

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

王 静^{1,2,3}, 王允青^{1,2}, 张凤芝⁴, 吴萍萍^{1,2},
叶 寅^{1,2}, 万水霞^{1,2}, 吕国安³, 郭熙盛²

(1.安徽省农业科学院土壤肥料研究所,合肥 230031;2.安徽省养分循环与资源环境省级实验室,合肥 230031;
3.华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070;4.安徽省农业生态环境总站,合肥 230001)

摘要: 添加氮素抑制剂是提高水稻氮肥利用率的有效途径之一。采用大田试验,探讨了氮素抑制剂(脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酸三胺(NBPT)、硝化抑制剂 3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)及其组合)对沿淮平原水稻产量、氮肥利用率及稻田氮素的影响,旨在为优化沿淮稻田生态系统氮素养分管理,减少氮素损失提供科学依据。以“常糯 1 号”为供试材料,于 2018 年 6—10 月在安徽省怀远县(沿淮平原典型水稻种植区)进行试验。试验设 5 个处理:不施氮肥(CK);尿素(U);尿素+硝化抑制剂(U+DMPP);尿素+脲酶抑制剂(U+NBPT);尿素+硝化抑制剂+脲酶抑制剂(U+NBPT+DMPP)。结果表明:尿素配施 NBPT 或者 DMPP 均有利于提高水稻产量、植株吸氮量和氮素利用效率,NBPT 效果优于 DMPP,NBPT 和 DMPP 联合施用表现出协同增效作用。尿素配施抑制剂的 3 个处理 U+NBPT、U+DMPP 和 U+NBPT+DMPP 较单独施用尿素 U 处理的产量分别增加 6.8%,4.3%,8.6%,植物吸氮量分别增加 9.6%,6.5%,12.2%,与 U 处理之间差异达显著水平($P<0.05$)。尿素单独配施 NBPT 或者 NBPT+DMPP 组合均显著提高了氮肥吸收利用率(NRE)、氮肥农学利用率(NAE)、氮素吸收效率(NUP)和氮肥偏生产力(NPFP)($P<0.05$),而尿素单独配施 DMPP 也有不同程度的提高,但差异未达到显著水平($P>0.05$)。另外,尿素单独配施 DMPP 或者 DMPP+NBPT 组合均显著提高了水稻成熟期土壤铵态氮(NH_4^+-N)和微生物量氮(SMBN)的含量,降低了硝态氮(NO_3^--N)的含量,提高了土壤中铵/硝比,而尿素单独配施 NBPT 对水稻成熟期土壤 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 SMBN 无显著影响。总体认为,在沿淮平原稻作种植体系中,尿素配施 NBPT 或者 DMPP 可以有效地增加水稻产量,促进水稻对氮素的吸收利用,提高氮素利用效率,NBPT 和 DMPP 联合施用效果最理想。

关键词: 脲酶/硝化抑制剂;水稻;产量;氮肥利用率;土壤氮;沿淮平原

中图分类号:S143.1; X522 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2019)05-0211-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.031

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

WANG Jing^{1,2,3}, WANG Yunqing^{1,2}, ZHANG Fengzhi⁴, WU Pingting^{1,2},
YE Yin^{1,2}, WAN Shuixia^{1,2}, LÜ Guoan³, GUO Xisheng²

(1. Institute of Soil & Fertilizer, Anhui Academy of Agriculture Sciences, Hefei 230031; 2. Anhui Key Lab of Nutrient Cycling, Resources & Environment, Hefei 230031; 3. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070; 4. The Agricultural Ecological Environment Station of Anhui, Hefei 230001)

Abstract: Application of nitrogen inhibitors is an effective way to improve nitrogen fertilizer use efficiency of rice. The effects of nitrogen inhibitors (urease inhibitor N-butylthiophosphoramidate, NBPT and nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate, DMPP) and their combinations on yield, nitrogen efficiency and soil nitrogen were studied by field experiment, aiming to provide scientific basis for formulating scientific

收稿日期:2019-02-22

资助项目:安徽省科技重大专项(17030701052);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07204-007);国家自然科学基金项目(41401308);农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室开放基金项目(FECP201701)

第一作者:王静(1982—),女,博士研究生,主要从事农业面源污染防治技术研究。E-mail:wangjinghf1982@163.com

通信作者:吕国安(1957—),男,博士,教授,主要从事水土资源利用研究。E-mail:lvguoanhzau@126.com

郭熙盛(1963—),男,博士,研究员,主要从事植物营养与施肥研究。E-mail:gxssfiaa@mail.hf.ah.cn

nitrogen management and reducing nitrogen loss of paddy field in plain along the Huaihe River. A field experiment (between June 2018 and October 2018) using rice cultivar of “Changnuo” 1 as test materials was conducted in Huaiyuan County, Anhui Province (a typical rice growing area along the Huaihe Plain). Five treatments were set up, which were CK (no nitrogen fertilizer), U (urea only), U+NBPT (urea plus NBPT), U+DMPP (urea plus DMPP) and U+NBPT+DMPP (urea plus combined application of NBPT and DMPP). The results showed that addition of NBPT or DMPP into urea increased the yield, nitrogen absorption and utilization, in which the effect of NBPT was better than that of DMPP, and the combination of NBPT and DMPP showed synergistic effect. Compared with U treatment, the rice yield of U+NBPT, U+DMPP and U+NBPT+DMPP treatments significantly increased by 6.8%, 4.3% and 8.6%, respectively, and plant nitrogen absorption increased by 9.6%, 6.5% and 12.2%, respectively, and the difference between the treatments were significant ($P < 0.05$). Furthermore, the addition of NBPT or NBPT+DMPP in urea both significantly improved the nitrogen recovery efficiency (NRE), nitrogen agronomic efficiency (NAE), nitrogen uptake efficiency (NUP) and nitrogen partial productivity (NPFP) ($P < 0.05$). However, urea combined with DMPP also increased in varying degrees, but the difference did not reach a significant level ($P > 0.05$). In addition, the addition of DMPP or NBPT+DMPP in urea both significantly enhanced soil $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content and microbial biomass nitrogen (SMBN), while reduced soil $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content at maturity, and increased the ratio of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ to $\text{NO}_3^- - \text{N}$. However, adding NPBT only had no obvious effect. In summary, adding urease inhibitor NBPT or nitrification inhibitor DMPP into urea could effectively improve rice yield and nitrogen use efficiency in plain along the Huaihe River, and the effect of urea added with combination of NPBT and DMPP was the best.

Keywords: Urease/nitrification inhibitors; rice; yield; nitrogen use efficiency rate; soil nitrogen; plain along the Huaihe River

氮(N)素是植物生长、发育所必需的大量营养元素之一,在作物产量和品质形成中起关键作用^[1]。植物对氮素的大量需求,使得施用氮肥是必不可少的增产途径。然而,氮肥的高量投入,在保证我国粮食安全的同时,也导致氮肥增产效应减缓、土壤酸化、水体污染及大气温室效应等一系列问题。据统计^[2],我国农田氮肥去向比例中,作物吸收仅占 35%,氨挥发损失 11%,硝化—反硝化损失 34%,淋洗损失 2%,径流损失 5%,未知部分 13%,损失率极高。稻田耕层土壤在淹水状态下所形成的氧化还原层使得稻田生态系统氮素转化不同于旱地,其氮肥损失率可高达 30%~70%,远高于旱地的 20%~50%。因此,如何有效提高稻田生态系统氮肥利用率、保证作物高产并降低环境风险,促进资源的可持续利用,是现代农业生产与环境保护迫切需要解决的问题。

近年来,向化学氮肥中添加氮素抑制剂来调节氮在土壤中的转化进程,是众多农田管理措施中能够减少氮素损失和提高氮肥利用率的重要措施之一^[3]。脲酶抑制剂(Urease inhibitor)可以抑制土壤中脲酶活性,减缓或延迟酰胺态氮水解,降低土壤溶液中铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)的浓度,减少氨(NH_3)挥发损失,从而提高氮肥利用率^[4];硝化抑制剂(Nitrification inhibitor)可以对氨单加氧酶(AMO)进行竞争性抑制,从而抑制硝化作用的第一

步反应(NH_4^+ 氧化为 NO_2^-)^[5],使土壤溶液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在较长时间内保持在较高水平,相应地促进作物对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸收和微生物固持^[6],进而减少硝酸盐($\text{NO}_3^- - \text{N}$)的淋溶及以氮氧化物等气态形式损失^[7-8]。但由于作为抑制剂的化合物本身的物理、化学性质以及在土壤中的降解特性等受土壤类型、气候条件和种植作物体系等各种环境因素的影响较大,导致不同的抑制剂,或者同一抑制剂在不同的施用环境下对氮素转化的调控效果变异性较大^[9]。目前,脲酶/硝化抑制剂对尿素氮在土壤中的转化、 NH_3 挥发、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋溶、 N_2O 排放等的影响有较多报道,但其对作物是否有增产效果,尚存在争议^[10-11],对特定田间条件下的作用效果还缺乏足够的认识。迄今,在具有南北气候过渡带复杂区域生态特征的沿淮平原,关于脲酶/硝化抑制剂在水稻田应用效果的研究鲜见报道。鉴于此,本文以目前应用较多的脲酶抑制剂 N—丁基硫代磷酰三胺(N—(n-butyl) thiophosphosphoric triamide, NBPT)和硝化抑制剂 3,4—二甲基吡唑磷酸盐(3,4—dimethylpyrazole phosphate, DMPP)为材料,研究其对我国沿淮平原水稻产量、氮素吸收利用效率、土壤无机氮和微生物量氮含量等的影响,探讨抑制剂的增效机理,为优化沿淮稻田生态系统氮素养分管理,减少氮素损失提供科学依据,为稻田施肥提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验设在安徽省蚌埠市怀远县河溜镇罗新庄村(117°04′12″E,32°58′58″N)。该区域位于黄淮海平原南缘,淮河中游,地貌以河间平原为主,兼有零星低丘、岗地。属于暖温带半湿润季风气候区,年平均气温 15.3 ℃,年均日较差 9.1 ℃,平均无霜期 218 d,年均降水量 874.6 mm,年内降水分布不均匀,多集中在夏季(6—8月),年平均日照时间 2 206 h。供试土壤为潜育型水稻土砂姜黑土田,试验前 0—20 cm 耕层土壤基本理化性质为:pH(水土比 2.5:1)为 6.46,有机质含量为 13.9 g/kg,全氮含量为 0.84 g/kg,碱解氮含量为55.3 mg/kg,全磷含量为 0.42 g/kg,Olsen-P 含量为 16.9 mg/kg,全钾含量为 1.35%,速效钾含量为 77.1 mg/kg,CEC 为 241.49 mmol/kg。

1.2 试验设计

试验共设 5 个处理:(1)不施氮肥(CK);(2)尿素(U);(3)尿素+硝化抑制剂(U+DMPP);(4)尿素+脲酶抑制剂(U+NBPT);(5)尿素+硝化抑制剂+脲酶抑制剂(U+NBPT+DMPP)。3 次重复,完全随机区组排列。每个小区面积 26 m²(6.5 m×4.0 m),各小区以 50 cm 的分隔行隔开,且保持小区间的田埂高出土表上方 30 cm,并用厚质农膜包裹田埂并压至犁底层以防止相互串水串肥,实现各小区单灌单排的管理目的。试验中氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)的用量分别为 225,90,105 kg/hm²,氮、磷、钾肥分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。氮肥分 3 次施用,基肥:分蘖肥:穗肥为 4:3:3,磷钾肥作为基肥一次性施入。脲酶抑制剂为 N—丁基硫代磷酸三胺(NBPT),硝化抑制剂为 3,4—二甲基吡唑磷酸盐(DMPP),用量均按对应处理尿素纯氮量的 1%添加,与尿素混匀后施用。水稻品种为“常糯 1 号”,6 月 26 日移栽,10 月 26 日收获,栽培管理措施同当地农民的常规管理保持一致。

1.3 测定项目与方法

试验开始前采集 0—20 cm 耕层土样,用于测定土壤 pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、全钾和速效钾。水稻成熟期采集各处理 0—20 cm 耕

层土样,用于测定硝态氮、铵态氮和微生物量氮。采集土壤样品的同时采集植株样用于测定籽粒和秸秆氮含量,实收每小区产量。

土壤 pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、全钾、速效钾、硝态氮、铵态氮和植株氮采用常规方法^[12]测定,土壤微生物量氮采用氯仿熏蒸—K₂SO₄溶液浸提法^[13]测定。

1.4 相关指标计算方法

氮肥吸收利用率(nitrogen recovery efficiency, NRE, %)=(施氮区地上部分总吸氮量—无氮区地上部分总吸氮量)/施氮量×100%;

氮肥农学利用率(nitrogen agronomic efficiency, NAE, kg/kg)=(施氮区籽粒产量—无氮区籽粒产量)/施氮量;

植株氮素吸收效率(nitrogen uptake efficiency by plant, NUP, %)=施氮区地上部氮吸收量/施氮量×100%;

氮肥偏生产力(partial factor productivity of nitrogen fertilizer, NPFP, kg/kg)=施氮区稻谷产量/施氮量

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 数据分析软件进行统计分析,用 LSD(Least significant difference test)进行处理间差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 脲酶/硝化抑制剂对水稻产量及生物量的影响

由表 1 可知,所有施氮处理的籽粒、秸秆和生物量均显著高于未施氮处理 CK($P<0.05$)。与 U 处理相比,U+NBPT 和 U+NBPT+DMPP 处理的籽粒分别增加 6.8%和 8.6%、秸秆分别增加 4.3%和 5.5%,地上部分生物量分别增加 5.5%和 7.0%,且差异达到显著水平($P<0.05$)。U+DMPP 处理较 U 处理的籽粒、秸秆和地上部分生物量分别增加了 4.3%,2.1%,3.1%,但差异未达到显著水平($P>0.05$)。这说明尿素添加 NBPT 和 DMPP 对沿淮水稻产量的提高均有促进作用,且 NBPT 的效果优于 DMPP,NBPT 和 DMPP 联合施用效果最为显著。

表 1 不同处理的水稻籽粒、秸秆和地上部分生物量

处理	籽粒		秸秆		地上部分生物量	
	产量/ (kg·hm ⁻²)	较 U 增加/%	产量/ (kg·hm ⁻²)	较 U 增加/%	产量/ (kg·hm ⁻²)	较 U 增加/%
CK	6648±181c	—24.5	7085±198c	—25.3	13733±367c	—24.9
U	8809±178b		9488±242b		18297±417b	
U+ NBPT	9413±201a	6.8	9899±181a	4.3	19312±371a	5.5
U+ DMPP	9188±281ab	4.3	9685±210ab	2.1	18873±492ab	3.1
U+ NBPT+ DMPP	9569±213a	8.6	10014 ±266a	5.5	19583±473a	7.0

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

2.2 脲酶/硝化抑制剂对氮素吸收利用的影响

2.2.1 植株氮素吸收量 由表 2 可知,所有施氮处理的籽粒、秸秆和植株的吸氮量均显著高于不施氮处理 CK($P<0.05$),这表明施氮有利于提高水稻对氮素的吸收积累。与 U 处理相比,U+NBPT、U+DMPP 和 U+NBPT+DMPP 处理籽粒吸氮量分别提高 12.6%,9.4%,

14.1%,秸秆吸氮量分别提高 5.6%,2.7%,9.8%,植株吸氮量分别提高 9.6%,6.5%和 12.2%,其中除 U+DMPP 处理秸秆吸氮量与 U 处理差异未达显著水平之外($P>0.05$),其余差异均达显著水平($P<0.05$),这说明添加脲酶/硝化抑制剂能够提高水稻对氮素的同化和吸收能力,有利于对氮素的吸收积累。

表 2 不同处理的水稻籽粒、秸秆和植株吸氮量

处理	籽粒		秸秆		植株	
	吸氮量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	较 U 增加/%	吸氮量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	较 U 增加/%	吸氮量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	较 U 增加/%
CK	67.0±0.3c	—36.9	52.1±1.9d	—35.7	119.2±2.2d	—36.4
U	106.3±1.0b		81.1±1.0c		187.4±1.4c	
U+NBPT	119.6±4.3a	12.6	85.7±1.5ab	5.6	205.3±2.9ab	9.6
U+DMPP	116.3±5.6a	9.4	83.3±3.8b	2.7	197.7±9.2b	6.5
U+NBPT+DMPP	121.2±6.0a	14.1	89.1±2.8a	9.8	210.3±7.8a	12.2

2.2.2 氮素吸收利用效率 氮肥吸收利用率(NRE)、氮肥农学利用率(NAE)、氮素吸收效率(NUP)和氮肥偏生产力(NPFP)这 4 个指标从不同的角度描述了作物对氮肥吸收和利用的程度。由表 3 可知,添加 NBPT 和 DMPP 有利于提高水稻氮素利用效率,其中,NBPT 效果优于 DMPP,两者联合施用效果最为显著。与 U 处理相比,U+NBPT、U+DMPP 和 U+NBPT+DMPP 处理

NRE 分别提高 26.3%,18.0%,33.6%,NAE 分别提高 27.9%,17.5%,35.2%,NUP 分别提高 9.6%,6.5%,12.2%,NPFP 分别提高 6.8%,4.3%,8.6%,且 U+NBPT、U+NBPT+DMPP 处理与 U 处理之间差异均达显著水平($P<0.05$)。这说明施用 NBPT/DMPP 提高了土壤持续供应氮素营养的能力,提高了水稻 NRE、NAE、NUP 和 NPFP,为高产奠定了基础。

表 3 不同处理的氮素利用率

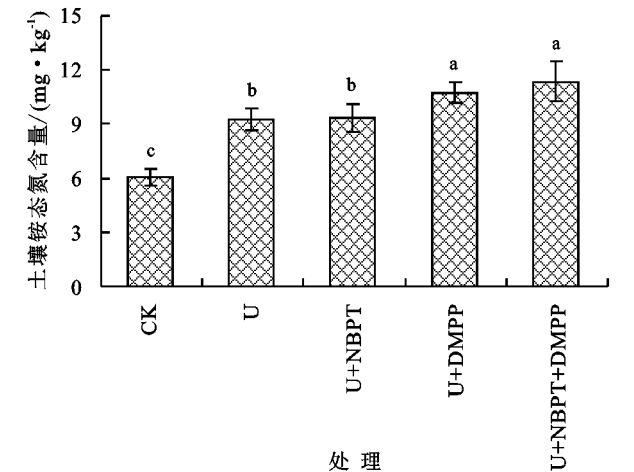
处 理	氮肥吸收利用率 (NRE)/%	氮肥农学利用率 (NAE)/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮素吸收效率 (NUP)/%	氮肥偏生产力(NPFP)/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
U	31.0±0.7b	9.8±0.17b	85.2±0.6b	40.0±0.8b
U+ NBPT	39.2±2.1a	12.6±0.09a	93.3±1.3a	42.8±0.9a
U+ DMPP	36.6±3.9ab	11.5±0.48ab	90.8±4.2a	41.8±1.3ab
U+ NBPT+ DMPP	41.4±4.0a	13.3±0.19a	95.6±3.5a	43.5±1.0a

2.3 脲酶/硝化抑制剂对土壤氮素的影响

2.3.1 土壤无机氮 由图 1 可知,尿素配施 DMPP 以及同时添加 DMPP 和 NBPT 显著提高了水稻成熟期的土壤铵态氮(NH_4^+-N)含量。处理 U 的土壤 NH_4^+-N 含量为 9.2 mg/kg,与 U 处理相比,U+DMPP 和 U+NBPT+DMPP 处理的土壤 NH_4^+-N 含量分别增加 16.2%和 22.8%,差异达到显著水平($P<0.05$)。而单独添加 NBPT 对水稻成熟期土壤 NH_4^+-N 含量无显著影响。这说明尿素添加 DMPP 为水稻的后期生长提供更多的铵态氮,延长了铵态氮的供应时间,从而有利于水稻对铵态氮的吸收利用,DMPP 和 NBPT 的联合使用效果更佳,单独施用 NBPT 无此效应。

在稻作体系中,与土壤 NH_4^+-N 含量相比,硝态氮(NO_3^--N)含量比较低(图 2)。尿素配施 DMPP 以及同时添加 DMPP 和 NBPT 有利于降低了水稻成熟期的土壤 NO_3^--N 含量。处理 U 的土壤 NO_3^--N 含量为 1.8 mg/kg,与 U 处理相比,U+DMPP 和 U+NBPT+DMPP 处理的土壤 NO_3^--N

含量分别减少了 19.1%和 25.6%,差异达到显著水平($P<0.05$)。与对土壤 NH_4^+-N 含量的影响相类似,单独添加 NBPT 对 NO_3^--N 含量无显著影响。



注:不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

图 1 水稻成熟期各处理土壤铵态氮含量

综合水稻成熟期土壤的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量来看,尿素配施 DMPP 以及同时添加 DMPP

和 NBPT 可以有效抑制水稻生育后期土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 向 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 转化,提高土壤中铵/硝比值,从而有利于水稻对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸收利用,而单独添加 NBPT 则无显著影响。

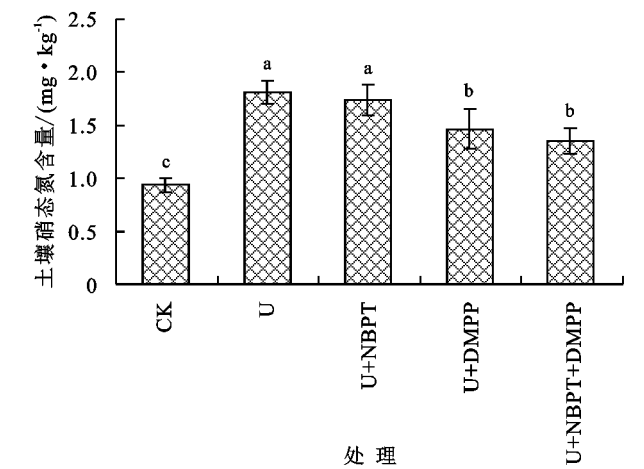


图2 水稻成熟期各处理土壤硝态氮含量

2.3.2 土壤微生物量氮 由图3可知,尿素配施 DMPP 以及同时添加 DMPP 和 NBPT 显著提高了水稻成熟期的土壤微生物量氮(SMBN)的含量。处理 U 的 SMBN 含量为 13.5 mg/kg ,与 U 处理相比, U+DMPP 和 U+NBPT+DMPP 处理的 SMBN 含量分别增加 15.9%和 20.8%,差异达到显著水平($P < 0.05$)。而单独添加 NBPT 对水稻成熟期 SMBN 含量无显著影响。这表明在沿淮地区水稻生产体系中尿素配施 NBPT/DMPP,有较多的氮素通过同化作用转入到微生物体内暂时固定,减少了氮素损失,从而有利于土壤持续供氮能力的提高。

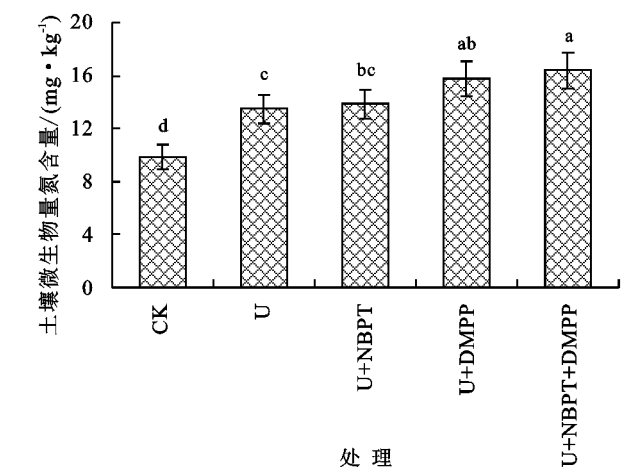


图3 水稻成熟期各处理土壤微生物量氮含量

3 讨论

3.1 脲酶/硝化抑制剂对水稻产量的影响

脲酶和硝化抑制剂作为氮肥增效剂,其主要作用是减少肥料氮素损失,提高氮肥利用率,但其对作物产量影响的研究结果并不完全一致。大多数研究^[10-11,14-16]结果表明,脲酶/硝化抑制剂能够促进作物对氮素的吸收,从而有利于作物产量的提高,但也

有少量报道,其对作物产量没有影响或影响不显著,如 Byrnes 等^[17]多次试验表明,添加 NBPT 确实可以减少氮挥发损失,但稻谷的增产达显著水平的却很少;Wilson 等^[18]研究结果也表明,硝化抑制剂 DCD 尽管提高了水稻对肥料氮的吸收,但对水稻产量没有影响。这可能是因为抑制剂的施用效果除取决于其自身物理、化学性质及降解特性外,还受土壤类型、有机质含量、pH、温度、湿度及土肥管理措施等环境因素的综合影响^[9],与不同条件下氮调控土壤氮养分供应量与形态是否与作物对养分的需求是否耦合和同步有关^[10]。本研究中,单独施用 NBPT 或者与 DMPP 配施均可显著提高水稻的产量,而单独施用 DMPP 尽管也提高了水稻产量,但其效果不如 NBPT,可能的原因就是 DMPP 主要调控尿素态氮水解生成的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 向 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 转化过程,使稻田土壤与田面水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量升高且较长时间维持在较高水平,而水稻作为喜铵作物,大量 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的存在尽管促进了水稻对氮素的吸收和利用,但同时也易导致稻田 NH_3 挥发几率的增加^[11,16,19]。

3.2 脲酶/硝化抑制剂对水稻氮素利用效率的影响

相关研究^[6-7,16,20]表明,脲酶抑制剂可以延缓尿素水解为 NH_4^+ ,而硝化抑制剂可以阻断 NH_4^+ 的硝化作用,两者分别对尿素态氮转化中某一特定过程起到抑制作用,其单独作用不能对全过程进行有效控制,配合施用可以有效延缓尿素水解和水解产物 NH_4^+ 的进一步氧化,使其在土壤中存在相对较长的时间和较大的量,减少 NO_3^- 淋溶和 NH_3 挥发及 N_2O 排放,从而促进水稻对氮素的吸收利用,提高氮肥利用效率。周旋等^[14]研究发现,不同施肥模式下,配施抑制剂组合(NBPT、NPPT/+CP)显著增加水稻 N、P、K 吸收量,促进抽穗后干物质生产和 N 素积累,提高籽粒中的养分分配及 N 素利用效率。张文学等^[16]研究表明,NBPT 和 DMPP 配合施用较单独施用能更有效提高氮肥回收率和降低稻株根际土壤 N 素损失。与上述研究结果一致,本研究中,在沿淮平原粳稻种植区,尿素配施添加脲酶抑制剂(NBPT)和硝化抑制剂(DMPP)均增加了水稻植株吸氮量,提高了氮肥利用率,尤其以 NBPT 和 DMPP 配施效果更为显著,表现出对 N 素转化的协同抑制效果。

3.3 脲酶/硝化抑制剂对水稻土壤氮素的影响

铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)是作物能够直接吸收利用的速效氮素营养, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 是旱地农田无机氮存在的主要形态, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 是稻作体系无机氮素的主要存在形态。两者的含量不仅能反应土壤的氮素供应状况,而且可直接影响 NH_3 挥发和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋溶。土壤微生物量氮土壤有机氮的重要组成部分,它的数量虽少,但它在土壤养分循

环和转化过程中是重要的活性源和汇,成为评价土壤肥力及质量的重要指标^[21]。本研究表明,尿素配施 DMPP 以及同时添加 DMPP 和 NBPT 显著提高了水稻成熟期的土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 SMBN 的含量,降低了 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量,这不仅有利于水稻对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸收利用,提高氮素利用率,而且还且能降低 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋溶及反硝化损失潜在的可能性。SMBN 含量的增加既意味着土壤氮库库容的增大和相对稳定,也意味着土壤中的氮素对作物的持续供应能力有了相应的提高。分析其可能原因:一方面,氮素抑制剂的存在可以使更多的氮以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的形态存在,而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 相比于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 更易于被土壤微生物固持利用;另一方面,在抑制剂存在的条件下,土壤硝化能力的限制或减弱,以及抑制剂本身在土壤中的降解提供利于异养微生物所需的碳源^[10],这将利于微生物对肥料氮的固持。而尿素仅配施 NBPT 时,对此无显著影响,其主要原因可能就是脲酶抑制剂抑制作用持续时间一般较短,对尿素态 N 转化为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 之后的变化影响较少,NBPT 施入土壤后 2 周左右可降解为 N、P、S 等元素,抑制效果受到了极大的限制。

4 结论

沿淮平原水稻种植体系中,尿素配施纯氮量 1% 的脲酶抑制剂 (NBPT) 或硝化抑制剂 (DMPP) 均有利于提高水稻产量、植株吸氮量和氮素利用效率,NBPT 效果优于 DMPP,尿素单独配施 DMPP 或者 DMPP+NBPT 配施组合均显著提高了水稻成熟期土壤铵态氮和微生物量氮的含量,降低了硝态氮的含量,提高了土壤中铵/硝比值,而尿素单独施用配施 NBPT 对此无显著影响。NBPT 和 DMPP 表现出协同增效作用,抑制效果最为显著。

参考文献:

- [1] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报 2014,20(4):783-795.
- [2] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
- [3] 周旋,吴良欢,戴锋.生化抑制剂组合对黄泥田土壤尿素态氮转化的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):95-100,123.
- [4] Trenkel M E. Characteristics and types of slow-and controlled-release fertilizers and nitrification and urease inhibitors [A]. Paris : International Fertilizer Industry Association (IFA), 2010:56.
- [5] 周旋,吴良欢,戴锋.土壤温度和含水量互作对抑制剂抑制氮素转化效果的影响[J].农业工程学报,2017,33(20):106-115.
- [6] 串丽敏,安志装,杜连凤,等.脲酶/硝化抑制剂对壤质潮土氮素淋溶影响的模拟研究[J].中国农业科学,2011,44(19):4007-4014.
- [7] 周旋,吴良欢,董春华,等.氮肥配施生化抑制剂组合对黄泥田土壤氮素淋溶特征的影响[J].生态学报,2019,39(5):1804-1814.
- [8] Shu K L, Helen S, Mei B, et al. Using urease and nitrification inhibitors to decrease ammonia and nitrous oxide emissions and improve productivity in a subtropical pasture [J]. Science of the Total Environment, 2018,64:1531-1535.
- [9] 刘建涛,许靖,孙志梅,等.氮素调控剂对不同类型土壤氮素转化的影响[J].应用生态学报,2014,25(10):2901-2906.
- [10] 鲁艳红,聂军,廖玉林,等.氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(1):95-104.
- [11] 孙海军,闵炬,施卫明,等.硝化抑制剂施用对水稻产量与氨挥发影响[J].土壤,2015,47(6):1027-1033.
- [12] 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,1999.
- [13] 吴金水,林启美,黄巧云,等.土壤微生物生物量测定方法及其应用[M].北京:气象出版社,2006.
- [14] 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养分累积及利用率的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(10):1495-1507.
- [15] Dillon K A, Walker T W, Harrell D L, et al. Nitrogen sources and timing effects on nitrogen loss and uptake in delayed flood rice [J]. Agronomy Journal, 2012,104(2):466-472.
- [16] 张文学,孙刚,何萍,等.脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田氨挥发影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(6):1411-1419.
- [17] Byrnes B H, Frenay J R. Recent developments on the use of urease inhibitors in the tropics [J]. Fertilizer Research, 1995(42):251-259.
- [18] Wilson C E, Norman R J, Wells B R. Dicyandiamide influence on uptake of preplant applied fertilizer nitrogen by rice [J]. Soil Science Society of American Journal,1990,54:1157-1161.
- [19] 周旋,吴良欢,戴锋,等.生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田稻季氨挥发影响[J].农业环境科学学报,2018,37(2):399-408.
- [20] 周旋,吴良欢,戴锋,等.生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田稻季 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J].生态与农村环境学报,2018,34(12):1122-1130.
- [21] Rifai S W, Markewitz D, Borders B. Twenty years of intensive fertilization and competing vegetation suppression in loblolly pine plantations: Impacts on soil C, N, and microbial biomass [J]. Soil Biology and Biochemistry,2010,42(5):713-723.