

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

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

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

基于重庆本地碳成分谱的 $\text{PM}_{2.5}$ 碳组分来源分析

张灿^{1,2}, 周志恩^{1,2}, 翟崇治^{1,2}, 白志鹏³, 陈刚才^{1,2*}, 姬亚芹⁴, 任丽红³, 方维凯^{1,2}

(1. 重庆市环境科学研究院, 重庆 401147; 2. 城市大气环境综合观测与污染防治重庆市重点实验室, 重庆 401147; 3. 中国环境科学研究院环境基准和风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 4. 南开大学国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071)

摘要: 为了解重庆主城 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分特征和来源, 2012-05-02 ~ 2012-05-10 日在商业区、工业区和居民区进行了 $\text{PM}_{2.5}$ 采样。利用 TOR 方法分析了 8 种碳组分, 对 3 个不同功能区大气环境 $\text{PM}_{2.5}$ 以及燃煤尘、尾气尘(机动车尾气、船舶尾气、施工机械尾气)、生物质燃烧尘、餐饮油烟尘这 6 类源 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 8 种碳组分进行了特征分析。在源的碳成分谱基础上, 利用化学质量平衡(CMB)模型得到重庆本地 $\text{PM}_{2.5}$ 的碳来源指示组分, 利用因子分析法解析出各类源对不同功能区内 $\text{PM}_{2.5}$ 碳组分的贡献率。结果表明, 重庆地区燃煤尘、机动车尾气尘、船舶尾气尘、施工机械尾气尘、生物质燃烧尘、餐饮油烟尘的 OC/EC 值分别为 6.3、3.0、1.9、1.4、12.7 和 31.3。EC2、EC3 的高载荷指示柴油车尾气排放, OC2、OC3、OC4、OPC 的高载荷指示燃煤排放, OC1、OC2、OC3、OC4、EC1 指示汽油车尾气排放, OC3 指示餐饮业排放, OPC 指示生物质燃烧排放。商业区 OC/ $\text{PM}_{2.5}$ 为 17.4%, EC/ $\text{PM}_{2.5}$ 为 6.9%, 估算得到, 二次有机碳(SOC)/OC 为 40.0%; 工业区 OC/ $\text{PM}_{2.5}$ 为 15.5%, EC/ $\text{PM}_{2.5}$ 为 6.6%, SOC/OC 为 37.4%; 居民区 OC/ $\text{PM}_{2.5}$ 为 14.6%, EC/ $\text{PM}_{2.5}$ 为 5.6%, SOC/OC 为 42.8%。工业区 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分的主要来源为燃煤和汽油车尾气、柴油车尾气; 商业区 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分的主要来源为汽油车尾气、柴油车尾气和餐饮业油烟; 居住区 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分的主要来源为汽油车尾气、餐饮业油烟、柴油车尾气。

关键词: 碳成分谱; 碳来源分析; $\text{PM}_{2.5}$; 分歧系数; 化学质量平衡; 因子分析; 重庆

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0810-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.03.002

Carbon Source Apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in Chongqing Based on Local Carbon Profiles

ZHANG Can^{1,2}, ZHOU Zhi-en^{1,2}, ZHAI Chong-zhi^{1,2}, BAI Zhi-peng³, CHEN Gang-cai^{1,2}, JI Ya-qin⁴, REN Li-hong³, FANG Wei-kai^{1,2}

(1. Chongqing Academy of Environmental Sciences, Chongqing 401147, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Urban Atmospheric Environment for Integrated Observation and Pollution Prevention and Control, Chongqing 401147, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: $\text{PM}_{2.5}$ was sampled from commercial, industrial and residential areas in Chongqing urban city from 2nd May to 10th May 2012 in order to find out characteristics and sources of carbon in $\text{PM}_{2.5}$. Eight kinds of carbons were analyzed by the TOR method. Characteristics of carbon pollution in $\text{PM}_{2.5}$ from three kinds of functional areas and six kinds of sources, including coal-combustion, exhausts (vehicle, boat and construction machine), biomass burning, cooking smoke, were analyzed. Based on carbon source profiles, local indicating components of carbon sources in $\text{PM}_{2.5}$ were obtained used the chemical mass balance (CMB) model. Contribution rate of different sources to $\text{PM}_{2.5}$ carbon were parsed out by factor analysis. The results showed the OC/EC of coal-combustion, vehicle exhausts, boat exhausts, construction machine exhausts, biomass burning and cooking smoke were 6.3, 3.0, 1.9, 1.4, 12.7 and 31.3, respectively. High loads of EC2 and EC3 indicated diesel vehicle exhaust emissions, high loads of OC2, OC3, OC4 and OPC indicated coal-combustion emissions, OC1, OC2, OC3, OC4 and EC1 indicated gasoline vehicle exhaust emissions, OC3 indicated cooking emissions, and OPC indicated biomass burning emissions. OC/ $\text{PM}_{2.5}$, EC/ $\text{PM}_{2.5}$, secondary organic carbon (SOC)/OC in the commercial area were 17.4%, 6.9% and 40.0%, respectively. OC/ $\text{PM}_{2.5}$, EC/ $\text{PM}_{2.5}$ and SOC/OC in the industrial area were 15.5%, 6.6% and 37.4%, respectively. OC/ $\text{PM}_{2.5}$, EC/ $\text{PM}_{2.5}$ and SOC/OC in the residential area were 14.6%, 5.6% and 42.8%, respectively. In the industrial area, the main sources of carbon in $\text{PM}_{2.5}$ were coal combustion, gasoline vehicle exhausts and diesel exhaust. In the commercial area, the main sources of carbon were gasoline vehicle exhausts, diesel exhausts and

收稿日期: 2013-07-10; 修订日期: 2013-10-22

基金项目: 重庆市“蓝天行动(2012-2017)”计划项目

作者简介: 张灿(1982~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为颗粒物污染与防治, E-mail: nkzhangcan@126.com

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

cooking. In the residential area, the main sources of carbon were gasoline vehicle exhausts, cooking smoke and diesel exhausts.

Key words: carbon profiles; carbon source apportionment; $\text{PM}_{2.5}$; coefficient divergence; CMB; factor analysis; Chongqing

碳组分是细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 中的重要成分,国内最新研究结果显示,城市环境大气中碳组分占到 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的 17% ~ 40%^[1~6],碳组分主要包括有机碳(OC)和无机碳(EC),OC 和 EC 称为总碳(TC),OC 既包括由污染源直接排放的一次有机碳(POC),也包括有机气体在大气中发生光化学氧化生成的二次有机碳(SOC);EC 则来自于化石燃料或生物质的不完全燃烧,由污染源直接排放^[7]. OC、EC 通过散射和吸收作用影响大气的光学性质,两者联合作用,对大气能见度、地气系统的辐射平衡、气候变化有显著的影响^[8],另外,OC 中有些物质具有高生理毒性,EC 有较强的吸附能力,能富集半挥发性物质,促进化学反应过程,影响人体健康^[9~10].

IMPROVE 推荐的热光反射(TOR)方法可分析出颗粒物膜样品中的 8 种碳组分 OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2、EC3 和 OPC,因此可根据不同源的碳谱特征,定性判断出碳的来源. 根据国外文献[11~13],OC1 高载荷指示生物质燃烧的贡献,OC2、OC3、OC4、EC1、OPC 的高载荷指示汽油车尾气,OC2、OC3、OC4、OPC 的高载荷指示燃煤废气,EC2、EC3 的高载荷指示柴油车尾气或工业用柴油燃烧废气,国内也有学者利用该规律解析了颗粒物中碳组分来源^[14~16]. 由于国内外燃料类型及燃烧效率不同,可能在源碳谱上存在差异,但国内对源碳谱的研究较少. 化学质量平衡(chemical mass balance, CMB)模型常被用在颗粒物及其中组分的来源解析上,如多环芳烃(PAHs)来源解析等^[17~19],但由于某些燃烧类颗粒物源的碳谱共线性较强,鲜见利用 CMB 模型对颗粒物中的碳组分进行解析的报道.

本文以重庆本地 $\text{PM}_{2.5}$ 排放源及大气环境中碳组分为研究对象,分析 $\text{PM}_{2.5}$ 来源中的碳组分特征,尝试利用 CMB 模型并结合因子分析法判断出颗粒物源的指示性碳组分,分析居住区、工业区和商业区大气环境中 $\text{PM}_{2.5}$ 碳组分特征并探讨其来源,以期控制 $\text{PM}_{2.5}$ 、提高城市环境质量和能见度提供依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

1.1.1 环境样品采集

2012-05-02 ~ 2012-05-10,在重庆主城设置巴南、茶园、沙坪坝 3 个采样点,分别代表居住区、工业区和商业区,对 $\text{PM}_{2.5}$ 进行集中采样. 采样位置设在大气自动监测站点,周边较开阔,无高大建筑物,无工业源,主要的污染源为 1 ~ 2 km 之外的城市道路,可以反映出城市大气环境质量水平. 采样仪器为美国URG-3000ABC 采样器,采样流量为 8.3 L·min⁻¹. 采样滤膜为 whatman 47 mm 石英滤膜. 采样时间为 14:00 ~ 次日 13:00.

1.1.2 源样品采集

2012 年,对 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源——燃煤尘、尾气尘(机动车尾气、船舶尾气、施工机械尾气)、生物质燃烧尘、餐饮油烟尘进行了采集. 燃煤尘选择典型的燃烧正常的、不同燃烧方式、不同除尘方式的燃煤工业炉窑,用烟道稀释混合湍流分级采样器采集;机动车尾气尘挑选了重庆市保有量最大的 9 种车型[CNG 公交车、(重型、中型及微型)柴油车、(中型和微型)汽油车、CNG 出租车及摩托车],机动车按照正常道路行驶,用随车采样器采集;船舶尾气尘采样选择经常在嘉陵江上行驶的柴油货船,按其正常的航道航行,分空载和满载两种情况进行采样;施工机械尾气尘选择挖掘机、混凝土搅拌机,在怠速状态下(定时根据实际工况加减油门)进行采样,采样方法与汽车尾气尘的采集方式相同;生物质燃烧尘选择重庆市具有代表性的农作物水稻秸秆和柏树枝,在晴天和风速较稳定的情况下,在空旷的地带进行燃烧采样;餐饮油烟尘选择具有代表性的川菜和火锅店,中、晚营业高峰期在烟气排放口进行直接采样,采样设备与采集固定源设备相同.

1.1.3 滤膜处理

采用前的空白滤膜在马弗炉中 800℃ 下烘 2 h,去除滤膜中碳组分对分析的影响. 放入恒温恒湿箱[(25 ± 5)℃, RH(50 ± 5)%]内平衡 24 h 后,使用梅特勒百万分之一天平称重,连续两次称量(之间平衡 1 h)结果之差小于 ± 20 μg,取平均值为称重值. 采样后平衡称重方法同,放入冰箱内(4℃)保存以备分析.

1.2 样品分析

分析仪器为美国沙漠研究所研制的 DRI MODEL2001 热光碳分析仪(Thermal/optical carbon Analyzer),其原理是在无氧的纯 He 环境中,颗粒中

的有机碳分别在 140、280、480、580℃下挥发,经催化氧化炉转化生成的 CO₂,得到的结果分别对应 OC1、OC2、OC3、OC4,然后再将样品在 2% 氧气的 He 环境下,分别于 580、740 和 840℃逐步加热,将 EC 释放出来,生成 CO₂,对应 EC1、EC2 和 EC3. 无氧加热阶段生成的 CO₂ 和 有氧阶段生成的 CO₂,均在还原炉中被还原成甲烷(CH₄),再由火焰离子化检测器(FID)定量检测. 无氧加热时的焦化效应(也称为碳化)可使部分 OC 转变为裂解碳(OPC),为检测 OPC 的生成量,用 633 nm 激光全程照射样品,测量加热升温过程中反射光强(或透射光强)的变化,以初始光强作为参照,准确确定 OC 和 EC 的分离点. 根据 IMPROVE 方法,OC = OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + OPC, EC = EC1 + EC2 + EC3 - OPC.

在颗粒物均匀分布的石英膜上选取 0.512 cm² 滤膜样品,放入石英舟中送入仪器进行分析. 每日分析样品前,首先对样品炉进行焙烘,然后利用 He/CH₄ 校准气体进行三峰测试,测试通过后(基线漂移 <3,峰面积误差在 5% 以内),测试系统空白,如果 OC < 1.5 μg·cm⁻²,EC < 0.5 μg·cm⁻²,TC < 2.0 μg·cm⁻²,方可进行样品分析,每分析大约 10 个样品,进行一次平行性测试,当 OC、EC 和 TC 浓度 < 10 μg·cm⁻²时,允许误差 < 1 μg·cm⁻²;当 OC、TC ≥ 10 μg·cm⁻²时,允许相对误差 < 10%;当 EC ≥ 10 μg·cm⁻²,允许相对误差 < 20%. 每日分析完最后一个样品,再进行一次三峰测试.

2 结果与讨论

2.1 源的碳组分特征

6类源的OC、EC比重如图1所示,餐饮油烟尘

中 OC 含量最高,达到 96.9% ± 1.4%,EC 含量仅为 3.1% ± 1.4%;其次为生物质燃烧源,OC 含量为 92.7% ± 4.8%,EC 含量为 7.3% ± 4.8%;施工机械和船舶尾气尘中的 EC 含量最高,分别达到 41.5% ± 36.7% 和 34 ± 21.9%;机动车尾气中 OC 含量为 75.2% ± 21.2%,EC 含量为 24.8% ± 21.2%;说明颗粒物中的 EC 主要是来自交通源排放,尤其是柴油燃烧.

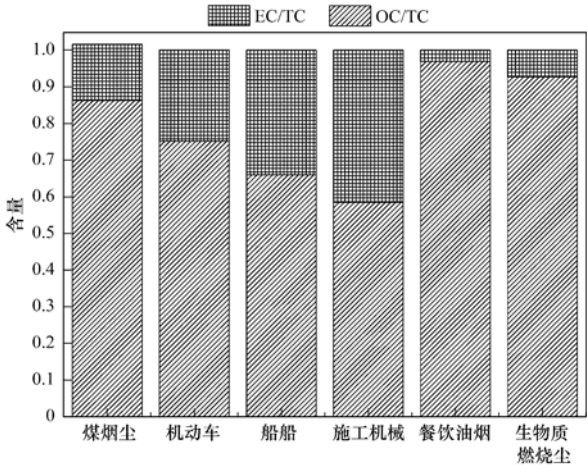


图 1 碳源中 OC、EC 含量

Fig. 1 OC and EC content in carbon sources

8 种碳组分的含量分布见表 1. 燃煤尘中,除了 EC3 含量最小之外,其余含量均在 10% ~ 30%. 机动车尾气尘以 OC1、OC2 为主,含量在 20% 以上;施工机械及船舶尾气尘以 OC1、EC2 为主,含量在 20% 以上;餐饮油烟尘以 OC2、OC3 为主,含量在 30% 以上;生物质燃烧尘 OC1、OC2 和 OC3 含量在 20% 以上. 整体来看,高温无机碳 EC3 在各类源中含量最小.

表 1 各源中 8 类碳组分含量分布

Table 1 Distribution of 8 kinds of carbons in each source

百分含量	>30%	20% ~ 30%	10% ~ 20%	1% ~ 10%	<1%
煤烟尘		OC1	OC2/OC3/OC4/EC2/EC1/OPC		EC3
机动车尾气尘	OC1	OC2	EC1/OC3	EC2/OC4	OPC/EC3
船舶尾气尘	OC1/EC2		OC2	OC3/EC1	OC4/EC3/OPC
施工机械尾气尘	EC2	OC1	OC2/OC3	EC3/OC4/EC1/OPC	
餐饮油烟尘	OC2/OC3		OC1	EC1/OC4/EC2/OPC	EC3
生物质燃烧尘	OC1	OC2/OC3	EC1	OPC/EC2/OC4	EC3

从 OC/EC 比例看(见表 2),重庆地区餐饮油烟尘 OC/EC 最高,高达 31.3,源采样点选择的重庆特色川菜馆、火锅店,与国内其他菜系相比,主要做法为煎、炒、油煮,食用油、脂肪类食料使用量大,这也是餐饮业油烟中 OC 浓度较大的原

因,但该值并不一定能代表其他菜系 OC、EC 比值. 与其他源类的 OC/EC 值相比,船舶和施工机械尾气尘的 OC/EC 均小于 2,说明柴油燃烧是 EC 的主要来源. 燃煤尘 OC/EC 为 6.3,比 Cao 等^[20]的结果偏低,可能与重庆地区燃煤质量以

及企业煤燃烧效率偏低有关。机动车尾气尘 OC/EC 值为 3.0, 低于国内 Cao 等^[20] 在西安的研究结果, 略高于国外 Hildemann 等^[21] 在洛杉矶的轻型汽油车研究结果。由于生物质燃烧类型不同, 重庆地区生物质燃烧以水稻秸秆和柏树枝为主, 生物质燃烧尘 OC/EC 值为 12.7, 较 Cachier 等^[22] 对热带生物质燃烧的研究结果偏高, 但低于森林燃烧的比值。

表 2 与国外研究结果对比¹⁾

Table 2 OC/EC of each source

项目	燃煤尘	机动车尾气尘 ¹⁾	船舶尾气尘	施工机械尾气尘	餐饮油烟尘	生物质燃烧尘	森林燃烧
本研究	6.3	3.0	1.9	1.4	31.3	12.7	
国外研究结果	12.0 ^[20]	2.2(轻型汽油车) ^[21]				9.0 ^[22]	14.5 ^[21]
		0.8(重型柴油车) ^[21]					
		4.1(汽油车尾气) ^[20]					

1) 根据重庆各车型保有量, 对 CNG 公交车、(重型、中型及微型)柴油车、(中型和微型)汽油车、CNG 出租车及摩托车 OC、EC 排放进行加权平均而得, 其余是监测样品 OC、EC 平均值的比值

2.2 源的标识性碳组分

特征组分也称为标识组分, 是某源类区别于其它源类的重要标志^[17]。影响大的表示该组分的灵敏度高, 影响小的表示灵敏度低。特征组分就是源成分谱中那些灵敏度最高的组分。MPIN(灵敏度)值为 1 的组分即为灵敏组分, 也就是相应源类的特征组分。利用 CMB 模型, 将 6 类源的 8 种碳组分谱

(包括百分比浓度及其标准偏差)及受体碳成分谱(包括浓度及其标准偏差)输入, 得到 MPIN 矩阵, 见表 3。燃煤尘的标识性组分为 OC4、机动车尾气尘的标识性组分为 EC1、船舶尾气尘的标识性组分为 EC2、施工机械尾气尘的标识性组分为 EC3、餐饮油烟尘的标识性组分为 OC3、生物质燃烧尘的标识性组分为 OPC 或者 OC1。

表 3 MPIN 矩阵

Table 3 MPIN matrix

组分	源名称					
	燃煤尘	机动车尾气尘	船舶尾气尘	施工机械尘	餐饮油烟尘	生物质燃烧尘
OC1	-0.40	-0.11	0.41	-0.24	-1.00	0.84
OC2	-0.23	0.26	-0.07	0.01	0.37	-0.05
OC3	0.16	-0.22	0.02	0.03	0.99	-0.08
OC4	1.00	0.52	-0.45	0.14	0.05	-1.00
EC1	0.27	1.00	-0.93	0.15	-0.63	-0.53
EC2	0.52	-0.11	1.00	0.02	0.60	-0.85
EC3	-0.12	0.01	-0.24	1.00	-0.14	0.12
OPC	0.46	-0.79	0.02	-0.17	-0.79	0.98

为了进一步验证标识性组分的合理性, 参考表 1, 与其他源类相比, 标识性组分均是含量最高的组分, 如燃煤尘中 OC4 的含量最高, 机动车尾气尘中 EC1 含量最高, 船舶尾气中 EC2 含量最高, 施工机械尾气尘中 EC3 含量最高, 餐饮油烟尘中 OC3 含量最高, 生物质燃烧尘中 OPC 虽然含量比燃煤尘低, 但燃煤尘的标识性组分为 OC4, OPC 是生物质燃烧区别于其他源的组分。

挥发性有机碳(VOC)是 120℃在氮气环境中释放出来的 OC 组分^[23,24], 挥发性芳香族化合物是二次气溶胶(SOA)最重要的人为源前体物, 城市大气中 50%~70%的 SOA 来自苯及其衍生物^[25], 而机动车排放是城市芳烃的主要来源^[26]。本文研究对象为重庆城区, 建筑装修、机动车尾气是主要的

VOC 排放源, 因此本文认为, 主城区 OC1 主要是 VOC 部分, 是机动车排放或者汽油挥发产生的。就重庆本地而言, EC2、EC3 的高载荷为柴油车尾气排放, OC2、OC3、OC4、OPC 的高载荷为燃煤排放, OC1、OC2、OC3、OC4、EC1 为汽油车尾气排放, OC3 为餐饮业排放, OPC 为生物质燃烧排放。

2.3 源的碳组分差异性分析

分歧系数(发散系数, coefficient divergence, CD)可以方便地确定样品之间的相似程度^[27], 在环境科学领域有广泛应用, 国内有学者利用 CD 对颗粒物样品的相似性进行分析^[27~29]。本研究将其应用于不同源碳成分谱相似性的检验, 其计算公式如下:

$$CD_{jk} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left(\frac{x_{ij} - x_{ik}}{x_{ij} + x_{ik}} \right)^2}$$

式中, CD_{jk} 为分歧系数; x_{ij} 为 j 源类的 i 组分平均含量; j, k 为 2 个不同的源; p 为参与分歧系数计算的源个数.

利用分歧系数对不同源成分谱进行分析比较

(表 4), 得到每两个源类之间的分歧系数. CD 数值介于 0 ~ 1. 当被比较的成分谱非常相似时, 它们的分歧系数趋近于 0; 反之, 它们之间含量差异越大, 则分歧系数越接近于 1.

表 4 各源类间的分歧系数

Table 4 Coefficient Divergence among sources

	燃煤尘	机动车尾气尘	船舶尾气尘	施工机械尾气尘	餐饮油烟尘	生物质燃烧尘
燃煤尘	—	0.41	0.57	0.52	0.66	0.38
机动车尾气尘		—	0.50	0.53	0.60	0.41
船舶尾气尘			—	0.54	0.67	0.56
施工机械尾气尘				—	0.57	0.53
餐饮油烟尘					—	0.52
生物质燃烧尘						—

姬亚芹^[30]将若干城市的成分谱按照不同的分歧系数代入 CMB 受体模型进行解析, 解析结果表明, 在其它源和受体成分谱不变的条件下, 分歧系数在 0.2 以下的 2 个成分谱的源解析结果相同, 即各个源的贡献率排位不发生变化. 从表 4 可以看出, CD 值最大的是船舶尾气尘-餐饮油烟尘, 为 0.67; 以及燃煤尘-餐饮油烟尘 0.66, 说明这 6 类源差别最大的是船舶尾气尘、餐饮油烟尘及燃煤尘. 其余源类之间的 CD 值均小于 0.60. 燃煤尘-生物质燃烧尘的 CD 值最小, 为 0.38, 燃煤尘-机动车尾气尘以及机动车尾气尘-生物质燃烧尘 CD 值为 0.41, 说明燃煤尘、机动车尾气尘与生物质燃烧尘这三类源相对其他源来说差异较小. 但由前面分析知, 其标识性碳组分不同, 因此不会影响分

析结果.

2.4 环境 $PM_{2.5}$ 中的碳组分特征

2.4.1 气象特征

采样期间, 均无明显降水, 气温 19.7 ~ 26.2℃, 平均气温 23.9℃; 气压 96.5 ~ 97.1 kPa, 平均气压 96.8 kPa; 风速 0.67 ~ 1.05 $m \cdot s^{-1}$, 平均风速 0.84 $m \cdot s^{-1}$; 风向以南风为主, 该风向也是重庆市全年主导风向; 相对湿度 58.1% ~ 81.9%, 平均相对湿度 70.5%, 见图 2, 可以代表重庆市春季气象条件. 重庆市春季颗粒物浓度平均水平低于冬季, 高于夏季, 与秋季相当.

2.4.2 浓度特征

采样期间, 各功能区 $PM_{2.5}$ 及其中碳组分浓度见图 3. 商业区 $PM_{2.5}$ 、OC、EC 平均浓度最大, 其中

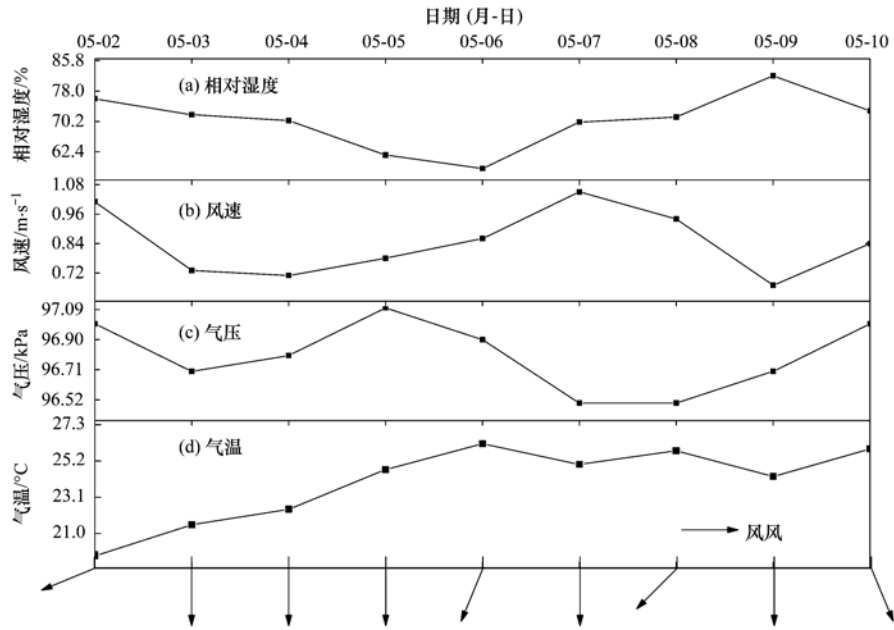


图 2 采样期间天气状况

Fig. 2 Weather conditions during the sampling period

PM_{2.5} 浓度为 $(101 \pm 27) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, OC 浓度为 $(17.5 \pm 5.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, EC 浓度为 $(7.0 \pm 2.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别占 PM_{2.5} 的 17.4% 和 6.9%; 工业区 PM_{2.5} 浓度为 $(92 \pm 37) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, OC 浓度为 $(13.9 \pm 4.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, EC 浓度为 $(5.8 \pm 1.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别占 PM_{2.5} 的 15.5% 和 6.6%; 居住区 PM_{2.5}、OC、EC 浓度最低, 分别为 $(90 \pm 27) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $(13.1 \pm 2.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(5.0 \pm 1.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, OC、EC 分别占 PM_{2.5} 的

14.6% 和 5.6%。该数据说明, 商业区因为路网密集、机动车数量多, PM_{2.5} 浓度较高、碳污染较严重。居民区、工业区、商业区 OC/EC 分别为 2.6、2.4 和 2.5, Chow 等^[31] 认为如果 OC/EC 的值高于 2.0, 可认为存在二次污染, 说明这 3 个采样点均存在二次有机碳污染, OC 中除了机动车或工业源排放贡献的一次有机碳之外, 还有来自大气化学过程形成的二次有机碳。

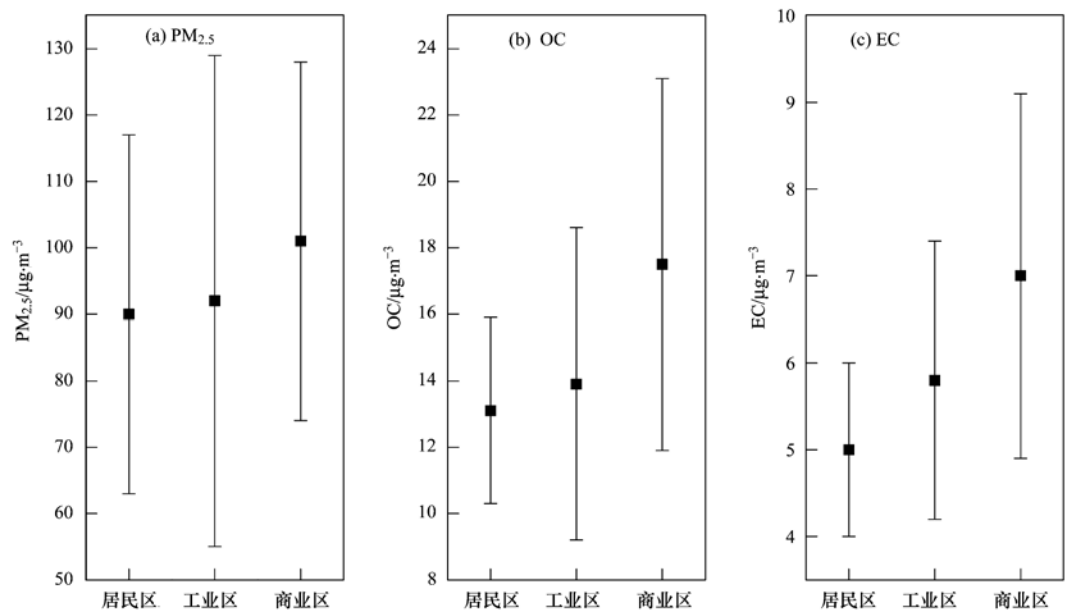


图3 各采样点 PM_{2.5} 及碳组分浓度

Fig. 3 PM_{2.5} and concentrations of carbon components in each sampling station

与其他城市 PM_{2.5} 中碳研究结果的对比见表 5。采样期间, OC 浓度低于北京、天津秋冬季节、西安春季和广州冬季, 高于上海春季、香港、清州和洛杉矶; OC/PM_{2.5} 仅低于广州和天津秋季。EC 低于

南京、西安, 与其他城市相比较; EC/PM_{2.5} 仅低于南京和广州。整体来看, 本研究采样期间重庆城区颗粒物中 EC 浓度以及 EC/PM_{2.5} 偏高, 需要重点关注柴油车尾气的治理。

表5 本研究 OC、EC 与其他城市结果对比

Table 5 Contrast of OC and EC in this study and those in other cities

城市	研究时间	OC 浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	OC/PM _{2.5} /%	EC 浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	EC/PM _{2.5} /%	分析方法
北京 ^[1]	2006-03 ~ 2006-12	25.85	14.6	6.14	3.5	TOR
	2006-08	13.53	7.61	3.75	2.10	
天津 ^[2]	2006-10	20.35	20.60	6.03	5.88	TOR
	2006-12	40.53	16.71	7.49	3.62	
上海 ^[3]	2008 年春季	7.14	11.5	4.06	6.5	TOR
济南 ^[4]	2010-01 ~ 2011-01	16.98	14.75	5.81	5.05	TOR
武汉 ^[5]	2011-07 ~ 2012-02	19.4	15.3	2.9	2.3	TOR
南京 ^[32]	2007-06 ~ 2008-05	15.7	15.9	10.4	10.5	TOR
	冬季	24.6	30.3	7.9	9.7	
广州 ^[6]	夏季	14.0	26.1	4.7	10.1	TOR
	冬季	28.07	17.5	9.83	6.1	
西安 ^[33]	2005 春季	28.07	17.5	9.83	6.1	TOR
香港(冬) ^[34]	冬季	9.6		4.7		TOR
	夏季	5.3		3.2		
清州 ^[35]	1995 ~ 1996	5.0		4.4		TOR
洛杉矶 ^[36]	1987 年夏秋季	6.0		3.8		TOR
本研究	2012-05	13.1 ~ 17.5	15.2 ~ 17.4	5.0 ~ 7.0	5.9 ~ 6.9	TOR

Turpin 等^[37]认为,若 OC 与 EC 的相关性很好,则说明 OC 主要为一次有机碳,二次有机碳对 OC 贡献相对较小. OC-EC 拟合及相关性见图 4, 3 个采样点 OC、EC 均呈现出正相关关系. 工业区 OC-EC 相关系数最大, $R=0.94$, 在 $\alpha=0.05$ 下高度相关; 商业区 $R=0.803$, 在 $\alpha=0.05$ 下显著相关; 居民区 $R=0.73$, 相关性不明显, 说明工业区 OC、EC 的来源较其他地区更单一, OC 主要为一次有机碳, 居住区 OC、EC 可能来至不同的污染源, 二次有机碳对 OC 贡献较大. 3 个功能区拟合线的斜率为 2.742、2.304 和 2.136, 根据前面的源 OC/EC 值, 远小于燃煤、餐饮油烟、生物质燃烧尘的 OC/EC 值, 与机动车尾气尘、船舶尾气尘、施工机械尾气尘 OC/EC 接近, 说明 OC、EC 主要来源于汽油、柴油交通设备的共同贡献; 居民区拟合线的截距大于工业区和商业区, 表明相对这两个区来说, 居民区 OC、EC 除机动车外, 还有其它源贡献, 工业区和商业区截距小, 表明 OC、EC 除燃煤、机动车、生物质等燃烧源外, 其他源的贡献较小.

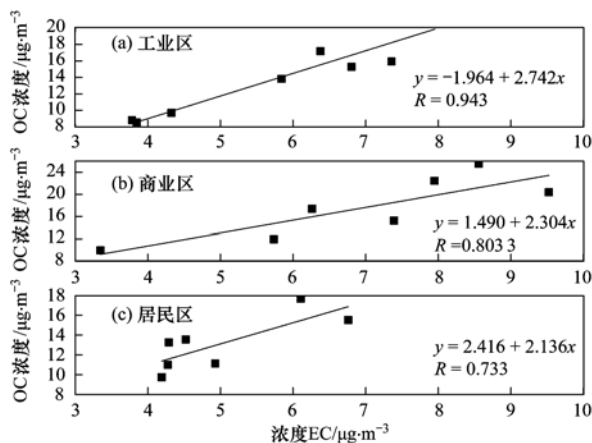


图 4 各采样点 OC、EC 相关性

Fig. 4 Correlation of OC-EC in each sampling station

2.4.3 二次有机碳浓度特征

为了对 SOC 的贡献率进行定量描述, Turpin 等^[37]和 Castro 等^[38]提出了以下经验公式:

$$SOC = OC_{tot} - EC \times (OC/EC)_{min}$$

式中, SOC 为二次有机碳, OC_{tot} 为总有机碳, $(OC/EC)_{min}$ 为所观测到的 OC/EC 最小值. 由于本研究所观测的样点均受区域尺度的二次有机污染影响, OC/EC 最小值已经超过 2.0, 显然不适合 $(OC/EC)_{min}$ 取值要求. 研究表明^[37,39], 许多城市地区的 $(OC/EC)_{min}$ 值在 1.3~1.5 之间变动; 广州^[40]研究也观测到室内外环境中的 $(OC/EC)_{min}$ 值均为 1.5.

本研究在估算重庆 SOC 的贡献时, 取 $(OC/EC)_{min}$ 为 1.5, 计算得到, 商业区 $PM_{2.5}$ 中 SOC 的浓度最高, 为 $7.0 \mu g \cdot m^{-3}$, 占 OC 浓度的 40.0%; 其次为居住区 $5.6 \mu g \cdot m^{-3}$, 占 OC 浓度的 42.8%; 工业区浓度最小, 为 $5.2 \mu g \cdot m^{-3}$, 占 OC 浓度的 37.4%.

与其他城市的结果对比见图 5, 重庆 SOC/OC 高于上海春季、西安春季、天津和济南, 低于北京, 与广州夏季和武汉研究值接近.

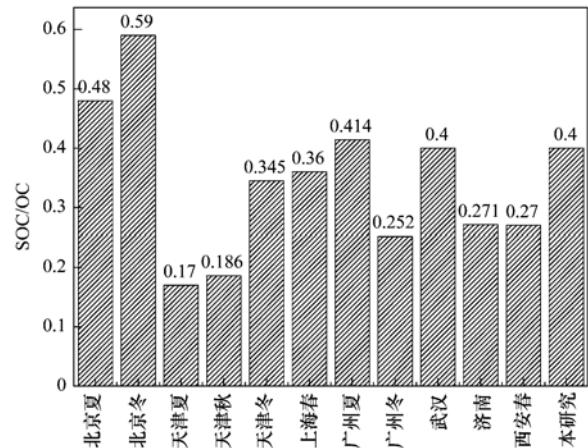


图 5 本研究 SOC/OC 与其他城市结果比较

Fig. 5 Contrast of SOC/OC in this study and those in other cities

2.5 环境样品中的碳来源分析

利用 SPSS 软件, 将 OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2、EC3 和 OPC 这 8 个碳组分的浓度值作为变量, 进行因子分析, 计算各变量的相关系数矩阵, 采取主因子分析法提取因子, 使用方差极大法进行旋转, 得到不同功能区的因子载荷矩阵, 见表 6. 根据前面分析, EC2/EC3 的高载荷为柴油车尾气排放, OC2/OC3/OC4/OPC 的高载荷为燃煤排放, OC1/OC2/OC3/OC4/EC1 为汽油车尾气排放, OC3 为餐饮业排放, OPC 为生物质燃烧排放.

工业区产生 2 个贡献率较大的因子, 累积方差贡献率达到了 86.0%, 因子 1 的高载荷组分为 OC1、OC2、OC3、OC4、EC1 和 OPC, 指示来源为燃煤和汽油车尾气, 解释了 $PM_{2.5}$ 中 72.1% 的碳组分; 因子 2 的高载荷组分为 EC3, 指示来源为柴油车尾气, 解释了 13.8% 的碳组分.

商业区产生 2 个贡献率较大的因子, 累积方差贡献率达到了 81.0%, 因子 1 的高载荷组分为 OC1、OC2、OC4 和 EC1, 指示来源为汽油车尾气, 解释了 $PM_{2.5}$ 中 61.8% 的碳组分; 因子 2 的高载荷组分为 OC3、EC3, 指示来源为柴油车尾气和餐饮业

油烟,解释了 19.2% 的碳组分。

居住区产生 3 个贡献率较大的因子,累积方差贡献率达到了 90.0%,因子 1 的高载荷组分为 OC1、OC2、OC4 和 EC1,指示来源为汽油车尾气,解释了 57.7% 的碳组分;因子 2 的高载荷组分为 OC3,指示来源为餐饮业油烟,解释了 18.4% 的碳组分;因子 3 的高载荷组分为 EC3,指示来源为柴油车,解释了 13.9% 的碳组分。

表 6 旋转后的因子载荷矩阵

Table 6 Rotated factor loading matrix

主因子	工业区		商业区		居住区		
	1	2	1	2	1	2	3
OC1	0.938	-0.034	0.954	0.094	0.827	0.356	-0.286
OC2	0.930	-0.285	0.943	0.197	0.844	0.148	-0.166
OC3	0.840	-0.354	0.582	0.779	0.630	0.631	-0.169
OC4	0.886	-0.404	0.911	0.361	0.973	0.154	0.146
EC1 ¹⁾	0.944	-0.244	0.901	0.160	0.789	0.185	-0.432
EC2	-0.670	0.434	-0.841	0.101	-0.777	0.517	-0.045
EC3	-0.082	0.967	0.012	0.904	-0.089	-0.004	0.985
OPC	0.843	0.166	0.042	0.592	-0.115	-0.919	-0.023
特征值	5.771	1.105	4.940	1.538	4.616	1.472	1.112
方差贡献率/%	72.142	13.813	61.754	19.225	57.703	18.401	13.896
累积方差贡献率/%	72.142	85.955	61.754	80.979	57.703	76.104	90
来源	燃煤 + 汽油车	柴油车	汽油车	柴油车 + 餐饮业	汽油车	餐饮业	柴油车

1) EC1 = EC1 (TOR 实测) - OPC (TOR 实测)

不同采样点碳组分来源对比见图 6,从中所示,无论何种功能区,汽油车尾气排放都是对 PM_{2.5} 中碳贡献最主要的来源,其次是柴油车尾气排放。另外,工业区还受到燃煤的影响,商业区和居民区受到餐饮业排放的影响,餐饮业排放对居民区 PM_{2.5} 的碳组分贡献率较大。

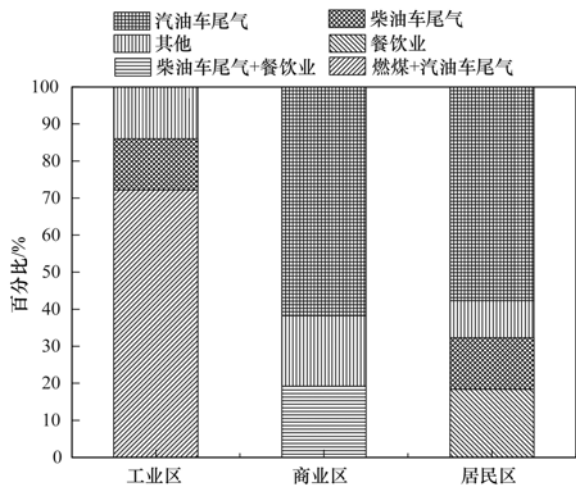


图 6 不同采样点碳来源结果对比

Fig. 6 Contrast of carbon source distribution in each sampling station

3 结论

(1)重庆地区燃煤尘、机动车尾气尘、船舶尾气尘、施工机械尾气尘、生物质燃烧尘、餐饮油烟尘 PM_{2.5} 中 OC/EC 值分别为 6.3、3.0、1.9、1.4、12.7 和 31.3,其标识性碳组分分别为 OC4、EC1、

EC2、EC3、OPC 和 OC3。EC2、EC3 的高载荷指示柴油车尾气排放,OC2、OC3、OC4、OPC 的高载荷指示燃煤排放,OC1、OC2、OC3、OC4、EC1 指示汽油车尾气排放,OC3 指示餐饮业排放,OPC 指示生物质燃烧排放。

(2)采样期间,商业区 OC、EC 分别占到 PM_{2.5} 质量浓度的 17.4% 和 6.9%;工业区 OC、EC 分别占 15.5% 和 6.6%;居民区 OC、EC 分别占 14.6% 和 5.6%。3 个采样点 OC/EC 值均大于 2,说明均存在 SOC 污染,SOC 在 OC 中的比重分别为 40.0%、37.4% 和 42.8%。

(3)工业区 PM_{2.5} 中的碳组分主要源自燃煤和汽油车尾气,其次为柴油车尾气;商业区 PM_{2.5} 中的碳组分主要源自汽油车尾气,其次为柴油车尾气和餐饮业油烟;居住区 PM_{2.5} 中的碳组分主要来源依次为汽油车尾气、餐饮业油烟、柴油车尾气。在 3 类功能区内,汽油车尾气排放均是 PM_{2.5} 最主要的碳来源,其次是柴油车尾气排放,此外,工业区还受到燃煤的影响,商业区和居民区受到餐饮业排放的影响,其中居民区受餐饮业排放的影响较大。

致谢:中国环境科学研究院殷宝辉、杨文,重庆市环境科学研究院张丹、王颖钊、张关丽、袁睿、吴莉萍、孟小星、陈敏、史小春参与了源采样和环境采样工作。南开大学国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室提供了再悬浮试验设备,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 周家茂, 曹军骥, 张仁健. 北京大气中 $PM_{2.5}$ 及其碳组分季节变化特征与来源[J]. 过程工程学报, 2009, **9**(增刊2): 248-252.
- [2] 董海燕, 古金霞, 陈魁, 等. 天津市区 $PM_{2.5}$ 中碳组分污染特征及来源分析[J]. 中国环境监测, 2013, **29**(1): 34-38.
- [3] 王杨君, 董亚萍, 冯加良, 等. 上海市 $PM_{2.5}$ 中含碳物质的特征和影响因素分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1755-1761.
- [4] 韩道汶, 王思晴, 安伟. 济南市环境空气中 $PM_{2.5}$ 的碳组成与特征分析[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2012, **22**(4): 42-44.
- [5] 成海容, 王祖武, 冯家良, 等. 武汉市城区大气 $PM_{2.5}$ 的碳组分与源解析[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(9): 1574-1579.
- [6] 朱李华, 陶俊, 张仁健, 等. 冬夏季广州城区碳气溶胶特征及其与 O_3 和气象条件的关联[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(10): 1942-1949.
- [7] 吴琳, 冯银厂, 戴莉, 等. 天津市大气中 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 及其碳组分污染特征分析[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(11): 1134-1139.
- [8] Watson J G. Visibility: science and regulation[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2002, **52**(6): 628-713.
- [9] 邹长伟, 黄虹, 曹军骥. 大气气溶胶含碳物质基本特征综述[J]. 环境污染与防治, 2006, **28**(4): 270-274.
- [10] 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.
- [11] Watson J G, Chow J C, Lowenthal D H. Differences in the carbon composition of source profiles for diesel- and gasoline-powered vehicles[J]. Atmospheric Environment, 1994, **28**(15): 2493-2505.
- [12] Kim E, Hopke P K, Edgerton E S. Improving source identification of Atlanta aerosol using temperature resolved carbon fractions in positive matrix factorization[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(20): 3349-3362.
- [13] Kim E, Hopke P K H, Paatero P, et al. Incorporation of parametric factors into multilinear receptor model studies of Atlanta aerosol[J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(36): 5009-5021.
- [14] 李杨. 西安大气中碳气溶胶的理化特征及其来源解析[D]. 西安: 中国科学院地球环境研究所, 2004.
- [15] 黄虹, 李顺诚, 曹军骥, 等. 广州市住宅室内、外 $PM_{2.5}$ 中碳污染来源解析[J]. 华南师范大学学报: 自然科学版, 2007, (4): 85-91.
- [16] 曹军骥, 李顺诚, 李扬, 等. 2003 年秋冬季西安大气中有机碳和元素碳的理化特征及其来源解析[J]. 自然科学进展, 2005, **15**(12): 1460-1466.
- [17] 冯银厂, 吴建会, 朱坦, 等. 济南市环境空气中 TSP 和 PM_{10} 来源解析研究[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(2): 1-5.
- [18] 李伟芳, 白志鹏, 史建武, 等. 天津市环境空气中细粒子的污染特征与来源[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(4): 394-400.
- [19] 彭林, 游燕, 朱坦, 等. 乌鲁木齐空气颗粒物中 PAHs 碳同位素组成及来源解析[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(5): 542-545.
- [20] Cao J J, Chow J C, Lee S C, et al. Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, **5**: 3127-3137.
- [21] Hildemann L M, Markowski G R, Cass G R. Chemical composition of emissions from urban sources of fine organic aerosol[J]. Environmental Science & Technology, 1991, **25**(4): 744-759.
- [22] Cachier H, Brémond M P, Buat-Ménard P. Carbonaceous aerosols from different tropical biomass burning sources[J]. Nature, 1989, **340**(6232): 370-373.
- [23] Hewitt C N. Reactive hydrocarbons in the atmosphere[M]. London: Academic Press, 1998. 322.
- [24] Barletta B, Meinardi S, Sherwood R F, et al. Volatile organic compounds in 43 Chinese cities[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [25] Odum J R, Jungkamp T P W, Griffin R J, et al. Aromatics, reformulated Gasoline, and Atmospheric organic aerosol formation[J]. Environmental Science & Technology, 1997, **31**(7): 1890-1897.
- [26] 白志鹏, 李伟芳. 二次有机气溶胶的特征和形成机制[J]. 过程工程学报, 2008, **8**(1): 202-208.
- [27] 胡伟, 魏复盛. 部分城市空气中颗粒物的元素组成比较[J]. 上海环境科学, 2002, **21**(7): 408-411.
- [28] 陆炳, 孔少飞, 韩斌, 等. 燃煤锅炉排放颗粒物成分谱特征研究[J]. 煤炭科学, 2011, **36**(11): 1928-1933.
- [29] 徐虹, 林丰妹, 毕晓辉, 等. 杭州市大气降尘与 PM_{10} 化学组成特征的研究[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(1): 1-7.
- [30] 姬亚芹. 城市空气颗粒物源解析土壤风沙尘成分谱研究[D]. 天津: 南开大学, 2007. 87-88.
- [31] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, et al. Descriptive analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX[J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(12): 2079-2112.
- [32] 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.
- [33] 陈超. 西安市春季大气碳气溶胶变化特征及其影响因素的相关分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007. 18-21.
- [34] Cao J J, Lee S C, Ho K F, et al. Spatial and seasonal variations of atmospheric organic carbon and elemental carbon in Pearl River Delta Region, China[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(27): 4447-4456.
- [35] Lee H S, Kang B W. Chemical characteristics of principal $PM_{2.5}$ species in Chongju, South Korea[J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(4): 739-746.
- [36] Chow J C, Watson J G, Fujita E M, et al. Temporal and spatial variations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} aerosol in the southern California air quality study[J]. Atmospheric Environment, 1994, **28**(12):

- 3773-3785.
- [37] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantization of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29** (23): 3527-3544.
- [38] Castro L M, Poi C A, Harrison R M, *et al.* Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: estimation of secondary organic carbon concentrations [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33** (17): 2771-2781.
- [39] Cao J J, Lee S C, Ho K F, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River Delta Region, China during 2001 winter period [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37** (11): 1541-1460.
- [40] 黄虹, 李顺诚, 曹军骥, 等. 广州市夏季室内外 PM_{2.5} 中有机碳、元素碳的分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2005, **25** (9): 1242-1249.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过 8 000 字 (含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明 (在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站 (www.hjxx.ac.cn) 进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果 (包括主要数据) 和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作 (引文即可) 和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg (毫克), m (米), h (小时) 等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用 (1), (2) …… 表示, 后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊: 作者 (外文也要姓列名前). 论文名 [J]. 期刊名, 年, 卷 (期): 起页-止页.

图书: 作者. 书名 [M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.

会议文集: 作者. 论文名 [A]. 见 (In): 编者. 文集名 [C]. 出版地: 出版社 (单位), 年. 起页-止页.

学位论文: 作者. 论文名 [D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告: 作者. 论文名 [R]. 出版地: 出版单位, 出版年.

专利: 专利所有者. 专利题名 [P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjxx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjxx.ac.cn

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 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