

2018年中国城市PM_{2.5}时空分布规律及防治策略

马 慧

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年1月8日; 录用日期: 2025年2月27日; 发布日期: 2025年3月6日

摘 要

作为雾霾污染的核心构成要素, 探究PM_{2.5}的时空分布演变特征及其影响因素, 对于有效遏制其浓度增长趋势具有至关重要的意义。本研究依托来自334个地级及以上城市的PM_{2.5}浓度数据指标, 并融入GIS空间分析技术, 解析PM_{2.5}浓度的时空分布特性。结果表明: 1) 时间上, 2018年, PM_{2.5}的月均浓度变化趋势呈现出先下降后上升的态势, 呈“U”型曲线变化; 在季节分布上, 2018年PM_{2.5}的季均浓度表现为夏季降至最低, 冬季则升至最高, 春秋两季则居中分布。2) 空间上, 2018年中国城市华北地区、西北地区PM_{2.5}浓度值在全国呈高值状态, 其中新疆维吾尔自治区PM_{2.5}浓度值最高, PM_{2.5}浓度最高的城市为和田地区(102.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$); 空间尺度上, 2018年大多数监测站点的PM_{2.5}浓度展现出了清晰的季节性波动趋势。具体而言, 每年的PM_{2.5}浓度从冬季开始逐渐降低, 直至夏季降至最低点; 随后, 从夏季到冬季, 浓度又逐渐回升, 最终在冬季达到峰值。结合2018年334个地级及以上城市的PM_{2.5}浓度数据及社会经济数据, 建立多元线性回归模型, 得出2018年中国各城市年均人口、地区生产总值、供气总量与2018年PM_{2.5}浓度呈相关性。并基于结果研究分析, 从实际情况出发, 提出大气污染防治的可行性建议。

关键词

PM_{2.5}浓度, 时空分布, 时空变化, 空间分析

Spatiotemporal Distribution of PM_{2.5} in Chinese Cities and Prevention Strategies in 2018

Hui Ma

College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Jan. 8th, 2025; accepted: Feb. 27th, 2025; published: Mar. 6th, 2025

Abstract

As the core component of haze pollution, it is of great significance to explore the spatial and

temporal distribution evolution characteristics and influencing factors of $PM_{2.5}$ to effectively curb its concentration growth trend. In this study, we relied on $PM_{2.5}$ concentration data from 334 prefecture-level cities and integrated GIS spatial analysis technology to analyze the spatial and temporal distribution characteristics of $PM_{2.5}$ concentration. The results showed that: 1) In 2018, the monthly average concentration of $PM_{2.5}$ showed a trend of first decreasing and then rising, showing a "U" curve. In 2018, the seasonal average concentration of $PM_{2.5}$ decreased to the lowest in summer, rose to the highest in winter, and was in the middle spring and autumn. 2) Spatially, in 2018, the $PM_{2.5}$ concentration values in North China and Northwest China were high in China, among which Xinjiang Uygur Autonomous Region had the highest $PM_{2.5}$ concentration and the highest $PM_{2.5}$ concentration in Hotan ($102.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$). On a spatial scale, $PM_{2.5}$ concentrations at most of the monitored sites in 2018 showed a clear seasonal fluctuation trend. Specifically, annual $PM_{2.5}$ concentrations gradually decrease from winter to summer to their lowest point in summer, and then gradually rise from summer to winter, eventually peaking in winter. Combined with the $PM_{2.5}$ concentration data and socio-economic data of 334 cities at and above the prefecture level in 2018, a multiple linear regression model was established to show that the average annual population, gross regional product and total gas supply of each city in China in 2018 were correlated with the $PM_{2.5}$ concentration in 2018. Based on the research and analysis of the results, the feasibility suggestions for air pollution prevention and control are put forward based on the actual situation.

Keywords

$PM_{2.5}$ Concentration, Spatial and Temporal Distribution, Spatial and Temporal Variation, Spatial Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自改革开放以来, 中国经济社会经历了翻天覆地的变化, 取得了全球瞩目的辉煌成就。然而, 伴随经济的快速增长, 长期采取以环境为代价的粗放型发展模式所累积的环境问题日益凸显, 特别是雾霾现象的频繁发生, 引起了社会各界的广泛关注并激发了强烈的社会反响。大气污染是指人类社会经济活动中, 大量源自工业、交通、生活等领域的废气、烟尘及粉尘等物质被排放至大气中, 或者由自然过程导致某些物质进入大气, 并在大气中达到一定的浓度和持续时间, 进而对人类正常生存发展构成威胁, 危害人类生命健康的现象。雾霾污染是如今造成大气污染的重要原因, 而雾霾污染加剧的一个关键因素在于颗粒物污染, 细颗粒物又称为 $PM_{2.5}$ 或可入肺颗粒物, 是指空气动力学中直径小于等于 2.5 微米的颗粒物[1]。 $PM_{2.5}$ 的形成与扩散是一个复杂的过程, 它紧密关联着地理位置、气象条件、人为排放以及外部干扰等多种因素。这些因素相互交织、相互作用, 通过多种物理和化学反应机制, 共同促进了细颗粒物的生成[2]。尽管 $PM_{2.5}$ 在地球大气组成中占比不高, 但它却在空气质量、能见度、全球气候变迁、大气辐射均衡以及大气化学反应等多个方面发挥着举足轻重的作用。在日常生活中, $PM_{2.5}$ 亦对人们的身体健康状况、日常出行活动以及生存与发展环境等方面产生了显著的影响。相较于其他颗粒物, $PM_{2.5}$ 因其直径较小而展现出更高的活性并拥有更大的比表面积, 这一特性使其易于成为其他污染物的附着体及化学反应的媒介。它能够携带大量的有毒物质, 并在大气环境中长时间停留, 从而对人体健康和环境质量构成极大的威胁和伤害[3]。

近年来, 为切实提升空气质量并改善民众的生活品质, 我国积极应对大气污染问题, 推行了一系列

严格且全面的大气污染防治措施。2013 年, 中国政府正式出台了《大气污染防治行动计划》, 详细列出了大气污染防治的重点防控任务, 其中包括实施严格的减排措施, 对工业排放、汽车尾气、燃煤污染等关键领域进行了全面部署, 并对 2013 年至 2017 年的大气污染防治工作进行了明确且具体的规划。在此基础上, 为了进一步巩固和扩大治理成果, 2018 年中国政府再度颁布了旨在“打赢蓝天保卫战”的三年行动计划。此计划致力于在未来三年内, 通过持续不断的努力, 大幅度削减主要大气污染物的排放总量, 特别是针对 $\text{PM}_{2.5}$ 等细颗粒物, 旨在进一步推动空气质量的稳步向好。在中央与地方政府的紧密配合和共同努力下, 我国近年来 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度已呈现出明显的下降趋势, 全国多数地区的雾霾问题得到了有效的管理和显著的改善。随着这些积极成效的取得, 民众的生活质量有了显著提升。然而, 我们仍需保持清醒头脑, 认识到 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的分布存在着显著的时间和空间差异性。这种差异不仅体现在不同地域间, 也体现在同一地域的不同时间段。因此, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空演变特征进行深入探究显得尤为重要。随着遥感技术的不断进步, 众多研究者从城市、区域乃至国家乃至全球的视角出发, 深入探究城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空分布规律、影响因素及其产生的效应特征。近年来, 我国 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度已显著下降, 全国大部分地区雾霾问题得到了有效的管理与改善。鉴于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在时间与空间上展现出明显的差异性, 因此, 在深入理解 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空演变特征的基础上, 采用空间自相关分析方法进一步探究其时空分布特性显得尤为重要。此举旨在为我国大气污染防治工作的推进提供科学依据与参考。为此, 我们可以借助空间自相关分析等先进技术手段, 更为细致且科学地剖析其分布特性, 从而为制定更为精确、高效的防治策略提供坚实支撑。同时, 依据研究结果, 结合实际情况提出大气污染防治建议, 为我国大气污染防治工作提供科学参考。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源

本研究所用的国家、省级、地级市等行政边界数据来源于国家基础地理信息中心提供的 1:400 万中国基础地理信息数据, 为了更清晰地揭示地域间的差异性, 并深入分析多尺度时空分异特征及其影响因素, 本文遵循《中国海洋统计年鉴》的划分原则, 将研究区域界定为中国沿海城市与内陆城市两大板块。本研究以整个中国大陆为研究区域, 采用来源于国家空气环境监测网络的大气污染物数据, 基于我国 334 个地级市监测站点(时间跨度为 2018 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日)的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据及社会经济数据(年均人口、工业二氧化硫排放量、工业氮氧化物排放量、地区生产总值、人均地区生产总值、供气总量), 采用 ArcGIS、SPSS 等对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据进行整理、分析等工作, 对时空分布结果及因素影响进行分析和讨论。

2.2. 研究方法

2.2.1. 空间自相关分析

全局空间自相关中, 邻近区域单元 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的平均相似程度可以用莫兰指数来表示, 其计算如式(1)所示[4]:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中: I 表示全局莫兰指数; x_i 和 x_j 分别是城市 i 和城市 j 的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度; w_{ij} 表示城市 i 和城市 j 之间的空间权重。

2.2.2. 空间插值

空间插值(Spatial Interpolation)它的核心作用在于将离散测量点的数据转换成连续的曲面数据, 从而

加深我们对各类空间现象分布模式的理解与比较能力。考虑到监测站点在空间分布上较为零散,呈现出间断性的特点,且主要集中于城市已建成区域,因此它们难以全面覆盖并准确反映城市郊区及农村地区PM_{2.5}污染的实际状况。面对环境监测领域中的这一挑战,空间插值模型适时出现,并展现出其独特价值。该模型以地面监测数据为稳固根基,既精妙地结合了确定性地理统计模型的精确严谨,又融入了随机性地理统计模型的灵活多变,两者互为补充,协同工作,以期对未设监测站点的区域进行污染物浓度的科学、精确估算,从而为环境保护工作提供更加详尽、精确的数据支撑。这样一来,我们就能在研究区域内生成一个空间上连续的PM_{2.5}污染分布图。基于上述考虑,本研究决定采用空间插值的方法,其计算如式(2)所示:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

在气象站点数据保持恒定的情况下,插值方法的选择对精度的提升具有显著影响。其中,克里金插值作为一种广泛采纳的方法,在气象学、环境科学及地理学等多个研究领域得到了普遍应用。相较于其他插值技术,克里金插值能够最大限度地挖掘并利用空间现有信息,从而在精度上展现出相对于传统方法的优越性,因此本研究运用克里金插值法分析PM_{2.5}浓度的空间异质性。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i - h)]^2 \quad (3)$$

式中: $Z(x_i)$ 、 $Z(x_i - h)$ 表示随机变量 Z 在 x_i 、 $x_i - h$ 点的样点值; $N(h)$ 为研究区内距离为 h 的样点个数。定义 $\gamma(h)$ 为 $Z(x_i)$ 与 $Z(x_i - h)$ 之差的方差的一半,将它定义为区域化变量 $Z(x_i)$ 在 x 轴方向上的变异函数[5][6]。

2.2.3. 多元线性回归模型

多元回归分析是指利用回归方程定量的解释因变量与两个或两个以上的自变量之间的线性依存关系。其基本思想是设法找出最能代表自变量与因变量之间关系的数学表达式。设因变量为 y , k 个自变量分别为 $x_1, x_2 \dots x_k$, 多元回归模型的一般形式为: $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$, 其中 β_0 为回归常数, β_1, \dots, β_k 称为回归系数[7]。

3. 结果与分析

3.1. 2018年PM_{2.5}浓度时间变化规律

在月份尺度上,中国各城市PM_{2.5}的浓度变化趋势呈现出先下降后上升的态势,呈“U”型曲线变化,即两端高而中间低(见图1)。2018年中国监测城市PM_{2.5}的年均浓度为40.7 μg/m³, 9月出现全年最低值,浓度为23.5 μg/m³, 1月是全年最高值,浓度为65.8 μg/m³。具体而言,在夏季的6月、7月和8月,PM_{2.5}的浓度则降至最低,对应于图中的波谷位置;而在冬季的月份,尤其是12月、1月以及2月期间,PM_{2.5}的浓度攀升至最高点,形成了图示中的明显波峰。

在季节尺度上,2018年PM_{2.5}的季均浓度表现为夏季降至最低,冬季则升至最高,春秋两季则居中分布(见图2)。在冬季,由于地面温度和辐射较低,地面辐射冷却对大气在接近地表的部分产生了尤为显著的影响,相较于远离地面的大气层,其降温效果更为突出,这易于在近地面形成逆温层。同时,在冬季,由于夜晚时间较长,中纬度沿海地区形成的逆温层相对较厚,并且其消散过程较为缓慢,冬季时节,由于海洋与陆地之间的热容量差异显著,导致海陆温差变得尤为明显。当温暖湿润的海上气流在水平移

动过程中, 缓缓覆盖于冷却的地面、宁静的水域或是低温气层之上时, 底层的空气因与这些冷却的下垫面紧密接触, 会迅速吸收冷量, 进而经历明显的温度下降。这种因直接接触冷却下垫面而引起的显著降温效应, 在特定的气象条件下, 这种现象尤为显著, 常常对局部气候产生显著影响。相比之下, 由于上层空气距离地面较远, 受到的直接冷却作用较小, 因此降温幅度也相对较小。这种垂直方向上的温度差异, 为逆温现象的产生创造了有利条件, 使得空气层结变得稳定, 逆温层得以形成。此外, 冬季大气流动能力与范围减弱, 静稳天气增多, 降水减少, 这些都不利于大气污染物的扩散, 从而导致重污染天气频发。在夏季, 地面转变为大气的热源, 促使大气垂直运动变得活跃, 同时气旋活动也更为频繁, 这些因素共同作用下使得逆温现象较难形成。此外, 夏季时水汽输送条件优越, 有利于降水的生成。夏季频繁的降雨伴随强烈的大风天气, 为 $\text{PM}_{2.5}$ 的扩散与清除提供了有利条件, 因此该季节的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度通常达到一年中的最低值。综上所述, $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度状况是污染源排放与气象因素相互作用下的综合结果, 表现出鲜明的季节变化特性。

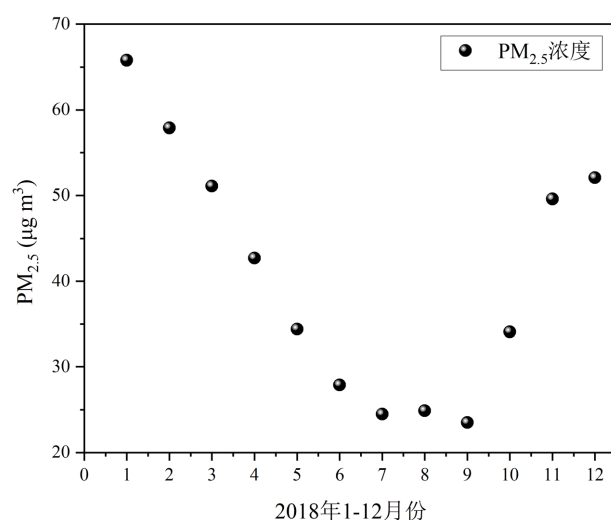


Figure 1. Changes in monthly mean $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in 2018

图 1. 2018 年 $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度变化

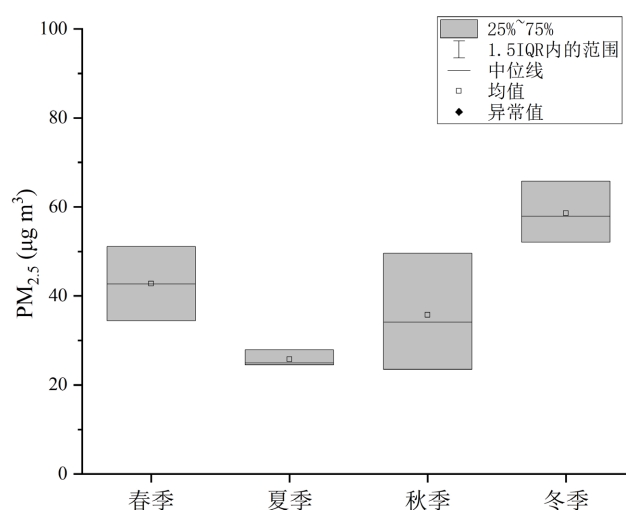


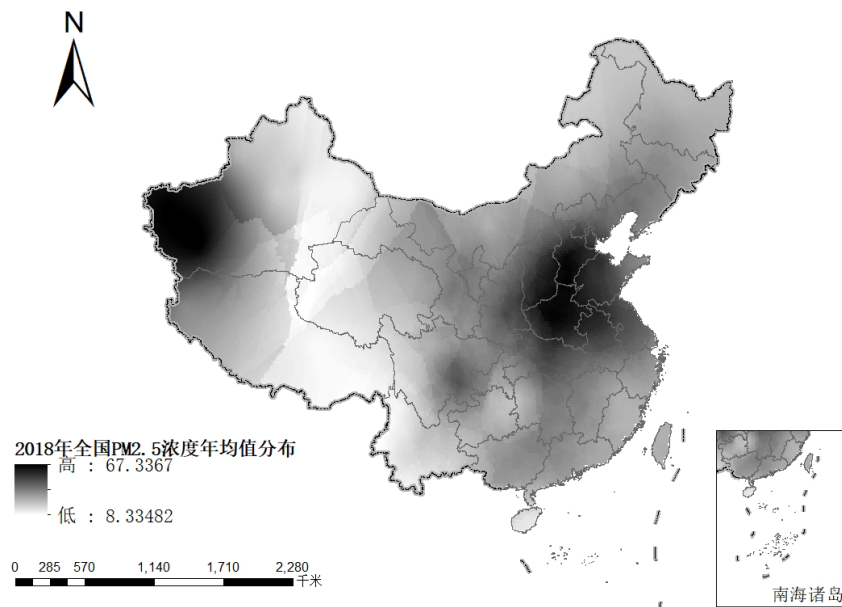
Figure 2. Seasonal mean $\text{PM}_{2.5}$ concentration changes in 2018

图 2. 2018 年 $\text{PM}_{2.5}$ 季均浓度变化

3.2. 2018 年 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布特征

3.2.1. 2018 年年均 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布特征

运用克里金插值法, 将 2018 年中国城市 $PM_{2.5}$ 浓度数据进行处理分析, 得到的空间分布情况如图所示(见图 3), 其中, $PM_{2.5}$ 年均浓度最高的 10 个城市(含地区)分别为和田地区($102.56 \mu g/m^3$)、喀什地区($79.75 \mu g/m^3$)、阿克苏地区($71.66 \mu g/m^3$)、自贡市($70.78 \mu g/m^3$)、安阳市($70.76 \mu g/m^3$)、邢台市($70.68 \mu g/m^3$)、邯郸市($70.54 \mu g/m^3$)、五家渠市($69.35 \mu g/m^3$)、石家庄市($69.14 \mu g/m^3$)、平顶山市($67.85 \mu g/m^3$)。华北地区、西北地区 $PM_{2.5}$ 浓度值在全国呈高值状态, 其中新疆维吾尔自治区浓度值最高, 因其主要分布在城市群及干旱沙漠区域, 工业园区排放的工业废气较多, 导致 $PM_{2.5}$ 浓度较高[8], 展现出显著的空间异质性特征, 全国 $PM_{2.5}$ 浓度的空间分布不均主要由区域排放差异、发展水平差异及地理环境条件等多种因素共同决定。具体而言, 新疆维吾尔自治区长期面临 $PM_{2.5}$ 浓度偏高的问题, 其时间分布表现为冬季浓度高于夏季, 而空间分布则呈现西部高于东部的趋势。这一现象的主要成因包括地区性采暖需求、燃烧排放的增加以及大风引起的扬尘。针对新疆维吾尔自治区, 应着重对城市周边采矿、采石及采砂企业的扬尘问题进行综合治理, 同时推动城市建成区及工业园区实施集中供暖, 推广清洁燃料使用, 并逐步淘汰未达到自治区及自治州规定规模的燃煤锅炉, 以期改善空气质量。在中国工业密集的华北地区以及干燥且沙尘暴频发的西北地区, $PM_{2.5}$ 占空气悬浮颗粒物总重量的比例超过一半。这些地区的持续干旱导致大片地面裸露, 进一步加剧了扬尘污染。而在冬季, 由于居民取暖燃煤量的增加, 加之不利的气象条件阻碍了污染物的扩散, 使得燃煤尘的贡献率显著上升。针对华北及西北地区 $PM_{2.5}$ 浓度较高的问题, 应制定区域性的排放标准, 严格控制各类污染源的排放, 优化产业结构, 并有效管理由其他污染物共同引发的复合污染问题。



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2765 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 3. Spatial distribution of annual average $PM_{2.5}$ concentrations in cities across China in 2018

图 3. 2018 年全国城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度空间分布

3.2.2. 2018 年各季节 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布特征

空间尺度上, 2018 年大多数监测站点的 $PM_{2.5}$ 浓度展现出了清晰的季节性波动趋势, 因此, 针对全

年的季节性变化，对全国城市春、夏、秋、冬四个季节的空间 $PM_{2.5}$ 浓度进行分析(见表 1)。具体而言，每年的 $PM_{2.5}$ 浓度从冬季开始逐渐降低，直至夏季降至最低点；随后，从夏季到冬季，浓度又逐渐回升，最终在冬季达到峰值。在春季， $PM_{2.5}$ 的高浓度区域主要涵盖新疆维吾尔自治区的广袤地区、东北三省的大部分范围、经济发达的环渤海城市群、工业密集的长江三角洲区域，以及人口稠密的中原地区的大多数城市群。以及长江中游经济快速发展的城市群。随着气温的逐渐回暖，此时降水却相对稀少，地表植被覆盖率依然维持在较低水平。此外，风沙天气频繁发生，风沙作用尤为显著，使得空气中的悬浮颗粒物增多。这些不利因素，包括不利的天气条件、工业排放增加、汽车尾气污染以及冬季取暖排放等，相互交织并共同作用，使得中国北方大部分地区空气中的 $PM_{2.5}$ 浓度显著上升。

Table 1. The monthly average concentrations of $PM_{2.5}$ in the top 10 cities in China by season in 2018
表 1. 2018 年中国城市各季节 $PM_{2.5}$ 浓度前十城市的月均浓度

$PM_{2.5}$ 浓度 (单位: $\mu g/m^3$)	春季	夏季	秋季	冬季
1	和田地区(205.21)	和田地区(100.56)	开封市(69.49)	五家渠(183.32)
2	喀什地区(125.73)	晋城市(49.98)	保定市(69.37)	石河子市(150.41)
3	阿克苏地区(114.05)	自贡市(47.38)	安阳市(68.20)	乌鲁木齐市(140.22)
4	克孜勒苏柯尔克孜自治州(109.80)	唐山市(44.58)	周口市(64.98)	西安市(121.91)
5	巴音郭楞州(82.31)	喀什地区(44.53)	石家庄市(64.94)	安阳市(120.82)
6	自贡市(78.92)	北京市(44.29)	漯河市(64.90)	南阳市(116.74)
7	石家庄市(77.06)	临汾市(43.72)	平顶山市(64.10)	邯郸市(112.53)
8	徐州市(71.45)	阳泉市(43.60)	邢台市(63.57)	邢台市(112.11)
9	邯郸市(70.96)	吕梁市(42.65)	邯郸市(62.94)	许昌市(111.89)
10	唐山市(70.51)	焦作市(42.18)	濮阳市(62.27)	咸阳市(110.44)

在夏季，空气质量优良的区域显著扩大，全国多数地域的污染物浓度普遍保持低位，整体空气质量展现出良好的态势，而华北地区依然是 $PM_{2.5}$ 浓度最高的区域，这一状况在全国范围内都较为突出。随着全国范围内气温逐渐升高、雨水日渐增多以及空气对流活动的显著增强，在全国范围内， $PM_{2.5}$ 浓度普遍呈现出大幅下降的趋势，进而使得空气质量有了显著改善。然而，在这一空气质量整体向好的趋势下，南疆盆地与华北平原地区却逆势凸显，成为仅有的两个污染重点区域，其 $PM_{2.5}$ 浓度依然保持在较高水平。

在秋季，新疆维吾尔自治区的部分地区、中原城市群中的某些区域以及东北的个别地方经历了 $PM_{2.5}$ 浓度的反弹，这一变化促使全国污染区域的范围逐渐扩大。在此过程中， $PM_{2.5}$ 污染的高浓度中心依旧主要集中在新疆维吾尔自治区和华北平原，这两个地区继续扮演着污染核心的角色。不仅自身污染严重，还不断向周边地区扩散，周边区域的空气质量因受到波及而遭受了一定程度的影响。与此同时，远离这两个主要污染源的其他区域， $PM_{2.5}$ 浓度则逐渐下降，形成了从污染中心向外围空气质量逐渐改善的明显梯度分布。随着季节的更迭，雨带逐渐南移，这一自然现象对空气质量产生了显著效应。进入秋季，随着雨带的南移，空气中的 $PM_{2.5}$ 污染中心也呈现出向南方迁移的趋势。在此过程中， $PM_{2.5}$ 的影响范围持续扩大，涉及了更多的地区和城市。原本主要集中在华北平原的污染，逐渐向南蔓延，覆盖了长江中下游、四川盆地以及华南地区，这些地区的空气质量也因此受到了不同程度的挑战。

在冬季，在全国范围内的研究区域内，普遍观察到多数城市的 $PM_{2.5}$ 浓度有所上升。近年来，大气污

染的区域范围显著扩大，不仅 PM_{2.5} 浓度的高值区域数量有所增加，其覆盖的地域也更为辽阔。特别是在东北地区、华北平原以及部分南方区域，污染浓度急剧上升，对当地居民的生活质量和健康状况构成了严峻挑战。进入冬季后，由于气温持续偏低，冷空气下沉并趋于稳定状态，加之此时降水较少，空气湿度降低，这些因素共同导致大气层稳定性显著增强，进而使得污染物难以有效扩散。此外，北方地区在冬季大规模开展的燃煤取暖活动，这也进一步促进了污染物排放量的增加。燃煤过程中产生的大量废气、颗粒物等污染物，在气象条件不佳时，更易在大气层中累积，从而引发严重的空气污染。这些多重不利因素相互叠加，导致全国范围内的 PM_{2.5} 污染水平在冬季攀升至历史高峰，给环境保护工作和公众健康保障带来了前所未有的重大挑战。

3.2.3. PM_{2.5} 浓度的影响因素多元线性回归分析

本部分依托 2018 年 334 个地级及以上城市的 PM_{2.5} 浓度数据及六项社会经济数据(年均人口、工业二氧化硫排放量、工业氮氧化物排放量、地区生产总值、人均地区生产总值、供气总量)，建立多元线性回归模型，进行 PM_{2.5} 浓度的影响因素多元线性回归分析。根据回归系数(见表 2)，可初步得出的多元线性回归模型为：

$$y = 30.763 + 0.024x_1 - 6.405x_2 - 1.46x_4 + 1.829x_5 + 2.53x_6$$

Table 2. Regression coefficients
表 2. 回归系数

模型	B	Beta	t	显著性	容差	VIF
(常量)	30.763		12.353	0.000		
年均人口	0.024	0.481	6.994	0.000	0.724	1.382
工业二氧化硫排放量	-6.405	-0.093	-0.893	0.373	0.315	3.177
工业氮氧化物排放量	0.000	0.179	1.618	0.107	0.281	3.562
地区生产总值	-1.460	-0.407	-3.119	0.002	0.202	4.956
人均地区生产总值	1.829	0.005	0.064	0.949	0.609	1.642
供气总量	2.530	0.247	2.233	0.027	0.280	3.571

Table 3. Goodness-of-fit scale
表 3. 拟合优度表

模型	R	R 方	调整后 R 方	标准估算的错误	德宾 - 沃森
1	0.482 ^a	0.232	0.211	11.70735	1.820

从表中(见表 3)数据可以看出，R²=0.232，调整后 R²=0.211，表示该模型拟合程度较好，且 D-W 值为 1.820，因而说明模型不存在自相关性样本数据之间并没有关联关系，模型较好。且该模型符合标准正态分布、数据具有较好的正态性，所以我们得出的线性回归模型是有意义的。

Table 4. Multiple linear regression analysis of influencing factors of PM_{2.5} concentration
表 4. PM_{2.5} 浓度的影响因素多元线性回归分析

影响因素	t 值	β 值	P 值
年均人口	6.994	0.481	0.000
工业二氧化硫排放量	-0.893	-0.093	0.373

续表

工业氮氧化物排放量	1.618	0.179	0.107
地区生产总值	-3.119	-0.407	0.002
人均地区生产总值	0.064	0.005	0.949
供气总量	2.233	0.247	0.027
工业氮氧化物排放量	1.618	0.179	0.107

最终分析可知(见表 4): 年均人口的回归系数值为 0.481 ($t=6.994, P=0.000<0.01$), 表示年均人口会对 $PM_{2.5}$ 浓度产生显著的正向影响关系。地区生产总值的回归系数值为-0.407 ($t=-3.119, P=0.002<0.01$), 表示年均人口会对 $PM_{2.5}$ 浓度产生显著的正向影响关系。供气总量的回归系数值为 0.247 ($t=-3.119, P=0.002<0.05$),表示年均人口会对 $PM_{2.5}$ 浓度产生显著的正向影响关系。

4. 结论

时间上, 2018 年 $PM_{2.5}$ 的月均浓度变化趋势呈现出先下降后上升的态势, 呈“U”型曲线变化; 在季节分布上, 2018 年 $PM_{2.5}$ 的季均浓度表现为夏季降至最低, 冬季则升至最高, 春秋两季则居中分布。空间上, 2018 年中国城市华北地区、西北地区 $PM_{2.5}$ 浓度值在全国呈高值状态, 新疆维吾尔自治区 $PM_{2.5}$ 浓度值最高, $PM_{2.5}$ 浓度最高的城市为和田地区($102.56 \mu g/m^3$); 2018 年大多数监测站点的 $PM_{2.5}$ 浓度展现出了清晰的季节性波动趋势。具体而言, 每年的 $PM_{2.5}$ 浓度从冬季开始逐渐降低, 直至夏季降至最低点; 随后, 从夏季到冬季, 浓度又逐渐回升, 最终在冬季达到峰值。依托 2018 年社会经济数据, 得出 2018 年中国各城市年均人口($\beta=0.481, P=0.000$)、地区生产总值($\beta=-0.407, P=-0.002$)、供气总量($\beta=0.247, P=0.027$)与 2018 年 $PM_{2.5}$ 浓度呈相关性。并基于上述结论, 提出如下对策: 各城市及地区之间应当深化协作, 构建起跨区域的联合防范与控制机制[9]。同时, 政府应当出台具有针对性的治理政策, 应该根据各城市 and 地区的具体情况进行政策制定; 实施创新驱动战略, 追求经济的绿色发展。改善地区经济发展的方向与形式, 带领所在地区进行各领域上的提升与改善, 提升使用资源的效率; 培养并大力提升各地居民的环保意识。鼓励相关部门进行税收抵扣的制度, 对各区域居民的生活行为进行管控与调节; 在对传统制造业进行优化与升级的同时, 积极促进先进制造业的蓬勃发展, 可以有效改善地区空气质量; 园林绿化树种对 $PM_{2.5}$ 颗粒物以及二氧化硫、氮氧化物等污染物具有较强的吸收与削减效能, 加强城市园林绿化, 对当地的园林规划进行科学合理地设计, 提高城市人均公园绿地面积; 对于大气污染严重的企业, 应采取切实有效的治理手段, 以保障其废气排放量的减少。同时积极推动公共交通体系的发展, 不断提升机动车辆的排放准则, 以促进环保型车辆的普及, 减少空气污染。

参考文献

[1] 申俊. $PM_{2.5}$ 污染对公共健康和社会经济的影响研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2018.

[2] 杨复沫, 马永亮, 贺克斌. 细微大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 及其研究概况[J]. 世界环境, 2000(4): 32-34.

[3] 邵龙义, 时宗波, 黄勤. 都市大气环境中可吸入颗粒物的研究[J]. 环境保护, 2000(1): 24-26+29.

[4] 周鹏, 刘雅婷, 刘兰君, 等. 2009-2018 年中国 $PM_{2.5}$ 时空演化特征及影响因素研究[J]. 生态经济, 2023, 39(5): 180-187.

[5] 刘世伟, 吴锦奎, 张文春, 等. 基于克里金插值估算区域降水量的抽样方法对比分析——以甘肃省为例[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 650-657.

[6] 王佐鹏, 张颖超, 熊雄, 等. 基于遗传算法和克里金的气温站网拓展设计[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(12): 4780-4786.

[7] 钱莹, 方秀男. 多元线性回归模型及实例应用[J]. 中国科技信息, 2022(4): 73-74.

-
- [8] 居鲁都孜·沙山. 新疆 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空特征及其对潜在健康风险的研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2023.
- [9] 刘晓红, 江可申. 中国城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空分异及影响因素分析——基于 161 个城市的实证研究[J]. 调研世界, 2018(1): 25-34.