氮肥配施增效剂实现寒地水稻增产、提质与增效

郝小雨[1,2]，马星竹[1]，陈苗苗[3]，周宝库[1]，孙 磊[1]，迟凤琴[1]，李伟群[1,4]

(1.黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所，哈尔滨 150086；
2.黑龙江省土壤环境与植物营养重点实验室，哈尔滨 150086；
3.河北农业大学科学技术研究院，河北 保定 071001；4.新疆生产建设兵团第十师农业科学研究所，新疆 北屯 836007)

摘要： 研究氮肥增效剂对寒地水稻产量、品质及氮素利用的影响，旨在为制定合理的稻田氮素管理措施及增产、提质和增效策略提供科学依据。2017 年和 2018 年在黑龙江省方正县设置田间试验，研究氮肥配施硝化抑制剂和脲酶抑制剂对水稻产量、品质、氮素利用和转化及经济收益的影响。结果表明：尿素配施硝化抑制剂 CP 和脲酶抑制剂 NBPT(N＋NI＋UI)显著提高水稻产量，2017 年较氮肥处理(N)水稻籽粒、秸秆和总生物量分别增产 6.4%，4.9%和 5.8%，2018 年分别增产 8.8%，7.2%和 8.2%。施用氮肥增效剂可以提高寒地水稻碾磨品质、外观品质和营养品质，并促进水稻氮素吸收，提高氮肥利用效率。与 N 处理相比，N＋NI＋UI 处理水稻氮肥表观利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力分别提高 15.6%，19.1%和 7 .6%。CP 和 NBPT 配施对氮素转化表现出明显的协同抑制效果，延迟和降低土壤 NH_4^+—N 含量峰值，保持水稻生育期较高的 NH_4^+—N 含量，延长了氮素供应时间。施用氮肥增效剂可使寒地水稻增收 2 499.08元/hm^2。可见，寒地水稻氮肥配施硝化抑制剂 CP 与脲酶抑制剂 NBPT 能够延长氮素释放周期，促进水稻氮素吸收，增加水稻产量，改善水稻品质，提高氮肥利用效率，增加经济效益。

关键词： 寒地水稻；硝化/脲酶抑制剂；产量；品质；氮素转化利用

中图分类号：S143.1$^+$6；S511　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1009-2242(2019)04-0175-05

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.025

Nitrogen Fertilizer Combined with Synergist Improved Yield, Grain Quality and Nitrogen Use Efficiency of Rice in Cold Region

HAO Xiaoyu[1,2], MA Xingzhu[1], CHEN Miaomiao[3], ZHOU Baoku[1], SUN Lei[1], CHI Fengqin[1], LI Weiqun[1,4]

(1.*Institute of Soil and Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin* 150086; 2.*Heilongjiang Key Laboratory of Soil Environment and Plant Nutrition, Harbin* 150086; 3.*Institute of Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei* 071001; 4.*Institute of Agricultural Science, the Tenth Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Beitun, Xinjiang* 836007)

Abstract: The effects of nitrogen fertilizer synergist on yield and quality of rice and nitrogen utilization in cold regions were studied in order to provide scientific basis for formulating rational nitrogen management measures and strategies of improving yield, quality and nitrogen use efficiency in paddy field. Field trials were conducted in Fangzheng county, Heilongjiang province in 2017 and 2018 to study the effects of nitrogen fertilizer combined with nitrification inhibitor and urease inhibitor on rice yield, quality, nitrogen utilization and transformation and economic benefits. The results showed that the treatment of N＋NI＋UI (applying urea combined with nitrification inhibitor CP and urease inhibitor NBPT) significantly increased rice yield, the rice grain, straw and total biomass increased by 6.4%, 4.9% and 5.8% in 2017, 8.8%, 7.2% and 8.2% in 2018, respectively, compared with nitrogen fertilizer treatment (N). Application of nitrogen fertilizer synergist could improve the milling quality, appearance quality and nutritional quality of rice in cold regions, promote the nitrogen absorption of rice and improve the utilization efficiency of nitrogen fertilizer. Compared

收稿日期：2019-01-07
资助项目：国家重点研发计划项目(2017YFD0300503-02，2016YFD0300901)；国家科技支撑计划项目(2013BAD07B01，2013BAD11B03)；黑龙江省农业科学院院级科研项目(2017JS05)
第一作者：郝小雨(1981—)，男，博士，助理研究员，主要从事农田养分循环研究。E-mail：xiaoyuhao1981@sina.com
通信作者：李伟群(1980—)，男，硕士，助理研究员，主要从事土壤肥料研究。E-mail：lwqun@126.com

with N treatment, N+NI+UI treatment increased the apparent nitrogen utilization rate, agronomic efficiency and partial nitrogen productivity of rice by 15.6%, 19.1% and 7.6%, respectively. The combined application of CP and NBPT showed obvious synergistic inhibition effect on nitrogen transformation, delayed and reduced the peak value of NH_4^+—N content in soil, maintained the NH_4^+—N content at a higher level at growth stage of rice and extended the nitrogen supply time. Application of nitrogen fertilizer synergist could increase rice in cold area by 2 499.08 yuan/hm^2. In conclusion, nitrogen fertilizer combined with nitrification inhibitor CP and urease inhibitor NBPT could prolong the nitrogen release cycle, promote nitrogen absorption, improve rice yield and quality, enhance nitrogen use efficiency and increase economic benefits of rice in cold regions.

Keywords: rice in cold region; nitrification/urease inhibitor; yield; quality; nitrogen transformation and utilization

黑龙江省是我国重要的商品粮基地。水稻作为黑龙江省的三大作物之一,2016 年播种面积达 381 万 hm^2,占全省粮食作物播种面积的 27%,产量达到 2 255.3 万 t[1]。黑龙江省水稻商品率达 80%,是南方多省和北京、上海等大城市的粮源产地,黑龙江省水稻的高产稳产对我国粮食安全有重要影响[2]。肥料是作物的“粮食”,在作物生产中发挥着不可替代的支撑作用,是作物增产增收最基本的物质保障[3]。当前水稻生产中,普遍存在化肥过量施用及利用效率不高的问题。彭显龙等[4]调查了黑龙江省寒地稻田施肥情况,发现近 60%的稻田氮素用量过高,稻田氮素有 17.2%的盈余,氮肥利用率较低;张福锁等[5]计算了 2001—2005 年全国粮食主产区的肥料利用率,指出水稻的氮肥利用率仅为 28.3%,其中黑龙江省水稻的氮肥利用率为 29.8%,虽略高于全国平均水平,但远低于国际水平。氮肥的过量施用不仅浪费资源、增加成本,而且还增加了环境污染(氮素气态损失、淋溶、面源污染等)的风险。因此,在保证粮食产量合理稳定增长的同时,提高氮肥利用率,减少氮肥过量施用带来的不良影响,成为我们亟需解决的重要课题。

近年来,采用氮肥增效剂调控土壤氮素转化成为提高作物氮肥利用率的有效措施。硝化抑制剂可以抑制土壤中 NH_4^+—N 向 NO_3^-—N 的转化,可使多数氮素以 NH_4^+—N 的形式留存于土壤中。脲酶抑制剂通过抑制土壤中脲酶活性来减缓尿素态氮水解为 NH_4^+—N。有研究[6-8]表明,硝化抑制剂和脲酶抑制剂联合施用对增加作物产量、提高氮肥利用率和减少氮素损失有较好的效果。目前,在东北平原白浆土[9]、棕壤[10]进行了一些硝化和脲酶抑制剂配合施用的效果研究,而且多集中在室内模拟和旱地土壤,在寒地水稻上的研究鲜见报道。因此,就硝化抑制剂和脲酶抑制剂配合施用对我国东北寒地水稻产量、品质、氮素利用和转化的影响,探讨氮肥增效剂的应用效果和机理,为寒地水稻增产、提质、增效和进一步的推广应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验地位于黑龙江省方正县水稻研究院。试验区属寒温带大陆性季风气候,年均气温 2.6 ℃,年均降水量 579.7 mm。试验地为草甸黑土。试验开始前 0—20 cm 耕层土壤基本性质为:有机质含量 25.2 g/kg,碱解氮含量 202.6 mg/kg,硝态氮含量 1.1 mg/kg,铵态氮含量 8.2 mg/kg,有效磷含量 20.1 mg/kg,速效钾含量 219.3 mg/kg,pH(水土比 2.5∶1)为6.5,土壤容重 1.18 g/cm^3。种植制度为一年一作。供试作物为水稻,品种为“龙稻 18”。

1.2 试验设计

试验设 3 个处理:(1)不施氮肥(CK);(2):氮肥(N);(3)氮肥+硝化抑制剂+脲酶抑制剂(N+NI+UI)。每个处理 3 次重复,随机排列。小区面积 25 m^2(5 m×5 m)。氮肥(N)、磷肥(P_2O_5)和钾肥(K_2O)用量分别为 148,75,75 kg/hm^2;硝化抑制剂为 2—氯—6—三氯甲基吡啶(CP),脲酶抑制剂为 N—丁基硫代磷酰三胺(NBPT),用量分别为施氮(N)量的 0.3%和 0.5%。氮肥 40%基施,40%于分蘖期施入,20%在孕穗期施入;磷肥全部基施;钾肥 60%基施,40%于孕穗期追施。所用化肥为尿素(N 46%)、重过磷酸钙(P_2O_5,46%)、氯化钾(K_2O 60%)。各小区设水口,单灌单排。为防止养分随水分侧渗,小区间设置土埂(高 30 cm,宽 35 cm),并在土埂上覆 1 层塑料薄膜,塑料薄膜两端埋入土中 40 cm 深。水稻种植密度 22 万穴/hm^2。2017 年 5 月 24 日移栽,9 月 27 日收获。2018 年 5 月 23 日移栽,9 月 23 日收获。其他措施同当地农民常规管理。

1.3 测定方法

于水稻收获期在各小区划分 3 个样区,每个样区 3 m^2,分别测产和考种,计算水稻产量。2018 年在水稻生育期内采集土壤样品:用土钻在小区内“S”形 5 点取耕层土壤(0—20 cm)并混合均匀;在施肥后每 3~5天取样 1 次,生育后期每 7~10 天取样 1 次。土

壤样品风干过 1 mm 筛后用 1 mol/L KCl 溶液浸提，化学分析仪（Cleverchem 380，DeChem - Tech）测定土壤 NH_4^+—N 含量。土壤容重采用环刀法测定；植株全氮含量采用硫酸双氧水消煮—凯氏定氮法测定；采用 JLGJ-45 型检测电动砻谷机加工成糙米，用 JNNJ3B 型检验碾米机加工精米；在整精米样品中随机取 100 粒，置有聚光灯的玻璃板上目测垩白粒数，计算垩白粒率；直链淀粉含量、脂肪含量、蛋白质含量采用 VECTOR22/N 型近红外光谱仪（德国 BRUKER 公司）测定。

1.4　计算与分析方法

氮肥利用效率计算参见文献[11]。

氮肥表观利用率（nitrogen use efficiency，NUE，%）=（施氮处理地上部吸氮量－不施氮处理地上部吸氮量）/施氮量×100%

氮肥农学效率（nitrogen agronomic efficiency，NAE，kg/kg）=（施氮区水稻籽粒产量－不施氮处理水稻籽粒产量）/施氮量

氮肥偏生产力（nitrogen partial factor productivity，NPFP，kg/kg）=施氮区水稻籽粒产量/施氮量

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据分析，SPSS 17.0 软件进行方差分析和多重比较。

2　结果与分析

2.1　水稻产量及其构成因子

由表 1 可知，尿素添加氮肥增效剂 CP 和 NBPT 显著提高了水稻产量。2017 年，N＋NI＋UI 处理水稻籽粒产量、秸秆产量和总生物量较氮肥处理（N）分别增加 6.4%，4.9%和 5.8%，差异达显著水平（$P<0.05$）。2018 年，N＋NI＋UI 处理同样表现为增产效应，水稻籽粒产量、秸秆产量和总生物量较 N 处理分别增加 8.8%，7.2%和 8.2%，差异达显著水平（$P<0.05$）。氮肥在寒地水稻上表现出明显的增产效应，N 处理和 N＋NI＋UI 处理水稻籽粒产量、秸秆产量和总生物量均显著高于 CK 处理（$P<0.05$）。

从产量构成因子来看，N＋NI＋UI 处理较 N 处理水稻株高、穗长、每穗实粒数和千粒重均明显增加，差异达显著水平（$P<0.05$）。与 CK 处理相比，N 处理显著提高水稻株高、穗长和每穗实粒数（$P<0.05$），但未增加水稻千粒重，原因是缺氮的植株提前进入生殖生长阶段，籽粒灌浆的时间较长，籽粒饱满，千粒重高[12]。

表 1　不同处理水稻产量及产量构成因子

年份	处理	产量			产量构成因子			
		籽粒/（kg·hm^{-2}）	秸秆/（kg·hm^{-2}）	总生物量/（kg·hm^{-2}）	株高/cm	穗长/cm	每穗实粒数	千粒重/g
2017	CK	4428.7±152.3c	3294.6±113.3c	7723.3±265.7c	69.8±0.5c	19.7±0.4c	122.3±3.2c	27.1±0.1b
	N	8262.8±82.4b	5362.9±53.5b	13625.6±135.8b	90.2±0.1b	24.2±0.2b	135.3±1.5b	27.2±0.2b
	N＋NI＋UI	8789.0±75.4a	5624.7±48.3a	14413.7±123.7a	91.6±0.3a	25.0±0.3a	142.0±1.0a	28.0±0.2a
2018	CK	5395.2±301.2c	4013.6±224.0c	9748.9±525.2c	71.2±0.3c	20.3±0.3 c	123.7±2.3 c	27.3±0.2b
	N	8401.9±148.3b	5453.2±96.2b	14125.9±244.5b	90.8±0.2b	24.2±0.2b	137.0±2.6 b	27.4±0.3b
	N＋NI＋UI	9137.8±103.8a	5848.0±66.5a	14942.7±170.3a	91.8±0.4 a	24.8±0.1a	143.3±0.6a	28.2±0.1a

注：表中数据为平均值±标准差；同列不同字母表示处理间差异显著（$p<0.05$）。下同。

2.2　稻米品质

碾磨品质、外观品质和营养品质对于稻米品质有重要影响，共同决定了稻米的品质优劣。碾磨品质与水稻的加工适应性密切相关。从表 2 可以看出，N＋NI＋UI 处理出糙率和整精米率均高于 N 处理，其中出糙率较 N 处理分别增加 0.4%（2017 年）和 0.8%（2018 年），整精米率较 N 处理分别增加 3.4%（2017 年）和 1.7%（2018 年）。外观品质的优劣直接影响水稻的商品性。尿素添加氮肥增效剂 CP 和 NBPT 对于提高稻米外观品质有积极作用。与 N 处理相比，N＋NI＋UI 处理垩白粒率降低 5.8%（2017 年）和 10.0%（2018 年），差异达到显著水平（$P<0.05$）。直链淀粉、脂肪和蛋白质含量影响稻米的外观、加工、食味和营养性质。通常直链淀粉含量高时，柔韧性和弹性降低，口感变差；稻米脂肪含量越高光泽度、适口性和香气越好；稻米蛋白质含量与米饭的硬度呈正相关，稻米蛋白质含量超过 9%时其食味品质往往较差[13]。与 N 处理相比，N＋NI＋UI 处理可降低稻米直链淀粉含量，增加脂肪含量，对蛋白质含量影响不大。其中，N＋NI＋UI 处理直链淀粉含量较 N 处理分别降低 1.6%（2017 年）和 3.6%（2018 年），脂肪含量分别增加 5.2%（2017 年）和 9.1%（2018 年）。总体来看，尿素添加氮肥增效剂 CP 和 NBPT 可以提高寒地水稻碾磨品质、外观品质和营养品质。

2.3　氮素吸收与利用

由表 3 可看出，尿素添加氮肥增效剂 CP 和 NBPT 可以显著提高水稻植株氮素吸收量，差异均达到显著水平（$P<0.05$）。与 N 处理相比，N＋NI＋UI 处理稻籽粒、秸秆和作物氮素吸收量分别增加 5.1%，7 .8%，6.3%（2017 年）和 6.4%，6.1%，6.3%（2018 年），平均为 5.7%，6.9%和 6.3%。施氮显著增加水稻植株氮素吸收，N 和 N＋NI＋UI 处理水稻籽粒、秸秆和植株氮素吸收

量均显著高于 CK 处理($P<0.05$)。

尿素添加氮肥增效剂 CP 和 NBPT 有利于提高寒地稻田氮肥利用效率。与 N 处理相比,N+NI+UI 处理氮肥表观利用率分别提高 14.8%(2017 年)和 16.5%(2018 年),平均为 15.6%;氮肥农学效率分别提高 13.7%(2017 年)和 24.5%(2018 年),平均为 19.1%;氮肥偏生产力分别提高 6.4%(2017 年)和 8.8%(2018 年),平均为 7.6%。

表 2 不同处理稻米碾磨品质、外观品质和营养品质 单位:%

年份	处理	出糙率	整精米率	垩白粒率	直链淀粉	脂肪	蛋白质
2017	CK	77.5±0.5b	60.5±1.0c	5.8±0.1a	17.5±0.3a	1.6±0.1b	6.1±0.4a
	N	78.6±0.3a	65.1±0.3b	5.1±0.1b	17.1±0.3ab	1.8±0.1ab	6.3±0.1a
	N+NI+UI	78.9±0.6a	67.3±1.0a	4.8±0.1c	16.8±0.2b	1.9±0.1a	6.2±0.1a
2018	CK	77.6±0.3b	62.2±2.6b	5.9±0.3a	17.4±0.4a	1.5±0.1c	6.0±0.2a
	N	78.4±0.4ab	66.2±1.0a	5.1±0.1b	16.8±0.1b	1.8±0.1b	6.2±0.1a
	N+NI+UI	79.1±0.6a	67.3±0.5a	4.6±0.1c	16.2±0.1c	2.0±0.1a	6.3±0.3a

表 3 不同处理水稻氮素吸收与利用

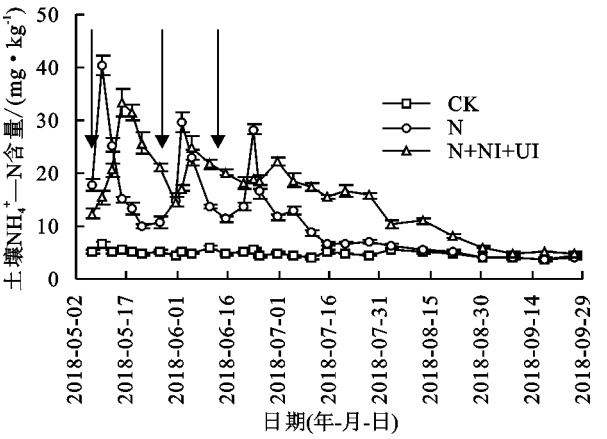
年份	处理	氮素吸收量			氮肥利用效率		
		籽粒/($kg\cdot hm^{-2}$)	秸秆/($kg\cdot hm^{-2}$)	作物吸氮量/($kg\cdot hm^{-2}$)	氮肥表观利用率/%	氮肥农学效率/($kg\cdot kg^{-1}$)	氮肥偏生产力/($kg\cdot kg^{-1}$)
2017	CK	40.7±1.9c	34.9±0.7c	75.6±1.7c	—	—	—
	N	74.8±2.5b	56.4±0.8b	131.2±2.9b	37.6±3.1b	25.9±1.2b	55.8±0.6b
	N+NI+UI	78.6±0.5a	60.8±0.3a	139.4±0.4a	43.1±1.3a	29.5±0.5a	59.4±0.5a
2018	CK	42.0±1.6c	40.4±1.2c	82.4±2.5c	—	—	—
	N	75.2±1.2b	57.9±1.2b	133.1±2.3b	34.2±0.5b	20.3±1.4b	56.8±1.0b
	N+NI+UI	80.0±0.6a	61.4±0.9a	141.4±0.6a	39.9±1.3a	25.3±2.7a	61.7±0.7a

2.4 氮素转化

由图 1 可知,N 处理在施基肥后,在脲酶的作用下尿素快速水解,土壤 NH_4^+—N 含量迅速上升,第 3 天土壤 NH_4^+—N 含量达到水解高峰,而后逐步降低(第 4~24 天),原因是前期硝化过程的底物较多,有利于硝化作用的进行,即在微生物作用下将 NH_4^+ 迅速氧化成 NO_3^-,产生的 NO_3^- 进一步淋失和反硝化损失[14]。N+NI+UI 处理施基肥后 3 天内的土壤 NH_4^+—N 含量低于 N 处理,之后迅速上升,至施肥后第 9 天出现释放高峰,相比于 N 处理尿素的水解进程明显延迟,这与脲酶抑制剂 NBPT 抑制土壤脲酶活性有关;第 10~24 天土壤 NH_4^+—N 含量逐步下降,但一直保持较高水平,这一阶段脲酶抑制剂 NBPT 逐步分解,抑制作用变弱,且硝化抑制剂 CP 又进一步抑制了 NH_4^+ 的氧化作用。在分蘖期和孕穗期追肥后,N 处理和 N+NI+UI 处理土壤 NH_4^+—N 含量变化趋势与施基肥时基本一致。与 N 处理相比,N+NI+UI 处理对氮素转化表现出明显的协同抑制效果,土壤 NH_4^+—N 含量峰值明显推迟,并显著降低了峰值,保持水稻生育期较高的 NH_4^+—N 含量,延长了氮素供应时间。

2.5 经济效益

由表 4 可知,尽管增施氮肥增效剂 CP 和 NBPT 后导致成本增加,但由于水稻产量的提高,抵消了肥料成本增加的部分,并增加了经济效益。2017 年和 2018 年 N+NI+UI 处理净收入分别达到 23 752.35,25 092.67 元/hm^2,较 N 处理分别增收 2 058.57,2 939.59 元/hm^2,平均为 2 499.08 元/hm^2。



注:图中箭头表示施肥日期。

图 1 不同处理水稻生育期土壤 NH_4^+—N 含量变化

表 4 不同处理水稻的经济效益

单位:元/hm^2

年份	处理	收入	肥料成本	其他成本	纯收入
2017	CK	18600.46	891.30	11275.00	6434.16±639.79c
	N	34703.56	1534.78	11475.00	21693.78±345.93b
	N+NI+UI	36913.63	1686.28	11475.00	23752.35±316.68a
2018	CK	22659.87	891.30	11400.00	10368.56±1264.91c
	N	35287.87	1534.78	11600.00	22153.09±622.75b
	N+NI+UI	38378.96	1686.28	11600.00	25092.67±436.14a

注:水稻 4.2 元/kg,尿素 2 000 元/t,重钙 2 400 元/t,氯化钾 4 000 元/t,CP 170 元/kg,NBPT 100 元/kg,人工成本 100 元/d。

3　讨论与结论

众多研究表明,硝化抑制剂与脲酶抑制剂联合施用,可促进作物氮素吸收、增加作物产量、改善作物品质、提高氮素利用效率和减少肥料氮素损失。Martins 等[7]指出,氮肥配施 CP 和 NBPT 可使氮素回收率提高 53%,玉米籽粒产量提高 23%;在浙江黄泥田的研究[8]表明,水稻施肥添加抑制剂 CP 和 NBPT 可以有效扩充籽粒库容,提高产量,获得较高收益;Mohammed 等[6]的研究结果指出,CP、NBPT 与尿素在春季撒施,较秋季单施尿素冬小麦产量增加 29%,还可提高小麦籽粒蛋白质含量;还有研究[15]指出,增施硝化抑制剂 DCD 和脲酶抑制剂 HQ 可提高油菜叶长、叶宽和叶绿素含量,油菜增产 25.2%,氮肥利用率提高 85.2%,硝酸盐含量降低 51.9%;赵自超等[16]在华北冬小麦－夏玉米轮作系统的研究结果证实,添加硝化抑制剂 DMPP 和脲酶抑制剂 NBPT,冬小麦—夏玉米周年产量增加 6.7%,N_2O 排放总量减少 38.2%。DMPP、NBPT 与尿素联合施用,水稻产量增加 8.24%,氨挥发损失量降低 13.58%[17]。本研究结果亦显示,在施用尿素基础上增施 CP、NBPT,水稻籽粒产量增加 6.4%,8.8%,氮肥表观利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力分别提高 15.6%,19.1%和 7.6%,还可促进水稻氮素吸收,改善作物品质,增加经济效益。也有研究结果显示,施用硝化抑制剂与脲酶抑制剂不影响作物产量。孙志梅等[18]的研究表明,硝化抑制剂 DCD 和脲酶抑制剂 LNS 联合施用对芹菜产量没有产生显著影响,但可降低植株硝酸盐含量,并提高芹菜干物质含量。在吉林黑钙土[19]和薄层黑土[20]的试验结果表明,一次性条施添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂的复合肥,未增加玉米产量,但可促进氮素吸收、提高氮肥利用率、减少氨挥发损失和 N_2O 排放。产生不同试验结果的原因,受种植作物、增效剂类型、土壤类型和性质、气候、氮肥管理方法等因素综合影响,与不同条件下氮肥增效剂调控土壤氮养分供应量和土壤供氮形态与作物养分需求是否耦合和同步有关[21]。

硝化抑制剂与脲酶抑制剂分别对氮素转化中某一特定过程起到抑制作用,单独施用时不能对全过程进行有效控制[22],脲酶抑制剂通过抑制脲酶的活性间接减缓尿素的水解,但作用时间较为短暂[23];应用硝化抑制剂可显著提高土壤中 NH_4^+—N 含量,降低土壤 NO_3^-—N 含量,但同时也存在土壤 NH_4^+—N 含量过高导致氨挥发量增加的风险[24]。而当 2 种抑制剂联合施用时,不但可有效抑制土壤脲酶活性,延缓尿素的水解,使 NH_4^+—N 在土壤中更多和更长时间保存,使水稻在生育期有足够氮素可利用,还可减少 NO_3^- 淋溶、氨挥发和 N_2O 排放[22]。本试验中,施氮处理 N 在施肥后第 3 天土壤 NH_4^+—N 含量达到释放高峰,较增施氮肥增效剂 CP 和 NBPT 的 N＋NI＋UI 处理快 3～6 天(图 1),表明尿素水解越快,土壤 NH_4^+—N 最大积累量出现的也就越早,损失率增高,水稻对氮素利用的有效期缩短,后期氮素供应不足,不利于水稻的生长。当然,土壤氮素转化受多种因素影响,针对黑龙江省不同土壤、不同积温带、不同品种及不同田间管理方法等还需进一步研究,以寻求最佳的稻田氮素管理方法。

综上可知,寒地水稻氮肥配施硝化抑制剂 CP 与脲酶抑制剂 NBPT 能够延长氮素释放周期,促进水稻氮素吸收,既可增加水稻产量,提高氮肥利用效率,又可改善水稻品质,最终增加经济效益。

参考文献:

[1]　黑龙江省统计局,国家统计局黑龙江调查队.黑龙江统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2017.

[2]　李大林,刘成才,李修平,等.黑龙江省水稻生产存在的问题与建议[J].黑龙江农业科学,2015(1):23-26.

[3]　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.

[4]　彭显龙,刘元英,罗盛国,等.寒地稻田施氮状况与氮素调控对水稻投入和产出的影响[J].东北农业大学学报,2007,38(4):467-472.

[5]　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.

[6]　Mohammed Y A, Chen C C, Jensen T. Urease and nitrification inhibitors impact on winter wheat fertilizer timing, yield, and protein content[J]. Agronomy Journal,2016,108:905-912.

[7]　Martins M R, Sant'Anna S A C, Zaman M, et al. Strategies for the use of urease and nitrification inhibitors with urea: Impact on N_2O and NH_3 emissions, fertilizer ^{15}N recovery and maize yield in a tropical soil[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 247: 54-62.

[8]　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.

[9]　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.

[10]　焦晓光,梁文举,陈利军,等.脲酶/硝化抑制剂对土壤有效态氮、微生物量氮和小麦氮吸收的影响[J].应用生态学报,2004,15(10):1903-1906.

[11]　张磊,曾胜和,高志建,等.不同氮磷配比对滴灌小麦产量及养分利用效率的影响[J].西北农业学报,2012,21(5):79-83.

(下转第 307 页)

下狗牙根 K^+、Na^+ 离子分布及其抗盐性的评价[J].中国草地,2004,26(5):37-42.

[14] 刘正祥,张华新,杨秀艳,等.Na_2SO_4 胁迫对沙枣幼苗生长和光合生理的影响[J].林业科学研究 2014,27(2):186-194.

[15] Nguyen H, Calvo P M, Zwiazek J J. Gas exchange and growth responses of ectomycorrhizal *Picea mariana*, *Picea glauca*, and *Pinus banksiana* seedlings to NaCl and Na_2SO_4[J]. Plant Biology,2006,8(5):646-652.

[16] 汪霞,马啸,张新全,等.四种不同钠盐胁迫对多花黑麦草种子萌发的影响[J].中国草地学报,2014,36(4):44-51.

[17] 杨志民,李志华.矮壮素对高羊茅生长特性影响的研究[J].草业科学,2005,22(2):31-33.

[18] 白小明,王靖婷,贺佳圆,等.8 个野生早熟禾种子萌发期耐盐性研究[J].草地学报,2013,21(3):546-555.

[19] Turgeon A J. Turfgrass management[C].9th ed. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 2011.

[20] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].2 版.北京:高等教育出版社,2006:134-282.

[21] 宋娅丽,王克勤,王莎,等.3 种冷季型草坪草对持续干旱、高温及其互作的生理生态响应[J].草地学报,2018,26(3):705-717.

[22] 杜利霞,董宽虎,乔志宏,等.NaCl 胁迫对赖草幼苗生理特性的影响[J].草原与草坪,2013,33(1):1-10.

[23] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology,2008,59:651-681.

[24] 鲁艳,雷加强,曾凡江,等.NaCl 处理对梭梭生长及生理生态特征的影响[J].草业学报,2014,23(3):152-159.

[25] Salter J, Morris K, Bailey P C E, et al. Interactive effects of salinity and water depth on the growth of *Melaleuc aericifolia* Sm. (Swamp paperbark) seedlings[J]. Aquatic Botany,2007,86(3):213-222.

[26] 陆銮眉,吴福妹,张琼,等.NaCl 胁迫对大黄龙船花生长及生理生化的影响[J].热带亚热带植物学报,2015,23(3):262-267.

[27] Rouhi V, Samson R, Lemeur R, et al.Photosynthetic gas exchange characteristics in three different almond species during drought stress and subsequent recovery[J]. Environmental and Experimental Botany,2007,59(2):117-129.

[28] 郭艳超,孙昌禹,王文成,等.NaC1 胁迫对美蓉葵种子萌发和种苗生长的影响[J].西北农业学报,2012,21(3):158-163.

[29] Tommasino E, Grifa S, Grunberg K, et al.Malondialdehyde content as a potential biochemical indicator of tolerance *Cenchrus ciliaris* L. genotypes under heat stress treatment[J]. Grass and Forage Science,2012,67:456-459.

(上接第 179 页)

[12] 姬景红,李玉影,刘双全,等.氮肥调控对白浆土水稻产量效益及氮肥利用效率的影响[J].土壤通报,2012,43(1):136-140.

[13] 宋添星,彭显龙,刘元英,等.实地氮肥管理对寒地水稻品质的影响[J].东北农业大学学报,2007,38(5):590-593.

[14] 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.

[15] 宋燕燕,赵秀娟,张淑香,等.水肥一体化配合硝化/脲酶抑制剂实现油菜减氮增效研究[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):632-640.

[16] 赵自超,韩笑,石岳峰,等.硝化和脲酶抑制剂对华北冬小麦—夏玉米轮作固碳减排效果评价[J].农业工程学报,2016,32(6):254-262.

[17] 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的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(6):1411-1419.

[18] 孙志梅,刘艳军,梁文举,等.新型脲酶抑制剂 LNS 与双氰胺配合施用对菜田土壤尿素氮转化及蔬菜生长的影响[J].土壤通报,2005,36(5):803-805.

[19] 李雨繁,贾可,王金艳,等.不同类型高氮复混(合)肥氨挥发特性及其对氮素平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(3):615-623.

[20] 韩蔚娟,王寅,陈海潇,等.黑土区玉米施用新型肥料的效果和环境效应[J].水土保持学报,2016,30(2):307-311.

[21] 鲁艳红,聂军,廖育林,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.

[22] 隽英华,陈利军,武志杰,等.脲酶/硝化抑制剂在土壤 N 转化过程中的作用[J].土壤通报,2007,38(4):773-780.

[23] 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.

[24] Lam S K, Suter H, Mosier A R, et al. Using nitrification inhibitors to mitigate agricultural N_2O emission: A double-edged sword? [J] Global Change Biology, 2017,23:485-489.