

陈晨,李云婷,常淼,等.2019~2021年北京市PM_{2.5}及组分受风向影响研究[J].中国环境科学,2023,43(12):6261-6269.

Chen Chen, Li Yun-ting, Chang Miao, et al. Study on the influence of PM_{2.5} and component concentration on wind direction in Beijing from 2019 to 2021 [J]. China Environmental Science, 2023,43(12):6261-6269.

2019~2021年北京市PM_{2.5}及组分受风向影响研究

陈晨,李云婷,常淼,景宽,孙峰,郭元喜,董欣,孙瑞雯,沈秀娥,刘保献* (北京市生态环境监测中心,北京100083)

摘要: 利用北京市2019~2021年的气象数据、PM_{2.5}及组分浓度数据,结合常规污染物NO₂浓度,分别对PM_{2.5}及组分浓度、气象参数、NO₂浓度和氮氧化率(NOR)大小的时空变化进行分析比较.结果表明:2019~2021年三年间北京市城区PM_{2.5}浓度下降14%,但NO₃⁻上升12%;各风向上,北京市城区PM_{2.5}浓度大小顺序为:东北风>东风>西南风>东南风>南风>西风>北风>西北风,此外,二次无机盐组分最高浓度均出现在偏东风风向,有机物(OM)最高浓度出现在西南风;各风向年际变化上,2019~2021年,北京市PM_{2.5}、各组分及NO₂浓度在空间上均呈现高浓度“东移”特征,NO₃⁻在东北风向上上升幅度最高,达65.7%;东北、东风及东南风风向上,相对湿度同步升高,NOR在东北、东风风向上同步升高,升高幅度达70%,由此认为,北京市NO₃⁻在东北风向上的反弹与前体物浓度东移和东北风向上相对湿度的升高有关.

关键词: PM_{2.5}; 组分浓度; 风向分布; NO₃⁻浓度反弹; 气象条件

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2023)12-6261-09

The influence of PM_{2.5} and component concentration on wind direction in Beijing from 2019 to 2021. CHEN Chen, LI Yun-ting, CHANG Miao, JING Kuan, SUN Feng, GUO Yuan-xi, DONG Xin, SUN Rui-wen, SHEN Xiu-e, LIU Bao-xian* (Beijing Ecological Environment Monitoring Center, Beijing 100083, China). *China Environmental Science*, 2023,43(12): 6261-6269

Abstract: Using the meteorological data, PM_{2.5} and component concentration data of Beijing from 2019 to 2021, combined with the NO₂ concentration, the temporal and spatial changes of PM_{2.5} and component concentration, meteorological parameters, NO₂ concentration and nitrogen oxidation rate (NOR) were analyzed and compared. The results showed that: (1) PM_{2.5} concentration in urban areas of Beijing decreased by 14% in the three years from 2019 to 2021, but NO₃⁻ rebounded by 12%; (2) Each wind was upward, and the order of PM_{2.5} concentration in urban areas of Beijing was: northeast wind> east wind> southwest wind> southeast wind> south wind> west wind> north wind> northwest wind, in addition, the highest concentration of secondary inorganic salt components appeared in the easterly wind direction, and the highest concentration of organic matter (OM) appeared in the southwest wind; (3) In terms of interannual changes in various wind directions, from 2019 to 2021, the concentration of PM_{2.5}, components and NO₂ in Beijing showed the characteristics of high concentration "eastward shift" in space, and NO₃⁻ rebounded the highest upward in the northeast wind, reaching 65.7%; (4) The north, northeast and southeast winds were upward, and the relative humidity increases synchronously, and NOR increased synchronously in the northeast and east winds, with an increase of 70%, so it was believed that the rebound of NO₃⁻ in the northeast wind in Beijing was related to the eastward shift of precursor concentration and the increase of relative humidity in the northeast wind.

Key words: PM_{2.5}; component concentration; wind direction distribution; NO₃⁻ concentration rebound; meteorological conditions

研究表明,气象条件是除污染源排放外影响大气中颗粒物浓度及其化学组分的重要因素^[1-3].受地形地貌、全球气候变化以及区域产业结构等因素影响,气象场在空间上具有特异性,在时间上呈现年度差异性,污染源排放在区域范围上也表现显著的地域化特征.

因此,不同地区的气象条件与PM_{2.5}浓度的关系具有理论统一性的同时兼具地方差异化特征^[4-5].在众多的气象条件中,风向是影响空气质量的关键

因子.Davis等^[6]指出短时间内大尺度环流形势对污染过程起到决定性的作用;Clappier等^[7]对希腊的研究中,根据污染排放特征和风型进行分类,将希腊半岛划为不同区域,每个区域对应一种特定的污染物行为.

收稿日期: 2023-04-13

基金项目: 北京市科技支撑课题(Z211100004321006);国家重点研发计划项目(2021YFC1809000)

* 责任作者, 正高级工程师, liubaoxian28@163.com

在我国,一些学者研究了短时段 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染事件,分析气象因素与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关系.在这些研究中,有的定性分析了风向风速是不可忽视的气象因子:何建军等^[8]指出风场是决定大气污染物局地输送、扩散和跨界输送的重要因素;有的解释了风向风速对污染物的影响方式:孙兆彬等^[5]的研究解释了北京特殊的地形特征下,不同风向风速对污染物传输的作用特征;有的计算了风场对污染浓度的影响程度:Liang 等^[9]研究了气象要素与 $\text{PM}_{2.5}$ 及组分浓度的多元线性方程,其中,风向、风速是具有较大相关系数的变量.更多的研究总结了我国不同城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与气象要素的关系或不同风向风速下 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度变化特征^[10-20].除此之外,一些学者将气象因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响进行了更精确的计算:许艳玲等^[4]基于 WRF-CMAQ 模型系统定量分析了气象和排放因素对全国及重点区域 $\text{PM}_{2.5}$ 污染影响程度,其指出,相比 2015 年,2016 年气象因素和排放因素变化导致全国 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度下降幅度分别为 4%和 3%.综上,目前针对气象要素与 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度关系、尤其是重污染时段气象要素与 $\text{PM}_{2.5}$ 及组分浓度关系的研究较多,有助于我们加深认识和探索污染物在环境中的过程演变规律.但是,针对较长时间尺度的、 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分浓度的分风向分布特征的研究严重不足.

本文利用 2019~2021 年一段较长时间段内,北京市车公庄站膜采样的 $\text{PM}_{2.5}$ 及组分浓度数据及观象台气象观测数据,配合北京市 NO_2 日均浓度数据,从年均 $\text{PM}_{2.5}$ 及组分浓度的分风向浓度分布、年际变化情况、不同风向的相对湿度大小、 NO_2 浓度及氮氧化率的分风向分布等多个方面的研究,重点探讨北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 及组分浓度与风向的关系,尝试探讨 NO_3^- 在单一风向上反弹程度严重的可能因素,以期为管理部门更为精准的控制大气污染提供科学依据.

1 数据和方法

1.1 样品采集与数据来源

$\rho(\text{PM}_{2.5})$ 及组分浓度采用膜采样分析结果,采样地点位于北京市海淀区西二环与三环之间,北京市生态环境监测中心 7 楼楼顶 ($39^\circ 55' 51''\text{N}$,

$116^\circ 19' 9''\text{E}$),距离车公庄西路约 50m,点位位于北京市中心城区,可在一定程度上代表北京市城区区域大气污染水平.

$\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分析使用 MX5(瑞士梅特勒公司)型分析天平,测量精度为 1100000,样品称量前后均恒温(18 ± 1) $^\circ\text{C}$ 、恒湿($47\% \pm 2\%$) 24h; OC 、 EC 质量浓度使用美国 Sunset-L4 型分析仪测定,膜裁剪面积为 1.5cm^2 ;水溶性阳离子质量浓度使用美国 Dionex-ICS2000 型离子色谱分析仪测定,阴离子质量浓度使用美国 Dionex-ICS3000 离子色谱分析仪测定,样品使用 50mL 去离子水超声提取, $0.45\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后测定;Si、Al、Fe、Mg 等金属及类金属组分的质量浓度使用美国 Thermo 公司 Intrepid II-XDL 光谱仪分析,样品经密闭微波消解冷却后,加饱和硼酸溶液再次密闭微波消解、过滤、定容后测定. $p(\text{NO}_2)$ 资料为北京市生态环境监测中心发布的逐时浓度数据.气象资料为与污染资料相对应的北京市观象台地面观测数据 (<http://cdc.cma.gov.cn/>).

1.2 研究方法

1.2.1 气象数据的处理 将 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与观象台风向小时数据一一对应,根据当日小时风向监测数据,统计当日风频最大风向为主导风向,设为当日风向.通过八分法将风向设定为北风($337.5^\circ \sim 22.5^\circ$)、东北风($22.5^\circ \sim 67.5^\circ$)、东风($67.5^\circ \sim 112.5^\circ$)、东南风($112.5^\circ \sim 157.5^\circ$)、南风($157.5^\circ \sim 202.5^\circ$)、西南风($202.5^\circ \sim 247.5^\circ$)、西风($247.5^\circ \sim 292.5^\circ$)、西北风($292.5^\circ \sim 337.5^\circ$)8 个风向,由于缺乏其它站点气象观测数据,以观象台风向代表全市整体风向,默认为全市多数情况为受到系统风场的影响.日均风速为小时风速监测数据平均值.此外,按照气象的定义,设定静风($0 \sim 0.2\text{m/s}$),研究表明静风风频较低,本文重点讨论 8 风向下 $\text{PM}_{2.5}$ 及组分浓度分布规律.

1.2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 化学质量重构处理方法 借鉴以往研究结果^[21-23], SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 EC 以直接测定结果参与化学重构中,对于大气颗粒物中的有机物(OM),化学结构比较复杂,多数研究将测定值 OC 乘以系数(κ)来代表 OM,综合以往研究结果^[23],本研究选择 1.4 为 OM 的全年平均折算系数;此外,针对 $\text{PM}_{2.5}$ 中地壳物质的重构,结合本研究所测定组分及

刘保献等^[23]的研究成果:
地壳物质=2.20Al+1.63Ca+2.42Fe+2.49Si+1.93Mg.

2 结果与分析

2.1 2019~2021 年北京城区 PM_{2.5} 浓度、组分浓度及气象要素情况

如表 1 所示,PM_{2.5} 各组分浓度均呈逐年下降趋势.与 2019 年相比,各组分中,浓度降幅最大的为 EC,降幅达 42%,唯一浓度反弹组分为 NO₃⁻,反弹幅度为 12%,PM_{2.5} 降幅为 14%.虽然北京市 PM_{2.5} 浓度逐年降低,但 NO₃⁻ 污染问题突出.

表 1 北京市 2019~2021 年 PM_{2.5} 主要组分浓度(μg/m³)

Table 1 Concentration of PM_{2.5} components in Beijing from 2019 to 2021(μg/m³)

项目	2019	2020	2021
OM	10.9±7.5	9.5±6.1	9.1±5.3
EC	1.9±1.7	1.1±0.9	1.1±0.9
SO ₄ ²⁻	6.5±5.2	5.9±4.9	4.6±5.8
NO ₃ ⁻	9.8±11.3	9.5±11.7	11±14.4
NH ₄ ⁺	5.0±5.4	4.4±4.7	5.1±4.8
地壳元素	4.6±4.2	4.2±4.4	4.3±4.8
PM _{2.5}	43.4±36.2	39.2±34.5	37.3±31.8

比较 2010~2020 年 10a 间中国不同城市 PM_{2.5}

中二次无机盐组分(SNA)占比情况(图 1),可以看出不同地区大气细颗粒物中主要水溶性离子的浓度存在明显差异.本研究中(2019~2021 年平均)北京市 SNA 占比与北京市其他研究相比处于中游水平.从北京本地的研究结果看,2014 年夏季^[24]硫酸盐浓度高于硝酸盐,2014 年以后,北京市 PM_{2.5} 水溶性组分中,硝酸盐浓度均高于硫酸盐.本研究中(2019~2021 年),北京市硝酸盐浓度是硫酸盐的 1.8 倍,2019~2021 年该比例逐年升高,分别为 1.5、1.6 和 2.4 倍.

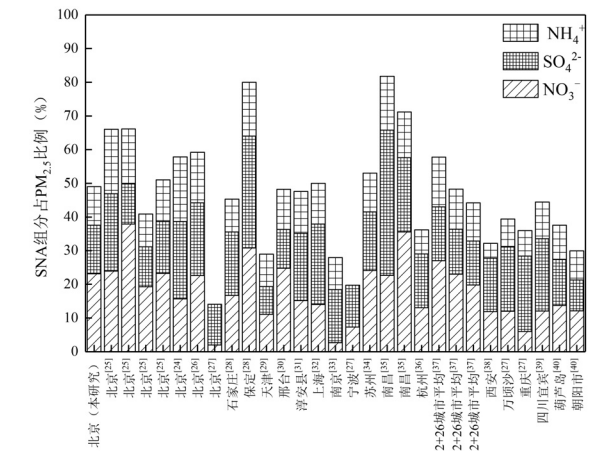


图1 2010 年以来中国不同城市 PM_{2.5} 二次无机盐组分浓度占比
Fig.1 Concentration of secondary inorganic salt components of PM_{2.5} in different cities in China since 2010

表 2 不同城市 OC 和 EC 的浓度水平及占比

Table 2 Concentration levels and proportions of OM (OC) and EC in different cities

采样点	采样时间	OC(μg/m ³)	EC(μg/m ³)	OC/EC	参考文献
北京(本研究)	2019 年	10.88±7.47	1.92±1.71	4.04	本研究
北京(本研究)	2020 年	9.45±6.11	1.10±0.92	6.13	本研究
北京(本研究)	2021 年	9.15±5.30	1.11±0.94	5.94	本研究
北京	2012~2013 年	18.87±13.24	2.66±1.54	7.09	[47]
北京	2012~2013 年	23.5±18.5	4.2±2.47	5.6	[46]
北京	2014 夏	10.91±3.95(OC)	1.67±0.64	6.5	[18]
唐山	2017~2018 年	21	4.3	3.5	[25]
2+26 个城市平均	2019 年采暖	21.8±11.6	3.04	5.1	[2]
2+26 个城市平均	2018 年采暖	30.9±20.7	4.75	4.6	[2]
2+26 个城市平均	2017 年采暖	25.9±18.5	5.712	3.2	[2]

研究表明^[30],含碳组分一般占 PM_{2.5} 浓度的 10%~70%,人口密集的城市中碳组分占比甚至超过 60%.不同地区由于污染排放、气象条件及大气氧化能力等条件的综合影响,OC 和 EC 在 PM_{2.5} 中的占比存在较大差异,表 2 中列出了北京及周边城市近年

来 OC 和 EC 的浓度水平及 OC/EC 的比值情况.从 OC/EC 比值上看,北京市 2020~2021 年 OC/EC 比例相较 2019 年显著升高,同时京津冀区域尤其北京市比值偏高,可见北京市半挥发性有机物(VOCs)的二次转化作用较强,且近 2a 有增强趋势.

如图 2 所示,2019 年北京市以西南风为主导风向,2020~2021 年则以东北风为主导风向.如图 3 所示,主导风向为东风时,日平均相对湿度最高;东北风、东风、东南风、南风为日主导风向时,日平均相对湿度高于 50%;西北风方向上,相对湿度最低.从年际变化上看,2019~2021 年各风向上相对湿度均呈升高趋势.与 2019 年相比,2021 年年均相对湿度升高 20.5%,尤其是东北风、东风、北风和西风风向上,相对湿度升高超 20%.

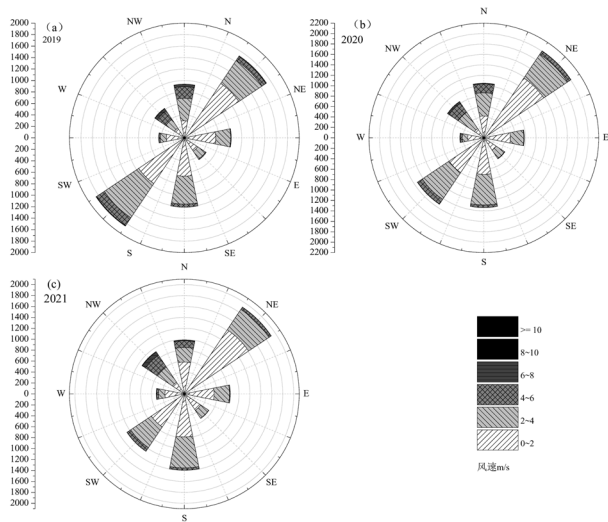


图 2 2019~2021 年北京市风向、风速玫瑰图

Fig.2 Rose chart of wind direction and wind speed in Beijing from 2019 to 2021

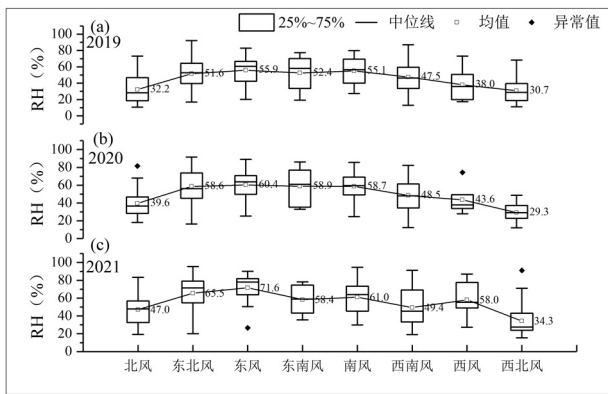


图 3 2019~2021 年北京市分风向相对湿度变化规律

Fig.3 Variation of relative humidity in Beijing from 2019 to 2021

2.2 北京市不同风向上 PM_{2.5} 及组分浓度分布规律及年际变化情况

表 3 统计了近 3a PM_{2.5} 及各组分在各风向上

的浓度,PM_{2.5} 在各风向上的大小顺序为:东北风>东风>西南风>东南风>南风>西风>北风>西北风.高值风向第一梯队为东北风、东风,第二梯队为西南风、东南风和南风,低值风向为西风、北风、西北风.从各组分上看,OM 最高浓度为西南风及东北风,最低浓度为西北风;NO₃⁻ 最高浓度出现在东北风及东风,最低浓度风向为西北风;SO₄²⁻ 最高浓度为东风、南风,最低浓度风向为西北风;NH₄⁺ 除东风外最高浓度风向为东北风,最低风向为西北风;地壳元素最高浓度风向为东南风、南风,最低浓度风向为北风.

表 3 2019~2021 年(平均)北京市不同风向 PM_{2.5} 各组分平均浓度(μg/m³)

Table 3 Concentration of PM_{2.5} components in Beijing from 2019 to 2021 (average) (μg/m³)

风向	OM	EC	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	地壳元素	PM _{2.5}
北风	5.5	0.6	1.5	3.3	2.6	2.9	17.2
东北风	11.1	1.6	6.0	13.8	6.4	4.1	47.9
东风	10.2	1.5	6.2	12.5	8.7	3.8	46.5
东南风	10.0	1.3	4.9	10.4	6.6	5.3	42.0
南风	10.5	1.5	5.2	10.5	7.2	5.1	42.9
西南风	11.2	1.7	4.8	9.8	5.9	4.7	43.4
西风	6.7	0.8	1.9	3.4	3.3	3.8	21.7
西北风	4.5	0.5	1.0	2.3	2.2	4.4	15.9

2019~2021 年不同风向的组分占比结果显示(扣除沙尘天,图 4),东风、东北风、南风风向上,SNA 占 PM_{2.5} 总浓度的比例最高,占比分别为 59%、55%、53%,其中,NH₄⁺、NO₃⁻ 在东风风向上浓度占比最高,而 SO₄²⁻ 在南风风向上浓度占比最高,OM 浓度占比最高风向则为北风.值得注意的是,地壳元素在西北风向上占比接近 30%,西北风方向带来的尘沙对北京市环境质量的影响也不容忽视.

图 5 比较了近 3aPM_{2.5} 组分浓度在各风向上的分布.从总体变化形势上看,各组分浓度呈整体下降趋势,但个别风向和组分浓度反而上升.与 2019 年相比,2020 年在东南风、东风、东北风风向上上升组分的平均升高幅度分别达 32%、27%、23%;与 2020 年相比,2021 年在北风、东北风、南风、西风、西北风风向上存在个别组分上升,北风分量上,NO₃⁻ 升高幅度达 42%,但 SO₄²⁻ 降幅较大,NH₄⁺ 变化不大,东北风、南风分量上则表现为 NO₃⁻、NH₄⁺ 同步上升.综上,从风向上看,近三年 PM_{2.5} 及组分浓度的分布

呈“东移”特征,东北风、东风、东南风分量上上升 组分多且“反弹”幅度大.

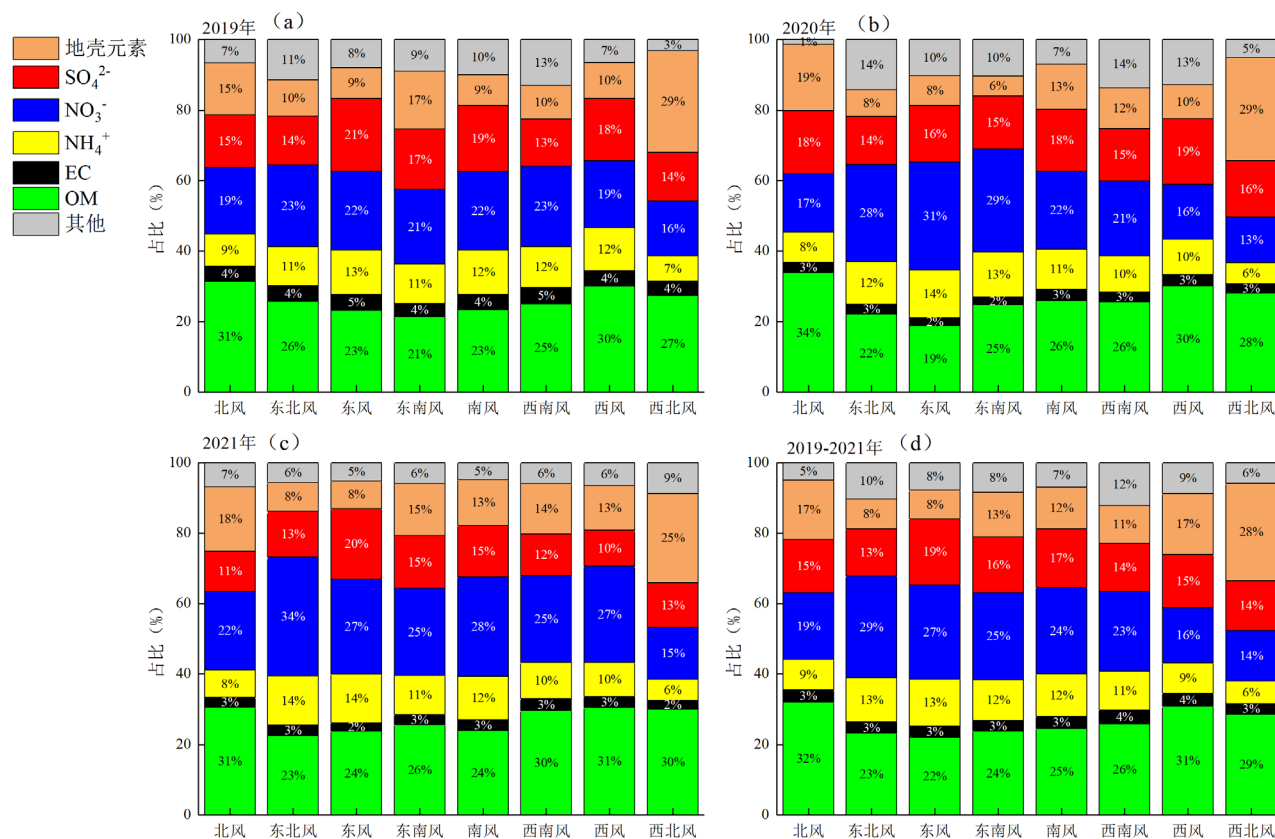


图 4 2019~2021 年不同风向上各组分占比

Fig.4 Proportion of components in different wind directions from 2019 to 2021

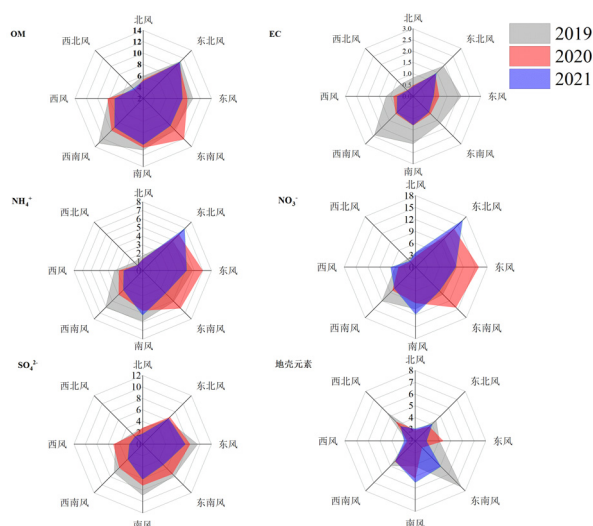


图 5 2019~2021 年不同组分浓度的分风向分布

Fig.5 Distribution of wind direction of concentrations of different components from 2019 to 2021

比较相对于 2019 年,北京市城区 2021 年 PM_{2.5} 及各组分在不同风向的浓度变化情况,如图 6 所示.

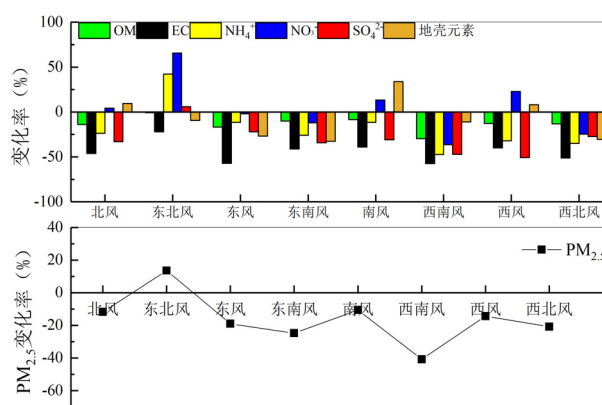


图 6 北京市各风向上主要组分 2021 年相比 2019 年变化率
Fig.6 The change rate of the main components of each wind upward trend in Beijing in 2021 compared with 2019

NO₃⁻为上升情况最严重的组分,其在东北风、西风、南风、北风分量上均有上升,升高幅度分别为 65.7%、22.9%、13.4%、4.32%;其次上升较显著的为东北风分量上的 NH₄⁺,升高幅度为 42.3%;地壳元素在南风、北风、西风分量上上升,升高幅度分别为

33.9%、9.5%、8.0%;而 SO_4^{2-} 仅在东北风分量上上升,升高幅度为 5.8%。总的来看, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度仅在东北风分量上上升,浓度升高幅度达 13.6%。综上所述,北京市城区 $\text{PM}_{2.5}$ 及组分在各风向上浓度分布的变化显示,北京市受东北风、北风作用时,二次组分浓度呈升高趋势,尤其是 NO_3^- 浓度在东北风分量上反弹严重,值得重点关注。

2.3 不同污染程度下北京市城区 $\text{PM}_{2.5}$ 中二次无机盐组分(SNA)浓度的风向分布特征

统计北京市区 2019~2021 年 $\text{PM}_{2.5}$ 组分中铵根、硫酸根、硝酸根在清洁天(优良天: $\text{PM}_{2.5}$ 浓度小于 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$)和超标天($\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$)的浓度风向分布特征,如图 7。

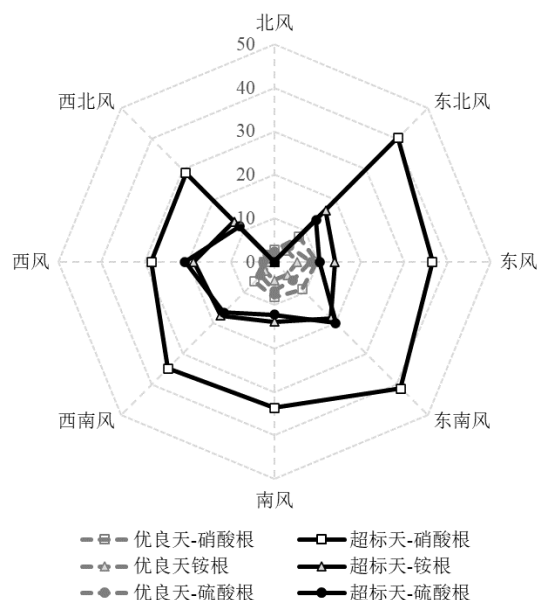


图7 北京市 2019~2021 年不同污染程度下 $\text{PM}_{2.5}$ 组分浓度的风向分布

Fig.7 Wind direction distribution of $\text{PM}_{2.5}$ component concentrations under different pollution levels in Beijing from 2019 to 2021

清洁天时,以东北风-西南风为分界,东南各风向上浓度高于西北各风向,各组分在各风向上的浓度分布呈“梭型”分布。与清洁天相比,污染天时,西北风、西风风向上各组分浓度升高幅度最大,这是因为清洁天时,西北风、西风风向上各组分本底浓度过低。此外,清洁天时,硝酸根浓度排名前三的风向为东风>东南风>南风=东北风,这 4 个风向中,硝酸根在东北风向上,超标天浓度升高幅度最大;而硫酸根、

硝酸根在清洁天时浓度排名前三的风向均为东风>南风>东南风,且在这 3 个风向中,超标天时均为东南风浓度升高幅度最高。综上可知,排除清洁天时较低起始浓度的影响,在污染程度加重时,北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 组分 SNA 浓度的升高主要源自于偏东风向的浓度抬升。因此,不论是清洁天,还是污染天,偏东风向上的污染物浓度的抬升均对北京城区的空气质量产生较大影响。

2.4 偏东向组分 NO_3^- 浓度反弹原因探索

为探讨东北风方向上 NO_3^- 浓度反弹原因,本研究分析了 NO_2 近 3a 分风向的浓度分布。如图 8 所见, NO_2 在各风向上浓度均下降,但在空间分布上,与 NO_3^- 一样,呈现“东移”特征。2019 年, NO_2 在东北风下的浓度比年均浓度高 7%,2021 年该偏高幅度达 19%,2021 年比 2019 年增加了 12 个百分点。由此可见,北京市东北方向上 NO_2 浓度的升高可能是东北风下 NO_3^- 浓度偏高的重要原因之一。

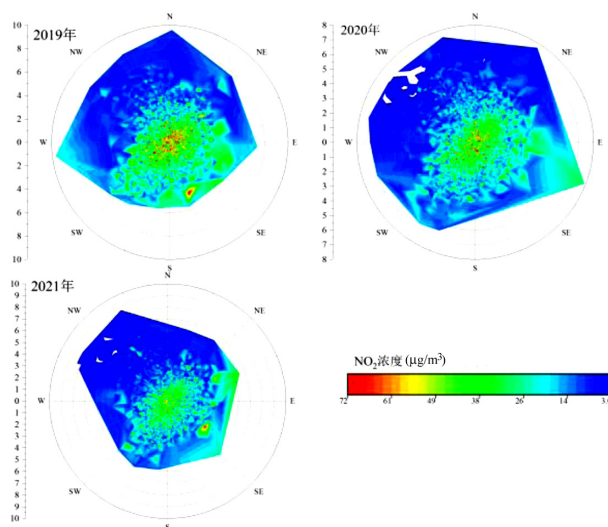


图8 2019~2021 年北京市 NO_2 浓度的分风向分布

Fig.8 Distribution of NO_2 concentration in Beijing from 2019 to 2021

研究表明^[43-45], NO_3^- 浓度与环境相对湿度具有较强正相关,如前文所述,北京市东北风、北风风向上近 2a 相对湿度增加显著,这也为 NO_2 的转化提供了更有利的化学反应条件。

此外, NO_2 转化效率也影响 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NO_3^- 的浓度水平。本文用氮转化率(NOR)来表征 NO_2 的转化效率,如式(1):

$$\text{NOR} = n(\text{NO}_3^-) / n(\text{NO}_3^- + \text{NO}_2) \tag{1}$$

计算北京市 2019~2021 年氮转化率水平(图 9), 近 3a 北京市 NOR 在不同风向上大小在 0.048~0.277 之间.与长三角地区相比,如表 4 所示,北京市年均 NOR 大小高于 2013 年前后的长三角地区,而低于其 2019 年前后.且年际变化上呈现逐年升高趋势.

表 4 北京与长三角地区 NOR 大小

Table 4 NOR in Beijing and the Yangtze River Delta region

地点时段	最大	最小	平均	参考文献
南京,2013,冬	0.29	0.15	0.21	[48]
苏州,2013,冬	0.30	0.06	0.16	
临安,2013,冬	0.24	0.12	0.18	
杭州,2013,冬	0.11	0.06	0.09	
宁波,2013,冬	0.23	0.03	0.11	
南京,2019,春	0.31	0.29	0.30	[49]
常州,2019,春	0.27	0.23	0.25	
常州,2019,冬	0.43	0.13	0.20	[50]
常州,2019,夏	0.63	0.08	0.28	[51]
2019,北京	0.49	0.008	0.13	本研究
2020,北京	0.53	0.008	0.16	本研究
2021,北京	1	0.12	0.19	本研究

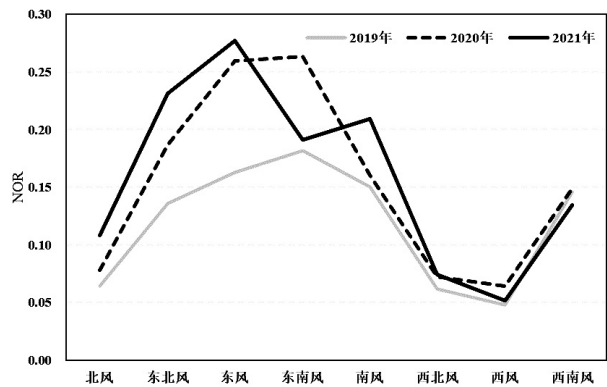


图 9 北京市 2019~2021 年各风向 NOR 变化情况
Fig.9 Changes of NOR in various wind directions in Beijing from 2019 to 2021

此外,不同风向上,在偏东、偏南风向上,NOR 较高,偏北、偏西风向上 NOR 较低.变化趋势上,近 2a 各风向上 NOR 呈升高趋势;与 2019 年相比,东北风、东风风向上 NOR 增高幅度最高,达 70%.由此,各风向上 NOR 变化情况印证了前体物浓度的增加和反应条件的提高对北京市偏东风向上氮转化效率起到增强作用.综上,本研究认为,偏东风向 NO₂ 浓度分布“东移”影响叠加偏东风向上相对湿度的增加是

北京市偏东风向上 NO₃⁻浓度上升的影响因素之一.研究表明,区域传输对北京市 PM_{2.5} 浓度的贡献超 3 成^[48],北京市偏东风向上 PM_{2.5} 以及组分浓度的升高受区域传输的影响程度在本文未能涉及,今后将进一步采用模型、监测数据相结合的方式,更加全面的解释北京市区 PM_{2.5} 及组分浓度的风向分布特征.

3 结论

3.1 2019~2021 年,北京市 PM_{2.5} 浓度下降 14%,组分上,EC 降幅 42%,唯一反弹组分为 NO₃⁻,反弹幅度达 12%.与其他研究相比,2019~2021 年北京市三年平均的 SNA 占比处于中间水平,近两年呈升高趋势;与北京和周边地区相比,北京市 OC、EC 比值处于偏高水平.

3.2 2019 年北京市主导风向为西南风,2020 和 2021 年为东北风.相对湿度上,受到盛行东北风的影响,北京市 2021 年年均相对湿度比 2019 年提高 20.5%.各风向上,与 2019 年相比,2021 年在北风、东风、东北风、西风风向上相对湿度升高幅度较高.

3.3 2019~2021 年北京市 PM_{2.5} 在各风向上的浓度大小顺序为东北风>东风>西南风>东南风>南风>西风>北风>西北风.趋势上看,2019~2021 年北京市 PM_{2.5} 和各组分浓度在各风向上均呈现下降趋势,空间上呈高浓度“东移”态势.与 2019 年相比,2021 年 NO₃⁻反弹最严重,各风向上,反弹幅度最大的风向为东北风,反弹 65.7%.从污染天与清洁天 SNA 浓度的风向分布比较中,同步发现,不论是清洁天还是污染天,偏东风向上污染物浓度对北京市空气质量影响较大.

3.4 通过计算北京市的 NO₃⁻前体物质 NO₂ 在 2019~2021 年的分风向浓度水平,和同期各风向上 NOR 的大小,发现偏东风向上前体物浓度的相对升高和反应条件即相对湿度的升高导致了该风向上氮转化率的提高,这可以一定程度上解释北京市东北风向上 NO₃⁻浓度大幅度反弹的现象.

参考文献:

[1] 丁一汇,李巧萍,柳艳菊,等.空气污染与气候变化[J].气象,2009,35(3):3-14.
Ding Y H, Li Q P, Liu Y J, et al. Atmospheric aerosols, air pollution and climate change [J]. Meteorological Monthly, 2009,35(3):3-14.
[2] Brasseur G P, Schultz M, Granier C, et al. Impact of climate change on the future chemical composition of the global troposphere [J]. Journal of Climate, 2006,19(16):3932-3951.

- [3] Zhang J P, Zhu T, Zhang Q H, et al. The impact of circulation patterns on regional transport pathways and air quality over Beijing and its surroundings [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012,12(11): 5031–5053.
- [4] 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. Quantitative effects of meteorological and emission changes on $PM_{2.5}$ pollution [J]. *China Environmental Sciences*, 2019,39(11):4546–4551.
- [5] 孙兆彬,李梓铭,廖晓农,等.北京大气热力和动力结构对污染物输送和扩散条件的影响 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(5):1693–1705.
Sun Z B, Li Z M, Liao X N, et al. Effects of atmospheric thermal and dynamic structure on the transport and diffusion conditions of pollutants in Beijing [J]. *Chinese Journal of Environmental Sciences*, 2017,37(5):1693–1705.
- [6] Davis R E, Kalkstein S. Using a spatial synoptic climatological classification to assess changes in atmospheric pollution concentrations [J]. *Physical Geography*, 1990,11(4):320–342.
- [7] Clappier A, Martilli A, Grossi P, et al. Effect of sea breeze on air pollution in the greater Athens area. Part I: numerical simulations and field observations [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000,39(4): 546–562.
- [8] 何建军,吴 琳,毛洪钧,等.气象条件对河北廊坊城市空气质量的影响 [J]. *环境科学研究*, 2016,29(6):791–799.
He J J, Wu L, Mao H J, et al. Effects of meteorological conditions on urban air quality in Langfang, Hebei Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016,29(6):791–799.
- [9] Liang P, Zhu T, Fang Y, et al. The role of meteorological conditions and pollution control strategies in reducing air pollution in Beijing during APEC 2014 and Victory Parade 2015 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017,17(22):13921–13940.
- [10] Wang H, Xu J, Zhang M, et al. A study of the meteorological causes of a prolonged and severe haze episode in January 2013 over central-eastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014,98:146–157.
- [11] 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. Study on the influence of wind direction on the distribution of $PM_{2.5}$ concentration on heavy pollution days in Beijing [J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 39(3):143–149.
- [12] 孙玉梅,姜泽生,赵 成.2016–2020 年河北省 $PM_{2.5}$ 浓度的时空分布研究 [J]. *石家庄铁路职业技术学院学报*, 2021,(4):52–56.
Sun Y M, Lou Z S, Zhao C. Spatial and temporal distribution of $PM_{2.5}$ concentrations in Hebei Province from 2016 to 2020 [J]. *Journal of Shijiazhuang Railway Vocational and Technical College*, 2021,(4):52–56.
- [13] 刘瑞琪,贾海鹰.北京地区气象条件与区域传输对 $PM_{2.5}$ 浓度影响研究 [J]. *环境监测管理与技术*, 2021,(5):16–20,25.
Liu R Q, Jia H Y. Influence of meteorological conditions and regional transport on $PM_{2.5}$ concentration in Beijing [J]. *Environmental Monitoring Management and Technology*, 2021,(5):16–20,25.
- [14] 侯梦琪.成都市气象因子对 $PM_{2.5}$ 浓度影响分析 [J]. *当代化工研究*, 2021,(20):96–99.
Hou M Q. Analysis of the effect of meteorological factors on $PM_{2.5}$ concentration in Chengdu [J]. *Journal of Contemporary Chemical Industry Research*, 2021,(20):96–99.
- [15] 吴序鹏,刘端阳,谢真珍,等.江苏淮安地区大气污染变化特征及其与气象条件的关系 [J]. *气象与环境科学*, 2018,41(1):31–38.
Wu X P, Liu D Y, Xie Z Z, et al. Characteristics of air pollution and its relationship with meteorological conditions in Huai'an, Jiangsu Province [J]. *Meteorological and Environmental Science*, 2018,41(1):31–38.
- [16] 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. Meteorological causes of two heavy pollution weather processes in Beijing-Tianjin-Hebei in the winter of 2015 [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(7):2748–2757.
- [17] 刘郁珏,李 艳,苗世光.北京市房山区大气污染物时空分布特征及气象影响因素分析 [J]. *气象与环境科学*, 2018,41(4):60–69.
Liu Y J, Li Y, Miao S G. Spatiotemporal distribution characteristics and meteorological influencing factors of air pollutants in Fangshan District, Beijing [J]. *Meteorological and Environmental Science*, 2018,41(4):60–69.
- [18] 赵 辉,郑有飞,吴晓云,等.江苏省大气复合污染特征与相关气象驱动 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(8):2830–2839.
Zhao H, Zheng Y F, Wu X Y, et al. Characteristics of atmospheric compound pollution and related meteorological drivers in Jiangsu Province [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(8):2830–2839.
- [19] 涂小萍,姚日升,高爱臻,等.浙江北部一次爆发式发展重度大气污染的气象特点和成因 [J]. *环境科学学报*, 2019,39(5):1443–1451.
Tu X P, Yao R S, Gao A Z, et al. Meteorological characteristics and causes of severe air pollution in northern Zhejiang [J]. *Journal of Environmental Science*, 2019,39(5):1443–1451.
- [20] 焦亚音,孟 凯,杜惠云,等.京津冀中南部污染气象贡献的时空变化特征 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(11):4982–4989.
Jiao Y Y, Meng K, Du H Y, et al. Spatiotemporal variation characteristics of pollution meteorological contribution in central and southern Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(11):4982–4989.
- [21] 刘子锐,王跃思,刘 全,等.鼎湖山秋季大气细粒子及其二次无机组分的污染特征及来源 [J]. *环境科学*, 2011,32(11):3160–3166.
Liu Z R, Wang Y S, Liu Q, et al. Pollution characteristics and sources of atmospheric fine particles and their secondary inorganic components in autumn in Dinghu Mountain [J]. *Environmental Science*, 2011,32(11):3160–3166.
- [22] 刘新民,邵 敏.北京市夏季大气消光系数的来源分析 [J]. *环境科学学报*, 2004,24(2):185–189.
Liu X M, Shao M. Source analysis of atmospheric extinction coefficient in Beijing in summer [J]. *Journal of Environmental Science*, 2004,24(2):185–189.
- [23] 刘保献,杨懂艳,张大伟,等.北京城区大气 $PM_{2.5}$ 主要化学组分构成研究 [J]. *环境科学*, 2015,36(7):2346–2352.
Liu B X, Yang X Y, Zhang D W, et al. Study on the composition of the main chemical components of atmospheric $PM_{2.5}$ in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015,36(7):2346–2352.
- [24] 安欣欣,张大伟,冯 鹏,等.北京城区夏季 $PM_{2.5}$ 中碳组分和二次水溶性无机离子浓度特征 [J]. *环境化学*, 2016,35(4):713–720.
An X X, Zhang D W, Feng P, et al. Concentrations of carbon components and secondary water-soluble inorganic ions in $PM_{2.5}$ in summer in Beijing [J]. *Environmental Chemistry*, 2016,35(4):713–720.
- [25] Su J, Zhao P, Ding J, et al. Insights into measurements of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ and their gaseous precursors in Bei Jing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021,102:123–137.
- [26] 杨懂艳,刘保献,张大伟,等.2012–2013 年间北京市 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析 [J]. *环境科学*, 2015,36(3):768–773.
Yang D Y, Liu B X, Zhang D W, et al. Spatial and temporal distribution and correlation analysis of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ in Beijing from 2012 to 2013 [J]. *Environmental Science*, 2015,36(3): 768–773.
- [27] 徐 虹,张晓勇,毕晓辉,等.中国 $PM_{2.5}$ 中水溶性硫酸盐和硝酸盐的时空变化特征 [J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2013,46(6):32–40.
Xu H, Zhang X Y, Bi X H, et al. Spatial and temporal variations of

- water-soluble sulfate and nitrate in PM_{2.5} in China [J]. Journal of Nankai University (Natural Science Edition), 2013,46(6):32-40.
- [28] 杨丽丽,冯 媛,靳 伟,等.石家庄市大气颗粒物中水溶性无机离子污染特征研究 [J]. 环境监测管理与技术, 2014,(6):17-21.
Yang L, Feng Y, Jin W, et al. Characteristics of water-soluble inorganic ion pollution in atmospheric particulate matter in Shijiazhuang City [J]. Environmental Monitoring Management and Technology, 2014,(6):17-21.
- [29] 李 鹏,高璟赉,肖致美,等.天津市 PM_{2.5} 中水溶性离子组分特征研究 [J]. 环境科学与管理, 2021,(3):95-99.
Li P, Gao J Y, Xiao Z M, et al. Characteristics of water-soluble ion components in PM_{2.5} in Tianjin [J]. Environmental Science and Management, 2021,(3):95-99.
- [30] Tiwari S, Dumka U C, Kaskaoutis D G, et al. Aerosol chemical characterization and role of carbonaceous aerosol on radiative effect over Varanasi in central Indo-Gangetic Plain [J]. Atmospheric Environment, 2016,125:437-449.
- [31] 黄丹丹,周 敏,余传冠,等.长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制 [J]. 环境科学, 2018,39(12):5308-5314.
Huang D D, Zhou M, Yu C G, et al. Formation mechanism of secondary particulate matter pollution in Chun'an area of Yangtze River Delta [J]. Environmental Science, 2018,39(12):5308-5314.
- [32] 陈宜然,陈长虹,王红丽,等.上海大气本底背景与高污染时段细颗粒物化学组分特征分析 [J]. 上海环境科学, 2011,(5):185-195.
Chen Y R, Chen C H, Wang H L, et al. Analysis of atmospheric background and chemical composition characteristics of fine particles in high pollution period in Shanghai [J]. Shanghai Environmental Science, 2011,(5):185-195.
- [33] 张予燕,任 兰,孙 娟,等.南京大气细颗粒物中水溶性组分的污染特征 [J]. 中国环境监测, 2013,(4):25-27.
Zhang Y Y, Ren L, Sun J, et al. Pollution characteristics of water-soluble components in fine particulate matter in Nanjing atmosphere [J]. China Environmental Monitoring, 2013,(4):25-27.
- [34] 彭 猛,崔璐璐,王 磊,等.唐山市大气 PM_{2.5} 季节污染特征及来源分析 [J]. 生态环境学报, 2020,(9):1855-1861.
Peng M, Cui L L, Wang L, et al. Seasonal pollution characteristics and sources of atmospheric PM_{2.5} in Tangshan City [J]. Journal of Ecological Environment, 2020,(9):1855-1861.
- [35] 梁 越,姜 红,李弘生,等.中部城市秋冬季 PM_{2.5} 水溶性离子的化学特征及来源 [J]. 环境化学, 2022,41(2):470-481.
Liang Y, Jiang H, Li H S, et al. Chemical characteristics and sources of PM_{2.5} water-soluble ions in Autumn and winter in Central China [J]. Environmental Chemistry, 2022,41(2):470-481.
- [36] 顾 涛,陈敏东. 临安本底站 PM_{2.5} 水溶性离子污染特征及来源解析 [J]. 环境科学与管理, 2022,(2):37-41.
Gu T, Chen M D. Characteristics and source analysis of PM_{2.5} water-soluble ion pollution in Lin'an Background Station [J]. Environmental Science and Management, 2022,(2):37-41.
- [37] 刀 谓,吉东生,张 显,等.京津冀及周边地区采暖季 PM_{2.5} 化学组分变化特征 [J]. 环境科学研究, 2021,34(1):1-10.
Dao Z, Ji D S, Zhang X, et al. Changes in chemical composition of PM_{2.5} in heating season in Beijing-Tianjin-Hebei region and surrounding areas [J]. Research of Environmental Sciences, 2021,34(1):1-10.
- [38] 王 平,曹军骥,刘随心,等.西安市春季大气颗粒物 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 的特征 [J]. 中国粉体技术, 2013,(6):58-63.
Wang P, Cao J J, Liu S X, et al. Characteristics of atmospheric particulate matter PM_{2.5} and PM₁₀ in spring in Xi'an [J]. China Powder Technology, 2013,(6):58-63.
- [39] 邓利群,钱 骏,佟洪金,等.宜宾市大气细颗粒物水溶性离子污染特征研究 [J]. 四川环境, 2018,(6):48-54.
Deng L Q, Qian J, Tong H J, et al. Characteristics of water-soluble ion pollution of fine particles in the atmosphere of Yibin City [J]. Sichuan Environment, 2018,(6):48-54.
- [40] 杨铁金,王慧超,李红梅,等.辽宁西南典型城市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析 [J]. 环境化学, 2022,41(1):160-172.
Yang T J, Wang H C, Li H M, et al. Characteristics and sources of water-soluble inorganic ion pollution of fine particulate matter in winter in typical cities of Southwest Liaoning [J]. Environmental Chemistry, 2022,41(1):160-172.
- [41] 王占山,李云婷,刘保献,等.北京市 PM_{2.5} 化学组分特征 [J]. 生态学报, 2016,36(8):2382-2392.
Wang Z S, Li Y T, Liu B X, et al. Chemical composition characteristics of PM_{2.5} in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(8):2382-2392.
- [42] 张大伟,王小菊,刘保献,等.北京城区大气 PM_{2.5} 主要化学组分及污染特征 [J]. 环境科学研究, 2015,(8):1186-1192.
Zhang D W, Wang X J, Liu B X, et al. Main chemical components and pollution characteristics of PM_{2.5} in urban area of Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2015,(8):1186-1192.
- [43] 文 亮.华北典型地区大气细颗粒物硝酸盐及气态亚硝酸变化规律与机理研究 [D]. 济南:山东大学, 2019.
Wen L. Study on the variation law and mechanism of atmospheric fine particle nitrate and gaseous nitrite in typical areas of North China [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [44] 高晓梅.我国典型地区大气 PM_{2.5} 水溶性离子的理化特征及来源解析 [D]. 济南:山东大学, 2012.
Gao Xiaomei. Physicochemical characteristics and sources of atmospheric PM_{2.5} water-soluble ions in typical areas of China [D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [45] Hallquist, M, Stewart, D J, Stephenson, S K, et al. Hydrolysis of N₂O₅ on sub-micron sulfate aerosols [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2003,5(16):3453-3463.
- [46] 王海潮,陆克定.五氧化二氮(N₂O₅)非均相摄取系数的定量和参数化 [J]. 化学进展, 2016,28(6):917.
Wang H C, Lu K D. Quantification and parameterization of heterogeneous uptake coefficients of nitrous pentoxide (N₂O₅) [J]. Progress in Chemistry, 2016,28(6):917.
- [47] Qin Y, Li J, Gong K, et al. Double high pollution events in the Yangtze River Delta from 2015 to 2019: Characteristics, trends, and meteorological situations [J]. Science of the Total Environment, 2021, 792:148349.
- [48] Zhang Y, Hong Z, Chen J, et al. Impact of control measures and typhoon weather on characteristics and formation of PM_{2.5} during the 2016G20 summit in China [J]. Atmospheric Environment, 2020,224: 117312.
- [49] Zhai T, Lu K, Wang H, et al. Elucidate the formation mechanism of particulate nitrate based on direct radical observations in the Yangtze River Delta summer 2019 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2023,23(4):2379-2391.

作者简介: 陈 晨(1989-),女,北京人,工程师,硕士,主要从事大气环境监测与污染成因分析研究.发表论文 10 余篇.chenchen9007@126.com.