

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM<sub>2.5</sub> 持续暴露的健康风险及其损害价值评估 ..... 谢元博, 陈娟, 李巍 ( 1 )

长白山 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子季节变化特征研究 ..... 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 ( 9 )

青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响 ..... 柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 ( 15 )

重庆市大气二噁英污染水平及季节变化 ..... 张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 ( 22 )

西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放 ..... 卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 ( 30 )

西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放 ..... 张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 ( 35 )

杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征 ..... 蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 ( 41 )

模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究 ..... 符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 ( 46 )

川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化 ..... 童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 ( 53 )

重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化 ..... 余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 ( 60 )

汉江上游金水河流域氮湿沉降 ..... 王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 ( 66 )

麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成 ..... 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 ( 73 )

兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究 ..... 吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 ( 79 )

中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究 ..... 马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 ( 85 )

水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO<sub>2</sub> 释放的影响 ..... 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 ( 93 )

黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征 ..... 吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 ( 100 )

浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价 ..... 马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 ( 108 )

POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测 ..... 张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 ( 117 )

降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义 ..... 陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师阳 ( 123 )

锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素 ..... 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede ( 131 )

子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征 ..... 赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 ( 143 )

水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响 ..... 宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 ( 150 )

黄东海表层沉积物中磷的分布特征 ..... 宋国栋, 刘素美, 张国玲 ( 157 )

河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究 ..... 张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 ( 163 )

沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制 ..... 武晓飞, 李大鹏, 汪明 ( 171 )

三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析 ..... 敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 ( 179 )

太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价 ..... 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 ( 186 )

滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究 ..... 王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 ( 194 )

浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术 ..... 王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 ( 202 )

光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究 ..... 王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 ( 208 )

同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究 ..... 刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 ( 214 )

垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究 ..... 孙洪伟, 郭英, 彭永臻 ( 221 )

油田区土壤石油烃组分残留特性研究 ..... 胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 ( 227 )

水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态 ..... 谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 ( 233 )

土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响 ..... 廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 ( 240 )

水稻土团聚体 Cu<sup>2+</sup> 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化 ..... 许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 ( 248 )

Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响 ..... 刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 ( 254 )

淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌侵染 2 种湿地植物的影响 ..... 马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 ( 263 )

太湖水质与水生生物健康的关联性初探 ..... 周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 ( 271 )

3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较 ..... 姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 ( 279 )

某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究 ..... 杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 ( 286 )

异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响 ..... 胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 ( 292 )

Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价 ..... 王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 ( 299 )

基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究 ..... 郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 ( 304 )

微囊藻毒素降解菌 *Paucibacter* sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性 ..... 游狄杰, 陈晓国, 向荟圯, 欧阳溱, 杨冰 ( 313 )

硝酸盐抑制油田采出水中硫酸盐还原菌活性研究 ..... 杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 ( 319 )

降解纤维素产甲烷的四菌复合系 ..... 吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 ( 327 )

中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素 ..... 谢薇, 陈书涛, 胡正华 ( 334 )

内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究 ..... 史晶晶, 耿元波 ( 341 )

南京河流夏季水-气界面 N<sub>2</sub>O 排放通量 ..... 韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 ( 348 )

杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响 ..... 肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 ( 356 )

生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究 ..... 彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 ( 365 )

不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究 ..... 卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 ( 371 )

硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用 ..... 严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 ( 380 )

县域尺度的京津冀都市圈 CO<sub>2</sub> 排放时空演变特征 ..... 汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 ( 385 )

保水剂性能及其农用安全性评价研究进展 ..... 李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 ( 394 )

《环境科学》征订启事 (65) 《环境科学》征稿简则 (220) 信息 (226, 270, 298, 364)

# 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO<sub>2</sub> 释放的影响

柯跃进, 胡学玉\*, 易卿, 余忠

(中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

**摘要:** 为探究生物炭自身稳定性及其输入土壤后对于土壤本体有机碳的影响, 本研究模拟自然条件, 分别将 500℃ 和 700℃ 裂解的水稻秸秆生物炭(RBC500 和 RBC700)以 0% (空白土壤)、3%、6% 和 100% (纯生物炭)的比例添加至耕地土壤进行室内培养实验, 观测总有机碳(TOC)与易氧化态碳(EOC)含量的变化及 CO<sub>2</sub> 排放特征. 结果表明, 与空白土壤处理相比, 土壤 TOC、EOC 含量均随水稻秸秆生物炭添加量的增加而升高; 相同添加量条件下, RBC500 对土壤 TOC 与 EOC 增加的贡献均高于 RBC700. 各处理土壤 TOC 含量在前 30 d 内均降低(最大降幅为 15.8%), 并于培养后期趋于稳定; 土壤 EOC 含量在培养初 30 d 内均降低, 当生物炭添加比例为 3% 和 6% 时, RBC500 使土壤的 EOC 含量降幅分别为 72.4% 和 81.7%, 大于 RBC700 的 61.3% 和 69.8%; 培养结束时, 添加相同裂解温度生物炭的土壤 EOC 值相近. 培养前期土壤中 EOC 含量的下降可能与生物炭中易分解组分引起的矿化作用有关. 在 130 d 培养期内, CO<sub>2</sub> 累计排放量大小顺序为: 土壤 + 生物炭混合处理 < 纯土壤处理 < 纯生物炭处理, 可见, 生物炭的土壤处理可以减少土壤 CO<sub>2</sub> 的排放, 最大减排率可达 41.05%. 在一个长的时间尺度内, 生物炭的土壤处理有利于土壤碳的固定. 生物炭施用于土壤可作为碳储存载体.

**关键词:** 生物炭; 土壤有机碳; 矿化作用; CO<sub>2</sub>; 减排

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0093-07

## Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO<sub>2</sub> Release in Arable Soil

KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, YU Zhong

(School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to investigate the stability of biochar and the effect of biochar when added into soil on soil organic carbon, a 130-day incubation experiment was conducted with rice straw biochar produced at 500℃ and 700℃ (RBC500 and RBC700) and with addition rates of 0% (control), 3%, 6% and 100% (pure biochar), to detect the change of total organic carbon (TOC), easily oxidized carbon (EOC) and status of CO<sub>2</sub> release, following addition of biochar in arable soil. Results showed that: the content of both TOC and EOC in soil increased with biochar addition rates comparing with the control. RBC500 had greater contributions to both TOC and EOC increasing amounts than those of RBC700 under the same biochar addition rate. TOC contents of all treatments decreased during the initial 30 days with the largest decreasing amplitude of 15.8%, and tended to be stable in late incubation stages. Same to that of TOC, EOC contents of all treatments also tended to remain stable after 30 days, but in the 30 days of early incubation, EOC in the soil decreased by 72.4% and 81.7% respectively when the added amount of RBC500 was 3% and 6%, while it was reduced by 61.3% and 69.8% respectively when the added amount of RBC700 was 3% and 6%. EOC contents of soil added with biochar produced at the same temperature were similar in the end of incubation. The reduction of soil EOC content in early incubation may be related to mineralization caused by labile fractions of biochar. During the 130-day incubation, the accumulated CO<sub>2</sub> releases showed an order of soil and biochar mixtures < the control < pure biochars. Biochar amendment in soil could reduce CO<sub>2</sub> release, the largest reduction amplitude is 41.05%. In a long time scale, biochar as a soil amendment is favorable to the deduction of greenhouse gas release and soil carbon immobilization. Biochar could be used as a soil carbon sequestration carrier.

**Key words:** biochar; soil organic carbon; mineralization; CO<sub>2</sub>; emission reduction

生物炭是黑碳的一种, 专指由植物或动物废弃物质在完全或部分缺氧条件下经裂解炭化产生的一类高度芳香化的、抗分解能力极强的固态物质<sup>[1, 2]</sup>. 生物炭含碳量高并表现出一定的化学惰性, 应用于土壤后在一定程度上可减缓陆地生态系统碳循环<sup>[3]</sup>. 正因为如此, 有研究者对生物炭的环境效应较为乐观, 认为生物炭——土壤系统具有固定大气 CO<sub>2</sub>、减少温室气体排放的潜力<sup>[4-7]</sup>, 将生物炭纳入碳排放交易框架具有可行性和现实意义<sup>[8]</sup>.

但是也有一些不同的声音. 实际上, 当生物炭进入土壤环境以后, 是增加土壤碳的储存还是促进土壤碳的排放, 这个问题仍存有争议. Wardle 等<sup>[9]</sup>以位于瑞典北部的 3 个不同年限和不同土壤肥力的森林土壤生态系统为研究对象, 调查了生物炭对森

收稿日期: 2013-04-02; 修订日期: 2013-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071159)

作者简介: 柯跃进(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境化学, E-mail: 0110keyuejin@gmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: huxueyu@cug.edu.cn

林土壤有机质的影响,研究历时 10 a. 结果表明,当生物炭与森林土壤腐殖质混合时,土壤中的微生物数量显著增加,这些微生物促进了该森林土壤中本体有机质的分解,使得其中的碳以  $\text{CO}_2$  的形式排放到大气中. 因此,该研究小组认为,生物炭作为一个长期的土壤碳库的功能似乎被高估了,该功能至少部分地被其能够促进土壤本体有机质分解这一效应所抵消. 但是也有研究表明,添加生物炭降低了土壤的  $\text{CO}_2$  通量<sup>[10]</sup>. 此外,不同温度下制备的生物炭及其添加量的不同也可引起土壤环境效应的差异<sup>[11]</sup>. 可见,生物炭如何影响土壤本体有机碳分解转化,仍存在很大的不确定性.

本研究选取农业生态系统中十分普遍的水稻秸秆为生物质原材料,通过限氧控温炭化法制取生物炭,采用室内培养实验,分析了生物炭对土壤总有机

碳(total organic carbon, TOC)、易氧化态碳(easily oxidized carbon, EOC)的影响及  $\text{CO}_2$  排放规律,以期生物炭施用于土壤的固碳效应提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

供试土壤取自武汉市郊磨山村(中国地质大学(武汉)旁)0~20 cm 表层菜园土. 多点混合采样. 去除活体根系和可见有机物残体后,取部分新鲜土壤测定土壤含水量及易氧化态碳,剩余土壤于室内自然风干,磨细过 2 mm 筛,储存于玻璃塞广口瓶中,0℃~4℃冷藏备用. 实验开始前,将土壤于恒温培养箱中(25±1)℃预培养 7 d 以活化土壤,调节土壤含水量为田间持水量 65% 左右. 供试土壤的理化性质见表 1.

表 1 供试土壤理化性质

pH 值	有机碳 /g·kg <sup>-1</sup>	全氮 /g·kg <sup>-1</sup>	全磷(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) /g·kg <sup>-1</sup>	全钾(K <sub>2</sub> O) /g·kg <sup>-1</sup>	碱解氮 /mg·kg <sup>-1</sup>	速效磷(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) /mg·kg <sup>-1</sup>	速效钾(K <sub>2</sub> O) /mg·kg <sup>-1</sup>	CaCO <sub>3</sub> /g·kg <sup>-1</sup>	土壤质地
6.42	18.71	0.91	1.25	11.9	58.3	106.1	226.1	0.00	砂壤土

### 1.2 生物炭制备

将洗净风干后的水稻秸秆碎屑置于马弗炉中(KSW-4b-11A 型,湖北英山县建力电炉制造有限公司),采用限氧控温炭化法,以 5℃·min<sup>-1</sup> 升至目标温度(500℃和 700℃),在目标温度下停留 2 h,关闭马弗炉,待温度自然冷却至室温后,将制得的生物炭用研钵磨碎并过 0.25 mm 筛,装袋备用. 所制取的生物炭分别记为 RBC500(代表 500℃ 温度下制取的水稻秸秆生物炭,以下类推)与 RBC700.

采用电极法(PHS-3C 酸度计,上海精科仪器厂)测定 pH; 采用全自动化比表面积测定仪(NOVA-2000E 型,美国 Quantachrome 公司)测定生物炭样品的比表面积; 采用醋酸铵法测定生物炭阳离子交换量(CEC). 其基本性状见表 2.

表 2 生物炭的基本性状

生物炭	pH	BET 比表面积 /m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	CEC /mol·kg <sup>-1</sup>
500RBC	9.09	31.56	232.61
700RBC	11.30	123.60	158.70

### 1.3 培养实验

将在 500℃ 和 700℃ 下制得的水稻秸秆生物炭分别以 0% (空白对照)、3%、6% 和 100% (纯生物炭)的质量分数与活化土壤混合均匀,活化土壤与

生物炭混合处理和纯生物炭处理的初始质量分别为 1 000 g 和 250 g, 分别装入培养瓶(1 000 mL 梅森瓶)并密封,记为土壤空白、RBC500-3%、RBC500-6%、RBC500(纯生物炭处理,以下类推)、RBC700-3%、RBC700-6% 和 RBC700,重复 3 次. 培养期内保持土壤含水量为田间持水量的 65% 左右. 培养瓶随机摆放于恒温培养箱内,设置温度为(25±1)℃、光照强度为昼 30 000 lx 夜 0 lx. 在培养期间的 0、30、80 和 130 d 分别于培养瓶中均匀选三点垂直取样 60 g,样品于室内自然风干、研磨,并分别过 0.850 mm 和 0.150 mm 筛.

### 1.4 CO<sub>2</sub> 排放量测定

采用碱液吸收法测定土壤的 CO<sub>2</sub> 排放量. 将盛有 20 mL 2 mol·L<sup>-1</sup> 的 NaOH 溶液的烧杯置于培养瓶内,将培养瓶加盖密封好,于恒温箱中培养. 取样测定时,取出烧杯,同时更换盛有等量同种 NaOH 溶液的烧杯继续培养(NaOH 需过量). 碱液每隔 10 d 更换一次,每次换取碱液之前,迅速向培养瓶吹入新鲜空气(5 min),并加入适量去离子水,使瓶内土壤含水量为田间持水量的 65%.

### 1.5 TOC 测定

水合热重铬酸钾氧化-比色法<sup>[12]</sup>. 称取过 0.150 mm 筛的风干土样 1.000 g,用 3.0 mL 去离子水充分将土样摇匀,加入 10.0 mL 的 0.800 0

mol·L<sup>-1</sup>重铬酸钾溶液和 10.0 mL 浓硫酸并摇匀, 停放 20 min, 加 10.0 mL 去离子水, 摇匀后静置 5 h. 吸取上清液 3.0 mL 于 10 mL 比色管中并加去离子水至刻度充分摇匀, 同时用葡萄糖配制有机碳标准溶液. 在 590 nm 波长下进行比色测定吸光值.

### 1.6 EOC 测定

高锰酸钾氧化法<sup>[13]</sup>. 称取过 0.150 mm 筛的 1 g 风干土样, 装入 100 mL 离心管中, 加入 25 mL 的 333 mmol·L<sup>-1</sup> KMnO<sub>4</sub> 溶液, 以 25 r·min<sup>-1</sup> 振荡 1 h, 同时设置空白对照. 以 4 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 5 min, 取上清液, 用去离子水按 1:250 稀释. 同时制备标准溶液. 标准溶液和稀释液均用分光光度计在 565 nm 波长下进行比色测定. 由空白对照样品与土壤样品的吸光率之差, 计算土壤样品的 EOC 含量 (1 mmol·L<sup>-1</sup> KMnO<sub>4</sub> 氧化消耗 9 mg C).

### 1.7 数据分析

采用 Microsoft EXCEL 2007 制作数据图、SPSS 13.0 进行单因素方差分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 水稻秸秆生物炭对土壤总有机碳 (TOC) 变化的影响

不同生物炭添加量处理在培养期间的土壤 TOC 变化如图 1 所示. 与空白处理相比, 生物炭的加入显著提高了土壤 TOC 的含量 ( $P < 0.05$ ), 添加生物炭的土壤 TOC 含量随生物炭添加量的增加而升高. 且生物炭添加量相同时, 低温裂解生物炭对土壤 TOC 含量的贡献高于高温裂解生物炭 ( $P < 0.05$ ).

由图 1 可知, 随着培养时间的延长, 土壤中 TOC 含量呈下降趋势. 在培养初始 30 d 内, 添加 RBC500 土壤的 TOC 含量降幅达到 15.8%, 随后其降低速率趋于平缓; 而添加 RBC700 的土壤 TOC 含量同期降幅仅为 3.3%, 其最大降幅出现在 30 d ~ 80 d 培养阶段, 之后降低速率也趋于平缓. 这可能与不同裂解温度下生物炭中 EOC 等活性组分的含量不同有关. 值得关注的是, 土壤培养 130 d 后, 4 个混合处理 (RBC500-3%、RBC500-6%、RBC700-3% 和 RBC700-6%) 的其 TOC 含量相近, 两个纯生物炭处理 (RBC500 和 RBC700) 的 TOC 含量也相近, 并由此推测其中有机碳的含量可能将不再大幅继续下降. 这一现象说明了培养前期土壤 TOC 含量的下降可能是由于生物炭中不稳定组分的矿化作用所致, 同时也说明在一个较长的时间尺

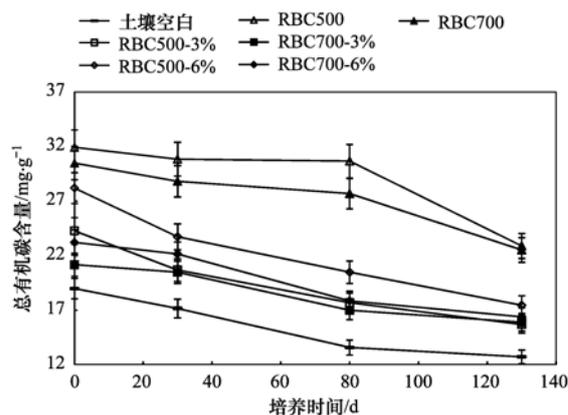


图 1 添加水稻秸秆生物炭对土壤总有机碳的影响

Fig. 1 Impacts of rice straw biochar on soil total organic carbon (TOC)

度内, 生物炭对土壤有机碳的贡献作用.

### 2.2 水稻秸秆生物炭对土壤易氧化态碳 (EOC) 变化的影响

易氧化态碳 (EOC) 是土壤中移动快、不稳定、易于氧化和矿化的具有较高微生物活性的有机碳, 是土壤活性有机碳的重要组成部分. 如图 2 所示, 与土壤空白相比, 添加生物炭处理的 EOC 含量随着生物炭添加量的增加而升高. 生物炭添加量相同时, 较低温裂解生物炭对土壤 EOC 的贡献高于高温裂解生物炭 ( $P < 0.05$ ). 4 种添加处理 (RBC500-3%、RBC500-6%、RBC700-3% 和 RBC700-6%) 的土壤 EOC 含量分别比土壤空白增加了 4.10、6.85、1.64 和 2.37 mg·g<sup>-1</sup>. 生物炭添加有利于土壤易氧化态碳的增加.

与培养起始 0 d 相比, 两个纯生物炭处理 (RBC500 和 RBC700) 在培养初始 30 d 内的 EOC 含量迅速降低, 分别降低了 38.26 mg·g<sup>-1</sup> 和 8.41 mg·g<sup>-1</sup>, 降幅为 71.1% 和 53.2%. 而添加生物炭的混合处理在该期间的 EOC 含量也均迅速降低, 4 种添加处理 (RBC500-3%、RBC500-6%、RBC700-3% 和 RBC700-6%) 的 EOC 含量分别降低了 6.17、6.38、3.32 和 3.32 mg·g<sup>-1</sup>. 添加 RBC500 的土壤 EOC 值降幅为 72.4% ~ 81.7%, 而添加 RBC700 的土壤 EOC 值降幅为 61.3% ~ 69.8%. 由此可见, 较低裂解温度下制得的生物炭使土壤的 EOC 含量降幅更大. 土壤培养 30 d 后, 其 EOC 含量基本趋于稳定. 130 d 的培养期结束后, 四种生物炭处理 (RBC500-3%、RBC500-6%、RBC700-3%、RBC700-6%) 的土壤 EOC 含量分别降低了 7.27、8.42、4.48 和 4.38 mg·g<sup>-1</sup>. 可以看出, 在培养结束时, 添加相同裂解温度生物炭的土壤 EOC 含量相

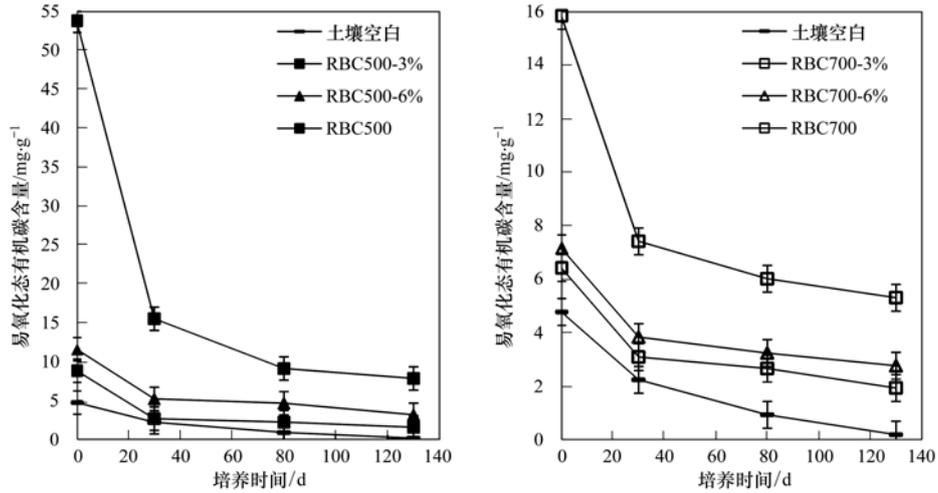


图2 水稻秸秆生物炭对土壤易氧化态碳的影响

Fig. 2 Impacts of rice straw biochar on soil easily oxidized carbon (EOC)

近. 这一现象说明了其培养前期土壤中 EOC 含量的下降可能与生物炭中易分解组分的矿化作用有关.

2.3 水稻秸秆生物炭对土壤 CO<sub>2</sub> 排放的影响

如图3所示,在培养期内,两种纯生物炭处理 RBC500 和 RBC700 的 CO<sub>2</sub> 排放趋势一致. 在培养

30 d 时,两者 CO<sub>2</sub> 排放量都达到最大值,分别为 25.00 μmol·g<sup>-1</sup>和 13.92 μmol·g<sup>-1</sup>,这与前述土壤的 TOC、EOC 的结果相一致. 在培养前 60 d 内,添加水稻秸秆生物炭的土壤 CO<sub>2</sub> 各时段排放量均高于对照(纯土壤),且在相同添加量条件下,较低裂解温度生物炭对土壤 CO<sub>2</sub> 排放量的贡献高于高温

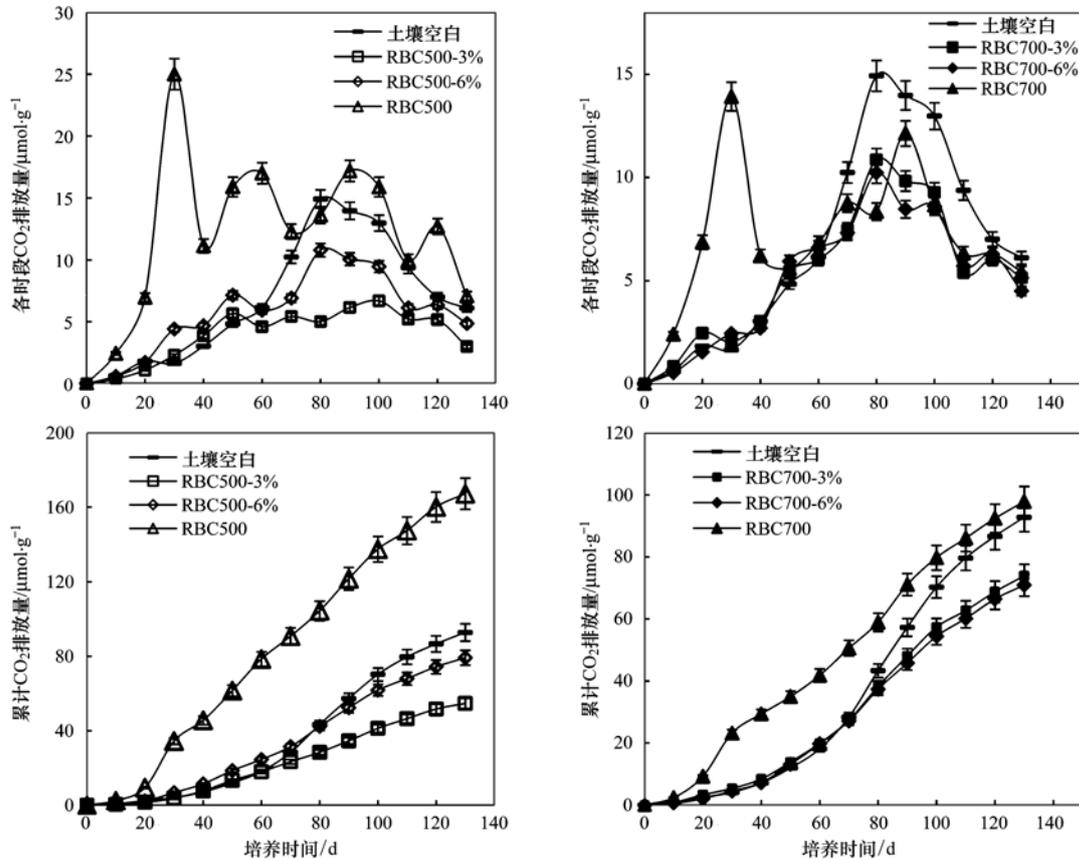


图3 CO<sub>2</sub> 的阶段排放量与累计排放量

Fig. 3 CO<sub>2</sub> stage release and accumulated release

裂解生物炭 ( $P < 0.05$ )。从 60 d 开始直至培养结束, 添加生物炭处理的土壤 CO<sub>2</sub> 排放量均低于对照 (纯土壤) ( $P < 0.05$ ), 这表明经过短期的矿化作用之后, 生物炭中的碳组分以及土壤有机碳组分均趋于稳定。

图 3 中不同处理土壤的 CO<sub>2</sub> 累计释放量结果显示, 在 130 d 培养期内, 两个纯生物炭处理 RBC500 和 RBC700 的 CO<sub>2</sub> 累计释放量分别达到 167.27  $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$  和 97.82  $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ , 均高于对照土壤的 92.78  $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ ; 4 种生物炭添加处理 (RBC500-3%、RBC500-6%、RBC700-3% 和 RBC700-6%) 的土壤 CO<sub>2</sub> 总排放量为 54.67、79.21、73.92 和 70.93  $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ , 均低于对照土壤释放量 ( $P < 0.05$ ), 最低值出现在 RBC500-3% 土壤处理, 其减排效果最为明显, 其 CO<sub>2</sub> 减排幅度达 41.05%。CO<sub>2</sub> 总排放量大小顺序为: 土壤 + 生物炭混合样品 < 纯土壤 < 纯生物炭, 处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。由此可见, 生物炭的土壤处理可以减少土壤 CO<sub>2</sub> 的排放。

### 3 讨论

#### 3.1 不同裂解温度生物炭在土壤中的稳定性

生物炭的稳定性受其中脂肪族成分和芳烃成分相对含量的影响<sup>[14]</sup>。生物炭是高度非均质物质, 其成分十分复杂。生物炭内的碳形式可能取决于植物细胞中碳的结构特征、炭化条件 (主要是温度和时间) 以及形成过程 (挥发性物质的浓缩或植物细胞直接炭化)<sup>[15]</sup>。有研究发现, 当裂解温度升高时, 生物炭的产率急剧下降; 生物炭随裂解温度的升高而进一步炭化, 其中剩余的碳重排形成稳定碳结构形式<sup>[16]</sup>, 不稳定的脂肪族化合物在热解过程中有所损失, 并形成更稳定的芳烃成分; 随热解温度的升高逐渐发生了矿物重组, 多环芳烃中萘的数量优势也逐渐增加<sup>[17]</sup>。较高温 (500 ~ 700℃) 裂解生物炭的主要碱性成分是碳酸盐, 而较低温度热解生物炭的碱度主要来源于—COO (—) (—COOH) 和—O (—) (—OH) 等官能团<sup>[18]</sup>。Ahmad 等<sup>[19]</sup>的研究也表明, 与较低温度制得的生物炭相比, 700℃ 制得的生物炭具有更高的芳香性和更低的孔隙度, 致使较高温条件下制得的生物炭更加稳定, 其自身所含易分解组分更少。这与本研究中较低温裂解生物炭对土壤 EOC 的贡献高于高温裂解生物炭、较低裂解温度下制得的生物炭使土壤的 EOC 含量降幅更大这两个结果一致。Masek 等<sup>[20]</sup>得出尽管生物炭稳

定性随生物炭热解温度的升高而升高, 生物炭稳定成分的产量却几乎和温度无关的结论, 在本研究也得到了相同的结果。这反过来能够解释 Kim 等<sup>[16]</sup>的研究中发生的更高裂解温度导致更低的生物炭产率的现象。因此, 本研究设定的两种裂解温度 (500℃ 与 700℃) 对生物炭的碳含量的影响, 更多表现为不稳定碳 (易氧化态碳) 的含量, 而不是稳定碳的含量。

#### 3.2 生物炭对土壤本体有机碳的影响

纯生物炭在培养初期的 CO<sub>2</sub> 释放, 一方面是微生物呼吸作用的结果, 生物炭的施用能够改变土壤的 pH, 从而改变土壤呼吸速率<sup>[21]</sup>。另一方面很可能还伴随着较强的化学分解过程<sup>[22]</sup>。较低裂解温度下形成的水稻秸秆生物炭具有较高含量的易氧化态碳等活性有机碳组分<sup>[23]</sup>, 使得土壤微生物活性更强。另外, 生物炭本身可以充当微生物的居住环境和培养基, 进而影响土壤微生物的数量及其活性<sup>[15]</sup>。有研究结果显示, 添加较低温 (250 ~ 400℃) 裂解生物炭后, 土壤有机碳矿化量比预期大得多<sup>[24, 25]</sup>, 也就是说, 较低温度裂解生物炭中易分解态碳含量更高。较低温度裂解生物炭中不完全转化的纤维素、半纤维素等糖类物质在土壤中对土壤有机碳的降解有较大贡献, 这些不稳定的糖类物质极易为土壤微生物利用, 降低生物炭的固碳潜力, 促进土壤 CO<sub>2</sub> 释放<sup>[26]</sup>。这可能可以解释本项研究在培养前期 RBC500 的 CO<sub>2</sub> 释放量高于 RBC700 的现象。土壤呼吸的 CO<sub>2</sub> 稳定同位素特征值显示, 培养早期碳矿化主要发生于热解碳矿化的激发, 其研究者认为土壤有机质的存在短期内激发了生物炭更多不稳定成分的协同矿化<sup>[24]</sup>。这与本研究中培养初期易氧化态碳含量骤减和纯生物炭处理的 CO<sub>2</sub> 释放量较大的现象一致。此外也有研究者认为, 生物炭的芳香烃成分对新微生物量的合成也产生贡献, 并且有实验测得的土壤释放的 CO<sub>2</sub> 主要来源于生物炭的芳香烃成分对初期碳释放的贡献<sup>[27, 28]</sup>。

Zimmerman 等<sup>[24]</sup>的研究显示, 生物炭加入土壤后, 其体系内的碳矿化在后期受到抑制, 这也与本研究结果相一致。作为外源有机质, 生物炭施入土壤一定时间后, 与土壤团聚体的结合使之与外界的接触面积减少, 反应性降低<sup>[29, 30]</sup>。此外, 生物炭与土壤有机质的不稳定成分也可能经物理化学或生物化学过程转化为稳定成分。有研究显示, 生物炭的添加不仅促进了土壤腐殖质的形成, 还有助于碳水化合物、酯族、芳烃等难以被微生物利用的有机大

分子的形成<sup>[31, 32]</sup>,这种过程将降低有机碳的微生物利用量,从而减少了土壤 CO<sub>2</sub> 的排放. 章明奎等<sup>[33]</sup>的研究也表明,生物质在短时间内提高了微生物量碳,但随着培养时间的增加,其微生物量碳最终明显低于不添加有机物料的处理. 本项研究中生物炭与土壤混合处理的 CO<sub>2</sub> 释放量比土壤空白处理与纯生物炭处理的释放量更低,生物炭对土壤有机碳的作用表现为互相抑制,这一结果与上述观点可以相互印证. 一项在黄土上的研究也显示,生物炭的施用降低了黄土中的 CO<sub>2</sub> 释放量<sup>[10]</sup>. 由本实验结果可以推测,在一个长的时间尺度内,生物炭的土壤处理有利于土壤碳的固定,有较明显的减排作用.

#### 4 结论

(1)生物炭的添加可提高土壤总有机碳的含量. 相同添加量条件下,低温裂解生物炭对土壤有机碳增加的贡献高于高温裂解生物炭. 经 130 d 的培养,所有处理 TOC 含量均降低,最大降幅为 15.8%. 培养结束后,各处理土壤中总有机碳含量基本趋于稳定. 生物炭施用于土壤可作为碳储存载体.

(2)生物炭的添加同样可提高土壤易氧化态碳的含量. 在培养初始 30 d 内,不同生物炭处理土壤 EOC 含量迅速降低,培养 30 d 后,土壤 EOC 含量基本趋于稳定;培养前期土壤中 EOC 含量的下降可能与生物炭中易分解组分的矿化分解有关.

(3)培养初期,生物炭发生剧烈的矿化作用. 就整个培养周期而言,CO<sub>2</sub> 总排放量大小顺序为:土壤 + 生物炭混合样品 < 纯土壤 < 纯生物炭. 生物炭的土壤处理可以减少土壤 CO<sub>2</sub> 的排放,最大减排率可达 41.05%. 由此可推测,在一个长的时间尺度内,生物炭的土壤处理有利于土壤碳的固定,有较明显的减排作用.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Goldberg E D. Black carbon in the environment: properties and distribution[M]. New York, NY: John Wiley and Sons, 1985. 198.
- [ 2 ] Hammes K, Schmidt M W I, Smernik R J, *et al.* Comparison of quantification methods to measure fire-derived (black/elemental) carbon in soils and sediments using reference materials from soil, water, sediment and the atmosphere[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2007, **21**, GB30163.
- [ 3 ] Lehmann J. A handful of carbon [J]. Nature, 2007, **447** (7141): 143-144.
- [ 4 ] Xu G, Lv Y C, Sun J N, *et al.* Recent advances in biochar applications in agricultural soils: benefits and environmental implications [J]. Clean-Soil, Air, Water, 2012, **40** (10): 1093-1098.
- [ 5 ] Sohi S P. Carbon storage with benefits[J]. Science, 2012, **338** (6110): 1034-1035.
- [ 6 ] Manyà J J. Pyrolysis for Biochar Purposes; a review to establish current knowledge gaps and research needs [J]. Environmental Science and Technology, 2012, **46**(15): 7939-7954.
- [ 7 ] Denyes M J, Langlois V S, Rutter A, *et al.* The use of biochar to reduce soil PCB bioavailability to *Cucurbita pepo* and *Eisenia fetida*[J]. Science of The Total Environment, 2012, **437**: 76-82.
- [ 8 ] Lehmann J. Bio-energy in the black [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2007, **5**(7): 381-387.
- [ 9 ] Wardle D A, Nilsson M C, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus [J]. Science, 2008, **320** (5876): 629.
- [ 10 ] Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H Q, *et al.* Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by <sup>14</sup>C labeling [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(2): 210-219.
- [ 11 ] Luo Y, Durenkamp M, De Nobili M, *et al.* Short term soil priming effects and the mineralisation of biochar following its incorporation to soils of different pH [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(11): 2304-2314.
- [ 12 ] 刘世杰, 窦森. 重铬酸钾氧化法用于黑碳分析的条件探讨 [J]. 吉林农业大学学报, 2010, **32**(3): 316-320.
- [ 13 ] Blair G J, Lefroy R, Lise L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, **46**(7): 1459-1466.
- [ 14 ] 胡学玉, 易卿, 禹红红. 土壤生态系统中黑碳研究的几个关键问题 [J]. 生态环境学报, 2012, **21**(1): 153-158.
- [ 15 ] Dou S, Zhou G Y, Yang X Y, *et al.* Biochar and its relation to humus carbon in soil: a short review [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, **49**(4): 796-802.
- [ 16 ] Kim K H, Kim J Y, Cho T S, *et al.* Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*) [J]. Bioresource Technology, 2012, **118**: 158-162.
- [ 17 ] Kloss S, Zehetner F, Dellantonio A, *et al.* Characterization of slow pyrolysis biochars: effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties [J]. Journal of Environmental Quality, 2012, **41**(4): 990-1000.
- [ 18 ] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 3488-3497.
- [ 19 ] Ahmad M, Lee S S, Dou X M, *et al.* Effects of pyrolysis temperature on soybean stover-and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water [J]. Bioresource Technology, 2012, **118**: 536-544.
- [ 20 ] Mašek O, Brownsort P, Cross A, *et al.* Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar [J].

- Fuel, 2013, **103**: 151-155.
- [21] 范分良, 黄平容, 唐勇军等. 微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 932-937.
- [22] Bird M I, Grocke D R. Determination of the abundance and carbon isotope composition of elemental carbon in sediments[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**(16): 3413-3423.
- [23] Zimmerman A R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar) [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **44**(4): 1295-1301.
- [24] Zimmerman A R, Gao B, Ahn M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(6): 1169-1179.
- [25] 刘燕萍, 高人, 杨玉盛, 等. 黑碳添加对土壤有机碳矿化的影响[J]. 土壤, 2011, **43**(5): 763-768.
- [26] Bruun E W, Hauggaard-Nielsen H, Ibrahim N, *et al.* Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, **35**(3): 1182-1189.
- [27] Knicker H, González-Vila F J, González-Vázquez R. Biodegradability of organic matter in fire-affected mineral soils of Southern Spain [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **56**: 31-39.
- [28] Zimmermann M, Bird M I, Wurster C, *et al.* Rapid degradation of pyrogenic carbon [J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(11): 3306-3316.
- [29] 章明奎, 顾国平, 王阳. 生物质炭在土壤中的降解特征[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2012, **38**(3): 329-335.
- [30] Liang B Q, Lehmann J, Sohi S P, *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, **41**(2): 206-213.
- [31] Cross A, Sohi S P. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(10): 2127-2134.
- [32] 花莉, 金素素, 洛晶晶. 生物质炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(11): 1795-1799.
- [33] 章明奎, Bayou W D, 唐红娟. 生物质炭对土壤有机质活性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(2): 127-131, 137.

## CONTENTS

An Assessment of PM <sub>2.5</sub> Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days .....	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei ( 1 )
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> at Changbai Mountain .....	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> ( 9 )
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility .....	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> ( 15 )
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation .....	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> ( 22 )
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China .....	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> ( 30 )
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China .....	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> ( 35 )
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou .....	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> ( 41 )
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources .....	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> ( 46 )
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China .....	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> ( 53 )
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010 .....	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> ( 60 )
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River .....	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> ( 66 )
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke .....	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> ( 73 )
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou .....	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> ( 79 )
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone .....	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> ( 85 )
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO <sub>2</sub> Release in Arable Soil .....	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> ( 93 )
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea .....	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> ( 100 )
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China .....	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> ( 108 )
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler .....	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> ( 117 )
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater .....	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> ( 123 )
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls .....	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> ( 131 )
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin .....	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> ( 143 )
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics .....	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jun-shui, <i>et al.</i> ( 150 )
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea .....	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling ( 157 )
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution <sup>31</sup> P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments .....	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> ( 163 )
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance .....	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming ( 171 )
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges .....	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> ( 179 )
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu .....	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> ( 186 )
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake .....	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> ( 194 )
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra .....	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> ( 202 )
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process .....	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> ( 208 )
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge .....	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> ( 214 )
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate .....	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen ( 221 )
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields .....	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> ( 227 )
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment .....	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> ( 233 )
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China .....	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> ( 240 )
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil .....	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> ( 248 )
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution .....	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> ( 254 )
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants .....	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang ( 263 )
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake .....	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> ( 271 )
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria .....	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> ( 279 )
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria .....	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> ( 286 )
Influence of the Coexistence of Zn <sup>2+</sup> on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i> .....	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> ( 292 )
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results .....	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> ( 299 )
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model .....	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> ( 304 )
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH .....	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> ( 313 )
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate .....	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> ( 319 )
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains .....	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> ( 327 )
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China .....	XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua ( 334 )
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China .....	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo ( 341 )
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer .....	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> ( 348 )
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water .....	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> ( 356 )
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant .....	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> ( 365 )
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N <sub>2</sub> O Catalytic Decomposition .....	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping ( 371 )
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea .....	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> ( 380 )
County Scale Characteristics of CO <sub>2</sub> Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region .....	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> ( 385 )
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application .....	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> ( 394 )

# 《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 15, 2014

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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. 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  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行