

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测 黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)

基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率 李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)

上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析 杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)

广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单 孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)

重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布 李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)

济南市夏、冬季 PM_{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)

聊城冬季一重污染过程 PM_{2.5} 污染特征及成因分析 张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)

夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量 王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)

晋城市冬季环境中挥发性有机物的污染特征及来源解析 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)

北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)

合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析 孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏楨, 王凤 (4060)

填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质 李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)

北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征 李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)

基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析 高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王朕, 滕彦国, 王金生 (4086)

透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估 官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)

黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析 赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)

黄河干流宁夏段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性 席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)

伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比 李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)

马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素 王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)

柳江盆地浅层地下水硝态氮水特征和成因分析 徐进, 何江涛, 彭颖, 曾颖 (4142)

地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性 张雯, 尹琳, 周念清 (4150)

三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征 张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)

蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)

铅改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响 何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)

洱河流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响 李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)

我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应 聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)

东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响 储瑜, 何肖微, 曾中, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)

处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程 汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)

华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征 胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)

制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征 花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)

人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较 赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)

城市污水管网中不同生化作用的基质流向 姚翔译, 石炬, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)

微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性 王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)

UV 强化草酸络合 Fe³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺 韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)

焦化废水 A/O² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析 吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)

长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响 俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)

NaCl 盐度对 A²/O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响 张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)

温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响 陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)

游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验 孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)

HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响 安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)

长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复 李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)

广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析 宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)

紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应 罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)

秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响 李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)

低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)

臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响 周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殿波 (4359)

再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响 韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)

黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险 李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)

村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析 靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)

《环境科学》征订启事 (3986) 《环境科学》征稿简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响

李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳*

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 在油菜/玉米轮作下, 研究不同秸秆与生物炭还田方式对农田生态系统碳平衡和收益的影响, 阐明秸秆和生物炭还田的固碳作用. 在重庆国家紫色土肥力与肥料效益长期监测基地, 通过油菜和玉米两季作物田间定位试验, 设置了常规施肥 (CK)、秸秆还田 (CS)、生物炭还田 (BC)、秸秆 + 速腐剂还田 (CSD)、秸秆 + 生物炭 1:1 还田 (CSBC) 5 个处理, 测定了秸秆与生物炭还田下土壤碳累积排放量, 并结合实地调研数据, 从土壤呼吸碳排放、土壤碳库及作物碳库角度兼顾考虑农业成本投入, 分析了秸秆与生物炭还田下农田生态系统碳排放、碳固定、碳汇效应和经济环境效益. 结果表明: ①两季作物的土壤碳累积排放量均高于对照 (CK), 其中秸秆直接还田 (CS) 处理和秸秆 + 速腐剂还田 (CSD) 处理显著 ($P < 0.05$); ②与 CK 对比, 秸秆及生物炭还田均能提高两季作物产量与生态系统净初级生产力 (NPP), 增产 1.49% ~ 3.92%, NPP 提高了 4.44% ~ 17.90%, 且秸秆 + 速腐剂处理 (CSD) 的两季作物产量与 NPP 均为最大; ③各处理 (除 CK 外) 均为系统净固碳量正值, 表现为“碳汇”; 在油菜季和玉米季两季中, 系统净固碳量最高的分别为秸秆 + 速腐剂还田 (CSD, $9.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和生物炭还田 (BC, $10.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 处理, 而碳排放量最低的均是生物炭 (BC) 处理, 比 CK 减少 62.69% ~ 81.86%. ④油菜季的秸秆直接还田 (CS) 处理的两季作物产投比最高, 而两季作物的 BC 处理均会降低产投比, 但其碳排放交易量最高 ($466.95 \sim 561.22 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$). ⑤两季作物的 BC 处理均会提高碳生产力 (C_p), 而 BC 处理的经济效益 (C_j) 与生态效益 (C_e) 均显著低于其他处理. 秸秆直接还田增加了系统的经济效益和生态效益, 而生物炭还田降低了系统的经济效益和生态效益.

关键词: 秸秆; 生物炭; 紫色土; 碳平衡; 碳效益

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4338-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201712051

Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System

LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, XU Guo-xin, LI Jia-cheng, GAO Ming, WANG Zi-fang*

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

Abstract: The effects of different straw and biochar applications on the carbon balance of a farmland ecosystem were studied under a rape-maize rotation planting system. The study explored impact of straw and biochar addition on soil carbon sequestration. A field experiment was carried out at the National Monitor Station of Soil Fertility and Fertilizer Efficiency of Purple Soils (Chongqing, China). Five treatments, i. e., control (CK, no organic material), straw only (CS), straw and microorganism (CSD), half straw and half biochar (CSBC), and biochar only (BC), were applied. *In-situ* cumulative emissions of soil total carbon were subsequently monitored. Based on field experiment and survey data, carbon emissions, carbon sequestration, and economic and environmental benefits were analyzed for soil respiration, soil carbon pool, crop carbon pool, as well as the cost of agricultural inputs after straw and biochar application. The main results were: ① Accumulative emissions of soil carbon during two planting seasons were all higher with treatment than in CK, and the differences between CS, CSD, and CK were significant ($P < 0.05$). ② Compared with CK, both straw and biochar treatments increased crop yield (by 1.49% - 3.92%) and crop net primary productivity (NPP) increased by 4.44% - 17.90%. Largest yields and NPP during both seasons were achieved with CSD. ③ Net carbon sequestration was positive during both seasons in all treatments without CK, indicating a carbon sink effect. The highest net carbon sequestration was obtained with CSD ($9.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) and BC ($10.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) treatments. The lowest carbon emissions were obtained with the BC treatment, with emissions 62.69% - 81.86% lower than CK. ④ The highest production to cost ratio was obtained with CS treatments during the rape planting season. Application of only biochar reduced the production to cost ratio but increased the carbon trading income ($466.95 \sim 561.22 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$). ⑤ BC treatment increased carbon productivity (C_p) in both seasons, while the economic (C_j) and ecological benefits (C_e) of BC treatment were significantly lower than with other treatments. The addition of straw increases economic and ecological benefits; however, addition of biochar reduces such benefits.

Key words: straw; biochar; purple soil; carbon balance; carbon benefit

收稿日期: 2017-12-07; 修订日期: 2018-03-10

基金项目: 重庆市农业综合开发办项目 (CQNZ2016DY12); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0800101)

作者简介: 李娇 (1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤质量与环境, E-mail: 840658493@qq.com

* 通信作者, E-mail: zifangw@126.com

农田生态系统作为陆地生态系统的—个重要组成部分,其碳库—直是全球碳库中最活跃的部分,对维持全球碳平衡具有很重要的作用^[1,2]。农田生态系统是受人类强烈调节与控制的复合系统,其碳循环受各类农作措施的影响极大,耕作施肥和秸秆还田等农业活动可使农田土壤有机碳的数量和质量发生变化^[3],农作物秸秆是一种可再生能源,还田处理不仅可以促进农业节水、节约成本、增产、增效;同时还能减少由于燃烧或移除秸秆造成的碳损失,有效地增加土壤碳储量,从而有利于减缓大气CO₂浓度的上升趋势^[4],具有明显的经济环保效益。秸秆不同的还田方式对提高农作物秸秆利用和增加土壤碳固定具有重要意义^[5]。有研究证实,秸秆促腐还田可以加速秸秆腐解进程、提高土壤微生物活性、改善土壤养分状况、增加土壤活性有机碳和有利于作物生长发育并提高产量^[6,7]。秸秆生物炭是有机质源变性的一种重要形式,其回田利用对土壤环境和作物生长将产生重要影响。由于农田生态系统碳循环涉及到其多个子系统(如作物、土壤、大气等)的物质循环和迁移转化,因而,对农田生态系统中不同形式秸秆还田的碳增汇/减排潜力的评估,有利于揭示碳循环的作用机理和调控机制,为农田生态系统的经济环境效益评价做出依据。目前,国内外对生态系统碳汇效应的研究以稻田生态系统为主,主要集中在不同施肥措施和保护性耕作下土壤固碳和土壤温室气体排放的差异^[8-10],且在各种农作措施中,前人研究主要利用秸秆直接还田或秸秆还田与不同耕作方式相结合的方法来探讨对农田生态系统的影响^[11,12],而对秸秆与生物炭还田的不同利用方式、还田对紫色土旱地农田生态系统的碳汇效应及经济环境效益的影响研究还鲜有报道。因此,本文以油菜/玉米轮作体系的农田生态系统为研究对象,利用生态系统净初级生产力,土壤碳库、土壤呼吸碳排放以及生态系统的物质投入和实地调研等资料,定量评估以秸秆为原料的秸秆与生物炭还田措施下农田生态系统的固碳减排潜力,从物质消耗和系统碳足迹角度,比较了不同形式的秸秆还田下农田生态系统的农业投入碳排放、系统净初级生产力和系统净碳汇的差异,同时对比较分析了不同形式的秸秆还田处理的投入-收益的经济生态效益。揭示秸秆与生物炭还田下农田生态系统中秸秆资源化利用和碳减排的经济环境可行性,以此优化秸秆科学利用措施及途径,以期实现秸秆高值化利用与构建低碳减排生态圈,并为实现经济与环

境效益共赢提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点及试验材料

试验地点位于重庆市北碚区“国家紫色土肥力与肥料效益长期监测基地”,海拔266.3 m,年平均气温18.3℃。7月最高和1月最低气温平均为28.7℃和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。供试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·kg⁻¹,碱解氮135.65 mg·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科技有限责任公司提供,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625.8 g·kg⁻¹,C/N为45.52,pH为8.9。水稻秸秆的有机碳含量为412.5 g·kg⁻¹,C/N为47.74,油菜秸秆的有机碳含量为392.1 g·kg⁻¹,C/N为41.56。将秸秆粉碎机粉碎成2 cm左右,生物炭过10 mm筛,备用。

1.2 试验设计

本试验以“等碳量”原则还入秸秆或生物炭,共设置5个处理,分别为①无物料还田,CK;②8 000 kg·hm⁻²秸秆还田,CS;③8 000 kg·hm⁻²秸秆+16 kg·hm⁻²速腐剂还田,CSD;④5 274 kg·hm⁻²生物质炭还田,BC;⑤4 000 kg·hm⁻²秸秆+2 637 kg·hm⁻²生物质炭,CSBC;各处理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,于2015年10月11日开始,2016年8月1日结束,各作物的氮、磷、钾、硼养分量根据《中国主要作物施肥指南》来确定,各季作物栽培方式和田间管理措施按照当地习惯进行。其中油菜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、磷、钾肥和硼肥用量分别为150、90、90和15 kg·hm⁻²。氮肥分基肥和基肥两次施用(基肥占70%),磷、钾、硼肥做基肥一次性施用。基肥

和藁肥分别于 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、磷、钾肥分别为 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(P₂O₅ 12%)、硫酸钾(K₂O 51%)和硼砂(含 B 12%). 所有处理田间管理技术与当地农民习惯一致, 其中油菜季还水稻秸秆, 玉米季还油菜秸秆.

1.3 试验方法

试验期间每 7 d 测一次 CO₂ 排放, 并于油菜(玉米)收获后采集 0~20 cm 土样, 自然风干后过 0.25 mm 筛测定土壤有机碳含量(TOC). 2016 年 5 月油菜收割后、2016 年 8 月玉米收获后分别采集 0~20 cm 层原状土, 每个微区采集 5 点, 将 5 点土样混合成一个样品, 装入袋中运回实验室.

作物收获时, 微区单打单收, 记录作物籽粒的单穗重、千粒重、总产量, 整个微区作物地上秸秆量、地上凋落物量、挖取地下土壤中作物根系, 最后将地上和地下鲜样于烘箱中 105℃ 杀青 1 h, 再 80℃ 烘干至恒重, 用重铬酸钾外加热容量法测定各部分碳含量. 详细记录每种作物从播种到收获时期内的施肥、打药、除草等人工管理活动, 农药投入量、化肥施用量、灌溉时期及耗电量、机耕柴油消耗量等农资物品投入数据.

1.3.1 土壤碳排放量

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 09:00~11:00 用土壤呼吸自动监测系统(ACE-002/OPZ/SC)测定土壤呼吸强度, 前期研究表明, 此时间段的排放通量接近日平均排放水平^[13, 14], 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 20 cm, 高 8 cm)插入土壤 3 cm 左右, 将植物种植在圈内, 测定呼吸时每个样点持续时间为 10 min, 整个作物生长季, 底座位置固定, 仅在作物收获时挖出, 待下茬作物播种前重新安置. 每次在采集气体样品时, 同步监测采样箱内温度、大气温度、5 cm 地温, 采样按区组进行, 以减少土壤呼吸的日变化影响. 种植作物的处理上测定的当天土壤呼吸速率即为 CO₂ 排放速率 R_{si} .

土壤碳累积排放量估算:

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

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

式中, C_{CO_2} 为土壤碳累积排放量(t·hm⁻²), D_i 为测定当天 CO₂ 排放量(g·m⁻²), R_{si} 为测定当天 CO₂ 排放速率[$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], 44 为 CO₂ 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 CO₂ 排放速率测定, $N_{i+1} - N_i$ 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累积 CO₂ 排放量.

1.3.2 农田生态系统碳平衡估算

本研究应用全生命周期评价系统净固碳效应, 结合全碳分析法与土壤-作物系统生物量排放法对系统的净碳收支平衡进行评估. 农田生态系统净碳源/汇效应用取决于系统对吸收的大气二氧化碳减去土壤呼吸碳排放、农业生产管理中的农资物质投入及人工管理投入所消耗能源折算成碳排放(能源消耗换算成 CO₂-C)的平衡来估算.

(1) 农田土壤碳储量增量

$$\Delta\text{SOC} = (\text{SOC}_i - \text{SOC}_0) \times \text{BD} \times H \times 10^{-1} \quad (3)$$

式中, ΔSOC 为土壤碳增量(t·hm⁻²), SOC_i 为第 i 次土壤有机碳含量(g·kg⁻¹), SOC_0 试验开始前基础土样土壤有机碳含量(g·kg⁻¹), BD 为土壤容重(g·cm⁻³), H 为土层深度(取 20 cm).

(2) 系统碳吸收(C_a)

$$C_a = C_{\text{NPP}} = C_{\text{crop}} + C_{\text{litter}} \quad (4)$$

式中, C_{NPP} 为系统内作物的净初级生产力固定碳, C_{crop} 为作物固碳(包括作物地上部的籽粒、秸秆、下部的根系所包含的碳), C_{litter} 田间凋落物残留碳.

(3) 系统碳排放(C_e)

$$\begin{aligned} C_e &= C_r + C_{\text{eh}} = C_r + C_{\text{ac}} + C_m + C_1 \\ &= C_r + C_{\text{pesticide}} + C_{\text{fertilizer}} + C_m + C_1 \\ &= C_r + C_{\text{pesticide}} + C_{\text{fertilizer}} + C_{\text{irrigation}} + \\ &\quad C_{\text{plowing}} + C_{\text{harvesting}} + C_1 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, C_r 为系统土壤呼吸碳排放, C_{eh} 为生产活动所产生的碳排放, C_{ac} 为农资涉及的能源碳排放(包括农药生产碳排放 $C_{\text{pesticide}}$ 和肥料生产碳排放 $C_{\text{fertilizer}}$), C_m 为系统人工管理投入的碳排放(包括灌溉活动碳排放 $C_{\text{irrigation}}$ 、机耕消耗能源碳排放 C_{plowing} 和收割机碳排放 $C_{\text{harvesting}}$), C_1 为农事操作人工投入碳排放.

(4) 系统净碳汇(C_s)

系统净碳汇(C_s)通过土壤固碳增量、吸收与排放碳平衡计算:

$$C_s = C_i + C_{NPP} + \Delta SOC + C_g - C_r - C_l - C_e \quad (6)$$

式中, C_i 为物料碳还田量, C_{NPP} 为净初级生产力, ΔSOC 为土壤固碳量, C_g 为可燃气减排碳量, C_r 为土壤呼吸碳排放量, C_l 为秸秆焚烧碳释放量, C_e 为采用碳足迹法、根据从作物播种到收获期农田生产活动中农业投入碳排放量, 主要包括种子、农药、化肥、农膜、灌溉和机耕及收获农机使用过程中产生的碳排放, 其中, 农业机械以耗

柴油量计算, 灌溉用电量计算; 各分项具体碳排放 = 物质投入量 × 碳排放系数, 不同处理物质投入和产出的数据为田间管理实际记录和已有研究, 同时部分数据来自四川省绵阳市 2015 年 10 月实地调研, 参考各项农业投入物质碳排放参数, 估测不同秸秆还田方式下农田生态系统中农业投入造成的碳排放量. 农产品收获后的经济效益均以 2016 年的市场价格进行估算. 各项碳排放系数和市场价格见表 1.

表 1 各种农业资料的碳排放系数

Table 1 Index of carbon emissions for different materials used in agricultural production

项目	碳排放参数(以 CE 计)	单价/元	文献
氮肥 N	0.857 kg·kg ⁻¹	1.85	[15]
磷肥 P ₂ O ₅	0.165 kg·kg ⁻¹	3.62	[15]
钾肥 K ₂ O	0.120 kg·kg ⁻¹	4.80	[15]
硼肥(取 N、P、K 肥平均值)	0.381 kg·kg ⁻¹	10	[15]
农药	4.932 kg·kg ⁻¹	60	[15]
柴油	0.849 kg·kg ⁻¹	6.21	[15]
电能	0.678 kg·(kW·h) ⁻¹	0.87	[16]
速腐剂	5.15 kg·kg ⁻¹	20	[17]
种子	1.05 kg·kg ⁻¹	60	[18]
人工	0.245 kg·(人·d) ⁻¹	60	[19]

1.3.3 农田生态系统碳效率评价

(1) 碳生产力(C_p)

碳生产力是农业投入碳排放量 C_i 与经济产量 Y 比值, 是直接和作物产量有关, 其值越小表示单位产量粮食引起的农业投入碳释放量越低, 碳效益越高, 单位 “kg·kg⁻¹”.

$$C_p = Y/C_i \quad (7)$$

(2) 碳的经济效益(C_j)

碳的经济效益是作物经济产值与农业投入碳排放量的比值, 是测量作物生产经济效益的指标, 其值越高表明作物生产中投入单位碳获得的经济价值越高. 本研究中用经济产值为经济产量与 2016 年市场收购单价的乘积.

$$C_j = (Y \times P)/C_i \quad (8)$$

(3) 碳的生态效益(C_e)

作物生产中碳的生态效率是指作物系统净初级生产力 NPP 与农业投入碳排放量的比值, 是评估农业生产可持续性的指标之一, 单位是 “kg·kg⁻¹”. 其值越大表明碳汇能力越强.

$$C_e = C_{NPP}/C_i \quad (9)$$

1.3.4 数据处理

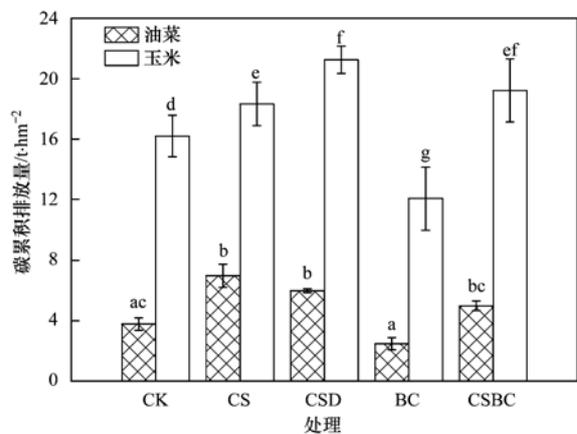
采用 SPSS 20.0、Origin 8.5 和 Excel 2010 软件进行数据处理、绘图制表. 所有的结果均用 3 次测

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 秸秆及生物炭还田对土壤碳累积排放量的影响

如图 1 所示, 油菜季和玉米季各处理的土壤碳累积 CO_2 排放量存在明显差异, 油菜季的土壤碳累积排放量 (2.48 ~ 3.98 t·hm⁻²) 明显低于玉米季 (12.07 ~ 21.25 t·hm⁻²) ($P < 0.05$). 除 BC 处理



不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同处理下土壤碳累积排放量

Fig. 1 Soil cumulative carbon emissions under different treatments

外,其他处理的土壤碳累积排放量高于对照 CK,油菜季 CS 处理显著增加了 $3.19 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,玉米季 CSD 处理显著增加了 $15.05 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$.

2.2 秸秆及生物炭还田对作物产量和生态系统净初级生产力

与常规施肥 CK 相比,秸秆及生物质炭还田能提高油菜和玉米产量(图 2),其中 CSD 处理的两季作物的产量均最大,较对照 CK 分别提高了 7.0% 和 3.9%. 如图 3 所示,油菜和玉米作物各部分的固碳量不同,油菜主要集中于角壳和茎秆,玉米主要集中于玉米粒和茎秆. 生态系统净初级生产力(NPP)是作物生长到成熟过程中籽粒、秸秆、根系等固定的有机碳量,秸秆及生物炭还田不同程度增加了生态系统净初级生产力. 油菜季, CSD、CSBC、CS 处理的 NPP 分别较 CK 提高了 12.74%、9.30%、6.08%,但各处理间的 NPP 差异不显著($P < 0.05$). 玉米季,各处理的 NPP 显著高于油菜季,秸秆及生物炭还田显著提高了玉米穗轴碳量,CK、CS、BC 的根系碳量显著低于 CSD、CSBC ($P < 0.05$);各处理的 NPP 较 CK 提高了 11.11% ~ 17.90%,其中 CSD 处理的玉米季 NPP 最高($12.40 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),其次为 CSBC($11.93 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),总体而言, CSD 处理提高系统净初级净生产力效果最好.

2.3 秸秆及生物炭还田下农田生态系统碳平衡分析

整理秸秆与生物炭还田下农田系统各碳收支项,分析不同处理下农田生态系统碳平衡(表 2).

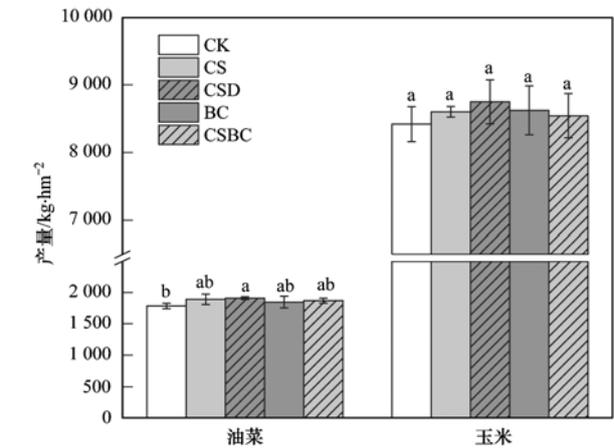


图 2 不同处理对油菜和玉米产量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on rapeseed and maize yield

与 CK 相比,其他处理增加了不同形式的碳投入量($3.14 \sim 3.30 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),减少了秸秆焚烧造成的大量碳损失($5.49 \sim 6.12 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),同时增加土壤固碳量($0.01 \sim 0.18 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$). 土壤呼吸碳损失是各处理碳排放主要源,玉米季土壤呼吸碳释放量($3.44 \sim 6.31 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著高于油菜季($0.53 \sim 1.31 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$).

CS、CSD、BC、CSBC 处理净固碳量均为正值,表现为“碳汇”,而 CK 为负值,表现为“碳源”. 油菜季, CSD 系统净固碳量($9.05 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)最高,与 CS 相比, CSD、BC、CSBC 的系统净碳固定量分别高出 6.56%、5.36%、4.37%;玉米季, BC 的系统净固碳量($10.75 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)最高,其次为 CSBC(9.01

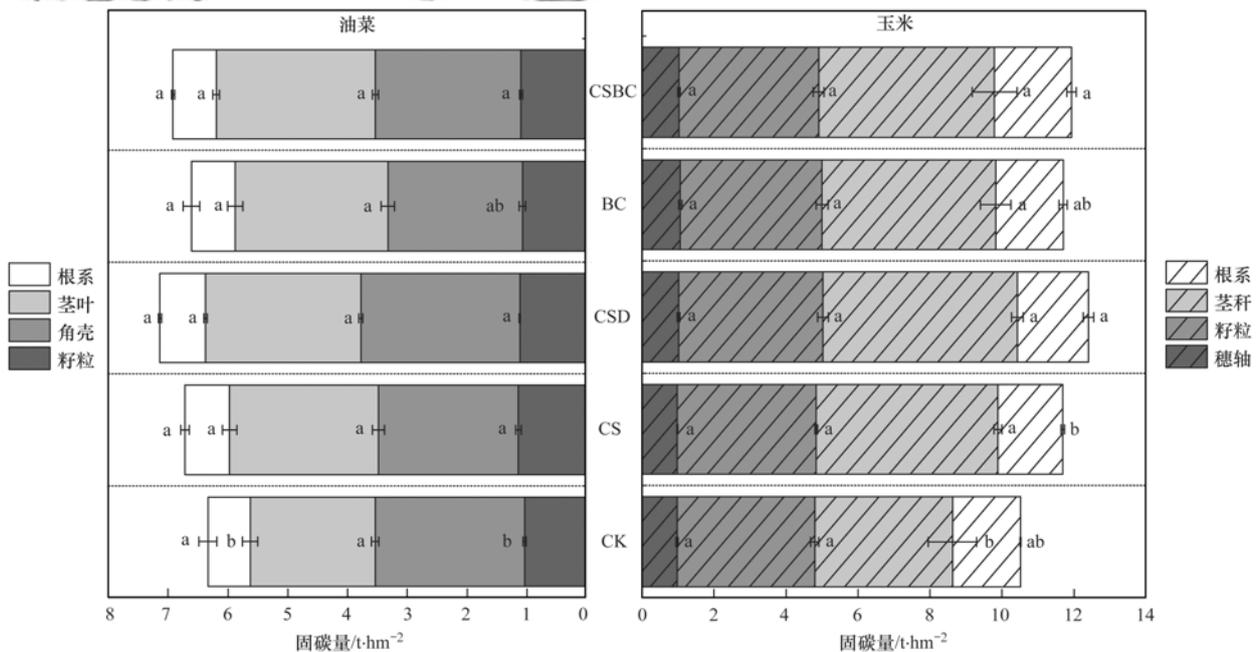


图 3 不同处理对油菜和玉米不同部位的固碳量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on carbon sequestration in different parts of rape and maize

表 2 不同处理系统碳平衡分析/ $t \cdot hm^{-2}$ Table 2 Carbon balance analysis under different treatments/ $t \cdot hm^{-2}$

系统碳汇/源各项	油菜					玉米				
	CK	CS	CSD	BC	CSBC	CK	CS	CSD	BC	CSBC
物料碳还田量 C_i	0.00	3.30	3.30	3.30	3.30	0.00	3.14	3.14	3.14	3.14
净初级生产力 C_{NPP}	6.33	6.71	7.14	6.61	6.92	10.52	11.69	12.40	11.70	11.93
土壤固碳量 ΔSOC	0.05	0.09	0.11	0.18	0.17	0.03	0.01	0.01	0.08	0.06
燃气减排量 C_g	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02
焚烧秸秆 C 量 C_l	5.49	0.00	0.00	0.00	0.00	6.12	0.00	0.00	0.00	0.00
土壤呼吸 C_r	0.71	1.31	1.12	0.53	1.06	4.74	5.59	6.31	3.44	5.54
农业投入排放碳 C_e	0.31	0.31	0.38	0.65	0.48	0.42	0.42	0.50	0.77	0.60
净固碳量	-0.12	8.49	9.05	8.95	8.86	-0.74	8.83	8.75	10.75	9.01

$t \cdot hm^{-2}$), 而 CSD 速腐剂添加增强了土壤呼吸作用, 因此 CSD 的系统净碳固定量较其他处理低(除 CK 外); 可见各不同形式秸秆还田处理能显著提高系统的固碳能力。

各处理下农田生态系统的固碳减排能力不同(图 4), 固碳能力强的处理, 其系统碳汇量就高。与 CK 相比, 秸秆及生物质炭处理的碳排放量显著降低(P

<0.05), 而碳固定量显著增加了 $3.73 \sim 4.61 t \cdot hm^{-2}$, 但各处理(除 CK 外)间的碳固定量无显著差异。碳排量最低的 BC, 依次比 CK、CS、CSD、CSBC 少排放 $62.69\% \sim 81.86\%$ 、 $27.03\% \sim 29.98\%$ 、 $21.49\% \sim 29.98\%$ 、 $23.53\% \sim 31.47\%$ 。可见生物炭还田碳汇能力较强, 增加农田生态系统碳汇量首先要减少碳排放量, 其次才是增加碳固定量。

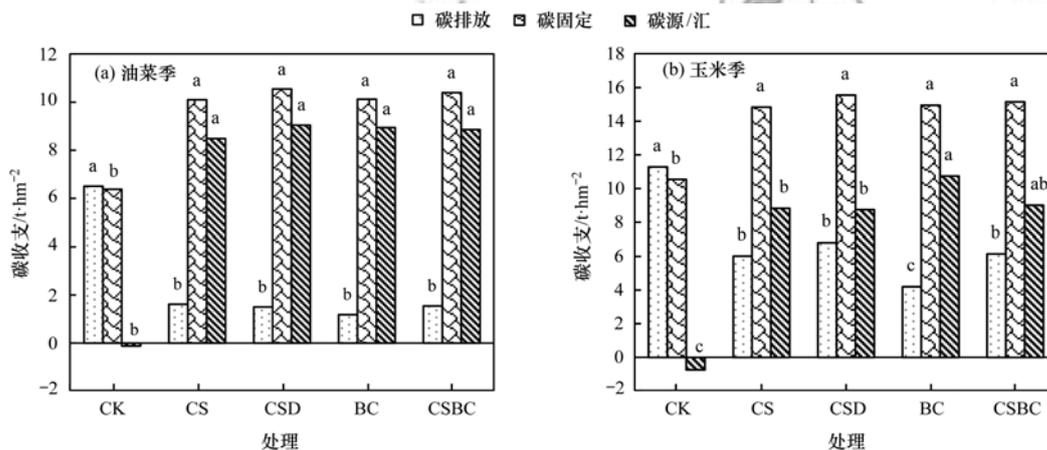


图 4 不同处理系统碳汇能力

Fig. 4 Carbon sequestration performance under different treatments

2.4 秸秆及生物炭还田下农田生态系统经济及环境效益分析

秸秆与生物炭还田下农田生态系统经济效益如表 3 所示, 各处理的经济产出收入均大于成本投入, 产投比在 $1.52 \sim 2.23$ 之间, 其中油菜季产投比 ($1.52 \sim 1.69$) 小于玉米季 ($2.08 \sim 2.23$), 产投比最高的是 CS, 表明生物质气炭联产技术经济收益低于秸秆直接还田。油菜季各处理的纯利润在 $3012.03 \sim 3487.01 t \cdot hm^{-2}$ 之间, 其中利润最高的为 CS 处理, 其系统净固碳量 $8.49 t$, 折合农田每吨秸秆原料, 净利润高达 $59.08 t^{-1}$, 考虑环境效益, 碳排放交易收入约 $443.09 t \cdot hm^{-2}$ 。玉米季各处理总成本约为

油菜季的 2 倍, 总收入 ($9133.47 \sim 9603.01 t \cdot hm^{-2}$) 约为油菜季的 3 倍左右, 纯利润率在 $51.92\% \sim 54.88\%$ 之间, 各处理(除 CK 外)碳排放交易收入均为 $456.601 \sim 561.22 t \cdot hm^{-2}$ 。从表 3 中可以看出, 玉米季 CSD 纯利润最高 ($9603.01 t \cdot hm^{-2}$), 经济效益最好, 虽然 BC 纯利润最低, 但 BC 碳排放交易最高 ($561.22 t \cdot hm^{-2}$), 其环境效益最好, CK 经济效益介于各处理之间, 碳排放收入为负, 环境效益最低, 因此, 常规施肥处理的农田生态系统为大气碳库的碳源, 在全球碳交易市场处于被动地位。

2.5 秸秆及生物炭还田下农田生态系统碳效益分析

本研究系统分析了秸秆与生物炭还田下农田生

态系统的碳生产力(C_p)、经济效益(C_j)、生态效益(C_e), C_p 指标直接与作物产量有关, 其值越小表示单位产量粮食引起的农业投入碳释放量越低, 碳效益越高; C_j 表示单位农业碳排放增加的作物经济产值, 其值越大, 经济效益越高; C_e 表示系统净初级生产力与农业投入碳排放量的比值, 其值越大, 表示生态效益越高. 从表 4 可见, 就油菜季而言, 与 CK 相比, 其他处理(除 CS 处理)调高了碳生产力, 其中最高的是 BC($0.35 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$), 最低的是 CS(0.16

$\text{t}\cdot\text{t}^{-1}$). 玉米季, 各处理的碳生产力大小顺序依次为: $\text{BC} > \text{CSBC} > \text{CSD} > \text{CS} > \text{CK}$, 且玉米季碳生产力显著低于油菜季($P < 0.05$). 综合两个作物季, BC、CSBC 的 C_j 和 C_e 均显著低于其它处理($P < 0.05$), 比 CK 分别降低了 20.14% ~ 31.16% 和 38.77% ~ 51.21%, CS 的 C_j 和 C_e 最高, 但 CSD 与 CK、CS 处理间无显著差异, 可见秸秆还田增加了系统的经济效益和生态效益, 而生物炭还田降低了系统的经济效益和生态效益.

表 3 秸秆与生物炭还田的经济及环境效益评价

Table 3 Evaluation of economic and environmental benefits of different treatments

内容	项目	油菜					玉米				
		CK	CS	CSD	BC	CSBC	CK	CS	CSD	BC	CSBC
成本/ $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$	燃料动力	653.32	651.46	665.74	1286.05	1006.70	844.03	839.68	855.21	1450.05	1183.12
	农资	1680.30	1680.30	1980.30	1680.30	1680.30	3859.50	3859.50	3859.50	3859.50	3859.50
	设备	—	—	—	60.00	30.00	—	—	—	60.00	30.00
	人工	2700.00	2700.00	2880.00	3102.00	2946.00	3000.00	3000.00	3180.00	3402.00	3246.00
	总成本	5033.62	5031.76	5526.04	6128.35	5663.00	7703.53	7699.18	7894.71	8771.55	8318.62
收入/ $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$	籽粒	8045.65	8518.77	8609.84	8317.00	8424.08	16837.00	17201.00	17497.72	17247.10	17087.62
	燃气	—	—	—	500.00	250.00	—	—	—	500.00	250.00
	木醋液	—	—	—	450.00	225.00	—	—	—	450.00	225.00
	焦油	—	—	—	45.00	22.50	—	—	—	45.00	22.50
	总收入	8045.65	8518.77	8609.84	9312.00	8921.58	16837.00	17201.00	17497.72	18242.10	17585.12
经济效益	产投比	1.60	1.69	1.56	1.52	1.58	2.19	2.23	2.22	2.08	2.11
	纯利润/ $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$	3012.03	3487.01	3083.80	3183.65	3258.58	9133.47	9501.82	9603.01	9470.55	9266.50
	利润率/%	37.44	40.93	35.82	34.19	36.52	54.25	55.24	54.88	51.92	52.70
环境效益	碳排放交易收益/ $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$	-6.26	443.09	472.24	466.95	462.54	-38.63	460.97	456.60	561.22	470.23
	吨秸秆碳交易收益/ $\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$	-0.84	59.08	62.96	62.26	61.67	-5.15	61.46	60.88	74.83	62.70

表 4 不同处理系统碳效率¹⁾

Table 4 Carbon efficiency under different treatments

项目	油菜					玉米				
	CK	CS	CSD	BC	CSBC	CK	CS	CSD	BC	CSBC
$C_p/\text{t}\cdot\text{t}^{-1}$	0.17d	0.16d	0.20c	0.35a	0.26b	0.05a	0.05a	0.06a	0.09a	0.07a
$C_j/\text{万元}\cdot\text{t}^{-1}$	2.63a	2.79a	2.25b	1.42c	1.84b	3.99a	4.08a	3.51a	2.38b	2.93b
$C_e/\text{t}\cdot\text{t}^{-1}$	20.73a	21.99a	18.68b	10.11d	14.27c	24.93a	27.75a	24.90a	15.26b	19.91b

1) 不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异($P < 0.05$)

3 讨论

我国农作物秸秆资源丰富, 资源化利用潜力大. 本研究中秋菜季的土壤碳累积排放量($2.48 \sim 3.98 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)明显低于玉米季($12.07 \sim 21.25 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)($P < 0.05$), 可能是由于气候条件的影响, 油菜季的温度明显低于玉米季, 且随着温度与降雨的增加, 微生物的代谢活动增强, 土壤中的微生物活性增加促进了土壤矿化, 增温可刺激土壤矿化产生大量 CO_2 ^[20], 使土壤中碳排放量增大. 就油菜与玉米的不同器官而言, 根系的固碳量均为最少, 说

明植物主要靠地上部分各器官进行光合碳固定. 生态系统净初级生产力(NPP)是作物生长到成熟过程中籽粒、秸秆、根系等固定的有机碳量, 本研究中秸秆及生物炭还田处理均不同程度增加了生态系统净初级生产力, NPP 不仅反映了植被群落在自然环境条件下的生产能力, 表征陆地生态系统的质量状况, 而且是调节生态过程和估算陆地碳“源/汇”的重要因子^[21].

魏小波等^[22]的研究表明, 土壤碳的固定受到土壤理化性质、环境因子和农业耕作措施等多种因素的影响. 在农业耕作措施中, 秸秆还田的固碳潜

力强于无物料还田^[23], 本研究中, 对比秸秆直接还田与生物炭还田, 发现生物炭还田后的土壤 CO₂ 累积释放量显著低于秸秆直接还田, 且植物固碳量均高于秸秆直接还田, 这与侯亚红等^[24]与游东海^[25]等的研究结果类似. 杨旭等^[26]在玉米种植田间试验中, 在施用同等化肥的处理中秸秆炭化还田比直接还田显著降低了土壤 CO₂ 的累积排放量, 张继旭等^[27]在通过对比不同类型秸秆还田对烟田土壤碳矿化的影响研究中发现, 秸秆生物炭还田后, 具有极低的矿化速率, 可以起到较好的固碳效果. 许多研究结果显示, 一般情况下, 对比秸秆直接还田与生物炭还田的土壤, 生物炭还田的土壤 CO₂ 排放量大多较低, 其原因可能有: ①由于秸秆易被分解, 秸秆直接还田后会使土壤微生物的呼吸作用增强, 增加碳排放量, 而生物炭还田会减少土壤中酶的活性, 使微生物活性降低, 抑制土壤呼吸作用. 并且热解的生物炭主要由芳香烃和单质碳或具有石墨结构的碳组成, 具有更多稳定性的碳^[28], 高度稳定的生物炭还田能有效抵抗微生物的分解作用, 使得生物炭中的碳得以在土壤中长期保存, 增加了土壤有机碳含量, 降低了土壤呼吸, 从而减少了土壤 CO₂ 累积释放量^[29]. ②Nguyen 等^[30]的研究表明, 生物炭巨大的比表面积及一定的矿物质含量(如 FeOH、CaCO₃ 等)对 CO₂ 具有较强的物理、化学固定作用, 物理及化学固定作用促使生物炭与土壤及有机质形成有机-无机复合体, 生成更紧密的团聚体, 团聚体对土壤有机碳具有物理保护作用, 储存在其中的有机碳不易被微生物分解和利用, 使碳排放减少^[31]. 本研究发现, 各个处理(CK 除外)的碳固定量之间差异不显著, 而碳排放量之间差异明显, 且 BC 处理排放量最低, 碳汇能力最强, 这个结果表明增加农田生态系统碳汇量首先要减少碳排放量, 其次才是增加碳固定量.

碳生产力是农业投入碳排放量与经济产量的比值, 本研究中, 与 CK 相比, 油菜的各个处理(CS 除外)均使碳生产力提高, 其中 BC 提高最多, 其原因可能是与秸秆直接还田相比, 热解生物炭过程中所排放的碳量会使农业投入的碳排放量大大增加, 从而使碳效益越低, 同时尽管生物炭施用后会增加作物经济产量, 但由于生物炭的制备与施用增加了成本的投入, 使其产投比低于秸秆直接还田, 降低经济效益. 对于 CS 处理而言, 较 CK 相比其碳生产力降低, 经济效益与生态效益均为最大, 说明施用秸秆直接还田的处理生态效益最大, 这与上文研

究相符, 对于 NPP 而言, 秸秆 + 速腐剂的处理提高最多, 其次为秸秆直接还田处理, 但是由于速腐剂的施用会增加其农业投入碳排放, 所以生态效益秸秆直接还田最大. 总体上, 秸秆直接还田增加了系统的经济效益和生态效益, 而生物炭还田降低了系统的经济效益和生态效益.

4 结论

与常规施肥(CK)相比, 秸秆与生物炭不仅能提高作物产量和系统净初级生产力(NPP), 还能增加土壤固碳量(0.01 ~ 0.18 t·hm⁻²). 除 CK 碳平衡表现为“碳源”外, 其他处理均表现为“碳汇”. 秸秆直接还田(CS)处理的产投比最高, 其经济效益优于生物炭还田处理, 但生物质炭还田(BC)处理的碳排放交易最高, 其环境效益最好; CK 经济效益介于各处理之间, 碳排放收入为负, 环境效益最低, 因此, 常规施肥处理的农田生态系统为大气碳库的碳源, 在全球碳交易市场处于被动地位, CS 具有良好的经济和环境效益, 加强秸秆还田的资源利用是粮食增产提质、实现降低农田系统碳足迹、提高碳汇能力的有效途径.

参考文献:

- [1] 张凤霞. 科尔沁沙地农田生态系统土壤呼吸与碳平衡特征[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
Zhang F X. Characteristics of soil respiration and carbon balance of agriculture ecosystem in Horqin Sandy Land[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.
- [2] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 355-362.
Xu G X, Wang Z F, Gao M, et al. Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration[J]. Environmental Science, 2018, 39(1): 355-362.
- [3] 王虎, 王旭东, 田霄鸿. 秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3491-3498.
Wang H, Wang X D, Tian X H. Effect of straw-returning on the storage and distribution of different active fractions of soil organic carbon[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(12): 3491-3498.
- [4] 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.
- [5] 周运来, 张振华, 范如芹, 等. 小麦秸秆不同还田方式下土壤微生物碳代谢多样性特征[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(10): 913-920.

- Zhou Y L, Zhang Z H, Fan R Q, *et al.* Carbon metabolism diversity characteristics of soil microbe affected by wheat straw incorporation pattern [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, **33**(10): 913-920.
- [6] 于建光, 常志州, 黄红英, 等. 秸秆腐熟剂对土壤微生物及养分的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(3): 563-570.
- Yu J G, Chang Z Z, Huang H Y, *et al.* Effect of microbial inoculants for straw decomposing on soil microorganisms and the nutrients[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(3): 563-570.
- [7] 张电学, 韩志卿, 刘微, 等. 不同促腐条件下玉米秸秆直接还田的生物学效应研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, **11**(6): 742-749.
- Zhang D X, Han Z Q, Liu W, *et al.* Biological effect of maize stalk return to field directly under different accretion decay conditions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, **11**(6): 742-749.
- [8] 李洁静, 潘根兴, 张旭辉, 等. 太湖地区长期施肥条件下水稻-油菜轮作生态系统净碳汇效应及收益评估[J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(7): 1664-1670.
- Li J J, Pan G X, Zhang X H, *et al.* An evaluation of net carbon sink effect and cost/benefits of a rice-rape rotation ecosystem under long-term fertilization from Tai Lake region of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(7): 1664-1670.
- [9] 李洁静, 潘根兴, 李恋卿, 等. 红壤丘陵区双季稻田农田生态系统不同施肥下碳汇效应及收益评估[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(12): 2520-2525.
- Li J J, Pan G X, Li L Q, *et al.* Estimation of net carbon balance and benefits of rice-rice cropping farm of a red earth paddy under long term fertilization experiment from Jiangxi, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(12): 2520-2525.
- [10] 彭华, 纪雄辉, 刘昭兵, 等. 洞庭湖地区长期施肥条件下双季稻田生态系统净碳汇效应及收益评估[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(12): 2526-2532.
- Peng H, Ji X H, Liu Z B, *et al.* Evaluation of net carbon sink effect and economic benefit in double rice field ecosystem under long-term fertilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(12): 2526-2532.
- [11] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, **47**(17): 3359-3371.
- Zhao Y L, Xue Z W, Guo H B, *et al.* Effects of tillage and straw returning on water consumption characteristics and water use efficiency in the winter wheat and summer maize rotation system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(17): 3359-3371.
- [12] 杨东, 李新举, 孔欣欣. 不同秸秆还田方式对滨海盐渍土水盐运动的影响[J]. *水土保持研究*, 2017, **24**(6): 74-78.
- Yang D, Li X J, Kong X X. Effects of different straw returning modes on the water and salt movement in the coastal saline soil [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, **24**(6): 74-78.
- [13] 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 姜丽芬, 曲来叶, 周玉梅, 等译. 北京: 高等教育出版社, 2007. 89-92.
- Luo Y Q, Zhou X H. Soil respiration and the environment[M]. Jiang L F, Qu L Y, Zhou Y M, *et al.* Trans. Beijing: Higher Education Press, 2007. 89-92.
- [14] 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 等. 杨白桦混交次生林与原始阔叶红松林土壤呼吸作用比较[J]. *植物生态学报*, 2007, **31**(3): 348-354.
- Wang X, Zhou G S, Jiang Y L, *et al.* Soil respiration in natural mixed (*Betula platyphylla* and *populus davidiana*) secondary forest and primary broad-leaved Korean pine forest[J]. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2007, **31**(3): 348-354.
- [15] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, **304**(5677): 1623-1627.
- [16] 李丹丹, 汪涛, 周辉. 基于不同时空尺度的知识溢出网络结构特征研究[J]. *地理科学*, 2013, **33**(10): 1180-1187.
- Li D D, Wang T, Zhou H. The structural characteristics of knowledge spillover networks based on different spatial and temporal scales [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, **33**(10): 1180-1187.
- [17] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(10): 2239-2250.
- Lu F, Wang X K, Han B, *et al.* Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China's cropland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(10): 2239-2250.
- [18] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, **91**(1-3): 217-232.
- [19] 刘巽浩, 徐文修, 李增嘉, 等. 农田生态系统碳足迹法: 误区、改进与应用——兼析中国集约农作碳效率(续)[J]. *中国农业资源与区划*, 2014, **35**(1): 1-7.
- Liu X H, Xu W X, Li Z J, *et al.* The missteps, improvement and application of carbon footprint methodology in farmland ecosystems with the case study of analyzing the carbon efficiency of China's Intensive farming[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, **35**(1): 1-7.
- [20] 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.
- [21] 王轶虹, 史学正, 王美艳, 等. 2001-2010年中国农田生态系统NPP的时空演变特征[J]. *土壤学报*, 2017, **54**(2): 319-330.
- Wang Y H, Shi X Z, Wang M Y, *et al.* Spatio-temporal variation of NPP in cropland ecosystem of China during the years from 2001 to 2010[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(2): 319-330.
- [22] 魏小波, 何文清, 黎晓峰, 等. 农田土壤有机碳固定机制及其影响因子研究进展[J]. *中国农业气象*, 2010, **31**(4): 487-494.
- Wei X B, He W Q, Li X F, *et al.* Review on the mechanism of soil organic carbon sequestration and its influence factors in cropland soils[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, **31**(4): 487-494.

- [23] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 等. 中国农田管理土壤碳汇估算[J]. 中国农业科学, 2008, **41**(3): 734-743.
Jin L, Li Y E, Gao Q Z, *et al.* Estimate of carbon sequestration under cropland management in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, **41**(3): 734-743.
- [24] 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.
- [25] 游东海, 田霄鸿, 把余玲, 等. 小麦-玉米轮作体系中秸秆还田方式对土壤肥力及作物产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, **40**(7): 167-172.
You D H, Tian X H, Ba Y L, *et al.* Effects of different models of straw returning to fields on soil carbon stock, soil nutrients and crop yield in wheat-maize cropping system[J]. *J Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2012, **40**(7): 167-172.
- [26] 杨旭, 兰宇, 孟军, 等. 秸秆不同还田方式对旱地棕壤 CO₂ 排放和土壤碳库管理指数的影响[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(3): 805-809.
Yang X, Lan Y, Meng J, *et al.* Effects of different stover-incorporation ways on CO₂ emission in dryland brown soil and soil carbon pool management index[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(3): 805-809.
- [27] 张继旭, 张继光, 申国明, 等. 不同类型秸秆还田对烟田土壤碳氮矿化的影响[J]. 烟草科技, 2016, **49**(3): 10-16.
Zhang J X, Zhang J G, Shen G M, *et al.* Effects of different types of straw and stalk returning on carbon and nitrogen mineralization in tobacco soil [J]. *Tobacco Science & Technology*, 2016, **49**(3): 10-16.
- [28] 徐敏, 伍钧, 张小洪, 等. 生物炭施用的固碳减排潜力及农田效应[J]. 生态学报, 2018, **38**(2): 393-404.
Xu M, Wu J, Zhang X H, *et al.* Impact of biochar application on carbon sequestration, soil fertility and crop productivity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(2): 393-404.
- [29] 刘鸿骄, 侯亚红, 王磊. 秸秆生物炭还田对围垦盐碱土壤的低碳化改良[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(1): 75-80.
Liu H J, Hou Y H, Wang L. Amelioration effect of Reed straw biochar returning to salty soil in the view of low carbon point[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(1): 75-80.
- [30] Nguyen M V, Lee B K. A novel removal of CO₂ using nitrogen doped biochar beads as a green adsorbent[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, **104**: 490-498.
- [31] Huang R, Lan M L, Liu J, *et al.* Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of different straws returning [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(36): 27942-27952.



CONTENTS

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