

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

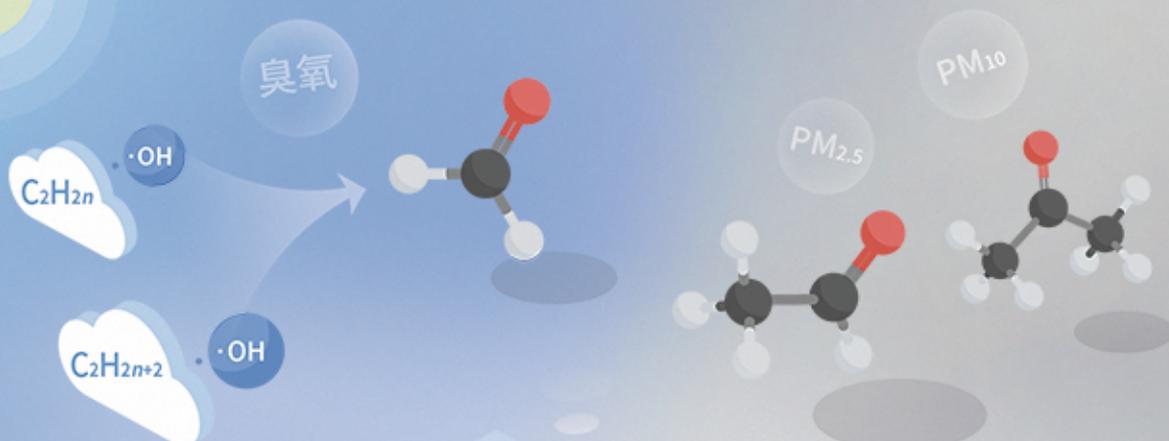
# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例  
胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年1月

第42卷 第1期

Vol.42 No.1

目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测 ..... 顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆 (1)

基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析 ..... 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨 (9)

中原城市群典型城市秋冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及溯源 ..... 苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文 (19)

沈阳市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子污染特征及来源解析 ..... 王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀 (30)

保定地区 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素的污染特征及健康风险评价 ..... 雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐 (38)

基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析: 以南京市观测为例 ..... 胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东 (45)

2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源 ..... 高璟璇, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐逸, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁 (55)

柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 ..... 刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽 (65)

天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析 ..... 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂 (75)

2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区 ..... 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李浩, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林 (88)

2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势 ..... 赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (97)

大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析 ..... 李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城 (106)

叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比 ..... 岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国 (114)

东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟 ..... 张冰, 张芊芊, 应光国 (127)

松花江哈尔滨段及阿什河抗生素的分布规律与生态风险评估 ..... 杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨 (136)

东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估 ..... 李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮 (147)

河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估 ..... 周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫 (159)

无锡-常州地下水水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估 ..... 王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波 (166)

清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估 ..... 刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛 (175)

会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险 ..... 李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹滢 (184)

三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化 ..... 陈昭宇, 李思悦 (195)

不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布 ..... 岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花 (204)

基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险 ..... 张红娜, 崔娜, 申红妙 (211)

分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制 ..... 闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜 (221)

丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素 ..... 郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进 (234)

太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应 ..... 郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆 (242)

石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量 ..... 邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王盛燕, 王子芳 (251)

前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响 ..... 陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪 (263)

浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制 ..... 陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然 (274)

填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响 ..... 刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励 (283)

FeMnNi-LDHs 对水中 As(III) 的吸附性能与机制 ..... 廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂 (293)

硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制 ..... 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌 (305)

某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征 ..... 颜亚玮, 於驰晟, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远 (315)

不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替 ..... 李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送 (323)

天然富硒土地划定的富硒阈值 ..... 王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃 (333)

融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测 ..... 高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴俊杰, 刘楚藩 (343)

南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟 ..... 戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平 (353)

闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险 ..... 林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌 (359)

干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响 ..... 杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵 (368)

三元复合调理剂对土壤镉吸附形态和糙米镉累积的调控效应 ..... 蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宇, 周航, 廖柏寒 (378)

风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响 ..... 郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星 (386)

不同施肥措施对水稻土壤微生物抗性的影响 ..... 郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷 (394)

氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性 ..... 张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希 (403)

黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征 ..... 钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (411)

生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制 ..... 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺 (422)

植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响 ..... 张瑞海, 宋振, 付卫东, 鄂玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良 (433)

黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应 ..... 史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太 (443)

等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响 ..... 何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华 (450)

秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响 ..... 孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔 (459)

生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响 ..... 杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明 (467)

氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响 ..... 俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红 (477)

微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累 ..... 赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇 (485)

无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟 ..... 阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞 (492)

基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析 ..... 孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超 (501)

《环境科学》征订启事(8) 《环境科学》征稿简则(220) 信息(233, 352, 421)

# 氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响

俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红\*

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014)

**摘要:** 氨挥发排放是稻田系统氮损失的主要途径. 现有技术多以调控氮肥施用为削减氨挥发排放的技术手段; 但由于氮肥投入基数较大且减投不能改变氨挥发途径氮损失比例, 氮肥减投后的氨挥发排放仍是限制氮肥利用效率提升的瓶颈. 对此, 本研究选用满足环境友好和使用便捷的农业废弃物粉末和两性分子物质作为膜材料, 配合氮肥施用在田面水表层进行多次铺洒, 研究膜材料对氨挥发排放过程及排放总量的影响, 结合作物生长和氮去向探索膜材料对氨挥发排放的影响机制. 连续 2 a 小区试验发现, 膜材料使用可减少水稻种植期氨挥发排放总量的 19%~31%, 由此减少的氮损失或以矿质态氮形态贮存于土壤或提高了作物氮吸收量. 施氮条件下, 田面水铵态氮含量和 pH 以及膜材料使用是影响氨挥发排放的主控因子; 氮肥减投后, 膜材料使用可进一步削减氨挥发排放. 基于不同膜材料对氨挥发排放影响机制差异, 应用时, 可根据实际生产需求对膜材料进行按需选择.

**关键词:** 氨挥发; 膜; 稻田系统; 氮肥减投; 农业废弃物; 两性分子

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0477-08 DOI: 10.13227/j.hjks.202006095

## Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application

YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, HE Shi-ying, DUAN Jing-jing, YANG Lin-zhang, XUE Li-hong\*

(Key Laboratory of Agricultural Environment of the Lower Reaches of the Yangtze River, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Ammonia volatilization emissions constitute the main pathway of nitrogen loss from paddy systems. Present control technologies are based on reducing the amount of nitrogen fertilizer applied. However, ratio of nitrogen loss through ammonia volatilization emissions has not changed, and it has become a bottleneck for promoting nitrogen use efficiency. Therefore, in order to study the effects of film materials on ammonia volatilization emissions, a two-year field plot experiment was carried out with agricultural waste powder and amphipathic molecule materials spread on surface water after nitrogen fertilizer application in paddy system. The results showed that film materials could reduce nitrogen loss through ammonia volatilization by 19%-31% in the paddy season, and this part of nitrogen was accumulated in soil or assimilated by paddy tissue. The ammonium concentration and pH in the surface water and film materials were the major control factors of ammonia volatilization emissions with nitrogen fertilizer application. Moreover, further reductions in ammonia volatilization emissions could be achieved by film materials after reducing nitrogen fertilizer application. Differences in the effect mechanisms of the film materials provide flexible options for practical agricultural production to meet demands.

**Key words:** ammonia volatilization; film; paddy system; reducing nitrogen fertilizer application; agricultural wastes; amphipathic molecular

氮肥投入是土壤耕作环境下水稻生长养分的主要来自,对保证稻米的高产稳产起决定性作用<sup>[1]</sup>.然而,当氮肥施用量超过当季水稻所需或施用方式不适宜时,氮素极易通过径流、淋洗、氨挥发和反硝化等途径发生损失<sup>[2,3]</sup>,进入周边水体及大气环境,引发农业面源污染.在长江中下游经济较为发达的地区,稻田系统氮肥过量施用现象十分普遍,当季水稻利用效率不足 40%<sup>[4-6]</sup>.当季未被作物利用的氮主要以残留土壤和损失为主要去向.在沟、渠、塘建设不断完善的当下,以径流渗漏等液态形式发生的氮肥损失比例不断降低<sup>[7]</sup>.氨挥发排放带来的氮肥损失比例可高达总施肥量的 9%~40%<sup>[8-10]</sup>,是稻田系统氮损失的主要途径之一,排放的氨分子也是带来 PM<sub>2.5</sub> 等后续大气问题的物质源.

相比于其他途径的氮损失,氨挥发损失一旦发

生,在迁移过程中对氨分子进行阻断拦截难度较大;因此,当前削减氨挥发排放的技术主要以调控氮肥施用为抓手<sup>[5,11]</sup>.有研究显示,在农户日常氮肥施用基础上(270~400 kg·hm<sup>-2</sup>),减少氮肥施用量的 20%~45% 可削减 20%~35% 氨挥发排放<sup>[6,10]</sup>;使用缓控肥料替代普通化肥氮,通过缓控肥料释放过程实现对作物生长过程氮素需求的响应,能够降低环境中短时间铵根的大量聚集,配合使用机械进行深施(10~20 cm),可达到削减 15%~40% 氨挥发排放<sup>[3,12,13]</sup>.值得注意的是,基于氮肥施用的调控技术并不能降低氨挥

收稿日期: 2020-06-09; 修订日期: 2020-07-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0801101); 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(19)3095)

作者简介: 俞映惊(1986~),女,博士,副研究员,主要研究方向为农田养分循环和面源污染, E-mail: yu.colleen@gmail.com

\* 通信作者, E-mail: njxuelihong@gmail.com

发途径氮损失比例;而搭配缓控尿素和深施的相关技术对水稻种植面积、所处地形以及机械操作均存在一定要求.稻田环境氮肥施用基数较大,减投后的氨挥发排放总量依然不容小视,氨挥发途径的氮损失仍是限制氮肥利用效率提升的瓶颈.

在稻田田面水表构建气-液膜结构,是有别于调控氮肥施用、以物理阻断为手段、削减氨挥发排放的技术方法.有关抑氨膜的制作工艺早在2001年已被提出<sup>[14]</sup>.稻田的研究结果显示其能减少水分蒸发20%~40%,提高田面温度1~2℃,增加水稻产量4%~12%<sup>[15]</sup>,但后续有关其在田间大规模使用的研究报道较少.近两年,有关周丛生物膜<sup>[16]</sup>和微藻生物膜<sup>[17]</sup>的研究报道再次证实了膜系统的氨挥发减排潜力.膜材料的筛选是实现氨挥发削减的关键.相较于膜材料对氨挥发损失过程的影响,材料本身的经济优势、环境友好和使用操控便捷等是选择时的先决考虑条件.具有复杂有机组成的抑氨膜可能会带来制备和贮存的困难,物质自身以及使用后降解过程产物的多样性也增加了判别其环境友好性的难度;而生物膜的铺洒在前期需要特定负载材料的支持,生长过程中对环境养分依赖性较强,生长可控性较差.

对此,本研究尝试选择农业废弃物粉末(稻糠粉末)<sup>[18]</sup>和两性分子物质(聚乳酸、卵磷脂)<sup>[19,20]</sup>为膜材料,于试验小区中连续种植水稻2 a,在氮肥减投基础上配合氮肥多次使用膜材料,以此明确膜材料对作物产量和氮肥利用效率的作用效果,研究膜材料对氨挥发排放过程和排放总量的影响,并通过对比氮去向的比较及肥期环境条件指标的同步检测,探索膜材料对氨挥发排放的影响机制,以期为后续

膜材料在实际种植中的应用提供数据支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试小区环境、土壤属性及气-液膜材料属性

#### 1.1.1 供试小区环境

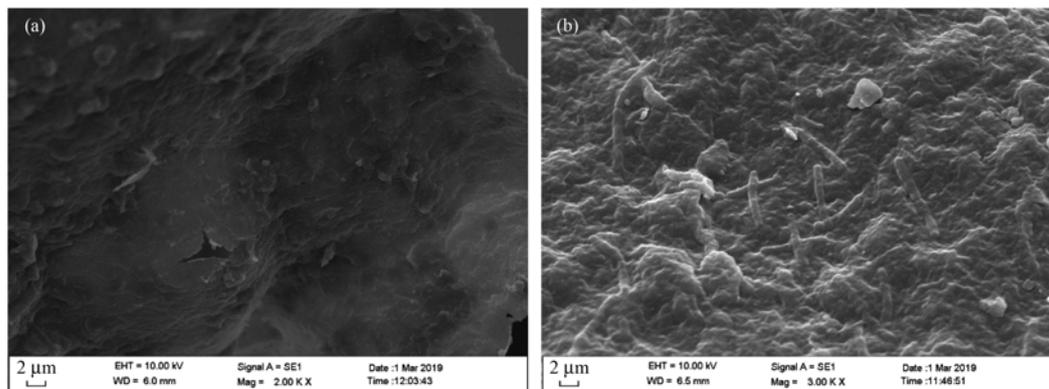
本研究开展于江苏省农业科学院院内稻田试验区(北纬32°02'N,东经118°51'E).试验区属典型亚热带季风气候,年平均气温为16.2℃,降水量为1106 mm.试验开展前,该区已连续种植水稻10 a以上.为保证土壤养分状况均匀,试验开始前2个月(2017年3月)对表层耕作土(0~20 cm)进行翻耕和平整,并修筑田埂,构建多个2 m×2 m试验小区.

#### 1.1.2 供试土壤属性

试验区翻耕平整后,多点取土混合为基础土样.该土样基本理化性质如下:有机质12.43 g·kg<sup>-1</sup>,全氮1.75 g·kg<sup>-1</sup>,全磷0.71 g·kg<sup>-1</sup>,矿质态氮85.85 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷30.27 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾101.83 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 7.10.

#### 1.1.3 气-液膜材料属性及使用方法

本试验所用膜材料为稻糠、聚乳酸和卵磷脂粉末.其中,稻糠粉末孔径<0.90 mm(20目)含水率<10%,为农业废弃物来源的自制备材料;聚乳酸粉末(C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>)<sub>n</sub>购自华创塑化;卵磷脂原料为大豆(C<sub>12</sub>H<sub>24</sub>NO<sub>7</sub>P),购自安耐吉化学.经过预试验对聚乳酸和卵磷脂粉末成膜属性的摸索,将两种材料分别以1 g:1.5 mL的比例与无水乙醇调配乳化,然后在氮肥施用后以材料干重的4 g·m<sup>-2</sup>铺洒至田面水表.铺洒在水层表面后,利用扫描电子显微镜(SEM; ZEISS EVO-MA 10,德国)分别对聚乳酸和卵磷脂成膜结构进行表征(图1和图2).



(a) 聚乳酸材料扫描电子显微镜表面成像; (b) 卵磷脂材料扫描电子显微镜表面成像

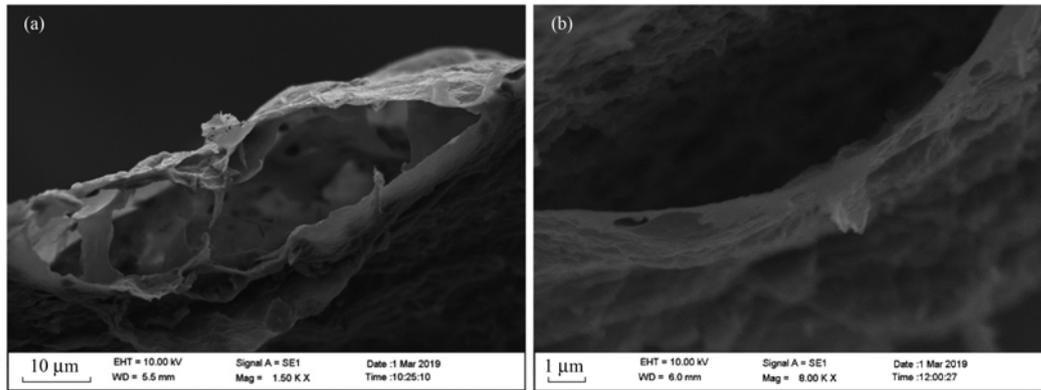
图1 聚乳酸和卵磷脂材料扫描电子显微镜表面成像

Fig. 1 Surface images of polylactic acid and lecithin by scanning electron microscopes

### 1.2 试验设计及田间管理

本试验设置5个处理:对照氮肥处理(CKU, 210 kg·hm<sup>-2</sup>),以氮计,该处理根据当地农户施氮情

况270~300 kg·hm<sup>-2</sup>实现了22%~30%的氮肥减投)、添加稻糠氮肥处理(RB, 210 kg·hm<sup>-2</sup>)、添加聚乳酸氮肥处理(PLA, 210 kg·hm<sup>-2</sup>)、添加卵磷脂肥



(a) 聚乳酸材料扫描电子显微镜剖面成像; (b) 卵磷脂材料扫描电子显微镜剖面成像

图2 聚乳酸和卵磷脂材料扫描电子显微镜剖面成像

Fig. 2 Profile images of polylactic acid and lecithin by scanning electron microscopes

处理 (LEC,  $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 以及无氮处理 (CK,  $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), 每个处理 3 次重复. 除 CK 处理外, 各处理均以尿素为氮肥, 分次施氮比例为基肥: 分蘖肥: 穗肥 = 30%: 30%: 40%; 此外, 所有处理均于基肥期一次性施用磷肥 (磷酸二氢钾)  $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和钾肥 (氯化钾)  $80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . 稻糠粉末 (每次使用量  $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )、聚乳酸 (每次使用量  $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 和卵磷脂 (每次使用量  $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 材料分 3 次于氮肥施用 (基肥、分蘖肥和穗肥) 当天, 均匀铺洒, 使其停留在田面水表层.

稻季小区试验共开展 2 a (2017 年和 2018 年). 其中, 2017 年基肥、分蘖肥和穗肥施用时间分别为 6 月 18 日、7 月 16 日和 8 月 4 日; 6 月 19 日以  $25 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  间距移栽水稻幼苗至  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  试验小区, 11 月 4 日收获; 2018 年基肥、分蘖肥和穗肥施用时间分别为 6 月 26 日、7 月 10 日和 8 月 6 日, 6 月 27 日进行水稻幼苗移栽, 11 月 13 日收获.

### 1.3 样品采集及指标测定

#### 1.3.1 植株样品采集及指标测定

收获时, 统计各小区平均分蘖数, 以此为标准, 每个小区采集典型植株样品 (仅地上部分) 4 穴. 植株样品穗和茎叶部分分开, 于  $105^\circ\text{C}$  烘箱内杀青 30 min, 在  $80^\circ\text{C}$  温度下分别烘至恒重, 分别称量, 用于生物量核算; 此后, 植株样品穗和茎叶分别磨碎, 用凯氏法 (Foss Scino KT260, China) 测定其中氮含量. 各处理产量以每个小区的实产实收记数为统计.

#### 1.3.2 氨挥发气体收集及测定

采用通气法进行氨挥发收集<sup>[21]</sup>. 施氮肥后一周内每天更换吸收载体 (如遇降雨, 当日氨挥发收集暂停); 烤田期每 2 d 更换一次; 其他时间, 肥后一周至半月内 3~5 d 更换一次, 半月后 10~15 d 更换一次. 回收吸收载体后, 将其浸泡在  $0.2 \text{ L}$ 、 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 KCl 溶液中, 以  $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  转速  $25^\circ\text{C}$  恒

温振荡 1 h, 使用流动分析仪 (Skalar, 荷兰) 测定浸取液中的铵态氮含量, 以此计算该海绵片上氨挥发收集情况. 本研究重点考察 3 个肥期的氨挥发排放日通量, 剩余时期的氨挥发收集仅用于计算整个种植期的氨挥发排放总量.

#### 1.3.3 田面水样品采集及指标测定

每个小区埋刻度尺一枚, 于肥期开始前 1 d 至肥期第 7 d, 每日读取田面水对应高度数值. 如当日进行灌溉补水, 则在补水前后分别读取并记录水层对应高度值. 以前日灌溉补水后与次日灌溉补水前高度值之差作为水层日变化幅度 ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 用于田面水蒸发强度比较. 对应氨挥发海绵收集时间点, 原位测定各小区田面水 pH 值 (pH 3310 SET 2, 德国) 并多点采集田面水样品进行混合, 使用流动分析仪 (Skalar, 荷兰) 测定田面水样品中铵态氮含量和硝态氮含量.

#### 1.3.4 土壤样品采集及指标测定

于基肥、分蘖肥和穗肥肥期的第 4 d 以及收获当日, 用土钻随机采集 0~20 cm 表层土壤, 每个小区随机采集 5 个点, 混匀, 阴凉处风干, 使用  $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 KCl 溶液, 以  $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  转速  $25^\circ\text{C}$  恒温振荡 1 h, 使用流动分析仪 (Skalar, 荷兰) 测定浸取液中的铵态氮含量和硝态氮含量.

### 1.4 数据处理及统计分析

#### 1.4.1 作物氮肥表观利用效率的计算

各小区每穴植株穗和茎叶分别称重, 分别计干物质重 (施氮处理为 DML 和 DME; 无氮处理为  $\text{DML}_0$  和  $\text{DME}_0$ ;  $\text{g} \cdot \text{穴}^{-1}$ )、其氮素含量 (施氮处理为 CNL 和 CNE; 无氮处理为  $\text{CNL}_0$  和  $\text{CNE}_0$ ;  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ). 种植密度按  $2 \times 10^5 \text{ 穴} \cdot \text{hm}^{-2}$  计, 氮施用量按  $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  计.

施氮处理作物氮吸收量 ( $\text{PNA}, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

$$= \text{DML} \times \text{CNL} \times 2 \times 10^5 \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \text{无氮处理作物氮吸收量 (PNA}_0, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \\ & = \text{DML}_0 \times \text{CNL}_0 \times 2 \times 10^5 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \text{氮肥利用效率 (NUE, \%)} \\ & = (\text{PNA} - \text{PNA}_0) \div 210 \times 100\% \end{aligned} \quad (3)$$

#### 1.4.2 稻田氨挥发通量的计算

记通气法每片海绵收集氨量 ( $M$ , g)、海绵片面积 ( $A$ ,  $\text{m}^2$ )、海绵片田间收集时间 ( $D$ , d) 和 KCl 浸取液中铵态氮含量 ( $c$ ,  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )。KCl 浸取液的体积按 0.2 L 计, 氮的摩尔质量取  $14 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

$$\text{海绵收集氨量 (M)} = c \times 0.2 \text{ L} \times 14 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \text{氨挥发通量} [\text{NH}_3, \text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}] \\ & = M \div A \div D \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (5)$$

#### 1.4.3 模型分析

将环境条件及田间管理的条件作为影响因子, 用于估算不同条件下的氨挥发排放通量对影响因子的响应。回归模型如下:

$$\text{AI}_t = \alpha_0 + \sum_k \alpha_k \text{Controls}_{kt} + \varepsilon_t \quad (6)$$

式中,  $t$  为特定肥期单一小区数据单元;  $\text{AI}_t$  为特定肥期单一小区数据的氨挥发排放通量;  $\text{Controls}_{kt}$  为不同的控制变量 (包含环境条件及田间管理两方面

影响因子, 如田面水铵态氮含量、pH、是否施肥和是否使用膜材料等);  $\varepsilon_t$  为残差。

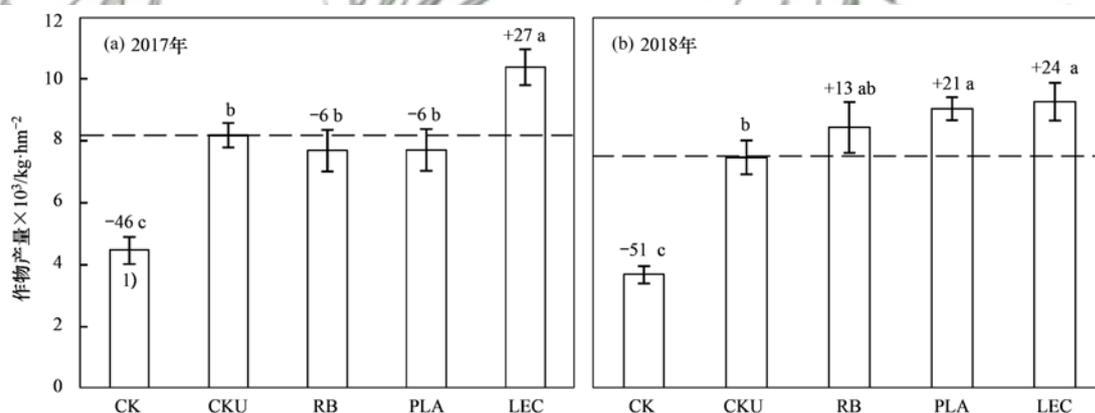
#### 1.4.4 数据处理

本研究采用 SPSS (SPSS ver. 16.0 for Windows, SPSS Inc., USA) 中 Duncan 法对作物产量、作物氮吸收量、氮肥利用效率、不同时期氨挥发损失量等数据进行差异显著性分析 (ANOVA,  $P < 0.05$ ); 最小二乘法模型 (ordinary least square) 估算氨挥发排放对不同影响因子的响应情况; 采用 Microsoft Excel 软件对数据进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 作物产量与氮肥表观利用效率

2017 年, 除卵磷脂 (LEC) 添加显著增加了 27% 的作物产量, 其余膜材料处理相比于 CKU 差异不显著 (图 3)。连续使用的第二年 (2018 年), 膜材料处理较 CKU 提高了作物产量的 13% ~ 24%。氮肥利用效率的变化趋势与产量一致, 2017 年膜材料使用未对利用效率产生显著影响, 2018 年膜材料添加处理较 CKU 具有较高的氮肥利用效率, 且卵磷脂处理达到统计学显著 (表 1)。



对 2017 年和 2018 年不同处理的作物产量分别进行统计分析, 柱子上同一字母表示统计学差异不显著; 分别以 2017 和 2018 年的 CKU 处理为参比, 虚线为 CKU 在 2017 年和 2018 年的数值延长线, 用于比较; 柱子上所标数字为较同年 CKU 处理的数值变化比例 (%), 负值表示减少, 正值增加

图 3 两年水稻产量变化

Fig. 3 Yields of paddy in two years

表 1 氮肥利用效率<sup>1)</sup> / %

Table 1 Nitrogen fertilizer use efficiency in two years / %

项目	2017 年	2018 年
CKU	31.35 ± 0.98a	38.27 ± 3.59b
RB	21.98 ± 2.25a	40.71 ± 3.85b
PLA	24.18 ± 2.60a	49.31 ± 2.80b
LEC	26.72 ± 2.61a	57.53 ± 4.10a

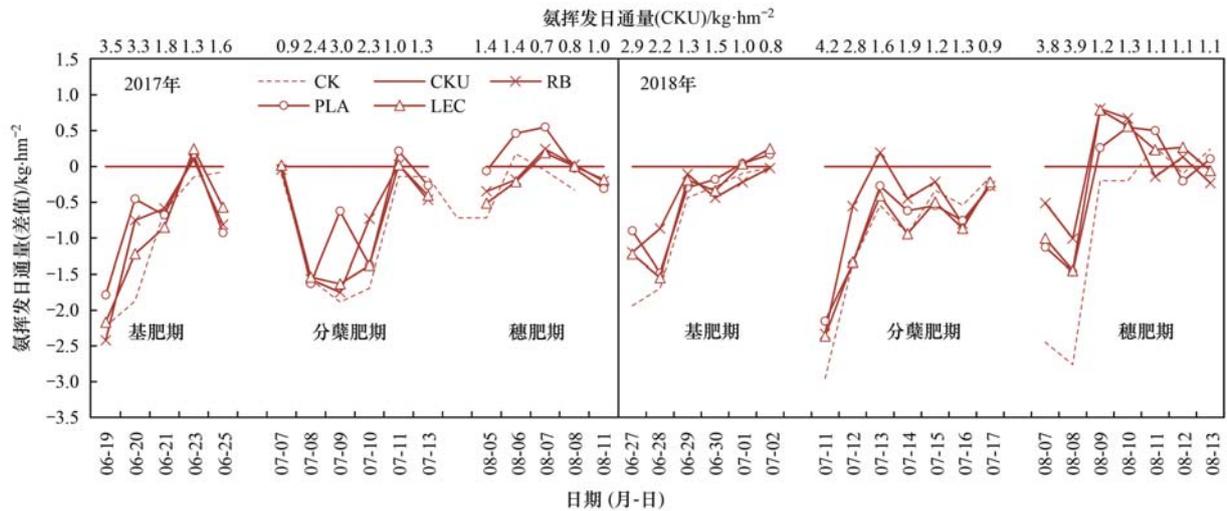
1) 对 2017 年和 2018 年不同处理的作物氮肥利用效率分别进行统计分析, 同一字母表示统计学差异不显著

### 2.2 关键肥期氨排放过程及损失总量

CKU 处理氨挥发日通量损失在施用基肥和分蘖肥的一周内以及施用穗肥的前 2 d 较高 (图 4)。

与之对应, 添加的膜材料在基肥和分蘖肥的前 5 d 可较 CKU 处理有效削减 14% ~ 69% 氨挥发日通量; 穗肥期, 2017 年膜材料的削减作用不明显, 2018 年仅在前 2 d 具有明显削减作用。由此可见, 膜材料的抑氨效果在氨挥发排放较高时更为显著。3 个膜材料中, 稻糠 (RB) 在铺洒在田面水表面的初期具有较好的抑氨效果, 但作用时间较短; 而聚乳酸 (PLA) 和卵磷脂 (LEC) 抑氨作用时间较长。

因为氮肥施用 (CKU 较 CK 处理), 稻季氨挥发总损失量提高了 62% ~ 80%; 除肥期以外的其



其他处理的数据为各处理与 CKU 处理相比的差值数据,当差值数值为正值时,说明该处理对应日期下的氨挥发日通量较高于 CKU 处理,反之亦然

图 4 两年稻季肥期氨挥发排放通量(较 CKU 处理)

Fig. 4 Ammonia volatilization emission flux in a paddy fertilizer-application period of two years

他时期,氨挥发累积损失量仅占稻季总损失量的 13%~25%;由此可见,氮肥施用是同一时间点不同处理间及同一处理不同时间点上产生氨挥发排放差异的主要原因(表 2)。3 个肥期的年季差异较大;2017 年基肥期、分蘖肥期和穗肥期的氨挥发累积排放比例约为 40:35:25,而 2018 年的 3 个时期占比约为 25:32:43;可见除田间抑闭度以外,气温、光照强度和降雨情况等天气因素对氨挥

发速率及日通量也起着决定性作用。使用膜材料可实现基肥期、分蘖肥期和穗肥期氨挥发累积排放量 27%~40%、31%~47% 和 2%~13% 的削减,并在稻季排放总量上实现 19%~31% 的削减;而除肥期以外的其他时期,膜材料的抑氨效果不显著。2017 年,聚乳酸(PLA)的抑氨效果略差于稻糠(RB)和卵磷脂(LEC);而 2018 年不同材料间无显著差异。

表 2 两年稻季氨挥发排放量及其施肥占比<sup>1)</sup>

Table 2 Amount of ammonia volatilization emissions and the proportion of fertilizer application

年份	项目	基肥期 /kg·hm <sup>-2</sup>	分蘖肥期 /kg·hm <sup>-2</sup>	穗肥期 /kg·hm <sup>-2</sup>	其他时期 /kg·hm <sup>-2</sup>	总损失量 /kg·hm <sup>-2</sup>	施肥占比 /%
2017	CK	6.50 ± 0.11c	5.28 ± 0.29d	3.80 ± 0.15c	5.32 ± 0.81a	20.90 ± 0.68d	9.95 ± 0.39d
	CKU	11.46 ± 0.56a	10.83 ± 0.77a	5.44 ± 0.18ab	6.10 ± 0.87a	33.82 ± 1.88a	16.11 ± 0.41a
	RB	6.98 ± 0.41c	6.29 ± 0.40bc	4.96 ± 0.67b	5.56 ± 0.87a	23.78 ± 1.02c	11.33 ± 0.42c
	PLA	7.77 ± 0.59b	7.13 ± 0.55c	6.04 ± 0.69a	6.17 ± 1.19a	27.11 ± 1.68b	12.91 ± 0.57b
	LEC	6.88 ± 0.04c	5.91 ± 0.44cd	4.72 ± 0.22b	5.88 ± 0.39a	23.40 ± 0.80c	11.14 ± 0.19c
2018	CK	5.25 ± 0.39c	6.15 ± 0.47d	8.21 ± 0.13b	3.98 ± 0.58c	23.58 ± 0.21d	11.23 ± 0.10d
	CKU	9.71 ± 0.56a	13.96 ± 0.89a	13.39 ± 0.16a	5.35 ± 0.72a	42.41 ± 0.38a	20.19 ± 0.18a
	RB	6.87 ± 0.45b	9.54 ± 0.09b	13.12 ± 0.52a	4.95 ± 1.02ab	34.47 ± 0.28b	16.42 ± 0.13b
	PLA	7.07 ± 0.36b	7.98 ± 0.25c	12.01 ± 1.13a	5.11 ± 0.45ab	32.17 ± 0.52c	15.32 ± 0.25c
	LEC	6.71 ± 0.32b	7.34 ± 0.76c	12.74 ± 1.08a	4.69 ± 0.49b	31.48 ± 1.89bc	14.99 ± 0.23bc

1) 对 2017 年和 2018 年不同处理的各时期氨挥发排放量分别进行统计分析,同一字母表示统计学差异不显著

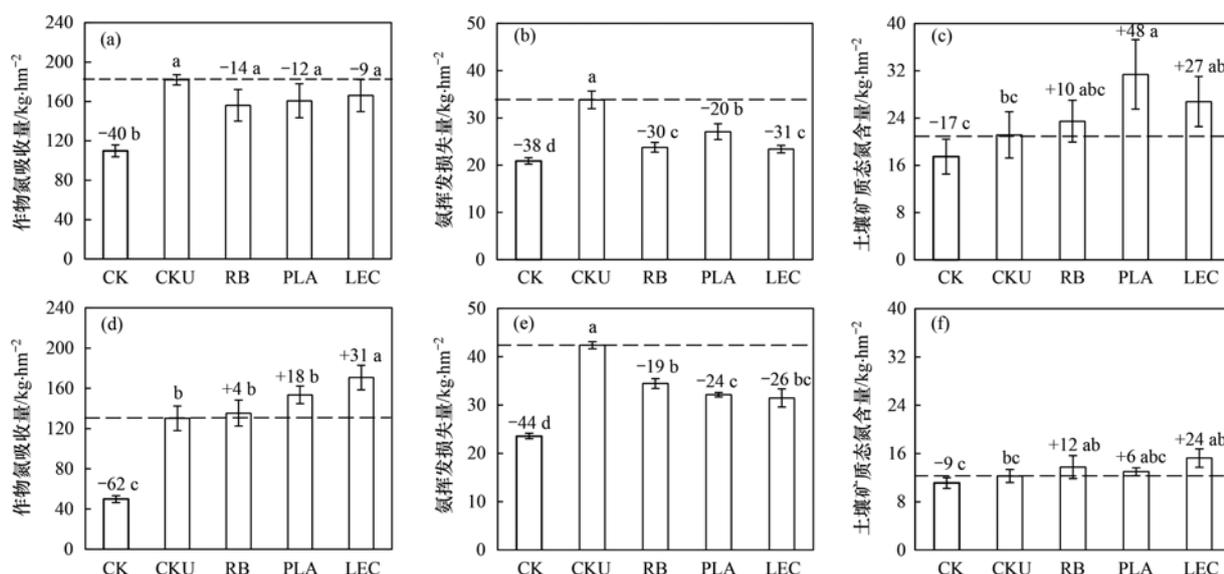
### 2.3 氮去向

分别比较不同处理间两年的氮去向差异。首先,膜材料对作物氮吸收未构成不利影响[图 5(a)和 5(d)]。尤其在连续耕作并使用膜材料两年的情况下,CK 和 CKU 处理产量无较大差异(图 3),但 CKU 处理在第二年(2018)年作物氮吸收量下降了 28%,CK 处理下降了 55%,说明试验用地在初期存在矿质态氮冗余现象。而膜材料处理的作物氮吸收量两年差异不显

著,并于第二年较 CKU 处理增加了 4%~31% 的作物氮吸收量[图 5(a)和 5(d)]。其次,因膜材料使用而减少的氮损失[图 5(b)和 5(e)]增加了土壤中矿质态氮含量[图 5(c)和 5(f)],为作物生长提供了更多可用氮。2017 年聚乳酸(PLA)使用虽然抑氨效果不如稻糠(RB)和卵磷脂(LEC)显著,但其收获后土壤的矿质态氮含量有了显著提升(提升了 48%)[图 5(c)],说明聚乳酸使用虽然抑氨效果不佳,但未增加

其他途径氮损失的风险,且为次年作物生长增加了土壤矿质态氮储备;而 2018 年膜材料处理土壤矿质态

氮含量并未较 CKU 有显著差异[图 5(f)],但与之对应的是作物氮吸收量的提升[图 5(d)].



对 2017 年(a)~(c)和 2018 年(d)~(f)不同处理的作物氮吸收量、氮挥发损失量以及土壤矿质态氮含量分别进行统计分析,柱子上同一字母表示统计学差异不显著;分别以 2017 和 2018 年的 CKU 处理为参比,虚线为 CKU 在 2017 年和 2018 年的数值延长线,用于比较;柱子上所标数字为较同年 CKU 处理的数值变化比例(%),负值表示减少,正值增加

图 5 两年氮积累及分配情况

Fig. 5 Accumulation and distribution of nitrogen in two years

### 3 讨论

#### 3.1 环境条件及田间管理对氨挥发排放的影响

设置不同参比,比较 3 种(基础种植、施氮和氮肥减投)条件下对氨挥发排放起主导作用的关键因子差异(表 3). 其中,对于普通水稻种植条件而言,田面水铵态氮浓度、pH 状态以及是否施用氮肥是影响氨挥发排放的主控因子,该结果符合之前众多有关氨挥发影响因子分析的研究结论<sup>[22]</sup>. 对施氮条件而言,田面水铵态氮浓度、pH 状态以及是否使用膜材料成为影响氨挥发排放的主控因子;田面水状态依然起至关重要的作用. 这一方面印证了通过调整

施氮量和施肥方式来削减田面水铵态氮含量对减少氨挥发排放的重要性<sup>[6,10]</sup>,同时也明确,即使在其他条件都一致的前提下,田面水 pH 对调控氨挥发排放意义重大. 此前,在利用酸性沼液直接灌溉稻田的研究中发现了酸性沼液添加量与氨挥发排放抑制效果的线性关系<sup>[23]</sup>,也验证了这一理论在实际生产中的操作性. 而对氮肥减投条件而言,田面水相关属性被土壤铵态氮含量所取代,与氮肥施用量和是否使用膜材料一起,成为影响氨挥发排放的主控因子. 这暗示着,当氮肥施用量进行削减后,土壤本底的铵态氮含量对于氨挥发的产生和排放起到了关键作用. 有关氨挥发排放的组成模型显示<sup>[16]</sup>,环境土壤的矿

表 3 氨挥发排放对环境条件及田间管理的响应<sup>1)</sup>

Table 3 Response of ammonia volatilization emissions to environmental conditions and field management

类型	项目	氨挥发排放		
		基础条件下(所有处理)	施氮条件下(参比 CK)	氮肥减投基础上(参比 CKU)
环境条件	田面水铵态氮浓度	3.048 *** (0.366)	1.410 *** (0.288)	0.046 (0.049)
	田面水硝态氮浓度	-1.355 (1.718)	-1.332 (1.685)	0.084 (0.228)
	田面水 pH	1.771 *** (0.627)	1.489 *** (0.513)	-0.123 (0.083)
	土壤铵态氮含量	-0.091 *** (0.020)	-0.016 (0.016)	0.007 ** (0.003)
	土壤硝态氮含量	-0.069 (0.165)	-0.017 (0.128)	-0.041 (0.022)
田间管理	是否使用膜材料	0.286 (0.557)	-0.797 ** (0.442)	-0.240 *** (0.074)
	氮肥施用量	1.417 ** (0.570)		0.265 *** (0.076)
常量		-11.378 ** (4.937)	-10.902 *** (4.065)	0.571 (0.656)
样本量		75	60	60
方差检验		28.755	14.871	4.379
决定系数		0.750	0.627	0.314

1) \*\*\* 表示  $P < 0.01$ , \*\* 表示  $P < 0.05$ , \* 表示  $P < 0.1$ ; 括号内表示系数的标准误差

质态氮含量对氨挥发排放也会产生正向影响,且主要发生作用的亦是铵态氮.值得注意的是,膜材料使用仅在施用氮肥以及氮肥减投条件下对氨挥发排放有显著抑制作用;换言之,氮肥投入是氨挥发排放的物质源,也是总量排放控制的基础,而对氮肥减投后氨挥发排放的进一步抑制,膜材料作用显著,这一结果与预期相符.

### 3.2 不同膜材料使用对氨挥发排放的影响

本研究有关对膜材料影响氨挥发排放的推测主要基于材料在气-液界面所起的物理阻隔<sup>[14,23]</sup>;而模型对田面水铵态氮和 pH 主控因子的分析突出了田面水环境条件对氨挥发排放的决定性作用(表 3);此外,同一个处理在两年试验中表现出了一定差异,这些均暗示着膜材料对氨挥发排放的影响可能是多方面的.对此,本研究比较了不同处理间田面水铵态氮含量、pH 及高度日变化情况(表 4).

表 4 肥期各处理田面水铵态氮含量、pH 及水面高度变化情况<sup>1)</sup>

Table 4 Ammonium concentration, pH, and height change of the surface water in the paddy fertilizer-application period

项目	田面水铵态氮含量 /mg·L <sup>-1</sup>	田面水 pH	田面水高度日变化 /cm·d <sup>-1</sup>
CK	1.03 ± 0.09b	8.12 ± 0.09a	1.58 ± 0.30a
CKU	1.89 ± 0.21a	8.16 ± 0.06a	
RB	1.22 ± 0.10b	7.43 ± 0.12c	1.56 ± 0.46a
PLA	1.43 ± 0.09b	7.93 ± 0.08ab	1.01 ± 0.21a
LEC	1.18 ± 0.11b	7.75 ± 0.13b	1.29 ± 0.25a

1) 对不同处理的田面水铵态氮含量、pH 以及高度日变化值分别进行统计分析,同一字母表示统计学差异不显著

2018 年 CK 和 CKU 处理氨挥发显著较高于 2017 年同期[图 5(b)和 5(e)],说明年季差异带来的材料抑氨效果的差异与肥期气候密切相关<sup>[22]</sup>,2018 年肥期时段风速和光辐射等更为强烈,更有利于促进氨挥发排放.在此前提下,2018 年使用稻糠(RB)的氨挥发抑制效果较差,说明相比于另外两个材料,稻糠在气-液界面的停留稳定性不强,易受到气候状态干扰,该结果也被之前相关研究所发现<sup>[18,23]</sup>.表 4 的数据证实,稻糠添加对田面水高度日变化幅度确实几乎不产生影响,但其能够显著降低田面水铵态氮浓度和 pH.结合稻糠在水面较短的停留时间,推测有机残体腐解过程产生的有机酸是对田面水 pH 值产生显著影响的主要原因,虽然现有研究缺少对稻糠腐解的直接研究,但根据对不同作物秸秆腐解过程的研究,猜测稻糠腐解带来的田面水 pH 降低可能持续较长时间<sup>[24,25]</sup>;当然也有研究发现,麦秸还田有可能因提高田面水 pH 增加稻田的氨挥发<sup>[26]</sup>,但这些结果无不指向稻糠材料影响氨挥发排放的主要机制与田面水 pH 密切相关.此

外,通过日变化情况的分析(数据此处未给出),稻糠对于田面水铵态氮的降低(较 CKU 处理)主要发生在肥期前 1~3 d,呈现明显削峰填谷的作用效果;稻糠腐解引发的 pH 改变影响了田面水中铵态氮的平衡浓度状态<sup>[14,22]</sup>,且带来的还原条件也一定程度延长了铵态氮在田面水中的停留时间.聚乳酸(PLA)和卵磷脂(LEC)作为完全不同于稻糠的分子材料,物理阻隔效果更为显著,分别较 CKU 处理减少了 36% 和 18% 的水分蒸发(表 4).与卵磷脂相比,聚乳酸在使用过程中具有更好的透明性和稳定性<sup>[19]</sup>,物理阻隔作用延续性超过肥后 7 d.而卵磷脂由于含有不饱和脂肪酸,在夏季较高温度下易发生氧化,颜色变深,且水解形成脂肪酸、甘油、肌醇和磷酸等小分子产物<sup>[20]</sup>,因此,不同于聚乳酸,卵磷脂主要通过显著影响田面水铵态氮浓度和 pH 来减少氨挥发排放(表 4).

## 4 结论

连续 2 a 田间环境下的膜材料使用对水稻产量及氮利用效率呈促进作用.膜材料在整个稻期可减少氨挥发排放总量的 19%~31%,且削减作用主要体现在基肥期和分蘖肥期的前 5 d.此外,由于氨挥发削减而减少的氮排放或以矿质态氮形态贮存于土壤或提高了作物氮吸收量,并未以其他形态发生氮损失.施氮条件下,环境条件中田面水铵态氮含量和 pH 以及膜材料的使用是影响氨挥发排放的主控因子;在减少氮肥施用后,膜材料依然可以进一步削减氨挥发排放量.3 种膜材料中,稻糠作为唯一的生物质材料,主要通过降低田面水 pH 值影响氨挥发排放;聚乳酸稳定较好,可在气-液表面停留较长时间,通过物理阻隔的途径减少氨挥发排放;而卵磷脂对于氨挥发的影响途径较为多样,除物理阻隔外,水解后还可通过改变田面水相关属性对氨挥发排放带来影响,抑氨作用显著.

### 参考文献:

- [1] Singh N, Pal N, Mahajan G, *et al.* Rice grain and starch properties: Effects of nitrogen fertilizer application [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, **86**(1): 219-225.
- [2] 王小治, 高人, 朱建国, 等. 稻季施用不同尿素品种的氮素径流和淋溶损失[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(5): 600-604. Wang X Z, Gao R, Zhu J G, *et al.* Nitrogen loss via runoff and leaching from employ of different urea bleeds in paddy season [J]. *China Environmental Science*, 2004, **24**(5): 600-604.
- [3] 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 等. 缓释侧肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5326-5332. Hou P F, Xue L X, Yu Y L, *et al.* Control effect of side deep fertilization with slow-release fertilizer on ammonia volatilization from paddy fields [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5326-5332.
- [4] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用

- 率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, **45**(5): 915-924.
- Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in china and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, **45**(5): 915-924.
- [ 5 ] 刘红江, 郭智, 郑建初, 等. 太湖地区氮肥减量对水稻产量和氮素流失的影响[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(3): 713-718.
- Liu H J, Guo Z, Zheng J C, *et al.* Effects of nitrogen reduction on rice yield and nitrogen loss in Taihu area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(3): 713-718.
- [ 6 ] 薛利红, 李刚华, 侯朋福, 等. 太湖地区稻田持续高产的减量施氮技术体系研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(4): 729-736.
- Xue L H, Li G H, Hou P F, *et al.* Nitrogen reduction technique system for sustaining high yield of paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(4): 729-736.
- [ 7 ] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(1): 1-8.
- Yang L Z, Shi W M, Xue L H, *et al.* Reduce-retain-reuse-restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: general countermeasures and technologies [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(1): 1-8.
- [ 8 ] 张惠, 杨正礼, 罗良国, 等. 黄河上游灌区稻田氨挥发损失研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2011, **17**(5): 1131-1139.
- Zhang H, Yang Z L, Luo L G, *et al.* Study on the ammonia volatilization from paddy field in irrigation area of the Yellow River[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, **17**(5): 1131-1139.
- [ 9 ] 宋勇生, 范晓晖. 稻田氨挥发研究进展[J]. 生态环境, 2003, **12**(2): 240-244.
- Song Y S, Fan X H. Summary of research on ammonia volatilization in paddy soil[J]. *Ecology and Environment*, 2003, **12**(2): 240-244.
- [ 10 ] 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): 1681-1689.
- [ 11 ] 俞映惊, 杨林章, 李红娜, 等. 种植业面源污染防治技术发展 历程分析及趋势预测[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3870-3878.
- Yu Y L, Yang L Z, Li H N, *et al.* Situation analysis and trend prediction of the prevention and control technologies for planting non-point non-point source pollution [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3870-3878.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] Guo C, Ren T, Li P F, *et al.* Producing more grain yield of rice with less ammonia volatilization and greenhouse gases emission using slow/controlled-release urea [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(3): 2569-2579.
- [ 14 ] 庄舜尧, 尹斌, 朱兆良. 表面分子膜抑制稻田氨挥发的模型 研究[J]. 中国农业科学, 2002, **35**(12): 1506-1509.
- Zhuang S Y, Yin B, Zhu Z L. Model research on the effect of surface film on ammonia volatilization from rice field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, **35**(12): 1506-1509.
- [ 15 ] 尹斌, 朱兆良. 稻田氮素损失与实用控制技术——液态分子 膜[A]. 见: 氮素循环与农业和环境学术研讨会论文(摘要) 集[C]. 厦门: 中国土壤学会, 中国植物营养与肥料学会, 中国作物学会, 中国地理学会, 中国园艺学会, 中国化学学会, 2001.
- [ 16 ] She D L, Wang H D, Yan X Y, *et al.* The counter-balance between ammonia absorption and the stimulation of volatilization by periphyton in shallow aquatic systems [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **248**: 21-27.
- [ 17 ] de Siqueira Castro J, Calijuri M L, Assemany P P, *et al.* Microalgae biofilm in soil: Greenhouse gas emissions, ammonia volatilization and plant growth [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1640-1648.
- [ 18 ] 宁伟军. 浮萍与稻糠对免耕抛秧稻生、产量及氨挥发影响研 究[D]. 南宁: 广西大学, 2008.
- Ning W J. Studies on the effect of rice chaff and duckweeds on growth and yield of no-tillage cast transplanting rice and ammonia volatilization in paddy soil [D]. Nanning: Guangxi University, 2008.
- [ 19 ] 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.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] 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]. 植物营养与肥科学报, 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.
- [ 22 ] Fillery I R P, Vlek P L G. Reappraisal of the significance of ammonia volatilization as an N loss mechanism in flooded rice fields[J]. *Fertilizer Research*, 1986, **9**(1-2): 79-98.
- [ 23 ] 徐晓萌. 调节 pH 对沼液稻田灌溉肥效和环境的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- Xu X M. Effects of biogas slurry application with pH adjustment on its fertilizer efficiency and environmental impacts in paddy field [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [ 24 ] 曹莹菲, 张红, 赵聪, 等. 秸秆腐解过程中结构的变化特征 [J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(5): 976-984.
- Cao Y F, Zhang H, Zhao C, *et al.* Changes of organic structures of crop residues during decomposition [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(5): 976-984.
- [ 25 ] 徐一然. 水稻与小麦两种秸秆及其组分在淹水土壤中腐解进 程的差异[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- Xu Y R. Differences in decay process between wheat and rice straws and their components under flooded soil condition [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014.
- [ 26 ] 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.

## CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System .....	GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, <i>et al.</i> ( 1 )
Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model .....	YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> ( 9 )
Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter .....	MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i> ( 19 )
Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in PM <sub>2.5</sub> in Winter in Shenyang .....	WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, <i>et al.</i> ( 30 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> Collected in Baoding .....	LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> ( 38 )
Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing .....	HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, <i>et al.</i> ( 45 )
Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019 .....	GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, <i>et al.</i> ( 55 )
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou .....	LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, <i>et al.</i> ( 65 )
Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer .....	LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, <i>et al.</i> ( 75 )
Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017 .....	XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, <i>et al.</i> ( 88 )
Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019 .....	ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, <i>et al.</i> ( 97 )
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise .....	LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, <i>et al.</i> ( 106 )
Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves .....	YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, <i>et al.</i> ( 114 )
Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed .....	ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo ( 127 )
Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River .....	YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, <i>et al.</i> ( 136 )
Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China .....	LI Hui, LI Jie, SONG Peng, <i>et al.</i> ( 147 )
Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province .....	ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, <i>et al.</i> ( 159 )
Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou .....	WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, <i>et al.</i> ( 166 )
Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River .....	LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, <i>et al.</i> ( 175 )
Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China .....	LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, <i>et al.</i> ( 184 )
Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area .....	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue ( 195 )
Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland .....	YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, <i>et al.</i> ( 204 )
Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir .....	ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao ( 211 )
Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir .....	YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> ( 221 )
Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir .....	ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, <i>et al.</i> ( 234 )
Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake .....	GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, <i>et al.</i> ( 242 )
Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed .....	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> ( 251 )
Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems .....	CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, <i>et al.</i> ( 263 )
Effect of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff .....	CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, <i>et al.</i> ( 274 )
Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland .....	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, <i>et al.</i> ( 283 )
Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs .....	LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> ( 293 )
Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments .....	ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> ( 305 )
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants .....	XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, <i>et al.</i> ( 315 )
Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion .....	LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, <i>et al.</i> ( 323 )
Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land .....	WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, <i>et al.</i> ( 333 )
Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors .....	GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, <i>et al.</i> ( 343 )
Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China .....	DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, <i>et al.</i> ( 353 )
Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province .....	LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, <i>et al.</i> ( 359 )
Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation .....	YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, <i>et al.</i> ( 368 )
Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice .....	JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> ( 378 )
Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains .....	ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, <i>et al.</i> ( 386 )
Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms .....	ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, <i>et al.</i> ( 394 )
Soil Enzyme Activity in <i>Picea schrenkiana</i> and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang .....	ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, <i>et al.</i> ( 403 )
Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China .....	ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, <i>et al.</i> ( 411 )
Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism .....	FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, <i>et al.</i> ( 422 )
Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of <i>Solanum rostratum</i> .....	ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, <i>et al.</i> ( 433 )
Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer .....	SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, <i>et al.</i> ( 443 )
Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen .....	HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, <i>et al.</i> ( 450 )
How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils .....	SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, <i>et al.</i> ( 459 )
Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation .....	YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, <i>et al.</i> ( 467 )
Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application .....	YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, <i>et al.</i> ( 477 )
Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish <i>Danio rerio</i> .....	ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, <i>et al.</i> ( 485 )
Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data .....	YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, <i>et al.</i> ( 492 )
Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale .....	SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, <i>et al.</i> ( 501 )