

# 减氮配施抑制剂及鸡粪提高尿素氮在稻田土壤中的转化及利用

于春晓<sup>1,2</sup>, 张丽莉<sup>1\*</sup>, 杨立杰<sup>1,3</sup>, 武开阔<sup>1</sup>, 李文涛<sup>1</sup>, 宋玉超<sup>1</sup>, 李东坡<sup>1</sup>, 武志杰<sup>1</sup>

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁沈阳 110016; 2 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003;

3 沈阳化工研究院有限公司, 辽宁沈阳 110021)

**摘要:**【目的】探究氮肥减量配施氮肥抑制剂和鸡粪的情况下土壤及肥料氮素供应和利用状况, 及其对土壤肥力和水稻产量的影响, 为我国东北地区水稻生产中提高氮肥利用效率、实现节肥增效提供理论基础。【方法】采用<sup>15</sup>N 同位素示踪技术, 盆栽试验设不施氮肥处理 (CK)、常规氮肥 (<sup>15</sup>N 示踪尿素) 处理 (N)、80% 尿素氮+20% 鸡粪氮处理 (NM)、80% 尿素氮+抑制剂处理 (NI)、80% 尿素氮+抑制剂+20% 鸡粪氮处理 (NIM)。测定不同生长时期来自于土壤及肥料中的铵态氮、微生物量氮含量及植株含氮量, 收获时测定水稻产量。

【结果】1) NI 处理在土壤及肥料来源的铵态氮供应能力方面与 N 处理相当, 抑制剂添加对氮肥减施有一定的补偿作用。在分蘖期和灌浆期, NM 处理供氮能力优于无机氮肥处理。NIM 处理在铵态氮和硝态氮供应能力方面效果最好。与 N 处理相比, NIM 处理在水稻返青期、分蘖期和灌浆期土壤铵态氮含量分别提高了 19.2%、66.3% 和 36.5%, 硝态氮含量分别提高了 13.9%、12.7% 和 17.3%, <sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量在分蘖期增加了 14.59 mg/kg。2) 无机氮肥处理 (N、NI) 对土壤微生物量碳含量无显著影响, 但添加鸡粪处理 (NM、NIM) 显著提高了返青期和灌浆期土壤微生物量氮含量 ( $P < 0.05$ )。与 N 处理相比, NIM 处理在水稻返青期、分蘖期、灌浆期和成熟期土壤微生物量碳含量分别提高了 32.61%、29.23%、53.46% 和 2.85%, 微生物量氮含量分别提高了 147.98%、22.97%、133.33% 和 24.63%, <sup>15</sup>N-微生物量氮含量在分蘖期增加了约 22.56 mg/kg。3) 抑制剂及鸡粪添加均提高了水稻产量和生物量, NIM 处理的水稻生物量、产量和吸氮量较 N 处理分别提高了 83.59%、124.18% 和 46.66% ( $P < 0.05$ ), 土壤中肥料氮的残留量显著增加了 56.48%, 肥料氮的损失减少了约 78.7%。NIM 处理的氮素吸收利用率、氮肥农学效率等显著高于其他处理, 抑制剂与鸡粪在提高肥料氮素利用率方面存在显著交互作用。【结论】在我国北方棕壤水稻土上, 在尿素中添加抑制剂 (1%PPD+1%NBPT+2%DMPP) 或者用鸡粪替代 20% 的尿素均能改善土壤氮素供应, 氮肥减量 20% 配施抑制剂和鸡粪不仅不会减产, 还会在提高水稻产量的同时提高肥料利用率。从肥料氮释放及水稻吸收利用的角度综合考量, 减少 20% 尿素投入, 添加氮肥抑制剂, 以及添加氮肥抑制剂的同时, 用鸡粪替代 20% 的尿素的效果较好。

**关键词:** 水稻; 肥料减施; 抑制剂; 氮肥利用率; 有机肥替代; <sup>15</sup>N 同位素示踪

## Combining N-inhibitor and chicken manure with reduced N fertilizer to improve the conversion and utilization of fertilizer N in a paddy soil

YU Chun-xiao<sup>1,2</sup>, ZHANG Li-li<sup>1\*</sup>, YANG Li-jie<sup>1,3</sup>, WU Kai-kuo<sup>1</sup>, LI Wen-tao<sup>1</sup>, SONG Yu-chao<sup>1</sup>, LI Dong-po<sup>1</sup>, WU Zhi-jie<sup>1</sup>

(1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

2 Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China;

3 Shenyang Chemical Research Institute Co., LTD., Shenyang, Liaoning 110021, China)

**Abstract:** 【Objectives】The nitrogen supply and utilization of soil and fertilizer-derived N were studied under the condition of reduced urea N input and combined with N-inhibitors and chicken manure, to provide a

收稿日期: 2021-01-05 接受日期: 2021-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31971531); 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA28090200); 中国科学院重点部署项目 (KFZD-SW-113); 2020 年度王宽诚率先进入人才计划“产研人才扶持项目”。

联系方式: 于春晓 E-mail: chunxiao\_yu@126.com; \* 通信作者 张丽莉 E-mail: llzhang@iae.ac.cn

theoretical basis for rice cultivation in Northeast of China, in terms of improving the nitrogen use and fertilizer efficiencies. 【 **Methods** 】  $^{15}\text{N}$  isotope tracer technology was adopted in a rice pot experiment. The five treatments included: no nitrogen fertilizer control (CK), conventional rate of urea (urea- $^{15}\text{N}$ ), 80% urea N + 20% chicken manure N (NM), 80% urea N+ inhibitor (NI), 80% urea N + inhibitor + 20% chicken manure N (NIM). The contents of ammonia nitrogen and microbial biomass N in soil and urea-derived nitrogen, and nitrogen content of rice plant at different growth stages were analyzed, investigated the rice yield was investigated. 【 **Results** 】 1) NI treatments had considerable soil ammonium N and fertilizer derived N supply ability compared with N treatment, inhibitors had a compensatory effect on nitrogen reduction. NM treatment had markedly higher N supply ability at the tillering and filling stages, compared to N treatment. Compared with N treatment, soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  in NIM treatment increased by 19.2%, 66.3%, and 36.5%;  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  content increased by 13.9%, 12.7%, and 17.3% at returning green, tillering and filling stage, respectively,  $^{15}\text{NH}_4^+\text{-N}$  content increased by 14.59 mg/kg at tillering stage. 2) N and NI treatments had no significant effect on soil microbial biomass carbon (MBC) content, however, NM and NIM treatments significantly improved soil microbial biomass N (MBN) content at the returning green and filling stage ( $P < 0.05$ ). Compared with N treatment, the MBC content in NIM treatment increased by 32.61%, 29.23%, 53.46% and 2.85%, and the MBN content increased by 147.98%, 22.97%, 133.33% and 24.63% at the returning green, tillering, filling and mature stages, respectively, while  $^{15}\text{N}$ -MBN increased by 22.56 mg/kg at the tillering stage. 3) N-inhibitor with chicken manure addition increased the rice yield and biomass. Compared with N treatment, NIM increased the biomass, yield and nitrogen uptake of rice by 83.59%, 124.18% and 46.66%. It also significantly increased fertilizer N residue in the soil by 56.48% and reduced the fertilizer N loss by 78.7%. Compared with N treatment, NIM treatment had a significant effect on N absorption and utilization of fertilizer, and its N absorption, N utilization rate and N agronomic efficiency were significantly higher than other treatments. 【 **Conclusions** 】 For brown paddy soil of northern China, the addition of inhibitor (1% PPD+1% NBPT+2% DMPP) and chicken manure could replenish soil N supply. Based on 20% reduction in urea, augments with the application of inhibitors and chicken manure increased the fertilizer utilization rate and increased the rice yield. From the perspectives of fertilizer N release and utilization in rice, NI and NIM treatments shows superior agronomic performances.

**Key words:** rice; fertilizer reduction; inhibitor; nitrogen fertilizer efficiency; organic fertilizer replacement;  $^{15}\text{N}$  isotope tracer

肥料在我国农业生产中占有非常重要的地位。目前, 由于存在化肥不合理使用、盲目施肥等现象, 导致作物肥料利用率低, 土壤肥力下降, 进而对粮食持续增产、农业提质增效产生严重影响<sup>[1]</sup>。2017 年我国氮素施用量已达到 2978.19 万 t<sup>[2]</sup>。氮肥用量大和吸收利用率相对较低, 不仅导致资源浪费, 还给生态环境带来负面影响。农业农村部提出到 2020 年我国农业要实现“一控两减三基本”, 即控制农业用水总量, 减少化肥农药使用量, 化肥、农药用量实现零增长, 基本实现畜禽养殖排泄物资源化利用等<sup>[3]</sup>。截止到 2016 年, 我国化肥用量实现了负增长<sup>[1]</sup>。因此, 科学合理的施肥方式, 提高肥料资源利用率, 是我国可持续发展的关键举措之一, 抑制剂及有机肥能从减少损失和增加固持两方面提

高土壤氮素供应能力, 是目前较为有效的提高肥料利用率的举措。

抑制剂的施用是提高肥料利用率, 减少化肥施用量的有效途径。研究表明, 在稻田中施用脲酶抑制剂能增产 8.5%~16.1%, 节肥 3.8%~8.4%, 施用硝化抑制剂能增产 3.9%~12.4%, 增效 11.1%~25.0%, 节肥 25.0%<sup>[4]</sup>。且脲酶硝化抑制剂组合能有效减少稻田土壤中氨挥发和温室气体的排放<sup>[5-6]</sup>, 还能提高尿素氮的利用效率, 促进水稻增产<sup>[7]</sup>, 脲酶硝化抑制剂 (NBPT+DMPP) 配合施用效果最为理想<sup>[8-9]</sup>。不同抑制剂类型及组合对氮素转化及氮的利用效率影响不同, 对于两种脲酶抑制剂与硝化抑制剂组合 (NBPT+PPD+DMPP) 在稻田中的应用是否能进一步提高肥料利用率和增加水稻产量? 尤其是在

氮肥减量施用条件下, 抑制剂在外源肥料氮素的提质增效方面有待于进一步研究。

我国有机肥料实物量约 57 亿 t, 折合氮量约 3000 万 t, 有机肥资源量大, 养分含量丰富, 有机肥还田在补充土壤养分方面作用巨大<sup>[10-13]</sup>。有机无机肥配施在提高肥料利用率、改善土壤性状等方面产生良好的效果<sup>[14]</sup>。朱菜红等<sup>[15]</sup>利用<sup>15</sup>N 示踪技术研究化肥配施鸡粪后<sup>15</sup>N 的利用状况, 其利用率大于 60%, 而单施化肥处理<sup>15</sup>N 利用率仅为 39%<sup>[16]</sup>。李燕青等<sup>[17]</sup>研究表明, 氮肥减量配施有机肥能够实现与化肥相当的氮素利用效率, 同时提升土壤肥力。实施化肥减量配施有机肥, 是推进农业可持续发展的重大措施, 也是促进节本增效、农业资源再利用的现实需求。减施无机肥增施有机肥能有效改善土壤理化性状, 提升土壤质量<sup>[18]</sup>, 还能显著降低稻田氨挥发累积排放量, 减少径流损失氮量, 可有效抑制 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[19]</sup>。故化肥减量并不会对水稻和秸秆产量产生不利影响, 还能显著提升耕地质量, 增加土壤碳氮储量<sup>[19]</sup>, 减量施肥+有机肥处理的综合效果最好<sup>[20]</sup>。合理的有机肥化肥配施能确保养分在水稻各个时期的持续供应, 增加水稻总吸氮量, 协调水稻产量各构成因素, 促进茎叶和籽粒产量全面提高。在我国稻田生态系统中, 化肥配施鸡粪的研究已有部分报道。研究表明, 施用鸡粪能节约约 20%<sup>[21]</sup>。但氮肥减量配施抑制剂或鸡粪及两者配施, 在提高土壤氮素供应及提高肥料氮素利用效率方面是否有协同增效作用? 还有待于进一步研究。

为探究抑制剂组配有机物料鸡粪在氮肥减施条件下对肥料氮的补偿及增效作用, 本研究借助于<sup>15</sup>N 同位素示踪技术, 采用盆栽试验, 以我国北方棕壤发育的水稻土为供试土壤, 探究在氮肥减量配施鸡粪或抑制剂及与两者配施的情况下, 土壤氮素及肥料氮素供应状况及与水稻需氮关系, 结合水稻产量及氮肥利用率, 探究复配的可行性及最佳的施肥方式。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

供试土壤为棕壤水稻土, 土壤质地为砂壤土, 采自沈阳农业大学水稻研究所试验地 (41°8'N、123°38'E)。盆栽试验在中科院沈阳应用生态研究所野外实验站 (43°31'N、123°22'E) 网室进行, 该站位于辽河平原南部, 气候类型为温带大陆性季风气候, 年均气温在 7℃~8℃, 大于 10℃ 的活动积温

为 3100℃~3400℃, 年降水量为 650~700 mm, 无霜期为 147~164 天。供试土壤基本理化性质如下: 容重为 1.3 g/cm<sup>3</sup>, pH 为 6.7, 全氮 1.2 g/kg, 碱解氮 84.5 mg/kg, 速效钾 158 mg/kg, 速效磷 15.9 mg/kg。

### 1.2 试验材料

供试鸡粪基本理化性质为: 全氮 29.5 g/kg, 有机碳 314 g/kg, 碳氮比 10.63, 20% 化肥氮所需鸡粪添加量为 5.05 g/kg, 相当于每 kg 土添加纯氮 30 mg。

### 1.3 试验设计

2019 年 5—10 月进行盆栽试验。选用直径 18 cm、高 20 cm 的塑料盆, 每盆称相当于 3 kg 干土重量的鲜土, 与有机无机肥混合均匀后装盆, 淹水一夜, 第二天进行水稻移栽, 每盆移栽水稻 3 穴, 每穴 2 株, 共 6 株, 水稻品种为‘美锋 9’。氯化钾和过磷酸钙作为底肥一次性施入, 添加量分别为 120 和 150 mg/kg, 相当于田间施磷量 212 kg/hm<sup>2</sup>、施钾量 318 kg/hm<sup>2</sup>。氮肥为<sup>15</sup>N 标记尿素 (丰度为 10.02%), 常规施氮量为 N 150 mg/kg 土, 相当于田间施氮量 318 kg/hm<sup>2</sup>, 按基肥、返青肥和分蘖肥 40%、30% 和 30% 的比例施用。抑制剂为苯基磷酰二胺 (PPD)+N-丁基硫代磷酰三胺 (NBPT)+3,4-二甲基吡啶磷酸盐 (DMPP) 组合, 抑制剂添加量均按尿素纯氮量的 1%、1% 和 2% 添加。试验设 5 个处理: 不施氮对照 (CK)、常量尿素 (N)、80% 常量尿素+20% 鸡粪氮 (NM)、80% 常量尿素+抑制剂 (NI)、80% 常量尿素+抑制剂+20% 鸡粪氮 (NIM)。

### 1.4 样品采集

水稻秧苗于 3 月下旬在大棚温室中采用育苗盘进行育苗, 秧苗长至 5 个叶片时进行移栽。水稻于 2019 年 5 月 29 日定植, 水稻管理同大田水分管理。分别于返青期 (2019 年 6 月 4 日)、分蘖期 (2019 年 6 月 25 日)、灌浆期 (2019 年 8 月 12 日) 和成熟期 (2019 年 9 月 21 日) 进行破坏性取样, 每个处理各取 3 盆。返青期和分蘖期分别在施肥后 7 天进行取样。每盆水稻收获所有 6 株样品 (茎和穗)。土壤选用五点取样法采集, 除去水稻根系后充分混匀待测。测定土壤铵态氮、硝态氮、微生物生物量碳氮、肥料来源的铵态氮 (<sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 及微生物量氮 (<sup>15</sup>N-MBN), 以及水稻地上部分生物量和吸氮量、水稻对肥料氮的吸收利用等指标。

### 1.5 测定指标与方法

土壤基本理化指标参照鲁如坤<sup>[22]</sup>的方法测定。土

壤铵态氮和硝态氮含量测定：取 10 g 采集的新鲜土壤样品，用 100 mL 2 mol/L 氯化钾溶液浸提（土：液=1：10），在 160 r/min 的震荡器中震荡 1 h，过滤浸提液，使用 AA3 型连续流动分析仪分别在波长 660 和 540 nm 处测定土壤铵态氮和硝态氮含量。土壤微生物量碳、氮含量采用氯仿熏蒸法测定：称取 20 g 新鲜土壤 2 份，一份在黑暗处熏蒸 24 h，一份不做熏蒸，两份样品均加入 80 mL 0.5 mol/L  $K_2SO_4$  浸提液进行往复震荡浸提，采用 TOC 分析仪 (Vario TOC Cube, Elementar, Germany) 测定熏蒸和未熏蒸样品，微生物量碳、氮计算分别采用熏蒸系数 0.45 和 0.54<sup>[23-24]</sup>。在水稻成熟期，分别收获每盆水稻秸秆和穗，于烘箱中 65℃ 下烘干至恒重，测定水稻籽粒产量、生物产量、穗数、千粒重等生物学指标。将烘干后的水稻植株样品（秸秆、籽粒），用球磨机 (RETSCH MM 400, Germany) 粉碎过 0.074 mm 筛。采用 Vario Macro 元素分析仪测定土壤和植株的有机碳和全氮含量。土壤及植株中的<sup>15</sup>N 丰度采用过筛后的样品，用锡舟包样，植物样称样量为 2.5 mg，土壤样品称样量为 18 mg，用同位素比例质谱仪 (253 MAT, Thermo Finnigan, Germany) 进行检测，测定顺序按照丰度从低到高测定，减少污染。<sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用扩散包法进行提取<sup>[25]</sup>，<sup>15</sup>N-MBN 采用过硫酸钾碱液消煮法和扩散包法进行提取<sup>[26]</sup>，提取结束后的扩散包在 -60℃ 冰箱中冷冻 0.5 h，然后采用冷冻干燥仪 (ALPHA 1-2 LDplus, Germany) 冷冻干燥，将扩散包中玻璃纤维包在锡舟中，采用同位素比例质谱仪 (253 MAT, Thermo Finnigan, Germany) 检测扩散包中<sup>15</sup>N 丰度。

### 1.6 计算公式

水稻氮素累积吸收量 (g/pot) = 植株氮素含量 × 植株干物质质量；

氮素籽粒生产效率 (g/g) = 籽粒产量/植株氮素累积吸收量；

氮收获指数 = 籽粒氮素累积量/地上部干物质氮素累积吸收量；

肥料氮贡献率 (%) = (施氮产量 - 不施氮产量)/施氮产量 × 100；

收获指数 = 籽粒产量/地上部干物质质量；

氮素吸收率 (%) = (施氮吸氮量 - 不施氮吸氮量)/施氮量 × 100；

氮肥农学效率 (g/g) = (施氮处理籽粒产量 - 不施氮处理籽粒产量)/施氮量；

氮肥偏生产力 (g/g) = 施氮处理籽粒产量/氮肥施

用量；

土壤或植株中<sup>15</sup>N 丰度 = 检测<sup>15</sup>N 丰度值 × 土壤或植株中全氮含量/尿素中<sup>15</sup>N 丰度；

土壤肥料来源的氮含量 (mg/kg) = 氮库中<sup>15</sup>N 丰度 × 该形态氮的含量/尿素中<sup>15</sup>N 丰度；

<sup>15</sup>N 残留 (%) = 收获后土壤残留<sup>15</sup>N 量/加入的<sup>15</sup>N 量 × 100。

### 1.7 数据处理

用 Microsoft office 2010 软件进行数据处理和计算，用 SPSS 18.0 进行差异显著性方差分析 (Duncan,  $P < 0.05$ )，并运用 Pearson 相关性分析，用 Origin 2020 进行图表制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥方式对土壤无机氮库转化的影响

由图 1 可知，减量尿素配施抑制剂和鸡粪处理 (NIM) 显著影响了土壤中铵态氮含量，但是对硝态氮含量影响不显著。在返青期、分蘖期乃至灌浆期，80% 尿素配施抑制剂 (NI) 与常规氮肥 (N) 处理铵态氮供应无显著差异 ( $P > 0.05$ )，与鸡粪配施 (NIM) 后提高了土壤铵态氮的含量。在返青期，NIM 处理铵态氮含量显著高于 NM 和 CK 处理；在分蘖期，NIM 处理显著高于 N、NI 处理 ( $P < 0.05$ )，但与 NM 处理之间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。与 N 处理相比，NM、NI 处理铵态氮含量分别提高了 43.6%、4.9%；在灌浆期和成熟期，各处理差异不显著 ( $P > 0.05$ )。与 N 处理相比，NIM 处理在水稻返青期、分蘖期和灌浆期土壤中铵态氮含量分别提高了 19.2%、66.3% 和 36.5%，<sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量在分蘖期增加了 14.59 mg/kg。表明在施肥初期，抑制剂添加在延缓氮素释放方面作用显著，其抑制效果高于鸡粪的供氮能力，但在分蘖期，鸡粪的铵态氮补偿能力要显著高于抑制剂，在水稻生长后期，抑制剂添加和鸡粪替代对铵态氮的影响较小。稻田土壤硝态氮含量较低，NM 处理在返青期和成熟期硝态氮含量最高，显著高出 N 处理 57.65%。NIM 处理在生育时期内均有较低硝态氮含量，但与 N 处理差异不显著 ( $P > 0.05$ )，与 N 处理相比，NIM 处理在水稻返青期、分蘖期和灌浆期土壤中硝态氮含量分别提高 13.87%、12.70% 和 17.30%，这表明硝化抑制剂在抑制硝化作用方面效果显著。综合无机氮含量，NIM 处理在生育前期增加铵态氮含量、减少硝态氮含量方面的作用显著 ( $P < 0.05$ )。

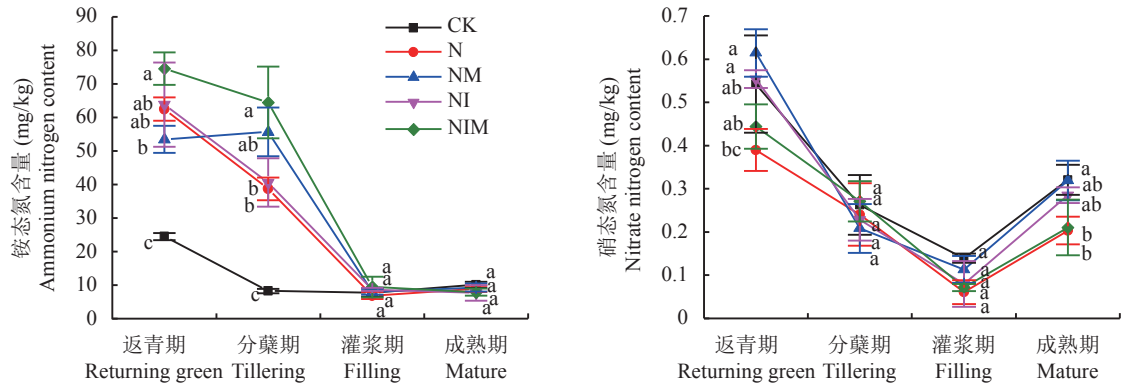


图 1 减量尿素配施抑制剂和鸡粪对水稻生育期土壤铵态氮和硝态氮含量的影响

Fig. 1 Effects of urea reduction combined with inhibitor and chicken manure on ammonium and nitrate nitrogen contents in paddy soil during rice growth

[注 (Note): CK—不施氮对照 No nitrogen control; N—常量尿素 Applying urea N 318 kg/hm<sup>2</sup>; NM—80% 常量尿素+20% 鸡粪氮 Applying 80% of urea and replace the left 20% with chicken manure; NI—80% 尿素+抑制剂 Applying 80% of urea and adding nitrogen inhibitor; NIM—80% 常量尿素+抑制剂+20% 鸡粪氮 NM plus nitrogen inhibitor in urea. 图中不同小写字母代表同一生育期处理之间差异显著 (Duncan, *P* < 0.05) Different small letters in the figure represent significant difference among treatments in the same period (Duncan, *P* < 0.05).]

2.2 不同施肥方式对土壤微生物量碳氮含量的影响

由图 2 可知, 施用无机氮肥 (N、NI) 处理对土壤微生物量碳含量无显著影响 (*P* > 0.05), 与 N 处理相比, NIM 处理显著提高了返青期、分蘖期和灌浆期土壤微生物量碳的含量 (*P* < 0.05), 施用鸡粪 (NM、NIM) 显著提高了返青期至灌浆期微生物量氮含量 (*P* < 0.05), 抑制剂配施鸡粪在促进微生物活性, 增加生物固持方面发挥重要作用。与单施氮肥处理相比, NI、NIM 处理中抑制剂的添加显著增加了返青期微生物量氮 (*P* < 0.05), NIM 显著提高了生育期内微生物量碳、氮含量 (*P* < 0.05), 在返青期、

分蘖期、灌浆期和成熟期微生物量碳含量分别比 N 处理提高了 32.61%、29.23%、53.46% 和 2.85%, 微生物量氮含量分别提高了 147.98%、22.97%、133.33% 和 24.63%。

2.3 肥料氮在土壤铵态氮及微生物量氮库中的转化

由图 3 可知, 减氮配施抑制剂及鸡粪影响了肥料氮在铵态氮及微生物量氮中的转化。水稻返青期 NIM 处理土壤 <sup>15</sup>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量显著高于 NM 处理 (*P* < 0.05); 在水稻灌浆期 NI 处理土壤 <sup>15</sup>N-微生物量氮含量显著高于其他处理 (*P* < 0.05), 表明抑制剂的添加抑制了尿素的水解, 增加了肥料来源氮素的供给,

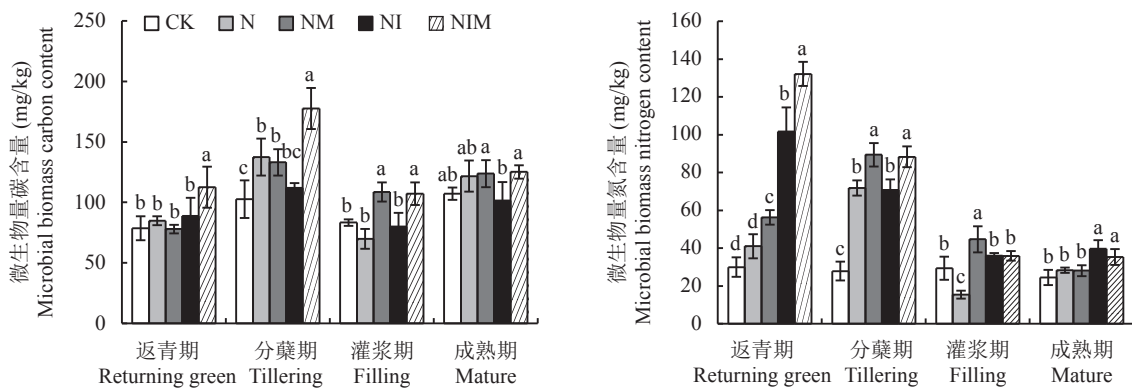


图 2 减量尿素配施抑制剂和鸡粪对水稻生育期土壤中微生物量碳氮转化的影响

Fig. 2 Effects of urea reduction combined with inhibitor and chicken manure on the transformation of soil microbial biomass carbon and nitrogen during rice growth

[注 (Note): CK—不施氮对照 No nitrogen control; N—常量尿素 Applying urea N 318 kg/hm<sup>2</sup>; NM—80% 常量尿素+20% 鸡粪氮 Applying 80% of urea and replace the left 20% with chicken manure; NI—80% 尿素+抑制剂 Applying 80% of urea and adding nitrogen inhibitor; NIM—80% 常量尿素+抑制剂+20% 鸡粪氮 NM plus nitrogen inhibitor in urea. 柱上不同小写字母代表同一生育期处理之间差异显著 (Duncan, *P* < 0.05) Different small letters above the bars represent significant difference among treatments in the same period (Duncan, *P* < 0.05).]

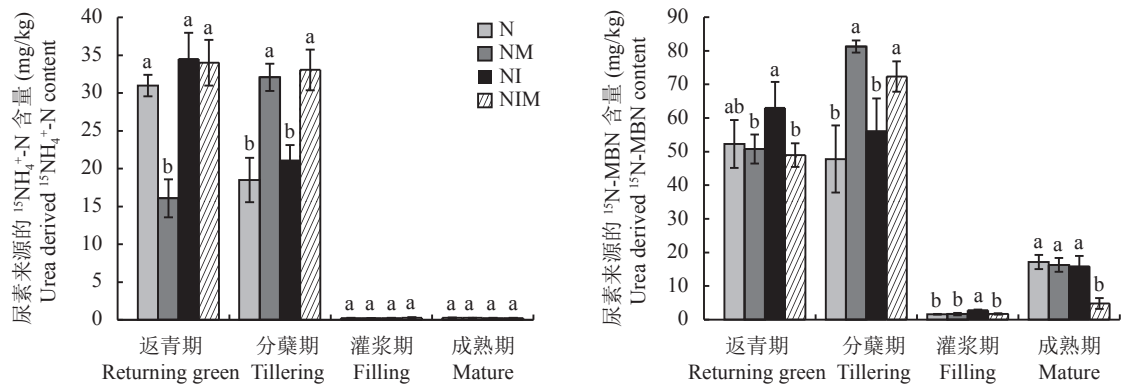


图3 抑制剂及鸡粪添加对水稻生育期尿素氮在铵态氮及微生物量氮中转化的影响

Fig. 3 Effects of inhibitor and chicken manure addition on the conversion of urea-derived nitrogen in ammonium nitrogen and microbial biomass nitrogen during rice growth

[注 (Note): MBN—微生物量氮 Microbial biomass N; N—常量尿素 Applying urea N 318 kg/hm<sup>2</sup>; NM—80% 常量尿素+20% 鸡粪氮 Applying 80% of urea and replace the left 20% with chicken manure; NI—80% 尿素+抑制剂 Applying 80% of urea and adding nitrogen inhibitor; NIM—80% 常量尿素+抑制剂+20% 鸡粪氮 NM plus nitrogen inhibitor in urea. 柱上不同小写字母代表同一生育期处理之间差异显著 (Duncan,  $P < 0.05$ ) Different small letters above the bars represent significant difference among treatments in the same period (Duncan,  $P < 0.05$ ).]

为微生物固持肥料氮素提供来源。而鸡粪添加对肥料氮转化的影响要高于抑制剂，且主要体现在分蘖期。与 N 处理相比，鸡粪添加显著提高了分蘖期肥料来源的 $^{15}\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量及 $^{15}\text{N}$ -微生物量氮的含量 ( $P < 0.05$ )。相比于 N 处理，分蘖期 NM、NIM 处理土壤 $^{15}\text{NH}_4^+\text{-N}$  分别增加了 13.60 和 14.59 mg/kg，分别增加了 93.63% 和 98.99%； $^{15}\text{N}$ -微生物量氮分别增加了 33.48 和 22.56 mg/kg，分别增加了 70.07% 和 51.39%。

#### 2.4 不同施肥方式对水稻产量及农学指标的影响

由表 1 可知，在等氮量添加及鸡粪替代 20% 氮肥条件下，各处理生物量在返青期和分蘖期差异均不显著 ( $P > 0.05$ )，在灌浆期和成熟期，NM、NI、NIM 处理生物量显著高于 CK 和 N 处理 ( $P < 0.05$ )。在成熟期，相比于 N 处理，NM、NI 和 NIM 处理生物量分别提高了 69.49%、74.75% 和 83.59%，表明抑制剂和鸡粪添加后显著提高灌浆期水稻生物量，在水稻生殖生长的关键阶段起着重要作用；鸡粪配施氮肥后氮素供应能力较强，利于水稻生长。NIM 处理穗数、产量均最高，其次为 NM、NI 处理，其穗数和产量均显著高于 CK 和 N 处理 ( $P < 0.05$ )。NIM 处理水稻产量是 CK 的 2.64 倍，是 N 处理的 2.24 倍。与 N 处理相比，NM、NI 和 NIM 处理产量分别提高了 105.99%、89.47% 和 124.18%，且均达到显著水平。各施氮处理千粒重均显著高于 CK 处理 ( $P < 0.05$ )，各施氮处理之间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。综上所述，鸡粪和抑制剂在氮肥减施及提高水稻生物量和产量方面作用显著。

#### 2.5 不同施肥方式对水稻氮肥利用率的影响

由表 2 可知，与 CK 相比，氮肥、抑制剂及鸡粪的添加降低了水稻的氮素籽粒生产效率，却显著提高了肥料氮贡献率及收获指数等。与 N 处理相比，NM、NI 和 NIM 处理均显著提高了氮素吸收率、氮肥农学效率及氮肥偏生产力等，其中，NM、NI 和 NIM 处理氮素吸收率分别提高了 41.96%、48.80% 和 89.80%，氮肥农学效率分别提高了 139.48%、150.92% 和 234.45%，氮肥偏生产力分别提高了 45.88%、49.64% 和 77.11%。NIM 处理具有最高的氮素吸收率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力，显著高于其他处理，其氮肥偏生产力高达 62.43 g/g，抑制剂及鸡粪在提高氮素利用方面发挥着显著的交互作用 ( $P < 0.05$ )。

#### 2.6 不同施肥方式对肥料及土壤氮在水稻-土壤系统中分配的影响

氮肥减量配施抑制剂及鸡粪，虽未显著影响土壤全氮含量，但显著影响了肥料氮在土壤中的残留状况 (表 3)。相比于 N，NM、NI 和 NIM 处理肥料氮在土壤中的残留量显著提高，分别增加了 30.49%、56.94% 和 56.48%。同时，NI 和 NM 处理均显著提高水稻总吸氮量及水稻利用肥料氮比例 ( $P < 0.05$ )，但对水稻吸收肥料氮量影响不显著 ( $P > 0.05$ )。与 N 处理相比，NM、NI 和 NIM 处理提高水稻吸氮量约 21.81%、25.36% 和 46.66%，促进水稻吸收肥料氮约 4.92%、18.30% 和 21.61%。综合肥料氮在土壤中保存及水稻吸收利用状况，NI 及 NIM 处

表 1 不同施肥方式对水稻农学指标的影响

Table 1 Effects of fertilization treatments on agronomic indexes of rice

处理 Treatment	生物量 Biomass (g/plant)				穗数 Panicle No. per plant	产量 Yield (g/plant)	千粒重 1000-grain weight (g)
	返青期 Returning green	分蘖期 Tillering	灌浆期 Filling	成熟期 Maturing			
CK	0.17 ± 0.08 a	2.28 ± 0.07 a	18.44 ± 0.43 d	30.52 ± 9.46 b	4.00 ± 0.00 d	10.65 ± 0.23 c	15.7 ± 6.4 b
N	0.18 ± 0.02 a	2.77 ± 1.04 a	35.10 ± 0.77 c	30.65 ± 10.25 b	6.33 ± 0.58 c	12.53 ± 5.34 c	22.6 ± 1.5 a
NM	0.16 ± 0.04 a	2.67 ± 1.28 a	51.24 ± 0.73 a	51.95 ± 7.20 a	8.33 ± 1.53 ab	25.81 ± 4.03 a	22.7 ± 1.8 a
NI	0.16 ± 0.04 a	3.61 ± 0.62 a	44.50 ± 3.74 b	53.56 ± 13.95 a	8.67 ± 0.58 ab	23.74 ± 1.28 ab	21.1 ± 3.0 a
NIM	0.18 ± 0.04 a	3.60 ± 0.44 a	44.13 ± 4.19 b	56.27 ± 3.49 a	9.33 ± 0.58 a	28.09 ± 3.68 a	21.1 ± 2.0 a

注 (Note): 表中数值为平均值 ± 标准差 Values in the table are mean ± standard deviation ( $n = 3$ ); CK—不施氮对照 No nitrogen control; N—常量尿素 Applying urea N 318 kg/hm<sup>2</sup>; NM—80% 常量尿素+20% 鸡粪氮 Applying 80% of urea and replace the left 20% with chicken manure; NI—80% 尿素+抑制剂 Applying 80% of urea and adding nitrogen inhibitor; NIM—80% 常量尿素+抑制剂+20% 鸡粪氮 NM plus nitrogen inhibitor in urea. 同列数据后不同小写字母代表处理间差异显著 (Duncan,  $P < 0.05$ ) Different lowercase letters in the same column represent significant difference among treatments of the same index (Duncan,  $P < 0.05$ ).

表 2 不同施肥方式对水稻氮素利用率的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on N-use efficiencies of rice

处理 Treatment	氮素籽粒生产效率 NGPE	氮收获指数 NHI	肥料氮贡献率 FCR	收获指数 HI	氮素吸收率 NUE	氮肥农学效率 NAE	氮肥偏生产力 NPFP
	(g/g)		(%)		(%)	(g/g)	(g/g)
CK	56.28 ± 2.44 a	0.56 ± 0.02 a	33.27 ± 2.02 b	0.33 ± 0.02 b			
N	40.15 ± 7.71 b	0.54 ± 0.06 a	42.73 ± 5.22 a	0.43 ± 0.05 a	45.57 ± 5.28 c	11.59 ± 5.62 c	35.25 ± 5.62 b
NM	48.54 ± 5.46 ab	0.59 ± 0.02 a	43.18 ± 2.82 a	0.43 ± 0.03 a	64.69 ± 13.43 b	27.76 ± 3.48 b	51.42 ± 3.48 a
NI	48.17 ± 4.76 ab	0.59 ± 0.05 a	41.88 ± 3.13 a	0.42 ± 0.03 a	67.81 ± 7.81 b	29.08 ± 2.84 b	52.75 ± 2.84 a
NIM	48.44 ± 1.65 ab	0.60 ± 0.03 a	44.30 ± 1.26 a	0.44 ± 0.01 a	86.49 ± 13.21 a	38.76 ± 8.19 a	62.43 ± 8.19 a

注 (Note): CK—不施氮对照 No nitrogen control; N—常量尿素 Applying urea N 318 kg/hm<sup>2</sup>; NM—80% 常量尿素+20% 鸡粪氮 Applying 80% of urea and replace the left 20% with chicken manure; NI—80% 尿素+抑制剂 Applying 80% of urea and adding nitrogen inhibitor; NIM—80% 常量尿素+抑制剂+20% 鸡粪氮 NM plus nitrogen inhibitor in urea. NGPE—Grain production efficiency of nitrogen; NHI—Nitrogen harvest index; FCR—Fertilizer N contribution rate; HI—Harvest index; NUE—N uptake efficiency; NAE—Agronomic efficiency of N fertilizer; NPFP—Nitrogen partial factor productivity. 表中数值为平均值 ± 标准差 Values in the table are mean ± standard deviation ( $n = 3$ ). 同列数据后不同小写字母代表处理间差异显著 (Duncan,  $P < 0.05$ ) Values followed by different lowercase letters in the same column represent significant difference among treatments (Duncan,  $P < 0.05$ ).

理效果较好, 不仅促进肥料氮在土壤中的保存, 还提高了水稻对肥料氮的吸收利用, 将肥料氮的利用率提高到 70% 及以上, 损失降到约 10% 左右。NM 处理效果亦显著高于 N 处理, 故在棕壤水稻土上, 氮肥减量 20% 配施鸡粪, 不仅不会减产, 还会提高肥料利用率及促进水稻生长。

### 2.7 减氮配施抑制剂及鸡粪下水稻生长及土壤氮转化指标间的相关关系

由图 4 相关分析表明, 肥料氮的残留量 (FN) 与取样时间、氮总吸收量、水稻生物量之间呈极显著正相关关系, 肥料氮添加对水稻生长及氮素吸收的促进效果显著。肥料氮残留量与铵态氮含量呈极显著负相关关系, 而铵态氮含量又与土壤微生物量氮

含量和土壤全氮呈显著正相关关系, 表明抑制剂及鸡粪添加促进了微生物同化铵态氮, 增加了肥料氮的微生物固持, 对土壤培肥有良好的效果。土壤全碳与全氮之间具有极显著的正相关关系, 表明本试验中的处理在一定程度上具有良好的碳氮耦合关系。

## 3 讨论

### 3.1 不同施肥方式对有机无机氮素转化的影响

80% 尿素+抑制剂与常规氮肥相比, 提高了土壤中及肥料来源的铵态氮含量 (图 1、图 3,  $P > 0.05$ ), 聂彦霞等<sup>[27]</sup>和唐贤等<sup>[28]</sup>研究表明, NBPT、DMPP 组合抑制尿素水解更为有效, 并使得大量氮以  $\text{NH}_4^+$ -

表 3 不同施肥方式下肥料及土壤固有氮在水稻-土壤系统中的分配

Table 3 Distribution of fertilizer and soil source nitrogen in rice-soil system under different fertilization management

处理 Treatment	土壤全氮 Soil total N (g/kg)	水稻吸收氮 N uptake by rice (g/pot)	土壤中肥料氮 Fertilizer N in soil (mg/kg)	水稻吸收肥料氮 Urea N uptake by rice (mg/pot)	土壤中肥料氮比例 Urea N ratio in soil (%)	水稻利用肥料氮比例 Urea N uptake ratio by rice (%)	肥料损失率 Urea N loss ratio (%)
CK	1.26 ± 0.07 a	189.61 ± 11.73 d					
N	1.30 ± 0.02 a	394.66 ± 23.78 c	30.63 ± 1.14 c	182.22 ± 14.97 b	6.81 ± 0.25 c	40.49 ± 3.33 c	50.51 ± 4.06 a
NM	1.27 ± 0.03 a	480.72 ± 60.42 b	39.97 ± 4.64 b	191.20 ± 15.56 b	8.88 ± 1.03 b	63.73 ± 5.19 b	22.10 ± 6.34 b
NI	1.28 ± 0.05 a	494.75 ± 35.15 b	48.07 ± 5.50 a	215.57 ± 4.84 ab	10.68 ± 1.22 ab	71.86 ± 1.61 ab	12.17 ± 1.97 c
NIM	1.32 ± 0.04 a	578.82 ± 59.43 a	47.93 ± 3.62 a	221.67 ± 17.61 a	10.65 ± 0.80 a	77.76 ± 8.65 a	10.76 ± 5.75 c

注 (Note) : 表中数值为平均值 ± 标准差 Values in the table are mean ± standard deviation (n = 3); CK—不施氮对照 No nitrogen control; N—常量尿素 Applying urea N 318 kg/hm<sup>2</sup>; NM—80% 常量尿素+20% 鸡粪氮 Applying 80% of urea and replace the left 20% with chicken manure; NI—80% 尿素+抑制剂 Applying 80% of urea and adding nitrogen inhibitor; NIM—80% 常量尿素+抑制剂+20% 鸡粪氮 NM plus nitrogen inhibitor in urea. 同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著 (Duncan, P < 0.05) Values followed by different lowercase letters in the same column represent significant difference among treatments (Duncan, P < 0.05).

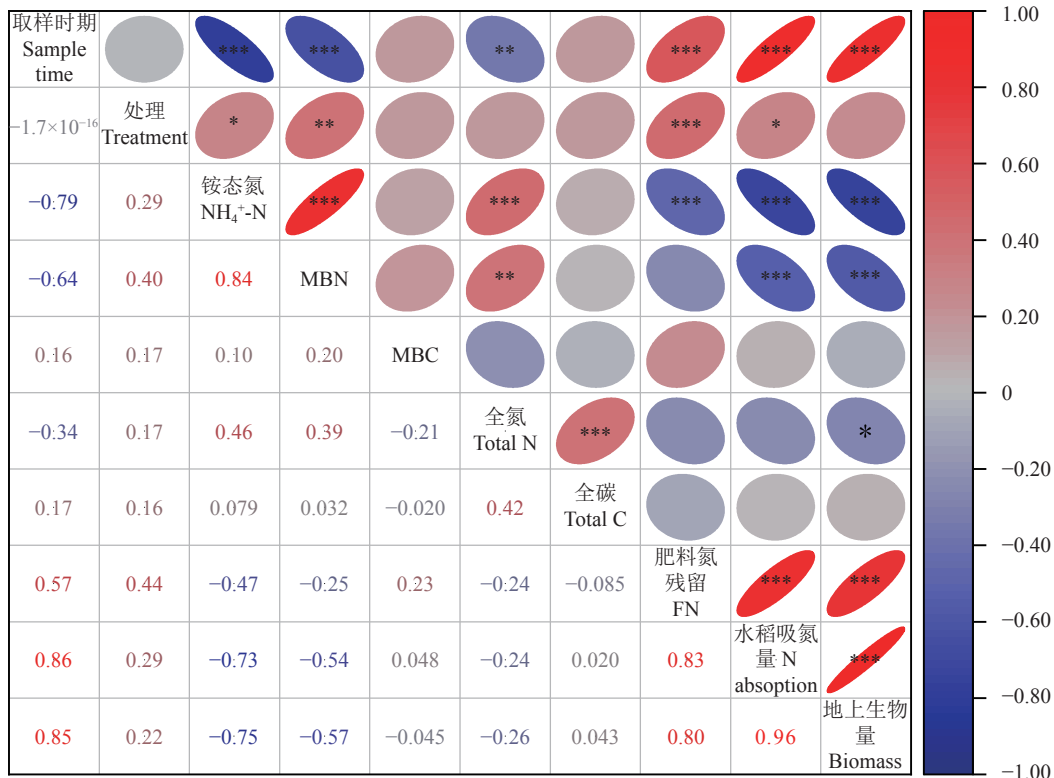


图 4 各指标之间的相关分析 (Pearson, n = 60)

Fig. 4 Correlation analysis among various indexes

[注 (Note) : MBN—微生物量 N Microbial biomass N; MBC—微生物量 C Microbial biomass C; TN—总氮 Total N; TC—总碳 Total C; FN—肥料氮 (残留) Fertilizer N residual. \*—P ≤ 0.05; \*\*—P ≤ 0.01; \*\*\*—P ≤ 0.001.]

N 的形式存在, 确保氮素供应, 故抑制剂添加后对抑制尿素水解及硝化作用显著, 对氮素的补偿作用较好。而 80% 尿素+鸡粪或 80% 尿素+抑制剂+鸡粪效果则相反, 其显著提高了土壤及分蘖期肥料来源的铵态氮及微生物量碳氮含量 (P < 0.05), 鸡粪添加对土壤有机无机态氮的供应能力的提升作用显著

(图 1、图 2 和图 3), 这可能与鸡粪中碳氮比有关 (C/N = 10.63)。研究表明, 鸡粪的碳氮矿化累积量及矿化速率较大, 矿化过程短<sup>[29]</sup>, 故鸡粪的矿化和释放为微生物的固持及粘土矿物的固定提供氮素来源, 微生物量氮库和固定态铵库发挥氮临时贮存库的作用, 待后期氮素供应不足及水稻养分需求量较大时



矿化释放, 土壤的碳氮供给与水稻的需肥特点得到有效地调节, 充分发挥了有机氮替代部分无机氮的氮素供应时间差, 这与 Liu 等<sup>[30]</sup>的结果相一致。Pan 等<sup>[31]</sup>研究亦表明, 在稻田土壤中, 有机无机肥配施会通过增加土壤有机碳的积累, 增加氮的有效性, 也有可能是提高土壤物理、化学、生物化学保护态有机氮的含量, 从而提高土壤肥力<sup>[32]</sup>。

### 3.2 不同施肥方式对水稻的增产作用

本研究结果显示, 80% 尿素与抑制剂及鸡粪配施后, 水稻产量增加最多, 约是 CK 的 2.64 倍和 N 的 2.24 倍 (表 1), 将氮肥速效性与有机肥持久性的特点进行了融合。减氮配施抑制剂与常规施氮肥相比, 虽然铵态氮及微生物量氮含量差异不显著, 但会促进水稻增产, 可能原因是抑制剂添加后会促进稻田土壤中黏土矿物对  $\text{NH}_4^+$  的固定, 增加固定态铵库的库容, 在水稻生长过程中缓慢持续释放, 发挥“中转库”的作用, 供水稻吸收利用<sup>[33]</sup>。有研究表明, 与单施化肥相比, 有机肥料氮替代无机肥料氮的最适替代率为 10%~25%, 能协调土壤肥料的供应与作物需氮的同步性, 在水稻全生育期内实现养分的持续稳定供给, 水稻产量、氮肥利用率和经济效益都达到最佳水平, 这是提高氮肥利用率的关键<sup>[34-36]</sup>。本研究 20% 的有机肥替代氮肥, 使得氮素吸收率高达 64% (表 2)。这可能是由于采用  $^{15}\text{N}$  标记的尿素, 能准确地定量肥料氮的含量和去向, 较常规计算更为精准。另有研究表明, 鸡粪配施氮肥的增产机理, 可能是因为有机无机肥配施增加了土壤中的盐基离子, 提高土壤的阳离子交换量, 另一方面, 土壤有机质和鸡粪携带的其他营养元素的补充, 正好与氮肥形成缓急相济的养分供应<sup>[37]</sup>。

### 3.3 不同施肥方式对水稻氮肥利用率及吸氮量的影响

肥料利用率、肥料农学利用率和肥料偏生产力常被用来表征农田中肥料的利用效率。相比于 N 处理, 配施抑制剂处理 (NI、NIM), 具有最高的氮肥利用率, 占施入肥料的 70% 以上, 肥料氮的损失率显著减少, 仅为 10% 左右 (表 3), 氮肥偏生产力亦显著提高, 达到 61.62 kg/kg, 而东北稻区近 30 年土壤的偏生产力为 54 kg/kg<sup>[38]</sup>, 与此相比约高出 14.11% (表 2)。孙祥鑫等<sup>[5]</sup>研究表明, 脲酶和硝化抑制剂配合尿素是减少水田氮素损失和气体排放的首选肥料。氮肥减量配施抑制剂或鸡粪, 有很好的铵态氮供应能力及较低的确态氮含量, 增加铵态氮向微生物

物量氮库中的转化, 增加肥料氮的生物固持。同时, 图 4 的相关分析也验证了施肥处理土壤铵态氮、微生物量氮及肥料氮的含量呈显著的相关关系。有研究表明, 抑制剂添加后, 抑制了尿素水解和硝化作用, 尿素氮的吸收利用与硝化作用呈负相关关系<sup>[39]</sup>, 这与本研究结果相一致 (图 4), 抑制剂组合增加了水稻吸收利用的尿素氮的含量, 引起氮肥利用及收获指数提高。且水稻籽粒中的养分, 除来自根系直接吸收, 主要来自营养器官的养分转移。本研究中在水稻分蘖期, 肥料来源的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  及微生物量氮含量的增加促进了水稻分蘖, 从而增加了水稻穗数及生物量, 为养分的转移奠定了良好的基础。

## 4 结论

氮肥减量配施抑制剂及鸡粪替代 20% 尿素氮均能促进水稻生长和改善土壤氮素供应。80% 尿素配施抑制剂未对土壤铵态氮、硝态氮、微生物量氮的供给产生显著影响, 抑制剂组合 (NBPT+PPD+DMPP) 在稻田土壤氮素补偿方面效果显著, 约节肥 20%。施用鸡粪显著提高了土壤微生物量碳氮含量, 增加微生物活性。氮肥减量配施抑制剂及鸡粪在提高土壤铵态氮、土壤微生物量氮、氮素吸收利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力方面作用显著, 且能增加肥料氮的微生物固持, 减少肥料氮素损失, 抑制剂和鸡粪对氮肥增效具有协同作用。

### 参 考 文 献:

- [1] 谢邵文, 芬杨, 冯含笑, 等. 中国化肥农药施用总体特征及减施效果分析[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(4): 490-495.  
Xie S W, Fen Y, Feng H X, *et al.* General characteristics of the chemical fertilizers and pesticides use and the analysis of use reduction effect in China[J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(4): 490-495.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.  
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [3] 中华人民共和国农业农村部. 关于印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》的通知[EB/OL]. (2017-11-29) [2020-12-02]. [http://www.moa.gov.cn/nybg/2015/san/201711/t20171129\\_5923401.htm](http://www.moa.gov.cn/nybg/2015/san/201711/t20171129_5923401.htm). Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PRC. Notice on the issuance of the action plan for zero growth in fertilizer use by 2020 [EB/OL]. (2017-11-29) [2020-12-02]. [http://www.moa.gov.cn/nybg/2015/san/201711/t20171129\\_5923401.htm](http://www.moa.gov.cn/nybg/2015/san/201711/t20171129_5923401.htm)
- [4] Abalos D, Jeffery S, Alberto S C, *et al.* Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 189: 136-144.

- [5] 孙祥鑫, 李东坡, 武志杰, 等. 持续施用缓/控释尿素条件下水田土壤 $\text{NH}_3$ 挥发与 $\text{N}_2\text{O}$ 排放特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1901–1909.  
Sun X X, Li D P, Wu Z J, *et al.* Characteristics of ammonia volatilization and nitrous oxide emission from a paddy soil under continuous application of different slow/controlled release urea[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(6): 1901–1909.
- [6] 武开阔, 张丽莉, 宋玉超, 等. 稳定性氮肥配合秸秆还田对水稻产量及 $\text{N}_2\text{O}$ 和 $\text{CH}_4$ 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30: 1287–1294.  
Wu K K, Zhang L L, Song Y C, *et al.* Effects of stabilized N fertilizer combined with straw returning on rice yield and emission of  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  in a paddy field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30: 1287–1294.
- [7] 卢婉芳, 陈苇. 稻田脲酶抑制剂对 $^{15}\text{N}$ -尿素去向的影响[J]. 核农学报, 1997, 11: 151–156.  
Lu W F, Chen W. Effect of paddy urease inhibitors on fate of  $^{15}\text{N}$ -urea[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 1997, 11: 151–156.
- [8] 张文学, 杨成春, 王少先, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田土壤氮素转化的影响[J]. 中国水稻科学, 2017, 31: 417–424.  
Zhang W X, Yang C C, Wang S X, *et al.* Effects of urease inhibitor and nitrification inhibitor on nitrogen transformation in paddy soil[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2017, 31: 417–424.
- [9] 王静, 王允青, 叶寅, 等. 脲酶/硝化抑制剂对沿淮平原水稻产量、氮肥利用率及稻田氮素的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33: 211–216.  
Wang J, Wang Y Q, Ye Y, *et al.* Effects of urease/nitrification inhibitors on yield and nitrogen utilization efficiency of rice and soil nitrogen of paddy field in plain along the Huaihe River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33: 211–216.
- [10] 朱文博, 刘鸣达, 肖珣, 等. 化肥配施有机肥对早稻产量及稻田氮素归趋的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(6): 728–733.  
Zhu W B, Liu M D, Xiao X, *et al.* Effects of chemical fertilizer combined with organic manure on early rice yield and nitrogen fate in paddy field[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, 50(6): 728–733.
- [11] 牛新胜, 巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1462–1479.  
Niu X S, Ju X T. Resources and utilization of organic fertilizer in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(6): 1462–1479.
- [12] 理鹏, 吴建强, 沙晨燕, 等. 粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4262–4272.  
Li P, Wu J Q, Sha C Y, *et al.* Effects of manure and organic fertilizer application on soil microbial community diversity in paddy fields[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4262–4272.
- [13] Sheikha A E. Mixing manure with chemical fertilizers, why? and what is after?[J]. Nutrition Science and Food Technology, 2016, 2: 1–5.
- [14] Liu J, Xie Q, Shi Q, *et al.* Rice uptake and recovery of nitrogen with different methods of applying  $^{15}\text{N}$ -labeled chicken manure and ammonium sulfate[J]. Plant Production Science, 2015, 11(3): 271–277.
- [15] 朱菜红, 董彩霞, 沈其荣, 等. 配施有机肥提高化肥氮利用效率的微生物作用机制研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 282–288.  
Zhu C H, Dong C X, Shen Q R, *et al.* Microbial mechanism on enhancement of inorganic fertilizer-N use efficiency for combined use of inorganic and organic fertilizers[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(2): 282–288.
- [16] Liao H, Li Y, Yao H. Fertilization with inorganic and organic nutrients changes diazotroph community composition and N-fixation rates[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 18(3): 1076–1086.
- [17] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对氮素利用率和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1669–1678.  
Li Y Q, Wen Y C, Lin Z A, *et al.* Effect of different organic manures combined with chemical fertilizer on nitrogen use efficiency and soil fertility[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(10): 1669–1678.
- [18] 李佳进, 肖丽霞, 刘银芬. 增施有机肥对土壤理化性状及水稻产量的影响[J]. 上海农业科技, 2020, (1): 107–108, 110.  
Li J J, Xiao L X, Liu Y F. Effects of organic fertilizer application on soil physical and chemical properties and rice yield[J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2020, (1): 107–108, 110.
- [19] 杜加银, 美茹, 倪吾钟. 减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 523–533.  
Du J Y, Mei R, Ni W Z. Effects of fertilization with reducing nitrogen, controlling phosphorus and stabilizing potassium on rice yield and nutrient accumulation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(3): 523–533.
- [20] 楼宇涛, 陈红金, 陆若辉, 等. 化肥减量对水稻产量和耕地质量的影响[J]. 浙江农业科学, 2020, 61: 17–19, 141.  
Lou Y T, Chen H J, Lu R H, *et al.* Effect of fertilizer reduction on rice yield and cultivated land quality[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2020, 61: 17–19, 141.
- [21] 付浩然, 李婷玉, 曹寒冰, 等. 我国化肥减量增效的驱动因素探究[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 561–580.  
Fu H R, Li T Y, Cao H B, *et al.* Research on the driving factors of fertilizer reduction in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(3): 561–580.
- [22] 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. 156–159.  
Lu R K. Analysis method of soil agriculture chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 156–159.
- [23] Joergensen R G. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the  $k_{\text{EC}}$  value[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1996, 28(1): 25–31.
- [24] Joergensen R G, Mueller T. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the  $k_{\text{EN}}$  value[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1996, 28(1): 33–37.
- [25] Sebilio M, Mayer B, Grably M, *et al.* The use of the ‘ammonium diffusion’ method for  $\delta^{15}\text{N}\text{-NH}_4^+$  and  $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$  measurements: comparison with other techniques[J]. Environmental Chemistry, 2004, 1: 99.
- [26] Cabrera M L, Beare M H. Alkaline persulfate oxidation for determining total nitrogen in microbial biomass extracts[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57: 1007–1012.

- [27] 聂彦霞, 李东坡, 李莉, 等. NBPT/DMPP对白浆土中尿素态氮转化调控效果研究[J]. 土壤通报, 2012, 44(6): 947-952.  
Nie Y X, Li D P, Li L, *et al.* Effects of NBPT and DMPP on regulating and controlling urea N transformation in albic soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 44(6): 947-952.
- [28] 唐贤, 陆太伟, 黄晶, 等. 脲酶/硝化抑制剂双控下红壤性水稻土氮素变化特征[J]. 中国土壤与肥料, 2018, (6): 30-37.  
Tang X, Lu T W, Huang J, *et al.* Characteristics of nitrogen changing in red paddy soil under different ratios of NBPT and DMPP to urea[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018, (6): 30-37.
- [29] 周博, 周建斌. 不同种类有机肥氮素有效性研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(2): 118-123.  
Zhou B, Zhou J B. Nitrogen availability of different types of organic manure[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(2): 118-123.
- [30] Liu M, Hu F, Chen X, *et al.* Organic amendments with reduced chemical fertilizer promote soil microbial development and nutrient availability in a subtropical paddy field: The influence of quantity, type and application time of organic amendments[J]. Applied Soil Ecology, 2009, 42(2): 166-175.
- [31] Pan G, Smith P, Pan W. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 129(1-3): 344-348.
- [32] 张丽敏, 徐明岗, 娄翼来, 等. 长期有机无机肥配施增强黄壤性水稻土有机氮的物理保护作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1481-1486.  
Zhang L M, Xu M G, Lou Y L, *et al.* Combined application of chemical and organic fertilizers long-term increase physical protection of organic nitrogen in yellow paddy soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(6): 1481-1486.
- [33] Yu C X, Xie X S, Yang H Z, *et al.* Effect of straw and inhibitors on the fate of nitrogen applied to paddy soil[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 21582.
- [34] 孟琳. 施用有机-无机肥料对水稻产量和氮肥利用率以及土壤供氮特性的影响[D]. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2008.  
Meng L. Effects of application of organic-inorganic mixed fertilizers on the yields of rice and nitrogen use efficiency and soil nitrogen supply[D]. Nanjing: MS Thesis of Nanjing Agricultural University, 2008.
- [35] 周江明. 有机/无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 234-240.  
Zhou J M. Effect of combined application of organic and mineral fertilizers on yield, quality and nitrogen uptake of rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2012, 18(1): 234-240.
- [36] 欧杨虹, 徐阳春, 沈其荣. 有机氮部分替代无机氮对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(1): 106-111.  
Ou Y H, Xu Y C, Shen Q R. Effect of combined use of organic and inorganic nitrogen fertilizer on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2009, 25(1): 106-111.
- [37] 汪吉东, 张辉, 张永春, 等. 连续施用不同比例鸡粪氮对水稻土有机质积累及土壤酸化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1178-1185.  
Wang J D, Zhang H, Zhang Y C, *et al.* Effect of different ratios of chicken manure N on organic matter accumulation and acidification of paddy soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(5): 1178-1185.
- [38] 黄晶, 刘立生, 马常宝, 等. 近30年中国稻区氮素平衡及氮肥偏生产力的时空变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(6): 987-998.  
Huang J, Liu L S, Ma C B, *et al.* Spatial-temporal variation of nitrogen balance and partial factor productivity of nitrogen in rice region of China over the past 30 years[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(6): 987-998.
- [39] Meng X, Li Y, Yao H, *et al.* Nitrification and urease inhibitors improve rice nitrogen uptake and prevent denitrification in alkaline paddy soil[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 154: 103665.