

2016—2023年乌鲁木齐市大气PM_{2.5}污染分析及建立预测模型

陈佩弟¹, 肖婷婷¹, 李新秀¹, 郑帅印¹, 黄芸²

1. 新疆第二医学院公共卫生学院, 新疆 克拉玛依 834000; 2. 克拉玛依市疾病预防控制中心, 新疆 克拉玛依 834000

摘要: **目的** 分析2016—2023年乌鲁木齐市大气细颗粒物(PM_{2.5})污染状况, 并建立预测模型, 为大气污染防治工作提供参考。**方法** 通过我国生态环境部网站收集2016—2023年乌鲁木齐市PM_{2.5}监测资料, 采用时序图、季节指数分析PM_{2.5}质量浓度的时间变化趋势。利用2016—2023年PM_{2.5}月均质量浓度建立自回归移动平均(ARIMA)模型, 用2023年数据进行验证, 采用平均绝对百分比误差(MAPE)评价模型的拟合效果, 并预测2024—2025年PM_{2.5}月均质量浓度。**结果** 2016—2023年乌鲁木齐市大气PM_{2.5}日均质量浓度呈下降趋势($r_s=-0.239$, $P<0.001$), 1月、2月和12月的季节指数较高, 具有一定的季节性。建立最优预测模型为ARIMA(1, 0, 0)(1, 1, 0)₁₂, 赤池信息准则值为727.38, 修正的赤池信息准则值为727.88, 贝叶斯信息准则值为737.10。2023年PM_{2.5}月均质量浓度的预测值与实际值比较, 绝对误差范围为0.31~7.45 μg/m³, 相对误差范围为0.01~0.53, MAPE为14.42%。经预测, 2024—2025年乌鲁木齐市PM_{2.5}月均质量浓度与2016—2023年变化趋势基本一致。**结论** 2016—2023年乌鲁木齐市大气PM_{2.5}质量浓度呈下降趋势, 冬季质量浓度相对较高; ARIMA(1, 0, 0)(1, 1, 0)₁₂可用于乌鲁木齐市大气PM_{2.5}污染状况的短期预测。

关键词: 细颗粒物; 大气污染; 自回归移动平均模型; 预测

中图分类号: R122.7

文献标识码: A

文章编号: 2096-5087(2024)06-0510-04

Analysis of PM_{2.5} pollution in Urumqi City from 2016 to 2023 and construction of a prediction model

CHEN Peidi¹, XIAO Tingting¹, LI Xinxiu¹, ZHENG Shuaiyin¹, HUANG Yun²

1. School of Public Health, Xinjiang Second Medical College, Karamay, Xinjiang 834000, China;

2. Karamay Center for Disease Control and Prevention, Karamay, Xinjiang 834000, China

Abstract: Objective To analyze the characteristics of fine particulate matter (PM_{2.5}) pollution in Urumqi City, Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2016 to 2023 and establish a prediction model, so as to provide the reference for air pollution prevention and control. **Methods** PM_{2.5} monitoring data of Urumqi City from 2016 to 2023 were collected through the website of Ministry of Ecology and Environment of China. The changing trend of PM_{2.5} concentration was analyzed using temporal chart and seasonal index. PM_{2.5} monthly average concentrations from 2016 to 2023 were used to establish an autoregressive integrated moving average (ARIMA) model, and the data in 2023 was fitted and compared with the actual values, using mean absolute percentage error (MAPE) to evaluate the effectiveness of the model, and PM_{2.5} monthly average concentration from 2024 to 2025 was predicted. **Results** PM_{2.5} daily average concentration in Urumqi City showed a decreasing trend from 2016 to 2023 ($r_s=-0.239$, $P<0.001$), with high seasonal indexes in Janu-

DOI: 10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2024.06.012

基金项目: 2022年自治区级大学生创新创业训练计划项目(S202213560013); 2023年自治区级大学生创新创业训练计划项目(S202313560010); 新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU2022P147); 新疆第二医学院青年科学基金项目(QK202211)

作者简介: 陈佩弟, 硕士, 讲师, 主要从事环境与健康工作

通信作者: 黄芸, E-mail: 2316578407@qq.com

ary, February and December, indicating certain seasonal characteristics. The optional model was ARIMA (1, 0, 0) (1, 1, 0)₁₂, with the value of Akaike information criterion, corrected Akaike information criterion, and Bayesian information criterion being 727.38, 727.88 and 737.10, respectively. PM_{2.5} monthly average concentration in 2023 was fitted and compared with the actual values, with an absolute error range of 0.31–7.45 μg/m³, a relative error range of 0.01–0.53, and MAPE of 14.42%. PM_{2.5} monthly average concentration in Urumqi City from 2024 to 2025 was predicted to be consistent with the trend from 2016 to 2023. **Conclusions** PM_{2.5} concentration in Urumqi City showed a tendency towards a decline from 2016 to 2023, and was relatively high in winter. ARIMA (1, 0, 0) (1, 1, 0)₁₂ can be used for short-term prediction of PM_{2.5} pollution in Urumqi City.

Keywords: fine particulate matter; air pollution; autoregressive integrated moving average model; prediction

细颗粒物 (PM_{2.5}) 可长期滞留在空气中, 传输能力强, 表面易富集致病因子^[1-2], 被世界卫生组织列为一类致癌物^[3]。流行病学研究表明, 长期生活在 PM_{2.5} 污染较重的环境中会增加居民心血管疾病患病和死亡风险^[4-7]。PM_{2.5} 是我国大气污染物的主要成分之一, 《2019 年中国生态环境状况公报》显示, 全国超半数城市存在大气污染物超标情况, PM_{2.5} 质量浓度超标导致严重或重度大气污染的天数占全年总天数的 78.8%^[8]。乌鲁木齐市位于我国西北边陲, 全年干旱, 降水稀少, 扬尘和雾霾等因素导致大气污染物不易扩散^[9]。本研究分析 2016—2023 年乌鲁木齐市大气 PM_{2.5} 污染状况, 并建立自回归移动平均 (autoregressive integrated moving average, ARIMA) 模型^[10] 对 2024—2025 年的 PM_{2.5} 污染状况进行预测, 为大气污染防治工作提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料来源

2016—2023 年乌鲁木齐市大气 PM_{2.5} 监测资料来源于我国生态环境部网站 (<http://www.mee.gov.cn>), 监测点分布在天山区、沙依巴克区、新市区、水磨沟区、头屯河区、达坂城区和米东区 7 个主城区。

1.2 PM_{2.5} 质量浓度的时间变化趋势分析

采用 PM_{2.5} 时序图、季节指数分析 PM_{2.5} 质量浓度的时间变化趋势。其中季节指数是一种以相对数表示的季节变动衡量指标; 若没有季节变动, 则各月的季节指数应等于 100%; 若某一月份有明显的季节变化, 则各月的季节指数应大于或小于 100%。

1.3 PM_{2.5} 污染状况的 ARIMA 模型拟合与预测

1.3.1 序列预处理

采用白噪声检验判定序列有无研究意义。采用增广迪基-富勒检验原序列平稳性, 评估原始序列的差异、趋势及季节变化。若 PM_{2.5} 月均质量浓度值为 0, 自相关函数 (autocorrelation function, ACF) 和偏自相关函数 (partial autocorrelation function, PACF) 表

现为拖尾或截尾, 无衰减或周期性变化, 则该原序列平稳, 可用于统计预测。对原序列 X_t (2016—2023 年 PM_{2.5} 月均质量浓度) 进行平稳性检验, 若结果显示 X_t 为非平稳的时间序列, 需进行差分使序列呈现稳定性。差分后重新进行平稳性检验, $P < 0.05$ 表明数据平稳; $P > 0.05$ 则需对时间序列进行额外的差分处理, 再进行平稳性检验, 直到序列平稳。

1.3.2 参数估计与最优模型识别

基于 X_t 经过平稳化处理后的数据, 推导出 ACF 和 PACF。建立 (p, d, q) (P, D, Q)_s 模型, 采用最小二乘法进行参数估计, 借助最小残差平方和获得参考值。若残差序列呈现类似白噪声的特点, 经检验 $P < 0.01$, 可被认定为具有显著效应的模型; 若残差次序呈现与白噪声不同的特点, 则切换模型重新进行拟合。对所得参数进行显著性检验, $P < 0.05$ 则在拟合模型中保留, 反之则剔除。根据贝叶斯信息准则 (Bayesian information criterion, BIC)、赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 和修正的赤池信息准则 (corrected Akaike information criterion, AICc), 选取函数值最小的模型为最优模型。

1.3.3 模型评价与预测

应用最优模型拟合 2023 年 PM_{2.5} 月均质量浓度, 与实际值比较, 采用平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, MAPE) 评价模型的拟合度, MAPE 值越小表明拟合度越好。MAPE 的计算公式如下:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{W_t - \hat{W}_t}{W_t} \times 100\%$$

式中: W_t 表示 t 时刻 PM_{2.5} 月均质量浓度, \hat{W}_t 表示模型预测的 PM_{2.5} 月均质量浓度, n 表示观测值数量。最后应用最优模型预测 2024—2025 年 PM_{2.5} 月均质量浓度。

1.4 统计分析

采用 EpiData 3.1 软件构建数据库, SPSS 20.0 软件统计分析。PM_{2.5} 日均质量浓度与国家标准的比较

采用单因素方差分析；PM_{2.5}日均质量浓度与时间的相关性采用 Spearman 秩相关分析。采用 R 4.1.2 软件绘制时序图和季节指数图，构建 ARIMA 模型。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 2016—2023 年乌鲁木齐市大气 PM_{2.5} 污染状况

2016—2023 年乌鲁木齐市大气 PM_{2.5} 日均质量浓度最高值在 2016 年，为 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，高于 GB 3095—2012《环境空气质量标准》^[11] 中的二级标准 (75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)，差异有统计学意义 ($F=23.673$, $P<0.001$)。PM_{2.5} 日均质量浓度呈逐年下降趋势 ($r_s=-0.239$, $P<0.001$)，在不同年份呈周期性变化，见图 1。1 月、2 月和 12 月的季节指数较高，具有一定的季节性，见图 2。

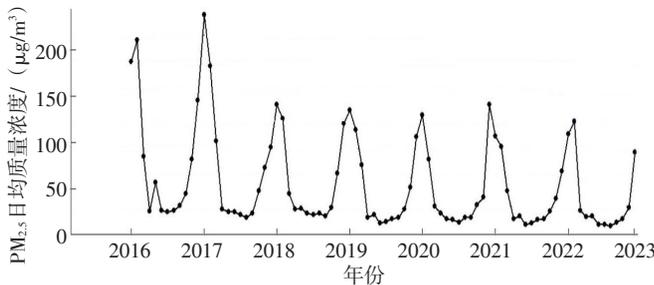


图 1 2016—2023 年乌鲁木齐市 PM_{2.5} 质量浓度变化趋势

Figure 1 Changing trend of PM_{2.5} concentration in Urumqi City from 2016 to 2023

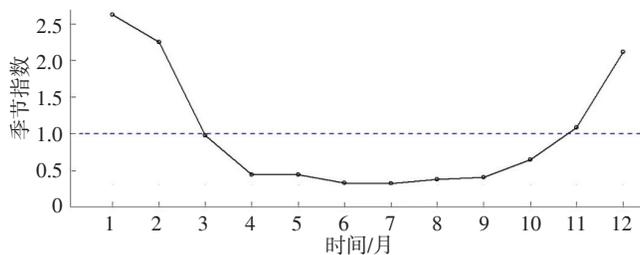


图 2 2016—2023 年乌鲁木齐市 PM_{2.5} 季节指数

Figure 2 Seasonal index of PM_{2.5} in Urumqi City from 2016 to 2023

2.2 PM_{2.5} 污染状况的 ARIMA 模型建立与评价

最优模型为 ARIMA (1, 0, 0) (1, 1, 0)₁₂，其 AIC 值为 727.38，AIC_c 值为 727.88，BIC 值为 737.10。采用该模型拟合 2023 年 PM_{2.5} 月均质量浓度，与实际值比较，绝对误差范围为 0.31~7.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，相对误差范围为 0.01~0.53，MAPE 为 14.42%，表明该模型的拟合效果较好。见表 1。

表 1 2023 年乌鲁木齐市 PM_{2.5} 月均质量浓度拟合结果

Table 1 The fitting of PM_{2.5} monthly average concentration in Urumqi City in 2023

月份	实际值/ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	预测值/ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	绝对误差/ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	相对 误差
1	104.00	100.98	3.02	0.03
2	109.00	107.42	1.58	0.01
3	43.00	37.67	5.33	0.12
4	20.00	21.29	1.29	0.06
5	14.00	21.45	7.45	0.53
6	15.00	8.91	6.09	0.41
7	12.00	13.83	1.83	0.15
8	13.00	13.36	0.36	0.03
9	13.00	15.79	2.79	0.21
10	18.00	20.75	2.75	0.15
11	33.00	33.31	0.31	0.01
12	80.00	78.31	1.69	0.02

2.3 2024—2025 年乌鲁木齐市 PM_{2.5} 污染状况预测结果

采用 ARIMA (1, 0, 0) (1, 1, 0)₁₂ 预测 2024—2025 年乌鲁木齐市 PM_{2.5} 月均质量浓度与 2016—2023 年变化趋势基本一致，1 月、2 月和 12 月 PM_{2.5} 月均质量浓度相对较高。见表 2。

3 讨论

2016—2023 年乌鲁木齐市大气 PM_{2.5} 质量浓度总体呈下降趋势，这与该地区“煤改气”^[12] 等措施密切相关；但 PM_{2.5} 日均质量浓度仍高于国家标准，相关部门仍需严把空气质量关，加强整体技术创新。另外，PM_{2.5} 质量浓度具有一定的季节性特征，1 月、2 月和 12 月的上升幅度大于其他月份，即冬季 PM_{2.5} 污染情况较严重。这可能是由于乌鲁木齐市地处山谷地带，降雨稀少，土地以砂质为主，植物覆盖率不高，易产生扬沙天气，再加上冬季采暖等人类活动，造成 PM_{2.5} 质量浓度上升^[13-15]。

本研究基于 2016—2023 年乌鲁木齐市 PM_{2.5} 月均质量浓度资料，构建了 ARIMA (1, 0, 0) (1, 1, 0)₁₂ 模型^[9]，该模型的拟合效果较好，可应用于乌鲁木齐市大气 PM_{2.5} 污染状况的短期预测。预测结果显示，2024—2025 年乌鲁木齐市 PM_{2.5} 月均质量浓度与 2016—2023 年变化趋势基本一致。今后研究将会根据预测结果，探究人群暴露风险，为早期高暴露风险人群的防治提供参考依据。

参考文献

[1] PEI C L, WU Y F, TAO J, et al. Seasonal variations of mass ab-

表 2 2024—2025 年乌鲁木齐市 PM_{2.5} 月均质量浓度预测结果
Table 2 Predictive values of PM_{2.5} monthly average concentration in Urumqi City from 2024 to 2025

时间	预测值/ (μg/m ³)	95%CI
2024年		
1月	106.89	71.39~142.39
2月	116.31	77.52~155.11
3月	34.87	-4.53~74.28
4月	20.03	-19.50~59.55
5月	17.60	-21.95~57.14
6月	13.47	-26.08~53.02
7月	12.00	-27.55~51.55
8月	11.47	-28.09~51.02
9月	13.51	-26.04~53.06
10月	18.00	-21.55~57.55
11月	31.46	-8.01~71.02
12月	85.12	45.57~124.67
2025年		
1月	105.41	62.23~148.59
2月	112.57	68.71~156.42
3月	39.03	-4.95~83.01
4月	20.01	-23.99~64.02
5月	15.76	-28.26~59.77
6月	14.25	-29.76~58.27
7月	12.00	-32.01~56.01
8月	12.25	-31.76~56.26
9月	13.25	-30.76~57.26
10月	18.00	-26.01~62.01
11月	32.25	-11.76~76.26
12月	82.50	38.49~126.51

sorption efficiency of elemental carbon in PM_{2.5} in urban Guangzhou of South China [J]. J Environ Sci (China), 2023, 133 (11): 83-92.

[2] 林少凯, 王恺, 詹小海, 等. 福州市工业区和商业居住区大气 PM_{2.5} 中多环芳烃特征的变化及其健康风险 [J]. 环境与职业医学, 2022, 39 (11): 1277-1283.

[3] DONG F, ZHANG S N, LI Y F, et al. Examining environment regulation efficiency of haze control and driving mechanism: evidence from China [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2020, 27 (23): 29171-29190.

[4] 徐琪, 叶辉, 朱冰, 等. 大气 PM_{2.5} 与呼吸系统、心脑血管疾病急救病例数的相关性研究 [J]. 预防医学, 2022, 34 (7): 710-714.

[5] 李朝康, 龚科米, 吕焯, 等. 杭州市大气污染对居民死亡的影响研究 [J]. 预防医学, 2023, 35 (1): 11-16.

[6] 王梦琦, 黄翌, 卢显晶, 等. 2014—2019 年中国 PM_{2.5} 浓度及与老年心脑血管疾病归因死亡的时空分析 [J]. 中国老年学杂志, 2023, 43 (6): 1490-1494.

[7] ZHANG X, ZHANG H, WANG Y, et al. Personal PM_{2.5}-bound PAH exposure and lung function in healthy office workers: a pilot study in Beijing and Baoding, China [J]. J Environ Sci (China), 2023, 133 (11): 48-59.

[8] 陈曼, 黄柏石, 刘晔. PM_{2.5} 污染对中国人口死亡率的影响——基于 346 个城市面板数据的实证分析 [J]. 地理科学进展, 2022, 41 (6): 1028-1040.

[9] 李婷, 张莹, 李二帅, 等. 乌鲁木齐市 2021 年采暖期与非采暖期大气中 PM_{2.5} 污染特征及来源分析 [J]. 中国热带医学, 2023, 23 (6): 631-636.

[10] 孙秀秀, 刘光涛, 刘艳, 等. ARIMA 乘积季节模型预测湖州市手足口病流行趋势 [J]. 预防医学, 2021, 33 (8): 801-803, 807.

[11] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准: GB 5749—2006 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.

[12] 祝婕, 都伟新, 马俊英, 等. 基于 MM5/CALPUFF 的乌鲁木齐市“煤改气”工程大气污染物浓度空间变化数值模拟 [J]. 干旱区地理, 2017, 40 (1): 165-171.

[13] 盛永财, 玉米提·哈力克, 阿不都拉·阿不力孜. 气象因素对乌鲁木齐市 PM_{2.5} 浓度影响分析 [J]. 环境工程, 2018, 36 (11): 64-69.

[14] 余会明, 曹琛, 夏平, 等. 新疆乌鲁木齐市地质灾害特征分析及防治措施建议 [J]. 地质灾害与环境保护, 2017, 28 (1): 20-24.

[15] 薛一波, 张小啸, 雷加强, 等. 新疆大气颗粒物污染时空演变及沙尘组分研究 [J]. 中国环境科学, 2024, 45 (3): 1-10.

收稿日期: 2023-11-27 修回日期: 2024-03-12 本文编辑: 刘婧出