

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

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

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析	包良满, 刘江峰, 雷前涛, 李晓林, 张桂林, 李燕 (1)
中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平	林海涛, 李琦路, 张干, 李军 (10)
广州城区秋冬季大气颗粒物中 WSOC 吸光性研究	黄欢, 毕新慧, 彭龙, 王新明, 盛国英, 傅家谟 (16)
南京地区大气 PM _{2.5} 潜在污染源硫碳同位素组成特征	石磊, 郭照冰, 姜文娟, 芮茂凌, 曾钢 (22)
青奥会前后南京 PM _{2.5} 重金属污染水平与健康风险评估	张恒, 周自强, 赵海燕, 熊正琴 (28)
南昌市秋季大气 PM _{2.5} 中金属元素富集特征及来源分析	林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 胡恭任, 于瑞莲 (35)
南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究	马佳, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 于超, 朱俊, 夏航 (41)
边界层低空急流导致北京 PM _{2.5} 迅速下降及其形成机制的个例分析	廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 赵普生, 马志强 (51)
电厂燃煤烟尘 PM _{2.5} 中化学组分特征	王毓秀, 彭林, 王燕, 张腾, 刘海利, 牟玲 (60)
2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 孙峰, 李令军, 李金香, 周一鸣, 杨妍妍, 姜磊 (66)
APEC 会议期间北京机动车排放控制效果评估	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 郭津津 (74)
晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析	王燕, 彭林, 李丽娟, 王毓秀, 张腾, 刘海利, 牟玲 (82)
北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究	薛亦峰, 周震, 钟连红, 闫静, 曲松, 黄玉虎, 田贺忠, 潘涛 (88)
长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征	尤翔宇, 刘湛, 张青梅, 漆燕, 向仁军, 苏艳蓉 (94)
长春城市水体夏秋季温室气体排放特征	温志丹, 宋开山, 赵莹, 邵田田, 李思佳 (102)
查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性	李思佳, 宋开山, 赵莹, 穆光熠, 邵田田, 马建行 (112)
不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例	孙平安, 于爽, 莫付珍, 何师意, 陆菊芳, 原雅琼 (123)
大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价	黄允优, 曾燊, 刘守江, 马永红, 胥晓 (132)
西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征	杨帆, 蒋铁锋, 王翠翠, 黄晓楠, 吴芝菱, 陈琳 (141)
合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析	樊慧慧, 李如忠, 裴婷婷, 张瑞钢 (148)
辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征	王维斐, 周俊丽, 裴淑玮, 刘征涛 (156)
水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价	黄廷林, 刘飞, 史建超 (166)
低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响	游蕊, 梁丽, 覃蔡清, 邓吟, 王定勇 (173)
北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态	王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 张超, 王闯 (180)
紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨	王文东, 张轲, 许洪斌, 刘国旗 (187)
二氧化钛光催化氧化阿散酸	许文泽, 杨春风, 李静, 李建斐, 刘会芳, 胡承志 (193)
紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能	段伦超, 王凤贺, 赵斌, 陈亚君 (198)
氢氧化钡-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用	林建伟, 王虹, 詹艳慧, 陈冬梅 (208)
纳米 TiO ₂ 吸附 HgCl ₂ 水溶液中 Hg(II)	周雄, 张金洋, 王定勇, 覃蔡清, 徐凤, 罗程钟, 杨熹 (220)
好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建	周林军, 刘济宁, 石利利, 冯洁, 徐炎华 (228)
3 种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性	古文, 周林军, 刘济宁, 陈国松, 石利利, 徐炎华 (240)
Fe(II) 活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水	朱松梅, 周振, 顾凌云, 蒋海涛, 任佳慧, 王罗春 (247)
长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源	李静雅, 吴迪, 许芸松, 李向东, 王喜龙, 曾超华, 付晓芳, 刘文新 (253)
直链烷基苯指示城市化过程初步研究	徐特, 曾辉, 倪宏刚 (262)
龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征	刘硕, 吴泉源, 曹学江, 王集宁, 张龙龙, 蔡东全, 周历媛, 刘娜 (270)
水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响	吴杨周, 陈健, 胡正华, 谢燕, 陈书涛, 张雪松, 申双和, 陈曦 (280)
中水浇灌对土壤重金属污染的影响	周益奇, 刘云霞, 傅慧敏 (288)
生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响	安艳, 姬强, 赵世翔, 王旭东 (293)
3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响	彭禧柱, 杨胜香, 李凤梅, 曹建兵, 彭清静 (301)
丛枝菌根真菌对镉污染土壤上玉米生长和镉吸收的影响	王芳, 郭伟, 马朋坤, 潘亮, 张君 (309)
珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染分布特征	李彬, 吴山, 梁金明, 邓杰帆, 王珂, 梁文立, 曾彩明, 彭四清, 张天彬, 杨国义 (317)
三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响	韦丽丽, 周琼, 谢从新, 王军, 李君 (325)
起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较	靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 程亚平, 汤华峰, 李敏, 黄炳富 (335)
序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析	李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 马强, 杨强 (342)
铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果	杨婷婷, 朱能武, 芦昱, 吴平霄 (350)
运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究	邓欢, 蔡旅程, 姜允斌, 钟文辉 (359)
通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响	齐鲁, 魏源送, 张俊亚, 赵晨阳, 才兴, 张媛丽, 邵春岩, 李洪枚 (366)
高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 丁文杰, 李琳, 林坚, 刘俊新 (377)
应用 FCM-qPCR 方法定量检测水中常见病原体	王明星, 柏耀辉, 梁金松, 霍旻, 杨婷婷, 袁林江 (384)
乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响	娄雪宁, 周丽萍, 宋丹, 杨荣, 龙峰 (391)
废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响	楼子墨, 王卓行, 周晓馨, 傅瑞琪, 刘榆, 徐新华 (397)

2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析

程念亮^{1,2,4}, 李云婷¹, 张大伟^{1*}, 陈添³, 孙峰¹, 李令军¹, 李金香¹, 周一鸣¹, 杨妍妍¹, 姜磊¹
(1. 北京市环境保护监测中心, 北京 100048; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 北京市环境保护局, 北京 100048; 4. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 利用 2014 年 11 月 1~12 日 (APEC 会议期间) 北京市大气污染物、PM_{2.5} 组分及气象、遥感监测数据, 结合 CMB 受体模型, 综合分析了 APEC 会议期间北京市空气质量与气象条件变化并初步评估了减排措施对 APEC 会议期间 PM_{2.5} 浓度的贡献及影响。结果表明, APEC 会议期间北京市 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 的浓度分别为 43、62、8 和 46 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 比近 5 年平均浓度 (PM_{2.5} 为 2012~2013 年平均浓度) 降低 45%、43%、64% 和 31%; 空间分布上 PM_{2.5} 在城区及北部山区改善效果最明显, 下降幅度在 30%~45% 之间, 南部地区降幅在 25% 以下; 不同类别的站点降幅在 27.4%~35.5% 之间; APEC 会议期间 PM_{2.5} 的主要组分 SO₄²⁻ 与同期 (2013 年 11 月 1~12 日) 相比下降 50%, 地壳物质同比下降 76%, NO₃⁻ 同比下降 35%; CMB 模型源解析结果显示 APEC 会议期间燃煤锅炉贡献 2% 左右, 扬尘贡献 7% 左右, 机动车贡献 30% 左右; APEC 会议期间北京市及周边地区针对可能发生的污染过程采取的减排保障措施对 PM_{2.5} 浓度具有明显的削峰降速作用。

关键词: APEC; PM_{2.5}; 北京; 减排; CMB

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0066-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.010

Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014

CHENG Nian-liang^{1,2,4}, LI Yun-ting¹, ZHANG Da-wei^{1*}, CHEN Tian³, SUN Feng¹, LI Ling-jun¹, LI Jin-xiang¹, ZHOU Yi-ming¹, YANG Yan-yan¹, JIANG Lei¹

(1. Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Beijing Environmental Protection Bureau, Beijing 100048, China; 4. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Variations of air quality, meteorological conditions and the effect of pollution control measures on particle matter concentrations in Beijing were all analyzed during APEC (from 1st to 12th in November) in 2014 based on the atmospheric pollutant monitoring data, monitoring components of PM_{2.5}, meteorological and remote sensing data and CMB model. The results showed that the average concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂ were 43, 62, 8, 46 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ respectively during APEC and the average concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂ were decreased by 45%, 43%, 64% and 31% compared to those in the same period of the last 5 years (PM_{2.5} was the average of the last 2 years); the concentrations of PM_{2.5} at different sites were decreased by 27.4%-35.5%; the concentrations of PM_{2.5} in the center of city and northern mountainous areas were the lowest, which dropped by 30%-45% compared to those in the same period of the last 5 years while in the southern area the decrement was below 25%; the main component SO₄²⁻, the substance of the crust, and NO₃⁻ were decreased by 50%, 76%, 35% respectively compared to those in the same period in 2013 and the chemical mass balance (CMB) model analysis results indicated that contributions of coal boiler, dust, motor vehicle were 2%, 7%, 30% respectively during APEC; air pollution control measures (coal, dust and traffic management) had a significant effect on reducing pollutant emissions and the pollutant emissions control reduced the concentration peak and delayed the accumulation speed.

Key words: APEC; PM_{2.5}; Beijing; emission reduction measures; CMB

2014 年 11 月北京市成功举办了 APEC 会议, 为了保障 APEC 会议期间良好的空气质量, 北京周边六省区市按照“APEC 会议期间空气质量保障方案”, 采取了严格的污染物排放控制措施, 力度空前。由于保障措施的实施, 在秋冬季易于发生重污染的情况下^[1,2], APEC 会议期间北京市空气质量持续较好, 被誉为“APEC 蓝”。

针对如 APEC 会议等国际重大活动、会议期间所采取的临时大气减排措施较为罕见, 不可重复, 且为空气质量改善分析及评估提供了难得的机会。目

前, 国内外对 2008 年北京奥运会期间空气质量分析评估较多, Wang 等^[3] 分析监测奥运期间 O₃、SO₂、CO 和 NO_x 的日均浓度发现, 它们的浓度分别下降了 23%、61%、25% 和 21%; Zhang 等^[4] 对比分析

收稿日期: 2015-06-04; 修订日期: 2015-08-11

基金项目: 北京市科技计划项目 (Z131100006113009); 环境保护公益性行业科研专项 (201409005, 201309071); 国家科技支撑计划项目 (2014BAC23B03); 北京市空气质量达标规划项目 (Z131100005613046)

作者简介: 程念亮 (1987~), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为大气环境监测、模拟、预报, E-mail: 15001195306@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangdawei@bjmemc.com.cn

了奥运期间(8月)和6月 CO 、 NO_x 、 BC 、 SO_2 和 PM_{10} 平均浓度发现,它们分别下降了23%、30%、26%、45%和21%;刘子锐等^[5]监测发现奥运期间偏南气流会引起 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的上升;孔茜等^[6]对交通环境的监测发现 NO_x 单人高峰小时吸入剂量下降了58%;吴其重等^[7]从气象场和排放源两方面研究了奥运期间北京市 PM_{10} 浓度大幅减小的主要原因,结果表明奥运赛事期间 PM_{10} 浓度大幅减小的主要原因不是气象因素,而是由于额外措施引起的 PM_{10} 排放减少。

针对 APEC 会议期间北京市空气质量改善和分析的研究很少,认识 APEC 会议期间北京及周边地区空气质量保障措施的实施效果,开展减排措施、气象条件后分析及评估研究是国内外急需研究和关注的问题。本研究利用污染物、气象、遥感数据结合源解析受体模型 CMB 综合分析了 2014 年 APEC 会议期间北京市空气质量现状及其影响因素,并初步评估了减排措施对 APEC 会议期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献及影响,以期为大气污染控制提供科学数据。

1 材料与方法

1.1 区域概况

北京位于东经 $115.7^\circ \sim 117.4^\circ\text{E}$,北纬 $39.4^\circ \sim 41.6^\circ\text{N}$,地处华北平原西北端,地形为簸箕型,三面环山,平均海拔 43.5 m。国土面积 $16\,410.54\text{ km}^2$,62%为山区,全市森林覆盖率 37.6%。位于北纬 40° 地区,属温带大陆性季风气候,近 10 年年降水量平均不足 450 mm,年均降水的 80% 集中在夏季 6、7、8 这 3 个月^[8];全市 2 100 多万常住人口、560 万辆机动车、年开复工面积 2 亿 m^2 以及大量的生产、服务活动主要集中在平原地区,污染物排放强度较高。

1.2 站点与仪器

CO 、 NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 PM_{10} 监测数据为北京市环境保护监测中心发布的逐时浓度数据(<http://zx.bjmemc.com.cn/>),地面监测站点共计 35 个(见图 1),覆盖所有区县,包括区域背景、郊区、城镇、交通干道、居住区等不同的环境功能类型^[9];集中分布在不同地区,包括城六区(东城、西城、朝阳、海淀、丰台、石景山)、西北部(昌平、延庆)、东北部(怀柔、密云、平谷、顺义)、东南部(通州、大兴、亦庄)、西南部(房山、门头沟)。

35 个空气质量自动监测子站操作流程严格按照《环境空气质量自动监测技术规范》(HJ/T 193-

2005)^[10]进行,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 均采用微量振荡天平法, SO_2 采用紫外荧光法、 NO/NO_2 采用化学发光法, O_3 采用紫外光度法, CO 采用气体滤波红外吸收法。监测设备由技术人员定期检查并及时维护保养,在 1a 的监测时间内有效数据捕获率超过 95%。 $\text{PM}_{2.5}$ 组分数据则为北京市环境保护监测中心综合观测实验平台分析的结果,使用武汉天虹 TH-16A 型四通道采样器进行样品采集,分别使用 ICP 等离子发射光谱法测定无机元素、原子荧光法测定砷和硒、离子色谱法测定水溶性离子、光热法测定 OC/EC。气象资料为北京市观象台地面观测资料、探空资料(<http://cdc.cma.gov.cn/>),边界层高度为云高仪监测结果,观测仪器为荷兰 WAISALA 公司的 WXT520 气象观测仪。天气实况图为韩国天气实况资料和数值预报产品(<http://web.kma.go.kr/eng/weather/images/analysischart.jsp>),遥感资料为 MODIS 数据产品(http://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/bamgommas_interactive)。

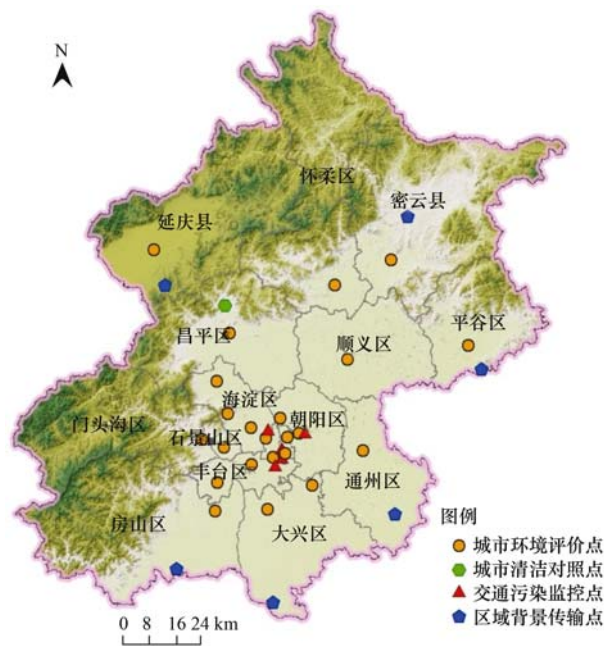


图 1 北京市污染物观测站点分布和分类

Fig. 1 Distribution and classification of pollutants observation sites in Beijing City

1.3 CMB 模型

CMB 模型是根据化学质量平衡原理建立起来的,目前其在大气颗粒物源解析研究工作中成为最重要、最实用的模型^[11]。研究应用 CMB 模型对北京市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来源进行解析,输入文件基于市环境保护监测中心综合观测实验平台的样品数据,对源与受体样品化学组分测试均采用统一的分析技

术,每批样品均采取空白样品、质控样品、加标样品、平行测试等质量控制和质量保证措施.根据调研、源谱评估及 CMB 灵敏矩阵^[12]的计算结果,选取 SO_4^{2-} 、Al、Ca 为电厂燃煤锅炉特征组分; SO_4^{2-} 、Na 为工业/供热锅炉燃煤特征组分;OC、EC、Mn 为机动车特征组分;Si 为土壤尘、扬尘特征组分;K 为生物质燃烧特征组分.

1.4 研究方法

分别结合天气图、气象要素及污染物监测情况分析 APEC 会议的空气质量及气象条件变化;通过与近五年 APEC 会议同期污染物空间分布及遥感监测变化情况分析污染物空间改善效果;比较 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要组分变化分析空气质量保障措施效果;选取气象条件相似的污染过程对比分析污染物减排效果,以期北京市大气污染控制提供科学数据.

利用 $\text{PM}_{2.5}$ 源解析 CMB 受体模型,对减排措施的环境改善效果展开评估,目标是剔除气象条件等

外在变化因素对空气质量造成的影响,相对客观准确地评估保障措施-污染物排放规模下降-污染排放量削减-空气质量改善之间的内在定性定量关系.

2 结果与分析

2.1 空气质量变化

图 2 为 APEC 会议期间北京市逐日 AQI 变化,从中可知,APEC 会议期间(11 月 1~12 日)北京市维持了优良的空气质量,期间一级优 4 d、二级良 7 d,三级轻度污染 1 d,11 月 4 日为 APEC 会议期间最高污染水平,为三级轻度污染, $\text{PM}_{2.5}$ 日均值仅为 $103 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,污染水平较低.从统计计算的 4 项污染物监测数据来看,2014 年 11 月 1~12 日北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 的浓度分别为 43、62、8 和 $46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,分别比去年同期分别下降 54%、43%、56% 和 30%;比近 5 年平均浓度($\text{PM}_{2.5}$ 为 2012~13 年平均水平)降低 45%、43%、64% 和 31%,各项污染物的浓度都达到近 5 年以来最低值.

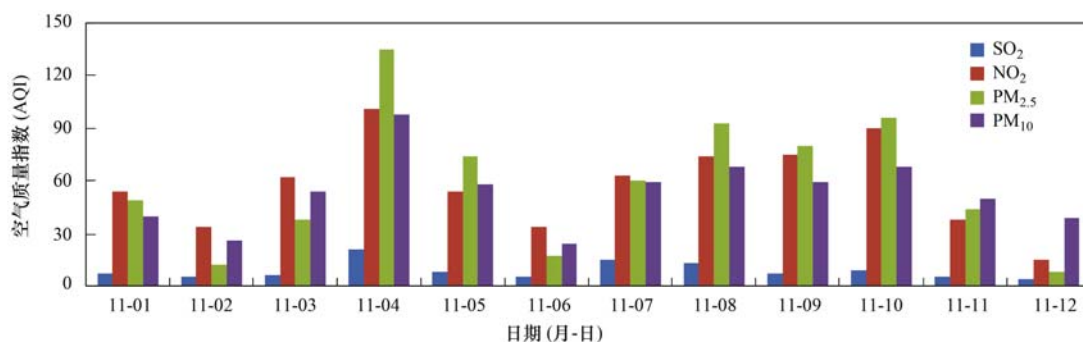


图 2 APEC 会议期间北京市逐日 AQI 变化

Fig. 2 Diurnal variation of AQI during APEC in Beijing City

表 1 为统计的 APEC 会议期间北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 与气象条件变化,从中可知,APEC 会议期间北京市天气背景场与重污染日的地面(弱气压梯度场或低压辐合区)和高空天气形势(平直环流,浅槽,西南气流或脊)^[13,14]不同,APEC 会议期间北京市地面弱高压频繁,500 hPa 高空以偏西北气流为主,高低空天气形势的配合导致扩散条件整体比去年同期较好.综合来看,APEC 会议期间出现 2 次稳定天气过程,分别为 11 月 3~5 日和 8~10 日;出现 2 次明显冷空气活动 11 月 6~7 日和 11~12 日;为应对这两次污染过程,11 月 3 日起京津冀及周边地区正式执行减排措施,11 月 6 日起京津冀及周边地区实施了“加强版减排措施”^[15],在减排措施有效控制下,冷空气间歇期稳定气象状况占主导的情况下, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度抬升速度明显下降;而部分时段特别是 11 月 5

日凌晨、11 月 8~10 日部分时段局部的弱北风也对高浓度起到一定抑制作用^[16~18],但这种作用在污染源排放量大幅度削减的背景下才可能发生.由此可见,在“人努力”和“天帮忙”的情况下,会议期间空气质量才能圆满完成保障.

经统计,APEC 会议期间平均风速为 $3.46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,远大于去年年均风速 $2.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 及 58 d 重污染日平均风速 $1.69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,也大于近 5 年同期(2009~2013 年)平均风速 $1.90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;平均相对湿度为 46.30%,明显小于 2013 年 58 d 重污染日平均相对湿度 68.6%,比近 5 年同期 54.7% 低约 8.4%;混合层高度较高,平均为 813 m,大于近 5 年同期平均值(531 m)281 m;边界层高度较高,北风较大,大气水平及垂直扩散能力较好,表明 APEC 会议期间污染扩散条件整体较好.

表 1 APEC 会议期间北京市 PM_{2.5}与气象条件变化

项目	日期(月-日)											
	11-01	11-02	11-03	11-04	11-05	11-06	11-07	11-08	11-09	11-10	11-11	11-12
地面形势场	高压前	高压	弱高压	均压	弱低压 转高压前	高压	高压	弱高压	弱高压	均压	高压前	高压
500 hPa 形势场	槽后	槽后	偏西北 气流	浅槽	槽区	槽后	槽后	偏西北 气流	偏西北 气流	偏西气流	槽后	槽后
相对湿度/%	52.23	23.10	43.60	67.85	44.33	34.63	55.33	65.83	57.48	52.65	40.81	17.80
风速/m·s ⁻¹	4.31	6.44	2.10	1.33	3.77	3.33	1.29	1.75	2.04	1.75	5.81	7.51
PBL/m	918	1355	337	419	764	2092	765	418	351	393	857	1091
PM _{2.5} /μg·m ⁻³	34	8	26	103	54	11	43	69	58	71	30	5

2.2 PM_{2.5}空间分布变化

PM_{2.5}是 APEC 会议空气质量保障的核心目标污染物,通过各类污染控制措施的综合实施可以有效降低会议期间 PM_{2.5}浓度水平.图 3 为采用克里格(Kriging)插值法对北京市 PM_{2.5}浓度进行空间插值后的分布图,克里格插值法应用广泛且插值准确性取决于点的分布及个数^[19].由图 3 可知,APEC 会议期间比近 2 年(2012 年 10 月正式开展 PM_{2.5}监测)会议同期明显降低.分地区来看,城区及北部山区改善效果最大,下降幅度在 30%~45%;南部地区站点,包括西南部的丰台、房山,东南部的大兴、通州、亦庄,降幅较低,基本在

25%以下.北京西南部、东南部的总体污染水平较高,且经常受到周边地区污染传输的影响,南部地区 PM_{2.5}降幅较低也说明区域污染控制的重要性,区域整体空气质量改善降低了污染传输对北京地区的影响.本文插值后污染物浓度空间分布的不确定性主要来自:①“簸箕状”的特殊地形影响,地形引起的山谷风、海陆风等小尺度环流等对 PM_{2.5}浓度造成很大影响;②二次化学反应的影响,没有考虑特定气象条件下,二次化学反应增加的 PM_{2.5}浓度;③插值方法误差,由于 35 个站点较集中分布在城六区,郊区点个数较少,插值受采样点范围、采样点密度等参数影响.

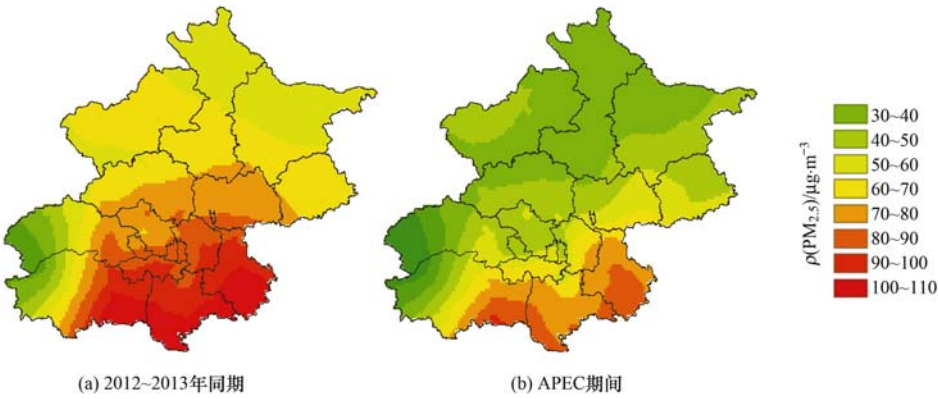


图 3 11 月 1~12 日北京市 PM_{2.5}空间变化

Fig. 3 Spatial distribution of PM_{2.5} in Beijing City from 1st to 12th in November

图 4 为统计的 APEC 会议期间北京市各监测站点 PM_{2.5}浓度同比改善百分比,从不同功能类别的站点的 PM_{2.5}降幅分析,各点位 PM_{2.5}浓度同比均下降,下降幅度 16%~50% 之间.区域背景站下降 27.4%,城市环境站下降 35.5%,交通环境站下降 29.9%,下降幅度均在 30% 左右,不同类别的站点降幅差异较小,城市环境站的下降幅度最大,说明 APEC 保障措施在重点保障区域取得最好效果.南部地区站点,包括西南部的丰台、房山,东南部的大

兴、通州、亦庄,PM_{2.5}降幅较低,基本在 25% 以下.北京西南部东南部的总体污染水平较高,且经常受到周边地区污染传输的影响,南部地区 PM_{2.5}降幅较低也说明区域污染控制的重要性,北京及区域的燃煤污染控制、单双号限行、企业停产限产、工地停工等措施起到了明显的环境效益.

图 5 为基于卫星遥感数据反演的 2014 年 APEC 会议期间、2013 年同期(2013 年 11 月 1~12 日,下同)京津冀区域 PM_{2.5}浓度分布,反演方法见文献

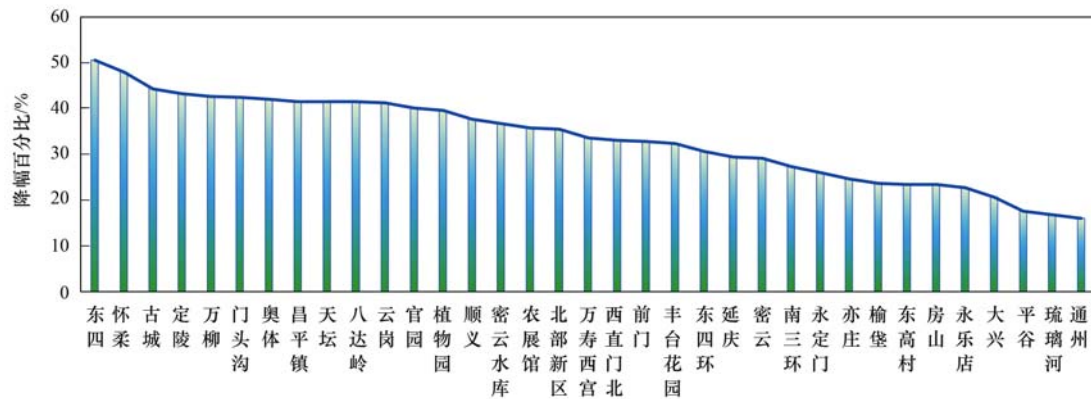


图4 APEC会议期间北京市各监测站点 $PM_{2.5}$ 同比改善百分比

Fig. 4 Improvement percentage of $PM_{2.5}$ at each monitoring site during APEC in Beijing City

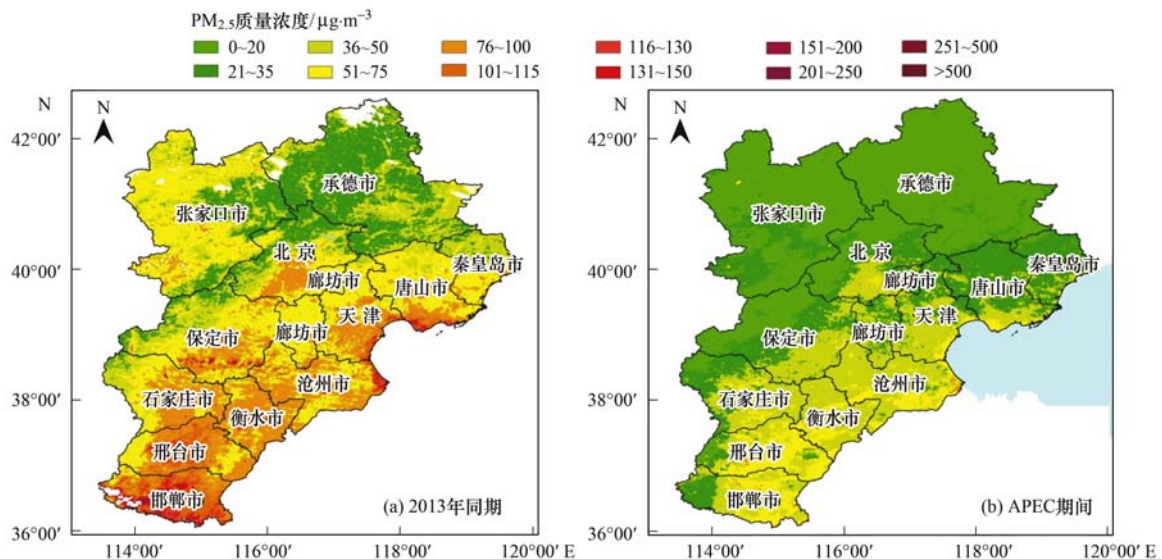


图5 2014年APEC会议期间京津冀 $PM_{2.5}$ 分布与2013年同期比较

Fig. 5 Spatial distribution of $PM_{2.5}$ in Beijing, Tianjin and Hebei region from 1st to 12th in November of 2013 and 2014

[15]. 从中可知, APEC会议期间整个区域 $PM_{2.5}$ 浓度水平明显下降, APEC会议期间京津冀 $PM_{2.5}$ 平均浓度均处于优良水平. 从区域统计情况看, 北京市 $PM_{2.5}$ 平均浓度下降幅度最大, 达38%; 天津市 $PM_{2.5}$ 平均浓度下降36%, 河北中南部地区下降24%. 京津冀及周边六省区市共同减排是APEC会议空气质量保障取得成功的重要基础, 也为区域联合治理大气污染指明了方向.

2.3 $PM_{2.5}$ 组分变化

图6为2014年APEC会议期间北京市 $PM_{2.5}$ 组分变化, APEC会议期间 $PM_{2.5}$ 的主要组分OM、EC、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、地壳物质、微量元素, 在总量中的质量分数分别为39.9%、3.0%、9.3%、20.4%、8.2%、7.6%、5.7%, 其他占5.9%. APEC会议期间 SO_4^{2-} 浓度与同期相比下降50%, SO_4^{2-} 主要来源

于燃煤^[20], 它的降低说明压煤措施效果明显. 受扬尘影响较大的地壳物质浓度^[21]与2013年同期相比下降76%, 由 $17.0 \mu g \cdot m^{-3}$ 下降至 $4.0 \mu g \cdot m^{-3}$, 说明扬尘控制措施到位. APEC会议期间 NO_3^- 浓度与同期相比下降35%, NO_3^- 主要为 NO_x 光化学反应生成, 受机动车排放量大幅降低影响, NO_3^- 浓度降低明显. EC浓度受燃烧源及大型货车一次排放影响较大, APEC会议期间EC浓度同比大幅度下降, 由 $3.89 \mu g \cdot m^{-3}$ 下降至 $1.57 \mu g \cdot m^{-3}$; 同时OC和EC相关性更高, 从0.82提高到0.93; OC和EC的比值更大, 从2013年同期的6.7提高为9.7, 说明EC、OC二者的来源一致性更强^[22], OC和EC浓度均有显著地降低, 体现了燃烧源减排的作用^[23], 燃烧源及大型货车污染控制效果显著, 对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献率降低.

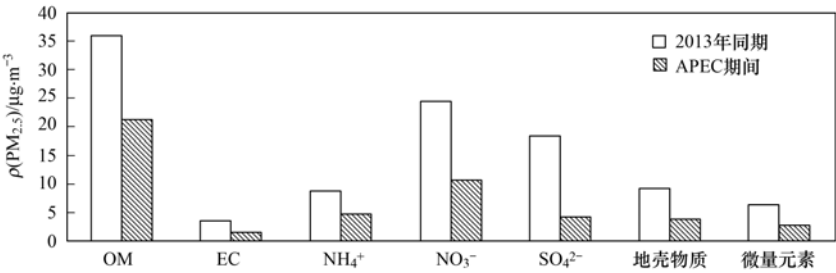


图6 APEC会议期间北京市PM_{2.5}组分变化

Fig. 6 Variation of the PM_{2.5} components in Beijing City during APEC

为进一步分析 APEC 会议期间北京市 PM_{2.5} 组分的特点和变化,表 2 统计了 APEC 会议期间、2013~2014 年均及重污染日 PM_{2.5} 中水溶性无机离子 (NO₃⁻、NH₄⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺) 的平均浓度. 从中可知,重污染日中无机组分 ρ(NO₃⁻)、ρ(NH₄⁺)、ρ(SO₄²⁻) 值较高,ρ(Cl⁻)、ρ(K⁺)、ρ(Ca²⁺) 值较低,重污染日各离子组分按质量浓度大小排序为:ρ(SO₄²⁻)>ρ(NO₃⁻)>ρ(NH₄⁺)>ρ(Cl⁻)>ρ(K⁺)>ρ(Na⁺)>ρ(Ca²⁺)>ρ(Mg²⁺); 年均各离子组分按质量浓度排序为

ρ(SO₄²⁻)>ρ(NO₃⁻)>ρ(NH₄⁺)>ρ(Cl⁻)>ρ(K⁺)>ρ(Ca²⁺)>ρ(Na⁺)>ρ(Mg²⁺); APEC 期间各离子组分按质量浓度大小排序为:ρ(NH₄⁺)>ρ(NO₃⁻)>ρ(SO₄²⁻)>ρ(Cl⁻)>ρ(K⁺)>ρ(Na⁺)>ρ(Ca²⁺)>ρ(Mg²⁺), ρ(NO₃⁻) 明显大于 ρ(SO₄²⁻)、ρ(NH₄⁺) 浓度最大,且各离子组分浓度明显小于年均及重污染日各离子浓度,而 ρ(NO₃⁻)/ρ(SO₄²⁻) 比值可以定性地表示移动源和固定源对大气中颗粒物贡献程度的相对大小^[24], APEC 期间该比值升至 2.45,表明会议期间北京市的排放源以移动源为主.

表2 北京市PM_{2.5}组分浓度统计

Table 2 Average mass concentrations of major chemical components in PM_{2.5} of Beijing City

项目	ρ(Cl ⁻)	ρ(NO ₃ ⁻)	ρ(SO ₄ ²⁻)	ρ(Na ⁺)	ρ(K ⁺)	ρ(NH ₄ ⁺)	ρ(Ca ²⁺)	ρ(Mg ²⁺)
2013~2014 年平均	3.64±3.35	14.55±10.81	21.76±20.65	0.47±0.33	0.96±0.85	13.56±8.94	0.56±0.36	0.08±0.03
2013~2014 重污染日平均	5.40±4.79	28.62±15.57	53.61±25.02	0.69±0.63	2.03±1.84	22.30±9.18	0.49±0.37	0.11±0.04
APEC 期间	3.65±3.32	10.80±9.99	4.40±3.16	0.70±0.31	1.09±0.80	12.79±10.71	0.37±0.19	0.22±0.02

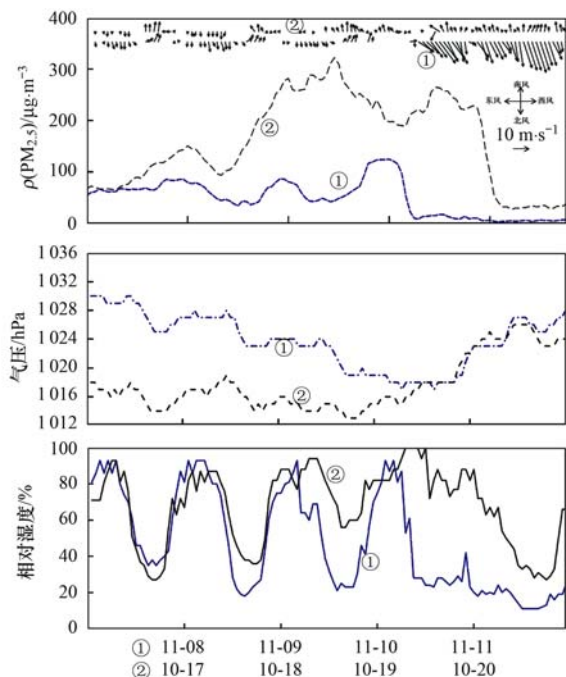
2.4 相似过程对比

研究参照 Zhang 等^[4] 的评估方法,选取与 APEC 会议期间相似的污染过程,两者 PM_{2.5} 浓度的差值为 APEC 会议减排措施的“净环境效益”. 选取两次相似的污染过程分别为 2014 年 10 月 16~20 日和 APEC 会议期的 11 月 7~11 日,两次污染过程北京及华北区域为弱气压系统,大气总体静稳,扩散条件较不利;卫星遥感云图^[25] 显示两次过程期间北京市周边的廊坊、保定、石家庄、邢台等地均处于重至严重污染. 图 7 为相似过程中 PM_{2.5} 浓度与气象要素变化,从中可见,两次过程中地面气压及相对湿度日变化十分相似,两次过程中 PM_{2.5} 起点浓度较为接近,在 70 μg·m⁻³ 左右. APEC 会议期间针对 11 月 8~10 日可能发生重污染过程,六省(区)市启动了预报预警会商机制,准确地预判形势,及时升级应急措施,区域减排力度达到最大,所有燃煤电厂限产减排 50%,钢铁、焦化、水泥、玻璃等重点行业高架源企业全部停产(焖炉),工业企业涉及

VOCs 排放工序全部停产^[26],减排措施使得 APEC 会议期间 PM_{2.5} 浓度上升幅度小,最高小时浓度 120 μg·m⁻³ 左右且持续积累时间短(4 h 左右),而相似气象条件下的 10 月 18~19 日 PM_{2.5} 浓度维持在 200 μg·m⁻³ 以上将近 54 h. 由此可见,APEC 会议控制措施使污染物的积累速度下降,峰值浓度降低且持续时间缩短,区域大幅度的污染物排放量削减具有明显的削减污染峰值、延缓积累速度的作用,联动的应急措施有效避免了重污染的发生.

2.5 CMB 源解析

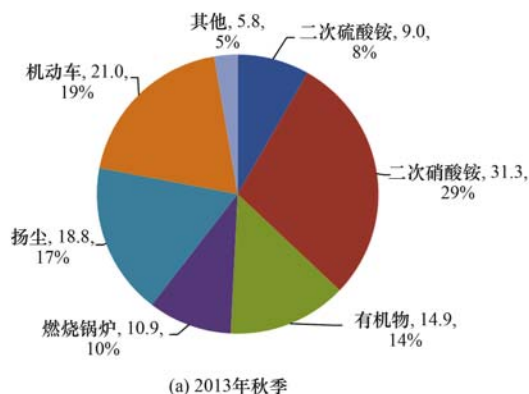
研究进一步利用 CMB 源解析模型,对保障措施的环境改善效果展开评估. 图 8 为应用 CMB 模型获得的 2014 年 APEC 会议期间北京市 PM_{2.5} 源解析结果,从中可知,与 2013 年秋季源解析结果相比,燃煤锅炉贡献率由 10% 下降到 2%,APEC 会议期间大力压减燃煤,燃煤供暖锅炉一律不准提前点火,北京市及区域压减燃煤污染控制成效显著. 扬尘贡献率下降十分明显,贡献率由 17% 下降幅度达到 7%,



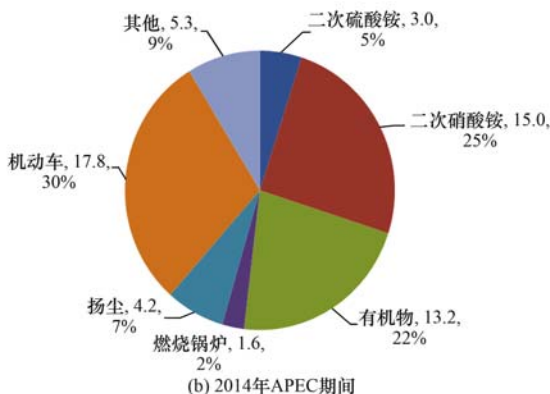
横坐标均为同一时间,①为2014年11月7~11日,
②为2014年10月16~20日

图7 相似过程 $PM_{2.5}$ 浓度与气象要素变化对比

Fig. 7 Time series of meteorological condition and fine particulate mass concentrations in similar process



(a) 2013年秋季



(b) 2014年APEC期间

图8 2014年APEC会议期间北京 $PM_{2.5}$ 源解析及与2013年秋季结果比较

Fig. 8 Analysis of $PM_{2.5}$ source identification during APEC in 2014 and autumn 2013 in Beijing City

北京市环保局总结了“APEC蓝”产生的三大要素^[29]:保障措施带来的本地污染排放大幅减少;周边联防联控协同减排;没有发生极端不利的气象条件。APEC会议期间空气质量保障成功说明雾霾不是无法克服的问题,给治理雾霾带来了更强的信心。在未来的污染治理及空气质量保障工作中,吸收本次保障措施的成功经验,借鉴APEC会议期间的工作机制,区域大气污染联防联控,以有效预防和控制空气重污染,保障公众健康。

APEC会议期间严控施工扬尘,全市“吸、扫、冲、收”道路清扫保洁作业频次加大,抑尘措施发挥明显成效。机动车贡献率从19%上升到30%,控车、减油措施特别是单双号限行对于 $PM_{2.5}$ 一次排放总量、NO排放量有很大的消减,同时对交通拥堵、交通扬尘的改善十分明显。二次硝酸盐贡献率由29%下降到25%,硝酸盐浓度的降低主要与其前体物氮氧化物的减排措施有关,相关减排措施包括区域电厂减产、脱硝设施投运、机动车排放量大幅降低等。有机物的贡献率不降反升,贡献率由14%上升到22%,但绝对浓度有小幅下降,相较于其他源类的减排效果,降幅较小。CMB模型源解析结果显示APEC会议期间北京市及周边地区采取的保障措施的环境效益显著。值得说明的是,本研究源解析结果受样品采集、称量、组分测试分析、元素选择、模型计算等环节影响;此外采样点位、采样时间的代表性,也会直接影响源解析结果的可靠性^[27,28]。今后对于 $PM_{2.5}$ 二次来源及区域传输的进一步解析,还应进一步细化本地污染源排放源谱,联合应用其他技术手段,如可靠的源清单数据、优化的空气质量数值模拟系统,深入分析其来源。

3 结论

(1) 2014年APEC会议期间北京市 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 的浓度分别为43、62、8和46 $\mu g \cdot m^{-3}$,比近5年平均浓度($PM_{2.5}$ 为2012~13年平均浓度)降低45%、43%、64%和31%。

(2) $PM_{2.5}$ 城区及北部山区改善效果最大,下降幅度在30%~45%;南部地区降幅在25%以下;不同类别的站点浓度降幅在27.4%~35.5%之间。

(3)北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要组分分析结果显示, APEC 会议期间 SO_4^{2-} 浓度同比下降 50%, 地壳物质同比下降 76%, NO_3^- 浓度同比下降 35%; CMB 模型源解析结果显示 APEC 会议期间燃煤锅炉贡献 2%, 扬尘贡献 7%, 机动车贡献 30%; APEC 会议期间北京市及周边地区采取的保障措施的环境效益显著, 同时污染物排放量大幅度地削减具有明显的“削峰降速”的作用。

参考文献:

- [1] Sun Y L, Zhang G S, Tang A H, *et al.* Chemical characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in haze-fog episodes in Beijing [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **40**(10): 3148-3155.
- [2] Yao X H, Chan C K, Fang M, *et al.* The water-soluble ionic composition of $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai and Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(26): 4223-4234.
- [3] Wang Y X, Hao J M, McElroy M B, *et al.* Ozone air quality during the 2008 Beijing Olympics: effectiveness of emission restrictions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(14): 5237-5251.
- [4] Zhang X Y, Wang Y Q, Lin W L, *et al.* Changes of atmospheric composition and optical properties over Beijing-2008 Olympic monitoring campaign [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, **90**(11): 1633-1651.
- [5] 刘子锐, 孙扬, 李亮, 等. 2008 奥运和后奥运时段北京大气颗粒物质量浓度和数浓度比对研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 913-923.
- [6] 孔茜, 吴焯, 杨柳, 等. 奥运期间北京典型交通环境气态污染物特征及人体吸入剂量[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(2): 281-286.
- [7] 吴其重, 王自发, 徐文帅, 等. 多模式模拟评估奥运赛事期间可吸入颗粒物减排效果[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(9): 1739-1748.
- [8] 程念亮. 东亚地区春季典型天气过程空气污染输送特征的数值模拟研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2013.
- [9] 谢淑艳, 王晓彦, 吴迺名, 等. 环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 自动监测方法比较及应用[J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(2): 150-155.
- [10] HJ/T 193-2005, 环境空气质量自动监测技术规范[S].
- [11] Zheng M, Salmon L G, Schauer J J, *et al.* Seasonal trends in $\text{PM}_{2.5}$ source contributions in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(22): 3967-3976.
- [12] Song Y, Zhang Y H, Xie S D, *et al.* Source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing by positive matrix factorization[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(8): 1526-1537.
- [13] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1154-1163.
- [14] 李令军, 王英, 李金香, 等. 2000~2010 北京大气重污染研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(1): 23-30.
- [15] 北京市环境保护局. APEC 空气质量保障环境空气质量改善效果评估报告[R]. 北京: 北京市环境保护局, 2014.
- [16] 王莉莉, 王跃思, 王迎红, 等. 北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(7): 924-930.
- [17] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程成因分析[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(2): 163-170.
- [18] Wang X Q, Yu T, Sun F, *et al.* Key meteorological factors resulting in PM_{10} heavy air pollution in Beijing[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, **11**(4): 470-476.
- [19] 程念亮, 李云婷, 邱启鸿, 等. 2013 年北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染日时空分布特征研究[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(3): 38-44.
- [20] Zhang K, Wang Y S, Wen T X, *et al.* Properties of nitrates, sulfate and ammonium in typical polluted atmospheric aerosols (PM_{10}) in Beijing[J]. *Atmospheric Research*, 2007, **84**(1): 67-77.
- [21] Chao 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**: 3127-3137.
- [22] Li J, Zhuang G S, Huang K, *et al.* The chemistry of heavy haze over Urumqi, Central Asia [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2008, **61**(1): 57-72.
- [23] Guo S, Hu M, Zamora M L, *et al.* Elucidating severe urban haze formation in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111**(49): 17373-17378.
- [24] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [25] 国家气象局. FY2E 卫星云图[EB/OL]. <http://www.nmc.gov.cn/publish/satellite/fy2.htm>, 2014-10-30.
- [26] 北京市环境保护局. APEC 会议空气质量保障方案(试行)[R]. 北京: 北京市环境保护局, 2014.
- [27] Li W J, Shao L Y. Transmission electron microscopy study of aerosol particles from the brown hazes in northern China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(D9): 302-312.
- [28] He K B, Zhang Q, Ma Y L, *et al.* Source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing[J]. *Fuel Chemistry Division Preprints*, 2002, **47**(2): 677-678.
- [29] 北京市环境保护局. 减排才是硬道理 APEC 空气质量保障措施效果评估结果出炉[EB/OL]. <http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/413526/331443/331937/333896/416644/index.html>, 2014-12-17.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou	 HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games	 ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China	 SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shao-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir	HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	 YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings	 PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China	 LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland	 JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 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	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