

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究 ..... 许稳,金鑫,罗少辉,冯兆忠,张霖,潘月鹏,刘学军(1279)

兰州春夏季 PM<sub>10</sub> 碳组分昼夜变化特征与来源分析 ..... 马丽,余晔,王博,赵素平,李刚(1289)

海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征 ..... 王璐,刘子锐,温天雪,苗红妍,王跃思(1298)

2015年北京城区大气 PM<sub>2.5</sub> 中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 及前体气体的污染特征 ..... 丁萌萌,周健楠,刘保献,王焱,张博韬,石爱军,杨懂艳,常森(1307)

北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险 ..... 齐丽,任玥,刘爱民,黄业茹,赵震,王江,李泓(1317)

北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征 ..... 胡亚东,马安周,吕鹏翼,张勃,庄国强(1327)

基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析 ..... 李笑语,吴琳,邹超,张意,毛洪钧,荆博宇(1340)

过渡金属掺杂对镉锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响 ..... 李曦峰,孙宇琦,王仲鹏,牟宗刚,崔兆杰(1348)

南水北调中线北京段水质状况分析 ..... 徐华山,赵磊,孙昊苏,任玉芬,丁涛,常帅,王海东,李森,果钊(1357)

三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征 ..... 杨兵,何丙辉,王德宝(1366)

基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应 ..... 李琳琳,张依章,唐常源,郑磊,孟伟,卢少勇,敦宇(1376)

抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征 ..... 王琳杰,余辉,牛勇,牛远,张有林,刘倩,吉正元(1384)

千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素 ..... 俞焰,刘德富,杨正健,张佳磊,徐雅倩,刘晋高,严广寒(1393)

高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征 ..... 王靖淇,王书平,张远,林佳宁,高欣,臧小苗,赵茜(1403)

三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响 ..... 戴文芳,郭永豪,郁维娜,熊金波(1414)

沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化 ..... 金赞芳,龚嘉临,施伊丽,金漫彤,李非里(1423)

广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征 ..... 丁洋,黄焕芳,李绘,罗杰,郑煌,孙焰,杨丹,张原,祁士华(1431)

太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价 ..... 边博,周燕,张琴(1442)

锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果 ..... 朱广伟,李静,朱梦圆,龚志军,许海,杨桂军,张运林,秦伯强(1451)

超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除 ..... 杨海燕,王灿,鄢忠森,李冬平,赵焱,瞿芳术,梁恒,徐叶琴,李圭白(1460)

UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学 ..... 李青松,李学艳,姚宁波,骆靖宇,李国新,陈国元,高乃云(1467)

真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素 ..... 韩慧丽,王宏杰,董文艺(1477)

g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸 ..... 李莉莉,陈翠柏,兰华春,刘菲,安晓强(1483)

锆改性硅藻土吸附水中磷的研究 ..... 范艺,王哲,赵连勤,吴德意(1490)

3种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较 ..... 郑吉,周振超,陈芳,陈涛,魏媛媛,韩玥,陈红(1497)

典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除 ..... 张秋亚,马晓妍,王晓昌,游猛(1506)

SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响 ..... 吕文洲,张树林,乔宇祥,刘英(1513)

分散染料 neocron black(NB) 的生物降解特性 ..... 杨波,丁凤友,徐辉,李方,田晴,马春燕(1520)

多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能 ..... 南亚萍,周国田,苏雪莹,袁林江(1529)

生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程 ..... 付昆明,周厚田,苏雪莹,王会芳(1536)

厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析 ..... 曹雁,王桐屿,秦玉洁,韩彬,任君怡(1544)

内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响 ..... 何正坤,宋博宇,朱南文,董军(1551)

矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH<sub>4</sub> 厌氧去除特性 ..... 王立立,何婷,龙焰,刘常宝(1558)

应用铅铋同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析 ..... 孙境蔚,于瑞莲,胡恭任,苏光明,王晓明(1566)

畜禽粪有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异 ..... 何梦媛,董同喜,茹淑华,苏德纯(1576)

山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析 ..... 葛蔚,程琪琪,柴超,曾路生,吴娟,陈清华,朱祥伟,马东(1587)

江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素 ..... 王建伟,张彩香,潘真真,廖小平,刘媛,吕幽,汤蜜(1597)

基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析 ..... 蔡观,胡亚军,王婷婷,袁红朝,王久荣,李巧云,葛体达,吴金水(1606)

秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响 ..... 陈珊,丁成庆,祝贞科,王娟,彭佩钦,葛体达,吴金水(1613)

生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响 ..... 张阳阳,胡学玉,邹娟,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬(1622)

淹水水稻土消耗 N<sub>2</sub>O 能力及机制 ..... 王玲,邢肖毅,秦红灵,刘毅,魏文学(1633)

不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放 ..... 李惠娟,彭党聪,刘文博,姚倩,卓杨(1640)

施用不同污泥堆肥对土壤温室气体排放的影响 ..... 杨雨滢,易建婷,张成,陈宏,木志坚(1647)

不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响 ..... 迟苏琳,徐卫红,熊仕娟,王卫中,秦余丽,赵婉伊,张春来,李彦华,李桃,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(1654)

不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制 ..... 彭琴,李哲,梁东丽,王梦柯,郭璐(1667)

褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用 ..... 刘仕翔,黄益宗,罗泽娇,黄永春,蒋航(1675)

不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价 ..... 金彩霞,司晓薇,王万峰,王春峰,王子英,张琴文,王婉(1683)

三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响 ..... 孙松,李楚娴,张成,王永敏,王定勇(1689)

重庆市居民头发重金属富集特征及其相关性分析 ..... 何明靖,李琦,王登祥,赵佳渊,杨婷(1697)

16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性 ..... 杨浩,张国珍,杨晓妮,武福平,赵炜,张洪伟,张翔(1704)

石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能 ..... 黄力华,李秀芬,任月萍,王新华(1717)

美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定 ..... 容跃(1726)

《环境科学》征稿简则(1505) 《环境科学》征订启事(1682) 信息(1339, 1459, 1612)

# 生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响

张阳阳, 胡学玉\*, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬

(中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

**摘要:** 为了探究生物炭输入对地表反照率及土壤呼吸的影响, 通过田间小区试验的方法, 在不同生物炭用量[0 (CK)、0.5 kg·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup> (BC0.5)、4.5 kg·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup> (BC4.5)]不同地表条件下[种植作物(以+表示)、裸地(以-表示)], 对农田地表反照率、土壤温湿度、土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量、土壤有机碳组分等指标进行了测定分析. 结果表明, 在作物生长前期(玉米的苗期至拔节期、小麦苗期至越冬期), BC4.5+、BC0.5+ 的地表反照率相较 CK+ 处理均有显著下降 ( $P < 0.05$ ), 小麦季最大降幅分别为 23.7%、17.9%, 玉米季最大降幅分别为 44.5%、44.9%. 随叶面积指数增加, 地表反照率在 3 个处理间的差异随之逐渐消失, 作物覆盖可有效缓解生物炭输入导致的地表反照率的降低效应; 裸地条件下, 生物炭处理的地表反照率较对照处理在全部的观测中均有显著下降 ( $P < 0.05$ ); 生物炭在输入初期可显著增加土壤 CO<sub>2</sub> 释放量 ( $P < 0.05$ ), 但其增幅随时间逐渐减小, 其中 BC4.5+ 较 CK+ 的增幅从 276.7% 逐步降低至 36.1%, BC4.5- 较 CK- 的增幅从 163.5% 明显减弱至 39.8%. 生物炭处理较对照处理增加的 CO<sub>2</sub> 释放量主要来自生物炭-土壤共存体系中的易分解碳组分, 其土壤 CO<sub>2</sub> 释放通量与土壤水溶性有机碳含量呈显著相关 ( $P < 0.05$ ); 生物炭输入导致的地表反照率变化未对土壤呼吸产生直接的影响, 而且生物炭输入可降低土壤呼吸温度敏感性  $Q_{10}$  值, 表明生物炭具有一定的化学和生物学稳定性.

**关键词:** 生物炭; 地表反照率; 土壤呼吸作用; 土壤有机碳组分; 土壤呼吸温度敏感性

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1622-11 DOI: 10.13227/j.hjks.201609149

## Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil

ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu\*, ZOU Juan, ZHANG Di, CHEN Wei, WANG Xiang-qian, CHEN Yao-jun, LIU Yang

(School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Biochar application to soils is currently considered as a means of mitigating climate change by sequestering C, which withdraws CO<sub>2</sub> from the atmosphere and consequently influences the trend of global climate change. However, only a few studies have been done on surface albedo variations on farmland, it might be true that the application of biochar to soil could induce a radiative forcing by changing the surface albedo. Based on this background, this study aiming at the characterization of seasonal changes in albedo on the farmland both with plants and without plants, and its effect on soil temperature, soil moisture, soil respiration and soil organic carbon fractions. There were 3 major treatments in the experiment with 3 repetition of each major treatment, namely, CK (the control treatment), BC0.5 (biochar applied at 0.5 kg·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>) and BC4.5 (biochar applied at 4.5 kg·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>). Each major treatment contained 2 sub-treatments, which were crop cultivation (+) and non-cultivation (-). The experiment results showed that in the early stage of crop growth (maize seedling stage to jointing stage, wheat seedling stage to winter period), the surface albedo of BC4.5+ and BC0.5+ significantly decreased compared with CK+ ( $P < 0.05$ ). The biggest surface albedo decline rates of BC4.5+ and BC0.5+ in winter wheat season were 23.7%, 17.9% and 44.5%, 44.9% in summer maize season. The leaf area index of each treatment was remarkably correlated with the surface albedo. The shadow produced by the development of crop canopy structure would cover the change of surface color induced by the input of biochar. Under the condition of bare land, the surface albedo of biochar treatment was significantly decreased compared with the control treatment ( $P < 0.05$ ). Compared with the control treatments, the soil CO<sub>2</sub> flux of the biochar treatments was significantly increased ( $P < 0.05$ ). With the extension of time, the growth rate of soil CO<sub>2</sub> flux of biochar treatment was decreased gradually. The increase from BC4.5+ to CK+ was gradually reduced from 276.7% to 36.1%, and the increase of BC4.5- from to CK- was significantly reduced from 163.5% to 39.8%. The increase of soil CO<sub>2</sub> flux could be derived from the mineralization of the readily decomposed carbon fractions in the biochar-soil system. The decrease of surface albedo caused by the input of biochar had no direct effect on soil respiration, and the input of biochar could reduce the temperature sensitivity of soil respiration. This result could provide a foundation for the verification of the chemical and biological stability of biochar.

收稿日期: 2016-09-19; 修订日期: 2016-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371485, 41071159); 湖北省自然科学基金重点项目(2014CFA116)

作者简介: 张阳阳(1989~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为农田土壤污染与控制, E-mail: culang@qq.com

\* 通信作者, E-mail: huxueyu@cug.edu.cn

**Key words:** biochar; surface albedo; soil respiration; soil organic carbon fractions; temperature sensitivity of soil respiration

目前, 众多研究证实了生物炭添加至土壤具有提高土壤肥力<sup>[1,2]</sup>、增加作物产量<sup>[2,3]</sup>、改善土壤生态环境<sup>[4~6]</sup>、修复受污染土壤<sup>[7]</sup>等潜力. 较之其他形式的有机碳, 生物炭的高度芳香化结构使其具有更高的生物化学稳定性和热稳定性, 因此通常认为生物炭施用于土壤可作为碳储存的稳定载体, 在温室气体减排方面发挥重要作用<sup>[8,9]</sup>. 但是也有研究结果表明生物炭进入土壤环境后会引发土壤 CO<sub>2</sub> 排放量增加<sup>[10,11]</sup>. 可见生物炭作为一项抵御气候变化的技术在大规模应用于农田之前, 还需要更多的工作积累.

被誉为黑色黄金的生物炭输入土壤后会导致地表颜色及其粗糙度的变化, 进而引起地表反照率的降低<sup>[12]</sup>. 地表反照率是地表能量平衡研究中的重要参数, 其降低可能会引起土壤温度上升<sup>[12]</sup>, 进而促进土壤呼吸, 导致土壤释放的 CO<sub>2</sub> 增加. 一项田间试验结果表明, 生物炭施用量为 3.0 ~ 6.0 kg·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup> 的处理, 与不施生物炭的处理相比, 地表反照率在生物炭施用后有 80% 的降低<sup>[13]</sup>; 本课题组的前期工作也表明, 0.5 kg·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>、4.5 kg·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup> 施用量的生物炭均可引起地表反照率的降低<sup>[14]</sup>, 但该研究未对地表反照率降低后土壤呼吸的变化进行探讨; 有学者经估算得出地表反照率的改变可使生物炭系统带来的总体气候缓解效益被削弱 13% ~ 22%<sup>[15]</sup>. 截止目前, 有关生物炭输入导致的地表反照率变化对土壤呼吸产生何种影响的研究还很少. 揭示生物炭进入土壤环境后对农田地表反照率及土壤呼吸作用的影响, 对于多角度认识生物炭对土壤有机碳源/汇效应的贡献有着非常重要的作用, 是值得研究探讨的问题之一, 具有科学意义和实际价值.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验布置于湖北省武汉市城郊农业区某蔬菜种植基地(30°31'54"N、114°24'09"E), 当地属于亚热带季风气候, 年均气温 15.8 ~ 17.5℃, 年降水量 1269 mm. 试验地块 0 ~ 20 cm 土壤基本理化性质: ω(砂粒)、ω(粉粒)、ω(黏粒) 分别为 69.7%、28.4%、1.9%; 土壤类型为砂壤土、pH 值 4.6、容重 1.1 g·cm<sup>-3</sup>、有机质 18.3 g·kg<sup>-1</sup>、总氮 1.6 g·kg<sup>-1</sup>、总磷 0.21 g·kg<sup>-1</sup>、总钾 12.6 g·kg<sup>-1</sup>、阳离

子交换量 9.1 cmol·kg<sup>-1</sup>.

### 1.2 供试材料与试验设计

供试小麦品种为郑麦 9023, 由河南黄泛区地神种业有限公司提供, 供试玉米品种为华糯 5 号甜糯玉米, 由江西省丰城市华裕种子有限公司提供. 500℃ 木质颗粒生物炭基本性状: pH 值 8.6、有机碳 566.0 g·kg<sup>-1</sup>、总氮 6.2 g·kg<sup>-1</sup>、总磷 0.96 g·kg<sup>-1</sup>、总钾 13.8 g·kg<sup>-1</sup>.

田间生物炭施用量分别为 0 (CK)、0.5 kg·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup> (BC0.5)、4.5 kg·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup> (BC4.5), 同时每个生物炭用量下设置 2 个副处理: 种植作物(以 + 表示)和裸地(以 - 表示). 每个处理均设 3 个重复, 随机区组排列, 每个小区面积为 2.25 m<sup>2</sup> (1.80 m × 1.25 m). 小麦每亩播种 7 kg, 行距 20 cm, 于 2014 年 11 月 6 日播种, 2015 年 5 月 25 日收获, 全生育期为 200 d. 玉米种植行距为 40 cm、株距为 30 cm, 于 2015 年 7 月 17 日播种, 9 月 28 日收获, 全生育期为 73 d. 两次生物炭施用时间分别为 2014 年 7 月 20 日、2015 年 7 月 12 日(2014 年 7 月至 2014 年 10 月所种植作物为玉米, 由于未获取该时段土壤呼吸数据, 本文仅对 2014 年 11 月至 2015 年 10 月间所获取数据进行讨论). 施用生物炭前, 对试验小区内土壤进行翻耕, 耕深 20 cm, 然后将生物炭均匀撒至相应处理小区中, 使用铁锹将生物炭均匀混合至 0 ~ 20 cm 土层, 平整土壤后施用复合肥 [ω(N): ω(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>): ω(K<sub>2</sub>O) = 15: 15: 15] 0.075 kg·m<sup>-2</sup>, 饼肥 [ω(N)、ω(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、ω(K<sub>2</sub>O) 分别为 8.2%、2.0%、1.8%] 0.135 kg·m<sup>-2</sup>.

### 1.3 测定方法

使用 Hukseflux NR01 四分量辐射传感器(短波辐射传感器光谱范围为 305 ~ 2800 nm, 灵敏度为 14.9 × 10<sup>-6</sup> V·W<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>) 连接至 CR1000 数据采集器测定地表反照率. 根据文献[16,17] 计算得出, 当试验小区面积为 2.25 m<sup>2</sup> 时, 四分量辐射传感器的安装高度距地表 16 cm 可保证地表的反射辐射全部来自小区. 为避免云层等气象因素带来的干扰, 地表反照率的测量选在晴朗少云的 12:00 ~ 13:00 进行. 为减少太阳辐射变动而产生的误差, 每个小区地表反照率的测定在 3 min 内完成, 将 3 min 内获得的地表反照率的平均值作为试验小区地表反照率的实测值. 2014 年 11 月 ~ 2015 年 10 月间共进行 19 次测定.

使用曲管地温计测定 0~10 cm 土壤平均温度,使用 TZS-1W 型土壤湿度探针(浙江托普仪器有限公司)测定 0~10 cm 土壤平均湿度,测定时间均为 08:00~17:00,每隔 1 h 测量 1 次,将每小时获得数据的平均值作为该测量日白天的土壤温度与土壤湿度.测定日期均与地表反照率的测定日期相同.

土壤 CO<sub>2</sub> 样品采用静态箱法采集,箱体由聚丙烯材料制成,箱体横截面积为 30 cm × 30 cm,高 40 cm,壁厚 1 cm.箱体不透明以减小由于太阳辐射引起的箱内温度变化.箱内顶部装有风扇以均匀混合箱内气体,每套箱体配备底座以便水封保持密闭,底座长期固定于试验小区.3 个重复的试验小区分别由 3 名试验人员同时进行采样,采样时间固定在 10:00~11:00.分别于关箱后的 20、40、60 min 用注射器采集气体样品 100 mL,并立即转移至真空气袋中.采样频率:小麦生长季自作物播种后约 30 d 一次,玉米生长季因其生育期相对较短,采气频率约 10~15 d 一次.采用气相色谱仪(Agilent 6820, FID 检测器)测定 CO<sub>2</sub> 浓度,求得 CO<sub>2</sub> 的排放速率,再根据大气压、气温、普适气体常数、采样箱高度、CO<sub>2</sub> 分子量等,求得 CO<sub>2</sub> 排放通量<sup>[18]</sup>.

采用 S 型采样法多点混合采样,去除活体根系和可见有机物残体后,取部分新鲜土壤测定土壤易氧化态碳及土壤水溶性有机碳,剩余土壤于室内自然风干,磨细过 2 mm 筛,储存于玻璃塞广口瓶中,0℃~4℃ 冷藏备用,采样频率约为 30 d 一次.土壤总有机碳(TOC)、土壤易氧化态碳(EOC)、土壤水

溶性有机碳(WSOC)的测定分别参考文献[19~21].小麦及玉米叶面积指数的测定采用系数法<sup>[22]</sup>,玉米、小麦的长宽校正系数分别取 0.75、0.83.

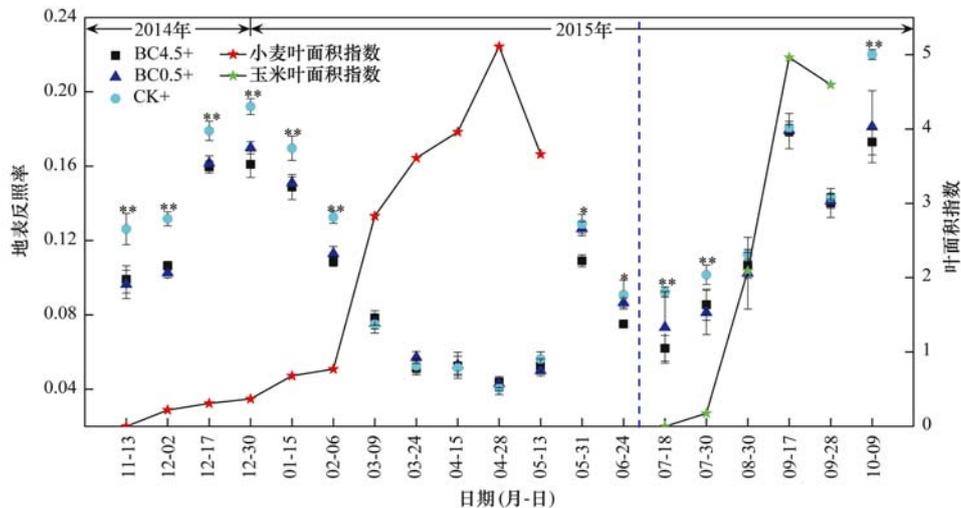
#### 1.4 数据分析

采用 Origin Pro 9.2 制作数据图、SPSS 22.0 进行重复测量的方差分析,多重比较(LSD 法)显著性水平设置为 0.05.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同地表条件下农田地表反照率对生物炭输入

有作物覆盖条件下,不同处理在不同测定日期的地表反照率差异如图 1 所示.小麦出苗期(2014 年 11 月 13 日)至越冬期(2015 年 2 月 6 日)的观测结果显示,BC4.5+ 和 BC0.5+ 处理的地表反照率均较 CK+ 处理显著下降( $P < 0.05$ ),降幅分别为 21.5%、23.6% 和 17.9%、14.8%.返青期(3 月 9 日)至成熟期(5 月 13 日),BC4.5+ 与 BC0.5+ 处理较 CK+ 处理未见显著差异.小麦作物于 5 月 25 日收获,在此之后的两次观测中(5 月 31 日、6 月 24 日),BC4.5+ 处理地表反照率与 CK+ 处理再次呈显著差异( $P < 0.05$ ),其值比 CK+ 处理下降了 15.3%、17.3%.玉米生长季 BC4.5+ 及 BC0.5+ 处理地表反照率变化与小麦生长季相似,在玉米生长的苗期和拔节期(7 月 18 日、30 日),施用生物炭的处理相对于 CK+ 处理地表反照率有显著下降( $P <$



\*\* 表示 BC4.5+ 处理与 BC0.5+ 处理地表反照率与 CK 处理相比均有显著差异( $P < 0.05$ ), \* 表示 BC4.5+ 处理地表反照率与 CK 处理相比有显著差异( $P < 0.05$ ), BC4.5+、BC0.5+、CK+ 的叶面积指数无显著差异,图中仅显示 BC4.5+ 处理的叶面积指数,蓝色虚线为小麦生长季与玉米生长季的分界线,下同

图 1 作物覆盖条件下地表反照率对生物炭输入

Fig. 1 Effects of biochar input on surface albedo under the condition of crop cultivation

0.05),而在抽穗期直至成熟期各处理地表反照率均未出现明显差异.不同生物炭施用量的2个处理间的地表反照率,在小麦及玉米生育期均未表现出具有统计学意义的差异.由图2可见,裸地条件下,BC4.5-和BC0.5-处理的地表反照率较CK-处理在19次观测中有17次均呈显著下降( $P < 0.05$ ),其中小麦生长季最大降幅分别为23.7%、17.9%,玉米生长季最大降幅分别为44.5%、44.9%,BC4.5-与BC0.5-处理的地表反照率在多数观测中未见显著差异.

表1为小麦生长季和玉米生长季各处理地表反

照率与叶面积指数的拟合结果.从中可知,在小麦生长季和玉米生长季中,各处理的叶面积指数与地表反照率均呈显著相关,随叶面积指数增加,地表反照率在3个处理间的差异随之逐渐消失.2014年11月至2015年10月间,BC4.5+、BC0.5+、BC4.5-、BC0.5-处理较对照处理的地表反照率平均值分别降低0.015、0.012、0.028、0.017,裸地条件下的地表反照率降幅高于作物覆盖条件.表明作物覆盖可在一定程度上缓解生物炭输入导致的地表反照率的降低效应,且叶面积指数是影响地表反照率的因素之一.

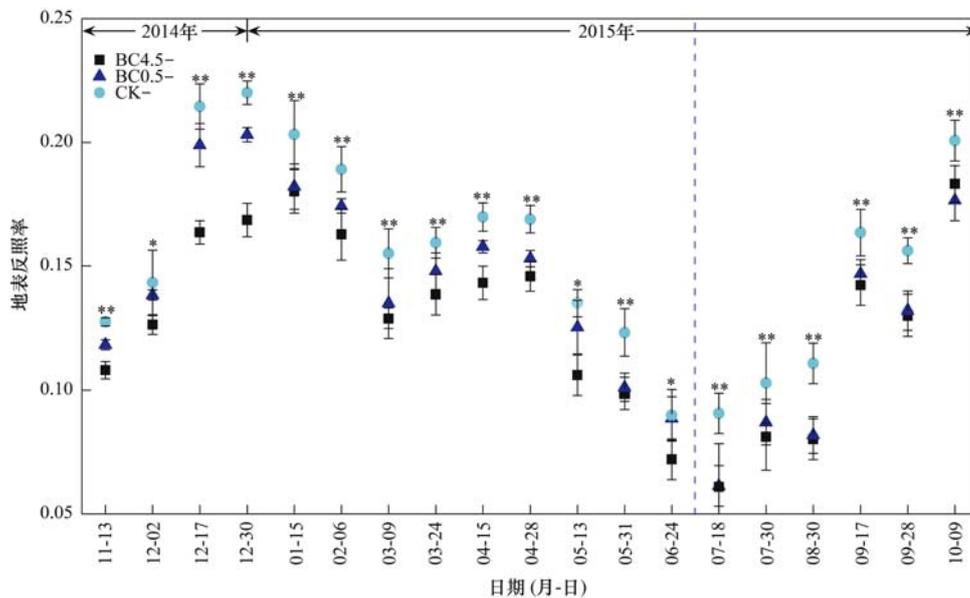


图2 裸地条件下地表反照率对生物炭输入响应

Fig. 2 Effects of biochar input on surface albedo under the condition of bare land

表1 地表反照率与叶面积指数的拟合方程<sup>1)</sup>

项目	处理	拟合方程	$R^2$
小麦生长季	CK+	$\alpha = -3.138 \ln(x) - 5.419$	0.923
	BC0.5+	$\alpha = -3.441 \ln(x) - 6.431$	0.831
	BC4.5+	$\alpha = -3.530 \ln(x) - 6.669$	0.852
玉米生长季	CK+	$\alpha = 7.921 \ln(x) + 19.244$	0.829
	BC0.5+	$\alpha = 6.036 \ln(x) + 15.972$	0.905
	BC4.5+	$\alpha = 5.420 \ln(x) + 14.700$	0.889

1)  $\alpha$  为地表反照率,  $x$  为叶面积指数

## 2.2 生物炭输入对土壤温度、土壤湿度的影响

生物炭输入对土壤温度的影响如图3所示.可见,各处理土壤温度的变化在全年范围内与日平均气温变化具有较强的一致性.在试验期内,BC4.5+和BC0.5+处理的土壤温度与CK+处理相比均无显著变化;在裸地条件下,BC4.5-与CK-处理相比未发现规律性的土壤温度升高或降低. BC0.5-处理

在所有的观测日期内虽未与CK-处理形成显著差异,但其土壤温度在多数观测中有所降低,降幅为0.16~0.70℃.

由图4可见,BC4.5+、BC0.5+、CK+处理的土壤湿度始终未出现有统计学意义的差异.但在裸地条件下,施用生物炭量较小的BC0.5-处理在两季作物的观测中的土壤湿度较CK-处理有显著增加( $P < 0.05$ ),增幅为1.1%~3.0%.另外,在作物收获后的3次观测中(5月31日、6月24日、10月9日),并没有发现BC0.5-处理的土壤湿度与CK-处理存在差异,可能是由于收获后的翻耕过程影响了土壤的孔隙结构,导致BC0.5-处理降低土壤湿度的效应暂未显现.

## 2.3 生物炭输入对土壤呼吸作用的影响

由图5可知,在小麦生长季中,4.5 kg·(m<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>的生物炭输入导致BC4.5+处理相较

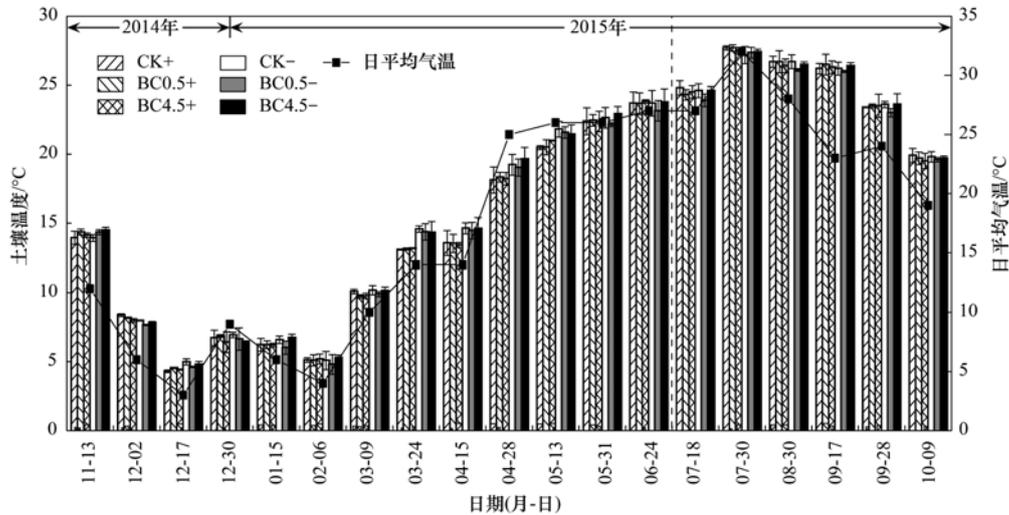


图3 生物炭输入对土壤温度的影响

Fig. 3 Dynamic changes of soil temperature in each treatment

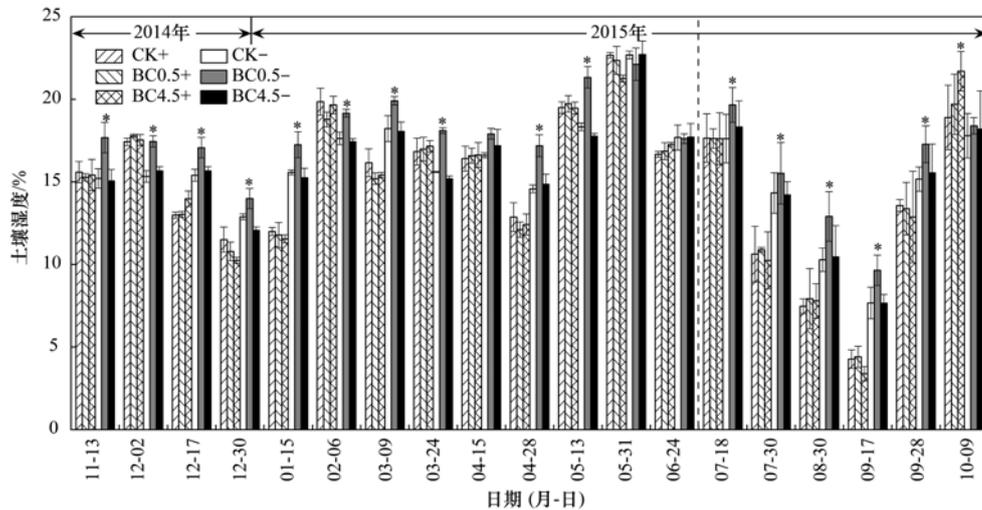
\* 表示该处理与对照处理相比均有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 下同

图4 生物炭输入对土壤湿度的影响

Fig. 4 Dynamic changes of soil moisture in each treatment

于CK+处理的土壤CO<sub>2</sub>排放通量有显著增加( $P < 0.05$ )。然而,随着生物炭施入时间的延长,增幅从276.7% (小麦苗期,2014年12月30日)逐步降低至36.1% (小麦成熟期,2015年5月13日)。由于生物炭输入量仅为 $0.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ,BC0.5+处理在小麦生长前期可观测到土壤呼吸的增强,较CK+处理增加14.1%~26.4%,但随着增幅的逐渐缩小,在小麦收获前(5月13日)的观测中,该处理的土壤CO<sub>2</sub>排放通量未与对照处理形成显著差异。在裸地条件下,BC4.5-及BC0.5-处理的土壤CO<sub>2</sub>排放通量总体变化趋势与BC4.5+及BC0.5+处理相似,即随着生物炭施入时间的延长,土壤呼吸的增强幅度逐渐减弱,其中BC4.5-处理的增幅从163.5%明显减弱至39.8%。

在玉米生长季土壤CO<sub>2</sub>排放通量的观测中,生物炭处理的土壤CO<sub>2</sub>排放通量均与对照相比形成显著差异。与小麦生长季观测结果相似的是,生物炭处理相对于对照处理的土壤CO<sub>2</sub>排放通量增幅均随着观测时间的延长而减小。在两季作物的观测中,有作物覆盖的处理在同一观测日内的土壤CO<sub>2</sub>排放通量均多于裸地的处理,而增加的部分可能由作物的根呼吸及根际微生物呼吸所贡献。

#### 2.4 生物炭输入后土壤有机碳组分的动态变化

图6~8分别为不同生物炭处理TOC、EOC、WSOC含量的动态变化。从图6可看出,在有作物覆盖处理中,各处理TOC动态变化基本一致,多表现为随作物生长时间延长而下降的趋势。而在裸地处理中,除7月18日的观测值外,各处理TOC变化

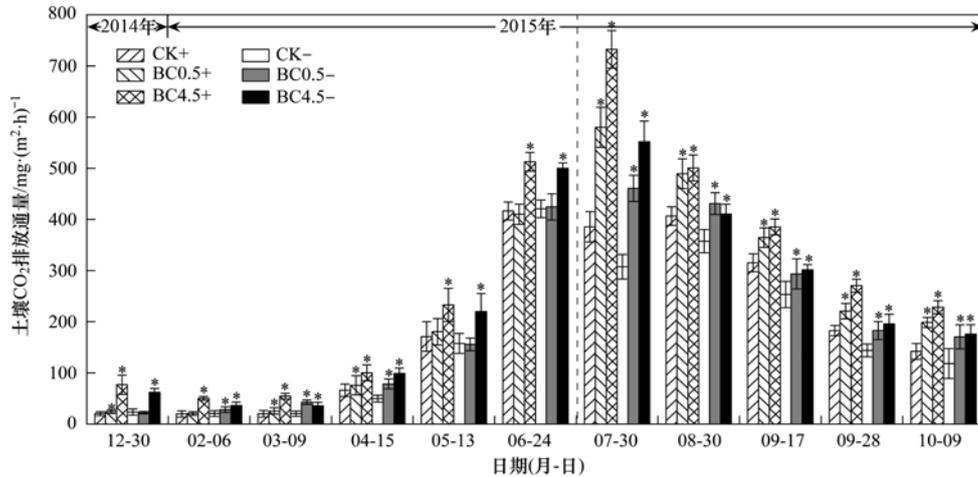


图 5 生物炭输入对土壤呼吸的影响

Fig. 5 Effects of biochar input on soil respiration

趋势较为平缓. 由于在 7 月 12 日向各处理添加了生物炭,使得BC4.5+、BC0.5+、BC4.5-、BC0.5-的 TOC 在 7 月 18 日的观测值比 6 月 24 日的观测值分别高出 14.8%、10.4%、13.1%、2.9%,表明生物炭的输入可有效提升 TOC 含量,且提升幅度随输入量的增加而增大.

添加生物炭的处理中,EOC 与 WSOC 含量变化趋势基本一致,多表现为随生物炭输入时间延长呈

下降趋势,在 2015 年 7 月 12 日获得生物炭补给后,出现 EOC 和 WSOC 含量的激增,BC4.5+、BC0.5+、BC4.5-、BC0.5- 的 EOC 含量较输入前分别提高了 46.3%、24.3%、20.7%、27.8%,而且 WSOC 含量增幅更大,分别为 110.7%、73.8%、62.1%、178.1%. CK+、CK- 处理由于始终未有外源有机碳源的输入,其 EOC 和 WSOC 含量保持在较低水平,且呈不规则波动.

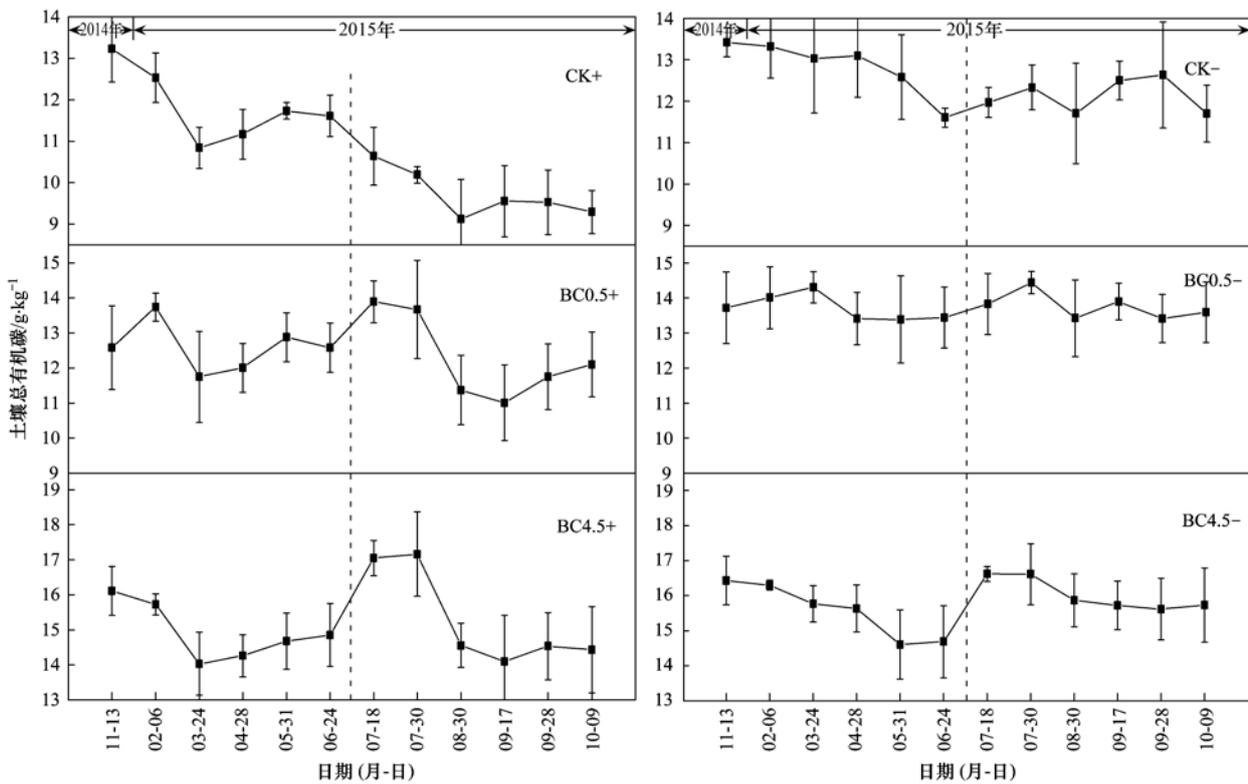


图 6 不同生物炭施用量下 TOC 的动态变化

Fig. 6 Variation of total soil organic carbon concentrations in each treatment

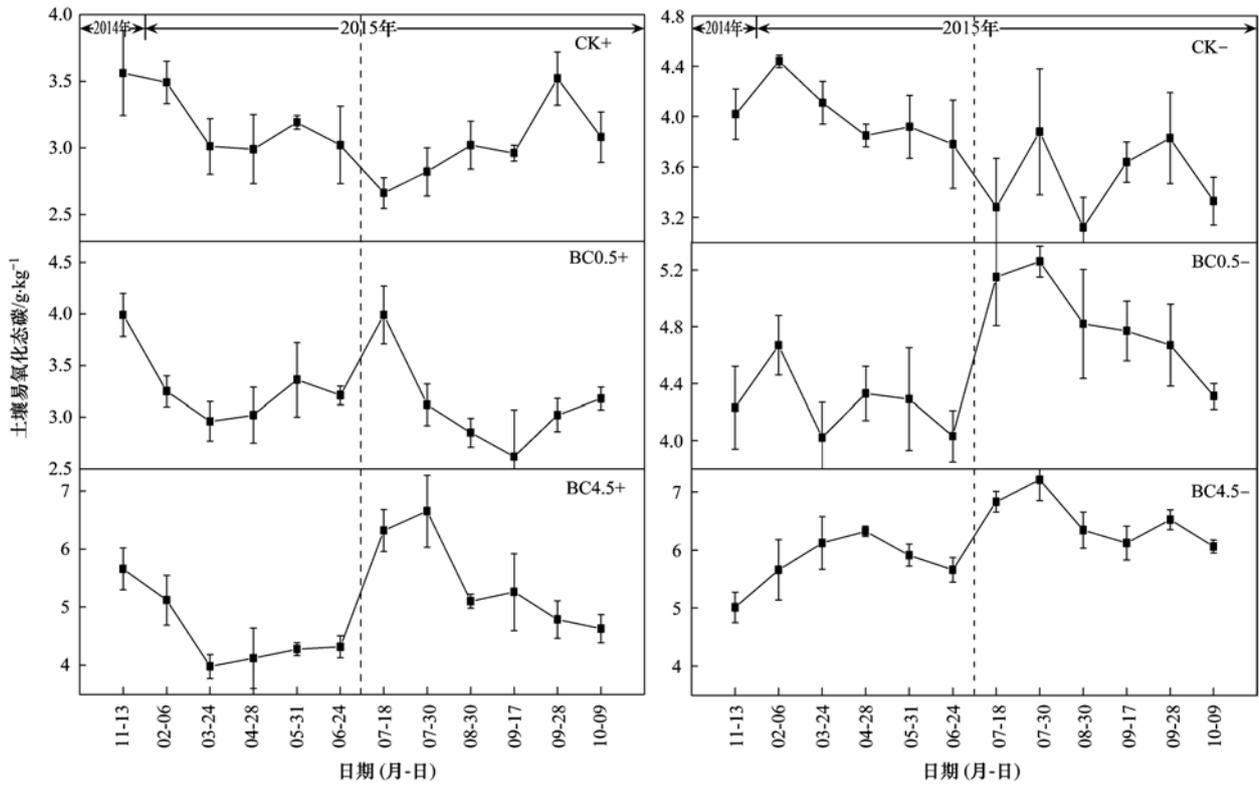


图 7 不同生物炭施用量下 EOC 的动态变化

Fig. 7 Variation of soil readily oxidizable carbon concentrations in each treatment

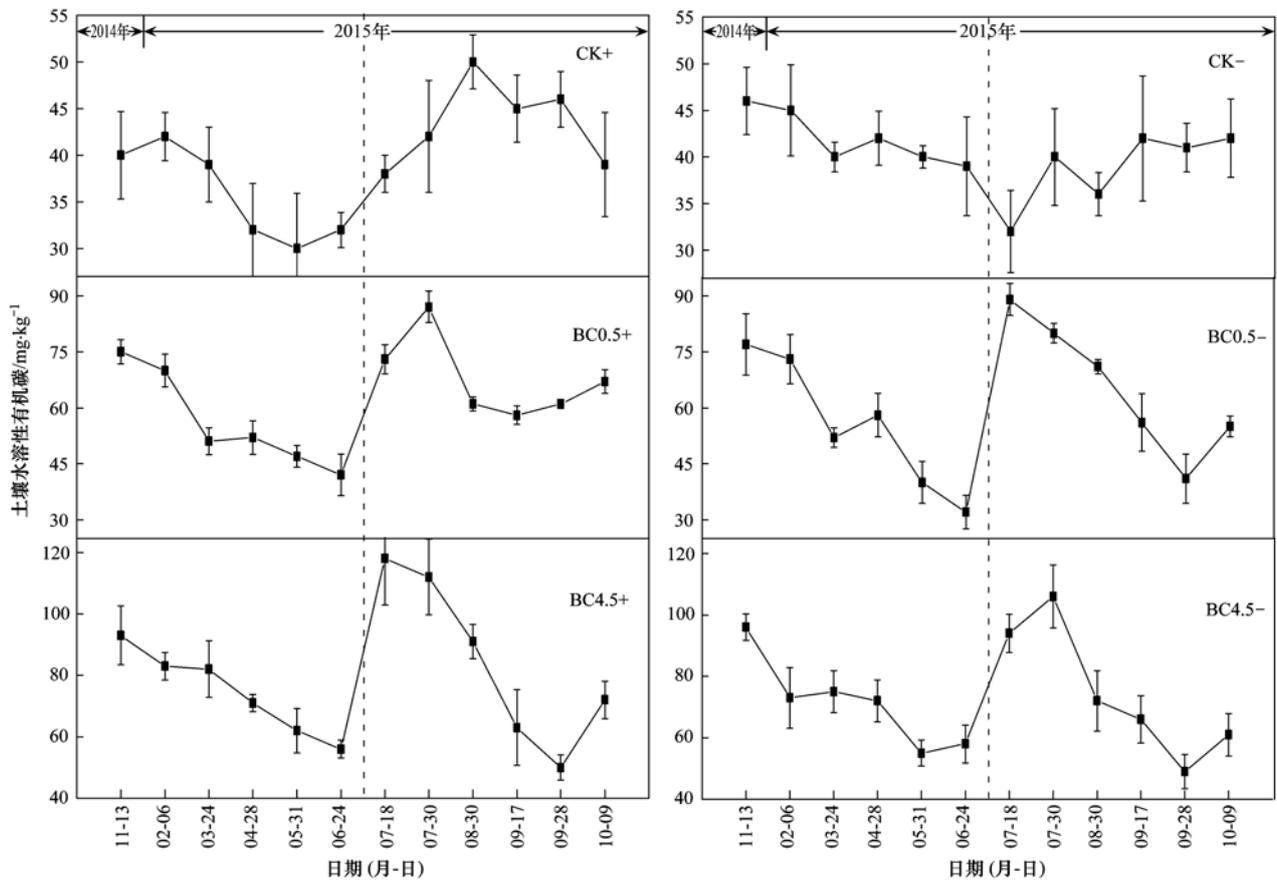


图 8 不同生物炭施用量下 WSOC 的动态变化

Fig. 8 Variation of soil water extractable carbon concentrations in each treatment

## 2.5 地表反照率、土壤有机碳组分与土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的关联性

对不同生物炭处理地表反照率、TOC、EOC、WSOC 含量与土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量进行了相关性分析, 详见表 2. 可以发现, 在添加生物炭的处理中, 土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量与 WSOC 含量有着显著的相关性, 但与地表反照率、TOC、EOC 含量相关性较弱. 在未添加生物炭的对照处理中, 土壤

CO<sub>2</sub> 排放通量与地表反照率、TOC、EOC、WSOC 含量的相关性均不显著. 结合前述结果, 生物炭处理较对照处理增加的 CO<sub>2</sub> 排放量来自生物炭-土壤共存体系中的易分解碳组分的矿化, 水溶性有机碳是其易分解碳组分的重要组成部分, 而生物炭是土壤水溶性有机碳增加的主要贡献者. 生物炭输入导致的地表反照率变化未对土壤呼吸产生直接的效应.

表 2 各处理地表反照率、TOC、EOC、WSOC 与土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的 Pearson 相关系数<sup>1)</sup>

Table 2 Pearson correlation coefficient of surface albedo, TOC, EOC, WSOC and soil CO<sub>2</sub> emission flux in each treatment

项目	小麦生长季				玉米生长季			
	反照率-CO <sub>2</sub>	TOC-CO <sub>2</sub>	EOC-CO <sub>2</sub>	WSOC-CO <sub>2</sub>	反照率-CO <sub>2</sub>	TOC-CO <sub>2</sub>	EOC-CO <sub>2</sub>	WSOC-CO <sub>2</sub>
BC4.5+	0.109	-0.133	-0.288	-0.885*	-0.183	0.642	0.941**	0.889*
BC4.5-	0.211	-0.199	-0.043	-0.842*	-0.166	0.891*	0.759	0.930**
BC0.5+	0.142	0.012	-0.138	-0.817*	0.125	0.439	-0.161	0.797
BC0.5-	0.116	-0.528	-0.477	-0.819*	0.069	0.543	0.750	0.917**
CK+	-0.203	-0.209	-0.441	-0.289	0.132	0.265	-0.652	0.803
CK-	0.217	-0.416	-0.610	-0.502	0.326	-0.142	-0.200	0.833

1) \* 表示双侧显著性水平小于 0.05, \*\* 表示双侧显著性水平小于 0.01

## 2.6 生物炭输入对土壤呼吸温度敏感性的影响

采用指数模型拟合土壤温度变化与土壤呼吸速率的关系, 并计算出不同生物炭处理的土壤呼吸温度敏感性  $Q_{10}$  值, 探究生物炭输入对土壤呼吸敏感性的影响.  $Q_{10}$  值为土壤温度敏感性指数, 表示温度每升高 10°C, 土壤呼吸速率变化的倍数, 其值越高表明土壤呼吸对温度依赖性越大<sup>[23]</sup>. 通过表 3 可以得

知, 添加生物炭的处理与对照处理相比, 其  $Q_{10}$  值在不同程度上有所降低, 在小麦生长季中 BC4.5+、BC0.5+ 的  $Q_{10}$  值分别较 CK+ 降低了 46.0%、2.0%, 而这一比例在玉米生长季则为 13.1%、10.7%. 在裸地的处理中, 施用生物炭的处理同样使得  $Q_{10}$  值降低. 生物炭输入可使土壤呼吸温度敏感性降低, 降低的幅度随生物炭输入量的增加而增大.

表 3 10 cm 土壤温度与土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的拟合方程<sup>1)</sup>

Table 3 Fitting equation of soil respiration and soil temperature at 10 cm depth for each treatment

项目	处理	拟合方程	R <sup>2</sup>	Q <sub>10</sub> 值	相对于对照的降幅/%
小麦生长季	BC4.5+	$y = 31.88e^{0.0897x}$	0.852	2.45	46.0
	BC0.5+	$y = 8.40e^{0.1494x}$	0.951	4.45	2.0
	CK+	$y = 7.19e^{0.1514x}$	0.910	4.54	
	BC4.5-	$y = 21.24e^{0.1036x}$	0.803	2.82	19.2
	BC0.5-	$y = 13.52e^{0.1148x}$	0.954	3.15	9.7
	CK-	$y = 8.73e^{0.1251x}$	0.908	3.49	
玉米生长季	BC4.5+	$y = 16.10e^{0.1291x}$	0.791	3.64	13.1
	BC0.5+	$y = 12.91e^{0.1318x}$	0.834	3.74	10.7
	CK+	$y = 7.59e^{0.1432x}$	0.929	4.19	
	BC4.5-	$y = 10.19e^{0.1366x}$	0.779	3.92	10.5
	BC0.5-	$y = 10.48e^{0.1349x}$	0.819	3.85	12.1
	CK-	$y = 5.63e^{0.1477x}$	0.871	4.38	

1) 式中  $x$  为 10 cm 深处土壤温度,  $y$  为土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量

## 3 讨论

### 3.1 生物炭输入对地表反照率的影响

有研究表明, 叶面积指数和太阳辐射透过率呈负指数相关, 即太阳辐射透过率随叶面积指数的增

大而减小<sup>[24]</sup>. 当小麦处于苗期及越冬期、玉米处于苗期及拔节期时, 其冠层结构尚未对投射到地表的太阳辐射形成有效遮挡, 但随着小麦及玉米植株的生长发育, 其叶面积发生显著变化, 叶面积指数迅速增加, 试验田块的大部分地表被叶片阴影所遮盖, 反

射了部分到达地表的太阳辐射,由此掩盖了因生物炭施用而引起的地表颜色变化,从而使得添加生物炭处理和对照处理的地表反照率差异减小.但在小麦生长季和玉米生长季,这种差异能被观测到的时间占整个生长周期的百分比却不相同.在小麦生长季中,能被观测到施用生物炭处理的地表反照率较对照处理有显著下降的时间约为 92 d,占整个生长周期的 46.0%,而在玉米生长季中这一比例仅为 29.1%.有研究指出作物叶面积指数越大,叶片越多,叶层越厚,作物对太阳辐射的截获量亦大<sup>[25]</sup>.相对于玉米,小麦生育期较长,且在返青期之前叶面积指数未见显著变化,因此考虑这一现象主要是由两种作物冠层结构发展速度以及叶面积的垂直分布不同所导致<sup>[26]</sup>.藉此分析,在生物炭大规模农用时,可以考虑优先在施用生物炭的土壤上种植冠层结构发展速度较快的作物,以规避农田地表反照率降低而可能带来的环境风险.

### 3.2 生物炭输入对土壤温度、土壤湿度的影响

在本研究中,  $0.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 、 $4.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  的生物炭处理均可使地表反照率较对照处理在作物冠层结构发展较弱以及裸地条件下有显著降低,但这并未引起土壤温度的显著升高,生物炭处理的土壤温度主要与大气温度变化相呼应.有研究表明,生物炭的施用可以有效减少土壤温度极端值的出现几率,当土壤日平均温度较低时,施炭量为  $0.9 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  的生物炭处理较对照处理的土壤日平均温度最大可增加  $0.5^\circ\text{C}$ ,而当土壤日平均温度较高时,生物炭处理又可以起到降低土壤温度的效果<sup>[27]</sup>.在另一项田间试验中,当施炭量为  $4.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  时,番茄生育期 0~10 cm 土层土壤含水率较对照处理增加 20.8%<sup>[28]</sup>.可见,由于田间试验环境的复杂性,不同研究者关于生物炭输入对土壤温度、土壤湿度的试验结果往往不尽相同.

土壤温度、土壤湿度的影响因素具有多重性,季节变换、作物覆盖、降雨、灌溉、土体因自然或人为因素的扰动都会对此产生影响,这些因素的共同作用尤其是季节变换引起的土壤温度的波动,可能会掩盖由地表反照率降低而造成的土壤温度乃至土壤湿度的变化.

### 3.3 生物炭输入对土壤呼吸的影响

在针对土壤呼吸作用的观测中发现,生物炭在施用初期的土壤呼吸较对照处理有显著增强,但其增幅随施用时间延长而变窄.相关分析结果支持生物炭处理较对照处理增加的  $\text{CO}_2$  排放量来自生物

炭-土壤共存体系中的易分解碳组分,生物炭处理的土壤  $\text{CO}_2$  排放通量与 WSOC 含量显著相关,且生物炭进入土壤系统使得芳香化程度较低的 WSOC 等活性有机碳组分含量增加<sup>[29]</sup>,而这些组分的逐渐矿化及由其引起的激发效应可能是土壤呼吸增强的主要原因.需要注意的是,本研究中气体样品的采样频率偏低,这可能带来一定的误差进而影响试验结果,因此在今后的田间土壤气体采样中应适当增加采样频率以减少误差.一些研究表明,生物炭改善了土壤中微生物的生存环境以及引入了部分易分解有机质,导致土壤呼吸的急剧增加,但随着不稳定成分的矿化,激发效应随之消失<sup>[29,30]</sup>.这一结果支持生物炭输入导致的地表反照率变化未对土壤呼吸产生直接的影响,而且生物炭输入可降低土壤呼吸温度敏感性  $Q_{10}$  值,这为生物炭具有一定的化学和生物学稳定性提供了直接证据.

土壤呼吸温度敏感性的变化可能来自于土壤有机碳组分的温度敏感性差异,也有可能来自土壤生物群落温度敏感性的差异.土壤有机碳矿化本身是温度敏感的<sup>[31]</sup>,在一项关于土壤有机碳矿化及其温度敏感性的研究中,随着环境温度 ( $5$ 、 $15$ 、 $25$ 、 $35^\circ\text{C}$ ) 的升高,土壤有机碳矿化速率增大,但其中活性碳分解速率变化无规律,缓效碳分解速率随温度的升高呈指数增长,可见不同的土壤有机碳组分对温度变化的敏感程度呈现差异<sup>[32]</sup>.这表明由于土壤有机碳中各组分含量不同以及不同有机碳组分对温度变化的敏感性不同,不同有机碳组分的矿化对土壤呼吸的贡献也不尽相同.因此,针对生物炭输入对不同土壤有机碳组分温度敏感性的影响还待后续的进一步研究.

从表 2 可知,地表反照率与土壤  $\text{CO}_2$  排放通量相关性较弱,考虑到田间试验条件的复杂性及影响土壤呼吸的因素众多,依据目前两种作物覆盖及裸地条件下 12 个月的田间观测结果,尚不能确定地表反照率下降对土壤呼吸具有显著影响.因此,较长时间尺度、多种作物覆盖条件下的田间观测,将有助于更好地认识生物炭输入导致的地表反照率变化对土壤呼吸作用的影响.

## 4 结论

(1) 在作物覆盖条件下,作物生长前期(玉米的苗期至拔节期、小麦苗期至越冬期), BC4.5+、BC0.5+ 的地表反照率较 CK+ 处理均有显著下降 ( $P < 0.05$ ),随叶面积指数增加,生物炭处理与对照处

理间的地表反照率差异随之消失。裸地条件下, 生物炭处理的地表反照率在全部的观测中较对照处理有显著下降( $P < 0.05$ )。作物覆盖可有效缓解地表反照率的降低效应。

(2) 生物炭在输入初期可显著增加土壤  $\text{CO}_2$  排放量( $P < 0.05$ ), 但其增幅随时间逐渐减小。相关分析结果支持生物炭处理较对照处理增加的  $\text{CO}_2$  排放量来自生物炭-土壤共存体系中的 WSOC 等易分解碳组分的矿化, 而生物炭是 WSOC 增加的主要贡献者。

(3) 生物炭输入导致的地表反照率变化未对土壤呼吸产生直接影响, 而且生物炭输入可降低土壤呼吸温度敏感性  $Q_{10}$  值, 表明生物炭具有一定的化学和生物学稳定性。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Tammeorg P, Simojoki A, Mäkelä P, *et al.* Biochar application to a fertile sandy clay loam in boreal conditions: effects on soil properties and yield formation of wheat, turnip rape and faba bean[J]. *Plant and Soil*, 2014, **374**(1-2): 89-107.
- [ 2 ] Noguera D, Rondón M, Laossi K R, *et al.* Contrasted effect of biochar and earthworms on rice growth and resource allocation in different soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(7): 1017-1027.
- [ 3 ] Marris E. Putting the carbon back: black is the new green[J]. *Nature*, 2006, **442**(7103): 624-626.
- [ 4 ] Lehmann J. A handful of carbon [J]. *Nature*, 2007, **447**(7141): 143-144.
- [ 5 ] Lu W W, Ding W X, Zhang J H, *et al.* Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: a negative priming effect [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **76**: 12-21.
- [ 6 ] 陈威, 胡学玉, 张阳阳, 等. 番茄根区土壤线虫群落变化对生物炭输入响应[J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(6): 998-1003.
- Chen W, Hu X Y, Zhang Y Y, *et al.* Response of nematode community in tomato rhizosphere soil to biochar input [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(6): 998-1003.
- [ 7 ] 张阳阳, 胡学玉, 余忠, 等. Cd 胁迫下城郊农业土壤微生物活性对生物炭输入响应[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(6): 936-942.
- Zhang Y Y, Hu X Y, Yu Z, *et al.* Responses of agricultural soil microbial activity to biochar under cadmium stress[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(6): 936-942.
- [ 8 ] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, *et al.* Biochar effects on soil biota: a review [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(9): 1812-1836.
- [ 9 ] 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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  release in arable soil[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 93-99.
- [ 10 ] Woolf D, Amonette J E, Street-Perrott F A, *et al.* Sustainable biochar to mitigate global climate change [J]. *Nature Communications*, 2010, **1**: 56.
- [ 11 ] Bruun S, Jensen E S, Jensen L S. Microbial mineralization and assimilation of black carbon: dependency on degree of thermal alteration[J]. *Organic Geochemistry*, 2008, **39**(7): 839-845.
- [ 12 ] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, *et al.* Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, **171**(4): 591-596.
- [ 13 ] Genesio L, Miglietta F, Lugato E, *et al.* Surface albedo following biochar application in durum wheat[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, **7**(1): 014025.
- [ 14 ] 张阳阳, 胡学玉, 张迪, 等. 生物炭对农田地表反照率及土壤温度与湿度的影响[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(8): 1234-1239.
- Zhang Y Y, Hu X Y, Zhang D, *et al.* Effects of biochar on soil surface albedo, temperature and moisture in agricultural soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(8): 1234-1239.
- [ 15 ] Meyer S, Bright R M, Fischer D, *et al.* Albedo impact on the suitability of biochar systems to mitigate global warming [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(22): 12726-12734.
- [ 16 ] 张亚峰, 王新平, 潘颜霞, 等. 荒漠地区地表反照率与土壤湿度相关性研究[J]. *中国沙漠*, 2011, **31**(5): 1141-1148.
- Zhang Y F, Wang X P, Pan Y X, *et al.* The dependence of surface albedo on soil moisture in an arid desert area[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, **31**(5): 1141-1148.
- [ 17 ] Sailor D J, Resh K, Segura D. Field measurement of albedo for limited extent test surfaces [J]. *Solar Energy*, 2006, **80**(5): 589-599.
- [ 18 ] 吴杨周, 陈健, 胡正华, 等. 水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 280-287.
- Wu Y Z, Chen J, Hu Z H, *et al.* Effects of reduced water and diurnal warming on winter-wheat biomass and soil respiration[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 280-287.
- [ 19 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 146-226.
- [ 20 ] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, **46**(7): 1459-1466.
- [ 21 ] Liang B C, Mackenzie A F, Schnitzer M, *et al.* Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, **26**(2): 88-94.
- [ 22 ] 张旭东, 蔡焕杰, 付玉娟, 等. 黄土区夏玉米叶面积指数变化规律的研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, **24**(2): 25-29.
- Zhang X D, Cai H J, Fu Y J, *et al.* Study on leaf area index of summer maize in loess areas [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, **24**(2): 25-29.
- [ 23 ] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, **27**(6): 753-760.

- [24] 郭江, 肖凯, 郭新宇, 等. 玉米冠层结构、光分布和光合作用研究综述[J]. 玉米科学, 2005, **13**(2): 55-59.  
Guo J, Xiao K, Guo X Y, *et al.* Review on maize canopy structure, light distributing and canopy photosynthesis [J]. Journal of Maize Sciences, 2005, **13**(2): 55-59.
- [25] 张艳敏, 李晋生, 钱维朴, 等. 小麦冠层结构与光分布研究[J]. 华北农学报, 1996, **11**(1): 54-58.  
Zhang Y M, Li J S, Qian W P, *et al.* Canopy structure and light distribution in winter wheat [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1996, **11**(1): 54-58.
- [26] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展[J]. 生态学杂志, 2005, **24**(5): 537-541.  
Wang X Q, Ma L Y, Jia Z K, *et al.* Research and application advances in leaf area index (LAI) [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, **24**(5): 537-541.
- [27] Zhang Q Z, Wang Y D, Wu Y F, *et al.* Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, **77**(5): 1478-1487.
- [28] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对土壤水肥热效应的影响试验研究[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(7): 1141-1147.  
Li C J, Qu Z Y, Gou M M, *et al.* The research of biochar's effect on soil humidity, fertility and temperature [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(7): 1141-1147.
- [29] Jones D L, Murphy D V, Khalid M, *et al.* Short-term biochar-induced increase in soil CO<sub>2</sub> release is both biotically and abiotically mediated[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(8): 1723-1731.
- [30] Ventura M, Zhang C, Baldi E, *et al.* Effect of biochar addition on soil respiration partitioning and root dynamics in an apple orchard[J]. European Journal of Soil Science, 2014, **65**(1): 186-195.
- [31] Pang X Y, Zhu B, Lü X T, *et al.* Labile substrate availability controls temperature sensitivity of organic carbon decomposition at different soil depths [J]. Biogeochemistry, 2015, **126**(1-2): 85-98.
- [32] 邬建红, 潘剑君, 葛序娟, 等. 不同土地利用方式下土壤有机碳矿化及其温度敏感性[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(3): 130-135.  
Wu J H, Pan J J, Ge X J, *et al.* Variations of soil organic carbon mineralization and temperature sensitivity under different land use types [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, **29**(3): 130-135.

## CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City .....	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM <sub>10</sub> During Spring and Summer of Lanzhou .....	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan .....	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> in PM <sub>2.5</sub> and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing .....	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing .....	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM <sub>2.5</sub> ) of Beijing and Baoding .....	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data .....	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals .....	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project .....	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir .....	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares .....	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer .....	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors .....	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaoh River Through High-throughput Sequencing .....	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay .....	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface .....	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland .....	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake .....	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China .....	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water .....	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate .....	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO <sub>2</sub> <sup>-</sup> .....	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride .....	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water .....	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes .....	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes .....	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater .....	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment .....	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process .....	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor .....	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor .....	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills .....	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse .....	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou .....	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure .....	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong .....	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain .....	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil .....	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil .....	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil .....	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N <sub>2</sub> O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism .....	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO <sub>2</sub> Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes .....	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil .....	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels .....	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism .....	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings .....	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize .....	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area .....	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing .....	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing .....	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode .....	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States .....	RONG Yue (1726)