

常玲利,邵龙义,杨书申,等. 大气污染综合治理攻坚行动前后北京市 PM_{2.5} 质量浓度变化特征研究[J]. 矿业科学学报,2019,4(6):539-546. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2019.06.009

Chang Lingli,Shao Longyi,Yang Shushen et al. Study on variation characteristics of PM_{2.5} mass concentrations in Beijing after the action for comprehensive control of air pollution [J]. Journal of Mining Science and Technology,2019,4(6):539-546. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2019.06.009

大气污染综合治理攻坚行动前后 北京市 PM_{2.5} 质量浓度变化特征研究

常玲利¹,邵龙义¹,杨书申²,李杰¹,张梦媛¹,冯晓蕾¹,李耀炜¹

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083;

2. 中原工学院能源与环境学院,河南郑州 450007

摘要:基于2013—2017年北京市美国大使馆监测点 PM_{2.5} 质量浓度数据,分析了北京市近5年来 PM_{2.5} 质量浓度的变化特征及其与 NO₂ 和 SO₂ 的关系,重点讨论了2017年秋冬季针对控制散煤燃烧排放实施的以“煤改气”“煤改电”及“错峰生产”等为主的大气污染综合治理攻坚行动后北京市 PM_{2.5} 变化。结果表明,北京市 PM_{2.5} 质量浓度年均值自2013年起呈现逐年降低的趋势,2017年的年均值较2013年降幅达到50%。2013—2016年间,不同季节 PM_{2.5} 质量浓度表现为冬季>秋季>春季>夏季的规律。2017年攻坚行动实施后,冬季 PM_{2.5} 质量浓度明显低于秋季和春季,接近于夏季水平;冬季大气 SO₂ 和 NO₂ 的质量浓度相对于往年亦有大幅度降低,其中 SO₂ 的质量浓度降幅更为明显,表明散煤燃烧排放得到较明显的控制。PM_{2.5} 质量浓度与 SO₂ 均存在显著的正相关性,表明“煤改气”“煤改电”等禁止散煤燃烧政策对降低 PM_{2.5} 具有明显效果。

关键词:PM_{2.5};北京;采暖期;燃煤排放;大气污染综合治理攻坚行动

中图分类号:X 823

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2019)06-0539-08

Study on variation characteristics of PM_{2.5} mass concentrations in Beijing after the action on comprehensive control of air pollution

Chang Lingli¹, Shao Longyi¹, Yang Shushen², Li Jie¹, Zhang Mengyuan¹, Feng Xiaolei¹, Li Yaowei

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083 China;

2. School of Energy & Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou Henan 450007, China

Abstract: Based on the data of the PM_{2.5} mass concentrations from the monitoring point at the US embassy in Beijing from 2013 to 2017, the characteristics of PM_{2.5} mass concentration and its correlation with the mass concentrations of NO₂ and SO₂ in Beijing in the past five years are analyzed. The emphasis is focused on the variation characteristics of PM_{2.5} after the action on comprehensive control of air pollution implemented in the autumn and winter of 2017, which is aimed at the emission reduction from banning of uncontrolled coal combustion. The results show that the annual average of PM_{2.5} mass

收稿日期:2019-01-22

基金项目:国家自然科学基金重大国际合作项目(41571130031);中国矿业大学(北京)越崎学者专项资金;中央高校基本科研业务费专项资金(2010YD09)

作者简介:常玲利(1993—),女,河北成安人,硕士研究生,主要从事大气颗粒物毒性特征的研究工作。Tel:15210737956, E-mail: linglilp@126.com。

通信作者:邵龙义(1964—),男,河南三门峡人,教授,博士生导师,主要从事煤田地质学方面的研究工作。Tel:13910766961, E-mail: ShaoL@cumtb.edu.cn

concentration in Beijing has decreased yearly since 2013, and the decreasing range of the annual average in 2017 has reached 50%. Analysis of data in different seasons shows that the $PM_{2.5}$ mass concentration in winter is the highest, followed by autumn, spring, summer in descending order in 2013 to 2016. However, after the action on comprehensive control of air pollution, it is noticed that the mass concentration of $PM_{2.5}$ in winter 2017 was lower than that in autumn and spring, approaching the level of summer. In addition, compared with the past years, the mass concentrations of NO_2 and SO_2 in the air also decreased significantly in winter 2017, in which the decrease of SO_2 mass concentration is more obvious. These results show that the emission from burning coals has been effectively controlled after the action on comprehensive control of air pollution. Finally, the correlation analysis shows that the mass concentrations of $PM_{2.5}$ has a significant positive correlation with those of SO_2 , indicating that countermeasures for the banning of uncontrolled coal combustion such as “coals replaced by gas” and “coals replaced by electricity” have an obvious effect on reducing the $PM_{2.5}$ emission.

Key words: $PM_{2.5}$; Beijing; heating period; emission from burning coal; the action on comprehensive control of air pollution

$PM_{2.5}$ 也称细颗粒物,是指悬浮在空气中能进入人体呼吸系统、空气动力学当量直径 $2.5 \mu m$ 以下的颗粒物,对大气能见度、公众健康和气候变化有重要的影响^[1-5]。国内外学者围绕大气颗粒物质量浓度的时空分布^[6-7]和理化特征^[8-11]、来源解析^[12-13]、VOCs 的污染特性^[14-15]、气溶胶颗粒物的健康效应^[16-17]、雾霾的形成机制及其演化过程^[18-19]以及大气颗粒物的治理与控制^[20]等开展了大量的研究。

近年来,我国大气污染事件频繁发生,尤其是京津冀地区,引起了社会各界的高度关注^[21-26],北京市大气环境更是国内外专家学者研究的重点。李云燕等^[27]对我国三大区域 $PM_{2.5}$ 来源解析的研究结果表明,北京市 $PM_{2.5}$ 主要来源于机动车排放、燃煤排放、工业生产以及扬尘等,其中机动车和燃煤排放占 53.5%,说明机动车和燃煤排放对 $PM_{2.5}$ 的影响很大。在 2013 年 9 月 10 日“大气十条”实施前,北京市 $PM_{2.5}$ 污染尤为严重,有研究表明^[28],2012 年 10 月到 2013 年 9 月 $PM_{2.5}$ 质量浓度的平均值为 $88.6 \mu g/m^3$,显然,年均值超过国家二级标准值 $75 \mu g/m^3$ 。在“大气十条”正式实施后,北京市实施了减少多污染物排放、加快调整产业结构和增加清洁能源等一系列大气污染综合治理措施,北京市 $PM_{2.5}$ 污染有所缓解。胥密等^[29]分析了北京市 2014 年 $PM_{2.5}$ 日平均值浓度变化情况,结果表明,2014 年北京市 $PM_{2.5}$ 污染较为严重,年均值为 $84 \mu g/m^3$,但是相较于“大气十条”实施前有了一定的改善。“大气十条”实施以来, $PM_{2.5}$ 污染不断减少,但是在 2016 年 $PM_{2.5}$ 质量浓度有所回升。陈锦超等^[30]研究分析北京市 2016 年

$PM_{2.5}$ 质量浓度时空变化,发现 2016 年 $PM_{2.5}$ 年均值浓度为 $119.8 \mu g/m^3$ 。为进一步改善大气环境质量,2017 年 8 月环保部印发《京津冀及周边地区 2017—2018 年秋冬季节大气污染综合治理攻坚行动方案》(以下简称大气污染综合治理攻坚行动),采取了一系列控制大气污染的措施,包括京津冀及其周边地区的钢铁化铸造行业实施部分错峰生产、整治“散乱污”企业和“气代煤”等。大气污染综合治理攻坚行动方案实施后,北京市大气环境有了很大的改善。因此,对大气污染综合治理攻坚行动实施前后北京市 $PM_{2.5}$ 质量浓度的变化特征进行研究分析,可为今后大气污染防治提供有力的科学参考和相应的数据支撑。

本文通过分析从 2013—2017 年的 $PM_{2.5}$ 颗粒物浓度以及 2015—2018 年大气 NO_2 和 SO_2 质量浓度,较为系统地揭示了大气污染综合治理攻坚行动前后北京市 $PM_{2.5}$ 质量浓度以及 NO_2 和 SO_2 质量浓度的变化特征,且通过研究 $PM_{2.5}$ 质量浓度与大气 NO_2 和 SO_2 质量浓度的相关性,分析通过控制燃煤排放对降低 $PM_{2.5}$ 的影响。

1 数据来源

数据采用美国大使馆空气质量在线监测分析平台 (<http://www.young-0.com/airquality/>) 公布的北京市 2013 年 3 月 1 日至 2018 年 3 月 15 日每小时 $PM_{2.5}$ 质量浓度值,再通过算数平均计算 $PM_{2.5}$ 日均值,在日均值基础上算出月均值、季均值以及年平均值。大气 NO_2 和 SO_2 质量浓度值来源于北京市环境保护监测中心 (<http://www.bjmemc.com.cn/>),同样运用算数平均计算

NO₂ 和 SO₂ 质量浓度的月均值。

2 结果与分析

2.1 PM_{2.5} 质量浓度变化

2.1.1 年际变化

从2013—2017年北京市PM_{2.5}质量浓度日均值变化(图1)分析可知,PM_{2.5}质量浓度在春夏季节出现谷值,而在秋冬季节,PM_{2.5}质量浓度则偏高,出现峰值。在大气污染治理攻坚行动实施后,2017年秋冬季节PM_{2.5}质量浓度大幅度降低。

从北京市监测站点观测2013—2017年PM_{2.5}质量浓度的逐年变化(图2)可以看出,“大气十条”实施4年以来,PM_{2.5}质量浓度的年均值分别是99 μg/m³、91 μg/m³、76 μg/m³、80 μg/m³、49 μg/m³,2017年PM_{2.5}年均值较2013年降幅达到50.5%。依照《环境空气质量标准》(GB 3095—2012),PM_{2.5}质量浓度日均值二级标准75 μg/m³,从2013—2017年,全年日均值超标率依次是51.2%、47.4%、34.7%、38.1%、18.6%,说明北京市PM_{2.5}质量浓度在2013—2017年明显下降,空气质量得到持续改善。

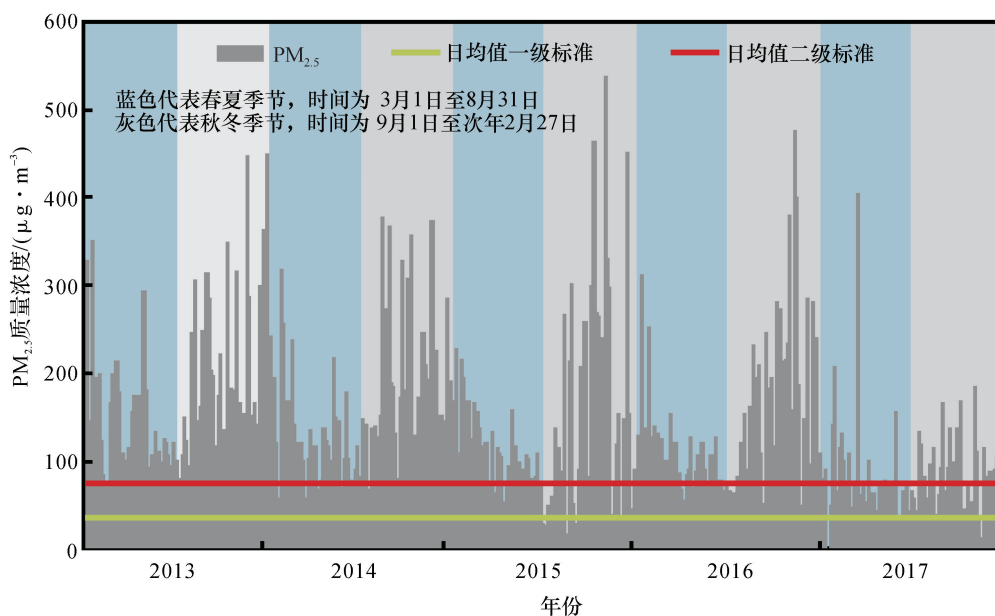


图1 2013—2017年PM_{2.5}质量浓度日均值变化

Fig. 1 Variation of the daily average PM_{2.5} mass concentrations from 2013 to 2017

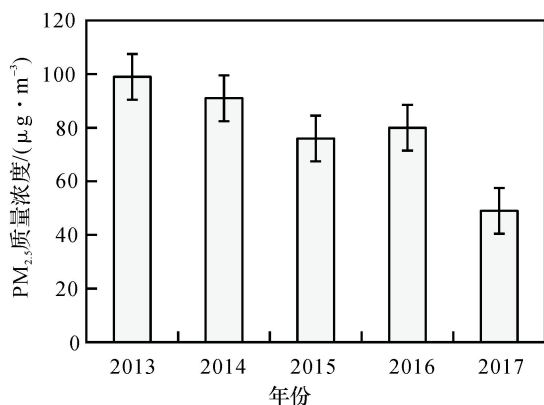


图2 2013—2017年PM_{2.5}质量浓度年均值

Fig. 2 The annual average of the PM_{2.5} mass concentrations from 2013 to 2017

图3给出了2013—2017年PM_{2.5}质量浓度在不同浓度等级所占比例。可见,5年来优良天气所占百分比不断增加,依次是48.8%、52.6%、

65.8%、62.2%、82%;空气质量污染天数(PM_{2.5}日均浓度超过标准限值75 μg/m³)所占百分比不断降低,2017年全年污染天数占总天数的仅有18.3%。2013—2017年空气质量持续得到改善,表明北京市相继实施的《2013—2017年清洁空气行动计划》《北京市大气污染防治条例》《京津冀及周边地区2017—2018年秋冬季节大气污染综合治理攻坚行动方案》等措施取得了显著成效。

2.1.2 季节变化

北京市PM_{2.5}质量浓度的季节变化如图4所示。可见一年中PM_{2.5}质量浓度的季节变化大致呈现“中间低、两边高”的V形分布。

2013—2016年,PM_{2.5}质量浓度的季平均浓度特征依次为冬季>秋季>春季>夏季,这与胥密等^[29]对2014年PM_{2.5}质量浓度变化特征的研究结果相一致。原因可能是冬季采暖,导致PM_{2.5}浓度

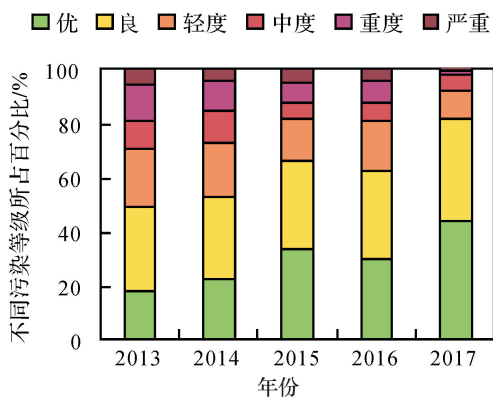


图3 2013—2017年不同污染等级所占百分比

Fig. 3 Relative percentages of the days with different pollution levels from 2013 to 2017

增加,且冬季气温低、地面有效辐射变弱,容易导致逆温现象,不利于PM_{2.5}的扩散。而2017年秋冬季采取的一系列控制大气污染的措施以及有利的气象条件,使得北京市秋冬季节的空气质量得到明显改善,PM_{2.5}的质量浓度季平均浓度低于春季,但依旧高于夏季。

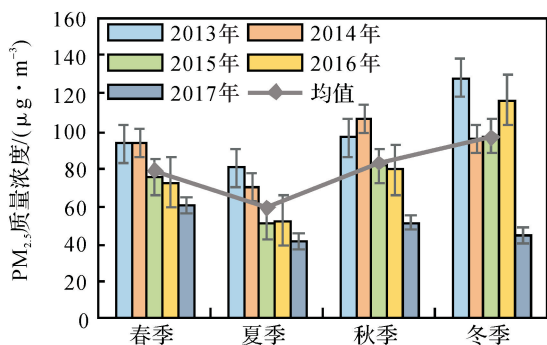


图4 2013—2017年不同季节PM_{2.5}质量浓度

Fig. 4 Comparison of the mass concentration of PM_{2.5} among different seasons from 2013 to 2017

进一步分析2013—2017年不同季节PM_{2.5}的质量浓度日均值超标率逐年变化特征(图5),结果表明,不同季节的PM_{2.5}日均值超标率整体处于下降趋势,而2016年秋冬季节的日均值超标率相比2015年有明显升高,在2017年大气污染治理攻坚行动实施后,2017年秋冬季节的超标率又有明显降低。除此之外,2013—2017年每年的夏季日均值超标率均低于其他季节,这一结果与夏季PM_{2.5}质量浓度最低相吻合。

2.1.3 采暖期与非采暖期变化

多年以来,北京市冬季大气污染与煤的燃烧排放有很大的关系,尤其是对于通常用燃煤取暖、做饭的北部郊区及农村地区^[31]。北京市2013—2017

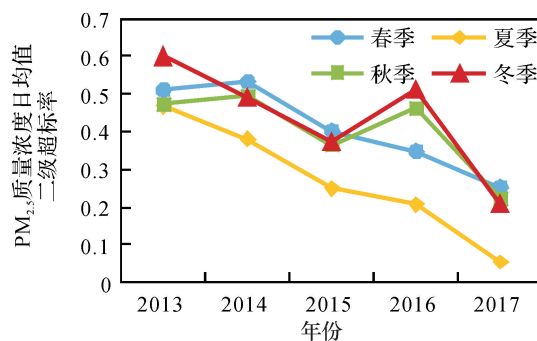


图5 2013—2017年PM_{2.5}质量浓度日均值高于国家二级标准的天数所占全年百分比

Fig. 5 Annual percentages of the days with PM_{2.5} mass concentrations higher than the national second standard from 2013 to 2017

年采暖期(11月15日到次年3月15日)与非采暖期(3月16日到11月14日)的PM_{2.5}质量浓度均值对比分析如图6所示。

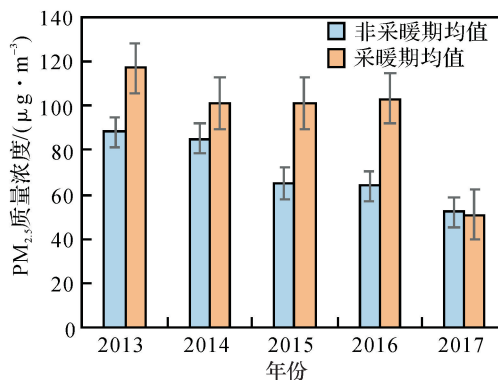


图6 2013—2017年采暖期与非采暖期PM_{2.5}质量浓度均值对比

Fig. 6 Comparison of mass concentration of PM_{2.5} between the heating period and non-heating period from 2013 to 2017

由图6可知,2013—2016年北京市采暖期的PM_{2.5}质量浓度均高于非采暖期。而2017年采暖期PM_{2.5}质量浓度低于非采暖期,且采暖期PM_{2.5}质量浓度较2013年降幅达到56%。这主要是大气污染综合治理攻坚行动方案实施的结果,且2017年冬季气象条件相比前几年也是更有利于污染物的扩散。综合多种因素,北京市2017年采暖期空气质量得到很大的改善。

2.2 气态污染物浓度变化

空气中气态污染物主要包括SO₂、NO₂、O₃、CO等。已有研究表明,SO₂主要来源于燃煤排放^[32],NO₂主要来源于机动车排放,仅有一小部分来源于

燃煤排放^[33]。图7显示了2015—2018年NO₂和SO₂质量浓度的月均值变化趋势。可见,“大气十条”实施以来无论是NO₂还是SO₂的质量浓度,每年月均值的最高值均有所下降,特别是在2017年8月大气污染防治攻坚行动实施后,2017年冬季以及2018年SO₂和NO₂的质量浓度有所降低。其

中,SO₂的质量浓度降幅更为明显,年均值降幅达到54%;但NO₂降幅不大,这可能是由于燃煤排放对SO₂的影响较大,而NO₂主要受机动车排放的影响。这就表明,大气污染防治攻坚行动实施后,控制燃煤排放主要是对降低SO₂污染的效果明显,下一步应考虑控制机动车排放对大气的污染。

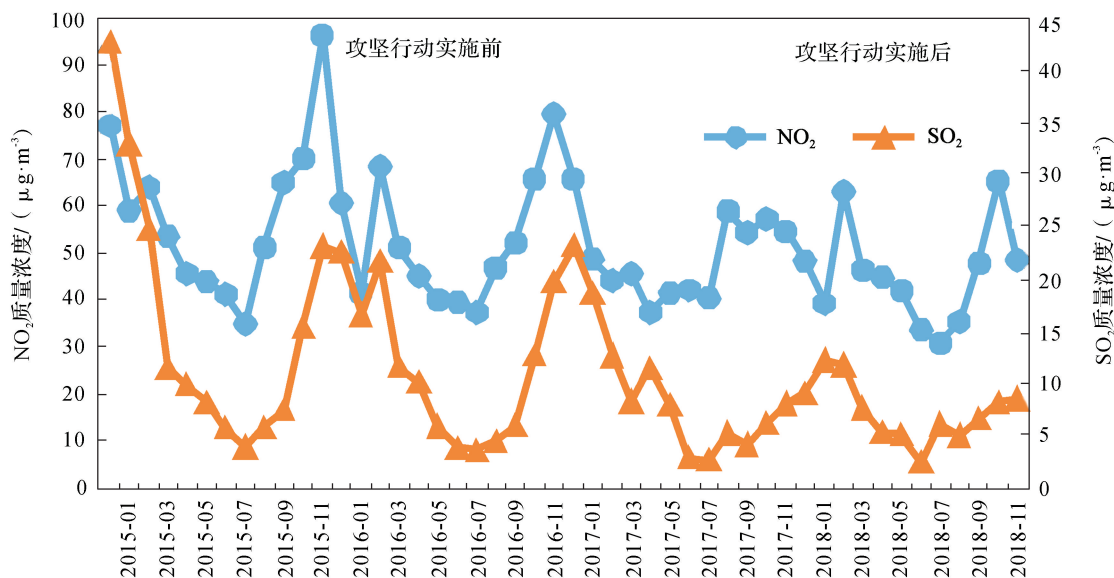


图7 2015—2018年NO₂和SO₂质量浓度的月均值

Fig. 7 The monthly mean values of the mass concentrations of NO₂ and SO₂ from 2015 to 2018

3 讨论

经长时间序列分析北京市PM_{2.5}质量浓度的时间变化,北京市PM_{2.5}质量浓度逐年降低,并且在2017年8月实施《大气污染防治攻坚行动方案》后,2017年秋冬季节的PM_{2.5}质量浓度有很

明显的改善。为进一步研究不同污染源对PM_{2.5}的来源贡献变化,分析了PM_{2.5}质量浓度与NO₂和SO₂的关系(图8),间接分析大气污染防治攻坚行动中禁止散燃煤排放政策对降低PM_{2.5}污染的影响。

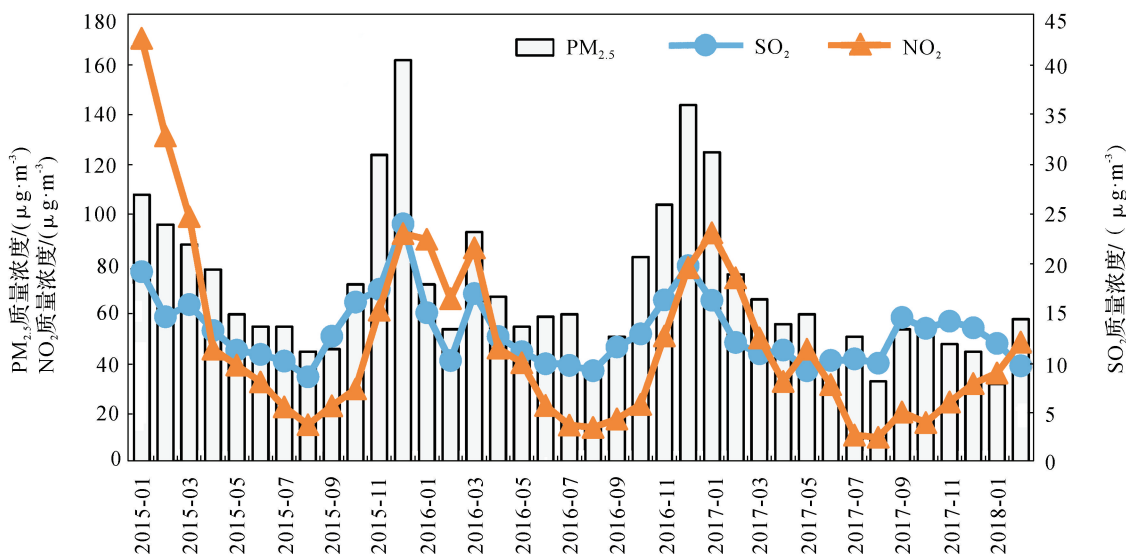


图8 PM_{2.5}质量浓度与NO₂和SO₂质量浓度之间的关系

Fig. 8 The relationship among the mass concentrations of PM_{2.5}, NO₂ and SO₂

由图8可以明显看出,PM_{2.5}与NO₂、SO₂之间存在良好的相关性,当空气中NO₂和SO₂的质量浓度升高时,PM_{2.5}的质量浓度随之增加。PM_{2.5}质量浓度与NO₂和SO₂之间的相关系数在0.01显著水平上分别为0.864和0.688,均表现为明显的正相关关系。SO₂主要来源于燃煤排放,NO₂主要来源于机动车排放,燃煤排放和机动车排放是北京市PM_{2.5}的两个主要来源。2017年秋冬季节SO₂质量浓度较2015年降幅达到54%,间接说明北京市大气污染治理攻坚行动实施后,以“煤改气”“煤改电”等禁止散煤燃烧政策对降低PM_{2.5}有明显的效果。

4 结 论

对北京市大气污染综合治理攻坚行动前后PM_{2.5}随时间的变化特征进行了相关分析,结果表明:

(1) 北京市PM_{2.5}质量浓度年均值自2013年起呈现逐年降低的趋势,2017年年均值降幅达到50%。2013—2017年优良天气天数逐年增多,2017年日均值超标率仅有18.6%。

(2) 2013—2016年,不同季节PM_{2.5}质量浓度表现为冬季>秋季>春季>夏季,且采暖期的PM_{2.5}质量浓度均高于非采暖期;在大气污染治理攻坚行动实施后,2017年冬季PM_{2.5}质量浓度则低于秋季和春季,2017年采暖期PM_{2.5}质量浓度也低于非采暖期。

(3) 2015—2018年,无论是NO₂还是SO₂的质量浓度,其月均值的最高值均有所下降;大气污染治理攻坚行动实施后,2017年冬季SO₂和NO₂的质量浓度有大幅度降低,其中SO₂的质量浓度降幅更为明显,年均值降幅达到54%。PM_{2.5}质量浓度与NO₂和SO₂均存在显著的正相关性,表明大气污染治理攻坚行动中禁止散煤燃烧的政策对降低PM_{2.5}污染有明显效果。

参考文献

- [1] 吴兑,刘放汉,梁延刚,等. 粤港细粒子(PM_{2.5})污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J]. 环境科学学报,2012,32(11):2660-2669.
Wu Dui, Liu Fanghan, Liang Yangang, et al. Hazy weather formation and visibility deterioration resulted from fine particulate (PM_{2.5}) pollutions in Guangdong and Hongkong [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(11):2660-2669.
- [2] Kan Haidong, Chen Renjie, Tong Shilu. Ambient air pollution, climate change, and population health in China [J]. Environment International, 2012, 42(1):10-19.
- [3] 杨新兴,冯丽华,尉鹏. 大气颗粒物PM_{2.5}及其危害[J]. 前沿科学,2012(1):22-31.
Yang Xinxing, Feng Lihua, Wei Peng. Air particulate matter PM_{2.5} in Beijing and its harm [J]. Frontier Science, 2012(1):22-31.
- [4] 王京丽,刘旭林. 北京市大气细粒子质量浓度与能见度定量关系初探[J]. 气象学报, 2006, 64(2):95-102.
Wang Jingli, Liu Xulin. The discuss on relationship between visibility and mass concentration of PM_{2.5} in Beijing [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 64(2):95-102.
- [5] Pui D H Y, Chen Shengchieh, Zuo Zhili. PM_{2.5} in China: measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation [J]. Particuology, 2014, 13(2):1-26.
- [6] He Kebin, Huo Hong, Zhang Qiang. Urban air pollution in China: current status, characteristics, and progress [J]. Annual Review of Energy & the Environment, 2011, 27(1):397-431.
- [7] 李广德,李效文. 北京市区春夏PM_{2.5}和PM₁₀浓度变化特征研究[J]. 环境科学与管理,2013,38(5):52-56.
Li Guangde, Li Xiaowen. Variation characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ concentration in Beijing urban areas during spring and summer [J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(5):52-56.
- [8] 王文华,邵龙义,李泽熙,等. 2013年1月京津唐地区霾事件气溶胶单颗粒形貌及硫酸盐化特征[J]. 岩石矿物学,2015,34(6):914-924.
Wang Wenhua, Shao Longyi, Li Zexi, et al. Morphologies and sulfation characteristics of individual aerosol particles in the haze episode over the Beijing-Tianjin-Tangshan area in January 2013 [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2015, 34(6):914-924.
- [9] Niu Hognya, Cheng Wenjing, Hu Wei, et al. Characteristics of individual particles in a severe short-period haze episode induced by biomass burning in Beijing [J]. Atmospheric Pollution Research, 2016, 7(6):1072-1081.
- [10] Shao Longyi, Hu Ying, Fan Jingsen, et al. Physicochemical characteristics of aerosol particles in the Tibetan Plateau: insights from TEM-EDX analysis [J]. Journal of Nanoscience & Nanotechnology, 2017, 17(9):6899-6908.
- [11] Ji Hongbing, Ding Huaijian, Tang Lei, et al. Chemical

- composition and transportation characteristic of trace metals in suspended particulate matter collected upstream of a metropolitan drinking water source, Beijing [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 169: 123-136.
- [12] 周静博,李治国,路娜,等. 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[J]. *环境科学*, 2016, 37(8): 2855-2862.
- Zhou Jingbo, Li Zhiguo, Lu Na, et al. Online sources about atmospheric fine particles during the 70th anniversary of victory parade in Shijiazhuang [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(8): 2855-2862.
- [13] 姜国,袁明浩,李梅,等. 沙尘天气细粒子污染快速来源解析初步研究[J]. *绿色科技*, 2017(16): 35-38.
- Jiang Guo, Yuan Minghao, Li Mei, et al. A preliminary study on rapid source appropriate of fine particles pollution in dust weather [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2017(16): 35-38.
- [14] 吕志勇,梁胜文,白石,等. VOCs 在线监测系统与SUMMA 罐采样-气质联用法的比对分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2017, 29(5): 40-43.
- Lü Zhiyong, Liang Shengwen, Bai Shi, et al. Comparison analysis of on-line VOCs monitoring system and SUMMA canister sampling-GC-MS [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2017, 29(5): 40-43.
- [15] 王琴,刘保献,张大伟,等. 北京市大气 VOCs 的时空分布特征及化学反应活性[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(10): 3636-3646.
- Wang Qin, Liu Baoxian, Zhang Dawei, et al. Temporal and spatial distribution of VOCs and their role in chemical reactivity in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(10): 3636-3646.
- [16] 郭茜,邵龙义,王文华,等. 2014年APEC期间北京市PM₁₀和PM_{2.5}氧化性损伤能力研究[J]. *环境科学*, 2016, 37(10): 3708-3713.
- Guo Qian, Shao Longyi, Wang Wenhua, et al. Oxidative capacity of the PM₁₀ and PM_{2.5} in Beijing during 2014 APEC [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(10): 3708-3713.
- [17] Xiao Zhenghui, Shao Longyi, Zhang Ning, et al. A toxicological study of inhalable particulates in an industrial region of Lanzhou city, northwestern China: results from plasmid scission assay [J]. *Aeolian Research*, 2014, 14: 25-34.
- [18] 张兴坤,张吉光. 雾霾天气的成因分析与防治对策研究[J]. *环境科学与管理*, 2016, 41(8): 82-85.
- Zhang Xingkun, Zhang Jiguang. Analysis and countermeasures of causes for fog and haze [J]. *Environmental Science and Management*, 2016, 41(8): 82-85.
- [19] 杨书序. 雾霾形成的物理机制及灰霾的控制[J]. *环境与发展*, 2016, 28(3): 54-57.
- Yang Shuxü. The physical mechanism of fog and haze formation and the haze control [J]. *Environment and Development*, 2016, 28(3): 54-57.
- [20] 孙亮. 灰霾天气成因危害及控制治理[J]. *环境科学与管理*, 2012, 37(10): 71-75.
- Sun Liang. Hazard and treatment of haze weather [J]. *Environmental Science and Management*, 2012, 37(10): 71-75.
- [21] Cheng Shuiyuan, Lang Jianlie, Zhou Ying, et al. A new monitoring-simulation-source apportionment approach for investigating the vehicular emission contribution to the PM_{2.5} pollution in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79(7): 308-316.
- [22] Liu Zirui, Hu Bo, Wang Lili, et al. Seasonal and diurnal variation in particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) at an urban site of Beijing: analyses from a 9-year study [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22(1): 627-642.
- [23] Wang Wenhua, Shao Longyi, Xing Jiaoping, et al. Physicochemical characteristics of individual aerosol particles during the 2015 China Victory Day Parade in Beijing [J]. *Atmosphere*, 2018, 9(2): 1-10.
- [24] Wang Wenhua, Shao Longyi, Guo Menglong, et al. Physicochemical properties of individual airborne particles in Beijing during pollution periods [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, 17(12): 3209-3219.
- [25] 骞炜. 邯郸城区霾污染过程降尘与飘尘颗粒物的单颗粒特征[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2016.
- [26] 张云芝,阿拉腾·图娅,戴昭鑫,等. 基于地面监测数据的2014年京津冀地区PM_{2.5}时空分布研究[J]. *环境污染与防治*, 2016, 38(12): 31-37.
- Zhang Yunzhi, Alateng Tuya, Dai Zhaoxin, et al. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei region based on the ground monitoring data in 2014 [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, 38(12): 31-37.
- [27] 李云燕,葛畅. 我国三大区域PM_{2.5}源解析研究进展[J]. *现代化工*, 2017, 37(4): 7-11.
- Li Yunyan, Ge Chang. Research progress of PM_{2.5} source analysis in three main regions of China [J]. *Modern Chemical Industry*, 2017, 37(4): 7-11.
- [28] Li Runkui, Li Zhipeng, Gao Wenju, et al. Diurnal, seasonal, and spatial variation of PM_{2.5} in Beijing [J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(3): 387-395.

- [29] 胥密,王广甫,尚宏忠,等. 北京市2014年 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征[J]. 环境工程学报,2016,10(8):4396-4402.
Xu Mi, Wang Guangfu, Shang Hongzhong, et al. Characterization of $PM_{2.5}$ mass concentration of Beijing in 2014 [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(8):4396-4402.
- [30] 陈锦超,董雪玲,张婉,等. 北京市霾天 $PM_{2.5}$ 污染特征及其与气象因素的关系[J]. 环境科学与技术,2018,41(8):87-94.
Chen Jinchao, Dong Xueling, Zhang Wan, et al. Characteristics of $PM_{2.5}$ in haze days in Beijing and its relationship with meteorological factors [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(8):87-94.
- [31] Li Weijun, Shi Zongbo, Zhang Daizhou, et al. Haze particles over a coal-burning region in the China Loess Plateau in winter: Three flight missions in December 2010 [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2012, 117(D12):n/a-n/a.
- [32] 赵凌卓. 大连市“十五”期间大气环境中 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 污染状况分析[J]. 辽宁城乡环境科技,2007,27(3):44-46.
Zhao Lingzhuo. Analysis of pollution situation of SO_2 , NO_2 , PM_{10} in air [J]. Liaoning Urban and Environmental Science & Technology, 2007, 27(3):44-46.
- [33] 姚森,韩力慧,程税源,等. 采暖季北京市主要大气污染物变化特征[J]. 北京工业大学学报,2016,42(11):1741-1749.
Yao Sen, Han Lihui, Cheng Shuiyuan, et al. Characteristics of main atmospheric pollutants in heating season of Beijing [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(11):1741-1749.

(责任编辑:陈贵仁)