

# 商洛市大气污染特征及人群健康风险评估

刘 燕<sup>1,2</sup>, 冯若梅<sup>1</sup>

<sup>1</sup>商洛学院城乡规划与建筑工程学院, 陕西 商洛

<sup>2</sup>商洛市生态环境技术研究中心, 陕西 商洛

收稿日期: 2026年3月31日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年5月21日

## 摘要

基于商洛市近十年空气质量监测数据, 研究商洛市城区近十年间的大气污染特征并利用环境暴露风险评价模型对主要大气污染物开展人群健康风险评估。研究发现近十年来商洛市城区空气质量指数呈现出“V”字形的波动趋势, 7~10月空气质量最佳, 12月至次年2月污染最为严重。从不同年份来看, 大气颗粒物PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、NO<sub>2</sub>浓度在近十年间整体呈波动式下降趋势, O<sub>3</sub>下降趋势不明显。PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的年平均浓度在2015年和2016年超过了国家二级标准浓度限值。近十年间, 颗粒物PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的健康风险整体呈下降趋势, 反映商洛市城区空气质量整体较好。商洛市大气污染的主要污染物是PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>, 需进一步加强防控。研究结果可为相关管理部门决策提供理论依据, 促进商洛市空气质量和居民健康水平的进一步优化。

## 关键词

环境暴露风险评价模型, 大气污染特征, 健康风险评估

# Characteristics of Air Pollution and Health Risk Assessment for Population in Shangluo City

Yan Liu<sup>1,2</sup>, Ruomei Feng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Urban, Rural Planning and Architectural Engineering, Shangluo University, Shangluo Shaanxi

<sup>2</sup>Shangluo Ecological Environment Technology Research Center, Shangluo Shaanxi

Received: March 31, 2026; accepted: May 11, 2026; published: May 21, 2026

## Abstract

Based on the air quality monitoring data of Shangluo City in the past decade, this study investigates the characteristics of atmospheric pollution in the urban area of Shangluo City during the past decade

and conducts a human health risk assessment on major air pollutants using an environmental exposure risk assessment model. The study finds that the air quality index in the urban area of Shang Luo City has shown a “V”-shaped fluctuation trend in the past ten years, with the best air quality from July to October and the most serious pollution from December to February of the following year. From the perspective of different years, the concentrations of atmospheric particulate matter  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ , and  $NO_2$  have shown an overall fluctuating downward trend in the past decade, while the downward trend of  $O_3$  is not obvious. The annual average concentrations of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  exceeded the concentration limits of the national second-level standards in 2015 and 2016. Over the past decade, the health risks of particulate matter  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  have shown an overall downward trend, reflecting that the overall air quality in the urban area of Shangluo is relatively good. The main air pollutants in Shangluo City are  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$ , which need to be further strengthened in prevention and control. The research results can provide a theoretical basis for decision-making by relevant management departments and promote the further optimization of air quality and residents' health level in Shangluo City.

## Keywords

Environmental Exposure Risk Assessment Model, Characteristics of Atmospheric Pollution, Health Risk Assessment

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

随着全球工业化与城镇化的快速推进, 大气污染已成为威胁人类健康与城市可持续发展的重要环境问题。世界卫生组织(WHO)数据显示, 每年全球约 700 万人因大气污染暴露导致呼吸系统疾病、心血管疾病等过早死亡, 凸显大气环境质量与公共健康之间的紧密关联[1]。在中国, 以  $PM_{2.5}$ 、 $O_3$  (臭氧) 为代表的复合型污染问题日益突出, 其健康风险在城市化进程加速的背景下呈现出显著的空间分异特征。作为生态文明建设的核心议题, 如何科学量化污染暴露对人群健康的影响机制, 并以此构建差异化的健康防护体系, 成为环境管理与公共健康领域的研究热点。

$PM_{2.5}$  (细颗粒物)是指空气动力学直径小于等于 2.5 微米的颗粒物, 主要来源于机动车尾气、燃煤及二次化学反应, 可穿透肺泡进入血液, 引发呼吸和心血管疾病;  $PM_{10}$  (可吸入颗粒物)指直径小于等于 10 微米的颗粒物, 主要来自扬尘和沙尘, 易沉积于呼吸道引发炎症;  $O_3$  (臭氧)是  $NO_x$  (氮氧化物)和 VOCs (挥发性有机物)经光化学反应生成的二次污染物[2], 高浓度时会刺激呼吸道并加剧健康风险[3];  $NO_2$  (二氧化氮)主要由燃烧排放产生, 可诱发呼吸系统疾病并参与光化学烟雾和酸雨形成。AQI (空气质量指数)是综合  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $O_3$ 、 $NO_2$ 、 $SO_2$ 、CO 六项污染物浓度计算的空气质量评价指标, 数值越高污染越重。

国外在大气污染与健康风险的相关研究上起步较早, 尤其注重多污染物协同效应及长期暴露的健康影响。Mahdih Danesh Yazdi 等通过队列研究发现,  $PM_{2.5}$  和  $NO_2$  的长期暴露可显著增加肺癌和心血管疾病死亡率, 且低浓度污染仍具有显著健康风险[4]。Pozzer 等研究指出, 大气污染物如  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  对人类健康的危害显著, 尤其是在气候变化和人口增长的背景下, 并通过多模型分析, 评估了不同减排策略对降低健康风险的潜在效果[5]。在方法学上, 国外研究广泛采用健康风险评估模型, 如时间序列分析、地理信息系统结合暴露评估, 并引入机器学习技术提升预测精度。例如, 美国环保署(EPA)开发的 BenMAP 模型[6], 可量化不同污染情景下的健康经济损失, 为政策制定提供依据。Pun 等在研究时证实  $PM_{2.5}$  长期暴露与呼吸系

统疾病、心血管疾病发病率呈正相关,且儿童、老年人等敏感人群风险更高[7]。国内关于大气污染特征及健康风险的研究已形成较为系统的框架。在健康风险评估领域,国内学者多采用流行病学调查与污染物暴露模型结合的方法。在大气污染特征分析方面,研究者多聚焦于污染物的时空分布、来源解析及影响因素。例如,张好艳等针对洛阳市的研究表明,PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>是其主要污染物,污染呈现季节性和区域性差异,冬季燃煤和工业排放导致PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>污染加剧,而O<sub>3</sub>夏季受光化学反应影响显著[8]。陈晨、吴婷对商洛市城区大气环境质量变化趋势研究时指出,商洛市的空气质量问题以煤烟型污染为主,PM<sub>10</sub>和SO<sub>2</sub>为主要污染物,冬季受地形和逆温层影响,污染物扩散能力弱,导致污染加重[9]。

商洛市作为全国康养产业20强市,每年吸引着大量旅居人群。根据2023年文旅局数据,慢性病患者及亚健康群体占康养客流的62%。本研究以商洛市这一典型康养城市进行案例分析,根据相关文献选取PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>四类特征污染物以及AQI(空气质量指数)[10],分析近十年商洛市空气质量变化趋势并评估其对人群健康的风险。该研究不仅填补商洛地区在此方面的研究空白,也为《健康商洛2030行动计划》从“环境质量达标”向“健康风险管控”的治理范式转型提供科学支撑。

## 2. 研究区概况

商洛市位于秦岭南麓东段,地处鄂豫陕三省交界,属暖温带向亚热带过渡性气候。全市森林覆盖率达69.56%,年均空气质量优良天数连续七年超过330天,2021年PM<sub>2.5</sub>平均浓度为25 μg/m<sup>3</sup>(接近国家一级标准限值25 μg/m<sup>3</sup>),负氧离子含量峰值达2.1万个/cm<sup>3</sup>[11]。凭借优良的生态基础条件,商洛市成为全国首批“国家生态文明建设示范区”和西北首个“中国康养之都”[12]。然而,优越的生态环境也使得当地居民及康养人群对大气污染物的敏感性显著增强。

商洛市作为陕西省的“生态绿肺”,凭借得天独厚的生态条件与严格的环保措施,近年来在环境治理和大气污染防治方面取得了不小的进展。商洛市近年来以PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>为首要污染物[9],其中冬季及春季受燃煤供暖、施工扬尘等污染源影响显著。该市通过能源消费结构调整与工业转型,推动燃煤清洁替代及扬尘精细化管控。2020~2023年,规模以上工业企业能源结构持续优化:煤炭消费占比从32.5%降至26.8%,清洁能源、电力消费占比分别提升4.3%、5.1%,生活垃圾资源化利用率达18%。产业结构同步调整,累计淘汰23家落后产能企业,钢铁、建材等高耗能行业产能压减15%,单位工业增加值能耗年均下降4.5%,2021年高耗能行业能源消费增速放缓至1.2%[13]。受关中城市群污染物传输以及本地旅游交通的叠加影响,夏秋季O<sub>3</sub>和NO<sub>2</sub>的光化学反应较为活跃[14]。冬季燃煤和机动车尾气排放加剧[15],导致PM<sub>2.5</sub>中二次无机离子(如硫酸根、硝酸根和铵根离子)的占比超过60%。

## 3. 数据来源与研究方法

空气质量数据和空气质量指数数据均来源于陕西省空气质量实时发布系统,商洛市城区环境监测点有三个,分别是商洛市监测站、东龙山气象局、商州区中学。本文主要选取的空气污染物指标包括PM<sub>2.5</sub>(μg/m<sup>3</sup>)、PM<sub>10</sub>(μg/m<sup>3</sup>)、NO<sub>2</sub>(μg/m<sup>3</sup>)、O<sub>3</sub>(μg/m<sup>3</sup>)以及反应城区环境质量情况的空气质量指数和空气优良天数,均为2015~2024年数据,该时间段数据完整、无缺失[16]。根据第七次全国人口普查数据,商洛市18~60岁人群占比达到57%~58%,为全年龄段中占比例最高的群体,因此选取该年龄段人群作为重点研究对象,以反映区域人口结构的主要特征[17]。

### 3.1. 时间序列分析法

本文在分析大气污染物的时间变化规律时主要运用了年际变化分析,季度变化分析及月度变化分析。年际变化分析是将收集到的商洛市大气污染物数据PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>和空气优良天数以及空气

质量指数进行年际变化分析。

季度变化分析是将收集到的商洛市大气污染物数据 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 进行季度变化分析。

月度变化分析是对收集到的商洛市空气质量指数和空气优良天数进行月度变化分析。

### 3.2. 暴露剂量计算方法

大气污染物侵入人体主要存在三种路径：呼吸道吸入、皮肤渗透和消化道摄入。其中，在长期暴露场景下，经呼吸道吸入的污染物传输路径成为本研究重点聚焦的关键环节。因而，对所研究的四种大气污染物 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>，重点评估其经呼吸道吸入途径的危害。其中 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub> 经呼吸道的日均暴露剂量计算公式如下：

$$ADD = (C \times IR \times ED) / (BW \times AT) \quad (1)$$

在公式(1)中，ADD 代表的是非致癌物质经呼吸道的日均暴露剂量(mg/(kg·d))；C 代表了环境中该污染物的质量浓度(mg/m<sup>3</sup>)；BW 为人体质量(kg)；IR 为呼吸的速率(m<sup>3</sup>/d)；AT 指的是平均暴露时间(d)；ED 为暴露持续时间(d) [18]。对于暴露参数的选择，由于我国暂未公布人群的标准暴露评价参数，因此，将参照美国国家环境保护局提供的暴露参数值[19]。依据该参数要求，结合研究人群年龄范围为 18~60 岁的特点，选取表中相应数值(见表 1)。

**Table 1.** Exposure parameters entering the human body via the respiratory tract

**表 1.** 经呼吸道进入人体的暴露参数

年龄/岁	性别	BW/kg	IR/(m <sup>3</sup> /d)	ED/d	AT (非致癌)/d
18~60	男	62.7	19.02	30 × 365	30 × 365
	女	54.4	14.17	30 × 365	30 × 365

### 3.3. 大气污染健康风险评估模型

大气污染健康风险评估作为交叉学科研究领域，通过整合环境卫生学、环境流行病学与卫生毒理学等多学科理论，创新性地将大气环境质量与人群健康效应进行关联性分析。该评价方法依托系统的环境监测数据，结合暴露人群的生理特征及临床健康资料，从而定量地获得大气中有害因素对暴露群体的有害作用。本研究采用美国国家环境保护局提出的非致癌物通过呼吸道途径进入人体的非致癌风险评估模型[20]，对 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 四种污染物质进行风险评估。

1) 非致癌物质 NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 所导致的健康风险评估按照以下公式：

$$R_i = (ADD \times 10^{-6}) / (RfDi \times 70) \quad (2)$$

公式(2)中的  $R_i$  即非致癌污染物  $i$  经呼吸道途径所引起的健康风险，无量纲；ADD 是非致癌物质  $i$  经呼吸途径的日均暴露剂量(mg/(kg·d))； $10^{-6}$  指的是非致癌物质  $i$  的可接受风险水平； $RfDi$  为呼吸途径下非致癌性污染物  $i$  的参考剂量(mg/(kg·d))；70 是平均寿命(年)。O<sub>3</sub> 的  $RfD$  (呼吸途径)为 0.05 mg/(kg·d)，NO<sub>2</sub> 的  $RfD$  (呼吸途径)为 0.029 mg/(kg·d)。

2) 采用非致癌效应污染物健康风险评估模型对城市大气环境颗粒物(PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>)进行健康风险评估，其计算公式为：

$$R = C / RfC \times 10^{-6} \quad (3)$$

公式(3)中， $R$  表示污染物终生的健康风险，无量纲； $C$  为终生日均暴露剂量(μg/m<sup>3</sup>)； $RfC$  为待评价污染物的参考浓度(μg/m<sup>3</sup>)，PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 的  $RfC$  值分别为 25 μg/m<sup>3</sup> 和 50 μg/m<sup>3</sup>。

3) 健康风险可接受水平确定。本研究采用的是美国国家环境保护局推荐的健康风险可接受值, 为  $1 \times 10^{-6}/a \sim 1 \times 10^{-4}/a$ 。

### 3.4. 统计学分析

研究过程中, 将全部实验数据导入 SPSS 26.0 版本统计分析系统。针对部分数据, 运用专业统计方法开展深入剖析。本研究数据以  $\bar{x} \pm s$  的形式呈现, 并运用单因素方差分析方法进行组间比较。在统计学判断标准上, 当  $P \leq 0.05$  时, 判定组间差异具有统计学显著性。

## 4. 空气质量变化特征及健康风险评估

### 4.1. 商洛市空气质量变化特征分析

#### 4.1.1. 年空气质量指数变化趋势分析

空气质量指数定量描述空气质量状况及对人体健康的影响。该指数基于 6 项污染物( $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $CO$ 、 $O_3$ )实时监测数据, 按 0~500 分为六等级, 数值越高意味着空气污染程度越严重。对商洛市城区 2015~2024 年的空气质量指数统计分析发现, 年均指数变化趋势形似“V”字型波动趋势, 具体表现为每年年初 1、2 月及年末 12 月期间, 空气质量指数处于较高水平, 表明这几个时段空气污染状况较为突出; 而随着时间推移, 其余月份空气质量指数逐步走低, 其中每年 7~10 月空气质量指数达到年度最低值, 空气质量相对最佳(图 1)。

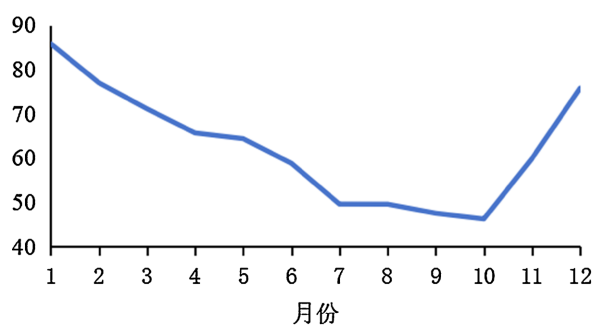


Figure 1. Trend chart of monthly average air quality index from 2015 to 2024

图 1. 2015~2024 年各月平均空气质量指数变化趋势图

#### 4.1.2. 商洛市城区空气优良天数变化趋势分析

基于 2015~2024 年的监测数据, 商洛市城区空气优良天数占比呈持续攀升趋势(详见表 2)。分月来看, 这种增长特征在 1 月、2 月、3 月及 12 月尤为显著: 2015~2024 年期间, 1 月优良天数占比从 70.9% 波动跃升至 87.1%, 2 月从 71.4% 提升至 86.2%, 3 月从 80.6% 增长至 93.6%, 12 月更是实现了从 85.7% 到 100% 的突破性提升。若按月份分布特征分析, 过去十年间, 商洛市空气质量优良天数比例在年内呈现明显差异, 1、2、3 月及 12 月均值处于全年低位, 而 7~10 月则成为空气质量最优时段, 该区间内各月优良天数占比均稳定超过 95%。

#### 4.1.3. 商洛市城区大气污染物浓度季度变化特征分析

本研究对 2015~2024 年商洛市城区不同季度的  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $NO_2$  及  $O_3$  四种主要污染物浓度变化展开对比分析。统计结果表明, 各污染物在不同季度间的浓度差异均具有显著性( $P < 0.05$ )。具体而言,  $NO_2$  和  $PM_{2.5}$  在每年第一季度和第四季度浓度水平较高, 空气污染状况较为突出; 而第二、三季度期间, 污染物的浓度明显下降, 空气质量相对更佳。 $PM_{10}$  的污染物浓度表现为在第一、二、四季度较高, 第三季度

较轻。O<sub>3</sub> 则表现为第一、四季度较轻; 第二、三季度较为严重(表 3~6)。

**Table 2.** Trend of proportion of good air quality days in Shangluo City urban area in the past decade  
**表 2.** 近十年商洛市城区空气优良天数占比变化趋势表

月份	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	均值
1	70.9%	67.7%	61.3%	83.9%	51.6%	70.9%	80.7%	83.9%	80.6%	87.1%	74%
2	71.4%	72.4%	89.3%	92.8%	85.7%	89.6%	85.7%	100.0%	78.3%	86.2%	85%
3	80.6%	71.0%	93.9%	100.0%	96.7%	96.8%	80.7%	87.1%	87.1%	93.6%	89%
4	86.7%	93.3%	93.3%	100.0%	96.7%	100.0%	93.3%	100.0%	76.7%	90.0%	93%
5	93.5%	77.4%	90.3%	100.0%	90.3%	90.4%	96.7%	93.5%	100.0%	100.0%	93%
6	90.0%	97.0%	93.3%	100.0%	86.7%	96.7%	83.3%	93.3%	100.0%	93.3%	93%
7	90.3%	100.0%	96.7%	100.0%	96.8%	100.0%	93.5%	100.0%	87.1%	100.0%	96%
8	96.8%	97.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	96.8%	99%
9	100.0%	90.0%	100.0%	100.0%	96.7%	100.0%	100.0%	93.7%	100.0%	93.4%	97%
10	93.6%	96.8%	100.0%	100.0%	96.8%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	99%
11	100.0%	73.3%	100.0%	96.7%	96.7%	96.7%	96.7%	93.7%	96.7%	100.0%	95%
12	85.7%	74.2%	77.4%	93.6%	93.6%	93.6%	90.3%	93.8%	90.3%	100.0%	89%

**Table 3.** Quarterly changes of PM<sub>2.5</sub> atmospheric pollutants in Shangluo City in the past decade ( $\bar{x} \pm s$ )  
**表 3.** 近十年商洛市大气污染物 PM<sub>2.5</sub> 的季度变化( $\bar{x} \pm s$ )

年份	PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )				F 值	P 值
	一季度	二季度	三季度	四季度		
2015	61.19 ± 32.34	34.03 ± 14.80	32.67 ± 13.84	46.68 ± 33.78	24.685	0.000
2016	57.34 ± 30.04	29.99 ± 11.92	24.65 ± 10.07	43.48 ± 26.94	41.885	0.000
2017	46.63 ± 24.95	26.90 ± 11.04	24.42 ± 9.74	36.85 ± 19.54	30.775	0.000
2018	40.19 ± 23.25	24.15 ± 9.92	21.97 ± 8.17	34.01 ± 20.85	23.292	0.000
2019	53.44 ± 29.24	23.36 ± 10.22	18.21 ± 8.82	31.53 ± 17.01	66.375	0.000
2020	44.76 ± 24.20	22.71 ± 7.915	17.09 ± 7.69	34.43 ± 17.64	54.748	0.000
2021	39.91 ± 24.13	21.48 ± 10.46	13.09 ± 5.68	27.60 ± 17.27	85.719	0.000
2022	43.22 ± 19.30	20.76 ± 9.11	15.92 ± 6.45	33.52 ± 17.09	70.422	0.000
2023	45.73 ± 26.99	26.41 ± 25.04	15.04 ± 6.56	26.07 ± 14.89	36.656	0.000
2024	45.09 ± 28.32	23.62 ± 9.93	16.17 ± 7.24	27.84 ± 14.45	47.423	0.000

**Table 4.** The quarterly variation of air pollutant PM<sub>10</sub> in Shangluo City over the past decade ( $\bar{x} \pm s$ )  
**表 4.** 近十年商洛市大气污染物 PM<sub>10</sub> 的季度变化( $\bar{x} \pm s$ )

年份	PM <sub>10</sub> (μg/m <sup>3</sup> )				F 值	P 值
	一季度	二季度	三季度	四季度		
2015	101.01 ± 45.57	71.07 ± 39.78	54.67 ± 26.16	78.41 ± 55.74	18.057	0.000
2016	111.12 ± 63.72	57.45 ± 26.83	44.03 ± 13.09	78.99 ± 43.33	45.938	0.000

续表

2017	75.62 ± 33.42	50.87 ± 22.09	42.34 ± 15.39	66.82 ± 34.42	30.616	0.000
2018	65.99 ± 30.44	52.13 ± 26.88	42.09 ± 14.66	60.54 ± 34.19	13.103	0.000
2019	82.34 ± 32.27	50.42 ± 27.01	34.02 ± 12.56	52.48 ± 21.96	61.262	0.000
2020	67.6 ± 41.02	52.13 ± 18.12	35.73 ± 12.36	60.72 ± 25.83	24.556	0.000
2021	79.98 ± 62.04	49.83 ± 36.08	26.56 ± 10.15	46.09 ± 19.17	31.800	0.000
2022	68.05 ± 38.80	48.96 ± 23.91	33.65 ± 10.52	62.28 ± 30.88	27.376	0.000
2023	86.64 ± 49.94	68.80 ± 90.02	34.85 ± 18.92	55.75 ± 31.42	14.579	0.000
2024	90.02 ± 125.62	56.91 ± 39.65	34.45 ± 20.58	50.32 ± 21.94	10.996	0.000

**Table 5.** The quarterly variation of air pollutant NO<sub>2</sub> in Shangluo City over the past decade ( $\bar{x} \pm s$ )**表 5.** 近十年商洛市大气污染物 NO<sub>2</sub> 的季度变化( $\bar{x} \pm s$ )

年份	NO <sub>2</sub> (μg/m <sup>3</sup> )				F 值	P 值
	一季度	二季度	三季度	四季度		
2015	28.58 ± 9.95	22.43 ± 5.37	19.29 ± 3.95	28.46 ± 11.44	28.230	0.000
2016	31.75 ± 11.59	20.85 ± 4.86	19.43 ± 5.34	31.77 ± 9.17	61.395	0.000
2017	30.50 ± 9.03	24.51 ± 5.49	22.45 ± 4.57	34.4 ± 9.66	48.917	0.000
2018	28.19 ± 11.27	21.82 ± 5.13	17.77 ± 3.47	33.33 ± 9.05	70.348	0.000
2019	30.46 ± 10.37	21.34 ± 5.20	15.21 ± 3.52	27.24 ± 8.55	75.289	0.000
2020	20.43 ± 10.23	21.48 ± 5.77	18.36 ± 5.18	31.35 ± 8.76	50.821	0.000
2021	27.45 ± 10.39	18.93 ± 5.08	13.09 ± 2.76	24.81 ± 9.69	63.802	0.000
2022	22.63 ± 8.04	18.73 ± 4.73	16.30 ± 5.38	29.01 ± 9.07	57.015	0.000
2023	25.34 ± 8.23	20.42 ± 4.71	18.43 ± 3.97	29.51 ± 7.94	54.241	0.000
2024	24.51 ± 9.80	16.60 ± 3.41	14.22 ± 3.95	28.27 ± 7.09	92.064	0.000

**Table 6.** The quarterly variation of air pollutant O<sub>3</sub> in Shangluo City over the past decade ( $\bar{x} \pm s$ )**表 6.** 近十年商洛市大气污染物 O<sub>3</sub> 的季度变化( $\bar{x} \pm s$ )

年份	O <sub>3</sub> (μg/m <sup>3</sup> )				F 值	P 值
	一季度	二季度	三季度	四季度		
2015	82.89 ± 20.80	114.89 ± 29.37	118.13 ± 22.64	67.37 ± 33.25	76.918	0.000
2016	95.88 ± 29.31	128.89 ± 24.42	113.76 ± 25.46	60.54 ± 21.35	124.105	0.000
2017	87.16 ± 19.35	120.23 ± 24.69	99.02 ± 30.22	61.16 ± 22.04	93.043	0.000
2018	80.56 ± 26.64	100.9 ± 24.37	95.02 ± 28.88	67.82 ± 30.23	26.524	0.000
2019	77.31 ± 21.76	108.96 ± 30.67	112.59 ± 26.48	63.54 ± 20.04	83.873	0.000
2020	85.00 ± 22.93	113.58 ± 26.60	97.75 ± 23.01	66.96 ± 23.45	61.715	0.000
2021	83.66 ± 22.43	112.21 ± 28.66	97.03 ± 27.98	68.55 ± 15.69	54.039	0.000
2022	83.51 ± 19.70	124.26 ± 23.37	109.53 ± 24.39	73.44 ± 22.94	96.757	0.000
2023	86.83 ± 20.70	109.15 ± 29.82	108.42 ± 28.54	69.88 ± 17.50	53.623	0.000
2024	82.56 ± 21.17	121.97 ± 24.43	99.77 ± 26.36	78.76 ± 20.83	65.268	0.000

#### 4.1.4. 商洛市城区大气污染物浓度年际变化趋势

经研究发现, 在 2015~2024 年期间, 商洛市城区大气污染物浓度在各年度间呈现出显著的统计学差异( $P < 0.05$ )。对照我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中规定的年平均浓度限值[21], 各项污染物浓度达标情况呈现不同特征:  $PM_{2.5}$  年平均浓度波动于  $28.15\sim 43.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 略高于国家二级标准限值  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $PM_{10}$  年平均浓度范围在  $50.46\sim 76.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 其中 2017~2024 年的监测数据均符合  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的国家二级标准要求, 而 2015 年( $76.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )和 2016 年( $72.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )的浓度值则稍高于国家二级标准。相比之下,  $NO_2$  年平均浓度处于  $20.91\sim 27.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$  区间, 显著低于  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的国家二级标准限值;  $O_3$  年平均浓度为  $86.06\sim 99.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 与  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的国家二级标准限值相比, 仍存在较大差距(表 7)。

**Table 7.** The interannual variation of air pollutant concentrations in Shangluo City ( $\bar{x} \pm s$ )

**表 7.** 商洛市大气污染物浓度年际变化情况( $\bar{x} \pm s$ )

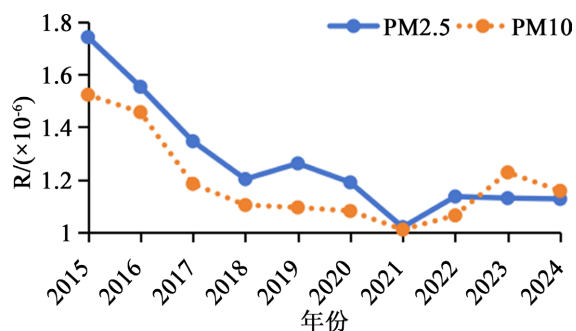
年份	$PM_{2.5}$	$PM_{10}$	$NO_2$	$O_3$
2015	$43.58 \pm 27.842$	$76.17 \pm 46.088$	$24.67 \pm 9.165$	$95.84 \pm 34.445$
2016	$38.84 \pm 24.998$	$72.84 \pm 48.294$	$25.95 \pm 10.058$	$99.7 \pm 35.870$
2017	$33.65 \pm 19.465$	$59.17 \pm 30.090$	$27.96 \pm 8.873$	$91.84 \pm 32.403$
2018	$30.04 \pm 18.346$	$55.14 \pm 28.864$	$25.27 \pm 9.835$	$86.06 \pm 30.407$
2019	$31.54 \pm 22.520$	$54.68 \pm 29.962$	$23.53 \pm 9.405$	$90.62 \pm 32.548$
2020	$29.73 \pm 19.149$	$54.01 \pm 29.033$	$22.92 \pm 9.223$	$90.78 \pm 29.439$
2021	$25.46 \pm 18.642$	$50.46 \pm 41.776$	$21.05 \pm 9.433$	$90.35 \pm 29.074$
2022	$28.38 \pm 17.568$	$53.17 \pm 30.857$	$21.67 \pm 8.509$	$97.69 \pm 30.339$
2023	$28.23 \pm 22.830$	$61.36 \pm 57.507$	$23.43 \pm 7.781$	$93.57 \pm 29.570$
2024	$28.15 \pm 20.004$	$57.84 \pm 70.106$	$20.91 \pm 8.703$	$95.73 \pm 28.827$
<i>F</i> 值	0.793	0.748	0.567	0.136
<i>P</i> 值	0.625	0.663	0.813	0.998

注:  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  单位为  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

## 4.2. 大气污染物人群健康风险评估

### 4.2.1. 商洛市城区大气污染物 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 健康风险变化

综合分析 2015 至 2022 年监测数据可知, 商洛市城区大气污染物中,  $PM_{2.5}$  对公众健康构成的潜在风险程度高于  $PM_{10}$ 。2023~2024 年间大气污染物  $PM_{10}$  的健康风险高于  $PM_{2.5}$ 。商洛市大气污染物  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  健康风险变化值最高为 2015 年,  $PM_{2.5}$  的健康风险值为  $1.74 \times 10^{-6}$ ,  $PM_{10}$  的健康风险值为  $1.52 \times 10^{-6}$ ; 最低为 2021 年,  $PM_{2.5}$  的健康风险值为  $1.01 \times 10^{-6}$ ,  $PM_{10}$  的健康风险值为  $1.00 \times 10^{-6}$ , 均小于美国国家环境保护局推荐的健康风险可接受值。从 2015 年到 2021 年, 商洛市城区  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的健康风险值均呈下降趋势。而 2021~2024 年期间, 商洛市城区  $PM_{2.5}$  的健康风险值先上升后下降趋于平稳,  $PM_{10}$  的健康风险值则为先上升后下降。值得关注的是,  $PM_{2.5}$  健康风险指数下降速率更为显著。与 2015 年相比, 2024 年  $PM_{2.5}$  健康风险指数已降至初始值的 66.1%; 同期,  $PM_{10}$  健康风险指数则为 2015 年水平的 75.7%, 显示出两种污染物对人体健康潜在威胁的持续缓解态势(图 2)。



**Figure 2.** Health risk changes of atmospheric pollutants PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Shangluo city  
**图 2.** 商洛市大气污染物 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 健康风险变化

#### 4.2.2. 商洛市城区大气污染物 NO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 健康风险评价

研究显示, 在 2015~2024 年监测周期内, 商洛市城区大气污染物 NO<sub>2</sub> 与 O<sub>3</sub> 的暴露风险值分别处于  $0.0027 \times 10^{-6}$ ~ $0.0042 \times 10^{-6}$ 、 $0.0064 \times 10^{-6}$ ~ $0.0086 \times 10^{-6}$  区间(表 8), 均显著低于美国国家环境保护局所建议的最大可接受风险水平。从时间序列分析, NO<sub>2</sub> 与 O<sub>3</sub> 对人群健康造成的潜在风险在近十年间呈现持续降低趋势。进一步按性别维度剖析发现, 不同性别在污染物暴露风险响应上存在显著差异( $P < 0.05$ ), 该结果具备统计学意义。

**Table 8.** Health risk assessment of atmospheric pollutants NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> for the population aged 18~60 in Shangluo City ( $R \times 10^{-6}$ )  
**表 8.** 商洛市大气污染物 NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 对于 18~60 岁人群的健康风险评价( $R \times 10^{-6}$ )

年份	NO <sub>2</sub>		O <sub>3</sub>	
	男	女	男	女
2015	0.0037	0.0032	0.0083	0.0071
2016	0.0039	0.0033	0.0086	0.0074
2017	0.0042	0.0036	0.0080	0.0068
2018	0.0038	0.0032	0.0075	0.0064
2019	0.0035	0.0030	0.0079	0.0067
2020	0.0034	0.0029	0.0079	0.0068
2021	0.0031	0.0027	0.0078	0.0067
2022	0.0032	0.0028	0.0085	0.0073
2023	0.0035	0.0030	0.0081	0.0070
2024	0.0031	0.0027	0.0083	0.0071
<i>P</i>	0.003		0.000	

## 5. 讨论与结论

总体来看, 在 2015~2024 年的监测周期内, 商洛市大气污染物浓度呈现出明显的时间变化特征。具体表现在, PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub> 年均浓度仅在 2015、2016 两年超出《环境空气质量标准》规定[21]的限值要求, 其余八个年度的监测数据均符合国家标准。NO<sub>2</sub> 与 O<sub>3</sub> 两种污染物的年均浓度在整个十年间均保持在国家规定的浓度限值以内, 未出现超标情况。交通治理领域, 针对 NO<sub>2</sub> 主要源自机动车尾气与工业排放的问题, 商洛市通过推广新能源货车 1800 余辆, 淘汰老旧柴油车 6200 台, 配套新建充电桩 850 个, 2022 年机动车尾气排放达标率提升至 92%。连续监测数据显示, PM<sub>2.5</sub> 年均浓度从 2015 年的  $43.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  下降为

2024年的 $28.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 降幅达35.2%;  $\text{PM}_{10}$ 年均浓度同步下降24.1%, 但冬春季仍阶段性超标。 $\text{O}_3$ 污染防治方面, 通过强化VOCs与 $\text{NO}_x$ 协同治理有所好转, 然而夏季的主要污染问题依然是臭氧污染。从空气优良天数来看, 2015至2024年间, 商洛市城区空气优良天数占比持续走高, 与同期大气污染物浓度变化趋势形成互证, 充分彰显了当地环保政策与治理措施的显著成效。

商洛市城区大气污染物浓度呈现显著的季节性分布特征。从污染物类型来看,  $\text{PM}_{2.5}$ 与 $\text{NO}_2$ 浓度在每年第一、四季度达到峰值, 而第二、三季度浓度水平明显降低;  $\text{PM}_{10}$ 浓度则在第一、二、四季度维持较高水平, 第三季度显著下降;  $\text{O}_3$ 浓度表现出与前三者相反的趋势, 于第二、三季度出现浓度高峰, 第一、四季度浓度显著回落。从空气质量综合评价指标分析来看, 每年12月至次年3月期间, 城区空气质量指数处于年度高位, 空气优良天数占比相对较低, 成为全年空气质量相对薄弱的时段。分析其主要原因为:

1) 商洛市地处秦岭山区, 地形闭塞导致冬季逆温频发, 污染物扩散受阻,  $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 易积聚[22];

2) 夏季高温强光则加剧臭氧生成。季节性气象差异显著——冬春低温少雨、风速低, 叠加燃煤采暖与扬尘活动, 颗粒物浓度升高; 夏秋虽扩散条件改善, 但光化学反应推高臭氧污染风险[23];

3)  $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染也可能与冬春季节气温较低密切相关。低温环境下, 取暖等能源消耗需求显著上升, 燃料使用量大幅增加; 同时, 为抵御寒冷天气, 居民选择汽车出行的频率也明显提高。

基于对四项大气污染物健康暴露风险的评估结果显示, 商洛市城区 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{NO}_2$ 及 $\text{O}_3$ 的健康风险值均显著低于美国国家环境保护局设定的推荐阈值, 这表明当地大气污染对居民健康构成的潜在威胁处于较低水平。纵向分析2015~2024年监测数据可见, 该城区大气污染物的人群健康风险呈现持续下行态势, 直观反映出区域大气环境质量的稳步改善。进一步对比发现, 大气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 是主导健康风险的关键污染物, 相较 $\text{PM}_{10}$ 而言, 其对公众健康的潜在威胁略高。

鉴于上述研究结论, 为保障居民身体健康, 建议采取针对性防护措施。在冬春污染高发季, 居民外出时应规范佩戴专业防护口罩; 遭遇雾霾等极端污染天气, 需尽量减少不必要的户外活动。通过落实此类防护策略, 可有效降低污染物暴露风险, 筑牢个人健康防线。

综上, 本研究系统剖析了2015~2024年间商洛市城区大气污染物浓度的时间演变规律, 并深入开展了健康风险评估。研究成果揭示了污染物时空分布特征与健康危害关联机制, 对区域大气污染防治工作具有重要的理论参考价值和实践指导意义。但由于研究周期和资源条件限制, 本研究在监测点位覆盖、污染物种类分析等方面仍存在一定局限性。后续研究将针对现存不足展开深化探索, 持续优化研究方法 with 数据体系, 以为环境治理决策提供更全面、精准的科学依据。

## 参考文献

- [1] 世界卫生组织: 空气污染导致全球每年700万人死亡[EB/OL]. <https://www.antpedia.com/news/60/n-2208260.html>, 2018-05-03.
- [2] 何舒. 区域VOCs联防联控最优减排方案研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [3] 王星. 关中平原城市群 $\text{O}_3$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 时空分布特征及其来源分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2024.
- [4] Wei, Y., Qiu, X., Yazdi, M.D., Shtein, A., Shi, L., Yang, J., et al. (2022) The Impact of Exposure Measurement Error on the Estimated Concentration-Response Relationship between Long-Term Exposure to  $\text{PM}_{2.5}$  and Mortality. *Environmental Health Perspectives*, **130**, Article ID: 077006. <https://doi.org/10.1289/ehp10389>
- [5] Pozzer, A., Steffens, B., Proestos, Y., Sciare, J., Akritidis, D., Chowdhury, S., et al. (2024) Atmospheric Health Burden across the Century and the Accelerating Impact of Temperature Compared to Pollution. *Nature Communications*, **15**, Article No. 9379. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53649-9>
- [6] 孟聪申, 刘静怡, 李亚伟. BenMAP-CE软件在中国空气污染健康风险评估中的应用[J]. 卫生研究, 2019, 48(4): 659-663.
- [7] Pun, V.C., Kazemparkouhi, F., Manjourides, J. and Suh, H.H. (2017) Long-Term  $\text{PM}_{2.5}$  Exposure and Respiratory, Cancer, and Cardiovascular Mortality in Older US Adults. *American Journal of Epidemiology*, **186**, 961-969.

- <https://doi.org/10.1093/aje/kwx166>
- [8] 张好艳. 影响洛阳市空气质量指数的 6 种污染物变化特征分析[J]. 农业灾害研究, 2020, 10(8): 71-73.
- [9] 陈晨, 吴婷. 商洛市城区大气环境质量变化趋势及防治对策[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(2): 198, 252.
- [10] 毛光瑞, 李宛真, 汪杰. 商洛市“十三五”环境空气质量评价[J]. 黑龙江环境通报, 2020, 33(2): 4-6.
- [11] 商洛市林业局. 商洛市森林覆盖率达到 69.56% [Z/OL].  
[https://lyj.shaanxi.gov.cn/zwxx/lydt/202104/t20210406\\_2158791.html](https://lyj.shaanxi.gov.cn/zwxx/lydt/202104/t20210406_2158791.html), 2021-04-06.
- [12] 商洛市人民政府办公室关于印发商洛市老龄事业发展和养老体系建设“十三五”规划的通知[EB/OL]. 2018-01-05.  
<https://www.shangzhou.gov.cn/info/1291/1337731.htm>, 2025-05-05.
- [13] 商洛市统计局. 商洛统计年鉴——2023 [Z/OL]. <https://www.shangluo.gov.cn/tjj/info/1091/1870.htm>, 2025-05-16.
- [14] 王星, 霍艾迪, 吕继强. 关中地区大气臭氧污染变化特征及其来源解析[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 3789-3798.
- [15] 蒋小梅, 孙雷涛, 王玲玲, 侯生贤, 范丽雅, 叶代启. 商丘市夏秋季臭氧光化学反应特征及减排策略[J]. 环境科学, 2024, 45(10): 5706-5714.
- [16] <https://www.aqistudy.cn/historydata/monthdata.php?city=%E5%95%86%E6%B4%9B>
- [17] 商洛市第七次全国人口普查主要数据公报[Z/OL]. 2021-06-09.  
<https://www.shangluo.gov.cn/info/1127/5961.htm>, 2025-05-08.
- [18] 洪燕, 谢海辉. 衡阳市城区大气污染特征分析及健康风险评估[J]. 湖南生态科学学报, 2023, 10(1): 86-92.
- [19] 胡芸迪, 陈楠. 银川市大气主要污染物特征与健康风险评估[J]. 公共卫生与预防医学, 2022, 33(2): 88-92.
- [20] 卜兴兵, 俸强, 廖肿, 等. 2016-2020 年成都市大气质量变化特征及健康风险评估[J]. 环保科技, 2021, 27(6): 18-24.
- [21] 生态环境部. 关于发布《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)修改单的公告[EB/OL].  
[https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/201808/t20180815\\_629602.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/201808/t20180815_629602.html), 2018-08-14.
- [22] 孟清, 白红英, 赵婷, 等. 秦岭山地气候变化的地形效应[J]. 山地学报, 2020, 38(2): 180-189.
- [23] 陈锦超. 合肥近地面臭氧浓度分布特征及影响因素[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.