

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.02.007

https://xuebao.xaut.edu.cn

引文格式:宋俊,李春林,胡远满,刘淼,黄泳波. 京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 污染区域及人口暴露风险研究[J]. 西安理工大学学报, 2024, 40(2):214-225.

SONG Jun, LI Chunlin, HU Yuanman, LIU Miao, HUANG Yongbo. Study on the spatial and temporal distribution patterns and exposure risks of PM<sub>2.5</sub> Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(2): 214-225.

## 京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 污染区域及人口暴露风险研究

宋俊<sup>1,2</sup>, 李春林<sup>2</sup>, 胡远满<sup>2</sup>, 刘淼<sup>2</sup>, 黄泳波<sup>3</sup>

(1. 山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南 250358; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所 中国科学院森林生态与管理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 3. 航天宏图信息技术股份有限公司, 北京 100195)

**摘要:** 为缓解京津冀地区面临的严峻 PM<sub>2.5</sub> 污染,本研究利用公里级高分辨率 PM<sub>2.5</sub> 数据集对京津冀地区的 PM<sub>2.5</sub> 时空分布格局进行分析,利用超标频数法和人口相对暴露风险模型评估京津冀地区的区域暴露风险和人口暴露风险,并预测未来的人口暴露风险。结果表明,京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度在 2001 至 2013 年间呈波动上升趋势,在 2014 至 2020 年间呈显著下降趋势,到 2020 年时下降至 38.43 μg/m<sup>3</sup>。京津冀的东南部地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度大于西北部地区。对于区域暴露风险,承德市和张家口市较低,邯郸市、衡水市、廊坊市、石家庄市和邢台市较高。对于人口暴露风险,承德市、张家口市和秦皇岛市较低,北京市、邯郸市、天津市、廊坊市、邢台市和石家庄市较高。综合来看承德市和张家口市的暴露风险最低,邯郸市、廊坊市、邢台市和石家庄市的暴露风险最高。京津冀地区在 2030、2035、2060 年的人口暴露风险较低(0 级)。本研究将区域暴露风险和人口暴露风险结合,避免了单一评价指标带来的误差,对暴露风险得到了更准确的理解。

**关键词:** 京津冀地区; PM<sub>2.5</sub>; 时空分布格局; 区域暴露风险; 人口暴露风险

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2024)02-0214-12

### Study on the spatial and temporal distribution patterns and exposure risks of PM<sub>2.5</sub> pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region

SONG Jun<sup>1,2</sup>, LI Chunlin<sup>2</sup>, HU Yuanman<sup>2</sup>, LIU Miao<sup>2</sup>, HUANG Yongbo<sup>3</sup>

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China;

2. Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Piesat Information Technology Company Limited, Beijing 100195, China)

**Abstract:** To mitigate the severe PM<sub>2.5</sub> pollution in Beijing, Tianjin and Hebei region, the kilometer-level high-resolution PM<sub>2.5</sub> dataset is used to analyze the spatial and temporal distribution patterns of PM<sub>2.5</sub> in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, with the frequency of exceedance method and population relative exposure risk model used to assess the regional exposure risk and population exposure risk in Beijing, Tianjin and Hebei region. This study also predicts the future population exposure risk. The results illustrate that the PM<sub>2.5</sub> concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region shows a fluctuating increasing trend between 2001 and 2013, and a significant decreasing trend between 2014 and 2020, decreasing to 38.43 μg/m<sup>3</sup> by 2020. The PM<sub>2.5</sub> concentration in the

收稿日期: 2023-02-24; 网络首发日期: 2023-04-24

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20230424.1357.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41871192,41730647); 中国科学院青年创新促进会资助项目(2021194)

第一作者: 宋俊,男,硕士生,研究方向为城市大气污染。E-mail: songjun990425@163.com

通信作者: 李春林,男,博士,研究员,研究方向为城市景观生态学、生态环境效应。E-mail: lichunlin@iae.ac.cn

southeastern part of Beijing-Tianjin-Hebei is larger than that in the northwestern part. For regional exposure risk, it is lower in Chengde and Zhangjiakou, and higher in Handan, Hengshui, Langfang, Shijiazhuang and Xingtai. For population exposure risk, it is lower in Chengde, Zhangjiakou and Qinhuangdao, and higher in Beijing, Handan, Tianjin, Langfang, Xingtai and Shijiazhuang. Overall, Chengde and Zhangjiakou have the lowest exposure risk, while Handan, Langfang, Xingtai and Shijiazhuang have the highest exposure risk. The population exposure risk in Beijing-Tianjin-Hebei Region will be low (Level 0) in 2030, 2035 and 2060. This study combines regional exposure risk and population exposure risk to avoid the errors caused by a single evaluation index and to obtain a more accurate understanding of exposure risk.

**Key words:** Beijing-Tianjin-Hebei Region; PM<sub>2.5</sub>; spatial and temporal distribution pattern; regional exposure risk; population exposure risk

PM<sub>2.5</sub>是世界范围内公认的导致公共卫生问题的污染物之一<sup>[1]</sup>。PM<sub>2.5</sub>作为主要的大气污染物,其成分复杂且来源多样<sup>[2]</sup>。随着工业化和城市化进程的加速,空气污染已对人的生命健康产生了重大负面影响<sup>[3]</sup>。当今大气污染问题主要集中在发展中国家,中国作为最大的发展中国家,目前正面临着PM<sub>2.5</sub>污染带来的严重危害。细颗粒物沉积在上呼吸道,甚至能深入到细支气管和肺泡<sup>[4]</sup>,对人体健康危害极大。事实证明暴露于PM<sub>2.5</sub>会导致脑卒中、缺血性心脏病、肺癌及慢性阻塞性肺疾病的发生<sup>[5]</sup>,会大大增加居民的死亡率。暴露于PM<sub>2.5</sub>还会导致代谢紊乱,加重其他慢性疾病<sup>[7]</sup>,并有可能导致心理健康问题<sup>[8]</sup>。此外PM<sub>2.5</sub>还对生态环境造成了破坏,如能见度下降、农作物产量降低等<sup>[9]</sup>。

当前关于PM<sub>2.5</sub>人口暴露风险的研究,相关学者分别基于人口密度<sup>[10-12]</sup>和人口加权<sup>[13-14]</sup>两种方法开展了研究。这两种方法都无法表征某空间子单元的暴露风险相对于整体空间单元的严重程度<sup>[15]</sup>,因此本研究采用人口暴露相对风险模型<sup>[14]</sup>,能够更加合理地表示对京津冀地区的暴露风险。此外,目前的研究大多基于站点监测数据,但由于区域监测站点分布数量十分有限且不均匀,难以提供PM<sub>2.5</sub>在空间分布上的连续信息。而通过遥感反演AOD数据与PM<sub>2.5</sub>之间的关系,得到的PM<sub>2.5</sub>浓度数据空间连续性较好,成为弥补监测数据空间精度不足的有效手段<sup>[19]</sup>,因此本文利用遥感反演数据将会得到PM<sub>2.5</sub>人口暴露风险更准确的结果。

由于PM<sub>2.5</sub>的严重危害,人们的生命健康和正常生产生活受到了极大影响<sup>[20]</sup>,因此科学精准的暴露评估是PM<sub>2.5</sub>风险防控的必要前提<sup>[21]</sup>。本研究利用中国公里级高分辨率PM<sub>2.5</sub>数据集和人口密度数据,对京津冀地区PM<sub>2.5</sub>浓度的时空分布格局进行研究,并分析了区域暴露风险和人口暴露风险。本研究使用更精细的PM<sub>2.5</sub>浓度数据,将得出更加准确、

可靠的结果。同时本文从区域和人口两个角度对暴露风险进行综合分析,这种评估和分析框架可以避免单一评价指标带来的误差。此外本研究对未来京津冀地区的人口暴露风险进行了预测。本研究的方法和结果有望加深对京津冀地区PM<sub>2.5</sub>污染格局和人口分布变化条件下暴露风险的认识,为改善空气质量和降低居民空气污染暴露风险的政策提供理论依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区

本研究的研究区是京津冀地区(图1),是中国三大城市群之一,构成了中国北方重要的核心区域<sup>[22]</sup>,在经济建设取得成果的同时也面临着前所未有的生态环境挑战<sup>[23]</sup>。

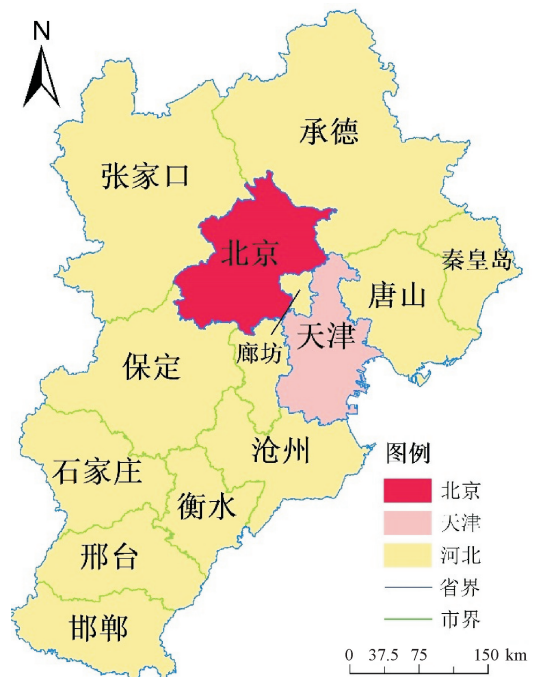


图1 京津冀地区

Fig. 1 Beijing-Tianjin-Hebei Region

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2016)1610的标准地图制作,底图无修改。

京津冀地区的PM<sub>2.5</sub>污染比全国其它地区更为严重,是中国乃至世界上空气污染最严重的地区<sup>[24]</sup>。京津冀地区多次遭受雾霾污染<sup>[25]</sup>,仅在2013年京津冀地区就有12万人死于PM<sub>2.5</sub>导致的疾病<sup>[26]</sup>。尽管近年来京津冀地区的空气质量有所好转,但在2020年石家庄、邯郸、唐山、邢台、保定等城市仍是全国空气质量最差的几个城市<sup>[27]</sup>。京津冀地区包括北京市、天津市、河北省,其中河北省包括11个市(保定市、沧州市、承德市、邯郸市、衡水市、廊坊市、秦皇岛市、石家庄市、唐山市、邢台市、张家口市)。

## 1.2 数据

### 1.2.1 公里级PM<sub>2.5</sub>数据

中国2001—2020年的PM<sub>2.5</sub>数据来自中国公里级高分辨率PM<sub>2.5</sub>数据集<sup>[8,28]</sup>,空间分辨率为1 km。中国公里级高分辨率PM<sub>2.5</sub>是长期、全覆盖、高分辨率和高质量的中国地面空气污染物系列数据集之一。考虑到空气污染的时空异质性,利用STET模型和大气校正(MAIAC)算法估计了1 km分辨率下的PM<sub>2.5</sub>浓度。为消除误差,该数据集考虑了可能影响PM<sub>2.5</sub>浓度的其他因素,包括气象变量、地表条件、污染物排放和人口分布等。在模型训练阶段,将所有影响因素作为自变量输入到模型中,训练结束后使用基尼系数计算各因素重要性得分,并选取最重要的因素进行重新训练用于优化模型。结果表明,该数据集能很好地在不同时空尺度上表达PM<sub>2.5</sub>浓度的变化,具有较高的准确性。本研究利用年均PM<sub>2.5</sub>数据对PM<sub>2.5</sub>污染的时空分布格局及暴露风险进行分析。

### 1.2.2 人口密度数据

2001—2020年中国的人口密度来自世界网格人口数据集(<https://www.worldpop.org/methods/populations>)。该数据集的分辨率为30",在赤道处的经纬度分辨率均为1 km,采用自上而下的建模方式对全球所有土地网格的人口密度进行估计。该数据集采用2000—2020年每年基于行政单位的人口普查和预测计数的全球数据库,并利用一组详细的地理空间数据集将其分解为基于网格单元的计数。本研究利用人口密度数据计算不同人口分布条件下的人口暴露风险。

为了验证数据集的准确性,将全国城市空气质量实时发布平台公布的年均PM<sub>2.5</sub>浓度数据、中国城市统计年鉴公布的京津冀地区城市人口数量与对应数据集提供的数据进行线性拟合,拟合结果见表1。在2001至2020年间,PM<sub>2.5</sub>浓度拟合结果( $R^2=0.88$ )及人口数量拟合结果( $R^2=0.98$ )表明,实际数据与

数据集基本一致,可用于京津冀地区的相关研究。

表1 2001至2020年京津冀地区年均PM<sub>2.5</sub>浓度及人口数量线性拟合结果

Tab. 1 Linear fitting results of annual average PM<sub>2.5</sub> concentration and population size in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2001 to 2020

拟合对象	线性拟合方程	R <sup>2</sup>
年均PM <sub>2.5</sub> 浓度	$y = 0.7966x + 7.0918$	0.8759
人口数量	$y = 1.1828x - 128.74$	0.9845

### 1.2.3 人口预测数据

2030、2035、2060年RCP6情况下SSP1~SSP5共五种人口增长模式的人口预测数据来自公里级预测网格人口数据集<sup>[29]</sup>。该数据集通过有代表性的城市网格和历史人口网格,考虑国家生育政策的变化和人口上限政策,将预测的省级人口以30"的分辨率分配到人口网格中,建立了空间分辨率为1 km的2010年至2100年的中国人口网格。该数据集利用《中国省级统计年鉴》2017年人口数据对省级预测数据进行了验证,结果表明全国人口的预测值比实际值大0.9%,省级人口预测的绝对百分比误差为1.7%~2.0%,准确度较高。SSP-RCP是一个涵盖各种社会经济发展路径(SSP)和温室气体浓度(RCP)及其相应的气候变化影响的人口预测模型<sup>[30]</sup>。其中RCP6代表高温室气体浓度情景<sup>[31]</sup>,更符合中国目前PM<sub>2.5</sub>浓度现状,SSP1~SSP5代表五种发展模式。本研究利用预测的人口数据对2030、2035、2060年的人口暴露风险进行分析。

## 2 研究方法

### 2.1 变化趋势分析

本研究采用趋势分析方法分析2001—2020年PM<sub>2.5</sub>浓度的变化趋势,并确定其增加或减少的程度。计算公式为:

$$T = \frac{n \sum_{i=1}^n i p_i - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n p_i)}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: $T$ 为各网格PM<sub>2.5</sub>浓度的变化趋势; $n$ 为时间跨度; $i$ 为年数; $p_i$ 为第 $i$ 年PM<sub>2.5</sub>的年平均浓度。如果 $T$ 大于0,说明PM<sub>2.5</sub>浓度呈上升趋势;如果 $T$ 小于0,则表示PM<sub>2.5</sub>浓度呈下降趋势。

### 2.2 区域暴露风险

空气污染的暴露风险(RER)是指一个区域内大气污染物浓度超过限值的时间,反映了该地



区人们暴露于空气污染的时间的大小或比例。利用超标频数估计法计算 RER,计算公式为:

$$R_j = \frac{\text{count}(C_j < S)}{n} \quad (2)$$

式中: $R_j$ 为网格  $j$  中的 RER; $C_j$ 为网格  $j$  中的 PM<sub>2.5</sub> 浓度; $S$  为 WHO 的过渡期目标 1(IT-1)即 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; $n$  表示时间跨度。RER 的取值范围为 0 到 1,值为 0 表示没有超过 WHO 的 IT-1 污染标准的事件,而 RER 值越大,污染事件的比例越大,值为 1 表示整个期间 PM<sub>2.5</sub> 浓度超过 IT-1 的标准。

### 2.3 人口暴露风险

高浓度的 PM<sub>2.5</sub> 对人们的生命健康构成了严重的威胁。然而,由于人口分布不均匀,RER 不能充分反映居民的 PM<sub>2.5</sub> 暴露风险。为了解决这一问题,有必要量化不同人口分布情况下的风险。本研究采用人口暴露相对风险模型,结合了污染物浓度和人口空间分布情况,在空间尺度上量化 PM<sub>2.5</sub> 污染的人口暴露风险(PER)。计算公式为:

$$P_{ij} = \frac{m P_{ij} C_{ij}}{\sum_{j=1}^m P_{ij} C_{ij}} \quad (3)$$

式中: $P_{ij}$ 是网格  $j$  第  $i$  年的 PER; $C_{ij}$ 是网格  $j$  在第  $i$  年的年平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度; $P_{ij}$ 是网格  $j$  第  $i$  年的人口密度; $m$  是研究区域网格的总数。PER 被分为 5 个级别,包括 0 级( $0 \leq \text{PER} \leq 1$ )、1 级( $1 < \text{PER} \leq 2$ )、2 级( $2 < \text{PER} \leq 3$ )、3 级( $3 < \text{PER} \leq 5$ )和 4 级( $\text{PER} > 5$ )。

## 3 结果与分析

### 3.1 PM<sub>2.5</sub> 时空分布格局

利用地面公里级年均 PM<sub>2.5</sub> 数据分析 2001—2020 年的年平均 PM<sub>2.5</sub> 的时空分布格局,图 2 展示了京津冀地区 5 个代表性年份中 PM<sub>2.5</sub> 浓度的时空分布格局。从图 2 中可以看出,20 年间 PM<sub>2.5</sub> 浓度经历了一个先上升后下降的过程,到 2020 年已显著下降。在空间分布上,京津冀的东南部地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度明显高于西北部地区。

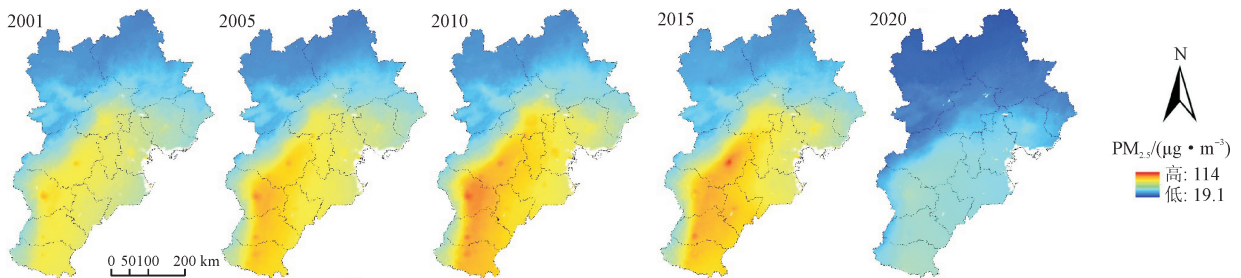


图 2 京津冀地区 5 个代表年的年平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空分布格局

Fig. 2 Spatial and temporal distribution patterns of annual average PM<sub>2.5</sub> concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region for five representative years

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2016)1610 的标准地图制作,底图无修改。

根据世界卫生组织发布的全球卫生质量指南<sup>[32]</sup>,以过渡期指标 IT-1( $< 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )为标准,将京津冀地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度按  $\leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $(35, 70]$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $(70, 105]$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $> 105 \mu\text{g}/\text{m}^3$  进行分级。2001 至 2020 年间,京津冀地区各级别的面积占比见图 3。京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度在 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以下的地区的面积占比在 2001 至 2014 年间波动较大,在 2015 至 2020 年间一直呈上升趋势,在 2020 年面积占比达到 44.81%。2006、2007 及 2009 至 2014 年间出现了 PM<sub>2.5</sub> 浓度大于 105  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  的地区,其中 2013 年面积占比最大,达到 22.73%。2013 年是 PM<sub>2.5</sub> 污染最严重的一年,只有 0.14% 的地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度在 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以下。2018 年后,京津冀地区已经没有 PM<sub>2.5</sub> 浓度在 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以上的地区。

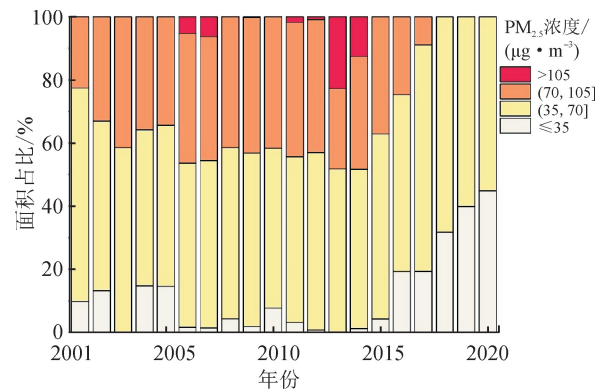


图 3 2001 至 2020 年京津冀地区 4 类 PM<sub>2.5</sub> 浓度的面积比例  
Fig. 3 Area proportion of 4 categories of PM<sub>2.5</sub> concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2001 to 2020



各地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度有着大致相同的变化趋势,在 2001 至 2013 年间呈波动上升趋势,在 2014 至 2020 年间呈快速下降趋势,见图 4。

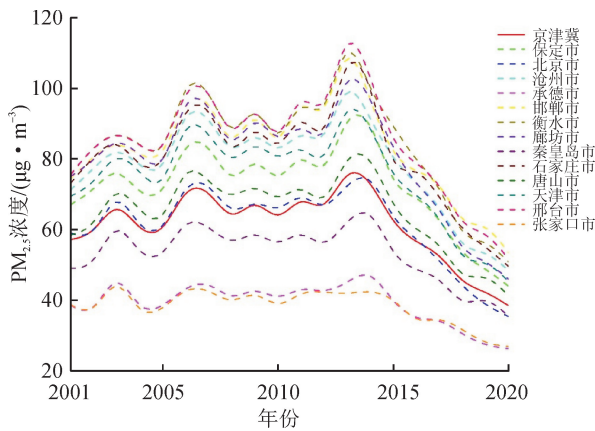


图 4 2001 至 2020 年京津冀地区 13 个城市年均 PM<sub>2.5</sub> 浓度  
Fig. 4 Annual average PM<sub>2.5</sub> concentrations in 13 cities in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2001 to 2020

在 13 个地区中,邢台市、衡水市、邯郸市和石家庄市 PM<sub>2.5</sub> 浓度较高,在 2013 年时 PM<sub>2.5</sub> 浓度均大于 105 μg/m<sup>3</sup>。同时这几个城市下降幅度均较明显,在 2020 年时 PM<sub>2.5</sub> 浓度均下降至 50 μg/m<sup>3</sup> 左右。承德市和张家口市 PM<sub>2.5</sub> 浓度较低,并且从

2017 年开始两市的 PM<sub>2.5</sub> 浓度均低于 35 μg/m<sup>3</sup>。整个京津冀地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度在 2013 年时到达峰值 75.20 μg/m<sup>3</sup>,到 2020 年时降低至 38.43 μg/m<sup>3</sup>。

### 3.2 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化趋势

由图 5(a),京津冀地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度通过显著性检验,在 20 年间均呈显著下降趋势( $p < 0.05$ )。可以看到的是,在京津冀地区中,PM<sub>2.5</sub> 浓度较高的东南部地区较 PM<sub>2.5</sub> 浓度较低的西北部地区下降趋势更大。由图 5(b),2001 至 2020 年间京津冀地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度有两个明显不同的变化趋势,分别是 2001 至峰值的波动上升和峰值至 2020 年的显著下降。在 13 个地区中,北京市、承德市、秦皇岛市、张家口市的 PM<sub>2.5</sub> 浓度在 2013 年到达峰值,其他城市的 PM<sub>2.5</sub> 浓度则在 2013 年到达峰值。邢台市、衡水市、邯郸市、石家庄市、沧州市和廊坊市在波动上升阶段的年均上升幅度最大,均超过 2 μg · m<sup>-3</sup> · 年<sup>-1</sup>。同时这些地区在显著下降阶段的年均下降幅度也最大,均超过 7 μg · m<sup>-3</sup> · 年<sup>-1</sup>。总体来说,在 PM<sub>2.5</sub> 浓度到达峰值前上升幅度大的地区,峰值后下降的幅度也大。

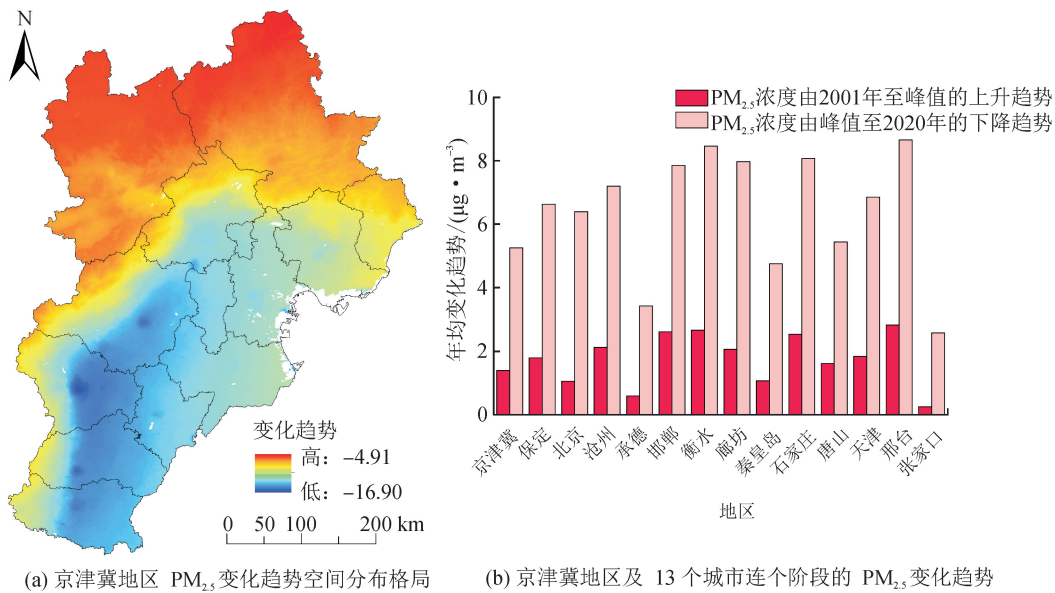


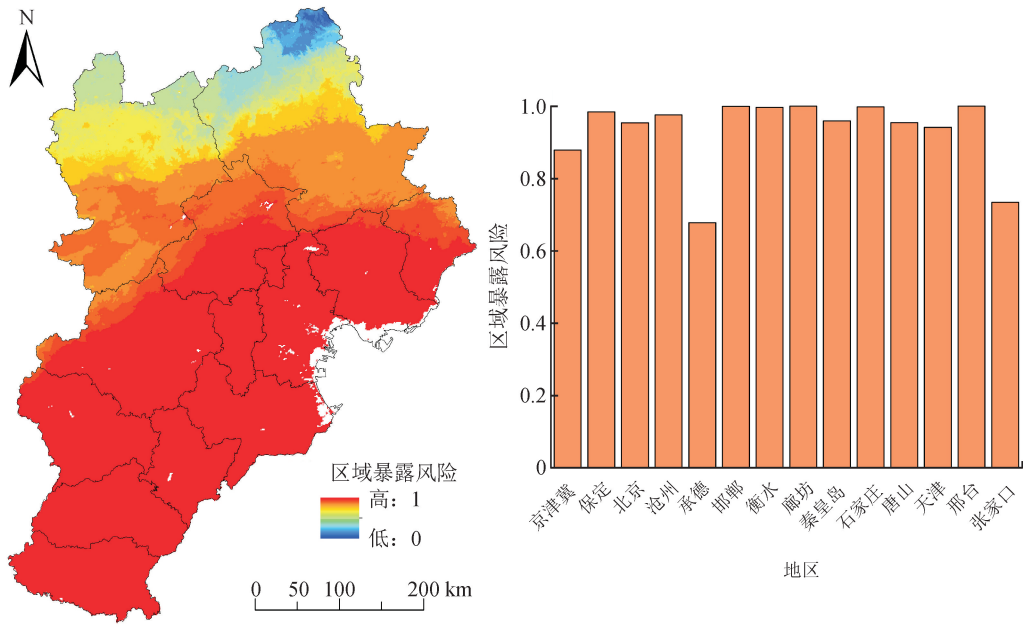
图 5 2001 至 2020 年间京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 变化趋势  
Fig. 5 Trends of PM<sub>2.5</sub> in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2001 to 2020

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2016)1610 的标准地图制作,底图无修改。

### 3.3 区域暴露风险

20 年间,各地区的 RER 均较高,京津冀地区平均 RER 为 0.88(见图 6)。京津冀的东南部地区的 RER 高于西北部地区,并从东南到西北逐渐降低。

承德市和张家口市的 RER 低于平均水平,分别为 0.68 和 0.73,其他地区均高于平均水平。邯郸市、衡水市、廊坊市、石家庄市和邢台市的 RER 为 1,即在 20 年间年均 PM<sub>2.5</sub> 均处于 35 μg/m<sup>3</sup> 以上。



(a) 京津冀地区区域暴露风险空间分布 (b) 京津冀地区及 13 个城市的区域暴露风险

图 6 京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度区域暴露风险

Fig. 6 Regional exposure risk of PM<sub>2.5</sub> concentration in Beijing-Tianjin-Hebei Region

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2016)1610 的标准地图制作,底图无修改。

3.4 人口暴露风险

由图 7,2001 至 2020 年间,除北京市外,京津冀的其他地区的 PER 变化幅度较小,并有着大致相同的变化趋势。

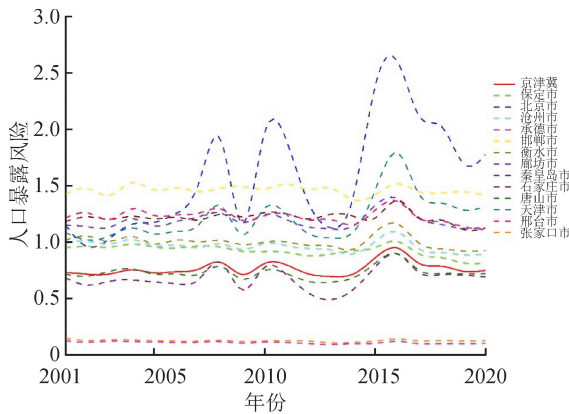


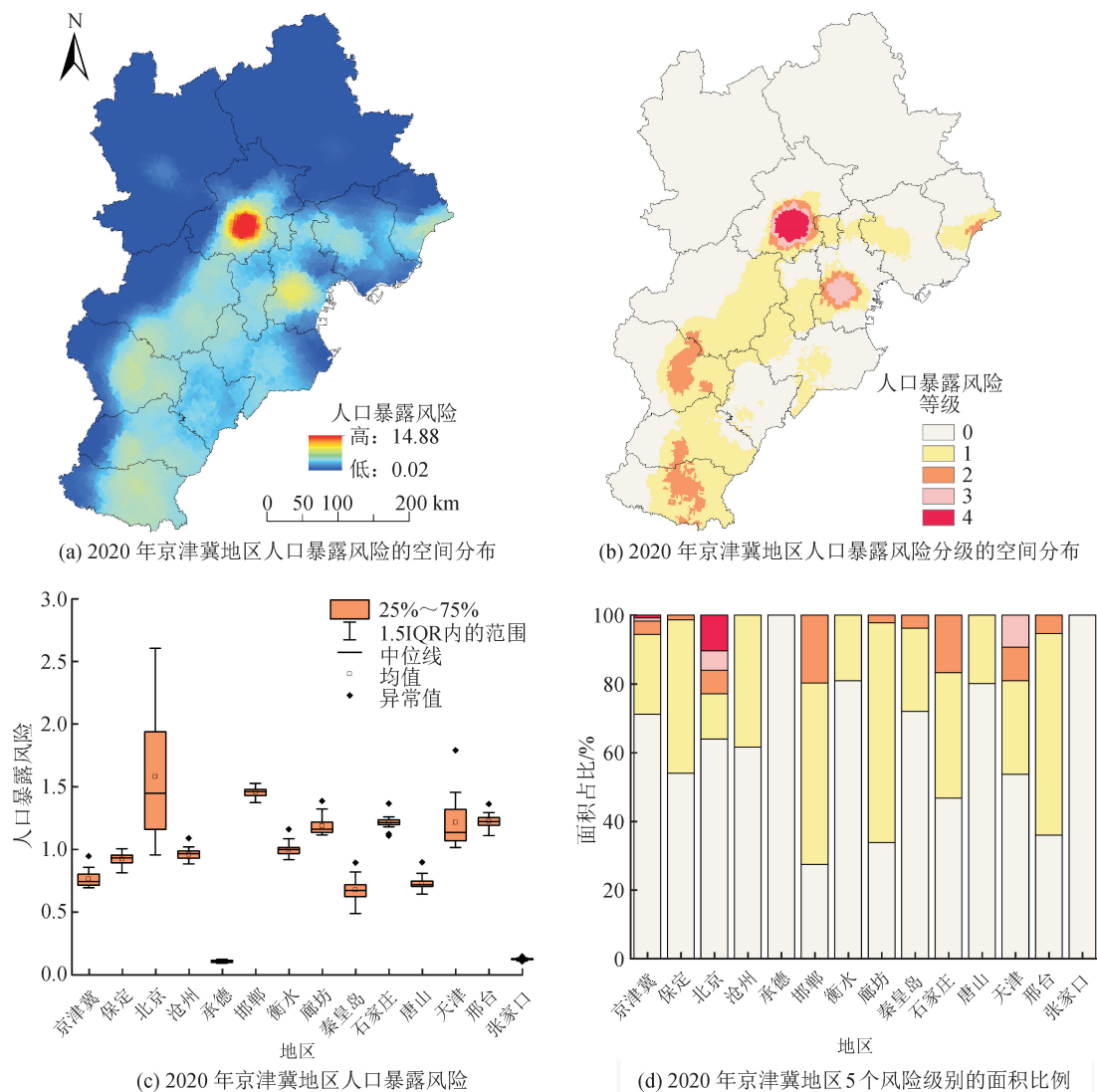
图 7 2001 至 2020 年间京津冀地区及 13 个城市的人口暴露风险

Fig. 7 Population exposure risk in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and 13 cities from 2001 to 2020

2020 年各地区的 PER 较 2001 年略有上升,北京市作为首都 PER 变化幅度较大且不稳定。按照 PER 的分级方法,京津冀地区总体在 20 年间均处于 0 级暴露风险。除了北京市外,其他地区在 20 年间均处于 2 级暴露风险以下。承德市、张家口市和秦皇岛市的 PER 在 20 年间均低于京津冀地区平均

水平,唐山市除 2003 和 2004 年外,PER 也低于平均水平。邯郸市、邢台市、廊坊市、石家庄市和天津市 PER 较高,在 20 年间均处于 1 级暴露风险。北京市 PER 同样较高,只有在 2002 年时处于 0 级暴露风险,甚至在 2015 至 2018 年 PER 风险等级达到 2 级,其他年份则均处于 1 级暴露风险。

由于 2001—2020 年间各市的 PER 基本相同,我们利用 2020 年的 PER 对京津冀地区的 PER 分布格局进行分析(图 8)。由图 8(a)和图 8(b),京津冀的东南部地区的 PER 和暴露等级均高于西北部地区。在北京市和天津市的中心有两个 PER 较高的地区,其中北京市中心地区达到 4 级暴露风险。京津冀的大部分地区都处于 0 级风险,东南部地区大多处于 1 级和 2 级风险。从图 8(c)中可以看出,京津冀地区总体 PER 暴露风险较低,处于 0 级风险。其中北京市、邯郸市、天津市、廊坊市、石家庄和邢台市 PER 较高,均处于 1 级暴露风险,其他地区则处于 0 级暴露风险。从图 8(d)中可以看出,承德市和张家口市全市都处于 0 级风险,衡水市、唐山市和沧州市风险等级也较低,全市都处于 0 和 1 级风险。只有北京市和天津市有风险等级为 3 级的区域,分别占比 5.66%和 9.31%。同时只有北京有风险等级为 4 级的区域,面积占比达到 10.34%。

图 8 2020 年  $PM_{2.5}$  人口暴露风险的分布和分类Fig. 8 Distribution and classification of  $PM_{2.5}$  population exposure risk in 2020

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2016)1610 的标准地图制作,底图无修改。

### 3.5 京津冀地区人口暴露风险预测

本研究对 RCP6 情况下的 SSP1~SSP5 共五种人口增长模式下 2030 年(碳峰值标准年)、2035 年(“美丽中国”目标年)、2060 年(碳中和目标年)的 PER 进行预测。Shi 等<sup>[33]</sup> 根据中国环境规划研究院提出的社会经济和能源路径以及空气污染末端治理技术预测中国  $PM_{2.5}$  排放量,并利用 WRF-CAMx 模型模拟 2030、2035、2060 年的国家和区域  $PM_{2.5}$  浓度。参考其研究结论,京津冀地区 2030、2035、2060 年的  $PM_{2.5}$  浓度分别较 2019 年将下降 44%、60%、90%。图 9(a)展示了 2030、2035、2060 年  $PM_{2.5}$  浓度的空间分布情况。由于 SSP1~SSP5 情

况下人口在空间上的分布基本相同,图 9(b)以 SSP1 为例展示了 2030、2035、2060 年人口密度的空间分布情况。

由图 10(a),2060 年时 SSP1~SSP5 五种情况下 PER 的空间分布情况。可以看到,到 2060 年时五种情况的 PER 在空间上的分布大致相同,均表现出东南高西北低的特征。图 10(b)展示了 2030、2035、2060 年 SSP1~SSP5 五种情况下 PER 的变化情况。五种情况下 PER 均呈下降趋势,且 2060 年的 PER 均低于 2030 年,京津冀地区在这几年间都处在 0 级暴露风险,风险等级明显下降。其中 SSP3 情况下 PER 较大且下降趋势不明显,SSP1、SSP4、SSP5 下降幅度较大。



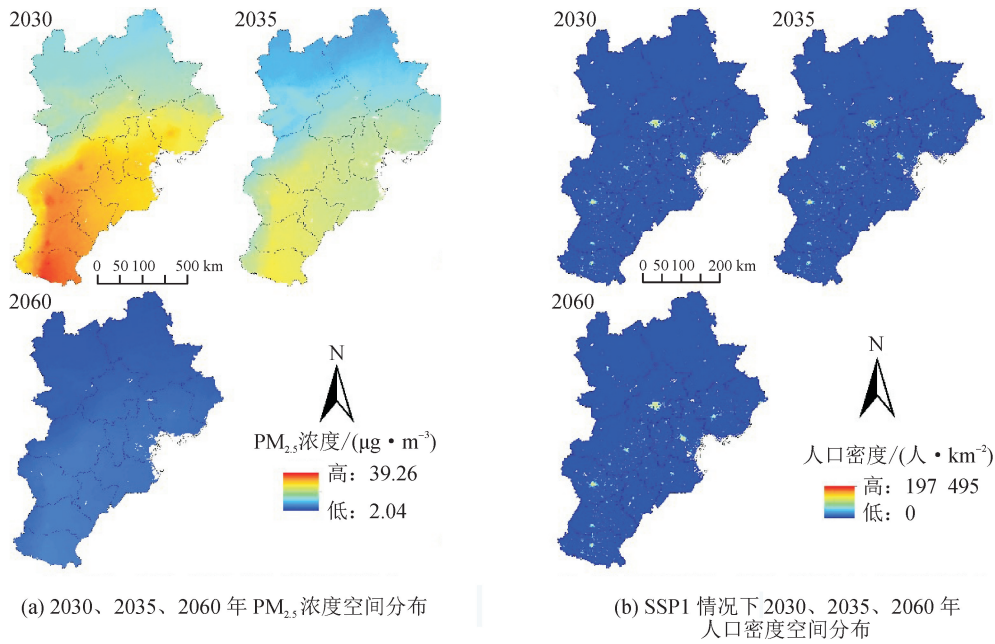


图 9 京津冀地区预测 PM<sub>2.5</sub> 和人口密度空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of projected PM<sub>2.5</sub> and population density in Beijing-Tianjin-Hebei Region  
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2016)1610 的标准地图制作,底图无修改。

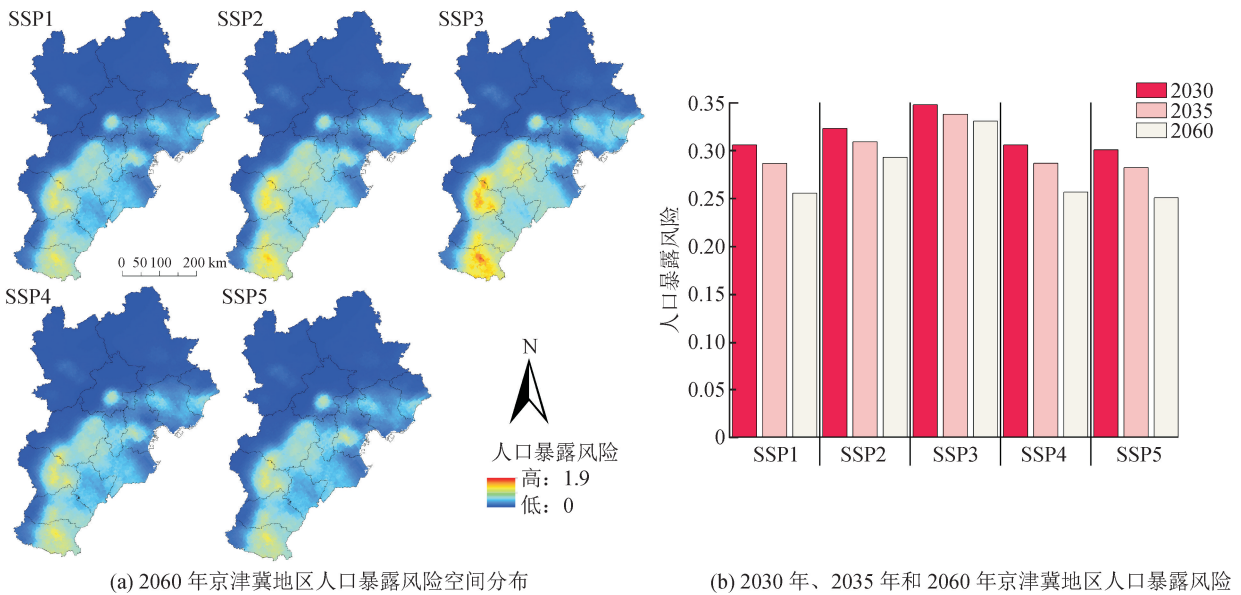


图 10 京津冀地区人口暴露风险预测

Fig. 10 Projected population exposure risk in Beijing-Tianjin-Hebei Regions  
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2016)1610 的标准地图制作,底图无修改。

## 4 讨论

### 4.1 影响京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度的因素

京津冀地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度从 2013 年后开始显著下降。这是由于中国政府已经认识到 PM<sub>2.5</sub> 污染带来的严重危害,开始采取一系列降低 PM<sub>2.5</sub> 浓度的政策,以平衡经济发展与污染排放之间的关系<sup>[34]</sup>。例如 2013 年发布的《大气污染防治行动计

划》<sup>[35]</sup>;采取了一系列例如优化产业结构、提高清洁能源占比、重污染车辆限行等严格的管控措施<sup>[36]</sup>;2018 年国家印发《打赢蓝天保卫战三年行动计划》,加强了对京津冀地区的管控<sup>[37]</sup>。这些措施很大程度上降低了京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度。

京津冀的东南部地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度显著大于西北部地区。京津冀地区西接太行山脉,北接燕山山脉<sup>[39]</sup>,呈现西北高东南低的地形特征<sup>[40]</sup>。当东南

季风盛行时,受燕山-太行山脉阻隔,PM<sub>2.5</sub>聚集在中南部城市,难以扩散。当西北季风盛行时,中南部城市处于PM<sub>2.5</sub>扩散的下风向,进一步加重了污染的程度。此外,由于工业发展会造成PM<sub>2.5</sub>浓度的超标<sup>[41]</sup>,同时煤炭燃烧是京津冀地区PM<sub>2.5</sub>的重要来源<sup>[42]</sup>,邢台、保定、石家庄、邯郸、衡水、唐山等工业高度发达的城市会不可避免地造成空气污染。而秦皇岛、承德和张家口重视旅游业的发展,城市内的绿化率较高<sup>[43]</sup>,有助于减少空气污染。

#### 4.2 影响暴露风险的因素

本研究采用RER和PER两种暴露风险评价方法,对京津冀地区的PM<sub>2.5</sub>暴露风险进行了评估。对于不考虑人口影响的RER,PM<sub>2.5</sub>的浓度是影响RER的唯一因素。位于京津冀东南地区的邯郸市、衡水市、邢台市PM<sub>2.5</sub>浓度较高,在2020年PM<sub>2.5</sub>浓度均在50 μg/m<sup>3</sup>以上。而位于西北地区的张家口市和承德市浓度较低,2020年年均PM<sub>2.5</sub>浓度在30 μg/m<sup>3</sup>以下。因此京津冀东南地区的RER高于西北地区。关于PER,研究表明2000至2016年间亚洲和中国的平均风险等级分别为5级和3级<sup>[44-45]</sup>,京津冀地区的风险等级在20年间都低于此值。本研究所得结论为京津冀地区的PER在2001至2014年间风险值逐渐增大,并维持在较高值,2015年后风险值持续下降,同时风险大小存在着不稳定的特点,这与相关研究结果相似<sup>[46]</sup>。例如北京作为京津冀地区常住人口重心<sup>[47]</sup>,而在空间上受PM<sub>2.5</sub>污染的程度与人口的聚集密切相关<sup>[48]</sup>,大量人口在此聚集并暴露于PM<sub>2.5</sub>污染之中,北京市PER在京津冀地区中最高。此外人类活动和相关政策的影响使北京市的PER不稳定程度较高。同时天津市和石家庄市的中心区域人口较多,因此也有一个PER高值区。

#### 4.3 暴露风险评价方法

本研究分析了京津冀地区2001至2020年间的区域暴露风险和人口暴露风险,两种评价方法各有优缺点。其中RER为防治PM<sub>2.5</sub>污染的空间管理提供了更好的理解和依据。本研究使用20年的数据来计算多年累积RER,然而RER忽略了人口空间分布的不均匀,这使得难以反映相同PM<sub>2.5</sub>浓度下不同人口密度地区暴露风险的差异<sup>[49]</sup>。PM<sub>2.5</sub>的浓度并不能完全表征区域空气质量的受污染程度,人口也是决定该区域内人们真正遭受到PM<sub>2.5</sub>污染程度的因素,PM<sub>2.5</sub>污染的严重程度与人口分布密切相关<sup>[50]</sup>。为了评估PM<sub>2.5</sub>暴露风险水平,特别是在特定地区,更适合使用考虑人口分布的PER<sup>[51]</sup>。

因此,由于人口分布的不均匀,PER似乎是评估京津冀地区PM<sub>2.5</sub>暴露风险的一种更合适的方法。在相关研究中,部分研究利用人口密度与污染物浓度的乘积来表征PER<sup>[52]</sup>,本研究采用的计算方法弥补了该传统方法在某空间子单元内污染状况量化的缺陷<sup>[45]</sup>。本研究综合考虑了RER和PER的优缺点并将其结合,对京津冀地区的暴露风险得到了更准确的理解。

## 5 结论

本研究利用2001—2020年PM<sub>2.5</sub>遥感反演数据和人口密度数据,探讨京津冀地区PM<sub>2.5</sub>浓度空间分布模式和暴露风险,包括区域暴露风险和人口暴露风险。结果表明,京津冀地区PM<sub>2.5</sub>浓度在2001至2013年间呈波动上升趋势,在2014至2020年间呈显著下降趋势,京津冀的东南部地区PM<sub>2.5</sub>浓度大于西北部地区。在2020年时PM<sub>2.5</sub>浓度小于35 μg/m<sup>3</sup>地区的面积占京津冀地区总面积的44.8%,年均PM<sub>2.5</sub>浓度降低至38.43 μg/m<sup>3</sup>。京津冀地区总体RER为0.88,其中承德市和张家口市的RER较低,分别为0.68和0.73,邯郸市、衡水市、廊坊市、石家庄市和邢台市的RER较高且均为1。承德市、张家口市和秦皇岛市的PER较低,在2020年时分别为0.10、0.13和0.69。北京市、邯郸市、天津市、廊坊市、邢台市和石家庄市PER较高,在2020年时分别为1.77、1.41、1.32、1.14和1.11。综合来看承德市和张家口市的暴露风险最低,邯郸市、廊坊市、邢台市和石家庄市的暴露风险最高。在RCP6的五种人口增长模式下,京津冀地区在2030、2035、2060年都处在0级人口暴露风险。

#### 参考文献:

- [1] THIANKHAW K, CHATTIPAKORN N, CHATTIPAKORN S C. PM<sub>2.5</sub> exposure in association with AD-related neuropathology and cognitive outcomes [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 292 (Part A): 118320.
- [2] 冯雅杰. 哈尔滨市2019—2020年两大主城区PM<sub>2.5</sub>分布规律解析[D]. 哈尔滨:哈尔滨商业大学,2022.  
FENG Yajie. Two main urban districts of Harbin from 2019 to 2020 analysis of PM<sub>2.5</sub> distribution[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2022.
- [3] SAMAL K K R, BABU K S, DAS S K. Multi-directional temporal convolutional artificial neural network for PM<sub>2.5</sub> forecasting with missing values: a deep learning approach [J]. *Urban Climate*, 2021, 36: 100800.

- [4] 束方玉. PM<sub>2.5</sub>人口暴露风险时空分异与影响因素研究[D]. 上海:上海师范大学,2019.  
SHU Fangyu. Spatio-temporal variation and influencing factors of PM<sub>2.5</sub> population weighted exposure level: a case study of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2019.
- [5] LIU Jun, HAN Yiqun, TANG Xiao, et al. Estimating adult mortality attributable to PM<sub>2.5</sub> exposure in China with assimilated PM<sub>2.5</sub> concentrations based on a ground monitoring network[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 568: 1253-1262.
- [6] COHEN A J, BRAUER M, BURNETT R, et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 [J]. *The Lancet*, 2017, 389(10082): 1907-1918.
- [7] XU Minxuan, GE Chenxu, QIN Yuting, et al. Prolonged PM<sub>2.5</sub> exposure elevates risk of oxidative stress-driven nonalcoholic fatty liver disease by triggering increase of dyslipidemia[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2019, 130: 542-556.
- [8] WEI Jing, LI Zhanqing, CRIBB M, et al. Improved 1 km resolution PM<sub>2.5</sub> estimates across China using enhanced space-time extremely randomized trees[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(6): 3273-3289.
- [9] 王叶. 未来不同排放情景下中国 PM<sub>2.5</sub>与 O<sub>3</sub>浓度及其健康效应评估[D]. 南京:南京信息工程大学,2022.  
WANG Ye. Future projection of concentrations of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> and the associated health effects in China under different emission scenarios[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2022.
- [10] 张西雅,扈海波. 基于多源数据的北京地区 PM<sub>2.5</sub>暴露风险评估[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(5):1103-1113.  
ZHANG Xiya, HU Haibo. Risk assessment of exposure to PM<sub>2.5</sub> in Beijing using multi-source data[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2018, 54(5): 1103-1113.
- [11] 汤鹏程. 安徽省 PM<sub>2.5</sub>人口暴露风险时空演化及影响因素研究[D]. 合肥:合肥学院,2022.  
TANG Pengcheng. Study on temporal and spatial evolution and influencing factors of PM<sub>2.5</sub> population exposure risk in Anhui Province[D]. Hefei: Hefei University, 2022.
- [12] 赵佳楠. 基于随机森林的长江三角洲 PM<sub>2.5</sub>浓度空间模拟及暴露风险评估[D]. 上海:华东师范大学,2018.  
ZHAO Jianan. Spatial simulation and exposure risk assessment of PM<sub>2.5</sub> concentration in the Yangtze river delta based on random forest model[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.
- [13] 黄晓军,祁明月,李艳雨,等. 关中地区 PM<sub>2.5</sub>时空演化及人口暴露风险[J]. *环境科学*, 2020, 41(12), 5245-5255.  
HUANG Xiaojun, QI Mingyue, LI Yanyu, et al. Spatio-temporal evolution and population exposure risk to PM<sub>2.5</sub> in the Guanzhong Area[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(12), 5245-5255.
- [14] 同丽嘎,李雪铭,黄哲,等. 包头市人口 PM<sub>2.5</sub>暴露风险评估[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(11):50-54.  
TONG Liga, LI Xueming, HUANG Zhe, et al. Study on risk of population exposure to PM<sub>2.5</sub> in Baotou City [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(11): 50-54.
- [15] 徐丹,林文鹏,施润和,等. 近 20 年长三角一体化示范区 PM<sub>2.5</sub>暴露风险时空格局演变[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(8):36-51.  
XU Dan, LIN Wenpeng, SHI Runhe, et al. Spatial-temporal evolution patterns of PM<sub>2.5</sub> exposure risk in the Yangtze River Delta Ecological Greening Development Demonstration Area during 2001—2020[J]. *Acta Scientiae Circumstantia*, 2022, 42(8): 36-51.
- [16] 周琪,于洋,刘苗苗,等. 基于机器学习和非参数估计的 PM<sub>2.5</sub>风险评估[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(8): 3554-3560.  
ZHOU Qi, YU Yang, LIU Miaomiao, et al. Risk assessment of PM<sub>2.5</sub> pollution based on machine learning and nonparametric estimation[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(8):3554-3560.
- [17] 彭伊依,周素红. 基于手机数据的不同年龄人群周末 PM<sub>2.5</sub>暴露时空风险测度——以广州市为例[C]//2020/2021 中国城市规划年会暨 2021 中国城市规划学术季, 2021:1350-1363.
- [18] 张祎婷. 南京市 PM<sub>2.5</sub>时空分异及暴露风险研究[D]. 南京:南京农业大学,2020.  
ZHANG Yiting. Research on spatial-temporal characteristic of PM<sub>2.5</sub> and exposure risk in Nanjing [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [19] 亢红霞,那晓东,臧淑英. 基于卫星遥感数据(AOD)估算 PM<sub>2.5</sub>的研究进展[J]. *环境科学与管理*, 2016, 41(2):30-34.  
KANG Hongxia, NA Xiaodong, ZANG Shuying. Advance in ground-level PM<sub>2.5</sub> prediction using remote sensing data (AOD) [J]. *Environmental Science and Management*, 2016, 41(2): 30-34.
- [20] 刘冰洁. 浙江省 PM<sub>2.5</sub>浓度的影响因素分析及季节



- 性预测[D]. 杭州:浙江科技学院,2022.
- LIU Bingjie. Analysis of influencing factors and seasonal forecast of PM<sub>2.5</sub> concentration in Zhejiang Province [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2022.
- [21] 张亮林. 全球 PM<sub>2.5</sub> 人口暴露风险时空格局研究[D]. 兰州:西北师范大学,2020.
- ZHANG Lianglin. The study on the spatial-temporal pattern of population exposure risk to PM<sub>2.5</sub> in Global [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.
- [22] CHEN Mingxing, GUO Shasha, HU Maogui, et al. The spatiotemporal evolution of population exposure to PM<sub>2.5</sub> within the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 265: 121708.
- [23] 李海霞. 京津冀新型城镇化对生态环境质量的空间效应研究[D]. 合肥:安徽财经大学,2022.
- LI Haixia. Research on the spatial effect of new urbanization in Beijing-Tianjin-Hebei on ecological environment quality[D]. Hefei: Anhui University of Finance and Economic, 2022.
- [24] GUAN Yang, XIAO Yang, RONG Bing, et al. Long-term health impacts attributable to PM<sub>2.5</sub> and ozone pollution in China's most polluted region during 2015—2020[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321: 128970.
- [25] SONG Yan, LI Zhenran, YANG Tingting, et al. Does the expansion of the joint prevention and control area improve the air quality? —Evidence from China's Jing-Jin-Ji region and surrounding areas[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 706: 136034.
- [26] LIU Ming, SAARI R K, ZHOU Gaoxiang, et al. Recent trends in premature mortality and health disparities attributable to ambient PM<sub>2.5</sub> exposure in China: 2005—2017 [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 279: 116882.
- [27] ZHOU Jingkun, YIN Ting, TIAN Juan. Research on the impact of Beijing-Tianjin-Hebei electric power and thermal power industry on haze pollution[J]. *Energy Reports*, 2022, 8(S4): 1698-1710.
- [28] WEI Jing, LI Zhanqing, LYAPUSTIN A, et al. Reconstructing 1-km-resolution high-quality PM<sub>2.5</sub> data records from 2000 to 2018 in China: spatiotemporal variations and policy implications[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 252: 112136.
- [29] CHEN Yidan, GUO Fang, WANG Jiachen, et al. Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100[J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 83.
- [30] GRAHAM N T, HEJAZI M I, CHEN Min, et al. Humans drive future water scarcity changes across all Shared Socioeconomic Pathways [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(1): 014007.
- [31] ASHRAFZADEH M R, KHOSRAVI R, MOHAMMADI A, et al. Modeling climate change impacts on the distribution of an endangered brown bear population in its critical habitat in Iran[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 837: 155753.
- [32] World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide [M]. Geneva: World Health Organization, 2021.
- [33] SHI Xurong, ZHENG Yixuan, LEI Yu, et al. Air quality benefits of achieving carbon neutrality in China [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 795: 148784.
- [34] GAO Jinglei, YUAN Zengwei, LIU Xuewei, et al. Improving air pollution control policy in China—A perspective based on cost-benefit analysis[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 543 (Part A): 307-314.
- [35] HUANG Jing, PAN Xiaochuan, GUO Xinbiao, et al. Health impact of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan: an analysis of national air quality monitoring and mortality data[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2018, 2(7): e313-e323.
- [36] 丁梦婷. 京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 时空特征及环流分型研究[D]. 石家庄:河北师范大学,2022.
- DING Mengting. Spatial and temporal characteristics and circulation types of PM<sub>2.5</sub> in Beijing-Tianjin-Hebei Region [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2022.
- [37] 齐莹. 环京津冀“2+26”城市雾霾时空演变及防治政策有效性评估[D]. 郑州:河南大学,2022.
- QI Ying. Spatial and temporal evolution of smog in “2+26” cities around Beijing-Tianjin-Hebei and evaluation of the effectiveness of prevention and control policies[D]. Zhengzhou: Henan University, 2022.
- [38] WANG Jiandong, ZHAO Bin, WANG Shuxiao, et al. Particulate matter pollution over China and the effects of control policies[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 584/585: 426-447.
- [39] ZHENG Qiuyue, JIANG Guanghui, YANG Yuting, et al. Does spatial equilibrium of factor allocation inevitably bring about high benefits for regional development? An empirical study of the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Habitat International*, 2020, 95: 102066.
- [40] CHEN Wei, CAO Chunxiang, LIU Di, et al. An eval-

- uating system for wetland ecological health: case study on nineteen major wetlands in Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 666: 1080-1088.
- [41] LI Guangdong, FANG Chuanglin, WANG Shaojian, et al. The effect of economic growth, urbanization, and industrialization on fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) concentrations in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(21): 11452-11459.
- [42] ZHANG Zhongzhi, WANG Wenxin, CHENG Miaomiao, et al. The contribution of residential coal combustion to PM<sub>2.5</sub> pollution over China's Beijing-Tianjin-Hebei region in winter[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 159: 147-161.
- [43] DENG Chuxiong, QIN Chunyan, LI Zhongwu, et al. Spatiotemporal variations of PM<sub>2.5</sub> pollution and its dynamic relationships with meteorological conditions in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Chemosphere*, 2022, 301: 134640.
- [44] 张亮林,潘竟虎. 全球 PM<sub>2.5</sub>人口暴露风险时空格局[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(11): 5391-5404.  
ZHANG Lianglin, PANG Jinghu. Spatial-temporal pattern of population exposure risk to PM<sub>2.5</sub> in Global[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(11): 5391-5404.
- [45] 张亮林,潘竟虎. 中国 PM<sub>2.5</sub>人口暴露风险时空格局[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(1): 1-12.  
ZHANG Lianglin, PANG Jinghu. Spatial-temporal pattern of population exposure risk to PM<sub>2.5</sub> in China[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(1): 1-12.
- [46] 管庆丹. 基于多源遥感数据的中国城市群 PM<sub>2.5</sub>浓度时空演变与人口暴露风险分析[D]. 昆明:昆明理工大学, 2022.  
GUAN Qingdan. Analysis of spatiotemporal evolution of PM<sub>2.5</sub> concentration and population exposure risk in Chinese urban agglomerations based on multi-source remote sensing data[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.
- [47] 盛亦男,杨旭宇. 中国三大城市群流动人口集聚的空间格局与机制[J]. *人口与经济*, 2021(6): 88-107.  
SHENG Yinan, YANG Xuyu. Spatial patterns and mechanisms of the floating population agglomeration among top three city clusters in China[J]. *Population & Economics*, 2021(6): 88-107.
- [48] 徐丹. 上海-杭州湾 PM<sub>2.5</sub>遥感估算与人口暴露风险评估[D]. 上海:上海师范大学, 2020.  
XU Dan. PM<sub>2.5</sub> estimation using remote sensing data and risk assessment of population exposure to PM<sub>2.5</sub> in Shanghai-Hangzhou Bay area[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2020.
- [49] DONG Junwu, WANG Yanhui, WANG Lili, et al. Assessment of PM<sub>2.5</sub> exposure risk towards SDG indicator 11. 6. 2-A case study in Beijing[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 82: 103864.
- [50] HE Qingqing, HUANG Bo. Satellite-based high-resolution PM<sub>2.5</sub> estimation over the Beijing-Tianjin-Hebei region of China using an improved geographically and temporally weighted regression model[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 236: 1027-1037.
- [51] WANG Hong, LI Jiawen, GAO Zhiqiu, et al. High-spatial-resolution population exposure to PM<sub>2.5</sub> pollution based on multi-satellite retrievals: a case study of seasonal variation in the Yangtze River Delta, China in 2013[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(23): 2724.
- [52] 慕航,何超,阮秋明,等. “一带一路”沿线国家 PM<sub>2.5</sub>污染与人口暴露风险的时空分布特征[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(6): 2229-2240.  
MU Hang, HE Chao, NGUYEN T, et al. Spatiotemporal distribution characteristics and population exposure risks to PM<sub>2.5</sub> in countries along the Belt and Road[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(6): 2229-2240.

(责任编辑 王绪迪)