

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨阳, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制

侯亚红,王磊*,付小花,乐毅全

(同济大学环境科学与工程学院,污染控制与资源化研究国家重点实验室,上海 200092)

摘要: 秸秆直接还田与秸秆炭化还田是目前最主要的秸秆还田措施。由于秸秆与秸秆生物炭结构和性质的差异以及还田过程的差异,其还田后的土壤呼吸和土壤碳收支必然有显著差异。采用室外盆栽的方式,以地肤草为目标植物,系统研究了土壤呼吸与土壤碳收支对多种秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其可能的机制。结果表明,秸秆生物炭还田的土壤呼吸[均值为 $21.69 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]显著低于秸秆直接还田[均值为 $65.32 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$],土壤有机碳含量(均值为 $20.40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和植物的固碳量(平均植物生物量 138.56 g)均高于秸秆直接还田(均值为 $17.76 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 76.76 g);考虑了生物炭制备过程的碳丢失后,秸秆生物炭还田的土壤碳收支仍显著高于秸秆直接还田,是一种较低碳的秸秆还田模式;秸秆直接还田显著促进土壤脱氢酶活性、土壤 β -糖苷酶活性和土壤活性微生物量,因此导致较高的土壤呼吸,而生物炭还田土壤的微生物活性普遍较低;秸秆生物炭的易氧化态碳含量和可生物降解性均显著低于秸秆对照,表明秸秆生物炭稳定性较高,难以被土壤微生物降解利用,因此其还田后土壤微生物活性普遍较低,秸秆碳可在土壤中长期保存。

关键词: 生物炭; 秸秆; 土壤呼吸; 碳收支; 微生物活性; 易氧化态碳

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2655-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.07.044

Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism

HOU Ya-hong, WANG Lei*, FU Xiao-hua, LE Yi-quan

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Research, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Direct straw returning and straw carbonization returning are the main measures of straw returning. Because of the differences in structure and nature as well as returning process between straw and straw biochar, the soil respiration and soil carbon budget after returning must have significant differences. In this study, outdoor pot experiment was carried out to study the response of soil respiration and carbon budget to straw and straw biochar returning and its possible mechanism. The results showed that soil respiration of straw biochar returning [mean value $21.69 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$] was significantly lower than that of direct straw returning [mean value $65.32 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$], and its soil organic carbon content (mean value $20.40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) and plant biomass (mean value 138.56 g) were higher than those of direct straw returning (mean values $17.76 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 76.76 g). Considering the carbon loss after the biochar preparation process, its soil carbon budget was also significantly higher than that of direct straw returning, so it was a low carbon mode of straw returning. Direct straw returning significantly promoted soil dehydrogenase activity, soil β -glycosidase activity and soil microorganism quantity, leading to higher soil respiration, but straw biochar did play an obvious role in promoting the microbial activity index. Easily oxidizable carbon (EOC) and biodegradability of straw biochar were lower than those of straw, which showed that straw biochar had higher stability, and was more difficult to degrade for soil microorganisms, so its soil microbial activity was generally lower, and could be retained in the soil for a long time.

Key words: biochar; straw; soil respiration; carbon budget; microbial activity; easily oxidizable carbon (EOC)

在全球陆地生态系统碳库中,只有农业土壤碳库是受到强烈的人为干扰且在较短的时间尺度上可以调节的碳库^[1,2],农田土壤呼吸(soil respiration, SR)排放的 CO_2 约占人为温室气体排放量的 21%~25%^[3],因而全球农业土壤碳库储量及其固碳能力对于土壤温室气体减排具有重要价值。

秸秆还田作为土壤改良的重要措施,可通过改善土壤理化性质而增加植物生长和固碳量^[4,5],但是秸秆还田也会增强土壤微生物活性和 SR,加速土壤有机质的矿化,增排的温室气体可能大幅度抵消

植物固碳的减排效益^[6~8]。为此,如何减少秸秆还田中温室气体排放、增加农田生态系统碳汇成为当前减缓气候变化研究的热点。

秸秆炭化还田不仅能稳定土壤有机碳库,持留土壤养分,促进作物生长,而且对维持土壤生态系统

收稿日期: 2014-12-02; 修订日期: 2015-01-23
基金项目: 国家自然科学基金项目(21177093); 上海市重大科技攻关项目(11dz1211403); 上海市科委重大科技攻关项目(14231200404)
作者简介: 侯亚红(1987~),男,硕士研究生,主要研究方向为生物质废弃物的资源化, E-mail: leizi0926@126.com
* 通讯联系人, E-mail: celwang@tongji.edu.cn

平衡可能发挥重要作用^[9,10]. 土壤的碳汇聚能力由以下两方面决定,即①碳输入:主要是植物生物量;②碳输出:主要表现为 SR. 综合考虑土壤碳收支(包括生物炭制备过程中的碳支出),施加生物炭后土壤的固碳量是否有所增加?与秸秆直接还田相比其 SR 和碳收支是否有差异?目前尚缺乏详实的证据.

本研究以上海市崇明岛丰富的水稻、芦苇、互花米草这 3 种农林秸秆制备生物炭,进行盆栽还田试验,从 SR、植物生长量、土壤有机碳(soil organic carbon,SOC)等角度,并结合制炭过程中的碳支出,分析了秸秆和秸秆生物炭还田过程中土壤碳收支的差异性,并从还田后土壤微生物性质以及秸秆与秸秆生物炭的理化性质等方面初步分析了秸秆与秸秆生物炭还田后土壤碳收支差异的可能原因,以期拓展废弃农林秸秆的低碳化还田措施提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 土壤

土壤取自崇明东滩湿地公园,土壤类型为新围垦的贫瘠土壤^[11],土壤容重 $1.22\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,总氮 $283.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $22.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤有机碳 $4.50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 供试土壤取自 0~20 cm 土层,去除杂物,过 2 mm 筛,待用.

1.2 秸秆收集与预处理

水稻、芦苇和互花米草这 3 种秸秆均取自上海市崇明岛,将其粉碎至 2 cm,80℃ 烘干 12 h,粉碎,并分别过 20 目筛,待用.

1.3 秸秆生物炭制备

试验所用生物炭采用同济大学能源与机械工程学院自制的回流炭化炉缺氧热解炭化制得,炭化温度 $450^{\circ}\text{C}\pm 20^{\circ}\text{C}$. 原材料为水稻、芦苇和互花米草这 3 种农林秸秆,80℃ 烘干 12 h,然后放入炭化炉,充 N_2 至无氧状态下缓慢升温至 450°C (炭化炉起始设定温度为 200°C ,每 1.5 h 升高 50°C),加热 30 min 以上直到无挥发分析出,反应完毕,再次通入 N_2 冷却至近室温,取出生物炭,称重,并粉碎至 1~2 mm,待用. 3 种秸秆的炭化收成率分别为 34.38%、36.57%、28.44%. 炭化炉启动时采用电加热,达 200°C 后利用热解产生的挥发分回流升温 and 保温.

1.4 盆栽试验

选用水稻、芦苇、互花米草这 3 种秸秆及其生物炭作为土壤改良剂,与预处理后的供试土壤均匀混合,分别置于长×宽×高为 $50\text{ cm}\times 40\text{ cm}\times 40\text{ cm}$

的无盖塑料箱中,其中土壤加入量均为每箱 40.00 kg(含水率约 25%),土壤层高约 25 cm,秸秆加入量均为每箱 1.00 kg(干重),生物炭加入量分别为水稻生物炭 343.82 g、芦苇生物炭 365.73 g、米草生物炭 284.40 g(加入量均按其 1.00 kg 秸秆的炭化收成率计算),每个处理设置 3 个重复,并设置空白土壤对照.

每个塑料箱的底部及四周均留有 5 个 $\phi 8\sim 10\text{ mm}$ 的小孔,以便于滤水和透气. 塑料箱的底部加高,保持透水 and 通风孔的作用. 塑料箱置于崇明东滩湿地公园内,雨水与日照等同自然界情况,稳定 20 d 后,移栽长势相同的地肤草幼苗,每箱 2 棵. 在植物生长过程中(6~11 月)根据生长需要浇水,但不施肥,并于 11 月下旬收割植物.

1.5 土壤样品采集

种植过程中共采集了 4 次土壤样品,分别于 6、7、9、11 月下旬梅花状采集表层土壤样品(5~10 cm),其中 6 月为本底值采样. 所得新鲜土壤混合后采用四分法分出两份:一份鲜样保存于 4°C 冰箱中,用于生物指标的测定;一份风干后过 60 目筛于常温下保存,用于理化指标的测定.

1.6 理化指标的测定

SOC^[12]:采用日本岛津总有机碳测定仪 TOC V-CPN,称取 30.00 mg 预处理后的土壤样品于陶瓷方舟中,直接上机测定,总碳(total carbon,TC)经过 900°C 燃烧炉测定,无机碳(inorganic carbon,IC)测定先加入体积比为 1:2(酸:水)的磷酸约 0.30 mL,经过 200°C 燃烧炉测定,结果采用差减法: $\text{SOC}=\text{TC}-\text{IC}$;测定时间分为夏季(6、7 月)和秋季(9、11 月).

秸秆与秸秆生物炭中易氧化态碳(easlily oxidized carbon,EOC)^[13]:高锰酸钾氧化法.

1.7 生物指标的测定

植物生物量:收割植物,洗净, 120°C 烘干 8 h,称其干重.

$\text{SR}^{[14]}$:使用 LICOR-8100A 型土壤呼吸仪并配以 LICOR 8100-102 土壤呼吸室. 测量时一个直径为 10 cm、高为 10 cm 的 PVC 圆柱管插入土壤中,插入深度约为 7 cm. 为了减少干扰 CO_2 流通量,至少在测量前的 12 h 将圆柱管插入土壤. 测定时间为 6、7、9、11 月,测定频率为 2 周 1 次.

土壤活性微生物量^[15]:土壤活性微生物量测定采用三磷酸腺苷法,用 Profile-1 生物发光仪快速测定,所获得的 ATP 值与土壤活性微生物成正比.

土壤 β -糖苷酶活性测定^[16]: 以对硝基苯- β -D-葡萄糖苷为底物, 称取新鲜土壤样品 1.00 g, 在 37℃ 条件下恒温培养 1 h, 400 nm 下比色法测定生成物对硝基苯酚(*p*-nitrophenol, PNP)的量。

土壤脱氢酶活性^[17]: 采用氯化三苯四氯唑(TTC)比色测定, 酶促反应底物 TTC 受氢后生成红色的三苯基甲苯(TPF), 在 37℃ 条件下恒温培养 24 h, 于 492 nm 进行比色, 酶活性以 TTC 的还原产物 TPF 的生成量表示。

1.8 秸秆与秸秆生物炭可降解性分析

分别将秸秆与秸秆生物炭按 2% 比例加入到土壤浸提液中, 用纱布密封瓶口, 于 $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 25℃ 条件下培养, 在培养 20 d 和 40 d 后, 测其秸秆与秸秆生物炭的质量减量率, 并以其代表生物可降解性。

土壤浸取液制备^[18]: 取适量土壤, 过 60 目筛, 然后在 30℃ 下恒温干燥 2 h. 称取 50.00 g 预处理后的土壤, 装入 5 L 的抽滤瓶中, 再加入一定量的蒸馏水, 制成 5.00 L 土壤培养液. 用玻璃棒均匀搅拌 30 min 后, 以 $1.50 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的气量连续曝气 24 h, 再静置沉降 24 h, 最后用玻璃漏斗过滤, 将滤液分成每份 150.00 mL, 待用。

质量减量率^[18]: 精确称量秸秆与秸秆生物炭降解前后的质量, 利用公式 $m_{\text{loss}} = (m_0 - m_t) / m_0 \times 100\%$ 计算其质量减量率, 式中 m_0 和 m_t 分别为秸秆与秸秆生物炭的原始质量和降解后的质量。

1.9 数据处理与统计分析

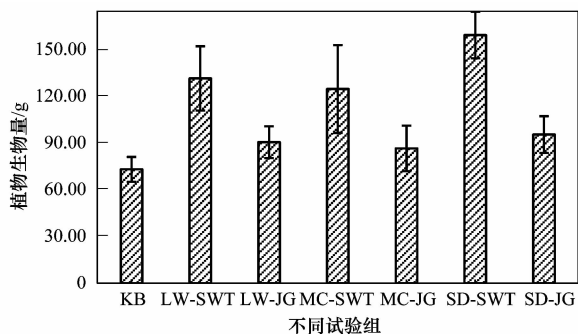
试验结果统计采用 Excel 和 SPSS 软件进行单因素方差分析(ANOVA)、Duncan 多重比较和相关性分析. 所有数据测定结果均以平均值表示(3 次重复)。

2 结果与分析

2.1 秸秆及其生物炭还田的植物固碳量与土壤呼吸

植物生物量可综合反映土壤改良剂对土壤的改良效果, 也反映植物的固碳量^[19]. 由图 1 可知, 不同秸秆及其生物炭还田对地肤草均有促生长作用, 但秸秆生物炭试验组(均值为 138.56 g)普遍好于其秸秆对照组(均值 76.76 g), 这可能与秸秆及其生物炭的结构性质有关. 生物炭为多孔结构, 比表面积高于其秸秆对照, 吸附性较强, 可固持钝化土壤养分, 减缓土壤养分的淋失, 增加土壤养分利用率, 进而提高作物产量。

土壤呼吸作为土壤碳库输出的一个关键环节,



LW-SWT: 芦苇生物炭, LW-JG: 芦苇秸秆, MC-SWT: 米草生物炭, MC-JG: 米草秸秆, SD-SWT: 水稻生物炭, SD-JG: 水稻秸秆, KB: 空白对照, 下同

图 1 秸秆及其生物炭对植物生物量的影响

Fig. 1 Effects of straw and straw biochar returning on plant biomass

是植物固定碳后, 又以 CO_2 形式返回大气的主要途径, 是土壤碳排放的一个重要过程^[20]。

如图 2 所示, 在地肤草生长期, 不同秸秆及其生物炭处理下, 土壤呼吸强度随时间的变化表现为不对称单峰型柱状图, 在七月份出现峰值后, 土壤呼吸强度逐渐变小, 直至成熟期, 达到最小, 这可能与不同季节月份水热条件有关. 不同处理土壤的呼吸强度差异较为明显, 空白对照[均值为 $22.27 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]与生物炭还田[均值为 $21.69 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]土壤呼吸强度相差不大, 但均明显低于其秸秆对照[均值为 $65.32 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]. 这可能与秸秆生物炭本身的性质以及由其还田后导致土壤性质的差异有关。

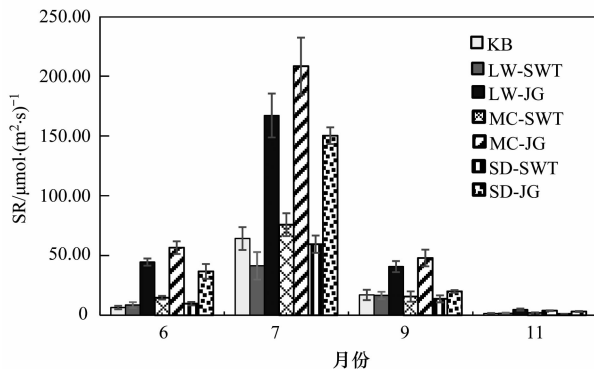


图 2 秸秆及其生物炭对土壤呼吸的影响

Fig. 2 Effects of straw and straw biochar returning on SR

为了进一步验证秸秆生物炭还田是否增加或稳定了土壤有机碳库, 又分析了各处理土壤的 SOC, 如图 3 所示. 秸秆还田后的 SOC(均值为 $17.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)虽低于秸秆生物炭试验组(均值为 $20.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 但均明显高于空白对照(均值为 4.93

g·kg⁻¹),这与 SOC 的直接输入有关. 但生物炭试验组高于其秸秆对照组,这可能与秸秆及其生物炭中有机碳的稳定性有关.

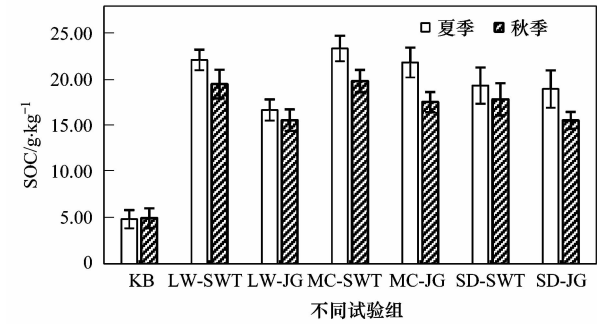


图 3 不同秸秆及其生物炭对土壤有机碳的影响

Fig. 3 Effects of straw and straw biochar returning on SOC

表 1 秸秆及其生物炭对土壤微生物指标的影响¹⁾

项目	KB	LW-SWT	LW-JG	MC-SWT	MC-JG	SD-SWT	SD-JG
土壤 β-糖苷酶(以 C ₆ H ₅ NO ₃ 计)/mg·(kg·h) ⁻¹	9.83 ± 0.58	7.78 ± 1.10	11.72 ± 1.25	10.51 ± 1.10	12.21 ± 0.87	8.49 ± 0.86	14.41 ± 1.35
土壤脱氢酶(以 TPF 计)/μg·(g·24 h) ⁻¹	6.99 ± 0.50	2.72 ± 0.12	20.08 ± 2.21	4.60 ± 0.89	26.00 ± 0.89	2.94 ± 0.87	13.84 ± 0.56
土壤活性微生物量(以 ATP 计) × 10 ⁻¹² /mol·g ⁻¹	3.58 ± 0.39	4.58 ± 0.48	45.48 ± 4.71	1.90 ± 0.13	45.77 ± 7.51	20.27 ± 0.92	48.99 ± 5.76

1)表中数据为 7、9、11 月的平均值; LW-SWT: 芦苇生物炭,LW-JG: 芦苇秸秆,MC-SWT: 米草生物炭,MC-JG: 米草秸秆,SD-SWT: 水稻生物炭,SD-JG: 水稻秸秆,KB: 空白对照,下同

2.3 秸秆与秸秆生物炭的组成与性质

土壤 EOC 是土壤活性有机碳库的重要组成部分,能够为土壤中生物的生活活动提供动力,而且土壤中碳储量的变化主要发生在土壤中 EOC 的部分^[24]. 由表 2 可知,秸秆中 TC 含量明显低于其秸

2.2 秸秆与秸秆生物炭还田土壤的微生物活性

土壤呼吸作为一种复杂的生物学反应,当输入的有机质性质有所差异,往往导致土壤微生物活性和土壤酶活性的差异. 土壤 β-糖苷酶和土壤脱氢酶为土壤微生物碳代谢过程中的重要酶^[21,22],土壤活性微生物量是土壤微生物活性的一个综合反映^[23]. 表 1 列出了秸秆与秸秆生物炭还田对以上 3 种土壤微生物指标的影响.

从表 1 可知,秸秆及其生物炭对土壤 β-糖苷酶活性、土壤活性微生物量和土壤脱氢酶活性影响差异都较为明显,总体上表现为秸秆 > 空白 > 生物炭,这说明秸秆还田显著促进了土壤异养微生物活性,而秸秆生物炭还田对土壤异养微生物活性可能会起到一定的抑制作用.

秆生物炭,但 EOC 含量明显高于其秸秆生物炭.

由图 4 的生物可降解性分析结果可知,在培养 20 d 和 40 d 后,秸秆和秸秆生物炭的质量减量率都呈上升趋势,但是秸秆质量减量率明显高于秸秆生物炭,这也验证了秸秆中 EOC 含量高,较易被土壤

表 2 秸秆与秸秆生物炭的基本性质¹⁾

项目	LW-SWT	SD-SWT	MC-SWT	LW-JG	SD-JG	MC-JG
TC/%	72.77 ± 0.34	53.91 ± 0.23	68.52 ± 0.43	40.96 ± 0.76	38.35 ± 0.21	43.77 ± 0.51
TN/%	0.55 ± 0.02	1.01 ± 0.03	0.35 ± 0.01	0.37 ± 0.02	0.63 ± 0.01	0.42 ± 0.01
C/N	131.83 ± 1.23	53.32 ± 0.98	193.55 ± 2.12	110.40 ± 1.09	61.06 ± 2.01	105.46 ± 3.01
EOC/%	6.10 ± 0.08	6.29 ± 0.11	9.31 ± 0.51	32.41 ± 1.07	35.38 ± 0.90	36.60 ± 2.17

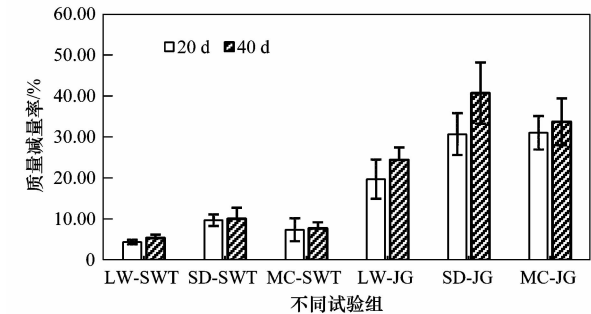


图 4 不同秸秆生物炭随培养时间的质量减量率

Fig. 4 Mass reduction rate of different straw and straw biochar with incubation time

微生物降解利用,而秸秆生物炭中 EOC 含量低,难以被土壤降解利用的现象. 这也能解释秸秆对照组 SR 较强和土壤酶活性较高的现象.

3 讨论

3.1 秸秆及其生物炭还田的综合碳收支

本研究中采用植物生物量与土壤呼吸的比值来粗略代表该土壤的有机碳收支,比值越大,表明土壤的有机碳汇聚能力越强.

从表 3 可知,不同处理土壤的植物量/土壤呼吸比值差异较为明显,秸秆炭改良组明显高于其秸秆

对照组和空白对照组,有利于土壤碳库的增加和稳定.初步的分析结果还表明,即使考虑了生物炭制备过程中的碳损失后(按每箱来计,碳损失量 LW-SWT 为 93.62 g,MC-SWT 为 182.23 g,SD-SWT 为

170.31 g;碳损失率 LW-SWT 为 23.09%,MC-SWT 为 44.94%,SD-SWT 为 42.00%),秸秆生物炭的碳收支仍显著高于秸秆直接还田和空白对照,可见,秸秆生物炭还田是一种较低碳的还田模式.

表 3 秸秆及其生物炭还田的土壤碳收支¹⁾

Table 3 Carbon budget of straw and straw biochar returning							
项目	KB	LW-SWT	LW-JG	MC-SWT	MC-JG	SD-SWT	SD-JG
植物量/土壤呼吸(Ⅰ)/%	3.45 ± 0.21	8.54 ± 0.53	1.62 ± 0.06	5.12 ± 0.64	1.25 ± 0.11	8.25 ± 0.82	3.74 ± 0.23
植物量/土壤呼吸(Ⅱ)/%	3.45 ± 0.21	7.43 ± 0.50	1.62 ± 0.06	4.32 ± 0.53	1.25 ± 0.11	6.78 ± 0.76	3.74 ± 0.23

表 3 中土壤呼吸的计算公式如下:

$$\text{土壤呼吸(Ⅰ)} = 0.83 \sum 12\text{SR}_i \cdot T_i \quad (1)$$
$$\text{土壤呼吸(Ⅱ)} = \text{土壤呼吸(Ⅰ)} + \frac{C_{\text{loss}}}{S} \quad (2)$$

式中,0.83 为昼夜间 SR 折算系数^[25];12 为碳原子相对分子量;SR_i 为第 i 月份 SR,单位 mol·(m²·s)⁻¹;T_i 为第 i 月份的 SR 时间,单位 s;C_{loss} 为制炭过程中的碳损失量,单位 g;S 为箱子底面面积,单位 m².

公式(1)中 SR 理论上为地肤草生长期间的平均值,但是由于 LICOR-8100A 土壤呼吸仪的局限性,未能对其进行连续测定.采用 6 次 SR 的加权平均值代表其理论值,这样虽不能很精确地表明不同还田模式下的绝对碳收支,但可以定性表明秸秆炭化还田与秸秆直接还田间碳收支的差异性.

3.2 土壤微生物活性与土壤呼吸的相关性

为了更直观地反映影响土壤呼吸强度的最主要微生物活性指标,用 SPSS 软件对土壤呼吸、土壤 β-糖苷酶、土壤脱氢酶和土壤活性微生物量这 4 个指标进行相关性分析.从表 4 可知,土壤呼吸与土壤 β-糖苷酶、土壤脱氢酶和土壤活性微生物量均具有一定的正相关性,但其顺序为土壤脱氢酶 > 土壤活性微生物量 > 土壤 β-糖苷酶.

土壤脱氢酶属于胞内酶,能催化有机物质脱氢,

起着氢的中间转化传递作用,其活性可作为微生物氧化还原系统的指标,表征土壤微生物的氧化能力^[26],可用来衡量土壤中有机的降解程度,进而反映土壤呼吸,因此土壤脱氢酶活性是土壤呼吸最主要的影响因子^[27].秸秆中的纤维素、木质素等在生物炭制备过程中发生裂解生成具有高度芳香化的碳组分^[28],从而具有生物化学稳定性,难以被土壤微生物快速分解,这也验证了生物炭试验组土壤脱氢酶活性低于其秸秆对照组.

土壤活性微生物量作为微生物活性的一种指标,能够表征生物降解过程中微生物数量的多少和新陈代谢速度的快慢^[29],可作为衡量土壤中微生物活力的重要指标,也是土壤呼吸重要的影响因子.生物炭试验组土壤活性微生物量低于其秸秆对照,也与秸秆生物炭难以被土壤微生物利用有关.但相关性分析表明它不是最主要的因素,这可能还和其中的菌群结构有关,目前正在研究之中.

土壤 β-糖苷酶是一种水解纤维素的酶,可以将纤维二糖、纤维三糖及其他低分子物质分解成单糖,参与物质与能量循环,但并不是纤维素降解的关键酶.而纤维素内切酶和外切酶可能是影响还田秸秆分解速率的最重要因素^[30],因此土壤 β-糖苷酶活性与秸秆及秸秆生物炭还田土壤呼吸强度的相关性较差,不是导致土壤呼吸强度差异的主要决定因素.

表 4 土壤呼吸与微生物指标的相关性分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis between soil respiration and microbial indicators				
项目	土壤呼吸	土壤 β-糖苷酶	土壤脱氢酶	土壤活性微生物量
土壤呼吸	1			
土壤 β-糖苷酶	0.553 1	1		
土壤脱氢酶	0.963 7	0.708 8	1	
土壤活性微生物量	0.745 0	0.784 3	0.837 4	1

1) 显著水平时的临界 P = 0.513 9; 极显著水平时的临界 P = 0.641 1

综上,影响土壤呼吸的最主要微生物指标是土壤脱氢酶.秸秆还田后增加了土壤微生物活性,尤其是增加了土壤脱氢酶的活性,导致土壤呼吸变强.

微生物活性的差异和输入的有机物性质、土壤环境有关,但在本研究中,由于土壤本底基本相同,所以导致脱氢酶活性差异的主要原因可能是秸秆及其生

物炭的组成和性质.

3.3 秸秆与秸秆生物炭的组成与性质对土壤微生物活性的影响

为了进一步分析土壤微生物活性与秸秆及其秸秆生物炭基本性质间的相互关系,用 SPSS 软件对 TC、TN、C/N、EOC 和土壤脱氢酶等 5 个指标进行相关性分析.

由表 5 可知,土壤脱氢酶与 EOC 含量有着显

著的正相关性,但与 TC 含量呈负相关. 这表明,秸秆加到土壤中后,由于其 EOC 含量较高,易于被土壤微生物降解利用,进而提高土壤脱氢酶活性,增强土壤呼吸. 而秸秆生物炭中 TC 含量虽然较高,但其芳香化程度较高,导致 EOC 含量很低,施加到土壤中后,难以被土壤微生物降解利用,对土壤微生物活性和土壤呼吸没有明显的增强作用.

表 5 土壤脱氢酶与秸秆及其秸秆生物炭基本性质的相关性分析¹⁾

	TC	TN	C/N	EOC	土壤脱氢酶
TC	1				
TN	-0.027 0	1			
C/N	0.647 5	-0.728 2	1		
EOC	-0.884 0	-0.364 3	-0.342 1	1	
土壤脱氢酶	-0.773 0	-0.474 7	-0.181 9	0.899 5	1

1) 显著水平时的临界 $P = \pm 0.513\ 9$; 极显著水平时的临界 $P = \pm 0.641\ 1$

4 结论

(1) 秸秆及其生物炭还田均促进作物生长和固碳,但秸秆生物炭还田后的 SR [$21.69\ \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$] 显著低于秸秆直接还田 [$65.32\ \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$],几乎和空白对照相似 [$22.27\ \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$];秸秆生物炭还田后的 SOC 含量 ($20.40\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 也普遍高于秸秆对照 ($17.76\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和空白对照 ($4.93\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$);综合考虑了秸秆生物炭制备过程中的碳支出,秸秆生物炭还田的土壤碳收支仍显著高于秸秆直接还田和空白对照,是一种较低碳的秸秆还田模式.

(2) 秸秆直接还田显著促进土壤脱氢酶和土壤 β -糖苷酶活性,提高土壤活性微生物量,从而导致较高的土壤呼吸,而秸秆生物炭对这些微生物活性指标没有明显的促进作用;秸秆直接还田后较高的土壤脱氢酶活性是导致土壤呼吸显著增加的重要原因.

(3) 秸秆生物炭 EOC 含量均低于秸秆对照,导致可生物降解性较低,难以被土壤微生物降解利用,因此其还田后土壤微生物活性和土壤呼吸较低.

致谢:本研究在采样过程中,得到了崇明东滩国际湿地公园科研部尹秋晓等的帮助,在此表示感谢.

参考文献:

[1] Tian N, Wang Y X, Weng B Q. Advances in estimating soil carbon storage [J]. Subtropical Agriculture Research, 2010, 6 (3): 193-198.

[2] Yang Y S, Xie J S, Sheng H, et al. The impact of land use/

cover change on storage and quality of soil organic carbon in midsubtropical mountainous area of southern China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(1): 49-57.

[3] Food & Agriculture Organization (FAO). Soil Carbon Sequestration for Improved Land Management [R]. Rome, Italy: World Soil Resources Reports, 2001. 488-532.

[4] 裴鹏刚,张均华,朱练峰,等. 秸秆还田对水稻固碳特性及产量形成的影响 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2885-2891.

[5] 刘义国,刘永红,刘洪军,等. 秸秆还田量对土壤理化性状及小麦产量的影响 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(3): 131-135.

[6] 张庆忠,吴文良,王明新,等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响 [J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2883-2887.

[7] 孟凡乔,匡星,杜章留,等. 不同土地利用方式及栽培措施对土壤有机碳及 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响 [J]. 环境科学, 2010, 31(8): 1733-1780.

[8] 强学彩,袁红莉,高旺盛. 秸秆还田量对土壤 CO_2 释放和土壤微生物量的影响 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 469-472.

[9] 姜志翔,郑浩,李锋民,等. 生物炭碳封存技术研究进展 [J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3327-3333.

[10] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 139(4): 469-475.

[11] 陈金海,王红丽,王磊,等. 互花米草/羊粪混合堆肥还田对滨海盐碱土壤改良效应: 实验室研究 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 513-521.

[12] Hu Y, Wang L, Tang Y S, et al. Variability in soil microbial community and activity between coastal and riparian wetlands in the Yangtze River estuary-Potential impacts on carbon sequestration [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 70: 221-

228.

[13] 刘荣杰, 吴亚丛, 张英, 等. 中国北亚热带天然次生林与杉木人工林土壤活性有机碳库的比较 [J]. 植物生态学报, 2012, **36**(5): 431-437.

[14] Chen S T, Zhang X, Liu Y F, *et al.* Simulated acid rain changed the proportion of heterotrophic respiration in soil respiration in a subtropical secondary forest [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **86**: 148-157.

[15] 席雪飞, 彭晓佳, 王磊, 等. 一种利用 Profile-1 生物发光仪快速测定土壤中微生物量的改良方法 [J]. 工业微生物, 2010, **40**(6): 23-27

[16] Yang J K, Zhang J J, Yu H Y, *et al.* Community composition and cellulase activity of cellulolytic bacteria from forest soils planted with broad-leaved deciduous and evergreen trees [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, **98**(3): 1449-1458.

[17] 卢冠男, 夏梦洁, 贾丹阳, 等. 我国 14 种典型土壤脲酶、脱氢酶活性对汞胁迫的响应 [J]. 环境科学学报, 2014, **34**(7): 1788-1793.

[18] 王晓霞. 模拟自然环境下脂肪族聚酯的生物降解性能的研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007. 12-13.

[19] 窦晶鑫, 刘景双, 王洋, 等. 模拟氮沉降对湿地植物生物量与土壤活性碳库的影响 [J]. 应用生态学报, 2008, **19**(8): 1714-1720.

[20] Chen S T, Zou J W, Hu Z H, *et al.* Global annual soil respiration in relation to climate, soil properties and vegetation characteristics: Summary of available data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **198-199**: 335-346.

[21] 叶俊, 王小丽, Gonzale P P, 等. 有机和常规生产模式下菜田土壤酶活性差异研究 [J]. 中国生态农业学报, 2012, **20**(3): 279-284.

[22] Bowles T M, Acosta-Martinez V, Calderon F, *et al.* Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, **68**: 252-262.

[23] de Araujo A S F, de Melo W J. Soil microbial biomass in organic farming system [J]. *Ciência Rural*, 2010, **40**(11): 2419-2426.

[24] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响 [J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 277-281.

[25] 程云, 周启星. 土壤脲酶和脱氢酶对活性 X-3B 红污染暴露的耐受性及机理研究 [J]. 环境科学, 2003, **24**(2): 23-29.

[26] 贾金生, 李俊, 张永强. 夏玉米生长盛期农田土壤 CO₂ 排放的研究 [J]. 中国生态农业学报, 2003, **11**(3): 1-4.

[27] 张洪宾. 不同原料及其配比对厌氧发酵过程中脱氢酶辅酶、F₄₂₀ 以及微生物群落结构的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012. 12-14

[28] Zhang Y N, Li Y L, Wang L, *et al.* Soil microbiological variability under different successional stages of the Chongming Dongtan wetland and its effect on soil organic carbon storage [J]. *Ecological Engineering*, 2013, **52**: 308-315.

[29] 闫晗, 葛蕊, 潘胜凯, 等. 恢复措施对排土场土壤酶活性和微生物量的影响 [J]. 环境化学, 2014, **33**(2): 327-333.

[30] 苑学霞, 林先贵, 褚海燕, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对不同施氮土壤酶活性的影响 [J]. 生态学报, 2006, **26**(1): 48-53.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主 编：欧阳自远
副主编：赵景柱 郝吉明 田 刚
编 委：（按姓氏笔画排序）

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976 年 8 月创刊)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《 环 境 科 学 》 编 辑 委 员 会 北京市 2871 信箱 (海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行