

包膜尿素与普通尿素配施对稻田氨挥发的影响

康兴蓉, 周旋, 彭建伟, 杨相东, 徐章倩, 黄粤林, 费讲驰

引用本文:

康兴蓉, 周旋, 彭建伟, 杨相东, 徐章倩, 黄粤林, 费讲驰. 包膜尿素与普通尿素配施对稻田氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2539-2551.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0946>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

速效氮与缓控释氮配比一次性侧深施对双季稻产量、氮素利用率及氮素损失的影响

侯坤, 荣湘民, 韩磊, 潘治宇, 彭建伟, 张玉平, 谢桂先, 田昌, 韩永亮

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1923-1934 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0290>

暗管农田不同类型肥料对向日葵生长及土壤氮素分布的影响

祁茜, 史海滨, 闫建文, 李仙岳, 高晓瑜, 范理权, 郝云凤

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 559-567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0840>

稻田氨挥发和水稻产量对增效复合肥减氮施用的响应

朱荣, 柳丽丽, 齐永波, 穆静, 蒋东, 章力干, 邵红建

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1935-1943 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0104>

洱海流域典型农区不同施肥处理下稻田氨挥发变化特征

吴凡, 张克强, 谢坤, 王风, 王瑞琦, 尹高飞, 沈仕洲

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1735-1742 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1621>

苏南麦田基施包膜尿素的农学和环境效应评价

孙婷, 王孟兰, 王柏淳, 李运东, 王慎强

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 1115-1123 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0472>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

康兴蓉, 周旋, 彭建伟, 等. 包膜尿素与普通尿素配施对稻田氨挥发影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2539–2551.

KANG X R, ZHOU X, PENG J W, et al. Effects of combined application of coated ureas and ordinary ureas on ammonia volatilization in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(11): 2539–2551.



开放科学 OSID

包膜尿素与普通尿素配施对稻田氨挥发的影响

康兴蓉¹, 周旋^{2*}, 彭建伟^{1*}, 杨相东³, 徐章倩¹, 黄粤林¹, 费讲驰¹

(1. 湖南农业大学资源与环境学院, 长沙 410128; 2. 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:为有效减少平原河网双季稻种植区农田氮素(N)损失并提高N肥利用率,采用聚氨酯包膜尿素与普通尿素掺混一次性施肥技术,探究控释掺混肥对早稻季氨挥发损失及N肥利用率的影响。连续两年(2018—2019年)在湖南益阳开展田间试验,设置不施N肥(CK)、常规施肥(CF)、聚氨酯包膜尿素(PuCU)、聚氨酯包膜尿素与普通尿素以6:4比例配比(0.6PuCU+0.4CF)共4个处理,采用半密闭通气法监测水稻生育期间氨挥发特征。结果表明:CF和0.6PuCU+0.4CF处理稻田氨挥发主要发生在移栽后10 d内,峰值出现于第2~3天和第10天;而PuCU处理整个早稻生长期氨挥发通量缓慢,略高于CK处理。早稻全生育期CF处理氨挥发损失量(率)最高,达 $39.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (22.22%), N肥吸收利用率(NRE)和N肥农学利用率(NAE)分别为29.19%和 $13.82 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; PuCU和0.6PuCU+0.4CF处理氨挥发损失量(率)分别为 $12.01 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (3.91%)和 $20.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (9.70%), NRE分别为60.22%和71.36%, NAE分别为 $18.99 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $20.34 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其中,0.6PuCU+0.4CF和PuCU处理早稻季总计氨挥发损失量较CF处理分别降低47.57%和69.56%,而NRE分别提高163.08%和116.29%, NAE分别提高69.85%和55.97%。Elovich方程能较好地拟合稻田氨挥发累积量随时间的变化趋势,各处理相关系数均达到极显著水平。相关分析表明,早稻季氨挥发通量与田面水 NH_4^+-N 浓度及pH呈显著正相关。研究表明,聚氨酯包膜尿素一次性基施能有效避免施肥后 NH_4^+-N 的急剧升高,减少稻田氨挥发损失,并提高早稻N肥利用率,而将其与尿素按比例进行互配能进一步促进N素吸收,提高N素利用效率,但氨挥发减排效果较单施聚氨酯包膜尿素低。

关键词:控释掺混肥;聚氨酯包膜尿素;氨挥发;稻田;氮肥利用率

中图分类号:S511.31 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)11-2539-13 doi:10.11654/jaes.2021-0946

Effects of combined application of coated ureas and ordinary ureas on ammonia volatilization in paddy fields

KANG Xingrong¹, ZHOU Xuan^{2*}, PENG Jianwei^{1*}, YANG Xiangdong³, XU Zhangqian¹, HUANG Yuelin¹, FEI Jiangchi¹

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha 410125, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: To effectively reduce the loss of N and improve the N fertilizer use rate in the double-cropping rice areas of plain river networks, this study used one-time fertilization with polyurethane-coated and common ureas to explore the effects of the controlled release fertilizer

收稿日期:2021-08-22 录用日期:2022-07-01

作者简介:康兴蓉(1994—),女,云南水富人,博士研究生,研究方向为新型肥料的研制。E-mail: ynsfkxr@126.com

*通信作者:彭建伟 E-mail: 314967900@qq.com; 周旋 E-mail: zhouxuan_123@126.com

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFD200703-3); 国家水稻产业技术体系(CARS-01-26); 湖南省农业科技创新资金项目(2019LS03-3); 湖南省自然科学基金青年基金项目(2019JJ50337)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2017YFD200703-3); The National Technical System of Rice Industry (CARS-01-26); The Hunan Agricultural Science and Technology Innovation Fund Project (2019LS03-3); The Hunan Natural Science Foundation Youth Fund Project(2019JJ50337)

on ammonia volatilization loss and N use efficiency in the early rice season. We conducted a field experiment for two consecutive years, 2018 to 2019, in Yiyang, Hunan Province, China. We set four treatments: no N fertilizer (CK), conventional fertilization (CF), polyurethane-coated urea (PuCU), and a 6:4 ratio of polyurethane-coated urea to common urea (0.6PuCU+0.4CF). We monitored the characteristics of ammonia volatilization during rice growth using semi closed ventilation. The results showed that ammonia volatilization mainly occurred within 10 days after fertilization under the CF and 0.6PuCU+0.4CF treatments, and the peak values occurred on the second to third and tenth days, respectively. However, the ammonia volatilization flux of the PuCU treatment was slow during the entire early rice-growing season, being slightly higher than that of the CK treatment. We observed the maximum ammonia volatilization loss (rate) of $39.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (22.22%) in the CF treatment, and the N recovery efficiency (NRE) and N agronomic efficiency (NAE) were 29.19% and $13.82 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The total ammonia volatilization loss (rate) of the PuCU and 0.6PuCU+0.4CF treatments were $12.01 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (3.91%) and $20.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (9.70%), respectively; the NRE were 60.22% and 71.36%, respectively; and the NAE were $18.99 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $20.34 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. Compared with that in the CF treatment, the total ammonia volatilization loss in the 0.6PuCU+0.4CF and PuCU treatments were lower by 47.57% and 69.56%, respectively, whereas NRE increased by 163.08% and 116.29% and NAE by 69.85% and 55.97%, respectively. The Elovich equation fit the variation trend of ammonia volatilization accumulation in rice fields with time, and the correlation coefficients of each treatment were extremely significant. From the results of correlation analysis, we found a significant positive correlation between ammonia volatilization flux and pH and the concentrations of NH_4^+-N in surface water during the early rice season. Overall, we found that a one-time base application of polyurethane-coated urea can effectively avoid the sharp rise in NH_4^+-N , reduce ammonia volatilization loss from paddy fields, and improve the N use efficiency of early rice. Moreover, combining these two ureas in proportion to each other can further promote N absorption and improve the N use rate, but their combined use has a weaker effect on ammonia volatilization reduction compared with the use of polyurethane-coated urea alone.

Keywords: controlled-release blended fertilizer; polyurethane-coated urea; ammonia volatilization; paddy field; nitrogen use efficiency

水稻是我国的主要粮食作物,我国水稻种植面积及产量分别约占全球的18.5%和27.7%,占我国粮食作物总量的27%和38%^[1]。在水稻生产过程中,农民为提高产量一味增加氮(N)肥施用量,过量施N现象普遍存在^[2-3]。长期不合理施用N肥造成水稻N肥利用率降低,损失量加大。据统计,施入土壤中的N有14%~52%以硝化反硝化、淋溶和氨挥发等形式损失,其中氨挥发占总N损失量的9%~40%^[4-6],为主要的损失途径^[7-9]。而氨通过干湿沉降又返回陆地和水体,造成土壤酸化、水体富营养化,加剧了温室效应^[10]。为加强农业面源污染控制,国家有关部门联合印发《农业农村污染治理攻坚战行动计划》,明确要求洞庭湖周边地区2020年化肥使用量比2015年减少10%以上^[11]。因此,迫切需要优化N肥施用以满足作物需求,并减少氨挥发造成的N素损失^[12]。

一般而言,氨挥发损失主要受土壤条件,气候因子和肥料种类、用量及施用方式等因素的影响,其损失量会随着施N量的增加而增加^[13]。合理的N肥施用既符合水稻N素的吸收规律,提高N素利用率,又能减少稻田中氨挥发、径流、渗漏等方式的N素损失,减轻对生态环境的影响^[14]。缓/控释N肥可控制N素释放速率,从而满足水稻生长需肥规律,提高N肥利用率,减少稻田氨排放^[15],但存在作物前期生长迟缓

等问题,因此推广难度较大。基于不同土壤地力和作物对养分的需求,将缓释肥料和普通肥料按比例进行复配,使其释放特性与作物需肥规律相匹配,可显著提高肥料利用率^[16-17]。这种施用方法操作简单、价格低廉,为缓释肥在大田作物上的普及提供了可能^[18-19]。

尿素是世界范围内应用最广泛的农业N源^[20]。聚氨酯(PUR)全称为聚氨基甲酸酯,作为包膜材料用于制备控释包膜肥,具有生产成本低、制备工艺简单、易实现连续化等优点^[3,21-22],已成为最有前景的膜材类别^[23-24]。目前,关于聚氨酯包膜尿素与普通尿素配比施用对稻田氨挥发减排的研究鲜有报道。本课题组连续两年在洞庭湖双季稻种植区开展聚氨酯包膜尿素与普通尿素配比对双季早稻氮肥利用率及氨挥发特征影响的研究,并探讨其影响因子,以期阻控平原河网区氨挥发、提高N肥利用率以及控释掺混肥的推广提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2018年和2019年的3—7月在湖南省益阳市赫山区兰溪镇桐木垵村稻田($28^{\circ}58'25''\text{N}$, $112^{\circ}45'47''\text{E}$)进行。该地属中亚热带向北亚热带过渡的

季风湿润性气候,年均气温 16.9 ℃,年无霜期 272 d,年日照时数 1 554 h,年均降雨量 1 433 mm^[25-26]。供试土壤为第四纪红土发育的红黄泥,中等地力,前茬为水稻,两年水稻分别种植在相邻田块上,0~20 cm 耕层土壤基本理化性质见表 1^[3,25]。

2018 年和 2019 年早稻季降水及温度情况如图 1 所示,数据由益阳市气象局提供。2018 年和 2019 年双季早稻生长期(4—7 月)累计降雨量分别为 348.6 mm 和 558.9 mm,平均气温分别为 25.4 ℃和 23.9 ℃,其中 4 月和 5 月降雨量分别为 261.9 mm 和 333.6 mm。2018 年较大降雨发生于 4 月 23 日、4 月 30 日和 5 月 6 日,分别为 38.1、31.6 mm 和 35.0 mm;2019

年较大降雨发生于 4 月 29 日、5 月 12 日和 7 月 12 日,分别为 57.3、57.3 mm 和 84.5 mm。

1.2 试验材料

供试水稻品种为湘早籼 45 号,全生育期 106 d 左右。供试肥料为聚氨酯包膜尿素(含 N 44%),N 素释放周期约为 90 d,由中国农业科学院农业资源与农业区划研究所提供;尿素(N 46%)、钙镁磷肥(P₂O₅ 12%)和氯化钾(K₂O 60%)均由当地农资部门提供。

1.3 试验设计

试验共设置 4 个处理:①CK,不施 N 肥;②CF (Conventional fertilization),常规施肥,N 用量为 150 kg·hm⁻²,普通尿素按基肥:分蘖肥=6:4 施用;③PuCU

表 1 2018—2019 年供试土壤基本理化性质								
Table 1 Physical and chemical properties of soil tested in 2018—2019								
年份 Year	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali hydrolyzed N/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)	pH
2018	31.96	1.88	2.35	11.01	129.45	20.45	149.32	4.65
2019	34.11	1.69	3.70	11.49	149.02	25.57	161.72	4.85

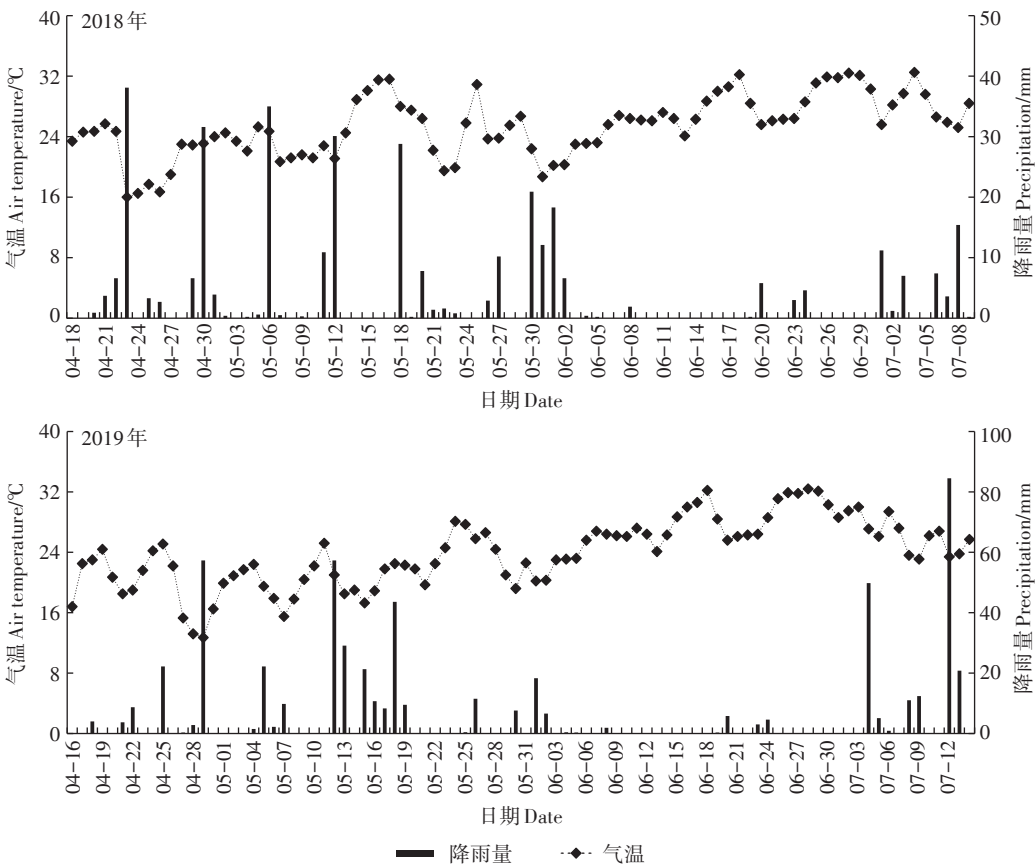


图 1 2018—2019 年早稻季降水及大气温度
Figure 1 Precipitation and atmospheric temperature in early rice season for 2018—2019

(Polyurethane coated urea), 聚氨酯包膜尿素一次性基肥施用; ④0.6PuCU+0.4CF, 60%N 聚氨酯包膜尿素+40%N 普通尿素一次性基肥施用。各处理 P_2O_5 用量为 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O 用量为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 均作基肥一次性施用。各处理具体施肥情况见表2。种植密度为 $17.5 \text{ cm} \times 25.0 \text{ cm}$, 小区面积 $21 \text{ m}^2 (3 \text{ m} \times 7 \text{ m})$ 。各处理均重复3次, 随机区组排列。小区田埂用农膜覆盖, 四周设保护行, 避免串水串肥, 田间管理按当地习惯方式。2018年和2019年早稻播种日期分别为3月17日和3月12日, 基肥日期分别为4月18日和4月16日, 追肥日期均为4月24日, 移栽日期分别为4月19日和4月17日, 收获日期分别为7月10日和7月14日。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 氨挥发采集及测定

氨挥发采用半密闭法测定^[27-28]。气体收集装置由内径15 cm、高40 cm的聚氯乙烯(PVC)硬质管制成。将两块厚度为2 cm、直径为16 cm的海绵均匀浸以15 mL磷酸甘油溶液后, 置于PVC管中, 下层海绵距离地表6 cm, 上层海绵与PVC管顶部齐平。采样时, 取出上层海绵后, 将下层海绵用封口袋装好带回实验室浸提测定, 更换下层海绵, 上层海绵更换磷酸甘油后仍放置在上层以阻挡空气中氨进入。将收集的下层海绵浸泡在200 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl溶液中, 振荡1 h, 用全自动间歇性化学分析仪(SmartChem 200)测定浸提液中 NH_4^+-N 含量, 计算氨挥发通量。

在施肥后第1、3、5、7、8、10、14天连续收集气体样品, 之后每7 d采集一次, 直至水稻成熟期结束。

$$F_{\text{NH}_3} = m \times A^{-1} \times t^{-1} \times 10$$

$$m = C \times V \times M_o$$

式中: F_{NH_3} 为氨挥发通量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; m 为平均每次测得的氨量(NH_4^+-N), g; A 为捕获装置的横截面积, m^2 ; t 为每次连续捕获的天数, d; C 为KCl浸取液中 NH_4^+-N 浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为KCl浸取液的体积, 200 mL; M_o 为氨的摩尔质量, $17 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

氨挥发累积损失量的计算公式^[29]如下:

$$Af = \sum_{i=1}^n \left[\frac{V_i + V_{i-1}}{2} \times (T_i - T_{i-1}) \right]$$

式中: Af 为氨挥发累积损失量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; n 为施肥后测定的总次数; V_i 为第 i 次测定时的氨挥发速率, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; T_i 为第 i 次测定时的施肥后天数; $T_i - T_{i-1}$ 为两个相邻测定日期之间的时间间隔, d。

氨挥发损失率=(施N区氨挥发累积N损失量-不施N区氨挥发累积N损失量)/施N量 $\times 100\%$

1.4.2 植株采集及测定

各小区采集成熟期水稻植株5穴, 样品清洗、剪碎、混匀后于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青30 min, 之后 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至质量恒定, 测定地上部干质量, 粉碎过筛后, 经 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 消煮, 采用凯氏定氮法测定全N含量。

N肥利用效率的计算公式^[30-31]如下:

N肥吸收利用率(NRE, %)=(施N区地上部植株吸N量-空白区地上部植株吸N量)/施N量 $\times 100\%$

N肥农学利用率(NAE, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=(施N区产量-空白区产量)/施N量

N肥生理利用率(NPE, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=(施N区产量-空白区产量)/(施N区地上部植株吸N量-空白区地上部植株吸N量)

N肥偏生产力(NPEP, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=施N区产量/施N量

1.4.3 田面水采集及测定

采用100 mL医用注射器, 在不扰动水层的前提下, 按对角线取样, 每个小区取5点田面水约300 mL装于塑料瓶, 采用Smartchem 200全自动间断化学分析仪测定田面水pH和 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 浓度。

1.5 数据处理

采用Excel 2016和SPSS 17.0软件进行数据统计分析, 处理间差异显著性分析采用最小显著差异法(LSD)。采用Pearson相关系数分析氨挥发通量与田面水pH、 NH_4^+-N 浓度、降雨量及大气温度之间的关系。采用Origin 8.5软件制图及进行方程拟合^[32]。

表2 不同处理施肥用量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 2 Application rate under different fertilization treatments($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	肥料养分 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	基肥 Basal			追肥 Dressing	
		包膜尿素 Coated urea	尿素 Urea	钙镁磷肥 Calcium magnesium phosphate	氯化钾 Potassium chloride	尿素 Urea
CK	0-45-90	—	—	375	150	—
CF	150-45-90	—	196	375	150	130
PuCU	150-45-90	341	—	375	150	—
0.6PuCU+0.4CF	150-45-90	205	130	375	150	—

Elovich 方程: $Q_t = a + b \ln t$

式中: Q_t 为氨挥发累积量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; a 为第 1 天氨挥发累积量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; b 为氨挥发速率, 即单位时间内的氨挥发量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; t 为监测时间。

2 结果与分析

2.1 双季早稻田氨挥发动态变化

如图 2 所示, 2018 年和 2019 年早稻季全生育期氨挥发通量变化表现基本一致。基肥施用后, 各施肥处理在前 3 d 内陆续出现峰值, CF 处理分别为 $4.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $5.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 0.6PuCU+0.4CF 处理分别为 $3.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $3.21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, PuCU 处理分别为 $0.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.86 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。速效 N 肥快速释放使氨挥发加快, 因此 CF 处理氨挥发通量较高, PuCU 处理氨挥发通量一直较低, 显著低于 CF 处理, 而略高于 CK 处理。与 CF 处理相比, 0.6PuCU+0.4CF 和 PuCU 处理峰值分别降低 26.54%~36.68% 和 83.04%~84.36%。移栽后第 10 天, CF 处理氨挥发通量又出现峰值, 分别为 $2.33 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和

$3.09 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 之后逐渐下降。水稻生育后期各施肥处理氨挥发通量均趋于 CK 处理。

2.2 双季早稻田全生育期氨挥发损失量

2.2.1 氨挥发累积动态

由图 3 可知, 移栽后第 10 天, 与 CK 处理相比, 2018 年 CF 和 0.6PuCU+0.4CF 处理氨挥发累积量分别增加 $21.13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $11.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 2019 年分别增加 $20.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $10.57 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 与 CF 处理相比, 2018 年 PuCU 和 0.6PuCU+0.4CF 处理氨挥发累积量分别减少 $20.44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $9.47 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 2019 年分别减少 $18.21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $10.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。施肥后, 速效 N 前期快速释放, CF 处理氨挥发快速累积且累积量较高, 而 PuCU 和 0.6PuCU+0.4CF 处理氨挥发缓慢, 显著低于 CF 处理。2018 年早稻分蘖盛期 (第 36 天) PuCU 和 0.6PuCU+0.4CF 处理氨挥发累积量较 CF 处理分别降低 83.00% 和 55.22%, 2019 年 (第 42 天) 分别降低 65.36% 和 45.29%。

2.2.2 氨挥发损失量

由表 3 可知, 施肥处理对双季早稻基肥期、追肥

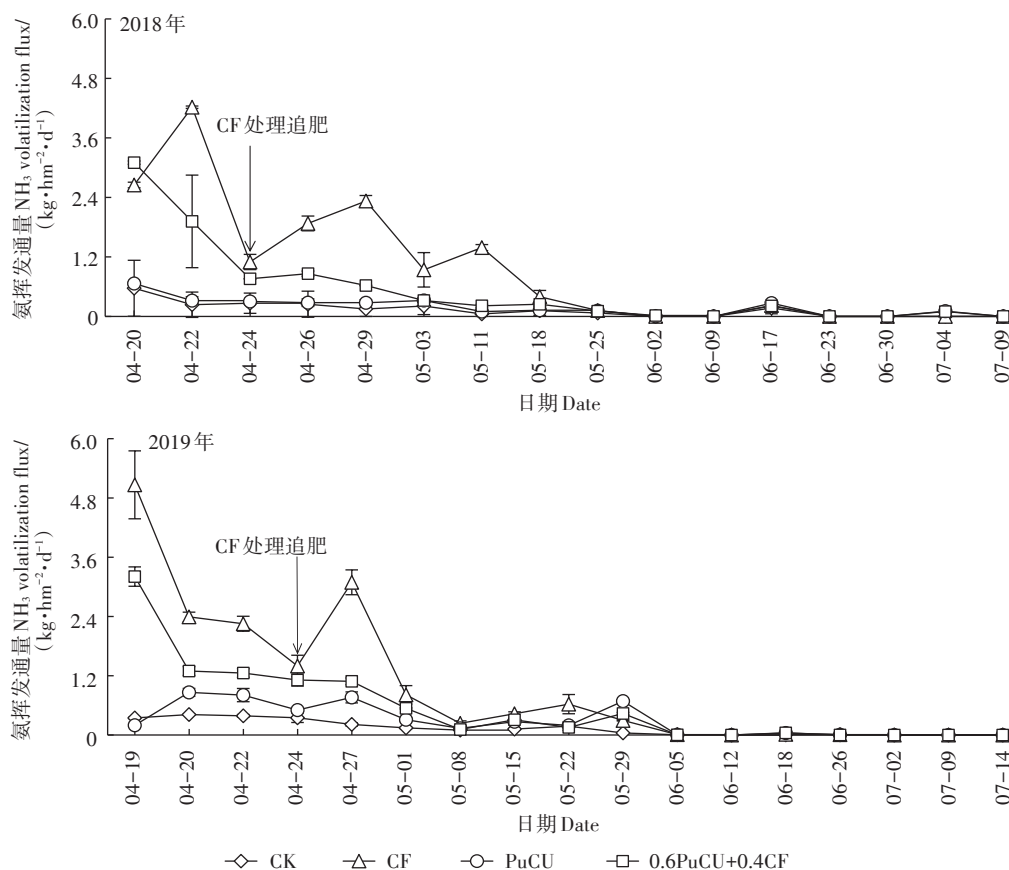


图 2 不同施肥处理下早稻季全生育期氨挥发通量

Figure 2 NH₃ volatilization flux during the whole growth period of early rice season under different fertilization treatments

期和整个生育期氨挥发损失量(率)效应极显著($P<0.01$), 年份和年份与施肥处理间交互效应对双季早稻各时期氨挥发损失量(率)效应不显著($P>0.05$)。各施肥处理早稻全生育期间氨挥发损失量(率)均高

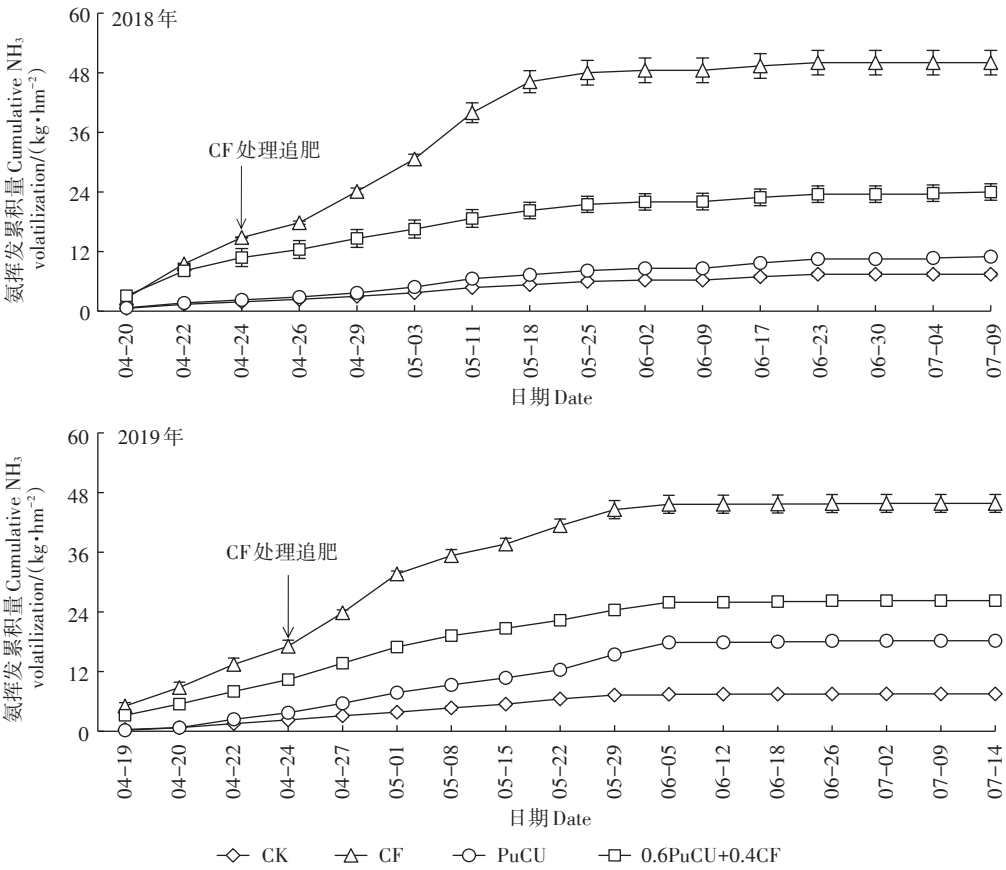


图3 不同施肥处理下稻田氨挥发累积量

Figure 3 Cumulative NH₃ volatilization in paddy field under different fertilization treatments

表3 不同施肥处理下稻田氨挥发损失量和损失率

Table 3 NH₃ loss and rate in paddy field under different fertilization treatments

年份 Year	处理 Treatment	基肥期 Basal fertilizer		追肥期 Topdressing		总计 Total	
		损失量	损失率	损失量	损失率	损失量	损失率
		Cumulative loss/(kg·hm ⁻²)	Loss rate/%	Cumulative loss/(kg·hm ⁻²)	Loss rate/%	Cumulative loss/(kg·hm ⁻²)	Loss rate/%
2018	CK	1.54c	—	4.58c	—	6.12c	—
	CF	12.22a	7.12a	28.99a	16.28a	41.21a	23.39a
	PuCU	1.87c	0.22c	7.17c	1.73c	9.04c	1.94c
	0.6PuCU+0.4CF	8.89b	4.90b	10.87b	4.20b	19.76b	9.09b
2019	CK	1.87c	—	4.31c	—	6.18d	—
	CF	14.08a	8.14a	23.66a	12.90a	37.74a	21.04a
	PuCU	3.03c	0.79c	11.93b	5.08b	14.99c	5.88c
	0.6PuCU+0.4CF	8.55b	4.45b	13.08b	5.85b	21.63b	10.30b
年份 Year(Y)		ns	ns	ns	ns	ns	ns
处理 Treatment(T)		***	**	**	**	***	**
年份×处理 Y×T		ns	ns	ns	ns	ns	ns

注: 同列数据后不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。*、**和***分别表示在0.05、0.01和0.001水平上差异显著, ns表示差异不显著。下同。
Note: The different letters after the same column data is significant ($P<0.05$). *, **, and *** show significant differences at the levels of 0.05, 0.01, and 0.001, respectively; ns is not significant. The same below.

于CK处理。两年CF处理早稻全生育期氮挥发损失量(率)均值为 $39.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (22.22%)。PuCU和 $0.6\text{PuCU}+0.4\text{CF}$ 处理氮挥发损失总量(率)分别为 $12.01 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (3.91%)和 $20.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (9.70%)。与CF处理相比, $0.6\text{PuCU}+0.4\text{CF}$ 和 PuCU 处理氮挥发损失总量分别降低了47.57%和69.56%。

2.3 双季早稻田全生育期田面水动态变化

2.3.1 田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度

如图4所示,基肥施用后第1天,CF处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度达峰值,2018年和2019年分别为 $10.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.6\text{PuCU}+0.4\text{CF}$ 和 PuCU 处理分别较CF处理降低18.95%和47.86%。2018年移栽后第7天和2019年移栽后第10天,CF处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度再次出现峰值($9.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $16.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),而施用包膜尿素处理大幅下降。水稻生长后期,各施肥处理田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度逐渐降低,趋于CK处理。

2.3.2 田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度

如图5所示,基肥施用后前3 d,各处理田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度出现峰值,CF处理2018年和2019年分别

为 $1.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.6\text{PuCU}+0.4\text{CF}$ 和 PuCU 处理较CF处理分别降低22.12%和46.12%。2018年移栽后第7天和2019年移栽后第10天,CF处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度再次出现峰值($0.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),而施用包膜尿素处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度大幅下降。水稻生长后期,各施肥处理田面水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度逐渐降低,趋于CK处理。

2.3.3 田面水 pH 变化

如图6所示,基肥施用后田面水 pH 两年均呈先增加后降低的趋势。CF和 $0.6\text{PuCU}+0.4\text{CF}$ 处理田面水 pH 快速上升达到峰值,2018年分别为7.45和7.04、2019年分别为7.96和7.42,而PuCU处理增幅较小。水稻生长后期,各施肥处理田面水 pH 逐渐降低,趋于CK处理。

2.4 双季早稻氮肥利用率

由表4可知,施肥处理对双季早稻成熟期N素吸收量及N肥利用效率效应显著或极显著,而年份效应不显著($P>0.05$, NAE除外),施肥处理与年份间的交互效应也不显著($P>0.05$)。2018年和2019年双季早

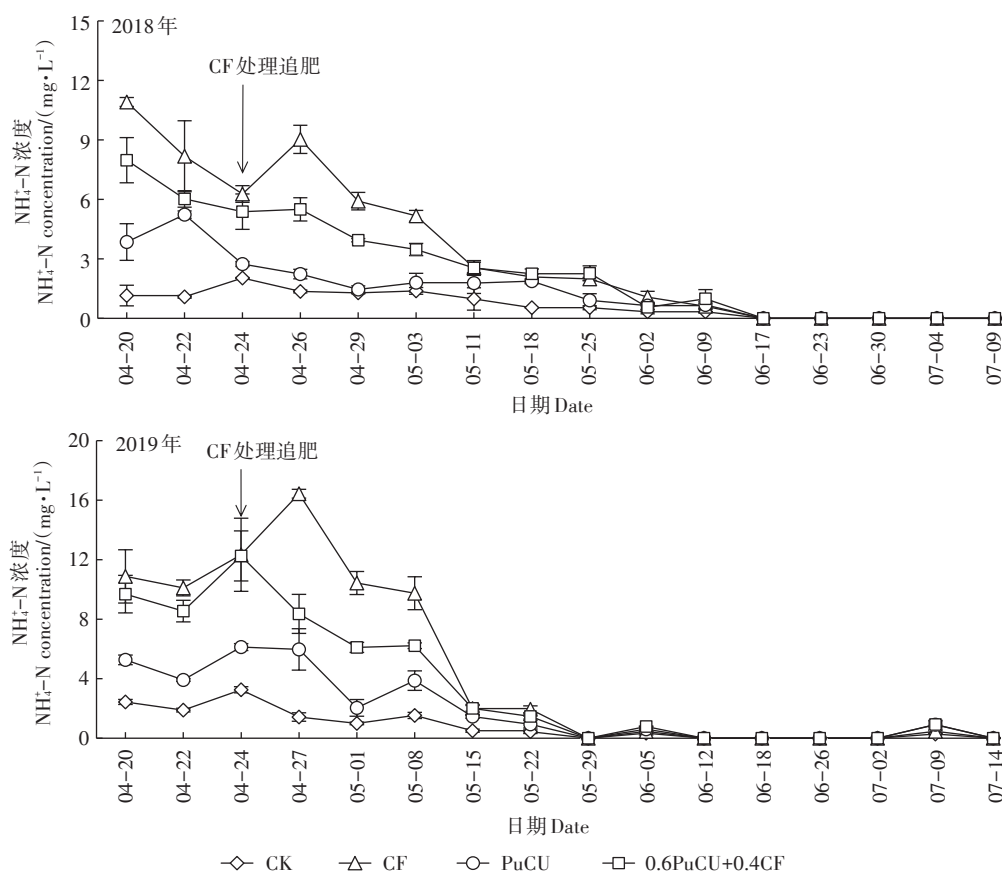


图4 不同施肥处理下早稻季田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度

Figure 4 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in surface water of early rice field under different fertilization treatments

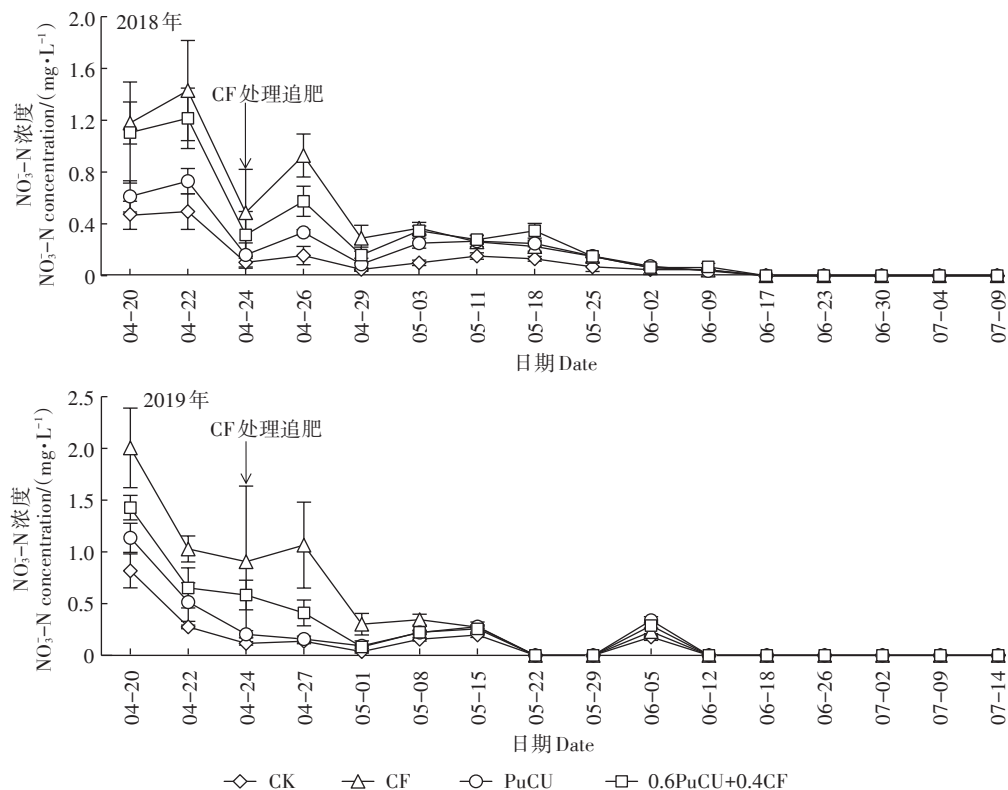
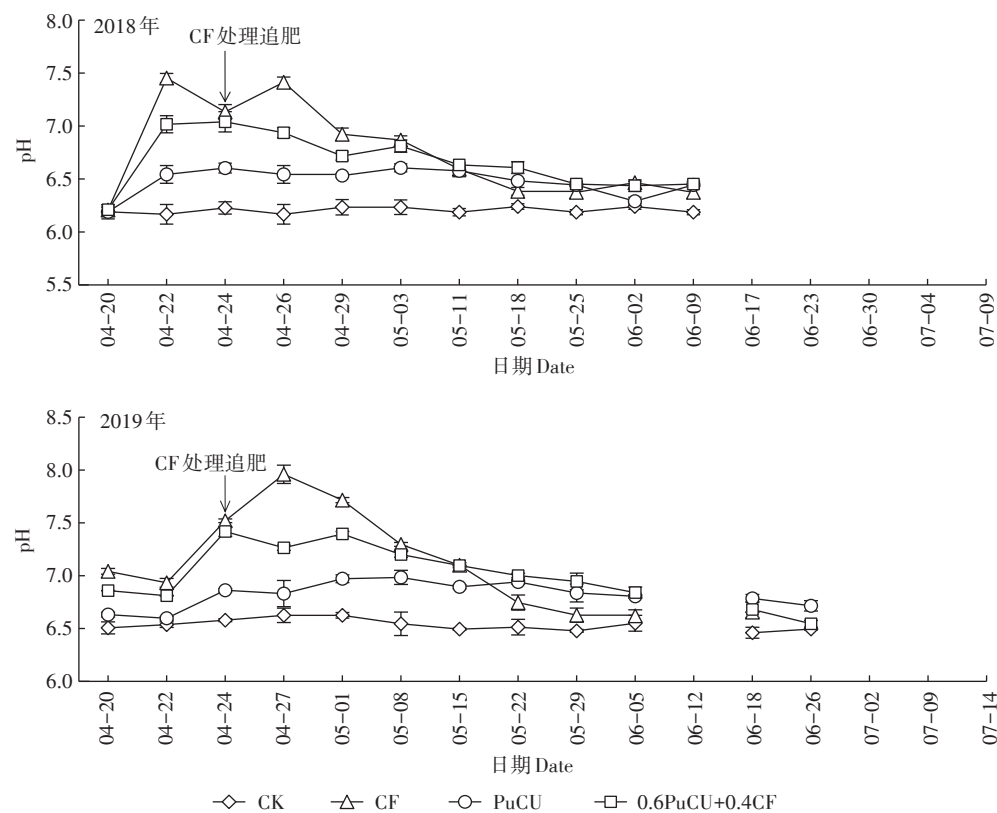
图5 不同施肥处理下早稻季田面水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度Figure 5 $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration in surface water of early rice field under different fertilization treatments

图6 不同施肥处理下早稻季田面水 pH

Figure 6 Surface water pH of early rice field under different fertilization treatments

表4 不同施肥处理下双季早稻氮素吸收量及氮肥利用率

Table 4 N uptake and its use efficiency of double cropping early rice under different fertilization treatments

年份 Year	处理 Treatment	氮素吸收量 N uptake/(kg·hm ⁻²)	氮肥吸收利用率 NRE/%	氮肥农学利用率 NAE/(kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 NPFP/(kg·kg ⁻¹)	氮肥生理利用率 NPE/(kg·kg ⁻¹)
2018	CK	90.41c	—	—	—	—
	CF	144.49b	36.05b	19.50a	46.22a	55.96a
	PuCU	184.39a	62.65a	21.61a	48.32a	35.18b
	0.6PuCU+0.4CF	189.84a	66.29a	22.37a	49.08a	35.09b
2019	CK	85.53d	—	—	—	—
	CF	119.03c	22.33c	8.14b	42.37b	40.90a
	PuCU	172.22b	57.79b	16.37a	50.60a	28.42a
	0.6PuCU+0.4CF	200.19a	76.43a	18.31a	52.55a	23.94a
年份 Year(Y)		ns	ns	***	ns	ns
处理 Treatment(T)		***	***	**	**	*
年份×处理 Y×T		ns	ns	ns	ns	ns

稻成熟期施N处理N素吸收量较CK处理分别增加59.81%~109.98%和39.17%~134.05%;早稻全生育期CF处理N肥NRE和NAE分别为29.19%和13.82 kg·kg⁻¹, PuCU和0.6PuCU+0.4CF处理的NRE分别为60.22%和71.36%, NAE分别为18.99 kg·kg⁻¹和20.34 kg·kg⁻¹。与CF处理相比,0.6PuCU+0.4CF和PuCU处理双季早稻N素吸收量分别显著增加49.79%和36.15%, NRE分别提高163.08%和116.29%, NAE分别提高69.85%和55.97%, NPFP分别提高15.10%和11.99%。

2.5 相关性分析

由表5可知,各施肥处理氨挥发通量与田面水NH₄⁺-N浓度呈显著正相关,与降雨量相关性不显著。施肥后,前期田面水NH₄⁺-N浓度、pH迅速增加,稻田氨快速挥发,而大气温度、降雨量与氨挥发量并未表现出一致性,说明氨挥发主要受田面水N素浓度、pH变化的影响。

2.6 氨挥发动力学模型

由表6可知,将不同处理氨挥发累积量随时间变化用Elovich方程进行拟合,其相关性均达到极显著水平($P<0.01$),但该动力学模型对不同处理氨挥发的拟合程度存在差异。参数 b 为斜率,可表征不同处理下氨的挥发强度,不同处理 b 值大小表现为CF>0.6PuCU+0.4CF>PuCU>CK,这与氨排放累积量变化趋势基本一致。通过2018年模型计算出2019年理论氨挥发累积量与实际氨挥发累积量相近,表明所建立的氨挥发累积动力学模型拟合性较好。

3 讨论

3.1 聚氨酯控释掺混肥对稻田氨挥发损失的影响

大量研究认为,速效N肥一次性基施不是合理的施肥方式,不能满足植株全生育期的养分需求,且会加剧N素损失^[33-34]。李菊梅等^[35]研究发现,稻田生态系统施用尿素后氨挥发损失比例高达37.8%。本研

表5 稻田氨挥发与田面水氮素浓度及气候条件的相关系数

Table 5 Correlation coefficients of ammonia volatilization in paddy field with N concentration in surface water and climatic conditions

年份 Year	处理 Treatment	田面水 NH ₄ ⁺ -N 浓度 NH ₄ ⁺ -N concentration	降雨量 Precipitation	气温 Air temperature	pH
2018	CK	0.662**	-0.057	-0.386	0.434
	CF	0.856**	0.102	-0.424	0.558*
	PuCU	0.723**	-0.096	-0.311	0.395
	0.6PuCU+0.4CF	0.863**	-0.039	-0.278	0.379
2019	CK	0.896**	0.054	-0.511*	0.499
	CF	0.860**	-0.018	-0.587*	0.547*
	PuCU	0.723**	0.021	-0.614*	0.507*
	0.6PuCU+0.4CF	0.889**	0.015	-0.535*	0.493

表6 不同施肥处理下氨挥发累积动力学模型

Table 6 Dynamic model of ammonia volatilization under different fertilization treatments

处理 Treatment	2018年			2019年	
	$Q_t/(kg \cdot hm^{-2})$	R^2	标准误差 SE	t	氨挥发累积量 Accumulation of NH_3 volatilization/($kg \cdot hm^{-2}$)
CK	$1.79 \ln t - 0.56$	0.97**	0.46	88	7.50
CF	$12.59 \ln t - 1.98$	0.96**	3.44	88	45.83
PuCU	$2.64 \ln t - 1.29$	0.95**	0.81	88	18.23
0.6PuCU+0.4CF	$4.87 \ln t + 3.21$	1.00**	0.47	88	26.29

究中,CF处理早稻季氨挥发总量两年平均为 $39.48 kg \cdot hm^{-2}$,损失率高达22.22%,与前人研究结果接近^[36]。XU等^[7]研究发现,普通尿素和包膜尿素处理双季稻田氨挥发损失分别占施N量的16%~30%和4%~8%。等施N量下,缓控释肥料较常规化肥分次施用能减少稻田氨挥发排放量13.80%~86.36%^[37]。邬刚等^[38]研究发现,控释N肥可减少江淮丘陵区稻田26.2%的氨挥发。本研究中,洞庭湖区早稻季PuCU处理氨挥发损失量(率)仅为 $12.01 kg \cdot hm^{-2}$ (3.91%),较CF处理降幅显著。

氨挥发峰值的出现与施肥时期密切相关^[33]。唐良梁等^[39]的研究发现,水稻季氨挥发持续的时间较短,主要发生在施肥后的一周内。追肥是造成氨挥发的重要原因,本研究中CF处理在追肥后产生的氨排放占比高,控释包膜肥一次性施用处理在水稻生长中后期几乎无氨产生。CF与0.6PuCU+0.4CF处理氨挥发速率在前3 d达到峰值,PuCU处理整个水稻生长季未出现峰值,与前人研究结果相似^[15,40],即控释包膜肥施用推迟氨挥发速率峰值的出现。此外,0.6PuCU+0.4CF处理会增加水稻生长前期的氨挥发量,但与CF处理相比,损失量仍平均降低47.57%。

3.2 影响双季稻田氨挥发的相关因子

土壤溶液中pH和 NH_4^+ 浓度是氨挥发的重要影响因素,施用N肥会提高土壤中 NH_4^+-N 浓度和田面水pH^[41]。2018年施肥后第5天与2019年施肥后第14天,氨挥发量可能受前1~2 d降雨的影响而骤然下降。控释肥料施入土壤后,养分释放相对缓慢持久,与施速效N肥相比可降低肥料施入时土壤中的 NH_4^+-N 浓度和田面水pH^[42]。本研究中,聚氨酯包膜尿素能减缓尿素的水解速率,调控水稻生长前期的土壤N素养分释放,显著降低田面水 NH_4^+-N 浓度及pH^[7],抑制N素的挥发损失,而将60%PuCU与40%CF进行配施既可降低田面水 NH_4^+-N 浓度,又能满足水稻生长后期所需养分。本研究中氨挥发通量与田面水 NH_4^+-N 浓度在水稻整个生育期规律趋于一致,但

各处理氨挥发通量峰值并不完全对应,这与俞映惊等^[43]和吴萍萍等^[44]的研究结论相似。施肥后稻田氨挥发量主要受田面水中 NH_4^+-N 平均浓度影响,但每日氨挥发通量还会受其他多种环境因素的综合影响^[44]。

稻田土壤氨挥发主要影响因素为表层水氨分压和风速等气候因子,降低稻田N素挥发损失的主要途径应为减少其表层水 NH_4^+-N 浓度^[43]。氨挥发与稻田水温存在较好的正相关关系。虽然控释尿素养分释放慢,但由于速效氮的水解及此时期稻田有较高的水层,肥料颗粒密度小,大量浮在水层上面,加上施肥期间背景气温高,使得田面水和土壤中 NH_4^+-N 浓度迅速增加,促进了氨的挥发^[45]。吴萍萍等^[44]的研究表明,一定范围内,温度升高能提高脲酶活性,促进尿素分解。温度升高增加液相中 NH_4^+-N 的比例,从而促进氨挥发作用^[46]。而本研究中大气温度、降雨量与氨挥发量并未表现出一致性,反映出田间环境条件的复杂性。

3.3 聚氨酯控释掺混肥对水稻氮肥利用率的影响

研究表明,施用缓释N肥可有效增加水稻产量,提高肥料利用率,减少施肥成本,降低环境污染^[47-48]。本研究中,PuCU处理不仅能在生长前期降低氨挥发损失,使养分释放周期延长,而且后期能满足作物对养分的需求。两年间,在P、K肥用量和施用方法一致的条件下,0.6PuCU+0.4CF处理较CF处理平均提高水稻N素吸收、NAE和NPFP分别为49.79%、69.85%和15.10%,提高NRE高达71.36%,且产量和经济效益分别提高15.10%和16.93%^[25],高于陈琨等^[49]的研究结果。因此,施用聚氨酯控释掺混肥可显著提高洞庭湖区水稻N素累积量及N肥利用效率,该方法适合在该区域进行推广。

陈贤友等^[50]的研究表明,硫磺加树脂双层包膜尿素与普通尿素的掺混比例达70%以上且一次性基施($N 210 kg \cdot hm^{-2}$)可满足水稻整个生育期N肥需求,增产显著,NAE和NRE明显提高。付月君等^[51]则发现,一次性基施40%缓释N肥+60%尿素处理($N 150 kg \cdot$

hm⁻²)的水稻N肥利用率在各处理中最高。本研究中,与CF处理相比,施用控释N肥均不同程度避免了尿素迅速水解释放养分的问题,有效协调了水稻全生育期的N素供应,且0.6PuCU+0.4CF处理的增产效果优于PuCU处理。这可能是由于双季早稻生长初期气温较低,PuCU处理的溶出速率受到抑制,前期生长受到养分短缺的影响,而0.6PuCU+0.4CF处理因掺混比例较为适宜,既能在早稻生长前期通过尿素提供适量的速效养分,又能增加生长后期土壤N素的供应强度,降低N肥损失的风险^[52]。0.6PuCU+0.4CF处理较PuCU处理早稻NRE平均提高19.03%。研究表明,聚氨酯尿素掺混普通尿素能较全面协调作物全生育期的N素需求,促进早稻生长,进而发挥其增产潜力。

4 结论

本试验条件下,施用控释包膜肥能显著降低双季早稻田氮挥发损失,且单施包膜尿素和控释掺混尿素处理稻田氮挥发累积损失量较常规施肥处理分别显著降低69.56%和47.57%。施用聚氨酯控释掺混肥能有效利用前期尿素释放N素较快、后期控释N肥缓释的特点,保证水稻生长过程中N素的充分供应,改善植株N素的营养状况,在降低氮挥发损失的同时提高作物N肥利用效率,进而实现减排、增效。

参考文献:

- [1] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 等. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3404-3414. ZHU D F, ZHANG Y P, CHEN H Z, et al. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3404-3414.
- [2] 刘红江, 郭智, 郑建初, 等. 太湖地区氮肥减量对水稻产量和氮素流失的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 713-718. LIU H J, GUO Z, ZHENG J C, et al. Effects of nitrogen reduction on rice yield and nitrogen loss in Taihu area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(3): 713-718.
- [3] 周旋, 康兴蓉, 彭建伟, 等. 聚氨酯包膜氮肥减施对双季早稻生长、产量及经济效益的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(7): 153-161. ZHOU X, KANG X R, PENG J W, et al. Effects of reduction application of polyurethane coated urea on growth, yield and economic benefit of double-cropping early rice[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(7): 153-161.
- [4] 赵冬, 颜廷梅, 乔俊, 等. 太湖地区稻田氮素损失特征及环境效应分析[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1149-1154. ZHAO D, YAN T M, QIAO J, et al. Characteristics of N loss and environmental effect of paddy field in Taihu area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(6): 1149-1154.
- [5] 李艳, 唐良梁, 陈义, 等. 施氮量对水稻氮素吸收、利用及损失的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 392-397. LI Y, TANG L L, CHEN Y, et al. The effects of nitrogen application rates on uptake, utilization, and losses of nitrogen for rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(2): 392-397.
- [6] 薛欣欣, 吴小平, 张永发, 等. 控失尿素对稻田氮挥发、氮素转运及利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 133-140. XUE X X, WU X P, ZHANG Y F, et al. Effects of loss-controlled urea on ammonia volatilization, nitrogen translocation and utilization efficiency in paddy rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 133-140.
- [7] XU M G, LI D C, LI J M, et al. Polyolefin-coated urea decreases ammonia volatilization in a double rice system in southern China[J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105(1): 277-284.
- [8] GAO S, XU P, ZHOU F, et al. Quantifying nitrogen leaching response to fertilizer additions in China's cropland[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 211: 241-251.
- [9] HOU X, ZHOU F, LEI P A, et al. Spatial patterns of nitrogen runoff from Chinese paddy fields[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 231: 246-254.
- [10] MARTINS M R, SANTANNA S A C, ZAMAN M, et al. Strategies for the use of urease and nitrification inhibitors with urea: Impact on N₂O and NH₃ emissions, fertiliser-¹⁵N recovery and maize yield in a tropical soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 247: 54-62.
- [11] 杜察文. 湖南省洞庭湖区化肥减量数据虚假失真[N]. 中国环境报, 2021-04-29(5版). DU C W. Fertilizer reduction data in Dongting Lake district of Hunan Province are false and distorted[N]. *China Environment News*, 2021-04-29(5th Page).
- [12] XIA L, LAM S K, CHEN D, et al. Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission --and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 1917-1925.
- [13] WANG H, ZHANG D, ZHANG Y, et al. Ammonia emissions from paddy fields are underestimated in China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 482-488.
- [14] 蒋曦龙, 陈宝成, 张民, 等. 控释肥氮素释放与水稻氮素吸收相关性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 215-220. JIANG X L, CHEN B C, ZHANG M, et al. Study on the correlation between nitrogen release dynamics of controlled-release fertilizer and nitrogen uptake of the rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1): 215-220.
- [15] 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NH₃挥发与N₂O排放特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1901-1909. SUN X X, LI D P, WU Z J, 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.
- [16] 李敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对水稻产量、光合特性及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 808-815. LI M, GUO X S, YE S Y, et al. Effects of sulfur-and polymer-coated controlled release urea on yield, photosynthetic char-

- acteristics and nitrogen fertilizer efficiency of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(4):808-815.
- [17] 王晓琪, 朱家辉, 陈宝成, 等. 控释尿素不同比例配施对水稻生长及土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4):178-182. WANG X Q, ZHU J H, CHEN B C, et al. Effects of different proportion of controlled-release urea on rice growth and soil nutrient[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4):178-182.
- [18] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 紫云英与尿素或控释尿素配施对双季稻产量及氮钾利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2):360-368. LU Y H, LIAO Y L, NIE J, et al. Effect of different incorporation of Chinese milk vetch coupled with urea or controlled release urea on yield and nitrogen and potassium nutrient use efficiency in double-cropping rice system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(2):360-368.
- [19] 黄巧义, 唐拴虎, 张发宝, 等. 减氮配施控释尿素对水稻产量和氮肥利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6):829-838. HUANG Q Y, TANG S H, ZHANG F B, et al. Effect of combined application of controlled-release urea and conventional urea under reduced N rate on yield and N utilization efficiency of rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(6):829-838.
- [20] FORRESTAL P J, HARTY M A, CAROLAN R, et al. Can the agronomic performance of urea equal calcium ammonium nitrate across nitrogen rates in temperate grassland[J]. *Soil Use and Management*, 2017, 33(2):243-251.
- [21] 王国喜, 李青山, 茹铁军, 等. 聚氨酯缓/控释肥制备与膜层表征[J]. 聚氨酯工业, 2010, 25(3):16-18, 41. WANG G X, LI Q S, RU T J, et al. Preparation and film characterization of polyurethane-coated urea slow/controlled release fertilizer[J]. *Polyurethane Industry*, 2010, 25(3):16-18, 41.
- [22] 陈杰, 程锐, 曲均峰, 等. 聚氨酯包膜控释尿素制备工艺与养分释放特性研究[J]. 化肥工业, 2014, 41(2):11-15. CHEN J, CHENG R, QU J F, et al. Study of preparation technology and nutrient release characteristics of polyurethane coated controlled release urea[J]. *Chemical Fertilizer Industry*, 2014, 41(2):11-15.
- [23] LI Q S, WU S, RU T J, et al. Synthesis and performance of polyurethane coated urea as slow/controlled release fertilizer[J]. *Journal of Wuhan University of Technology:Material Science in English*, 2012, 27(1):126-129.
- [24] YANG Y C, ZHANG M, LI Y C, et al. Improving the quality of polymer-coated urea with recycled plastic proper additives, and large tablets[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(45):11229-11237.
- [25] 康兴蓉, 周旋, 彭建伟, 等. 聚氨酯包膜尿素掺混比例对早稻产量及经济效益的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3):119-126. KANG X R, ZHOU X, PENG J W, et al. Effects of blend ratio of polyurethane coated urea on yield and economic benefit of early rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(3):119-126.
- [26] 钟雪梅, 黄铁平, 彭建伟, 等. 机插同步一次性精量施肥对双季稻养分累积及利用率的影响[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(5):436-446. ZHONG X M, HUANG T P, PENG J W, et al. Effects of machine-transplanting synchronized with one-time precision fertilization on nutrient uptake and use efficiency of double cropping rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(5):436-446.
- [27] 李鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1):99-104. LI X, JU X T, ZHANG L J, et al. Effects of different fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1):99-104.
- [28] 敖玉琴, 张维, 田玉华, 等. 脲胺氮肥对太湖地区稻田氨挥发及氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2016, 48(2):248-253. AO Y Q, ZHANG W, TIAN Y H, et al. Effects of urea-ammonium mixed nitrogen fertilizer on ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in paddy field of Taihu Lake region[J]. *Soils*, 2016, 48(2):248-253.
- [29] 谢志坚. 填闲作物紫云英对稻田氮素形态变化及其生产力的影响机理[D]. 武汉:华中农业大学, 2016. XIE Z J. Nitrogen transformation and productivity of paddy field influenced by catch crop(*Astragalus sinicus* L.)[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University, 2016.
- [30] 潘圣刚, 黄胜奇, 曹凑贵, 等. 氮肥运筹对稻田田面水氮素动态变化及氮素吸收利用效率影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5):1000-1005. PAN S G, HUANG S Q, CAO C G, et al. Effects of nitrogen management on dynamics of nitrogen in surface water from rice field and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):1000-1005.
- [31] 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 X, WU L H, DAI F, 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.
- [32] ZHONG X M, ZHOU X, FEI J C, et al. Reducing ammonia volatilization and increasing nitrogen use efficiency in machine-transplanted rice with side-deep fertilization in a double-cropping rice system in southern China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 306:107-183.
- [33] 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CH₄和N₂O排放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(12):1122-1130. ZHOU X, WU L H, DAI F, et al. Effects of combined biochemical inhibitors and fertilization models on CH₄ and N₂O emission from yellow clayey field during rice growth season[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(12):1122-1130.
- [34] 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 W J, ZHOU W, LIANG G Q, et al. Effect of optimized nitrogen application on ammonia volatilization from paddy field under wheat-rice rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(1):6-13.
- [35] 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 J M, LI D C, XU M G, et al. Ammonia volatilization and its influence factors under different fertilization in red paddy soil with double rice cropping system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2008, 17(4):1610-1613.

- [36] 盛伟红, 刘文波, 赵晨光, 等. 常规施肥对不同轮作系统稻田氨挥发的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 45-53, 65. SHENG W H, LIU W B, ZHAO C G, et al. Effect of optimized fertilization on ammonia volatilization of paddy rice under different rotation systems[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2018, 46(7): 45-53, 65.
- [37] 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 等. 缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5326-5332. HOU P F, XUE L X, YU Y L, et al. Control effect of side deep fertilization with slow-release fertilizer on ammonia volatilization from paddy fields[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(12): 5326-5332.
- [38] 郭刚, 袁漫漫, 曹哲伟, 等. 江淮丘陵区不同氮肥管理模式下稻田氨挥发损失特征研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 285-288, 331. WU G, YUAN M M, CAO Z W, et al. Study on the ammonia volatilization under different nitrogen schemes from paddy field in Jianghuai hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4): 285-288, 331.
- [39] 唐良梁, 李艳, 李恋卿, 等. 不同施氮量对稻田氨挥发的影响及阈值探究[J]. 土壤通报, 2015, 46(5): 1232-1239. TANG L L, LI Y, LI L Q, et al. Effect of different nitrogen application rate on paddy ammonia volatilization and nitrogen threshold[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(5): 1232-1239.
- [40] 周亮, 荣湘民, 谢桂先, 等. 不同氮肥施用对双季稻田氨挥发及其动力学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 143-147. ZHOU L, RONG X M, XIE G X, et al. Effects of different nitrogen fertilizers on ammonia volatilization and its dynamic characteristics of double cropping rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 143-147.
- [41] 吕东波, 吴景贵, 任玲, 等. 几种缓控尿素的养分释放特性研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 283-287. LÜ D B, WU J G, REN L, et al. Study on the nutrient release characteristics of different slow controlled release urea[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2015, 29(2): 283-287.
- [42] 田昌, 周旋, 谢桂先, 等. 控释尿素减施对双季稻田氨挥发损失和氮肥利用率的影响[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(4): 387-397. TIAN C, ZHOU X, XIE G X, et al. Ammonia volatilization loss and nitrogen use efficiency in double-cropping rice field as affected by decreasing controlled-release urea application level[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2018, 32(4): 387-397.
- [43] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 太湖地区稻田不同氮肥管理模式氨挥发特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1682-1689. YU Y L, XUE L H, YANG L Z. Ammonia volatilization from paddy fields under different nitrogen schemes in Taihu Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8): 1682-1689.
- [44] 吴萍萍, 刘金剑, 杨秀霞, 等. 不同施肥制度对红壤地区双季稻田氨挥发的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(1): 85-93. WU P P, LIU J J, YANG X X, et al. Effects of different fertilization systems on ammonia volatilization from double-rice cropping field in red soil region[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2009, 23(1): 85-93.
- [45] GUO C, REN T, LI P F, et al. Producing more grain yield of rice with less ammonia volatilization and greenhouse gases emission using slow/controlled-release urea[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(3): 2569-2579.
- [46] LI H, LIANG X Q, CHEN Y X, et al. Ammonia volatilization from urea in rice fields with zero-drainage water management[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(8): 887-894.
- [47] 唐拴虎, 陈建生, 徐培智, 等. 控释肥料氮素释放与水稻吸收动态研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(2): 187-189. TANG S H, CHEN J S, XU P Z, et al. Nitrogen release and dynamic of controlled release fertilizer studied with rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(2): 187-189.
- [48] YU P, SUN Y J, JIANG M J, et al. Effects of water management and slow/controlled release nitrogen fertilizer on dramatically in rice paddy soil[J]. *Chemosphere*, 2017, 168: 1277-1284.
- [49] 陈琨, 秦鱼生, 喻华, 等. 控释氮肥对一季中稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(3): 507-512. CHEN K, QIN Y S, YU H, et al. Effects of controlled-release urea on yield of one season middle rice and nitrogen use efficiency[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(3): 507-512.
- [50] 陈贤友, 吴良欢, 李金先, 等. 新型控释肥对水稻产量与氮肥利用率的影响探讨[J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 133-137. CHEN X Y, WU L H, LI J X, et al. Effects of new controlled release fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(1): 133-137.
- [51] 付月君, 王昌全, 李冰, 等. 控释氮肥与尿素配施对单季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2016, 48(4): 648-652. FU Y J, WANG C Q, LI B, et al. Effects of combined application of controlled-release nitrogen fertilizer and urea on rice (*Oryza sativa* L.) yield and nitrogen use efficiency[J]. *Soils*, 2016, 48(4): 648-652.
- [52] 王强, 姜丽娜, 潘建清, 等. 缓释氮肥一次性施肥对单季稻氮素吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3951-3960. WANG Q, JIANG L N, PAN J Q, et al. Yield and nitrogen absorption of single-cropping rice as influenced by one-off fertilization of slow-released nitrogen fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3951-3960.

(责任编辑:李丹)