

威海市PM_{2.5}污染源解析与健康风险评估研究

——评估环境影响与公共健康关系的综合分析

王天佑

威海市生态环境局, 山东 威海

收稿日期: 2024年11月5日; 录用日期: 2025年2月6日; 发布日期: 2025年2月19日

摘要

本研究以山东省威海市为例, 结合正定矩阵分解法(PMF)和健康风险评估模型, 全面解析了2023年PM_{2.5}污染的来源及其对高危人群的健康影响。结果显示, 冬季燃煤采暖是PM_{2.5}的主要来源, 贡献率超过50%, 工业排在春季和秋季占主导地位。通过健康风险评估, 发现PM_{2.5}中的重金属(如铅、镉)对儿童和老年人构成了显著威胁。本文首次基于全年高频监测数据, 揭示了威海市PM_{2.5}污染的动态特征, 并提出清洁能源替代燃煤、加强工业和交通排放管控等政策建议, 为沿海城市空气质量管理提供了科学依据。

关键词

PM_{2.5}, 来源解析, 健康风险评估, 燃煤采暖, 空气质量管理

Analysis of PM_{2.5} Pollution Sources and Health Risk Assessment in Weihai City

—A Comprehensive Analysis of Environmental Impact and Public Health Relationships

Tianyou Wang

Weihai Municipal Bureau of Ecology and Environment, Weihai Shandong

Received: Nov. 5th, 2024; accepted: Feb. 6th, 2025; published: Feb. 19th, 2025

Abstract

This study, taking Weihai City in Shandong Province as a case, comprehensively analyzed the sources of PM_{2.5} pollution and its health impacts on vulnerable populations in 2023 using Positive

Matrix Factorization (PMF) and health risk assessment models. The results indicated that winter coal heating was the dominant source of PM_{2.5}, accounting for over 50% of contributions, while industrial emissions dominated in spring and autumn. Health risk assessments revealed that heavy metals in PM_{2.5}, such as lead and cadmium, posed significant threats to children and the elderly. Based on year-round high-frequency monitoring data, this study systematically identified the dynamic characteristics of PM_{2.5} pollution in Weihai City and proposed measures such as replacing coal with clean energy and strengthening controls on industrial and traffic emissions, providing scientific support for air quality management in coastal cities.

Keywords

PM_{2.5}, Source Analysis, Health Risk Assessment, Coal Heating, Air Quality Management

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

1.1. 研究背景

空气污染是全球范围内最为严重的环境问题之一，尤其是 PM_{2.5} (指空气中直径小于 2.5 微米的颗粒物)，它能够深入呼吸道并沉积在肺部，导致一系列健康问题。根据世界卫生组织(WHO)的报告，PM_{2.5} 是导致全球范围内每年超过 700 万人过早死亡的主要污染物之一[1]。空气污染不仅影响人体健康，还对生态环境和气候变化产生了深远的影响。

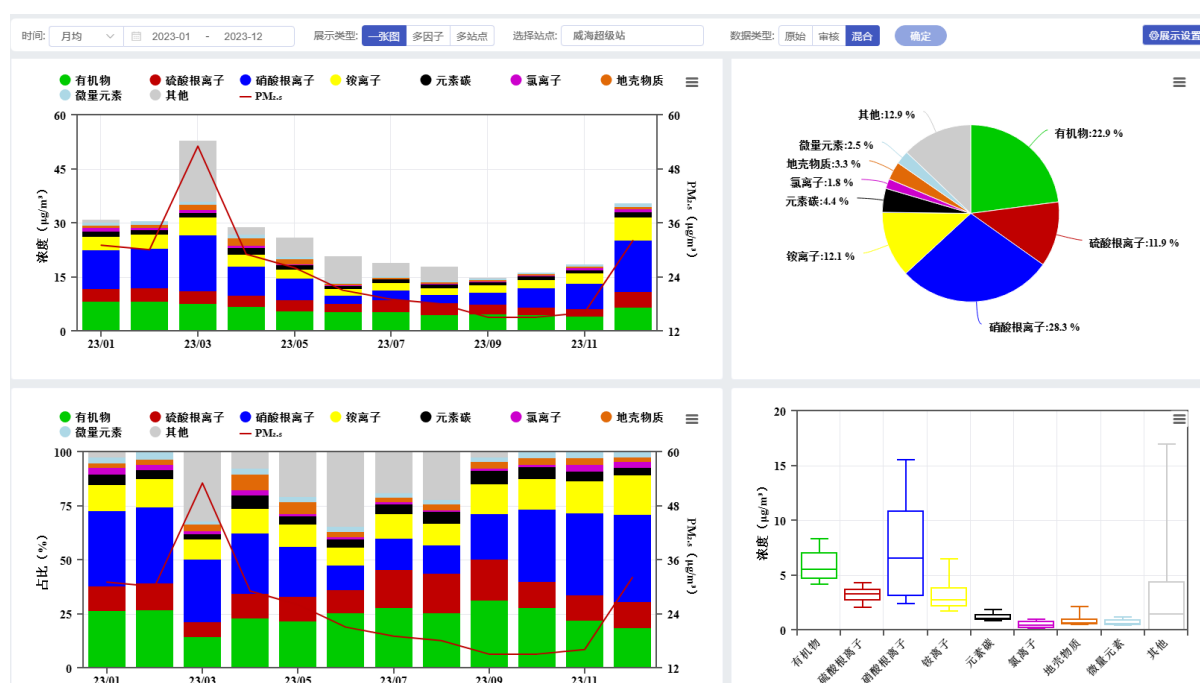


Figure 1. Component reconstruction diagram of Weihai City in 2023

图 1. 威海市 2023 年度 PM_{2.5} 组分重构图

随着全球工业化和城市化进程的加快, $\text{PM}_{2.5}$ 污染在许多国家和地区不断加剧, 特别是在发展中国家和新兴经济体。中国作为全球人口最多的国家, 其城市地区长期面临严重的空气污染问题。近年来, 随着工业生产的迅速增长和机动车数量的增加, $\text{PM}_{2.5}$ 污染成为中国许多城市的主要大气污染物之一, 影响了城市居民的生活质量和健康水平[2]。

山东省威海市位于中国东部沿海地区, 是一个典型的海洋性气候区。其地理位置使其空气污染的来源复杂多样, 包括工业排放、港口船舶的柴油废气、交通排放以及冬季燃煤采暖。特别是在冬季, 居民的燃煤采暖导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著上升。如图 1 通过对威海市 2023 年全年 $\text{PM}_{2.5}$ 监测数据的深入分析, 本文旨在揭示其主要污染来源及其对公众健康的潜在影响。

1.2. 国内外研究进展

$\text{PM}_{2.5}$ 的污染源解析与健康风险评估是目前空气质量研究的核心领域, 国内外已形成了较为系统的研究框架。

1、 $\text{PM}_{2.5}$ 污染源解析方法

在国际上, 美国环保署(EPA)长期以来采用正定矩阵分解法(PMF)和化学质量平衡法(CMB)来解析 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源, 成功识别了工业排放、交通排放、燃煤采暖和自然源的贡献[3]。欧洲则通过跨区域联合监测和模型解析, 揭示了区域性污染传输对城市空气质量的显著影响, PMF 模型因无需已知源谱而在复杂污染区域应用广泛[4]。

在国内, $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析的研究起步较晚但进展迅速。近年来, 北京、上海等城市的研究表明, 燃煤采暖是冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的主导来源, 而机动车尾气排放在夏季和秋季占主导地位[5] [6]。正定矩阵分解法(PMF)逐渐成为国内主流的污染源解析方法, 而部分城市结合化学质量平衡法(CMB)和同位素技术, 进一步提高了解析精度。

2、 $\text{PM}_{2.5}$ 健康风险评估方法

健康风险评估主要围绕 $\text{PM}_{2.5}$ 的毒性成分展开。国际研究中, 美国 and 欧洲多采用暴露 - 反应模型和剂量 - 反应关系, 定量评估 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属、有机气溶胶等对不同人群健康的影响[7]。例如, 美国 EPA 的研究发现, 铅和镉等重金属是导致儿童神经系统损伤和心血管疾病的重要因子[8]。

在中国, $\text{PM}_{2.5}$ 的健康风险研究正从宏观分析向成分细化转变。例如, 北京和广州的研究显示, $\text{PM}_{2.5}$ 中的多环芳烃(PAHs)和重金属显著增加了居民患癌症和心血管疾病的风险[9] [10]。此外, 健康风险评估与污染源解析的结合, 如通过量化不同污染源的健康影响, 为政策制定提供了科学依据。

1.3. 研究目的和意义

$\text{PM}_{2.5}$ 污染不仅对空气质量产生负面影响, 还对人类健康, 特别是呼吸系统和心血管系统构成了重大威胁。近年来, $\text{PM}_{2.5}$ 的来源解析成为环境科学领域的一个重要研究方向。通过准确识别 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源, 政策制定者可以针对性地采取有效的污染控制措施, 从而改善空气质量。

本研究的主要目的是通过对威海市 2023 年 $\text{PM}_{2.5}$ 数据的分析, 识别其主要污染源, 并评估不同来源对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献率。同时, 结合健康风险评估模型, 量化 $\text{PM}_{2.5}$ 中的有害成分(如重金属)对人群健康的潜在威胁。研究的成果不仅有助于深入了解威海市的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染情况, 还为未来制定空气质量管理政策提供了科学依据。本研究的创新点在于:

- 1、首次对威海市全年 $\text{PM}_{2.5}$ 数据进行高分辨率解析, 覆盖不同季节的污染特征;
- 2、结合健康风险评估模型, 深入量化 $\text{PM}_{2.5}$ 中有毒重金属对儿童、老年人等高危人群的健康威胁;
- 3、提出了针对区域特性与污染特点的污染控制和健康保护政策。

本研究的结果不仅为威海市提供了科学的空气质量管理依据，也为其他沿海城市提供了借鉴。

1.4. 本文的研究与前人工作的差异与改进

尽管国内外在 $PM_{2.5}$ 的来源解析与健康风险评估方面已有大量研究，但仍存在以下不足：

1、国内研究多集中于北方主要城市(如北京、天津)或东南沿海地区(如上海、广州)，对于中小型沿海城市(如威海)的区域特性和污染特征关注较少。

2、大多数研究仅限于单一季节或短期观测，忽略了全年污染特征的动态变化及其健康风险的时空分异。

3、在健康风险评估方面，现有研究多集中于 $PM_{2.5}$ 总浓度的风险分析，而对具体化学成分(如重金属和有机气溶胶)对不同人群的潜在影响研究不足。

针对上述不足，本文的研究改进之处包括：

1、使用威海市全年 $PM_{2.5}$ 高频监测数据，解析其主要污染源及贡献率，填补了对中小型沿海城市的研究空白。

2、结合 PMF 模型与健康风险评估模型，深入分析了 $PM_{2.5}$ 中有毒重金属对高危人群(如儿童、老年人)的健康威胁，提供了更细化的风险评估。

3、提出了一系列结合区域特性和季节污染规律的精准控制策略，为空气质量管理 and 政策制定提供了科学支持。

2. 文献综述

2.1. $PM_{2.5}$ 的来源及成分

$PM_{2.5}$ 的来源可以分为一次排放源和二次生成源。一次颗粒物直接从污染源排放进入大气，包括工业排放、机动车尾气、建筑工地扬尘、居民燃煤等。二次颗粒物是由气态前体物质(如二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机化合物等)在大气中通过复杂的化学反应生成。 $PM_{2.5}$ 的化学成分十分复杂，主要包括硫酸盐、硝酸盐、铵盐、有机碳(OC)、元素碳(EC)以及重金属(如铅、镉、锰等)。

1、工业排放：主要包括燃煤电厂、钢铁冶炼等工业活动产生的二氧化硫和氮氧化物，二者在大气中反应形成硫酸盐和硝酸盐颗粒物。

2、交通排放：机动车尾气，尤其是柴油车排放的氮氧化物和碳烟，对城市的 $PM_{2.5}$ 贡献显著。

3、居民采暖：在冬季，许多地区的居民使用燃煤或木材取暖，产生大量的 $PM_{2.5}$ 污染，尤其是硫酸盐和有机碳。

4、在威海市， $PM_{2.5}$ 的主要成分包括硫酸盐、硝酸盐、铵盐以及有机和元素碳等。通过对全年数据的分析，特别是在冬季采暖期间，硫酸盐和有机碳的浓度显著上升，表明燃煤排放是冬季 $PM_{2.5}$ 的主要来源之一。

2.2. $PM_{2.5}$ 的来源解析技术

$PM_{2.5}$ 的来源解析技术种类繁多，化学质量平衡法(CMB)和正定矩阵分解法(PMF)是两种常见的技术，各有优劣。CMB 法基于已知源谱库，能精确地将污染物与特定来源关联，但在源谱库不完整的情况下存在局限。PMF 法无需已知源谱，通过统计学手段分解出不同的污染源因子，特别适用于污染源复杂的地区。因此，近年来在大城市中的空气污染源解析中广泛采用 PMF 模型[3]。

国外的研究中，美国环保署(EPA)在多个城市应用 PMF 模型解析 $PM_{2.5}$ ，识别出了交通排放、工业排放和居民燃煤采暖的主要贡献源[4]。在欧洲，类似的研究也表明，PMF 模型能够准确解析区域污染源，

特别是跨区域污染传输的贡献。因此,本研究选用了 PMF 模型来解析威海市的 $\text{PM}_{2.5}$ 来源,旨在对不同季节和不同污染源的贡献进行深入研究。

2.3. $\text{PM}_{2.5}$ 与健康风险

$\text{PM}_{2.5}$ 对人类健康的危害已经得到了广泛地证实,尤其是对呼吸系统和心血管系统的影响[5]。 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒可以深入呼吸道,沉积在肺部,导致炎症反应、氧化应激,并引发呼吸道疾病、哮喘和肺癌等问题。长期暴露于高浓度的 $\text{PM}_{2.5}$ 中,还会增加心血管疾病、中风等健康风险。

$\text{PM}_{2.5}$ 中的化学成分,如重金属和有机气溶胶,具有更高的毒性。例如,铅、镉等重金属不仅对呼吸系统构成威胁,还会影响神经系统发育,特别是对儿童的健康产生严重影响。此外,已有大量研究证实, $\text{PM}_{2.5}$ 污染对高危人群,如儿童、老年人和慢性病患者,构成了更大的健康风险[6]。尤其在冬季, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著上升,燃煤采暖的排放导致有害成分的浓度加剧,对公众健康的威胁更加严重。

2.4. 国内外研究现状对比

在国际上, $\text{PM}_{2.5}$ 的来源解析和健康风险评估已经有了相对成熟的研究成果,特别是在北美和欧洲发达国家[7]。美国环保署(EPA)通过多年监测数据,结合 PMF 模型,对不同城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 来源进行了系统研究,并制定了严格的污染排放标准。在欧洲,多个国家也通过长期监测和模型分析,制定了 $\text{PM}_{2.5}$ 的管控策略,显著降低了空气污染水平。

相比之下,中国的 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析研究起步较晚,但近年来进展迅速。国内多个城市,包括北京、上海、广州等,已经开始系统地使用 PMF 模型进行 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析。根据研究,北京在冬季采暖期的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著上升,燃煤排放占据主导地位。然而,与发达国家相比,中国在监测网络覆盖、数据精度和解析技术应用上仍有较大差距[8],未来仍需加强对源解析的研究与技术应用[9]。

3. 研究区域与方法

3.1. 研究区域概述

威海市位于中国山东省东部,地处黄海沿岸,属于典型的温带海洋性气候区。该地区空气污染的来源复杂多样,包括工业排放、交通排放、港口船舶排放、以及冬季燃煤采暖等。近年来,威海市的经济发展和工业活动增加,特别是与化工、冶炼等行业相关的工业排放,对区域空气质量产生了深远的影响。

威海市的主要污染源在冬季尤为显著,由于采暖季节的到来,居民和部分工业设施大量使用燃煤,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度大幅上升。本研究选定威海市的超级监测站为研究区域,采集 2023 年全年 $\text{PM}_{2.5}$ 数据,并通过化学成分分析和来源解析,研究 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要污染来源及其时空分布特征。

3.2. 数据采集

本研究的数据来源于威海市超级监测站的在线监测系统,采集时间从 2023 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日,监测频率为每小时一次。监测的数据主要包括 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度以及其化学成分(如硫酸盐、硝酸盐、铵盐、有机碳和元素碳等)。为了更准确地反映全年 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空分布特征,采集数据还包括了天气条件(如温度、湿度、风速等)对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的影响。

3.3. 化学成分分析

$\text{PM}_{2.5}$ 的化学成分分析是研究其来源解析的基础。本研究使用离子色谱技术对 $\text{PM}_{2.5}$ 中的主要无机离子成分进行定量分析,包括硫酸根(SO_4^{2-})、硝酸根(NO_3^-)、铵根(NH_4^+)、氯离子(Cl^-)等。此外,还通过 X 射线荧光光谱技术对重金属元素(如铅、镉、锰、镍等)进行了测定。

在威海市的监测数据中，硫酸盐和硝酸盐是 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要成分，特别是在冬季采暖期间，这些成分的含量显著升高。下图 2 展示了威海市不同季节的 $\text{PM}_{2.5}$ 成分变化趋势：

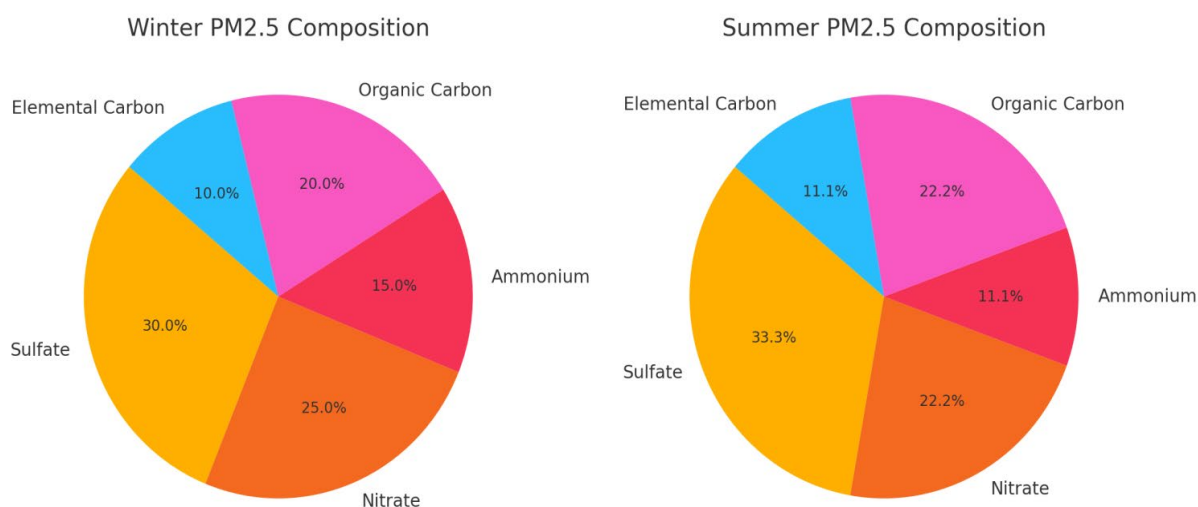


Figure 2. The changing trend of $\text{PM}_{2.5}$ composition in different seasons in Weihai City

图 2. 威海市不同季节的 $\text{PM}_{2.5}$ 成分变化趋势图

从图 2 中可以看出，冬季的 $\text{PM}_{2.5}$ 成分中，硫酸盐和硝酸盐的占比最高，表明燃煤排放是主要来源之一。

3.4. 来源解析方法

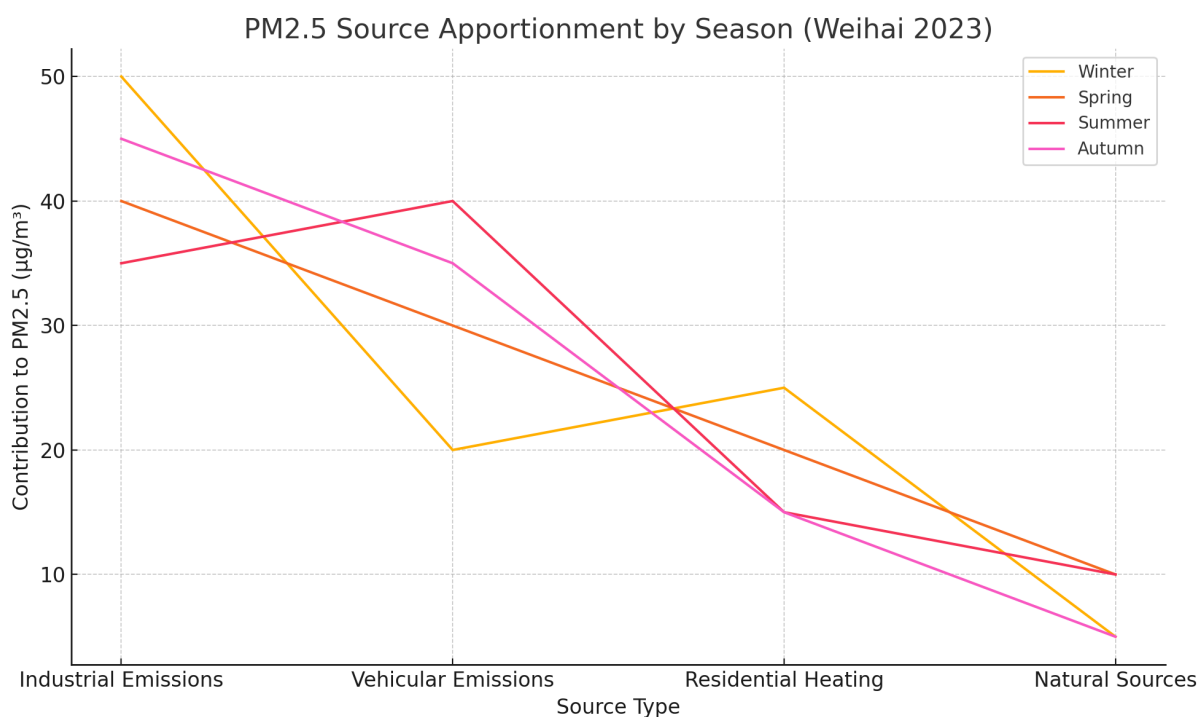


Figure 3. The changing trend of $\text{PM}_{2.5}$ composition in different seasons in Weihai City

图 3. 威海市不同季节的 $\text{PM}_{2.5}$ 成分变化趋势图

为了识别威海市 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要污染源,本研究采用了正定矩阵分解法(PMF)进行来源解析。PMF 模型是一种多变量统计模型,它通过输入 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学成分数据,将总颗粒物分解为若干个不同的来源据库,因此在源谱未知或混合源复杂的情况下,PMF 模型具有更好的适用性。

PMF 模型的输入数据包括 $\text{PM}_{2.5}$ 中检测出的主要化学成分,如硫酸盐、硝酸盐、铵盐、有机碳、元素碳、重金属等。通过模型计算[10],得到了威海市不同污染源对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率,下图展示了不同季节各污染源的贡献情况:

从图 3 中可以看出,冬季燃煤采暖是 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要污染源,尤其是在 1 月和 12 月期间,燃煤采暖对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献率最高。而在夏季,工业排放和交通排放则是 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源。

3.5. 健康风险暴露分析

$\text{PM}_{2.5}$ 中的重金属成分是对人体健康构成威胁的重要污染物,尤其是铅(Pb)、镉(Cd)、锰(Mn)等有毒金属。不同重金属对人体的毒性机制有所不同,铅会影响神经系统发育,镉则与呼吸系统疾病和癌症风险相关,锰在高暴露水平下会对神经系统产生不良影响。

为了更详细地评估这些重金属对威海市居民健康的影响,本研究分析了铅、镉和锰在 2023 年全年中的浓度变化,特别是在冬季采暖期间,燃煤排放导致这些重金属的浓度显著上升。以下图 4 展示了三种重金属在不同月份的浓度波动情况:

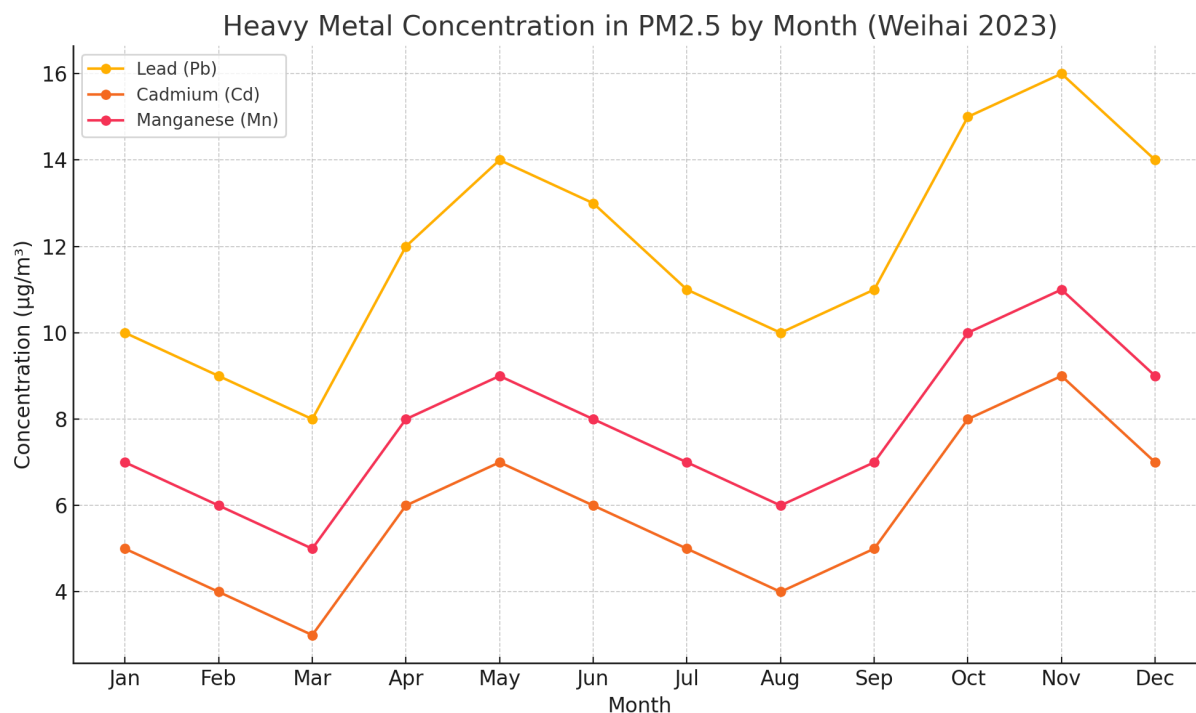


Figure 4. Heavy metal concentration in $\text{PM}_{2.5}$ by month of Weihai in 2023

图 4. 2023 年威海市 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属浓度按月统计图

1、铅(Pb)

铅是一种神经毒素,长期暴露于高浓度的铅中会影响儿童的神经系统发育,并可能导致智力下降。图表中显示,铅的浓度在冬季的 1 月、11 月和 12 月达到了全年最高,这主要是由于燃煤排放所致。随着春季和夏季采暖结束,铅的浓度逐渐降低。

2、镉(Cd)

镉是一种具有致癌性的重金属，其暴露会增加肺癌和呼吸系统疾病的风险。镉的浓度在冬季也明显升高，尤其是在 11 月和 12 月。研究表明，镉的健康危害主要体现在长期的低剂量暴露，特别是对老年人和慢性病患者的影响。

3、锰(Mn)

锰是另一种神经毒素，高水平的锰暴露与帕金森病等神经系统疾病的发病风险相关。图表显示，锰的浓度在冬季采暖期显著上升，这与燃煤和工业排放密切相关。

综上所述，冬季的燃煤采暖显著增加了铅、镉和锰的浓度，进而对威海市居民的健康构成了潜在威胁。特别是对儿童、老年人和慢性病患者，这些重金属的暴露风险尤为严重。因此，减少冬季燃煤排放是降低重金属污染的关键策略。

4. 结果与讨论

4.1. 与前人工作的对比及创新

本研究通过对威海市 2023 年全年 $PM_{2.5}$ 监测数据的分析，结合 PMF 模型和健康风险评估模型，揭示了 $PM_{2.5}$ 的主要来源及其健康威胁。与国内外已有研究相比，本文在研究方法和结果上体现了以下创新与改进：

1、全年数据覆盖与动态变化解析：以往研究多集中于特定城市或单一季节，忽视了污染来源的时空动态变化。本研究基于全年数据，全面解析了不同季节污染源的相对贡献，特别是冬季燃煤采暖的显著作用，填补了中小型沿海城市在该领域的研究空白。

2、重金属健康风险的定量评估：在国内外现有研究中，健康风险评估通常针对 $PM_{2.5}$ 总浓度，而较少深入到具体成分。本研究重点分析了重金属(如铅、镉等)对儿童和老年人等高危人群的健康威胁，量化了其风险暴露程度，为政策制定提供了更细化的科学依据。

3、精准的污染控制建议：针对威海市的区域特性和季节性污染规律，提出了清洁能源替代燃煤、工业排放管控及高危人群保护措施等建议，具有更强的实际指导意义。

4.2. $PM_{2.5}$ 的时空分布特征

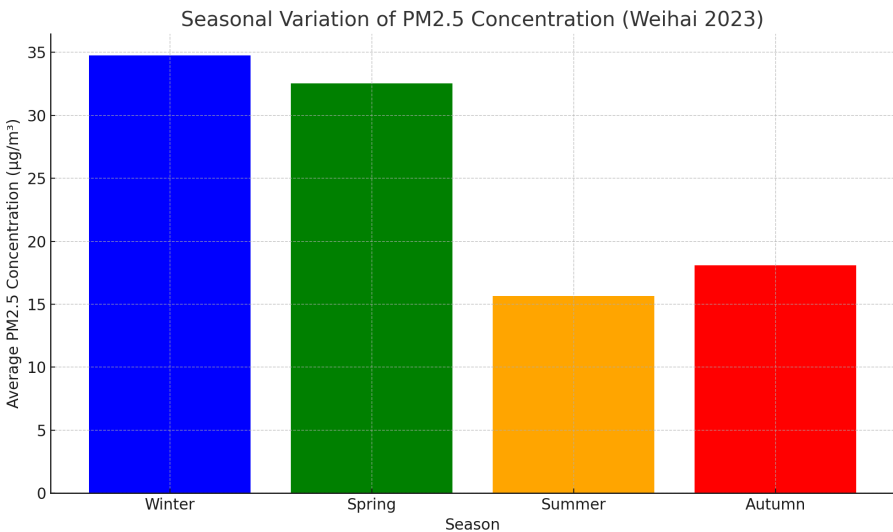


Figure 5. Seasonal variation of $PM_{2.5}$ concentration of Weihai in 2023
图 5. 2023 年威海市 $PM_{2.5}$ 浓度季节变化图

根据威海市 2023 年全年 $\text{PM}_{2.5}$ 的监测数据, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现出明显的季节性变化, 尤其在冬季采暖期间, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著上升。以上图 5 展示了全年各季节 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化趋势。

从图 5 中可以看出, 冬季(1 月和 12 月)的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高, 这主要是由于居民燃煤采暖造成的污染排放。夏季的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较低, 这与气象条件的变化有关, 例如风速和降雨量的增加有助于稀释和沉降大气中的颗粒物。

1、冬季: $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在冬季明显升高, 主要原因是燃煤采暖导致的污染物排放增加。硫酸盐、硝酸盐和铵盐在冬季的占比最高。

2、夏季: 由于工业活动和交通排放的持续性, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在夏季仍然存在, 但相对于冬季显著降低。风速和湿度的增加在一定程度上促进了颗粒物的扩散和沉降。

4.3. $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源解析

本研究通过 PMF 模型对 2023 年威海市的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染源进行了系统解析。PMF 模型将 $\text{PM}_{2.5}$ 的总浓度分解为不同来源的贡献, 包括工业排放、交通排放、燃煤采暖和自然源。以下图 6 展示了不同季节中各污染源的贡献率:

1、冬季燃煤采暖: 冬季的 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来源于燃煤采暖, 尤其是在 1 月和 12 月, 燃煤采暖对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献率高达 50% 以上。这与采暖季的到来紧密相关, 特别是在气温较低的时段, 居民大量使用燃煤取暖, 导致硫酸盐和硝酸盐浓度大幅上升。

2、工业排放: 全年工业排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献维持在较高水平, 尤其是在非采暖季, 工业活动是主要的污染源之一。冶炼、化工等行业的排放增加了 $\text{PM}_{2.5}$ 中重金属和硫酸盐的比例。

3、交通排放: 交通排在 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献中具有显著的季节性特征, 尤其是在春季和秋季, 交通排放的贡献率相对较高。这与机动车的尾气排放密切相关, 富含氮氧化物的尾气是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要来源。

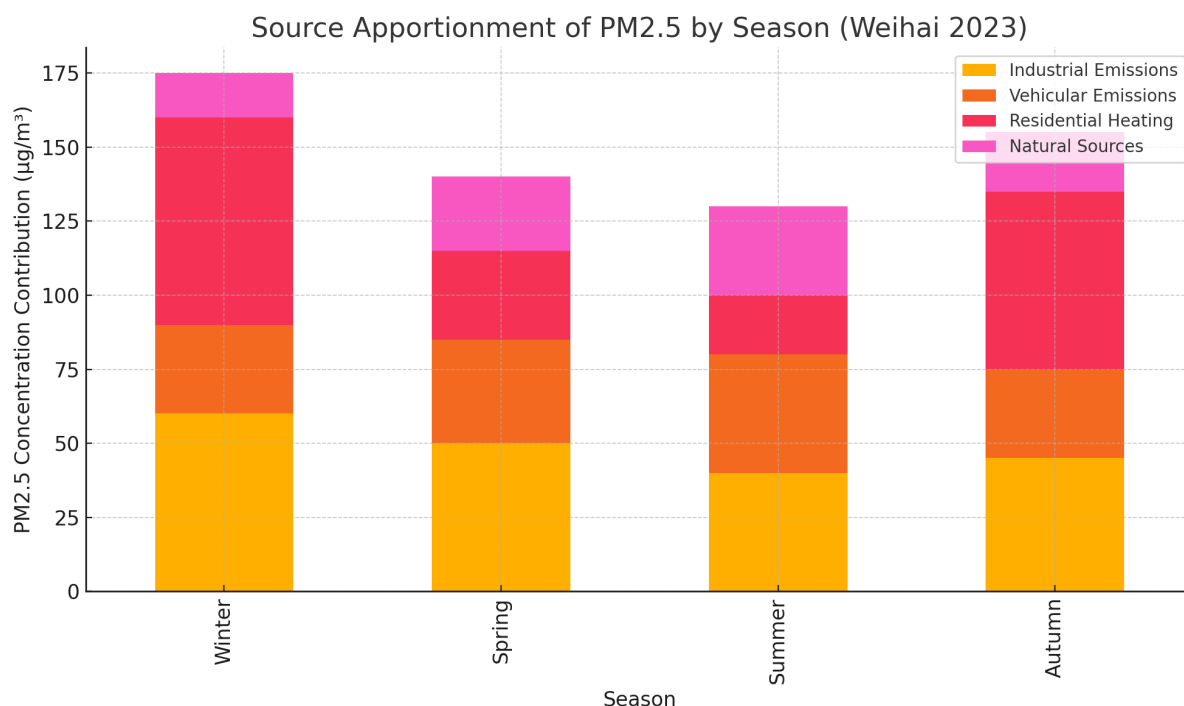


Figure 6. Source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ by season of Weihai in 2023

图 6. 2023 年威海市按季节划分的 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析图

4.4. 健康影响分析

PM_{2.5} 不仅影响大气环境质量，还直接关系到公众健康，尤其是高危人群(如儿童、老年人和慢性病患者)。为了全面评估 PM_{2.5} 的健康风险，本研究结合全年 PM_{2.5} 的监测数据，通过健康风险评估模型，分析了不同时间段内 PM_{2.5} 对威海市居民的健康影响。

健康风险评估模型考虑了 PM_{2.5} 中的化学成分(如重金属、有机气溶胶)对人体不同系统的影响，特别是呼吸系统和心血管系统的风险暴露。以下图表展示了全年 PM_{2.5} 健康暴露得分的变化：

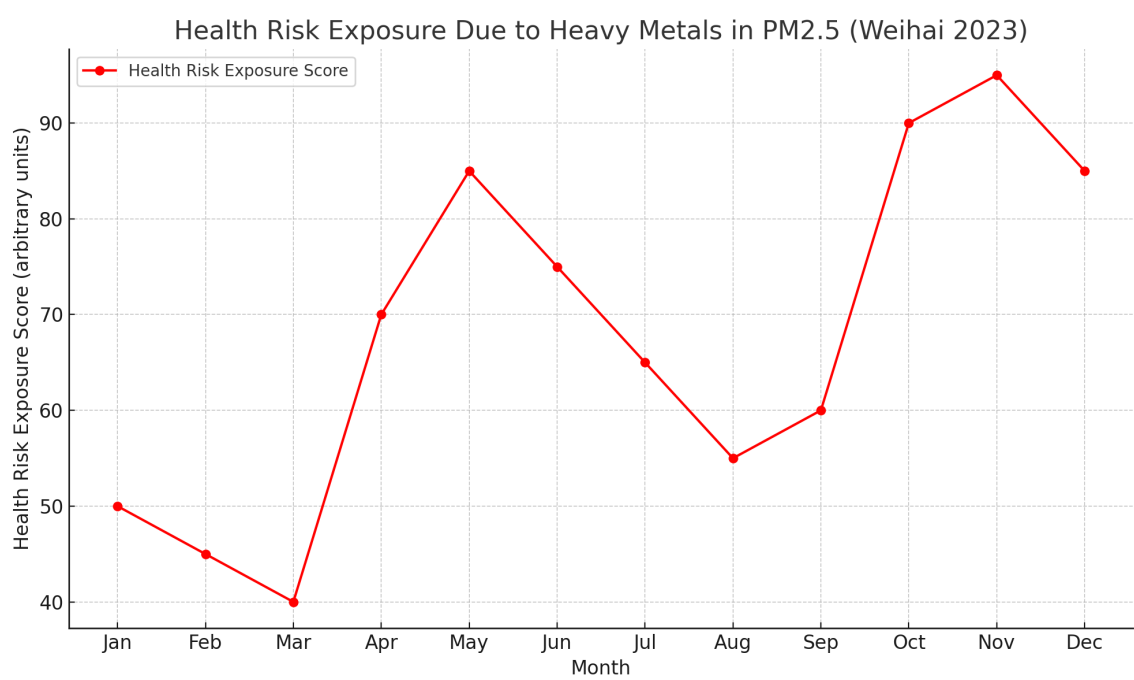


Figure 7. Health risk exposure due to heavy metals in PM_{2.5} of Weihai in 2023

图 7. 2023 年威海市 PM_{2.5} 中重金属的健康风险暴露图

图 7 显示，PM_{2.5} 的健康风险暴露得分在冬季达到了全年最高峰，尤其是 1 月和 12 月期间，由于燃煤采暖导致的 PM_{2.5} 浓度上升，使得居民的健康暴露风险显著增加。相比之下，春季和夏季的健康暴露得分较低，这与较为清洁的空气质量 and 较少的污染源有关。

1、冬季高峰期：1 月和 12 月是 PM_{2.5} 浓度和健康暴露风险的高峰期，主要原因是燃煤采暖和工业排放的双重影响。

2、夏季低谷期：夏季的 PM_{2.5} 浓度显著降低，健康暴露风险得分也相应下降，这与工业活动减少和气象条件改善有关。

高危人群分析：

1、儿童：由于儿童的免疫系统尚未完全发育，PM_{2.5} 中的有毒物质对其健康影响尤为显著，特别是重金属污染可能导致儿童智力发育障碍和呼吸系统疾病[11]。

2、老年人：老年人是 PM_{2.5} 污染的另一高危群体，特别是在冬季，PM_{2.5} 中的硫酸盐和硝酸盐等化学成分会加重心血管疾病和呼吸系统疾病的发作风险。

3、慢性病患者：长期暴露于高浓度的 PM_{2.5} 中会增加慢性病患者的发病风险，尤其是呼吸系统和心血管系统的慢性病。

综上所述，威海市的 PM_{2.5} 污染对高危人群的健康威胁尤为严重，尤其是在冬季采暖期间，PM_{2.5} 浓

度的急剧上升加剧了健康风险。因此，未来的空气质量管理政策应重点针对冬季污染高峰期，采取更严格的排放控制和公共健康保护措施。

4.5. 结果讨论

本研究的结果与国内外类似地区的研究相吻合，表明威海市的 $PM_{2.5}$ 污染来源主要受冬季燃煤采暖和工业排放的影响。在冬季，燃煤排放是 $PM_{2.5}$ 浓度升高的主要原因，尤其是硫酸盐和有机碳的浓度显著增加。这与中国北方多个城市的研究结果一致，例如，北京、天津等城市的冬季 $PM_{2.5}$ 污染也以燃煤采暖为主[12]。

此外，工业排放在全年中对 $PM_{2.5}$ 的贡献持续较高，特别是化工、冶炼等行业的污染排放。这与美国洛杉矶等工业化城市的 $PM_{2.5}$ 来源具有一定的相似性，美国环保署(EPA)通过 PMF 模型也发现工业排放是 $PM_{2.5}$ 的主要来源之一。

健康风险分析结果表明， $PM_{2.5}$ 中的重金属成分对威海市居民健康构成了显著威胁，特别是在冬季采暖期间。铅和镉等重金属对儿童、老年人和慢性病患者的健康影响尤为严重，重金属的长期暴露可能导致神经系统疾病、呼吸系统疾病和心血管疾病的发病率增加。

5. 政策建议

5.1. 针对不同污染源的控制策略

为了有效控制威海市的 $PM_{2.5}$ 污染，本文提出以下针对不同污染源的控制策略：

- 1、工业排放控制：威海市应加强对重点工业企业的排放监管，推动工业企业采用清洁生产技术，减少硫酸盐、硝酸盐及重金属的排放。
- 2、燃煤采暖替代：在冬季采暖期，建议推广使用清洁能源，如天然气或电采暖，逐步替代传统的燃煤采暖方式，减少 $PM_{2.5}$ 和硫酸盐的排放。
- 3、交通排放减量：通过发展公共交通系统、推广新能源车辆以及优化交通管理，减少机动车尾气的排放，特别是在交通高峰期，降低氮氧化物的浓度。

5.2. 改进空气质量监测和管理

为更好地应对 $PM_{2.5}$ 污染，威海市应进一步扩展其空气质量监测网络，增加监测点覆盖范围，尤其是在工业区、交通枢纽和居民密集区。此外，建议结合大数据和人工智能技术，开发更加精准的污染预测和预警系统，提高监测数据的实时性和准确性。

5.3. 公共健康保护措施

针对高危人群(如儿童、老年人、慢性病患者)，威海市应制定个性化的健康防护措施，尤其是在冬季污染高发期，建议采取以下措施：

- 1、减少户外活动：在 $PM_{2.5}$ 浓度较高的时段，建议高危人群尽量减少户外活动，并在室内使用空气净化装置。
- 2、加强健康宣传：政府应加强公众对空气污染危害的认识，推广健康防护知识，尤其是在冬季采暖期间，提醒居民做好个人防护。

6. 结论

6.1. 主要研究成果总结

本研究通过对威海市 2023 年全年 $PM_{2.5}$ 监测数据的深入分析，结合正定矩阵分解法(PMF)模型和健

康风险评估模型，揭示了 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源及其对公众健康的潜在威胁。具体研究成果如下：

1、 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空分布特征

研究表明，威海市 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度具有明显的季节性变化，冬季采暖期(1 月和 12 月)的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著升高，主要原因是居民燃煤采暖和工业排放增加。而在夏季， $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较低，气象条件(如风速、湿度)的改善对污染物扩散起到了积极作用。

2、 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源解析

通过 PMF 模型解析，冬季燃煤采暖是 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源，占冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 总浓度的 50%以上。工业排放在全年中对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献较为持续，特别是在春季和秋季，工业排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献显著增加。交通排在夏季和秋季对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献也较大，主要来源于机动车尾气排放。

3、重金属污染的健康风险评估

研究表明， $\text{PM}_{2.5}$ 中的重金属(如铅、镉和锰)对威海市居民的健康构成了显著威胁。特别是在冬季，铅和镉的浓度显著升高，这些重金属与呼吸系统和神经系统疾病的发病率增加相关。儿童、老年人和慢性病患者是最易受 $\text{PM}_{2.5}$ 污染影响的高危人群。

4、健康风险的季节性变化

健康风险评估显示，冬季的 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露风险最高，尤其是 1 月和 12 月， $\text{PM}_{2.5}$ 中的有毒有害物质对公众健康的威胁达到了全年高峰。而在春季和夏季，健康风险相对较低，这是由于污染源减少和大气扩散条件改善。

6.2. 改进与差异

与国内外相关研究相比，本研究在以下方面具有显著差异和改进：

1、研究数据的广泛性与精度

本研究基于威海市全年逐小时的高分辨率监测数据，全面覆盖了不同季节的污染特征。这一数据规模和时空覆盖显著高于以往大多数仅聚焦单一季节或短期监测的研究，避免了短期数据可能带来的偏差，使得解析结果更具代表性和精确性。

2、多维度综合分析

通过将正定矩阵分解法(PMF)模型与健康风险评估模型相结合，本研究首次全面揭示了威海市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的动态变化和区域性特征。在污染源解析方面，定量分析了燃煤采暖、工业排放和交通排放在不同季节的相对贡献；在健康风险方面，量化了 $\text{PM}_{2.5}$ 成分(尤其是重金属铅和镉等)对高危人群(儿童、老年人和慢性病患者)健康威胁的具体影响。这种多维度的综合分析改进了以往研究中对 $\text{PM}_{2.5}$ 总量分析的局限性，为污染控制提供了科学依据。

3、政策指导的针对性

本研究结合威海市区域特性和季节性污染规律，提出了切实可行的政策建议，包括清洁能源替代燃煤采暖、工业排放监管和高危人群的健康保护等。这些建议充分考虑了威海市作为沿海城市的特殊污染来源及其对健康的潜在影响，具有更强的实践指导意义，不仅适用于威海，还可为类似沿海城市提供政策借鉴。

6.3. 政策启示与研究展望

6.3.1. 政策启示

基于研究结果，本研究提出以下针对威海市污染控制和健康管理的政策建议：

1、推进冬季清洁能源替代

冬季燃煤采暖是威海市 $\text{PM}_{2.5}$ 的主导污染源。建议通过政府补贴、政策扶持等方式，推广天然气、电力等清洁能源替代传统燃煤采暖，同时引入高效低排放的燃烧设备以降低污染物排放。

2、强化工业和交通排放治理

全年工业排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献持续显著，特别是在非采暖季。建议加强对重点工业企业(如冶炼、化工等)的排放监管，推行清洁生产技术，并制定行业排放限额。此外，交通排在夏季和秋季影响显著，需加快新能源车辆的推广，优化交通结构和管理，降低机动车尾气污染。

3、加强高危人群的健康保护

针对儿童、老年人等高危人群，政府应优化医疗资源配置，加强空气污染对健康危害的宣传教育，鼓励使用室内空气净化装置，并在 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度时期减少户外活动。同时，在重污染天气下应完善健康预警系统，提供个性化防护指导。

6.3.2. 研究展望

1、长时间尺度研究

未来研究应结合多年的 $\text{PM}_{2.5}$ 监测数据，分析长期污染趋势及其与气候变化的关系，特别是探讨长期气候因子对污染源贡献率和健康风险的影响，为制定更具前瞻性的污染控制政策提供支持。

2、跨区域污染传输分析

威海市作为沿海城市，其空气质量可能受到邻近区域和国际污染物传输的显著影响。未来可结合区域空气质量模型(如 CMAQ 或 WRF-Chem)，量化外来污染对威海市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献，评估跨区域污染传输的健康风险。

3、精细化健康风险评估

开发更细化的健康风险评估模型，将个体暴露、职业差异和健康基础状况纳入模型框架，特别是针对高危人群的长期暴露研究。此外，可进一步分析不同污染源对重金属、挥发性有机物(VOCs)等毒性成分健康风险的相对贡献，为公共卫生政策提供精准数据支持。

参考文献

- [1] World Health Organization (WHO) (2021) Ambient (Outdoor) Air Pollution.
- [2] Brauer, M., et al. (2015) Ambient Air Pollution Exposure Estimation for the Global Burden of Disease 2013. *Environmental Science & Technology*, **49**, 416-422.
- [3] U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2009) Air Quality Criteria for Particulate Matter. National Center for Environmental Assessment.
- [4] Amato, F., et al. (2016) Air Quality Characterization and Source Apportionment in a Heavily Polluted City in Central Italy. *Environmental Pollution*, **218**, 326-335.
- [5] Peng, R.D., et al. (2009) Evidence of $\text{PM}_{2.5}$ on the Short-Term Effects of Cardiovascular and Respiratory Diseases: A Systematic Review. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, **19**, 473-482.
- [6] Chen, R., et al. (2013) Associations between Coarse Particles and Daily Mortality in Three Chinese Cities. *Environmental Health Perspectives*, **121**, 1183-1188.
- [7] European Environment Agency (EEA) (2018) Europe's Air Quality—What's the Impact on Our Health? EEA Report No 12/2018.
- [8] Zhang, Q., et al. (2019) Chemical Composition and Sources of $\text{PM}_{2.5}$ in Suburban Areas of Northern China: Implications for Controlling Heavy Pollution Episodes. *Environmental Science & Technology*, **53**, 2018-2027.
- [9] Wang, S. and Hao, J. (2012) Air Quality Management in China: Issues, Challenges, and Options. *Journal of Environmental Sciences*, **24**, 2-13. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(11\)60724-9](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(11)60724-9)
- [10] Liu, H., et al. (2017) Source Apportionment and Health Risk Assessment of $\text{PM}_{2.5}$ -Bound Metals in the Urban Atmosphere of Changsha, China. *Atmospheric Research*, **185**, 166-175.
- [11] Tian, Y., et al. (2019) Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai, China. *Science of the Total Environment*, **630**, 219-226.
- [12] Wang, Y., et al. (2021) Seasonal Variations and Health Risks of $\text{PM}_{2.5}$ -Bound Heavy Metals in Beijing. *Journal of Hazardous Materials*, **401**, Article 123763.