

# 2016~2020年太原市城区PM<sub>2.5</sub>时空分布特征及其影响因素分析

梁其胜<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>云南师范大学地理学部, 云南 昆明

<sup>2</sup>云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明

收稿日期: 2024年3月4日; 录用日期: 2024年3月24日; 发布日期: 2024年4月9日

## 摘要

本文采用太原市城区2016~2020年PM<sub>2.5</sub>空气质量数据, 通过Excel统计、普通克里金插值法、Pearson相关系数法等方法来探究其时空变化特征及其影响因素。结果表明: 在2016~2020年期间, 太原市城区的PM<sub>2.5</sub>浓度呈现出明显的季节性变化, 即冬季高和夏季低, 这与冬季大气稳定性增强和供暖季节排放增加有关, 夏季则受有利气象条件和工业排放减少影响。在过去的5年中, PM<sub>2.5</sub>浓度呈下降趋势, 环境治理和产业结构调整发挥了作用。在空间上, 同一季节内PM<sub>2.5</sub>浓度差异小, 但冬季南部稍高, 年际尺度上南部和东部浓度较高。地形和土地利用差异也影响PM<sub>2.5</sub>浓度空间分布, 工业结构、扬尘污染和环保政策在空气质量变化中至关重要。总体而言, 太原市城区PM<sub>2.5</sub>浓度的下降反映了综合治理措施的有效实施和环境保护工作的加强。

## 关键词

太原市城区, PM<sub>2.5</sub>浓度, 时空分布特征, 影响因素

# Analysis of the Spatiotemporal Distribution Characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Urban Areas of Taiyuan from 2016 to 2020 and Its Influencing Factors

Qisheng Liang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

<sup>2</sup>Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes & Environmental Changes, Kunming Yunnan

Received: Mar. 4<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 24<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 9<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In this paper, PM<sub>2.5</sub> air quality data from 2016 to 2020 in urban areas of Taiyuan were used to explore its spatio-temporal variation characteristics and its influencing factors by Excel statistics, ordinary Kriging interpolation, and Pearson correlation coefficient method. The results show that during 2016~2020, PM<sub>2.5</sub> concentrations in urban areas of Taiyuan city show obvious seasonal variations, i.e., high in winter and low in summer, which are related to the enhanced atmospheric stability and increased emissions during the heating season in winter, and influenced by favorable meteorological conditions and reduced industrial emissions in summer. In the past five years, PM<sub>2.5</sub> concentrations showed a decreasing trend, with environmental management and industrial restructuring playing a role. Spatially, there were small differences in PM<sub>2.5</sub> concentrations within the same season, but they were slightly higher in the south in winter and higher in the south and east on the interannual scale. Topography and land use differences also influence the spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> concentrations, and industrial structure, dust pollution, and environmental policies are crucial in air quality changes. Overall, the decline in PM<sub>2.5</sub> concentrations in the urban area of Taiyuan reflects the effective implementation of comprehensive management measures and the strengthening of environmental protection.

## Keywords

Urban Area of Taiyuan City, PM<sub>2.5</sub> Concentration, Spatiotemporal Distribution, Influencing Factors

Copyright © 2024 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

随着工业化和城市化进程的加速,大气污染已成为全球范围内的重要环境问题,其中 PM<sub>2.5</sub> 作为主要污染物之一,引起了广泛关注[1] [2]。PM<sub>2.5</sub>是指空气中直径小于或等于 2.5 微米的颗粒物,其来源涵盖了工业排放、机动车尾气、生物质燃烧以及自然源等多个方面,并且这些细颗粒物对人类健康和环境造成严重危害,包括呼吸道疾病、心血管疾病以及能见度下降等问题[3] [4] [5]。针对 PM<sub>2.5</sub> 污染问题,国内外学者进行了大量研究工作,包括对其时空分布、来源解析、影响因素和防治措施等方面的探讨[1] [2] [6] [7] [8]。国外学者利用地学统计学和 ArcGIS 空间分析相结合的方法,深入研究了 PM<sub>2.5</sub> 的时空分布规律,为大气污染管理提供了重要参考。例如,Jerrett 等人通过 Kriging 插值方法分析了汉密尔顿城市 PM<sub>2.5</sub> 的分布规律,展示了不同区域的变化趋势[9]。李佳乐等人基于北京市监测站日数据发现,北京市 PM<sub>2.5</sub> 浓度在空间上由南向北逐渐减少,这一现象主要与人口密集度、城市建设密度以及城区热岛效应等因素密切相关。值得注意的是,远郊及山区农村地区的 PM<sub>2.5</sub> 月均浓度在冬季明显高于中心城区站和卫星城区站,这与该地区主要采用自主燃煤取暖有关[10]。此外,程煜等人通过分析安徽省 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响因素发现,气温、社会用电量和人口密度是主要影响因素之一[11]。而赵文斐等人的研究表明,增加林地和草地面积、适度增加绿地面积有助于改善 PM<sub>2.5</sub> 大气污染治理[12]。太原市依靠丰富的煤炭和矿产资源成为我国传统的重工业和能源基地,其煤炭、冶金、化工、能源等产业对当地的大气环境产生巨大压力。因此,本研究通过 2016~2020 年环境空气监测数据深入研究太原市城区 PM<sub>2.5</sub> 浓度的时空分布特征及其驱动影响因素,为探讨大气污染的形成机制和传输过程提供基础数据和理论支持,为相关部门改善大气环境质量、

制定有效的环境政策和管理措施提供科学依据。

## 2. 研究区域概况

太原市位于山西省的中心位置, 在  $111^{\circ}30' \sim 113^{\circ}09'E$ ,  $37^{\circ}27' \sim 38^{\circ}25'N$  之间, 总面积约  $6988 \text{ km}^2$ , 其中太原市城区(城区)的面积约为  $1460 \text{ km}^2$ 。太原市位于陕北高原的东部, 晋中盆地的北部, 境内东、西和北部三面为高山, 而中部和南部则为河谷平原。汾水自北向南纵贯全境, 使得地势呈现北高南低、形似簸箕状的特点(图 1)。同时, 太原市因地形和海拔差异等综合因素, 构成了温带大陆性气候, 表现为冬季无酷暑、夏季无严寒的特点, 年平均温度为  $9.5^{\circ}\text{C}$ , 年均降水量则为 400 毫米以上。此外, 太原市境内矿产资源丰富, 以煤炭、铁矿为代表。基于这一优势, 太原市发展了以煤炭、冶金、化工、能源和机械为主的工业结构, 成为中国传统的重工业和能源基地。而太原市正在向服务型城市发展转变, 同时优化能源消费结构, 三大产业的比重也呈现优化发展的趋势[13][14]。

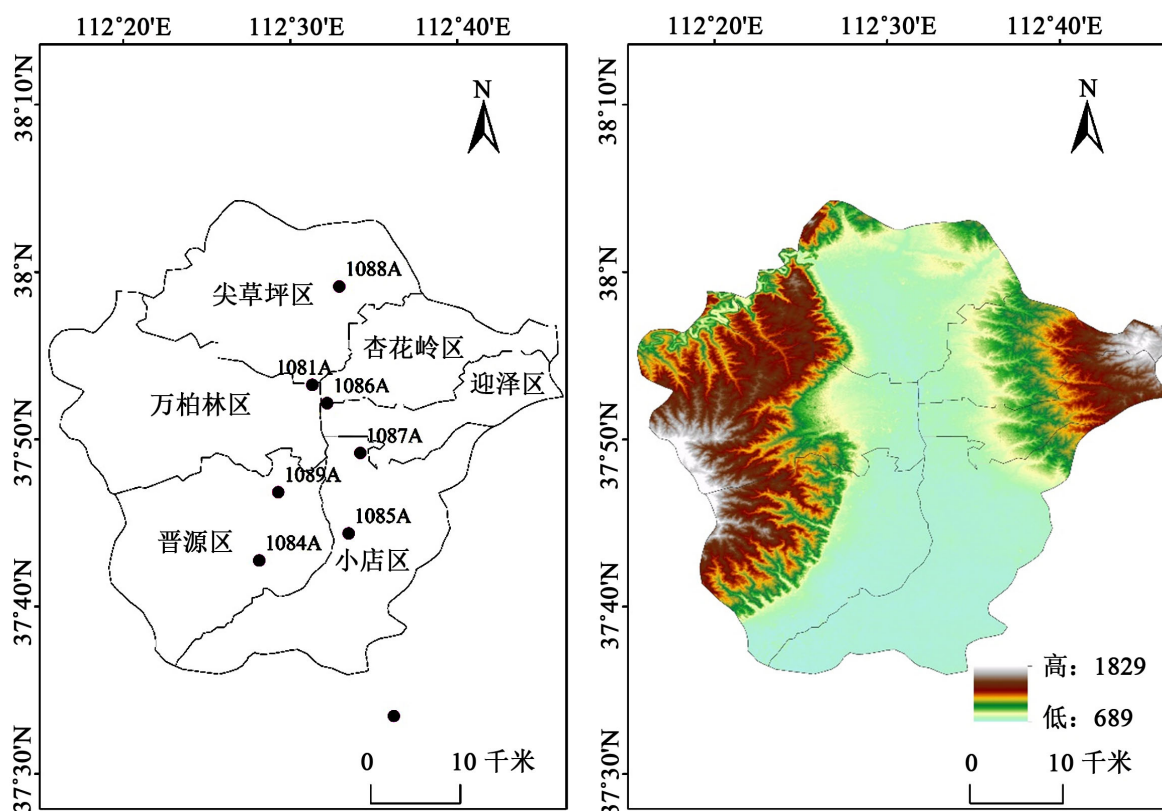


Figure 1. Administrative division and topography map of Taiyuan City urban area

图 1. 太原市城区行政区划图与地形图

## 3. 数据来源与研究方法

本文选择了太原市城区内 7 个  $\text{PM}_{2.5}$  监测站点, 覆盖面广, 分布均匀。这些站点周围没有明显污染源或其他污染排放干扰, 环境相对稳定, 因此所测数据基本代表了太原市城区整体空气质量状况。 $\text{PM}_{2.5}$  浓度数据来源于中国空气质量在线监测分析平台 <https://www.aqistudy.cn/>, 气象数据则来自中国气象数据网 <http://data.cma.cn/>, 包括月极大风速、月平均降水量、月平均气温和月平均气压。地形数据和土地利用数据来自地理空间数据云, 社会经济数据则来源于《太原市统计年鉴》和《中国统计年鉴》。

本研究利用 Excel 和 Origin 软件对太原市城区  $PM_{2.5}$  浓度监测数据进行了处理和绘制, 得出了季节平均和年平均的时间变化趋势图。在空间分析方面, 使用 Excel 统计了各个站点的季节均值和年均值的  $PM_{2.5}$  浓度数据, 并在 ArcGIS 中利用普通克里金插值方法绘制了  $PM_{2.5}$  浓度的空间分布图。此外, 通过 SPSS 软件进行了  $PM_{2.5}$  浓度与气象因子的相关性分析。

## 4. 太原市城区 $PM_{2.5}$ 时空变化特征

### 4.1. $PM_{2.5}$ 的时间变化特征

根据 2012 年《环境空气质量二级标准》中 AQI 指数的等级要求, 利用 Excel 软件对 2016~2020 年太原市的空气质量指数进行分类求和。统计出这五年间太原市城区的优、良、轻、中、重以及严重污染的天数所占比重。

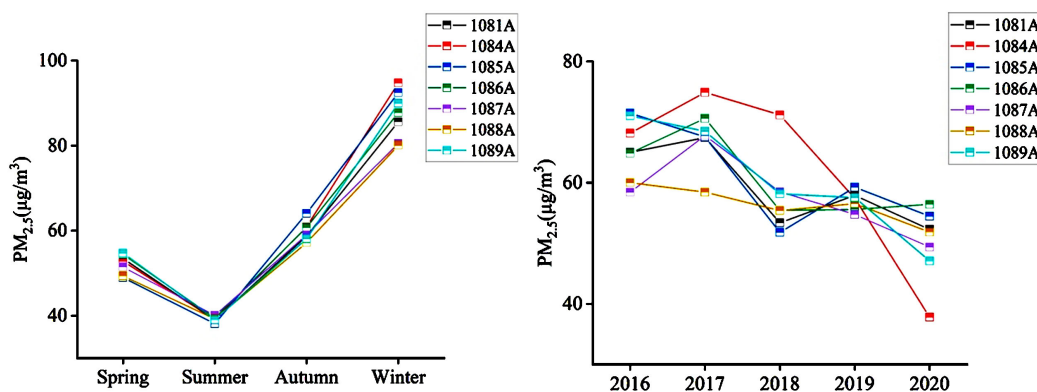
从表 1 中可以看出, 2016 年至 2020 年太原市的优良天数分别为 232 天、175 天、203 天、200 天和 225 天, 优良率占比分别为 63.39%、49.16%、55.62%、54.79% 和 61.48%, 总体上呈上升趋势。污染天数分别为 134 天、181 天、162 天、165 天和 141 天, 分别占监测天数的 36.61%、50.84%、44.38%、45.21% 和 38.52%, 呈下降趋势。整体来看, 严重污染和重度污染的天数有所减少, 近 5 年太原市城区的空气质量有所提高, 这也说明了太原市城区近年来在大气污染治理工作方面取得了相当不错的进展。

**Table 1.** 2016~2020 Taiyuan City urban  $PM_{2.5}$  concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) classification

**表 1.** 2016~2020 年太原市城区  $PM_{2.5}$  浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )分级

	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染
2016 年	26	206	82	26	18	8
2017 年	11	164	134	31	10	6
2018 年	19	184	125	29	7	1
2019 年	18	182	117	37	9	2
2020 年	27	198	114	12	15	0

在季节尺度上, 太原市城区的  $PM_{2.5}$  平均浓度呈现出明显的季节差异, 总体上表现为“V”形变化趋势(图 2)。不同监测点在冬季的  $PM_{2.5}$  平均浓度最高, 远高于其他季节, 而夏季则最低。这种季节差异主要归因于冬季的低温、低风速和高湿度等大气稳定气候特征, 以及供暖季节燃煤排放和工业活动增加等因素[15]。相反, 夏季的高温、高风速和湿度增加有利于污染物的稀释和扩散, 加上降雨的清洗作用, 导致夏季  $PM_{2.5}$  浓度较低。



**Figure 2.** Trend of  $PM_{2.5}$  concentration variation in Taiyuan City urban area across different seasons and years

**图 2.** 太原市城区在不同季节和不同年份的  $PM_{2.5}$  浓度变化趋势图

在年际尺度上, 2016 年至 2020 年间, 不同监测点的  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度呈下降趋势(图 2)。这一变化主要归因于环境治理强度增加、产业结构调整、能源结构优化、科技进步和技术创新以及生态环境保护力度加强等多重因素的作用[16]。政府实施了严格的环保政策和措施, 限制了工业排放, 推进了清洁能源替代, 降低了高污染、高能耗产业的比重。同时, 太原市逐步减少了对传统高污染能源的依赖, 加大了对清洁能源的开发和利用, 这些举措共同促成了太原市城区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的下降趋势。

#### 4.2. $\text{PM}_{2.5}$ 的空间变化特征

根据图 3 显示, 太原市城区在同一季节内的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度具有较小的空间差异。在春季、夏季、秋季和冬季, 其变化幅度分别为  $6 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 、 $2 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 、 $4 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$  和  $15 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ , 而不同季节的空间平均值分别为  $52 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 、 $39 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 、 $60 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$  和  $87 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 。不同监测点  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在夏季的差异最小, 其次是春季和秋季, 最大的是冬季。这可能是由于所选择的 7 个监测点相距较近, 因此在同一季节内, 监测点之间的平均水平相差不大, 更能够代表太原市城区在同一季节的整体  $\text{PM}_{2.5}$  浓度水平。另一方面, 不同季节的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度差异导致了太原市城区在不同季节的平均水平差异较大。相比之下, 太原市城区在冬季期间的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在南部稍微比北部更加偏高。

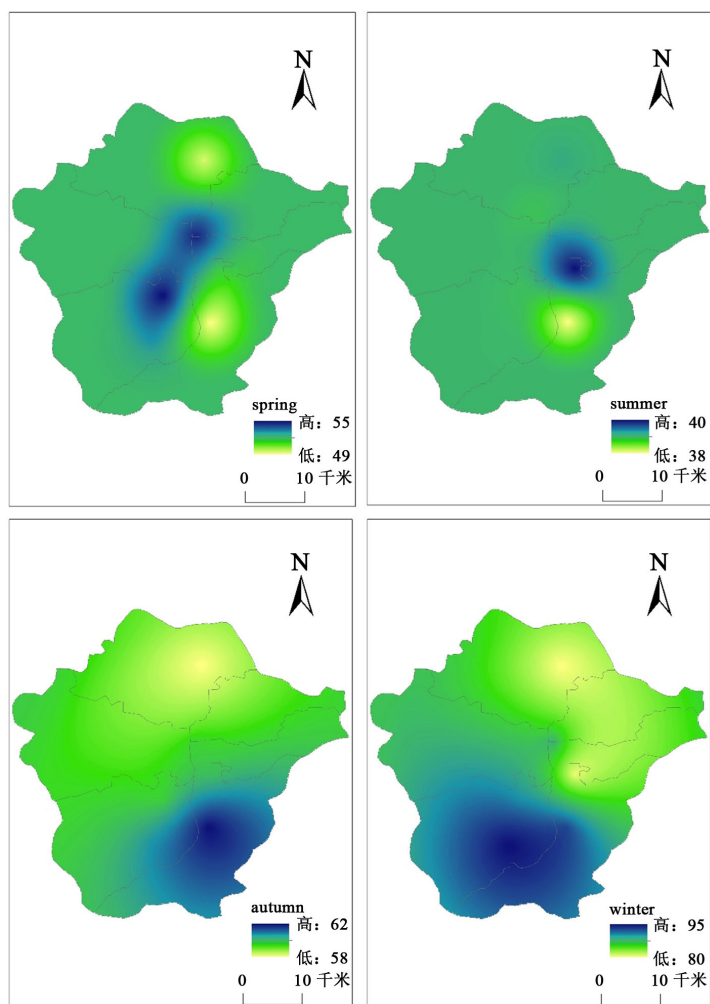
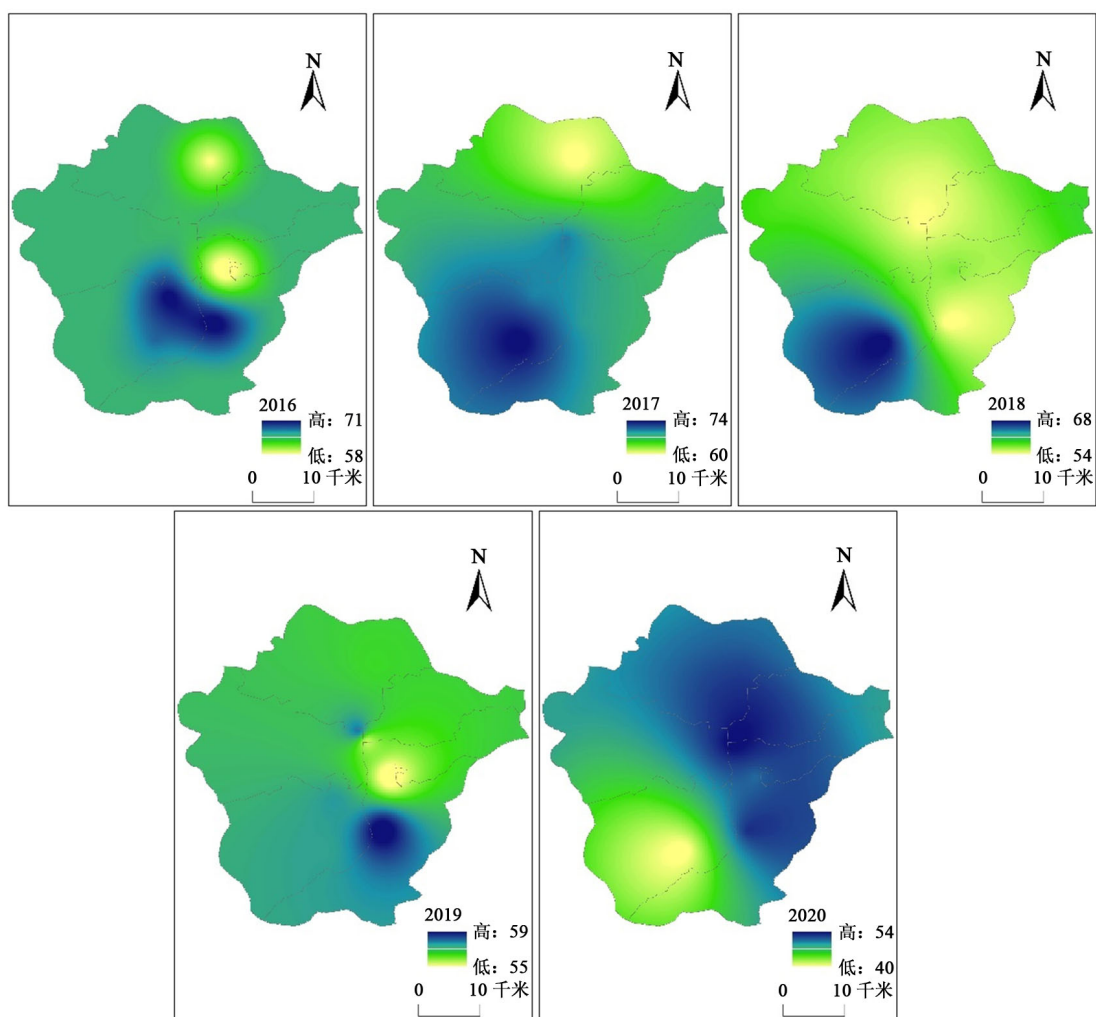


Figure 3. Spatial variation trend of  $\text{PM}_{2.5}$  concentration in Taiyuan City urban area across different seasons  
图 3. 太原市城区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在不同季节空间变化趋势图



在2016年至2020年期间,太原市城区的 $PM_{2.5}$ 浓度变化幅度分别为 $13(\mu g/m^3)$ 、 $14(\mu g/m^3)$ 、 $14(\mu g/m^3)$ 、 $4(\mu g/m^3)$ 和 $14(\mu g/m^3)$ ,而不同年份的空间平均值分别为 $66(\mu g/m^3)$ 、 $67(\mu g/m^3)$ 、 $59(\mu g/m^3)$ 、 $57(\mu g/m^3)$ 和 $49(\mu g/m^3)$ 。从图4可以看出,同一年份太原市城区 $PM_{2.5}$ 浓度在空间上的差异不大,尤其是在2019年,总体上南部比北部以及东部比西部偏高。而不同年份的空间平均值则进一步反映了太原市城区在2016年至2020年期间 $PM_{2.5}$ 浓度呈下降趋势,这与前述近5年太原市空气质量改善的情况相符。太原市城区 $PM_{2.5}$ 浓度的总体下降归因于环境治理力度的增强、产业结构的优化、能源结构的调整、科技进步与技术创新、以及生态环境保护力度的提升等多重因素[16]。



**Figure 4.** Spatial variation trend of  $PM_{2.5}$  concentration in Taiyuan City urban area across different years  
**图 4.** 太原市城区  $PM_{2.5}$  浓度在不同年份空间变化趋势图

## 5. 讨论

### 5.1. 自然因素

#### 气象因素

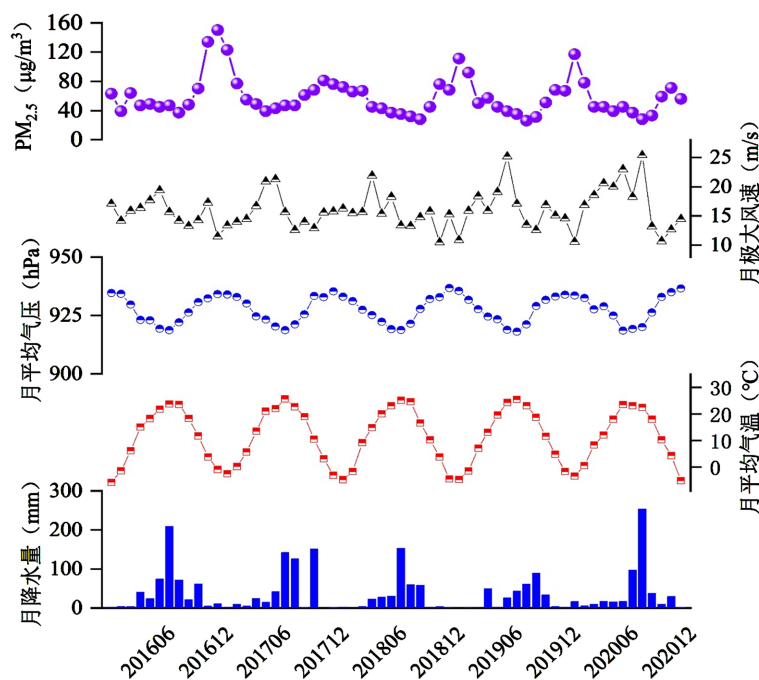
从表2可见, Pearson 相关系数显示太原市城区  $PM_{2.5}$  月均浓度与极大风速、降水量、平均气压以及平均气温之间存在不同的相关关系。 $PM_{2.5}$  浓度除了与月平均气压呈显著正相关外,在0.01水平(双侧)上

与另外3种气象因子均呈现明显负相关。夏季太原市城区  $PM_{2.5}$  浓度较低的原因主要归因于温暖湿润的气候条件、频繁的降水、高风速以及大气层的不稳定性。夏季高温高湿的气候有利于颗粒物与水蒸气结合形成悬浮颗粒,降水过程中雨水可清洗空气中的颗粒物,而高风速和大气层的不稳定性则有助于颗粒物的扩散和稀释,从而减少了污染物在城市内的积聚,改善了空气质量[17][18][19][20]。冬季太原市城区  $PM_{2.5}$  浓度升高与降水量少、高压天气导致的温度逆转和风速减缓密切相关,这导致污染物在低层空间的积聚和扩散受限,同时低风速难以扩散颗粒物,气温较低增加了颗粒物的稳定性,使得  $PM_{2.5}$  更加稳定和积聚[17][18][19][20]。这些气象因素相互作用,共同导致了冬季太原市城区空气污染物浓度的增加(图5)。因此,太原市城区的季节气候条件差异解释了为何夏季  $PM_{2.5}$  浓度较低而冬季较高的现象。

**Table 2.** Correlation analysis of  $PM_{2.5}$  concentration and meteorological factors in Taiyuan City urban area from 2016 to 2022  
**表 2.** 2016~2020 年太原市城区  $PM_{2.5}$  质量浓度与气象因素的相关分析

气象因子	相关性
月极大风速	-0.383**
月平均降水量	-0.382**
月平均气压	0.640**
月平均气温	-0.702**

注: \*\*在 0.01 水平(双侧)上显著相关。



**Figure 5.** Trends in  $PM_{2.5}$  concentration, monthly maximum wind speed, monthly mean air pressure, monthly mean temperature, and monthly precipitation variation in Taiyuan City urban area from 2016 to 2020

**图 5.** 2016~2020 年太原市城区的  $PM_{2.5}$  浓度,月极大风速、月平均气压,月平均气温和月降水量变化趋势

## 5.2. 地形因素

除了气象因素外,地形因素也可能对太原市城区冬季  $PM_{2.5}$  浓度产生影响。太原市城区地貌形态复杂多样,海拔高度为 689~1289 米,东部、西部以及北部分别被高大山脉所围绕,中部和南部为地势平坦的汾河冲积平原,因而半封闭状态的盆地结构(图 1)。太原市城区周围的山地环抱对夏季和冬季的  $PM_{2.5}$  浓度产生不

同影响。在夏季，山地可能对太原市城区的  $PM_{2.5}$  浓度起到保护作用，阻挡了迎风侧的空气流动，减少了外部地区的污染物输入，有利于降低市区的  $PM_{2.5}$  浓度。同时，山地环抱还可能增加了局部地区的风速，有助于污染物的扩散，进一步减少了太原市城区的  $PM_{2.5}$  浓度。然而，在冬季，山地环抱可能产生相反的影响。山地形成的地势槽和坳陷可能导致冷空气在山谷内滞留，增加了冷空气的滞留时间，进而增加了冬季太原市城区的  $PM_{2.5}$  积聚。此外，山地环抱可能限制了外部气流的通风，使得市区污染物扩散受阻，加剧了  $PM_{2.5}$  浓度的增加。因此，太原市城区周围的地形因素在夏季和冬季对  $PM_{2.5}$  浓度的影响表现出不同的趋势。

### 5.3. 土地利用类型因素

本研究使用了 2016 年至 2020 年每年 9 月份且云量少于 3% 的 Landsat 8 卫星图像，结合人工解译核查和 ArcGIS 软件的最大似然法监督分类技术，获得了太原市城区的土地利用分布图(图 6)。由于逐年的土地类型变化明显不大，故通过计算土地利用类型的栅格象元统计 2016 年和 2020 年的土地变化情况，其中 2016 年建设用地占比 42.04%，水域用地占比 1.19%，生态用地占比 39.07%，耕地占比 17.70%，而截止 2020 年建设用地占比 43.19%，水域用地占比 0.92%，生态用地占比 38.21%，耕地占比 17.67%。根据 2016 年和 2020 年太原市城区土地利用类型的栅格象元统计结果，显示建设用地面积在这段时间内增加，而水域、生态用地和耕地面积略有减少。尤其是南部地区，耕地面积减少，转而向建设用地的增加趋势。北部地区的生态用地较为广泛，受益于植被的滞尘效果，有助于空气净化，从而降低  $PM_{2.5}$  浓度。与此相反，南部地区的耕地和建设用地增加，频繁的人类活动可能导致扬尘和煤烟等污染物的产生，进而增加  $PM_{2.5}$  浓度。另外，耕地具有季节性特征，作物在生长期能够净化空气，而作物收获期可能会产生扬尘，特别是秋冬季节，农作物秸秆焚烧会加剧空气污染。综上所述，太原市城区南部地区  $PM_{2.5}$  浓度高部于北部，东部高于西部。

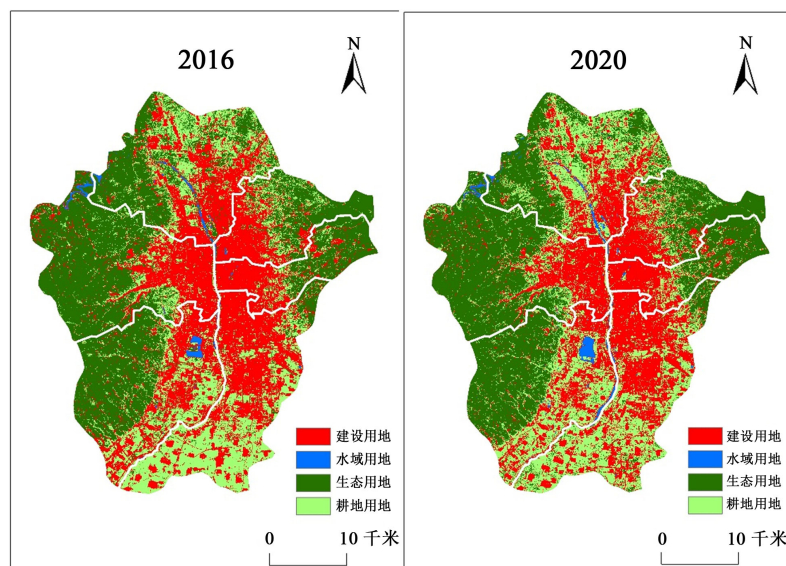


Table 6. Land type changes in Taiyuan City urban area in 2016 and 2020

图 6. 太原市城区在 2016 和 2020 年的土地利用变化图

### 5.4. 人为因素

#### 5.4.1. 工业结构

自 20 世纪 60 年代起，太原市的能源结构主要以煤炭为主，电力和石油为辅助，而其产业结构则过



于单一, 主要依赖于丰富的煤炭和石油资源, 致使大量颗粒污染物(如工业烟尘、粉尘)在能源消耗过程中排放, 严重破坏了太原市的环境质量。特别是在冬春季采暖期, 燃煤锅炉的运转需要消耗大量煤炭以供暖, 导致颗粒污染物大量排放, 直接导致  $PM_{2.5}$  浓度超标。近年来, 太原市加强了环境保护工作, 优化了能源消费结构, 并调整了三大产业结构, 这些举措在一定程度上改善了空气质量。

#### 5.4.2. 扬尘污染

随着太原市城市化进程的加速, 大量旧建筑被拆除改造, 同时住宅区域扩建, 交通基础设施的建设力度也增加, 导致大量工地扬尘和未经环保措施的煤堆残渣释放粉尘成为大气中颗粒物的重要来源。此外, 大型矿渣运输车的撒漏、碾压以及不恰当的道路清扫也会导致路面积尘反复扬起, 引发严重的二次扬尘污染。太原市环境监测部门分析显示, 扬尘占 40%, 烟尘为 28%, 其他污染物约占 32%, 表明扬尘污染是导致太原市空气质量下降的主要因素。

#### 5.4.3. 政策理念

在过去的 5 年中, 太原市城区的环境空气质量呈现出明显的改善趋势, 其中  $PM_{2.5}$  浓度逐年减少。这一变化得益于太原市政府在治理大气污染方面的决心和采取的一系列有力措施。政府将“战胜蓝天保卫战”作为重中之重任务, 并实施了多种手段, 包括“控气、控煤、控尘、控车”等, 以全面治理空气污染问题。这些举措的有效实施大大减少了太原市城区的细颗粒物污染, 使得空气质量得到了显著改善。然而, 需要注意的是, 随着太原市的城市化进程加快, 大量旧建筑被拆除改造, 交通基础设施的建设力度增大, 工地扬尘、未经环保措施的煤堆残渣等因素仍然是大气中颗粒物的重要来源。因此, 太原市仍需继续加大环境治理力度, 包括加强工地扬尘管控、提升煤炭利用效率、推动清洁能源替代、完善交通管理等措施, 以进一步改善空气质量, 保障居民的健康和城市的可持续发展。

## 6. 结论

1) 在时间上, 太原市城区的  $PM_{2.5}$  浓度呈现出明显的季节性差异, 以冬季最高、夏季最低的“V”形变化趋势为主, 这主要由于冬季的大气稳定性增强, 导致污染物积聚, 以及供暖季节燃煤排放和工业活动增加等因素所致, 而夏季  $PM_{2.5}$  浓度较低主要因为有利的气象条件和相对减少的工业排放。在年际尺度上, 2016 年至 2020 年间,  $PM_{2.5}$  平均浓度呈下降趋势, 环境治理力度增加、产业结构调整等因素发挥了作用。

2) 在空间上, 同一季节内的  $PM_{2.5}$  浓度具有较小的空间差异, 而太原市城区在冬季期间南部稍微比北部偏高。而在年际尺度上,  $PM_{2.5}$  平均浓度在南部稍微比北部偏高, 东部稍微比西部偏高。地形因素在空气质量中发挥关键作用, 夏季山地可能阻挡污染物输入, 而冬季山地环绕可能导致冷空气滞留, 加剧了  $PM_{2.5}$  浓度的积聚。此外, 土地利用类型差异也影响  $PM_{2.5}$  浓度分布, 南部地区的城市化和工业化程度较高, 而北部地区的生态环境保护较好, 导致两者之间的  $PM_{2.5}$  浓度差异。工业结构、扬尘污染和环保政策等人为因素也在太原市城区空气质量变化中发挥着重要作用。

## 参考文献

- [1] Lin, Y., Zou, J., Yang, W., et al. (2018) A Review of Recent Advances in Research on  $PM_{2.5}$  in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **15**, e438. <https://doi.org/10.3390/ijerph15030438>
- [2] Geng, G., Zheng, Y., Zhang, Q., et al. (2021) Drivers of  $PM_{2.5}$  Air Pollution Deaths in China 2002-2017. *Nature Geoscience*, **14**, 645-650. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00792-3>
- [3] 耿天召, 朱余, 魏帆, 等. 基于多种源解析技术的合肥市环境空气  $PM_{2.5}$  来源解析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(6): 830-838.
- [4] 吴丹, 张立平, 夏广锋, 等. 沈阳市大气中  $PM_{2.5}$  来源解析研究[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(1): 18-22.

- [5] 曹广翰, 曹天慧, 朱绍东等. 基于 CMAQ-ISAM 模型的长三角典型城市  $PM_{2.5}$  来源解析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 803-812.
- [6] 高冉冉, 刘立忠, 刘焕武, 等. 西安南郊地区冬季  $PM_{2.5}$  质谱特征和来源解析[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(10): 156-163.
- [7] 纪晓腾, 马心怡, 马博健, 等. 邯郸市大气  $PM_{2.5}$  时空分布及季节性潜在源分析[J]. 环境科学学报, 2024, 44(2): 298-309.
- [8] 罗怡, 朱宽广, 陈璞珑, 等. 湖北咸宁细颗粒物  $PM_{2.5}$  来源[J]. 环境科学, 2023: 1-21.
- [9] Jerrett, M., Arain, A., Kanaroglou, P., et al. (2005) A Review and Evaluation of Intraurban Air Pollution Exposure Models. *The Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, **15**, 185-204.  
<https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500388>
- [10] 李佳乐, 谷洪彪, 钱安. 北京市  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  季节变化特征与空间差异分析[J]. 防灾科技学院学报, 2020, 22(3): 54-9.
- [11] 程煜, 黄薇薇, 沈非, 等. 安徽省  $PM_{2.5}$  污染时空分布特征及影响因素分析[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(2): 144-147.
- [12] 赵文斐, 于占江, 王让会, 等. 石家庄市  $PM_{2.5}$  时空特征及其对土地利用变化的响应[J]. 生态环境学报, 2020, 29(12): 2404-2413.
- [13] 张晋光. 太原市工业经济绿色转型研究[J]. 生态经济, 2011(2): 127-131.
- [14] 高秀清. 太原市工业能源消费与大气污染的相关性分析[J]. 山西能源学院学报, 2017, 30(2): 112-114.
- [15] 倪登峰, 刘素, 曹力媛, 等. 太原市采暖季  $PM_{2.5}$  组分特征及重污染事件分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(7): 2821-2828.
- [16] 张保留, 王健, 吕连宏, 等. 对资源型城市能源转型的思考——以太原市为例[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(1): 181-186.
- [17] 李梦航, 阙翔, 刘金福, 等. 中国城市  $PM_{2.5}$  影响因素的空间异质性分析[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2021, 37(1): 37-41.
- [18] 沙英琰, 翟畅. 长春市  $PM_{2.5}$  污染特征及影响因素分析[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(12): 120-121+134.
- [19] 阳欢, 陈佰满, 李建维, 等. 东莞市  $PM_{2.5}$  浓度时间变化特征及影响因素研究[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(6): 60-65.
- [20] 杨亚丽. 中原城市群  $PM_{2.5}$  的时空演化特征与影响因素研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2023(18): 95-97.