

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

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

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧, 朱彬, 高晋徽, 张恩红, 王红磊, 陈焯鑫, 王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳, 魏建苏, 严文莲, 吕军, 孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏, 张国庆, 王剑琼, 吴昊, 李宝鑫, 王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华, 王东方, 赵倩彪, 崔虎雄, 李娟, 段玉森, 伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊, 朱彬, 安俊琳, 段卿, 邹嘉南, 沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙龙, 陆钊, 张天舒, 伍德侠, 盛世杰, 陆亦怀, 刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真, 赵亚丽, 赵浩宁, 梁兴印, 孙静雯, 王保贵, 王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利, 杨力, 孙剑宇, 梁欣欣, 虎雪姣, 孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的实验研究	陆叶强, 陈秋方, 孙在, 蔡志良, 杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣, 丁永建, 曾国雄, 吴锦奎, 秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹, 陈能汪, 吴殷琪, 莫琼利, 周兴鹏, 鲁婷, 田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷, 秦延文, 马迎群, 赵艳民, 时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞, 王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕, 石安邦, 瞿杨晟, 岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀, 金军, 何畅, 王英, 马召辉, 李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠, 杨继伟, 钱靖, 董玉红, 唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波, 盛明, 朱强, 杨霜, 檀炳超, 范冉, 南旭军, 何茂阳, 王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新, 梁新强, 吴明, 叶小齐, 蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊, 李云梅, 吕恒, 朱利, 吴传庆, 杜成功, 王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁, 江韬, 闫金龙, 魏世强, 王定勇, 卢松, 李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐, 江韬, 卢松, 闫金龙, 高洁, 魏世强, 王定勇, 郭念, 赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉, 周雪峰, 胡学香, 胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋, 万金泉, 马邕文, 黄明智, 王艳, 陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺, 曾思思, 梁思, 韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖, 黄玉婷, 葛川, 张浩, 陈昕, 张志剑, 罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康, 常晋, 王先宝, 刘柯君, 王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥, 张大林, 黄勇, 陈宗炬, 袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝, 倪晓棠, 魏源送, 佟娟, 王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静, 王广启, 曹知平, 李中华, 胡玉瑛, 王凯军, 左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 刘捷, 沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲, 任杰, 宋志文, 吴等等, 夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青, 刘锐, 罗金飞, 王根荣, 陈吕军, 刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华, 张芹, 白旭丽, 刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华, 白旭丽, 张芹, 刘毅, 贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东, 胡晓娜, 章小强, 刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利, 李艳粉, 徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华, 张玮, 顾琬雯, 张瑞雷, 王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨, 杨贵芹, 陆琴, 周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超, 王宁, 杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵, 熊黑钢, 陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮, 李忠武, 黄斌, 王艳, 张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰, 唐冰培, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响	刘新伟, 段碧辉, 夏全杰, 矫威, 郭再华, 胡承孝, 赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪, 王继华, 关键飞, 杨雪辰, 陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军, 何丙辉, 赵旋池, 李源, 毛文韬, 曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲, 王世杰, 罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺, 廖婷婷, 王睿, 郑循华, 胡荣桂, Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹, 王彬, 王云琦, 张会兰, 杨松楠, 李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇, 卓钟旭, 孙水裕, 罗光前, 李晓明, 谢武明, 王玉洁, 杨佐毅, 赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春, 江梅, 邹兰, 李晓倩, 魏玉霞, 赵国华, 张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则(3279) 《环境科学》征订启事(3545) 信息(3364,3486,3552,3563)	

上海城区 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析

张懿华, 王东方, 赵倩彪, 崔虎雄, 李娟, 段玉森, 伏晴艳

(上海市环境监测中心, 上海 200030)

摘要: 2010年6月~2011年5月间在上海城区点位采集了181组PM_{2.5}样品, 采用热光反射法(thermal optical reflectance, TOR)测定了样品中的有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(elemental carbon, EC)含量。结果表明, 上海城区环境空气PM_{2.5}中OC和EC年平均浓度分别为 $8.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 6.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 1.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 两者之和占PM_{2.5}质量浓度的20%。OC和EC的季节平均浓度值冬季最高, 夏季最低, 秋季OC和EC在PM_{2.5}中的比例最高。全年OC/EC比值为 3.54 ± 1.14 。采用最小OC/EC比值法估算二次有机碳(secondary organic carbon, SOC)含量得到SOC年均浓度为 $3.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 4.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占OC含量的38.9%。夏季SOC浓度低且与O₃最大小时浓度值相关性好, 表明光化学反应是夏季SOC的重要生成途径, 主导西风向的秋冬季SOC浓度高于静风条件下的浓度水平, 存在输送作用。进一步对OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2、EC3和OPC进行主成分分析, 结果显示上海城区PM_{2.5}中OC和EC主要来自机动车尾气、燃煤排放、生物质燃烧和道路尘, 这4个来源对含碳组分的贡献率达69.8%~81.4%, 其中机动车尾气在4个季节中的贡献率均较高, 生物质燃烧贡献约15%~20%, 春季和秋季道路尘影响明显, 冬季燃煤的贡献高于其他季节。

关键词: PM_{2.5}; 有机碳; 元素碳; 来源分析; 上海

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3263-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.09.004

Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM_{2.5} in Shanghai Urban Area

ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, CUI Hu-xiong, LI Juan, DUAN Yu-sen, FU Qing-yan
(Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200030, China)

Abstract: Organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM_{2.5} samples collected in Shanghai urban area during June 2010 to May 2011 were analyzed with IMPROVE-TOR protocol. The results showed that the annual average concentrations of OC and EC in PM_{2.5} were $8.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 6.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and $2.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 1.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ respectively, accounting for 20% of PM_{2.5} mass concentration. The seasonal average concentrations of OC and EC were highest in winter and lowest in summer. And the percentages of OC and EC in PM_{2.5} were highest in autumn. The annual average OC/EC ratio was 3.54 ± 1.14 . The concentrations of secondary organic carbon (SOC) were evaluated by the minimum OC/EC ratio method and the annual average concentration of SOC was $3.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 4.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, accounting for 38.9% of OC. In summer, the concentrations of SOC were relatively low and were correlated well with the maximum hourly concentrations of ozone, which indicated that the photochemical reaction was an important way of SOC formation. In autumn and winter when the west wind direction was predominant, the concentrations of SOC were higher than that in windless condition, which meant the transportation of SOC. The carbonaceous components were associated with source contributions using the principal component analysis (PCA) with eight thermally-derived carbon fractions, OC1, OC2, OC3, OC4, EC1, EC2, EC3 and OPC. Motor vehicle, coal-fired units, biomass burning and road dust were four main sources of OC and EC in PM_{2.5} in Shanghai urban area, which contributing 69.8% - 81.4% of carbonaceous aerosols. The contribution of motor vehicle was high throughout the year. Biomass burning contributed about 15% - 20% of OC and EC. The influence of road dust was relatively obvious in spring and autumn. And the contribution of coal-fired units was higher in winter than those in other seasons.

Key words: PM_{2.5}; organic carbon (OC); elemental carbon (EC); source analysis; Shanghai

大气颗粒物是影响人体健康、大气能见度以及地球辐射平衡的重要污染物, 细颗粒物PM_{2.5}因其对人体健康的影响远大于粗颗粒物而更加受到关注^[1]。PM_{2.5}中包含各类化学成分, 包括含碳物质、水溶性离子、矿物元素等。其中, 含碳气溶胶是PM_{2.5}的重要组成部分, 可以占PM_{2.5}质量的20%~80%左右^[2]。颗粒物中的含碳部分包括有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(elemental carbon, EC), OC来源于化石燃料燃烧直接排放的一次有机

颗粒物和经过大气化学反应生成的二次有机颗粒物, EC来自化石燃料或生物质不完全燃烧直接排放的一次颗粒物, 两者是识别细颗粒物来源的重要参数^[3,4]。此外, OC通过光散射, EC通过光吸收都能对颗粒物的消光系数产生贡献, 它们的共同作用甚

收稿日期: 2014-01-20; 修订日期: 2014-03-27

基金项目: 上海市环境保护科研项目(沪环科2012-01, 沪环科2013-08); 上海市科学技术委员会科研项目(12dz1202700)

作者简介: 张懿华(1983~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: zhangyh@semc.gov.cn

至可以达到总消光的 30% ~ 40%^[5], EC 的强吸光能力还会对气溶胶的辐射强迫产生重要影响, 从而对气候变化产生影响^[6].

近年来, 随着我国大气细颗粒物污染问题的逐步突显, 关于 PM_{2.5} 中含碳组分的研究也越来越多, 京津冀、长三角、珠三角地区以及中西部一些重要城市都开展了相关研究并得到了各地区含碳气溶胶的浓度水平、季节特征、粒径分布以及贡献来源^[7-18]. 但总体而言, 大气细颗粒物中含碳气溶胶的连续性、系统性观测数据仍比较有限, 对含碳气溶胶来源及形成机制的理解还存在很多不足. 本研究通过观测分析 2010 年 6 月 ~ 2011 年 5 月期间上海城区 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度的变化特征, 探讨上海市细颗粒物中含碳组分的主要影响因素, 并进一步对 OC 和 EC 的贡献来源进行定量研究, 以期为进一步有效控制细颗粒物污染提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

PM_{2.5} 细颗粒物的手工采样点位于浦东中心城区内环线以内区域 (E121.533°, N31.228°), 采样位置距离地面约 20 m, 站点周边主要为住宅区和商业区, 南面 600 m 处为一条城市交通干道, 站点与内环线最短距离约为 4 km, 周边 10 km 范围内无大型工业源, 基本可代表上海城区人口密集区域的环境特征. 研究采样期为 2010 年 6 月 ~ 2011 年 5 月, 覆盖完整的一年四季, 样品为隔天采集, 采集时间为前 1 d 中午 12:00 至当天中午 12:00, 采样时间误差 < ±0.5 h.

采样设备为四通道 PM_{2.5} 采样器 (RP2300), 4 个通道中两个通道采样流量为 16.7 L·min⁻¹, 另两个通道采样流量为 10.0 L·min⁻¹. 采样滤膜分别采用直径 47 mm 的 Teflon 滤膜和石英滤膜 (Whatman, Φ47 mm). 其中两个 16.7 L·min⁻¹ 通道放置 Teflon 滤膜用于称重计算颗粒物质量浓度以及进行离子和元素组分分析, 一个 10.0 L·min⁻¹ 通道放置石英滤膜用于测定颗粒物中的 OC 和 EC 浓度, 另一个 10.0 L·min⁻¹ 通道用于采集现场空白样和平行样.

1.2 样品处理与分析

样品采集前后 Teflon 膜均在温度为 (20 ± 1) °C、相对湿度为 (50 ± 5)% 的恒温恒湿箱中平衡 24 h 以上, 然后用电子微量天平 (Sartorius, 0.01 mg) 称量. 采样前石英滤膜在 450 °C 灼烧 5 h 以上, 以去除滤膜上原有的有机物和其他杂质, 且用灼烧

过的干净铝箔包裹滤膜盒用于保存石英滤膜, 防止运输保存过程中的有机物吸附污染. 采集后的样品均保存在 -18 °C 的冰柜内直至分析.

OC 和 EC 分析采用美国沙漠研究所研制的热光碳分析仪 (DRI Model 2001A). 应用 IMPROVE 热光反射的实验方法 (TOR): 先在纯氮环境中将 0.526 cm² 的滤膜分别加热至 120、250、450 和 550 °C, 测得 OC1、OC2、OC3 和 OC4; 然后在含有 2% 氧气的氮气环境下, 继续升温至 550、700 和 800 °C, 获得 EC1、EC2 和 EC3 的含量. 各个温度下产生的 OC 和 EC 经 MnO₂ 氧化生成 CO₂ 再经催化还原为 CH₄, 并通过火焰离子化检测器 (FID) 进行定量测定. 在测定 EC 的过程中反射率回到初值时的部分定义为裂解碳 (optically detected pyrolyzed carbon, OPC). 最终的 OC 定义为 OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + OPC, EC 定义为 EC1 + EC2 + EC3 - OPC^[19].

1.3 质量控制与质量保证

进行每批次样品分析前均使用标准蔗糖溶液进行仪器校正以及实验室空白测量, 分析过程中随机选择 1 ~ 2 个样品进行重复测试, 重复测试结果的相对偏差在 10% 以内.

每个月采样过程中均采集 2 个现场空白样, 取两者 OC 和 EC 含量均值作为当月样品本底值扣除. 全年共计采集 24 个现场空白样, 空白样 OC 和 EC 浓度均低于实际样品的 5%.

每个月采样过程中均采集 2 ~ 3 个平行样品, 作为采样现场和实验室分析的全过程质量控制. 全年采样期间共采集 25 组平行样, 平行样品中测得的 OC 和 EC 浓度相对偏差在 10% 以内, OC 和 EC 浓度平均相对偏差分别为 8.1% 和 4.6%.

1.4 气态污染物与气象数据

文中所用 O₃ 浓度数据为同一观测点位的自动监测数据, 监测设备为美国 API 公司的臭氧分析仪 (API 400E), 监测分析方法为紫外吸收法, 仪器运行维护符合《环境空气气态污染物 (SO₂、NO₂、O₃、CO) 连续自动监测系统技术要求及检测方法》(HJ 654-2013) 中的相关要求. 风速、风向等气象参数采用位于采样点位西面 17 km 处的上海虹桥机场观测数据 (<http://www.wunderground.com>).

2 结果与讨论

2.1 OC 和 EC 质量浓度特征

2010 年 6 月 ~ 2011 年 5 月共采集 181 组 PM_{2.5} 样品. PM_{2.5} 质量浓度为 55 μg·m⁻³ ± 37 μg·m⁻³,

高出新《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中 PM_{2.5} 年均浓度二级标准限值 (35 μg·m⁻³) 57%。其中, OC 和 EC 平均浓度分别为 8.6 μg·m⁻³ ± 6.2 μg·m⁻³ 和 2.4 μg·m⁻³ ± 1.3 μg·m⁻³, TC 占 PM_{2.5} 质量浓度的 20%。与上海已有的研究结果相比(表 1)^[11,20], 本研究得到的 TC 浓度较前几年有所下降, 但 TC 在 PM_{2.5} 中所占比重基本一致。尽管上海 PM_{2.5} 中的 OC 与 EC 浓度低于南京和京津冀地区^[21,22], TC 浓度与珠三角地区接近^[16,23,24], 但仍高于国外发达地区部分城市的观测结果^[25~27], 含碳气溶胶的控制仍是 PM_{2.5} 治理的主要方面之一。

表 1 国内外主要城市 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度及所占比例

Table 1 Average concentrations of OC and EC and percentage of TC in PM _{2.5} in different cities in the world						
城市	时间	OC/ μg·m ⁻³	EC/ μg·m ⁻³	TC/PM _{2.5} /%	测量方法	文献
上海	2010-06 ~ 2011-05	8.6 ± 6.2	2.4 ± 1.3	20	TOR	本研究
上海	2008	8.10 ± 5.48	3.91 ± 1.72	19	TOR	[20]
上海	2005 ~ 2006	14.7 ± 10.1	2.8 ± 1.3	19	TOT	[11]
南京	2007-06 ~ 2008-05	15.7 ± 9.9	10.4 ± 6.9	26	TOR	[21]
北京	2009-04 ~ 2010-02	18.2 ± 13.8	6.3 ± 2.93	20	TOR	[22]
天津	2009-04 ~ 2010-02	18.8 ± 12.9	6.9 ± 3.3	18	TOR	[22]
石家庄	2009-04 ~ 2010-02	26.4 ± 21.7	9.7 ± 4.8	19	TOR	[22]
广州	2006-08 ~ 2007-08	7.1 ± 3.3	4.0 ± 2.5	29	TOR	[23]
香港	2004-08 ~ 2004-09, 2005-02 ~ 2005-03	12.0 ± 6.2	3.4 ± 1.0	29	TOT	[16]
香港	2004-11 ~ 2005-10	7.42 ± 1.22	6.01 ± 0.55	34	TOR	[24]
荷兰阿姆斯特丹	2005-07 ~ 2005-08, 2006-01 ~ 2006-02	5.3 ± 2.7	1.8 ± 0.8	27	TOT	[25]
西班牙巴塞罗那	2004-07 ~ 2004-08, 2004-11 ~ 2004-12	5.3 ± 2.0	2.1 ± 1.1	32	TOT	[25]
比利时根特	2004-06 ~ 2004-07, 2005-01 ~ 2005-02	4.1 ± 2.8	1.0 ± 0.5	28	TOT	[25]
意大利米兰	2002-08 ~ 2003-12	9.2 ± 7.2	1.4 ± 0.7	27	TOT	[26]
美国丹佛	2008-03 ~ 2009-03	3.37	0.44	50	TOT	[27]

不同季节的气候条件和污染来源有所差异, 因此 OC 和 EC 浓度也表现出不同的变化特征。由表 2 可见, 冬季 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度明显高于其他季节, 而夏季 OC 和 EC 浓度相对较低, 这是由于冬季在本地污染源排放有所加强的同时, 叠加北方冷空气扩散带来的内陆气团污染输送, 而夏季上海盛行东南风向, 海上

吹来的洁净空气有利于污染物的扩散, 从而形成了冬高夏低的变化特点。从 OC 和 EC 在 PM_{2.5} 中所占比重来看, 虽然冬季 OC 和 EC 绝对浓度较高, 但所占比重并非最高, 说明冬季的污染源排放对 PM_{2.5} 中的无机组分贡献更大, 而秋季 PM_{2.5} 中的 OC 和 EC 所占比重在四季中为最高, 含碳组分贡献较大。

表 2 不同季节 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度及所占比例

Table 2 Seasonal concentrations and percentage of OC and EC in PM _{2.5}					
时间	样本量	OC/ μg·m ⁻³	OC/PM _{2.5} /%	EC/ μg·m ⁻³	EC/PM _{2.5} /%
夏季 (2010-06 ~ 2010-08)	34	6.8 ± 4.0	14.4 ± 3.8	2.2 ± 1.2	5.0 ± 1.6
秋季 (2010-09 ~ 2010-11)	54	8.6 ± 8.0	17.6 ± 5.2	2.2 ± 1.4	5.3 ± 2.6
冬季 (2010-12 ~ 2011-02)	42	11.8 ± 6.8	16.9 ± 3.8	3.0 ± 1.5	4.5 ± 1.4
春季 (2011-03 ~ 2011-05)	51	7.2 ± 3.2	14.3 ± 3.6	2.3 ± 1.1	4.5 ± 1.6

利用数理统计软件 (SPSS V17.0) 对不同季节的 OC 和 EC 浓度进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 结果列于表 3 和表 4 中, 4 个季节的 OC 和 EC 浓度数据均通过正态分布 Kolmogorov-Smirnov 检验。统计结果表明, 在 0.05 显著性水平下, 冬季 PM_{2.5} 中的 OC 和 EC 浓度与其他 3 个季节均有显著差异, 而其他 3 个季节之间无明显差异, 并且春、夏、秋这 3 个季节的 EC 浓度几乎不存在组间差异。考虑到 EC 主要来自一次排放, 因此认为春、夏、秋这 3 个季节的含碳气溶胶一次排放源基本稳定, 而

冬季存在不同的污染来源。

2.2 二次有机碳 (SOC) 估算

由大气中的挥发性有机物 (VOCs) 经气粒反应形成的 OC, 即为二次有机碳 (secondary organic carbon, SOC), SOC 含量的确定对细颗粒物污染治理有着重要意义, 但是目前没有直接测定颗粒物中 SOC 含量的方法。有研究认为^[28], OC/EC 比值高低可用于评价 OC 中二次来源的部分。如表 5 所示, 采样期间 PM_{2.5} 中的 OC/EC 比值为 3.54 ± 1.14, 秋冬季节的 OC/EC 比值明显高于春夏季, 表明秋冬季节

表 3 不同季节 OC 浓度的单因素方差分析结果

Table 3 One-way ANOVA of seasonal OC concentrations

季节	秋季 (2010-09 ~ 2010-11)	冬季 (2010-12 ~ 2011-02)	春季 (2011-03 ~ 2011-05)
夏季 (2010-06 ~ 2010-08)	$F = 1.569$ Sig. = 0.214	$F = 14.396$ Sig. = 0.000	$F = 0.325$ Sig. = 0.570
秋季 (2010-09 ~ 2010-11)	—	$F = 4.180$ Sig. = 0.044	$F = 1.359$ Sig. = 0.246
冬季 (2010-12 ~ 2011-02)	—	—	$F = 17.995$ Sig. = 0.000

表 4 不同季节 EC 浓度的单因素方差分析结果

Table 4 One-way ANOVA of seasonal EC concentrations

季节	秋季 (2010-09 ~ 2010-11)	冬季 (2010-12 ~ 2011-02)	春季 (2011-03 ~ 2011-05)
夏季 (2010-06 ~ 2010-08)	$F = 0.000$ Sig. = 0.991	$F = 5.812$ Sig. = 0.018	$F = 0.000$ Sig. = 0.986
秋季 (2010-09 ~ 2010-11)	—	$F = 6.448$ Sig. = 0.013	$F = 0.000$ Sig. = 0.998
冬季 (2010-12 ~ 2011-02)	—	—	$F = 9.206$ Sig. = 0.003

表 5 不同季节 PM_{2.5} 中 OC/EC 比值

Table 5 Seasonal OC/EC ratios in PM_{2.5}

比值	夏季 (2010-06 ~ 2010-08)	秋季 (2010-09 ~ 2010-11)	冬季 (2010-12 ~ 2011-02)	春季 (2011-03 ~ 2011-05)
OC/EC	3.00 ± 0.65	3.80 ± 1.59	3.94 ± 0.90	3.31 ± 0.79

PM_{2.5} 中可能存在较多的 SOC.

最小 OC/EC 比值法是一种常用的 SOC 定量估算方法,计算公式如下^[4]:

$$SOC = OC - EC(OC/EC)_{\min} \quad (1)$$

式中 $(OC/EC)_{\min}$ 为研究期间观测到的 OC/EC 比值的最小值. 考虑到不同季节的气象条件和污染源排放有所不同,本研究以各季节观测到的 $(OC/EC)_{\min}$ 计算不同季节的 SOC 含量, $(OC/EC)_{\min}$ 采样日均没有出现降雨或大风天气,计算结果列于表 6 中. 全年 SOC 平均浓度为 $3.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \pm 4.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这一

结果高于上海已有文献报道结果中靠近交通道路点位的 SOC 浓度,低于工业区点位 SOC 浓度^[20],临近交通道路的颗粒物相对新鲜, SOC 含量低,而工业区污染程度较重,因此本文的结果基本合理,能够反映距排放源一定距离、经过一定程度二次反应的城区 PM_{2.5} 中 SOC 浓度水平. 全年 SOC 占 OC 比重为 38.9%,其中秋冬季节的 SOC 浓度明显高于春夏季,与 OC/EC 比值法得出的结果一致. 与全国其他重点地区相比,珠三角地区夏季 SOC 浓度低但占 OC 比重高^[29],而京津冀地区无论 SOC 浓度还是

表 6 最小 OC/EC 比值法估算 PM_{2.5} 中 SOC 浓度水平

Table 6 Estimated SOC concentrations in PM_{2.5} from the minimum OC/EC ratios method

时段	$(OC/EC)_{\min}$	SOC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	POC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	SOC/OC/%
夏季 (2010-06 ~ 2010-08)	2.15	2.1 ± 1.9	4.7 ± 2.5	25.3 ± 14.6
秋季 (2010-09 ~ 2010-11)	1.71	4.9 ± 6.0	3.8 ± 2.4	47.5 ± 20.0
冬季 (2010-12 ~ 2011-02)	2.27	5.1 ± 3.9	6.7 ± 3.5	39.4 ± 14.3
春季 (2011-03 ~ 2011-05)	1.92	3.0 ± 2.1	4.2 ± 1.6	38.6 ± 15.5
全年 (2010-06 ~ 2011-05)	2.01	3.9 ± 4.2	4.7 ± 2.8	38.9 ± 18.1

SOC 占 OC 比例均为冬高夏低^[22], 上海的 SOC 季节变化特征更接近北方地区。

有研究显示细颗粒物中的 SOC 浓度与 O₃ 浓度呈显著相关^[30]。本研究中夏季 PM_{2.5} 中的 SOC 浓度

与采样期间臭氧小时浓度最大值具有较好的正相关性($R^2 = 0.5048$), 而在其余 3 个季节中未发现这一关系(图 1), 表明夏季光化学反应是 SOC 生成的重要途径, 而在其他季节可能存在其他的反应机制。

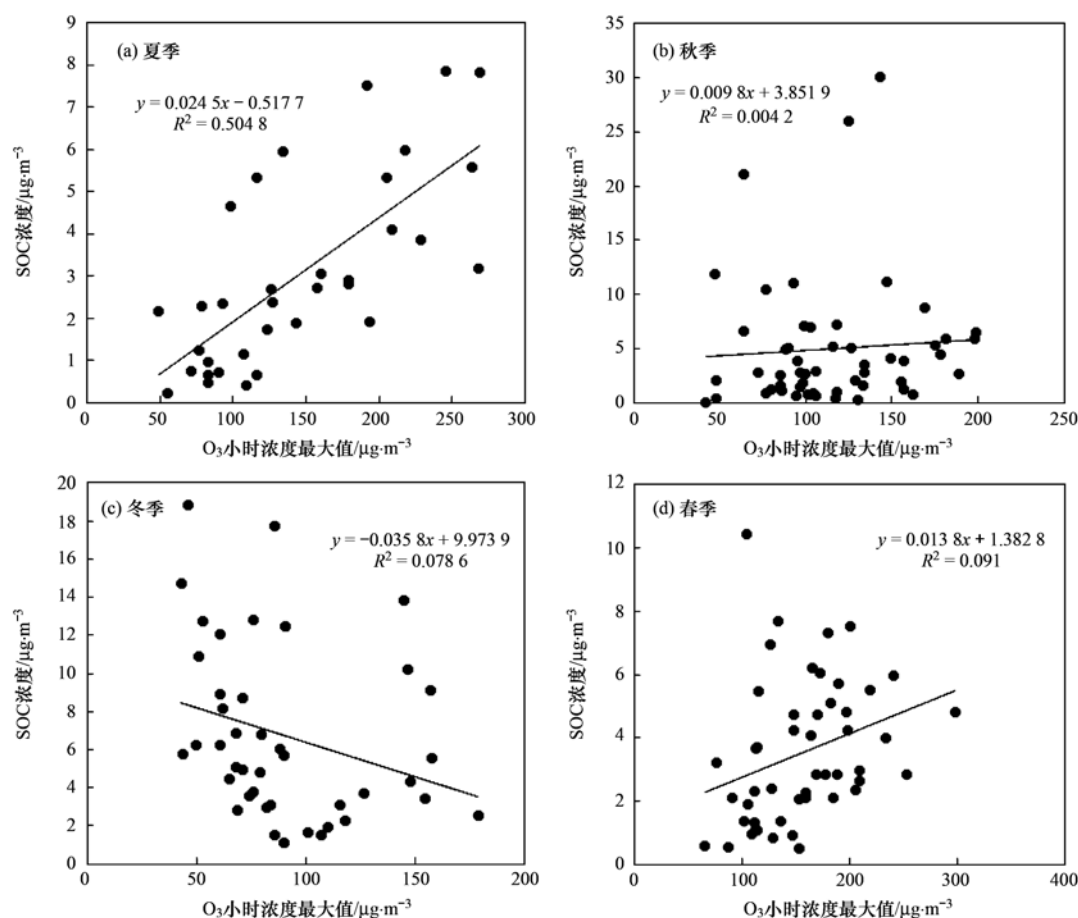


图 1 不同季节 SOC 浓度与 O₃ 最大小时浓度值线性拟合结果

Fig. 1 Linear regression of SOC concentrations and the maximum ozone hourly concentrations in different seasons

结合主导风向来看(图 2), 东南风向 SOC 浓度相对较低, 与上海东南面靠海有关, 海上洁净空气的稀释作用降低了气态前体污染物的浓度, 二次反应形成的 SOC 浓度也随之降低。西北偏北风向下 SOC 浓度均值最高, 达 $7.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 甚至高于静风条件下 SOC 浓度, 造成这一现象的原因是一方面西北风向带来的内陆气团中污染物经过长时间累积使 SOC 得以生成, 另一方面外来输送的上游地区存在不同于上海本地的 OC 和 EC 排放源。结合上海秋冬季节冷空气扩散频繁, 西北风向居多, 这也解释了上海秋冬季节 SOC 浓度较高的原因。

2.3 OC 和 EC 来源分析

OC 和 EC 之间的相关性在一定程度上反映了两者来源之间的关系。从图 3 可见, 4 个季节 PM_{2.5}

中 OC 和 EC 浓度相关性均较好(R^2 为 $0.65 \sim 0.87$), 表明 OC 和 EC 具有相似的来源。

热光反射法(TOR)在测定颗粒物中 OC 和 EC 含量的同时, 给出 8 个碳组分的相对含量, 即 OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2、EC3 和 OPC, 可用于进一步识别含碳气溶胶的来源。综合文献报道中的源谱测试结果^[17,31,32], 机动车尾气排放的细颗粒物中 OC2、OC3、OC4、OPC、EC1 和 EC2 含量丰富, 其中汽油车尾气中的 EC1 含量明显高于柴油车, 而柴油车尾气中含量较高的特征碳组分为 EC2 和 EC3; 燃煤排放的细颗粒物中 OC2 组分含量丰富; OC1 是生物质燃烧的特征排放组分; 此外, 因道路尘混合了沥青颗粒、轮胎碎屑及机动车尾气的影响, 其对细颗粒物中的 OC 和 EC 也有部分贡献, 测

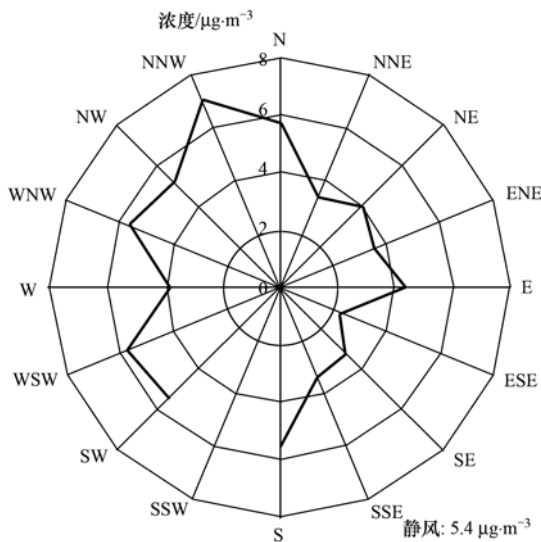


图2 不同主导风向下SOC平均浓度
Fig. 2 Average SOC concentrations in different wind directions

试结果显示道路尘中的OC3和OC4含量相对丰富。
应用数理统计软件(SPSS V17.0)对本研究中4个季节的PM_{2.5}样品中8个碳组分相对含量进行主

成分分析,提取特征值大于1的因子,并采用正交旋转使不同组分的因子载荷差异化便于进行因子识别,用于识别因子的特征组分因子载荷值均以下划线标出,具体结果列于表7中。机动车尾气、燃煤排放、生物质燃烧以及道路尘是上海城区PM_{2.5}中OC和EC的主要贡献源,这几个因子解释了PM_{2.5}中含碳组分的69.8%~81.4%。其中,机动车尾气的贡献相对高于其他几个源,生物质燃烧对含碳气溶胶的贡献约为15%~20%。春季和秋季易出现大风干燥天气,道路尘贡献上升。而冬季燃煤源的贡献明显高于其他季节,这主要是一方面冬季能源消耗有所增加,另一方面北方进入采暖期,大量民用燃煤排放的含碳气溶胶随着冷空气扩散至上海,两者共同作用使得冬季燃煤排放贡献最高。需要指出的是,因子分析对于含碳气溶胶来源的识别能力有限,且上海拥有众多的化工企业,排放的VOCs对于含碳气溶胶有贡献,同时餐饮作为含碳气溶胶的重要来源,目前对其研究和认识十分有限,因此需进一步分析细颗粒物中痕量有机示踪物,以达到精细化的定

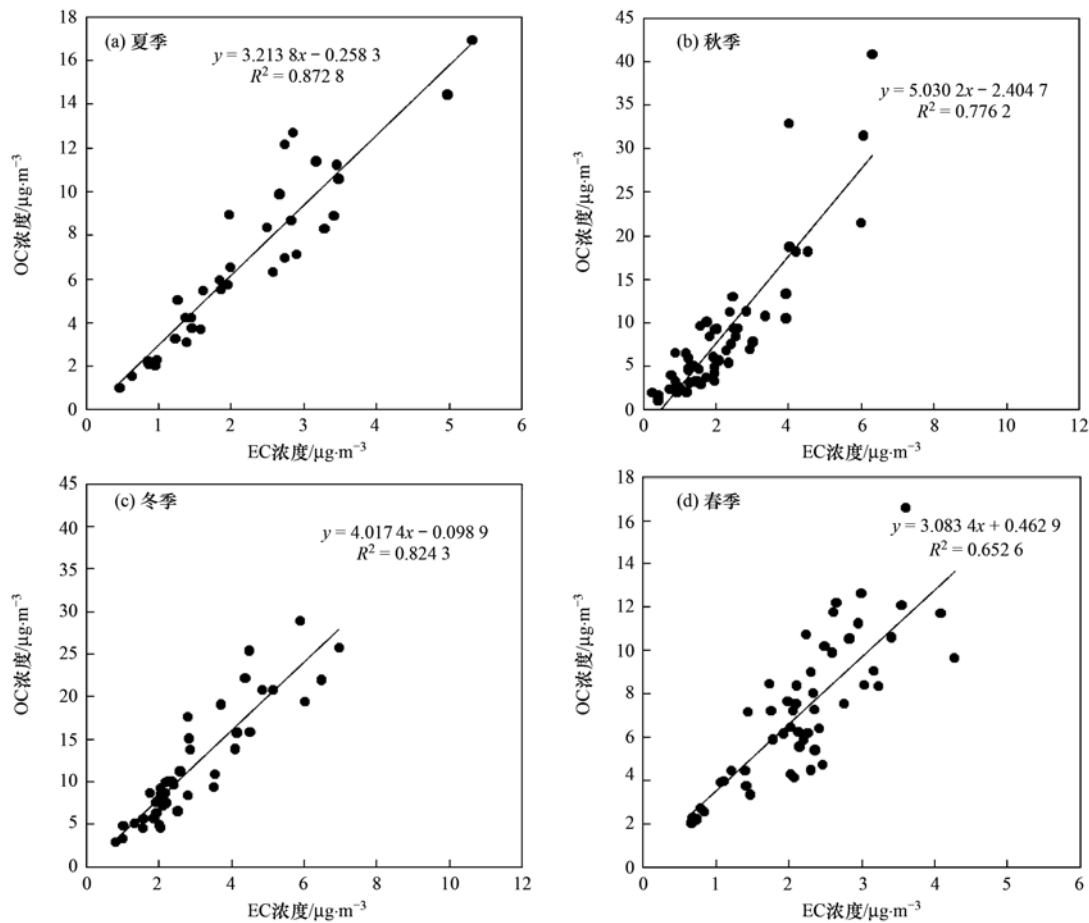


图3 不同季节PM_{2.5}中OC和EC相关性
Fig. 3 Relationship between OC and EC concentrations in PM_{2.5} in different seasons

表 7 4 个季节碳组分的主成分分析结果

Table 7 PCA results of carbonaceous components in different seasons

组分	冬季				春季			
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
OC1	0.059	-0.197	<u>0.844</u>	0.074	-0.030	-0.101	<u>0.904</u>	0.224
OC2	<u>0.891</u>	-0.131	0.209	-0.017	<u>0.797</u>	-0.074	-0.419	-0.051
OC3	-0.013	<u>0.480</u>	0.665	-0.132	<u>0.182</u>	0.135	0.072	<u>0.918</u>
OC4	-0.450	<u>0.118</u>	0.601	0.430	<u>0.821</u>	-0.008	0.386	<u>0.118</u>
EC1	-0.344	<u>0.749</u>	-0.129	-0.172	<u>0.534</u>	-0.011	0.179	-0.677
EC2	0.820	0.072	-0.373	<u>0.233</u>	-0.410	<u>0.822</u>	0.102	0.182
EC3	0.120	0.012	0.033	<u>0.926</u>	0.052	0.075	0.539	-0.204
OPC	0.156	<u>0.942</u>	0.090	0.230	<u>0.179</u>	<u>0.957</u>	-0.068	0.004
贡献率/%	28.0	20.9	19.9	12.6	26.5	19.8	18.4	15.1
特征值	2.238	1.674	1.593	1.007	2.121	1.583	1.473	1.209
来源	燃煤	汽油车	生物质燃烧	柴油车	汽油车	柴油车	生物质燃烧	道路尘

组分	夏季			秋季		
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3
OC1	0.020	-0.153	<u>0.881</u>	-0.442	-0.140	<u>0.639</u>
OC2	0.158	0.840	0.153	<u>0.769</u>	-0.116	0.152
OC3	<u>0.787</u>	-0.025	-0.296	0.108	<u>0.904</u>	-0.031
OC4	-0.077	0.280	0.404	-0.349	<u>0.643</u>	-0.370
EC1	<u>0.792</u>	0.241	0.442	0.158	0.675	0.490
EC2	<u>0.910</u>	-0.001	-0.022	<u>0.931</u>	0.001	-0.059
EC3	-0.025	0.866	-0.107	0.063	0.034	0.689
OPC	<u>0.941</u>	0.036	0.016	<u>0.844</u>	0.174	-0.153
贡献率/%	38.3	20.0	15.1	31.9	21.7	16.2
特征值	3.062	1.598	1.208	2.552	1.739	1.298
来源	机动车	燃煤	生物质燃烧	机动车 + 燃煤	道路尘	生物质燃烧

量源解析.

3 结论

(1)2010 年 6 月 ~ 2011 年 5 月期间,上海城区 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 平均浓度分别为 8.6 μg·m⁻³ ± 6.2 μg·m⁻³ 和 2.4 μg·m⁻³ ± 1.3 μg·m⁻³,两者之和占 PM_{2.5} 质量浓度的 20%. 观测期间 SOC 占 OC 比例为 38.9%, 二次生成是 PM_{2.5} 中 OC 的重要来源.

(2)夏季 OC 和 SOC 浓度均为四季中最低,且 SOC 与 O₃ 相关性较好,说明光化学反应是夏季 SOC 的重要生成途径. 秋冬季 SOC 浓度高且在 OC 中占比高,含碳气溶胶老化程度高,且主导西向风时 SOC 浓度偏高,甚至超过静风下浓度水平,表明秋冬季节存在含碳气溶胶的输送影响.

(3)机动车尾气、燃煤排放、生物质燃烧以及道路尘是上海城区 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的主要来源,可贡献 PM_{2.5} 中含碳组分的 69.8% ~ 81.4%. 其中机动车尾气贡献占主导,春季和秋季道路尘影响明显,冬季燃煤的贡献高于其他季节.

致谢:本研究在采样分析过程中得到了浦东新区环境监测站的支持,化学分析得到了环境保护部

华南环境科学研究所陈来国课题组的帮助,在此表示感谢.

参考文献:

[1] Dockery D W, Pope C A. Acute respiratory effects of particulate air pollution [J]. Annual Revision Public Health, 1994, **15** (1): 107-132.

[2] Jimenez J L, Canagaratna M R, Donahue N M, *et al.* Evolution of organic aerosols in the atmosphere [J]. Science, 2009, **326** (5959): 1525-1529.

[3] Pandis S N, Harley R A, Cass G R, *et al.* Secondary organic aerosol formation and transport [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1992, **26**(13): 2269-2282.

[4] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantification of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. Atmospheric Environment, 1995, **29**(23): 3527-3544.

[5] Chan Y C, Simpson R W, McTainsh G H, *et al.* Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression techniques [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(19): 3237-3250.

[6] Kirkevåga A, Iversen T, Dahlback A. On radiative effects of black carbon and sulphate aerosols [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(17): 2621-2635.

[7] 迟旭光, 段凤魁, 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.
- [8] Duan J C, Tan J H, Wang S L, *et al.* Roadside, urban, and rural comparison of size distribution characteristics of PAHs and carbonaceous components of Beijing, China [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2012, **69**(4): 337-349.
- [9] Li W F, Bai Z P. Characteristics of organic and elemental carbon in atmospheric fine particles in Tianjin, China [J]. *Particuology*, 2009, **7**(6): 432-437.
- [10] 郭育红, 辛金元, 王跃思, 等. 唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2497-2504.
- [11] 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.
- [12] 王广华, 位楠楠, 刘卫, 等. 上海市大气颗粒物中有机碳(OC)与元素碳(EC)的粒径分布[J]. *环境科学*, 2010, **5**(9): 1993-2001.
- [13] 张予燕, 俞美香, 任兰, 等. 南京大气细颗粒中有机碳与元素碳污染特征[J]. *环境监测管理与技术*, 2012, **24**(4): 30-32.
- [14] 刘刚, 张旭贤, 滕卫林, 等. 杭州市大气 PM_{2.5} 中有机碳元素碳的同位素组成[J]. *科学通报*, 2007, **52**(16): 1935-1937.
- [15] 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): 1451-1460.
- [16] Duan J C, Tan J H, Cheng D X, *et al.* Sources and characteristics of carbonaceous aerosol in two largest cities in Pearl River Delta Region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(14): 2895-2903.
- [17] Cao J J, Wu F, Chow J 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.
- [18] 李礼, 余家燕. 重庆城区空气中有机碳和元素碳浓度水平的监测分析[J]. *三峡环境与生态*, 2012, **34**(2): 41-43, 59.
- [19] Chow J C, Watson J G, Pritchett L C, *et al.* The dri thermal/optical reflectance carbon analysis system: description, evaluation and applications in U. S. air quality studies [J]. *Atmospheric Environment*, 1993, **27A**(8): 1185-1201.
- [20] 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.
- [21] 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*, **30**(8): 1015-1020.
- [22] Zhao P S, Dong F, Yang Y D, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 389-398.
- [23] 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.
- [24] So K L, Guo H, Li Y S. Long-term variation of PM_{2.5} levels and composition at rural, urban, and roadside sites in Hong Kong: increasing impact of regional air pollution [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(40): 9427-9434.
- [25] Viana M, Maenhaut W, ten 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.
- [26] Lonati G, Ozgen S, Giugliano M. Primary and secondary carbonaceous species in PM_{2.5} samples in Milan (Italy) [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(22): 4599-4610.
- [27] Xie M J, Coons T L, Dutton S J, *et al.* Intra-urban spatial variability of PM_{2.5}-bound carbonaceous components [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **60**: 486-494.
- [28] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(12): 2079-2112.
- [29] 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.
- [30] 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 O₃ 和气象条件的关联[J]. *环境科学学报*, 2010, **42**(10): 1942-1949.
- [31] Watson J G, Chow J C, Lowenthal D H, *et al.* Differences in the carbon composition of source profiles for diesel-and gasoline-powered vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(15): 2493-2505.
- [32] 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*, 2004, **54**(2): 185-208.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i> (3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i> (3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i> (3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i> (3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i> (3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i> (3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i> (3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i> (3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i> (3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i> (3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i> (3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i> (3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i> (3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i> (3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i> (3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i> (3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i> (3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i> (3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i> (3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i> (3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i> (3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i> (3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i> (3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i> (3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i> (3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i> (3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i> (3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i> (3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i> (3632)

《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9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 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

国内外公开发行人