



生物有机肥与化肥配施对稻田氨挥发的影响

张 靖, 朱 潇, 沈健林, 李 勇, 王 娟, 吴金水

Effects of combined application of microbial organic fertilizer and chemical fertilizer on ammonia volatilization in a paddy field with double rice cropping

ZHANG Jing, ZHU Xiao, SHEN Jianlin, LI Yong, WANG Juan, and WU Jinshui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20210355>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

茄子与香蕉轮作配施生物有机肥对连作蕉园土壤微生物区系的影响

Effect of eggplant–banana rotation with bioorganic fertilizer treatment on soil microflora in banana continuous cropping orchard

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(1): 78–85

有机肥部分替代化肥氮对叶菜产量和环境效应的影响

Effects of the partial replacement of chemical fertilizer with manure on the yield and nitrogen emissions in leafy vegetable production

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(3): 349–356

有机无机配施体系中有有机肥腐熟程度对化肥氮利用率的影响机制

Effects of organic fertilizer maturity degree on nitrogen utilization efficiency of chemical fertilizer

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(6): 1051–1060

华北平原氮肥周年深施对冬小麦–夏玉米轮作体系土壤氨挥发的影响

The effects of deep application of nitrogen fertilization on ammonia volatilization in a winter wheat/summer maize rotation system in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(12): 1880–1889

有机肥施用模式对环水有机蔬菜种植氮磷径流的影响

Effects of different organic fertilization patterns on the nitrogen and phosphorus runoff losses in organic agriculture in watershed areas

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(3): 465–473

稻蛙共作对水稻–紫云英轮作系统氨挥发的影响

Effect of rice–frog cultivation on ammonia volatilization in rice–Chinese milk vetch rotation system

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(5): 792–801



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20210355

张靖, 朱潇, 沈健林, 李勇, 王娟, 吴金水. 生物有机肥与化肥配施对稻田氨挥发的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(1): 15-25

ZHANG J, ZHU X, SHEN J L, LI Y, WANG J, WU J S. Effects of combined application of microbial organic fertilizer and chemical fertilizer on ammonia volatilization in a paddy field with double rice cropping[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(1): 15-25

生物有机肥与化肥配施对稻田氨挥发的影响*


张靖^{1,3}, 朱潇^{1,3}, 沈健林^{1,2}, 李勇^{1,2}, 王娟^{1,2**}, 吴金水^{1,2,3}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所/中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室 长沙 410125; 2. 中国科学院长沙农业环境观测研究站 长沙 410125; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 氨挥发是农田氮素损失的重要途径之一, 氨排放到大气中后与酸性气体反应形成二次气溶胶, 对空气质量有重要影响。本文研究了生物有机肥与化肥配施对稻田氨挥发的效果及主要机制, 旨在探索有效的稻田氨减排措施。本研究选取湖南省长沙县典型双季稻稻田, 开展为期两年4个稻季的田间试验, 设置不施氮肥(CK)、常规氮肥表施(CON)、生物有机肥替代40%氮肥+化肥表施(CB)、氮肥减量30%+生物有机肥替代40%减量氮肥+化肥深施(RBD)4种施肥处理, 观测不同施肥处理下氨挥发动态及相关影响因素。两年的田间定位试验结果表明, 相同施氮量下, 采用生物有机肥与化肥配施显著降低了氨挥发($P<0.05$), 且产量差异不显著。深施减氮结合生物有机肥与化肥配施, 氨挥发较CB处理进一步显著减少($P<0.05$); 除2019年晚稻季外, 其余3个稻季CB处理与CON处理间水稻籽粒产量差异不显著。早、晚稻季, CB和RBD氨挥发累积量较CON处理分别降低25.2%~35.6%和63.2%~70.9% ($P<0.05$)。田面水铵态氮浓度与稻田氨挥发通量在各处理表现一致的变化趋势, 且呈现显著正相关($P<0.05$), 表明施用生物有机肥及化学氮肥深施均可有效降低田面水铵态氮浓度, 从而减少氨挥发。综合两年的试验, 生物有机肥替代化肥结合深施减氮可减少稻田氨挥发达60%, 且不降低水稻产量, 可有效实现稻田氮肥减量、氨挥发减排。

关键词: 氨挥发; 氮循环; 生物有机肥; 深施; 水稻

中图分类号: S144.1; X171.3

开放科学码(资源服务)标识码(OSID): 

Effects of combined application of microbial organic fertilizer and chemical fertilizer on ammonia volatilization in a paddy field with double rice cropping*

ZHANG Jing^{1,3}, ZHU Xiao^{1,3}, SHEN Jianlin^{1,2}, LI Yong^{1,2}, WANG Juan^{1,2**}, WU Jinshui^{1,2,3}

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Changsha Research Station for Agricultural and Environmental Monitoring, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Ammonia (NH_3) volatilization is one of the significant causes of nitrogen (N) loss in farmland. When NH_3 is released into the atmosphere, it reacts with acid gases to form secondary aerosols, which has a critical impact on air quality. This study aimed to simultaneously evaluate the effects and identify key mechanisms of combined applications of microbial organic fertilizer and chemi-

* 国家重点研发计划项目(2018YFC0213302)、国家自然科学基金项目(41771336)和湖南省重点研发项目(2020NK2011)资助

** 通信作者: 王娟, 主要研究方向为土壤生态与农业环境。E-mail: wangjuan@isa.ac.cn

张靖, 主要研究方向为土壤碳氮循环。E-mail: secr0090@163.com

收稿日期: 2021-06-09 接受日期: 2021-10-15

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2018YFC0213302), the National Natural Science Foundation of China (41771336) and Key Research and Development Project of Hunan Province (2020NK2011).

** Corresponding author, E-mail: wangjuan@isa.ac.cn
Received Jun. 9, 2021; accepted Oct. 15, 2021

cal fertilizer on reducing ammonia volatilization in paddy fields. A two-year field experiment was conducted in a typical double-cropping rice field in Changsha County, Hunan Province. There were four fertilization treatments: no nitrogen fertilizer (CK), surface application of chemical nitrogen fertilizer (CON), a substitution of 40% chemical fertilizers with microbial organic fertilizers and surface application of chemical fertilizer (CB), and 30% reduction of chemical fertilizer with a substitution of 40% chemical fertilizers with microbial organic fertilizers and deep application of chemical fertilizer (RBD). NH_3 volatilization was measured using the intermittent closed chamber ventilation method in a two-year rice growing period (2019–2020), and the ammonium-N ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and nitrate-N ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) concentrations in the surface water were also measured. The results showed that under the same nitrogen application rate, NH_3 volatilization was significantly ($P<0.05$) reduced in CB treatment compared to CON treatment, and the rice grain yield for CB treatment was not significantly different from that for CON treatment in all the four rice seasons. NH_3 volatilization was lowest in RBD treatment compared to CON and CB treatments. The differences in rice grain yield between CON and RBD treatments was significant ($P<0.05$) for the late-rice season in 2019, while the differences were not significant for the remaining three seasons. In the early-rice season, the average cumulative NH_3 volatilization losses of CON, CB, and RBD were $33.1 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$, $24.8 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $12.2 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. The NH_3 volatilization losses of CB and RBD decreased by 25.2% and 63.2%, respectively, compared to CON. In the late-rice season, the average cumulative NH_3 volatilization losses of CON, CB, and RBD treatments were $50.4 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$, $32.4 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $14.7 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. The NH_3 volatilization losses of CB and RBD decreased by 35.6% and 70.9%, respectively, compared to CON. The magnitude of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations in the surface water showed the same trend with the NH_3 volatilization across the treatments in the rice seasons. Furthermore, there were significantly ($P<0.01$) positive correlations between these two parameters, which indicated that application of microbial organic fertilizer as well as deep application of chemical nitrogen fertilizer played a role in reducing $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations in the surface water, and thus, reduced NH_3 volatilization. Based on the two-year field experiment conducted here, this study revealed that microbial organic fertilizer combined with deep application of nitrogen-reduced fertilizer can reduce ammonia volatilization by 60%, while maintaining rice yields. Thus, in conclusion, microbial organic fertilizers combined with deep applications of reduced nitrogen fertilizer can effectively reduce the application rate of nitrogen fertilizer and mitigate ammonia volatilization in double-cropping paddy fields.

Keywords: Ammonia emissions; Nitrogen cycle; Microbial-organic fertilizer; Deep application; Rice

水稻 (*Oryza sativa*) 是我国重要的粮食作物, 我国稻谷播种面积占粮食作物播种面积的 25.8%^[1]。由于氮是作物生长的必需元素, 在一定范围内增氮肥可以提高水稻产量, 因此农户为了追求水稻产量而施入过量的氮肥, 导致出现氮肥利用率不高及氮损失严重等问题。我国稻田氮肥的利用率仅为 30%~35%, 损失量可达 40%~50%^[2-4]。除被吸收利用的氮以外, 剩余的氮素通过氨挥发、径流、淋洗等多种途径进入环境中, 造成农业面源污染以及大气污染等^[5]。

稻田氨挥发受施肥剂量、施肥方式等多种因素的影响。有研究表明施氮量减少 22%~44% 可降低氨挥发损失 20.2%~35.3%^[6]。氮肥深施能减少氮肥损失、提高氮肥利用率^[7], 减少氨挥发^[8]。Liu 等^[9] 在免耕水稻土和 Yao 等^[10] 在太湖地区稻田的研究表明, 深施氮肥与常规表施化肥相比, 能显著减少氨挥发损失, 同时增加氮吸收、提高氮肥利用率和产量。杨明达^[11] 研究表明相同控释氮肥处理下, 侧条施肥处理比撒施处理显著降低氨挥发速率和氨挥发总量。在南方双季稻田中采用机械侧条施肥可减少 18.6%~26.9% 氨挥发累积损失, 并提高土壤速效氮含量和水稻氮素利用效率^[12]。水稻田面水的铵态氮浓度是影响水稻季氨挥发的主要因素, 随温度上升, 对

氨挥发速率的影响逐渐增大^[13-14]。

有机肥部分替代化肥能降低农田氨挥发且提高作物产量。邢月等^[15] 研究表明化肥处理能够显著增加氨挥发损失量, 可达 $56.0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 比 80% 尿素和 20% 有机肥混施处理和有机肥处理分别增加 $11.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $28.7 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。单施化肥氨挥发损失率为 11.9%, 而单施有机肥和化肥有机肥混施处理氨挥发损失率分别为 2.3% 和 8.1%。华北平原旱地农田采用干猪粪为有机替代能有效降低氨挥发损失且提高作物产量^[16]。

依据中华人民共和国行业标准 NY 884—2012 《生物有机肥》, 生物有机肥 (microbial organic fertilizers) 指特定功能微生物与主要以动植物残体 (如畜禽粪便、农作物秸秆等) 为来源并经无害化处理、腐熟的有机物料复合而成的一类兼具微生物肥料和有机肥效应的肥料。微生物肥料是一种对环境友好的新型生物肥料, 可以促进植物生长, 提高果实品质, 改善土壤质量等^[17]。在河套地区碱性土上采用微生物菌肥处理, 氨挥发减少, 但作物产量相对于农民习惯施肥显著减少^[18]。且采用生物有机肥和生物质炭混施, 氨挥发较单施生物有机肥显著减少^[19]。绿色木霉菌生物有机肥料 (*Trichoderma viride* biofertilizer) 在减少碱性土壤氨挥发和提高甜高粱 (*Sorghum*

dochna) 氮肥利用率方面具有巨大的潜力^[20]。与化肥相比, 配施 50% 枯草杆菌生物有机肥 (*Bacillus subtilis* biofertilizer) 农田氮素损失减少 54%^[21]。利用植物生长促进菌 (plant growth-promoting bacteria, PGPB) 与降解有机物等制成的生物有机肥有效提高了氮肥和磷肥的利用效率, 可减少约 30% 的氮肥^[22]。鉴于生物有机肥在南方稻田中对于氨挥发的影响及其主要机制尚未明确, 本研究基于中亚热带典型双季稻田两年试验, 采用密闭室间歇抽气法研究生物有机肥配施化肥等对稻田氨挥发的影响及其主要作用机制, 旨在为稻田氨挥发减排提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验在位于湖南省长沙县金井镇湘丰村 (113°19'52"E, 28°33'04"N) 的中国科学院长沙农业环境观测研究站进行, 海拔 80 m。中亚热带季风气候, 年平均气温 17.5 °C, 年平均降雨量为 1330 mm, 降雨主要集中在 3—8 月, 无霜期约 300 d。试验时间为 2019—2020 年水稻生长期, 试验期间日平均气温与降水量由长沙环境观测研究站气象站记录, 如图 1 所示。试验田为典型双季稻稻田, 母质为花岗岩风化物。耕层 (0~20 cm) 土壤基本理化性质为: 全氮含量 1.81 g·kg⁻¹, 全磷含量 0.50 g·kg⁻¹, 全钾含量 37.8 g·kg⁻¹, 有机质含量 40.9 g·kg⁻¹, 容重 1.09 g·cm⁻³, pH 为 5.06。土壤机械组成中砂砾、粉粒和黏粒的质量分数分别为 52%、45% 和 3%。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计, 共 4 个处理: 不施氮肥

处理 (CK); 常规化学氮肥表施处理 (CON), 氮肥基追比为 3 : 1; 生物有机肥替代 40% 化学氮肥+化学氮肥表施 (CB), 剩余氮肥基追比为 1 : 1; 氮肥减量 30%+生物有机肥替代 40% 减量化学氮肥+化学氮肥深施 (RBD), 化肥全部作为基肥, 深施方式为穴施, 深度为 7 cm, 位于每两列水稻之间。每个处理 3 次重复, 小区面积 27 m² (3 m×9 m)。每季磷钾肥分别为 P₂O₅ 75 kg·hm⁻²、K₂O 100 kg·hm⁻², 作基肥一次性施入。CON 处理早/晚稻季氮肥 (尿素, 46%) 分别为 150/180 kg(N)·hm⁻²。施生物有机肥处理根据 N 含量确定用量, 作基肥一次性表施。并计算生物有机肥携入的磷钾量, 剩余养分用尿素、过磷酸钙和氯化钾补齐。生物有机菌肥由河北丰和绿光农业科技有限公司提供, 为粉状。其中养分含量氮磷钾≥6%、有机质≥60%、有效活菌数≥2 亿·g⁻¹, 该有机肥包括螯合氨基酸、抗重茬剂、生根剂、保水剂、土壤激活素, 内含枯草、放线菌、木霉、芽孢杆菌等多种有益菌。具体施肥措施见表 1。试验地田间管理与当地常规管理方式一致。供试作物品种: 早稻为‘潭两优 45’, 晚稻为‘玉针香’。种植密度为 20 cm×20 cm, 每穴 2~3 株秧苗。2019 年早稻季, 移栽和施基肥时间为 4 月 30 日, 施追肥时间为 5 月 20 日, 收获时间为 7 月 16 日; 2019 年晚稻季, 移栽和施基肥时间为 7 月 20 日, 施追肥时间为 8 月 2 日, 收获时间为 10 月 28 日。2020 年早稻季, 移栽和施基肥时间为 4 月 24 日, 施追肥时间为 5 月 10 日, 收获时间为 7 月 13 日; 2020 年晚稻季, 移栽和施基肥时间为 7 月 18 日, 施追肥时间为 7 月 30 日, 收获时间为 11 月 6 日。

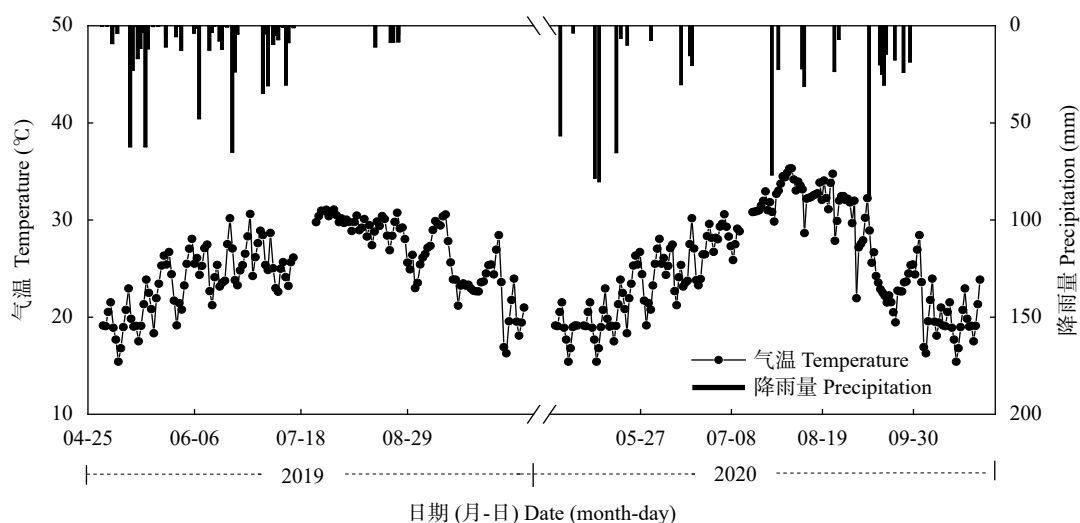


图 1 试验期 (2019—2020 年) 研究区平均气温与降雨量

Fig. 1 Monthly average temperature and precipitation from 2019 to 2020 in the study area

表 1 各处理的生物有机肥和化肥氮肥的施用情况

Table 1 Application rates and methods of microbial organic fertilizer and chemical fertilizer of each treatment $\text{kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$

稻季 Rice season	处理 Treatment	基肥 Basal fertilization		化肥追肥 Topdressing of chemical fertilizer	施肥次数 Times of fertilization	化肥施用方法 Application method of chemical fertilizer	基追比 Base to top ratio
		化肥 Chemical fertilizer	生物有机肥 Microbial organic fertilizer				
早稻 Early-season rice	CK	0	0	0	0	—	0
	CON	112.5	0	37.5	2	表施 Surface application	3 : 1
	CB	45	60	45	2	表施 Surface application	1 : 1
	RBD	63	42	0	1	深施 Deep application	1 : 0
晚稻 Late-season rice	CK	0	0	0	0	—	0
	CON	135	0	45	2	表施 Surface application	3 : 1
	CB	54	72	54	2	表施 Surface application	1 : 1
	RBD	75.6	50.4	0	1	深施 Deep application	1 : 0

CK、CON、CB、RBD 分别表示不施氮肥、常规施肥、40% 生物有机肥与化肥配施、深施减氮结合 40% 生物有机肥配施化肥。CK、CON、CB、RBD are treatments of no nitrogen application, conventional chemical nitrogen fertilizer (urea) top dressing, conventional chemical nitrogen fertilizer with 40% microbial fertilizer replacement top dressing, conventional with 30% reduction and 40% microbial fertilizer replacement and chemical nitrogen fertilizer deep dressing.

1.3 样品采集与测定

$$EF = (F_x - F_0)/Q \quad (3)$$

1.3.1 氨挥发收集与通量估算

氨挥发采用密闭室间歇抽气法^[23], 气室直径为 20 cm, 气室内的换气速率为 15~20 次·min⁻¹, 通过调节阀和流量计控制换气速率。密闭室内挥发的氨由抽气泵带动进入吸收瓶中, 被瓶中 0.05 mol·L⁻¹ 的稀酸 (100 mL) 吸收, 从而估算土壤表面挥发氨量及累积量。每次施肥后连续采样 7~14 d, 采样时间为每天的 9:00—11:00 和 15:00—17:00。抽气结束后通过流动注射分析仪 AA3 (Auto Analyzer 3, SEAL Analytical, 德国) 测定氨浓度, 氨挥发通量计算:

$$F = C \times V \times 10^{-3} \times 10^{-6} \times \frac{10^4}{\pi \times r^2} \times 6 \quad (1)$$

式中: F 为氨挥发通量 [$\text{kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$]; C 为吸收液铵态氮的浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); V 为稀硫酸吸收液的体积 (mL); 10^{-3} 为体积转换系数; 10^{-6} 为质量转换系数; 10^4 为面积转换系数; r 为气室的半径 (m); 6 为时间转换系数, 24 h 与日氨挥发收集时间 4 h 的比值。

氨挥发累积通量估算公式如下:

$$F_c = \left[\frac{F_1 + F_n}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right) \right] \times (t_{i+1} - t_i) \quad (2)$$

式中: F_c 为当季累积通量 [$\text{kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$]; F_1 和 F_n 分别为第 1 次和最后 1 次采样时的排放通量 [$\text{kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$]; F_i 和 F_{i+1} 为第 i 和 $i+1$ 次采样时的排放通量 [$\text{kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$]; n 为当季观测次数; t_{i+1} 和 t_i 为第 $i+1$ 和第 i 次采样的时间间隔 (d)。

氨挥发损失率计算:

式中: EF 为氨挥发损失率 (%); F_x 为施氮处理氨挥发通量 [$\text{kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$], F_0 为不施氮处理 (CK) 氨挥发通量 [$\text{kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$]; Q 为施氮量 [$\text{kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$].

1.3.2 田面水收集与测定

水稻田面水采集与氨挥发采集时间一致, 小区内采用五点取样法, 装入聚乙烯塑料瓶中, 并混合均匀, 过滤后, 通过流动注射分析仪测定水样中铵态氮和硝态氮浓度。

1.3.3 植株样品收集与测定

水稻成熟后, 记录各小区水稻稻谷、秸秆鲜重, 再根据各小区稻谷、秸秆的含水率折算稻谷标准产量 (13.5%) 及秸秆产量。

氮肥偏生产力计算:

$$PFP_N = Y/Q \quad (4)$$

式中: PFP_N 为氮肥偏生产力 [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}(\text{N})$], Y 为施氮处理水稻产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), Q 为施氮量 [$\text{kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$].

1.4 数据处理与制图

运用 Origin 进行数据处理及制图。采用 SPSS 进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 多重比较选用 Duncan 检验, 进行 Person 相关分析。

2 结果与分析

2.1 生物有机肥与化肥配施下稻田氨挥发动态

早稻季期间, 基肥施用后, 施氮处理每日氨挥发通量在 1~3 d 达到峰值, 之后逐日降低, 约 2 周后趋

于平缓。CON 峰值最高, 早稻季两年平均为 $3.98 \text{ kg(N)·hm}^{-2}·\text{d}^{-1}$, 两个生物有机肥处理的峰值为 $1.82\sim 2.55 \text{ kg(N)·hm}^{-2}·\text{d}^{-1}$ 。氨挥发排放通量随着施氮量增加而增加。追肥施用后, 氨挥发通量于第 2 天达到峰值, 随后逐渐下降至与不施氮处理无显著差异。CB 处理峰值最高, 为 $3.25 \text{ kg(N)·hm}^{-2}·\text{d}^{-1}$, 而 CON 峰值低于 CB, 为 $2.47 \text{ kg(N)·hm}^{-2}·\text{d}^{-1}$, 主要是因为 CON

和 CB 处理基追肥比例不同, CB 处理追肥的施氮量高于 CON。晚稻季的基追肥氨挥发动态与早稻季的趋势相似。施肥后的第 2 天达到峰值, 基追肥各施氮处理峰值分别为 $1.38\sim 8.58 \text{ kg(N)·hm}^{-2}·\text{d}^{-1}$ 和 $4.20\sim 5.27 \text{ kg(N)·hm}^{-2}·\text{d}^{-1}$ (图 2)。晚稻季氨挥发通量明显高于早稻季, 原因主要是晚稻季的施氮量、气温和光照等明显高于早稻季, 利于尿素的水解, 促进了氨挥发。

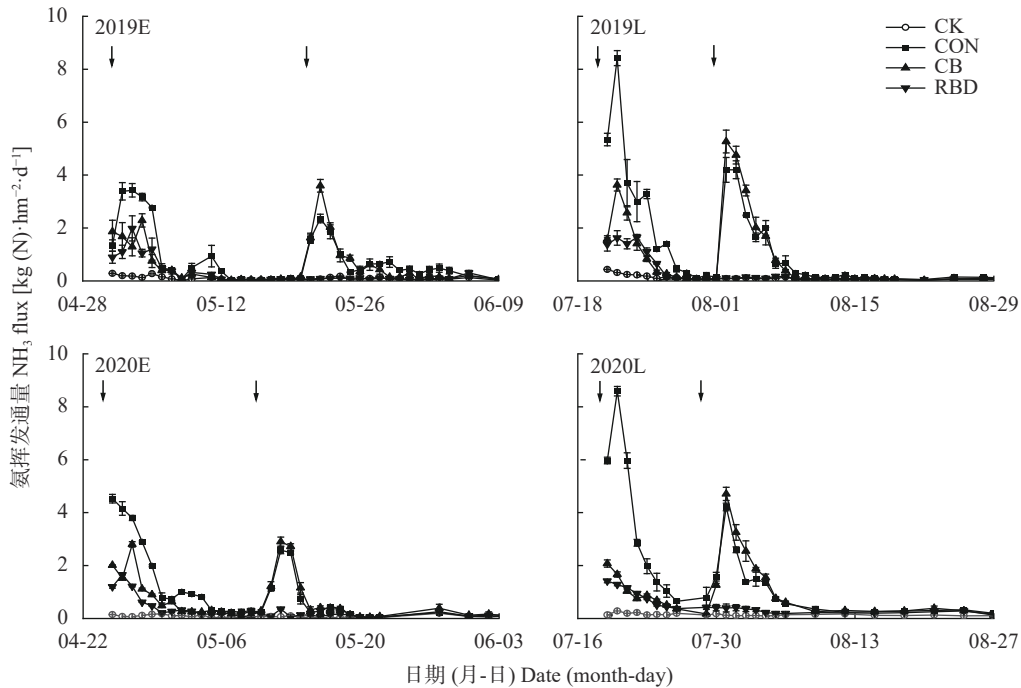


图 2 2019 年和 2020 年不同施肥处理下双季稻稻田氨挥发的动态变化

Fig. 2 Dynamics of NH_3 fluxes under different fertilizer treatments from the double rice paddy field in 2019 and 2020

2019E、2019L、2020E、2020L 分别为 2019 年早稻季、2019 年晚稻季、2020 年早稻季和 2020 年晚稻季; 箭头代表氮肥施用; 各处理说明详见表 1。2019E、2019L、2020E、2020L at the upper left corner mean the early-season rice of 2019, the late-season rice of 2019, the early-season rice of 2020, and the late-season rice of 2020, respectively. The arrows denote the N fertilizer application. The description of each treatment is shown in the table 1.

2.2 生物有机肥与化肥配施对氨挥发累积量的影响

从图 3A 可以看出, 不同处理氨挥发累积排放量有显著差异 ($P<0.05$)。施氮量影响氨挥发累积量, 不同施肥处理氨挥发累积量表现为 $\text{CON}>\text{CB}>\text{RBD}>\text{CK}$ 。两年平均, 氨挥发累积排放量 CON 早稻季为 $33.1 \text{ kg(N)·hm}^{-2}$, 晚稻季为 $50.4 \text{ kg(N)·hm}^{-2}$ 。施氮量相同的 CB 比 CON 氨挥发累积排放量小, CB 处理早稻季氨挥发累积排放量为 $24.8 \text{ kg(N)·hm}^{-2}$, 晚稻季为 $32.4 \text{ kg(N)·hm}^{-2}$; 与 CON 相比, 早稻季和晚稻季氨挥发累积排放量分别降低了 25.2% 和 35.6%。两个处理的氨挥发累积排放量有显著差异 ($P<0.05$), 说明生物有机肥与氮肥配施有利于减少氨挥发。RBD 氨挥发累积排放量最小, 早稻季氨挥发累积量两年平均为 $12.2 \text{ kg(N)·hm}^{-2}$, 晚稻季两年平均为 $14.7 \text{ kg(N)·hm}^{-2}$ 。相较于 CON, 早稻季和晚稻季分别降低 63.2% 和

70.9%。RBD 与 CON 差异显著 ($P<0.05$), 说明深施减氮, 同时用生物有机肥替代 40% 化肥可有效降低氨挥发排放量。晚稻季的氨挥发累积量普遍高于早稻季, 这与试验设定中的施氮量有关, 晚稻季施氮量比早稻季施氮量增加 30 kg·hm^{-2} , 同时晚稻季气温和光照等条件也明显高于早稻, 促进尿素的水解, 氨挥发增加。

如图 3B 所示, 2019 年和 2020 年早、晚稻季的各处理氨挥发量占施氮量的比例差异显著 ($P<0.05$)。不同施肥处理下的氨挥发损失量占施氮量的比例为 6.2%~25.5%。CON 氨挥发损失量占施氮量的比例为 17.5%~25.5%, CB 氨挥发损失量占施氮量的比例为 12.5%~15.1%。相对于 CON, 早稻季 CB 的氨挥发损失量占施氮量的比例平均下降了 29.5%, 晚稻季平均下降了 40.0%。RBD 的氨挥发损失量占施氮量的比例为 6.2%~8.2%, 与 CON 相比, 早稻季和晚稻季分

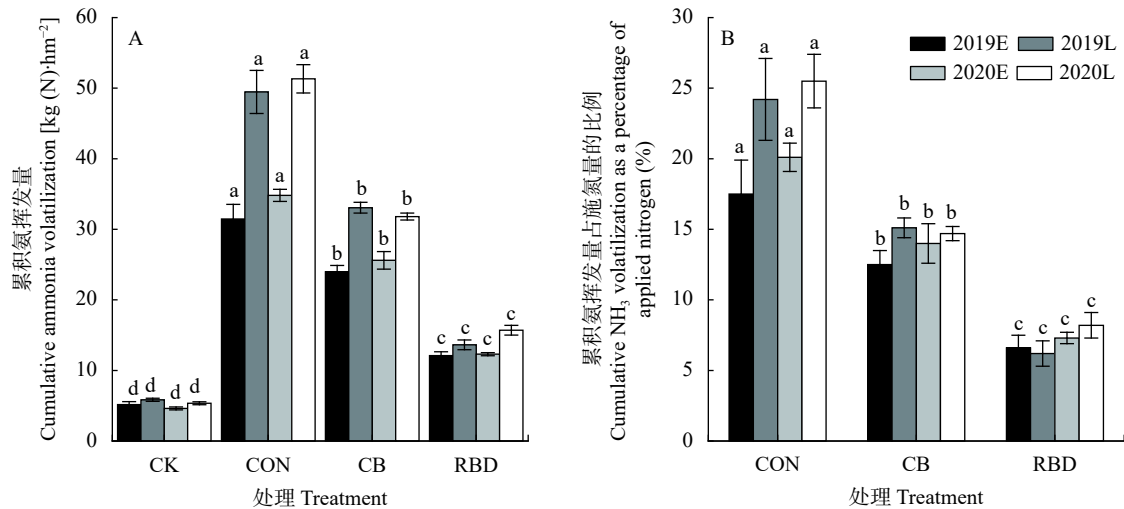


图 3 2019 年和 2020 年不同施肥处理下双季稻稻田氨挥发累积排放量 (A) 及其占施氮量的比例 (B)

Fig. 3 Cumulative ammonia volatilization (A) and percentage of applied nitrogen (B) under different fertilizer treatments in the double rice paddy fields in 2019 and 2020

同一稻季不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。2019E、2019L、2020E 和 2020L 分别指 2019 年早稻季、2019 年晚稻季、2020 年早稻季和 2020 年晚稻季。各处理说明详见表 1。Different lowercase letters for the same rice season indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test. 2019E, 2019L, 2020E and 2020L mean the early-rice season of 2019, the late-rice season of 2019, the early-rice season of 2020, and the late-rice season of 2020, respectively. The description of each treatment is shown in the table 1.

别下降了 63.0% 和 71.1%。

2.3 生物有机肥与化肥配施对田面水铵态氮浓度的影响

铵态氮是田面水中氮的主体形态。图 4 是田面水铵态氮浓度在施肥后随时间的动态变化。从图中可以看出,田面水铵态氮浓度变化趋势与氨挥发变化趋势相似。早稻季期间,基肥施用后,田面水铵态氮浓度第 1~2 天达到峰值,之后逐日下降,约两周后趋于平缓。两年早稻季平均 CON 峰值为 $27.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, CB 峰值为 $14.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, RBD 峰值为 $12.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。与 CON 的峰值相比, CB 峰值降低 46.5%, RBD 峰值降低 55.8%。追肥施加后,田面水铵态氮浓度于第 1~2 天达到峰值,然后逐渐下降至与不施肥处理无显著差距。CB 峰值最高,两年平均为 $15.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, CON 处理为 $13.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这是因为基追肥比例不同, CB 追肥量大于 CON。晚稻的田面水铵态氮浓度变化与早稻相似,施肥后第 1 天达到峰值,后逐渐降低到不施肥处理水平。基、追肥各施氮处理峰值为 $10.5\sim 29.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $15.8\sim 18.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.4 不同施肥处理下稻田田面水铵态氮浓度与氨挥发通量的相关性分析

田面水铵态氮浓度对氨挥发有显著影响^[24]。当尿素施加在淹水稻田时,会迅速被水解为 NH_4^+ 和 HCO_3^- ^[25]。大量铵态氮转化为氨气挥发。通过对田面水铵态氮浓度与氨挥发通量进行 Pearson 相关分析(表 2),发现各施氮处理氨挥发与田面水铵态氮浓

度呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。水稻田面水铵态氮浓度越高,稻田氨挥发量越大。田面水铵态氮是稻田氨挥发的关键影响因素,可以通过降低田面水中 NH_4^+-N 的浓度来降低氨挥发量^[6]。

2.5 生物有机肥与化肥配施对产量及氮素偏生产力的影响

由图 5A 可知,2019 年、2020 年早、晚稻季的产量在不同施肥处理与 CK 间存在显著差异 ($P < 0.05$)。早稻季,CK 平均产量为 $3.3 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, CON 平均产量为 $5.2 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, CB 平均产量为 $5.1 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, RBD 平均产量为 $5.0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, CB、CON、RBD 处理间均表现为无显著差异。2019 年晚稻季,CON 产量为 $8.4 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, RBD 产量为 $7.6 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, CON 与 RBD 产量差异显著 ($P < 0.05$)。相较于 2019 年晚稻季,2020 年晚稻整体产量低,CON、CB、RBD 产量差异不显著。

由图 5B 可知不同施肥处理的氮肥偏生产力。产量和施氮量决定氮肥偏生产力,两年各早、晚稻季 CON 与 CB 处理间氮肥偏生产力差异不显著, CON 与 RBD 之间差异显著 ($P < 0.05$)。早稻季 CON 平均氮肥偏生产力为 $34.6 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, CB 为 $34.1 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, RBD 为 $47.2 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。相较于 CON,早稻季 RBD 的氮肥偏生产力增加 36.3%。2019 年晚稻季,各处理氮肥偏生产力均大于早稻季, RBD 较 CON 氮肥偏生产力增加 29.6%。2020 年晚稻季,因遭遇连续低温阴雨、寒露风天气,晚稻产量有所下降, CON、CB 和 RBD 处理的氮肥偏生产力与 2019 年相比分别下降 29.6%、

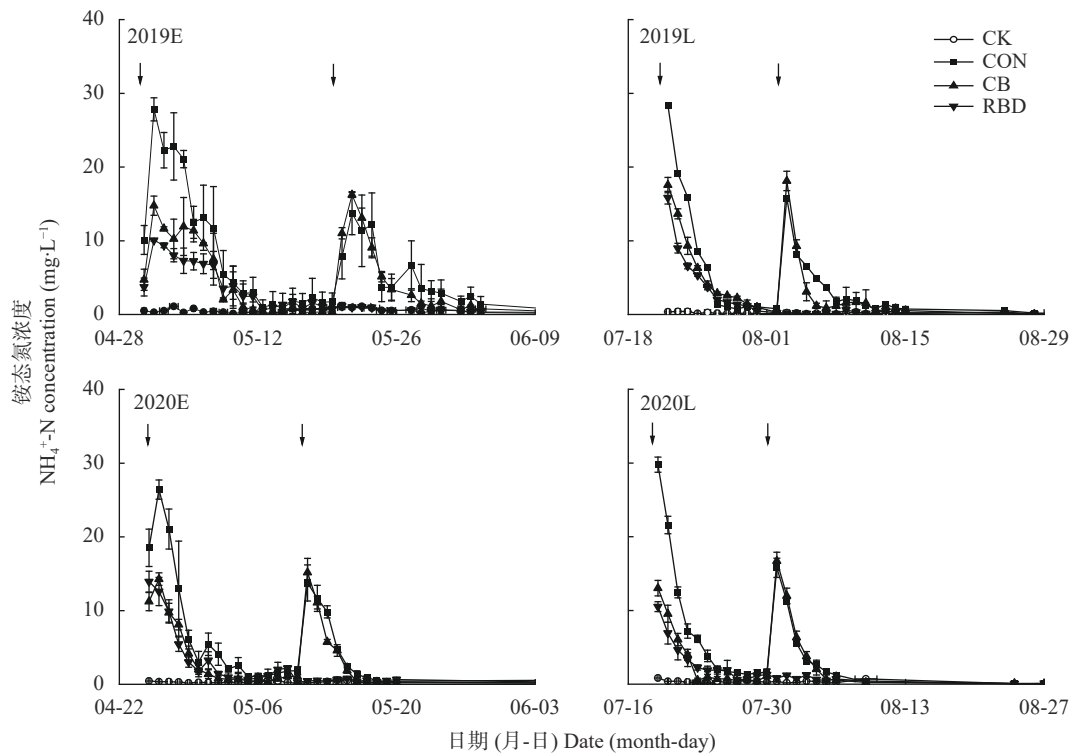


图 4 2019 年和 2020 年不同施肥处理双季稻田田面水铵态氮浓度的动态变化

Fig. 4 Dynamics of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in surface water under different fertilizer treatments of the double rice paddy fields in 2019 and 2020

2019E、2019L、2020E、2020L 分别为 2019 年早稻季、2019 年晚稻季、2020 年早稻季和 2020 年晚稻季; 箭头代表氮肥施用; 各处理说明详见表 1。2019E, 2019L, 2020E, 2020L at the upper left corner mean the early-season rice of 2019, the late-season rice of 2019, the early-season rice of 2020, and the late-season rice of 2020, respectively. The arrows denote the N fertilizer application. The description of each treatment is shown in the table 1.

表 2 不同施肥处理的双季稻田氨挥发通量与田面水铵态氮浓度的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between NH_3 flux and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in surface water of double rice paddy fields under different fertilizer treatments in 2019 and 2020 ($n=35$)

处理 Treatment	2019早稻季 Early-season rice of 2019	2019晚稻季 Late-season rice of 2019	2020早稻季 Early-season rice of 2020	2020晚稻季 Late-season rice of 2020
CON	0.895**	0.878**	0.942**	0.919**
CB	0.806**	0.897**	0.803**	0.904**
RBD	0.828**	0.907**	0.953**	0.936**

**表示在 $P<0.01$ 水平上差异显著。各处理说明详见表 1。 ** means significant difference at $P<0.01$ level. The description of each treatment is shown in the table 1.

26.1% 和 27.9%。

3 讨论

3.1 生物有机肥化肥配施、减氮深施对于氨挥发的影响

本试验中 CB 处理与 CON 处理相比, 在早稻季和晚稻季, 氨挥发损失量占施氮量的比例分别减少 29.5% 和 40.0%, 氨挥发累积损失量分别减少 25.2% 和 35.7%, 说明生物有机肥与化肥配施处理能有效降低双季稻田氨挥发损失, 这与白雪原^[26] 研究结果一致, 生物有机肥在河套地区碱化土与南方稻田中都能降低氨挥发损失。有机肥在土壤中矿化为植物可以吸收的无机氮需要一定时间, 并且矿化过程是一

个持续稳定的过程, 因此有机肥中的氮不易转化为氨气挥发到大气中^[27]。本试验中施用的生物有机肥包含枯草、木霉、芽孢杆菌等多种有益菌。在碱性土壤中, 采用枯草芽孢杆菌生物有机肥配施与由秸秆和畜禽粪便堆肥而成的有机肥相比氨挥发减少 44%。枯草芽孢杆菌生物有机肥能增强硝化过程, 促进 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化^[28]。由功能基因 *ureC* 编码的脲酶可以快速水解氮肥产生 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ^[29], 是土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的主要来源。Sun 等^[28] 发现配施枯草芽孢杆菌生物肥能降低土壤中 *ureC* 的数量, 进而减缓土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的生成速率, 降低了氨挥发, 同时生物有机肥也改变了土壤氮循环微生物群落, 影响氮循环中硝化、反硝化、DNRA 过程。杨亚红等^[30] 研究表

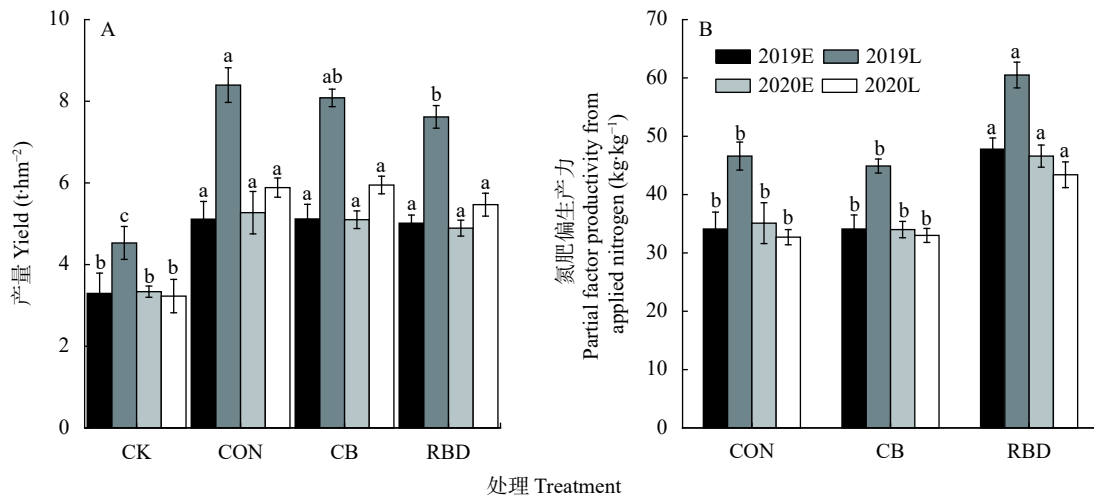


图 5 2019 年和 2020 年不同施肥处理水稻籽粒产量 (A) 及氮肥偏生产力 (B)

Fig. 5 Grain yields (A) and partial factor productivities from applied nitrogen (B) under different fertilizer treatments in 2019 and 2020

同一稻季不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。2019E、2019L、2020E 和 2020L 分别指 2019 年早稻季、2019 年晚稻季、2020 年早稻季和 2020 年晚稻季。各处理说明详见表 1。Different lowercase letters for the same rice season indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test. 2019E, 2019L, 2020E and 2020L mean the early-rice season of 2019, the late-rice season of 2019, the early-rice season of 2020, and the late-rice season of 2020, respectively. The description of each treatment is shown in the table 1.

明, 相同施氮量下, 在碱性土壤上, 与化肥相比, 配施或全施解淀粉芽孢杆菌 (*B. amyloliquefaciens*) 生物有机肥, 能够降低 70% 以上农田土壤氨挥发量, 解淀粉芽孢杆菌生物有机肥的施用, 提高了土壤细菌群落的多样性及丰富度, 特别是芽孢杆菌、硝化螺旋菌属 (*Nitrospira*) 相对丰度明显提升, 促进了土壤硝化过程, 从而减少了氨挥发。汪霞^[31] 通过盆栽试验研究 3 种不同微生物菌剂和传统化肥的配施对碱性土壤氨挥发减排效果的差异, 发现真菌类微生物菌剂绿色木霉菌氨挥发量比尿素处理降低 42.2%, 微生物菌剂解淀粉芽孢杆菌和多粘类芽孢杆菌 (*Paenibacillus polymyxa*) 氨挥发量分别降低 20.3% 和 13.8%, 其主要作用机制有降低氨挥发速率峰值期间的土壤 pH, 提高硝化菌群的丰度, 增强土壤硝化作用。与绿色木霉菌生物有机肥相比, 解淀粉芽孢杆菌负载于有机肥上施入农田土壤中有较好的定殖和存活能力, 解淀粉芽孢杆菌生物有机肥与化肥配施是降低农业氨排放的更优方式^[32]。

本试验中 RBD 处理与 CB 处理相比, 在早稻季和晚稻季, 氨挥发损失量占施氮量的比例分别减少 47.5% 和 51.7%, 氨挥发累积量分别减少 50.7% 和 54.7%。本研究结果表明, 减少 30% 氮肥施入结合深施氮肥是降低氨挥发的重要手段。施肥剂量主要通过影响田面水铵态氮的总浓度来影响土壤氨挥发, 铵态氮浓度会对氨挥发产生直接影响^[33-34]。相较于表施, 氮肥深施可以降低 54%~90% 的氨挥发, 且有

利于提高氮肥利用率、作物产量和根系活力^[10,35-36]。这是因为氮肥深施可以减少氮肥与空气的接触面积, 增加土壤与尿素水解的 NH_4^+ 的接触, 使土壤胶体吸附更多 NH_4^+ ^[9-10], 增加对铵的固定, 降低土壤脲酶活性^[33], 减缓尿素的水解^[9]。周丽平^[37] 将等量尿素施于土表以下 25 cm 深度, 能够明显减少氨挥发速率峰值和氨挥发累积量。YAO 等^[10] 研究发现, 深施氮肥, NH_4^+ -N 几乎没有扩散进入田面水中, 可以在作物早期生长阶段, 为土壤提供更多的 NH_4^+ -N, 并延长 2 个月氮供应时间。深施减氮 25% 时, 植物对 ^{15}N 的吸收提高 62%, ^{15}N 的损失降低 38%。周平遥等^[38] 减量深施氨挥发损失率较减量撒施处理降低 23.9%~53.1%。施肥次数的减少, 可以减少追肥期间的氨挥发损失。胡瞞瞞等^[39] 研究发现, 一次性深施处理能避开土壤氨高挥发期。Wang 等^[40] 研究了深层施肥和地面撒施在不同基肥施用比例下对稻田氨挥发的影响, 发现高比例基肥深施时, 可以有效地减少稻田氨挥发损失, 而追肥时与化肥表施处理无明显差异。刘兆辉等^[41] 研究结果表明, 与农民传统施肥方式相比, 一次性基施缓控释肥可以显著减少农田氨挥发 18.1%~81.3%。本研究 RBD 处理因为化学氮肥深施、且肥料一次性施用, 氨挥发损失较常规处理降幅最大。

3.2 生物有机肥配施化肥、减氮深施对于产量的影响

适当的有机肥施用可使土壤中的碳氮比较适宜,

有利于氮矿化和转化微生物的生长,保证了养分的充足供应,实现了产量的最大化^[27]。与绿色木霉菌生物有机肥相比,解淀粉芽孢杆菌负载于有机肥上施入农田土壤中有较好的定殖和存活能力,解淀粉芽孢杆菌生物有机肥与化肥配施是提高作物产量的更优方式^[31]。本试验中 CON、CB 与 RBD 处理产量差异不显著,但氮肥偏生产力 RBD 高于 CON、CB 处理。Sun 等^[28]研究发现,与单施尿素相比,采用枯草芽孢杆菌生物有机肥替代尿素处理氮肥利用率提高了 11.2%,产量提高 5.0%。本试验采用 40% 生物有机肥配施,而 Sun 等的研究采用 50% 生物有机肥配施,配施比例增加可能有利于产量的增加。周丽平^[37]研究表明与尿素表施处理相比,尿素深施可明显提高夏玉米 (*Zea mays*) 的产量和氮素利用率,两年平均增产 5.4%,氮肥表观回收率两年平均提高了 27.9%,尿素深施有助于保蓄养分,促进植物生长发育。Min 等^[42]将施氮量从 270 kg·hm⁻² 减到 200 kg·hm⁻²,采用表面撒施时,产量显著下降 13.1%,但是机械侧条深施处理,产量没有下降。而相同施氮量下,不同肥料采用机械侧条深施处理,其产量没有显著差异。

为了提高作物产量,传统常规施肥中通常将氮肥分次施入稻田,Pan 等^[43]研究认为通过侧面深施的方式一次性施用氮肥可能足以满足整个生长周期对氮肥的需求,并提高产量。本研究中,RBD 采用一次性穴施,施肥次数较 CON、CB 少,早稻季 RBD 与 CON 施氮量差距为 45 kg(N)·hm⁻²。施氮量影响产量,但由于采用深施和生物有机肥配施氨挥发损失较低,氮素利用率高,早稻季 RBD 与 CON、CB 产量差异不显著;2019 年晚稻,RBD 与 CON 施氮量相差 54 kg·hm⁻²,产量差异显著 ($P < 0.05$),施氮量减少,产量可能下降。但在 2020 年的早晚稻季中,RBD 与 CON 处理相比,产量并未下降,可能与两年有机肥施用下土壤有机质含量增加,土壤保肥能力增加,从而能够在氮肥减施条件下保证水稻氮素供应。

4 结论

两年四季田间定位试验研究表明,40% 生物有机肥替代与化肥配施较常规化肥处理,氮肥的氨挥发损失率早稻季平均下降 29.5%,晚稻季平均下降 40.0%。早稻季和晚稻季氨挥发累积量分别降低 25.2% 和 35.7%,且两处理间产量和氮肥偏生产力没有显著差异。

深施减氮结合生物有机肥替代 40% 化肥处理相较于常规化肥处理,早稻季和晚稻季氮肥的氨挥发

损失率平均下降 63.0% 和 71.1%,氨挥发累积量早稻季和晚稻季分别降低 63.2% 和 70.9%。综合两年的试验结果,水稻产量并未较常规化肥处理显著下降。化肥生物有机肥配施以及化肥生物有机肥配施结合深施减氮处理均有效减少了田面水铵态氮浓度,且稻田氨挥发量与田面水铵态氮浓度呈极显著正相关,表明配施生物有机肥以及深施均是减少稻田田面水铵态氮浓度的有效措施,从而有利于实现氨减排。综合两年的试验,生物有机肥替代化肥结合深施减氮可减少稻田氨挥发 60%,且不降低水稻产量,可有效实现稻田氮肥减量、氨挥发减排。

参考文献 References

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报[R]. 国家统计局. [2021-02-28]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227_1814154.html
National Bureau of Statistics. Statistical Bulletin of the People's Republic of China on National Economic and Social Development in 2020[R]. National Bureau of Statistics. [2021-02-28]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227_1814154.html
- [2] 于飞, 施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1311-1324
YU F, SHI W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1311-1324
- [3] XING G X, ZHU Z L. An assessment of N loss from agricultural fields to the environment in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 57(1): 67-73
- [4] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486-489
- [5] FU J, WU Y L, WANG Q H, et al. Importance of subsurface fluxes of water, nitrogen and phosphorus from rice paddy fields relative to surface runoff[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 627-635
- [6] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 太湖地区稻田不同氮肥管理模式下氨挥发特征研究[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 Tai Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8): 1682-1689
- [7] ROCHETTE P, ANGERS D A, CHANTIGNY M H, et al. Ammonia volatilization and nitrogen retention: how deep to incorporate urea?[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(6): 1635-1642
- [8] CHUONG T, PLANT R, LINQUIST B A. Fertilizer source and placement influence ammonia volatilization losses from water-seeded rice systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2020, 84(3): 784-797
- [9] 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
- [10] YAO Y L, ZHANG M, TIAN Y H, et al. Urea deep placement for minimizing NH₃ loss in an intensive rice cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2018, 218: 254–266
- [11] 杨明达. 缓控释肥种类及施肥方式对氨挥发和温室气体排放的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2019
YANG M D. Effects of slow and controll-released fertilizer types and fertilization modes on ammonia volatilization and greenhouse gas emission[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019
- [12] ZHONG X, ZHOU X, FEI J, 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 & Environment*, 2021, 306: 107183
- [13] 陈慧妍, 沙之敏, 吴富钧, 等. 稻蛙共作对水稻-紫云英轮作系统氨挥发的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(5): 792–801
CHEN H Y, SHA Z M, WU F J, et al. Effect of rice-frog cultivation on ammonia volatilization in rice-Chinese milk vetch rotation system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(5): 792–801
- [14] 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
- [15] 邢月, 沙之敏, 单志钢, 等. 不同施肥方式对稻田氨挥发特征的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(17): 313–318
XING Y, SHA Z M, BEI Z G, et al. Effects of different fertilization methods on ammonia volatilization characteristics in paddy fields[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(17): 313–318
- [16] 张怡彬, 李俊改, 王震, 等. 有机替代下华北平原旱地农田氨挥发的年际减排特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(1): 1–11
ZHANG Y B, LI J G, WANG Z, et al. Substitution of chemical fertilizer with organic manure reduces ammonia volatilization in maize farmland in North China Plain[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(1): 1–11
- [17] 武杞蔓, 张金梅, 李玥莹, 等. 有益微生物菌肥对农作物的作用机制研究进展[J]. *生物技术通报*, 2021, 37(5): 221–230
WU Q M, ZHANG J M, LI Y Y, et al. Recent advances on the mechanism of beneficial microbial fertilizers in crops[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2021, 37(5): 221–230
- [18] 白雪原, 红梅, 刘向东, 等. 施肥对河套灌区农田氨挥发损失的影响[C]//中国土壤学会. 中国土壤学会第十三次全国会员代表大会暨第十一届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会论文集. 西安, 2016: 183–190
BAI X Y, HONG M, LIU X D, et al. Effects of fertilization on ammonia volatilization from farmland in Hetao Irrigation District[C]. Soil Science Society of China. Proceedings of the 13th National Congress of the Soil Science Society of China and the 11th Cross-strait Academic Exchange Seminar on Soil and Fertilizer. Xi'an, 2016: 183–190
- [19] SUN H J, ZHANG Y, YANG Y T, et al. Effect of biofertilizer and wheat straw biochar application on nitrous oxide emission and ammonia volatilization from paddy soil[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 275: 116640
- [20] WANG X, XU S J, WU S H, et al. Effect of *Trichoderma viride* biofertilizer on ammonia volatilization from an alkaline soil in Northern China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 66: 199–207
- [21] SUN B, GU L K, BAO L J, et al. Application of biofertilizer containing *Bacillus subtilis* reduced the nitrogen loss in agricultural soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 148: 107911
- [22] NAHER U A, BISWAS J C, MANIRUZZAMAN M, et al. Bio-organic fertilizer: a green technology to reduce synthetic N and P fertilizer for rice production[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 602052
- [23] HOU H, ZHOU S, HOSOMI M, et al. Ammonia emissions from anaerobically-digested slurry and chemical fertilizer applied to flooded forage rice[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 183(1/2/3/4): 37–48
- [24] 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 Fertilizer*, 2013, 19(5): 1129–1138
- [25] 徐伟. 利用vensim动态模拟软件模拟水稻田氮素迁移动态过程[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 20
XU W. Using vensim to simulate the dynamic course of nitrogen in paddy field[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 20
- [26] 白雪原. 施肥对河套灌区农田系统温室气体排放及氨挥发损失的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017: 23–24
BAI X Y. Study on fertilization on farmland system of greenhouse gas emissions and ammonia volatilization in Hetao Irrigation District[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017: 23–24
- [27] 武星魁, 姜振萃, 陆志新, 等. 有机肥部分替代化肥氮对叶菜产量和环境效应的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(3): 349–356
WU X K, JIANG Z C, LU Z X, et al. Effects of the partial replacement of chemical fertilizer with manure on the yield and nitrogen emissions in leafy vegetable production[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(3): 349–356
- [28] SUN B, BAI Z H, BAO L J, et al. *Bacillus subtilis* biofertilizer mitigating agricultural ammonia emission and shifting soil nitrogen cycling microbiomes[J]. *Environment International*, 2020, 144: 105989
- [29] FISHER K A, YARWOOD S A, JAMES B R. Soil urease activity and bacterial *ureC* gene copy numbers: Effect of pH[J]. *Geoderma*, 2017, 285: 1–8
- [30] 杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 等. 解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防

- 控土壤氨挥发[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4711–4718
YANG Y H, XUE L X, SUN B, et al. *Bacillus amyloliquefaciens* biofertilizer mitigating soil ammonia volatilization[J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4711–4718
- [31] 汪霞. 微生物菌剂对碱性土壤氨挥发的控制及其机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017: 1–15
WANG X. The effects and mechanism of biofertilizer on mitigation the ammonia volatilization from the alkaline soil[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017: 1–15
- [32] 薛莉霞. 生物有机肥防控农田土壤氨挥发及其生态效应[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020: 1–2
XUE L X. Biofertilizer mitigating soil ammonia volatilization and its ecological efficiency[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020: 1–2
- [33] 朱影, 庄国强, 吴尚华, 等. 农田土壤氨挥发的过程和控制技术研究[J]. 环境保护科学, 2020, 46(6): 88–96
ZHU Y, ZHUANG G Q, WU S H, et al. Ammonia volatilization process and control technology of farmland soil[J]. Environmental Protection Science, 2020, 46(6): 88–96
- [34] MA B L, WU T Y, TREMBLAY N, et al. On-farm assessment of the amount and timing of nitrogen fertilizer on ammonia volatilization[J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(1): 134–144
- [35] ZHANG M, YAO Y L, ZHAO M, et al. Integration of urea deep placement and organic addition for improving yield and soil properties and decreasing N loss in paddy field[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 247: 236–245
- [36] PAN B B, LAM S K, MOSIER A, et al. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: a global synthesis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 232: 283–289
- [37] 周丽平. 不同氮肥缓释化处理及施肥方式对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016: 52
ZHOU L P. Effects of slow-released nitrogen fertilizers and urea placement on soil ammonia volatilization and nitrogen utilization of summer maize[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016: 52
- [38] 周平遥, 张震, 王华, 等. 不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(11): 2683–2691
ZHOU P Y, ZHANG Z, WANG H, et al. Effects of deep fertilization methods on ammonia volatilization and rice yield in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(11): 2683–2691
- [39] 胡瞞瞞, 董文旭, 王文岩, 等. 华北平原氮肥周年深施对冬小麦-夏玉米轮作体系土壤氨挥发的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(12): 1880–1889
HU M M, DONG W X, WANG W Y, et al. The effects of deep application of nitrogen fertilization on ammonia volatilization in a winter wheat/summer maize rotation system in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(12): 1880–1889
- [40] WANG C, SUN H F, ZHANG J N, et al. Effects of different fertilization methods on ammonia volatilization from rice paddies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 295: 126299
- [41] 刘兆辉, 吴小宾, 谭德水, 等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3827–3839
LIU Z H, WU X B, TAN D S, et al. Application and environmental effects of one-off fertilization technique in major cereal crops in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3827–3839
- [42] MIN J, SUN H J, WANG Y, et al. Mechanical side-deep fertilization mitigates ammonia volatilization and nitrogen runoff and increases profitability in rice production independent of fertilizer type and split ratio[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 316: 128370
- [43] PAN S G, WEN X C, WANG Z M, et al. Benefits of mechanized deep placement of nitrogen fertilizer in direct-seeded rice in South China[J]. *Field Crops Research*, 2017, 203: 139–149