

# 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, 程轲, 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, 元燕铭, 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)

太湖重点区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)

珠江三角洲高钾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, 张剑峰, 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, 王洪伦, 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, 吕锋, 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, 钊珍芳, 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, 李磊, 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镉 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, 许新 (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, 何晓漪, 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)

# 杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析

徐宏辉<sup>1</sup>, 徐婧莎<sup>2</sup>, 何俊<sup>2\*</sup>, 浦静姣<sup>1</sup>, 齐冰<sup>3</sup>, 杜荣光<sup>3</sup>

(1. 浙江省气象科学研究所, 杭州 310008; 2. 宁波诺丁汉大学化学环境工程系, 宁波 315100; 3. 杭州市气象局, 杭州 310051)

**摘要:** 为了研究杭甬地区大气气溶胶中含碳气溶胶的季节性变化和它们的来源, 于 2014 年 12 月至 2015 年 11 月收集了杭州和宁波 2 个城市中 4 个采样点的 PM<sub>2.5</sub> 样品, 利用碳热光学分析仪测定了样品中 8 种碳组分, 获得了有机碳 (OC) 和元素碳 (EC) 的质量浓度. 在此基础上, 估算了含碳气溶胶总量 (TCA) 和二次有机碳 (SOC) 的浓度水平, 根据 OC 与 EC 的相关性、比值和不同碳组分的特征, 分析了主要来源. 结果表明: ①杭甬地区总碳 (TC) 年均浓度为 (14.3 ± 4.1) μg·m<sup>-3</sup>, 占年均 PM<sub>2.5</sub> 浓度的 (26.2 ± 6.5)%; OC 和 EC 的年均浓度分别为 (11.3 ± 3.4) μg·m<sup>-3</sup> 和 (3.0 ± 0.9) μg·m<sup>-3</sup>. 4 季中, 冬季 TC 浓度最高; ②杭甬地区估算的 TCA 年均浓度为 (25.6 ± 7.5) μg·m<sup>-3</sup>, 占 PM<sub>2.5</sub> 的 (42.2 ± 10.0)%, SOC 占 OC 年均值的 (41.1 ± 5.5)%; ③杭甬地区年均 OC/EC 比值为 4.7 ± 1.7, 落在汽车尾气排放, 煤炭燃烧和生物燃料燃烧的区间内, 说明这些排放源都是含碳气溶胶的主要来源. 各个采样点在秋冬季都具有更高的 char-EC/soot-EC 比值, 表明了这 2 个季节生物质燃烧活动的贡献也不容忽视.

**关键词:** 有机碳 (OC); 元素碳 (EC); PM<sub>2.5</sub>; 来源; 杭甬地区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)08-3511-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201712245

## Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo

XU Hong-hui<sup>1</sup>, XU Jing-sha<sup>2</sup>, HE Jun<sup>2\*</sup>, PU Jing-jiao<sup>1</sup>, QI Bing<sup>3</sup>, DU Rong-guang<sup>3</sup>

(1. Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008, China; 2. Department of Chemical and Environmental Engineering, University of Nottingham Ningbo China, Ningbo 315100, China; 3. Hangzhou Meteorological Bureau, Hangzhou 310051, China)

**Abstract:** To investigate the seasonal variations and sources of carbonaceous aerosols in the cities of Hangzhou and Ningbo, field PM<sub>2.5</sub> sampling was conducted at four representative sites (two urban, one suburban, and one rural) in this region from December 2014 to November 2015. A thermal/optical carbon analyzer was employed to analyze both organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) contents in PM<sub>2.5</sub> by identifying eight different carbon fractions, including OC1, OC2, OC3, OC4 + OPC, EC1 - OPC, EC2, and EC3. Based on these fractions, OC and EC were defined as OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + OPC and EC1 + EC2 + EC3 - OPC, respectively; total carbon (TC) was calculated as the sum of OC and EC; and total carbonaceous aerosols (TCAs) were quantified via the sum of organic aerosols (OAs; converted from OC) and EC. The results showed the following. ①The annual average level of TC in this region was (14.3 ± 4.1) μg·m<sup>-3</sup>, accounting for (26.2 ± 6.5)% of the annual average PM<sub>2.5</sub> concentration. The annual average OC and EC concentrations were (11.3 ± 3.4) μg·m<sup>-3</sup> and (3.0 ± 0.9) μg·m<sup>-3</sup>, respectively. The highest TC level was observed in winter among the four seasons. ②The annual average TCA concentration in this region was (25.6 ± 7.5) μg·m<sup>-3</sup>, contributing (42.2 ± 10.0)% of PM<sub>2.5</sub>. In addition, secondary organic carbon (SOC) was also estimated by the commonly applied EC method. It was found that SOC contributed (41.1 ± 5.5)% to OC on an annual average basis. ③The sources of carbonaceous aerosols were determined using the correlation between OC and EC, OC/EC mass ratio, and different carbon fraction characteristics. The annual average OC/EC ratio in this region was 4.7 ± 1.7, which falls in the diagnostic ratio range for vehicular emissions, coal combustion, and biomass burning, indicating these sources are probably the major contributors of the regional carbonaceous aerosols. Moreover, a higher char-EC/soot-EC ratio was observed during winter and autumn at all sites, possibly implying the enhanced biomass burning activities during these two seasons.

**Key words:** organic carbon (OC); elemental carbon (EC); PM<sub>2.5</sub>; sources; cities of Hangzhou and Ningbo

含碳气溶胶是大气细颗粒 (PM<sub>2.5</sub>) 的重要成分, 在城区 PM<sub>2.5</sub> 中所占比例可达到 40%<sup>[1]</sup>. 含碳气溶胶通常分为有机碳 (OC) 和元素碳 (EC), 后者在用光学方法测量时也被称为黑碳<sup>[2]</sup>. EC 是继 CO<sub>2</sub> 之后导致全球变暖的第二大成分<sup>[3]</sup>, 它对大气中太阳

收稿日期: 2017-12-29; 修订日期: 2018-02-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0201900); 国家自然科学基金项目 (91544229, 41303091); 宁波市室内空气污染净化技术创新团队项目 (2017C510001)

作者简介: 徐宏辉 (1978 ~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大气环境, E-mail: forsnow@126.com

\* 通信作者, E-mail: Jun. He@nottingham.edu.cn

辐射强烈的吸收作用会减少到达地面的太阳辐射总量因而会导致作物减产<sup>[4,5]</sup>. OC 是由上百种有机物混合的复杂物质,其中包括致癌多环芳香烃(PAHs),脂肪链烃和有机酸等<sup>[6~8]</sup>,它能够吸收太阳辐射,对气候和人类健康都会产生负面影响<sup>[9]</sup>.

由于含碳气溶胶的重要性,国内外已经开展了广泛的研究.目前,我国含碳气溶胶的研究主要集中在京津冀、珠三角等地区<sup>[10,11]</sup>.长三角地区对霾及颗粒物的观测研究通常关注单个城市的污染事件(如上海、南京),观测的物种或参数也大都单一<sup>[12~14]</sup>.在浙江地区对含碳气溶胶的研究相对比较缺乏.

本研究针对浙江省主要的两大城市杭甬地区的大气细粒子开展了多点同步观测,分析含碳气溶胶组分的浓度变化,解析 PM<sub>2.5</sub> 中含碳物质的主要来源,以期厘清该区域内颗粒物中关键物种的来源和制定有效防治措施提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 观测地点

如图 1,所选取的站点包含城区、城郊及偏远本底站,观测点介绍如下.

杭州气象局国家基准气候站(HMB;经纬度:北纬 30.22°,东经 120.17°):城区观测点,位于杭州市区中心人口密集区域,周围 200 m 区域内有交通密集的道路.

宁波气象局观测站(NMB;经纬度:北纬 29.86°,东经 121.52°):城区观测点,位于宁波城市中心主干道(气象路)上,和居民住宅区毗邻,距离机场高架桥约 1 km,省际高速约 500 m.

宁波鄞州高教园区观测站(UNNC;经纬度:北纬 29.80°,东经 121.56°):城郊观测点,位于宁波市南部的大学园区宁波诺丁汉大学内,距离中心商业区约 10 km,该区域作为同时被城区和郊区排放

污染源影响的中间过渡区域.

临安区域大气本底站(LRABS;经纬度:北纬 30.30°,东经 119.73°):偏远地区观测点,处于杭州市所辖临安市郊区,是隶属于世界气象组织全球大气观测网络的本底监测站.监测站周围是农田和森林,受到工业化和交通类排放的影响较小.

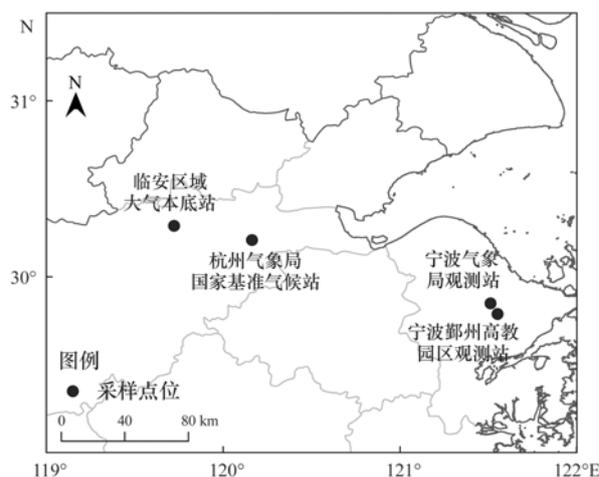


图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Locations of the sampling sites

### 1.2 观测方法

每个站点从 2014 年 12 月至 2015 年 11 月每 6 d 一次同步进行 PM<sub>2.5</sub> 采样.所用仪器为美国 Airmetrics 便携式采样器,使用 47 mm 石英膜采样,采样流速分别为 5 L·min<sup>-1</sup>;每月在这 4 个采样点取 1 次空白样本.所有的滤膜使用前在 550℃ 的马弗炉内预烘烤 5 h 以去除残留的有机杂质.滤膜在采样前后皆在恒温(22 ± 1)℃、恒湿(30 ± 5)% 下平衡 24 h 并通过微量天平(型号:SE2-F,赛多利斯,精确度 0.1 μg)进行称重.然后将所有的滤膜包裹在预烘烤过的铝箔中并存储在 -20℃ 以下直至进行样品分析.本研究中使用的气象数据(风速、降水、温度以及相对湿度)从距离每个采样点最近气象站获取,相关数据见表 1.

表 1 采样期间杭甬地区 4 个采样点 PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度和气象参数平均值

Table 1 PM<sub>2.5</sub> concentrations and meteorological parameters during the sampling period

时间	PM <sub>2.5</sub> 浓度/μg·m <sup>-3</sup>	风速/m·s <sup>-1</sup>	降水量/mm	温度/℃	相对湿度/%
2014 年冬季	93.1 ± 38.4	2.0 ± 0.3	33.0	6.3 ± 0.5	64.1 ± 1.4
2015 年春季	65.1 ± 30.9	2.1 ± 0.3	42.8	15.7 ± 0.2	71.1 ± 5.0
2015 年夏季	37.8 ± 16.2	2.0 ± 0.3	103.3	26.7 ± 0.7	77.8 ± 3.6
2015 年秋季	61.3 ± 34.5	1.8 ± 0.3	32.8	18.1 ± 0.8	76.0 ± 2.7
年均值	66.2 ± 37.7	2.0 ± 0.3	211.9	16.7 ± 0.5	72.3 ± 3.1

### 1.3 实验方法

采用美国沙漠研究所(DRI)的碳热光学分析

仪(型号 2001A),应用热光学反射(TOR)法来分析 PM<sub>2.5</sub> 中 OC 和 EC 含量.在分析过程中,通过逐

步加热滤膜(膜面积:  $0.502 \text{ cm}^2$ ) 从室温到  $840^\circ\text{C}$  来确定不同的碳成分, 其中包含在纯氮气中检测 OC1 ( $140^\circ\text{C}$ ), OC2 ( $280^\circ\text{C}$ ), OC3 ( $480^\circ\text{C}$ ) 和 OC4 + OPC ( $580^\circ\text{C}$ ), 在  $98\% \text{ He}/2\% \text{ O}_2$  环境中检测 EC1-OPC ( $580^\circ\text{C}$ ), EC2 ( $740^\circ\text{C}$ ) 和 EC3 ( $840^\circ\text{C}$ ); 其中 OPC 特指热解有机碳<sup>[15]</sup>. OC 的组成可视为 OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + OPC, EC 的成分可视为 EC1 + EC2 + EC3-OPC, 总碳 (TC) 指 OC 和 EC 含量之和.

## 2 结果与讨论

### 2.1 TC、OC 和 EC 的浓度水平

杭甬地区  $\text{PM}_{2.5}$  中总碳的年均浓度为  $(14.3 \pm 4.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 占年均  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的  $(26.2 \pm 6.5)\%$ . 该结果与我国南部  $\text{PM}_{2.5}$  中的总碳含量相当 [TC:  $(15.0 \pm 2.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]<sup>[16]</sup>, 低于北京 (TC:  $32.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[17]</sup>, 然而比发达国家的许多城市例如西班牙巴塞罗那 (TC:  $5.1 \sim 9.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 荷兰阿姆斯特丹 (TC:  $5.6 \sim 8.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[18]</sup>, 英国伯明翰 (TC:  $4.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 都要高<sup>[19]</sup>. 4 个采样点中, 总碳含量的年均值占  $\text{PM}_{2.5}$  的比例从大到小依次为: UNNC ( $31.9\%$ ) > HMB ( $30.1\%$ ) > LRABS ( $25.8\%$ ) > NMB ( $17.2\%$ ).

杭甬地区  $\text{PM}_{2.5}$  中 OC 的年均浓度为  $(11.3 \pm 3.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 其中最大值出现在 HMB [ $(15.3 \pm$

$6.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ], 最小值在 NMB [ $(7.2 \pm 3.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]. 杭甬地区  $\text{PM}_{2.5}$  中 EC 的年均浓度为  $(3.0 \pm 0.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 低于 OC 浓度. EC 的最高浓度出现在 HMB [ $(4.3 \pm 2.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ], 最低值出现在 UNNC [ $(2.3 \pm 1.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]. 最低的 EC 浓度水平出现在郊区 UNNC, 这可能与该地区排放源较少并且风速是 4 个采样点最高 [年均风速  $(2.3 \pm 0.8) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] 有关, 强风有助于污染物的扩散. 本研究中 OC 和 EC 的年均浓度和上海的观测结果相当 ( $14.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $6.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[20]</sup>, 但低于在北京的 OC 和 EC 的年均浓度 ( $29.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $10.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[21]</sup>.

如图 2 所示, 冬季 TC 的浓度最高, 这与其它地区如北京<sup>[17]</sup>、广州<sup>[22]</sup>、上海<sup>[7]</sup> 的结果一致. 根据后向轨迹分析, 来自华北等高污染地区的远距离输送气团以及冬季静稳气象条件有利于污染物的积累, 可能是杭甬地区 TC 的浓度高的原因. 夏季的 TC 浓度水平在 4 个采样点不相同, 但是所有采样点夏季 TC/ $\text{PM}_{2.5}$  的比值在四季中是最高的. 太阳辐射和二次有机气溶胶的形成有很大相关性<sup>[23]</sup>, 夏季强太阳辐射会导致产生相对更多的二次有机气溶胶, 这是 TC/ $\text{PM}_{2.5}$  比值高的原因之一. 此外, 该地区夏季的火点 (图 3) 是四季中最多的, 夏季生物质的燃烧排放是一种重要来源, 贡献了较多的有机气溶胶.

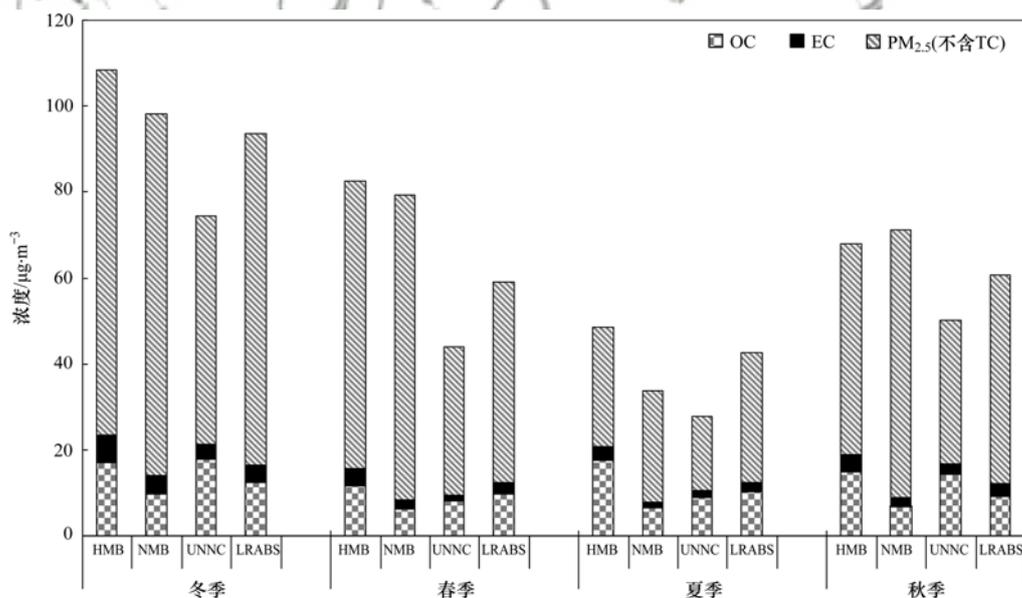


图 2 杭甬地区 4 个采样点  $\text{PM}_{2.5}$  及其碳成分的季均浓度

Fig. 2 Seasonal variation of the concentrations of  $\text{PM}_{2.5}$ , OC and EC

### 2.2 TCA 和 SOC 的估算

有机气溶胶 (OA) 由氢, 氧, 氮共同组成的含

碳化合物. 为了估算 OA 浓度, 引入了 OC 和 OA 的转化因子. 该转化因子是有机物分子质量与其中所

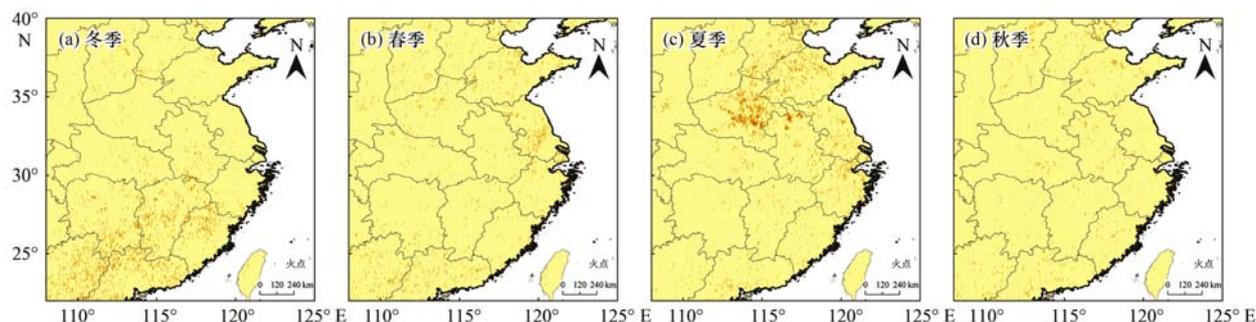


图3 采样期间季节性火点

Fig. 3 Locations of fires in different seasons during the sampling period

含碳质量的平均比值<sup>[8]</sup>. 老化的气溶胶的转化因子在 1.9~2.3 之间, 生物燃料燃烧生成的气溶胶该因子在 2.2~2.6 之间, 城区的气溶胶转化因子为  $(1.6 \pm 0.2)^{[24]}$ . 在本研究中, 考虑到长三角杭甬地区的气溶胶有着 3 种来源: 当地化石燃料的燃烧, 生物质燃烧, 以及气团的长距离传输, 使用 2.0 作为 OC 与 OA 的转化因子<sup>[8]</sup>. 含碳气溶胶总量 (TCA) 是 OA 和 EC 之和. 如表 2, 杭甬地区 TCA 的年均浓度为  $(25.6 \pm 7.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 占了  $\text{PM}_{2.5}$  的  $(42.2 \pm 10.0)\%$ , 说明含碳气溶胶占了长三角杭甬地区空气颗粒物的很大一部分. UNNC, NMB, LRABS 和 HMB 年均 TCA 浓度分别为  $(26.7 \pm 16.2)$ 、 $(17.0 \pm 8.3)$ 、 $(23.6 \pm 9.1)$  和  $(35.0 \pm 13.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 最低的年均 TCA 浓度  $(17.0 \pm 8.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 TCA/ $\text{PM}_{2.5}$  比值  $(30.3 \pm 14.7)\%$  均出现在 NMB, 表明该地区  $\text{PM}_{2.5}$  中含碳气溶胶较少, 无机气溶胶含量较多. 杭甬地区, TCA 的浓度变化遵循以下趋势: 冬季  $[(33.0 \pm 8.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$  秋季  $[(25.3 \pm 8.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$  夏季  $[(23.7 \pm 10.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] >$  春季  $[(20.3 \pm 5.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ . 夏秋季的 TCA/ $\text{PM}_{2.5}$  比值要比春冬季要高.

为了估计二次有机碳 (SOC) 的浓度, 本文采用了一种以 EC 为示踪物的方法<sup>[25, 26]</sup>, 其公式如下:

$$\text{SOC} = \text{OC} - \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}} \quad (1)$$

式中,  $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}}$  可由最低的 OC/EC 比值来代替, 这里假设有着最低 OC/EC 比值的样品中的 SOC 含量可以忽略. 由于  $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}}$  的值很大程度上取决于采样点和季节, 因此, 计算 SOC 时  $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}}$  从 4 个采样点的每个季节值分别选取. 本研究中  $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pri}}$  的值在 4 个采样点的冬季, 春季, 夏季和秋季分别为: 3.0、3.1、4.2、3.8 (UNNC); 1.3、1.8、2.1、1.2 (NMB); 1.6、1.9、2.4、2.1 (LRABS); 1.6、1.9、3.9、2.7 (HMB).

在杭甬地区, SOC  $[(4.7 \pm 0.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$  占 OC

年均量的  $(41.1 \pm 5.5)\%$ . 估算得到的年均 SOC 浓度在 UNNC、NMB、LRABS 和 HMB 分别为  $(4.8 \pm 4.4)$ 、 $(3.6 \pm 2.1)$ 、 $(4.9 \pm 3.2)$  和  $(5.6 \pm 4.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 分别占 OC 总量的  $(39.7 \pm 22.9)\%$ 、 $(47.1 \pm 17.3)\%$ 、 $(43.5 \pm 19.8)\%$  和  $(34.2 \pm 18.9)\%$ . 在杭甬地区冬季的 SOC 浓度最高, 这与台湾海峡西部地区发现的结果相似<sup>[16]</sup>, 但与上海等多个城市的结果不同<sup>[7, 27]</sup>, 这些城市 SOC 在冬季有最小值. 该差异可能是由于各地不同的气候特征引起的. 有研究表明二次有机气溶胶的形成速率在气温从  $0^\circ\text{C}$  升高到  $16^\circ\text{C}$  时会加快<sup>[23]</sup>. 在本研究中, 杭甬地区冬季的平均气温为  $(6.3 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ , 高于  $0^\circ\text{C}$ , 这可能为冬季 SOC 的形成提供了有利的气象条件. 此外, 在冬季静稳的气象条件下会积累更多的挥发性有机物 (VOCs), 因此, 冬季较高的 SOC 浓度可能是温度和高 VOCs 排放共同导致的.

表 2 杭甬地区 TCA 和 SOC 的每季和年均浓度<sup>1)</sup>

时间	TCA/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	OC/EC	SOC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
2014 年冬季	$33.0 \pm 8.2$	$3.6 \pm 1.7$	$6.1 \pm 1.4$
2015 年春季	$20.3 \pm 5.6$	$4.2 \pm 1.8$	$4.0 \pm 1.1$
2015 年夏季	$23.7 \pm 10.4$	$6.1 \pm 1.1$	$4.5 \pm 1.7$
2015 年秋季	$25.3 \pm 8.4$	$4.7 \pm 2.5$	$4.5 \pm 1.1$
年均值	$25.6 \pm 7.5$	$4.7 \pm 1.7$	$4.7 \pm 0.9$

1) 数值为 4 个采样点平均值

## 2.3 来源分析

### 2.3.1 OC 和 EC 的相关性

OC 和 EC 具有良好相关性说明它们有着相似的污染来源<sup>[28]</sup>. 如表 3, 本研究中所有采样点在春秋两季 OC 和 EC 都有一定的相关性 ( $R > 0.60$ ), 说明在这 2 个季节中 OC 和 EC 有着共同的污染来源和相似的大气扩散过程. 特别是在农村地区 LRABS, 秋季 OC 和 EC 呈现的强相关性 ( $R = 0.96$ ) 意味着它们具有相同一次污染来源, 例如农村地区在秋收时期的生物质燃烧. 然而在夏冬季

节, OC 和 EC 相关性减弱, 特别是 LRABS, 说明这 2 个季节里 OC 和 EC 有着不同的污染来源, 夏季 SOC 对 OC 贡献较大, 而 EC 主要来自一次排放源; 冬季含碳气溶胶来源复杂, 包括来自华北等地远距离传输气团、二次含碳气溶胶的形成和局地排放等共同的影响。

表 3 OC 和 EC 相关系数(*R*)

Table 3 Correlations between OC and EC

时间	HMB	NMB	UNNC	LRABS
2014 年冬季	0.67	0.84	0.71	0.09
2015 年春季	0.86	0.91	0.87	0.73
2015 年夏季	0.57	0.53	0.60	0.30
2015 年秋季	0.65	0.85	0.74	0.96

### 2.3.2 OC/EC 比值

OC/EC 的比值可以说明含碳颗粒物不同的污染源和转化特征. OC/EC 比值大于 2.0, 说明有二次有机气溶胶生成, 因此, 该比值可以用来指示初次和二次有机气溶胶的存在<sup>[29]</sup>. 生物质燃烧导致的 OC/EC 比值要高于化石燃料<sup>[16]</sup>. 柴油机动车的 OC/EC 比值小于 1.0<sup>[15]</sup>, 汽油引擎的比值为 2.1 ~ 2.4<sup>[30, 31]</sup>, 煤炭燃烧的比值为 2.7<sup>[32]</sup>, 生物质燃烧为 6.6 和 9.0<sup>[33, 34]</sup>, 木材燃烧为 16.8 ~ 40.0<sup>[8]</sup>.

在本研究中, 杭甬地区 OC/EC 的年均比值为  $4.7 \pm 1.7$ , 其值落在汽车尾气, 煤炭燃烧和生物质燃烧的区间内, 表明这些污染源可能是含碳气溶胶的主要排放来源. 该结果与台湾在生物燃料燃烧较多时期得到的结果相似 ( $4.8 \pm 1.5$ )<sup>[15]</sup>, 比北京 (2.9)<sup>[35]</sup> 和广州 (2.5)<sup>[22]</sup> 的结果要高, 但是比我国西部慕士塔格山地区 (10.0) 得到的结果要低<sup>[36]</sup>, 这可能是由于高海拔山区生物和人为排放很少因而导致极低的 EC 含量. OC/EC 比值在 UNNC ( $7.2 \pm 6.4$ ) 最高, 在 NMB ( $3.4 \pm 1.9$ ) 最低, 表明宁波郊区的生物燃料排放相对较多, 而城区以汽车尾气和化石燃料为主. 宁波城区采样点在交通主干道附近并且靠近几条交通干道, 因此受到交通排放影响较大. 值得注意的是, 和宁波城区和郊区相比, 农村地区采样点 LRABS 同样有着较低的 OC/EC 比值, 可能与该站点降水量最高有关; 由于 OC 比 EC 更加亲水, 该地高降水量有利于 OC 的湿沉降<sup>[8]</sup>.

在杭甬地区, 夏秋季相较春冬季有着更高的 OC/EC 比值, 这可能是由于夏季的高温和强辐射促进了 SOC 的形成, 此外秋收季节有更多的生物燃料, 例如农作物残留被燃烧<sup>[37]</sup>. 冬季的 OC/EC 比值 ( $3.6 \pm 1.7$ ) 是四季最低的, 该结果表明化石燃料

的燃烧是污染物的主要来源.

### 2.3.3 碳成分分析

碳成分 (OC1、OC2、OC3、OC4、OPC、EC1、EC2 和 EC3) 常被用于解析不同的来源, 因为不同的来源能够产生不同丰度的碳成分<sup>[38-40]</sup>. 如图 4 所示, OC2 质量分数在夏季是最高的, 含有 OC2 的有机物大多是半挥发性的含碳有机物<sup>[38]</sup>. 如图 3 所示, 夏季长三角地区的火点分布是最多的, 高浓度 OC2 与夏季密集的开敞性燃烧相关. 此外, 在相对较低温度下稻草闷烧产生的烟雾含有相对大量的 OC1 和 OC2<sup>[40]</sup>; 而 7 月初收获水稻后焚烧稻秆是清理农田的常用方法, 这个过程增加了 OC2 在夏季的浓度水平. OC3 和 OC4 浓度在冬季是最高的, OC3 和 OC4 是在较高温度的明火条件下产生的, OC4 是极性物质和高分子化合物的混合<sup>[41, 42]</sup>. 这可能与北方冬季供暖导致化石燃料和民用燃料燃烧增加产生的远距离输送气团有关.

(EC1 - OPC) 和 (EC2 + EC3) 分别定义为 char-EC 和 soot-EC<sup>[43]</sup>. char-EC 通常由生物燃料在相对较低的燃烧温度下生成, 而 soot-EC 通常生成自高温情况下煤炭燃烧或者汽车尾气<sup>[44]</sup>. 与 OC/EC 相似, char-EC/soot-EC 比值也可以作为含碳气溶胶来源的指标. 因为 OC/EC 的值会由于生成 SOC 而变动<sup>[45]</sup>, 所以 char-EC/soot-EC 比值比 OC/EC 比值更加可靠.

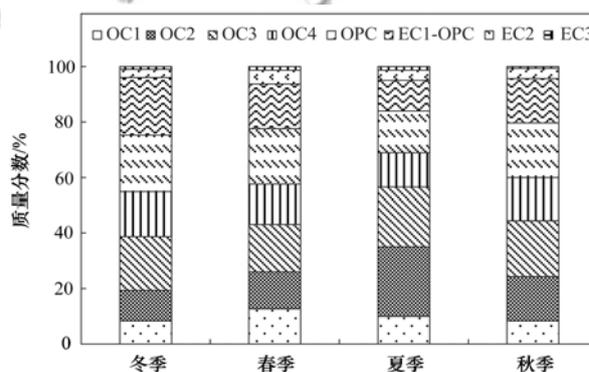


图 4 不同季节 8 种碳组分在总碳中的质量分数

Fig. 4 Seasonal variation of the contributions of the eight carbonaceous components to total carbon

汽车尾气和生物燃料燃烧的 char-EC/soot-EC 比值分别为 0.6 和 22.6<sup>[15, 38]</sup>. 在我国西安进行的一次实验中, 煤炭燃烧和生物燃料燃烧产生的 char-EC/soot-EC 比值分别为 1.9 和 11.6<sup>[46]</sup>. UNNC、NMB、LRABS 和 HMB 的年均 char-EC/soot-EC 比值分别为  $3.1 \pm 2.8$ 、 $10.6 \pm 20.8$ 、 $3.1 \pm 1.8$  和  $4.9 \pm 3.0$ . 此外, 所有采样点在秋冬季节都有更

高的 char-EC/soot-EC 比值, 表明了这 2 个季节生物质燃烧活动的贡献也不容忽视。

### 3 结论

(1) 杭甬地区含碳气溶胶总量占了  $PM_{2.5}$  浓度的  $(42.2 \pm 10.0)\%$ , 含碳气溶胶是  $PM_{2.5}$  的重要组成部分; SOC 占了 OC 浓度的  $(41.1 \pm 5.5)\%$ , 二次生成的有机气溶胶对含碳气溶胶贡献较大。

(2) 杭甬地区冬季含碳气溶胶浓度最高, 其中 SOC 对 OC 贡献较大, 该地区冬季的气象条件有利于二次有机气溶胶的形成。此外, 还受到远距离传输气团、生物质燃烧、化石燃料燃烧等多种来源的共同影响。夏季含碳气溶胶在  $PM_{2.5}$  中的占比最高, 二次生成和生物质燃烧排放是主要的来源。秋季主要受到生物质燃烧排放的影响。春季含碳气溶胶浓度最低, 来源相对单一。

致谢: 感谢浙江省气象局临安区域大气本底站和宁波市气象局为本研究提供观测数据。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change [ M ]. New York: Wiley-Interscience, 1998. 1326.
- [ 2 ] Bae M S, Shin J S, Lee K Y, *et al.* Long-range transport of biomass burning emissions based on organic molecular markers and carbonaceous thermal distribution [ J ]. Science of the Total Environment, 2014, **466-467**: 56-66.
- [ 3 ] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [ J ]. Nature Geoscience, 2008, **1** (4): 221-227.
- [ 4 ] Chameides W L, Yu H, Liu S C, *et al.* Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: an opportunity to enhance crop yields in China through emission controls? [ J ]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1999, **96** (24): 13626-13633.
- [ 5 ] Hansen J, Sato M, Ruedy R, *et al.* Efficacy of climate forcings [ J ]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, **110** (D18): D18104.
- [ 6 ] Qiu J H, Yang L Q. Variation characteristics of atmospheric aerosol optical depths and visibility in North China during 1980-1994 [ J ]. Atmospheric Environment, 2000, **34** (4): 603-609.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] Safai P D, Raju M P, Rao P S P, *et al.* Characterization of carbonaceous aerosols over the urban tropical location and a new approach to evaluate their climatic importance [ J ]. Atmospheric Environment, 2014, **92**: 493-500.
- [ 9 ] Ackerman A S, Toon O B, Taylor J P, *et al.* Effects of aerosols on cloud albedo: evaluation of Twomey's parameterization of cloud susceptibility using measurements of ship tracks [ J ]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2000, **57** (16): 2684-2695.
- [ 10 ] 刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 等. 菏泽市  $PM_{2.5}$  碳组分季节变化特征 [ J ]. 环境科学, 2017, **38** (12): 4943-4950.
- [ 11 ] Liu Z J, Wu J H, Zhang Y F, *et al.* Seasonal variation of carbon fractions in  $PM_{2.5}$  in Heze [ J ]. Environmental Science, 2017, **38** (12): 4943-4950.
- [ 11 ] 杨毅红, 陶俊, 高健, 等. 中国北部湾地区夏季大气碳气溶胶的空间分布特征 [ J ]. 环境科学, 2013, **34** (11): 4152-4158.
- [ 12 ] Yang Y H, Tao J, Gao J, *et al.* Spatial distribution characteristics of carbonaceous aerosol during summer in Beibu Gulf Zone, China [ J ]. Environmental Science, 2013, **34** (11): 4152-4158.
- [ 12 ] 马骁骏, 耿福海, 陈勇航, 等. 上海地区不同类和不同强度灰霾季节分布特征 [ J ]. 环境科学与技术, 2013, **36** (3): 32-36.
- [ 13 ] Ma X J, Geng F H, Chen Y H, *et al.* Seasonal variation in haze for different types and intensities at Shanghai [ J ]. Environmental Science & Technology, 2013, **36** (3): 32-36.
- [ 13 ] 张懿华, 王东方, 赵倩彪, 等. 上海城区  $PM_{2.5}$  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.
- [ 14 ] Zhang Y H, Wang D F, Zhao Q B, *et al.* Characteristics and sources of organic carbon and elemental carbon in  $PM_{2.5}$  in Shanghai urban area [ J ]. Environmental Science, 2014, **35** (9): 3263-3270.
- [ 14 ] 张程, 于兴娜, 安俊琳, 等. 南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 [ J ]. 环境科学, 2017, **38** (12): 4932-4942.
- [ 15 ] Zhang C, Yu X N, An J L, *et al.* Aerosol chemical characteristics for different air pollution levels in north suburban Nanjing [ J ]. Environmental Science, 2017, **38** (12): 4932-4942.
- [ 15 ] Chuang M T, Lee C T, Chou C C K, *et al.* Carbonaceous aerosols in the air masses transported from Indochina to Taiwan: long-term observation at Mt. Lulin [ J ]. Atmospheric Environment, 2014, **89**: 507-516.
- [ 16 ] Niu Z C, Zhang F W, Chen J S, *et al.* Carbonaceous species in  $PM_{2.5}$  in the coastal urban agglomeration in the Western Taiwan Strait Region, China [ J ]. Atmospheric Research, 2013, **122**: 102-110.
- [ 17 ] Yang F, Huang L, Duan F, *et al.* Carbonaceous species in  $PM_{2.5}$  at a pair of rural/urban sites in Beijing, 2005-2008 [ J ]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11** (15): 7893-7903.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] Harrison R M, Yin J X. Sources and processes affecting carbonaceous aerosol in central England [ J ]. Atmospheric Environment, 2008, **42** (7): 1413-1423.
- [ 20 ] Ye B M, Ji X L, Yang H Z, *et al.* Concentration and chemical composition of  $PM_{2.5}$  in Shanghai for a 1-year period [ J ]. Atmospheric Environment, 2003, **37** (4): 499-510.
- [ 21 ] He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* The characteristics of  $PM_{2.5}$  in Beijing, China [ J ]. Atmospheric Environment, 2001, **35**

- (29): 4959-4970.
- [22] 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.
- [23] Strader R, Lurmann F, Pandis S N. Evaluation of secondary organic aerosol formation in winter [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(29): 4849-4863.
- [24] Turpin B J, Lim H J. Species contributions to PM<sub>2.5</sub> mass concentrations: revisiting common assumptions for estimating organic mass [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **35** (1): 602-610.
- [25] Castro L M, Pio C A, Harrison R M, *et al.* Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: estimation of secondary organic carbon concentrations [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(17): 2771-2781.
- [26] 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.
- [27] Cao J J, Lee S C, Chow J C, *et al.* Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112** (D22): D22S11.
- [28] Na K, Sawant A A, Song C, *et al.* Primary and secondary carbonaceous species in the atmosphere of Western Riverside County, California [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38** (9): 1345-1355.
- [29] 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.
- [30] Cadle S H, Mulawa P A, Hunsanger E C, *et al.* Composition of light-duty motor vehicle exhaust particulate matter in the Denver, Colorado area [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(14): 2328-2339.
- [31] Liu W, Wang Y H, Russell A, *et al.* Enhanced source identification of southeast aerosols using temperature-resolved carbon fractions and gas phase components [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(S2): 445-466.
- [32] Watson J G, Chow J C, Houck J E. 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.
- [33] Saarikoski S, Timonen H, Saarnio K, *et al.* Sources of organic carbon in fine particulate matter in northern European urban air [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(20): 6281-6295.
- [34] Cachier H, Brémond M P, Buat-Ménard P. Carbonaceous aerosols from different tropical biomass burning sources [J]. *Nature*, 1989, **340**(6232): 371-373.
- [35] Yang F, He K, Ye B, *et al.* One-year record of organic and elemental carbon in fine particles in downtown Beijing and Shanghai [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5** (6): 1449-1457.
- [36] Cao J J, Xu B Q, He J Q, *et al.* Concentrations, seasonal variations, and transport of carbonaceous aerosols at a remote Mountainous region in western China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(29): 4444-4452.
- [37] Yin S, Wang X F, Xiao Y, *et al.* Study on spatial distribution of crop residue burning and PM<sub>2.5</sub> change in China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 204-221.
- [38] 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.
- [39] Han Y M, Cao J J, Lee S C, *et al.* Different characteristics of char and soot in the atmosphere and their ratio as an indicator for source identification in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(2): 595-607.
- [40] Sun J, Shen Z X, Cao J J, *et al.* Particulate matters emitted from maize straw burning for winter heating in rural areas in Guanzhong Plain, China: current emission and future reduction [J]. *Atmospheric Research*, 2017, **184**: 66-76.
- [41] Grabowsky J, Streibel T, Sklorz M, *et al.* Hyphenation of a carbon analyzer to photo-ionization mass spectrometry to unravel the organic composition of particulate matter on a molecular level [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2011, **401**(10): 3153-3164.
- [42] Joseph A E, Unnikrishnan S, Kumar R. Chemical characterization and mass closure of fine aerosol for different land use patterns in Mumbai City [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, **12**(1): 61-72.
- [43] Han Y M, Cao J J, Chow J C, *et al.* Evaluation of the thermal/optical reflectance method for discrimination between char- and soot-EC [J]. *Chemosphere*, 2007, **69**(4): 569-574.
- [44] Zhu C S, Chen C C, Cao J J, *et al.* Characterization of carbon fractions for atmospheric fine particles and nanoparticles in a highway tunnel [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(23): 2668-2673.
- [45] Han Y M, Lee S C, Cao J J, *et al.* Spatial distribution and seasonal variation of char-EC and soot-EC in the atmosphere over China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43** (38): 6066-6073.
- [46] 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.

## 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, et al. (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, et al. (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, et al. (3502)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo .....	XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, et al. (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, et al. (3518)
Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China .....	YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-ni, et al. (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, et al. (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, et al. (3552)
Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents .....	ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, et al. (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, et al. (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, et al. (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, et al. (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, et al. (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, et al. (3622)
Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta .....	ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, et al. (3631)
Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay .....	XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, et al. (3640)
Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors .....	CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, et al. (3649)
Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors .....	WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, et al. (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, et al. (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, et al. (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, et al. (3689)
Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments .....	SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, et al. (3696)
Effect of Cr(VI) on Coagulation Process of Different Coagulants .....	GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, et al. (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, et al. (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, et al. (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, et al. (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, et al. (3744)
Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal .....	YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, et al. (3753)
Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance .....	CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, et al. (3759)
Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process .....	XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, et al. (3767)
Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System .....	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, et al. (3775)
Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process .....	WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, et al. (3782)
Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions .....	KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, et al. (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, et al. (3797)
Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge .....	LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, et al. (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, et al. (3816)
Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil .....	CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, et al. (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, et al. (3845)
Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil .....	YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, et al. (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, et al. (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, et al. (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, et al. (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, et al. (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, et al. (3917)
Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate .....	TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, et al. (3927)
Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance .....	ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, et al. (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, et al. (3946)
Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water .....	YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, et al. (3954)