

2014~2025年呼和浩特市污染物浓度与气象因子关系

赵 旭, 柳乾乾*

内蒙古工业大学理学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2026年6月16日; 录用日期: 2026年7月18日; 发布日期: 2026年7月28日

摘 要

当前我国城市空气污染治理与环境监测工作亟需科学量化污染物浓度与气象因子的内在关系。本文以2014~2025年呼和浩特市污染物PM_{2.5}、PM₁₀、O₃浓度与气象因子的实际环境监测数据为基础, 构建多元线性回归模型, 对二者的定量关系开展研究。结果表明, 温度、相对湿度、风速、气压等气象因子对污染物PM_{2.5}、PM₁₀和O₃的浓度具有显著影响, 不同气象因子与污染物之间存在稳定的线性相关关系, 且气象条件的季节变化与空间差异会导致影响强度存在明显区别。该研究方法可为空气质量预测、监测数据校准及污染防控决策提供量化依据与方法支撑, 对提升城市环境管理水平具有一定的现实意义。

关键词

污染物浓度, 气象因子, 多元线性回归, 最小二乘法, 空气质量

Relationship between Pollutant Concentrations and Meteorological Factors in Hohhot from 2014 to 2025

Xu Zhao, Qianqian Liu*

College of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot Inner Mongolia

Received: June 16, 2026; accepted: July 18, 2026; published: July 28, 2026

Abstract

Against the background of urban air pollution control and environmental monitoring in China, it is

*通讯作者。

文章引用: 赵旭, 柳乾乾. 2014~2025 年呼和浩特市污染物浓度与气象因子关系[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(7): 1285-1297. DOI: 10.12677/aep.2026.167129

urgent to scientifically quantify the relationship between pollutant concentration and meteorological factors. Based on actual environmental monitoring data of PM_{2.5}, PM₁₀, O₃ and meteorological factors in Hohhot from 2014 to 2025, we establish a multiple linear regression model to study their quantitative correlation. It turns out that temperature, relative humidity, wind speed, air pressure and other meteorological factors have significant impacts on the concentration of pollutants such as PM_{2.5}, PM₁₀ and O₃. There exists a stable linear correlation between different meteorological factors and pollutants, and the influence intensity varies obviously with seasonal changes and spatial differences of meteorological conditions. It can provide quantitative basis and methodological support for air quality prediction, monitoring data calibration and pollution prevention decision-making, and has practical significance for improving urban environmental management.

Keywords

Pollutant Concentration, Meteorological Factors, Multiple Linear Regression, Least Squares Method, Air Quality

Copyright © 2026 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

伴随生态意识提升,环境问题越来越多地受到社会各界的关注。大气颗粒物(PM)对人类健康的危害引起了世界范围内的高度关注[1],其中PM₁₀和PM_{2.5}对人类健康的危害尤为显著[2]。研究表明[3]全球95%人口居住地的PM_{2.5}水平超过WHO的年平均目标值10 μg/m³。臭氧是另一种对公众健康、生态系统、农作物等具有重要影响的大气污染物[4]-[6],已成为制约环境空气质量持续改善的主要瓶颈[7]-[9]。因此,大气污染物(PM_{2.5}、PM₁₀和臭氧)浓度的监测研究和防控显得尤为重要。

气象因子对空气质量的影响分析是多元线性回归在环境科学中的一个重要应用。运用多元线性回归分析方法搭建模型,通过模型解析气象条件对污染物浓度的影响机制,可以把区域气象对大气污染的驱动作用揭示出来,也能给后续在区域内开展大气污染物的短期预警、制定更精细化的污染防控政策提供一个更严谨的科学依据[2]。王猛,代立芹,许莹等[10]基于2015~2023年的空气污染物(PM_{2.5}, PM₁₀, O₃等)和气象条件(温度、湿度、风速、气压等)数据,采用相关性分析、多元回归模型等方法,系统探讨了气象条件与污染物浓度的耦合关系。郑书瑶,段琳和刘心洁[11]使用相关性分析和主观天气分型研究了空气污染特征及其气象条件,得到了影响抚州城区的主要大气污染物为O₃、PM₁₀和PM_{2.5}等。基于深圳市2017~2020年空气质量监测数据,通过构建多元线性回归模型,陈聪[12]发现PM_{2.5}和O₃对于空气质量指数的贡献度显著高于二氧化氮,揭示了不同污染物的差异化影响机制。许晶,杨海迪,李国栋等[13]利用2019~2023年鄂尔多斯市空气质量监测资料和气象资料分析得到鄂尔多斯市首要污染物主要以PM₁₀和O₃为主;从相关性分析得出,鄂尔多斯市空气质量与气压、最小相对湿度呈负相关,与气温、风速呈正相关,影响鄂尔多斯市空气质量的主要因子是气压、气温、最小相对湿度和风速。张岚晶,张岚彪,李佳燕[14]基于2018~2019年呼和浩特市中心城区空气质量实时监测系统空气污染物浓度数据与同期气象数据研究得到呼和浩特市中心城区主要空气污染物(PM_{2.5}、PM₁₀、O₃和NO₂)分布特点及与气象因子的关系。周琳,井瑾,赵丹娅等[15]基于2020年多源监测数据,结合HYSPLIT模型、后向轨迹聚类及潜在源贡献分析,系统解析了巴彦淖尔市PM₁₀、PM_{2.5}、O₃等污染物的时空分布特征、气象耦合机

制及区域传输路径。赵崇志[16]以大理市 2017~2021 年大理市两个环境空气自动监测点和大理市气象站的监测数据为基础, 统计分析 PM_{2.5}、O₃ 和气象因子的年际和干雨季节变化趋势及相关性, 探讨主要影响大理市 PM_{2.5}、O₃ 变化的因子。汪泉旭[17]依托 2022 年天山北坡城市群 32 个监测站点的大气监测数据, 结合克里金插值、空间自相关分析与广义可加模型, 探讨了 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 O₃ 的时空分布特征及其与气象因子的响应关系。

本文以呼和浩特市 2014~2025 年三种污染物 PM₁₀、PM_{2.5} 和 O₃ 浓度和气象因子数据为基础, 基于 Python 环境完成数据预处理、开展污染物浓度与气象因子的多元线性回归分析建模、通过多实例对比, 验证多元线性回归模型在不同场景下的适用性, 分析气象因子对不同污染物浓度的影响特征, 为该区域污染物浓度的预测与管控提供数据支撑和理论参考。

2. 数据来源及方法

2.1. 数据来源

研究所用的 2014~2025 年呼和浩特市空气中的三种污染物 PM₁₀、PM_{2.5} 和 O₃ 浓度逐日/月度空气质量监测数据来源于 AQICN 实时空气质量平台呼和浩特站点[18], 气象因子数据来源于哥白尼气候变化服务(C3S)ERA5 全球大气再分析数据[19]。数据均经过初步筛选, 剔除异常值、缺失值等无效数据, 确保分析数据的可靠性和完整性。

2.2. 数据预处理

为确保多元线性回归分析的准确性, 需对原始数据进行预处理, 主要包括缺失值处理、异常值处理、数据标准化三个环节。经统计, PM₁₀、PM_{2.5} 和 O₃ 浓度的样本总量分别是 4444 条, 全样本共 $3 \times 4444 = 13,332$ 条观测数据, 缺失值和异常值具体信息见表 1。PM_{2.5} 和 PM₁₀ 缺失样本与异常样本数量比较少, 占样本量至多 1.37%; 而 O₃ 样本缺失最为严重, 缺失率为 19.49%, 缺失为随机缺失, 不存在系统性数据遗漏。样本缺失总计 896 条, 占整体样本的 6.72%, 3σ 异常样本总计 137 条, 占整体的 1.03%。对于 6 个气象因子(十米相对风速、两米气温、两米相对湿度、降水量、地面气压均值和边界层高度)的数据, 采取相同的统计方式, 得到变量 25 个, 缺失总计 205 条, 占样本总量 0.19%; 3σ 异常值共 562 条, 占样本总量的 0.51%。对于缺失值的处理, 主要采用线性插值法对原始数据中的缺失值进行补充, 避免缺失值对回归分析结果产生干扰。通过 3σ 原则识别原始数据中的异常值, 对异常值进行核实后, 采用剔除异常值的方式处理, 确保数据的合理性。

Table 1. Table of missing values and outliers of three pollutants

表 1. 3 种污染物的缺失值和异常值统计表

变量	有效样本	缺失样本	缺失率(%)	3σ 异常数	3σ 异常率(%)
PM _{2.5}	4428	16	0.36	47	1.06
PM ₁₀	4430	14	0.32	61	1.37
O ₃	3578	866	19.49	29	0.65

由于三种污染物浓度与气象因子的计量单位不同(PM₁₀、PM_{2.5} 和 O₃ 浓度单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 气温单位为 $^{\circ}\text{C}$), 为消除量纲影响, 采用 Z-score 标准化方法对所有变量数据进行标准化处理, 标准化后的数据用于后续回归模型构建[20]。数据预处理完成后, 得到复合多元线性回归分析要求的 PM₁₀、PM_{2.5} 和 O₃ 数据, 并且得到相应的预处理图表。污染物 PM₁₀、PM_{2.5} 和 O₃ 浓度月均值时间序列和年度 - 月度热力图

分别见图 1~3, 单位是 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

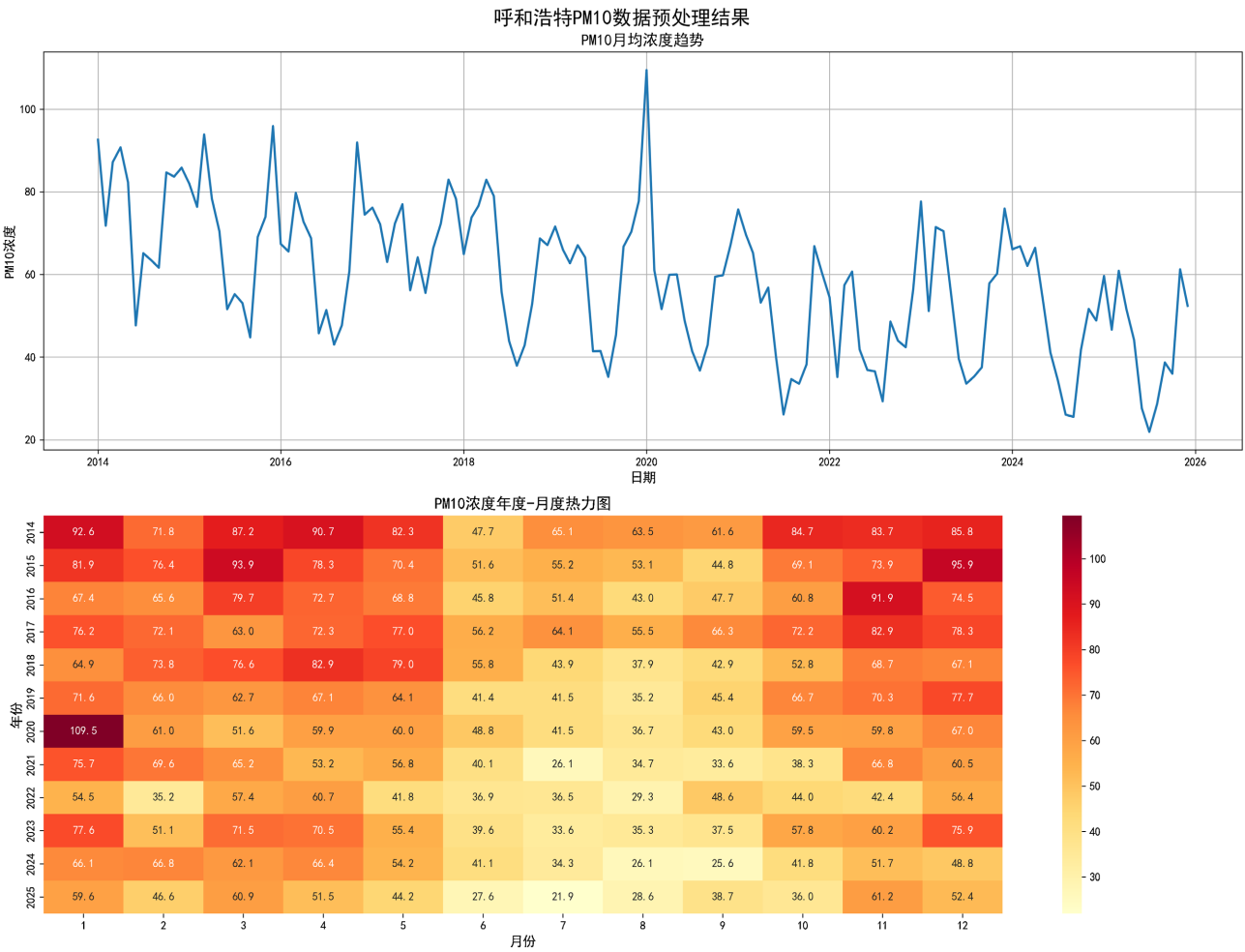
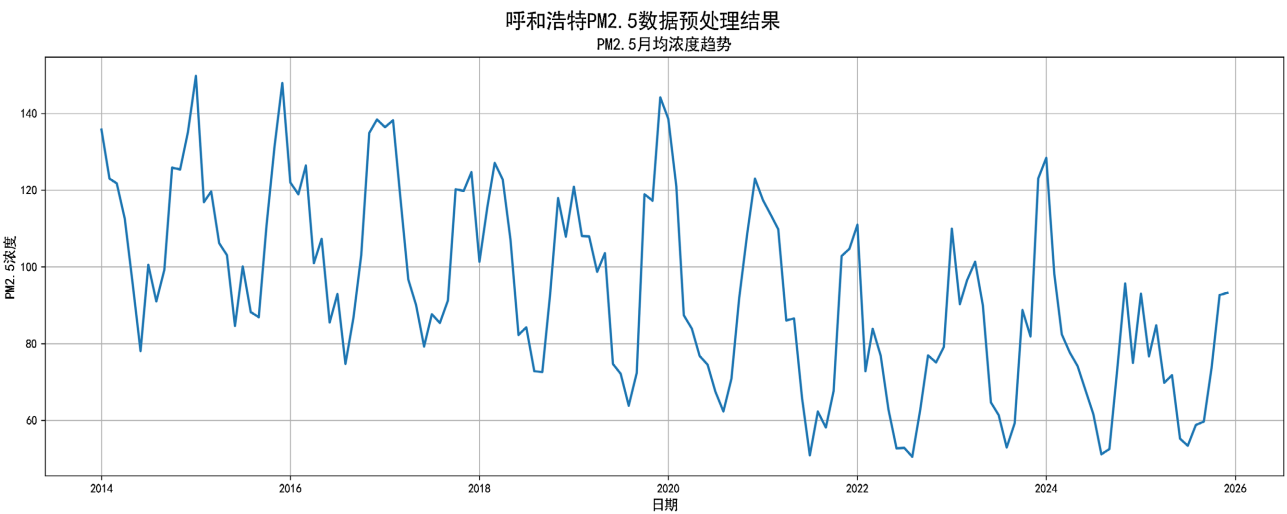


Figure 1. Time series of monthly average PM10 concentration and annual-monthly heatmap from 2014 to 2025 in Hohhot
图 1. 2014~2025 年呼和浩特市 PM10 浓度月均值时间序列及年度 - 月度热力图



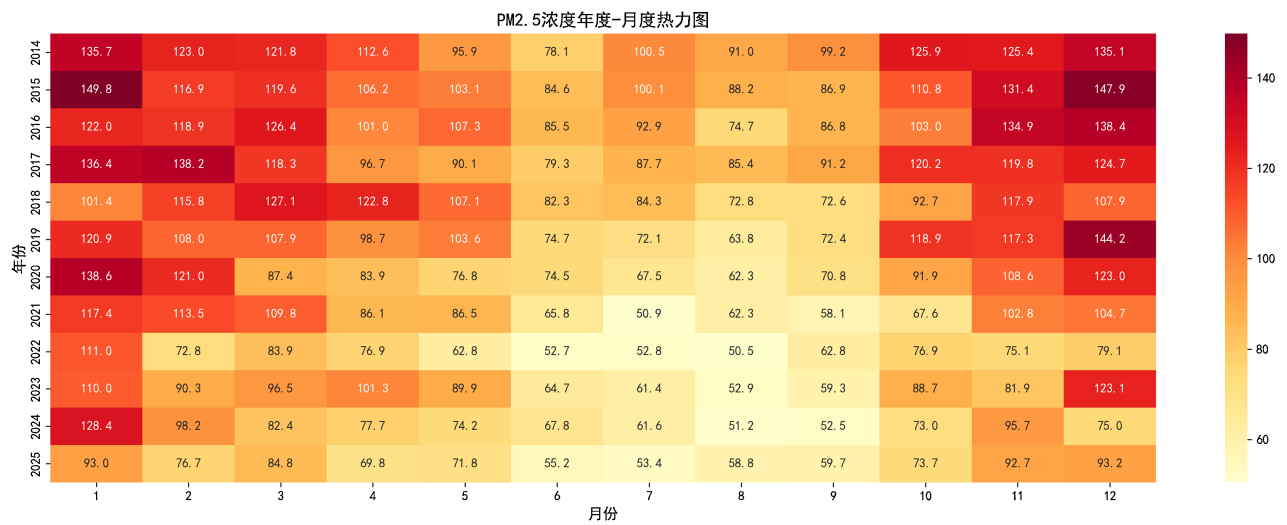


Figure 2. Time series of monthly average PM2.5 concentration and annual-monthly heatmap from 2014 to 2025 in Hohhot
图 2. 2014~2025 年呼和浩特市 PM2.5 浓度月均值时间序列及年度 - 月度热力图

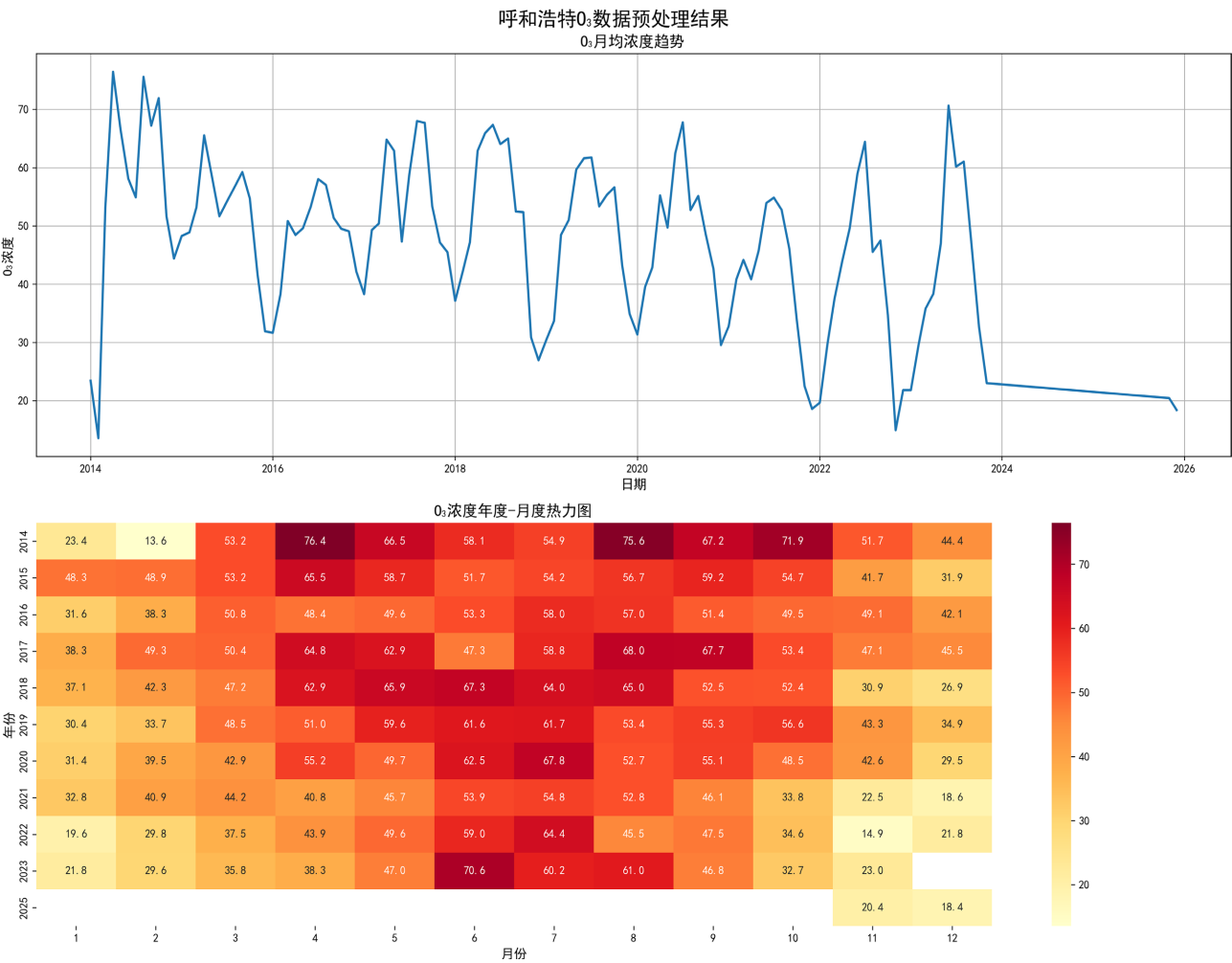


Figure 3. Time series of monthly average O₃ concentration and annual-monthly heatmap from 2014 to 2025 in Hohhot
图 3. 2014~2025 年呼和浩特市 O₃ 浓度月均值时间序列及年度 - 月度热力图

3. 多元线性回归模型建构与结果分析

本节选取十米相对风速均值, 两米气温均值, 两米相对湿度均值, 降水量, 地面气压均值, 边界层高度六个气象因子作为自变量, 分别把三种污染物 PM10、PM2.5 和 O₃ 浓度作为因变量, 基于 Python 环境开展污染物浓度与气象因子的多元线性回归分析。根据 Python 的分析结果得到了气象因子对呼和浩特市 PM10 浓度的影响规律, 并针对性地提出污染物防控建议。

3.1. PM10 浓度与气象因子的多元线性回归分析

选取 PM10 浓度作为因变量(Y_1), 选取十米相对风速均值(x_1), 两米气温均值(x_2), 两米相对湿度均值(x_3), 降水量(x_4), 地面气压均值(x_5), 边界层高度(x_6)六个气象因子作为自变量。基于预处理后的标准化数据, 构建的多元线性回归模型, 基本形式如下:

$$Y_1 = 1504.6963 - 3.5189x_1 - 1.4154x_2 - 0.0749x_3 - 0.4973x_4 - 1.5961x_5 - 0.0024x_6 + \varepsilon_1$$

通过 Python 软件开展多元线性回归分析, 依托 statsmodels 库调用 OLS (普通最小二乘法)方法构建模型, 输出模型拟合优度、回归系数、显著性检验等结果, 同时利用 pandas 库对结果进行整理分析, 具体如表 2~4 所示。

Table 2. Regression analysis results of the impact of meteorological factors on PM10 concentration variation
表 2. 气象因子对 PM10 浓度变化的回归分析结果

	未标准化系数	标准错误	标准化系数	T 值	显著性
(常量)	1504.6963	105.6880		14.2372	0.0000
10 米风速(m/s)	-3.5189	0.6337	-0.0932	-5.5534	0.0000
2 米气温(℃)	-1.4154	0.0679	-0.4754	-20.8598	0.0000
2 米相对湿度(%)	-0.0749	0.0359	-0.0512	-2.0893	0.0368
降水量(mm)	-0.4973	0.1270	-0.0715	-3.9161	0.0001
地面气压(hPa)	-1.5961	0.1179	-0.2992	-13.5349	0.0000
边界层高度	-0.0024	0.0006	-0.0636	-4.1118	0.0000

Table 3. R-test fitting results of regression model of PM10 concentration affected by meteorological factors
表 3. PM10 浓度受气象因子影响回归模型 R 检验拟合结果

模型	R	R 方	调整后的 R 方	标准估算的错误
1	0.4041	0.1633	0.1621	28.0549

Table 4. F-test results of multiple linear regression model between PM10 and meteorological factors
表 4. PM10 与气象因子多元线性回归模型的 F 检验结果

模型		平方和	自由度	均方	F	显著性
1	回归	676,773.1	6	112795.5	143.3098	0.000
	残差	3,416,690	4341	787.0745		
	总计	4,083,546	4347			

3.2. PM10 影响强度及回归模型各项指标结果分析

图 4 为 PM10 浓度多元线性回归模型拟合效果与气象因子影响强度分析图, 其中左上为 PM10 浓度

实测值与模型预测值时间序列对比, 右上为预测精度散点图(红色虚线为理想预测线), 左下为模型残差分布直方图, 右下为各气象因子标准化系数影响强度柱状图。

基于 Python 的分析结果可见, 模型通过显著性检验($P < 0.05$), 具备良好的拟合效果, 可有效解释气象因子对呼和浩特市 PM10 浓度的影响规律。根据表 1~3 可得各气象因子对 PM10 浓度呈负相关, 影响如下: 风速较大时, 颗粒物扩散速度更快, 能有效降低空气中 PM10 浓度; 气温升高会增强大气湍流与分子运动, 让 PM10 更易扩散稀释; 较高湿度能使细颗粒物吸湿凝结沉降, 同时抑制地面扬尘产生; 降水对 PM10 有显著清除效果, 雨水冲刷可直接降低其浓度; 高压系统常伴随静稳天气, 不利于 PM10 扩散; 边界层高度越高, 大气容纳和扩散污染物的空间越大, PM10 浓度也就相对更低[7]。

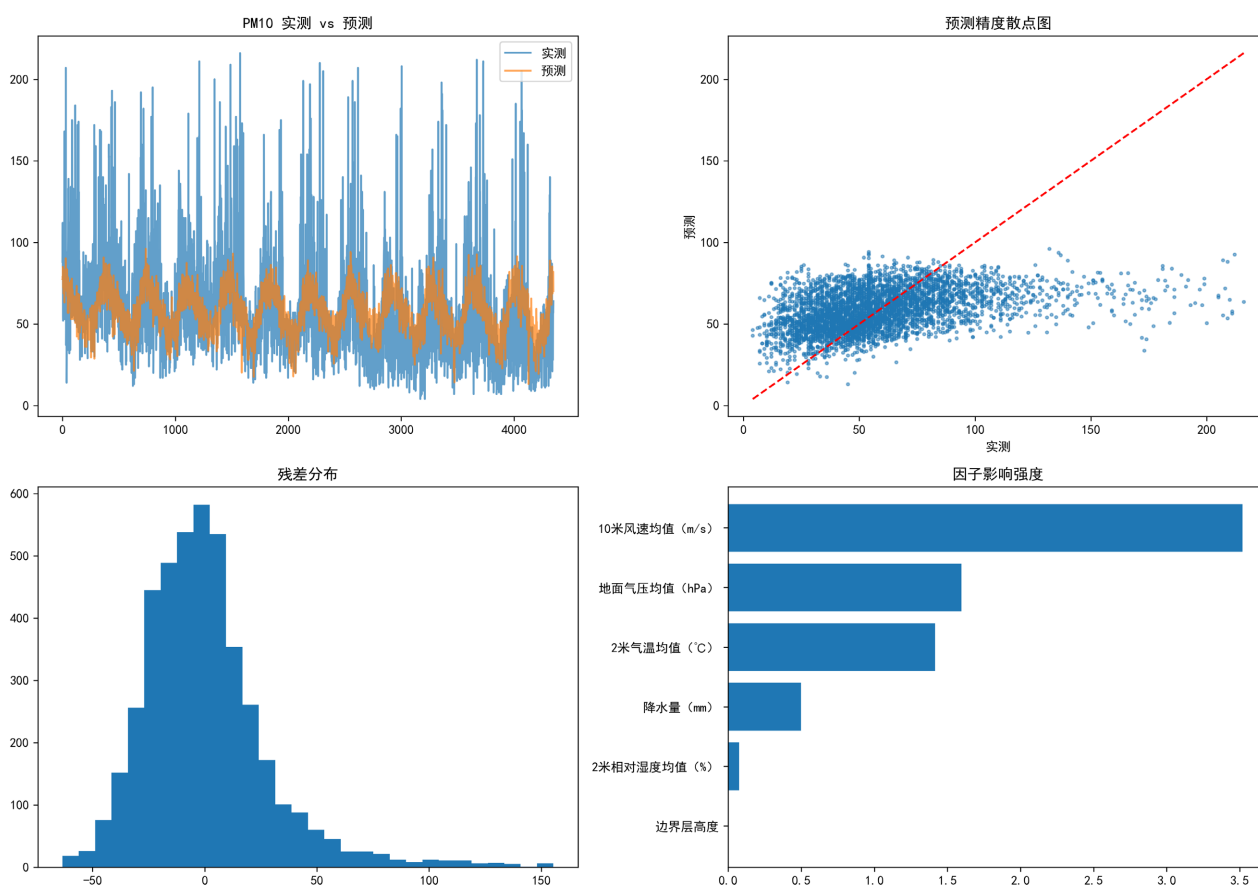


Figure 4. Analysis of the fit of the PM10 concentration multiple linear regression model and the influence intensity of meteorological factors (Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

图 4. PM10 浓度多元线性回归模型拟合效果与气象因子影响强度分析图(单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

3.3. PM2.5 浓度与气象因子的多元线性回归分析

选取 PM2.5 浓度作为因变量(Y_1), 选取十米相对风速均值(x_1), 两米气温均值(x_2), 两米相对湿度均值(x_3), 降水量(x_4), 地面气压均值(x_5), 边界层高度(x_6)六个气象因子作为自变量。基于预处理后的标准化数据, 构建的多元线性回归模型, 基本形式如下:

$$Y_1 = 2892.1486 - 3.2499x_1 - 2.6856x_2 + 0.6429x_3 - 0.9368x_4 - 3.1416x_5 - 0.0037x_6 + \varepsilon_1$$

通过 Python 软件开展多元线性回归分析, 依托 statsmodels 库调用 OLS 方法构建模型, 输出模型拟

合优度、回归系数、显著性检验等结果, 同时利用 pandas 库对结果进行整理分析, 结果如表 5~7 所示。

Table 5. Regression analysis results of the impact of meteorological factors on PM2.5 concentration variation
表 5. 气象因子对 PM2.5 浓度变化的回归分析结果

	未标准化系数	标准错误	标准化系数	T 值	显著性
(常量)	2892.1486	130.4185		22.1759	0.0000
10 米风速(m/s)	-3.2499	0.7825	-0.0519	-4.1534	0.0000
2 米气温(°C)	-2.6856	0.0835	-0.6941	-32.1817	0.0000
2 米相对湿度(%)	0.6429	0.0438	0.2714	14.6825	0.0000
降水量(mm)	-0.9368	0.1608	-0.0992	-5.8262	0.0000
地面气压(hPa)	-3.1416	0.1455	-0.4401	-21.5981	0.0000
边界层高度	-0.0037	0.0007	-0.0773	-5.2593	0.0000

Table 6. R-test fitting results of regression model of PM2.5 concentration affected by meteorological factors
表 6. PM2.5 浓度受气象因子影响回归模型 R 检验拟合结果

模型	R	R 方	调整后的 R 方	标准估算的错误
2	0.5117	0.2619	0.2608	34.1834

Table 7. F-test results of multiple linear regression model between PM2.5 and meteorological factors
表 7. PM2.5 与气象因子多元线性回归模型的 F 检验结果

模型		平方和	自由度	均方	F	显著性
2	回归	1,889,156	6	314,859.3	269.4547	0.000
	残差	5,072,483	4341	1168.506		
	总计	6,871,963	4347			

3.4. PM2.5 影响强度及回归模型各项指标结果分析

图 5 为 PM2.5 浓度多元线性回归模型拟合效果与气象因子影响强度分析图, 其中左上为 PM2.5 浓度实测值与模型预测值时间序列对比, 右上为预测精度散点图(红色虚线为理想预测线), 左下为模型残差分布直方图, 右下为各气象因子标准化系数影响强度柱状图。

基于 Python 的分析结果可见, 模型通过显著性检验($P < 0.05$), 具备良好的拟合效果, 可有效解释气象因子对呼和浩特市 PM2.5 浓度的影响规律; 根据表 4~6 可得各气象因子的回归系数与显著性结果: 风速与 PM2.5 浓度大致呈负相关关系, 风速越大, 空气对流和扩散作用越强, PM2.5 浓度往往越低; 温度同样与 PM2.5 浓度呈负相关, 气温升高会增强大气对流, 更有利于污染物的扩散与稀释; 湿度则与 PM2.5 浓度呈正相关, 湿度较高时, 颗粒物容易吸湿增长, 二次生成增强, 导致 PM2.5 浓度有所上升; 降水对 PM2.5 有明显的冲刷清除作用, 因此二者也呈负相关; 气压方面, 气压偏高时常伴随静稳天气, 不利于污染物扩散, 所以气压与 PM2.5 浓度同样呈负相关; 边界层高度也与 PM2.5 浓度呈负相关, 边界层高度越高, 大气容纳和扩散污染物的空间越大, PM2.5 浓度也就相对更低。

3.5. O₃ 浓度与气象因子的多元线性回归分析

选取 O₃ 浓度作为因变量(Y_1), 选取十米相对风速均值(x_1), 两米气温均值(x_2), 两米相对湿度均值(x_3),

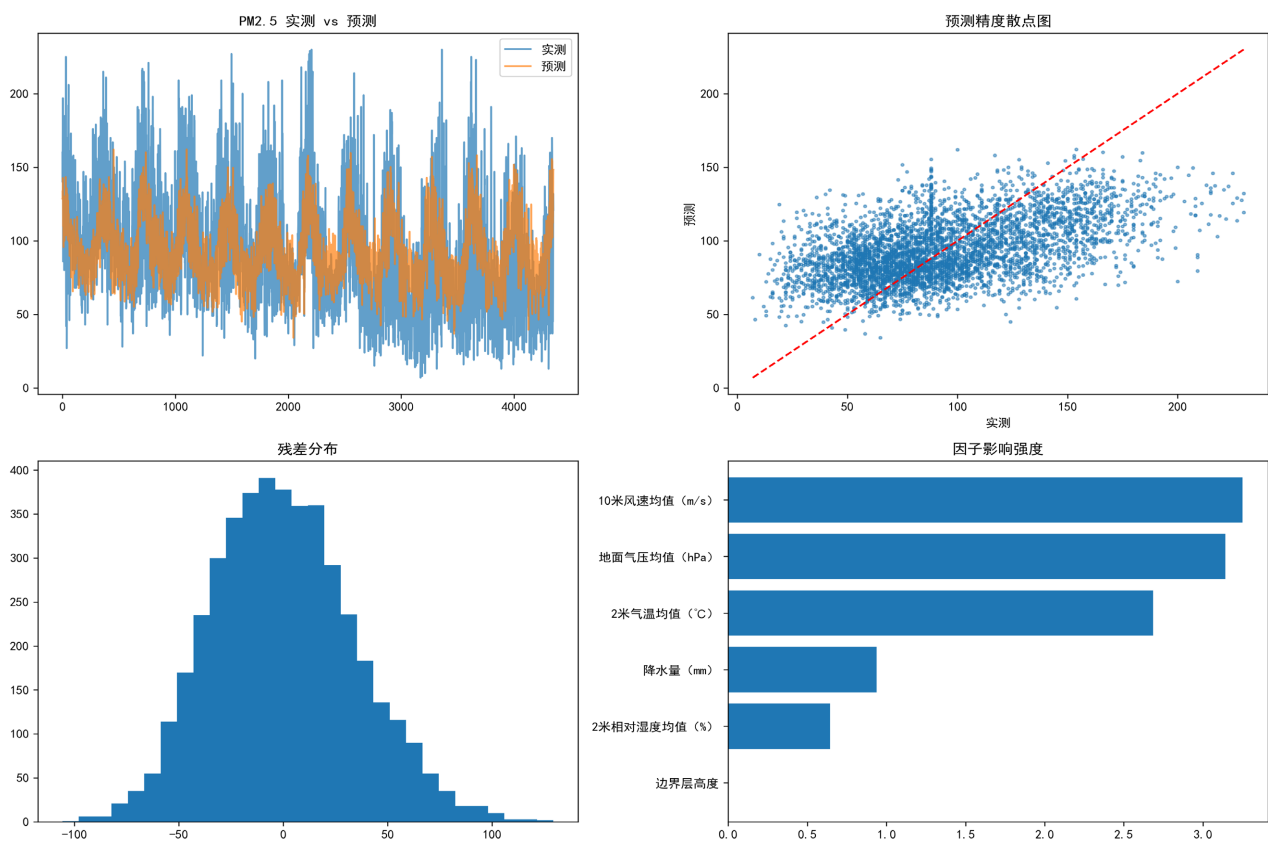


Figure 5. Analysis of the fit of the PM2.5 concentration multiple linear regression model and the influence intensity of meteorological factors (Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

图 5. PM2.5 浓度多元线性回归模型拟合效果与气象因子影响强度分析图(单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

降水量(x_4), 地面气压均值(x_5), 边界层高度(x_6)六个气象因子作为自变量。基于预处理后的标准化数据, 构建的多元线性回归模型, 基本形式如下:

$$Y_1 = 175.5614 - 0.5417x_1 + 1.0276x_2 - 0.1883x_3 - 0.0538x_4 - 0.1328x_5 - 0.0019x_6 + \varepsilon_1$$

通过 Python 软件开展多元线性回归分析, 依托 statsmodels 库调用 OLS 方法构建模型, 输出模型拟合优度、回归系数、显著性检验等结果, 同时利用 pandas 库对结果进行整理分析, 具体如表 8~10 所示。

Table 8. Regression analysis results of the impact of meteorological factors on O_3 concentration variation
表 8. 气象因子对 O_3 浓度变化的回归分析结果

	未标准化系数	标准错误	标准化系数	T 值	显著性
(常量)	175.5614	74.6104		2.3530	0.0187
10 米风速(m/s)	-0.5417	0.4353	-0.0001	-1.2443	0.2135
2 米气温($^{\circ}\text{C}$)	1.0276	0.0474	0.5313	21.6875	0.0000
2 米相对湿度(%)	-0.1883	0.0244	-0.1480	-7.7084	0.0000
降水量(mm)	-0.0538	0.0942	-0.0126	-0.5710	0.5680
地面气压(hPa)	-0.1328	0.0832	-0.0392	-1.5964	0.1105
边界层高度	-0.0019	0.0004	-0.0719	-4.6775	0.0000

Table 9. R-test fitting results of regression model of O₃ concentration affected by meteorological factors
表 9. O₃ 浓度受气象因子影响回归模型 R 检验拟合结果

模型	R	R 方	调整后的 R 方	标准估算的错误
1	0.5314	0.2824	0.2812	17.0698

Table 10. F-test results of multiple linear regression model between O₃ and meteorological factors
表 10. O₃ 与气象因子多元线性回归模型的 F 检验结果

模型		平方和	自由度	均方	F	显著性
1	回归	402445.9	6	67074.31	230.1962	0.000
	残差	1031190	3539	291.3788		
	总计	1437073	3545			

3.6. O₃ 影响强度及回归模型各项指标结果分析

图 6 为 O₃ 浓度多元线性回归模型拟合效果与气象因子影响强度分析图, 其中左上为 O₃ 浓度实测值与模型预测值时间序列对比, 右上为预测精度散点图(红色虚线为理想预测线), 左下为模型残差分布直方图,

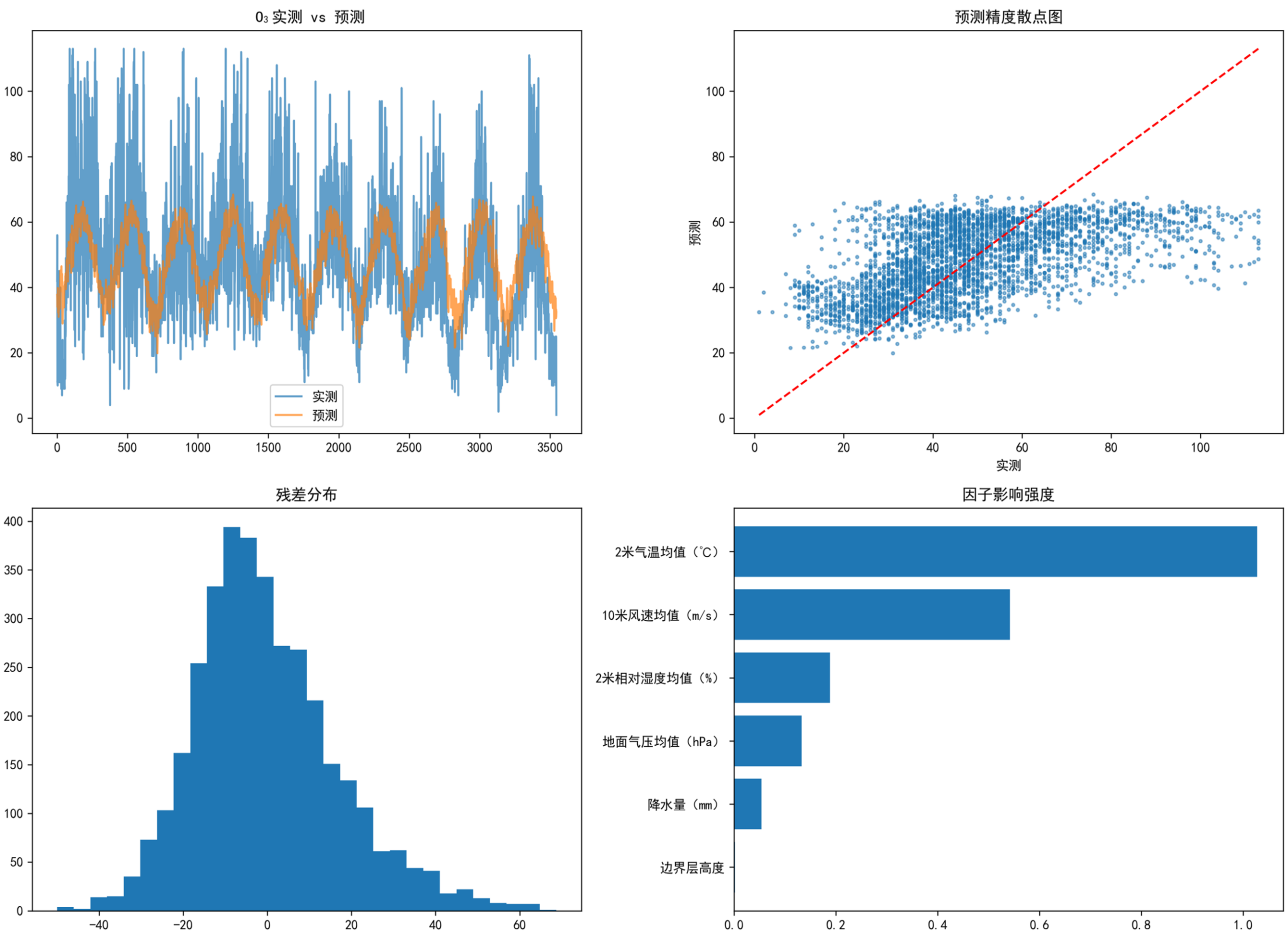


Figure 6. Analysis of the fit of the O₃ concentration multiple linear regression model and the influence intensity of meteorological factors (Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
图 6. O₃ 浓度多元线性回归模型拟合效果与气象因子影响强度分析图(单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

右下为各气象因子标准化系数影响强度柱状图。

基于 Python 的分析结果可见, 模型通过显著性检验($P < 0.05$), 具备良好的拟合效果, 可有效解释气象因子对呼和浩特市 O_3 浓度的影响规律; 各气象因子的回归系数与显著性结果, 如: 温度与臭氧浓度整体呈正相关, 气温升高会加快光化学反应速率, 更有利于臭氧的生成与积累。湿度则与臭氧浓度呈负相关, 空气湿度较大时, 会在一定程度上抑制光化学反应, 从而减少臭氧生成。边界层高度同样与臭氧浓度呈负相关, 边界层越高, 大气扩散条件越好, 臭氧越不容易聚集, 浓度相应更低。风速、降水量、地面气压对 O_3 浓度无显著线性影响, 主要因多因子对冲效应、短时降水事件被日均值平滑所致。比如风速对臭氧存在双重作用: 大风一方面扩散稀释臭氧(负效应), 另一方面输送周边工业、机动车臭氧前体物(正效应), 两种作用相互抵消, 最终线性相关不显著; 降雨有湿沉降清除臭氧的作用, 但降雨事件属于短时离散过程, 使用日均值平滑后, 单日平均降水量数值普遍偏小, 稀释清除效应被平均弱化, 长期逐日尺度线性关系不明显, 因此不显著; 气压间接反映环流、垂直下沉运动, 属于间接气象因子, 对臭氧无直接、稳定的线性驱动; 仅在极端高低压天气才有明显影响, 全年日均尺度下线性关联微弱, 所以相关性不显著。

4. 结论

基于呼和浩特市的气象与污染物数据, 本文通过多元线性回归方法分析了气象因子对 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 O_3 三种典型空气污染物浓度的影响。整体来看, 三个模型均通过了 F 检验($P < 0.05$), 说明气象因子与污染物浓度之间存在统计学意义上的线性关系, 反映了污染物浓度整体呈下降趋势, 这符合区域大气环境治理与气象条件协同改善的大背景。从解释能力来看, O_3 模型的 R^2 值为 0.2824, 意味着气象因子能解释约 28% 的 O_3 浓度变化, 在三者中表现最好; $PM_{2.5}$ 模型次之, R^2 为 0.2619; PM_{10} 模型最弱, R^2 仅为 0.1633。从预测精度来看, O_3 模型的 RMSE 为 17.07, 远低于 PM_{10} 的 28.05 和 $PM_{2.5}$ 的 34.18, 说明对 O_3 浓度的预测最准确。这种差异的产生与污染物的自身特性密切相关。 O_3 是气态污染物, 其生成主要依赖光化学反应, 而这一过程受温度、湿度等气象条件直接调控, 所以气象因子的解释度最高。 $PM_{2.5}$ 虽然是颗粒物, 但部分来自二次转化过程, 气象因子的影响仍然明显但略低于 O_3 。 PM_{10} 则更多来自扬尘等一次排放, 受建筑施工、道路扬尘等人为活动影响更大, 因此气象因子只能解释其变化的一小部分。

研究识别了六个核心气象因子: 10 米风速、2 米气温、2 米相对湿度、降水量、地面气压和边界层高度。它们对不同污染物的影响方向和强度存在共性与差异。在共性方面, 风速、降水量、地面气压和边界层高度对三类污染物均呈现负相关。风速促进污染物扩散, 降水量通过冲刷作用减少颗粒物, 边界层高度越高扩散空间越大, 浓度自然越低[9]。在差异方面, 气温对颗粒物呈负相关——温度升高增强对流, 促进颗粒物扩散; 但对 O_3 呈正相关, 因为高温会加剧光化学反应, 推动 O_3 生成。相对湿度对 $PM_{2.5}$ 呈正相关, 湿度增加导致颗粒物吸湿膨胀、浓度上升; 对 PM_{10} 和 O_3 则呈负相关, 适度湿度能抑制扬尘和削弱光化学反应[9]。从影响强度来看, 风速对 PM_{10} 的影响系数最大(-3.52), 说明风速是调控 PM_{10} 的核心因子; 气温对 $PM_{2.5}$ 的影响系数(-2.69)高于 PM_{10} (-1.42), 是影响 $PM_{2.5}$ 的关键因子; 气温同样是 O_3 的首要调控因子, 其正相关系数(1.03)直接反映了光化学反应的温度敏感性。

本文采用多元线性回归构建污染物浓度与气象因子拟合模型, 结果显示 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 O_3 模型调整 R^2 分别为 0.1633、0.2619、0.2824, 与已有研究结论一致[21]-[24]: 敦煌戈壁莫高窟全年 PM_{10} 气象线性模型 R^2 仅 0.17, 沙尘单因子线性 R^2 不足 0.01 [21]; 兰州河谷郊区 PM_{10} 线性拟合度仅 0.08~0.21 [22]; 兰州全年 O_3 气象线性模型 R^2 为 0.14, PM_{10} 的 R^2 为 0.19 [23]; 关中盆地西安、宝鸡、咸阳 $PM_{2.5}$ 线性 R^2 介于 0.19~0.23, 臭氧统一仅 0.15 [24]。事实上, 仅依靠气温、湿度、风速、气压等气象要素构建的全局线性模型对大气污染物浓度变化解释能力较弱。上述结果说明区域污染物与气象因子存在显著非线性

特征, 线性回归模型存在严重局限。究其原因, 污染物受本地燃煤、机动车排放、西北沙尘跨境输送等多重非气象因素驱动, 且污染物与气象因子间存在显著非线性响应规律, 普通最小二乘线性模型难以捕捉复杂耦合关系, 后续可采用分季节回归、地理加权回归或机器学习模型进一步提升拟合精度。

5. 污染防控建议

基于上述研究明确了三种污染物 PM₁₀、PM_{2.5} 和 O₃ 浓度有显著影响的气象因子及影响方向、程度, 可以为后续针对性提出气象调控建议提供依据。在静稳天气下, 可通过人工增雨、喷雾降尘等方式, 缓解颗粒物累积; 同时合理规划城市热源分布, 能够减轻局部热岛效应, 改善大气扩散条件直接降低空气中 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度。此外, 要充分利用自然降水的净化作用, 并配合路面清扫、加强扬尘管控等手段减少颗粒物累积。遇到高压静稳天气时, 需强化工业污染源管控, 实施机动车限行等措施, 降低低空污染物排放; 同时优化工业烟囱高度设计, 提升污染物排放扩散效果。这些综合举措, 都能在一定程度上有效控制城市区域内的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度。在高温时段, 应重点加强工业 VOCs (挥发性有机化合物) 与氮氧化物(NO_x)的排放管控, 同时合理调整企业生产时段, 尽量避开光照强、温度高的时间段集中排放。在城市整体规划中, 可通过建设通风廊道增强空气流动性, 加快 O₃ 及其前体物的扩散。在气候偏干燥的时期, 可适当采取人工增湿等措施, 抑制 O₃ 生成。同时要抓住自然降水的有利时机, 强化对 VOCs 和 NO_x 等前体物的管控力度。在低压天气条件下, 也需加强对工业排放的监管, 减少低空污染物排放, 并优化工业烟囱高度设计, 提升 O₃ 排放扩散效果。

基金项目

内蒙古自治区一流学科科研专项项目(YLXKZX-NGD-055)。

参考文献

- [1] Cappellari, M., Turcato, G., Zannoni, M., Forlivesi, S., Maccagnani, A., Bonora, A., et al. (2018) Association between Short- and Medium-Term Air Pollution Exposure and Risk of Mortality after Intravenous Thrombolysis for Stroke. *Journal of Thrombosis and Thrombolysis*, **45**, 293-299. <https://doi.org/10.1007/s11239-017-1589-7>
- [2] Zhong, H., Shu, Z., Zhou, Y., Lu, Y., Yi, B., Tang, X., et al. (2018) Seasonal Effect on Association between Atmospheric Pollutants and Hospital Emergency Room Visit for Stroke. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, **27**, 169-176. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2017.08.014>
- [3] Alimohammadi, H., Fakhri, S., Derakhshanfar, H., Hosseini-Zijoud, S., Safari, S. and Hatamabadi, H.R. (2016) The Effects of Air Pollution on Ischemic Stroke Admission Rate. *Chonnam Medical Journal*, **52**, 53-58. <https://doi.org/10.4068/cmj.2016.52.1.53>
- [4] 中国环境科学学会臭氧污染控制专业委员会. 中国大气臭氧污染防治蓝皮书(2020 年) [R/OL]. <http://www.xlusysu.org/downloads/LanPiShu2020.pdf>, 2026-07-24.
- [5] 朱仁成, 王亚男, 王丹, 等. 城市空气污染对儿童呼吸道疾病就诊率的影响: 以郑州市为例[J]. 环境科学研究, 2023, 36(11): 2099-2107.
- [6] 鲍捷萌, 曹娟, 高锐, 等. 欧洲环境空气臭氧污染防治历程、经验及对我国的启示[J]. 环境科学研究, 2021, 34(4): 890-901.
- [7] Li, A., Zhou, Q. and Xu, Q. (2021) Prospects for Ozone Pollution Control in China: An Epidemiological Perspective. *Environmental Pollution*, **285**, Article 117670. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117670>
- [8] 中华人民共和国生态环境部. 2022 中国生态环境状况公报[R/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkqb/202305/P020230529570623593284.pdf>, 2023-05-24.
- [9] 姜华, 高健, 李红, 等. 我国大气污染协同防控理论框架初探[J]. 环境科学研究, 2022, 35(3): 601-610.
- [10] 王猛, 代立芹, 许莹, 等. 唐山市空气污染与气象条件耦合性研究[J]. 环境科学与管理, 2026, 51(1): 126-131.
- [11] 郑书瑶, 段琳, 刘心洁. 2016-2023 年抚州城区空气污染特征与气象条件分析[J]. 河南科技, 2026, 53(5): 110-115.
- [12] 陈聪. 基于多元线性回归模型的深圳市空气质量实证分析[J]. 科学技术创新, 2021(9): 29-32.

-
- [13] 许晶, 杨海迪, 李国栋, 等. 鄂尔多斯市污染物变化特征及其与气象要素的关系[J]. 内蒙古科技与经济, 2025(1): 121-125.
- [14] 张岚晶, 张岚彪, 李佳燕. 呼和浩特中心城区主要大气污染物变化特征与气象因子关系[J]. 内蒙古科技与经济, 2025(9): 126-130.
- [15] 周琳, 井瑾, 赵丹娅, 等. 巴彦淖尔市 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 污染时空分布特征和输送路径分析[J]. 环境科学研究, 2026, 39(1): 71-82.
- [16] 赵崇志. 大理市 2017-2021 年 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染特征及与主要气象条件相关性分析[J]. 黑龙江环境通报, 2025, 38(5): 115-118.
- [17] 汪泉旭. 大气颗粒物时空特征与气象因子的相关性分析[J]. 黑龙江环境通报, 2025, 38(11): 25-27.
- [18] 呼和浩特空气污染: 实时空气质量指数(AQI) [EB/OL]. <https://aqicn.org/city/huhehaote/cn/>, 2026-06-26.
- [19] 欧盟哥白尼气候变化服务. 哥白尼气候数据存储平台[EB/OL]. <https://cds.climate.copernicus.eu/>, 2026-06-26.
- [20] 舒林, 刘浠, 万天军, 等. 基于线性回归的数据处理方法研究[C]//中国航空学会. 2019 年(第四届)中国航空科学技术大会论文集. 北京: 中航出版传媒有限责任公司, 2019: 47-52.
- [21] 杨小菊, 赵学勇, 武发思, 等. 莫高窟 PM_{10} 浓度与气象要素的关系[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 54-64.
- [22] 翟广宇, 王式功, 董继元, 等. 兰州市不同粒径大气颗粒物污染特征及气象因子的影响分析[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1): 70-75.
- [23] 杨雪玲, 王颖, 李博. 河谷地形气象要素对污染物浓度的影响[J]. 环境科学研究, 2018, 31(1): 34-41.
- [24] 苏佳, 聂达文, 李晓萌, 等. 基于 CatBoost-SHAP-MCM 模型的关中地区 $PM_{2.5}$ 浓度的气象影响因素研究[J]. 环境科学研究, 2025, 38(4): 787-797.