

山东省PM_{2.5}质量浓度时空演化特征及污染程度分析

李娜¹, 丁媛媛¹, 司林静²

¹菏泽市气象局, 山东 菏泽

²泰安市气象局, 山东 泰安

收稿日期: 2025年10月6日; 录用日期: 2025年11月6日; 发布日期: 2025年11月13日

摘要

基于山东省13个地市级观测站点2022年1月~2022年12月近地面观测大气PM_{2.5}质量浓度数据, 运用统计分析和Arc GIS空间插值算法, 系统分析了研究区域PM_{2.5}质量浓度时空演化态势及其污染程度时空格局。结果表明: (1) 2022年山东省PM_{2.5}污染在时序演化上呈“M”型波动态势, 4~9月PM_{2.5}质量浓度较低其余月份PM_{2.5}质量浓度较高; 空间分布上半岛沿海地区污染较弱, 南部临沂地区污染最严重, 其他地区污染分布不均匀; (2) 不同污染等级出现日数空间分布不均匀, 轻度污染出现日数临沂地区最多, 滨州地区最少; 中度污染出现日数临沂地区最多, 威海地区最少; 重度污染出现日数临沂和德州地区出现日数最多; 严重污染兖州地区出现日数最多。由此可见, 山东省大气PM_{2.5}质量浓度在时间和空间上均存在明显的分布差异, 临沂地区为山东省主要污染源, 各污染等级出现日数均较多。研究结果可为下一步污染控制及防治处理提供数据支持。

关键词

PM_{2.5}, 山东省, 统计分析, 污染程度, 时空演化

Analysis of Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Pollution Severity of PM_{2.5} in Shandong Province

Na Li¹, Yuanyuan Ding¹, Linjing Si²

¹Heze Meteorological Bureau, Heze Shandong

²Tai'an Meteorological Bureau, Tai'an Shandong

Received: October 6, 2025; accepted: November 6, 2025; published: November 13, 2025

文章引用: 李娜, 丁媛媛, 司林静. 山东省PM_{2.5}质量浓度时空演化特征及污染程度分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(6): 1247-1254. DOI: 10.12677/ccrl.2025.146125

Abstract

Based on the ground-level observation data of PM_{2.5} concentration in 13 prefecture-level cities in Shandong Province from January 2022 to December 2022, this study used statistical analysis methods and Arc GIS spatial interpolation algorithms to systematically analyze the temporal and spatial evolution trends of PM_{2.5} concentration and pollution degree patterns in the study area. The results show that: (1) The PM_{2.5} pollution in Shandong Province in 2022 showed a “M”-shaped dynamic trend in temporal evolution, with lower PM_{2.5} concentrations from April to October and higher concentrations in the other months. In spatial distribution, the pollution in the coastal areas of the peninsula was relatively weak, and the pollution in Linyi in the south was the most serious. The pollution distribution in other areas was uneven; (2) The spatial distribution of the number of days with different pollution levels was uneven. The number of days with light pollution was the highest in Linyi and the lowest in Binzhou. The number of days with moderate pollution was the highest in Linyi and the lowest in Weihai. The number of days with heavy pollution was the highest in Linyi and Dezhou. The number of days with severe pollution was the highest in Yanzhou; therefore, it can be seen that there are obvious distribution differences in PM_{2.5} concentration in time and space in Shandong Province, and Linyi is the main pollution source in the province. The number of days with each pollution level is relatively high. The research results can provide data support for the next step of pollution control and treatment.

Keywords

PM_{2.5}, Shandong Province, Statistical Analysis, Pollution Degree, Temporal and Spatial Evolution

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

近年来,随着工业化和城镇化的快速发展,雾霾天气频繁出现、空气污染持续加剧,成为国家和社会公众关注的焦点问题[1]。PM_{2.5}是导致雾霾天气出现的重要污染物,具有典型的区域性、复合型、长期性特征,为空气质量监测的重点指标,也是空气污染防治的首要任务[2]。PM_{2.5}中存在较多有毒有害物质,与其他空气污染物转化关系复杂,对人体健康、交通安全、城市环境、工业生产、能源利用及社会经济等造成直接和间接的影响[3]-[5]。随着人口的增长,汽车尾气、工业废弃物、建筑垃圾和 SO₂、NO_x 与粉尘的排放量逐年增加,控制污染物的扩散、改善空气质量是当今社会亟需解决的重点问题[6][7]。山东省是我国工业大省,工业排放污染严重,尤其煤炭、石油为主的传统能源结构使得空气污染加重,近几年虽有所治理,但形势仍较严峻[8][9]。部分学者对山东省 PM_{2.5} 浓度特征展开了一定的研究,张淼等基于 2016~2020 年环境空气自动监测站监测数据与同期气象监测数据,研究了 PM_{2.5} 和 O₃ 时空分布变化特征,分析了其与气象因子的关系[10]。李恬等根据 2018 年~2022 年济南市和青岛市的污染监测数据,对比分析内陆和沿海代表性城市 PM_{2.5} 和 O₃ 的污染特征及其相互作用规律[11]。目前针对全省 PM_{2.5} 污染情况的统计研究较少,因此,本文基于山东省 13 个地市气象台站 PM_{2.5} 观测数据,开展 PM_{2.5} 质量浓度污染的时空演化规律及空间特征分析,对实现对当地大气环境状况更深层次的掌握、提高城市雾霾事件的监测和预报精度及 PM_{2.5} 空气污染的精准治理具有重要意义[12][13]。

2. 数据与方法

2.1. 研究区及数据选择

山东省位于中国东部沿海、黄河下游, $34^{\circ}22.9' \sim 38^{\circ}24.01'N$, $114^{\circ}47.5' \sim 122^{\circ}42.3'E$ 之间, 陆域面积 $158,100 \text{ km}^2$, 毗邻海域面积约为 $158,600 \text{ km}^2$; 属暖温带季风气候, 四季分明, 夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥; 地形以平原为主, 中部山地突起, 西南、西北低洼平坦, 东部缓丘起伏; 人口众多、农业发达、工业体系完备, 自然资源丰富。本文收集整理了山东省 17 地市地面气象观测站逐日小时 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度监测数据, 数据来源于山东省气象资料业务系统(MDOS)操作平台 v2.0 资料下载, 经精度评价和质量控制, 剔除数据缺失的部分台站, 选取具有代表性的 13 个台站(烟台、威海、潍坊、日照、东营、滨州、淄博、德州、泰安、兖州、菏泽、薛城、临沂)资料数据集, 该数据集具有较好的完整性和连续性, 数据准确率和可用率均较高, 为下一步的研究提供可靠的数据支持(图 1)。

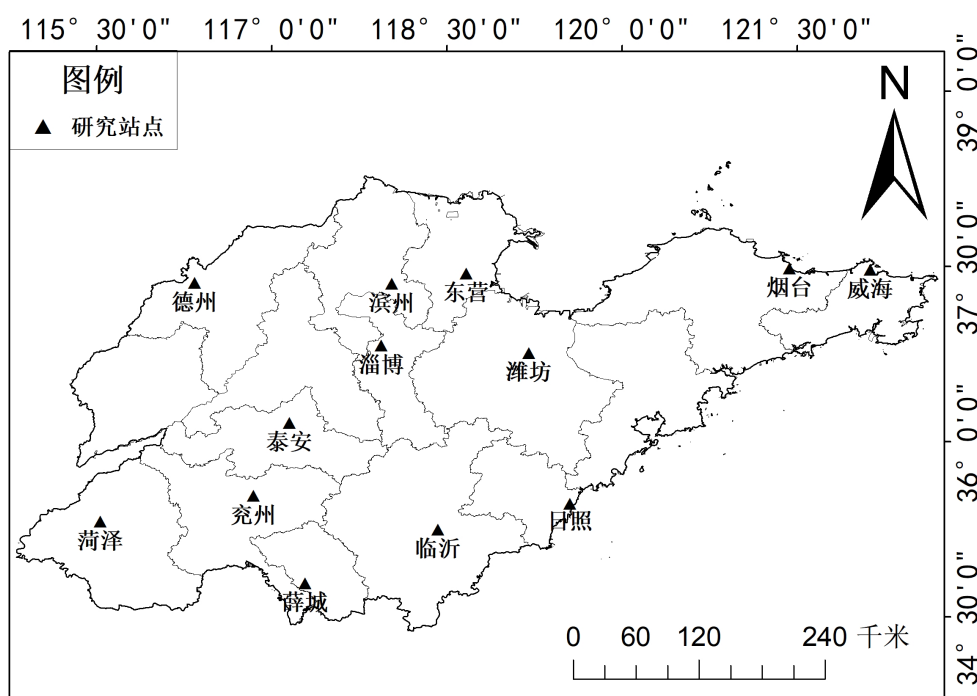


Figure 1. Site selection in the study area

图 1. 研究区站点选择

2.2. 统计分析方法

运用统计分析方法原理, 对各研究站点逐日 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度进行对比、平均和综合评价[14]。具体方法为数量关系分析法中的对比分析法、平均和变异分析法、综合评价分析法。对比各研究站点逐日 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度大小及变化趋势, 对 13 台站污染情况进行汇总求平均值得出全省平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度全年变化情况, 根据质量浓度范围将污染情况分为轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染四个等级; 统计整理所有台站不同等级污染日数, 最终对全省污染情况进行综合评价。

2.3. 空间插值方法

运用 Arc GIS 反距离权重空间插值算法, 对山东省污染情况及不同等级污染的出现日数进行空间分

布特征提取研究。反距离加权插值法(Inverse Distance Weighting, 简称 IDW)是 ArcGIS 中应用最为广泛的一种几何空间内插方法, 具体是将插值点到采样点之间的间距作为权重, 进行加权平均, 对靠近插值点越近的采样点赋予较大的权重[15]-[17]。设平面上分布一系列离散点, 已知其坐标为 $Z_i (i=1, 2, \dots, n)$, 其与待插值点 O 之间的距离为 $d_i (i=1, 2, \dots, n)$, 则待插值点 O 的数值:

$$Z_o = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^k}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^k}} \quad (1)$$

式中: Z_o 为插值点 O 的估计值; Z_i 为控制点 i 的值; d_i 为控制点 i 与点 O 间的距离; n 为在估计中用到的控制点的数目; k 为指定的幂。

3. 结果与分析

3.1. 山东省平均 PM_{2.5} 质量浓度变化特征

分别整理山东省 13 个研究台站 2022 年 1 月 1 日~2022 年 12 月 31 日逐日 PM_{2.5} 质量浓度数据, 对所有台站进行平均, 获得全省平均逐日 PM_{2.5} 质量浓度数据集。由图 2 可以看出, 2022 年全省平均 PM_{2.5} 质量浓度在时序演化上呈“M”型波动态势, 4~9 月 PM_{2.5} 质量浓度较低, 均在 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下, 大部分时段在 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右, 少部分时段低于 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 空气质量状况较好; 其余月份 PM_{2.5} 质量浓度较高, 最高达到 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上, 出现在 12 月中旬, 其余时段 PM_{2.5} 质量浓度变化幅度较明显, 在 20~100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间波动。说明冬季污染较严重, 夏季污染较轻, 与《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中污染季(10 月至次年 3 月)和非污染季(4~9 月)的划分相一致[18]。

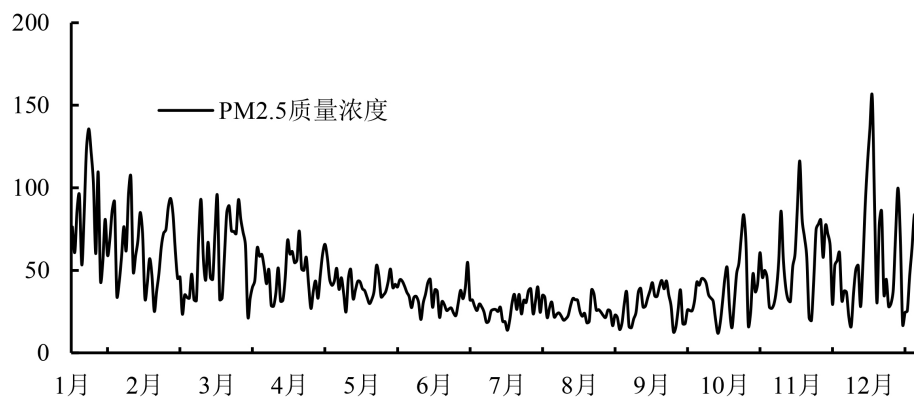


Figure 2. Average PM_{2.5} concentration variation curve of various stations in Shandong Province in 2022

图 2. 2022 年山东省各台站平均 PM_{2.5} 质量浓度变化曲线

3.2. 山东省 PM_{2.5} 污染情况空间分布特征

根据国家环境空气质量标准, 当 24 小时平均 PM_{2.5} 质量浓度标准值小于 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时空气质量等级为优, 当 24 小时平均 PM_{2.5} 质量浓度标准值在 35~75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间时空气质量等级为良, 当 24 小时平均 PM_{2.5} 质量浓度标准值大于 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时空气质量等级定义为污染。按照污染等级标准统计山东省 13 个研究台站 2022 年 1 月 1 日~2022 年 12 月 31 日逐日 PM_{2.5} 质量浓度数据, 筛选出出现污染的时段, 整理各台站出现污染的日数, 利用 Arc GIS IDW 空间插值法, 分析山东省 2022 年污染情况的空间分布特征。由图 3 可以看出, 半岛地区空气质量较好, 出现污染的天数最少, 在 16~35 天之间; 东营、潍坊及薛城出现污染

的天数较少，在 50~60 天之间；临沂地区空气质量最差，全年出现污染的天数最多，达到 105 天以上；兖州、淄博出现污染的天数较多，在 90~105 天之间；其余地区污染天数在 60~90 天之间。

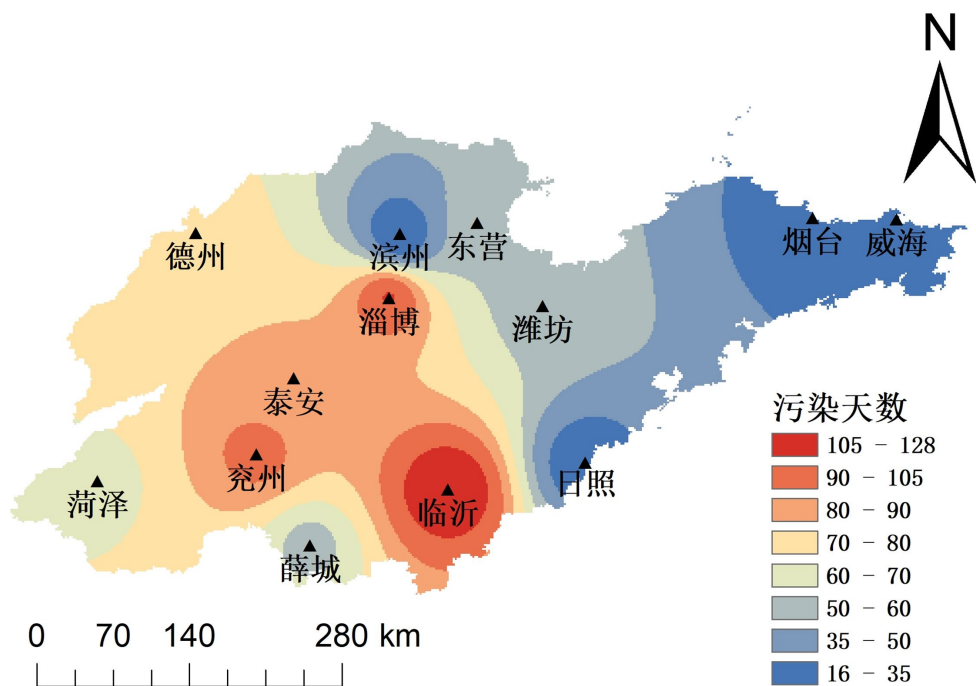


Figure3. In 2022, the spatial distribution characteristics of pollution in Shandong Province appeared
图 3. 2022 年山东省出现污染情况空间分布特征

3.3. 山东省不同等级污染情况统计

根据国家环境空气质量标准，根据 24 小时平均 PM_{2.5} 质量浓度的标准值将污染分为 4 个等级，统计不同等级污染出现的日数与出现频率，如表 1 所示。

Table 1. Statistics of different pollution levels in Shandong Province in 2022
表 1. 2022 年山东省不同污染等级情况统计

空气质量等级	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染
24 h PM _{2.5} 平均值	75~115 μg/m ³	115~150 μg/m ³	150~250 μg/m ³	大于 250 μg/m ³ 及以上
出现日数	34	10	4	4
出现频率	9.32%	2.74%	1.10%	1.10%

分别对 13 个研究台站 4 个污染等级进行对比分析，由图 4 可以看出，德州、烟台、潍坊、菏泽、日照、薛城均未出现严重污染，兖州严重污染最严重，达 38 天；德州、临沂出现重度污染天数最多，为 11 天，滨州未出现重度污染；临沂出现中度污染天数最多，为 24 天，烟台、威海、日照中度污染出现日数较少；临沂出现轻度污染天数也是最多，为 91 天，滨州轻度污染出现日数最少，只有 9 天。

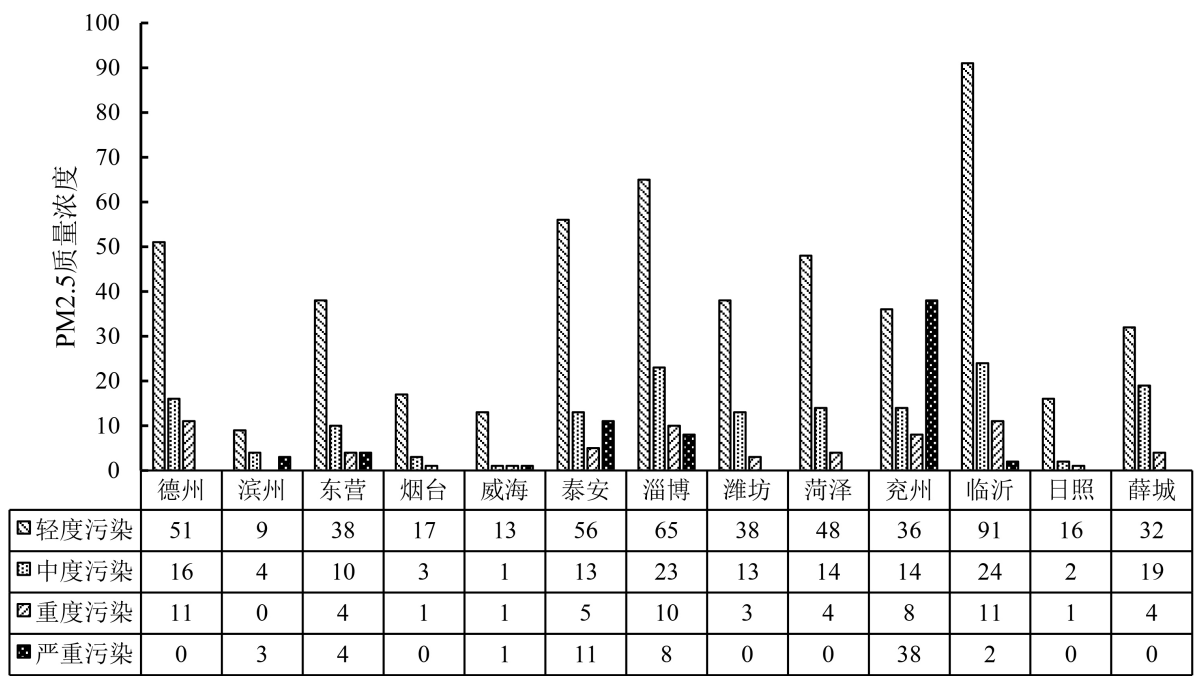
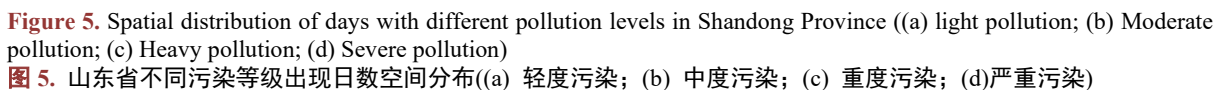


Figure 4. Statistical comparison of the number of days with different pollution levels at 13 stations in Shandong Province
图 4. 山东省 13 台站不同污染等级出现日数统计对比

3.4. 山东省不同等级污染的空间分布特征

基于山东省 13 个研究台站 2022 年逐日 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度值统计了不同污染等级的出现日数，计算出 2022 年山东省轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染的出现日数，研究结果表明：轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染出现日数的空间分布不均匀，轻度污染出现日数最多，严重污染出现日数最少；从整体上看，山东省不同污染等级出现日数分布呈中部多半岛少的特点，整个研究区域各污染等级出现日数差别比较明显。

从 2022 年山东省不同污染等级出现日数的空间分布(见图 5)可知，整体上轻度污染(图 5(a))出现日数最多，临沂轻度污染出现日数最多，大于 80 天，淄博轻度污染出现日数较多，为 60~70 天，泰安、德州轻度污染出现日数在 50~60 天，烟台、威海、滨州、日照轻度污染出现日数最少，小于 20 天，潍坊、东营、兖州、薛城轻度污染出现日数在 30~40 天；轻度污染出现日数空间分布呈西多东少的特点；中度污染(图 5(b))出现日数空间分布不均匀，临沂、淄博中度污染出现日数最多，大于 21 天，薛城、德州中度污染出现日数较多，为 15~20 天，威海、日照中度污染出现日数最少，小于 3 天，烟台、滨州中度污染出现日数较少，为 3~6 天，其他地区中度污染出现日数在 9~15 天之间，中度污染出现日数空间分布呈中部多西部次之东部最少的特点；重度污染(图 5(c))出现日数较少，德州、淄博、临沂重度污染出现日数最多，大于 9 天，滨州、烟台、威海、日照重度污染出现日数最少，小于 2 天，东营、潍坊重度污染出现日数较少，为 3~4 天，其他地区重度污染出现日数在 4~6 天之间，重度污染出现日数空间分布呈西南多东北少的特点；严重污染(图 5(d))出现日数最少，大部分地区严重污染出现日数均小于 3 天，少部分地区严重污染出现日数在 3~8 天之间，兖州严重污染出现日数最多，全年出现严重污染日数大于 33 天，重度污染出现日数空间分布除兖州地区外差异不明显。研究结果表明，山东省不同污染等级的出现日数具有较明显的区域分布差异，半岛沿海地区污染较少，各污染等级出现日数均较少，中部兖州地区严重污染最严重，南部临沂地区轻度污染、中度污染和重度污染出现日数最多。



文章基于山东省 13 个研究台站 2022 年 1 月~2022 年 12 月逐日 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度实测资料, 计算了各站和全省平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度, 分析了各台站和全省 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化趋势及不同污染等级的出现日数。利用 ArcGIS 时空分析工具, 分析了山东省 2022 年全年污染情况及轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染出现日数的空间分布特征, 主要结论如下:

(2) 从山东省 $\text{PM}_{2.5}$ 污染情况空间分布上来看, 半岛地区空气质量较好, 出现污染的天数最少; 东营、潍坊及薛城出现污染的天数较少; 临沂地区空气质量最差, 全年出现污染的天数最多; 兖州、淄博出现污染的天数较多。

PM_{2.5}影响着人体的健康、大气的能见度和辐射的平衡，是污染大多数城市大气环境的首要污染物，近年来成为社会民众关注的焦点[19]。本文揭示了山东省 PM_{2.5} 的变化规律及污染的空间分布特征，但 PM_{2.5} 的溯源、迁移机制及影响因素，亟需进一步深入分析。本文研究结果为持续改善山东省各地市空气质量提供科学指导，为空气污染预报和服务提供基础依据，对保护人体健康具有重要意义[20] [21]。

参考文献

- [1] Chan, C.K. and Yao, X. (2007) Air Pollution in Mega Cities in China. *Atmospheric Environment*, **42**, 1-42. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.003>
- [2] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000-2011 年中国 PM_{2.5} 时空演化特征及驱动因素解析[J]. 地理学报, 2017, 72(11): 2079-2092.
- [3] Liang, C., Duan, F., He, K., et al. (2016) Review on Recent Progress in Observations, Source Identifications and Countermeasures of PM_{2.5}. *Environment International*, **86**, 150-170. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.10.016>
- [4] 杨冕, 王银. 长江经济带 PM_{2.5} 时空特征及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(1): 91-100.
- [5] 滕堂伟, 湛丹华, 胡森林. 黄河流域空气污染的空间格局演化及影响因素[J]. 地理科学, 2021, 41(10): 1852-1861.
- [6] 李峰. 基于层次分析法的济宁市大气环境污染质量评价模型研究[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(6): 179-184.
- [7] 张净雯, 倪成诚. 成都地区 PM_{2.5} 质量浓度变化特征及其与气象要素的关系研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(7): 61-66.
- [8] 徐勇, 韦梦新, 邹滨, 等. 基于空间尺度效应的山东省 PM_{2.5} 浓度时空变化及空间分异地理探测[J]. 环境科学, 2024, 45(5): 2596-2612.
- [9] 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 等. 2016-2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2022, 43(6): 2937-2946.
- [10] 张淼, 丁椿, 孟赫, 等. 山东省环境空气中 PM_{2.5} 与 O₃ 的复合污染特征与时空变化趋势[J]. 环境科学研究, 2023, 36(2): 246-259.
- [11] 李恬, 姚文姣, 栾兆鹏, 等. 山东省内陆和沿海特大城市 PM_{2.5} 和 O₃ 污染变化特征对比[J]. 环境科技, 2023, 36(6): 47-52, 69.
- [12] 田小芳, 梁栋, 孙云. 雾霾天气 PM_{2.5}、PM₁₀ 质量浓度及相对湿度特征分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2024, 41(5): 56-58, 62.
- [13] 戴刘新, 张莹, 李正强, 等. 中国近地面 PM_{2.5} 质量浓度卫星遥感数据集比较及历史趋势分析[J]. 大气与环境光学学报, 2022, 17(6): 613-629.
- [14] 刘宇峰, 原志华, 杨军军, 等. 2000-2018 年陕西省县域 PM_{2.5} 质量浓度时空演化特征分析[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(5): 127-134, 138.
- [15] 刘祥, 庞玥, 何军, 等. 不同空间插值方法对重庆地区降水的适用性分析[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(2): 75-81.
- [16] 肇毓锋, 吴奇. 多时间尺度下 Kriging 与 IDW 空间插值方法的适用性研究[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(11): 9-14.
- [17] 何鹏, 张媛, 高文波, 等. 四川省多年平均气温数据空间插值方法与影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(9): 114-124.
- [18] 马星芬, 王雁, 闫世明, 等. 不同污染等级下阳泉市 PM_{2.5} 传输特征和潜在源区分析[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 3858-3869.
- [19] 杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 等. 2017-2018 年冬季菏泽大气 PM_{2.5} 中金属元素特征及健康风险评估[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1361-1370.
- [20] 耿心泽, 刘畅, 刘旭艳, 等. 2020 年 1 月哈尔滨 PM_{2.5} 重污染形成机制[J]. 应用气象学报, 2024, 35(6): 737-746.
- [21] 蔡惠文, 吕恩奇, 陈欣昊, 等. 高陵区 PM_{2.5} 污染特征及其与气象要素的关系研究[J]. 陕西气象, 2021(5): 42-46.