



中国环境监测
Environmental Monitoring in China
ISSN 1002-6002, CN 11-2861/X

《中国环境监测》网络首发论文

题目：西安市区主要大气污染物暴露水平及健康风险评价
作者：麦尔哈巴·图尔贡，王鑫鑫，史兴民
收稿日期：2023-07-10
网络首发日期：2024-04-15
引用格式：麦尔哈巴·图尔贡，王鑫鑫，史兴民. 西安市区主要大气污染物暴露水平及健康风险评价[J/OL]. 中国环境监测.
<https://link.cnki.net/urlid/11.2861.X.20240412.1903.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

西安市区主要大气污染物暴露水平及健康风险评价

麦尔哈巴·图尔贡, 王鑫鑫, 史兴民
陕西师范大学地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119

摘 要: 为探索西安市区主要大气污染物暴露水平及健康风险状况, 基于空气质量监测数据和问卷调查数据, 使用 GIS 方法、美国国家环境保护局健康风险评价模型和多元线性回归模型, 对 2015—2020 年西安市区 6 种主要大气污染物 ($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 和 O_3) 的时间和空间变化特征, 以及 6 种污染物对公众的年均健康风险、季均健康风险及其影响因素进行了评价。结果表明: ①西安市区 2015—2020 年 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 NO_2 年均浓度值均超出了环境空气质量二级标准; 除 O_3 外, 其余 5 种污染物的年均浓度在 2020 年最小, 整体呈下降趋势, 说明西安市区空气质量逐年好转。② $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO 的空间分布特征基本一致, SO_2 和 O_3 的空间分布特征基本一致。经开区和阎良区监测点空气污染较严重, 兴庆小区 (碑林区) 和曲江文化产业集团 (曲江新区) 监测点空气质量相对较好。③ $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 等 5 种污染物的非致癌风险指数 (HI) 在冬季最高, 在夏季最低; O_3 的 HI 在夏季最高, 在冬季最低。在冬季, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的 HI 平均值均大于 1, 存在非致癌健康风险; SO_2 、 NO_2 、 CO 和 O_3 等 4 种污染物的 HI 平均值均小于 1, 不存在非致癌健康风险。在夏季, O_3 存在一定的非致癌健康风险, 超阈值天数占 4%; 其余 5 种污染物的 HI 平均值和最大值均小于 1, 不存在非致癌健康风险。从年均值来看, 6 种污染物的 HI 年均值均小于 1, 不存在非致癌健康风险。④男性、户外劳动者和老年人面临更高的大气污染物健康风险。
关键词: 大气污染物; 暴露水平; 健康风险; 西安市区
中图分类号: X820.4 **文献标识码:** A

Exposure Level and Health Risk Assessment of Major Air Pollutants in Xi'an City

TURHUN Marhaba, WANG Xinxin, SHI Xingmin
School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

Abstract: To explore the public haze exposure and health risks in Xi'an city, through air quality monitoring data and questionnaire survey data, the GIS method, USEPA health risk assessment model and multiple linear regression model were used to analyze the temporal and spatial variation characteristics of six haze pollutants ($PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO and O_3), and the average annual、seasonal health risks of six public pollutants and as well as their influencing factors evaluated in Xi'an city. The results showed that: ① The concentration values of $PM_{2.5}$, PM_{10} and NO_2 in Xi'an from 2015 to 2020 all exceeded the second-level ambient air quality standards. Except for O_3 , the concentration of the other five pollutants is the lowest in 2020, and the annual average concentration has trend of overall downward. It shows that the air quality of Xi'an is improving year by year. ② The spatial distribution of $PM_{2.5}$ is coincided with PM_{10} and CO . Similarly, the distribution of SO_2 and O_3 are basically the same. Among the 13 monitoring sites, Jingkai district and Yanliang district had serious haze pollution, while Beilin district and Qujiang district had good air quality. ③ In winter, the

收稿日期: 2023-07-10; 修订日期: 2024-01-22
基金项目: 教育部人文社会科学基金项目 (21YJA840014); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2022JM-151)
第一作者简介: 麦尔哈巴·图尔贡 (1995-), 女, 维吾尔族, 新疆阿图什人, 在读博士研究生, E-mail: maraba218@126.com
通讯作者: 史兴民

average HI values of $PM_{2.5}$ and PM_{10} are both greater than 1, indicating a non carcinogenic health risk; The average HI values of four pollutants, SO_2 , NO_2 , CO, and O_3 , are all less than 1, indicating no non carcinogenic health risk. In summer, there are non carcinogenic health risks associated with O_3 values, with 4% of days exceeding the threshold; The average and maximum HI values of the remaining 5 pollutants are all less than 1, indicating no health risk hazards. From the annual average, the average HI values of the six pollutants are all less than 1, indicating no non carcinogenic health risks. ④ Men, outdoor professionals, and older adults are at higher risk of haze health.

Keywords: air pollutants; exposure level; health risk assessment; Xi'an

随着工业化和城镇化的快速推进,很多城市的空气质量不容乐观。目前,大气污染已成为全球面临的重要环境问题之一^[1]。研究表明,大气污染不仅会降低大气能见度,还会引起各种呼吸系统疾病,增加疾病发病率和死亡率^[2]。以往,国内学者主要是参考美国国家环境保护局(USEPA)

《暴露参数手册》中的数据开展人体暴露和健康风险研究^[3]。但有研究^[4]表明,不同地域、性别、年龄的青少年的暴露特征不同,这就使得暴露参数和健康风险评价结果不够准确。通过实地调研获得的暴露参数会弥补上述缺点,但目前按研究区通过实地调研获得暴露参数数据的研究特别少见。

在健康风险评价研究中,多数研究只关注颗粒物中的有毒物质和化学元素对公众造成的健康风险。其中,国内的研究区域多集中在一些大城市^[5-7],如上海、北京、天津、厦门等,而国外的研究区域多为东南亚地区^[8-9]。有些研究倾向于进行对比研究,如雾霾时期与非雾霾时期的对比研究、室内与室外的对比研究,以及不同人口统计学特征人群的差异研究^[9-10],但这些研究主要集中在国外,国内的相关研究开展较少。亦有学者研究表明^[11],公众在冬季的大气污染物健康风险最高。目前,大气污染物健康风险研究的对象以 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 为主,鲜有研究针对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3 等 6 种大气污染物开展系统分析。

西安市属于暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明。城市建成区面积为 565.75 km^2 ^[12],全市常住人口为 1299.59 万^[13]。西安市是我国西部地区重要的经济中心、对外交往中心、丝路科创中心、丝路文化高地^[14],同时也是我国西北部最大的中心城市。西安市拥有众多常住人口和流动人口。受能源结构、产业结构、地形地势等因素的影响,西安市大气污染较为严重。因此,加强西安市大气污染物暴露水平和健康风险评价研究势在必行。

本研究以西安市区为研究区域,分析 2015—2020 年西安市区大气污染状况以及大气污染物健康风险。首先,根据研究区 13 个国控空气质量监测点监测数据,使用 ArcGIS 软件对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3 等 6 种大气污染物浓度进行反距离权重插值,获得每个受访者所住小区的精确空气质量数据,并对西安市区 6 种大气污染物的时间和空间变化特征进行分析。然后,通过问卷调查的方式获得每个受访者的健康风险暴露参数数据,使计算结果更为符合样本的个体特征。最后,将室外暴露量和室内暴露量相结合,得到公众的总暴露量,并对 6 种污染物的年均和季均健康风险进行评价。本研究的研究结果不仅可为相关环境保护管理和治理工作提供一定的支撑,还可为西安市公众健康防护提供一定的参考。

1 数据来源与评价方法

1.1 数据来源

1.1.1 空气质量监测数据

本研究数据主要来源于西安市 13 个空气质量国控监测站,数据内容为 2015 年 1 月至 2021 年 5

月每日PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO和O₃浓度。相关数据完整，未出现插值、缺失情况。PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂和CO浓度为24小时平均值，O₃浓度为日最大8小时平均值。计算时段浓度时，采用平均浓度。13个国控监测站点分布见图1。

1.1.2 健康风险暴露参数数据及健康风险影响因素数据

健康风险暴露参数数据及健康风险影响因素数据的获取方式为问卷调查。本研究共计发放问卷480份，收回有效问卷459份，问卷有效率为95.62%。问卷主要包含6个问题：①公众每天的活动地区有哪些；②公众进行的室外活动类型；③在长时间尺度下，公众习惯性从事的室外活动的强度和时长；④公众每周进行户外活动的天数；⑤公众对自身大气污染物暴露状况危害性的评价；⑥公众对自身大气污染物暴露状况非致癌风险的评价。

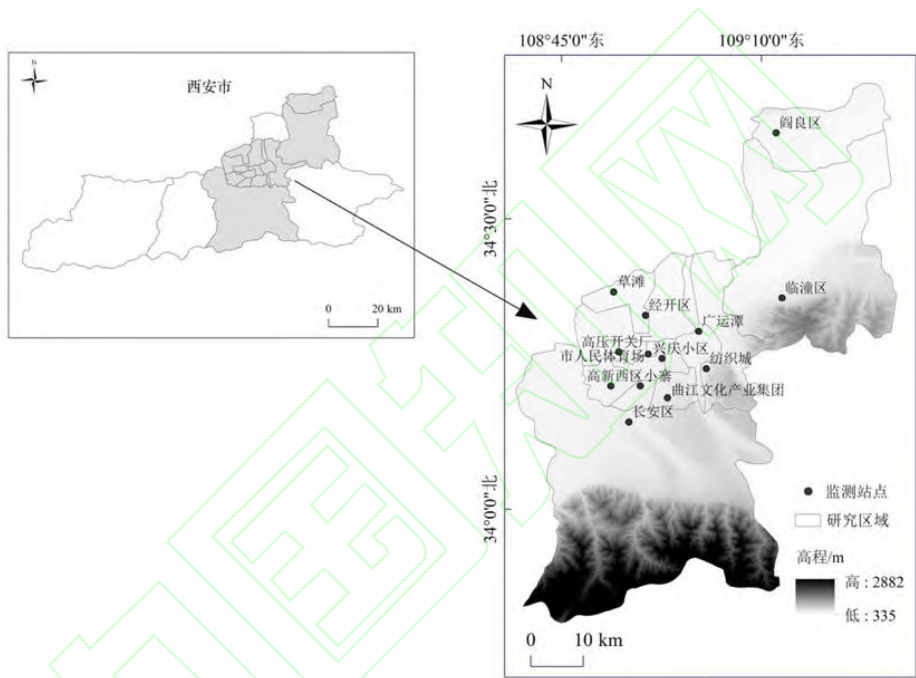


图1 研究区空气监测站点分布示意图
Fig.1 Distribution of air monitoring stations in study area

1.2 评价方法

1.2.1 暴露评估

本研究采用USEPA^[15-17]提出的呼吸途径非致癌风险指数（HI）来分析PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO和O₃对公众造成的健康风险。

（1）应用呼吸日均暴露量（ADD）来计算SO₂和NO₂的暴露量。对于SO₂、NO₂的室内和室外年日均暴露剂量，分别采用公式（1）和公式（2）进行计算^[15-17]。

$$ADD_{\text{年室外}} = \frac{C_{\text{年室外}} \times IR_{\text{室外}} \times ET_{\text{室外}} \times EF_{\text{年室外}} \times ED}{BW \times AT_{\text{年}}} \tag{1}$$

$$ADD_{\text{年室内}} = \frac{C_{\text{年室内}} \times IR_{\text{室内}} \times ET_{\text{室内}} \times EF_{\text{年室内}} \times ED}{BW \times AT_{\text{年}}} \tag{2}$$

式中：ADD_{年室外}是呼吸暴露对应的空气中污染物的室外年日均暴露量，mg/(kg·d)；ADD_{年室内}是保守估计的呼吸暴露对应的空气中污染物的室内年日均暴露量，mg/(kg·d)；C_{年室外}为室外污染物的年日均浓度，mg/m³；C_{年室内}为保守估计的室内污染物的年日均浓度，mg/m³；IR_{室外}是室外活动时的呼吸量，m³/d；IR_{室内}是室内活动时的呼吸量，m³/d；ET_{室外}指每天室外暴露时长，来自问卷，h/d；ET_{室内}指每天室内暴露时长，ET_{室内}=24-ET_{室外}，h/d；EF_{年室外}为室外年暴露频率，来自问卷，d/a；EF_{年室内}为室内年暴露频率，取值 365，d/a；ED 为暴露持续时间，来自问卷，a；BW 为体重，来自问卷，kg；AT_年为以年为单位的平均暴露时间，取值 ED×365，d。

在以往的研究中，SO₂ 和 NO₂ 的暴露量主要基于呼吸途径计算得到^[11, 18]，因而需要考虑呼吸量对公众日均暴露量的影响。相关研究^[19]表明，呼吸量可能受到年龄、性别、生理状况、体质和活动强度的影响。因此，本研究调查了公众的身高、体重、年龄、性别以及户外活动强度与时长等指标，并通过人体能量代谢估算法相关公式，计算得出公众在每种活动下的呼吸量^[19]。呼吸量具体计算过程参见参考文献^[19]和^[20]。室外呼吸量可细分为 IR_{休息}、IR_坐、IR_{轻微活动}、IR_{中体力活动}、IR_{重体力活动}和 IR_{极重体力活动}。由于室内大部分时间用于睡眠，所以 IR_{室内}取休息时的呼吸量。数据来源为经问卷调查获取受访者的体力活动类型、性别、年龄、身高和体重数据后，使用人体能量代谢估算法计算得出。

C_{年室内}=C_{年室外}×(I/O)，单位为 mg/m³。PM_{2.5} 的 I/O 值为室内 PM_{2.5} 浓度与室外 PM_{2.5} 浓度的比值，取值 0.4^[21-22]；PM₁₀ 的 I/O 值为室内 PM₁₀ 浓度与室外 PM₁₀ 浓度的比值，取值 0.4^[21, 23]；SO₂ 的 I/O 值为室内 SO₂ 浓度与室外 SO₂ 浓度的比值，取值 0.1^[24-25]；NO₂ 的 I/O 值为室内 NO₂ 浓度与室外 NO₂ 浓度的比值，取值 0.38^[24]；CO 的 I/O 值为室内 CO 浓度与室外 CO 浓度的比值，取值 0.6^[26]；O₃ 的 I/O 值为室内 O₃ 浓度与室外 O₃ 浓度的比值，取值 0.18^[24]。以上 I/O 值均为无量纲。

(2) 应用空气中污染物浓度的日均暴露量 (CNC) 来计算 PM_{2.5}、PM₁₀、CO 和 O₃ 的暴露量，在计算 CNC 时，不需要计算呼吸量。1989 年，USEPA 提出了一种针对特定场所的吸入途径污染物健康风险评价方法 (EPA/540/1-89/002)，并于 2009 年对该方法进行了更新调整 (EPA/40-R-070-002)。新方法指出，当评价吸入途径污染物健康风险时，可以使用空气中的化学物质的质量浓度作为暴露量，而不再使用基于人体呼吸量和体重计算得到的吸入摄入量^[27-28]。对于 PM_{2.5}、PM₁₀、CO、O₃ 的室内和室外年日均暴露剂量，分别采用公式 (3) 和公式 (4) 进行计算^[27-28]。

$$CNC_{年室外} = \frac{C_{年室外} \times ET_{室外} \times EF_{年室外} \times ED \times 1/24}{AT_{年}} \quad (3)$$

$$CNC_{年室内} = \frac{C_{年室内} \times ET_{室内} \times EF_{年室内} \times ED \times 1/24}{AT_{年}} \quad (4)$$

式中：CNC_{年室外}是室外空气中污染物非致癌反应年日均总暴露量，mg/m³；CNC_{年室内}是室内空气中污染物非致癌反应的年日均总暴露量，mg/m³；1/24 是小时与天的换算系数。

(3) 为了对比不同季节的暴露状况，本研究对暴露剂量计算公式进行了改进。对于 SO₂ 和 NO₂ 的室内和室外季日均暴露剂量，分别采用公式 (5) 和公式 (6) 进行计算。

$$ADD_{季室外} = \frac{C_{季室外} \times IR_{室外} \times ET_{室外} \times EF_{季室外} \times ED}{BW \times AT_{季}} \quad (5)$$

$$ADD_{季室内} = \frac{C_{季室内} \times IR_{室内} \times ET_{室内} \times EF_{季室内} \times ED}{BW \times AT_{季}} \quad (6)$$

式中：ADD_{季室外}是呼吸暴露对应的空气中污染物的室外季日均暴露量，mg/(kg·d)；ADD_{季室内}是保守估计的呼吸暴露对应的空气中污染物的室内季日均暴露量，mg/(kg·d)；C_{季室外}为室外污染物的季日均浓度，mg/m³；C_{季室内}为保守估计的室内污染物的季日均浓度，mg/m³；EF_{季室外}为每个季节的室外暴露频率，来自问卷，d/a；EF_{季室内}为每个季节的室内暴露频率，取值 91，d/a；AT_季为以季节为单位的平均暴露时间，取值 ED×91，d^[29]。

(4) 对于 PM_{2.5}、PM₁₀、CO 和 O₃ 的室内和室外季日均暴露剂量，分别采用公式 (7) 和公式

(8) 进行计算。

$$CNC_{季室外} = \frac{C_{季室外} \times ET_{室外} \times EF_{季室外} \times ED \times 1/24}{AT_{季}} \quad (7)$$

$$CNC_{季室内} = \frac{C_{季室内} \times ET_{室内} \times EF_{季室内} \times ED \times 1/24}{AT_{季}} \quad (8)$$

式中：CNC_{季室外}是室外空气中污染物非致癌反应的季日均总暴露量，mg/m³；CNC_{季室内}是室内空气污染物非致癌反应的季日均总暴露量，mg/m³。

1.2.2 健康风险评价方法

有关研究表明^[11,18]，空气中的 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 为非致癌物质。对于 CO 和 O₃，目前并未有明确的证据证明其属于致癌物质^[15-17]。CO 的污染水平较低，而 O₃ 污染则是在近些年才逐渐引起公众的重视。在 USEPA 等机构发布的相关文件中，并未公布 CO 和 O₃ 的风险参考剂量。结合上述情况，本研究将 CO 和 O₃ 作为非致癌物质进行健康风险评价。本研究中的参考浓度（RfC）采用的是世界卫生组织（WHO）^[30]规定的 PM_{2.5}、PM₁₀ 的 24 h 平均浓度准则值（分别为 25、50 μg/m³），O₃ 的 8 h 平均浓度准则值（100 μg/m³）。由于 WHO 未公布 CO 的准则值，本研究采用我国《环境空气质量标准》（GB 3095—2012）^[31]中的 CO 的 24 h 平均浓度限值（4 μg/m³）作为准则值。相关浓度限值如表 1 所示。

表 1 环境空气污染物浓度准则值^[31]

Table 1 Concentration limits of ambient air pollutants

污染物项目	平均时间	限值/准则值
CO/(mg/m ³)	24 h 平均	4
O ₃ /(μg/m ³)	8 h 平均	100
PM _{2.5} /(μg/m ³)	24 h 平均	25
PM ₁₀ /(μg/m ³)	24 h 平均	50

对 PM_{2.5}、PM₁₀、CO、O₃ 年日均暴露剂量和季日均暴露剂量对应的健康风险进行评价，分别采用公式（9）和公式（10）进行计算：

$$HI_{年} = \frac{CNC_{年总}}{RfC} \quad (9)$$

$$HI_{季} = \frac{CNC_{季总}}{RfC} \quad (10)$$

式中：HI_年为非致癌性污染物的年日均健康风险；HI_季为非致癌性污染物的季日均健康风险；RfC 为参考浓度，PM_{2.5}、PM₁₀、CO、O₃ 的 RfC 值分别为 0.025、0.05、4、0.1 mg/m³^[30-32]；CNC_{年总}是空气中污染物非致癌反应年日均总暴露量，等于 CNC_{年室外}与 CNC_{年室内}之和；CNC_{季总}是空气中污染物非致癌反应季日均总暴露量，等于 CNC_{季室外}与 CNC_{季室内}之和。

对 SO₂、NO₂ 年日均暴露剂量和季日均暴露剂量对应的健康风险进行评价，分别采用公式（11）和公式（12）进行计算：

$$HI_{年} = \frac{ADD_{年总}}{RfD} \quad (11)$$

$$HI_{季} = \frac{ADD_{季总}}{RfD} \quad (12)$$

式中：RfD 为参考剂量，SO₂ 和 NO₂ 的 RfD 值（呼吸途径）分别为 0.023 mg/(kg·d)和 0.029 mg/(kg·d)^[18,33]；ADD_{年总}是呼吸暴露对应的空气中污染物的年日均总暴露量，等于 ADD_{年室外}与 ADD_{年室内}之和；ADD_{季总}是呼吸暴露对应的空气中污染物的季日均总暴露量，等于 ADD_{季室外}与 ADD_{季室内}之和。

之和。当 $HI < 1$ 时，表明公众每天摄入的污染物剂量低于反应的阈值，非致癌风险处于可接受范围内；当 $HI \geq 1$ 时，表明公众每天摄入的污染物剂量超过了反应的阈值，非致癌风险处于不可接受的范围内，可能会对公众健康造成不良影响。

1.2.3 反距离权重插值法

在问卷调查过程中，会记录受访者的地理位置并询问其居住的小区。结合百度地图中的坐标拾取工具，获得受访者所居住小区的经纬度。根据西安市 13 个国控空气质量监测点的空气质量数据和地理坐标数据，在 ArcGIS 平台上对 6 种污染物的监测数据进行反距离权重插值，并将插值提取至每一个样本点，最终获得每个受访者所住小区的精确空气质量数据，以便精确进行暴露量计算和健康风险评价。

1.2.4 多元线性回归模型

鉴于公众健康风险受多个变量的影响，选用多元线性回归模型进行分析。多元线性回归模型是用来研究在线性相关条件下，一个以上的自变量对一个因变量产生的影响。回归分析可以准确地计量各影响因素之间的相关程度与回归拟合程度，从而做出优选，提高预测方程的效果。

2 结果与讨论

2.1 6 种污染物的时间变化特征

西安市区 2015—2020 年 6 种主要大气污染物的年平均浓度如图 2 所示。6 年期间，西安市区 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 NO_2 年平均浓度均超出《环境空气质量标准》（GB 3095—2012）二级标准限值^[31]。 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 等 5 种污染物年平均浓度的线性拟合结果显示，回归系数（A）均为负值，2020 年的年平均浓度值最小， PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度仍较高，表明 5 种污染物的年平均浓度整体均呈下降趋势，西安市区空气质量整体逐年好转，但还未完全达到国家空气质量标准。 O_3 年平均浓度的拟合回归系数为正值（ $A=1.9405$ ），但不显著（ $P=0.231>0.1$ ），表明 O_3 年平均浓度整体呈现缓慢上升趋势。

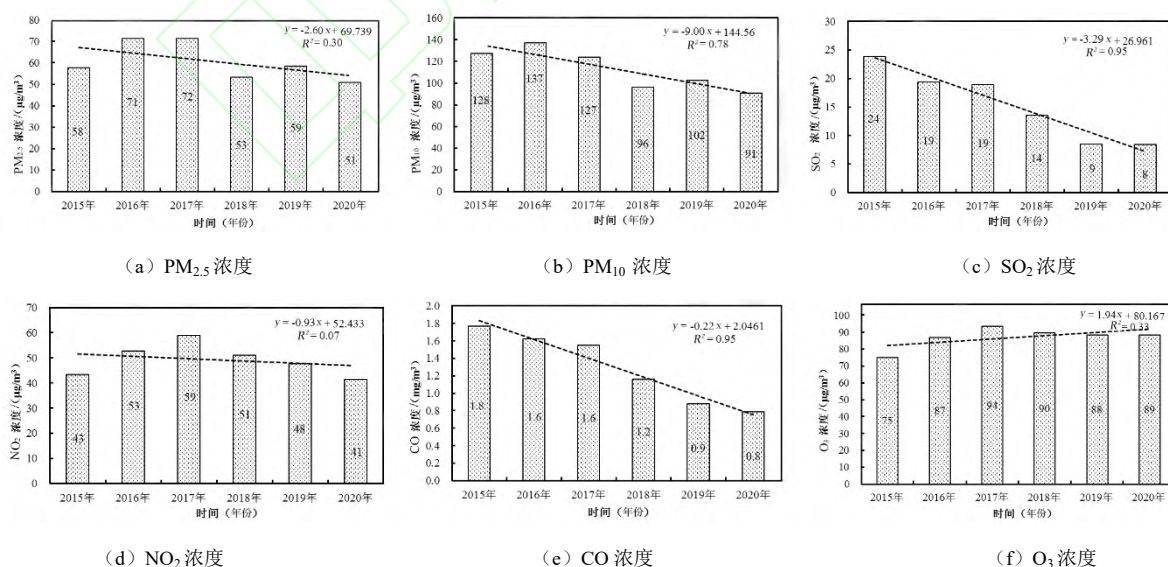
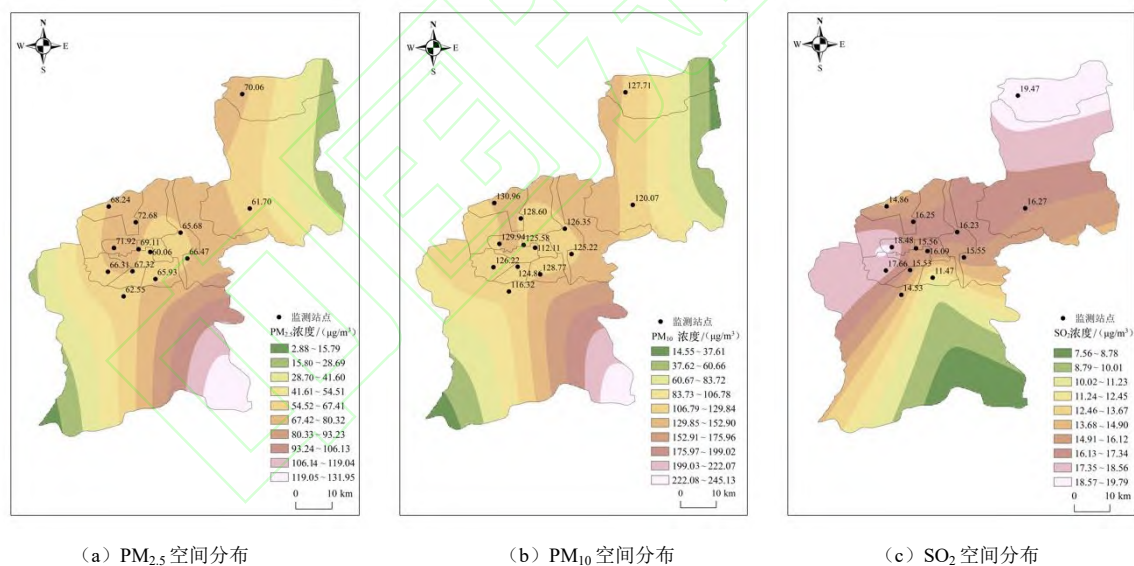


图 2 研究区 2015—2020 年 6 种主要大气污染物的年平均浓度

Fig.2 Annual average concentrations of six air pollutants in the research area from 2015 to 2020

2.2 6种污染物的空间变化特征

2015—2020年西安市区6种主要大气污染物浓度均值的空间分布如图3所示。PM_{2.5}、PM₁₀和CO浓度均值的空间分布格局基本一致，高值区主要出现在研究区东南部，低值区主要出现在研究区东北部和西南部。SO₂和O₃浓度均值的空间分布基本一致，高值区主要出现在研究区北部（部分O₃浓度高值区还出现在了西南部），低值区主要出现在研究区东南部。NO₂浓度高值区主要分布在研究区中部，低值区主要分布于研究区东北部。其中，经开区监测点的PM_{2.5}、PM₁₀和CO浓度均值最高，说明经开区的大气污染相对严重。经开区是国家级出口加工区和国家新型工业化产业示范基地，同时也具备临空、沿站、滨河、高速公路交会和地铁密集的特征，因此，汽车尾气和工业排放是经开区PM_{2.5}、PM₁₀和CO的主要来源^[34-35]。阎良区监测点的SO₂和O₃浓度均值最高，说明研究区东北部硫化物和O₃污染较为严重。此外，阎良区监测点的PM_{2.5}、PM₁₀和CO浓度均值同样较高。阎良区为重要的航空工业基地，生产、试飞等环节对空气质量存在一定的影响。在13个监测点中，长安区监测点的CO浓度均值最低，兴庆小区监测点（碑林区）的PM_{2.5}、PM₁₀浓度均值最低，曲江文化产业集团监测点（曲江新区）的SO₂和O₃浓度均值最低。曲江新区是以文化产业和旅游产业为主导的国家级文化产业示范区，工业污染较少，但受绕城高速交通源和地形因素（骊山、白鹿原的阻挡）等的影响，其PM_{2.5}、PM₁₀和CO浓度均值较高，因此，需要进一步加强曲江新区移动源管理。



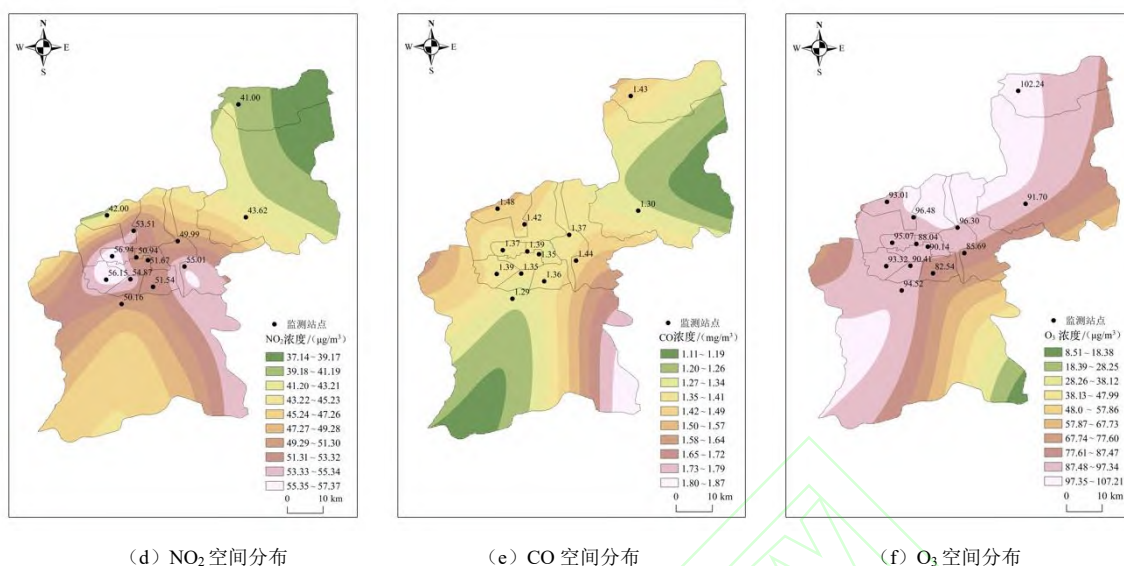


图 3 研究区 6 种主要大气污染物的 2015—2020 年均值空间分布

Fig.3 Spatial distribution map of six-year average values of six air pollutants in the research area

2.3 6 种污染物的健康风险评价

研究区 2021 年 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 和 O_3 等 6 种大气污染物的分季节 HI 分布如图 4 所示。 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 等 5 种污染物的 HI 平均值均在冬季最高，夏季最低； O_3 的 HI 平均值在夏季最高，冬季最低。冬季的 HI 平均值排序为 $PM_{2.5}$ (1.42) > PM_{10} (1.25) > CO (0.29) > O_3 (0.20) > NO_2 (0.15) > SO_2 (0.03)。其中： $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的 HI 平均值均大于 1， $PM_{2.5}$ HI 值超阈值天数占比为 99.3%， PM_{10} HI 值超阈值天数占比为 97.6%，表明 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 存在非致癌健康风险；其余 4 种污染物的 HI 平均值及最大值均小于 1，说明不存在非致癌健康风险。春季的 6 种污染物 HI 平均值排序为 PM_{10} (1.24) > $PM_{2.5}$ (0.76) > O_3 (0.35) > CO (0.16) > NO_2 (0.13) > SO_2 (0.02)。 PM_{10} 春季 HI 平均值大于 1，且超阈值天数占比为 95.6%，因此， PM_{10} 存在非致癌健康风险。虽然其余 5 种污染物的春季 HI 平均值均小于 1，但 $PM_{2.5}$ HI 值超阈值天数占比为 8.1%， $PM_{2.5}$ 存在一定的非致癌健康风险。夏季的 6 种污染物 HI 平均值排序为 O_3 (0.51) > PM_{10} (0.49) > $PM_{2.5}$ (0.43) > CO (0.14) > NO_2 (0.08) > SO_2 (0.01)。6 种污染物的夏季 HI 平均值均小于 1，但是 O_3 HI 值超阈值天数占比为 4%，表明夏季 O_3 污染可能存在潜在性危害。秋季的 6 种污染物 HI 平均值排序为 PM_{10} (0.85) > $PM_{2.5}$ (0.84) > O_3 (0.35) > CO (0.20) > NO_2 (0.13) > SO_2 (0.02)。6 种污染物的秋季 HI 平均值均小于 1，属可接受风险水平。 $PM_{2.5}$ HI 值超阈值天数占比为 14.2%， PM_{10} HI 值超阈值天数占比为 15%，因此， $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 存在一定的非致癌风险，具有潜在危害。

6 种污染物的 HI 年平均值均小于 1，但 $PM_{2.5}$ HI 值超阈值天数占比为 15.3%， PM_{10} HI 值超阈值天数占比为 24.4%，因此， PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 存在一定的非致癌健康风险，具有潜在性危害。 O_3 、 CO 、 NO_2 、 SO_2 等 4 种污染物的 HI 年平均值未超出阈值，不存在非致癌健康风险。总体来看，研究区 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 的 HI 最高值均出现冬季，最低值出现在夏季，说明研究区冬季大气污染比较严重。

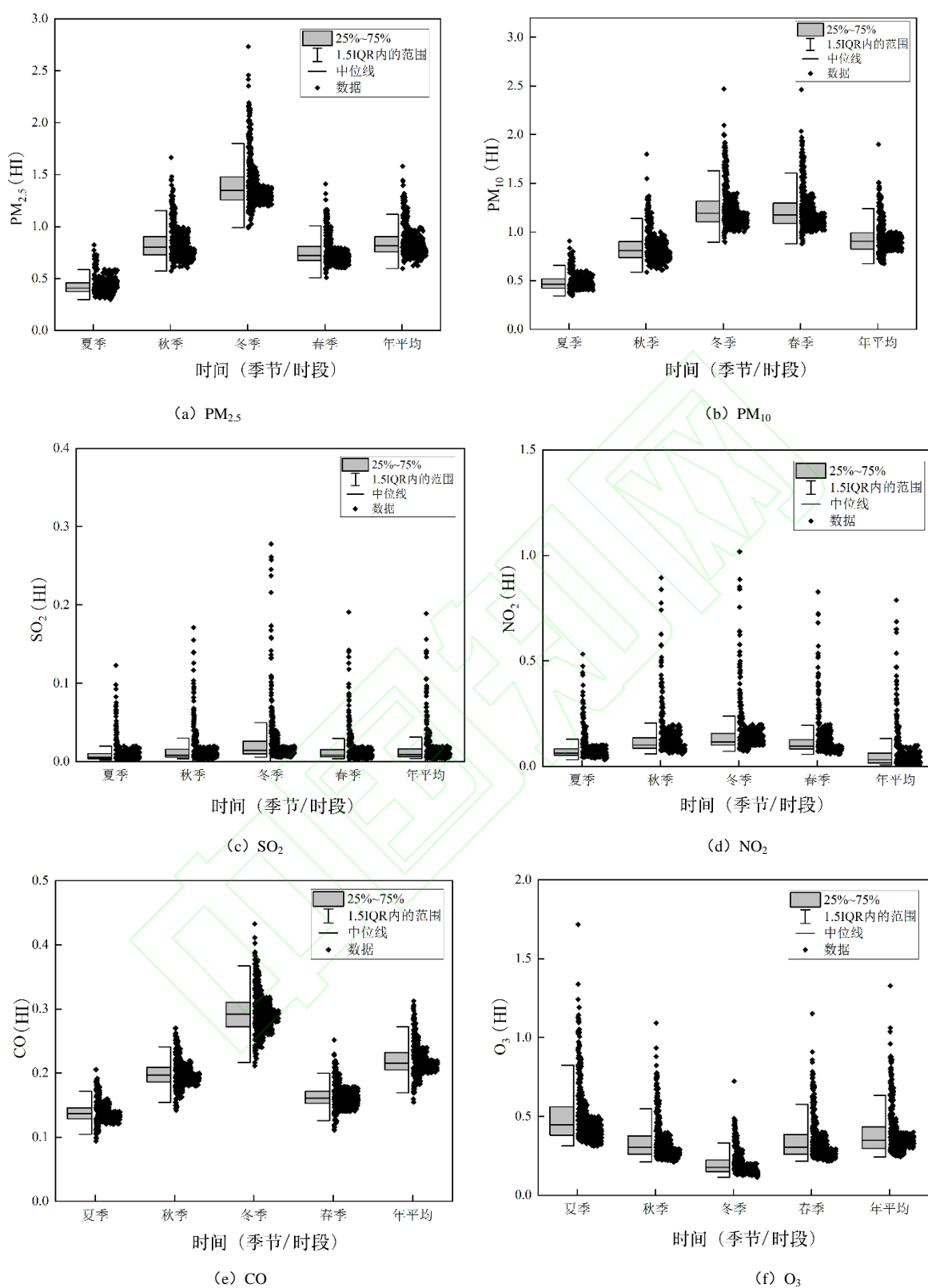


图 4 6 种污染物的健康风险

Fig.4 Health risk assessment chart of six pollutants

本研究进一步分析了大气污染物对公众造成的健康风险，以便更全面地了解污染物对人体的健

康危害。冬季6种污染物中，PM_{2.5}和PM₁₀的健康风险值较高。PM_{2.5}和PM₁₀具有难降解、毒性大、易富集等特点，被吸入肺部后，会引发肺部炎症，影响人体呼吸系统和心血管健康^[36]。冬季燃煤取暖会造成大量污染物排放。西安市位于关中盆地中部，处于秦岭和黄土高原之间，在冬季冷暖空气交汇状态下，易形成静稳天气，导致污染物不易扩散，PM_{2.5}和PM₁₀浓度升高。据统计^[37]，西安市2019年机动车保有量为359.42万辆，比2018年增长12.3%，工业增加值比2018年增长6.6%，PM_{2.5}和PM₁₀浓度相比2018年也存在一定增长。汽车尾气排放和工业排放是研究区PM_{2.5}和PM₁₀的主要来源之一。西安市区夏季O₃HI值较高，存在一定的非致癌健康危害。O₃会刺激呼吸道，导致肺部细胞损伤，从而造成慢性肺部疾病^[38]。此外，O₃还会影响植物生长。

2.4 大气污染物健康风险影响因素分析

使用多元线性回归模型对大气污染物引起的健康风险的影响因素进行分析。对于受访者来说，如果1种污染物存在健康风险（HI≥1），则记为1；如果6种污染物均存在健康风险，则记为6。为了明确西安市区大气污染物引起的健康风险的影响因素，将健康风险等级作为因变量，将公众性别、年龄、本地居住时长、家里是否有老人和小孩、是否属于户外劳动者和自我健康评价结果作为自变量，开展多元线性回归分析。多元线性回归结果（表2）显示，性别在0.1的显著性水平上对公众的大气污染物健康风险有显著的负向影响。具体来说，与女性相比，男性面临的大气污染物健康风险更高，这可能是由于大多数男性在日常工作和生活中面临更多的大气污染物暴露，并且男性相对缺乏污染防护意识，两因素叠加导致了男性的大气污染物健康风险要高于女性。年龄在0.01的显著性水平上对公众的大气污染健康风险有显著的正向影响，即公众的年龄越大，面临的大气污染物健康风险越高。与上班族相比，老年人往往拥有更多的可支配时间进行户外休闲和采购等活动，并且其本身的身体健康状况比较脆弱，因而老年人面临更高的大气污染物健康风险。是否属于户外劳动者在0.01的显著性水平上对公众的大气污染物健康风险存在显著的正向影响，即从事户外职业的公众会面临更高的大气污染物健康风险。较多研究表明，若室内无污染源，室内污染物浓度通常低于室外。因此，从事户外职业的公众在工作过程中可能会摄入更多的大气污染物，导致健康风险更高。总体来说，男性、老年人和户外劳动者具有更高的大气污染物健康风险。本地居住时长、家里是否有老人和小孩以及自我健康评价结果则对公众的大气污染物健康风险无显著影响。

表2 大气污染物健康风险影响因素
Table 2 Influencing factors of air pollutant health risk

模型	非标准化系数		标准化系数	t 统计量	显著性水平 (Sig.)
	回归系数	标准误差			
常量	0.275	0.254	—	1.084	0.279
性别	-0.112	0.064	-0.074	-1.757	0.080
年龄	0.007	0.002	0.151	3.026	0.003
本地居住时长	0.001	0.002	0.016	0.339	0.735
家里是否有老人和小孩	-0.010	0.074	-0.006	-0.139	0.890
是否属于户外职业	0.638	0.081	0.362	7.844	0.000
自我健康评价	0.039	0.039	0.040	0.991	0.322

注：“—”表示不涉及。

2.5 政策建议

根据本文研究结论，提出相关意见和建议，以期能为西安市大气污染防治和公众健康防护提供借鉴和参考。

1) 提升公众对相关污染物的防范意识，宣传防护知识，以降低大气污染物健康风险。政府部门应对公众加强大气污染基本知识和防护措施宣传。公众的个人防护行为对于降低公众大气污染物健康风险具有直接影响，因此，公众也应主动学习相关知识，避免因缺乏相关认知而使自身健康受

到损害。

2) 及时多渠道发布环境空气质量信息, 提高公众对空气质量的认知度。研究发现, 大部分公众对于空气质量的判断主要是根据个人经验。与天气状况播报相比, 公众较少关注空气质量播报。因此, 相关部门应规范空气质量信息的发布时间和更新频率, 并适当拓宽发布渠道, 进一步提升公众对于空气质量的认知度和关注度。

3) 立足自身优势, 推进产业结构调整, 优化生产方式, 有效降低污染物排放。西安市拥有丰富的自然和人文旅游资源, 高校聚集。在今后的发展中, 应降低重化工等重污染产业的比重, 重点发展高新技术产业和服务业, 减少颗粒物和氮硫化物的排放, 从而推动西安市产业结构调整和生产方式优化, 从源头降低西安市公众的大气污染物健康风险。

4) 建立长效机制, 持续降低污染排放强度。西安市空气质量虽呈持续改善趋势, 但仍存在大气污染物健康风险。政府部门应进一步完善大气污染防治方面的政策法规, 不断提升企业生产工艺和污染防治技术, 甚至淘汰部分高污染产能, 在重点时段开展限产和轮停。同时, 进一步优化交通运输结构, 有效降低移动源影响。只有坚持严格落实各项治理措施, 才能确保西安市空气质量持续改善, 使大气污染问题逐步得到解决, 同时保证公众身体健康不会受到大气污染的危害。

3 结论

1) 2015—2020 年, 西安市区 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 NO_2 的年平均浓度均超出了环境空气质量二级标准, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 和 CO 的年平均浓度整体呈下降趋势, O_3 的年平均浓度整体呈上升趋势。

2) 从空气污染物的空间分布来看: $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO 的浓度高值区主要分布在西安市区东南部, 低值区主要分布在东北部和西南部; SO_2 和 O_3 的浓度高值区主要分布在西安市区北部(部分 O_3 高值区还出现在了西安市区西南部), 低值区主要分布在西安市区东南部; NO_2 的浓度高值区主要分布在西安市区中部, 低值区主要分布在西安市区东北部。13 个监测点中, 经开区和阎良区监测点污染较重, 兴庆小区(碑林区)和曲江文化产业集团(曲江新区)监测点空气质量相对较好。

3) 西安市区 6 种大气污染物的健康风险评价结果表明, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 等 5 种污染物的 HI 在冬季最高, 在夏季最低; O_3 的 HI 在夏季最高, 在冬季最低。在冬季, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的 HI 平均值均大于 1, 存在非致癌健康风险; SO_2 、 NO_2 、 CO 和 O_3 等 4 种污染物的 HI 平均值均小于 1, 不存在非致癌健康风险。在夏季, O_3 存在一定的非致癌健康风险, 超阈值天数占 4%; 其余 5 种污染物的 HI 平均值和最大值均小于 1, 不存在健康风险。从年均值来看, $PM_{2.5}$ 的 15.3% 值超出 HI 阈值, PM_{10} 的 24.4% 值超出 HI 阈值; 其余 4 种污染物的 HI 年均值小于 1, 不存在非致癌健康风险。

4) 男性、户外劳动者、老年人面临更高的大气污染物健康风险。

致谢: 陕西师范大学地理科学与旅游学院李雪萍、秦语晗、刘亚伟、冯晓、樊怡等参与了问卷调查和数据录入, 特此致谢。

参考文献(References):

- [1] 任万辉, 李云丹, 苏枫枫, 等. 沈阳市大气 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征、来源解析及健康风险评价[J]. 环境化学, 2021, 40(4): 1029-1037.

REN Wanhui, LI Yundan, SU Congcong, et al. Pollution Characteristics, Source Apportionment and Health Risk Assessment of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ in Shenyang[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(4): 1029-1037.

- [2] RAMAKRESHNAN L, AGHAMOHAMMADI N, FONG C S, et al. Haze and Health Impacts in Asian Countries: A Systematic Review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(3): 2096-2111.
- [3] 段小丽, 聂静, 王宗爽, 等. 健康风险评价中人体暴露参数的国内外研究概况[J]. *环境与健康杂志*, 2009, 26(4): 370-373.
DUAN Xiaoli, NIE Jing, WANG Zongshuang, et al. Human Exposure Factors in Health Risk Assessment[J]. *Journal of Environmental Health*, 2009, 26(4): 370-373.
- [4] 董静梅, 夏丽, 俞益, 等. 青少年体力活动中环境健康风险评估的呼吸暴露参数研究进展[J]. *中国运动医学杂志*, 2016, 35(7): 664-668.
DONG Jingmei, XIA Li, YU Yi, et al. Research Progress of Respiratory Exposure Parameters in Environmental Health Risk Assessment of Adolescents During Physical Activity[J]. *Chinese Journal of Sports Medicine*, 2016, 35(7): 664-668
- [5] 高广阔, 王佳书, 吴世昌, 等. 上海市雾霾污染物对人群健康影响的统计研究[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(6): 17-22.
GAO Guangkuo, WANG Jiashu, WU Shichang, et al. Statistical Research on the Influence of Haze Contaminants on Population Health in Shanghai[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, 31(6): 17-22.
- [6] 杨晓辉, 肖登攀, 柏会子, 等. 2013—2020 年京津冀地区 PM_{2.5} 浓度时空变化模拟及趋势分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2022, 38(4): 58-67.
YANG Xiaohui, XIAO Dengpan, BAI Huizi, et al. Simulation and Trend Analysis of Spatiotemporal Variation of PM_{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2013 to 2020[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2022, 38(4): 58-67
- [7] 肖思晗, 蔡美君, 李香, 等. 厦门港大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2022, 43(7): 3404-3415.
XIAO Sihan, CAI Meijun, LI Xiang, et al. Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM_{2.5} in Xiamen Port[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 43(7): 3404-3415.
- [8] AMNUAYLOJAROEN T, PARASIN N, LIMAKUL A. Health Risk Assessment of Exposure Near-Future PM_{2.5} in Northern Thailand[J]. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2022, 15(11): 1963-1979.
- [9] WANG Y, ZHANG S, YANG L, et al. Characteristics, Diffusion, and Exposure Risk of Bioaerosol Pollution During Haze Period on a Campus of Central China[J]. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2023, 16(10): 99-111.
- [10] WANG B Q, NIU H H, LIU B W, et al. The Indoor-Outdoor Characteristics of Water-Soluble Ion in PM_{2.5} in Tianjin Wintertime[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(3): 20985-20998.
- [11] 盛丹睿, 温小虎, 冯起, 等. 2018 年春季西北五省省会城市大气质量与健康风险评估[J]. *高原气象*, 2021, 40(1): 200-208.
SHENG Danrui, WEN Xiaohu, FENG Qi, et al. Air Quality and Health Risk Assessment of Capital Cities in Five Northwest Provinces of China in the Spring of 2018[J]. *Plateau Meteorology*, 2021, 40(1): 200-208.
- [12] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾霾成因及其治理的思考[J]. *科学通报*, 2013, 58(13): 1178-1187.
ZHANG Xiaoye, SUN Junying, WANG Yaqiang, et al. Factors Contributing to Haze and Fog in China[J]. *Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [13] 西安市人民政府. 人口状况[EB/OL]. (2023-03-30) [2023-06-15]. <http://www.xa.gov.cn/sq/csgk/rkzk/1.html>.
- [14] 陈楠, 史兴民. 基于因子分析和熵值法的公众雾霾习惯度研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34 (11): 15-21.
CHEN Nan, SHI Xingmin. Research on Public Haze Habit Degree Based on Factor Analysis and Entropy Method[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34 (11): 15-21.
- [15] USEPA. Exposure Factors Handbook: 2011 Edition[R]. Washington DC: National Center for Environmental Assessment, 1997.
- [16] USEPA. Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites[R]. Washington DC:

- Environmental Protection Agency, 2002.
- [17] USEPA. Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment) [R]. Washington DC: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, 2004.
- [18] 王航, 李欢, 任东晓, 等. 西安市大气污染物健康风险评价[J]. 地下水, 2014, 36(6): 279-282.
WANG Hang, LI Huan, REN Dongxiao, et al. Health Risk Assessment of Air Pollutants in Xi'an City[J]. Groundwater, 2014, 36(6): 279-282.
- [19] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [20] 梁洁, 蒋卓勤, 何玉敏, 等. 中国健康成人基础代谢率估算公式的探讨[J]. 中国校医, 2008(4): 372-374.
LIANG Jie, JIANG Zhuoqin, HE Yuming, et al. Estimated Equations of Basal Metabolic Rate in Chinese Healthy Adults[J]. Chinese Journal of School Doctor, 2008(4): 372-374.
- [21] 高军, 房艳兵, 江畅兴, 等. 上海地区冬季住宅室内外颗粒物浓度的相关性[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(2): 110-114.
GAO Jun, FANG Yanbing, JIANG Shangxing, et al. Relationship Between Indoor and Outdoor Particulate Matter Concentrations in a Residential in Winter Shanghai[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2014, 36(2): 110-114.
- [22] 沈玉, 万春, 高莹, 等. 济南市室内外空气 PM_{2.5} 关系及影响因素[J]. 环境与健康杂志, 2019, 36(11): 941-946.
SHEN Yu, WAN Chun, GAO Ying, et al. Relationship Between Indoor and Outdoor PM_{2.5} in Jinan and Influencing Factors[J]. Journal of Environment and Health, 2019, 36(11): 941-946.
- [23] 李晓男, 王立鑫, 宋佩瑶. 室内外因素对北京居室内 PM₁₀ 污染的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(29): 141-146.
LI Xiaonan, WANG Lixin, SONG Peiyao. Study on Influence of Indoor and Outdoor Factors on PM₁₀ Pollution in Household in Beijing[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(29): 141-146.
- [24] 刘冉冉, 赵卓慧, 董川, 等. 太原市初中学校室内外环境与儿童不良建筑综合征的相关性[J]. 科学通报, 2014, 59(12): 1127-1132.
LIU Ranran, ZHAO Zhuohui, DONG Chuan, et al. The Correlation of Indoor and Outdoor Environment of Junior High School in Taiyuan and Children's Poor Building Syndrome[J]. Science Bulletin, 2014, 59(12): 1127-1132.
- [25] 田园春, 孙亚兵, 冯景伟, 等. 南京市居室内 SO₂、HCHO 和 TVOCs 污染的研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2): 190-194.
TIAN Yuanchun, SUN Yabing, FENG Jingwei, et al. Indoor Air Levels of SO₂, HCHO and TVOCs in Dwellings in Nanjing[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 27(2): 190-194.
- [26] 刘建兵. 交通主干道旁室内外碳氧化物的分析和研究[J]. 北方环境, 2013, 25(8): 50-53.
LIU Jianbing. Analysis and Study of Indoor and Outdoor the Interior Carbon Oxide Beside the Trunk Road[J]. North Environment, 2013, 25(8): 50-53.
- [27] 顾天毅. 兰州市室内典型挥发性有机物污染特征及其健康风险评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [28] 李雷, 李红, 王学中, 等. 广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价[J]. 环境科学, 2013, 34(12): 4558-4564.
LI Lei, LI Hong, WANG Xuezhong, et al. Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in the Downtown Area of Guangzhou, China[J]. Environmental Science, 2013, 34(12): 4558-4564.
- [29] 周欢. 太原市大气颗粒物污染特征与健康风险研究[D]. 太原: 山西大学, 2020.
- [30] 郭隽. 通过 WHO 的空气质量准则看中国新颁布空气质量标准[J]. 资源节约与环保, 2013(12): 124.
GUO Jun. Looking at China's Newly Issued Air Quality Standards Through WHO's Air Quality Guidelines[J]. Resources Economization & Environment Protection, 2013(12): 124.

- [31] 环境保护部. 环境空气质量标准: GB 3095—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [32] 于云江. 环境污染的健康风险评估与管理技术[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [33] 王宗爽, 武婷, 段小丽, 等. 环境健康风险评价中我国居民呼吸速率暴露参数研究[J]. 环境科学研究, 2009, 22(10): 1171-1175.
WANG Zongshuang, WU Ting, DUAN Xiaoli, et al. Research on Inhalation Rate Exposure Factors of Chinese Residents in Environmental Health Risk Assessment[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(10): 1171-1175.
- [34] 王薇, 程歆玥. 合肥市不同功能街道峡谷 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 时空分布特征及影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2022, 31(3): 524-534.
WANG Wei, CHENG Xinyue. Analysis of Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Different Functional Street Canyons in Hefei City[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(3): 524-534.
- [35] 沈佳惠, 王行, 李和平, 等. 兰州市 CO 污染分布特征[J]. 环境保护科学, 2022, 48(6): 62-69.
SHEN Jiahui, WANG Hang, LI Heping, et al. Distribution Characteristics of Carbon Monoxide Pollution in Lanzhou[J]. Environmental Protection Science, 2022, 48(6): 62-69.
- [36] 肖凯, 任学昌, 陈仁华, 等. 典型西北钢铁城市冬季大气颗粒物重金属来源解析及健康风险评价——以嘉峪关为例[J]. 环境化学, 2022, 41(5): 1649-1660.
XIAO Kai, REN Xuechang, CHEN Renhua, et al. Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Air Particulates of Typical North West Steel Cities in Winter: A Case Study in Jiayuguan[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(5): 1649-1660.
- [37] 陕西省政府办公厅. 西安市 2019 年国民经济和社会发展统计公报[R/OL]. (2020-04-16) [2023-06-15]. http://www.shaanxi.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/tjxx/tjgb_240/sqgb/202004/t20200416_1666595.html.
- [38] 陈菁, 彭金龙, 徐彦森. 北京市 2014—2020 年 $PM_{2.5}$ 和 O_3 时空分布与健康效应评估[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4071-4082.
CHEN Jing, PENG Jinlong, XU Yansen. Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of $PM_{2.5}$ and O_3 in Beijing, from 2014 to 2020[J]. Environmental Science, 2021, 42(9): 4071-4082.