

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

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

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康	(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松	(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅	(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经	(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成	(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝	(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠	(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇	(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹	(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪	(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏	(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗	(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹	(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽	(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙	(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远	(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚	(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春	(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海	(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏	(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺	(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪	(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏	(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明	(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽	(1326)
γ 辐照降解水中的盐酸环丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静	(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼	(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳	(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪	(1352)
308 nm光作用下 α -Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强	(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强	(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博	(1374)
枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用	(1379)
嗜酸降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英	(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建	(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉	(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东	(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰	(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先	(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰	(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春	(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月	(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提	(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞	(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银	(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云	(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐	(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新	(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁	(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭	(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮	(1507)
《环境科学》征订启事		(1216)
《环境科学》征稿简则		(1248)
信息		(1163,1194,1248,1424)

落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究

杨伟宗, 刘刚*, 李久海, 徐慧, 吴丹

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要: 为研究落叶燃烧排放的颗粒物(PM)及有机碳(OC)、元素碳(EC), 采用明燃和闷燃两种形式对 10 种乔木的落叶进行燃烧实验, 采集了排放的烟尘, 并用元素碳/有机碳分析仪测定样品的 OC 和 EC 含量。结果表明, 落叶在明燃状态下 PM、OC、EC 的排放因子范围分别为 7.9~31.9、0.9~9.7、3.6~13.9 g·kg⁻¹, 平均值分别为 19.7、5.2、6.8 g·kg⁻¹。闷燃状态下 PM、OC、EC 的排放因子范围分别为 61.3~128.9、31.7~60.4、1.9~6.0 g·kg⁻¹, 平均值分别为 91.0、43.0、4.0 g·kg⁻¹。明燃和闷燃的 OC/EC 变化范围分别为 0.21~1.82 和 8.16~16.84。明燃状态下 OC/PM、EC/PM 的范围分别为 0.11~0.41 和 0.18~0.56。闷燃状态下 OC/PM、EC/PM 的范围分别为 0.43~0.53 和 0.03~0.06。OC 和 PM 的排放因子在两种燃烧状态下均呈现显著的相关性。在不同的燃烧状态下, 各组分之间的排放因子具有较大的差异, OC 的排放因子在闷燃状态下高于明燃状态, 而 EC 的排放因子则相反。不同燃烧状态下 PM、OC、EC 的排放因子及它们之间的比值分析, 对建立森林生物质燃烧源排放清单以及来源解析具有重要意义。

关键词: 落叶燃烧; PM; OC; EC; 排放因子

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1202-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.009

Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves

YANG Wei-zong, LIU Gang*, LI Jiu-hai, XU Hui, WU Dan

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

Abstract: The two kinds of burning conditions, i. e., flaming and smoldering, were selected to investigate the particulate matter (PM), organic carbon (OC), and elemental carbon (EC) from burning of ten kinds of fallen leaves. In the experiment, the emission smoke was sampled from the fallen leaves burning, in which the OC and EC loadings were measured by the Thermal Optical Carbon Analyzer. The results showed that the emission factors of PM, OC, and EC were 7.9-31.9, 0.9-9.7, and 3.6-13.9 g·kg⁻¹, with the average values of 19.7, 5.2, and 6.8 g·kg⁻¹, respectively, under the flaming condition. The emission factors of PM, OC, and EC were 61.3-128.9, 31.7-60.4, and 1.9-6.0 g·kg⁻¹, with the average values of 91.0, 43.0, and 4.0 g·kg⁻¹, respectively, under the smoldering condition. The OC/EC ratio ranged from 0.21 to 1.82 and from 8.16 to 16.84 under the flaming and smoldering condition, respectively. The OC/PM and EC/PM ratios ranged from 0.11 to 0.41 and from 0.18 to 0.56, respectively under the flaming condition. The OC/PM and EC/PM ratios, however, ranged from 0.43 to 0.53 and from 0.03 to 0.06, respectively, under the smoldering condition. The OC emission factor was well correlated with the PM emission factor in the two burning conditions. Those results indicated that rather different emission factors occurred in all kind of components in different burning emission. In addition, the OC emission factor was higher under the smoldering condition than that under the flaming condition. However, the EC emission factor was higher under flaming condition, compared with that under smoldering condition. Analysis of the PM, OC, and EC emission factor and their ratios was beneficial for building the emission list from the biomass burning and the sources apportionment.

Key words: burning of fallen leaves; PM; OC; EC; emission factor

生物质燃烧是大气气溶胶的重要来源。有机碳(OC)和元素碳(EC)是大气气溶胶的重要组成部分^[1]。OC由成百上千种有机化合物组成^[2]。EC具有较强的吸光性,是影响太阳辐射的主要物质^[3]。这些组分在大气中不但会危害人体健康、引起灰霾现象,而且会改变整个大气层的辐射平衡,影响全球气候^[4~7]。在全球范围内,每年均有约数十亿吨的生物质燃烧并向大气排放大量的颗粒物(PM)^[1]。特别地,森林火灾在生物质燃烧颗粒物排放中的贡献高达42%^[8]。森林火灾中OC占排放的总颗粒物的比例约50%,EC所占比例约3%^[6,9]。受全球气

候变化的影响,未来森林火灾的频率可能会增加^[7],由此可见,森林火灾是大气中OC、EC的重要来源。

近年来,国内外学者通常以树枝、树叶等常见森林生物质为燃料进行模拟实验,估算其排放因子(EF)。Hays等^[10]燃烧落叶测得PM_{2.5}排放因子范

收稿日期: 2014-09-24; 修订日期: 2014-11-01

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: 杨伟宗(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气污染控制与工程, E-mail: yangweizong@163.com

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

围约为 $10.8 \sim 27.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。木材燃烧的 PM 排放因子约在 $10.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下^[11~13]。Kannan 等^[14]研究发现不同类型生物质燃烧 PM 的排放因子不同,落叶燃烧 PM 的排放量高于树枝和杂草。对同种燃料而言,不同的实验方法和实验装置也会造成 PM 排放因子的差异^[15,16]。受燃料特性和燃烧条件等因素的影响,OC 和 EC 所占 PM 的比例也具有较大的差异^[17],但 OC 和 PM 的排放因子之间具有较强的相关性($r = 0.97$)^[18]。Schmidl 等^[19]测得干树叶燃烧 OC 和 EC 排放因子的平均值分别为 $65.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。木材燃烧的 EC 排放因子相对稳定(约在 $2.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下),而 OC 的排放因子变化较大(约在 $0.8 \sim 40.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间)^[11,12,19,20]。Wang 等^[21]的研究中指出 OC/EC 的比值可以作为区分不同燃烧源的指标。对同一种燃烧材料而言,OC/EC 的比值可以很好地反映不同燃烧状态的特征,闷燃占主导时,OC/EC 的比值远高于明燃状态^[22,23]。

从近年的研究结果看,主要对不同类型森林生物质燃烧 PM、OC、EC 的排放因子开展了较多研究。然而,就不同燃烧条件(明火燃烧和闷火燃烧)对 OC、EC 排放的影响关注较少。本研究选取 10 种乔木的落叶为燃料,模拟森林火灾中明燃和闷燃两种模式,收集落叶燃烧的烟尘,计算 PM、OC、EC 的排放因子,并对其数值进行比较分析,初步探讨不同燃烧条件下各组分排放因子的差异,以期建立森林生物质燃烧源排放清单以及来源解析提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 落叶采集与制备

所选材料包括梧桐、杨树、构树、栎树、刺槐、麻栎、柳树、榿树、香樟、雪松共 10 种乔木的落叶,其中榿树、香樟、雪松 3 种树木为常绿乔木,其余 7 种为落叶乔木。收集于江苏省南京市浦口区龙王山森林区域(118.70°E , 32.19°N)。采集后的落叶拣除杂物,抖除泥土,并放置通风处保存。

1.2 燃烧实验和烟尘采集

在燃烧实验前,分别测定落叶的含水率。实验模拟树叶的两种燃烧方式——明火燃烧和闷火燃烧。燃烧采集系统如图 1 所示,通过调节变压器控制明燃和闷燃两种形式。模拟明火燃烧时,分别取各类落叶 $2 \sim 3 \text{ g}$,在电压 220 V ,初始温度约 620°C 左右的条件下,将落叶放入燃烧底盘进行燃烧。闷火燃烧时,分别取各类落叶 1 g 置于燃烧底盘,在电

压 175 V ,初始温度为室温的条件下进行闷燃。两种燃烧过程中保证烟气不溢出烟气收集罩,进行全部烟气的收集。装置的水槽内放入冷水用来降低管道内烟气温度,使采样头处烟气温度保持在 40°C 以下。每次燃烧实验完毕后去除燃烧底盘上的灰烬,即可进行下一次实验。每种树叶以两种燃烧方式分别进行 3 次燃烧实验。

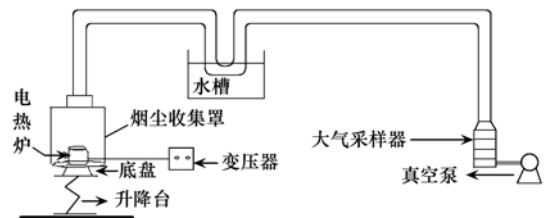


图1 燃烧装置及采样系统示意

Fig. 1 Schematic representation of the firing setup and sampling system

燃烧开始前启动配备 $4 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 真空泵的 PM 颗粒物采样器,进行全颗粒物等速采样。由于采样时所需抽力较大,所使用的 $4 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 真空泵并非大气分级采样器的标配设备,因此未进行分级采样。采样持续到叶片燃烧完毕不再冒烟延迟 2 min 为止,以确保烟道内无烟气残留。采样所用玻璃纤维滤膜使用前在马弗炉中以 500°C 锻烧 2 h 预处理去除有机碳,冷却后置于干燥器中在室温下平衡 24 h 后使用。每次采样前先称量后放入 PM 采样器中。完成采样的滤膜在室温下平衡 24 h 后再次称重。烟尘样品用铝箔(在 500°C 灼烧 2 h)包裹,在冰箱中冷冻保存。此外,在未燃烧样品的条件下,要进行 3 次空白样的采集,以扣除本底。

1.3 样品测定

实验使用高精度分析天平(0.0001 g)称量样品的烟尘含量。使用美国沙漠所(DRI)开发的 Model 2001A Thermal Optical Carbon Analyzer 分析样品中 OC 和 EC 含量。OC/EC 分析仪器的升温程序分为 2 个阶段。第 1 阶段为纯氦气环境下按一定温度梯度($140^\circ\text{C} \rightarrow 280^\circ\text{C} \rightarrow 480^\circ\text{C} \rightarrow 580^\circ\text{C}$)升温加热,使滤膜上的有机物气化。释放的有机物经催化氧化炉转化成 CO_2 , CO_2 在还原炉内还原为 CH_4 ,再由火焰离子化检测器(FID)定量检测。第 2 阶段为通入含 2% 氧气的氦气,按一定温度(580°C)继续加热样品,使样品中的元素碳氧化成 CO_2 。 CO_2 转化为甲烷后,用 FID 检测。在测定过程中用 633 nm 的激光全程照射样品,监测升温过程中反射光强度的变化。以初始光强作为参照,确定 OC 和 EC 的分离点。有

机碳气化过程中会生成一部分焦化碳(POC). 无氧加热期间各个温度台阶对应的碳分别为 OC1、OC2、OC3、OC4; 有氧加热阶段各个温度台阶对应的碳为 EC1、EC2、EC3, EC1 中包含了 POC. 其 OC 定义为 $OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + POC$; EC 定义为 $EC1 + EC2 + EC3 - POC$. 根据采样滤膜总面积和截取部分的面积计算所耗颗粒物的质量, 进而计算烟尘中 OC 和 EC 的含量.

1.4 质量控制

样品分析前对仪器进行常规检漏. 每天使用仪器前, 高温烘烤样品炉 10 min 去除炉内残留的杂质气体, 用 He/CH_4 进行校准, 确保初始和最终 $-3 < FID < 3$, 校准峰面积相对标准偏差小于 5%. 每个样品进行 2 次平行样分析. 且对 10% 的样品要重复分析. 保证同一样品前后两次分析结果的相对误差小于 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.

2 结果与讨论

2.1 PM 的排放因子

生物质燃烧排放的颗粒物, 其排放因子在很大程度上取决于燃料的燃烧状态和燃料类型^[24], 同时也受实验方法、燃烧条件等因素的影响^[15,16]. 落叶在自然界中燃烧很难出现严格意义上的闷燃状态, 因此往往需通过实验室模拟来研究这一过程^[24]. 本实验过程中的闷火燃烧状态较为极端, 这使得和其他学者研究所得的数据具有较大的差异. 燃烧材料的含水状况是 PM 排放因子的重要影响因素. 湿度过高的燃料在燃烧过程中需要消耗一定的热量蒸发水分, 更易形成闷火燃烧的条件, 导致 PM 的排放因子升高^[25]. 在森林火灾中, 落叶处于地表火层, 且含水率低于处于树冠层的树枝、绿叶等生物质. 本实验中的落叶含水率均值在 10.9% ~ 16.0% 之间, 在燃烧过程中受湿度的影响小. 因此, 落叶燃烧时 PM 的排放量和绿叶、树枝等生物质具有较大差异.

表 1 所示, 10 种乔木的落叶在明燃和闷燃两种状态下 PM 排放因子的范围分别为 7.9 ~ 31.9 $g \cdot kg^{-1}$ 和 61.3 ~ 128.9 $g \cdot kg^{-1}$, 平均值分别为 19.7 $g \cdot kg^{-1}$ 和 91.0 $g \cdot kg^{-1}$. 根据研究表明, $PM_{2.5}$ 在生物质燃烧产生的颗粒物中的比重在 90% 以上^[5], 因此, 文中 PM 排放因子的数据和其他学者所得 $PM_{2.5}$ 排放因子的数据具有可比较性. 一些学者的研究并没有区分两种燃烧状态, 例如 Hays 等^[10] 燃烧落叶

和绿叶的 $PM_{2.5}$ 排放因子范围分别为 10.8 ~ 27.2 $g \cdot kg^{-1}$ 和 11.2 ~ 33.5 $g \cdot kg^{-1}$. Kannan 等^[14] 在实验室燃烧落叶测得 PM 排放因子均值为 32.3 $g \cdot kg^{-1}$. 文献[10,14] 中的 PM 排放因子与本研究落叶明燃状态的 PM 排放因子较为接近, 但低于闷燃状态下的 PM 排放因子. 不同类型生物质燃烧 PM 的排放因子具有较大差异. 祝斌等^[24] 在实验室模拟秸秆燃烧的明燃和闷燃两种状态, 测得 $PM_{2.5}$ 排放因子范围分别为 7.2 ~ 39.0 $g \cdot kg^{-1}$ 和 67.6 ~ 104.6 $g \cdot kg^{-1}$. Ortiz 等^[26] 在户外燃烧谷物秸秆测定颗粒物的排放因子也得出相似的结果, 明燃排放 2.0 ~ 18.0 $g \cdot kg^{-1}$, 闷燃排放 56.0 ~ 104.0 $g \cdot kg^{-1}$. 这和本研究测得的落叶燃烧 PM 的排放因子较为接近. 而韦思业等^[11] 和 Fine 等^[13] 测得木材燃烧 PM 的排放因子 (0.7 ~ 6.2 $g \cdot kg^{-1}$ 和 2.7 ~ 11.4 $g \cdot kg^{-1}$) 则低于落叶和秸秆. 通过和文献[10 ~ 14,24,26] 对比得出, 落叶和秸秆燃烧的 PM 排放因子比较相近, 高于木材燃烧的 PM 排放因子. 造成该现象的原因主要取决于燃烧物质的结构. 木材的木质素含量高, 结构密实, 在燃烧时挥发析出的烟气速度较慢^[27]. 落叶和秸秆的结构没有木材密实, 在燃烧时烟气排放量大. 这表明, 同等干物质量的落叶和木材相比, 落叶燃烧产生的颗粒物污染更加严重.

从两种燃烧状态来看, 落叶在闷燃状态下的 PM 排放因子明显高于明燃状态. 10 种乔木的落叶闷燃状态下 PM 排放因子的平均值是明燃状态的 4.7 倍. 各类落叶燃烧烟尘排放的差异, 不仅和燃烧状态有关, 与各类落叶的物理化学性具有密切的关联. 柳树和雪松的落叶在两种燃烧状态下 PM 排放因子的差异最为明显, 分别相差 9.9 和 8.0 倍. 主要原因在于这两种落叶都比较散碎, 在明燃过程中速率高, 烟气排放量较小, 闷燃时烟气析出则比较多. 而同属落叶乔木类且叶片形状相似的杨树、梧桐、构树的落叶的 PM 排放因子便较为接近. 实验发现作为常绿乔木的香樟、雪松、榧树的落叶在闷燃状态下的 PM 排放因子均比较高, 且它们的 PM 排放因子均值在两种燃烧状态下都高于其他落叶乔木的 PM 排放因子均值, 但本研究数据相对较少, 常绿乔木的落叶燃烧的 PM 排放因子比落叶乔木的落叶高这一结论的合理性还有待验证.

2.2 OC 和 EC 的排放因子

OC 在明燃和闷燃状态下的排放因子范围分别为 0.9 ~ 9.7 $g \cdot kg^{-1}$ 和 31.7 ~ 60.4 $g \cdot kg^{-1}$, 平均值分别为 5.2 $g \cdot kg^{-1}$ 和 43.0 $g \cdot kg^{-1}$. EC 在明燃和闷

燃状态下的排放因子范围分别为 3.6 ~ 13.9 g·kg⁻¹ 和 1.9 ~ 6.0 g·kg⁻¹, 平均值分别为 6.8 g·kg⁻¹ 和 4.0 g·kg⁻¹. 本研究中 EC 排放因子的数值与 Schmidl 等^[19] 混合不同干树叶燃烧测得的数据较为接近(4.3 g·kg⁻¹), 而 OC 排放因子的数值则低于他们的结果(65.0 g·kg⁻¹). 然而, Schmidl 等的实验并未区分落叶的两种燃烧状态, 且选取的实验材料

并不类似. 相应地, 落叶燃烧的 OC、EC 排放因子和木材燃烧的排放因子也不相同. Oros 等^[20] 研究的 5 种落叶乔木的 OC 和 EC 排放因子范围分别为 2.1 ~ 25.5 g·kg⁻¹ 和 0.2 ~ 1.9 g·kg⁻¹, 韦思业等^[11] 的研究中 9 种木材 OC 和 EC 的变化范围分别为 0.1 ~ 3.8 g·kg⁻¹ 和 0.1 ~ 0.97 g·kg⁻¹. 比较明显看出落叶燃烧 EC 的排放因子高于木材.

表 1 不同燃烧状态下 OC、EC 和 PM 的排放因子/g·kg⁻¹

落叶品种	明火燃烧			闷火燃烧		
	OC	EC	PM	OC	EC	PM
梧桐	4.6	4.2	16.8	40.9	4.7	84.6
杨树	2.6	4.8	13.8	34.9	3.2	80.4
构树	4.5	7.2	16.8	31.7	1.9	61.3
栾树	8.9	10.3	31.9	44.5	4.9	94.9
刺槐	8.0	3.6	19.7	32.3	2.2	64.9
麻栎	2.8	13.9	24.6	50.0	5.1	108.7
柳树	0.9	4.3	7.9	34.9	2.5	78.4
榉树	9.7	5.3	27.3	60.4	6.0	128.9
香樟	6.3	9.9	25.2	52.5	3.1	102.0
雪松	3.4	4.2	13.3	48.2	5.9	106.0

各类落叶在明燃和闷燃两种状态下 OC 和 EC 的排放因子存在较大差异(图 2). 落叶在闷燃状态下总碳 TC(TC = OC + EC)的排放因子均值(47.0 g·kg⁻¹)约为明燃(11.9 g·kg⁻¹)的 3.9 倍. 闷燃状态下 OC 的排放因子均值(43.0 g·kg⁻¹)约为明燃状态(5.2 g·kg⁻¹)的 8.3 倍. 而 EC 的排放因子均值明燃(6.8 g·kg⁻¹)比闷燃(4.0 g·kg⁻¹)稍高. 因此, EC 的排放因子在两种燃烧状态下较为接近, OC 的排放受燃烧状态的影响强烈, 在两种燃烧状态下的排放因子差异较大. 图 2 显示, 有 7 类落叶在明燃状态下 OC 的排放因子小于 EC 的排放因子, 这与文献[11,19,20]中的研究结果相背. 造成该现象的原因主要是实验方法及实验材料的不同. EC 来自各种不完全燃烧过程^[2], 落叶在明火条件下燃烧旺盛, 而实验装置的烟气收集罩内的燃烧空间相对较

小, 供气量有限, 燃料燃烧不充分, 导致 EC 排放增多^[28]. 生物质在露天燃烧时氧气供应较为充分, OC 排放便相对较高^[29,30]. 实验表明, 不同温度造成的燃烧状态是落叶燃烧 OC、EC 排放的重要影响因素. 闷燃状态下的 PM 和 OC 的排放量均较大.

2.3 OC、EC、PM 排放因子的相关性 & 比值分析

10 种乔木的落叶在两种燃烧状态下 OC 与 PM 的排放因子均呈现显著相关关系(图 3、图 4), 这与 Roden 等^[18] 研究的薪柴燃烧结果一致($r=0.97$). EC 和 PM 的排放因子在闷燃状态下具有较高相关性($r=0.86$), 但明燃状态下相关性较低($r=0.64$). OC 和 EC 的排放因子在闷燃状态下也呈现较高的相关性($r=0.79$), 但明燃状态下不具相关性($r=0.06$). 这也说明落叶燃烧 OC、EC 的排在闷燃状态下比明燃状态稳定. 韦思业等^[11] 的研究表明室内薪柴燃烧 PM、OC、EC 排放因子之间呈显著的相关性关系. Chen 等^[28] 在燃煤实验中也得到一样的结论. 本研究中落叶在闷燃状态下 PM、EC、OC 的排放因子两两之间均具有较高相关性, 但考虑到落叶闷燃是在极端条件下进行, 不能确定自然界中落叶燃烧 PM、EC、OC 的排放因子两两相关.

在生物质燃烧中, OC/EC 的比值可作为区分明燃和闷燃状态的指标, 也可用作区别不同燃料类型的指标^[21,22,31]. 10 种乔木的落叶在明燃状态下的 OC/EC 比值变化范围为 0.21 ~ 1.82, 闷燃状态下变

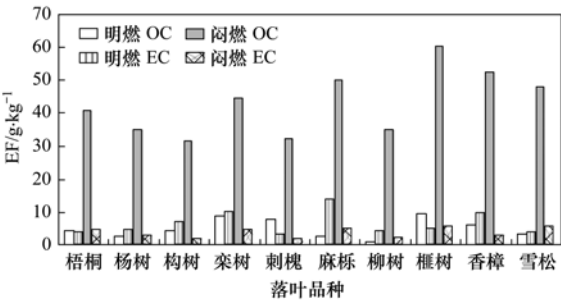


图 2 落叶在不同燃烧状态下 OC、EC 的排放因子对比
Fig. 2 Comparison of OC and EC emission factors for burning of fallen leaves under different status

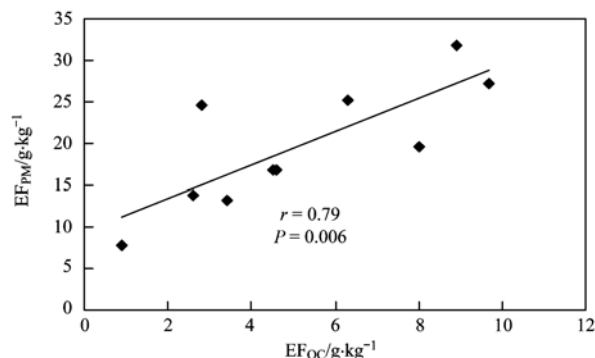


图3 落叶明燃状态下 OC 和 PM 排放因子之间的相关关系

Fig. 3 Correlation between OC and PM emission factors for burning of fallen leaves under flaming condition

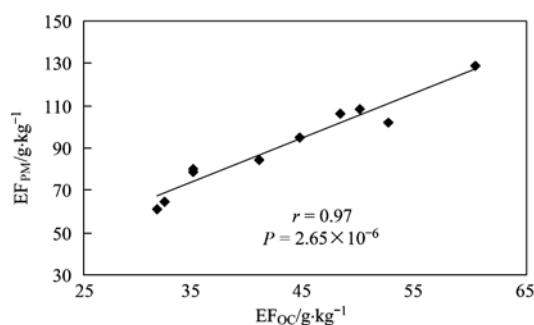


图4 落叶闷燃状态下 OC 和 PM 排放因子之间的相关关系

Fig. 4 Correlation between OC and PM emission factors for burning of fallen leaves under smoldering condition

化范围为 8.16 ~ 16.84, 均值分别为 0.89 和 11.83. 可以看出明燃状态下的 OC/EC 比值远小于闷燃状态(图 5). Schmidl 等^[19]燃烧干树叶测得 OC/EC 比值为 15.08, 这与本研究中闷燃状态下的数值较为接近. Oros 等^[20]测得落叶乔木的 OC/EC 范围为 9.00 ~ 43.00, 高于本研所得数据. 与单一源相比, Vicente 等^[7]发现森林火灾时 OC/EC 的比值范围为 7.00 ~ 69.00. 通过和文献^[19,20]对比, 落叶燃烧的 OC/EC 比值要低于木材燃烧所得的 OC/EC 比值. 本实验落叶明燃状态下 OC/EC 的比值偏低, 主要是受实验装置影响, EC 排放量过高造成的, 这与 Zhang 等^[22]的研究相符. 落叶在闷燃状态下 OC/EC 的变化范围为 8.16 ~ 16.84, 这可以作为区别落叶明燃和闷燃状态的参考指标.

落叶燃烧排放的总碳(TC)在明燃和闷燃的 PM 排放中分别占 65.35% 和 53.67%, 这和 Schmidl 等^[19]测得的数据比较接近. OC、EC 存在于颗粒物中的比例在两种燃烧状态下具有较大的差异(图 6). OC/PM、EC/PM 的比值在明燃状态下分别为 0.11 ~ 0.41 和 0.18 ~ 0.56, 在闷燃状态下分别为

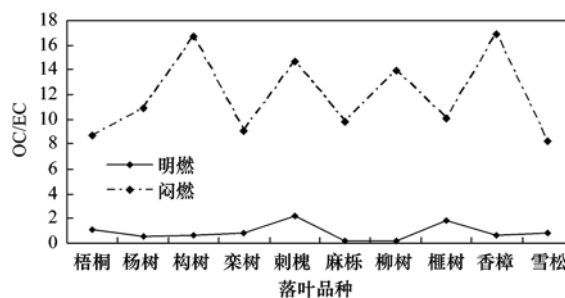


图5 落叶不同燃烧状态下 OC/EC 数值对比

Fig. 5 Comparison of the OC/EC ratio for burning of fallen leaves under different status

0.43 ~ 0.53 和 0.03 ~ 0.06. 可看出 OC/PM 的比值在闷燃状态下高于明燃状态, 相反地 EC/PM 的比值在闷燃状态下远低于明燃状态. 从同种燃烧状态来看, 闷燃状态下 OC/PM 的值远高于 EC/PM 的比值, 且数据变化波动较小. 而明燃状态下 OC/PM 和 EC/PM 之间的数据变化范围比较接近, 但数据的变化波动较大. 其中柳树叶和麻栎叶在明燃状态下 OC/PM 和 EC/PM 的比值超出平均范围较多, 是由于它们在燃烧过程中缺氧导致 EC 排放过多造成的. 由此也可得出, 闷燃状态下 OC、EC 排放因子的变化幅度小, 明燃状态下的受供氧、燃料性质等多方面因素影响导致燃烧不稳定, OC、EC 排放因子变化幅度相对较大. OC/PM 和 EC/PM 的比值关系也可作为区分落叶不同燃烧状态的参考指标.

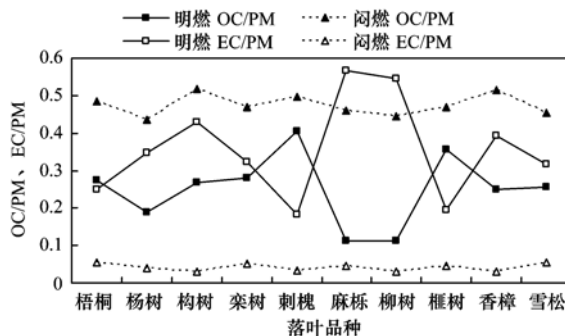


图6 落叶不同燃烧状态下 OC/PM、EC/PM 数值对比

Fig. 6 Comparisons of the OC/PM and EC/PM ratios for burning of fallen leaves under different status

3 结论

在不同燃烧条件下, 落叶燃烧 PM、OC、EC 的排放因子具有显著差异, 闷燃状态下 PM 和 OC 的排放因子明显高于明燃状态, 而 EC 的排放因子在闷燃状态下低于明燃状态. 落叶在两种燃烧状态下 PM 和 OC 之间均呈现显著的相关关系. PM、OC、EC 之间的含量比值在两种燃烧状态下具有不同的

特征, OC/EC、OC/PM、EC/PM 的比值可以作为区分落叶明火燃烧和闷火燃烧的指标。

参考文献:

- [1] Popovicheva O, Kistler M, Kireeva E, *et al.* Physicochemical characterization of smoke aerosol during large-scale wildfires: Extreme event of August 2010 in Moscow [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **96**: 405-414.
- [2] 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.
- [3] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Nature*, 2001, **409** (6821): 695-697.
- [4] Offenberg J H, Baker J E. Aerosol size distributions of elemental and organic carbon in urban and over-water atmospheres [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(10): 1509-1517.
- [5] 邓从蕊. 中国大气气溶胶中生物质燃烧的源追踪及灰霾的形成机制[D]. 上海: 复旦大学, 2011. 5-7.
- [6] Chow J C, Watson J G, Lowenthal D H, *et al.* PM_{2.5} source profiles for black and organic carbon emission inventories [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(31): 5407-5414.
- [7] Vicente A, Alves C, Monteiro C, *et al.* Organic speciation of aerosols from wildfires in central Portugal during summer 2009 [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **57**: 186-196.
- [8] Ito A, Penner J E. Historical emissions of carbonaceous aerosols from biomass and fossil fuel burning for the period 1870-2000 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19** (2), doi: 10.1029/2004GB002374.
- [9] Chow J C. Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1995, **45** (5): 320-382.
- [10] Hays M D, Geron C D, Linna K J, *et al.* Speciation of gas-phase and fine particle emissions from burning of foliar fuels [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36** (11): 2281-2295.
- [11] 韦思业, 苏玉红, 沈国锋, 等. 农村室内薪柴燃烧的颗粒物和炭黑排放因子[J]. *生态毒理学报*, 2013, **8**(1): 29-36.
- [12] Li X H, Duan L, Wang S X, *et al.* Emission characteristics of particulate matter from rural household biofuel combustion in China [J]. *Energy & Fuels*, 2007, **21**(2): 845-851.
- [13] Fine P M, Cass G R, Simoneit B R T. Chemical characterization of fine particle emissions from fireplace combustion of woods grown in the northeastern United States [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(13): 2665-2675.
- [14] Kannan G K, Gupta M, Chandra K J. Estimation of gaseous products and particulate matter emission from garden biomass combustion in a simulation fire test chamber [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(3): 563-573.
- [15] Gonçalves C, Alves C, Fernandes A P, *et al.* Organic compounds in PM_{2.5} emitted from fireplace and woodstove combustion of typical Portuguese wood species [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(27): 4533-4545.
- [16] Alves C, Gonçalves C, Fernandes A P, *et al.* Fireplace and woodstove fine particle emissions from combustion of western Mediterranean wood types [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **101**(3): 692-700.
- [17] 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.
- [18] Roden C A, Bond T C, Conway S, *et al.* Emission factors and real-time optical properties of particles emitted from traditional wood burning cookstoves [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(21): 6750-6757.
- [19] Schmidl C, Bauer H, Dattler A, *et al.* Chemical characterisation of particle emissions from burning leaves [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(40): 9070-9079.
- [20] Oros D R, Simoneit B R T. Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning Part 2. Deciduous trees [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16** (13): 1545-1565.
- [21] Wang Z Z, Bi X H, Sheng G Y, *et al.* Characterization of organic compounds and molecular tracers from biomass burning smoke in South China I: broad-leaf trees and shrubs [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(19): 3096-3102.
- [22] Zhang Y Y, Obrist D, Zielinska B, *et al.* Particulate emissions from different types of biomass burning [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **72**: 27-35.
- [23] Ferek R J, Reid J S, Hobbs P V, *et al.* Emission factors of hydrocarbons, halocarbons, trace gases and particles from biomass burning in Brazil [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1998, **103**(D24): 32107-32118.
- [24] 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.
- [25] Simoneit B R T. Biomass burning—a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion [J]. *Applied Geochemistry*, 2002, **17**(3): 129-162.
- [26] Ortiz I, Ezcurra A, Lacaux J P, *et al.* Emission factor estimates of cereal waste burning in Spain [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(19): 3183-3193.
- [27] 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 等. 长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1623-1632.
- [28] Chen Y J, Sheng G Y, Bi X H, *et al.* Emission factors for carbonaceous particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(6): 1861-1867.
- [29] Rau J A. Composition and size distribution of residential wood smoke particles [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1989, **10** (1): 181-192.
- [30] Bond T C, Streets D G, Yarber K F, *et al.* A technology - based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109**(D14): doi: 10.1029/2003JD003697.
- [31] Pósfai M, Simónics 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): doi: 10.1029/2002JD002291.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 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