

# 乌鲁木齐市 $PM_{2.5}$ 分布特征及其预测模型研究

张纯曦,阿丽亚·拜都热拉\*,刘丽,胡梦玲

(新疆农业大学林学与园艺学院,新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**作为“一带一路”节点城市,防治乌鲁木齐市大气环境污染对改善城市人居环境和提升城市形象尤为重要。为合理评估乌鲁木齐市的大气环境质量变化特征,获得更科学的  $PM_{2.5}$  时空分布特征及预测模型,本文以乌鲁木齐市 2018 年  $PM_{2.5}$  质量浓度为研究对象,基于 7 个国控地面空气质量监测站数据,运用 SPSS 数据分析和 GIS 插值方法探讨  $PM_{2.5}$  的时空分布规律,建立  $PM_{2.5}$  预测模型对未来  $PM_{2.5}$  的变化趋势加以预测。结果表明:乌鲁木齐市  $PM_{2.5}$  日变化和季变化在不同季节表现规律不同;空间分布上西南部高于东北部;影响因子中,CO、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub> 与  $PM_{2.5}$  正相关,O<sub>3</sub> 与  $PM_{2.5}$  负相关;建立的预测模型较为稳健,可用于对未来  $PM_{2.5}$  变化趋势的预测。

**关键词:**乌鲁木齐市; $PM_{2.5}$ ;时空分布;多元回归分析;R 语言

**中图分类号:**S719

**文献标志码:**A

## Temporal and spatial distribution characteristics and prediction model of $PM_{2.5}$ in Urumqi

ZHANG Chunxi, ALIYA·Baidourela\*, LIU Li, HU Mengling

(College of Forestry and Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

**Abstract:** As a “Belt and Road” node city, prevention and control of atmospheric pollution in Urumqi is particularly important for improving the urban residential environment and enhancing the city’s image. In order to reasonably evaluate the changes of atmospheric environmental quality in Urumqi, obtain a more scientific spatial and temporal distribution characteristics and prediction model of  $PM_{2.5}$ . This article takes the  $PM_{2.5}$  mass concentration of Urumqi as the research object in 2018, based on the data of 7 surface air quality monitoring stations of the state control, uses SPSS data analysis and GIS interpolation method to discuss the spatial and temporal distribution of  $PM_{2.5}$ , and establishes the  $PM_{2.5}$  prediction model, Predict the future trends of  $PM_{2.5}$ . The results show that the daily and seasonal changes of  $PM_{2.5}$  in Urumqi are different in different seasons; the spatial distribution is southwest > northeast; among the influencing factors, CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> and  $PM_{2.5}$  are positively correlated, O<sub>3</sub> and  $PM_{2.5}$  negative correlation; the established prediction model is more robust and can be used to predict the future trend of  $PM_{2.5}$ .

**Key words:** Urumqi;  $PM_{2.5}$ ; spatiotemporal distribution; multiple linear regression; R language

$PM_{2.5}$ 是指空气动力学当量直径小于等于 2.5  $\mu m$  的颗粒物,也称为可入肺颗粒物<sup>[1]</sup>。 $PM_{2.5}$ 因粒径小、面积大、活性强,易附带有毒、有害物质(如重金属、微生物等),且在大气中停留时间长、输送距离远、可入肺,因而对人体健康和大气环境质量产生影响<sup>[2]</sup>。目前许多国家都制定了颗粒物的大气环境质量标准<sup>[3]</sup>,以保护动植物和人体健康。乌鲁木齐市作为新疆维吾尔自治区的首府城市,是干旱区绿洲城市的代表,近年来空气质量备受人们关注。据

2018 年中国社会统计年鉴数据显示,2017 年乌鲁木齐市  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  年平均浓度分别为 74、115  $\mu g/m^3$ ,空气质量二级及以上的天数为 246 d,占全年总天数的 67%<sup>[4]</sup>,明显高于华北、西北地区。作为丝绸之路经济带的节点城市,根据国家及自治区发展战略,乌鲁木齐市要建设成为“五大中心”,但其能源供应主要以煤、天然气等化石燃料为主,冬季(采暖期)供暖所需燃料较多、排放量大<sup>[5]</sup>,加之汽车数量增加以及特殊气象状况和地理条件,空气质量较差,这

收稿日期:2019-12-26

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2017D01B15)

作者简介:张纯曦(1995—),女,汉族,硕士研究生,专业方向为林业生态工程与管理,e-mail:zcx@c4dlx.com。

\* 通信作者:阿丽亚·拜都热拉(1986—),女,副教授,研究方向为城市生态环境、荒漠化防治方面,e-mail:aliya\_12@163.com。

对提升乌鲁木齐市的城市形象不利。目前,乌鲁木齐市已建立了7个监测站、全面开展常规监测,并在国家生态环境部和市环保监测中心网站上实时发布小时浓度数据。目前,国内外模拟颗粒物浓度时空分布的方法主要有空间插值法、土地利用回归模型、空间自相关分析等。王振波<sup>[6]</sup>利用空间插值法对中国城市  $PM_{2.5}$  浓度分布进行了研究,发现京津冀地区空气污染最为严重;贺佳等<sup>[7]</sup>基于 GIS 运用 LUR 模型对西安市  $PM_{2.5}$  浓度进行空间分布模拟,表明  $PM_{2.5}$  年均浓度高风险区分布于中部,中风险区分布于中南部,低风险区分布于东南部和西部;杨冕等<sup>[8]</sup>利用空间自相关分析法对长江经济带  $PM_{2.5}$  浓度的时空特征分析发现,长江中下游较上游地区、长江北岸较南岸地区污染更为严重。 $PM_{2.5}$  浓度变化的预测模型主要有灰色关联模型、神经网络模型(BP-ANN)和多元回归模型等。王鸥<sup>[9]</sup>基于灰色关联度法对乌鲁木齐市  $PM_{2.5}$  及其影响要素进行讨论,得出2014—2016年间月、旬变化中对  $PM_{2.5}$  浓度影响最大的要素都是 CO;曲悦<sup>[10]</sup>建立长短期记忆模型的预测结果展示了北京市  $PM_{2.5}$  污染与其周边地区的气象条件关系密切;张玉丽<sup>[11]</sup>基于多元回归分析建立的模型结果较为理想,并为当地政府提出了建议。

关于乌鲁木齐市  $PM_{2.5}$  的研究存在研究区域零散、空间尺度小、观测时间尺度短等缺点。本研究以乌鲁木齐市为研究区域,选取国家生态环境部网站公布的乌鲁木齐市7个国控空气质量监测站的  $PM_{2.5}$  浓度数据,结合监测站点的经纬度坐标,利用 GIS 的空间分析功能,借助数理统计方法和地统计学方法,从日际、季节2个时间尺度和区域空间尺度对2018年1—12月乌鲁木齐市  $PM_{2.5}$  浓度数据进行分析,探讨乌鲁木齐市  $PM_{2.5}$  的时空分布规律,建立  $PM_{2.5}$  浓度与各指标的预测模型,旨在合理评估乌鲁木齐市大气环境质量变化特征,弥补以往研究时间序列不完整的缺陷,以期获得更科学的乌鲁木齐市  $PM_{2.5}$  时空分布特征以及预测模型,为乌鲁木齐市大气污染治理提供较为科学的理论依据。

## 1 研究区概况

研究区为乌鲁木齐市(图1),是新疆维吾尔自治区的首府城市,地理坐标为  $42^{\circ}45'32''\sim 45^{\circ}00'00''N$ ,  $86^{\circ}37'33''\sim 88^{\circ}58'24''E$ ,位于我国西北内陆干旱区新疆中北部,地处天山北麓和准格尔盆地南部,南北最宽处约153 km,东西最长约190 km,海拔580~920 m,自然坡度  $12\%\sim 15\%$ 。乌鲁木齐市山区面积

占50%以上,南部和东北地势偏高、中部和北部偏低,气温属中温带大陆性干旱气候,最热月在7—8月,平均气温  $25.7^{\circ}C$ ,最冷月为1月,平均气温  $-25.7^{\circ}C$ 。

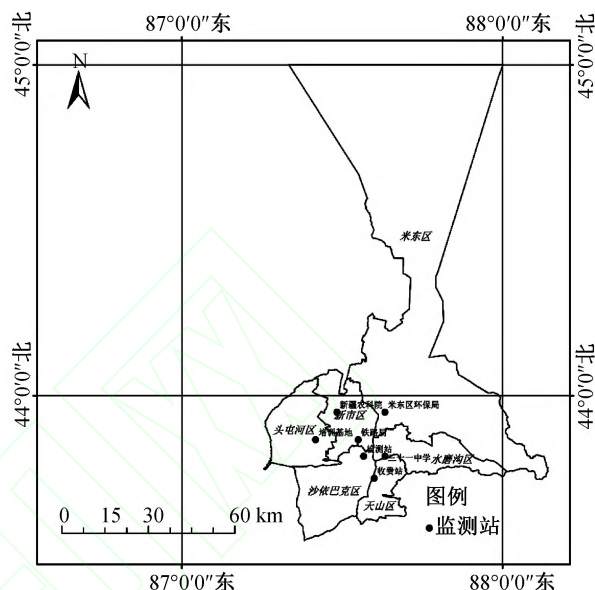


图1 监测点分布示意

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本研究的  $PM_{2.5}$  浓度数据来自于国家生态环境部空气质量自动检测站公布的乌鲁木齐国控空气质量监测站 AQI 质量浓度实时数据 (<http://106.37.208.233:20035/>),包括2018年1月1日—12月31日乌鲁木齐市监测站、收费站、铁路局、三十一中、培训基地、米东区环保局、新疆农科院7个地面定位监测站全年共计8496 h的  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、CO、 $O_3$  时均浓度数据,覆盖乌鲁木齐市全年不同的空气污染级别。对原始数据经过统计分析,得到乌鲁木齐市2018年1月1日—12月31日  $PM_{2.5}$  的日均、季均浓度值。

### 2.2 研究方法

从国家生态环境部网站上获取的数据经过筛选整理,发现存在一定缺失,利用平均数法对缺失数据进行简单非随机插值补全,借助于 SPSS 19.0 对乌鲁木齐市  $PM_{2.5}$  浓度的日、季变化数据进行独立样本  $t$  检验。空间分析上,利用 ArcGIS 10.2 对乌鲁木齐市7个国控空气质量监测站的地理坐标进行编码,形成空间点位属性图层。根据研究需求,将2018年1月1日—12月31日乌鲁木齐市7个国控空气质量监测站的  $PM_{2.5}$  浓度数据采用地统计学中

的反距离加权法(inverse distance weighted, IDW)模拟乌鲁木齐市主城区 PM<sub>2.5</sub>浓度的空间分布特征。对于 PM<sub>2.5</sub>的预测采用多元回归分析法,以 PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub>等5项 AQI 指标作为解释变量,PM<sub>2.5</sub>为目标变量,借助于 R 语言构建模型,并采用 F 检验法对方程进行显著性检验。

### 3 结果与分析

#### 3.1 乌鲁木齐市 PM<sub>2.5</sub>时间浓度特征

##### 3.1.1 乌鲁木齐市 PM<sub>2.5</sub>日均浓度特征

乌鲁木齐市 2018 年 PM<sub>2.5</sub>日均浓度变化范围在 7~241 μg/m<sup>3</sup>之间,最低值出现在 9 月 25 日,最高值出现在 1 月 10 日,日均值超过二级指标、低于一级指标的天数分别为 87、197 d,占全年总天数的 25%、57%。将乌鲁木齐市主城区 7 个国控空气质量检测站 2018 年不同季节同一时刻的 PM<sub>2.5</sub>浓度数值进行算数平均,得到乌鲁木齐市 2018 年不同季节

PM<sub>2.5</sub>日均浓度变化特征(图 2)。乌鲁木齐市 PM<sub>2.5</sub>浓度在不同季节表现出不同的变化规律。春季 PM<sub>2.5</sub>浓度一日中峰值(39 μg/m<sup>3</sup>)出现在 0:00—7:00,此时颗粒物一直处于累积过程,7:00—21:00 持续下降,至 21:00 达到一日观测期内最小值(30 μg/m<sup>3</sup>),呈单峰单谷形;夏季 PM<sub>2.5</sub>浓度在 2:00—3:00 和 9:00—10:00 两个时段分别出现峰值(29 μg/m<sup>3</sup>),后波动下降,至 20:00 出现谷值(20 μg/m<sup>3</sup>),同时在 15:00 和 17:00 也出现了小高峰(24 μg/m<sup>3</sup>),在 12:00—13:00 出现次谷峰(22 μg/m<sup>3</sup>),变化规律不稳定,大致表现为双峰双谷;秋季 PM<sub>2.5</sub>浓度在 23:00—24:00 时出现最高值(47 μg/m<sup>3</sup>),10:00 出现次高峰(42 μg/m<sup>3</sup>),8:00 出现谷值(39 μg/m<sup>3</sup>),14:00—15:00 出现次谷峰(40 μg/m<sup>3</sup>)呈“W”型双峰双谷状;冬季 PM<sub>2.5</sub>浓度的变化规律较为稳定,一日中在 19:00 出现峰值(147 μg/m<sup>3</sup>),9:00—10:00 点出现谷值(109 μg/m<sup>3</sup>),变化规律表现为“V”型单峰单谷形。

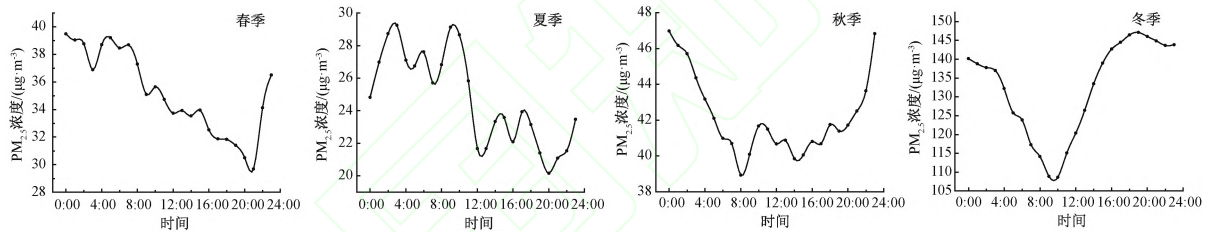
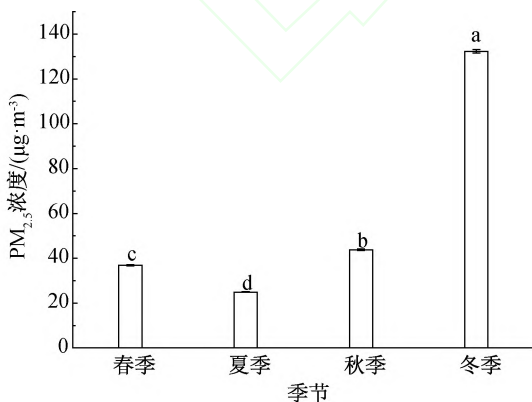


图 2 乌鲁木齐市 PM<sub>2.5</sub>日均浓度变化

##### 3.1.2 乌鲁木齐市 PM<sub>2.5</sub>季节变化特征

基于国家生态环保部 PM<sub>2.5</sub>小时浓度、日均浓度数据,统计出 2018 年乌鲁木齐市主城区 PM<sub>2.5</sub>的季均浓度值(图 3)。



均值±标准误,不同字母代表不同季节颗粒物浓度差异显著( $P < 0.05$ )。

图 3 乌鲁木齐市 PM<sub>2.5</sub>季均浓度变化

根据气候学上对四季的分类,北半球每年的 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季。从四季上来看,乌鲁木齐市主城区春、夏、秋、冬季 PM<sub>2.5</sub>浓度值均值分别为 37、

25、44、132 μg/m<sup>3</sup>。春季 PM<sub>2.5</sub>大于二级标准的天数为 3 d,占总天数的 3%,符合一级标准天数占总天数的 64%;夏季 PM<sub>2.5</sub>大于二级标准的天数为 0 d,符合一级标准的天数占 94%;秋季 PM<sub>2.5</sub>大于二级标准的天数为 13 d,占总天数的 14%,符合一级标准的天数占 61%;冬季 PM<sub>2.5</sub>大于二级标准的天数为 71 d,占 85%,符合一级标准的天数为 0,在  $P < 0.05$  的水平上,冬季的 PM<sub>2.5</sub>浓度值显著高于其它三季。

#### 3.2 乌鲁木齐市 PM<sub>2.5</sub>空间分布特征

地统计学中常用的空间插值方法主要有 IDW、Spline、Kriging3 种,通过比较其适用性,本研究采用的 IDW 插值法,是较为便捷的常用空间插值方法,是以插值点与样点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本点权重越大。目前,此方法主要用于 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>等的空间变化特征分析。对乌鲁木齐市主城区 PM<sub>2.5</sub>浓度数值进行空间插值分析,得到乌鲁木齐市 PM<sub>2.5</sub>浓度分布(图 4),从整体来看,2018 年乌鲁木齐市 PM<sub>2.5</sub>浓度在空间分布



上均表现为新疆农科院和铁路局所在的高新区浓度最高,其次是米东区,浓度最低为培训基地所在的头屯河区。将7个国控空气质量监测点按研究所需分为北部(新疆农科院、米东区环保局)、中部(培训基地、铁路局)、南部(监测站、三十一中、收费站)。春季 $PM_{2.5}$ 浓度在空间分布上表现为新市区、水磨沟区、天山区高于米东区、头屯河区,即中部高于北部、东部

高于西部;夏季 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布规律为米东区、新市区、水磨沟区、天山区高于沙依巴克区高于头屯河区,即东部高于西部,其中米东区西南部污染最严重;秋季分布规律与夏季较为相似,污染最严重的地方由夏季的米东区西南部西移至新市区;冬季空间分布上中部高于北部高于南部、东部高于西部,除头屯河区外,其余地方 $PM_{2.5}$ 浓度整体较高,污染较严重。

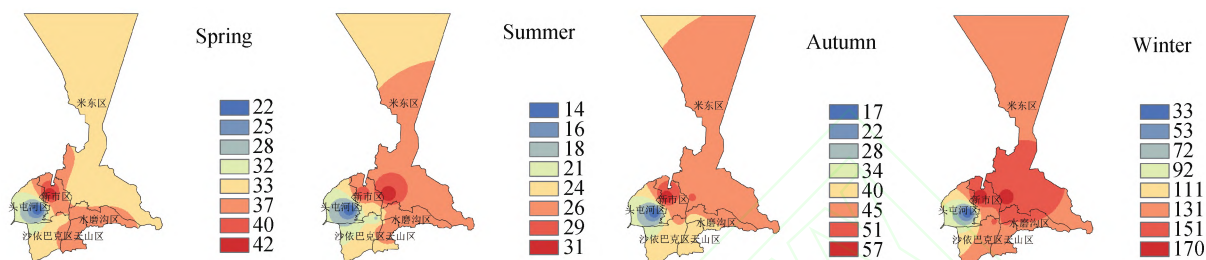


图4 不同季节 $PM_{2.5}$ 质量浓度空间分布

### 3.3 $PM_{2.5}$ 预测模型研究

为研究 $PM_{2.5}$ 与各影响因素的关系,将2018年1月1日—12月31日的数据进行筛选,保留 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $CO$ 、 $O_3$ 等5项指标,利用相邻2个数的平均数对缺失数据进行填补,以保证数据的完整性。将乌鲁木齐市2018年1月1日—12月31日整1a的数据进行分割,其中,2018年1月1日—9月31日的数据用于建立模型,2018年10月1日—2019

年12月31日数据用于对模型进行准确性验证。对 $PM_{2.5}$ 浓度值和各影响变量进行相关性检验,并用R语言绘制 $PM_{2.5}$ 与各影响因素的相关性散点图(图5)。结果表明, $PM_{2.5}$ 与 $CO$ 、 $NO_2$ 之间存在显著正向线性关系,相关系数分别为0.932、0.820,与 $SO_2$ 、 $PM_{10}$ 之间存在一定正向线性关系,相关系数为0.701、0.519,与 $O_3$ 的相关性表现为负,相关系数为-0.532。

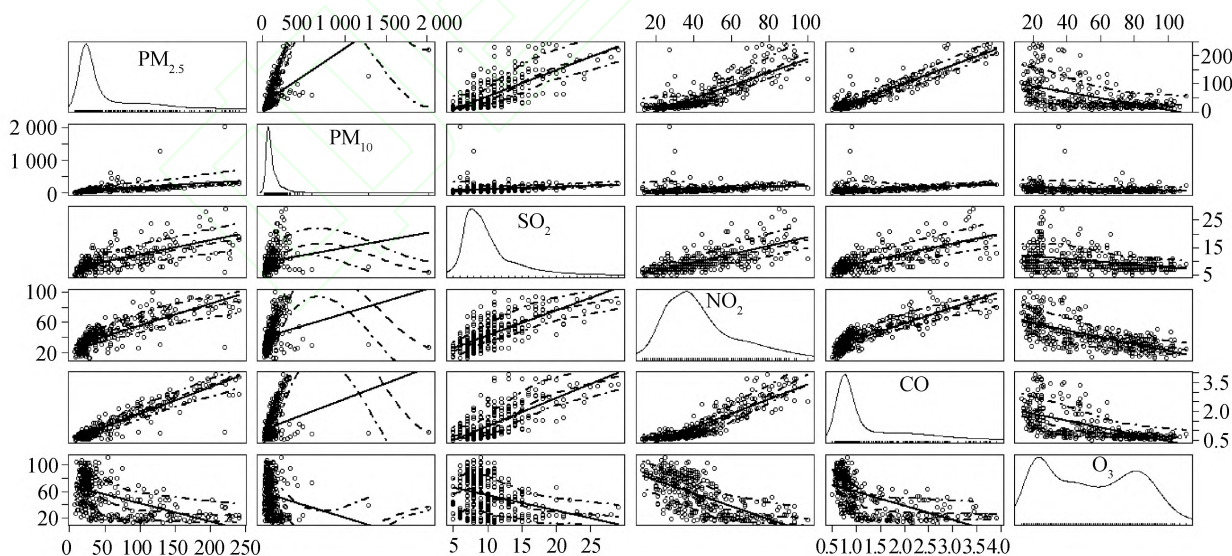


图5  $PM_{2.5}$ 与各影响因素散点图

通过相关性分析得出, $PM_{2.5}$ 与 $CO$ 、 $NO_2$ 、 $SO_2$ 、 $PM_{10}$ 、 $O_3$ 变量之间存在线性关系,为了更准确评估各变量与 $PM_{2.5}$ 之间的数量关系,借助R语言进行目标变量 $PM_{2.5}$ 与 $CO$ 、 $NO_2$ 、 $SO_2$ 、 $PM_{10}$ 、 $O_3$ 等5个解释变量的多元回归分析,评估各变量对 $PM_{2.5}$ 的影响,表达式为:

$$PM_{2.5} = 0.137230X_1 + 0.646366X_2 - 0.187928X_3 + 57.534555X_4 + 0.174558X_5 - 42.3497$$

其中: $X_1$ 表示 $PM_{10}$ , $X_2$ 表示 $SO_2$ , $X_3$ 表示 $NO_2$ , $X_4$ 表示 $CO$ , $X_5$ 表示 $O_3$ 。

采用拟合优度检验法对模型进行检验, Multiple R-Square 为决定系数, Adjusted R-Square 为可调整

的拟合优度,其值越大表示解释变量对目标变量的解释程度和方程的拟合优度越高。利用 R 语言中的 summary 函数检验方程的拟合优度,得 Multiple R-Square 值为 0.9676, Adjusted R-squared 值为 0.9669,  $R^2$  为 0.9676,模型拟合度较好。采用  $F$  检验法对方程的显著性进行检验,利用 R 语言计算得到  $P < 0.05$ ,因此可以认为方程是显著的。

通过以上建模分析,得到了乌鲁木齐市 2018 年 1 月 1 日—9 月 31 日  $\text{PM}_{2.5}$  浓度变化与各影响因子的关系模型,该模型可用于预测乌鲁木齐市 2018 年 10 月 1 日—12 月 31 日  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的变化特征。利用 R 语言做出  $\text{PM}_{2.5}$  预测值与真实值的对比图(图 6),采用 RMSE 准则对模型的预测效果进行检验,得到的 RMSE 系数为 24.3449。在  $\text{PM}_{2.5}$  的正常变化及其常用颗粒物监测仪器的监测范围之内,因此该模型较为可信。

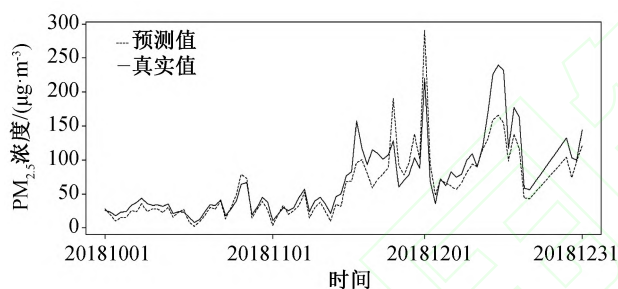


图 6  $\text{PM}_{2.5}$  预测值与真实值对比

## 4 讨论

乌鲁木齐市  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度一日中白天的变化规律除冬季外与乌鲁木齐市上、下班高峰期基本一致。早晨大气温度相对较低、相对湿度较高,晚上辐射冷却形成逆温层,加之 8:00 后人车流量开始增多,因此  $\text{PM}_{2.5}$  浓度逐渐增大<sup>[12]</sup>。9:00—10:00 正值乌鲁木齐市居民早晨上班时间,人车流量迅速增多,此时汽车尾气集中排放和人类活动成为  $\text{PM}_{2.5}$  的主要来源,形成一日变化中的小高峰,18:00—19:00 是乌鲁木齐市下午下班高峰期,形成又一高峰,因此白天  $\text{PM}_{2.5}$  浓度变化规律受交通、居民生活排放等人为活动的影响较大<sup>[13]</sup>。20:00 之后,交通流量已过高峰期,并且随着温度的降低、相对湿度的增高, $\text{PM}_{2.5}$  浓度随之增高,至凌晨出现一日变化中的最高峰,因此晚上  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的变化规律更多的是受气象条件的影响<sup>[14]</sup>。

污染物季节性差异的原因主要是冬季近地面温度较低,大气层结构比其它季节更为稳定,空气对流

运动减弱,不利于  $\text{PM}_{2.5}$  的扩散<sup>[15]</sup>;乌鲁木齐市冬季采用燃煤供暖,供暖时间从当年 10 月 10 日至次年 4 月 10 日,供暖期 6 个月,燃煤产生大量废弃污染物,导致  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在冬春季较高<sup>[16]</sup>;乌鲁木齐市地形条件也较为特殊,东、西、南三面环山的封闭地形,致使冬季焚风天气出现的频率较高,也不利于  $\text{PM}_{2.5}$  的扩散<sup>[17]</sup>;除此之外,节庆活动也影响着  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的时空分布,研究表明春节期间人们燃烧大量的烟花爆竹,污染物直接扩散至空气中<sup>[18]</sup>,不利地形和大气条件使得污染物长时间积累,得不到有效稀释,进一步加剧污染。夏季因为近地面温度高,空气垂直对流较为强烈,使得污染物能够被快速的运输到外围地区<sup>[19]</sup>。同时植被也具有滞尘作用<sup>[20-22]</sup>,夏季植被覆盖度明显增高,植物滞尘作用显著。夏季也是乌鲁木齐市大气降水相对较多的季节,降水也具有清除大气颗粒物的作用<sup>[23-24]</sup>,因此夏季是一年  $\text{PM}_{2.5}$  浓度最低的季节。春秋两季,乌鲁木齐市的主导风向为西北风,多扬沙和沙尘暴天气,空气中悬浮大量颗粒物,因此春秋  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度也相对夏季较高<sup>[25]</sup>。

乌鲁木齐市  $\text{PM}_{2.5}$  的空间分布存在差异性,一年中,头屯河区浓度最低,空气质量最为良好,中部、东部浓度最高,污染最严重,北部、南部因季节不同存在差异。主要因为乌鲁木齐市的常年主导风向为西北风,污染较为严重的地方均位于主导风向的下风向,污染物向下风向扩散积累,因此  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在空间上表现为西部到东部递增。另一方面,米东区是乌鲁木齐市工业园区,集中了中泰化工工业,煤炭工业、塑料工业和机械制造工业等大量的重工业,产生大量的废气污染物,因此米东区所在的东北部污染较为严重<sup>[26]</sup>,南部和西部城市绿化较好,自实施“蓝天工程”后,煤改气从根本上改变了乌鲁木齐市的采暖期供热格局<sup>[16]</sup>,因此冬季  $\text{PM}_{2.5}$  浓度较低,这种“西部、南部浓度低,中部、东部、北部较高”的空间分布特征与孙蓉花等<sup>[27]</sup>对乌鲁木齐市 2013、2014 年等的研究结果一致,也与陈学刚<sup>[28]</sup>对 2004—2009 年乌鲁木齐市  $\text{PM}_{10}$  空间分布特征的研究一致。

基于 R 语言对乌鲁木齐市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度与  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_3$  等 5 个影响因子进行了多元回归分析,在数据的处理过程中,未对极端数据进行剔除,所建立的模型精度仍较好,因此此模型能够对极端天气下  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度进行较为理想的预测,这是对敖希琴<sup>[29]</sup>就合肥地区的此类研究所建模型的进一步改善。相关分析发现, $\text{PM}_{2.5}$  的各影响因子中,

CO 与其关联性最强,与  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{O}_3$  的关联性最低,这与王鸥<sup>[30]</sup>基于灰色关联度法探讨乌鲁木齐市  $\text{PM}_{2.5}$  与各要素关系的结论一致。本研究模型选取的因子均是对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度有一定关联性的因子,但并不是唯一影响  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的几个因子。胡玉筱<sup>[31]</sup>基于高斯烟羽模型和多元回归模型对西安市的研究发现,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度还受地形条件、时间序列等变化的影响,因此认为对于  $\text{PM}_{2.5}$  的扩散特征和预测模型的研究是一个长期且复杂的问题。该模型可以较为理想地预测未来  $\text{PM}_{2.5}$  浓度状况,可以提前了解  $\text{PM}_{2.5}$  的污染情况,为人们的出行和其他活动提供参考。但该模型仍具有很大的局限性,因此适用性有待继续进一步的研究证实,在未来使用的过程中逐渐加以完善。

## 5 结论

(1) 乌鲁木齐市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度日变化规律因季节不同而异。一日 24 h 中,春季呈单峰单谷形,夏季略呈双峰谷形,秋季表现为“W”型双峰双谷状,冬季表现为“V”型单峰单谷状。白天的变化规律与市民上、下班高峰期基本一致,人为活动的影响较大,晚上则更多受到气象条件的影响。

(2) 乌鲁木齐市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度四季差异很明显,由高到低为冬季、秋季、春季、夏季。冬季主要受燃煤供暖、多雾和霾以及焚风等条件影响,春秋又多扬沙和沙尘暴天气,因此浓度均高于夏季,夏季是一年中植被覆盖度最高且空气对流运动最强烈的时期,因此夏季  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在一年中最低。

(3) 受乌鲁木齐市主城区工业布局、主导风向的影响,  $\text{PM}_{2.5}$  空间分布表现为东部、北部高,西部、南部低,由西南至东北浓度分布呈现递增趋势。

(4) 经过检验,基于 R 语言的多元回归分析建立的模型精度较高、显著性较强,对于  $\text{PM}_{2.5}$  的预测也与实际观测值的变化趋势基本相同,具有一定的实用性,可为人们出行的选择提供参考,但存在一定缺陷,仍需在应用中不断改进。

## 参考文献 (References)

- [1] 戴树桂.环境化学[M].北京:高等教育出版社,1997:75-79.
- [2] 吴小玲,金洪.畅呼吸临床实用指南[M].成都:四川科学技术出版社,2014:169-171.
- [3] 吴海龙,余新晓,师忱,等. $\text{PM}_{2.5}$  特征及森林植被对其调控研究进展[J].中国水土保持科学,2012,10(6):116-122.  
WU H L, YU X X, SHI C, et al. Advances in the study of  $\text{PM}_{2.5}$  characteristic and the regulation of forests to  $\text{PM}_{2.5}$  [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(6):116-122.
- [4] 金红,张会英.中国社会统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2018,15.
- [5] 李新琪,海热提·涂尔逊.乌鲁木齐市大气环境承载力及污染防治对策研究[J].干旱区资源与环境,2001,15(3):17-24.  
LI X X, HAIRET T. Studies on the air environmental bearing capacities and the countermeasures of air pollution prevention and control in Urumqi [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2001, 15(3):17-24.
- [6] 王振波,方创琳,许光,等.2014 年中国城市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的时空变化规律[J].地理学报,2015(11):1720-1734.  
WANG Z B, FANG C L, XU G, et al. Spatial-temporal characteristics of the  $\text{PM}_{2.5}$  in China in 2014 [J]. Acta Geographica Sinica, 2015(11):1720-1734.
- [7] 贺佳,贺亮,张涛,等.基于 GIS 和 LUR 模型的西安市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度空间分布模拟研究[J].环境科学与管理,2017,42(2):57-60.  
HE J, HE L, ZHANG T, et al. Simulation study on spatial distribution of  $\text{PM}_{2.5}$  concentration in Xi'an based on GIS and LUR model [J]. Environmental Science and Management, 2017, 42(2):57-60.
- [8] 杨冕,王银.长江经济带  $\text{PM}_{2.5}$  时空分布特征及影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2017,27(1):91-100.  
YANG M, WANG Y. Spatial-temporal characteristics of  $\text{PM}_{2.5}$  and its influencing factors in the Yangtze River Economic Belt [J]. China Population Resources and Environment, 2017, 27(1):91-100.
- [9] 王鸥,何秉宇.基于灰色关联度的乌鲁木齐市  $\text{PM}_{2.5}$  与环境空气质量六要素关系的探讨[J].干旱区资源与环境,2018,32(6):176-181.  
WANG O, HE B Y. Relationships between  $\text{PM}_{2.5}$  and six elements for air quality in Urumqi based on Grey correlation [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(6):176-181.
- [10] 曲悦,钱旭,宋洪庆,等.基于机器学习的北京市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度预测模型及模拟分析[J].工程科学学报,2019,41(3):401-407.  
QU Y, QIAN X, SONG H Q, et al. Machine-learning-based model and simulation analysis of  $\text{PM}_{2.5}$  concentration prediction in Beijing [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(3):401-407.
- [11] 张玉丽,何玉,朱家明.基于多元线性回归模型  $\text{PM}_{2.5}$  预测问题的研究[J].安徽科技学院学报,2016,30(3):92-97.  
ZHANG Y L, HE Y, ZHU J M. Study of the prediction of  $\text{PM}_{2.5}$  based on the multivariate linear regression model [J]. Journal of Anhui Science and Technology University, 2016, 30(3):92-97.
- [12] 王祎崙,王真祥.上海市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度变化特征及其气象因子分析[J].干旱区地理,2018,41(5):1088-1096.  
WANG Y D, WANG Z X. Characteristics of  $\text{PM}_{2.5}$  concentration variability and its meteorological factors in Shanghai [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5):1088-1096.
- [13] 张冬健,薛惠文.2015 年北京、上海和拉萨  $\text{PM}_{2.5}$  浓度



- 日变化和日际变化分析[J].北京大学学报(自然科学版),2018,54(4):705-712.
- ZHANG D J, XUE H W. Interdiurnal and diurnal variation of  $PM_{2.5}$  concentration in Beijing, Shanghai, and Lhasa in 2015[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018, 54(4): 705-712.
- [14] 李珂, 刘朝顺, 焦鹏龙. 基于 NPP/VIIRS 夜间灯光遥感数据估算上海地区  $PM_{2.5}$  浓度[J]. 环境科学学报, 2019, 39(6): 1913-1922.
- LI K, LIU C S, JIAO P L. Estimation of nighttime  $PM_{2.5}$  concentration in Shanghai based on NPP/VIIRS Day-Night Band data[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(6): 1913-1922.
- [15] 孙小燕, 杨萍果, 敖红, 等. 山西省 2015 年细颗粒物的污染状况和空间分布[J]. 地球环境学报, 2017, 8(5): 459-468.
- SUN X Y, YANG P G, AO H, et al. Spatial distribution and pollution variation of fine particulate matter at urban area from Shanxi Province in 2015[J]. Journal Of Earth Environment, 2017, 8(5): 459-468.
- [16] 王庆. 乌鲁木齐市核心区采暖期集中供热污染监控点优化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2007.
- [17] 赵克明. 焚风对乌鲁木齐市冬季大气污染的影响探析[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [18] 王伟, 孔少飞, 刘海彪, 等. 南京市春节前后大气  $PM_{2.5}$  中重金属来源及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 2186-2195.
- WANG W, KONG S F, LIU H B, et al. Sources and risk assessment of heavy metals in  $PM_{2.5}$  around 2014 Spring Festival in Nanjing[J]. China Environmental Science, 2016, 36(7): 2186-2195.
- [19] 苏志华, 王建华. 贵阳市大气颗粒物的污染特征及其影响因素分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2015, 54(5): 77-84.
- SU Z H, WANG J H. Pollution characteristics and determinants of atmospheric particulate matter and its determinants in Guiyang[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2015, 54(5): 77-84.
- [20] AL-DOUSARI A M, AHMED M, AL-DOUSARI N, et al. Environmental and economic importance of native plants and green belts in controlling mobile sand and dust hazards[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, 16(5): 2415-2426.
- [21] 凯丽比努尔·努尔麦提, 玉米提·哈力克, 阿丽亚·拜都热拉, 等. 阿克苏市街道绿地主要树种滞尘特征及价值估算[J]. 林业科学, 2017, 53(1): 101-107.
- KALBINUR N, UMUT H, ALIYA B, et al. Characterization and valuation of dust retention of the main species of street trees in Aksu City[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(1): 101-107.
- [22] 阿丽亚·拜都热拉, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 等. 干旱区绿洲城市主要绿化树种最大滞尘量对比[J]. 林业科学, 2015, 51(3): 57-64.
- ALIYA B, UMUT H, TAYIERJIANG A, et al. Maximum dust retention of main greening trees in arid land oasis cities, Northwest China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(3): 57-64.
- [23] 栾天, 郭学良, 张天航, 等. 不同降水强度对  $PM_{2.5}$  的清除作用及影响因素[J]. 应用气象学报, 2019, 30(3): 279-291.
- LUAN T, GUO X L, ZHANG T H, et al. The scavenging process and physical removing mechanism of pollutant aerosols by different precipitation intensities[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2019, 30(3): 279-291.
- [24] 李凯飞, 张恒德, 谢永华. 降水对京津冀中南部  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  清除作用的分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(3): 69-74.
- LI K F, ZHANG H D, XIE Y H. Analysis on precipitation scavenging on  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  in central and south of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(3): 69-74.
- [25] 徐鸣, 王建国. 一次特大沙尘暴对乌鲁木齐市环境空气质量的影响分析[J]. 干旱环境监测, 2002(3): 139-141.
- XU M, WANG J G. Impact of an extraordinarily serious sandstorm on Urumqi air quality[J]. Arid Environmental Monitoring, 2002(3): 139-141.
- [26] 张克磊. 乌鲁木齐市  $PM_{2.5}$  的时空格局及其变化特征[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014.
- [27] 孙蓉花. 乌鲁木齐市  $PM_{2.5}$  浓度时空变化特征及与气象条件的关系[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2017.
- [28] 陈学刚, 魏疆, 任泉, 等. 城市扩展下大气污染物浓度的空间格局变化趋势研究: 以乌鲁木齐市为例[J]. 生态环境学报, 2013, 22(6): 1015-1019.
- CHEN X G, WEI J, REN Q, et al. Effects of the urban expansion on the spatially varying trends of distribution in air pollutants concentration: a case study of Urumqi[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(6): 1015-1019.
- [29] 敖希琴, 费久龙, 陈家丽, 等. 基于多元统计的  $PM_{2.5}$  分析与预测: 以合肥地区为例[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2018, 36(1): 96-99.
- AO X Q, FEI J L, CHEN J L, et al. Analysis and prediction of  $PM_{2.5}$  based on multivariate statistics: Taking Hefei area as an example[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2018, 36(1): 96-99.
- [30] 王鸥, 何秉宇. 乌鲁木齐市空气质量 5 参数对  $PM_{2.5}$  的影响及  $PM_{2.5}$  浓度时空变化特征分析[J]. 新疆环境保护, 2018, 40(1): 6-11.
- WANG O, HE B Y. Influence of 5 air quality parameters on  $PM_{2.5}$  and temporal and spatial variation characteristics of  $PM_{2.5}$  concentration in Urumqi[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2018, 40(1): 6-11.
- [31] 胡玉筱, 段显明. 基于高斯烟羽和多元线性回归模型的  $PM_{2.5}$  扩散和预测研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(6): 86-92.
- HU Y X, DUAN X M.  $PM_{2.5}$  dispersion prediction based on Gaussian Plume model and Multiple Linear Regression model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(6): 86-92.

(责任编辑: 齐鲁壮)