

南方平原灌区稻田氨挥发排放规律及影响因素研究

杨子荣¹, 邹志科², 罗文兵^{2*}, 肖新¹, 黄绍哲¹, 潘红忠¹, 李亚龙²

(1.长江大学, 武汉 430100; 2.长江科学院, 武汉 430100)

摘要:【目的】探究水、氮在中稻各生育阶段对氨挥发损失量及气象因子对中稻氨挥发速率的影响。【方法】以稻田为研究对象, 在江西省灌溉试验中心站开展氨挥发田间试验, 设置间歇灌溉(W1)和传统淹灌(W0)2种灌溉模式, 不施氮(N0, 0 kg/hm²)、减量施氮(N1, 135 kg/hm²)和常规施氮(N2, 180 kg/hm²)3种施氮水平, 分析不同灌溉模式和施氮量对中稻各生育阶段氨挥发损失量的影响, 建立氨挥发速率和气象因子之间的回归方程。

【结果】同一灌溉模式下, 在一定范围内增施氮肥会增加氨挥发损失量; 同等施氮水平下, 间歇灌溉相比传统淹灌会增加氨挥发损失量; 氨挥发损失主要发生在分蘖、拔节、抽穗3个时期, 其氨挥发损失量之和占整个生育期氨挥发损失总量的50%以上; 气象因子中, 日照时间对氨挥发的影响最大, 呈正相关, 其次为风速, 呈负相关, 最后是蒸发量, 呈负相关。【结论】间歇灌溉相比传统淹灌会增加氨挥发损失量, 从中稻整个生育阶段来看, 氨挥发损失主要发生在生育中前期, 氨挥发与日照时间呈正相关, 与风速和蒸发量呈负相关。

关键词: 氨挥发; 水肥管理; 气象因子; 平原灌区; 显著性

中图分类号: S143.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2022370

OSID:



杨子荣, 邹志科, 罗文兵, 等. 南方平原灌区稻田氨挥发排放规律及影响因素研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 79-86.

YANG Zirong, ZOU Zhike, LUO Wenbing, et al. Ammonia Volatilization from Irrigated Paddy Fields in Southern China Plains and Its Determinants[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 79-86.

0 引言

【研究意义】随着人口增长和经济发展, 我国对粮食的需求日益增加。水稻作为我国主要的粮食作物之一, 其产量约占全国粮食总产量的42%^[1]。水稻的高产、稳产主要依赖于灌溉和施氮, 在我国南方丰水区, 水稻种植普遍存在大灌大排现象, 我国北方地区农田灌溉水有效利用系数显著高于南方地区农田灌溉水有效利用系数^[2]。据统计, 我国是世界第一大氮肥消耗国, 氮肥用量占全球氮肥用量的30%, 其中稻田氮肥用量占我国氮肥总消耗量的24%左右^[3]。我国地域辽阔, 气候和土壤条件具有明显的区域异质性, 不同区域的农田管理措施各异, 造成氮肥损失存在较大的时空差异^[4]。南方平原灌区地处亚热带湿润季风气候区, 气候温和, 雨水丰沛, 土壤资源丰富^[5], 已成为国家水稻生产的重点区域。在水稻种植过程中, 大排大灌、过量施氮以及降水与施肥期的重合, 都会引发大量的农田氮素流失。其中, 氨挥发作为氮素损失的主要途径之一, 造成

的氮素损失高达40%~60%^[6-7], 因此, 有必要针对稻田氨挥发排放规律及影响因素开展试验研究, 为减少南方平原灌区氮素损失提供理论依据。

【研究进展】许多学者针对氨挥发的影响因素进行了大量研究, 得出农田氨挥发的时空差异是由气象条件、土壤条件以及农田管理措施的差异所引起的, 是这些因子综合作用的结果^[8]。在气象因子方面, 吴萍萍等^[9]研究表明, 低温、强降水会抑制氨气的产生和传输, 其中低温不利于田间NH₄⁺转化为NH₃, 降水则会将已产生的NH₄⁺再带回到农田土壤中。风速对氨挥发的影响存在临界值, 在风速较小时, 氨挥发随风速增大而增大, 但在风速达到临界值后, 其对氨挥发速率几乎没有影响^[10]。在土壤因子方面, 朱坚等^[11]研究发现, 土壤pH值的升高促进了NH₄⁺向NH₃的转化, 从而加速了氨挥发。阳离子交换量和土壤有机质对氨挥发存在抑制作用, 土壤有机质不仅能够吸附NH₄⁺, 且有机质被分解成腐殖质后会降低土壤pH值, 从而抑制氨挥发^[12]。田间土壤含水率过高或过低都会减少氨挥发^[10], 土壤含水率过低时, 肥料的水解作用被削弱, 进而抑制了氨挥发^[13]; 土壤含水率过高时, 土壤水中会溶解较多的氨, 使得土-气界面氨浓度减小, 从而削弱氨气的扩散作用^[14]。在田间管理措施方面, 施氮会在不同程度上加大氨挥发速率和氨挥发损失量^[15-16], 不同类型氮肥对氨挥发的影响也存在差异^[17]。叶世超

收稿日期: 2022-07-02

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中华人民共和国水利部-中国长江三峡集团有限公司长江水科学研究联合基金项目(U2040213); 中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目(CKSF2019251/NY, CKSF2021299/NY)

作者简介: 杨子荣(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事农业水资源管理研究。E-mail: 1944183037@qq.com

通信作者: 罗文兵(1986-), 男, 博士, 主要从事农田排水及水管理研究。E-mail: luowenbing20050@126.com

等^[18]研究发现, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度和氨挥发损失量都会随着施氮量的增加而增加。李诗豪等^[17]研究表明, 耕作方式显著影响氨挥发, 但不影响氮肥利用率和水稻产量。不同施氮方式对氨挥发的影响也不一致, 具体表现为表施>混施>深施>粒肥深施^[19]。针对灌溉模式对氨挥发的影响, 相关学者的研究结论有所不同。崔远来等^[20]研究发现, 节水灌溉条件下氨挥发损失量高于淹灌; 而彭世彰等^[21]研究表明, 与淹水灌溉相比, 控制灌溉减少了稻田氨挥发损失。

【切入点】以往研究多集中在水、肥、气象等单一因素对水稻生育期内氨挥发的影响, 而缺少水、肥、气象综合因子对水稻不同生育阶段氨挥发损失的影响研究。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究以鄱阳湖流域赣抚平原灌区的稻田为研究对象, 在江西省灌溉试验中心站开展水氮调控下的氨挥发田间试验, 分析水、氮对中稻各生育阶段氨挥发损失量及气象因子对氨挥发速率的影响, 为南方平原灌区田间水肥高效安全管理提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在江西省鄱阳湖流域赣抚平原灌区内的江西省灌溉试验中心站(东经 $115^{\circ}58'$, 北纬 $28^{\circ}26'$, 海拔 22.6 m)开展。试验区为典型的亚热带湿润季风性气候区, 光照充足, 多年平均日照时间为 1 720 h, 多年平均气温为 18.1°C , 多年平均降水量为 1 634 mm, 降水量年内分布不均, 主要集中在 4—6 月, 占全年降水量的 46.1%左右。试验区稻田土壤为水稻土, 耕作层土壤质地为粉壤土, 其中砂粒占比 8.13%、粉粒占比 70.01%、黏粒占比 21.86%。稻田土壤耕作层厚度大约在 15~20 cm 之间, 耕作层土壤

体积质量为 1.36 g/cm^3 , 土壤有机质质量分数为 1.74%, 全氮质量分数为 0.82%, 全磷质量分数为 0.25%, 全钾质量分数为 1.18%。农田地势整体北高南低, 农田东侧有主排水沟, 灌溉水源取自试验站周围的抚河二干渠, 区域内田块按水稻不同处理进行管理。试验站的水稻种植制度和自然条件在鄱阳湖流域具有一定代表性。

1.2 试验设计

2019—2021 年中稻试验在田间小区内进行, 各小区长度为 8 m, 宽度为 3.5 m。为防止各小区之间发生串水串肥, 用塑料膜将小区田埂与排灌水沟田埂包裹分隔开。试验设置 3 种施氮水平(以纯氮计), 分别为不施氮(N0 , 0 kg/hm^2)处理、减量施氮(N1 , 135 kg/hm^2)处理和常规施氮(N2 , 180 kg/hm^2)处理, 以及传统淹灌(W0)和间歇灌溉(W1)2 种灌溉模式, 共计 6 个处理。不同灌溉模式的田间水层深度控制标准见表 1, 不同水氮处理组合见表 2。由于场地限制, 2019 年和 2021 年的 W1N0 处理和 W0N0 处理不设重复小区(但在小区内重复取样), 其余处理均设置 3 个重复, 共 14 个小区。2020 年未设置 W1N0 处理及 W0N0 处理, 其余每个处理重复 3 次, 共计 12 个小区, 各小区通过随机区组的方式排列。供试水稻品种为黄华占, 按株距×行距为 $13\text{ cm}\times 27\text{ cm}$ 的密度进行种植。氮肥按照基肥: 蘖肥: 拔节肥=5:3:2 的比例施用, 氮肥品种为 45%的复合肥($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$: 15-15-15); 磷肥(以 P_2O_5 计): 67.5 kg/hm^2 , 类型为钙镁磷肥, 全部作为基肥施用; 钾肥(以 K_2O 计): 150 kg/hm^2 , 类型为氯化钾, 按基肥: 拔节肥=4.5:5.5 施用。生育阶段划分及田间管理措施见表 3。

表 1 不同灌溉模式田间水层深度控制标准

Table 1 Field water depth control standards for different irrigation modes

灌溉模式	灌前下限-灌后上限-蓄水上限/mm						
	返青期	分蘖前期	分蘖后期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
间歇灌溉 (W1)	0-20-30	0-20-50 干 4 d	0-20-50 后期晒田	0-20-50 干 4 d	0-20-50 干 4 d	0-20-50 干 4 d	0-20-30 后期落干
传统淹灌 (W0)	20-40-40	20-50-50	20-50-50 后期晒田	20-50-50	20-50-50	20-50-50	0-30-30 后期落干

注 表中 W1 处理 0-20-30 均为田间水层深度, 其中 0 mm 为田间水层灌前下限深度、20 mm 为田间水层灌后上限深度、30 mm 为田间水层雨后蓄水上限深度, 干 4 d 为 W1 处理在水层下降为 0 mm 后田面连续落干 4 d 再灌水, 后期晒田为分蘖后期距拔节孕穗期 7 d 晒田, 后期落干为黄熟期最后 10 d 田面自然落干。

表 2 不同水氮处理组合

Table 2 Combination of different water and fertilizer treatments

处理	灌水模式	施氮水平	处理	灌水模式	施氮水平
W0N0*	W0	N0	W1N0*	W1	N0
W0N1	W0	N1	W1N1	W1	N1
W0N2	W0	N2	W1N2	W1	N2

注 表中标注*的 W0N0、W1N0 表示 2020 年未设置该处理。

表 3 中稻生育阶段划分及田间管理措施

Table 3 Division of midseason rice growth stages and field management measures

年份	2019 年	2020 年	2021 年
生育阶段	返青期	0618—0624	0616—0623
	分蘖前期	0625—0709	0624—0707
	分蘖后期	0710—0722	0708—0723
	拔节孕穗期	0723—0805	0724—0812
	抽穗开花期	0806—0819	0813—0823
	乳熟期	0820—0827	0824—0910
	黄熟期	0827—0917	0911—0924
	水稻移栽日期	0618	0616
	水稻收获日期	0920	0918
	生育期总天数/d	95	95
施氮	基肥	0617	0615
	分蘖肥	0701	0627
	拔节肥	0723	0721

1.3 样品采集

稻田氨挥发速率采用通气法^[22]观测。氨气采集装置为上下无底的透明玻璃圆柱筒（内径 10 cm，高 20 cm），以及 2 个涂有 15 mL 磷酸甘油溶液的厚 2 cm、直径为 10.5 cm 的海绵块。2 块海绵分别置于玻璃圆筒的上层和下层，上层海绵与圆筒顶部齐平，可排除外部空气中氨的干扰，下层海绵与上层海绵间隔 1 cm，用于吸收田面挥发出的氨气。2019 年和 2021 年随机选择 W0N0、W0N1、W0N2、W1N0、W1N1、W1N2 处理的 6 个小区进行氨挥发观测，2020 年对 12 个小区均进行氨挥发观测。施肥 7 d 内每天取 1 次样，然后根据观测到的氨挥发速率，每隔 1~3 d 取样 1 次，拔节孕穗期后取样时间间隔延长至 4~6 d 为 1 次，直至水稻收割。取样后，将采集装置下层的海绵块用 200 mL 的 1.0 mol/L 的 KCl 溶液浸取，并用纳氏试剂比色法测定海绵块中的氨量。氨挥发速率计算方法参考文献[23]。

1.4 数据处理

利用 Excel 2010 对数据进行处理并绘图，利用 SPSS 中的单因素方差分析进行组间比较，多重比较

采用 LSD 法 ($P < 0.05$) 计算各因素的斜统计量，并得到对应的 P 值，采用逐步线性回归法 ($P < 0.05$) 得到回归方程。

2 结果与分析

2.1 水氮调控下中稻生育期氨挥发速率变化规律

2021 年中稻氨挥发速率变化规律如图 1 所示。中稻在分蘖前期和分蘖后期先后于 7 月 14 日和 8 月 2 日出现了氨挥发速率峰值。追施拔节肥（8 月 4 日）7 d 内，中稻氨挥发速率并未迅速增大，反而呈逐渐下降趋势，在 8 月 10 日，中稻氨挥发速率降至最低点后，其挥发速率才缓慢增加。2019 年和 2020 年，中稻氨挥发速率的变化规律详见文献[24]，从整个生育期来看，3 a 中稻氨挥发速率变化规律在分蘖期略有差异，在其余生育阶段的变化则大体相似，表现出“拔节孕穗期和抽穗开花期减小，乳熟期增加，黄熟期减小”的规律。与 2019 年和 2020 年不同的是，2021 年中稻分蘖期氨挥发速率呈“增-减-增”的波动变化趋势。

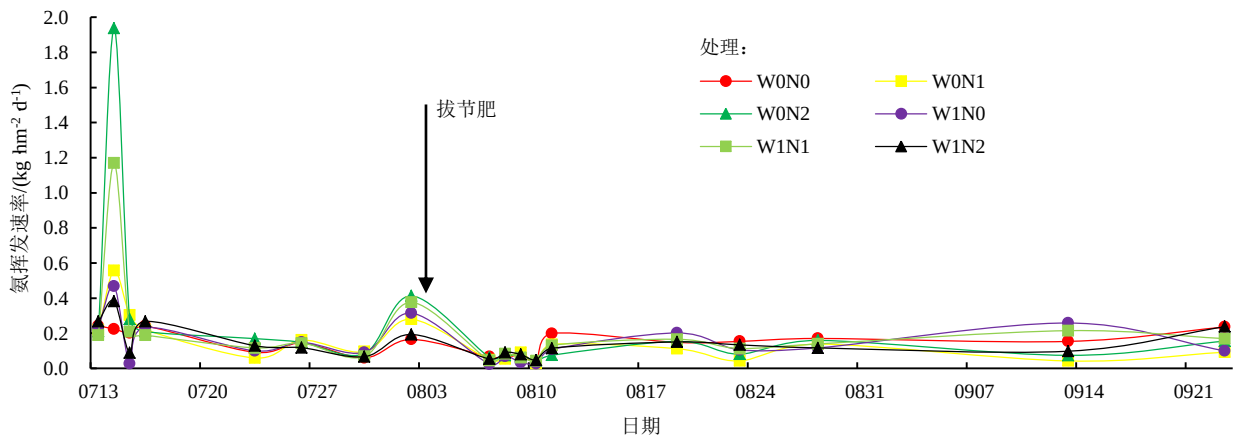


图 1 2021 年中稻氨挥发速率
Fig.1 Ammonia volatilization rate of midseason rice in 2021

2.2 水氮调控下中稻各生育阶段氨挥发损失量变化规律

2021 年中稻各生育阶段氨挥发损失量及整个生育期内氨挥发损失总量如表 4 所示。2021 年中稻在分蘖、拔节孕穗、抽穗开花 3 个时期的氨挥发损失量占整个生育期氨挥发损失总量的比例较大, 6 个处理 3 个生育阶段氨挥发损失量之和占比高达 81.77%, 而乳熟期和黄熟期氨挥发损失量占比仅为 18.23%。

表 4 2021 年中稻各生育阶段氨挥发损失量及占比

Table 4 Amount and proportion of ammonia volatilization loss in different growth stages of midseason rice in 2021

处理	分蘖前期		分蘖后期		拔节孕穗期		抽穗开花期		乳熟期		黄熟期		氨挥发损失总量/ (kg hm ⁻²)
	氨挥发 损失量/ (kg hm ⁻²)	占氨挥发 损失总量 比例/%	氨挥发 损失量/ (kg hm ⁻²)	占氨挥发 损失总量 比例/%	氨挥发 损失量/ (kg hm ⁻²)	占氨挥发 损失总量 比例/%	氨挥发 损失量/ (kg hm ⁻²)	占氨挥发 损失总量 比例/%	氨挥发 损失量/ (kg hm ⁻²)	占氨挥发 损失总量 比例/%	氨挥发 损失量/ (kg hm ⁻²)	占氨挥发 损失总量 比例/%	
W0N0	1.83	15.36	2.21	18.55	2.29	19.27	3.39	28.52	1.94	16.32	0.24	1.98	11.90
W0N1	2.06	18.63	2.22	20.11	1.56	14.17	1.89	17.11	2.79	25.30	0.52	4.68	11.03
W0N2	3.75	31.23	2.87	23.87	1.64	13.61	2.46	20.47	1.14	9.52	0.16	1.29	12.02
W1N0	1.89	14.20	3.93	29.56	2.04	15.37	3.55	26.69	1.79	13.44	0.10	0.75	13.29
W1N1	2.64	21.59	2.02	16.53	2.01	16.48	3.46	28.31	1.92	15.71	0.17	1.39	12.21
W1N2	2.12	21.16	1.74	17.34	1.93	19.20	2.33	23.27	1.67	16.67	0.24	2.36	10.03

灌溉模式、施氮水平以及水氮交互作用对不同生育阶段氨挥发损失量的影响见表 5。水、氮及其耦合作用对 3 a 中稻氨挥发损失总量及各生育阶段氨挥发损失量的影响均不显著。逐年对中稻氨挥发损失量进行检验可知, 2019 年和 2020 年, 灌溉模式对中稻氨挥发损失总量均有显著影响, 且 2019 年灌溉模式对拔节孕穗期氨挥发损失量的影响达到了极显著水平, 2020 年灌溉模式对抽穗开花期氨挥发损失

由此可见, 分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期为中稻氨挥发损失的关键时期。2019 年和 2020 年各生育阶段氨挥发损失量变化规律详见文献[24], 与 2019 年和 2020 年中稻氨挥发损失主要发生在拔节孕穗和抽穗开花期不同, 2021 年中稻除拔节孕穗期和抽穗开花期外, 分蘖期的氨挥发损失也较大, 占比为 20.36%。

量的影响达到了显著水平。然而, 2021 年施氮水平以及灌溉模式对氨挥发损失总量和不同生育阶段氨挥发损失量的影响均不显著。原因可能是氨挥发除受灌溉、施肥等农田管理措施影响外, 还受气象要素影响, 2021 年水稻各生育阶段的日照时间、风速、蒸发量等气象条件与 2019 年和 2020 年有较大差异, 导致氨挥发损失规律不一致。

表 5 2019—2021 年中稻各生育阶段氨挥发损失量显著性分析

Table 5 Significance analysis of ammonia volatilization loss in different growth stages of midseason rice from 2019 to 2021

指标	灌溉模式			施氮水平			水氮交互		
	F 值	P 值	显著性	F 值	P 值	显著性	F 值	P 值	显著性
氨挥发损失总量	0.56	0.46	ns	0.09	0.91	ns	0.20	0.82	ns
分蘖前期氨挥发损失量	0.41	0.54	ns	1.28	0.33	ns	2.70	0.13	ns
分蘖后期氨挥发损失量	0.37	0.55	ns	0.57	0.57	ns	0.21	0.82	ns
拔节孕穗期氨挥发损失量	1.51	0.23	ns	0.21	0.81	ns	0.69	0.51	ns
抽穗开花期氨挥发损失量	0.29	0.59	ns	0.59	0.56	ns	0.02	0.98	ns
乳熟期氨挥发损失量	0.01	0.91	ns	0.18	0.84	ns	1.01	0.38	ns

注 根据《灌溉试验规范》(SL13—2015), 对田间试验结果进行差异显著性检验时, 显著性标准如下: $F < F_{0.10}$ 时为不显著 (ns); $F_{0.05} > F \geq F_{0.10}$ 时为较显著 (⊙); $F_{0.01} > F \geq F_{0.05}$ 时为显著 (*); $F \geq F_{0.01}$ 时为极显著 (**).

2.3 不同水氮调控下氨挥发损失量的差异

2019—2021 年中稻全生育期各处理氨挥发损失总量见图 2。由于 2020 年未设置 W0N0 处理和 W1N0 处理, 因此, 图 2 未给出 2020 年相应处理的数值。W0N1、W0N2、W1N1 处理和 W1N2 处理的氨挥发损失量存在一定差异。总体来看, W0 模式下, N2 (180 kg/hm²) 施氮水平稻田氨挥发损失总量比 N1 (135 kg/hm²) 施氮水平稻田氨挥发损失总量高出 8.98%~16.01%; W1 模式下, N2 (180 kg/hm²) 施氮水平稻田氨挥发损失总量比 N1 (135 kg/hm²)

施氮水平稻田氨挥发损失总量高出 4.49%~37.16%。这表明在同一灌溉模式下, 在一定范围内增施氮肥会增加氨挥发损失量。N1 (135 kg/hm²) 施氮水平下, W1 模式稻田氨挥发损失总量比 W0 模式稻田氨挥发损失总量高 10.70%~10.86%; 在 N2 (180 kg/hm²) 施氮水平下, W1 模式稻田氨挥发损失总量比 W0 模式稻田氨挥发损失总量高 13.29%~35.28%。这表明在同等施氮水平下, 间歇灌溉较传统淹灌会增加氨挥发损失。

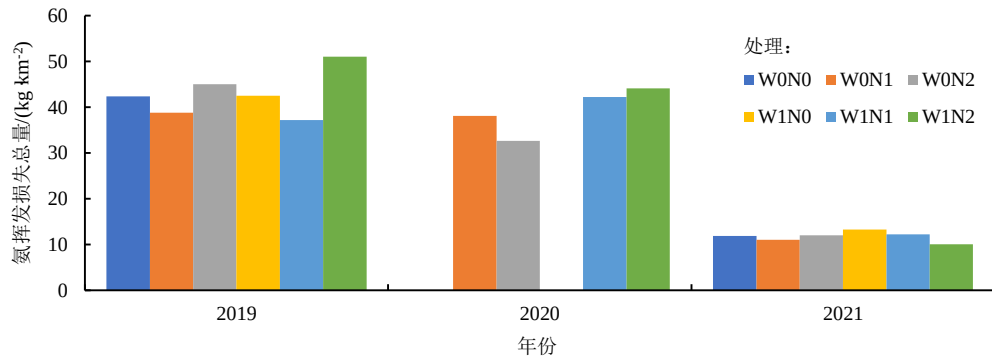


图 2 2019—2021 年中稻全生育期氨挥发损失总量

Fig.2 Total ammonia volatilization loss during the whole growth period of midseason rice in 2019—2021

对 3 a 内 W0N1、W0N2、W1N1 处理和 W1N2 处理之间的氨挥发损失总量差异进行显著性分析，结果见表 6。同一灌溉模式不同施氮水平下的氨挥发损失总量之间差异不显著，同种施氮水平不同灌溉模式下的氨挥发损失总量之间差异也不显著。不同处理下氨挥发损失量的标准偏差均在 14~20 kg/km² 之间，表明不同水氮耦合下的氨挥发损失量波动较大。

表 6 2019—2021 年中稻不同水氮调控下
氨挥发损失量差异显著性分析

Table 6 Significant differences in ammonia volatilization
loss under different water and fertilizer control in
midseason rice from 2019 to 2021

	处理	标准偏差/(kg m ⁻²)	F 值	P 值	显著性
W0	N1 施氮水平	14.85	0.00	0.99	ns
	N2 施氮水平	14.76			
W1	N1 施氮水平	15.01	0.33	0.57	ns
	N2 施氮水平	19.13			
N1	W0 灌溉模式	14.85	0.00	0.98	ns
	W1 灌溉模式	15.01			
N2	W0 灌溉模式	14.76	0.32	0.58	ns
	W1 灌溉模式	19.13			

2.4 气象因子对氨挥发速率的影响

对 3 a 氨挥发速率与平均气温、相对湿度、降水量、日照时间、风速、蒸发量 6 个气象因子进行线性逐步回归分析，通过逐步回归将变量引入，并对已选入的变量进行逐个检验，最终引入了日照时间、风速和蒸发量，剔除了平均气温、相对湿度和降水量，得到氨挥发速率与日照时间、风速和蒸发量之间的回归方程如下：

$$y=0.412x_1-0.318x_2-0.089x_3 \quad (p<0.05, R^2=0.428), \quad (1)$$

式中：y 为氨挥发速率 (kg/(hm² d))；x₁ 为日照时间 (h)；x₂ 为风速 (m/s)；x₃ 为蒸发量 (mm)。

日照时间对氨挥发速率的影响最大，呈正相关，其次是风速，呈负相关，最后是蒸发量，呈负相关。

3 讨论

3.1 水氮调控对中稻全生育期氨挥发速率的影响

2021 年与 2019—2020 年中稻分蘖期的氨挥发速率变化规律略有差异。2021 年中稻在施入分蘖肥 7 d 后至分蘖期结束，日照时间相比 2019—2020 年同时期明显下降，2019 年和 2020 年同期平均日照时间分别为 4.0 h 和 7.5 h，而 2021 年同期日照时间平均仅为 1.4 h。刘伯顺等^[8]研究表明，光照会加速 NH₄⁺ 向 NH₃ 转化，日照时间越长这种过程则越持久，这也使得 2021 年中稻分蘖期的氨挥发速率出现了下降趋势。而其速率在下降之后又缓慢上升，这是因为在分蘖后期到拔节孕穗期晒田期间，2021 年相比 2019—2020 年同期的降水总量明显减少，其中 2020 年该期间降水总量达到 35.7 mm，而 2021 年同期的降水总量仅为 2.9 mm。卢丽丽等^[10]研究表明，降水会抑制氨挥发，这也导致 2021 年中稻氨挥发速率在下降后又缓慢上升，使得 2021 年与 2019—2020 年中稻氨挥发速率不同，表现出“增-减-增”的波动趋势。追施拔节肥后氨挥发速率没有增大，反而在施肥 5~7 d 内逐渐下降。原因在于 8 月 4 日追施拔节肥的前 1 天及后 1 天均有降水，并且在 8 月 3—10 日的 7 d 内有 3 次降水，集中的降水抑制了氨挥发，使得其挥发速率不断减小，并在 8 月 10 日降至最低。雨水下渗将肥料带入深层土壤，增加 NH₄⁺ 被土壤颗粒吸附或植株吸收的概率和氨气上升到土壤表层的阻力，从而间接减少氨挥发损失^[24-25]。

3.2 水氮调控对中稻各生育阶段氨挥发损失量的影响

2019—2021 年，中稻各生育阶段的氨挥发损失量有所差异。总体来看，3 a 中稻的氨挥发损失基本发生在分蘖期、拔节孕穗期和抽穗开花期，表现出生育中前期氨挥发损失量大于生育中后期。李然等^[26]研究表明，不同生育阶段田间土壤铵态氮浓度表现出分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期>成熟期的规律，而稻田氨挥发排放通量与表层土壤铵态氮浓度又呈

极显著正相关^[27],表明田间氨挥发损失主要发生在分蘖期、拔节孕穗期和抽穗开花期,与本文结论一致。肖新等^[28]研究发现,不同生育阶段的氨挥发损失量表现为返青期>拔节孕穗期>分蘖期>抽穗开花期>乳熟期,与本文的结论不同。返青期氨挥发损失量较大的原因可能是水稻处于生长初期,生物量小、根系不发达、覆盖度较低、植株对氮素吸收速度较慢且吸收量也较少,使得在水稻移栽初期大部分的氮素从田间流失,增加了田间氮素浓度,促进稻田氨挥发^[29]。

3.3 水、肥因子对中稻氨挥发损失量的影响

针对 3 a 的 W0N1、W0N2、W1N1、W1N2 处理,在同等施氮水平下,间歇灌溉相比传统淹灌会增加氨挥发损失,这与余双等^[30]的研究结论一致。一方面,节水灌溉稻田水分相对较少,基质浓度较高,导致间歇灌溉氨挥发损失高于淹灌^[20]。另一方面,由于间歇灌溉条件下田间干湿交替,田间裂隙发育较强,土壤结构性较好,土壤孔隙度得到改善,进而提高土壤透气能力,促进氨挥发^[31-32]。彭世彰等^[21]研究发现,与淹水灌溉相比,控制灌溉减少了稻田氨挥发损失,与本文结论不一致。原因在于二者试验在分蘖期前氮肥投入比例不同,本试验在分蘖期前氮肥投入比例为 80%,而彭世彰的试验分蘖期前氮肥投入比例为 57%,此外,二者施肥次数也不一致,这种施肥制度的差异导致 2 种节水灌溉模式下氨挥发现象与淹灌相比具有不同的结果^[30]。针对 3 a 内 W0N1、W0N2、W1N1、W1N2 处理,在同一灌溉条件下,在一定范围内增施氮肥会增加氨挥发损失量,这与区惠平等^[33]研究结论一致。

3.4 气象因子对中稻氨挥发速率的影响

气象因子对氨挥发速率的影响表现为日照时间>风速>蒸发量,且日照时间表现出正相关,风速和蒸发量表现为负相关。日照时间对氨挥发速率影响最大,会促进氨挥发,这是因为日照时间越大,净辐射量就越多,从而加速氨挥发进程,这与刘伯顺等^[8]的研究结论一致。朱兆良等^[34]研究发现,田间氨挥发速率随着风速增大而增大,风速较大时会带走挥发出的氨气,从而促进氨的扩散,与本文的研究结论不一致,这可能与施氮时间、地面的粗糙度、植被覆盖以及氨挥发取样时的天气状况有关^[35]。周静等^[36]研究表明,在 230 kg/km² 施氮水平下,蒸发量对氨挥发速率表现为负相关,与本文的研究结论较为一致。这是由于稻田蒸发量越大时,其上方的空气湿度就会因蒸发产生的水汽而逐渐增大,而空气湿度会影响水气或土气界面气压差,空气湿度增大会减小水气或土气界面气压差,从而减小氨挥发速

率^[21]。

4 结 论

1) 3 a 中稻氨挥发速率除分蘖期外变化规律大致相似,表现为“拔节孕穗期和抽穗开花期减小,乳熟期增加,黄熟期减小”的波动变化趋势。

2) 氨挥发损失基本发生在分蘖期、拔节孕穗期和抽穗开花期,3 个时期的氨挥发损失量占整个生育期氨挥发损失总量的 50%以上,总体上表现出生育中前期氨挥发损失大于生育中后期。

3) 同一灌溉模式下,一定范围内增施氮肥会增加氨挥发损失量;同等施氮水平下,间歇灌溉相比传统淹灌会增大氨挥发损失,不同水肥调控下氨挥发损失量存在差异,但这种差异均不显著。

4) 各气象因子对氨挥发速率的影响为日照时间>风速>蒸发量,氨挥发速率与日照时间呈正相关,与风速和蒸发量呈负相关。

参考文献:

- [1] 程勇翔,王秀珍,郭建平,等.中国水稻生产的时空动态分析[J].中国农业科学,2012,45(17): 3 473- 3485.
CHENG Yongxiang, WANG Xiuzhen, GUO Jianping, et al. The temporal-spatial dynamic analysis of china rice production[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(17): 3 473-3 485.
- [2] LI Xinru, JIANG Wenlai, DUAN Dingding. Spatio-temporal analysis of irrigation water use coefficients in China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 262: 110 242.
- [3] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等.提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J].中国农业科学,2002(9): 1 095-1 103.
PENG Shaobing, HUANG Jianliang, ZHONG Xuhua, et al. Research Strategy in Improving Fertilizer-nitrogen Use Efficiency of Irrigated Rice in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002(9): 1 095-1 103.
- [4] HUANG Xin, SONG Yu, LI Mengmeng, et al. A high-resolution ammonia emission inventory in China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(1): 14-27.
- [5] 王少华.江西省赣抚平原灌区降雨分布及干旱等级划分[J].中国农村水利水电,2017(4): 32-35.
WANG Shaohua. Rainfall distribution and drought grade division in the Ganfu Plain of Jiangxi Province[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(4): 32-35.
- [6] PAN Baobao, LAM Shukee, MOSIER Arvin, et al. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 232: 283-289.
- [7] WANG Cong, SUN Huifeng, ZHANG Jining, et al. Effects of different fertilization methods on ammonia volatilization from rice paddies[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 295: 126 299.
- [8] 刘伯顺,黄立华,黄金鑫,等.我国农田氨挥发研究进展与减排对策[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(6): 875-888.
LIU Boshun, HUANG Lihua, HUANG Jinxin, et al. Research progress and emission reduction countermeasures of ammonia volatilization from farmland in my country[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture (Chinese and English), 2022, 30(6): 875-888.
- [9] 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 Pingping, LIU Jinjian, YANG Xiuxia, 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.
- [10] 卢丽丽, 吴根义. 农田氨排放影响因素研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(1): 149-162.
LU Lili, WU Genyi. Advances in affecting factors of ammonia emission in farmland[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(1): 149-162.
- [11] 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): 1 129-1 138.
ZHU Jian, SHI Lihong, TIAN Faxiang, 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 Fertilizer, 2013, 19(5): 1 129-1 138.
- [12] 杨国英, 郭智, 刘红江, 等. 稻田氨挥发影响因素及其减排措施研究进展[J]. 生态环境学报, 2020, 29(9): 1 912-1 919.
YANG Guoying, GUO Zhi, LIU Hongjiang, et al. Research progress on factors affecting ammonia volatilization and its mitigation measures in paddy fields[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(9): 1 912-1 919.
- [13] 王文林, 刘波, 韩睿明, 等. 农业源氨排放影响因素研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(6): 870-878.
WANG Wenlin, LIU Bo, HAN Ruiming, et al. Review of researches on factors affecting emission of ammonia from agriculture[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32(6): 870-878.
- [14] 高鹏程, 张一平. 氨挥发与土壤水分散失关系的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 22-26.
GAO Pengcheng, ZHANG Yiping. Research on relationship between volatilization of ammonia and evaporation of soil water[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2001, 29(6): 22-26.
- [15] 董文旭, 吴电明, 胡春胜, 等. 华北山前平原农田氨挥发速率与调控研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1 115-1 121.
DONG Wenxu, WU Dianming, HU Chunsheng, et al. Ammonia volatilization and control mechanisms in the piedmont of North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1 115-1 121.
- [16] CHEN Gui, ZHAO Guohua, CHENG Wangda, et al. Rice nitrogen use efficiency does not link to ammonia volatilization in paddy fields[J]. Science of the Total Environment, 2020, 741: 140 433.
- [17] 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 Shihao, LIU Tianqi, MA Yuhua, et al. Effects of tillage methods and nitrogen fertilizer types on ammonia volatilization, nitrogen fertilizer use efficiency and rice yield in paddy fields[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(5): 447-454.
- [18] 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 Shichao, LIN Zhongcheng, DAI Qigen, et al. Effects of nitrogen application rate on the characteristics of ammonia volatilization and nitrogen utilization in rice season[J]. China Rice Science, 2011, 25(1): 71-78.
- [19] LI Maona, WANG Yunling, ADELI Ardeshir, et al. Effects of application methods and urea rates on ammonia volatilization, yields and fine root biomass of alfalfa[J]. Field Crops Research, 2018, 218: 115-125.
- [20] 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(3): 280-285.
CUI Yuanlai, LI Yuanhua, LYU Guoan, et al. Nitrogen movement and transformation with different water supply for paddy rice[J]. Advances In Water Science, 2004(3): 280-285.
- [21] 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 节水灌溉稻田氨挥发损失及影响因素[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 35-39.
PENG Shizhang, YANG Shihong, XU Junzeng. Ammonia volatilization and its influence factors of paddy field under water-saving irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(8): 35-39.
- [22] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定——通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002(2): 205-209.
WANG Zhaohui, LIU Xuejun, JU Xiaotang, et al. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002(2): 205-209.
- [23] 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 Shihong, PENG Shizhang, XU Junzeng, 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.
- [24] 罗文兵, 刘凤丽, 肖新, 等. 鄱阳湖流域水肥管理对稻田氨挥发的影响[C]//中国水利学会 2021 学术年会论文集第二分册. 北京: 黄河水利出版社, 2021: 123-128.
LUO Wenbing, LIU Fengli, XIAO Xin, et al. Effects of water and fertilizer management on the volatilization of ammonia in paddy fields in the Poyang Lake Basin[C]//Proceedings of the 2021 Annual Conference of the Chinese Society for Hydraulic Conservancy. Beijing: The Yellow River Water Conservancy Press, 2021: 123-128.
- [25] NASTRI A, TODERI G, BERNATI E, et al. Ammonia volatilization and yield response from urea applied to wheat with urease (NBPT) and nitrification (DCD) inhibitors[J]. Agrochimica, 2000, 44(5): 231-239.
- [26] 李然, 蔡威威, 艾天成, 等. 稻田氨挥发损失和水稻产量对不同水氮处理的响应[J]. 中国土壤与肥料, 2020(3): 47-54.
LI Ran, CAI Weiwei, AI Tiancheng, et al. Responses of ammonia volatilization and grain yield under different water and fertilizer practices in a rice paddy[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(3): 47-54.
- [27] 郭刚, 袁漫漫, 曹哲伟, 等. 不同水氮管理条件下稻田氨挥发损失特征[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(5): 651-658.
WU Gang, YUAN Manman, CAO Zhewei, et al. Ammonia volatilization under different water management and nitrogen schemes in a paddy field[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(5): 651-658.
- [28] 肖新, 杨露露, 邓艳萍, 等. 水氮耦合对水稻田间氨挥发规律的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 2 066-2 071 .
XIAO Xin, YANG Lulu, DENG Yanping, et al. Effects of water-nitrogen coupling on the regularity of ammonia volatilization in rice fields[J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2012, 31(10): 2 066-2 071.
- [29] 王矿, 袁先江, 曹秀清, 等. 深蓄控排条件下稻田土壤水氮变化规律[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 40-48.
WANG Kuang, YUAN Xianjiang, CAO Xiuqing, et al. Variation of soil water and nitrogen in paddy fields under the condition of deep storage and drainage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 40-48.
- [30] 余双, 崔远来, 韩焕豪, 等. 不同水肥制度下稻田氨挥发变化规律[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(3): 1-5.
YU Shuang, CUI Yuanlai, HAN Huanhao, et al. Changes of ammonia volatilization in paddy fields under different water and fertilizer regimes[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(3): 1-5.
- [31] 陈祯, 崔远来, 刘方平, 等. 不同灌溉施肥模式对水稻土物理性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(5): 38-41.
CHEN Zhen, CUI Yuanlai, LIU Fangping, et al. Effects of different irrigation and fertilization modes on physical properties of paddy

- soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(5): 38-41.
- [32] LARSEN S, GUNARY D. Ammonia loss from ammoniacal fertilisers applied to calcareous soils[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1962, 13: 566-572.
- [33] 区惠平, 周柳强, 黄金生, 等. 不同施氮量对稻田氨挥发损失的影响[J]. 南方农业学报, 2013, 44(11): 1 851-1 855.
- OU Huiping, ZHOU Liuqiang, HUANG Jinsheng, et al. Nitrogen application impact on ammonia volatilization in paddy field[J]. Southern Agricultural Journal, 2013, 44 (11): 1 851-1 855.
- [34] 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.
- ZHU Zhaoliang, WEN Qixiao. Soil nitrogen in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1990.
- [35] 宋勇生, 范晓晖. 稻田氨挥发研究进展[J]. 生态环境, 2003(2): 240-244.
- SONG Yongsheng, FAN Xiaohui. Research progress of ammonia volatilization in rice fields[J]. Ecological Environment, 2003(2): 240-244.
- [36] 周静, 崔健, 王国强, 等. 春秋旱地土壤氨挥发对氮施用量、气象因子的响应[J]. 土壤学报, 2007(3): 499-507.
- ZHOU Jing, CUI Jian, WANG Guoqiang, et al. Responses of ammonia volatilization in red soil dryland to nitrogen application rate and meteorological factors in spring and autumn[J]. Soil Journal, 2007(3): 499-507.

Ammonia Volatilization from Irrigated Paddy Fields in Southern China Plains and Its Determinants

YANG Zirong¹, ZOU Zhike², LUO Wenbing^{2*}, XIAO Xin¹,
HUANG Shaozhe¹, PAN Hongzhong¹, LI Yalong²

(1. Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430100, China)

Abstract: 【Objective】 Ammonia volatilization is a pathway of nitrogen cycling in soil. It is mediated by various biotic and abiotic processes. The objective of this paper is to study its variation and determinants in irrigated midseason rice fields in southern China plains. 【Method】 The field experiment was conducted in an irrigation experimental station in Jiangxi province. It consisted of two irrigation methods: intermittent irrigation (W1) and traditional flooding irrigation (W0), and three nitrogen fertilizations: 0 (N0), 135 kg/hm² (N1), 180 kg/hm² (N2). We measured the ammonia volatilization from each treatment and analyzed its correlation with different meteorological factors. 【Result】 When irrigation was the same, increasing nitrogen fertilization increased ammonia volatilization, while when nitrogen fertilization was the same, ammonia volatilization was less in flooded irrigation than in intermittent irrigation. Ammonia volatilization occurred mainly in the tillering, jointing and heading stages, the total ammonia volatilization during which accounted for more than half of the total ammonia volatilization in the whole growth season. Among the meteorological factors, sunshine duration positively impacted ammonia volatilization the most, followed by wind speed and evaporation but their influence was negative. 【Conclusion】 Compared with traditional flooding irrigation, intermittent irrigation increased ammonia volatilization, especially in early and middle stages of the growth season. Ammonia volatilization was positively correlated with sunshine duration and negatively with wind speed and evaporation.

Key words: ammonia volatilization; water and fertilizer management; meteorological factor; plain irrigation area; significance

责任编辑: 韩 洋

关于评选优秀论文的公告

本刊已开启优秀论文评选活动, 每年评选优秀论文 10 篇, 每篇奖励 800 元, 并颁发获奖证书, 届时将在期刊网站首页展示, 同时微信公众号推送。欢迎广大读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部