

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的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 399–408.

ZHOU Xuan, WU Liang-huan, DAI Feng, et al. Effects of combined biochemical inhibitors and fertilization models on ammonia volatilization in yellow clayey paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2): 399–408.

生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田稻季氨挥发的影响

周旋^{1,2,3}, 吴良欢^{1,2*}, 戴锋⁴, 董春华³

(1.教育部环境修复与生态健康重点实验室/浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2.浙江省农业资源与环境重点实验室/浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 3.湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 4.浙江奥复托化工有限公司, 浙江 上虞 312300)

摘要:为探讨生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田稻季氨挥发的影响,采用二因素随机区组设计,研究生化抑制剂组合[N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)、N-丙基硫代磷酰三胺(NPPT)和2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)]与施肥模式(一次性和分次施肥)互作对黄泥田稻季氨(NH₃)挥发动态变化的影响。结果表明:黄泥田稻季NH₃挥发损失主要集中于施肥后1周,峰值发生在第1~3 d。生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田稻季NH₃挥发损失量的效应显著。尿素分次施用处理稻季NH₃挥发净损失率较一次性施用处理显著降低24.6%。不同施肥模式下,硝化抑制剂CP处理显著提高田面水NH₄⁺-N峰值和NH₃挥发速率峰值,增加稻田NH₃挥发损失量;脲酶抑制剂NBPT/NPPT或配施CP处理明显延缓尿素水解,降低NH₃挥发速率峰值,减少稻田NH₃挥发损失量。新型脲酶抑制剂NPPT单独施用及与CP配施的稻田NH₃挥发动态变化与NBPT相似。相关性分析表明,稻田NH₃挥发速率与田面水NH₄⁺-N浓度和pH值呈显著正相关,而与气温、土温和土壤相对湿度无显著相关性。总之,生化抑制剂组合与适宜的运筹相结合更能有效减少黄泥田稻季NH₃挥发损失。

关键词:脲酶抑制剂;硝化抑制剂;N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT);N-丙基硫代磷酰三胺(NPPT);2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP);黄泥田;氨挥发

中图分类号:S143.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2018)02-0399-10 **doi:**10.11654/jaes.2017-0703

Effects of combined biochemical inhibitors and fertilization models on ammonia volatilization in yellow clayey paddy field

ZHOU Xuan^{1,2,3}, WU Liang-huan^{1,2*}, DAI Feng⁴, DONG Chun-hua³

(1.Key Laboratory of Environmental Remediation and Ecosystem Health, Ministry of Education/College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment/ College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3.Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China; 4.Zhejiang Aofutuo Chemical Co., Ltd., Shangyu 312300, China)

Abstract: Ammonia(NH₃) volatilization is one of the main pathways of nitrogen(N) fertilizer loss in rice production. This study was conducted to investigate the interaction effects of biochemical inhibitor combinations and fertilization models(one-off and three-time fertiliza-

收稿日期:2017-05-14 录用日期:2017-10-09

作者简介:周旋(1986—),男,四川攀枝花人,博士,从事肥料与养分资源管理研究。E-mail:zhouxuan_123@126.com

*通信作者:吴良欢 E-mail:finm@zju.edu.cn

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划“长江中下游水旱轮作区高效施肥技术研究与示范”(2015BAD23B03);苕河流域农村污染治理技术集成与规模化工程示范(2014ZX07101-012);国家重点基础研究发展计划项目(2015CB150502);浙江省“三农六方”科研协作计划项目;浙江大学-浙江奥复托化工有限公司合作项目

Project supported: The National Sci-tech Support Plan of 12th Five-Year Plan: Research and Demonstration of High Efficiency Fertilization Techniques in the Middle and Lower Reaches of Changjiang River for Rice Field-upland Field Rotation(2015BAD23B03); The Rural Nonpoint Pollution Technology Integration and Scale Demonstration Project of Tiaoxi Catchment(2014ZX07101-012); National Basic Research Program of China(2015CB150502); "San Nong Liu Fang" Research Plan of Zhejiang Province; Cooperation Projects of Zhejiang University-Zhejiang Aofutuo Chemical Limited Company

tions) on ammonia(NH_3) volatilization during the rice growing season in yellow clayey field using two-factor randomized block design. The results showed that NH_3 volatilization loss mainly occurred within one week after fertilization during the rice growing season, and peaked within 1–3 days. Both biochemical inhibitor combinations and fertilization models had significant effects on the loss of NH_3 volatilization. The three-time urea fertilization treatment significantly reduced the net NH_3 volatilization loss rate by 24.6% than that of one-off urea fertilization treatment during the rice growing season. The addition of nitrification inhibitor CP significantly increased the peak value of NH_4^+-N concentration in surface water and NH_3 volatilization rate, and thus enhanced NH_3 volatilization loss under different fertilization modes. Combined with(or without) CP, the addition of urease inhibitor NBPT/NPPT significantly inhibited urea hydrolysis, and reduced the peak value of NH_3 volatilization rate, and thus mitigated NH_3 volatilization loss. The addition of new urease inhibitor NPPT alone(or combined with CP) had a similar trend of dynamic change of NH_3 volatilization to that of NBPT. Correlation analysis showed that NH_3 volatilization rate from paddy fields had a significant positive correlation with NH_4^+-N concentration and pH in surface water rather than air temperature, soil temperature, and soil relative moisture. In conclusion, biochemical inhibitors combined with appropriate management can more effectively reduce NH_3 volatilization loss during the rice growing season from yellow clayey fields.

Keywords: urease inhibitor; nitrification inhibitor; N-(n-butyl)thiophosphoric triamide (NBPT); N-(n-propyl)thiophosphoric triamide (NPPT); 2-chloro-6-(trichloromethyl)pyridine (CP); yellow clayey field; ammonia volatilization

氨(NH_3)挥发是稻田氮(N)肥损失的主要途径之一,占施N量的10%~60%^[1-2]。根据土壤和气候因素的不同,尿素施入稻田后2~10 d内完全水解^[3],释放大量的铵态氮(NH_4^+-N),导致田面水pH值迅速上升,造成严重的 NH_3 挥发损失;而 NH_3 通过大气干湿沉降进入地表水体,加剧水体富营养化^[4-5]。因此,如何有效减少稻田N素损失、提高N肥利用率对经济及生态效益意义重大^[6-7]。

采用脲酶抑制剂是一项有效降低稻田 NH_3 挥发损失的技术措施。N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)是目前商品化的土壤脲酶抑制剂之一^[3],其减缓尿素水解的作用明显,可以延长施肥点尿素的扩散,降低土壤溶液中 NH_4^+ 浓度,抑制 NH_3 挥发损失,从而使养分尽快被作物吸收^[8]。彭玉净等^[9]研究发现,施用NBPT的稻田 NH_3 挥发损失(率)从 $73.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (24.4%)下降至 $34.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (11.5%),降幅53%。此外,脲酶抑制剂的效用受到土壤类型、pH和水分状况等土壤理化性质、有机物质及尿素浓度等因素的影响^[10]。

硝化抑制剂应用于稻田与N肥配施,可以有效减少稻田氧化亚氮排放^[11],降低N素径流与淋溶损失量^[12],从而提高N素利用率,增加水稻产量。与旱地土壤不同,水稻土表层多处于淹水状态,施入N肥转化为 NH_4^+-N 保留在田面水中,添加硝化抑制剂会增加田面水 NH_4^+-N 浓度,导致更多(约20%) NH_3 挥发损失^[13]。Sun等^[14]通过田间微区 ^{15}N 标记试验发现,不同施N水平下施用硝化抑制剂2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)会增加54.7%~110.6% NH_3 挥发排放。张文学等^[15]研究发现,硝化抑制剂3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)前期对 NH_3 挥发有一定促进作用,而添加

NBPT可降低累积 NH_3 挥发损失量21.7%,NBPT+DMPP配施则可使其降低13.6%。

黄泥田是广泛分布于南方省份的一种典型渗育型水稻土^[16],通常水分供应不足,磷(P)、钾(K)养分缺乏,属于中低产水稻田^[17]。前期研究发现,尿素添加CP施用能促进早、晚稻生长,增产增收,提高N肥利用率,且早稻增产效果较晚稻好^[18],推测与晚稻生育期间的 NH_3 挥发损失较高有关。目前,在黄泥田地区关于生化抑制剂组合配施的应用较少^[10],而结合施肥模式的 NH_3 挥发排放研究更是鲜有报道。浙江奥复托化工公司经多次筛选发现一款有良好应用前景的脲酶抑制剂——N-丙基硫代磷酰三胺(NPPT),具有一定的抑制作用^[19]。此外,影响 NH_3 挥发损失的因素主要有气候条件(温度、湿度、光照及风速等)、土壤性质、化肥品种和施用方式以及种植制度等^[20]。因此,开展脲酶抑制剂(NBPT/NPPT)和硝化抑制剂(CP)配施结合不同施肥模式,对黄泥田稻季 NH_3 挥发速率和损失累积量影响及 NH_3 挥发相关影响因素的研究,为减少农业生产中N素损失、提高N肥利用率及稻田缓释N肥的研制提供理论依据和技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2015年5—10月在浙江省金华市婺城区琅琊镇金朱村(29°01'19"N,119°27'96"E)进行。该区地处金衢盆地东缘,属于中亚热带季风气候,海拔86 m,年均降雨量1424 mm,年均气温17.5℃。供试土壤为黄泥田水稻土,前茬为冬闲田。耕层土壤基本理化性状:pH(H_2O)5.31(土:水=1:1),有机质 $25.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,

全 N $1.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解 N $118.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $7.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $93.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 供试材料

供试水稻品种为杂交籼稻“两优培九”。供试肥料品种 N 肥为尿素(含 N 46%), 磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 12%), 钾肥为氯化钾(含 K_2O 60%)。脲酶抑制剂 NBPT、NPPT 和硝化抑制剂 CP(24%乳油剂型)为分析纯, 由浙江奥复托化工有限公司生产。

1.3 试验设计

试验采用生化抑制剂组合 $\times$ 施 N 模式两因素随机区组设计, 设置 2 种施 N 模式(一次性和分次施肥)和 6 种生化抑制剂组合及不施 N 处理(CK), 共 13 个处理。N 肥施用模式如表 1 所示, 与抑制剂配施前将二者混合均匀。磷(P_2O_5)、钾(K_2O)用量分别为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。磷肥和钾肥全部用作基肥于移栽前一次性施入。栽插密度为 $19.8 \text{ cm} \times 19.8 \text{ cm}$, $25 \text{ 万穴} \cdot \text{hm}^{-2}$, 每穴 2 苗。单季稻于 2015 年 5 月 28 日播种, 6 月 21 日移栽, 10 月 14 日收获。小区面积 30 m^2 ($5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$), 重复 3 次。每小区之间筑埂并用塑料薄膜包裹, 区组间设排灌沟, 单灌单排。田间其他管理按常规进行。

1.4 采样与测定方法

NH_3 挥发测定采用密闭室通气法^[20-21], 密闭室为透明的有机玻璃制作(直径 20 cm、高 15 cm), 挥发 NH_3 吸收液采用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 稀硫酸, 于施肥后 1、3、6、9、12 d 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。每日 8:00—10:00 和 15:00—17:00 分别进行抽气, 以这段时间的通量值作为每日 NH_3 挥发平均通量计算全日的 NH_3 挥发量。施肥后定期测定田面水 pH, 用注射器选 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定 NH_4^+-N 浓度。

土壤温度与相对含水率采用土壤温湿度速测仪(YE48YM-19, 北京中西远大科技有限公司)进行监测, 设置记录间隔为 2 h, 埋深为 15 cm, 其中土壤相对含水率是指土壤含水量占田间持水量的比例(%)。气温数据由浙江省金华市气象局婺城区监测点提供。

1.5 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 数据分析软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 稻田气温、土温和土壤相对湿度

由图 1A 和图 1B 可知, 单季稻生长期气温和土温总体呈下降趋势, 气温前期波动较大, 土温变化幅度较小; 整个生育期平均气温和土温分别为 26.2°C 和 25.6°C , 变化幅度分别为 15.0°C 和 13.0°C 。水稻生长前期水层较厚, 中间晒田, 后期落干, 干湿交替较为频繁(图 1B)。

2.2 NH_3 挥发动态变化

2.2.1 NH_3 挥发速率

由图 2 可知, 施肥后 2 周内 NH_3 挥发速率于第 3

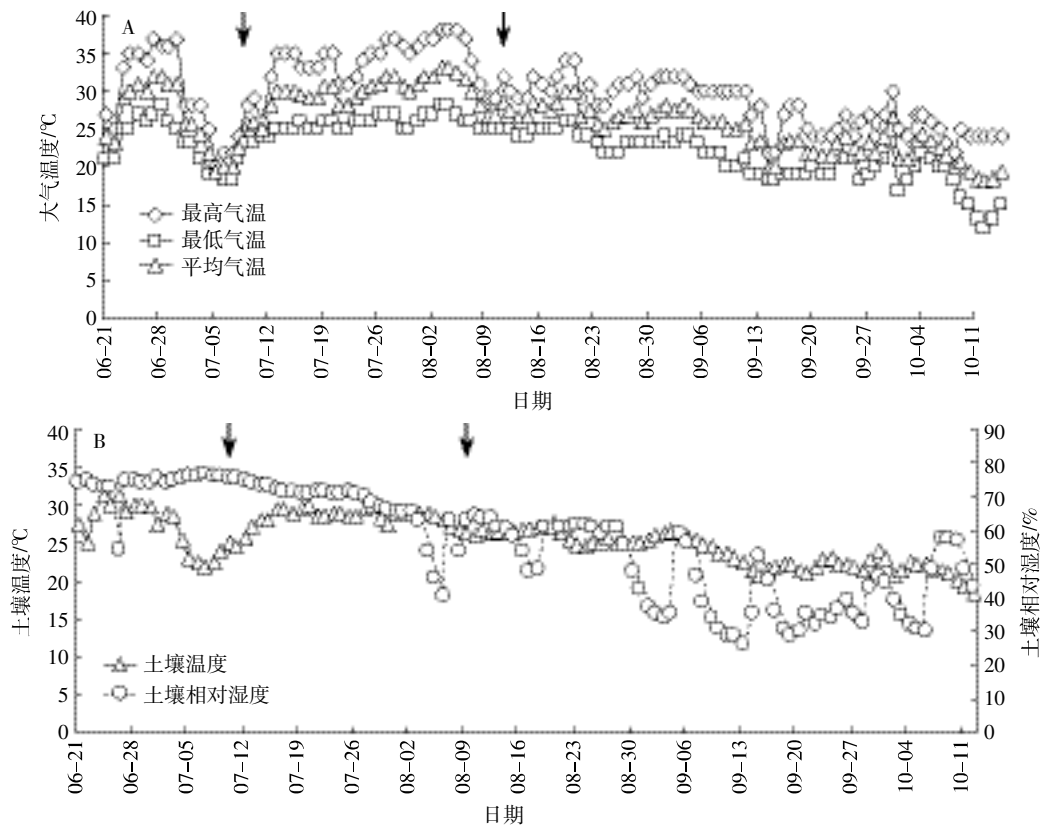
表 1 氮肥施用方式

Table 1 N application methods

处理	施 N 量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	抑制剂类型	添加量(以 N 计)/%	施肥方式
CK	—	—	—	—
U	180	—	—	一次性基施
U+NBPT	180	NBPT	0.5	一次性基施
U+NPPT	180	NPPT	0.5	一次性基施
U+CP	180	CP	0.3	一次性基施
U+NBPT+CP	180	NBPT+CP	0.5+0.3	一次性基施
U+NPPT+CP	180	NPPT+CP	0.5+0.3	一次性基施
U_3	180	—	—	基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2
U_3 +NBPT	180	NBPT	0.5	基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2
U_3 +NPPT	180	NPPT	0.5	基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2
U_3 +CP	180	CP	0.3	基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2
U_3 +NBPT+CP	180	NBPT+CP	0.5+0.3	基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2
U_3 +NPPT+CP	180	NPPT+CP	0.5+0.3	基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2

注:分次施肥(基肥、分蘖肥、穗肥)时间分别为 2015 年 6 月 21 日、7 月 8 日、8 月 10 日。

Note: The time of split fertilization (base, tillering and earing fertilizer) were 21 June, 8 July, and 10 August in 2015, respectively.



↓ 所指时间为分蘖肥或穗肥的施入时间。下同
↓ represents the time of tiller or earing fertilizer application. The same below

图 1 稻季生育期气温、土温和土壤相对湿度的动态变化

Figure 1 Dynamics of air temperature, soil temperature and soil relative moisture during the experimental period of rice season

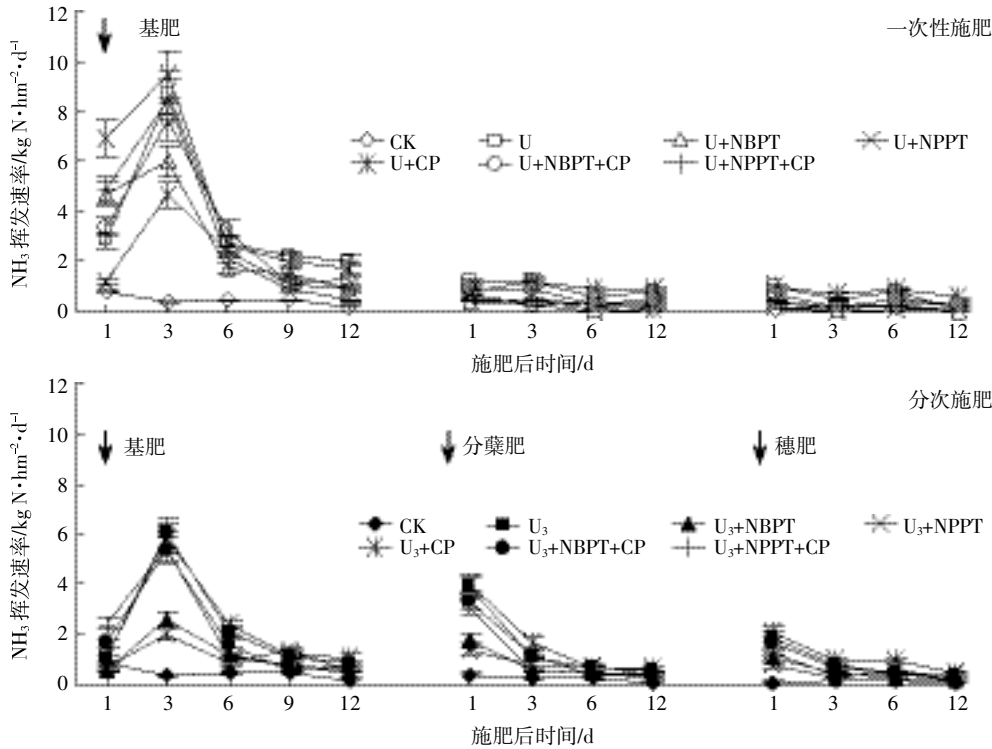


图 2 不同处理下黄泥田稻季 NH_3 挥发速率的动态变化

Figure 2 Dynamics of NH_3 volatilization rate during rice growing season from yellow clayey field under different treatments

d 达到峰值后逐渐下降,之后各处理 NH_3 挥发速率差异不大。基肥施用后第 3 d 峰值大小表现为 $\text{U}+\text{CP}>\text{U}+\text{NPPT}+\text{CP}>\text{U}>\text{U}+\text{NBPT}+\text{CP}>\text{U}+\text{NBPT}>\text{U}+\text{NPPT}>\text{CK}$ (一次性施肥); $\text{U}_3>\text{U}_3+\text{CP}>\text{U}_3+\text{NPPT}+\text{CP}>\text{U}_3+\text{NBPT}+\text{CP}>\text{U}_3+\text{NBPT}>\text{U}_3+\text{NPPT}>\text{CK}$ (分次施肥),说明添加 CP 会提高稻田 NH_3 挥发速率峰值,而 NBPT/NPPT 或配施 CP 明显延缓尿素水解,降低 NH_3 挥发速率峰值。分次施肥中,基肥施用后 NH_3 挥发峰值明显较一次性施肥低;分蘖肥和穗肥施用后 NH_3 挥发迅速达到峰值,之后逐渐降低并趋于稳定。

2.2.2 NH_3 挥发总量

由表 2 可知,整个水稻生育期一次性施肥的 NH_3 挥发净损失量为 $18.3\sim 55.7 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,占 N 肥施用量的 $10.2\%\sim 31.0\%$;分次施肥为 $15.6\sim 41.2 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,占 N 肥施用量的 $8.7\%\sim 22.9\%$ 。基肥期是 NH_3 挥发损失的主要时期,占总挥发量的 $68.8\%\sim 86.9\%$ (一次性施肥)和 $51.7\%\sim 61.8\%$ (分次施肥);穗肥期 NH_3 挥发损失量最小。

不同施肥模式下,施 N 处理稻田 NH_3 总挥发损

失量均显著高于 CK 处理。生化抑制剂组合和施肥模式分别对 NH_3 总挥发损失量效应极显著 ($P<0.001$),两者交互效应不显著 ($P>0.05$) (表 2)。 U_3 处理 NH_3 总挥发损失量和净损失率较 U 处理降低 $11.5 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 24.6% 。一次性施用中,各施 N 处理较 CK 处理 NH_3 总挥发损失量增加 $18.3\sim 55.7 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。与 U 处理相比, $\text{U}+\text{NBPT}$ 、 $\text{U}+\text{NPPT}$ 、 $\text{U}+\text{NBPT}+\text{CP}$ 和 $\text{U}+\text{NPPT}+\text{CP}$ 处理 NH_3 挥发净损失率分别降低 46.9% 、 60.9% 、 20.2% 和 35.0% ,而 $\text{U}+\text{CP}$ 处理增加 18.9% 。分次施用中,各施 N 处理较 CK 处理 NH_3 总挥发损失量增加 $15.6\sim 41.2 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。与 U_3 处理相比, U_3+NBPT 、 U_3+NPPT 、 $\text{U}_3+\text{NBPT}+\text{CP}$ 和 $\text{U}_3+\text{NPPT}+\text{CP}$ 处理 NH_3 挥发净损失率分别降低 55.9% 、 53.0% 、 19.1% 和 32.5% ,而 U_3+CP 处理增加 16.6% 。说明尿素配施 NBPT/NPPT 能有效延缓尿素水解,降低 NH_3 挥发损失,而单独添加 CP 抑制 NH_4^+ 硝化作用,会增加 NH_3 挥发损失,加剧 N 素流失风险。

2.3 田面水 NH_4^+-N 浓度动态变化

由图 3 可知,施 N 处理稻田田面水 NH_4^+-N 浓度

表 2 不同处理下黄泥田稻季各施肥期 NH_3 挥发损失量与净损失率

Table 2 NH_3 volatilization loss and net loss ratio at various fertilization stages during rice growing season from yellow clayey paddy field under different treatments

处理	各施肥期损失量/ $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$			总损失量/ $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$	净损失率/%
	基肥期	分蘖肥期	穗肥期		
CK	5.2±0.4i	2.7±0.2de	1.7±0.1e	9.5±0.7i	
U	41.5±3.0ab	10.2±0.7b	4.7±0.3c	56.4±4.1b	26.0±1.9b
U+NBPT	29.2±2.1de	3.5±0.3de	1.7±0.1e	34.4±2.5fg	13.8±1.0fg
U+NPPT	24.2±1.7efg	2.2±0.2e	1.4±0.1e	27.8±2.0gh	10.2±0.7gh
U+CP	44.9±3.2a	11.5±0.8b	8.8±0.6a	65.2±4.7a	31.0±2.2a
U+NBPT+CP	35.8±2.6bc	6.7±0.5c	4.5±0.3cd	46.9±3.4cd	20.8±1.5cd
U+NPPT+CP	32.5±2.3cd	4.1±0.3d	3.4±0.2d	40.0±2.9def	16.9±1.2def
U_3	25.9±1.9efg	11.7±0.8b	7.3±0.5b	44.8±3.2cde	19.6±1.4cde
U_3+NBPT	13.8±1.0h	6.7±0.5c	4.5±0.3cd	25.1±1.8h	8.7±0.6h
U_3+NPPT	13.5±1.0h	7.8±0.6c	4.8±0.3c	26.1±1.9gh	9.2±0.7h
U_3+CP	27.2±2.0def	13.8±1.0a	9.7±0.7a	50.7±3.7bc	22.9±1.7bc
$\text{U}_3+\text{NBPT}+\text{CP}$	21.7±1.6fg	10.0±0.7b	6.5±0.5b	38.1±2.8ef	15.9±1.1ef
$\text{U}_3+\text{NPPT}+\text{CP}$	20.6±1.5g	7.8±0.6c	5.0±0.4c	33.4±2.4fgh	13.3±1.0fg
方差分析(ANOVA)					
F	***	***	***	***	***
I	***	***	***	***	***
F×I	ns	ns	ns	ns	ns

注:F:施肥模式;I:抑制剂组合;F×I:施肥模式×抑制剂组合。表中数值为平均值±标准误($n=3$),同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著(LSD 检验)。*** 表示在 0.001 水平上效应显著;ns 表示效应不显著。下同。

Note: F: Fertilizer models; I: Inhibitors combinations; F×I: Fertilizer models × Inhibitors combinations. Data in the table are Mean±SE ($n=3$). Values followed by a different letter are significantly different at $P<0.05$ (LSD). *** indicates significant effect at the 0.001 probability levels; ns indicates the effect is not in significant. The same as below.

整体呈下降趋势,基肥施用后第6 d分别降为峰值的57.9%~69.1%(一次性施肥)和29.9%~60.7%(分次施肥)。第1次施肥后,田面水 NH_4^+-N 浓度下降较缓,而后两次施肥后下降迅速,可能与水稻吸收利用、田面水温度高及 NH_3 挥发损失快有关。不同施肥模式下,基施后第1 d施N处理稻田田面水 NH_4^+-N 浓度均显著高于CK处理。 U_3 处理第1 d田面水 NH_4^+-N 浓度较U处理降低22.5%。一次性施用中,各施N处理较CK处理增加10.2~23.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。与U处理相比,U+NBPT、U+NPPT、U+NBPT+CP和U+NPPT+CP处理 NH_4^+-N 浓度分别降低48.1%、50.4%、23.4%和24.0%,而U+CP处理增加4.4%。分次施用中,各施N处理较CK处理增加5.9~19.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。与 U_3 处理相比, U_3 +NBPT、 U_3 +NPPT、 U_3 +NBPT+CP和 U_3 +NPPT+CP处理 NH_4^+-N 浓度分别降低58.5%、53.5%、20.5%和13.1%,而 U_3 +CP处理增加12.0%。说明尿素配施NBPT/NPPT能有效延缓尿素水解,推迟田面水 NH_4^+-N 峰值出现时间,降低田面水 NH_4^+-N 浓度,而单独添加CP则抑制水相 NH_4^+ 的形态转化,提高田面水 NH_4^+-N 浓度,加剧N素挥发损失风险。

2.4 田面水 pH 动态变化

由图4可知,施N处理田面水pH值整体呈先升后降的趋势,在1~3 d内迅速达到峰值,且pH值均大于7;pH值变幅分别为6.5~8.3(一次性施肥)和5.6~8.1(分次施肥)。基肥施用后pH值第3 d的大小顺序表现为 $\text{U}>\text{U}+\text{CP}>\text{U}+\text{NPPT}>\text{U}+\text{NBPT}>\text{U}+\text{NBPT}+\text{CP}>$

$\text{U}+\text{NPPT}+\text{CP}$ (一次性施肥); $\text{U}_3+\text{CP}>\text{U}_3+\text{NBPT}+\text{CP}>\text{U}_3>\text{U}_3+\text{NPPT}>\text{U}_3+\text{NBPT}>\text{U}_3+\text{NPPT}+\text{CP}$ (分次施肥)。说明稻田尿素水解过程使pH值增加,添加NBPT/NPPT可以通过抑制尿素水解来减弱pH的升高,有利于降低 NH_3 挥发损失。

2.5 NH_3 挥发速率与其影响因子的相关性分析

由表3可知,各施肥处理 NH_3 挥发速率与同期田面水pH值($r_{\text{一次性}}=0.529\sim0.687^*$; $r_{\text{分次}}=0.413\sim0.646^*$)及 NH_4^+-N 浓度($r_{\text{一次性}}=0.599^*\sim0.908^{**}$; $r_{\text{分次}}=0.613\sim0.823^{**}$)均呈显著正相关,而与气温($r_{\text{一次性}}=-0.034\sim0.168$; $r_{\text{分次}}=-0.243\sim0.060$)、土温($r_{\text{一次性}}=0.302\sim0.458$; $r_{\text{分次}}=-0.107\sim0.080$)及土壤相对湿度($r_{\text{一次性}}=0.073\sim0.257$; $r_{\text{分次}}=0.209\sim0.428$)的相关性不显著。施肥后3 d内,田面水pH值及 NH_4^+-N 浓度迅速增加,稻田 NH_3 挥发速率随之剧增,而气温、土温趋势与 NH_3 挥发速率并未表现出一致性。在稻田施入尿素2周内,田面水pH值随着 NH_4^+-N 含量下降而降低。说明田面水 NH_4^+-N 浓度和pH值是影响稻田 NH_3 挥发损失的主要因素。

3 讨论

3.1 施肥模式对稻田 NH_3 挥发的影响

关于稻田 NH_3 挥发主要时期的报道结论不一。邓美华等^[22]研究发现,稻田施肥后 NH_3 挥发持续时间短,主要发生在施肥后1周以内;基肥阶段是 NH_3 挥发的主要时期,约占挥发损失N的50%。而曹金留等^[23]

表3 NH_3 挥发速率与其影响因子的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between NH_3 volatilization rate and influencing factors

处理	田面水 pH 值	田面水 NH_4^+-N 浓度	气温	土温	土壤相对湿度
CK	0.091	0.417	-0.262	0.156	0.325
U	0.651*	0.718**	0.128	0.384	0.227
U+NBPT	0.687*	0.884**	-0.033	0.339	0.257
U+NPPT	0.627*	0.599*	0.168	0.458	0.073
U+CP	0.673*	0.908**	-0.034	0.325	0.251
U+NBPT+CP	0.611*	0.793**	0.068	0.384	0.119
U+NPPT+CP	0.529	0.818**	0.017	0.302	0.190
U_3	0.486	0.684*	-0.139	-0.059	0.238
U_3 +NBPT	0.603*	0.823**	-0.098	-0.015	0.223
U_3 +NPPT	0.429	0.815**	0.060	0.080	0.428
U_3 +CP	0.520	0.613*	-0.144	-0.083	0.209
U_3 +NBPT+CP	0.646*	0.790**	-0.243	-0.107	0.272
U_3 +NPPT+CP	0.413	0.813**	-0.240	-0.077	0.333

注:* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关。

Note: * and ** indicate significant correlation at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

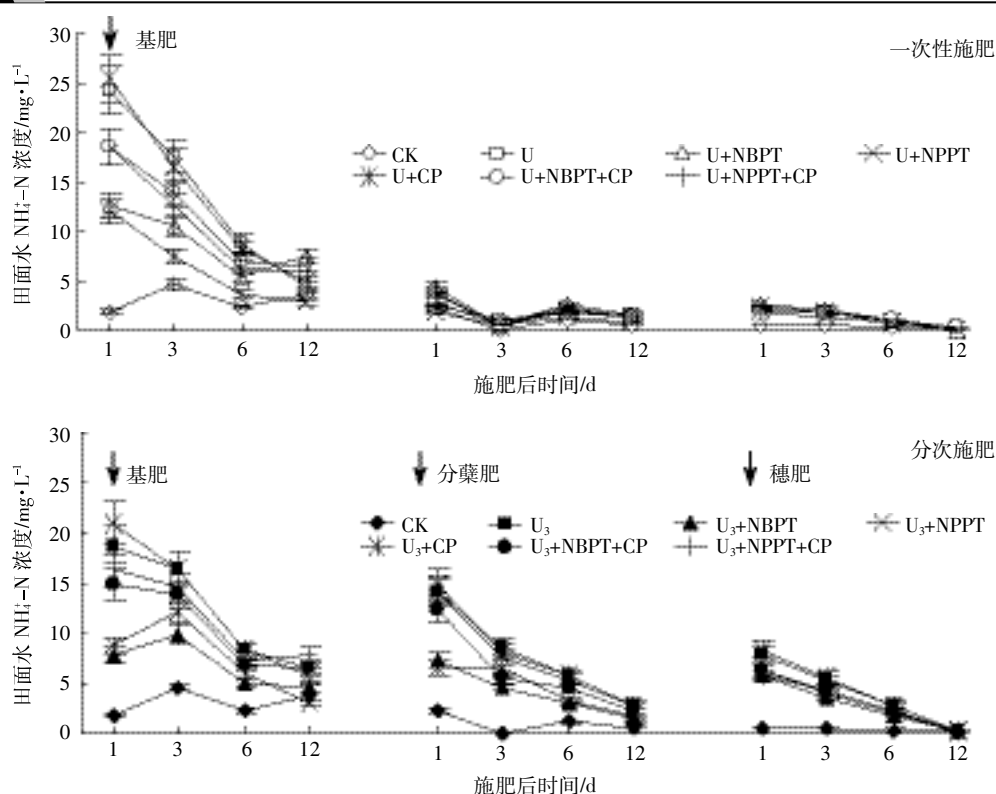
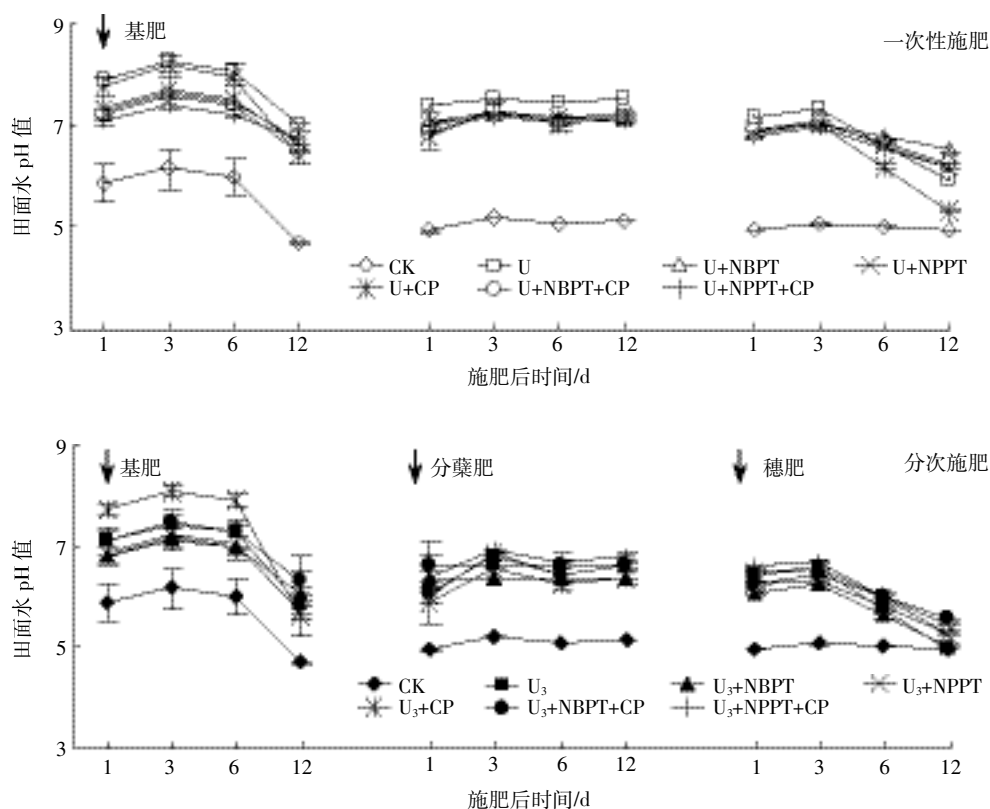
图 3 不同处理下黄泥田稻季田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的动态变化Figure 3 Dynamics of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in surface water during rice growing season from yellow clayey field under different treatments

图 4 不同处理下黄泥田稻季田面水 pH 的动态变化

Figure 4 Dynamics of pH in surface water during rice growing season from yellow clayey field under different treatments

研究发现,稻田基肥期 N 素损失比例最小,分蘖肥期比例最大。叶世超等^[24]研究发现, NH_3 挥发损失量为分蘖肥期>倒 4 叶穗肥期>基肥期>倒 2 叶穗肥期。本研究中,一次性施肥稻田 NH_3 挥发主要发生在基肥期;分次施肥主要发生在基肥期和分蘖肥期,穗肥期最低。其原因可能是基蘖肥施 N 量大,水稻秧苗较小、需 N 量少、吸 N 能力弱;而穗肥施用,植株生长旺盛,养分需求量大,田间郁闭度较高,冠层覆盖对藻类光合作用引起 pH 上升有抑制作用,导致穗肥期 NH_3 损失远低于基蘖肥期^[23,25]。

夏文建等^[26]研究发现,稻季 NH_3 挥发损失量(率)为 $32.5\sim 62.8 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ (8.2%~19.4%), NH_3 挥发峰值发生在施肥后 2~3 d,持续 5~7 d。张惠等^[27]研究发现,稻田 NH_3 挥发量(率)为 $27.6\sim 94.1 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ (16.4%~22.2%);不同施肥阶段 NH_3 挥发持续时间为 10 d 左右,最大峰值均在施肥后 2~3 d,分蘖肥期损失量(率)最大(27.1%~37.0%)。Sun 等^[14]研究发现,不同处理¹⁵N 标记尿素 NH_3 挥发累积量为 $15.1\sim 56.8 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,占当季投入量 8.4%~23.7%。本研究结果表明,黄泥田稻季 NH_3 挥发损失主要集中于施肥后 1 周,峰值发生在施肥后第 1~3 d。 U_3 处理 NH_3 总挥发损失量和净损失率较 U 处理降低 $11.5 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 24.6%,可能与基肥期 N 肥施用量有关。不同施肥时期 NH_3 挥发损失量大小表现为基肥期>分蘖肥期>穗肥期。其中,基肥期 NH_3 挥发损失量占整个水稻生育期的 68.4%~86.9%(一次性施肥)和 51.7%~61.8%(分次施肥),可能是由于施肥初期温度迅速升高达 30℃,加剧基肥期 NH_3 的挥发,随后温度突然下降又上升,影响分蘖肥期的排放。

3.2 抑制剂组合对稻田 NH_3 挥发的影响

硝化抑制剂施用减缓 NH_4^+-N 的硝化反应,使稻田土壤与田面水中 NH_4^+-N 含量升高且较长时间维持在较高水平,易导致稻田 NH_3 挥发增加^[3,12,13,15]。而 Li 等^[28]研究发现,施用 DMPP 处理前 2 d 稻田 NH_3 挥发量均高于单施尿素处理,但对 NH_3 挥发总量影响不显著。本研究结果表明,单独添加 CP 会导致施肥后 NH_3 挥发量显著增加,加剧 N 素挥发损失,与 Sun 等^[14] 研究结果一致。

相关研究表明,脲酶抑制剂在淹水稻田施用后,可以有效降低 NH_3 挥发速率、减少累积 NH_3 挥发损失量^[29-30]。Phongpan 等^[31]研究发现,NBPT 在碱性土壤、通气性较好的条件下对 NH_3 损失抑制较好。彭玉净等^[9]研究发现,小麦秸秆还田中添加 NBPT 可以延缓

尿素水解,显著降低 NH_3 损失。本研究中,NBPT 在偏酸性的黄泥田土壤中施用效果与以上研究结果一致,可以有效减少 N 素挥发损失。陈利军等^[32]研究发现,氢醌(HQ)和双氰胺(DCD)配合使用不仅延缓土壤中尿素水解,而且使其水解后释放出的 NH_4^+ 在土壤中更多和更长时间的保持。孙祥鑫等^[33]研究发现,1% DMPP 处理 NH_3 挥发显著增加 25.8%,而 0.5%NBPT+1%DMPP 和 0.5%NBPT 处理分别减排 NH_3 71.9%和 43.2%。本研究中,添加 NBPT/NPPT 或配施 CP 可以明显延缓尿素水解,推迟田面水 NH_4^+-N 峰值出现的时间,并减小 NH_4^+-N 峰值,降低田面水 NH_3 挥发速率和损失量,减少 NH_3 挥发损失,与以上研究结果一致。因此,两者配合施用在黄泥田中对 NH_3 挥发具有协同抑制效果,有利于缓解单独添加 CP 造成的损失。

3.3 环境因子对稻田 NH_3 挥发的影响

尿素施入土壤后,水解产物碳铵导致土壤 pH 升高,在遇到风速较大、土壤湿润、作物覆盖率较低、温度较高等条件时易引起 NH_3 挥发损失^[29]。相关研究表明,稻田 NH_3 挥发量与田面水中 NH_4^+-N 浓度呈正相关^[27,34-36]。张惠等^[27]研究表明,温度、光照、pH 值是黄河上游灌区 NH_3 挥发的主要影响因素。叶世超等^[24]研究发现,施 N 后 NH_3 挥发峰值和田面水 NH_4^+-N 峰值同步出现,且分蘖肥期最大。张文学等^[15]研究表明,地表水中 NH_4^+-N 浓度和 pH 值与 NH_3 挥发速率均达极显著正相关,而气温、地温和水温与 NH_3 挥发速率相关性不显著。本研究结果表明,在影响 NH_3 挥发速率的环境因子中,田面水 pH 值和 NH_4^+-N 浓度与 NH_3 挥发速率呈显著正相关,与李菊梅等^[37]、张文学等^[15] 研究结果一致。因此,降低田面水 NH_4^+-N 浓度与 pH 值是减少黄泥田稻季 NH_3 挥发的重要措施,而添加脲酶抑制剂 NBPT/NPPT 是缓解尿素类肥料 N 素损失的重要解决途径。

4 结论

NBPT 是减少稻季 NH_3 挥发损失、促进黄泥田保 N 的一项有效措施。新型脲酶抑制剂 NPPT 单独施用及与 CP 配施的稻田 NH_3 挥发动态变化与 NBPT 相似。单独添加硝化抑制剂 CP 有加剧黄泥田稻季 N 肥 NH_3 挥发损失的风险,而 CP 配施 NBPT/NPPT 可以有效降低稻田 NH_3 挥发损失,利于作物吸收。基于作物 N 素吸收阶段,增加追肥比例和施肥次数的优化施 N,可以有效减少肥料 N 的 NH_3 挥发损失。然而选择何种方式减少 NH_3 挥发损失,还要综合考虑机械化

水平、劳动力、N肥市场及价格等因素。

参考文献:

- [1] Fillery I R P, Vlek P L G. Reappraisal of the significance of ammonia volatilization as an N loss mechanism in flooded rice fields[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1986, 9(1): 79–98.
- [2] Lin D X, Fan X H, Hu F, et al. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu Lake Region, China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(5): 639–645.
- [3] Trenkel M E. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture[M]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010: 56.
- [4] 蔡贵信. 稻田中化肥氮的气态损失[J]. 土壤学报, 1995, 32(增刊): 128–135.
CAI Gui-xin. Evaluation of gaseous nitrogen losses from fertilizers applied to flooded rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(Suppl): 128–135.
- [5] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 等. 稻田氮肥的氨挥发损失与稻季大气氮的湿沉降[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1884–1888.
SU Cheng-guo, YIN Bin, ZHU Zhao-liang, et al. Ammonia volatilization loss of nitrogen fertilizer from rice field and wet deposition of atmospheric nitrogen in rice growing season[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1884–1888.
- [6] Freney J R. Strategies to reduce gaseous emissions of nitrogen from irrigated agriculture[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 48(1): 155–160.
- [7] Erisman J W, Bleeker A, Galloway J, et al. Reduced nitrogen in ecology and the environment[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 150(1): 140–149.
- [8] Watson C J, Akhonzada N A, Hamilton J T G, et al. Rate and mode of application of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea[J]. *Soil Use & Management*, 2008, 24(3): 246–253.
- [9] 彭玉净, 田玉华, 尹斌, 等. 添加脲酶抑制剂 NBPT 对麦秆还田稻田氨挥发的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 19–23.
PENG Yu-jing, TIAN Yu-hua, YIN Bin, et al. Effects of NBPT urease inhibitor on ammonia volatilization in paddy fields with wheat straw application[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(1): 19–23.
- [10] 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.
ZHOU Xuan, WU Liang-huan, DAI Feng. Effects of combined biochemical inhibitors on transformation of urea-N in yellow clayey soil[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2015, 29(5): 95–100.
- [11] Boeckx P, Xu X, Van Cleemput O. Mitigation of N₂O and CH₄ emission from rice and wheat cropping systems using dicyandiamide and hydroquinone[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 72(1): 41–49.
- [12] 俞巧钢, 陈英旭. DMPP 对稻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.
- [13] Qiao C L, Liu L L, Hu S J, et al. How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(3): 1249–1257.
- [14] Sun H, Zhang H, Powlson D, et al. Rice production, nitrous oxide emission and ammonia volatilization as impacted by the nitrification inhibitor 2-chloro-6-(trichloromethyl)-pyridine[J]. *Field Crops Research*, 2015, 173(9): 1–7.
- [15] 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]. 植物营养与肥科学报, 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]. *Plant Nutrition & Fertilizer Science*, 2013, 19(6): 1411–1419.
- [16] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥对南方黄泥田水稻子粒品质性状与土壤肥力因子的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2011, 17(2): 283–290.
WANG Fei, LIN Cheng, LI Qing-hua, et al. Effects of long-term fertilization on rice grain qualities and soil fertility factors in yellow paddy fields of southern China[J]. *Plant Nutrition & Fertilizer Science*, 2011, 17(2): 283–290.
- [17] 林诚, 王飞, 李清华, 等. 不同施肥制度对黄泥田土壤酶活性及养分的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2009(6): 24–27.
LIN Cheng, WANG Fei, LI Qing-hua, et al. Effects of different fertilizer application strategies on nutrients and enzymatic activities in yellow clayey soil[J]. *Soil & Fertilizer Sciences in China*, 2009(6): 24–27.
- [18] 刘彦伶, 来庆, 徐旱增, 等. 不同氮肥类型对黄泥田双季稻产量及氮素利用的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2013, 39(4): 403–412.
LIU Yan-ling, LAI Qing, XU Han-zeng, et al. Effects of different types of nitrogen fertilizers on grain yield and nitrogen utilization of double-cropping rice in yellow clayey soil[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2013, 39(4): 403–412.
- [19] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 新型磷酸胺类脲酶抑制剂对不同质地土壤尿素转化的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 4003–4012.
ZHOU Xuan, WU Liang-huan, DAI Feng. Influence of a new phosphoramidate urease inhibitor on urea-N transformation in different texture soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(12): 4003–4012.
- [20] 田光明, 蔡祖聪, 曹金留, 等. 镇江丘陵区稻田化肥氮的氨挥发及其影响因素[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 324–332.
TIAN Guang-ming, CAI Zu-cong, CAO Jin-liu, et al. Ammonia volatilization from paddy field and its affecting factors in Zhenjiang hilly region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(3): 324–332.
- [21] 田玉华, 贺发云, 尹斌, 等. 太湖地区氮磷肥施用对稻田氨挥发的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 893–900.
TIAN Yu-hua, HE Fa-yun, YIN Bin, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake Region as affected by N and P combination in fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5): 893–900.
- [22] 邓美华, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量和施氮方式对稻田氨挥发损失的影响[J]. 土壤, 2006, 38(3): 263–269.
DENG Mei-hua, YIN Bin, ZHANG Shao-lin, et al. Effects of rate and

- method of N application on ammonia volatilization in paddy fields[J]. *Soils*, 2006, 38(3):263-269.
- [23] 曹金留, 田光明, 任立涛, 等. 江苏南部地区稻麦两熟土壤中尿素的氨挥发损失[J]. 南京农业大学学报, 2000, 23(4):51-54.
- CAO Jin-liu, TIAN Guang-ming, REN Li-tao, et al. Ammonia volatilization from urea applied to the field of wheat and rice in southern Jiangsu Province[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2000, 23(4):51-54.
- [24] 叶世超, 林忠成, 戴其根, 等. 施氮量对稻季氨挥发特点与氮素利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(1):71-78.
- YE Shi-chao, LIN Zhong-cheng, DAI Qi-gen, et al. Effects of nitrogen application rate on ammonia volatilization and nitrogen utilization in rice growing season[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 25(1):71-78.
- [25] Byrnes B H, Freney J R. Recent developments on the use of urease inhibitors in the tropics[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1995, 42(1):251-259.
- [26] 夏文建, 周卫, 梁国庆, 等. 优化施氮下稻-麦轮作体系氮肥氨挥发损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):6-13.
- XIA Wen-jian, ZHOU Wei, LIANG Guo-qing, et al. Effect of optimized nitrogen application on ammonia volatilization from paddy field under wheat-rice rotation system[J]. *Plant Nutrition & Fertilizer Science*, 2010, 16(1):6-13.
- [27] 张惠, 杨正礼, 罗良国, 等. 黄河上游灌区稻田氨挥发损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5):1131-1139.
- ZHANG Hui, YANG Zheng-li, LUO Liang-guo, et al. Study on the ammonia volatilization from paddy field in irrigation area of the Yellow River[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5):1131-1139.
- [28] Li H, Chen Y X, Liang X Q, et al. Mineral-nitrogen leaching and ammonia volatilization from a rice-rapeseed system as affected by 3, 4-dimethylpyrazole phosphate[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(5):2131-2137.
- [29] Chien S H, Prochnow L I, Cantarella H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts[J]. *Advances in Agronomy*, 2009, 102(9):267-322.
- [30] Soares J R, Cantarella H, Mlde M. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 52(8):82-89.
- [31] Phongpan S, Freney J R, Keerthisinghe D G, et al. Use of phenylphosphorodiamidate and N-(n-butyl)thiophosphorictriamide to reduce ammonia loss and increase grain yield following application of urea to flooded rice[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1995, 41(1):59-66.
- [32] 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 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4):368-372.
- CHEN Li-jun, SHI Yi, LI Rong-hua, et al. Synergistic effect of urease inhibitor and nitrification inhibitor on urea-N transformation and N_2O emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4):368-372.
- [33] 孙祥鑫, 李东坡, 武志杰, 等. 持续施用缓/控释尿素条件下水田土壤 NH_3 挥发与 N_2O 排放特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(6):1901-1909.
- SUN Xiang-xin, LI Dong-po, WU Zhi-jie, et al. Characteristics of ammonia volatilization and nitrous oxide emission from a paddy soil under continuous application of different slow/controlled release urea[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(6):1901-1909.
- [34] 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氨挥发[J]. 土壤学报, 2006, 43(5):786-792.
- HUANG Jin-bao, FAN Xiao-hui, ZHANG Shao-lin. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizer in the rice field of Fe-leachi-stagnic anthrosols in the Taihu Lake Region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5):786-792.
- [35] 张静, 王德建. 太湖地区乌栅土稻田氨挥发损失的研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(6):84-87.
- ZHANG Jing, WANG De-jian. Ammonia volatilization in gleyed paddy field soils of Taihu Lake Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(6):84-87.
- [36] 朱小红, 马中文, 马友华, 等. 施肥对巢湖流域稻季氨挥发损失的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(7):2119-2126.
- ZHU Xiao-hong, MA Zhong-wen, MA You-hua, et al. Effect of fertilization on ammonia volatilization from paddy fields in Chao Lake Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7):2119-2126.
- [37] 李菊梅, 李冬初, 徐明岗, 等. 红壤双季稻田不同施肥下的氨挥发损失及其影响因素[J]. 生态环境, 2008, 17(4):1610-1613.
- LI Ju-mei, LI Dong-chu, XU Ming-gang, et al. Ammonia volatilization and its influence factors under different fertilization in red paddy soil with double rice cropping system[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4):1610-1613.