

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

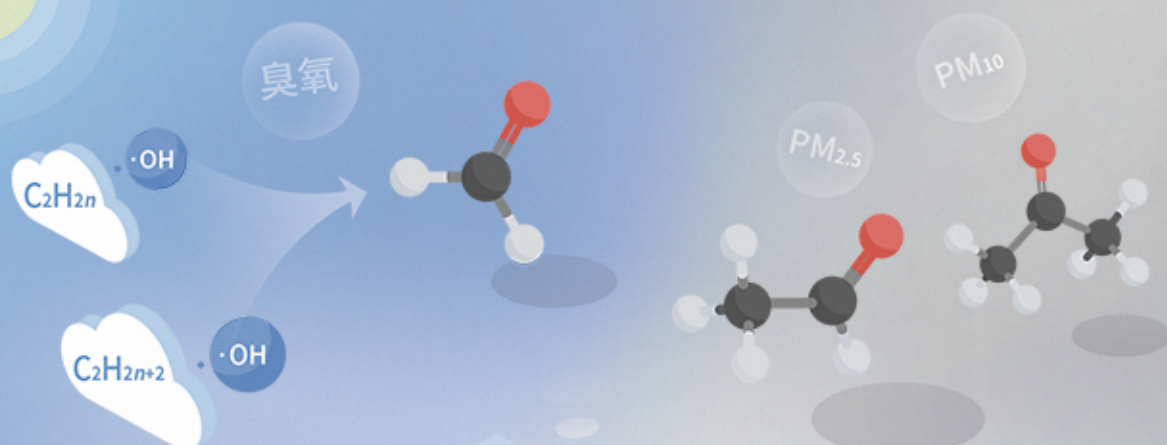
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

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



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年1月

第42卷 第1期
Vol.42 No.1

目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测	顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆(1)
基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析	杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨(9)
中原城市群典型城市秋冬季大气 PM _{2.5} 污染特征及溯源	苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文(19)
沈阳市冬季大气 PM _{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源解析	王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀(30)
保定地区 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐(38)
基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析:以南京市观测为例	胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东(45)
2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源	高璟贇, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐邈, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁(55)
柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析	刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽(65)
天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析	罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂(75)
2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林(88)
2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势	赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳(97)
大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析	李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城(106)
叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比	岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国(114)
东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟	张冰, 张芊芊, 应光国(127)
松花江哈尔滨段及阿什河抗生素的分布规律与生态风险评估	杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨(136)
东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估	李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮(147)
河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估	周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫(159)
无锡-常州地下水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估	王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波(166)
清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估	刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛(175)
会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险	李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹尼(184)
三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化	陈昭宇, 李思悦(195)
不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布	岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花(204)
基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险	张红娜, 崔娜, 申红妙(211)
分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制	闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜(221)
丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素	郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进(234)
太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应	郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆(242)
石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量	邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王莹燕, 王子芳(251)
前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响	陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪(263)
浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制	陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然(274)
填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响	刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励(283)
FeMnNi-LDHs 对水中 As(Ⅲ) 的吸附性能与机制	廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂(293)
硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制	张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌(305)
某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征	颜亚玮, 於驰晟, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远(315)
不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替	李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送(323)
天然富硒土地划定的富硒阈值	王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃(333)
融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测	高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴伟杰, 刘楚藩(343)
南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟	戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平(353)
闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险	林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌(359)
干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响	杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵(368)
三元复合调理剂对土壤镉赋存形态和糙米镉累积的调控效应	蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宁, 周航, 廖柏寒(378)
风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响	郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星(386)
不同施肥措施对水稻土壤微生物拮抗性的影响	郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷(394)
氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性	张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希(403)
黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征	钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(411)
生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制	冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺(422)
植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响	张瑞海, 宋振, 付卫东, 郭玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良(433)
黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应	史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太(443)
等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响	何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华(450)
秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响	孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔(459)
生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响	杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明(467)
氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响	俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红(477)
微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累	赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇(485)
无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟	阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞(492)
基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析	孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超(501)

黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应

史登林¹, 王小利^{1*}, 刘安凯^{1,2}, 侯再芬³, 梁国太³

(1. 贵州大学农学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省农业农村厅, 贵阳 550001; 3. 贵州省思南县农业农村局, 铜仁 565100)

摘要: 探讨生物炭与氮肥减量配施对黄壤稻田土壤微生物碳、氮(SMBC、SMBN)和稻谷产量及品质的影响,旨在为该区域土壤培肥及氮肥减施增效提供科学依据。采用大田试验,设置5个氮肥减施梯度(T0~T4):0、10%、20%、30%和40%,用等氮量生物炭氮替代,以不施氮肥为对照(CK),在水稻成熟期进行测产采样,并对样品进行室内分析。结果表明,生物炭与氮肥减量配施处理的SMBC和SMBN变化范围分别在208.42~303.16 mg·kg⁻¹和32.28~54.73 mg·kg⁻¹之间。SMBC、SMBN、土壤微生物熵(qMB)、土壤微生物量氮与全氮比值(SMBN/TN)及稻谷产量随生物炭与氮肥配施比例的增加均呈先增加后降低趋势,T2处理的SMBC、SMBN及稻谷产量均最高,较T0处理依次增加了28.0%、30.0%和13.4%($P<0.05$),而T4处理略有降低($P>0.05$)。各处理的SMBC、qMB、SMBN及SMBN/TN两两之间均呈极显著正相关关系($P<0.01$)。与T0处理相比,T2处理可显著增加稻米精米率、胶稠度和直链淀粉含量。本试验条件下生物炭(5.0 t·hm⁻²)与氮肥减量(20%)配施可有效提高土壤微生物量碳氮,稻谷增产提质,可作为贵州黄壤稻田水稻氮肥减施增效的较好选择。

关键词: 生物炭; 黄壤稻田; 土壤微生物量; 土壤微生物熵; 产量; 稻米品质

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0443-07 DOI: 10.13227/j.hjks.202005186

Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer

SHI Deng-lin¹, WANG Xiao-li^{1*}, LIU An-kai^{1,2}, HOU Zai-fen³, LIANG Guo-tai³

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Department of Agriculture and Rural Affairs of Guizhou Province, Guiyang 550001, China; 3. Agriculture and Rural Bureau of Sinan County, Guizhou Province, Tongren 565100, China)

Abstract: The effects of biochar combined with nitrogen fertilizer on soil microbial carbon, nitrogen (SMBC, SMBN), and rice yield and quality were investigated to provide a scientific basis for soil fertilization and nitrogen fertilizer reduction. Using a field experiment, we set up a nitrogen reduction gradient (T0-T4): 0, 10%, 20%, 30%, and 40% reductions. The same amount of biochar nitrogen was used as the substitute and no nitrogen fertilizer was used as the control (CK). The yield was measured and sampled at the mature stage of rice, and the samples were analyzed in the laboratory. The results showed that the range of SMBC and SMBN was 208.42-303.16 mg·kg⁻¹ and 32.28-54.73 mg·kg⁻¹, respectively. SMBC, SMBN, soil microbial entropy (qMB), soil microbial biomass nitrogen to total nitrogen ratio (SMBN/TN), and rice yield increased first and then decreased as the proportion of biochar and nitrogen fertilizer increased. SMBC, SMBN, and rice yield were all the highest in T2, which increased successively by 28.0%, 30.0%, and 13.4% compared with that of the T0 treatment ($P<0.05$), while those of the T4 treatment decreased slightly ($P>0.05$). The processing of SMBC, qMB, SMBN, and SMBN/TN showed a significantly positive relationship between the two ($P<0.01$). Compared with that of the T0 treatment, the T2 treatment significantly increased the Milled rice, gel consistency, and amylose content. In this study, the combination of biochar (5.0 t·hm⁻²) and nitrogen reduction (20%) effectively improved soil microbial carbon and nitrogen content and increased the yield and quality of rice, which could be a good choice for reducing nitrogen fertilization and increasing the efficiency of rice in a yellow soil paddy field in Guizhou.

Key words: biochar; yellow paddy soil; soil microbial biomass; qMB; yield; rice quality

生物炭(biochar)是由生物质(农林废弃物和动物粪便等)在无氧或厌氧条件下通过热化学转化得到的富碳黑色固态物^[1],具有丰富的孔隙结构、巨大的比表面积和较强吸附能力,是良好的土壤改良剂^[2,3],在土壤微生态调控、农作物增产提质和农业废弃物资源化利用等方面受到科研工作者青睐。将农林废弃物炭化后作为土壤改良剂,不仅解决了农林废弃物等直接焚烧造成的环境破坏和资源浪费问题,且在土壤固碳培肥和缓解温室效应方面极具潜力,因此,农林废弃物炭化后还田是一项多赢策略。

土壤微生物是土壤中碳、氮等植物营养元素转化和循环的动力源泉,土壤微生物量(SMB)是土壤中最活跃和最易被利用的养分^[4]。土壤耕作层中的土壤微生物量碳(SMBC)和土壤微生物量氮(SMBN)分别占土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)的3%和5%左

收稿日期: 2020-05-18; 修订日期: 2020-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860160, 41361064); 思南县秸秆生物炭还田试验项目

作者简介: 史登林(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为稻田土壤培肥, E-mail: sdlin0126@163.com

* 通信作者, E-mail: xlwang@gzu.edu.cn

右^[5],其含量是表征土壤肥力的重要依据之一.生物炭的多孔性和表面特性为土壤微生物生存提供丰富附着位点和空间,增加土壤微生物数量和生物量^[6-9],促进土壤养分有效供给,提高农作物产量和品质^[10-12].陶朋闯等^[13]和芮绍云等^[14]的研究发现,旱地红壤 SMBC 和 SMBN 随生物炭施用量的增加而增加;而张志龙等^[15]的研究表明,潮土 SMBC 和 SMBN 随生物炭添加量的增加呈先增加后降低的趋势,壤土中也呈类似规律^[16];Fang 等^[17]的研究发现施用生物炭显著提高 SMBC 含量,但对 SMBN 没有明显影响;而刘杰云等^[18]的研究发现添加生物炭均降低 SMBC 和 SMBN.以上研究结果的差异,可能是因为不同生物炭源材料、炭化温度及炭化时间和施用土壤类型、土壤肥力、耕作方式及种植作物种类等不同所致.生物炭还田不仅可有效改良土壤性状,且在作物提质增效方面也发挥重要作用^[10,19,20].有研究发现,稻田土壤中施用生物炭不仅可增产稳产,且能保质增质^[21-23].

综上,国内外关于生物炭对土壤微生物活性、SMBC、SMBN、农作物产量及品质的研究较多,而针对黄壤稻田中生物炭与氮肥减量配施对 SMBC、SMBN、水稻产量及品质的研究较为缺乏,且在贵州黄壤稻田中生物炭能否用于氮肥减量配施、减施多少对 SMBC、SMBN、农作物产量及品质的提升效果最佳尚不明确.因此,本研究通过秸秆生物炭配施氮肥试验,分析黄壤稻田 SMBC、SMBN、水稻产量及品质对生物炭与氮肥减量配施的响应,通过提升贵州黄壤稻田土壤肥力,以期为实现水稻绿色高效生产提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况和试验材料

试验地为贵州省思南县水稻绿色增产增效技术示范基地,位于贵州省铜仁市思南县塘头镇(108°11'35"E, 27°45'35"N),该区域属中亚热带季风湿润型气候区,平均海拔 600 m,年均日照时数 1 349.80 h 左右,年均气温 17.5℃,相对湿度 75.5%,全年无霜期 294 d 左右,年均降水量 1 200 mm.试验田为稻油轮作,土壤为黄壤性水稻土,其基础性质为:pH 5.86,有机质 29.62 g·kg⁻¹,全氮 1.39 g·kg⁻¹,碱解氮 133.00 mg·kg⁻¹,有效磷 37.16 mg·kg⁻¹,速效钾 182.07 mg·kg⁻¹.

供试化肥为尿素(N 46.2%)、过磷酸钙(P₂O₅ 16%)和硫酸钾(K₂O 60%);供试生物炭为水稻秸秆炭,炭化温度为 450℃,其基本性质为:pH 8.65,有机碳 667.22 g·kg⁻¹,全氮 5.99 g·kg⁻¹,全磷 1.99

g·kg⁻¹,全钾 27.15 g·kg⁻¹,由南京勤丰众成生物质新材料有限公司提供;供试水稻品种为“中浙优 8 号”,由浙江勿忘农种业股份有限公司提供.

1.2 试验设计

试验共设置 6 个处理,①CK:不施氮肥,仅施磷、钾肥;②T0:常规施用氮磷钾肥(100% 化肥氮);③T1:10% 生物炭氮 + 90% 化肥氮;④T2:20% 生物炭氮 + 80% 化肥氮;⑤T3:30% 生物炭氮 + 70% 化肥氮;⑥T4:40% 生物炭氮 + 60% 化肥氮,T1 ~ T4 处理的生物炭氮替代部分化肥氮均按等氮量原则设计,各处理的生物炭和化肥施用量见表 1,各处理设 3 次重复,共 18 个小区,各小区面积为 30 m²,田间采用完全随机区组排列.于 2019 年 5 月 2 日育秧,6 月 5 日插秧,水稻行株距为 30 cm × 20 cm,水稻移栽前先将生物炭均匀撒施于稻田土壤表层,翻匀,再将化肥氮的 50%、磷肥的 100% 和钾肥的 50% 混匀后作为基肥一次性施入,化肥氮的 20% 作分蘖肥,化肥氮的 20% 和钾肥的 50% 作保花肥,化肥氮的 10% 作促花肥,其他田间管理与当地农民习惯一致.

表 1 不同施肥处理的生物炭和化肥用量

处理	生物炭 /t·hm ⁻²	化肥用量/kg·hm ⁻²		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	0.0	0.0	148.0	230.0
T0	0.0	150.0	148.0	230.0
T1	2.5	135.0	148.0	230.0
T2	5.0	120.0	148.0	230.0
T3	7.5	105.0	148.0	230.0
T4	10.0	90.0	148.0	230.0

1.3 测产取样与指标测定

于成熟期进行采样测产,各小区全部收获计产获取实际鲜重产量,称取 30 g,采用烘干法测定含水量,按稻谷标准含水量 13.5% 折算水稻产量;稻谷风干后,根据国家优质稻谷标准^[24]测定各处理的稻米糙米率、粒长、精米率、垩白粒率、蛋白质含量、直链淀粉含量和胶稠度等品质指标.

于 2019 年 9 月底水稻收获后,按对角线取样法选取各小区中 9 个采样点利用土钻采集 0 ~ 20 cm 耕层土壤,混匀分两份,一份过 2 mm 筛后存于 4℃ 左右的冰箱中,供土壤微生物生物量碳氮测定;一份常温避光风干后过 0.15 mm 筛,供土壤养分指标测定. SMBC 和 SMBN 采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ (0.5 mol·L⁻¹) 浸提法测定,换算系数分别为 0.45 和 0.54;生物炭和土壤有机碳(SOC)、速效氮、磷、钾及全氮(TN)等养分指标按文献[25]的方法测定.

1.4 数据分析

数据采用 Excel 2016 和 SPSS 23.0 软件进行统计分析,不同处理之间采用 LSD 法进行多重比较,显著水平为 0.05.

2 结果与分析

2.1 生物炭与氮肥减量配施对黄壤稻田 SOC、TN、SOC/TN、SMBC、SMBN 和 SMBC/SMBN 的影响

与 CK 处理相比,生物炭与氮肥减量配施均明显提高了黄壤稻田的 SOC 和 TN 含量(表 2). SOC 随生物炭与氮肥减量配施比例的增加而增加,较 T0 处理均显著增加,其增幅为 18.5%~36.7%;土壤 TN 随生物炭与氮肥减量配施比例的增加呈先增加后降低趋势,T2 处理较 T0 处理显著增加 9.9%,达 $1.44\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;生物炭与氮肥减量配施处理的土壤 SOC/TN 值较 CK 处理和 T0 处理分别增加 2.9%~30.1% 和 9.8%~38.8%,T3 和 T4 处理

均显著增加.

据表 2 可知,常规施肥及生物炭与氮肥减量配施处理的 SMBC 和 SMBN 较 CK 处理分别增加 4.5%~45.5% 和 4.3%~69.6%,除 T4 处理外均显著增加.与 T0 处理相比,T1、T2 和 T3 处理的 SMBC 和 SMBN 分别增加了 4.0%~28% 和 6.7%~30.0%,且随生物炭与氮肥减量配施比例的增加均呈先增加后减少趋势,T2 处理均显著增加,T4 处理均略有降低.

SMBC/SMBN 能揭示土壤微生物群落结构信息,真菌的 SMBC/SMBN 约为 10:1,细菌的约为 5:1,放线菌的约为 6:1,是评价土壤养分有效性及其供应能力的重要指标^[26].表 2 中 CK 处理的 SMBC/SMBN 为 6.6:1 左右,均高于其他处理但无显著差异.常规施肥和生物炭配施氮肥处理的 SMBC/SMBN 分别在 5.7:1 和 5.9:1 左右,说明在生物炭与氮肥减量配施的黄壤稻田中,土壤微生物群落可能以细菌和放线菌为主,真菌占比较少.

表 2 生物炭配施氮肥下土壤有机碳、全氮、微生物量碳氮含量及其比值

Table 2 Contents of SOC, TN, SMBC, SMBN, SOC/TN, and SMBC/SMBN with the application of biochar with nitrogen fertilizer						
处理	SOC/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	TN/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	SOC/TN	SMBC/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	SMBN/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	SMBC/SMBN
CK	$17.24\pm0.29\text{d}$	$1.27\pm0.11\text{e}$	$14.76\pm3.08\text{e}$	$208.42\pm18.95\text{d}$	$32.28\pm6.43\text{d}$	$6.56\pm0.82\text{a}$
T0	$18.11\pm0.63\text{d}$	$1.31\pm0.01\text{bc}$	$13.84\pm0.52\text{e}$	$236.84\pm9.48\text{bc}$	$42.10\pm4.21\text{bc}$	$5.66\pm0.52\text{a}$
T1	$21.47\pm0.83\text{c}$	$1.39\pm0.06\text{ab}$	$15.25\pm2.18\text{bc}$	$284.21\pm9.47\text{a}$	$46.31\pm4.21\text{ab}$	$6.19\pm0.77\text{a}$
T2	$22.75\pm1.05\text{bc}$	$1.44\pm0.05\text{a}$	$15.19\pm1.94\text{bc}$	$303.16\pm9.48\text{a}$	$54.73\pm4.22\text{a}$	$5.57\pm0.61\text{a}$
T3	$23.55\pm1.04\text{ab}$	$1.38\pm0.05\text{abc}$	$18.49\pm1.10\text{ab}$	$246.32\pm9.48\text{b}$	$44.91\pm4.86\text{b}$	$5.51\pm0.41\text{a}$
T4	$24.76\pm0.63\text{a}$	$1.34\pm0.01\text{abc}$	$19.21\pm0.46\text{a}$	$217.89\pm9.48\text{cd}$	$33.68\pm4.21\text{cd}$	$6.52\pm0.69\text{a}$

1) 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)

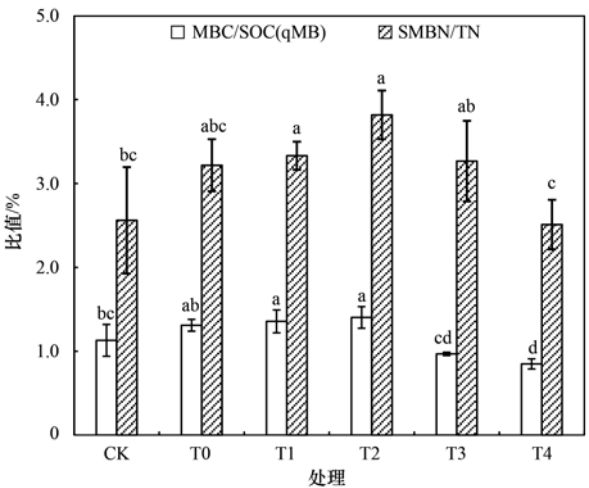
2.2 生物炭与氮肥减量配施对黄壤稻田 SMBC/SOC(qMB) 和 SMBN/TN 的影响

如图 1 所示,土壤微生物熵(qMB)介于 0.7%~

1.4% 之间,SMBN/TN 介于 2.5%~3.8% 之间.与 CK 处理相比,T0 处理的 qMB 和 SMBN/TN 增加效果不明显,T1 和 T2 处理的 qMB 和 SMBN/TN 均显著提高,T3 和 T4 处理的 qMB 均有所降低,T4 处理显著降低;且随着生物炭与氮肥减量配施比例的增加 qMB 和 SMBN/TN 均呈先增加后减少趋势,T2 处理的 qMB (1.4%) 和 SMBN/TN (3.8%) 均为最高.可能是因为适量生物炭与氮肥减量配施改善土壤理化性质,增强土壤微生物活性,加快有机碳和全氮的周转速率,而高量生物炭与氮肥减量配施对土壤微生物活性有抑制作用,减缓了土壤有机碳和全氮的周转.

2.3 SMBC、SMBN 与 SMBC/SOC、SMBN/TN、SOC 和 TN 的相关性分析

相关性研究显示,SMBC、SMBN、qMB 和 SMBN/TN 两两之间呈极显著正相关关系(表 3);TN 与 SMBC、SMBN 和 SOC 均呈显著正相关关系;SMBN 和 SMBN/TN 与 SMBC/SMBN 呈极显著负相关关系.说明 qMB 值和 SMBN/TN 值的多少与 SMBC、SMBN 及 TN 含量变化密切相关,微生物量



柱上不同字母表示不同处理之间差异达显著水平 ($P<0.05$)

图 1 生物炭配施氮肥下土壤微生物量碳氮在土壤有机碳和全氮中的比例

Fig. 1 SMBC and SMBN in SOC and TN with the application of biochar with nitrogen fertilizer

碳氮是微生物的营养源,通过适量生物炭与氮肥减量配施可显著提高土壤微生物量碳氮含量,从而影响 qMB 和 SMBN/TN 的增减,因此土壤微生物量碳氮或许可作为表征土壤质量的生物学指标.

表 3 土壤微生物量碳、氮与微生物熵、微生物量碳氮比、有机碳和全氮的相关性
Table 3 Correlation between SMBC, SMBN, qMB, SMBC/SMBN, SOC, and TN

	SMBC	SMBN	SMBC/SMBN	SOC	qMB	TN	SMBN/TN
SMBC	1.00						
SMBN	0.87 **	1.00					
SMBC/SMBN	-0.38	-0.77 **	1.00				
SOC	0.29	0.14	0.10	1.00			
qMB	0.66 **	0.68 **	-0.41	-0.43	1.00		
TN	0.56 *	0.52 *	-0.17	0.50 *	0.32	1.00	
SMBN/TN	0.81 **	0.97 **	-0.81 **	0.01	0.66 **	0.29	1.00

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

2.4 生物炭与氮肥减量配施对稻谷产量及品质的影响

由表 4 可知,生物炭与氮肥减量配施对稻谷产量和品质有明显影响. 常规施肥和生物炭与氮肥减量配施处理稻谷产量均显著高于不施氮肥(CK)处理,增幅为 35.4%~59.2%,其中 T2 处理增产效果最好;与常规施肥(T0)处理相比,T1、T2 和 T3 处理籽粒产量提高 2.4%~13.4%,随着生物炭与氮肥减量配施比例的增加呈先增产后减产趋势,其中 T2 处理最高达 $7.96\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,呈显著增加,T4 处理略微减产. 由此可见,适量生物炭与氮肥减量配施可以促进水稻生长,提高稻谷产量.

从稻米品质指标来看(表 4),生物炭与氮肥减量配施可明显影响稻米的精米率、垩白粒率、粒长等加工品质和胶稠度、直链淀粉、蛋白质含量等营养品质,但对糙米率和垩白度无明显影响. 与 CK 处理相

比,常规施肥和生物炭与氮肥减量配施处理增加稻米粒长和蛋白质含量,增幅分别为 0.4%~1.5% 和 0.52~0.99 个百分点,其中粒长以 T1 和 T3 处理达到显著水平,最高为 6.80 mm;蛋白质以 T1、T3 和 T4 处理达到显著水平,最高为 6.58%;T0、T1、T2 和 T4 处理均提高稻米精米率,T1 和 T2 处理达显著水平,仅 T3 处理有所降低;T0~T3 处理均降低了稻米垩白度率,均未达显著水平,仅 T4 处理增加,这可能是氮肥减量过高所致. 与 T0 处理相比,T1 和 T2 处理的稻米精米率分别显著提高了 1.00 和 1.03 个百分点;T4 处理的稻米垩白度率显著增加了 0.9 个百分点,这可能是氮肥减量过高所致;T2 和 T4 处理的稻米胶稠度分别显著增加 4.9% 和 4.0%;T2 处理的稻米直链淀粉含量显著提高 0.37 个百分点. 因此,适量生物炭与氮肥减量配施可改善稻米品质的同时也减少化肥施用.

表 4 生物炭配施氮肥下稻谷产量及稻米品质

Table 4 Rice yield and rice quality with the application of biochar with nitrogen fertilizer

处理	籽粒产量 / $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	糙米率 /%	精米率 /%	垩白度 /%	垩白粒率 /%	粒长 /mm	胶稠度 /mm	直链淀粉 /%	蛋白质 /%
CK	5.00c	80.10a	72.60b	1.83a	13.33ab	6.70b	76.67abc	14.93ab	5.59b
T0	7.02b	80.60a	72.67b	1.63a	10.33b	6.73ab	75.33c	14.90b	6.11ab
T1	7.19ab	80.73a	73.67a	2.27a	11.33ab	6.80a	76.00bc	14.87b	6.55a
T2	7.96a	80.73a	73.70a	2.17a	9.67b	6.77ab	79.00a	15.27a	6.36ab
T3	7.32ab	80.43a	72.53b	2.53a	11.67ab	6.80a	77.33abc	14.90b	6.51a
T4	6.77b	80.60a	73.17ab	2.37a	14.67a	6.73ab	78.33ab	15.13ab	6.58a

1) 同列数据后不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

3 讨论

土壤微生物量是表征土壤微生物对有机物料分解的重要指标^[27~29]. 生物炭的属性特征可为土壤微生物提供广阔的生存空间,调节微生物生存环境和微生物的生长繁殖,从而影响土壤微生物量. 本研究中,氮肥减量配施生物炭处理均增加了 SMBC 和 SMBN 含量,且随生物炭与氮肥减量配施比例的增

加呈先增加后减少趋势,均以 T2 处理最显著,分别达 $303.16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $54.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这与张志龙等^[15]的研究结果相似. 究其原因可能是少量生物炭配施氮肥还田时由于其吸附特性和多孔特性,生物炭吸附了部分有机质的同时有些土壤微生物附存在其孔隙之中,一定程度刺激了微生物活性,加速微生物活动频率和繁殖速度^[30],所以适量生物炭与氮肥减量配施增加了土壤 SMBC 和 SMBN;但随着生物

炭与氮肥减量配施比例的增加而 SMBC 和 SMBN 趋于减少,这可能是源于过量生物炭与氮肥减量配施后土壤总有机碳含量过高,全氮变化幅度小,从而致使土壤微生物代谢不平衡,微生物活动受抑制. 本研究中生物炭 ($5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 与氮肥减量 (20%, 即施用 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 配施效果最好,而袁晶晶^[27]的研究发现,在河南濮阳地区 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭配施 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 效果最佳,这可能是土壤肥力、土地利用方式不同所致.

土壤微生物量碳氮是土壤碳和氮的重要来源,具有较高的生物活性,其增减程度反映土壤微生物利用碳氮效率^[4]. qMB、SMBN/TN 和 SMBC/SMBN 可表征生物炭与氮肥减量配施后土壤有机碳和氮素营养的变化规律和作物所需养分供应情况. 土壤微生物熵 (qMB) 是指土壤中 SMBC 所占 SOC 的百分比,其范围为 1%~4%^[31],qMB 值的高低可表征土壤有机质活性及其被微生物利用效率. SMBN/TN 是表征土壤中微生物对氮素的利用程度及 SMBN 对土壤氮库的贡献率,可作为土壤氮素有效性和对作物氮素供应能力的重要评价指标,范围在 2%~6% 之间^[32]. 本试验的 qMB 和 SMBN/TN 值分别在 0.7%~1.4% 和 2.5%~3.8% 之间,且均随生物炭与氮肥减量配施比例的增加呈先增加后降低趋势,说明适量生物炭与氮肥减量配施提高微生物对土壤碳氮的利用效率,与孟繁昊^[33]的研究结果相似. 一般情况下,真菌、细菌和放线菌的 SMBC/SMBN 值依次约为 10:1、5:1 和 6:1^[26]. 本研究中常规施肥和生物炭与氮肥减量配施处理的 SMBC/SMBN 分别在 5.7:1 和 5.9:1 左右,均低于 CK 处理 (6.6:1),说明生物炭与氮肥减量配施的黄壤稻田中,土壤微生物群落可能以细菌和放线菌为主,真菌占比较少. 且各施肥处理的 SMBC/SMBN 值基本处于同一水平,说明有机碳输入土壤后对土壤 SMBC/SMBN 影响较小^[34].

本研究结果表明,T1、T2 和 T3 处理稻谷产量较 T0 处理均有不同程度地增加,T2 处理显著提高了 13.4%,而 T4 处理略微减产,这说明在当前试验条件下,施用生物炭配施 70%~90% 化学氮肥具有一定的可行性,80% 氮肥配施比例最佳. 生物炭与氮肥减量配施实现增产或稳产的主要原因:一方面是生物炭自身含有丰富的氮素,尽管其含有的氮素并非均是易分解或可有效利用的,但由于氮素含量高,故而可替代部分化学氮肥^[35];同时,生物炭除了含有氮、磷和钾等大量元素外,还富含钙、镁和锌等多种矿质养分,有利于作物所需养分的平衡供应^[36];另一方面可能是本试验地土壤呈微酸性 (pH 为 5.86),施用高量生物炭后提高了土壤 pH 值,改

良微生物生境,从而促进土壤养分有效供给,因此可以保证作物实现增产或稳产. 有研究表明生物炭的施用可以改善作物品质^[20,37,38],本研究结果与前人研究类似. 本研究中,与 T0 处理相比,生物炭与氮肥减量配施使稻米精米率、垩白度、粒长等外观品质及胶稠度、直链淀粉和蛋白质等食用品质均有不同程度的改善,这与陈梦云等^[38]的研究结果相似. 其中 T1 和 T2 处理的精米率较 T0 处理显著增加 1.00 和 1.03 个百分点,T2 和 T4 处理的胶稠度较 T0 处理显著增加了 4.9% 和 4.0%,T2 处理的直链淀粉含量较 T0 处理显著提高 0.37 个百分点. 这可能是由于生物炭中含有较高钾素和 Ca、Mn 和 Zn 等多种微量元素能够促进相关酶在植株体内合成,有利于改善稻谷品质^[39]. 本研究结果表明,在贵州中等肥力黄壤稻田中生物炭 ($5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 与氮肥减量 (20%, 即施用 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 配施的增产提质效果最佳,而孟繁昊^[33]的研究推荐在种植玉米的沙壤土中生物炭 ($8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 与氮肥 ($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 配施效果最好,武沛然^[40]推荐在种植甜菜的盐碱地中施用生物炭替代 10% 的化学氮肥效果最佳,这可能是由于土壤类型、土壤肥力和耕作模式等不同所致. 综上,本试验条件下生物炭 ($5.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 配施氮肥 (80%) 可有效提高土壤微生物量碳氮、稻谷产量和品质,是该区域氮肥减施增效的较好选择,但其长效机制还需进一步试验研究.

4 结论

SMBC、qMB、SMBN 及 SMBN/TN 对生物炭与氮肥减量配施均有不同程度响应,并随生物炭与氮肥减量配施比例的增加均呈先增加后降低趋势,且两两之间均呈现极显著正相关关系. 本试验条件下,适量生物炭 ($5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 配施氮肥 (80%) 对土壤微生物量碳氮、稻谷产量和品质的提升效果最好,可作为贵州黄壤稻田水稻氮肥减施增效的较好选择.

参考文献:

- [1] Zimmerman A R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (Biochar)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(4): 1295-1301.
- [2] Yao Q, Liu J J, Yu Z H, *et al.* Three years of biochar amendment alters soil physiochemical properties and fungal community composition in a black soil of northeast China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **110**: 56-67.
- [3] 董心亮. 长期施用生物炭对潮土碳库及作物产量的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
Dong X L. Long-term effects of biochar application on Fluvo-aquic soil carbon pool and crop yields[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [4] Álvaro-Fuentes J, Morell F J, Madejón E, *et al.* Soil biochemical properties in a semiarid mediterranean agroecosystem

- as affected by long-term tillage and N fertilization[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, **129**: 69-74.
- [5] Van Veen J A, Ladd J N, Frissel M J. Modelling C and N turnover through the microbial biomass in soil[J]. *Plant and Soil*, 1984, **76**(1-3): 257-274.
- [6] Gomez J D, Denef K, Stewart C E, *et al.* Biochar addition rate influences soil microbial abundance and activity in temperate soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, **65**(1): 28-39.
- [7] 石玉龙, 高佩玲, 刘杏认, 等. 生物炭和有机肥施用提高了华北平原滨海盐土微生物量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, **25**(4): 555-567.
- Shi Y L, Gao P L, Liu X R, *et al.* Increased microbial biomass in coastal saline fields of North China Plain by application of biochar and organic manure[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, **25**(4): 555-567.
- [8] Cao H, Feng F, Xun M, *et al.* Effect of carbonized apple wood on nitrogen-transforming microorganisms and nitrogen oxides in soil of apple tree rootzone[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, **69**(3): 545-554.
- [9] 张萌, 刘彦伶, 魏全全, 等. 酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4690-4700.
- Zhang M, Liu Y L, Wei Q Q, *et al.* Effects of short-term application of moutai-flavor vinasse biochar on nitrogen availability and bacterial community structure diversity in yellow soil of Guizhou Province[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4690-4700.
- [10] Kamau S, Karanja N K, Ayuke F O, *et al.* Short-term influence of biochar and fertilizer-biochar blends on soil nutrients, fauna and maize growth[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, **55**(7): 661-673.
- [11] 包立, 刘惠见, 邓洪, 等. 玉米秸秆生物炭对滇池流域大棚土壤磷素利用和小白菜生长的影响[J]. *土壤学报*, 2018, **55**(4): 815-824.
- Bao L, Liu H J, Deng H, *et al.* Effect of straw biochar on utilization of soil phosphorus and growth of bok choy in greenhouse in Dianchi lake basin[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(4): 815-824.
- [12] You J J, Sun L, Liu X, *et al.* Effects of sewage sludge biochar on soil characteristics and crop yield in loamy sand soil[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019, **28**(4): 2973-2980.
- [13] 陶朋闯, 陈效民, 靳泽文, 等. 生物质炭与氮肥配施对旱地红壤微生物量碳、氮和碳氮比的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(1): 231-235.
- Tao P C, Chen X M, Jin Z W, *et al.* Effects of biochar combined with nitrogen fertilizers on microbial biomass C, N and carbon-to-nitrogen ratio of upland red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(1): 231-235.
- [14] 芮绍云, 袁颖红, 周际海, 等. 改良剂对旱地红壤微生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, **31**(5): 260-265.
- Rui S Y, Yuan Y H, Zhou J H, *et al.* Effects of soil amendments on microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon and nitrogen in upland red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(5): 260-265.
- [15] 张志龙, 陈效民, 曲成闯, 等. 生物质炭对黄瓜连作土壤中微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, **38**(5): 1384-1391.
- Zhang Z L, Chen X M, Qu C C, *et al.* Effects of biochar addition on soil microbial biomass C, N and enzyme activities in cucumber continuous cropping[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(5): 1384-1391.
- [16] 尚杰, 耿增超, 王月玲, 等. 施用生物炭对土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, **49**(6): 1142-1151.
- Shang J, Geng Z C, Wang Y L, *et al.* Effect of biochar amendment on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activity in tier soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, **49**(6): 1142-1151.
- [17] Fang Y Y, Singh B P, Luo Y, *et al.* Biochar carbon dynamics in physically separated fractions and microbial use efficiency in contrasting soils under temperate pastures[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **116**: 399-409.
- [18] 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 等. 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[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3799-3807.
- Liu J Y, Qiu H S, Tang H, *et al.* Effects of biochar amendment on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in paddy soils[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3799-3807.
- [19] 姬强, 马媛媛, 刘永刚, 等. 秸秆生物质炭对土壤结构体与活性碳分布、转化酶动力学参数及小麦生长的影响[J]. *生态学报*, 2019, **39**(12): 4366-4375.
- Ji Q, Ma Y Y, Liu Y G, *et al.* Effects of biochar application on the distribution of soil aggregates and active organic carbon, kinetic parameters of soil invertase, and wheat growth[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(12): 4366-4375.
- [20] Rogovska N, Laird D, Leandro L, *et al.* Biochar effect on severity of soybean root disease caused by *Fusarium virguliforme*[J]. *Plant and Soil*, 2017, **413**(1-2): 111-126.
- [21] 睦锋, 廖萍, 黄山, 等. 施用生物炭对双季水稻产量和氮素吸收的影响[J]. *核农学报*, 2018, **32**(10): 2062-2068.
- Sui F, Liao P, Huang S, *et al.* Effects of biochar amendment on yield and nitrogen uptake in a double rice-cropping system[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, **32**(10): 2062-2068.
- [22] 张婧旻, 李建宏, 洪思诚, 等. 椰纤维生物炭对砖红壤水稻土 Pb 形态及水稻产量和品质的影响[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(9): 1886-1892.
- Zhang J M, Li J H, Hong S C, *et al.* Effect of coconut fiber-derived biochars amendments on geochemical fractions of Pb in paddy soils and yield and quality of rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(9): 1886-1892.
- [23] Lian F, Liu X W, Gao M L, *et al.* Effects of Fe-Mn-Ce oxide-modified biochar on As accumulation, morphology, and quality of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(15): 18196-18207.
- [24] 林海. 《稻谷》、《优质稻谷》新国家标准介绍[J]. *中国稻米*, 2000, (2): 14.
- Lin H. Introduction of the new national standard of 《Paddy》and 《High quality paddy》[J]. *China Rice*, 2000, (2): 14.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] Lovell R D, Jarvis S C, Bardgett R D. Soil microbial biomass and activity in long-term grassland: Effects of management changes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, **27**(7): 969-975.
- [27] 袁晶晶. 生物炭与氮肥配施对土壤肥力及红枣产量、品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- Yuan J J. Effects of biochar and nitrogen fertilizer amendments on soil fertility, yield and quantity in jujube orchard[D]. Yangling:

- Northwest A&F University, 2018.
- [28] 汪月, 张名豪, 赵秀兰. 有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3808-3815.
Wang Y, Zhang M H, Zhao X L. Effects of organic amendments on microbial biomass carbon and nitrogen uptake by corn seedlings grown in two purple soils[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3808-3815.
- [29] 罗梅, 田冬, 高明, 等. 紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4327-4337.
Luo M, Tian D, Gao M, *et al.* Soil organic carbon of purple soil as affected by different application of biochar[J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4327-4337.
- [30] Durenkamp M, Luo Y, Brookes P C. Impact of black carbon addition to soil on the determination of soil microbial biomass by fumigation extraction[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(11): 2026-2029.
- [31] 何瑞清, 王百群, 张燕. 耕作与施肥对甘蔗地土壤微生物量碳、氮的影响[J]. 水土保持研究, 2015, **22**(5): 118-121.
He R Q, Wang B Q, Zhang Y. Effects of tillage and fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen in sugarcane field[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, **22**(5): 118-121.
- [32] 张洋, 倪九派, 周川, 等. 三峡库区紫色土旱坡地桑树配置模式对土壤微生物量碳氮的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, **22**(7): 766-773.
Zhang Y, Ni J P, Zhou C, *et al.* Effects of configuration mode of crop-mulberry system in purple arid hillside field on SMBC and SMBN in the Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, **22**(7): 766-773.
- [33] 孟繁昊. 生物炭配施氮肥对土壤理化性质及春玉米产量和氮效率的影响机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
Meng F H. Influence mechanism of soil physicochemical property and yield and nitrogen efficiency of spring corn by combined application of biochar with nitrogen fertilizer[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.
- [34] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施改善枣区土壤微生物学特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, **24**(4): 1039-1046.
- Yuan J J, Tong Y A, Lu S H, *et al.* Combined application of biochar and inorganic nitrogen influences the microbial properties in soils of jujube orchard[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, **24**(4): 1039-1046.
- [35] Ouyang L, Yu L Q, Zhang R D. Effects of amendment of different biochars on soil carbon mineralisation and sequestration[J]. Soil Research, 2014, **52**(1): 46-54.
- [36] 廖上强, 陈延华, 李艳梅, 等. 生物炭基尿素对芹菜产量、品质及土壤硝态氮含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, **32**(5): 443-448.
Liao S Q, Chen Y H, Li Y M, *et al.* Effect of biochar-based urea on yield and quality of celery and soil NO_3^- -N content[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, **32**(5): 443-448.
- [37] Jaiswal A K, Frenkel O, Tsechansky L, *et al.* Immobilization and deactivation of pathogenic enzymes and toxic metabolites by biochar: A possible mechanism involved in soilborne disease suppression[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, **121**: 59-66.
- [38] 陈梦云, 李晓峰, 程金秋, 等. 秸秆全量还田与氮肥运筹对机插优质食味水稻产量及品质的影响[J]. 作物学报, 2017, **43**(12): 1802-1816.
Chen M Y, Li X F, Cheng J Q, *et al.* Effects of total straw returning and nitrogen application regime on grain yield and quality in mechanical transplanting japonica rice with good taste quality[J]. Acta Agronomica Sinica, 2017, **43**(12): 1802-1816.
- [39] Khan M A, Kim K W, Mingzhi W, *et al.* Nutrient-impregnated charcoal: an environmentally friendly slow-release fertilizer[J]. The Environmentalist, 2008, **28**(3): 231-235.
- [40] 武沛然. 生物炭与氮肥配施对盐碱胁迫下甜菜生长及土壤特性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
Wu P R. Effects of combined application of biochar and nitrogen fertilizer on sugar beet growth and soil properties under Saline-alkali stress [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.

CONTENTS

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