

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 刁海玲,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BOD₅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pCO₂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,黄宁秋 (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Fe₃O₄-H₂O₂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)

水中萘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,姚锬,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 王金泉,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 张璐璐,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A²/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N₂O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,刘邃庆 (1995)

上海市浦东新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CO₂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,刘芄,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)

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^{1,2}, 陈进生², 胡恭任^{1*}, 徐玲玲², 尹丽倩², 张福旺²

(1. 华侨大学化工学院环境科学与工程系, 厦门 361021; 2. 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021)

摘要: 以福建省福州、厦门和泉州这3个主要城市为研究对象, 采集了冬季 PM_{2.5} 样品, 采用热光透射法 (thermal optical transmission, TOT) 分析得到 PM_{2.5}、OC 和 EC 的浓度水平和空间分布、OC 与 EC 的相关性、OC/EC 值以及二次有机碳分布特征。结果表明, 福州、厦门和泉州冬季 PM_{2.5} 的浓度范围为 (79.94 ± 18.08) ~ (114.78 ± 26.10) μg·m⁻³, 均超过《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 规定的 PM_{2.5} 日均值 75 μg·m⁻³。OC 和 EC 的浓度范围 (以 C 计) 分别为 (14.77 ± 2.65) ~ (19.27 ± 1.96) μg·m⁻³ 和 (1.99 ± 0.50) ~ (3.36 ± 0.41) μg·m⁻³, 分别是背景点福州平潭的 1.2 ~ 1.6 倍和 1.2 ~ 2.0 倍。福州平潭 ($R^2 = 0.70$) 和晋安 ($R^2 = 0.66$) 冬季 PM_{2.5} 中 OC 与 EC 的相关性显著, 说明 OC 和 EC 有相近的一次污染源。OC/EC 值为 5.64 ~ 7.71, 且值均大于 2.0, 说明各采样点存在二次有机碳 (secondary organic carbon, SOC) 的生成。SOC 的浓度为 2.47 ~ 7.17 μg·m⁻³, 占 OC 的比例为 13.08% ~ 45.67%, 占 PM_{2.5} 的 2.20% ~ 7.78%。

关键词: PM_{2.5}; 有机碳; 元素碳; 热光透射法; 福建省三大城市

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1988-07

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^{1,2}, CHEN Jin-sheng², HU Gong-ren¹, XU Ling-ling², YIN Li-qian², ZHANG Fu-wang²

(1. Environmental Science and Engineering Department, College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: PM_{2.5} samples were collected in three cities (Fuzhou, Xiamen and Quanzhou) in Fujian Province, China, during the winter, and were analyzed for organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) by thermal optical transmission (TOT). The characteristics such as pollution levels and spatial distributions of PM_{2.5}, OC and EC, correlations between OC and EC, OC/EC ratios and secondary organic carbon (SOC) were discussed in details. Average concentrations of PM_{2.5} were ranged from (79.94 ± 18.08) μg·m⁻³ to (114.78 ± 26.10) μg·m⁻³, which were in excess of the Ambient Air Quality Standards (GB 3095-2012) 24-hr mass-based standards of 75 μg·m⁻³. Averages concentrations of OC and EC were fluctuated from (14.77 ± 2.65) μg·m⁻³ to (19.27 ± 1.96) μg·m⁻³ and (1.99 ± 0.50) μg·m⁻³ to (3.36 ± 0.41) μg·m⁻³, respectively, which were 1.2 to 1.6 times and 1.2 to 2.0 times more than that in the background site, Pingtan in Fuzhou. Correlations between OC and EC in PM_{2.5} were found to be strong in Pingtan ($R^2 = 0.70$) and Jin'an ($R^2 = 0.66$) (Fuzhou), suggesting that there were similar primary pollutants of OC and EC. Average OC/EC ratios were 5.64-7.71 and all higher than 2, which indicated that the secondary organic carbon (SOC) was formed. The estimated concentrations of SOC were from 2.47 μg·m⁻³ to 7.17 μg·m⁻³, which contributed 13.08% - 45.67% to the OC and 2.20% - 7.78% to PM_{2.5}.

Key words: PM_{2.5}; organic carbon (OC); elemental carbon (EC); thermal optical transmission (TOT); three major cities in Fujian Province

碳气溶胶主要包括有机碳 (organic carbon, OC) 和元素碳 (elemental carbon, EC)。EC 存在于污染源直接排放的一次气溶胶中, 主要是化石燃料不完全燃烧所产生; OC 则包括由排放源直接排放的一次有机碳 (如多环芳烃及一些致癌的有毒有害物质) 和通过光化学反应等途径形成的二次有机碳 (secondary organic carbon, SOC)。OC 和 EC 对气候变化、地球辐射平衡、环境质量、人体健康等产生

重要影响, 因此是国内外大气化学研究的热点之一^[1-8]。大气颗粒物中, 81.9% 的 OC 和 84.9% 的 EC 集中于粒径小于 2.5 μm 的细颗粒物^[3], 因此近

收稿日期: 2012-07-11; 修订日期: 2012-11-07

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项 (201009004); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-453)

作者简介: 陈衍婷 (1985 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: ytchen@iue.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: grhu@hqu.edu.cn

年来国内 PM_{2.5} 中碳气溶胶的时空变化及污染特征研究已广泛展开,但主要集中在北京、上海、香港等大中城市以及珠江三角洲^[4~8].

福州、厦门和泉州作为海峡西岸经济区 3 个重要的城市,大气碳气溶胶的污染问题受到了越来越多的关注^[9~12],但是针对 PM_{2.5} 的研究相对较少,尤其缺乏福建省主要城市 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 污染特征的对比研究. 因此,本文以冬季 PM_{2.5} 为研究对象,同时监测分析了福建省福州、厦门和泉州等三大城市 PM_{2.5} 中有机碳(OC)和元素碳(EC)的污染水平和污染特征,从而了解不同城市、气象条件和环境功能区等因素变化对 OC 和 EC 分布特征的影响. 该研究结果将有助于全面地了解福建省沿海城市群大气 PM_{2.5} 中碳组份的污染特征,对有效控制城市空气中气溶胶的污染提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

PM_{2.5} 样品来自福建省福州、厦门和泉州这 3 个主要城市的 7 个站点. 其中,作为清洁对照点的福州市平潭采样点设在平潭三十六角湖水库管理站,周围为水库水面及低矮坡地. 7 个站点点的详

细描述见表 1.

采样时间为 2011 年 1 月 5 ~ 14 日,各站点同步采样,每个站点连续 24 h 采集样品,共获得 70 个样品. 采样期间天气情况具体见表 2. 采样仪器为中流量气溶胶颗粒仪(TH-150C 型,武汉天虹公司,中国),流速为 100 L·min⁻¹. 所用石英纤维滤膜(Whatman, QFF, Φ 90 mm)在采样前置于马弗炉中 450℃ 焙烧 5 h,以消除可能存在的目标物. 采样前后滤膜均放入恒温恒湿箱中平衡 24 h [温度(25 ± 1)℃,湿度(52 ± 1)%],采用电子分析天平(Sartorius T-114)称重获得 PM_{2.5} 重量,精度为 0.01 mg. 采样后的滤膜用铝箔纸封装后放入冰箱低温保存.

1.2 样品分析

PM_{2.5} 样品中 OC 和 EC 质量浓度分析采用的仪器主要为美国 Sunset Lab. 公司生产的 Model-4 半连续有机碳/元素碳气溶胶分析仪. 该仪器的分析方法为热光透射法(thermal optical transmission, TOT),是美国国家职业安全保健研究所(National Institute of Occupational Safety and Health, NIOSH)推荐方法,仪器的使用方法主要参考文献[10],EC 和 OC 的检测限均低于 0.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 仪器的实验原

表 1 采样点的具体描述

Table 1 Specific description of sampling sites

采样点	监测站点	经度 / (°)	纬度 / (°)	采样高 / m	站位描述
平潭县	平潭三十六角湖	119.76	25.48	约 10	位于平潭县三十六角湖水库管理站,周围为水库及低矮坡地
福州	晋安区 紫阳监测站	119.32	26.08	约 30	位于福州市晋安区,城市中心位置,属交通居民区,测点背面约 30 m 为主干道福马路,受道路及紫阳立交桥影响较大
	福清市 福清市监测站	119.38	25.73	约 20	位于福清市,城市中心位置,属商业居民混住区
泉州	丰泽区 泉州市环保局	118.60	24.90	约 30	位于泉州市环保局楼顶,属商业居民混住区. 周围均为民用房
	石狮市 石狮石光华侨中学	118.66	24.73	约 25	位于石狮石光华侨中学楼顶,离海边较近,常年风力在 5 ~ 8 级. 周围较开阔,附近有工地
厦门	集美区 中国科学院城市环境研究所	118.06	24.61	约 5	位于厦门集美区中科院城环所大院内,周围小区绿地和杏林湾水面,测点东北方向约 30 m 为海翔大道和集美大道
	思明区 瑞景小学	118.15	24.48	20	位于厦门思明区瑞景小学内,周围为商住区,测点北侧约 100 m 为城市主干道莲前路

表 2 采样期间气象参数

Table 2 Meteorological parameters during sampling

站名	气温/℃	湿度/%	风速/m·s ⁻¹	风向	天气情况描述
平潭县	8.62	71.96	4.98	西北风	11 日有小雨
晋安区	7.87	67.92	1.95	西北风	5、6 和 11 日有小雨
福清市	8.32	64.19	2.17	西北风偏北	5、6 日阴有小雨,11 日有小雨
丰泽区	10.32	— ¹⁾	1.76	西北风偏西为主、东北风	6 日阴转阵雨,11 日有小雨
石狮市	10.08	67.74	2.18	西北风偏西为主、西南风	11 和 12 日有雨
集美区	11.48	64.05	1.67	西北风偏西为主、西南风	5 日小雨转阵雨,11 和 12 日有小雨
思明区	10.20	66.13	2.77	西北风	11 日阴转阵雨

1) “—”表示文章中没有相关数据

理:首先,在氦气(He)的非氧化环境中逐级进行程序升温,使 OC 被加热挥发(还有一部分被碳化);其次,样品在氦气和氧气(He/O₂)氧化环境(98% He + 2% O₂)下逐级进行升温,升温过程中 EC 被氧化分解为气态氮. 升温过程中所产生的分解产物都随着通过分析室的载气,即 He 或 He/O₂ 经过二氧化锰氧化炉(MnO₂)被转化为 CO₂ 后由离子火焰法(FID)或是由非红外色散法(NDIR)定量检验. 整个的过程都有一束激光,即 660 nm 的红光,照在石英膜上,其透射光在 OC 碳化时会逐渐减弱,而在 He 切换成 He/O₂ 时,随着 EC 被氧化分解,激光束的透射光就会逐渐增强. 当透射光的强度恢复到最初时,此刻就是 OC 和 EC 的分割点,即:此时刻之前检出的碳为 OC,之后检出的碳为 EC.

2 结果与讨论

2.1 OC 和 EC 质量浓度特征

2.1.1 PM_{2.5}、OC 和 EC 平均质量浓度

表 3 为福州、厦门和泉州这 3 个城市 7 个站点冬季 PM_{2.5}、OC 和 EC 浓度的平均值. 从中可知,厦门集美、泉州丰泽和福州晋安冬季 PM_{2.5} 的均值最高且超过 110 μg·m⁻³,分别为(114.78 ± 26.10) μg·m⁻³、(113.33 ± 20.89) μg·m⁻³和(112.14 ± 20.30) μg·m⁻³,最低值出现在作为背景点的福州平潭,其值为(79.09 ± 27.87) μg·m⁻³. 按照 2012 年 2 月新颁布的《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)规定 PM_{2.5} 的最高限制为日均值 75 μg·m⁻³ 来看,福州、厦门和泉州冬季 PM_{2.5} 的质量浓度均已超标. 有研究表明^[10],2010 年厦门集美冬季 PM_{2.5} 浓度[(99.92 ± 5.17) μg·m⁻³]略低于思明[(117.08 ± 10.12) μg·m⁻³],与之相比,2011 年冬季集美区

PM_{2.5} 浓度值略高于思明区,这与 2011 年集美新城项目大规模兴建,建筑扬尘与施工现场机械排放尾气对空气质量产生的影响有关. 福州郊区 2008 年冬季 PM_{2.5} 的浓度为 59.81 μg·m⁻³^[9],相较之下,本研究获得的福州地区 PM_{2.5} 浓度均明显偏高,这可能是由于城区机动车数量快速增长的贡献,有关数据表明,截止 2008 年 1 月,福州地区机动车保有量近 80 万辆,而到 2011 年 11 月,机动车保有量达到 116 万辆,增长了近 45%.

作为背景点的福州平潭三十六角湖冬季 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 平均浓度明显低于其余采样点,分别为(12.03 ± 2.87) μg·m⁻³和(1.65 ± 0.50) μg·m⁻³. 这与背景点位于平潭岛上,周围为水库及低矮坡地,受到人为影响较小有关. 同时,由表 2 可知,采样期间平潭的平均风速较高,可达 4.98 m·s⁻¹,对 OC、EC 的浓度起到一定的稀释作用. 比较其余采样点,EC 的最高值和最低值分别出现在厦门集美[(3.36 ± 0.41) μg·m⁻³]和福州福清[(1.99 ± 0.50) μg·m⁻³],是背景点的 2.0 倍和 1.2 倍;而 OC 的浓度最高值和最低值分别出现在泉州丰泽[(19.27 ± 1.96) μg·m⁻³]和福州福清[(14.77 ± 2.65) μg·m⁻³],是背景点的 1.6 倍和 1.2 倍.

OC 和 EC 的平均浓度分布表现为:晋安 > 福清(福州); 丰泽 > 石狮(泉州); 集美 > 思明(厦门),这与采样点周边的环境有密切关系. 福州晋安和厦门集美均地处交通要道,受到交通污染的影响较大,因此其 OC 和 EC 浓度分别相对于福州福清和厦门思明均较高;而石狮的采样点位于石光华侨中学楼顶,受到海风的影响,其 OC 和 EC 浓度会相对低于位于居民混住区的丰泽. 同时,随着城市化进程的发展,采样点周围建筑施工扬尘与机械运转排放的烟气也会对 OC 和 EC 浓度产生影响.

表 3 福州、厦门和泉州冬季 PM_{2.5}、OC 和 EC 浓度的平均值

Table 3 Average concentrations of PM_{2.5}, OC and EC in Fuzhou, Xiamen and Quanzhou

城市	采样点	PM _{2.5} 浓度/μg·m ⁻³	OC 浓度/μg·m ⁻³	EC 浓度/μg·m ⁻³
福州	平潭	79.09 ± 27.87	12.03 ± 2.87	1.65 ± 0.50
	晋安	112.14 ± 20.30	18.84 ± 4.14	2.98 ± 0.88
	福清	79.94 ± 18.08	14.77 ± 2.65	1.99 ± 0.50
厦门	思明	99.99 ± 27.23	15.71 ± 2.19	2.72 ± 0.70
	集美	114.78 ± 26.10	18.67 ± 1.67	3.36 ± 0.41
泉州	丰泽	113.33 ± 20.89	19.27 ± 1.96	2.85 ± 0.41
	石狮	81.42 ± 20.26	15.31 ± 2.12	2.42 ± 0.43

2.1.2 国内外其他城市 OC 和 EC 的平均质量浓度

表 4 为国内外其他城市冬季 PM_{2.5} 中 OC、EC 平均质量浓度和 OC/EC 值. 与表 4 相比较,福建

省三市的 OC、EC 平均质量浓度处于中等水平. 福建省三市的 OC、EC 浓度明显低于典型的北方城市,如北京[31.49 μg·m⁻³、11.08 μg·m⁻³],

天津 $[(41.4 \pm 29.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}, (8.0 \pm 2.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 、太原 $[(28.9 \pm 14.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}, (8.0 \pm 2.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 和西安 $[(61.9 \pm 33.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}, (12.3 \pm 5.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$, 其中北京、天津、太原和西安冬季取暖和煮饭燃烧的煤是 OC 和 EC 的主要贡献源, 并且造成 OC 的浓度远高于 EC 的浓度. 曹军骥等^[13] 采用绝对主分量分析获得排放源对西安冬季碳的贡献率表明, 冬季燃煤占 44%, 汽油车尾气占 44%, 生物质燃烧占 9%, 柴油车占 3%, 说明汽车尾气排放也是这些城市高浓度 OC 和 EC 的主要贡献源. 而南方经济发达城市深圳 OC 和 EC 浓度, 分别为 $(20.3 \pm 4.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(12.7 \pm 3.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 略高于福建省三市, 这是由于深圳地区繁忙的交通排放的大量汽车尾气的贡献, 其次发达的经济导致大量的工业排放源的贡献, 再

者煤炭的使用和居民做饭的木材燃烧也是另一贡献. 而位于城市中心的福州晋安、泉州丰泽和厦门集美的 OC 浓度高于上海, 说明在经济发展的过程中, 福州、厦门和泉州的空气质量受到了一定的影响.

福州、厦门和泉州(除了背景点)冬季 PM_{2.5} 中 OC 浓度均高于意大利米兰、韩国首尔和仁川、阿姆斯特丹和比利时根特, 而 EC 浓度则与这些城市的相近, 说明这三大城市人为引起的大气污染相对轻微^[14]. 除了受燃煤排放的影响外, 城区 EC 主要来源于柴油的不完全燃烧, 而汽油和燃油蒸发和排放产生的主要是 OC. 目前, 厦门市柴油型汽车的限制通行也会导致 EC 排放量减少, 同时, 福建省三大城市靠近中国东南沿海, 受海洋的稀释作用影响, 所以 EC 的污染并不严重.

表 4 国内外其他城市冬季 PM_{2.5} 中 OC、EC 平均质量浓度

Table 4 Average concentrations of OC and EC in PM_{2.5} during the winter in other cities

地名	OC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	EC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	分析方法	采样时间
北京 ^[15]	31.49	11.08	热/光反射法(TOR)	2003年1月
天津 ^[16]	41.4 ± 29.8	8.0 ± 2.4	热/光反射法(TOR)	2006年12月~2007年1月
太原 ^[17]	28.9 ± 14.8	4.8 ± 2.2	热/光透射法(TOT)	2005年12月~2006年2月
西安 ^[13]	61.9 ± 33.2	12.3 ± 5.3	热/光反射法(TOR)	2003年9月~2004年2月
上海 ^[18]	16.1 ± 8.0	2.3 ± 1.0	热/光反射法(TOT)	2005年10月~2006年7月
深圳 ^[19]	20.3 ± 4.8	12.7 ± 3.1	热/光透射法(TOT)	2004年11~12月
意大利米兰 ^[20]	13.4	1.6	热/光透射法(TOT)	2002年8月~2003年11月
韩国首尔 ^[21]	13.4 ± 5.4	3.6 ± 2.5	热/光透射法(TOT)	2003年3月~2005年2月
阿姆斯特丹 ^[22]	6.7	1.7	热/光透射法(TOT)	2005年1~2月
比利时根特 ^[22]	5.4	1.2	热/光透射法(TOT)	2005年1~2月
韩国仁川 ^[23]	10.9 ± 0.8	1.8 ± 0.1	热/光透射法(TOT)	2009年6月~2010年5月

1) TOT 和 TOR 的区别在于 OC、EC 的分割点不同, TOT 测得的 OC 浓度值高于 TOR 测得

2.2 OC 与 EC 污染特征及来源初步分析

2.2.1 OC 与 EC 的相关性

OC 和 EC 的相关性可在一定程度上对大气气溶胶的来源进行定性分析, 其相关性分析可以初步判断 OC 和 EC 来源的稳定性和一致性^[14, 24].

图 1 为福州、厦门和泉州冬季 PM_{2.5} 中 OC 和

EC 的相关性分析. 从中可知, 福州地区的平潭 ($R^2 = 0.70$) 和晋安 ($R^2 = 0.66$) 冬季 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的相关性显著, 说明 OC 和 EC 有较为相近的一次污染源, 如机动车、燃煤等; 而福州福清、厦门和泉州的相关性则不显著, 说明这些地区 OC 和 EC 的来源较为复杂多变, 可能与城市发展过程中的快速性

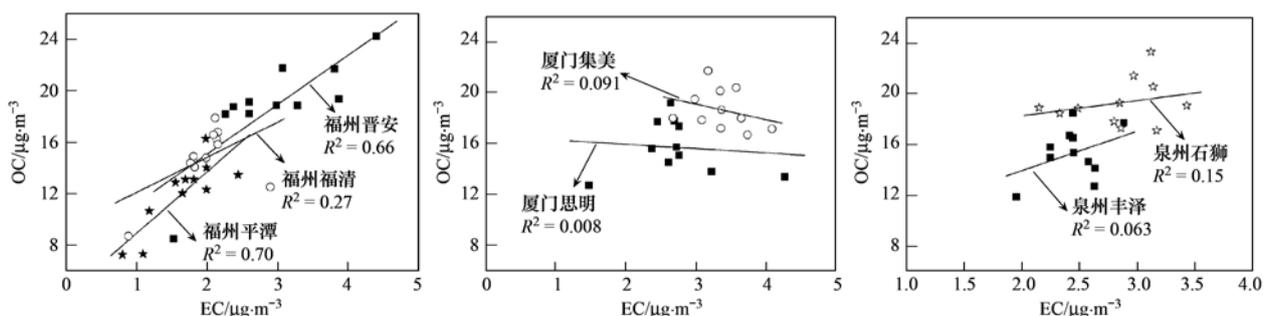


图 1 福州、厦门和泉州冬季 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的相关性

Fig. 1 Correlations between OC and EC in PM_{2.5} during the winter in Fuzhou, Xiamen and Quanzhou

和波动性有关。

2.2.2 OC/EC 值的变化特征

OC/EC 值被用来判断是否有二次污染的产生,这对于控制气溶胶中的有机污染具有重要的意义,若 OC/EC 值超过 2.0,则表明存在二次污染^[25]。

图 2 为福州、厦门和泉州冬季 PM_{2.5} 中 OC/EC 值的柱状分布图。从中可知,福建省三大主要城市冬季 PM_{2.5} 的 OC/EC 值为 5.64 ± 0.93 (厦门集美) ~ 7.71 ± 1.37 (福州福清),均大于 2.0,说明各采样点均可能存在二次污染。OC/EC 的值表现为城区的大于郊区,如福州晋安 (6.49) < 福州福清 (7.71),厦门集美 (5.64) < 厦门思明 (6.10),泉州石狮 (6.47) < 泉州丰泽 (6.88)。这一顺序与 OC 和 EC 浓度在不同功能区大小顺序刚好相反。

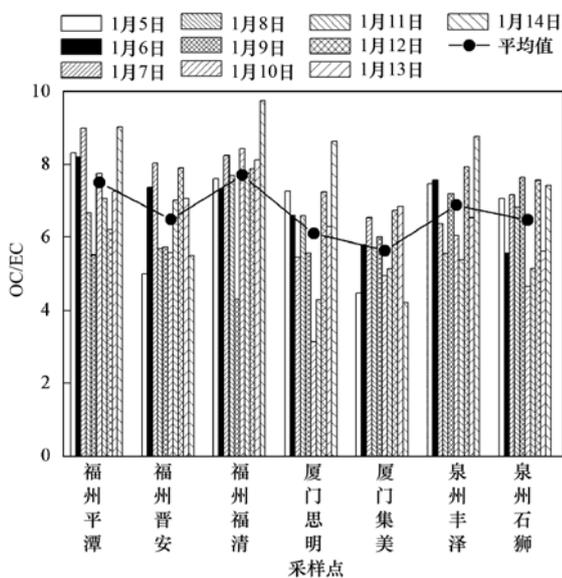


图 2 福州、厦门和泉州冬季 PM_{2.5} 中 OC/EC 值

Fig. 2 OC/EC ratios in PM_{2.5} during the winter in Fuzhou, Xiamen and Quanzhou

OC/EC 值一般受控于 3 个因素,即排放源、OC 在空气中的转化、OC 和 EC 粒子的清除。福州平潭 OC 和 EC 的质量浓度均小于其余采样点,但 OC/EC 值却较大,仅次于福州福清,这是由于福州平潭三十六角潭附近没有大的局地燃煤污染源,EC 主要是远距离输送来的,加之采样点周围常年植被茂盛,而植被释放的有机物可能也是该监测点 OC 的主要来源,使得 OC 浓度相对较高,导致 OC/EC 值也较大。再者,较高的 OC/EC 值可能来自于大气中的二次转化,如天然排放的 VOCs 经光化学氧化导致二次污染物贡献比重相对较大,导致 OC/EC 值较大。而在类似的居民混住区,如福州福清和泉州丰泽,OC/EC 值均

较高,分别为 7.71 和 6.88,可能是由于高 OC/EC 值的厨房烹饪 (OC/EC = 4.3 ~ 7.7)^[26] 和生物质燃烧 (OC/EC = 3.8 ~ 13.2)^[27] 的贡献。福州晋安的 OC/EC 值为 6.49,明显低于平潭 (7.50) 和福清 (7.71),这是由于晋安监测站位为交通居民区,测点背面约 30 m 为主干道福马路,受机动车尾气和汽车尾气排放低对 OC/EC 值的影响较大所致^[14, 28]。另外,OC 的浓度受气象条件,如降水、光强、温度和湿度等的影响比 EC 大得多。厦门集美 1 月 5 日、11 日和 12 日有小雨,而福州晋安 1 月 5 日、6 日和 11 日均有小雨,由于降水对水溶性 OC 的清除作用要明显强于 EC^[24],导致其 OC/EC 值较低。

2.3 气溶胶碳的组成分布

EC 作为一次源,其排放来源相对稳定,因此 EC 的增加在一定程度上可以说明大气污染的富集程度。EC 主要来自各种化石燃料的不完全燃烧排放,是一次气溶胶的指示物,可用 EC 作为估算一次有机碳 (primary organic carbon, POC) 的示踪物质^[29, 30]。而 OC 在空气中,适宜的温度和光照下容易发生各种光化学反应,并形成二次有机碳 (secondary organic carbon, SOC),使得 OC/EC 值升高。一般认为当 OC/EC 的值大于 2.2 或 2.0 时,表明存在 SOC^[25, 31],由 OC/EC 值的分析已知,福州、厦门和泉州均存在二次污染。因此,可利用公式 (1) 和 (2) 对二次有机碳 (secondary organic carbon, SOC) 进行估算。

$$\text{SOC} = \text{OC}_{\text{tot}} - \text{OC}_{\text{pri}} \quad (1)$$

$$\text{OC}_{\text{pri}} = \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\text{min}} \quad (2)$$

式中, SOC 为二次有机碳 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); OC_{tot} 为总有机碳 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); OC_{pri} 为一次有机碳 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); EC 为元素碳 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{min}}$ 为 OC/EC 的最小比值,本研究所用 $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{min}}$ 为各采样站位 OC/EC 的最小值。需要说明的是,降雨对 OC、EC 均有不同程度的清除,因此为了比较客观的估算福建省三大城市冬季 SOC,首先排除降雨天气下和 O₃ 浓度较高的晴天,再选择各采样站位 OC/EC 的最小值。根据上述计算公式得到冬季稳定的非降雨天气条件下 SOC 的浓度水平见表 5。

表 5 为福州、厦门和泉州冬季 PM_{2.5} 中 SOC 的浓度水平和所占质量分数。从中可知,冬季 PM_{2.5} 中 POC、SOC 和 TC 的浓度分别 8.53 ~ 16.38 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、2.47 ~ 7.17 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 13.68 ~ 22.11 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。平潭和晋安冬季 PM_{2.5} 中 POC 的贡献明显高于 SOC, SOC 的浓度均较低,分别为 2.93 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 2.47

表 5 福州、厦门和泉州冬季 PM_{2.5} 中 SOC 的浓度水平和质量分数Table 5 Levels of secondary organic carbon (SOC) in PM_{2.5} during the winter at Fuzhou, Xiamen and Quanzhou

采样点	POC 浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	SOC 浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	TC 浓度 ¹⁾ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	POC/TC /%	EC/TC /%	SOC/TC /%	SOC/OC /%	SOC/PM _{2.5} /%	
福州	平潭	9.11	2.93	13.68	66.55	12.08	21.38	24.31	3.70
	晋安	16.38	2.47	21.82	75.06	13.64	11.30	13.08	2.20
	福清	8.55	6.22	16.75	51.03	11.86	37.11	42.10	7.78
厦门	思明	8.53	7.17	18.43	46.30	14.78	38.92	45.67	7.17
	集美	14.15	4.52	22.03	64.24	15.26	20.50	24.20	3.94
泉州	丰泽	15.80	3.47	22.11	71.44	12.87	15.69	18.01	3.06
	石狮	11.24	4.07	17.73	63.41	13.63	22.96	26.58	5.00

1) TC = OC + EC; OC = SOC + POC

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,可能是由于在温度较低的冬季(采样期间平均温度分别为 8.62℃ 和 7.87℃),二次有机碳的形成较为困难。

总体上讲,POC 在 TC 中的比例(质量分数,下同)较高,除厦门思明(46.30%),均可达到 50% 以上,说明相对二次有机碳,福州、厦门和泉州受到一次有机碳的影响较大。各城市的不同功能区中,SOC 在 TC 中占的比例差别较大,福州福清和厦门思明 SOC 在 TC 中占的比例可达 37.11% 和 38.92%,而相对应的福州晋安和厦门集美仅为 11.30% 和 20.50%。

福建省三大城市冬季 PM_{2.5} 中 SOC 占 OC 的比例为 13.08% ~ 45.67%,而 SOC 占 PM_{2.5} 的比例为 2.20% ~ 7.78%。有研究表明^[32],大气中 SOC 的形成主要受控于气温,当温度低于 15℃ 时,基本不形成 SOC,温度愈高,SOC 愈容易形成。然而,也有研究表明^[6, 33],冬季 PM_{2.5} 中 SOC 占有 OC 较高的比例,如香港 35.2%、广州 49.2%、深圳 40.7%、珠海 48.3% 和北京 40%,这些城市中二次污染均较为严重。与之比较,福州晋安、厦门集美、泉州丰泽和泉州石狮 SOC 占 OC 比例明显低于这些城市,分别为 13.08%、24.20%、18.01% 和 26.58%,说明受到二次污染较轻。而福州福清和厦门思明的二次污染较严重,SOC 占 OC 的比例最高,分别可达 45.67% 和 42.10%,高于香港、北京和深圳,低于广州和珠海。

3 结论

(1) 福建省三大主要城市冬季 PM_{2.5} 的浓度范围为(79.94 ± 18.08) ~ (114.78 ± 26.10) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,均超过 2012 年 2 月新颁布的《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 规定 PM_{2.5} 的最高日均值 75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。OC 和 EC 的浓度范围分别为(14.77 ±

2.65) ~ (19.27 ± 1.96) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 (1.99 ± 0.50) ~ (3.36 ± 0.41) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是背景点福州平潭的 1.2 ~ 1.6 倍和 1.2 ~ 2.0 倍,说明福州、厦门和泉州大气碳气溶胶存在一定程度的污染。

(2) 与国内外城市 OC 和 EC 浓度相比较,福建省三大城市冬季 OC、EC 的浓度低于北方主要城市,如北京、天津、太原和西安,也低于南方经济高速发展的城市如深圳,然而均高于国外的城市。

(3) OC/EC 比值均大于 2.0,说明各采样点可能存在二次污染。而根据二次有机碳估算表明,冬季 PM_{2.5} 中二次有机碳 SOC 的浓度为 2.47 ~ 7.17 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,占 OC 和 PM_{2.5} 的比例分别为 13.08% ~ 45.67% 和 2.20% ~ 7.78%。其中福州福清和厦门思明的二次污染较严重,高于香港、北京和深圳,低于广州和珠海。

参考文献:

- [1] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, *et al.* Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. *Science*, 2002, **297** (5590): 2250-2253.
- [2] Offenbergh J H, Barker J E. Aerosol size distributions of elemental and organic carbon in urban and over-water atmospheres [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(10): 1509-1517.
- [3] Chen S J, Liao S H, Jian W J, *et al.* Particle size distribution of aerosol carbons in ambient air [J]. *Environment International*, 1997, **23**(4): 475-488.
- [4] Ho K F, Lee S C, Chan K C, *et al.* Characterization of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(1): 31-39.
- [5] Ye B M, Ji X L, Yang H Z, *et al.* Concentration and chemical composition of PM_{2.5} in Shanghai for a 1-year period [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(4): 499-510.
- [6] 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*, 2004, **37**(11): 1451-1460.
- [7] Pathak R K, Wang T, Ho K F, *et al.* Characteristics of

- summertime PM_{2.5} organic and elemental carbon in four major Chinese cities: Implications of high acidity for water-soluble organic carbon (WSOC) [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(2): 318-325.
- [8] Li Y C, Yu J Z, Ho S S H, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} and organic aerosol source analysis during cold front episodes in Hong Kong, China [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **118**: 41-51.
- [9] 陈晓秋, 俞是聃, 傅彦斌. 福州市春、冬季霾日与非霾日 PM_{2.5}及碳气溶胶污染水平与特征 [J]. *中国环境监测*, 2008, **24**(6): 68-72.
- [10] Zhang F W, Zhao J P, Chen J S, *et al.* Pollution characteristics of organic and elemental carbon in PM_{2.5} in Xiamen, China [J]. *Journal of Environmental Science*, 2011, **23**(8): 1342-1349.
- [11] Xu L L, Chen X Q, Chen J S, *et al.* Seasonal variations and chemical compositions of PM_{2.5} aerosol in the urban area of Fuzhou, China [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **104-105**: 264-272.
- [12] Zhang F W, Xu L L, Chen J S, *et al.* Chemical compositions and extinction coefficients of PM_{2.5} in peri-urban of Xiamen, China, during June 2009-May 2010 [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **106**: 150-158.
- [13] 曹军骥, 李顺诚, 李杨, 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.
- [14] 于建华, 虞统, 杨晓光, 等. 北京冬季 PM_{2.5} 中元素碳、有机碳的污染特征 [J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(1): 48-50, 55.
- [15] He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **36**(29): 4959-4970.
- [16] Li W F, Bai Z P, Liu A X, *et al.* Characteristics of major PM_{2.5} components during winter in Tianjin, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2009, **9**(1): 105-119.
- [17] 孟昭阳, 张怀德, 蒋晓明, 等. 太原冬季 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的变化特征 [J]. *应用气象学报*, 2007, **18**(4): 524-531.
- [18] Feng Y L, Chen Y J, Guo H, *et al.* Characteristics of organic and elemental carbon in PM_{2.5} samples in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **92**(4): 434-442.
- [19] Niu Y W, He L Y, Min H, *et al.* Pollution characteristics of atmospheric fine particles and their secondary components in the atmosphere of Shenzhen in summer and in winter [J]. *Science in China Series B: Chemistry*, 2006, **49**(5): 466-474.
- [20] Lontai G, Giugliano M, Butelli P, *et al.* Major chemical components of PM_{2.5} in Milan (Italy) [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(10): 1925-1934.
- [21] Kim H S, Huh J B, Hopke K P, *et al.* Characteristics of the major chemical constituents of PM_{2.5} and smog events in Seoul, Korea in 2003 and 2004 [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(32): 6762-6770.
- [22] Viana M, Maenhaut W, Brink H M, *et al.* Comparative analysis of organic and elemental carbon concentrations in carbonaceous aerosols in three European cities [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(28): 5972-5983.
- [23] Chol J K, Heo J B, Ban S J, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} aerosol in Incheon, Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **60**: 583-592.
- [24] 刘新民, 邵敏, 曾立民, 等. 珠江三角洲地区气溶胶中含碳物质的研究 [J]. *环境科学*, 2002, **23**(S1): 54-59.
- [25] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJAQA/AUSPEX [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(12): 2070-2112.
- [26] See S W, Balasubramanian R. Chemical characteristics of fine particles emitted from different gas cooking methods [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(12): 8852-8862.
- [27] Zhang Y X, Shao M, Zhang Y H, *et al.* Source profiles of particulate organic matters emitted from cereal straw burnings [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(2): 167-175.
- [28] 王坚, 庄马展, 杨红斌, 等. 厦门市空气 PM₁₀ 中有机碳和元素碳的污染特征 [J]. *环境化学*, 2006, **25**(4): 518-519.
- [29] 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.
- [30] Castro L M, Pio 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.
- [31] Turpin B J, Huntzicker J J, Larson S M. Los Angeles summer midday particulate carbon: primary and secondary aerosol [J]. *Environmental Science and Technology*, 1991, **25**(10): 1788-1793.
- [32] Strader R, Lurman F, Pandis S N. Evaluation of Secondary organic aerosol formation in winter [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(29): 4849-4863.
- [33] Duan F K, He K B, Ma Y L, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosols in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(3): 355-364.

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