

京津冀地区大气 PM_{2.5} 污染时空分布特征及成因分析*

苏孟倩^{1,2}, 石玉胜^{1†}

(1 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

(2022 年 12 月 5 日收稿; 2023 年 3 月 27 日收修改稿)

Su M Q, Shi Y S. Spatial and temporal distribution characteristics and influential factors of PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2024, 41(3): 334-344. DOI: 10.7523/j.ucas.2023.025.

摘要 基于 PM_{2.5} 浓度数据、自然因素数据和人类活动因素数据,采用克里金插值法和统计分析法探究 2017 年京津冀地区 13 个城市大气 PM_{2.5} 污染的时空分布特征,并采用相关分析模型和因子分析模型探究其成因。结果表明,京津冀地区:1)PM_{2.5} 浓度空间分布呈现“北低南高”的特点,南部和北部城市的年平均浓度梯度最高可达到 64 μg/m³;2)PM_{2.5} 浓度时间分布呈现“冬高夏低”、“早晚高午后低”的特点,冬季 PM_{2.5} 浓度是夏季的 1.3~2.8 倍,四季 PM_{2.5} 浓度日较差介于 11~29 μg/m³;3)大气 PM_{2.5} 污染与自然因素关系密切。地势地形影响 PM_{2.5} 的聚集、传输和扩散过程。风速、日照时数和相对湿度是影响大气 PM_{2.5} 污染的主导气象因素,冬季 PM_{2.5} 浓度与气象因素的相关性最强;4)大气 PM_{2.5} 污染与人类活动关系密不可分,具体可归为:社会经济因素、工业污染排放因素和城市建设因素。研究结果将有助于为京津冀地区大气污染防治查漏补缺。

关键词 京津冀地区;PM_{2.5};时空分布;相关分析;因子分析

中图分类号:X51 **文献标志码**:A **DOI**:10.7523/j.ucas.2023.025

Spatial and temporal distribution characteristics and influential factors of PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei

SU Mengqian^{1,2}, SHI Yusheng¹

(1 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The fine particulate matter PM_{2.5} could be harmful to human health and the atmospheric environment. Beijing-Tianjin-Hebei is one of the most serious regions in China in terms of atmospheric PM_{2.5} pollution. Based on PM_{2.5} concentrations data, natural factors data, and human activity factors data, this study used kriging interpolation and statistical analysis to explore the

* 风云三号 03 批气象卫星工程地面应用系统生态监测评估应用项目(第一期)(ZQC-R22227)、国家自然科学基金(42071398)、国家重点研发计划(2021YFB3901000)和中国科学院人才项目(Y8YR2200QM)资助

† 通信作者, E-mail: shiys@aircas.ac.cn

spatial and temporal distribution characteristics of atmospheric PM_{2.5} pollution in 13 cities of Beijing-Tianjin-Hebei in 2017 and then used correlation analysis models and factor analysis models to explore its influential factors. The results show that in Beijing-Tianjin-Hebei, 1) PM_{2.5} concentrations are low in the north and high in the south. The gradient of annual average concentrations between the southern and northern cities can reach up to 64 μg/m³. 2) PM_{2.5} concentrations are high in winter and low in summer, high in the morning and evening, and low in the afternoon. PM_{2.5} concentration in winter is 1.3-2.8 times higher than in summer, and the daily differences in PM_{2.5} concentrations in all seasons are between 11-29 μg/m³. 3) Atmospheric PM_{2.5} pollution is closely related to natural factors. Terrain and topography affect the processes of PM_{2.5} aggregation, transport, and dispersion. Wind speed, sunshine hours, and relative humidity are the dominant meteorological factors affecting atmospheric PM_{2.5} pollution, and PM_{2.5} concentrations have the strongest correlation with meteorological factors in winter. 4) Atmospheric PM_{2.5} pollution is closely related to human activities, which can be summarized into social economy factor, industrial pollutant discharge factor, and urban construction factor. The results of this study will help fill the gaps in air pollution prevention and control in Beijing-Tianjin-Hebei.

Keywords Beijing-Tianjin-Hebei; PM_{2.5}; spatial-temporal distribution; correlation analysis; factor analysis

大气污染能够显著影响人体健康、城市发展与气候环境^[1-3], 空气质量下降所带来经济成本达到中国每年国内生产总值的 18%^[4]。中国现行的 GB 3095—2012《环境空气质量标准》对环境空气污染物基本项目提出了浓度限值, 其中以细颗粒物 PM_{2.5} (环境空气中空气动力学当量直径小于 2.5 μm 的颗粒物) 作为首要污染物并且达到重度污染以上的天数频发^[5-6], 引起了人们的广泛关注。PM_{2.5} 粒径小, 活性强, 易附带有毒有害物质, 能在空气中长期停留, 并进行远距离传输, 从而对人体健康^[7-9] 和大气环境质量^[10-11] 带来严重危害。袁博等^[12] 利用聚类分析法得出中国城市空气污染呈现“城市群”分布特点, 而且随季节变化。而京津冀地区位于中国政治经济中心, 区域面积广阔、人口稠密、工业发展迅速, 加之其特殊的地形和大气环境特点, 成为中国大气 PM_{2.5} 污染的重灾区之一^[13-14], 同时也是中国区域大气污染联防联控的重点关注区域。众多学者对该区域大气 PM_{2.5} 污染的时空分布特征与影响因素展开了研究和讨论。

刘海猛等^[4] 研究表明, 京津冀地区 PM_{2.5} 浓度在季节上呈秋冬高、春夏低, 空间上呈东南高、西北低的特点。李慧等^[15] 指出, 受冬季高强度污染排放以及不利气象条件的影响, 京津冀地区 PM_{2.5} 高污染时段主要出现在冬季。大气 PM_{2.5} 污染是区域内自然因素和人类活动因素共同作用

的结果。对于自然因素, 徐丹妮等^[16] 使用 HYSPLIT 模型探究复杂地形影响下冬季 PM_{2.5} 的不同传输特征。金莲姬等^[17] 利用 WRF-Chem 模型探究 PM_{2.5} 空中输送对北京地面污染影响的地形强迫机制。王黎明等^[18] 采用物理实验模拟探究有利于雾霾天气出现的最佳相对湿度范围。孟丽红等^[19] 研究表明海陆风对天津市的 PM_{2.5} 污染总体起扩散作用。王琪等^[20] 研究表明风速、相对湿度和日照时数对北京细颗粒物的污染程度有较显著的影响。杨旭^[5] 综合统计学和数值模拟方法探究京津冀地区 PM_{2.5} 等污染物与气象条件的关系。对于人类活动因素, 马召辉等^[21] 通过构建北京排放源 PM_{2.5} 成分谱得出, 燃煤电厂、水泥窑炉、工业锅炉和车辆尾气等排放是构成大气 PM_{2.5} 组分的重要来源。王振波等^[22] 运用 GIS 空间分析和空间面板杜宾模型研究表明城市群 PM_{2.5} 年均浓度空间集聚性显著, 工业化、能源消耗、城市化水平和产业结构等对 PM_{2.5} 污染影响显著。马丽等^[23] 使用因素分解法探讨京津冀地区工业规模、结构和效率与大气污染物排放的时空耦合关系。常亚敏等^[24] 结合树种对城市环境的适应性建立了适用于控制 PM_{2.5} 污染的城市绿化树种的选择方法。

大量研究仅单方面注重区域自然因素或人类活动因素对 PM_{2.5} 的影响解析, 导致对 PM_{2.5} 污

染的成因把握不够全面;或只开展单个城市污染状况的综合影响因素分析,忽略了城市群之间的共性污染特征。2017 年不仅是国务院部署的“大气污染防治行动计划”的收官之年,也是全国“蓝天保卫战”的打响之年,是中国大气污染治理由初显成效向纵深推进的关键时间节点。因此,本研究以 2017 年为例,基于京津冀地区 13 个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度监测数据,分别采用克里金插值法和统计分析法探究京津冀地区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的空间和时间分布特征,并在此基础上分别采用相关分析模型和因子分析模型进一步探究影响京津冀地区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的主要自然因素和人类活动因素,以期京津冀地区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治查漏补缺,同时为制定相关大气污染防治政策提供一定参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

国家环境空气质量监测网涵盖城市、区域和背景点的环境空气质量状况和污染物传输影响监测。本研究所用的大气污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度数据来源于 79 个位于京津冀地区的国家空气质量自动监测点位(简称空气质量国控点)的每小时自动监测结果。如图 1 所示,站点在京津冀 13 个城市范围内分布较为均匀,具有良好的区域代表性。大气污染成因分析所用的气象因素数据来自中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>)公布的中国地面气候资料日值数据集(V 3.0),各城市数据由城市所在范围内所有站点数据的平均值表示,人类活动因素指标数据来自《中国城市统计年鉴》。

1.2 克里金插值

本研究基于 ArcGIS 的克里金(Kriging)插值方法^[25]对京津冀地区 79 个空气质量国控点的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度监测数据进行空间插值,探究 2017 年京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分布特征。克里金插值法是空间分析中广泛使用的一种空间插值技术,可以实现从离散的空间点数据到连续的区域面数据的拓展^[26],有效弥补了观测数据不足带来的缺点。克里金插值法充分考虑了样点之间的位置关系,基于半变异函数模型反映空间数据的相关特性,根据线性加权原理对给定空间内的变量进行无偏最优估计,其基本变异函数计算公式^[27-28]为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2. \quad (1)$$

式中: h 代表样本之间的距离, $N(h)$ 为研究区域内距离为 h 的点对数, $Z(x_i + h)$ 和 $Z(x_i)$ 分别为点 $x_i + h$ 和 x_i 处的变量值; $\gamma(h)$ 为所有距离为 h 的点对的半方差函数,满足二阶平稳假设条件。

1.3 数据标准化-极差法

在进行数据综合评价时,需要对处于不同量级的多个评价指标进行标准化处理,这对获取合理的评价结果是至关重要的^[29]。因此,为排除不同人类活动评价指标变量量纲和变异范围影响,本研究采用极差法对所研究的人类活动影响指标数据进行标准化处理,进而评价城市 $j=1, 2, \dots, n$ ($n=13$) 的人类活动因素对城市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响状况。评价指标体系包括 $i=1, 2, \dots, m$ ($m=10$) 个指标,根据各人类活动因素的社会影响效应,将所有指标分为效益型指标(+)与成本型指标(-),效益型指标越高越好,成本型指标越低越好^[30]。

原始评价指标数据矩阵 X 表示为

$$X = \{x_{ij}\}_{m \times n}. \quad (2)$$

效益型指标标准化方法为

$$y = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}. \quad (3)$$

成本型指标标准化方法为

$$y = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}}. \quad (4)$$

其中, x_{\max} 和 x_{\min} 分别为该项指标的最大值和最小值。

标准化后的评价指标数据矩阵 Y 为

$$Y = \{y_{ij}\}_{m \times n}. \quad (5)$$

1.4 相关分析与因子分析

相关分析是指对 2 个或多个具备相关性的变量元素进行分析,从而衡量 2 个因素之间相关关系的密切程度^[31]。本研究使用 Spearman 相关模型,在年尺度和季节尺度上分别展开京津冀地区城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与气温、相对湿度、气压、风速、累计降水量和日照时数这 6 个气象因素的双变量相关分析,并进行显著性检验,探究影响大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的主要气象因素。

因子分析主要基于数据降维思想,根据变量的相关性大小对变量进行分组,在尽可能不损失或者少损失原始数据信息的情况下,将众多变量

聚合成少数几个可以独立反映原始众多变量主要信息的公共因子^[32]。本研究基于 SPSS 25.0 模型采用因子分析法对 10 个不同的人类活动指标变量进行聚合降维, 探究影响大气污染的主要人类活动因素。

2 PM_{2.5} 浓度时空分布特征

2.1 PM_{2.5} 浓度空间分布特征

2017 年京津冀地区 PM_{2.5} 浓度空间分布特征如图 1 所示。总体来看, 京津冀地区 PM_{2.5} 浓度在空间上呈现出明显的“北低南高”的纬向分布特征, PM_{2.5} 浓度梯度在同一城市内部最高能够达到 22 μg/m³ (如张家口、保定和石家庄), 在不同城市之间最高能够达到 64 μg/m³^[4, 33-35]。具体来看, 北部 3 个城市 (张家口、承德、秦皇岛) 的大气污染水平最低, 受细颗粒物的影响最小, PM_{2.5} 质量浓度基本都在 51 μg/m³ 以下, 其中张家口和承德的部分地区低于《国家环境空气质量标准》中规定的国家二级标准 (35 μg/m³); 中部 5 个城市 (北京、廊坊、天津、唐山、沧州) 的 PM_{2.5} 污染水平处于中等, PM_{2.5} 质量浓度年均值大约在 51 ~ 75 μg/m³; 南部 5 个城市 (衡水、邢台、保定、石家庄、邯郸) PM_{2.5} 污染最为严重, PM_{2.5} 质量浓度年均值基本都在 75 μg/m³ 以上。

2.2 PM_{2.5} 浓度时间变化特征

由于京津冀地区的 PM_{2.5} 浓度呈现明显的北部<中部<南部的“城市群”分布特征, 本研究据此将京津冀地区的 13 个城市划分为 3 组, 进一步探

究这 3 个城市群的 PM_{2.5} 浓度逐月变化特征^[36]。其中, 衡水、邢台、保定、石家庄、邯郸 5 个城市 PM_{2.5} 浓度最高, 为第 1 组; 北京、天津、廊坊、唐山、沧州 5 个城市 PM_{2.5} 浓度居中, 为第 2 组; 张家口、承德、秦皇岛 3 个城市 PM_{2.5} 浓度较低, 为第 3 组。由图 2 可知, 京津冀地区 3 个城市群的 PM_{2.5} 浓度逐月变化具有较为明显的相似性, 总体呈夏季最低、春秋次之、冬季最高的“U”型特征^[33], 不同城市冬季的 PM_{2.5} 浓度是夏季的 1.3~2.8 倍^[34-35]。与《国家环境空气质量标准》规定的年均 PM_{2.5} 浓度二级标准 (35 μg/m³) 相比, 第 1 组城市全年各月的 PM_{2.5} 浓度均未达标; 第 2 组城市仅有廊坊在 8 月份达标, 而第 3 组城市在春季末至秋季初 (4—10 月) 基本都达标。从逐月变化来看, 京津冀地区 13 个城市的 PM_{2.5} 浓度均在 1 月份达到峰值, 其中 12 个城市 (除邯郸外) 的 PM_{2.5} 浓度在 8 月份达到谷值, 但是不同城市群之间存在不同的变化特征。具体来看, 第 1 组城市的 PM_{2.5} 浓度在冬季末至春季初下降速率最快, 春、夏季下降缓慢; 第 2 组城市的 PM_{2.5} 浓度在夏季末达到谷值后开始上升, 但在 10 月份有所回落, 12 月份各城市之间的 PM_{2.5} 浓度差异较大; 第 3 组城市的 PM_{2.5} 浓度值在全年波动较为平稳, 总体变化幅度不大。3 个城市群的对比结果表明, 大气 PM_{2.5} 污染越严重的城市之间 PM_{2.5} 浓度的变化特征越为相似, 季节特征也越明显; 而大气 PM_{2.5} 污染状况良好的城市之间 PM_{2.5} 浓度的全年变化规律性越弱。据此可以推断, 在 PM_{2.5} 污染较为严重的城市中, 引起大气 PM_{2.5} 污染的因素可能存在共性, 这为研究提供了便利。

根据《国家空气质量标准》规定: PM_{2.5} 浓度的 24 h 平均值在 35 μg/m³ 以下达到国家一级标准, 在 35~75 μg/m³ 之间达到国家二级标准。《环境空气质量指数技术规定》将 PM_{2.5} 的 24 h 平均浓度划分成 6 个等级, 分别为: 优 (0~35 μg/m³)、良 (35~75 μg/m³)、轻度污染 (75~115 μg/m³)、中度污染 (115~150 μg/m³)、重度污染 (150~250 μg/m³)、严重污染 (250~500 μg/m³)。据此, 本研究计算了 2017 年京津冀地区各自的 PM_{2.5} 污染等级天数比例。由图 3 可知, 京津冀地区 PM_{2.5} 污染等级天数呈现出明显的季节性变化规律, PM_{2.5} 达标天数夏季最多, 春秋次之, 冬季最少^[5]。具体而言, 6—8 月的 PM_{2.5} 浓度达标率均高于 90%, 4、5、9、10、11 月的 PM_{2.5} 浓度达标率

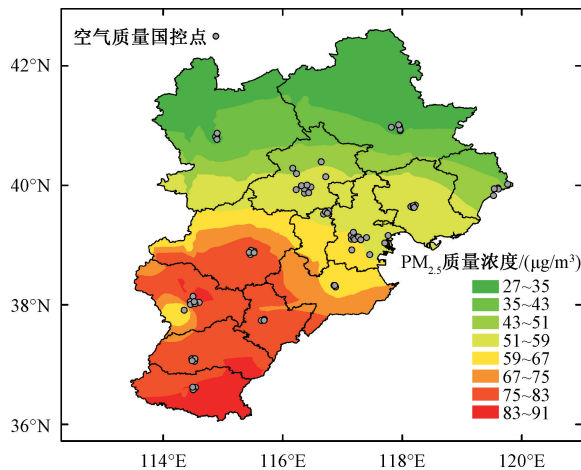


图 1 2017 年京津冀地区 PM_{2.5} 浓度与空气质量国控点
Fig. 1 PM_{2.5} concentrations and national environmental monitoring sites in Beijing-Tianjin-Hebei in 2017

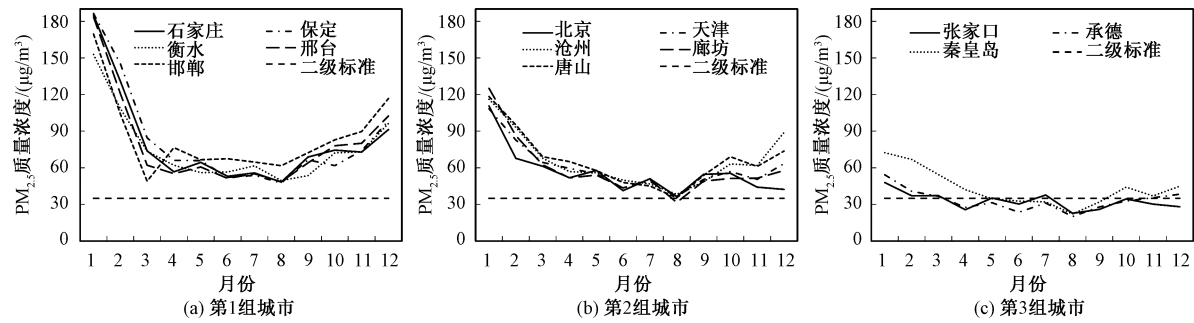


图 2 2017 年京津冀地区 3 个城市群 $PM_{2.5}$ 月浓度

Fig. 2 Monthly $PM_{2.5}$ concentrations in three urban agglomerations in Beijing-Tianjin-Hebei in 2017

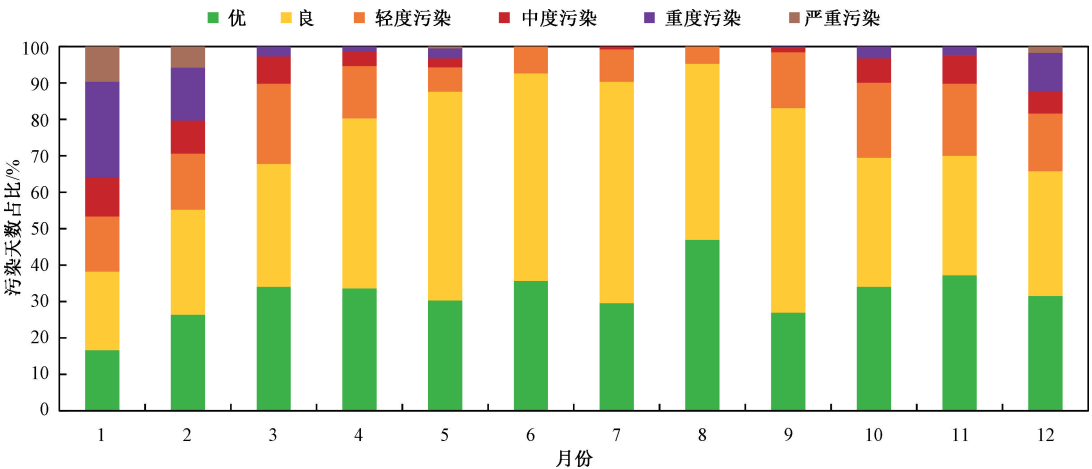


图 3 2017 年各月京津冀地区 $PM_{2.5}$ 污染等级天数比例

Fig. 3 Proportion of $PM_{2.5}$ pollution level days in Beijing-Tianjin-Hebei by month in 2017

在 70%~90%, 1、2、3、12 月的 $PM_{2.5}$ 浓度达标率低于 70%。其中, 8 月的 $PM_{2.5}$ 浓度达标率 (95.3%) 以及达到国家一级标准的天数 (189 天) 均为全年最高, 是全年空气质量最好的月份; 而 1 月的 $PM_{2.5}$ 浓度达标率 (38.2%) 和达到国家一级标准的天数 (67 天) 均为全年最低, 是全年大气 $PM_{2.5}$ 污染最严重的月份。与此相反, $PM_{2.5}$ 污染天数冬季最多, 秋春次之, 夏季最少, 中度以上的污染主要分布在 1—3 月和 10—12 月, 重度污染和严重污染集中分布在冬季^[33]。

由于京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度存在季节性差异, 为避免季节性变化因子带来的不确定性, 本研究分别探究京津冀地区 13 城市 2017 年冬、春、夏、秋 4 个季节的 $PM_{2.5}$ 浓度均值与标准误差的日变化特征。由图 4 可知, 4 个季节的 $PM_{2.5}$ 浓度日变化趋势总体较为相似, 呈现出冬季最高、春秋次之、夏季最低的季节变化特征。 $PM_{2.5}$ 浓度日变化呈“早晚高, 午后低”的“双峰型”分布特征。第 1 个峰值出现在 07:00—09:00, 该时段正好与

早高峰对应, 大量的汽车尾气排放加重了细颗粒物的集聚; 第 2 个峰值出现在 22:00—01:00, 傍

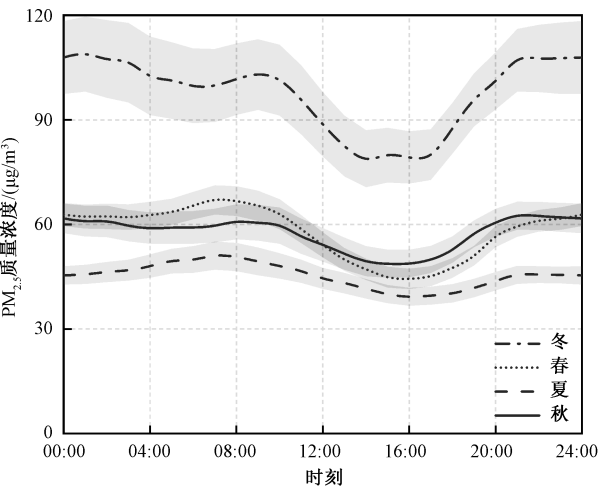


图 4 2017 年四季京津冀地区 13 个城市 $PM_{2.5}$ 浓度均值 (线) 与标准误差 (阴影) 日变化

Fig. 4 Daily variations of average (lines) and standard error (shading) of $PM_{2.5}$ concentrations in the 13 cities of Beijing-Tianjin-Hebei for four seasons in 2017

晚城市晚高峰过后大气层结趋于稳定, 细颗粒物在集聚之后不易扩散, 尽管夜晚至凌晨人为活动大幅减少, 但是由于扩散条件较差, 夜晚峰值过后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降较为缓慢, 故夜间浓度高于白天。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度谷值出现在 14:00—16:00, 这是由于午后温度升高, 近地面容易形成不稳定层结, 大气的垂直运动有利于颗粒物扩散, 所以出现了短暂的谷值^[5,34]。此外, 冬季的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度波动最大, 日较差达 $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 且 13 个城市之间的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度差异最为显著, 标准误差在 $7 \sim 11 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 夏季的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度波动最小, 日较差为 $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 且各城市之间的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度差异最小, 标准误差在 $2 \sim 4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

3 $\text{PM}_{2.5}$ 污染影响因素分析

3.1 自然因素

地形特征和气象条件是影响京津冀地区污染过程的重要自然因素^[37-38]。京津冀地区地质构造条件复杂, 地势西北高东南低, 地形由高原向山地、平原过度^[39]。西北部为坝上高原, 西部的太行山山脉和北部的燕山山脉相连组成弧形山地, 这种特殊山形对向北输送的空气起到了阻挡和削弱作用。北部张家口、承德、秦皇岛 3 个城市大气污染总体较低, 而山脉南部城市, 如北京和廊坊则容易出现大气污染的形成和聚集^[40]。南部为华北平原, 东部至东南部为丘陵和渤海湾的海陆交错地带, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的区域输送和清除产生了重要的影响。唐山、天津、沧州 3 市环渤海, 夜晚陆地的大气污染物向海洋扩散, 白天海上清洁空气向城市输送, 海陆风的影响作用对减轻城市空气污染十分关键。河北中南部是京津冀地区工业集中区和人口聚集地, 工业生产和人们日常生活向大气中排放的污染物总量较大, 加之山脉阻挡不利于污染物扩散, 容易造成污染物在山前积累聚集, 使得空气污染状况加重^[41]。

由图 5 可知(仅对通过显著性检验的数据进行分析), 京津冀地区 13 个城市的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与各气象因素的相关性存在一定差异。

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度与气压、累计降水量总体呈负相关关系, 与气温总体呈正相关关系。这是因为低气压场天气形势下常见静风、逆温天气, 大气层结稳定, 不利于 $\text{PM}_{2.5}$ 扩散, 易造成大气污染^[42-43]; 高温天气大气氧化性较强, 能够促进二次颗粒物

的生成和转化, 使大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高^[44-45]; 降水能对污染物起到清除和冲刷作用^[46]。

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度与风速呈负相关关系, 京津冀地区北部的北京、天津、唐山、张家口、承德和廊坊这 6 个城市在冬季的相关系数达到 -0.56 以下。这是因为风场为污染物的传输构建了有利的条件^[47], 风速决定了颗粒物的清除扩散强度, 风向决定了污染物的传输方向^[48-49]。京津冀北部地区冬季盛行西北风, 且风速较大^[50], 单位时间内颗粒物得以远距离输送, 能够有效降低北部这些城市的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染。

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度与日照时数呈负相关关系, 冬季和春季相关性最强, 这是由于污染严重时大气对太阳辐射存在削弱作用, 日照时数缩短引起地面辐射降温, 大气容易形成较为稳定的逆温层, 造成污染物累积, 从而进一步加重 $\text{PM}_{2.5}$ 污染^[51-52]。

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度与相对湿度呈正相关关系, 冬季的相关性最强, 除张家口外, 所有城市的相关系数介于 $0.66 \sim 0.85$ 。这是因为冬季的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最为严重, 空气湿度增大时, 颗粒物的吸湿性增长能够进一步促进其质量浓度增加^[53], 而张家口远离海岸, 相对湿度在全年均处于较低水平^[50], 颗粒物的吸湿增长相对较弱。

总体来看, 京津冀地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与气温、气压、累计降水量的相关性较弱, 仅在个别城市通过了显著性检验; 绝大多数城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与风速、日照时数和相对湿度存在较强的相关关系, 且在冬季最为明显。综上, 风速、日照时数和相对湿度是影响京津冀地区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的主导气象因素。

3.2 人类活动因素

大气污染与人口、资源环境、经济发展、科技创新、人民生活、公共服务、基础设施等人类活动的各个方面密不可分。本文结合他人研究结论^[4,33,36,54-55], 最终选取了 10 个能够代表城市发展水平且和大气污染密切相关的影响指标进行综合分析, 分别为: 地区生产总值(+)、规模以上工业企业数(-)、工业二氧化硫排放量(-)、工业氮氧化物排放量(-)、工业粉尘排放量(-)、全社会用电量(-)、供气总量(-)、年末公共汽车数(-)、城市绿化覆盖率(+)、年末总人口(-)。指标适用性检验结果显示, 2010 年京津冀地区 13 个城市上述指标的 KMO 检验值为 0.732 , Bartlett 球形检验的显著值为 0.000 , 说明所选的指标变量

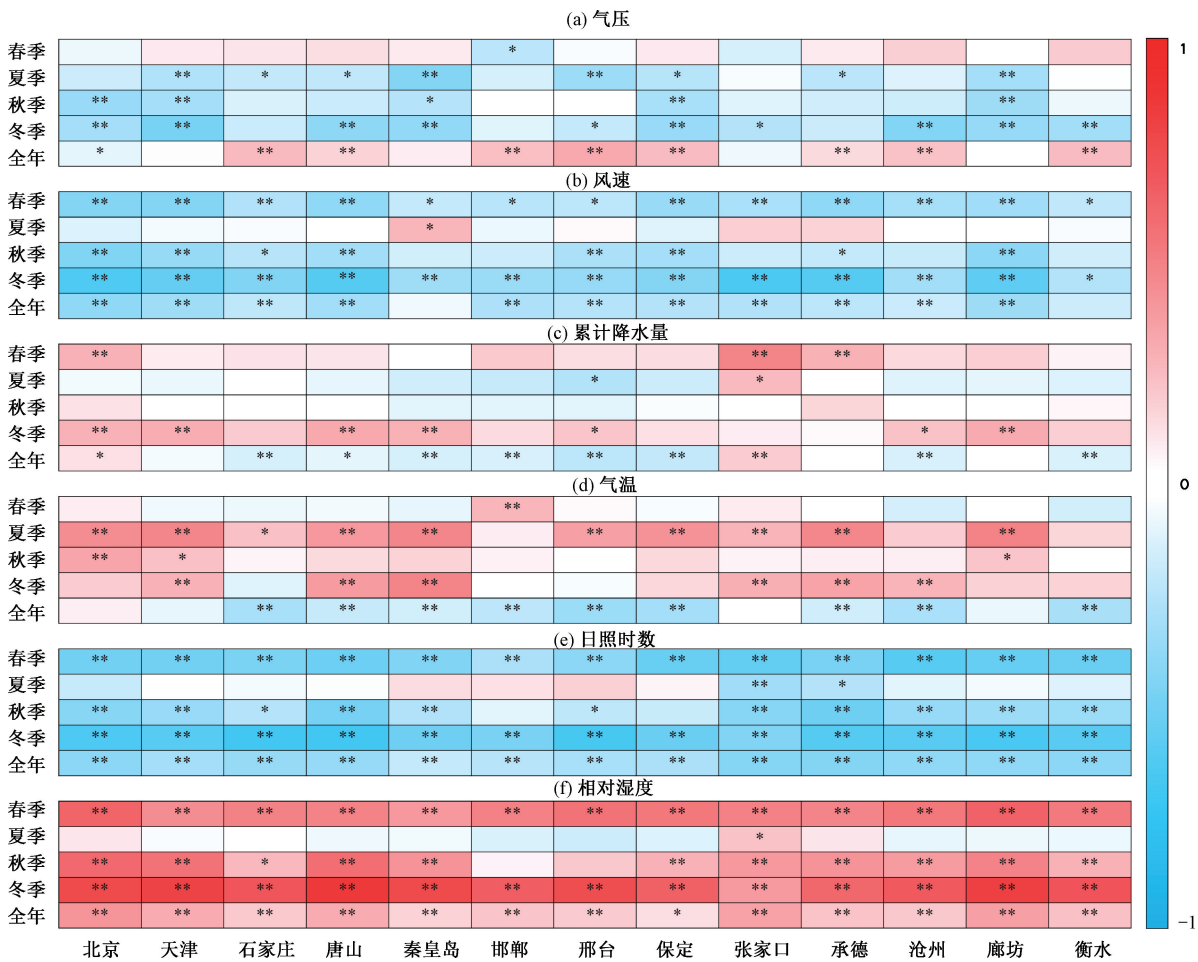


图 5 四季与全年京津冀地区 13 个城市 PM_{2.5} 浓度与各气象因素的相关系数热力图

Fig. 5 Heat map of correlation coefficients between PM_{2.5} concentrations and each meteorological factor for 13 cities in Beijing-Tianjin-Hebei on seasonal and annual scales

之间具有较强的相关性,适合作因子分析。公因子方差提取值基本都在 0.85 以上,可见指标变量所蕴含的多数信息可以被因子所提取,变量能够被公因子很好地表达,因此因子分析是有效的。

为排除不同人类活动影响变量的量纲和变异范围对分析结果带来的影响,首先对变量进行极差标准化处理,并采用因子分析法提取标准化评价指标的公共因子变量。因子分析得到的总方差解释体现了各个影响指标的初始特征值,以及提出公因子后与旋转后的载荷平方和,包括因子分析的各个特征值、方差贡献率和累计贡献率等信息。由表 1 可知,本研究基于特征值大于 1 提取得到 3 个因子,这 3 个因子的累计贡献率达到 86.69%,即共同解释了人类活动影响指标总方差的 86.69%,超过了一般标准 85%^[32],原有指标的信息丢失较少,从数据上看是科学理想的,因此可

以用这 3 个因子反映人类活动影响因素的总体特征。

为更加突出因子分析得到的 3 个成分的具体实际意义,基于最大方差法对成分矩阵进行旋转,使得每个变量尽可能地在 1 个因子上有较高的载荷。旋转后的成分矩阵(表 2)中,每个变量仅与提取到的因子之一具有较强的相关关系,系数绝对值越接近 1,说明相关度越高,仅显示绝对值大于 0.65 的系数。正值表示标准化指标对因子的影响方向为正向,负值表示标准化指标对因子的影响方向为负向。“年末公共汽车数”、“全社会用电量”、“供气总量”、“规模以上工业企业数”、“年末总人口”、“地区生产总值”在第 1 个因子上具有较高的载荷;“工业二氧化硫排放量”、“工业粉尘排放量”、“工业氮氧化物排放量”在第 2 个因子上有较高的载荷;“城市绿化覆盖率”在

表 1 总方差解释

Table 1 Total variance explanation

成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	总计	方差/%	累积/%	总计	方差/%	累积/%	总计	方差/%	累积/%
1	4. 467	44. 669	44. 669	4. 467	44. 669	44. 669	4. 316	43. 160	43. 160
2	3. 138	31. 377	76. 046	3. 138	31. 377	76. 046	3. 112	31. 125	74. 285
3	1. 064	10. 644	86. 690	1. 064	10. 644	86. 690	1. 241	12. 406	86. 690
4	0. 920	9. 202	95. 892						
5	0. 207	2. 068	97. 961						
6	0. 140	1. 405	99. 365						
7	0. 044	0. 444	99. 809						
8	0. 011	0. 109	99. 918						
9	0. 005	0. 050	99. 968						
10	0. 003	0. 032	100. 000						

表 2 旋转后的成分矩阵

Table 2 The rotated component matrix

指标	成分		
	1	2	3
年末公共汽车数	0. 945		
全社会用电量	0. 905		
供气总量	0. 878		
规模以上工业企业数	0. 859		
年末总人口	0. 757		
地区生产总值	-0. 701		
工业二氧化硫排放量		0. 988	
工业粉尘排放量		0. 982	
工业氮氧化物排放量		0. 977	
城市绿化覆盖率			0. 970

注: 旋转在 4 次迭代后已经收敛。正(负)值表示标准化指标对因子的影响方向为正(负)向。

第 3 个因子上有较高的载荷。此结果说明变量与其对应的因子的相关程度较高, 因子含义比较清晰, 能够很好地代表其所包含的变量意义。产业结构不合理、能源消费比例失衡是京津冀地区大气严重污染的重要原因^[56], 经济增长、能耗强度、人口密度和交通排放等社会经济因素会影响城市空气质量变化^[15]。第 1 因子包含的 6 个影响指标涉及人口、能源、交通等方面, 可综合概括为社会经济发展状况对大气 PM_{2.5} 污染的影响, 因此将影响大气污染的第 1 类人类活动因子归纳为“社会经济”因素。工业主要通过化石能源的大量消耗向空气中排放硫氧化物、氮氧化物及颗粒物等, 是造成大气污染的主要原因之一^[57]。第 2 因子包含的 3 个指标强调了工业排放对大气环境具有不可忽视的影响, 因此将影响大气污染的第 2 类人类活动因子归纳为“工业污染排放”因素。城市绿色基础设施是消减大气颗粒物的有效途径, 直径 1 000 m 范围内绿化覆盖率每提高 10%, 能够使 PM_{2.5} 浓度降低 7. 58%^[58]。用“城市建

设”因素代表影响大气污染的第 3 类人类活动因子, 重点强调城市绿色建设在治理大气污染中的重要作用。

因子分析得到的成分得分系数矩阵(表 3)反映各项指标与提取的所有因子之间的线性数量关系, 系数的正负号表示得分系数权重的正负。据此, 本研究进一步给出各个因子的表达式

$$F_k = \sum_{i=1}^{10} r_{ki} \times V_i.$$

(6)

其中: F_k ($k=1, 2, 3$) 表示提取的因子, V_i ($i=1, 2, \cdots, 10$) 表示原始人类活动因素指标的标准变量, r_{ki} 表示指标 i 对因子 k 的得分系数。

影响大气污染的人类活动因素涉及多个方面, 研究选择的指标变量范围和分类依据可能会使结果存在一定的不确定性。本研究将影响大气污染的 10 个人类活动影响因素降维简化为社会经济(F_1)、工业污染排放(F_2)和城市建设(F_3)这 3 个因子, 给出了各因子表达式, 并对各自的影响作用加以讨论, 可以为改善空气质量和制定各项大气污染法规政策提供一定参考。

表 3 成分得分系数矩阵

Table 3 The component score coefficient matrix

指标	成分		
	1	2	3
地区生产总值	-0. 193	0. 066	-0. 182
规模以上工业企业数	0. 251	-0. 013	0. 322
工业二氧化硫排放量	-0. 022	0. 322	-0. 051
工业氮氧化物排放量	0. 016	0. 310	0. 046
工业粉尘排放量	-0. 035	0. 322	-0. 075
全社会用电量	0. 203	0. 115	-0. 019
供气总量	0. 178	-0. 042	-0. 164
年末公共汽车数	0. 212	-0. 040	-0. 049
城市绿化覆盖率	0. 101	-0. 036	0. 844
年末总人口	0. 158	0. 032	-0. 101

注: 正(负)值表示得分系数为正(负)。

4 结论

本研究通过对京津冀地区 13 个城市的大气 PM_{2.5} 污染时空分布特征及成因分析,得出以下结论:

1)京津冀地区 PM_{2.5} 浓度空间分布呈现“北低南高”的特点,南部和北部城市的年平均浓度梯度最高可达 64 μg/m³。北部张家口、承德、秦皇岛 3 个城市 PM_{2.5} 污染水平最低;中部天津、北京、廊坊、沧州、唐山 5 个城市 PM_{2.5} 污染水平中等;南部保定、石家庄、衡水、邢台、邯郸 5 个城市 PM_{2.5} 污染最为严重。

2)京津冀地区 PM_{2.5} 浓度冬季最高,春秋次之,夏季最低,冬季 PM_{2.5} 浓度是夏季的 1.3~2.8 倍;按照月变化特征的相似程度可以划分为 3 个城市群。PM_{2.5} 污染达标率夏季最高,春秋次之,冬季最低,重度以上污染集中分布在冬季。PM_{2.5} 浓度日变化呈现“早晚高、午后低”的“双峰型”分布特征,四季 PM_{2.5} 浓度日较差介于 11~29 μg/m³。

3)自然条件与大气 PM_{2.5} 污染的分布关系密切,包括地势地形影响和气象因素影响。地势地形对污染物的扩散、传输影响较大。通过 Spearman 双变量相关分析可知,京津冀地区 13 个城市的大气 PM_{2.5} 浓度与各气象因素的相关性存在一定差异。PM_{2.5} 浓度与气温、气压、累计降水量的相关性较弱,与风速、日照时数和相对湿度的相关性较强,且在冬季最为明显。风速、日照时数和相对湿度是影响京津冀地区大气 PM_{2.5} 污染的主导气象因素。

4)人类活动对大气 PM_{2.5} 污染的影响十分重大。通过因子分析模型得出,京津冀地区大气污染第 1 个人类活动影响因子归纳为社会经济因素,包括能源消耗、产业结构等方面。需要注意,经济的高速发展在很大程度上是以牺牲环境为代价的;第 2 个人类活动影响因子归纳为工业污染排放因素,这也是大气中污染存在的最直接的因素,相关企业可通过企业转型、污染物减排、污染物净化等方式从源头上减轻大气 PM_{2.5} 污染;第 3 个人类活动影响因子归纳为城市建设因素,本文体现指标主要是城市绿化覆盖率,城市绿化建设对大气污染的缓解作用相当重要,是城市发展过程中不可缺少的一环,应该得到足够的重视。

参考文献

[1] Shaddick G, Thomas M L, Mudu P, et al. Half the world's population are exposed to increasing air pollution[J]. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2020, 3: 23. DOI: 10.1038/s41612-020-0124-2.

[2] Lu J, Li B, Li H, et al. Expansion of city scale, traffic modes, traffic congestion, and air pollution[J]. *Cities*, 2021, 108: 102974. DOI: 10.1016/j.cities.2020.102974.

[3] 刘乐乐, 赵小峰, 赵颜创, 等. 基于城市环境气候图的宁波大气环境分析与调控对策[J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 606-618. DOI: 10.5846/stxb201507091458.

[4] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J]. *地理学报*, 2018, 73(1): 177-191. DOI: 10.11821/dlxb201801015.

[5] 杨旭. 京津冀地区空气污染特征与气象成因及其预报研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.

[6] 中华人民共和国环境保护部. 2017 年《中国生态环境状况公报》(摘录一)[J]. *环境保护*, 2018, 46(11): 31-38.

[7] Wang Q, Wang J N, He M Z, et al. A county-level estimate of PM_{2.5} related chronic mortality risk in China based on multi-model exposure data[J]. *Environment International*, 2018, 110: 105-112. DOI: 10.1016/j.envint.2017.10.015.

[8] Shi Y S, Zhu Y, Gong S Y, et al. PM_{2.5}-related premature deaths and potential health benefits of controlled air quality in 34 provincial cities of China during 2001-2017[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022, 97: 106883. DOI: 10.1016/j.eiar.2022.106883.

[9] 李勇, 廖琴, 赵秀阁, 等. PM_{2.5} 污染对我国健康负担和经济损失的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(4): 1688-1695. DOI: 10.13227/j.hjxx.202008313.

[10] Yang D Y, Chen Y L, Miao C H, et al. Spatiotemporal variation of PM_{2.5} concentrations and its relationship to urbanization in the Yangtze river delta region, China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, 11(3): 491-498. DOI: 10.1016/j.apr.2019.11.021.

[11] Chen G J, Hu Y, Zhang R, et al. Evolution of south-north transport and urbanization effects on PM_{2.5} distribution with increased pollution levels in Beijing[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 72: 103060. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103060.

[12] 袁博, 肖苏林, 蒋大和. 我国城市群空气污染及其季节变化特点[J]. *环境科技*, 2009, 22(S1): 102-106. DOI: 10.3969/j.issn.1674-4829.2009.z1.037.

[13] 王郁, 赵一航. 区域协同发展政策能否提高公共服务供给效率?:以京津冀地区为例的研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(8): 100-109. DOI: 10.12062/cpre.20200121.

[14] 陆大道. 京津冀城市群功能定位及协同发展[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(3): 265-270. DOI: 10.11820/dlkxjz.2015.03.001.

[15] 李慧, 王淑兰, 张文杰, 等. 京津冀及周边地区“2+26”

- 城市空气质量特征及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2021, 34(1): 172-184. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.12.26.
- [16] 徐丹妮, 王瑾婷, 袁自冰, 等. 汾渭平原复杂地形影响下冬季 PM_{2.5} 污染分布特征、来源及成因分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(4): 1184-1198. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2020.0553.
- [17] 金莲姬, 刘峥, 朱彬, 等. PM_{2.5} 空中输送对北京地面污染影响的地形强迫机制模拟研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(8): 2976-2986. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0284.
- [18] 王黎明, 刘动, 陈枫林, 等. 雾霾模拟方法及其装置研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3297-3304. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2014.11.001.
- [19] 孟丽红, 李英华, 韩素芹, 等. 海陆风对天津市 PM_{2.5} 和 O₃ 质量浓度的影响[J]. 环境科学研究, 2019, 32(3): 390-398. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2018.12.10.
- [20] 王琪, 孙巍, 张新宇. 北京地区 PM_{2.5} 质量浓度分布及其与气象条件影响关系分析[J]. 计算机与应用化学, 2014, 31(10): 1193-1196. DOI: 10.11719/com.app.chem20141010.
- [21] 马召辉, 梁云平, 张健, 等. 北京市典型排放源 PM_{2.5} 成分谱研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 4043-4052. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0584.
- [22] 王振波, 梁龙武, 王旭静. 中国城市群地区 PM_{2.5} 时空演变格局及其影响因素[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2614-2630. DOI: 10.11821/dlxb201912014.
- [23] 马丽, 康蕾, 金凤君. 京津冀工业发展与大气污染物排放时空耦合关系分析[J]. 环境影响评价, 2018, 40(5): 43-48. DOI: 10.14068/j.ceia.2018.05.009.
- [24] 常亚敏, 闫蓬勃, 杨军. 北京地区控制 PM_{2.5} 污染的城市绿化树种选择建议[J]. 中国园林, 2015, 31(1): 69-73. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6664.2015.01.014.
- [25] 李俊晓, 李朝奎, 殷智慧. 基于 ArcGIS 的克里金插值方法及其应用[J]. 测绘通报, 2013(9): 87-90, 97. DOI: 10.1007/s12204-013-1367-4.
- [26] 杜雪, 王景弟, 白彦锋, 等. 基于克里金插值法的湖南省慈利县森林碳储量专题图研究[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(1): 198-204. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2022.01.29.
- [27] 姜春雷. 克里格插值的加速和参数优化及其应用[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2016.
- [28] 李海涛, 邵泽东. 空间插值分析算法综述[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(7): 1-8. DOI: 10.15888/j.cnki.csa.006988.
- [29] 刘竞妍, 张可, 王桂华. 综合评价中数据标准化方法比较研究[J]. 数字技术与应用, 2018, 36(6): 84-85. DOI: 10.19695/j.cnki.cn12-1369.2018.06.49.
- [30] 周文华, 王如松, 张克锋. 人类活动对北京空气质量影响的综合生态评价[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2214-2220. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2005.09.012.
- [31] 朱玉祥, 江剑民, 赵亮, 等. 不同计算形式的相关分析在气象中的应用综述[J]. 热带气象学报, 2021, 37(1): 1-13. DOI: 10.16032/j.issn.1004-4965.2021.001.
- [32] 林海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件: 兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷[J]. 统计研究, 2005, 22(3): 65-69. DOI: 10.19343/j.cnki.11-1302/c.2005.03.015.
- [33] 任毅, 郭丰, 高聪聪. 京津冀城市群雾霾污染的时空特征与影响因素[J]. 首都经济贸易大学学报, 2019, 21(6): 80-91. DOI: 10.13504/j.cnki.issn1008-2700.2019.06.008.
- [34] 丁梦婷. 京津冀地区 PM_{2.5} 时空特征及环流分型研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2022.
- [35] 陈辉, 厉青, 李营, 等. 京津冀及周边地区 PM_{2.5} 时空变化特征遥感监测分析[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 33-43. DOI: 10.13227/j.hjlx.201802104.
- [36] 王冠岚, 薛建军, 张建忠. 2014 年京津冀空气污染时空分布特征及主要成因分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(1): 34-42. DOI: 10.16765/j.cnki.1673-7148.2016.01.005.
- [37] 王无为. 湖北省大气污染物时空分布特征及影响因素[D]. 武汉: 华中师范大学, 2018.
- [38] 李青春, 李炬, 郑祚芳, 等. 冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 513-524. DOI: 10.13227/j.hjlx.201803193.
- [39] 张竞, 杜东, 白耀楠, 等. 基于 DEM 的京津冀地区地形起伏度分析[J]. 中国水土保持, 2018(9): 33-37. DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2018.0200.
- [40] 吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件[J]. 环境科学学报, 2014, 34(1): 1-11. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.01.019.
- [41] 孙航. 京津冀与长三角城市群大气污染时空特征及影响因素对比研究[D]. 兰州: 兰州财经大学, 2019.
- [42] 朱倩茹, 刘永红, 徐伟嘉, 等. 广州 PM_{2.5} 污染特征及影响因素分析[J]. 中国环境监测, 2013, 29(2): 15-21. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2013.02.006.
- [43] 周静, 张岳军, 相栋, 等. 太原市 PM_{2.5} 周期性特征及其成因分析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(3): 527-532. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2018.03.017.
- [44] Qi L, Zheng H T, Ding D, et al. Effects of meteorology changes on inter-annual variations of aerosol optical depth and surface PM_{2.5} in China: implications for PM_{2.5} remote sensing[J]. Remote Sensing, 2022, 14(12): 2762. DOI: 10.3390/rs14122762.
- [45] 张宇静, 赵天良, 殷静之, 等. 徐州市大气 PM_{2.5} 与 O₃ 作用关系的季节变化[J]. 中国环境科学, 2019, 39(6): 2267-2272. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2019.0269.
- [46] 王静, 邱黎, 刘焕彬, 等. 山东重点城市空气质量及其与气象要素的关系[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 644-649. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2013.04.021.

[47] Liu Z D, Wang H, Shen X Y, et al. Contribution of meteorological conditions to the variation in winter $PM_{2.5}$ concentrations from 2013 to 2019 in Middle-Eastern China [J]. Atmosphere, 2019, 10 (10): 563. DOI: 10.3390/atmos10100563.

[48] Charron A, Harrison R M. Fine ($PM_{2.5}$) and coarse ($PM_{2.5-10}$) particulate matter on a heavily trafficked London highway: sources and processes [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(20): 7768-7776. DOI: 10.1021/es050462i.

[49] 王超. 镇江地区主要大气污染物时空分布及气象影响因素相关性研究[D]. 江苏镇江: 江苏大学, 2019.

[50] 刘赓. 京津冀地区空气质量状况及其与气象条件的关系 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2010.

[51] 徐杰, 匡汉祯, 王国强, 等. $PM_{2.5}$ 与空气相对湿度间关系浅析[J]. 农业与技术, 2017, 37(9): 148-149, 157. DOI: 10.11974/nyyjs.20170532072.

[52] 徐祥德, 施晓晖, 张胜军, 等. 北京及周边城市群落气溶胶影响域及其相关气候效应[J]. 科学通报, 2005, 50 (22): 2522-2530. DOI: 10.3321/j. issn: 0023-074X. 2005. 22. 014.

[53] Shen R R, Schäfer K, Schnelle-Kreis J, et al. Characteristics and sources of PM in seasonal perspective: a case study from one year continuously sampling in Beijing [J]. Atmospheric Pollution Research, 2016, 7(2): 235-248. DOI: 10.1016/j. apr. 2015. 09. 008.

[54] 周媛, 石铁矛, 胡远满, 等. 基于城市气候环境特征的绿地景观格局优化研究[J]. 城市规划, 2014, 38(5): 83-89. DOI: 10.11819/cpr20140515a.

[55] 陈永林, 谢炳庚, 杨勇. 全国主要城市群空气质量空间分布及影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29 (11): 99-103. DOI: 10.13448/j. cnki. jalre. 2015. 369.

[56] 张晓平, 林美含. 中国城市空气污染区域差异及社会经济影响因素分析: 基于两种空气质量指数的比较研究 [J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(1): 39-50. DOI: 10.7523/j. issn. 2095-6134. 2020. 01. 006.

[57] 任嘉敏, 马延吉. 吉林省工业增长与工业大气污染脱钩关系的时空演变[J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36 (1): 72-81. DOI: 10.7523/j. issn. 2095- 6134. 2019. 01. 011.

[58] 戴菲, 陈明, 朱晟伟, 等. 街区尺度不同绿化覆盖率对 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的消减研究: 以武汉主城区为例[J]. 中国园林, 2018, 34(3): 105-110. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-6664. 2018. 03. 018.