

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第8期

Vol.39 No.8

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                                 |                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 我国城市 PM <sub>2.5</sub> 污染的健康风险及经济损失评价 .....                                     | 李惠娟, 周德群, 魏永杰 (3467)                                    |
| 冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响 .....                                                      | 孙晓伟, 郭秀锐, 程水源 (3476)                                    |
| 基于区域传输矩阵和 PM <sub>2.5</sub> 达标约束的大气容量计算方法 .....                                 | 李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌 (3485)                          |
| 利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征 .....                                           | 温杰, 史旭荣, 田瑛泽, 徐娇, 史国良, 冯银厂 (3492)                       |
| 重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征 .....                                                   | 彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜 (3502)           |
| 杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析 .....                                                       | 徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光 (3511)                       |
| 城市生活垃圾露天焚烧 PM <sub>2.5</sub> 及其组分排放特征 .....                                     | 王艳, 郝伟伟, 程珂, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋 (3518)                     |
| 民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子 .....                                                       | 杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢 (3524) |
| 大连地区夏季非甲烷烃 (NMHC) 特征及其来源解析 .....                                                | 纪德钰 (3535)                                              |
| “十三五”挥发性有机物总量控制情景分析 .....                                                       | 张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (3544)                     |
| 浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数 .....                                                  | 王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平 (3552)                          |
| 有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别 .....                                               | 翟增秀, 孟洁, 王巨, 翟友存, 曹阳, 邹克华 (3557)                        |
| 基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征 .....                                       | 胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼 (3563)                         |
| 基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景 .....                                                  | 樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (3571)                                    |
| 北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露 .....                                                    | 陶双成, 高硕吟, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙 (3580)                          |
| 丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化 .....                                                 | 李冰, 王亚, 郑钊, 许信, 辛英督, 黄进, 郭诗君, 毕升阁, 胡兰群, 陈兆进, 李玉英 (3591) |
| 太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义 .....                                                | 吕伟伟, 姚昕, 张保华 (3601)                                     |
| 太湖重点水域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价 .....                                              | 朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯 (3614)                      |
| 台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性 .....                                                    | 姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳 (3622)                     |
| 珠江三角洲高碑地下水赋存环境特征及成因分析 .....                                                     | 张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华 (3631)                               |
| 有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响 .....                                                      | 宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波 (3640)                     |
| 澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析 .....                                                    | 程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏 (3649)                        |
| 碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子 .....                                                     | 王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋 (3660)                              |
| 浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析 .....                                     | 张亚迪, 宋永会, 彭剑桥, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强 (3670)                |
| 人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响 .....                                              | 刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利 (3677)                                |
| 外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N <sub>2</sub> O 排放影响 .....                               | 余冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋 (3689)                          |
| 雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布 .....                                                     | 尚宇, 周毅, 廖安意, 方正 (3696)                                  |
| 水体中 Cr(VI) 对不同混凝剂混凝过程的影响 .....                                                  | 高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇森, 王东升 (3704)                       |
| Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /BiVO <sub>4</sub> 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A ..... | 李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭 (3713)                                  |
| 海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能和机制 .....                                        | 于长江, 董心雨, 王苗, 林强 (3719)                                 |
| 磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制 .....                                               | 赵华轩, 郎印海 (3729)                                         |
| 污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证 .....                                                      | 陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青 (3736)                      |
| 臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解 .....                                         | 关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾 (3744)             |
| 阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮 .....                                                         | 叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民 (3753)                             |
| 普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能 .....                                                | 陈思, 白波, 王洪林, 索有瑞 (3759)                                 |
| PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能 .....                                                       | 许静怡, 杜俊, 杨一峰, 吕峰, 夏四清 (3767)                            |
| 苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用 .....                                                      | 马娟, 王瑾, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟 (3775)                        |
| 反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能 .....                                          | 王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇 (3782)                             |
| 好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因 .....                                                     | 康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 刘珍芳, 王跃, 谭欣林 (3789)            |
| 苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性 .....                                              | 吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (3797)            |
| 污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析 .....                                                    | 刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂 (3807)                 |
| 生物炭对华北农田土壤 N <sub>2</sub> O 通量及相关功能基因丰度的影响 .....                                | 刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平 (3816)                               |
| 设施菜田土壤 N <sub>2</sub> O 产生对 O <sub>2</sub> 的响应 .....                            | 陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国 (3826)                           |
| 利用 $\mu$ -XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性 .....                                  | 孙晓艳, 柳检, 罗立强 (3835)                                     |
| 南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征 .....                                            | 李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录 (3845)                                 |
| Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果 .....                                            | 杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄 (3854)               |
| 基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移 .....                                              | 李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新 (3867)                             |
| 生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程 .....                                                | 赵鹏宇, 李鑫, 柴宝峰 (3876)                                     |
| 转 cry1Ab 和 epsps 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响 .....                         | 王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林 (3885)               |
| 脱硫石膏对稻田 CH <sub>4</sub> 释放及其功能微生物种群的影响 .....                                    | 胡翔宇, 向秋洁, 木志坚 (3894)                                    |
| 长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征 .....                                                 | 杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水 (3901)   |
| 黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响 .....                                  | 宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛 (3910)                               |
| 黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价 .....                                              | 康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航 (3917)                  |
| 氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响 .....                                                      | 涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民 (3927)                       |
| 有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响 .....                                                 | 祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许君 (3937)                              |
| 中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO <sub>2</sub> 排放 .....                                 | 林婷, 吴焯, 何晓婧, 张少君, 郝吉明 (3946)                            |
| 气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展 .....                                                      | 叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊 (3954)                               |
| 《环境科学》征订启事 (3543) .....                                                         |                                                         |
| 《环境科学》征稿简则 (3570) .....                                                         |                                                         |
| 信息 (3600, 3728, 3844) .....                                                     |                                                         |

# 重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征

彭小乐<sup>1</sup>, 郝庆菊<sup>1</sup>, 温天雪<sup>2</sup>, 吉东生<sup>2</sup>, 刘子锐<sup>2</sup>, 王跃思<sup>2</sup>, 陈建博<sup>1</sup>, 江长胜<sup>1\*</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

**摘要:** 为了研究重庆市北碚城区大气碳质气溶胶组分的污染特征, 于2014年3月~2015年2月采用安德森采样器采集大气颗粒物样品, 用DRI Model 2001 A热光碳分析仪测定其中有机碳(OC)和元素碳(EC)的质量浓度。结果表明, 北碚城区PM<sub>2.1</sub>和PM<sub>9.0</sub>中OC和EC的年平均浓度分别为(16.3±7.6)、(1.8±0.7)和(25.0±9.7)、(3.2±1.3) μg·m<sup>-3</sup>。在PM<sub>2.1</sub>中, OC和EC均呈现出冬春季大于夏秋季的季节变化特征, 而PM<sub>9.0</sub>中OC呈现出夏春季大于冬秋季, EC呈现出冬春季大于夏秋季的季节变化特征。对全年OC和EC的粒径进行分析, 发现OC在整个粒径上呈现“双峰型”分布, 其中细粒子段峰值位于0.43~0.65 μm粒径段, 粗粒子段峰值位于4.7~5.8 μm粒径段; EC呈现出“三峰型”分布, 其中细粒子段峰值位于0.43~0.65 μm粒径段, 粗粒子段峰值位于4.7~5.8 μm粒径段, 同时2.1~3.3 μm粒径段也出现一个明显峰值。对OC和EC进行相关性分析并对PM<sub>2.1</sub>中的SOC进行估算, 发现北碚城区全年SOC浓度为(6.3±5.9) μg·m<sup>-3</sup>, 占全年OC的33.5%±22.6%, 且OC和EC显著相关。最后对北碚城区大气气溶胶的污染来源进行分析, 发现污染主要来源于汽油车尾气、生物质燃烧和燃煤排放。

**关键词:** 有机碳(OC); 元素碳(EC); 粒径; 北碚; 大气气溶胶

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)08-3502-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711205

## Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing

PENG Xiao-le<sup>1</sup>, HAO Qing-ju<sup>1</sup>, WEN Tian-xue<sup>2</sup>, JI Dong-sheng<sup>2</sup>, LIU Zi-rui<sup>2</sup>, WANG Yue-si<sup>2</sup>, CHEN Jian-bo<sup>1</sup>, JIANG Chang-sheng<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** To study the pollution characteristics of atmospheric carbon aerosols, aerosol samples were collected via a cascade impactor (Andersen) from March 2014 to February 2015 in Beibei District, Chongqing. Organic carbon (OC) and element carbon (EC) were detected using a DRI 2001A carbon analyzer. The results showed that the annual average concentrations of OC and EC in PM<sub>2.1</sub> were (16.3±7.6) and (1.8±0.7), respectively, and (25.0±9.6), and (3.2±1.3) μg·m<sup>-3</sup>, respectively, in PM<sub>9.0</sub>. The concentrations of both OC and EC were higher in winter and spring than in summer and autumn for PM<sub>2.1</sub>, whereas, for PM<sub>9.0</sub>, the concentration of OC was higher in summer and spring than in winter and autumn and that of EC was higher in winter and spring than in summer and autumn. The particle size distributions of OC and EC for the study year were analyzed, and it was found that those of OC were bimodal, with peaks in the size ranges of 0.43-0.65 μm for fine particles and 4.7-5.8 μm for coarse particles, and those of EC were trimodal, with peaks in the size ranges of 0.43-0.65 μm for fine particles and 4.7-5.8 μm for coarse particles and a concurrent significant peak in the particle size range of 2.1-3.3 μm. In addition, the correlations between OC and EC were analyzed and the SOC in PM<sub>2.1</sub> was estimated. It was found that the average concentration of SOC was (6.3±5.9) μg·m<sup>-3</sup>, which accounted for 33.5%±22.6% of the OC concentration in Beibei District. Furthermore, OC and EC were significantly correlated. Finally, the pollution sources of atmospheric aerosols in Beibei were analyzed, and it was found that the pollution in Beibei mainly came from the exhaust gas of gasoline vehicles, biomass combustion, and coal combustion.

**Key words:** organic carbon(OC); elemental carbon(EC); particle size; Beibei; atmospheric aerosol

碳质气溶胶作为大气气溶胶的重要组成部分, 由污染源直接排放的一次有机碳(POC)和有机气体  
主要由有机碳(OC)和元素碳(EC)组成, OC主要 经光化学氧化生成的二次有机碳(SOC)组成。元素

收稿日期: 2017-11-21; 修订日期: 2018-01-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230642); 国家自然科学基金项目(41275160); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05100100); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015A013)

作者简介: 彭小乐(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: 1677165874@qq.com

\* 通信作者, E-mail: jiangcs@126.com

碳 EC, 在一些研究中也称为黑碳 (black carbon, BC) 或石墨碳 (graphitic carbon)<sup>[1]</sup>, 是一种性质类似石墨的混合物, 主要来源于生物质及化石燃料的不完全燃烧<sup>[2]</sup>. 此外, 大气中 OC 具有较强的散光性, EC 具有较强的吸光性, 两者共同作用甚至能够达到总消光的 30% ~ 40%, 降低了大气能见度, 从而对气候变化产生影响<sup>[3]</sup>. 同时 OC 和 EC 还能通过呼吸作用进入人体肺部, 可带来各种呼吸性疾病, 危害人体健康<sup>[4-6]</sup>.

目前针对大气碳质气溶胶的监测和研究还比较多, 主要集中在对 OC、EC 时空变化、粒径分布及来源解析等研究方面. 在时空变化研究方面, 吴梦龙等<sup>[7]</sup>的研究表明南京工业区 OC 和 EC 质量浓度高于城区, 且两地 OC 和 EC 浓度均呈现出冬春季大于夏季的季节特点; Viana 等<sup>[8]</sup>的研究发现 OC 受到污染源及气象条件影响, 与地理位置 (南欧和西欧) 没有较大关系; Harrison 等<sup>[9]</sup>的研究表明, 城市、道路和乡村的 OC、EC 是在区域背景基础上增长的. 在粒径分布研究方面, 樊晓燕等<sup>[10]</sup>在北京、郭育红等<sup>[11,12]</sup>在保定和唐山的研究均表明, OC 和 EC 的粒径呈“双峰型”分布. 在来源解析研究方面, Cao 等<sup>[13]</sup>发现在珠江三角洲各城市中 EC<sub>2</sub> 含量均较高, 得出机动车尾气是 OC 和 EC 的主要污染源; 张懿华等<sup>[3]</sup>运用主成分分析, 发现机动车尾气、燃煤、生物质燃烧以及道路扬尘是上海 OC 和 EC 的主要污染源.

重庆是我国西南地区的工业重镇, 也是我国重要的老工业基地之一, 大气污染比较严重, 素有“雾都”之称. 针对近年重庆市大气碳质气溶胶, 有学者进行了一些研究, 如叶堤等<sup>[14]</sup>对重庆 9 个主城区和缙云山对照点春季 PM<sub>10</sub> 中的 OC 和 EC 进行了空间对比研究; 彭超等<sup>[15]</sup>在万州分析了夏冬季节 PM<sub>2.5</sub> 中的 OC 和 EC 的分布特点. 但是重庆大气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还不清楚. 为此, 本研究于 2014 年 3 月 ~ 2015 年 2 月, 采用安德森采样器对北碚城区大气中的 OC 和 EC 进行采样, 同时分析了 OC 和 EC 的季节变化规律和粒径分布特征, 并对 OC 和 EC 的来源进行分析, 确定了北碚城区 OC 和 EC 的主要污染源, 以期为控制及治理北碚区的 OC 和 EC 污染提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 观测点与采样方法

采样点位于重庆市北碚城区西南大学资源环境

学院楼顶 (东经 106°24'58", 北纬 29°48'43"), 距地面约 35 m, 观测站所处地形平坦, 受局地环流影响较小, 周围 5 km 内多为文教、行政和居民区, 无高大的建筑物和明显的局地排放源. 采样仪器为九级惯性撞击式分级采样器 (Anderson, 美国), 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. 使用前将玻璃纤维滤膜在马弗炉中以 450℃ 焙烧 4 h, 以消除可能的有机物, 冷却后放入恒温恒湿箱中平衡 24 h (温度为 25℃, 湿度为 50%). 采样前先以标准流量计对采样泵进行流量校正, 以确保采样过程中流量为 28.3 L·min<sup>-1</sup>, 采样结束后将样品保存于 4℃ 中待分析, 减少有机碳的挥发损失. 采样时间为 2014 年 3 月 ~ 2015 年 2 月, 每 2 周采样 1 次, 每个样品连续采样 48 h (采样日 11:00 至第三日 11:00), 扣除滤膜的损坏, 得到有效样品数 19 组, 共 171 个.

### 1.2 样品分析

OC 和 EC 的质量浓度测定采用美国沙漠所研制的 DRI Model 2001A 热光碳分析仪. 该方法的主要原理是: 在无氧纯 He 的环境中, 分别在 140℃ (OC<sub>1</sub>)、280℃ (OC<sub>2</sub>)、480℃ (OC<sub>3</sub>) 和 580℃ (OC<sub>4</sub>) 的温度下, 对 0.5025 cm<sup>2</sup> 的滤膜片进行加热, 将滤纸上的颗粒态碳转化为 CO<sub>2</sub>; 然后再将样品在含 2% 氧气的氦气环境下, 于 580℃ 加热, 样品中的元素碳 (EC<sub>1</sub>)、(EC<sub>2</sub>) 和 (EC<sub>3</sub>) 随加热分解的时间延伸释放出来. 上述各个温度梯度下挥发出来的含碳化合物经 MnO<sub>2</sub> 催化氧化转化成 CO<sub>2</sub>, 再经 Ni 催化还原转化为 CH<sub>4</sub>, 通过火焰离子化检测器 (FID) 定量检测. 样品在加热过程中, 部分有机碳可发生碳化现象而形成黑碳, 导致有机碳和元素碳峰不易区分. 因此, 在测量过程中, 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. 关于仪器的详细原理参见文献 [16].

### 1.3 质量控制及数据分析

样品分析开始、结束和每 15 个样品间都采用 He/CH<sub>4</sub> (5% CH<sub>4</sub> + 95% He) 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, 对每组样品的空白

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.

根据 Anderson 采样器切割空气动力学等效粒径,文中将  $PM_{2.1}$  (空气动力学等效直径小于等于  $2.1\ \mu m$ ) 视为细粒子;  $PM_{>2.1}$  (空气动力学等效直径大于  $2.1\ \mu m$ ) 视为粗粒子;  $PM_{9.0}$  (空气动力学等效直径小于等于  $9.0\ \mu m$ ) 视为可吸入颗粒物.

将原始实验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行汇总整理,用 Origin 9.1 进行作图,再利用 SPSS 21.0 软件进行相关性分析和因子分析.

2 结果与分析

2.1 OC 和 EC 质量浓度特征

表 1 为北碚城区 4 个季节  $PM_{2.1}$ 、 $PM_{9.0}$ 、 $PM_{2.1}-PM_{9.0}$  以及 TSP (总悬浮颗粒物) 中各碳组分含量的分布情况. 由表 1 可知,全年观测期间, TSP 中 OC 和 EC 的年平均质量浓度分别为  $(26.5 \pm 10.1)\ \mu g \cdot m^{-3}$  和  $(3.6 \pm 1.4)\ \mu g \cdot m^{-3}$ .  $PM_{9.0}$  中 OC 和 EC 的年平均质量浓度分别为  $(25.0 \pm 9.6)\ \mu g \cdot m^{-3}$  和  $(3.2 \pm 1.3)\ \mu g \cdot m^{-3}$ , 各占 TSP 中 OC 和 EC 年平均质量浓度的 94.3% 和 88.9%, 与叶堤等<sup>[14]</sup> 于 2006 年春季在北碚天生桥采样点采样的结果相比 [ $PM_{10}$  中 OC 和 EC 浓度:  $(47.5 \pm 20.1)\ \mu g \cdot m^{-3}$  和  $(5.9 \pm 2.5)\ \mu g \cdot m^{-3}$ ], 北碚城区大气中 OC 与 EC 的质量

浓度明显降低,表明近年来北碚城区大气碳质气溶胶污染明显减轻.  $PM_{2.1}$  中 OC 和 EC 的年平均质量浓度分别为  $(16.3 \pm 7.6)\ \mu g \cdot m^{-3}$  和  $(1.8 \pm 0.7)\ \mu g \cdot m^{-3}$ , 各占 TSP 中 OC 和 EC 年平均质量浓度的 61.5% 和 50%, 表明北碚城区 OC 和 EC 的质量浓度主要集中在  $PM_{2.1}$  的细粒子中.

由于不同季节的气候条件和污染来源有所差异,因此 OC 和 EC 的浓度也可能呈现出不同的季节分布特征. 由表 1 可知,北碚城区  $PM_{2.1}$  中 OC 质量浓度呈现出冬季 > 春季 > 夏季 > 秋季的季节分布特征,其中 OC 质量浓度在冬季最高,这可能是由于冬季生物质燃烧和燃煤排放增多以及较低的大气混合层共同作用导致<sup>[17]</sup>. 而  $PM_{9.0}$  中 OC 质量浓度的季节分布特征是夏季 > 春季 > 冬季 > 秋季,与  $PM_{2.1}$  稍有不同,夏季较冬季高,结合表 1 发现  $PM_{9.0}$  中 OC 在夏季的平均质量浓度最高,是由于夏季 OC 在  $PM_{2.1}-PM_{9.0}$  中浓度较高导致,这可能与夏季较粗粒径的植物碎屑、花粉等增加有关<sup>[18]</sup>.

北碚城区  $PM_{2.1}$  和  $PM_{9.0}$  中 EC 质量浓度均呈现出冬季 > 春季 > 夏季 > 秋季的季节分布特征,冬季 EC 质量浓度较高的原因一方面是由于冬季生物质燃烧和燃煤排放增多,另一方面冬季大气稳定度的增加使污染物不易扩散导致<sup>[17]</sup>. EC 易被雨水冲刷<sup>[19]</sup>,而重庆夏秋季节降雨较多,这可能是导致北碚城区夏秋季节 EC 质量浓度较低的原因.

表 1 北碚城区  $PM_{2.1}$ 、 $PM_{9.0}$ 、 $PM_{2.1}-PM_{9.0}$  以及 TSP 中各碳组分含量/ $\mu g \cdot m^{-3}$

| 季节 | $PM_{2.1}$ |         | $PM_{9.0}$ |         | $PM_{2.1}-PM_{9.0}$ |         | TSP       |         |
|----|------------|---------|------------|---------|---------------------|---------|-----------|---------|
|    | OC         | EC      | OC         | EC      | OC                  | EC      | OC        | EC      |
| 春  | 18.8±8.1   | 2.1±0.4 | 28.2±9.9   | 3.9±1.2 | 9.4±1.9             | 1.7±0.8 | 30.4±10.4 | 4.6±1.2 |
| 夏  | 16.0±3.2   | 1.6±0.6 | 29.4±6.0   | 3.0±1.0 | 13.4±3.2            | 1.4±0.7 | 31.2±6.3  | 3.3±1.0 |
| 秋  | 10.5±2.4   | 1.4±0.4 | 15.8±2.3   | 2.2±1.0 | 5.3±1.4             | 0.9±0.6 | 16.6±2.4  | 2.4±1.0 |
| 冬  | 20.7±12.0  | 2.3±1.0 | 27.0±13.3  | 4.0±1.3 | 6.3±1.3             | 1.6±0.8 | 27.9±13.5 | 4.3±1.4 |
| 平均 | 16.3±7.6   | 1.8±0.7 | 25.0±9.6   | 3.2±1.3 | 8.7±3.8             | 1.4±0.8 | 26.5±10.1 | 3.6±1.4 |

2.2 OC 和 EC 在各粒径颗粒物中的污染特征

粒径是大气颗粒物最基本的物理特征参数,其大小可以决定颗粒物在大气中的滞留时间、传输距离以及从对流层中清除的机制<sup>[20]</sup>. 而 OC 和 EC 粒径大小可以决定大气气溶胶的形成与转变,这对大气能见度、全球气候变化乃至人类健康的影响都具有重要意义<sup>[21]</sup>.

表 2 为北碚城区各粒径段中 OC 和 EC 年均质量浓度及质量分数的分布情况. 从中可知,OC 在  $0.43 \sim 0.65\ \mu m$  和  $0.65 \sim 1.1\ \mu m$  两个粒径段中的年均浓度最大,分别为  $(4.8 \pm 2.2)\ \mu g \cdot m^{-3}$  和  $(4.9$

$\pm 2.7)\ \mu g \cdot m^{-3}$ , 各占 OC 总粒径浓度的 18.0% 和 18.4%. EC 在  $<0.43\ \mu m$  粒径段的年平均质量浓度最大,为  $(0.7 \pm 0.4)\ \mu g \cdot m^{-3}$ , 占 EC 总粒径浓度的 20.1%. 根据 Whitby 等<sup>[22]</sup> 对大气颗粒物粒径谱分布的阐述,粒径在  $0.05 \sim 2\ \mu m$  之间的颗粒物处于积聚模态. 同时,在积聚模态中还存在两个亚模态,称为“凝结模态”和“液滴模态”<sup>[23]</sup>. 其中峰值在  $0.2\ \mu m$  的亚模态是“凝结模态”主要由气相反应产生;峰值在  $0.7\ \mu m$  的亚模态是“液滴模态”,主要由小颗粒的成核生长和在液滴中发生反应生成. 而 OC 在  $0.43 \sim 0.65\ \mu m$  和  $0.65 \sim 1.1\ \mu m$  粒径段,

EC 在  $<0.43\text{ }\mu\text{m}$  粒径段都正好处于积聚模态中。因此, 对于在  $0.43\sim0.65\text{ }\mu\text{m}$  和  $0.65\sim1.1\text{ }\mu\text{m}$  粒径段范围内 OC 所占比例较大的原因, 可能是由于气相反应、小颗粒的形核生长及在液滴中反应引起的。同理, EC 在  $<0.43\text{ }\mu\text{m}$  粒径段中所占的比例较大也可能是如此。

表 2 各个粒径间 OC 和 EC 年平均质量浓度及其质量分数

| Table 2 Average concentrations and percentages of OC and EC in each particle size class |                     |                                     |           |                                     |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|
| 粒径粗细                                                                                    | 粒径范围/ $\mu\text{m}$ | OC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | OC 质量分数/% | EC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | EC 质量分数/% |
| 细( $<2.1\text{ }\mu\text{m}$ )                                                          | 0~0.43              | $2.7\pm1.0$                         | 10.3      | $0.7\pm0.4$                         | 20.1      |
|                                                                                         | 0.43~0.65           | $4.8\pm2.2$                         | 18.0      | $0.3\pm0.1$                         | 8.4       |
|                                                                                         | 0.65~1.1            | $4.9\pm2.7$                         | 18.4      | $0.3\pm0.2$                         | 9.3       |
|                                                                                         | 1.1~2.1             | $3.9\pm1.9$                         | 14.7      | $0.5\pm0.2$                         | 12.9      |
|                                                                                         | 0~2.1               | $16.3\pm7.6$                        | 61.5      | $1.8\pm0.7$                         | 50.0      |
| 粗( $>2.1\text{ }\mu\text{m}$ )                                                          | 2.1~3.3             | $2.7\pm1.3$                         | 10.1      | $0.4\pm0.4$                         | 12.1      |
|                                                                                         | 3.3~4.7             | $2.4\pm1.2$                         | 9.2       | $0.3\pm0.2$                         | 8.1       |
|                                                                                         | 4.7~5.8             | $2.3\pm1.1$                         | 8.7       | $0.4\pm0.6$                         | 11.5      |
|                                                                                         | 5.8~9.0             | $1.3\pm0.6$                         | 5.0       | $0.3\pm0.2$                         | 7.2       |
|                                                                                         | 9.0~100             | $1.5\pm0.7$                         | 5.6       | $0.4\pm0.3$                         | 10.4      |
|                                                                                         | 2.1~100             | $10.2\pm4.4$                        | 38.5      | $1.8\pm0.9$                         | 50.0      |

3 讨论

3.1 与其他城市的对比

图 1 为北碚城区以及其他国内外城市  $\text{PM}_{2.1}$  中 OC 和 EC 在 4 个季节中的分布情况。从 OC 的分布中可以看出, 北碚城区  $\text{PM}_{2.1}$  中 OC 在 9 个城市中处于较高水平, OC 污染较严重。相比于沿海城市上海<sup>[3]</sup>和广州<sup>[24]</sup>来说, 北碚城区  $\text{PM}_{2.1}$  中 OC 质量浓度较高, 约为其两倍。相比于污染较重的北方城市唐山<sup>[12]</sup>和保定<sup>[11]</sup>来说, 北碚城区 OC 在秋冬季节污染较轻。而与地理位置相近的成都<sup>[25]</sup>相比, 北碚城区秋冬季节 OC 浓度较成都低, 春夏季节与成都接近。与国外发达地区阿姆斯特丹、根特和巴塞罗那<sup>[8]</sup>相比, 北碚城区  $\text{PM}_{2.1}$  中 OC 质量浓度还较高。

从 EC 的分布中看出, 北碚城区  $\text{PM}_{2.1}$  中 EC 显著低于北方城市唐山和保定, 也显著低于地理位置接近的成都地区, 比东部沿海城市上海稍低, 与国外城市阿姆斯特丹、根特和巴塞罗那相接近。EC 污染主要来源于汽车尾气和工业燃煤排放, 而北碚城区 EC 在 9 个城市中处于较低水平, 这可能与北碚城区偏离主城工业区, 没有大型工业企业, 燃煤较少, 以及靠近缙云山, 植被覆盖较多有关。

3.2 OC 和 EC 的粒径分布

本研究利用安德森九级惯性撞击式分级采样器采样, 采样的粒径范围为  $0\sim100\text{ }\mu\text{m}$ , 粒径的间隔跨度较大。因此, 为了保留粒子分布的全部信息同时突出小粒子的分布特性, 采用对数模型对 OC 和 EC 粒径进行分析, 利用微分概念, 定义为:

$$\text{d}M = M(\lg D_p) \times \text{d} \lg D_p \tag{1}$$

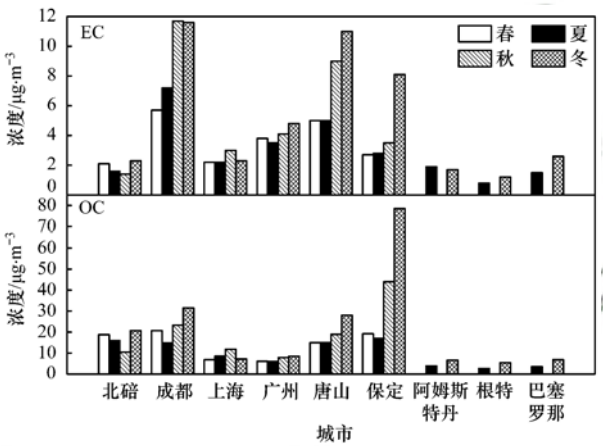


图 1 国内外城市  $\text{PM}_{2.1}$  中 EC 和 OC 的分布  
Fig. 1 Distributions of EC and OC in  $\text{PM}_{2.1}$  of cities at home and abroad

式中,  $\text{d}M$  表示粒径在  $(D_p, D_p + \text{d}D_p)$  范围内的粒子质量浓度,  $M(\lg D_p)$  为质量浓度分布函数<sup>[26]</sup>.  $D_p$  为粒径段之间的平均值, 以  $\text{d}M/\text{d} \lg D_p$  为纵坐标, 以  $D_p$  为横坐标作图, 得到 OC 和 EC 粒径分布。

图 2 为北碚城区全年 OC 和 EC 的粒径分布, 从中可知, OC 在整个粒径上呈现出“双峰型”分布。其中细粒子段峰值出现在  $0.43\sim0.65\text{ }\mu\text{m}$ , 主要来源可能是机动车尾气<sup>[27]</sup>和生物质燃烧排放<sup>[28]</sup>, 还可能通过二次化学生成或气-粒转化而形成<sup>[28]</sup>; 粗粒子段峰出现在  $4.7\sim5.8\text{ }\mu\text{m}$ , 其来源可能有沙尘或土壤的悬浮物<sup>[29]</sup>及生物气溶胶, 如微生物、植物碎片、花粉等<sup>[30]</sup>。

与 OC 粒径的“双峰型”分布相比, EC 粒径分布稍有差异。EC 呈现“三峰型”分布, 其中 EC 细粒子段峰值出现在  $0.43\sim0.65\text{ }\mu\text{m}$  之间, 主要的

来源可能是机动车尾气和生物质燃烧排放<sup>[27]</sup>；粗粒子段峰值出现在  $4.7 \sim 5.8 \mu\text{m}$ ，其来源可能是燃烧过程直接排放的 EC 在沉降过程中与轮胎刹车磨损、道路扬尘、工业排放和建筑活动等产生的地表灰尘混合，通过再次扬尘<sup>[31]</sup>而形成。同时在  $2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$  粒径段还出现一个峰值，主要来源可能是小粒子成核长大和在液滴中发生反应凝结核所致<sup>[22]</sup>。

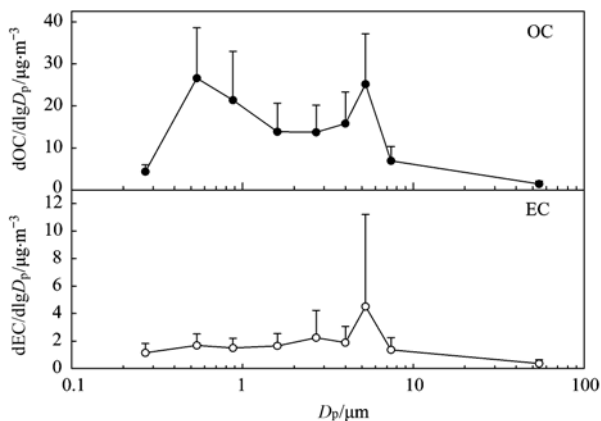


图2 OC与EC粒径分布

Fig. 2 Distributions of OC and EC in different particle size classes

### 3.3 二次有机碳估算

由于 EC 比较稳定，在常温条件下一般不发生大气化学反应，所以常被用作一次污染源排放的示踪物，而 OC 不仅包含了排放源直接排放的 POC，还包括通过光化学反应等途径形成的 SOC。所以，通常利用大气中 OC 与 EC 浓度的比值来识别碳质颗粒物的排放和转化特征，当大气颗粒物中 OC/EC 比值超过一定临界值时，就表示有 SOC 形成<sup>[32]</sup>。Chow 等<sup>[33]</sup>认为 OC/EC 的比值高于 2.0 时，则可认为大气中存在二次污染，且该比值越大，表示 SOC 浓度越高，该结果已被文献<sup>[17,34]</sup>采用。

表 3 为北碚、成都、万州这 3 个城市  $\text{PM}_{2.5}$  中 SOC 浓度及占 OC 浓度百分比的分布情况。从中可知，北碚城区春夏秋冬四季 OC/EC 比值的平均值分别为  $9.0 \pm 4.0$ 、 $11.4 \pm 5.4$ 、 $8.0 \pm 2.2$  和  $8.6 \pm 2.0$ ，各 OC/EC 比值均大于 2，表明在整个观测期间各个季节中都存在 SOC，即使在光化学反应较弱的冬季也均存在 SOC。而且 OC/EC 比值呈现出夏季最大，秋季最小的趋势。

大气颗粒物中的 OC 成分复杂，主要包括 POC 和 SOC，而 SOC 是由大气中的挥发性有机物 (VOCs) 经气粒反应形成的 OC，其含量的确定对细颗粒物污染治理有着重要意义。而 OC/EC 比值只

能定性描述 SOC 的大小，而没有办法定量描述 SOC 大小，为了对 SOC 进行定量描述，本研究采用 Turpin 等<sup>[35]</sup>提出的经验公式，对 SOC 进行定量描述，计算公式如下：

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

式中，SOC 为二次有机碳， $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}}$  为一次排放过程中产生的 OC 与 EC 的质量浓度比，一般是 OC/EC 比值中的最小值，由于 OC/EC 值容易受到气象条件、日变化波动以及排放源等因素影响，仅通过单一参数来确定 SOC 的生成会存在很大偏差<sup>[36]</sup>，本研究选取 OC/EC 比值中最小的 3 个值的平均值作为  $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}}$  的值，其值为 5.48。计算 SOC 的过程如图 3 所示。

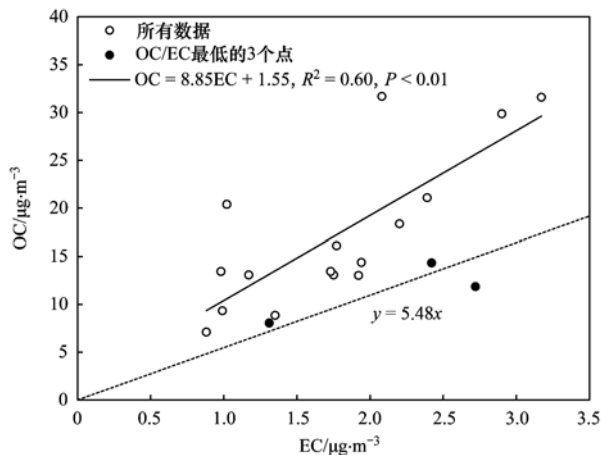


图3  $\text{PM}_{2.5}$ 中SOC计算方法及OC、EC相关性分析

Fig. 3 Calculation of SOC in  $\text{PM}_{2.5}$  and OC, EC correlation analysis

由表 3 可知，北碚城区全年 SOC 平均浓度为  $(6.3 \pm 5.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，占  $\text{PM}_{2.5}$  中 OC 的 38.5% 与 Zhang 等<sup>[37]</sup>在 2013 年重庆万州研究的结果 (SOC:  $9.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，占 OC 的 32.3%) 相近，其中冬季 SOC 浓度最高，其次是夏春季，秋季 SOC 浓度最低，但是与之对应的 SOC/OC 比值却是夏季最高，冬春季次之，秋季最低。北碚城区夏季 SOC 浓度最高可能是因为夏季太阳辐射强烈，通过光化学反应生成的 SOC 浓度较大导致<sup>[38]</sup>，而冬季 SOC 浓度较高可能是冬季气温较低，挥发性有机前体吸附和结合半挥发性有机物到现有颗粒物增强，同时，冬季低温条件也不利于 SOC 扩散<sup>[39]</sup>。

与地理位置相接近的成都<sup>[39]</sup>和万州<sup>[37]</sup>相比较，北碚城区全年 SOC 的年平均质量浓度较低，二次污染较轻，这可能与北碚城区大型工业少，而且靠近缙云山，植被覆盖较多有关。同时，3 个城市中均呈现出冬季 SOC 浓度最大的特点，与成都和万州不同的是，北碚城区夏季 SOC 含量较高，仅次于

冬季，而成都与万州两地夏季 SOC 浓度均最小，这可能是因为北碚城区植被覆盖较多，夏季植被排放的 VOCs(如异戊二烯、萜烯等)增多，最终转化为了 SOC<sup>[7]</sup> 导致。

表 3 北碚、成都、万州这 3 个城市 PM<sub>2.1</sub> 中 SOC 浓度及占 OC 浓度的比

| 季节 | 北碚城区     |                                      |          | 成都                                   |          | 万州                                   |           |
|----|----------|--------------------------------------|----------|--------------------------------------|----------|--------------------------------------|-----------|
|    | OC/EC    | SOC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | SOC/OC/% | SOC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | SOC/OC/% | SOC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | SOC/OC/%  |
| 春季 | 9.0±4.0  | 7.0±8.5                              | 37.4     | 8.2±5.0                              | 39.6%    | 4.2±3.9                              | 34.3±24.8 |
| 夏季 | 11.4±5.4 | 7.4±4.5                              | 46.1     | 4.9±2.3                              | 32.9%    | 1.7±1.3                              | 20.8±13.1 |
| 秋季 | 8.0±2.2  | 3.1±2.3                              | 29.4     | 9.3±3.6                              | 40.0%    | 5.4±4.4                              | 35.0±18.9 |
| 冬季 | 8.6±2.0  | 7.9±7.2                              | 38.1     | 13.0±7.4                             | 41.3%    | 24.6±14.5                            | 38.9±6.5  |
| 全年 | 9.3±3.4  | 6.3±5.9                              | 38.5     | 8.9±4.6                              | 38.5%    | 9.0±10.5                             | 32.3±7.9  |

3.4 污染源分析

OC/EC 比值不仅可以用来评价是否存在二次污染，还可以用来分析碳质颗粒物的来源和排放特征。有报道指出 OC/EC 比值在 1.0~4.2 时为机动车尾气排放<sup>[40]</sup>，其中重型柴油车 OC/EC 比值约为 0.8<sup>[41]</sup>，轻型汽油车为 2.2<sup>[42]</sup>；2.5~10.5 为生物质燃烧排放<sup>[43]</sup>，其中木材燃烧为 4.15<sup>[44]</sup>；地面扬尘为 13.1<sup>[42]</sup>；32.9~81.6 为烹调排放<sup>[45]</sup>。从表 3 可知，北碚城区 PM<sub>2.1</sub> 中春夏秋冬四季 OC/EC 的平均比值分别为 9.0、11.4、8.0 和 8.6，稳定在 8~12 之间。说明北碚城区主要污染源为生物质燃烧排放和地面扬尘。同时北碚城区各个粒径中 OC/EC 都大于 2，说明北碚城区柴油车污染排放少，这与北碚城区采样点的实际情况相符，观测点周围主要为文教、行政和居民区，工厂少，无高大的建筑物和明显的局地排放源，汽车多为居民私家车，无重型和大型柴油车。

Turpin 等认为<sup>[35]</sup>，OC 和 EC 的关系可以进一步用来区分碳质颗粒物的来源，若 OC 与 EC 的相关性好，表明 OC 和 EC 来自相同污染源。因此，利用 OC 和 EC 的相关性可在一定程度上区分含碳气溶胶粒子的来源<sup>[46]</sup>。图 3 为重庆市北碚城区 PM<sub>2.1</sub> 中 SOC 计算方法及 OC、EC 相关性分析。从中可以看出，北碚城区大气 PM<sub>2.1</sub> 中 OC 与 EC 显著相关 ( $R^2=0.60$ ,  $P<0.01$ )，表明北碚城区大气 PM<sub>2.1</sub> 中 OC 和 EC 具有相同的污染来源，且 OC 与 EC 拟合曲线斜率为 8.85，这一比值介于 2.5~10.5 这一范围中，而 OC/EC 比值为 2.5~10.5 之间时，表明为生物质燃烧排放，这说明北碚城区污染主要来源于生物质燃烧排放。

热光反射法 (TOR) 在测定颗粒物中 OC 和 EC 含量的同时，给出 7 个碳质组分的相对含量，即 OC<sub>1</sub>、OC<sub>2</sub>、OC<sub>3</sub>、OC<sub>4</sub>、EC<sub>1</sub>、EC<sub>2</sub> 和 EC<sub>3</sub>。图 4 为全年 7 个碳质组分分布。从中可以看出，OC<sub>2</sub>、OC<sub>3</sub>、

OC<sub>4</sub> 以及 EC<sub>1</sub> 的质量浓度较大，其他 3 个碳质组分 OC<sub>1</sub>、EC<sub>2</sub> 和 EC<sub>3</sub> 的质量浓度较小。源谱测试结果发现<sup>[13, 35, 47]</sup>，机动车尾气排放的细颗粒物 OC<sub>2</sub>、OC<sub>3</sub>、OC<sub>4</sub>、EC<sub>1</sub> 和 EC<sub>2</sub> 含量丰富，其中汽油车尾气中的 EC<sub>1</sub> 含量明显高于柴油车，而柴油车尾气中 EC<sub>2</sub> 和 EC<sub>3</sub> 含量较高。由图 4 可知，北碚城区 PM<sub>2.1</sub> 中 OC<sub>2</sub>、OC<sub>3</sub>、OC<sub>4</sub> 和 EC<sub>1</sub> 的含量都比较高，而 EC<sub>2</sub> 和 EC<sub>3</sub> 的含量较低，说明了北碚城区大气碳质污染主要源于机动车尾气，而且还主要来源于汽油车尾气，这与用 OC/EC 比值法分析的污染来源一致。燃煤排放的细颗粒物中 OC<sub>2</sub> 组分含量丰富，而北碚城区中 OC<sub>2</sub> 的年平均质量浓度在 7 个碳组分中含量最高，说明燃煤排放也是北碚城区碳质气溶胶组分的主要来源之一。OC<sub>1</sub> 是生物质燃烧的特征排放组分，从图 4 中可以发现北碚城区 OC<sub>1</sub> 在春季的含量较其他 3 个季节高，这说明北碚城区春季的生物质燃烧比较多，在治理的时候需要考虑。此外，因道路扬尘混合了沥青颗粒、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，测试结果显示道路扬尘中的 OC<sub>3</sub> 和 OC<sub>4</sub> 含量相对丰富，而本研究中 OC<sub>3</sub> 和 OC<sub>4</sub> 的含量也较高，说明道路扬尘也是北碚城区碳质气溶胶组分的主要来源之一。

为了进一步研究和确定北碚城区碳质气溶胶的来源，应用 SPSS 软件对全年 PM<sub>2.1</sub> 样品中 7 个碳组分进行主成分分析，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，具体结果列于表 4 中。最终得到 3 个特征值大于 1 的因子，其中因子 1 的贡献率最大，达到了 55.3%，OC<sub>3</sub>、OC<sub>4</sub> 和 EC<sub>1</sub> 是主要贡献因子；因子 2 的贡献率为 16.2%，OC<sub>1</sub> 和 OC<sub>2</sub> 是主要贡献因子；因子 3 的贡献率和因子 2 比较接近为 15.0%，主要受 OC<sub>1</sub> 的影响。根据源谱分析发现，OC<sub>3</sub>、OC<sub>4</sub> 和 EC<sub>1</sub> 含量主要受到汽油车尾气的影响，

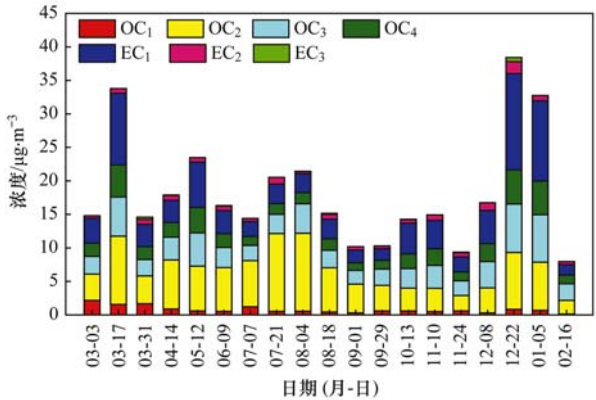


图 4 全年碳质组分浓度

Fig. 4 Concentration of carbon composition for the study year

OC<sub>1</sub> 是生物质燃烧的特征排放组分, 燃煤排放时 OC<sub>2</sub> 组分含量丰富, 说明北碚城区 OC 和 EC 的主要污染来源为汽车尾气和生物质燃烧.

表 4 碳组分主成分分析结果<sup>1)</sup>

Table 4 Principal component analysis of carbon components

| 组分              | 成分      |         |         |
|-----------------|---------|---------|---------|
|                 | 因子 1    | 因子 2    | 因子 3    |
| OC <sub>1</sub> | 0.165   | 0.466 * | 0.861 * |
| OC <sub>2</sub> | 0.485   | 0.500 * | -0.245  |
| OC <sub>3</sub> | 0.935 * | 0.189   | -0.203  |
| OC <sub>4</sub> | 0.935 * | 0.169   | -0.054  |
| EC <sub>1</sub> | 0.968 * | 0.077   | -0.003  |
| EC <sub>2</sub> | 0.769   | -0.521  | -0.048  |
| EC <sub>3</sub> | 0.576   | -0.572  | 0.447   |
| 贡献率/%           | 55.3    | 16.2    | 15.0    |
| 特征值             | 3.869   | 1.136   | 1.047   |

1) \* 表示识别因子特征组分的因子载荷值

4 结论

(1)北碚城区大气 PM<sub>2.1</sub> 中 OC、EC 质量浓度的年均值为 (16.3 ± 7.6) μg·m<sup>-3</sup> 和 (1.8 ± 0.7) μg·m<sup>-3</sup>. PM<sub>9.0</sub> 中 OC、EC 质量浓度的年平均值为 (25.0 ± 9.6) μg·m<sup>-3</sup> 和 (3.2 ± 1.3) μg·m<sup>-3</sup>. 与历史观测值相比, 浓度降低, 说明北碚城区近几年间大气污染减轻.

(2)北碚城区大气 PM<sub>2.1</sub> 中 OC 和 EC 的质量浓度均呈现出冬春季大于夏秋季的季节变化特征. 而 PM<sub>9.0</sub> 中 OC 呈现出夏春季大于冬秋季的季节变化特征, 主要是由于夏季 OC 中粗粒子质量浓度显著增加导致, 而 EC 与 PM<sub>2.1</sub> 中呈现的季节变化特征相似为冬春季大于夏秋季.

(3)北碚城区大气 OC 和 EC 主要赋存在细粒子中, 在整个粒径上, OC 全年呈现出“双峰型”分布, 其中细粒子段峰值位于 0.43 ~ 0.65 μm 粒径段, 粗粒子段峰值位于 4.7 ~ 5.8 μm 粒径段; EC

呈现出“三峰型”分布, 其中细粒子段峰值位于 0.43 ~ 0.65 μm 粒径段, 粗粒子段峰值位于 4.7 ~ 5.8 μm 粒径段, 同时在粗细粒子之间的 2.1 ~ 3.3 μm 粒径段也出现一个明显峰值.

(4)各粒径以及各季节中 OC/EC 比值都超过 2.0, 北碚城区存在二次有机碳, SOC 平均浓度为 (6.3 ± 5.9) μg·m<sup>-3</sup>, 占了 OC 浓度的 38.5%.

(5)对全年 7 个碳质组分进行主成分分析, 并结合 OC/EC 比值, 发现北碚城区大气污染源主要为汽油车尾气排放、生物质燃烧和燃煤排放.

参考文献:

[ 1 ] 曹军骥, 占长林. 黑碳在全球气候和环境系统中的作用及其在相关研究中的意义[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33 (2): 177-184.  
Cao J J, Zhan C L. Research significance and role of black carbon in the global climate and environmental systems [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(2): 177-184.  
[ 2 ] 田鹏山, 曹军骥, 韩永明, 等. 关中地区冬季 PM<sub>2.5</sub> 中碳气溶胶的污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 427-433.  
Tian P S, Cao J J, Han Y M, et al. Pollution characteristics and sources of carbonaceous aerosol in PM<sub>2.5</sub> during winter in Guanzhong area [J]. Environmental Science, 2016, 37(2): 427-433.  
[ 3 ] 张懿华, 王东方, 赵倩彪, 等. 上海城区 PM<sub>2.5</sub> 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析[J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3263-3270.  
Zhang Y H, Wang D F, Zhao Q B, et al. Characteristics and sources of organic carbon and elemental carbon in PM<sub>2.5</sub> in Shanghai urban area [J]. Environmental Science, 2014, 35(9): 3263-3270.  
[ 4 ] 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京地区大气 PM<sub>1.1</sub> 中 OC、EC 特征及来源解析[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 774-779.  
Jiang W J, Guo Z B, Liu F L, et al. Characteristics and sources apportionment of OC and EC in PM<sub>1.1</sub> from Nanjing [J]. Environmental Science, 2015, 36(3): 774-779.  
[ 5 ] Feng Y L, Chen Y J, Guo H, et al. Characteristics of organic and elemental carbon in PM<sub>2.5</sub> samples in Shanghai, China [J]. Atmospheric Research, 2009, 92(4): 434-442.  
[ 6 ] Li B, Zhang J, Zhao Y, et al. Seasonal variation of urban carbonaceous aerosols in a typical city Nanjing in Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, 106: 223-231.  
[ 7 ] 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京市 PM<sub>2.1</sub> 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.  
Wu M L, Guo Z B, Liu F L, et al. Pollution characteristics and influencing factors of organic and elemental carbon in PM<sub>2.1</sub> in Nanjing [J]. China Environmental Science, 2013, 33(7): 1160-1166.  
[ 8 ] 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.
- [9] Harrison R M, Yin J X. Sources and processes affecting carbonaceous aerosol in central England [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(7): 1413-1423.
- [10] 樊晓燕, 温天雪, 徐仲均, 等. 北京大气颗粒物碳质组分粒径分布的季节变化特征[J]. 环境化学, 2013, **32**(5): 742-747.
- Fan X Y, Wen T X, Xu Z J, *et al.* Characteristics and size distributions of organic and element carbon of atmospheric particulate matters in Beijing, China [J]. Environmental Chemistry, 2013, **32**(5): 742-747.
- [11] 郭育红, 辛金元, 王跃思, 等. 保定市大气颗粒物中含碳组分粒径分布[J]. 气候与环境研究, 2014, **19**(2): 185-192.
- Guo Y H, Xin J Y, Wang Y S, *et al.* A study of size distributions of carbonaceous species in ambient particles in Baoding, China [J]. Climatic and Environmental Research, 2014, **19**(2): 185-192.
- [12] 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.
- Guo Y H, Xin J Y, Wang Y S, *et al.* Observation of size distribution of atmospheric OC/EC in Tangshan, China [J]. Environmental Science, 2013, **34**(7): 2497-2504.
- [13] 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**(11): 3127-3137.
- [14] 叶堤, 蒋昌潭, 赵琦, 等. 重庆市春季大气 PM<sub>10</sub> 中有机碳、元素碳浓度水平及污染特征分析[J]. 中国环境监测, 2007, **23**(3): 69-73.
- Ye D, Jiang C T, Zhao Q, *et al.* Pollution character of organic carbon and elemental carbon in PM<sub>10</sub> during springtime in Chongqing [J]. Environmental Monitoring in China, 2007, **23**(3): 69-73.
- [15] 彭超, 翟崇治, 王欢博, 等. 万州城区夏季、冬季 PM<sub>2.5</sub> 中有机碳和元素碳的浓度特征[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(6): 1638-1644.
- Peng C, Zhai C Z, Wang H B, *et al.* Characteristics of organic carbon and elemental carbon in PM<sub>2.5</sub> in the urban Wanzhou area in summer and winter [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(6): 1638-1644.
- [16] 王红磊, 朱彬, 安俊琳, 等. 亚青会期间南京市气溶胶中 OC 和 EC 的粒径分布[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3271-3279.
- Wang H L, Zhu B, An J L, *et al.* Size distribution and characterization of OC and EC in atmospheric aerosols during the Asian Youth Games of Nanjing, China [J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3271-3279.
- [17] 霍静, 李彭辉, 韩斌, 等. 天津秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 碳组分化学特征与来源分析[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(12): 1937-1942.
- Huo J, Li P H, Han B, *et al.* Character and source analysis of carbonaceous aerosol in PM<sub>2.5</sub> during autumn-winter period, Tianjin [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(12): 1937-1942.
- [18] 祁建华, 高会旺. 生物气溶胶研究进展: 环境与气候效应[J]. 生态环境, 2006, **15**(4): 854-861.
- Qi J H, Gao H W. Environment and climate effect of bioaerosol: a review [J]. Ecology and Environment, 2006, **15**(4): 854-861.
- [19] 周雅清. 西安 2011 年世园会期间 PM<sub>2.5</sub> 特征、来源及其光学性质[D]. 西安: 中国科学院研究生院(地球环境研究所), 2015.
- Zhou Y Q. PM<sub>2.5</sub> mass, chemical composition, and optical properties during the 2011 Xi'an international horticultural exposition [D]. Xi'an: Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [20] Spracklen D V, Mickley L J, Logan J A, *et al.* Impacts of climate change from 2000 to 2050 on wildfire activity and carbonaceous aerosol concentrations in the western United States [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, **114**(D20): D20301.
- [21] 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.
- Duan F K, He K B, Liu X D, *et al.* Review of carbonaceous aerosol studies: organic carbon and elemental carbon [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007, **1**(8): 1-8.
- [22] Whitby K T, Husar R B, Liu B Y H. The aerosol size distribution of Los Angeles smog [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1972, **39**(1): 177-204.
- [23] John W, Wall S M, Ondo J L, *et al.* Modes in the size distributions of atmospheric inorganic aerosol [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1990, **24**(9): 2349-2359.
- [24] 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.
- Huang H, Cao J J, Tsang P K, *et al.* Characterization of organic carbon, elemental carbon and water-soluble organic carbon in PM<sub>2.5</sub> of Guangzhou city [J]. Journal of Analytical Science, 2010, **26**(3): 255-260.
- [25] 陈源, 谢绍东, 罗彬. 成都市大气细颗粒物组成和污染特征分析(2012—2013 年) [J]. 环境科学学报, 2016, **36**(3): 1021-1031.
- Chen Y, Xie S D, Luo B. Composition and pollution characteristics of fine particles in Chengdu from 2012 to 2013 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(3): 1021-1031.
- [26] 许万智, 赵凤生. 北京市秋季大气气溶胶质量浓度谱分布特征的观测研究 [J]. 环境科学学报, 2013, **33**(8): 2105-2114.
- Xu W Z, Zhao F S. Observational study on the size distribution characteristics of atmospheric aerosol mass concentration in autumn of Beijing City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(8): 2105-2114.
- [27] 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.
- [28] Glaser B, Dreyer A, Bock M, *et al.* Source apportionment of organic pollutants of a highway-traffic-influenced urban area in Bayreuth (Germany) using biomarker and stable carbon isotope signatures [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(11): 3911-3917.
- [29] Bi X H, Sheng G Y, Peng P A, *et al.* Size distribution of n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban

- and rural atmospheres of Guangzhou, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(3): 477-487.
- [30] Lan Z J, Chen D L, Li X, *et al.* Modal characteristics of carbonaceous aerosol size distribution in an urban atmosphere of South China[J]. *Atmospheric Research*, 2011, **100**(1): 51-60.
- [31] Salma I, Maenhaut W, Zúray G. Comparative study of elemental mass size distributions in urban atmospheric aerosol[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2002, **33**(2): 339-356.
- [32] 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.
- [33] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(12): 2079-2112.
- [34] 云龙龙, 陆钊, 张天舒, 等. 无锡市冬季典型天气 PM<sub>2.5</sub> 中碳组分的污染特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3280-3286.
- Yun L L, Lu F, Zhang T S, *et al.* Pollution characteristics of carbonaceous aerosols in PM<sub>2.5</sub> during typical winter days in Wuxi City[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3280-3286.
- [35] Turpin B J, Huntzicker J J. Secondary formation of organic aerosol in the Los Angeles Basin: a descriptive analysis of organic and elemental carbon concentrations [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1991, **25**(2): 207-215.
- [36] 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.
- [37] Zhang L Y, Huang Y M, Liu Y, *et al.* Characteristics of carbonaceous species in PM<sub>2.5</sub> in Wanzhou in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir of Northeast Chongqing, China[J]. *Atmosphere*, 2015, **6**(4): 534-546.
- [38] 刘珊, 彭林, 温彦平, 等. 太原市 PM<sub>2.5</sub> 中有机碳和元素碳的污染特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 396-401.
- Liu S, Peng L, Wen Y P, *et al.* Pollution characteristics of organic and elemental carbon in PM<sub>2.5</sub> in Taiyuan [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 396-401.
- [39] 范忠雨, 李友平, 杨铮铮, 等. 成都市 PM<sub>2.5</sub> 中有机碳和元素碳的污染特征及来源[J]. *四川环境*, 2016, **35**(2): 76-81.
- Fan Z Y, Li Y P, Yang Z Z, *et al.* Pollution characteristics and sources of organic carbon and elemental carbon in PM<sub>2.5</sub> of Chengdu City[J]. *Sichuan Environment*, 2016, **35**(2): 76-81.
- [40] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 4. C<sub>1</sub>-C<sub>27</sub> organic compounds from cooking with seed oils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 567-575.
- [41] Hildemann L M, Markowski G R, Cass G R. Chemical composition of emissions from urban sources of fine organic aerosol [J]. *Environmental Science & Technology*, 1991, **25**(4): 744-759.
- [42] Watson J G, Chow J C, Lu Z Q, *et al.* Chemical mass balance source apportionment of PM<sub>10</sub> during the Southern California air quality study [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1994, **21**(1): 1-36.
- [43] 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): L20815.
- [44] Watson J G, Chow J C, Houck J E, *et al.* PM<sub>2.5</sub> chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995 [J]. *Chemosphere*, 2001, **43**(8): 1141-1151.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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

|                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| An Assessment of PM <sub>2.5</sub> -Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities .....                                                                                                                  | LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)                         |
| Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River ...                                                                                         | SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)                     |
| Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and PM <sub>2.5</sub> Concentration Target Constraint .....                                                                                                         | LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, <i>et al.</i> (3485)        |
| Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS) .....                                                                          | WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, <i>et al.</i> (3492)              |
| Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing .....                                                                                                     | PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3502)         |
| Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo .....                                                                                                              | XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, <i>et al.</i> (3511)                |
| Emission Characteristics and Chemical Components of PM <sub>2.5</sub> from Open Burning of Municipal Solid Waste .....                                                                                                           | WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, <i>et al.</i> (3518)                 |
| Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China .....                                                                                                                            | YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-ni, <i>et al.</i> (3524)       |
| Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons (NMHC) in Dalian .....                                                                                                                                           | Ji De-yu (3535)                                                       |
| Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period .....                                                                                                          | ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (3544)   |
| Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province .....                                                                            | WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3552)         |
| Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents .....                                                                            | ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, <i>et al.</i> (3557)               |
| Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006 .....                                                                                                                     | HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (3563)           |
| Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow .....                                                                                                           | FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)                         |
| Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing .....                                                                                                                            | TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, <i>et al.</i> (3580)   |
| Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project .....                                                                  | LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, <i>et al.</i> (3591)                    |
| Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter .....                                                                                      | LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)                             |
| Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake .....                                                                                       | ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, <i>et al.</i> (3614)         |
| Nitrogen and Phosphorous Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall .....                                                                                   | YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, <i>et al.</i> (3622)           |
| Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta .....                                                                                                                      | ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3631)   |
| Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay .....                                                                                                                                            | XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, <i>et al.</i> (3640)            |
| Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors .....                                                                                                      | CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, <i>et al.</i> (3649)                 |
| Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors .....                                                                                                                         | WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, <i>et al.</i> (3660)               |
| Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors ..... | ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, <i>et al.</i> (3670)      |
| Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal .....                                                                                                                    | LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3677)         |
| Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N <sub>2</sub> O Emissions in Ditches Under Different Land Uses .....                                                                                        | SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, <i>et al.</i> (3689)           |
| Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments .....                                                                                                                               | SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, <i>et al.</i> (3696)                   |
| Effect of Cr(VI) on Coagulation Process of Different Coagulants .....                                                                                                                                                            | GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, <i>et al.</i> (3704)                  |
| Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /BiVO <sub>4</sub> Composite Photoanode .....                                               | LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (3713)              |
| Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(II) .....                                                                                    | YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, <i>et al.</i> (3719)          |
| Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar .....                                                                                                                                                     | ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)                                    |
| Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater .....                                                                                                                   | CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, <i>et al.</i> (3736)              |
| Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control .....                                                                                                                    | GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, <i>et al.</i> (3744)          |
| Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal .....                                                                                                                                                            | YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, <i>et al.</i> (3753)                   |
| Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance .....                                                                                                                                       | CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, <i>et al.</i> (3759)                  |
| Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process .....                                                                                                                                                          | XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, <i>et al.</i> (3767)                |
| Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System .....                                                                                                                                            | MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3775)                  |
| Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process .....                                                                                                                               | WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, <i>et al.</i> (3782)              |
| Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions .....                                                                                                        | KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3789) |
| Characteristic of Benzo[a]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge .....                                                                                           | WU Hai-zhen, HU Xiao-yi, WANG Ming, <i>et al.</i> (3797)              |
| Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge .....                                                                                                                                 | LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, <i>et al.</i> (3807)           |
| Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain .....                                                                                    | LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i> (3816)    |
| Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil .....                                                                                                                                        | CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, <i>et al.</i> (3826)               |
| Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure .....                                                  | SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)                           |
| Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing .....                                                                                                 | LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, <i>et al.</i> (3845)                 |
| Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil .....                                                                                                                            | YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3854)         |
| Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique .....                                                                                                                 | LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3867)               |
| Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forests of the Guandi Mountains .....                                                                            | ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)                            |
| Effects of Transgenic Maize with <i>cry1Ab</i> and <i>Epsps</i> Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria .....                                                                  | WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, <i>et al.</i> (3885)                       |
| Effects of Gypsum on CH <sub>4</sub> Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil .....                                                                                                                           | HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)                        |
| Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles .....                                                                                                                                  | DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3901)          |
| Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of <i>Suaeda salsa</i> in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta .....                                        | SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, <i>et al.</i> (3910)            |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River .....                                                                             | KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, <i>et al.</i> (3917)        |
| Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate .....                                                                                                                                                            | TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (3927)            |
| Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance .....                                                                                                                                    | ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, <i>et al.</i> (3937)                           |
| Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO <sub>2</sub> Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China .....                                                                                                             | LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-yi, <i>et al.</i> (3946)                     |
| Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water .....                                                                                                                                                          | YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (3954)       |