

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响

刘杰云^{1,2}, 邱虎森^{1,2}, 汤宏^{2,3}, 沈健林^{2*}, 吴金水²

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所农业农村部节水灌溉工程重点实验室, 新乡 453002; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 3. 凯里学院环境与生命科学学院, 凯里 556011)

摘要: 生物质炭可影响土壤微生物量, 但生物质炭对双季稻田土壤微生物生物量碳、氮(MBC、MBN)及可溶性有机碳、氮(DOC、DON)的影响还不清楚。基于此, 本研究选取亚热带2种典型双季稻田土壤(花岗岩母质发育的水稻土S1和第四纪红壤发育的水稻土S2)作为研究对象, 开展室内培养试验来研究不施氮肥条件下生物质炭添加对土壤微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮的影响。每种土壤设置3个小麦秸秆生物质炭添加量, 即土重的0%、1%和2%, 分别用CK、LB和HB表示。培养70 d后, 2种水稻土的MBC均值:S1为877.03、832.11和849.30 mg·kg⁻¹, S2为902.94、874.19和883.22 mg·kg⁻¹。S1+LB、S1+HB和S2+LB均显著降低了土壤MBC均值($P < 0.05$), 这可能是由生物质炭吸附土壤有机碳及其他有机物, 阻碍了微生物的生长而造成的。S1土壤中低生物质炭添加量较对照显著降低了土壤MBN均值($P < 0.05$), 降幅达9.45%。生物质炭对S1土壤MBC/MBN均值影响不明显, 但LB降低了S2土壤MBC/MBN均值($P < 0.05$)。由于生物质炭本身含有部分可溶性有机碳及其高pH值, 添加到2种水稻土中均增加了土壤DOC均值, 增幅分别达4.42%~22.20%和10.57%~35.47%。但生物质炭(除S2+HB处理)显著降低了土壤DON均值, 这可能归因于生物质炭对土壤有机氮的吸附作用及生物质炭本身有机碳分解过程中对N的消耗作用。生物质炭显著增加了2种水稻土的DOC/DON均值, 且随着生物质炭添加量的增加而增加。综上所述, 在双季稻田土壤中单施生物质炭虽然可增加土壤可溶性有机碳, 但对土壤微生物量有一定的降低作用, 且会加重土壤氮亏缺状况。因此, 在亚热带双季稻田中生物质炭应与化肥等配合施用。

关键词: 生物质炭; 水稻土; 双季稻; 微生物生物量碳、氮; 可溶性有机碳、氮

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3799-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901182

Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils

LIU Jie-yun^{1,2}, QIU Hu-sen^{1,2}, TANG Hong^{2,3}, SHEN Jian-lin^{2*}, WU Jin-shui²

(1. Key Laboratory of Water-Saving Irrigation Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. College of Environment and Life Science, Kaili University, Kaili 556011, China)

Abstract: Biochar can influence soil microbial biomass. It is not clear how biochar amendment affects soil microbial biomass carbon and nitrogen (MBC and MBN) and dissolved organic carbon and nitrogen (DOC and DON) in double-cropping rice soils. To address this problem, two subtropical double-cropping rice soils (S1 and S2) were selected for an incubation experiment. S1 is developed from granite-weathered red soil and S2 is developed from Quaternary red clay. The following three wheat straw-derived biochar application rates were used, without N fertilizer, in each paddy soil: 0%, 1%, and 2% of soil weight, represented by CK, LB, and HB, respectively. After a 70 d incubation, soil mean MBC was 877.03 mg·kg⁻¹, 832.11 mg·kg⁻¹, and 849.30 mg·kg⁻¹ in S1 for the three application rates, and 902.94 mg·kg⁻¹, 874.19 mg·kg⁻¹, and 883.22 mg·kg⁻¹, respectively, in S2. S1+LB, S1+HB, and S2+LB treatments reduced soil mean MBC compared to the CK treatment ($P < 0.05$). This may be attributed to biochar inhibiting microbial growth by adsorbing soil organic carbon and other low-molecular-weight organic matter. Low biochar application rates decreased mean soil MBN by 9.45% compared to the CK treatment in S1 ($P < 0.05$). No significant differences in mean MBC/MBN were observed among the S1 treatments, but LB reduced MBC/MBN in S2 ($P < 0.05$). Due to the soluble organic carbon content and strong alkalinity of biochar, biochar amendment increased mean soil DOC by 4.42%-22.20% and 10.57%-35.47% in S1 and S2, respectively ($P < 0.05$). However, biochar amendment (except for the S2+HB treatment) decreased mean soil DON in both paddy soils. This may have resulted from the adsorption of soil organic nitrogen by biochar and N consumption during the decomposition of the organic carbon within biochar. Biochar amendment increased mean soil DOC/DON in both paddy soils ($P < 0.05$) and mean DOC/DON increased with an increase in the biochar application rate. Based on these results, biochar amendment increased soil dissolved

收稿日期: 2019-01-22; 修订日期: 2019-02-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200307); 中央级科研院所基本科研业务费专项(FIRI2019-01-02, FIRI2019-02-01); 中国农业科学院农业科技国际合作研究项目(Y2019GH19)

作者简介: 刘杰云(1985~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农田温室气体减排, E-mail: liujieyun66@163.com

* 通信作者, E-mail: jishen@isa.ac.cn

organic carbon, decreased soil microbial biomass, and enhanced the nitrogen deficit in double-cropping paddy soils. Therefore, biochar should be combined with the application with fertilizer in double-cropping rice systems in subtropical central China.

Key words: biochar; paddy soils; double rice cropping system; microbial biomass carbon, nitrogen; dissolved organic carbon, nitrogen

微生物是土壤生态系统的重要组成部分,是物质转化和养分循环的驱动力,参与土壤有机质的分解和腐殖质的形成、土壤养分转化和循环等过程,是重要的植物养分储备库^[1]. 土壤微生物生物量碳(MBC)虽然在土壤中的绝对数量不大,仅占土壤总碳量的2.00%~4.00%,但它是土壤有机碳中最活跃的部分^[2]. 土壤微生物生物量氮(MBN)一般占土壤全氮含量的1.00%~5.00%^[2],是重要的土壤活性氮的“源”和“库”,直接调节土壤氮素的供给^[3]. 土壤微生物生物量碳、氮可反映土壤有效养分状况和生物活性,能在很大程度上反映土壤微生物数量,是评价土壤微生物数量和活性及土壤肥力的重要指标^[4]. 可溶性有机碳(DOC)是土壤活性有机质,容易被土壤微生物分解,在提供土壤养分方面起着重要作用. 可溶性有机氮(DON)在土壤氮素循环中发挥着重要作用,是土壤氮素最具活性的组分,是土壤养分的重要来源之一,可直接或经过转化后被微生物利用. 土壤微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮是土壤碳、氮库中最活跃的组分^[5],是植物可利用养分的重要来源,其大小可反映土壤的同化和矿化能力,是土壤活性大小的标志^[6],也是反映土壤被干扰程度的重要灵敏指标^[7]. 在农田生态系统中,其变化主要受施肥、灌溉和耕作等措施的影响^[8].

生物质炭是生物质在部分或完全缺氧条件下热解炭化产生的一类具有高度芳香化结构的稳定性物质^[9]. 生物质炭具有碱性、多孔性、丰富的营养元素、高比表面积和含有大量表面负电荷及高电荷密度等特点^[10],添加到土壤中,可改善土壤微生物的生存环境,为微生物的生长和繁殖提供有利条件^[11]. 有研究表明,生物质炭添加可增加土壤微生物量^[12]. 芮绍云等^[13]在红壤性旱地土壤上的培养试验结果表明,生物质炭与过氧化钙配施可有效提高土壤微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮含量,有助于土壤改良. 在红壤性旱地大田中的研究表明,生物质炭与氮肥配施可有效提高土壤MBC和MBN含量,提高幅度分别为18.22%~122.74%和20.86%~312.91%^[14]. 同样,陈安强等^[15]在油菜-水稻轮作的稻田中添加生物质炭,结果表明,生物质炭与化肥配施较不施肥或单施化肥处理可显著增加土壤微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮含量. 综上所述,生物质炭施用可明显增加旱地土

壤或水旱轮作土壤微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮含量,但在双季稻田土壤中是否也具有同样的效果,目前此方面的研究还较少. 双季稻田土壤有机碳含量、水分状况等都与旱地土壤及水旱轮作土壤具有较大差异,而土壤有机碳含量及水分状况又是影响土壤微生物生物量、可溶性有机碳、氮的重要因子^[8],同时又受到生物质炭施用的影响. 因此,有必要对生物质炭添加对双季稻田土壤微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮含量的影响进行研究. 另外,前人的研究多是针对生物质炭与化肥、有机肥、土壤改良剂等配施对土壤微生物生物量碳氮及可溶性有机碳氮的影响,很少关注单施生物质炭的效果. 基于此,本研究选取2种亚热带典型的双季稻田土壤为研究对象,通过培养试验,分析不施化肥条件下生物质炭添加对双季稻田土壤微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮的影响,以期对生物质炭在亚热带双季稻田土壤的应用提供理论基础和依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤与生物质炭

供试土壤为2种,一种为花岗岩母质发育的麻沙泥水稻土(S1),取自湖南省长沙县金井镇中国科学院亚热带农业生态研究所长沙农业环境观测研究站长期定位试验小区(112°80'E, 28°37'N),另一种为第四纪红壤发育的红黄泥水稻土(S2),取自湖南省长沙县春华镇(113°18'E, 28°20'N),主要种植模式为双季稻. 取耕层0~20 cm土壤,将土壤风干,拣出可见石头、动植物残体等,过2 mm筛,充分混合均匀. 培养前,将土壤湿度调至45%的田间持水量(45% WHC, 此土壤湿度为生物最适宜生长水分条件),25℃条件下预培养一周.

供试生物质炭选用产自河南三利新能源有限公司的小麦秸秆生物质炭,其热解温度约为500℃. 供试土壤和生物质炭的基本理化性质见表1.

1.2 试验设计与方法

根据生物质炭不同添加量,每种土壤设置3个处理:①无生物质炭添加(CK);②添加土重1%(质量分数,下同)生物质炭(LB);③添加2%生物质炭(HB). 每个处理15个重复,用于培养后第5、10、20、40和70 d破坏性采集土壤样品(每次3个重复).

表 1 供试土壤和生物质炭的基本理化性质¹⁾
Table 1 Properties of the study soils and biochar

项目	总碳 /g·kg ⁻¹	总氮 /g·kg ⁻¹	总磷 /g·kg ⁻¹	总钾 /g·kg ⁻¹	pH	MBC /mg·kg ⁻¹	MBN /mg·kg ⁻¹	灰分 /%	砂粒 /%	粉粒 /%	黏粒 /%
S1	25.11	2.84	0.05	25.53	5.1	1 008.31	106.43	—	37.12	32.26	30.61
S2	24.53	2.57	0.06	10.89	5.4	789.34	116.09	—	14.74	50.24	35.02
生物质炭	421.74	4.08	0.47	25.70	9.3	—	—	35.6	—	—	—

1) “—”表示未测

取 400 g(干土重), 根据不同生物质炭添加量, 分别加入生物质炭, 充分混匀后, 加入到 1.0 L 的培养瓶中, 再向培养瓶中加入适量去离子水, 使土壤处于淹水状态, 且土面以上保持 2 cm 水层. 在 25℃ 恒温 and 黑暗条件下培养 70 d.

1.3 样品采集与分析方法

在培养的第 5、10、20、40 和 70 d 分别进行破坏性采集土壤样品. 采集样品放入 4℃ 冰箱内, 并在 1 周之内完成分析测试. 土壤样品测定指标为土壤微生物生物量碳、氮(MBC、MBN)、可溶性有机碳、氮(DOC、DON). 取 80 mL 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 加到 30 g 土中, 振荡 1 h 后过滤. 滤液用连续流动分析仪(Tecator FIA Star 5000 Analyzer, Foss Tecator, 瑞典)测定土壤中的铵态氮(NH₄⁺-N); 取滤液用 TOC 仪(TOC-VWP, Shimadzu Corporation, 日本)测定土壤中的可溶性有机碳(DOC)的含量. 土壤 MBC 和 MBN 采用“氯仿熏蒸-0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 提取法”测定^[16, 17]; 称取相当于烘干重 20.0 g 新鲜土样, 在真空干燥器中用氯仿蒸气在 25℃ 下避光熏蒸培养 24 h, 熏蒸后反复抽真空以除去残留氯仿, 再加入 80 mL 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 溶液振荡 1 h 后过滤; 提取液中的可溶性有机碳用 TOC 仪测定. 另取 10 mL 提取液, 加 CuSO₄ 溶液和浓硫酸消化后采用连续流动分析仪分析测定其中的 N^[16]. 以熏蒸与不熏蒸土样的有机碳和氮的差值分别除以转换系数(0.45)来计算土壤 MBC

和 MBN. 用不熏蒸土样提取的氮减去无机氮中的铵态氮即得到可溶性有机氮(DON); 土壤含水量采用烘干称重法测定.

基础土样及生物质炭基本理化性质测定方法: 总碳采用重铬酸钾氧化法(外加加热法)测定; 总氮采用硒粉-硫酸铜-硫酸消化法测定; 总磷采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定; 总钾采用 NaOH 熔融-原子吸收光谱法测定; 土壤 pH 值(土水比 1:2.5)用 pH 计测定; 生物质炭灰分测定: 马弗炉中 600℃ 烧 3 h 后测定; 土壤机械组成采用比重计法测定.

1.4 数据处理与统计分析

数据统计分析采用 SPSS 20 (SPSS Inc. Chicago, IL) 进行单因素方差分析和双因素方差分析, 单因素方差分析多重比较采用最小显著差数法(LSD), 显著水平为 $P < 0.05$; 双因素方差分析的显著水平为 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 或 $P < 0.001$.

2 结果与分析

2.1 生物质炭对土壤微生物生物量碳、氮的影响
由双因素方差分析的结果可知(表 2), 从整个培养期的平均值来看, 土壤类型及生物质炭添加量均显著影响土壤 MBC 含量($P < 0.001$), 但土壤类型和生物质炭的共同作用对土壤 MBC 含量影响不显著($P > 0.05$). 土壤类型和生物质炭添加量均显著影响土壤 MBN 含量($P < 0.001$), 且二者的共同作用也对 MBN 含量产生显著影响($P < 0.05$).

表 2 土壤和生物质炭对土壤 MBC、MBN、DOC、DON、MBC/MBN 和 DOC/DON 影响的双因素方差分析¹⁾

Table 2 Two-way ANOVA analysis for the effects of soil type and biochar on soil MBC, MBN, DOC, DON, MBC/MBN, and DOC/DON

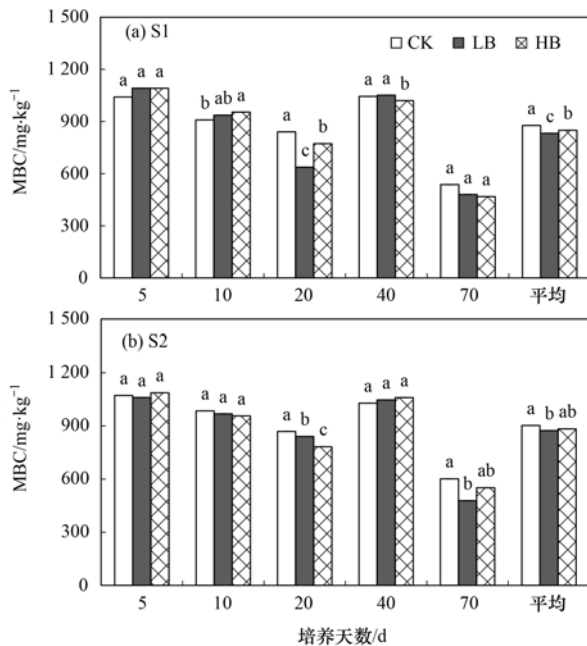
项目	DF	MBC		MBN		DOC		DON		MBC/MBN		DOC/DON	
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
S	1	53.74	0.000	0.78	0.000	357.12	0.000	398.90	0.000	0.77	0.40	2 483	0.000
B	1	21.38	0.000	0.42	0.000	195.48	0.000	12.59	0.001	1.92	0.19	3.91	0.049
S × B	2	1.00	0.40	6.74	0.011	16.76	0.000	3.25	0.075	5.20	0.024	4.63	0.032

1) S 表示土壤; B 表示生物质炭; 各指标均为培养期内的均值

各处理的土壤 MBC 动态变化如图 1 所示, 2 种水稻土的 MBC 含量表现出相同的动态变化趋势, 即培养前 20 d, 各处理土壤 MBC 含量均逐渐降低, 但在培养 40 d, 各处理均出现峰值, 之后降低, 在培养结束时降至最低. 培养初期(5 d), 生物质炭

对 2 种水稻土 MBC 含量均未产生显著影响. 培养 10 d 以后, 生物质炭对 2 种水稻土 MBC 含量的影响出现差异. 培养第 10 d, 生物质炭对 S2 土壤 MBC 量仍没有显著影响($P > 0.05$), 但在 S1 中, HB 显著增加了 MBC 含量($P < 0.05$). 培养第 20

d, 生物质炭均降低了 2 种水稻土的 MBC 含量, 且各处理之间均表现出显著的差异性 ($P < 0.05$), 在 S1 中 LB < HB, 但 S2 中, LB > HB. 培养第 40 d, S1 中 HB 较 CK 和 LB 显著降低了 MBC 含量 ($P < 0.05$), 而在 S2 中, 各处理之间差异不显著 ($P > 0.05$). 培养结束时, 生物质炭降低了土壤 MBC 含量, 但 S1 中降幅不显著 ($P > 0.05$), S2 中 LB 显著降低了 MBC 含量 ($P < 0.05$). 整个培养期内, CK、LB 和 HB 的 MBC 均值: S1 为 877.03、832.11 和 849.30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, S2 为 902.94、874.19 和 883.22 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 在 S1 中, 生物质炭显著降低了土壤 MBC 含量, 且生物质炭处理之间也表现出显著差异性 ($P < 0.05$), 但在 S2 中, 仅 LB 显著降低了土壤 MBC 含量 ($P < 0.05$).



不同字母表示同一采样时间在 $P < 0.05$ 水平下
处理间差异显著, 下同

图 1 2 种水稻土 MBC 含量的动态变化

Fig. 1 Dynamics of soil MBC content in two paddy soils

各处理土壤 MBN 含量的动态变化见图 2. 培养开始前, 2 种水稻土的 MBN 初始值分别为 106.43 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 116.09 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 在培养的第 5 d, 2 种水稻土 CK 的 MBN 含量远高于生物质炭处理, 出现培养期内的峰值, 分别高达 150.34 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 159.91 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 之后迅速降至与生物质炭同等水平. 培养 10~20 d 内, MBN 含量逐渐升高, 到 20 d 时增至高点, 之后降低并趋于稳定. 在培养 10~20 d 期间, S1 中 HB 的 MBN 含量高于 CK, 且在第 20 d 时达到显著水平 ($P < 0.05$), 而 LB 在第 10 d 时显著低于 CK ($P < 0.05$), 但 S2 中生物质炭均显著增加了土壤 MBN 含量 ($P < 0.05$). 培养 40 d 时, 2

种土壤中各处理之间差异均不显著 ($P > 0.05$). 而培养第 70 d, LB 显著增加了 MBN 含量 ($P < 0.05$). 从整个培养期来看, 各处理的 MBN 均值在 S1 中分别为 72.57、65.71 和 72.33 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, S2 中分别为 68.05、75.27 和 71.59 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 仅 S1 中 LB 显著降低了 MBN 含量 ($P < 0.05$), 降幅为 9.45%, 其他处理与相应的 CK 均未表现出显著差异 ($P > 0.05$).

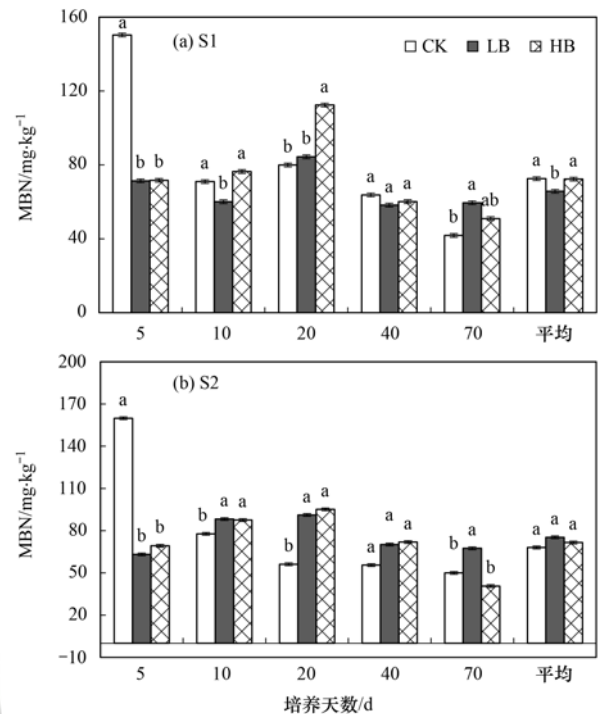


图 2 两种水稻土 MBN 含量的动态变化

Fig. 2 Dynamics of soil MBN content in two paddy soils

2.2 生物质炭对土壤可溶性有机碳、氮的影响

由双因素方差分析的结果 (表 2) 可知, 土壤类型及生物质炭添加量均显著影响土壤 DOC 和 DON 均值 ($P < 0.001$), 土壤类型和生物质炭的共同作用对土壤 DOC 含量影响不显著 ($P > 0.05$), 但显著影响了 DON 含量 ($P < 0.05$).

图 3 为 2 种水稻土 DOC 含量的动态变化. S1 中培养前 20 d, 各处理的 DOC 基本保持稳定, 之后逐渐降低, 至培养结束时降至最低. 而 S2 中, 各处理在整个培养期均保持相对稳定. 整个培养期内 HB 的 DOC 含量均显著高于 CK ($P < 0.05$), 而对于 LB, S1 中仅在培养第 10 d 显著增加了 DOC 含量 ($P < 0.05$), 其他时间均未与 CK 表现出显著差异性 ($P > 0.05$); S2 中在培养第 10 d 和 40 d 时 LB 较 CK 显著增加了 DOC 含量 ($P < 0.05$), 其他时间均未与 CK 表现出显著差异性 ($P > 0.05$). 在整个培养期内, 各处理 DOC 均值在 S1 中分别为 60.56、63.24 和 74.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, S2 中分别为 70.66、78.13 和 95.72 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. HB 显著增加了土壤 DOC

含量 ($P < 0.05$), 增幅分别为 22.20% 和 35.47%, LB 显著增加了 S2 土壤 DOC 含量 ($P < 0.05$), 增幅为 10.57%.

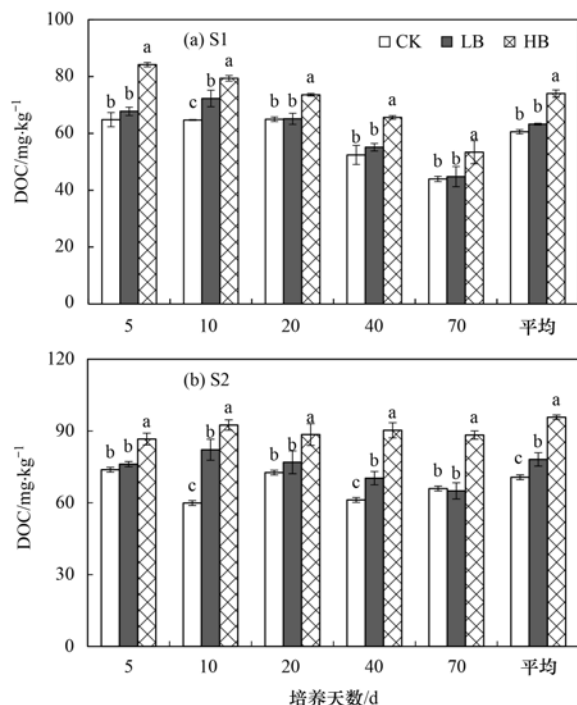


图 3 2 种水稻土 DOC 含量的动态变化

Fig. 3 Dynamics of soil DOC content in two paddy soils

生物质炭添加后 DON 的动态变化如图 4 所示. 培养期间 2 种土中生物质炭处理的 DON 含量变化不大, 但 CK 表现出不同的变化趋势, S1 中前 40 d 内 DON 含量逐渐增加, 至 40 d 出现峰值, 之后保持稳定; 而 S2 中前 20 d 逐渐增加, 20 d 时达到峰值, 之后又缓慢降低. 培养初期 (5 d), 生物质炭显著增加了 2 种水稻土的 DON 含量 ($P < 0.05$), 但在培养第 10 ~ 20 d 期间, S2 中生物质炭却显著降低了 DON 含量 ($P < 0.05$), 而 S1 中各处理之间差异不显著 ($P > 0.05$). 培养 40 d 时, 生物质炭显著降低了 S1 土壤 DON 含量 ($P < 0.05$), 而 S2 中仅 LB 显著降低 ($P < 0.05$). 培养结束时, S1 + HB 和 S2 + LB 均较 CK 显著降低了 DON 含量 ($P < 0.05$). 从培养期内均值来看, LB 和 HB 显著降低了 S1 土壤 DON 含量, 降幅达 4.50% 和 9.22% ($P < 0.05$). 生物质炭虽然也降低了 S2 土壤 DON 含量, 但仅有 LB 显著降低, 降幅为 6.46% ($P < 0.05$).

2.3 生物质炭对土壤微生物生物量碳、氮比的影响

从培养期内双因素方差分析结果来看 (表 2), 虽然生物质炭和土壤均没有显著影响 MBC/MBN 均值, 但二者的互作显著影响 MBC/MBN 均值 ($P < 0.05$). 培养期间, 2 种水稻土中各处理 MBC/MBN 变化范围分别为 6.88 ~ 18.40 和 6.72 ~ 18.68 (表

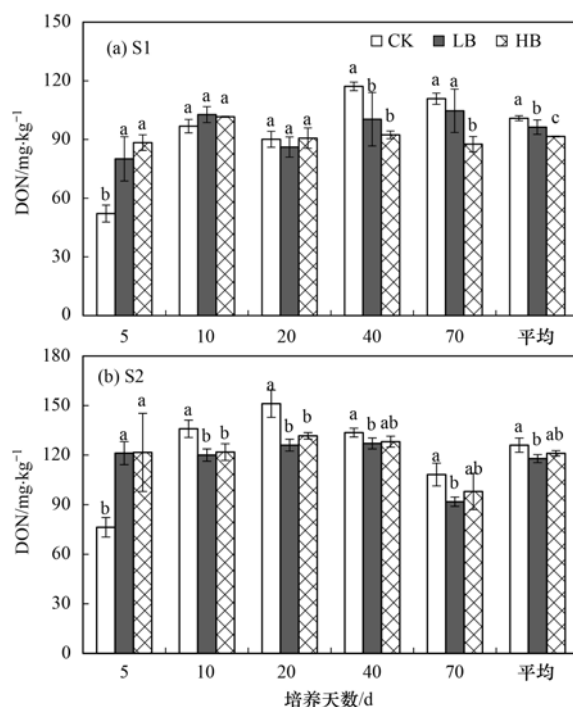


图 4 2 种水稻土 DON 含量的动态变化

Fig. 4 Dynamics of soil DON content in two paddy soils

3). 由于 CK 的 MBN 含量在培养初期远高于生物质炭处理, 故 CK 的 MBC/MBN 最小值出现在培养初期 (第 5 d), 而 LB 的最小值分别出现在 S1 培养第 20 d 和 S2 培养第 70 d, HB 的 MBC/MBN 最小值均出现在培养第 20 d. 2 种水稻土 CK 的 MBC/MBN 最大值均出现在培养第 40 d. S1 中 LB 和 HB 的最大值也出现在培养第 40 d. S2 中 LB 和 HB 的最大值出现在培养第 5 d. 整个培养期内, S1 中 MBC/MBN 均值分别为 12.10、12.68 和 11.75, 生物质炭对 MBC/MBN 均值没有显著影响 ($P > 0.05$). S2 中 MBC/MBN 均值分别为 13.31、11.65 和 12.35, LB 显著降低了 MBC/MBN 均值 ($P < 0.05$).

2.4 生物质炭对土壤可溶性有机碳、氮比的影响

双因素方差分析表明 (表 2), 培养期内, 土壤类型和生物质炭添加量及二者的互作均对 DOC/DON 均值产生显著影响. 培养期间, 各处理 DOC/DON 变化范围分别为 0.40 ~ 1.25 和 0.44 ~ 0.97 (表 4). S1 中各处理的最大值均出现在培养初期 (第 5 d), 之后逐渐降低, 至培养结束时降至最低. S2 中 CK 的最大值出现在培养的第 5 d, 第 10 d 时降至最低, 之后逐渐增加, 而生物质炭处理在整个培养期 DOC/DON 变化不大. 除了培养第 5 d 时生物质炭均显著降低了 2 种水稻土 DOC/DON ($P < 0.05$), 培养第 10 ~ 70 d 内生物质炭均增加了 DOC/DON, 尤其是 HB 显著增加了 DOC/DON ($P <$

0.05). 培养期内, 生物质炭显著增加了 2 种水稻土 DOC/DON 均值, 增幅达 9.44% ~ 34.59% 和 18.16% ~ 40.87%, 且随着添加量的增加而显著增加 ($P < 0.05$).

表 3 培养期间 2 种水稻土各处理 MBC/MBN 的变化¹⁾

Table 3 Dynamics of soil MBC/MBN in two paddy soils during the incubation period

土壤	处理	培养时间/d					平均值
		5	10	20	40	70	
S1	CK	6.93b	12.82b	10.54a	16.44a	13.10a	12.10a
	LB	15.35a	15.61a	7.56a	18.40a	8.14b	12.68a
	HB	15.25a	12.52b	6.88b	17.04a	9.16b	11.75a
S2	CK	6.72b	12.68a	15.55a	18.68a	12.63a	13.31a
	LB	17.01a	10.98b	9.23 b	15.33a	7.12b	11.65b
	HB	15.72a	10.97b	8.23b	14.78a	13.59a	12.35ab

1) 不同字母表示同一土壤同一采样时间在 $P < 0.05$ 水平下处理间差异显著, 下同

表 4 培养期间 2 种水稻土各处理 DOC/DON 的变化

Table 4 Dynamics of soil DOC/DON in two paddy soils during the incubation period

土壤	处理	培养时间/d					平均值
		5	10	20	40	70	
S1	CK	1.25a	0.67b	0.72a	0.45c	0.40b	0.60c
	LB	0.85b	0.70b	0.77a	0.55b	0.43b	0.66b
	HB	0.95b	0.78a	0.81a	0.71a	0.61a	0.81a
S2	CK	0.97a	0.44b	0.48b	0.46c	0.61b	0.56c
	LB	0.63b	0.68a	0.61a	0.55b	0.71b	0.66b
	HB	0.72b	0.76a	0.67a	0.70a	0.91a	0.79a

3 讨论

3.1 生物质炭对土壤微生物生物量碳、氮的影响

微生物在驱动土壤 C、N、P 等营养元素的生物地球化学循环, 维持生态系统过程和功能等方面具有十分重要的作用, 而且其对土壤环境条件变化具有强烈的敏感性, 能较快地反映出土壤质量的变化^[18]. 已有研究表明, 生物质炭添加到土壤中可引起微生物群落结构的变化^[19]. 而且, 生物质炭具有巨大的比表面积、发达的孔隙结构及较高的阳离子交换量, 添加到土壤后, 可为土壤微生物的生长与繁殖提供良好的栖息环境^[20, 21]. 此外, 生物质炭含有大量营养元素, 可为微生物生长提供养分^[22], 从而提高土壤微生物量. 有研究表明, 生物质炭添加, 尤其是生物质炭与化肥配施, 可明显增加土壤微生物生物量碳、氮含量^[13, 14, 23]. 而在本研究中, 生物质炭添加 (尤其是 1% 添加量) 降低了 2 种水稻土 MBC 含量, 且降低了 S1 的 MBN 含量, 这与 Durenkamp 等^[24] 及罗梅等^[25] 的研究结果一致.

本研究中两种水稻土的 MBC 及 MBN 变化趋势都较为一致, 且生物质炭降低了 2 种水稻土 (尤其是 S1) 的微生物量. 但培养初期, 生物质炭并未降低 MBC. 生物质炭本身含有部分可溶性的碳和氮^[26, 27] (增加了培养初期土壤 DOC 和 DON 含量), 可为微生物的生长提供能量和营养, 进而提高土壤

微生物量, 这可能是培养初期生物质炭添加后 S1 土壤 MBC 含量增加的主要原因. 但随着培养的持续, 2 种水稻土中各处理 MBC 含量均呈持续下降趋势 (除培养 40 d 外), 这可能是由于没有施用氮肥, 土壤供氮不足引起的. 已有研究表明, 当氮素成为土壤中养分供应的限制因子时, 微生物的代谢活动会相应减弱, 从而使土壤微生物量降低^[28]. 本研究培养后期, 生物质炭中可溶性有机物逐渐减少, 多为难降解有机物, 要分解这些难降解性有机物, 需要更多的 N, 而土壤未施用氮肥, 则出现氮源供应不足, 抑制了微生物的生长, 导致土壤 MBC 呈现逐渐降低的趋势. 生物质炭具有发达的孔隙结构, 可将土壤中有有机碳吸附到其孔隙结构中, 减少了与微生物的接触面, 阻碍了微生物的生长, 这可能是培养后期生物质炭降低土壤 MBC 含量的重要原因. 有研究表明, 高温 ($> 400^{\circ}\text{C}$) 制备的生物质炭较低温 ($\leq 400^{\circ}\text{C}$) 制备的生物质炭具有更大的比表面积^[29], 而生物质炭的比表面积是决定其吸附能力的关键因素^[30]. 本研究中所用生物质炭制备温度约为 500°C , 吸附性较强. 生物质炭可吸附土壤中的小分子有机物 (如含 N 化合物) 到其孔隙内或外表面, 强烈抑制被吸附有机物的可利用性^[31], 进一步加重了土壤供氮不足的状况 (培养后期, 生物质炭添加降低了土壤 DON 含量), 影响了微生物的生长, 而且生物质炭对这些小分子有机物的吸附是缓

慢的扩散运动, 因此, 导致培养后期土壤微生物量降低. 此外, 有研究表明, 与革兰氏阳性细菌相比, 革兰氏阴性细菌对环境胁迫的适应能力差, 不能很好地利用具有高度芳香化结构的生物质炭^[32, 33], 本研究中生物质炭添加导致土壤微生物生物量降低可能与革兰氏阴性细菌的数量降低有关, 但相关原因还有待于进一步验证. 生物质炭对偏砂性的 S1 土壤微生物量的影响较偏黏性的 S2 土壤更为明显, 这可能是由于生物质炭添加到砂性土壤, 更有利团聚体的形成, 增加对土壤有机碳的吸附, 隔绝与微生物的接触, 使得微生物生物量受影响较黏性土壤大, 具体的影响机制还有待进一步研究.

土壤 MBC/MBN 常用来反映微生物群落结构特征^[34]. 有研究表明, 细菌的 C/N 为 3.00 ~ 5.00, 真菌的 C/N 为 5.40 ~ 15.00^[35]. 本研究中两种水稻土的 MBC/MBN 在 6.72 ~ 18.68 范围内, 因此本研究 2 种水稻土微生物群落以真菌为主. 不同处理及不同培养时间土壤 MBC/MBN 差异较大, 表明土壤微生物受外界环境影响处于不断变化之中. 一方面土壤中微生物群落时刻处于变化之中, 不同的微生物区系其 C、N 含量有较大差异, 另一方面, 生物质炭本身含有的 C、N 会对土壤 MBC 和 MBN 产生影响, 且生物质炭的特殊性质(如吸附性、碱性等)也可能影响土壤微生物生物量碳、氮的变化. 从整个培养期的均值来看, 生物质炭添加没有显著影响 S1 的 MBC/MBN, 但降低了 S2 的 MBC/MBN. 有研究认为, 土壤 MBC/MBN 反映了土壤氮素供应能力, MBC/MBN 较小时土壤氮素有较高的生物有效性, 可提高氮素利用率^[36]. 生物质炭降低了 S2 土壤 MBC/MBN, 可提高土壤氮素的生物有效性, 缓解了 S2 土壤供氮不足的状况, 这可能也是 S2 土壤微生物量降幅较 S1 小的原因.

3.2 生物质炭对土壤可溶性有机碳、氮的影响

本研究结果表明, 生物质炭添加可增加 2 种水稻土 DOC 含量, 这与多数研究结果一致^[37, 38]. 生物质炭在制备的过程中可形成一定量的可溶性有机碳^[39], 添加到土壤中, 可作为土壤有机碳的一部分增加土壤 DOC 含量. 生物质炭本身呈碱性^[40], 本研究中所用生物质炭 pH 为 9.30, 施入土壤可增加土壤 pH^[40], pH 的增加可能导致水溶性有机碳中弱酸性官能团的去质子化, 增加了活性有机碳的亲水性和电荷密度^[41], 有利于固相有机碳的溶解, 增加土壤 DOC 含量. 此外, 生物质炭本身含有部分脂肪族和氧化态碳, 可被土壤微生物分解^[29], 转化为小分子的可溶性有机物. 培养期内两种水稻土 DOC 含量的时间变化趋势有较大差异, 这可能与土壤质

地有关. S1 土壤偏砂性, 不利于土壤团聚体的形成, 土壤有机碳易被微生物消耗, 从而使得 DOC 含量随着培养时间的持续逐渐降低. 而 S2 土壤粉粒含量高达 50.24% (表 1), 可形成结构良好的土壤团聚体, 有利于土壤肥力的保持, 较好的保护了土壤有机碳, 故其土壤 DOC 在整个培养期内差异不大.

在本研究中, 生物质炭降低了 2 种水稻土 DON 含量, 这与芮绍云等^[13]的结果一致. 但培养初期, 生物质炭显著增加了土壤 DON 含量, 这可能是由生物质炭本身含有的部分可溶性有机氮引起的. 培养后期, 随着生物质炭本身可溶性有机氮的消耗, 而生物质炭又将 DON 吸附到生物质炭内或土壤胶体中^[42], 从而导致生物质炭降低了 2 种水稻土的 DON 含量. 另外, 土壤微生物在分解生物质炭中容易降解的有机碳时, 需要消耗土壤中的 N, 这个过程也可降低土壤 DON 含量. 培养期内, S2 土壤 DON 含量在培养后期降低, 培养结束时降至最低, 可能是培养过程中氮素消耗的结果, 而 S1 土壤 DON 含量基本保持稳定, 这可能是 S1 土壤总氮含量高于 S2, 随着土壤氮素的消耗, 土壤中难溶性有机氮逐渐向 DON 转化, 保持了 DON 的基本稳定, 但具体的内在机制还有待于进一步地研究.

DOC/DON 的变化可表征土壤中 DOC 及 DON 的来源及转化, 对于调节农田中 DOC 和 DON 等有机养分含量具有重要意义. 本研究中, 2 种水稻土的 DOC/DON 分别为 0.40 ~ 1.25 和 0.44 ~ 0.97, 这与汤宏等^[43]的研究结果一致, 但与芮绍云等^[13]及陈安强等^[15]的结果相差较大, 这可能与土壤类型、质地等有关, 需要进一步研究. 培养期间, S1 各处理的 DOC 含量逐渐降低, 而 DON 的时间变异较小, 导致 DOC/DON 变化与 DOC 变化趋势一致; 而 S2 培养期间 DOC 和 DON 随时间变化不大, 故 DOC/DON 的变化也较小. 生物质炭显著增加了 2 种水稻土的 DOC 含量, 而 DON 有一定的降低, 因此, 生物质炭较对照增加了 DOC/DON, 即增加了土壤可溶性有机 C/N, 这也在一定程度上说明, 单施生物质炭条件下, 加重了土壤氮亏缺的状况.

4 结论

(1) 生物质炭添加降低了 2 种水稻土的 MBC 含量, 尤其是 S1 土壤 MBC 降低较为明显; S1 + LB 的 MBN 含量较对照显著降低, 其他处理对土壤 MBN 含量影响较小.

(2) 生物质炭增加了 S1 和 S2 的 DOC 含量, 增幅分别为 4.42% ~ 22.20% 和 10.57% ~ 35.47, 且

DOC 含量随着生物质炭添加量的增加而增加;但生物质炭(除 S2 + HB 处理)显著降低了土壤 DON 含量。

(3)培养期内,在 S1 土壤中生物质炭对 MBC/MBN 均值影响不大,但 S2 中添加低量生物质炭显著降低了土壤 MBC/MBN;生物质炭增加了土壤 DOC/DON,且随着添加量的增加而增加。

(4)在单施生物质炭条件下,虽然增加了土壤 DOC 含量,但降低了 2 种水稻土微生物量,且加重了土壤氮亏缺状况。因此,在亚热带红壤性水稻土中,单施生物质炭不利于土壤微生物的生长,需要与化肥、有机肥等配合施用。此外,在大田中有水稻种植条件下,由于水稻根系分泌物会改变土壤微环境,以及水稻生长对土壤养分等产生影响,且大田环境下土壤受多种复杂环境因子的影响,可能会与培养条件下的结果有一定的差异,因此,还需要开展田间试验进行验证。

参考文献:

- [1] 薛青芳,高艳梅,汪景宽,等. 土壤微生物量碳氮作为土壤肥力指标的探讨[J]. 土壤通报, 2007, **38**(2): 247-250.
Xue J F, Gao Y M, Wang J K, *et al.* Microbial biomass carbon and nitrogen as an indicator for evaluation of soil fertility[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, **38**(2): 247-250.
- [2] 赵先丽,程海涛,吕国红,等. 土壤微生物生物量研究进展[J]. 气象与环境学报, 2006, **22**(4): 68-72.
Zhao X L, Cheng H T, Lv G H, *et al.* Advances in soil microbial biomass[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2006, **22**(4): 68-72.
- [3] 王淑平,周广胜,孙长占,等. 土壤微生物量氮的动态及其生物有效性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, **9**(1): 87-90.
Wang S P, Zhou G S, Sun C Z, *et al.* The dynamics of soil microbial biomass nitrogen and its biological availability[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, **9**(1): 87-90.
- [4] Nsabimana D, Haynes R J, Wallis F M. Size, activity and catabolic diversity of the soil microbial biomass as affected by land use[J]. Applied Soil Ecology, 2004, **26**(2): 81-92.
- [5] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, *et al.* Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**(3): 387-401.
- [6] 肖新,朱伟,肖靛,等. 适宜的水氮处理提高稻基农田土壤酶活性和土壤微生物量碳氮[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(21): 91-98.
Xiao X, Zhu W, Xiao L, *et al.* Suitable water and nitrogen treatment improves soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities of paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(21): 91-98.
- [7] 任天志, Grego S. 持续农业中的土壤生物指标研究[J]. 中国农业科学, 2000, **33**(1): 68-75.
Ren T Z, Grego S. Soil bioindicators in sustainable agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, **33**(1): 68-75.
- [8] 汤宏,沈健林,张杨珠,等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(1): 240-246.
Tang H, Shen J L, Zhang Y Z, *et al.* Effect of rice straw incorporation and water management on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in a rice paddy field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, **27**(1): 240-246.
- [9] Lehmann J. A handful of carbon[J]. Nature, 2007, **447**(7141): 143-144.
- [10] 刘玉学. 生物质炭输入对土壤氮素流失及温室气体排放特性的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [11] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(6): 1301-1310.
- [12] Xu N, Tan G C, Wang H Y, *et al.* Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure[J]. European Journal of Soil Biology, 2016, **74**: 1-8.
- [13] 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.
- [14] 陶朋闯,陈效民,靳译文,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.
- [15] 陈安强,付斌,鲁耀,等. 有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(21): 160-167.
Chen A Q, Fu B, Lu Y, *et al.* Exogenous organic materials applied to paddy field improving soil microbial biomass C, N and dissolved organic C, N[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(21): 160-167.
- [16] Brookes P C, Landman A, Pruden G, *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1985, **17**(6): 837-842.
- [17] Wu J S, Joergensen R G, Pommerening B, *et al.* Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction-an automated procedure[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, **22**(8): 1167-1169.
- [18] Falkowski P G, Fenchel T, Delong E F. The microbial engines that drive earth's biogeochemical cycles[J]. Science, 2008, **320**(5879): 1034-1039.
- [19] 李明,李忠佩,刘明,等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2015, **48**(7): 1361-1369.
Li M, Li Z P, Liu M, *et al.* Effects of different straw biochar on nutrient and microbial community structure of a red paddy soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, **48**(7): 1361-1369.
- [20] Liang B Q, Lehmann J, Solomon D, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Science Society of American Journal, 2006, **70**: 1719-1730.
- [21] Wu W X, Yang M, Feng Q B, *et al.* Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment[J]. Biomass and Bioenergy, 2012, **47**: 268-276.

- [22] Zhao K, Cao X D, Mašek O, *et al.* Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **256**: 1-9.
- [23] 刘杰云, 邱虎森, 王聪, 等. 生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2394-2403.
Liu J Y, Qiu H S, Wang C, *et al.* Influence of biochar amendment on soil denitrifying microorganisms in double rice cropping system[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2394-2403.
- [24] 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**(1): 2026-2029.
- [25] 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.
- [26] Jones D L, Murphy D V, Khalid M, *et al.* Short-term biochar-induced increase in soil CO₂ release is both biotically and abiotically mediated[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(8): 1723-1731.
- [27] Liu J Y, Shen J L, Tang H, *et al.* Effects of biochar amendment on the net greenhouse gas emission and greenhouse gas intensity in a Chinese double rice cropping system[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, **65**: 30-39.
- [28] Wang C Y, Feng X G, Guo P, *et al.* Response of degradative enzymes to N fertilization during litter decomposition in a subtropical forest through a microcosm experiment[J]. *Ecological Research*, 2010, **25**(6): 1121-1128.
- [29] 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 等. 不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 333-342.
Zhao S X, Yu X L, Li Z H, *et al.* Effects of biochar pyrolyzed at varying temperatures on soil organic carbon and its components: influence on the soil active organic carbon[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 333-342.
- [30] Kasozi G N, Zimmerman A R, Nkedi-Kizza P, *et al.* Catechol and humic acid sorption onto a range of laboratory-produced black carbons (Biochars) [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **44**(16): 6189-6195.
- [31] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(6): 1169-1179.
- [32] 雷海迪, 尹云锋, 刘岩, 等. 杉木凋落物及其生物炭对土壤微生物群落结构的影响[J]. *土壤学报*, 2016, **53**(3): 790-799.
Lei H D, Yin Y F, Liu Y, *et al.* Effects of fir (*cunninghamia lanceolata*) litter and its biochar on soil microbial community structure[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(3): 790-799.
- [33] Farrel M, Kuhn T K, Macdonald L M, *et al.* Microbial utilisation of biochar-derived carbon[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **465**: 288-297.
- [34] 白震, 张明, 宋斗妍, 等. 不同施肥对农田黑土微生物群落的影响[J]. *生态学报*, 2008, **28**(7): 3244-3253.
Bai Z, Zhang M, Song D Y, *et al.* Effect of different fertilization on microbial community in an arable mollisol[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(7): 3244-3253.
- [35] Anderson J P E, Domsch K H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils[J]. *Soil Science*, 2006, **130**(4): 211-216.
- [36] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006. 71-74.
- [37] Smebye A, Alling V, Vogt R D, *et al.* Biochar amendment to soil changes dissolved organic matter content and composition [J]. *Chemosphere*, 2015, **142**: 100-105.
- [38] 章明奎, Bayou W D, 唐红娟. 生物质炭对土壤有机质活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(2): 127-131, 137.
Zhang M K, Bayou W D, Tang H J. Effects of biochar's application on active organic carbon fractions in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(2): 127-131, 137.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] De Wit H A, Groseth T, Mulder J. Predicting aluminum and soil organic matter solubility using the mechanistic equilibrium model WHAM[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**(4): 1089-1100.
- [42] 魏珞宇. 生物灰渣和猪粪肥料化利用对土壤氮素组分的影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- [43] 汤宏, 沈健林, 刘杰云, 等. 稻秸的不同组分对水稻土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**(4): 264-271.
Tang H, Shen J L, Liu J Y, *et al.* Effects of different ingredients of rice straw incorporation on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in rice paddy soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(4): 264-271.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)