

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

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(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达(4340)
嘉兴市春季PM、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣(4479)
城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生(4531)
基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳(4615)
蜈蚣草中砷与铊的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟苏琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟苏琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录	(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	
《环境科学》征稿简则(4454)	
信息(4463,4530,4573,4581)	

APEC 期间北京空气质量改善对比分析

李文涛^{1,2}, 高庆先^{2,3*}, 刘俊蓉^{1,2}, 李亮⁴, 高文康⁵, 苏布达²

(1. 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 河北大学经济学院, 保定 071000; 4. 中国环境监测总站, 北京 100012; 5. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100191)

摘要: 为了评估 APEC 期间强化减排措施对北京空气质量的改善效果, 利用 2014 年 11 月 1~15 日中国环境监测总站发布的奥体中心监测点空气质量监测数据, 分析其空气质量演变特征, 并与 2013 年同期监测数据进行对比研究。结果表明: ① $PM_{2.5}$ 是当前北京最重要的污染物, APEC 期间空气质量以优良为主, 期间有 3 次明显的污染过程, 与 2013 年同期相比较有所好转, 显示出强化减排措施对北京空气质量的改善有显著的效果; ② 与世界卫生组织 (WHO) 的标准值相比, APEC 期间 $PM_{2.5}$ 有 5d 在 WHO 标准值 ($25 \mu g \cdot m^{-3}$) 以下, 而 SO_2 均小于标准值; ③ APEC 期间, 在空气质量为优时 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 小于 0.5, 且随污染浓度的增加比值逐渐增大, 在严重污染情况下 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 达到 0.9 以上; ④ 与 2013 年同期相比, 强化减排措施对 $PM_{2.5}$ 的减少有一定的贡献, 但与 SO_2 和 CO 的减少量相比, 颗粒物的减少量又相对较少, NO_2 减少量相对最小, 实施强化减排措施对污染物减排的排序为 $SO_2 > CO > PM > NO_2$, 说明北京空气污染中的 $PM_{2.5}$ 的来源、影响和减排的复杂性, 有待进一步深入研究。

关键词: APEC; 强化减排措施; 奥体中心; 空气质量; $PM_{2.5}$

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4340-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.12.003

Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC

LI Wen-tao^{1,2}, GAO Qing-xian^{2,3*}, LIU Jun-rong^{1,2}, LI Liang⁴, GAO Wen-kang⁵, SU Bu-da²

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Economics, Hebei University, Baoding 071000, China; 4. China National Environmental Monitoring Station, Beijing 100012, China; 5. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to evaluate the effects of the implementation of emission reduction measures and the revolution of air quality of Beijing during APEC, the evolution characteristics of air quality was analyzed based on the hourly monitored readings of Olympic Sports Center from 1 to 15 November 2014 released by Environmental Monitoring Station of China, and compared with that in 2013. The results showed that: ① $PM_{2.5}$ was the main pollutant in Beijing. The air quality was good during the period of APEC with three obvious pollution events, and it was better than that in the same period in 2013, indicating that the implementation of emission reduction measures had made significant contribution to the improvement of air quality. ② During the period of APEC, the concentrations of $PM_{2.5}$ of 5 days were below the World Health Organization (WHO) standard ($25 \mu g \cdot m^{-3}$), and the concentration of SO_2 met the WHO standard during this time. ③ During the period of APEC, the ratio of $PM_{2.5}$ and PM_{10} was less than 0.5 when the air quality was good, and gradually increased with the increasing pollution level. The ratio reached 0.9 when the air was seriously polluted. ④ Compared with the same time in 2013, although the implementation of emission reduction measures made contribution to the reduction of the concentration of $PM_{2.5}$, its contributions to the reduction of SO_2 and CO concentration were much more obvious than that of $PM_{2.5}$, and it had little impact on the reduction of NO_2 concentration, and the reduction order of pollutants emission was $SO_2 > CO > PM > NO_2$, indicating that the sources, effects and emission reduction of $PM_{2.5}$ were complex, and further studies are required.

Key words: APEC; emission reduction measures; Olympic Sports Center; air quality; $PM_{2.5}$

近年来,随着工业化、城市化、交通运输现代化的迅速发展,化石燃料(煤、石油、天然气)的消耗量迅猛增加,已经成为城市环境恶化的重要影响因素之一,引起世界科学家的高度关注,世界气象组织(WMO)在2001年就开展了城市气象和环境研究计划(GURME),主要研究了城市空气污染及不同排放控制策略的影响评估等内容^[1]。如何改善城市空气质量已经成为目前人们普遍关注的热点问题^[2],

特别是在一些特大城市举行大型活动时,如何保障空气质量成为活动是否成功的关键,活动期间往往会采取一些临时污染防治措施,不仅能够保障大型活动的顺利完成,同时也为环境保护工作者开展大

收稿日期: 2015-04-20; 修订日期: 2015-07-22

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201509001, 201409027)

作者简介: 李文涛(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气环境, E-mail: lwt111an@163.com

* 通讯联系人, E-mail: gaoqx@craes.org.cn

气污染控制效果研究提供难得的实验机会。

最近几年,我国频繁发生持续时间长、污染程度高的雾霾天气过程,尤其在京津冀和长三角地区,污染更为严重,因此我国科学家对污染过程从各个方面进行了阐述。研究表明气象条件以及不同季节不同污染来源对污染物浓度存在显著影响^[3~7]。张小曳等^[8]通过分析雾和霾与气溶胶的联系、维持机制和污染物构成等,阐述了雾霾的形成原因,为空气质量改善提供技术支持。Guo 等^[9]研究表明,控制措施实施会减少运输行业污染物的排放,从而产生很大的经济效益。曹伟华等^[10]对 2009 年 11 月 3 ~ 8 日的一次持续雾霾天气过程的气象因素和气溶胶演变特征进行了分析,指出雾霾过程具有明显的阶段性特征。李婷苑等^[11]对广州亚运会期间广州的空气质量进行分析,指出亚运会期间空气质量良好得益于政府实施的减排措施及良好的气象条件。喻义勇等^[12]对南京“亚青会”期间的空气质量进行了分析,指出在政府主导污染源控制后,空气质量明显好转。王占山等^[13]对 2014 年春节期间的北京的空气质量分析后指出,污染源减排对空气质量有明显的改善。针对国内举办大型活动期间污染控制措施的实施及其环境改善状况,国内外还有很多学者就空气质量保障、空气质量的演变和不同控制措施下污染形成机制等展开了大量的研究^[14~25]。

2014 年 11 月在北京举办的亚太经合组织 (Asia-Pacific Economic Cooperation, APEC) 会议前,北京市政府和周边地区政府进行了一系列的污染防治措施。北京在 11 月 3 ~ 12 日间采取了非常严格的强化减排措施,包括:11 月 3 ~ 12 日实行机动车单双号限行;11 月 7 ~ 12 日在京政府机关和企事业单位放假调休 6 d;全市所有施工工地停工;北京及周边部分排污企业停产等等。在天帮忙人努力的情况下,APEC 期间空气质量有了显著的改善,大会得以圆满成功。该研究以中国环境监测总站发布的北京奥体中心空气质量指数 (AQI) 为基础,对比研究 2013 年同期空气质量的变化,辅以每日照片影像为参照,探讨污染减排措施和空气质量保障措施的效果,分析探究 APEC 期间北京空气污染的演变、转化、输送特征,以期改善北京空气质量提供科学的技术支持,具有重要的科学意义和实用价值。

1 材料与方法

1.1 资料

(1)空气污染数据来自环境保护部中国环境监

测总站“全国城市空气质量实时发布平台 (<http://113.108.142.147:20035/emcpublish/>)”发布的各类污染物数据,包括各类污染物小时浓度值、日均浓度值以及空气质量指数 (AQI) 等。选择北京 APEC 主要活动场所的奥体中心监测点作为研究对象,收集该站逐小时 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 等浓度值;为了比较减排措施实施前后的效果,该研究资料收集的时段为 2014 年 11 月 1 ~ 15 日,涵盖了 APEC 峰会期间和强化减排措施实施期间,同时还收集了 2013 年同期空气质量数据。

(2)我国 AQI 标准和技术规定:中国空气质量标准来自国家环境保护部发布的《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)、《环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 (试行)》(HJ 633-2012)(下称《规定》)。

1.2 方法

本研究主要是利用统计学中的时间序列分析方法,对 APEC 期间的空气质量进行了分析,同时与 2013 年同期的空气质量进行了对比研究。

考虑到我国环境空气质量计算时,颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10}) 1h 浓度空气质量分指数 (IAQI) 分级浓度限值参照 24 h 浓度 AQI 分级浓度限值,因此,本研究参考《规定》中的表 1,将 AQI 大于 150 (对应 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度限值大于 $115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的情况定义为污染事件,即持续出现中度污染以上的事件定义为一次污染事件。同时规定一次污染事件是由污染累积过程和污染消失过程两部分组成,污染累积过程是指污染物由低谷 (最低值) 上升至峰值 (最高值) 的过程;而一个污染消失过程则是指污染由峰值下降至另一次谷值的过程。一般而言,污染累积过程的累积时间会多于污染消失过程的时间。

为了从视觉上比较北京奥体中心周边空气质量的演变,本研究使用了每日上午 08:00 ~ 08:30 期间的照片作对比,照片是从国家奥林匹克体育中心生命之树观光塔东北方向 4.5 km 处中国环境科学研究院高层向西南方向 (生命之树观光塔) 进行拍照所得,照片虽然是静态瞬时的,但也从某种程度上反映出北京空气质量的实况。

2 结果与讨论

2.1 APEC 期间空气质量的演变

图 1 给出了 2014 年 11 月 1 ~ 15 日北京奥体中心监测站主要污染指标的演变,从中可以看出,在这 15 d 中北京经历了 3 次污染过程,峰值分别在 11 月 5 日、11 日及 15 日各有一次。这 3 个过程在颗粒物

($\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10}) 的演变[图 1(a) 和图 1(b)]中反映特别突出,有明显的峰值和谷值。 SO_2 [图 1(c)]和 NO_2 [图 1(d)]虽然也可以分辨出有 3 次过程,但不是非常明显。对比污染物浓度消失的演变趋势和瞬间天空状况照片可以看出在 11 月的这 15 d 中存在有 3 次典型的污染过程。在第一次污染过程中,累计过程经历 68 h,而消失仅经历 14 h,污染物浓度由 $3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 迅速增长到 $350 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,增长 100 多倍;第二个污染过程污染累积的时间明显增长,历时 131 h,污染物浓度由谷值为 $3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,增加到 184

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 即达到峰值,峰值也比第一个过程减小。这一过程正好是在 APEC 强化污染控制阶段,体现出污染控制措施有较好的改善效果,此次的污染消失过程非常迅速,仅有短短的 7 h;第 3 个污染累计过程也相对缓慢,持续了 91 h,累积量比第二次过程明显增多,但仍然小于第一次累计过程,累积的峰值为 $144 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,此次过程消失的也很快,仅用 6 h 就回落到谷底。这 3 次污染过程的形成,除了受到当时的天气形势影响外,APEC 期间的强化污染减排和控制措施对空气质量的改善有显著的作用。

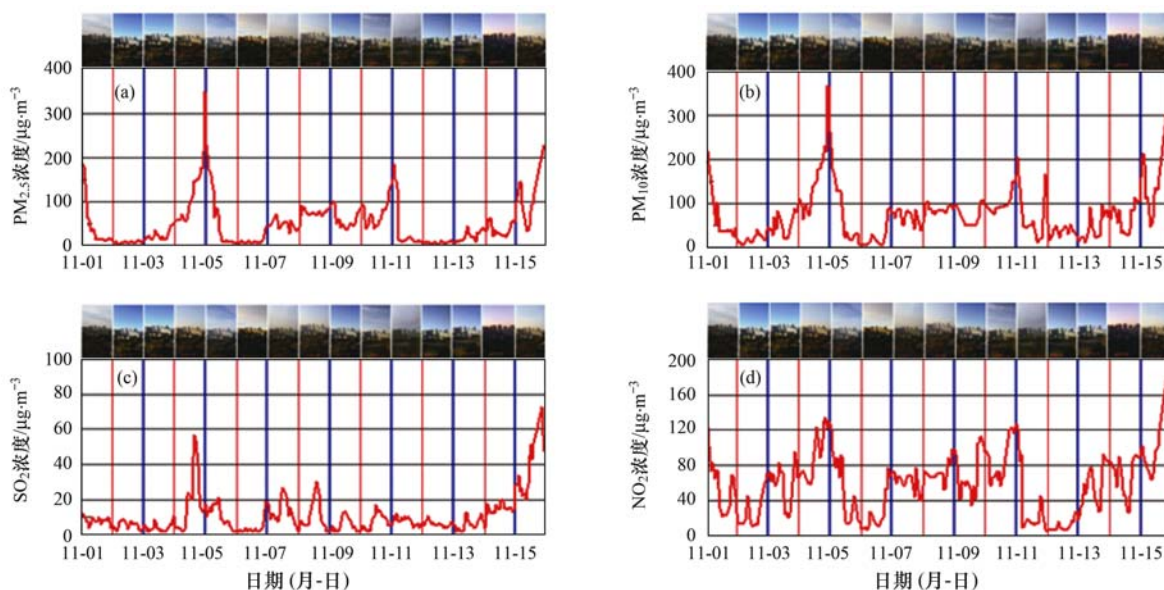


图 1 2014 年 11 月 1 ~ 15 日北京奥体中心监测站空气质量演变

Fig. 1 Evolution of air quality in Beijing Olympic Sports Center on November 1-15 2014

表 1 给出 2014 年 11 月 1 ~ 15 日主要污染物逐日日均值与世界卫生组织(WHO)发布的 24 h 准则值^[26]的比较,可以看出, $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度值有 5 d 小于 WHO 空气质量基准值中 $\text{PM}_{2.5}$ 24 h 平均浓度($25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),即强化减排措施开始当天及前一天(11 月 2 ~ 3 日),强化减排措施结束之日及其后一天(11 月 12 ~ 13 日)和冷锋过境后的 11 月 6 日。如果按照国家环境质量标准(GB 3095-2012)评估, $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度达到国家一级标准(优)的天数同样为 5 d,达到国家二级标准(良好)的天数有 13 d,特别是 APEC 强化控制措施期间(11 月 3 ~ 12 日),奥体中心监测数据显示均为优良天气,出现所谓的 APEC 蓝。 PM_{10} 日均浓度值有 5 d 小于基准值($50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),同样 PM_{10} 日均浓度达到国家一级($50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和二级标准($150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的天数分别为 5 d 和 13 d,并与 $\text{PM}_{2.5}$ 的情况完全一样。 SO_2 除了第 15 d 日均浓度超过 WHO 基准值($20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)外,其

他均低于 WHO 基准值,同样按照国家环境质量标准评估,奥体中心监测数据显示 SO_2 均小于国家一级标准($50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),即均为优。WHO 准则中没有给出 24 h NO_2 平均准则值,参照国家环境质量标准,可以看出在 2014 年 11 月 1 ~ 15 日期间小于国家一级标准($40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的天数为 4 d,有 8 d NO_2 日均浓度为良好($80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),出现过 3 d 轻度污染。

综合分析可以看出,在 APEC 强化减排措施实施前一天,受西北气流的影响,奥体中心空气质量为优,特别是 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度仅有 $6.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,远远小于 WHO 基准值。在强化减排措施实施的 10 d 内, SO_2 均为优, NO_2 只出现轻度污染 2 d,良好天气 5 d,优的天数仅有 3 d。这显示出污染来源的复杂性和空气质量改善的艰巨性。从表 1 中还可以看出,当日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为优时($< 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 小于 0.5。

表 1 奥体中心主要污染物日均浓度与 WHO 准则值的比较/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Comparison of daily average concentration of main pollutants in Beijing Olympic Sports Center and criterion of WHO/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

类别	WHO 准则	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
PM _{2.5} 24 h 平均值	25	47.8	6.52	21.86	115.14	68.95	10.43	45.78	73.55	59.45	73.7	40.42	5.59	20.27	35.75	112.89
PM ₁₀ 24 h 平均值	50	76.32	19.26	47.42	155.55	85.87	29.43	68.06	86.83	81	114	70.75	36.18	43.43	68.18	163.5
SO ₂ 24 h 平均值	20	8	5.05	4.14	17.64	11.35	4.1	13.33	9.5	5.64	7.61	7.71	6.14	5.86	14.54	37.26
NO ₂ 1 h 平均值	200	62.35	27.38	58.19	90.09	55.75	25.71	60.72	71	70.73	86.2	35.83	11.82	56.41	68.04	103.21
PM _{2.5} /PM ₁₀		0.52	0.39	0.51	0.73	0.62	0.47	0.7	0.88	0.81	0.84	0.4	0.17	0.51	0.57	0.7

表 2 给出不同污染等级下 PM_{2.5} 的浓度分布, PM_{2.5}/PM₁₀ 的分布情况,可以看出 2014 年 11 月 1 ~ 15 日总共有 360 h,在收集到的监测数据中,PM_{2.5} 的有效时数为 319 h,占总数的 88.61%,平均的 PM_{2.5} 浓度为 48.66 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中 PM_{2.5} 小于 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的时数为 163 h,占总有效时数的 51.1%,平均浓度为 13.27 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其次是良好天气,占总有效时数的 28.48%,平均浓度为 53.67 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,即优良时数占到总有效时数的 79.94%。轻度、中度、重度和严重污染出现的时数分别为 30、15、18 和 1 h,占总有效

时数的比例分别为 9.4%、4.7%、5.64% 和 0.31%,平均浓度分别为 87.53、136.93、188.39 和 250 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。监测数据显示 2014 年上半月奥体中心以优良天气为主。期间 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 比值的平均值为 0.57,其中在优的情况下 PM_{2.5}/PM₁₀ 为 0.42,良好天气时 PM_{2.5}/PM₁₀ 为 0.68,轻度和中度污染时为 0.81,重度污染时为 0.83,严重污染时为 0.95。这一结论与以前的研究结果基本一致,即在优的情况下 PM_{2.5}/PM₁₀ 一般小于 0.50,且随着污染程度的加剧,比值逐渐增大^[27]。

表 2 PM_{2.5} 浓度及 PM_{2.5}/PM₁₀ 等级分布

Table 2 Concentration of PM_{2.5} and ratio of PM_{2.5}/PM₁₀

PM _{2.5} / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PM _{2.5} 平均 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	有效时数 /h	比例 /%	PM _{2.5} /PM ₁₀ 平均	有效时数 /h	比例 /%
<35	13.27	163	51.1	0.42	141	54.23
36 ~ 75	53.67	92	28.48	0.68	62	23.85
76 ~ 115	87.53	30	9.4	0.81	26	10
116 ~ 150	136.93	15	4.7	0.81	12	4.62
151 ~ 250	188.39	18	5.64	0.83	18	6.92
>250	350	1	0.31	0.95	1	0.38
平均值	48.66	319	100	0.57	260	100

2.2 与 2013 年同期对比分析

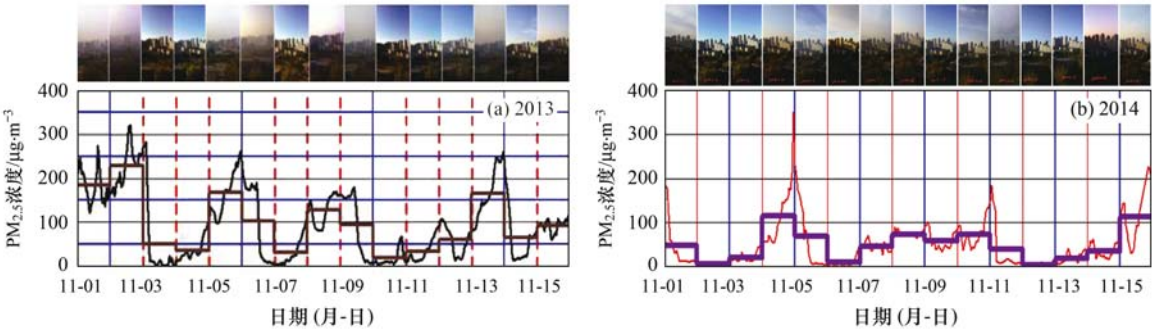
为量化研究 APEC 期间强化污染减排和控制措施的实际效果,选择 2013 年同期(2013 年 11 月 1 ~ 15 日)同一地点(奥体中心监测站)的监测资料进行对比分析。在进行对比分析监测资料之前,首先将 2013 年 11 月与 2014 年 11 月上半月的天气形势图进行了比较分析(图略)。对比分析结果显示 2013 年和 2014 年 11 月上半月总的天气形势没有异常的变化。从节气看是完全一致的,期间跨越了霜降(10 月 23 日 ~ 11 月 6 日)和立冬(11 月 7 ~ 21 日)两个节气。期间有 3(2014 年) ~ 4(2013 年)次明显的冷空气南下过程,分别对应地面出现 3 ~ 4 次污染过程。

2.2.1 2013 年和 2014 年 PM_{2.5} 浓度演变比较

图 2 给出了 2013 年和 2014 年 11 月上半月北京奥体中心监测站 PM_{2.5} 浓度逐小时和日均值演变,

其中还配有每日上午 08:30 左右天空的照片。可以看出,对比同期两年天空照片反映的空气质量没有特别明显的差异,2014 年略好于 2013 年。2013 年同期出现过 4 次污染过程[图 2(a)],其中最为严重的污染累积过程中 PM_{2.5} 浓度累积可达 320 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,相对较轻的污染过程 PM_{2.5} 浓度累积最高浓度也达到 181 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。2014 年同期发生的 3 次污染事件中[图 2(b)],最为严重的一次污染累积过程中 PM_{2.5} 浓度累积高达到 350 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,相对较轻的污染累积也致使 PM_{2.5} 浓度达到 184 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从 PM_{2.5} 浓度在污染累积过程达到的最大值可以看出,2013 年和 2014 年同期空气质量变化不大。

如果将 2013 年和 2014 年同期 PM_{2.5} 浓度演变叠加在一起(图 3),其中带阴影的是 2013 年 PM_{2.5} 逐时演变情况,红色曲线表示 2014 年 PM_{2.5} 逐时演变情况。可以看出与 2013 年相比,2014 年 11 月 1



图中横线表示 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值, 曲线表示 $\text{PM}_{2.5}$ 逐小时浓度变化

图 2 奥体中心监测站 $\text{PM}_{2.5}$ 逐时和日均浓度变化趋势

Fig. 2 Hourly and daily variation of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Olympic Sports Center monitoring station

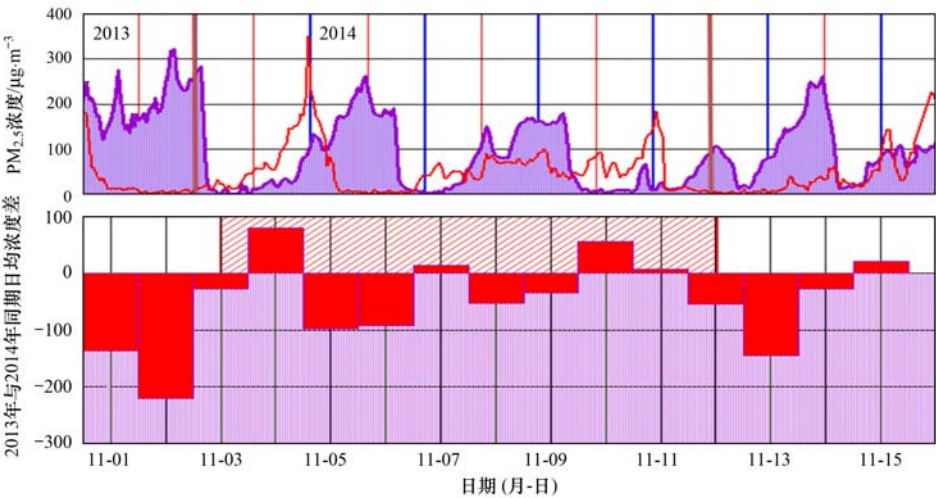


图 3 奥体中心监测站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度演变

Fig. 3 Evolution of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Olympic Sports Center monitoring station

~15 日空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日均值有比较明显的改善,大部分日数的差值为负值,表示 2014 年同期空气质量比 2013 年有所改善,但是, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度出现增加的日数虽然仅有 5 d,其中大部分却出现在 APEC 强化措施实施期间,特别是在刚刚开始实施强化减排措施时,这种现象主要是与当时的天气背景有关.

2.2.2 各污染物浓度变化

表 3 给出了两年同期各种污染物浓度的变化,为了评估强化减排措施实施对北京空气质量改善的贡献,特别是将 APEC 强化减排措施实施期间的污染物浓度变化单独列出. 可以看出,2014 年与 2013 年同期(11 月上半月)相比,各类污染物浓度均有明显的减少, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降了 $47.86 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 浓度下降 $50.65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, SO_2 、 NO_2 和 CO 浓度也分别下降了 15.67、11.93 和 $0.67 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 在强化减排措施实施期间(11 月 3 ~ 12 日), $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度分别只下降了 $20.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $22.09 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 下降

比例在 43% 左右,即 APEC 强化减排措施实施期间减排的量是整个上半月减排量的 43% 左右,表明强化减排措施对颗粒物的减排有一定的贡献. 从污染物浓度变化情况可以判断,强化减排措施对 SO_2 和 CO 的改善最为明显, SO_2 和 CO 浓度则分别下降了 $15.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, APEC 强化减排措施实施期间这两种污染物浓度下降比例分别为 97% 和 73%. 相对而言, NO_2 的浓度下降了 $3.07 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 下降幅度只占上半月下降量的 26%.

为了比较北京其他站点 2013 年和 2014 年各类污染的变化情况,本研究选择部分站点进行了 2013 年和 2014 年各类污染物 APEC 期间差值与上半月差值之比(表 4),这些站点包括东四、古城、官园、农展馆和天坛. 由表 4 可以看出:与 2013 年同期相比,强化减排措施对气态一次污染物 SO_2 的减少贡献相对最大,且区域分布比较均匀,总体方差为 0.020; 其次依次为 CO 和颗粒物质量浓度,平均也

达到 77% ,总体方差 0.052; 考虑到北京地区近地层排放 NO_x 的 90% 为 NO , 近地面注入的大量 NO 垂直输送到高空, 输送过程中与大气中的 O_3 反应生成 NO_2 [28, 29], 这样使得 NO_2 在空间分布变化上与其他污染物具有一定差异, 总体方差达 0.108, 高出其它污染物一个量级. 这从另一方面也反映出 NO_2 在北京空间的差异性比较明显; 不同粒径的颗粒物空

间差异性也有所差别, $\text{PM}_{2.5}$ 的空间差异性相对较小, 总体方差仅有 0.004, 而 PM_{10} 的空间差异性则相对较大, 总体方差为 0.021. 考虑到强化减排措施实施期占上半月的 67%, 如果从这个维度进行比较, 显然颗粒物的下降程度并不明显, 说明北京空气污染中的 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源、影响和减排的复杂性, 有待进一步深入研究.

表 3 2013 年和 2014 年 11 月上半月同期及 APEC 强化措施实施期间各种污染物浓度变化/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 3 Variation of pollutants concentration on Nov. 1-15 in 2013 and 2014 and in the implementation period of emission reduction measures during APEC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

时期		$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	NO_2	CO
上半月	2013 年 11 月 1 ~ 15 日	97.07	127.05	26.2	70.82	1.64
	2014 年 11 月 1 ~ 15 日	49.2	76.4	10.52	58.9	0.97
	差值	-47.86	-50.65	-15.67	-11.93	-0.67
APEC 强化减排措施实施期间	2013 年 11 月 3 ~ 12 日	72.14	99.62	23.88	59.68	1.43
	2014 年 11 月 3 ~ 12 日	51.48	77.53	8.72	56.61	0.94
	差值	-20.66	-22.09	-15.16	-3.07	-0.49

表 4 2013 年和 2014 年各类污染物 APEC 强化减排措施实施期间与上半月差值之比

Table 4 Ratio of difference in pollutant concentrations on Nov. 1-15 in 2013 and 2014 and in the implementation period of emission reduction measures during APEC at different sites of Beijing

地点	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	NO_2	CO
奥体	0.43	0.44	0.97	0.26	0.73
东四	0.58	0.37	1.03	0.92	1.28
古城	0.46	0.70	1.43	0.51	0.86
官园	0.54	0.70	1.21	0.71	0.66
农展馆	0.42	0.75	1.15	-0.08	0.68
天坛	0.56	0.64	1.04	0.84	0.65
万寿西宫	0.48	0.76	1.11	0.71	0.52
平均	0.50	0.63	1.14	0.62	0.77
方差	0.004	0.024	0.023	0.126	0.061
总体方差	0.004	0.021	0.020	0.108	0.052
标准差	0.064	0.155	0.153	0.355	0.247
总体标准差	0.059	0.144	0.142	0.328	0.229

表 5 给出的是 2013 年和 2014 年 11 月上半月北京奥体中心 $\text{PM}_{2.5}$ 逐日浓度变化情况, 可以看出, 2014 年与 2013 年相比绝大多数的日均浓度都是在减少, 只有 5 d 的浓度呈现增加, 虽然绝大多数的天数是在减少, 但是仅有的几天增加的幅度明显高于减少的幅度. 例如 2014 年 11 月 4 日 $\text{PM}_{2.5}$ 的日均浓度由 2013 年的 $36.29 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

增加到 2014 年的 $115.14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 增加了 $78.85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (217%), 10 日 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度由 2013 年的 $18.13 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到 2014 年的 $73.65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 增加了 $55.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (306%). 可以看出, 在实施排放控制措施的前提下, 仍能产生较高的污染值, 这与更大范围的污染源及天气扩散条件有不可分割的关系.

表 5 2013 年和 2014 年 11 月上半月 $\text{PM}_{2.5}$ 逐日浓度变化/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 5 Daily concentration of $\text{PM}_{2.5}$ on Nov. 1-15 2013 and 2014/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	日期														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2013 年 11 月	184.5	227.42	49.5	36.29	166.39	102.91	32.24	127.05	94.88	18.13	34	60.04	165.83	64.29	92.54
2014 年 11 月	47.8	6.52	21.86	115.14	68.95	10.43	45.78	73.55	59.45	73.65	40.42	5.59	20.27	35.75	112.89
差值(2014 ~ 2013 年)	-136.7	-220.9	-27.64	78.85	-97.44	-92.48	13.54	-53.5	-35.43	55.52	6.42	-54.45	-145.6	-28.54	20.35
下降比例/%	-74	-97	-56	217	-59	-90	42	-42	-37	306	19	-91	-88	-44	22

3 结论

(1) 2014 年 11 月 1 ~ 15 日共出现 3 次明显的污染过程, 第一次过程污染物累积时间最短, 持续 68 h, 污染物浓度峰值是这 3 次中最高, 达到的 $350 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 强化减排措施实施期间, 污染物平均累积时间延长, 峰值下降; 同时, 后两次污染过程消失很快, 空气质量有明显改善. 由此可见, 2014 年 11 月 3 日起实施的排放源控制措施对空气质量有一定的改善作用.

(2) APEC 强化减排措施期间 (11 月 3 ~ 12 日), 按国家环境质量标准评估奥体中心数据得出, 在此期间, $\text{PM}_{2.5}$ 空气质量均表现出优良, 即出现 APEC 蓝天气. 与世界卫生组织 (WHO) 发布的 24 h 准则值 ($25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 相比, 其中仅有 5 d $\text{PM}_{2.5}$ 的 24 h 平均浓度小于 WHO 空气质量基准值; SO_2 则均小于 WHO 给出的基准值, NO_2 出现几次弱的污染过程; 即我国的空气质量标准与国际标准仍有一定的差别.

(3) 在空气质量为优的天气情况下 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 为 0.42, 良好天气时 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 为 0.68, 轻度和中度污染时为 0.81, 重度污染时为 0.83, 严重污染时为 0.95. 即在优的情况下 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 一般小于 0.50, 随着污染程度的加剧, 比值逐渐增大.

(4) 2014 年与 2013 年同期相比, 空气质量有明显的改善, 强化减排措施的实施, 对颗粒物的减少有一定的贡献, 强化减排措施实施期间减少量是整个 11 月上半月的 43%; SO_2 、 CO 较 2013 年减少效果最显著, 但对 NO_2 相对不明显, 即实施强化减排措施后对污染物减排的排序为 $\text{SO}_2 > \text{CO} > \text{PM} > \text{NO}_2$. 说明北京空气污染的来源及影响复杂, 仍有待进一步加强研究.

参考文献:

- [1] WMO. WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Strategic Plan; 2008-2015 [R]. GAW Research and Monitoring Reports No. 172, WMO TD NO. 1384, 2007.
- [2] 汪光焘, 王晓云, 苗世光, 等. 城市规划大气环境影响多尺度评估技术体系的研究与应用 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, **35**(增刊 I): 145-155.
- [3] Zheng J Y, Zhong L J, Wang T, *et al.* Ground-level ozone in the Pearl River Delta region: analysis of data from a recently established regional air quality monitoring network [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(6): 814-823.
- [4] 徐祥德, 周秀骥, 施晓晖. 城市群落大气污染源影响的空间结构及尺度特征 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, **35**(增刊 I): 1-19.
- [5] 李令军, 王英, 张强, 等. 麦秸焚烧对北京市空气质量影响探讨 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, **38**(2): 232-242.
- [6] 孟晓艳, 余予, 张志富, 等. 2013 年 1 月京津冀地区强雾霾频发成因初探 [J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(1): 190-194.
- [7] 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.
- [8] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考 [J]. 科学通报, 2013, **58**(13): 1178-1187.
- [9] Guo X R, Cheng S Y, Chen D S, *et al.* Estimation of economic costs of particulate air pollution from road transport in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(28): 3369-3377.
- [10] 曹伟华, 梁旭东, 李青春. 北京一次持续性雾霾过程的阶段性特征及影响因子分析 [J]. 气象学报, 2013, **71**(5): 940-951.
- [11] 李婷苑, 邓雪娇, 范绍佳, 等. 2010 年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析 [J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 2932-2938.
- [12] 喻义勇, 谢放尖, 陆晓波, 等. 南京亚青会环境空气质量状况及原因分析 [J]. 环境监控与预警, 2014, **6**(1): 5-9.
- [13] 王占山, 张大伟, 李云婷, 等. 2014 年春节期间北京市空气质量分析 [J]. 环境科学学报, 2015, **35**(2): 371-378.
- [14] 陈敏, 马雷鸣, 魏海萍, 等. 气象条件对上海世博会期间空气质量影响 [J]. 应用气象学报, 2013, **24**(2): 140-150.
- [15] Streets D G, Fu J S, Jang C J, *et al.* Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(3): 480-492.
- [16] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 1-42.
- [17] 胡婧, 程水源, 苏福庆. 北京奥运会及残奥会期间 PM_{10} 质量浓度演变特征及成因 [J]. 环境科学研究, 2009, **22**(12): 1395-1402.
- [18] 王红丽, 陈长虹, 黄海英, 等. 世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究 [J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4151-4158.
- [19] 张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 等. 奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析 [J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2512-2518.
- [20] 吴兑, 廖碧婷, 吴晟, 等. 2010 年广州亚运会期间灰霾天气分析 [J]. 环境科学学报, 2012, **32**(3): 521-527.
- [21] 谢放尖, 李文青, 喻义勇, 等. 南京亚青会空气质量保障回顾性评价及启示 [J]. 环境监控与预警, 2014, **6**(2): 1-4.
- [22] 黄嫣曼, 魏海萍, 段玉森, 等. 上海世博会环境空气质量状况和原因分析 [J]. 中国环境监测, 2013, **29**(5): 58-63.
- [23] 余环, 王普才, 宗雪梅, 等. 奥运期间北京地区卫星监测 NO_2 柱浓度的变化 [J]. 科学通报, 2009, **54**(3): 299-304.
- [24] 蒋德海, 吴兑, 邓雪娇, 等. 2010 年广州亚运限行减排对大气环境的影响 [J]. 热带气象学报, 2012, **28**(4): 527-532.
- [25] Wang X, Westerdahl D, Chen L C, *et al.* Evaluating the air

- quality impacts of the 2008 Beijing Olympic Games: on-road emission factors and black carbon profiles [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(30): 4535-4543.
- [26] 世界卫生组织. 关于颗粒物、臭氧、二氧化氮和二氧化硫的空气质量准则风险评估概要(2005 年全球更新版)[M]. Geneva: WHO Press, 2005.
- [27] 高庆先, 刘俊蓉, 李文涛, 等. 中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1141-1147.
- [28] 唐贵谦. 北京及周边地区奥运时段臭氧时空分布特征数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院大气物理研究所 2010.
- [29] 高文康, 唐贵谦, 姚青, 等. 天津重污染期间大气污染物浓度垂直分布特征[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(7): 731-738.

欢迎订阅 2016 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2016 年为大 16 开本,120 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjlx@rcees.ac.cn;网址:www.hjlx.ac.cn

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 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