

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.04.002

刘仲阳, 吴小宾, 郑福丽, 等. 我国主要粮食作物一次性施肥的长期效应研究进展. 土壤, 2022, 54(4): 667–675.

## 我国主要粮食作物一次性施肥的长期效应研究进展<sup>①</sup>

刘仲阳<sup>1,2</sup>, 吴小宾<sup>2\*</sup>, 郑福丽<sup>2</sup>, 张灵菲<sup>1,2</sup>, 崔秀敏<sup>1</sup>, 谭德水<sup>2</sup>

(1 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018; 2 山东省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部黄淮海平原农业环境重点实验室, 济南 250100)

**摘要:** 一次性施肥是农业轻简化生产的迫切需求, 一次性施肥在我国主要粮食作物上的短期应用研究较多, 但缺乏长期效应分析, 探明一次性施肥长期施用对三大粮食作物产量、土壤肥力、氮肥利用率及环境效应的影响, 可为我国农业轻简化绿色可持续生产提供支撑。本研究利用“中国知网”数据库对三大粮食作物上进行一次性施肥的所有文献(截至2021年12月20日)进行检索, 分析一次性施肥连续施用5 a及5 a以上对三大粮食作物产量、土壤肥力和氮肥利用率的影响, 以及一次性施肥连续施用3 a及3 a以上对农田生态环境的影响。与普通尿素分次施肥相比, 一次性施肥连续施用5 a及以上使小麦、玉米和水稻的产量分别提高4.9%~19.6%、0~14.4%、0~17.6%, 氮肥利用率分别提高24.2%~52.0%、14.3%~80.3%、4.4%~80.7%, 土壤全氮、有机质、无机氮( $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N)含量分别提高0~8.7%、0~6.7%、0~23.8%, 3.8%~11.8%、0~6.4%、0~16.6%和0~77.2%、0~66.3%、0~42.4%; 一次性施肥连续施用3 a及以上的小麦、玉米和水稻农田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放、 $\text{NH}_3$ 挥发分别降低16.9%~43.3%、5.1%~56.0%、5.6%~43.2%和18.6%~37.6%、6.1%~52.4%、37.2%~66.0%。一次性施肥在三大粮食作物连续应用可长期维持土壤肥力和作物产量, 同时提高氮肥利用率和降低氮素损失。

**关键词:** 一次性施肥; 产量; 土壤肥力; 氮肥利用率; 环境效应

**中图分类号:** S143.1 **文献标志码:** A

### Progress of Long-term Effects of One-off Fertilization on Major Food Crops in China

LIU Zhongyang<sup>1,2</sup>, WU Xiaobin<sup>2\*</sup>, ZHENG Fuli<sup>2</sup>, ZHANG Lingfei<sup>1,2</sup>, CUI Xiumin<sup>1</sup>, TAN Deshui<sup>2</sup>

(1 College of Recourses and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Agro-Environment of Huang-Huai-Hai Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinan 250100, China)

**Abstract:** One-off fertilization is an urgent need for light and simplified agricultural production in China. The long-term effects of controlled-release fertilizers are less reported in comparison with those of short-term effects, thus, this study aims to explore the effects of long-term application of one-off controlled-release urea on the yields, soil fertilities, nitrogen use efficiencies and environmental effects of the major food crops to provide the supports for the light and green sustainable production of agriculture in China. We collected the related papers (as of December 20, 2021) from the China National Knowledge Infrastructure database (<http://www.cnki.net/>) and analyzed the effects of controlled-release urea (CRU) continuous application for five years or more on the yields, soil fertilities, and nitrogen use efficiencies of three major food crops (wheat, maize and rice) as well as the effects of CRU continuous application for three years or more on the ecological environment of farmlands. Compared with the normal urea split application, CRU continuous application for 5 years or more can increase the yields of wheat, maize and rice by 4.9%–19.6%, 0–14.4% and 0–17.6%, nitrogen use efficiencies by 24.2%–52.0%, 14.3%–80.3%, 4.4%–80.7%, soil total nitrogen by 0–8.7%, 0–6.7% and 0–23.8%, organic matter by 3.8%–11.8%, 0–6.4% and 0–16.6%, and inorganic nitrogen ( $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N) by 0–77.2%, 0–66.3% and 0–42.4%, respectively. While CRU continuous application for three years or more can reduce  $\text{N}_2\text{O}$  emission by 16.9%–43.3%, 5.1%–56.0%, 5.6%–43.2% and  $\text{NH}_3$  volatilization by 18.6%–37.6%, 6.1%–52.4%, 37.2%–66.0%, respectively in

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1901003)、山东省大科学计划项目(优势特色主导产业发展专项)(2018-001)和山东省农业科学院科技创新工程项目(CXGC2021A01, CXGC2022A09)资助。

\* 通讯作者(xbwuferguson@163.com)

作者简介: 刘仲阳(1998—), 女, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要从事作物施肥技术研究。E-mail: liuzhongyang1215@163.com

wheat, maize and rice fields. In conclusion, one-off CRU application continuously can not only maintain soil fertility and crop yield in the long term, but also improve nitrogen use efficiency and reduce N losses for the three major food crops.

**Key words:** One-off application of controlled-release urea; Yield; Soil fertility; Nitrogen use efficiency; Environmental effect

面对当前农村劳动力短缺对传统高产高效施肥技术所造成的冲击,三大粮食作物施肥简化和机械作业已成为我国农业可持续生产的迫切需求。一次性施肥技术是以作物专用缓控释氮肥为载体,根据作物养分需求特征和土壤肥力情况确定最佳施肥量,在播种或整地时将作物专用缓控释氮肥配合磷、钾肥一次性基施,整个作物生育期内不再进行追肥的方法<sup>[1]</sup>。前人对一次性施肥在主要粮食作物上的应用效果研究较多。与尿素分次施肥相比,一次性施肥(控释氮肥一次性基施)条件下水稻当季产量和氮肥利用率分别提高 11.4% 和 44.0%<sup>[2]</sup>; 一次性施肥连续施用两季,春玉米产量和氮肥利用率分别平均提高 2.8% 和 21.9%<sup>[3]</sup>; 一次性施肥连续施用 3 a 的研究结果表明,小麦冬前分蘖、最大分蘖、有效分蘖和产量分别提高 5.7%~14.7%、10.9%~22.2%、4.5%~6.0% 和 2.6%~4.6%<sup>[4]</sup>。一次性施肥在提高作物产量和氮肥利用率的同时亦可减少农田温室气体排放,一次性施肥较尿素分次施肥相比,夏玉米田当季 N<sub>2</sub>O 累积排放量显著减少 18.2%<sup>[5]</sup>。侯朋福等<sup>[6]</sup>研究表明,控释氮肥一次性基施减少了追肥所产生的 NH<sub>3</sub> 挥发,作物整个生长季内 NH<sub>3</sub> 挥发总量较尿素分次施肥相比显著减少 13.8%~86.4%。纪洋等<sup>[7]</sup>研究发现控释氮肥一次性基施与尿素分次施肥相比可有效减少 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub>

排放总量,分别减少 49.6% 和 15.1%,综合温室效应降低 19.8%。刘楚桐等<sup>[8]</sup>研究指出,控释氮肥一次性基施可以提升土壤肥力,较尿素分次施肥处理相比,控释氮肥一次性基施使冬小麦/夏玉米轮作体系土壤全氮、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量分别提高 36.4%、39.7% 和 27.0%。前人关于一次性施肥对作物产量、氮肥利用率、土壤肥力及环境效应等方面的研究较多,但大部分研究是针对一次性施肥在我国主要粮食作物上短期效应的研究。本研究利用“中国知网”数据库进行文献搜集,以“控释氮肥”、“小麦”、“玉米”和“水稻”为关键词检索 2021 年 12 月 20 日之前发表的试验文献,基于本研究目的按以下条件对文献进行筛选:①研究中需提供明确的试验时间,试验方式为大田试验;②试验处理的重复数≥3;③试验必须同时包括控释氮肥一次性基施处理和普通尿素分次施肥处理。基于以上标准,共筛选出有关小麦、玉米和水稻控释氮肥一次性基施(一次性施肥)的大田试验研究论文 773 篇,按不同年限(1~2、3~4、≥5 a)和指标(产量、肥力、氮肥利用率和环境)分类,统计各指标下不同年限论文分别占该指标全部论文的比值。其中 1~2 a 的短期研究占 89.9%,3~4 a 的短期研究占 6.2%,而关于控释氮肥一次性基施长期效应(≥5 a)的研究报告较少(表 1)。长期定位试验

表 1 三大粮食作物一次性施肥不同试验年限论文分布情况

Table 1 Distribution of papers on one-off fertilization of three major grain crops with different experimental years

作物类型	指标	年限分布(篇)		
		1~2 a	3~4 a	≥5 a
小麦	产量	126(86.9%)	11(7.6%)	8(5.5%)
	肥力	79(83.1%)	9(9.5%)	7(7.4%)
	NUE	95(84.8%)	10(8.9%)	7(6.3%)
	环境	20(90.9%)	2(9.1%)	-
玉米	产量	296(89.2%)	22(6.6%)	14(4.2%)
	肥力	152(89.4%)	8(4.7%)	10(5.9%)
	NUE	221(89.5%)	16(6.5%)	10(4.0%)
	环境	43(79.6%)	6(20.4%)	-
水稻	产量	265(90.1%)	19(6.5%)	10(3.4%)
	肥力	94(86.2%)	6(5.5%)	9(8.3%)
	NUE	192(89.3%)	15(7.0%)	8(3.7%)
	环境	62(91.2%)	6(8.8%)	-
累计		695(89.9%)	48(6.2%)	30(3.9%)

注:肥力指标统计土壤无机氮、全氮、有机质、有效磷和速效钾等;NUE:氮肥利用率,统计氮素表观利用率、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力;环境指标统计农田 NH<sub>3</sub> 挥发, N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 排放以及氮素淋溶、径流损失;括号内数据为占比。

可以对控释氮肥长期应用的可行性进行系统分析, 巨晓棠和张翀<sup>[9]</sup>对合理施氮的原则和指标进行研究时, 将 $\geq 5$  a 的田间试验定义为长期定位试验。因此, 本研究选取 5 a 及 5 a 以上的田间定位试验对一次性施肥(控释氮肥一次性基施)的产量、氮肥利用率和土壤肥力等指标进行综述。由于多年连续一次性施肥的农田环境效应定点监测研究较少, 本研究统计一次性施肥连续 3 a 及 3 a 以上的定位试验作为一次性施肥对环境影响的长期效应进行评价。明确一次性施肥对我国主要粮食作物产量、土壤肥力、氮肥利用率和农田环境影响的长期效应, 可为我国轻简化绿色可持续农业生产提供理论指导和技术支撑。

## 1 一次性施肥对小麦的影响

### 1.1 对小麦产量的影响

与普通尿素分次施肥相比, 一次性施肥(控释氮肥一次性基施)长期施用可以显著提高小麦产量。不同于普通尿素养分快速释放造成的前期养分过剩、后期养分供应不足, 控释氮肥的养分释放可根据作物不同的生育期进行调节, 保障小麦全生育期的养分供应, 有利于获得高产稳产。黄淮海连续 5 a 大田定位试验研究表明, 在沟施覆土条件下, 控释掺混肥一次性基施较尿素分次施肥可显著提高产量 9.6% ~ 11.8%, 获得增产的主要原因是小麦穗数的提高<sup>[10]</sup>。郑文魁<sup>[11]</sup>在进行控释氮肥增产机理与长期效应研究时, 选取树脂包膜、硫包膜和硫加树脂包膜控释氮肥进行田间定位试验, 不同控释氮肥的养分释放期均为 3 个月, 结果表明, 在 210 kg/hm<sup>2</sup> 施氮量下, 不同包膜控释氮肥处理 7 a 平均地上部生物量和产量较尿素分次施肥处理分别增加 8.4% ~ 11.2% 和 4.9% ~ 11.5%。叶青等<sup>[12]</sup>7 a 定位试验研究结果表明, 习惯施肥量下, 70% 控释氮肥掺混 30% 尿素连续施用第 7 年小麦产量较普通尿素分次施肥处理增加 6.0%。黄淮海潮土区 8 a 长期定位研究表明, 控释掺混尿素处理 8 a 间产量仅第二年与尿素分次施肥处理之间差异不显著, 其余年间均显著增产, 8 a 平均产量提高 14.6%, 控释氮肥的增产作用表现出良好的稳定性<sup>[10]</sup>。Zheng 等<sup>[13]</sup>研究发现, 常规施氮量下, 70% 控释氮肥与 30% 尿素配施处理冬小麦 8 a 平均产量比尿素分次施肥处理提高 11.9%。Li 等<sup>[14]</sup>长期定位试验(2013—2020 年)研究结果表明, 控释氮肥的施用影响了小麦的地上部与根系生长, 控释氮肥处理的根长、根表面积、根数、株高、叶面积指数和

叶绿素含量均高于普通尿素处理, 为作物吸收充足的养分提供了基础; 秸秆还田条件下, 控释氮肥处理平均产量(2018—2020 年)较尿素分次施肥处理提高 19.6%, 减量 1/3 条件下仍不减产。一次性基施控释氮肥的长期应用不仅实现了生产过程的简化, 同时保障了小麦稳定持续生产。

### 1.2 对麦田土壤肥力的影响

氮肥投入对土壤肥力具有维持与提高作用, 长期一次性基施控释氮肥对土壤的培肥作用明显优于普通尿素。控释氮肥可有效减缓尿素水解速率, 减少 NO<sub>3</sub>-N 的形成与损失<sup>[15]</sup>。周洪印<sup>[10]</sup>在对长期定位试验的土壤物理性质和化学性质进行研究时发现, 与尿素分次施肥处理相比, 控释氮肥和尿素 7:3 掺混连续 5 a 施用对土壤容重、比重以及孔隙度无明显影响; 土壤 pH、全氮、全磷以及全钾含量无显著差异, 土壤无机氮、有机碳含量分别提高 8.4% 和 5.3%; 控释氮肥会促进有效磷、钾的吸收, 表现为土壤有效磷、速效钾含量降低。5 a 定位试验研究表明, 210 kg/hm<sup>2</sup> 施氮量下, 不同控释氮肥处理小麦收获期土壤全氮和有机质含量较尿素分次施肥处理分别提高 5.8% ~ 8.7% 和 3.8% ~ 5.8%, 表层(0 ~ 20 cm)土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量差异不显著, NO<sub>3</sub>-N 含量增加 31.4% ~ 34.3%, 控释氮肥养分的缓慢释放减缓了土壤 pH 的下降幅度, 减少了 20 ~ 60 cm 土层的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量, 降低了氮素的淋溶损失<sup>[11]</sup>。郑文魁等<sup>[16]</sup>在进行不同包膜控释肥长期施用对土壤生化性质的影响研究时发现, 在弱碱性土壤中连续沟施 6 a 控释氮肥后土壤无机氮含量较尿素分次施肥处理提高 31.1% ~ 35.0%。在鲁中地区 7 a 定位研究结果显示, 秸秆还田条件下, 控释氮肥连续施用 7 a 后小麦收获期表层(0 ~ 20 cm)土壤中 NO<sub>3</sub>-N 含量比尿素分次施肥处理高 15.8%, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量无显著差别, 全氮、有机质含量分别显著增加 7.5% 和 11.8%<sup>[14]</sup>。叶青等<sup>[12]</sup>于 2008—2015 年在山东省开展了 7 a 的长期定位试验, 研究表明, 240 kg/hm<sup>2</sup> 施氮量下, 控释掺混尿素连续施用 7 a 后土壤 NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、全氮和有机质含量与普通尿素分次施肥相比提高 77.2%、15.6%、3.0% 和 6.0%。Zheng 等<sup>[13]</sup>发现, 在中等肥力产田上连续应用 7 a 控释掺混肥后, 小麦收获季表层(0 ~ 20 cm)土壤有机质、全氮含量较尿素分次施肥处理分别增加 9.0% 和 4.9%, pH 提高 0.17 个单位。土壤作为农业生产的基础, 控释氮肥的长期一次性基施可维持或提高土壤肥力, 有利于农业可持续发展。

### 1.3 对小麦氮肥利用率的影响

氮肥利用率反映了氮肥施入后作物氮素养分的提高程度<sup>[17]</sup>, 可用来衡量氮肥施用的合理性<sup>[18]</sup>。研究表明, 控释氮肥的养分释放与作物养分需求实现了时间上和空间上的同步, 减少了氮素损失, 氮肥利用率较尿素分次施肥处理可提高 36.3%~52.0%<sup>[10]</sup>。长期定位试验结果表明, 与尿素分次施肥相比, 不同包膜尿素处理(树脂包膜、硫包膜和硫加树脂包膜尿素)7 a 平均氮肥利用率可显著提高 28.7%~34.4%<sup>[11]</sup>。叶青等<sup>[12]</sup>在山东省淄博市的长期定位试验结果表明, 与普通尿素分次施肥相比, 控释氮肥与尿素 7:3 掺混连续施用第 7 年可提高氮肥利用率 24.7%。农民习惯施氮量下, 控释掺混尿素处理 7 a 间冬小麦氮肥利用率均高于普通尿素处理, 年均氮肥利用率提高 35.7%<sup>[13]</sup>。周洪印<sup>[10]</sup>认为, 控释掺混尿素可保障冬小麦全生育期的氮素供应, 第 8 年定位试验数据显示, 控释掺混尿素处理的氮素吸收量和氮肥利用率较尿素分次施肥处理分别显著提高 19.0% 和 24.2%。上述研究表明, 控释氮肥的养分释放与小麦不同生育期的养分需求具有很好的同步性, 长期施用实现了资源的持续高效利用。

### 1.4 对麦田环境效应的影响

氮挥发、硝化-反硝化作用和淋溶是土壤中氮素损失的主要途径<sup>[19]</sup>, 氮素的大量损失已经造成了严重的环境问题<sup>[20-21]</sup>。孙婷等<sup>[22]</sup>研究发现, 控释氮肥一次性撒施后翻耕较尿素分次施用明显推迟并降低了 N<sub>2</sub>O 和 NH<sub>3</sub> 的排放峰值, 3 a 累积排放量较尿素 3 次施肥处理可分别降低 37.6%~43.3% 和 18.6%~37.6%。Shakoor 等<sup>[23]</sup>连续 4 a 对华东地区小麦生育期的温室气体进行监测, 结果表明, 225 kg/hm<sup>2</sup> 施氮量下, 控释氮肥处理年均 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放量较尿素分次施肥处理分别显著减少 16.9% 和 19.4%, 温室气体排放强度降低 26.1% 且增产 10.8%。控释氮肥具有显著的固氮减排作用, 减量 1/3 树脂包膜控释氮肥处理比尿素分次施肥处理提高作物产量的同时显著降低了 4 a 平均 N<sub>2</sub>O 累积排放量 25.0%, 平均净温室效应、温室气体排放强度分别降低 20.0% 和 22.0%<sup>[24]</sup>。以上研究表明, 长期进行控释氮肥一次性基施显著减少了小麦生育期的 NH<sub>3</sub> 挥发、N<sub>2</sub>O 以及温室气体排放, 有利于构建绿色安全的农业生产体系。

## 2 一次性施肥对玉米的影响

### 2.1 对玉米产量的影响

氮肥投入是作物产量提升的关键, 与普通尿素相

比, 全量及减量控释氮肥连续一次性基施 5~11 a 仍可提高或维持玉米产量。控释氮肥对作物产量提高作用明显优于普通尿素。在沟施覆土条件下, 一次性施用控释掺混尿素较尿素分次施用显著提高了夏玉米地上部生物量积累, 有利于养分后期向籽粒转移, 5 a 年均产量增加 10.4%~14.4%<sup>[25]</sup>。甘肃省张掖市春玉米产田 5 a 长期定位研究表明, 控释氮肥一次性施用可减少劳动力的同时维持了作物稳产, 5 a 年均产量与尿素分次施肥相比无显著差别<sup>[26]</sup>。周洪印<sup>[10]</sup>研究表明, 与尿素分施相比, 控释掺混尿素第 5 年施用夏玉米产量显著提高 6.9%~11.0%。晋中地区长期定位研究表明, 一次性沟施控释氮肥可以显著提高作物产量, 5 a 年均产量较尿素分施处理提高 13.6%<sup>[27]</sup>。西北旱作区长期定位试验研究表明, 在撒施翻耕条件下, 控释氮肥连续施用第 5、6 年春玉米产量与普通尿素分次施肥处理之间无显著差异, 减少了劳动力成本投入<sup>[28]</sup>。郑文魁<sup>[11]</sup>7 a 定位研究表明, 树脂包膜、硫包膜和硫加树脂包膜尿素处理 7 a 平均产量与尿素分施处理相比增加 7.3%~13.0%。300 kg/hm<sup>2</sup> 施氮量下, 控释氮肥掺混尿素处理与普通尿素分次施肥处理相比第 7 年小麦增产 5.5%<sup>[12]</sup>。相同施氮量下, 70% 控释氮肥与 30% 尿素配施处理 8 a 平均产量比尿素分施处理提高 6.8%~9.8%<sup>[13]</sup>。控释氮肥具有稳定的增产作用, 长期定位试验研究结果显示, 控释掺混尿素处理 8 a 间产量均显著高于尿素分次施肥处理, 8 a 平均产量提高 10.9%<sup>[10]</sup>。Gao 等<sup>[29]</sup>11 a(2008—2019 年)定位研究表明, 控释氮肥可有效提高玉米地上部生物量的累积, 相同施氮量下, 控释氮肥掺混尿素(掺混比 7:3)处理 3 a(2017—2019 年)平均生物量较普通尿素分次施肥处理提高 8.6%~20.2%, 产量提高 9.4%~14.0%。

控释氮肥在减量条件下对作物产量仍有维持或小幅度提高作用。相同施氮量以及减氮 25% 条件下, 一次性沟施树脂包膜尿素可实现作物稳产, 5 a 年均产量与尿素分次施肥处理之间均无显著差异<sup>[30]</sup>。焉莉<sup>[31]</sup>在东北典型黑土上进行了 6 a 定位试验, 在减少 37.6% 施氮量的条件下, 产量与普通尿素分次施用之间无显著差异。郑文魁<sup>[11]</sup>研究表明, 减量 30% 的树脂包膜和硫加树脂包膜尿素处理夏玉米 7 a 平均产量与全量尿素处理之间差异不显著, 硫加树脂包膜处理增产 6.3%。研究表明, 控释掺混尿素处理减量 50% 的情况下 8 a 年均产量与全量尿素处理之间仍无差异, 净收益增加 14.8%<sup>[32]</sup>。控释氮肥减量施用的产量效应可为探索合理的施氮量提供数据支撑, 但由

于各地土壤肥力、气候、控释氮肥类型与施肥习惯等差异较大，长期进行控释氮肥减量施用的研究结果变异较大。

## 2.2 对农田土壤肥力的影响

控释氮肥的养分缓慢释放实现了土壤养分供应与作物养分需求的多维度同步，减少了氮素损失，长期施用有利于土壤中养分的持续累积，实现土壤培肥。研究表明，控释氮肥和尿素 7:3 掺混有利于提高土壤氮素的供应强度，秸秆还田条件下，控释掺混尿素连续施用 5 a 土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N、有效磷和速效钾含量相比常规施肥(尿素分次施肥)处理分别显著提高 52.0% ~ 66.3%、18.6% ~ 25.2%、19.5% ~ 30.8%和 15.1% ~ 48.4%，土壤有机质、全氮含量分别提高 6.1% ~ 6.7%和 2.9% ~ 6.7%<sup>[25]</sup>。郑文魁<sup>[11]</sup>在山东省的 5 a 定位研究表明，控释氮肥处理可增加夏玉米关键生育期的土壤  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$ -N 含量，实现养分高效供给，玉米收获期表层土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 含量较尿素分次施肥处理分别增加 37.9% ~ 62.5%和 37.5% ~ 52.1%。宋梓璇等<sup>[30]</sup>在东北地区春玉米产田长期定位研究发现，在 180 kg/hm<sup>2</sup> 施氮量下，控释氮肥长期一次性基施与尿素分次施肥相比提高了土壤有机质含量 6.4%，对土壤全氮的影响不显著。Zheng 等<sup>[13]</sup>发现，在 375 kg/hm<sup>2</sup> 施氮量下，控释氮肥配施尿素连续应用 6 a 后，玉米收获季表层(0 ~ 20 cm)土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 含量较尿素分施处理分别增加 19.2% 和 60.5%。研究表明，农民习惯施氮量下，控释掺混尿素连续施用 7 a 玉米收获期土壤全氮含量与普通尿素分次施肥相比提高 4.6%，土壤有机质含量无显著差别；同时，连续多年施用尿素的表层土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 含量与控释氮肥处理相比高 13.3% 和 43.4%， $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 在 20 ~ 200 cm 土层中大量累积，加剧了土体中氮素的向下淋洗损失<sup>[12]</sup>。以上研究表明，长期一次性基施控释氮肥可提高土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 含量，减少氮素的淋溶损失，同时对土壤全氮和有机质也具有提升作用。

## 2.3 对玉米氮肥利用率的影响

提高氮肥利用率需要实现根层养分供应与高产作物需求在数量上匹配、时间上同步、空间上一致<sup>[33]</sup>。长期定位试验第 5 年结果显示，控释掺混尿素处理的氮肥利用率较尿素分施处理可提高 42.6% ~ 49.6%<sup>[10]</sup>。研究表明，与尿素分次施肥相比，控释氮肥掺混尿素连续施用第 5 年氮素利用率和氮肥农学利用率分别提高 57.5% ~ 61.3% 和 24.7% ~ 27.4%<sup>[25]</sup>。春玉米产田长期定位研究表明，在撒施旋耕条件下，控释氮肥

处理在维持作物稳产的同时提高了氮肥利用效率，5 a 年均氮肥利用率提高 65.9%<sup>[26]</sup>。焉莉<sup>[31]</sup>在东北春玉米 6 a 定位试验研究表明，高等肥力产田上一次性基施控释氮肥可提高氮肥利用率 55.1%。Zheng 等<sup>[13]</sup>7 a 长期定位试验研究发现，农民习惯施氮量下，控释掺混尿素处理 7 a 年均氮肥利用率较尿素分次施肥处理提高 14.3%。山东省淄博市的长期定位试验结果表明，与普通尿素分次施肥相比，控释掺混尿素连续施用第 7 年可提高玉米季氮肥利用率 20.5%<sup>[12]</sup>。郑文魁<sup>[11]</sup>在泰安的研究结果表明，与尿素分施处理相比，树脂包膜、硫包膜和硫加树脂包膜尿素一次性基施可有效提高夏玉米氮肥利用率，7 a 年均氮肥利用率分别提高 65.9%、75.7% 和 80.3%。周洪印<sup>[10]</sup>在优化并制定合理的氮、磷和钾的施肥水平研究中指出，控释掺混尿素可以在维持夏玉米产量的同时提高氮肥利用率，第 8 年数据显示，控释掺混尿素处理的氮肥利用率较尿素分次施肥处理提高 18.3%。Gao 等<sup>[29]</sup>11 a(2008—2019 年)长期定位研究表明，相同施氮量下，一次性沟施控释掺混肥 3 a(2017—2019 年)氮素利用率、氮素农学利用率和氮肥偏生产力较尿素分次施肥处理分别提高 22.2% ~ 53.0%、47.3% ~ 73.1% 和 9.5% ~ 10.8%。综上，控释氮肥长期一次性基施实现了肥料资源的高效利用，与普通尿素相比，氮肥利用率可提高 14.3% ~ 80.3%，氮肥农学利用效率可提高 24.7% ~ 73.1%。

## 2.4 对农田环境效应的影响

控释氮肥是当前可提高作物产量的同时减少农田温室气体排放的有效措施<sup>[34-35]</sup>，长期一次性基施可显著减少农田  $\text{NH}_3$  挥发、 $\text{N}_2\text{O}$  以及其他温室气体排放。210 kg/hm<sup>2</sup> 施氮量下，控释氮肥处理与尿素 3 次施用相比在提高玉米产量的同时显著减少了  $\text{N}_2\text{O}$  排放，显著降低 3 a 平均  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量 9.1%<sup>[36]</sup>。与农民习惯施肥(尿素分次施用)相比，树脂包膜控释氮肥明显降低了玉米季施肥所产生的  $\text{NH}_3$  挥发损失， $\text{NH}_3$  挥发总量减少 48.0% ~ 52.4%<sup>[37]</sup>。朱永昶等<sup>[38]</sup>连续 4 a 对春玉米生长季内的  $\text{N}_2\text{O}$  排放进行监测研究表明，硫包膜控释氮肥处理较常规施肥(尿素分施)处理降低了  $\text{N}_2\text{O}$  排放峰平均峰值 32.9%，排放高峰期间  $\text{N}_2\text{O}$  排放量降低 50.8%，年均  $\text{N}_2\text{O}$  排放减少 37.8% 且增产 16.0%，控释氮肥与尿素基肥均采用沟施覆土的方式。东北春玉米农田长期定位研究表明，180 kg/hm<sup>2</sup> 施氮量下，控释氮肥处理比农民习惯施肥(尿素分次施肥)减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量 19.2%， $\text{NH}_3$  挥发总量减少 6.1%<sup>[30]</sup>。吕晓东<sup>[26]</sup>在甘肃省张掖市春玉米产田上进

行了为期 5 a(2011—2015 年)的温室气体检测, 研究表明, 减量 1/3 的控释氮肥处理较常规施肥处理(尿素分次施用)5 a 平均  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量显著减少 56.0%,  $\text{N}_2\text{O}$  直接排放系数显著降低 43.2%, 平均氮肥利用率增加 65.9%, 5 a 土壤  $\text{CH}_4$  累积吸收量和  $\text{CO}_2$  累积排放通量较常规施肥处理分别显著减少 21.7% 和 26.2%, 控释氮肥与尿素基肥均采用撒施后旋耕的方式。西北旱作区长期定位试验第 4~5 年温室气体连续监测结果表明, 相较于普通尿素 3 次施用所产生的  $\text{N}_2\text{O}$  排放峰, 控释氮肥的应用可降低玉米生长后期的  $\text{N}_2\text{O}$  排放,  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量降低 5.1%~9.5%<sup>[28]</sup>。段智源<sup>[27]</sup>利用静态箱温室气体自动监测系统, 在 2009—2013 年期间对春玉米生长季内的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量进行连续测定, 研究表明, 硫包衣控释尿素可同步实现  $\text{N}_2\text{O}$  减排和作物稳产增产, 5 a 平均  $\text{N}_2\text{O}$  排放累积量较尿素分次施肥处理减少 36.8%, 平均单位面积产量增加 15.6%。控释氮肥的缓慢释放有效降低了农田  $\text{NH}_3$  挥发和  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 长期施用有效减少了氮肥投入造成的环境污染, 有利于构建绿色生态的农业生产体系。

林茵等<sup>[39]</sup>在包膜材料使用安全风险评价综述中指出, 包膜残留累积会影响土壤生态环境、增加土壤微塑料污染风险, 但受降解作用影响, 土壤中包膜残留呈抛物线型积累即累积量不会无限制增长<sup>[40]</sup>。通过模拟试验发现, 将 10~40 a 的树脂残膜累积量一次性施入土壤中并未对土壤生态环境造成危害<sup>[41-42]</sup>。连续施用 10 a 硫包膜和聚合物包膜控释氮肥后, 虽会增加土壤中微塑料含量, 但未对土壤造成污染, 且有益于土壤特殊菌群的发生, 是环境友好型的施肥方式<sup>[43]</sup>。

### 3 一次性施肥对水稻的影响

#### 3.1 对水稻产量的影响

控释氮肥特有的养分释放特性可使土壤中的氮素供应与水稻不同生育期养分需求达到一致, 有益于作物长期稳产增产。研究发现, 控释氮肥可通过提高水稻穗长、总粒数、实粒数和千粒重实现增产, 在  $270 \text{ kg}/\text{hm}^2$  施氮量下, 控释掺混尿素处理较尿素分次施肥处理第 5 年产量提高 11.0%~12.6%<sup>[44]</sup>。Sun 等<sup>[45]</sup>研究表明, 聚合物包膜控释氮肥的增产效应具有很好的稳定性, 5 a 间控释氮肥处理的水稻产量均高于尿素分次施肥处理且年均产量可增加 12.1%。中低产田长期定位试验研究发现, 控释氮肥连续 5 a 施用较尿素分施处理可提高晚稻年均产量 5.0%, 对早

稻产量无显著影响<sup>[46]</sup>。在统一配施紫云英作为 40% 氮源条件下, 树脂包膜控释氮肥一次性基施处理较普通尿素分次施肥处理 6 a 平均早、晚稻总产量提高 4.2%<sup>[47]</sup>。刘益曦等<sup>[48]</sup>选取硫黄加树脂双层包膜尿素和树脂包膜尿素进行长期田间定位试验(2008—2013 年), 在  $210 \text{ kg}/\text{hm}^2$  施氮量下, 控释尿素显著增加了水稻有效穗数和每穗实粒数, 全氮条件下较尿素分次施肥处理增产 7.6%~17.6%。Mi 等<sup>[49]</sup>研究表明, 双季稻上连续施用 7 a 控释掺混尿素(70%+30%)较尿素分次施肥处理可增产 5.3%。

控释氮肥在减量条件下长期施用对作物产量仍具有维持或小幅提高作用, 与尿素分次施用相比, 控释氮肥减量 30%一次性基施处理 6 a 平均产量提高 4.5%~6.7%, 与全量控释氮肥的增产程度(4.7%~8.2%)基本持平<sup>[50]</sup>。上述研究中, 控释氮肥在等量或减量条件下均实现了稳产增产, 但李文兵<sup>[51]</sup>的长期定位研究中, 减量 1/3 的控释氮肥处理产量在前 3 a 与当地常规施肥持平, 后 3 a 土壤中氮素供应明显不足, 导致产量下降, 减量施肥时应应对作物生长情况以及土壤地力变化进行密切观察, 氮素供应不足时应及时补充。

#### 3.2 对稻田土壤肥力的影响

长期一次性基施控释氮肥可以改善稻田土壤环境。水田中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  是无机氮的主要存在形式<sup>[52]</sup>, 控释氮肥的养分缓慢释放减少了氮素的淋溶损失, 有利于土壤表层中的养分积累。研究表明, 在高等肥力产田上, 60% 的控释氮肥配施 40% 紫云英连续施用 6 a 后, 土壤全氮、碱解氮、全钾和速效钾含量与 60% 普通尿素配施 40% 紫云英处理之间并无显著差异<sup>[47]</sup>。刘益曦等<sup>[48]</sup>长期田间定位试验(2008—2013 年)结果表明, 硫黄加树脂双层包膜尿素和树脂包膜尿素连续施用 6 a 后土壤有机质和全氮含量较尿素分次施肥分别增加 3.5%~16.6% 和 13.1%~15.6%。杨铎<sup>[50]</sup>6 a 定位试验研究表明, 农民习惯施肥量下( $180 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ), 不同控释氮肥处理 0~20 cm、20~40 cm 土层中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量较尿素分次施肥处理分别增加 13.6%~37.3%、26.0%~28.6%, 土壤表层 pH、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、碱解氮、有机质、全氮含量无显著差别。Mi 等<sup>[49]</sup>研究表明, 双季稻连续 7 a 施用硫加树脂包膜尿素后, 0~60 cm 土层的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量显著高于尿素分次施肥处理, 分别提高 20.3% 和 42.4%, 但是包膜中含有的硫单质被氧化为  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{H}^+$ , 导致土壤 pH 降低。

中等肥力产田上, 树脂包膜尿素掺混尿素处理(70%+30%, 50%+50%)连续施用 5 a 后土壤全磷与 pH

与普通尿素分次处理之间无显著差异,土壤全氮、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量分别显著提高3.2%~5.2%、1.3%~4.9%、12.0%~19.6%、2.7%~6.0%和8.1%~18.4%<sup>[39]</sup>。Geng等<sup>[53]</sup>在湖北省的定位研究表明,在180 kg/hm<sup>2</sup>施氮量下,硫包膜控释氮肥连续施用7 a后,0~60 cm土层内的土壤有机质、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量较尿素处理分别提高8.9%、15.5%和13.3%,表层土壤全氮含量提高9.9%。Gao等<sup>[29]</sup>11 a(2008—2019年)长期定位试验研究表明,同等施氮量下,控释掺混尿素处理较尿素处理显著提高了土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量总和23.3%~24.5%,有效减少了氮淋溶损失,控释掺混尿素处理还显著改善了土壤团聚体特性,增加了土壤中腐殖酸和黄腐酸含量。研究表明,水稻生产上减量1/3控释氮肥连续应用6 a后,土壤有机质以及全氮含量较农民习惯施肥处理提高9.9%和23.8%<sup>[51]</sup>。控释氮肥长期施用可以提升土壤养分含量,改善土壤理化性质,但受不同土壤类型、包膜类型以及土壤基础地力等的影响,控释氮肥在不同试验中对土壤的培肥效应表现并不一致。

### 3.3 对水稻氮肥利用率的影响

氮肥利用率低是限制我国农业生产实现资源高效利用的重要因素,控释氮肥的养分释放与水稻整个生育期的氮素吸收的关系表现为显著相关,长期施用控释氮肥在实现资源高效利用、提高氮肥利用率上发挥了重要作用。控释氮肥可协同实现增产增效,树脂包膜尿素掺混尿素处理(70%+30%, 50%+50%)连续施用第5年氮肥利用率较普通尿素分次施肥处理提高36.2%~51.4%<sup>[39]</sup>。宓文海<sup>[46]</sup>研究发现,控释氮肥一次性基施和控释掺混处理连续5 a施用较尿素分次处理5 a平均早、晚稻氮肥利用率分别提高4.4%~15.7%和37.8%~44.2%。鲁艳红等<sup>[47]</sup>研究表明,在统一配施40%绿肥条件下,树脂包膜控释氮肥处理双季稻氮肥回收利用率提高11.9%,氮肥农学效率提高10.9%,氮肥偏生产力差异不明显。研究表明,与尿素分次施肥相比,直播水稻生产上连续施用控释氮肥第6年可提高氮肥利用率5.5%<sup>[51]</sup>。

控释氮肥减量条件下,氮肥利用率的提高更加显著。刘益曦等<sup>[48]</sup>研究表明,减量30%控释氮肥处理氮肥利用率较普通尿素处理提高6.1%~7.2%,全量处理提高10.9%~13.3%。与尿素分次施肥相比,减量30%硫加树脂包膜尿素、树脂包膜尿素处理6 a平均氮肥吸收利用率提高8.6%~13.5%,全量处理提高9.2%~10.3%<sup>[50]</sup>。长期进行控释氮肥一次性基施可显著提高水稻氮肥利用率,实现资源高效的同时对产

量效应、地力提升以及环境效应也具有促进作用。

### 3.4 对稻田环境效应的影响

化肥投入是农田N<sub>2</sub>O排放和NH<sub>3</sub>挥发的主要来源,肥料类型是影响N<sub>2</sub>O排放和NH<sub>3</sub>挥发的重要因素<sup>[54-55]</sup>。稻田N<sub>2</sub>O排放高峰主要出现在施肥后、烤田以及干湿交替阶段<sup>[56]</sup>。在240 kg/hm<sup>2</sup>施氮量下,与尿素分次施肥相比,聚氨酯包膜尿素一次性基施较尿素分次施肥可有效推迟NH<sub>3</sub>挥发峰值的出现以及排放峰值的大小,对N<sub>2</sub>O的排放峰值也具有降低作用,减少NH<sub>3</sub>挥发37.2%<sup>[57]</sup>。华中地区典型稻田温室气体连续3 a监测结果表明,硫包膜控释氮肥一次性基施与尿素分次施用相比减少了晚稻N<sub>2</sub>O排放量43.2%<sup>[58]</sup>。Guo等<sup>[59]</sup>3 a定位研究表明,在195 kg/hm<sup>2</sup>施氮量下,聚合物包膜控释氮肥一次性基施避免了追肥造成的NH<sub>3</sub>损失,与农民习惯施肥(尿素3次施用)相比,NH<sub>3</sub>排放量减少64.2%~66.0%,CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O累积排放量分别减少16.5%~24.2%和32.8%~38.0%。Ji等<sup>[60]</sup>4 a观测结果表明,与习惯施肥(尿素分次施用)相比,相同施氮量下(240 kg/hm<sup>2</sup>),一次性施用树脂包膜控释氮肥可使稻田N<sub>2</sub>O排放量减少13.0%。Shakoor等<sup>[23]</sup>连续4 a在华东地区水稻进行温室气体监测,结果表明,控释氮肥处理水稻季年均N<sub>2</sub>O排放量较尿素分次处理显著减少5.6%,CO<sub>2</sub>排放量减少11.9%,温室气体排放强度降低14.5%且增产3.1%。Ji等<sup>[61]</sup>4 a研究发现,与尿素3次施用处理相比,树脂包膜控释氮肥降低了稻田CH<sub>4</sub>排放量3.9%~15.2%。控释氮肥的长期施用为解决当前农田生态系统中氮素的大量损失提供了解决方案,同时保障了粮食稳定生产,这与Yang等<sup>[62]</sup>的综述结果一致。

## 4 结论

一次性施肥连续施用5 a及5 a以上能够持续维持我国粮食作物农田土壤肥力,显著提高小麦、玉米和水稻氮肥利用率,同时保证小麦、玉米、水稻稳产或增产。一次性施肥连续施用3 a及3 a以上可显著减少三大作物农田的氮素损失,N<sub>2</sub>O排放和NH<sub>3</sub>挥发均显著降低,包膜材料未对土壤生态环境产生负面影响。一次性施肥可同时实现粮食作物长期稳产增产、土壤培肥、养分高效和环境友好,在我国未来农业轻量化绿色可持续发展中具有较好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 刘兆辉,吴小宾,谭德水,等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3827-3839.

- [2] Lyu Y F, Yang X D, Pan H Y, et al. Impact of fertilization schemes with different ratios of urea to controlled release nitrogen fertilizer on environmental sustainability, nitrogen use efficiency and economic benefit of rice production: A study case from Southwest China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 293: 126198.
- [3] 冯朋博, 康建宏, 梁熠, 等. 普通尿素与控释尿素配比和方法对土壤氮素供应和春玉米产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(4): 692–704.
- [4] 吴小宾, 谭德水, 林海涛, 等. 冬小麦一次性施肥氮肥产品筛选与产量效应[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3863–3875.
- [5] 徐钰, 刘兆辉, 张建军, 等. 不同氮肥管理措施对华北地区夏玉米田增产减排的效果分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(1): 9–15.
- [6] 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 等. 缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果[J]. *环境科学*, 2017, 38(12): 5326–5332.
- [7] 纪洋, 于海洋, 徐华. 控释肥与尿素配合施用对稻季土壤  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(9): 1494–1500.
- [8] 刘楚桐, 陈松岭, 金鑫鑫, 等. 控释氮肥减量配施对土壤氮素调控及夏玉米产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(2): 108–115.
- [9] 巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 1–13.
- [10] 周洪印. 控释尿素配合秸秆还田及磷钾肥对小麦玉米产量和土壤肥力的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [11] 郑文魁. 控释尿素在小麦—玉米轮作体系中的养分高效利用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [12] 叶青, 曹国军, 耿玉辉. 控释氮肥在小麦玉米轮作体系中的养分高效利用研究[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(8): 124–129.
- [13] Zheng W K, Liu Z G, Zhang M, et al. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J]. *Field Crops Research*, 2017, 205: 106–115.
- [14] Li R C, Gao Y X, Chen Q, et al. Blended controlled-release nitrogen fertilizer with straw returning improved soil nitrogen availability, soil microbial community, and root morphology of wheat[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 212: 105045.
- [15] 疏晴, 王香琪, 齐永波, 等. 尿素与缓释尿素配施添加 DMPP 对砂姜黑土氮素转化的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(5): 945–951.
- [16] 郑文魁, 李成亮, 窦兴霞, 等. 不同包膜类型控释氮肥对小麦产量及土壤生化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 162–167, 174.
- [17] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. *生态环境*, 2003, 12(2): 192–197.
- [18] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(2): 450–459.
- [19] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 778–783.
- [20] 张亚捷, 牛海山. 农田土壤氧化亚氮产生机制和相关模型研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(5): 554–562.
- [21] 杨国英, 郭智, 刘红江, 等. 稻田氨挥发影响因素及其减排措施研究进展[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(9): 1912–1919.
- [22] 孙婷, 王孟兰, 王柏淳, 等. 苏南麦田基施包膜尿素的农学和环境效应评价[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(5): 1115–1123.
- [23] Shakoor A, Xu Y L, Wang Q, et al. Effects of fertilizer application schemes and soil environmental factors on nitrous oxide emission fluxes in a rice-wheat cropping system, East China[J]. *PLoS One*, 2018, 13(8): e0202016.
- [24] 韩笑. 农田管理措施对土壤碳库和温室气体排放的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [25] 高永祥, 李若尘, 张民, 等. 秸秆还田配施控释掺混尿素对玉米产量和土壤肥力的影响[J]. *土壤学报*, 2021, 58(6): 1507–1519.
- [26] 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.
- [27] 段智源. 不同施肥处理对春玉米  $\text{N}_2\text{O}$  排放和综合温室效应的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [28] 白炬. 旱作覆膜春玉米农田温室气体排放对氮肥管理的响应及硝化抑制剂减排机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [29] Gao Y X, Song X, Liu K X, et al. Mixture of controlled-release and conventional urea fertilizer application changed soil aggregate stability, humic acid molecular composition, and maize nitrogen uptake[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 789: 147778.
- [30] 宋梓璇, 李虎, 李建政, 等. 控释肥对东北春玉米产量和土壤氨挥发的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(10): 2342–2349.
- [31] 焉莉. 不同施肥管理对东北玉米连作地农业面源污染影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [32] Zhou H Y, Zhang M, Liu Z G, et al. Maize yield and economic return with controlled-release urea[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2019, 115(3): 427–440.
- [33] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915–924.
- [34] Liu Y C, Whitman W B. Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of the methanogenic Archaea[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008, 1125: 171–189.
- [35] McTaggart I P, Tsuruta H. The influence of controlled release fertilizers and the form of applied fertilizer nitrogen on nitrous oxide emissions from an andosol[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 67(1): 47–54.
- [36] 刘慧颖, 华利民, 张鑫. 不同施氮方式对玉米产量及  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2013, 30(5): 76–80.
- [37] 王文岩, 董文旭, 陈素英, 等. 连续施用控释肥对小麦/玉米农田氮素平衡与利用率的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S2): 135–141.
- [38] 朱永昶, 李玉娥, 秦晓波, 等. 控释肥和硝化抑制剂对华北春玉米  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(7): 1421–1428.



- [39] 林茵, 刘红芳, 保万魁, 等. 肥料包膜材料使用安全风险评价和控制研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(5): 310–317.
- [40] 李亚星, 徐秋明, 杨宜斌, 等. 树脂包衣肥料残膜对土壤植物的影响及光降解膜肥料的研制[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1691–1695.
- [41] 程冬冬, 张民, 杨越超, 等. 控释肥残膜对土壤性质及冬小麦和夏玉米生长的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 225–230, 235.
- [42] 朱书豪. 树脂包膜控释尿素施用对南方稻田土壤的环境效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [43] Bian W X, An L R, Zhang S G, et al. The long-term effects of microplastics on soil organomineral complexes and bacterial communities from controlled-release fertilizer residual coating[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 304: 114193.
- [44] 李敏, 李广涛, 叶舒娅, 等. 连续施用控释氮肥对超级水稻产量、氮肥利用率及土壤养分变化的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(33): 130–134.
- [45] Sun Y, Mi W H, Su L J, et al. Controlled-release fertilizer enhances rice grain yield and N recovery efficiency in continuous non-flooding plastic film mulching cultivation system[J]. *Field Crops Research*, 2019, 231: 122–129.
- [46] 宓文海. 中低产黄泥田培肥模式与氮素高效利用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [47] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 紫云英与尿素或控释尿素配施对双季稻产量及氮钾利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 360–368.
- [48] 刘益曦, 袁玲, 伍绍福, 等. 两种包膜控释尿素对水稻产量和土壤理化性质的影响[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(7): 1213–1220.
- [49] Mi W H, Gao Q, Xia S Q, et al. Medium-term effects of different types of N fertilizer on yield, apparent N recovery, and soil chemical properties of a double rice cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2019, 234: 87–94.
- [50] 杨铎. 水稻包膜控释尿素养分释放特性及其肥效研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [51] 李文兵. 长期不同施肥处理对直播稻田生态系统中氮磷影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [52] 张富林, 刘冬碧, 范先鹏, 等. 农艺深施及配施缓控释氮肥对水稻产量及氮素损失的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 858–866.
- [53] Geng J B, Sun Y B, Zhang M, et al. Long-term effects of controlled release urea application on crop yields and soil fertility under rice-oilseed rape rotation system[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 65–73.
- [54] Kang Y N, Liu M X, Song Y, et al. High-resolution ammonia emissions inventories in China from 1980 to 2012[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(4): 2043–2058.
- [55] Ju X T, Zhang C. Nitrogen cycling and environmental impacts in upland agricultural soils in North China: A review[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(12): 2848–2862.
- [56] 于海洋, 张广斌, 马静, 等. 稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放对大气CO<sub>2</sub>浓度升高响应的研究进展[J]. 土壤, 2021, 53(3): 458–467.
- [57] 王柏淳. 苏南稻田新型改性水基聚丙烯酸酯包膜尿素一次性基施增产减排效果评价[D]. 贵阳: 贵州民族大学, 2021.
- [58] 秦晓波. 减缓华中典型双季稻田温室气体排放强度措施的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [59] Guo C, Ren T, Li P F, et al. Producing more grain yield of rice with less ammonia volatilization and greenhouse gases emission using slow/controlled-release urea[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(3): 2569–2579.
- [60] Ji Y, Liu G, Ma J, et al. Effects of urea and controlled release urea fertilizers on methane emission from paddy fields: A multi-year field study[J]. *Pedosphere*, 2014, 24(5): 662–673.
- [61] Ji Y, Liu G, Ma J, et al. Effect of controlled-release fertilizer on mitigation of N<sub>2</sub>O emission from paddy field in South China: A multi-year field observation[J]. *Plant and Soil*, 2013, 371(1/2): 473–486.
- [62] Yang M, Zhu X Q, Bai Y, et al. Coated controlled-release urea creates a win-win scenario for producing more staple grains and resolving N loss dilemma worldwide[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 288: 125660.