

稻田氨挥发和水稻产量对增效复合肥减氮施用的响应

朱荣, 柳丽丽, 齐永波, 穆静, 蒋东, 章力干, 邵红建

引用本文:

朱荣, 柳丽丽, 齐永波, 等. 稻田氨挥发和水稻产量对增效复合肥减氮施用的响应[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1935–1943.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0104>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响

周平遥, 张震, 王华, 肖智华, 徐华勤, 汪久翔

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2683–2691 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0441>

氮肥品种对露地蔬菜 NH_3 挥发及经济效益的影响

李晓明, 居静, 夏永秋, 钱晓晴, 颜晓元, 周伟

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1337–1343 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1482>

不同遮阴处理下施肥对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

王坤, 娄运生, 邢钰媛, 刘健

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 464–472 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0953>

种植方式对稻田氨挥发及氮磷流失风险的影响

杨振宇, 罗功文, 赵杭, 胡旺, 王艺哲, 张含丰, 张玉平

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1529–1537 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1481>

太湖地区集约化农田氮素减排增效技术实践

闵炬, 孙海军, 陈贵, 姜振萃, 陆扣萍, 纪荣婷, 施卫明

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2418–2426 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1287>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

朱荣, 柳丽丽, 齐永波, 等. 稻田氨挥发和水稻产量对增效复合肥减氮施用的响应[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1935–1843.

ZHU R, LIU L L, QI Y B, et al. Responses of ammonia volatilization and grain yield to nitrogen reduction with synergistic compound fertilizer in a paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9): 1935–1943.



开放科学 OSID

稻田氨挥发和水稻产量对增效复合肥减氮施用的响应

朱荣, 柳丽丽, 齐永波, 穆静, 蒋东, 章力干*, 郜红建

(农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室/安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘要:通过田间试验研究3种增效复合肥(腐植酸、氨基酸及海藻酸复合肥)减氮施用对稻田氨挥发、氮素利用率和产量的影响,为探究增效复合肥的高效利用并评价其环境效应提供科学依据。田间试验设不施肥(CK)、常规施肥(CF)、常规施肥减氮20%(CR)、腐植酸复合肥减氮20%(HR)、氨基酸复合肥减氮20%(AR)和海藻酸复合肥减氮20%(SR)6个处理。采用密闭式间歇通气法测定施肥后氨挥发通量,于水稻成熟期测产,测定植株吸氮量并计算氮素利用率。结果表明:氨挥发主要发生在基肥和分蘖肥施用后。与CF处理相比,CR、HR、AR、SR处理均显著降低了稻田氨挥发损失总量($P<0.05$),降低幅度为38.9%~54.7%;且与CR处理相比,增效复合肥减氮处理AR与SR的氨挥发损失总量分别显著降低20.5%和25.8%。此外,田面水 NH_4^+-N 浓度是影响氨挥发的重要因素,减氮条件下田面水 NH_4^+-N 浓度降低,其中3种增效复合肥减氮处理田面水 NH_4^+-N 平均浓度较CR处理降低了5.5%~18.7%。减氮条件下,增效复合肥处理(HR、AR与SR)的植株吸氮量较CR处理显著提高20.0%~31.8%($P<0.05$)。而且,HR、AR与SR处理的氮素利用率均显著高于CF和CR处理($P<0.05$)。对比CF处理的产量,3种增效复合肥减氮处理的产量没有显著降低;同一减氮水平下,HR、AR与SR的产量均显著高于CR处理,增幅为4.4%~4.8%($P<0.05$)。研究表明,增效复合肥减氮施用均可有效降低稻田氨挥发损失,并具有较好的稳产效应,其中以氨基酸和海藻酸增效复合肥效果更为明显。

关键词:氨挥发;增效复合肥;减氮;产量;稻田

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)09-1935-09 doi:10.11654/jaes.2021-0104

Responses of ammonia volatilization and grain yield to nitrogen reduction with synergistic compound fertilizer in a paddy field

ZHU Rong, LIU Lili, QI Yongbo, MU Jing, JIANG Dong, ZHANG Ligan*, GAO Hongjian

(Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention/School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: A field experiment was performed to explore the effects of nitrogen reduction application of three compound fertilizers (humic acid, amino acid, and alginic acid synergistic compound fertilizer) on ammonia volatilization, nitrogen use efficiency, and grain yield to provide a scientific basis for exploring the efficient utilization of compound fertilizer and evaluating its environmental effects. The field experiment was performed in a paddy field located in Zhenjiang Institute of Agricultural Sciences. Six treatments were set up, namely without fertilization (CK), conventional fertilization (CF), conventional fertilization with 20% nitrogen reduction (CR), humic acid synergistic compound fertilizer with 20% nitrogen reduction (HR), amino acid synergistic compound fertilizer with 20% nitrogen reduction (AR), and alginic acid synergistic compound fertilizer with 20% nitrogen reduction (SR). The ammonia volatilization flux after fertilization was measured by the closed intermittent ventilation method. Rice yield, nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency were measured at the

收稿日期:2021-01-25 录用日期:2021-05-13

作者简介:朱荣(1988—),男,江苏泰州人,硕士研究生,研究方向为新型肥料的推广与应用。E-mail:782627713@qq.com

*通信作者:章力干 E-mail:zhligan@ahau.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0200402,2018YFD0800301)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2016YFD0200402, 2018YFD0800301)

rice maturity stage. The results showed that ammonia volatilization mainly occurred after the application of basal fertilizer and tillering fertilizer. Compared with the CF treatment, the CR, HR, AR, and SR treatments significantly reduced the total ammonia volatilization loss by 38.9%~54.7%. Compared with that of the CR treatment, the total ammonia volatilization loss of the AR and SR treatments decreased by 20.5% and 25.8%, respectively. The concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in the surface water was an important factor in ammonia volatilization, which was significantly reduced by the nitrogen reduction fertilization treatments. The average $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in the surface water of the three synergistic compound fertilizer treatments decreased by 5.5%~18.7% compared with that of the CR treatment. Under the nitrogen reduction conditions, the plant nitrogen uptake under the synergistic compound fertilizer treatments (HR, AR, and SR) was significantly increased by 20.0%~31.8% compared with that in the CR treatment. Moreover, the nitrogen use efficiencies of the HR, AR, and SR treatments were significantly higher than those of the CF and CR treatments. The grain yields of the three synergistic compound fertilizer treatments (HR, AR, and SR) were not significantly reduced compared with that of the CF treatment. Under the same nitrogen reduction level, the yields of the three synergistic compound fertilizer treatments (HR, AR, and SR) were significantly higher than that of the CR treatment (increased by 4.4%~4.8%). These findings show that ammonia volatilization is significantly decreased by the treatments of synergistic compound fertilizer combined with nitrogen reduction application, whereas the grain yield is not differentially affected, especially by the treatment of amino acid and alginic acid synergistic compound fertilizer combined with nitrogen reduction application.

Keywords: ammonia volatilization; synergistic compound fertilizer; nitrogen reduction; yield; paddy field

氨挥发是稻田气态氮素损失的主要途径,据统计2016年我国氨排放总量达到11 Tg,其中稻田氨挥发排放占10%~25%^[1-3]。稻田氨挥发可导致养分浪费、氮素利用率低,同时加剧了PM_{2.5}形成、水体富营养化、土壤酸化等一系列环境问题^[4-8]。

在影响稻田氨挥发的诸多因素中,氮肥施用是最主要的影响因子^[9]。氮肥的过量施用会增加稻田氨挥发损失风险,已有研究表明,稻田氨挥发损失随氮肥施用量的增加呈指数增长^[10-11],其损失比例占施氮量的10%~40%^[12]。氮肥减量施用是实现降低稻田氨挥发损失的可行措施^[13-15]。然而,氮肥减量施用可能造成水稻减产^[16-17]。因此,研发高效环保的新型肥料是减少氮肥用量、保障粮食安全、降低环境污染的重要途径^[18-19]。

近年来,通过添加不同增效载体(腐植酸、氨基酸、海藻酸等)的新型增效复合肥料产品不断出现,关于增效载体及增效复合肥料的提质增效作用受到人们的广泛关注。相关研究表明,新型增效复合肥料能够促进作物根系生长发育、提升氮素吸收利用,进而提高作物产量^[20-22]。关于增效复合肥料减氮稳产效应已有相关报道。黄继川等^[22]发现,海藻酸复合肥料减氮条件下可降低双季稻减产幅度,达到减氮稳产的效果。匡石滋等^[23]的研究表明,化肥减量配施氨基酸水溶性肥可以提高香蕉产量和品质。此外,对比不同增效载体发现^[24-26],腐植酸复合肥料含有的有机物质和有机胶体,具有较强的吸附能力,能吸附土壤或水体中的 NH_4^+ 并形成稳定的腐植酸铵盐结构;氨基酸复合肥料含有小分子有机物能够刺激和调节作物的生长发育,可

以清除植物体内活性氧自由基,提高作物可抗逆性,同时对土壤具有一定的改良作用;海藻酸复合肥料含有天然植物生长调节剂,可促进根系生长并提高根系活力,促进作物对养分的吸收,进而提高作物产量。葛明慧等^[27]和程林等^[28]关于增效载体的研究发现,氨基酸增效载体与尿素配施能促进水稻幼苗期生长和养分吸收,其中水稻根长、根直径、根表面积、根尖数分别提高了45%、26%、6%、91%,氮肥利用率提高了10%~26%;提升根际菌落多样性,根际细菌总量增加了18%~23%,其中氨化细菌数量和硝化细菌数量增加0.5~1.7倍;增强了土壤对氮素固持能力,其中根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、微生物氮含量分别提高了40%、38%。蒋东等^[29]发现3种增效复合肥料减氮施用可减少稻田水氮素的径流和渗漏损失,能有效降低田面水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度,其中海藻酸增效复合肥料的氮素径流损失和渗漏损失分别降低了36%和7%。而田面水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化与稻田氨挥发密切相关^[30]。现有的研究表明,增效载体和增效复合肥料均能有效减少肥料氮素损失、提高氮素吸收利用率。增效载体的作用机制表现在通过刺激作物生长增进养分吸收,通过增效载体与肥料的加工工艺优化增加肥料的稳定性,通过调控养分土壤转化机制增加土壤对氮素的固持。氨挥发是稻田氮素损失的主要途径之一,复合肥料通过增效载体添加和减氮施用,是否能够减少稻田氨挥发损失一直为学界所关注,本研究基于增效载体添加调控氮素在土壤-作物-肥料中的过程,针对增效载体添加促进氮素养分吸收,提升肥料氮在土壤中的稳定性,增加土壤对肥料养分的生物固持,从而提高养分利用效率,

减少氮挥发损失的假设,开展了增效复合肥减氮施用对稻田氮挥发影响的研究,以期对增效复合肥合理施用和环境效应评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于2018年6—11月在江苏镇江农业科学研究所试验站(31°58'N, 119°18'E)进行。该地区属于亚热带季风气候区,年均气温15℃,年均降雨量1018 mm。主要种植方式为稻-麦轮作。供试土壤为发育于下蜀黄土的爽水性水稻土,其基本理化性质^[31]:有机质含量11.90 g·kg⁻¹,全氮0.85 g·kg⁻¹,碱解氮76.71 mg·kg⁻¹,速效磷11.23 mg·kg⁻¹,速效钾86.12 mg·kg⁻¹,pH 5.21(土:水=1:2.5)。

1.2 试验处理

试验共设6个处理:(1)CK,不施肥;(2)CF,常规施肥;(3)CR,常规施肥减氮20%;(4)HR,腐植酸复合肥减氮20%;(5)AR,氨基酸复合肥减氮20%;(6)SR,海藻酸复合肥减氮20%。每个处理3次重复,随机区组设计。CF处理施氮量为240 kg·hm⁻²;3种复合肥处理(HR、AR和SR)施氮量与CR处理一致,为192 kg·hm⁻²。氮肥为尿素,施用量均以纯N计。氮素按基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2施用,HR、AR和SR处理中3种增效复合肥作基肥一次性施入,两次追肥均施用尿素,其中减氮处理中的3次施肥均减氮20%。除CK外,各处理磷肥和钾肥施用量相同,并作为基肥一次性施用,其中CF和CR处理的施用量为磷酸二氢钾144.5 kg·hm⁻²、氯化钾118.5 kg·hm⁻²;3种复合肥处理施用的磷肥和钾肥用上述两种肥料进行平衡调配。试验小区面积为4 m×3 m,各小区之间设有高出地面30 cm的田埂,并用塑料薄膜覆盖,以防肥水串流。各个试验小区单独设定进、排水口。供试水稻品种为扬宁1号,水稻移栽时间为6月21日,收获时间为10月28日,施肥时间分别为6月21日、7月11日和7月30日,基肥撒施后进行耙地使其与表土充分混匀,两次追肥均为撒施。田间水分管理和当地常规方法一致,为间歇灌溉,其特点:前期淹水(2018年6月21日—7月20日)、中期烤田(2018年7月21—30日)、后期干湿交替(2018年8月29日—10月10日)、排水落干(2018年10月22—28日)。

供试肥料:3种复合肥都是通过向普通复合肥中添加天然活性物质腐植酸、氨基酸、海藻酸等,经过熔融生产造粒。腐植酸复合肥(N-P₂O₅-K₂O=18-12-

15,腐植酸添加量0.5%)由山东农大肥业公司提供,氨基酸复合肥(N-P₂O₅-K₂O=26-12-10,氨基酸添加量0.5%)由深圳芭田公司提供,海藻酸复合肥(N-P₂O₅-K₂O=22-10-10,海藻酸添加量0.5%)由江西开门子公司提供。

1.3 样品采集和测定

采用密闭室间歇通气-稀硫酸吸收法测定田间氮挥发^[32],密闭室为直径20 cm、高15 cm、底部开放的圆柱体,材料为有机玻璃。密闭室顶部与一根2.5 m高的通气管连通(架到地面2.5 m处,以保证交换空气氨浓度一致),将密闭室嵌入表土中,启动真空泵,抽气时设定换气频率为15~20次·min⁻¹。每次施肥后的第1、2、3、5、7 d采集样品,时间为每日7:00-9:00和15:00-17:00,用装有60 mL 0.03 mol·L⁻¹稀H₂SO₄溶液的洗气瓶吸收挥发的氨,样品采集完成后将吸收液带回实验室用全自动化学分析仪(SmartChem 200S/N1104238, WESTCO, 法国)测定NH₄⁺的浓度,以此4 h的通量值作为每日氮挥发的平均通量计算全天的氮挥发通量。

施肥后第1 d上午7:00利用注射器采集各试验小区田面水样,每小区5个平行点,混合成100 mL左右的水样。水样带回实验室过滤,田面水样中NH₄⁺-N浓度采用靛酚蓝比色法测定。

水稻成熟后,各小区的地上部生物量全部收割并进行实际测产,同时在各试验小区挑选具有代表性的3穴水稻植株样,分成籽粒和秸秆两部分并烘干磨碎,用凯氏定氮法测定植株样中的全氮含量。

1.4 计算公式与数据处理

氮挥发通量计算公式为:

$$F = \frac{C \times V \times 24 \times 10^{-6}}{\pi \times r^2 \times t \times 10^{-4}}$$

式中: F 表示氮挥发日通量(以N计),kg·hm⁻²·d⁻¹; C 表示测得的吸收液中NH₄⁺-N浓度,mg·L⁻¹; V 表示稀硫酸吸收液体积,L; t 表示氨收集时间,h; r 表示收集氮挥发的密闭室半径,m。

施氮产生氮挥发水体富营养化效应的边际环境损失(M_1 ,元·hm⁻²)计算公式为^[7]:

$$M_1 = 16\% \times 0.33 \times F \times Pe \times 17/14$$

式中:16%为自然湿地(河流、湖泊、沼泽等)所占陆地面积的百分数;0.33为1 kg氮挥发等量(PO₄³⁻)富营养化效应的转换系数; Pe 代表1 kg PO₄³⁻造成的富营养化损失,本试验中为3.88元·kg⁻¹; F 为氮挥发的损失量,kg·hm⁻²;17/14为氮对氨的转换系数。

施氮产生氨挥发酸雨效应的边际环境损失(M_2 , 元· hm^{-2})计算公式为^[33-34]:

$$M_2 = 84\% \times 1.88 \times F \times Pa \times 17/14$$

式中:84%为除自然湿地外的陆地面积的百分数;1.88为1 kg 氨挥发等量(SO_2)酸雨效应的转换系数; Pa 代表1 kg SO_2 造成的酸雨损失,本试验中为5元· kg^{-1} ; F 为氨挥发的损失量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 17/14为氮对氨的转换系数。

氨挥发损失率=(施氮处理氨挥发总量-空白处理氨挥发总量)/施氮量 $\times 100\%$

氮素利用率(NUE)=(施氮处理水稻吸氮量-空白处理水稻吸氮量)/施氮量 $\times 100\%$

尿素 1 700 元· t^{-1} , 腐植酸复合肥 1 750 元· t^{-1} , 氨基酸复合肥 1 760 元· t^{-1} , 海藻酸复合肥 1 760 元· t^{-1} , 水稻籽粒当地市场普通价格为 2.5 元· kg^{-1} 。

数据处理、作图及分析分别采用 Excel 2010、Origin 8.5 和 SPSS 25.0 完成。

2 结果与分析

2.1 稻田氨挥发通量的动态变化

施肥后氨挥发通量的动态变化如图1所示,各施肥处理在施肥后1~2 d内达到氨挥发高峰,随后逐渐下降至与CK无差异。基肥和分蘖肥施用后的氨挥发通量明显高于穗肥施用后。基肥施用后,减氮处理的氨挥发通量始终低于CF处理,各施肥处理的氨挥发峰值为3.9~8.0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,减氮处理的氨挥发峰值较CF处理降低了11.3%~50.9%。而且减氮处理之间,3种增效复合肥处理HR、AR与SR的氨挥发峰值较CR处理分别降低1.8%、20.2%与44.7%,其中SR处理降

低幅度最大。分蘖肥后,各施肥处理的氨挥发峰值均高于其他施肥阶段的氨挥发峰值。减氮处理的氨挥发峰值始终低于CF处理,而减氮处理之间的氨挥发峰值虽有波动,但SR处理的氨挥发峰值保持在最低。穗肥后,各施肥处理的氨挥发通量都处于较低水平。

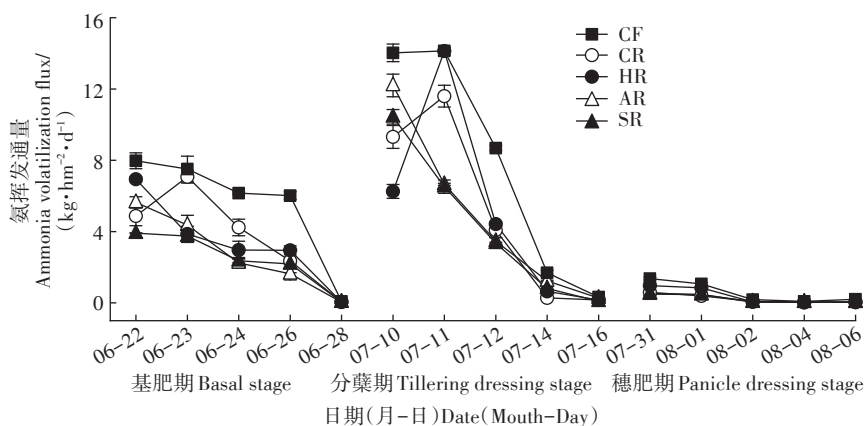
2.2 不同施肥时期的氨挥发量、氨挥发损失总量及损失率

稻季不同施肥时期的氨挥发量、氨挥发损失总量及损失率如表1所示。3个施肥时期中,减氮均显著降低了稻田氨挥发量,各施肥处理的氨挥发损失主要集中在基肥期和分蘖期。基肥期,3种增效复合肥HR、AR和SR处理较CR处理均显著降低了稻田氨挥发量($P < 0.05$),降低幅度为14.1%~33.2%。分蘖期,与CR处理相比,3种增效复合肥HR、AR和SR处理的氨挥发量均有所减少,其中AR和SR达到显著水平($P < 0.05$)。穗肥期,减氮处理之间的氨挥发量差异不显著。

各施肥处理的氨挥发总量和损失率分别为33.46~73.84 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和17.09%~30.50%,其中CF处理的氨挥发总量和损失率均最高,分别为73.84 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和30.50%。与CF处理相比,减氮处理的氨挥发总量降低了38.9%~54.7%;与CR处理相比,3种增效复合肥处理HR、AR、SR的氨挥发总量降低了7.2%、20.5%和25.8%,其中AR、SR处理达显著水平($P < 0.05$)。3种增效复合肥处理HR、AR、SR的氨挥发损失率低于CF和CR处理。

2.3 田面水 NH_4^+-N 浓度动态变化及其与氨挥发通量的相关性分析

稻田氨挥发通量与田面水 NH_4^+-N 浓度变化密切



CK 处理不同施肥时期的氨挥发通量范围为 0.01~0.14 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$
The range of ammonia volatilization flux indifferent fertilization periods of CK is 0.01~0.14 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$

图1 不同施肥时期氨挥发通量的动态变化

Figure 1 Dynamic changes of ammonia volatilization flux in different fertilization periods

表1 不同施肥时期的氨挥发量、氨挥发损失总量及损失率

Table 1 Ammonia volatilization, total ammonia volatilization loss and ammonia volatilization loss rate in different fertilization periods

处理 Treatment	基肥期氨挥发 Basal stage/(kg·hm ⁻²)	分蘖期氨挥发 Tillering dressing stage/(kg·hm ⁻²)	穗肥期氨挥发 Panicle dressing stage/(kg·hm ⁻²)	氨挥发损失总量 Total NH ₃ loss/(kg·hm ⁻²)	氨挥发损失率 NH ₃ loss rate/%
CF	33.57±1.89a	37.88±1.74a	2.39±0.12a	73.84±3.53a	30.50
CR	21.10±1.67b	23.10±0.55b	0.93±0.19b	45.12±2.16b	23.16
HR	18.13±1.63c	22.83±0.71b	0.92±0.13b	41.88±1.78b	21.47
AR	14.24±1.04d	20.68±0.74c	0.94±0.05b	35.86±1.19c	18.34
SR	14.09±0.88d	18.47±0.68d	0.91±0.17b	33.46±0.97c	17.09

注:CK处理基肥期、分蘖期、穗肥期的氨挥发和氨挥发损失总量分别为(0.18±0.01)、(0.25±0.01)、(0.22±0.01)、(0.65±0.18) kg·hm⁻²。同一列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Ammonia volatilization and total ammonia volatilization loss of blank treatment (CK) at basal fertilizer stage, tillering stage and panicle fertilizer stage are (0.18±0.01), (0.25±0.01), (0.22±0.01), (0.65±0.18) kg·hm⁻². Different letters in the same column indicate significant differences among different treatments at $P<0.05$ levels. The same below.

相关。如图2所示,各施肥处理田面水NH₄⁺-N浓度与稻田氨挥发通量具有较一致的变化规律。基肥施用后,减氮处理的田面水NH₄⁺-N浓度始终低于CF处理,3种增效复合肥处理HR、AR、SR田面水的NH₄⁺-N平均浓度较CR处理降低了5.5%~18.7%。分蘖肥后,各施肥处理田面水的NH₄⁺-N浓度峰值范围为32.33~48.52 mg·L⁻¹。穗肥后,各施肥处理田面水的NH₄⁺-N浓度维持在较低水平。各施肥处理田面水的NH₄⁺-N浓度与氨挥发通量的相关性分析表明(图3),两者之间呈线性正相关关系,除CF处理未达显著水平外,其余均达到显著甚至极显著水平, R^2 值为0.854~0.977。

2.4 不同处理的水稻产量、吸氮量、氮素利用率及经济效益

由表2可知,对比CF处理的籽粒产量,CR处理的籽粒产量显著降低了7.9%($P<0.05$);3种增效复合肥HR、AR、SR处理降低了3.5%~3.9%,但差异不显著。对比CR处理的籽粒产量,增效复合肥HR、AR及SR处理显著增加了4.4%~4.8%。3种增效复

合肥处理之间的籽粒产量差异不显著,其中AR的产量最高。

各施肥处理的地上部总吸氮量显著高于CK处理。与CF处理相比,增效复合肥处理AR、SR的总吸

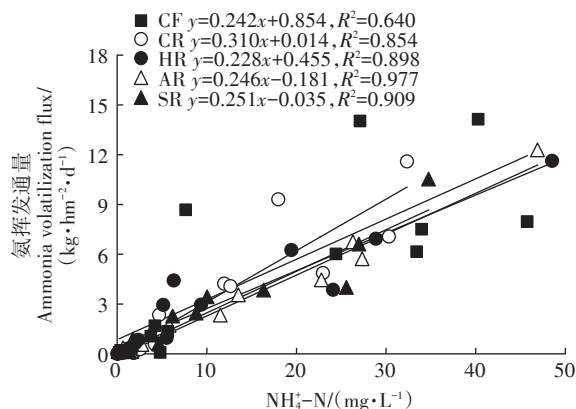
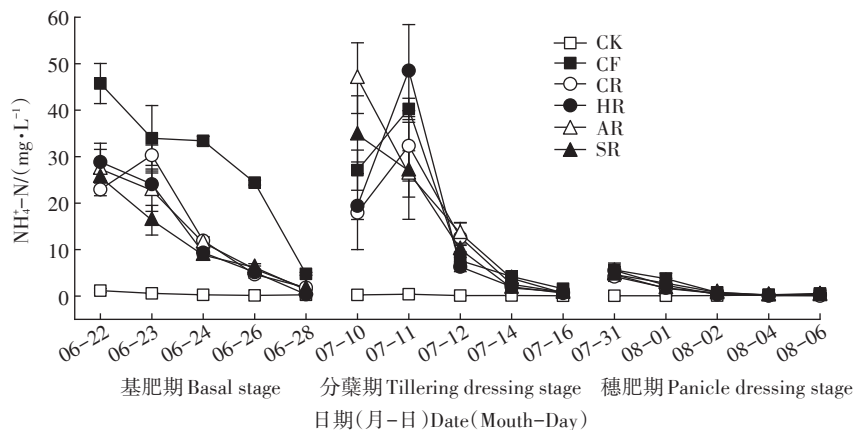
图3 氨挥发通量与田面水NH₄⁺-N浓度相关性分析Figure 3 Correlation analysis of ammonia volatilization flux and NH₄⁺-N concentration in the surface water of paddy field图2 田面水NH₄⁺-N浓度的动态变化Figure 2 Dynamic changes of NH₄⁺-N concentration in the surface water of paddy field

表2 不同施肥处理的产量、吸氮量和氮素利用率

Table 2 Yield, shoot N uptake and N use efficiency under different fertilization treatments

处理 Treatment	秸秆 Straw		籽粒 Grain		总吸氮量 Total N uptake/(kg·hm ⁻²)	氮素利用率 NUE/%
	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	吸氮量 N uptake/(kg·hm ⁻²)	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	吸氮量 N uptake/(kg·hm ⁻²)		
CK	7.22±0.17b	23.63±0.56c	6.38±0.41c	50.31±2.50d	73.94±2.50c	—
CF	8.81±0.39a	66.60±1.86a	9.39±0.22a	83.66±2.49b	150.26±2.50a	31.80b
CR	8.31±0.41a	52.78±1.32b	8.65±0.01b	71.50±2.83c	124.28±3.83b	26.22b
HR	8.32±0.38a	66.18±2.21a	9.03±0.02a	82.96±2.29b	149.13±3.29a	39.16a
AR	8.34±0.23a	66.07±2.15a	9.07±0.08a	89.98±1.11ab	156.04±2.75a	42.76a
SR	8.34±0.44a	60.07±1.81a	9.05±0.09a	94.65±2.49a	154.72±3.49a	42.07a

氮量有所增加;减氮处理之间,3种增效复合肥 HR、AR、SR 处理的总吸氮量较 CR 处理显著提高了 20.0%~31.8% ($P<0.05$)。各施肥处理氮素利用率的范围为 26.22%~42.76%,3 种增效复合肥 HR、AR、SR 处理的氮素利用率显著高于 CF 和 CR 处理。

综合经济和环境效益,CF 处理的净收入最高为 21 891 元·hm⁻²(表 3)。减氮条件下,3 种增效复合肥处理 HR、AR、SR 的净收入均高于 CR 处理,其由高到低为 AR>SR>HR。因此,从绿色农业发展的角度看,施用增效复合肥不仅保证了经济效益,同时也减少了氮挥发损失带来的环境成本。

表3 不同施肥处理的经济效益(元·hm⁻²)

Table 3 Economic benefits of different fertilization treatments (yuan·hm⁻²)

处理 Treatment	产值 Output	肥料成本 Fertilizers cost	氮挥发环境损失 Environments loss		净收入 Net income
			M_1	M_2	
CK	15 957		1	6	15 950
CF	23 483	866	18	708	21 891
CR	21 624	693	11	433	20 487
HR	22 576	1 278	11	407	20 880
AR	22 667	995	9	344	21 319
SR	22 631	1 113	8	321	21 189

3 讨论

3.1 不同增效复合肥对稻田氮挥发的影响

稻田氮挥发损失主要受施氮量、田面水 NH₄⁺-N 浓度、肥料类型、土壤条件、温度、pH 等因素的影响^[6,35-36]。本研究表明:减氮能有效降低稻田氮挥发通量;基肥期,3 种增效复合肥处理 HR、AR、SR 的氮挥发峰值较 CR 处理分别降低了 1.8%、20.2%、44.7%,其中 SR 处理降低幅度最大;稻季氮挥发峰值通常在

施肥后的 1~3 d 出现^[7,10],基肥后和分蘖肥后的氮挥发通量明显高于穗肥后(图 1)。

从不同施肥时期的氮挥发量可以看出(表 1),基肥期各处理氮挥发损失均低于分蘖期,可能的原因是基肥撒施后进行耙地使其与表土充分混匀,减少了氮挥发排放,且分蘖期气温升高促进了氮挥发排放。而穗肥期的氮挥发排放差异显著,可能的原因是穗肥期是水稻生长的旺盛期,对氮素的需求量大^[10],而减氮处理均降低了基肥期和分蘖期的稻田氮挥发损失量,特别是减氮条件下,对比 CR 处理,增效复合肥 AR 和 SR 处理均显著降低了基肥期和分蘖期的稻田氮挥发($P<0.05$),损失总量上也表现出同样的规律。其原因首先可能是由于氨基酸、海藻酸富含的官能团结构与尿素态氮形成了较稳定的化学键或抑制了土壤脲酶活性,降低了氮素的释放速度,而此时水解的 NH₄⁺更多地被土壤胶体所吸附,从而使田面水 NH₄⁺-N 浓度锐减^[20,26,37]。其次,氨基酸、海藻酸含有的活性基团对作物生长具有调节作用,可促进作物根系生长,增加对氮素吸收和利用^[26-27],提高土壤质量,改善土壤性质^[38-39],增强土壤对氮素的固持能力^[27,29],从而达到减少稻田氮挥发损失的可能。另外,通过对稻田田面水 NH₄⁺-N 浓度动态变化监测发现,各施肥处理田面水 NH₄⁺-N 浓度与稻田氮挥发通量具有较一致的变化规律。尿素施入稻田后,在脲酶的作用下水解产生大量的 NH₄⁺。基肥施用后,3 种增效复合肥处理 HR、AR、SR 田面水的 NH₄⁺-N 平均浓度较 CR 处理降低了 5.5%~18.7%,可能的原因是 3 种增效复合肥分别添加的腐植酸、氨基酸、海藻酸活性物质,其中腐植酸能吸附 NH₄⁺形成稳定的腐植酸铵盐,从而起到保氮的作用^[24];氨基酸能够降低田面水或土壤 pH,使 NH₄⁺不易转化为氨气^[25];海藻酸能够延缓氮素的释放,降低田面水中 NH₄⁺浓度^[26],从而减少稻田氮挥发损失。同时

也进一步验证了增效复合肥能够抑制土壤脲酶活性,且具备一定的缓释效应。本研究中田面水的 NH_4^+-N 浓度与氮挥发通量之间呈线性正相关(图3),除CF处理未达到显著水平外,其余均达到显著甚至极显著水平, R^2 值为0.854~0.977,这与前人^[30,34]的研究结果一致。除此之外,施氮量和温度也可能影响稻田氮挥发。本研究中的氮挥发通量主要集中在基肥期和分蘖期两个时期,可能是由于基肥期的施氮量大,水稻苗小,对氮素的需求较少^[13],及分蘖期气温过高所致^[40]。减氮施肥的目标是在保证产量的基础上提高氮素利用率,降低氮素损失。

3.2 不同增效复合肥的产量效应

本研究表明,增效复合肥减氮施用能实现水稻减氮不减产,同时均显著提高了氮素利用率。与CF处理相比,3种增效复合肥HR、AR、SR处理的实际产量有所减少,但四者间未达显著差异水平;对比CR处理的产量,3种增效复合肥HR、AR、SR处理均有增产潜力,增幅为4.4%~4.8%,其产量由大到小为 $\text{AR} > \text{SR} > \text{HR}$ (表2)。3种增效复合肥HR、AR、SR处理的总吸氮量较CR处理提高了20.0%~31.8%(表2)。前人研究表明,腐植酸、氨基酸、海藻酸作为植物刺激素,可促进作物根系生长^[26-27],而作物根系生长情况与作物的吸氮能力和产量存在正相关关系^[41-42]。新型增效复合肥在玉米、番茄、棉花等作物上均表现为促进作物生长、增加作物产量、提高氮素利用率^[43-45]。李伟等^[46]的研究发现腐植酸尿素可显著提高氮肥利用率,提高水稻产量。因此,实现肥料零增长的目标,还需要大量研发环境友好新型肥料,以提高氮素利用率,促进植物生长,实现减氮保产增产。本试验结果表明,3种增效复合肥均具有增产效果,且提升了氮素的利用率。

尽管增效复合肥的作物效应已被很多研究所验证,但其环境效应的研究未见到系统报道,从本试验的结果看,增效复合肥减氮施用能有效降低稻田氮挥发损失,还可实现减氮不减产,同时在经济效益上也具备可行性。但本研究中的部分参数是参考了邻近太湖地区研究的结果,如陆地和河流占比的百分数、氮素损失引起的富营养化和酸雨效应的转换系数等,关于这些参数指标的选择还需要进一步调研试验所属地区的实际情况进行多点验证。另外,对于增效复合肥的产量效应已在不同稻作区上有了广泛的应用和验证,但其对氮挥发的影响过程和机制还需要进一步进行多点多季的试验进行

验证。

4 结论

(1)增效复合肥减氮施用能有效降低稻田氮挥发。与常规施肥相比,减氮施肥均能显著降低稻田氮挥发损失总量,降幅为38.9%~54.7%。减氮条件下,3种增效复合肥(腐植酸、氨基酸、海藻酸)的氮挥发总量较常规施肥减氮均有所降低,其中氨基酸、海藻酸增效复合肥降幅分别为20.5%和25.8%,且达到显著水平。

(2)减氮条件下,施用增效复合肥均表现出增产趋势。与常规施肥减氮处理相比,3种增效复合肥处理的产量增幅为4.4%~4.8%。

(3)在保证水稻产量和减少稻田氮挥发损失上,氨基酸、海藻酸增效复合肥减氮施用均能达到稳产,且可显著降低氮挥发损失风险,而施用不同增效复合肥引起的稻田氮挥发损失的过程和作用机制,及不同增效复合肥之间的差异还需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] YAN X Y, AKIMOTO H, OHARA T. Estimation of nitrous oxide, nitric oxide and ammonia emissions from croplands in east, southeast and south Asia[J]. *Global Change Biology*, 2010, 9(7): 1080-1096.
- [2] RIDDICK S, WARD D, HESS P, et al. Estimate of changes in agricultural terrestrial nitrogen pathways and ammonia emissions from 1850 to present in the Community Earth System Model[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(11): 3397-3426.
- [3] ZHAN X Y, ADALIBIEKE W, CUI X Q. Improved estimates of ammonia emissions from global croplands[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(2): 1329-1338.
- [4] ZHAN X Y, YAN B, FENG Z, et al. Evidence for the importance of atmospheric nitrogen deposition to eutrophic Lake Dianchi, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(12): 6699-6708.
- [5] BOSCH-SERRA D, YAGUEE M R, TERIA-ESMATGES M R. Ammonia emissions from different fertilizing strategies in Mediterranean rainfed winter cereals[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 84(1): 204-212.
- [6] 杨国英, 郭智, 刘红江, 等. 稻田氮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): 1912-1919. YANG G Y, GUO Z, LIU H J, et al. Research progress on factors affecting ammonia volatilization and its mitigation measures in paddy fields[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(9): 1912-1919.
- [7] 赵蒙, 曾科, 姚元林, 等. 聚脲甲醛缓释肥对太湖稻麦轮作体系氮挥发及产量的影响[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 poly urea-formaldehyde on ammonia volatilization and yields under rice-wheat rotation in Tai-

- hu region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 55-63.
- [8] 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 W L, LIU B, HAN R M, 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.
- [9] LIU T Q, HUANG J F, CHAI K B, et al. Effects of N fertilizer sources and tillage practices on NH_3 volatilization, grain yield and N use efficiency of rice fields in central China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1-10.
- [10] 唐良梁, 李艳, 李恋卿, 等. 不同施氮量对稻田氨挥发的影响及阈值探究[J]. 土壤通报, 2015, 46(5): 1232-1239. TANG L L, LI Y, LI L Q, et al. Effect of different nitrogen application rate on paddy ammonia volatilization and nitrogen threshold[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(5): 1232-1239.
- [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): 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.
- [12] SUN H, DAN A, FENG Y, et al. Floating duckweed mitigated ammonia volatilization and increased grain yield and nitrogen use efficiency of rice in biochar amended paddy soils[J]. *Chemosphere*, 2019, 237: 124532.
- [13] 邓美华, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量和施氮方式对稻田氨挥发损失的影响[J]. 土壤, 2006, 38(3): 263-269. DENG M H, YIN B, ZHANG S L, et al. Effects of rate and method of N application on ammonia volatilization in paddy fields[J]. *Soils*, 2006, 38(3): 263-269.
- [14] 王淳, 周卫, 李祖章, 等. 不同施氮量下双季稻连作体系土壤氨挥发损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 349-358. WANG C, ZHOU W, LI Z Z, et al. Effects of different nitrogen application rates on ammonia volatilization from paddy fields under double-harvest rice system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(2): 349-358.
- [15] 邹刚, 袁嫚嫚, 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 G, YUAN M M, CAO Z W, 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.
- [16] 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.
- [17] 李波, 宫亮, 曲航, 等. 辽河三角洲稻区施氮水平对水稻生长发育及产量的影响[J]. 作物杂志, 2020(1): 173-178. LI B, GONG L, QU H, et al. Effects of nitrogen application rate on rice growth and yield in Liaohedelta[J]. *Crops*, 2020(1): 173-178.
- [18] 赵秉强, 张福锁, 廖宗文, 等. 我国新型肥料发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 536-545. ZHAO B Q, ZHANG F S, LIAO Z W, et al. Research on development strategies of fertilizer in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2004, 10(5): 536-545.
- [19] 赵秉强. 传统化肥增效改性提升产品性能与功能[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 1-7. ZHAO B Q. Modification of conventional fertilizers for enhanced property and function[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(1): 1-7.
- [20] 袁亮, 赵秉强, 林治安, 等. 增值尿素对小麦产量、氮肥利用率及肥料氮在土壤剖面中分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 620-628. YUAN L, ZHAO B Q, LIN Z A, et al. Effects of value-added urea on wheat yield and N use efficiency and the distribution of residual N in soil profiles[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(3): 620-628.
- [21] 张水勤, 袁亮, 李伟, 等. 腐植酸尿素对玉米产量及肥料氮去向的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1207-1214. ZHANG S Q, YUAN L, LI W, et al. Effects of humic acid urea on maize yield and the fate of fertilizer nitrogen[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(5): 1207-1214.
- [22] 黄继川, 彭智平, 涂玉婷, 等. 施用海藻酸复合肥料的双季稻产量和氮磷肥料效应[J]. 热带作物学报, 2020, 41(5): 859-867. HUANG J C, PENG Z P, TU Y T, et al. Yield, nitrogen and phosphorus nutrient effects of alginate compound fertilizers on double-cropping rice[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(5): 859-867.
- [23] 匡石滋, 邵雪花, 赖多, 等. 香蕉减量施肥与氨基酸水溶性肥配施效果研究[J]. 中国与土壤肥料, 2020(3): 134-140. KUANG S Z, SHAO X H, LAI D, et al. Study on the effect of banana reduced fertilizer and amino acids soluble fertilizer[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(3): 134-140.
- [24] 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.
- [25] 张力, 刘景辉, 李辉, 等. 氨基酸复合肥对盐碱土理化性状的改良效果[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 204-211. ZHANG L, LIU J H, LI H, et al. Effect of amino acid compound fertilizer on physical and chemical properties of saline-alkali soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(1): 204-211.
- [26] 张静, 冀建华, 李絮花, 等. 海藻酸增效剂对尿素在土壤中转化及损失的调控[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 228-233. ZHANG J, JI J H, LI X H, et al. Effects of alginate synergist on the conversion and loss of urea in soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(6): 228-233.
- [27] 葛明慧, 章力干, 齐永波, 等. 复合氨基酸增效剂与尿素配施对水稻幼苗生长及土壤氮素的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 122-129. GE M H, ZHANG L G, QI Y B, et al. Effects of combined application of compound amino acid synergist and urea on the growth of rice seedlings and soil nitrogen[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(6): 122-129.
- [28] 程林, 章力干, 张国漪, 等. 氨基酸增值尿素对水稻苗期生长及根

- 际微生物菌落的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(1):35-44. CHENG L, ZHANG L G, ZHANG G Y, et al. Effects of urea containing amino acid on rice seedling growth and rhizosphere microbial community[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(1): 35-44.
- [29] 蒋东, 章力干, 齐永波, 等. 增效复合肥减氮施用对稻田水氮素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6):1342-1350. JIANG D, ZHANG L G, QI Y B, et al. Effects of synergistic compound fertilizer combined with nitrogen reducing application on loss of nitrogen in paddy water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1342-1350.
- [30] 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氮挥发的影响[J]. 土壤, 2014, 46(4):623-629. HUANG J J, ZHU B, LIN C W, et al. Effects of nitrogen rate and field water nitrogen content on ammonia volatilization from paddy field in a purple soil hilly district[J]. *Soils*, 2014, 46(4):623-629.
- [31] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学出版社, 2000. LU R K. Methods for agricultural chemical analysis of soils[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [32] 周伟, 田玉华, 曹彦圣, 等. 两种氨挥发测定方法的比较研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(5):1090-1095. ZHOU W, TIAN Y H, CAO Y S, et al. A comparative study on two methods for determination of ammonia volatilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(5):1090-1095.
- [33] 夏永秋, 颜晓元. 太湖地区麦季协调农学、环境和经济效益的推荐施肥量[J]. 土壤学报, 2011, 48(6):1210-1218. XIA Y Q, YAN X Y. Nitrogen fertilization rate recommendation integrating agronomic, environmental and economic benefits for wheat season in the Taihu Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(6):1210-1218.
- [34] 敖玉琴, 张维, 田玉华, 等. 脲胺氮肥对太湖地区稻田氮挥发及氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2016, 48(2):248-253. AO Y Q, ZHANG W, TIAN Y H, et al. Effects of urea-ammonium mixed nitrogen fertilizer on ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in paddy field of Taihu Lake region[J]. *Soils*, 2016, 48(2):248-253.
- [35] 肖其亮, 朱坚, 彭华, 等. 稻田氮挥发损失及减排技术研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1):16-25. XIAO Q L, ZHU J, PENG H, et al. Ammonia volatilization loss and emission reduction measures in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1):16-25.
- [36] 李雪, 李荣荣, 侯亚红, 等. 氮肥施用对西藏青稞产量及氮挥发损失的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8):1006-1014. LI X, LI R R, HOU Y H, et al. Study on the effects of nitrogen fertilizer application on the yield and ammonia volatilization loss of highland barley in Tibet[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(8):1006-1014.
- [37] 孙凯宁, 袁亮, 李絮花, 等. 增值尿素对氨挥发和土壤脲酶活性的影响[J]. 山东农业科学, 2010(6):60-62, 71. SUN K N, YUAN L, LI X H, et al. Effects of value-added urea on ammonia volatilization and soil urease activity[J]. *Shandong Agricultural Science*, 2010(6): 60-62, 71.
- [38] 吕娜娜, 沈宗专, 王东升, 等. 施用氨基酸有机肥对黄瓜产量及土壤生物学性状的影响[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(3):456-464. LÜ N N, SHEN Z Z, WANG D S, et al. Effects of amino acid organic fertilizer on cucumber yield and soil biological characters[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2018, 41(3):456-464.
- [39] 刘超, 相立, 王森, 等. 土壤熏蒸剂棉隆加海藻菌肥对苹果连作土微生物及平邑甜茶生长的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(10):1995-2002. LIU C, XIANG L, WANG S, et al. Effects of dazomet fumigation and seaweed biologic fertilizer on the *Malushu pehensis* seedlings and soil microbial quantity under replant conditions[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, 43(10):1995-2002.
- [40] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氮挥发及影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(2):265-269. SONG Y S, FAN X H, LIN D X, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2):265-269.
- [41] 董桂春, 罗刚, 张家星, 等. 不同产量水平粳稻品种根系特征及其对产量构成因素的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2016, 37(1):51-57. DONG G C, LUO G, ZHANG J X, et al. Characteristics of root traits in conventional japonica rice varieties with different grain yield and its relation with yield components[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2016, 37(1):51-57.
- [42] 刘科, 叶昌, 刘少文, 等. 不同氮肥处理下机插杂交稻的根系动态生长特征研究[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(6):611-618. LIU K, YE C, LIU S W, et al. Dynamic growth characteristics of roots of mechanically-transplanted hybrid rice under different nitrogen treatments[J]. *China Journal Rice Science*, 2017, 31(6):611-618.
- [43] 李军, 袁亮, 赵秉强, 等. 腐植酸尿素对玉米生长及肥料氮利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2):524-530. LI J, YUAN L, ZHAO B Q, et al. Effect of urea containing humic acid on maize growth and ^{15}N utilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(2):524-530.
- [44] 张健, 李燕婷, 袁亮, 等. 氨基酸发酵尾液可促进樱桃番茄对水溶肥料氮素的吸收利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1):114-121. ZHANG J, LI Y T, YUAN L, et al. Tail liquid from amino acid fermentation could improve the uptake and utilization of water soluble fertilizer nitrogen by cherry tomato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1):114-121.
- [45] 许猛, 袁亮, 李伟, 等. 复合氨基酸肥料增效剂对新疆棉花生长、产量和养分利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(4):87-92. XU M, YUAN L, LI W, et al. Effects of the compound amino acid fertilizer synergist on growth and nutrients use of cotton in Xinjiang[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(4):87-92.
- [46] 李伟, 袁亮, 黄继川, 等. 腐植酸尿素对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 腐植酸, 2017(3):40-43. LI W, YUAN L, HUANG J C, et al. Effect of applying humic acid urea on rice yield and N use efficiency[J]. *Humic Acid*, 2017(3):40-43.