

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 PM₁₀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 祁闻, 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地下水碳同位素地球化学特征及生态意义 任坤, 潘晓东, 曾浩, 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-MnO₂/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)

Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 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, 周曙仝聃, 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 CO₂ 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)

O₃ 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)

柑橘/大球盖菇套作下土壤 CO₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应

游璟¹, 倪九派^{1*}, 黄容¹, 张洋², 谢德体¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要:以柑橘/大球盖菇套作模式为研究对象, 利用秸秆作为大球盖菇的培养基原料, 通过原位试验, 连续监测大球盖菇生长期, 不同秸秆还田量(半量、全量和倍量)下土壤 CO₂ 排放规律, 并进一步对比栽培大球盖菇(HSM、ASM和DSM)和未栽培大球盖菇(HS、AS和DS)处理下土壤 CO₂ 排放量变化及其影响因素, 结合大球盖菇产量及土壤碳排放效率, 分析不同秸秆还田量所产生的环境及经济效益, 为合理利用柑橘园林下土地提供理论依据. 结果表明:①秸秆还田处理的土壤 CO₂ 累积排放量均高于常规种植(CK), 随着秸秆还田量的增加呈增加趋势;且栽培大球盖菇处理的土壤 CO₂ 累积排放量大于未栽培大球盖菇, 表现为:DSM(52.09 t·hm⁻²) > ASM(41.10 t·hm⁻²) > HSM(33.20 t·hm⁻²) > DS(27.15 t·hm⁻²) > AS(25.34 t·hm⁻²) > HS(18.94 t·hm⁻²) > CK(12.16 t·hm⁻²);其中, 倍量秸秆填埋还田+栽培大球盖菇(DSM)处理的土壤 CO₂ 累积排放量增加最为显著, 较CK增加了328.37%;②对于栽培了大球盖菇的处理, 土壤 CO₂ 排放量最大时段均集中在大球盖菇菌丝生长期, 其次为出菇后和出菇期;其中DSM处理在菌丝生长期土壤 CO₂ 累积排放量占其总累积排放量的43.27%, 其次为全量秸秆填埋还田+栽培大球盖菇(ASM, 42.63%)和半量秸秆填埋还田+栽培大球盖菇(HSM, 40.57%);③栽培大球盖菇处理降低了温度敏感系数 Q₁₀; 5 cm 土壤温度能解释 27%~71% 的土壤 CO₂ 排放速率变化(P < 0.01), 而土壤体积含水量单因子对土壤 CO₂ 排放速率不存在显著影响;但双因子拟合发现, 5 cm 土壤温度和体积含水量可以解释土壤 CO₂ 排放速率变化的 36%~82%;④对于栽培了大球盖菇的处理, 各处理产量分别为:DSM(49.7 t·hm⁻²) > ASM(47.0 t·hm⁻²) > HSM(23.3 t·hm⁻²), 其中ASM的土壤碳排放效率最高(CEE = 1.14). 综上, 柑橘/大球盖菇套作模式短期内会显著促进土壤 CO₂ 排放, 但同时也提高了柑橘园综合经济效益, 其中全量秸秆还田能较好地协调其产生的经济及环境效益.

关键词:大球盖菇; 柑橘; 套作; 土壤 CO₂ 排放; 秸秆还田

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4708-10 DOI: 10.13227/j.hjxk.201903276

Response of Soil CO₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems

YOU Jing¹, NI Jiu-pai^{1*}, HUANG Rong¹, ZHANG Yang², XIE De-ti¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the pattern of citrus tree/stropharia mushrooms intercropping, returning-straw was used as the raw material for the stropharia mushrooms, and an in-situ experiment was conducted to monitor soil CO₂ emissions under different dosage of straw application during the stropharia growth period. Soil CO₂ emissions and the influencing factors were analyzed under different treatments of cultivated (HSM, ASM, and DSM) and uncultivated stropharia mushrooms (HS, AS, and DS). The mushroom yield and soil carbon emission efficiency (CEE) were used to provide a theoretical basis for improving the use of land under citrus orchards. The results showed that: ① Straw return increased the cumulative CO₂ emissions compared with the control system (conventional planting, CK) and cumulative CO₂ emissions increased with the dosage of straw application. Cumulative CO₂ emissions from soil treated with cultivated stropharia mushrooms were higher than those from soil treated with uncultivated stropharia mushrooms, in the order of DSM (52.09 t·hm⁻²) > ASM (41.10 t·hm⁻²) > HSM (33.20 t·hm⁻²) > DS (27.15 t·hm⁻²) > AS (25.34 t·hm⁻²) > HS (18.94 t·hm⁻²) > CK (12.16 t·hm⁻²). Cumulative CO₂ emissions under the DSM treatment significantly increased by 328.37% compared with CK. ② For the treatment of cultivated stropharia mushrooms, peak soil CO₂ emissions occurred during the period of mycelium growth. The highest cumulative CO₂ emissions during this period were obtained under the DSM treatment and accounted for 43.27% of the total cumulative emissions. This was followed by ASM and HSM which accounted for 42.63% and 40.57% of emissions, respectively. ③ Cultivated stropharia mushrooms reduced the temperature sensitivity coefficient (Q₁₀). The soil temperature (5 cm depth) had a significant effect on the soil CO₂ emission rate (P < 0.01) but soil moisture did not (P > 0.05). Soil temperature explained 27% to 71% of the variation in soil CO₂ emissions rates, and the two-factor fitting of soil temperature and soil moisture explained 36% to 82% of the variation. ④ For the treatment of cultivated stropharia mushrooms, the ranked yield of each treatment was DSM (49.7 t·hm⁻²) > ASM (47.0 t·hm⁻²) > HSM (23.3 t·hm⁻²), and ASM had the highest soil CEE (1.14). Therefore,

收稿日期: 2019-03-31; 修订日期: 2019-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671291); 重庆市社会事业与民生保障科技创新专项项目(cstc2017shms-xdny80062)

作者简介: 游璟(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤改良与土地利用规划, E-mail: 469401154@qq.com

* 通信作者, E-mail: nijupai@163.com

under the system of citrus tree/stropharia mushroom intercropping, straw return can increase soil CO₂ emissions, with the highest emissions being obtained when a double dosage of straw was applied. However, the optimal amount of straw still needs to be determined in combination with changes in soil nutrients and crop yields.

Key words: stropharia mushroom; citrus; intercropping; soil CO₂ emissions; straw returning

重庆市位于西南丘陵区域, 是发展柑橘产业的黄金地带^[1]. 作为中国柑橘主产区之一, 截止 2017 年底, 重庆市果园种植面积为 32.91 万 hm², 其中柑橘种植面积达 21.75 万 hm², 占重庆市果园种植面积的 66.06%^[2]. 柑橘园果树行间距大(柑橘种植株距一般采用 3 m × 4 m, 交错种植), 林下闲置的可利用空间多, 科学利用果树行间的闲置土地资源可成为提高果树林地综合效益的重要手段. 近年来, 相继出现了在果树行间播优良多年生牧草、禾本科、豆科、中草药、食用菌等的立体种植模式, 该种植模式既能充分利用闲置土地, 又能增加果园综合经济效益.

果菇套作是将一种异养型食用菌的培养与自养型果树栽培相结合的套作方式, 由于食用菌和果树不同的代谢特征以及对环境条件的不同需求, 使得两者在一定空间内实现互利共存成为可能, 不仅可以增加果园的综合经济效益, 而且也能提高果园的土壤耕地质量. 大球盖菇是国际粮农组织推荐栽培的特色菇类之一, 也是国际食用菌市场十大交易菇类之一, 它可生长在各种秸秆培养基料上, 具有喜阴凉、生长周期短、经济及营养价值高等特点^[3]. 现已有学者结合大球盖菇生长特性, 对果园内套作大球盖菇的技术进行了研究. 廖家艳等^[4]提出了以稻草为培养基料的梨园套作大球盖菇技术, 颜淑婉等^[5]结合柑橘园的种植特点及其生态环境, 提出了大球盖菇立体高效栽培模式, 其研究表明利用柑橘树天然遮阳和果园湿度较大的特点, 在柑橘园栽培大球盖菇, 有利于大球盖菇生长, 可实现早出菇、多出菇. 除了有利于增加经济效益外, 果菇套作还可以在在一定程度上能够提高土壤中活性有机碳和氮素的形成和累积, 增加土壤碳氮储量^[6, 7].

秸秆还田不仅可以实现秸秆资源二次利用、减少焚烧带来的大气污染, 还可以增加土壤有机碳含量、改善土壤肥力、土壤孔隙度, 改变土壤微生物

活动^[8-11], 但短期内秸秆还田也会增加土壤 CO₂ 排放量^[12, 13], 给大气环境造成一定负效益. 将秸秆作为培养基埋还田是目前秸秆利用的重要方式之一^[14], 秸秆作为食用菌的培养基, 施入土壤后会对土壤碳转化产生一定的影响. 但目前针对果菇套作下秸秆作为培养基还田后食用菌产量和土壤环境效应的研究鲜有报道. 因此, 本研究基于柑橘/大球盖菇套作模式, 以秸秆作为大球盖菇的培养基料, 通过设置不同秸秆还田量处理, 连续监测大球盖菇生长期土壤 CO₂ 排放速率、土壤水分和温度的变化, 对比分析不同秸秆还田量下土壤 CO₂ 累积排放量差异及其影响因素, 揭示果菇套作模式下土壤 CO₂ 的排放特征, 并结合大球盖菇产量, 综合比较经济正效益和环境负效益, 通过探求柑橘/大球盖菇套作模式下的适宜还田量, 以期为柑橘园土地经营方式及秸秆还田利用的土壤碳排放的研究提供理论依据.

1 材料与与方法

1.1 供试区概况

试验地点位于重庆市江津区慈云镇(106°19'76.43"E, 29°09'10.44"N), 平均海拔 265.6 m, 整体地势较为平坦, 境内丘陵起伏, 属典型的浅丘地貌. 全年四季分明, 气候温和, 光照充足, 雨量充沛, 属典型的亚热带季风气候. 常年平均气温 18.4℃, 夏季平均气温 28.5℃, 冬季平均气温 7.7℃; 年日照时数 1207.9 h, 全年太阳总辐射量约 4348.4 MJ·m⁻²; 年均降水量 1034.7 mm, 且降水主要集中于 5~9 月, 其量占全年降水量的 70% 左右; 无霜期长, 可达 341 d. 柑橘园试验区域总长 30 m, 总宽 10 m, 柑橘树交错种植, 行株距为 2 m × 4 m, 相邻柑橘树行间有宽 0.5 m 的排水沟, 土壤类型为发育的紫色砂页岩, 属酸性紫色土, 土壤基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the experimental soils

供试土壤	pH	容重 /g·cm ⁻³	有机质 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	全钾 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	有效磷 /mg·kg ⁻¹	有效钾 /mg·kg ⁻¹
紫色土	5.83	1.55	14.7	1.04	1.20	21.7	90.2	25.1	91.5

1.2 试验材料

柑橘品种: 锦橙; 使用菌种: 大球盖菇.

培养基辅料成分: 水稻秸秆 75%, 谷壳 15%,

麸皮 8%, 生石灰 2%.

辅料制备过程: ①将谷壳、麸皮、麸皮打碎后的水稻秸秆混合, 将混合料平铺在地面上, 喷

水让混合料全面湿透,上下翻搅使其均匀混合;②将生石灰溶于水中,并均匀地泼洒到混合料表面;③将混合料堆结实后,用塑料薄膜将其盖严实,并用石块压住薄膜边缘,防止被风吹起;④每隔3 d将上下层混合料对翻1次,若发现混合料太干燥,则加水喷湿.如此重复翻堆4次.最后去掉塑料薄膜,将混合料平铺在地面,露天散温2 d,就此培养基料发酵完成,可移入柑橘园中使用.

1.3 试验设计

本试验于2017年11月8日至2018年5月30日期间内开展,采用裂区试验设计,主因素为是否栽培大球盖菇,副因素为秸秆填埋还田量.在柑橘树行间划分试验小区,每个小区长4 m,宽1.5 m.试验共设置7个处理(每个处理设3个重复):①常规种植(CK);②半量秸秆填埋还田(HS);③半量秸秆填埋还田+栽培大球盖菇(HSM);④全量秸秆填埋还田(AS);⑤全量秸秆填埋还田+栽培大球盖菇(ASM);⑥倍量秸秆填埋还田(DS)和⑦倍量秸秆填埋还田+栽培大球盖菇(DSM).

栽培大球盖菇的处理(HSM、ASM和DSM)是将大球盖菇套作在柑橘树行间.栽培方式采用地坑式栽培,即在相邻两棵柑橘树之间,距两端植株各50 cm处,挖深20 cm,宽100 cm,长300 cm的地坑,将地坑底部整平,填入长度、宽度与地坑均一致的秸秆辅料(半量还田填埋8 cm厚的秸秆辅料,全量还田填埋16 cm厚的秸秆辅料,倍量还田填埋32 cm厚的秸秆辅料)作为菌种的培养基床;然后采用穴播法接种大球盖菇菌种,每个培养基种植两行大球盖菇,大球盖菇菌种栽培行株距为10 cm×20 cm,最后在菌种上覆盖5 cm厚度的土壤,试验设计详见图1.净秸秆还田即未栽培大球盖菇的处理(HS、AS和DS)只填埋相应厚度的秸秆辅料;常规种植为常规柑橘园种植.试验期间,柑橘树生长所需水分均为自然降水(即不进行局部人工灌溉),而大球盖菇生长所需水分较多,其生长期间视自然降水情况,在土壤含水量较低时对每个处理均进行喷灌,保证喷灌次数及每次灌溉量基本一致.7种处理除辅料添加量和播种不同外,其他管理措施均相同.

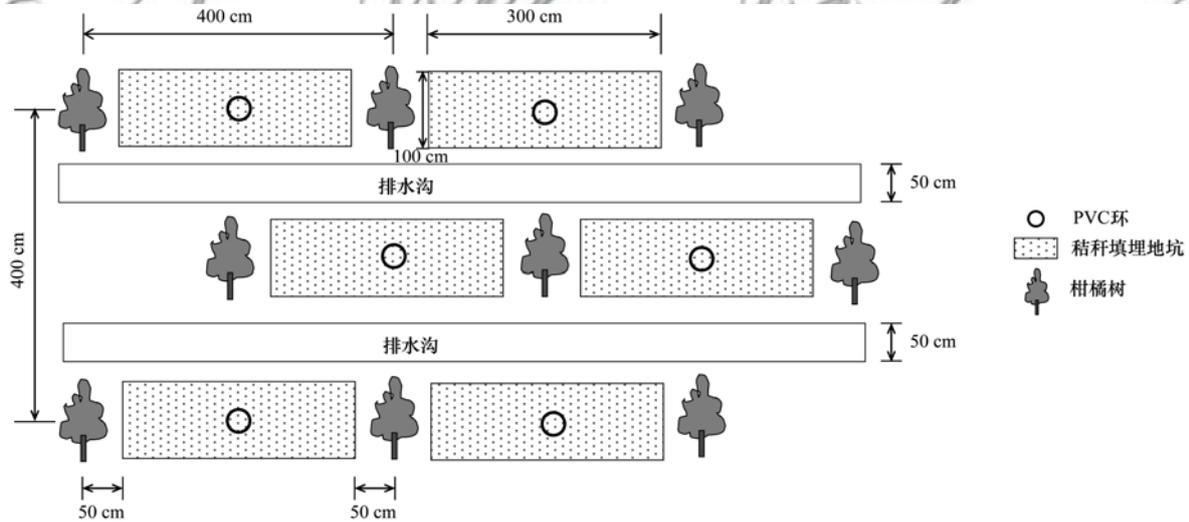


图1 柑橘园套作大球盖菇试验设计示意

Fig. 1 Experimental design of the citrus/mushroom intercropping system

1.4 测定指标与方法

土壤CO₂排放速率、土壤温度及土壤含水量测定

本试验采用美国Li-8100A开路式土壤呼吸通量测定系统(Li-COR, Lincoln, NE),从播下菌种开始(2017-11-08)至大球盖菇出菇后一个月(2018-05-30),分别每隔7 d在上午09:00~12:00测定土壤呼吸强度(即CO₂排放速率),遇到降雨适当推迟1~2 d.为减少对土壤的扰动,在试验小区布置完后,在每个试验小区中央安置一个高11 cm、内径20 cm的PVC环(作为土壤呼吸测定气室),插

入土壤的高度为5 cm.在试验期内,PVC环固定不动,测定前清除圈内杂草和菌菇.每个样点测定时间约为7 min(每次测定时间为120 s,间歇15 s进行下一次测定,重复3次).

测定土壤呼吸的同时,用Li-8100A仪器的辅助测定端口P/N-8100-201 Omega Probe土壤温度探头和Theta Probe type ML2x土壤水分探头分别测定5 cm土层的土壤温度和体积含水量.

1.5 数据处理与统计分析

土壤CO₂累积排放量估算:根据涂纯^[15]等提出的公式,大球盖菇生长期间土壤CO₂累积排放量可

用测量的平均值相加计算得出:

$$R_i = \sum \left(\frac{R_i + R_{i+1}}{2} \right) \times 60 \times 60 \times 24 \times n \times 44 \times 10^{-8} \quad (1)$$

式中, R_i 为土壤 CO₂ 累积排放量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); R_i 和 R_{i+1} 为第 i 次和第 $i+1$ 次测定的土壤呼吸速率 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]; $60 \times 60 \times 24$ 表示将秒转化为天; n 为相邻两次测定间隔的天数 (d); 44 为 CO₂ 的摩尔质量; 10^{-8} 表示将 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 转化为 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$.

经验指数方程反应了土壤呼吸速率 (R_e) 与土壤温度 (T) 的关系:

$$R_e = a \times e^{bT} \quad (2)$$

式中, R_e 指土壤呼吸速率 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]; T 指表层 5 cm 土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$); a 指温度为 0°C 的土壤呼吸, b 为温度反应系数.

土壤呼吸温度敏感系数 Q_{10} : 表示温度每升高 10°C , 土壤呼吸速率增加的倍数.

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (3)$$

式中, b 为由公式 (2) 得到的温度反应系数.

通过用 Quadratic 回归模型, 反映土壤呼吸速率 (R_e) 与土壤湿度 (W) 的关系:

$$R_e = a + bW + cW^2 \quad (4)$$

式中, W 为土壤体积含水量 (%), a 、 b 和 c 为方程拟合参数.

为检验土壤温度与湿度对土壤呼吸的叠加效应, 将温度、水分及其两者乘积作为独立变量, 引入到对数变换后的方程 (2) 中, 进行多元线性回归

分析, 通过检验, 推断土壤温度、土壤湿度以及两者叠加能否检验土壤呼吸变异, 如下所示:

$$\ln R_i = c_1 + c_2 T + c_3 W + c_4 TW \quad (5)$$

式中, T 和 W 含义同上, c_1 、 c_2 、 c_3 和 c_4 为方程拟合参数.

土壤碳排放效率 (carbon emission efficiency, CEE), 指作物生长期间土壤每排放 1kg 碳所产生的籽粒产量, 具体公式如下:

$$\text{CEE} = \text{GY}/R_i \quad (6)$$

式中, GY 为作物产量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), R_i 为作物生长期土壤碳累积排放量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)

所有数据及图表均采用 Excel 2010、SPSS 20.0、Origin 8.5 软件进行分析处理.

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田量下土壤 CO₂ 排放

2.1.1 土壤 CO₂ 排放速率

如图 2 所示, 试验期内, 各处理的 CO₂ 排放速率的最大值均出现在试验初期, 即刚填入秸秆辅料和栽培大球盖菇时的菌丝生长期. 随着种植时间的增加, 各处理的土壤 CO₂ 排放速率呈下降趋势, 在出菇期趋于平稳, 出菇后出现小幅上升. 与对照 CK [$1.07 \sim 3.33 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] 相比, 栽培大球盖菇和未栽培大球盖菇处理均增加了土壤 CO₂ 排放速率, 其中栽培了大球盖菇 (HSM、ASM 和 DSM) 处理的土壤 CO₂ 排放速率普遍高于未栽培.

未栽培大球盖菇 (HS、AS 和 DS) 的不同秸秆还

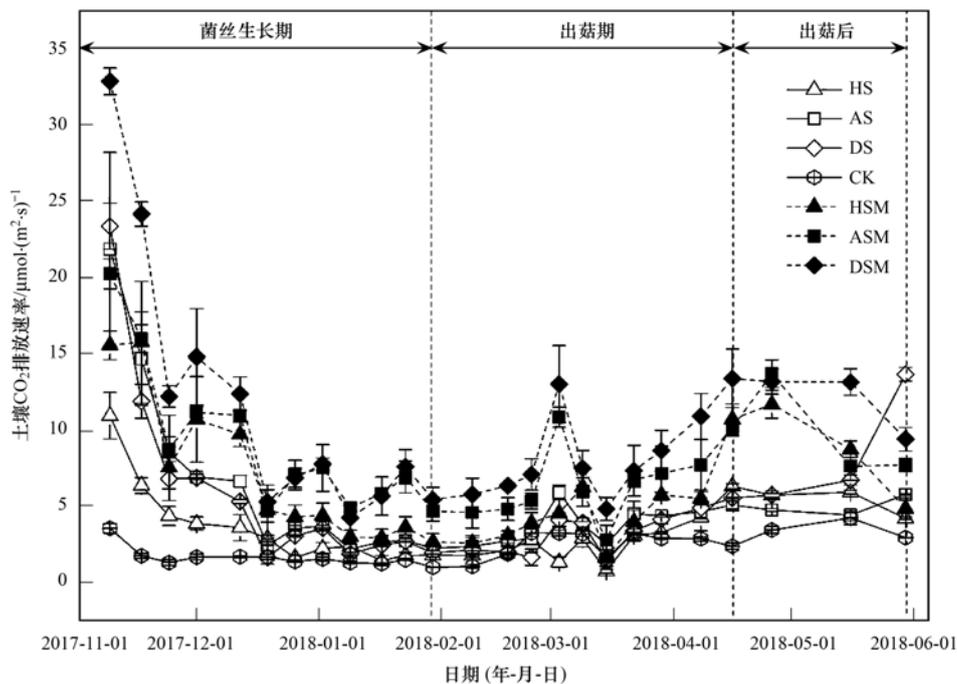


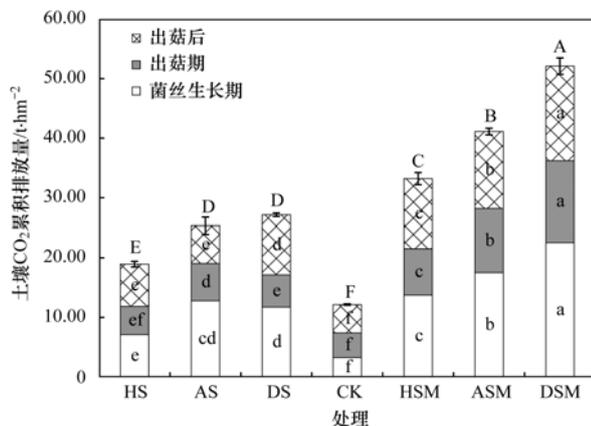
图 2 果菇套作系统下土壤 CO₂ 排放速率变化

Fig. 2 CO₂ emission rates of soil under the citrus/mushroom intercropping system

田量处理间土壤 CO₂ 排放速率差异不明显,且变化趋势基本一致,其中 HS 的 CO₂ 排放速率[0.82 ~ 10.99 μmol·(m²·s)⁻¹] 低于 AS [2.28 ~ 21.86 μmol·(m²·s)⁻¹] 和 DS [1.49 ~ 23.26 μmol·(m²·s)⁻¹]. 在栽培了大球盖菇的处理中,不同秸秆还田量处理间土壤 CO₂ 排放速率存在显著差异,表现为:DSM [4.32 ~ 32.84 μmol·(m²·s)⁻¹] > ASM [2.87 ~ 20.23 μmol·(m²·s)⁻¹] > HSM [1.68 ~ 15.77 μmol·(m²·s)⁻¹]. 总体上,秸秆还田处理均增加了土壤 CO₂ 排放速率,各处理平均土壤 CO₂ 排放速率排序为:DSM [10.45 μmol·(m²·s)⁻¹] > ASM [8.21 μmol·(m²·s)⁻¹] > HSM [6.39 μmol·(m²·s)⁻¹] > AS [5.35 μmol·(m²·s)⁻¹] > DS [5.29 μmol·(m²·s)⁻¹] > HS [3.58 μmol·(m²·s)⁻¹] > CK [2.31 μmol·(m²·s)⁻¹], 其中倍量秸秆还田 + 栽培大球盖菇(DSM)处理的土壤 CO₂ 排放速率最高.

2.1.2 土壤 CO₂ 累积排放量

试验期间(图3),各处理的土壤 CO₂ 累积排放量表现为 DSM (52.09 t·hm⁻²) > ASM (41.10 t·hm⁻²) > HSM (33.20 t·hm⁻²) > DS (27.15 t·hm⁻²) > AS (25.34 t·hm⁻²) > HS (18.94 t·hm⁻²) > CK (12.16 t·hm⁻²), 可见栽培大球盖菇和未栽培大球盖菇的处理均增加了土壤 CO₂ 累积排放量,且随着秸秆还田量的增加,土壤 CO₂ 累积排放量呈增加趋势. 未栽培大球盖菇(HS、AS 和 DS)处理的土壤 CO₂ 累积排放量随秸秆还田量的增加而增加,较对照 CK 分别增加了 55.76%, 108.39% 和



小写字母表示大球盖菇不同生育期各处理间土壤 CO₂ 累积排放量的差异显著性分析结果; 大写字母表示大球盖菇整个生长期各处理间土壤 CO₂ 累积排放量的差异显著性分析结果

图3 果菇套作系统下土壤 CO₂ 累积排放量

Fig. 3 Cumulative CO₂ emissions of soil under the citrus/mushroom intercropping system

123.27%. 栽培了大球盖菇(HSM、ASM 和 DSM)处理的土壤 CO₂ 累积排放量也表现为随秸秆还田量的增加而增加,其中, HSM 处理的土壤 CO₂ 累积排放量较对照 CK 增加了 173.03%, ASM 和 DSM 处理分别增加了 237.99% 和 328.37%, 且 HSM、ASM 和 DSM 处理土壤 CO₂ 累积排放量主要集中在大球盖菇菌丝生长期. 与未栽培大球盖菇的处理相比较,在菌丝生长期, HSM 处理土壤 CO₂ 累积排放量增长率明显低于 ASM 和 DSM 处理; 出菇期, DSM 处理的 CO₂ 累积排放量增长幅度最大, 其次为 HSM 和 ASM 处理; 出菇结束后, ASM 处理的土壤 CO₂ 累积排放量增长率最高.

2.2 不同秸秆还田量下土壤水热因子变化

如图4所示,各处理的5 cm 土壤温度的变化基本趋于一致,差异不显著,且与大气温度变化规律相似,呈现出明显的季节性特征. 在大球盖菇生长期,1月(菌丝生长期)和2月(出菇期)土壤温度较低,各处理在1月30日达到整个生长期温度最低值4.72℃; 11月(菌丝生长期)和5月(出菇完成后)温度较高,各处理均在5月16日达到整个生长期温度最高值26.78℃. 观测期间,各处理5 cm 土壤温度在4.72~26.78℃之间变化,各处理5 cm 土壤温度均值表现为:CK > ASM > DSM > AS > DS > HSM > HS, 其中对照 CK 的5 cm 土壤温度均值最大,为14.02℃,而 HS 处理的最小,为13.46℃.

土壤体积含水量变化较为复杂,且受降雨影响较大,试验期内各处理的土壤体积含水量为3.36%~45.93%. 总体上,对照 CK 的体积含水量及其波动幅度均明显高于秸秆还田处理. 造成这种现象的原因与所覆盖的秸秆辅料有关,秸秆辅料对降雨有一定的截留和保水作用,会吸收部分雨水,导致覆盖了辅料的处理土壤含水量比裸地对照处理要低,且导致土壤含水量变化反应存在一定的滞后.

2.3 土壤 CO₂ 排放与水热因子相关性分析

2.3.1 土壤 CO₂ 排放速率与土壤温度相关性分析

土壤温度是影响土壤呼吸最重要的环境因子之一,通过经验指数方程拟合了土壤 CO₂ 排放速率与5 cm 土壤温度之间的关系发现(图5),各处理的土壤呼吸速率与5 cm 土壤温度之间存在显著相关性($P < 0.01$). 由拟合公式看出,本试验条件下5 cm 土壤温度变化可以解释27%~71%的土壤 CO₂ 排放速率的变化,其中5 cm 土壤温度对对照 CK 的土壤 CO₂ 排放速率变化的解释程度最大(71%)[图5(a)],而5 cm 土壤温度对栽培大球盖菇处理的土壤 CO₂ 排放速率解释程度,较相应的未栽培大球盖菇的处理下降了5%~9%. 如图5所示,在温度较

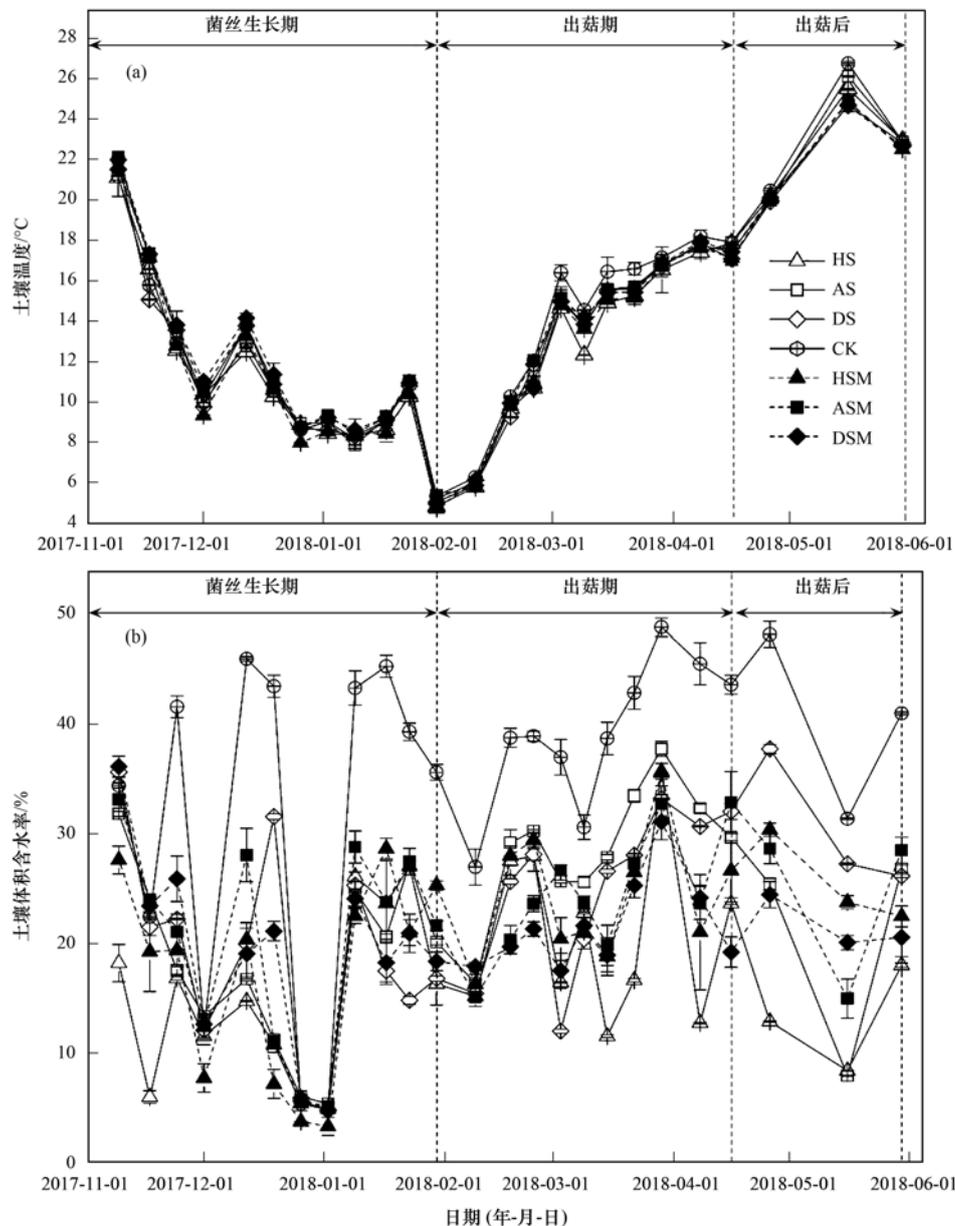


图4 果菇套作系统下土壤 5 cm 温度和土壤体积含水量变化

Fig. 4 Change in soil temperature (5 cm depth) and soil moisture under the citrus/mushroom intercropping system

低的情况下, 表征土壤 CO₂ 排放速率的散点集中在拟合曲线附近, 当温度较高时, 点则比较分散, 表明在土壤温度较低的情况下, 土壤 CO₂ 排放速率受温度影响较大, 而在温度较高时, 其他因素对其的影响则更为突出。

温度敏感系数 Q_{10} 是用来表征土壤呼吸对土壤温度变化的响应程度, 其值越大表明土壤呼吸速率对土壤温度变化越敏感. 利用公式(2) 计算得到各处理的温度敏感系数, 其中 DS 处理最大, 为 2.49, 其次为 HS 处理(2.03)和 ASM 处理(1.56). 如图 6 所示, 与对照 CK 相比, 栽培大球盖菇(HSM、ASM 和 DSM)降低了 Q_{10} 值, 而未栽培大球盖菇的处理(除 AS 处理外) Q_{10} 值均有所增加. 在秸秆还田量相同的条件下, 栽培了大球盖菇的处理较相应未栽培

大球盖菇处理的 Q_{10} 值有所降低, 分别较 HS、AS 和 DS 处理减少了 7.4%、16% 和 24%.

2.3.2 土壤 CO₂ 排放速率与土壤体积含水量相关性分析

分别利用了 Quadratic 回归模型和指数模型对土壤 CO₂ 排放速率和土壤体积含水量关系进行了拟合, 结果见表 2. Quadratic 回归模型的拟合度 R^2 在 0.008 5 ~ 0.375 1 之间, 指数模型的拟合度 R^2 在 0.005 9 ~ 0.118 4 之间, 可见本试验条件下, Quadratic 回归模型对土壤 CO₂ 排放速率和土壤体积含水量的拟合效果更优. 并且在进行土壤 CO₂ 排放速率和土壤体积含水量相关性分析时发现, HS、AS、DS、CK、HSM 和 ASM 处理的土壤 CO₂ 排放速率和土壤体积含水量不存在显著相关性, 而 DSM

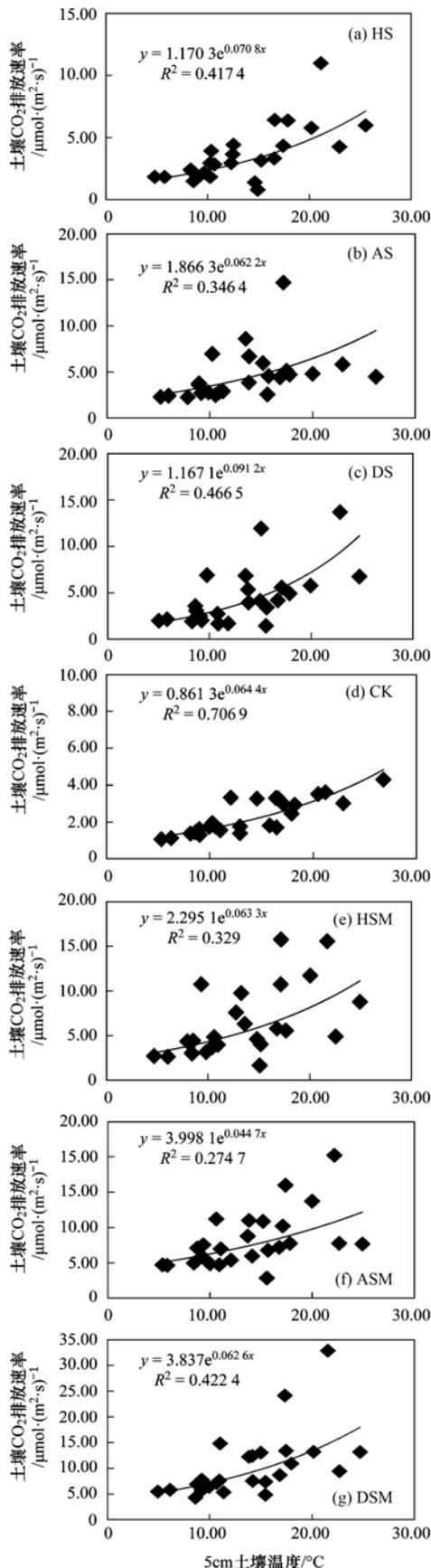


图5 土壤 CO₂ 排放速率与 5cm 土壤温度的关系

Fig. 5 Relationships between soil temperature (5 cm depth) and the CO₂ emission rate of soil

处理的土壤 CO₂ 排放速率和土壤体积含水量呈现

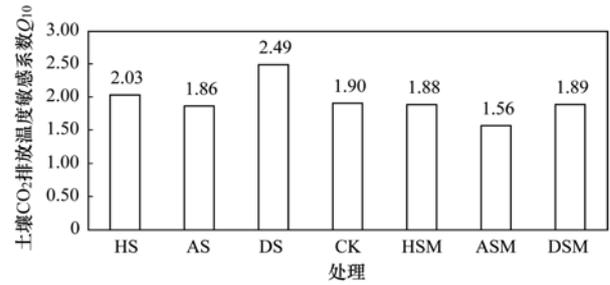


图6 果菇套作系统下土壤 CO₂ 排放的温度敏感系数 Q_{10}

Fig. 6 Temperature sensitivity index of soil CO₂ emissions (Q_{10}) under the citrus/mushroom intercropping system

出显著相关性,且拟合效果最好(Quadratic 回归模型拟合度 R^2 的值为0.3751),说明倍量秸秆还田+栽培大球盖菇处理(DSM)增大了土壤体积含水量对土壤 CO₂ 排放速率的贡献。

进行回归模型拟合发现,土壤体积含水量对土壤 CO₂ 排放速率的影响存在一个响应阈值,土壤体积含水量过高或过低都会抑制土壤 CO₂ 排放。在 DSM 处理中,水分含量较低时,土壤 CO₂ 排放速率随土壤体积含水量的增加而降低,当土壤体积含水量超过 12.67% 时,土壤 CO₂ 排放速率则呈现出随土壤体积含水量增加而增加的趋势。从目前相关研究来看,土壤体积含水量对土壤 CO₂ 排放的影响较为复杂,对此尚未达成一致结论。对于为何本研究中除 DSM 外的其他处理土壤 CO₂ 排放速率与土壤体积含水量相关性不显著,有待进一步研究。

2.3.3 果菇套作系统下水热因子对土壤 CO₂ 排放的协同作用

由表 3 可以看出,5 cm 土壤温度和土壤体积含水量双因子拟合出来的 R^2 值均比与单因子拟合的高,构建水热双因子拟合比单因子拟合能够更好地解释土壤 CO₂ 排放的变化,其解释程度在 40%~80% 之间,且水热因子协同作用与土壤 CO₂ 排放速率变化呈现极显著相关性($P < 0.05$),其中对照 CK 对水热因子的响应程度最高($R^2 = 0.824$),HSM 处理的响应程度最低($R^2 = 0.357$)。

2.4 不同秸秆还田量下的土壤碳排放效率

如图 7 所示,不同秸秆还田量下大球盖菇的产量存在差异,其中 ASM 和 DSM 处理的大球盖菇产量较 HSM 处理明显增加了 23.70 t·hm⁻² 和 26.40 t·hm⁻²,而 ASM 和 DSM 处理间差异不显著。进一步对比不同秸秆还田量下的土壤碳排放效率发现,ASM 处理的土壤碳排放效率最高(1.14),其次是 DSM(0.95),HSM 处理最低(0.70)。

3 讨论

秸秆还田能改善土壤水热状况,提高土壤有机

表 2 土壤 CO₂ 排放速率与土壤体积含水量的关系方程

Table 2 Relationship equations between soil CO₂ emissions rates and soil moisture (5 cm depth)

处理	$R_1 = a + b_1 W + b_2 W^2$				$R_1 = ae^{bW}$			相关性分析	
	<i>a</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>R</i>	<i>P</i>
HS	3.300 3	0.076 5	-0.002 9	0.022 4	3.349 7	-0.006 0	0.005 9	-0.116	0.580
AS	3.350 3	0.096 2	-0.000 3	0.028 6	3.633 5	0.008 7	0.018 2	0.169	0.419
DS	5.560 5	-0.286 9	0.010 5	0.122 2	2.788 1	0.016 4	0.043 5	0.296	0.151
CK	1.182 7	0.065 1	-0.000 8	0.082 7	1.553 7	0.008 8	0.069 2	0.253	0.222
HSM	5.237 7	0.077 8	-0.001 0	0.008 5	4.934 4	0.004 3	0.003 6	0.090	0.668
ASM	10.761 0	-0.625 0	0.020 4	0.238 5	4.979 1	0.018 0	0.103 3	0.346	0.090
DSM	13.961 0	-0.989 6	0.036 4	0.375 1	5.346 0	0.026 2	0.118 4	0.435 *	0.030

表 3 果菇套作系统下土壤 CO₂ 排放与土壤温度、体积含水量的复合模型参数

Table 3 Composite model parameters derived for the combined influence of soil temperature (*T*) and moisture (*W*) on the soil CO₂ emissions under the citrus/mushroom intercropping system

处理	$\ln R_1 = c_1 + c_2 T + c_3 W + c_4 TW$					<i>R</i> ²	<i>P</i>
	<i>c</i> ₁	<i>c</i> ₂	<i>c</i> ₃	<i>c</i> ₄			
HS	-11.500	0.881	3.262	0.763	0.466	0.004	
AS	34.603	-0.488	-10.448	4.248	0.394	0.013	
DS	16.062	-0.283	-6.278	3.758	0.520	0.001	
CK	0.747	0.653	-0.400	0.427	0.824	0.000	
HSM	57.749	-0.216	-11.803	2.431	0.357	0.023	
ASM	10.578	-0.910	-2.427	3.001	0.472	0.003	
DSM	17.112	-0.945	-2.862	2.962	0.645	0.000	

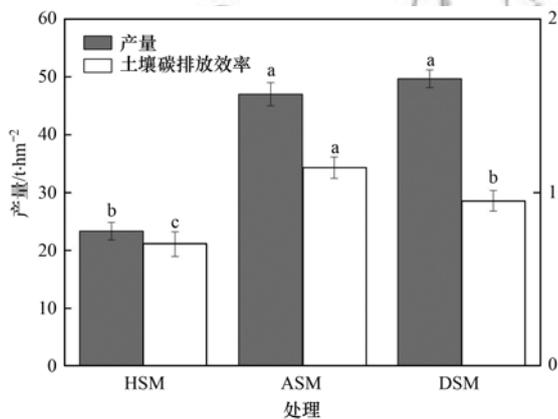


图 7 大球盖菇产量及土壤碳排放效率对比

Fig. 7 Comparison of the yield of stropharia mushrooms and the carbon emissions efficiency of soil

碳含量，促进土壤 CO₂ 排放^[16]。本研究中，秸秆还田处理的土壤 CO₂ 累积排放量均明显高于未有秸秆填埋还田处理(对照 CK)，这一结果与前人的研究结论一致。这是因为秸秆还田后可显著提高土壤微生物量和酶活性，促进土壤原有机碳的分解^[11,17,18]，从而增加了碳排放。此外，短期秸秆还田可增加土壤总有机碳、溶解性有机碳等组分含量^[19]。可溶性有机碳作为土壤微生物利用的主要碳源，其含量的提高会刺激土壤微生物代谢活动，增强土壤微生物呼吸，加剧土壤碳素分解，最终表现出较高的土壤 CO₂ 累积排放量^[20,21]。张莉等^[12]的研究也表明，秸秆还田在短期内显著提高了小麦-玉米系统中土壤呼吸速率和碳累积排放量。本试验中，在秸秆还田基础上，栽培了大球盖菇后土

壤 CO₂ 累积排放量比净秸秆还田(未栽培大球盖菇)高，说明以秸秆为培养基料栽培大球盖菇对土壤 CO₂ 排放的贡献大于单纯的秸秆还田，这可能是因为在柑橘园中套作大球盖菇能加速秸秆辅料的分解，提高土壤活性有机碳含量^[6]，从而导致一定程度上促进土壤 CO₂ 排放。

本研究还发现大球盖菇对土壤 CO₂ 排放速率影响高峰主要集中在菌丝生长期，栽培了大球盖菇(HSM、ASM 和 DSM)的处理均表现出菌丝生长期的土壤 CO₂ 排放量在总累积排放量中的占比最大。这可能是由于在大球盖菇菌丝生长期，菌丝能分泌出各种不同的酶，对培养基料和土壤中的营养元素及有机质进行分解，增加土壤中微生物的活性，导致土壤 CO₂ 累积排放量增加^[22, 23]。此外，栽培了大球盖菇的处理(HSM、ASM 和 DSM)与净秸秆还田(HS、AS 和 DS)处理相比，前者的土壤 CO₂ 排放量均有明显增加，在菌丝生长期和出菇期，DSM 增长率最大，出菇结束后其增长速率有所减缓，这表明倍量秸秆还田条件下，大球盖菇菌丝生长增大了秸秆辅料对土壤呼吸的贡献作用。强学彩等^[24]的研究表明，土壤碳排放与土壤中微生物活性呈正比，在微生物作用下，还田秸秆量越多，秸秆中的碳向环境的释放量越大。

土壤温度、土壤水分和土壤孔隙度等是影响土壤 CO₂ 排放的重要因子。秸秆填埋还田后，会导致土壤结构发生变化，其土壤透气性、热传导性等也随之改变，随着土壤温度的升高，土壤中微生物活

性增强,促进土壤矿化,加速秸秆腐解,从而对土壤呼吸速率及 CO₂ 排放量产生影响^[25-29],本研究中,秸秆填埋还田缓解了外界水热变化对土壤 CO₂ 排放的影响,对照 CK 对水热因子的响应程度最高 ($R^2 = 0.707$). 但秸秆作为碳源,作为培养基填埋还田后为微生物创造了适宜的生存和繁殖条件,同时秸秆的腐解更是为土壤微生物提供了丰富的营养,有利于土壤微生物繁殖和生长,一定程度上增加了土壤 CO₂ 累积排放量^[20,30,31]. 由于大球盖菇的种植,虽然促进了土壤碳排放,但同时也增加了土壤表面的覆盖度,减少外界水热变化对土壤 CO₂ 的影响,这也进一步解释了 5 cm 土壤温度对栽培大球盖菇处理的土壤 CO₂ 排放速率解释程度低于相应的未栽培大球盖菇处理.

在全球气候变暖的态势下,秸秆资源的二次利用不仅要考虑经济效益,还有兼顾由此带来的环境影响. 胡发龙等提出^[32],作物生长期释放每千克碳所生产的作物产量称为土壤碳排放效率,其受作物产量和土壤碳排放的综合影响,能较好地反映秸秆还田所产生的经济和环境综合效益. 胡发龙等^[32]的研究还发现,在干旱地区免耕秸秆还田能降低土壤碳排放量,从而提高土壤碳排放效率. 而涂纯等认为^[15],秸秆覆盖还田明显降低了作物产量,导致土壤碳排放效率降低. 本研究中,柑橘/大球盖菇套作模式下,大球盖菇产量和土壤碳排放量均受秸秆填埋还田量影响,随秸秆还田量的增加而增加,但不同秸秆还田量下土壤碳排放效率存在差异,其中 ASM 的土壤碳排放效率最高 (CEE = 1.14).

4 结论

(1) 与柑橘园中净秸秆填埋还田相比,基于秸秆填埋还田的柑橘/大球盖菇套作模式会进一步增加土壤 CO₂ 排放量,给环境造成一定的负效益. 该套作模式下土壤 CO₂ 排放量随秸秆还田量的增加而增加,其中倍量秸秆还田 (DSM) 处理的增排效果最明显,且土壤 CO₂ 排放主要集中在大球盖菇菌丝生长期. 5 cm 土壤温度单因子与土壤 CO₂ 排放速率变化表现出极显著相关性,可以单独解释土壤 CO₂ 排放速率变化的 27% ~ 71%; 土壤体积含水量单因子对土壤 CO₂ 排放速率的影响比较复杂,仅 DSM 处理中体现出了极显著相关性,其他处理均未体现出显著相关性. 而土壤温度和土壤体积含水量双因子拟合可以解释土壤 CO₂ 排放速率变化的 36% ~ 82%.

(2) 基于秸秆填埋还田的柑橘/大球盖菇套作模式充分利用了柑橘林下闲置土地资源,提高了柑橘园的综合经济效益. 本试验中,倍量秸秆还田

(DSM) 处理下的大球盖菇产量最高 (49.70 t·hm⁻²),但其投入产出比最大,经济效益最差.

(3) 基于秸秆填埋还田的柑橘/大球盖菇套作模式下,全量秸秆还田 (ASM) 处理的土壤碳排放效率最高 (CEE = 1.14),建议实际生产过程中的适宜秸秆填埋量可以参考本试验设计的全量秸秆还田.

参考文献:

- [1] 重庆市统计局. 重庆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [2] 冉瑞莲. 浅析重庆柑橘种植产业优势与果品提升的综合措施[J]. 农家参谋, 2017, (16): 10.
- [3] 汪虹, 陈辉, 张津京, 等. 大球盖菇生物活性成分及药理作用研究进展[J]. 食用菌学报, 2018, 25(4): 115-120.
Wang H, Chen H, Zhang J J, et al. Research progresses on bioactive components in *Stropharia rugosoannulata* and their pharmacological effects[J]. Acta Edulis Fungi, 2018, 25(4): 115-120.
- [4] 廖家艳, 雷干农. 梨园套种大球盖菇试验研究[J]. 现代农业科技, 2010, (24): 108-109.
Liao J Y, Lei G N. The experimental research on transplanting *Stropharia rugoso-annulata* in pear orchard [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2010, (24): 108-109.
- [5] 颜淑婉, 苏诗垂. 大球盖菇立体高效栽培模式[J]. 食用菌, 1997, (6): 34-35.
- [6] 张洋, 刘月娇, 倪九派, 等. 柑橘/大球盖菇间作对三峡库区紫色土活性有机碳库的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(5): 53-65.
Zhang Y, Liu Y J, Ni J P, et al. Effect of *Citrus tree/Stropharia mushrooms* intercropping on 'purple soil' labile organic carbon in the Three Gorges Reservoir region [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(5): 53-65.
- [7] 农金花. 果菇间作系统下紫色土碳氮组分变化特征及其相互关系研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
Nong J H. Study on the variation characteristics and relationships of carbon and nitrogen compositions in purple soil under the intercropping system [D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [8] 马超, 周静, 刘满强, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 915-921.
Ma C, Zhou J, Liu M Q, et al. Effects of incorporation of pre-treated straws into field on soil nutrients and labile organic carbon in ShaJiang black soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 915-921.
- [9] 王丙文, 迟淑筠, 田慎重, 等. 不同玉米秸秆还田方式对冬小麦田土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1374-1380.
Wang B W, Chi S J, Tian S Z, et al. Effects of different maize straw-returning modes on the soil respiration in a winter wheat field [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1374-1380.
- [10] 范围, 吴景贵, 李建明, 等. 秸秆均匀还田对东北地区黑钙土土壤理化性质及玉米产量的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 835-846.
Wu W, Wu J G, Li J M, et al. Effects of straw return on soil physico-chemical properties of chernozem in Northeast China and Maize Yield Therein [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(4): 835-846.
- [11] 矫丽娜, 李志洪, 殷程程, 等. 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 665-672.

- Jiao L N, Li Z H, Yin C C, *et al.* Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(3): 665-672.
- [12] 张莉, 王婧, 逢焕成, 等. 短期秸秆颗粒还田对小麦-玉米系统作物产量与土壤呼吸的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(2): 565-572.
- Zhang L, Wang J, Pang H C, *et al.* Effects of short-term granulated straw incorporation on grain yield and soil respiration in a winter wheat-summer maize cropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(2): 565-572.
- [13] 王海飞, 贾兴永, 高兵, 等. 不同土地利用方式土壤温室气体排放对碳氮添加的响应[J]. *土壤学报*, 2013, **50**(6): 1172-1182.
- Wang H F, Jia X Y, Gao B, *et al.* Response of greenhouse gas emission to application of carbon and nitrogen in soils different in land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, **50**(6): 1172-1182.
- [14] 李昕竺, 曾先富, 沈鹰, 等. 秸秆栽培食用菌的现状与发展趋势[J]. *食药菌*, 2015, **23**(4): 222-224.
- [15] 涂纯, 王俊, 官情, 等. 秸秆覆盖对旱作冬小麦农田土壤呼吸、作物产量及经济-环境效益的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, **21**(8): 931-937.
- Tu C, Wang J, Guan Q, *et al.* Effect of straw mulching on soil respiration, crop yield, economy-environment benefit in rainfed winter wheat fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(8): 931-937.
- [16] 陈述悦, 李俊, 陆佩玲, 等. 华北平原麦田土壤呼吸特征[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(9): 1552-1560.
- Chen S Y, Li J, Lu P L, *et al.* Soil respiration characteristics in winter wheat field in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(9): 1552-1560.
- [17] Tarafdar J C, Meena S C, Kathju S. Influence of straw size on activity and biomass of soil microorganisms during decomposition[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, **37**(3): 157-160.
- [18] Santos V B, Araújo A S F, Leite L F C, *et al.* Soil microbial biomass and organic matter fractions during transition from conventional to organic farming systems[J]. *Geoderma*, 2012, **170**: 227-231.
- [19] 邵洪峰, 梅洪飞, 潘忠潮, 等. 玉米秸秆还田对土壤有机碳、微生物功能多样性及甘蓝产量的影响[J]. *浙江农业学报*, 2016, **28**(5): 838-842.
- Shao Y F, Mei H F, Pan Z C, *et al.* Effects of corn straw returning on soil organic carbon content, microbial functional diversity and cabbage yield[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2016, **28**(5): 838-842.
- [20] 王志明, 朱培立, 黄东迈, 等. 秸秆碳的田间原位分解和微生物量碳的周转特征[J]. *土壤学报*, 2003, **40**(3): 446-453.
- Wang Z M, Zhu P L, Huang D M, *et al.* Straw carbon decomposition *in situ* in field and characteristics of soil biomass carbon turnover[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, **40**(3): 446-453.
- [21] Chaker R, Gargouri K, Ben Mbarek H, *et al.* Effect of biochemical fraction of exogenous organic matter on CO₂ emission from arid soil[J]. *Greenhouse Gases-Science and Technology*, 2018, **8**(4): 721-733.
- [22] 陆娜, 宋吉玲, 闫静. 竹-菇套种模式对毛竹林土壤的影响[J]. *浙江农业科学*, 2017, **58**(10): 1717, 1720.
- [23] Martínez-García L B, Korhals G, Brussaard L, *et al.* Organic management and cover crop species steer soil microbial community structure and functionality along with soil organic matter properties[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, **263**: 7-17.
- [24] 强学彩, 袁红莉, 高旺盛, 等. 秸秆还田量对土壤 CO₂ 释放和土壤微生物量的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(3): 469-472.
- Qiang X C, Yuan H L, Gao W S, *et al.* Effect of crop-residue incorporation on soil CO₂ emission and soil microbial biomass[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(3): 469-472.
- [25] 王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 等. 模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1943-1951.
- Wang Z H, Chen S T, Sun L, *et al.* Effects of simulated precipitation reduction on soil respiration in a soybean-winter wheat rotation cropland[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1943-1951.
- [26] 刘玉槐, 严员英, 张艳杰, 等. 不同温度条件下亚热带森林土壤碳矿化对氮磷添加的响应[J]. *生态学报*, 2017, **37**(23): 7994-8004.
- Liu Y H, Yan Y Y, Zhang Y J, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition under different temperatures on the soil carbon mineralization in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in the subtropics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(23): 7994-8004.
- [27] 李晓莎, 武宁, 刘玲, 等. 不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(6): 1765-1771.
- Li X S, Wu N, Liu L, *et al.* Effects of different straw recycling and tillage methods on soil respiration and microbial activity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(6): 1765-1771.
- [28] Rittl T F, Butterbach-Bahl K, Basile C M, *et al.* Greenhouse gas emissions from soil amended with agricultural residue biochars: effects of feedstock type, production temperature and soil moisture[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2018, **117**: 1-9.
- [29] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(19): 155-165.
- Zhao Y L, Xue Z W, Guo H B, *et al.* Effects of tillage and crop residue management on soil respiration and its mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(19): 155-165.
- [30] 黄容, 高明, 万毅林, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4446-4456.
- Huang R, Gao M, Wan Y L, *et al.* Effects of straw in combination with reducing fertilization rate on soil nutrients and enzyme activity in the paddy-vegetable rotation soils[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4446-4456.
- [31] 田冬, 高明, 黄容, 等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2988-2999.
- Tian D, Gao M, Huang R, *et al.* Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and biochar in rape-maize rotation systems[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2988-2999.
- [32] 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.

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 PNA 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)