

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响

周鹏¹, 祁乐¹, 牛海东¹, 王子芳^{1,2}, 高明^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400715)

摘要: 水稻田的生态系统呼吸和温度敏感性 (Q_{10}) 在稻田生态系统温室气体排放等方面有非常重要的作用. 本文采用静态暗箱/气相色谱法, 研究间歇灌溉和淹水灌溉两种方式下不施肥 (CK)、单施化肥 (NPK)、10 t·hm⁻² 生物炭 + 化肥 (LBC)、20 t·hm⁻² 生物炭 + 化肥 (MBC) 和 40 t·hm⁻² 生物炭 + 化肥 (HBC) 这 5 个处理的稻田生态系统呼吸和 Q_{10} 的变化规律. 结果表明: ①淹水灌溉下生态系统呼吸的温度敏感系数 Q_{10} 分别为 4.45 (CK)、7.40 (NPK)、6.44 (LBC)、4.58 (MBC) 和 3.87 (HBC). 5 个处理下淹水灌溉比间歇灌溉均显著降低了稻田生态系统的 Q_{10} 值 ($P < 0.01$), CK、NPK、LBC、MBC 和 HBC 在淹水灌溉下分别比在间歇灌溉下降低了 48.6%、55.2%、67.9%、70.3% 和 70.8%; ②两种灌溉条件下, 化肥与生物炭配施相比不施肥处理均增加了稻田生态系统的呼吸, 但不同的生物炭施入水平, 对生态系统呼吸的促进作用差异不显著; ③化肥与中、低量生物炭配施相比不施肥均增加了稻田生态系统呼吸的温度敏感性 ($P < 0.05$), 但 MBC 和 HBC 处理均比 NPK 处理降低了稻田生态系统的 Q_{10} 值, 稻田生态系统呼吸的温度敏感性随着生物炭施入水平的增加而减小.

关键词: 灌溉方式; 生物炭; 稻田; 生态系统呼吸; 温度敏感性 (Q_{10})

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4700-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201901249

Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil

ZHOU Peng¹, QI Le¹, NIU Hai-dong¹, WANG Zi-fang^{1,2}, GAO Ming^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control in the Three-Gorges Reservoir Area of Chongqing, Chongqing 400715, China)

Abstract: The ecosystem respiration and temperature sensitivity (Q_{10}) of paddy soil play very important roles in the emission of greenhouse gases from paddy ecosystems. Under intermittent irrigation and flooding irrigation conditions, a static opaque chamber and gas chromatography method were applied to study the regulation and influence of ecosystem respiration and Q_{10} using five treatments: no fertilizer (CK), conventional fertilization (NPK), 10 t·hm⁻² biochar with chemical fertilizer (LBC), 20 t·hm⁻² biochar with chemical fertilizer (MBC), and 40 t·hm⁻² biochar with chemical fertilizer (HBC). The results showed that: ① The temperature sensitivity coefficients (Q_{10}) of ecosystem respiration under flooding irrigation were 4.45 (CK), 7.40 (NPK), 6.44 (LBC), 4.58 (MBC), and 3.87 (HBC), respectively. Flooding irrigation significantly reduced the Q_{10} value of the paddy field ecosystem compared to intermittent irrigation ($P < 0.01$). CK, NPK, LBC, MBC, and HBC decreased by 48.6%, 55.2%, 67.9%, 70.3%, and 70.8% under flooding irrigation, respectively. ② Whether intermittent irrigation or flooding irrigation was adopted, the application of fertilizer with biochar increased the respiration of the paddy field ecosystem than conventional fertilization treatment, but the effect of different biochar levels on respiration was not significant. ③ The application of chemical fertilizer with medium or low amounts of biochar increased the temperature sensitivity of respiration compared with no fertilization in the paddy field ecosystems ($P < 0.05$), but both MBC and HBC treatments reduced the Q_{10} value of paddy field ecosystem compared with NPK. Furthermore, the temperature sensitivity of respiration in the paddy field ecosystem decreased with an increase in the level of biochar application. Therefore, under the two irrigation methods, HBC treatment was more effective than LBC and MBC treatments to inhibit the effect of increasing soil temperature on the respiration of the ecosystem.

Key words: irrigation pattern; biochar; paddy soil; ecosystem respiration; temperature sensitivity (Q_{10})

人类活动造成大气中的 CO₂ 浓度急剧上升, 近 50 年来全球 CO₂ 排放的增长已超过过去百万年的平均增长^[1], 2017 年大气 CO₂ 的平均浓度比工业革命前增加了 45%^[2]. 约 60% 的温室气体来源于 CO₂^[3], IPCC 指出, CO₂ 的效果已达到温室气体的 63%, 全国温室气体中 17% 由农业生产排放^[4], 而农业生产系统中水稻田是必不可少的部分, 其 CO₂ 的排放在全球气候变化中有重要作用. 世界总耕地中水稻种植面积占 10%, 我国占世界水稻种植面积的 27%^[5], 随着人口数量的增加, 世界环境压力越

来越大, 采取降低稻田 CO₂ 排放的措施对缓解全球气候变化有重要意义^[6], 因此, 在保证粮食安全的前提下又要减少稻田温室气体排放成为了当前科技工作者的重要任务.

生态系统呼吸 (R_e) 代表整个生态系统总的

收稿日期: 2019-01-29; 修订日期: 2019-04-16

基金项目: 西南大学资源环境学院"光炯行动计划"项目 (2018004); 重庆市研究生科研创新项目 (CYB18091); 国家大学生创新创业训练计划项目 (201910635077)

作者简介: 周鹏 (1997~), 男, 主要研究方向为农田生态系统呼吸及其与环境的关系, E-mail: zp60171@email.swu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

CO₂ 释放量, 是植株呼吸和土壤呼吸的总和, 是碳循环中至关重要的一环^[7]. 植物呼吸是生态系统作为碳源向大气释放 CO₂ 的重要分量, 在对生态系统呼吸的贡献中占有较大比例^[8], 植物呼吸在一定范围内与土壤温度成正相关, 土壤呼吸通常与土壤温度成指数相关^[9]. 包含植物呼吸在内的生态系统呼吸更能反映实际稻田的 CO₂ 排放情况, 因此, 探究生态系统的呼吸对温度的响应有助于解释稻田生态系统对温室效应的综合效应^[10]. 采用 Q_{10} 表示增温对呼吸的影响, 即土壤温度每增加 10℃ 呼吸所增加的倍数, 但不同生态系统的 Q_{10} 显然存在差异^[11].

多数学者的研究围绕着生物炭对土壤呼吸以及土壤温室气体排放的影响开展, Subedi 等^[12]、Wu 等^[13] 和 Liu 等^[14] 分别发现生物炭处理对土壤呼吸有促进、抑制和无影响的作用, Zhang 等^[15] 的研究结果表明生物炭施用量对土壤 CO₂ 排放有不同影响. 生物炭对 CO₂ 排放的影响仍存在较大分歧, 近来的研究主要从生物炭材料对土壤呼吸、土地利用方式和土壤温室气体排放的作用方面着手, 灌溉措施以及生物炭施用量对植株与土壤构成的生态系统呼吸温度敏感性的影响还鲜见报道. 本试验以紫色水稻土为研究对象, 探究淹水灌溉和间歇灌溉两种灌溉方式下不同生物炭施入水平配施化肥对水稻生态系统呼吸与 Q_{10} 的影响, 以期对稻田水分管理和生物炭的施用提供科学依据, 对农业固碳减排、生态文明建设以及减缓全球气候变暖有重要意义.

1 材料与方法

1.1 供试土壤与试验设计

试验地点位于重庆市北碚区西南大学试验农场温室大棚内, 海拔 242 m, 年均气温 18.3℃, 最高气温 7 月平均 28.7℃, 最低气温 1 月 7.7℃. 供试土壤来源于西南大学试验农场 (E106° 24' 41", N29°48'47"), 为侏罗系沙溪庙组紫色砂泥岩发育形

成的中性紫色水稻土. 其基本理化性质为: 有机碳含量 13.95 g·kg⁻¹, 碱解氮 121.52 mg·kg⁻¹, 有效磷 141.23 mg·kg⁻¹, 速效钾 206.32 mg·kg⁻¹, pH 为 7.86. 试验容器为 PVC 密闭圆桶, 上口直径 24.4 cm, 下口直径 21 cm, 高度 23 cm, 土壤预先通过 2 mm 筛, 充分混合后每桶装 6 kg 干土. 试验设置 5 个处理: ①不施肥 (CK); ②单施化肥 (NPK); ③低量生物炭 10 t·hm⁻² + 化肥 (LBC); ④中量生物炭 20 t·hm⁻² + 化肥 (MBC); ⑤高量生物炭 40 t·hm⁻² + 化肥 (HBC), 每个处理 6 个重复且随机分布.

本试验水稻品种为宜香优 2115, 2017 年 3 月 10 日播种, 2017 年 5 月 14 日插秧, 每盆定苗 2 穴, 每穴 2 株, 2017 年 9 月 15 日收割. 淹水灌溉处理水稻在苗期和返青期 2~3 d 浇一次水, 分蘖期、拔节期、抽穗期和乳熟期阴雨天气 1 d 浇一次水, 晴天及高温天气 1 d 浇 2~3 次水, 保持水稻在试验期间淹水深度为 5 cm; 间歇灌溉处理在苗期和返青期 4~5 d 浇一次水, 分蘖期、拔节期、抽穗期阴雨天气 2~3 d 浇一次水, 保持水稻淹水 1 cm 以下, 晴天及高温天气仅保持土壤湿润, 乳熟期不浇水.

施肥量: 氮肥按 N 0.2 g·kg⁻¹, 磷肥按 P₂O₅ 0.12 g·kg⁻¹, 钾肥按 K₂O 0.16 g·kg⁻¹ 施入. 试验肥料为尿素 (N 质量分数 46%), 过磷酸钙 (P₂O₅ 质量分数 12%), 钾肥 (KCl 质量分数 60%). 氮肥施肥比例为基肥: 分蘖肥 = 60%: 40%. 5 月 6 日施入基肥, 6 月 2 日施入追肥. 钾肥、磷肥作为底肥一次性施入. 基肥和不同施用量的生物炭与土样充分混匀后, 施入桶中, 追肥溶于水后施入土壤表面. 除 CK 外, 各处理保持等氮磷钾的输入 (见表 1). 本试验生物炭来源于四川省久晟农业有限责任公司, 由油菜秸秆在 500℃ 高温厌氧条件下热解 2 h 而成, 其 C、N、P 和 K 含量分别为 625.8 g·kg⁻¹、4.36 g·kg⁻¹、0.97 g·kg⁻¹ 和 10.5 g·kg⁻¹, pH 为 8.9^[16].

表 1 各处理施肥量/g·桶⁻¹

Table 1 Amount of fertilizer applied in different treatments/g·pot⁻¹

处理	编号	生物炭	尿素		过磷酸钙	氯化钾
			基肥	追肥		
对照	CK	—	—	—	—	—
单施化肥	NPK	—	1.56	1.04	6	1.6
10 t·hm ⁻² 生物炭 + 化肥	LBC	26.67	1.42	0.94	5.79	1.13
20 t·hm ⁻² 生物炭 + 化肥	MBC	53.34	1.26	0.84	5.57	0.67
40 t·hm ⁻² 生物炭 + 化肥	NBC	106.68	0.96	0.64	5.14	0.26

1.2 分析方法

采用静态暗箱法采集 CO₂ 气体. 用于气体采集的箱体为分节组合式标准箱, 由顶箱、延长箱和底座组成. 顶箱和延长箱均由不锈钢板制成, 顶箱尺

寸均为长 × 宽 × 高 = 30 cm × 30 cm × 50 cm, 侧面采气口高度距底面 27 cm, 延长箱尺寸为 30 cm × 30 cm × 50 cm. 箱体外覆白色棉被, 防止太阳辐射影响箱内温度, 每盆水稻底部由一个高度 3 cm、直径 50

cm 的 PVC 底座固定. 顶箱上部装有 2 个轴流扇, 用于混合箱内气体, 顶部安装有电源插头和 JM624 型便携式测温计采集口, 侧面安装有气体样品采集口. 采样时视作物生长情况适时增加延长箱, 将顶箱或延长箱罩在底座上, 用水液封. 采样频率为每 7~10 d 一次, 每次采样时间在上午 08:30~11:30 进行, 施肥后, 增加采样频率, 为每 1~3 d 一次, 持续一周. 扣箱后立刻用 60 mL 的三通阀注射器采集 0 min 样品, 之后每隔 10 min 采集一次, 共采集 4 次样品, 采样后立即带回实验室分析. 5 cm 土温和暗箱温度于采样时分别用便携式测温计每隔 10 min 读取一次并记录. 气体样品采用 Agilent GC-7890A 气相色谱仪进行分析, 标准气体来自中国计量科学研究院, 分析方法及条件详见文献[17].

生态系统呼吸与温度关系、 Q_{10} 采用指数模型拟合、计算^[8]:

$$R_e = a \cdot e^{kT}$$

$$Q_{10} = e^{10k}$$

式中, R_e 为生态系统呼吸 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], a 和 k 均为指数模型参数, T 为箱温或 5 cm 土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$).

1.3 数据处理与统计分析

试验数据采用 Excel 2016 和 SPSS 23.0 软件进

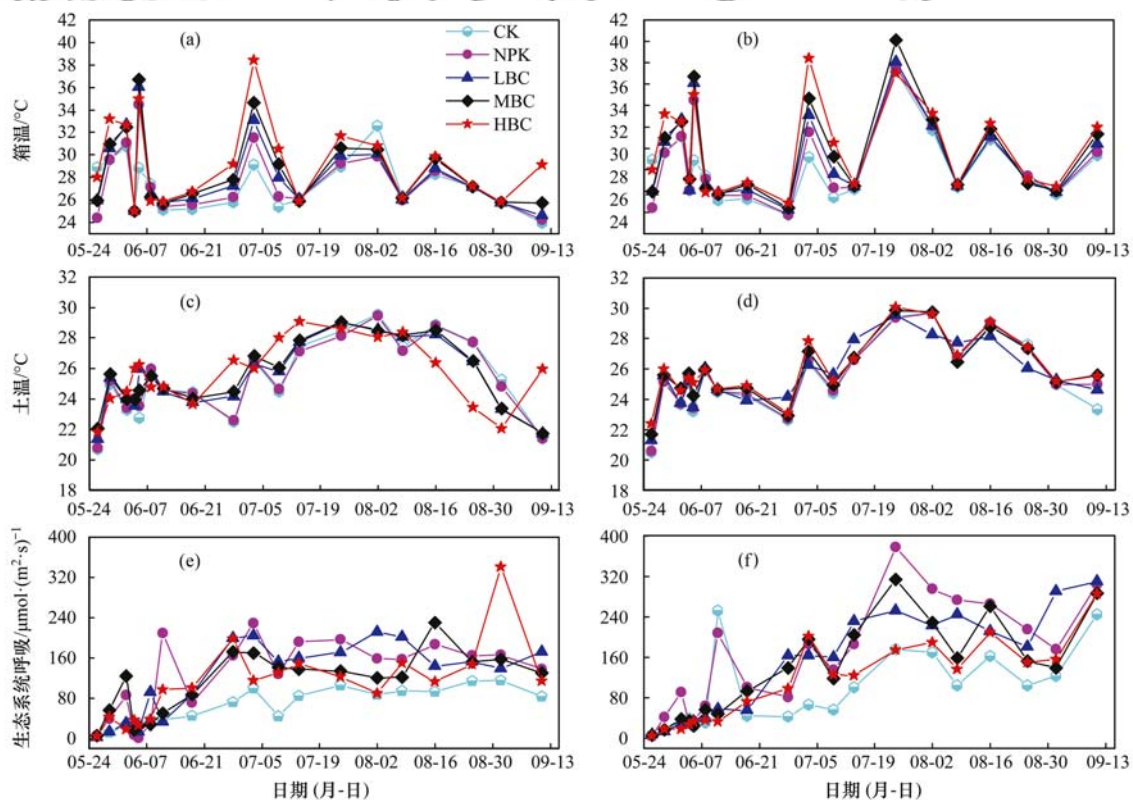
行数据处理, Origin 9.1 作图, 不同处理之间采用多重比较, 其显著性水平通过最小显著差数法 LSD 进行检验; 两种灌溉方式差异用 T Tests 检验 ($P < 0.05$).

2 结果与分析

2.1 不同处理稻田生态系统呼吸与温度的变化规律

在较长的时间里, 两种灌溉方式下箱内温度与 5 cm 土壤温度的变化趋势一致且同步 (图 1), 均在 7~8 月之间达峰值, 在时间尺度上反复波动, 但前者的波动范围和幅度均高于后者. 7 月上旬 (拔节期) 开始, 间歇灌溉与淹水灌溉的土温、箱温、生态系统呼吸的变化开始出现较大差异, 淹水灌溉下箱温和生态系统呼吸的变化幅度较间歇灌溉明显减小. 8 月末至 9 月中旬收获水稻期间, 间歇灌溉下箱温、土温、生态系统呼吸有回升的趋势, 且三者变化一致; 淹水灌溉下箱温、土温总体随时间逐渐降低, 生态系统呼吸则先小幅增加后降低, 其中 HBC 较其他处理的变化幅度更大. 两种灌溉方式下各施肥处理间土温均无显著差异, HBC 与 CK 之间的箱温均差异显著 ($P < 0.05$), 说明不同灌溉措施和施肥处理对土温无显著影响, 施入高量生物炭可使箱内温度升高.

间歇灌溉不同施肥处理生态系统呼吸的变化范



(a)、(c)和(e)淹水灌溉; (b)、(d)和(f)间歇灌溉

图 1 淹水灌溉与间歇灌溉的箱温、土温、生态系统呼吸速率的变化规律

Fig. 1 Changes in box temperature, soil temperature, and ecosystem respiration rate under flooding irrigation and intermittent irrigation treatments

围为：6.58 ~ 252.32、4.24 ~ 377.81、7.56 ~ 310.14、6.14 ~ 313.54 和 4.61 ~ 285.29 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ (CK、NPK、LBC、MBC 和 HBC)，淹水灌溉不同施肥处理生态系统呼吸变化范围为：6.13 ~ 115.15、1.18 ~ 229.07、2.56 ~ 211.19、6.24 ~ 230.26 和 4.94 ~ 340.52 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ (图 1：CK、NPK、LBC、MBC 和 HBC)，间歇灌溉生态系统呼吸及其变化范围均大于淹水灌溉，表明淹水深度与生态系统呼吸呈负相关，深度越大呼吸波动越弱。整个观测期内间歇灌溉的平均生态系统呼吸速率为 100.82、174.91、152.98、148.08 和 123.84 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ (CK、NPK、LBC、MBC 和 HBC)，淹水灌溉平均生态系统呼吸为 70.74、138.52、132.89、119.81 和 114.76 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ (CK、NPK、LBC、MBC 和 HBC)。两种灌溉方式下 3 种生物炭处理相较不施肥显著升高了生态系统呼吸，但相比单施化肥处理则显著降低了生态系统呼吸 ($P < 0.05$)。

2.2 5 cm 深土温、箱温与稻田生态系统呼吸的相关性

对生态系统呼吸与 5 cm 深土温、箱温的关系分别做了 Pearson 相关分析(表 2)。可以看出，淹水灌溉和间歇灌溉生态系统呼吸与土温的相关性表现出相似的趋势而与箱温的相关性有所差异。两种灌溉方式下 5 cm 深土温同生态系统呼吸均呈极显著相关 ($P < 0.001$)，箱温同间歇灌溉生态系统呼吸呈极显著相关而与淹水灌溉生态系统呼吸相关性未达显著水平；从相关性分析可知，土温对生态系统呼吸的影响程度大于箱温对生态系统呼吸的影响，箱温对间歇灌溉呼吸的影响程度大于对淹水灌溉呼吸的影响。5 cm 深土温可以解释间歇灌溉下约 54% 的生态系统呼吸变化，淹水灌溉下仅能解释 35%；箱温可以解释间歇灌溉下约 35%，而淹水灌溉下箱温不足以解释生态系统呼吸的变化。土温对生态系统呼吸变化的解释程度高于箱温，说明土温对生态系统呼吸变化的贡献高于箱温。

表 2 5 cm 土温、箱温与两种灌溉方式下生态系统呼吸的 Pearson 相关分析¹⁾

Table 2 Pearson's correlation analysis for soil temperature (5 cm depth), box temperature, and ecosystem respiration under the two irrigation regimes

项目	淹水灌溉		间歇灌溉	
	P	Sig.	P	Sig.
5 cm 土温	0.345 **	<0.001	0.536 **	<0.001
箱温	0.069	0.367	0.345 **	<0.001

1) ** 表示 0.01 (双尾) 相关性显著

2.3 稻田生态系统呼吸的温度敏感性 (Q_{10})

间歇灌溉土温与生态系统呼吸呈极显著的指数相关，淹水灌溉土温与生态系统呼吸呈弱指数相关，间歇灌溉与淹水灌溉的生态系统呼吸同箱温的指数相关性均未达显著水平。间歇灌溉和淹水灌溉其指数拟合方程、相关系数 (R^2) 和温度敏感性 Q_{10} 值如表 3 所示。

间歇灌溉下 5 cm 土温与生态系统呼吸之间指数相关系数大小为 $\text{NPK} > \text{LBC} > \text{MBC} > \text{HBC} \approx \text{CK}$ ，淹水灌溉下 5 cm 土温与生态系统呼吸之间指数相关系数大小为 $\text{CK} > \text{LBC} \approx \text{MBC} > \text{NPK} > \text{HBC}$ 。间歇灌溉下生态系统呼吸与 5 cm 土温之间的相关性 (R^2) 相比淹水灌溉分别增加了 2%、27%、24%、21% 和 16%。间歇灌溉除 HBC 外的施肥措施均增加了土温与呼吸之间的指数相关性，淹水灌溉各处理均降低了土温与呼吸之间的指数相关性，表明灌溉方式和施肥处理的改变对土温与生态系统呼吸的关系有影响。不同生物炭施入水平对呼吸的影响差异显著 ($P < 0.05$)，LBC 对呼吸的影响与 MBC 差异不显著，而与 HBC 差异显著。

间歇灌溉下不同施肥措施呼吸 30% ~ 43% 的变异可以用土温来解释，淹水灌溉下土温仅能解释 14% ~ 28%。淹水灌溉较间歇灌溉 Q_{10} 降低了 49% ~ 71%。淹水灌溉下，与 CK 比，低量和中量生物炭使 Q_{10} 增加，高量生物炭使 Q_{10} 减小；与 CK 比，两种灌溉方式下生物炭施入水平对 Q_{10} 的影响大小为 $\text{LBC} > \text{MBC} > \text{HBC}$ 。可见，不同灌溉方式改变了不同施肥措施对 Q_{10} 的作用效果，不同生物炭施入

表 3 土壤 5 cm 温度对生态系统呼吸、 Q_{10} 的影响与指数相关系数 (R^2)¹⁾

Table 3 Effect of soil temperature (5 cm depth) on ecosystem respiration, Q_{10} , and the index correlation coefficient (R^2)

处理	淹水灌溉			间歇灌溉		
	指数方程	Q_{10}	R^2	指数方程	Q_{10}	R^2
CK	$R_e = 1.322 2e^{0.149 27}$	4.45	0.28 *	$R_e = 0.280 3e^{0.215 97}$	8.66	0.30 **
NPK	$R_e = 0.589 2e^{0.200 17}$	7.40	0.16 *	$R_e = 0.094 5e^{0.280 57}$	16.53	0.43 **
LBC	$R_e = 0.797 4e^{0.186 27}$	6.44	0.17 *	$R_e = 0.044 5e^{0.300 87}$	20.10	0.41 **
MBC	$R_e = 1.868 1e^{0.152 27}$	4.58	0.17 *	$R_e = 0.089 4e^{0.273 67}$	15.43	0.38 **
HBC	$R_e = 2.669 7e^{0.135 37}$	3.87	0.14 *	$R_e = 0.102 1e^{0.258 57}$	13.26	0.30 **

1) ** 表示 $P < 0.01$ ，* 表示 $P < 0.05$

水平对 Q_{10} 的影响程度亦不同, Q_{10} 随着生物炭施入比例的增加而减小。

3 讨论

3.1 两种灌溉方式下生物炭对生态系统呼吸的影响

生物炭具有疏松多孔、比表面积较大的特点, 可通过改变土壤的结构和性质影响生态系统呼吸。无论是间歇灌溉还是淹水灌溉, 与对照相比, 单施化肥及配施生物炭均显著提高了生态系统的呼吸, 这与郭艳亮等^[17]和于晓娜等^[18]的结果相同。这是由于生物炭增强了土壤保持肥力的能力, 为微生物的生长代谢提供了较好的环境, 土壤微生物量和酶活性得以提高^[19,20], 同时生物炭中不稳定碳组分的微生物降解作用也促进了土壤表观呼吸^[21]; 另外, 生物炭也可以在短期内发生矿化作用产生 CO_2 ^[22~24]。故在水稻生长阶段中, 生物炭与化肥配施处理的生态系统呼吸总体高于 CK。但生物炭与化肥配施较单施化肥可以抑制生态系统的呼吸, 这与 Cross 等^[25]的研究结果一致, 这是由于生物炭对土壤中的 N、P 和 K 有一定的固定作用, 为土壤团聚体的形成提供了有利条件, 对土壤中的有机质起到一定保护作用, 同时生物炭对易分解有机物质具有物理和化学吸附作用^[26], 有机碳分解量下降, 使得生物炭配施化肥处理下 CO_2 的排放量相较单施化肥减少, 但由于化肥对生态系统呼吸的促进作用大于生物炭的抑制作用, 故生物炭配施化肥处理下生态系统呼吸仍高于 CK。

本研究中观测的生态系统呼吸主要由土壤呼吸与植株呼吸组成, 各处理的 CO_2 排放规律受土壤温度、水分以及植株生长的影响较大^[27]。间歇灌溉的生态系统呼吸高于淹水灌溉, 这与周延等^[28]和 Juszczak 等^[29]的土壤表层水量减少导致 CO_2 排放增加结果一致, 张忠明等^[30]的研究结果也证实了水稻盆栽 CO_2 的排放与淹水深度呈一定的负相关。这是由于生态系统呼吸中水稻植株的参与可增加约 4.7 倍的 CO_2 排放量^[31], 被水层淹没的水稻植株部分越多, 水稻的维持性呼吸量则越小, 生态系统呼吸减弱。

3.2 温度与稻田生态系统呼吸的关联性

水热条件是植物生长代谢必不可少的条件, 是评估植株呼吸和土壤呼吸总排放效应的重要因子, 也是两种灌溉方式下温度与生态系统呼吸的关联性显著差异的主要原因。温度控制着水稻植株的生长, 本研究间歇灌溉下水稻植株生长旺盛时期与生态系统呼吸作用旺盛时期吻合, 生态系统呼吸随时间变化与水稻随时间变化的生长规律一致, 这与寇

太记等^[32]的结果类似, 表明温度在生态系统呼吸变化中起重要作用^[33]。微生物呼吸和植物根系呼吸是生态系统呼吸的重要部分, 温度影响微生物代谢产生 CO_2 的各个阶段, 根系呼吸也受到温度的强烈影响^[34], 最终生态系统呼吸与土温呈正相关^[35]。本研究中两种灌溉方式下水稻盆栽生态系统呼吸与土温之间存在着极显著的相关性, 但淹水灌溉降低了生态系统呼吸与土温的相关性。这主要是由于间歇灌溉土壤表层水小于 1 cm, 淹水灌溉土壤表层水大于 5 cm, 故间歇灌溉的土壤受温度的影响更大; 淹水灌溉条件使土壤通气性和温度变化减弱, 温度因子提供解释生态系统呼吸变化的信息量下降, 直接作用于水稻的生长状况以及根系和微生物活性, 进而调控了生态系统呼吸。箱温在间歇灌溉下与生态系统呼吸也显著相关, 淹水灌溉下二者无关, 可能是因为箱温反映的是土壤呼吸和水稻呼吸共同的温度效应, 生态系统呼吸并未直接响应空气温度的变化, 故本试验生态系统呼吸与箱温的关系与 Fu 等^[36]研究中的指数关系有所差异。

3.3 稻田生态系统呼吸的温度敏感性(Q_{10})

本研究中淹水灌溉和间歇灌溉 Q_{10} 均值分别为 5.35 和 14.80, 远高于全球陆地生态系统 Q_{10} 范围 2.14 ~ 2.27^[10]。主要是由于本试验过程在大棚进行, 晴天太阳辐射到玻璃大棚, 使大棚内温度急剧升高, 为了保证温度因子不受其他因素的干扰, 本试验并未对大棚做降温措施, 故大棚内产生增温效应。已有的研究中增温对生态系统呼吸温度敏感性的影响大多受土壤水分的限制^[36,37], 但本研究中两种灌溉方式下水分条件并非限制因素, Q_{10} 并不会随温度增加而减小, 使得夏季外界和温室大棚内的增温效应增大了生态系统呼吸的温度敏感性, 因此, 水热条件充分是造成本研究 Q_{10} 较大的重要原因。另外, 水稻根系相较其他草本植物较发达, 而根系呼吸是土壤呼吸的重要部分, 本研究中生态系统呼吸包含了水稻盆栽的全部根系, 具有较高的温度敏感性^[38], 且根系分泌物较丰富, 也使得 Q_{10} 增大^[8]; 盆栽中植株枯落部分含有较多的易分解碳完全进入土壤, 生态系统呼吸基质活性增加从而增加 Q_{10} ^[39]。同时, 尽管不同组分对温度增加的敏感性不同, 但由于水稻植株生长以及气候的季节性变异的影响^[40], 植株代谢旺盛, 根系分泌物也随之增加, 生态系统呼吸敏感性总体增大。此外, 本研究结果与 Ding 等^[41]发现短期内土壤颗粒越小使 Q_{10} 越大, 土壤温度与生态系统呼吸的数据同步测定也有使 Q_{10} 增大的趋势^[42]相吻合。这也充分印证了 Q_{10} 变化的不确定性, 因此, 灌水和生物炭对 Q_{10} 值

的影响还需在大田进一步验证。

间歇灌溉下不同量生物炭以及淹水灌溉下低量、中量生物炭施入较之 CK 均明显增加了生态系统呼吸对土壤温度的敏感程度。这是由于地上水层有屏障和隔热的作用, 灌溉超过一定量时, 土壤的热容量等性质改变, 植物的蒸腾作用以及根系吸收水分、养分的作用随之改变^[43], 因而 Q_{10} 与灌溉量呈负相关^[44], 淹水灌溉下土温变化对生态系统呼吸的影响比间歇灌溉更弱, 温度敏感性更低, 这与 Yang 等^[45]的研究结果一致。氮肥施入将导致 Q_{10} 增大^[46], 这是生物炭的施入增加了土壤呼吸底物的有效性和酶活性^[47]使得微生物呼吸敏感性增加的结果。有关生物炭对土壤呼吸温度敏感性的影响仍存在许多不确定因素^[48], 一般施入的生物炭在短期内增加 Q_{10} 而在长时间内使 Q_{10} 降低^[49]。本试验中随生物炭施入比例的增加 Q_{10} 越小, 淹水灌溉下 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物炭起到降低 Q_{10} 的作用, 表明一定量的生物炭可以降低 Q_{10} ^[50]。但生物炭施用量对 Q_{10} 的作用有差异, 中、低量生物炭一定程度上使土壤基础呼吸的底物质量增加而有增大 Q_{10} 的作用^[37]; 高量生物炭的施入明显破坏了土壤结构和土壤生态, 对土壤微生物数量与分布以及植物根系的生长与分布有较大影响, 进而对土壤呼吸产生了抑制效果, 从而降低了 Q_{10} 值。本试验中 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物炭对 Q_{10} 的影响才出现差异, 且在两种灌溉方式下的作用效果不同, 故更高量的生物炭对 Q_{10} 的作用效果有待进一步研究。

4 结论

(1) 两种灌溉方式下生态系统呼吸与温度显著相关 ($P < 0.05$)。淹水灌溉相比间歇灌溉降低了生态系统呼吸与 5 cm 土温、箱温的关联性, Q_{10} 值在淹水灌溉下分别比在间歇灌溉下减少了 48.6% (CK)、55.2% (NPK)、67.9% (LBC)、70.3% (MBC) 和 70.8% (HBC)。但是本试验主要在大棚中进行, 势必会影响气温与地温的变化, 灌水和生物炭对 Q_{10} 值的影响还需在大田进一步验证。

(2) 两种灌溉方式下施肥均促进了水稻生态系统的呼吸, 生物炭施入水平之间的差异对生态系统呼吸无影响。生物炭配施化肥与单施化肥相比降低了生态系统呼吸, 但与不施肥相比则提高了生态系统呼吸。

(3) 不同施肥方式显著改变了生态系统呼吸对土壤温度的敏感性, Q_{10} 随生物炭施入水平的增加而减小, $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 生物炭降低生态系统呼吸对土壤温度的敏感性效果最佳。

参考文献:

- [1] Doney S C, Schimel D S. Carbon and climate system coupling on timescales from the precambrian to the anthropocene[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2007, **32**: 31-66.
- [2] 张含. 大气二氧化碳、全球变暖、海洋酸化与海洋碳循环相互作用的模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. 1-8.
Zhang H. A modeling study of interactive feedbacks between carbon dioxide, global warming, ocean acidification, and the ocean carbon cycle[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. 1-8.
- [3] Dalal R C, Allen D E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems[J]. *Australian Journal of Botany*, 2008, **56** (5): 369-407.
- [4] 蔡松峰, 黄德林. 我国农业源温室气体技术减排的影响评价——基于一般均衡模型的视角[J]. *北京农业职业学院学报*, 2011, **25** (2): 24-29.
- [5] 邵美红, 孙加焱, 阮关海. 稻田温室气体排放与减排研究综述[J]. *浙江农业学报*, 2011, **23** (1): 181-187.
Shao M H, Sun J Y, Ruan G H. Review on greenhouse gases emission and the reduction technology in rice fields[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2011, **23** (1): 181-187.
- [6] 杨艳. 太湖流域水稻种植系统温室效应、碳汇效应及收益评估[D]. 南京: 南京大学, 2013. 5-17.
Yang Y. The greenhouse effect, the carbon sink effect and cost-benefit assessments of the Taihu Lake Basin rice cultivation system[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013. 5-17.
- [7] Luyssaert S, Inglima I, Jung M, et al. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database[J]. *Global Change Biology*, 2007, **13** (12): 2509-2537.
- [8] 李东, 罗旭鹏, 曹广民, 等. 高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36** (3): 1075-1083.
Li D, Luo X P, Cao G M, et al. Effect of degradation succession process on the temperature sensitivity of ecosystem respiration in Alpine potentilla fruticosa scrub meadow[J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (3): 1075-1083.
- [9] Zhang Y J, Guo S L, Zhao M, et al. Soil moisture influence on the interannual variation in temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization in the Loess Plateau[J]. *Biogeosciences*, 2015, **12** (11): 3655-3664.
- [10] 游桂莹, 张志渊, 张仁铎. 全球陆地生态系统光合作用与呼吸作用的温度敏感性[J]. *生态学报*, 2018, **38** (23): 8392-8399.
You G Y, Zhang Z Y, Zhang R D. Temperature sensitivity of photosynthesis and respiration in terrestrial ecosystems globally[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38** (23): 8392-8399.
- [11] 朱先进, 张函奇, 殷红. 增温影响陆地生态系统呼吸的研究进展[J]. *沈阳农业大学学报*, 2017, **48** (5): 513-521.
Zhu X J, Zhang H Q, Yin H. Advances in warming effect on ecosystem respiration in terrestrial ecosystems[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2017, **48** (5): 513-521.
- [12] Subedi R, Taupe N, Pelissetti S, et al. Greenhouse gas emissions and soil properties following amendment with manure-derived biochars: influence of pyrolysis temperature and feedstock type[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **166**: 73-83.
- [13] Wu M X, Han X G, Zhong T, et al. Soil organic carbon content affects the stability of biochar in paddy soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, **223**: 59-66.
- [14] 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.
- [15] Zhang A F, Liu Y M, Pan G X, *et al.* Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. Plant and Soil, 2012, **351**(1-2): 263-275.
- [16] 祁乐, 高明, 郭晓敏, 等. 生物炭施用量对紫色水稻土温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2351-2359.
- Qi L, Gao M, Guo X M, *et al.* Effects of biochar application rates on greenhouse gas emissions in the purple paddy soil[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2351-2359.
- [17] 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.
- [18] 于晓娜, 周涵君, 张晓帆, 等. 基于盆栽试验的施用烟秆生物炭对植烟土壤呼吸速率的影响[J]. 烟草科技, 2017, **50**(12): 29-37.
- Yu X N, Zhou H J, Zhang X F, *et al.* Effects of tobacco stalk biochar on respiration rate of tobacco-planting soil based on pot experiment[J]. Tobacco Science & Technology, 2017, **50**(12): 29-37.
- [19] Keiluweit M, Nico P S, Johnson M G, *et al.* Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar) [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(4): 1247-1253.
- [20] 王娟, 张丽君, 姚槐应. 添加秸秆和黑炭对水稻土碳氮转化及土壤微生物代谢图谱的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, **27**(1): 97-104.
- Wang J, Zhang L J, Yao H Y. Effects of straw and black carbon addition on C-N transformation and microbial metabolism profile in paddy soil[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2013, **27**(1): 97-104.
- [21] 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.
- [22] Luo Y, Durenkamp M, De Nobili M, *et al.* Short term soil priming effects and the mineralisation of biochar following its incorporation to soils of different pH [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(11): 2304-2314.
- [23] Nguyen B T, Lehmann J, Hockaday W C, *et al.* Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(9): 3324-3331.
- [24] 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.
- [25] Cross A, Sohi S P. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(10): 2127-2134.
- [26] 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.
- [27] 杨士红, 王乙江, 徐俊增, 等. 节水灌溉稻田土壤呼吸变化及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(8): 140-146.
- Yang S H, Wang Y J, Xu J Z, *et al.* Changes of soil respiration of paddy fields with water-saving irrigation and its influencing factors analysis [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(8): 140-146.
- [28] 周延, 靖磊, 杨萌, 等. 不同出露时间下洞庭湖洲滩土壤及生态系统呼吸特征[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1664-1671.
- Zhou Y, Jing L, Yang M, *et al.* Soil properties and ecosystem respiration characterization of mudflat in Lake Dongting during drawdown period[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(6): 1664-1671.
- [29] Juszczak R, Humphreys E, Acosta M, *et al.* Ecosystem respiration in a heterogeneous temperate peatland and its sensitivity to peat temperature and water table depth [J]. Plant and Soil, 2013, **366**(1-2): 505-520.
- [30] 张忠明, 王忠波, 张忠学, 等. 不同灌溉模式对寒地水稻田碳排放、耗水量及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, **37**(11): 1-7.
- Zhang Z M, Wang Z B, Zhang Z X, *et al.* Effects of different irrigations on carbon emission, water consumption and yield of paddy field in cold regions [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, **37**(11): 1-7.
- [31] Khalil M A K, Rasmussen R A, Wang M X, *et al.* Emissions of trace gases from Chinese rice fields and biogas generators - CH₄, N₂O, CO, CO₂, chlorocarbons, and hydrocarbons [J]. Chemosphere, 1990, **20**(1-2): 207-226.
- [32] 寇太记, 朱建国, 谢祖彬, 等. 大气 CO₂ 体积分数升高环境温度与土壤水分对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态环境, 2008, **17**(3): 950-956.
- Kou T J, Zhu J G, Xie Z B, *et al.* The effects of temperature and soil moisture on soil respiration in the cropland under elevated pCO₂ [J]. Ecology and Environment, 2008, **17**(3): 950-956.
- [33] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. Functional Ecology, 1994, **8**(3): 315-323.
- [34] Bouma T J, Nielsen K L, Eissenstat D M, *et al.* Estimating respiration of roots in soil: interactions with soil CO₂, soil temperature and soil water content[J]. Plant and Soil, 1997, **195**(2): 221-232.
- [35] Lin X W, Zhang Z H, Wang S P, *et al.* Response of ecosystem respiration to warming and grazing during the growing seasons in the alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, **151**(7): 792-802.
- [36] Fu G, Shen Z X, Zhang X Z, *et al.* Response of ecosystem respiration to experimental warming and clipping at daily time scale in an alpine meadow of Tibet [J]. Journal of Mountain Science, 2013, **10**(3): 455-463.
- [37] 陈骥. 模拟增温和围栏封育对青海湖北岸高寒草甸化草原生态系统碳交换影响[D]. 西安: 中国科学院地球环境研究所, 2015. 64-73.
- Chen J. The responses of ecosystem carbon exchanges to experimental warming and grazing exclusion in a meadow grassland on the northern shore of Qinghai Lake, China [D]. Xi'an: Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, 2015. 64-73.
- [38] Saiz G, Byrne K, Butterbach B K, *et al.* Stand age-related effects on soil respiration in a first rotation Sitka spruce chronosequence in central Ireland[J]. Global Change Biology, 2006, **12**(6): 1007-1020.
- [39] Davidson E A, Janssens I V, Luo Y Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q₁₀ [J]. Global Change Biology, 2006, **12**(2): 154-164.

- [40] 朱娟, 班远冲. 陆地生态系统呼吸温度敏感性及其影响因素研究[J]. 环境科学与管理, 2017, **42**(1): 158-161.
Zhu J, Ban Y C. Temperature sensitivity and influencing factors of terrestrial ecosystem respiration [J]. Environmental Science and Management, 2017, **42**(1): 158-161.
- [41] Ding F, Sun W, Huang Y, *et al.* Larger Q_{10} of carbon decomposition in finer soil particles does not bring long-lasting dependence of Q_{10} on soil texture [J]. European Journal of Soil Science, 2018, **69**(2): 336-347.
- [42] Pavelka M, Acosta M, Marek M V, *et al.* Dependence of the Q_{10} values on the depth of the soil temperature measuring point [J]. Plant and Soil, 2007, **292**(1-2): 171-179.
- [43] 付时丰, 李中, 杨丽娟, 等. 保护地栽培条件下灌水方法对土壤温度的影响[J]. 灌溉排水学报, 2006, **25**(1): 67-70.
Fu S F, Li Z, Yang L J, *et al.* Effect of irrigation methods on soil temperature under protected cultivation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, **25**(1): 67-70.
- [44] 齐玉春, 郭树芳, 董云社, 等. 灌溉对农田温室效应贡献及土壤碳储量影响研究进展[J]. 中国农业科学, 2014, **47**(9): 1764-1773.
Qi Y C, Guo S F, Dong Y S, *et al.* Advances in research on the effects of irrigation on the greenhouse gases emission and soil carbon sequestration in agro-ecosystem [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, **47**(9): 1764-1773.
- [45] Yang S H, Jiang Z W, Sun X, *et al.* Effects of biochar amendment on CO_2 emissions from paddy fields under water-saving irrigation [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(11): 2580.
- [46] Jia X X, Shao M A, Wei X R. Responses of soil respiration to N addition, burning and clipping in temperate semiarid grassland in northern China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, **166-167**: 32-40.
- [47] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. Nature, 2006, **440**(7081): 165-173.
- [48] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J]. 生态学报, 2011, **31**(8): 2301-2311.
Yang Q P, Xu M, Liu H S, *et al.* Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(8): 2301-2311.
- [49] Wang X J, Chen G H, Wang S Y, *et al.* Temperature sensitivity of different soil carbon pools under biochar addition [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(4): 4130-4140.
- [50] He X H, Du Z L, Wang Y D, *et al.* Sensitivity of soil respiration to soil temperature decreased under deep biochar amended soils in temperate croplands [J]. Applied Soil Ecology, 2016, **108**: 204-210.



CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul·Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)