

尿素添加硝化抑制剂 DMPP 对稻田土壤不同形态矿质态氮的影响

俞巧钢^{1,2}, 陈英旭¹

(1.浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029; 2.浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021)

摘要:采用小粉土和青紫泥两种典型土壤种植水稻,研究尿素添加新型硝化抑制剂 3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)对土壤氮素转化及水稻生物学效应的影响。结果表明,水稻田施用含 DMPP 硝化抑制剂的尿素,与常规尿素处理相比,小粉土和青紫泥土壤中铵态氮浓度分别增加 94.6%~97.9%和 55.4%~65.1%,硝态氮浓度下降 49.0%~81.3%和 33.9%~83.7%,亚硝态氮浓度下降 46.9%~90.9%和 53.7%~90.2%。添加 DMPP 抑制剂于尿素,小粉土和青紫泥处理水稻的产量增加 24.9%和 14.2%,生物量增加 20.6%和 14.4%,吸氮量增加 15.3%和 22.5%。DMPP 抑制剂可有效保持土壤高铵态氮浓度、低硝态氮与亚硝态氮浓度,促进水稻对氮素的吸收利用,提高氮素利用率。

关键词:硝化抑制剂;3,4-二甲基吡唑磷酸盐;稻田;氮素转化;尿素

中图分类号:XS143.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)07-1357-07

Effect of the Urea with Nitrification Inhibitor DMPP Addition on Different Form Nitrogen Transformation in Rice Fields

YU Qiao-gang^{1,2}, CHEN Ying-xu¹

(1.College of Natural Resources and Environmental Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 2.Institute of Environment, Resource, Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: In a rice pot incubation experiment, the effect of nitrogen transformation and rice growth were studied by applied urea with new nitrification inhibitor 3,4-dimethyl pyrazole phosphate (DMPP) in the powder soil and blue clayey paddy soil. The results showed that, in the powder soil and blue clayey paddy soil, the ammonium concentration were increased 94.6% to 97.9% and 55.4% to 65.1%, nitrate nitrogen concentrations were declined 49.0% to 81.3% and 33.9% to 83.7%, and nitrite nitrogen concentrations were declined 46.9% to 90.9% and 53.7% to 90.2%, respectively. DMPP could stimulate the nitrogen uptake, improve the rice yields 24.9% and 14.2%, increase biomass amount 20.6% and 14.4%, in the powder soil and blue clayey paddy soil, respectively. The nitrogen adsorption amount was also increased 15.3% and 22.5% in the powder soil and blue clayey paddy soil, improving the nitrogen use efficiency in rice production. The nitrification inhibitor DMPP addition in the urea could effectively sustain the high ammonium nitrogen concentration and low nitrate and nitrite nitrogen concentrations in the soil, increase the nitrogen uptake by rice and improve the nitrogen use efficiency.

Keywords: nitrification inhibitor; 3,4-dimethyl pyrazole phosphate; rice fields; nitrogen transformation; urea

水体生态环境的恶化,很大程度上归因于农田面源氮磷等营养型污染物^[1-2]。近年来,我国沿海稻田不

断增加氮肥用量使水稻获得高产,但氮肥利用率低,损失严重引发地表水和地下水污染^[3-4]。因此,如何调控肥料氮在土壤中的转化进程,以促进它的有效利用,并控制其对环境质量可能产生的不利影响,实现肥料氮在生态系统中的良性循环^[5-7],一直是当前土壤氮素研究的热点和难点问题。提高肥料氮利用率的重要途径之一是改善氮肥性能,如氮肥中加入硝化抑制

收稿日期:2011-01-02

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2002CB410807);浙江省自然科学基金项目(Y3090180)

作者简介:俞巧钢(1973—),男,博士,副研究员,主要从事农业环境污染控制与废弃物资源化的相关研究。

E-mail: yqganghzzj@sina.com

剂,延缓铵态氮向硝态氮的转化,利用土壤对铵态氮和硝态氮不同的生化特性,减轻氮素流失^[5,8-12]。双氰胺和西吡啶是近年来研究较多的一种硝化抑制剂,但其应用效果欠佳^[11-12]。3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)是一种最近报道的新型硝化抑制剂,据国内外最近的研究,其在减少旱季土壤氮素流失有着优良的效果^[9-10,13-14]。本研究从尿素添加新型硝化抑制剂角度,研究其对渍水环境下土壤氮素迁移转化的影响,提高水稻对氮素的吸收利用,进而为防治水体氮素面源污染提供一定的理论科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试两种土壤为杭嘉湖地区典型小粉土和青紫泥,采样深度为 30 cm,其土壤性质见表 1。水稻品种为早稻浙 852,在 4 月中旬移栽,7 月上旬收获,栽培管理方式与当地习惯相同。

表 1 土壤基本理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil

参数	青紫泥	小粉土
TOC /g·kg ⁻¹	23.1	20.4
TN/g·kg ⁻¹	2.40	1.88
C/N 比	9.61	10.85
全磷/g·kg ⁻¹	0.928	0.740
pH(土:水=1:2.5)	6.80	7.38
CEC/cmole·kg ⁻¹	18.25	9.88
粘粒/%	46.4	29.0
粉粒/%	42.1	62.7
砂粒/%	11.5	8.3

注:TOC 为总有机碳,TN 为全氮,CEC 为阳离子交换量。

1.2 试验内容与分析方法

将土样自然风干、压碎,剔除根系,用孔径大小为 1 mm×1 mm 粗筛过筛,混合均匀后称取 7.5 kg 土壤移入陶瓷盆(20 cm×20 cm×25 cm)中,再分别添加 5 L 去离子水,使土壤保持在淹水泡田的一种状态。1 周后,将表层土壤水排出,将肥料以基肥的形式均匀施入土壤,然后移栽水稻苗 10 棵。在水稻移栽 5 周后,进行第二次的施肥(追肥)。两种土壤的水稻施肥采用以下的处理:(1)对照(CK),不施氮肥;(2)常规尿素(UA);(3)常规尿素+DMPP 抑制剂(DP),各处理重复 3 次,氮肥用量折纯氮为基肥 90 kg·hm⁻²,第二次施肥 90 kg·hm⁻²,DMPP 用量为尿素氮含量的 1%。试验保持水稻淹水 3 cm,10 周后不再加水,让其自然落干,

直到水稻完全成熟。在水稻生长过程中每隔 1 周采集 0~3 cm 层土壤。土壤鲜样用 2 mol·L⁻¹ 的氯化钾提取,流动分析仪测定铵态氮、硝态氮及亚硝态氮。水稻收获后,采集水稻秸秆和稻谷,开氏定氮法测定氮素含量。

1.3 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 10.0 进行统计与方差分析。

2 结果与分析

2.1 氧化层土壤铵态氮的动态变化

氧化层土壤位于土水交换的界面,土水相中的氮素均在此进行传输运移,因此研究氧化层土壤氮素的形态转化具有重要意义。从图 1 可知,第一次施氮后,在小粉土和青紫泥中,常规尿素不断发生水解,形成铵态氮。随后铵态氮一部分进入田面水,另一部分被土壤胶体所固定,使土壤中铵态氮的含量迅速增加。7 d 后,小粉土和青紫泥氧化层土壤的铵态氮分别高达 55.26 mg·kg⁻¹ 和 153.03 mg·kg⁻¹,之后由于水稻的吸收、硝化反应及发生氨挥发的原因,土壤铵态氮含量不断下降,35 d 后分别为 8.99 mg·kg⁻¹ 和 12.58 mg·kg⁻¹,与不施肥处理相近。而加入硝化抑制剂 DMPP 后,对土壤氧化层氮素转化有着明显的影响,小粉土和青紫泥土壤铵态氮同样在 7 d 后达最高峰 88.64 mg·kg⁻¹ 和 207.12 mg·kg⁻¹,使土壤铵态氮分别增加 33.38 mg·kg⁻¹ 和 54.09 mg·kg⁻¹,之后发生平缓下降,但一直高于常规尿素处理,至 35 d 后分别为 16.69 mg·kg⁻¹ 和 70.74 mg·kg⁻¹。第一次施氮 35 d 内,添加 DMPP 抑制剂使小粉土和青紫泥土壤铵态氮的平均浓度增加 97.9%和 55.4%。不施肥处理,土壤铵态氮的变化趋势不明显,一直维持在低浓度的水平。第二次施氮后,氧化层土壤铵态氮的动态变化趋势与第一次施氮相似,7 d 后铵态氮含量达到高峰,但由于水稻后期生长较快,氮素需求量大,所以氧化层土壤铵态氮 7 d 后下降的趋势较快。第二次施氮 35 d 内,添加 DMPP 抑制剂使小粉土和青紫泥土壤中铵态氮的平均浓度增加 94.6%和 65.1%。

2.2 氧化层土壤硝态氮的动态变化

土壤在淹水的条件下,氧气难以进入致使硝化过程不易进行。但在土水界面或水稻根际等氧化微区,由于提供了硝化反应所必需的底物氧气,铵态氮在硝化微生物的作用下,发生形态迁移转化而成为硝态氮。从图 2 可知,在小粉土中和青紫泥中,不施肥处理

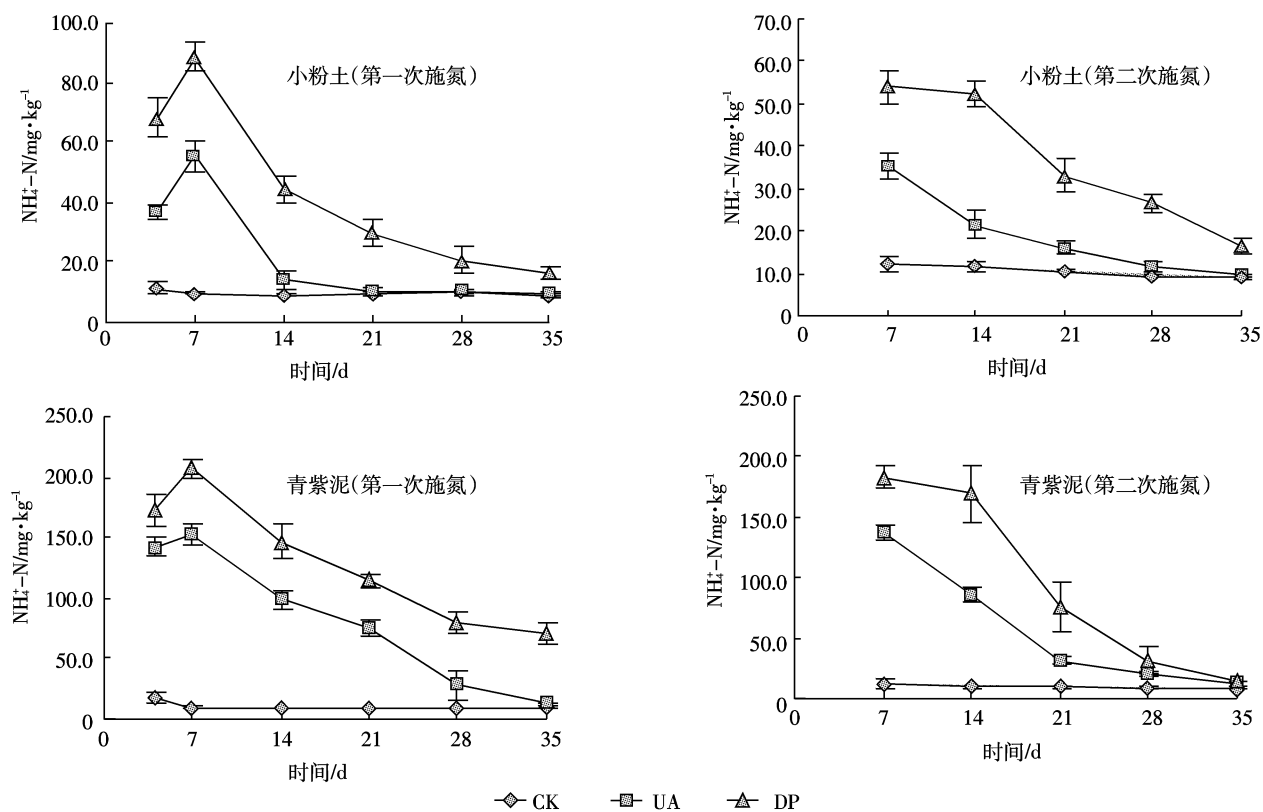


图1 土壤铵态氮的动态变化

Figure 1 Temporal changes of ammonium concentration in the surface soil

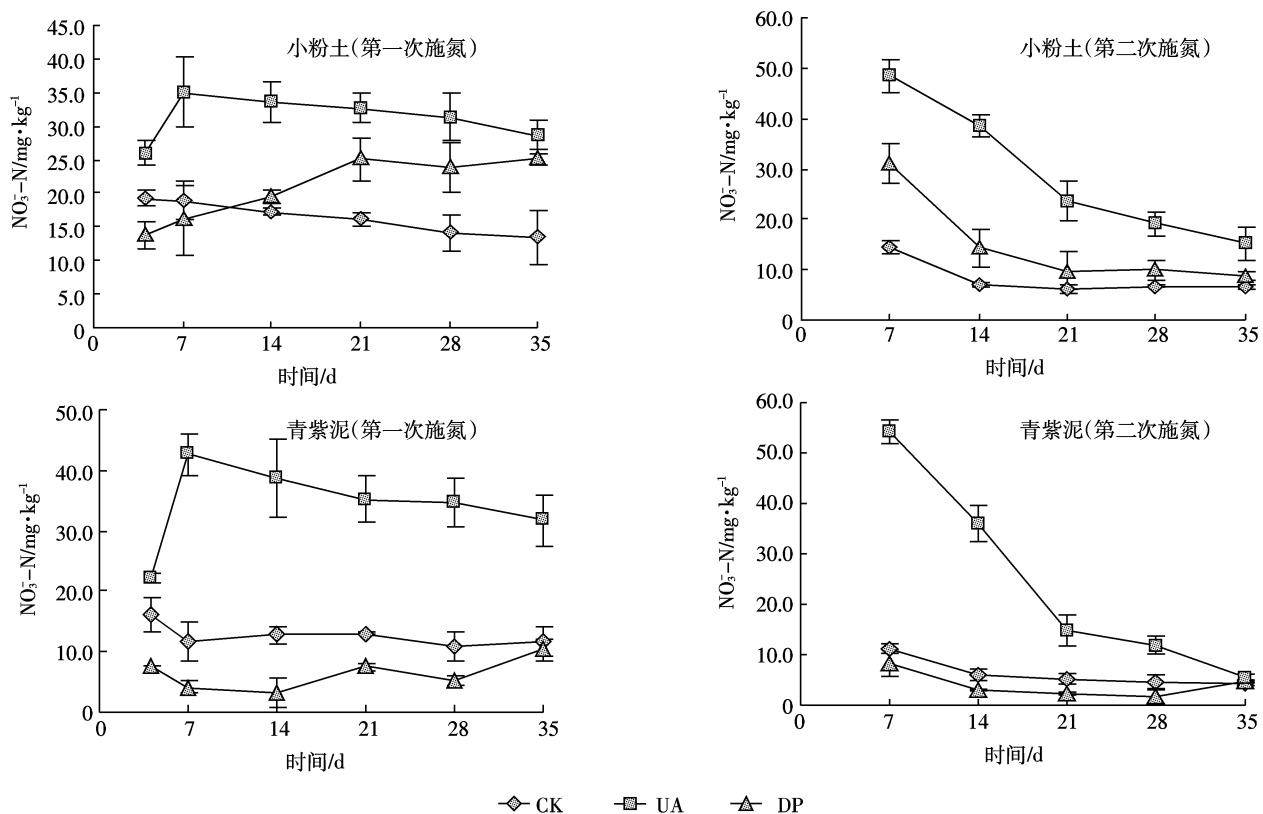


图2 土壤硝态氮的动态变化

Figure 2 Temporal changes of nitrate concentration in the surface soil

硝态氮变化趋势不明显;施用常规尿素后,在 0~7 d 内硝态氮的含量迅速增加至峰值 $35.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $42.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,之后至 35 d 分别保持在 $28.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $31.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上的水平;而使用添加 DMPP 抑制剂尿素后,小粉土处理硝态氮含量在 $13.73 \sim 25.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,青紫泥处理含量在 $7.56 \sim 10.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著低于常规尿素处理,表明能有效抑制该层土壤的硝化反应进程。第一次施氮 35 d 内,添加 DMPP 抑制剂使小粉土和青紫泥土壤硝态氮的平均浓度下降 81.3% 和 33.9%。第二次施氮后,土壤硝态氮同样在 7 d 内达到峰值,但 7~21 d 内硝态氮含量表现为急剧下降的趋势,这可能是因为水稻对铵态氮的大量吸收消耗底物,同时还有一部分硝态氮可能经反硝化作用发生气态迁移。青紫泥土壤硝态氮的含量低于小粉土,表明青紫泥土壤中不易发生硝化进程。第二次施氮 35 d 内,添加 DMPP 抑制剂使小粉土和青紫泥土壤硝态氮的平均浓度下降 49.0% 和 83.7%。

2.3 氧化层土壤亚硝态氮的动态变化

亚硝态氮是铵态氮硝化反应的中间产物,其含量的高低直接与硝化速率大小有关。从图 3 可知,在小粉土中施用常规尿素后,土壤亚硝态氮的含量增加,

第二次施氮后 35 d 内的平均浓度为 $8.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;施用 DMPP 抑制剂尿素,亚硝态氮的含量显著降低,第二次施氮后 35 d 内的平均浓度为 $0.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别比常规尿素降低 90.9% 和 46.9%。在青紫泥中施用常规尿素后,土壤亚硝态氮的含量增加,第二次施氮后在 35 d 内的平均浓度为 $5.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;施用 DMPP 抑制剂尿素,亚硝态氮的含量显著降低,第二次施氮后在 35 d 内的平均浓度为 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别比常规尿素降低 90.2% 和 53.7%。土壤亚硝态氮含量高,以及硝态氮通过扩散过程进入到厌氧区域时,极易促进反硝化反应发生,造成氮素的气态损失,同时引发温室效应的问题,而使用 DMPP 有助于降低亚硝态氮的形成,从而推测可减轻反硝化氮氧化物形成,减轻温室效应的严重后果^[4,11]。

2.4 氧化层土壤无机氮的动态变化

从表 2 氧化层土壤无机氮含量的动态变化分析可知,不施肥的处理,由于水稻生长对氮素的不断吸收消耗,土壤无机氮的含量随时间的延长表现为下降的趋势,但同时由于土壤所含的氮素会不断发生矿化,使其维持在一定的浓度水平。在小粉土和青紫泥

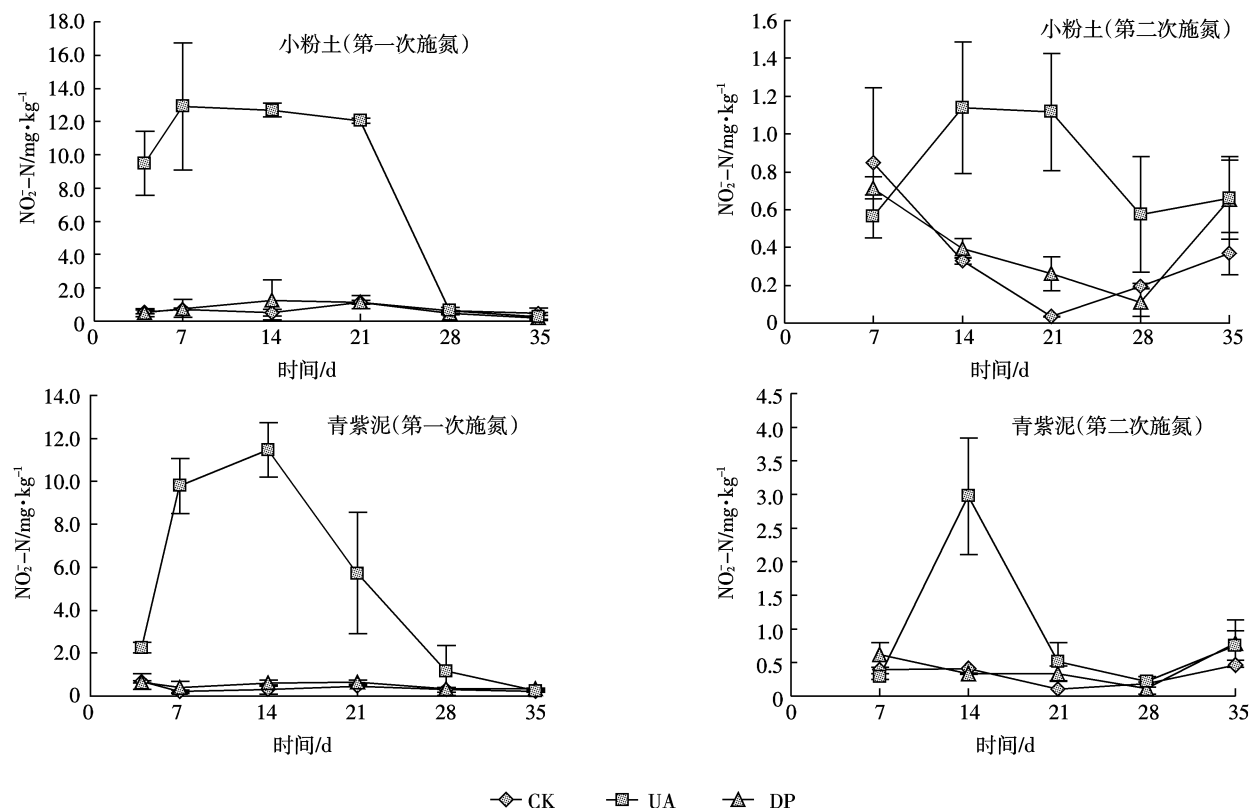


图 3 氧化层土壤亚硝态氮的动态变化

Figure 3 Temporal changes of nitrite concentration in the surface soil

表 2 土壤无机氮含量的动态变化特征($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 Temporal changes of inorganic nitrogen concentration in the surface soil($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理		第一次施氮						第二次施氮				
		4 d	7 d	14 d	21d	28 d	35 d	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d
小粉土	CK	30.94	29.11	26.70	26.69	24.72	22.68	32.63	19.09	16.51	16.23	16.16
	UA	72.33	103.26	60.32	55.12	41.81	37.66	84.43	61.09	40.84	31.14	25.37
	DP	82.35	105.39	65.16	55.75	45.10	42.17	85.89	66.95	42.96	36.62	26.19
青紫泥	CK	33.87	21.54	22.04	22.58	20.10	20.78	24.28	15.76	14.65	13.73	13.43
	UA	165.95	205.48	149.43	115.96	63.75	44.53	191.85	124.84	46.97	33.36	18.22
	DP	181.25	211.74	150.88	122.52	85.15	81.46	192.02	172.84	78.92	33.24	20.29

中,施肥对土壤无机氮含量的增加有着决定性的重要作用。施氮 7 d 后,由于尿素的水解转化完成,其含量达到最高值,之后由于水稻对氮素营养的消耗,土壤无机氮表现为下降趋势。在水稻生长期,常规尿素 70 d 内在小粉土和青紫泥土壤中无机氮的平均含量分别为 $55.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 $105.49\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 添加 DMPP 抑制剂处理分别为 $59.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 $120.94\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 加入 DMPP 抑制剂的土壤无机氮浓度高于常规尿素处理。使用 DMPP 抑制剂,能使土壤无机氮含量分别增高 6.7%和 14.7%, 有利于水稻对氮素的吸收利用,提高氮素利用率。

2.5 DMPP 对水稻生物学性状及氮利用的影响

施用 DMPP 抑制剂对水稻的生物学性状有显著影响(表 3)。在小粉土中,与常规尿素相比,稻谷和秸秆的生物量增加 24.9%和 16.3%, 总生物量增加 20.6%,吸氮量增加 22.5%。在青紫泥中,与常规尿素相比,稻谷和秸秆的生物量增加 14.2%和 14.7%,总生物量增加 14.4%,吸氮量增加 15.3%。施用 DMPP 使氮素利用率提高,同时也促进了水稻对磷吸收,吸磷量增加。

3 讨论

硝化反应过程可分为两个步骤:第一步为 NH_4^+ 氧

化为 NO_2^- , 参与这一步反应的细菌称为铵氧化细菌,亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*)为此类细菌的代表;第二步反应为 NO_2^- 氧化为 NO_3^- ,亚硝酸氧化细菌参与这一步反应,硝化杆菌属(*Nitrobacter*)为此类细菌的代表。这两步反应中,只要有一步反应被抑制,整个硝化反应就被抑制^[11,14]。硝化抑制剂进入土壤后能抑制土壤中亚硝化、硝化和反硝化作用,从而阻碍铵态氮向硝态氮及亚硝态氮的转化过程。小粉土和青紫泥盆栽水稻的试验表明,DMPP 可有效增加两种土壤铵态氮浓度,降低土壤硝态氮和亚硝态氮浓度,这与 DMPP 能有效抑制硝化反应的第一个步骤相符合^[11]。

研究表明,不同作物种类在不同的试验条件下对硝化抑制剂施用的响应不同^[11,14]。但由于抑制剂的施用使土壤中较长时间保持较高的铵态氮含量,减少硝态氮的累积,从而可以使硝态氮的淋溶损失和反硝化损失显著降低^[6,10,13]。土壤胶体可以吸附固持带正电荷的铵态氮,而对带负电荷的硝态氮则起排斥作用,因此土壤硝化率降低,有利于减轻氮素向水体的释放迁移,降低氮素对水体的污染^[9,13]。已有的研究表明,向化学氮肥中添加生化抑制剂来调节氮在土壤中的转化进程,以提高肥料氮的利用率,是一项很有发展潜力的氮肥管理技术,而且抑制剂的施用今后在环境保护方面的作用将大于它对粮食生产的贡献^[5,11,15]。本

表 3 DMPP 对水稻生物学性状及土壤氮利用影响分析

Table 3 Effect of DMPP on rice growth characters and soil nitrogen uptake

土壤	处理	稻谷/g	秸秆/g	生物量/g	含氮量/%	吸氮量/g	含磷量/%	吸磷量/g	氮表观利用率/%
小粉土	CK	4.24c	5.54b	9.78c	2.55b	0.25	1.68c	0.16	—
	UA	6.39b	6.37a	12.76b	3.13a	0.40	2.35b	0.30	28.8
	DP	7.98a	7.41a	15.39a	3.16a	0.49	2.60a	0.40	45.4
青紫泥	CK	7.33c	5.91b	13.24c	2.91b	0.39	2.32c	0.31	—
	UA	10.96b	7.94a	18.91b	3.10a	0.59	2.57b	0.49	37.7
	DP	12.52a	9.11a	21.63a	3.13a	0.68	2.77a	0.60	55.2

注:同一列中不同字母表示差异显著($P<0.05$),LSD 多重比较。

研究表明,DMPP 添加量为尿素氮量的 1%时,可对青紫泥和小粉土中铵氧化过程起到显著的抑制效应,维持土壤较高铵态氮浓度,从而提高水稻产量。施用 DMPP 使水稻增产的效果与许超等人的研究结果相似^[16]。

与硝态氮相比,作物对铵态氮的吸收可以消耗更少的能量,有利于作物生物量的提高^[17]。水稻为喜铵态氮的作物,硝化抑制剂 DMPP 的加入,为水稻吸收尽可能多的铵态氮而提高生物量提供了条件。另外,DMPP 抑制剂的加入,土壤中硝酸盐及亚硝酸盐含量低,能有效降低氮素的反硝化气态脱氮损失,使土壤能保持更多的氮素供给水稻生长^[6,11]。氮素分析结果表明,添加 DMPP 抑制剂,可使水稻干物质含氮量有所增加,吸氮量增加 22.5%(小粉土)和 15.3%(青紫泥),提高水稻对氮素的利用率。青紫泥土壤具有高的 CEC(阳离子交换量)值,尿素水解产生的铵离子可被土壤矿物颗粒大量固定,降低土壤氨挥发损失^[9-10,13-14],致使尿素氮在青紫泥土壤中利用率较高,生物量增加显著。

与小粉土相比,青紫泥土壤粘性强、CEC 值较大,土壤硝化势相对较低。两种土壤施用常规尿素后,青紫泥土壤中铵态氮的含量高于小粉土。因此,在小粉土中施用添加抑制剂的尿素后,DMPP 抑制剂提高铵态氮浓度的效果更明显,这与以前的研究相一致^[10-11,15]。此外,硝化抑制剂 DMPP 的加入,使水稻对磷素的吸收量增加 33.3%(小粉土)和 22.4%(青紫泥)。这可能与水稻对铵态氮的大量吸收有关,根据细胞对铵态氮的交换吸收原理,铵态氮吸收后根际所释放的质子使根际微域土壤 pH 下降,提高了土壤磷素的有效性,从而使水稻对磷素的吸收利用有所增加^[17-19]。

4 结论

(1)硝化抑制剂 DMPP 能显著降低土壤硝化反应的进程,使小粉土和青紫泥土壤铵态氮浓度分别提高 94.6%~97.9%和 55.4%~65.1%,硝态氮浓度分别下降 49.0%~81.3%和 33.9%~83.7%。

(2)施用 DMPP 使小粉土和青紫泥土壤亚硝态氮浓度下降 46.9%~90.9%和 53.7%~90.2%,土壤亚硝态氮含量显著低于常规尿素处理,有效减轻亚硝态氮向水环境迁移的污染风险。

(3)添加 DMPP 抑制剂于尿素,小粉土和青紫泥水稻的产量增加 24.9%和 14.2%,生物量增加 20.6%

和 14.4%,吸氮量增加 15.3%和 22.5%,氮素利用率明显提高。

参考文献:

- [1] Matson P A, Parton W J, Power A G, et al. Agricultural intensification and ecosystem properties[J]. *Science*, 1997, 277: 504-509.
- [2] 王 静,郭熙盛,王允青,等. 保护性耕作与平衡施肥对巢湖流域稻田氮素径流损失及水稻产量的影响研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2010,29(6):1164-1171.
WANG Jing, GUO Xi-sheng, WANG Yun-qing, et al. Effects of conservation tillage and balanced fertilization on nitrogen loss from paddy field and rice yields in chaohu region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010,29(6):1164-1171.
- [3] Camargo J A, Alonso A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment[J]. *Environ Int*, 2006, 32: 831-849.
- [4] Gioacchini P, Nastri A, Marzadori C, et al. Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soil fertilized with urea[J]. *Biol Fert Soils*, 2002, 36:129-135.
- [5] Trenkel M. Improving fertilizer use efficiency controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture[M]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 1997:53-102.
- [6] 串丽敏,赵同科,安志装,等. 添加硝化抑制剂双氰胺对油菜生长及品质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010,29(5):870-874.
CHUAN Li-min, ZHAO Tong-ke, AN Zhi-zhuang, et al. Effects of adding a nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on the growth and quality of rape[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010,29(5):870-874.
- [7] Cookson W R, Cornforth I S. Dicyandiamide slows nitrification in dairy cattle urine patches: Effects on soil solution composition, soil pH and pasture yield[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34:1461-1465.
- [8] 赵言文,刘常珍,胡正义,等. 元素硫和双氰胺对蔬菜地土壤硝态氮淋失的影响[J]. *应用生态学报*, 2005,16(3):496-500.
ZHAO Yan-wen, LIU Chang-zhen, HU Zheng-yi, et al. Effects of elemental sulphur and dicyandiamide on mitigating NO₃-N leaching loss from vegetable soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005,16(3):496-500.
- [9] 俞巧钢,陈英旭. DMPP 对稻田田面水氮素转化及流失潜能的影响 [J]. *中国环境科学*, 2010, 30(9):1274-1280.
YU Qiao-gang, CHEN Ying-xu. Influences of nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate on nitrogen transformation and potential runoff loss in rice fields [J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(9):1274-1280.
- [10] 俞巧钢,陈英旭,张秋玲,等. DMPP 对氮素垂直迁移转化及淋溶损失的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(4):813-818.
YU Qiao-gang, CHEN Ying-xu, ZHANG Qiu-ling, et al. Effect of DMPP on inorganic nitrogen transformation and leaching in vertical flow of simulated soil column[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4):813-818.
- [11] Zerulla W, Barth T, Dressel J, et al. 3,4-dimethylpyrazole phosphate

- (DMPP)—a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture[J]. *Biol Fert Soils*, 2001, 34:118–125.
- [12] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 尿素与 DCD 和有机物料配施条件下氮素的转化和去向[J]. 中国农业科学, 2002, 35(2):181–186.
- JU Xiao-tang, LIU Xue-jun, ZHANG Fu-suo. Nitrogen transformation and fate in soil under the conditions of mixed application of urea with DCD or different organic materials[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35 (2):181–186.
- [13] Yu Q, Ye X, Chen Y, et al. Influences of nitrification inhibitor 3,4-dimethyl pyrazole phosphate on nitrogen and soil salt-ion leaching[J]. *J Environ Sci*, 2008, 20(3): 304–308.
- [14] Serna M D, Banuls J, Quifiones A, et al. Evaluation of 3,4-dimethylpyrazole phosphate as a nitrification inhibitor in a citrus-cultivated soil[J]. *Biol Fert Soils*, 2000, 31(1):41–46.
- [15] Roco M M, Blu R O. Evaluation of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate in two Chilean soils[J]. *J Plant Nutr*, 2006, 29 (3): 521–534.
- [16] 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. Effect of nitrogen fertilizer with nitrification inhibitor(DMPP) on rice yields and nitrogen absorption[J]. *Zhejiang Agriculture Sciences*, 2003(2):75–78.
- [17] Ullrich W R. Transport of nitrate and ammonium through plant membranes[C]//Mengel K, Pilbeam D J, editors. Nitrogen metabolism of plants. Oxford: Clarendon Press, 1992: 121–135.
- [18] Wang M Y, Glass A D M, Shelf J E, et al. Ammonium uptake by rice roots[J]. *Electrophysiology Plant Physiol*, 1994, 104: 899–906.
- [19] Klein H, Priebe A, Jager H J. Putrescine and spermidine in peas: effect of nitrogen source and potassium supply[J]. *Physiol Plant*, 1979, 45: 497–499.