

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



2020

Vol.41 No.12
第41卷 第12期

目次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分 闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启(5215)

2015~2018年我国PM_{2.5}健康损害价值的动态评估 李惠娟, 周德群, 魏永杰(5225)

2011~2017年中国PM_{2.5}多尺度时空分异特征分析 杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮(5236)

关中地区PM_{2.5}时空演化及人口暴露风险 黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨(5245)

中原城市冬季两次重污染形成机制及来源 贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉(5256)

西北工业城市冬季PM_{2.5}污染特征及理化性质 杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽(5267)

基于PMF模型的PM_{2.5}中金属元素污染及来源的区域特征分析 邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向铎鹏(5276)

重庆主城大气降尘中重金属污染特征及评价 张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达(5288)

鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析 孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞峰, 许彩琴(5295)

杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性 景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽(5306)

成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏(5316)

石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析 王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷(5325)

厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析 吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕(5336)

建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单 梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国(5345)

我国西北工业区城市大气多氯联苯来源及健康风险 毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民(5352)

基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征 黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏(5362)

新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析 卓海华, 娄保锋, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静(5371)

三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征 钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠(5381)

衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价 张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮(5389)

宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征 崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌(5400)

梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 禚映雪, 李睿, 陈建耀(5410)

汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子 赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发(5419)

山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险 王世亮, 曹雪雅(5428)

太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析 吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建(5438)

岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价 叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕(5448)

澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素 孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生(5458)

白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性 申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升(5470)

生物质粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响 王鹏飞, 甄蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠(5480)

Bi₂MoO₆/Bi₂S₃异质结构催化降解四环素-铜复合物 黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍(5488)

超滤膜负载UiO-66@Fe₃O₄@UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制 尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭(5500)

低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试 廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳(5509)

盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响 高京, 张少华, 王锐, 金鹏康(5518)

限NH₄⁺和限NO₂⁻厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征 宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(5527)

厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性 闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送(5535)

二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能 毕薇薇, 阮书瑜, 陈吴傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖(5544)

中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析 赵靛, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫(5552)

我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术 窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明(5562)

晒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明(5571)

广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价 叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章(5579)

胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果 王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊(5589)

毛竹遗态Fe/C复合材料对As(V)污染土壤的钝化修复性能 赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩(5600)

大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解 杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5609)

1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性 韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍(5617)

铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征 贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏(5628)

生物质炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响 崔丙健, 崔二革, 胡超, 樊向阳, 高峰(5636)

废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姍, 杨林章(5648)

基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析 夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣驥(5656)

氮肥和秸秆还田方式对麦玉米轮作土壤N₂O排放的影响 许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪(5668)

《环境科学》第41卷(2020年)总目录 (5677)

《环境科学》征订启事(5344) 《环境科学》征稿简则(5361) 信息(5287, 5499, 5508)

废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响

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

(1. 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; 2. 江苏大学环境与安全工程学院, 镇江 212001)

摘要: 生物炭农田回用是实现农林废弃物资源化利用和碳封存的有效手段。近年来,水热碳化技术由于在炭产率、能耗及生产过程中的烟气排放等方面显著优于常规热解碳化技术而受到关注。为实现农林废弃物的资源化利用,明确水热炭农田应用对作物生产力的影响,本研究通过原状土柱模拟试验和表征分析,研究了4种不同类型改良水热炭对两种典型土壤的水稻产量和氮素吸收的影响及可能的驱动因素。结果表明,锯末水热炭和秸秆水热炭经物理或生物改良后,在两种类型土壤上均能够增加水稻产量和氮素吸收,减少氮素损失,且其效应不受水热炭添加量影响(5%, 15%; 质量分数)。与对照相比,水热炭添加处理的产量和氮素吸收量分别提高9.2%~20.7%和7.7%~17.0%。高C/N比的锯末水热炭更有利于高肥力土壤水稻氮素吸收量的增加;而低肥力土壤由于限制性因子较多,受水热炭类型的影响较小。通过对水热炭的表征分析发现,其表面养分元素丰富;水洗或生物改良后其表面孔隙结构有较大改善,C元素相对含量明显降低,N和O元素相对含量明显增加,这对养分的固持/供应可能产生影响。因此,水热炭改良后孔隙结构的改变和N、O元素含量的增加可能是其施用后水稻产量和氮素吸收增加的关键驱动因素。结果说明,水热碳化材料改良后应用农田可以在实现农林废弃物资源化利用的同时,提高作物生产力,减少农田氮素环境损失。

关键词: 农林废弃物; 资源化利用; 水热碳化; 作物生产力; 氮素吸收

中图分类号: X712 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)12-5648-08 DOI: 10.13227/j.hjks.202005335

Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake

HOU Peng-fu^{1,2}, XUE Li-hong^{1,2}, FENG Yan-fang^{1,2*}, YU Shan¹, YANG Lin-zhang¹

(1. Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. School of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212001, China)

Abstract: Biochar application on farmlands is an efficient way to realize agricultural/forestry biowaste recycling in parallel with carbon sequestration. Recently, hydrochar produced by hydrothermal carbonization processes has attracted attention due to the advantages over conventional pyrolytic production (i. e., easier production process, higher carbon yield, reduced energy consumption, and lower flue gas emissions). To clarify the effects of hydrochar applied in farmlands on crop production, as well as to realize the recycling of agricultural/forestry biowaste resources, this study evaluated the effects of four types of modified-hydrochar addition on rice yield and nitrogen uptake in two typical soils and the possible influencing factors through soil-column experiments and material characterization. The results showed that sawdust hydrochar and/or straw hydrochar could increase rice yield and nitrogen uptake, as well as reduce N loss, in both treated soils after physical or biological modification, an effect that was independent of the application rate (5%, 15%; mass fraction). In comparison to the control, the rice yield and nitrogen uptake of hydrochar-addition treatments increased by 9.2% - 20.7% and 7.7% - 17.0% respectively. Sawdust hydrochar, with a wider C/N material, was conducive to improving nitrogen uptake in high fertility soils; meanwhile, the nitrogen utilization in low fertility soils was less affected by the type of hydrochar due to the limitations imposed by multiple factors. The results of material characterization showed that the surface of the hydrochar was rich in nutrients; the pore structure of hydrochar after washing or biological modification was greatly improved, the relative content of C was remarkably reduced, and the relative contents of N and O notably increased, which could affect nutrient fixation and supply. Thus, the improved pore structure and increased contents of N and O of modified hydrochars may be the key drivers for the increase in rice yield and nitrogen uptake with hydrochar addition. These results suggest that modified hydrochar is beneficial to realizing agricultural/forestry biowaste recycling and improving crop yield and nitrogen utilization, as well as reducing N loss from farmlands.

Key words: agricultural/forestry biowaste; resource recycling; hydrothermal carbonization; crop productivity; nitrogen uptake

作物产量除了与粮食安全问题紧密联系,还与世界各国的环境、社会和经济要素密切相关。由于人口的持续增长,全球粮食安全问题日趋严峻^[1]。而过去几十年,由于资源短缺、生态系统退化和气候变化等因素影响,全球粮食生产的不确定性增加^[2]。提高单位面积的作物产量和养分利用效率对

收稿日期: 2020-05-31; 修订日期: 2020-06-14

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: 侯朋福(1986~),男,博士,副研究员,主要研究方向为农田养分管理与面源污染控制, E-mail: pengfuhou100smb@163.com

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

应对全球粮食安全及农田养分环境损失具有重要意义^[3]。除常规养分管理优化措施^[4-6], 通过增施土壤增效剂进一步提高农田作物产量和氮素利用率近年来受到广泛关注^[7]。近 20 年来, 由于生物炭回用农田在实现农林废弃物资源化利用的同时能够增加土壤碳封存、改善土壤质量、缓解气候变化和保证粮食安全等多方面的优势而得到广泛关注 and 实际应用^[8-11]。然而, 基于 Meta 分析, Purakayastha 等^[12]的研究指出, 生物炭对作物产量和氮素利用的实际影响效应在很大程度上取决于作物类型、土壤类型和肥力以及生物炭的性质(原料、热解温度)等。因此, 作物生产力对生物炭添加的响应还需要结合生物炭类型和土壤类型等进一步研究确定。

近年来, 水热炭(hydrochar)由于在制备过程中具有产率高、成本低、制作过程烟气排放少等方面的优势, 受到越来越多的关注^[13]。与高温热解制备的裂解生物炭(pyrochar)不同, 由于制备过程是以水为介质在较低温度下进行(150~375℃), 因此两种类型生物炭的理化特性差异较大。除与常规裂解炭相同, 具有丰富的孔隙结构、较高的碳含量和丰富的表面官能团外, 水热炭材料能够保留更多的养分元素、更高的表面芳构化结构, 更丰富的含氧、含氮基团^[14-16]。因此, 水热炭的农田和环境应用潜力十分突出。然而, 由于制备条件不同, 水热炭往往呈弱酸性, 且其表面常携带大量有机类化合物(有机酸、有机酚类等), 直接大量施用可能会对作物生长产生胁迫效应, 不利于农林废弃物的资源化利用^[17-19]。在团队前期研究中, Zhou 等^[20]和王悦满等^[21]的研究也发现水热炭直接应用稻田可能对水稻产量和氮素吸收利用有负向效应, 尤其在高施加量下其负向效应更加显著。因此, 有必要寻求适宜的方法对水热炭材料进行改良, 溶出或降解有机类有毒化合物, 在实现农林废弃物资源化的同时适于农田应用。

基于中国知网和 Web of Science 数据库的文献整合分析结果也表明, 水热炭在农田中的应用研究

起步较晚(始于 2012 年), 目前正处于快速发展阶段; 且相关研究以原始制备的水热炭材料为主, 近两年集中出现水洗、厌氧发酵/微生物陈化、反应介质替换和与黏土矿物掺混等水热炭改良材料对作物生产力影响的研究^[16, 20, 22-29]。但由于相关研究较少, 因此对不同原料和不同施加量下的作物生产力表现亟需进一步研究确定。基于此, 为进一步明确水热炭改良对作物产量和氮素吸收的影响, 实现农林废弃物的资源化利用, 本文选择主要粮食作物水稻作为受体植物, 以碳氮比差异较大的两种农林废弃物为炭化材料, 通过水洗或微生物陈化改良, 研究了其在两种土壤肥力差异较大土壤上对作物产量和氮素吸收的影响, 以为农林废弃物的资源化利用提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料制备与表征

选择碳氮比差异较大的两种农林废弃物(杨树锯末和小麦秸秆), 以水作为反应介质[原料与水添加比例为 1:10(固液比)], 利用高压水热反应釜, 在 260℃ 和 8 MPa 参数下反应 1 h 进行原始水热炭材料的制备。材料制备后, 以体积比为计量单位按照 1:10(水热炭:水)的比例用去离子水振荡冲洗并烘干后获得改良的水洗锯末水热炭(W-SHC)和水洗秸秆水热炭(W-WHC)。此外, 结合厌氧发酵技术, 接种甲烷细菌、纤维素分解菌和蛋白质水解菌, 将原始水热炭材料在厌氧发酵罐中进行微生物陈化改良 60 d, 即可获得微生物改良锯末水热炭(M-SHC)和微生物改良秸秆水热炭(M-WHC)。

分别利用 NOVA 1200 分析仪、元素分析仪(Vario EL cube)和 pH 计(1:10, 固液比)对 4 种水热炭材料的孔隙结构、元素含量和 pH 进行分析测定。采用扫描电子显微镜(SEM)对水热炭的表面形貌进行观察, 并用 EDS(Aztec X-Max 80)对水热炭材料表面的元素相对含量进行分析。4 种改良水热炭基本理化性状如表 1 所示。

表 1 不同类型水热炭的理化特性与孔隙特征

Table 1 Physiochemical properties and pore characteristics of experimental hydrochars

水热炭类型	理化特性				孔隙特征		
	pH	C/%	N/%	C/N	比表面积 /m ² ·g ⁻¹	孔容 × 10 ⁻³ /cm ³ ·g ⁻¹	孔径/nm
M-WHC	6.6	50.7	2.5	20.7	0.9	3.0	3.1
W-WHC	4.9	51.1	3.2	16.2	1.2	0.2	50.9
M-SHC	7.0	69.0	2.3	30.3	2.7	9.0	6.0
W-SHC	4.0	65.0	2.1	30.4	1.3	35.0	11.1

1.2 水稻土柱试验

本试验于 2018~2019 年在江苏省农业科学院

院内试验基地进行。供试水稻品种为太湖地区常规优质粳稻品种南粳 46 号, 育苗移栽, 每土柱(直径

30cm)栽插3穴,每穴3株,分别于2018年6月29日和2019年6月10日移栽,2018年11月9日和2019年10月10日收获。除中期烤田和收获前断水,全生育期淹水灌溉。为验证不同类型水热炭的实际添加效果,两年试验土壤分别为黄泥土(2018年)和低肥力马肝土(2019年)。两种土壤分别采自江苏省宜兴市周铁镇长期水稻土和江苏省农业科学院院内复垦低肥力土壤。黄泥土土壤理化性状为:pH 6.4,有机碳含量1.7%,全氮含量 $1.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $23.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $159.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;低肥力马肝土土壤理化性状为:pH 7.0,有机碳含量0.5%,全氮含量 $0.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $4.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $147.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

本试验采用双因素裂区设计,水热炭类型为主区,添加量为副区[5‰, 15‰(质量分数)];田间用量折合为 $8.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $25.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$],每处理3次重复。试验开始前将水热炭按预定添加比例与土柱内耕层土壤(0~20 cm)充分混合。为明确不同水热炭添加处理对水稻产量和氮素吸收的影响,设置不添加水热炭的相同施肥处理为对照(CKU)。所有处理的氮磷钾用量均相同,分别为240, 96和192 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。氮肥运筹比例为3:3:4,分别于移栽期、移栽后2周和孕穗期施入土柱中,磷肥和钾肥均作为基肥一次性施。试验所用的氮磷钾肥分别为尿素($460 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,以N计)、过磷酸钙($120 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,以 P_2O_5 计)和氯化钾($600 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,以 K_2O 计)。

1.3 采样分析方法

水稻生理成熟期,将水稻植株整株收回,分为茎叶鞘和穗两部分。穗部室内考种后,按有效穗数、穗

粒数、结实率和千粒重折算水稻产量(含水量13.5%)。将水稻两部分样品分别置于烘箱 105°C 杀青后, 70°C 烘干至恒重。称重后将样品粉碎,用凯氏法测定各部位氮素含量,并折算水稻氮素吸收量。地上部氮素吸收量计算见式(1)。

$$\text{NU} = m_1 \times c_1 + m_2 \times c_2 \quad (1)$$

式中,NU指地上部氮素吸收量($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$); m_1 指茎叶鞘干重($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$); c_1 指茎叶鞘部分氮含量(%); m_2 指穗干重($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$); c_2 指穗部氮含量(%).

1.4 统计分析方法

由于不同水热炭添加处理的氮素用量相同,本文仅分析不同处理的氮素吸收量指征氮素利用差异和环境损失控制效果。此外,考虑年际间气候条件差异对水稻产量和氮素吸收量的影响,本文未对相关指标进行年际间(土壤间)比较。

用SPSS 16.0统计分析软件进行文献荟萃和试验差异显著性分析(Duncan法)。用Origin 8.0进行作图和文献数据离散分析。

2 结果与分析

2.1 不同水热炭材料的表征分析

2.1.1 表面结构扫描电镜观察

4种改良水热炭及衍生前原始水热炭表面结构扫描电镜观察结果列于图1。不同类型炭材料SEM图对比可以看出,未改良的原始水热炭(SHC和WHC)的表面较光滑,孔径较小。经水洗改良的水热炭(W-SHC和W-WHC)表面网状结构更明显,且孔径有所增加。此外,微生物陈化改良水热炭(M-

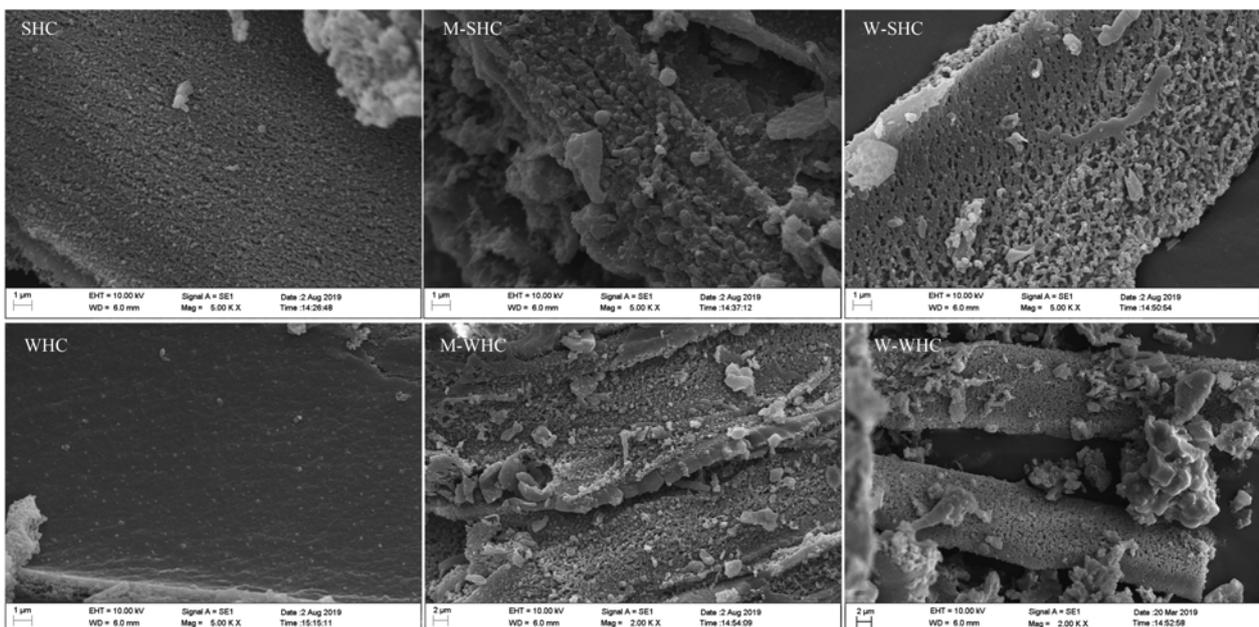


图1 原始水热炭和改良水热炭的表面结构扫描电镜观察

Fig. 1 SEM observations on the surface structures of unmodified and modified hydrochars

SHC 和 M-WHC)的孔径更大且更均匀. 这说明,水热炭经过水洗或微生物陈化改良,其表面孔隙结构较未改良水热炭有较大改善.

2.1.2 材料表面元素相对含量分析

利用 EDS(Aztec X-Max 80)对水热炭材料表面元素含量分析结果表明,两种有机废弃物物料(杨树锯末和小麦秸秆)制备的水热碳化材料表面养分元素丰富,富含 C、N、O、Mg、P、S、K、Ca 和 Fe 等植物生长必需的营养元素和水稻生长所需的有益元素 Si(图 2). 此外,不同水热炭材料元素相对含量结果分析表明,与原始未改良水热炭相比,水洗或微生物陈化改良后水热碳化材料表面 C 元素相对含量降低,N 和 O 元素相对含量增加. 结果同时表明,与锯末水热炭相比,秸秆水热炭的 Si 元素相对含量明显较高.

2.2 改良水热炭稻田施用对水稻生产力的影响

2.2.1 对水稻产量的影响

不同类型水热炭和添加量对水稻产量影响的效应因子分析列于表 2. 结果表明,两种用量下不同类型水热炭添加均对产量有显著影响,两种效应因子间无显著交互效应. 由于两种效应因子交互效应不显著,因此本文分别通过对水热炭类型和用量的整合分析,明确水热炭类型和用量对作物生产力的影响(图 3). 结果表明,物理或微生物陈化改良在两种类型土壤上均显著增加了水稻产量,且其增加效应不受水热炭添加量影响. 与不施水热炭对照相

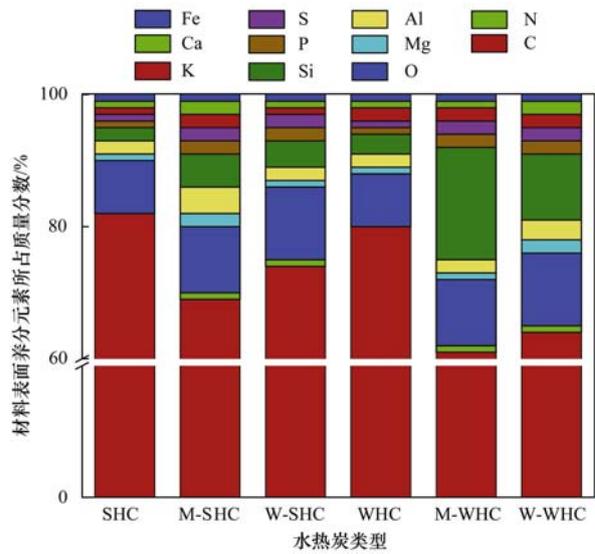


图 2 原始水热炭和改良水热炭的表面元素所占质量分数

Fig. 2 Mass fraction of surface elements for unmodified and modified hydrochars

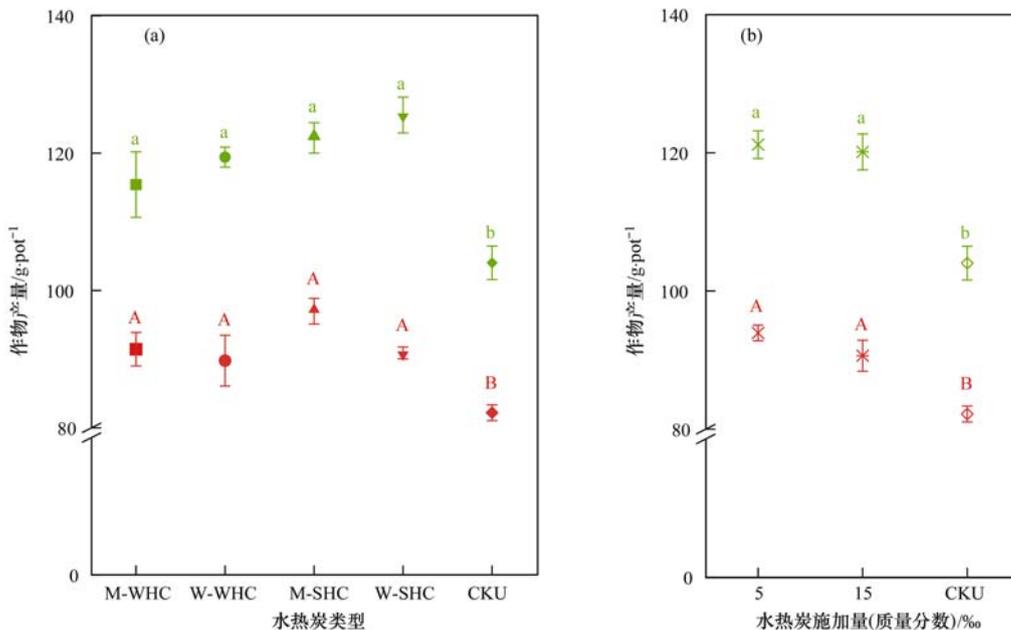
表 2 不同土壤类型作物产量和吸氮量的效应分析¹⁾

Table 2 Analysis of the main and reciprocal effects on crop yield and N uptake in two treated soils

效应因子	产量		吸氮量	
	黄泥土	马肝土	黄泥土	马肝土
类型	5.19 **	3.47 *	7.45 ***	4.61 **
用量	6.11 **	4.77 *	3.46 *	8.17 **
类型 × 用量	1.06ns	1.03ns	0.72ns	1.74ns

1) ns 表示 $P > 0.05$; * 表示 $0.01 < P \leq 0.05$; ** 表示 $0.001 < P \leq 0.01$; *** 表示 $P \leq 0.001$

比,水热炭添加后两种土壤的水稻产量增加幅度分



(a)水热炭类型对水稻产量的影响;(b)水热炭施加量对水稻产量的影响;

不同字母表示同一土壤类型下作物产量的差异显著性 ($P < 0.05$);绿色表示黄泥土,红色表示马肝土

图 3 水热炭添加对水稻产量的影响

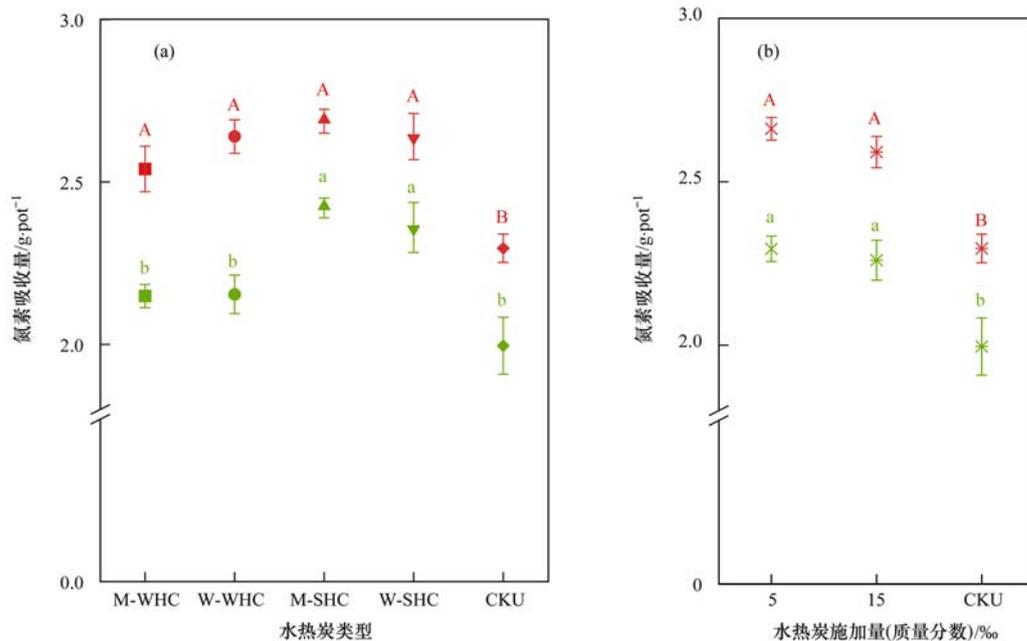
Fig. 3 Rice yield as affected by the addition of hydrochar

别为 10.9% ~ 20.7% (黄泥土) 和 9.2% ~ 18.0% (低肥力马肝土). 结果同时表明, 不同类型水热炭和不同用量下, 处理间水稻产量均无显著差异.

2.2.2 对水稻氮素吸收的影响

由于不同水热炭添加处理的氮素用量相同, 本文仅分析不同处理的氮素吸收量指征氮素利用差异和环境损失控制效果. 与产量表现一致, 两种用量下不同类型水热炭添加对水稻氮素吸收量均有显著影响, 两种效应因子间无显著交互效应(表 2). 对 4 种类型水热炭在不同施加量下结果分析表明, 两种施加量下水热炭添加均显著增加了水稻氮素吸收

量, 但不同类型水热炭在两种水稻土上表现不尽一致(图 4). 与不施水热炭对照相比, 4 种类型水热炭添加均显著增加了低肥力马肝土水稻氮素吸收量, 增加幅度为 10.6% ~ 17.0%. 不同类型水热炭下, 水稻氮素吸收量无显著差异. 与低肥力马肝土表现不同, 锯末水热炭(M-SHC 和 W-SHC) 添加显著增加了黄泥土水稻氮素吸收量, 与秸秆水热炭(M-WHC 和 W-WHC) 添加处理和不施水热炭对照处理(CKU) 差异均达到显著水平($P < 0.05$). 黄泥土添加秸秆水热炭尽管表现出对氮素吸收量的增加趋势, 但与对照差异未达到显著水平.



(a) 水热炭类型对水稻氮素吸收的影响; (b) 水热炭施加量对水稻氮素吸收量的影响;

不同字母表示同一土壤类型下作物氮素吸收量的差异显著性 ($P < 0.05$); 绿色表示黄泥土, 红色表示马肝土

图 4 水热炭添加对水稻氮素吸收量的影响

Fig. 4 Nitrogen uptake as affected by the addition of hydrochar

3 讨论

有研究指出, 水热碳化材料较常规裂解炭能够保留更多的养分元素、更高的表面芳构化结构, 更丰富的含氧、含氮基团^[14~16], 因此其农田和环境应用潜力十分突出. 然而, 现有研究分析结果表明, 水热碳化材料直接应用农田后作物生产力的不确定性增加. 低添加量下(质量分数 < 2%) 不同研究中作物产量响应不一致, 而高添加量下(质量分数 > 2%) 整体均表现为减产效果(表 3 和图 5). 不考虑水热炭添加量, 未改良水热炭添加后作物平均减产 14%. 这可能与水热炭的低 pH 和材料自身携带的有机类化合物引起的胁迫效应有关^[17~19, 25, 30]. 此外, 高施加量下水热炭对土壤可利用氮的吸附固定增加也会对作物的氮素吸收利用产生影响^[21, 31, 32].

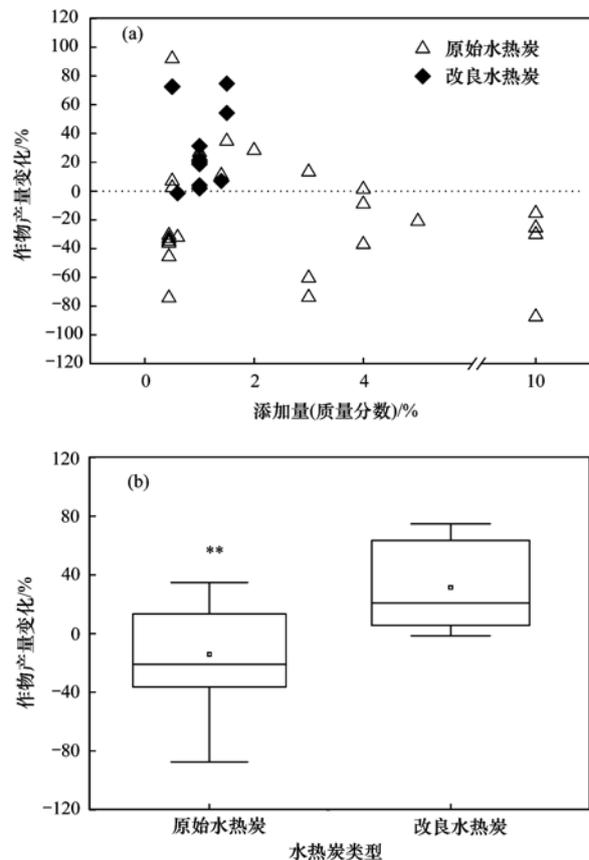
结果同时表明, 与未改良水热碳化材料还田表现不同, 水热炭物理或化学改良后应用农田均表现出较好的增产效果, 平均增产 31%. 结果说明, 水热炭经过物理或化学改良后应用农田有增加作物生产力的潜势. 但由于相关研究较少(中国知网和 Web of Science 数据库涉及水热炭对作物生产力影响的研究仅有 10 篇, 有效数据 39 组, 其中未改良水热炭数据 27 组, 改良水热炭数据 12 组), 因此对不同原料和不同施加量下的作物生产力表现亟需进一步研究确定.

本研究结果表明, 两种用量下不同类型水热炭添加均对水稻产量和氮素吸收量有显著影响, 两种效应因子间无显著交互效应. 锯末水热炭和秸秆水热炭经物理或微生物陈化改良后在两种类型土壤上均能够增加水稻产量和氮素吸收量, 且其增加效应

不受水热炭添加量影响。文献对比发现,改良水热炭研究主要集中在近 2 年(表 3),且相关研究中添加量均相对处于较低水平(图 5),这一方面不会造成养分的大量固持,降低作物关键养分需求期的养分供应;另一方面水热炭改良后其自身携带的复杂化合物溶出或降解^[16,33],而其多孔特性和自身养分输入可能会改变土壤理化特性和微生物区系结构,提高土壤养分供应能力,进而促进作物生长^[8,34,35]。

有研究指出,由于水热炭自身含有丰富的营养元素和含氧官能团,且孔隙结构发达,对土壤中养分具有较好的吸附固持作用,因此能够增加作物养分供应,减少养分流失,促进作物生长^[13-16]。同时,经过改良后的水热炭比表面积增加,施加后可以通过降低土壤容重、增加土壤持水量对作物生长起正向调节作用^[36]。而水热炭可溶性有机碳的输入和其孔隙结构还能够同时提高根区土壤理化性质和微生物活性^[22]。此外,有研究指出,土壤中适宜的挥发性化合物可以进一步刺激作物生长^[37,38]。材料表征结果表明,水热炭表面养分元素丰富,与未改良水热炭相比,经过水洗或微生物陈化改良,其表面孔隙结构较未改良水热炭有较大改善,C 元素相对含量明显降低,N 和 O 元素相对含量增加(表 1、图 1 和图 2)。因此,水热炭改良后有机类有毒化合物的溶出/降解、水热炭自身养分元素的输入、孔隙结构对养分的吸附固持和其对土壤微生物区系及作物生长的激发效应可能是水稻产量和氮素吸收量增加的主要原因。值得一提的是,由于不同处理氮素用量相同,因此不同处理的氮素吸收量能够直接反映作物氮素利用差异和环境损失控制效果。结果说明,适宜用量下水热炭改良在实现废弃物资源化的同时能够提高作物产量和氮素吸收利用,减少氮素环境损失。

考虑年际间气候条件差异对水稻产量和氮素吸



(a) 所有观测值分布情况; (b) 组内观测值离散分布情况及组间显著性检验; 利用整合分析方法 (Meta-analysis), 以水热炭类型 (改良/不改良)、生物炭施用量、土壤理化性质 (pH、土壤有机碳、土壤全氮) 和水热炭理化特性 (总 C、总 N、C/N、pH) 作为效应因子进行整合荟萃分析发现, 由于有效数据较少, 相关研究分布在全球不同地区, 相关结果受其它效应因子干扰较大, 较难反映相关数据的真实变化 (数据未列出), 因此仅对相关研究作物产量变化率进行简单离散分析和差异显著性比较, 未利用系统评价方法进行整合荟萃分析; ** 表示 $P < 0.01$

图 5 原始 (未改良) 水热炭和改良水热炭应用农田后作物产量变化

Fig. 5 Crop yield as affected by unmodified and modified hydrochars

表 3 水热炭相关文献检索结果¹⁾

Table 3 Past studies related to the addition of hydrochar

发表年份	作物类型	原料类型	改良手段	文献
2012	甜菜	甜菜渣/啤酒糟	无	[23]
2012	豆科植物	啤酒糟	无	[24]
2014	大麦	马粪/木屑/麦秸秆	无	[25]
2015	春小麦	青贮玉米	无/厌氧发酵	[26]
2016	大豆	青贮玉米	无	[22]
2018	水稻	麦秸秆/木屑	无	[20]
2019	水稻	木屑	无/微生物陈化/水洗	[16]
2020	水稻	小球藻	无/柠檬酸	[27]
2020	水稻	污泥	无/柠檬酸镁/柠檬酸镁 + 硫酸	[28]
2020	水稻	木屑	矿物掺混	[29]

1) 基于中国知网和 Web of Science 数据库, 检索关键词分别设置为“水热炭”和“hydrochar”或“hydrothermal carbonization”, 以作物产量为收集原则, 初步收集并剔除同一作者重复试验的相关文献后, 获得目标文献

收利用的影响,本文未对相关指标进行年际间(土壤间)比较。但值得注意的是,尽管两种施加量下水热炭添加均显著增加了水稻氮素吸收量,不同类型水热炭在两种水稻土上表现不尽一致(图4)。与低肥力马肝土表现不同,黄泥土下锯末水热炭(M-SHC和W-SHC)添加的水稻氮素吸收量显著高于秸秆水热炭(M-WHC和W-WHC)添加处理。这说明不同C/N水热炭材料对氮素的吸附固定在不同类型土壤可能存在差异。Sigua等^[32]的研究指出,土壤氮素的吸附固定随着生物炭C/N比的增加而增加,从而降低无机氮损失。此外,孔隙内部和生物炭内表面的物理吸附是生物炭添加后氮素固持的一种常见现象,与孔隙特征密切相关^[39,40]。本研究中,与低肥力马肝土氮素供应受限不同,长期种植水稻黄泥土的土壤氮素含量相对较高。因此,尽管孔径较小,锯末水热炭较高的C/N比,较大的孔容均有利于高肥力土壤氮素的吸附固定,从而提高氮素的吸收量(表1)。结果说明,高C/N比水热炭材料更有利于高肥力土壤氮素利用率的提高;而低肥力土壤主要由于底物限制,受水热炭类型影响较小。此外,与微生物陈化改良水热炭相比,水洗改良水热炭材料仍呈弱酸性(表1),因此其对土壤理化性状及作物产量和养分损失的长期影响在未来研究和应用中值得关注。

4 结论

(1) 锯末水热炭和秸秆水热炭经物理或微生物陈化改良后在两种类型土壤上均能够增加水稻产量和氮素吸收量,减少氮素环境损失,且其增加效应不受水热炭添加量影响。

(2) 高C/N比材料(锯末水热炭)更有利于高肥力土壤水稻氮素吸收量的增加;而低肥力土壤由于底物限制,受水热炭类型影响较小。

(3) 水热炭表面养分元素丰富,经过水洗或微生物陈化改良,其表面孔隙结构较未改良水热炭有较大改善,C元素相对含量明显降低,O元素相对含量增加。这可能是其施用后水稻产量和氮素吸收增加的关键驱动因素。

致谢:感谢南京农业大学江瑜教授对数据整合分析部分提出的建设性意见;感谢南京林业大学孙海军副教授对本文的帮助。

参考文献:

[1] Prosekov A Y, Ivanova S A. Food security: the challenge of the present[J]. *Geoforum*, 2018, **91**: 73-77.
 [2] El Bilali H. Research on agro-food sustainability transitions: where are food security and nutrition? [J]. *Food Security*, 2019, **11**(3): 559-577.

[3] Arora N K. Agricultural sustainability and food security [J]. *Environmental Sustainability*, 2018, **1**(3): 217-219.
 [4] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——源头减量技术[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(5): 881-888.
 Xue L H, Yang L Z, Shi W M, *et al.* Reduce-retain-reuse-restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: source reduction technology [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(5): 881-888.
 [5] 朱浩宇, 高明, 龙翼, 等. 化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1921-1929.
 Zhu H Y, Gao M, Long Y, *et al.* Effects of fertilizer reduction and application of organic fertilizer on soil nitrogen and phosphorus nutrients and crop yield in a purple soil sloping field [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1921-1929.
 [6] 赵明, 周宝元, 马玮, 等. 粮食作物生产系统定量调控理论与技术模式[J]. *作物学报*, 2019, **45**(4): 485-498.
 Zhao M, Zhou B Y, Ma W, *et al.* Theoretical and technical models of quantitative regulation in food crop production system [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, **45**(4): 485-498.
 [7] Wang S W, Shan J, Xia Y Q, *et al.* Different effects of biochar and a nitrification inhibitor application on paddy soil denitrification: a field experiment over two consecutive rice-growing seasons [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **593-594**: 347-356.
 [8] 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高. 不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1914-1920.
 Yang C D, Zong Y T, Lu S G. Dynamic effects of different biochars on soil properties and crop yield of acid farmland [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1914-1920.
 [9] Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, *et al.* The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, **164**: 80-99.
 [10] 潘根兴, 张阿凤, 邹建文, 等. 农业废弃物生物黑炭转化还田作为低碳农业途径的探讨[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, **26**(4): 394-400.
 Pan G X, Zhang A F, Zou J W, *et al.* Biochar from agro-byproducts used as amendment to croplands: an option for low carbon agriculture [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, **26**(4): 394-400.
 [11] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. *中国农业科学*, 2013, **46**(16): 3324-3333.
 Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, **46**(16): 3324-3333.
 [12] Purakayastha T J, Bera T, Bhaduri D, *et al.* A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: pathways to climate change mitigation and global food security [J]. *Chemosphere*, 2019, **227**: 345-365.
 [13] Feng Y F, Sun H J, Han L F, *et al.* Fabrication of hydrochar based on food waste (FWHTC) and its application in aqueous solution rare earth ions adsorptive removal: process, mechanisms and disposal methodology [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **212**: 1423-1433.
 [14] 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.
- [15] Gai C, Chen M J, Liu T T, *et al.* Gasification characteristics of hydrochar and pyrochar derived from sewage sludge[J]. *Energy*, 2016, **113**: 957-965.
- [16] 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**: 118180.
- [17] Busch D, Stark A, Kammann C I, *et al.* Genotoxic and phytotoxic risk assessment of fresh and treated hydrochar from hydrothermal carbonization compared to biochar from pyrolysis [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **97**: 59-66.
- [18] Bargmann I, Rillig M C, Buss W, *et al.* Hydrochar and biochar effects on germination of spring barley[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2013, **199**(5): 360-373.
- [19] Jandl G, Eckhardt K U, Bargmann I, *et al.* Hydrothermal carbonization of biomass residues: mass spectrometric characterization for ecological effects in the soil-plant system[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, **42**(1): 199-207.
- [20] 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.
- [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] Egamberdieva D, Wirth S, Behrendt U, *et al.* Biochar treatment resulted in a combined effect on soybean growth promotion and a shift in plant growth promoting rhizobacteria [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, **7**: 209.
- [23] Gajić A, Koch H J. Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) growth reduction caused by hydrochar is related to nitrogen supply [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, **41**(4): 1067-1075.
- [24] George C, Wagner M, Kücke M, *et al.* Divergent consequences of hydrochar in the plant-soil system; arbuscular mycorrhiza, nodulation, plant growth and soil aggregation effects [J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, **59**: 68-72.
- [25] 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.
- [26] Reibe K, Roß C L, Ellmer F. Hydro-/Biochar application to sandy soils; impact on yield components and nutrients of spring wheat in pots [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, **61**(8): 1055-1060.
- [27] Chu Q N, Xue L H, Cheng Y Q, *et al.* Microalgae-derived hydrochar application on rice paddy soil; Higher rice yield but increased gaseous nitrogen loss [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**: 137127.
- [28] Chu Q N, Xue L H, Singh B P, *et al.* Sewage sludge-derived hydrochar that inhibits ammonia volatilization, improves soil nitrogen retention and rice nitrogen utilization [J]. *Chemosphere*, 2020, **245**: 125558.
- [29] Chu Q N, Xu S, Xue L H, *et al.* Bentonite hydrochar composites mitigate ammonia volatilization from paddy soil and improve nitrogen use efficiency [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **718**: 137301.
- [30] Poerschmann J, Weiner B, Wedwitschka H, *et al.* Characterization of biochars and dissolved organic matter phases obtained upon hydrothermal carbonization of *Elodea nuttallii* [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **189**: 145-153.
- [31] Gao S, DeLuca T H. Influence of biochar on soil nutrient transformations, nutrient leaching, and crop yield [J]. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 2016, **4**(5): 348-362.
- [32] Sigua G C, Novak J M, Watts D W, *et al.* Impact of switchgrass biochars with supplemental nitrogen on carbon-nitrogen mineralization in highly weathered Coastal Plain Ultisols [J]. *Chemosphere*, 2016, **145**: 135-141.
- [33] Ji M Y, Sang W J, Tsang D C W, *et al.* Molecular and microbial insights towards understanding the effects of hydrochar on methane emission from paddy soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **714**: 136769.
- [34] Sun K, Han L F, Yang Y, *et al.* Application of hydrochar altered soil microbial community composition and the molecular structure of native soil organic carbon in a paddy soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(5): 2715-2725.
- [35] Chen H, Yin C, Fan X P, *et al.* Reduction of N₂O emission by biochar and/or 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) is closely linked to soil ammonia oxidizing bacteria and nosZI-N₂O reducer populations [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **694**: 133658.
- [36] Aller D, Rathke S, Laird D, *et al.* Impacts of fresh and aged biochars on plant available water and water use efficiency [J]. *Geoderma*, 2017, **307**: 114-121.
- [37] Fincheira P, Quiroz A. Microbial volatiles as plant growth inducers [J]. *Microbiological Research*, 2018, **208**: 63-75.
- [38] 自由路. 植物营养中理论问题的追本溯源 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, **25**(1): 1-10.
- Bai Y L. Tracing back to the origin of theoretical problems in plant nutrition [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, **25**(1): 1-10.
- [39] Sun H J, Lu H Y, Chu L, *et al.* Biochar applied with appropriate rates can reduce N leaching, keep N retention and not increase NH₃ volatilization in a coastal saline soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 820-825.
- [40] Clough T J, Condon L M, Kammann C, *et al.* A review of biochar and soil nitrogen dynamics [J]. *Agronomy*, 2013, **3**(2): 275-293.

CONTENTS

Sources and Control Area Division of Ozone Pollution in Cities at Prefecture Level and Above in China	YAN Hui, ZHANG Wei, HOU Mo, <i>et al.</i> (5215)
Dynamic Assessment of PM _{2.5} Health Damage Value in China from 2015 to 2018	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (5225)
Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of PM _{2.5} in China from 2011 to 2017	YANG Wen-tao, QIAO Peng, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (5236)
Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to PM _{2.5} in the Guanzhong Area	HUANG Xiao-jun, QI Ming-yue, LI Yan-yu, <i>et al.</i> (5245)
Formation Mechanism and Source Analysis of Two Heavy Pollution Periods in Winter in a Central Plains City	JIA Jia, CONG Yi, GAO Qing-min, <i>et al.</i> (5256)
Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of PM _{2.5} in a Northwest Industrial City	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, WANG Li-na, <i>et al.</i> (5267)
Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric PM _{2.5} and Its Sources Based on the PMF Model	DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan, YIN Zi-yuan, <i>et al.</i> (5276)
Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing	ZHANG Xia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, <i>et al.</i> (5288)
Factors Influencing New Atmospheric Particle Formation in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, WANG Hong-lei, ZHANG Lian-xia, <i>et al.</i> (5295)
Characteristics and Reactivity of Ambient VOCs in Urban Hangzhou, China	JING Sheng-ao, GAO Ya-qin, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (5306)
Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (5316)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs and O ₃ in Shijiazhuang	WANG Shuai, CUI Jian-sheng, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (5325)
Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen	WU Dong-yang, ZHUANG Ma-zhan, WU Yan-cong, <i>et al.</i> (5336)
Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, SU Yan-hua, <i>et al.</i> (5345)
Sources and Health Risks of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls in an Urban/Industrial Areas, Northwest China	MAO Xiao-xuan, LI Zi-xuan, SONG Shi-jie, <i>et al.</i> (5352)
Vertical Distribution of Surface Formaldehyde in the Pearl River Delta Urban Area Based on Observations at the Canton Tower	HUANG Shan, PEI Cheng-lei, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5362)
Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, <i>et al.</i> (5371)
Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area	QIAN Tian, HUANG Qi, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5381)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LIU Li, <i>et al.</i> (5389)
Endogenous Pollution and Release Characteristics of Bottom Sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City	CUI Hui-fang, CHEN Shu-yun, YANG Chun-hui, <i>et al.</i> (5400)
Pollution and Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin	JIANG Tao, LIN Wei-wen, CAO Ying-jie, <i>et al.</i> (5410)
Influence Factors of Potential Nitrification Rates and Functional Genes Abundance in the Jinshui River and the Qihe River of the Hanjiang River Basin	ZHAO Bin-jie, WANG Xu, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (5419)
Contamination Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Perfluoroalkyl Substances in the Water and Sediment of Coastal Tourism Resorts in Shandong Province	WANG Shi-liang, CAO Xue-zhi (5428)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organophosphate Esters in Key Waters Areas of Taihu Lake	LÜ Jia-pei, ZHANG Zhen-fei, LIU Yang, <i>et al.</i> (5438)
Residual Characteristics and Health Assessment Analysis of OCPs and PCBs in Karst Groundwater	YE Kai, SUN Yu-chuan, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5448)
Biogeographic Distribution Patterns of Diatoms in Lancang River and Their Key Drivers	SUN Sheng-hao, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (5458)
Bioaccumulation Characteristics of Quinolones (QNs) in Dominant Fish Species and Their Correlation with Environmental Factors in Baiyangdian Lake	SHEN Li-na, FU Yu, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5470)
Effect of Biomass Particle Size on the Adsorption of Phosphorus from Aqueous Solution by MgO-loaded Biochar	WANG Peng-fei, ZHI Meng-meng, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (5480)
Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Copper Complex by Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ Heterojunction	HUANG Wen-xin, WEI Hu, JIANG Cai-yun, <i>et al.</i> (5488)
Enhancing PPCPs Removal and Membrane Fouling Control of Ultrafiltration Membrane by UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66	YIN Yue, WU Dao-wen, SUN Meng-yao, <i>et al.</i> (5500)
Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons	LIAO Xue-ke, YAN Han-lu, WANG Zhi-yuan, <i>et al.</i> (5509)
Metagenomic Insights into Salinity Build-up in Microbial Communities and Metabolism of Hydrolytic Bioreactor Treating High-color PDWW	GAO Jing, ZHANG Shao-hua, WANG Rui, <i>et al.</i> (5518)
Performance and Microbial Characteristics of Ammonium-limited and Nitrite-limited ANAMMOX Systems	SONG Jia-jun, ZHU Ming-yi, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (5527)
Microbial Community Structure and Diversity During the Enrichment of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	YAN Bing, XIA Song, GUI Shuang-lin, <i>et al.</i> (5535)
Enhanced Dewaterability of Waste-Activated Sludge in Presence of Fe(II)-Activated Calcium Peroxide	BI Wei-wei, RUAN Shu-yu, CHEN Wu-ao-xiao, <i>et al.</i> (5544)
Spatial Distribution, Contamination Assessment, and Sources of Heavy Metals in the Urban Green Space Soils of a City in North China	ZHAO Liang, LIANG Yun-ping, CHEN Qian, <i>et al.</i> (5552)
Technological Classification of Cadmium Quality in the Rice Producing Areas of South China	DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, <i>et al.</i> (5562)
Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (5571)
Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong	YE Mai, ZHANG Jing-ru, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5579)
DA-6 and GLDA Enhanced <i>Panicum virgatum</i> L. to Phytoextract Cd from Contaminated Soils	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh Mohamed, <i>et al.</i> (5589)
Remediation Performance via the Passivation of a Porous Biomorph Genetic Composite of α -Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄ /C Using a Bamboo Template on As(V) Contaminated Soils	ZHAO Ning-ning, HE Hao, FENG Guo-jie, <i>et al.</i> (5600)
Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in <i>Zophobas morio</i> : Effects of Gut Microbiota	YANG Li, LIU Ying, GAO Jie, <i>et al.</i> (5609)
Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium	HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen (5617)
Characteristics of Phyllosphere and Rhizosphere Bacterial Communities in <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings	JIA Tong, YAO Yu-shan, WANG Rui-hong (5628)
Effects of Selected Biochars Application on the Microbial Community Structures and Diversities in the Rhizosphere of Water Spinach (<i>Ipomoea aquatica</i> Forss.) Irrigated with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, HU Chao, <i>et al.</i> (5636)
Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake	HOU Peng-fu, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (5648)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model	XIA Zi-shu, WANG Yu-yu, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5656)
Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N ₂ O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils	XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, <i>et al.</i> (5668)