

## 西安市区复合污染健康风险时空演变及分区优化策略

### Spatiotemporal Evolution of Composite Pollution Health Risks and Regional Optimization Strategies in Xi'an

刘李琛<sup>#</sup> 赵敬源<sup>#\*</sup>

LIU Lichen<sup>#</sup> ZHAO Jingyuan<sup>#\*</sup>

(长安大学建筑学院, 西安 710061)

(School of Architecture, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi, China, 710061)

文章编号: 1000-0283(2025)09-0018-09

DOI: 10.12193/j.laing.2025.09.0018.003

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2025-03-27

修回日期: 2025-05-17

#### 摘要

全球气候变化与城市化进程加速带来了前所未有的环境挑战,通过直接或间接途径增加了人类在生存空间中的健康风险。尤其是在人口密度高且污染严重的城市中,居民面临由大气污染和高温热浪共同作用下形成的复合污染健康风险。基于“危险性—暴露度—脆弱性”三维框架,构建适用于城市尺度的复合污染健康风险评估模型,并以西安市为案例,分析其2015–2022年复合污染健康风险的时空演变特征及其主导因素。研究结果发现,西安市复合污染健康风险在时间上呈阶段性波动,老城区虽风险趋缓但仍波动明显,未央区、雁塔区因人口集中与开发加剧,风险持续上升;空间上呈“中心高、外围低”的圈层分布,老城区叠加高污染、高暴露构成高风险区,而鄠邑、临潼等生态缓冲带风险较低。揭示西安市区复合污染健康风险的主导影响因子,针对不同区位的主导风险特征,从空间结构、功能布局、生态环境、基础设施与社会资源5个层面提出分区优化策略,旨在加强城市韧性,提升城市健康风险综合防控效能。

#### 关键词

高温热浪; 大气污染; 复合污染; 健康风险评估; 时空演变; 分区优化

#### Abstract

Rapid urbanization and climate change have intensified environmental challenges, heightening health risks—especially in densely populated, polluted cities. This study develops a composite pollution health risk assessment model based on the “Hazard - Exposure - Vulnerability” framework, employing Xi'an as a case study to analyze the spatiotemporal evolution and dominant factors of health risks from 2015 to 2022. The results indicate periodic fluctuations in health risks, with declines yet persistent volatility within the old city, and increasing risks in expanding regions such as Weiyang and Yanta due to population concentration and urban development. Risks are distributed spatially in a “center-high, periphery-low” pattern, with the old city constituting high-risk zones, while ecological buffers like Huiyi and Lintong demonstrate lower risks. The study affirms key risk drivers and recommends area-specific strategies across five dimensions—spatial structure, functional layout, ecological environment, infrastructure, and social resources—to enhance urban resilience and improve the effectiveness of health risk mitigation.

#### Keywords

high temperatures and heatwaves; air pollution; compound pollution; health risk assessment; spatiotemporal evolution; zoning optimization

#### 刘李琛

1999年生/男/陕西咸阳市人/硕士/研究方向为建筑技术科学和气候适应性

#### 赵敬源

1972年生/女/河南南阳人/博士/教授/研究方向为节能与绿色建筑、城市生态环境和生态规划

20世纪70年代以来,气候变化加剧导致极端气候事件频发。中国快速城镇化和工业化进程中,能源消耗和污染物排放剧增,造成空气质量恶化<sup>[1]</sup>;同时新建建筑和道路增加加剧了城市热负荷,导致高温热浪频发<sup>[2-3]</sup>。大气污染与高温热浪形成的复合污染,已成为当下城市环境的重要挑战<sup>[4]</sup>。且随着老龄化问题的加剧,越来越多的区域与居民将受

#### 基金项目:

国家自然科学基金面上项目“高密度城市建筑气候参数模型建构与应用”(编号:52278087);陕西省社会科学基金项目“基于城市热污染环境健康风险评估的健康城市发展路径研究”(编号:2024R312)

\*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: zjyqt@163.com

到大气污染和高温热浪的影响<sup>[5-6]</sup>。如何有效降低复合污染健康风险成为全社会关注焦点。

健康风险评估是识别城市脆弱区域和制定风险管理策略的基础<sup>[7]</sup>。当前研究主要聚焦三个方向：极端气候事件、大气污染和基础设施风险评估<sup>[8-10]</sup>。在极端气候事件方面，研究分为两类：基于灾害模型（利用遥感/气象数据识别高风险区）<sup>[11]</sup>和基于脆弱性评估（综合考量气候事件及人群敏感性、适应能力）<sup>[12]</sup>。大气污染风险评估包括宏观尺度（土地利用回归模型分析暴露水平）<sup>[13]</sup>和微观尺度（物理过程模拟风险分布）。基础设施风险评估则通过情景模拟和多指标分析，评估其抗灾能力和功能性<sup>[14-15]</sup>。

现有研究在单一风险要素评估方面取得重要进展，但现实中大气污染与高温热浪常协同作用形成复合效应：高温促进O<sub>3</sub>生成，而静稳天气抑制其扩散<sup>[16-17]</sup>。传统单一因素评估方法难以全面反映复合污染的健康风险。针对这些不足，本文基于IPCC提出的“危险性—暴露度—脆弱性”框架，结合多源数据和熵权法，构建了城市尺度的复合污染健康风险评估模型。以西安市区为例，系

统揭示复合污染健康风险的时空演变特征及主导因子，并提出因区施策的分区优化策略，以期提升城市健康风险的协同防控效能。

## 1 研究区域及特征

### 1.1 研究区域

西安市位于33.42°N—34.45°N和107.40°E—109.49°E之间，市域总面积10 108 km<sup>2</sup>，辖境东西长约204 km，南北宽约116 km。本文的研究范围为西安市市区层级，指《西安统计年鉴2021》中市区范围包含的11个区：新城区、碑林区、莲湖区、灞桥区、未央区、雁塔区、阎良区、临潼区、长安区、高陵区、鄠邑区，市区总面积5 145.66 km<sup>2</sup>。

### 1.2 研究对象特征

#### 1.2.1 自然地貌

西安，位于黄河中游关中盆地，是中国西部重要中心城市。关中盆地夹于黄土高原与秦岭山脉之间，为喜马拉雅运动形成的断陷带。东界灞源山地与渭南、商洛相邻；西界太白山与宝鸡接壤；南至北秦岭主脊，与佛坪、宁陕、柞水为界；北跨渭河，与咸阳、杨凌及周边多个县（市）相接。

### 1.2.2 社会经济

近年来城镇化快速推进，西安市常住人口由2015年的870.56万人增至2022年的1 299.59万人，建成区面积从500.59 km<sup>2</sup>扩展至868.2 km<sup>2</sup>。同期，车辆数由239.41万辆增至458.45万辆，年均增速逾10%，尾气与废热成主要污染源（表1）。GDP稳步增长带动用电量与工业废气排放上升，能源消耗加剧城市环境负担，社会经济发展带来的生态压力日益显现。

### 1.2.3 气候条件

西安属暖温带半湿润大陆性季风气候，四季分明。冬季寒冷少雨，春季干燥多风，夏季炎热多雷雨，秋季凉爽有秋淋。主城区常年盛行东北风，周至、鄠邑、长安多西风，高陵、临潼多东北风，蓝田以东风为主。

## 2 复合污染健康风险评估体系的构建

通过选取和构建合适的空间健康风险评估模型，不仅可以分析风险要素，还能够得出健康风险的空间分布，并根据评估结果提出优化策略，是管理复合污染健康风险的关键。

表1 西安市2012—2022年的主要经济指标  
Tab. 1 Main economic indicators of Xi'an from 2010 to 2020

年份 Year	GDP/ 亿元	车辆数 / 万辆 Number of vehicles	年末常住人口 / 万人 Resident population at year-end	用电量 / 万 kW Electricity consumption	建成区面积 / km <sup>2</sup> Built-up area	工业废气排放量 / 亿 m <sup>3</sup> Industrial air emissions
2015	5 932.86	239.41	870.56	2 844 836	500.59	1 108.48
2016	6 396.36	258.85	883.21	3 120 582	517.74	1 034.46
2017	7 418.04	288.56	961.67	3 613 693	661.08	1 444.6
2018	8 499.41	325.63	1 000.37	3 967 465	701.67	1 040.4
2019	9 399.98	359.42	1 020.35	4 184 997	700.69	1 067.3
2020	10 023.73	398.01	1 296	4 150 188	729.14	1 194.32
2021	10 751.31	445.38	128.30	4 893 749	850	1 372.78
2022	11 486.51	458.45	1 299.59	5 311 051	868.2	2 295.07

注：资料整理自《西安统计年鉴》和《中国城市建设统计年鉴》。

## 2.1 复合污染健康风险评估框架

在健康风险评估领域，学者主要采用“暴露—敏感—适应”<sup>[16]</sup>、“压力—状态—响应”<sup>[19]</sup>、“概率—后果”<sup>[20]</sup>，以及IPCC在第5次评估报告中提出的“危险性—暴露度—脆弱性”<sup>[21]</sup>等评估框架。本研究基于IPCC的框架，构建了包含危险性、暴露度和脆弱性三个维度的评估体系。

## 2.2 复合污染健康风险评估指标体系

健康风险的定量评估应包括指标选取、指标权重确立与指标整合<sup>[22]</sup>。本研究基于大量国内外文献检索，进行指标初选。在此基础上，借鉴层次分析法的理念模式，从目标层、准则层和方案层三个层次对指标体系进行构建，有助于厘清各指标之间的层次关系，提高指标筛选的逻辑性和科学性。

### 2.2.1 危险性指标

复合污染的危险性主要由对人群造成健康风险的各类污染灾害发生的频率、强度和空间范围决定。在中国，一般将日最高气

温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 定义为高温热浪，将空气质量指数 $\geq$ 三级定义为大气污染，污染物超标限值见表2。本研究选取温度、污染物浓度、高温热浪/污染物超标最长持续日数4个指标表征复合污染发生时的强度，高温热浪/污染物超标日数表征发生的频率<sup>[23]</sup>。数据来源于中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台、美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 全球气象站点和国家青藏高原科学数据中心。

### 2.2.2 暴露度指标

居民作为复合污染的直接受害者，其暴露风险与所在区域的人口密度密切相关<sup>[24]</sup>。由于实际暴露程度难以大规模量化，通常可以通过人口密度来间接反映居民受到复合污染干扰的概率。采用LandScan千米级人口栅格数据反映人口密度，用以评估复合污染暴露风险。

### 2.2.3 脆弱性指标

脆弱性评估包含敏感性和适应能力两个维度。敏感性指标重点关注脆弱人群（户外工作者、65岁以上老人、低收入群体等），这

些群体因生理机能和资源获取限制更易受复合污染影响<sup>[25]</sup>。适应能力指标包括经济发展水平、医疗条件、社会保障等宏观因素，以及居民教育程度、经济状况等微观特征<sup>[26]</sup>。数据来源于《西安统计年鉴》《西安市卫生健康事业发展统计公报》。

## 2.2.4 评估指标汇总

本研究以“危险性—暴露度—脆弱性”三维框架为基础，系统梳理并选取反映复合污染健康风险的关键因素。所选指标不仅具备数据可获得性和区域适用性，还能在一定程度上揭示复合污染健康风险的形成机制及其空间分异特征<sup>[27]</sup>。表3展示了复合污染健康风险评估指标体系及其具体内容。

## 2.3 复合污染健康风险评估指标量化与综合评估模型

### 2.3.1 确定评估指标权重

评估指标权重的确定是空间健康风险定量评估的关键，常用方法分为主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法常见的有专家调

表2 AQI分指数及对应的O<sub>3</sub>、PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>浓度限值  
Tab. 2 AQI sub-indexes and corresponding O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentration limits

AQI 数值 AQI value	AQI 级别 AQI level	AQI 类别 AQI category	对健康影响情况 Health impact	O <sub>3</sub> 8 h 滑动平均 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 8-Hour sliding average O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub> 24 h 滑动平均 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 24-Hour sliding average PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub> 24 h 滑动平均 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 24-Hour sliding average PM <sub>2.5</sub>
0 ~ 50	一级	优	空气质量令人满意，基本无污染	0 ~ 100	0 ~ 50	0 ~ 35
51 ~ 100	二级	良	空气质量可接受，但少数敏感人群可能受影响	101 ~ 160	51 ~ 150	36 ~ 75
101 ~ 150	三级	轻度污染	易感人群症状轻度加剧，健康人群出现刺激症状	161 ~ 215	151 ~ 250	76 ~ 115
151 ~ 200	四级	中度污染	易感人群症状加剧，可能影响健康人群心脏、呼吸系统	216 ~ 265	251 ~ 350	116 ~ 150
201 ~ 300	五级	重度污染	心脏病和肺病患者症状显著加剧，健康人运动耐力下降	266 ~ 800	351 ~ 420	151 ~ 250
> 300	六级	严重污染	健康人运动耐力显著下降，出现明显症状，提前出现某些疾病	—	421 ~ 500	251 ~ 350

注：AQI表示环境空气质量指数，资料整理自《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》。

表3 复合污染对空间健康风险评估指标体系  
Tab. 3 Composite pollution spatial health risk assessment indicator system

目标层 Target level	准则层 Criterion level	方案层 Alternative level	指标含义 Indicator meaning	
污染危险性	污染发生强度	最高温度 /℃	地表温度	
		污染物最高浓度 / (μg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> 浓度、PM <sub>2.5</sub> 浓度、PM <sub>10</sub> 浓度	
		高温热浪最长持续日数 /d	日最高气温 ≥ 35℃ 的高温最长持续日数	
	污染发生频率	污染物超标最长持续日数 /d	AQI ≥ 三级的污染最长持续日数	
		高温热浪日数 /d	日最高气温 ≥ 35℃ 的高温天数	
		污染物超标日数 /d	AQI ≥ 三级的污染天数	
人口暴露度	暴露规模	人口密度 / (人 / km <sup>2</sup> )	基于手机信令数据的人口密度	
		≥ 65 岁人口比例 /%	城市总人口中 ≥ 65 岁老年人口比例	
	人群敏感性	< 15 岁人口比例 /%	城市总人口中 < 15 岁人口比例	
		常住人口城镇化率 /%	地区城镇地域上的常住人口占该地区全部常住人口的比重	
		从事建筑业活动人口比例 /%	反映户外工作人口比例	
	社会脆弱性	系统适应能力	卫生支出占 GDP 比值 /%	反映城市的社会经济水平
			居民人均可支配收入 / 元	居民实际收入中能用于安排日常生活的收入
		每千人拥有卫生技术人员 / 人	平均每千人拥有的执业医师和注册护士数	
		每千人拥有医院床位数 / 张	平均每千人拥有的医院床位数量	
		高中及以上受教育人口比例 /%	受教育程度在高中及高中以上的人口比例	
	城镇登记失业率 /%	满足全部就业条件的就业人口中仍未有工作的劳动力比例		

查法、层次分析法和图层叠加法。如郑颖生等<sup>[28]</sup>假设各指标权重相同，利用图层叠加法获得健康风险的空间分布。客观赋权法常见的方法有熵权法和均方方法。陈恺等<sup>[29]</sup>采用熵权法，利用“暴露度—敏感性—适应能力”框架评估了北京中心城区高温热浪脆弱性分布。本文采用熵权法确定各评估指标权重。主要步骤如下：

(1) 原始数据标准化。采用极差归一化方法消除量纲影响，使各指标方向一致。正向指标按公式(1)处理，负向指标则按公式(2)处理。

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \text{Min}(X_j)}{\text{Max}(X_j) - \text{Min}(X_j)} \quad (1)$$

$$Y_{ij} = \frac{\text{Max}(X_j) - X_{ij}}{\text{Max}(X_j) - \text{Min}(X_j)} \quad (2)$$

式中，Y<sub>ij</sub>为标准化的数据；X<sub>ij</sub>为第i个样

本(i=1, 2, 3, …, m)第j个指标(j=1, 2, 3, …, n)的原始数据；Min(X<sub>j</sub>)为所有样本第j个指标的最小值，Max(X<sub>j</sub>)所有样本第j个指标的最大值。

(2) 计算指标比重，见公式(3)。

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中，P<sub>ij</sub>为第j个指标第i个样本的数值比重，X<sub>ij</sub>为标准化后第j个指标第i个样本的数值。

(3) 计算指标熵值，见公式(4)(5)。

$$e_j = -k * \sum_{i=1}^m P_{ij} * \ln(P_{ij}) \quad (4)$$

$$k = \frac{1}{\ln(m)} \quad (5)$$

式中，e<sub>j</sub>为第j个指标的信息熵，k为比例常数，k>0, e<sub>j</sub>≥0。

(4) 计算指标权重系数，见公式(6)(7)。

$$d_j = 1 - e_j \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (7)$$

式中，d<sub>j</sub>为第j个指标的信息熵冗余度，w<sub>j</sub>为第j个指标的权重。

### 2.3.2 综合评估模型

复合污染健康风险由危险性、暴露度、脆弱性三个指标整合得到。指标整合主要有加减法和乘除法两种方式<sup>[30]</sup>。本文选用乘除法对指标进行整合，因其更能反映各指标之间的相互作用关系，见公式(8)。

$$R = H \times E \times V \quad (8)$$

式中，R为健康风险指数，H为危险性指数，E为暴露度指数，V为脆弱性指数。

危险性通过加权求和计算，见公式(9)。

$$H = \sum_{j=1}^n h_j H_{ij} \quad (9)$$

式中,  $h_j$  为危险性各指标权重,  $H_{ij}$  为危险性各指标标准化值。

暴露度指数由标准化人口密度表征, 其值域范围为  $[0, 1]$ 。

脆弱性通过敏感性与适应能力加权求和的比值得到, 见公式 (10)–(12)。

$$V = \frac{S}{A} \quad (10)$$

$$S = \sum_{j=1}^n s_j S_{ij} \quad (11)$$

$$A = \sum_{j=1}^n a_j A_{ij} \quad (12)$$

其中,  $V$  为脆弱性指数,  $S$  为敏感性指数,  $A$  为适应能力指数,  $s_j$  和  $S_{ij}$  为敏感性各指标权重和标准化值,  $a_j$  和  $A_{ij}$  为适应能力各指标权重和标准化值。

### 3 西安市区复合污染健康风险的时空特征

#### 3.1 西安市区复合污染健康风险的时序演变特征

从时序演变来看, 西安市各区的健康风

险指数呈现出明显的差异化特征(图1)。主城区如新城区、碑林区和莲湖区总体呈下降趋势, 但过程中有阶段性波动。新城区从2015年的0.309降至2022年的0.185, 2020年反弹至0.192; 碑林区2019年出现峰值0.470后回落至0.274; 莲湖区在2016–2018年波动后, 2019年显著改善, 最终稳定在0.151。相比之下, 扩展区如未央区和雁塔区呈上升趋势, 未央区从0.023升至0.109, 雁塔区2021年为0.123, 反映城市化加剧环境压力。城郊区如阎良、临潼、长安等长期维持低风险, 鄠邑区则连续8年保持最低值, 可能与其生态功能定位相关。2020年多个区域短期风险反弹, 或与疫情初期的医疗资源紧张和公共卫生压力有关。

#### 3.2 西安市区复合污染健康风险的空间演变特征

从空间分布来看, 健康风险指数呈现“中心高、外围低”的梯度分异格局(图2)。主城区的新城、碑林、莲湖三区构成“核心

高风险圈”, 其高值(多数年份 $> 0.1$ )与人口密集、交通拥堵等城市病直接相关。未央、雁塔等城市扩展区形成“中风险过渡带”, 风险水平(0.02~0.12)与城市建设强度同步上升, 需警惕土地开发与生态保护的失衡问题。外围的灞桥、阎良、临潼等区则构成“环状低风险带”, 得益于较低的开发强度和生态屏障功能, 风险指数长期稳定在0.05以下, 其中鄠邑区作为唯一零风险区, 可能与其作为秦岭北麓生态保护区的发展定位相关。

#### 3.3 西安市区复合污染健康风险的指标权重变化

基于熵权法的复合污染危险性与脆弱性指标权重分析显示, 健康风险驱动机制呈现显著的时间异质性。危险性指标(图3, 图4)中, 污染物超标最长持续日数权重在2019–2021年形成“高峰平台”(均值 $> 0.3$ ), 2021年达峰值0.345后骤降58.3%至2022年0.144, 突显其阶段性主导地位;  $O_3$ 最高浓度权重则呈“U型”演变, 从2015年0.187降至2017年0.088低点后逐步回升至2022年0.135, 反映臭氧污染治理的复杂性。 $PM_{2.5}$ 与最高气温权重分布稳定( $IQR \leq 0.023$ ), 但 $PM_{10}$ 在2018年出现异常高值(0.182), 高温热浪最长持续日数权重更于2021年跃升193%(0.069至0.202)。

脆弱性指标(图5, 图6)中, 建筑业从业人口比例权重持续上升(2015年0.128至2020年0.191), 成为核心驱动因素; 卫生支出占GDP比值权重则波动下降, 2020年后回落至0.151, 表明医疗资源投入的区域均衡性增强。年龄结构指标( $\geq 65$ 岁与 $< 15$ 岁人口)权重分布集中( $IQR < 0.03$ ), 而卫生技术人员数量( $IQR=0.062$ )与建筑业人口( $IQR=0.063$ )离散程度显著, 揭示社会脆弱性的时间分异特征。

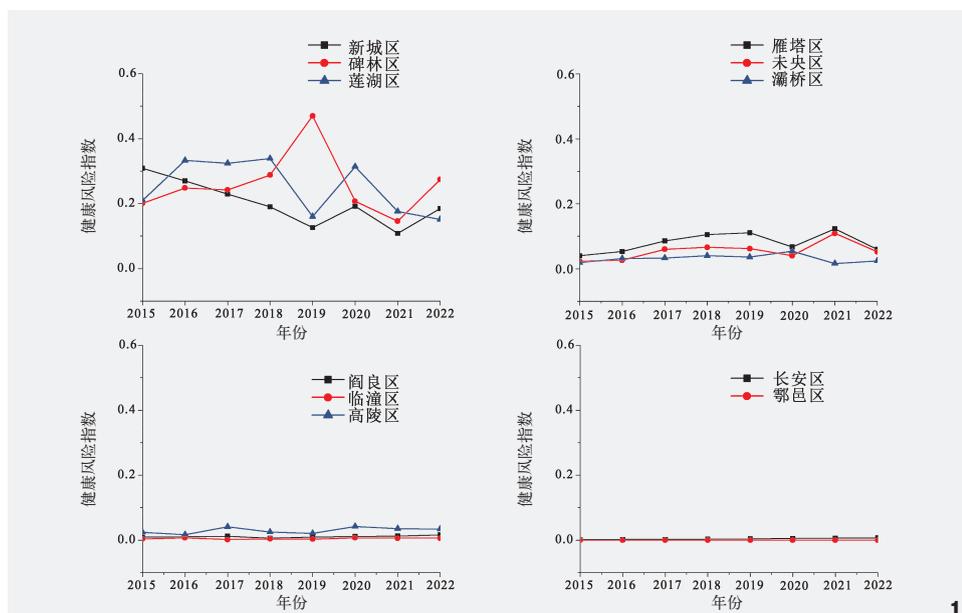


图1 2015–2022年西安市区健康风险变化趋势  
Fig. 1 Trend of urban health risk changes in Xi'an from 2015 to 2022

### 3.4 分析方法

为识别各区健康风险主导因素, 本文采用TOPSIS法计算各指标年度相对接近度, 并通过等距法划分为5个等级。正向指标等级越高表示风险越大, 负向指标则相反。进而统计各区高风险指标的频次, 提取关键因子, 并归纳主要健康风险类型, 揭示其主导特征, 为优化策略提供依据。

TOPSIS法是通过逼近理想解的程度来评估各个样本的优劣等级, 分别计算评价对象与最优方案和最劣方案的距离, 以此为依据来评价样本的优劣等级<sup>[31]</sup>。TOPSIS法计算步骤如下:

(1) 计算各指标最大值和最小值, 见公式(13)(14)。

$$Z_j^+ = \max\{Z_{1j}, Z_{2j}, Z_{3j}, \dots, Z_{mj}\} \quad (13)$$

$$Z_j^- = \min\{Z_{1j}, Z_{2j}, Z_{3j}, \dots, Z_{mj}\} \quad (14)$$

式中,  $Z_j^+$ 为第j个指标的最大值,  $Z_j^-$ 为第j个指标的最小值,  $Z_{mj}$ 为第m个样本在第j个指标的数值。

(2) 计算指标与最大值和最小值的距离(欧式距离), 见公式(15)(16)。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_j^+ - Z_{ij})^2} \quad (15)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_j^- - Z_{ij})^2} \quad (16)$$

式中,  $D_i^+$ 为第i个样本与最大值的距离(正理想距离),  $D_i^-$ 为第i个样本与最小值的距离(负理想距离),  $Z_{ij}$ 为第i个样本第j个指标的数值。

(3) 计算各样本的评价得分(相对接近度), 见公式(17)。

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (17)$$

式中,  $S_i$ 为第i个评价对象的综合接近度

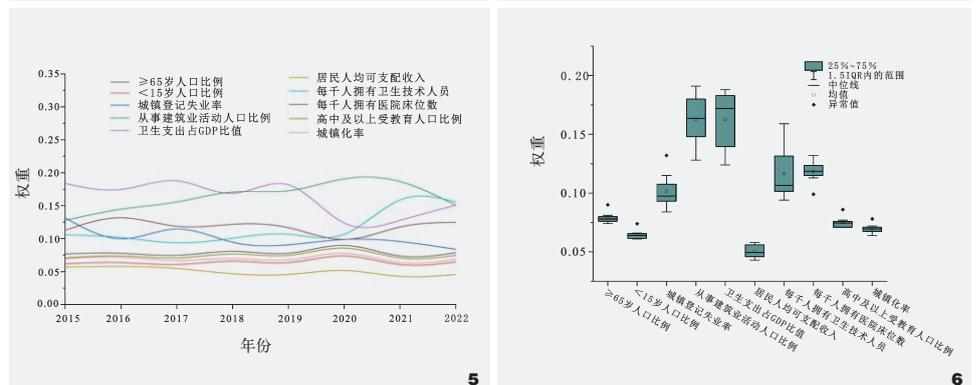
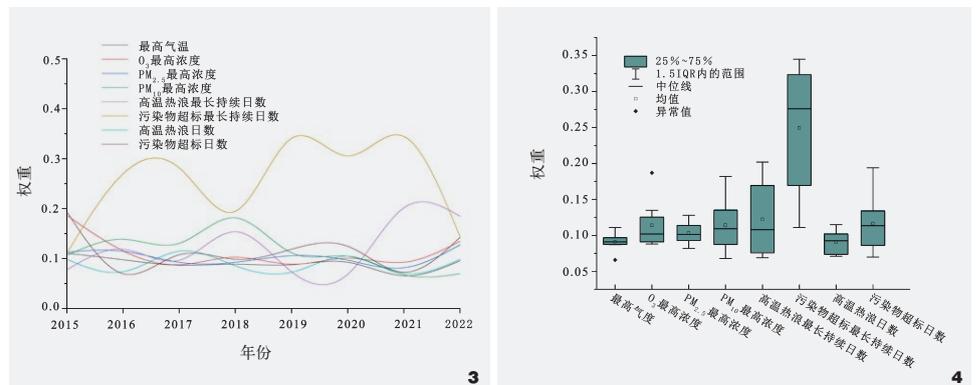
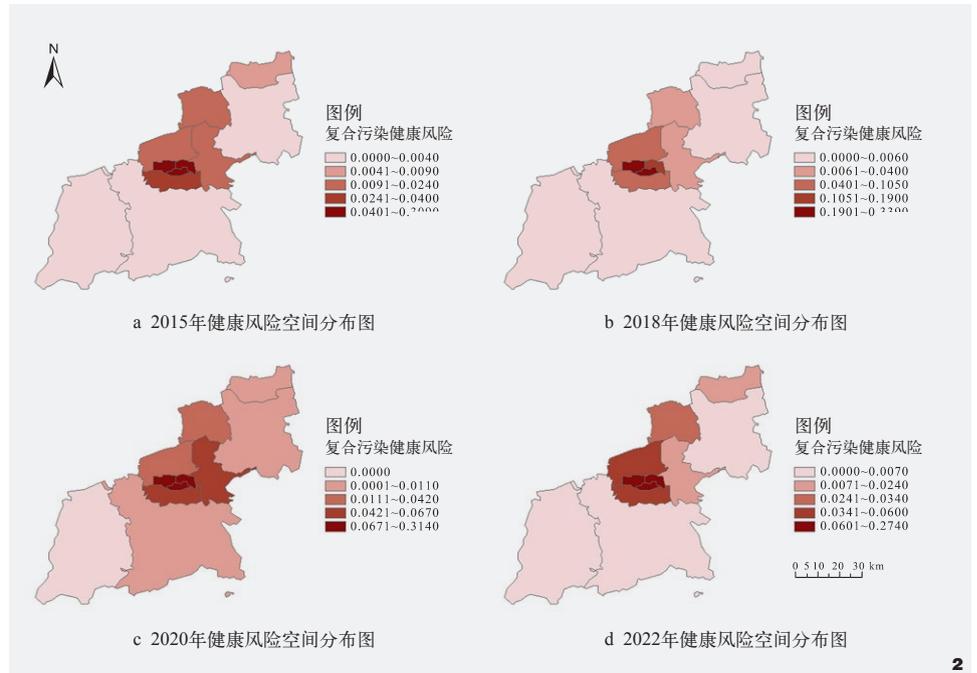


图2 西安市区健康风险空间分布  
Fig. 2 Spatial distribution of urban health risks in Xi'an

图3 危险性各指标权重变化趋势  
Fig. 3 Trend of weights for hazard indicators

图4 危险性各指标权重箱型图  
Fig. 4 Box plot of weights for hazard indicators

图5 脆弱性各指标权重变化趋势  
Fig. 5 Trend of weights for vulnerability indicators

图6 脆弱性各指标权重箱型图  
Fig. 6 Box plot of weights for vulnerability indicators

表4 西安市各区复合污染主导风险类型及特征描述  
Tab. 4 Dominant risk types and characteristic descriptions of compound pollution in each district of Xi'an

区名 District name	主导风险类型 Dominant risk type	风险特征描述 Risk characteristic description
新城区	高温热浪、大气污染、老龄化及医疗资源不足	高温热浪和大气污染对健康影响大,特别是老年群体易受影响,且卫生投入不足,增加健康风险
碑林区	高温热浪、大气污染、人口密度及户外工作者暴露	高温热浪与大气污染,结合高人口密度,户外工作者暴露较高,且卫生投入不足,健康风险加剧
莲湖区	高温热浪、大气污染、人口密度及污染物超标	高温热浪和大气污染,特别是PM <sub>2.5</sub> 和PM <sub>10</sub> 对健康影响较大,人口密度高导致暴露风险大,卫生投入不足
灞桥区	高温热浪、医疗资源不足	高温热浪导致热应激,医疗资源不足导致应对能力差
未央区	高温热浪、户外工作者暴露	高温热浪与户外工作者长期暴露,增加了环境健康风险,卫生投入不足,影响健康保障
雁塔区	高温热浪、大气污染与卫生资源不足	高温热浪事件和大气污染对健康影响严重,卫生投入不足
阎良区	老龄化、医疗资源不足	老龄化问题显著,医疗资源不足
临潼区	高温热浪、老龄化、失业率及医疗资源不足	高温热浪加剧老年人群体的健康风险,同时高失业率和低卫生资源配备增加社会脆弱性
长安区	高温热浪、卫生资源不足	高温热浪对健康造成压力,尤其是在卫生资源匮乏的情况下,医疗能力难以满足需求
高陵区	高温热浪、教育水平差异与儿童暴露	高温热浪对老人、儿童群体的影响尤为严重,教育程度较低导致对健康防护意识不足
鄠邑区	高温热浪、老龄化与卫生资源不足	高温热浪对老年群体影响较大,城镇化水平高、失业率较高,脆弱群体比例高,医疗资源分配差

得分,  $0 \leq S_i \leq 1$ 。

### 3.5 分析结果

基于上述分析方法总结西安市各区复合污染主导风险类型(表4)。西安市健康风险呈现多因子复合驱动特征,高温热浪与大气污染的协同效应构成主要环境暴露源。研究表明,城市化进程中环境压力与人口结构变化的叠加效应可能进一步放大风险,亟需通过医疗资源均衡配置与老龄化适应性治理等构建分区优化体系。

## 4 应对复合污染健康风险的分区优化策略

### 4.1 空间健康防控体系

为应对复合污染带来的健康风险,应构建系统化、多层级的空间健康防控体系,从城市结构、功能、生态、基础设施与社会资源等方面综合施策。

(1) 优化空间结构。在高风险区强化国土空间规划,限制高污染源布局,控制开发强度,并配置生态缓冲区以稀释污染。在低风险区引导人口与功能疏解,缓解老城区环境压力。

(2) 调整功能布局。完善高风险区医疗与应急设施,提升绿地可达性与健康服务能力,减少高污染功能用地,推动功能转型。在新区规划中应统筹绿色空间与通风廊道布局。

(3) 强化生态治理。建设跨尺度绿廊系统与生态隔离带,提升污染稀释与空气流通能力;建立多部门协同机制,推动区域污染联防联控与应急响应。

(4) 提升基础设施能力。推广绿色屋顶、透水铺装等低碳技术,配置喷雾系统与遮阳设施,缓解热岛效应;引入集中能源系统,降低能耗与热排放,提升城市环境适应性。

(5) 优化资源匹配。构建分区预警体系,制定脆弱人群防护方案,提升社区医疗保障能力;推动医疗资源向高风险区倾斜,并加强公众健康教育,形成多方参与的治理格局。

### 4.2 分区优化策略

基于各区主导风险类型及上述优化方向,进一步提出具有针对性的分区优化策略,体现出“因区施策、因类防控”的精细化治理理念,推动城市空间、人群与环境之间更协调、更可持续发展(表5)。

## 5 结论

本研究基于IPCC提出的“危险性—暴露度—脆弱性”框架,构建城市尺度复合污染健康风险评估模型,并以西安市为例,分析2015–2022年间健康风险的时空演变及其成

表5 西安市分区优化策略汇总  
Tab. 5 Summary of optimization strategies by zone in Xi'an

区名 District name	空间结构优化 Spatial structure optimization	功能布局调整 Functional layout adjustment	生态环境治理 Ecological and environmental management	基础设施升级 Infrastructure upgrade	社会资源匹配 Social resource allocation
新城區	控制开发与污染源, 增设绿地缓冲	保障老年人医疗与避暑可达性	建设绿带缓解热岛污染	推广绿色屋顶与纳凉设施	强化老年人健康防护资源
碑林區	疏解人口密度, 优化通风结构	增设绿地与遮阳节点	设置生态隔离绿带	建设户外休息遮阳设施	加强户外劳动者健康防护
莲湖區	控制开发强度, 引导功能疏解	减少高耗能用地, 引入绿色功能	构建通风走廊与绿楔	推进透水铺装与微绿设施	提升学校与社区防护能力
灞桥區	强化城乡边界生态隔离	增设医疗与避暑服务点	打造沿线绿带缓冲区	高温区推广纳凉设施	强化基层医疗应急能力
未央區	减少密集开发, 控制暴露区建设	为高暴露行业增设避暑空间	工地等区设绿化缓冲	配建遮阳站与饮水点	强化劳动群体健康教育
雁塔區	控制污染区开发强度, 增强生态支撑	完善公共服务与绿地系统	建通风廊道, 引入清洁气流	改善高校与住宅区热环境	扩容医疗网络, 提升能级
阎良區	提升生活设施与医疗配套	构建 15 min 老年健康服务圈	增设绿阴通道与小绿地	改造步行空间, 适宜宜居	推进远程医疗终端覆盖
临潼區	合理职住分布, 避免老年人热暴露	强化失业人群社区服务	建绿轴增强通风性	提升医疗普惠性	建立健康补贴与救助机制
长安區	划定新区生态缓冲, 预控热岛	增设避暑服务点覆盖新社区	利用秦岭屏障拓展通风廊	公共空间优化遮阳设计	医疗资源向边缘倾斜
高陵區	教育区留足生态缓冲	配套儿童避暑与医疗点	学校周边增设绿隔与降温地	推广校园遮阳与饮水设施	开展健康科普与演练
鄠邑區	控制边缘区人口与开发强度	规划复合型服务点	建立城区—郊区绿廊系统	提升基层设备与人力	健全社区预警与宣教机制

因。结果显示, 西安市健康风险呈阶段性波动, 空间上表现出“中心高、外围低”的圈层分布。核心城区因人口密度大、污染源集中与老龄化叠加, 风险持续高位; 扩展区如未央、雁塔因快速开发与生态缓冲不足, 风险上升明显。危险性指标中臭氧浓度与污染持续性变化显著, 脆弱性方面建筑业从业人口与老年人口比重增加, 强化了复合风险的多因子叠加效应。针对不同区域主导风险类型, 研究提出涵盖空间结构、功能布局、生态治理、基础设施与社会资源的五维应对策略, 强调因区施策与系统协同。研究结果为城市健康风险管理提供了科学支持, 建议未来加强高分辨率数据融合、动态监测与脆弱

人群适应性研究, 推动城市治理向主动适应与协同管控转型。

注: 图2底图来源于国家地理信息公共服务平台GS(2024) 0650; 其余图表均由作者绘制。

参考文献

[1] ZHANG N N, MA F, QIN C B, et al. Spatiotemporal Trends in PM<sub>2.5</sub> Levels from 2013 to 2017 and Regional Demarcations for Joint Prevention and Control of Atmospheric Pollution in China[J]. Chemosphere, 2018, 210: 1176-1184.  
[2] KUERBAN M, WAILI Y, FAN F, et al. Spatiotemporal Patterns of Air Pollution in China from 2015 to 2018 and Implications for Health Risks[J]. Environmental Pollution, 2020, 258: 113659.

[3] WILLIAMS S, NITSCHKE M, TUCKER G, et al. Extreme Heat Arrangements in South Australia: An Assessment of Trigger Temperatures[J]. Health Promotion Journal of Australia, 2011, 22: S21-S27.  
[4] SONG T L, FENG M, SONG D L, et al. Comparative Analysis of Secondary Organic Aerosol Formation During PM<sub>2.5</sub> Pollution and Complex Pollution of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> in Chengdu, China[J]. Atmosphere, 2022, 13(11): 1834.  
[5] National Research Council (US) Committee on Improving Risk Analysis Approaches Used by the U.S. EPA. Science and Decisions: Advancing Risk Assessment[M]. Washington, D.C.: National Academies Press, 2009.  
[6] AVEN T. Risk Assessment and Risk Management: Review of Recent Advances on Their Foundation[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 253(01): 1-13.  
[7] ELBAZ K, HOTEIT I, SHABAN W M, et al. Spatiotemporal Air Quality Forecasting and Health

- Risk Assessment over Smart City of NEOM[J]. *Chemosphere*, 2023, 313: 137636.
- [8] BOLAN S, PADHYE L P, JASEMIZAD T, et al. Impacts of Climate Change on the Fate of Contaminants Through Extreme Weather Events[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 909: 168388.
- [9] COUÑAGO E, GARCÍA-PINTOS A, CABALLERO G, et al. Analysing Coastal Flood Risk: Assessing the Impact on Critical Water Infrastructures[J]. *Water Resources Management*, 2024, 38(05): 1791-1806.
- [10] BARTH WAL V, JAIN S, BABUTA A, et al. Health Impact Assessment of Delhi's Outdoor Workers Exposed to Air Pollution and Extreme Weather Events: An Integrated Epidemiology Approach[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(29): 44746-44758.
- [11] 喻鸥, 阎建忠, 张懿铨. 区域气候变化脆弱性综合评估研究进展[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(01): 27-34.
- [12] 王兰, 贾颖慧, 孙文尧, 等. 面向城市规划方案的定量健康影响评估研究[J]. *规划师*, 2021, 37(19): 72-77.
- [13] 李赛, 曹素珍, 张洪潇, 等. 空气污染暴露测量技术的现状及发展趋势[J]. *环境与健康杂志*, 2018, 35(04): 354-360.
- [14] 王俊佳, 王川涛, 曾胜. 基于情景模拟的城市排水能力及内涝风险评估[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(17): 115-120.
- [15] 施建刚, 俞晓莹. 气候变化下长三角城市群基础设施脆弱性评估及空间分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(12): 1836-1844.
- [16] HAN L, YU C W, CAO S-J. Synergistic Control of Air Pollution and Heat Waves in the Urban Built Environment: Challenges and Opportunities[J]. *Indoor and Built Environment*, 2024, 33(03): 417-421.
- [17] PASCAL M, WAGNER V, ALARI A, et al. Extreme Heat and Acute Air Pollution Episodes: A Need for Joint Public Health Warnings?[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 249: 118249.
- [18] 李欢欢, 张明顺. 北京市高温热浪健康风险评估框架及应用[J]. *环境与健康杂志*, 2020, 37(01): 58-65.
- [19] 牛彦合, 焦胜, 操婷婷, 等. 基于PSR模型的城市多灾种风险评估及规划响应[J]. *城市发展研究*, 2022, 29(04): 39-48.
- [20] MEYER V, SCHEUER S, HAASE D. A Multicriteria Approach for Flood Risk Mapping Exemplified at the Mulde River, Germany[J]. *Natural Hazards*, 2009, 48(01): 17-39.
- [21] 李涛, 陶辉, 陈金雨. 中巴经济走廊极低温事件风险评估[J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(03): 343-354.
- [22] 谢盼, 王仰麟, 彭建, 等. 基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价——研究进展与框架[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(02): 165-174.
- [23] 罗晓玲, 杜尧东, 郑璟. 广东高温热浪致人体健康风险区划[J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(02): 139-146.
- [24] 余中元, 李波, 张新时. 湖泊流域社会生态系统脆弱性时空演变及调控研究——以滇池为例[J]. *人文地理*, 2015, 30(02): 110-116.
- [25] 吴晓, 张莹. 新冠肺炎疫情下结合社区治理的流动人口管控[J]. *南京社会科学*, 2020(03): 21-27.
- [26] 田毅鹏. 治理视域下城市社区抗击疫情体系构建[J]. *社会科学辑刊*, 2020(01): 19-27.
- [27] 俞立平, 潘云涛, 武夷山. 科技评价中指标初步筛选的实证研究[J]. *科技进步与对策*, 2010, 27(05): 116-121.
- [28] 郑颖生, 王墨, 李建军, 等. 城市高温风险评估与气候适应性规划策略——以亚热带高密度城市深圳为例[J]. *规划师*, 2021, 37(14): 13-19.
- [29] 陈恺, 唐燕. 城市高温热浪脆弱性空间识别与规划策略应对——以北京中心城区为例[J]. *城市规划*, 2019, 43(12): 37-44, 77.
- [30] 谢盼, 王仰麟, 刘焱序, 等. 基于社会脆弱性的中国高温灾害人群健康风险评估[J]. *地理学报*, 2015, 70(07): 1041-1051.
- [31] CHEN P Y. Effects of the Entropy Weight on TOPSIS[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 168: 114186.