

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第7期

Vol.35 No.7

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

区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究 张小玲,夏祥鳌,车慧正,汤洁,唐宜西,孟伟,董璠 (2439)

北京上甸子区域大气本底站甲基氯仿在线观测研究 姚波,周凌晔,刘钊,张根,夏玲君 (2449)

浙江临安大气本底站 CO 浓度及变化特征 方双喜,周凌晔,栾天,马千里,王红阳 (2454)

南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征 段卿,安俊琳,王红磊,缪青 (2460)

西安冬季非灰霾天与灰霾天 PM_{2.5} 中水溶性有机氮污染特征比较 程玉婷,王格慧,孙涛,成春雷,孟静静,任艳芹,李建军 (2468)

沙尘天气对兰州市 PM₁₀ 中主要水溶性离子的影响 王芳,陈强,张文煜,郭勇涛,赵连彪 (2477)

上海大气降水中细菌气溶胶的多样性研究 梁宗敏,杜睿,杜鹏瑞,王亚玲,李梓铭 (2483)

重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量 彭玉龙,王永敏,覃蔡清,王定勇 (2490)

宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析 李璇,王雪松,刘中,吴梁,翁燕波,胡杰 (2497)

包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选 王海林,王俊慧,祝春蕾,聂磊,郝郑平 (2503)

氨水混合吸收剂脱除 CO₂ 实验研究 夏芝香,项群扬,周旭萍,方梦祥 (2508)

焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究 孙鹏程,李晓璐,成钢,陆勇,吴昌敏,罗锦洪 (2515)

2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源 邢建伟,钱薇微,绳秀珍 (2520)

千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异 王明珠,张运林,施坤,高贲,刘刚,蒋浩 (2528)

千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析 殷燕,吴志旭,刘明亮,何剑波,虞左明 (2539)

太湖夏季水体中尿素的来源探析 韩晓霞,朱广伟,许海,Steven W. Wilhelm,秦伯强,李兆富 (2547)

鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征:以军山湖为例 刘霞,钱奎梅,谭国良,邢久生,李梅,陈宇炜 (2557)

不同营养湖泊沉积物中²¹⁰Pb_{ex}和营养盐垂向分布特征及相关性分析 王小雷,杨浩,顾祝军,张明礼 (2565)

地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究 姜烈,何江涛,姜永海,刘菲 (2572)

预压力混凝沉淀除藻工艺中 DOC 变化规律研究 陈雯婧,丛海兵,徐亚军,王巍,蒋新跃,刘玉娇 (2579)

类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附 王红宇,刘艳 (2585)

粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学 孙德帅,郑强强,张晓东,方龙 (2590)

SDS 对两性修饰膨润土吸附 Cd²⁺ 的影响 王建涛,孟昭福,杨亚提,杨淑英,李彬,马麟莉,许绍娥 (2596)

老化的生物质炭性质变化及对非吸持的影响 唐伟,郭悦,吴景贵,黄兆琴,代静玉 (2604)

TiO₂ 光催化降解 PFOA 的反应动力学及机制研究 李明洁,喻泽斌,陈颖,王莉,刘晴,刘钰鑫,何丽丽 (2612)

荧光猝灭法研究洛克沙肿与腐殖酸的相互作用 朱江鹏,梅婷,彭云,葛思怡,李时银,王国祥 (2620)

改性活性炭纤维电芬顿降解苯酚废水性能研究 马楠,田耀金,杨广平,谢鑫源 (2627)

催化铁强化低碳废水生物反硝化过程的探讨 王梦月,马鲁梅 (2633)

聚丁二酸丁二醇酯(PBS)为反硝化固体碳源的脱氮特性研究 刘佳,沈志强,周岳溪,曹蓉,李元志 (2639)

某造纸厂废水中二噁英含量及其电子束辐照降解 青亮,黄锦琼,余小巍,张素坤,杨艳艳,任明忠,温玉龙 (2645)

嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究 卫丹,万梅,刘锐,王根荣,张汛达,文晓刚,赵远,陈吕军 (2650)

提高污泥碱性发酵挥发酸积累的新方法 李晓玲,彭永臻,柴同志,朱建平,王淑莹 (2658)

滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价 郭雪,毕春娟,陈振楼,王薛平 (2664)

舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征 江敏,Le Huy Tuan,梅卫平,阮慧慧,吴昊 (2672)

青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析 谢婷,张淑娟,杨瑞强 (2680)

福建鹭峰山脉土壤有机氯农药分布特征及健康风险评估 黄焕芳,祁士华,瞿程凯,李绘,陈文文,张莉,胡婷,石燎 (2691)

不同功能区表层土壤中全氟化合物污染指纹及其来源解析 张鸿,赵亮,何龙,柴之芳,沈金灿,杨波 (2698)

桑沟湾溶解态无机砷的分布、季节变化及影响因素 李磊,任景玲,刘素美,蒋增杰,杜金洲,方建光 (2705)

引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价:以银川市兴庆区为例 王幼奇,白一茹,王建宇 (2714)

三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征 李楚娴,孙荣国,王定勇,赵铮,张金洋,马明,张成 (2721)

广东典型海水养殖区沉积物及鱼体中磺胺类药物的残留及其对人体的健康风险评估 何秀婷,王奇,聂湘平,杨永涛,程章 (2728)

青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价 张春荣,吴正龙,姚春卉,高宗军 (2736)

焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评估研究 伯鑫,王刚,温柔,赵春丽,吴铁,李时蓓 (2742)

Cd、Cu 和 Pb 复合污染对蚯蚓抗氧化酶活性的影响 王辉,谢鑫源 (2748)

3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应 李雅洁,崔益斌,蒋丽娟,窦静,李梅 (2755)

施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究 陈喆,铁柏清,雷鸣,刘孝利,叶长城,罗梅梅,毛懿德 (2762)

保护性耕作对后茬冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响 潘莹,胡正华,吴杨周,孙银银,盛露,陈书涛,肖启涛 (2771)

渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系 贾曼莉,郭宏,李会科 (2777)

蒸汽-空气混合注射修复 TCE 污染的二维土箱实验研究 王宁,彭胜,陈家军 (2785)

铜离子对双室微生物燃料电池电能输出的影响研究 牟姝君,李秀芬,任月萍,王新华 (2791)

连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征 赵晨阳,魏源送,葛振,钟佳,才兴,张媛丽,李洪枚 (2798)

冬季猪粪固体堆放过程中 NH₃、N₂O 和 NO 排放特征研究 丁钢强,韩圣慧,袁玉玲,罗琳,王立刚,李虎,李萍 (2807)

填埋场渗滤液腐殖酸随填埋龄的变化特性及模型研究 黄友福,许心雅,范良鑫,方艺民 (2816)

渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究 王东梅,刘丹,刘庆梅,陶丽霞,刘颖 (2822)

中国铅流变化的定量分析 马兰,毛建素 (2829)

半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展 赵志瑞,侯彦林 (2834)

《环境科学》征稿简则(2679) 《环境科学》征订启事(2735) 信息(2476,2556,2713,2770)

南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征

段卿, 安俊琳*, 王红磊, 缪青

(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044)

摘要: 采用 DRI Model 2001A 热/光碳分析仪对 2013 年 5~7 月期间南京北郊大气气溶胶 9 级惯性撞击式分级 Andersen 采样器膜采样样品中有机碳(OC)和元素碳(EC)的质量浓度进行了分析. 结果表明, 南京北郊夏季 EC、OC 的平均浓度, 在 PM_{2.1} (空气动力学直径≤2.1 μm)中分别为(2.6±1.1) μg·m⁻³、(13.0±5.2) μg·m⁻³, 在 PM_{9.0} (空气动力学直径≤9.0 μm)中, 分别为(3.4±1.7) μg·m⁻³、(20.3±7.3) μg·m⁻³. EC 主要富集在超细颗粒物中, OC 主要存在于细颗粒物中, EC 的 PM_{1.1}/PM_{9.0} 比值和 OC 的 PM_{2.1}/PM_{9.0} 比值分别为 0.62 和 0.64. EC 和 OC 浓度的平均最高值都出现在≤0.43 μm 粒径段中, 分别占 PM_{9.0} 中的总元素碳的 33.4% 和总有机碳的 21.1%. 南京北郊夏季 PM_{1.1}、PM_{2.1} 和 PM_{9.0} 中 EC、OC 的相关性较好, 说明存在共同的一次污染源. 通过 OC/EC 特征物比值的方法得到南京夏季碳质颗粒物的主要来源有机车尾气排放、燃煤排放和地面扬尘排放.

关键词: 有机碳; 元素碳; 二次有机碳; 浓度分布; 粒径分布

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)07-2460-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.07.004

Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Nanjing Northern Suburb in Summer

DUAN Qing, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, MIAO Qing

(Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To understand organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) mass concentration, the particles samples were collected by an Andersen cascade impactor and analyzed with the DRI analyzer in Nanjing northern suburb during May to July in 2013. The results showed that the average mass concentrations of EC and OC in PM_{2.1} were (2.6±1.1) μg·m⁻³, (13.0±5.2) μg·m⁻³ and (3.4±1.7) μg·m⁻³, (20.3±7.3) μg·m⁻³ in PM_{9.0}, respectively. EC was mainly enriched in ultrafine particles, and OC was mainly in fine particles. The ratios of PM_{1.1}(EC)/PM_{9.0}(EC) and PM_{2.1}(OC)/PM_{9.0}(OC) were 0.62 and 0.64, respectively. The average peak of concentration of both EC and OC appeared in 0.43 μm, accounting for 33.4% of TEC and 21.1% of TOC. EC and OC in PM_{1.1}, PM_{2.1} and PM_{9.0} had a good relation during the summer in Nanjing northern suburb, suggesting that they shared the same source. Ratios of OC and EC indicated that the main origins of carbonaceous particles were attributed to automobile exhaust fumes, coal combustion and road dust.

Key words: organic carbon; elemental carbon; secondary organic carbon; concentration distribution; size distribution

碳质气溶胶包括有机碳(organic carbon, OC)、元素碳(elemental carbon, EC)和无机碳(inorganic carbon, IC),对空气质量、能见度和气候变化都有重要的影响. OC 主要来自污染源直接排放的一次有机碳(primary organic carbon, POC)和由挥发性碳氢化合物经过光化学反应形成的二次有机碳(secondary organic carbon, SOC). 有机碳中的多环芳烃、正构烷烃、有机酸、羰基化合物(醛类、酮类)及杂环化合物等均为有毒物质^[1],部分甚至具有较强的致癌性. 此外,部分可溶性有机碳还会对气溶胶与云的相互作用有重要的影响^[2]. EC 也称为黑碳,主要来自化石燃料和生物质的不完全燃烧,据估计全球每年可产生 50~200 Tg 的 EC,其中 80% 以上来自生物质燃烧^[3]. Masiello^[4] 研究表明

EC 由于其生物化学惰性和热稳定性,因此具有极长的环境周期,可对海洋碳循环、土壤碳库储量、地球辐射热量平衡及人类健康都有着重要的影响. 研究证实,EC 的直接辐射强迫的主导因子是 CH₄, 目前已成为仅次于 CO₂ 的全球变暖增温组分^[5].

近年来国内众多城市已经针对有机碳和元素碳的观测、分析及源解析开展了一系列的研究. 段凤魁等^[1]得到了北京碳质气溶胶的污染特征及北京城区与背景点的 OC 季节变化特征,并对麦收季节

收稿日期: 2013-12-18; 修订日期: 2014-02-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41305135); 中国科学院战略先导科技专项(B类)(XDB05020206)

作者简介: 段卿(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气环境. E-mail: duanqing_dq@163.com

* 通讯联系人, E-mail: junlinan@nuist.edu.cn

生物质燃烧对 OC 的贡献作了初步估算,同时确定了碳质组分排放清单及二次有机碳的形成机制也是有待解决的难点^[6,7]. Cao 等^[8,9]得到了珠江三角洲(香港、广州、深圳和珠海)碳质颗粒物的污染特征,认为受夏季天气条件和东亚季风的影响,夏季碳质气溶胶的浓度低于冬季,同时 OC 和 EC 具有很强的相关性,其主要是一次污染源排放,如机动车尾气排放. 上海^[10]、厦门^[11]、泉州^[12]等地的研究表明, EC 和 OC 主要富集在颗粒物的细粒径段中,且碳质颗粒物的浓度低于北方主要城市如北京,也低于南方经济高速发展的城市.

长江三角洲地区是我国经济发展最快的地区之一,随着城市化、工业化迅猛发展,机动车保有量、工业废气和建筑工地扬尘等各种人为源的排放不断增多,大气气溶胶污染逐年增加. 南京作为该地区的典型代表,是国家综合交通枢纽,长三角辐射带动中西部地区发展的重要门户城市. 国内学者对南京地区的大气污染进行了大量研究表明,近年来其年和四季能见度呈明显下降趋势,且霾日数呈急剧上升趋势^[13,14]. 气溶胶单次散射反照率的增大与吸收性、散射性气溶胶有关^[15]. EC、OC 分别为重要的吸收性和散射性气溶胶,通过颗粒物的吸收作用可造成能见度下降 20%,颗粒物的散射作用大约占消光系数的 70%^[16]. 可见,对碳质颗粒物的深入研究极具意义,但至今南京地区碳质颗粒物观测的研究较少. 本研究运用 2013 年 5~7 月南京北郊大气中碳质颗粒物的观测结果,分析了南京夏季 OC、EC 的污染特征,同时对南京夏季碳质颗粒物的来源进行了初步探讨,以期对南京地区碳质颗粒物的控制提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样地点

采样点设在南京北郊南京信息工程大学气象楼顶(距地约 40 m)位于 32°207'N, 118°717'E, 平均海拔 62 m, 南京北郊有扬子石化、南化集团、南钢集团等化工、钢铁、能源企业,这些企业在生产作业过程都会向空气中大量排放气溶胶颗粒物,严重地影响南京北郊的空气质量,同时距采样点附近有宁六路,汽车尾气的排放加重空气污染. 因此,此次观测能够作为南京北郊污染地区的代表.

1.2 实验仪器、时间及分析方法

采用 9 级撞击式采样器(Anderson, 美国), 采样流量为 28.3 L·min⁻¹, 粒径范围分别为 ≤ 0.43、

0.43~0.65、0.65~1.1、1.1~2.1、2.1~3.3、3.3~4.7、4.7~5.8、5.8~9.0 和 >9.0 μm. 使用石英滤膜采集样品,使用前在马弗炉中以 800℃ 焙烧 5 h, 冷却后放入恒温恒湿箱中平衡 24h, 用 1/100 000 的精密电子天平称重后放入冰箱中低温保存. 采样时间为 2013 年 5 月 18 日~7 月 17 日(其中 6 月 16~18 日缺测), 每天采集样品一次, 每个样品连续采集 23 h. 采样结束称重后同样将样品低温保存在冰箱中直至分析. 采用美国沙漠所研制的 Model 2001A 热/光碳分析仪对样品中的 EC、OC 的浓度进行测定, 在热光炉中, 先通入氦气, 在无氧的情况下升温, 逐步加热所采集样品, 使样品中有机碳(OC1、OC2、OC3 和 OC4)挥发, 之后再通 2% 氧/98% 氦混合气, 在有氧的情况下继续加热, 使得样品中的元素碳(EC1、EC2 和 EC3)燃烧. 释放出的有机物经 MnO₂ 催化氧化转化生成 CO₂, 再在还原炉中被还原成甲烷(CH₄), 最后由火焰离子化检测器(FID)定量检测. 无氧加热时的焦化效应可使部分有机碳转变为裂解碳, 因此, 采用 633 nm 的 He-Ne 激光全程检测滤纸, 监测加热升温过程中反射光强的变化, 以初始光强作为指示, 准确确定有机碳和元素碳的区分点. 同时, 本次实验还使用了自动气象站记录地全天候连续观测的主要气象要素资料, 其采样间隔为 1 h, 本研究采用 24 h 平均值, 并剔除明显的异常值.

1.3 质量控制

样品分析开始、结束和每 15 个样品间都采用 He/CH₄ 标准气体对仪器进行校准, 确保初始和最终 FID 信号漂移在 ±3 以内、校准峰面积相对偏差在 5% 以内. 实验开始前, 对仪器检漏, 5 s 内样品炉的压力不变即为不漏气. 分析样品前, 高温烘烤并做仪器空白确保已除去所残留的杂质. 为保证数据精确可靠, 对每套样品的空白膜进行分析, 且每 10 个样品随机抽取一个进行平行分析, 前后误差在 10% 内可再进行后续样品分析.

2 结果与讨论

2.1 OC、EC 浓度谱分布及粒径分布

图 1 为南京北郊夏季采样期间的日降水量和风速及采用安德森九级采样器得到的各粒径段中的 EC 和 OC 的质量浓度累积分布. 从中可以发现, 观测期间, PM_{9.0} 中, OC 的平均值为 20.3 μg·m⁻³, 最大值为 37.2 μg·m⁻³, 最小值为 7.3 μg·m⁻³, EC 的平均值为 3.4 μg·m⁻³, 最大值为 9.7 μg·m⁻³, 最小

值为 $0.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 观测期间, 出现几次强降水过程, 对应的 EC、OC 的浓度均有下降, 降水过程对碳质颗粒物有一定的清除作用. 在无降水过程中, 风

速较大时, 有利于碳质颗粒物的扩散, EC、OC 的浓度有一定的下降; 在风速较小时, 不利于碳质颗粒物的扩散, EC、OC 的浓度相对较高.

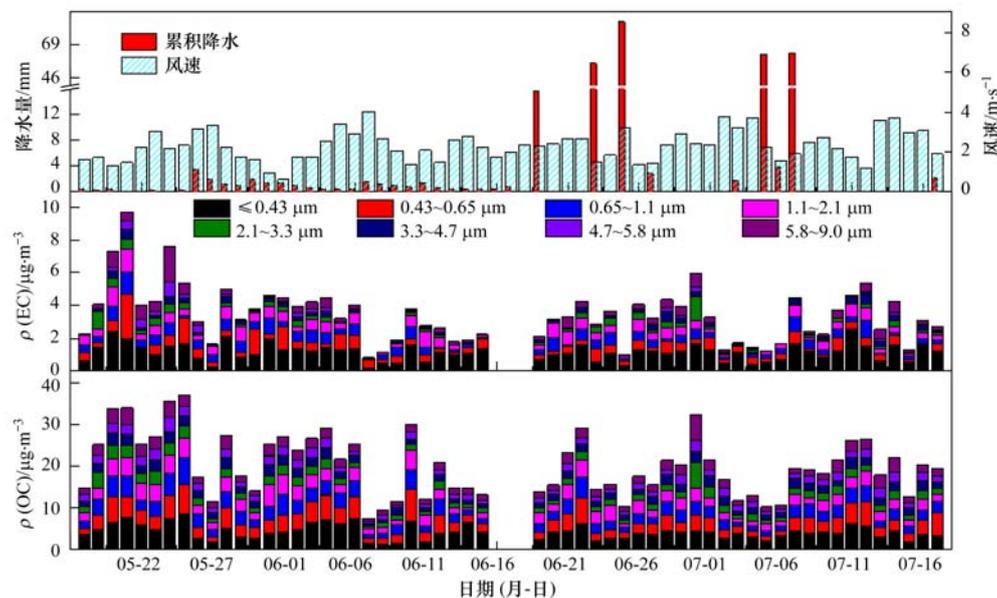


图1 采样期间风速和降水量分布及 EC 和 OC 质量浓度累积分布示意

Fig. 1 Wind velocity, precipitation, elemental and organic carbon during the sampling period

表 1 为在 $\text{PM}_{9.0}$ 中 OC、EC、SOC 的浓度与温度、湿度及风速的皮尔森相关系数. 其中, SOC 值由 Turpin 等提出的计算公式得出, 具体过程在 2.3 节说明. 夏季南京受副热带高压控制, 且易受台风外围影响, 从东面带来的清洁气团有助于 OC、EC 的扩散消除, 因此, 风速对 OC、EC 的质量浓度影响较大. 从表 1 中可以得出, 南京北郊夏季 OC、EC 与

风速呈显著的负相关. SOC 与温度呈正相关, 温度越高, 越有利于 SOC 的生成, 这与在光照充足且温度较高的条件下发生光化学反应形成 SOC 的特性相一致. 而 EC 与温度和湿度呈负相关, 由于 EC 是属于吸收性气溶胶, 黑碳气溶胶的尺度分布呈积聚模态, 可以作为云凝结核^[17], 湿度较大, 有利于 EC 的湿清除.

表 1 $\text{PM}_{9.0}$ 中 OC、EC、SOC 的浓度与温度、湿度、风速的相关性¹⁾

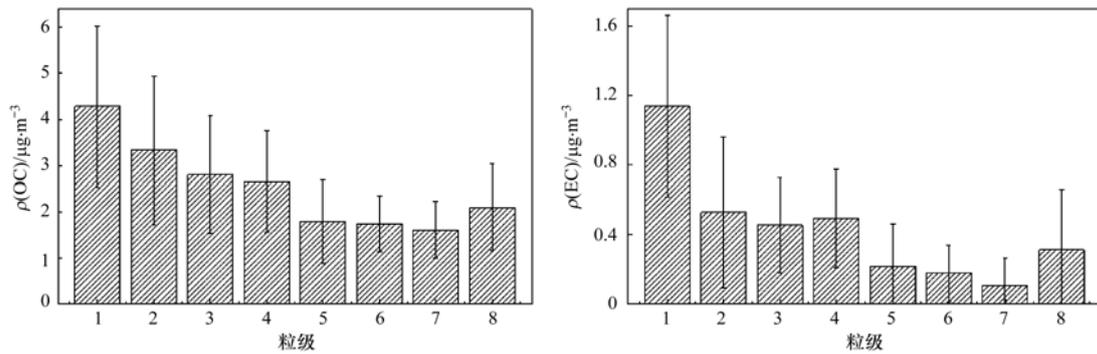
Table 1 Correlation among OC, EC, SOC, temperature, humidity and wind velocity in $\text{PM}_{9.0}$

	OC	EC	SOC	温度	湿度	风速
OC	1					
EC	0.867 **	1				
SOC	0.540 **	0.050	1			
温度	0.171	-0.050	0.265 *	1		
湿度	-0.445 **	-0.260 *	-0.466 **	-0.645 **	1	
风速	-0.318 *	-0.445 **	-0.123	0.357 **	-0.255	1

1) ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关; * 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关

本研究将空气动力学直径 $\leq 1.1 \mu\text{m}$ 的颗粒物定义为超细粒子, $\leq 2.1 \mu\text{m}$ 的颗粒物定义为细粒子, $> 2.1 \mu\text{m}$ 的定义为粗粒子. $\text{PM}_{1.1}$ 、 $\text{PM}_{2.1}$ 和 $\text{PM}_{9.0}$ 中的 OC 浓度为 (10.4 ± 4.3) 、 (13.0 ± 5.2) 和 $(20.3 \pm 7.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; EC 浓度分别为 (2.1 ± 0.9) 、 (2.6 ± 1.1) 和 $(3.4 \pm 1.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. OC 的 $\text{PM}_{1.1}/\text{PM}_{2.1}$ 、 $\text{PM}_{1.1}/\text{PM}_{9.0}$ 和 $\text{PM}_{2.1}/\text{PM}_{9.0}$ 分别为 80%、51% 和

64%, EC 的 $\text{PM}_{1.1}/\text{PM}_{2.1}$ 、 $\text{PM}_{1.1}/\text{PM}_{9.0}$ 和 $\text{PM}_{2.1}/\text{PM}_{9.0}$ 分别为 81%、62% 和 76%. 从图 2 可以看出 OC 的浓度在 $\leq 0.43 \mu\text{m}$ 和 $> 0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$ 粒径段中的平均值较大, 占 $\text{PM}_{9.0}$ 的 37.5%, EC 的浓度在 $\leq 0.43 \mu\text{m}$ 粒径段中的平均值最高, 占 $\text{PM}_{9.0}$ 的 33.4%, 可见南京北郊夏季大气颗粒物中的 OC 主要存在于细颗粒物中, EC 主要富集在超细粒子中.



粒径为 1: $\leq 0.43 \mu\text{m}$; 2: $>0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$; 3: $>0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$; 4: $>1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$;

5: $>2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$; 6: $>3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$; 7: $>4.7 \sim 5.8 \mu\text{m}$; 8: $>5.8 \sim 9.0 \mu\text{m}$

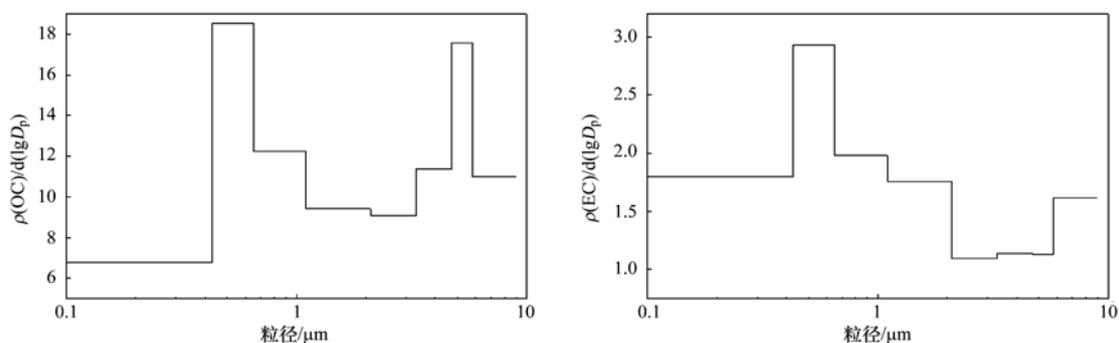
图 2 不同粒径颗粒物中 OC 和 EC 的浓度分布

Fig. 2 Mass concentrations of OC and EC on atmospheric particulates with various diameters

图 3 为南京北郊夏季大气碳质颗粒物质量浓度在 $\leq 9.0 \mu\text{m}$ 以下不同粒径段的分布特征. 从中可以看出, EC、OC 的粒径分布都呈双峰型. SOC 一般认为是由挥发性有机物被大气中的臭氧以及 NO_3 、 $\cdot\text{OH}$ 等自由基氧化而形成的, 并主要以细颗粒形式存在, POC 主要是来自各种燃烧过程的直接排放, 多以细颗粒形式存在^[1]. 同时, 某些工业活动等其他非燃烧过程排放的一次有机气溶胶主要是粗颗粒模态^[18]. OC 细粒子的峰值位于 $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$, 粗粒子的峰值位于 $4.7 \sim 5.8 \mu\text{m}$, 细粒子的峰值略大于粗粒子峰值, 这种粗、细粒子峰值大小相似的双峰型分布反映了环境大气中可能存在 OC 的不同来源. 采样点周边的燃烧源及机动车尾气排放等可能是细粒径段中的 OC 来源, 而粗粒径段的来源可能是在传输过程中部分可溶性 OC 其亲水性有助于吸湿增长为大粒径颗粒物, 及周边非燃烧工业活动过程中产生的 POC.

EC 细粒子的峰值位于 $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$, 粗粒子的峰值位于 $5.8 \sim 9.0 \mu\text{m}$, 细粒子的峰值明显高于

粗粒子峰值, 由于 EC 主要是含碳物质不完全燃烧所产生的, 燃烧源所产生的颗粒对大粒径粒子贡献较小^[19]. 南京北郊夏季细粒子的 EC 可能来源于学校周边煤炭燃烧、机动车尾气排放等. 由于南京北郊大气存在一定的污染, 刚刚生成的 EC 可迅速老化^[20], 导致 EC 表面形成有机物/硫酸涂层, 其具有较好的亲水性^[21], 同时南京夏季湿度较大, 因此在传输过程中, 细粒径的 EC 易发生颗粒物混合及吸湿增长为粗粒径粒子. EC 粗粒子的来源还可能是采样点周边地铁施工导致土壤尘埃的再悬浮及公路上车辆轮胎及其他机械摩擦等贡献^[22]. 同时, EC 和 OC 的细粒子的峰值都为 $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$, 存在部分相同的一次污染来源. 表 2 给出了 2013 年夏季南京北郊平均碳质气溶胶与国内其他城市的对比情况, 从中可以看出, 南京大气中 OC 平均浓度处于中上水平, 而 EC 平均浓度处于中等偏下水平. 对于 2011 年夏季南京浦口区^[23]测得的 EC、OC 含量有所增大, 说明随着南京北郊经济发展, 国道车辆的增多, 同时采样点周边修建地铁作业可能导致南京北



$d(\lg D_p)$ 为粒径段粒径范围值的对数之差, 即 $\lg D_{p,\max} - \lg D_{p,\min}$

图 3 OC 和 EC 的粒径分布

Fig. 3 Log-normal size distribution of OC and EC

郊污染加重,除了燃煤排放,机动车尾气排放及某些非燃烧工业活动对 EC、OC 有一定的贡献. 对于 9 月西安^[24], 秸秆燃烧是一个比重较大的污染源, 相比而言, 南京北郊夏季, 秸秆燃烧并不是主要的污染

源. 而对于大气本底监测站北京上甸子^[19]、代表了城区居住及商业交通混合的上海徐家汇^[25]、香港^[26], 南京北郊的 OC 平均浓度约为这些城市的 2 倍.

表 2 国内城市大气碳质颗粒物中的 OC、EC 浓度特征

Table 2 Concentration characteristics of OC and EC for different cities

采样地点	采样时间	分析方法	OC / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	EC / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	OC/EC /%	粒径范围
本研究	2013-05 ~ 07(夏)	TOR DRI	13.0 ± 5.2	2.6 ± 1.1	5.2 ± 1.3	PM _{2.1}
南京鼓楼区 ^[23]	2011-07(夏)	TOR DRI	11.41 ± 4.67	2.17 ± 1.04	5.74 ± 2.06	PM _{2.1}
南京浦口区 ^[23]	2011-07(夏)	TOR DRI	9.53 ± 5.46	1.77 ± 1.07	5.86 ± 2.28	PM _{2.1}
北京上甸子 ^[19]	2004-07(夏)	TOT SUNSET	5.07 ± 2.66	1.26 ± 0.66	4.0	PM _{2.1}
西安 ^[24]	2003-09 秋	TOR DRI	24.9 ± 10.3	8.3 ± 4.5	3.3	PM _{2.5}
上海徐家汇 ^[25]	2008-07(夏)	TOR DRI	5.53 ± 2.47	3.41 ± 1.33	1.62	PM _{2.5}
香港 ^[26]	2001-07 ~ 08(夏)	TOR DRI	5.9 ± 3.8	3.6 ± 2.1	2.3	PM _{2.5}
广州珠海区 ^[27]	2002-06 ~ 07(夏)	TOR DRI	13.10 ± 3.00	4.80 ± 0.96	2.8	PM _{2.5}
天津 ^[28]	2008(夏)	TOR DRI	10.2	5.5	1.8	PM _{2.5}
厦门思明区 ^[11]	2009(夏)	TOT SUNSET	9.90 ± 0.67	2.34 ± 0.52	4.4 ± 1.4	PM _{2.5}

2.2 OC 和 EC 来源分析

Turpin 等^[29]认为,通过研究 OC 和 EC 的相关性,可以区分碳质气溶胶的来源. 如果 EC 和 OC 的相关性较好,表明其存在相似或者一致的污染源. 图 4 为南京北郊夏季 PM_{1.1}、PM_{2.1} 和 PM_{9.0} 中 EC、OC 的相关性. 从中可知,PM_{1.1}、PM_{2.1} 和 PM_{9.0} 中 EC 和 OC 的相关性较好, R^2 分别为 0.54、0.58 和

0.75, 表明其具有共同的一次来源,而在超细粒径段中, R^2 最低,相比细粒径段和粗粒径段中的 EC 和 OC 来源相对更为复杂.

OC、EC 的比值对分析污染源及气候辐射强迫有一定的科学意义. EC 是在燃烧过程直接排放的产物, OC 包括一次排放的 POC 及经过大气化学反应产生的 SOC, 根据实际样品中 OC、EC 的比值可以估计有多少的二次有机碳的产生; 另一方面, OC 与 EC 比值在气候辐射强迫研究中有重要意义, 大气中碳气溶胶是加热还是冷却大气依赖于气溶胶的单个散射反照率 SSA (single scattering albedo), 而 SSA 反映了气溶胶对光(辐射)的散射和吸收的相对大小, 它的数值与气溶胶中所含的具有光吸收性的 EC 和具有光散射性的 OC 的相对量有关^[30].

OC 和 EC 的比值常用来分析碳质颗粒物的来源: OC 和 EC 的比值为 1.0 ~ 4.2 表明有柴油和汽油车的尾气排放^[31,32], 比值为 16.8 ~ 40.0 表明生物质燃烧排放^[33], 2.5 ~ 10.5 表明燃煤排放^[34], 32.9 ~ 81.6 表明烹调排放^[35], 13.1 为地面扬尘排放, 12.7 为家庭天然气排放^[36]. 表 3 为 OC 和 EC 各粒径段中的比值, 不同粒径段中的比值差异较大, 说明南京北郊碳质颗粒物存在不同的污染源, 细粒子中的碳质颗粒物的来源主要有燃煤排放和机动车尾气排放等, 而粗粒子中的碳质颗粒物的来源主要是来自燃煤排放和地面扬尘等.

2.3 二次有机碳的估值

EC 主要来源于化石燃料和生物质的不完全燃烧产生的, 由于其化学惰性及热稳定性, 为一次排放

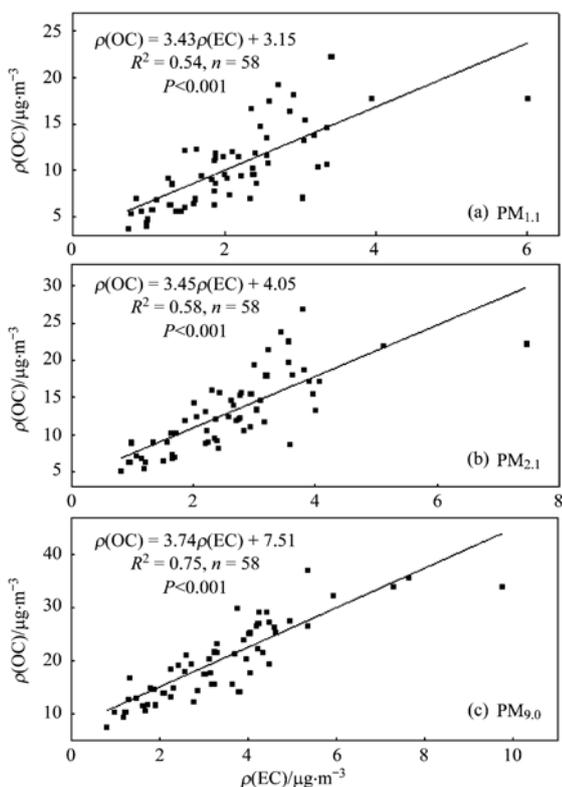


图 4 OC 和 EC 的相关性

Fig. 4 Correlations between mass concentrations of OC and EC

表 3 不同粒径上 OC 和 EC 的比值

Table 3 Rates of EC and OC on atmospheric particulates with various diameters

项目	$\leq 0.43 \mu\text{m}$	$0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$	$0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$	$1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$	$2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$	$3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$	$4.7 \sim 5.8 \mu\text{m}$	$5.8 \sim 9.0 \mu\text{m}$
OC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	4.28	3.33	2.80	2.64	1.79	1.74	1.60	2.09
EC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	1.14	0.53	0.45	0.49	0.21	0.17	0.10	0.31
OC/EC	3.76	6.33	6.18	5.37	8.32	9.96	15.52	6.76

物. 因此, EC 能很好地成为污染物的指示物, 常用来估算二次有机碳的含量. Chow 等^[37]认为 OC 和 EC 的比值大于 2 时, 存在二次反应生成的有机碳. 本研究采用 Turpin 等^[38]提出的 SOC 计算方法:

$$\rho(\text{OC}_{\text{pri}}) = \rho(\text{EC}) \times [\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})]_{\text{pri}} \quad (1)$$

式中, $[\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})]_{\text{pri}}$ 为污染源一次排放过程中 OC 和 EC 浓度的比值, $\rho(\text{OC}_{\text{pri}})$ 为一次有机碳的含量 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 然而, 由于 OC 的来源复杂, 很难确定 $[\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})]_{\text{pri}}$ 的值. 因此, 采取 Castro 等^[39]提出 OC/EC 的最小比值可以近似地等于一次排放过程中的 OC/EC 的比值. 可近似得到:

$$[\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})]_{\text{pri}} \approx [\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})]_{\text{min}} \quad (2)$$

式中, $[\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})]_{\text{min}}$ 为污染源一次排放过程中 OC 和 EC 浓度的最小比值.

$$\rho(\text{OC}_{\text{sec}}) \approx \rho(\text{OC}) - \rho(\text{OC}_{\text{pri}}) \quad (3)$$

式中, $\rho(\text{OC}_{\text{sec}})$ 为二次有机碳的含量 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 由于降水和大风过程会对碳质颗粒物有不同程度的清除作用, 为选取较为准确的 $[\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})]_{\text{min}}$ 值, 排除大风和降水天气等天气条件下的观测数据后,

确定采样期间 OC/EC 的最小值. 因此, 可计算出南京北郊夏季 SOC 的平均浓度. 在 $\text{PM}_{9.0}$ 中, POC 的平均质量浓度高于 SOC 的平均质量浓度, 分别为 $(12.65 \pm 6.14) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $(7.61 \pm 3.54) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, POC 占 OC 的比例为 62.43%, 而在 $\text{PM}_{2.1}$ 中, POC 的贡献略低于 SOC, 分别为 $(6.42 \pm 2.82) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $(6.62 \pm 3.50) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, SOC 占 OC 的比例为 50.74%, 说明在细粒径段中, 存在更多的二次反应产生的有机碳, 在粗粒径段中, SOC 的贡献相对较少. 对比南京浦口区^[23]2011 年 7 月的 SOC 浓度更高些, 且在 OC 中所占比例更高, 而对比其 2011 年 1 月的 SOC 浓度更低, 由于夏季阳光充足, 温度较高, 大气光化学活性强, 有利于 SOC 的生成, 而冬季可能温度较低, 光照不足, 不利于 OC 通过光化学反应生成 SOC. 表 4 给出了南京北郊及国内其他城市 SOC 的平均浓度, 对比国内其他城市夏季的 SOC 浓度, 南京北郊 SOC 浓度处于中等偏上, 在 OC 中所占的比例偏高, 说明南京北郊夏季受二次污染较重.

表 4 国内城市 SOC 浓度特征

Table 4 Concentration characteristics of SOC for different cities

采样地点	采样时间	$(\text{OC}/\text{EC})_{\text{min}}$	SOC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	SOC/OC/%	粒径范围
本研究	2013-05 ~ 07	2.46	6.62 ± 3.50	50.74	$\text{PM}_{2.1}$
		3.72	7.61 ± 3.54	37.57	$\text{PM}_{9.0}$
南京鼓楼区 ^[23]	2011-01(冬)	2.6	2.3	16.73	$\text{PM}_{2.1}$
	2011-07(夏)	2.8	5.32	46.63	$\text{PM}_{2.1}$
南京浦口区 ^[23]	2011-01(冬)	2.14	3.23	24.53	$\text{PM}_{2.1}$
	2011-07(夏)	2.93	4.35	45.65	$\text{PM}_{2.1}$
上海徐家汇 ^[25]	2008-07(夏)	0.99	2.16 ± 1.38	37	$\text{PM}_{2.5}$
天津 ^[40]	2006-08(夏)	3.12	2.3	17	$\text{PM}_{2.5}$
广州 ^[41]	2006 ~ 2007(夏)	2	1.8	32	$\text{PM}_{2.5}$
福州晋安区 ^[12]	2011-01(冬)		2.47	13.08	$\text{PM}_{2.5}$
深圳 ^[42]	2004(夏)		4.0	56	$\text{PM}_{2.5}$
北京 ^[6]	2002-09(秋)		9.2	57	PM_{10}
杭州 ^[43]	2001(夏)		6.2	47	PM_{10}

3 结论

(1) 南京北郊夏季 EC 和 OC 主要集中在细粒径段中, 在 $\text{PM}_{9.0}$ 中, EC、OC 的浓度分别为 $(3.4 \pm 1.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $(20.3 \pm 7.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中 EC、OC

的 $\text{PM}_{2.1}/\text{PM}_{9.0}$ 分别为 0.76 和 0.64. OC 主要在 $\leq 0.43 \mu\text{m}$ 和 $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$ 粒径段中, 而 EC 主要在 $\leq 0.43 \mu\text{m}$ 粒径段中, 分别占总 $\text{PM}_{9.0}$ 中有机碳的 37.5%, 元素碳的 33.4%. EC 和 OC 变化范围较大, 夏季南京处亚热带季风气候条件下, EC 和 OC

易受降水和大风天气影响,其平均质量浓度易波动。对比国内其他城市,OC 的浓度处于中等偏上,而 EC 的浓度处于中等偏下,南京北郊 OC 污染比 EC 严重。

(2)OC 和 EC 的相关性较好。说明南京北郊夏季 EC 和 OC 存在相同的来源,而在细粒径段中的相关性略低,说明细粒径段中的污染来源相对粗粒径段的更为复杂。通过 OC/EC 的比值可以得到,南京北郊夏季细粒径段中主要污染源是燃煤排放和机动车尾气排放等,而燃煤源和地面扬尘排放等是粗粒径段中的主要来源。

(3)通过对二次有机碳的估算,发现在 $PM_{2.1}$ 和 $PM_{9.0}$ 中, SOC/OC 分为 50.74% 和 37.57%,说明粗粒径段中的经大气光化学反应产生的 SOC 不如细粒径段中的多,粗模态中的 OC 主要还是以 POC 形式存在。

参考文献:

- [1] 段凤魁,贺克斌,刘威德,等. 含碳气溶胶研究进展: 有机碳和元素碳[J]. 环境工程学报, 2007, **1**(8): 1-8.
- [2] Yang H, Li Q F, Yu J Z. Comparison of two methods for the determination of water-soluble organic carbon in atmospheric particles[J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(6): 865-870.
- [3] Kuhlbusch T A J. Ocean chemistry: Black carbon and the carbon cycle [J]. Science, 1998, **280**(5371): 1903-1904.
- [4] Masiello C A. New directions in black carbon organic geochemistry [J]. Marine Chemistry, 2004, **92**(1-4): 201-213.
- [5] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. Nature, 2001, **409**(6821): 695-697.
- [6] 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.
- [7] Duan F K, Liu X D, Yu T, *et al.* Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(9): 1275-1282.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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 Sciences, 2011, **23**(8): 1342-1349.
- [12] 陈衍婷,陈进生,胡恭任,等. 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[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1989-1994.
- [13] 叶香,姜爱军,张军,等. 南京市大气能见度的变化趋势及特征[J]. 气象科学, 2011, **31**(3): 325-331.
- [14] 孙燕,魏建苏,赵小艳,等. 南京灰霾天气事件的变化特征 [A]. 见: 粮食安全与现代农业气象业务发展——2008 年全国农业气象学术年会论文集 [C]. 2008. 533-536.
- [15] 王静,牛生杰,许丹,等. 南京一次典型雾霾天气气溶胶光学特性[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(2): 201-208.
- [16] Deng X J, Tie X X, Wu D, *et al.* Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) region, China [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(7): 1424-1435.
- [17] 秦世广,汤洁,温玉璞. 黑碳气溶胶及其在气候变化研究中的意义[J]. 气象, 2001, **27**(11): 3-7.
- [18] Chow J C. Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles [J]. Journal of Air and Waste Management Association, 1995, **45**(5): 320-382.
- [19] 颜鹏,郇宁,张养梅,等. 北京乡村地区粒径气溶胶 OC 及 EC 分析[J]. 应用气象学报, 2012, **23**(3): 285-293.
- [20] Li W J, Shao L Y. Transmission electron microscopy study of aerosol particles from the brown hazes in northern China [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, **114**(D9), doi: 10.1029/2008JD011285.
- [21] Yu H, Wu C, Wu D, *et al.* Size distributions of elemental carbon and its contribution to light extinction in urban and rural locations in the Pearl River Delta region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(11): 5107-5119.
- [22] Shah S D, Cocker D R III, Norbeck J M, *et al.* Emission rates of particulate matter and elemental and organic carbon from in-use diesel engines [J]. Environmental Science and Technology, 2004, **38**(9): 2544-2550.
- [23] 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,等. 南京市 $PM_{2.1}$ 中有机碳和元素碳污染特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(7): 1160-1166.
- [24] 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**(3): 3127-3137.
- [25] 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.
- [26] Ho K F, Lee S C, Cao J J, *et al.* Variability of organic and elemental carbon, water soluble organic carbon, and isotopes in Hong Kong [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, **6**: 4569-4576.

- [27] 赖森潮, 叶计册, 张颖仪, 等. 广州夏季大气中碳气溶胶浓度水平及污染特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, **43**(5): 61-65.
- [28] Gu J X, Bai Z P, Liu A X, *et al.* Characterization of atmospheric organic carbon and element carbon of PM_{2.5} and PM₁₀ at Tianjin, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2010, **10**: 167-176.
- [29] Turpin B J, Cary R A, Huntzicker J J. An in-situ, time-resolved analyzer for aerosol organic and elemental carbon [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1990, **12**(1): 161-171.
- [30] Novakov T, Menon S, Kirchstetter T W, *et al.* Aerosol organic to black carbon ratios: analysis of published data and implications for climate forcing [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, **110** (D21), doi: 10.1029/2005JD005977.
- [31] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources; 2. C1 through C30 organic compounds from medium duty diesel trucks [J]. *Environmental Science and Technology*, 1999, **33**(10): 1578-1587.
- [32] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources; 5. C1—C32 organic compounds from gasoline-powered motor vehicles [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, **36**(6): 1169-1180.
- [33] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources; 3. C1—C29 organic compounds from fireplace combustion of wood [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, **35**(9): 1716-1728.
- [34] 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**(20), doi: 10.1029/2006GL026966.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Chow J C, Waston 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.
- [38] 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.
- [39] Castro L M, Harrison R M, Smith D J T. Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres; estimation of secondary organic carbon concentrations [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(17): 2771-2781.
- [40] 董海燕, 古金霞, 陈魁, 等. 天津市区 PM_{2.5} 中碳组分污染特征及来源分析[J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(1): 34-38.
- [41] 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.
- [42] Niu Y W, He L Y, Hu M, *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.
- [43] 焦荔, 祁国伟. 杭州市 PM₁₀ 中有机碳和元素碳含量特征 [A]. 见: 第九届全国气溶胶会议暨第三届海峡两岸气溶胶技术研讨会论文集 [C]. 2007. 174-178.

CONTENTS

Observation Study on Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Using the Ground-based and Satellite Remote Sensing at Background Station During the Regional Pollution Episodes	ZHANG Xiao-ling, XIA Xiang-ao, CHE Hui-zheng, <i>et al.</i>	(2439)
<i>In-situ</i> Measurement of Atmospheric Methyl Chloroform at the Shangdianzi GAW Regional Background Station	YAO Bo, ZHOU Ling-xi, LIU Zhao, <i>et al.</i>	(2449)
Distribution of CO at Lin'an Station in Zhejiang Province	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, LUAN Tian, <i>et al.</i>	(2454)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Nanjing Northern Suburb in Summer	DUAN Qing, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(2460)
Characteristics of Water-soluble Organic Nitrogen of PM _{2.5} in Xi'an During Wintertime Non-haze and Haze Periods	CHENG Yu-ting, WANG Ge-hui, SUN Tao, <i>et al.</i>	(2468)
Effect of Sand Dust Weather on Major Water-soluble Ions in PM ₁₀ in Lanzhou, China	WANG Fang, CHEN Qiang, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i>	(2477)
Diversity of Bacterial Areasols in Precipitation of Shanghai Area	LIANG Zong-min, DU Rui, DU Peng-rui, <i>et al.</i>	(2483)
Concentrations and Deposition Fluxes of Heavy Metals in Precipitation in Core Urban Areas, Chongqing	PENG Yu-long, WANG Yong-min, QIN Cai-qing, <i>et al.</i>	(2490)
Anthropogenic VOC Emission Inventory and Contribution from Industrial Sources in Ningbo	LI Xuan, WANG Xue-song, LIU Zhong, <i>et al.</i>	(2497)
Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry	WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, <i>et al.</i>	(2503)
Experimental Study on CO ₂ Absorption by Aqueous Ammonia-based Blended Absorbent	XIA Zhi-xiang, XIANG Qun-yang, ZHOU Xu-ping, <i>et al.</i>	(2508)
Preliminary Investigation on Emission of PCDD/Fs and DL-PCBs Through Flue Gas from Coke Plants in China	SUN Peng-cheng, LI Xiao-lu, CHENG Gang, <i>et al.</i>	(2515)
Distribution and Source of Particulate Organic Carbon and Particulate Nitrogen in the Yangtze River Estuary in Summer 2012	XING Jian-wei, XIAN Wei-wei, SHENG Xiu-zhen	(2520)
Characteristics of Optical Absorption Coefficients and Their Differences in Typical Seasons in Lake Qiandaohu	WANG Ming-zhu, ZHANG Yun-lin, SHI Kun, <i>et al.</i>	(2528)
Dynamic Distributions of Dissolved Oxygen in Lake Qiandaohu and Its Environmental Influence Factors	YIN Yan, WU Zhi-xu, LIU Ming-liang, <i>et al.</i>	(2539)
Source Analysis of Urea-N in Lake Taihu During Summer	HAN Xiao-xia, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>	(2547)
Phytoplankton Community Structure and Its Succession in Isolated Lakes of Poyang-Junshan Lake	LIU Xia, QIAN Kui-mei, TAN Guo-liang, <i>et al.</i>	(2557)
Vertical Distribution and Relationship Between ²¹⁰ Pb _{ex} Activities and Nutrients in Sediment Cores of Two Different Eutrophication Level Lakes	WANG Xiao-lei, YANG Hao, GU Zhu-jun, <i>et al.</i>	(2565)
Simulation of Nitrate Pollution in Groundwater Using Pump-and-treat Optimization Method	JIANG Lie, HE Jiang-tao, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(2572)
Variation of Water DOC During the Process of Pre-pressure and Coagulation Sedimentation Treatment	CHEN Wen-jing, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i>	(2579)
Adsorption of Perchlorate by Calcined Mg/Zn/Al Layered Double Hydroxides	WANG Hong-yu, LIU Yan	(2585)
Adsorption Kinetic Mechanism of Ionic Soluble Dye Mixture on Fly Ash	SUN De-shuai, ZHENG Qiang-qiang, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i>	(2590)
Effect of SDS on the Adsorption of Cd ²⁺ onto Amphoteric Modified Bentonites	WANG Jian-tao, MENG Zhao-fu, YANG Ya-ti, <i>et al.</i>	(2596)
Structural Changes of Aged Biochar and the Influence on Phenanthrene Adsorption	TANG Wei, GUO Yue, WU Jing-gui, <i>et al.</i>	(2604)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in TiO ₂ Dispersion and Its Mechanism	LI Ming-jie, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2612)
Characterizing the Interaction Between Roxarsone and Humic Acid by Fluorescence Quenching Experiment	ZHU Jiang-peng, MEI Ting, PENG Yun, <i>et al.</i>	(2620)
Modification of Activated Carbon Fiber for Electro-Fenton Degradation of Phenol	MA Nan, TIAN Yao-jin, YANG Guang-ping, <i>et al.</i>	(2627)
Investigation of Enhanced Low Carbon Wastewater Denitrification by Catalytic Iron	WANG Meng-yue, MA Lu-ming	(2633)
Denitrification Performance of PBS as a Solid Carbon Source of Denitrification	LIU Jia, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i>	(2639)
Concentrations, Distribution Characteristics and Electron Beam Radiolysis Degradation of PCDD/Fs in Waste Water from a Paper Mill	QING Xian, HUANG Jin-qiong, YU Xiao-wei, <i>et al.</i>	(2645)
Study on the Quality of Digested Piggery Wastewater in Large-Scale Farms in Jiaying	WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2650)
New Ways to Improve Volatile Fatty Acids Accumulation in Sludge Alkaline Fermentation System	LI Xiao-ling, PENG Yong-zhen, CHAI Tong-zhi, <i>et al.</i>	(2658)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments and Soils from Dishui Lake and Its Water Exchange Areas	GUO Xue, BI Chun-tuan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i>	(2664)
Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Sediment from Zhoushan Coastal Area, China	JIANG Min, Le Huy Tuan, MEI Wei-ping, <i>et al.</i>	(2672)
Contamination Levels and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Soils and Grasses from Lake Catchments in the Tibetan Plateau	XIE Ting, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang	(2680)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Soil from Jiufeng Mountain Range in Fujian, China	HUANG Huan-fang, QI Shi-hua, QU Cheng-kai, <i>et al.</i>	(2691)
Pollution Fingerprints and Sources of Perfluorinated Compounds in Surface Soil of Different Functional Areas	ZHANG Hong, ZHAO Liang, HE Long, <i>et al.</i>	(2698)
Distribution, Seasonal Variation and Influence Factors of Dissolved Inorganic Arsenic in the Sanggou Bay	LI Lei, REN Jing-ling, LIU Su-mei, <i>et al.</i>	(2705)
Distribution of Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation on the Different Sampling Scales in Farmland on Yellow River Irrigation Area of Ningxia; A Case Study in Xingqing County of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu	(2714)
Release of Mercury from Soil and Plant in Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area and Its Accumulation in Zebrafish	LI Chu-xian, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i>	(2721)
Residues and Health Risk Assessment of Sulfonamides in Sediment and Fish from Typical Marine Aquaculture Regions of Guangdong Province, China	HE Xiu-ting, WANG Qi, NIE Xiang-ping, <i>et al.</i>	(2728)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Dust of Qingdao City	ZHANG Chun-rong, WU Zheng-long, YAO Chun-hui, <i>et al.</i>	(2736)
Health Risk Assessment of Coke Oven PAHs Emissions	BO Xin, WANG Gang, WEN Rou, <i>et al.</i>	(2742)
Effects of Combined Pollution of Cd, Cu and Pb on Antioxidant Enzyme Activities of Earthworm in Soils	WANG Hui, XIE Xin-yuan	(2748)
Toxicity of Three Chlorophenols to Protozoa <i>Tetrahymena thermophila</i>	LI Ya-jie, CUI Yi-Bin, JIANG Li-juan, <i>et al.</i>	(2755)
Phytoexclusion Potential Studies of Si Fertilization Modes on Rice Cadmium	CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, <i>et al.</i>	(2762)
Effects of Conservation Tillage on Soil CO ₂ and N ₂ O Emission During the Following Winter-Wheat Season	PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(2771)
Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Soil Enzyme Activities in Apple Orchard in Weibei	JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke	(2777)
Steam and Air Co-injection in Removing TCE in 2D-Sand Box	WANG Ning, PENG Sheng, CHEN Jia-jun	(2785)
Effect of Cu ²⁺ on the Power Output of Dual-chamber Microbial Fuel Cell	MU Shu-jun, LI Xin-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i>	(2791)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from Sewage Sludge Composting by Continuous Aerated Turning Pile	ZHAO Chen-yang, WEI Yuan-song, GE Zhen, <i>et al.</i>	(2798)
Emissions of NH ₃ , N ₂ O, and NO from Swine Manure Solid Storage in Winter	DING Gang-qiang, HAN Sheng-hui, YUAN Yu-ling, <i>et al.</i>	(2807)
Variation Characteristics and Mathematical Model of Humic Substances in Landfill Leachates with Different Landfill Ages	HUANG You-fu, XU Xin-ya, FAN Liang-xin, <i>et al.</i>	(2816)
Research on the Variation Regularity of Effluent from the Leachate Reverse Osmosis Concentrate Recirculation	WANG Dong-mei, LIU Dan, LIU Qing-mei, <i>et al.</i>	(2822)
Quantitative Analysis on the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su	(2829)
Research Progress in Microbiological Characteristics in Combined N ₂ Removal Process by Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	ZHAO Zhi-ru, HOU Yan-lin	(2834)

《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7月15日 第35卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 7 Jul. 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