

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 李志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315)	
《环境科学》征稿简则 (3357)	
信息 (3391, 3441, 3564)	

麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响

韩晨^{1,2}, 侯朋福^{2,3}, 薛利红^{1,2,3}, 冯彦房^{1,2,3*}, 余姗², 杨林章^{1,2}

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 3. 江苏大学环境与安全工程学院, 镇江 212001)

摘要: 水热炭的酸性特性及材料吸附性质为其稻田回用及氨挥发损失控制提供了可能. 为实现农业废弃物的资源化利用和稻田环境损失控制, 本研究以小麦秸秆为原材料, 通过土柱模拟试验, 考察了麦秸水热炭 (WHC) 及其水洗改良产物 (W-WHC) 对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响. 结果表明, 麦秸水热炭及其改良产物稻田回用能够增加水稻产量, 低量添加 (0.5%) 的增产效应高于高量添加 (1.5%) 处理. 低量添加下, WHC 和 W-WHC 处理的水稻产量分别较对照处理 (CKU) 增加 17.16% 和 20.20%. 结果同时表明, 除 W-WHC 低量添加处理的氨挥发损失量与对照相当, 水热炭及其改良产物添加均能够减少稻田氨挥发损失. 其中, WHC 低量添加和 W-WHC 高量添加处理的稻田氨挥发损失显著低于 CKU 处理, NH_3 挥发累积排放量分别减少 31.01% 和 17.40%. 阶段氨挥发损失结果分析表明, 水热炭添加对稻田氨挥发损失的控制效应主要集中在蘖肥期和穗肥期, 水热炭添加后蘖肥期田面水氮素浓度的变化和穗肥期田面水 pH 的改变是秸秆水热炭添加后稻田氨挥发控制的主要驱动因素. 结果说明, 适宜用量下小麦秸秆碳化还田可以在提高作物产量的同时减少稻田氨挥发损失, 是一种适于农业副产物资源化利用的良好方式.

关键词: 农业废弃物; 水热炭化; 水稻; 产量; 氨挥发

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3451-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010086

Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields

HAN Chen^{1,2}, HOU Peng-fu^{2,3}, XUE Li-hong^{1,2,3}, FENG Yan-fang^{1,2,3*}, YU Shan², YANG Lin-zhang^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Key Laboratory of Agricultural 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; 3. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212001, China)

Abstract: Hydrochar can mitigate ammonia volatilization when applied in paddy fields due to its acidity and adsorption property. To realize the recycling of agricultural biowaste as well as the control of nutrient loss from paddy fields, a simulation soil-column experiment with wheat straw hydrochar (WHC) and water-washed hydrochar (W-WHC) was conducted to evaluate the performance of rice yield and ammonia volatilization from paddy fields. The results showed that WHC and W-WHC applied in paddy fields both increased the rice yield and the increased effect at low application rate (0.5%) was higher than that at high application rate (1.5%). In comparison with the control treatment (CKU), the rice yields achieved from low application rate treatments for WHC and W-WHC increased by 17.16% and 20.20% respectively. Except for the equal emission rate between W-WHC with low application rate and CKU treatments, hydrochar (WHC, W-WHC) addition reduced the ammonia volatilization from paddy fields when compared with the CKU. Among them, the ammonia volatilization levels from low-application WHC and high-application W-WHC treatments were significantly lower than that from the CKU treatment, reduced by 31.01% and 17.40%, respectively. Based on the analysis of ammonia volatilization during different fertilization stages, the control effect of hydrochar addition on ammonia volatilization was mainly benefited from tillering and panicle fertilizer stages. The change in the nitrogen concentration of surface water at the tillering fertilizer stage and in pH at the panicle fertilizer stage with the addition of hydrochar was the main driving factor for the reduction in ammonia volatilization. The results show that sufficient amounts of hydrochar derived from wheat straw application can increase crop yield while reducing ammonia volatilization from paddy fields. This method provides an effective route for recycling agricultural biowastes.

Key words: agricultural biowaste; hydrothermal carbonization; rice; yield; ammonia volatilization

水稻是一种重要的粮食作物, 据统计, 全球范围内有超过 35 亿人口以稻米为主食^[1]. 氮肥投入的增加对提高包括水稻在内的粮食作物产量, 保障口粮安全以应对全球人口的持续增长发挥了重要作用. 据统计, 与 20 世纪 60 年代相比, 全球农田氮肥用量近几十年来增加了近 7 倍^[2]. 氮肥投入的大幅增加

在提高作物产量的同时也增加了农田氮素损失. 就

收稿日期: 2020-10-16; 修订日期: 2020-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877090); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0300104); 江苏省农业科技自主创新项目 (CX(19)1007)

作者简介: 韩晨 (1998 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田废弃物资源化及其环境效应, E-mail: 1372579746@qq.com

* 通信作者, E-mail: jaasfengyanfang@163.com

水稻而言,其对氮素的当季利用率仅为 31.1%~44.0%^[3],其余主要通过径流、淋洗、氨挥发和反硝化等途径损失^[4,5],进入周边水体及大气环境.其中,氨挥发损失是稻田最大的活性氮损失形态,其损失比例可达施肥量的 15%~40%^[6,7].因此,在保证水稻产量的基础上,寻求有效措施减少稻田氨挥发损失具有重要意义^[8].

生物质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,其理化性质稳定,具有较大的比表面积和较强的吸附能力,对氮化合物具有较好的吸附效果,是一种潜在的土壤增效剂^[9~11].但由于常规热裂解炭常呈碱性^[12],而氨挥发损失是受土壤 pH 和温度影响的物理过程,因此其稻田应用后可能会增加氨挥发损失^[13].近年来,水热炭化技术作为一种新兴的废弃生物质炭化方式,由于其在生产过程中的炭产量、能耗和烟气排放等方面的优势而受到关注^[14,15].与常规热裂解炭的碱性特性不同,水热炭常呈酸性,这为其稻田回用和氨挥发损失控制提供了可能.有研究表明,采用木屑制备的水热炭能够显著降低稻田 NH_3 挥发损失^[16].但由于兴起较晚,水热炭农田应用及其对氨挥发影响的研究明显不足.特别值得注意的是,受传统热裂解炭研究结果启发,生物炭对稻田氨挥发损失的影响除受 pH 影响外,还可能与材料本身性质及不同材料炭化后的官能团和孔隙结构等的差异有关^[17].因此,水热炭的稻田实际应用效果是否与热裂解炭相同,受材料影响不得而知.

秸秆是常见的农业副产物,由于多熟制地区复

种指数高和岔口紧,秸秆产量大,直接还田易出现秸秆分解过程与作物幼苗争夺养分现象,同时秸秆腐解过程中释放的 H_2S 等有毒物质易导致水稻黄苗、死苗等,带来不良影响^[18].秸秆炭化还田是秸秆再利用的一种有效方式,如前所述,由于兴起较晚,水热炭农田应用及其对氨挥发影响的研究明显不足.因此,秸秆水热炭化还田对稻田氨挥发的影响并不明确.此外,受制备过程影响,水热炭常携带大量的可溶性有机物^[19,20],直接过量施用可能会对作物生长产生影响^[21,22].水洗改良是去除水热炭表面可溶性有机物质,缓解其胁迫效应的有效手段^[14].有研究表明,与未改良水热炭相比,水洗改良后的水热炭表面孔隙结构和粗糙度得到明显改善,养分元素相对含量明显增加^[16],这些改变是否会对稻田氨挥发损失控制产生积极效应不得而知.基于此,本研究以秸秆炭化还田和稻田氨挥发损失控制为目的,通过土柱模拟试验,考察了秸秆水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响,以期为农业废弃物资源化和基于养分损失控制的稻田回用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 水热炭化材料的制备

以农业副产物小麦秸秆为原材料,在水热反应温度 260℃、压力 8 MPa 下利用高压水热反应釜进行秸秆水热炭 (WHC) 的制备;并通过去离子水浸渍(浸渍时间 1 h,其中炭:水=1:10,体积比,搅拌 30 min)、抽滤后烘干获得水洗秸秆水热炭 (W-WHC).不同水热炭的理化性质如表 1 所示.

表 1 试验所用水热炭的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of hydrothermal carbon used in the experiment

处理	pH	C/%	N/%	比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	孔容/ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	孔径/nm
WHC	4.77	47.96	2.77	0.3	1.28×10^{-3}	17.07
W-WHC	4.94	51.07	3.16	1.24	0.16×10^{-3}	50.88

1.2 试验设计

本试验采用模拟土柱(高度 0.50 m;直径 0.30 m),于 2018 年 6~10 月在江苏省农业科学院院内进行.供试水稻品种为南粳 46 号(太湖地区常规粳稻品种),2018 年 6 月 29 日移栽,11 月 9 日收获.供试土壤为黄泥土,取自江苏省宜兴市周铁镇,取耕作层(0~20 cm)和非耕作层(20 cm 以下)土壤分别混匀后分层添加到试验土柱(0~20 cm、20~50 cm).每个土柱共装入 35 kg 的水稻土,并经过 12 个月的稳定处理.供试耕作层土壤(0~20 cm)的基本性质如下:pH 为 6.42(土壤:水=1:2.5),有机质含量为 2.92%,全氮为 $1.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷为 23.09

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾为 $159.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,CEC 为 $22.61 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$.

本试验共设置 6 个处理:以常规分次施肥 (CKU) 为对照,在 0.5% 和 1.5% (质量分数) 添加量下设置水热炭 (WHC) 和水洗水热炭 (W-WHC) 添加处理 (WHC05、WHC15、W-WHC05 和 W-WHC15);为进一步明确氨挥发损失的肥料来源占比,另设置不施氮肥处理对照 (CK0).每个处理 3 次重复.施炭处理于水稻移栽前,将水热炭按预定添加量与 0~20 cm 表土混匀.除不施氮肥处理,其余处理的氮肥分基肥、蘖肥和穗肥,分别在 6 月 30 日、7 月 15 日和 8 月 13 日施用.本试验所用氮肥为尿素.

3 次氮肥施加量分别为 96、96 和 48 kg·hm⁻². 所有处理的磷钾肥用量一致, 均在基肥时一次性施入. 磷肥和钾肥用量分别为 96 kg·hm⁻² 和 192 kg·hm⁻², 磷肥采用过磷酸钙, 钾肥为氯化钾. 水分管理为全生育期淹水灌溉, 田面保持 3~5 cm 水层.

1.3 样品的采集与测定

1.3.1 氨挥发排放

采用密闭室间歇抽气-硼酸吸收法收集测定氨挥发^[23], 密闭室为直径 10 cm 的有机玻璃圆筒, 顶部留有进气孔和采气孔, 其中进气孔与通气管 (高 2 m) 连通, 采气孔通过吸收装置与真空泵相连. 每次施肥后 7 d 内连续每天滴定, 采集时间为 08:00~10:00 和 13:00~15:00. 使用 0.01 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 对硼酸吸收液进行反滴定确定 NH₃ 吸收量. NH₃ 的累积挥发量为观测期间日排放量之和^[24]. 氨挥发通量计算公式为:

$$F = c \times V \times 10^{-3} \times (24/4) \times 0.014 \times (10^4 / \pi \times r^2)$$

式中, F 表示氨挥发通量 [kg·(hm²·d)⁻¹]; c 表示滴定用硫酸的标准浓度 (mol·L⁻¹); V 表示滴定用硫酸的体积 (mL); 24/4 表示 24 h 与日氨挥发收集时间 4 h 的比值; 0.014 表示氮原子的相对原子质量 (kg·mol⁻¹); 10⁴ 表示面积转换系数; r 表示气室的半径 (m).

1.3.2 田面水 pH 和 NH₄⁺-N 含量

与氨挥发采集同步, 使用便携式 pH 仪 (德国 WTW pH3310SET2) 原位测定田面水 pH, 并采集田面水, 利用 SKALAR SAN⁺⁺ SYSTEM 流动分析仪测定 NH₄⁺-N 含量.

1.3.3 水稻产量

水稻成熟期, 将土柱地上部分植株样品收割并分为籽粒和秸秆两部分. 籽粒在自然条件下风干后脱粒称重, 并按标准水分含量 (13.5%) 折算水稻产量.

1.4 数据处理与分析

用 Microsoft Excel 2013 进行数据统计分析, 用 SPSS 2019 统计软件进行方差分析, 使用 Origin 2019 进行绘图.

2 结果与分析

2.1 田面水 NH₄⁺-N 浓度

3 次施肥后田面水 NH₄⁺-N 浓度动态变化如图 1 所示. 结果表明, 不同处理的田面水 NH₄⁺-N 浓度均在 3 次施肥后 1~2 d 达到峰值浓度, 此后逐渐降低. 穗肥期田面水 NH₄⁺-N 峰值浓度明显低于基肥期和蘖肥期. 处理间浓度比较来看, 基肥期和蘖肥期

CKU 处理的田面水 NH₄⁺-N 峰值浓度均最高, 穗肥期各处理的田面水 NH₄⁺-N 浓度均处于较低水平. 此外, 与蘖肥期和穗肥期不同, 基肥期水热炭处理的田面水 NH₄⁺-N 浓度普遍高于 CKU 处理, 其中, W-WHC05 处理田面水 NH₄⁺-N 浓度明显较高.

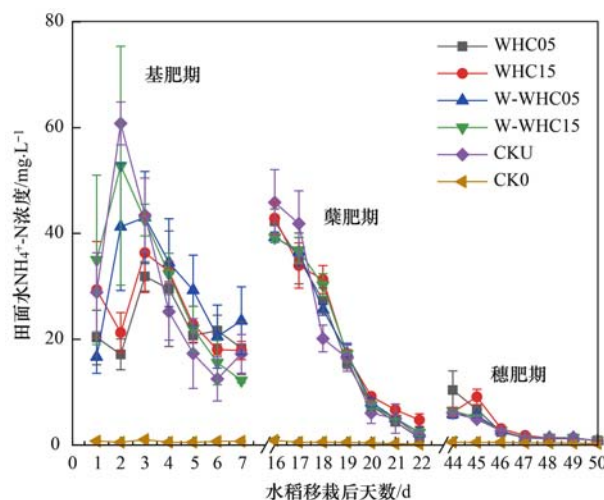


图 1 水热炭添加对水稻肥期田面水 NH₄⁺-N 质量浓度的影响

Fig. 1 Effect of hydrochar addition on NH₄⁺-N concentration in surface water after fertilization

2.2 田面水 pH

由于 3 次施肥后田面水 pH 变化幅度较小 (数据未列出), 因此本部分仅对处理间田面水 pH 进行肥期的均值比较. 结果表明, 不同处理的田面水 pH 均为中性偏碱 (图 2). 与 CKU 处理相比, 水热炭添加处理有降低田面水 pH 的趋势, 但不同处理在基肥期和蘖肥期的差异均未达到显著水平 ($P > 0.05$); 穗肥期差异显著 ($P < 0.05$). 穗肥期处理间比较来看, 水热炭及其改良产物低量添加处理 (0.5%, 质量分数) 的田面水 pH 显著低于高量添加处理 (1.5%, 质量分数). 此外, WHC05 处理的穗肥

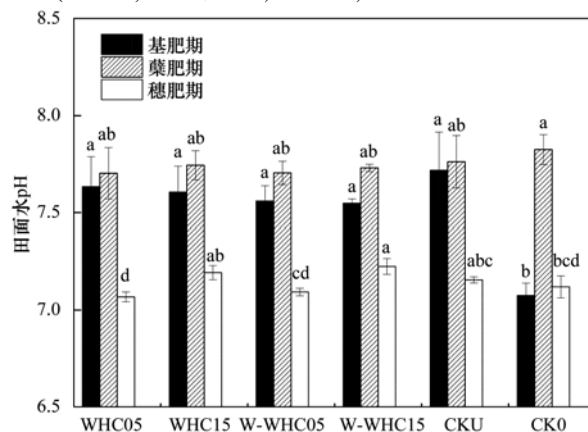


图 2 水热炭添加对水稻肥期田面水 pH 的影响

Fig. 2 Effect of hydrochar addition on surface water pH after fertilization

期田面水 pH 显著低于 CKU 处理($P < 0.05$).

2.3 氨挥发排放通量

不同处理 NH₃ 挥发排放通量列于图 3. 结果表明,不同处理的氨挥发排放均在 3 次施肥后的 2~3 d 达到峰值浓度,此后逐渐降低. 穗肥期的氨挥发排放通量明显低于基肥期和蘖肥期. 处理间比较来看,基肥期水热炭添加处理(WHC05、WHC15、W-WHC05 和 W-WHC15)的氨挥发排放通量峰值均高于 CKU 处理,且高量添加处理(WHC15 和 W-

WHC15)的氨挥发排放通量峰值明显较高. 蘖肥期 CKU 处理的氨挥发排放通量峰值显著高于其它处理,此外,W-WHC05 处理的蘖肥期排放通量峰值也明显较高. 穗肥期除 CKU 处理的排放通量峰值明显较高,由于排放通量较小,不同处理间差异较小,且未呈现一致性规律变化.

2.4 NH₃ 挥发累积排放量

NH₃ 挥发累积排放量结果表明,不同处理的 NH₃ 挥发累积排放量均表现为基肥期最高,穗肥期最低,除了 W-WHC15 处理穗肥期 NH₃ 挥发累积排放量仅显著低于基肥期外,其他各处理穗肥期的 NH₃ 挥发累积排放量显著低于基肥期和蘖肥期(表 2). 不同肥期处理间比较来看,基肥期水热炭添加处理的 NH₃ 挥发损失量均高于 CKU 处理,而蘖肥期和穗肥期水热炭添加处理的 NH₃ 挥发损失量则低于 CKU 处理,其中蘖肥期水热炭添加处理的氨挥发损失量均显著低于 CKU 处理,穗肥期 WHC05 和 W-WHC15 处理与 CKU 处理差异显著. 全生育期氨挥发累积排放量结果分析表明,不同处理的氨挥发损失量占施肥量的 11.96%~25.18%. 除 W-WHC05 处理与 CKU 处理的氨挥发累积排放量相当,其它水热炭添加处理的氨挥发累积排放量均低于 CKU 处理. WHC05 和 W-WHC15 处理与 CKU 处理的差异显著,NH₃ 挥发累积排放量分别减少 31.01% 和 17.40%.

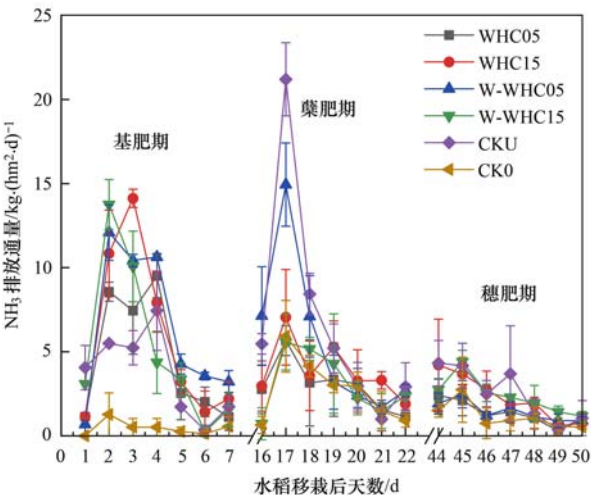


图3 水热炭添加对稻田 NH₃ 挥发排放通量的影响
Fig. 3 Effect of hydrochar addition on NH₃ volatilization flux from paddy fields

表2 水热炭添加对稻田 NH₃ 挥发累积排放量的影响¹⁾

处理	NH ₃ 挥发累积排放量/kg·hm ⁻²				氮肥损失比/%
	基肥期	蘖肥期	穗肥期	累积排放量	
WHC05	32.34 ± 4.23cA	20.71 ± 5.70cdB	9.48 ± 2.45cdC	62.53 ± 7.03c	11.96
WHC15	40.88 ± 4.80abA	27.34 ± 1.37cB	15.82 ± 3.92abcC	84.04 ± 8.03ab	20.92
W-WHC05	44.89 ± 3.27aA	39.16 ± 5.17bA	10.19 ± 2.16bcdB	94.25 ± 4.53a	25.18
W-WHC15	36.47 ± 2.69bcA	21.83 ± 3.83cdB	16.55 ± 1.21abB	74.85 ± 0.05b	17.09
CKU	26.03 ± 1.23eB	47.18 ± 5.42aA	17.41 ± 5.38aB	90.62 ± 8.89a	23.66
CK0	6.68 ± 1.72dB	19.10 ± 0.70dA	8.05 ± 3.71dB	33.83 ± 4.58d	—

1) 同一生育期不同小写字母表示处理之间存在显著差异,同一处理不同大写字母表示生育期之间存在显著差异, $P < 0.05$

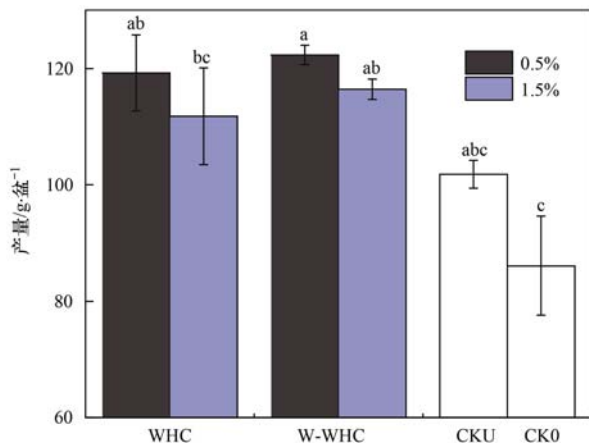
2.5 水稻产量

不同水热炭处理的水稻产量结果表明(图 4),与对照 CKU 处理相比,麦秸水热炭及其改良产物均增加了水稻的产量,水热炭低量添加处理(0.5%,质量分数)的水稻增产效应高于高量添加处理(1.5%,质量分数). 与对照处理相比,低量添加下,WHC05 和 W-WHC05 处理的水稻产量增幅分别为 17.16% 和 20.20%. 结果同时表明,相同添加量下,经过水洗处理的水热炭对水稻产量的增加效应有高于未改良水热炭的趋势.

3 讨论

3.1 麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量的影响

受制备过程影响,水热炭常携带大量的可溶性有机物,直接过量施用可能会对作物生长产生不利影响. 但有研究指出,水热炭及其改良产物在适宜用量下能够增加水稻产量. 本研究发现,在 0.5% 和 1.5% 添加量下,未改良小麦秸秆水热炭及其水洗改良产物均不同程度地提高了水稻产量,表现出良好的增产效果. 这可能与适宜用量下水热炭的吸附特



柱形图上方不同字母表示处理之间存在显著差异, $P < 0.05$

图4 麦秸水热炭对水稻产量的影响

Fig. 4 Effect of wheat straw hydrothermal charcoal on rice yield

性和养分输入有关。

首先,水热炭本身含有丰富的营养元素,保留大量含氧官能团^[25],能够为作物生长直接提供营养^[26];其次,水热炭良好的吸附性能,发达的孔隙结构(表1),能够有效吸附固持土壤中养分元素,在实现养分缓效释放的同时减少养分流失,从而促进水稻生长及增加水稻产量^[27]。此外,有研究表明,土壤中适量的挥发性有机物存在也可以促进植物生长。因此,适宜用量下水热炭材料表面携带的可溶性有机物可能也对作物生长起积极效应。但可溶性有机物中含有有机酚类和醛类等物质,过量的外源有机酚类和醛类等物质可能对土壤生物活性产生抑制作用^[28],并损害作物根部和地上部生长,从而对作物产量产生抑制效应^[29]。这可能是低量添加的产量高于高量添加的原因。值得一提的是,与未改良水热炭相比,水热炭水洗改良后可以在一定程度上溶出并降解水热炭化材料表面的可溶性有机成分^[30],其pH、碳氮含量、比表面积和孔径均得到改善(表1)。与未改良水热炭相比,水洗水热炭中C和N元素含量明显提高。水热炭中养分元素的增加不仅可以提高其本身养分供应能力,还可以通过提高土壤微生物的生物利用性增加土壤养分供应能力^[31]。此外,本研究材料表征结果表明,水洗后水热炭的比表面积和孔径较原始水热炭分别增加了4.13倍和2.98倍,表面孔隙率明显提高。这可以进一步改善其吸附特性及土壤通气性,并促进微生物活动,提高土壤的养分供应能力^[32]。因此,水热炭添加下水稻产量的增加可能是上述多种因素共同作用的结果。

3.2 麦秸水热炭及其改良产物对稻田氨挥发损失的影响

本研究结果表明,不同处理的 NH_3 挥发累积排放量均表现为前期较高(基肥期最高),后期较低

(穗肥期最低)。除与施肥量密切相关外,还可能与作物生长动态和所处时期的气候条件有关。试验所在地区一般6月下旬移栽,10月下旬收获,由于移栽后短时间内(基肥期、分蘖期)植被盖度较低,且此期温度高、光照强,有利于氨挥发的产生,因此水稻生长前期氨挥发损失较高,而穗肥期稻田郁闭度较高,温度、光强降低,不利于稻田氨挥发,此期最低^[4]。季节排放量比较结果表明,除W-WHC05处理与CKU处理的氨挥发累积排放量相当,小麦秸秆制备的水热炭及其水洗改良产物均降低了稻田氨挥发损失,其中,WHC05和W-WHC15处理与CKU处理的差异显著, NH_3 挥发累积排放量分别减少31.01%和17.40%。

由于课题组前期研究发现,稻田的氨挥发主要集中在肥期^[33],因此本研究重点通过3次施肥后连续监测结果对水热炭的氨挥发控制效应进行解析。肥期结果比较来看,其降低效应主要集中在蘖肥期和穗肥期,而基肥期增加了氨挥发排放通量和累积损失量(表2)。这与余姗等^[16]指出锯末水热炭施用后基肥期氨挥发损失同样低于CKU处理的研究结果不尽相同。结果说明,不同炭化材料对稻田氨挥发的影响过程不尽一致。与锯末水热炭相比,除养分元素丰富和吸附特性良好^[14],秸秆水热炭的碳氮比明显较低,碳氮比仅为16。而高碳氮比的生物炭添加初期更有利于土壤氮素的固定,减少土壤速效氮含量^[34]。因此,秸秆水热炭施用后养分释放导致的基肥期田面水 NH_4^+-N 浓度增加(其最大值达到 $60.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,图1),以及材料本身较低的碳氮比(表1)可能是其添加后引起基肥期氨挥发增加的主要原因。

氨挥发损失是受田面水 NH_4^+-N 浓度和pH控制的物理过程^[35,36]。汪军等^[24]的研究指出,稻田氨挥发速率与田面水 NH_4^+-N 浓度呈显著正相关关系。此外,Yu等^[6]的研究指出,淹水中pH值的变化对 NH_3 挥发速率有较大影响。当淹水呈弱碱性,即使是微小的pH增加也会迅速增加 NH_3 挥发。本研究结果表明,所有处理的稻田田面水pH在3个肥期均呈弱碱性,田面水氮素浓度也呈现先高后低的变化趋势(1~2 d达到峰值浓度)。与CKU处理相比,水热炭添加处理的蘖肥期的田面水pH与CKU处理无显著差异,其田面水pH值约为7.75,但 NH_4^+-N 峰值浓度明显较低,其中水热炭处理的 NH_4^+-N 最大峰值浓度也明显低于CKU处理(WHC15处理);而穗肥期田面水 NH_4^+-N 浓度无明显差异,但低量添加处理的田面水pH显著降低。因此,水热炭添加后蘖肥期田面水氮素浓度的变化(图1)和穗肥期田面水

pH 的改变(图 2)可能是秸秆水热炭添加对稻田氨挥发控制的主要原因. 这说明,水热炭材料稻田应用对氨挥发损失控制的机制与还田时间密切相关,在不同时期不尽一致,其添加后田面水的 pH 和铵态氮浓度变化均值得关注. 本研究还表明,与未改良水热炭不同,高量添加下改良水热炭的氨挥发损失低于低量添加. 如前所述,与未改良水热炭相比,水洗后水热炭的比表面积和孔径分别增加了 4.13 倍和 2.98 倍,表面孔隙率明显提高. 这可以进一步改善其吸附特性,从而增加其对 NH_4^+ -N 的吸附固定. 因此,水洗改良后水热炭表面吸附特性的改善可能是高量添加下改良水热炭的氨挥发损失低于低量添加的主要原因. 此外,值得注意的是,低量水热炭添加后其穗肥期田面水 pH 显著低于高量添加处理. 由于水热炭及其改良产物均为酸性,因此,这是否暗示低量添加下水热炭对土壤氮素周转可能存在激发效应有待进一步试验证实.

4 结论

(1) 麦秸水热炭及其改良产物稻田回用能够增加水稻产量,低量添加的增产效应高于高量添加.

(2) 除 W-WHC05 处理,水热炭及其改良产物添加均能够减少稻田氨挥发损失,且其控制效应主要集中在蘖肥期和穗肥期.

(3) 水热炭添加后蘖肥期田面水氮素浓度的变化和穗肥期田面水 pH 的改变可能是麦秸水热炭添加对稻田氨挥发控制的主要原因.

参考文献:

- [1] Seck P A, Diagne A, Mohanty S, *et al.* Crops that feed the world 7: rice[J]. Food Security, 2012, **4**(1): 7-24.
- [2] Goulding K, Jarvis S, Whitmore A. Optimizing nutrient management for farm systems[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2008, **363**(1491): 667-680.
- [3] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. 生态环境, 2003, **12**(2): 192-197.
Ju X T, Zhang F S. Thinking about nitrogen recovery rate[J]. Ecology and Environment, 2003, **12**(2): 192-197.
- [4] 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.
- [5] 俞映惊, 王梦凡, 杨棋, 等. 氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 477-484.
Yu Y L, Wang M F, Yang B, *et al.* Effects of film materials on ammonia volatilization emissions from a paddy system after reducing nitrogen fertilizer application [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 477-484.
- [6] Yu S, Xue L H, Feng Y F, *et al.* Hydrochar reduced NH_3 volatilization from rice paddy soil: Microbial-aging rather than water-washing is recommended before application[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **268**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122233.
- [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), doi: 10.1088/1748-9326/9/11/115010.
- [8] Wang H L, Cao X D, Rinklebe J. Biochar effects on environmental qualities in multiple directions[J]. Chemosphere, 2020, **250**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126306.
- [9] Baiaomonte 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] Wang A J, Che L K, Dong R J, *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] Zheng X B, Yang Z M, Xu X H, *et al.* Characterization and ammonia adsorption of biochar prepared from distillers' grains anaerobic digestion residue with different pyrolysis temperatures [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2018, **93**(1): 198-206.
- [12] Yuan J H, Xu R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic ultisol [J]. Soil Use and Management, 2011, **27**(1): 110-115.
- [13] Sha Z P, Li Q Q, Lv T T, *et al.* Response of ammonia volatilization to biochar addition: a meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2019, **655**: 1387-1396.
- [14] 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 等. 废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5648-5655.
Hou P F, Xue L H, Feng Y F, *et al.* Effects of modified biowaste-based hydrochar on rice yield and nitrogen uptake[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5648-5655.
- [15] 刘亦陶, 魏佳, 李军. 废弃生物质水热炭化技术及其产物在污水处理中的应用进展[J]. 化学与生物工程, 2019, **36**(1): 1-10.
Liu Y T, Wei J, Li J. Progress on hydrothermal carbonation of waste biomass and application of hydro-biochar in sewage treatment[J]. Chemistry & Bioengineering, 2019, **36**(1): 1-10.
- [16] 余姗, 薛利红, 花昀, 等. 水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 922-931.
Yu S, Xue L H, Hua Y, *et al.* Effect of applying hydrochar for reduction of ammonia volatilization and mechanisms in paddy soil [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 922-931.
- [17] Yu S, Feng Y F, Xue L H, *et al.* Biowaste to treasure: Application of microbial-aged hydrochar in rice paddy could improve nitrogen use efficiency and rice grain free amino acids [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **240**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118180.
- [18] Buchspies B, Kaltschmitt M, Junginger M. Straw utilization for biofuel production: a consequential assessment of greenhouse gas emissions from bioethanol and biomethane provision with a focus on the time dependency of emissions[J]. GCB-Bioenergy, 2020, **12**(10): 789-805.
- [19] Qu X L, Fu H Y, Mao J D, *et al.* Chemical and structural properties of dissolved black carbon released from biochars[J].

- Carbon, 2016, **96**: 759-767.
- [20] Song C F, Shan S D, Yang C, *et al.* The comparison of dissolved organic matter in hydrochars and biochars from pig manure[J]. Science of the Total Environment, 2020, **720**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137423.
- [21] 王悦满, 冯彦房, 杨林章, 等. 水热及裂解生物炭对水稻产量及氮素利用率的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2018, **34**(8): 755-761.
Wang Y M, Feng Y F, Yang L Z, *et al.* Effects of hydrochar and pyrochar on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, **34**(8): 755-761.
- [22] Zhou B B, Feng Y F, Wang Y M, *et al.* Impact of hydrochar on rice paddy CH₄ and N₂O emissions; a comparative study with pyrochar[J]. Chemosphere, 2018, **204**: 474-482.
- [23] 周伟, 田玉华, 曹彦圣, 等. 两种氨挥发测定方法的比较研究[J]. 土壤学报, 2011, **48**(5): 1090-1095.
Zhou W, Tian Y H, Cao Y S, *et al.* A comparative study on two methods for determination of ammonia volatilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, **48**(5): 1090-1095.
- [24] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 27-33.
Wang J, Wang D J, Zhang G, *et al.* Comparing the ammonia volatilization characteristic of two typical paddy soil with total wheat straw returning in Taihu Lake Region[J]. Environmental Science, 2013, **34**(1): 27-33.
- [25] 刘冬冬, 李金铭, 赵博骏, 等. 秸秆水热炭与热裂解炭的结构表征及铅吸附机制研究[J]. 农业机械学报, 2020, **51**(12): 304-314.
Liu D D, Li J M, Zhao B J, *et al.* Study on Pb²⁺ absorption mechanism and structure characterization of hydrochar and pyrochar from straw[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2020, **51**(12): 304-314.
- [26] Wang D, Jiang P K, Zhang H B, *et al.* Biochar production and applications in agro and forestry systems; a review[J]. Science of the Total Environment, 2020, **723**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137775.
- [27] Zhang S C, Zhu X D, Zhou S J, *et al.* Hydrothermal carbonization for hydrochar production and its application[A]. In: Ok Y S, Tsang D C W, Bolan N, *et al.* (Eds.). Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and Applications[M]. Amsterdam: Elsevier, 2019. 275-294.
- [28] Bargmann I, Rillig M C, Kruse A, *et al.* Initial and subsequent effects of hydrochar amendment on germination and nitrogen uptake of spring barley[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2014, **177**(1): 68-74.
- [29] Hao S L, Zhu X D, Liu Y C, *et al.* Production temperature effects on the structure of hydrochar-derived dissolved organic matter and associated toxicity[J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(13): 7486-7495.
- [30] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 等. 不同氮水平下秸秆和酚类、有机酸对土壤碳含量的影响[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(1): 71-76.
Ma H L, Zhu J G, Xie Z B, *et al.* Effects of straw, phenol and organic acids on soil carbon in different sized particles under different nitrogen levels[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, **22**(1): 71-76.
- [31] Bargmann I, Rillig M C, Kruse A, *et al.* Effects of hydrochar application on the dynamics of soluble nitrogen in soils and on plant availability[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2014, **177**(1): 48-58.
- [32] 刘成, 刘晓雨, 张旭辉, 等. 基于整合分析方法评价我国生物质炭施用的增产与固碳减排效果[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(3): 696-706.
Liu C, Liu X Y, Zhang X H, *et al.* Evaluating the effects of biochar amendment on crop yield and soil carbon sequestration and greenhouse gas emission using meta-analysis[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(3): 696-706.
- [33] 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.
- [34] Sigua G C, Novak J M, Watts D W. Ameliorating soil chemical properties of a hard setting subsoil layer in Coastal Plain USA with different designer biochars[J]. Chemosphere, 2016, **142**: 168-175.
- [35] 俞映倞, 薛利红, 杨林章. 太湖地区稻田不同氮肥管理模式下的氨挥发特征研究[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): 1682-1689.
- [36] 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.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)