

Environmental Monitoring In China ISSN 1002-6002,CN 11-2861/X

《中国环境监测》网络首发论文

中国环境监测

题目:	2017年厦门金砖会晤期间PM2.5的化学特征及来源						
作者:	刘涛涛,徐芯蓓,徐玲玲,陈进生,洪有为						
DOI:	10.19316/j.issn.1002-6002.2020.02.05						
收稿日期:	2019-08-30						
网络首发日期:	2020-02-27						
引用格式:	刘涛涛,徐芯蓓,徐玲玲,陈进生,洪有为. 2017 年厦门金砖会晤期间PM2.5						
	的化学特征及来源[J/OL]. 中国环境监测.						
	https://doi.org/10.19316/j.issn.1002-6002.2020.02.05						





网络首发: 在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶 段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期 刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出 版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出 版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编 辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、 出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。 为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认:纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国 学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷 出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出 版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首 发论文视为正式出版。

2017 年厦门金砖会晤期间 PM25 的化学特征及来源

刘涛涛^{1,2,3},徐芯蓓^{1,2,4},徐玲玲^{1,2},陈进生^{1,2},洪有为^{1,2} 1.中国科学院城市环境研究所,中国科学院区域大气环境研究卓越中心,福建厦门 361021 2.中国科学院城市环境研究所,城市环境与健康重点实验室,福建厦门 361021 3.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100086 4.福建农林大学资源与环境学院,福建福州 350002

摘 要:为了探讨厦门金砖会晤期间的排放控制措施以及天气形势对大气颗粒物污染特征的影响,于2017年8月10日 至9月10日对厦门气态污染物、细颗粒物(PM_{2.5})中的水溶性离子以及有机碳(OC)、元素碳(EC)等主要化学成分开展 了高时间分辨率的在线监测。根据空气质量管控措施和天气形势将研究期分为6个阶段。管控前、管控期 I(非台风) 和管控期 II(非台风)PM_{2.5}质量浓度分别为(33.12±9.48)、(30.30±17.00)、(16.01±4.71) μ g/m³。管控期 I(+台风)和 管控期 II(+台风)PM_{2.5}质量浓度分别为(12.40±3.73)、(12.45±3.28) μ g/m³。结果表明:管控期 I(+台风)阶段受静稳 天气的影响,管控效果削弱,PM_{2.5}质量浓度下降幅度小;台风对颗粒物质量浓度下降的影响比管控更显著。管控初期, PM_{2.5}中二次无机离子的质量浓度下降明显;台风对碳质组分质量浓度的影响不如无机组分显著。PMF 源解析结果表 明,二次无机源是 PM_{2.5}主要来源,随着管控措施的实行,扬尘源的贡献从 21%降低到了 6%,而机动车源的贡献降幅不明 显。台风期间 SO₄²⁻、NO₃⁻、SO₂、NO₂ 以及硫酸盐氧化比值(SOR)均明显低于非台风期间,氮氧化比值(NOR)反而升高。 台风和非台风期间 NOR 的日变化特征一致,NOR 与阳离子的相关性分析结果表明,台风或高风速海风期间 NOR 与 Na⁺ 呈现很强的正相关性,说明海盐粒子可促进 NO₂ 非均相反应生成 NO₃⁻。

关键词:细颗粒物;污染特征;来源解析;管控;金砖会晤

中图分类号: X823 文献标志码: A 文章编号:1002-6002(2020)02-0031-10 DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2020.02.05

Chemical Characteristics and Sources of PM2.5 During the 2017 BRICS Summit in Xiamen

LIU Taotao^{1,2,3}, XU Xinbei^{1,2,4}, XU Lingling^{1,2}, CHEN Jinsheng^{1,2}, HONG Youwei^{1,2}

1.Centre for Excellence in Regional Atmospheric Environment, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2.Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

3. Academy of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China

4. Academy of Resource and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Abstract: To explore the impact of control measures and the synoptic situations on the characteristics of atmospheric particles during the BRICS summit in Xiamen, the gaseous pollutants, the water-soluble ions and organic carbon/elemental carbon (OC/EC) of fine particles ($PM_{2.5}$) were monitored online at high time resolution from Aug.10 to Sep.10,2017. The whole study period was divided into six stages based on air quality control measures and weather situations. $PM_{2.5}$ concentration of S1,S2-non-typhoon and S3-non-typhoon were(33.12±9.48),(30.30±17.00),(16.01±4.71) µg/m³, respectively, while $PM_{2.5}$ concentration of S2-typhoon and S3-typhoon were(12.40±3.73),(12.45±3.28) µg/m³. Because of stagnant meteorology, the impact of control measures on $PM_{2.5}$ concentration in S2-non-typhoon was weak, while the impact of typhoon on the decline of particles concentration was more significant than control. At the beginning of emission control stage, the concentration of secondary inorganic ions decreased significantly. The effect of typhoon on the concentration of carbonaceous components was not significant.

收稿日期:2019-08-30;修订日期:2019-11-08

基金项目:国家重点研发计划项目"近海地基高分辨率观测与数据集成技术"(2016YFC02005)

第一作者简介:刘涛涛(1993-),女,陕西延安人,在读硕士研究生。

PMF results show that the secondary inorganic source was the most important source of $PM_{2.5}$. With the implementation of the control measures, the contribution of dust source was reduced from 21% to 6%, while the contribution of vehicle source was not reduced significantly. $SO_4^{2^-}$, NO_3^- , SO_2 , NO_2 , and Sulfate oxidation ratio(SOR) during the typhoon period were lower than those during the non-typhoon period, while Nitrogen oxide ratio (NOR) showed opposite result. The daily variation of NOR during typhoon and non-typhoon was similar, and NOR and Na⁺ showed a strong positive correlation during typhoon or high wind speed sea breeze period, which indicated that sea salt can promote heterogeneous reaction of NO₂ to NO_3^- .

Keywords: PM2.5; pollution characteristics; source apportionment; control measures; BRICS summit

大气细颗粒物(PM_{2.5})的质量浓度水平及其 化学组成是影响大气能见度的关键因素,也对环 境空气质量、人体健康等具有重要影响^[1-3]。随着 我国城市群经济的快速发展,PM_{2.5}污染逐渐呈现 出区域性^[4-5]、复杂性^[6-8]等特征。研究表明,雾 霾主要是由区域传输和本地排放源引起的,气象 条件在亚洲大陆外流区域的雾霾演变中起着重要 作用^[9-10]。此外,台风、海盐和港口航运等多种沿 海独特的环境因素使沿海地区的大气颗粒物污染 更加复杂。

2017 年 9 月 3—5 日,金砖国家领导人第九 次会晤(以下简称金砖会晤)于福建省厦门市成 功举办。厦门位于我国东南沿海,由于受到东亚 季风的影响,亚热带高压、台风和强季风降雨等事 件频繁发生[11-12]。金砖会晤空气质量保障期间 (2017年8月18日至9月5日),福建省经历了 副热带高压强盛引发的高温强辐射、台风外围 下沉气流抑制污染物垂直扩散以及我国东北大 陆污染气团输送等不利的天气形势的影响,使 得厦门在金砖会晤期间保障优良的大气环境成 为一项艰巨的挑战。在福建省和厦门市的生态 环境保护部门科学减排、精准管控措施的有效 实行以及浙江、江西、广东等省不同程度的减排 措施的配合下,厦门SO2、NOx、颗粒物以及VOCs 等的排放量削减比例平均达到40%以上,会晤 期间所有污染物日均质量浓度和小时质量浓度 均达到一级标准,为深入研究人为管控和气象 条件影响下大气颗粒物的污染特征提供了很好 的机会。

为了掌握和分析金砖会晤前后厦门大气颗粒物的污染特征及生消过程,本研究对常规气态污染物、PM2.5质量浓度及其化学组成进行高时间分辨率的在线监测,并结合气象条件、气团的后向轨迹和正矩阵因子分析模型(PMF模型)对不同管控阶段和天气形势下大气颗粒物的污染特征和来源进行分析,可为沿海独特环境以及特殊气象条

件影响下的大气颗粒物的管控提供有效的技术 支持。

1 研究方法

1.1 研究站点

厦门是东南沿海重要的中心城市、港口及风 景旅游城市。厦门陆地面积 1 699 km²,以滨海平 原、台地和丘陵为主,海域面积 390 km²,2017 年 常住人口 401 万。厦门属于亚热带季风气候,年 平均气温在 21 ℃ 左右;年平均降雨量在 1 200 mm 左右,每年平均受 4~5 次台风的影响,且多集 中在 7—9 月。本研究的观测站点是厦门集美区 的中国科学院城市环境研究所的大气监测超级站 (24.48°N,118.15°E),该观测站点位于 19 层楼 高的建筑物楼顶,高出地面约 60 m。观测站点周 围分布有高速公路、学校、新住宅楼和杏林湾商业 行政区。

1.2 观测仪器和数据来源

观测时间为2017年8月10日至9月10日。 利用连续颗粒物监测仪(TEOM 1405 D,美国)通 过微量振荡天平法测定 PM1、PM2, 和 PM10的小时 质量浓度。CO、O3、SO2、NO2(48i、49i、43i 和 42i, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, 美国)等大 气污染物浓度是基于厦门市3个环境空气质量监 测国控点位的实测值计算得到。使用在线气溶胶 及气体组分分析仪(MARGA,瑞士)测量 PM2.5水 溶性无机离子(WSII)包括 SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、 Cl⁻、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺和 Na⁺的小时质量浓度。基于 厦门市大气环境观测超级站,使用在线碳质气溶 胶分析仪(RT-4 OCEC,美国)对有机碳(OC)和元 素碳(EC)的小时质量浓度进行观测。温度(T)、 大气 压 (P)、风 向 (WD)、风 速 (WS)、降 水 (PRCP)和相对湿度(RH)等气象参数由自动气 象站(MAWS 301, Finland)同时进行监测。通过 能见度传感器(Belfort Model 6 000,美国)利用散 射原理测定能见度。降水量数据由福建省气象局 提供。

在整个观测期间,对在线仪器执行了严格的 质量保证和质量控制。定期检查在线观测系统的 流量以及仪器的性能。所有标准溶液均为纯度等 级,且定期重新制备。观测期间,仪器状态保持稳 定且数据可靠。

1.3 数据分析方法

1.3.1 二次有机碳的估算

有机碳可分为二次有机碳(SOC)和一次有机碳(POC)。颗粒物中的SOC一般通过使用EC作为示踪剂确定POC质量浓度,然后从测量的总OC的质量浓度中减去POC质量浓度来估算。计算公式^[13]:

$$\rho(\text{SOC}) = \rho(\text{OC}) - \rho(\text{POC}) \tag{1}$$

$$\rho(\text{POC}) = \rho(\text{EC}) \times (\text{OC/EC})_{\min} \qquad (2)$$

式中: $\rho(SOC)$ 、 $\rho(OC)$ 、 $\rho(POC)$ 和 $\rho(EC)$ 分别代 表二次有机碳、有机碳、一次有机碳和元素碳的质 量浓度(以C计), $\mu g/m^3$; (OC/EC)_{min}为OC和 EC质量浓度比的最小值。

1.3.2 NO₃⁻与 SO₄²⁻的转化率

本研究利用硫酸盐氧化比值(SOR)、氮氧化 比值(NOR)分别表示 SO₂转化为 SO₄⁻、NO₂转化 为 NO₃⁻的转化效率^[14]。SOR 和 NOR 计算公式:

 $SOR = [SO_4^{2-}] / [SO_4^{2-}] + [SO_2]$ (3)

NOR=[NO₃⁻]/{[NO₃⁻]+[NO₂]} (4) 式中[x]表示化学物质x的摩尔浓度。

1.4 气团后向轨迹分析

本研究使用 MeteoInfo 模型对观测期间到达 厦门的气团后向轨迹进行了模拟和聚类^[15]。该 模型计算到达采样点 100 m 高度的 72 h 后向轨 迹,每小时运行一次,每天运行 24 次,开始时间为 00:00,结束时间 23:00(运行时间以当地为准)。 后向轨迹的聚类采用欧拉距离分析法。用于计算 轨迹 的数 据从 美国国家海洋与大气管理局 (NOAA)的空气资源实验室(ARL)获取(ftp:// arlftp.arlhq.noaa.gov./pub/archives/gdas1)。

1.5 PMF 源解析

本文 PM_{2.5}源解析采用 USEPA PMF 5.0 模型,其基本方程式^[16]:

$$X = GF + E \tag{5}$$

式中: *X* 为样品质量浓度矩阵(*n×m*,*n* 为样品数, *m* 为化学成分数); *G* 为因子(污染源)贡献矩阵 (*n×p*,*p* 为析出因子个数); *F* 为因子轮廓矩阵; *E* 为残差矩阵,定义:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^{p} g_{ik} f_{kj} + e_{ij}$$
(6)

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \left[\frac{x_{ij} \sum_{k=1}^{p} g_{ik} f_{kj}}{u_{ij}} \right]^{2}$$
(7)

式中: x_{ij} 代表在第 i 个样品中测定的物质 j 的质量 浓度; g_{ik} 代表对第 i 个样品有贡献的因子 k 的质 量浓度; f_{ij} 为 k 因子中物种 j 的质量百分比; e_{ij} 代 表第 i 个样品中物种 j 的质量浓度的残差; u_{ij} 为 x_{ij} 的标准偏差;Q 是模型的判据之一,只有当 Q 收 敛时才可以进行下一步分析。本研究输入 PMF 模型的变量包括 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC、SO₄²⁻、NO₃⁻、 NH₄⁺、Cl⁻、Na⁺、K⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺的小时质量浓度, 每类变量的样品数量为 744 个,满足 PMF 运行的 数据量要求。

2 结果与讨论

2.1 气象情况和大气污染特征概述

观测期间厦门以西南风(23%)、东南风 (20%)和东北风(18%)为主。降水量为83.42 mm,多集中在受台风外围影响的8月23日和9 月3日。从图1可以看出,观测期间厦门天气形 势多变:8月22-24日、8月27日和9月3日3 次台风期间湿度和大气压都相应升高。该研究中 能见度和相对湿度具有显著负相关(r=-0.48, P<0.05),能见度低于 10 km 主要集中在降水期 间。根据空气质量管控措施的实行和天气形势的 变化,整个研究期可分为四大过程6个阶段:管控 前(S1.8 月 10—17 日)是没有执行管控措施的过 程:管控期 I (S2) 是工业排放和建筑工地管制的 过程,其中8月22-24日和27日分别受到13号 台风"天鸽"和14号台风"帕卡"的影响,划分为 S2-台风,其余时段划分为 S2-非台风:管控期Ⅱ (S3) 启动超低排放治理、扬尘管控、VOCs 整治和 其他重点控制措施,全面实施厦门机动车单双号 限行、船舶限行、未达标企业和施工现场等依法临 时关停等措施,其中9月3日受到16号台风"珊 瑚"的影响,划分为 S3-台风,其余时段划分为 S3-非台风:管控后(S4.9月6—10日)所有控制措施 都被取消。



图 1 2017 年 8 月 10 日至 9 月 10 日厦门市大气污染物颗粒物浓度与气象参数的时间变化序列 Fig.1 Time series of air pollutant mass concentrations and meteorological parameters in Xiamen from Aug.10 to Sep.10,2017

观测期间,管控前、管控期I(非台风)和管控期 II(非台风)PM_{2.5}质量浓度分别为(33.12±9.48)、 (30.30±17.00)、(16.01±4.71) μg/m³;管控期I(台 风)和管控期II(台风)PM_{2.5}质量浓度分别为 (12.40±3.73)、(12.45±3.28) μg/m³。不同阶段 PM_{2.5}质量浓度为(12.40~33.12) μg/m³。S1阶段 颗粒物以及气态污染物质量浓度相对较高(表 1)。S2阶段对工业排放和建筑工地排放进行了 管控,相对基准排放量,该阶段 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x和 VOCs 减排了 20%~41%,其中 $PM_{2.5}$ 减排 了 30%(减排数据由厦门市环境保护局大气污染 整治组提供)。但 S2-非台风阶段的污染物质量 浓度相比 S1 下降幅度较小,大气污染物质量浓度 (除 O₃ 外)降低了 2%~17%,其中 $PM_{2.5}$ 质量浓度 降低了 9%。从图 1 可见, S2-非台风前期(8 月 18—21 日)的颗粒物以及气态污染物质量浓度均 达到研究期间的最高值,归因于该阶段大气呈现 静稳状态[平均风速为(1.98±1.05)m/s],大气 垂直湍流交换受到抑制,不利于污染物扩散。由 气团后向轨迹聚类结果可知,S2-非台风气团主要 来源于各大陆边缘的东海和台湾海峡,气团轨迹 最短,而近海域的污染物质量浓度水平远高于远 海域^[17]。S2-非台风阶段相对静稳的气象条件使 得管控对污染物质量浓度的降低效果削弱很多。 S3 阶段管控措施更严格,在 S2 阶段的基础上 PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO_x和 VOCs 减排了 43% ~ 53%,其中 PM_{2.5}减排了 43%。S3-非台风阶段大 气污染物质量浓度相比 S1 降低了 24%~64%,其 中 PM_{2.5}质量浓度降低了 52%。由于执行了扬尘 的严格防控,该阶段 PM₁₀质量浓度下降最显著, PM₁₀ 占比(PM_{2.5}/PM₁₀ 为 64%)明显低于 S1 (53%)和 S2-非台风(PM_{2.5}/PM₁₀ 为 59%)。从图 1 可见,S3-非台风前期(8 月 31 日至 9 月 2 日), 颗粒物不降反升,是由于该阶段持续的东北向 西南方向的气流输送影响到整个华东沿海地 区,呈现区域传输的污染特征^[18]。S4 阶段停止 管控措施后,污染物质量浓度反弹。剔除台风 影响后,各阶段减排管控措施可降低大气污染 物质量浓度,但降低效果受到局地扩散条件的 影响。

表 1 不同阶段大气污染物质量浓度、气象参数以及比值

Table 1 Mass concentrations of air pollutants, meteorological parameters and ratios at different s	stages
--	--------

参数S1S2-台风S2-非台风S3-台风S3-非台风S4气温/℃29.41±2.2228.12±1.8029.26±2.3625.88±0.5527.97±1.8928.30±1.89湿度/%77.16±10.9381.62±11.6974.52±12.2387.67±9.2073.25±15.3083.29±9.86风速/(µx/w)2.44±0.973.61±1.432.27±1.304.02±1.323.46±1.672.15±1.10PM ₁₀ /(µg/m ³)62.07±18.6023.61±7.3751.34±27.0017.52±5.1924.93±8.6037.93±13.23PM _{2.5} /(µg/m ³)122.3±30.1256.00±4.60141.1±45.4384.54±0.3993.38±14.59102.8±29.61CO/(mg/m ³)0.41±0.110.28±0.090.40±1.310.34±0.040.33±0.050.31±0.08S0_2/(µg/m ³)6.61±5.713.72±1.556.39±2.993.26±0.773.59±1.024.99±1.84N0_2/(µg/m ³)30.02±17.1612.15±7.8925.29±14.319.26±3.9910.90±7.2322.08±12.28EC/(µg/m ³)8.97±2.188.16±1.448.11±3.444.69±0.894.43±0.934.74±1.06S0C/OC0.34±0.170.38±0.110.34±0.140.26±0.130.42±0.130.34±0.16S04 ²⁻ /(µg/m ³)6.27±1.752.42±1.205.87±3.304.07±0.704.38±1.336.13±2.31N0 ₃ ^{-/} /(µg/m ³)6.27±1.752.42±1.205.87±3.304.07±0.704.38±1.336.13±2.31N0 ₃ ^{-/} /(µg/m ³)6.27±1.752.42±1.205.87±3.304.07±0.704.38±1.336.13±2.31N0 ₃ ^{-/} /(µg/m ³)6.27±1.752.42±1.205.87±3.304.	Tuble 1	wides concentration	iis of all pollutal	its, meteorologica	i parameters ai	la radios de uniere	int stuges
4 29.41 ± 2.22 28.12 ± 1.80 29.26 ± 2.36 25.88 ± 0.55 27.97 ± 1.89 28.30 ± 1.89 $\overline{B}\overline{B}'$ 77.16 ± 10.93 81.62 ± 11.69 74.52 ± 12.23 87.67 ± 9.20 73.25 ± 15.30 83.29 ± 9.86 $\overline{M}\overline{B}'$ 2.44 ± 0.97 3.61 ± 1.43 2.27 ± 1.30 4.02 ± 1.32 3.46 ± 1.67 2.15 ± 1.10 $PM_{10}'(\mug/m^3)$ 62.07 ± 18.60 23.61 ± 7.37 51.34 ± 27.00 17.52 ± 5.19 24.93 ± 8.60 37.93 ± 13.23 $PM_{2.5}'(\mug/m^3)$ 33.12 ± 9.48 12.40 ± 3.73 30.30 ± 17.00 12.45 ± 3.28 16.01 ± 4.71 24.64 ± 9.47 $0_{3}'(\mug/m^3)$ 0.41 ± 0.11 0.28 ± 0.99 0.40 ± 0.13 0.34 ± 0.04 0.33 ± 0.05 0.31 ± 0.08 $S0_{2'}'(\mug/m^3)$ 0.41 ± 0.11 0.28 ± 0.99 0.40 ± 0.13 0.34 ± 0.04 0.33 ± 0.05 0.31 ± 0.08 $S0_{2'}(\mug/m^3)$ 2.40 ± 0.59 2.20 ± 0.53 2.35 ± 1.15 1.48 ± 0.41 1.29 ± 0.43 1.63 ± 0.52 $CO'(\mug/m^3)$ 2.40 ± 0.59 2.20 ± 0.53 2.35 ± 1.15 1.48 ± 0.41 1.29 ± 0.43 1.63 ± 0.52 $OC'(\mug/m^3)$ 8.97 ± 2.18 8.16 ± 1.44 8.11 ± 3.44 4.69 ± 0.89 4.43 ± 0.93 4.74 ± 1.06 SO_4^{2-}/EC 3.01 ± 1.07 1.22 ± 0.63 2.56 ± 1.36 3.02 ± 1.22 3.49 ± 1.97 4.01 ± 2.24 $NO_3^{-2}/(\mug/m^3)$ 8.97 ± 2.18 8.16 ± 1.44 8.11 ± 3.44 4.69 ± 0.89 4.3 ± 0.93 4.74 ± 1.06 $SO_4^{2-}/(\mug/m^3)$ 6.27 ± 1.75 2.42 ± 1.20 5.87 ± 3.30 4	参数	S1	S2-台风	S2-非台风	S3-台风	S3-非台风	S4
湿度/%77. 16 ± 10.93 81. 62 ± 11.69 74. 52 ± 12.23 87. 67 ± 9.20 73. 25 ± 15.30 83. 29 ± 9.86 风速/(m/s)2. 44 ± 0.97 3. 61 ± 1.43 2. 27 ± 1.30 4.02 ± 1.32 3. 46 ± 1.67 2. 15 ± 1.10 PM ₁₀ /(µg/m ³)62. 07 ± 18.60 23. 61 ± 7.37 51.34 ± 27.00 17.52 ± 5.19 24. 93 ± 8.60 37.93 ± 13.23 PM ₂ , $_5/(µg/m^3)$ 33. 12 ± 9.48 12.40 ± 3.73 30. 30 ± 17.00 12.45 ± 3.28 16.01 ± 4.71 24. 64 ± 9.47 $0_3/(µg/m^3)$ 122.3 ± 30.12 56.00 ± 4.60 141.1 ± 45.43 84.54 ± 4.03 93.38 ± 14.59 102.8 ± 29.61 $CO/(mg/m^3)$ 0.41 ± 0.11 0.28 ± 0.09 0.40 ± 0.13 0.34 ± 0.04 0.33 ± 0.05 0.31 ± 0.08 $80_2/(µg/m^3)$ 6.61 ± 5.71 3.72 ± 1.55 6.39 ± 2.99 3.26 ± 0.77 3.59 ± 1.02 4.99 ± 1.84 $NO_2/(µg/m^3)$ 2.40 ± 0.59 2.20 ± 0.53 2.35 ± 1.15 1.48 ± 0.41 1.29 ± 0.43 1.63 ± 0.52 $OC/(µg/m^3)$ 2.40 ± 0.59 2.20 ± 0.53 2.35 ± 1.15 1.48 ± 0.41 1.29 ± 0.43 1.63 ± 0.52 $OC/(µg/m^3)$ 8.97 ± 2.18 8.16 ± 1.44 8.11 ± 3.44 4.69 ± 0.89 4.43 ± 0.93 4.74 ± 1.06 SOC/OC 0.34 ± 0.17 0.38 ± 0.11 0.34 ± 0.14 0.2 ± 0.13 0.42 ± 0.13 0.34 ± 0.16 $SO_4^{2-}/(Pc/m^3)$ 6.27 ± 1.75 2.42 ± 1.20 5.87 ± 3.30 4.07 ± 0.70 4.38 ± 1.33 6.13 ± 2.31 $NO_3^{-}/(µg/m^3)$ 2.5 ± 1.14 1.35 ± 0.42 2.47 ± 1.73 <td< td=""><td>气温/℃</td><td>29. 41±2. 22</td><td>28.12±1.80</td><td>29.26±2.36</td><td>25.88±0.55</td><td>27.97±1.89</td><td>28.30±1.89</td></td<>	气温/℃	29. 41±2. 22	28.12±1.80	29.26±2.36	25.88±0.55	27.97±1.89	28.30±1.89
風速/(m/s)2.44±0.973.61±1.432.27±1.304.02±1.323.46±1.672.15±1.10 $PM_{1n}/(\mug/m^3)$ 62.07±18.6023.61±7.3751.34±27.0017.52±5.1924.93±8.6037.93±13.23 $PM_2, 5/(\mug/m^3)$ 33.12±9.4812.40±3.7330.30±17.0012.45±3.2816.01±4.7124.64±9.47 $O_3/(\mug/m^3)$ 122.3±30.1256.00±4.60141.1±45.4384.54±4.0393.38±14.59102.8±29.61 $CO/(mg/m^3)$ 0.41±0.110.28±0.090.40±0.130.34±0.040.33±0.050.31±0.08 $SO_2/(\mug/m^3)$ 6.61±5.713.72±1.556.39±2.993.26±0.773.59±1.024.99±1.84 $NO_2/(\mug/m^3)$ 30.02±17.1612.15±7.8925.29±14.319.26±3.9910.90±7.2322.08±12.28 $EC/(\mug/m^3)$ 2.40±0.592.20±0.532.35±1.151.48±0.411.29±0.431.63±0.52 $OC/(mg/m^3)$ 8.97±2.188.16±1.448.11±3.444.69±0.894.43±0.934.74±1.06 SOC/OC 0.34±0.170.38±0.110.34±0.140.26±0.130.42±0.130.34±0.16 $SO_4^{2^2}/EC$ 3.01±1.071.22±0.632.56±1.363.02±1.223.49±1.974.01±2.24 $NO_3^{-7}/(\mug/m^3)$ 6.27±1.752.42±1.205.87±3.304.07±0.704.38±1.336.13±2.31 $NO_3^{-7}(\mug/m^3)$ 2.54±1.141.35±0.422.47±1.731.22±0.301.38±0.582.66±1.88 $NH_4^+/(\mug/m^3)$ 0.41±0.500.52±0.390.13±0.180.22±0.140.08±0.120.16±0.21 $Mg^{2^2}/(\mug/m^3)$	湿度/%	77.16±10.93	81.62±11.69	74. 52±12. 23	87.67±9.20	73.25±15.30	83.29±9.86
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	风速/(m/s)	2.44±0.97	3.61±1.43	2.27±1.30	4.02±1.32	3.46±1.67	2.15±1.10
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$PM_{10}/(\mu g/m^3)$	62.07±18.60	23.61±7.37	51.34±27.00	17.52±5.19	24.93±8.60	37.93±13.23
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$PM_{2.5}/(\mu g/m^3)$	33.12±9.48	12. 40±3. 73	30.30±17.00	12.45±3.28	16.01±4.71	24.64±9.47
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$O_3/(\mu g\!/m^3)$	122. 3±30. 12	56.00±4.60	141, 1±45, 43	84.54±4.03	93.38±14.59	102.8±29.61
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$CO/(mg/m^3)$	0.41±0.11	0.28±0.09	0.40±0.13	0,34±0.04	0.33±0.05	0.31±0.08
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\mathrm{SO}_2/(\mu\text{g/m}^3)$	6.61±5.71	3.72±1.55	6.39±2.99	3.26±0.77	3.59±1.02	4.99±1.84
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\mathrm{NO}_2/(\mu\text{g/m}^3)$	30.02±17.16	12.15±7.89	25.29±14.31	9.26±3.99	10.90±7.23	22.08±12.28
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\text{EC/}(\mu\text{g/m}^3)$	2.40±0.59	2.20±0.53	2.35±1.15	1.48 ± 0.41	1.29±0.43	1.63±0.52
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$OC/(\mu g/m^3)$	8.97±2.18	8.16±1.44	8.11±3.44	4.69±0.89	4.43±0.93	4.74±1.06
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	SOC/OC	0.34±0.17	0.38±0.11	0. 34±0. 14	0.26±0.13	0.42±0.13	0.34±0.16
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\mathrm{SO_4}^{2-}/\mathrm{EC}$	3.01±1.07	1.22±0.63	2.56±1.36	3.02±1.22	3.49±1.97	4.01±2.24
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	NO ₃ ⁻ /EC	1.32±0.69	0.64 ± 0.27	1.06±0.59	0.89±0.32	1.10±0.73	1.64±1.19
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	${\rm SO_4^{\ 2^-}/(\mu g/m^3)}$	6.27±1.75	2.42±1.20	5.87±3.30	4.07±0.70	4.38±1.33	6.13±2.31
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$NO_3^-/(\mu g/m^3)$	2.54±1.14	1.35±0.42	2.47±1.73	1.22±0.30	1.38±0.58	2.66±1.88
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$N{H_4}^{+}/(\mu g\!/m^3)$	2.85±0.96	0.97±0.46	2.69±1.63	1.45±0.24	1.62±0.54	2.82±1.27
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\text{Cl}^-/(\mu\text{g/m}^3)$	0.41±0.50	0.52±0.39	0.13±0.18	0.22±0.14	0.08±0.12	0.16±0.21
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$Mg^{2+}/(\mu g/m^3)$	0.07±0.03	0.11±0.06	0.03±0.03	0.07 ± 0.04	0.04 ± 0.03	0.03±0.03
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$K^{*}/(\mu g/m^{3})$	0.42±0.15	0.18±0.05	0.33±0.16	0.14 ± 0.04	0.19±0.09	0.18±0.09
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$Ca^{2+}/(\mu g/m^3)$	0.31±0.28	0.14±0.08	0.14±0.10	0.03 ± 0.04	0.05 ± 0.05	0.08 ± 0.06
NOR 0. 09±0. 06 0. 12±0. 07 0. 10±0. 06 0. 13±0. 04 0. 14±0. 07 0. 12±0. 06 SOR 0. 54±0. 20 0. 39±0. 13 0. 46±0. 13 0. 56±0. 08 0. 54±0. 07 0. 55±0. 11	$Na^{*}/(\mu\text{g/m}^{3})$	0.25±0.17	0.57±0.27	0.23±0.13	0.33±0.15	0.32±0.13	0.25±0.06
SOR 0.54±0.20 0.39±0.13 0.46±0.13 0.56±0.08 0.54±0.07 0.55±0.11	NOR	0.09 ± 0.06	0.12±0.07	0.10 ± 0.06	0.13±0.04	0.14 ± 0.07	0.12±0.06
	SOR	0.54±0.20	0.39±0.13	0.46±0.13	0.56 ± 0.08	0.54±0.07	0.55±0.11

注:0,是日最大8h滑动平均值。

S2-台风阶段, PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁、CO、O₃、SO₂ 和 NO₂相比 S1 阶段减少了 32%~69%, 各污染物 (除 O₃ 外)质量浓度降低量是 S2-非台风阶段降 低量的 3.59、7.53、7.03、13.6、13.45、3.78 倍。 S3-台风阶段, PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁、CO、O₃、SO₂和 NO₂相比 S1 阶段减少了(除 CO 外)31%~72%, 各污染物质量浓度降低量是 S3-非台风阶段降 低量的 1.20、1.21、1.16、1.31、1.11、1.09 倍。 综上,说明在相同的减排措施下,台风对大气污 染物有更好的扩散作用,台风的影响要显著大 于管控措施的影响。

2.2 颗粒物的化学特征

研究期间厦门 $PM_{2.5}$ 中 OC 和 EC 的平均质量 浓度分别为(6.76±2.66) μ g/m³ 和(1.95±0.71) μ g/m³,碳组分在 $PM_{2.5}$ 中的占比为 40%±18%; 水溶性离子总质量浓度为(10.83±3.97) μ g/m³, 占 $PM_{2.5}$ 的 45%±8%,其中 SNA(SO₄²⁻、NO₃⁻和 NH₄⁺的质量浓度总和)占离子总质量浓度的 70%~96%。管控前(S1) SNA 和碳组分在 $PM_{2.5}$ 中的占比分别为 34%±7%和 35%±9% (图 2)。与 S1 阶段相比,S2-非台风阶段所有 离子组分和碳组分质量浓度均降低,但是碳组 分、SNA、Na⁺和 K⁺等占比相对稳定,反映了局 地累积效应的影响。相比 S2-非台风阶段,S3-非台风阶段的离子组分(除了 Cl⁻)和碳组分质 量浓度继续降低。S3-非台风 SO₄²⁻和 Na⁺在 PM_{2.5}中的占比显著升高,达到研究期间的最高 值。S3-非台风所有气团均来源于或经过海洋, 海洋气团传输导致厦门 PM_{2.5}中海盐离子的比 重增加;同时气团在长距离输送过程中发生强 烈的二次反应,导致硫酸盐占比增加。S4 阶段 解除管控措施后,NO₃⁻和 NH₄⁺组分的占比有 所升高。





Fig.2 Proportion of carbon and ionic components at different stages

与 S2-非台风相比, S2-台风阶段 Cl⁻、Na⁺和 Mg²⁺质量浓度分别增加了 0.39、0.34、0.07 μg/m³, 其他离子组分质量浓度均明显降低,下降幅度为 5%~64%,反映了海盐的影响。与 S3-非台风相 比,S3-台风阶段 Cl⁻和 Mg²⁺质量浓度分别增加了 0.14、0.03 μg/m³,其他离子组分质量浓度下降幅 度为 7%~52%。说明了 S2-台风的影响要强于 S3-台风。S2-台风阶段 OC 质量浓度高于 S2-非台 风阶段,S3-台风阶段 PM_{2.5}中 OC 和 EC 的质量浓 度和占比均比 S3-非台风阶段明显增加,说明台 风对碳质气溶胶质量浓度的降低效果不显著。

由于 EC 主要来自一次排放,受气象条件的 影响显著, NO₃⁻/EC 和 SO₄²⁻/EC 可以将边界层 变化、扩散等气象因素对气溶胶组分质量浓度的 影响最小化, 从而来确定二次反应的程度^[19]。 NO₃⁻/EC 和 SO₄²⁻/EC 表现出相似的变化趋势, 从管控前到 S2-非台风阶段降低, 而在 S3-非台风 阶段回升。管控期 II 的 NO₃⁻/EC 和 SO₄²⁻/EC 高 于管控期 I,同时管控期 II 的 NOR 和 SOR 也明 显高于管控期 I,说明管控期 II 的大气条件更有 利于二次生成, 为会议期间的空气质量保障增加 了难度。研究期间 OC/EC 范围为 3.11~3.94, 平 均值为 3. 61。OC/EC>2 表示存在 SOC 的生成, 这归因于厦门夏季温暖潮湿天气条件^[20]。S3-非 台风阶段对交通、建筑工程、油漆、住宅和餐馆烹 任等的管控措施使得 VOCs 最大程度减少(70. 63 t/d,与 S1 相比),但是该阶段 SOC/OC 最高 (0. 42±0. 13),与东北地区气团的区域大尺度输 送以及传输过程中强烈的二次转化有关^[21]。总 体来说,管控期 I 的排放控制措施和气象条件在 减少 SNA 方面发挥了重要作用,但在气象条件有 利于二次生成的管控期 II,减少一次污染物的排 放成为严格管控期的主力军。

2.3 PMF 来源解析

图 3 显示了 PMF 解析的各因子组分贡献特 征。二次无机源的因子通过高载荷的 NH₄⁺、 NO₃⁻和 SO₄²⁻来识别^[22]。燃煤通过高载荷的 Cl⁻来识别^[23]; Na⁺和 Cl⁻是典型的海盐示踪剂, 所以燃煤因子可能混合部分的海盐来源。机动 车来源通过高载荷的 OC 和 EC 来识别,研究表 明,OC 和 EC 也有可能来源于燃煤、生物质燃 烧和二次有机物等来源^[24]。扬尘通过 Ca²⁺和 Mg²⁺来识别^[21]。生物量燃烧因子通过 K⁺来 识别^[11]。



PM_{2.5} in Xiamen

研究期间厦门 PM_{2.5}的源解析结果表现为二次无机源(38%)、机动车排放(29%)、扬尘(12%)、海盐(11%)、生物质燃烧(5%)和燃煤(5%)。不同阶段厦门 PM_{2.5}的来源贡献如图 4 所示。从 S1 到 S4 的非台风阶段,扬尘对 PM_{2.5}的贡

献持续降低,从21%降到6%,可以看出城市空气 质量管理期间扬尘的管控效果最显著。研究期间 频繁受到台风的影响,导致不同阶段海盐对 PM, 的贡献有很大差异。S2-台风阶段和 S3-台 风阶段海盐源对 PM,5的贡献分别为 21% 和 25%,明显高于相应管控时期的非台风阶段。时 处夏季,厦门本地的生物质燃烧事件较少,因此生 物质燃烧源的贡献较小且在3%~6%的范围内波 动。另外,厦门的燃煤主要为工业燃煤,燃煤源对 PM,5的贡献基本小于7%;其中S3-台风阶段燃煤 源对 PM,,的贡献达到最大(7%),可能有很大一 部分 Cl⁻来源于海洋。随着交通限行措施的加 强.S2、S3-非台风阶段机动车排放源贡献有所下 降,但是降幅相对较小。扬尘源的管控效果更为 显著,可能导致机动车排放源的贡献没有出现明 显下降。另外,交通限行措施对气态污染物 NO。 质量浓度的下降效果比颗粒物显著,与管控期、尤 其是管控期Ⅱ气象条件有利于二次反应生成有 关。二次无机源对 PM,,的贡献是所有来源中最 大的。S3 阶段虽然对大气污染物的管控更加严 格,NO,和SO,等前体物的减排幅度更大,但是 S3-非台风阶段二次无机源的贡献(42%)高于 S2-非台风阶段, 与 S3-非台风阶段气象条件有利于 二次生成有关。S2-台风阶段和 S3-台风阶段二次 无机源的贡献均低于相应管控期的非台风阶段, 主要原因:台风阶段 NO, 和 SO, 等前体物质量浓 度较低,台风带来的低温天气不利于二次反应,以 及降雨对老化颗粒物的清除等。



2.4 台风对颗粒物二次组分的影响

通过 PM, 化学组分以及来源贡献的分析 可知,二次无机组分在 PM25中的占比或二次无 机源对 PM,,的贡献均很显著。研究台风以及 非台风期间颗粒物中二次无机组分的反应生成 对了解沿海城市颗粒物污染过程具有重要的意 义。从图5可以看出,同一管控措施下,台风期 间 SO4²⁻和 SO,质量浓度以及 SOR 均明显低于 非台风期间。整个观测期间 SO42-显示出对湿 度的依赖性(r=0.7,P<0.05)。S2-非台风阶段 SO4²⁻和 SOR 均在白天(08:00—18:00)出现峰 值,说明该期间光化学反应是生成 SO₄²⁻的主要 路径。在 S3-非台风阶段 SOR 在白天出现峰值, 但是 SO42-质量浓度在白天相对较低,说明光化 学反应不是影响 SO42-质量浓度的主要因素,可 能与前文 S3-非台风阶段气团长距离传输过程 中 SO4²⁻生成的结果有关。S2-台风、S3-台风阶 段,夜间(00:00-06:00、18:00-24:00)SO²⁻ 质量浓度略高于白天,SO4²⁻的前体物 SO,的峰 值在 S2-非台风阶段出现在白天,在 S3-非台风

和 S2-台风、S3-台风阶段夜间和凌晨质量浓度最 高。以上结果说明,台风期的气象条件以及其 对前体物的稀释扩散作用在一定程度上降低了 SO42-的光化学反应生成。S2-非台风、S3-非台风 阶段 NO3⁻质量浓度峰值出现在上午(08:00-10:00), NOR 峰值出现在中午(12:00—14:00); NO₃⁻和 NOR 的峰值出现时间错开,反映了 NO₃⁻ 峰值的出现与前体物 NO, 夜间的大量累积有关。 S2、S3 台风和非台风阶段 NO₃、NO₂ 和 NOR 的日 变化趋势基本一致。但是台风期间 NO、和 NO, 质量浓度比非台风期间明显降低, NOR 反而升 高。通过计算 S2、S3 台风和非台风 NOR 与一次 阳离子(Mg²⁺、K⁺、Ca²⁺和 Na⁺)的相关性(表 2), 发现 S2-非台风阶段 NOR 与阳离子无显著相关 性,而 S3-非台风和 S2-台风、S3-台风阶段, NOR 与 Na⁺显著正相关。台风阶段受到明显的海盐的 影响、S3-非台风阶段也受到远洋传输的气团的影 响,如图4所示,这3个阶段海盐源对颗粒物的贡 献较大,说明 NO,可以在海盐粒子表面发生非均 相氧化反应,从而向 NO3⁻转化。



图 5 台风和非台风阶段 SO₄²⁻、NO₃⁻、NOR、SOR、SO₂ 和 NO₂ 的日变化特征 Fig.5 Diurnal variation of SO₄²⁻, NO₃⁻, NOR, SOR, SO₂, NO₂ of typhoon and non-typhoon

	Table 2	Correlatio		un cations o	i typnoon and	i non-typno	011	
阶段 -	Mg ²⁺		K ⁺		Ca ²⁺		Na ⁺	
	r	Р	r	Р	r	Р	r	Р
S2-非台风	0.107	0.241	0.123	0.080	0.041	0.586	0.133	0.065
S2-台风	0.159	0.156	0.055	0.615	0.322	0.005	0.325	0.002
S3-非台风	0.064	0.590	0.155	0.117	0.015	0.905	0.641	0.000
S3-台风	0.557	0.013	0.372	0.080	-0.482	0.273	0.856	0.000

表 2 台风和非台风阶段 NOR 与阳离子的显著相关性 Table 2 Correlation of NOR with cations of typhoon and non-typhoon

3 结论

1) 观测期间不同阶段厦门 PM_{2.5}的质量浓度 范围为(16.01~33.12) μg/m³。管控期 I(S2-非 台风阶段) PM_{2.5} 质量浓度相比 S1 阶段下降了 9%,管控期 II(S3-非台风阶段) PM_{2.5} 质量浓度相 比 S1 阶段下降了 52%。S2-台风阶段和 S3-台风 阶段 PM_{2.5} 质量浓度相比 S1 阶段分别下降了 63%和 62%。说明台风对颗粒物质量浓度降低的 影响要显著大于管控措施的影响。

2)管控期 I 和管控期 II 阶段 PM_{2.5}中离子质 量浓度和碳组分质量浓度相比管控前明显降低。 S2-非台风阶段 PM_{2.5}中二次无机离子质量浓度的 下降最明显,而 S3-非台风阶段区域传输和气象 条件均有利于二次反应,硫酸盐和 SOC 的占比增 加。台风对碳组分质量浓度的降低效果不如无机 组分。管控措施对于扬尘的控制最有效,其贡献 从 S1 阶段的 21%下降到 S2-非台风阶段的 14% 和 S3-非台风阶段 7%。交通限行对气态污染物 NO,质量浓度的削减效果比颗粒物明显。

3) 台风期间, 厦门市 SO₄²⁻和 SO₂ 质量浓度 以及 SOR 受台风外围的影响均明显低于非台风 期; 台风期间 NO₃⁻和 NO₂ 质量浓度也明显低于非 台风期间, 但是 NOR 反而升高。台风期间或受到 海洋气团的影响时, NOR 与 Na⁺有很强的正相关 性, 表明台风或海风携带的大量海盐粒子为 NO₂ 生成 NO₃⁻的非均相反应提供表面反应的场所。

参考文献(References):

[1] 曾贤刚,阮芳芳,彭彦彦.基于空间网格尺度的中国 PM_{2.5}污染健康效应空间分布[J].中国环境科学, 2019,39(6):2 624-2 632.

ZENG Xiangang, Ruan Fangfang, PENG Yanyan, et al. Health Effects' Spatial Distribution Analysis of PM_{2.5} Pollution in China Based on Spatial Grid Scale [J]. China Environmental Science, 2019, 39 (6): 2 624-2 632.

- [2] SULONG N A, LATIF M T, KHAN M F, et al. Source Apportionment and Health Risk Assessment Among Specific Age Group During Haze and Non-Haze Episodes in Kuala Lumpur, Malaysia [J]. Science of the Total Environment, 2017, 601:556-570.
- [3] ZHOU J, YING X, XING Z, et al. Characterizing and Sourcing Ambient PM_{2.5} over Key Emission Regions in China II: Organic Molecular Markers and CMB Modeling [J]. Atmospheric Environment, 2017, 163: 57-64.
- [4] 孙峰, 张大伟, 孙瑞雯, 等.北京地区冬季典型 PM_{2.5}重污染案例分析[J].中国环境监测, 2014, 30(6):1-12.

SUN Feng, ZHANG Dawei, SUN Ruiwen, et al. Typical Heavy Pollution Episode Analysis on PM_{2.5} in Winter of Beijing [J]. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(6):1-12.

[5] 丁萌萌,周健楠,刘保献,等.2015年北京城区大气中 PM_{2.5}中 NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻及前体气体的污染特征[J].环境科学,2017,38(4):1307-1316.
DING Mengmeng, ZHOU Jiannan, LIU Baoxian, et al. Pollution Characteristics of NH₄⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ in PM_{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing [J]. Environmental Science, 2017, 38(4):1307-1316.

- [6]黄凡,陈楠,周家斌,等. 2016—2017 年武汉市城 区大气 PM_{2.5}污染特征及来源解析[J].中国环境监 测,2019,35(1):17-25.
 HUANG Fan, CHEN Nan, ZHOU Jiabin, et al. Characteristics and Source Apportionment of PM_{2.5} in Urban Areas of Wuhan During 2016-2017 [J]. Environmental Monitoring in China, 2019, 35(1):17-25.
- [7] WANG H, SHOOTER D. Water Soluble Ions of Atmospheric Aerosols in Three New Zealand Cities: Seasonal Changes and Sources [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(34):6 031-6 040.
- [8] 董海燕,古金霞,陈魁,等. 天津市区 PM_{2.5}中碳组 分污染特征及来源分析[J]. 中国环境监测, 2013, 29(1):34-38.

DONG Haiyan, GU Jinxia, CHEN Kui, et al. Character

and Source Analysis of Carbonaceous Aerosol in $PM_{2.5}$ in the Center of Tianjin City [J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29(1):34-38.

- [9] JEONG J I, PARK R J. Winter Monsoon Variability and Its Impact on Aerosol Concentrations in East Asia [J]. Environmental Pollution, 2017, 221:285-292.
- [10] 高愈霄, 霍晓芹, 闫慧, 等. 京津冀区域大气重污染 过程特征初步分析[J]. 中国环境监测, 2016, 32
 (6):26-35.

GAO Yuxiao, HUO Xiaoqin, YAN Hui, et al. Preliminary Analysis on the Characteristics of Heavy Air Pollution Events in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Environmental Monitoring in China, 2016, 32(6): 26-35.

- [11] BAGTASA G, CAYETANO M G, YUAN C S. Seasonal Variation and Chemical Characterization of PM_{2.5} in Northwestern Philippines [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(7):4 965-4 980.
- [12] LI M, HU M, DU B, et al. Temporal and Spatial Distribution of PM_{2.5}, Chemical Composition in A Coastal City of Southeast China [J]. Science of The Total Environment, 2017, 605/606:337-346.
- [13] TURPIN B J, HUNTZICKER J J. Identification of Secondary Organic Aerosol Episodes and Quantitation of Primary and Secondary Organic Aerosol Concentrations during SCAQS [J]. Atmospheric Environment, 1995, 29(23): 3 527-3 544.
- [14] LI H, WU H, WANG Q, et al. Chemical Partitioning of Fine Particle-Bound Metals on Haze-Fog and Non-Haze-Fog Days in Nanjing, China and its Contribution to Human Health Risks [J]. Atmospheric Research, 2017,183:142-150.
- [15] WANG H, TAN S C T, WANG Y, et al. A Multisource Observation Study of the Severe Prolonged Regional Haze Episode over Eastern China in January 2013[J]. Atmospheric Environment, 2014, 89(2):807-815.
- [16]金蕾,华蕾.大气颗粒物源解析受体模型应用研究及 发展现状[J].中国环境监测,2007,23(1):38-42.
 JIN Lei,HUA Lei. Research and Development Status of

Receptor Model on Source Apportionment of Atmospheric Particulate Matter [J]. Environmental Monitoring in China, 2007, 23(1):38-42.

- [17] FU P, KAWAMURA K, CHEN J, et al. Isoprene, Monoterpene, and Sesquiterpene Oxidation Products in the High Arctic Aerosols during Late Winter to Early Summer [J]. Environmental Science & Technology, 2009,43(11):4 022-4 028.
- [18] 王杰.中国空气质量在线监测分析平台[EB/OL]. (2015-01-30) [2019-08-06]. https://www.aqistudy.cn/.
- [19] ZHENG G J, DUAN F K, SU H, et al. Exploring the Severe Winter Haze in Beijing: the Impact of Synoptic Weather, Regional Transport and Heterogeneous Reactions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015,15(6):2 969-2 983.
- [20] CAO J J,ZHU C S,TIE X X, et al. Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosols from Shanghai, China
 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 2(13):803-817.
- [21] 徐少才,王静,吴建会,等.青岛市 PM_{2.5}化学组分特 征及综合来源解析[J].中国环境监测,2018, 34(4):44-53.
 - XU Shaocai, WANG Jing, WU Jianhui, et al. Characterization of Chemical Composition and Comprehensive Source Apportionment of PM_{2.5} in Qingdao [J]. Environmental Monitoring in China, 2018,34(4):44-53.
- [22] SONG Y, ZHANG Y, XIE S, et al. Source Apportionment of PM_{2.5} in Beijing by Positive Matrix Factorization [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(8):1 526-1 537.
- [23] YAO X H, CHAN C K, FANG M, et al. The Water-Soluble Ionic Composition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36 (26):4 223-4 234.
- [24] ZHAO P, DONG F, YANG Y, et al. Characteristics of Carbonaceous Aerosol in the Region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmospheric Environment, 2013,71:389-398.