

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

重庆市 PM_{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子 吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)

2012~2013 年间北京市 PM_{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)

南京地区大气 PM_{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)

太原市大气 PM_{2.5} 中碳质组成及变化特征 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)

朔州市市区 PM_{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征 刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)

中国 2013 年 1 月 PM_{2.5} 重污染过程卫星反演研究 薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)

高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)

重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量 覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)

海南五指山大气气态总汞含量变化特征 雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)

树叶烟尘中的有机碳和元素碳 陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)

介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析 姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)

长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价 母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)

河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素 王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)

岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)

岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析 卢丽, 王喆, 裴建国 (862)

两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例 闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)

三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征 王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)

夏、冬季降水中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析 梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)

南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比 程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)

夏季大辽河口区水体反硝化及其影响因素 杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)

太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性 叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)

汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)

三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)

太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算 金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)

贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析 苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)

物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用 史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)

磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响 殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)

矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究 王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)

PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝 和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)

微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用 宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)

生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究 汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)

污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)

高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律 卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)

MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制 郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)

基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响 滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)

天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究 何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)

开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价 李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)

不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)

种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘云飞 (1053)

江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价 金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)

镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用 章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)

高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响 李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)

黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究 李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)

单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究 叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)

不同有机物料中的磷形态特征研究 邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)

北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究 施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)

燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述 段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)

菌根真菌金属耐性机制研究进展 陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展 沈李东 (1133)

《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)

太原市大气 PM_{2.5} 中碳质组成及变化特征

张桂香¹, 闫雨龙¹, 郭利利¹, 何秋生^{1*}, 陈来国²

(1. 太原科技大学环境与安全学院, 太原 030024; 2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 采用 DRI Model 2001A 热/光碳分析仪测定了 2009 年冬季和 2010 年春季太原市大气细粒子(PM_{2.5})中有机碳(OC)和元素碳(EC)的昼夜变化特征, 分析了含碳物质的变化特征, 并探讨了其来源. 结果表明, PM_{2.5}、OC、EC 平均浓度水平和 OC/EC 平均值均呈现出冬季[(289.2 ± 104.8) μg·m⁻³、(65.2 ± 22.1) μg·m⁻³、(23.5 ± 8.2) μg·m⁻³和 2.8 ± 0.3]高于春季[(248.6 ± 68.6) μg·m⁻³、(29.7 ± 6.2) μg·m⁻³、(20.2 ± 5.4) μg·m⁻³和 1.5 ± 0.3], 冬季夜晚[(309.3 ± 150.0) μg·m⁻³、(74.6 ± 19.5) μg·m⁻³、(24.3 ± 6.6) μg·m⁻³和 3.1 ± 0.3]高于白天[(234.9 ± 122.1) μg·m⁻³、(54.9 ± 28.2) μg·m⁻³、(22.6 ± 10.8) μg·m⁻³和 2.5 ± 0.5], 春季白天[(292.5 ± 120.8) μg·m⁻³、(32.7 ± 10.5) μg·m⁻³、(22.7 ± 10.1) μg·m⁻³和 1.6 ± 0.5]高于夜晚[(212.3 ± 36.7) μg·m⁻³、(29.6 ± 6.6) μg·m⁻³、(20.7 ± 6.4) μg·m⁻³和 1.5 ± 0.2]的污染特征. 这是因为冬季处于采暖期, 特别是夜晚, 煤和生物质燃烧量增加导致碳质颗粒物排放量增加以及大气温度低且稳定不利于污染物扩散; 高的 OC/EC 是 OC 排放量增加所致而非二次有机碳(SOC)的贡献, 因为气温低且太阳辐射弱不利于 SOC 的生成. 春季白天 PM_{2.5}、OC 和 EC 浓度水平高于夜晚可能是白天风速比夜晚大且相对湿度比夜晚低而更有利于城市扬尘形成所致, OC/EC 高可能是白天温度较高且太阳辐射较强有利于 SOC 的生成. 与国内其他城市相比, 太原 PM_{2.5}、OC 和 EC 均处于较高的浓度水平, 表明太原碳质气溶胶污染严重, 可能对城市灰霾形成有重要贡献.

关键词: 太原; PM_{2.5}; 碳质组成; 变化特征; 来源分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0780-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.04

Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM_{2.5} in Taiyuan, China

ZHANG Gui-xiang¹, YAN Yu-long¹, GUO Li-li¹, HE Qiu-sheng^{1*}, CHEN Lai-guo²

(1. School of Environment and Safety, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 2. South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: Day-night variation characteristics of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in atmospheric fine particles (PM_{2.5}) collected during winter of 2009 and spring of 2010 in Taiyuan city were analyzed using DRI Model 2001A Thermal/Optical Carbon Analyzer, and the sources of carbonaceous materials in PM_{2.5} were analyzed. The results showed that the average concentrations of PM_{2.5}, OC, EC and average OC/EC ratios were all higher during winter [(289.2 ± 104.8) μg·m⁻³, (65.2 ± 22.1) μg·m⁻³, (23.5 ± 8.2) μg·m⁻³ and 2.8 ± 0.3] than during spring [(248.6 ± 68.6) μg·m⁻³, (29.7 ± 6.2) μg·m⁻³, (20.2 ± 5.4) μg·m⁻³ and 1.5 ± 0.3], higher in nighttime [(309.3 ± 150.0) μg·m⁻³, (74.6 ± 19.5) μg·m⁻³, (24.3 ± 6.6) μg·m⁻³ and 3.1 ± 0.3] than in daytime [(234.9 ± 122.1) μg·m⁻³, (54.9 ± 28.2) μg·m⁻³, (22.6 ± 10.8) μg·m⁻³ and 2.5 ± 0.5] during winter while higher in daytime [(292.5 ± 120.8) μg·m⁻³, (32.7 ± 10.5) μg·m⁻³, (22.7 ± 10.1) μg·m⁻³ and 1.6 ± 0.5] than in nighttime [(212.3 ± 36.7) μg·m⁻³, (29.6 ± 6.6) μg·m⁻³, (20.7 ± 6.4) μg·m⁻³ and 1.5 ± 0.2] during spring. This result was explained by the fact that winter is a "heating season", especially in nighttime, emission of carbonaceous particles was increased because of the increase of coal and biomass combustion and diffusion of pollutants was difficult because of low atmospheric temperature and stable atmospheric conditions; and high OC/EC was caused by increase of OC emission but not contribution of secondary organic carbon (SOC) since low temperature and weak solar radiation were not favorable for the formation of SOC. The higher concentrations of PM_{2.5}, OC and EC in daytime than in nighttime during spring might be due to more dust in daytime because of higher wind speed and lower relative humidity in daytime than in nighttime, and the higher OC/EC in daytime than in nighttime might be caused by higher temperature and stronger solar radiation in daytime, which were favorable for the formation of SOC. Comparing with other cities in China, Taiyuan showed high concentrations of PM_{2.5}, OC and EC, indicating serious carbonaceous aerosol pollution which may significantly contribute to the formation of dust-haze.

Key words: Taiyuan; PM_{2.5}; carbonaceous composition; variation characteristics; source analysis

收稿日期: 2014-08-28; 修订日期: 2014-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172316); 国家教育部重点项目(211026); 山西省科技研究基金项目(2011021025-2); 山西省资助回国留学人员科研项目(2011080)

作者简介: 张桂香(1984~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为有机环境化学, E-mail: zhanggx@tyust.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: heqs@tyust.edu.cn

大气细粒子 (PM_{2.5}) 对人类健康和气候变化等有重要的负面影响,特别是对大气灰霾形成的贡献不容忽视^[1~3]. 碳质气溶胶包括元素碳 (EC) 和有机碳 (OC) 是大气细粒子的重要组成部分,一般占我国城市大气中 PM_{2.5} 质量的 20% ~ 50%^[4,5]. EC 主要来自含碳物质不完全燃烧,OC 包括污染源直接排放的一次有机碳 (POC) 和污染物通过大气光化学氧化反应生成的二次有机碳 (SOC)^[1,5~9]. EC 对全球变暖的影响程度仅次于二氧化碳^[10,11],OC 通过影响云中水滴的表面张力也会影响全球气候,并含多环芳烃等对人体健康有害的化合物^[3].

为此,大气碳质颗粒物污染引起了国内外学者的广泛关注. 比如,已有国外学者研究发现,整个欧洲自西向东除了西和东两端采样点的冬季碳质气溶胶浓度水平高于夏季以外,其余采样点与此相反,并且所有 EC 主要来源于化石燃料燃烧,OC 冬季主要来源于生物质和化石燃料燃烧,夏季主要是二次有机气溶胶的贡献^[12]; 整个美国的 EC 主要来源于化石燃料燃烧,OC 主要来源于植被、生物燃料和化石燃料燃烧以及火灾^[13]. 国内学者在我国北京^[1~4,5,8,14,15]、上海^[8,16~18]、珠三角地区^[7,9]、天津^[19]、重庆^[20]和福建省的主要城市^[21]等地开展大气中碳质气溶胶的污染特征研究,结果表明 EC 和 OC 主要富集在细粒子中,其浓度水平均为冬季高于夏季,因为冬季采暖期燃煤量增加并且大气混合层较低、沉降量较少. Cao 等^[5]研究了我国 14 个城市 (北方城市:北京、长春、金昌、青岛、天津、西安和玉林; 南方城市:重庆、广州、香港、杭州、上海、武汉和厦门) 大气中 PM_{2.5}、OC 和 EC 的浓度水平分布特征,结果表明北方城市的碳质气溶胶浓度水平通常高于南方城市,内陆城市通常高于沿海城市,并且能源结构、地形和气候条件对碳质气溶胶的浓度水平有重要影响.

太原属于内陆城市并且是我国重要的煤炭重工业城市,由于受到气候条件、三面环山的特殊地形及其工业结构和燃料结构等因素的制约,大气颗粒物一直处于高污染水平. 但是,目前仅有少数研究报告了太原市大气碳质颗粒物污染特征. 彭林等^[22]和张建强等^[23]研究发现燃煤和机动车尾气排放对太原市大气 PM₁₀ 中的总碳 (TC) 贡献较大,其次是城市扬尘. 孟昭阳等^[24]研究发现太原市冬季 PM_{2.5} 和碳质气溶胶污染严重,采暖燃煤是 OC 和 EC 的主要贡献源. 已有研究发现碳质气溶胶对太原市大气灰霾的形成有重要贡献,并且灰霾天气多数情

况下在冬季和春季发生频率最高^[25],深入研究太原市冬季和春季大气中碳质气溶胶的变化特征及其来源对了解太原市大气灰霾的成因具有重要意义. 为此,本研究重点探讨了太原大气中 PM_{2.5}、OC 和 EC 在全年污染最为严重的冬季和春季的昼夜变化特征及来源解析,以期有效为控制太原市大气气溶胶污染提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

太原盆地布置的 8 个大气污染物监测站点数据分析结果显示,除了小店区和晋源区两个郊区监测站点以外,位于城区所有监测站点的大气污染物浓度水平之间无显著性差异,表明大气污染物在太原市区分布均匀^[26]. 本研究选择位于城区的太原科技大学一办公楼楼顶为采样点 (距地面约 25 m, 具体位置见图 1), 周围无高建筑物和明显局地污染源,开展冬季代表性月份 (2009 年 11 月 17 日到 22 日) 和春季代表性月份 (2010 年 3 月 27 日到 4 月 10 日) 的昼夜采样,采样时段为日间 12 h (08:00 ~ 20:00) 和夜间 12 h (20:00 ~ 次日 08:00).

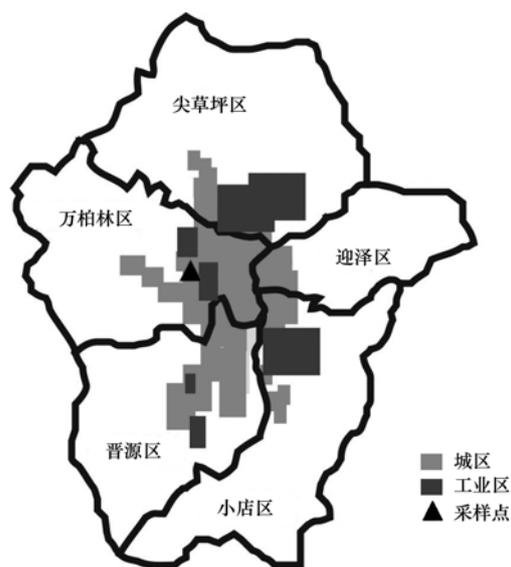


图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Location of the sampling site

采用大流量采样器 (HT-1500, 中国天虹公司) 采集 PM_{2.5} 样品, 采样流速为 1.05 m³ · min⁻¹, 采样滤膜为石英纤维滤膜 (20.3 × 25.4 cm, 英国 Whatman 公司). 采样前, 石英膜在 450℃ 的马弗炉中灼烧 4 h 以去除残留的碳质污染物, 用铝箔密封保存. 样品采集前后均在温度为 25℃ 和相对湿度为 50% 的恒温恒湿箱 (BE-TH-1400M8, 中国东莞) 中平衡 24

h 后用 $1/10^4$ 的微量电子天平 (AB204-S, METTLER, TOLEDO, 瑞士) 称重, 用铝箔密封保存在 -10°C 的冰箱内待用. 采样期间用气象仪 (JL-03, 中国清胜公司) 记录气温、相对湿度、风速、风向和降雨量等气象数据.

1.2 样品分析与质量控制

$\text{PM}_{2.5}$ 中的 OC 和 EC 是通过 DRI Model 2001A 热/光反射碳分析仪 (Atmoslytic Inc., Calabasas, CA, USA) 进行分析 (TOR 方法)^[27]. 将样品置于 100% 纯氮气环境中分 4 阶段升温 140°C (OC1)、 280°C (OC2)、 480°C (OC3) 和 580°C (OC4) 热解有机碳物质, 接着在 2% 氧气和 98% 氮气环境中分 3 阶段升温 580°C (EC1)、 740°C (EC2) 和 840°C (EC3) 氧化元素碳物质. 各个温度梯度下产生的二氧化碳在还原环境下转化为可以通过火焰离子检测器 (FID) 测定的甲烷. 样品在加热过程中, 部分有机碳会炭化为黑碳而使得 OC 和 EC 的峰不容易区分. 测定过程中, 用 633 nm 的氦-氖激光监测滤纸的反射光强, 利用光强的变化指示 EC 的氧化起点. 从加入氧气到获得反射率所测得碳含量的初始值为光学上检测到的热解碳 (OPC). $\text{OC} = \text{OC1} + \text{OC2} + \text{OC3} + \text{OC4} + \text{OPC}$; $\text{EC} = \text{EC1} + \text{EC2} + \text{EC3} - \text{OPC}$.

进行样品分析前, 均采用甲烷/二氧化碳标准气对仪器进行校正. 每测定 10 个样品进行一次平行和空白分析. OC 和 EC 的实验误差均小于 10%.

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 、OC 和 EC 的水平

太原冬季和春季 $\text{PM}_{2.5}$ 的日均浓度水平分别为 $(289.2 \pm 104.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(248.6 \pm 68.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (表 1), 分别是环境空气中日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度限值 ($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, GB 3095-2012 环境空气质量标准) 的 3.85 倍和 3.31 倍, 超标率均为 100%. 本研究期间, 冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染水平略高于春季, 因为冬季处于采暖期, 煤和生物质燃烧的增加导致大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平增高. 春季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平并没有显著降低, 和春季风速变化大 (图 2) 导致城市扬尘经常发生有关. 与国内其他城市相比, 太原 $\text{PM}_{2.5}$ 污染严重 (表 1), 冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平除低于西安外, 是其他北方城市 (长春、青岛、天津和北京) 的 1.6 ~ 2.3 倍, 是珠三角地区城市 (香港、广州、深圳和珠海) 和上海的 2.7 ~ 15.0 倍; 春季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平也较高, 分别是北京和上海的 2.1 倍和 4.0 倍. 这是因为太原市是以煤炭为主要能源的重工业城市, 燃煤导致大量的

颗粒物排放, 且三面环山的地形条件不利于污染物扩散导致污染物在市区积累. 本研究 (2009 年) 冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平也高于 2005 年冬季太原 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度水平 [$(193.4 \pm 102.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]^[24], 表明太原市大气颗粒物污染状况仍然严峻.

太原 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 OC 在冬季和春季的日均浓度水平分别为 $(65.2 \pm 22.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(29.7 \pm 6.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, EC 分别为 $(23.5 \pm 8.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(20.2 \pm 5.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (表 1). 冬季的 OC 浓度约是春季的 2 倍, 冬季的 EC 浓度也略高于春季 (表 1), 与冬季处于采暖期有关. 太原 OC 和 EC 在国内城市中均处于高的浓度水平 (表 1). 太原冬季 OC 和 EC 浓度水平除了分别低于和相当于西安外, 分别是表 1 中北方城市的 1.6 ~ 2.5 倍和 2.4 ~ 3.7 倍, 是珠三角地区城市的 2.9 ~ 6.8 倍和 2.8 ~ 5.0 倍; 太原春季 OC 略高于北京, 但 EC 是北京 的 3.1 倍. 这与太原以煤炭为主要能源密切相关, 而北京等一些发达城市已经进行能源结构调整, 天然气等占据越来越重要的地位^[5]. 本研究冬季 OC 和 EC 的浓度水平也高于 2005 年冬季太原 OC 和 EC 的浓度水平 [分别为 $(28.9 \pm 14.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(4.8 \pm 2.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]^[24], 表明太原市大气中碳质气溶胶污染并未改善. 太原冬季和春季总的碳质气溶胶 ($\text{TCA} = 1.6 \times \text{OC} + \text{EC}$) 分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 总质量的 $44.4\% \pm 7.9\%$ 和 $28.0\% \pm 5.1\%$, 与 Duan 等^[3] 报道的其他北方城市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中 TCA 所占比例 (40.1% ~ 54.4%) 类似.

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 、OC 和 EC 的昼夜变化特征

图 3 显示了太原冬季和春季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平的昼夜变化特征. 冬季白天和夜晚 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度分别为 $(234.9 \pm 122.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(309.3 \pm 150.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 春季分别为 $(292.5 \pm 120.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(212.3 \pm 36.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 冬季主要为夜晚 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平显著高于白天 (除 11-18 和 11-19 外), 这是因为冬季夜晚气温低, 供暖燃煤量和生物质燃烧量增加, 导致 $\text{PM}_{2.5}$ 排放增多, 并且大气边界层高度降低不利于 $\text{PM}_{2.5}$ 扩散^[28,29]. 然而, 与冬季相反, 春季主要为白天 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平高于夜晚 (除 03-28、04-02、04-04 和 04-06 外), 这主要是因为春季白天风速较高且干燥 (图 2), 更容易发生城市扬尘. 更重要的是, 山西春季沙尘暴天气频发, 特别是白天午后到傍晚时段最强, 导致白天大气中不同粒径的颗粒物浓度会显著增加^[30].

表 1 本研究与国内其他研究中冬季和春季 PM_{2.5}、OC 和 EC 的平均浓度及 OC/EC (TOR 方法)Table 1 Average concentrations of PM_{2.5}, OC, EC and their OC/EC ratios in Taiyuan and other cities in China (TOR method)

城市	时间	PM _{2.5} /μg·m ⁻³	OC/μg·m ⁻³	EC/μg·m ⁻³	OC/EC	文献
太原	冬季	289.2 ± 104.8	65.2 ± 22.1	23.5 ± 8.2	2.8 ± 0.3	本研究
	春季	248.6 ± 68.6	29.7 ± 6.2	20.2 ± 5.4	1.5 ± 0.3	本研究
香港	冬季	54.5 ± 22.9	9.6 ± 4.5	4.7 ± 2.9	2.3	[9]
广州	冬季	105.9 ± 71.4	22.6 ± 18.0	8.3 ± 5.6	2.7	[9]
深圳	冬季	60.8 ± 18.0	13.2 ± 4.1	6.1 ± 1.8	2.2	[9]
珠海	冬季	19.3 ± 23.7	12.2 ± 4.4	5.0 ± 1.6	2.5	[9]
上海	冬季	88.6	16.4	8.16		[16]
	春季	61.7	16.1	5.27		[16]
长春	冬季	140.5 ± 66.1	27.2 ± 15.3	7.1 ± 3.5	3.7	[5]
青岛	冬季	127.9 ± 58.5	26.6 ± 11.0	6.3 ± 2.4	4.3	[5]
天津	冬季	179.4 ± 87.8	38.9 ± 18.4	8.5 ± 3.5	4.5	[5]
西安	冬季	375.2 ± 143.5	102.3 ± 33.0	21.6 ± 5.4	4.7	[5]
北京	冬季	184.5 ± 33.9	40.1 ± 4.4	9.9 ± 3.0	4.3	[8]
	春季	118.5 ± 27.3	21.5 ± 7.3	6.5 ± 0.1	3.3	[8]

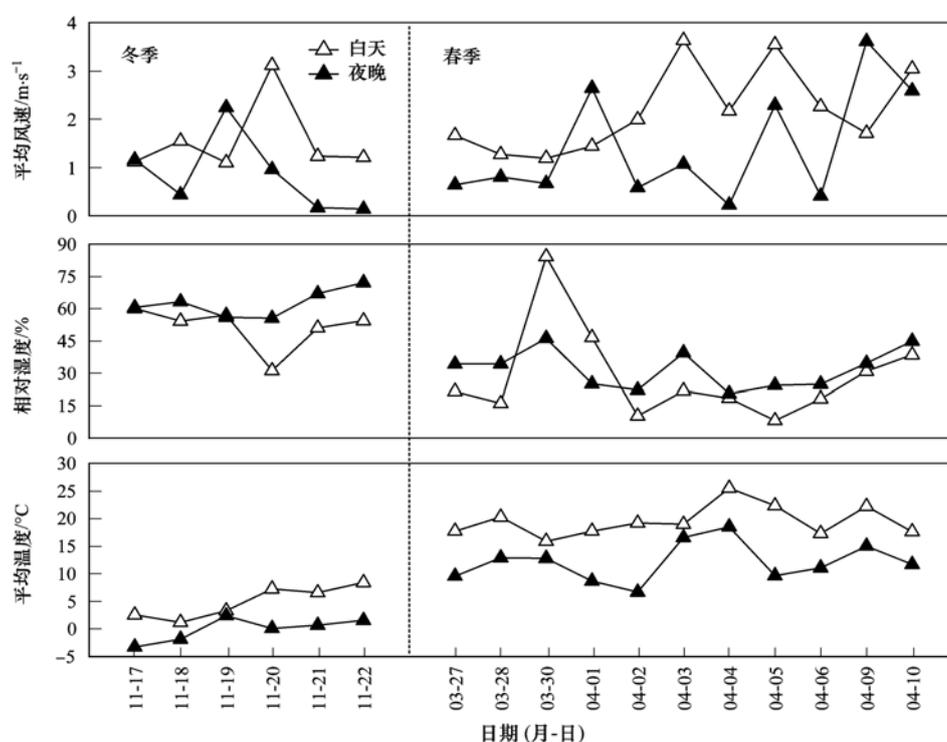


图 2 采样期间冬季和春季气象条件的昼夜变化

Fig. 2 Day-night variability of ambient conditions in winter and spring during the sampling period

图 4 表示了太原冬季和春季 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 浓度水平的昼夜变化特征. 冬季白天和夜晚的 OC 平均浓度分别为 $(54.9 \pm 28.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(74.6 \pm 19.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, EC 分别为 $(22.6 \pm 10.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(24.3 \pm 6.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 春季白天和夜晚的 OC 平均浓度分别为 $(32.7 \pm 10.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(29.6 \pm 6.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, EC 分别为 $(22.7 \pm 10.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(20.7 \pm 6.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 冬季夜晚 OC (除 11-18 外) 和 EC (除了 11-18 和 11-22) 浓度水平显著高于白天, 这

与印度坎普尔市冬季 OC 和 EC 的昼夜变化趋势一致^[28]. 然而, 春季白天 OC (除了 04-02 和 04-06) 和 EC (除了 03-30、04-02 和 04-06) 浓度水平高于或者接近于夜晚, 这也主要与春季白天易于发生城市扬尘和沙尘暴有关^[23,30]. 冬春两季白天和夜晚 OC 浓度水平均高于 EC, 这是因为 EC 全部为一次排放的污染物, 并且具有化学惰性, EC 浓度的增加是气象因素和排放导致污染积累的结果; 而 OC 包括一次排放和二次生成两部分, OC 浓度增加是污染积累和

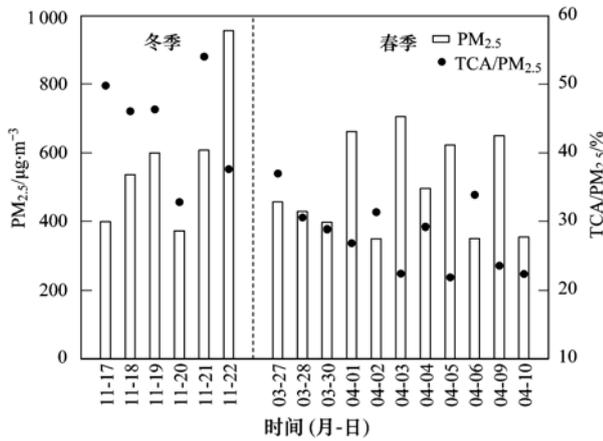


图3 冬季和春季 $PM_{2.5}$ 浓度水平和总碳质气溶胶 (TCA) 所占比例的昼夜变化

Fig. 3 Day-night variability of concentrations of $PM_{2.5}$ and proportion of total carbonaceous aerosol (TCA) in $PM_{2.5}$ in winter and summer

二次生成的共同作用结果^[18,19]. 本研究中,除了春季白天 SOC 对 OC 具有重要贡献以外,其余时间 OC 浓度较高主要是一次排放导致的,详见 2.3 节. 夜晚 TCA 所占 $PM_{2.5}$ 质量的百分比通常高于白天(图 3),表明夜晚含碳物质浓度的增加并不是因为气溶胶负载量的增加,而是因为含碳物质的排放量增加^[28]. 比较图 3 和图 4 可以看出,冬季和春季 OC 和 EC 的昼夜变化趋势与 $PM_{2.5}$ 的变化趋势相似,表明产生 OC 和 EC 的排放源比如机动车尾气、燃煤和生物质燃烧等对太原市大气中 $PM_{2.5}$ 有重要贡献.

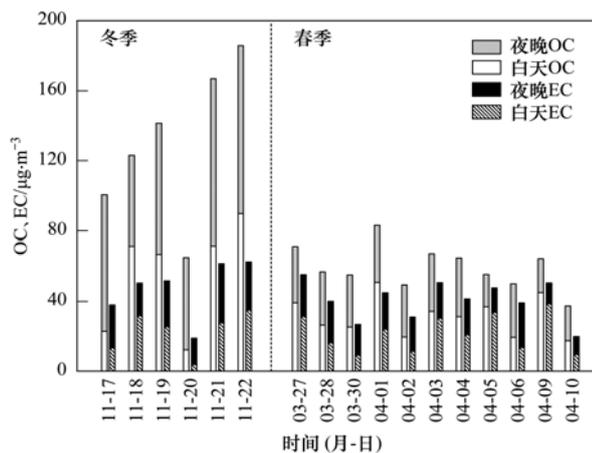


图4 冬季和春季 OC 和 EC 浓度水平的昼夜变化

Fig. 4 Day-night variability of levels of OC and EC in winter and summer

2.3 OC 与 EC 的来源分析

OC/EC 比值可以用于示踪碳质气溶胶排放源及其组成的变化. 太原冬季和春季 OC/EC 平均值分别为 2.8 ± 0.3 和 1.5 ± 0.3 (表 1),与珠三角地区

相当,但明显低于其他北方城市. 冬季 OC/EC 高于春季,这主要是因为太原冬季处于采暖期燃煤量增加,特别是城区内较多的“城中村”大量使用低质蜂窝煤甚至原煤用于取暖,导致冬季含碳物质特别是 OC 的大量排放^[8,31,32]. 春季处于非采暖期,煤和生物质燃烧减少,OC/EC 有所降低^[23].

图 5 给出了冬季和春季 OC/EC 的昼夜变化特征. 冬季和春季的白天和夜晚 OC/EC 在 1.0 ~ 4.0 之间,与世界大多数城市地区 OC/EC 值一致^[7],表明 OC 和 EC 主要来源于煤和生物质燃烧,部分来源于机动车尾气^[23,32]. 冬季白天和夜晚 OC/EC 平均值分别为 2.5 ± 0.5 和 3.1 ± 0.3 ,春季分别为 1.6 ± 0.5 和 1.5 ± 0.2 . 冬季夜晚 OC/EC 显著高于白天(图 5),这是冬季夜晚煤和生物质燃烧量大于白天所致,而非 SOC 的贡献. 一方面,煤特别是生物质燃烧排放的颗粒物中 OC/EC 高,另一方面,大气中 SOC 的形成主要受温度影响,当温度低于 $15^{\circ}C$ 时,基本不形成 SOC,太原冬季白天温度低于 $10^{\circ}C$,夜晚的温度几乎均在 $0^{\circ}C$ 以下,并且冬季太阳辐射弱,从气象条件看导致太原市冬季发生二次污染的光化学反应不强^[5,19,32],较高的 OC/EC 值主要与直接排放源有关. 与冬季不同,春季有一半的时间是白天 OC/EC 高于夜晚(图 5),因为春季白天温度几乎均在 $15^{\circ}C$ 以上,并且太阳辐射较强,较有利于形成 SOC(图 2)^[19,28].

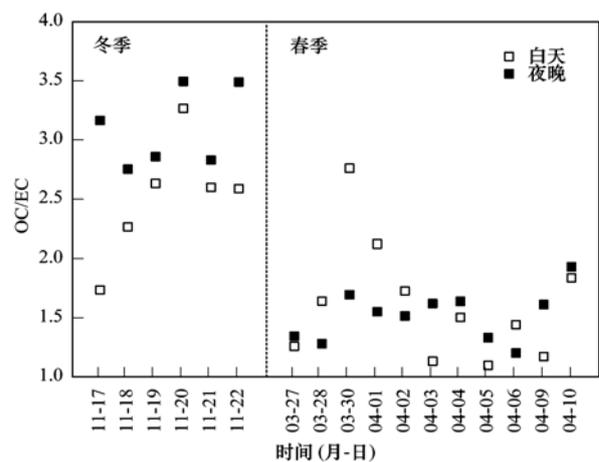
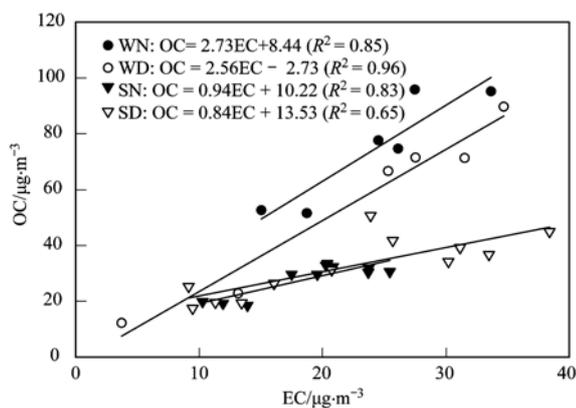


图5 冬季和春季 OC/EC 的昼夜变化

Fig. 5 Day-night variability of OC/EC ratios in winter and spring

OC 与 EC 之间的线性相关性能够提供判断碳质颗粒物来源的信息. 图 6 给出了白天和夜晚的 OC 与 EC 之间的线性相关关系 ($OC = aEC + b$). 与 OC/EC 的结果一致,冬季白天 OC 与 EC 的相关性较夜晚好,说明白天 OC 和 EC 具有相似的来源和大

气扩散过程,而夜晚煤或生物质燃烧增多导致 OC 排放量大于 EC. 但是春季白天 OC 与 EC 的相关性较夜晚差,说明春季白天存在大气不稳定性和生成一定量 SOC 的影响. 在 OC 与 EC 的线性关系式中,斜率 a 代表与燃烧源有关一次排放的 OC^[5]. 冬季 a 值显著高于春季(图 6),表明冬季煤和生物质燃烧一次排放源对碳质气溶胶具有重要贡献.



WN: 冬季夜间, WD: 冬季日间, SN: 春季夜间, SD: 春季日间

图 6 冬季和春季昼夜 PM_{2.5} 中 OC 与 EC 之间的相关关系

Fig. 6 Correlations between OC and EC in day-night PM_{2.5} in winter and spring

不同排放源的碳质组成有较大的差异,根据碳质组成的变化可以进一步判断碳质颗粒物的主要来源,比如 OC1 或 OPC 是生物质燃烧的标识性组分、OC2 或 OC4 是煤燃烧的标识性组分、EC2 或 EC3 施工机械等重型设备尾气、OC3 和 EC1 分别是餐饮油烟和机动车尾气的标识性组分^[33,34]. 碳组分变化与不同排放源的贡献有关. 图 7 给出了太原冬季和春季 PM_{2.5} 中 8 种碳组分的昼夜变化特征. 冬季

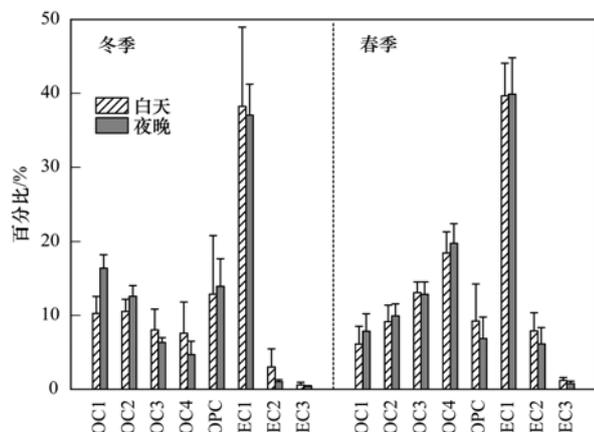


图 7 冬季和春季 PM_{2.5} 中 8 种碳组分
占总碳质气溶胶百分比的昼夜变化

Fig. 7 Day-night variability of the percentages of 8 carbon fractions in the total carbon aerosols of PM_{2.5} in winter and spring

OC1、OC2 和 OPC 占总碳的比例高于春季,春季和冬季的 EC1 水平相差不大,而 OC3、OC4、EC2 和 EC3 均为春季高于冬季. 这表明,冬季煤和生物质燃烧对总碳的贡献大于春季,而冬季和春季机动车尾气的排放的贡献几乎相同,春季可能餐饮油烟和施工机械的烟尘贡献较冬季大. 冬春季节中 OC1 和 OC2 均是夜晚高于白天,表明夜晚煤和生物质燃烧的贡献大于白天,与 OC 和 EC 的比值分析和相关性分析的结果一致. 春季白天和夜晚 EC1 所占比例几乎相同,而冬季夜晚略低于白天,这可能与春季夜晚人们出行较冬季夜晚频繁有关.

3 结论

(1) 太原 PM_{2.5}、OC、EC 浓度水平和 OC/EC 平均值均呈现出冬季高于春季,冬季夜晚高于白天,春季白天高于夜晚的污染特征.

(2) 冬季处于采暖期,特别是夜晚,煤和生物质燃烧量增加导致碳质颗粒物排放量增加以及大气温度低且稳定不利于污染物扩散;高的 OC/EC 是 OC 排放量增加所致而非 SOC 的贡献,因为气温低且太阳辐射弱不利于 SOC 的生成. 春季白天 PM_{2.5}、OC 和 EC 浓度水平高于夜晚可能是白天风速比夜晚大且相对湿度比夜晚低而更有利于城市扬尘形成所致,OC/EC 高可能是白天温度较高且太阳辐射较强有利于 SOC 的生成.

(3) 与国内其他城市相比,太原碳质气溶胶污染严重,对城市灰霾形成有重要贡献.

参考文献:

- [1] Dan M, Zhuang G S, Li X X, *et al.* The characteristics of carbonaceous species and their sources in PM_{2.5} in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(21): 3443-3452.
- [2] 谭吉华, 赵金平, 段青春, 等. 广州典型灰霾期有机碳和元素碳的污染特征 [J]. *环境污染与防治*, 2009, **31**(3): 105-108.
- [3] Duan J C, Tan J H, Wang S L, *et al.* Roadside, urban, and rural comparison of size distribution characteristics of PAHs and carbonaceous components of Beijing, China [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2012, **69**(4): 337-349.
- [4] 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.
- [5] 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*, 2007, **112**(D22), doi: 10.1029/2006JD008205.
- [6] 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.
- [7] Yuan Z B, Yu J Z, Lau A K H, *et al.* Application of positive matrix factorization in estimating aerosol secondary organic carbon in Hong Kong and its relationship with secondary sulfate [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(1): 25-34.
- [8] 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 Discussions*, 2005, **5**(1): 217-241.
- [9] 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.
- [10] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, *et al.* Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. *Science*, 2002, **297**(5590): 2250-2253.
- [11] 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.
- [12] Gelencsér A, May B, Simpson D, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} organic aerosol over Europe: Primary/secondary, natural/anthropogenic, and fossil/biogenic origin [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112** (D23), doi: 10.1029/2006JD008094.
- [13] Park R J, Jacob D J, Chin M, *et al.* Sources of carbonaceous aerosols over the United States and implications for natural visibility [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, **108** (D12): 4355, doi: 10.1029/2002JD003190.
- [14] 迟旭光, 段凤魁, 董树屏, 等. 北京大气颗粒物中有机碳和元素碳的浓度水平和季节变化 [J]. *中国环境监测*, 2000, **16**(3): 35-38.
- [15] 李杏茹, 王英锋, 郭雪清, 等. 2008 年奥运期间北京不同粒径大气颗粒物中元素碳和有机碳的变化特征 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 313-318.
- [16] Ye B M, Ji X L, Yang H Z, *et al.* Concentration and chemical composition of PM_{2.5} in Shanghai for 1-year period [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(4): 499-510.
- [17] 王广华, 位楠楠, 刘卫, 等. 上海市大气颗粒物中有机碳(OC)与元素碳(EC)的粒径分布 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(9): 1993-2001.
- [18] 周敏, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海秋季典型大气高污染过程中有机碳和元素碳的变化特征 [J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(1): 181-188.
- [19] 古金霞, 白志鹏, 刘爱霞, 等. 天津冬季 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 中有机碳、元素碳的污染特征 [J]. *环境污染与防治*, 2009, **31**(8): 33-36.
- [20] 叶堤, 蒋昌潭, 赵琦, 等. 重庆市春季大气 PM₁₀ 中有机碳、元素碳浓度水平与污染特征分析 [J]. *中国环境监测*, 2007, **23**(3): 69-73.
- [21] 陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 等. 福建省三大城市冬季 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1988-1994.
- [22] 彭林, 崔昊, 张建强, 等. 山西省四城市空气颗粒物中碳的组成特征 [J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2011, **32**(2): 223-226.
- [23] 张建强, 王莹, 彭林, 等. 太原市 PM₁₀ 及其污染源中碳的同位素组成 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(6): 968-972.
- [24] 孟昭阳, 张怀德, 蒋晓明, 等. 太原冬季 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的变化特征 [J]. *应用气象学报*, 2007, **18**(4): 524-531.
- [25] 姚晨婷. 太原市灰霾天气发生过程大气细颗粒物化学成分特征研究 [D]. 太原: 山西大学, 2013.
- [26] 闫雨龙, 何秋生, 钱天伟. 太原市大气污染现状及监测站点优化 [J]. *太原科技大学学报*, 2010, **31**(5): 427-431.
- [27] Chow J C, Watson 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 and Waste Management Association*, 2007, **57**(9): 1014-1023.
- [28] Ram K, Sarin M M. Day-night variability of EC, OC, WSOC and inorganic ions in urban environment of Indo-Gangetic Plain: Implications to secondary aerosol formation [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(2): 460-468.
- [29] 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.
- [30] 刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 等. 2012 年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2843-2850.
- [31] Duan F K, Liu X D, Yu T, *et al.* Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(9): 1275-1282.
- [32] Watson J G, Chow J C, Houck J E. PM_{2.5} 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] Cao J J, Chow J C, Lee S 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 Discussions*, 2005, **5**(3): 3561-3593.
- [34] 张灿, 周志恩, 翟崇治, 等. 基于重庆本地碳成分谱的 PM_{2.5} 碳组分来源分析 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 810-819.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i>	(759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i>	(774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i>	(780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i>	(787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i>	(794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i>	(801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i>	(809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	(817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i>	(824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i>	(831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i>	(839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i>	(847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i>	(855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo, <i>et al.</i>	(862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i>	(869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i>	(879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i>	(898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei, <i>et al.</i>	(905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i>	(914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i>	(922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>	(936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beijing River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i>	(946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i>	(955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i>	(963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i>	(969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i>	(980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i>	(989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i>	(995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i>	(1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i>	(1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i>	(1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i>	(1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i>	(1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i>	(1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i>	(1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i>	(1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i>	(1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i>	(1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i>	(1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i>	(1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i>	(1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong	(1133)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行