中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

长江中下游典型种植业氨排放特征与减排关键技术

夏永秋，王慎强，孙朋飞，陈小琴，沈健林，王　华，肖智华，李晓明，杨　广，颜晓元

Ammonia emission patterns of typical planting systems in the middle and lower reaches of the Yangtze River and key technologies for ammonia emission reduction

XIA Yongqiu, WANG Shenqiang, SUN Pengfei, CHEN Xiaoqin, SHEN Jianlin, WANG Hua, XIAO Zhihua, LI Xiaoming, YANG Guang, and YAN Xiaoyuan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12357/cjea.20210247

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国农业氨排放的时空演变趋势与减排潜力分析

Space–time evolution of China's agricultural ammonia emission and emission reduction potential

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(9): 1257–1268

重庆市规模化畜禽养殖氨排放特征及减排策略研究

Characteristics of ammonia emission from large–scale livestock/poultry breeding and its mitigation countermeasures in Chongqing

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(5): 769–777

黄淮和长江中下游冬麦区小麦品种(系)农艺性状及其聚类分析

Agronomic traits and cluster analysis of winter wheat varieties (lines) in the Huanghuai and the middle/lower reaches of the Yangtze River wheat areas

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(3): 395–404

华北平原农田温室气体排放与减排综述

Review on greenhouse gas emission and reduction in wheat–maize double cropping system in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(2): 167–174

家畜圈舍粪尿表层酸化对氨气排放的影响

Impact of surface acidification of manure on ammonia emission in animal housing

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(5): 677–685

不同施肥方式下砂姜黑土冬小麦–夏玉米轮作农田氨挥发特征及排放系数

Ammonia emission characteristics and emission coefficients of wheat and corn rotation cropland under different fertilization methods in lime concretion black soil

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(12): 1869–1879

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 12 月 第 29 卷 第 12 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Dec. 2021, 29(12): 1981−1989

DOI: 10.12357/cjea.20210247

夏永秋, 王慎强, 孙朋飞, 陈小琴, 沈健林, 王华, 肖智华, 李晓明, 杨广, 颜晓元. 长江中下游典型种植业氨排放特征与减排关键技术[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(12): 1981−1989

XIA Y Q, WANG S Q, SUN P F, CHEN X Q, SHEN J L, WANG H, XIAO Z H, LI X M, YANG G, YAN X Y. Ammonia emission patterns of typical planting systems in the middle and lower reaches of the Yangtze River and key technologies for ammonia emission reduction[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(12): 1981−1989

长江中下游典型种植业氨排放特征与减排关键技术*

夏永秋[1], 王慎强[1], 孙朋飞[1], 陈小琴[1], 沈健林[2], 王 华[3], 肖智华[3], 李晓明[1], 杨 广[1], 颜晓元[1]

(1. 江苏常熟农田生态系统国家野外观测研究站/中国科学院南京土壤研究所 南京 210008; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所 长沙 410125; 3. 湖南农业大学资源环境学院 长沙 410128)

摘 要: 长江中下游稻、菜、果种植业发达, 是氨挥发的主要场所, 迫切需要掌握其氨排放特征与减排关键技术。本文系统梳理了“十三五”国家重点研发计划项目课题“长江中下游种植业高效控氨减排关键技术研发”取得的主要进展, 并展望了“十四五”期间的研究重点。取得的主要研究结果包括: 1) 明确了典型稻菜果氨排放系数与特征, 稻田氨排放系数和变异最大, 平均为 14.2%, 露天蔬菜次之 (平均为 11.2%), 果树最低 (平均为 4.76%)。2) 以“减、抑、控、固”全链条氨减排思路, 提出稻田优化减氮技术、稻田深施控氨技术、稻田周丛生物成膜抑氨技术、果树大颗粒肥料深施与蔬菜新型缓释肥等减排技术, 实现了高效控氨减排的目标。“十四五”期间, 建议加强氨挥发损失的长期原位监测与模拟, 氨减排环境和经济效益核算, 以及操作简易、成本低廉的氨挥发减排技术研发。

关键词: 减排潜力; 氨减排全链条; 排放系数; 机具; 综合效益; 长江中下游

中图分类号: S158.5 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Ammonia emission patterns of typical planting systems in the middle and lower reaches of the Yangtze River and key technologies for ammonia emission reduction*

XIA Yongqiu[1], WANG Shenqiang[1], SUN Pengfei[1], CHEN Xiaoqin[1], SHEN Jianlin[2], WANG Hua[3], XIAO Zhihua[3], LI Xiaoming[1], YANG Guang[1], YAN Xiaoyuan[1]

(1. Changshu Agro-Ecological National Field Scientific Observation and Research Station / Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. College of Resources & Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Rice, vegetables, and fruit fields in the middle and lower reaches of the Yangtze River are the main sites of ammonia volatilization in the planting system of China. Therefore, there is an urgent need to understand the characteristics and key control technologies of ammonia emissions in the middle and lower reaches of the Yangtze River. This paper systematically reviewed the major progresses of the National Key Research and Development Project of the National 13th Five-Year Plan: “Research and Development of Key Technologies for Efficient Ammonia Control and Emission Reduction in Planting System in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River,” and foreseen the research focus during the 14th Five-Year period. The main research results included the follow-

* 国家重点基础研究发展计划项目 (2018YFC0213302) 资助
夏永秋, 研究方向为农田氮素循环与环境效应。E-mail: yqxia@issas.ac.cn
收稿日期: 2021-04-22 接受日期: 2021-07-10

* This study was supported by the National Basic Research Program of China (2018YFC0213302).
Corresponding author, XIA Yongqiu, E-mail: yqxia@issas.ac.cn
Received Apr. 22, 2021; accepted Jul. 10, 2021

ings: 1) The ammonia emission coefficient and characteristics of typical rice, and vegetables and fruit trees fields were identified, indicating that the paddy field had the largest ammonia emission coefficient and variation, averaging 14.2%, followed by open-air vegetables (averaging 11.2%), and fruit fields (averaging 4.76%). 2) After verifying the whole process of ammonia emission reduction, "reduction, retrain, control, and immobilization", we put forward technologies such as optimized nitrogen reduction technology in paddy fields, deep fertilizer applications for ammonia emission control technology in paddy fields, ammonia emission immobilization by periphyton technology in paddy fields, deep application of large-size granular fertilizer for fruit trees, and slow-release fertilizer for open-air vegetables. With these technologies, we achieved the goals of reducing ammonia volatilization. During the 14th Five-Year Plan period, the long-term in-situ monitoring and simulation of ammonia volatilization should be strengthened, ammonia emission reduction technologies should be evaluated environmentally and economically, and simple and low-cost ammonia volatilization emission reduction technology should be developed.

Keywords: Potential of emission reduction; Whole chain of ammonia emission reduction; Ammonia emission coefficient; Machines and tools; Comprehensive benefits; Middle and lower reaches of the Yangtze River

氮肥施入土壤后, 氮素的去向主要分为 3 种途径: 一部分被植物吸收利用, 另一部分以无机氮、有机氮和土壤固定态等形态残留在土壤中, 其余部分则以氨挥发、径流淋洗、氮气、氮氧化物气体等形式损失进入环境[1]。据统计, 我国种植业通过氨挥发造成的氮素损失可达施氮量的 9%~42%, 其中碳铵和尿素的氨挥发损失可分别达 49%~66% 和 29%~40%[2-3]。由此, 我国种植业大量氨排放引起国际社会的普遍关注。

长江中下游稻、菜、果是我国种植业氨挥发的主要场所。水稻 (*Oryza sativa*) 是南方主要粮食作物, 大田水稻一般采用穴栽的方式种植, 稻株吸收的养分绝大部分来自于根系周围。而我国农民习惯的水稻施肥仍然以基肥加后期追肥为主, 施肥方式大多直接撒于土壤表面。从而土壤供肥与水稻需肥不匹配、根区与肥区吻合度差, 导致施肥后田面水氨浓度大、稻田肥料利用率低和氨挥发损失大等问题[4]。随着人民生活水平的提高, 蔬菜、瓜果的需求量日益增加, 其肥料用量也呈直线增加趋势。据调查, 我国蔬菜化肥用量 1998 年为 604.51 万 t, 2014 年增加到 1291.36 万 t, 增加了 1.1 倍, 其化肥用量占农作物化肥总用量的比例从 1998 年的 13.38% 增加至 2014 年的 18.81%。水果化肥用量 1998 年为 531.55 万 t, 2014 年增加到 1223.42 万 t, 增加了 1.4 倍, 其化肥用量占比从 1998 年的 11.76% 增长到 2014 年的 17.82%[5]。其中, 我国南方地区蔬菜、瓜果化肥用量增长尤为突出。据第二次污染普查, 海南、浙江、福建、上海、广东等地蔬菜、瓜果播种面积占省 (区、市) 内农作物总播种面积比例已超过 30%。因此, 长江中下游稻、菜、果高强度的化肥施用导致了大量的氨挥发损失。

过量施肥、不合理的肥料类型和施肥方式是农田氨挥发量大的重要原因, 高效氨减排技术是国际研究热点[3]。欧美开展了大量养分管理研究, 实现农田氮肥减施, 从源头减少农田氨挥发[6]。通过肥料深施、缓控施肥、添加抑制剂和微生物菌剂等, 提高养分效率, 是降低氨挥发损失的重要途径[7]。鉴于我国氮肥品种单一, 多数为铵态氮肥, 60% 为表施, 南方水稻田极易发生氨挥发等情况, 欧美的经验不能直接借鉴[5]。尽管目前国内外围绕控氨减排技术取得不少进展, 但是各减排技术不规范、减排效果在不同区域差别大、经济成本较高, 集成效果不理想。在深入理解肥料氮在土壤中迁移转化规律与损失机制基础上, 参数化各减排技术、充分挖掘各单项氨减排技术、集成各项技术、开发潜在新技术, 是实现高效控氨减排的突破口。

十三五期间, 在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"的支持下, 课题 2"长江中下游种植业高效控氨减排关键技术研发"针对南方土壤硝化强度弱, 铵态氮存续长、氮肥表施排放严重等问题, 重点研究稻田优化减氮技术、稻田侧根深施技术及机具、周丛生物成膜抑氨技术、果树大颗粒肥料深施与蔬菜新型缓释肥等减排技术; 以长江中下游种植业"精准减氮、缓释抑氨、根施控氨、生物固铵"的"减、抑、控、固"全链条氨减排思路, 提出协调环境与经济的长江中下游主要种植业氨减排技术, 实现氨挥发减排 40% 的课题目标。本文将重点介绍该课题取得的主要研究进展。

1 长江中下游典型种植业氨排放特征

1.1 长江中下游典型稻菜果氨排放系数及变异

课题以长江中下游典型稻菜果种植模式为依托, 选取代表性区域稻菜果监测点位, 课题组在统一密闭式抽气法测定方法的基础上, 通过 3 年的田块试验, 结合已有文献报道, 明确了常规施肥下长江中下

游典型单季稻、双季稻、露天蔬菜、桃树 (*Amygdalus persica*) 氨排放系数，如图 1 所示。稻田氨排放系数和变异最大, 平均排放系数为 14.2%, 露天蔬菜次之 (平均为 11.2%), 果树最低 (平均为 4.76%)。

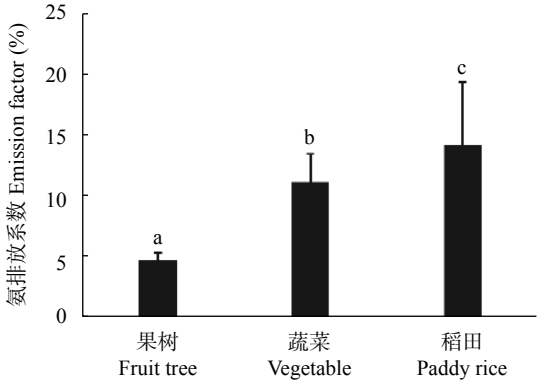

图 1　长江中下游典型稻菜果田氨排放系数及变异 (不同字母表示在 *P*<0.05 水平差异显著, 方差分析软件为 SPSS V19.0)

Fig. 1　Ammonia emission coefficients and variations of paddy rice, open-air vegetables, and peach tree in the middle and lower reaches of the Yangtze River (different letters indicate significant differences at *P*<0.05 level, variance analysis is conducted by SPSS V19.0)

与以往研究相比, 本研究所得的氨挥发系数基本一致。Lin 等[8]测得太湖地区氨挥发系数为 9.0%~17.6%。Ju 等[9]统计了太湖地区 26 块试验田的氮素损失结果, 发现稻田氨挥发系数为 11.6%±4.7%。田昌等[10]的研究表明, 湖南典型双季稻的氨挥发系数为 14.6%~28.7%。Shan 等[11]研究了太湖地区不同肥料处理下蔬菜氨挥发损失, 3 年 (2010—2012 年) 的大田试验结果表明, 露天蔬菜氨挥发损失系数为 11.51%~17.39%。Zhang 等[12]研究了桃树的氨挥发损失, 结果表明, 常规配施缓控施肥氨挥发损失系数为 6.28%。

1.2　长江中下游典型稻菜果氨排放特征

稻田氨挥发在施肥后各阶段均呈现出先增加后降低的趋势, 峰值出现在每次施肥后的 1~5 d, 氨挥发持续时间为 7~21 d, 之后与空白处理无显著差异。稻田氨挥发具有显著的日变化, 氨挥发主要发生在白天, 夜间基本没有氨挥发。气候条件 (温湿度等)、土壤因素及农业措施 (施肥量及类型、施肥方式、施肥时期等) 等通过影响田面水铵态氮浓度和 pH 等影响稻田氨挥发。

露天蔬菜地氨挥发均表现为施肥后显著上升、到达顶峰后缓慢下降的趋势。从氨挥发速率动态变化来看, 施肥后 1~8 d 是氨挥发的主要时间段, 此阶段各施肥处理氨挥发速率差异显著 (*P*<0.05), 氨挥发持续时间为 10~15 d, 此后与空白处理无显著差异。从季节变化来看, 夏季种植期 (8—9 月) 蔬菜地氨挥发通量显著高于其他季节。温度和土壤表层铵态氮含量是其主要影响因素。

果树由于树干庞大, 施肥以环施为主, 不同树干距离氨挥发规律一致, 都是施肥后 2~3 d 出现排放高峰, 持续时间为 5~10 d, 此后与无施肥处理无显著差异。但是不同树干距离氨挥发总量差异显著。在常规施肥下, 距离树干 45~90 cm 处氨挥发总量最大, 占总排放量的 45%; 其次为距离树干 90~135 cm 处, 氨挥发占总量的 40%; 距离树干 0~45 cm 氨挥发排放量仅占排放总量的 15%。

2　长江中下游典型种植业高效控氨减排关键技术

2.1　双季稻优化减氮技术

针对双季稻体系氨挥发量大、现有减排措施单一、减排措施效果不稳定等现状, 课题组在湖南长沙县金井镇双季稻试验基地开展不同氮肥剂量 (全量、减量)、不同施肥方式 (表施和深施) 和肥料类型 (尿素、尿素+脲酶抑制剂、微生物菌肥替代等) 及组合优化比选试验来实现双季稻稻田控氮减氨。

该技术体系 (专利申请号: 202010783702.7) 主要包括氮肥减量 30%、氮肥减量 30% 结合基肥深施、氮肥减量 30% 结合脲酶抑制剂、氮肥减量 30% 结合深施及脲酶抑制剂、有机无机配施 (微生物菌肥替代 40% 化学氮肥), 以及氮肥减量 30% 结合深施以及微生物菌肥替代 40% 化学氮肥等措施。研究结果表明 (图 2), 氮肥减量 30% 可以减少氨挥发 (减幅 43.0%), 但显著降低了晚稻季水稻产量。减氮深施技术可实现减排潜力为 65.7%, 尿素深施增加了其与土壤的接触, 更多的 NH_4^+被土壤胶体吸附, 限制了铵态氮由土壤向田面水的扩散, 从而减缓了尿素的水解, 降低了稻田 NH_3 损失[13]。就氮肥形态替代来说, 微生物菌肥替代 40% 化学氮肥 (有机无机肥配施) 可减少 35.6% 的氨排放。但微生物菌肥含氮量低, 替代氮肥所使用的菌肥量大, 相应增加了成本与劳动强度。相较常规表施, 减氮表施添加脲酶抑制剂 (配施 1% NBPT) 能达到极佳减排效果 (75.9%~81.7%)。脲酶抑制剂可以与尿素竞争脲酶的活性位点, 从而减少脲酶与尿素的结合, 延缓尿素的水解反应, 从而减少氨挥发, 同时一定程度上缓解了 N_2O 和 NO_x 的排放[14-15]。考虑不同减排技术的交互作用, 试验同时设置了减氮深施结合菌肥替代与脲酶抑制剂组合的比

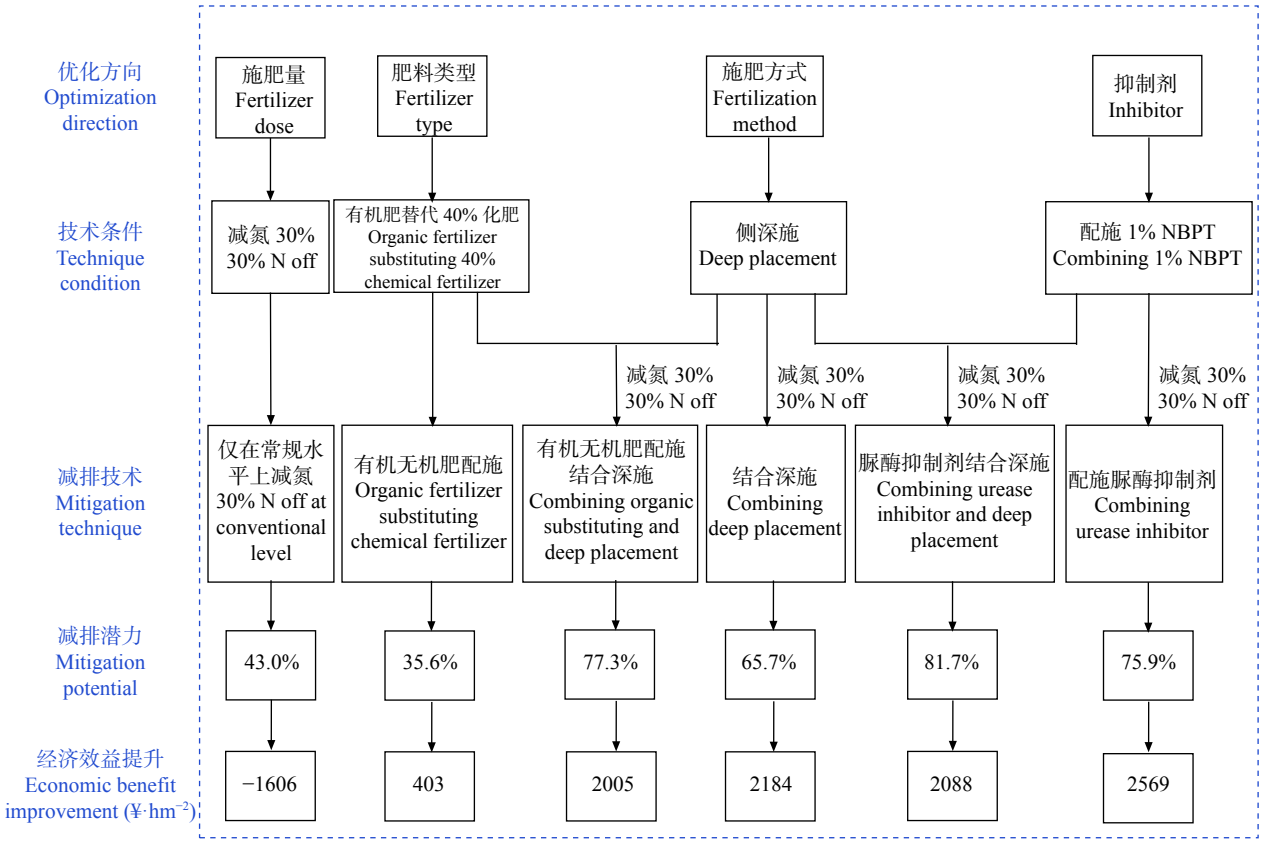

图 2　双季稻稻田优化减氮技术及其减排潜力和经济效益

Fig. 2　Optimized nitrogen reduction technology of double-cropping rice field and its mitigation potential of ammonia emission and economic benefit

选试验, 相较于常规处理, 组合技术显著延迟了氨挥发峰值出现时间, 降低氨挥发通量峰值, 减排效果最好, 减排潜力为 77.3%~81.7%。减氮配合深施或脲酶抑制剂或菌肥替代化肥及其组合, 均未降低水稻产量, 且提高了氮肥利用率。综合考虑深施成本、产量收益, 脲酶抑制剂表施可获得最佳经济收益。

2.2　稻田深施控氨技术

针对当前稻田肥料深施存在的条施肥料利用率不高、深度太浅土盖不住肥、深施机具效果不稳定等问题, 课题组分别通过室内和田间试验, 开展了稻田深施控氨及其机具研究。

通过盆栽试验, 比较了传统氮肥撒施、条施、不同点位深施对稻田氨挥发的影响。设置的处理为: SF (传统氮肥撒施)、R5 (减氮 30%+条施、深度 5 cm)、R10 (减氮 30%+条施、深度 10 cm)、B5 (减氮 30%+大颗粒球肥定点深施, 深度 5 cm)、B10 (减氮 30%+大颗粒球肥定点深施, 深度 10 cm); 施肥点为每两株水稻中间点, 隔行施肥。农田管理按照当地农民习惯管理。结果表明: 1) 与 SF 相比, R5、R10、B5 和 B10 处理的水稻田总氨挥发量分别减少 31.61%、44.04%、37.05% 和 46.63%, 氮肥减量深施能够有效抑制氨挥发, 且随着施肥深度的加深, 抑制效果加强。且在施肥深度为 5 cm 时, 肥球点施优于条施。2) 氨挥发累计损失量表现为 SF>R5>B5>R10>B10, B10 处理的氨挥发量最低。3) 与 SF 相比, 减氮深施处理的氮素回收率、氮素农艺利用效率和籽粒生产效率分别提高 27.89%~51.63%、33.13%~54.50% 和 34.03%~53.30%。4) 与 SF 相比, R5、R10、B5 没有显著减产, 而 B10 处理水稻增产 7.32%。B10 处理能达到稳产、增产和减少氨排放的目的。

在上述点位优化施肥的基础上, 在江苏省泰州市姜堰区梁徐镇进一步研究了肥料配方和水稻侧根施肥对氨挥发和水稻氮磷利用率的影响。试验设 7 个处理: 1) 不施氮肥, 磷钾肥撒施 (CK); 2) 氮磷钾肥撒施 (FFP); 3) 氮肥 (尿素) 一次穴施, 磷钾撒施 (RZF1); 4) 氮 (尿素) 磷钾肥一次穴施 (RZF2); 5) 氮 (氯化铵) 磷钾肥一次穴施 (RZF3); 6) 氮 (硫酸铵) 磷钾肥一次穴施 (RZF4)。结果表明, 根据土壤理化性质和养分状况及水稻品种的养分需求特点, 基于普通速效性肥料配置水稻专用肥, 在秧苗移栽的同时, 将水稻全生育期所需肥料通过人工或机械施用于偏离水稻秧苗根系 5 cm 左右、距地表 10 cm 左右的位置 (图 3),

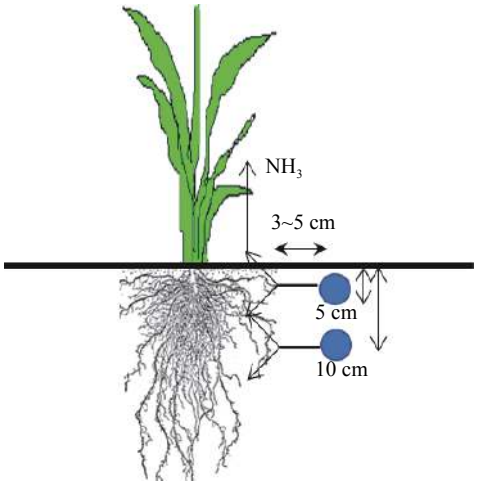

图 3　稻田肥球点位 (圆点) 优化

Fig. 3　Location optimization for ball fertilizer (dots) in paddy field

后期不再进行任何追肥, 可以保证产量甚至显著增产。氨挥发累积损失量可降为 1.3~5.2 kg(N)·hm^{-2}, 氨挥发损失率降为 0.6%~3.5%, 与不施氮肥的空白处理无显著差异, 氮肥利用率可达 44.8%~66.6% (专利申请号: 202010696951.2)。

目前水稻施肥机械多为气送式侧条深施作业方式, 仍存在肥料利用率低的问题。基于上述试验基础, 课题组研制了水稻插秧机的球肥精准侧深穴施装置 (专利申请号: 202110223156.6), 包括送肥机构、鹰嘴式施肥器与带动鹰嘴式施肥器升降的升降机构。具体施肥时, 肥料箱中的球肥落入球肥转盘上的容肥孔内, 容肥孔体积略大于一颗球肥, 每个容肥孔中可存放一颗球肥; 驱动电机带动球肥转盘转动, 当某一个容肥孔旋转至与过料孔对齐时, 该容肥孔内的球肥可经过料孔落入送肥管中, 再经送肥管落入闭合的左、右鹰嘴内。本装置具有结构简单紧凑、穴施精度高、施肥量一致性好、肥料利用率高的优点。

2.3　稻田周丛生物成膜抑氨技术

稻田系统土-水界面广泛存在周丛生物, 可能是影响稻田氨挥发的主要因素。周丛生物是丝状藻类通过黏附在土壤/沉积物表面生长, 与细菌、真菌和其他微生物形成聚集体[16], 常以藻类等自养微生物为优势物种[17]。此外, 周丛生物内部存在空隙和微孔, 这些空隙和微孔有助于营养物质和氧气的来回转移。周丛生物具有很强的环境适应性, 能显著影响水土环境的理化性质, 在调节氮素循环和能量流动方面发挥着重要作用[18]。现有研究表明, 周丛生物对氨挥发的影响存在直接抑制 (覆盖和吸附) 和间接促进 (提高 pH 和 NH_4^+浓度) 的双重作用[19]。因此, 如何最大限度发挥周丛生物对氮素的储存作用并同时减少藻类对氨挥发的促进作用, 有望成为抑制稻田氨挥发的新的技术突破口, 并有望形成一套新型稻田氨挥发抑制技术。

针对上述问题, 课题组使用包埋法制备出周丛生物诱导载体 (制备方法见专利 201911138867.2), 试验田中插秧后, 均匀撒施诱导载体, 用量为 45 kg·hm^{-2}; 穗肥施加后再次撒施诱导载体 30 kg·hm^{-2}; 对照田中不施加任何载体。比较不同水稻生长期内试验田与对照田中不同施肥期周丛生物氮储存能力及其诱导的氨挥发通量。结果表明, 诱导载体的使用能够快速诱导稻田周丛生物的生长, 人工诱导生长的周丛生物具有更大的氮富集能力, 表现出更强的抑制氨挥发潜势。

如表 1 所示, 人工诱导载体的使用能快速诱导稻田周丛生物的生长, 增加了稻田周丛生物的生物量, 具有更大的氮富集能力, 从而减少施肥后田面水 NH_4^+浓度, 抑制了氨挥发。载体诱导使得基肥、分蘖肥、穗肥后周丛生物中氮储量分别增加 0.44 kg·hm^{-2}、6.36 kg·hm^{-2} 和 2.23 kg·hm^{-2}。

表 1　不同施肥期稻田人工诱导的周丛生物氮储量

Table 1　Nitrogen storage in artificial induced and naturally growth periphyton in different fertilization periods of paddy field　　kg·hm^{-2}

处理 Treatment	基肥 Basal fertilizer	分蘖肥 Tillering fertilizer	穗肥 Panicle fertilizer
自然生长 Natural growth	1.11	4.46	2.37
载体诱导 Carrier induced	1.55	10.92	4.60

为了使周丛生物储存的氮释放出来供水稻利用, 同时降低田面水 pH, 达到释肥抑氨的效果, 试验通过施用特丁净来达到此目的。试验共施加 2 次特丁净, 间隔两天, 每次施加 0.1 kg·hm^{-2}, 对照田中不施加特丁净。结果表明, 特丁净的使用可显著抑制稻田氨挥发的发生, 其中基肥期、分蘖肥期以及穗肥期周丛生物诱导的氨挥发量 (处理组与对照组之差) 分别为 17.64 kg·hm^{-2}、4.29 kg·hm^{-2} 以及 0.11 kg·hm^{-2}, 特丁净的使用对基肥期氨挥发抑制效果最显著 (表 2)。利用特丁净将该时期氨挥发累计损失量降低了 71.3% [17.76 kg(N)·hm^{-2}]。

基于上述试验结果, 提出以抑藻控氨-快速成膜-抑藻释铵的“控-固-释”技术 (图 4)。该技术在基肥期推荐施加特丁净, 抑制藻类与水稻的养分竞争, 降低田面水 pH。在分蘖期与穗肥期, 周丛生物介导的氨挥发量均小于周丛生物导致的氮储存增加量, 因此

表 2 抑氨技术对稻田氨挥发累积量及损失率的影响

Table 2 Effects of ammonia inhibition technology on ammonia volatilization accumulation and ammonia volatilization loss rate in periphyton in paddy field

处理 Treatment	氨挥发排放量 NH_3 emission [kg(N)·hm^{-2}]				氨挥发损失率 NH_3 emission rate (%)
	基肥 Basal fertilizer	分蘖肥 Tillering fertilizer	穗肥 Panicle fertilizer	累计排放量 Total NH_3 flux	
对照田 Control field	24.75±1.05	10.92±0.07	0.21±0.03	35.88	14.9
试验田 Treatment field	7.11±0.53	6.63±0.07	0.10±0.25	13.84	5.8

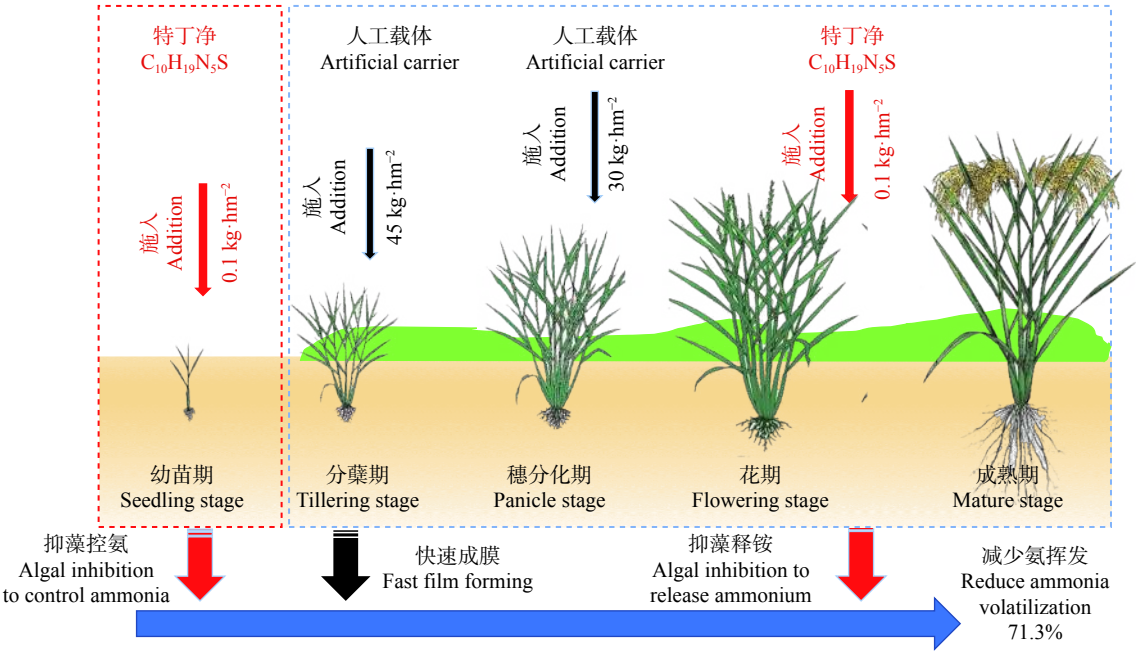

图 4 稻田周丛生物“控-固-释”技术

Fig. 4 Periphyton “retrain-immobilization-release” technology in paddy field

可在这两个时期诱导周丛生物的生长, 通过强化周丛生物对氮的储存, 抵消对氨挥发的影响。在花期再次施入特丁净, 将分蘖期与穗肥期周丛生物固定的铵态氮释放出来, 供水稻后期利用, 最终实现肥料高效利用与减少氨挥发排放的目的。

2.4 露天蔬菜新型缓释抑氨技术

太湖地区是我国经济最发达的地区之一, 该地区蔬菜种植氮肥投入量大, 复种指数高, 氨挥发损失量可占到施氮量的 24%。目前控氨减排技术主要是针对大田作物, 目前还没有专门针对蔬菜的控氨减排技术。基于此, 课题组以太湖地区大面积种植的‘上海青’(*Brassica chinensis*) 为供试蔬菜作物, 通过田间试验, 研究了不同氮肥品种和肥料用量对‘上海青’产量及氨挥发的影响, 比较了氨挥发造成的环境损失。

试验共设置 8 个处理, 其中: 200 kg(N)·hm^{-2} 条件下 4 个处理, 包括 1) 传统尿素 (N200)、2) 硝基复合肥 (N200A)、3) 脲酶抑制剂 (NBPT) 尿素 (N200B)、4) 有机肥部分替代 (尿素 : 有机肥=7 : 3)(N200C); 160 kg(N)·hm^{-2} 条件下 3 个处理, 包括 5) 减施 20% 氮尿素 (N160)、6) 减施 20% 氮金正大牌缓控释肥 (N160A)、7) 减施 20% 氮美农牌缓控释肥 (N160B); 1 个不施肥处理为 8) 不施肥 (CK)。通过对不同氮肥品种对露天蔬菜地氨挥发及其环境经济效益的监测与评价, 得出同时协调环境效益与经济效益, 且相对增产效果较优的肥料种类措施。在常规施氮条件下, 硝基复合肥处理具有较高的农学效益和较低的环境成本, N200A 蔬菜产量平均为 34.03 t·hm^{-2}, 与 N200 相比, 增加 25.13%, 同时 N200A 的环境损益最低, 为 140.63 元·hm^{-2}。在减氮 20% 条件下, 缓控施肥具有较高的农学效益和较低的环境成本, 与 N160 相比, N160A 和 N160B 处理‘上海青’产量均有增产效果 (15.04%~27.98%), 其中 N160B 的环境损失最低, 仅为 108.34 元 t·hm^{-2}, 与 N200 相比减少 88.16%。

4 个蔬菜种植季 N200、N200A、N200B、N200C、N160、N160A、N160B 和 CK 处理的氨挥发累积量变化范围分别为 1.80~44.86 kg·hm^{-2}、0.47~5.72 kg·hm^{-2}、

0.09~8.84 kg·hm^{-2}、1.55~5.49 kg·hm^{-2}、2.42~32.34 kg·hm^{-2}、2.09~13.16 kg·hm^{-2}、1.55~5.49 kg·hm^{-2} 和 0.18~3.87 kg·hm^{-2}。4 个种植季, 各施肥处理平均氨挥发系数分别为 11.22% (N200)、0.84% (N200A)、2.28% (N200B)、5.12% (N200C) 和 8.63% (N160)、3.19% (N160A)、0.90% (N160B), 常规尿素 (N200) 氨排放系数最高, 硝基复合肥处理 (N200A) 和美农缓控释肥处理 (N160B) 氨排放系数最小。

硝基复合肥处理增产率最高, 氨挥发减排量最多, 是最有效的露天蔬菜地氨减排技术。这是因为'上海青'是喜硝作物, 对硝基肥利用率高。同时, 由于施入的硝态氮不是氨挥发的底物, 因此氨挥发极少。但是, 由于安全因素, 市场上硝基肥较少, 我们进一步推荐了脲酶抑制剂和蔬菜专用缓控施肥措施, 这两种措施也能达到较好的减排效果和经济收益。由此, 我们提出如图 5 所示露天蔬菜新型缓释抑氨技术。

2.5　果树大颗粒肥深施控氨技术

由于水果经济效益比较高, 近年来太湖地区稻改果的面积越来越大, 而集约化果园的氨挥发损失与减排技术尚少见报道。基于此, 课题选择阳山水蜜桃特色果树为研究对象, 研制专用大颗粒肥料。针对水蜜桃氮、钾需求量较高的特点, 该肥料氮磷钾比例为 12∶11∶18, 采用活化腐殖酸、化学缓释肥以及功能微生物菌剂通过制造车间制作成直径 5 cm、高 3 cm 的圆柱形水蜜桃专用生物有机无机超大颗粒肥料, 重量约为 100 g·颗$^{-1}$。根据缓释肥的养分释放特点, 以等基肥施氮量和总追肥施氮量的大颗粒肥料在果树休眠期和开花期进行施肥。施入方式为围绕树冠滴水线 (距离树干 40~60 cm) 挖沟深施或钻孔深施, 深度为 10~20 cm。

试验共设置 5 个处理: 1) 对照不施化学氮肥 (CK); 2) 农民常规化肥氮用量 (T1); 3) −30% 化肥氮+深施 (T2); 4) 等 T2 施氮量的大颗粒肥料深施 8 cm (T3); 5) 等 T2 施氮量的大颗粒肥料深施 13 cm (T4)。根据不同施肥措施的水蜜桃园氨挥发消减效果和经济效益, 对太湖果园大颗粒肥料深施控氨技术的可行性进行评估。

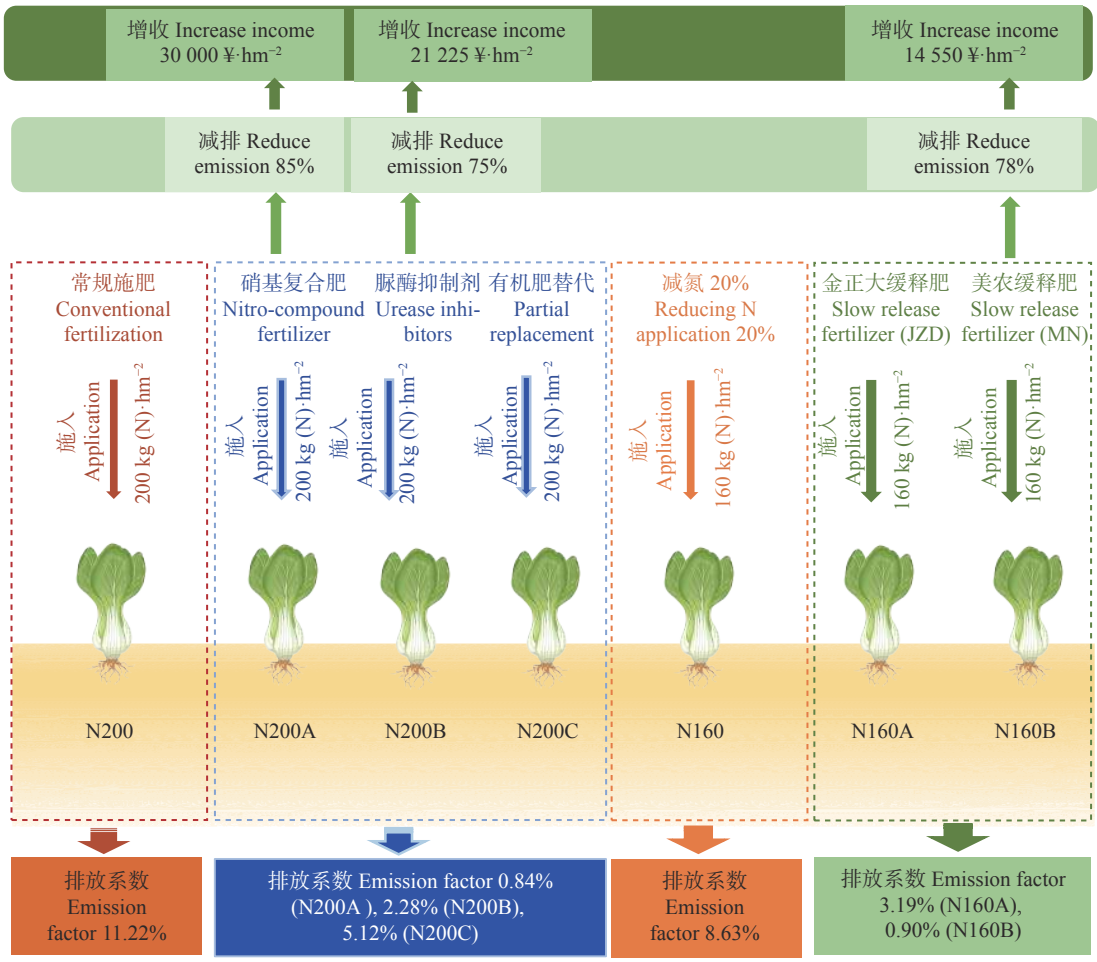

图 5　露天蔬菜新型缓释抑氨技术

Fig. 5　Slow-release fertilizers in reducing ammonia emission for open-air vegetables

与常规施肥相比, 大颗粒肥料深施 13 cm 效果最好, 增加了 20%~30% 的果实产量、18%~25% 的果实数量、果实构成中>250 g 的果实数量, 提高了果实吸氮量, 消减了 52.7%~63.7% 的氨挥发总量, 同时降低了 N_2O 排放及氮素径流造成的氮素损失。在经济效益上, 大颗粒肥料的施用虽然增加了经济成本, 但削减了两次追肥产生的人工成本, 增加了果实产量, 增加 45 000~60 000 元·hm^{-2} 的净收益。由此, 我们提出如图 6 所示果树大颗粒肥深施控氨技术: 在果树休眠期和开花期围绕树冠滴水线 (距离树干 40~60 cm) 挖沟深施或钻孔深施大颗粒专用肥, 深度为 10~20 cm。

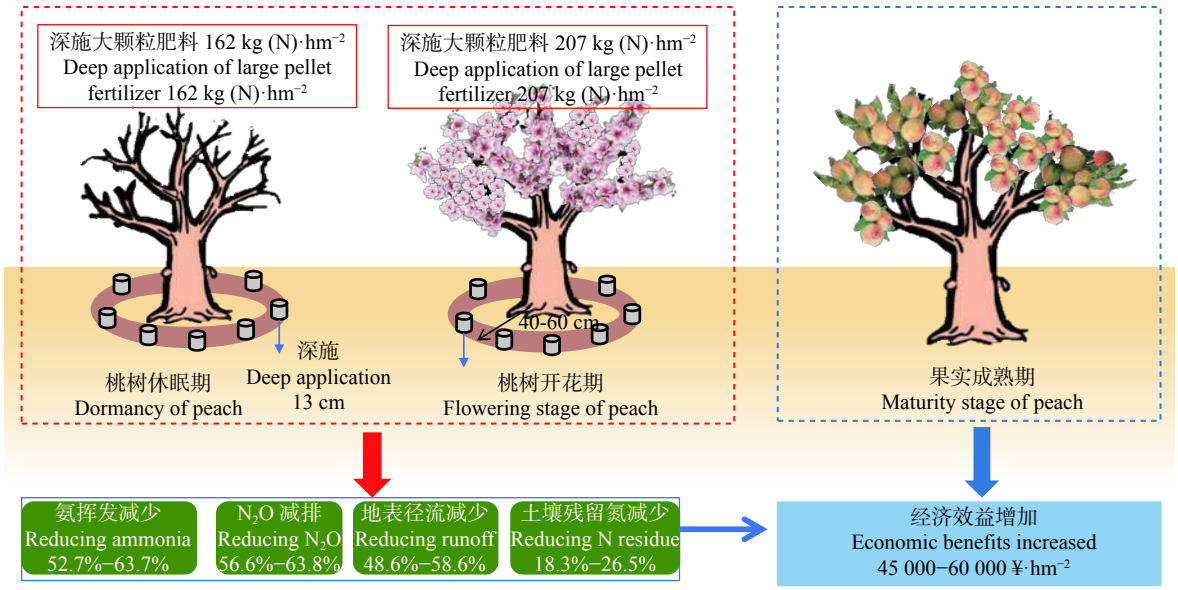

图 6 果树大颗粒肥深施控氨技术

Fig. 6 Deep application of large-size granular fertilizer in reducing ammonia emission for fruit trees

3 结论与展望

通过本课题研究, 主要取得以下 6 个方面的主要进展:

1) 长江中下游典型稻菜果氨排放特征: 在常规施肥下, 稻田氨排放系数和变异最大 (平均为 14.2%), 露天蔬菜次之 (平均为 11.2%), 果树最低 (平均为 4.76%)。

2) 双季稻氮肥减量技术: 脲酶抑制剂技术经济效果最优, 为 2569 元·hm^{-2}。脲酶抑制剂或者菌肥替代和深施组合技术氨挥发减排效果最佳, 氨挥发减排分别可达 81.7% 和 77.3%。

3) 水稻肥料侧根深施技术: 将所用肥料在距水稻根系 5 cm、土深 10 cm 处作基肥一次穴施, 既能满足作物肥料需求, 又最大程度减少氨挥发。

4) 稻田周丛生物成膜抑氨技术: 在基肥施加后使用特丁净抑制周丛生物中藻类生长减少分蘖期氨挥发的排放, 在分蘖肥及穗肥期通过人工载体促进周丛生物对氮的储存拦截, 在开花期再施加特丁净使周丛生物存储的氮释放出来, 供后期水稻利用, 最终实现肥料的高效利用与氨减排的目的。

5) 露天蔬菜缓释抑氨技术: 硝基复合肥具有氨挥发减排和增产双重最佳效果, 脲酶抑制剂和蔬菜专用缓控施肥措施, 也能达到较好的减排效果和经济收益。

6) 果树大颗粒肥深施控氨技术: 果树专用大颗粒肥料深施 13 cm 较常规减少 52.7%~63.7% 的氨挥发总量, 并实现增加 45 000~60 000 元·hm^{-2} 的净收益。

基于本课题的研究结果和尚未完全解决的该领域科学问题和技术难题, 建议“十四五”期间继续开展以下几方面研究:

1) 农田氨排放具有很强的时空变异, 需要加强氨挥发损失的长期原位监测, 明确典型作物类型、不同区域特征氨排放影响因素, 提出区域氨排放估算模型。

2) 加强氨减排环境和经济效益核算, 应用生命周期评价方法, 开展全链条综合减排技术研究。综合考虑氨挥发和温室气体 (CH_4 和 N_2O) 协同减排等因素, 有针对性地提出综合的氨挥发减排技术体系。

3) 加大机具研制力度, 研发兼具操作简易、成本低廉的氨挥发减排技术。综合利用农业有机废弃

物、新型缓控释肥料、选育氮高效品种, 充分挖掘氨挥发减排潜力。

参考文献 References

[1] 朱兆良. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992
ZHU Z L. Nitrogen in Soils of China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992

[2] ZHANG Y S, LUAN S J, CHEN L L, et al. Estimating the volatilization of ammonia from synthetic nitrogenous fertilizers used in China[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(3): 480−493

[3] 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

[4] 肖其亮, 朱坚, 彭华, 等. 稻田氨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

[5] 侯萌瑶, 张丽, 王知文, 等. 中国主要农作物化肥用量估算[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(4): 360−367
HOU M Y, ZHANG L, WANG Z W, et al. Estimation of fertilizer usage from main crops in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(4): 360−367

[6] MENCARONI M, DAL FERRO N, FURLANETTO J, et al. Identifying N fertilizer management strategies to reduce ammonia volatilization: Towards a site-specific approach[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 277: 111445

[7] SOARES J R, CANTARELLA H, MENEGALE M L D C. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 52: 82−89

[8] LIN D X, FAN X H, HU F, et al. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu Lake region, China[J]. Pedosphere, 2007, 17(5): 639−645

[9] JU X T, XING G X, CHEN X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. PNAS, 2009, 106(19): 8077

[10] 田昌, 周旋, 谢桂先, 等. 控释尿素减施对双季稻田氨挥发损失和氮肥利用率的影响[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(4): 387−397
TIAN C, ZHOU X, XIE G X, et al. Ammonia volatilization loss and nitrogen use efficiency in double-cropping rice field as affected by decreasing controlled-release urea application level[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2018, 32(4): 387−397

[11] SHAN L N, HE Y F, CHEN J, et al. Ammonia volatilization from a Chinese cabbage field under different nitrogen treatments in the Taihu Lake Basin, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, 38: 14−23

[12] ZHANG Y F, LUO J J, PENG F T, et al. Application of bag-controlled release fertilizer facilitated new root formation, delayed leaf, and root senescence in peach trees and improved nitrogen utilization efficiency[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 627313

[13] YAO Y L, ZHANG M, TIAN Y H, et al. Urea deep placement for minimizing NH_3 loss in an intensive rice cropping system[J]. Field Crops Research, 2018, 218: 254−266

[14] 刘学军, 沙志鹏, 宋宇, 等. 我国大气氨的排放特征、减排技术与政策建议[J]. 环境科学研究, 2021, 34(1): 149−157
LIU X J, SHA Z P, SONG Y, et al. China's atmospheric ammonia emission characteristics, mitigation options and policy recommendations[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(1): 149−157

[15] SHA Z P, MA X, LOICK N, et al. Nitrogen stabilizers mitigate reactive N and greenhouse gas emissions from an arable soil in North China Plain: Field and laboratory investigation[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 121025

[16] 葛顺峰, 彭玲, 任饴华, 等. 秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 366−373
GE S F, PENG L, REN Y H, et al. Effect of straw and biochar on soil bulk density, cation exchange capacity and nitrogen absorption in apple orchard soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(2): 366−373

[17] LARNED S T, KILROY C. Effects of *Didymosphenia geminata* removal on river macroinvertebrate communities[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2014, 29(3): 345−362

[18] 王梦凡, 俞映倞, 杨桢, 等. 不同表面分子膜材料抑制稻田氨挥发的效果及其作用途径[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1685−1695
WANG M F, YU Y L, YANG B, et al. Effect of different surface molecular membrane materials on inhibition of ammonia volatilization and the action pathways in paddy fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(8): 1685−1695

[19] HUANG J, LIU X M, LIU Y Q, et al. Non-linear response of ammonia volatilization to periphyton in paddy soils[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2021, DOI: 10.1029/2020jg005870