中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

界面阻隔材料对稻田产量、氮肥利用率和氨挥发排放的影响

王梦凡，俞映倞，杨棋，侯朋福，杨林章，薛利红，孙庆业

引用本文:
王梦凡, 俞映, 杨, 等. 界面阻隔材料对稻田产量、氮肥利用率和氨挥发排放的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 803–812.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200049

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国北方立体种养殖稻田氮素利用率研究

Nitrogen use efficiency in stereoscopic planting rice field in North China

中国生态农业学报. 2015(7): 812–822 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150125

养分专家系统推荐施肥对苏北地区水稻产量和肥料利用率的影响

Effect of nutrient expert recommendation fertilization on rice yield and fertilizer use in northern Jiangsu Province

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(1): 68–75 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190506

减氮配施控释尿素对水稻产量和氮肥利用的影响

Effect of combined application of controlled–release urea and conventional urea under reduced N rate on yield and N utilization efficiency of rice

中国生态农业学报. 2017, 25(6): 829–838 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160836

不同施肥方法对双季稻区水稻产量及氮素流失的影响

Effects of different fertilization modes on rice yield and nitrogen loss in paddy soils under double cropping rice

中国生态农业学报. 2017, 25(12): 1815–1822 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170420

秸秆还田对关中地区麦玉复种体系土壤氨排放的影响

Effect of straw returning on ammonia emissions from soil in a wheat–maize multiple cropping system in the Guanzhong region, China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 513–522 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190627

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 6 月 第 28 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2020, 28(6): 803−812

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200049

王梦凡, 俞映倞, 杨椇, 侯朋福, 杨林章, 薛利红, 孙庆业. 界面阻隔材料对稻田产量、氮肥利用率和氨挥发排放的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 803−812

WANG M F, YU Y L, YANG B, HOU P F, YANG L Z, XUE L H, SUN Q Y. Effects of interface barrier materials on rice yield, nitrogen use efficiency, and NH_3 volatilization[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(6): 803−812

界面阻隔材料对稻田产量、氮肥利用率和氨挥发排放的影响*

王梦凡[1,2], 俞映倞[1], 杨 椇[1], 侯朋福[1], 杨林章[1], 薛利红[1**], 孙庆业[2]

(1. 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室/江苏省农业科学院农业资源与环境研究所 南京 210014;
2. 安徽大学资源与环境工程学院 合肥 230601)

摘 要: 氨挥发是稻田氮素损失的一个重要途径, 有效控制稻田氨挥发对水稻增产减排具有重要意义。界面阻隔材料具有环境友好性和低成本的特点, 可以作为一种截然不同的氨挥发减排方法。本研究比较分析了 3 种界面阻隔材料对水稻产量、氮肥利用率和氨挥发排放的影响, 以期为水稻降本增效及减少环境污染提供技术支持。通过在稻田喷施表面分子膜材料和覆盖稻糠, 比较了两种表面分子膜材料——聚乳酸(PLA)和卵磷脂(LEC)及稻糠(RB)施用后水稻产量及其构成、稻田田面水 pH 和铵态氮及硝态氮含量动态、稻田氨挥发及氮肥吸收利用的变化特征。结果表明, 3 种界面阻隔材料均显著增加了水稻产量, 与常规施肥对照(CKU, 无添加界面阻隔材料)相比增幅分别为 13.0%(RB)、21.0%(PLA)和 24.1%(LEC)。增产主要是因为有效穗数的增加, 其中 RB 和 PLA 处理与 CKU 处理差异达显著水平; 每穗粒数和结实率均无显著差异。LEC 处理显著提高了氮肥利用率(19.0%), 但 RB 处理氮肥利用率显著低于 CKU。与 CKU 处理相比, 3 种界面阻隔材料的添加减少 12.3%~19.9%的氨挥发量。PLA 处理氨挥发减排效果最佳, 达显著水平; 其次为 LEC 处理。氨挥发减排可能与界面阻隔材料添加导致的田面水 pH、铵态氮浓度变化和土壤铵态氮含量的增加有关。与 CKU 处理相比, 所有处理均增加了田面水铵态氮浓度, 但同时降低了田面水 pH, 且在水稻分蘖期影响较明显。其中 PLA 处理还提高了土壤铵态氮含量。本研究表明, 稻田施加界面阻隔材料是稻田氨挥发减排以及增产增效的另一种可行的技术途径。

关键词: 界面阻隔材料; 表面分子膜; 稻糠; 稻田; 氮肥利用率; 氨挥发

中图分类号: S5-33 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Effects of interface barrier materials on rice yield, nitrogen use efficiency, and NH_3 volatilization*

WANG Mengfan[1,2], YU Yingliang[1], YANG Bei[1], HOU Pengfu[1], YANG Linzhang[1], XUE Lihong[1**], SUN Qingye[2]

(1. Key Lab of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. College of

* 国家重点研发计划课题(2016YFD0801101)和江苏省农业科技自主创新资金[CX(19)3646]资助
** 通信作者: 薛利红, 主要研究方向为农业面源污染治理。E-mail: njxuelihong@gmail.com
王梦凡, 主要研究方向为农业面源污染治理。E-mail: 15855966880@163.com
收稿日期: 2020-01-28 接受日期: 2020-03-31
* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0801101) and the Jiangsu Agricultural Science and Technology Innovation Fund [CX(19)3646].
** Corresponding author, E-mail: njxuelihong@gmail.com
Received Jan. 28, 2020; accepted Mar. 31, 2020

Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: NH_3 volatilization emissions cause significant nitrogen losses in rice fields. Effective control of NH_3 volatilization emissions in rice fields is critical to increase rice yield and nitrogen use efficiency. Interface barrier materials are environmental-friendly and low cost, making them suitable as a completely different method of reducing NH_3 volatilization. This study therefore explored the impacts of interface barrier materials on rice yield and nitrogen use efficiency, which may help to achieve rice yields with low costs and reduced environmental pollution. In this study, three interface barrier materials including two surface molecular film materials: polylactic acid (PLA) and lecithin (LEC) materials were formulated as surface molecular film materials and were sprayed evenly on the field after fertilization at the basal, tillering, and earing rice stages. Rice bran was also evenly spread over the field after fertilization on the same day. The rice yield and yield composition, pH and nitrogen concentration in paddy surface water, soil nitrogen content, nitrogen use efficiency and NH_3 volatilization were investigated. The experiment involved five treatments: CK (no N fertilizer), CKU (only urea), RB (rice bran + urea), PLA (polylactic acid + urea), and LEC (lecithin + urea). Fertilizer additions and field management practices remained the same across all treatments. The results showed that the RB, PLA and LEC treatments significantly increased rice yield compared to CKU treatment by 13.0%, 21.0%, and 24.1%, respectively. The nitrogen fertilizer utilization rate of LEC treatment significantly increased by 19.0% compared to the CKU. The RB treatment significantly increased yield by 13.0% compared to CKU, but did not significantly affect the nitrogen utilization rate. The addition of RB and PLA significantly increased the effective spike number in rice, but the LEC treatment produced no significant difference in this variable. The number of grains and the seed setting rate did not differ significantly under the CKU from their interface barrier materials added. The addition of interface barrier materials reduced NH_3 volatilization by 12.3%–19.9% in comparison with CKU, and the PLA treatment significantly reduced NH_3 volatilization by 19.9%, and performed best. It was followed by the LEC treatment with a reduction of 14.3%. The reductions in NH_3 volatilization may be related to the changes in surface water pH, NH_4^+-N concentration, and soil NH_4^+-N content caused by the addition of interface barrier materials. Compared to the CKU treatment, all treatments increased the NH_4^+-N concentration but lowered the pH in surface water, especially during the tillering stage. The soil NH_4^+-N content was also improved in the PLA treatment. This study shows that the application of interface barrier materials in rice fields is a feasible technical approach to reduce NH_3 volatilization and increase rice yield and nitrogen use efficiency.

Keywords: Interface barrier materials; Surface molecular film; Rice bran; Rice field; Nitrogen use efficiency; NH_3 volatilization

氮肥是作物生长的必要营养元素，为保证水稻高产，常被过量施用[1-2]。中国作为世界上最大的水稻(*Oryza sativa*)生产国，其种植面积约占世界水稻种植面积的 20%，却消耗了世界水稻氮肥总消费量的 37%[3]。目前我国稻田单季水稻氮肥用量平均为 180 kg·hm^{-2}，这一用量比世界稻田氮肥单位面积平均用量高 75%左右[4]。过量的氮输入不仅不会显著提高水稻产量，反而会导致氮肥利用率(NUE)低下(仅为 20%~40%)及严重的氮肥损失[5-6]。氨挥发作为氮肥损失中的最主要途径，氮损失率可高达施氮量的 40%~50%[7]。挥发到大气中的 NH_3 部分转化为 N_2O、NO 等温室气体，引起全球气候变暖等；还有很大一部分又通过干湿沉降回到地面，造成雨水酸化、水体富营养化等环境问题[8]。因此，减少稻田氨挥发对减少环境污染、增加稻田产量和提高氮肥利用率具有重要意义。

影响氨挥发的因素主要有气候条件(温度、光照和风速等)、土壤与田面水性质、施肥量和施肥方式以及作物覆盖情况等，其中田面水中游离的 NH_4^+ 转换为气态 NH_3 的界面控制和改变水土性质是减少氨挥发的一个重要途径[9]。

稻田界面阻隔材料多由高碳醇乳化后配制而成，是一种特制的液体乳剂，喷施于稻田表面后能迅速形成一层膜覆盖于水面，且成膜材料多具有无污染可降解的特性[10]。稻田界面阻隔材料可通过降低气液两相间的物质交换来降低 NH_3 挥发损失[11]。研究表明，界面阻隔材料能显著抑制水面氨挥发，且可逐渐自然降解，其降解成分还能为土壤微生物提供有机碳源，不会带来二次污染[12]，是一种低成本且环境友好的减少氨挥发的方法。史青山等[13]研究表明施用界面阻隔材料可增加水稻产量 8.0%~13.1%。何文寿等[14]的试验结果表明施用液态分子膜材料能显著减少棵间水分蒸发量，提高田面温度 0.4~0.6 ℃，同时可使水稻产量增加 6.5%~7.9%。然而，前人研究多基于界面阻隔材料对稻田产量和水分蒸发的影响，对于不同界面阻隔材料对氨挥发和氮素利用率的影响研究较少。

聚乳酸是以乳酸为原料聚合而成的聚酯，拥有

良好的透明性和一定的韧性、生物相容性及耐热等性能, 但具有一定的疏水性, 是一种典型的合成类可完全生物降解材料, 其降解产物无毒无害[15]。卵磷脂是精炼食用大豆油时得到的一种黏稠的含油很高的毛磷脂, 是一类天然的表面活性剂, 不溶于水, 易溶于多种有机溶剂, 形成反胶团[16]。磷脂作为乳化剂已在农业、食品、医药等行业得到广泛的应用[17]。聚乳酸和卵磷脂均有一定的成膜性能, 其应用于稻田中是否能减少氨挥发还有待于研究验证。此外, 在水稻有机生产中, 稻糠常被用来覆盖于水稻行间来防治稻田杂草, 且稻糠中含有丰富的营养, 还田后可为水稻提供各种养分, 减少化肥投入[18]。同时其也影响了田面水中氮浓度和 pH 的变化, 从而对氨挥发有所影响, 但是稻糠覆盖对氨挥发排放影响的研究少见报道。

因此, 在保证材料的低成本及环境友好性的条件下, 本研究选取聚乳酸、卵磷脂、稻糠 3 种材料, 研究其稻田添加后对水稻氮肥吸收利用、产量及构成和氨挥发损失的影响, 分析影响水稻产量、氮肥利用率和控制氨挥发的关键因素和控制效果, 以期为提高水稻产量和氮肥利用率、减少氨挥发提供另外一种技术途径。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本试验选择聚乳酸[$(C_3H_4O_2)_n$, PLA, 购自华创塑化]、卵磷脂(购自安耐吉化学)和稻糠(购自农家细稻糠)为供试材料。根据聚乳酸和卵磷脂的成膜特性, 加入一定比例的无水乙醇(C_2H_6O, 含量≥99.7%, 分析纯), 在 60 ℃下进行乳化后配制成相应的乳液, 无水乙醇与去离子水的比例为 2∶3。将稻糠材料过 20 目筛后, 放置于烘箱中去除稻糠水分烘干至恒重, 密封后待用。

1.2　试验地概况

试验于 2018 年 6 月 27 日至 11 月 13 日在中国南京江苏省农业科学院的长期水稻-小麦(*Triticum aestivum*)轮作农田基地进行(32°02′N, 118°51′E)。该地区属于典型的亚热带季风气候, 年平均气温为 16.2 ℃, 降水量为 1 106.5 mm。0~15 cm 表层土壤的基本理化特性如下: pH(1∶2.5, H_2O) 7.1, 有机质 12.4 $g\cdot kg^{-1}$, 总氮 1.8 $g\cdot kg^{-1}$, 总磷 0.7 $g\cdot kg^{-1}$, 速效氮 85.9 $mg\cdot kg^{-1}$, 速效磷 30.3 $mg\cdot kg^{-1}$, 速效钾 101.8 $mg\cdot kg^{-1}$。

1.3　试验设计

试验共设 5 个处理, 分别为: 不施氮肥(CK)、常规施肥(CKU), 在常规施肥基础上添加稻糠(RB)、添加聚乳酸(PLA)和添加卵磷脂(LEC)。每个处理 3 次重复, 共有 15 个小区, 随机排列, 小区面积为 4 m^2(2 m×2 m)。小区四周由水泥制成, 具有独立的灌溉口和排水口。水稻品种采用当地主栽品种‘南粳 46’。除不施氮肥处理外, 其余 4 个处理氮肥用量均为 210 $kg\cdot hm^{-2}$, 分别在 2018 年 6 月 27 日移栽后 1 d、13 d 和 45 d 施用, 比例为 3∶3∶4。基肥期、分蘖期和穗肥期分别为水稻 3 次施肥后一周。所有处理磷钾肥用量一致, 分别为 60 $kg\cdot hm^{-2}$ 磷肥和 80 $kg\cdot hm^{-2}$ 钾肥, 于基肥期一次性撒入田间。前期针对研究涉及的每个材料做了探索性预试验, 通过为期 15 d 的室内培养试验选择出了各材料适宜的添加量。稻糠添加量为 150 $g\cdot m^{-2}$, 于 3 次施肥后均匀撒于田面, 田面水稻糠的覆盖率为 98%以上; 聚乳酸和卵磷脂的添加量均为 8 $g\cdot m^{-2}$, 在 3 次施肥当天将配制完成的聚乳酸和卵磷脂溶液混合均匀, 每个小区 5 L, 分别于施肥后立即用喷壶均匀喷撒入田间。除烤田期 8 月 10—20 日外, 田间小区日常保持 3~5 cm 水层, 灌溉水为自来水, 田间液面日常保持平整, 无异物破环液面。水稻幼苗于 2018 年 6 月 27 日移栽(每小区为每行 8 株, 共 8 行 64 株), 于 2018 年 10 月 23 日进行收获。

1.4　测定指标与计算公式

1.4.1　植物样品的采集与测定

水稻植株于收获期采用 5 点法取样, 每个小区随机选取 5 株水稻将茎叶、穗和根部进行分离, 105 ℃下杀青 30 min, 然后 65 ℃下烘干。将烘干后的植物磨碎后, 采用 H_2SO_4-H_2O_2 法消煮后用凯氏定氮法测定各部位植株全氮含量。每个小区随机选取 35 株水稻植株进行水稻产量构成的测定。

将小区所有水稻自然风干后脱粒称重考种, 产量折算为标准含水量时的产量。氮肥利用率采用下式计算:

氮肥利用率(%)=[(施氮肥作物收获时地上部吸氮总量–未施氮肥作物收获时地上部吸氮总量)/化肥氮的投入量]×100　(1)

氮肥农学效率($kg\cdot kg^{-1}$)=(施氮肥区作物产量–无氮肥区作物产量)/施氮量　(2)

籽粒收获指数(HI)=水稻实际所得籽粒重量/地上部生物量　(3)

1.4.2　氨挥发的采集与测定

氨挥发的测定采用通气法[19], 捕获装置由聚氯乙烯硬质塑料管(PVC)制成, 内径为 10 cm, 高为 15 cm, 测定过程中将厚度为 1.5 cm、直径为 11 cm

的海绵均匀浸入磷酸甘油溶液(50 mL 磷酸+40 mL 丙三醇，定容至 1 000 mL)后，置于硬质塑料管中，其中下层 1 cm 塑料管埋入土壤中，上层海绵与管顶部平行。氨挥发的测定于水稻移栽施肥后开始，在 3 个施肥期期间，每天 8: 00—9: 00 测定。其余水稻生长周期时间每 3 d 换取 1 次海绵，直至收获。收集后的海绵带回实验室后，分别装入 500 mL 的塑料瓶中，加 200 mL 1 mol·L^{-1} 的 KCL 溶液，使海绵完全浸于其中，振荡 1 h 过滤。采用荷兰 Skalar 连续流动分析仪测定滤液中的铵态氮含量。氨挥发积累量为氨挥发日通量的总和，氨挥发通量的计算公式为:

$$氨挥发通量(kg·hm^{-2}·d^{-1})=M/A/D/100 \quad (4)$$

$$M=c\times v\times M_o \quad (5)$$

式中: M 为通气法单个装置平均每次测得的氨量(NH_4^+-N), g; A 为捕获装置的横截面积(cm^2); D 为每次连续捕获的天数, d; c 为 KCl 浸取液中 NH_4^+-N 含量, mol·L^{-1}; v 为 KCl 浸取液的体积，本试验取 0.2 L; M_o 为氨的摩尔质量，取 17 g·mol^{-1}。

1.4.3 田面水的采集与测定

田面水于水稻 3 个施肥期后 1 周内的每天上午采集，采集后的水样利用滤膜过滤后由荷兰 Skalar 连续流动分析仪测定铵态氮和硝态氮浓度。采集水样的同时使用德国 pH 3310 SET 2 型便携式 pH 计进行 pH 的测定。

1.4.4 土壤的采集与测定

稻田土壤于水稻生长的基肥期、分蘖肥、穗肥期施肥后的第 4 d 采集，采用交叉法随机用土钻采集 0~20 cm 的表层土壤，每个小区随机采集 2 个点，混匀后作为供试土壤。称取 6 g 鲜土装入 100 mL 的塑料瓶中，加入 50 mL 2 mol·L^{-1} 的 KCl 溶液进行浸提，在 25 ℃恒温、转速 180 r·min^{-1} 条件下震荡 1 h，过滤，采用荷兰 Skalar 连续流动分析仪测定滤液中的铵态氮和硝态氮含量。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2017 软件进行数据整理，SPSS 22.0 软件进行数据统计分析，Origin 8.0 和 Microsoft Excel 2017 作图。采用单因素方差分析(ANOVA)和最小显著性差异法(LSD)在 0.05 水平上比较不同处理的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 界面阻隔材料的成膜特性

PLA 和 LEC 界面阻隔材料的原子力显微镜图(Atomic Force Microscope, AFM)如图 1 所示。在三维形貌结构图中，颜色越浅，表示相对位置越高；而颜色越深，表示相对位置越低。可以看出, PLA 和 LEC 的成分分布有一定的区域性，但整体结构较为平整稳定，且膜表面较为光滑。表明不同界面阻隔材料乳化后均有一定的成膜结构，但不同成膜材料之间，成膜效果有所不同。

2.2 不同材料对水稻产量、产量构成和氮肥利用率的影响

不同处理的水稻产量及产量构成情况如表 1 所示。与 CKU 处理相比，稻糠(RB)、聚乳酸(PLA)和卵磷脂(LEC)处理均显著增加了水稻产量，增幅分别为 13.0%、21.0%和 24.1%，但 3 种添加材料之间无显著差异。不同材料的添加对水稻的产量构成情况也有一定的影响(表 1)。除 LEC 处理外，各处理的有效穗数均显著高于 CKU 处理，与 CKU 处理相比增加 13.2%~23.2%，其中 PLA 处理的有效穗数最高。各处理间的每穗粒数和结实率与 CKU 处理相比均无显著差异。对于水稻的千粒重来说，界面阻隔材料的添加降低了水稻的千粒重，但各处理与 CKU 相比无显著差异(除 PLA 处理外)。

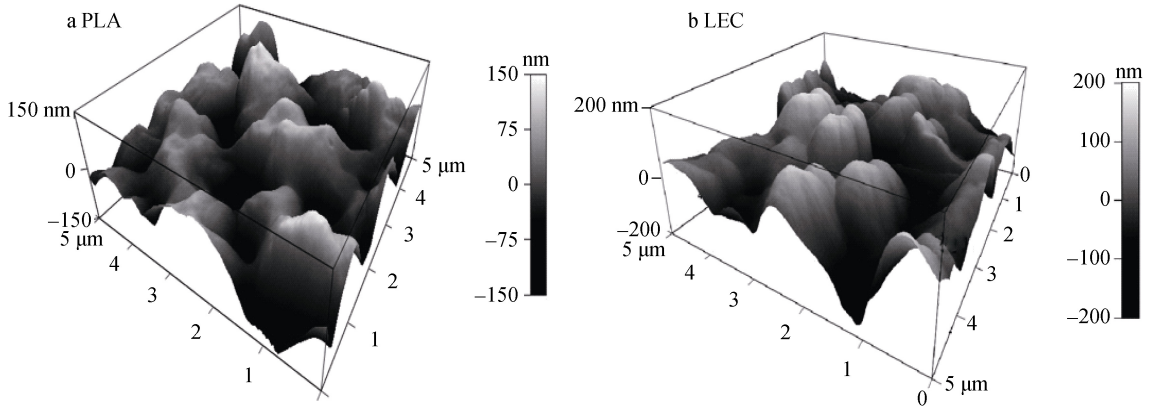

图 1 聚乳酸(PLA)和卵磷脂(LEC)界面阻隔材料成膜的原子力显微镜图(图 a 为 PLA 处理，图 b 为 LEC 处理)

Fig. 1 Atomic force microscope (AFM) image of polylactic acid (PLA) and lecithin (LEC) interface barrier film formation (the Fig. a is PLA treatment; the Fig. b is LEC treatment)

表 1　不同界面阻隔材料对水稻产量及其构成的影响

Table 1　Effects of different interface barrier materials on rice yield and its components

处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm^{-2})	有效穗数 Effective spike number (spikes·m^{-2})	每穗粒数 Grain numbers per spike	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)
CK	4 285.2±563.8c	187.1±14.3c	126.2±11.2a	83.8±0.04b	26.4±0.2a
CKU	8 716.4±485.8b	246.0±18.0b	144.0±10.1a	93.4±0.02a	26.1±0.8ab
RB	9 850.4±587.2a	289.9±28.3a	151.7±8.9a	93.6±0.01a	25.5±0.5ab
PLA	10 548.6±545.4a	303.2±12.5a	143.2±11.7a	94.3±0.01a	25.2±0.8b
LEC	10 820.9±903.3a	278.4±18.3ab	132.4±22.4a	92.2±0.02a	25.5±0.6ab

CK: 不施氮肥; CKU: 常规施肥; RB: 添加稻糠; PLA: 添加聚乳酸; LEC: 添加卵磷脂。同列不同小写字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。CK: no N fertilization; CKU: conventional fertilization without interface barrier materials; RB: conventional fertilization and rice bran application; PLA: conventional fertilization and polylactic acid application; LEC: conventional fertilization and lecithin application. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments (P < 0.05).

PLA 和 LEC 两种界面阻隔材料处理的地上部氮素吸收量均高于对照(CKU), 与对照相比分别增加 11.8%和 40.8%(表 2)。其中 LEC 处理达显著水平, 主要是显著提高了秸秆氮素吸收量。稻糠 RB 处理则显著降低了地上部的氮素吸收量。PLA 和 LEC 两种界面阻隔材料的添加均提高了氮肥利用率和氮肥农学效率, 尤其是 LEC 处理, 氮肥利用率提高至 40.3%, 显著高于对照。3 种添加材料的氮肥农学效率均显著高于 CKU 处理, 其中 PLA 处理的氮肥农学效率最高, 为 30.4%。RB 处理氮肥利用率和籽粒收获指数最低, 仅为 8.5%和 0.4, 均显著低于对照。

表 2　不同界面阻隔材料对水稻氮肥利用率、氮肥农学效率和收获指数的影响

Table 2　Nitrogen use efficiency, agronomic efficiency of nitrogen fertilizer, and harvest index of rice under different interface barrier material treatments

处理 Treatments	氮素吸收量 Nitrogen uptake (kg·hm^{-2})			氮肥利用率 Nitrogen use efficiency (%)	氮肥农学效率 Agronomic efficiency of nitrogen fertilizer (kg·kg^{-1})	收获指数 Harvest index
	籽粒 Grain	秸秆 Straw	地上部 Above ground			
CK	21.9±2.9c	31.4±4.6c	53.3±4.3c	—	—	0.5±0.06ab
CKU	43.1±2.4ab	54.9±7.8b	98.0±5.4b	21.2±2.6b	21.6±2.3b	0.6±0.06a
RB	27.4±19.9bc	43.8±3.4bc	71.2±19.7c	8.5±9.4c	27.0±0.7a	0.4±0.02b
PLA	54.7±3.1a	54.8±7.2b	109.5±10.1b	26.7±4.8b	30.4±2.6a	0.6±0.05a
LEC	57.6±4.2a	80.7±17.3a	137.9±15.2a	40.3±7.2a	27.2±6.4a	0.6±0.05a

CK: 不施氮肥; CKU: 常规施肥; RB: 添加稻糠; PLA: 添加聚乳酸; LEC: 添加卵磷脂。同列不同小写字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。CK: no N fertilization; CKU: conventional fertilization without interface barrier materials; RB: conventional fertilization and rice bran application; PLA: conventional fertilization and polylactic acid application; LEC: conventional fertilization and lecithin application. Differenct lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments (P < 0.05).

2.3　不同材料对水稻施肥期氨挥发通量的影响

有研究表明, 氨挥发主要发生在施肥后的 1 周内, 施肥期内的氨挥发积累量约占整个水稻周期的 86%[20], 因此氨挥发测定在 3 次施肥期后的 7 d 内。氨挥发日通量在施肥后 1 周内整体呈现逐渐下降趋势(图 2), 3 个施肥期的峰值均出现在施肥后 1~3 d 内, 但在施肥后 4~5 d 后会有一个上升趋势。施肥后前 4 d 各处理间氨挥发日通量差异较明显, 第 5~7 d(除分蘖期外)无明显差别。基肥期不同材料的添加增加了氨挥发通量, 尤其是稻糠处理。分蘖期 CKU 处理氨挥发日通量显著高于其他处理, 而 3 种添加材料处理之间无明显差别。

3 种材料均在不同程度上减少了稻田累积氨挥发量, PLA 处理的氨挥发累积量最低, 较 CKU 处理降低了 19.9%, LEC 和 RB 处理分别降低 14.2%和 12.3%, 但不同处理间差异不显著(表 3)。3 个时期中, 穗肥期的氨挥发累积量明显高于分蘖期和基肥期(除 CKU 处理外)。3 种材料添加处理均提高了基肥期的累积氨挥发量, 稻糠处理最为明显; 但显著降低了分蘖期的累积氨挥发量, 以 LEC 处理最低; 对穗肥期的氨挥发影响不大, 但 LEC 处理有所提高。

2.4　不同材料对田面水 NH_4^+-N 浓度和 pH 的影响

图 3 为 3 个施肥时期不同材料的田面水 NH_4^+-N 浓度变化。田面水 NH_4^+-N 浓度在施肥后逐渐下降并趋于稳定, 但在基肥期 4~5 d 和穗肥期第 3~4 d 内略微上升, 而后逐渐下降趋于平稳, 所有处理在施肥后 7 d 均下降至 2 mg·L^{-1} 以下。基肥期 RB、PLA 和 LEC 处理的田面水铵态氮浓度在施肥后 1 d

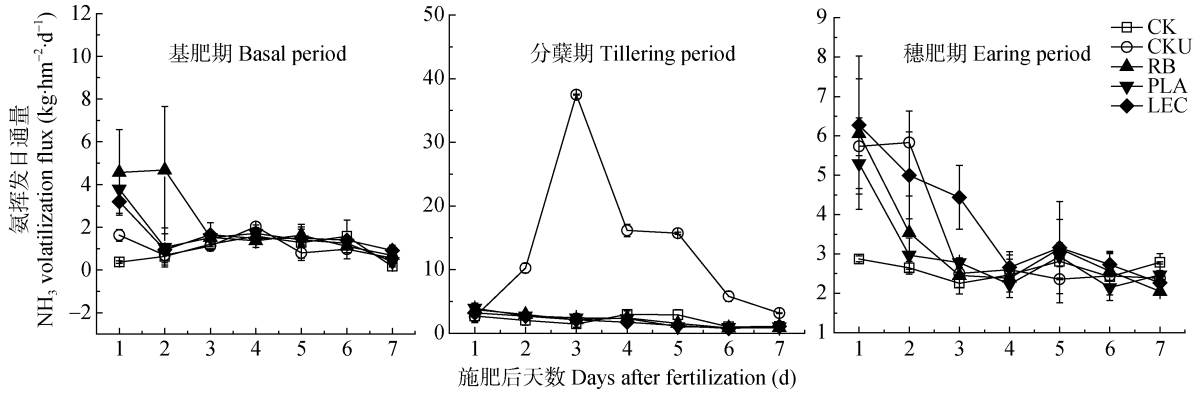

图 2　3 个肥期不同界面阻隔材料处理的稻田氨挥发日通量变化

Fig. 2　Daily flux of NH_3 volatilization of rice field under different interface barrier material treatments in three fertilizer periods

CK: 不施氮肥; CKU: 常规施肥; RB: 添加稻糠; PLA: 添加聚乳酸; LEC: 添加卵磷脂。CK: no N fertilization; CKU: conventional fertilization without interface barrier materials; RB: conventional fertilization and rice bran application; PLA: conventional fertilization and polylactic acid application; LEC: conventional fertilization and lecithin application.

表 3　不同界面阻隔材料对水稻不同施肥期氨挥发累积损失量的影响

Table 3　Effects of different interfacial barrier materials on the accumulated NH_3 volatilization at different fertilizer periods of rice　　$kg·hm^{-2}$

处理 Treatment	基肥期 Basal period	分蘖期 Tillering period	穗肥期 Earing period	累积挥发量 Accumulation
CK	6.3±1.7a	14.1±1.7b	18.3±0.4a	46.6±0.4a
CKU	5.6±0.1a	24.5±11.7a	23.9±11.5a	63.0±2.5a
RB	10.3±5.8a	14.4±0.7b	22.2±3.6a	55.2±2.4a
PLA	6.9±1.4a	14.4±0.8b	20.8±1.6a	50.5±4.2a
LEC	7.0±0.8a	12.8±1.2b	26.5±3.9a	54.0±5.1a

CK: 不施氮肥; CKU: 常规施肥; RB: 添加稻糠; PLA: 添加聚乳酸; LEC: 添加卵磷脂。同列不同小写字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。CK: no N fertilization; CKU: conventional fertilization without interface barrier materials; RB: conventional fertilization and rice bran application; PLA: conventional fertilization and polylactic acid application; LEC: conventional fertilization and lecithin application. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments (P < 0.05).

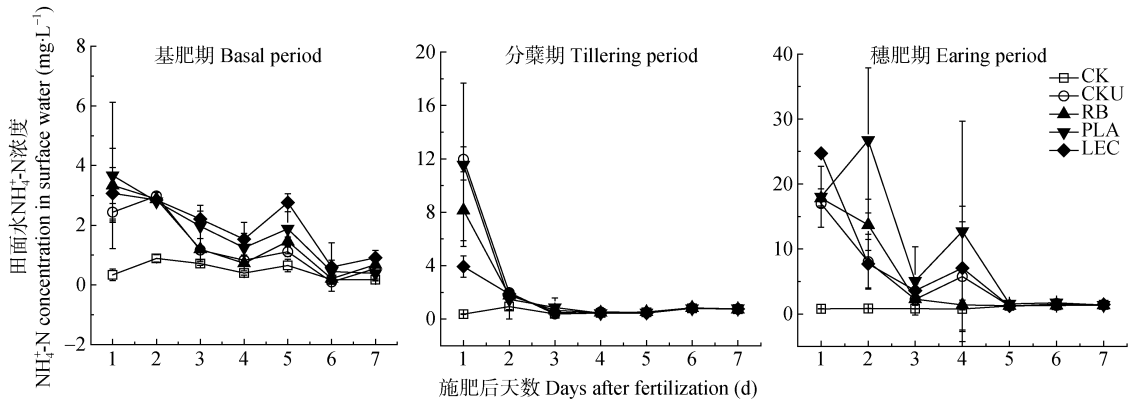

图 3　3 个肥期不同界面阻隔材料对稻田田面水 NH_4^+-N 浓度的影响

Fig. 3　Variation of NH_4^+-N concentration in surface water of rice field with different interface barrier materials in three fertilization periods

CK: 不施氮肥; CKU: 常规施肥; RB: 添加稻糠; PLA: 添加聚乳酸; LEC: 添加卵磷脂。CK: no N fertilization; CKU: conventional fertilization without interface barrier materials; RB: conventional fertilization and rice bran application; PLA: conventional fertilization and polylactic acid application; LEC: conventional fertilization and lecithin application.

内明显高于 CKU 处理，而后各处理间无明显差异。分蘖期 3 种材料的添加降低了施肥后 1 d 内的田面水氨氮峰值，第 2 d 后 NH_4^+-N 浓度就急剧下降至 1 $mg·L^{-1}$ 以下。穗肥期 PLA 处理的田面水铵态氮浓度在施肥后 1~4 d 内均高于 CKU 处理。

3 个施肥期田面水 pH 的范围和均值如表 4 所

表 4　3 个施肥期不同界面阻隔材料对稻田田面水 pH 的影响

Table 4　Effect of different interface barrier materials on pH of surface water of rice field in three fertilizer periods

处理 Treatment	基肥期 Basal period		分蘖期 Tillering period		穗肥期 Earing period	
	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean
CK	7.3~8.2	7.7±0.4a	7.5~8.4	8.0±0.4a	7.4~7.9	7.5±0.2a
CKU	6.3~8.5	7.6±0.7a	7.5~8.3	7.9±0.3a	7.3~7.8	7.5±0.2a
RB	7.3~8.6	7.8±0.4a	7.3~7.7	7.5±0.1b	6.9~7.5	7.2±0.2b
PLA	7.2~8.5	8.0±0.5a	7.6~8.2	7.9±0.2a	7.0~7.9	7.5±0.3a
LEC	7.3~8.6	7.9±0.5a	7.4~8.0	7.8±0.2ab	7.1~7.6	7.4±0.2a

CK：不施氮肥；CKU：常规施肥；RB：添加稻糠；PLA：添加聚乳酸；LEC：添加卵磷脂。同列不同小写字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。CK: no N fertilization; CKU: conventional fertilization without interface barrier materials; RB: conventional fertilization and rice bran application; PLA: conventional fertilization and polylactic acid application; LEC: conventional fertilization and lecithin application. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments (P < 0.05).

示。在基肥期，施加界面阻隔材料处理的田面水 pH 均值都略高于 CKU 处理，但不同处理间差异不显著。但在分蘖期和穗肥期，施加界面阻隔材料的田面水平均 pH 比 CKU 低 0.01~0.4 个单位，其中，RB 处理在分蘖期和穗肥期均最低。

不同处理氨挥发日通量与田面水 pH、氮浓度的相关性分析发现(表 5)，CKU 处理的氨挥发日通量与 pH 显著正相关(P<0.05)，与田面水 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度几乎没有相关性。而其他处理的氨挥发日通量均与田面水 NH_4^+-N 浓度呈极显著正相关(P<0.01)，与 pH 和田面水 NO_3^--N 浓度无显著相关性(表 5)。

2.5　不同材料对土壤矿质态氮含量的影响

图 4 为水稻分蘖期施肥后第 4 d 不同处理下土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量。由图可以看出，土壤 NH_4^+-N 含量均高于土壤中 NO_3^--N 含量。3 种界面阻隔材料添加均提高了土壤 NH_4^+-N 含量，其中 PLA 处理达到显著水平。各处理间的 NO_3^--N 含量无显著差异，其中 PLA 处理的 NO_3^--N 含量最低。

3　讨论

3.1　不同界面阻隔材料对水稻产量、产量构成和氮肥利用率的影响

水稻产量是植株物质积累、转运和分配的最终结果[21]。氮肥利用率通过反映作物对土壤中肥料氮的吸收与利用效果来体现[22]。许前欣等[11]研究表明，添加聚乳酸、卵磷脂和稻糠界面阻隔材料能增产 5.8%~6.8%，且提高氮肥利用率 6.5%~11.6%。尹斌等[23]研究也表明，界面阻隔材料的添加能增产 4%~12%。本研究结果表明，添加 PLA 和 LEC 界面阻隔材料能增加 13.0%~24.1% 的水稻产量和 5.5%~19.0%的氮肥利用率，这与前人[9]的研究结果一致，说明界面阻隔材料的施用可较好地满足作物生育后期生殖生长对氮素的需求。

本研究结果表明，3 种材料添加处理均显著增加了水稻的有效分蘖数，但对每穗粒数和结实率没有明显影响。水稻穗数增加，可能是因为材料添加后分蘖期田面水 NH_4^+-N 浓度降低，提高了分蘖期土壤氮含量。而 RB 处理的土壤矿质态氮含量低于 CKU

表 5　不同界面阻隔材料下稻田氨挥发日通量与田面水 pH、氮浓度的相关性

Table 5　Correlation between daily NH_3 volatilization flux and pH, nitrogen concentration in surface water of rice field under different treatments of interface barrier materials

处理 Treatment	pH	NH_4^+-N 浓度 NH_4^+-N concentration	NO_3^--N 浓度 NO_3^--N concentration
CK	0.022	0.367***	0.019
CKU	0.270*	−0.038	0.040
RB	0.069	0.434***	−0.123
PLA	0.037	0.607***	−0.171
LEC	−0.147	0.584***	−0.124

CK：不施氮肥；CKU：常规施肥；RB：添加稻糠；PLA：添加聚乳酸；LEC：添加卵磷脂。*和***分别表示 P<0.05 和 P<0.001。CK: no N fertilization; CKU: conventional fertilization without interface barrier materials; RB: conventional fertilization and rice bran application; PLA: conventional fertilization and polylactic acid application; LEC: conventional fertilization and lecithin application. * and *** represent significant correlation at P < 0.05 and P < 0.001, respectively.

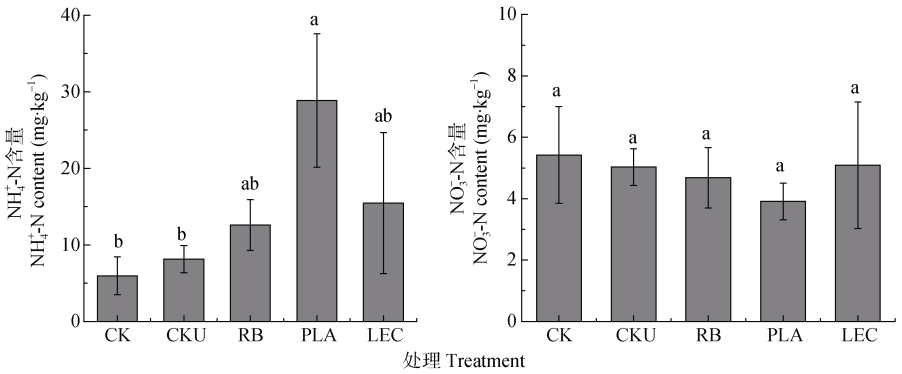

图 4 不同界面阻隔材料水稻分蘖期施肥 4 d 后的土壤铵态氮和硝态氮含量

Fig. 4 NH_4^+-N and NO_3^--N contents of rice field soil on 4 days after fertilization under different interface barrier material treatments in rice tillering period

CK: 不施氮肥; CKU: 常规施肥; RB: 添加稻糠; PLA: 添加聚乳酸; LEC: 添加卵磷脂。不同小写字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。CK: no N fertilization; CKU: conventional fertilization without interface barrier materials; RB: conventional fertilization and rice bran application; PLA: conventional fertilization and polylactic acid application; LEC: conventional fertilization and lecithin application. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P < 0.05).

处理, 不利于水稻的氮素吸收[24]。另一方面, PLA 和 LEC 处理的籽粒和秸秆氮素吸收量显著增加, 这可能是因为 PLA 和 LEC 材料的添加带来一定的易分解利用的碳源, 可能对土壤原有有机质起到了激发效应, 促进土壤有机氮的周转矿化, 这也是影响水稻产量的重要因素[25]。但 RB 处理的氮素吸收量低于 CKU 处理, 这可能是因为稻糠的添加虽有抑制杂草的作用, 但随着时间的增加会使水体处于厌氧状态。稻糠被分解后可能会产生有害气体如 H_2S、NH_3 等, 会毒害水稻根系, 影响根系吸收营养成分, 从而影响水稻的氮素吸收[26]。因此, 添加 PLA 界面阻隔材料一方面能增加水稻的有效分蘖数和粒数提高水稻籽粒品质; 另一方面能显著增加土壤矿质态氮含量, 有利于氮素吸收。LEC 界面阻隔材料主要通过增加氮素吸收量增加水稻产量。而 RB 处理会影响根系吸收养分, 影响水稻产量。

3.2 不同界面阻隔材料对稻田氨挥发的影响

稻田氨挥发是田面水中游离的 NH_4^+ 转换为气态 NH_3 后经水面挥发到空气中的过程, 与施氮量、田面水 NH_4^+-N 浓度、田面水 pH 等密切相关, 是稻田氮素损失的最主要途径之一[27-28]。本研究结果表明, 3 种添加材料均能降低累积氨挥发排放量, PLA 处理抑制氨挥发排放效果最佳, 与 CKU 处理相比降低了 19.9%。减少氨挥发排放的原因可能是表面分子膜材料喷洒于田面后, 在水表面迅速扩散并形成一层紧密稳定的液态分子膜。一方面通过物理阻隔作用, 形成物理屏障减少氨挥发排放[23]。另一方面通过抑制田间藻类等微生物的生长, 降低了田间 pH[24]。而 PLA 由于其具有良好的可塑性、耐热性和物理加工性能, 具有较好的成膜和阻隔性能, 抑制氨挥发排放的效果最好[29]。由不同施肥期界面阻隔材料的氨挥发日通量变化可以看出, 在施肥后 4~5 d 内氨挥发日通量有一个上升趋势, 而前人的研究表明氨挥发峰值为肥后 1~2 d 内, 而后逐渐降低。因此说明界面阻隔材料的添加会使氨挥发排放有一定的延缓过程[2,30]。氨挥发日通量在施肥后的 6~7 d 时, 各处理与 CKU 处理无明显差别。说明界面阻隔材料成膜随着时间推移, 阻隔材料因微生物作用和环境因素等原因会逐渐分解[31]。而 PLA 和 LEC 材料无毒、无刺激性, 具有优良的生物相容性, 可生物降解吸收, 在生物体内经过酶解, 可最终分解成水和二氧化碳, 不污染环境[32-33]。此外, 稻糠材料具有一定的肥田作用, 可以改善土壤结构, 提高土壤肥力[34]。因此, 本试验所用抑氨材料均具有可降解性, 且无毒无害。

本研究结果表明, 在水稻基肥期, 添加界面阻隔材料并没有显著降低氨挥发日通量, 这可能是由于在水稻幼苗时期, 田间覆盖率较低, 更有利于氨挥发的排放[25]。另一方面, 可能与材料添加后使稻田田面水中的 NH_4^+-N 浓度长时间维持在较高水平有关, 且田面水 pH 也有所升高, 而田面水 NH_4^+-N 浓度与氨挥发日通量显著正相关, pH 升高均有利于氨挥发排放。在分蘖期和穗肥期, 所有处理与 CKU 处理相比均能显著降低氨挥发日通量, 且田面水 pH 与 CKU 处理相比有所降低。说明物理阻隔材料在水稻生长后期抑制氨挥发排放的效果更佳。其原因在于: 一方面挡住了直射田面水的阳光, 抑制田面水 pH 的升高, 使界面阻隔材料的分解速率变慢, 停留时间变长[35]。另一方面水稻生长后期植株生长茂盛, 水稻对氮素的吸收同化能力强, 水稻叶面积指数也达到全生育期的最大值[36]。因此, 物理阻隔材料的

添加能在一定程度上抑制氨挥发排放, 主要作用于施肥后 1~5 d 内和水稻生长后期阶段, 且对氨挥发的排放有一个延缓过程。

稻田土壤氮素转化是一个复杂的过程[37], 除田面水 pH 和 NH_4^+-N 浓度外, 还与土壤 pH、微生物和 C/N 比等因素密切相关[38]。因此关于界面阻隔材料的添加对稻田产量和氨挥发的影响机制还待进一步的研究。

4　结论

1)RB、PLA 和 LEC 处理均显著增加了水稻穗数, 从而显著增加了水稻产量, 与 CKU 处理相比分别增产 13.0%、21.0%和 24.1%。PLA 和 LEC 处理均提高了植株地上部吸氮量和土壤 NH_4^+-N 含量从而提高氮肥利用率, 但 RB 处理显著降低了植株地上部吸氮量。

2)RB、PLA 和 LEC 处理均降低了施肥期的累积氨挥发量, 尤其是分蘖期的氨挥发量, PLA 处理的氨挥发减排效果最佳, 与对照相比降低了 19.9%; 其次为 LEC 和 RB 处理, 与对照相比分别降低 14.2%和 12.3%。界面阻隔材料的添加虽然增加了基肥期和穗肥期的田面水 NH_4^+-N 浓度, 但分蘖期田面水 NH_4^+-N 浓度有所下降, 并降低了分蘖期和穗肥期田面水 pH。

3)综合来说, PLA 处理不仅显著增加了水稻产量和氮肥利用率, 还有一定的降低氨挥发作用, 在稻田增产减排中具有潜在应用前景, 但后续关于界面阻隔材料对稻田产量和氨挥发的影响机制还需进一步研究。

参考文献 References

[1] SUN L Y, WU Z, MA Y C, et al. Ammonia volatilization and atmospheric N deposition following straw and urea application from a rice-wheat rotation in southeastern China[J]. Atmospheric Environment, 2018, 181: 97–105

[2] 彭玉净, 田玉华, 尹斌. 添加脲酶抑制剂 NBPT 对麦秆还田稻田氨挥发的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 19–23
PENG Y J, TIAN Y H, YIN B. Effects of NBPT urease inhibitor on ammonia volatilization in paddy fields with wheat straw application[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(1): 19–23

[3] 徐嘉翼, 牛世伟, 隋世江, 等. 聚天门冬氨酸/盐对水稻田面水氮素变化及养分利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1696–1703
XU J Y, NIU S W, SUI S J, et al. Effects of polyaspartic-acid/salt on nitrogen loss from paddy surface water and nutrients utilization[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(8): 1696–1703

[4] ZHANG Z J, CHU G, LIU L J, et al. Mid-season nitrogen application strategies for rice varieties differing in panicle size[J]. Field Crops Research, 2013, 150: 9–18

[5] HE T H, LIU D Y, YUAN J J, et al. A two years study on the combined effects of biochar and inhibitors on ammonia volatilization in an intensively managed rice field[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 264: 44–53

[6] 宋蝶, 陈新兵, 董洋阳, 等. 养分专家系统推荐施肥对苏北地区水稻产量和肥料利用率的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 68–75
SONG D, CHEN X B, DONG Y Y, et al. Effect of nutrient expert recommendation fertilization on rice yield and fertilizer use in northern Jiangsu Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(1): 68–75

[7] XUE L H, YU Y L, YANG L Z. Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(11): 115010

[8] GU B J, GE Y, REN Y, et al. Atmospheric reactive nitrogen in China: Sources, recent trends, and damage costs[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(17): 9420–9427

[9] XU J Z, PENG S, Z YANG S H, et al. Ammonia volatilization losses from a rice paddy with different irrigation and nitrogen managements[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104: 184–192

[10] YIN B, SHEN R F, ZHU Z L. Use of new water soluble surface film-forming material to reduce ammonia loss from water solution[J]. Pedosphere, 1996, 6(4): 329–334

[11] 许前欣, 赵振达, 李振云. 稻田水面分子膜对提高氮肥利用率的研究[J]. 农业环境报护, 1998, 17(5): 216–218
XU Q X, ZHAO Z D, LI Z Y. Study on the effect of paddy water surface molecular membrane on increasing utilization rate of nitrogen fertilizers[J]. Agro-Environmental Protection, 1998, 17(5): 216–218

[12] 李振声, 朱兆良, 章申, 等. 挖掘生物高效利用土壤养分潜力 保持土壤环境良性循环[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2004: 1–426
LI Z S, ZHU Z L, ZHANG S, et al. Exploiting the Potential of Bio-Efficient Utilization of Soil Nutrients and Maintaining a Virtuous Cycle of Soil Environment[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2004: 1–426

[13] 史青山, 杨国俊, 诸化斌, 等. 稻田抑氨膜在水稻上应用效果初探[J]. 上海农业科技, 2005, (3): 114–115
SHI Q S, YANG G J, ZHU H B, et al. Preliminary study on the application effect of ammonia suppression film in rice field on rice[J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2005, (3): 114–115

[14] 何文寿, 孙权, 朱兆良, 等. 水稻田喷施液态分子膜及节氮节水技术研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(S1): 191–199
HE W S, SUN Q, ZHU Z L, et al. Study on spraying film of liquid molecular in paddy field with techniques of both nitrogen fertilizer and water saving[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(S1): 191–199

[15] 唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 等. 聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究[J]. 环境科学, 2014, 35(6): 2236–2240
TANG D Q, WANG J, ZHENG T L, et al. Effect of PLA/starch slow-release carbon source on biological denitrification[J]. Environmental Science, 2014, 35(6): 2236–2240

[16] 赵淑敏, 谭红梅, 葛红霞, 等. 大豆磷脂及其应用[J]. 大豆通报, 2006, (1): 39–42
ZHAO S M, TAN H M, GE H X, et al. Application of phosphatide in soybean[J]. Soybean Bulletin, 2006, (1): 39–42

[17] 蔡卓, 程龙军, 江彩英, 等. 大豆卵磷脂的研究现状[J]. 化工技术与开发, 2008, 37(9): 34–37
CAI Z, CHENG L J, JIANG C Y, et al. Recent development in soybean lecithin[J]. Technology & Development of

Chemical Industry, 2008, 37(9): 34–37

[18] 宋庆乃, 蒲淑英, 于佩锋. 稻糠稻作, 农业生产的一大飞跃——日本水田除草和水稻施肥的新动向(四)[J]. 中国稻米, 2002, (4): 40–41
SONG Q N, PU S Y, YU P F. Rice bran rice, a big leap in agricultural production — New trends in weeding and fertilizing rice in Japan's paddy fields (4)[J]. China Rice, 2002, (4): 40–41

[19] 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, 8(2): 205–209
WANG Z H, LIU X J, JU X T, et al. Field *in situ* determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 205–209

[20] 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 等. 两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3746–3752
ZHOU Y L, HOU P F, LI G H, et al. Effect of two soil synergists on ammonia volatilization in paddy fields[J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3746–3752

[21] 聂江文, 王幼娟, 吴邦魁, 等. 施氮对冬种紫云英不还田条件下稻田土壤微生物数量与结构的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(12): 3617–3624
NIE J W, WANG Y J, WU B K, et al. Effects of nitrogen application on the abundance and community of soil microbes in paddy field under the condition of no returning Chinese milk vetch[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(12): 3617–3624

[22] 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

[23] 尹斌, 朱兆良. 稻田氮素损失与实用控制技术——液态分子膜[C]//氮素循环与农业和环境学术研讨会论文(摘要)集. 厦门: 中国土壤协会, 2001: 86–87
YIN B, ZHU Z L. Nitrogen loss in paddy fields and practical control technology — liquid molecular film[C]//Symposium on Nitrogen Cycle and Agriculture and Environment. Xiamen: Soil Science Society of China, 2001: 86–87

[24] CHATTERJEE D, MOHANTY S, GURU P K, et al. Comparative assessment of urea briquette applicators on greenhouse gas emission, nitrogen loss and soil enzymatic activities in tropical lowland rice[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 252: 178–190

[25] YAO H Y, HUANG S, QIU Q F, et al. Effects of different fertilizers on the abundance and community structure of ammonia oxidizers in a yellow clay soil[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 100(15): 6815–6826

[26] 顾大路, 黄秀华, 王红军. 稻田施稻糠的除草效果及对水稻生育的影响[J]. 江苏农业科学, 2006, (1): 64–65
GU D L, HUANG X H, WANG H J. Effects of chaff on weeds in rice field and growth of rice[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2006, (1): 64–65

[27] 徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 等. 生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3963–3970
XU S S, HOU P F, FAN L H, et al. Effect of straw incorporation and domestic sewage irrigation on ammonia volatilization from paddy fields[J]. Environmental Science, 2016, 37(10): 3963–3970

[28] HUDA A, GAIHRE Y K, ISLAM M R, et al. Floodwater ammonium, nitrogen use efficiency and rice yields with fertilizer deep placement and alternate wetting and drying under triple rice cropping systems[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016, 104(1): 53–66

[29] 蒋金勇, 唐海兵, 栾东磊, 等. 聚乳酸/聚丁二酸-己二酸丁二酯可降解抗氧化薄膜对鲜切西兰花的保鲜效果[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 274–280
JIANG J Y, TANG H B, LUAN D L, et al. Effect of polylactic acid/poly (butylene succinate-co-adipate) biodegradable film containing different essential oils in preserving quality and extending shelf-life of fresh-cut broccoli[J]. Food Science, 2019, 40(13): 274–280

[30] 张翀, 韩晓阳, 李雪倩, 等. 川中丘陵区紫色土冬小麦/夏玉米轮作氨挥发研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11): 1359–1366
ZHANG C, HAN X Y, LI X Q, et al. Ammonia volatilization in winter wheat/summer maize rotation system of purple soil in hilly area of Central Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(11): 1359–1366

[31] 吴邦信, 陈天祥, 孙海健. 单分子膜水面阻蒸发技术的绿色化学[J]. 环境保护, 2003, (11): 11–13
WU B X, CHEN T X, SUN H J. Green chemistry of water surface obstruction evaporation technologies with monomolecular films[J]. Environmental Protection, 2003, (11): 11–13

[32] 江镇海. 聚乳酸的应用与市场前景[J]. 上海化工, 2010, 35(2): 37–38
JIANG Z H. Application and market prospect of polylactic acid[J]. Shanghai Chemical Industry, 2010, 35(2): 37–38

[33] TRZASKOWSKA P A, PONIATOWSKA A, TRZASKOWSKI M, et al. Lecithin suspensions for electrophoretic deposition on stainless steel coatings[J]. Materials Science and Engineering: C, 2018, 93: 134–144

[34] 陈先茂, 秦厚国, 彭春瑞, 等. 稻糠替代化学除草剂控制早稻田杂草的试验初报[J]. 中国稻米, 2010, 16(3): 39–40
CHEN X M, QIN H G, PENG C R, et al. Primary studies on use rice bran instead of herbicides to control the weeds in the early paddy rice field[J]. China Rice, 2010, 16(3): 39–40

[35] 田光明, 蔡祖聪, 曹金留, 等. 镇江丘陵区稻田化肥氮的氨挥发及其影响因素[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 324–332
TIAN G M, CAI Z C, CAO J L, et al. Ammonia volatilization from paddy field and its affecting factors in Zhenjiang hilly region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(3): 324–332

[36] 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 S, CUI Y L, HAN H H, et al. Variation of ammonia volatilization in paddy field under different irrigation and fertilization systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(3): 1–5

[37] 王强, 姜丽娜, 潘建清, 等. 一次性施肥稻田田面水氮素变化特征和流失风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 168–175
WANG Q, JIANG L N, PAN J Q, et al. Dynamic variation and runoff loss evaluation of nitrogen in the surface water of paddy fields as affected by single basal fertilizer application[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(1): 168–175

[38] 胡春胜, 张玉铭, 秦树平, 等. 华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1501–1514
HU C S, ZHANG Y M, QIN S P, et al. Nitrogen processes and related environmental effects on agro-ecosystem in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1501–1514