

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 、中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继凯, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCBMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

菏泽市 PM_{2.5} 碳组分季节变化特征

刘泽珺¹, 吴建会^{1*}, 张裕芬¹, 梁丹妮¹, 马咸¹, 刘保双¹, 冯银厂¹, 张勤勋²

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071; 2. 菏泽市环境监测中心站, 菏泽 274000)

摘要: 于2015年8月到2016年4月在菏泽市城区采集PM_{2.5}颗粒, 利用热/光碳分析仪测定了颗粒物中8种碳组分, 获得了有机碳(OC)和元素碳(EC)的质量浓度, 分析了OC与EC的比值、相关性, 使用OC/EC比值法估算了二次有机碳(SOC)的浓度, 并使用主成分分析法研究8种碳组分含量。结果表明, ① PM_{2.5}中OC、EC的年质量浓度变化范围分别为1.2~60.6 μg·m⁻³、0.6~24.8 μg·m⁻³, OC/PM_{2.5}、EC/PM_{2.5}的季节分布特征相似: 冬季>春季>秋季>夏季; ② OC/EC的年平均值为2.6±1.0, 春夏秋冬OC、EC的相关系数分别为0.91、0.56、0.86、0.75, 估算的SOC年平均浓度为(4.7±5.0) μg·m⁻³; ③ 不同季节8种碳组分质量分数均为EC1最高, EC3最低。主成分分析结果显示, 春夏秋冬这3个季节碳组分的主要来源为燃煤、机动车和生物质燃烧。

关键词: PM_{2.5}; 有机碳; 元素碳; 8种碳组分; 季节变化; 菏泽市

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-4943-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201704296

Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM_{2.5} in Heze

LIU Ze-jun¹, WU Jian-hui^{*}, ZHANG Yu-fen¹, LIANG Dan-ni¹, MA Xian¹, LIU Bao-shuang¹, FENG Yin-chang¹, ZHANG Qin-xun²

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Heze Environmental Monitoring Centre, Heze 274000, China)

Abstract: PM_{2.5} samples were collected in Heze from August 2015 to April 2016. Eight carbon fractions were analyzed by a thermal/optical carbon analyzer, and organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) analyses were obtained. The OC/EC ratio and the correlation between OC and EC were analyzed. Secondary organic carbon (SOC) mass concentration was estimated by the OC/EC ratio method; and eight carbon fractions were analyzed using a principal component analysis. The results showed that: ① The annual average mass concentrations of OC and EC were 1.2-60.6 μg·m⁻³ and 0.6-24.8 μg·m⁻³, respectively; and the characterization of OC and EC percentages in PM_{2.5} during different seasons were similar with winter > spring > autumn > summer. ② The annual average OC/EC ratio was 2.6±1.0, and the correlations between OC and EC during spring, summer, autumn, and winter were 0.91, 0.56, 0.86, and 0.75, respectively, and the estimated mass concentration of SOC was (4.7±5.0) μg·m⁻³. ③ The characterization of eight carbon fractions percentages in PM_{2.5} in the different seasons demonstrated similar seasonal variations, with EC1 having the highest percentage and EC3 having the lowest percentage. The result of the principal component analysis showed that coal burning, motor vehicle emissions, and biomass burning were the major sources of carbon.

Key words: PM_{2.5}; organic carbon (OC); elemental carbon (EC); eight carbon fractions; seasonal variation; Heze

目前,我国大多数城市大气污染以细颗粒物(PM_{2.5})为首要污染物。含碳气溶胶是PM_{2.5}的重要组成部分之一,占到了城市大气气溶胶的20%~90%^[1,2]。特别是粒径范围在0.15~0.45 μm的大气气溶胶中,含碳气溶胶的占比达到49%^[3,4]。含碳气溶胶主要包括有机碳、元素碳和碳酸盐碳^[5-8],其中碳酸盐碳的含量在普通天气状况下很低,一般不予考虑。有机碳主要为芳香类、脂肪类及酸类化合物的混合物^[2,9,10],包括一次有机碳(POC)和二次有机碳(SOC),一次有机碳主要由燃烧源(化石燃料及生物质)直接排放产生,二次有机碳则是由前体物经过化学反应(主要为光化学反应)生

成的。元素碳是由化石燃料或生物质的不完全燃烧产生的单质碳^[11,12],性质比较稳定,在大气中不易发生化学变化。研究表明,OC中包含有多种具有致癌致畸作用物质,严重危害人体健康^[13];EC对光的吸收能力会导致能见度降低^[14,15],造成空气质量下降,影响人们的健康和出行。同时EC对挥发性物质具有较强的吸附能力,能够促进化学反应的发生^[9]。

收稿日期: 2017-04-30; 修订日期: 2017-06-02

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(21207069)

作者简介: 刘泽珺(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染控制工程, E-mail: 1183475478@qq.com

* 通信作者, E-mail: envwujh@nankai.edu.cn

含碳气溶胶的组分及其重要性已经受到国内外的广泛关注. 目前,我国关于含碳气溶胶的研究较多,主要集中在大城市,如北京^[15~17]、上海^[18~20]、天津^[21]、成都^[22]、西安^[23, 24]等,而中等城市相关研究开展较少.

菏泽市位于山东省的西南部,鲁苏豫皖交界处,城区总面积1 288.6 km²,人口 128 万. 随着经济的发展和城市化进程的加快,大气颗粒物污染问题日益突出. 2015 年全年污染天数 240 d,占比 65.8%. 本研究以菏泽市城区为研究对象,分析 PM_{2.5} 中 OC、EC (包括 OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2、EC3 和 OP,OP 即裂解碳, pyrolytic carbon) 浓度变化、季节分布特征,解析 PM_{2.5} 中含碳物质的主要来源,以期制定菏泽市颗粒物污染防治有效措施提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样点

本研究共布设 6 个采样点位 (如图 1 和表 1),分别为市污水处理厂、市政协、高新区管委会、西城水库、华润制药、菏泽学院.

1.2 样品采集

样品采集时间为 2015 年 8 月 13~22 日 (夏季)、10 月 21~30 日 (秋季)、2016 年 1 月 14~23 日 (冬季)、4 月 7~16 日 (春季). 采样仪器为中流量采样器 (武汉天虹 TH-150C 型),采样流量为 100 L·min⁻¹,每天采集 22 h. 采样同步天气状况见表 2,其中温度、湿度、风速、降水量数据来自当地气象监测站,大气压、日照时数来自中国大气数据网在线数据库 (<http://data.cma.cn/data>). 共采集 PM_{2.5} 有效样品 230 个.

表 2 采样期间气象参数

Table 2 Meteorological parameters during the sampling period						
季节	温度/℃	湿度/%	风速/m·s ⁻¹	大气压/hPa	日照时数/h	降水量/mm
春季	18.4	55.1	2.3	1 002.4	7.9	10.7
夏季	26.7	69.3	2.2	999.1	7.3	31.1
秋季	16.7	50.1	1.7	1 013.4	4.8	9.6
冬季	0.1	49.4	1.9	1 019.3	5.6	6.0

1.3 样品分析

采用热/光碳分析仪 (DRI 2001A 型) 测定样品中的碳组分^[25~28],主要分析原理:惰性环境 (纯氮) 下程序升温 (温度分别为 140、280、480、580℃) 分析 OC1、OC2、OC3、OC4 这 4 种碳组分的含量; 有氧环境 (98% 氮 + 2% 氧) 下继续程序升温 (温度分别为 580、740、840℃), 分析 EC1、EC2、EC3 这 3

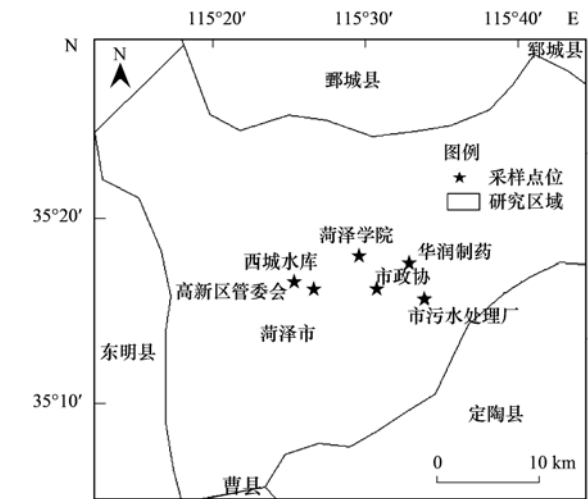


图 1 采样点位置

Fig. 1 Location of sampling sites

表 1 菏泽市 PM_{2.5} 采样点位介绍

Table 1 Descriptions of PM _{2.5} sampling sites at Heze		
采样点位	经纬度	周边情况
市污水处理厂	35°13.35'N; 115°31.60'E	工业、交通、居民
高新区管委会	35°14.64'N; 115°24.46'E	交通、居民
市政协	35°14.25'N; 115°28.48'E	居民、商业
菏泽学院	35°16.16'N; 115°27.60'E	学校、居民、商业
西城水库	35°15.21'N; 115°23.17'E	农田、村庄
华润制药	35°15.38'N; 115°30.95'E	交通、工业

本研究选取石英纤维滤膜 (φ 90 mm, PALL) 进行样品采集和分析. 采样前将滤膜置于马弗炉中 600℃ 下烘 2 h, 去除滤膜中的挥发性组分. 恒温 (20℃ ± 1℃)、恒湿 (50% ± 5%) 环境中平衡 72 h 后使用电子天平 (Mettler Toledo, AX205 型, ± 0.01 mg) 进行称重. 每张滤膜采样前后均称重两次, 误差小于 50 μg.

种碳组分的含量. 使用 633 nm 的 He-Ne 激光对有机碳碳化过程中形成的 OP 进行定量. 根据 IMPROVE 协议: OC = OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + OP, EC = EC1 + EC2 + EC3 - OP, 计算 PM_{2.5} 样品中 OC、EC 的浓度.

仪器检测限为: TC 0.93 μg·cm⁻²、TOC 0.82 μg·cm⁻²、TEC 0.20 μg·cm⁻², 检测范围为 0.2 ~

750 μg·cm⁻². 每季采集 2 个平行样品, 用于采样及分析的全过程质控, 本研究 8 个平行样的 OC、EC 的相对偏差小于 10%; 每季采集 2 个空白样测定样品本底值并在数据处理时进行扣除, 本研究空白样中 OC、EC 浓度均小于实际样品的 5%.

2 结果与分析

本研究在 6 个点位同步进行样品的采集, 使用 SPSS 软件对 6 个点位的 PM_{2.5}、OC、EC 质量浓度进行单因素方差分析, 结果见表 3. PM_{2.5}、OC、EC 这 3 个分析变量的 *P* 值均接近于 1, 表明 6 个点位之间上述 3 个变量的差异性不大, 本文不做空间差异性分析研究.

表 3 PM_{2.5}、OC、EC 空间差异性分析

Table 3 Spatial variation analysis of PM _{2.5} , OC, and EC			
分析变量	方差齐性检验	<i>F</i>	<i>P</i>
PM _{2.5}	0.941	0.152	0.979
OC	0.604	0.110	0.990
EC	0.915	0.108	0.990

2.1 PM_{2.5}、OC、EC 的质量浓度季节变化特征

2015 年 8 月~2016 年 4 月菏泽市春夏秋冬大气中 PM_{2.5}、OC 和 EC 的平均质量浓度见表 4, OC、EC 在 PM_{2.5} 中的质量分数如图 2 所示. 观测期间, PM_{2.5} 的质量浓度在 29.3~331.2 μg·m⁻³ 之间, 4 个季度的平均质量浓度为 (109.1±56.7) μg·m⁻³, 高于国家二级标准 2.1 倍, 表明菏泽市细颗粒物污染较为严重. OC 的质量浓度年变化范围为 1.2~60.6 μg·m⁻³, 春夏秋冬四季的质量浓度分别为 (11.6±4.6)、(3.9±1.5)、(13.2±5.6) 和 (24.0±10.2) μg·m⁻³, 在 PM_{2.5} 中的质量分数分别为 12.2、7.2、10.8、17.7%; EC 的质量浓度年变化范围为 0.6~24.8 μg·m⁻³, 春夏秋冬四季质量浓度分别为 (5.7±2.3)、(2.1±0.7)、(4.4±1.7) 和 (8.5±4.8) μg·m⁻³, 在 PM_{2.5} 中的质量分数分别为 5.9%、2.4%、3.7%、6.2%.

表 4 不同季节 PM_{2.5}、OC 和 EC 的质量浓度

Table 4 Seasonal variation of mass concentrations of PM _{2.5} , OC and EC				
项目	样品量 / 个	PM _{2.5} / μg·m ⁻³	OC / μg·m ⁻³	EC / μg·m ⁻³
春季	55	115.6±61.2	11.6±4.6	5.7±2.3
夏季	57	56.0±21.4	3.9±1.5	2.1±0.7
秋季	60	126.9±44.3	13.2±5.6	4.4±1.7
冬季	58	136.8±53.2	24.0±10.2	8.5±4.8
全年	230	109.1±56.7	13.2±9.6	5.2±3.6

OC、EC 的质量浓度均表现为冬季最高, 夏季最低, 与 PM_{2.5} 的季节浓度变化一致. 分析主要的原因: EC 的变化主要受到气象条件和污染源变化的双重影响. ①气象: 各季节降水的季节分布不同, 菏泽属于温带大陆性气候, 夏季降水多, 春秋季次之, 冬季最少 (见表 2). 降水会使得颗粒物发生湿沉降^[29~32], 进而导致 EC 浓度的降低; EC 性质稳定, 受温度和湿度的影响不大, 在大气中不易发生化学变化; 污染物扩散条件的不同, 与春夏季相比, 秋冬季大气层结稳定, 不利于污染物扩散; ②污染物排放的季节变化. 研究表明燃煤电厂排放的 PM_{2.5} 中 OC、EC 的质量分数为 10.89%~18.00%^[33~36], 家用燃煤排放的总颗粒物中 OC、EC 的质量分数为 1.58%~74.13%^[37]. 菏泽市 1 月为采暖季, 煤炭燃烧量的增加会导致 EC 浓度的升高. OC 的变化除受到气象条件以及污染物的季节变化影响外, 还受到环境空气中二次有机碳 (SOC) 的影响. ①气象: 扩散条件对 OC 质量浓度的影响与 EC 相似; 降水对 OC 的清除效率高于 EC^[38]; OC 在高温高湿状态下易转化为 SOC; ②污染物的季节变化: 采暖期燃煤会导致一次有机碳 (POC) 的产生和累积. ③SOC 的生成: 夏季的高温高湿、强烈的太阳辐射以及冬季二次有机前体物的累积都会促进 SOC 的生成.

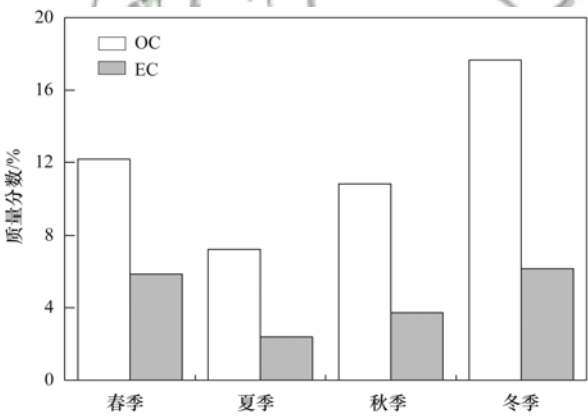


图 2 不同季节 OC、EC 在 PM_{2.5} 中的占比

Fig. 2 Seasonal variation of the percentages of OC and EC in PM_{2.5}

2.2 OC、EC 的相关性分析

OC 和 EC 的相关性一定程度上能够用来判断二者来源的一致性和稳定性^[39,40]. 若相关性很好, 则说明 OC、EC 的污染来源相似或较为一致^[41]. 使用 SPSS 软件分别对每个季节的 OC、EC 质量浓度进行显著性检验, 结果表明在 0.01 水平上, 4 个季节的 *P* 值均小于 0.01, 表明菏泽市春夏秋冬 4 个季节 OC、EC 质量浓度具有相关性. 相关系数大于

0.65, 表明 OC、EC 的相关性较高^[2,23,38,40], 菏泽市不同季节 PM_{2.5} 中 OC、EC 的相关性如图 3 所示. 春夏秋冬 OC、EC 的相关系数分别为 0.91、0.56、

0.86、0.75, 其中夏季的相关系数最低, 表明与其他季节相比, OC 和 EC 的来源差异性较大, 这与夏季二次有机气溶胶的生成较多有关.

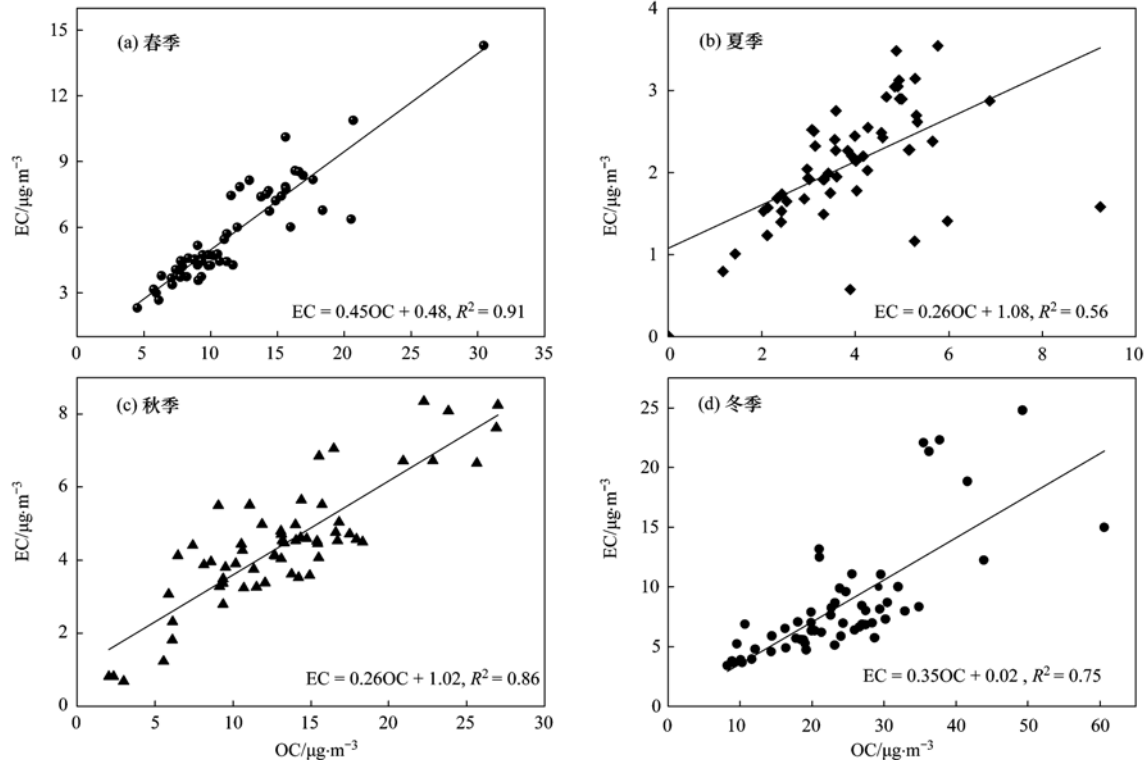


图3 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 的相关性
Fig. 3 Correlations between OC and EC in PM_{2.5}

2.3 OC、EC 的比值分析及 SOC 的估算

当 OC/EC 的比值超过 2 时, 可以认为存在二次反应的发生^[42], 即 SOC 的产生. 本研究中 OC/EC 的年均值为 2.6, 高于 2.0, 表明存在 SOC. SOC 计算方法有很多种, 如 EC 示踪法(包括排放源清单 OC/EC 法、最小 OC/EC 比值法)、化学迁移模型法、非反应性模型法、受体模型有机物示踪法等^[43,44]. 本研究采用 OC/EC 最小比值法^[42] 估算 SOC 的浓度. OC/EC 最小比值法计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{POC} &= \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\min} \\ \text{SOC} &= \text{OC} - \text{POC} \end{aligned}$$

式中, $(\text{OC}/\text{EC})_{\min}$ 为春夏秋冬这 4 个采样时段各自的 OC/EC 最小值, POC(一次有机碳)与 SOC(二次有机碳)分别为估算的有机碳的质量浓度, 单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

由 OC/EC 比值法估算的 SOC 年平均浓度为 $(4.7 \pm 5.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (表 5), SOC/OC 四季分别为冬季(38.6%) > 夏季(34.0%) > 秋季(29.4%) > 春季(29.2%). SOC 的生成通常由两方面共同决定, 一是反应条件, 即温度、光照强度和相对湿度的

大小; 二是反应物的量, 即二次有机前体物的多少. 一般来说, 与冬季相比, 夏季的温度高(27.0℃)、湿度大(67.4%)、太阳光辐射强(日照时数为 7.3 h), 更有利于 SOC 的生成, 若仅考虑这一方面, 夏季的 SOC/OC 要高于冬季, 但菏泽市冬季较低的风速、平均混合层高度以及逆温现象的频繁发生, 会导致环境空气中二次有机前体物发生积累, 在氧化物的作用下形成 SOC^[45], 此外夏季的降雨频率高, 也会导致颗粒物发生湿沉降^[29~32], 进而导致 SOC 的产生减少. 冬夏两季 SOC/OC 高, 表明 OC 与主要来源于一次排放的 EC 差异性大, 二者的相关系数低, 这与 2.3 节的结论相一致.

表 5 PM_{2.5} 中 OC/EC 的值及 SOC 浓度水平
Table 5 OC/EC ratios and SOC concentrations in PM_{2.5}

项目	OC/EC	SOC/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	SOC/OC/%
春季	2.1 ± 0.3	3.5 ± 2.1	29.2 ± 10.0
夏季	2.1 ± 1.2	1.4 ± 1.2	34.0 ± 17.7
秋季	3.0 ± 0.7	4.2 ± 3.2	29.4 ± 18.1
冬季	3.0 ± 0.8	9.5 ± 6.8	38.6 ± 19.2
全年	2.6 ± 1.0	4.7 ± 5.0	32.8 ± 17.2

3 8 种碳组分的分布及污染特征

3.1 8 种碳组分的分布特征

如图 4 为不同季节 8 种碳组分在总碳中的质量分数. 其中, 秋季和冬季 8 种碳组分的质量分数排序相同: EC1 > OC4 > OC3 > OC2 > OC1 > OP > EC2 > EC3; 春季和夏季也呈现 EC1 最高, 4 种有机碳组分和 OP 质量浓度居中, EC2、EC3 最小的排序趋势, 但是春季 OP 的质量分数高于 OC1, 夏季与此相反.

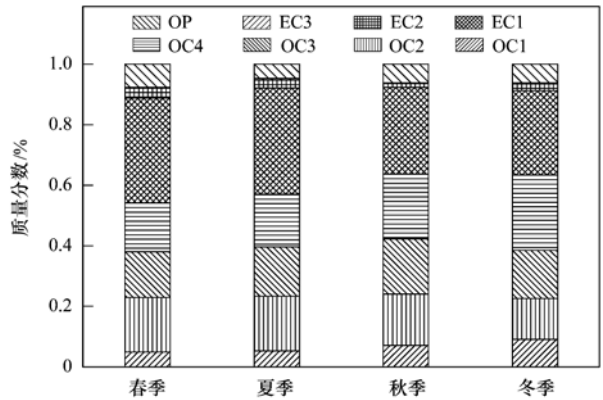


图 4 不同季节 8 种碳组分在总碳中的质量分数
Fig. 4 Seasonal variation of the contributions of eight carbonaceous components in total carbon

3.2 主成分分析

8 种碳组分比 OC、EC 包含的源类信息更加丰富, 因此, 为进一步识别大气中含碳颗粒物的来源^[46~49], 本研究使用 SPSS 软件对不同季节 8 种碳组分的浓度进行主成分分析.

其中夏季 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验值为 0.533, 小于 0.6, 不进行主成分分析. 表 6 为春秋冬三季 8 种碳组分主成分分析结果, 特征组分为因子负荷大于 0.646 的碳组分. 综合考虑累积方差 ≥ 70%、特征因子大于 1, 春秋冬各提取了 3 个因子, 解释方差的范围为 20.3% ~ 57.7%, 累积解释方差分别为 80.2%、71.0%、73.7%. 依据各季节因子负荷, 可以发现, 不同季节各因子负荷具有一定的共性. 春季的因子 1、秋季的因子 1 以及冬季的因子 1 均为 OC1、OC2、OC3、OC4、EC1 显著, 春季的因子 2、秋季的因子 2 以及冬季的因子 2 均为 OC3、EC1 贡献显著. 此外春季因子 1 中 OP 也较为显著.

OC1、OP 主要来源于生物质燃烧^[50], OC2 是燃煤的碳组分标识物^[24], 机动车尾气中 OC2、OC3、OC4、EC1、EC2、EC3、OP 的含量均较高^[51,52], 其中, OC3 是汽油车的主要碳标识组分, 柴油车排放的 EC2、EC3 更为丰富. 依据不同季节各因子提取出来的特征碳组分, 可以发现春秋冬三季碳组分的主要

表 6 8 种碳组分含量主成分分析结果

Table 6 Percentage of eight carbonaceous components in total carbon by principal component analysis

碳组分	春季		秋季		冬季	
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2
OC1	0.73	0.226	0.646	0.364	0.934	0.095
OC2	0.964	-0.099	0.97	-0.011	0.976	-0.02
OC3	0.847	0.342	0.9	0.111	0.925	0.096
OC4	0.903	-0.187	0.859	-0.144	0.532	-0.094
EC1	0.869	-0.418	0.909	-0.262	0.86	-0.006
EC2	0.352	0.835	0.336	0.766	0.043	0.909
EC3	0.371	0.692	0.052	0.696	-0.086	0.9
OP	0.775	-0.489	0.454	-0.566	0.714	-0.09
解释方差/%	57.7	22.5	50.7	20.3	52.8	20.9
累积解释方差/%	80.2	71.0	73.7			
特征值	4.6	1.8	4.0	1.6	4.2	1.7

来源是燃煤、机动车尾气和生物质燃烧.

4 结论

(1) 观测期间, PM_{2.5} 年平均质量浓度为 (109.1 ± 56.7) μg·m⁻³, 说明菏泽市细颗粒物污染较为严重.

(2) 菏泽市 OC、EC 的质量浓度均为冬季最高, 夏季最低, OC、EC 在 PM_{2.5} 中的质量分数的季节分

布特征为: 冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季.

(3) 菏泽市春秋两季 OC、EC 的相关系数分别为 0.91、0.86, 表明这 2 个季节 OC、EC 来源相似. 夏季相关性最低, 为 0.56, 表明夏季 OC 和 EC 的来源差异性较大.

(4) 由 OC/EC 比值法估算的 SOC 年平均浓度为 (4.7 ± 5.0) μg·m⁻³, SOC/OC 的季节分布特征为: 冬季 (38.6%) > 夏季 (34.0%) > 秋季

(29.4%) > 春季 (29.2%)。

(5)秋季和冬季8种碳组分质量分数的季节分布特征相同:EC1 > OC4 > OC3 > OC2 > OC1 > OP > EC2 > EC3;春季OP的质量分数高于OC1,夏季与此相反。主成分分析结果显示,春秋冬3个季节碳组分的主要来源为燃煤、机动车和生物质燃烧。

致谢:本实验的现场采样工作由菏泽市环境保护监测站协助完成,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Jimenez J L, Canagaratna M R, Donahue N M, *et al.* Evolution of organic aerosols in the atmosphere[J]. *Science*, 2009, **326** (5959): 1525-1529.
- [2] 彭超, 翟崇治, 王欢博, 等. 万州城区夏季、冬季PM_{2.5}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_{2.5} in the urban Wanzhou area in summer and winter[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1638-1644.
- [3] Offenberg J H, Baker J E. Aerosol size distributions of elemental and organic carbon in urban and over-water atmospheres[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(10): 1509-1517.
- [4] 谢绍东, 于森, 姜明. 有机气溶胶的来源与形成研究现状[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(12): 1933-1939.
- Xie S D, Yu M, Jiang M. Research progress in source and formation of organic aerosol[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(12): 1933-1939.
- [5] Chow J C, Watson J G. PM_{2.5} carbonate concentrations at regionally representative interagency monitoring of protected visual environment sites[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D21): ICC 6-1-ICC 6-9.
- [6] Clarke A G, Karani G N. Characterisation of the carbonate content of atmospheric aerosols[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1992, **14**(1-4): 119-128.
- [7] 齐文启, 陈光, 孙宗光, 等. 大气颗粒物监测分析及今后研究课题[J]. *中国环境监测*, 2003, **19**(1): 50-62.
- Qi W Q, Chen G, Sun Z G, *et al.* The pollution activity, monitoring and researching aspect of gas granule[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2003, **19**(1): 50-62.
- [8] Japar S M, Brachaczek W W, Gorse Jr R A, *et al.* The contribution of elemental carbon to the optical properties of rural atmospheric aerosols[J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1986, **20**(6): 1281-1289.
- [9] 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, Zeng B Q, *et al.* Characterization of organic carbon, elemental carbon and water-soluble organic carbon in PM_{2.5} of Guangzhou city[J]. *Journal of Analytical Science*, 2010, **26**(3): 255-260.
- [10] 吴琳, 冯银厂, 戴莉, 等. 天津市大气中PM₁₀、PM_{2.5}及其碳组分污染特征分析[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(11): 1134-1139.
- Wu L, Feng Y C, Dai L, *et al.* Characteristics of PM₁₀, PM_{2.5} and their carbonaceous species in Tianjin City[J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(11): 1134-1139.
- [11] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(14): 5131-5153.
- [12] Cao G L, Zhang X Y, Zheng F C. Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(34): 6516-6527.
- [13] 段凤魁, 贺克斌, 刘咸德, 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.
- [14] Wang Q Y, Cao J J, Tao J, *et al.* Long-term trends in visibility and at Chengdu, China[J]. *PLoS One*, 2013, **8**(7): e68894.
- [15] Wang Q Y, Huang R J, Cao J J, *et al.* Contribution of regional transport to the black carbon aerosol during winter haze period in Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **132**: 11-18.
- [16] Tao J, Zhang L M, Zhang R J, *et al.* Uncertainty assessment of source attribution of PM_{2.5} and its water-soluble organic carbon content using different biomass burning tracers in positive matrix factorization analysis—a case study in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **543**: 326-335.
- [17] Gao J, Peng X, Chen G, *et al.* Insights into the chemical characterization and sources of PM_{2.5} in Beijing at a 1-h time resolution[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **542**: 162-171.
- [18] Zhou M, Qiao L P, Zhu S H, *et al.* Chemical characteristics of fine particles and their impact on visibility impairment in Shanghai based on a 1-year period observation[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **48**: 151-160.
- [19] Wang H Q, Kang Y M, He Q S, *et al.* Transport of black carbon aerosols from non-local sources: a case study in Shanghai[J]. *Particuology*, 2015, **20**: 89-93.
- [20] Wang H L, Qiao L P, Lou S R, *et al.* Chemical composition of PM_{2.5} and meteorological impact among three years in urban Shanghai[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **112**: 1302-1311.
- [21] Wu H, Zhang Y F, Han S Q, *et al.* Vertical characteristics of PM_{2.5} during the heating season in Tianjin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **523**: 152-160.
- [22] Tao J, Zhang L M, Engling G, *et al.* Chemical composition of PM_{2.5} in an urban environment in Chengdu, China: importance of springtime dust storms and biomass burning[J]. *Atmospheric Research*, 2013, **122**: 270-283.
- [23] 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.
- [24] Xu H M, Cao J J, Chow J C, *et al.* Inter-annual variability of wintertime PM_{2.5} chemical composition in Xi'an, China: evidences of changing source emissions[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **545-546**: 546-555.
- [25] Han Y M, Cao J J, An Z S, *et al.* Evaluation of the thermal/optical reflectance method for quantification of elemental carbon in sediments[J]. *Chemosphere*, 2007, **69**(4): 526-533.

- [26] Chow J C, Waston J G, Chen L W, *et al.* Equivalence of elemental carbon by thermal/optical reflectance and transmittance with different temperature protocols[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(16): 4414-4422.
- [27] Chow J C, Waston J G, Robles J, *et al.* Quality assurance and quality control for thermal/optical analysis of aerosol samples for organic and elemental carbon[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2011, **401**(10): 3141-3152.
- [28] Chow J C, Waston J G, Chen L W A, *et al.* The IMPROVE_A temperature protocol for thermal/optical carbon analysis: maintaining consistency with a long-term database[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(9): 1014-1023.
- [29] 董群, 赵普生, 陈一娜. 降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3686-3692.
Dong Q, Zhao P S, Chen Y N. Impact of collision removal of rainfall on aerosol particles of different sizes[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3686-3692.
- [30] 尚可, 杨晓亮, 张叶, 等. 河北省边界层气象要素与 PM_{2.5} 关系的统计特征[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(3): 323-333.
Shang K, Yang X L, Zhang Y, *et al.* Statistical analysis of the relationship between meteorological factors and PM_{2.5} in the boundary layer over Hebei province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(3): 323-333.
- [31] 杨复沫, 贺克斌, 贾英涛, 等. 北京清华园采暖前与采暖期 PM₁₀ 中有机碳与元素碳的污染特征[A]. 见: 中国气象学会. 新世纪气象科技创新与大气科学发展——中国气象学会 2003 年年会“大气气溶胶及其对气候环境的影响”分会论文集[C]. 北京: 中国气象学会, 2003. 42-45.
- [32] 郑晓霞, 赵文吉, 晏星, 等. 降雨过程后北京城区 PM_{2.5} 日时空变化研究[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(5): 797-805.
Zheng X X, Zhao W J, Yan X, *et al.* Spatial and temporal variation of PM_{2.5} in Beijing city after rain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(5): 797-805.
- [33] 金永民. 抚顺市大气颗粒物主要排放源的成分谱研究[J]. *中国环境监测*, 2007, **23**(2): 58-61.
Jin Y M. Study on elements spectral from main source of TSP in Fushun city[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2007, **23**(2): 58-61.
- [34] 肖致美, 毕晓辉, 冯银厂, 等. 宁波市环境空气中 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 来源解析[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(5): 549-555.
Xiao Z M, Bi X H, Feng Y C, *et al.* Source apportionment of ambient PM₁₀ and PM_{2.5} in urban area of Ningbo city [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(5): 549-555.
- [35] 王毓秀, 彭林, 王燕, 等. 电厂燃煤烟尘 PM_{2.5} 中化学组分特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 60-65.
Wang Y X, Peng L, Wang Y, *et al.* Characteristics of chemical components in PM_{2.5} from the coal dust of power plants [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 60-65.
- [36] 赵珂. 北京某燃煤电厂颗粒物的排放特征与环境影响研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
Zhao K. Research on emission characteristics and environmental impacts of the particulate matter emitted from a coal-fired power plant in Peking [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [37] 陈颖军. 家用蜂窝煤燃烧烟气中碳颗粒和多环芳烃的排放特征[D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2004.
Chen Y J. Emission characteristics of carbonaceous particulate and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential honeycomb-coal-briquette combustion[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [38] 张清艳. 广州市 PM_{2.5} 及其有机碳和元素碳的变化特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
Zhang Q Y. The variation characteristics of fine articles PM_{2.5} and its organic carbon and elemental carbon in Guangzhou [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012.
- [39] 于建华, 虞统, 杨晓光, 等. 北京冬季 PM_{2.5} 中元素碳、有机碳的污染特征[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(1): 48-50, 55.
Yu J H, Yu T, Yang X G, *et al.* Characteristics of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} in Beijing in the winter [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(1): 48-50, 55.
- [40] 王果, 迪丽努尔·塔力甫, 买里克扎提·买合木提, 等. 乌鲁木齐市 PM_{2.5} 和 PM_{2.5-10} 中碳组分季节性变化特征[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(2): 356-362.
Wang G, Dilnur T, Mailikezhati M, *et al.* Seasonal changes of carbonaceous species in PM_{2.5}, PM_{2.5-10} in Urumqi [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(2): 356-362.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 叶文媛, 吴琳, 冯银厂, 等. 大气中二次有机气溶胶估算方法研究进展[J]. *安全与环境学报*, 2011, **11**(1): 127-131.
Ye W Y, Wu L, Feng Y C, *et al.* Advances in the estimation methods of secondary organic aerosol in atmospheric environment [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2011, **11**(1): 127-131.
- [44] 朱坦, 冯银厂. 大气颗粒物来源解析原理、技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 1-120.
- [45] 李伟芳. 天津 PM_{2.5} 理化特性和含碳气溶胶的分布与来源研究[D]. 天津: 南开大学, 2008.
- [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.
- [47] Kim E, Hopke P K. Improving source identification of fine particles in a rural northeastern U. S. area utilizing temperature-resolved carbon fractions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109**(D9): D09204.
- [48] Kim E, Hopke P K, Edgerton E S. Source identification of Atlanta aerosol by positive matrix factorization[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2003, **53**(6): 731-739.
- [49] Kim E, Larson T V, Hopke P K, *et al.* Source identification of PM_{2.5} in an arid northwest U. S. city by positive matrix factorization[J]. *Atmospheric Research*, 2003, **66**(4): 291-305.

- [50] Cao J J, Lee S C, Ho K F, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in pearl river delta region, China during 2001 winter period[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(11): 1451-1460.
- [51] Watson J G, Chow J C, Lowenthal D H, *et al.* Differences in the carbon composition of source profiles for diesel-and gasoline-powered vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(15): 2493-2505.
- [52] Niu Z C, Wang S, Chen J S, *et al.* Source contributions to carbonaceous species in PM_{2.5} and their uncertainty analysis at typical urban, peri-urban and background sites in southeast China[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **181**: 107-114.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框.图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1,1.1,1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:
期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)