

稳定氮肥用量和施用方式对水稻产量和氮肥效率的影响

李 敏^{1,2,3}, 叶舒娅^{1,3}, 刘 枫^{1,3}, 郭熙盛^{1,3}, 武 际^{1,3}, 黄义德², 郭肖颖⁴

(1.安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 安徽 合肥 230031; 2.安徽农业大学农学院, 安徽 合肥 230036; 3.安徽养分循环与资源环境省级实验室, 安徽 合肥 230031; 4.安徽省农业科学院农业工程研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要:通过田间小区试验,研究了稳定氮肥用量及施用方式对水稻产量、氮素累积量、氮肥利用效率、经济效益及土壤养分含量的影响。结果表明,与不施稳定氮肥相比,100%稳定氮肥一次施用、100%稳定氮肥分次施用、85%稳定氮肥一次施用和70%稳定氮肥一次施用分别增产53.1%、61.6%、39.7%和36.7%,植株地上部氮素总累积量分别增加64.0%、80.9%、36.0%和32.3%,经济效益分别增加50.4%、59.5%、37.4%和34.5%。与农民习惯等氮施肥相比,稳定氮肥一次施用和分次施用分别增产5.7%和11.6%,植株地上部氮素总累积量分别增加9.9%和21.2%,经济效益分别增加5.8%和12.2%。等氮施用稳定氮肥较农民习惯施肥促进水稻对氮素的吸收累积,提高了产量,分次施用达到显著性差异。稳定氮肥一次施用和分次施用氮肥表观利用率和农学效率高于农民习惯施肥,且分次施用达到显著性差异,生理效率和偏生产力3处理无显著性差异。施用稳定氮肥能够提高土壤碱解氮含量,且随着施用量增加而增大。稳定氮肥施氮量在240 kg N·hm⁻²且基肥与分蘖肥6:4分次施用,能较好地协调水稻高产与稳定氮肥合理利用的统一。

关键词:稳定氮肥;水稻;产量;施用方式;氮肥效率

中图分类号:S145.6

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)06-0559-06

doi: 10.13254/j.jare.2015.0157

Effects of Stabilized Nitrogen Fertilizer Application Amount and Application Methods on Yield and Nitrogen Efficiency of Rice

LI Min^{1,2,3}, YE Shu-ya^{1,3}, LIU Feng^{1,3}, GUO Xi-sheng^{1,3}, WU Ji^{1,3}, HUANG Yi-de², GUO Xiao-ying⁴

(1.Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 2.College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3.Laboratory of Nutrient Cycling, Resources and Environment of Anhui, Hefei 230031, China; 4.Institute of Agricultural Engineering, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: A rice field experiment was carried out in Anhui Province in 2014 to investigate the effects of stabilized N fertilizer (SNF) application amount and its application methods on rice yield, nitrogen accumulation, nitrogen use efficiency (NUE) of rice, economic efficiency and soil nutrients. Compared with non-stabilized nitrogen fertilizer, the yield of SNF treatments as 100% one application, 100% split application, 85% one application and 70% N one application increased 53.1%, 61.6%, 39.7% and 36.7% respectively, total N accumulated by aboveground parts increased 64.0%, 80.9%, 36.0% and 32.3%, and economic benefits increased 50.4%, 59.5%, 37.4% and 34.5% respectively. Compared with local farmer fertilizer practice, the yield of SNF treatments as 100% and 100% split application increased 5.7% and 11.6% respectively. Total N absorbed by aboveground parts increased 9.9% and 21.2%, and economic benefits increased 5.8% and 12.2% respectively. At the same N application amount, SNF with 100% promoted rice yield and N accumulation compared with farmer fertilizer practice and the split application had even more significant difference. The nitrogen apparent efficiency and nitrogen agronomic efficiency of SNF with 100% was higher than farmer fertilizer practice and the split application had even more significant difference. The three treatments of nitrogen physiological efficiency and nitrogen partial factor productivity had no significant difference. SNF could increase soil available nitrogen content, which was increased with the increasing application amount. Based on rice yield and NUE, the optimum SNF application amount was 240 kgN·hm⁻² with the ratio of basal fertilizer to tiller fertilizer of 6:4.

Keywords: stabilized nitrogen fertilizer; rice; yield; application methods; nitrogen efficiency

收稿日期:2015-06-20

基金项目:施可丰稳定性专用肥试验示范网络项目;安徽省科技厅项目(1406c085025);公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503122);安徽省农业科学院学科建设项目(15A1011);安徽省农业科学院院长青年创新基金(13B1042)

作者简介:李 敏(1979—),女,安徽阜阳人,博士研究生,主要从事新型肥料研究。E-mail: limin791025@126.com

氮素对水稻生产的重要性仅次于水,中国水稻生产所消耗的氮肥占世界水稻氮肥总消耗量的 37%,稻田氮肥用量约占氮肥总消费量的 24%左右^[1]。安徽是我国水稻主产省份之一,常年水稻种植面积 220 万 hm^2 左右,水稻种植面积和产量约占全省粮食种植面积和产量的 40%和 50%^[2]。农民常常以施用过量氮肥来获得高产,水稻过量施肥现象普遍存在。中国稻田单季水稻氮肥用量平均为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,这一用量比世界稻田氮肥单位面积平均用量大约高 75%左右^[1]。太湖地区稻季化学氮肥投入量高达 $300 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,以尿素为主^[3]。

稻田氮素损失率高达 30%~70%^[4],氮素利用率低引起的大量损失导致地下水污染和江河湖泊富营养化加剧。调查显示,稻作区稻农饮用的地下水中能检测出铵和硝酸盐^[5]。脲酶抑制剂和硝化抑制剂分别对尿素转化的某一特定过程产生作用,添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂等生物化学方法是减少氮素损失、提高氮肥利用率最为有效和常见的方法^[6]。脲酶抑制剂减缓水稻分蘖期尿素水解和氮素损失,提高孕穗期土壤铵态氮含量,显著增加水稻产量和氮肥利用率^[7]。硝化抑制剂能够抑制铵态氮向硝态氮转化来降低氮素损失,降低氮氧化物排放量^[8]。脲酶抑制剂和硝化抑制剂存在一定的协同作用^[9],配合施用较单独施用能更有效提高氮肥回收率和稻株根际土壤氮素损失^[10]。

近年来随着农田氮磷流失导致的环境污染问题加重,农田氮素合理施用措施之一的环境友好型新型肥料的研发与施用成为研究热点。笔者就旱地玉米稳定氮肥最佳用量已进行系统研究^[11],但针对尿素中添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂复配剂制成稳定氮肥,不同用量和施用方式对水稻产量和氮素效应研究鲜见报道。本试验通过研究稳定氮肥不同用量和施用方式对水稻产量、氮肥利用率、经济效益及土壤养分含量的影响,找出稳定氮肥在安徽水稻最佳用量和施用方式,以期为稳定氮肥在水稻生产中合理施用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2014 年 6 月 5 日—9 月 24 日在安徽省芜湖县六郎镇东八村进行。研究区属亚热带湿润性季风气候,光照充足,雨量充沛,四季分明,年平均气温 $15 \sim 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$,日照时数 2 000 h 左右,年降雨量 1 200 mm,无霜期每年达 219~240 d。当地习惯种植制度为水

稻-油菜两熟制。供试土壤为河流冲积物发育形成的潜育型水稻土砂泥田。供试土壤初始理化性质:全氮 $2.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质 $38.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $158.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷(P) $42.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾(K) $87.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值 6.06。

1.2 供试肥料

稳定氮肥由中国科学院沈阳应用生态研究所提供,为普通尿素中加入脲酶抑制剂氢醌和硝化抑制剂双氰胺复配制成,氢醌和双氰胺配比为 1:2;普通氮肥为尿素,含氮量为 46%;磷肥为过磷酸钙, P_2O_5 含量为 12%;钾肥为氯化钾, K_2O 含量为 60%。

1.3 试验设计

试验共设 6 个处理:(1)无 N 对照(N0);(2)农民习惯施氮 $240 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,分两次 6:4 基肥施用(N1);(3)稳定氮肥 $240 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,一次性基施(N2);(4)稳定氮肥 $240 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,分两次 6:4 基肥施用(N3);(5)85%稳定氮肥 $204 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,一次性基施(N4);(6)70%稳定氮肥 $168 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,一次性基施(N5)。小区面积 $7.50 \text{ m} \times 3.33 \text{ m} = 25 \text{ m}^2$,3 次重复,随机区组排列。

水稻品种为超级稻两优 6326,水稻播期 2014 年 4 月 29 日,6 月 4 日各小区基肥混匀撒施均匀,6 月 5 日水稻移栽,密度为 $27.4 \text{ 万穴} \cdot \text{hm}^{-2}$,9 月 24 日收获。各处理磷钾肥用量相同, P_2O_5 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 K_2O $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,一次性基施。各小区统一按照当地习惯方式进行田间管理。

1.4 测定项目及方法

水稻成熟后,按小区收获脱粒风干后测实产。同时每小区采水稻 2 穴地上部进行室内考种。植株按籽粒和秸秆分开,烘干、称重、粉碎,分析不同部位氮含量,采用 $\text{H}_2\text{O}_2\text{--H}_2\text{SO}_4$ 消煮,凯氏定氮法测定。土壤基本理化性质用常规方法测定^[12]。

收获指数=经济产量/生物产量;

氮肥表观利用率(%)=(施氮区植株总吸氮量-不施氮区植株总吸氮量)/氮肥用量 $\times 100$;

氮肥农学效率($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=(施氮区产量-不施氮区产量)/氮肥用量;

氮肥生理效率($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=(施氮区产量-不施氮区产量)/(施氮区植株总吸氮量-不施氮区植株总吸氮量);

氮肥偏生产力($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=施氮区产量/氮肥用量。

1.5 数据处理

应用 Excel 2003 和 SPSS17.0 统计分析软件进行

数据统计与分析。

2 结果与分析

2.1 稳定氮肥对水稻产量的影响

稳定氮肥施用对水稻产量有显著影响(表 1),施氮处理显著高于不施氮处理。各处理水稻籽粒产量表现为:N3>N2>N1>N4>N5>N0。N3 产量最高,显著高于其他处理,但与 N2 无显著性差异,比 N0 增产 61.6%。等氮施用稳定氮肥处理 N2 和 N3 高于农民习惯 N1 处理,分别增产 5.7%和 11.6%,其中 N3 达到显著性差异水平,说明等氮施用稳定氮肥处理高于农民习惯施氮,且分次施用达到显著性差异。地上部秸秆产量以 N2 最高,与 N3、N4、N1 无显著性差异。收获指数 N3 最高,与其他施氮处理无显著性差异。从水稻产量、秸秆产量和收获指数结果看,N3 处理对提高水稻产量效果最好,说明等氮稳定氮肥分次施用效果最高,其次是一次性施用,均高于农民习惯施氮处理。

2.2 稳定氮肥对水稻产量构成的影响

稳定氮肥对水稻产量构成因素的影响结果见表 2。各处理对水稻株高、结实率和千粒重无显著性影响。穗长以 N0 最高,与 N1、N2、N3 无显著性差异。有效穗数以 N3 最高,与 N1 和 N2 无显著性差异。穗实粒数以 N3 最高,与 N0、N1、N2 无显著性差异。说明施用稳定氮肥 N3 处理通过提高水稻有效穗数和穗

实粒数来提高产量。

2.3 稳定氮肥对水稻经济效益的影响

不同肥料组合的经济效益分析结果见表 3。由表 3 可以看出,施用稳定氮肥处理经济效益显著高于不施氮 N0 处理,收益比 N0 增加 34.5%~59.5%。各施氮处理以 N3 处理最高,其次为 N2,均高于农民习惯施氮处理 N1,N2 和 N3 比 N1 分别增收 1 290.5 元·hm⁻²和 2 718.6 元·hm⁻²,收益增加 5.8%和 12.2%。

2.4 稳定氮肥对水稻氮素累积量的影响

稳定氮肥对水稻氮素吸收累积量的影响结果表明(表 4),籽粒和秸秆吸氮量以 N3 最高,与 N2 秸秆吸氮量无显著性差异,显著高于其他施氮处理。总吸氮量以 N3 最高,显著高于其他施氮处理,其次为 N2,显著高于农民习惯 N1 处理。氮素在籽粒中分配比例以 N5 最高,其次为 N3 和 N1。说明稳定氮肥分次施用能够较农民习惯施氮显著提高水稻吸氮量。

2.5 稳定氮肥对水稻氮肥利用率的影响

氮肥表观利用率、氮肥农学利用率、氮肥生理利用率和氮肥偏生产力从不同的侧面描述了作物对氮素或氮肥的利用率^[13]。本试验研究结果表明(表 5),氮肥表观利用率以 N3 处理最高,显著高于其他施氮处理,其次为 N2 处理,但与 N1 农民习惯施氮处理无显著性差异。农学效率以 N3 最高,显著高于 N1,但与其他施氮处理无显著性差异。生理利用率以 N5 最高,

表 1 稳定氮肥对水稻产量的影响

Table 1 Effects of stabilized nitrogen fertilizer on rice yield

处理	产量/kg·hm ⁻²	比 N0		比 N1		秸秆/kg·hm ⁻²	收获指数
		增产量/kg·hm ⁻²	增产率/%	增产量/kg·hm ⁻²	增产率/%		
N0	6 189.5±545.3d	—	—	—	—	8 809.5±765.3b	0.41±0.01b
N1	8 963.7±670.2bc	2 774.2	44.8	—	—	9 375.5±809.0ab	0.49±0.03a
N2	9 473.3±83.2ab	3 283.8	53.1	509.6	5.7	9 896.6±909.4a	0.49±0.03a
N3	10 002.2±142.7a	3 812.7	61.6	1 038.5	11.6	9 832.8±428.6a	0.50±0.01a
N4	8 646.6±224.9c	2 457.1	39.7	-317.1	-3.5	9 297.8±518.5ab	0.48±0.01a
N5	8 457.6±470.7c	2 268.1	36.7	-506.1	-5.7	8 806.8±271.9b	0.49±0.02a

注:同列不同字母表示各处理差异显著(P<0.05)。下同。

表 2 稳定氮肥对水稻产量构成的影响

Table 2 Effects of stabilized nitrogen fertilizer on the yield components of rice

处理	株高/cm	穗长/cm	有效穗数/万穗·hm ⁻²	结实率/%	穗实粒数/粒·穗 ⁻¹	千粒重/g
N0	110.2±2.7a	25.9±1.1a	160.3±7.0c	0.81±0.1a	159.1±13.8a	25.4±1.5a
N1	117.4±2.8a	25.5±0.6ab	211.5±9.1ab	0.86±0.0a	161.0±13.6a	25.8±0.8a
N2	117.0±5.4a	25.1±0.5abc	230.8±19.2a	0.90±0.0a	165.0±4.9a	26.2±0.4a
N3	114.5±6.4a	24.8±0.3abc	234.0±11.1a	0.90±0.0a	177.5±12.6a	26.5±0.5a
N4	114.2±6.3a	24.2±0.4bc	198.7±14.7b	0.85±0.0a	135.1±14.2b	25.8±0.1a
N5	118.7±5.3a	23.8±1.5c	198.7±5.7b	0.83±0.1a	127.1±6.2b	25.9±0.8a

与N4 无显著性差异。偏生产力以 N5 最高,显著高于其他施氮处理,施用稳定氮肥各处理均高于农民习惯施氮 N1 处理。

2.6 稳定氮肥对水稻收获后土壤养分含量的影响

稳定氮肥施用对水稻收获后土壤养分含量的影响结果得出(表 6),施用稳定氮肥主要影响土壤碱解氮含量,对土壤全氮、有效磷、速效钾含量影响不明显,主要原因可能是由于本试验地本底土壤养分含量高造成。施氮能够增加碱解氮含量,各施氮处理以 N3 最高,碱解氮含量排序为 N3>N2>N1>N4>N5>N0,等氮施用抑制剂处理 N2 和 N3 处理高于农民习惯施肥处理 N1。

3 讨论

尿素作为农业生产上最常用的氮肥品种,在脲酶催化作用下迅速水解成铵离子,石灰性土壤上 4 d 内完全水解^[14]。脲酶抑制剂与硝化抑制剂同时施用可减缓尿素水解和硝化作用^[15-16]。张学学等^[17]研究表明,尿素中添加脲酶抑制剂与传统单施尿素相比,早、晚稻

分别增产 8.54%和 12.87%。叶会财等^[18]研究表明,尿素配施 0.75%脲酶抑制剂水稻增产 14.75%。本试验的水稻产量结果表明,等氮施用稳定氮肥处理水稻产量高于农民习惯施氮处理,增产5.7%~11.6%,且分次施用稳定氮肥达到显著性差异,与前人研究结果一致。生物产量的高低是籽粒产量的基础^[18],等氮施用稳定氮肥较农民习惯施氮显著提高水稻生物产量。施用稳定氮肥通过提高水稻产量构成中的有效穗数、穗实粒数来提高水稻产量。稳定氮肥通过向尿素添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂延缓尿素水解及水解后的硝化作用,达到更好调节尿素氮素的转化,进而有效提高水稻产量。

氮肥施用过量造成损失严重、氮肥利用率低一直是困扰水稻生产的现实问题。我国农田化学氮肥当季作物吸收利用率约为 35%,实际上高产高肥地区可能低于 25%^[19]。李荣刚^[20]报道,江苏省水稻的氮肥利用率仅 19.90%。而本试验结果农民习惯施氮水稻氮肥表观利用率仅为 17.76%,主要原因是由于供试土壤基础肥力高,氮肥损失严重。前人研究表明,尿素中添加硝化抑制剂能够提高水稻植株地上部及籽粒的吸氮量,促进水稻氮素营养,提高水稻产量^[21],添加脲酶抑制剂早晚稻氮肥当季利用率分别提高 6.78% 和

表 3 稳定氮肥对水稻经济效益的影响
Table 3 Effects of stabilized nitrogen fertilizer on economic benefits of rice

处理	产值/ 元·hm ⁻²	肥料成本/ 元·hm ⁻²	收益/ 元·hm ⁻²	收入比 N0 增加/%	收入比 N1 增加/%
N0	16 711.5	1 040.0	15 671.6	—	—
N1	24 201.8	1 926.9	22 274.9	42.1	—
N2	25 577.9	2 012.6	23 565.3	50.4	5.8
N3	27 006.0	2 012.6	24 993.5	59.5	12.2
N4	23 346.0	1 819.8	21 526.2	37.4	-3.4
N5	22 835.6	1 751.9	21 083.7	34.5	-5.4

注:水稻收购价 2.7 元·kg⁻¹,粒状过磷酸钙 800 元·t⁻¹,粉状氯化钾 3 200 元·t⁻¹,尿素 1 700 元·t⁻¹,抑制剂 10 000 元·t⁻¹,稳定氮肥 2 500 元·t⁻¹。

表 4 稳定氮肥对水稻氮素累积量的影响
Table 4 Effects of stabilized nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation of rice

处理	籽粒吸氮量/ kg·hm ⁻²	秸秆吸氮量/ kg·hm ⁻²	总吸氮量/ kg·hm ⁻²	分配比例/%	
				籽粒	秸秆
N0	52.95±4.68d	43.35±5.56d	93.45±6.67e	56.66	43.34
N1	83.85±6.26bc	55.65±4.78bc	139.50±7.90c	60.12	39.88
N2	90.60±0.80b	62.70±7.90ab	153.30±8.14b	59.13	40.87
N3	102.75±1.47a	66.30±2.89a	169.05±2.35a	60.79	39.21
N4	75.00±1.95c	52.05±2.91cd	127.05±4.02d	58.99	41.01
N5	76.80±4.27c	46.80±1.45cd	123.60±4.25d	62.15	37.85

表 5 稳定氮肥对水稻氮肥利用率的影响
Table 5 Effects of stabilized nitrogen fertilizer on N use efficiency of rice

处理	氮肥表观利用/ %	氮肥农学效率/ kg·kg ⁻¹	氮肥生理利用率/ kg·kg ⁻¹	氮肥偏生产力/ kg·kg ⁻¹
N0	—	—	—	—
N1	17.76±1.34bc	11.56±1.54b	65.71±13.44bc	37.35±2.79b
N2	23.66±1.95b	13.68±2.28ab	57.92±7.65c	39.47±0.35b
N3	30.20±5.17a	15.89±2.07a	52.54±2.02c	41.68±0.59b
N4	15.05±3.24c	12.05±2.25ab	80.90±2.22ab	42.39±1.10b
N5	16.15±4.47c	13.50±1.83ab	86.46±16.70a	50.35±2.80a

表 6 稳定氮肥对水稻收获后土壤养分含量的影响
Table 6 Effects of stabilized nitrogen fertilizer on soil nutrients content after rice harvest

处理	全氮/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
N0	2.31±0.02c	175.06±2.18c	46.48±0.22a	113.26±4.23a
N1	2.37±0.05b	182.09±2.80ab	47.08±0.94a	94.65±13.83a
N2	2.40±0.01ab	185.52±4.34a	47.94±0.52a	101.96±10.03a
N3	2.44±0.01a	187.05±3.24a	50.15±0.14a	103.83±3.55a
N4	2.39±0.02ab	181.82±2.08ab	47.76±1.39a	109.00±13.42a
N5	2.39±0.01ab	179.24±2.48bc	45.56±1.98a	99.65±6.30a

9.46%^[17],氮肥农学利用率提高 18.41%^[18]。本试验结果表明,等氮施用稳定氮肥处理氮肥表观利用率均高于农民习惯施氮,以 N3 最高,显著高于其他施氮处理,其次为 N2 处理,但与 N1 和 N5 无显著性差异。等氮施用稳定氮肥农学利用率高于农民习惯施氮,N3 较 N1 达到显著性差异。说明水稻施用稳定氮肥可以有效提高氮肥表观利用率和农学利用率。稻田施用稳定氮肥是减少稻田氮素损失、提高氮肥利用率的有效途径之一,具有广阔的应用前景。

本试验结果表明,等氮施用稳定氮肥处理土壤碱解氮含量均高于农民习惯施氮,以 N3 最高。这与尿素中添加脲酶抑制剂/硝化抑制剂处理作物成熟后土壤有效氮含量显著高于单施尿素处理^[22],有效提高水稻孕穗期土壤铵态氮含量结果一致^[17]。原因可能在于尿素中添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂能增加了微生物在作物生长初期对有效态 N 固持,有利于后期土壤有效态 N 的矿化^[23],说明施用含抑制剂的稳定氮肥能有效提高土壤有效氮含量。

4 结论

稳定氮肥通过向尿素中添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂能够有效减少氮素损失,提高水稻产量、经济效益和氮肥利用效率。本试验综合水稻产量、氮素利用效率、经济效益和土壤养分结果得出,等氮施用稳定氮肥优于农民习惯施氮,稳定氮肥用量 240 kg N·hm⁻² 且基肥与分蘖肥 6:4 分次施用在水稻上应用效果最佳。

参考文献:

- [1] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.
PENG Shao-bing, HUANG Jian-liang, ZHONG Xu-hua, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1095-1103. (in Chinese)
- [2] 尹海鸥. 安徽水稻种植存在的问题及解决方案[J]. 商品与质量, 2014 (5): 335-336.
YIN Hai-ou. Problems and solutions of rice cultivation in Anhui Province [J]. *Commodity and Quality*, 2014(5): 335-336. (in Chinese)
- [3] 周 杨, 司友斌, 赵 旭, 等. 太湖流域稻麦轮作农田氮肥施用状况、问题和对策[J]. 土壤, 2012, 44(3): 510-514.
ZHOU Yang, SI You-bin, ZHAO Xu, et al. Situation, problems and countermeasures in nitrogen fertilization in rice/wheat rotation paddy-field of Taihu Lake watershed, China[J]. *Soils*, 2012, 44(3): 510-514. (in Chinese)
- [4] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
ZHU Zhao-liang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 1-6. (in Chinese)
- [5] Ahmad A R, Zulkefli M, Ahmed M, et al. Environmental impact of agricultural inorganic pollution on groundwater resources of the Kelantan Plain, Malaysia[J]. *ACIAR Proceedings*, 1996, 61: 8-21.
- [6] 隗英华, 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.
JUAN Ying-hua, CHEN Li-jun, WU Zhi-jie, et al. Effect of urease and nitrification inhibitor on soil N transformation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(4): 773-780. (in Chinese)
- [7] 张文学, 孙 刚, 何 萍, 等. 双季稻田添加脲酶抑制剂 NBPT 氮肥的最高减量潜力研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 821-830.
ZHANG Wen-xue, SUN Gang, HE Ping, et al. Highest potential of subtracting nitrogen fertilizer through addition of urease inhibitor NBPT in double-cropping paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 821-830. (in Chinese)
- [8] 王 斌, 李玉娥, 万运帆, 等. 控释肥和添加剂对双季稻温室气体排放影响和减排评价[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 314-323.
WANG Bin, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effect and assessment of controlled release fertilizer and additive treatments on greenhouse gases emission from a double rice field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2): 314-323. (in Chinese)
- [9] 陈利军, 史 奕, 李荣华, 等. 脲酶抑制剂和硝化抑制剂的协同作用对尿素氮转化和 N₂O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4): 365-372.
CHEN Li-jun, SHI Yi, LI Rong-hua, et al. Synergistic effect of urease inhibitor and nitrification on urea-N transformation and N₂O emission [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4): 365-372. (in Chinese)
- [10] 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.
ZHANG Wen-xue, SUN Gang, HE Ping, et al. Effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization from paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(6): 1411-1419. (in Chinese)
- [11] 李 敏, 叶舒娅, 刘 枫, 等. 稳定氮肥用量对夏玉米产量和氮肥利用率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(4): 323-327.
LI Min, YE Shu-ya, LIU Feng, et al. Effects of stabilized nitrogen fertilizer on grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(4): 323-327. (in Chinese)
- [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, 2000.
LU Rui-kun. Analytical methods for soil and agrochemistry[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [13] 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.
ZHANG Fu-suo, WANG Ji-qing, ZHANG Wei-feng, et al. Nutrient

- use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- [14] Dawar K, Zaman M, Rowarth J S, et al. Urea hydrolysis and lateral and vertical movement in the soil: Effects of urease inhibitor and irrigation[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(2): 139-146.
- [15] Gioacchini P, Natri A, Marzadori C. Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36(2): 129-135.
- [16] Xu X K, Zhou L K, Van C O. Fate of urea- ^{15}N in a soil-wheat systems influenced by urease inhibitor hydroquinone and nitrification dicyandiamide[J]. *Plant and Soil*, 2000, 220(1-2): 261-270.
- [17] 张文学, 孙刚, 何萍, 等. 双季稻田添加脲酶抑制剂 NBPT 氮肥的最高减量潜力研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 821-830.
ZHANG Wen-xue, SUN Gang, HE Ping, et al. Highest potential of subtracting nitrogen fertilizer through addition of urease inhibitor NBPT in double-cropping paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 821-830. (in Chinese)
- [18] 叶会财, 李大明, 柳开楼, 等. 脲酶抑制剂配施比例对红壤双季稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 909-912.
YE Hui-cai, LI Da-ming, LIU Kai-lou, et al. Effects of combined application rate of urease inhibitor on rice yield in red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 45(4): 909-912. (in Chinese)
- [19] 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.
ZHU Zhao-liang, JIN Ji-yun. Fertilizer use and food security in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese)
- [20] 李荣刚. 高产农田氮素肥效与调控途径—以江苏太湖地区稻麦两熟农区为例推及全省[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2000.
LI Rong-gang. Efficiency and regulation of fertilizer nitrogen in high-yield farmland: A case study on rice and wheat double maturing system agriculture area of Tai Lake for deducing to Jiangsu Province[D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese)
- [21] 许超, 吴良欢, 郑寨生, 等. 含硝化抑制剂(DMPP)氮肥对水稻产量及氮素吸收的影响[J]. 浙江农业科学, 2003(2): 75-78.
XU Chao, WU Liang-huan, ZHENG Zhai-sheng, et al. Effects of nitrogen containing nitrification inhibitors (DMPP) on the yield of rice and nitrogen uptake[J]. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 2003(2): 75-78. (in Chinese)
- [22] 华建峰, 蒋倩, 施春健, 等. 脲酶/硝化抑制剂对土壤脲酶活性、有效态氮及春小麦产量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 94-99.
HUA Jian-feng, JIANG Qian, SHI Chun-jian, et al. Effects of urease/nitrification inhibitors on soil urease activity, soil available N and the yield of spring wheat[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(1): 94-99. (in Chinese)
- [23] 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.
JIAO Xiao-guang, LIANG Wen-ju, CHEN Li-jun, et al. Effects of urease/nitrification inhibitors on soil available N and microbial biomass N and on N uptake of Wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1903-1906. (in Chinese)