太行山沿线典型工业城市 2021 年秋冬季 $PM_{2.5}$ 阶段性污染特征

王红果[1]；燕利利[2]；张建平[1]；李利霞[1]

1.河南省济源生态环境监测中心，河南 济源 459000

2.中科三清科技有限公司，北京 101500

摘 要：为探究太行山沿线城市秋冬季 $PM_{2.5}$ 污染特征，选取典型工业城市济源市为研究对象，依据不同时间段内气象因子对 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化的影响特征、$PM_{2.5}$ 污染等级、冬季采暖开始（2021 年 11 月 15 日）前后污染物增长速率的差异等，将 2021 年 10 月~2022 年 3 月划分为四个阶段，并运用多元线性回归模型对不同阶段 $PM_{2.5}$ 与气象因子小时数据进行分析。结果表明，第一阶段（2021.10.1~11.14）26.1%的 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化由气象因子决定，单因子与 $PM_{2.5}$ 的相关性均在 36%以下；第二阶段（2021.11.15~12.31）72.4%的 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化由气象因子决定，风向、相对湿度、能见度三项因子对 $PM_{2.5}$ 影响显著，且 $PM_{2.5}$ 与相对湿度和能见度的相关性均达到最高（61.5%和 73.1%）；第三阶段（2022.1.1~1.31）53.2%的 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化由气象因素决定，相对湿度和风速对 $PM_{2.5}$ 的小时值变化影响不显著，这与该阶段大气稳定性高、污染物与大气扩散能力双向反馈效应显著有关；第四阶段（2022.2.1~3.31）32.2%的 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化由气象因素决定，受沙尘及扬尘影响，风速对 $PM_{2.5}$ 小时变化影响不显著。济源市秋冬季污染过程中颗粒物组分以 NO_3^- 、NH_4^+、OC、SO_4^{2-}为主，其中 SNA（SO_4^{2-}、NO_3^-、NH_4^+）占比在 65.7%以上，二次污染严重。颗粒物组分浓度增速整体表现为 NO_3^-、S、EC、Cl^-随污染程度加重增速减缓，SO_4^{2-}、OC 、K^+、NH_4^+增速随污染程度加重呈现“慢快慢”的变化趋势。

关键词：济源市；$PM_{2.5}$；气象要素；阶段性污染特征

文章编号： **中图分类号：X823** **文献标志码：A**

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2023.23013

Periodic pollution characteristics of $PM_{2.5}$ in typical industrial cities along Taihang Mountains in autumn and winter of 2021

WANG Hongguo[1]; YAN Lili[2]； ZHANG Jianping[1]; LI Lixia[1]

1. Henan Jiyuan Ecological Environment Monitoring Center, Jiyuan 454650, China

2. Zhongke Sanqing Technology Co., Ltd, Beijing 101500, China

Abstract：In order to explore the characteristics of $PM_{2.5}$ pollution in autumn and winter in cities along the Taihang Mountains, Jiyuan City, a typical industrial city was selected as the research object. According to the influence characteristics of meteorological factors on the hourly concentration change of $PM_{2.5}$ in different time periods, the pollution level of $PM_{2.5}$, and the difference of pollutant growth rate before and after the start of heating in winter (November 15, 2021), October 2021 to

---

收稿日期：2023-2-21；修收日期：2023-7-12

作者简介：王红果（1980-），女，河南济源人，高级工程师。（电话）13838935288 ，（电子邮箱）122793082@qq.com。

通讯作者：王红果

March 2022 are divided into four stages, and the hourly data of $PM_{2.5}$ and meteorological factors in different stages are analyzed by using multiple linear regression model. The results show that in the first stage (2021.10.1-11.14), 26.1% of $PM_{2.5}$ hourly concentration change is determined by meteorological factors, and the correlation between single factor and $PM_{2.5}$ is less than 36%; In the second stage (2021.11.15-12.31), 72.4% of the hourly concentration change of $PM_{2.5}$ was determined by meteorological factors. The wind direction, relative humidity and visibility had significant effects on $PM_{2.5}$, and the correlation between $PM_{2.5}$ and relative humidity and visibility reached the highest (61.5% and 73.1%); In the third stage (2022.1.1-1.31), 53.2% of the hourly concentration change of $PM_{2.5}$ is determined by meteorological factors, and the relative humidity and wind speed have no significant impact on the hourly change of $PM_{2.5}$, which is related to the large impact of the long-range migration and detention of pollution clusters in this stage; In the fourth stage (2022.2.1-3.31), 32.2% of $PM_{2.5}$ hourly concentration change is determined by meteorological factors. Affected by sand and dust, wind speed has no significant impact on $PM_{2.5}$ hourly change. In the process of pollution in autumn and winter in Jiyuan City, the main components of particulate matter are NO_3^-, NH_4^+, OC and SO_4^{2-}, of which the proportion of SNA (SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+) is more than 65.7%, and the secondary pollution is serious. On the whole, the growth rate of particle component concentration shows that the growth rate of NO_3^-, S, EC and Cl^- slows down with the increase of pollution, while the growth rate of SO_4^2, OC, K^+ and NH_4^+ shows a "slow-fast" trend with the increase of pollution.

Keywords: Jiyuan; $PM_{2.5}$; Meteorological elements; Periodic pollution characteristics.

引言：

中国华北地区秋冬季受青藏高原大地形“背风坡”效应所导致的下沉气流和“弱风效应”影响（张小曳等，2020），大气扩散及稀释能力减弱，对颗粒物浓度的升高产生累积效应，这种效应霾天更明显，也促使华北区域秋、冬季成为空气污染高发季节（陈锦超等，2018）。在 Yang 等（2017）对中国各地区气象因子与 $PM_{2.5}$ 的季节性和区域性关系研究中指出 $PM_{2.5}$ 与相对湿度在华北地区和乌鲁木齐呈正相关，在其他区域呈负相关，且这种相关性在冬季和春季强于其他季节，$PM_{2.5}$ 与风速呈负相关，与温度在秋季呈负相关，在冬季则相反；Xu 等（2018）在气象变化对中国冬季 $PM_{2.5}$ 污染的影响中指出，不利的气象条件会增加 $PM_{2.5}$ 的恶化程度。在前人的研究，华北地区采暖季 $PM_{2.5}$ 的组分组成中水溶性离子质量浓度占比达到 47%以上，其中二次无机离子（SNA）为主要离子成分（张逸琴等，2019）；二次有机碳（SOC）在有机碳（OC）中占比也较高，在 55%以上（贺博文等，2021；徐雪梅等，2020 年），在采暖前主要来自于机动车，在采暖后主要来自于燃煤和散煤燃烧，且 OC 和 EC 存在强相关关系（李璇等，2018）。冯小琼等（2020）对成都市 2019 年 12 月 8 日至 2020 年 1 月 6 日期间的三次污染过程颗粒物组分变化特征研究发现，三次污染过程均以硝酸盐占主导，不同污染过程的不同时段组分浓度增速存在差异（钱骏等，2021），出现这种现象的原因一是 NO_3^- 热稳定性差，在温度低于 15℃，扩散条件不利时，更易使 NO_3^- 以 NH_4NO_3 的形式聚集在大气中（徐仲均，2015；杨周等，2020），而低温和弱光照的气象条件不利于 OH 和 O_3 等氧化剂的形成，进而抑制 SO_4^{2-} 的气粒转化（张毓秀等，2020）；二是冬季车辆怠速时间更长，汽车尾气排放的 NOx 经非均相氧化作用增大（刘晓迪等，2018）。刘盈盈等（2018）、刘晓迪等（2018）在对重污染天气下颗粒物组分变化特征的研究中指出，冬季湿度的升高促进 NO_2 和 SO_2 的非

均相转化，在湿度大于 50%时硫酸盐呈现出更快的增长速率；汤莉莉等（2014）对南京雾霾天颗粒物化学组分的研究中指出霾期重污染过程，SO_4^{2-}与相对湿度呈单调递增函数，当湿度<80%时, NO_3^-随相对湿度的递增呈递增的趋势，80%<湿度<90%时，NO_3^-质量浓度相对较低，即高湿促进了 NO_2 和 SO_2 的非均相转化。已有研究中对秋冬季气象因子与 $PM_{2.5}$ 的区域性、季节性差异，典型重污染过程组分浓度的变化特征，污染过程来源解析等研究较多，但对基于秋冬季不同阶段的气象特征、显著性影响因子、$PM_{2.5}$ 污染等级分布等因素下的差异，及这种差异在组分浓度增速上的特征变化研究较少。

我国大气污染特征从空间来看，太行山脉以东京津冀、山东半岛、黄河中游属于高污染热点集聚区，从区域层面来看，能源消耗、第二产业占比和民用汽车拥有量对大气污染具有不同程度的正向加重效应（肖悦等，2018）。济源市作为太行山沿线典型的工业城市，“簸箕型”地貌特征不利于城区大气污染物的稀释和扩散（黄善斌等，2020），加之当代能源结构没有发生根本性改变，能源消费总量不断增加，在“煤烟型”污染没有根治的同时，“复合型”污染越来越凸显（姜华等，2022 年；刘淼晗，2023 年），城市环境空气质量达标与持续改善的形势异常严峻，面临着污染程度重、持续时间长、污染清除慢的窘境。基于此，本研究选取济源市 2021~2022 年秋冬季（2021.10.1~2022.3.31）重污染过程为研究对象，对不同时期的气象特征、影响 $PM_{2.5}$ 的关键气象因子、$PM_{2.5}$ 浓度污染等级分布的阶段性差异进行分析，以期为太行山沿线工业城市秋冬季不同阶段重污染过程污染特征提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

济源市地处河南省西北部，黄河北岸，邻接晋城市，北依太行，西距王屋，南临洛阳，东接焦作，形成市境西北高、东南低的倾斜地势，梯度差异明显，地貌形态复杂，山区、丘陵、平原地形多样，全域总面积 1931 平方公里，其中城市面积 80 平方公里，平原面积 552 平方公里，山区面积 1299 平方公里，是国家发改委支持建设的全国首个全域产城融合示范区，典型的工业主导型城市，工业经济发达（济源市统计局，2018），高耗能重污染行业比重偏高问题突出，济源钢铁、豫光金铅销售收入超百亿元，矿产资源丰富，长期发展形成了有色、钢铁、化工、能源、装备制造等 5 大支柱产业，是全国最大的铅锌冶炼基地，也是河南省重要的钢铁、能源基地。同时，济源市还是晋煤外运通道，过境重载货车较多，产生大量交通运输尾气污染和道路扬尘污染。

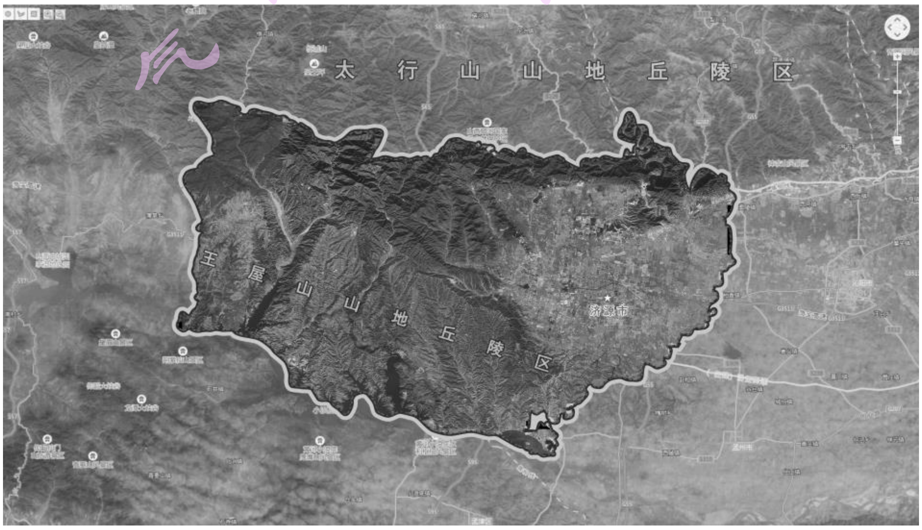

图 1　济源市地形图

Fig.1　Topographic Map of Jiyuan

1.2 数据来源

本文使用的气象数据、$PM_{2.5}$数据、组分数据分为小时数据和日数据，来源于河南省济源环境监测中心在线监测设备，详细信息如表 1 所示。监测期间，严格按照《环境空气质量自动监测技术规范》(HJ/T 193—2005) 、《关于印发<2021 年国家生态环境监测方案>的通知》（环办监测函[2021]88 号）等相关标准的要求，定期进行仪器检查、校准和质控，每天 24h 连续采样，确保数据的稳定性和可靠性。

表 1　济源市监测仪器设备信息

Table 1　Monitoring instrument and equipment information in Jiyuan Demonstration Area

序号	设备名称	设备型号	生产厂家	测量参数
1	细颗粒物	5030i 型	赛默飞世尔	空气中粒径小于 2.5 微米的颗粒物
2	气象五参数	WS-5P	智翔宇	空气中风向、风速、温度、湿度及大气压
3	气溶胶在线水溶性离子分析仪	URG-9000D	赛默飞世尔	$PM_{2.5}$的阴阳离子
4	重金属监测仪	XHAM-2000A	先河环保	$PM_{2.5}$中悬浮颗粒物及金属浓度
5	碳组分分析仪	XHOCEC3000	先河环保	$PM_{2.5}$中的有机碳及元素碳

2 结果与讨论

2.1 污染过程阶段划分

依据环境空气质量标准（GB 3095~2012），2021~2022 年秋冬季共出现 74 天污染天，$PM_{2.5}$超标天为 62 天，占污染天数的 83.8%。本文将从 $PM_{2.5}$浓度污染等级分布、气象特征、区域传输影响等阶段性差异将 2021 年 10 月至 2022 年 3 月划分为四个阶段。从 $PM_{2.5}$污染等级分布情况来看，采暖季开始前（2021.10.1~11.14）$PM_{2.5}$日均空气质量以轻度污染为主，$PM_{2.5}$日均浓度峰值出现在 11 月 1 日（113 $\mu g/m^3$）；采暖季开始后至 1 月底污染程度逐步加重，2021.11.15~12.31 期间污染天与优良天间隔分布，$PM_{2.5}$日均空气质量以轻中度污染为主（12 d），占该阶段 $PM_{2.5}$污染天数（14d）85.7%，$PM_{2.5}$日均浓度峰值出现在 12 月 10 日（172 $\mu g/m^3$）；2022.1.1~1.31 期间 $PM_{2.5}$日均空气质量以中重度污染为主（22 d），占该阶段 $PM_{2.5}$污染天数（28 d）78.6%，$PM_{2.5}$日均浓度峰值出现在 1 月 19 日（220 $\mu g/m^3$）；进入 2 月份后污染程度逐步减轻，以轻度污染为主（16 d），占该阶段 $PM_{2.5}$污染天数（18 d）88.9%，$PM_{2.5}$日均浓度峰值出现在 2 月 13 日和 3 月 21 日（119 $\mu g/m^3$）。

从本地气象特征来看，不同阶段近地面温湿风降水情况如图 2 所示，整体表现为低温、弱风、高湿，而高湿、空气流动差的大气状况下促进了粒子在液滴中的反应生成和成核增长，是污染加剧的主要原因（常清，2015；Zhang et al.，2022）。2021.10.1~11.14（第一阶段）日均温度 8~20℃，日均湿度 40~95%，平均风速 1.5m/s，高温高湿多雨条件下湿清除作用较强（党聪聪和姜坪，2019；潘晨和康志明，2022），不利于颗粒物的成核增长，$PM_{2.5}$以轻度污染为主；2021.11.15~12.31（第二阶段）日均温度逐渐下降（-3~13℃），平均风速 1.6m/s，近地面受东北高压与西北高压交替控制，日均相对湿度变幅较大（22~83%），逆温现象显现，垂直扩散条件转差，$PM_{2.5}$轻中度污染天数增多；2022.1.1~1.31（第三阶段）日均气温下降至-3~5℃，雨雪过程对 $PM_{2.5}$的削减作用较弱，平均湿度 76%，平均风速 1.2m/s，高湿静稳逆温持续整个阶段，水平及垂直扩散条件均最差，叠加污染团远距离迁移滞留，导致高浓度气溶胶无法有

效扩散（吴进等，2017），从而加剧高湿、逆温、静小风、低边界层等不利气象条件，使得原本的静稳态势得到进一步的增强，而转差的气象条件反馈作用又控制了较长时间的 $PM_{2.5}$ 重度及以上污染，大气扩散能力与污染物浓度增长的“双向反馈机制”在该阶段得到充分体现（张小曳等，2020）；2022.2.1~3.31（第四阶段）气温逐步回升（-0.5~17℃），相对湿度午间降幅增大，$PM_{2.5}$ 污染程度减轻。

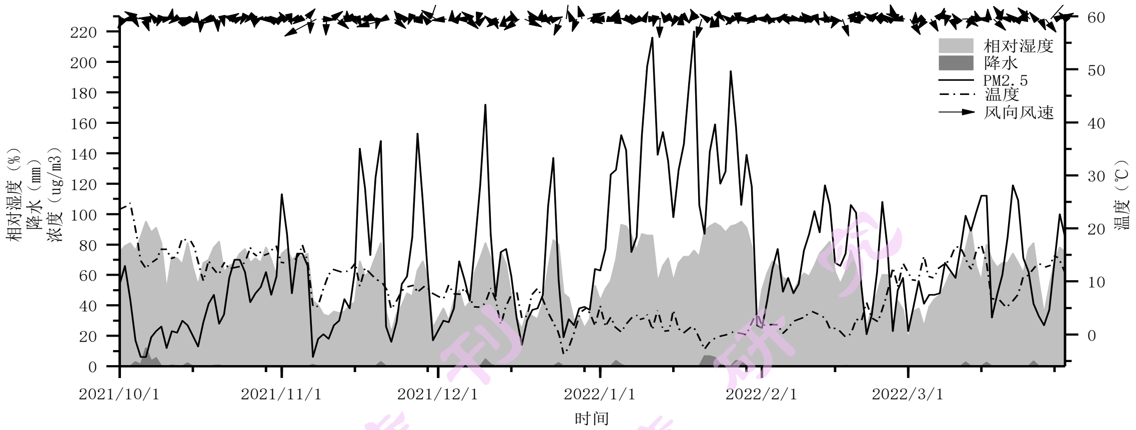

图 2　$PM_{2.5}$ 浓度与气象因子时序图

Fig.2　Timing diagram of $PM_{2.5}$ concentration and meteorological factors

从区域传输影响来看（图 3），2021 年 10 月~12 月西北风频次高、风力大，污染清除较快，环境空气质量相对洁净；2022 年 1~3 月以东南风、东风为主，西北风清除作用减弱。选取的两次典型重污染过程进行污染来源示踪，其中图 4（左）为 12 月 8 日至 12 日污染过程，后向轨迹显示来自东北部的 1000m 和 1500m 气团和来自长三角区域的 500m 气团在京津冀区域汇合后，沿太行山脉一线向南推移，于 9 日早间气团到达济源并沉降至近地面附近，此时近地面 $PM_{2.5}$ 持续加重至重度污染。图 4（右）为 1 月 8 日至 12 日重污染过程，其中 1500m 高空气团自南向北到达我市，500m 和 1000m 高空气团自东南部移动至豫北及冀南城市后，在东部高压影响下，沿太行山回流并在豫北区域滞留，近地面 9 日凌晨至 13 日受高空气团下压影响，垂直扩散条件持续较差，污染持续以重度及以上污染为主。综合以上分析，济源市秋冬季以东风、东南风、西风为主导风向，在偏东风、东南风影响下受远距离污染传输滞留影响较大，污染程度较重，西北风清除作用在 2021 年 10 月~12 月较为显著，在 2022 年 1~3 月减弱。

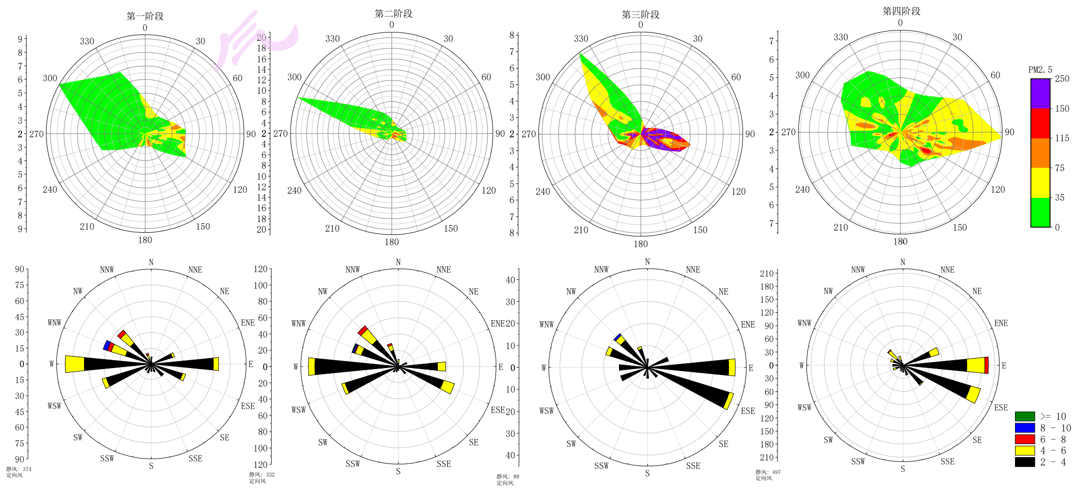

图 3　不同阶段风玫瑰图

Fig.3　Wind Rose Diagram at Different Stages

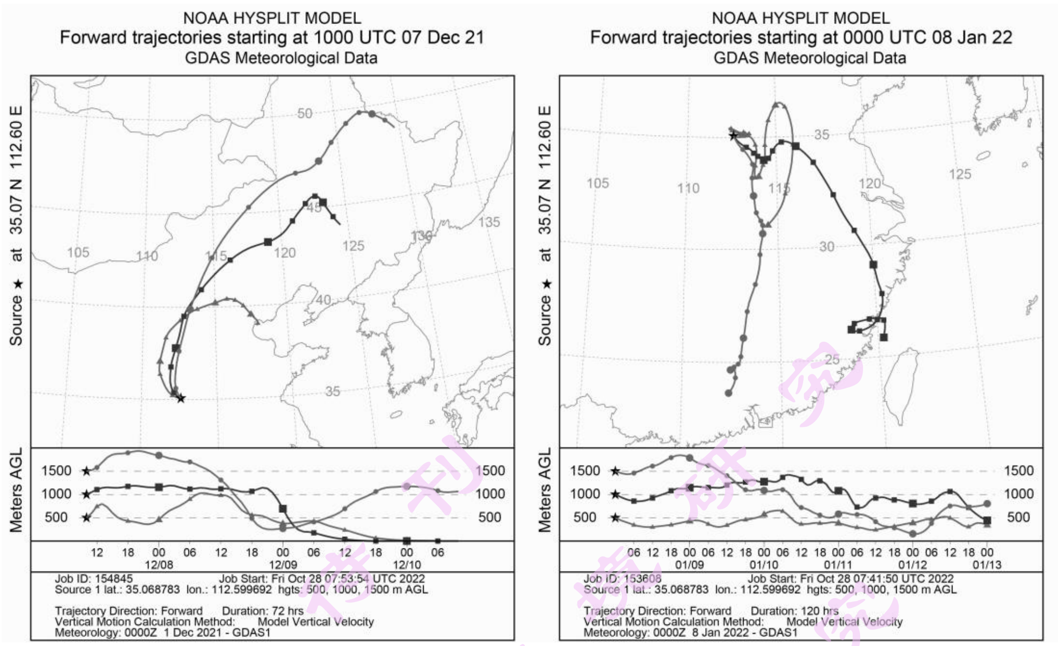

图 4　典型污染过程后向轨迹图（图左为 12 月 8 日至 12 日污染过程，图右为 1 月 8 日至 12 日污染过程）

Fig.4　Backward trajectory diagram of typical pollution process(The left picture shows the pollution process from December 8 to 12, and the right picture shows the pollution process from January 8 to 12.)

注：风玫瑰图去除风力 2m/s 以下时段。

2.2　不同阶段 $PM_{2.5}$ 与气象条件的关系

2.2.1 相关性分析

表 2 给出了 $PM_{2.5}$ 与气象因子小时均值相关系数统计表，结果显示 $PM_{2.5}$ 在各个阶段与风速为负相关，与湿度为正相关（黄善斌等，2020），且湿度与 $PM_{2.5}$ 的相关性显著高于其他因子，其中第二阶段湿度与 $PM_{2.5}$ 的正相关性表现为强相关（相关性系数为 0.615，通过显著水平为 0.01 的检验），第三阶段湿度与 $PM_{2.5}$ 的正相关性表现为中等相关（相关性系数分别为 0.518，通过显著水平为 0.01 的检验）。

表 2　2021 年秋冬季不同阶段 $PM_{2.5}$ 与气象因子小时均值相关系数统计

Table 2　Statistics of correlation coefficient between $PM_{2.5}$ and hourly mean value of meteorological factors at different stages in autumn and winter of 2021

	风速	相对湿度	温度	降水	气压	风向	能见度
第一阶段 $PM_{2.5}$	-.282**	.208**	.083**	-.140**	-.186**	-.190**	-.356**
第二阶段 $PM_{2.5}$	-.297**	.615**	.180**	.246**	-.298**	-.340**	-.731**
第三阶段 $PM_{2.5}$	-.200**	.518**	-.236**	-0.052	-.114**	-.293**	-.671**
第四阶段 $PM_{2.5}$	-.068*	.379**	-.082**	-0.056	-.066*	-.212**	-.439**

注：1.R=0. 8～1. 0 时，二者为显著相关;当 R=0. 6～0. 8 时，二者为强相关;当 R= 0. 4～0. 6 时，二者为中等程度相关;当 R=0. 2～0. 4 时，二者为弱相关;当 R=0. 0～0. 2 时，二者为极弱相关或无相关。

2. **通过显著水平为 0.01 的检验，*通过显著水平为 0.05 的检验；采用 IBM SPSS Statistics26 软件对各因子数据进行相关性分析。

2.2.2 多元回归分析

为评估不同阶段气象条件对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响，利用多元线性回归模型进行分析（于文金

等，2016），气象要素主要包括风速、相对湿度、温度、降水、气压、风向、能见度，通过显著水平 0.05 的检验为标准，得到污染物统计模型的拟合优度（R^2）（王莉莉等，2011；姚青等，2020）及各因子显著性特征。结果显示（表 3）不同阶段气象条件 $PM_{2.5}$ 质量浓度的影响存在显著性差异，第一阶段 26.1%的 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化由气象因素决定，各因子均表现为显著性影响；第二阶段 72.4%的 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化由气象因素决定，相对湿度、风向、能见度三项因子表现为显著性影响；第三阶段 53.2%的 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化由气象因素决定，风速及相对湿度对 $PM_{2.5}$ 的影响不显著；第四阶段 32.2%的 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化由气象因素决定，除风速外其他因子均表现为显著性影响，这与该阶段大风天气下受沙尘及本地扬尘影响导致 $PM_{2.5}$ 出现高值有关（李贵玲等，2014）。相关性分析和多元线性回归分析结果表明，气象因素与 $PM_{2.5}$ 浓度之间存在显著的阶段性差异。

表 3　2021 年秋冬季不同阶段多元线性回归分析

Table 3　Multivariate linear regression analysis of different stages in autumn and winter of 2021

	第一阶段						第二阶段					
	B	β	t	p	F	R^2	B	β	t	p	F	R^2
风速	-4.245	-0.181	-5.725	0.000	49.832***	0.261	-1.167	-0.036	-1.876	0.061	362.193***	0.724
湿度	-0.461	-0.393	-7.383	0.000			0.775	0.399	11.989	0.000		
温度	-2.487	-0.471	-8.819	0.000			-0.036	-0.005	-0.111	0.912		
降水	-25.057	-0.168	-5.939	0.000			16.569	0.027	1.532	0.126		
气压	-1.685	-0.346	-9.009	0.000			-0.028	-0.004	-0.173	0.862		
风向	-0.024	-0.077	-2.600	0.009			-0.050	-0.099	-5.414	0.000		
能见度	-2.902	-0.655	-12.114	0.000			-2.926	-0.587	-17.901	0.000		
	第三阶段						第四阶段					
	B	β	t	p	F	R^2	B	β	t	p	F	R^2
风速	0.617	0.010	0.313	0.754	95.315***	0.532	1.135	0.043	1.594	0.111	81.779***	0.322
湿度	-0.198	-0.081	-1.045	0.297			0.237	0.174	3.763	0.000		
温度	-4.195	-0.271	-4.712	0.000			-0.757	-0.160	-2.550	0.011		
降水	-86.446	-0.206	-6.938	0.000			-43.761	-0.120	-4.945	0.000		
气压	-2.509	-0.149	-4.853	0.000			0.513	0.123	2.494	0.013		
风向	-0.050	-0.076	-2.441	0.015			-0.040	-0.114	-4.598	0.000		
能见度	-6.390	-0.698	-13.105	0.000			-2.181	-0.518	-14.931	0.000		

注：采用 IBM SPSS Statistics26 软件对各因子数据进行多元线性回归分析。

2.3 颗粒物组分变化特征

2.2.1 水溶性离子的酸碱平衡

水溶性离子中酸碱离子的组成比例直接影响着大气颗粒物的酸碱度，而酸碱度对颗粒物表面非均相反应的途径和速率有着直接影响，一般使用离子的当量浓度来对大气颗粒物的酸碱性进行分析，阳离子当量浓度(CE）和阴离子当量浓度(AE)的计算公式分别如下：

$$CE = \frac{Na^+}{23} + \frac{NH_4^+}{18} + \frac{K^+}{39} + \frac{Mg^{2+}}{12} + \frac{Ca^{2+}}{20}$$

$$AE = \frac{F^-}{19} + \frac{Cl^-}{35.5} + \frac{NO_3^-}{62} + \frac{SO_4^{2-}}{48}$$

图 5 结果显示，济源市 2021 年秋冬季阴离子与阳离子相关系数 R^2 均接近 1，阴、阳离子

间具有显著相关性，表明济源市秋冬季 $PM_{2.5}$ 中阴阳离子平衡较好，同时也表明观测数据可靠合理（吴明等，2019；Huang，2022）。优良至轻度污染过程，$PM_{2.5}$ 中酸性成分含量有增加的趋势，在中度污染时期最高，重度和严重时期降低，这与张敬巧等（2018）的研究中重度污染时期酸度最高的结论存在差异，原因可能是沿海与内陆污染来源的差异和计算方法的不同（本文利用斜率法，张敬巧等利用阴阳离子当量浓度比值法）。本文未分析 CO_3^{2-}、HCO_3^- 等阴离子，可能会低估颗粒物的酸性。

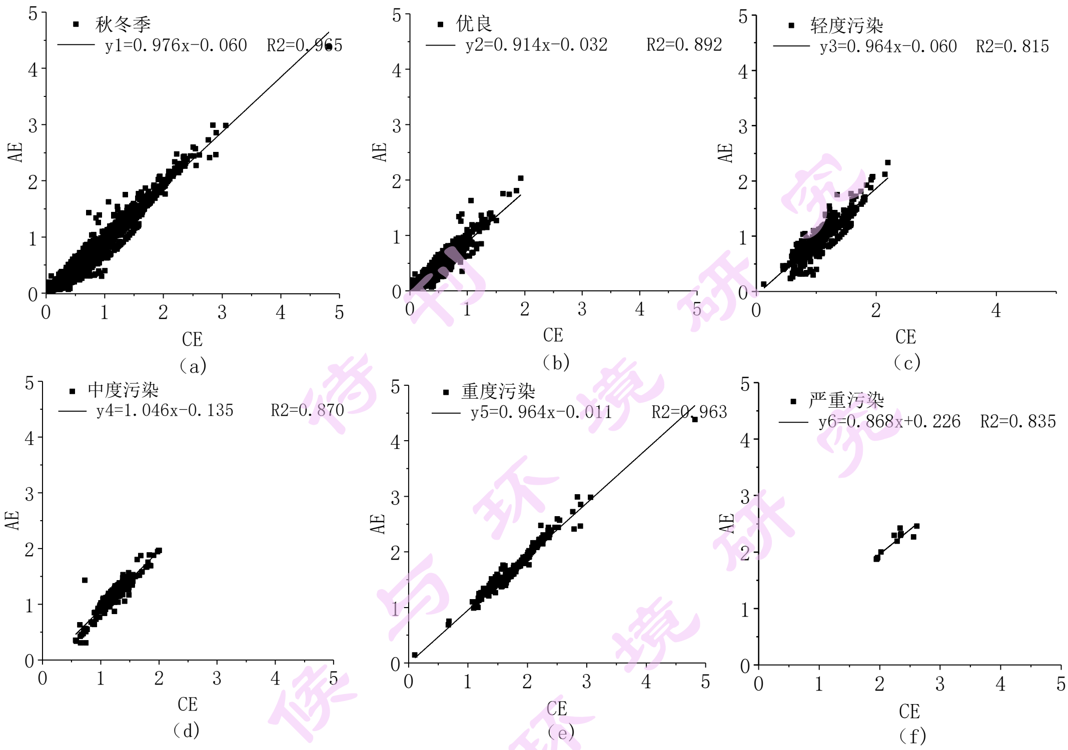

图 5 秋冬季及不同污染等级阴阳离子酸碱性

Fig.5 Acidity and alkalinity of anion and cation with different pollution levels in autumn and winter

2.2.2 颗粒物组分特征

2.2.2.1 颗粒物组分整体特征

污染过程选取 $PM_{2.5}$ 轻度污染前连续 24h 优良数据至污染最重时段各参数数据，共选取 17 个污染过程进行统计分析（图 7）。结果显示秋冬季污染过程颗粒物组分浓度均值由大到小依次为 NO_3^- (38.6%) > NH_4^+(18.3%) > OC(13.3%) > SO_4^{2-}(12.9%) >无机元素 (7.7%) > EC (4.2%) >Cl^- (4.0%) >K^+(1.1%)>。从组分浓度上来看，NO_3^-质量浓度占比最高（赵晴，2010），无机元素中 S 占比 4.2%（二次颗粒物）， Zn、Pb、Cu、Mn、Cl、As 占比 2.8%（机动车及工业排放），Ca、Al、Si 浓度占比 0.7%（扬尘源）（张莹玲等，2022 年；刘军等，2020 年）第一阶段至第四阶段均以 NO_3^- 、NH_4^+、OC、SO_4^{2-}为主，各阶段质量浓度占比之和均达 80%以上，为颗粒物组分的主要成分，其中 SNA（SO_4^{2}、NO_3^-、NH_4^+）占比在 65.7%以上，二次污染较为严重。与其他阶段相比，第一阶段组分浓度呈现出优良时段质量浓度最低，轻度至重度污染过程浓度最高的特点，其中优良至轻度污染过程浓度增速是其他阶段的 2.8~3.3 倍；第二阶段组分浓度最低，在轻度至中度污染过程中浓度增速最快，是其他阶段的 1.3~1.9 倍；第三阶段组分浓度最高，在中度至重度污染过程中浓度增速是其他阶段的 1.2 倍，且仅该阶段出现严重污染时段。

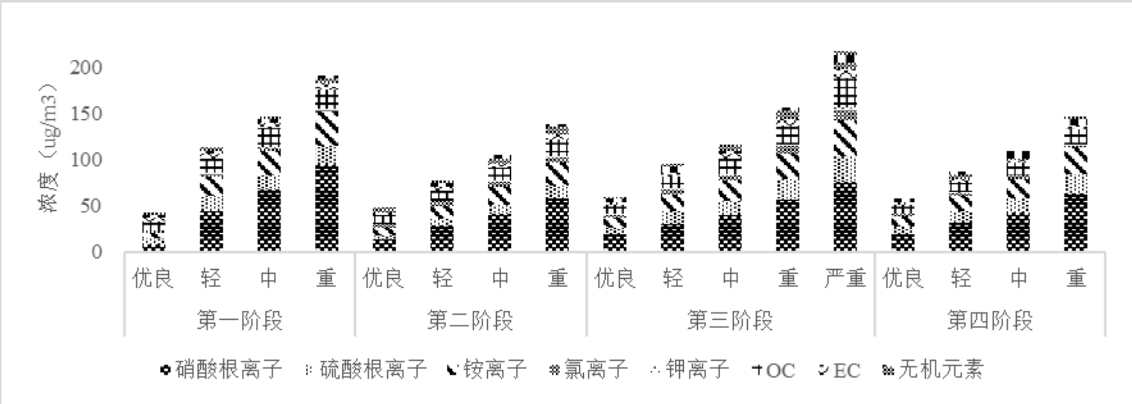

图 6 不同阶段组分浓度堆积图

Fig.6 Accumulation diagram of component concentration in different stages

图 7 污染过程时间分布图

Fig.7 Time distribution diagram of pollution process

注：无机元素包括硫、钙、硅、铝、锰、锌、铅、氯、铜、砷。

污染过程主要选取 2021.10.1~2、11.1~2（第一阶段），2021.11.16、11.19、12.8~10、12.14、12.22~23、（第二阶段），2022.1.2~6、1.8~12、1.15~20、1.21~23（第三阶段），2022. 2.9~14、2.18~19、2.23~25、3.11~12、3.20~22、3.30~31（第四阶段）。

2.2.2.2 硫氮转化速率特征

SO_4^{2-}和 NO_3^-是水溶性离子中的主要离子，通常用硫氧化率（SOR）和氮氧化率（NOR）来表征 SO_2 和 NO_2 的转化效率，SOR 和 NOR 值越高，表示 SO_2 和 NO_2 转化为二次气溶胶就越多。SOR≤0.1 时大气中以一次污染物为主，SOR＞0.1 时说明大气中有光化学氧化反应生成。

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

$$NOR = NO_3^-/(NO_3^- + NO_2)$$

对污染过程硫氮转化速率计算得出，济源市 SOR、NOR 分别为 0.49、0.46，SOR>NOR 说明观测期间 SO_2 比 NO_2 向离子态转化的更多，这与陈桢等在对开封离子酸碱性的研究结论一致（陈桢等，2023）；同时不同污染等级 SOR 和 NOR 均>0.1，且随着污染程度的加重持续上升，表明济源市污染过程主要以二次生成为主。

不同阶段 SOR/NOR 趋势存在差异，第一阶段 SOR/NOR 在优良时段大于 1，其他时段小于 1，在中度污染时段达到“谷值”；第二阶段 SOR/NOR 始终小于 1，随污染程度加重比值增加；第三阶段和第四阶段 SOR/NOR 始终大于 1，且均出现 2 个“峰值”，第三阶段峰值分别出现在中度污染和严重污染时段，第四阶段峰值分别出现在轻度和重度污染时段。

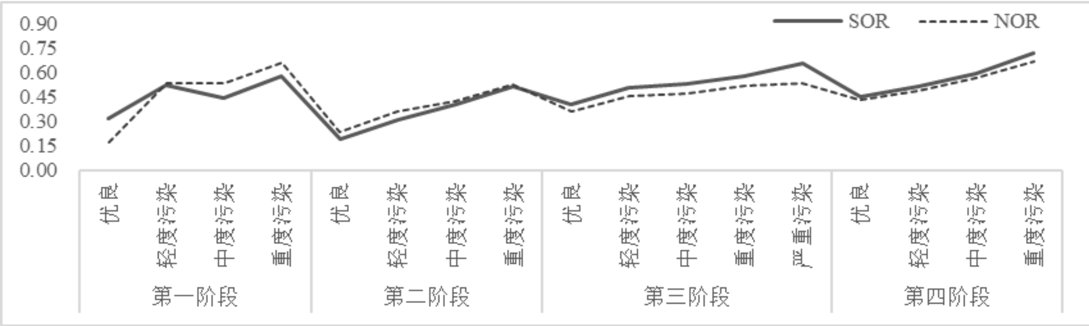

图 8 2021 年秋冬季硫氮转化率

Fig.8 Sulfur and nitrogen conversion rate in autumn and winter of 2021

2.2.2.3 不同污染等级组分变化特征（颗粒物组分增速差异）

将选取的 17 次污染过程按环境空气质量污染等级进行细分，计算不同污染等级下浓度增长速率，如表 7 所示，不同组分随污染程度加重呈现不同的增速变化。高速增长过程 NO_3^-、SO_4^{2-}、NH_4^+、无机元素增速较快（34% ~ 50%的概率），NO_3^-、NH_4^+、除 S 之外的无机元素在优良-轻度污染时段增速最快，随污染程度加重增速减缓；SO_4^{2-}在轻度-中度污染时段增速最快，随污染程度加重增速减缓，而 SOR 随污染程度加重而增大表明该阶段 SO_4^{2-}的高速增长除二次生成外有较多一次源输入。快速增长过程 OC、K^+、S、EC、NH_4^+增速较快（43% ~ 62%的概率），S、EC 在优良-轻度污染时段增长最快， OC、K^+、NH_4^+在轻度-中度污染时段增长最快。慢速增长过程除 S 之外的无机元素在轻度-中度污染时段增速较快（52-55%的概率）。Cl^-有 61.4%的概率保持在快速增长以上，在优良-轻度污染时段增速较快。

高速增长期，优良-轻度污染过程 NO_3^-浓度增速快于其他因子，轻度-重度污染过程 SO_4^{2-}增速最快，重度-严重污染时段 Cl^-在增速最快，除 S 外的其他无机元素增速也较快；快速增长期，优良-轻度污染过程 S 增速快于其他因子，轻度-严重污染过程 OC 增速最快，重度-严重污染时段 S 增速也较快；慢速增长期，优良-轻度污染过程 OC 增速快于其他因子，轻度-严重污染过程无机元素增速最快，重度-严重污染时段 SO_4^{2-}、NH_4^+增速较快。

表 4 不同污染等级组分浓度增速情况

Table.4 Concentration growth of components with different pollution levels

污染等级	时间	EC	OC	S	工业及机动车源	扬尘源	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	K^+	NH_4^+
高速增长	优良-轻度	2.3%	6.8%	9.1%	15.9%	13.6%	13.6%	20.5%	13.6%	2.3%	18.2%
	轻度-中度	13.6%	-	13.6%	11.4%	9.1%	6.8%	18.2%	20.5%	2.3%	6.8%
	中度-重度	2.3%	-	11.4%	4.5%	6.8%	4.5%	11.4%	15.9%	-	11.4%
	重度-严重	2.3%	-	-	4.5%	2.3%	4.5%	-	-	-	-
	合计	20.5%	6.8%	34.1%	36.4%	31.8%	29.5%	50.0%	50.0%	4.5%	36.4%
快速增长	优良-轻度	20.5%	11.4%	27.3%	4.5%	6.8%	13.6%	9.1%	22.7%	20.5%	18.2%
	轻度-中度	11.4%	29.5%	13.6%	2.3%	-	9.1%	13.6%	9.1%	22.7%	25.0%
	中度-重度	9.1%	15.9%	11.4%	4.5%	4.5%	9.1%	9.1%	4.5%	11.4%	11.4%
	重度-严重	2.3%	4.5%	4.5%	-	2.3%	-	2.3%	-	2.3%	-
	合计	43.2%	61.4%	56.8%	11.4%	13.6%	31.8%	34.1%	36.4%	56.8%	54.5%
慢速增长	优良-轻度	15.9%	20.5%	2.3%	18.2%	18.2%	11.4%	9.1%	2.3%	15.9%	2.3%
	轻度-中度	9.1%	4.5%	6.8%	20.5%	25.0%	18.2%	2.3%	4.5%	9.1%	2.3%

中度-重度	11.4%	6.8%	-	13.6%	11.4%	9.1%	2.3%	2.3%	11.4%	-
重度-严重	-	-	-	-	-	-	2.3%	4.5%	2.3%	4.5%
合计	36.4%	31.8%	9.1%	52.3%	54.5%	38.6%	15.9%	13.6%	38.6%	9.1%

注：高速增长判定方法为不同污染过程不同等级增长速率排名前 3 的频次占比，快速增长判定方法为不同污染过程不同等级增长速率排名 4-7 的频次占比，慢速增长判定方法为不同污染过程不同等级增长速率排名后 3 的频次占比。

3 结论

（1）秋冬季气象整体表现为低温、弱风、高湿，各阶段 $PM_{2.5}$ 与风速为负相关，相关性较弱，与湿度为正相关，在采暖季开始后（第二阶段至第四阶段）与湿度的相关性增大。

（2）第一阶段 26.1%的 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化由气象因素决定；第二阶段 72.4%的 $PM_{2.5}$ 浓度的小时浓度变化由气象因素决定，相对湿度、风向、能见度三项因子表现为显著性影响，在东风和东南风下受远距离传输影响较大，在强西北风下污染清除较快；第三阶段 53.2%的 $PM_{2.5}$ 浓度的小时浓度变化由气象因素决定，高湿静稳逆温持续整个阶段，同时在东风和东南风条件下污染团远距离传输滞留，进一步加重本地污染，该阶段风速和相对湿度对 $PM_{2.5}$ 的小时变化影响不显著；第四阶段 32.2%的 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化由气象因素决定，受春季大风扬尘及沙尘影响，风速对 $PM_{2.5}$ 的小时变化影响不显著。

（3）济源市 2021 年秋冬季阴离子与阳离子相关性（$R^2 = 0.8$），线性回归方程的斜率(AE /CE) 小于 1，说明济源市 $PM_{2.5}$ 呈弱碱性，在优良至中度污染时段大气颗粒物的碱性成分会降低，酸性成分含量会增加，在重度及以上污染时段则相反。

（4）济源市秋冬季污染过程中颗粒物组分均以 NO_3^- 、NH_4^+、OC、SO_4^{2-}为主，各阶段质量浓度占比之和均达 80%以上，其中 SNA（SO_4^{2-}、NO_3^-、NH_4^+）占比在 65.7%以上，二次污染较为严重。高速增长过程，SO_4^{2-}在轻度-中度污染时段增速最快，除二次生成加快外有较多一次源输入；NO_3^-在优良-轻度污染时段增速最快，随污染程度加重增速减缓，二次生成增加，一次源输入减少。快速增长过程，OC、K^+、NH_4^+在轻度-中度污染时段增长最快，S、EC 在优良-轻度污染时段增长最快；慢速增长过程，除 S 之外的无机元素在轻度-中度污染时段增速较快。快速和高速增长过程，Cl^-在优良-轻度污染时段增速较快。

参考文献（References）

陈锦超，董雪玲，张婉，等. 2018. 北京市霾天 $PM_{2.5}$ 污染特征及其与气象因素的关系[J].环境科学与技术, 2018, 41(8):87-94. Chen Jinchao, Dong Xueling, Zhang Wan, et al. 2018. Characteristics of $PM_{2.5}$ pollution in haze days in Beijing and its relationship with meteorological factors [J]. Environ. Sci. Technol., 41 (8): 87-94. doi:10.19672/j.cnki.1003-6504.2018.08.014.

常清，杨复沫，李兴华，等. 2015. 北京冬季雾霾天气下颗粒物及其化学组分的粒径分布特征研究[J].环境科学学报, 35(2): 363-370. Chang Qing, Yang Fumo, Li Xinghua, et al. 2015. Study on the particle size distribution characteristics of particulate matter and its chemical components in winter haze in Beijing [J]. Journal of Environmental Science, 35 (2): 363-370. doi:10.13671 / j. hjkxxb. 2014. 0725.

陈桢，王晓东. 某典型平原地区大气细颗粒物污染过程成因及组分来源分析[J]. 能源与环保, 2023, 45(1): 141-147. Chen Zhen, Wang Xiaodong. Analysis on the causes and component sources of atmospheric fine particles pollution process in a typical plain area[J]. Energy and Environmental Protection, 2023, 45(1): 141-147. doi:1003-0506(2023)01-0141-08.

党聪聪，姜坪. 2019. 气象条件对大气中 $PM_{2.5}$ 浓度的影响[J]. 洁净与空调技术, (2):31-37. Dang Congcong, Jiang Ping, et al. 2019. The influence of meteorological conditions on the concentration of PM2.5 in the atmosphere [J]. Clean and Air Conditioning Technology, (2): 31-37.

冯小琼，陈军辉，尹寒梅，等. 2020. 成都市冬季 3 次灰霾污染过程特征及成因分析[J]. 环境科学, 41(10) : 3291-4382. Feng Xiaoqiong, Chen Junhui, Yin Hanmei, et al. 2020. Characteristics and cause analysis of three haze pollution processes in winter in Chengdu[J]. Environmental Science, 41 (10): 4382-3 291. doi: 10.13227 /j.hjkx.202002130.

贺博文，聂赛赛，王帅，等. 2021. 承德市 $PM_{2.5}$ 中碳质组分的季节分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 42(11) :5152-5161. He Bowen, Nie Saisai, Wang Shuai, et al. 2021. Seasonal distribution characteristics and source analysis of carbon components in $PM_{2.5}$ in Chengde City[J]. Environmental Science, 42 (11): 5152-5161.doi: 10. 13227 /j.hjkx.202101082.

黄善斌，李本轩，王文青，等. 2020. 济南 PM2.5 质量浓度与气象条件相关性初步研究[J].海洋气象学报, 40(1):90-97. Huang Shanbin, Li Benxuan, Wang Wenqing, et al. 2020. Preliminary study on correlation between PM2.5 mass concentration and meteorological conditions in Jinan [J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40 (1): 90-97. doi: 10. 19513/j. cnki. issn2096-3599. 2020. 01. 009. (in Chinese).

Huang Y M, Zhang L Y, Peng C, et al. 2022. Pollution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in $PM_{2.5}$ from a Mountainous City in Southwest China[J]. Atmosphere, 13(10), 1713. doi.org/10.3390/atmos13101713.

济源市统计局. 2018. 济源统计年鉴[M].北京:中国统计出版社. Jiyuan Municipal Bureau of Statistics. 2018. Jiyuan Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press.

姜华，高健，李红，等. 我国大气污染协同防控理论框架初探[J]. 2022, 环境科学研究，35(3): 601-608. Jiang Hua, Gao Jian, Li Hong, et al. Preliminary Study on the Theoretical Framework of Collaborative Prevention and Control of Air Pollution in China[J]. 2022, Environmental science research, 35(3): 601-608. DOI：10.13198/j.issn.1001-6929.2022.01.11.

刘淼晗，于宸涛，房祥玉，等. 2023, 2014-2020 年河南省 $PM_{2.5}$-O_3 复合污染特征及气象成因分析[J]. 环境科学研究，36(2): 285-292. Liu Miaohan, Yu Chentao, Fang Xiangyu, et al. 2023, Analysis on the Characteristics and Meteorological Causes of $PM_{2.5}$-O_3 Composite Pollution in Henan Province from 2014 to 2020[J]. Environmental science research, 36(2): 285-292. DOI：10.13198/j.issn.1001-6929.2022.11.06.

刘军，陆晓波，陈新星，等. 2020, 南京市城区 $PM_{2.5}$ 中化学组分演变特征[J]. 环境监控与预警, 12(4): 40-44. Liu Jun, Lu Xiaobo, Chen Xiaoxing, et al. 2020, Study on the Evolution Characteristics of Chemical Components in $PM_{2.5}$ in Urban Area of Nanjing[J], Environmental Monitoring and Forewarning, 12(4): 40-44. Doi:1674 6732(2020) 04 0040 05.

李璇，赵晓楠，俞磊，等. 2018. 石家庄市采暖前后大气颗粒物及其碳组分特征[J].环境科学研究, 31 (4) :679-687. Li Xuan, Zhao Xiaonan, Yu Lei, et al. 2018. Characteristics of atmospheric particulates and their carbon components before and after heating in Shijiazhuang[J].Environmental Science Research, 31(4): 679-687. DOI: 10. 13198 j. issn. 1001-6929. 2017. 04. 08.

李贵玲,周敏,陈长虹,等.2014. 2011 年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征[J].环境科学, 35 (5) :1644-1653. Li Guiling, Zhou Min, Chen Changhong, et al. 2014. Change characteristics of atmospheric particulates and their chemical components in Shanghai under the influence of sand dust weather in spring 2011 [J]. Environmental Science, 35 (5): 1644-1653. DOI: 10. 13227 /j. hjkx. 2014.05.003

刘晓迪，孟静静，侯战方，等. 2018. 济南市夏、冬季 $PM_{2.5}$ 中化学组分的季节变化特征及来源解析[J].环境科学，39(9):4 014-4 025. Liu Xiaodi, Meng Jingjing, Hou Zhanfang, et al. 2018. Seasonal variation characteristics and source analysis of chemical components in $PM_{2.5}$ in summer and winter in Jinan [J]. Environmental Science, 39 (9):4014-4025. DOI: 10. 13227 /j. hjkx. 201801081.

刘盈盈，殷宝辉，王静，等. 2018. 济南冬季大气重污染过程颗粒物组分变化特征[J].环境化学，37(12):2 749-2 757. Liu Yingying, Yin Baohui, Wang Jing, et al. 2018. Change characteristics of particulate matter composition during heavy air pollution in Jinan in winter [J]. Environmental Chemistry, 37 (12):2 749-2 757. DOI: 10. 7524 /j. issn. 0254-6108. 2018072601.

潘晨，康志明. 2022. 2001~2019 年气象条件对江苏省 $PM_{2.5}$ 分布的影响[J].环境科学，43(2):649-662. Pan Chen, Kang Zhiming, et al. 2022. Impact of meteorological conditions on the distribution of $PM_{2.5}$ in Jiangsu Province from 2001 to 2019 [J]. Environmental Science,2022,43 (2): 649-662. DOI: 10. 13227 /j. hjkx. 202104292.

钱骏，冯小琼，陈军辉，等. 2021. 四川盆地典型城市 $PM_{2.5}$ 污染过程组分特征和来源解析[J].环境科学学报，41 (11) :4366-4376. Qian Jun, Feng Xiaoqiong, Chen Junhui, et al. 2021. Compositional characteristics and source analysis of $PM_{2.5}$ pollution process in typical cities of Sichuan Basin[J]. Journal of Environmental Science, 41 (11): 4366-4376. DOI:10.13671/ j.hjkxxb.2021.0263.

Yang Q Q, Yuan Q Q, Li T W, et al. 2017. The Relationships between PM2.5 and Meteorological Factors in China: Seasonal and Regional Variations[J].Environmental Research and Public Health, 14(12):1510. doi.org/10.3390/ijerph14121510.

汤莉莉，张运江，孙业乐，等. 2014. 南京持续雾霾天气中亚微米细颗粒物化学组分及光学性质[J]. 科学通报，59(20) :1955-1966. Tang Lili, Zhang Yunjiang, Sun Yele, et al. 2014. Chemical Composition and Optical Properties of Submicron Fine Particles in Nanjing Continuous Haze Weather [J]. Science Bulletin, 59 (20): 1955-1966. doi: 10.1360/972013-1098.

吴进，李琛，孙兆彬，等. 2017. 北京地区两次重污染过程中 $PM_{2.5}$ 浓度爆发性增长及维持的气象条件[J]. 干旱气象，35 (5):830 -838. Wu Jin, Li Chen, Sun Zhaobin, et al. 2017. Meteorological conditions for the explosive growth and maintenance of $PM_{2.5}$ concentration during two heavy pollution processes in Beijing [J]. Arid Weather, 35 (5): 830-838. DOI:10. 11755 /j. issn. 1006-7639(2017)-05-0830.

王莉莉，王跃思，吉东生，等. 2011. 天津滨海新区秋冬季大气污染特征分析[J].中国环境科学，31(7):1 077~1 086. Wang Lili, Wang Yuesi, Ji Dongsheng, et al. 2011. Analysis on Characteristics of Air Pollution in Autumn and Winter in Tianjin Binhai New Area [J]. China Environmental Science, 31 (7): 1 077~1 086. doi: 1000-6923(2011)07-1077-10.

吴明，吴丹，夏俊荣，等. 2019. 成都冬季 $PM_{2.5}$ 化学组分污染特征及来源解析[J].环境科学，40(1):76-85. Wu Ming, Wu Dan, Xia Junrong, et al. 2019. Pollution characteristics and source analysis of $PM_{2.5}$ chemical components in winter in Chengdu [J]. Environmental Science, 2019, 40 (1): 76-85. DOI: 10. 13227 /j. hjkx. 201805035.

Xu Y L, Xue W B, Lei Y, et al. 2018. Impact of Meteorological Conditions on $PM_{2.5}$ Pollution in

China during Winter[J]. Atmosphere, 9(11):429. doi.org/10.3390/atmos9110429.
徐雪梅，冯小琼，陈军辉，等. 2021，成都市主城区 $PM_{2.5}$ 碳组分污染特征分析[J]. 环境化学，40(8):1-12. Xu Xuemei, Feng Xiaoqiong, Chen junhui, et al. 2021, Analysis on Pollution Characteristics of $PM_{2.5}$ Carbon Components in Chengdu Urban Area [J]. Environmental Chemistry, 40(8):1-12. DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2020041401.
肖悦，田永中，许文轩，等. 2018. 中国城市大气污染特征及社会经济影响分析[J]. 生态环境学报，27(3): 518-526. Xiao Yue, Tian Yongzhong, Xu Wenxuan, et al. 2018. Analysis on the Characteristics of Urban Air Pollution and Its Socio economic Impact in China [J]. Journal of Ecological Environment, 27 (3): 518-526. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2018.03.016.
徐仲均. 2015. 石家庄霾污染过程大气颗粒物化学组分分析及来源解析[D].石家庄:南京北京化工大学. Xu Zhongjun. 2015. Chemical composition analysis and source analysis of atmospheric particulates in Shijiazhuang haze pollution process[D]. Shijiazhuang: Nanjing Beijing University of Chemical Technology.
于文金，于步云，谢涛，等. 2016. 基于 MODIS 气溶胶光学厚度与气象要素的苏锡常地区 $PM_{2.5}$ 地面浓度分布研究[J].环境科学学报, 36(10) :3 535-3 542. Yu Wenjin, Yu Buyun, Xie Tao, et al. 2016. Study on $PM_{2.5}$ ground level concentration distribution in Suzhou Wuxi Changzhou region based on MODIS aerosol optical thickness and meteorological elements [J]. Journal of Environmental Science, 36 (10): 3 535-3 542. DOI: 10. 13671 / j. hjkxxb. 2016. 0146.
姚青，蔡子颖，刘敬乐，等. 2020. 气象条件对 2009-2018 年天津地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度的影响[J]. 环境科学学报, 40(1): 65-75. Yao Qing, Cai Ziying, Liu Jingle, et al. 2020. Impact of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ mass concentration in Tianjin from 2009 to 2018 [J]. Journal of Environmental Science, 40 (1): 65-75. DOI: 10. 13671 /j. hjkxxb. 2019. 0370.
杨周，李晓东，雷国良，等. 2020. 成都市 $PM_{2.5}$ 中无机组分与硝酸盐氮氧同位素变化特征[J].地球与环境，48(1) : 10-16. Yang Zhou, Li Xiaodong, Lei Guoliang, et al. 2020. Variation characteristics of inorganic components and nitrate nitrogen and oxygen isotopes in $PM_{2.5}$ in Chengdu [J]. Earth and Environment, 48 (1): 10-16. Doi: 10. 14050/j. cnki. 1672-9250. 2020. 01. 022.
张小曳，徐祥德，丁一汇，等. 2020. 2013~2017 年气象条件变化对中国重点地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度下降的影响[J].中国科学：地球科学, 50(4):483-500. Zhang Xiaoyi, Xu Xiangde, Ding Yihui, et al. 2020. Impact of changes in meteorological conditions from 2013 to 2017 on the decline of $PM_{2.5}$ mass concentration in key regions of China [J]. Chinese Science: Earth Science, 50 (4): 483-500. doi: 10.1360/N072018-00303.
张逸琴，王杰，高健，等. 2019. 2016~ 2017 年采暖期华北平原东部 $PM_{2.5}$ 组分特征及来源解析[J].环境监控与预警, 40 (12) :5202-5212. Zhang Yiqin, Wang Jie, Ggao Jian, et al. 2019. Analysis on the Characteristics and Sources of $PM_{2.5}$ Components in the East of North China Plain during the Heating Period from 2016 to 2017 [J]. Environmental Monitoring and Early Warning, 40 (12): 5202-5212. DOI: 10.13227 /j.hjkx.201904076.
Zhang X R, Xiao X, Wang F, et al. 2022. Observed sensitivities of $PM_{2.5}$ and O_3 extremes to meteorological conditions in China and implications for the future [J]. Environment International.168. Doi.org/10.1016/j.envint.2022.107428.
张敬巧，王淑兰，罗达通，等. 2018. 聊城市冬季 $PM_{2.5}$ 及水溶性离子污染特征及来源分析[J].

环境科学研究, 31(10):1712-1718. Zhang Jingqiao, Wang Shulan, Luo Datong, et al. 2018. Analysis of PM2.5 and water-soluble ion pollution characteristics and sources in Liaocheng City in winter [J]. Environmental Science Research, 31 (10): 1712-1718. DOI: 10. 13198/j. issn. 1001-6929. 2017. 04. 22.
张莹玲，李嘉康，吴航航，等. 2022. 北京市某街道采暖期与非采暖期环境空气颗粒物（$PM_{2.5}$）组分特征及来源分析初探[J]. 广东化工, 11(49): 153-156. Zhang Yingling, Li Jiakang, Wu Hanghang, et al. 2022, Research on Chemical Components and their Sources of Particulate Matter (PM2.5) in the Ambient Air of a Street in Beijing during Heating and Non-heating Periods[J], Guangdong chemistry, 11(49): 153-156. doi: 1007-1865(2022)11-0152-05.
赵晴. 2010. 典型地区无机细粒子污染特征及成因研究[D].北京:清华大学. Zhao Qing. 2010. Study on characteristics and causes of inorganic fine particle pollution in typical areas [D].Beijing: Tsinghua University.
张毓秀，于兴娜，刘偲嘉，等. 2020. 南京江北新区大气颗粒物化学组分的粒径分布特征[J].环境科学, 41 (11):4803-4812. Zhang Yuxiu, Yu Xingna, Liu Sijia, et al. 2020. Particle size distribution characteristics of chemical components of atmospheric particulates in Jiangbei New Area, Nanjing [J]. Environmental Science, 41 (11): 4803-4812. DOI: 10. 13227 /j. hjkx. 202004213.