

DOI: 10.12357/cjea.20230594

饶怡晴, 岳子钦, 汪金平, 李成芳. 不同氮肥类型对稻-油轮作氨挥发和氮肥利用率的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(5): 780–789

RAO Y Q, YUE Z Q, WANG J P, LI C F. Effects of different nitrogen fertilizer types on ammonia volatilization and nitrogen use efficiency of rice-oilseed rape rotation systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(5): 780–789

不同氮肥类型对稻-油轮作氨挥发和氮肥利用率的影响^{*}

饶怡晴, 岳子钦, 汪金平, 李成芳^{**}

(华中农业大学植物科学技术学院/农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室 武汉 430070)

摘 要: 水稻-油菜(稻-油)轮作是我国代表性轮作方式之一, 然而不合理的氮肥施用导致稻-油轮作系统氮肥利用率下降和氮素流失。为此, 本研究采用随机区组设计, 以不施氮肥(CK)为对照, 设尿素(UF)、缓释肥+尿素(SF)、尿素+硝化抑制剂+脲酶抑制剂(DF)和生物炭+尿素(BF)4个处理, 拟探明不同氮肥类型对稻-油轮作系统氨挥发和氮肥利用率的影响。结果表明, 不同氮肥类型显著影响NH₃挥发、氮肥利用率与作物产量。1)各处理水稻季氨挥发均高于油菜季。与CK相比, UF、SF、DF和BF处理周年累积NH₃挥发量分别显著提高1.6倍、1.0倍、1.1倍和0.8倍。与UF相比, SF、DF和BF周年累积NH₃挥发量分别显著降低20.5%、19.7%和30.9%。2)与UF相比, SF、DF和BF油菜季氮肥吸收利用率分别提高27.9%、10.3%和19.3%, 水稻季氮肥吸收利用率分别提高49.3%、32.8%和41.5%。3)与UF相比, SF、DF和BF油菜产量分别提高6.7%、2.8%和4.3%, 水稻产量分别提高36.7%、14.0%和23.4%。与UF相比, SF油菜季经济效益提高24.3%, SF、DF和BF水稻季经济效益分别提高70.7%、21.1%和1.1%, 其中SF经济效益最高。本研究结果表明, 缓释肥+尿素能显著减少稻-油轮作NH₃挥发损失, 并更有效地提高氮肥利用率、作物产量和经济效益, 是一项经济生态的施肥模式。

关键词: 水稻-油菜轮作; 缓释肥; 氨挥发; 氮肥利用率; 经济效益

中图分类号: S314

Effects of different nitrogen fertilizer types on ammonia volatilization and nitrogen use efficiency of rice-oilseed rape rotation systems^{*}

RAO Yiqing, YUE Ziqin, WANG Jinping, LI Chengfang^{**}

(College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Farming in the Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: The rice-oilseed rape rotation is one of the main rotational patterns in China. However, excessive nitrogen fertilizer application reduces nitrogen use efficiency and causes nitrogen loss during rotation. In this study, a field experiment with a randomized block design was conducted to investigate the effects of different nitrogen fertilizer types on ammonia volatilization and nitrogen use efficiency during rice-oilseed rape rotation. Five treatments were applied: urea (UF), slow-release fertilizer + urea (SF), urea + nitrification inhibitor + urease inhibitor (DF), biochar + urea (BF), and no nitrogen fertilizer (CK). The results showed that the nitrogen fertilizer type significantly affected NH₃ volatilization, nitrogen use efficiency, and grain yield. 1) Ammonia volatilization was higher

^{*} 国家重点研发计划项目(2022YFD2301405)资助

^{**} 通信作者: 李成芳, 主要从事农业生态与耕作制度研究。E-mail: lichengfang@126.com

饶怡晴, 主要从事稻田生态研究。E-mail: 1540809118@qq.com

收稿日期: 2023-10-16 接受日期: 2023-12-05

^{*} This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFD2301405).

^{**} Corresponding author, E-mail: lichengfang@126.com

Received Oct. 16, 2023; accepted Dec. 5, 2023

during the rice season than during the oilseed rape season. Compared with the CK, the UF, SF, DF, and BF treatments significantly increased the annual NH_3 volatilization by 1.6, 1.0, 1.1, and 0.8 times, respectively. Moreover, compared with the UF, the SF, DF, and BF treatments significantly reduced the annual cumulative NH_3 volatilization by 20.5%, 19.7%, and 30.9%, respectively. 2) Compared with the UF, the SF, DF, and BF treatments increased the nitrogen recovery efficiency by 27.9%, 10.3%, and 19.3% in the oilseed rape season and by 49.3%, 32.8%, and 41.5% in the rice season, respectively. 3) Compared with the UF, the SF, DF, and BF treatments increased the oilseed rape yield by 6.7%, 2.8%, and 4.3%, and the rice yield by 36.7%, 14.0%, and 23.4%, respectively. Compared with the UF, the SF treatment significantly increased the economic benefit in the oilseed rape season by 24.3%, whereas the SF, DF, and BF treatments increased the economic benefit in the rice season by 70.7%, 21.1%, and 1.1%, respectively, with the highest economic benefit observed in the SF treatment. The results of this study show that slow-release fertilizer plus urea is an economic and ecological fertilization mode for reducing the NH_3 volatilization loss of rice-oilseed rape rotation and improving nitrogen recovery efficiency, yield, and economic benefits.

Keywords: Rice-oilseed rape rotation systems; Slow-release fertilizer; Ammonia volatilization; Nitrogen recovery efficiency; Economic benefit

水稻 (*Oryza sativa*) 和油菜 (*Brassica napus*) 是我国主要的粮食与油料作物, 其种植面积分别占全国作物种植面积的 39% 和 48%^[1]。我国人口众多, 粮油问题一直是我国农业现代化发展重点关注的问题。南方地区光温条件良好, 发展一年两熟制, 可充分利用其光热资源, 因此水稻-油菜 (稻-油) 轮作成为了中国南方主要的耕作制度。氮肥的施用有利于水稻和油菜产量的提高, 但是为追求高产, 我国氮肥施用量逐年上升。氮肥利用率低是我国农业普遍存在的问题, 通常单季作物利用率不高于 35%^[2]。 NH_3 挥发是稻田氮素损失的主要途径。1961 年至 2018 年期间, 全球农业平均年氨 (NH_3) 排放量估计为 39.2 Tg N, 耕地驱动其中 41.6% 的 NH_3 挥发, 其中水稻、玉米 (*Zea mays*) 和小麦 (*Triticum aestivum*) 共占农业 NH_3 排放总量的 53.4%^[3]。在确保粮食安全的前提下, 合理施用氮肥以提高氮肥利用率进而减少氮损失, 是我国科学家关注的焦点。

农田 NH_3 挥发和氮肥利用率受氮肥类型的影响。缓释肥能以较慢的速度释放营养物质, 长时间提供营养^[4]。研究表明控释氮肥的 NH_3 挥发量比尿素降低 54%, 氮肥利用率比尿素高 32.2%^[4]。硝化抑制剂主要作用于硝化微生物, 通过有针对性地降低微生物在土壤中活跃度减缓土壤 NH_4^+ 向 NO_3^- 转化, 从而提高氮肥利用率^[5]。研究表明, 相比常规尿素, 硝化抑制剂尿素和脲酶抑制剂尿素显著提高了氮肥利用率, 而硝化抑制剂尿素比脲酶抑制剂尿素显著增加了 NH_3 挥发量^[6]。Chakraborty 等^[7] 研究表明尿素+脲酶抑制剂处理对 NH_3 挥发的抑制作用最大, 抑制率为 37%~40%。与其他增效剂相比, 生物炭比表面积较大, 结构疏松多孔, 孔隙空间大, 能较强地吸附营养^[8], 降低土壤 NH_4^+ 浓度, 进而减少 NH_3 挥发。此外, 生物炭施加到土壤中会直接改变土壤理化特性,

间接影响土壤微生物活性, 对农田 NH_3 排放具有降低和促进两种作用^[9]。

近年来, 新型肥料 (缓释肥、控释肥等)、氮肥增效剂 (硝化/脲酶抑制剂、生物炭等) 被积极应用于农业生产。目前, 有关新型肥料和氮肥增效剂对作物生产的影响已有大量报道^[10-12], 但对作物增产与 NH_3 挥发的影响尚存争议^[13-14]。目前关于新型肥料和氮肥增效剂的综合分析较少, 且缺乏不同氮肥类型对轮作系统经济效益、生态效益等方面的研究。因此, 本文探讨了不同氮肥类型对稻-油轮作模式 NH_3 挥发、氮肥利用率和经济效益的影响, 旨在探求减少 NH_3 挥发, 提高氮肥利用率和增产的氮肥类型, 为稻-油轮作模式提供科学施氮决策。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

大田试验于 2021 年 10 月至 2022 年 10 月在湖北省武汉市华中农业大学校内基地 (30°28'3"N, 114°21'10"E) 进行。该地区地处江汉平原, 属亚热带季风气候。年平均降雨 1150~1450 mm, 年平均气温为 15.8~17.5 °C。试验田土壤类型为 Q3 沉积物发育的黄棕壤 (淋溶土), 质地为黏壤土。土壤初始理化性质为: pH 5.97、有机碳 18.49 g·kg⁻¹、全氮 1.47 g·kg⁻¹、 NH_4^+ -N 8.14 mg·kg⁻¹、 NO_3^- -N 4.45 mg·kg⁻¹、容重 1.18 g·cm⁻³。

1.2 试验设计

本研究种植模式为稻-油轮作。供试水稻品种为‘19 香’, 油菜品种为‘华油杂 9 号’。共设 5 个处理: 不施氮肥处理 (CK)、单施尿素处理 (UF)、缓释肥+尿素处理 (SF)、尿素+硝化抑制剂+脲酶抑制剂处理 (DF) 和生物炭+尿素处理 (BF)。随机区组设置, 3 次重复, 小区面积为 25 m²。油菜在 2021 年 10 月 13 日

直播,播种量为 $9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,于 2022 年 5 月 5 日收获,油菜收获后秸秆不还田。水稻 2022 年 6 月 23 日移栽,每穴 3 株,行株距为 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$,于 10 月 10 日收获。对于油菜季,除了油菜直播后浇水灌溉外,其他时期均不灌溉。水稻生长前期浅水淹灌,分蘖盛期晒田一周,之后间歇性灌溉,收获前一周排水。病虫害等按大田常规管理进行。

试验所采用氮肥为尿素 ($46\% \text{ N}$),磷肥为过磷酸钙 ($12\% \text{ P}_2\text{O}_5$),钾肥为氯化钾 ($61\% \text{ K}_2\text{O}$)。生物炭 ($\text{pH } 9.5$,全氮 1.02% ,全碳 44.81% ,比表面积 $27.31 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,灰分 5.11% ,孔径 8.12 nm) 购自江苏艾格尼斯环境科技有限公司;缓释肥 ($30\% \text{ N}$ 、 $6\% \text{ P}_2\text{O}_5$ 、 $6\% \text{ K}_2\text{O}$) 购自上海永通生态工程股份有限公司,该肥料通过包裹在水溶肥表面的半透性包膜使养分在大田土壤中缓慢释放,从而实现满足作物生长的养分需求^[4]。硝化抑制剂 (DMPP) 与脲酶抑制剂 (NBPT) 购自河南神雨生物科技有限公司,纯度 98% 。油菜和水稻全生育期总施肥量均为氮肥 $150 \text{ kg}(\text{N}) \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷肥 $90 \text{ kg}(\text{P}_2\text{O}_5) \cdot \text{hm}^{-2}$ 和钾肥 $120 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O}) \cdot \text{hm}^{-2}$ 。油菜季氮肥按照基肥:基肥=6:4 施用,水稻季氮肥按照基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2 施用,磷、钾肥均作为基肥一次性施用。对于 CK 处理,只在基肥期施入磷钾肥,其他时期均不施肥。对于 UF 处理,尿素按上述相应比例施用,磷钾肥均作为基肥施用。对于 BF 处理,油菜季基肥施用生物炭 $5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、尿素 $193.97 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、过磷酸钙 $562.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 与氯化钾 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,基肥施用尿素 $129.31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;水稻季基肥施用生物炭 $5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、尿素 $161.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、过磷酸钙 $562.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和氯化钾 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分蘖肥施用尿素 $96.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,穗肥施用尿素 $64.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。对于 SF 处理,缓释肥在油菜季和水稻季分别占总施氮量的 60% 和 50% ,均作为基肥一次性施入,剩余的氮以尿素作为追肥施用。对于 DF 处理,在每次尿素施用时,硝化抑制剂和脲酶抑制剂均按照尿素施用量的 1% 与尿素混合使用。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 NH_3 挥发测定

采用通气法进行测定^[15]。采样装置为聚氯乙烯硬质塑料管(内径 11 cm ,高 30 cm)。将两块直径 11 cm 、厚 2 cm 的海绵浸泡在 25 mL 的磷酸甘油溶液(40 mL 磷酸和 50 mL 丙三醇混合加蒸馏水定容至 1 L)直至将溶液完全吸收,后将两块海绵置于采样装置的上下两层,下层海绵距田面 10 cm 以上。下层海绵用以吸收田间 NH_3 ,上层海绵用于防止空气中

的 NH_3 和灰尘进入。每个小区设置 2 个 NH_3 挥发采样装置,每次施肥后立即采集 NH_3 ,具体采样时间为施肥后的第 1 天、3 天、5 天、7 天、14 天,取样后换上新的海绵。把取下的海绵按照相应编号装入密封袋中带回实验室,将海绵剪碎后放入 $300 \text{ mL } 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 溶液的 500 mL 塑料瓶中,放入摇床振荡 1 h ,浸提液中的铵态氮用靛酚蓝比色法进行测定,具体的氨挥发通量计算如下:

$$N = (M/A \times D) \times 10^{-2} \quad (1)$$

式中: N 为每次取样时的 NH_3 挥发速率 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); M 为每次取样单个装置吸收的 NH_3 量 ($\text{NH}_3\text{-N}$, mg); A 为采样装置的横截面积 (m^2); D 为每相邻采样时间的间隔 (d)。在整个生产过程中的 NH_3 挥发总量采用平均内插法计算。

土壤速效氮含量采用鲁如坤^[16]的方法测定。

1.3.2 氮肥利用率计算

参照刘立军等^[17]的方法计算。具体如下:

$$\text{吸氮量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{植株茎叶干物重} \times \text{植株茎叶含氮量} + \text{穗粒干物重} \times \text{穗粒含氮量} \quad (2)$$

$$\text{氮收获指数} = \text{籽粒吸氮量} / \text{植株总吸氮量} \quad (3)$$

$$\text{氮肥偏生产力}(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \text{施氮区产量} / \text{施氮量} \quad (4)$$

$$\text{氮肥农学利用率} = (\text{施氮区产量} - \text{无氮区产量}) / \text{施氮量} \quad (5)$$

$$\text{氮肥吸收利用率} = (\text{施氮区地上部植株总吸氮量} - \text{空白区地上部植株总吸氮量}) / \text{施氮量} \quad (6)$$

$$\text{氮肥生理利用率} = (\text{施氮区产量} - \text{空白区产量}) / (\text{施氮区地上部含氮量} - \text{空白区地上部含氮量}) \quad (7)$$

由于生物炭衍生的无机氮含量有限及生物炭对微生物分解的顽固性^[18],因此氮肥偏生产力、氮肥农学利用率和氮肥吸收利用率计算中的施氮量只考虑施入的肥料氮量,未考虑生物炭含氮量。

作物植株氮含量的测定如下:收获时,每个小区随机取 12 株植株,分离成叶片、茎秆、籽粒和枝梗 4 部分进行测定。各部分烘干称重后粉碎,过 100 目筛,然后用元素分析仪测定各组织氮浓度,再根据各部分生物量计算植株各器官的吸氮量及氮肥利用率。

1.3.3 产量测定

在作物成熟期于每个小区选取长势均匀的样方 4 m^2 ,人工收割测产。晾干脱粒后称重,并使用谷物水分仪 (PM-8188-A, Japan) 测定含水量,最终油菜和

水稻分别换算成含水量 8% 和 14% 的产量。

1.3.4 经济效益计算

参照周旋等^[19]方法计算。具体如下:

经济效益 = 产值 - 肥料成本 - 施肥人工成本 - 其他费用 (8)

油菜价格按 $5.6 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 计算, 水稻价格按 $2.9 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 计算, 其他费用包括播种、翻地、耙地、草害防治及收割等所产生的费用。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 软件进行数据处理, DPS 9.50 进行方差分析, 使用 Origin 2018 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥类型对土壤 NH_3 挥发通量和累积排放量的影响

如图 1 所示, 不同氮肥处理 NH_3 挥发通量的变化趋势整体一致, 施氮后 NH_3 挥发处于较高水平, 峰值一般出现在 3~5 d 后。不同处理 NH_3 挥发通量在油菜季处于 $0.20 \sim 3.72 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 水平, 在水稻季处

于 $0.50 \sim 12.61 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 水平。

氮肥施用显著提高 NH_3 挥发 (表 1)。与 CK 相比, UF、SF、DF 和 BF 油菜季累积 NH_3 挥发量分别提高 1.8 倍、1.0 倍、0.8 倍和 1.1 倍 ($P < 0.05$), 水稻季累积 NH_3 挥发量分别提高 1.4 倍、1.1 倍、1.2 倍和 0.6 倍 ($P < 0.05$)。不同氮肥类型显著影响累积 NH_3 挥发量。与 UF 相比, SF、DF 和 BF 油菜季累积 NH_3 挥发量分别降低 29.2%、34.2% 和 25.2% ($P < 0.05$), 水稻季累积 NH_3 挥发量分别降低 13.2%、7.6% 和 35.7% ($P < 0.05$), 周年累积 NH_3 挥发量分别显著降低 20.5%、19.7% 和 30.9% ($P < 0.05$)。

2.2 不同氮肥类型对氮肥利用率的影响

氮肥施用显著提高油菜和水稻氮肥利用率 (表 2)。与 CK 相比, UF、SF、DF 和 BF 油菜季吸氮量分别提高 54.0%、69.0%、59.5% 和 64.4% ($P < 0.05$), 水稻季吸氮量分别提高 60.8%、90.8%、80.8% 和 86.1% ($P < 0.05$)。油菜季 SF、DF 和 BF 较 UF 氮肥偏生产力分别提高 6.8%、2.8% 和 4.3%, 氮肥农学利用率分别提高 21.2%、8.8% 和 13.6%, 且 SF 和 BF 处理

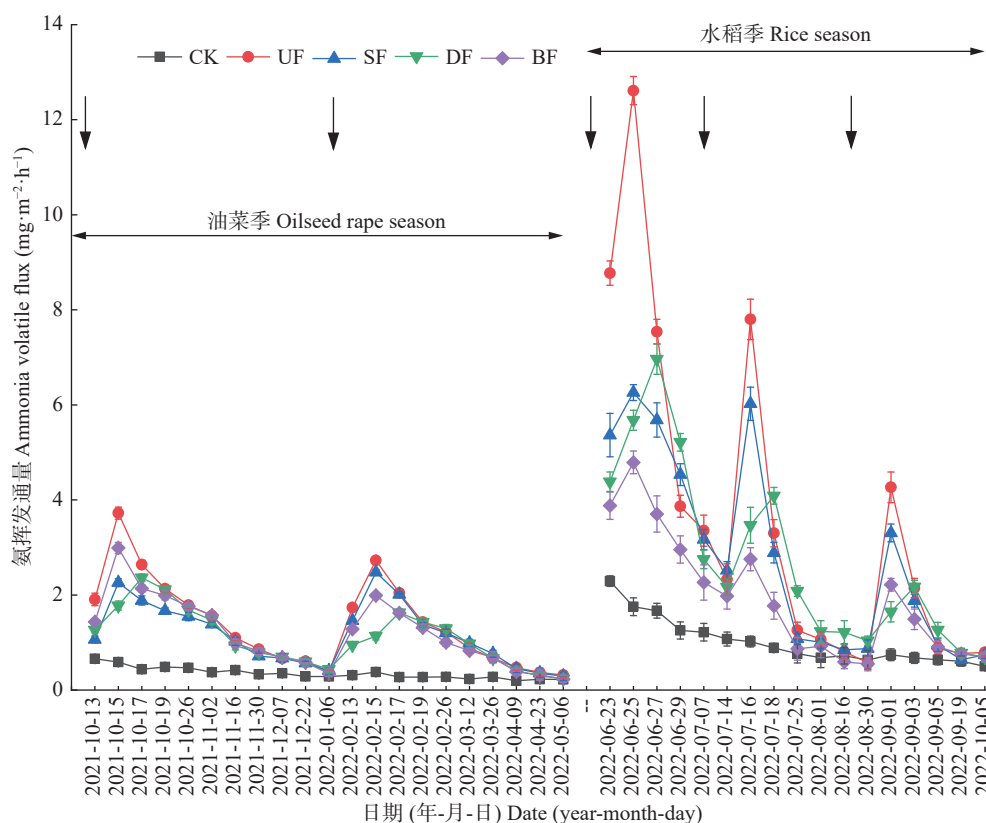


图 1 不同氮肥类型下水稻-油菜轮作系统 NH_3 挥发通量的季节变化

Fig. 1 Seasonal changes of NH_3 volatilization flux in rice-oilseed rape rotation system under different nitrogen fertilizer treatments

CK、UF、SF、DF 和 BF 分别为不施氮肥、尿素、缓释肥+尿素、尿素+硝化抑制剂+脲酶抑制剂和生物炭+尿素处理。箭头示施肥时间。CK, UF, SF, DF and BF mean treatments of no nitrogen fertilizer, urea, slow-release fertilizer + urea, urea + nitrification inhibitor + urease inhibitor and biochar + urea, respectively. Arrows indicate the fertilization times.

表 1 不同氮肥类型下水稻-油菜轮作系统累积 NH_3 挥发量的变化

Table 1 Changes in cumulative NH_3 volatilization of rice-oilseed rape rotation system under different nitrogen fertilizer treatments $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

处理 Treatment	油菜季 Oilseed rape season	水稻季 Rice season	周年 Whole year
CK	6.52±1.04d	8.94±0.51e	15.46±0.64d
UF	18.17±0.93a	21.64±0.94a	39.81±1.07a
SF	12.87±0.72bc	18.78±0.42c	31.65±0.30b
DF	11.96±0.84c	19.99±0.40b	31.95±1.19b
BF	13.60±0.56b	13.91±0.25d	27.50±0.81c

CK、UF、SF、DF和BF分别为不施氮肥、尿素、缓释肥+尿素、尿素+硝化抑制剂+脲酶抑制剂和生物炭+尿素处理。同列不同小写字母表示不同处理在 $P<0.05$ 水平差异显著。CK, UF, SF, DF and BF mean treatments of no nitrogen fertilizer, urea, slow-release fertilizer + urea, urea + nitrification inhibitor + urease inhibitor and biochar + urea, respectively. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments at $P<0.05$.

均达显著水平 ($P<0.05$); 氮肥吸收利用率分别提高 27.9%、10.3% 和 19.3% ($P<0.05$), 氮肥生理利用率分别提高 70.2%、10.3% 和 34.5% ($P<0.05$)。水稻季 SF、DF 和 BF 较 UF 氮肥偏生产力分别提高 36.7%、14.1% 和 23.4% ($P<0.05$), 氮肥农学利用率分别提高 126.8%、48.5% 和 80.9% ($P<0.05$), 氮肥吸收利用率分别提高

49.3%、32.8% 和 41.5% ($P<0.05$), 氮肥生理利用率分别提高 28.8%、13.5% 和 17.6% ($P<0.05$)。

2.3 不同氮肥类型对作物产量及经济效益的影响

2.3.1 对作物产量的影响

不同氮肥类型对作物产量有显著影响 (表 3)。与 CK 相比, UF、SF、DF 和 BF 油菜产量分别提高 46.8%、56.7%、50.9% 和 53.1% ($P<0.05$), 水稻产量分别提高 40.7%、92.3%、60.4% 和 73.6% ($P<0.05$)。与 UF 相比, SF、DF 和 BF 分别提高油菜产量 6.7% ($P<0.05$)、2.8% 和 4.3% ($P<0.05$), 水稻产量 36.7% ($P<0.05$)、14.0% 和 23.4% ($P<0.05$)。

2.3.2 对经济效益的影响

油菜季不同处理经济效益为 293~5906 元 $\cdot \text{hm}^{-2}$ (表 4), 水稻季不同处理经济效益为 6873~20 186 元 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 。与 CK 相比, UF、SF 和 DF 油菜季经济效益分别提高 1.2 倍、1.8 倍和 1.1 倍 ($P<0.05$), UF、SF、DF 和 BF 水稻季经济效益分别提高 0.7 倍、1.9 倍、1.1 倍和 0.7 倍 ($P<0.05$)。与 UF 相比, SF 油菜季经济效益提高 24.3% ($P<0.05$), SF、DF 和 BF 水稻季经济效益分别提高 70.7% ($P<0.05$)、21.1% 和 1.1%。

表 2 不同氮肥类型下水稻-油菜轮作系统氮肥利用率的变化

Table 2 Nitrogen utilization efficiencies of crops of rice-oilseed rape rotation system under different nitrogen fertilizer treatments

作物 Crop	处理 Treatment	吸氮量 Total nitrogen uptake ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	氮肥偏生产力 Nitrogen partial factor productivity ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮肥农学利用率 Nitrogen agronomic efficiency (%)	氮肥吸收利用率 Nitrogen recovery efficiency (%)	氮肥生理利用率 Nitrogen physiological efficiency (%)
油菜 Oilseed rape	CK	102.18±2.89e				
	UF	157.32±1.02d	14.96±0.29c	4.77±0.29c	36.76±0.68d	19.27±0.58d
	SF	172.70±2.08a	15.97±0.23a	5.78±0.23a	47.01±0.38a	32.79±0.55a
	DF	163.02±2.27c	15.38±0.15bc	5.19±0.15bc	40.55±1.52c	21.25±0.52c
	BF	167.95±1.57b	15.61±0.18ab	5.42±0.18ab	43.85±1.05b	25.91±0.60b
水稻 Rice	CK	91.50±1.65e				
	UF	147.16±1.09d	50.46±0.54d	14.59±0.54d	37.11±0.73d	31.57±0.36d
	SF	174.60±0.75a	68.97±0.55a	33.09±0.55a	55.40±0.50a	40.65±0.54a
	DF	165.44±1.02c	57.55±0.15c	21.67±0.15c	49.29±0.68c	35.83±0.45c
	BF	170.27±1.14b	62.27±0.28b	26.40±0.28b	52.51±0.76b	37.12±0.45b

CK、UF、SF、DF和BF分别为不施氮肥、尿素、缓释肥+尿素、尿素+硝化抑制剂+脲酶抑制剂和生物炭+尿素处理。同列不同小写字母表示不同处理在 $P<0.05$ 水平差异显著。CK, UF, SF, DF and BF mean treatments of no nitrogen fertilizer, urea, slow-release fertilizer + urea, urea + nitrification inhibitor + urease inhibitor and biochar + urea, respectively. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments at $P<0.05$.

3 讨论

3.1 不同氮肥类型对稻-油种植模式 NH_3 挥发的影响

本研究中, 各处理水稻季 NH_3 累积挥发量均高于油菜季 (表 1)。原因是 NH_4^+ -N 主要分布在较浅土层, 由于 NH_4^+ 较易向上迁移, 因此田面水 NH_4^+ -N 浓度较高, 促进 NH_3 的挥发^[20]。

与 UF 相比, SF、DF 和 BF 显著降低了 NH_3 累

积挥发量 (表 1)。其中 BF 的 NH_3 累积挥发量显著低于其他氮肥处理, 说明 BF 抑制稻-油种植模式 NH_3 挥发效果最佳, 这一结果与 Mandal 等^[21] 的研究结果一致。生物炭配施氮肥抑制 NH_3 挥发的原因主要由于生物炭特殊的结构, 及其对 NH_4^+ 和 NH_3 的吸附程度强以及官能团与 NH_3 发生的一系列反应所造成的^[22]。同时, 生物炭可以发挥自身独特优势, 吸附土

表 3 不同氮肥处理油菜和水稻产量变化

Table 3 Changes in yield of oilseed rape and rice under different nitrogen fertilizer treatments $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

处理 Treatment	油菜 Oilseed rape	水稻 Rice
CK	1529±40d	5381±570d
UF	2245±44c	7570±458c
SF	2396±35a	10345±777a
DF	2307±23bc	8632±404bc
BF	2342±27ab	9340±333ab

CK、UF、SF、DF和BF分别为不施氮肥、尿素、缓释肥+尿素、尿素+硝化抑制剂+脲酶抑制剂和生物炭+尿素处理。同列不同小写字母表示不同处理在 $P<0.05$ 水平差异显著。CK, UF, SF, DF and BF mean no nitrogen fertilizer, urea, slow-release fertilizer + urea, urea + nitrification inhibitor + urease inhibitor and biochar + urea treatment, respectively. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments at $P<0.05$.

壤中存在和新产生的 NH_3 , 抑制大田产生 NH_3 挥发。但有研究认为, 生物炭能提高土壤 pH, 从而促进 NH_3 挥发^[23]。不同的研究结果可能和生物炭与尿素不同的配比比例及不同的生物炭来源有关。本研究

中, SF 和 DF 较之 UF 降低了 NH_3 挥发(表 1)。SF 之所以能显著降低 NH_3 挥发, 是因为缓释肥表面有一层膜衣, 在一定程度上阻止了水分在膜内外的流通, 有效延缓了尿素溶解, 导致土壤里层和田面水中含有的 NH_4^+-N 处于较低浓度水平^[24]。前人的研究证明, NBPT 对 NH_3 挥发的抑制效果较好, DMPP 的应用没有显著增加 NH_3 挥发量^[25]。对于 DF 处理, 虽然硝化抑制剂施用能抑制土壤硝化作用, 导致土壤 NH_4^+-N 在土壤富集, 提高 NH_3 挥发的潜力, 但是脲酶抑制剂施用缓解了土壤酰胺态氮水解转变为 NH_4^+-N 的速度, 降低了土壤 NH_4^+-N 浓度, 因此两者配合施用减少了 NH_3 挥发。孙爱文等^[26] 研究表明, 脲酶抑制剂通过对在脲酶催化过程中扮主要角色的巯基发生作用, 从而延缓土壤中尿素的水解而减少 NH_3 的挥发损失。另外, 本研究中 DF 处理出现 NH_3 挥发峰值时间相对其他氮肥处理推迟(图 1), 这与刘攀^[27] 的结论一致。

表 4 不同氮肥处理作物经济效益变化

Table 4 Changes in economic benefits of crop under different nitrogen fertilizer treatments

作物 Crop	处理 Treatment	产量 Yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	产值 Output value ($\text{¥} \cdot \text{hm}^{-2}$)	肥料成本 Fertilizer cost ($\text{¥} \cdot \text{hm}^{-2}$)	施肥人工成本 Fertilization labor cost ($\text{¥} \cdot \text{hm}^{-2}$)	其他费用 Other expenses ($\text{¥} \cdot \text{hm}^{-2}$)	经济效益 Economic benefit ($\text{¥} \cdot \text{hm}^{-2}$)
油菜 Oilseed rape	CK	1529±40d	8562±224d	2762	180	3497	2123±224c
	UF	2245±44c	12572±246c	4055	270	3497	4750±246b
	SF	2396±35a	13418±196a	3745	270	3497	5906±196a
	DF	2307±23bc	12919±129bc	4637	270	3497	4515±129b
	BF	2342±27ab	13115±135ab	9055	270	3497	293±135d
水稻 Rice	CK	5381±570d	15605±1653d	2762	200	5770	6873±1653c
	UF	7570±458c	21953±1328c	4055	300	5770	11828±1328b
	SF	10345±777a	30001±2253a	3745	300	5770	20186±2253a
	DF	8632±404bc	25033±1172b	4637	300	5770	14326±1172b
	BF	9340±333ab	27086±966b	9055	300	5770	11961±966b

CK、UF、SF、DF和BF分别为不施氮肥、尿素、缓释肥+尿素、尿素+硝化抑制剂+脲酶抑制剂和生物炭+尿素处理。同列不同小写字母表示不同处理在 $P<0.05$ 水平差异显著。CK, UF, SF, DF and BF mean no nitrogen fertilizer, urea, slow-release fertilizer + urea, urea + nitrification inhibitor + urease inhibitor and biochar + urea treatment, respectively. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments at $P<0.05$.

3.2 不同氮肥类型对稻-油种植模式氮肥利用率的影响

氮肥利用率可体现作物对氮素的运用趋势, 表征氮肥对产量的贡献程度。吸氮量、氮肥偏生产力、氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率和氮肥生理利用率这些指标从不同角度直接或间接反映了农作物对氮素吸收利用的综合效果。合理施肥能够提高作物的氮肥利用率。本研究结果表明, 不同氮肥处理下作物氮肥利用率存在显著差异(表 2)。缓释肥处理较其他处理显著提高了作物对氮素的吸收和氮肥利用率。前人的研究已表明, 与普通尿素相比, 在等氮量

情况下控释尿素氮肥利用率提高 10% 以上^[28]。这主要是因为缓释肥的养分分配符合作物生长规律, 保证了农作物整个生长过程中的营养供应, 而单施尿素在作物生长中后期所能提供的养分较少, 导致农作物的养分需求得不到满足。此外, 缓释肥施用能降低田面水中 NH_4^+-N , 减少 NH_3 挥发(表 1), 从而提高植株吸氮量, 最终提高了氮肥利用率^[29]。

生物炭与尿素结合显著提高了氮肥利用率(表 2), 这与向伟等^[30] 报道的施用生物炭配合施用尿素能提高作物对氮素吸收的结果一致。生物炭的比表面积大且官能团数量多, 可以提高土壤阳离子交换量, 吸

附更多的养分离子,促进作物氮吸收及土壤对氮素的吸附,从而提高作物的氮素利用率^[31]。同时,适量施用生物炭可以在短期内改善土壤理化性质,减少 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 流失,截留更多氮素在植物根系周边,减少氮素损失^[32]。

本研究还指出,NBPT、DMPP 和尿素混合施用能提高作物氮吸收和氮肥利用率(表 2)。研究表明 NBPT 在非酸性、通气性良好的农田中,对于延缓尿素水解,提高尿素氮肥的利用率非常有效^[33]。硝化抑制剂则促进侧根生长,增强作物的吸氮能力。崔磊等^[34]研究表明,与仅施用氮肥相比,氮肥配施硝化抑制剂双氰胺的作物吸氮量和氮肥吸收利用率分别显著提高 6.1 倍和 4.4 倍。可见,NBPT、DMPP 和尿素混合施用对提高作物氮吸收有积极的影响。两种生化抑制剂的最佳适用条件不同,在某些情况下,双抑制剂为全面减少氮损失和提高氮肥利用率提供了不错的选择。未来还需要进一步研究双抑制剂的比例对作物生产力的影响。

3.3 不同氮肥类型对稻-油种植模式作物产量的影响

本研究表明,施用氮肥显著提高水稻和油菜产量。与 UF 处理相比,SF、DF 和 BF 作物产量均有不同程度的提高,且 SF 处理增产效果最好(表 3)。前人研究已表明,缓释肥/控释肥可以延缓氮素的释放周期,满足作物整个生育期的养分需求,促进了作物氮肥吸收利用,从而提高了作物产量^[35]。马富亮等^[36]在小麦上的研究结果也显示,与普通尿素相比,缓释氮肥提高了氮肥利用率,且提高了每穗粒数和千粒重,产量增幅可达 10.4%~16.5%。

本研究中生物炭配施尿素也显著提高水稻和油菜产量(表 3)。由于生物炭氮供应不足,单独施用会降低作物产量,因此生物炭和尿素共施既包含两者肥力,又秉承生物炭的结构特点,使得肥效更持久。生物炭与尿素混合施用对促进作物成熟和增产稳产具有积极影响^[37]。一方面生物炭本身因其结构特殊,能够很好地吸附养分,有利于提高肥料吸收率,促进作物增产。另一方面生物炭发挥着改良土壤的作用,积极影响土壤有益微生物,丰富土壤营养。

在本试验中,DF 产量均比 CK 有不同程度提高(表 3),可见脲酶抑制剂和硝化抑制剂对于增产增效也具有一定积极作用。施用生化抑制剂提高作物产量原因主要有两点:一是脲酶抑制剂通过作用于脲酶与尿素结合位点,阻止尿素水解过快,促进作物增产^[38];二是硝化抑制剂通过阻碍硝化作用,调整

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的比例,提高对作物的供给量,使供应时间更持久,保证作物高产稳产。卢杨^[39]研究发现脲酶抑制剂和硝化抑制剂都可以对油菜产量产生影响,与单纯施用尿素相比,能够增加油菜产量 9.77%~30.33%。对于脲酶抑制剂不同添加量的研究发现^[40],NBPT 添加量为纯氮的 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 时,可以显著提高油菜产量。此外,硝化抑制剂和脲酶抑制剂共施可以优化土壤中的氮形态转化效果,在全过程进行适当控制调节,从而避免尿素过多的无效损失。

3.4 不同氮肥类型对经济效益的影响

前人的研究多集中在针对肥料减量减次对作物经济效益的影响,如周雯雯等^[41]研究指出,与常规施氮处理相比,缓释肥减少了追肥环节,人工成本减少 6300 元· hm^{-2} ,从而提高经济效益。本研究是在等量施氮条件下设计不同氮肥类型对经济效益的影响。从表 4 可以看出,与 CK 相比,UF、SF 和 DF 显著提高了油菜季经济效益,而 BF 由于肥料成本高,导致相比 CK 经济效益下降。在水稻季,不同氮肥处理均较 CK 显著提高了经济效益。本研究中作物经济效益受作物产量、肥料成本、人工成本和其他费用的共同影响,由于各处理在生产过程中作物产值和生产总成本不同,所以经济效益也有较大差别。

在本研究中 SF 在油菜季和水稻季经济效益最高(表 4),这不仅因为缓释肥显著提高了作物产量(表 3),还因为 SF 处理肥料成本较之其他氮肥处理低(表 4)。缓释肥是一种高效环保肥,不仅显著减轻了不同途径的氮损失,提高氮肥利用率,还进一步优化施肥方式、节省物力人力,提高了经济效益^[42]。当前,传统农作物种植耗时费工的生产方式已难以为继,轻简高效生产越来越受到农民的青睐。因此,根据产量、效益等综合评估,缓释肥在农业上值得推广,如何有效推广缓释肥还需深入研究。

4 结论

相比单施尿素,新型肥料和氮肥增效剂提高了稻-油轮作的作物产量,显著降低 NH_3 挥发和提高氮肥利用率。但不同氮肥类型之间存在差异,生物炭+尿素的 NH_3 挥发最低,缓释肥+尿素氮肥利用率、产量和经济效益最高。综合考虑作物生产的环境、农学和经济效益,缓释肥+尿素处理增加了作物产量和经济效益,减少了 NH_3 挥发,对于促进作物的高产稳产和环境减排具有重要意义。在今后的研究中还需进一步阐明缓释肥的作用机理,研究在不同土壤特

性和作物体系下的田间应用效果。

参考文献 References

- [1] 程勇翔, 王秀珍, 郭建平, 等. 中国水稻生产的时空动态分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(17): 3473–3485
CHENG Y X, WANG X Z, GUO J P, et al. The temporal-spatial dynamic analysis of China rice production[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(17): 3473–3485
- [2] 金树权, 陈若霞, 汪峰, 等. 不同氮肥运筹模式对稻田田面水氮浓度和水稻产量的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 242–248
JIN S Q, CHEN R X, WANG F, et al. Effects of different nitrogen fertilizer application modes on the variation of nitrogen concentration in paddy field surface water and the yield of rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(1): 242–248
- [3] YANG Y Y, LIU L, LIU P, et al. Improved global agricultural crop-and animal-specific ammonia emissions during 1961–2018[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 344: 108289
- [4] 郑圣先, 刘德林, 聂军, 等. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 137–142
ZHENG S X, LIU D L, NIE J, et al. Fate and recovery efficiency of controlled release nitrogen fertilizer in flooding paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2004, 10(2): 137–142
- [5] 张苗苗, 沈菊培, 贺纪正, 等. 硝化抑制剂的微生物抑制机理及其应用[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2077–2083
ZHANG M M, SHEN J P, HE J Z, et al. Microbial mechanisms of nitrification inhibitors and their application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2077–2083
- [6] 刘世腾, 刘春丽, 李开春, 等. 氮肥增效剂对石灰性潮土氨挥发及冬小麦产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(3): 1–6
LIU S T, LIU C L, LI K C, et al. Effects of different fertilizer synergists on ammonia volatilization loss and yield of winter wheat in a calcareous fluvo-aquic soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(3): 1–6
- [7] CHAKRABORTY R, PURAKAYASTHA T J, PENDALL E, et al. Nitrification and urease inhibitors mitigate global warming potential and ammonia volatilization from urea in rice-wheat system in India: a field to lab experiment[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 898: 165479
- [8] 王宇函, 吕波, 张林, 等. 不同土壤改良剂对酸性铝富集红壤毒性缓解效应的差异[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(2): 73–80
WANG Y H, LYU B, ZHANG L, et al. Differences in toxicity mitigation effects of different amendments on acidic aluminum-enriched red soil[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2019, 38(2): 73–80
- [9] 许云翔, 何莉莉, 陈金媛, 等. 生物炭对农田土壤氨挥发的影响机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4312–4320
XU Y X, HE L L, CHEN J Y, et al. Effects of biochar on ammonia volatilization from farmland soil: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12): 4312–4320
- [10] 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
LIU Z H, WU X B, TAN D S, et al. Application and environmental effects of one-off fertilization technique in major cereal crops in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3827–3839
- [11] 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 X J, MA H B, NING Y W, 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
- [12] 于淑芳, 杨力, 张民, 等. 控释尿素对小麦-玉米产量及土壤氮素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1744–1749
YU S F, YANG L, ZHANG M, et al. Effects of controlled-release urea on wheat-corn's yield and soil nitrogen[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9): 1744–1749
- [13] 卢婉芳, 陈苇. 稻田脲酶抑制剂的应用效果及其与环境条件的关系[J]. 中国水稻科学, 1992, 6(3): 135–138
LU W F, CHEN W. Effectiveness of urease inhibitors related to environmental factors in paddy field[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1992, 6(3): 135–138
- [14] 王峰, 陈玉真, 吴志丹, 等. 施用生物炭对酸性茶园土壤氨挥发的影响[J]. 茶叶科学, 2017, 37(1): 60–70
WANG F, CHEN Y Z, WU Z D, et al. Effect of biochar addition on ammonia volatilization in acid tea garden[J]. *Journal of Tea Science*, 2017, 37(1): 60–70
- [15] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定——通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205–209
WANG Z H, LIU X J, JU X T, et al. Field *in situ* determination of ammonia volatilization from soil: venting method[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 205–209
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
LU R K. *Methods of Soil Agrochemical Analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2000
- [17] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(12): 1456–1461
LIU L J, SANG D Z, LIU C L, et al. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(12): 1456–1461

- [18] SEKI M, SUGIHARA S, MIYAZAKI H, et al. Impact of biochar and manure application on in situ carbon dioxide flux, microbial activity, and carbon budget in degraded cropland soil of southern India[J]. *Land Degradation and Development*, 2022, 33(10): 1626–1636
- [19] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田水稻产量和经济效益的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(12): 3517–3525
- ZHOU X, WU L H, DAI F. Effects of biochemical inhibitor combination and fertilization mode on rice yield and economic benefit in yellow clayey field[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(12): 3517–3525
- [20] PAN W, MADSEN I J, BOLTON R P, et al. Ammonia/ammonium toxicity root symptoms induced by inorganic and organic fertilizers and placement[J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108: 2485–2492
- [21] MANDAL S, THANGARAJAN R, BOLAN N S, et al. Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat[J]. *Chemosphere*, 2016, 142: 120–127
- [22] SHA Z P, LI Q Q, LV T T, et al. Response of ammonia volatilization to biochar addition: a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 1387–1396
- [23] 董玉兵, 吴震, 李博, 等. 追施生物炭对稻麦轮作中麦季氨挥发和氮肥利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1258–1267
- DONG Y B, WU Z, LI B, et al. Effects of biochar reapplication on ammonia volatilization and nitrogen use efficiency during wheat season in a rice-wheat annual rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5): 1258–1267
- [24] ROCHETTE P, ANGERS D A, CHANTIGNY M H, et al. Ammonia volatilization following surface application of urea to tilled and no-till soils: a laboratory comparison[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103(2): 310–315
- [25] WU D, ZHANG Y X, DONG G, et al. The importance of ammonia volatilization in estimating the efficacy of nitrification inhibitors to reduce N_2O emissions: a global meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 271: 116365
- [26] 孙爱文, 石元亮, 张德生, 等. 硝化/脲酶抑制剂在农业中的应用[J]. *土壤通报*, 2004, 35(3): 357–361
- SUN A W, SHI Y L, ZHANG D S, et al. Application of nitrification-urease inhibitors in agriculture[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3): 357–361
- [27] 刘攀. 脲酶/硝化抑制剂对青藏高原高寒人工草地氮肥挥发、氮素利用研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2017
- LIU P. Effects of urease/nitrification inhibitor on nitrogen volatilization and nitrogen utilization in nitrogen fertilizer of alpine artificial grassland in Qinghai-Tibet Plateau[D]. Xining: Qinghai Normal University, 2017
- [28] 陈琨, 秦鱼生, 喻华, 等. 控释氮肥对一季中稻产量及氮肥利用率的影响[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(3): 507–512
- CHEN K, QIN Y S, YU H, et al. Effects of controlled-release urea on yield of one season middle rice and nitrogen use efficiency[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(3): 507–512
- [29] ZHENG W K, ZHANG M, LIU Z G, et al. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2016, 197: 52–62
- [30] 向伟, 王雷, 刘天奇, 等. 生物炭与无机氮配施对稻田温室气体排放及氮肥利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(22): 4634–4645
- XIANG W, WANG L, LIU T Q, et al. Effects of biochar plus inorganic nitrogen on the greenhouse gas and nitrogen use efficiency from rice fields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(22): 4634–4645
- [31] ZHANG Y F, WANG X P, HU R, et al. Throughfall and its spatial variability beneath xerophytic shrub canopies within water-limited arid desert ecosystems[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 539: 406–416
- [32] 梁传斌, 李建国, 沈枫, 等. 移栽密度和施用生物炭对水稻产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(2): 240–247
- LIANG C B, LI J G, SHEN F, et al. Effect of transplanting density and biochar application on the yield of rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(2): 240–247
- [33] 彭玉净, 田玉华, 尹斌. 添加脲酶抑制剂 NBPT 对麦秆还田稻田氨挥发的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(1): 19–23
- PENG Y J, TIAN Y H, YIN B. Effects of NBPT urease inhibitor on ammonia volatilization in paddy fields with wheat straw application[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(1): 19–23
- [34] 崔磊, 李东坡, 武志杰, 等. 不同硝化抑制剂对红壤氮素硝化作用及玉米产量和氮素利用率的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3953–3960
- CUI L, LI D P, WU Z J, et al. Effects of different nitrification inhibitors on nitrification, maize yield, and nitrogen use efficiency in red soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3953–3960
- [35] 熊海蓉, 文卓琼, 熊远福, 等. 3 种水稻缓/控释肥一次性施用效果比较[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(33): 1–5
- XIONG H R, WEN Z Q, XIONG Y F, et al. Comparison of one-time application effect of three kinds of slow/controlled release fertilizers on rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(33): 1–5
- [36] 马富亮, 宋付朋, 高杨, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对小麦产量、品质及氮素利用率的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 67–72
- MA F L, SONG F P, GAO Y, et al. Effects of sulfur- and polymer-coated controlled release urea fertilizers on wheat yield and quality and fertilizer nitrogen use efficiency[J]. *Chinese*

- Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 67–72
- [37] ABBAS A, YASEEN M, KHALID M, et al. Effect of biochar-amended urea on nitrogen economy of soil for improving the growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under field condition[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2017, 40(16): 2303–2311
- [38] 王玲莉, 古慧娟, 石元亮, 等. 尿素配施添加剂 NAM 对三江平原白浆土氮素转化和玉米产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2012(2): 34–38
- WANG L L, GU H J, SHI Y L, et al. Soil nitrogen transformation and corn yield as affected by combination of urea and fertilizer additive NAM in Sanjiang Plain of China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(2): 34–38
- [39] 卢杨. 脲酶/硝化双抑制剂配施对油菜生长及控氮效应的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2013
- LU Y. Effects of urease/nitrification inhibitor application on growth of rape and nitrogen control[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2013
- [40] 串丽敏. 硝化/脲酶抑制剂对土壤氮素迁移转化及油菜生长的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2010
- CHUAN L M. Effects of nitrification/urease inhibitor on nitrogen migration, transformation and reape growth[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2010
- [41] 周雯雯, 贾浩然, 张月, 等. 不同类型新型肥料对双季稻产量、氮肥利用率和经济效益的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(4): 657–668
- ZHOU W W, JIA H R, ZHANG Y, et al. Effects of different new types of fertilizer on yield, nitrogen use efficiency and economic benefit of double cropping rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(4): 657–668
- [42] YANG G, WANG Y, WANG S Q, et al. Drilling of super large granular slow-release humic acid compound fertilizer improves simultaneously environmental and economic benefits in peach orchard[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 348: 108437