

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析	陈卓, 刘峻峰, 陶玮, 陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单	刘海彪, 孔少飞, 王伟, 严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 PM _{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析	苗蕾, 廖晓农, 王迎春 (2836)
2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征	
程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 魏强, 孙彤卉, 王步英, 富佳明, 何乐为, 程兵芬, 皮帅, 马立光, 崔继宪, 孟凡 (2847)	
抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析	
周静博, 李治国, 路娜, 徐曼, 杨鹏, 高康宁, 王建国, 靳伟 (2855)	
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征	蒋燕, 贺光艳, 罗彬, 陈建文, 王斌, 杜云松, 杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析	
沈利娟, 王红磊, 李莉, 吕升, 袁婧, 张孝寒, 章国骏, 王翥 (2871)	
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析	张棕巍, 胡恭任, 于瑞莲, 刘贤荣, 胡起超, 王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险: 以贵阳市为例	李晓燕, 汪浪, 张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析	郭雅思, 于爽, 黎泳珊, 孙平安, 何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH ₃ 和N ₂ O)减排效果比较: 以夏玉米季为例	范会, 姜姗姗, 魏茨, 蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O通量的观测	吴建国, 周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬CO ₂ 和CH ₄ 分压特征分析	张军伟, 雷丹, 肖尚斌, 张成, 穆晓辉, 刘佳, 李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析	张晨, 刘汉安, 高学平, 张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应: 以兰陵溪小流域为例	
吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄, 韩黎阳 (2940)	
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究: 以洱海北部流域为例	项颂, 庞燕, 储昭升, 胡小贞, 孙莉, 薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响: 以草堂河为例	王晓彤, 罗光富, 操满, 王雨春, 汪福顺, 邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析	李如忠, 黄青飞, 钱靖, 殷晓曦, 韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究	李强坤, 胡亚伟, 宋常吉, 彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨	
柴雪思, 雷利国, 江长胜, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2979)	
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究	刘静, 郑丙辉, 刘录三, 马迎群, 林岗璇, 汪星, 夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究	崔晓宇, 张鸿, 罗骥, 张若冰 (3001)
柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价	卫亚宁, 潘佳钊, 宋玉梅, 郭鹏然, 王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析	陈永娟, 胡玮璇, 庞树江, 王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义	王启栋, 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 曹磊 (3026)
甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚酸酯的污染现状与分布特征	昌盛, 赵兴茹, 刘琰, 耿梦娇, 肖晋翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析	张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 赵瑞一, 梁作兵 (3049)
Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制	张翔凌, 黄华玲, 郭露, 陈巧珍, 阮聪颖, 冷玉洁 (3058)
Ce ³⁺ 与Cu ²⁺ 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究	张剑桥, 迟惠中, 宋阳, 罗从伟, 江进, 马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究	丁文川, 向星光, 曾晓岚, 厉晓宇, 梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO ₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解	徐琪, 周泽宇, 王洪涛 (3079)
单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制	阳海, 魏宏庆, 胡乐天, 胡倩, 阳立平, 刘华杰, 易翔, 易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能	刘春, 于长富, 张静, 陈晓轩, 张磊, 杨景亮 (3101)
ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良, 张婷 (3108)
活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探	李祥, 林兴, 杨朋兵, 黄勇, 刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动	顾书军, 方芳, 李凯, 刘勇, 郭劲松, 陈猷鹏, 蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能	马娟, 宋璐, 俞小军, 李璐, 孙雷军, 孙洪伟, 李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响	何志江, 赵媛, 张源凯, 王洪臣, 齐鲁, 尹训飞, 张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估	
王菲, 吴泉源, 吕建树, 董玉龙, 曹文涛, 康日斐, 曹见飞 (3144)	
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征	赵科理, 傅伟军, 叶正钱, 戴巍 (3151)
我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究	冯璞阳, 李哲, 者渝芸, 黄杰, 梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征	李鑫, 杨军, 饶伟, 王代长, 杜光辉, 化党领, 刘世亮, 刘红恩 (3169)
聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 的吸附特性	朱健, 雷明婧, 王平, 张伟丽, 陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价	王文东, 刘荟, 张银婷, 杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附	朱倩, 李正魁, 张一品, 韩华杨, 王浩 (3192)
鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性	
张亚楠, 杨兴伦, 卞永荣, 谷成刚, 王芳, 王代长, 蒋新 (3201)	
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响	景新新, 苏志忠, 邢红恩, 王发园, 石兆勇, 刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究	王晓南, 闫振广, 余若祯, 王婉华, 陈丽红, 刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响	林文芳, 陈胜, 万堃, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (3224)
不同氮水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响	吕玉, 周龙, 龙光强, 汤利 (3229)
《环境科学》征订启事 (3025) 《环境科学》征稿简则 (3057) 信息 (3072, 3085, 3143)	

抗战胜利 70 周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析

周静博¹, 李治国¹, 路娜¹, 徐曼¹, 杨鹏², 高康宁¹, 王建国¹, 靳伟^{1*}

(1. 石家庄市环境监测中心, 石家庄 050022; 2. 石家庄市气象局, 石家庄 050081)

摘要: 抗战胜利 70 周年阅兵纪念活动空气质量保障前后, 利用位于石家庄市大气自动梯度站 20 m 处单颗粒气溶胶质谱仪 (SPAMS) 对大气细颗粒物来源进行了解析。结果表明, 阅兵活动当日, 大气细颗粒物的首要污染源为机动车尾气 (20.9%) 和燃煤 (20.6%), 与空气质量保障前后相比, 两类源的贡献均出现不同程度的降低, 且颗粒物数浓度处于较低水平, 保障措施起到了较好的效果, 其中“控车”和“控煤”效果更为显著。来自机动车尾气的颗粒以短链元素碳和 Mn 为主, 来自燃煤源的颗粒物以有机碳为主, 来自工艺工业源的颗粒物以有机碳和金属为主, 来自扬尘源的颗粒物以硅酸盐和钙为主。保障措施结束后, 颗粒物浓度迅速攀升, 是低压静稳不利气象条件和东南方向低空传输共同作用结果, 其中扬尘和机动车尾气的贡献增长较为突出。

关键词: 阅兵; 细颗粒物; 在线源解析; 大气; 石家庄

中图分类号: X513; X832 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-2855-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.005

Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang

ZHOU Jing-bo¹, LI Zhi-guo¹, LU Na¹, XU Man¹, YANG Peng², GAO Kang-ning¹, WANG Jian-guo¹, JIN Wei^{1*}

(1. Shijiazhuang Environmental Monitoring Station, Shijiazhuang 050022, China; 2. Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Robust measures were taken to ensure a good air quality for the parade on the 70th Victory Memorial Day for the Chinese People's War of Resistance against Japanese Aggression (VM Day). During the period, the source of fine particulate matter in air was analyzed with the single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) located at Shijiazhuang air automatic monitoring station of 20 meter. The results indicated that, on VM Day the primary sources of air pollution were vehicle exhaust emission (20.9%) and coal-generated emissions (20.6%), which were also at lower degrees than those on pre-and post-VM Day. It turned out that these air quality-improving measures, especially the vehicle restriction and coal consumption reduction, had a good effect. Particles from the vehicle exhaust and coal combustion source were mainly based on short-chain elements, carbon, manganese and organic carbon. The particles from the industry source were mainly organic carbon and metal. Particles from the dust source were mainly composed of silicate and calcium. When air quality-improving measures were stopped, the concentration of particulate matter rapidly rose again, and the contribution of dust and vehicle exhaust emission was remarkable. It was believed that the interaction of low-pressure static stability of adverse weather conditions and southeast direction of low altitude transmission was a major cause in the deterioration of air quality.

Key words: VM Day parade; fine particles; online source apportionment; atmosphere; Shijiazhuang

近年来随着工业进程的加快, 空气污染问题日益严峻, 其中以细颗粒物和臭氧为代表的大气复合污染已成为制约城市经济环境可持续发展的重大问题之一^[1]。细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 对光有显著的散射和吸收作用^[2], 往往导致大气能见度降低, 同时通过直接和间接作用影响全球气候变化^[3], 细颗粒物污染问题在国内外已引起广泛关注^[4]。石家庄市位于河北省中南部, 地处太行山东麓, 地势西高东低^[5], 大风次数明显少于同纬度的地区, 特殊的地理环境使市区污染物难于扩散^[6]。经济主要以煤炭、医药、化工、电力工业为主^[7], 污染物排放量大, 大气首要污染物以颗粒物尤其 $PM_{2.5}$ 为主。

目前 $PM_{2.5}$ 来源解析的常规方法主要包括源排放清单法、扩散模型法和受体模型法等^[8], 源排放清单法通过建立污染源清单数据库, 对不同源类排放量进行评估, 确定主要源贡献率。该方法简单, 目前已经建立全国^[9]、重点区域^[10,11]和典型城市^[12]的大气污染源清单。但该方法仅考虑了各类源排放的相对重要性, 没有考虑转化、生消机制, 不能同空

收稿日期: 2015-11-21; 修订日期: 2016-03-29

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项 (201109004); 河北省科技支撑计划项目 (16273714D)

作者简介: 周静博 (1985 ~), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为环境监测, E-mail: 616570625@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: jiwei65815@126.com

气质量变化建立直接关系,且不确定性较大.扩散模型也称源模型法,是基于源排放清单和气象场,用数值方法模拟污染物在大气中的传输、扩散、化学转化等过程,进而估算不同源对受体点的贡献^[13].该方法使用简单,但来自源清单数据、边界层气象过程以及复杂大气化学过程的不确定性大,因此应用扩散模型开展颗粒物来源解析的研究工作较少.受体模型法通过分析环境受体大气颗粒物的化学组分和物理特性来推断各类污染源的贡献率,应用较为广泛.目前在北京^[14]、天津^[15]、广州^[16]、南京^[17]等城市开展的来源解析工作已有一定基础.

常规源解析方法手工采样分析至解析完成周期达3个月以上,时效性较差,且无法研究小时时间尺度的突发污染事件.为快速捕捉灰霾天气的污染特征,广州禾信分析仪器有限公司于2010年研制出单颗粒气溶胶质谱仪(SPAMS),是一种从单个颗粒层面上分析颗粒物特性的新型分析技术,能够检测单个颗粒物的粒径大小以及其对应的化学组成^[18].该技术分析速度快,拥有极高的时间分辨率,避免了样品特性的变化对监测结果的影响.因此SPAMS对于快速颗粒物表征具有重要的意义,已有大量的研究报道了其在颗粒物排放源表征^[19]、环境颗粒物源解析^[20-22]、源谱构建^[23,24]等领域的应用.

2015年是中国人民抗日战争暨世界反法西斯战争胜利70周年,9月3日在北京举行了“阅兵”纪念活动.为保障纪念活动期间北京的空气质量,京津冀等区域采取了最高级别的空气质量保障措施,并制定了区域空气质量保障方案.8月21日,石家庄市政府办公厅下发《关于印发中国人民抗日战争暨世界反法西斯战争胜利70周年纪念活动石家庄市空气质量保障方案的通知》^[25],要求全力做好抗战胜利70周年纪念活动期间空气质量保障工作.控制时间为8月28日00:00至9月4日24:00,共8d.本研究在中国环境科学研究院的指导下,以大气自动梯度站20m点位的在线单颗粒气溶胶质谱监测数据为依据,将此次阅兵活动空气质量保障前后大气细颗粒物来源解析进行了对比分析,结果对区域大气污染防治协作、有效控制石家庄市大气PM_{2.5}污染具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 采样点位与仪器

时间选取空气质量保障前(8月21~27日)、空气质量保障期间(8月28日~9月4日)和保障

结束后(9月5~12日).观测地点设在石家庄电视塔-大气梯度自动监测站(东经114°31'49",北纬38°01'11"),测点离地高度约20m,位于石家庄市裕华区商业和居民混合区,测点南临世纪公园,以西是体育大街,以北是槐安路高架桥,观测点周围无明显局地污染源,站点附近水域较多,相对湿度较大,公园内植被覆盖率高.

大气细颗粒物样品通过广州禾信分析仪器有限公司生产的单颗粒气溶胶质谱仪(SPAMS 0515)进行测定.颗粒物的质量浓度采用美国ThermoFisher公司生产的 β 射线颗粒物监测仪(1405D)监测.

1.2 SPAMS工作原理^[26]

大气中的气溶胶颗粒经黑色导电硅胶管引入SPAMS后,气溶胶在空气动力学透镜的作用下聚焦成粒子束,逐一进入测径区,颗粒连续散射两束相距一定距离的激光束,颗粒经过两束激光的时间差,既用于计算颗粒的空气动力学直径,又用于控制电离激光在颗粒到达电离区中心时出射激光将颗粒电离,随后气溶胶粒子到达电离区中心被266nm紫外脉冲激光电离,电离产生的正负离子分别被双极飞行时间质量分析器检测,经数据采集系统处理后获得单个气溶胶粒子的正负质谱图.SPAMS采集的粒径范围为200nm~2.0 μ m,分辨率达到500,质谱测量范围 m/z 最大为 ± 250 .

1.3 SPAMS数据分析方法^[27]

数据采用单颗粒质谱数据分析软件包进行处理.气溶胶粒子的分类采用自适应共振神经网络算法(ART-2a).本研究ART-2a算法参数选择如下:学习效率0.05,警戒值0.75,迭代次数为20,该算法能够根据颗粒质谱中离子峰的种类及强度自动将相似的颗粒归为同一类.

1.4 颗粒物的来源解析方法

石家庄市大气细颗粒物污染源归结为8类,分别为燃煤、工业工艺(非燃烧产生的颗粒)、机动车尾气、扬尘、生物质燃烧、纯二次无机源、餐饮及其它.

针对燃煤、工业工艺、生物质燃烧锅炉及餐饮等固定源,以国控重点污染源企业名单为主要参考依据,并参考2013年石家庄市环境统计数据,选取了30家有代表性的典型企业进行源样品采集;针对扬尘源,分别采集了建筑尘、土壤尘、道路尘及自然降尘样品;针对机动车尾气源,分别采集了汽油车和柴油车尾气尘;针对开放式生物质燃烧源采集了石家庄本地有特征的生物质(农作物秸秆、落

叶)带回实验室进行模拟燃烧实验。除尘样需要干燥过筛后再悬浮进样外,其余样品均直接进仪器进行质谱特征采集,并获取各污染源排放颗粒物的化学成分及粒径特征,采用 ART-2a 法将相似的颗粒归为同一类,并提取其特征谱图(特征粒子的数浓度比重之和为 60% 以上)即源谱特征,进而建立石家庄市排放源谱库。环境空气中单颗粒样品经 SPAMS 采集、测径、电离、数据处理软件进行质谱特征提取后,根据特征离子的质荷比、相对峰面积、粒径分布等信息与源谱库进行比对、归类,从而得到各排放源对颗粒物的贡献比例。

1.5 后向气流轨迹分析

利用混合型单粒子拉格朗日综合轨迹 HYSPLIT 模式进行后推气流轨迹模拟(<http://ready.arl.noaa.gov/hypub-bin/trajsrcm.pl>),每 6 h (00:00、06:00、12:00、18:00) 计算一条轨迹,同时后向延伸 48 h (2 d),轨迹模拟起始高度设定为 500 m。

1.6 质量控制与仪器的校准

固定污染源采样点选择在锅炉或工艺废气除尘处理装置后的位置,避开废气采用湿法脱硫或水喷淋处理后水汽较大的位置、距离风机太近以及弯头和管径变化的位置采样,尽量选择在平直的烟道处进行采样。每采完一种污染源后,采样用

具均清洗干净,避免污染下一个源谱的采集。样品须在采集完毕后送回仪器立即进行样品的测试,以防时间过长,采集到的颗粒物物理化学性质发生较大的变化。进样前检查仪器进样压力以及质漂范围是否在允许范围内,如超过仪器质控范围则进行仪器校正。

SPAMS 的校准分为粒径校准和质谱校准两部分^[28],分别用以保证颗粒物粒径检测和质谱检测的准确性。采样前,通过气溶胶发生器产生标准粒径(0.2、0.3、0.5、0.72、1.0、1.3、2.0 μm)的聚苯乙烯小球(polystyrene latex spheres, PSLs)可实现颗粒物粒径检测校正,校准系数 $R^2 > 0.99$; 采样结束后,使用 $10 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的 NaI 标准物质气溶胶对仪器质谱漂移进行校准。

2 结果与分析

2.1 细颗粒物数浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的相关性分析

将观测期间 SPAMS 捕获到的颗粒物数浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度小时值进行相关性分析[图 1(a)]。从图 1(b)中可以看出,两者的相关系数 R^2 为 0.710 7,可见仪器采集到的细颗粒物数浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度之间具有一定的对应关系,说明 SPAMS 检测到的颗粒物在一定程度上能够反映 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染程度。

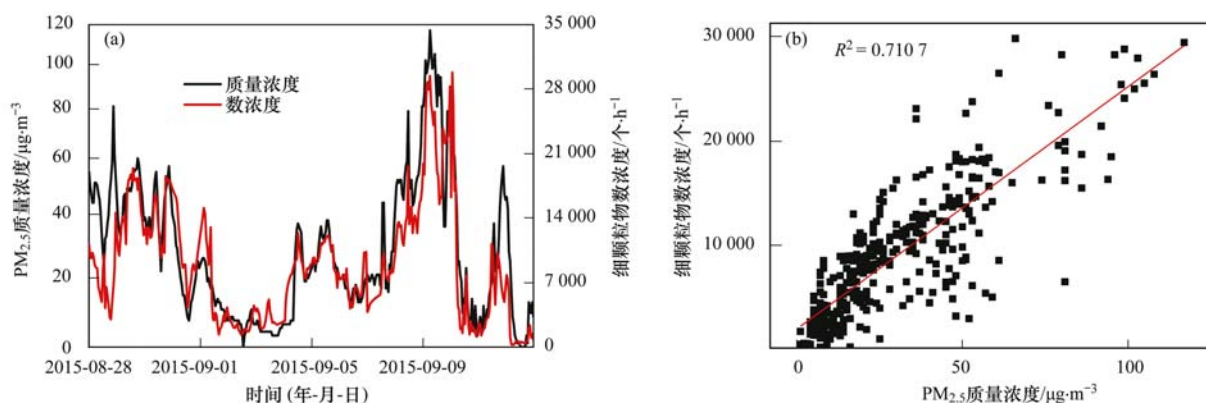


图 1 细颗粒物数浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的相关性分析

Fig. 1 Analysis of the correlation between number concentration of fine particulate matter and mass concentration of $\text{PM}_{2.5}$

2.2 细颗粒物的来源解析及控制效果评估

根据石家庄市空气质量保障方案^[25],此次阅兵纪念活动的控制时间为 8 月 28 日 00:00 至 9 月 4 日 24:00,共 8 d。控制区域为全市行政区域,应急减排措施主要包括:① 控制燃煤污染,所有涉燃煤设施,要通过采取停产、检修或降低生产负荷、燃用低硫优质煤、加强污染治理设施运行管理等措施,减少排放污染物 30% 以上。对于未完成超低排放改

造的燃煤电厂或机组,要降低生产负荷,减少排放污染物 50% 以上。② 控制工业污染,全市所有钢铁、焦化、水泥等高架点源,要减少排放污染物 50% 以上,工业企业涉及挥发性有机物排放的工序暂停生产,排放不能稳定达标的企业,要全部停产。③ 控制移动源污染,主城区、县(市)城区实行机动车单双号限行,限行时段为 07:00 ~ 21:00。运输土方、渣土、混凝土等扬尘车辆、危险化学品运输车辆和

低速载货车全部停运. ④ 控制扬尘污染,除重大民生抢险工程外,全市区域内土石方挖掘、拆除工程、渣土清运及市政道路工程等,一律停止施工作业,并采取洒水、覆盖等抑尘措施.

提取空气质量保障前(8月21~27日)、保障期间(8月28日~9月4日)、阅兵日(9月3日)和保障后(9月5~12日)的单颗粒样品经质谱特征提取、与源谱库比对得到各排放源的贡献比例. 由图2(a)可以看出,空气质量保障措施采取前大气细颗粒物的首要污染源为机动车尾气(蓝色区域)和燃煤(黑色区域),贡献分别为

30.1%和25.1%. 保障期间[图2(b)]首要污染源种类没有发生变化,但机动车尾气的贡献下降了4.5%,同时扬尘源的贡献下降3.0%;保障工作结束后[图2(c)],机动车尾气和燃煤源的贡献分别上升9.7%和3.9%,呈现明显上升趋势,扬尘源的贡献变化不明显,工业源甚至出现降低的情况. 9月3日阅兵活动当天[图2(d)],机动车尾气和燃煤的贡献出现保障期间的最低值,分别降至20.9%和20.6%. 由此可见,此次保障期间在颗粒物数浓度降低的背景下,“控车”和“控煤”的效果更为显著.

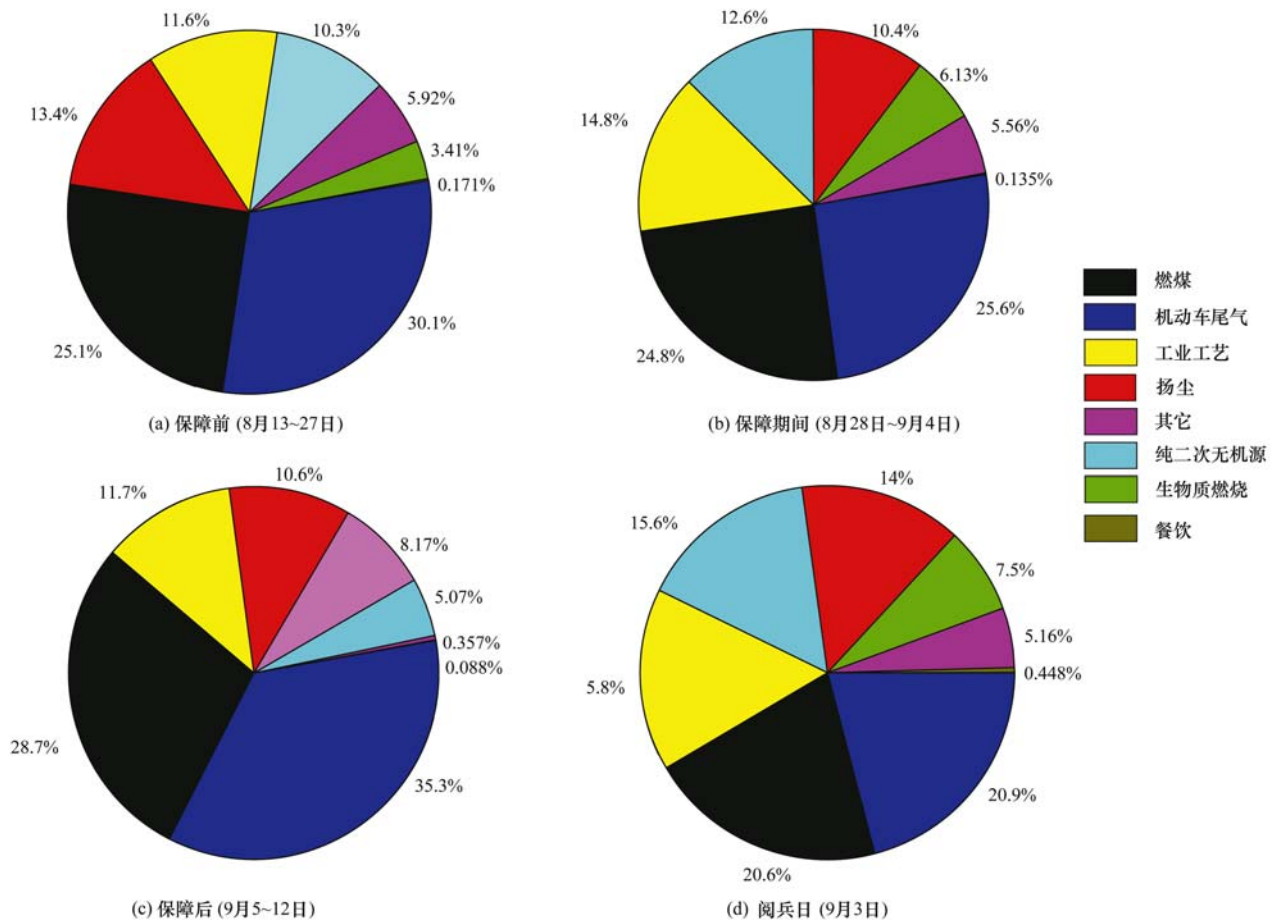


图2 空气保障期间和保障结束之后颗粒物来源解析

Fig. 2 Source apportionment of particulate matter during and after the air guarantee period

2.3 来自主要污染源的颗粒数随时间变化趋势

提取来自机动车尾气、燃煤、工业工艺和扬尘源的颗粒物小时数浓度作图. 从图3可以看出,在空气质量保障的前期(8月28~31日),来自四大污染源的颗粒数整体较多,从9月1日凌晨开始下降,到上午09:00达到最低值并趋于稳定;9月2日晚19:00颗粒物出现一定的累积,但持续时间较短,9月3日凌晨03:00开始下降,中午12:00降至最低,

并趋于稳定;9月3日晚上19:00开始出现颗粒物的第二次累积,且强度大,持续时间较长. 空气质量保障措施结束后,颗粒物持续累积增长. 可见在阅兵日当天,颗粒物数浓度较低,空气质量保障措施起到了最好的效果.

此外,来自各排放源的颗粒物基本呈现“同升同降”的变化趋势,只是程度有所不同. 变化最大的源是机动车尾气,小时排放颗粒物数浓度最高达到

1 336 个,最低为 54 个,高峰值出现在中午 12:00 ~ 14:00 和凌晨 23:00 ~ 24:00; 燃煤源小时排放颗粒物数浓度最高达到 1 402 个,最低为 42 个,高峰值出现在凌晨 23:00 ~ 01:00. 其它源变化不大.

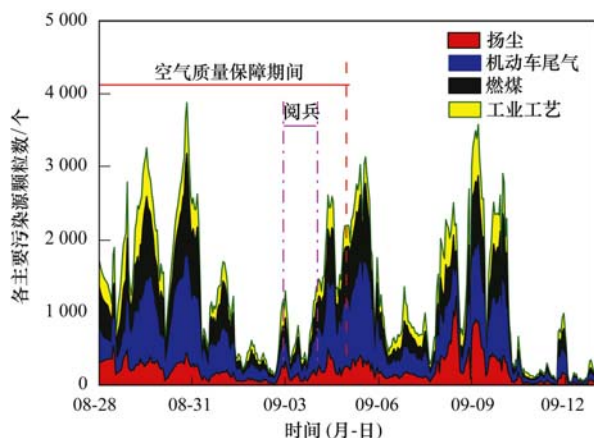


图 3 2015 年各主要排放源的颗粒数随时间变化

Fig. 3 Change of number of particles from the major sources over time in 2015

2.4 来自主要污染源的颗粒物平均谱图特征和粒径分布

由于 K 和 Na 元素的电离能量低^[29],较易电离,所以质谱图 3 中 K 和 Na 两种元素的信号均较强,故进行谱图特征成分分析时暂不考虑该两种

元素.

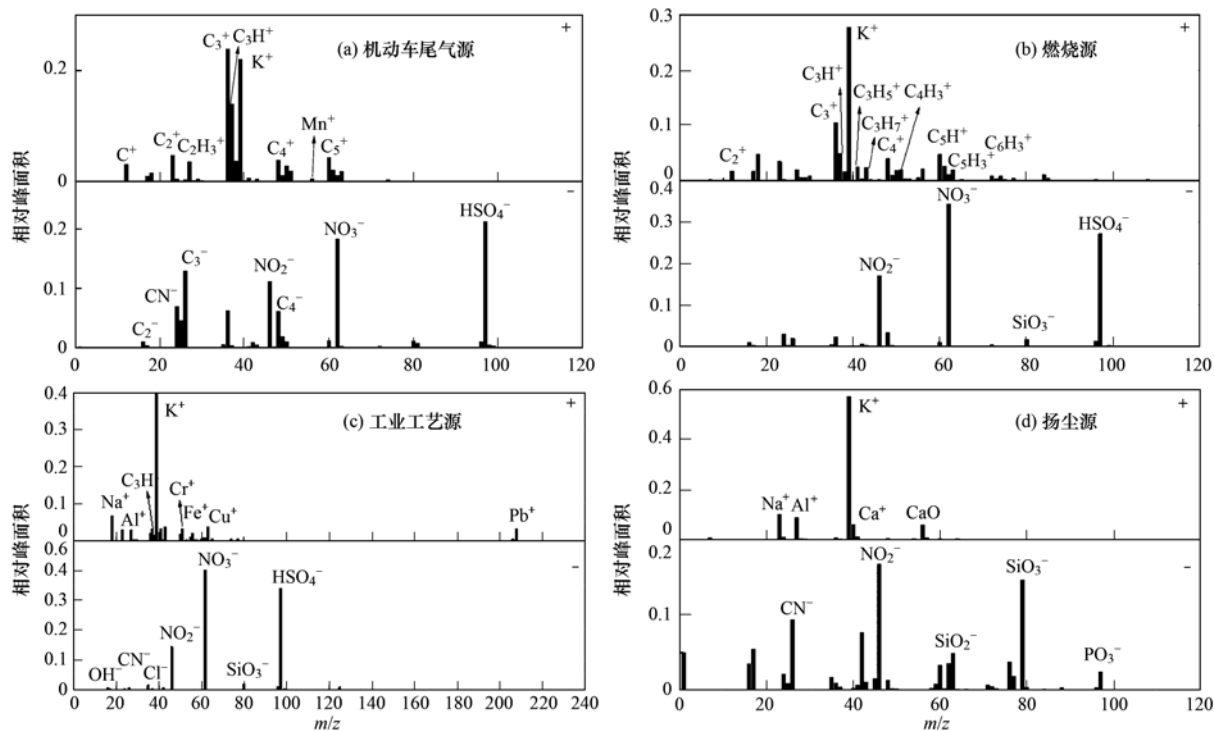
从图 4 可以看出,来自这 4 类污染源的颗粒物质谱图中都出现了 HSO_4^- (m/z - 97)、 NO_2^- (m/z - 46)、和 NO_3^- (m/z - 62) 等二次离子组分的质谱峰,可见采集到的颗粒物大都经历了二次反应过程或与二次组分进行了不同程度的混合.

来自机动车尾气排放的颗粒正负谱图中均含有大量的元素碳峰 (m/z 12、24、36、48、60、-24、-36、-48),此外正离子谱图中含有明显的 Ca^+ (m/z 40)、 Mn^+ (m/z 55),负离子谱图中含有较明显的 CN^- (m/z - 26) 信号.

来自燃煤源的颗粒物以有机碳 [C_3H^+ (m/z 37)、 C_3H_7^+ (m/z 43)、 C_4H_3^+ (m/z 51)、 C_5H^+ (m/z 61)、 C_5H_3^+ (m/z 63)、 C_6H_3^+ (m/z 75)] 为主,此外正谱图中有明显的 Fe^+ (m/z 56)、 Cr^+ (m/z 52) 等离子,而负谱图中则含有较高的 Cl^- (m/z 35) 信号.

来自工艺工业源的颗粒物以有机碳和金属 (Cr、Fe 及氧化物、Pb) 为主,来自扬尘源的颗粒物以硅酸盐和钙为主.

从图 5 可以看出,来自扬尘源的颗粒主要分布在 $1.0 \mu\text{m}$ 以上的大粒径段,来自燃煤和机动车尾气的颗粒主要分布在 $1.0 \mu\text{m}$ 以下的小粒径段,来



每张图片上方为正谱图,下方为负谱图

图 4 四大污染源排放颗粒物平均谱图

Fig. 4 Average spectra of particulate matter from four major sources of emissions

自其它污染源的颗粒在整个粒径段的分布情况较为均匀.

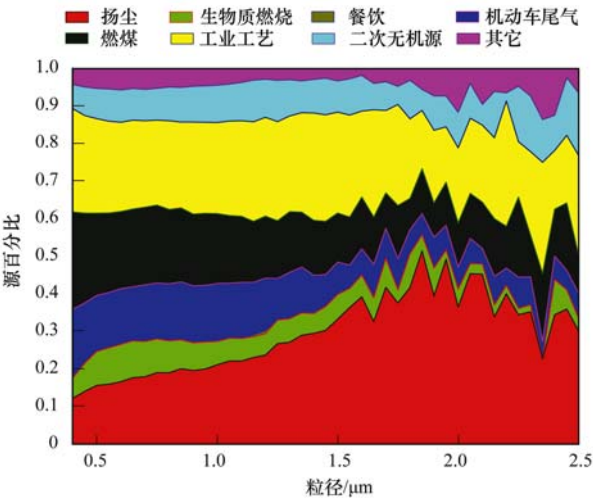


图5 来自各污染源颗粒物的粒径分布
Fig. 5 Particle size distribution of particulate matter from various sources

2.5 颗粒物的消散和累积过程

本研究时段内 $PM_{2.5}$ 的质量浓度小时值随时间变化趋势如图6所示. 可以看出, 颗粒物质量浓度从8月30日晚20:00开始下降, 8月31日凌晨02:00有小幅攀升后继续下降, 此后较为稳定, 9月1~3日 $PM_{2.5}$ 质量浓度一直维持在 $20 \mu g \cdot m^{-3}$ 以下. 直至9月4日上午09:00颗粒物浓度开始攀升. 在空气质量保障期间, 石家庄市连续收获了11个优良天气, 空气质量保障取得了很好的效果. 空气质量保障结束后, 颗粒物在9月8~9日出现了严重的累积过程, 最高达到了 $117 \mu g \cdot m^{-3}$, 呈现三级轻度污染的天气.

监测期间, 石家庄市 $PM_{2.5}$ 的浓度出现了明显的下降和累积过程. 下面选取6个时段的颗粒物来源

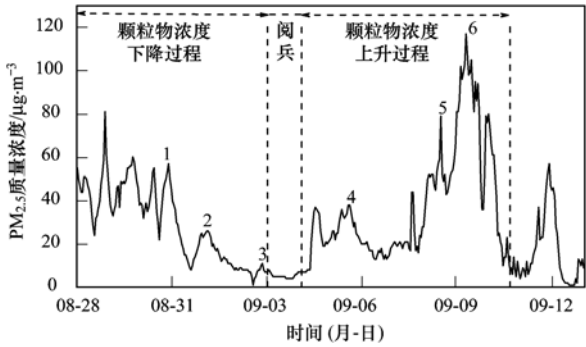


图6 $PM_{2.5}$ 质量浓度随时间的变化
Fig. 6 Mass concentration of $PM_{2.5}$ versus time

解析数据进行对比分析, 具体时段选择和每个时段的颗粒物来源解析如表1和图7所示. 从中可以看出, 时段1到时段3, $PM_{2.5}$ 质量浓度从 $52.5 \mu g \cdot m^{-3}$ 下降至 $3.3 \mu g \cdot m^{-3}$, 空气质量级别由良转为优, 颗粒物的主要排放源为机动车尾气和燃煤, 贡献率均出现较大幅度地降低, 燃煤源由30.4%下降至18.6%, 机动车尾气源由30.1%下降至21.9%.

从时段4到时段6出现了空气轻度污染过程, $PM_{2.5}$ 质量浓度由 $11.8 \mu g \cdot m^{-3}$ 迅速爬升至 $86.9 \mu g \cdot m^{-3}$. 颗粒物浓度上升过程中, 贡献变化较大的排放源为机动车尾气和扬尘. 从时段4到时段5第一次爬升过程中, $PM_{2.5}$ 的质量浓度从 $11.8 \mu g \cdot m^{-3}$ 上升至 $48.4 \mu g \cdot m^{-3}$, 空气质量由优转为良, 首要污染源转为扬尘源, 贡献率为33%, 上升了23%, 可见此次颗粒物浓度的上升主要来自扬尘源的贡献; 时段5至时段6, $PM_{2.5}$ 质量浓度持续上升, 空气质量转为轻度污染, 扬尘源的贡献率降低, 首要污染源转变为机动车尾气, 燃煤源的贡献率由12.8%上升至23.4%, 可见此次污染过程是由机动车尾气和燃煤源排放颗粒累积引起的.

表1 颗粒物浓度下降和上升过程时间段选取

Table 1 Selection of time period during processes of descending and rising concentration of particulate matter			
项目	时段	时间(月-日-T)	空气质量级别
颗粒物浓度下降过程	1	08-30 19:00 ~ 08-30 21:00	良
	2	09-01 02:00 ~ 09-01 04:00	优
	3	09-02 12:00 ~ 09-02 14:00	优
颗粒物浓度上升过程	4	09-05 13:00 ~ 09-05 15:00	优
	5	09-08 10:00 ~ 09-08 12:00	轻度污染
	6	09-09 05:00 ~ 09-09 07:00	轻度污染

2.6 空气质量、气象条件及气团来源的关系分析

纪念活动期间, 在最高一级的减排措施和最严格管控下, 大气污染物排放总量得到了有效控制. 在纪念活动保障初期(8月28~30日)空气质量

AQI连续3d为二级良水平, AQI指数最高也仅为66. 其后, 连续5d空气质量保持在一级优的水平, AQI指数最低为9月2日的22, 阅兵当天AQI指数也仅为23, 这与污染物排放量减少有很大关系.

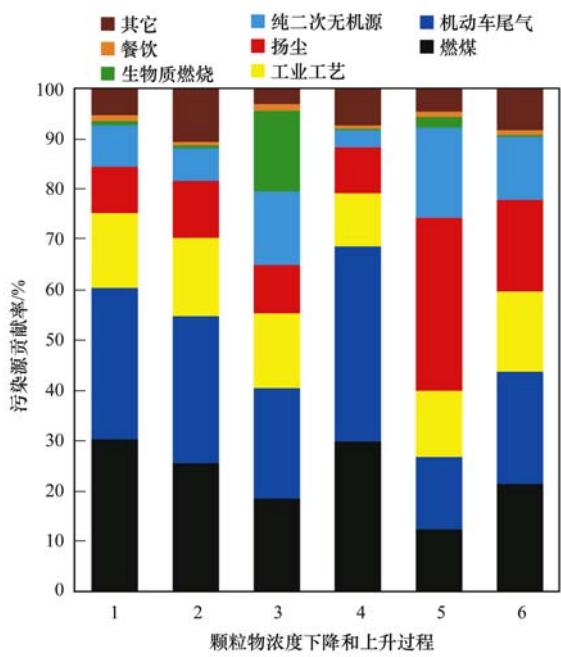


图7 颗粒物浓度下降和上升过程中颗粒物来源解析变化

Fig. 7 Variation of the source of particulate matter during processes of descending and rising concentration of particulate matter

在有利于污染物扩散的气象条件配合下,我市没有出现污染物累积骤升现象,空气污染指数及大

气污染物浓度均呈现逐渐降低的变化态势. 8月28日~9月2日受高空偏北气流影响,气象条件有利于污染物扩散,9月3日阅兵当天,影响我市的大气环流发生转折,北风减弱,下午转南风,夜间到9月4日早晨湿度大,气象条件不利于污染物扩散,但持续时间短;9月4日下午到夜间随着冷空气来临,气象条件有利于污染物扩散,能见度较好. 总体来看,纪念活动期间气象条件有利于污染物稀释扩散. 而去年同期,我市风速偏低,气温偏高,平均相对湿度接近,扩散能力总体偏弱,且未实施应急减排措施,空气污染连续三天出现轻度污染(8月30日~9月1日),AQI指数最高达到了144.

9月8日凌晨随着冷空气离开,石家庄市进入低压系统,近地层大气结构稳定,进入静稳状态,不利于污染物稀释扩散,污染物出现了一定程度的累积. 9月10日06:00低压系统减弱,扩散条件转好. 利用HYSPLIT后向气流轨迹方法对9月8日、9月10日的气团来源进行了追踪(图8). 可以看出,9月8日的气团主要来自东南方向,且属于低空传输,9月10日气团来自1500 m以上的高空气团,同时有长距离输送.

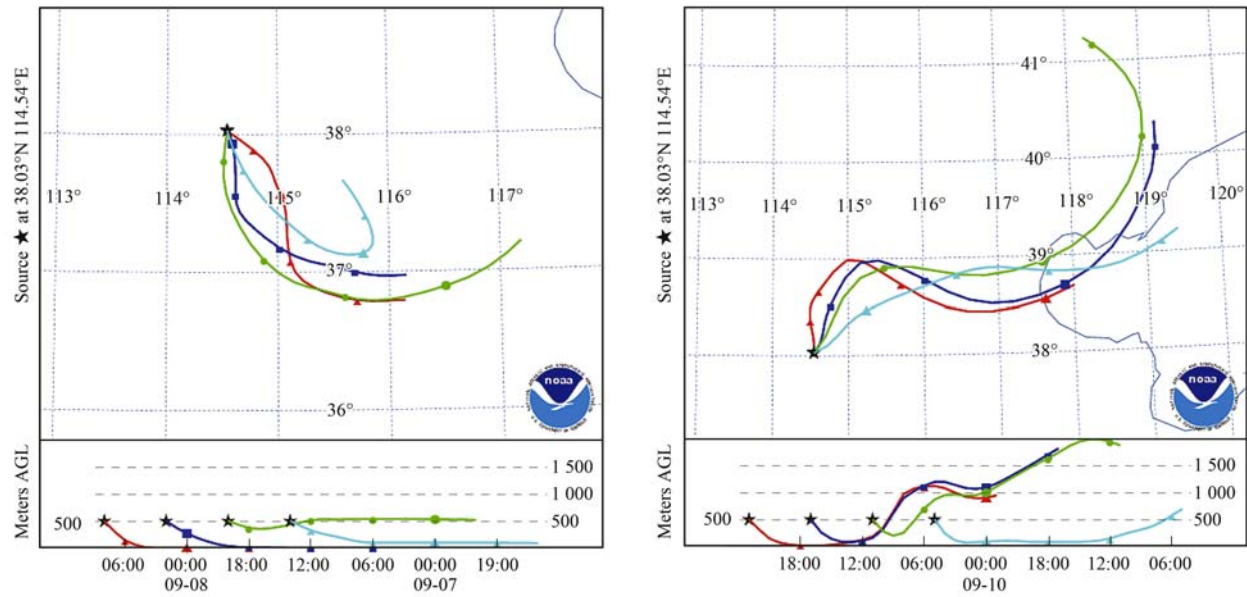


图8 HYSPLIT气团后向轨迹分析

Fig. 8 Analysis of air back trajectory map by HYSPLIT

3 结论

(1)抗战胜利70周年大阅兵活动当日,石家庄市大气细颗粒物的首要污染源为机动车尾气(20.9%)和燃煤(20.6%),与空气质量保障前后对比,两类源的贡献均出现不同程度的降低;来自各

类排放源的颗粒物数浓度处于较低水平,空气质量保障措施起到了最好的效果,其中“控车”和“控煤”效果更为显著.

(2)来自机动车尾气的颗粒以短链元素碳和Mn为主,来自燃煤源的颗粒物以有机碳为主,来自工艺工业源的颗粒物以有机碳和金属为主,来自扬

尘源的颗粒物以硅酸盐和钙为主。来自扬尘源的颗粒主要分布在 $1.0\ \mu\text{m}$ 以上的大粒径段,来自燃煤和机动车尾气的颗粒主要分布在 $1.0\ \mu\text{m}$ 以下的小粒径段,来自其它污染源的颗粒在整个粒径段的分布情况较为均匀。

(3)空气质量保障措施采取 3 d 后颗粒物浓度才出现较为稳定的低值,同时各污染源贡献明显下降;措施结束后,颗粒物浓度迅速攀升,与其它源相比扬尘和机动车尾气的贡献增长较为突出。

(4)空气质量保障措施结束后污染物浓度的攀升是低压静稳不利气象条件和东南方向低空传输共同作用的结果。

致谢:本研究开展期间得到了暨南大学李梅研究员团队和广州禾信分析仪器有限公司的大力协助,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 李莉,安静宇,严茹莎. 基于细颗粒物来源追踪技术的 2013 年 12 月上海市严重污染过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 的源贡献分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(10): 3543-3553.
- [2] 赵承美,邵龙义,侯聪,等. 元宵节期间北京 $\text{PM}_{2.5}$ 单颗粒的物理化学特征[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(4): 1004-1012.
- [3] 郑玫,张延君,闫才青,等. 中国 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析方法综述[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, **50**(6): 1141-1154.
- [4] 于海斌,薛荔栋,郑晓燕,等. APEC 期间京津冀及周边地区 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分变化特征及来源[J]. 中国环境监测, 2015, **31**(2): 48-52.
- [5] 中国环境监测总站. 2013、2014 中国环境状况公报[EB/OL]. (2014-06-05/2015-06-05). <http://www.cnemc.cn/>.
- [6] 周静博,任毅斌,洪纲,等. 利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 3972-3980.
- [7] 王浩,李轶,高健,等. APEC 会议期间石家庄市大气污染特征及空气质量保障措施效果评估[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(2): 164-174.
- [8] 环境保护部. 大气颗粒物来源解析技术指南(试行)[S]. 北京:环境保护部, 2013.
- [9] 董文煊,邢佳,王书肖. 1994~2006 年中国人为源大气氨排放时空分布[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1457-1463.
- [10] 董艳强,陈长虹,黄成,等. 长江三角洲地区人为源氨排放清单及分布特征[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(8): 1611-1617.
- [11] 赵斌. 华北地区大气污染源排放状况研究[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2007.
- [12] 赵斌,马建中. 天津市大气污染源排放清单的建立[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(2): 368-375.
- [13] 廖乾邑,陈建文,罗彬,等. 颗粒物源解析研究进展与展望[J]. 资源节约与环保, 2015, (11): 136.
- [14] 邹本东,徐子优,华蕾,等. 因子分析法解析北京市大气颗粒物 PM_{10} 的来源[J]. 中国环境监测, 2007, **23**(2): 79-85.
- [15] 董海燕,古金霞,姜伟,等. 天津市颗粒物中元素化学特征及来源[J]. 环境监测管理与技术, 2012, **24**(1): 25-28.
- [16] 崔明明,王雪松,苏杭,等. 广州地区大气可吸入颗粒物的化学特征及来源解析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, **44**(3): 459-466.
- [17] 王苏蓉,喻义勇,王勤耕,等. 基于 PMF 模式的南京市大气细颗粒物源解析[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(12): 3535-3542.
- [18] Li L, Huang Z X, Dong J G, *et al.* Real time bipolar time-of-flight mass spectrometer for analyzing single aerosol particles[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2011, **303**(2-3): 118-124.
- [19] 李磊,谭国斌,张莉,等. 运用单颗粒气溶胶质谱仪分析柴油车排放颗粒物[J]. 分析化学, 2013, **41**(12): 1831-1836.
- [20] 喻义勇,王苏蓉,秦玮. 大气细颗粒物在线源解析方法研究进展[J]. 环境监测管理与技术, 2015, **27**(3): 12-17.
- [21] 黄深,潘要武,刘国盛,等. 茂名市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 在线源解析[J]. 环境监控与预警, 2015, **7**(4): 37-42.
- [22] 吉祝美,咸月,赵友政. 质谱直接测量法解析盐城市大气细颗粒物来源[J]. 环境监控与预警, 2015, **7**(3): 35-38.
- [23] 李梅,李磊,黄正旭,等. 运用单颗粒气溶胶质谱技术初步研究广州大气矿尘污染[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(6): 632-636.
- [24] 杜娟,宋韶华,张志朋,等. 桂林市细颗粒物典型排放源单颗粒质谱特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(5): 1556-1562.
- [25] 张淑玫. 石家庄:8月28日至9月4日单双号限行 公交免费[N]. 燕赵都市报, 2015-08-22(03).
- [26] 牟莹莹,楼晟荣,陈长虹,等. 利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2071-2080.
- [27] 付怀于,闫才青,郑玫,等. 在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4070-4077.
- [28] 李梅,毕燕茹,黄正旭,等. 在线单颗粒气溶胶质谱在大气重金属铅污染事故中的应用研究[J]. 中国环境监测, 2015, **31**(6): 118-124.
- [29] 张太平,邵文松. 元素的电离能、电子亲和能、电负性、电极电势四者的联系与区别[J]. 高等函授学报(自然科学版), 2001, **14**(6): 15-18.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China	WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions	ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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