

控释尿素减少双季稻田氨挥发的主要机理和适宜用量

黄思怡, 田昌*, 谢桂先, 欧震, 刘强, 彭建伟

(湖南农业大学资源与环境学院/土肥资源高效利用国家工程实验室, 湖南长沙 410128)

摘要:【目的】研究施用控释尿素减少稻田氨挥发的主要机理, 及有效减少氨挥发的施用量, 为充分发挥控释尿素的环保效应提供参考。【方法】盆栽试验于 2017 年在湖南农业大学试验基地大棚内进行, 供试土壤为潮砂泥田水稻土, 供试早稻、晚稻品种为中早 39 和泰优 390, 供试控释氮肥为树脂包膜控释尿素。设置不施氮肥 (CK)、普通尿素 (U) 以及控释尿素等氮量 (CRU1)、减氮 10%(CRU2)、减氮 20%(CRU3) 和减氮 30% (CRU4) 6 个处理。采用密闭室间歇通气法监测双季稻田氨挥发特征, 监测同期田面水铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 浓度、pH 值及土壤温度动态变化。【结果】施用控释尿素 (CRU) 显著降低了稻田氨挥发损失, 各施氮处理稻季氨挥发累积损失量表现为 $U > \text{CRU1} > \text{CRU2} > \text{CRU4} \approx \text{CRU3}$ 。与 U 处理相比, CRU 处理明显降低了氨挥发速率峰值, 且不同程度减少了稻田氨挥发累积损失量, 减排程度可达 50.3%~70.1%。CRU 处理氨挥发损失率为 5.6%~8.13%, 且早、晚稻均以 CRU3 和 CRU4 处理较低。与 U 处理相比, 早、晚稻 CRU 处理施基肥后田面水中的铵态氮浓度峰值分别降低 74.5%~80.4%、53.4%~76.0%, 施分蘖肥后分别降低 69.5%~89.1%、67.3%~80.3%。U、CRU1、CRU2、CRU3 和 CRU4 处理早稻田面水平平均 pH 值分别为 7.26、7.22、7.25、7.32 和 7.14, 各处理差异不显著; 晚稻田面水平平均 pH 值分别为 7.85、7.71、7.72、7.72 和 7.66, CRU 处理均显著低于 U 处理。U 处理氨挥发速率和田面水铵态氮浓度呈极显著正相关 ($r = 0.8813$), 与硝态氮浓度呈显著负相关 ($r = -0.5319$); CRU 处理与 U 处理变化规律类似, CRU3 和 CRU4 处理氨挥发速率与田面水铵态氮浓度达到显著正相关 ($r = 0.5388$ 和 0.4245), 各处理氨挥发速率与田面水 pH 值和 10 cm 土层温度相关不明显。【结论】施用控释尿素可显著降低稻田水面中的铵态氮含量, 减少由于施肥导致的 pH 值增加, 因而显著降低了稻田的氨挥发损失量, 减少了氨挥发损失率。早稻和晚稻均以控释尿素施用量减少 20%~30% 的氨挥发减排效果最为明显。

关键词: 控释尿素; 双季稻; 氨挥发; 田面水

Mechanism and suitable application dosage of controlled-release urea effectively reducing ammonia volatilization in double-cropping paddy fields

HUANG Si-yi, TIAN Chang*, XIE Gui-xian, OU Zhen, LIU Qiang, PENG Jian-wei

(College of Recourses and Environment, Hunan Agricultural University/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Hunan, Changsha 410128, China)

Abstract: 【Objectives】The main pathways of controlled-release urea in decreasing ammonia volatilization in paddy fields, and the application dosage for the effectiveness were studied, aiming for the best environmental returns of controlled-release urea. 【Methods】Pot experiments were conducted in the greenhouse of Hunan Agricultural University. The tested rice cultivars were Zhongzao39 and Taiyou390, the controlled-release fertilizer (CRU) was resin coated urea, and the tested soil was tide sandy mud paddy soil. There were six treatments, including no nitrogen control (CK), commercial urea (U), CRU treatments with N equal to urea (CRU1), 10% less (CRU2), 20% less (CRU3) and 30% less (CRU4). 60% of nitrogen were basal applied before transplanting and

收稿日期: 2019-07-26 接受日期: 2019-12-03

基金项目: 十三五重点研发计划课题 (2017YFD0200703); 湖南省自然科学基金项目 (2019JJ50233); 湖南农业大学“双一流”建设项目 (SYL201802004)。

联系方式: 黄思怡 E-mail: 920942452@qq.com; *通信作者 田昌 E-mail: chtian12@126.com

40% were top dressed at 10 days after transplanting. All the pots stood in isolated glass containers, and ammonia volatilization was monitored by continuous measuring intermittent airflow. The $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations and pH in the field surface water and the soil temperature at 10 cm depth were measured at the same time.

【 Results 】 Application of CRU in rice fields significantly reduced ammonia volatilization loss in paddy fields. Among the nitrogen treatments, the cumulative ammonia volatilization loss of CRU3 in rice was the lowest, followed by CRU4, CRU2, CRU1 and U, respectively. Compared with U treatment, CRU significantly reduced the peak rate of ammonia volatilization, and reduced the cumulative ammonia volatilization loss by 50.3%–70.1%. The loss rate of ammonia volatilization in CRU treatment was 5.6%–8.13%, and the ammonia volatilization loss rates in CRU3 and CRU4 in early and late rice were lower than those in the others. Compared with U treatment, the peak $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in CRU were decreased by 74.5%–80.4% and 53.4%–76.0% after basal fertilization in early and late rice, and decreased by 69.5%–89.1% and 67.3%–80.3% after topdressing. The average pH in surface water of paddy field in U, CRU1, CRU2, CRU3 and CRU4 were 7.26, 7.22, 7.25, 7.32 and 7.14 in early rice, and there was no significant difference among treatments. The pH in late rice were averaged 7.85, 7.71, 7.72, 7.72 and 7.66, and pH in CRU was significantly lower than that in urea treatment. The ammonia volatilization rate of U treatment showed a very significant and positive correlation with $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration ($r = 0.8813$), a significant negative correlation with $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($r = -0.5319$). The ammonia volatilization rates in CRU3 and CRU4 were significantly and positively correlated with the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration of surface water ($r = 0.5388, 0.4245$), and each treatment was not significantly correlated with water and soil temperature. **【 Conclusions 】** Application of controlled-release urea in rice fields can significantly reduce the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration and lessen the pH increase caused by fertilization in the surface water, therefore, could significantly reduce the loss of ammonia volatilization. Decreasing 20%–30% of controlled-release urea input could bring the best environmental effect in both early and late rice.

Key words: controlled-release urea; double-cropping paddy field; ammonia volatilization; surface water

氮是实现水稻高产稳产的重要元素, 对水稻产量形成、品质改善等有举足轻重的作用^[1]。人口大国和粮食消费大国使得农民通过大量施用氮肥来获得较高的水稻产量, 但会导致氮肥利用率低、氮素损失量大等问题。施入土壤中的氮素除被作物吸收外, 其余部分会通过径流、淋溶、氨挥发、硝化-反硝化等途径损失, 造成大气和水体污染^[2]。稻田氨挥发是农田土壤氮素损失的主要途径之一, 我国南方稻田施用化学氮肥, 其氨挥发损失的氮量可占施氮量 9%~40%^[3-5]。农田排放的氨易通过沉积转回陆地和地表水, 导致土壤酸化、水体富营养化、生物多样性丧失等, 危害水土环境^[6-7]。因此, 有效控制稻田氨挥发排放具有重要意义。

选择合适的肥料种类是减少稻田氨挥发的关键措施之一。树脂包膜尿素是一种控释肥料, 养分释放速度可与作物需肥规律基本同步^[8], 能显著增加水稻产量和氮肥利用率^[9-10], 还能显著降低水稻生长前期氮素径流^[11-12]、渗漏^[13]损失, 明显减少氨挥发和反硝化损失^[14-15]。目前, 多数研究集中于树脂包膜尿素的减排增效及减少环境污染等方面, 但较少研究控

释尿素施用下双季稻田氨挥发损失的影响因素, 因此有待进一步研究。

稻田氨挥发损失因试验条件不同而结果迥异, 前人研究认为, 施肥、土壤特性^[16]和田面水 pH 值、铵态氮浓度^[5,17-18]是影响稻田氨挥发的重要因素; 同时, 降雨也对氨挥发有重要影响, 降雨时间和降雨量往往通过改变田面水铵态氮浓度、pH 值等增加测定误差, 影响稻田氨挥发损失量^[19-20]。但在无降雨影响的条件下稻田氨挥发的关键影响因素是什么? 目前很少有人研究。为此, 本试验采取大棚盆栽试验, 研究无降雨条件下施用控释尿素对稻田氨挥发动态的影响及其关键影响因素, 以期揭示在湖南双季稻生产上施用控释尿素对氨挥发损失的关键影响因素及作用原理, 为制定南方双季稻田氨挥发减排的合理施肥技术提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 供试地点

大棚盆栽试验于 2017 年在湖南省长沙市湖南农

业大学土壤肥料资源高效利用国家工程实验室校内基地进行, 供试土壤采自湖南省长沙市浏阳市永和镇 (28°11'0.72" N, 113°06'23.79" E) 试验基地内保护的耕作层土壤 (0—20 cm)。土样采集后风干, 挑去肉眼可以看见的细根、石块后过 1 cm 筛保存备用。

1.2 供试材料

供试早稻、晚稻品种为中早 39 和泰优 390。供试氮肥为普通尿素 (含 N 46%) 和控释尿素 (山东金正生态工程股份有限公司生产, 树脂包膜, 含 N 42%); 磷肥为过磷酸钙 (含 P₂O₅ 12%); 钾肥为氯化钾 (含 K₂O 60%)。供试土壤为河流冲积物发育的潮沙泥, 土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 16.62、1.21、0.54、11.51 g/kg, 碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 48.9、21.2、156 mg/kg, pH 值为 5.61。

1.3 试验设计

试验设不施氮肥 (CK)、普通尿素 (U) 及控释尿素等氮量 (CRU1)、减氮 10% (CRU2)、减氮 20% (CRU3) 和减氮 30% (CRU4) 共 6 个处理。盆栽容器为长 40 cm、宽 30 cm、高 25 cm 的矩形塑料盆, 每盆栽种稻秧 4 蔸, 每蔸 2 株秧苗。CK、U、CRU1、CRU2、CRU3、CRU4 处理的早稻氮用量分别为 N 0、150、150、135、120、105 kg/hm², P₂O₅、K₂O 用量均为 72 kg/hm²、90 kg/hm²; 晚稻氮用量分别为 N 0、180、180、162、144、126 kg/hm², P₂O₅、K₂O 用量均为 60 kg/hm²、105 kg/hm²。将 60% 氮肥、100% 磷肥和 60% 钾肥与土混匀后装入盆内作基肥, 10 天后将剩余的 40% 氮肥和钾肥撒施于土壤表层作追肥。基肥和移栽、追肥、收获的时间早稻分别为 2017 年 4 月 23 日、5 月 3 日、7 月 17 日, 晚稻分别为 2017 年 7 月 22 日、8 月 1 日和 11 月 1 日。插秧后用自来水灌溉, 前期定期浇水并保持 3~5 cm 水层, 分蘖盛期晒田, 后期干湿交替。整个生育期按常规大田管理。

1.4 测定项目与分析方法

挥发的氨气采用密闭室间歇式通气法收集。密闭室长 25 cm、宽 15 cm、高 9 cm, 采用透明有机玻璃制作。挥发氨吸收液为 20 g/L 硼酸, 每次抽气结束后, 用标准稀硫酸 (H₂SO₄ 5 mmol/L) 滴定, 计算土壤中氨挥发量。抽气时, 气室内换气速率控制在 15~20 次/min。施肥后每天上午 9:00—11:00 和下午 15:00—17:00 进行抽气, 作为当天氨挥发的平均通量计算全天氨挥发量, 持续测定直至施氮处理与未施氮处理的氨挥发通量无显著差异为止。

田间土壤氨挥发损失的计算公式如下:

$$F = (c \times V \times 14 \times 10^{-2}/S) \times (24/t)$$

式中, F 为氨挥发通量 [以 NH₃-N 计, kg/(hm²·d)]; c 为标准稀硫酸的滴定浓度 (mol/L); V 为滴定消耗稀硫酸的体积 (mL); 14 为每摩尔 NH₃ 中 N 的质量数 (g/mol); S 为捕获装置的截面积 (m²); t 为氨挥发收集时间 (h)。

累积氨挥发量是各测定时期的氨挥发通量之和; 氨挥发损失率是施氮处理与未施氮处理的累积氨挥发量差值占该施氮处理施氮量的百分比。

于施肥后的第 1、2、3、5、7、9 天采集田面水样品测定 pH 值和 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量, 24 h 内测定完毕, 未能当天完成测定的水样保存在 4℃ 冰箱中, 于次日分析。水样 pH 值用 pH 计测定, 铵态氮和硝态氮含量用 SmartChem200 测定。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 17.0 软件进行数据处理和分析, 处理间差异显著性分析采用最小显著差异法 (LSD)。

2 结果与分析

2.1 双季稻田氨挥发损失动态特征

2.1.1 双季稻生长季氨挥发速率动态变化 由图 1 可知, 施肥后早、晚稻氨挥发速率均表现出一致的规律。施基肥后, 所有处理氨挥发速率均于第 1 天出现峰值; 施分蘖肥后, U 和 CRU 处理氨挥发速率峰值分别于第 2 天和第 3 天出现, U 处理氨挥发峰值最高, CRU 处理氨挥发峰值随施氮量增加而升高, 峰值后逐渐下降。施基肥后, U 处理早、晚稻氨挥发峰值分别为 5.51 kg/(hm²·d) 和 10.63 kg/(hm²·d); CRU 处理分别为 1.55~2.09 kg/(hm²·d) 和 2.54~3.37 kg/(hm²·d), 较 U 处理分别降低 62.1%~71.9% 和 68.3%~76.1%。施分蘖肥后, U 处理早、晚稻氨挥发峰值分别为 5.45 kg/(hm²·d) 和 11.83 kg/(hm²·d); CRU 处理分别为 1.87~2.46 kg/(hm²·d) 和 2.36~3.06 kg/(hm²·d), 较 U 处理分别降低 54.9%~65.7% 和 74.1%~80.1%, 第 9 天降至与 CK 处理无明显差异。监测期内, CRU 处理氨挥发峰值较低, 显著低于 U 处理。

2.1.2 双季稻生长季氨挥发累积损失量、损失率

表 1 显示, 各施肥处理在基肥、分蘖肥施用后和水稻生长季氨挥发累积损失量均高于 CK 处理。早、晚稻基肥期, U 处理氨挥发累积损失量 (率) 分别为

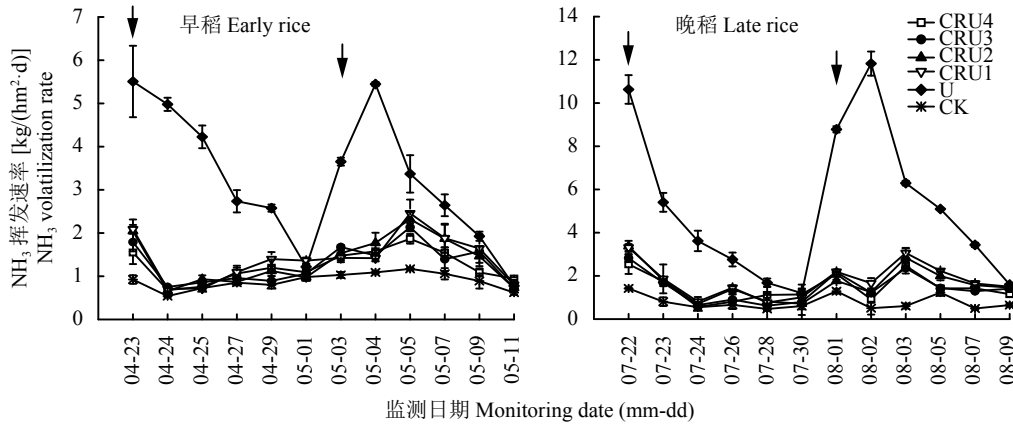


图 1 不同处理下早、晚稻生长季氨挥发速率

Fig. 1 Ammonia volatilization rate during early and late rice seasons under different treatments

[注 (Note): 图中箭头表示施肥日期 Arrows indicate fertilization date.]

表 1 早、晚稻施肥后氨挥发累积损失量和损失率

Table 1 Cumulative ammonia volatilization loss and loss rate after fertilization in early and late rice seasons

稻季 Season	处理 Treatment	基肥 Basal fertilizer		分蘖肥 Topdressing		总计 Total	
		(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)	(kg/hm ²)	(%)
早稻 Early rice	CK	8.13 ± 0.41c		9.17 ± 0.32c		17.3 ± 0.67d	
	U	30.3 ± 1.73 a	24.63	25.11 ± 0.91 a	26.57	55.42 ± 0.88 a	25.41
	CRU1	12.01 ± 0.63 b	4.31	15.52 ± 0.91 b	10.58	27.53 ± 1.06 b	6.82
	CRU2	10.46 ± 0.33 bc	2.88	15.15 ± 0.92 b	11.07	25.61 ± 1.23 bc	6.16
	CRU3	10.07 ± 0.42 bc	2.69	13.95 ± 0.94 b	9.96	24.02 ± 0.80 c	5.60
	CRU4	10.46 ± 0.55 bc	3.70	13.31 ± 0.09 b	9.86	23.77 ± 0.50 c	6.16
晚稻 Late rice	CK	6.53 ± 1.74 c		9.79 ± 0.11 d		16.32 ± 0.64 c	
	U	33.06 ± 1.22 a	24.56	52.69 ± 0.53 a	59.58	85.75 ± 2.36 a	38.57
	CRU1	12.86 ± 2.58 b	5.86	17.53 ± 0.32 b	10.75	30.39 ± 1.94 b	7.82
	CRU2	12.31 ± 0.83 b	5.95	17.18 ± 0.73 b	11.40	29.49 ± 1.35 b	8.13
	CRU3	10.27 ± 1.33 bc	4.33	15.36 ± 1.09 c	9.67	25.63 ± 0.98 b	6.47
	CRU4	11.23 ± 2.57 bc	6.22	14.92 ± 0.81 c	10.18	26.15 ± 2.02 b	7.80

注 (Note): 同列数值后不同字母表示同一稻季不同处理间在 5% 水平上差异显著 Values followed by different letters in a column indicate significantly different among treatments in the same rice season at the 5% level.

30.3 kg/hm² (24.63%) 和 33.06 kg/hm² (24.56%), CRU 处理分别为 10.07~12.01 kg/hm² (2.69%~4.31%) 和 10.27~12.86 kg/hm² (4.33%~6.22%), 4 个 CRU 处理间差异不显著, 但 CRU 处理均显著低于 U 处理。分蘖肥期, 早、晚稻 U 处理氨挥发累积损失量 (率) 分别为 25.11 kg/hm² (26.57%) 和 52.69 kg/hm² (59.58%), CRU 处理分别为 13.31~15.52 kg/hm² (9.86%~11.07%) 和 14.92~17.53 kg/hm² (9.67%~11.40%), CRU 处理均显著低于 U 处理, 其中晚稻 CRU3 和 CRU4 处理显著低于 CRU1 和

CRU2 处理。早、晚稻分蘖肥期氨挥发累积损失量及损失率均高于基肥期, 这与施肥方式有关, 施用分蘖肥 (表层撒施) 较基肥 (土层混施) 可提高田面水铵态氮浓度, 增大氨挥发损失^[21]。

早、晚稻生长季 U 处理累积氨挥发损失量 (率) 最高, 分别为 55.42 kg/hm² (25.41%) 和 85.75 kg/hm² (38.57%), 显著高于其他处理; CRU 处理累积氨挥发损失量 (率) 分别为 23.77~27.53 kg/hm² (5.6%~6.82%) 和 25.63~30.39 kg/hm² (6.47%~8.13%), 其中早稻 CRU3 和 CRU4 处理显著低于 CRU1 处理。

与 U 处理相比, CRU1、CRU2、CRU3 和 CRU4 处理早稻生长季累积氨挥发损失量分别降低 50.3%、53.8%、56.7% 和 57.1%, 晚稻分别降低 64.6%、65.6%、70.1% 和 69.5%。晚稻各处理氨挥发损失量及损失率均较早稻高, 可能与早稻生长季温度和施肥量较低有关。

2.2 双季稻田氨挥发的影响因子动态变化及其相关性

2.2.1 双季稻田面水铵态氮动态变化

通过监测田面水氮素浓度变化, 发现早、晚稻施肥后各处理田面水铵态氮浓度动态特征与稻田氨挥发变化规律相似(图 1、图 2)。图 2 所示, 早稻基肥后第 2 天, 各处理田面水铵态氮浓度达峰值, 之后迅速下降, 7 天后为峰值的 9.9%~14.8%。分蘖肥后, 田面水铵态氮浓度变化规律与基肥期基本一致。U 处理铵态氮浓度峰值最高, 施基肥和追肥后峰值分别达 10.14 mg/L、8.37 mg/L; CRU 处理次之, 为 1.99~2.59 mg/L、0.91~2.55 mg/L。较 U 处理, CRU1、CRU2、CRU3 和 CRU4 处理基肥后铵态氮浓度峰值分别降低 74.5%、78.2%、80.4% 和 80.3%, 施分蘖肥后分别降低 69.5%、79.1%、71.6% 和 89.1%。

晚稻施肥后田面水铵态氮浓度迅速升高, 当天达到峰值, 之后迅速下降。施分蘖肥后, U 处理在第 3 天达到峰值, CRU 处理在当天达到峰值。施肥后 U 处理铵态氮浓度峰值最高, 基肥和追肥期峰值分别达 18.93、17.75 mg/L, CRU 处理铵态氮浓度峰值分别为 4.54~8.83、3.49~5.80 mg/L; 与 U 处理相比, CRU1、CRU2、CRU3 和 CRU4 处理施基肥后铵态氮浓度峰值分别降低 53.4%、65.7%、75.3% 和

76.0%, 施分蘖肥后分别降低 69.5%、67.3%、80.3% 和 78.2%。U 处理田面水铵态氮浓度在监测期内均最高, 说明速效氮肥能显著增加田面水铵态氮浓度, 而控释氮肥可明显降低田面水铵态氮浓度峰值。

2.2.2 双季稻田面水硝态氮动态变化

由图 3 可知, 淹水、厌氧环境使监测期内稻田田面水硝态氮浓度一直处于较低水平。后期田面水层逐渐变浅, 厌氧条件被破坏, 硝态氮浓度开始上升, 硝态氮浓度出现波动性变化。施基肥后第 3 天, U 处理硝态氮浓度开始升高, 到第 9 天达到峰值, 之后迅速下降; 追肥后第 3 天硝态氮浓度又开始上升, 第 7 天达到峰值。CRU1 处理基肥后第 5 天硝态氮浓度开始缓慢上升, CRU2 和 CRU3 处理追肥后第 2 天开始上升, CRU4 和 CK 处理硝态氮浓度一直较低。

晚稻各处理田面水硝态氮浓度在前期均保持较低水平, 后期呈上升趋势。基肥后第 5 天, 各处理硝态氮浓度开始升高, 第 7 天均达到峰值, 后迅速下降。追肥后第 5 天各处理硝态氮浓度又开始上升, 直到第 13 天开始下降。追肥后第 11 天 U 处理达到峰值(3.48 mg/L), CRU1 和 CRU2 处理追肥后第 11 天达到峰值, 分别为 3.06 mg/L 和 2.78 mg/L, CRU3 和 CRU4 处理追肥后第 9 天达到峰值, 分别为 2.25 mg/L 和 1.74 mg/L, CK 处理硝态氮浓度一直较低。较 U 处理, 施用 CRU 能明显降低田面水硝态氮浓度。

2.2.3 双季稻田面水 pH 值动态变化

由图 4 可以看出, 早晚稻田面水 pH 值均呈现先升高后降低再升高再降低的趋势。因为尿素水解成铵态氮会导致

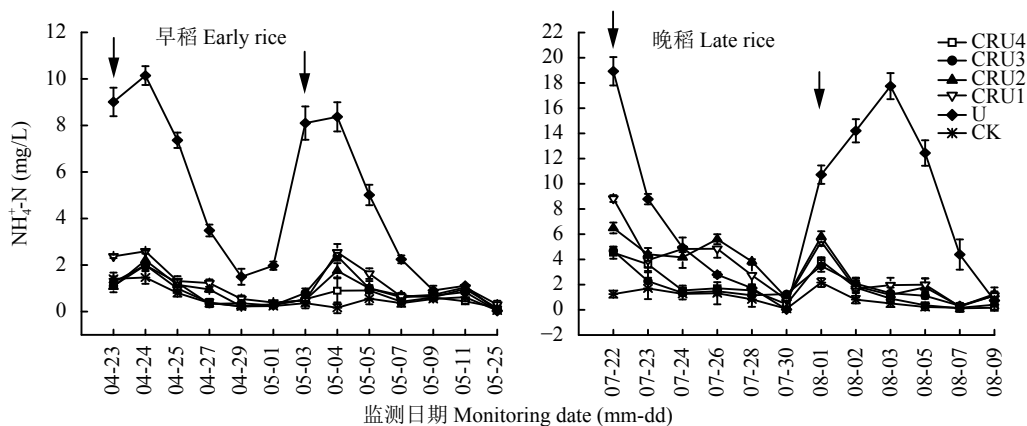


图 2 不同处理早、晚稻田面水中铵态氮浓度变化

Fig. 2 Dynamic change of ammonium nitrogen concentration in surface water of early and late rice under different treatments

[注 (Note): 图中箭头表示施肥期 Arrows indicate fertilization date.]

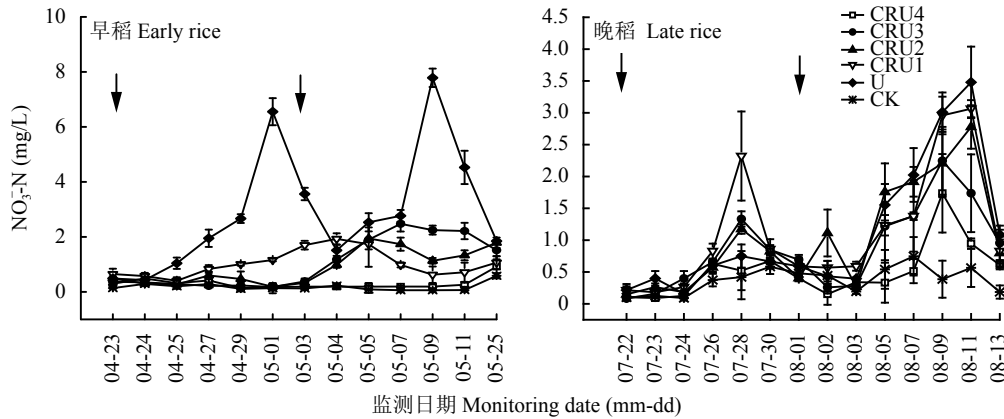


图 3 不同处理早、晚稻田面水硝态氮浓度变化

Fig. 3 Dynamic change of nitrate nitrogen concentration in surface water of early and late rices under different treatments

[注 (Note): 图中箭头表示施肥期 Arrows indicate fertilization date.]

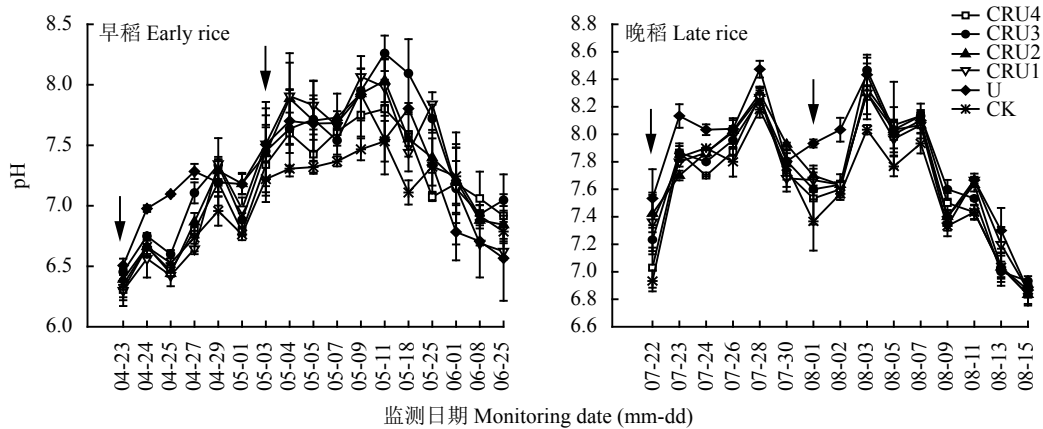


图 4 不同处理早、晚稻田面水 pH 值变化

Fig. 4 Dynamic change of pH in surface water of early and late rices under different treatments

[注 (Note): 图中箭头表示施肥期 Arrows indicate fertilization date.]

pH 值升高, 当氨挥发损失后, pH 值开始下降; 另外, 硝化作用是一个酸化过程, 可使田面水 pH 值先升高后降低。施肥后田面水 pH 值随着水稻生长出现波动, 但总体处于中性偏弱碱性。

早、晚稻施基肥后, 各处理田面水 pH 值逐渐升高, 施肥后第 7 天出现峰值, 之后逐渐下降。施追肥后 pH 值又开始升高, 第 9 天达最高值, 随后逐渐下降。早稻各处理田面水 pH 值在 6.30~8.26 间波动。U、CRU1、CRU2、CRU3 和 CRU4 处理早稻田面水平均 pH 值分别为 7.26、7.22、7.25、7.32 和 7.14。晚稻各处理田面水 pH 值在 6.83~8.47 间波动。U、CRU1、CRU2、CRU3 和 CRU4 处理水稻生长季田面水平均 pH 值分别为 7.85、7.71、7.72、7.72 和 7.66, CRU 处理均显著低于 U 处理, 其中 CRU2、CRU3 处理与 CRU4 处理差异显著。早晚稻 CK 处理平均 pH 分别为 7.03、7.58, 各处理平均

pH 较 CK 处理分别有不同程度的提高, 表明施用氮肥提高了田面水 pH 值。在早晚稻基肥期, U 处理田面水 pH 值均高于 CRU 处理期, 因为控释尿素缓慢释放的氮素降低了田面水 pH 值。

2.2.4 双季稻田氨挥发监测期气温与 10 cm 土层温度

在氨挥发监测期内记录气温和 10 cm 土层温度。由图 5 和图 6 可知, 土壤温度受气温影响显著, 两者有很高的相似性。CK、U、CRU1、CRU2、CRU3 和 CRU4 处理早稻平均土温分别为 23.0℃、23.3℃、23.3℃、23.2℃、23.4℃ 和 23.1℃, 晚稻平均土温分别为 31.9℃、31.9℃、31.7℃、31.5℃、31.7℃ 和 31.5℃, 各处理间土壤温度差异不显著, 施肥对稻田土壤温度的影响不显著。

2.2.5 氨挥发速率与其影响因子相关性分析

将田面水铵态氮浓度、硝态氮浓度、pH 值和土温与氨挥发速率进行相关性分析 (表 2), 得出各处理氨挥发速

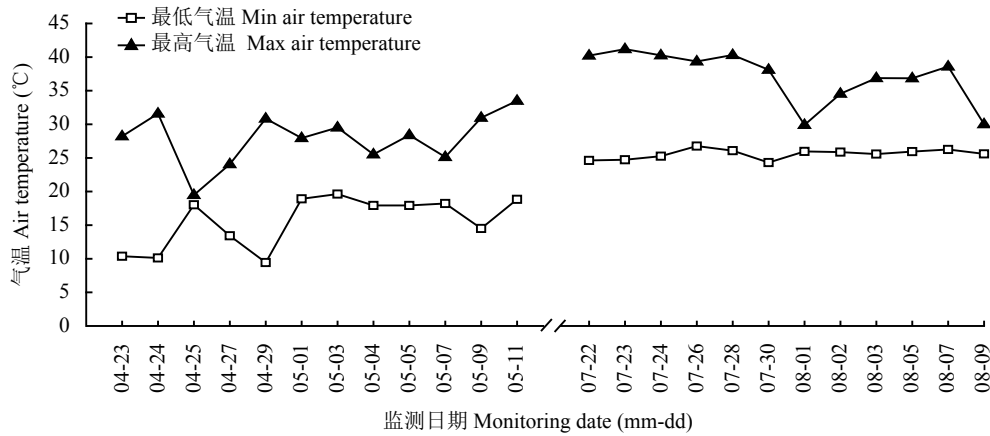


图 5 早、晚稻氨挥发期间的气温

Fig. 5 Air temperature during monitoring stage in early and late rice seasons

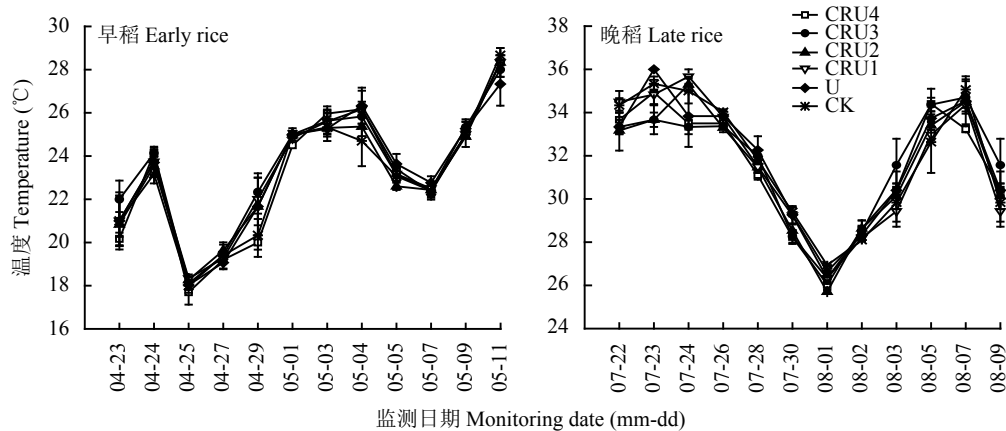


图 6 早、晚稻氨挥发期间 10 cm 土层温度

Fig. 6 Temperature at 10 cm soil layer during monitoring stage in early and late rice seasons

率与田面水铵态氮浓度均呈正相关关系，其中，U、CRU3 处理氨挥发速率与田面水铵态氮浓度均呈极显著正相关，CRU4 处理氨挥发速率与田面水铵态氮浓度呈显著正相关关系；各处理氨挥发速率与田面水 pH 值、土壤温度相关不明显；与田面水硝态氮浓度呈负相关。施肥后，田面水铵态氮浓度迅速增加，稻田氨挥发速率随之剧增，田面水 pH 值、土温趋势与氨挥发速率并未表现出一致规律，而田面水硝态氮浓度与之相反。因此，推断出在上述四种影响因素中田面水铵态氮浓度是影响稻田土壤氨挥发的最重要因素。

3 讨论

3.1 控释尿素对双季稻田氨挥发损失的影响

本研究早、晚稻 U 处理氨挥发速率峰值均出现在施肥后 1~2 天，CRU 处理氨挥发速率峰值在第

1 天和第 3 天，较 U 处理有不同程度降低，因为尿素施入土壤后迅速水解，导致初期有大量氨挥发，而树脂包膜材料具有疏水性，可以控制膜内尿素缓慢持续释放^[22]，因此施用控释尿素能明显降低氨挥发峰值，与前人^[14,23]研究结果一致。本试验 CRU 处理氨挥发速率在监测期内一直维持在较低水平，与李诗豪等^[24]研究结果一致。本试验早、晚稻均以 U 处理累积氨挥发损失量最高，早稻为 55.42 kg/hm²，晚稻为 85.75 kg/hm²，明显高于田昌等^[25]的研究结果 (U 处理早、晚稻氨挥发损失量分别为 47.2 kg/hm²、61.9 kg/hm²)，因为本研究为无降雨的盆栽试验，无降雨等条件减少了氮素径流和渗漏损失，间接增加氨挥发损失。CRU 处理早稻生长季氨挥发累积损失量为 23.77~27.53 kg/hm²，晚稻为 25.63~30.39 kg/hm²，较 U 处理降低 50.3%~57.1% 和 64.6%~70.1%；薛欣欣等^[26]在海南研究控释尿素分次施用的氨挥发损失量为 24.7 kg/hm²，较普通尿素分次施用

表 2 不同处理氨挥发速率与田面水中氮含量、pH 值及 10 cm 土层温度的相关性
 Table 2 Correlation of ammonia volatilization rate with the nitrogen content and pH in surface water and temperature at 10 cm soil layer

处理 Treatment	变量 Variable	相关方程 Correlation equation	<i>r</i>
U	SW-NH ₄ ⁺	$y = 0.4663x + 1.1813$	0.8813***
	SW-NO ₃ ⁻	$y = -0.7609x + 5.7017$	-0.5319**
	ST	$y = 0.0836x + 1.9210$	0.1516
	SW-pH	$y = 0.6593x - 0.8353$	0.1091
CRU1	SW-NH ₄ ⁺	$y = 0.1360x + 1.2987$	0.3966
	SW-NO ₃ ⁻	$y = -0.1411x + 1.7471$	-0.1393
	ST	$y = 0.0273x + 0.8546$	0.2014
	SW-pH	$y = 0.2020x + 0.0818$	0.1696
CRU2	SW-NH ₄ ⁺	$y = 0.0932x + 1.3079$	0.2553
	SW-NO ₃ ⁻	$y = 0.0482x + 1.4571$	0.0453
	ST	$y = 0.0243x + 0.8346$	0.1779
	SW-pH	$y = 0.2068x - 0.0692$	0.2656
CRU3	SW-NH ₄ ⁺	$y = 0.3601x + 0.9369$	0.5388**
	SW-NO ₃ ⁻	$y = -0.0364x + 1.3932$	-0.0492
	ST	$y = 0.0152x + 0.9417$	0.1296
	SW-pH	$y = 0.0327x + 1.1126$	0.0291
CRU4	SW-NH ₄ ⁺	$y = 0.1822x + 1.1192$	0.4245*
	SW-NO ₃ ⁻	$y = -0.2833x + 1.4454$	-0.1836
	ST	$y = 0.0174x + 0.8693$	0.1745
	SW-pH	$y = 0.2039x - 0.1835$	0.0214

注 (Note): SW-NH₄⁺—田面水铵态氮浓度 NH₄⁺-N concentration in surface water; SW-NO₃⁻—田面水硝态氮浓度 NO₃⁻-N concentration in surface water; ST—土壤温度 Soil temperature; *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ***— $P < 0.001$.

减少 15.4%，与本试验相比，累积损失量相差不大但减排效果更低，可能是因为海南降雨量大，减少了氨挥发损失，进一步证明降雨可能是尿素处理氨挥发损失的重要影响因素，但还需进一步验证。孙祥鑫等^[14]研究发现，施用树脂包膜尿素处理的氨挥发累积排放量较尿素处理减少了 73.4%，减排效果与本研究基本一致。从本研究结果还可看出，早晚稻稻田氨挥发损失率都以尿素处理最高，分别为 25.41%(早稻)、38.57%(晚稻)，CRU 处理为 5.6%~6.82%(早稻)、6.47%~8.13%(晚稻)。侯朋福等^[27]研究表明，树脂包膜尿素一次施肥处理和树脂尿素一基一穗施肥处理氨挥发损失氮量占施氮量的 3.84% 和 9.52%，与本试验结果相差不大。Xu 等^[28]研究表明，中国南方双季稻田尿素和包膜尿素处理氨挥发损失占总施氮量的比例分别为 16%~30% 和 4%~8%，包膜尿素能显著降低氨挥发损失率，与本试验结果一致。其

中，本试验早晚稻均以控释尿素减氮 20%~30% 处理氨挥发损失率较低。以上结果可以说明，与单施尿素相比，控释尿素处理具有降低氨挥发损失的作用，且减量施用效果更好。

3.2 相关因素对稻田氨挥发的影响

稻田氨挥发受多种因素综合影响^[29]，而田面水铵态氮浓度是最关键的因素^[30-33]。田面水氮含量受氮肥类型和氮肥用量等影响，本研究证实控释尿素能显著降低田面水铵态氮浓度。尿素施入稻田后，在脲酶作用下快速水解为 NH₄⁺，使田面水铵态氮浓度迅速升高，包膜尿素的包膜材料阻隔膜内尿素与土壤脲酶直接接触，使 CRU 处理田面水铵态氮浓度较低。本试验中氨挥发速率与田面水铵态氮浓度呈正相关关系，其中 U、CRU3 处理达极显著水平。黄晶晶等^[34]发现不同尿素施用量的田面水铵态氮浓度与氨挥发的相关系数均达到极显著水平；朱坚等^[5]研究也

表明尿素和碳酸氢铵基施后氨挥发速率与田面水铵态氮浓度呈极显著正相关, 与本试验尿素处理结果一致。赵蒙等^[35]研究认为, 田面水铵态氮浓度和氨挥发日通量间存在正相关关系, 聚脲甲醛缓释肥 (MU) 处理田面水铵态氮浓度较低, 施用聚脲甲醛缓释肥能够显著减少稻田氨挥发损失, 与本试验控释尿素处理结果一致。图 1 与图 2 对比发现, 各处理氨挥发速率峰值与田面水铵态氮浓度峰值并不完全对应, 俞映惊等^[36]研究指出, 施肥后稻田氨挥发量主要受田面水中铵态氮平均含量影响, 但每日氨挥发通量还受其他因素影响。吴萍萍等^[18]研究也表明, 田面水铵态氮浓度与氨挥发速率并不完全同步, 说明稻田氨挥发速率受多种因素综合影响。本研究中, 田面水硝态氮浓度动态变化与氨挥发速率及田面水铵态氮的动态变化趋势相反。CRU 处理较 U 处理田面水硝态氮浓度峰值低, 说明 CRU 处理能有效降低田面水硝态氮浓度峰值。施肥后田面水硝态氮与氨挥发速率的相关分析表明, 氨挥发速率与田面水硝态氮呈负相关关系, 其中 U 处理呈极显著负相关关系。控释尿素通过缓慢释放氮素来降低施肥后田面水中氮含量, 尤其是铵态氮浓度, 田面水中铵态氮浓度降低减少了氨挥发的底物, 减少了 NH_3 进入大气层。因此, 田面水铵态氮浓度是影响控释尿素处理氨挥发的主要因素, 而田面水硝态氮是铵态氮转化后的主要产物^[22]。

田面水 pH 值是影响稻田氨挥发速率的另一个重要因素, 田面水 pH 值受多种因素影响, 如, 高施氮量、高温、强光照及藻类生长等都会提高 pH 值^[18]。各施氮处理田面水平均 pH 值均高于不施氮处理, 说明施氮能引起田面水 pH 值升高, 与叶玉适等^[37]研究结果一致。氨挥发监测期间, 施氮处理田面水 pH 值变化趋势与氨挥发变化不一致且变化复杂, U 处理田面水 pH 值在前期高于 CRU 处理, 因为尿素施入土壤后立即水解, 产生碳铵导致 pH 值升高, 而控释尿素延迟氮素释放, 降低了前期田面水 pH 值。晚稻 U 处理平均 pH 高于 CRU 处理, 说明施用控释尿素较普通尿素能有效降低田面水 pH 值。Xu 等^[28]发现控释肥能降低田面水铵态氮浓度和 pH 值, 与本试验结果一致。对施肥后田面水 pH 值动态与氨挥发速率进行相关分析, 结果表明, 各处理氨挥发速率与田面水 pH 值呈正相关。有研究结果表明, 稻田氨挥发速率与田面水 pH 值存在正相关关系^[38], 与本试验结果一致。吴凡等^[33]研究显示, 田面水 pH 值的变化对稻田氨挥发产生一定影响, 但并不显著, 因为田面水 pH 值变化范围较小, 对氨挥发影响不显著。

氨挥发同时受各种环境因素影响, 田间降雨、温度、光照和风速都会影响土壤氨挥发。在湖南双季稻地区 (早稻梅雨时节、晚稻高温少雨), 早稻氨挥发受降雨的影响较大^[5]; 而在大棚盆栽试验条件下, 早、晚稻无降雨的差异。所以从气候条件来看, 若有差异, 则主要为温度差异。氨挥发速率与 10 cm 土层温度的相关分析结果表明, 氨挥发速率与土温呈正相关但不显著, 说明土壤温度对氨挥发速率有影响, 但非主导因子。温度对 CRU 处理的氨挥发产生影响是因为温度可控制包膜尿素养分释放。Grant 等^[39]研究表明控释肥的有效性受所在地区环境条件影响, 树脂包膜为热塑性包膜, 能通过水分作用, 使肥料释放到土壤中, 因此受温度和水分影响较大^[40]。但由于淹水稻田水分充足, 故决定其养分释放的主要因素是温度^[41]。杨铎等^[42]研究认为, 在土壤相对含水率较高情况下, 温度是树脂包膜尿素释放的决定性因素。其中, 尿素处理氨挥发速率与土温相关性较 CRU1、CRU2、CRU4 处理低, 可能是因为高温多发生在氨挥发后期, 此时 U 处理的尿素已经基本分解, 受温度影响不明显。

4 结论

与普通尿素相比, 控释尿素可显著降低氨挥发损失。控释尿素处理氨挥发速率峰值较尿素处理降低了 54.9%~80.1%; 控释尿素处理氨挥发损失率为 5.6%~8.13%, 早、晚稻均以减氮 20%~30% 处理较低; 早、晚稻生长季各处理氨挥发累积损失量分别为 23.77~55.42 kg/hm²、25.63~85.75 kg/hm², 控释尿素早晚稻氨挥发累积损失量均低于普通尿素, 且减少 50.3%~70.1% 的稻田氨挥发损失, 以控释尿素减氮 20%~30% 的效果最为明显。

普通尿素与控释尿素的氨挥发速率和田面水铵态氮浓度均呈正相关, 其中控释尿素减氮 20%~30% 条件下相关性达到显著性或极显著水平, 与田面水硝态氮浓度呈负相关关系, 与田面水 pH 值、土温间相关不明显。控释尿素能显著降低田面水中铵态氮浓度, 降低田面水中硝态氮浓度峰值, 有效降低施肥导致的田面水 pH 值增加, 进而有效减少氨挥发损失。

参 考 文 献:

- [1] 侯云鹏, 杨建, 李前, 等. 施氮对水稻产量、氮素利用及土壤无机氮积累的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 118-124.
Hou Y P, Yang J, Li Q, et al. Effects of nitrogen application on yield, nitrogen utilization and accumulation of soil inorganic nitrogen of

- rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(1): 118–124.
- [2] 周伟, 吕腾飞, 杨志平, 等. 氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J]. *应用生态报*, 2016, 27(9): 3051–3058.
Zhou W, Lv T F, Yang Z P, *et al.* Research advances on regulating soil nitrogen loss by the type of nitrogen fertilizer and its application strategy[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9): 3051–3058.
- [3] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. 171–249.
Zhu Z L, Wen Q X. *Nitrogen in soils of China*[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. 171–249.
- [4] 宋勇生, 范晓晖. 稻田氨挥发研究进展[J]. *生态环境*, 2003, 12(2): 240–244.
Song Y S, Fan X H. Summary of research on ammonia volatilization in paddy soil[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2): 240–244.
- [5] 朱坚, 石丽红, 田发祥, 等. 湖南典型双季稻田氨挥发对施氮量的响应研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5): 1129–1138.
Zhu J, Shi L H, Tian F X, *et al.* Responses of ammonia volatilization to nitrogen application amount in typical double cropping paddy fields in Hunan Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(5): 1129–1138.
- [6] Hellsten S, Dragosits U, Place C J, *et al.* Modeling the spatial distribution of ammonia emissions in the UK[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 154(3): 370–379.
- [7] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [8] 樊小林, 廖宗文. 控释肥料与平衡施肥和提高肥料利用率[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(3): 219–223.
Fan X L, Liao Z W. Increasing fertilizer use efficiency by means of controlled release fertilizer (CRF) production according to theory and techniques of balanced fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 1998, 4(3): 219–223.
- [9] 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 characteristics and nitrogen fertilizer efficiency of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(4): 808–815.
- [10] 袁嫚嫚, 叶舒娅, 刘枫, 等. 树脂包膜尿素对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(S1): 83–87.
Yuan M M, Ye S Y, Liu F, *et al.* Effects of application of controlled-release polyolefin-coated urea on yield and nitrogen utilization rate of rice[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(S1): 83–87.
- [11] 鲁艳红, 纪雄辉, 郑圣先, 等. 施用控释氮肥对减少稻田氮素径流损失和提高水稻氮素利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(3): 490–495.
Lu Y H, Ji X H, Zheng S X, *et al.* Effect of controlled-release nitrogen fertilizer on reducing nitrogen runoff loss and increasing nitrogen recovery efficiency of rice plant[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2008, 14(3): 490–495.
- [12] 田昌, 周旋, 谢桂先, 等. 控释尿素减施对双季稻田径流氮素变化、损失及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 21–28.
Tian C, Zhou X, Xie G X, *et al.* Effects of controlled-release urea application on dynamics and loss of nitrogen in runoff and yield in double-rice cropping field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 21–28.
- [13] 田昌, 周旋, 刘强, 等. 控释尿素减施对双季稻田氮素渗漏淋失的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3267–3274.
Tian C, Zhou X, Liu Q, *et al.* Effects of the reduction of controlled-release urea application on nitrogen leaching in double cropping paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10): 3267–3274.
- [14] 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.
- [15] 王斌, 李玉娥, 万运帆, 等. 控释肥和添加剂对双季稻温室气体排放影响和减排评价[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(2): 314–323.
Wang B, Li Y E, Wan Y F, *et al.* Effect and assessment of controlled release fertilizer and additive treatments on greenhouse gases emission from a double rice field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2): 314–323.
- [16] 朱兆良, 蔡贵信, 徐银华, 等. 种稻下氮肥挥发及其在氮素损失中的重要性的研究[J]. *土壤学报*, 1985, 22(4): 320–328.
Zhu Z L, Cai G X, Xu Y H, *et al.* Ammonia volatilization of nitrogen fertilizer in rice and its importance in nitrogen loss[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1985, 22(4): 320–328.
- [17] 杨士红, 彭世彰, 徐俊增, 等. 不同水氮管理下稻田氨挥发损失特征及模拟[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(11): 99–104.
Yang S H, Peng S Z, Xu J Z, *et al.* Characteristics and simulation of ammonia volatilization from paddy fields under different water and nitrogen management[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(11): 99–104.
- [18] 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.
- [19] 吴萍萍. 不同施肥制度下红壤稻田氨挥发与氧化亚氮排放的研究[D]. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2008.
Wu P P. Ammonia volatilization and nitrous oxide emission from double rice system in red paddy soil under different fertilization systems[D]. Nanjing: MS Thesis of Nanjing Agricultural University, 2008.
- [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 G M, Cai Z C, Cao J L, *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] 施泽升, 续勇波, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同施氮强度对水稻季稻田氨挥发的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(3): 672–678.
Shi Z S, Xu Y B, Lei B K, *et al.* Ammonia volatilization under

- different nitrogen application rates in paddy soil in the Northern Erhai Lake Area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(3): 672–678.
- [22] 韩蔚娟. 新型肥料在黑土上的施用效果及环境效应研究[D]. 长春: 吉林农业大学硕士学位论文, 2015.
- Han W J. Study on the application effectiveness and environmental effect of new-type fertilizer in the black soil[D]. Changchun: MS Thesis of Jilin Agricultural University, 2015.
- [23] 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.
- [24] 李诗豪, 刘天奇, 马玉华, 等. 耕作方式与氮肥类型对稻田氨挥发、氮肥利用率和水稻产量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(5): 447–454.
- Li S H, Liu T Q, Ma Y H, *et al.* Effects of tillage practices and nitrogen sources on NH_3 volatilization, nitrogen use efficiency and yield in paddy fields in central China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(5): 447–454.
- [25] 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.
- [26] 薛欣欣, 吴小平, 张永发, 等. 控失尿素对稻田氨挥发、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, N translocation and utilization efficiency in paddy rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 133–140.
- [27] 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 Q, *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.
- [28] Xu M G, Li D C, Li J M, *et al.* Polyolefin-coated urea decreases ammonia volatilization in a double rice system of southern China[J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105(1): 277–284.
- [29] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 1–6.
- Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 1–6.
- [30] Chen A Q, Lei B K, Hu W L, *et al.* Characteristics of ammonia volatilization on rice grown under different nitrogen application rates and its quantitative predictions in Erhai Lake Watershed, China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 101(1): 139–152.
- [31] Yao Y L, Zhang M, Tian Y H, *et al.* Urea deep placement for minimizing NH_3 loss in an intensive rice cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2018, 218: 254–266.
- [32] Sun X, Zhong T, Zhang L, *et al.* Reducing ammonia volatilization from paddy field with rice straw derived biochar[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 512–518.
- [33] 吴凡, 张克强, 谢坤, 等. 洱海流域典型农区不同施肥处理下稻田氨挥发变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8): 1735–1742.
- Wu F, Zhang K Q, Xie K, *et al.* Characteristics of ammonia volatilization from rice paddy fields under different fertilization treatments in typical agricultural areas of Erhai basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1735–1742.
- [34] 黄晶晶, 朱波, 林超文, 等. 施氮量和田面水含氮量对紫色土丘陵区稻田氨挥发的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(4): 623–629.
- Huang J J, Zhu B, Lin C W, *et al.* Effects of nitrogen application rate and nitrogen content in surface water on ammonia volatilization in paddy fields in purple soil hilly region[J]. *Soils*, 2014, 46(4): 623–629.
- [35] 赵蒙, 曾科, 姚元林, 等. 聚脲甲醛缓释肥对太湖稻麦轮作体系氨挥发及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(1): 55–63.
- Zhao M, Zeng K, Yao Y L, *et al.* Effects of polyurea-formaldehyde on ammonia volatilization and yields under rice-wheat rotation in Taihu Region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 55–63.
- [36] 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.
- [37] 叶玉适, 梁新强, 金熠, 等. 节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水氮素变化及径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5): 105–112, 118.
- Ye Y S, Liang X Q, Jin Y, *et al.* Dynamic variation and runoff loss of nitrogen in surface water of paddy field as affected by water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5): 105–112, 118.
- [38] Duan Z H, Xiao H L. Effects of soil properties on ammonia volatilization[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, 46(4): 845–852.
- [39] Grant C A, Wu R, Selles F, *et al.* Crop yield and nitrogen concentration with controlled release urea and split applications of nitrogen as compared to non-coated urea applied at seeding[J]. *Field Crop Research*, 2012, 127: 170–180.
- [40] 杨春蕾, 袁玲, 李英才, 等. 南太湖流域控释包膜尿素对水稻产量及稻田氮素流失的影响[J]. *土壤通报*, 2013, 44(1): 184–190.
- Yang C L, Yuan L, Li Y C, *et al.* Effect of controlled release coated urea on rice yield and nitrogen loss in paddy fields in the South Taihu Basin[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(1): 184–190.
- [41] 杨俊刚, 曹兵, 徐秋明, 等. 包膜控释肥料在旱地农田的应用研究进展与展望[J]. *土壤通报*, 2010, 41(2): 494–500.
- Yang J G, Cao B, Xu Q M, *et al.* Advances and prospects of application of coated controlled release fertilizers in dryland farm[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2): 494–500.
- [42] 杨铨, 吴良欢, 伍少福, 等. 树脂包膜尿素在稻田中的释放特征及与积温的关系[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(2): 199–204.
- Yang X, Wu L H, Wu S F, *et al.* Nitrogen release characteristic of polymer coated urea in paddy soil and its relationship with cumulative temperature[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(2): 199–204.