

添加脲酶抑制剂 NBPT 对麦秆还田稻田氨挥发的影响*

彭玉净^{1,2} 田玉华^{1**} 尹斌¹

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008;

2. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 氨挥发是稻田氮素损失的重要途径,为探明脲酶抑制剂 NBPT 对小麦秸秆还田稻田中氨挥发的影响,采用密闭室通气法,在太湖地区乌珊土上,研究了脲酶抑制剂 n-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)对小麦秸秆还田稻田中施肥后尿素水解和氨挥发动态变化的影响。结果表明:稻田氨挥发损失主要集中在基肥和分蘖肥时期。添加 NBPT 可明显延缓尿素水解,推迟田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值出现的时间,并降低 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值,降低了田面水氨挥发速率和挥发量。NBPT 的效果在基肥和分蘖肥施用后尤为明显,不加 NBPT 时施入的尿素在 2~3 d 内基本水解彻底, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和氨挥发速率在第 2 d 即达到峰值,两次施肥后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值分别为 $132.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $66.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨挥发峰值为 $15.6 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $10.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$;而添加 NBPT 后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值推迟至施肥后第 4 d 出现, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值降至 $70.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $51.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨挥发峰值降至 $4.7 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $2.6 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。添加 NBPT 使稻田氨挥发损失总量从 $73.3 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ (占施氮量的 24.4%)降低至 $34.5 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ (占施氮量的 11.5%),降低 53%。在添加小麦秸秆稻田中添加 NBPT 通过延缓尿素水解而显著降低了氨挥发损失。

关键词 稻田 小麦秸秆 尿素 脲酶抑制剂(NBPT) 氨挥发 田面水

中图分类号: S143.1 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2012)01-0019-05

Effects of NBPT urease inhibitor on ammonia volatilization in paddy fields with wheat straw application

PENG Yu-Jing^{1,2}, TIAN Yu-Hua¹, YIN Bin¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture; Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract While ammonia volatilization is the main mode of nitrogen loss in paddy fields, urease inhibitors are known to effectively inhibit urease activity, delay urea hydrolysis and reduce ammonia emission. Urease inhibitors have, however, not been widely applied in paddy fields. In this study, the effects of NBPT urease inhibitor on the dynamic changes in urea hydrolysis and ammonia volatilization in wheat-straw incorporated gley paddy soils in Taihu Lake region were investigated via the dynamic chamber method. Results showed that ammonia volatilization mainly occurred during basal and tillering fertilization periods. While the highest ammonia volatilization was at basal fertilization stage, the lowest was at booting fertilization stage. Ammonia volatilization mainly occurred within three days after fertilization. Applying NBPT one day before fertilization significantly retarded urea hydrolysis, delayed occurring time and decreased value of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ peak and reduced rate and amount of ammonia volatilization of surface water. After basal and tillering fertilization, urea hydrolysis ended within 2~3 days after fertilization, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and ammonia volatilization peaks occurred on the second day under non-NBPT treatment. Peak values of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ of basal and tillering fertilization were $132.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $66.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Also ammonia volatilization peak values were $15.6 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ and $10.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively. Under NBPT treatment, however, the peak of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ occurred 4 days after fertilization after which it dropped to $70.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and then to $51.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. After 4 days of fertilization, ammonia volatilization peak dropped to $4.7 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ and then to $2.6 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. Total ammonia volatilization dropped from $73.3 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ (24.4% of applied N) to $34.5 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ (11.5% of applied N) after NBPT application, a drop of 53%. NBPT application in wheat-straw incorporated paddy fields significantly reduced ammo-

* 国家自然科学基金面上项目(31000940, 41071197)资助

** 通讯作者: 田玉华(1980—), 女, 助理研究员, 主要从事农田氮肥与环境研究。E-mail: yhtian@issas.ac.cn

彭玉净(1986—), 女, 主要从事稻田氮肥与环境研究。E-mail: yjpeng@issas.ac.cn

收稿日期: 2011-04-11 接受日期: 2011-07-29

nia volatilization by delaying urea hydrolysis. It was recommended that NBPT urease inhibitor could be used as nitrogen fertilizer additive to inhibit ammonia loss in paddy fields.

Key words Gley paddy field, Wheat straw, Urea, NBPT urease inhibitor, Ammonia volatilization, Field surface water

(Received Apr. 11, 2011; accepted Jul. 29, 2011)

我国是世界上氮肥消耗量最多的国家, 占世界氮肥消耗量的 30%左右, 其中稻田氮肥用量约占我国氮肥总消费量的 24%左右, 主要是尿素^[1], 而氮肥的当季作物利用率仅为 30%~35%^[2], 甚至更低^[3]。氮挥发是稻田氮肥损失的主要途径之一, 可占施氮量的 10%~60%^[4]。农田生态系统的氮排放与一系列的生态环境问题密切相关, 如水体富营养化、土壤酸化、生物多样性减少等, 农田氮挥发研究已成为近年来国内外农田氮肥研究的热点之一^[5-6]。

稻-麦轮作是太湖地区典型的耕作方式, 为解决秸秆焚烧带来的资源浪费和环境污染问题, 并达到培肥的目的, 在水稻季进行部分或全部麦秆还田已成为一种趋势。有关秸秆还田对土壤养分、理化性质、水稻生长等方面的影响已开展了许多研究, 如长期秸秆还田可以提高土壤的养分水平, 改善土壤结构和理化性状^[7-8]。然而, 有研究表明新鲜秸秆以及植物残留物的存在可增加土壤脲酶活性, 进而促进尿素的氮挥发损失^[9]。脲酶抑制剂通过抑制土壤脲酶活性, 延缓尿素水解, 但受土壤性质和环境影响较大^[10-11]。现今国内外发现的脲酶抑制剂有机和无机化合物有几百种, 主要有重金属盐类、多元酸和醌类等^[12], 广泛采用的主要有 NBPT(n-丁基硫代磷酰三胺)和 HQ(氢醌)^[13]。

采用合适的脲酶抑制剂是一项有效降低稻田氮挥发损失的技术措施, NBPT 是目前商品化的土壤脲酶抑制剂之一, 是一种较弱的植物或微生物脲酶抑制剂, 而其在土壤中衍生的 NBPTO 为一种有潜力的脲酶抑制剂。NBPT 在非酸性、通气性良好的农田中, 对于延缓尿素水解, 提高尿素氮肥的利用率十分有效^[14-16], 而在水稻田中对氮肥损失的影响结果不一致^[17]。在秸秆还田的淹水稻田中, NBPT 对于氮挥发的效果还不清楚, 相关研究还少有报道。

本研究采用密闭室通气法研究了部分秸秆还田下 NBPT 对稻田施肥后尿素水解动态、氮挥发速率和损失量的影响, 同时监测了氮挥发的相关影响因素, 旨在阐明脲酶抑制剂(NBPT)对部分秸秆还田情况下稻田氮挥发过程和数量的影响, 为减少稻田氮肥损失、提高氮肥利用率提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验在中国科学院常熟农业生态实验站

(120°41'88" E, 31°32'93"N)进行。该站位于太湖流域, 属亚热带湿润气候区, 年均气温 15.5 °C, 年均降雨量 1 038 mm, 无霜期 224 d。6~10 月份日照强烈, 最高气温 38 °C 左右。土壤为普通潜育水耕人为土(乌栅土), 0~15 cm 土壤有机质含量 35.0 g·kg⁻¹、全氮 2.01 g·kg⁻¹、速效氮(无机氮)12.4 mg·kg⁻¹、速效磷 5.0 mg·kg⁻¹、速效钾 121.3 mg·kg⁻¹、CEC 17.7 cmol·kg⁻¹, pH 7.35。

1.2 试验设计

在水稻品种、磷钾肥用量、小麦秸秆还田量、田间基本管理如灌水、植保等相同的条件下, 设置对照 CK(不施氮肥)、N1(施氮 300 kg·hm⁻²)和 N1+NBPT(施氮 300 kg·hm⁻²、添加脲酶抑制剂 NBPT)3 个处理, 每个处理 3 个重复, 氮肥品种为尿素(N 460 g·kg⁻¹), 磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 160 g·kg⁻¹), 钾肥为氯化钾(K₂O 600 g·kg⁻¹)。根据当地农民习惯, 氮肥分 3 次施用, 基肥: 分蘖肥: 孕穗肥=5: 3: 2, 3 次施肥时间分别为 6 月 23 日、7 月 8 日、8 月 10 日, 每次施肥均在傍晚进行, 脲酶抑制剂为氮肥用量的 0.14%, 溶于适量水中于施肥前一天施用, 与田面水均匀混合。磷肥用量为 90 kg(P₂O₅)·hm⁻², 钾肥为 90 kg(K₂O)·hm⁻², 磷钾肥做基肥与氮肥一起一次性施入, 6 月 20 日将小麦秸秆与 0~10 cm 土层混合并做淹水处理, 秸秆用量 4.8 t·hm⁻²。水稻于 2010 年 6 月 22 日移栽, 10 月 20 日收获。

为更好地控制各处理间除氮肥和脲酶抑制剂以外的其他条件(如灌水、施肥均匀性等)的一致性, 本试验采用田间大型盆栽法, 盆栽用桶直径 35 cm, 高度 42 cm, 为保证水稻生长水热条件与田间一致, 将桶的下半部埋入田中, 上方 15 cm 露出地面, 每盆装表层水稻土 12 kg(折合成干土), 种植 3 株水稻, 品种为当地“常优 3 号”, 除收获前 2 周停止灌水, 其余时间保持 3~5 cm 水层, 灌溉水为试验地点旁的河水。

1.3 监测内容与方 法

氮挥发采用密闭室通气法^[18-19]并加以改进, 为减少抽气过程中空气中颗粒物对测定结果的干扰, 挥发氮的吸收液改为 0.01 mol·L⁻¹ 的稀硫酸, 每天抽气结束后将吸收液带回实验室, 采用靛酚蓝比色法测定挥发量。每天上午 7:00~9:00 和下午 15:00~17:00 分别进行 2 h 的抽气, 以这 4 h 的通量值作为每天氮挥发的平均通量计算全天的氮挥发量, 以 CK 处理的氮挥发量作为背景值, 直至两施氮处理的氮挥发量与背景值相近时终止本次施肥氮挥发的测定。

施肥后每天清晨定时测定田面水 pH, 用注射器在每盆选 5 点混合采集田面水样品, 带回实验室后过滤, 采用靛酚蓝比色法测 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度, 二乙酰异肟异丙醇-安替比林法测定尿素浓度^[20]。

所得数据采用 Excel 和 SAS 统计分析软件处理。

2 结果与分析

2.1 脲酶抑制剂 NBPT 对稻田氨挥发动态的影响

稻田 3 次施肥后氨挥发损失主要发生在基肥和分蘖肥时期, 这两次施肥氨挥发持续时间长, 达 7~10 d, 而孕穗肥施用后氨挥发量很小, 且持续时间短, 仅 2 d, 之后几乎检测不到氨挥发(图 1)。这与基肥施肥氮量大, 此时水稻秧苗较小, 需氮量少, 吸收氮能力弱有关; 至孕穗肥施用后, 水稻生长旺盛, 养分需求量大, 同时冠层的覆盖对藻类光合作用以及由此而引起的 pH 持续上升也有抑制作用^[21], 导致穗肥期的氨损失远低于基肥时期。

NBPT 对氨挥发抑制效果显著, 在基肥和分蘖肥时期, 添加 NBPT 对于推迟氨挥发峰值出现的时间以及降低峰值有明显效果。不添加 NBPT 时, 氨挥发在施肥后 1~2 d 即达到峰值, 峰值分别为 $15.6 \text{ kg(N)\cdot hm}^{-2}\cdot \text{d}^{-1}$ 和 $10.4 \text{ kg(N)\cdot hm}^{-2}\cdot \text{d}^{-1}$; 而施用 NBPT 后, 基肥和分蘖肥氨挥发峰值出现时间分别推迟了 4 d 和 2 d, 相应的基肥、分蘖肥氨挥发峰值分别下降至 $4.7 \text{ kg(N)\cdot hm}^{-2}\cdot \text{d}^{-1}$ 和 $2.6 \text{ kg(N)\cdot hm}^{-2}\cdot \text{d}^{-1}$ (图 1), 表明在稻田中施用 0.14% 的 NBPT 对氨挥发的进程有明显抑制作用。

已有研究表明, NBPT 在旱地上对氨挥发有明显抑制作用^[14-15], 在水田中抑制氨挥发的结果不一致, 主要原因是 NBPT 需要转化为氧化态后才能发挥抑制作用, 转化需要的时间因环境气候条件不同而不同, 若直接施用氧化态的 NBPT(NBPTO)对于抑制水田氨的挥发有显著效果^[22]。本研究中, NBPT 在施

肥前 1 d 随灌溉水施入并进行搅拌混匀, 促进了氧化过程的进行, 使其抑制效果得以发挥。

2.2 NBPT 对氨挥发相关影响因素的影响

2.2.1 田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度动态变化

田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度是决定稻田氨挥发量的最主要因素之一。从图 2 可知, 田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度与氨挥发通量的变化趋势一致。高浓度的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为氨挥发提供了丰富的底物, 这与以往研究认为的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度与氨挥发量呈正相关的结果吻合^[23-24]。

NBPT 推迟了基肥和分蘖肥施用后田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值出现的时间, 降低了相应的峰值。添加 NBPT 将基肥时期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值从 $132.3 \text{ mg(N)\cdot L}^{-1}$ 下降至 $70.7 \text{ mg(N)\cdot L}^{-1}$, 将分蘖肥时期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值从 $66.3 \text{ mg}\cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $51.6 \text{ mg}\cdot \text{L}^{-1}$ 。对于孕穗肥, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在施肥后 3 d 即降至背景值, N1 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在施肥后第 1 d 即达到峰值($50.8 \text{ mg}\cdot \text{L}^{-1}$), 第 2 d 降至 $10 \text{ mg}\cdot \text{L}^{-1}$ 以下; 而 N1+NBPT 处理的田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度始终低于 $10 \text{ mg}\cdot \text{L}^{-1}$, 这与该时期施氮量不高, 水稻需氮量大, 生长旺盛有关。

2.2.2 田面水尿素 $[(\text{NH}_2)_2\text{CO}]$ 浓度动态变化

田面水中的尿素浓度可直接验证 NBPT 对尿素水解速率影响程度。尿素浓度与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度存在相互消长的关系(图 2, 图 3), NBPT 通过抑制尿素水解, 降低了田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度。N1+NBPT 处理施肥后第 1 d 尿素态浓度最高, 之后缓慢下降。其中水稻基肥期尿素在水中存留时间较长, 为 9 d; 分蘖肥时期在施肥 4 d 后监测不到尿素; 孕穗肥时期, 只在施肥后第 1 d 能监测到尿素的存在, 第 2 d 即降至背景值。然而, N1 处理在基肥施用后第 3 d、两次追肥后第 2 d, 尿素浓度就已降至背景值(图 3), 表明尿素几乎全部水解, N1 处理中尿素的快速水解使田面水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度迅速升高。证实了 NBPT 对于稻田尿素水解抑制作用显著。

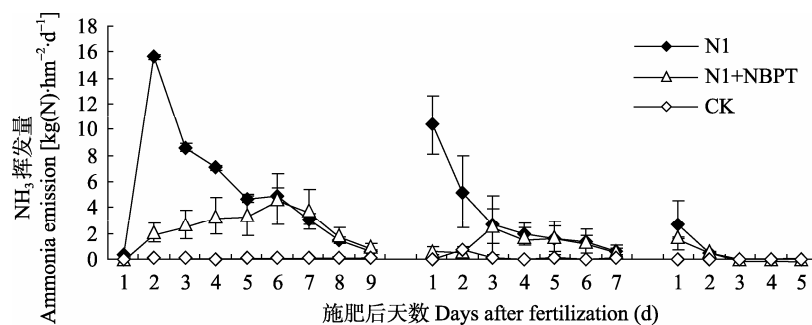


图 1 脲酶抑制剂 NBPT 对添加小麦秸秆稻田中不同施肥期(依次为基肥期、分蘖期、穗肥期)氨挥发动态的影响
Fig. 1 Effects of urease inhibitor NBPT on dynamics of ammonia volatilization in different fertilization stages (basal, tillering and booting stages) during rice growth period with wheat straw incorporation

2.2.3 田面水 pH 动态变化

pH 是影响氨挥发的另一个重要因素, pH 升高可迅速加剧氨挥发^[25-26]。从图 4 可以看出稻田施肥后田面水 pH 均在 7 以上, 有利于氨挥发的进行。在相同施肥及气象条件下, 施肥后 N1+NBPT 处理的 pH 大多低于 N1 处理, 尤其在基肥施用后氨挥发严重的第 3~4 d, N1+NBPT 处理的 pH 明显低于 N1 处理(图 4)。尿素水解过程可使 pH 增加, NBPT 可通过抑制尿素水解而减弱由此引起的 pH 的升高, 利于降低氨挥发损失。值得指出的是, 穗肥期田面水 pH 较基

肥和分蘖肥时期低, 原因可能与水稻冠层对藻类光合作用以及由此而引起的 pH 上升受到抑制有关^[21]。

2.3 NBPT 对稻田氨挥发总量的影响

整个水稻季 N1 处理的氨挥发量显著高于 N1+NBPT 处理, 添加 NBPT 使得稻田氨挥发损失总量从 73.3 kg(N)·hm⁻²(施肥量的 24.4%)下降至 34.5 kg(N)·hm⁻²(占施肥量的 11.5%), 减少 53%, 表明施用 NBPT 可显著降低稻田的氨挥发损失。各生育期的氨挥发损失量表现为: 基肥期>分蘖肥期>穗肥期, 其中基肥和分蘖肥时期占总损失量的 90%以上(表 1)。

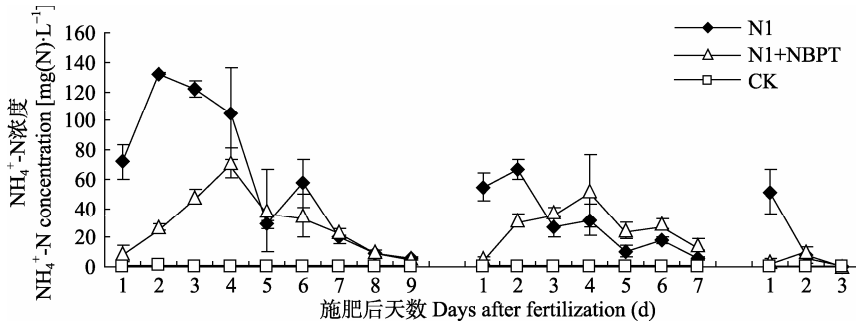


图 2 脲酶抑制剂 NBPT 对添加小麦秸秆稻田不同施肥期(依次为基肥期、分蘖期、穗肥期)田面水 NH₄⁺-N 浓度的影响
Fig. 2 Effects of urease inhibitor NBPT on dynamics of ammonium concentrations of surface water in different fertilization stages (basal, tillering and booting stages) during rice growth period with wheat straw incorporation

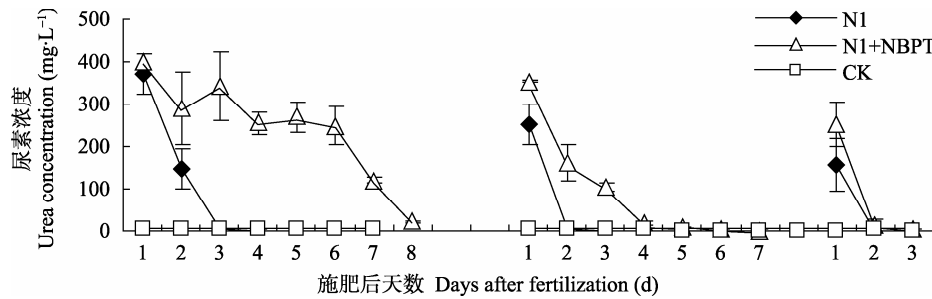


图 3 脲酶抑制剂 NBPT 对添加小麦秸秆稻田不同施肥期(依次为基肥期、分蘖期、穗肥期)田面水尿素浓度动态的影响
Fig. 3 Effects of urease inhibitor NBPT on dynamics of urea concentrations of surface water in different fertilization stages (basal, tillering and booting stages) during rice growth period with wheat straw incorporation

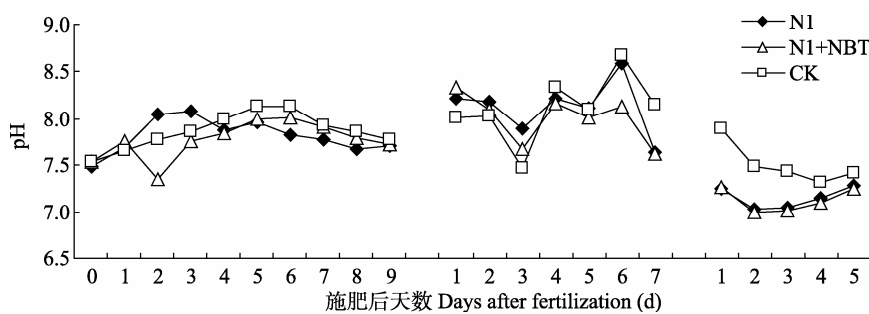


图 4 脲酶抑制剂 NBPT 对添加小麦秸秆稻田不同施肥期(依次为基肥期、分蘖期、穗肥期)田面水 pH 动态的影响
Fig. 4 Effects of urease inhibitor NBPT on dynamics of pH in surface water in different fertilization stages (basal, tillering and booting stages) during rice growth period with wheat straw incorporation

表 1 不同处理下水稻各生育期氨挥发量与损失率

Table 1 Ammonia volatilization loss and loss rate in various fertilization stages during rice growth under different fertilization treatments kg(N)·hm⁻²

处理 Treatment	基肥期 Basal stage	分蘖肥期 Tillering stage	穗肥期 Booting stage	总损失 Total loss
N1	46.4a(30.9%)	23.7a(26.3%)	3.2a(5.4%)	73.3a(24.4%)
N1+NBPT	22.9b(15.3%)	9.3b(10.4%)	2.3a(3.8%)	34.5b(11.5%)

括号内数据表示氨挥发量占施氮量的比例, 处理间不同字母表示在 0.05 水平差异显著。The number in parentheses indicates the percentage of ammonia volatilization amount to applying amount of N fertilizer. Different letters indicate significant difference between treatments at 5% level.

3 讨论与结论

在小麦秸秆还田情况下, 稻田氮挥发集中在基肥和分蘖肥时期, 以基肥时期损失量最大, 占整个稻季氮挥发损失量的 62%~66%, 其次是分蘖肥时期, 占损失量的 27%~32%, 孕穗肥时期挥发量较小, 占总损失的 4%~7%。

施用脲酶抑制剂 NBPT 通过抑制尿素水解, 进而延迟了稻田田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度和氮挥发峰值出现的时间, 未加 NBPT 时, 其峰值出现在施肥后的第 2~3 d, 施用 NBPT 使得峰值出现时间推迟了 2~4 d。添加 NBPT 使稻田氮挥发损失量从 $73.3 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ 降至 $34.5 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$, 损失率从 24.4% 降至 11.5%, 减少 53%。施用脲酶抑制剂减缓稻田尿素水解, 降低氮挥发的效果显著, 与在旱地上添加相近浓度的 NBPT 对氮挥发的抑制效果一致^[27]; 且水稻产量和吸氮量有所提高, 肥料氮的土壤残留量增加(数据未列出), 表明在淹水稻田中添加 NBPT 可有效降低氮肥损失, 以及由氮挥发及其沉降引起的环境影响。

NBPT 是减少稻田氮挥发损失、促进稻田保氮的一项有效措施。在本研究中, NBPT 在施肥前 1 d 施入田中, 留有一定的时间促使抑制剂有效态(NBPTO)的形成, 效果发挥显著。但 NBPT 在不同类型水稻田的最佳施用量、施用方法和施用时间还需进一步研究。一种好的脲酶抑制剂除可以抑制土壤脲酶外, 还应注重添加脲酶抑制剂与其他措施相结合, 如与硝化抑制剂结合, 效果或许会更好。另外, 还应该考虑其成本及环境污染问题, 为大面积推广脲酶抑制剂提供科学依据。

参考文献

- 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
- 朱兆良, 张绍林, 尹斌, 等. 太湖地区单季晚稻产量-氮肥施用量反应曲线的历史比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 1-5
- Liu X J, Ai Y W, Zhang F S, et al. Crop production, nitrogen recovery and water use efficiency in rice-wheat rotation as affected by non-flooded mulching cultivation (NFMC)[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2005, 71(3): 289-299
- Fillery R P, De Datta S K. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizer as a N loss mechanism in flooded rice fields[J]. Fertilizer Research, 1986, 9: 78-98
- Erisman J W, Bleeker A, Galloway J, et al. Reduced nitrogen in ecology and the environment[J]. Environ Pollut, 2007, 150(1): 140-149
- Freney J R. Strategies to reduce gaseous emissions of nitrogen from irrigated agriculture[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, 48(1/2): 155-160
- 余冬立, 王凯荣, 谢小立, 等. 稻草还田的土壤肥力与产量效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 100-104
- 刘世平, 陈后庆, 聂新涛, 等. 稻麦两熟制不同耕作方式与秸秆还田土壤肥力的综合评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 51-56
- Lal R B, Kissel D E, Cabrera M L, et al. Kinetics of urea hydrolysis in wheat residue[J]. Soil Biol Biochem, 1993, 25(8): 1033-1036
- Wang Z P, Van Cleemput O, Demeyer P, et al. Effect of urease inhibitors on urea hydrolysis and ammonia volatilization[J]. Biol Fertil Soils, 1991, 11(1): 43-47
- Antisari L V, Marzadori C, Gioacchini P, et al. Effects of the urease inhibitor N-(n-butyl) phosphorothioic triamide in low concentrations on ammonia volatilization and evolution of mineral nitrogen[J]. Biol Fertil Soils, 1996, 22(3): 196-201
- 宁国辉, 刘树庆, 张笑归. 脲酶抑制剂的研究进展[J]. 河北环境科学, 2003(4): 30-33
- 丁和平, 王帅, 王楠. 氮肥增效技术研究现状及发展趋势[J]. 现代农业科学, 2009, 16(2): 24-26
- Sanz-Cobena A, Misselbrook T H, Arce A, et al. An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2008, 126(3/4): 243-249
- Turnera D A, Edisa R B, Chen D, et al. Determination and mitigation of ammonia loss from urea applied to winter wheat with N-(n-butyl) thiophosphoric triamide[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 137(3/4): 261-266
- 康莉, 周文生, 侯翠红, 等. 脲酶抑制剂的研究综述[J]. 河南化工, 2009, 26(2): 8-10
- Freney J R. Strategies to reduce gaseous emissions of nitrogen from irrigated agriculture[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, 48(1/2): 155-160
- 田光明, 蔡祖聪, 曹金留, 等. 镇江丘陵区稻田化肥氮的氮挥发及其影响因素[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 324-332
- 田玉华, 贺发云, 尹斌, 等. 太湖地区氮肥施用对稻田氮挥发影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 893-900
- 严小蓉. 游泳池水中尿素检测方法改进[J]. 中国实用医药, 2009, 4(5): 27-29
- 蔡贵信. 氮挥发[M]//朱兆良, 文启孝主编. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992
- Freney J R, Keerthisinghe D G, Phongpan S, et al. Effect of urease, nitrification and algal inhibitors on ammonia loss and grain yield of flooded rice in Thailand[J]. Fertilizer Research, 1995, 40(3): 225-233
- 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 节水灌溉稻田氮挥发损失及影响因素[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 35-39
- 黄进宝, 范晓晖, 张绍林. 太湖地区铁渗水耕人为土稻季上氮肥的氮挥发[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 786-792
- 朱兆良, 邢光熹. 氮循环[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 63-64
- 贺发云, 尹斌, 金雪霞, 等. 南京两种菜地土壤氮挥发的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 253-259
- Rawluk C D L, Grant C A, Racz G J. Ammonia volatilization from soils fertilized with urea and varying rates of urease inhibitor NBPT[J]. Can J Soil Sci, 2001, 81(2): 239-246