

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

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

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析	徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响	于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)
南京北郊冬季霾天 PM _{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究	周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系	李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征	莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析	朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征	薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征	胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)
燃煤电厂湿烟卤降雨成因分析	欧阳丽华, 庄焯, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究	谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露	李岫雯, 曾辉, 倪宏刚 (1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳	黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能	王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响	方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析	刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)
深圳近岸海域全氟化化合物的污染特征	刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)
杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义	李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价	黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应	万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系	张磊, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)
藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响	包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国锋, 韩士群, 周庆 (2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究	李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征	肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义	李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征	张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究	黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究	丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)
三维花状结构 α-FeOOH 协同 H ₂ O ₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠	许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)
UV/H ₂ O ₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素	冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)
钼掺杂 TiO ₂ 光催化降解全氟辛酸	刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7	吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)
纳米 Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解	孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe ⁰ 及降解水中 TCE 的研究	樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究	祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制	肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)
铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)
聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附	张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径	杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究	孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征	张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素	贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究	雍佳君, 成小英 (2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析	王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应	王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)
Shevanelia oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化	司友斌, 孙林, 王卉 (2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收诺氟沙星的影响	马微, 鲍艳宇 (2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响	禄兴丽, 廖允成 (2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化	李晓燕, 张舒婷 (2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染特征	李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟	张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292)
生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响	陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用	曾伟铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制	曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价	杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)
《环境科学》征订启事 (1965) 《环境科学》征稿简则 (2115) 信息 (1925, 2076, 2084, 2146)	

森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳

黄柯, 刘刚*, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要: 选取 10 种乔木制备风干树枝、新鲜树枝两种类型的样品, 通过自制的生物质燃烧装置模拟阴、明燃两种燃烧方式燃烧制备的树枝样品, 采集排放的烟尘, 并使用 DRI2001A 热/光分析仪测定样品中的有机碳(OC)、元素碳(EC)。结果表明, 风干树枝明燃排放烟尘中 OC 的排放因子(EF_{OC})、EC 的排放因子(EF_{EC})、PM 的排放因子(EF_{PM})均值分别为 6.8、2.1、16.5 $g \cdot kg^{-1}$, 阴燃排放烟尘中均值分别为 57.5、11.1、130.9 $g \cdot kg^{-1}$; 新鲜树枝明燃排放烟尘中 EF_{OC} 、 EF_{EC} 、 EF_{PM} 均值分别为 13.6、3.3、30.5 $g \cdot kg^{-1}$, 阴燃排放烟尘中均值分别为 57.6、9.6、125.6 $g \cdot kg^{-1}$ 。树枝(风干树枝、新鲜树枝)阴燃时 EF_{OC} 、 EF_{EC} 、 EF_{PM} 均高于明燃时, 在明燃(高温)条件下含水率与树枝燃烧时 EF_{OC} 、 EF_{EC} 、 EF_{PM} 是呈正相关关系。树枝燃烧烟尘中 OC、EC、TC(TC = OC + EC)占 PM 的百分比约为 45%、10%、55%, 乔木树枝阴燃排放烟尘中 OC 的质量分数高于明燃, EC 的质量分数低于明燃。新鲜树枝排放烟尘中 OC 的质量分数高于风干树枝, EC 的质量分数低于风干树枝。风干树枝明燃条件下 OC/EC 的均值为 3.3(2.5~5.2), 阴燃条件下均值为 5.2(4.3~6.3); 新鲜树枝明燃条件下 OC/EC 的均值为 4.1(3.1~5.3), 阴燃条件下均值为 6.2(4.2~8.4), 乔木树枝阴燃时 OC/EC 的值高于明燃, 含水率高的乔木树枝(新鲜树枝)燃烧排放烟尘中 OC/EC 的值高于含水率低的树枝(风干树枝)。风干树枝燃烧烟尘中 OC、EC 的相关系数为 0.985, 新鲜树枝燃烧烟尘中 OC、EC 的相关系数为 0.915, 含水率不同的乔木树枝(风干树枝、新鲜树枝)在不同燃烧条件下(明燃、阴燃)排放烟尘中 OC 与 EC 都具有良好的相关性。

关键词: 树木树枝; 有机碳(OC); 元素碳(EC); 排放因子; 相关性

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-1998-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.06.012

Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke

HUANG Ke, LIU Gang*, ZHOU Li-min, LI Jiu-hai, XU Hui, WU Dan, HONG Lei, CHEN Hui-yu, YANG Wei-zong

(School of Environmental Science and Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Ten kinds of trees were selected for preparing dry and wet stick samples. Concentrations of organic carbon (OC), elemental carbon (EC) in particular matter produced by sticks samples in the flaming and smoldering were analyzed through the Thermal Optical Carbon Analyzer (Model 2001A). The results showed that mean values of OC (EF_{OC}), EC (EF_{EC}), PM (EF_{PM}) emission factors were 6.8, 2.1, 16.5 $g \cdot kg^{-1}$ in the dry stick flaming smoke, 57.5, 11.1, 130.9 $g \cdot kg^{-1}$ in the dry stick smoldering smoke, 13.6, 3.3, 30.5 $g \cdot kg^{-1}$ in the wet stick flaming smoke, 57.6, 9.6, 125.6 $g \cdot kg^{-1}$ in the wet stick smoldering smoke. Compared to the flaming condition, EF_{OC} , EF_{EC} , EF_{PM} were much higher in the smoldering condition. In the flaming condition, EF_{OC} , EF_{EC} , EF_{PM} had positive correlations with the moisture content. The mean values of OC/PM, EC/PM, TC/PM (TC = OC + EC) were 45%, 10%, 55%, and the mass fractions of OC was much higher in smoldering condition than those in flaming condition, but the mass fractions of EC was lower in the smoldering condition. Compared to dry sticks, the smoke of wet sticks combustion had higher mass fractions of OC and lower mass fractions of EC. The mean value of OC/EC was 3.3 (2.5-5.2) in the dry stick flaming smoke, and was 5.2 (4.3-6.3) in the dry stick smoldering smoke, in the wet stick flaming smoke was 4.1 (3.1-5.3), and was 6.2 (4.2-8.4) in the wet stick smoldering smoke. Compared to the flaming condition, the mean value of OC/EC was higher in the smoldering condition, and the mean value of OC/EC was much higher in high moisture content stick combustion smoke. The correlation coefficient between OC and EC was 0.985 in dry stick combustions, and was 0.915 in wet stick combustions. So, based on the flaming and smoldering condition, the correlation between OC and EC was significant in different moisture contents of sticks.

Key words: sticks; OC; EC; emission factor; correlation

森林火灾是大气气溶胶的一个重要来源^[1~6]。

全世界每年发生森林火灾几十万次, 受灾面积达到几百万公顷, 约占全球森林总面积的 0.1%^[7]。森林火灾不仅使生态遭到破坏^[3], 而且排放出有害气体以及大量的颗粒物^[8~10]。森林火灾排放的颗粒物

收稿日期: 2014-10-23; 修订日期: 2014-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41073019); 江苏省自然科学基金项目(BK20130998)

作者简介: 黄柯(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染与防治工程, E-mail: huang19900926ke@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liugang650104@sina.com

中含有大量的 OC、EC, 对太阳辐射有大量的吸收从而对大气产生重大影响^[11~15]。

树木在不同方式下燃烧排放颗粒物中 OC、EC 的质量分数存在着较大差异。森林野火排放颗粒物中含有较高的 OC^[16~20], 而家庭炉灶中树木燃烧排放颗粒物中 EC 的相对质量分数较高^[21~23]。目前对树木燃烧排放烟尘中 OC、EC 的探讨, 主要侧重于森林野火以及家庭炉灶等树木的明燃状态, 而燃烧条件以及含水率的改变直接影响 OC、EC 的排放。本课题组现已对乔木新叶以及落叶燃烧排放烟尘中 OC、EC 进行研究, 而本研究通过自制的生物质燃烧装置, 在阴燃、明燃两种条件下对森林中的 10 种乔木不同含水率的树枝进行燃烧试验, 通过测定燃料消耗量以及颗粒物的排放量来获得燃烧过程中 OC、EC 的排放因子, 比较不同含水率树枝在不同燃烧方式下排放烟尘中 OC 及 EC 的差异, 以期为源解析及大气污染防治提供可靠资料以及科学依据。

1 材料与方法

1.1 树枝采集与处理

选取森林中常见的 10 种乔木树枝(树枝直径小于 1 cm)作为样品。采样地点为南京浦口, 采样树木为梧桐、柳树、栎树、香樟、刺槐、榔榆、构树、榿树、雪松、麻栎这 10 种乔木。将收集的树木树枝去除灰尘、杂物, 并分成两份, 一份放置于干净通风的走廊中干燥两个星期以上进行风干, 另外一份则直接进行燃烧试验。

1.2 树枝含水率测定

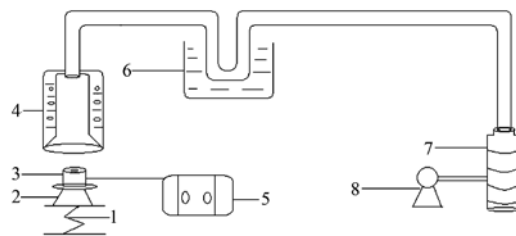
从每一树种的树枝样品中取少量的树枝, 剪碎后放置在烘干已称重的小烧杯中, 将标记好的小烧杯放置在烘箱中, 温度设定为 105℃, 烘干至恒重(即相邻两次称量值差值小于 0.002 g), 在冷却后立即称重, 由上述公式来计算含水率, 精确到 0.1%。

$$\text{含水率}(\%) = \frac{\text{鲜重}(\text{g}) - \text{绝干重}(\text{g})}{\text{鲜重}(\text{g})} \times 100\%$$

1.3 燃烧试验与烟尘采集

模拟树木树枝的两种燃烧方式——明燃和阴燃, 进行室内燃烧试验。利用不锈钢制作的生物质燃烧烟尘采样系统(图 1)进行模拟试验。燃烧装置由一台可调节变压器(0~250 V), 升降台以及电炉组成。通过变压器调节可变电电压控制燃烧温度, 由此来实现树枝的不同燃烧方式。明燃时变压器电压设为 250 V, 预热 2 min, 保证样品添加后能够立即

燃烧并产生火焰; 阴燃时变压器电压设为 175 V, 预热 2 min, 保证样品添加后有火星但无火焰。烟尘集气罩为一双层铁皮桶夹层中加入冷却水, 整个 U 型管道浸没在水槽中, 用于烟尘的降温, 每次采样从开始加热到燃尽(无可见烟气产生)。每种树木树枝按两种燃烧方式各采集 3 个平行样品。



1. 升降台; 2. 底座; 3. 电热炉; 4. 烟尘收集罩;
5. 变压器; 6. 水槽; 7. 采样器; 8. 真空泵

图 1 生物质燃烧烟尘采样系统

Fig. 1 Smoke sampling system of biomass burning

采样所用的滤膜为玻璃纤维滤膜(孔径 0.22 μm), 在使用前将滤膜置于马弗炉中温度设置为 500℃灼烧 2 h, 冷却后置于干燥器中在室温下平衡 24 h, 再称量记录使用。采样后的滤膜同样在室温下平衡 24 h 后再称重。样品用铝箔(在 500℃灼烧 2 h)包裹后, 立即在冰箱中冷冻保存。此外, 在未焚烧树枝的条件下, 进行 3 次空白样的采集, 以排除环境因素的影响。

1.4 样品分析

采用 Model 2001A 热/光碳分析仪(DRI, 美国)对样品中的 OC、EC 进行测定。采用 Improve A-glass 协议程序升温, 升温包含两个阶段, 第一阶段在纯氦气环境下按一定温度梯度(150℃-300℃-450℃-550℃)升温加热, 使滤膜上的有机物气化, 第二阶段在通入含 2% 氧气的氦气环境下进行, 按一定温度梯度(600℃-800℃-900℃)继续加热样品, 分别测出 OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2、EC3。升温全程采用 633 nm 激光全程照射样品, 将反射光强回到初始状态时作为 EC 的起点准确界定 OC 碳化形成的焦化石(POC), 最终将 OC 定义为 OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + POC; EC 定义为 EC1 + EC2 + EC3 - POC。

1.5 质量保证与控制

每天对 Model 2001A 热/光碳分析仪进行检漏, 进样分析前高温烘烤样品炉 10 min 除尽残留杂质气体, 当样品炉压力在 15s 内变化不超过 69 Pa (0.01 Psi) 视为不漏气, 用 He/CH₄ 进行校准, 确保

初始和最终 FID 信号漂移在 ± 3 以内、校准峰面积相对偏差在 5% 以内,每 2 周进行流量平衡校准. 在每个树种所采的 3 张平行样中选取 2 张进行 OC、EC 检测,每张滤膜截取 2 个相邻的小孔(每个小孔的面积为 0.537cm^2 ,使用专用截取器截取),将截取的 2 张小孔分别进行检测,通过计算分别得到 2 组该树种 OC、EC 的值,就得到的 2 组数据求其相对误差,若其相对误差小于 10% 则为合格,否则重新在滤膜上截取小孔,若多次分析后相对误差仍大于 10%,则需要重新进行重新采样. 另外对 10% 的样品要重复分析. 同一样品前后两次分析结果的相对误差应小于 10%. 否则,重新分析所代表数目的样品. 每批样品分析完毕后须再次校准仪器. 如果前后两次校准结果的相对标准偏差小于 5%,则判定此间分析结果可靠. 不然,须重新校准仪器. 如果仍然偏差较大,须重新反顺序测试该批样品,直到与第一次样品测试结果误差较小时为止.

表 1 树枝燃烧烟尘中 OC、EC 及 TC 的质量分数/%

Table 1 Mass fraction of OC, EC and TC in stick burning smoke/%

树木种类	明燃						阴燃					
	风干树枝			新鲜树枝			风干树枝			新鲜树枝		
	OC	EC	TC	OC	EC	TC	OC	EC	TC	OC	EC	TC
榿树	41	15	56	45	9	54	42	8	50	48	6	54
香樟	44	10	55	41	10	51	40	7	47	45	8	53
构树	42	14	56	42	10	52	45	8	53	52	6	58
麻栎	43	16	59	49	12	61	46	10	56	45	8	52
榔榆	41	17	58	47	15	62	48	9	57	50	8	58
雪松	41	13	54	48	13	61	41	9	50	48	8	56
刺槐	45	12	57	47	10	57	39	7	46	49	7	57
栎树	42	9	52	46	9	55	50	8	58	46	7	54
柳树	40	12	52	47	11	58	46	9	55	46	8	54
梧桐	37	14	51	42	12	54	45	10	55	36	9	45
均值	41.6	13.2	55	45.4	11.1	56.5	44.2	8.5	52.7	46.5	7.5	54.1

而生物质含水率的改变也直接影响着 OC、EC 的排放,Carroll 等^[29]对不同含水率的秸秆燃烧排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 进行比较,发现秸秆的含水量能影响燃烧状态,从而进一步影响到颗粒物的排放,含水量越高,颗粒物的排放越高. Chomanee 等^[30]发现当树木含水率增大时,PM 的排放也随之增大. Shen 等^[31]对不同含水率的原木进行燃烧试验,当原木含水率为 5.3% 时, EF_{PM} 为 $2.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, EF_{OC} 的排放因子为 $0.99\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 原木含水率为 17.6% 时, EF_{PM} 为 $3.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, EF_{OC} 为 $2.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 原木含水率为 31.1% 时, EF_{PM} 为 $4.75\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, EF_{OC} 为 $3.32\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 当原木的含水率增大时,OC 与 PM 的排放也随之增大. 本研究中风干树枝的含水率均值为 16.4%,新鲜树

2 结果与讨论

2.1 树枝阴燃、明燃烟尘中 OC、EC 的组成

生物质燃烧排放烟尘中含有一定量的 OC 和 EC,EC 则是 OC 不完全燃烧的产物^[24],燃烧产物中碳成分的含量严重依赖于燃烧条件^[25]. Lioussse 等^[26]对典型秸秆进行燃烧研究,结果表明阴燃排放的 OC、EC 约是明燃的 3 倍. 祝斌等^[27]对 3 种农作物秸秆研究表明,麦秸阴燃排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 约是明燃时的 3 倍,玉米是 6.1 倍,稻草是 8 倍. Alves 等^[28]对桉树研究发现,对比于明燃,阴燃下排放的 OC 显著提高. 本研究中风干树枝阴燃(表 1)时排放 OC 约是明燃的 8.5 倍,EC 约是明燃的 5.3 倍,PM 约是明燃的 7.9 倍;新鲜树枝阴燃时排放 OC 约是明燃的 4.2 倍,EC 约是明燃的 2.9 倍,PM 约是明燃的 4.1 倍. 树木树枝阴燃时 OC、EC、PM 的排放远高于明燃.

枝的含水率均值为 39.6%,新鲜树枝与风干树枝的含水率差异较大. 图 2 中显示了不同树种在明燃条件下 EF_{PM} 、 EF_{OC} 、 EF_{EC} 的变化情况,从中可以得出,明燃条件下新鲜树枝燃烧排放的 OC、EC、PM 均高于风干树枝,明燃下新鲜树枝燃烧排放的 OC 约是风干树枝的 2 倍,EC 约是风干树枝的 1.6 倍,PM 约是风干树枝的 1.8 倍. 而本研究中阴燃条件下树木树枝燃烧排放的 OC、EC 没有明显区别. 这种情况可能是因为高温燃烧高含水率的树枝的时候,需要多余的能量来蒸发多余的水分,从而减少树枝在燃烧阶段的能量,从而导致树枝的不完全燃烧,使得明燃下新鲜树枝燃烧排放的 OC、EC、PM 高于风干树枝. 这与 Rogge 等^[32]的结论相符合.

OC、EC 在烟尘中的质量分数常被作为区分不

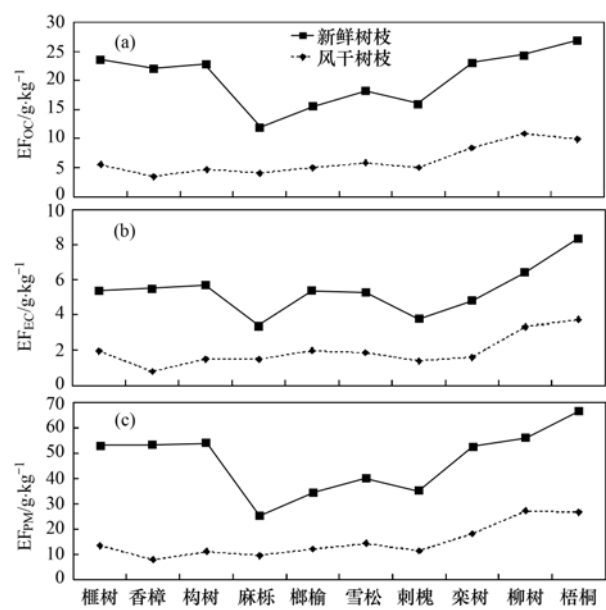


图2 树枝明燃时EF_{PM}、EF_{OC}、EF_{EC}

Fig. 2 EF_{PM}, EF_{OC} and EF_{EC} of sticks burning in flaming condition

同气溶胶燃烧来源的指标. 由表1所得, 本研究中10种乔木风干树枝明燃排放烟尘中OC、EC、TC的质量分数均值分别为41.6%、13.2%、55%, 阴燃时分别为44.2%、8.5%、52.7%; 新鲜树枝明燃排放烟尘中OC、EC、TC的质量分数均值分别为45.4%、11.1%、56.5%, 阴燃时分别为46.5%、7.5%、54.1%. 总体而言, 树木树枝阴燃排放烟尘中OC的质量分数高于明燃, EC的质量分数低于明燃. 新鲜树枝排放烟尘中OC的质量分数高于风干树枝, EC的质量分数低于风干树枝. 这是因为相比于明燃, 阴燃更有利于OC的形成, 从而使得阴燃条件下颗粒物种OC的质量分数高于明燃^[33]. 风干树枝与新鲜树枝(表1)在明燃、阴燃下TC占PM的质量百分比均值相接近, 分别为55%、52.7%、

56.5%、54.1%. 总体而言, 乔木树枝燃烧烟尘中TC占PM的百分比约为55%. 这与Shen等^[21]研究的结论相符合.

2.2 树枝阴燃、明燃烟尘中OC、EC的排放因子

本研究中燃烧的样品分为风干树枝和新鲜树枝两种类型, 通过试验得到的颗粒物的排放量及消耗燃料的量从而得出排放因子. 研究中OC、EC、PM的排放因子如表2所示, 10种乔木风干树枝明燃排放烟尘中EF_{OC}、EF_{EC}、EF_{PM}均值分别为6.8、2.1、16.5 g·kg⁻¹, 阴燃排放烟尘中均值分别为57.5、11.1、130.9 g·kg⁻¹; 新鲜树枝明燃排放烟尘中EF_{OC}、EF_{EC}、EF_{PM}均值分别为13.6、3.3、30.5 g·kg⁻¹, 阴燃排放烟尘中均值分别为57.6、9.6、125.6 g·kg⁻¹. 通过比较发现10种乔木风干树枝中明燃条件下栎树, 阴燃条件下柳树EF_{OC}、EF_{EC}、EF_{PM}较高; 新鲜树枝中明燃条件下香樟, 阴燃条件下梧桐EF_{OC}、EF_{EC}、EF_{PM}较高. 进一步比较得出风干树枝与新鲜树枝在明燃时EF_{OC}、EF_{EC}、EF_{PM}低于阴燃. Zhang等^[34]发现原木在温度较高的炉灶燃烧排放烟尘中EF_{OC}、EF_{EC}低于温度相对较低的野外燃烧. 而本研究中明燃时铁板的温度约为850℃, 阴燃时铁板的温度约为450℃, 阴燃时的温度明显低于明燃. 温度是影响树枝燃烧排放烟尘中EF_{OC}、EF_{EC}的重要因素. Chomanee等^[30]研究发现树木含水率增大时, 其燃烧排放的EF_{OC}、EF_{EC}、EF_{PM}也随之增大. 本研究中风干树枝的含水率均值为16.4%, 新鲜树枝的含水率均值为39.6%, 新鲜树枝的含水率明显高于风干树枝. 进一步比较得出明燃时(表2)风干树枝EF_{OC}、EF_{EC}、EF_{PM}低于新鲜树枝, 而阴燃时没有显著的区别. 因此, 在高温条件下含水率与树枝燃烧时EF_{OC}、EF_{EC}、EF_{PM}是呈正相关关系.

表2 树枝燃烧时OC、EC、PM排放因子/g·kg⁻¹

Table 2 Emission factor of OC, EC and PM in stick burning smoke/g·kg⁻¹

树木种类	明燃						阴燃					
	风干树枝			新鲜树枝			风干树枝			新鲜树枝		
	EF _{OC}	EF _{EC}	EF _{PM}	EF _{OC}	EF _{EC}	EF _{PM}	EF _{OC}	EF _{EC}	EF _{PM}	EF _{OC}	EF _{EC}	EF _{PM}
桉树	5.5	1.9	13.3	18.1	3.4	39.8	59.2	11.4	141.8	68.8	8.5	143.2
香樟	3.4	0.8	7.8	18.6	4.7	45.5	56.9	10.5	140.8	59.4	10.5	131.4
构树	4.6	1.5	11.0	18.2	4.2	42.9	58.3	10.9	130.2	46.0	5.5	89.2
麻栎	4.0	1.5	9.4	7.9	1.9	16.0	58.9	12.3	128.4	58.9	10.1	131.7
榔榆	4.9	2.0	12.0	10.5	3.4	22.5	51.8	9.3	107.9	51.4	8.2	102.8
雪松	5.8	1.9	14.2	12.4	3.4	25.7	59.6	12.5	144.2	57.8	10.2	120.5
刺槐	5.0	1.4	11.2	11.0	2.4	23.7	45.7	7.8	118.1	59.4	8.8	120.4
栎树	13.7	3.0	32.4	8.8	1.7	19.1	44.7	7.1	90.0	51.0	8.1	110.3
柳树	10.8	3.3	27.1	13.6	3.1	29.1	71.8	13.5	154.6	58.1	10.7	126.6
梧桐	9.8	3.7	26.5	17.1	4.6	40.2	68.3	15.7	152.4	65.2	15.4	179.4

表 3 中列举了相关文献中不同种类的生物质燃料燃烧排放的 OC、EC、PM 的排放因子,对比发现不同类型生物质燃料燃烧排放的 EF_{OC} 、 EF_{EC} 、 EF_{PM} 存在显著差异. 本研究中风干树枝明燃时 EF_{OC} 、 EF_{EC} 与 Gonçalves 等^[17]以及 Bond 等^[38]使用炉灶燃烧木材的研究结果接近,这是由于炉灶提供了较高的温度,家庭使用的木头更接近于本研究中风干的树枝. 但风干树枝阴燃、新鲜树枝明燃、阴燃时

EF_{OC} 、 EF_{EC} 、 EF_{PM} 与表中列出的值差异较大. 本研究中对明燃的定义为:树枝燃烧时出现明显的燃烧火焰;对阴燃定义为:树枝燃烧时不出现明显的燃烧火焰但产生火星,所定义的明燃、阴燃为树枝燃烧的两种极端状态,而且本研究中燃烧的样品含水率差异较大. 因此,对燃烧状态的定义、燃烧样品的选择以及采样方式的差异可能是造成本研究与表 3 文献中数据差别较大的原因.

表 3 不同生物质燃料燃烧 EF_{OC} 、 EF_{EC} 、 $EF_{PM}/g \cdot kg^{-1}$
Table 3 EF_{OC} , EF_{EC} and EF_{PM} of different biomass burning smoke/ $g \cdot kg^{-1}$

燃料种类	OC	EC	PM	文献
木头	0.95 ± 0.27	0.35 ± 0.07		[22]
	1 ± 0.58	1.5 ± 0.72	3.8 ± 0.82	[21]
	6.2 ± 4.6	0.32 ± 0.15		[17]
	8.9 ± 8.2	2.3		[20]
	3.5 ± 1.9	1.1 ± 0.5		[35]
	4.2	0.7		[36]
	0.41	0.38 ~ 0.62		[37]
	1.7 ~ 7.8	0.3 ~ 1.4		[38]
	1.32 ± 1.00	0.31 ± 0.12	5.99 ± 5.34	[39]
				[40]
生物燃料	5.0	1.0		[41]
秸秆	1.9 ± 2.4	0.66 ± 0.72	6.1 ± 4.1	
风干树枝明燃	6.8	2.1	16.5	本研究
风干树枝阴燃	57.5	11.1	130.9	本研究
新鲜树枝明燃	13.6	3.3	30.5	本研究
新鲜树枝阴燃	57.6	9.6	125.6	本研究

2.3 OC、EC 的比值及相关性分析

OC/EC 的值在不同燃烧物质及不同条件下体现出较为明显的差异,Pósfai 等^[42]通过 OC/EC 的值来区分不同的燃烧强度,本研究中树枝燃烧排放烟尘中 OC/EC 的值如表 4 所示,风干树枝明燃条件下 OC/EC 的均值为 3.3(2.5 ~ 5.2),阴燃条件下均值为 5.2(4.3 ~ 6.3),新鲜树枝明燃条件下 OC/EC 的均值为 4.1(3.1 ~ 5.3),阴燃条件下均值为 6.2(4.2 ~ 8.4). 进一步比较发现,乔木树枝阴燃条件下 OC/EC 的值高于明燃,新鲜乔木树枝燃烧排放烟尘中 OC/EC 的值高于风干树枝. 这是因为对比于温度低的阴燃,温度高的明燃产生较多的 EC,从而使得 OC/EC 的值降低^[42]. 而新鲜树枝需要多余的能量来蒸发多余的水分,从而导致树枝的不完全燃烧^[40].

OC/EC 的值可用来区分不同的燃烧源,石化燃料(煤、石油、天然气)燃烧排放颗粒物中 OC/EC 值较低,一般低于 0.4^[43],大气气溶胶中的 OC/EC 比值范围为 2.8 ~ 6.2^[44]. 秸秆燃烧排放烟尘中 OC/EC 值范围为 2.2 ~ 3.5^[32],Zhang 等^[45]测得木头燃烧烟尘中 OC/EC 值为 10.8. Yan 等^[46]研究发

表 4 树枝燃烧烟尘中 OC/EC 的值

Table 4 Values of OC/EC in stick burning smoke

树木种类	风干树枝		新鲜树枝	
	明燃	阴燃	明燃	阴燃
榿树	2.8	5.2	5.3	8.1
香樟	4.3	5.4	4.0	5.7
构树	3.1	5.3	4.3	8.4
麻栎	2.7	4.8	4.2	5.9
榔榆	2.5	5.5	3.1	6.3
雪松	3.1	4.8	3.6	5.7
刺槐	3.6	5.8	4.6	6.8
栎树	5.2	6.3	4.6	6.3
柳树	3.3	5.3	4.4	5.4
梧桐	2.6	4.3	3.7	4.2

现松树林火灾排放烟气中 OC/EC 的值为 32,Shen 等^[21]测得原木燃烧烟尘中 OC/EC 比值范围为 0.4 ~ 11.8,Sandradewi 等^[47]测得木头燃烧烟尘中 OC/EC 的均值为 7. 本研究中乔木树枝燃烧烟尘中 OC/EC 的范围为 2.5 ~ 8.4,与 Shen 等^[21]和 Sandradewi 等^[47]研究结果相近,与煤、石油、天然气等石化燃料以及秸秆燃烧颗粒物中 OC/EC 值有着明显差异.

Turpin 等^[48]通过研究 OC 与 EC 之间的关系来区分碳质气溶胶的来源,若 EC 和 OC 之间的相关性

好,则表明 OC、EC 来自相同的污染源. 本研究中树枝燃烧烟尘中 OC、EC 的相关性如图 3 所示,风干树枝燃烧烟尘中 OC、EC 的相关系数为 0.985,新

鲜树枝燃烧烟尘中 OC、EC 的相关系数为 0.915, Turpin 等^[48]对于碳质气溶胶来源分析适用于乔木燃烧排放.

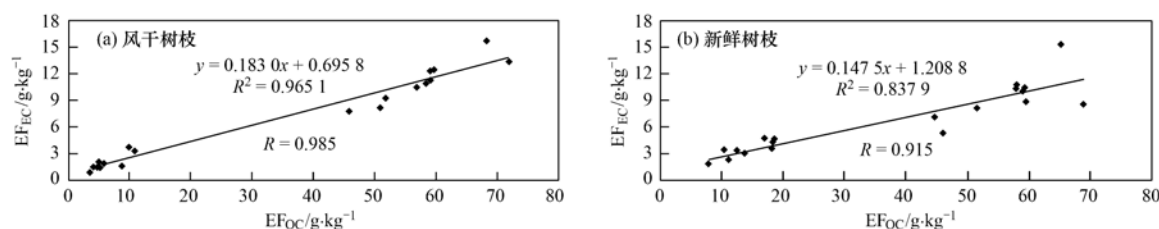


图 3 树枝燃烧烟尘中 OC、EC 的相关性

Fig. 3 Correlation between OC and EC in stick burning smoke

3 结论

(1) 10 种乔木树枝(风干树枝、新鲜树枝)阴燃时 EF_{PM} 、 EF_{OC} 、 EF_{EC} 均高于明燃时,在明燃条件下含水率与树枝燃烧时 EF_{OC} 、 EF_{EC} 、 EF_{PM} 呈正相关关系.

(2) 乔木树枝阴燃排放烟尘中 OC 的质量分数高于明燃,EC 的质量分数低于明燃. 新鲜树枝排放烟尘中 OC 的质量分数高于风干树枝,EC 的质量分数低于风干树枝.

(3) 与石化燃料(煤、石油、天然气)、森林大火以及秸秆燃烧相比,乔木树枝燃烧烟尘中 OC/EC 有着明显差异,10 种乔木树枝阴燃时 OC/EC 的值高于明燃,新鲜树枝燃烧排放烟尘中 OC/EC 的值高于风干树枝. 含水率不同的乔木树枝(风干树枝、新鲜树枝)在不同燃烧条件下(明燃、阴燃)排放烟尘中 OC 与 EC 都具有良好的相关性.

参考文献:

[1] Crutzen P J, Andreae M O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles [J]. Science Citation Index, 1990, **250**(4988): 1669-1678.

[2] Simoneit B R T. Biomass burning - a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion [J]. Applied Geochemistry, 2002, **17**(3): 129-162.

[3] Caseiro A, Bauer H, Schmidl C, *et al.* Wood burning impact on PM_{10} in three Austrian regions [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(13): 2186-2195.

[4] Fine P M, Cass G R, Simoneit B R T. Chemical characterization of fine particle emissions from the fireplace combustion of wood types grown in the Midwestern and Western United States [J]. Environmental Engineering Science, 2004, **21**(3): 387-409.

[5] Gaeggeler K, Prevota A S H, Dommen J, *et al.* Residential wood burning in an Alpine valley as a source for oxygenated volatile organic compounds, hydrocarbons and organic acids [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(35): 8278-8287.

[6] Gonçalves C, Alves C, Evtugina M, *et al.* Characterisation of

PM_{10} emissions from woodstove combustion of common woods grown in Portugal [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(35): 4474-4480.

[7] 舒立福, 田晓瑞. 世界森林火灾状况综述[J]. 世界林业研究, 1998, (6): 41-47.

[8] 狄丽颖, 孙仁义. 中国森林火灾研究综述[J]. 灾害学, 2007, **22**(4): 118-123.

[9] 邓光瑞, 胡海清. 森林火灾烟气的危害[J]. 林业科技, 2006, **31**(3): 38-39.

[10] 陈国庆, 袁新彦, 吴杰. 火灾烟气毒害分析[J]. 实用全科医学, 2004, **2**(40): 353-354.

[11] Martin M V, Honrath R E, Owen R C, *et al.* Significant enhancements of nitrogen oxides, black carbon and ozone in the North Atlantic lower free troposphere resulting from North American boreal wildfires [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, **111**(D23): 5525-5536.

[12] Kanakidou M, Seinfeld J H, Pandis S N, *et al.* Organic aerosol and global climate modelling: a review [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, **5**: 1053-1123.

[13] 许丹丹, 屈晓萍, 汪伟峰, 等. 宁波 PM_{10} 中有机碳和元素碳的季节变化及来源分析[J]. 中国环境监测, 2014, **30**(1): 49-52.

[14] 段凤魁, 贺克斌, 刘咸德, 等. 含碳气溶胶研究进展: 有机碳和元素碳[J]. 环境工程学报, 2007, **1**(8): 1-8.

[15] 黄虹, 李顺诚, 曹军骥, 等. 大气气溶胶中有机碳和元素碳监测方法的进展[J]. 分析科学学报, 2006, **22**(2): 225-229.

[16] Vu B, Alves C A, Gonçalves C, *et al.* Mutagenicity assessment of aerosols in emissions from wood combustion in Portugal [J]. Environmental Pollution, 2012, **166**: 172-181.

[17] Gonçalves C, Alves C, Pio C. Inventory of fine particulate organic compound emissions from residential wood combustion in Portugal [J]. Atmospheric Environment, 2012, **50**: 297-306.

[18] Garcia-Hurtado E, Pey J, Borrás E, *et al.* Atmospheric PM and volatile organic compounds released from Mediterranean shrubland wildfires [J]. Atmospheric Environment, 2014, **89**: 85-92.

[19] Vassura I, Venturini E, Marchetti S, *et al.* Markers and influence of open biomass burning on atmospheric particulate size and composition during a major bonfire event [J]. Atmospheric

- Environment, 2014, **82**: 218-225.
- [20] Vicente A, Alves C, Calvo A I, *et al.* Emission factors and detailed chemical composition of smoke particles from the 2010 wildfire season [J]. Atmospheric Environment, 2013, **71**: 295-303.
- [21] Shen G, Xue M, Chen Y C, *et al.* Comparison of carbonaceous particulate matter emission factors among different solid fuels burned in residential stoves [J]. Atmospheric Environment, 2014, **89**: 337-345.
- [22] Saud T, Gautam R, Mandal T K, *et al.* Emission estimates of organic and elemental carbon from household biomass fuel used over the Indo-Gangetic Plain (IGP), India [J]. Atmospheric Environment, 2012, **61**: 212-220.
- [23] Leskinen J, Tissari J, Uski O, *et al.* Fine particle emissions in three different combustion conditions of a wood chip-fired appliance - particulate physico-chemical properties and induced cell death [J]. Atmospheric Environment, 2014, **86**: 129-139.
- [24] Chu S H. Stable estimate of primary OC/EC ratios in the EC tracer method [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39** (8): 1383-1392.
- [25] 王娉, 马建中. 天津市 EC 和 OC 气溶胶排放源的估算 [J]. 环境科学研究, 2009, **22**(11): 1269-1275.
- [26] Liousse C, Penner J E, Chuang C, *et al.* A global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, **101** (D14): 19411-19432.
- [27] 祝斌, 朱先磊, 张元勋, 等. 农作物秸秆燃烧 PM_{2.5} 排放因子的研究 [J]. 环境科学研究, 2005, **18**(2): 29-33.
- [28] Alves C A, Vicente A, Monteiro C, *et al.* Emission of trace gases and organic components in smoke particles from a wildfire in a mixed-evergreen forest in Portugal [J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(8): 1466-1475.
- [29] Carroll J J, Miller G E, Thompson J F, *et al.* The dependence of open field burning emissions and plume concentrations on meteorology, field conditions and ignition technique [J]. Atmospheric Environment, 1977, **11**(11): 1037-1050.
- [30] Chomanee J, Tekasakul S, Tekasakul P, *et al.* Effects of moisture content and burning period on concentration of smoke particles and particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from rubber-wood combustion [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2009, **9**: 404-411.
- [31] Shen G, Xue M, Wei S, *et al.* Influence of fuel moisture, charge size, feeding rate and air ventilation conditions on the emissions of PM, OC, EC, parent PAHS, and their derivatives from residential wood combustion [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(9): 1808-1816.
- [32] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 2. Nuncatalyst and catalyst-equipped automobiles and heavy-duty diesel trucks [J]. Environmental Science and Technology, 1993, **27**(4): 636-651.
- [33] Maruf Hossain A M, Park S, Kim J S, *et al.* Volatility and mixing states of ultrafine particles from biomass burning [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **205**(3): 189-197.
- [34] Zhang Y Y, Obrist D, Zielinska B, *et al.* Particulate emissions from different types of biomass burning [J]. Atmospheric Environment, 2013, **72**: 27-35.
- [35] Parashar D C, Gadi R, Mandal T K, *et al.* Carbonaceous aerosol emissions from India [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39** (40): 7861-7871.
- [36] Cooper J A. Environmental impact of residential wood combustion emissions and its implications [J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1980, **30**(8): 855-861.
- [37] Venkataraman C, Habib G, Eiguren-Fernandez A, *et al.* Residential biofuels in South Asia: carbonaceous aerosol emissions and climate impacts [J]. Science, 2005, **307** (5714): 1454-1456.
- [38] Bond T C, Bergstrom R W. Light absorption by carbonaceous particles: An investigative review [J]. Aerosol Science and Technology, 2006, **40**(1): 27-67.
- [39] Saud T, Mandal T K, Gadi R, *et al.* Emission estimates of particulate matter (PM) and trace gases (SO₂, NO and NO₂) from biomass fuels used in rural sector of Indo-Gangetic Plain, India [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45** (32): 5913-5923.
- [40] Streets D G, Yarber K F, Woo J H, *et al.* Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, **17**(4): 1099.
- [41] Wei S, Shen G, Zhang Y, *et al.* Field measurement on the emissions of PM, OC, EC and PAHs from indoor crop straw burning in rural China [J]. Environmental Pollution, 2014, **184**: 18-24.
- [42] Pósfai M, Simonics R, Li J, *et al.* Individual aerosol particles from biomass burning in southern Africa: 1. Compositions and size distributions of carbonaceous particles [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, **108** (D13): 347-362.
- [43] Wang B, Lee S C, Ho K F. Chemical composition of fine particles from incense burning in a large environmental chamber [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(40): 7858-7868.
- [44] 陈魁, 银燕, 魏玉香, 等. 南京大气 PM_{2.5} 中碳组分观测分析 [J]. 中国环境科学, 2010, **30**(8): 1015-1020.
- [45] Zhang H F, Wang S X, Hao J M, *et al.* Chemical and size characterization of particles emitted from the burning of coal and wood in rural households in Guizhou, China [J]. Atmospheric Environment, 2012, **51**: 94-99.
- [46] Yan B, Zheng M, Hu Y T, *et al.* Organic composition of carbonaceous aerosols in an aged prescribed fire plume [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, **8** (21): 6381-6394.
- [47] Sandradewi J, Prévôt A S H, Weingartner E, *et al.* A study of wood burning and traffic aerosols in an Alpine valley using a multi-wavelength Aethalometer [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(1): 101-112.
- [48] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. Atmospheric Environment, 1995, **29**(23): 3527-3544.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 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. 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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行