

稻田氨挥发损失和水稻产量对不同水氮处理的响应

李 然^{1, 2}, 蔡威威^{1*}, 艾天成¹, 申华平², 武红亮², 王 斌³, 李如楠³

(1. 长江大学农学院, 湖北 荆州 434025; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘 要: 为了实现减少氨挥发带来的环境负效应和增加作物产量的目的, 在典型的江汉平原稻作区, 设计 4 种不同的水氮管理模式: 1) U+CI (普通尿素+常规灌溉), 对照 (CK); 2) US+SWD (普通尿素减氮 20%+薄浅湿晒节水灌溉); 3) CRU+CI (树脂包膜控释尿素+常规灌溉); 4) CRUS+SWD (树脂包膜控释尿素减氮 20%+薄浅湿晒节水灌溉), 探究了减氮与节水灌溉搭配的条件下, 控释尿素对稻田氨挥发损失和水稻产量的影响。结果表明: 不同水氮处理间稻田土壤铵态氮浓度无显著差异, 但在水稻不同生育期间差异显著, 表现为返青期>分蘖期、孕穗期、抽穗期>成熟期; 各水氮处理氨挥发最高峰出现在施肥后的 1~3 d, 其中 CRU+CI 的氨挥发速率最快, 为 $N\ 1.46\ kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$ 。在整个晚稻生长季, 基肥期和分蘖期是氨挥发的主要时期; 节水减氮搭配下, 常规施肥稻田的氨挥发总量显著小于控释肥处理稻田的氨挥发总量。其中 US+SWD 分别比 CRU+CI 和 CRUS+SWD 氨挥发总量降低了 21.3% 和 15.3%, 损失率分别降低了 0.9% 和 14.8%; 其中 U+CI 的氨挥发总量分别比 CRU+CI 和 CRUS+SWD 的氨挥发总量降低了 15.7% 和 9.4%, 损失率分别降低了 15.5% 和 27.3%。稻田氨挥发损失量与土壤铵态氮浓度显著正相关。相比 U+CI (CK), CRU+CI 的水稻产量和 CRUS+SWD 的水稻产量均显著增加, 其中 CRU+CI 增加了 17.4%, CRUS+SWD 增加了 11.0%, 而两个处理之间的水稻产量没有显著差异。因此, 综合增产效应和节能减排效应, CRUS+SWD 是该区域目前最佳的水肥管理方式。

关键词: 节水灌溉; 控释肥; 铵态氮; 氨挥发

氮是水稻生长的三大必需元素之一, 在水稻产量形成和品质方面起着至关重要的作用^[1]。氮肥的施用提高了水稻生产力, 但随用量增加和施用方法不当, 不仅造成了肥料的大量浪费, 还带来了许多环境和生态问题^[2]。施入土壤的氮肥, 当季能被作物吸收利用的只有 30%~60%, 其余的随降水和灌溉水淋入土壤深层或淋溶、地表径流损失, 或经氨挥发、反硝化作用损失^[3]。其中氨挥发是氮肥气态损失的重要途径, 其损失量因测量方法与土地利用方式的不同有较大差异, 占施氮量 9%~40%^[4]。

基于当前氮肥施用不合理造成的氮肥利用率低

以及一系列环境问题, 通过对肥料性质的改良, 控制氮素损失, 提高氮素在土壤中的吸附和固定能力, 可以达到提高肥料利用率、减少养分损失、提高水稻产量等效果, 缓释尿素就是其中的代表^[5-6]。已有研究表明, 等施氮量下, 与常规化肥分次施用相比, 3 种新型缓控释肥料均能够不同程度减少稻田的氨挥发排放, 减排程度可达 13.80%~86.36%, 施用树脂尿素和掺混控释肥的减排效果优于硫包衣尿素^[7-9]。但也有研究表明, 控释尿素分次施用的氨挥发氮损失率最低, 其次为普通尿素分次施用, 而控释尿素一次施用的损失率却最高^[10]。施肥量是影响氨挥发和作物产量的重要因素, 有研究表明, 氨挥发速率并没有随施氮量的增加持续增加^[11]; 但也有研究表明, 减氮及优化施肥能减少土壤氨挥发损失, 并能增产^[12-13]。水分也是影响作物生长和氨挥发的重要因素, 前人研究发现稻田田面不积水能够有效减少氨挥发, 进而降低氮损失^[14]。水分和氮肥的互作效应也是至关重要的, 大量研究表

收稿日期: 2019-10-14; 录用日期: 2019-12-25

基金项目: 国家重点研发计划项目“农畜牧业氨排放污染高效控制技术”(2018YFC0213300); 国家科技支撑计划项目“典型陆地生态系统减排增汇增产关键技术及示范”(2015BAC02B06)。

作者简介: 李然(1992-), 男, 湖北仙桃人, 在读硕士研究生, 研究方向为土壤培肥与改良。E-mail: 799930704@qq.com。

通讯作者: 蔡威威, E-mail: caiweiwei2014@sina.com。

明,控制灌溉能使水稻增产,控制灌溉和实地氮肥管理可降低稻田氨挥发速率峰值和施肥后期的氨挥发量,同时能节约灌溉水和提高灌水利用效率^[15-19]。综上所述,尿素经过改性后的控释化肥对作物具有明显的增产效应,可以达到减排增效、减少环境污染的效果;节水灌溉下施肥能够提高水的利用率和氮肥利用率,但是氮肥的影响高于水分模式的管理^[20]。目前,节水灌溉和减量施氮的组合技术对稻田氨挥发和水稻产量影响的综合效应少有研究,而且控释肥能否有效减少氨挥发损失更有待进一步验证。本研究基于大田试验,研究树脂包膜控释尿素、薄浅湿晒节水灌溉和减氮 20% 搭配的不同水氮组合对晚稻种植氨挥发损失和产量的效应,旨在探讨长江中下游平原有效减少稻田氮素损失的水肥高效利用模式,为农田“节水减排高产”提供试验支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究在湖北省荆州市荆州区农业气象站试验地进行(30° 21' N, 112° 09' E),土壤类型为内陆河湖交替沉积形成的水稻土,质地为粉质中壤土,试验田土壤基本理化性质:土壤 pH 值 7.7、有机质 11.14 g·kg⁻¹,全氮 1.37 g·kg⁻¹,有效磷 15.38 mg·kg⁻¹,速效钾 62.51 mg·kg⁻¹,容重 1.44 g·cm⁻³。试验地位于汉江平原腹地,属亚热带季风性气候,雨热同季。水稻种植期间(2017 年 7 月 24 日~10 月 26 日)平均气温 23.7℃,降水量 439.7 mm,日照时数 438.8 h。2017 年晚稻季降水及温度情况如图 1 所示。

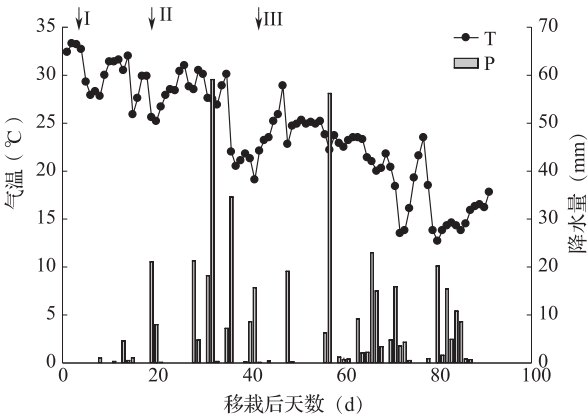


图 1 2017 年晚稻季日平均气温和降水情况

注: I: 基肥施用时间; II: 分蘖肥追施时间; III: 穗肥追施时间。下同。T: 气温; P: 降水量。

1.2 试验设计

试验采用 4 种氮肥管理模式,分别为(1)普通尿素(N≥46%)(U);(2)树脂包膜控释尿素(N≥42%)(CRU);树脂包膜控释尿素养分释放周期为 90 d;(3)普通尿素减氮 20%(US);(4)树脂包膜控释尿素减氮 20%(CRUS)。采用 2 种水分管理方式,分别为(1)常规灌溉(CI):常规灌溉为间歇性灌溉模式;(2)薄浅湿晒节水灌溉(SWD):薄浅湿晒节水灌溉是在常规灌溉的基础上,根据水稻不同生长阶段实际需水量的差异进行水分管理,技术特点为:(a)浅水返青:插秧后田间水层保持浅水层;(b)分蘖前期干湿交替:每 3~5 d 灌一次 10 mm 水层;(c)中期晒田;(d)孕穗期和抽穗开花期保持浅水层;(e)乳熟期干湿交替:每 3~5 d 灌一次 10 mm 水层;(f)黄熟期水分自然落干。各小区安装土壤湿度探头监测 15~20 cm 深土壤体积含水量。2 种水分管理方式在各生育期的灌溉标准详见表 1^[21]。

表 1 两种灌溉方式在水稻不同生育期田间水分管理标准 (mm)

灌溉方式	灌溉阈值	返青期	分蘖期	中期晒田	孕穗期	抽穗期	乳熟期	黄熟期
CI	灌溉前下限	40	20	自然落干 (5~7 d)	20	10	10	自然落干
	灌溉后上限	70	50	0	40	40	30	0
SWD	灌溉前下限	30	75 θs	60 θs	10	5	85 θs	自然落干
	灌溉后上限	40	10	0	20	15	10	0

注: θs: 土壤饱和含水量(%)。

试验设置 4 个不同处理组合: (1) U+CI, 作为对照 (CK); (2) US+SWD; (3) CRU+CI; (4) CRUS+SWD, 各处理 3 次重复, 共 12 小区, 采用单因素随机区组排列。氮肥分 3 次施用, 水稻移栽前施基肥, 分蘖期和抽穗期各追肥一次, 比例为 2:1:1; 树脂包膜控释尿素由于养分释放具有长效性, 因此只施基肥和分蘖肥。常量氮肥处理 (U+CI, CRU+CI) 总施氮量为 $N\ 180\ kg \cdot hm^{-2}$, 减氮 20% 处理 (US+SWD, CRUS+SWD) 总施氮量为 $N\ 144\ kg \cdot hm^{-2}$, 具体施氮量和施氮时间见表 2。磷肥用量均为 $P_2O_5\ 60\ kg \cdot hm^{-2}$, 作为基肥全部施入。钾肥用量均为 $K_2O\ 90\ kg \cdot hm^{-2}$, 基肥、分蘖肥和穗肥按比例 2:1:3 施入。

表 2 晚稻施氮方案 ($N\ kg \cdot hm^{-2}$)

处理	基肥	分蘖肥	穗肥
U+CI	90	45	45
US+SWD	72	36	36
CRU+CI	120	60	0
CRUS+SWD	96	48	0

试验用晚稻品种为 T 优 118, 为当地主推品种, 移栽密度为 $21\ 万穴 \cdot hm^{-2}$, 每穴 2 ~ 3 株。晚稻于 7 月 24 日移栽, 10 月 26 日收割。各个小区长 6 m, 宽 4.5 m, 小区间以宽 30 cm, 高 20 cm 的田埂分隔, 并覆盖尼龙膜, 保证水肥互不干扰。每个小区皆可单独灌溉和排水, 进水管处安装数字电控水表, 记录每次灌溉水量 (m^3)。常规灌溉 (CI) 管理模式, 整个生育期总灌水量为 $5\ 889\ m^3 \cdot hm^{-2}$; 薄浅湿晒节水灌溉 (SWD) 管理模式, 整个生育期总灌水量为 $3\ 852\ m^3 \cdot hm^{-2}$ 。各个小区除水肥管理外, 其余田间管理全部依照当地的耕作习惯进行。

1.3 样品的采集与分析

1.3.1 土壤样品采集与测定

在水稻的返青期、分蘖期、孕穗期、抽穗期、成熟期也按照“S”型采样法于试验地的每个小区采集 0 ~ 20 cm 耕层混合土样 (施肥前后 3 d 不采集)。土样中 NH_4^+-N 浓度测定采用 KCl 浸提 - 靛酚蓝比色法。

1.3.2 氨挥发的收集与通量估算

采用通气法测定稻田氨挥发^[22]。试验中将通气法的氨挥发收集管 (PVC 材质) 高度改为 30 cm, 以适用于水田。两块厚度为 2.5 cm, 直径为 16 cm 的海绵均匀浸以磷酸甘油溶液 (50 mL 磷酸 + 40 mL 丙三醇, 定容至 1 000 mL), 并放置在收集管中。上层海绵距顶部 2 cm, 用于防止空气中氨气及灰尘进入, 下层海绵距稻田水面或土壤 10 cm, 用于捕获氨挥发。每个小区随机放置 3 个氨挥发收集管, 取样时间为: 施肥 (基肥、分蘖肥、穗肥) 后第 1 周, 每天取样 1 次; 第 23 周, 视测到的挥发数量多少, 每 1 ~ 3 d 取样 1 次, 以后取样间隔可延长到 1 ~ 2 周, 直到水稻收获。把取下的海绵带回实验室后, 分别装入 500 mL 塑料瓶中, 加入 300 mL $1\ mol \cdot L^{-1}$ 的 KCl 溶液, 震荡 1 h 后取浸提液用靛酚蓝比色法测定铵态氮浓度。

氨挥发通量 ($kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$) = $M \times A^{-1} \times D^{-1} \times 10^{-2}$, $M = c \times v \times M_0$ (式中: M 为通气法单个装置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 ; D 为每次连续捕获的天数, d; c 为 KCl 浸取液中 NH_4^+-N 含量, $mol \cdot L^{-1}$; v 为 KCl 浸取液的体积, 本研究取 0.3 L, M_0 为 NH_3 的摩尔质量, 取 $17\ g \cdot mol^{-1}$)。

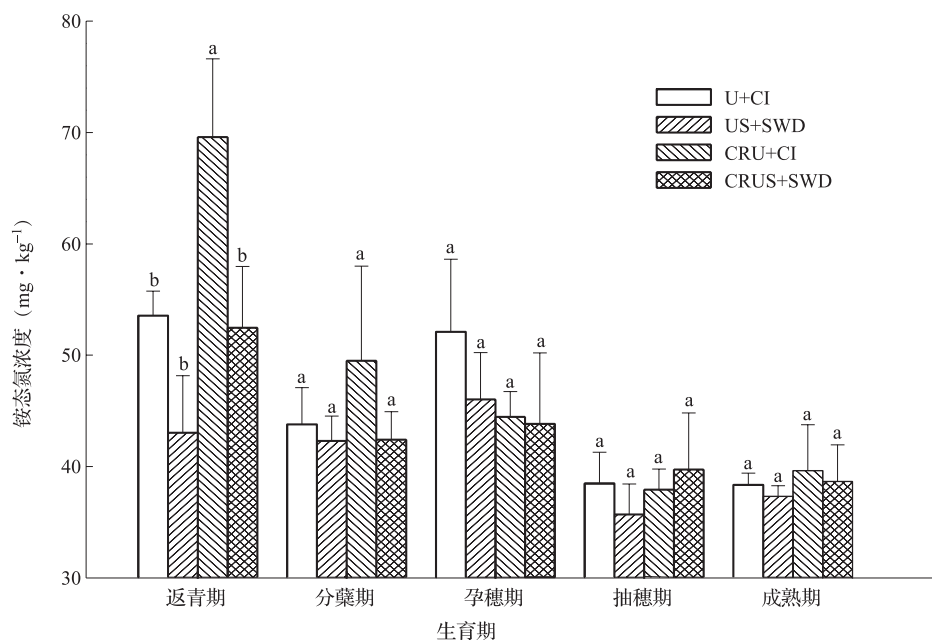
1.3.3 数据处理

采用 Excel 2007 软件计算数据, Sigmaplot 12.5 软件绘图, SPSS 20.0 软件进行统计分析, LSD 法检验差异显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同水氮管理土壤 NH_4^+-N 浓度

施肥后田间土壤中 NH_4^+-N 浓度迅速上升, 在返青期 NH_4^+-N 浓度较高, 以 CRU+CI 最高 ($69.60\ mg \cdot kg^{-1}$), 然后呈现下降趋势, 抽穗后趋于稳定 (图 2)。在相同的水氮管理模式, 不同生育期的 NH_4^+-N 浓度表现为返青期 > 分蘖期、孕穗期、抽穗期 > 成熟期。在返青期, 与 U+CI (CK) 相比, CRU+CI 的土壤中 NH_4^+-N 浓度显著增加 $16.05\ mg \cdot kg^{-1}$, US+SWD 与 CRUS+SWD 的土壤中 NH_4^+-N 浓度无显著差异。在分蘖期、孕穗期、抽穗期及成熟期, 与 U+CI (CK) 相比, 各处理的土壤中 NH_4^+-N 浓度无显著差异。

图2 不同水氮管理模式对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的影响

2.2 不同水氮管理稻田氨挥发速率

不同水氮管理模式, 稻田氨挥发速率存在较为一致的趋势, 随着移栽天数整体呈先增加后降低的趋势 (图3), 分别在基肥、分蘖肥和穗肥施用后的1~3 d出现峰值, 而第一次施肥后的氨挥发速率显著高于后两次施肥。各处理氨挥发速率在基肥施用后变化最大, 为 $\text{N } 0.19 \sim 1.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 其峰值表现为: $\text{U+CI} > \text{CRUS+SWD} > \text{CRU+CI} > \text{US+SWD}$, U+CI (CK) 峰值比 CRUS+SWD 高 5.5%, 但差异不显著, 比 CRU+CI 和 US+

SWD 分别高 24.7%、41.8%, 且存在显著差异。各水氮处理在分蘖期氨挥发速率为 $\text{N } 0.048 \sim 0.70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 峰值表现为: $\text{CRU+CI} > \text{US+SWD} > \text{CRUS+SWD} > \text{U+CI}$, CRU+CI 峰值相比 US+SWD 、 CRUS+SWD 及 U+CI , 分别增加 4.3%、11.4%、28.6%, 但差异不显著。穗肥施用后氨挥发速率为 $\text{N } 0.010 \sim 0.54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 峰值表现为: $\text{U+CI} > \text{US+SWD} > \text{CRUS+SWD} > \text{CRU+CI}$ 。 U+CI (CK) 比 US+SWD 高 7.4%, 差异不显著, 比 CRUS+SWD 和 CRU+CI 分别高 70.1% 和 70.1%, 差异显著。

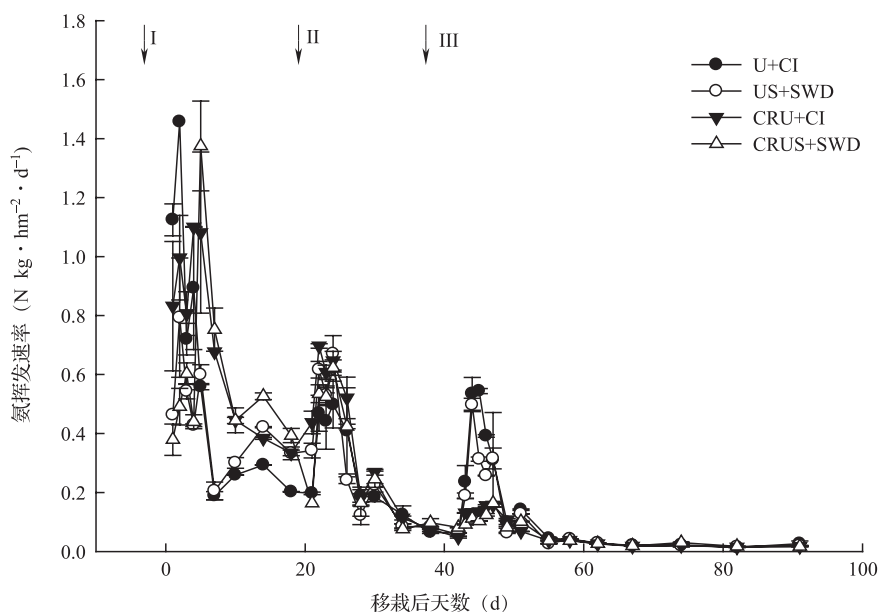


图3 不同水氮管理模式稻田表面氨挥发速率

稻田氨挥发速率与土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈极显著线性正相关 (图 4), 决定系数为 0.652 5。土壤铵态氮浓度每增加 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其氨挥发速率增加 $\text{N } 0.30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

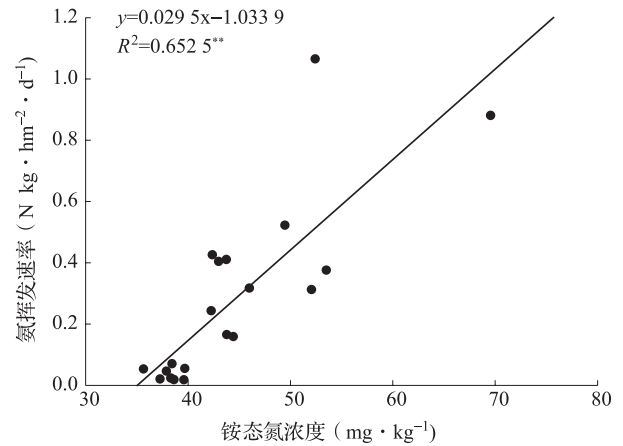


图 4 氨挥发速率与土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的关系

2.3 不同水氮管理稻田氨挥发损失量

不同移栽天数均以 CRU+CI 的氨挥发累积量最

高, US+SWD 最低, 大小顺序为 $\text{CRU+CI} > \text{CRUS+SWD} > \text{U+CI} > \text{US+SWD}$ (图 5)。CRU+CI 处理在基肥施用第 34 d 之后基本达到稳定水平, U+CI (CK) 和 CRUS+SWD 处理均在基肥施用第 28 d 之后基本达到稳定水平, 其较 CRU+CI 处理提前 6 d。

相同灌溉条件下, 树脂包膜控释尿素处理的氨挥发损失量均显著高于普通尿素处理 (表 3)。基肥施用后, 与 U+CI (CK) 相比, US+SWD 的氨挥发量无显著差异, CRU+CI 和 CRUS+SWD 的氨挥发量显著增加。在分蘖肥期, 所有灌溉施肥处理的氨挥发量大幅度降低, U+CI (CK) 的氨挥发量最低。穗肥期, 所有施肥灌溉处理氨的挥发量达到较低水平。从整个生育期氨挥发总量和损失率来看, 表现为 $\text{CRU+CI} > \text{CRUS+SWD} > \text{U+CI} > \text{US+SWD}$ 。其中 US+SWD 分别比 CRU+CI 和 CRUS+SWD 氨挥发总量降低了 21.3% 和 15.3%, 损失率分别降低了 0.9% 和 14.8%; 其中 U+CI 的氨挥发总量分别比 CRU+CI 和 CRUS+SWD 降低了 15.7% 和 9.4%, 损失率分别降低了 15.5% 和 27.3%。

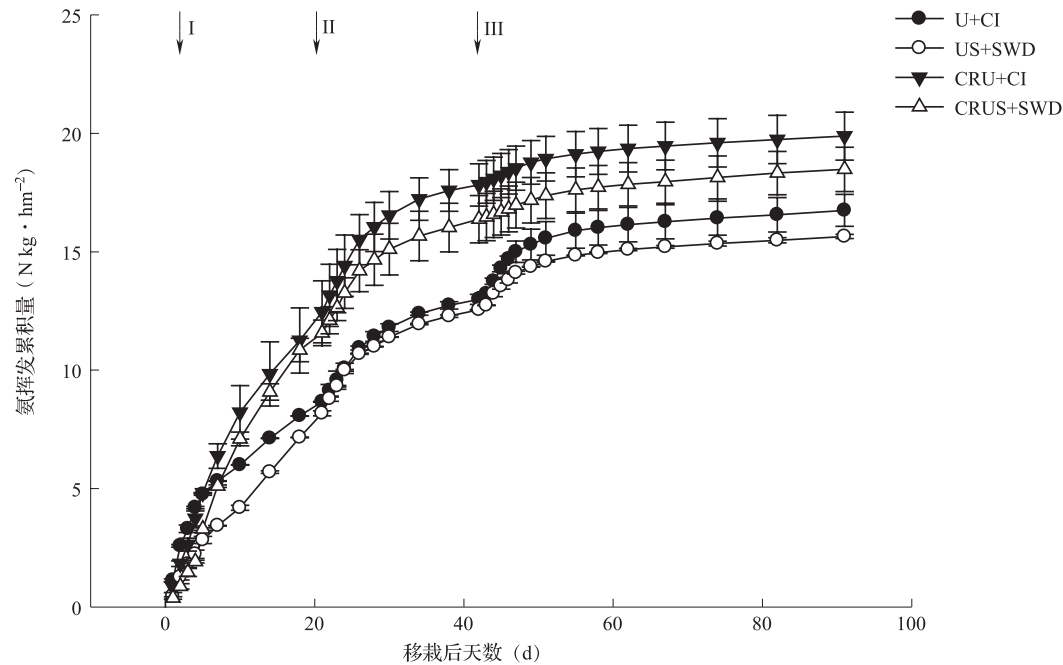


图 5 不同水氮管理模式下稻田氨挥发累积量动态变化

表 3 不同施肥时期的氨挥发累积量和水稻产量

处理	氨挥发损失量 ($\text{N kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 及损失率 (%)				产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	单位产量氨挥发量 ($\text{N kg} \cdot \text{t}^{-1}$)
	基肥期	分蘖肥期	穗肥期	总生长季		
U+CI	8.66 b	4.32 a	3.76 a	16.74 (9.3) ab	7 656 b	2.19 a
US+SWD	8.18 b	4.37 a	3.10 a	15.65 (10.9) b	7 444 b	2.10 a
CRU+CI	12.46 a	5.36 a	2.06 b	19.88 (11.0) a	8 986 a	2.21 a
CRUS+SWD	11.57 a	4.81 a	2.10 b	18.48 (12.8) a	8 496 a	2.18 a

注: 不同小写字母表示处理间差异达到 5% 显著水平。括号中数据为损失率。

2.4 不同水氮管理的水稻产量

表3表明,与U+CI(CK)相比,US+SWD的水稻产量降低了2.8%,但差异不显著;而CRU+CI和CRUS+SWD都显著增加了水稻产量,其中CRU+CI增加了17.4%,CRUS+SWD增加了11.0%。与US+SWD相比,CRUS+SWD的水稻产量显著增加了14.1%。与CRU+CI相比,CRUS+SWD的水稻产量降低了5.5%,但差异不显著。各水氮处理间单位产量氨挥发损失量差异不显著。

3 讨论

3.1 不同水氮管理对稻田氨挥发损失的影响

氮肥的过量施用不仅导致了肥料利用率的下落,而且对环境产生了潜在的影响^[3]。氨挥发是氮肥施入稻田后导致氮素气态损失的重要途径,其主要受土壤条件、气候因子、田面水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度和施肥状况等因素的影响^[4]。目前,氮肥控释化是一种提高氮肥利用率的有效措施^[23],但是控释肥能否有效减少 NH_3 的排放存在争议。秦道珠等^[8]研究表明,施用控释尿素,可大幅度降低水田氨挥发损失。而侯朋福等^[7]研究表明,控释尿素一次施入稻田土壤氨挥发损失量较普通尿素高。但在本研究中,与U+CI(CK)相比,CRU+CI的氨挥发损失增加18.8%;与US+SWD相比,CRUS+SWD显著增加了氨挥发。这主要与试验地点背景气温有较大关系。氨挥发与稻田水温存在较好的正相关关系^[24]。虽然控释尿素养分释放慢,但是由于控释肥分基肥、分蘖肥两次投入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,使得田间水面和土壤中铵态氮浓度迅速增加,从而增加了氨挥发^[25-27],这与朱小红等^[13]对巢湖流域晚稻氨挥发研究的发现一致。本试验观测到基肥施用后返青期CRU+CI的土壤铵态氮显著高于U+CI对照处理,从而导致更高的氨挥发,进一步证实了这一观点。本研究中,控释尿素若分3次施用,既可以减少前两个时期氨的挥发,又可以进一步补充后期稻田氮素供应。薛欣欣等^[10]研究表明,控释尿素分次施用具有降低氨挥发损失的作用,此结论与控释尿素分3次施用结果一致。因此,控释尿素采用分次施用的方式是该区域目前稻田相对较好的施肥措施。

土壤水分对氨挥发的影响报道并不一致,而且缺乏与减氮相结合的研究。不同灌溉方式下,稻

田土壤的理化性质以及氮素的积累、运转和分配各有差异,导致氮肥减量施用下氨挥发损失的方面存在诸多不确定性。崔远来等^[17]研究表明,节水灌溉的氨挥发量高于普通灌溉的氨挥发量。彭世彰等^[28]在晚稻研究中表明,与淹水灌溉相比,控制灌溉减少了稻田氨挥发损失。本研究中,与U+CI(CK)相比,US+SWD减少了氨挥发损失;与CRU+CI相比,CRUS+SWD使氨挥发降低。常规灌溉条件下,氨挥发发生在水层与大气的界面处,田表水中铵态氮浓度是普通灌溉稻田氨挥发速率的主要影响因素;节水灌溉条件下,大部分氨挥发发生在土壤表面,表层土壤水中铵态氮浓度与稻田氨挥发速率有很好的线性关系,节水灌溉提高水-土界面的空气交换,土壤中的硝化作用得以增强,部分 NH_4^+ 转化为 NO_3^- ,降低了氨的挥发。肥料氮素氨挥发损失量随施肥量增加而增加^[29-30],氮肥施用是氨挥发通量增加的主导因素,减少氮肥施用可显著降低氨挥发损失量^[25]。因此,节水灌溉技术和减氮结合,能更有效地减少氨的挥发损失。

控释尿素、减氮、节水灌溉技术相结合的综合效应少有报道。前人研究表明,控释肥和控制灌溉模式相结合的水肥联合利用模式在节水的同时,大幅度减小了稻田的氨挥发损失,提高了稻田氮利用率,减少了对环境的污染^[28]。在本试验中,与U+CI(CK)相比,CRUS+SWD的氨挥发量增加,但差异不显著。减氮和节水搭配的减排作用抵消了单次控释尿素的氨挥发氮损失,故普通灌溉条件下控释肥、减氮和节水组合对氨的挥发无显著作用,只有通过改变尿素的性质和减少投入量,才能减少氨的挥发;节水灌溉条件下,干湿交替、中期晒田和浅水灌溉均能改善土壤的通气状况,减少氨的挥发。综上所述,树脂包膜控释尿素采用减氮分次施用是长江中下游平原晚稻相对较好的施肥措施,但需合理安排施肥次数^[31]。因此,根据本研究结果和荆州市的自然条件因素,建议采用基肥期减少氮肥用量,氮肥深施和合理分次施用缓释肥料等管理措施,这样才能达到“减排”的效果。本研究说明了对控释尿素、减氮、节水灌溉技术相结合的综合效应对氨排放的影响,但是研究三者的单独及交互作用有待提高和改进。因此,如何区分水和肥效的单独及交互效应是今后研究的重要方向。

3.2 不同水氮管理对水稻产量的影响

水分和氮肥在水稻产量形成中起着重要的作

用。研究表明作物产量与施肥量成正相关关系^[32]。在本研究中,相比U+CI(CK),US+SWD的水稻产量无显著差异,CRU+CI的水稻产量和CRUS+SWD的水稻产量显著增加。本研究是晚稻季开展的试验,由于前期温度较高和降雨较多,氮素损失较多,可能会造成减产。已有研究表明,作物生长期氮素供应不足可造成干物质产量降低^[33]。单次施用大量的树脂包膜控释尿素,虽然前期增加了氮的挥发损失,但养分释放周期长,后期能满足作物对养分的需求,有助于产量增长。而且节水灌溉下良好的土壤通气环境,有利于氮的转化吸收,同时根系生长旺盛,白根多且分布深,使其吸肥力高于普通灌溉,从而导致水稻增产。本试验中,控释尿素处理间的产量无显著差异。这些结果说明控释尿素对水稻增产有显著效果,节水灌溉有增产效果。因此,在薄浅湿晒节水灌溉搭配控释尿素减氮20%的条件下,既能节约水和氮肥,又能增产。

4 结论

相比常规灌溉普通尿素U+CI(CK),常规灌溉控释尿素处理(CRU+CI)和节水灌溉树脂包膜控释尿素减氮20%处理(CRUS+SWD)均未对氮挥发损失产生显著影响,但均显著增加了水稻产量,其中CRU+CI增加了17.4%,CRUS+SWD增加了11.0%,而两个处理之间没有显著差异。综合考虑,树脂包膜控释尿素在节水灌溉减氮20%的情况下,仍显著提高了水稻产量,也并未显著增加氮的排放。因此,CRUS+SWD既可增加作物的经济效益,又可节约水分和肥料,对减缓水稻生产导致的环境负效应及增加产量具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 田昌,周旋,谢桂先,等.控释尿素减施对双季稻田氮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.
- [2] 沃飞,陈效民,方堃,等.太湖地区两种典型水稻土中氮、磷迁移转化的研究[J].土壤通报,2007,38(6):1058-1063.
- [3] 王朝辉,刘学军,巨晓棠,等.北方冬小麦/夏玉米轮作体系土壤氮挥发的原位测定[J].生态学报,2002,22(3):359-365.
- [4] 夏文建,周卫,梁国庆,等.优化施氮下稻-麦轮作体系氮肥挥发损失研究[J].植物营养与肥料学报,2010,16(1):6-13.
- [5] 周丽平,杨俐苹,白由路,等.不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氮挥发和氮素利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1449-1457.
- [6] Yang Q L, Liu P, Dong S T, et al. Effects of fertilizer type and rate on summer maize grain yield and ammonia volatilization loss in northern China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(5): 2200-2211.
- [7] 侯朋福,薛利祥,俞映惊,等.缓控释肥侧深施对稻田氮挥发排放的控制效果[J].环境科学,2017,38(12):5326-5332.
- [8] 秦道珠,李冬初,徐明岗,等.红壤稻田施用控释肥与氮素转化的关系[J].中国农学通报,2008,24(9):273-276.
- [9] 周亮,荣湘民,谢桂先,等.不同氮肥施用对双季稻田氮挥发及其动力学特性的影响[J].水土保持学报,2014,28(4):143-147.
- [10] 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.
- [11] 王成,陈波浪,玉素甫江·玉素音,等.不同施氮水平对库尔勒香梨园土壤氮挥发损失的影响[J].中国土壤与肥料,2019,(2):46-53.
- [12] 刘立军,桑大志,刘翠莲,等.实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J].中国农业科学,2003,36(12):1456-1461.
- [13] 朱小红,马中文,马友华,等.施肥对巢湖流域稻季氮挥发损失的影响[J].生态学报,2012,32(7):2119-2126.
- [14] 陈振华,陈利军,武志杰,等.辽河下游平原不同水分条件下稻田氮挥发[J].应用生态学报,2007,(12):2771-2776.
- [15] 王磊,董树亭,刘鹏,等.水氮互作对冬小麦田氮挥发损失和产量的影响[J].应用生态学报,2018,29(6):1919-1927.
- [16] 杨士红,彭世彰,徐俊增,等.不同水氮管理下稻田氮挥发损失特征及模拟[J].农业工程学报,2012,28(11):99-104.
- [17] 崔远来,李远华,吕国安,等.不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究[J].水科学进展,2004,15(3):280-285.
- [18] 徐久凯,李絮花,李伟,等.缓释尿素与普通尿素配施对氮挥发和土壤氮素动态变化过程的影响[J].中国土壤与肥料,2015,(6):23-27.
- [19] He Y P, Zhang J Y, Yang S H, et al. Effect of controlled drainage on nitrogen losses from controlled irrigation paddy fields through subsurface drainage and ammonia volatilization after fertilization [J]. Agricultural Water Management, 2019, 221(43): 231-237.
- [20] 郭刚,袁嫚嫚,曹哲伟,等.不同水氮管理条件下稻田氮挥发损失特征[J].生态与农村环境学报,2019,35(5):651-658.
- [21] 李健陵,李玉娥,周守华,等.节水灌溉、树脂包膜尿素和脲酶/硝化抑制剂对双季稻温室气体减排的协同作用[J].中国农业科学,2016,49(20):3958-3967.

- [22] Liu T Q, Fan D J, Zhang X X, et al. Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China [J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 80–90.
- [23] 宋梓璇, 李虎, 李建政, 等. 控释肥对东北春玉米产量和土壤氮挥发的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37 (10): 2342–2349.
- [24] 张艺磊, 韩建, 张丽娟, 等. 新型尿素对农田土壤 N_2O 排放、氮挥发及土壤氮素转化的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47 (11): 313–316.
- [25] 李银坤, 梅旭荣, 武雪萍, 等. 不同水氮条件对日光温室冬春茬黄瓜栽培氮挥发的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20 (11): 1413–1419.
- [26] 俞映惊, 薛利红, 杨林章, 等. 太湖地区稻田不同氮肥管理模式下氮挥发特征研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32 (8): 1682–1689.
- [27] 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.
- [28] 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 节水灌溉稻田氮挥发损失及影响因素 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25 (8): 35–39.
- [29] 雍太文, 陈平, 刘小明, 等. 减量施氮对玉米–大豆套作系统土壤氮素氨化、硝化及固氮作用的影响 [J]. *作物学报*, 2018, 44 (10): 1485–1495.
- [30] 蒋一飞, 巴闯, 王丹蕾, 等. 控释氮肥减量配施对土壤氮挥发和 N_2O 排放的影响 [J]. *环境科学研究*, 2019, 31 (1): 159–165.
- [31] Xiao F, Tian J B, Geng Y L, et al. Controlled-release urea decreased ammonia volatilization and increased nitrogen use efficiency of cotton [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2017, 180 (6): 667–675.
- [32] 梁斌, 赵伟, 杨学云, 等. 长期不同施肥对旱地小麦土壤氮素供应及吸收的影响 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45 (5): 885–892.
- [33] 李诗豪, 刘天奇, 马玉华, 等. 耕作方式与氮肥类型对稻田氮挥发、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.

Responses of ammonia volatilization and grain yield under different water and fertilizer practices in a rice paddy

LI Ran^{1, 2}, CAI Wei-wei^{1*}, AI Tian-cheng¹, SHEN Hua-ping², WU Hong-liang², WANG Bin³, LI Ru-nan³ (1. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434025; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: In order to reduce the negative environmental effects caused by ammonia volatilization and increase the grain yield, four different water management and nitrogen schemes were designed for the late rice in a typical rice-growing area of the Jiangnan Plain, including: 1) U+CI: common urea with conventional irrigation, as the control (CK); 2) US+SWD: 20% reduction of common urea nitrogen with “thin and shallow alternate wetting drying” water-saving irrigation; 3) CRU+CI: polymer-coated urea with conventional irrigation; 4) CRUS+SWD: 20% reduction of polymer-coated urea nitrogen with “thin and shallow alternate wetting drying” water-saving irrigation. Responses of nitrogen reduction with water-saving irrigation and controlled-release urea on ammonia volatilization loss and grain yield were measured. Results showed that there was no significant difference in the content of ammonium nitrogen in paddy soils with different water and nitrogen treatments, but there were significant differences in different growth periods of rice, ranked as: regreening stage>tillering stage, booting stage, heading stage>maturity stage. The NH_3 volatilization peak among different treatments occurred within one to three days after fertilization, and the ammonia volatilization rate of CRU+CI treatment was the fastest ($N\ 1.46\ kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$). During the whole growing season of the late rice, base stage and tillering stage were the main periods of ammonia volatilization. Under nitrogen reduction with water-saving irrigation condition, the ammonia volatilization loss in conventional fertilized paddy field was significantly less than that of controlled release fertilizer treatment. The total ammonia volatilization amount and the loss rates in US+SWD treatment reduced by 21.3%, 0.9% and 15.3%, 14.8%, respectively, compared with CRU+CI and CRUS+SWD. The total ammonia volatilization amount and the loss rate in U+CI treatment reduced by 15.7%, 15.5% and 9.4%, 27.3%, respectively, compared with CRU+CI or CRUS+SWD. There was a significant positive correlation between ammonia emission and soil ammonium nitrogen content in paddy fields. Compared with U+CI (CK), the grain yield of CRU+CI and CRUS+SWD increased significantly by 17.4% and 11.0%, respectively. But the rice yield of CRUS+SWD was not significantly different from that of CRU+CI. Thus, CRUS+SWD is the best fertilization method for increasing the grain yield and reducing environmental risks.

Key words: water-saving irrigation; controlled release fertilizer; ammonium nitrogen; ammonia volatilization