

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲, 赵三平, 周文 (1645)
环境损害评估: 国际制度及对中国的启示	张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕, 李怀恩 (1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法	蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)
温州城市降雨径流中BOD ₅ 和COD污染特征及其初始冲刷效应	王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)
香溪河库湾春季pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 黄允秋 (1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)
纳米Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚	何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锐, 周丽华, 谢成屏 (1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳王荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张聪璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)
倒置A ² /O-MBR处理城市污水的中试研究	张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N ₂ O释放特性	梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)
咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究	赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)
宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征	樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)
内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征	郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)
丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)
海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)
1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)
1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性	裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)
1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)
福建省三大城市冬季PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘遂庆 (1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)
厦门秋季近郊地面CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)
GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b	郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿, 王钧伟 (2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博, 李巍 (2057)
《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)	

上海市含碳大气颗粒物的粒径分布

袁宁^{1,2}, 刘卫^{2*}, 赵修良^{1*}, 王广华², 姚剑², 曾友石², 刘邃庆²

(1. 南华大学核科学技术学院, 衡阳 421001; 2. 中国科学院上海应用物理研究所核分析重点实验室, 上海 201800)

摘要: 使用 STAPLEX 大流量六级采样器 ($<0.49\ \mu\text{m}$ 、 $0.49\sim0.95\ \mu\text{m}$ 、 $0.95\sim1.5\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\sim3.0\ \mu\text{m}$ 、 $3.0\sim7.2\ \mu\text{m}$ 和 $>7.2\ \mu\text{m}$), 结合 DRI Model 2001 热光碳分析仪 (TOR), 分析了 2010 年 5 月~2011 年 5 月期间上海市嘉定区 (市郊)、徐汇区 (市区) 的大气颗粒物样品中有机碳 (OC) 和元素碳 (EC) 的粒径分布。结果表明, 不同粒径的 OC 和 EC 质量浓度均呈双峰分布, 较高峰出现于 $<0.49\ \mu\text{m}$ 粒径段, 次高峰则出现于 $>3.0\ \mu\text{m}$ 的两个粒径段。嘉定区 (JD) 和徐汇区 (XH) $\text{PM}_{3.0}$ 中 OC 的质量浓度分别为 $16.35\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $11.85\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, EC 质量浓度分别为 $2.22\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.91\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 市郊大气颗粒物中碳组分质量浓度高于市区, 说明市郊碳污染更为严重。在 $<1.5\ \mu\text{m}$ 的粒径段, 嘉定区 OC 与 EC 的同源性较好, 表明其中大部分 OC 来自于燃烧源。两地区不同粒径 OC/EC 值与不同排放源特征值的对比, 可以说明徐汇区更多受到机动车尾气排放和道路扬尘的影响。通过 EC 示踪法计算二次有机碳 (SOC) 质量浓度可知: 上海市 SOC 质量浓度较高, $\text{PM}_{3.0}$ 中达到 $6.76\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占 OC 的质量分数为 69%, 粒径分布呈双峰分布, 峰值位于 $0.49\sim0.95\ \mu\text{m}$ 和 $3.0\sim7.2\ \mu\text{m}$ 粒径段。

关键词: 颗粒物; OC; EC; 粒径分布; 上海

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1995-08

Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China

YUAN Ning^{1,2}, LIU Wei², ZHAO Xiu-liang¹, WANG Guang-hua², YAO Jian², ZENG You-shi², LIU Sui-qing²

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China; 2. Key Laboratory of Nuclear Analysis and Nuclear Energy Technology, Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: Using STAPLEX pumping system with a six-stage cascade impactor (size range: $<0.49\ \mu\text{m}$, $0.49\sim0.95\ \mu\text{m}$, $0.95\sim1.5\ \mu\text{m}$, $1.5\sim3.0\ \mu\text{m}$, $3.0\sim7.2\ \mu\text{m}$, $>7.2\ \mu\text{m}$), the atmospheric particulate samples at suburb (Jiading District) and urban (Xuhui District) sites in Shanghai, China were collected from May 2010 to May 2011. The organic carbon (OC) and the element carbon (EC) of those samples were analyzed by a DRI Model 2001 thermal/optical carbon analyzer with the reflectance (TOR) method. The size distributions of OC and EC in atmospheric particles both showed bimodal distributions at Jiading and Xuhui, with the peaks at size range of $<0.49\ \mu\text{m}$. Meanwhile, the average annual concentrations of OC and EC in $\text{PM}_{3.0}$ were $16.35\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and $2.22\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ at Jiading, $11.85\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and $1.91\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ at Xuhui, respectively. The higher concentrations of particulate matters together with their carbonaceous species at the suburb site indicated that the particulate and carbonaceous aerosol pollution was more serious at suburb than at urban in Shanghai. Compared with Xuhui, the OC shared a higher homology with EC at $<1.5\ \mu\text{m}$ sizes at Jiading, which suggested that OC was mostly derived from combustion sources at urban site in Shanghai. Furthermore, the OC/EC mass ratios at various particulate sizes and those ratios of different sources were discussed. The result suggested that more vehicle emission and more road dust were present at Xuhui District. Moreover, the second organic carbon (SOC) were estimated using EC as a tracer of primary organic carbon, the SOC mass concentration in $\text{PM}_{3.0}$ was $6.76\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and had a proportion of 69% of OC in Shanghai, which also showed a bimodal distribution with peaks at size of $0.49\sim0.95\ \mu\text{m}$ and $3.0\sim7.2\ \mu\text{m}$, respectively.

Key words: aerosol particle; organic carbon; element carbon; size distribution; Shanghai

大气颗粒物是大气中主要污染成分之一,是导致大气环境能见度降低和影响气候变迁的重要因素^[1],可吸入颗粒物更是危及人类健康的环境“杀手”之一。碳是大气颗粒物中几种主要富含元素之一,主要以有机碳 (organic carbon, OC) 和元素碳 (element carbon, EC) 形式存在。不同的碳质组分,其物理化学性质存在差异,EC 是大气中主要的吸光成分,是大气中能见度降低的重要原因,同时影响大气热量平衡^[2]。OC 含有大量的有毒成分,如多环芳

烃 (PAHs)^[3]、二噁英^[4]等,严重危害人类健康。不同粒径的颗粒物中的碳组分对人体健康、大气能见度和大气成云降雨的影响也有不同^[5]。目前国内外对大气颗粒物中碳的研究主要集中在特定粒径区

收稿日期: 2012-08-17; 修订日期: 2012-10-24

基金项目: 上海市科委基础研究重点项目 (10JC1417200); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (11005144)

作者简介: 袁宁 (1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: yuanning@sinap.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: liuwei@sinap.ac.cn; zhaoxiul@163.com

间,如 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} ^[6,7],并局限在北京、广州等地^[8-10],针对上海市大气颗粒物中的碳污染,特别是碳组分粒径分布特征的研究相对较少。

上海市是中国的经济中心,至 2011 年末,人口已经突破 2 300 万人,机动车则超过 310 万辆^[11],煤、石油、矿石和水泥的消耗,造成大量的烟尘排放和污染,直接导致雾霾天气的增加,带来严重的大气污染问题。本研究选择上海市嘉定区和徐汇区分别作为上海市郊和市区的典型代表,通过对两地区大气颗粒物中不同粒径的碳组分进行对比分析,得到了上海市大气含碳颗粒物的粒径分布特征,初步判断含碳污染物的来源,以期为大气颗粒物污染的有效治理提供基础资料和科学依据。

1 样品采集与分析

大气颗粒物采样器布置在上海市郊区——嘉定、市区——徐汇区两个采样点。嘉定采样点 ($31.40^{\circ}N, 121.29^{\circ}E$) 放置在上海嘉定区中国科学院上海应用物理研究所 102 楼楼顶,高 18 m,位于上海市中心城区西北约 30 km,宝山工业区以西约 20 km。嘉定采样点周围无工业厂房、高大建筑,分布有 3 个自然村,地势开阔,植被茂盛,东 300 m 处是一条二级公路,主要碳排放源有 3 个木柴小锅炉,一个燃煤锅炉以及生物源排放的有机碳。徐汇区采样点 ($31.19^{\circ}N, 121.44^{\circ}E$) 位于上海市徐汇区环境检测中心三楼楼顶,距地面 12 m,紧邻漕溪路与南丹路交汇路口。该地区是典型的商业区代表,人口密度高、车流量大、高层建筑多,采样点可能受到机动车尾气、道路扬尘、商业餐饮油烟等排放源影响。两地相距约 30 km,地理位置如图 1 所示。

采样仪器选用美国 STAPLEX 公司的 M235 大流量六级采样器,流速 $1.13 m^3 \cdot min^{-1}$,1~6 级粒径范围依次是: $<0.49 \mu m$ 、 $0.49 \sim 0.95 \mu m$ 、 $0.95 \sim 1.5 \mu m$ 、 $1.5 \sim 3.0 \mu m$ 、 $3.0 \sim 7.2 \mu m$ 和 $>7.2 \mu m$ 。为了消除周末效应带来的影响^[12,13],采样时间从周二上午 09:00 开始至周四上午 09:00 结束,连续采样 48 h。采样前石英膜在 $850^{\circ}C$ 下烘烤 6 h,以消除膜上可能存在的碳。所有待检测样品置于 $-20^{\circ}C$ 冰柜中保存,采样前后恒温恒湿 48 h,用 Mettler Toledo 微量天平(精度 $10^{-5} g$)称量石英膜,由差值法测定颗粒物质量,采用美国沙漠研究所研制的 DRI Model 2001 热光碳分析仪(TOR 热光反射法)进行样品分析^[14]。样品采集从 2010 年 5 月持续至 2011 年 5 月,选取两地区相同采样日期的各 12 套(共 24



图 1 嘉定区与徐汇区采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in Jiading and Xuhui

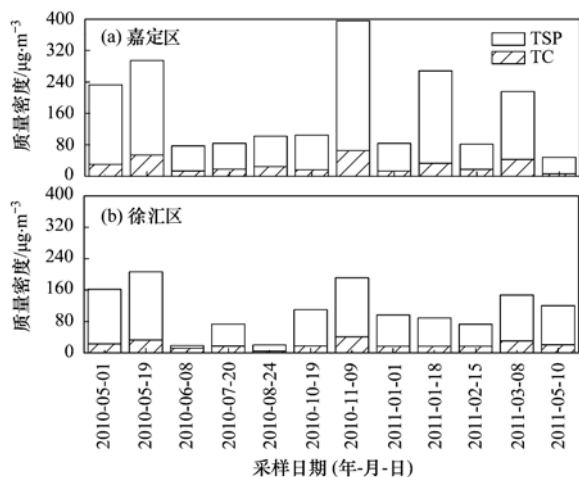
套 144 个)有效样本进行对比分析,另添加嘉定 22 套(共 34 套 204 个)样品对嘉定区进行 OC、EC 相关性和二次有机碳(secondary organic carbon, SOC)的分析。

2 结果与讨论

2.1 大气总悬浮颗粒物质量浓度与碳组分分析

采样期间大气总悬浮颗粒物(total suspended particle, TSP)与碳组分(total carbon, TC)质量浓度分布如图 2 所示,其中碳组分 $TC = OC + EC$ 。嘉定区 TSP 平均质量浓度 ($137.59 \mu g \cdot m^{-3}$) 和 TC 平均质量浓度 ($27.74 \mu g \cdot m^{-3}$) 较徐汇区 ($108.86 \mu g \cdot m^{-3}$ 、 $20.68 \mu g \cdot m^{-3}$) 偏高,说明嘉定区空气污染比徐汇区更为严重。而从时间分布来看,两采样点的 TSP 浓度变化趋势较为一致,例如起始日期为 2010-05-01、2010-05-19、2010-11-09、2011-03-08 的样品,嘉定区和徐汇区的 TSP 质量浓度均比较高,说明两者的大气颗粒物污染随时间变化呈现一致性,意味着上海市市区与市郊的大气颗粒物可能存在着整体性的污染特征。为进一步分析上海市大气颗粒物中碳组分的污染特征,图 3 给出了颗粒物中 TC 质量浓度和 TSP 中 TC 的粒径分布。

从图 3 中可看出,嘉定区与徐汇区的 TC 粒径分布均为双峰分布,最高峰值均位于 $<0.49 \mu m$,次高峰值则分别位于 $>7.2 \mu m$ (JD) 和 $3.0 \sim 7.2 \mu m$



图中标注日期为样品采集的起始日期,

从当日上午 09:00 起,持续 48 h 后结束

图 2 上海市大气总悬浮颗粒物与碳组分质量浓度分布

Fig. 2 Concentration distribution of TSP and TC in Shanghai

(XH)的粒径段. 其中,在 $<3.0 \mu\text{m}$ 的 4 个粒径段,嘉定区和徐汇区的 TC 质量浓度均随粒径的增大而减小,说明在这 4 个粒径段的颗粒物中总碳含量存在明显的粒径分布特征,且这种分布与采样点无关. 细颗粒物中的含碳物质主要来自于燃烧生成的一次碳(EC 和 POC)和由气态前体物通过气-粒转换生成的二次碳(SOC). 一方面,由燃烧产生的一次碳主要分布在小粒径颗粒中(本研究中为 $<0.49 \mu\text{m}$ 的颗粒物),并在大气滞留过程中不断吸湿生长,而该过程受采样点分布影响小. 另一方面,二次生成的碳与大气中气态前体物浓度以及生成环境相关,同样受区域性采样点分布影响较小. 而对于 $>3.0 \mu\text{m}$ 的两个粒径段,TC 的质量浓度相差不大,嘉定区分别为 $4.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $4.65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,徐汇区分别为 $3.71 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $3.21 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 由于两地区采样点的 $>3.0 \mu\text{m}$ 颗粒物的来源存在明显的差异:嘉定区采样点周边绿化率高,粗颗粒中可能更多地来自于植物碎片和花粉等自然源;徐汇区采样点周边为道路和高楼,粗颗粒中可能更多受到道路扬尘和机动车刹车磨损以及轮胎摩擦等人为来源的影响. 来源上的差异决定了两采样点 TC 浓度在这两个粒径段上的分布差异,嘉定区 $>7.2 \mu\text{m}$ 颗粒物中 TC 的浓度大于 $3.0 \sim 7.2 \mu\text{m}$ 颗粒物中 TC 的浓度,而徐汇区则相反. 这种差异可能是花粉颗粒和植物碎片等产生的影响,因为花粉和植物碎片的粒径一般处于 $>7.2 \mu\text{m}$ 的粒径段.

对于碳组分占颗粒物的质量分数,从图 3 可看出,其百分数随着粒径的增大而有减小的趋势,在

$<0.49 \mu\text{m}$ 和 $0.49 \sim 0.95 \mu\text{m}$ 粒径段约为 25%,而在 $>7.2 \mu\text{m}$ 粒径段,则降低到 15% 左右. 可见,含碳物质更容易在细颗粒物中富集,这与唐小玲等^[15]对广州大气颗粒物粒径分析的研究结果是一致的. 另外,在细粒径颗粒物中,碳所占质量分数随粒径增大而减小,说明细颗粒在增长过程中,含碳物质的增长并不是同步的.

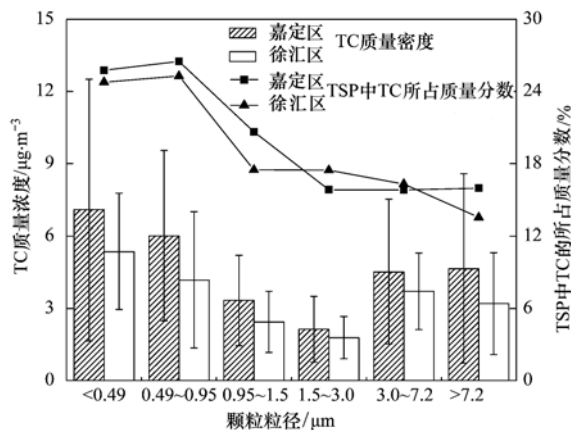


图 3 TC 质量浓度及 TC/TSP 的粒径分布

Fig. 3 Size distribution of TC concentrations and the percentages of TC in TSP

2.2 OC、EC 粒径分布

上海市嘉定区与徐汇区大气颗粒物中 OC、EC 质量浓度的粒径分布如图 4 所示,两地区不同粒径 OC、EC 的质量浓度均呈双峰分布,但 OC 的分布特征与 EC 存在着明显的差异. OC 质量浓度较高峰出现于 $<0.49 \mu\text{m}$ 粒径段,次高峰则出现于 $>3.0 \mu\text{m}$ 的两个粒径段;在 $<0.49 \mu\text{m}$ 粒径段,嘉定区为 $6.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,徐汇区为 $4.44 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,均占 OC 总量

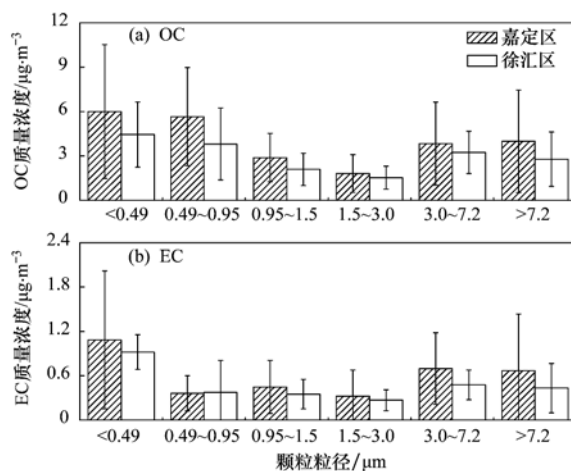


图 4 上海市大气颗粒物 OC、EC 质量浓度粒径分布

Fig. 4 Mass concentration for size distribution of OC and EC in Shanghai aerosol particles

的 25% ; 而在 $>3.0 \mu\text{m}$ 的两个粒径段,嘉定区为 $7.81 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,徐汇区为 $6.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,分别占 OC 总量的 32% (JD) 和 34% (XH). 而在 $<0.49 \mu\text{m}$ 粒径区间,EC 占 EC 总量的 30% (JD) 和 33% (XH),在 $>3.0 \mu\text{m}$ 的两个粒径段,分别占 EC 总量的 38% (JD) 和 32% (XH). 相对于 OC 而言,EC 更多地集中在 $<0.49 \mu\text{m}$ 的颗粒物中,这可能是因为汽车尾气、煤炭燃烧等 EC 的主要排放源,其产生的一次颗粒粒径集中在 $<0.2 \mu\text{m}$ 的粒径范围内^[16].

两地区 $\text{PM}_{3.0}$ 中 OC 质量浓度分别为 $16.35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (JD)、 $11.85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (XH),EC 质量浓度分别为 $2.22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (JD)、 $1.91 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (XH),嘉定区碳组分质量浓度偏高,在各粒径区间内,嘉定区的 OC、EC 质量浓度分别是徐汇区的 1.2 ~ 1.5、1 ~ 1.5 倍,充分说明市郊空气污染比市区更为严重,在王杨君等^[17]对上海市大气颗粒物观测也呈现出市郊大气颗粒物污染明显高于市区的特点. 但在国内其他城市的研究中,如陈刚才等^[18]对重庆观音桥(市区)和缙云山(市郊)和迟旭光等^[19]对北京天坛公园(市区)和十三陵(市郊)监测时发现,市区 OC 和 EC 的质量浓度远远高于市郊. 存在这样的差异,与郊区采样点的大气环境有密切关系,但值得注意的是,上海市从 20 世纪 90 年代开始进行城市空间布局调整,将工业生产主体从中心城区向周边地区迁移,对改善市区空气质量起到明显作用,通过王杨君等^[17]2007 ~ 2008 年对上海市大气颗粒物采样结果与往年对比发现,中心城区的空气质量已经有了比较大的改善,不过这也同时导致市郊的空气质量的恶化.

从城市大气环境监测的角度来说,由于不同城市功能区之间的污染水平存在差异,郊区的污染水平可能更高,需要设置更多的郊区监测点来保证对整个上海市大气颗粒物污染水平进行综合全面的评价. 从环境保护治理措施来讲,上海市的工业布局决定了未来上海市的大气污染呈现为中心城区污染低,周围郊区污染相对严重的特点,但是由于大气扩散与运动,中心城区也不可避免受到周围污染严重地区的影响. 因此,严格控制郊区一次污染源的排放,才能够更有效地改善上海市大气环境状况.

2.3 OC、EC 的相关性分析

大气颗粒物中的 EC 仅来自于燃烧源,可以作为一个一次有机碳(primary organic carbon, POC)的示踪物. 而 OC 中不仅含有与 EC 一起产生的 POC,还有经大气光化学反应生成的二次有机碳(secondary

organic carbon, SOC),以及其他生物颗粒,如孢子、细菌、病毒等,除 POC 以外的其他 OC 成分会使 OC 与 EC 的相关性变差. Turpin 等^[20]认为,OC 和 EC 的关系可以被用来区分碳颗粒物的来源,若 OC 与 EC 的相关性好,表明 OC 和 EC 来自相同污染源. 因此利用 OC 和 EC 的相关性可在一定程度上对大气碳颗粒物的来源进行定性分析. 由于徐汇区采样数目较少,本研究仅对嘉定区 34 套(共计 204 个)样品的不同粒径区间按照公式 $\rho(\text{OC}) = a + b \times \rho(\text{EC})$ 进行回归计算^[8]. 其中截距 a 代表非燃烧源的有机碳部分,如生物颗粒等,斜率 b 表示燃烧源排放的有机碳与元素碳的比值, R^2 为相关系数,结果如图 5 所示.

在 $<0.49 \mu\text{m}$ 、 $0.49 \sim 0.95 \mu\text{m}$ 和 $0.95 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 粒径段, R^2 分别为 0.79、0.82 和 0.69,相关性较好,说明 OC 与 EC 的同源性较好. 在 $<0.49 \mu\text{m}$ 和 $0.95 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 粒径段 a 值分别为 -0.32 和 0.11,接近于 0,说明 OC 主要来自燃烧源;对于 $0.49 \sim 0.95 \mu\text{m}$ 粒径段,OC、EC 相关性好但 a 值较大,说明该粒径区间内 OC 来源比较稳定,但有部分 OC 来自非燃烧源,有研究表明,在 $0.7 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 粒径段,小颗粒在生长过程中吸附了大量的二次反应产物^[21]. 而在 $1.5 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 、 $3.0 \sim 7.2 \mu\text{m}$ 和 $>7.2 \mu\text{m}$ 粒径段, R^2 分别为 0.06、0.05 和 0.11,OC 与 EC 的相关性较差, a 值也较大,表明大颗粒中的 OC 来源较为复杂,有更多来自非燃烧源的有机碳^[15],嘉定区粗颗粒中的生物气溶胶如花粉、孢子、细菌、病毒等会对实验结果造成较大影响.

Michael 等^[21]对美国加州洛杉矶市市区的大气颗粒物观测中认为,市区污染源主要受到机动车尾气、道路扬尘、烹饪和燃煤等因素的影响,并分析各排放源的粒径分布特征,峰值在 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 粒径段的颗粒物主要源自机动车尾气、烹饪和燃煤,道路扬尘的影响集中在 $>2.5 \mu\text{m}$ 的粒径段. Chow 等^[22]研究表明不同的污染源所排放颗粒物的 OC/EC 值存在明显差异,如在 $\text{PM}_{2.5}$ 中柴油和汽油车尾气排放的 OC/EC 值为 1.0 ~ 4.2,燃煤排放为 2.5 ~ 10.5^[23],生物质燃烧排放为 16.8 ~ 40.0^[24],烹调排放为 32.9 ~ 81.6^[25],在 $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 粒径段道路扬尘的 OC/EC 值为 8.8^[22]. 在 $<1.5 \mu\text{m}$ 的粒径区间内 OC 与 EC 的同源性较好,本研究试用 OC/EC 值来推测大气颗粒物中碳成分的来源,图 6 列出了上述碳排放源的 OC/EC 特征值与本次测量值的对应关系.

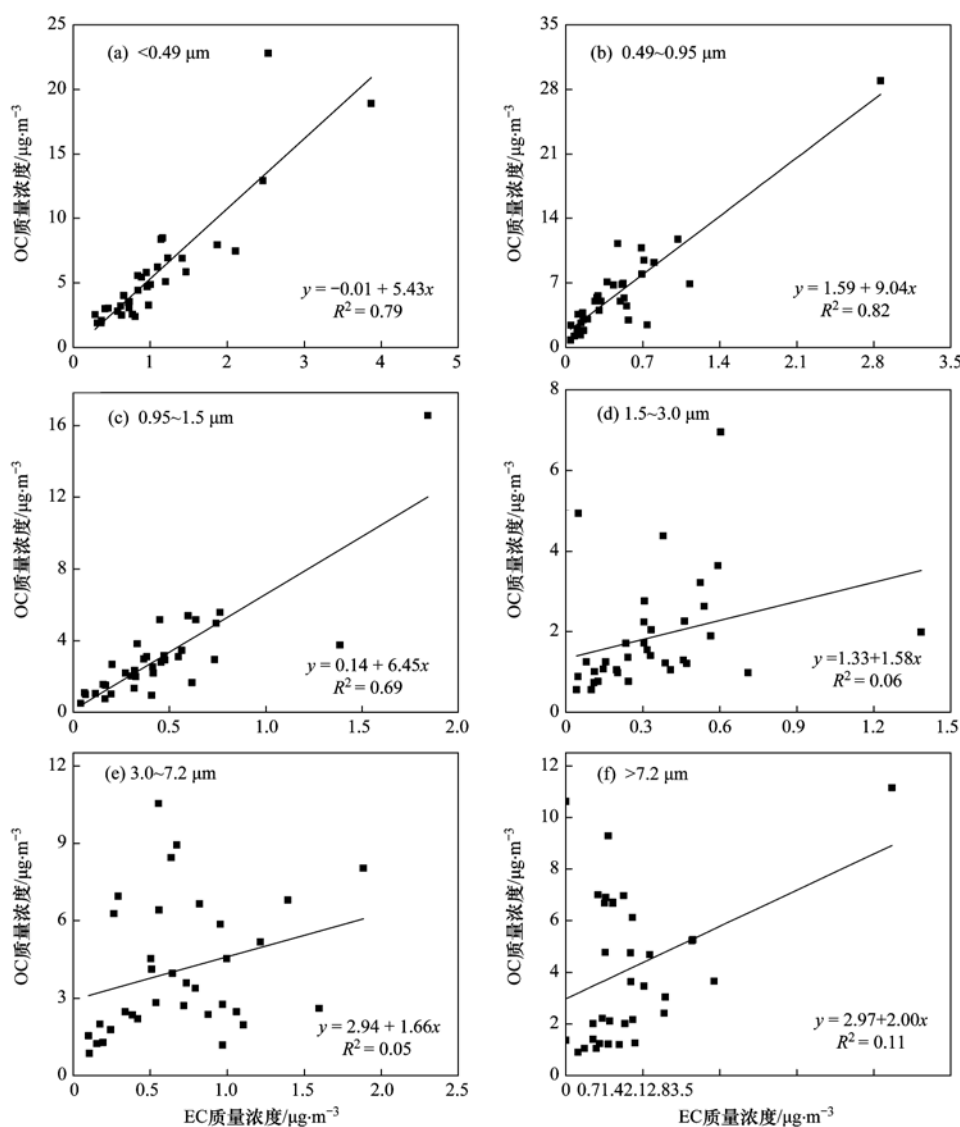


图5 嘉定区不同粒径 OC、EC 的相关性分析

Fig. 5 Correlation of OC and EC with different diameters in Jiading

通过各粒径区间 OC/EC 值与排放源 OC/EC 特征值比较可以发现:在 <0.49 μm 和 0.95~1.5 μm 粒径区间内,两地主要受到燃煤和机动车尾气的影响;在 0.49~0.95 μm 粒径段,两地 OC/EC 值偏高,这可能是受到机动车尾气、生物质燃烧等多方面因素的综合影响,前文进行 OC、EC 相关性分析时,也认为此粒径段除燃烧源产生的 OC 外,还含有部分稳定的非燃烧源产生的 OC. 在 <3.0 μm 粒径段,徐汇区 OC/EC 值分别为 4.6 (<0.49 μm)、13.9(0.49~0.95 μm)、6.3(0.95~1.5 μm)、6.1(1.5~3.0 μm),均小于嘉定区对应粒径的 OC/EC 值(5.8、16.8、8.3、7.6),可以说明该地区受到机动车尾气的影响更加明显. 在 3.0~7.2 μm 和 >7.2 μm 粒径段,徐汇区 OC/EC 值分别为 7.0、6.9

高于嘉定区 4.5、5.3,表明徐汇区更多受到道路扬尘的影响,这与采样点周围的环境一致. 另外,本实验采用光热法^[26]进行碳组分分析时,大气颗粒物中土壤来源的碳酸盐^[27,28]在高温下分解生成 CO₂,会造成 EC 测量值偏大,从而使 OC/EC 值变小,而嘉定区位于市郊,大气中有更多土壤来源的颗粒物,这也会给实验结果造成一定影响.

2.4 二次有机碳(SOC)分析

大气颗粒物中的 SOC 来自于燃烧源和植物挥发而产生的气态有机物,如苯并芘、异戊二烯、萜烯等,被大气中的 O₃、OH 自由基等氧化,经过气-粒转化效应而进入颗粒相^[29]. EC 在大气中具有良好的稳定性,在大气中滞留时间较长,不易发生化学转化,所以 EC 可以作为一次排放的示踪物. 由于一次

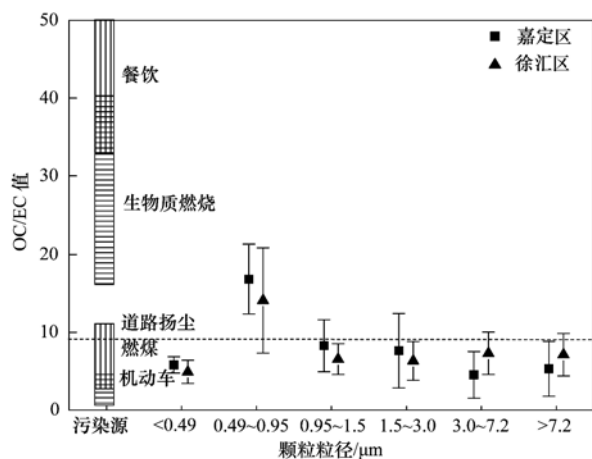


图6 嘉定区与徐汇区不同粒径 OC/EC 值

Fig. 6 Values of OC/EC with different diameters in Jiading and Xuhui

排放源的 OC 与 EC 存在一个相对稳定的比值,一般认为当大气颗粒物中 OC/EC 值高于某个临界值(通常取 2.0)时,大气颗粒物中含有 SOC^[30],采用 EC 示踪法对 SOC 进行估算^[31]:

$$\rho(\text{SOC}) = \rho(\text{OC}) - \rho(\text{EC}) \times \left[\frac{\text{OC}}{\text{EC}} \right]_{\min} \quad (1)$$

式中, $\rho(\text{SOC})$ 为二次有机碳质量浓度; $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 分别代表样品中有机碳和元素碳实测浓度; $[\text{OC}/\text{EC}]_{\min}$ 表示测定周期中 OC/EC 的最小值.由于样本数过少造成统计信息误差偏大,导致采用的 $[\text{OC}/\text{EC}]_{\min}$ 有可能高于 $[\text{OC}/\text{EC}]_{\text{primary}}$,使计算结果 SOC 比实际值偏小,本研究只针对嘉定区 34 套(共计 204 个)样品进行 SOC 粒径分析.在 $[\text{OC}/\text{EC}]_{\min}$ 取值上,Turpin 等^[32]对洛杉矶空气样品进行分析发现,特定天气(低温、阴雨、臭氧浓度低以及气团不稳定)的大气光化学活性低,不利于 SOC 的生成,OC/EC 值较低,因此可以将一定时期内的 $[\text{OC}/\text{EC}]_{\min}$ 近似等同于 $[\text{OC}/\text{EC}]_{\text{primary}}$.但是 OC 中含有大量的水溶性有机物,降雨会导致测得的 OC/EC 值偏小,取值应当首先排除降雨条件下的测定值^[33,34],本研究中 $[\text{OC}/\text{EC}]_{\min}$ 的选取也参考了采样期间的气象条件,从各个粒径区间内,选取晴朗天气下各个粒径的最小 OC/EC 值作为 $[\text{OC}/\text{EC}]_{\min}$,将上述取值代入公式(1),得到结果如图 7 所示.

图 7 表示上海市嘉定区大气颗粒物中 SOC 质量浓度以及 OC 中 SOC 所占质量分数的粒径分布情况,其中, SOC 粒径分布呈现双峰分布,峰值位于 0.49~0.95 μm 和 3.0~7.2 μm 粒径段,质量浓度达到 2.19 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 3.26 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,各粒径区间的

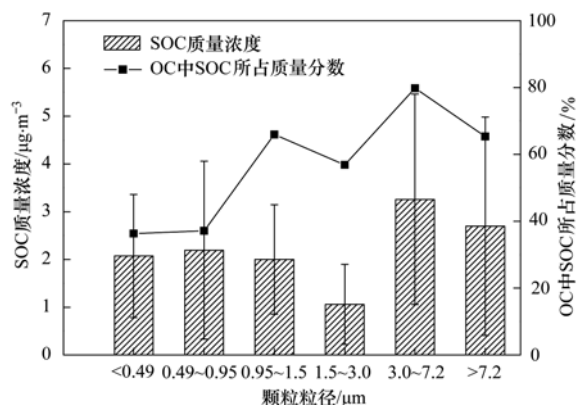


图7 嘉定区 SOC 质量浓度及 SOC/OC 值的粒径分布

Fig. 7 Size distribution of SOC mass concentration and the percentage of SOC in OC in Jiading

SOC/OC 值最高为 80% (3.0~7.2 μm),最低值为 36% (<0.49 μm),颗粒物中平均值为 54%.在唐小玲等^[15]对广州市大气颗粒物的研究中也得到类似结论: SOC 峰值出现在 0.49~0.95 μm (3.87 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 3.0~7.2 μm (3.10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 粒径区间, 3.0~7.2 μm 粒径上的 SOC/OC 值最高 (74%), <0.49 μm 粒径上的值最低 (16%), 平均值为 47%.有研究认为,由二次光化学反应直接生成的颗粒浓度峰值集中在 0.2 μm ^[35],而本次测量中 SOC 的粒径分布并没有表现出这样的特点.这可能是因为一方面大颗粒物多来自于土壤扬尘,其中碳酸盐等碱性物质吸收硫化物、氮化物等酸性气体,生成盐类和水,更容易吸收可溶性有机物^[36];另一方面,大颗粒较大的体积为气-粒转化提供了大的反应表面,更有利于 SOC 向颗粒态转化^[36].

Cao 等^[37]研究珠三角地区冬夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 中 SOC 质量浓度均值为 4.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,占 OC 质量分数为 51.3%.本次观测得到上海地区大气 $\text{PM}_{3.0}$ 中 SOC 的年平均质量浓度为 6.76 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,占 OC 质量分数为 69%.这表明上海可能比广州地区提供了更有利于 SOC 形成的大气环境与气候条件,如较高浓度的气态前体物、充足的阳光照射时间、较低的温度等^[38].上海市的年平均气温为 15.6℃,光照时间为 1874 h;而广州的年平均温度为 22.6℃,光照时间为 1628 h.较低的气温有利于气态向颗粒态的转变,充足的阳光则保证大气中 OH 自由基、 O_3 等氧化剂的浓度,使得气态活性气体更容易被氧化为半挥发性产物附着在大气颗粒上^[39].

3 结论

(1) 2010 年 5 月~2011 年 5 月采样期间,嘉定

区(市郊)和徐汇区(市区)PM_{3.0}中OC质量浓度分别为16.35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (JD)、11.85 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (XH),EC质量浓度分别为2.22 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (JD)、1.91 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (XH),市郊碳组分质量浓度明显偏高,说明由于上海市工业布局调整的影响,市郊大气中碳污染比市区更为严重。

(2)上海市大气颗粒物中碳组分主要集中在<3.0 μm 粒径段,其中EC更多集中在<0.49 μm 粒径段,占全部EC的30%以上。OC与EC的相关性分析表明,嘉定区在<1.5 μm 的粒径段,OC与EC的同源性较好,细颗粒中大部分OC来自于燃烧源,在0.49~0.95 μm 粒径段存在部分稳定的非燃烧源,而在粗颗粒(>3.0 μm)中存在较多的非燃烧源的有机碳。

(3)在<3.0 μm 的粒径区间内,徐汇区OC/EC值分别为4.6(<0.49 μm)、13.9(0.49~0.95 μm)、6.3(0.95~1.5 μm)、6.1(1.5~3.0 μm),均小于嘉定区对应粒径的OC/EC值(5.8、16.8、8.3、7.6),在3.0~7.2 μm 和>7.2 μm 粒径段,徐汇区OC/EC值(7.0、6.9)高于嘉定区(4.5、5.3)。通过不同粒径OC/EC值与不同排放源特征值的对比,可以认为在<3.0 μm 粒径区间内,徐汇区更多受到机动车尾气的影响,而在>3.0 μm 粒径区间内,徐汇区受到道路扬尘的影响更加显著。

(4)通过EC示踪法计算嘉定区SOC含量,PM_{3.0}中SOC的年平均质量浓度为6.76 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,占OC的69%,不同粒径SOC质量浓度呈现双峰分布,峰值位于0.49~0.95 μm (2.19 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和3.0~7.2 μm (3.26 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)粒径段。与珠三角地区相比,上海市SOC浓度较高,与该地区较高浓度的气态前体物,充足的阳光,较低的温度有关。

参考文献:

[1] 高健. 大气颗粒物个数浓度、粒径分布及颗粒物生成——成长过程研究[D]. 济南: 山东大学, 2008. 15-17.

[2] 陶俊, 朱李华, 韩静磊, 等. 2007年春季广州城区黑碳气溶胶污染特征的初步研究[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(5): 658-662.

[3] Hali J L F, Richard C F, John H S. Secondary organic aerosol from the photooxidation of aromatic hydrocarbons: molecular composition[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 31(5): 1345-1358.

[4] 鄂有幸, 王覃, 李蕾, 等. 多氯联苯类化合物分子结构的理论研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2006, 33(3): 81-84.

[5] 陈仁煌. 柴油机排气烟羽颗粒物二次生长过程研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008. 2-3.

[6] Park S S, Kim Y J, Fung K. PM_{2.5} carbon measurements in two urban areas: Seoul and Kwangju, Korea [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(8): 1287-1297.

[7] Yin J X, Harrison R M. Pragmatic mass closure study for PM_{1.0}, PM_{2.5} and PM₁₀ at roadside, urban background and rural sites [J]. Atmospheric Environment, 2007, 42(5): 980-988.

[8] 陈宗良, 葛苏, 张晶. 北京大气气溶胶小颗粒的测量与解析[J]. 环境科学研究, 1994, 7(3): 1-9.

[9] Dan M, Zhuang G S, Li X X, et al. The characteristics of carbonaceous species and their sources in PM_{2.5} in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(21): 3443-3452.

[10] 黄虹, 曹军骥, 曾宝强, 等. 广州大气细粒子中有机碳、元素碳和水溶性有机碳的分布特征[J]. 分析科学学报, 2010, 26(3): 255-260.

[11] 上海统计局. 上海统计年鉴[EB/OL]. <http://www.stats-sh.gov.cn/data/toTjnj.xhtml?y=2011>.

[12] 肖秀珠, 刘鹏飞, 耿福海, 等. 上海市区和郊区黑碳气溶胶的观测对比[J]. 应用气象学报, 2011, 22(2): 158-168.

[13] Lough G C, Schauer J J, Lawson D R. Day-of-week trends in carbonaceous aerosol composition in the urban atmosphere [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(33): 4137-4149.

[14] Cheng Y, Zheng M, He K B, et al. Comparison of two thermal-optical methods for the determination of organic carbon and elemental carbon: Results from the southeastern United States [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(11): 1913-1918.

[15] 唐小玲, 毕新慧, 陈颖军, 等. 不同粒径大气颗粒物中有机碳(OC)和元素碳(EC)的分布[J]. 环境科学研究, 2006, 19(1): 104-108.

[16] Hildemann L M, Markowski G R, Jones M C, et al. Submicrometer aerosol mass distributions of emissions from boilers, fireplaces, automobiles, diesel trucks, and meat-cooking operations [J]. Aerosol Science and Technology, 1991, 14(1): 138-152.

[17] 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.

[18] 陈刚才, 陶俊, 赵琦, 等. 重庆主城区大气总悬浮颗粒中有机碳和元素碳污染特征分析[J]. 重庆环境科学, 2003, 25(10): 1-6.

[19] 迟旭光, 段凤奎, 董树屏, 等. 北京大气颗粒物中有机碳和元素碳的浓度水平和季节变化[J]. 中国环境监测, 2000, 16(3): 35-38.

[20] Turpin B J, Lim H J. Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: Revisiting common assumptions for estimating organic mass [J]. Aerosol Science and Technology, 2001, 35(1): 602-610.

[21] Michael J L, Glen R C. Source contributions to the size and composition distribution of urban particulate air pollution [J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(16): 2803-2816.

[22] Chow J C, Watson J G, Kuhns H, et al. Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the Big Bend Regional Aerosol Visibility and Observational study [J]. Chemosphere, 2000, 40(12): 1555-1565.

- 2004, **54**(2): 185-208.
- [23] Chen Y J, Zhi G R, Feng Y L, *et al.* Measurements of emission factors for primary carbonaceous particles from residential raw-coal combustion in China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**: L20815, doi: 10.1029/2006GL026966.
- [24] James J S, Michael J K, Glen R C, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 3. C₁-C₂₉ organic compounds from fireplace combustion of wood [J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, **35**(9): 1716-1728.
- [25] He L Y, Hu M, Huang X F, *et al.* Measurement of emissions of fine particulate organic matter from Chinese cooking [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(38): 6557-6564.
- [26] 郇宁, 曾立民, 邵敏. 气溶胶中有机碳及元素碳分析方法进展 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2005, **41**(6): 957-964.
- [27] 曹军骥, 王亚强, 张小曳, 等. 大气中碳酸盐的碳同位素分析及其来源指示意义 [J]. *科学通报*, 2004, **49**(17): 1785-1788.
- [28] Jankowski N, Schmidl C, Marr L L, *et al.* Comparison of methods for the quantification of carbonate carbon in atmospheric PM₁₀ aerosol samples [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(34): 8055-8064.
- [29] Lim H J, Barbara J T. Origins of primary and secondary organic aerosol in Atlanta: results of time-resolved measurements during the Atlanta supersite experiment [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, **36**(21): 4489-4496.
- [30] Lee S C, Cheng Y, Ho K F, *et al.* PM_{1.0} and PM_{2.5} characteristics in the roadside environment of Hong Kong [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2006, **40**(4): 157-165.
- [31] 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.
- [32] Turpin B J, Huntzicker J J. Secondary formation of organic aerosol in the Los Angeles basin: a descriptive analysis of organic and elemental carbon concentrations [J]. *Atmospheric Environment*, 1991, **25**(2): 207-215.
- [33] Sullivan A P, Weber R J, Clement A L, *et al.* A method for on-line measurement of water-soluble organic carbon in ambient aerosol particles: Results from an urban site [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**: L13105, doi: 10.1029/2004GL019681.
- [34] Cao J J, Lee S C, Chow J C, *et al.* Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**: D22S11, doi: 10.1029/2006JD008205.
- [35] Pandis S N, Wexler A S, Seinfeld J H. Secondary organic aerosol formation and transport-II. Predicting the ambient secondary organic aerosol size distribution [J]. *Atmospheric Environment*, 1993, **27**(15): 2403-2416.
- [36] Wang Y Q, Zhang X Y, Arimoto R, *et al.* Characteristics of carbonate content and carbon and oxygen isotopic composition of northern China soil and dust aerosol and its application to tracing dust sources [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(14): 2631-2642.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Ross S, Lurmann F, Pandis S N. Evaluation of secondary organic aerosol formation in winter [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(29): 4849-4863.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

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