

烟花爆竹燃放对保定市大气污染特征影响研究*

曹 晴 谭玉玲[#] 张艳平 刘 宇 田 刚

(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)

摘要 为了解烟花爆竹燃放对保定市大气污染特征的影响,于2018年春节期间对保定市不同监测站点PM_{2.5}中水溶性离子、有机碳(OC)、元素碳(EC)的污染特征进行了分析。结果表明:(1)春节期间保定市PM_{2.5}最大值为588 μg/m³,水溶性离子浓度排序为NO₃⁻>SO₄²⁻>Cl⁻>NH₄⁺>K⁺>Mg²⁺>Na⁺>Ca²⁺,PM_{2.5}的阴离子过剩电荷在0.06~2.26 μmol/m³波动,PM_{2.5}整体呈酸性;(2)监测期间PM_{2.5}中OC、EC的质量浓度分别为28.41、3.10 μg/m³,OC与EC的相关系数高达0.960 6,OC、EC主要来自一次污染源的排放;(3)后向轨迹模型计算表明,春节期间保定市受到西北方向和偏南方向气团传输的影响,PM_{2.5}污染是本地源排放和京津冀区域传输叠加的结果。

关键词 PM_{2.5} 水溶性离子 有机碳 元素碳 烟花爆竹 传输

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.04.004

Study on the influence of fireworks on atmospheric pollution characteristics in Baoding CAO Qing, TAN Yuling, ZHANG Yanping, LIU Yu, TIAN Gang. (State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012)

Abstract: In order to study the influences of fireworks on atmospheric pollution characteristics in Baoding, this paper collected the online monitoring data of national control sites and provincial control sites during the 2018 Spring Festival, and analyzed the characteristic, sources and regional pollution transport of water-soluble ions, organic carbon (OC), elemental carbon (EC) in PM_{2.5}. The results showed: (1) the PM_{2.5} of Baoding during monitoring period peaked at 588 μg/m³, the concentration of water-soluble ions in PM_{2.5} followed the order of NO₃⁻>SO₄²⁻>Cl⁻>NH₄⁺>K⁺>Mg²⁺>Na⁺>Ca²⁺, anion excess charge had a fluctuation range of 0.06-2.26 μmol/m³, PM_{2.5} was generally acidic. (2) The mass concentrations of OC and EC in PM_{2.5} were 28.41, 3.10 μg/m³ respectively. The correlation coefficient between OC and EC was high ($R^2=0.960\ 6$), the EC and OC were mainly came from the direct discharge of primary pollution source. (3) Backward trajectory model calculation showed that Baoding was affected by the northwest and southerly air mass transport during Spring Festival. The PM_{2.5} pollution was the results of superimposition of local source emissions and regional transport in Beijing-Tianjin-Hebei.

Keywords: PM_{2.5}; water-soluble ions; organic carbon; elemental carbon; fireworks; transport

烟花爆竹燃放会释放大量大气颗粒物和气态污染物^[1-2],其含有的大量水溶性离子、元素碳(EC)、有机碳(OC)、重金属、二次污染物等将导致大气能见度下降,环境空气质量恶化,威胁人体健康^[3-4]。2018年保定市首次实施主城区三环内禁止燃放烟花爆竹,本研究基于烟花爆竹禁放区和非禁放区多个站点的在线监测数据,对2018年春节期间大气颗粒物水溶性离子、碳组分特征及潜在源的传输进行了分析,探讨烟花爆竹燃放对保定市大气颗粒物污染的影响,在一定程度上反映大气质量状况以及区域环境的污染特征,为保定市大气污染防治及制定有针对性的管控措施提供技术依据。

1 实验方案

1.1 监测时间和地点

为全面了解春节烟花爆竹燃放时保定市大气污染物浓度特征,根据保定市空气质量地面自动监测点位,选取胶片厂、华电二区、监测站、易县国税局、清苑县政府、唐县开元大厦、定州市商务局等站点的监测数据进行分析,监测时间为2018年2月13—19日,其中市区胶片厂、华电二区、监测站位于禁放区,周边没有烟花爆竹燃放点;郊区清苑县政府、唐县开元大厦、易县国税局、定州市商务局位于非禁放区,以商业、住宅区和学校为主。本研究中PM_{2.5}、水溶性离子、OC、EC均采用各监测站点的小时均值数据。

第一作者:曹 晴,女,1987年生,本科,工程师,主要从事大气污染控制技术研究。[#]通讯作者。

* 大气重污染成因与治理攻关项目(No.DQGG0304)。

1.2 仪器和分析方法

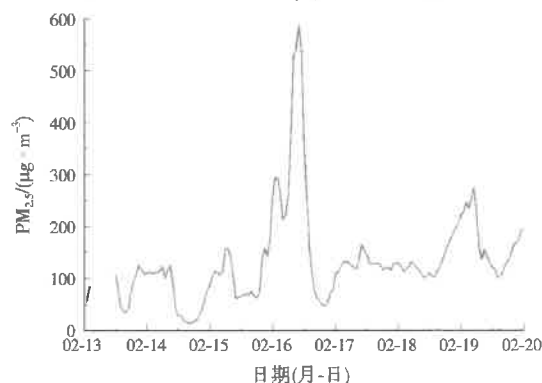
PM_{2.5}中水溶性离子采用在线气体与气溶胶成分监测仪连续采集,采样流量16.67 L/min,检测限为0.002 μg/m³。由ICS-2100型离子色谱仪测试阴阳离子,样品采集分析频率为1次/h。阳离子色谱柱为CS12A/CG12A 4 mm柱,抑制电流为59 mA,淋洗液为22 mmol/L甲基磺酸,流速为1.0 mL/min。阴离子色谱柱为AS11/AG11 4 mm柱,抑制电流为90 mA,淋洗液为30 mmol/L KOH溶液,流速为1.2 mL/min。

碳组分分析采用DRI Model 2001A型热光碳分析仪(美国Atmoslytic)。从采样石英膜上截取0.512 cm²圆形滤膜,在无氧氮气环境下,分别在120、250、450、550℃下逐步加热,充分释放OC;在含氧量2%(体积分数)的氮气环境下,分别于550、700、800℃逐步加热,充分释放EC。上述温度梯度加热产生的CO₂,经MnO₂催化还原为CH₄,由火焰离子化检测器(FID)检测。

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5}浓度变化特征

监测期间保定市PM_{2.5}浓度变化如图1所示,PM_{2.5}质量浓度在13~588 μg/m³,平均值为135 μg/m³。从2月15日(除夕)开始,保定市PM_{2.5}小时质量浓度迅速增加,最大值出现在2月16日(初一)9:00。PM_{2.5}浓度迅速上升过程中,多数工业企业放假停工,工业排放源减少,且2018年保定市中心城区三环内禁止燃放烟花爆竹,推断保定市2月16日PM_{2.5}的短时间急剧升高是受到郊区烟花爆竹燃放影响。参考《环境空气质量标准》(GB 3015—2012)二级标准(PM_{2.5}≤75 μg/m³),保定市除夕、初



注:由于天气原因,2月13日部分时段采样数据缺失。下同。

图1 监测期间保定市PM_{2.5}变化
Fig.1 Changes of PM_{2.5} in Baoding during monitoring period

一PM_{2.5}处于较高污染水平。2月17日,由于保定市边界层高度上升,相对湿度由39%上升至67%,以及冷空气开始进入,垂直扩散条件转好,受内部集中燃放期污染物排放总量削减的影响,PM_{2.5}浓度迅速下降至相对较低的水平。

2.2 PM_{2.5}的水溶性离子组分特征及平衡

2.2.1 水溶性离子组分特征

监测期间保定市PM_{2.5}中水溶性离子质量浓度及占比情况见表1,二次水溶性离子SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺是PM_{2.5}中水溶性离子的主要组成部分,其质量浓度平均值分别为16.92、17.62、6.41 μg/m³,分别占PM_{2.5}的12.53%、13.05%、4.75%。其他离子中,Cl⁻占主要地位,质量浓度平均值可达10.01 μg/m³,K⁺次之,平均值可达3.57 μg/m³,变化趋势同PM_{2.5}相近。SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻合计占PM_{2.5}的40.70%,水溶性离子浓度排序为NO₃⁻>SO₄²⁻>Cl⁻>NH₄⁺>K⁺>Mg²⁺>Na⁺>Ca²⁺。

表1 监测期间保定市PM_{2.5}中水溶性离子平均值及变化范围

Table 1 Average and variation range of water-soluble ions concentration in PM_{2.5} of Baoding during the monitoring period

离子	平均值 (μg·m ⁻³)	范围 (μg·m ⁻³)	在总水溶性离子中的占比/%	相对标准 偏差/%
SO ₄ ²⁻	16.92	3.47~76.89	30.79	12.23
NO ₃ ⁻	17.62	0.52~49.78	32.06	11.64
NH ₄ ⁺	6.41	0.54~14.47	11.66	3.36
Mg ²⁺	0.23	0~1.86	0.42	0.34
Na ⁺	0.16	0.02~0.73	0.28	0.12
Ca ²⁺	0.05	0~0.45	0.09	0.06
Cl ⁻	10.01	0.37~79.43	18.20	12.41
K ⁺	3.57	0.03~47.66	6.49	7.47

由图2可见,大部分水溶性离子出现峰值的时间与PM_{2.5}基本保持一致。在烟花爆竹燃放高峰时段(2月16日9:00—10:00),SO₄²⁻、Mg²⁺、K⁺、Cl⁻、Ca²⁺均出现明显峰值,分别为76.89、1.86、47.66、79.43、0.45 μg/m³,与基本无烟花爆竹燃放的对照时段(2月14日9:00—10:00)相比分别增加15.9、57.6、188.6、28.2、9.7倍。烟花爆竹燃放高峰时段NO₃⁻、NH₄⁺质量浓度分别为20.85、8.84 μg/m³,与对照时段相比分别增加7.4、6.6倍。监测期间,SO₄²⁻、K⁺、Mg²⁺、Cl⁻、Ca²⁺等离子波动较大,说明燃放烟花爆竹对这些离子浓度影响较大。

烟花爆竹燃放高峰时段与对照时段相比,K⁺、Mg²⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻在总水溶性离子中的占比均有所升高,其中K⁺占比由1.46%升至20.39%,Cl⁻

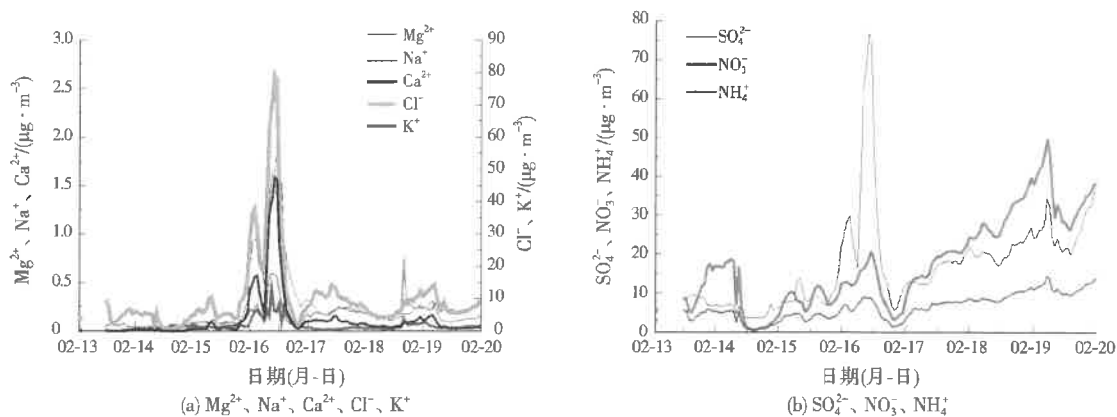


图 2 监测期间水溶性离子质量浓度变化

Fig.2 Time series of water-soluble ions mass concentration during the monitoring period

的占比由 16.24% 升至 33.99%， SO_4^{2-} 占比由 27.88% 升至 32.90%，而 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 在总水溶性离子中的占比有不同程度的下降。可见，燃放烟花爆竹对 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子构成具有较大影响。

2.2.2 水溶性离子相关性分析

不同时段水溶性离子相关性分析见表 2、表 3。在 2 月 14 日对照时段， NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 的相关系数分别为 0.753 9 和 0.982 4，判断 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 可能是以硫酸铵、硝酸铵的形式存在；在 2 月 16 日烟花爆竹燃放高峰时段， SO_4^{2-} 和 NO_3^- 可能还存在硫酸钾、硝酸钾等形式。 K^+ 与 Mg^{2+} 在烟花爆竹燃放高峰时段具有较好的相关性，表明两者来源相同。 Ca^{2+} 的浓度变化主要受 2 月 15 日至 2 月 16 日烟花

爆竹燃放产生的扬尘影响。 Na^+ 受人造的干扰较小，主要受环境本底控制^[3-7]。

2.2.3 阴阳离子平衡及 $\text{PM}_{2.5}$ 酸碱性

水溶性离子平衡与大气颗粒物酸碱性有密切关系。计算保定市 $\text{PM}_{2.5}$ 的阴阳离子当量浓度^[8-9]，绘制阴阳离子一元线性回归模型，判断保定市 $\text{PM}_{2.5}$ 的酸碱性。

由图 3 可见，保定市 $\text{PM}_{2.5}$ 的阴阳离子当量浓度的相关系数高达 0.988 5，相关性较为显著，样品测试数据有效；拟合曲线斜率为 2.044 4，表明阴离子电荷过剩。计算监测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 水溶性离子的电荷平衡情况，总阳离子与总阴离子的当量比为 0.38~0.63，平均值为 0.53。可见，大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中

表 2 对照时段水溶性离子相关性分析

Table 2 Correlation analysis of water-soluble ions during control periods

水溶性离子	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Na^+	Ca^{2+}
SO_4^{2-}	1.000 0							
NO_3^-	0.657 0	1.000 0						
Cl^-	0.902 4	0.788 6	1.000 0					
NH_4^+	0.753 9	0.982 4	0.883 4	1.000 0				
K^+	0.797 9	0.621 8	0.905 2	0.723 1	1.000 0			
Mg^{2+}	0.000 1	0.132 7	0.000 2	0.073 9	0.023 8	1.000 0		
Na^+	0.569 6	0.164 2	0.570 7	0.263 9	0.692 2	0.094 9	1.000 0	
Ca^{2+}	0.159 8	0.553 3	0.289 6	0.488 9	0.281 9	0.206 8	0.000 6	1.000 0

表 3 烟花爆竹燃放高峰时段水溶性离子相关性分析

Table 3 Correlation analysis of water-soluble ions during peak hours of fireworks

水溶性离子	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Na^+	Ca^{2+}
SO_4^{2-}	1.000 0							
NO_3^-	0.762 6	1.000 0						
Cl^-	0.974 7	0.790 2	1.000 0					
NH_4^+	0.761 6	0.914 7	0.824 1	1.000 0				
K^+	0.995 2	0.757 0	0.983 3	0.755 1	1.000 0			
Mg^{2+}	0.824 0	0.803 1	0.808 0	0.708 5	0.835 8	1.000 0		
Na^+	0.969 0	0.752 9	0.946 3	0.764 7	0.958 0	0.794 7	1.000 0	
Ca^{2+}	0.453 2	0.464 3	0.459 4	0.467 8	0.452 1	0.470 2	0.433 2	1.000 0

NH_4^+ 等阳离子不足以完全中和酸性离子, $\text{PM}_{2.5}$ 整体呈酸性。

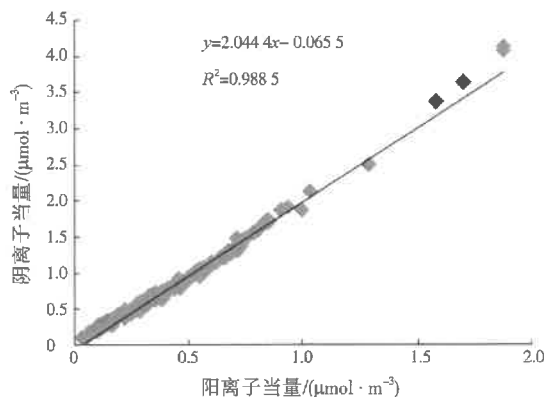


图 3 监测期间阴阳离子平衡图

Fig.3 Anion-cation balance diagram during the monitoring period

假定 $\text{PM}_{2.5}$ 总是处在电荷平衡状态, 阴离子过剩部分的负电荷 ($Q, \mu\text{mol}/\text{m}^3$) 将由等质量的质子中和^[10-12]。在气象条件一定的情况下, Q 越大, 其对 $\text{PM}_{2.5}$ 酸碱度的影响越显著。从图 4 可以看出, Q 与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的变化趋势相近, 说明两者具有明显相关性。2018 年 2 月 16 日 9:00 空气污染严重, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度达到最高值, Q 也达到峰值 $2.26 \mu\text{mol}/\text{m}^3$, 是空气质量优良时 Q ($0.06 \mu\text{mol}/\text{m}^3$) 的 38 倍, 烟花爆竹燃放产生的水溶性离子污染加重了对 $\text{PM}_{2.5}$ 酸度的影响。

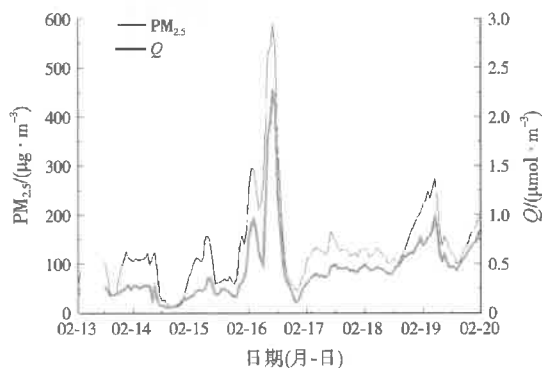


图 4 监测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 与 Q 的变化对比

Fig.4 Change of $\text{PM}_{2.5}$ and Q during the monitoring period

2.3 OC 与 EC 污染特征分析

2.3.1 OC 与 EC 的变化规律

在污染严重的城市, OC 和 EC 浓度可占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 20%~60%^[13-15]。监测期间, 保定市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC、EC 质量浓度逐时变化见图 5。可以看出, $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC 含量较高, 且波动幅度较大, 而 EC 无论是常规时段还是重污染时段变化均不明显。监测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC、EC 的平均质量浓度为 28.41、

$3.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 21.04%、2.30%。2 月 16 日 7:00 OC、EC 出现了峰值, 质量浓度分别达到了 118.97 、 $11.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2 月 16 日 OC 日均质量浓度最高, 为 $44.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2 月 15 日次之, 质量浓度达 $31.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。OC 升高是烟花爆竹中添加蔗糖增加响度所致^[16-18], 蔗糖、纸包装及黏合剂等 在爆炸燃烧时形成了细小的有机颗粒^[19-20]。

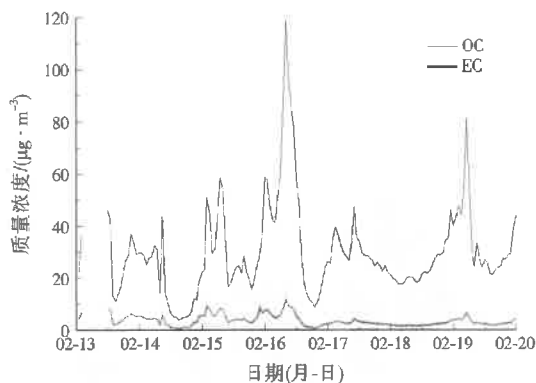


图 5 监测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC、EC 质量浓度的逐时变化

Fig.5 Time series of OC and EC mass concentrations in $\text{PM}_{2.5}$ during the monitoring period

监测期间, OC、EC、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的占比变化见图 6, 在烟花爆竹燃放高峰期 OC/ $\text{PM}_{2.5}$ 占比较低, 造成这一现象的原因是 $\text{PM}_{2.5}$ 中 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等其他组分含量的大幅上升。

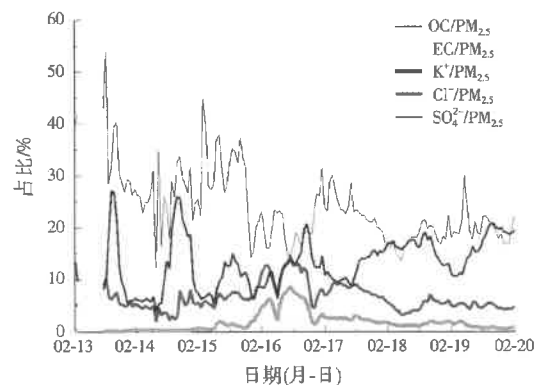


图 6 监测期间 OC、EC、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的占比

Fig.6 Percentage of OC, EC, K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} in $\text{PM}_{2.5}$ during the monitoring period

2.3.2 含碳粒子来源分析

通常利用 OC 与 EC 相关性、二次有机碳 (SOC) 及 OC/EC (质量比) 等初步判断含碳粒子的来源。监测期间, OC 与 EC 线性相关性较好, 相关系数为 0.960 6, 表明保定市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC 与 EC 的来源大部分是相同的, 由于 EC 来源于一次排放的气溶胶, 烟花爆竹是春节大气含碳物质的重要排放源^[21-22], 因此 OC 受一次排放源的影响较大。

通常采用最小 OC/EC 法估算颗粒物中 SOC 浓度^[23-24], 计算公式见式(1):

$$c_{\text{SOC}} = c_{\text{OC}} - c_{\text{EC}} \times R_{\text{min}} \quad (1)$$

式中: c_{SOC} 为 SOC 质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; c_{OC} 为 OC 质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; c_{EC} 为 EC 质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; R_{min} 为 OC/EC 最小值。

如 OC 中 SOC 贡献率较小, 则说明 OC 中一次排放源占主导地位^[25-26]。根据式(1)计算 2 月 16 日 SOC 的平均质量浓度为 $11.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 占 OC 的 26.56%, 说明保定市春节 OC 主要来自于一次污染源的排放, 与 OC 与 EC 相关性分析得到的结论一致。

以往研究表明, SOC 生成较多时, OC/EC 约为 3.3; 生物质燃烧影响下, OC/EC 约为 6.6; 在长距离传输的污染物影响下, OC/EC 约为 12^[27-29]。保定市监测期间 OC/EC 在 3.6~15.2, 平均值为 10.3, 2 月 16 日后 OC/EC 集中分布在 10~13 (见图 7)。OC/EC 较高可能由春节燃煤、周边地区秸秆焚烧及烟花爆竹燃放引起, 此类排放源 OC 含量较高, 而 EC 含量较低。根据 OC/EC 判断保定市受长距离传输的污染物影响。

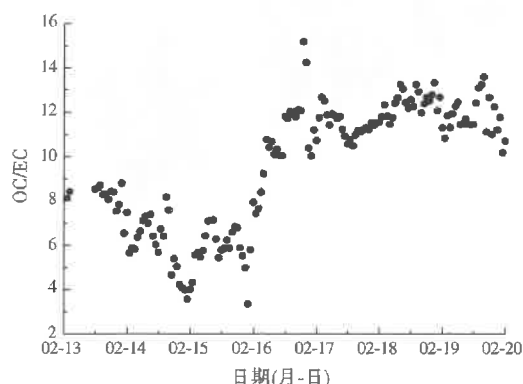


图 7 监测期间保定市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC/EC
Fig.7 OC/EC in $\text{PM}_{2.5}$ of Baoding during the monitoring period

2.4 $\text{PM}_{2.5}$ 来源分析

利用单颗粒质谱源解析数据判断污染物来源。2 月 15 日 17:00 保定市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度开始上升, 2 月 16 日 9:00 出现峰值 $588 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 根据保定市污染源占比分析可知, 此 $\text{PM}_{2.5}$ 上升过程烟花源贡献率达到 11.1%, 推断短时间内 $\text{PM}_{2.5}$ 急剧升高是烟花爆竹燃放引起。2 月 16 日保定市 $\text{PM}_{2.5}$ 源解析结果表明, 燃煤源、烟花源、生物质燃烧的贡献率分别为 26.9%、11.1%、12.4%, 扬尘、机动车尾气及二次无机源等贡献率相对较小, 可见保定市 $\text{PM}_{2.5}$ 主要受

本地燃煤、烟花爆竹燃放及生物质燃烧等排放影响。

监测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 除受本地污染源排放影响外, 还与大气污染区域传输有关。源解析结果显示, 保定市 $\text{PM}_{2.5}$ 本地污染排放贡献约占 60.0%~70.0%。利用混合型单粒子拉格朗日综合轨迹模式 (HYSPLIT-4)^[30-31] 研究气团对保定市大气污染传输的影响, 轨迹模拟高度选取 500 m, 后推轨迹时间为 72 h, 模拟频率为 24 h 一次, 得到监测期间各来源气团的污染特征 (见表 4)。

表 4 监测期间各来源气团的污染特征
Table 4 Pollution characteristics of air masses from various sources during the monitoring period

气团方向	聚类占比/%	$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)
西北偏西	42.9	113
西北偏北	42.9	132
偏南	14.3	156

由表 4 可见, 保定市受到 3 个方向气团的影响, 分别为西北偏西、西北偏北、偏南, 其中以西北气团为主导。西北偏西方向气团横穿内蒙古途经包头市到达保定市, 气团占比为 42.9%, 该气团传输距离长传输速度快; 西北偏北方向气团途经乌兰察布市与张家口市的中点, 远距离传输气团较为稳定, 气团占比为 42.9%; 偏南方向气团来自河北省东部渤海, 途经沧州市、天津市, 气团占比最小, 为 14.1%, 气团传输距离短、速度慢, 不利于颗粒物扩散, 其携带的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较大。偏南气团携带的 $\text{PM}_{2.5}$ 高于西北方向, 故保定市大气颗粒物污染同时受到近距离排放和远距离传输的影响, 除受到本地区县浓度影响外, 这些潜在源区主要分布在京津冀区域。

3 结 语

(1) 保定市春节期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最大值为 $588 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 出现在 2 月 16 日 9:00, 水溶性离子浓度排序为 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$, 同时 Q 达到峰值 $2.26 \mu\text{mol}/\text{m}^3$, 烟花爆竹燃放对 $\text{PM}_{2.5}$ 酸度影响显著。

(2) 监测期间, $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC、EC 的平均质量浓度为 28.41 、 $3.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 21.04%、2.30%。OC 与 EC 相关性较好 (相关系数为 0.960 6), SOC 在 OC 中占比较低, 仅为 26.56%, 说明 OC、EC 主要来自一次污染源的排放。

(3) 保定市主要受本地污染源 (燃煤、烟花爆竹燃放、生物质燃烧等) 影响, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献率在 60.0%~70.0%。后向轨迹聚类可知, 保定市受西

北方向和偏南方向气团传输的影响,这些城市集中分布在京津冀区域。应采取有效的控制措施如扩大烟花爆竹禁燃区、削减燃煤总量、禁止周边地区秸秆焚烧等。

参考文献:

- [1] 刘齐,何洪,郭云霞,等.春节期间燃放烟花爆竹对柳州市区PM_{2.5}中水溶性离子的影响[J].广东化工,2019,46(16):69-71.
- [2] LIN S S, VOS T, FLAXMAN A D, et al. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the global burden of disease study 2010 [J]. Lancet, 2012, 380(9859): 2224-2260.
- [3] 王伟,尹伟康,张欣荣,等.2018年春节期间烟花爆竹燃放对银川市空气质量的影响[J].环境化学,2019,38(9):2018-2026.
- [4] 陈威,邢延峰,孟庆庆,等.春节期间烟花爆竹燃放对哈尔滨市空气质量的影响[J].中国环境监测,2018,34(5):54-60.
- [5] HUANG Y, CHEN H, WANG L, et al. Single particle analysis of amines in ambient aerosol in Shanghai [J]. Environmental Chemistry, 2012, 9(3): 202-210.
- [6] 张小玲,徐敬,李腊平.不同气象条件下烟花爆竹燃放对空气质量的影响研究[J].气象与环境学报,2008,24(4):1-12.
- [7] 蔡敏,严明良,包云轩.苏州市大气PM_{2.5}中水溶性无机离子的源解析及其气象因子分析[J].气象科学,2018,38(5):648-658.
- [8] 张婷,曹军骥,刘随心.宝鸡市PM_{2.5}中水溶性离子组分污染特征及来源分析[J].地球环境学报,2017,8(1):46-54.
- [9] WANG P, CAO J J, SHEN Z X, et al. Spatial and seasonal variations of PM_{2.5} mass and species during 2010 in Xi'an, China [J]. Science of the Total Environment, 2015, 50(8): 477-487.
- [10] 王明毅,吴洪波.武汉城区春节PM_{2.5}中水溶性无机离子污染特征[J].环境科学与技术,2016,39(6):80-85.
- [11] 周变红,王格慧,张承中,等.春节期间西安市南郊细颗粒物中水溶性离子的污染特征[J].环境化学,2013,32(3):498-504.
- [12] 陶俊,张仁健,董林,等.夏季广州城区细颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀中水溶性无机离子特征[J].环境科学,2012,31(7):1717-1724.
- [13] BYTNEROWICZ A, FENN M E. Nitrogen deposition in California forests: a review [J]. Environmental Pollution, 1996, 92(2): 127-146.
- [14] 张小曳,张养梅,曹国良.北京PM₁中的化学组成及其控制对策思考[J].应用气象学报,2012,23(3):257-264.
- [15] 杨健,丁祥,刘寅,等.高原城市昆明PM_{2.5}中碳组分污染特征及来源分析[J].环境化学,2017,36(2):257-264.
- [16] 邹强,姚玉刚.春节烟花爆竹燃放期间苏州市区PM_{2.5}组分特征分析[J].中国环境监测,2014,30(4):100-106.
- [17] ZHAO P S, DONG F, YANG Y D, et al. Characteristics of carbonaceous aerosol in the region of Beijing, Tianjin, and He-

- bei, China [J]. Atmospheric Environment, 2013, 7(1): 389-398.
- [18] 谢绍东,于森,姜明.有机气溶胶的来源与形成研究现状[J].环境科学学报,2006,26(12):1933-1939.
- [19] 张鹤华,段玉森,高松,等.上海城区典型空气污染过程中细颗粒物污染特征研究[J].中国环境科学,2011,31(7):1115-1121.
- [20] CUSACK M, ALASTUEY A, PEREZI N, et al. Trends of particulate matter (PM_{2.5}) and chemical composition at a regional background site in the Western Mediterranean over the last nine years (2002-2010) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(8): 341-357.
- [21] 周变红,张承中,王格慧,等.春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究[J].环境科学,2013,34(2):448-454.
- [22] RAVINDRA K, MOR S, KAUSHIK C P. Short-term variation in air quality associated with fireworks events: a case study [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2003, 5(2): 260-264.
- [23] DUAN F K, HE K B, MA Y L, et al. Characteristics of carbonaceous aerosols in Beijing, China [J]. Chemosphere, 2005, 60(3): 355-364.
- [24] CHU S H. Stable estimate of primary OC/EC ratios in the EC tracer method [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(8): 1383-1392.
- [25] 霍静,李彭辉,韩斌,等.天津秋冬季PM_{2.5}碳组分化学特征与来源分析[J].中国环境科学,2011,31(12):1937-1942.
- [26] 吴琳,冯银厂,戴莉,等.天津市大气中PM₁₀、PM_{2.5}及其碳组分污染特征分析[J].中国环境科学,2009,29(11):1134-1139.
- [27] CARBONE S, SAANKOAKI S, FREY A R F, et al. Chemical characterization of submicrom aerosol particle in Santiago de Chile [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2013, 13(2): 462-473.
- [28] 瞿群,杨毅红,宋丹林,等.成都典型秸秆燃烧季节PM_{2.5}中化学成分研究[J].气候与环境研究,2016,21(4):439-448.
- [29] DUAN J C, TAN J H, WANG S L, et al. Roadside, urban, and rural comparison of size distribution characteristics of PAHs and carbonaceous components of Beijing, China [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2012, 69(4): 337-349.
- [30] WANG Y Q, ZHANG X Y, DRAXLER R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. Environmental Modeling & Software, 2009, 24(8): 938-939.
- [31] 丁新航,梁越,肖化云,等.太原市采暖季清洁天与灰霾天PM_{2.5}中水溶性无机离子组成及来源分析[J].环境化学,2019,38(6):1356-1366.

编辑:丁怀 (收稿日期:2020-03-20)