

薛梦涵,王轶浩,郭红妍,等.邢台市 2014~2023 年大气污染物时空特征及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2026,46(5):2425-2434.

Xue M H, Wang Y H, Guo H Y, et al. Spatiotemporal characteristics and driving factors of air pollutants in Xingtai city from 2014 to 2023 [J]. China Environmental Science, 2026,46(5):2425-2434.

邢台市 2014~2023 年大气污染物时空特征及影响因素

薛梦涵,王轶浩*,郭红妍,杨得权,邓洁,高澳寒,张佳怡 (重庆师范大学地理与旅游学院,山区生态系统碳循环与碳调控重庆市重点实验室,三峡库区地表生态过程重庆市野外科学观测研究站,重庆 401331)

摘要: 基于 2014~2023 年邢台市空气质量逐时数据,采用空间自相关、灰色关联法、突变点检测法等研究了邢台市大气污染物时空分异规律及其驱动因素.结果表明:(1)邢台市空气质量综合指数及大气 PM_{2.5}、PM₁₀、CO、SO₂、NO₂ 质量浓度均随年限呈下降趋势,并呈“U”型的年内月变化规律;大气 O₃ 质量浓度则随年限呈上升趋势,年均增幅达 3.05%,并呈倒“V”型的年内月变化规律.(2)各大气污染物空间分异明显,且呈显著的正相关趋势及整体集聚现象,其中大气 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、O₃ 还呈明显的局部集聚现象.(3)第二产业占比对大气 PM_{2.5}、PM₁₀、CO、NO₂ 的影响最大,工业烟(粉)尘排放则主导大气 SO₂ 变化,风速等多个因素均与大气 O₃ 关联性极强.(4)除大气 O₃ 外,政府政策对各大气污染物的防治成效均明显,但对部分污染物存在一定滞后性.研究结果可为京津冀大气污染联防联控及其政策制定提供科学依据,同时建议未来需重点关注邢台市大气 O₃ 污染,并制定实施专门的大气 O₃ 污染防治政策及措施.

关键词: 大气污染物; 时空分异; 影响因素; 污染防治政策; 邢台市

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2026)05-2425-10

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20251125.003

Spatiotemporal characteristics and driving factors of air pollutants in Xingtai city from 2014 to 2023. XUE Meng-han, WANG Yi-hao*, GUO Hong-yan, YANG De-quan, DENG Jie, GAO Ao-han, ZHANG Jia-yi (College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing Key Laboratory of Carbon Cycle and Carbon Regulation in Mountain Ecosystems, Chongqing Field Scientific Observatory of Surface Ecological Processes in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China). *China Environmental Science*, 2026,46(5): 2425~2434

Abstract: In this study, we utilized the hourly air quality data from 2014 to 2023 in Xingtai city, Hebei Province. The spatiotemporal variation patterns of air pollutants and their driving factors were analyzed using spatial autocorrelation, gray correlation analysis, and mutation point testing. The results show that: (1) The comprehensive air quality index and atmospheric concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, CO, SO₂, and NO₂ in Xingtai city have exhibited a decreasing interannual trend, with intra-annual variations following a "U"-shaped pattern. In contrast, the O₃ concentration showed an increasing interannual trend, with an average annual growth rate of approximately 3.05%, and its intra-annual variation displayed an inverted "V"-shaped distribution. (2) The spatial differentiation of air pollutants was pronounced, characterized by a significant positive correlation and an overall clustering pattern. Notably, PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, and O₃ exhibited distinct local clustering phenomena. (3) The proportion of the secondary industry was identified as having the most significant impact on atmospheric concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, CO, and NO₂. By contrast, industrial smoke (dust) emissions played a dominant role in driving variations in atmospheric SO₂ levels. Moreover, wind speed, along with various other factors, demonstrated strong correlations with atmospheric O₃ concentrations. (4) In addition to atmospheric O₃, government policies have demonstrated significant efficacy in mitigating and controlling various air pollutants, albeit with a noticeable time lag for certain pollutants. The findings of this study can serve as a scientific foundation for the collaborative prevention and control of air pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region, as well as for policy formulation. It is recommended that future efforts focus on prioritizing the mitigation of O₃ pollution in Xingtai city and developing and implementing targeted policies and measures to effectively reduce atmospheric O₃ concentrations.

Key words: air pollutants; spatiotemporal differentiation; influencing factors; pollution prevention policy; Xingtai city

随着工业化和城市化的快速发展,大气污染已成为当前全球面临的主要环境问题之一.大气污染不仅影响经济社会可持续发展^[1-2],而且还严重威胁着人们的身体健康^[3].研究表明,大气污染是影响人类死亡的全球第四大风险因素,其引发的相关疾病导致全球每年约 667 万人过早死亡^[4].因此,大气污

染问题受到政府部门及社会各界的广泛关注.

收稿日期: 2025-10-09

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0741); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202000502); 重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(CSTB2024TIAD-LDX0001); 重庆师范大学基金项目(20XLB005)

* 责任作者, 研究员, wyih515@163.com

近年来国内外研究学者聚焦大气污染这一全球性难题,从大气污染的成因、危害及防治措施等方面开展了较为系统的研究,取得了不少研究成果.已有研究表明,我国空气质量总体呈改善趋势,但区域差异显著,北方地区污染仍呈加剧与集聚态势,且京津冀等重点区域虽整体好转,仍面临污染天数多、等级高与空间异质性明显等问题^[5-6].在研究方法上,学者多运用空间自相关分析以揭示污染的空间依赖与异质格局,并采用灰色关联分析、面板向量自回归模型、关联规则等方法,从气象、社会经济等多维度识别影响因素^[7-9].这其中空间自相关分析作为空间格局诊断的重要方法,能够精确量化大气污染物的空间依赖性与异质性^[10],被广泛应用于研究大气污染物的空间特征^[11-12];灰色关联法则能够在数据有限情况下识别不同因素对大气污染物质量浓度的贡献度^[13],进而有助于其时空差异的归因分析.然而,以往这些研究主要针对个别大气污染物的中短期尺度研究,尚缺乏多污染物指标的长时期尺度系统研究,且研究区主要是针对一些大型城市,而对中小型城市的研究较少,尤其针对一些典型工业城市研究则更为不足.

河北省邢台市作为典型的老工业城市,是京津冀一体化发展的重要节点城市,也是京津冀大气污染传输通道“2+26”城市之一,对于京津冀大气污染联防联控起着重要作用.然而近年来邢台市空气质量曾多次位列全国倒数^[14],这不仅大大威胁着当地居民身体健康及其生活质量,也严重影响着城市可持续发展和京津冀大气污染联防联控成效.与此同时,目前有关邢台市大气污染物的长时期尺度时空变化规律及其驱动因素尚不清楚,尤其对其相关大气污染防治政策的实施成效还未见验证,使得无法明晰邢台市大气污染物时空变化的主要影响因素及其与大气污染防治政策的关系,也难以以为邢台市大气污染物精准防治及其

政策制定提供理论依据和科技支撑.

因此,本文基于近 10a(2014~2023 年)期间邢台市空气质量综合指数以及大气 PM_{2.5}、PM₁₀、CO、SO₂、NO₂、O₃ 等污染物的监测数据资料,选取了 13 项社会经济与自然环境指标,采用空间自相关分析、灰色关联分析等方法系统分析了邢台市大气污染物时空变化规律及其影响因素,明确了影响大气污染物质量浓度变化的主要因素,并借助突变点检测法评估了相关大气污染防治政策的实施成效,以期能为邢台市大气污染防治及京津冀联防联控政策制定实施提供科学依据与参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河北省邢台市地处华北平原中心,为晋、冀、鲁三省交汇地带,东临大运河与山东省相望,西接太行山脉与山西省毗邻,北邻接河北省石家庄市、衡水市,南连河北省邯郸市,幅员面积 1.24 万 km²,距离首都北京约 400km,地理坐标为 N36°50'~37°47', E113°52'~115°49'.邢台市属暖温带亚湿润季风气候,四季分明,年平均气温为 12~14℃,年平均降雨量为 525mm,且主要集中在夏季.境内地势高差悬殊,自西向东呈山地、丘陵、平原阶梯排列(图 1),其中以平原为主,占全市总面积 70.50%;山地、丘陵则分别占 14.21%、15.29%.土壤类型复杂,有潮土、褐土、棕壤、粗骨土等 12 种土壤类型,其中西部山区以褐土为主,东部平原则以潮土为主.地带性植被类型为落叶阔叶林,主要树种有油松(*Pinus tabulaeformis*)、华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)、鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii*)、辽东栎(*Quercus wutaishansea*)等,2024 年森林覆盖率达 35.8%.截至 2024 年,常住人口 695.55 万人,地区生产总值 2765.9 亿元.

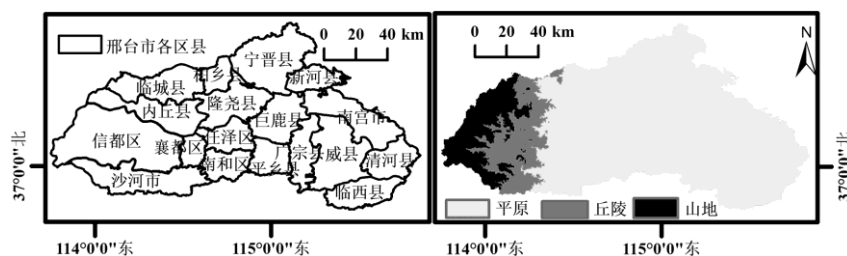


图 1 邢台市行政区划及地貌特征

Fig.1 Administrative divisions and geomorphologic features of Xingtai city

审图号:GS(2024)0650 号(国家测绘地理信息局)标准地图制作

1.2 数据来源

本文邢台市大气污染物时间变化特征数据通过中国空气质量在线监测分析平台 (<https://www.aqistudy.cn/>) 获取,包括 2014~2023 年期间邢台市大气 PM_{2.5}、PM₁₀、CO、SO₂、NO₂、O₃ 等污染物质量浓度的逐日数据,数据监测频次为 1 次/h.邢台市空气质量综合指数和大气污染物的空间分布特征数据则通过查阅《邢台市生态环境公报》(2014~2023 年)获取,包括邢台市空气质量综合指数及其所辖 18 个区县的各項大气污染物质量浓度的逐年数据,其中大气 O₃ 质量浓度为日最大 8h 平均值.

通常影响大气污染物质量浓度的因素主要包括社会经济和自然环境因素^[15],本文选取了 13 项社会经济和自然环境指标进行分析(表 1),其中,社会经济方面选取了国内生产总值(GDP)、第一产业占比、第二产业占比、第三产业占比、人口数量等 9 项指标;自然环境方面选取了森林面积、降水量、风速、气温等 4 项指标.社会经济指标和森林面积指标数据均通过《邢台市统计年鉴》(2014~2023 年)获取,降水量、气温指标数据均通过邢台市气象局(涉及邢台市辖区内的邢台站、临城站等 17 个国家级气象站)获取,风速指标数据通过国家环境信息中心(NCEI)获取.

表 1 社会经济和自然环境指标选取

Table 1 Selection of socio-economic and natural environmental indicators

序列	影响因素	单位
X1	GDP	亿元
X2	第一产业占比	%
X3	第二产业占比	%
X4	第三产业占比	%
X5	人口数量	万人
X6	规模以上工业企业数量	个
X7	机动车保有量	万辆
X8	工业烟(粉)尘排放量	t
X9	单位 GDP 电耗	kWh/万元
X10	森林面积	km ²
X11	年降水量	mm
X12	平均风速	km/h
X13	平均气温	℃

1.3 数据处理方法

运用 Excel 2019 软件对数据进行处理,并运用 ArcGIS Desktop 10.8 软件对大气污染物质量浓度的

空间分布进行矢量数据栅格化,同时对其集聚现象开展空间自相关分析.运用 SPSSPRO(Scientific Platform Serving for Statistics Professional)软件计算皮尔逊相关系数,以剔除大气污染物影响因素中存在显著共线性的指标,采用灰色关联法分析影响大气污染物质量浓度的关键因素;并利用突变点检验、独立样本 *T* 检验综合评估研究期间中华人民共和国环境保护部印发的《京津冀及周边地区 2017~2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》(2017 年 8 月 21 日)及其相关大气污染防治政策实施效果.最后用 Origin 2025 软件制图.

1.3.1 莫兰指数 莫兰指数(Moran's *I*)是表征空间自相关的最常用指标,分为全局莫兰指数(Global Moran's *I*)和局部莫兰指数(Local Moran's *I*).全局莫兰指数可衡量整个研究区域的空间自相关性(值越接近 1 表示聚集越强,越接近-1 表示差异越大,等于 0 则表示随机分布),其统计显著性通过 *Z* 值判断,当 *Z* 值绝对值大于 1.96 时,说明存在显著空间自相关.局部莫兰指数则针对每个空间单元计算其与邻近区域的空间关联性,通过 *Z* 值检验后,可利用 LISA(Local Indicators of Spatial Association)集聚图识别局部“热点”(高值聚集)和“冷点”(低值聚集)区域,进一步揭示空间异质性特征.

1.3.2 突变点检测 突变点检测可识别时间序列数据的结构变化或断点^[16].本文以研究期间环境保护部印发执行的《京津冀及周边地区 2017~2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》为例,该方案涵盖了北京、天津以及河北省、山西省、山东省和河南省的“2+26 市”(含邢台市),并力争在 2017 年 10 月~2018 年 3 月期间实现“2+26 市”PM_{2.5} 平均浓度同比下降 15% 以上,重污染天数同比下降 15% 以上的目标.利用突变点检测验证该方案实施前后邢台市大气污染物质量浓度的变化,从而评估政府部门制定大气污染防治政策的有效性.

2 结果与讨论

2.1 大气污染物时间变化特征

2.1.1 大气污染物质量浓度年际变化 由图 2 可知,2014~2023 年期间邢台市空气质量综合指数随时间呈线性下降趋势,其值依次分别为 10.84、10.01、8.85、8.57、7.49、6.85、5.65、4.73、4.93、4.73,

拟合方程为 $y = -0.73x + 1481.99 (R^2 = 0.96, P < 0.001, n = 10)$ 。与2014年相比,2023年邢台市空气质量综合指数下降了56.37%。由此可见,近10a来邢台市空气质量总体好转,并呈现出持续改善趋势。

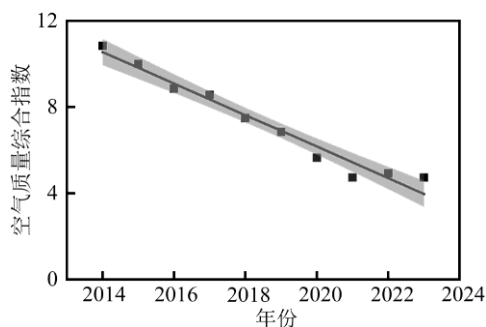


图2 2014~2023年邢台市空气质量综合指数年际变化
Fig.2 Interannual changes of the comprehensive air quality index in Xingtai city from 2014 to 2023

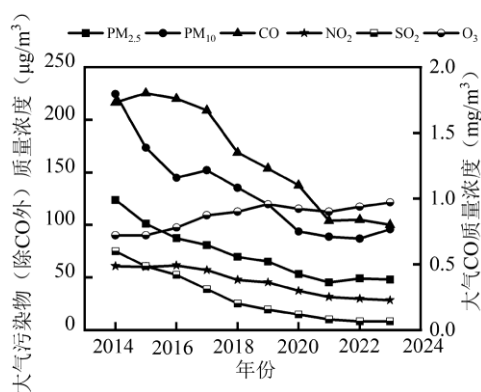


图3 2014~2023年邢台市大气污染物质量浓度年际变化
Fig.3 Interannual changes of air pollutant concentrations in Xingtai city from 2014 to 2023

不同大气污染物质量浓度年际变化表明(图3),2014~2023年期间邢台市大气O₃质量浓度随时间呈缓慢上升趋势,其中2014年大气O₃质量浓度为89.78µg/m³,2023年则达到121.15µg/m³,10a增幅为34.94%,平均年增幅为3.05%。2014~2023年期间邢台市其他五项大气污染物(PM_{2.5}、PM₁₀、CO、SO₂、NO₂)质量浓度则均随时间呈下降趋势,其中以大气PM_{2.5}、SO₂的下降幅度最大,相比2014年,2023年邢台市大气PM_{2.5}、SO₂质量浓度分别减少75.45和66.89µg/m³,减幅分别达到61.05%和89.19%,而大气PM₁₀、CO、NO₂质量浓度减幅也分别达到57.41%、53.76%、53.45%。由此可见,除大气O₃外,近10a邢台市对多项大气污染物的防治成效显著,尤其以大气

PM_{2.5}和SO₂的防治效果最佳。

2.1.2 大气污染物质量浓度年内月变化 由图4可知,邢台市大气PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂、CO质量浓度的年内月变化均呈“U”型,其全年最大值均出现在1月份,分别为134.20、200.30、65.40、66.60µg/m³、2.30mg/m³。这五项大气污染物质量浓度均在1~5月份快速下降,降幅分别达到66.32%、48.73%、39.91%、59.61%、56.96%;5~8月份虽继续下降,但速度变缓,降幅分别为13.72%、29.5%、25.95%、45.35%、7.07%;8月份降到最低,分别为39.00、72.40、29.10、14.70µg/m³、0.92mg/m³;9~12月份则均逐渐升高,其中大气PM_{2.5}、PM₁₀、CO上升速度较快,而大气NO₂、SO₂上升速度较慢。这变化趋势与以往京津冀及周边地区的大气污染物年内变化研究结果一致^[17],主要原因是邢台市夏季高温多雨、风力强盛,有助于空气运动,从而促进大气污染物扩散及其质量浓度降低,而冬季降水少且气温低,容易形成逆温层,不利于大气污染物扩散^[18]。同时我国北方城市冬季供暖需求增加,容易导致燃煤污染物排放量增长^[19],致使污染物质量浓度增大。

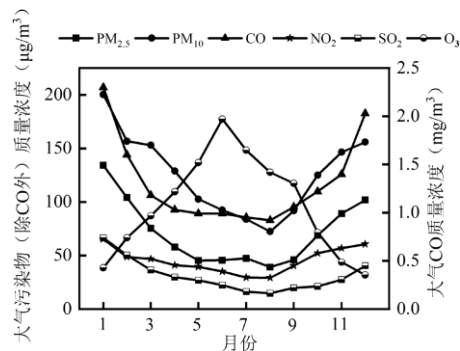


图4 2014~2023年邢台市大气污染物质量浓度年内月变化
Fig.4 Monthly changes of air pollutant concentrations in Xingtai city from 2014 to 2023

但邢台市大气O₃质量浓度的年内月变化规律与其他五项大气污染物相反,呈倒“V”型,即1~6月份其质量浓度快速升高,6月份达到峰值(177.33µg/m³),然后快速下降,到12月份降到全年最低值(31.90µg/m³),降幅达82.01%。这一变化特征与京津冀地区大气O₃质量浓度的时空变化规律也相吻合^[20],其主要成因在于,大气O₃来源于人为排放的氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOCs)等在适宜条件下发生的光化学反应^[21],夏季太阳辐射强、日照时间长,有利于光化学反应进行;冬

季辐射减弱、温度降低,则抑制 O₃ 生成^[22]。

2.2 大气污染物空间分布特征

2.2.1 大气污染物年平均质量浓度空间分布 通过对 2014~2023 年期间邢台市 18 个区县的六项大气污染物质量浓度年平均均值进行统计分级(图 5),表明大气 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂ 质量浓度的空间分布规律基本一致,即呈现出“中间高四周低”的空间分布特征,其中高值区主要分布在邢台市宁晋县、柏乡县、隆尧县、任泽区、襄都区、南和区、平乡县等山前平原区县,该区域静稳天气频发,大气扩散条件极差^[23]。同时也是传统工业集聚区^[24],能源消耗大,大气污染物排放多^[25]。大气 CO、SO₂ 质量浓度则呈现出“西高东低”的空间分布特征,其中高值区主要

分布在邢台市内丘县、襄都区、信都区、沙河市等地势海拔较高的区县,这些区域海拔较高、气温较低,居民冬季依赖分散燃煤取暖,导致不完全燃烧产物(CO)与硫氧化物(SO₂)排放增强^[26],加之山区地形阻碍污染物扩散,造成局部积聚^[27]。大气 O₃ 质量浓度空间分布格局则正好与大气 CO、SO₂ 相反,即呈现出“东高西低”的空间分布特征,其高值区主要分布在邢台市广宗县、威县、南宫市、清河县、临西县等地势海拔较低且地形平坦的区县,这些区域地势低平、太阳辐射强、气温较高,且人类活动密集,为 O₃ 生成提供了充足的光化学条件与前体物^[28]。此外,不同地区的地面粗糙度、地表湿度及温度等也对 O₃ 的生成与分布具有调控作用^[29]。

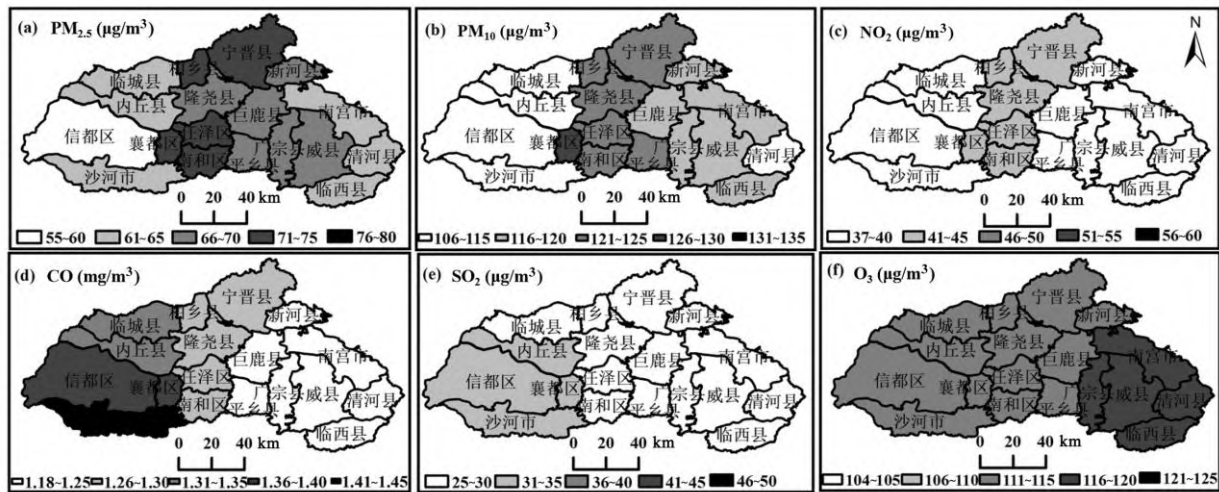


图 5 2014~2023 年邢台市大气污染物年平均质量浓度空间变化特征

Fig.5 Spatial variation characteristics of air pollutant concentrations in Xingtai city from 2014 to 2023

审图号:GS(2024)0650 号(国家测绘地理信息局)标准地图制作

表 2 2014~2023 年邢台市大气污染物质量浓度空间分布全局莫兰指数

Table 2 Global Moran's *I* of the spatial distribution of air pollutant concentrations in Xingtai city from 2014 to 2023

大气污染物	Global Moran's <i>I</i>	Z-score	P-value
PM _{2.5}	0.629221	2.530793	0.011380
PM ₁₀	0.842580	3.383231	0.000716
NO ₂	0.519598	2.374034	0.017595
CO	0.812420	3.287238	0.001012
SO ₂	0.810858	3.167996	0.001535
O ₃	0.776891	3.033372	0.002418

2.2.2 大气污染物年平均质量浓度空间集聚现象 通过对 2014~2023 年期间邢台市 18 个区县六

项大气污染物质量浓度年平均均值进行全局空间自相关分析(表 2),可知邢台市六项大气污染物全局莫兰指数均呈正数,且 $Z > 1.96, P < 0.05$,表明邢台市大气污染物年平均质量浓度空间分布均呈现显著的正相关趋势及整体集聚现象,即各区县大气污染物质量浓度的增加或减少,会导致周边区县大气污染物质量浓度发生相似变化,在整体上形成协同变化的空间格局,最终使得相邻区县之间的大气污染程度相近,空间上呈现集聚现象。这也进一步说明了不同地区之间存在着内在联系,即空间自相关。因此,政府部门在制定大气污染防治政策时,要从整体性、系统性出发,不要只关注单个区域的大气污染防治措施,

更要考虑不同区域之间的协同治理^[30],才能达到理想的大气污染防治效果。

由图 6 可知,邢台市大气 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 质量浓度的空间分布呈现出“高~高”聚类模式,主要分布在邢台市隆尧县、任泽区、襄都区 and 南和区,这些区县的大气 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 污染程度较高,会导致周围区县的污染加剧,形成热点区域。大气 O_3 质量浓度空间分布也呈现出“高~高”聚类模式,主要分布

在邢台市威县,这说明威县及其周边地区的 O_3 污染较为严重。大气 NO_2 质量浓度空间分布呈现出“高~高”和“高~低”两种聚类模式,其中,“高~高”聚类模式出现在邢台市襄都区、南和区和任泽区;“高~低”聚类模式则出现在邢台市沙河市,可以反映出沙河市大气 NO_2 质量浓度的空间异质性较大。邢台市大气 CO 、 SO_2 质量浓度均无特征值,说明其没有形成显著的局部集聚现象。

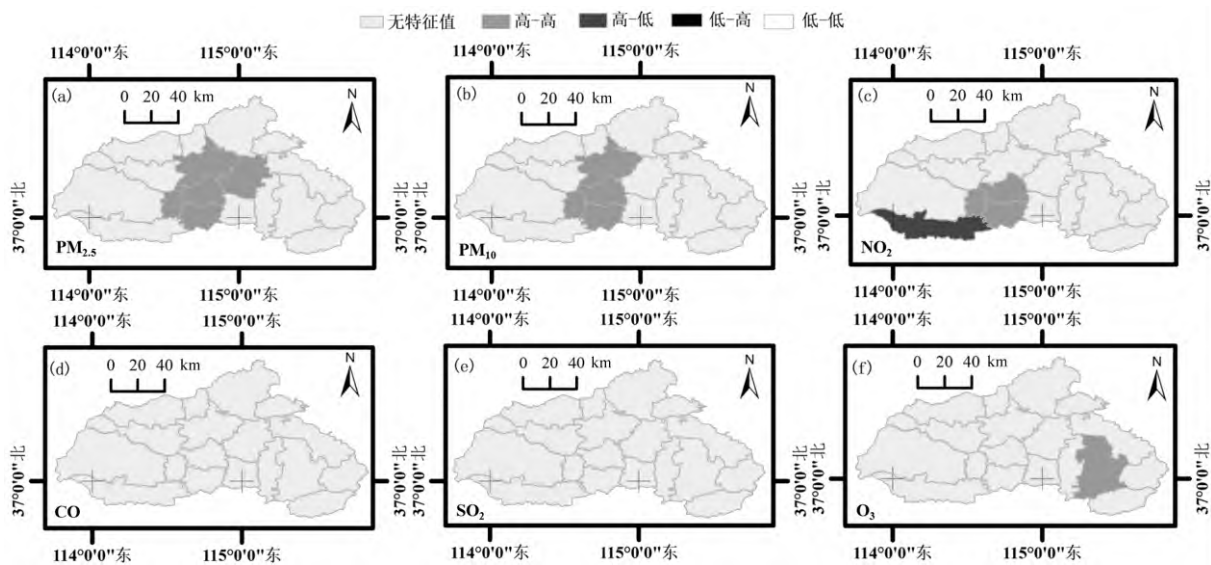


图 6 2014~2023 年邢台市大气污染物质量浓度空间分布 LISA 集聚图

Fig.6 LISA cluster maps of the spatial distribution of air pollutant concentrations in Xingtai city from 2014 to 2023

审图号:GS(2024)0650 号(国家测绘地理信息局)标准地图制作

2.3 大气污染物质量浓度的影响因素分析

2.3.1 影响因素指标筛选

通过对选取的影响大气污染物质量浓度的社会经济、自然环境指标进行相关分析(表 3),可知各指标中分别以 X1 与 X6、X2 与 X8、X3 与 X4、X5 与 X10、X7 与 X8、X8 与 X4、X9 与 X8、X10 与 X6 的相关系数最高,分别为 0.939、0.815、-0.984、0.826、-0.956、-0.969、0.899、-0.860,而 X11、X12、X13 与其它 10 项指标基本无显著相关性。为消除各指标间的共线性影响,同时综合考虑各指标属性及其代表性,最后从 13 项指标中筛选出 X3(第二产业占比)、X5(人口数量)、X6(规模以上工业企业数量)、X8(工业烟(粉)尘排放量)等 4 项社会经济指标和 X11(年降水量)、X12(平均风速)、X13(平均气温)等 3 项自然环境指标,最终确定 7 项影响因素指标。

2.3.2 大气污染物质量浓度与影响因素指标的相

关性 对邢台市六项大气污染物质量浓度与以上筛选的 7 个影响因素指标进行灰色关联分析(表 4),第二产业占比对大气 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO 、 NO_2 质量浓度的影响最大,关联系数分别达到 0.813、0.798、0.843、0.843,其次为人口数量、平均气温、平均风速、规模以上工业企业数量、年降水量;而以工业烟(粉)尘排放量的影响最小,但其关联系数也均高于 0.5。在社会经济因素中,第二产业占比、人口数量与以上四种大气污染物质量浓度的关联最为紧密,在所有因素中排名前两位,这主要是由于第二产业占比直接决定着污染物排放规模,而人口数量反映了人为活动强度,同样直接影响着大气污染物排放^[31]。在自然环境因素中,平均气温和平均风速的影响最为显著,在所有因素中排名第三、四位,分别通过影响污染物化学反应过程和扩散能力,进而影响污染物质量浓度^[32]。

表 3 影响大气污染物质量浓度的各项指标相关分析
Table 3 Correlation analysis of indicators affecting air pollutant concentrations

影响因子	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13
X1	1												
X2	-0.759*	1											
X3	-0.827**	0.655*	1										
X4	0.865**	-0.778**	-0.984**	1									
X5	-0.669*	0.092	0.547	-0.476	1								
X6	0.939**	-0.604	-0.728*	0.747*	-0.765**	1							
X7	0.891**	-0.718*	-0.867**	0.889**	-0.516	0.733*	1						
X8	-0.901**	0.815**	0.937**	-0.969**	0.484	-0.751*	-0.956**	1					
X9	-0.835**	0.552	0.890**	-0.869**	0.694*	-0.791**	-0.887**	0.899**	1				
X10	-0.707*	0.209	0.585	-0.535	0.826**	-0.860**	-0.510	0.487	0.672*	1			
X11	0.445	-0.112	-0.197	0.190	-0.686*	0.489	0.319	-0.254	-0.393	-0.390	1		
X12	0.534	-0.759*	-0.480	0.576	-0.086	0.483	0.397	-0.571	-0.371	-0.036	0.151	1	
X13	0.193	-0.024	-0.122	0.107	-0.216	0.249	0.109	-0.070	-0.196	-0.459	0.295	-0.398	1

注：**、*分别表示 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$,下同。

工业烟(粉)尘排放量对大气 SO_2 质量浓度的影响最大,关联系数为 0.765,然后依次为第二产业占比(0.626)、年降水量(0.605)、人口数量(0.598)、平均气温(0.595)、平均风速(0.591),以规模以上工业企业数量的影响最小(0.573),这其中工业烟(粉)尘排放量作为第一社会经济因素,决定着向大气排放的 SO_2 数量,而降水量作为第一自然环境因素有助于稀释大气 SO_2 质量浓度,并促进酸沉降,即从大气中去除 SO_2 ^[33]。刘涛涛等^[34]对山西省研究也指出降水量、工业产值与火力发电是影响 SO_2 浓度的主要成分。对大气 O_3 质量浓度而言,除工业烟(粉)尘排放量的关联系数为 0.591 外,其余因子关联系数均高于 0.8,大小依次排序为平均风速(0.939)>规模以上工业企业数量(0.935)>平均气温(0.934)>人口数量(0.926)>第二产业占比(0.879)>年降水量(0.861),说明平均风速和规模以上工业企业对大气 O_3 质量浓度的影响最大,这是因为风速主导 O_3 的输送与扩散过程^[35],而规模以上工业企业数量则反映了区域工业化水平,这些工业企业排放的 NO_x 和 VOCs 是 O_3 生成的重要前体物。黄小刚等^[36]研究也表明工业化进程是影响大气 O_3 质量浓度的重要社会经济因素之一。可见,像邢台这类扩散条件受限的城市,若单纯依靠控制前体物排放而不辅以区域性扩散协同治理,则难以实现对 O_3 浓度的有效遏制^[37]。

2.3.3 大气污染防治政策实施对大气污染物的影响 对 2014~2023 年期间邢台市每年大气污染物质量浓度较差的 1~2 月份、10~12 月份等五个月份进

行突变点检测(图 7),发现邢台市六项大气污染物质量浓度在大气污染防治政策实施期间均存在显著突变点。大气 $PM_{2.5}$ 、 CO 、 SO_2 质量浓度突变点均发生在 2017 年 10 月,即《京津冀及周边地区 2017~2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》实施初期。大气 PM_{10} 、 NO_2 、 O_3 质量浓度突变点则分别发生在 2019 年 10 月、2019 年 2 月、2018 年 2 月,即大气污染防治攻坚行动方案实施结束后或末期,相较于其他三种大气污染物质量浓度突变点具有一定滞后性。说明邢台市不同大气污染物质量浓度对大气污染防治政策实施的响应存在差异性,其中大气 $PM_{2.5}$ 、 CO 、 SO_2 对政策实施敏感、响应速度快,而大气 PM_{10} 、 NO_2 、 O_3 对政策实施的响应速度则较慢。

表 4 邢台市大气污染物质量浓度影响因素的关联系数
Table 4 Correlation coefficients of influencing factors of air pollutant concentrations in Xingtai city

影响因素	$PM_{2.5}$	PM_{10}	NO_2	SO_2	O_3	CO
第二产业占比	0.813	0.798	0.843	0.626	0.879	0.843
人口数量	0.756	0.741	0.809	0.598	0.926	0.794
规模以上工业企业数量	0.708	0.685	0.743	0.573	0.935	0.744
工业烟(粉)尘排放量	0.599	0.564	0.608	0.765	0.591	0.615
年降水量	0.672	0.655	0.703	0.605	0.861	0.707
平均风速	0.742	0.727	0.790	0.591	0.939	0.774
平均气温	0.748	0.733	0.801	0.595	0.934	0.789

为了进一步验证政策实施的有效性,对政策实施前和实施后的数据进行了独立样本 T 检验(表 5),

结果表明邢台市六项大气污染物质量浓度在政策实施前后均存在显著差异($P<0.05$),说明大气污染防治政策制定实施对邢台市大气污染物质量浓度产生显著影响,也进一步证实了大气污染防治政策实施的有效性.但政策实施对不同大气污染物质量浓度的影响效果并不同,其中政策实施均能有效降低大气 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 CO 、 SO_2 的质量浓度,但

大气 O_3 质量浓度却增高,这反映出此政策的实施有利于防治大多数大气污染物,但不利于大气 O_3 的防治.同时结合邢台市近 10a 大气污染物时间变化规律,建议该区域乃至京津冀及周边地区未来需要重点关注大气 O_3 污染,深入开展其来源解析、影响机制及其防治技术等研究,并制定针对性的区域 O_3 污染防治策略.

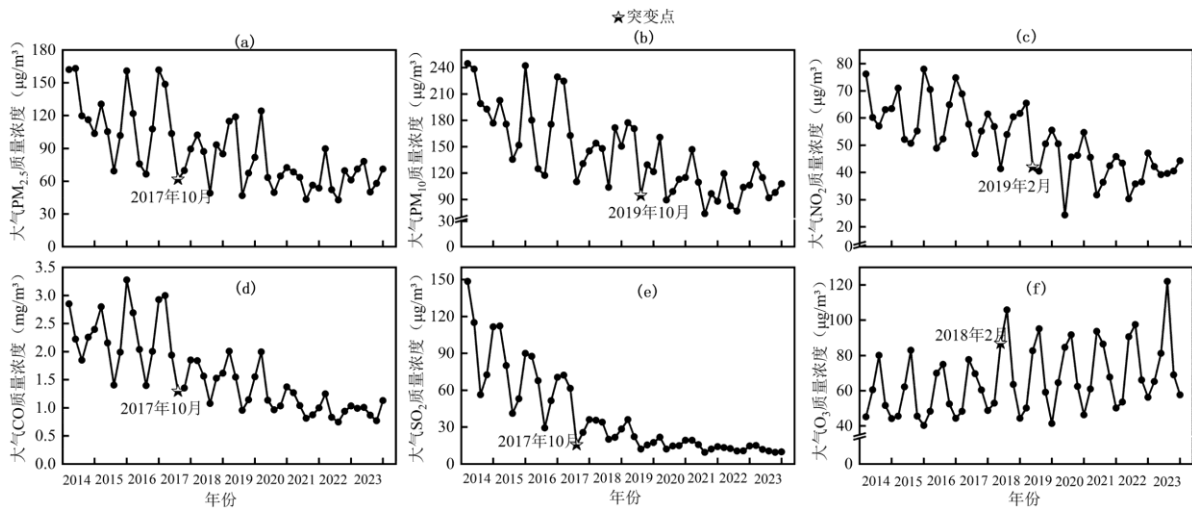


图7 2014~2023年邢台市秋冬大气污染物质量浓度突变点检测

Fig.7 Detection of mutation points in air pollutant concentrations during the autumn and winter seasons in Xingtai city (2014~2023)

表5 政策实施前后大气污染物质量浓度的独立样本 T 检验

Table 5 Independent samples T-test of air pollutant concentrations before and after the policy implementation

变量名	变量值	样本量	平均值	标准差	T 检验	Welch's T 检验	平均值差值	Cohen's d 值
$PM_{2.5}$	2017-10 前	17	118.767	32.282	$T=6.145, P=0.000^{**}$	$T=5.410, P=0.000^{**}$	46.936	1.834
	2017-10 后	33	71.831	21.468				
	总计	50	87.789	33.849				
PM_{10}	2017-10 前	17	186.728	40.489	$T=6.858, P=0.000^{**}$	$T=6.142, P=0.000^{**}$	67.614	2.047
	2017-10 后	33	119.114	28.570				
	总计	50	142.103	45.991				
NO_2	2017-10 前	17	62.662	9.387	$T=5.868, P=0.000^{**}$	$T=5.921, P=0.000^{**}$	16.749	1.752
	2017-10 后	33	45.913	9.646				
	总计	50	51.608	12.401				
CO	2017-10 前	17	2.306	0.547	$T=8.398, P=0.000^{**}$	$T=7.370, P=0.000^{**}$	1.081	2.507
	2017-10 后	33	1.225	0.360				
	总计	50	1.592	0.671				
SO_2	2017-10 前	17	77.772	30.549	$T=10.640, P=0.000^{**}$	$T=7.930, P=0.000^{**}$	59.802	3.176
	2017-10 后	33	17.970	8.069				
	总计	50	38.303	34.149				
O_3	2017-10 前	17	57.304	14.521	$T=-2.438, P=0.019^*$	$T=-2.690, P=0.010^*$	13.258	0.728
	2017-10 后	33	70.562	19.803				
	总计	50	66.055	19.111				

本研究虽然系统分析了我国典型工业城市——邢台市大气污染物的时空变化特征及其影响因

素,但由于其数据主要源于公开统计资料,在一定程度上限制了大气污染物影响因素指标的选取.故未来尚需要进一步收集与整合气象、环保、能源等政府职能部门的专项监测数据,包括如道路移动源排放清单、重点企业实时排放等更具指向性的动态指标数据,以准确揭示自然环境与社会经济因素对大气污染的协同驱动机制,为邢台市乃至京津冀大气污染防治提供更为坚实的理论依据和技术支撑.

3 结论

3.1 研究期间邢台市空气质量综合指数及大气 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO 、 NO_2 、 SO_2 质量浓度均随年限呈下降趋势,10 年降幅均达到 50% 以上,而年内月变化则呈“U”型规律.大气 O_3 质量浓度则随年限呈上升趋势,10 年增幅为 34.94%,其年内月变化呈倒“V”型规律.

3.2 邢台市大气污染物空间分异明显,其中大气 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 的高值区分布于中部山前平原的区县;大气 CO 、 SO_2 的高值区分布于西部海拔较高的区县;大气 O_3 高值区则分布于东部海拔较低的区县.同时各大气污染物空间分布均呈现显著的正相关趋势及整体集聚现象,Global Moran's I 均呈正数,且 $Z > 1.96$, $P < 0.05$,其中除大气 CO 和 SO_2 外,其他大气污染物还呈明显的局部集聚现象.

3.3 社会经济和自然环境因素共同影响着邢台市大气污染物质量浓度,其中第二产业占比与大气 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO 、 NO_2 的关联度最强,关联系数分别达到 0.813、0.798、0.843、0.843;工业烟(粉)尘排放则是大气 SO_2 的主要驱动因子,关联系数为 0.765;除工业烟(粉)尘排放量外,其他影响因素与大气 O_3 的关联系数均极高,均大于 0.8.

3.4 政府大气污染防治政策实施对邢台市大气污染物质量浓度影响显著,其中对大气 $PM_{2.5}$ 、 CO 、 SO_2 防治效果明显且见效快;对大气 PM_{10} 、 NO_2 虽防治效果明显但存在一定滞后性,大气 O_3 则不仅存在滞后性且其质量浓度还增加.因此,未来尚需要重点关注邢台市大气 O_3 污染,并做好专门的大气 O_3 污染防治政策制定及其防治措施实施.

参考文献:

[1] Tie X X, Wu D, Brasseur G. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China [J]. Atmospheric Environment, 2009,43(14):2375-2377.

[2] Wang S, Fang C L, Guan X L, et al. Urbanisation, energy consumption, and carbon dioxide emissions in China: A panel data analysis of China's provinces [J]. Applied energy, 2014,136:738-749.

[3] Wang Y Z, Duan X J, Liang T, et al. Analysis of spatio-temporal distribution characteristics and socioeconomic drivers of urban air quality in China [J]. Chemosphere, 2022,291:132799.

[4] WHO. WHO global air quality guidelines [EB/OL]. (2021-09-23) [2024-01-20]. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.

[5] Xu W X, Sun J Q, Liu Y X, et al. Spatiotemporal variation and socioeconomic drivers of air pollution in China during 2005~2016 [J]. Journal of environmental management, 2019,245:66-75.

[6] 王耀庭,殷振平,郑祚芳,等.基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征 [J]. 环境科学, 2022,43(7):3508-3522.

Wang Y T, Yin Z P, Zheng Z F, et al. Spatiotemporal distribution and evolution characteristics of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region based on long-term ground-satellite data [J]. Environmental Science, 2022,43(7):3508-3522.

[7] Deng C X, Qin C Y, Li Z W, et al. Spatiotemporal variations of $PM_{2.5}$ pollution and its dynamic relationships with meteorological conditions in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Chemosphere, 2022,301:134640.

[8] Wang W, Chen Y, Xie Y H, et al. Research on influence factors of air quality in the host area of the 24th winter olympic games based on grey relational analysis [J]. Frontiers in Environmental Science, 2021,9:757533.

[9] 赵杨,黄纯凯,高铁岭,等.2020~2022 年石家庄市大气变化特征及关联性研究 [J]. 中国环境监测, 2024,40(5):126-134.

Zhao Y, Huang C K, Gao T L, et al. Analysis of temporal variation and relevance of air pollution in Shijiazhuang city from 2020 to 2022 [J]. Environmental Monitoring in China, 2024,40(5):126-134.

[10] 王丽丽,刘笑杰,李丁,等.长江经济带 $PM_{2.5}$ 空间异质性和驱动因素的地理探测 [J]. 环境科学, 2022,43(3):1190-1200.

Wang L L, Liu X J, Li D, et al. Geographical detection of spatial heterogeneity and drivers of $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Economic Belt [J]. Environmental Science, 2022,43(3):1190-1200.

[11] 张向敏,罗桑,李星明,等.中国空气质量时空变化特征 [J]. 地理科学, 2020,40(2):190-199.

Zhang X M, Luo S, Li X M, et al. Spatio-temporal variation features of air quality in China [J]. Geographical Science, 2020,40(2):190-199.

[12] 周侃.中国环境污染的时空差异与集聚特征 [J]. 地理科学, 2016,36(7):989-997.

Zhou K. Spatial-temporal differences and cluster features of environmental pollution in China [J]. Geographical Science, 2016,36(7):989-997.

[13] 郑霞,胡东滨,李权.基于小波分解和 SVM 的大气污染物浓度预测模型研究 [J]. 环境科学学报, 2020,40(8):2962-2969.

Zheng X, Hu D B, Li Q. Study on prediction model of atmospheric pollutant concentration based on wavelet decomposition and SVM [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020,40(8):2962-2969.

[14] 兰童,韩力慧,田健,等.邢台市影响 $PM_{2.5}$ 和 O_3 浓度多时间尺度演变的重要因素 [J]. 中国环境科学, 2024,44(9):4786-4795.

Lan T, Han L H, Tian J, et al. Significant factors influencing the multi-temporal-scale evolutions of $PM_{2.5}$ and O_3 concentrations in Xingtai city [J]. China Environmental Science, 2024,44(9):4786-4795.

[15] 刘海猛,方创琳,黄解军,等.京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析 [J]. 地理学报, 2018,73(1):177-191.

Liu H M, Fang C L, Huang J J, et al. The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(1):177-191.

- [16] 蒋梦凡,李智国,李杰,等.耕地利用转型突变点检测及其时空特征——以昆明市东川区为例[J].中国土地科学,2022,36(3):86-95.
Jiang M F, Li Z G, Li J, et al. Mutation point detection of cultivated land use transition and its spatial-temporal characteristics: taking Dongchuan district of Kunming city as an example[J]. China Land Science, 2022,36(3):86-95.
- [17] 崔梦娇.京津冀及周边地区大气污染特征及典型城市污染物传输研究[D].上海:华东师范大学,2023.
Cui M J. Study on the characteristics of air pollution in Beijing, Tianjin, Hebei and surrounding areas and the transmission of pollutants in typical cities[D]. Shanghai: East China Normal University, 2023.
- [18] 沈楠驰,周丙锋,李珊珊,等.2015~2019年天津市大气污染物时空变化特征及成因分析[J].生态环境学报,2020,29(9):1862-1873.
Shen N C, Zhou B F, Li S S, et al. Temporal and spatial variation characteristics and origin analysis of air pollutants in Tianjin from 2015 to 2019[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020,29(9):1862-1873.
- [19] 孟红旗,张家兴,韩桥,等.冬季供暖对城市大气PM_{2.5}水溶性组成及污染源解析的影响[J].环境化学,2021,40(9):2768-2779.
Meng H Q, Zhang J X, Han Q, et al. Impacts of municipal heat supply in winter on water-soluble ions and sources identification of atmospheric PM_{2.5}[J]. Environmental Chemistry, 2021,40(9):2768-2779.
- [20] 宋小涵,燕丽,刘伟,等.2015~2021年京津冀及周边地区PM_{2.5}和臭氧复合污染时空特征分析[J].环境科学,2023,44(4):1841-1851.
Song X H, Yan L, Liu W, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of co-pollution of PM_{2.5} and ozone over BTH with surrounding area from 2015 to 2021[J]. Environmental Science, 2023,44(4):1841-1851.
- [21] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, et al. Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575:1582-1596.
- [22] Wang Z B, Li J X, Liang L W. Spatio-temporal evolution of ozone pollution and its influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. Environmental Pollution, 2020,256:113419.
- [23] 梅梅,朱蓉,孙朝阳.京津冀及周边“2+26”城市秋冬季大气重污染气象条件及其气候特征研究[J].气候变化研究进展,2019,15(3):270-281.
Mei M, Zhu R, Sun Z Y. Study on meteorological conditions for heavy air pollution and its climatic characteristics in “2+26” cities around Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter[J]. Advances in Climate Change Research, 2019,15(3):270-281.
- [24] 崔飞.资源型城市河北省邢台市转型战略分析[D].河北:河北地质大学,2018.
Cui F. Analysis on the transformation strategy of resource-based city Xingtai, Hebei Province[D]. Hebei: Hebei GEO University, 2018.
- [25] Wu W Q, Zhang M, Ding Y T. Exploring the effect of economic and environment factors on PM_{2.5} concentration: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Environmental Management, 2020,268:110703.
- [26] 陈传敏,刘春雨,刘松涛,等.天津市民用散煤燃烧大气污染物排放清单[J].环境污染与防治,2023,45(1):35-39.
Chen C M, Liu C Y, Liu S T, et al. Emission inventory of air pollutants from residential coal combustion in Tianjin[J]. Environmental Pollution & Control, 2023,45(1):35-39.
- [27] 徐丹妮,王瑾婷,袁自冰,等.汾渭平原复杂地形影响下冬季PM_{2.5}污染分布特征、来源及成因分析[J].环境科学学报,2021,41(4):1184-1198.
Xu D N, Wang J T, Yuan Z B, et al. Temporal-spatial variations, source apportionment, and formation mechanisms of PM_{2.5} pollution over Fenwei Plain, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021,41(4):1184-1198.
- [28] 杨溟淼,王咏薇,张丹,等.重庆臭氧时空分布特征及其污染成因的初步分析[J].环境科学学报,2021,41(12):5026-5037.
Yang M J, Wang Y W, Zhang D, et al. A preliminary analysis of the characteristics of ozone and the cause of its pollution in Chongqing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021,41(12):5026-5037.
- [29] 梅莹莹.地表臭氧时空分布及其与多尺度景观类型的关系研究[J].地理研究,2024,43(5):1304-1315.
Mei Y Y. Spatiotemporal distribution of ground-level ozone and its relationship with multi-scale landscape types[J]. Geographical Research, 2024,43(5):1304-1315.
- [30] 张培德,彭彬彬,米志付,等.政策关联性与协同防治:基于城市大气政策的实证分析[J].系统工程理论与实践,2025,45(1):1-16.
Zhang P D, Peng B B, Mi Z F, et al. Policy relevance and collaborative governance—Empirical analysis based on urban air policies[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2025,45(1):1-16.
- [31] 樊宇,经思雨,王宁,等.我国社会经济因素驱动协同减排降碳影响研究[J].生态经济,2025,41(3):193-201,229.
Fan Y, Jing S Y, Wang N, et al. Research on the impact of socio-economic factors-driven collaborative pollution reduction and carbon reduction in China[J]. Ecological Economy, 2025,41(3):193-201,229.
- [32] 史海琪,曾胜兰,李浩楠.四川盆地大气污染物时空分布特征及气象影响因素研究[J].环境科学学报,2020,40(3):763-778.
Shi H Q, Zeng S L, Li H N. Temporal and spatial distribution characteristics and influencing meteorological factors of air pollutants in Sichuan Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020,40(3):763-778.
- [33] 韩力慧,王红梅,向欣,等.北京市典型区域降水特性及其对细颗粒物影响[J].中国环境科学,2019,39(9):3635-3646.
Han L H, Wang H M, Xiang X, et al. The characteristics of precipitation and its impact on fine particles at a representative region in Beijing[J]. China Environmental Science, 2019,39(9):3635-3646.
- [34] 刘涛涛,王勇辉,刘西刚.山西省SO₂时空变化特征及影响要素分析[J].环境工程,2019,37(12):153-160.
Liu T T, Wang Y H, Liu X G. Analysis of spatial and temporal variation characteristics and influencing factors of SO₂ in Shanxi province[J]. Environmental Engineering, 2019,37(12):153-160.
- [35] 翁雷霆,王鹏,肖荣波,等.2000~2022年珠三角城市群PM_{2.5}与O₃时空分布特征及其影响因素[J].生态环境学报,2025,34(2):268-278.
Weng L T, Wang P, Xiao R B, et al. Spatial-temporal distribution characteristics of PM_{2.5} and O₃ in the Pearl River Delta Urban agglomeration and corresponding Influence Factors[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025,34(2):268-278.
- [36] 黄小刚,赵景波,曹军骥,等.中国城市O₃浓度时空变化特征及驱动因素[J].环境科学,2019,40(3):1120-1131.
Huang X G, Zhao J B, Cao J J, et al. Spatial-temporal variation of ozone concentration and its driving factors in China[J]. Environmental Science, 2019,40(3):1120-1131.
- [37] 侯晓松,程水源,肖潇,等.典型钢铁工业城市O₃污染特征及减排策略研究[J].中国环境科学,2025,45(11):6480-6490.
Hou X S, Cheng S Y, Xiao X, et al. Research on the ozone pollution characteristics and emission reduction strategies in a typical steel industry city[J]. China Environmental Science, 2025,45(11):6480-6490.

作者简介:薛梦涵(2001-),女,河北邢台人,重庆师范大学硕士研究生,主要从事自然地理学研究.Xuemenghan832@163.com.