



移动扫码阅读

姚瑶,王冬进,杨伟波.连云港市区春节期间 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子特征分析[J].能源环境保护,2020,34(6): 89-94.

YAO Yao, WANG Dongjin, YANG Weibo. Characteristics of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ during Spring Festival in Lianyungang city[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(6): 89-94.

连云港市区春节期间 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子特征分析

姚瑶,王冬进,杨伟波

(江苏省连云港环境监测中心,江苏连云港 222001)

摘要:采用在线离子色谱分析了连云港市区春节期间 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的浓度变化范围,探讨了这些离子的小时变化、日变化、比例特征和相关性,解析其来源。结果表明: $PM_{2.5}$ 质量浓度及水溶性离子质量浓度分别在腊月三十晚、初一早晨和傍晚出现小峰值;烟花爆竹燃放集中时段 $PM_{2.5}$ 中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 、 K^+ 、 Mg^{2+} 质量浓度增加明显,初一傍晚与腊月二十八傍晚相比, Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 、 K^+ 、 Mg^{2+} 分别增加了 5.67 倍、1.20 倍、3.70 倍、82.8 倍和 20.9 倍; K^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 占总水溶性离子 (TWSI) 的比例明显上升,而 NH_4^+ 和 NO_3^- 占 TWSI 的比例明显下降。相关性分析表明, $PM_{2.5}$ 中的 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 具有相同来源, Cl^- 、 K^+ 和 Mg^{2+} 具有相同来源。主成分分析显示, $PM_{2.5}$ 中水溶性离子最主要的来源是机动车源、燃煤源、二次粒子源、扬尘源、烟花爆竹燃放源以及海洋源,烟花爆竹燃放源对 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子组分的贡献率达到 32.3%。

关键词:水溶性离子; $PM_{2.5}$;春节;连云港市区

中图分类号:X831

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2020)06-0089-06

Characteristics of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ during Spring Festival in Lianyungang city

YAO Yao, WANG Dongjin, YANG Weibo

(Jiangsu Lianyungang Environmental Monitoring Center, Lianyungang 222001, China)

Abstract: The concentration range of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ during the Spring Festival (from January 24 to 30, 2020) in Lianyungang city was analyzed by on-line ion chromatography. The hourly changes, daily changes, proportional characteristics and correlations of these ions were discussed, and their sources were analyzed. The results show that the mass concentrations of $PM_{2.5}$ and water-soluble ions appeared small peaks in lunar New Year's Eve, the morning and evening of the first day during the Spring Festival. During the period of setting off firecrackers and fireworks, the concentrations of Cl^- , SO_4^{2-} , F^- , K^+ , Mg^{2+} in $PM_{2.5}$ increased significantly. Compared with data on the evening of the twenty-eighth day of the first lunar month, the concentrations of Cl^- , SO_4^{2-} , F^- , K^+ , Mg^{2+} on the evening of the first day increased 5.67 times, 1.20 times, 3.70 times, 82.8 times and 20.9 times, respectively. The proportions of K^+ , Cl^- and Mg^{2+} in total water-soluble ions (TWSI) increased significantly, while the proportions of NH_4^+ and NO_3^- in TWSI decreased. According to correlation analysis, NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} in $PM_{2.5}$ may have the same emission source, and the Cl^- , K^+ and Mg^{2+} may have the same emission source. The principal component analysis shows that water-soluble ions were mainly derived from vehicle emission, coal firing, secondary inorganic particles, dust source, fireworks discharge source and oceanic source. The contribution rate of the fireworks discharge source to water-soluble ions in $PM_{2.5}$ was 32.3%.

Key Words: Water-soluble ions; $PM_{2.5}$; Spring Festival; Lianyungang city

0 引言

春节燃放烟花爆竹是中国人的传统习俗,烟花爆竹的燃放不仅增添了喜庆的节日气氛,也产生了严重的环境污染,导致空气质量明显下降。许多学者对此进行了研究,秦玮等^[1]研究表明,春节期间因烟花爆竹燃放对 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的贡献约占50%。杨雪等^[2]研究发现,与烟花爆竹成分基本一致的 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 K^+ 和 Mg^{2+} 攀升迅速。邹强等^[3]研究表明, $PM_{2.5}$ 中 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 在烟花爆竹燃放时段可能具有相同的来源。胡晓峰等^[4]研究表明大量的烟花爆竹的燃烧增加了 NH_4^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 等离子的浓度。马莹等^[5]研究表明烟花爆竹的燃烧可能会排放大量的 K^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 。为了深入分析因燃放烟花爆竹导致连云港市区空气质量变差的程度,利用URG-9000D气溶胶水溶性离子在线监测仪的监测结果,分析了连云港市区春节期间 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子(TWSI)的组分特征,以此研究燃放烟花对空气质量产生的影响并解析其污染来源。

1 材料与方法

1.1 监测点和时间

监测点位于江苏省连云港环境监测中心超级站(东经 $119^{\circ}10'33''$ 、北纬 $34^{\circ}35'19''$)6楼,楼顶距地面约20 m,采用仪器连续在线监测。监测点位于市区,紧邻道路,周边主要是各单位和生活区,无高建筑物阻挡,周围无明显工业污染源,但植被覆盖度不高,观测结果能有效反映连云港城区大气污染特征。观测时间为2020年1月24~30日(除夕至正月初六),样品采集周期为1 h,有效观

测7天,获得168组有效数据。 $PM_{2.5}$ 质量浓度、气象参数采用连云港市大气多参数站和国控监测点连云港环境监测中心数据。

1.2 主要仪器

$PM_{2.5}$ 总水溶性离子组分观测采用的是赛默飞世尔科技公司的URG-9000D气溶胶水溶性离子在线监测仪。该仪器由颗粒物采集系统和离子色谱分析系统(ICS 1100)2部分组成,可分析 F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 等离子,各离子检出限在 $0.006\sim 0.240\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,标准溶液由购买的赛默飞世尔科技公司阴阳离子储备液稀释而成,绘制的标准工作曲线相关系数均大于0.999。气象参数采用维萨拉 Vaisala WXT 520型仪器。

2 结果与分析

2.1 $PM_{2.5}$ 监测结果

图1是2020年1月24日~30日 $PM_{2.5}$ 质量浓度逐时变化情况。观测时间连云港市区 $PM_{2.5}$ 平均浓度为 $74\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,浓度范围为 $34\sim 129\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,峰值出现在1月24日(除夕),从2:00前后 $PM_{2.5}$ 开始逐渐上升,到8:00达到最高峰(图1),小时质量浓度为 $263\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。除夕当天是阴天,污染过程主要受高湿、小风等不利气象要素影响,近地面颗粒物在高湿的条件下,吸湿增长和二次转化,同时近地面风速较弱,不利于污染物的扩散,颗粒物持续累积而导致污染,之后天气阴转小雨,雨水对污染物的冲刷起到了净化作用, $PM_{2.5}$ 骤降。1月25~29日(初一至初五)空气质量良,1月30日(初六)空气质量优, $PM_{2.5}$ 质量浓度于1月24日22:00、1月25日9:00和19:00出现

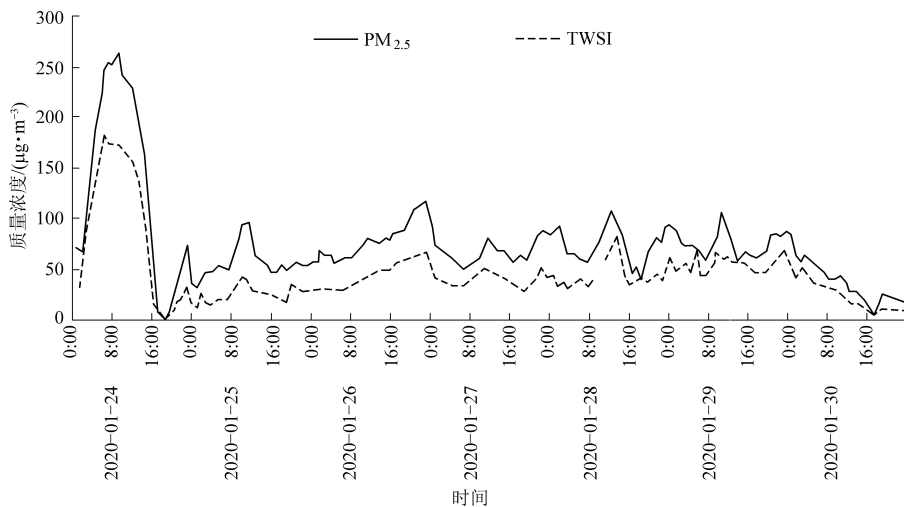


图1 $PM_{2.5}$ 质量浓度逐时变化

小峰值,这和连云港市政府发布《关于市区部分区域禁止燃放烟花爆竹的通告》(连政发[2019]116号)有关,其中要求市区晚 10 点至次日早 6 时禁止燃放烟花爆竹(除夕、正月初一、正月十五除外);除此之外与大部分企业休假,疫情期间停工停产,市民活动减少有关。

2.2 PM_{2.5} 中水溶性离子监测结果

2.2.1 水溶性离子小时值监测结果

图 2 是 2020 年 1 月 24 日~30 日 PM_{2.5} 中水溶性离子质量浓度逐时变化情况。由图 2 可见,1 月 24 日 22:00(燃放开始时段),Cl⁻、SO₄²⁻、F⁻、K⁺、

Mg²⁺ 出现明显峰值,小时质量浓度分别达到 3.00、18.0、0.032、7.65、0.446 μg/m³,同基本无烟花爆竹燃放的 1 月 22 日 22:00 相比,分别增加了 2.62、1.03、0.88、25.6、10.2 倍;1 月 25 日 9:00,Cl⁻、SO₄²⁻、F⁻、K⁺、Mg²⁺ 出现小峰值,小时质量浓度分别达到 6.76、17.3、0.143、9.20、0.541 μg/m³,同 1 月 22 日 9:00 相比,分别增加了 23.1、0.76、13.3、51.6、53.1 倍;1 月 25 日 19:00,Cl⁻、SO₄²⁻、F⁻、K⁺、Mg²⁺ 出现另一小峰值,小时质量浓度为 3.28、16.7、0.108、6.62、0.219 μg/m³,同 1 月 22 日 19:00 相比,分别增加了 5.67、1.20、3.70、82.8、20.9 倍。

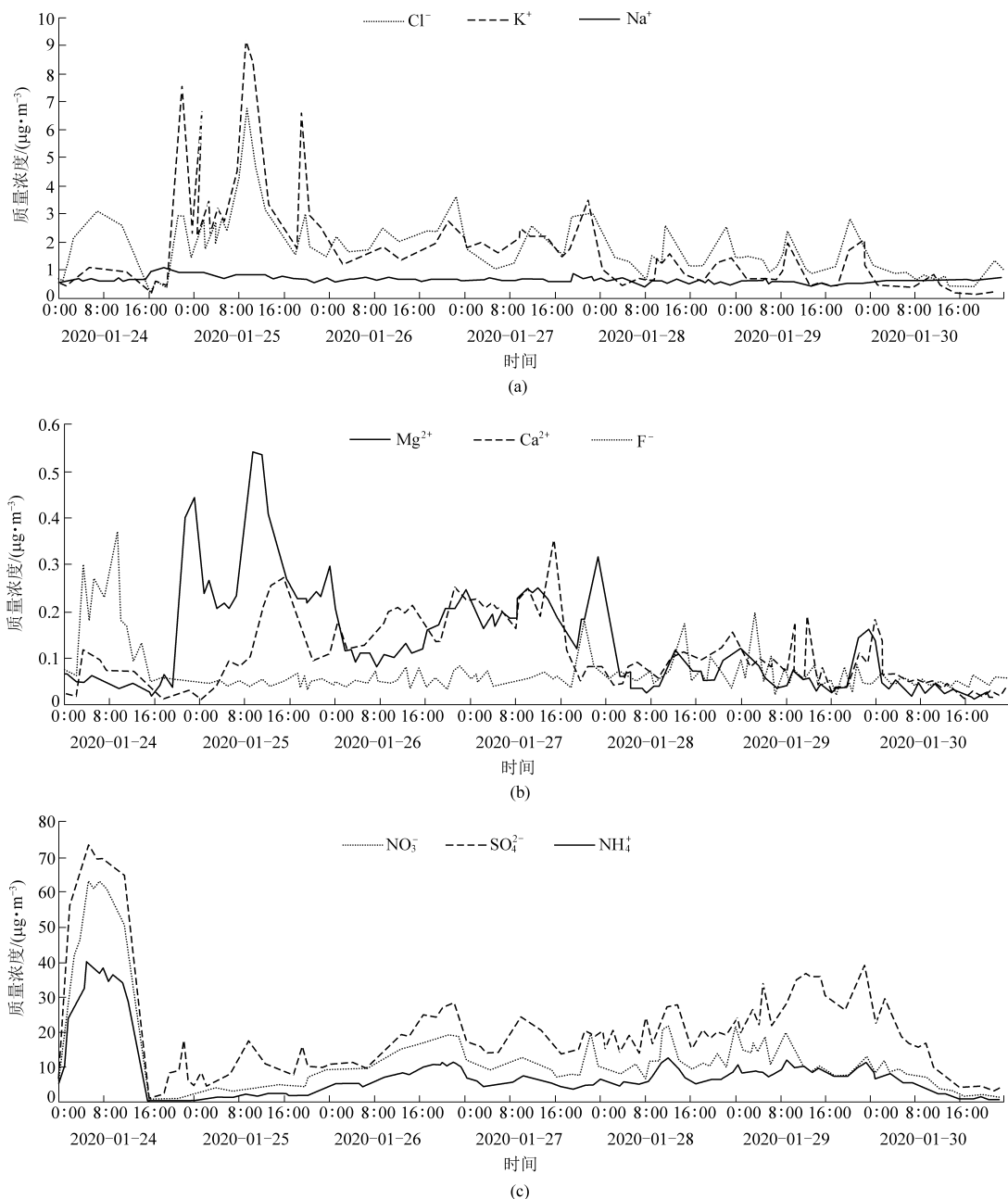


图 2 水溶性离子质量浓度逐时变化

2.2.2 水溶性离子比例变化

1月24日22:00与1月22日22:00两个时段的水溶性离子占TWSI的比例情况见表1。

表1 水溶性离子比例 %

| 水溶性离子 | 1月24日22:00 | 1月22日22:00 |
|-------------------------------|------------|------------|
| F ⁻ | 0.10 | 0.10 |
| Cl ⁻ | 9.36 | 4.93 |
| NO ₃ ⁻ | 4.27 | 20.2 |
| SO ₄ ²⁻ | 56.2 | 52.8 |
| NH ₄ ⁺ | 1.70 | 15.1 |
| Ca ²⁺ | 0.18 | 0.70 |
| Mg ²⁺ | 1.39 | 0.24 |
| K ⁺ | 23.9 | 1.72 |
| Na ⁺ | 2.83 | 4.28 |

由表1可知,1月24日22:00与1月22日22:00相比,K⁺占TWSI的比例从1.72%上升至23.9%,Cl⁻从4.93%上升至9.36%,Mg²⁺从0.24%上升至1.39%;而NH₄⁺占TWSI的比例从15.1%下降到1.70%,NO₃⁻从20.0%下降到4.27%。可见与基本无燃放相比,春节期间燃放烟花爆竹会导致

各水溶性离子比例发生变化。

烟花爆竹燃放时段,K⁺、Mg²⁺、Cl⁻小时浓度值增加明显,占TWSI的比例也明显增大,SO₄²⁻占比也有所增加,分析原因为烟花爆竹的主要成分为硫磺、硝酸钾、高硫酸钾等,为使烟花产生绚丽的色彩和闪光效果还含有镁、铝、锶等金属粉末和无机盐^[6]。当燃放烟花爆竹时会产生大量烟尘和有害气体,燃放现场烟消弥漫,严重污染空气。

2.2.3 水溶性离子日均值监测结果

1月24日~30日PM_{2.5}中水溶性离子日均浓度值监测结果见表2。由表2可知,在基本无燃放时段(1月28日~1月30日),各组分的质量浓度由高到低的顺序基本为SO₄²⁻>NO₃⁻>NH₄⁺>Cl⁻>K⁺>Na⁺>Ca²⁺>Mg²⁺>F⁻,NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺是PM_{2.5}中水溶性离子的主要成分。在燃放高峰时段(1月25日),各水溶性离子浓度的由高到低依次为SO₄²⁻>NO₃⁻>K⁺>NH₄⁺>Cl⁻>Na⁺>Mg²⁺>Ca²⁺>F⁻,SO₄²⁻、NO₃⁻、K⁺成为大气PM_{2.5}中含量较高的离子,说明春节燃放烟花爆竹期间,K⁺浓度上升明显。

表2 水溶性阴、阳离子日均值监测结果

| 日期 | F ⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | NH ₄ ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | μg/m ³ |
|------------|----------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------|
| 2020-01-24 | 0.055 | 2.06 | 28.9 | 37.6 | 17.9 | 0.131 | 0.102 | 1.44 | 0.769 | |
| 2020-01-25 | 0.135 | 2.98 | 4.35 | 9.99 | 2.20 | 0.052 | 0.296 | 3.92 | 0.785 | |
| 2020-01-26 | 0.174 | 2.27 | 13.6 | 17.7 | 7.93 | 0.059 | 0.145 | 1.77 | 0.701 | |
| 2020-01-27 | 0.178 | 1.96 | 10.4 | 17.7 | 5.77 | 0.071 | 0.208 | 2.12 | 0.685 | |
| 2020-01-28 | 0.095 | 1.71 | 11.5 | 19.9 | 7.25 | 0.074 | 0.082 | 0.928 | 0.634 | |
| 2020-01-29 | 0.091 | 1.53 | 12.1 | 29.2 | 9.21 | 0.070 | 0.073 | 0.997 | 0.565 | |
| 2020-01-30 | 0.043 | 0.847 | 5.44 | 12.7 | 4.02 | 0.054 | 0.038 | 0.385 | 0.672 | |

从水溶性离子日均浓度变化幅度看,K⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻浓度变化幅度较大,分别为0.385~3.92 μg/m³、0.038~0.296 μg/m³、0.847~2.98 μg/m³、9.99~37.6 μg/m³;Ca²⁺、Na⁺浓度变化幅度相对较小,分别为0.052~0.131 μg/m³、0.565~0.785 μg/m³。

2.2.4 水溶性离子占PM_{2.5}的比例

1月24日~30日PM_{2.5}中水溶性离子占比结

果见表3。由表3可知,TWSI占PM_{2.5}的比例在42.6%~71.8%,与基本无燃放时段相比,烟花爆竹集中燃放时段(1月25日)的K⁺和Cl⁻占比明显上升,其中K⁺从1.03%左右上升到6.76%,Cl⁻从1.48%左右上升到5.14%,NO₃⁻、NH₄⁺与基本无燃放时段相比下降明显,NO₃⁻从20.8%左右下降至7.51%,NH₄⁺从12.9左右下降至3.80%。

表3 各水溶性离子占PM_{2.5}的百分比

| 日期 | F ⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | NH ₄ ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | 合计 | % |
|------------|----------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|------|---|
| 2020-01-24 | 0.04 | 1.48 | 20.8 | 27.1 | 12.9 | 0.09 | 0.07 | 1.03 | 0.55 | 64.0 | |
| 2020-01-25 | 0.23 | 5.14 | 7.51 | 17.2 | 3.80 | 0.09 | 0.51 | 6.76 | 1.35 | 42.6 | |
| 2020-01-26 | 0.22 | 2.84 | 17.0 | 22.2 | 9.91 | 0.07 | 0.18 | 2.22 | 0.88 | 55.5 | |
| 2020-01-27 | 0.27 | 2.93 | 15.5 | 26.4 | 8.62 | 0.11 | 0.31 | 3.17 | 1.02 | 58.3 | |
| 2020-01-28 | 0.13 | 2.28 | 15.4 | 26.5 | 9.66 | 0.10 | 0.11 | 1.24 | 0.85 | 56.3 | |
| 2020-01-29 | 0.12 | 2.04 | 16.1 | 38.9 | 12.3 | 0.09 | 0.10 | 1.33 | 0.75 | 71.8 | |
| 2020-01-30 | 0.13 | 2.49 | 16.0 | 37.3 | 11.8 | 0.16 | 0.11 | 1.13 | 1.98 | 71.1 | |

2.3 PM_{2.5} 中水溶性离子相关性分析

春节期间水溶性离子小时均值相关性分析结果见表 4。由表 4 可知,春节期间, NH₄⁺ 与 NO₃⁻、SO₄²⁻ 的相关系数分别 0.984、0.953,说明 NH₄⁺ 与 NO₃⁻、SO₄²⁻ 的相关性较高,很可能是以硝酸铵、硫酸铵的形式存在; Cl⁻ 和 K⁺、Mg²⁺ 的相关性较高,相关

系数分别为 0.827、0.695, K⁺ 和 Mg²⁺ 的相关系数为 0.896,表明 Cl⁻、K⁺、Mg²⁺ 具有相同的来源即烟花爆竹的燃放,与沈建东等^[7] 研究的结果一致, NO₃⁻ 与 K⁺、Mg²⁺、Na⁺ 相关性不强,而与 Ca²⁺ 的相关性较高,说明 NO₃⁻ 与 K⁺、Mg²⁺、Na⁺ 的来源不同,与 Ca²⁺ 具有相同来源。

表 4 春节期间水溶性离子小时均值相关性分析

| 水溶性离子 | F ⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | NH ₄ ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ |
|-------------------------------|----------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|
| F ⁻ | 1 | 0.344 | 0.059 | 0.039 | 0.024 | -0.070 | 0.463 | 0.335 | -0.070 |
| Cl ⁻ | - | 1 | 0.236 | 0.234 | 0.206 | 0.238 | 0.695 | 0.827 | 0.276 |
| NO ₃ ⁻ | - | - | 1 | 0.911 | 0.984 | 0.766 | -0.256 | -0.170 | -0.265 |
| SO ₄ ²⁻ | - | - | - | 1 | 0.953 | 0.687 | -0.256 | -0.142 | -0.420 |
| NH ₄ ⁺ | - | - | - | - | 1 | 0.756 | -0.310 | -0.210 | -0.329 |
| Ca ²⁺ | - | - | - | - | - | 1 | -0.183 | -0.102 | -0.071 |
| Mg ²⁺ | - | - | - | - | - | - | 1 | 0.896 | 0.464 |
| K ⁺ | - | - | - | - | - | - | - | 1 | 0.439 |
| Na ⁺ | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 |

2.4 来源分析

采用 SPSS 软件对春节期间 PM_{2.5} 中水溶性离子主要成分分析,结果见表 5。

表 5 主要成分分析结果

| 离子组分 | 1 | 2 | 3 |
|-------------------------------|--------|-------|--------|
| Cl ⁻ | -0.050 | 0.933 | 0.059 |
| F ⁻ | -0.116 | 0.500 | -0.730 |
| NO ₃ ⁻ | 0.915 | 0.328 | 0.043 |
| SO ₄ ²⁻ | 0.909 | 0.302 | -0.070 |
| NH ₄ ⁺ | 0.945 | 0.283 | 0.021 |
| Ca ²⁺ | 0.759 | 0.321 | 0.317 |
| Mg ²⁺ | -0.559 | 0.773 | -0.059 |
| K ⁺ | -0.465 | 0.833 | 0.052 |
| Na ⁺ | -0.499 | 0.325 | 0.654 |
| 特征值 | 3.92 | 2.90 | 1.08 |
| 贡献率/% | 43.6 | 32.3 | 12.0 |

PM_{2.5} 中水溶性离子来源可分为 3 个因子,因子 1 贡献率为 43.6%,因子 2 贡献率为 32.3%,因子 3 贡献率为 12.0%,累计贡献率达 87.9%,因此 3 个因子可以基本解释原始数据。因子 1 中 NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺ 相关性较好,NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺ 与燃煤和机动车尾气排放相关^[8],也是 NO₃⁻、SO₄²⁻ 二次转化的重要来源^[9],Ca²⁺ 主要代表扬尘源^[10],因此因子 1 主要代表机动车源、燃煤源、二次粒子源和扬尘源。因子 2 中 Cl⁻、Mg²⁺、K⁺ 相关性较好,表明春节期间三者主要来自烟花爆竹的燃放,因子 2

主要代表烟花爆竹燃放源。因子 3 解析出 Na⁺ 载荷值较高,Na⁺ 是海洋源的标识元素^[11],因此,因子 3 可认为是海洋源。综上可知,春节期间连云港市区 PM_{2.5} 中水溶性离子最主要的来源是机动车源、燃煤源、二次粒子源、扬尘源、烟花爆竹燃放源以及海洋源。

3 结论

(1) 春节期间,由于烟花爆竹的燃放,PM_{2.5} 质量浓度及水溶性离子质量浓度分别在 1 月 24 日 22:00、1 月 25 日 9:00 和 19:00 出现小峰值;烟花爆竹燃放集中时段 PM_{2.5} 中 Cl⁻、SO₄²⁻、F⁻、K⁺、Mg²⁺ 质量浓度增加明显,1 月 25 日 19:00 与 1 月 22 日 19:00 相比,Cl⁻ 增加了 5.67 倍,SO₄²⁻ 增加了 1.20 倍,F⁻ 增加了 3.70 倍,K⁺ 增加了 82.8 倍,Mg²⁺ 增加了 20.9 倍;K⁺、Cl⁻、Mg²⁺ 占 TWSI 的比例明显上升,而 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 占 TWSI 的比例明显下降。

(2) 春节期间,连云港市区 PM_{2.5} 中 NH₄⁺ 与 NO₃⁻、SO₄²⁻ 的相关性较高,Cl⁻、K⁺、Mg²⁺ 的相关性较高,NO₃⁻ 与 K⁺、Mg²⁺、Na⁺ 相关性不强,而与 Ca²⁺ 的相关性较高,表明 NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺ 具有相同的来源,Cl⁻、K⁺ 和 Mg²⁺ 具有相同的来源;主成分分析显示,PM_{2.5} 中水溶性离子最主要的来源是机动车源、燃煤源、二次粒子源、扬尘源、烟花爆竹燃放源以及海洋源,其中烟花爆竹燃放源对 PM_{2.5} 中水溶性离子组分的贡献率达 32.3%。

参考文献

- [1] 秦玮, 葛顺, 张祥志, 等. 烟花燃放对空气中 $PM_{2.5}$ 及水溶性离子的影响研究 [J]. 环境监控与预警, 2013, 5 (3): 1-4.
- [2] 杨雪, 张祥志, 汤莉莉, 等. 烟花禁燃对南京市春节期间 $PM_{2.5}$ 及其组分的影响研究 [J]. 环境科学与管理, 2017, 42 (11): 131-134.
- [3] 邹强, 姚玉强, 丁铭, 等. 春节烟花爆竹燃放期间苏州市区 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子特征分析 [J]. 环境监测管理与技术, 2014, 26 (2): 26-29+62.
- [4] 胡晓峰, 赵露, 李佳, 等. 西宁取暖季 $PM_{2.5}$ 水溶性离子的污染特征研究 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41 (1): 95-100.
- [5] 马莹, 吴兑, 刘健. 珠三角春节期间 $PM_{2.5}$ 及水溶性离子成分的变化——以 2012 年为例 [J]. 中国环境科学, 2016, 36 (10): 2890-2895.
- [6] 李悦, 程水源, 黄青, 等. 烟花爆竹燃放期间大气颗粒物的化学成分特征 [J]. 暨南大学学报 (自然科学版), 2013, 34 (3): 329-332.
- [7] 沈建东, 焦荔, 何曦, 等. 杭州城区春节 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子在线观测 [J]. 中国环境监测, 2014, 30 (2): 151-157.
- [8] 牛宏宏, 王宝庆, 刘博薇, 等. 天津冬季 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子污染特征研究 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41 (5): 592-595.
- [9] 王鑫龙, 李星, 杨兴川, 等. 天津市 $PM_{2.5}$ 水溶性无机离子污染特征与来源分析 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41 (10): 1223-1226.
- [10] 丁新航, 梁越, 肖化云, 等. 长沙市秋季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子特征及其来源解析 [J]. 地球与环境, 2019, 47 (2): 186-192.
- [11] 张棕巍, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 厦门市大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源解析 [J]. 中国环境科学, 2016, 36 (7): 1947-1954.