ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第38卷 第7期
2017年7月15日

目 次

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究 …… 颜金培,陈立奇,林奇,赵淑惠,李磊,朱大勇(2629)
利用MODIS C6数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征 …… 赵仕伟,高晓清(2637)
秋冬季节华北背景地区PM_1污染特征及来源 …… 张周祥,张养梅,张小曳,王亚强,沈小静,孙俊英,周怀刚(2647)
杭州市$PM_{2.5}$中水溶性离子的污染特征及其消光贡献 …… 吴丹,蔺少龙,杨焕强,杜荣光,夏俊荣,齐冰,刘刚,李凤英,杨孟,盖鑫磊(2656)
青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布 …… 谢丹丹,祁建华,张瑞峰(2667)
西安市重污染与清洁天$PM_{2.5}$组分及其活性氧物质对比 …… 王堃,韩永明,何世恒,张婷,刘随心,曹军骥(2679)
黄山PM_{10}中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源 …… 孟静静,侯战方,张二勋,董杰,刘晓迪,邢继钊,刘加珍(2688)
泉州市大气$PM_{2.5}$镧系元素组成特征及来源解析 …… 张云峰,于瑞莲,胡恭任,孙境蔚,许文质,张棕巍(2698)
西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价 …… 许亚宣,李小敏,于华通,董林艳,赵玉婷,姚懿函,邹广迅,张新民(2707)
G20峰会期间宜兴市大气VOCs特征及来源分析 …… 张璘,张祥志,秦玮,茅晶晶,秦艳红,谢卫平,史文科,陈文泰(2718)
四川省2005~2014年农业源氨排放清单及分布特征 …… 冯小琼,陈军辉,姜涛,钱骏,叶宏(2728)
长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单 …… 鲁君,黄成,胡磬遥,杨强,井宝莉,夏阳,卢滨,唐伟,楼晟荣,陶士康,李莉(2738)
我国城市饮用水中*N*-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定 …… 张秋秋,潘申龄,张昱,杨敏,安伟(2747)
地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析 …… 赵鹏,何江涛,王曼丽,崔亚丰(2754)
胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析 …… 张倩,宋金明,彭全材,李学刚,袁华茂,李宁,段丽琴,曲宝晓,王启栋(2763)
桂江流域夏季水-气界面CO_2脱气的空间变化及其影响因素 …… 张陶,李建鸿,蒲俊兵,吴飞红,李丽,袁道先(2773)
都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险 …… 宁增平,肖青相,蓝小龙,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(2784)
太湖表层水体及沉积物中双酚A类似物的分布特征及潜在风险 …… 陈玫宏,郭敏,徐怀洲,刘丹,程杰,李江,张圣虎,石利利(2793)
洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异 …… 李文章,张莉,王圣瑞,肖尚斌,钱伟斌,席银,许可宸,史玲珑(2801)
阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征 …… 孙清清,陈敬安,王敬富,杨海全,计永雪,兰晨,王箫(2810)
北京市水环境中精神活性物质污染特征 …… 张艳,张婷婷,陈卫平,郭昌胜,花镇东,张远,徐建(2819)
降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响 …… 陈莹,王昭,吴亚刚,赵剑强,杨文娟(2828)
CaO_2不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用 …… 徐垚,李大鹏,韩菲尔,宋小君,李鑫,周婧,黄勇(2836)
坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征 …… 鲜青松,唐翔宇,朱波(2843)
微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果 …… 陈友媛,吴亚东,孙萍,吴丹(2850)
氧化镁基生物质炭高效去除水体中磷的特性 …… 王彬斌,林景东,万顺利,何锋(2859)
Pd/Fe^0双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺 …… 张环,傅敏,魏俊富,王一冰,安慧颖,沈书怡(2868)
针铁矿、磁铁矿和石膏对2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响 …… 孔殿超,周跃飞,陈天虎,王进,李碧(2875)
污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律 …… 韩慧慧,缪恒锋,张雅晶,陆敏峰,黄振兴,阮文权(2883)
微生物燃料电池改性阳极处理PTA废水 …… 孙靖云,范梦婕,陈英文,祝社民,沈树宝(2893)
水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用 …… 苏文,陈洁,张胜鹏,孔繁翔(2901)
沼液SBR处理出水养殖螺旋藻 …… 蔡小波,郁强强,刘锐,赵远,陈吕军(2910)
K^+强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能 …… 吴国栋,于德爽,李津,周同,王晓静(2917)
包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行 …… 于濛雨,刘毅,田玉斌,石欢,徐富,杨宏(2925)
ANAMMOX的快速启动及EPS在ANAMMOX颗粒污泥中的空间分布 …… 李惠娟,彭党聪,陈国燕,姚倩,卓杨,王彬斌(2931)
厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体 …… 李祥,林兴,王凡,袁砚,黄勇,袁怡,毕贞,刘忻,杨朋兵(2941)
基于厌氧氨氧化的含氨废气原位处理 …… 林兴,王凡,袁砚,李祥,黄勇,顾澄伟(2947)
基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成 …… 沈庆然,李田,曹熠,潘舆(2953)
罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响 …… 高景峰,孙丽欣,樊晓燕,潘凯玲,李定昌(2961)
不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水 …… 周贵忠,许硕,姚倩,银钗(2972)
CO_2-咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征 …… 王博强,李晨阳,卢伟,樊昊,张冬至,汪治,吕聪,沈福东(2978)
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 …… 田冬,高明,黄容,吕盛,徐畅(2988)
模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响 …… 腾昌运,沈建国,王忠,王行,李鸿毅,张志剑(3000)
秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素 …… 杜璨,许晨阳,王强,张帆,马武功,和文祥,侯琳,耿增超(3010)
微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响 …… 贾钦,朱雪梅,王琪,傅海辉,郝亚琼,何洁,杨子良(3020)
施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响 …… 方至萍,廖敏,张楠,吕婷,黄小辉(3028)
BS+CTMAB复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用 …… 刘伟,孟昭福,任爽,李文斌(3036)
1999年与2014年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比 …… 李芬,王训,罗辑,袁巍,喻子恒,商立海(3045)
铅锌尾矿污染区3种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征 …… 朱光旭,肖化云,郭庆军,张忠义,杨曦,孔静(3054)
膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用 …… 周莉娜,蔡函臻,李荣华,王美净,赵军超,王权,张增强(3061)
餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比 …… 郭香麟,左剑恶,史绪川,王凯军,吴静(3070)
我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异 …… 晏卓逸,岳波,高红,李志龙,黄启飞,聂小琴,汪群慧(3078)
甲烷催化还原NO_x中Co基/分子筛催化剂的助剂和载体优化 …… 潘华,建艳飞,陈宁娜,刘红霞,何炽,贺亚飞(3085)
《环境科学》征稿简则(2737) 《环境科学》征订启事(2809) 信息(2867, 2971, 3027)

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

田冬[1],高明[1*],黄容[1],吕盛[1],徐畅[2]
(1. 西南大学资源环境学院,重庆 400715; 2. 中国烟草总公司重庆市公司,重庆 400023)

摘要: 土壤呼吸是农田生态系统碳排放的主要途径,为研究土壤呼吸、其组分和水热因子对秸秆与生物炭还田的响应,在重庆国家紫色土肥力与肥料效益长期监测基地采用根系排除法联合运用土壤呼吸自动监测系统(ACE-002/OPZ/SC)测定了无物料还田(CK)、秸秆还田(CS)、秸秆 + 速腐剂还田(CSD)、生物炭还田(BC)、秸秆 + 生物炭 1∶1还田(CSBC)5 种处理下的紫色土丘陵区油菜/玉米轮作制中油菜和玉米生长季的土壤呼吸及其水热因子,并计算了根系呼吸贡献. 结果表明,秸秆与生物炭还田显著影响土壤呼吸季节性变化特征和峰值,除 BC 处理外,其他处理均促进了土壤呼吸和碳排放;油菜季土壤呼吸呈单峰曲线,在 0.12 ~ 2.29 μmol·(m^2·s)$^{-1}$波动,不同处理土壤呼吸差异显著,表现为 CS > CSD > CSBC > CK > BC 处理;玉米季各处理土壤呼吸变化较复杂,变化范围为 1.02 ~ 15.32 μmol·(m^2·s)$^{-1}$,其中 CS、CSD 和 CSBC 呈双峰型曲线,CK 和 BC 呈单峰曲线. 土壤异养呼吸能够解释土壤总呼吸变化的 86.50% ~ 93.94%,各处理的玉米季根系呼吸贡献(26.49% ~ 32.86%)显著低于 CK 处理(53.65%). 土壤呼吸速率的变化主要受 5cm 土壤温度控制,与土壤含水量无显著关系;5cm 土壤温度能够解释土壤呼吸季节变化的 82% ~ 94%. 土壤呼吸的温度敏感性系数 Q_{10} 值在 3.28 ~ 4.47 之间,与 CK 处理相比,CS、CSD、CSBC 处理的 Q_{10} 分别降低了 26.62%、18.12%、20.58%;而 BC 处理则增大了 12.53%. 水热双因子对土壤呼吸不存在协同作用,仅用土壤温度单因子指数函数可较好地模拟土壤呼吸速率的动态变化. 可见,秸秆、秸秆 + 速腐剂和秸秆 + 生物炭还田显著促进了土壤呼吸,生物炭还田抑制了土壤呼吸.

关键词:根系排除法;土壤呼吸;根系呼吸贡献;生物炭;秸秆还田
中图分类号: X144 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)07-2988-12 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201612188

Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems

TIAN Dong[1], GAO Ming[1*], HUANG Rong[1], LÜ Sheng[1], XU Chang[2]
(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Municipal Tobacco Company, Chongqing 400023, China)

Abstract: Soil respiration has become the main way of farmland ecosystem carbon emissions. Soil respiration and its responses to soil moisture and soil temperature under straw and biochar returning were investigated. Combined soil CO_2 fluxes system(ACE-002/OPZ/SC) with the method of root exclusion, this study conducted a long-term field experiment in the national monitor station of soil fertility and fertilizer efficiency of purple soils. The total soil respiration and heterotrophic respiration rate and the soil hydrothermal factors were measured during the growth period of rape and maize in rape-maize rotation systems, and the difference between total soil respiration and heterotrophic respiration was calculated as the contribution of root respiration to soil respiration. There were five treatments including CK(no organic material), CS(straw), CSD(straw + microorganism), BC(biochar), CSBC(50% straw + 50% biochar), which were replicated three times. The results showed that straw and biochar returning significantly affected the seasonal variations and the peak of soil respiration. In addition to BC treatment, other treatments promoted soil respiration and cumulative emissions of soil CO_2. Soil respiration rate was significantly different under different treatments, the changes in soil respiration rates showed a single peak curve under all treatments, the seasonal variations in soil respiration rates under rape was 0.12-2.29 μmol·(m^2·s)$^{-1}$, displaying an order of CS > CSD > CSBC > CK > BC. Soil respiration was pretty complex in maize season, the seasonal variation in soil respiration rates under rape was 1.02-15.32 μmol·(m^2·s)$^{-1}$, displaying an order of CSD > CS > CSBC > CK > BC, the changes in soil respiration rate presented a double peak curve under CS and CSD and CSBC treatments and a single peak curve under BC and CK treatments. Heterotrophic respiration could explain 86.50%-93.94% of seasonal variations in the soil total respiration, and the contribution of root respiration(26.49%-32.86%) was significantly lower than CK treatment(53.65%). Straw and biochar returning did not change soil temperature and soil moisture. Soil temperature at 5 cm depth had significant effects on the change dynamics of soil respiration rates, but soil moisture did not. Soil temperature at 5 cm depth could explain 82%-94% of the variations in soil

收稿日期: 2016-12-21; **修订日期**: 2017-02-27
基金项目: 国家"十二五"科技支撑计划项目(2012BAD14B18)
作者简介: 田冬(1990 ~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤质量与环境,E-mail:676860084@qq.com
* 通信作者,E-mail:gaoming@swu.edu.cn

respiration. The values of temperature sensitivity coefficient changed from 3.28 to 4.47. Compared with CK treatment, Q_{10} of CS, CSD and CSBC decreased by 26.62%, 18.12%, 20.58%, respectively, while BC increased by 12.53%. There was no synergistic effect between soil temperature and soil moisture on soil respiration, the dynamic changes of soil respiration rate could be simulated by single factor index function of soil temperature. Overall, soil respiration was significantly promoted by returning of straw, straw + microorganism, straw + biochar, while it was inhibited by returning of biochar.

Key words: root exclusion method; soil respiration; contribution of root respiration; biochar; straw returning

土壤呼吸作用是土壤碳素排放到大气的主要途径,土壤呼吸排放的 CO_2 占陆地生态系统与大气碳交换量的60% ~90%,土壤呼吸作用微小的变化将显著影响大气 CO_2 浓度. 土壤呼吸主要包括来自植物根系的自养呼吸作用和微生物的异养呼吸作用[1], 然而植物根系呼吸并不属于土壤碳损失[2]. 忽略根系呼吸作用将会高估土壤碳排放. 因此,精确测定农田生态系统土壤呼吸及其组分对土壤呼吸的贡献率,对于寻找减缓土壤有机碳分解的对策和措施具有重要的指导意义[3].

秸秆还田不仅可以充分利用秸秆资源、减少大气污染,还可以增加土壤有机碳含量、改善土壤质量,已成为一种重要的培肥增产技术. 研究表明秸秆还田能增加土壤总孔隙度、土壤有机碳和活性有机碳含量,改变土壤生物(微生物、土壤动物等)数量和群落结构而增加土壤碳库,但秸秆还田也会增强土壤呼吸作用,增加土壤温室气体排放. 生物炭国外将其定义为 biochar,指由有机物料(秸秆、树干或其枝条、粪肥、生活垃圾等)在完全或部分缺氧的情况下经热解炭化产生的一类高度芳香化难熔性固态物质[4]. 生物炭具有极高比例芳香碳和极强的生物化学热稳定性,在土壤中可稳定存在几百年甚至上千年[5],生物炭施入土壤被认为有巨大的固碳增汇潜力. 不少学者已证实生物炭能改善土壤理化性质和土壤结构、提高作物产量、品质和增强土壤"碳汇"功能[6],但关于生物炭施入土壤对土壤呼吸作用的研究相对较少且研究结果存在争议[7,8]. 生物炭本身含有的活性炭输入到土壤可作为微生物生长的碳源和能源,从而促进了土壤微生物的繁殖. 另外,生物炭输入改善了土壤微生物的生存环境,从而提高碳代谢过程中特定功能微生物的数量及活性[9],能激发有机碳的分解,进而促进了土壤呼吸[10]. 也有研究表明,生物炭稳定性较高,难以被土壤微生物降解利用,因此其还田后土壤微生物活性普遍较低,对土壤呼吸强度无显著影响[11]. 而成功等[12]研究发现添加 16 $t \cdot hm^{-2}$ 生物炭处理下土壤 CO_2 的年排放总量显著降低了 14.4%. 秸秆直接还田和秸秆炭化还田是目前主要的秸秆还田方式,而秸秆与生物炭还田后土壤温度和土壤水分的变化对土壤呼吸及土壤碳循环的影响尚不清楚. 基于上述研究结果,本研究假设:农田土壤在秸秆及秸秆生物炭还田后,土壤水热因子也随之而变,因而土壤呼吸速率极有可能产生显著差异. 生态系统土壤呼吸是当前国内外关于碳循环研究的热点,近年来,对土壤-植物系统中土壤呼吸的研究更多见于森林和草原生态系统[13,14],且农田生态系统土壤呼吸作用的研究主要集中在耕作方式[15]、施肥[16]、灌溉[17]等农田管理措施对土壤呼吸排放通量、时间变异性及其影响因素,而针对旱作油菜/玉米轮作生态系统,对比分析秸秆与生物炭还田对土壤呼吸组分特征的研究还鲜见报道. 因此,开展秸秆与生物炭还田下典型旱地生态系统土壤呼吸作用变化机制及其影响因素的控制机制研究,对正确评价旱作农田生态系统的源/汇特征具有重要的科学理论意义和实践价值.

本研究拟通过田间原位连续监测油菜季和玉米季的土壤呼吸、温度及水分的变化,并采用根系排除法对土壤呼吸组分进行了分离,对比分析两种不同形式的秸秆还田下土壤呼吸速率的差异及其影响因素,通过揭示不同形式的秸秆还田下农田土壤总呼吸、土壤异养呼吸、根系呼吸贡献变化情况以及土壤水热因子对其响应特征,探求能减少碳排放的最佳秸秆还田方式,以期为秸秆资源化利用和提高农田生态系统固碳增汇潜力提供基础数据和科学依据.

1　材料与方法

1.1　供试区概况

试验地点设在重庆市北碚区"国家紫色土土壤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,属于亚热带季风气候. 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. 其基本理化性质为:有机碳含量 9.98 $g \cdot kg^{-1}$,碱解氮 135.65 $mg \cdot kg^{-1}$,速效磷 17.38

mg·kg^{-1},速效钾 206.32 mg·kg^{-1},pH 为 6.7. 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. 水稻秸秆的有机碳含量为 412.50 g·kg^{-1},C/N 为 47.74,油菜秸秆的有机碳含量为 392.05 g·kg^{-1},C/N 为 41.56.

1.2 试验设计

试验以"等碳量"原则还入秸秆或生物炭,共设置 5 个处理(见表 1),3 次重复;采用随机区组排列在 15 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.

试验种植模式采用"油玉新两熟"制,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、硼养分用量根据《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 2015 年 10 月 11 日育苗, 2015 年 11 月 3 日移栽,(96v44,密度 8 万株·hm^{-2}),2016 年 4 月 19 日收获. 玉米于 2016 年 4 月 9 日育苗,4 月 20 日移栽,玉米(中豪 9 号,密度 4 万株·hm^{-2}),8 月 1 日收获. 各处理油菜施肥量相同,氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)肥和硼肥用量分别为 150、90、90 和 15 kg·hm^{-2}. 氮肥分基肥和臺肥两次施用(基肥占 70%),磷钾硼肥做基肥一次性施用. 基肥和臺肥分别于 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 kg·hm^{-2},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%)和硫酸钾(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.

表 1 试验处理描述

Table 1 Treatment designing in the experiment

代码	处理	物料还田量 /kg·hm^{-2}	具体措施
CK	无物料还田	0	油菜季还水稻秸秆,玉米季还油菜秸秆;生物炭由油菜秸秆制成;用秸秆粉碎机粉碎成 2 cm 左右,生物炭过 10 mm 筛,移栽作物前 3 d 将秸秆或生物炭均匀覆盖于地表,然后进行 10 cm 深翻耕
CS	秸秆还田	8 000	
CSD	秸秆+速腐剂还田	8 000+16	
BC	生物炭还田	5 274	
CSBC	秸秆+生物炭还田	4 000+2 637	

1.3 土壤呼吸、土壤温度和土壤水分的测定

从油菜移栽(2015 年 11 月)到玉米收获(2016 年 8 月),分别每 7 d 在上午 09:00~12:00 用土壤呼吸自动监测系统(ACE-002/OPZ/SC)测定土壤呼吸强度,遇到降雨时适当调节测定时间. 为了减少对土壤表层的扰动,作物种植前安置好自制的 PVC 圈(直径为 20cm,高 8 cm)插入土壤 3 cm 左右,每个样点持续时间为 10min,整个作物生长季,底座位置固定,仅在作物收获时挖出,待下茬作物播种后重新安置. 为了区分土壤呼吸的组分比例,用根系排除法测定根呼吸,种植作物的处理上测定的土壤呼吸为土壤总呼吸 R_t,为排除植物根系的影响在相应处理的裸地上测定的土壤呼吸为土壤异养呼吸 R_s,利用作物地土壤呼吸 R_t 减去相应处理裸地土壤呼吸 R_s,即得到各处理农田根系呼吸 R_m. 分别利用仪器自带的温度探针、土壤水分探针测定土壤温度、土壤水分,测定深度为 5 cm.

1.4 数据处理与统计分析

土壤累积呼吸量估算:累积土壤呼吸(cumulative CO_2 emission)由测定的土壤呼吸速率进行估算. 累积土壤呼吸公式为:

$$C_{CO_2} = \sum_{i=\text{first}}^{i=\text{last}-1} \left[\frac{D_i + D_{i+1}}{2} \times (N_{i+1} - N_i - 1) + D_i \right] + D_{\text{last}} \quad (1)$$

$$D_i = R_{si} \times 3\,600 \times 24 \times 44 \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中,D_i 为测定当天 CO_2 排放量(g·m^{-2}),R_{si} 为测定当天土壤呼吸速率[μmol·(m^2·s)$^{-1}$],44 为 CO_2 的摩尔质量(g·mol^{-1}),3 600、24 和 10^{-6} 均为换算系数,first、last 分别表示第一次、最后一次土壤呼吸测定,$(N_{i+1} - N_i)$ 表示第 $i+1$ 次测定与第 i 次测定之间间隔天数. 根据油菜、玉米生育期天数,换算成不同作物季的土壤碳累积排放量.

经验指数方程用于描述土壤呼吸与土壤表层温度的关系:

$$R_t = ae^{bT} \quad (3)$$

式中,R_t 为测定的土壤呼吸速率[以 CO_2 计,μmol·(m^2·s)$^{-1}$],T 为表层 5 cm 土壤温度(℃),a 是温度为 0℃的土壤呼吸,b 为温度反应系数.

温度敏感系数:温度每升高 10℃,土壤呼吸增

加的倍数：

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (4)$$

土壤呼吸速率与土壤湿度(W)之间的关系通过二次回归方程(5)计算：

$$R_t = a + b_1 W + b_2 W^2 \quad (5)$$

式中，W 为土壤含水量体积分数(%)，a、b_1、b_2 为方程拟合参数.

土壤呼吸速率与土壤温度和土壤水分之间的关系采用指数-幂函数模型拟合：

$$R_t = ae^{bT}W^c \quad (6)$$

式中，T、W 同上所述，a、b、c 为方程拟合参数.

为检验土壤湿度与土壤温度对于土壤呼吸速率的叠加效应，将土壤温度、土壤含水量及其乘积作为独立变量引入到对数变换后的方程(7)中，如下式所示：

$$\ln R_t = c_1 + c_2 T + c_3 W + c_4 TW \quad (7)$$

式中，T、W 同上所述，c_1、c_2、c_3、c_4 为方程拟合参数.

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　秸秆与生物炭还田下土壤水热因子的变化

秸秆与生物炭还田下各处理的 5 cm 土壤温度与大气温度变化规律相似[图 1(a)]，都具有明显的季节性变化，表现出明显的夏高冬低的趋势，但各处理之间差异性不显著($P>0.05$). 1～2 月温度较低，其中在 1 月 24 日达到全年最小值 5.7℃，夏季频繁的降雨加剧了大气温度的波动，最大值都出现在 7 月. 观测期间大气温度变化幅度为 5.9～37.3℃，其均值为 20.1℃，5 cm 土壤温度在 4.6～29.4℃之间变化，其均值大小顺序都为：CSBC > BC > CSD ≈ CS > CK 处理，均值最大的 CSBC 处理为 19.0℃，最小的 CK 处理为 18.3℃，表明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，较少水分蒸发，提高土壤水分利用效率.

土壤含水量变化较为复杂，总体上玉米季含水量高于油菜季土壤含水量[图 1(b)]. 油菜季土壤含水量呈先不断上升后降低再升高的双峰曲线模式，在 2016 年 1 月 24 日降大雪之后土壤含水量达到第一个峰值，油菜角果期和成熟期达到油菜季最大值. 玉米季土壤含水量受频繁的降雨和高温天气两者共同作用波动较大，在 23.00%～36.34%之间变化，平均土壤含水量为 27.89%，CSBC 处理土壤含水量最高，其次为 BC 处理，CK 处理最低，但处理之间差异不显著.

2.2　秸秆与生物炭还田下土壤总呼吸和异养呼吸动态

秸秆与生物炭还田下各处理的土壤总呼吸速率和异养呼吸速率有着相似的时间变化过程，总体上，油菜季偏低，玉米季较高(图 2). 土壤呼吸速率的变化趋势与 5 cm 土壤温度基本一致，土壤总呼吸速率和异养呼吸速率最小值均是出现在冬季 1 月，最大值为 5 月或 7 月. 秸秆和生物炭还田对土壤呼吸速率曲线及峰值有显著的影响，其中 CK 和 BC 处理呈单峰型，最高峰出现在玉米灌浆期 2016 年 7 月

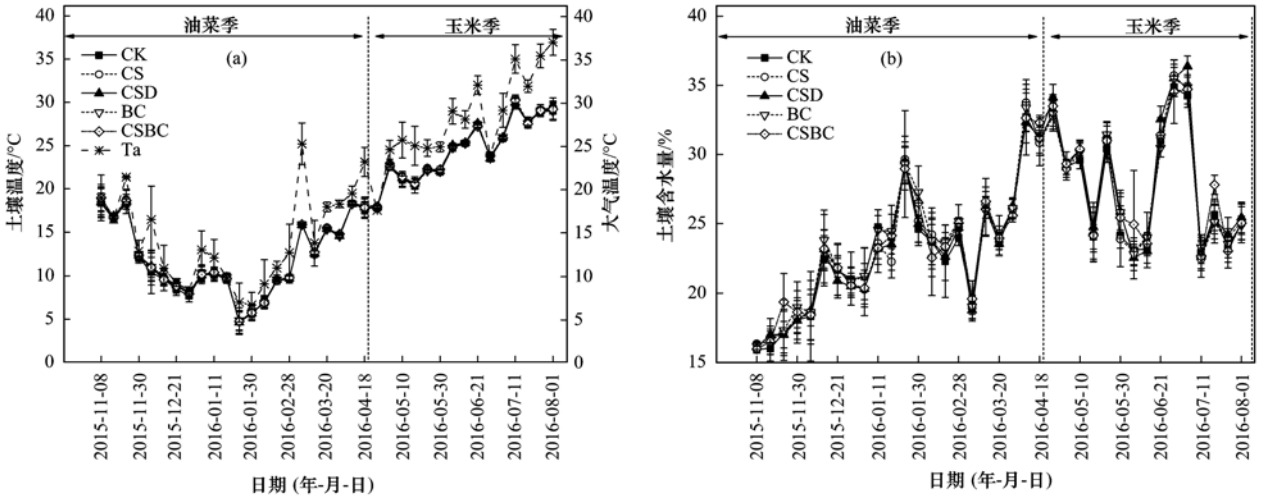

图 1　秸秆与生物炭还田下土壤 5 cm 温度和土壤水分的变化

Fig. 1　Dynamics of soil temperature at 5 cm depth and soil moisture under straw and biochar returning

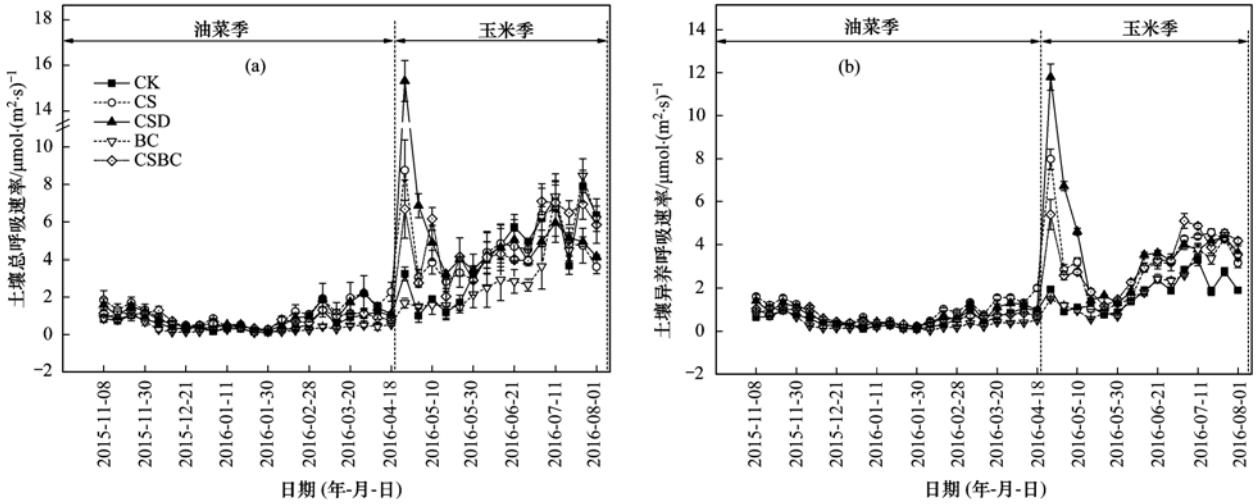

图 2 秸秆与生物炭还田下土壤总呼吸和异养呼吸动态变化

Fig. 2 Dynamics of soil total respiration and soil heterotrophic respiration under straw and biochar returning

11 日,而 CS、CSD 和 CSBC 处理大致表现为双峰型变化,最高峰出现在玉米移栽后一周 2016 年 4 月 25 日,次高峰出现在玉米灌浆期.

冬季土壤温度低和太阳辐射弱,根系呼吸作用较小,因此油菜苗期土壤总呼吸和异养呼吸间无显著差异. 油菜开花期,气温回升,植物生长迅速,根系呼吸作用增强,土壤总呼吸与异养呼吸间存在较大的差异,荚果期差异最大,随后根系活力下降,土壤总呼吸与异养呼吸间差异消失. 玉米移栽后,玉米根系小,根系呼吸贡献小,拔节期玉米快速生长,土壤总呼吸与异养呼吸间出现明显差异,玉米抽雄期至玉米吐丝期,适宜的温度,充沛的降雨,充足的阳光促进了作物生长和光合作用造成了土壤总呼吸与异养呼吸间的最大差异,而玉米成熟期,植物根系活力降低,频繁的暴雨与高温天气使土壤干湿交替进而影响土壤养分的供给与微生物活性,因此,土壤总呼吸与异养呼吸间差异波动较大,但差异小于玉米灌浆期.

在两个作物季,CK 和 BC 处理土壤呼吸变化基本一致,CS、CSD 和 CSBC 处理间相似,且 CK 和 BC 处理的土壤呼吸(除成熟期外)始终小于 CS、CSD 和 CSBC 处理,方差分析表明,CS、CSD、CSBC 处理与 CK、BC 处理间的土壤总呼吸速率和异养呼吸速率存在显著性差异($P<0.05$).

2.3 秸秆与生物炭还田下根系呼吸对土壤呼吸的贡献

秸秆与生物炭显著影响土壤总呼吸和异养呼吸(表 2). 整个油菜季,CS 和 CSD 处理的土壤呼吸速率与异养呼吸速率波动范围大于 CK 处理,BC 和 CSBC 处理与 CK 处理无显著差异. 土壤总呼吸速率均值和土壤异养呼吸速率均值顺序都为:CS > CSD > CSBC > CK > BC 处理,较之 CK 处理,CS、CSD、CSBC 处理的土壤总呼吸速率分别提高了 86.89%、53.38%、31.15%,而 BC 处理降低了 31.14%. CS、CSD、CSBC 处理显著增加了油菜季土壤总呼吸碳排放和土壤异养呼吸碳排放量($P<0.05$),其中以 CS 处理碳排放量最高,较之 CK 处理分别提高了 45.94% 和 80.46%,而 BC 处理显著降低了 25.37% 和 35.22%($P<0.05$). 各处理根系呼吸对土壤总呼吸的贡献顺序为 CSBC > CSD > CS > BC > CK 处理,各处理均提高了根系呼吸对土壤总呼吸的贡献,贡献最高的 CSBC 处理提高了 32.52%,说明秸秆 + 生物炭还田最有利油菜根系的生长.

整个玉米季,各处理土壤总呼吸速率和异养呼吸速率均高于对照,其中 CSD 处理最大,分别为 5.39 $\mu mol\cdot(m^2\cdot s)^{-1}$ 和 3.97 $\mu mol\cdot(m^2\cdot s)^{-1}$,显著高于 CK 处理 20.96%、118.13%. CSD 处理土壤总呼吸碳排放显著高于对照处理 24.85%,CS、CSBC 处理土壤总呼吸碳排放分别为 20.50 $t\cdot hm^{-2}$、20.33 $t\cdot hm^{-2}$,较之 CK 处理无显著差异,BC 处理土壤总呼吸碳排放最低,仅为 12.61 $t\cdot hm^{-2}$,比 CK 处理降低了 27.49%. 土壤异养呼吸碳排放特征与油菜季相似,大小顺序为:CSD > CS > CSBC > CK > BC 处理. 油菜季根系呼吸速率在 0.03 ~ 0.83 $\mu mol\cdot(m^2\cdot s)^{-1}$ 之间波动,其根系呼吸对土壤总呼吸的平均贡献为 17.31% ~ 22.94%,各处理之间的根系呼吸对土壤总呼吸的贡献不存在显著性差异.

从表 2 还可以看出，与对照相比，各处理显著降低了玉米季根系呼吸对土壤总呼吸的贡献（$P<0.05$），其根系呼吸对土壤总呼吸的平均贡献率在 26.49%～32.86%之间变化，远远小于 CK 处理的 53.65%，贡献率最高的 CK 处理是其它处理的 1.63～2.02 倍.

表 2　秸秆与生物炭还田下根系呼吸对土壤呼吸的贡献[1)]

Table 2　Contribution of root respiration to soil respiration under straw and biochar returning

处理		油菜季				玉米季			
		范围 /μmol·(m²·s)⁻¹	均值 /μmol·(m²·s)⁻¹	累积排放（以 CO_2 计）/t·hm⁻²	根系呼吸贡献/%	范围 /μmol·(m²·s)⁻¹	均值 /μmol·(m²·s)⁻¹	累积排放（以 CO_2 计）/t·hm⁻²	根系呼吸贡献/%
CK	总呼吸	0.12～1.31	0.61	2.60aC	17.31	1.02～7.90	4.26	17.39aB	53.65
	异养呼吸	0.09～1.06	0.51	2.15bD		0.76～3.30	1.82	8.06bD	
CS	总呼吸	0.27～2.29	1.14	4.81aA	19.33	2.84～8.76	4.63	20.50aAB	28.93
	异养呼吸	0.23～2.00	0.92	3.88bA		0.94～7.98	3.24	14.57bB	
CSD	总呼吸	0.22～2.24	0.96	4.11aB	22.87	3.25～15.32	5.39	23.14aA	26.49
	异养呼吸	0.21～1.41	0.73	3.17bB		1.31～11.80	3.97	17.01bA	
BC	总呼吸	0.11～1.16	0.42	1.94aD	18.04	1.45～8.47	3.40	12.61aC	32.83
	异养呼吸	0.03～1.01	0.35	1.59aE		0.56～4.30	2.09	8.47bD	
CSBC	总呼吸	0.26～1.33	0.80	3.88aB	22.94	2.04～7.09	4.90	20.33aAB	32.86
	异养呼吸	0.17～1.13	0.63	2.99bC		1.17～5.40	3.30	13.65bC	

1）同一列带有不同小写字母表示同一处理土壤呼吸和土壤异养呼吸间差异显著（$P<0.05$）；同一列带有不同上标大写字母表示不同处理土壤呼吸间差异显著（$P<0.05$）；同一列带有不同下标大写字母表示不同处理土壤异养呼吸间差异显著（$P<0.05$）

2.4　秸秆与生物炭还田下土壤总呼吸与土壤异养呼吸的关系

秸秆与生物炭还田显著影响土壤呼吸的组分特征，土壤总呼吸和土壤异养呼吸有显著地正相关关系（图 3，$P<0.05$）. 根据相关曲线的斜率倒数可以粗略的估算土壤异养呼吸占土壤总呼吸的比例，该值越大土壤异养呼吸对土壤总呼吸的贡献越大，根系呼吸对土壤总呼吸的贡献越小. 秸秆与生物炭还田提高了土壤异养呼吸对土壤总呼吸的贡献，以 CS 和 CSD 处理增加幅度最高，BC 处理增加幅度最低，均显著高于对照，该现象表明向土壤中施入有机物料会增加土壤碳排放的风险. CK、CS、CSD、CSBC、BC 处理的土壤异养呼吸分别能够解释土壤总呼吸变化的 91.66%、86.50%、93.94%、93.07%、90.75%.

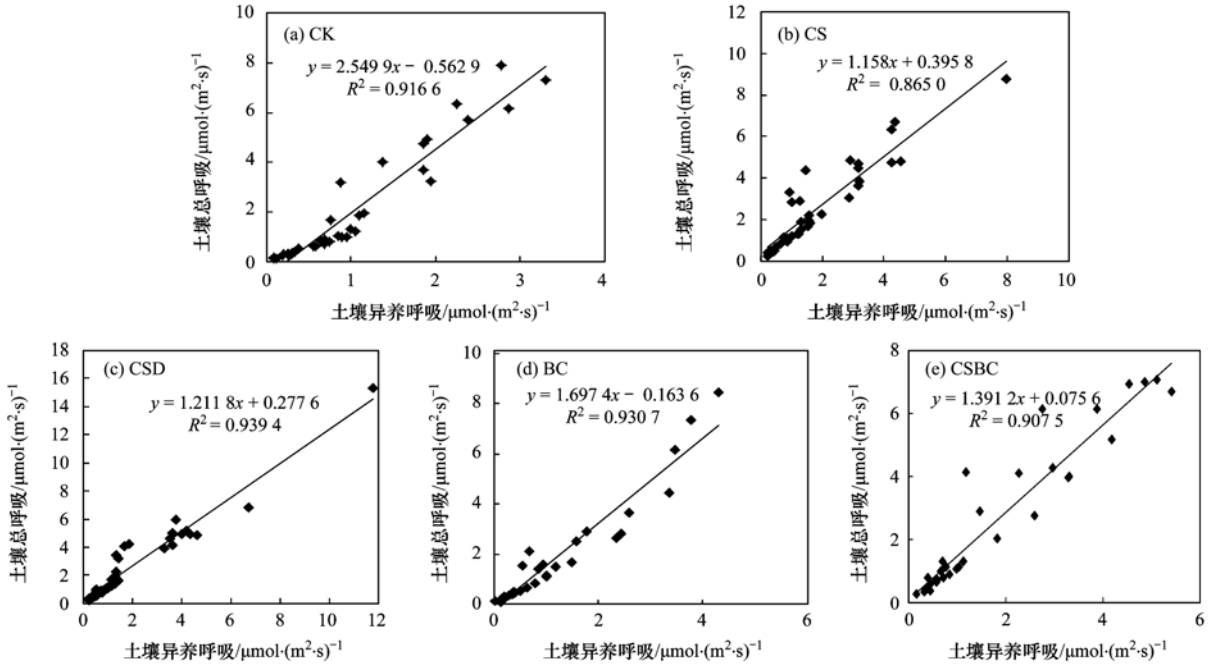

图 3　秸秆与生物炭还田下土壤总呼吸和土壤异养呼吸的关系

Fig. 3　Correlation of soil total respiration and soil heterotrophic respiration under straw and biochar returning

2.5 秸秆与生物炭还田下土壤呼吸与5 cm土壤温度的关系

土壤温度是影响土壤呼吸最重要的环境因子之一,采用指数模型拟合了土壤呼吸和5 cm土壤温度之间的关系,结果见图4,各处理的土壤呼吸速率都随着土壤温度的升高而呈现增加的趋势,两者之间存在显著的指数相关性($P<0.05$). 5 cm土壤温度分别可以解释土壤呼吸变化的90%、82%、78%、94%、82%,从决定系数来看BC处理下土壤呼吸速率与5 cm土壤温度的相关性高于CK处理,而CK处理又高于CS、CSD、CSBC处理. 从图4还可以看出当土壤温度较小时,土壤呼吸速率变异较小,随着土壤温度升高,各处理间土壤呼吸速率差异增大,说明温度较高时可能会诱发如太阳有效辐射、植物生物量等其它因素对土壤呼吸影响,削弱土壤呼吸对水热因子的响应. 研究中常用土壤呼吸温度敏感系数 Q_{10} 来表征土壤呼吸对土壤温度变化的响应程度,Q_{10} 值越大表明土壤呼吸对土壤温度变化的响应越敏感. 图5显示,秸秆与生物炭还田会显著影响土壤呼吸温度敏感性($P<0.05$),CS、CSD、CSBC处理的 Q_{10} 分别为3.28、3.66、3.55,显著低于CK处理的4.47,与CK处理相比 Q_{10} 分别降低了26.62%、18.12%、20.58%;而BC处理较CK处理的 Q_{10} 增大了12.53%,研究表明生物炭还田尽管降低了土壤呼吸,但显著增加了土壤呼吸温度敏感性,当温度升高时,土壤呼吸速率倍增越大.

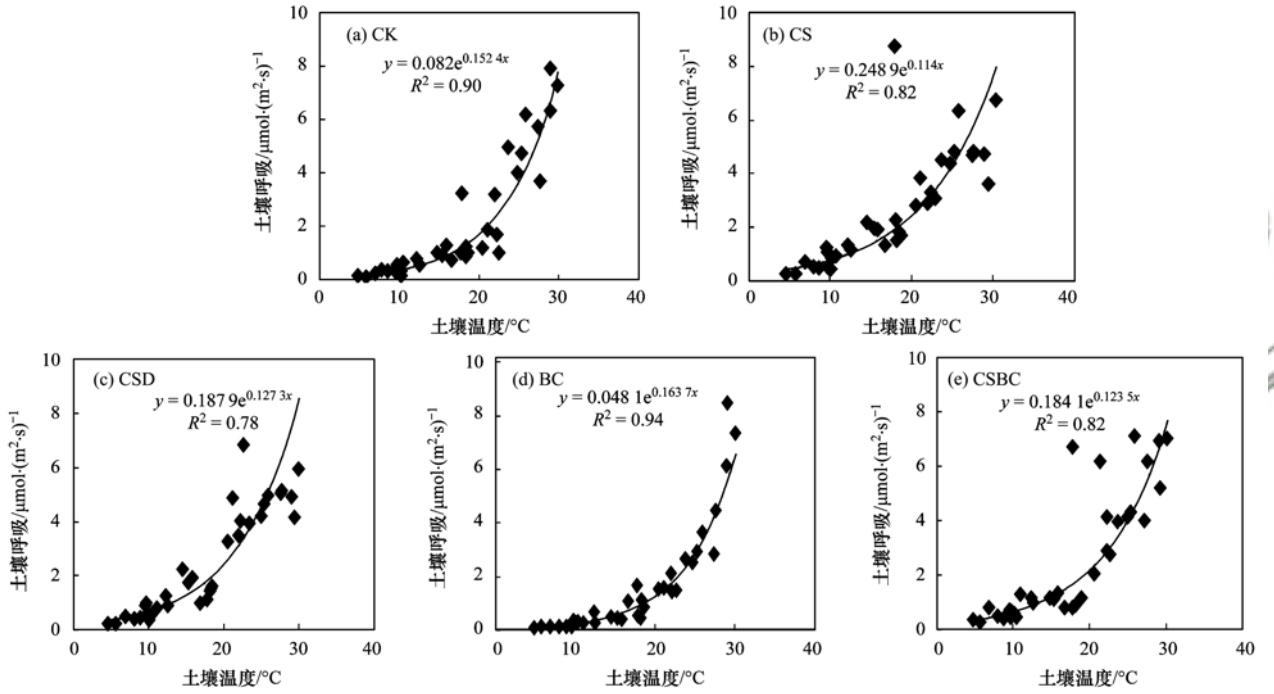

图4 秸秆与生物炭还田下土壤呼吸和5 cm土壤温度的关系

Fig. 4 Correlation of soil respiration and soil temperature at 5 cm under straw and biochar returning

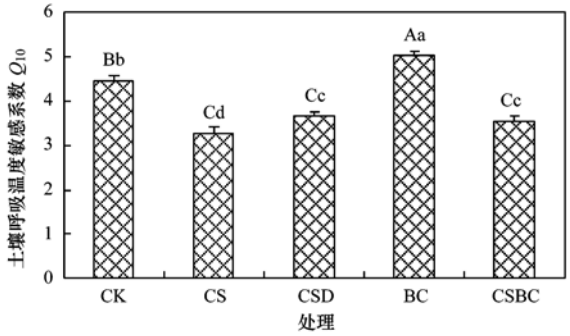

图5 秸秆与生物炭还田下土壤呼吸的温度敏感系数 Q_{10}

Fig. 5 Temperature sensitivity index of soil respiration(Q_{10}) under straw and biochar returning

2.6 秸秆与生物炭还田下土壤呼吸与5 cm土壤水分的关系

分别利用二次模型和指数模型对土壤呼吸与土壤水分进行拟合,结果表明(表3),二次模型的拟合度 R^2 在0.021~0.247,指数模型的拟合度 R^2 在0.041~0.172;CS、CSD和CSBC处理的二次模型拟合度优于指数模型,CK和BC处理的指数模型拟合效果优于二次模型,但拟合效果较差(R^2 仅为0.102和0.041),CK和BC处理的土壤呼吸与土壤水分之间不存在显著相关性(P 分别为0.054、0.227),而CS、CSD和CSBC处理的土壤呼吸与土壤水分之间存在显著相关性($P<0.05$)且二次

模型拟合效果较好. 土壤水分对土壤呼吸的影响较为复杂,从目前研究结果来看未达成一致结论,当土壤水分过高或过低都会抑制土壤呼吸,因此理论上土壤呼吸受到抑制时相应有一个土壤水分响应阈值. 结合抛物线形态可知,在整个观测期内,除 BC 处理外,其它处理的土壤呼吸速率均呈现随土壤水分含量增加而增加的趋势;当土壤水分含量超过 31.30% 时,BC 处理的土壤呼吸强度则随着土壤水分含量的增加而降低. 本研究表明,除 BC 处理外,土壤呼吸与土壤水分并无显著地相关关系,土壤水分仅从较小程度上影响土壤呼吸强度.

表 3　秸秆与生物炭还田下土壤呼吸与水分的关系方程

Table 3　Relationship equations between soil respiration rate and soil moisture at 5 cm depth under straw and biochar returning

处理	$R=a+b_1W+b_2W^2$					$R=ae^{bW}$			
	a	b_1	b_2	P	R^2	a	b	P	R^2
CK	0.674	−0.031	0.003	0.171	0.099	0.169	0.076	0.054	0.102
CS	3.062	−0.224	0.008	0.014	0.223	0.351	0.065	0.029	0.130
CSD	3.452	−0.331	0.012	0.008	0.247	0.202	0.085	0.011	0.172
BC	−2.909	0.313	−0.005	0.702	0.021	0.217	0.052	0.227	0.041
CSBC	0.437	−0.045	0.005	0.022	0.200	0.210	0.079	0.016	0.154

2.7　秸秆与生物炭还田下水热因子对土壤呼吸的协同作用

由表 4 可知,经对数变换后的方程 $\ln R_t=c_1+c_2T+c_3W+c_4TW$ 和指数-幂函数 $R_t=ae^{bT}W^c$ 两种水热双因子模型均能较好地解释土壤呼吸变化,其中经对数变换后的方程能够更好地拟合试验结果. 水热双因子能够解释土壤呼吸变化的 0.786 ~ 0.935,且水热因子对土壤呼吸的影响程度均达到极显著水平($P<0.01$),其中 BC 处理对水热因子的响应程度最高($R^2=0.935$),其次是 CK 对照处理($R^2=0.888$),CSD 处理响应程度最低($R^2=0.786$),与土壤温度单因子模型拟合结果相一致,水热双因子对土壤呼吸不存在协同作用,这与上述土壤水分仅很小程度影响土壤呼吸相一致,仅用土壤温度单因子指数函数可较好地模拟土壤呼吸速率的动态变化.

表 4　秸秆与生物炭还田下土壤呼吸与温度、水分的复合模型参数

Table 4　Composite model parameters derived for the combined influence of soil temperature(T) and moisture(W) on the soil respiration under straw and biochar returning

处理	$\ln R_t=c_1+c_2T+c_3W+c_4TW$						$R_t=ae^{bT}W^c$				
	c_1	c_2	c_3	c_4	P	R^2	a	b	c	P	R^2
CK	−2.616	0.084	0.084	0.000	<0.001	0.888	0.013	0.147	0.611	0.000	0.886
CS	−1.131	0.071	−0.008	0.001	<0.001	0.818	0.031	0.074	0.925	<0.001	0.654
CSD	−2.612	0.135	0.043	0.000	<0.001	0.786	0.013	0.060	1.316	<0.001	0.389
BC	−3.145	0.186	0.003	0.000	<0.001	0.935	0.236	0.181	−0.607	0.000	0.936
CSBC	−0.631	0.033	−0.041	0.003	<0.001	0.828	0.018	0.106	0.859	<0.001	0.768

3　讨论

3.1　秸秆与生物炭还田对土壤呼吸特征及根系呼吸贡献的影响

在油菜生长季节内土壤呼吸速率呈现先降低后增加再降低的变化趋势;秸秆施入土壤显著影响了玉米季土壤呼吸变化趋势,其中秸秆还田、秸秆 + 速腐剂还田和秸秆 + 生物炭还田呈现双峰型变化趋势且首次峰值显著大于温度较高时的第二次峰值,对照和生物炭还田呈现单峰变化趋势. 秸秆还田、秸秆 + 速腐剂还田和秸秆 + 生物炭还田向土壤中归还的秸秆在适宜的水热条件下腐解释放大量养分,改善了土壤养分状况,改变了土壤 C/N 比值,增加了土壤孔隙度,提高了微生物数量和活性,进而有利于作物生长和产生大量根系分泌物;因此,秸秆还田、秸秆 + 速腐剂还田和秸秆 + 生物炭还田均提高了土壤呼吸速率,其土壤呼吸速率显著高于对照达 31.15% ~ 86.89%,其中以秸秆还田提高的幅度最大,且随着秸秆还田的时间推移激发效应逐渐降低,这与胡发龙等[18]和张晓雨等[19]研究结果相似. Liu 等[20]研究结果显示生物炭还田对土壤呼吸作用无显著影响,且生物炭类型、还田量、土壤类型对土壤 CO_2 排放也均无显著影响,而本研究发现,生物炭还田能显著降低土壤呼吸速率,较对照处理降低幅度达 31.14%,这与 Liu 等[20]研究结果不一致,这可能是本研究生物炭还田量(5 t·hm^{-2})远小于 Liu

等[20]所采用的生物炭还田量(20 t·hm^{-2}和40 t·hm^{-2}),随着生物炭还田量增大,土壤的通气状况和营养状况得到进一步改善,土壤呼吸也随着增强[21];另外,生物炭对土壤有机碳分解的负激发效应大小不仅与土壤和生物炭类型有关[22],而且还取决于土壤有机质及养分含量[23]. 土壤呼吸与土壤pH密切相关,生物炭施入酸性土壤中能显著提高土壤呼吸速率,反之,中性和石灰性土壤中添加生物炭则会降低土壤呼吸速率[24],另外,生物炭主要由难以氧化分解和微生物利用的惰性芳香碳组成,生物炭输入可以改变土壤有机碳的组成比例,朝着"惰性化"方向发展,吸附包裹土壤养分、酶等活性物质,有效隔离微生物与有机碳的接触,强烈抑制被吸附有机质的可利用性[9];生物炭还会促进土壤团聚体形成,团聚体对有机碳的物理保护作用将会抑制有机碳的分解[25],生物炭输入可引起微生物活性、数量和群落结构与组成的改变,降低微生物代谢熵(qCO_2)[26],提高微生物对碳利用效率. 因此本研究发现生物炭显著降低了土壤呼吸速率,这与文献[7,27]的研究结果一致;生物炭施入土壤可能会有一个适应过程,所以关于生物炭还田对土壤排放的影响还需进一步更深入的试验验证.

研究土壤呼吸各组分对土壤总呼吸的贡献是定量评价农业生态系统碳循环和能量平衡的基础[28],只有了解土壤呼吸各组分占土壤呼吸的比例才能寻找合理的农田管理方式和经营模式提高农业生态系统固碳减排能力,充分发挥其碳汇功能. 不同生态系统中,根系呼吸占土壤总呼吸的比例在10% ~ 90%之间波动[29],可见根系呼吸变异较大. 本研究结果显示,油菜季根系呼吸速率在0.03 ~ 0.83 μmol·(m^2·s)$^{-1}$之间波动,其根系呼吸对土壤总呼吸的平均贡献率为17.31% ~22.94%,这与徐志波等[30]研究结果不一致. 本研究采用裸地土壤呼吸作为土壤异养呼吸,裸地土壤不受作物根系生长影响,而徐志波等[30]测定的油菜50 cm行间土壤异养呼吸可能会受到作物根系生长和凋落物分解的干扰,另外,徐志波等[30]测定土壤呼吸次数较少,作物生长旺盛期的根系呼吸偏高将会导致油菜季根系呼吸对土壤呼吸的贡献被高估. Kuzyakov等[31]采用^{14}C示踪法测定的根呼吸占土壤呼吸比例在15% ~ 60%之间变异,其均值为41%,比本研究采用的根系排除法测定的结果略高. 玉米季根系呼吸速率在0.34 ~4.60 μmol·(m^2·s)$^{-1}$之间波动,其根系呼吸对土壤总呼吸的平均贡献率在26.49% ~53.65%之间变化,这一比例略高于任志杰等[32]在不同管理措施下玉米根系对土壤呼吸的贡献上的研究结果(玉米根系呼吸对土壤总呼吸的贡献为23.70% ~ 29.60%),其中贡献率最高的对照CK处理是其它处理的1.63 ~2.02倍. 蔡艳等[3]采用根系排除法测定玉米根系呼吸占土壤呼吸的平均比例为46%,高于本研究结果,其原因在于盆栽试验得出的结果值通常较高[15],盆栽试验设置的根区周围是高密度的根系区,未考虑株间的土壤呼吸可能较小,这样高估了根区呼吸,最终导致根系呼吸占土壤呼吸比例高于本研究结果. 有机物料腐解提高了土壤有机碳含量,供土壤微生物生长、繁殖利用的碳源充足,最终有利于微生物呼吸;而CK处理氮肥施入促进了作物地下部根茬及其分泌物输入,进而提高了根系呼吸[16];另外,CK处理的营养元素有效性低且不均衡,导致玉米根系旺长以拓展根系空间汲取更多的营养物质. 因此,各处理的根系呼吸贡献显著低于对照. 一般认为,植物根系在春季和夏季生长旺盛,故根系呼吸速率在此季节所占比例高. 秋冬季温度下降,根系生长近乎停滞,相比土壤微生物,根系所受影响更大,因此土壤微生物呼吸在此季节中所占比例较高[33],根系呼吸对土壤呼吸贡献较低. 根系呼吸作用主要依赖于植物光合产物对地下部分的分配[34],植被类型不同,其生产力产生差异,光合作用同化的碳素分配到根系自养呼吸的比例就不同[35],玉米季光合作用较强,根系生长旺盛,促进了根系呼吸作用,因此本研究中夏玉米的根系呼吸贡献高于油菜.

区分土壤呼吸组分的方法主要有根系生物量外推法、根系排除法、同位素示踪法,根系排除法因其操作简单、成本和破坏性小被广泛应用[36]. Rochette等[37]研究发现用同位素法和用根去除法测得的根系呼吸占土壤呼吸比例都在45%左右,没有明显差异. 作物根系及其根系分泌物会改变土壤微生物群落结构和丰度,因此作物根系将会对土壤呼吸作用产生激发作用[38],而本研究裸地无作物根系,仅用根区土壤呼吸与裸地土壤呼吸差值来估算根系呼吸,因此本研究未考虑根系及根系分泌物对土壤呼吸的影响,这样估算根系呼吸对总土壤呼吸的贡献带来了一定的不确定性. 另外,作物覆盖将会改变太阳辐射地面强度、土壤温度、土壤水分等环境因子,所以今后的研究尽量保证裸地与根区土壤的微环境一致,减少根系排除法估算土壤呼吸组分的误差.

3.2 秸秆与生物炭还田下土壤呼吸与水热因子之间的关系

土壤温度和土壤湿度是影响土壤呼吸的最重要环境因子,土壤呼吸的大部分变化可由土壤温度和湿度共同解释[39]. 生物炭还田对土壤温度有"削高填低"效应,即当大气温度剧烈变化时,生物质还田能平缓土壤温度的变化,如减缓高温天气对作物生长的抑制,减少水分蒸发,提高土壤水分利用效率. 秸秆与生物炭还田下各处理的 5 cm 土壤温度与土壤水分都具有明显的季节性变化,但处理之间差异性不显著($P>0.05$). 究其原因:①土壤温度、土壤湿度的影响因素具有多重性[40];②夏季频繁的降雨使土壤经常处于干湿交替,加之作物生长覆盖的影响;这些因素会综合延缓土壤温度、土壤湿度变化.

温度一方面会改变底物的有效性、土壤酶与微生物活性以及生物化学反应速率;另一方面会影响植物的光合作用、根系的生长和光合同化碳的输入及周转,因此温度变化与植物根际呼吸和微生物呼吸密切相关. 本研究结果表明,土壤呼吸速率都随着土壤温度的升高而呈现增加的趋势,土壤呼吸和 5 cm 土壤温度之间存在显著的指数相关性($P<0.05$). 5 cm 土壤温度能够解释土壤呼吸变化的 82% ~94%,其中 BC 处理下土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度的相关性最好. 本研究结果显示:各处理 Q_{10} 变化范围为 3.28 ~5.03,与 Zheng 等[41] 测定的农田 Q_{10}(1.28 ~4.75)结果较为接近. 与对照相比,秸秆还田、秸秆加速腐剂还田和秸秆与生物炭混合还田显著降低了 Q_{10},而生物炭还田显著增加了 Q_{10}. Leifeld 等[42] 认为新鲜有机质质量高,成分简单,转化周期短,Q_{10} 较低;稳定有机质质量低,成分复杂,转化周期长,Q_{10} 较高. Knorr 等[43] 利用数学模型的方法也发现难分解组分的温度敏感性要高于易分解组分. 秸秆中易分解有机物含量高,生物炭则主要以芳香族、烷烃的惰性碳为主,稳定性碳难以被矿化;因此,生物炭还田较秸秆还田提高了土壤呼吸温度敏感性. 另外 7 月高温下生物炭还田土壤呼吸速率反而高于秸秆还田,这也印证了生物炭还田 Q_{10} 较高.

诸多研究指出,水分对土壤呼吸的影响具有复杂性与不确定性[44]. 张丁辰等[45] 研究发现,土壤呼吸和水分之间在一定范围内呈良好的"U"型曲线关系,0 ~10 cm 土壤水分能够解释 57% ~76% 的土壤呼吸季节变化. 此外,还有研究表明土壤 CO_2 排放通量与土壤温度密切相关,而与土壤水分关系不明显[46]. 本研究发现土壤水分仅从较小程度上影响土壤呼吸强度(R^2 为 0.021 ~0.247),CS、CSD 和 CSBC 处理的土壤呼吸与土壤水分之间存在显著相关性($P<0.05$),而 CK 和 BC 处理的土壤呼吸与土壤水分之间的相关性不显著. 通过水热双因子模型(表 4)可以看出土壤水分对土壤呼吸影响较小,且土壤温度和水分不存在交互作用,仅用土壤温度单因子指数函数可较好地模拟土壤呼吸速率的动态变化.

4　结论

(1)秸秆与生物炭还田显著影响土壤呼吸季节性变化特征和峰值,秸秆还田、秸秆 + 速腐剂还田和秸秆 + 生物炭还田均促进了土壤呼吸和碳排放,但是却显著降低了土壤呼吸温度敏感性;生物炭还田降低了土壤呼吸和碳排放量,但是却显著提高了土壤呼吸温度敏感性.

(2)土壤异养呼吸能够解释土壤总呼吸变化的 86.50% ~93.94%,各处理油菜季和玉米季根系呼吸贡献分别为 17.31% ~ 22.94%、26.49% ~ 53.65%,秸秆与生物炭还田对油菜季根系呼吸贡献无显著影响,但显著降低了玉米季根系呼吸对土壤总呼吸的贡献.

(3)秸秆与生物炭还田没有改变 5 cm 土壤温度和土壤水分. 土壤呼吸速率的变化主要受 5 cm 土壤温度控制,与 5 cm 土壤温度呈显著指数关系,土壤水分仅从较小程度上影响土壤呼吸强度. 水热双因子对土壤呼吸不存在协同作用,仅用土壤温度单因子指数函数可较好地模拟土壤呼吸速率的动态变化.

参考文献:

[1] Fang J Y, Zhao K, Liu S H. Factors affecting soil respiration in reference with temperature's role in the global scale[J]. Chinese Geographical Science, 1998, **8**(3): 246-255.

[2] Werth M, Kuzyakov Y. Root-derived carbon in soil respiration and microbial biomass determined by ^{14}C and ^{13}C[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, **40**(3): 625-637.

[3] 蔡艳, 丁维新, 蔡祖聪. 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献[J]. 生态学报, 2006, **26**(12): 4273-4280.
Cai Y, Ding W X, Cai Z C. Soil respiration in a maize-soil ecosystem and contribution of rhizosphere respiration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, **26**(12): 4273-4280.

[4] Antal M J Jr, Grønli M. The art, science, and technology of charcoal production[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, **42**(8): 1619-1640.

[5] Pessenda L C R, Gouveia S E M, Aravena R. Radiocarbon dating of total soil organic matter and humin fraction and its comparison with ^{14}C ages of fossil charcoal[J]. Radiocarbon,

2001, **43**(2B): 595-601.

[6] 姜志翔, 郑浩, 李锋民, 等. 生物炭碳封存技术研究进展[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3327-3333.
Jiang Z X, Zheng H, Li F M, *et al*. Research progress on biochar carbon sequestration technology [J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3327-3333.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Smith J L, Collins H P, Bailey V L. The effect of young biochar on soil respiration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(12): 2345-2347.

[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] 成功, 陈静, 刘晶晶, 等. 秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 792-801.
Cheng G, Chen J, Liu J J, *et al*. Comparative analysis on effect of wheat straw and its biochar amendment on net global warming potential under wheat-maize rotation ecosystem in the Guanzhong Plain[J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 792-801.

[13] 沈小帅, 陈书涛, 胡正华, 等. 亚热带次生林土壤自养和异养呼吸研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3181-3187.
Shen X S, Chen S T, Hu Z H, *et al*. Investigation of heterotrophic and autotrophic components of soil respiration in a secondary forest in subtropical China [J]. Environmental Science, 2011, **32**(11): 3181-3187.

[14] 范月君, 侯向阳, 石红霄, 等. 气候变暖对草地生态系统碳循环的影响[J]. 草业学报, 2012, **21**(3): 294-302.
Fan Y J, Hou X Y, Shi H X, *et al*. Effect of carbon cycling in grassland ecosystems on climate warming[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, **21**(3): 294-302.

[15] 张赛, 王龙昌, 黄召存, 等. 保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2419-2425.
Zhang S, Wang L C, Huang Z C, *et al*. Soil respiration and carbon balance in wheat field under conservation tillage [J]. Environmental Science, 2014, **35**(6): 2419-2425.

[16] 张芳, 郭胜利, 邹俊亮, 等. 长期施氮和水热条件对夏闲期土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3174-3180.
Zhang F, Guo S L, Zou J L, *et al*. Effects of nitrogen fertilization, soil moisture and soil temperature on soil respiration during summer fallow season[J]. Environmental Science, 2011, **32**(11): 3174-3180.

[17] 张前兵, 杨玲, 王进, 等. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学, 2012, **45**(12): 2420-2430.
Zhang Q B, Yang L, Wang J, *et al*. Effects of different irrigation methods and fertilization measures on soil respiration and its component contributions in cotton field in arid region [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, **45**(12): 2420-2430.

[18] 胡发龙, 柴强, 甘延太, 等. 少免耕及秸秆还田小麦间作玉米的碳排放与水分利用特征[J]. 中国农业科学, 2016, **49**(1): 120-131.
Hu F L, Chai Q, Gan Y T, *et al*. Characteristics of soil carbon emission and water utilization in wheat/maize intercropping with minimal/zero tillage and straw retention[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, **49**(1): 120-131.

[19] 张晓雨, 张赛, 王龙昌, 等. 秸秆覆盖条件下小麦生长季根系呼吸对土壤呼吸作用的贡献[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(11): 2846-2852.
Zhang X Y, Zhang S, Wang L C, *et al*. Contribution of root respiration to soil respiration based on straw mulching in wheat growing season [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(11): 2846-2852.

[20] Liu X Y, Zheng J F, Zhang D X, *et al*. Biochar has no effect on soil respiration across Chinese agricultural soils[J]. Science of the Total Environment, 2016, **554-555**: 259-265.

[21] 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 等. 生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3393-3400.
Guo Y L, Wang D D, Zheng J Y, *et al*. Effect of biochar on soil greenhouse gas emissions in semi-arid region[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3393-3400.

[22] Wang J Y, Xiong Z Q, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects [J]. Global Change Biology Bioenergy, 2016, **8**(3): 512-523.

[23] Hamer U, Marschner B. Priming effects in different soil types induced by fructose, alanine, oxalic acid and catechol additions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, **37**(3): 445-454.

[24] Liu S W, Zhang Y J, Zong Y J, *et al*. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: a meta-analysis [J]. Global Change Biology Bioenergy, 2016, **8**(2): 392-406.

[25] 安艳, 姬强, 赵世翔, 等. 生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 293-300.
An Y, Ji Q, Zhao S X, *et al*. Effect of biochar application on soil aggregates distribution and moisture retention in orchard soil [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 293-300.

[26] Anderson C R, Condron L M, Clough T J, *et al*. Biochar induced soil microbial community change: implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus[J]. Pedobiologia, 2011, **54**(5-6): 309-320.

[27] Lu N, Liu X R, Du Z L, *et al*. Effect of biochar on soil respiration in the maize growing season after 5 years of consecutive application[J]. Soil Research, 2014, **52**(5): 505-512.

[28] 李虎, 邱建军, 王立刚. 农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(4): 14-20.

Li H, Qiu J J, Wang L G. Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration[J]. Transactions of the CSAE, 2008, **24**(4): 14-20.

[29] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al*. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations[J]. Biogeochemistry, 2000, **48**(1): 115-146.

[30] 徐志波, 江长胜, 郝庆菊, 等. 稻-油轮作农田油菜生长季土壤呼吸作用及其影响因素分析[J]. 中国生态农业学报, 2012, **20**(12): 1599-1605.
Xu Z B, Jiang C S, Hao Q J, *et al*. Soil respiration and its influencing factors in rice-rape rotation fields during rape growing season[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, **20**(12): 1599-1605.

[31] Kuzyakov Y, Ehrensberger H, Stahr K. Carbon partitioning and below-ground translocation by *Lolium perenne*[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, **33**(1): 61-74.

[32] 任志杰, 高兵, 黄涛, 等. 不同轮作和管理措施下根系呼吸对土壤呼吸的贡献[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(9): 2367-2375.
Ren Z J, Gao B, Huang T, *et al*. The contribution of root respiration to soil respiration under different crop rotations and managements[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(9): 2367-2375.

[33] 韩广轩, 周广胜. 土壤呼吸作用时空动态变化及其影响机制研究与展望[J]. 植物生态学报, 2009, **33**(1): 197-205.
Han G X, Zhou G S. Review of spatial and temporal variations of soil respiration and driving mechanisms[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, **33**(1): 197-205.

[34] Yan L M, Chen S P, Huang J H, *et al*. Water regulated effects of photosynthetic substrate supply on soil respiration in a semiarid steppe[J]. Global Change Biology, 2011, **17**(5): 1990-2001.

[35] Kuzyakov Y, Gavrichkova O. Time lag between photosynthesis and carbon dioxide efflux from soil: a review of mechanisms and controls[J]. Global Change Biology, 2010, **16**(12): 3386-3406.

[36] 朱凡, 王光军, 田大伦, 等. 杉木人工林去除根系土壤呼吸的季节变化及影响因子[J]. 生态学报, 2010, **30**(9): 2499-2506.
Zhu F, Wang G J, Tian D L, *et al*. Seasonal variation of soil respiration by root exclusion and its controlling factors in a *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(9): 2499-2506.

[37] Rochette P, Flanagan L B, Gregorich E G. Separating soil respiration into plant and soil components using analyses of the natural abundance of carbon-13[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, **63**(5): 1207-1213.

[38] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(11-12): 1485-1498.

[39] Burton A J, Pregitzer K S. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine[J]. Tree Physiology, 2003, **23**(4): 273-280.

[40] Liu H Z, Wang B M, Fu C B. Relationships between surface albedo, soil thermal parameters and soil moisture in the semi-arid area of Tongyu, Northeastern China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2008, **25**(5): 757-764.

[41] Zheng Z M, Yu G R, Fu Y L, *et al*. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: a trans-China based case study[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(7): 1531-1540.

[42] Leifeld J, Fuhrer J. The Temperature response of CO_2 production from bulk soils and soil fractions is related to soil organic matter quality[J]. Biogeochemistry, 2005, **75**(3): 433-453.

[43] Knorr W, Prentice I C, House J I, *et al*. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming[J]. Nature, 2005, **433**(7023): 298-301.

[44] Reth S, Reichstein M, Falge E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO_2 efflux - a modified model[J]. Plant and Soil, 2005, **268**(1): 21-33.

[45] 张丁辰, 蔡典雄, 代快, 等. 旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应[J]. 生态学报, 2013, **33**(6): 1916-1925.
Zhang D C, Cai D X, Dai K, *et al*. Soil respiration and its responses to soil moisture and temperature under different tillage systems in dryland maize fields[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(6): 1916-1925.

[46] 肖胜生, 熊永, 段剑, 等. 基于组分区分的南方红壤丘陵土壤呼吸对植被类型转换的响应[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(14): 123-131.
Xiao S S, Xiong Y, Duan J, *et al*. Responses of soil respiration to vegetation type conversion in south hilly red soil based on main components[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(14): 123-131.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 7

Jul. 15, 2017

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry ····· YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, *et al.* (2629)

Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product ····· ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)

Sources and Characteristics of Regional Background PM_1 in North China During the Autumn and Winter Polluted Period ··· ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, *et al.* (2647)

Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of $PM_{2.5}$ in Hangzhou ····· WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, *et al.* (2656)

Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China ····· XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)

Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of $PM_{2.5}$ in Xi'an, China During Haze and Clean Days ····· WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, *et al.* (2679)

Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM_{10} from Mt. Huangshan ····· MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, *et al.* (2688)

Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in $PM_{2.5}$ of Quanzhou ····· ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, *et al.* (2698)

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China ····· XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, *et al.* (2707)

VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit ····· ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, *et al.* (2718)

Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014 ····· FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, *et al.* (2728)

Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China ····· LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, *et al.* (2738)

Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of *N*-nitrosodimethylamine(NDMA) in Drinking Waters in China ····· ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, *et al.* (2747)

Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment ····· ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, *et al.* (2754)

Distribution and Sources of *n*-alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay ····· ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, *et al.* (2763)

Spatial Variations of CO_2 Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China ····· ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, *et al.* (2773)

Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River ····· NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, *et al.* (2784)

Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu ····· CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, *et al.* (2793)

Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources ····· LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, *et al.* (2801)

High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir ··· SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, *et al.* (2810)

Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China ····· ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, *et al.* (2819)

Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution ····· CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, *et al.* (2828)

Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO_2 ····· XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, *et al.* (2836)

Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks ····· XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)

Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed ····· CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, *et al.* (2850)

MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water ····· WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, *et al.* (2859)

Degradation of *N*-nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber ····· ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, *et al.* (2868)

Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol ····· KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, *et al.* (2875)

Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes ····· HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, *et al.* (2883)

Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell ····· SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, *et al.* (2893)

Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta ····· SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, *et al.* (2901)

Cultivation of *Spirulina platensis* in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization ····· CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, *et al.* (2910)

Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K^+ Addition in Saline Surroundings ····· WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, *et al.* (2917)

Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria ····· YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, *et al.* (2925)

Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules ····· LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, *et al.* (2931)

Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge ····· LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, *et al.* (2941)

Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process ····· LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, *et al.* (2947)

Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling ····· SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, *et al.* (2953)

Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge ····· GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, *et al.* (2961)

Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment ····· ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, *et al.* (2972)

Shift of Microbial Communities During the CO_2-Brine-Sandstone Interaction Process ····· WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, *et al.* (2978)

Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems ····· TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, *et al.* (2988)

Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils ····· TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, *et al.* (3000)

Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under *Betula albosinensis* Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains ····· DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, *et al.* (3010)

Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area ····· JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, *et al.* (3020)

Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination ····· FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, *et al.* (3028)

Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil ····· LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, *et al.* (3036)

Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of *Abies fabri* at Mount Gongga in China: A Comparison Study Between 1999 and 2014 ····· LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, *et al.* (3045)

Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area ····· ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, *et al.* (3054)

Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost ····· ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, *et al.* (3061)

Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw ····· GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, *et al.* (3070)

Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China ····· YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, *et al.* (3078)

Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO_x by CH_4 ····· PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, *et al.* (3085)