

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测 黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率 李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析 杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单 孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布 李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)
济南市夏、冬季 PM_{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)
聊城冬季一重污染过程 PM_{2.5} 污染特征及成因分析 张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量 王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)
晋城市冬季环境中挥发性有机物的污染特征及来源解析 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析 孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏楨, 王凤 (4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质 李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征 李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析 高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王朕, 滕彦国, 王金生 (4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估 官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析 赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)
黄河干流宁夏段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性 席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比 李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素 王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)
柳江盆地浅层地下水硝态氮水特征和成因分析 徐进, 何江涛, 彭颖, 曾颖 (4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性 张雯, 尹琳, 周念清 (4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征 张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)
铅改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响 何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)
洱河流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响 李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应 聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响 储瑜, 何肖微, 曾中, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程 汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征 胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征 花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较 赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向 姚翔译, 石炬, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性 王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)
UV 强化草酸络合 Fe³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺 韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)
焦化废水 A/O² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析 吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响 俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)
NaCl 盐度对 A²/O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响 张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响 陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)
游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验 孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响 安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复 李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析 宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应 罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响 李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响 周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殿波 (4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响 韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险 李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析 靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小卉, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)
《环境科学》征订启事 (3986) 《环境科学》征稿简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应

罗梅, 田冬, 高明*, 黄容

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 土壤有机碳(SOC)是土壤最重要的组成部分, 土壤活性有机碳是引起土壤碳库变化的关键, 为研究在不同施用量生物炭还田下土壤有机碳及其活性组分的影响, 本试验在重庆国家紫色土肥力与肥料效益长期监测基地测定了无物料还田(CK)、生物炭还田(8 000 kg·hm⁻², BC)、0.5 倍生物炭还田(4 000 kg·hm⁻², 0.5 BC)、2 倍生物炭还田(16 000 kg·hm⁻², 2 BC)配施化肥处理下的紫色土丘陵区油菜/玉米轮作制中土壤有机碳及活性组分含量。结果表明:①施用生物炭可以显著提高土壤有机碳的含量($P < 0.05$), 在一定范围内, 生物炭的施用量与土壤有机碳含量成正比。适量的生物炭施入土壤后, 土壤微生物量碳(SMBC)含量上升, 但 0.5BC 和 2BC 处理下土壤微生物量碳反而减少。生物炭不同施入量均可提高土壤可溶性碳(DOC)和土壤易氧化碳(ROC)的含量, 其中 0.5BC 处理的含量最高, 分别为 198.83 g·kg⁻¹ 和 4.86 g·kg⁻¹。②生物炭的施用均显著降低了土壤微生物熵和 ROC/SOC, 其中 0.5BC 处理最低, 分别较 CK 处理下降了 20.45% 和 4.11%, 而 2BC 处理最高。0.5BC 和 BC 处理均能提高 DOC/SOC, 且 0.5BC 处理显著高于 BC 处理。总体上, 虽然生物炭还田微生物活性较低, 但土壤有机碳及其稳定性较高, 有利于土壤有机碳积累, 促进土壤固碳。同时适量的生物炭还田可以持续稳定增长土壤有机碳含量, 少量生物炭 0.5BC 处理还田可提高土壤中可溶性有机碳和易氧化有机碳含量。

关键词: 有机碳; 生物炭; 可溶性有机碳(DOC); 土壤有机碳(SOC); 易氧化碳(ROC); 土壤微生物量碳(SMBC)

中图分类号: X144; X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4327-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711067

Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar

LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming*, HUANG Rong

(College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) is the most important part of the soil carbon pool and soil labile organic carbon is a key indicator of changes in the soil carbon pool. In order to study changes in SOC and its labile components with different biochar additions to soil, a field experiment was conducted at Chongqing National Purple Soil Fertility and Fertilizer Efficiency of Long-Term Monitoring Station. Different amounts of biochar (0 kg·hm⁻², CK; 4 000 kg·hm⁻², 0.5 BC; 8 000 kg·hm⁻², BC; 16 000 kg·hm⁻², 2BC) combined with fertilizer were applied to purple soil in this hilly area. SOC and soil labile carbon content were determined for purple soil rape-maize rotation systems. Results showed that: ① Application of biochar can significantly improve SOC content; within a certain range, the amount of added biochar is correlated with SOC content. The content of soil microbial biomass carbon (SMBC) increased with application of 8 000 kg·hm⁻² biochar, but decreased with application of 4 000 and 16 000 kg·hm⁻². The content of dissolved organic carbon (DOC) and readily oxidized carbon (ROC) in soil increased with different amounts of biochar; the highest DOC (198.83 g·kg⁻¹) and ROC (4.86 g·kg⁻¹) were obtained under low biochar addition treatments. ② The application of biochar significantly decreases the ratio of soil ROC to SOC and microbial entropy. The ratio of soil ROC to SOC and microbial entropy of 0.5 BC treatment are 20.45% and 4.11%, respectively, lower than for CK. Moreover, 0.5 BC and BC treatments can significantly improve the ratio of soil DOC to SOC. In summary, biochar addition in soil leads to low soil microbial activity but higher soil stability. An appropriate biochar treatment can stimulate accumulation of SOC, and 0.5BC treatment can improve soil DOC and ROC.

Key words: organic carbon; biochar; dissolved organic carbon (DOC); soil organic carbon (SOC); ROC; SMBC

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是全球碳循环的重要组成部分, 增加土壤有机碳对于提高土壤碳汇能力、保障粮食安全及延缓全球气候变暖具有重要意义^[1]。土壤有机碳是有机物料输入碳和矿化分解排放的长期平衡结果, 其含量和质量在短时间内不能对施肥、耕作方式转变、有机物料施用等农田管理措施作出灵敏地响应。土壤碳库变化主要发生在活性碳库中, 土壤活性有机碳是指土壤中稳定性差、周转速率快、易矿化分解, 在土壤中移

动快、易受植物和土壤微生物影响、活性较高的那部分有机碳, 主要包括微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)、可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、易氧化态有机碳(readily

收稿日期: 2017-11-07; 修订日期: 2018-03-13

基金项目: 重庆市农业综合开发办课题项目(CQNZ2016-12); 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101)

作者简介: 罗梅(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染防治, E-mail: 450934141@qq.com

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

oxidized carbon, ROC)、颗粒有机碳。虽然土壤活性有机碳占土壤有机碳总量的比例较小,但它可以灵敏地反映土壤微小变化,可作为土壤有机碳有效性和土壤质量的早期指标。有研究表明,土壤活性有机碳库对温室气体排放有较大的贡献^[2],其含量的高低直接影响到土壤微生物的活性,从而影响土壤固碳能力及温室气体的排放^[3],因此研究土壤活性有机碳对土壤碳库平衡及土壤温室气体减排有重大意义^[4]。

生物炭也称生物质炭,主要由 C、H、O 等元素组成,是物质在缺氧或无氧条件下热裂解得到的一类含炭的稳定的高度芳香化的固态物质^[5]。因生物炭富含 Na、K、Ca、Mg 等矿质组分,呈碱性,施入土壤能改良酸性土壤,改善土壤物理结构^[6]。生物炭含碳量高,具有较高的稳定性,若被埋到地下后可以在土壤中封存很长的时间,有助于减缓全球变暖,因此国内外学者提出了将农业废弃物转化为生物炭,并投入到土壤中以达到固碳效果^[7]。有研究表明,农田施用生物炭可以增加土壤有机碳量,促进土壤团聚体的形成且输入量越大,土壤有机碳含量越高^[8]。付琳琳等^[9]的研究表明施加生物炭可以提高活性有机碳含量,这与生物炭本身活性有机碳的含量密切相关。王月玲等^[10]的研究表明生物炭能显著提高土壤总有机碳含量,提高土壤的固碳能力。侯亚红等^[11]的研究表明秸秆生物炭的施入有利于土壤碳库的增加和稳定,但对土壤微生物活性和土壤呼吸没有明显的增强作用。尚杰等^[12]的研究表明施用生物炭可以显著提高土壤总有机碳、易氧化有机碳、颗粒有机碳和微生物生物量碳含量。张晓玲等^[13]的研究表明施加生物炭处理的土壤活性有机碳含量均有不同程度的上升,而土壤缓性碳含量大致呈下降趋势。但另有研究表明,生物炭的碳源为惰性碳源,添加后不能显著促进微生物的繁殖,因此没有增加土壤微生物生物量碳^[14]。潘全良^[15]的研究表明与秸秆还田和施用猪厩肥相比,生物炭处理土壤有机碳含量较低。同时,有研究表明,生物炭与秸秆等方式相比可在短时间内更多地提高土壤有机碳,但是这种优势能否在较长时间内保持,短期试验不能得出正确评价^[16]。作为重要的土壤改良剂、污染物质吸附剂的生物炭在农业和环境中具有巨大的应用价值和现实意义。本试验通过对不同施用量生物炭还田下土壤活性有机碳库组分的测定,分析生物炭还田对紫色土活性有机碳库的影响,以期在全球气候变暖背景下为紫色土最适生

物炭施用量提供科学的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地点设在重庆市北碚区“国家紫色土肥力与肥料效益长期监测基地”(以下称长期定位点),海拔 266.3 m,年平均气温 18.3℃。最高气温 7 月平均 28.7℃,最低气温 1 月平均 7.7℃,≥10℃ 积温 6 006℃,年降雨量 1 086.6 mm,年日照时数 1 276.7 h,为亚热带季风气候。试验土壤为侏罗纪沙溪庙组紫色泥页岩发育形成的紫色土,中性紫色土亚类,灰棕紫泥土属,是重庆四川紫色土区分布最广的一种土壤。

1.2 试验材料

试验中所用生物炭由四川省久晟农业有限责任公司提供,以油菜秸秆为原料在 500℃ 高温厌氧条件下热解 2 h 烧制,其碳含量为 62.58%,C/N 为 45.52, pH 为 8.9。试验前采集 0~20 cm 耕层土壤测定其基本理化性质,见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

pH	有机碳 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹
6.7	9.98	135.65	17.38	206.32

1.3 试验设计

试验共设置 4 个处理:① 单施化肥,无物料还田(CK),② 8 000 kg·hm⁻² 生物炭配施化肥还田(BC),③ 4 000 kg·hm⁻² 生物炭配施化肥还田(0.5 BC),④ 16 000 kg·hm⁻² 生物炭配施化肥还田(2 BC),每个处理设置 3 个重复;采用随机区组排列在 12 个 2 m×1 m 能独立排灌的微区内,各个微区的水肥管理均相同。生物炭在每季作物播种前 3 d 按照等碳量原则还入,施入大田之前首先将生物炭磨碎并通过 2 mm 筛使其混合均匀,生物炭直接均匀覆盖在土壤表面。还田时人工翻入土壤,深度为 10 cm,要求在土层,混拌均匀。

试验种植模式采用油菜/玉米轮作,本试验于 2015 年 10 月 11 日开始,2016 年 8 月 1 日结束,各作物的氮、磷、钾、硼养分量根据《中国主要作物施肥指南》来确定,各季作物栽培方式和田间管理措施按照当地习惯进行。其中油菜(96v44,密度 8 万株·hm⁻²)于 2015 年 10 月 11 日育苗,2015 年 11 月 3 日移栽,2016 年 4 月 19 日收获。玉米(中豪 9 号,密度 4 万株·hm⁻²)于 2016 年 4 月 9 日育苗,4

月 20 日移栽, 8 月 1 日收获. 油菜季的氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)肥和硼肥用量分别为 150、90、90 和 $15 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 氮肥分基肥和基肥两次施用(基肥占 70%), 磷钾硼肥做基肥一次性施用. 基肥和基肥分别于 2015 年 11 月 1 日和 2016 年 2 月 20 日施用, 施用方法为小雨前后撒施. 玉米季各处理的氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)肥分别为 180、60、90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 全部作为基肥在玉米移栽时施入. 氮、磷、钾和硼肥品种分别为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P_2O_5 12%)、硫酸钾(K_2O 51%)、硼砂(含 B 12%), 所有处理田间管理技术与当地农民习惯一样.

1.4 样品采集与测定

从油菜移栽(2015 年 11 月)到玉米收获(2016 年 8 月), 每两周采集靠近植株处、株间和行间 3 个地点的 0~20 cm 土壤, 混合成一个土壤样品装入自封袋中, 每个土壤样品带回实验室经去除土壤动物、植物根系、秸秆残渣及凋落物后充分混匀, 部分新鲜土样立即过 2 mm 筛保存于 4℃ 冰箱, 用于测定土壤含水量、SMBC 和 DOC 等; 部分土样自然风干后磨细过 0.15 mm 筛, 以测定 SOC 和 ROC.

土壤 SOC 含量的测定采用重铬酸钾外加热容量法; SMBC 采用吴金水^[17]的氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提法测定:

$$\text{SMBC} = \text{EC}/K_{\text{EC}}$$

式中, EC 为熏蒸和未熏蒸样品浸提液测定的有机碳差值; K_{EC} 为转换系数, 取值为 0.38. ROC 采用高锰酸钾氧化比色法测定.

土壤 DOC 含量的测定: 称取过 2 mm 筛的鲜土 20 g 于 100 mL 塑料离心管内, 加入 40 mL 去离子水浸提(土液比为 1:2), 在 25℃ 下振荡 30 min ($250 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$), 离心 20 min ($4000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$), 然后上清液用真空泵抽滤过 0.45 μm 微孔滤膜到 50 mL 塑料瓶中, 滤液直接在 Multi N/C 2100 分析仪(耶拿, 德国)测定.

1.5 数据处理与统计分析

采用 SPSS 17.0 和 Excel 2003 软件进行数据处理、绘图制表. 所有的结果均用 3 次测定结果的平均值表示. 不同处理之间的多重比较采用 LSD 最小显著差数法($P < 0.05$).

2 结果与分析

2.1 生物炭还田下土壤有机碳(SOC)的变化

土壤有机碳含量随着生物质还田在整个生育期呈现先增加后小幅度降低的趋势, 同时在油菜季和玉米季土壤有机碳含量有一定的季节变化. 其中, 在油菜季蕾薹期 0.5BC 处理下土壤有机碳含量显著高于其他 3 个处理($P < 0.05$). 玉米季各处理土壤有机碳含量均在 2016 年 6 月 21 日(灌浆期)达到最大值(图 1). 各处理土壤有机碳平均含量表现为: 2BC ($20.83 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > BC ($17.88 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 0.5BC ($15.62 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > CK ($11.94 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). 因此, 各处理生物炭还田均能显著增加土壤有机碳含量, 与试验前土壤相比较, 各处理增加幅度表现为: 2BC (74.41%) > BC (49.71%) > 0.5BC (30.79%), 且玉米季增幅大于油菜季.

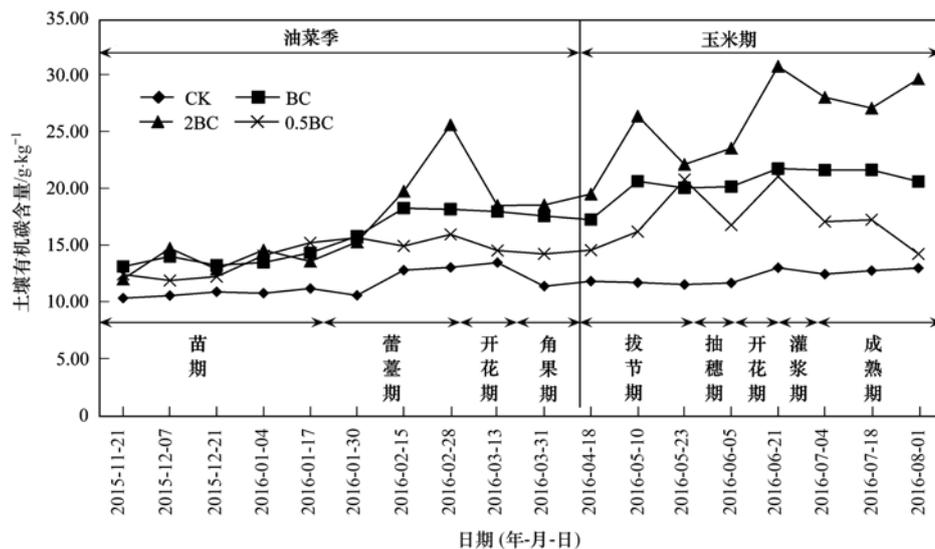


图 1 不同生物炭施用量还田下土壤有机碳的变化

Fig. 1 Dynamics of soil total organic carbon with different amounts of biochar addition

2.2 生物炭还田下土壤微生物量碳(SMBC)的变化

各处理油菜季和玉米季土壤微生物量碳动态变化如图2所示,在油菜季土壤微生物量碳随着生育期的进行呈现先降低再增加后降低的趋势,而在玉米季土壤微生物量碳在整个生育期呈现先增加后降低再增加的趋势.在油菜季,土壤微生物量碳于2015年12月7日(油菜季苗期)达到最小值,随着油菜的旺盛生长于2016年3月31日(角果期)达到

峰值.在玉米季,土壤中微生物量碳于2016年5月23日(拔节期)达到第一个峰值后,又在2016年7月4日(灌浆期)达到第二个峰值.各处理微生物量碳含量平均值表现为:BC($125.53 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > CK($112.58 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 2BC($112.51 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 0.5BC($111.52 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),较之CK处理,只有BC处理下土壤微生物量碳含量提高了12%,其余两个处理0.5BC,2BC的施入反而使土壤中微生物量碳含量下降.

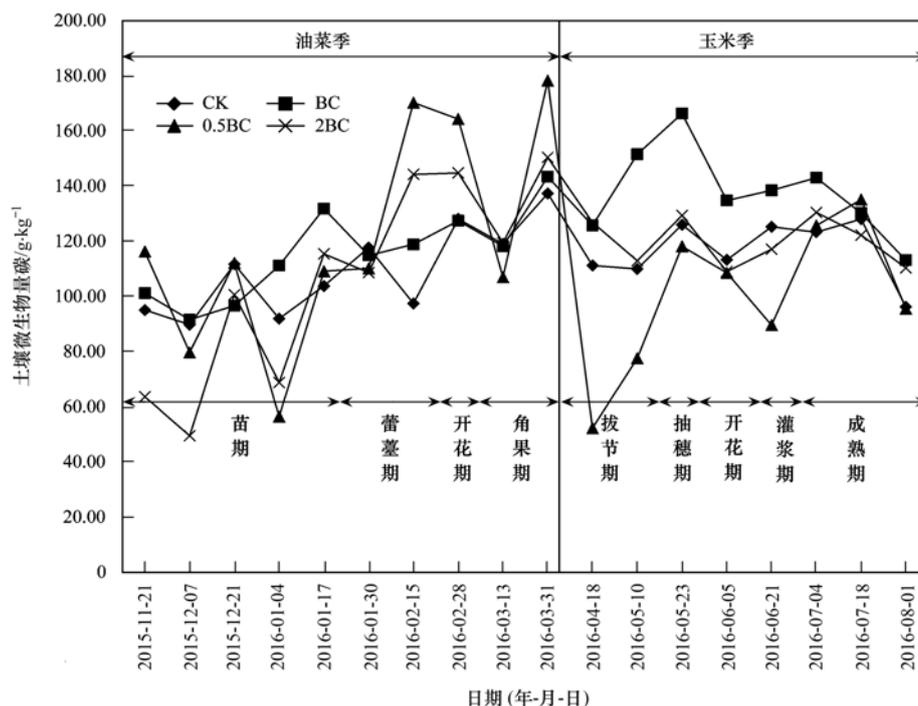


图2 不同生物炭施用量还田下土壤微生物量碳的变化

Fig. 2 Dynamics of soil microbial biomass carbon with different amounts of biochar addition

2.3 生物炭还田下可溶性有机碳(DOC)的变化

由图3可以看出油菜在苗期土壤可溶性有机碳含量出现先增加后减少的趋势,且各处理间变化幅度较小.蕾薹期到成熟期,也呈现先增加后减少的趋势,其中油菜蕾薹期时土壤可溶性有机碳含量0.5BC处理与其它3个处理差异显著.在开花期后期至角果期,各处理DOC含量均达到最高值($129.66 \sim 336.72 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$).随着玉米生育期的进行土壤可溶性有机碳含量呈先上升后下降的趋势,均在2016年7月4日(灌浆期)达到最高,其中0.5BC处理显著高于CK、BC和2BC处理.生物炭还田能提高土壤可溶性碳含量,各处理DOC平均含量表现为:0.5BC($198.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > BC($115.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 2BC($70.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > CK($70.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);与对照相比较,0.5BC、BC和2BC处理

DOC含量分别提高了184%、65%和10%.

2.4 生物炭还田下易氧化有机碳(ROC)的变化

图4为土壤易氧化有机碳在油菜季和玉米季动态变化形式,土壤易氧化有机碳可代表土壤活性有机碳,而土壤活性有机碳与非活性有机碳之间会相互转化,直到它们之间达到平衡.在油菜季植物旺盛生长期土壤易氧化有机碳含量高于油菜生长初期及末期.苗期初期土壤ROC含量较高,随着作物生长逐渐降低,并在2015年12月21日苗期末期降到最小值,随后各处理下土壤易氧化有机碳含量均在蕾薹期达到最大值.各处理ROC平均含量在 $1.79 \sim 10.47 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间变化,其中以2BC处理的变化幅度最大.土壤易氧化有机碳随着玉米整个生育期的进行呈现先下降后上升再下降的趋势,各处理在拔节期差异显著.在玉米季,各处理土壤ROC

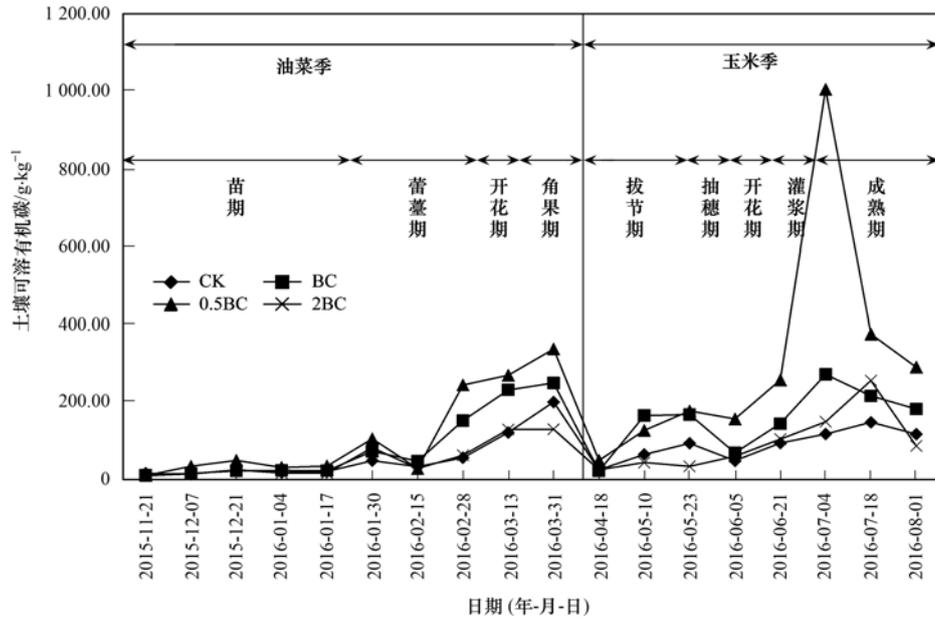


图 3 不同生物炭施用量还田下可溶性有机碳的变化

Fig. 3 Dynamics of soil microbial biomass carbon with different amounts of biochar addition

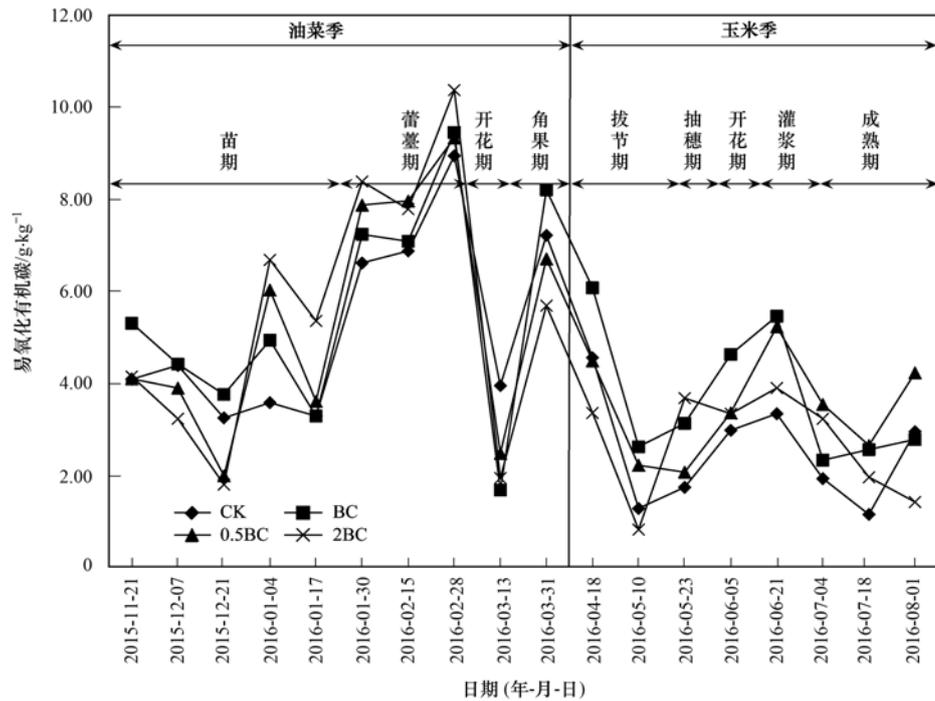


图 4 不同生物炭施用量还田下易氧化有机碳的变化

Fig. 4 Dynamics of soil microbial biomass carbon with different amounts of biochar addition

含量均高于对照处理 5% ~ 57%，其中以 0.5BC 处理最高。生物炭还田提高了土壤易氧化有机碳的含量，各处理 ROC 平均含量表现为：0.5BC (4.86 g·kg⁻¹) > 2BC (4.34 g·kg⁻¹) > BC (3.56 g·kg⁻¹) > CK (3.24 g·kg⁻¹)。

2.5 生物炭还田下土壤微生物熵的变化

表 2 为生物炭还田下油菜季和玉米季土壤微生物

熵的变化情况。油菜季土壤微生物熵随着作物的生长在 0.36% ~ 1.13% 此范围内波动，且总体上呈现先上升后下降的趋势。同时，玉米季各个处理土壤微生物熵均在开花期达到最大值。如表 2 所示，各处理在油菜季角果期差异十分显著 ($P < 0.05$)，而苗期和开花期 CK 处理和 BC 处理不存在差异。在玉米季的抽穗期和灌浆期各个处理间也存在着显

表 2 不同生物炭施用量还田下土壤微生物熵的变化¹⁾/%

Table 2 Dynamics of soil microbial quotient with different amounts of biochar addition/%

项目	油菜季				玉米季				
	苗期	蕾薹期	开花期	角果期	拔节期	抽穗期	开花期	灌浆期	成熟期
CK	0.81 ± 0.01bc	0.78 ± 0.02a	0.87 ± 0.02a	0.97 ± 0.02a	0.81 ± 0.02a	0.90 ± 0.01a	1.16 ± 0.02a	0.85 ± 0.01a	0.76 ± 0.01a
0.5BC	0.71 ± 0.02a	1.13 ± 0.02b	0.73 ± 0.03b	0.36 ± 0.01b	0.48 ± 0.03b	0.64 ± 0.01b	0.73 ± 0.03b	0.78 ± 0.01b	0.78 ± 0.01a
BC	0.78 ± 0.01b	0.72 ± 0.04c	0.85 ± 0.03a	0.50 ± 0.02c	0.47 ± 0.03bc	0.59 ± 0.02c	0.76 ± 0.01b	0.71 ± 0.02c	0.71 ± 0.02b
2BC	0.84 ± 0.03c	0.73 ± 0.02c	0.64 ± 0.01c	0.65 ± 0.01d	0.43 ± 0.02c	0.46 ± 0.01d	0.46 ± 0.02c	0.45 ± 0.02d	0.45 ± 0.01c

1) 不同小写字母表示作物同一生育期在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

著差异. 总体上来说, 不同处理下土壤微生物熵差异显著 ($P < 0.05$).

2.6 生物炭还田下可溶性有机碳 (DOC/SOC) 和易氧化碳分配比例 (ROC/SOC) 的变化

各处理在油菜季和玉米季土壤可溶性有机碳分配比例随着生育期的进行均呈现先增加后下降的趋势. 油菜季各处理土壤 DOC/SOC 在开花期达到最大值, 随后从开花期到角果期土壤 DOC/SOC 开始下降. 如表 3 所示, 在油菜季开花期各处理下 DOC/ROC 差异十分显著 ($P < 0.05$), 而在生育期前期 CK 和 BC 处理不存在显著性差异. 玉米季土壤 DOC/SOC 的峰值出现在开花期和灌浆期, BC 处理在开花期达到最大值, CK、0.5BC 和 2BC 处理则均在灌浆期达到最大值, 其中 0.5BC 处理下土壤 DOC/SOC 达 2.16%, 在玉米季的抽穗

期, 开花期和灌浆期和各处理土壤 DOC/SOC 差异显著 ($P < 0.05$). 如表 4 所示, 各处理土壤 ROC/SOC 比例在 10.36% ~ 53.17% 之间变化. 在油菜季 CK、0.5BC 和 BC 处理土壤 ROC/SOC 比例呈先降低后增加再降低又增加的“W”型变化趋势, 油菜整个生育期内各处理均和 CK 处理存在显著差异. 玉米季各处理土壤 ROC/SOC 比例表现为拔节期到抽穗期逐渐增加, 各处理均在抽穗期达到全生育期的最大值 14.06% ~ 25.21%, 而开花期到成熟期呈先降低后增加的趋势. 在玉米整个生育期各处理土壤 ROC/SOC 比例范围在 3.05% ~ 29.42% 之间变化. 在玉米季拔节期 CK 和 BC 不存在显著差异, 成熟期 0.5BC 和 BC 处理差异不显著, 在灌浆期和抽穗期各处理之间均差异显著.

表 3 不同生物炭施用量还田下 DOC/SOC 的变化/%

Table 3 Dynamics of allocation ratio of DOC/SOC with different amounts of biochar addition/%

项目	油菜季				玉米季				
	苗期	蕾薹期	开花期	角果期	拔节期	抽穗期	开花期	灌浆期	成熟期
CK	0.18 ± 0.02a	0.26 ± 0.01a	0.89 ± 0.02a	0.21 ± 0.01a	0.55 ± 0.02a	0.41 ± 0.01a	0.93 ± 0.02a	1.15 ± 0.02a	0.89 ± 0.03a
0.5BC	0.23 ± 0.02b	0.19 ± 0.01b	1.84 ± 0.01b	0.34 ± 0.01b	0.78 ± 0.02b	0.92 ± 0.01b	0.61 ± 0.01b	2.16 ± 0.04b	2.02 ± 0.01b
BC	0.16 ± 0.01a	0.26 ± 0.02a	1.28 ± 0.02c	0.13 ± 0.01c	0.79 ± 0.04b	0.34 ± 0.02c	1.25 ± 0.02c	0.99 ± 0.02c	0.88 ± 0.03a
2BC	0.12 ± 0.01c	0.14 ± 0.01c	0.69 ± 0.02d	0.13 ± 0.02c	0.17 ± 0.01c	0.25 ± 0.01d	0.53 ± 0.01d	0.94 ± 0.01d	0.29 ± 0.01c

表 4 不同生物炭施用量还田下 ROC/SOC 的变化/%

Table 4 Dynamics of allocation ratio of ROC/SOC with different amounts of biochar addition/%

项目	油菜季				玉米季				
	苗期	蕾薹期	开花期	角果期	拔节期	抽穗期	开花期	灌浆期	成熟期
CK	29.05 ± 0.02a	53.17 ± 0.02a	29.01 ± 0.02a	38.11 ± 0.02a	10.74 ± 0.03a	25.21 ± 0.01a	15.27 ± 0.01a	8.86 ± 0.001a	22.44 ± 0.01a
0.5BC	23.48 ± 0.01b	52.91 ± 0.03bc	16.86 ± 0.01bc	30.52 ± 0.01b	13.54 ± 0.01b	19.82 ± 0.01b	20.52 ± 0.01b	15.21 ± 0.01b	29.42 ± 0.01b
BC	22.71 ± 0.01c	38.50 ± 0.01bc	9.23 ± 0.01bc	34.95 ± 0.01c	12.57 ± 0.01a	22.78 ± 0.01c	10.67 ± 0.01a	11.71 ± 0.01c	13.36 ± 0.01b
2BC	39.08 ± 0.02d	39.13 ± 0.03c	10.36 ± 0.02c	17.06 ± 0.02d	3.05 ± 0.002c	14.06 ± 0.01d	11.43 ± 0.01c	7.16 ± 0.001d	4.73 ± 0.001c

3 讨论

3.1 生物炭对土壤有机碳 (SOC) 的影响

生物炭是含碳丰富的有机物料, 施入土壤不仅能直接增加土壤有机碳含量, 还能改善土壤养分状况, 促进作物生长进而提高作物初级生产力, 提高

植物残体及根系归还量. 本研究结果表明: 与试验开展前对比, 各处理均能显著增加土壤总有机碳含量, 这与文献[18, 19]的研究结果类似. 各处理增加幅度为 30.79% ~ 74.41%, 其中以两倍生物质炭还田(2BC)处理最显著, 对照 CK 最低. 本研究中各处理均较大程度地增加了土壤有机碳, 一方面是

因为本供试土壤有机碳含量较低仅为 $9.98 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 另一方面, 生物炭可通过提高作物产量, 增加作物对大气中 CO_2 的吸收作用, 从而植物根系固定的碳会成为土壤有机碳的一部分^[20], 使土壤有机碳水平得到提升. 也有相关研究表明生物炭在施入土壤后可能改变土壤有机碳的有效性, 增加土壤对有机碳的固持作用, 从而有利于土壤有机碳的固定^[21]. 从图 1 可看出土壤有机碳呈现一定季节性变化, 土壤有机碳分别在油菜薹期和玉米灌浆期达到最高, 玉米季土壤有机碳提高幅度大于油菜季, 说明生物炭还田能持续稳定增加土壤有机碳含量. 本团队前期的研究表明, 秸秆和生物质炭还田有利于小粒径团聚体有机碳含量的增加, 其中生物炭还田提高团聚体有机碳含量效果优于秸秆还田. 同时, 生物炭还田对土壤温度有“削高填低”效应, 即生物炭还田不仅能提高土壤平均温度, 还能降低土壤最高温度, 减缓高温天气对作物生长的抑制, 从而影响土壤有机碳含量. 因此土壤有机碳含量主要受有机物料种类、土壤温度和作物生长的影响.

3.2 生物炭对土壤微生物量碳(SMBC)的影响

生物炭还田增加了外源有机物的投入, 改善了土壤养分状况, 为土壤动物、微生物、菌根提供了充足的营养基质, 同时改善了土壤孔隙度, 有利于土壤团聚体形成^[22], 良好的土壤结构是微生物重要的活动场所, 进而使微生物数量和活性提高, 从而影响微生物分解转化有机物质. 土壤微生物量碳是土壤碳库中最活跃的部分, 数量虽少, 但对土壤碳循环起着重要作用, 是表征土壤生物肥力重要指标^[23, 24]. 尽管生物炭中碳有效性较低, 但生物炭施入土壤后: 一方面, 生物炭具有疏松多孔的结构、巨大的表面积及较高的阳离子交换量等特点, 为土壤微生物提供良好的栖息地; 另一方面, 生物炭空隙内吸附和储存了丰富的营养物质, 为微生物群落提供了充足的养分来源, 促进微生物的生长、繁殖和改变土壤中微生物群落结构^[25]. 本研究结果表明, 适量生物炭还田能提高土壤微生物量碳, 但 0.5BC 和 2BC 处理下的土壤微生物量碳反而减少, 其中 2BC 和 0.5 BC 处理下土壤微生物量碳分别较 CK 减少了 0.06% 和 0.09%. 在施入 0.5BC 生物炭后, 可能由于本身施用量就非常小, 因此对土壤微生物量碳没有贡献. 而在施入 2BC 的过量生物炭后, 土壤微生物量碳较之对照较低, 这与章明奎等^[26]的研究结果相似. 有研究表明, 施用生物炭时, 在培养初期可提高土壤微生物量碳, 但随着培

养时间的增加, 其微生物量碳逐渐下降. 这可能是由于生物质炭本身具有强吸附性和疏松多孔的特性, 使土壤中部分微生物被附着在生物质炭孔隙内, 直接减少了土壤有机质与微生物的接触面, 因此较少土壤有机质被微生物转化成土壤微生物量碳^[27]. 土壤水热条件是影响作物生长、微生物活性和有机物料分解最重要的环境因子^[28], 油菜季土壤微生物量碳最高值出现在角果期, 玉米季土壤微生物量碳则有两个峰值, 分别为拔节期和灌浆期. 这可能是由于 3 月中旬油菜处于角果期和 7 月上旬玉米处于灌浆期, 土壤水热条件适宜, 利于作物迅速生长, 光合作用强烈, 光合同化碳传输到根部, 然后以根系分泌物、脱落物等形式进入土壤, 部分土壤根际活性碳经过微生物作用转化为微生物量碳. 另外, 此时期微生物活动旺盛, 能分解有机物料产生大量的活性有机物, 为微生物生长提供了充足能源和基质. 玉米拔节期, 一方面生物质炭还田会直接增加土壤活性有机碳含量, 促进微生物生长、繁殖; 另一方面新鲜有机物料易被微生物分解产生大量有效养分, 反过来刺激了微生物生长及活性提高; 加之, 此时期玉米生长缓慢, 对养分需求较少, 被植物吸收利用的活性有机碳减少, 因而显著增加了微生物量碳.

土壤微生物熵(qMB)是指土壤微生物量碳(SMBC)与土壤有机碳(SOC)的比值, 它可以从微生物学的角度揭示土壤质量, 是表征土壤微生物固碳效益的指标, 能更好地反映土壤碳库的容量和活性特征^[29], 可以作为有机碳变化的早期指标. 由于土壤微生物量碳周转快, 所以微生物熵值越大, 微生物固定的有机碳越多, 土壤有机碳周转越快. 有关研究表明, 当 qMB 值变大, 可认为土壤中有有机碳处于积累阶段, 反之则反映了土壤有机碳处于消耗阶段^[30]. 本研究中, 各处理微生物熵在 0.36% ~ 1.16% 之间波动. 与对照 CK 比较, 0.5BC、BC 和 2BC 处理均降低了土壤微生物熵. 这可能是因为在土壤有机碳基础值不大, 在微生物量碳变化不是很大的情况下, CK 处理下的土壤微生物熵反而最大.

3.3 生物炭对土壤可溶性碳(DOC)的影响

土壤可溶性有机碳(DOC)是土壤碳库中活性较高的组分, 是土壤微生物分解转化有机物料的重要能源与碳源^[31]. 土壤微生物碳和可溶性有机碳相互依存, 密切相关^[32]. 有研究表明, 可溶性有机物中有 10% ~ 40% 的组分能够直接被微生物分解利用^[33]. 本研究表明: 生物炭的施入均提高了土壤

可溶性碳的含量,在 0.5 倍生物炭还田(0.5BC)处理下,土壤可溶性碳含量最高.这可能是因为,0.5BC 处理下土壤微生物量碳含量最低,此时微生物活性最弱.因此,在施入生物炭后,仅有少量被微生物转化成微生物量碳,而大部分留存为可溶性碳.土壤可溶性有机碳在油菜和玉米生长期内的变化较为一致,均在作物生长旺盛期达到最大,分别在油菜角果期和玉米灌浆期;可溶性有机物含量受作物生长状况和微生物活性强烈的影响,而作物生长旺盛期,水热条件较好有利于作物生长,作物根系生命力强,根系分泌物一方面直接向土壤中提供了大量可溶解性有机碳,另一方面根系分泌物为微生物提高了大量可直接利用的碳源和能源,进而提高了微生物活性,微生物通过分解有机物料和促进土壤中原有有机碳转化来增加土壤可溶性有机碳.同时,生物炭输入还可提高土壤 pH, pH 值的增加可能导致土壤可溶性碳中弱酸性官能团的去质子化,这增加了活性有机碳的亲水性和电荷密度,从而增加了土壤 DOC 的溶解性^[34].

3.4 生物炭对土壤易氧化有机碳(ROC)的影响

易氧化有机碳(ROC)不仅是反映农业管理措施对土壤质量影响的敏感指标,同时也是评价土壤潜在生产力的重要指标,其含量的高低或分配比例大小表明土壤有机质的质量,尤其是土壤有机质的潜在分解性质^[35].土壤易氧化碳主要来源于作物根系、地上部分残体归还、土壤微生物死亡体内物质释放及土壤原有有机碳活化等.外源有机物料还田会增加有机质来源和改变土壤 C/N 比,同时不同有机物料碳源可利用程度不一,因此有机物料还田在短时间内首先会对土壤易氧化碳有明显的影 响.马莉等^[36]通过盆栽试验发现,添加生物炭可以显著提高灰漠土易氧化态有机碳含量,这是因为添加生物炭能够提高作物的生物量,特别是能够提高根系的生物量,这样就增加了土壤新鲜有机碳的输入量,从而增加了土壤易氧化碳含量^[37].本研究中,生物炭还田各处理土壤 ROC 显著高于对照处理 5%~57%,有利于土壤中易氧化有机碳的累积,其中以 0.5 BC 处理最显著.

对比分析土壤有机碳及活性碳的季节性变化趋势发现,水热因子和作物生长会对土壤微生物活性和土壤活性有机碳周转产生重要影响;从各活性有机碳的主要波峰值与波谷值发现,在玉米的拔节期、灌浆期和油菜的角果期,土壤水热条件达到较好水平,作物快速旺盛生长,不仅提高了作物根系

活力,也促进了土壤微生物的生长繁殖及其活性的提高,进而促进了有机物料快速分解,加速腐质化过程.作物残体归还量及腐解量的增加,作物根系分泌物迅速显著增加,同时土壤微生物数量快速增长,微生物群落结构和代谢功能发生改变,提高了碳、氮等物质和能量的利用效率,最终导致该时期土壤 SOC、SMBC 和 ROC 含量达到较高的水平.但由于微生物的呼吸作用会大量消耗土壤 DOC,进而使同时期的土壤 DOC 的含量有明显降低.土壤活性碳组分对生物炭还田的响应比较灵敏,且 SMBC、DOC 和 ROC 间相关性较强.因此,SMBC、DOC 和 ROC 的动态变化可以指示有机碳短期的改变,可作为评价短期内土壤有机碳变化及其质量对有机物料还田的敏感性指标,这对于保持土壤生物肥力有重要意义.

3.5 生物炭对可溶性有机碳(DOC/SOC)和易氧化碳分配比例(ROC/SOC)的影响

尽管土壤活性有机碳占土壤有机碳总量的比例很小,但它直接参与土壤生物化学转化过程,是土壤微生物活动的碳源和土壤养分的驱动力,对农田生态系统的稳定性、生产力及环境具有重要的影响.土壤活性有机碳占土壤有机碳的比例比活性有机碳绝对含量更能反映土壤有机碳的质量和稳定性,分配比例越高表示有机碳活性越高,越易被作物和微生物吸收利用,有机碳周转越快;该值越低表示有机碳越能长期稳定储存.有研究表明,DOC/SOC 和 ROC/SOC 受物料投入量、物料品质、土壤温度、土壤水分、作物生长和土壤类型影响^[38].本研究中,作物生长和土壤水热条件是影响 DOC/SOC 和 ROC/SOC 的重要因子,DOC/SOC 和 ROC/SOC 呈季节性变化,在作物生长初期其分配比例低于生长中后期,这是因为随着温度的上升,一方面,适宜的水热条件有利于微生物的生长,促进了微生物分解新鲜还田的有机物料,从而增加了活性有机碳的来源;另一方面,作物旺盛的生长产生了更多的凋落物、根系分泌物和微生物残体等活性有机碳,为微生物的生长发育提供了碳源.夏季频繁的降水也会间接影响微生物活性,土壤干湿交替会加速土壤团聚体破碎,使团聚体结合的活性碳随水溶出,进而增加了土壤活性碳含量.从土壤肥力角度,较高的 DOC/SOC 比例有利于养分分解供作物吸收利用,提高土壤生产力;但从土壤固碳角度,较高的 DOC/SOC 比例将会加大 DOC 随径流流失的风险,降低了土壤有机碳稳定性,不利于土壤碳

持续稳定保存. 本研究表明: 0.5BC 和 BC 处理均提高了 DOC/SOC, 与 CK 相比, 分别提高了 65.57% 和 9.84%, 而 2BC 处理降低了 DOC/SOC, 可见大量的生物炭还田并不利于土壤有机碳的稳定. 土壤 ROC/SOC 比例越高, 说明土壤碳的活性越大, 稳定性越差, 养分循环速率越快, 不利于土壤有机质的积累. 土壤 ROC/SOC 远高于土壤 DOC/SOC, 各处理土壤 ROC/SOC 范围在 3.05% ~ 53.17% 之间变化. 与对照相比, 0.5BC、BC 和 2BC 处理显著低于 CK 处理, 说明生物炭还田降低了易氧化碳分配比例, 促进了缓效性和惰性有机碳库积累, 有利于土壤有机碳稳定保存.

4 结论

施用生物炭可以显著提高土壤有机碳的含量, 在一定范围内, 生物炭的施用量与土壤有机碳含量成正比. 适量的生物炭 (BC) 处理能增加土壤微生物量碳含量, 但 0.5BC 和 2BC 处理下, 土壤微生物量碳反而减少. 不同生物炭施入量均可提高土壤可溶性碳和易氧化碳的含量, 其中 0.5BC 处理含量最高, 分别为 198.83 和 4.34 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 施用生物炭均显著降低了土壤微生物熵和 ROC/SOC, 其中 2BC 处理最为显著, 分别较 CK 下降了 35.23% 和 37.00%; 0.5BC 和 BC 处理均能提高 DOC/SOC, 且 0.5BC 处理显著高于 BC 处理. 总体上, 生物炭还田的微生物活性较低, 适量的生物炭处理的土壤有机碳及其稳定性较高, 有利于土壤有机碳积累, 促进土壤固碳, 而过量的生物炭处理土壤固碳效果不佳.

参考文献:

- [1] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 355-362.
Xu G X, Wang Z F, Gao M, *et al.* Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration [J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 355-362.
- [2] 杨丽霞, 潘剑君. 土壤活性有机碳库测定方法研究进展[J]. 土壤通报, 2004, **35**(4): 502-506.
Yang L X, Pan J J. Progress in the study of measurements of soil active organic carbon pool [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, **35**(4): 502-506.
- [3] Yagi K, Minami K. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1990, **36**(4): 599-610.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004, **304**(5677): 1623-1627.
- [5] 田冬, 高明, 黄容, 等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2988-2999.
Tian D, Gao M, Huang R, *et al.* Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and biochar in rape-maize rotation systems [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2988-2999.
- [6] 徐楠楠, 林大松, 徐应明, 等. 生物炭在土壤改良和重金属污染治理中的应用[J]. 农业环境与发展, 2013, **30**(4): 29-34.
Xu N N, Lin D S, Xu Y M, *et al.* Application of biochar on soil improvement and heavy metal pollution abatement [J]. Agro-Environment & Development, 2013, **30**(4): 29-34.
- [7] 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO_2 释放的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 93-99.
Ke Y J, Hu X Y, Yi Q, *et al.* Impacts of rice straw biochar on organic carbon and CO_2 release in arable Soil [J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 93-99.
- [8] Novak J M, Busscher W J, Watts D W, *et al.* Short-term CO_2 mineralization after additions of biochar and switchgrass to a Typic Kandudult [J]. Geoderma, 2010, **154**(3-4): 281-288.
- [9] 付琳琳, 蔺海红, 李恋卿, 等. 生物质炭对稻田土壤有机碳组分的持效影响[J]. 土壤通报, 2013, **44**(6): 1379-1384.
Fu L L, Lin H H, Li L Q, *et al.* Persistent effects of biochar application on organic carbon fractions of paddy soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, **44**(6): 1379-1384.
- [10] 王月玲, 周凤, 张帆, 等. 施用生物炭对土壤呼吸以及土壤有机碳组分的影响[J]. 环境科学研究, 2017, **30**(6): 920-928.
Wang Y L, Zhou F, Zhang F, *et al.* Influence of biochar on soil respiration and soil organic carbon fractions [J]. Research of Environmental Science, 2017, **30**(6): 920-928.
- [11] 侯亚红, 王磊, 付小花, 等. 土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2655-2661.
Hou Y H, Wang L, Fu X H, *et al.* Response of straw and straw biochar returning to soil carbon budget and its mechanism [J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2655-2661.
- [12] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(3): 509-517.
Shang J, Geng Z C, Chen X X, *et al.* Effects of biochar on soil organic carbon and nitrogen and their fractions in a rainfed farmland [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(3): 509-517.
- [13] 张晓玲, 陈效民, 陶朋闯, 等. 施用生物质炭对旱地红壤有机碳矿化及碳库的影响[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(2): 191-196.
Zhang X L, Chen X M, Tao P C, *et al.* Effects of biochar on soil organic carbon mineralization and carbon pool in upland red soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(2): 191-196.
- [14] 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 等. 生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2298-2303.
Zhang T, Wang X D, Pang M W, *et al.* Impacts of biochar and straw application on soil organic carbon transformation [J].

- Environmental Science, 2016, **37**(6): 2298-2303.
- [15] 潘全良. 施用生物炭和炭基肥对棕壤有机碳组分和活性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
Pan Q L. Influences of application of biochar and biochar-based compound fertilizer on Carbon component and active on brown soil [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [16] 郑悦. 生物炭与秸秆还田对盐碱地水稻土壤理化性状及产量的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015.
- [17] 吴金水. 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.
- [18] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响[J]. 土壤学报, 2007, **44**(4): 675-682.
Xu J B, Li C L, He Y Q, *et al.* Effect of fertilization on organic carbon content and fractionation of aggregates in upland red soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, **44**(4): 675-682.
- [19] 安婉丽, 高灯州, 潘婷, 等. 水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(5): 1833-1840.
An W L, Gao D Z, Pan T, *et al.* Effect of rice straw returning on paddy soil water-stable aggregate distribution and stability in the paddy field of Fuzhou plain [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(5): 1833-1840.
- [20] 李程, 李小平. 生物质炭制备及不同施用量对土壤碳库和植物生长的影响[J]. 南方农业学报, 2015, **46**(10): 1786-1791.
Li C, Li X P. Effect of biochar preparation and its application amount on soil carbon pool and plant growth [J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, **46**(10): 1786-1791.
- [21] 康熙龙, 张旭辉, 张硕硕, 等. 旱地土壤施用生物质炭的后效应——水分条件对土壤有机碳矿化的影响[J]. 土壤, 2016, **48**(1): 152-158.
Kang X L, Zhang X H, Zhang S S, *et al.* Effects of biochar application history on soil: effect of moisture regime on dynamics of soil organic carbon mineralization [J]. Soils, 2016, **48**(1): 152-158.
- [22] 王月玲, 耿增超, 王强, 等. 生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3634-3641.
Wang Y L, Geng Z C, Wang Q, *et al.* Influence of biochar on greenhouse gases emissions and physico-chemical properties of loess soil [J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3634-3641.
- [23] 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学, 2015, **48**(4): 705-712.
Hou X N, Li H, Zhu L B, *et al.* Effects of biochar and straw additions on lime concretion black soil aggregate composition and organic carbon distribution [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, **48**(4): 705-712.
- [24] 潘能, 侯振安, 陈卫平, 等. 绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4081-4087.
Pan N, Hou Z A, Chen W P, *et al.* Study on soil enzyme activities and microbial biomass carbon in Greenland irrigated with reclaimed water [J]. Environmental Science, 2012, **33**(12): 4081-4087.
- [25] 张春霞, 郝明德, 魏孝荣, 等. 不同农田生态系统土壤微生物生物量碳的变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, **14**(1): 81-83.
Zhang C X, Hao M D, Wei X R, *et al.* Change of soil microbial biomass carbon in different agroecosystems [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, **14**(1): 81-83.
- [26] 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.
- [27] Fowles M. Black carbon sequestration as an alternative to bioenergy [J]. Biomass and Bioenergy, 2007, **31**(6): 426-432.
- [28] Mao D M, Min Y W, Yu L L, *et al.* Effect of afforestation on microbial biomass and activity in soils of tropical China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992, **24**(9): 865-872.
- [29] 刘守龙, 苏以荣, 黄道友, 等. 微生物商对亚热带地区土地利用及施肥制度的响应[J]. 中国农业科学, 2006, **39**(7): 1411-1418.
Liu S L, Su Y R, Huang D Y, *et al.* Response of Micro-to-Corg to land use and fertilization in subtropical region of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, **39**(7): 1411-1418.
- [30] 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.
- [31] 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 676-684.
Luo K, Hu R G, Zhang W J, *et al.* Response of black soil organic Carbon, Nitrogen and its availability to Longterm fertilization [J]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 676-684.
- [32] 吴静, 陈书涛, 胡正华, 等. 不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1497-1506.
Wu J, Chen S T, Hu Z H, *et al.* Soil microbial respiration under different soil temperature conditions and its relationship to soil dissolved organic carbon and invertase [J]. Environmental Science, 2015, **36**(4): 1497-1506.
- [33] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 黄土高原不同乔木林土壤微生物量碳氮和溶解性碳氮的特征[J]. 生态学报, 2015, **35**(11): 3589-3605.
Zeng Q C, Li X, Dong Y H, *et al.* Soil microbial biomass nitrogen and carbon, water soluble nitrogen and carbon under different arbors forests on the loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(11): 3589-3605.
- [34] 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 等. 不同温度制备的生物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.
- [35] Soon Y K, Arshad M A, Haq A, *et al.* The influence of 12 years of tillage and crop rotation on total and labile organic carbon in a sandy loam soil [J]. Soil and Tillage Research, 2007, **95**(1-2): 38-46.

- [36] 马莉, 吕宁, 冶军, 等. 生物炭对灰漠土有机碳及其组分的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, **20**(8): 976-981.
Ma L, Lv N, Ye J, *et al.* Effects of biochar on organic carbon content and fractions of gray desert soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, **20**(8): 976-981.
- [37] 杨萌, 李永夫, 肖永恒, 等. 生物质炭输入对土壤有机碳库和 CO₂ 排放的影响研究进展[J]. 湖北农业科学, 2017, **56**(2): 205-210.
Yang M, Li Y F, Xiao Y H, *et al.* The Effects of biochar input on soil organic carbon pool and CO₂ emission: a review[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, **56**(2): 205-210.
- [38] 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 等. 干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1365-1371.
Tang G Y, Li K, Sun Y Y, *et al.* Soil labile organic carbon contents and their allocation characteristics under different land uses at dry-hot valley[J]. Environmental Science, 2010, **31**(5): 1365-1371.

《环境科学》连续 6 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2017 年 11 月 22 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2017 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2017 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 6 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

The image shows a large, stylized calligraphic logo for the journal 'Environmental Science' (环境科学). The characters are written in a bold, expressive cursive style, with thick black outlines and a light gray fill. The logo is positioned at the bottom of the page, partially overlapping the text area.

CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin	XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-jiang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extract on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)