

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8  
第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM<sub>2.5</sub>污染特征与浓度控制效果 ..... 张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)

北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析 ..... 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)

合肥市PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>中元素组成特征及重污染成因分析 ..... 刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)

濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 ..... 陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琬, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)

关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析 ..... 康宝荣, 刘立志, 刘焕武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)

长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源 ..... 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)

中国城市扩张及空间特征变化对PM<sub>2.5</sub>污染的影响 ..... 王桂林, 张炜 (3447)

不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM<sub>2.5</sub>排放的影响 ..... 邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)

浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数 ..... 徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)

生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征 ..... 马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)

青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征 ..... 官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)

广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价 ..... 宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)

截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征 ..... 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)

黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析 ..... 邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)

风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响 ..... 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)

向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应 ..... 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)

外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响 ..... 李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)

新疆喀什三角洲地下水SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>化学特征及来源 ..... 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)

黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析 ..... 李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)

北京市河流秋季浮游动物群落特征分析 ..... 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)

三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系 ..... 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)

渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测 ..... 万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)

汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系 ..... 汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)

饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析 ..... 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)

基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果 ..... 彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)

植被对绿色屋顶径流量和水质影响 ..... 章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)

光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制 ..... 范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)

多种材料对水中氨氮的吸附特性 ..... 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)

不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响 ..... 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)

3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程 ..... 刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)

铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制 ..... 韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)

缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮 ..... 杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)

连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响 ..... 薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)

FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制 ..... 马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)

ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件 ..... 董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)

全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析 ..... 张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)

不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比 ..... 刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)

异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析 ..... 杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)

Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现 ..... 高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)

高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N<sub>2</sub>O产生特征 ..... 代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)

生物炭对盐碱土壤氨挥发影响 ..... 王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)

两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响 ..... 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)

承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征 ..... 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)

厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析 ..... 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)

宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析 ..... 张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)

铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果 ..... 林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)

铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用 ..... 周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)

生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响 ..... 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)

有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响 ..... 汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)

土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响 ..... 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)

宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响 ..... 高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)

不同浸提剂条件下生物炭溶解性有机物的浸出规律 ..... 何晶晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)

基于成组生物毒性测试的PM<sub>2.5</sub>毒性 ..... 江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)

《环境科学》征订启事(3587) 《环境科学》征稿简则(3595) 信息(3611, 3705, 3745)

## 两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响

周玉玲<sup>1,2</sup>, 侯朋福<sup>2</sup>, 李刚华<sup>1</sup>, 王绍华<sup>1</sup>, 杨林章<sup>2</sup>, 薛利红<sup>2\*</sup>, 丁艳锋<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学农业部南方作物生理生态重点开放实验室, 南京 210095; 2. 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:** 硝化抑制剂和生物炭是农田土壤管理常用的土壤增效剂。其中, 硝化抑制剂可以增加作物产量提高氮素利用率, 而生物炭是生物质资源利用的一种新方式, 且具有一定的吸附特性。以减少稻田氨挥发带来的氮素损失及环境污染问题为目的, 在原状土柱模拟试验条件下, 以单施化肥处理(CN)为对照, 研究了生物炭(B)添加、硝化抑制剂(CP)添加及复合添加处理(BCP)对田面水pH、田面水铵态氮浓度、水稻产量及氨挥发损失的影响。结果表明, 两种增效剂施用对水稻产量无显著影响, 硝化抑制剂添加有增加水稻产量的趋势。两种土壤增效剂添加均显著增加了稻田氨挥发损失, 损失量占施氮量的25%~35%。其中, 肥期(施肥后7 d内)氨挥发损失占总损失的86%~91%, 是氨挥发损失的主要时期。与CN处理相比, CP处理明显提高了田面水 $\text{NH}_4^+$ -N浓度和氨挥发损失, 基肥期、穗肥期和非肥期增加效应明显, 氨挥发增幅分别为138%、48%和78%, 全生育期氨挥发总损失量增加59%。生物炭添加对稻田氨挥发损失也有明显的促进效应, 且具有阶段性特征, 前期(基肥期和蘖肥期)的增加效应高于后期(穗肥期和穗肥后), 田面水 $\text{NH}_4^+$ -N浓度和pH也表现出相同的趋势。两者配施添加处理显现出了正交互作用, 氨挥发损失量大于单施处理, 与化肥处理差异显著。结果说明, 生物炭添加不能解决硝化抑制剂添加引起的铵态氮浓度升高和氨挥发损失增加的问题, 对于硝化抑制剂添加引起的氨挥发损失增加的问题需要继续研究。

**关键词:** 水稻; 生物炭; 硝化抑制剂; 氨挥发; 产量

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3746-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201901189

## Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields

ZHOU Yu-ling<sup>1,2</sup>, HOU Peng-fu<sup>2</sup>, LI Gang-hua<sup>1</sup>, WANG Shao-hua<sup>1</sup>, YANG Lin-zhang<sup>2</sup>, XUE Li-hong<sup>2\*</sup>, DING Yan-feng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology in Southern China, Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Nitrification inhibitor and biochar are commonly used as soil synergists. Among them, nitrification inhibitor can increase crop yields and N use efficiency, while biochar is a relatively new way of using biomass resources and has certain adsorption characteristics. In order to reduce nitrogen loss and environmental pollution caused by ammonia volatilization in paddy fields, a pot experiment with chemical fertilizer application (CN) as a control was conducted to study the effects of biochar (B), nitrapyrin (CP), and compound application (BCP) on pH,  $\text{NH}_4^+$ -N concentration dynamics in the flood water, rice yields, and ammonia volatilization from paddy fields. The results showed that the application of these two synergists had no significant effect on rice yields, and the nitrification inhibitors had a tendency to increase rice yields. The two synergists significantly increased ammonia volatilization from paddy fields, accounting for 25% -35% of the total N rate. Ammonia volatilization during periods of fertilizer application accounted for 86% -91% of the total loss, representing the main period of ammonia volatilization. Compared with the CN treatment, the CP treatment increased  $\text{NH}_4^+$ -N concentrations in flood water and the loss of ammonia via volatilization, which was increased by 59.18% and mainly occurred during a week after the basal fertilization(138%) and spike fertilization (48%), and non-fertilization stage (78%). Biochar had a promoting effect on ammonia volatilization with typically phased characteristics. The initial increasing effect of biochar on ammonia volatilization was higher than during the later stages, when  $\text{NH}_4^+$ -N concentrations and the pH of flood water showed the same trend. In addition, the coupling of nitrification inhibitor and biochar significantly increased the total loss of ammonia via volatilization loss due to the promotion effect of CP and B. The problem of increased ammonia volatilization loss caused by the application of nitrification inhibitors requires further research.

**Key words:** rice; biochar; nitrapyrin; ammonia volatilization; yield

氮素是作物生长必需的营养元素,也是农业生产可持续发展的根本要素。我国水稻种植面积约占谷物面积的1/3,产量约占总产的37%,居世界第一位,水稻生产在我国粮食生产中占有十分重要的地位。提高水稻综合生产能力,是保障我国粮食安全的长期战略目标。水稻是太湖流域主要种植作物,为追求高产,农民往往施入大量化肥,但过量

氮肥的施入,不仅降低氮肥利用率更容易引起农田

收稿日期: 2019-01-23; 修订日期: 2019-03-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300104, 2016YFD0801101); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41601319); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202004-003)

作者简介: 周玉玲(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为作物生理生态, E-mail: 2197455762@qq.com

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

氮素损失和一系列环境问题<sup>[1,2]</sup>。因此,提高氮肥利用率、减少稻田氮素损失成为水稻高效绿色生产亟需解决的问题<sup>[3]</sup>。

水稻是一种喜铵作物,有学者指出添加硝化抑制剂可以阻断铵态氮向硝态氮的转化,使施入土壤氮较长时间内以 $\text{NH}_4^+$ -N形态存在,从而提高水稻氮素利用率、增加产量<sup>[4]</sup>。但是,硝化抑制剂的添加可能也会因为稻田铵氮浓度增加而造成氨挥发损失增加。孙海军等<sup>[5]</sup>的研究表明,施用硝化抑制剂会增加 55%~110% 的氨挥发排放。而氨挥发损失是稻田氮素损失的主要途径,约占施氮量的 9%~40%<sup>[6~8]</sup>。因此亟需解决硝化抑制剂施用后稻田土壤铵氮浓度升高引起的氨挥发排放增加的问题。生物炭是一种在无氧或缺氧环境下将生物质高温裂解形成的含碳物质,理化性质稳定,具有较大的比表面积和较强的吸附能力,对氮化合物有较好的吸附效果<sup>[9,10]</sup>。生物炭的这一特征为阻断土壤冗余氮素的迁移提供了可能。有研究表明,由于生物炭具有较大的比表面积及表面附着的含氧官能基团,对铵和氨具有较强的吸附作用,可以降低春播黄瓜土壤氨挥发损失<sup>[11~14]</sup>。董玉兵等<sup>[15]</sup>的研究发现老化生物炭能显著减少稻麦轮作体系中麦季土壤氨挥发损失。这说明,生物炭对旱地土壤氮素有较好的吸附效应,能够降低农田氨挥发损失。而稻田生物炭添加对氨挥发损失影响的研究结果不尽相同。有研究表明添加生物炭可通过影响微生物活动降低氨挥发损失,但也有研究认为生物炭可能会通过影响 pH 和硝化作用增加氨挥发损失<sup>[16~18]</sup>。

稻麦轮作农田是一种特殊的水旱轮作系统。添加生物炭能否缓解硝化抑制剂带来的氨挥发损失风险增加,还有待于进一步研究验证。因此,本研究选择生物炭和硝化抑制剂两种添加剂,分析了生物炭与硝化抑制剂添加及配施对稻田田面水氮素动态及氨挥发损失的影响,以期水稻高效绿色生产提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验概况

本试验于 2017 年在江苏省农业科学院内试验基地进行,供试水稻品种为武运粳 23 号,供试土壤为江苏黄泥土。供试生物炭由小麦秸秆在 450℃ 厌氧煅烧而成。生物炭理化属性:总碳 503.10  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、总氮 12.52  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、铵态氮 1.82  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、硝态氮 3  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、pH 8.9、比表面积 (BET) 7.37  $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 。硝化抑制剂为 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶 (nitrapyrin, CP)。

### 1.2 试验设计

本试验采用原状模拟土柱,土柱高度为 50 cm,直径为 30 cm。试验设置 5 个处理:添加硝化抑制剂 CP 处理 (CP)、1.5% 生物炭添加处理 (B)、1.5% 生物炭和硝化抑制剂 CP 耦合处理 (BCP)、N 肥对照处理 (CN) 和不施 N 对照处理 (NO)。每个处理 3 次重复。除 NO 处理不施氮肥外,所有处理的化肥氮磷钾投入和水管理均保持一致,其中氮肥采用尿素,施肥量采用当地常规用量, N 用量为 270  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。分 3 次施用,基肥:分蘖肥:穗肥分配比例为 4:2:4;磷肥采用过磷酸钙,用量为 96  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (纯  $\text{P}_2\text{O}_5$ ),一次性基施;钾肥采用氯化钾,用量 192  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $\text{K}_2\text{O}$ ),分两次使用,基施 50%、穗肥施用 50%。本试验用硝化抑制剂其有效成分为 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶,含量为 24%,按照有效成分为尿素质量的 0.25% 于 3 个肥期与尿素同时添加。基肥、蘖肥和穗肥分别于 7 月 3 日、7 月 17 日和 8 月 24 日施入,水稻于 7 月 4 日移栽,11 月 6 日收获。水管理采用前期淹水-中期干湿交替-后期淹水的方式。其中,移栽后 10 d 内、施肥后 7 d 内、孕穗期和灌浆期保持 2~5 cm 水层,中期(分蘖期至孕穗前)采用干湿交替灌溉方式,此外有效分蘖临界叶龄期排水晒田和收获前期稻田自然落干。

### 1.3 样品的采集与测定

#### 1.3.1 氨挥发测定

采用密闭室间歇通气法测定氨挥发损失量,分别于每天上午 05:00~07:00 和下午 13:00~15:00 进行连续 2 h 的抽气测定,测定到施肥处理与不施肥处理氨挥发通量无差别为止,并计算氨挥发损失通量及总损失量<sup>[19]</sup>。由于无机化肥具有集中释放的特点,于 3 次施肥后 7 d 内(肥期)连续每天滴定,其余时间(非肥期)每隔 3~5 d 滴定一次并折算区间损失通量。田间采气装置的密闭室是一有机玻璃罩子,放入水田中即成为一密闭的气室。罩子顶部开有一个进气孔和一个采气孔,进气孔连接进气管口到 2.5 m 高处,以减少田面交换空气对稻田氨挥发测定的影响;采气孔与盛有 2% 硼酸的吸收瓶相连,吸收瓶再与真空泵相连调节真空泵抽气量,使密闭室的换气频率控制在每分钟 15~20 次<sup>[20]</sup>。需要说明的是,由于盆栽内径较小(30 cm),每盆栽插 3 穴,为防止氨挥发采气罩置于土壤中对水稻根系生长的影响,采气罩置于较浅土层,主要利用田面水层实现采气系统的密封,因此在干湿交替期末对氨挥发排放通量进行监测。

### 1.3.2 水样采集及测定

于3次施肥后,7d内每天采集1次田面水,采集的水样带回实验室过滤后,用pH仪(PHS-3C)测定田面水pH,并用流动分析仪(荷兰SKALAR SAN<sup>++</sup> SYSTEM)测定铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)浓度。

### 1.3.3 产量

水稻成熟后,将籽粒收获脱粒,烘干称重后折算水稻籽粒产量(含水量13.5%)。

### 1.4 数据处理

数据计算和分析采用Microsoft Excel 2010和SPSS19.0统计软件进行方差分析;绘图采用Microsoft Excel 2010软件。采用Duncan法进行差异显著性分析( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 田面水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度动态变化

田面水铵态氮浓度动态变化结果表明,基肥期和蘖肥期的田面水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度在施肥后第1d即达到峰值,穗肥期则在第3d达到峰值(表1)。基肥期峰值浓度最高,其次是蘖肥期,穗肥期最低。

处理间比较来看,添加土壤增效剂处理(CP、B和BCP)的田面水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度均高于单施化肥处理CN(表2)。生物炭处理(B)的峰值浓度和均值浓度均最高,在基肥期和蘖肥期显著高于其他处理,尤其是基肥期,浓度高达105.20 mg·L<sup>-1</sup>;不施氮肥处理的最低。与单一添加相比,生物炭与硝化抑制剂耦合添加处理BCP的峰值浓度在不同肥期表现不一致,基肥期和蘖肥期高于CP处理但低于B处理,穗肥期低于B和CP处理。

### 2.2 田面水pH动态

田面水pH在基肥期的差异高于蘖肥期和穗肥期,基肥期的田面水pH均值显著高于蘖肥期和穗肥期(图1)。不同处理间比较来看,土壤增效剂添加处理(B、CP和BCP)有增加基肥期和蘖肥期田面水pH的趋势,穗肥期不同处理的田面水pH相当。生物炭添加处理B的基肥期和蘖肥期田面水pH明显高于其它处理,且与CN处理差异在基肥期达到显著水平。生物炭与硝化抑制剂耦合添加处理BCP的田面水pH在基肥期和蘖肥期均低于B处理但高于CP处理,在穗肥期则低于B处理和CP处理。

表1 不同处理的田面水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度动态变化<sup>1)</sup>/mg·L<sup>-1</sup>

Table 1 Dynamics of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentrations in surface waters under different treatments/mg·L<sup>-1</sup>

肥期	处理	施肥后天数/d							均值
		1	2	3	4	5	6	7	
基肥期	CN	25.80b	20.47b	17.17a	6.68a	5.80ab	2.29a	0.98a	11.31bc
	CP	45.87b	20.80b	15.43a	5.27a	6.05ab	2.07a	0.80a	13.76b
	B	105.20a	32.20a	17.93a	6.30a	6.10ab	2.16a	1.05a	24.42a
	BCP	49.00b	33.13a	18.57a	12.32a	12.38a	1.87a	1.17a	18.35ab
	NO	2.73b	5.87c	4.50a	2.68a	2.28b	0.38a	0.57a	2.72c
蘖肥期	CN	22.10b	14.70ab	6.03a	1.35a	3.12a	0.45a	0.49b	6.89c
	CP	25.60b	23.07a	5.97a	2.80a	3.54a	0.72a	0.49b	8.88bc
	B	47.33a	27.53a	6.00a	2.42a	3.97a	1.15a	0.46b	12.69a
	BCP	35.17ab	28.73a	7.60a	2.15a	3.67a	0.75a	0.45b	11.22ab
	NO	0.70c	1.40b	1.10b	1.20a	1.60a	0.53a	0.59a	1.02d
穗肥期	CN	12.13a	17.00a	19.98a	9.53b	9.05b	2.68b	1.99bc	10.34a
	CP	8.53ab	15.18a	19.63a	11.88ab	12.88ab	6.07a	4.75a	11.27a
	B	8.80ab	14.20a	21.43a	16.00a	15.08a	5.63a	5.48a	12.37a
	BCP	6.77b	11.87a	17.52a	13.55ab	13.48a	6.78a	4.18ab	10.59a
	NO	4.10b	1.77b	1.98b	1.13c	1.88c	0.33b	0.41c	1.66b

1)同一列每个肥期不同字母表示这一肥期此列处理之间差异显著, $P < 0.05$ ,下同

表2 不同肥期NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N平均浓度比较/mg·L<sup>-1</sup>

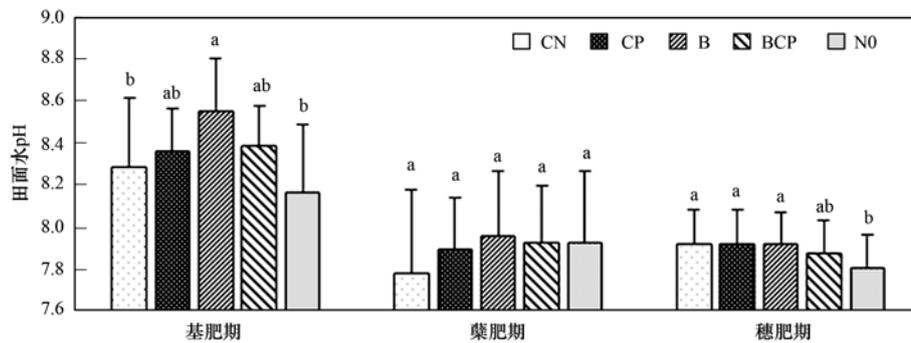
Table 2 Comparison of the average mass concentrations of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in different fertilizer periods/mg·L<sup>-1</sup>

肥期	CN	CP	B	BCP	NO	均值
基肥期	11.31a	13.76a	24.42a	18.35a	2.72a	14.11a
蘖肥期	6.89a	8.88a	12.69b	11.22a	1.02b	8.14b
穗肥期	10.34a	11.28a	12.38b	10.59a	1.66ab	9.25b

### 2.3 稻季氨挥发排放通量

图2结果表明,不同处理氨挥发排放通量变化趋势基本一致,肥期(施肥7d内)的氨挥发排放通

量明显高于非肥期(施肥7d以后)。氮肥添加明显增加了肥期的氨挥发损失通量。此外,不同处理均在3次施肥后的1~3d达到排放通量峰值,此



柱形图上方每个肥期不同小写字母表示这一肥期不同处理之间差异显著,  $P < 0.05$

图1 各处理不同肥期田面水 pH 变化

Fig. 1 Dynamics of surface water pH under different treatments

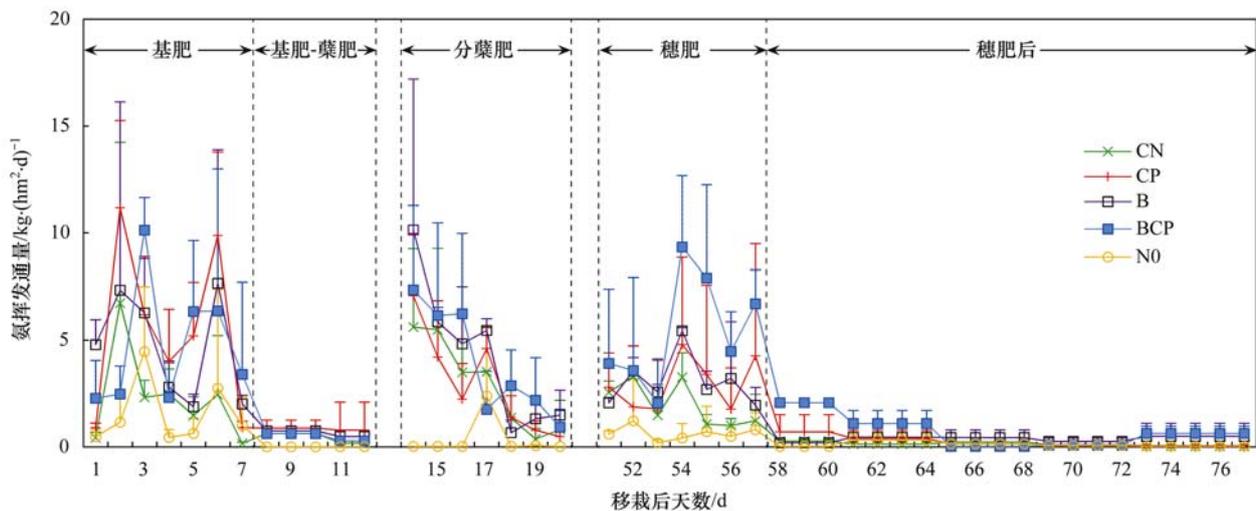


图2 不同处理氨挥发通量变化

Fig. 2 Dynamics of ammonia volatilization flux under different treatments

后逐渐下降. 基肥期和蘖肥期的排放通量峰值明显高于穗肥期. 除 BCP 处理在穗肥施用后第 8 d 和 9 d (移栽后 59 ~ 60 d) 的氨挥发排放通量较高, 不同处理非肥期的氨挥发排放通量均较低. 与 CN 处理相比, 添加土壤增效剂处理 (CP、B 和 BCP) 不同程度增加了氨挥发通量. 其中, 与 CN 处理相比, B 处理在基肥 1 d 与其差异显著、CP 处理在基肥 5 d 与其差异显著、BCP 处理在基肥 3 d 和 5 d 达到显著水平. 此外, 耦合添加处理 BCP 显著提高了穗肥期氨挥发排放通量. 不同处理的排放通量均值在不同阶段分别表现为: CP、BCP、B > CN > N0 (基肥期), B、BCP > CP、CN > N0 (蘖肥期), BCP > B、CP、CN > N0 (穗肥期), CP > B > BCP、CN > N0 (基肥-蘖肥), BCP > B > CP、CN > N0 (穗肥后).

#### 2.4 累积氨挥发损失量

表 3 结果表明, 氮肥和添加剂施用显著增加了氨挥发损失, 损失量为  $55.83 \sim 115.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 占施氮量的 13% ~ 35%. 肥期的氨挥发损失量显著高于非肥期, 占全生育期氨挥发损失量的 86% ~ 91%, 是氨挥发损失的主要时期. 处理间比较来

看, 与 CN 处理相比, 硝化抑制剂和生物炭单一添加 (CP 和 B) 与耦合添加处理 (BCP) 均不同程度增加了稻田氨挥发阶段损失量和总损失量, 其中, BCP 处理达到显著水平. 此外, 不同增效剂处理对氨挥发损失的影响在不同阶段表现不尽一致, 基肥期氨挥发损失量 CP 处理最高, 蘖肥期 B 处理最高, 穗肥期 BCP 处理最高. 与 CN 处理相比, CP 处理主要增加了基肥期、穗肥期和非肥期的氨挥发, 增加比例分别为 138%、48% 和 78%, 氨挥发总量增加了 59%; B 处理则促进了所有肥期和非肥期的氨挥发, 其中基肥期和蘖肥期增加比例高于穗肥期和穗肥后阶段, 氨挥发总量增加了 69%; BCP 处理对氨挥发的促进作用更加明显, 尤其是穗肥期和穗肥后, 氨挥发增加了 1.72 倍和 3.94 倍, 氨挥发总量增加了 1.07 倍. 不同处理在基肥期、蘖肥期、穗肥期和非肥期氨挥发损失量及全生育期氨挥发总损失量分别表现为: CP > BCP、B、CN > N0 (基肥期), B、BCP > CP、CN > N0 (蘖肥期), BCP > B、CP > CN > N0 (穗肥期), CP > B、BCP、CN > N0 (基肥-蘖肥), BCP > B > CP、CN > N0 (穗肥后), BCP > B、

表 3 稻季阶段氨挥发损失量与比例<sup>1)</sup>

Table 3 Volumes and ratios of cumulative ammonia emissions in different periods of the paddy season

处理	肥期			肥期占全生育期总氨挥发量的比例/%	非肥期 <sup>2)</sup>		肥期和非肥期总量 /kg·hm <sup>-2</sup>	氨挥发占总施氮量比例 /%
	BF /kg·hm <sup>-2</sup>	TF /kg·hm <sup>-2</sup>	PF /kg·hm <sup>-2</sup>		BF-TF 阶段 /kg·hm <sup>-2</sup>	PF 后阶段 /kg·hm <sup>-2</sup>		
CN	16.07ab	20.67ab	13.92ab	91	2.29ab	2.88b	55.83bc	13
CP	38.25a	20.74ab	20.67ab	90	4.23a	4.98b	88.87ab	25
B	32.76ab	29.73a	20.95ab	88	3.24ab	7.73b	94.40ab	27
BCP	33.36ab	27.43a	37.94a	86	2.45ab	14.24a	115.42a	35
N0	10.96b	2.59b	4.47b	88	0.07b	2.44b	20.52c	—

1) 同一列不同小写字母表示不同处理阶段氨挥发差异显著,  $P < 0.05$ ; BF 指基肥期, TF 指蘖肥期, PF 指穗肥期; 2) 非肥期指施肥 7 d 后的时间

CP > CN > N0(全生育期).

### 2.5 不同配施处理对水稻产量的影响

不同处理下水稻产量结果表明(图 3), 不同处理间水稻产量无显著差异, 且均明显高于不施氮肥 N0 处理. 与 CN 处理相比, 硝化抑制剂添加处理 CP 的产量增加了 12%, 而添加生物炭处理(B 和 BCP)产量则有所下降, 但差异不显著. 生物炭与硝化抑制剂配施处理 BCP 的产量略高于单一添加生物炭处理. 表明硝化抑制剂添加中和了生物炭添加对产量带来的不利影响.

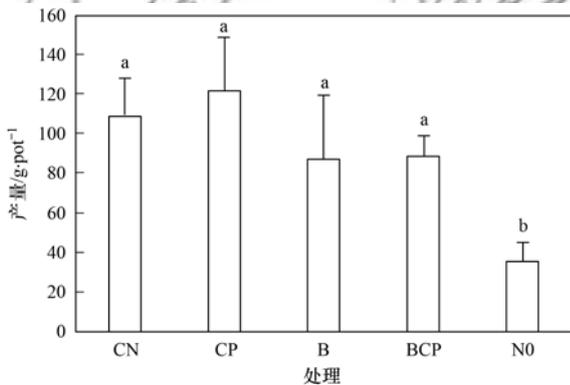


图 3 不同处理对水稻产量的影响

Fig. 3 Rice yield relative to the different treatments

### 3 讨论

我国的人口和现实国情要求必须以保证作物产量为前提进行稻田面源污染减排技术的研发. 本研究表明, 硝化抑制剂和生物炭添加对水稻产量无显著影响, 但硝化抑制剂添加处理(CP)表现出一定的增产优势(图 3), 这可能与水稻倾向于吸收  $\text{NH}_4^+$ -N, 而硝化抑制剂与氮肥配合施用后使施入土壤中的氮较长时间内以  $\text{NH}_4^+$ -N 形态存在, 供水稻吸收利用有关<sup>[5]</sup>. 稻田氨挥发是稻田田面水中游离的  $\text{NH}_4^+$  转换为气态  $\text{NH}_3$  后经水面挥发到空气中的过程, 与施氮量、田面水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度、田面水 pH 等密切相关<sup>[21, 22]</sup>, 是稻田氮素损失的最主要途径之一. 本研究结果表明, 氮肥施用明显增加稻田氨挥

发损失通量和损失量, 这与前人研究结果一致<sup>[21, 23, 24]</sup>. 氮肥施用主要通过影响田面水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度对氨挥发产生影响<sup>[24]</sup>. 本研究结果表明, 施氮后田面水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度迅速增加, 明显高于不施肥处理(表 1), 这可能与尿素的速效水解特性有关<sup>[25]</sup>. 徐珊珊等<sup>[21]</sup>的研究认为化肥施用后显著增加了肥期的氨挥发损失. 本研究也发现, 等氮量下, 单施化肥和复合添加土壤增效剂下各处理肥期(施肥后 7 d 内)的氨挥发损失显著高于非肥期(表 3), 是氨挥发损失的主要时期.

有研究表明, 硝化抑制剂施用可以阻断铵态氮向硝态氮的转化, 使稻田土壤和田面水中的  $\text{NH}_4^+$ -N 含量升高且较长时间维持在较高水平, 增加氨挥发损失<sup>[5]</sup>. 本研究也发现, 添加硝化抑制剂 CP 明显增加了 3 次施肥后田面水铵态氮浓度和氨挥发损失通量. 与单施化肥处理相比, CP 处理的氨挥发损失量增加了 59%, 且 CP 施用主要导致基肥、穗肥和非肥期氨挥发损失明显增加, 而对蘖肥期无明显影响(表 3). 因此, 亟需解决硝化抑制剂施用后稻田土壤铵态氮浓度升高引起的氨挥发排放增加的问题. 前人研究发现, 生物炭具有较大的比表面积及表面附着的含氧官能基团, 对旱地土壤氮素有较好的吸附效应, 能够降低旱地农田氨挥发损失<sup>[11~15]</sup>. 而稻田生物炭添加对氨挥发损失影响的研究结果不尽相同<sup>[16~18]</sup>. 本研究表明, 生物炭添加处理 B 未表现出对铵态氮的吸附效应, 田面水铵态氮浓度在基肥期和蘖肥期相比化肥处理还显著增加(表 1), 这可能是因为生物炭自身带入的碳 ( $503.10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 和氮素 ( $12.52 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 增加了土壤养分; 此外生物炭的高 C/N 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, 从而使铵态氮浓度增加<sup>[26, 27]</sup>. 加上生物炭本身是一种碱性物质 (pH 8.9), 其添加后明显提高了田面水的 pH(图 1), 因此对稻田氨挥发排放起到了促进作用. 生物炭添加处理下稻田氨挥发损失具有明显的

阶段性特征, 基肥期和蘖肥期的增加效应高于穗肥期和穗肥后(表 3)。这可能与生物炭的老化有关, 老化后的生物炭自身特性改变, 从而降低氨挥发排放<sup>[15, 28]</sup>。

由于生物炭和硝化抑制剂添加对氨挥发损失均有促进作用, 两者配施表现出了正交互作用, BCP 处理的氨挥发损失总量高于单施生物炭和硝化抑制剂处理。值得注意的是, BCP 处理的穗肥期田面水铵态氮浓度和 pH 均低于单施生物炭和硝化抑制剂处理, 但其穗肥期氨挥发损失却明显高于单施生物炭和硝化抑制剂处理, 说明耦合添加的氨挥发损失与田面水氮浓度无明显相关关系, 这与侯朋福等<sup>[26]</sup>的研究结果相同。这可能与复合添加对稻田土壤微生物群落结构的影响有关, 需要进一步研究<sup>[27, 29, 30]</sup>。本研究结果说明, 生物炭添加不能解决硝化抑制剂添加引起的铵态氮浓度升高和稻田氨挥发损失增加的问题, 对于硝化抑制剂添加引起的氨挥发损失增加的问题需要另行研究。

杨士红等<sup>[31]</sup>的研究表明, 控制灌溉水稻氨挥发损失量普遍较低。此外, 本试验是在盆栽条件下进行, 由于盆栽内径较小(30 cm), 每盆栽插 3 穴, 为防止氨挥发采气罩置于土壤中对水稻根系生长的影响, 采气罩置于较浅土层, 主要利用田面水层实现采气系统的密封, 因此在干湿交替的中期末对氨挥发排放通量进行监测。而土壤氮素转化是一个复杂的过程, 除水分因素外, 还与土壤 pH、有机碳和 C/N 等因素密切相关<sup>[32]</sup>。稻田排水晒田期土壤增效剂的添加, 尤其是生物炭添加可能会引起土壤理化性质、C/N 比、微生物活动、有机质分解及矿化速度发生改变<sup>[30]</sup>, 对氨挥发的影响仍需在大田条件下进一步研究验证。

#### 4 结论

(1) 硝化抑制剂和生物炭添加对水稻产量无显著影响, 但硝化抑制剂添加表现出一定的增产效应。

(2) 硝化抑制剂和生物炭添加均明显提高了田面水铵态氮浓度, 促进了氨挥发损失量, 增幅分别为 59% 和 68%。生物炭添加对稻田氨挥发的促进作用在基肥期和蘖肥期明显高于施穗肥以后。

(3) 生物炭和硝化抑制剂耦合添加表现出正交互作用, 氨挥发损失量高于单一添加硝化抑制剂或生物炭处理。

#### 参考文献:

[1] 薛利红, 俞映琼, 杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 1133-1138.

- Xue L H, Yu Y L, Yang L Z. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu Lake region [J]. Environmental Science, 2011, 32(4): 1133-1138.
- [2] 张亦涛, 王洪媛, 雷秋良, 等. 农田合理施氮量的推荐方法 [J]. 中国农业科学, 2018, 51(15): 2937-2947.  
Zhang Y T, Wang H Y, Lei Q L, et al. Recommended methods for optimal nitrogen application rate [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(15): 2937-2947.
- [3] Bodirsky B L, Popp A, Lotze-Campen H, et al. Reactive nitrogen requirements to feed the world in 2050 and potential to mitigate nitrogen pollution [J]. Nature Communications, 2014, 5: 3858.
- [4] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 95-104.  
Lu Y H, Nie J, Liao Y L, et al. Effects of urease and nitrification inhibitor on yield, nitrogen efficiency and soil nitrogen balance under double-rice cropping system [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 95-104.
- [5] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 硝化抑制剂施用对水稻产量与氨挥发的影响 [J]. 土壤, 2015, 47(6): 1027-1033.  
Sun H J, Min J, Shi W M, et al. Effects of nitrification inhibitor on rice production and ammonia volatilization in paddy rice field [J]. Soils, 2015, 47(6): 1027-1033.
- [6] 薛欣欣, 吴小平, 张永发, 等. 控失尿素对稻田氨挥发、氮素转运及利用效率的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 133-140.  
Xue X X, Wu X P, Zhang Y F, et al. Effects of loss-controlled urea on ammonia volatilization, N translocation and utilization efficiency in paddy rice [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 133-140.
- [7] Wang X, Xu S J, Wu S H, et al. Effect of *Trichoderma viride* biofertilizer on ammonia volatilization from an alkaline soil in Northern China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 66: 199-207.
- [8] 郭刚, 袁漫漫, 曹哲伟, 等. 江淮丘陵区不同氮肥管理模式下水稻氨挥发损失特征研究 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 285-288, 331.  
Wu G, Yuan M M, Cao Z W, et al. Study on the ammonia volatilization under different nitrogen schemes from paddy field in Jianghuai hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(4): 285-288, 331.
- [9] Baiamonte G, Crescimanno G, Parrino F, et al. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil [J]. CATENA, 2019, 175: 294-303.
- [10] Liu N, Zhou C J, Fu S F, et al. Study on characteristics of ammonium nitrogen adsorption by biochar prepared in different temperature [J]. Advanced Materials Research, 2013, 724-725: 452-456.
- [11] Mandal S, Thangarajan R, Bolan N S, et al. Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat [J]. Chemosphere, 2016, 142: 120-127.
- [12] Kastner J R, Miller J, Das K C. Pyrolysis conditions and ozone oxidation effects on ammonia adsorption in biomass generated chars [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2-3): 1420-1427.
- [13] Korus A, Szłęk A, Samson A. Physicochemical properties of biochars prepared from raw and acetone-extracted pine wood [J]. Fuel Processing Technology, 2019, 185: 106-116.

- [14] 郑蕾, 王学东, 郭李萍, 等. 施肥对露地菜地氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(12): 4063-4070.  
Zheng L, Wang X D, Guo L P, *et al.* Impact of fertilization on ammonia volatilization and N<sub>2</sub>O emissions in an open vegetable field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(12): 4063-4070.
- [15] 董玉兵, 吴震, 李博, 等. 追施生物炭对稻麦轮作中麦季氨挥发和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(5): 1258-1267.  
Dong Y B, Wu Z, Li B, *et al.* Effects of biochar reapplication on ammonia volatilization and nitrogen use efficiency during wheat season in a rice-wheat annual rotation system [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, **23**(5): 1258-1267.
- [16] 王江伟. 秸秆黑炭对农田作物生长、土壤性质及氨挥发的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. 43-48.  
Wang J W. Effects of successive straw biochar application on crop growth, soil fertility and ammonia volatilization in three agricultural soils with varying properties and crop rotations [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. 43-48.
- [17] Sun H J, Zhang H L, Min J, *et al.* Controlled-release fertilizer, floating duckweed, and biochar affect ammonia volatilization and nitrous oxide emission from rice paddy fields irrigated with nitrogen-rich wastewater [J]. Paddy and Water Environment, 2016, **14**(1): 105-111.
- [18] Feng Y F, Sun H J, Xue L H, *et al.* Biochar applied at an appropriate rate can avoid increasing NH<sub>3</sub> volatilization dramatically in rice paddy soil[J]. Chemosphere, 2017, **168**: 1277-1284.
- [19] 张刚, 王德建, 俞元春, 等. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, **22**(4): 877-885.  
Zhang G, Wang D J, Yu Y C, *et al.* Effects of straw incorporation plus nitrogen fertilizer on rice yield, nitrogen use efficiency and nitrogen loss [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, **22**(4): 877-885.
- [20] Chen A Q, Lei B K, Hu W L, *et al.* Characteristics of ammonia volatilization on rice grown under different nitrogen application rates and its quantitative predictions in Erhai Lake Watershed, China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, **101**(1): 139-152.
- [21] 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.
- [22] Huda A, Gaihe 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.
- [23] Cameron K C, Di H J, Moir J L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review[J]. Annals of Applied Biology, 2013, **162**(2): 145-173.
- [24] 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.
- [25] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 秸秆还田条件下稻田田面水不同形态氮动态变化特征研究[J]. 水利学报, 2014, **45**(4): 410-418.  
Wang J, Guo X S, Wang Y Q, *et al.* Study on dynamics of nitrogen in different forms in surface water of paddy field under straw return [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(4): 410-418.
- [26] 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 等. 缓控释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.
- [27] 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.
- [28] Ren X H, Sun H W, Wang F, *et al.* The changes in biochar properties and sorption capacities after being cultured with wheat for 3 months[J]. Chemosphere, 2016, **144**: 2257-2263.
- [29] Rajput R, Pokhriya P, Panwar P, *et al.* Soil nutrients, microbial biomass, and crop response to organic amendments in rice cropping system in the Shivaliks of Indian Himalayas [J]. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 2019, **8**(1): 73-85.
- [30] 阎海涛, 殷全玉, 丁松爽, 等. 生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2412-2419.  
Yan H T, Yin Q Y, Ding S S, *et al.* Effect of biochar amendment on physicochemical properties and fungal community structures of cinnamon soil [J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2412-2419.
- [31] 杨士红, 彭世彰, 徐俊增, 等. 不同水氮管理下稻田氨挥发损失特征及模拟[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(11): 99-104.  
Yang S H, Peng S Z, Xu J Z, *et al.* Characteristics and simulation of ammonia volatilization from paddy fields under different water and nitrogen management [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, **28**(11): 99-104.
- [32] 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.

## CONTENTS

Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016 .....	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter .....	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> , and Heavy Pollution Analysis in Hefei .....	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China .....	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM <sub>2.5</sub> in the Guanzhong Area .....	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun .....	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM <sub>2.5</sub> Pollution in China .....	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM <sub>2.5</sub> from Coal-Fired Power Plants .....	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province .....	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site .....	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao .....	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou .....	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project .....	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta .....	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China .....	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir .....	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging .....	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang .....	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands .....	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing .....	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors .....	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin .....	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen .....	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water .....	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling .....	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs .....	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process .....	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials .....	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains .....	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials .....	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid .....	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR .....	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System .....	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX .....	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems .....	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China .....	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations .....	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NPI .....	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification .....	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N <sub>2</sub> O Production Under Saline and Alkaline Conditions .....	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil .....	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields .....	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde .....	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City .....	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils .....	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P .....	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions .....	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils .....	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils .....	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates .....	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia .....	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents .....	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM <sub>2.5</sub> Based on a Battery of Bioassays .....	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)