

北京市传统春节假期空气质量特征研究

张 章¹,刘保献^{1,2},安欣欣¹,董 欣¹,王 琴¹,姚 欢¹,孙瑞雯¹,李云婷^{1*} (1.北京市生态环境监测中心,大气颗粒物监测技术北京市重点实验室,北京 100048; 2.清华大学环境学院,北京 100084)

摘要: 利用 2013~2020 年北京市传统春节假期期间主要污染物浓度、PM_{2.5} 主要离子组分浓度及气象数据,研究近年烟花爆竹集中燃放对北京市空气质量的影响。结果表明,自 2018 年北京市加强对烟花爆竹燃放的管控后,空气质量显著改善,其中 2019 年传统春节假期中共 7 个优良天,占比达 87.5%,且未出现中度及以上级别污染天;近 3 年除夕期间的 PM_{2.5} 峰值浓度显著降低,与近 8 年最高值相比(2016 年 699 μg/m³),降幅分别为 61.1%、74.7% 和 71.4%。此外,一方面,近年除夕期间 SO₂、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度突增倍数显著降低,由 2013 年的 1.31、1.37 和 0.92 降低至 2020 年的 0.08、0.14 和 0.02。另一方面,与烟花燃放相关的一次离子组分浓度增长倍数及对 PM_{2.5} 及其组分的贡献率逐年降低,说明近年烟花燃放对空气质量的影响缩减明显。2020 年传统春节假期期间,不利的气象条件使烟花燃放污染无法完全消散,同时加剧本地污染物积累和区域污染物输送,导致出现连续 3d 的重污染过程。因此,严苛的禁限放措施、有利的气象条件、低水平的周边区域污染物浓度对北京市传统春节假期的空气质量至关重要。

关键词: 传统春节假期; 烟花燃放; 气象条件; 区域污染物输送; PM_{2.5}

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)01-0102-12

A study on the air quality in Beijing during the Spring Festival. ZHANG Zhang¹, LIU Bao-xian^{1,2}, AN Xin-xin¹, DONG Xin¹, WANG Qin¹, YAO Huan¹, SUN Rui-wen¹, LI Yun-ting^{1*} (1.Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology of Beijing, Beijing Municipal Ecological and Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 2.School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China). China Environmental Science, 2021,41(1): 102~113

Abstract: This study investigated the influence of fireworks on air quality by using the concentrations of major pollutants and PM_{2.5} components and meteorological conditions during the Spring Festival in Beijing from 2013 to 2020. The results suggest that air quality improved significantly due to strict control on fireworks since 2018. In particular, 87.5% (seven days) of the days during the 2019 Spring Festival achieved the good and excellent air quality standards, and no heavy polluted days occurred. The maximum PM_{2.5} concentration during the New Year's eve decreased sharply in recent three years, falling by 61.1%, 74.7% and 71.4%, respectively, compared to the highest concentration of 699 μg/m³ in 2016. Besides, the sudden increase rates of SO₂, PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations were reduced from 1.31, 1.37 and 0.92 in 2013 to 0.08, 0.14 and 0.02 in 2020. Further, the concentration of primary ion components from fireworks to PM_{2.5} decreased significantly thus confirming the reduction in impact of fireworks on air quality in recent years. During the Spring Festival in 2020, adverse meteorological conditions prohibited fireworks pollution dispersion, and aggravated the local pollution accumulation and regional transport, resulting in three-day heavy pollution event. Therefore, the strict control of fireworks, optimal meteorological conditions, and low levels of pollution in the surrounding area are crucial to the air quality in Beijing during the Spring Festival.

Key words: the Spring Festival; fireworks; meteorological condition; regional transport of pollutants; PM_{2.5}

近年来,京津冀区域频现主要由细颗粒物(PM_{2.5})造成的雾霾等一系列大气污染问题^[1~3],公众对于良好空气质量的需求日益迫切^[4~6]。然而在春节期间,烟花爆竹的集中燃放将会造成环境空气中 SO₂、NO₂ 等气态污染物和 PM_{2.5}、PM₁₀ 等颗粒物的浓度显著增加^[7~8],使空气质量迅速恶化^[9~14]。据报道,2014 年除夕期间,北京市官园、怀柔、良乡监测站点的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度分别达到当年 1、2 月份的 1.5~3.2 倍和 2.0~3.6 倍,监测中心站点初一凌晨 1:00 的能见度降低到仅为 1、2 月份均值的 22.9%^[15]。王占山等^[16]对 2015 年春节期间的空气质量进行分析,结果表明

PM_{2.5} 组分中的硫酸盐、氯离子和钾离子受烟花爆竹燃放影响显著,3 种组分的峰值浓度达到观测期间均值的 4.5~10.5 倍。经过计算发现,除夕、初五和元宵节的烟花爆竹集中燃放对二氧化硫、细颗粒物及其 3 种组分的贡献率在 30.1%~78.4% 范围内。Zhang 等^[17]对北京市 2015 年春节期间细颗粒物的组分进行分析,结果表明烟花爆竹的燃放使钾离子和氯离子的

收稿日期: 2020-06-09

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0208900);首都蓝天行动培育课题(Z191100009119004)

* 责任作者, 高级工程师, lee_yunting@163.com

占比明显升高,此外离子平衡计算结果显示烟花爆竹的燃放导致 $PM_{2.5}$ 的酸度升高.Feng 等^[18]针对新乡 2015 年春节期间空气质量的研究发现,由于假日效应导致除 K、Cl、Mg、Al、Fe、K 以外的组分均呈现降低现象,而上述组分在烟花爆竹集中燃放的影响下出现短时段升高趋势.此外,重金属致癌风险明显超过临界值,进一步证实燃放烟花爆竹对人体健康将会造成严重危害.虽然春节期间的烟花爆竹集中燃放将在短时内向环境空气释放大量污染物,但是当一次污染物进入大气环境后,其扩散传输及二次转化主要依靠气象条件,因此气象条件对于污染的持续或清除至关重要^[19].相关研究表明,由于 2014 年元宵节期间的大气扩散条件不利,导致 $PM_{2.5}$ 峰值浓度高于除夕夜集中燃放时段且污染持续时间较长,由此可见春节期间的气象条件对空气质量的影响不容忽视^[20].

由于春节期间燃放烟花爆竹是中华民族的传统习俗,为了平衡公众对于节日气氛和空气质量的需求,北京市近年相继出台了一系列烟花爆竹安全管理规定.2017 年 12 月 1 日起将五环路以内(含五环路)区域由限制燃放修改为禁止燃放烟花爆竹的区域,2019 年五环路外在大兴区、延庆区、昌平区增划了禁放区域,2020 年大兴区、延庆区、顺义区和平谷区进一步新增禁放区,其中大兴区实行全区禁止燃放烟花爆竹.逐年严苛的烟花爆竹管控措施,使近年北京市春节期间的烟花爆竹燃放污染源排放量锐减.

本文利用 2013~2020 年北京市大气污染物浓度、 $PM_{2.5}$ 组分、气象条件等数据对近 8 年北京市传统春节假期的空气质量进行深入研究,在对空气质量整体情况进行分析的基础上,采用浓度特征比对法定量估算烟花爆竹燃放对 $PM_{2.5}$ 及其组分的贡献,进一步结合气象条件的变化,探讨其对传统春节假期空气质量及烟花爆竹燃放污染消散的影响,综合对 2020 年传统春节假期重污染过程的成因分析,更好的为北京市春节期间的大气污染防治工作提供技术保障和管理支撑.

1 资料来源与研究方法

1.1 监测点位与研究时间

大气污染物浓度数据来源为北京市东城东四、

天坛,西城官园、万寿西宫,朝阳农展馆、奥体中心,海淀万柳,石景山古城,昌平镇,怀柔镇,顺义新城共 11 个点位的浓度均值; $PM_{2.5}$ 组分数据来源为北京市生态环境监测中心综合观测实验平台;气象数据来源于北京市南郊观象台.具体研究时间,包括:传统春节假期(除夕至初七);冬季(12 月至次年 2 月).

1.2 研究方法

利用浓度特征对比法计算烟花爆竹燃放贡献率^[15~16,21],由于 NH_4^+ 受烟花爆竹燃放影响较小,选取该组分作为参考指标对 $PM_{2.5}$ 及其主要离子组分进行分析,定量计算烟花爆竹燃放的贡献率.

2 结果与讨论

2.1 近年北京市传统春节假期空气质量情况

2.1.1 空气质量级别天数分布 近 8 年北京市传统春节假期的空气质量级别天数分布如图 1 所示,在 2013~2017 年未实行严苛的烟花爆竹禁限放措施期间,北京市传统春节假期的优良天数为 3~4d,除 2014 年外均出现 2d 重污染,其中 2013 年和 2017 年各出现 1d 严重污染.自 2018 年起,北京市对于烟花爆竹燃放的管控力度日益加强,在源排放水平锐减的影响下,连续 2 年未出现重污染日,2019 年的优良天数显著增加至 7d,占比达 87.5%,且未出现中度及以上级别污染天,空气质量明显改善.然而,2020 年传统春节假期的空气质量明显恶化,其中优良天数缩减至 3d,重污染天数达到近 8 年最多的 3d.

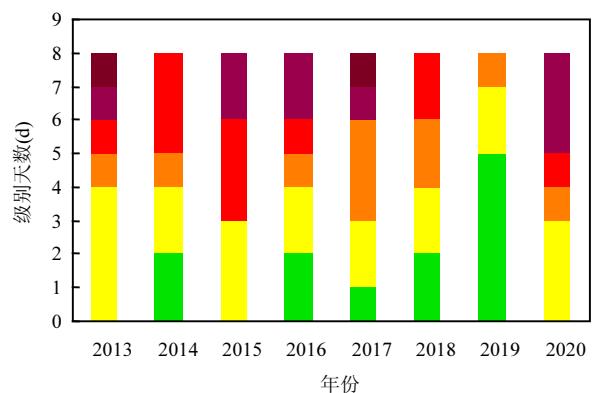


图 1 2013~2020 年北京市传统春节假期空气质量级别天数分布

Fig.1 The days of different air quality levels during the Spring Festival in Beijing from 2013 to 2020

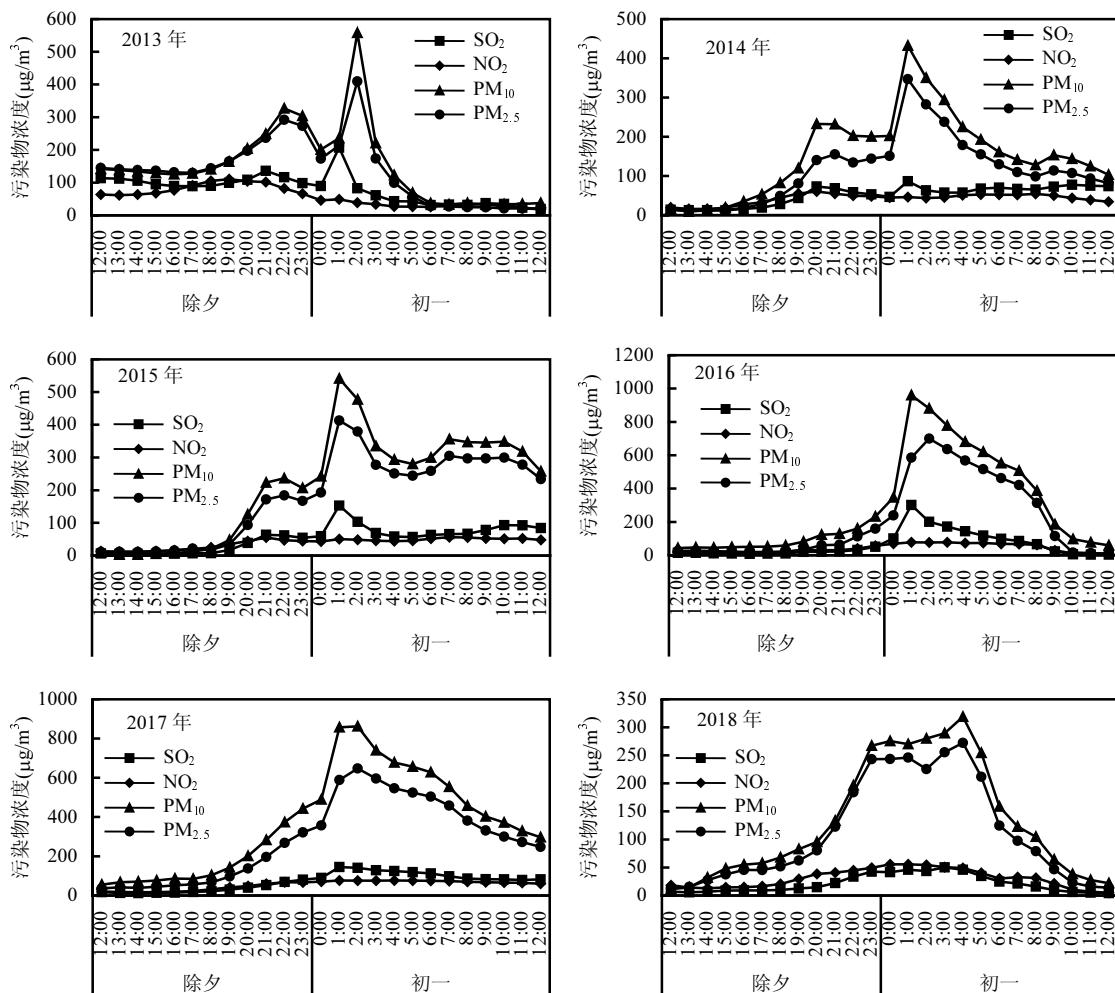
■ 优 ■ 良 ■ 轻度污染 ■ 中度污染 ■ 重度污染 ■ 严重污染

2.1.2 除夕烟花爆竹燃放对主要污染物浓度的影

响 由于受到除夕夜间烟花爆竹集中燃放的影响,主要污染物浓度出现短时激增并于初一凌晨达到峰值,以PM_{2.5}为例,2013~2015年的峰值浓度基本稳定于400μg/m³左右,2016年和2017年激增至近700μg/m³,管控力度的逐年加强使近3年PM_{2.5}峰值浓度大幅降低,与近8年最高值699μg/m³(2016年)相比,降幅分别为61.1%、74.7%和71.4%,且2019和2020年均未达到严重污染级别。此外,以SO₂为代表的气态污染物、以PM₁₀为代表的粗颗粒物在除夕期间的浓度变化趋势及峰值浓度出现的时间基本一致,说明同样受到烟花爆竹燃放的显著影响。由图2可见,2013~2015年的主要污染物浓度变化整体呈现“双峰”特征,除夕前夜随烟花爆竹的开始燃放各项污染物浓度出现第一个高峰,后半夜更加集中的燃放将污染物浓度再次推高。然而随后几年的污染物浓度变化趋势发生明显改变,2016~2020年除夕夜前期,各项污染物浓度呈现缓慢攀升趋势,后期随烟花爆竹集中燃放将浓度推向峰值,整体呈现“单峰”特

征,其中2018~2019年达到峰值浓度时刻前的浓度增长速率明显降低。通过对主要污染物峰值浓度及前一时刻浓度进行比较,结果显示(表1),SO₂、PM₁₀和PM_{2.5}的浓度增长倍数分别为0.08~1.98倍、0.01~1.77倍和0.02~1.29倍,其中SO₂的小时浓度上升幅度基本高于颗粒物,说明气态污染物SO₂受烟花爆竹燃放的影响相对更大,在颗粒物方面,粒径较大的PM₁₀受到的影响相对更大。此外,2017~2020年3种污染物的浓度突变涨幅与前4年相比明显降低,SO₂由2016年的近8年最大倍数1.98降至2020年的近8年最小倍数0.08,PM₁₀由2016年的近8年最大倍数1.77降至2020年0.14,PM_{2.5}由2014年的近8年最大倍数1.29降至2020年的近8年最小倍数0.02。

这种污染物浓度缓慢升高且呈现“单峰”特征的现象一方面与浓度突变涨幅降低对应,另一方面证实近年来禁放区域扩大、燃放量减少等因素对除夕期间的空气质量产生明显影响。



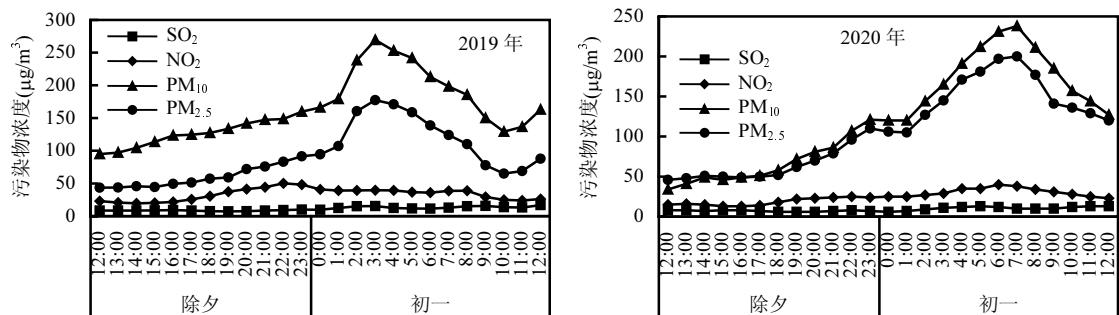


图 2 2013~2020 年除夕期间主要污染物浓度变化

Fig.2 The concentration of major pollutants during the New Year's eve in 2013~2020

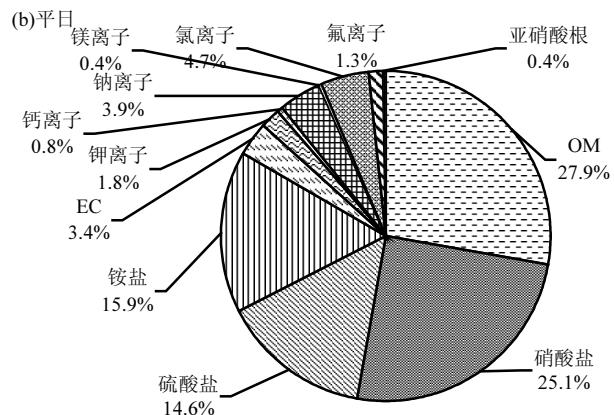
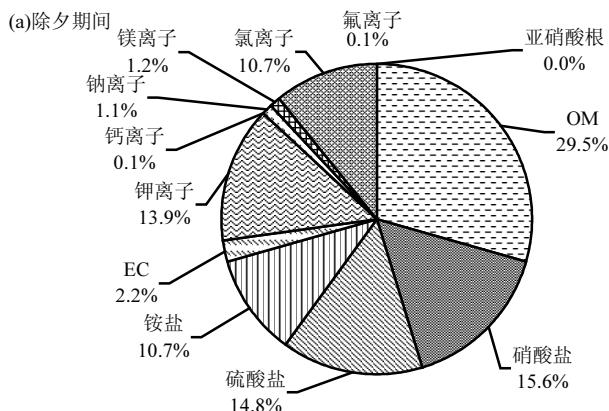
表 1 2013~2020 年除夕期间主要污染物浓度突增倍数

Table 1 The increasing times of the concentration of major pollutants during the New Year's eve in 2013~2020

| 年份 | SO ₂ | PM ₁₀ | PM _{2.5} |
|------|-----------------|------------------|-------------------|
| 2013 | 1.31 | 1.37 | 0.92 |
| 2014 | 0.86 | 1.14 | 1.29 |
| 2015 | 1.58 | 1.23 | 1.14 |
| 2016 | 1.98 | 1.77 | 0.19 |
| 2017 | 0.62 | 0.01 | 0.10 |
| 2018 | 0.16 | 0.10 | 0.07 |
| 2019 | 0.28 | 0.13 | 0.11 |
| 2020 | 0.08 | 0.14 | 0.02 |

2.2 烟花爆竹燃放对 PM_{2.5} 主要离子组分的影响

2.2.1 烟花爆竹燃放对 PM_{2.5} 主要离子组分的浓度及占比影响 烟花爆竹中含有大量镁粉、硝酸钾、氯酸盐等易燃易氧化成分^[22~24],为了进一步研究其对空气质量的影响,选取车公庄站点的 PM_{2.5} 主要离子组分进行深入分析.图 3 为除夕期间与平日 PM_{2.5} 各组分占比情况,春节期间社会活动水平大幅降低使得硝酸盐占比缩减明显,而与烟花爆竹成分相关的钾离子、镁离子、氯离子等组分占比大幅增加且转变为 PM_{2.5} 的主要组分,体现出明显的烟花爆竹燃放特征.

图 3 2020 年(a)除夕期间及(b)平日 PM_{2.5} 组成特征Fig.3 The characteristics of PM_{2.5} components between (a) the New Year's eve and (b) ordinary days in 2020

由图 4 可见(2016 年由于仪器问题未采集数据,2018 年由于气象条件等多因素影响导致结果存在明显差异),烟花爆竹的集中燃放对 PM_{2.5} 组分中 Mg²⁺、K⁺、Cl⁻ 的影响最为显著.与冬季(12 月~次年 2 月)均值浓度相比,上述一次离子组分在除夕烟花爆竹集中燃放时段的浓度增长倍数相对最高,分别可达 54.7 倍、39.1 倍和 9.2 倍.相比之下,二次离子组分 NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 NH₄⁺ 的浓度增长不及一次离子组分明显,最高增长倍数仅为 1.3 倍、3.0 倍和 3.6 倍.此外,在 PM_{2.5} 峰值浓度出现时刻,一次离子组分浓度增长倍数进一步升高,Mg²⁺、K⁺、Cl⁻ 最高可达冬季均值的 140.6 倍、99.5 倍和 22.6 倍,进一步说明烟花爆竹燃放对 PM_{2.5} 一次离子组分所产生的影响更为显著.同时,与烟花爆竹燃放相关性显著的一次离子组分浓度增长倍数呈逐年降低趋势,2020 年 Mg²⁺、K⁺、Cl⁻ 的浓度增长倍数最高降幅分别达到 83.9%、75.2% 和 53.3%,证实近年烟花爆竹燃放对空气质量的影响明显缩减.

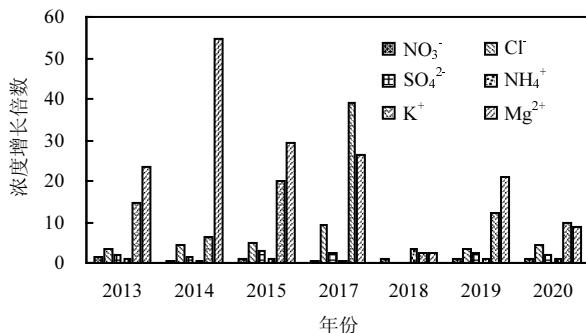


图4 2013~2020年除夕期间PM_{2.5}主要离子组分浓度增长倍数

Fig.4 The increasing times of major ions concentration of PM_{2.5} during the New Year's eve in 2013~2020

2.2.2 烟花爆竹燃放对PM_{2.5}及其主要离子组分的贡献率估算 假设相同时期PM_{2.5}的组成成分恒定不变,即可依据其各组分的浓度比例估算烟花爆竹集中燃放对PM_{2.5}及其组分的贡献率^[15~16,21].本研究选取受烟花爆竹燃放影响较小的NH₄⁺作为基准组分,通过其他组分与NH₄⁺的浓度比例估算烟花爆竹燃放的贡献率.表2为近年除夕期间烟花爆竹集中燃放对PM_{2.5}及其主要离子组分的贡献率,其中2014年烟花爆竹燃放对PM_{2.5}浓度的贡献率达84.6%为近年最高水平,此后逐年降低至2019年的32.5%,同样证实近年烟花爆竹燃放对空气质量的影响明显缩减,而2020年贡献率反弹至47.9%.在组分方面,SO₄²⁻作为二次离子组分受到的影响小于一次离子组分,贡献率为46.3%~75.7%;K⁺和Mg²⁺受到的影响最为显著,2013~2019年的贡献率均高于90.0%,而2020年贡献率有所降低,分别为89.3%和88.1%.由此可见,今年除夕期间集中燃放对烟花爆竹相关组分贡献率降低而对PM_{2.5}贡献率升高,进一步说明今年污染程度的加重受到了不利气象条件等因素的共同影响.

表2 2013~2020年除夕期间烟花爆竹燃放贡献率(%)
Table 2 The contribution of fireworks burning during the New Year's eve in 2013~2020(%)

| 年份 | Cl^- | SO_4^{2-} | K^+ | Mg^{2+} | PM _{2.5} |
|------|---------------|--------------------|--------------|------------------|-------------------|
| 2013 | 74.7 | 48.2 | 93.7 | 96.1 | 49.6 |
| 2014 | 84.9 | 51.2 | 90.1 | 98.8 | 84.6 |
| 2015 | 84.3 | 75.7 | 96.3 | 97.5 | 75.6 |
| 2017 | 92.0 | 72.1 | 98.1 | 97.3 | 68.1 |
| 2019 | 69.7 | 53.8 | 91.6 | 95.1 | 32.5 |
| 2020 | 75.9 | 46.3 | 89.3 | 88.1 | 47.9 |

2.3 气象条件对传统春节假期空气质量及烟花爆竹燃放污染消散的影响

春节期间的空气质量一方面受到以烟花爆竹为主要污染源的短时高强度排放影响,另一方面,气象条件也是影响污染物扩散形势的关键因素,其中地面风向与风速决定污染物的扩散方向和程度,相对湿度决定污染物二次反应的生成速率^[25~27].结合地理位置、人口密度、周边区域污染水平和二次污染物生成与转化机理,北京市在偏北风、低湿度等条件下的大气扩散能力较好,有利于污染物的扩散;然而在偏南风、高湿度的条件下,大气扩散能力相对不利,周边区域污染物输送叠加本地污染物快速转化积累的共同影响,使北京市的空气污染程度进一步加重^[28~35].

表3 2013~2020年传统春节假期期间气象条件及PM_{2.5}浓度水平

Table 3 Meteorological condition and concentration of PM_{2.5} during the Spring Festival in 2013~2020

| 年份 | 相对湿度 (%) | 风速 (m/s) | 气压 (hPa) | PM _{2.5} 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|------|----------|----------|----------|---|
| 2013 | 50.1 | 1.96 | 1022.9 | 108 |
| 2014 | 43.6 | 2.46 | 1019.1 | 80 |
| 2015 | 53.3 | 2.34 | 1018.3 | 111 |
| 2016 | 44.4 | 2.63 | 1016.7 | 87 |
| 2017 | 30.1 | 2.21 | 1025.9 | 106 |
| 2018 | 39.0 | 1.81 | 1019.5 | 71 |
| 2019 | 33.4 | 2.90 | 1028.9 | 38 |
| 2020 | 57.2 | 1.75 | 1028.9 | 108 |
| 平均 | 43.9 | 2.30 | 1022.5 | 89 |

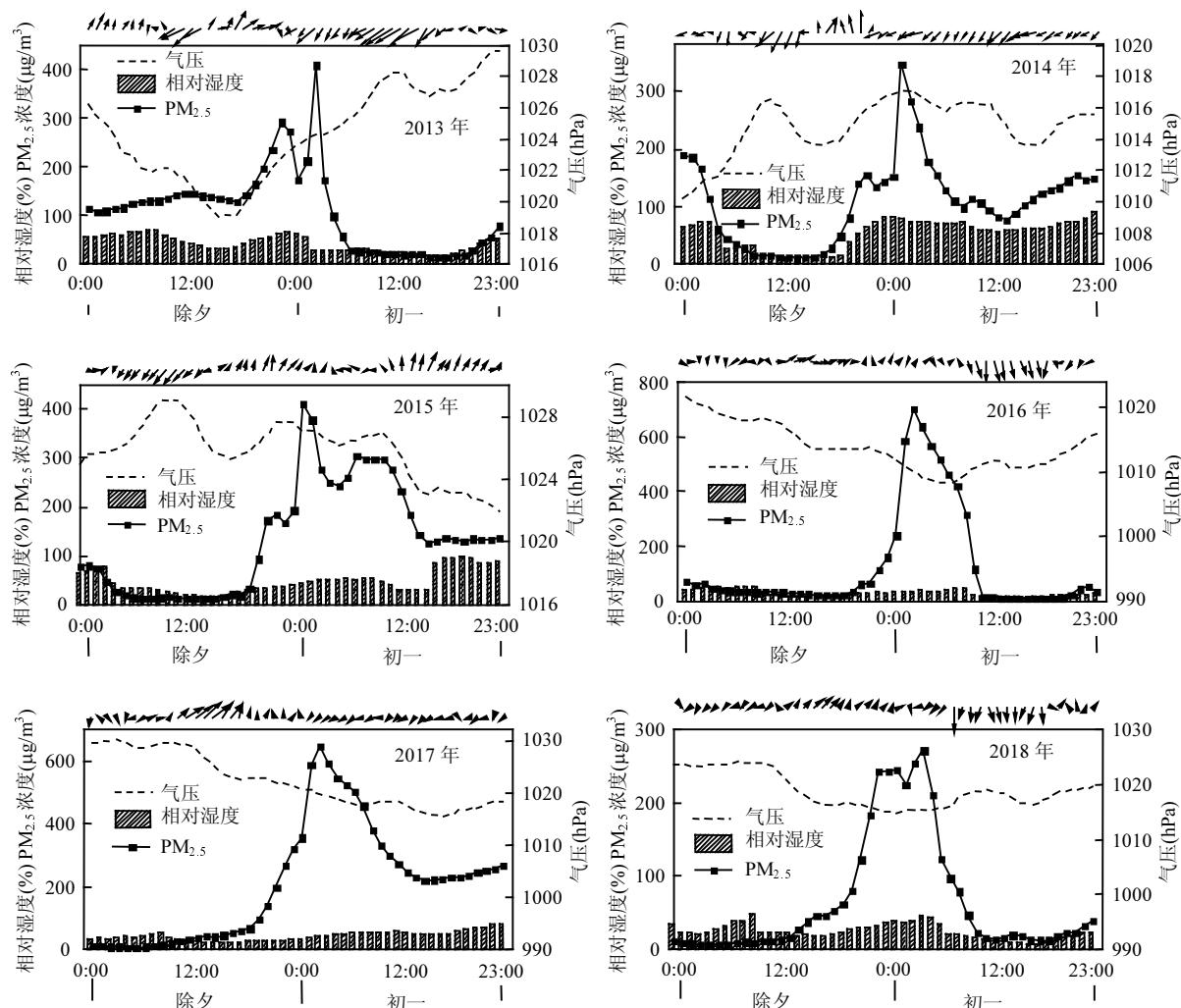
2.3.1 气象条件对传统春节假期空气质量的影响 由表3可以看出,2013~2017年北京市未实施“限改禁”等严苛的烟花爆竹燃放管理规定期间,2014年较低的相对湿度(43.6%)和较高的地面风速(2.46m/s)等气象条件有利于污染物的扩散,在“天帮忙”的情况下使得传统春节假期期间的PM_{2.5}平均浓度仅为80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,为2013~2017年间的最低水平;自2018年起,北京市五环路以内(含五环路)区域对于烟花爆竹的管理由限放改为禁放,且针对烟花爆竹燃放的管控逐年严苛,烟花爆竹燃放污染源排放量明显降低.在“人努力”减少烟花爆竹燃放量的同时,“天帮忙”使得2018~2019年传统春节假期期间的PM_{2.5}平均浓度显著降低.其中,2019年的各项气象条件均优于

近 8 年同期平均水平,相对湿度仅为 33.4%(次低),地面平均风速为 2.90m/s(最高)、地面气压为 1028.9hPa(最高),PM_{2.5} 平均浓度是近 8 年同期的最低值仅为 38μg/m³.

然而,2013 年和 2015 年传统春节假期期间大量烟花爆竹集中燃放,同时 50.1% 和 53.3% 的相对湿度均高于近 8 年同期平均水平,2013 年 1.96m/s 的地面平均风速低于近 8 年同期平均水平,2015 年 1018.3hPa 的气压为近 8 年次低值,在高强度的源排放和不利气象条件的共同影响下污染程度进一步加重,PM_{2.5} 浓度分别达到 108 和 111μg/m³ 的近 8 年最高值.虽然 2020 年随禁限放区域的进一步扩大使烟花爆竹燃放量明显缩减,但不利的气象条件对污染物的扩散“帮倒忙”,近 8 年同期最高的相对湿度 57.2% 和近 8 年同期最低的地面平均风速 1.75m/s,使 PM_{2.5} 浓度反弹至近 8 年的次高值

108μg/m³.

2.3.2 除夕期间烟花爆竹燃放污染消散的判定 由图 5 所示,2013 年、2016 年和 2018 年除夕期间 PM_{2.5} 浓度在短时内(4、8、9h)由严重污染级别降至 1 级优,烟花爆竹燃放造成的污染消散完全.对气象条件进行分析可知,除夕烟花爆竹燃放污染达到峰值后,地面气压增压明显、地面风向以偏北风为主、风速短时内显著提高且平均值大于 3m/s、相对湿度较低约为 25%,上述气象条件均利于污染物的扩散,从而使烟花爆竹燃放污染在短时内得以完全消散.然而,其余年份的气象条件相对不利,地面气压明显降低,相对湿度逐渐升高至接近饱和,2015 年和 2019 年地面受到偏南风持续作用、2017 年和 2020 年地面以不定风向的弱风为主,不利的扩散条件一方面使烟花爆竹燃放造成的污染无法在短时内快速消散,另一方面加剧了本地污染物积累和区域污染物输送.



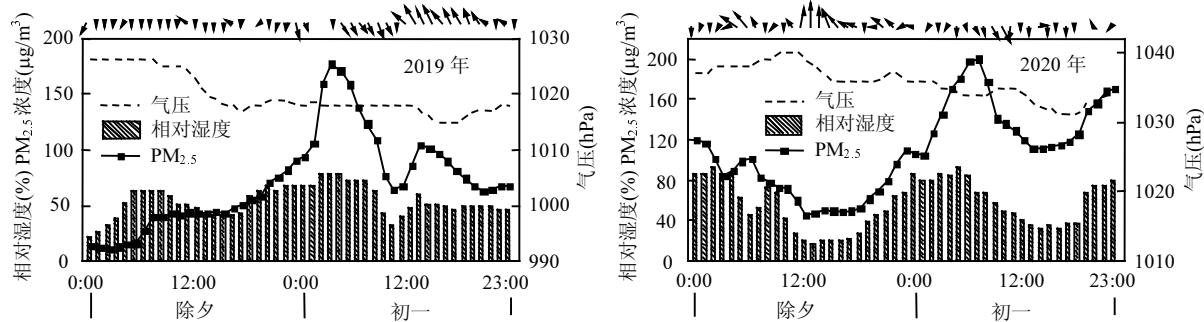
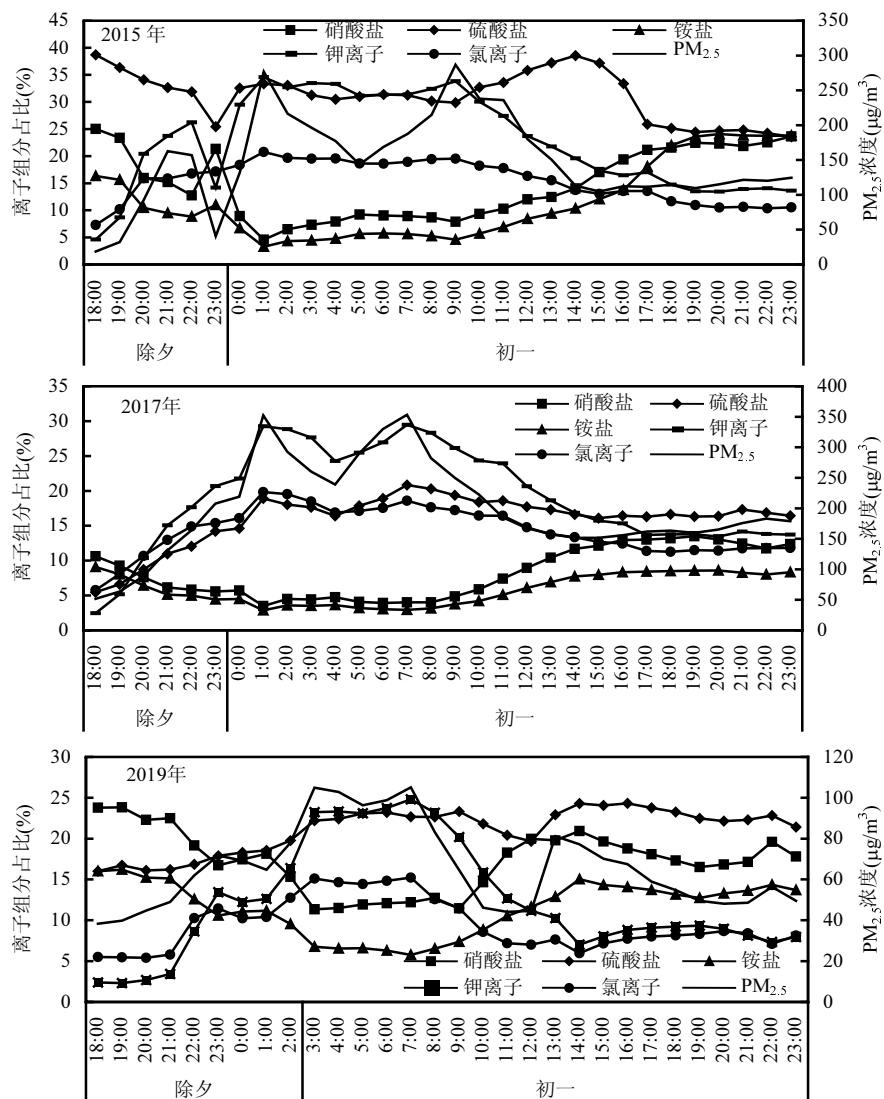


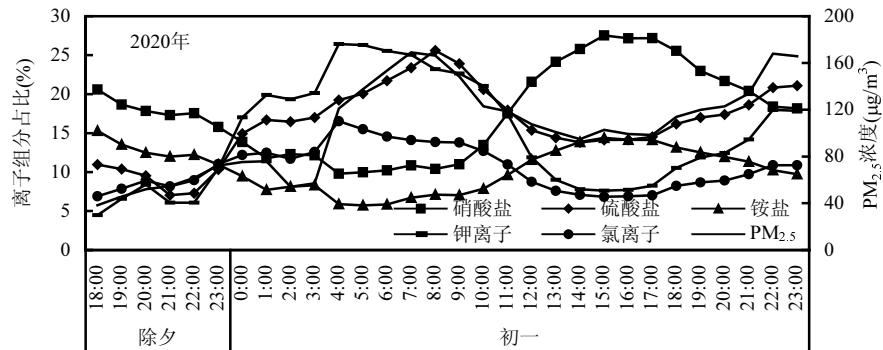
图 5 气象条件对烟花爆竹燃放污染的消散影响

Fig.5 The influence of meteorological conditions on the diffusion of fireworks pollutants

从PM_{2.5}主要离子组分的演变结果分析可知(图6),初一凌晨时段静稳的天气形势使与烟花爆竹成分相关的钾离子和氯离子在PM_{2.5}中所占比例稳定维持在较高水平且是PM_{2.5}的主要组分,考虑烟花爆竹燃放造成颗粒物污染的半衰期,同时在较高相对湿度等不利气象条件的影响下,污染物的二次反应速率加剧,硝酸盐、硫酸盐等二次离子组分在PM_{2.5}

中所占比例明显升高并转换为PM_{2.5}的主要组分。当烟花爆竹相关组分在PM_{2.5}中所占比例持续降低且稳定于较低水平(小于10%)时,即可判定烟花爆竹燃放造成的污染消散。然而2020年初一后期,钾离子和氯离子占比出现反弹并与硫酸盐占比同步升高,说明不利的气象条件导致本地污染物积累转化加速及剧烈的区域烟花爆竹燃放污染物输送。

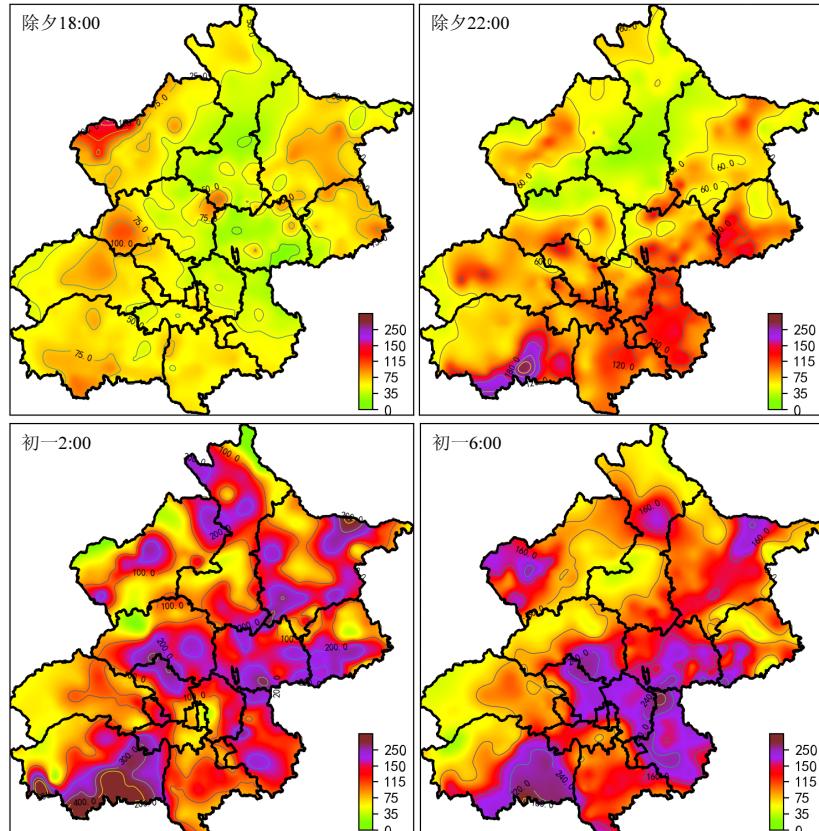


图 6 PM_{2.5} 浓度及其主要离子组分占比变化Fig.6 The concentration of PM_{2.5} and the proportion of its major ion components

2.4 2020 年烟花爆竹燃放管理措施效果评估及重污染成因解析

近年北京市传统春节假期空气质量呈整体改善趋势,主要原因之一是烟花爆竹燃放管控使源排放水平锐减。由表 1 可知,近年除夕期间主要污染物浓度突增倍数与管控实施前相比显著降低,2020 年春节期间北京市禁限放区域进一步扩大,使得除夕期间 SO₂ 和 PM_{2.5} 的浓度突增倍数进一步降低至近 8 年的最低值。此外,除夕期间 PM_{2.5} 中与烟花爆竹燃放相关性显著的一次离子组分 Mg²⁺、K⁺ 和 Cl⁻ 的浓度增长倍数与之前

年份相比大幅降低,使上述结论得到进一步验证(图 4)。从 PM_{2.5} 空间分布来看(图 7),除夕集中燃放时段北京市整体呈现斑块状特征。其中,2020 年实行全区禁止燃放烟花爆竹的大兴区 PM_{2.5} 浓度水平显著低于可燃放区,该区与全市 PM_{2.5} 浓度比值由 2018 年的 1.81 缩减至 2020 年的 0.95;顺义区北务镇、延庆区康庄镇、平谷区平谷镇作为 2020 年新增划的禁放区域,其与全市 PM_{2.5} 浓度比值分别由 2019 年的 2.18、1.85 和 1.71 缩减至 2020 年的 0.74、1.24 和 1.28,进一步说明 2020 年北京市烟花爆竹燃放管理措施效果显著。

图 7 2020 年除夕期间 PM_{2.5} 空间分布情况Fig. 7 The spatial distribution of PM_{2.5} during the New Year's eve in 2020

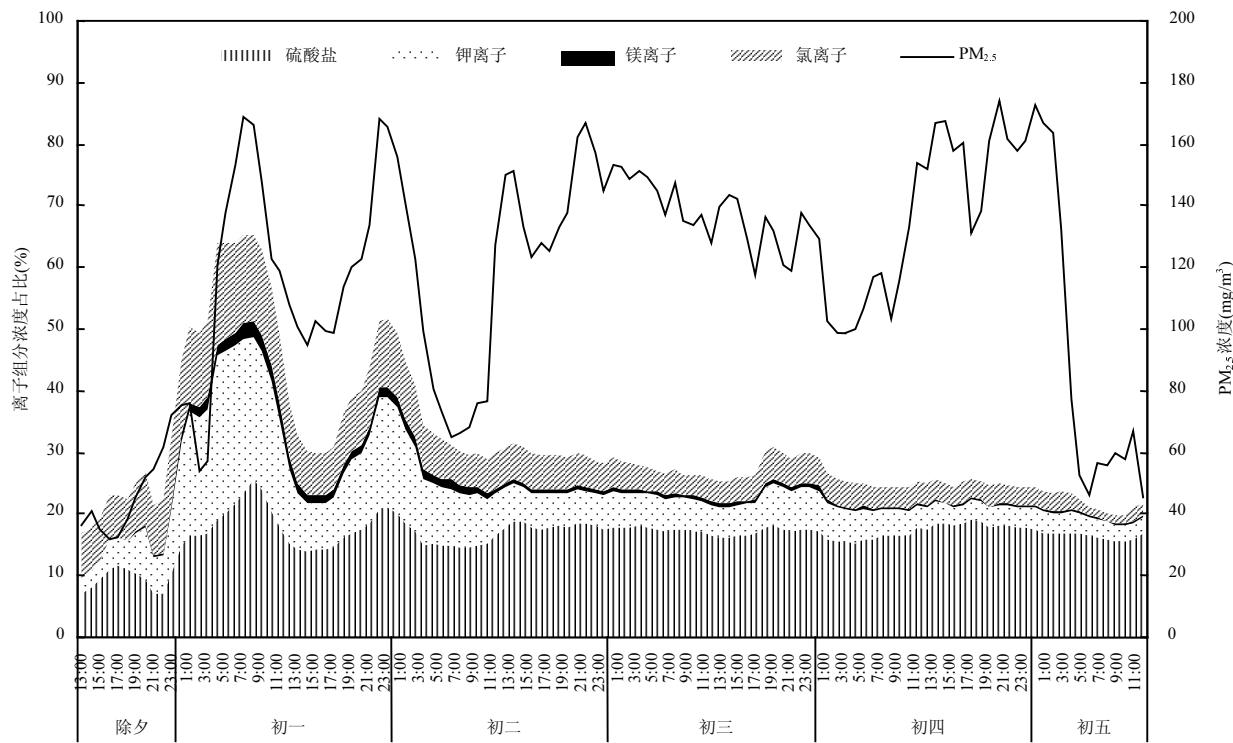


图 8 2020 年春节重污染期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及其主要离子组分浓度占比演变情况

Fig.8 The $\text{PM}_{2.5}$ concentration and its proportion of major ionic components during heavy pollution of the Spring Festival in 2020

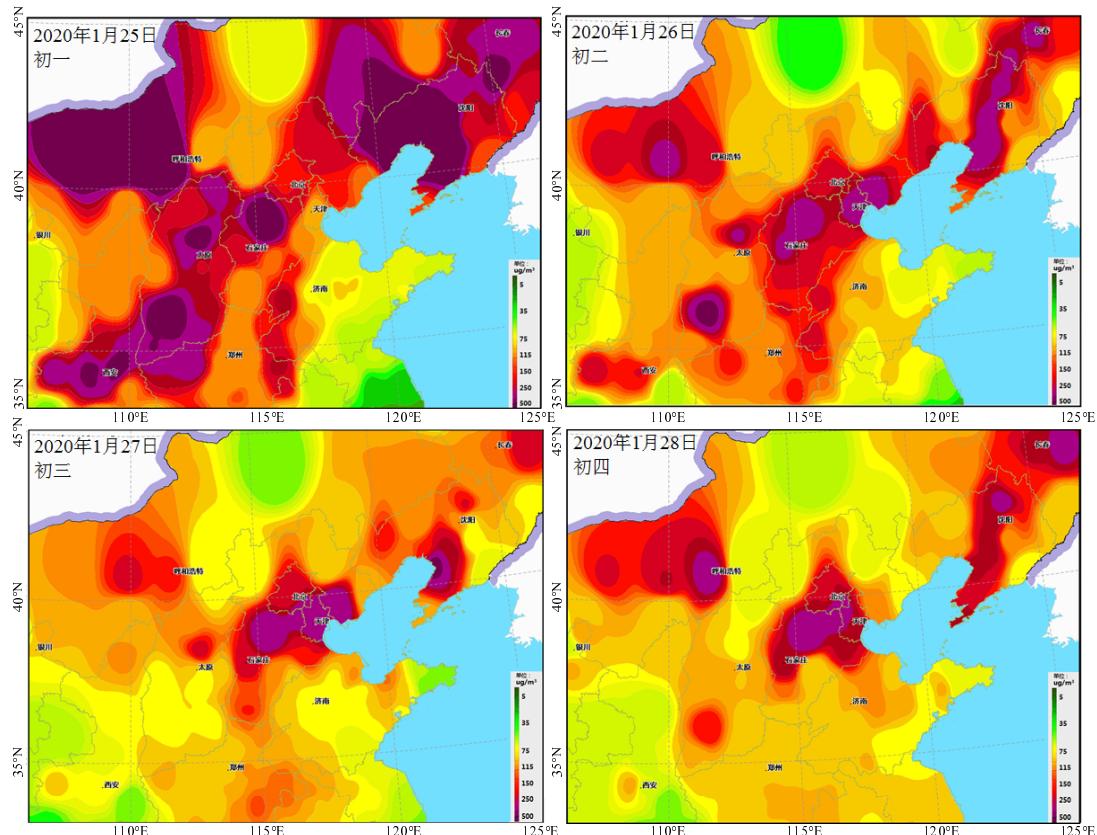
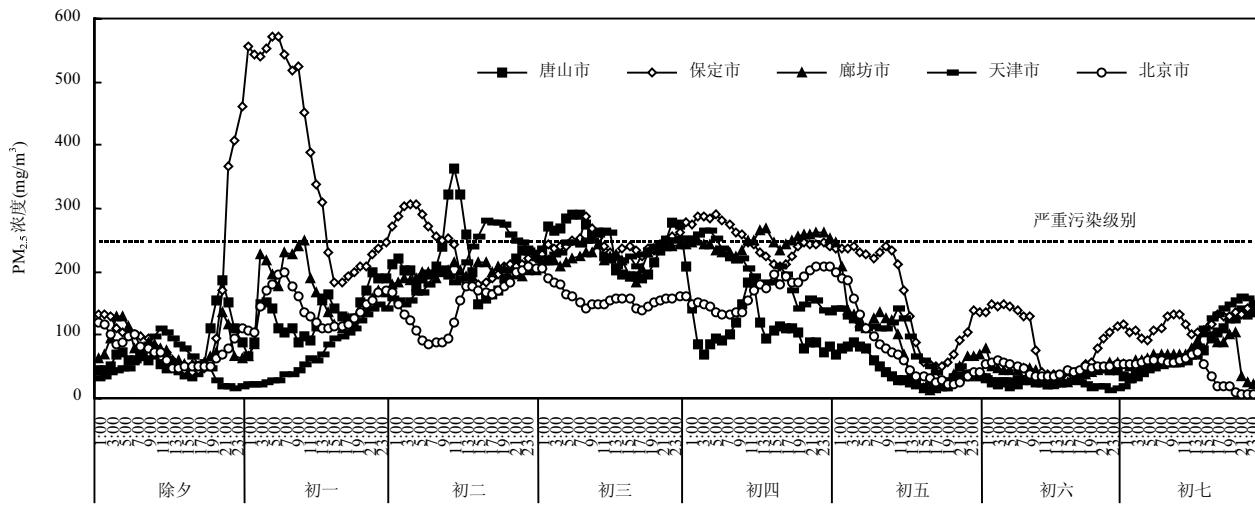


图 9 2020 年 1 月 25 日(初一)至 28 日(初四)北京市及周边地区 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度空间分布

Fig. 9 The spatial distribution of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing and surrounding area during January 25–28, 2020

图 10 2020 年传统春节假期期间北京市及周边地区 PM_{2.5} 浓度变化Fig.10 The concentration of PM_{2.5} in Beijing and surrounding area during the Spring Festival in 2020

然而,2020年1月26日(初二)至28日(初四)北京市发生连续3d的重污染过程,为近8年传统春节假期重污染天数最多的一年。这次重污染过程发生的一个原因是不利气象条件加重除夕烟花爆竹集中燃放造成的污染程度、加速本地污染物积累转化。通过对重污染日的气象条件进行分析可知,重污染期间的气象条件相比传统春节假期更加不利,地面气压为1025.9hPa、相对湿度为60.9%、地面风速为1.2m/s。静稳高湿等不利气象条件一方面使烟花爆竹燃放产生的污染物难以扩散,另一方面加剧二次污染物的转化。如图8所示,除夕至初一烟花爆竹集中燃放后,重污染期间PM_{2.5}中与烟花爆竹燃放相关性显著的离子组分K⁺、Mg²⁺、Cl⁻和SO₄²⁻的浓度占比之和稳定于30%左右,说明烟花爆竹燃放产生的污染物长时间在本地积累、未得到有效扩散;SO₄²⁻的浓度占比稳定于20%左右,说明二次污染转化剧烈。此外,结合图9和图10可知,2020年传统春节假期北京市南部地区如唐山、天津、廊坊、保定等地的PM_{2.5}浓度显著高于北京市,初一凌晨保定市烟花爆竹集中燃放使PM_{2.5}峰值浓度“爆表”达到571μg/m³,除北京市外以上各地PM_{2.5}浓度均出现小时严重污染,说明区域高浓度污染物输送是推高北京市污染峰值、延长污染过程持续时间的另一个重要原因。

3 结论

3.1 北京市自2018年加强烟花爆竹燃放管控后,

连续两年的传统春节假期未出现重污染日,其中2019年的优良天数为近8年最多。除夕集中燃放期间,SO₂、NO₂、PM₁₀和PM_{2.5}浓度变化特征由“双峰”转变为缓慢增长的“单峰”,且浓度突增倍数逐年降低。

3.2 烟花爆竹燃放对PM_{2.5}中一次离子组分的影响显著高于二次离子组分,Mg²⁺、K⁺、Cl⁻的浓度最高可达冬季的140.6倍、99.5倍和22.6倍,而NO₃⁻、SO₄²⁻和NH₄⁺的浓度最高增长倍数仅为1.3倍、3.0倍和3.6倍;对PM_{2.5}的贡献,由2014年的最高值84.6%逐年降低至2019年的最小值32.5%,2020年反弹至47.9%。

3.3 2014、2018和2019年传统春节假期的气象条件有利于污染物的扩散,然而2013、2015和2020年不利的气象条件使污染程度加重。对于除夕期间烟花爆竹燃放污染的消散,2013、2016和2018年在偏北风、高风速、低湿度的影响下,PM_{2.5}短时降低至1级优,污染消散完全;而2015、2017、2019和2020年在偏南风、弱风速、高湿度的影响下,一方面烟花爆竹燃放污染无法快速消散,表现为PM_{2.5}一次离子组分维持高占比,另一方面加剧了本地污染物积累转化和区域烟花爆竹燃放污染物输送,体现在2020年PM_{2.5}一次离子组分和二次离子组分的同步升高。

3.4 2020年烟花爆竹管控措施效果显著,除夕期间PM_{2.5}空间分布整体呈斑块状。传统春节假期期间,不利气象条件下周边区域高浓度污染物输送,叠加本地烟花爆竹燃放污染物积累转化的共同影响,进一

步推高北京市污染浓度峰值、延长污染持续时间，导致出现连续3d重污染过程。

参考文献：

- [1] 王德羿,王体健,韩军彩,等.“2+26”城市大气重污染下PM_{2.5}来源解析[J].中国环境科学,2020,40(1):92–99.
Wang D Y, Wang T J, Han J C, et al. Source apportionment of PM_{2.5} under heavy air pollution conditions in “2+26” cities [J]. China Environmental Science, 2020,40(1):92–99.
- [2] 王杰,张逸琴,高健,等.2016~2018年采暖季太行山沿线城市PM_{2.5}污染特征分析[J].中国环境科学,2019,39(11):4521–4529.
Wang J, Zhang Y Q, Gao J, et al. Characteristics of PM_{2.5} in cities along the Taihang Mountains during the heating season of 2016~2018 [J]. China Environmental Science, 2019,39(11):4521–4529.
- [3] 姜蕴聪,杨元建,王泓,等.2015~2018年中国代表性城市PM_{2.5}浓度的城乡差异[J].中国环境科学,2019,39(11):4552–4560.
Jiang Y C, Yang Y J, Wang H, et al. Urban–rural differences in PM_{2.5} concentrations in the representative cities of China during 2015~2018 [J]. China Environmental Science, 2019,39(11):4552–4560.
- [4] Gao Y, Ji H B. Microscopic morphology and seasonal variation of health effect arising from heavy metals in PM_{2.5} and PM₁₀: one-year measurement in a densely populated area of urban Beijing [J]. Atmospheric Research, 2018,212:213–226.
- [5] 雷瑜,张小玲,唐宜西,等.北京城区PM_{2.5}及主要污染气体“周末效应”和“假日效应”研究[J].环境科学学报,2015,35(5):1520–1528.
Lei Y, Zhang X L, Tang Y X, et al. Holiday effects on PM_{2.5} and other major pollutants in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(5):1520–1528.
- [6] Lv D, Chen Y, Zhu T L, et al. The pollution characteristics of PM₁₀ and PM_{2.5} during summer and winter in Beijing, Suning and Islamabad [J]. Atmospheric Pollution Research, 2019,10(4):1159–1164.
- [7] Wang S S, Yu R L, Shen H Z, et al. Chemical characteristics, sources, and formation mechanisms of PM_{2.5} before and during the Spring Festival in a coastal city in southeast China [J]. Environmental Pollution, 2019,251:442–452.
- [8] Li N, Han W Z, Wei X, et al. Chemical characteristics and human health assessment of PM₁ during the Chinese Spring Festival in Changchun, Northeast China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2019,10(6):1823–1831.
- [9] 程念亮,陈添,张大伟,等.2015年春节北京市空气质量分析[J].环境科学,2015,36(9):3150–3158.
Cheng N L, Chen T, Zhang D W, et al. Air quality characteristics in Beijing during Spring Festival in 2015 [J]. Environmental Science, 2015,36(9):3150–3158.
- [10] 胡丙鑫,段菁春,刘世杰,等.2018年春节期间京津冀及周边地区烟花爆竹禁放效果评估[J].环境科学研究,2019,32(2):203–211.
Hu B X, Duan J C, Liu S J, et al. Evaluation of the effect of fireworks prohibition in the Beijing–Tianjin–Hebei and surrounding areas during the Spring Festival of 2018 [J]. Research of Environmental Sciences, 2019,32(2):203–211.
- [11] 陈威,邢延峰,孟庆庆,等.春节期间烟花爆竹燃放对哈尔滨市区空气质量的影响[J].中国环境监测,2018,34(5):54–60.
Chen W, Xing Y F, Meng Q Q, et al. Influence of burning fireworks on air quality during the Spring Festival in Harbin city [J]. Environmental Monitoring in China, 2018,34(5):54–60.
- [12] 曹馨元,何月欣,陈卫卫,等.烟花爆竹禁燃对春节期间东北地区空气质量影响评估[J].中国环境监测,2018,34(4):77–84.
Cao X Y, He Y X, Chen W W, et al. Effects of fireworks forbidden on air quality during the Spring Festival in northeast China [J]. Environmental Monitoring in China, 2018,34(4):77–84.
- [13] Ajit S, Pallavi P, Francis D P. Air quality during and after festivals: aerosol concentrations, composition and health effects [J]. Atmospheric Research, 2019,227:220–232.
- [14] Yao L, Wang D F, Fu Q Y, et al. The effects of firework regulation on air quality and public health during the Chinese Spring Festival from 2013 to 2017 in a chinese megacity [J]. Environment International, 2019,126:96–106.
- [15] 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.
Wang Z S, Zhang D W, Li Y T, et al. Analysis of air quality in Beijing City during Spring Festival period of 2014 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015,35(2):371–378.
- [16] 王占山,李云婷,孙峰,等.烟花爆竹燃放对北京市空气质量的影响研究[J].中国环境监测,2016,32(4):15–21.
Wang Z S, Li Y T, Sun F, et al. Study on the effect of burning of fireworks on air quality in Beijing [J]. Environmental Monitoring in China, 2016,32(4):15–21.
- [17] Zhang Y, Wei J, Tang A, et al. Chemical characteristics of PM_{2.5} during 2015 Spring Festival in Beijing, china [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017,17(5):1169–1180.
- [18] Feng J L, Yu H, Su X F, et al. Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} during Chinese Spring Festival at Xinxiang, a heavily polluted city in north china: fireworks and health risks [J]. Atmospheric Research, 2016,182:176–188.
- [19] 许艳玲,薛文博,雷宇.气象和排放变化对PM_{2.5}污染的定量影响[J].中国环境科学,2019,39(11):4546–4551.
Xu Y L, Xue W B, Lei Y. Impact of meteorological conditions and emission change on PM_{2.5} pollution in China [J]. China Environmental Science, 2019,39(11):4546–4551.
- [20] 马小会,孙兆彬,丁海燕,等.烟花爆竹燃放和气象条件对北京市空气质量的影响[J].气象与环境学报,2015,31(3):50–55.
Ma X H, Sun Z B, Ding H Y, et al. Effect of fireworks and meteorological conditions on air quality during Spring Festival in Beijing [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015,31(3):50–55.
- [21] Wang Y, Zhuang G S, Xu C, et al. The air pollution caused by the burning of fireworks during the lantern festival in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2007,41(2):417–431.
- [22] 杨志文,吴琳,元洁,等.2015年春节期间天津烟花爆竹燃放对空气质量的影响[J].中国环境科学,2017,37(1):69–75.
Yang Z W, Wu L, Yuan H, et al. Effect of fireworks on the air quality during the Spring Festival of 2015 in Tianjin City [J]. China Environmental Science, 2017,37(1):69–75.
- [23] 赵承美,邵龙义,侯聪,等.元宵节期间北京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.

- Zhao C M, Shao L Y, Hou C, et al. Physicochemical characteristics of individual particle in $PM_{2.5}$ of Beijing during the Lantern Festival [J]. China Environmental Science, 2015,35(4):1004–1012.
- [24] 王红磊,朱彬,沈利娟,等.春节期间南京气溶胶质量浓度和化学组成特征 [J]. 中国环境科学, 2014,34(1):30–39.
- Wang H L, Zhu B, Shen L J, et al. The mass concentration and chemical compositions of the atmospheric aerosol during the Spring Festival in Nanjing [J]. China Environmental Science, 2014,34(1):30–39.
- [25] 吕梦瑶,张恒德,王继康,等.2015年冬季京津冀两次重污染天气过程气象成因 [J]. 中国环境科学, 2019,39(7):2748–2757.
- Lv M Y, Zhang H D, Wang J K, et al. Analysis of meteorological causes of two heavily polluted weather processes in Beijing–Tianjin–Hebei Region in winter of 2015 [J]. China Environmental Science, 2019,39(7):2748–2757.
- [26] 杨旭,张小玲,康延臻,等.京津冀地区冬半年空气污染天气分型研究 [J]. 中国环境科学, 2017,37(9):3201–3209.
- Yang X, Zhang X L, Kang Y Z, et al. Circulation weather type classification for air pollution over the Beijing–Tianjin–Hebei region during winter [J]. China Environmental Science, 2017,37(9):3201–3209.
- [27] 张晗宇,温维,程水源,等.京津冀区域典型重污染过程与反馈效应研究 [J]. 中国环境科学, 2018,38(4):1209–1220.
- Zhang H Y, Wen W, Cheng S Y, et al. Study on typical heavy pollution process and feedback effect in Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. China Environmental Science, 2018,38(4):1209–1220.
- [28] 程念亮,张大伟,李云婷,等.风向对北京市重污染日 $PM_{2.5}$ 浓度分布影响研究 [J]. 环境科学与技术, 2016,39(3):143–149.
- Cheng N L, Zhang D W, Li Y T, et al. Effects of wind direction on spatial distribution of $PM_{2.5}$ during heavy pollution days in Beijing [J]. Environmental Science & Technology, 2016,39(3):143–149.
- [29] 林廷坤,洪礼楠,黄争超,等.北京市秋冬季大气环流型下的气象和污染特征 [J]. 中国环境科学, 2019,39(5):1813–1822.
- Lin T K, Hong L N, Huang Z C, et al. Meteorological and pollution characteristics under atmospheric circulation types in autumn and winter in Beijing [J]. China Environmental Science, 2019,39(5):1813–1822.
- [30] 李令军,王占山,张大伟,等.2013~2014年北京大气重污染特征研究 [J]. 中国环境科学, 2016,36(1):27–35.
- Li L J, Wang Z S, Zhang D W, et al. Analysis of heavy air pollution episodes in Beijing during 2013~2014 [J]. China Environmental Science, 2016,36(1):27–35.
- [31] 江琪,王飞,张恒德,等.2013~2015年北京市 $PM_{2.5}$ 、反应性气体和气溶胶粒径的特性分析 [J]. 中国环境科学, 2017,37(10):3647–3657.
- Jiang Q, Wang F, Zhang H D, et al. The characteristics of $PM_{2.5}$, reactive gas and aerosol size distributions of Beijing from 2013 to 2015 [J]. China Environmental Science, 2017,37(10):3647–3657.
- [32] 王占山,李云婷,张大伟,等.2015年“九三阅兵”期间北京市空气质量分析 [J]. 中国环境科学, 2017,37(5):1628–1636.
- Wang Z S, Li Y T, Zhang D W, et al. Analysis on air quality in Beijing during the military parade period in 2015 [J]. China Environmental Science, 2017,37(5):1628–1636.
- [33] 康志明,桂海林,王继康,等.2015年北京“阅兵蓝”特征及成因探讨 [J]. 中国环境科学, 2016,36(11):3227–3236.
- Kang Z M, Gui H L, Wang J K, et al. Characteristics and cause of the “parade blue” in Beijing 2015 [J]. China Environmental Science, 2016,36(11):3227–3236.
- [34] 桂海林,江琪,康志明,等.2016年冬季北京地区一次重污染天气过程边界层特征 [J]. 中国环境科学, 2019,39(7):2739–2747.
- Gui H L, Jiang Q, Kang Z M, et al. Analysis of boundary layer characteristics of a heavily polluted weather process in Beijing in winter 2016 [J]. China Environmental Science, 2019,39(7):2739–2747.
- [35] 江琪,王飞,张恒德,等.北京市 $PM_{2.5}$ 和反应性气体浓度的变化特征及其与气象条件的关系 [J]. 中国环境科学, 2017,37(3):829–837.
- Jiang Q, Wang F, Zhang H D, et al. Analysis of temporal variation characteristics and meteorological conditions of reactive gas and $PM_{2.5}$ in Beijing [J]. China Environmental Science, 2017,37(3):829–837.

作者简介: 张 章(1991–),女,北京人,工程师,博士研究生,主要从事大气环境研究。