

济南市空气质量变化特征及影响因素分析

朱文晶¹,刘冠权^{1,2},杨雨霖¹

(1.青岛理工大学 管理工程学院,山东 青岛 266525;2.山东省高校智慧城市建设管理研究中心,山东 青岛 266525)

摘要:城市空气污染问题受到了社会的广泛关注,研究济南市空气质量变化趋势对济南市未来的大气污染防治具有重要意义。基于济南市2018—2022年空气常规污染物质量浓度的监测数据,采用Sen's斜率估计、MK检验分析、灰色关联分析等方法对济南市空气质量变化趋势和影响因素进行了分析。结果表明:1)近五年来,济南市各项空气污染物质量浓度显著性下降,空气质量总体变好,并且自2021年下半年,空气质量整体变化趋势更加显著;2)空气污染物质量浓度季节性变化特征明显,除O₃质量浓度随时间变化呈倒“V”型,夏季最高外,其他污染物质量浓度随时间变化呈“V”型,春冬高,夏秋低;3)在冬季供暖时期,除O₃外,其他空气常规污染物质量浓度均有明显升高,其中PM_{2.5}的质量浓度变化最显著;4)通过灰色关联分析可知,对济南市空气质量影响较大的气象因素和经济因素分别为年平均气温、第二产业占比。

关键词:空气质量;MK检验;灰色关联分析;影响因素

中图分类号:X51 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8020(2023)04-0294-09

随着我国经济的快速发展,工业企业数量大幅度增长,对化石能源与自然资源的需求也随之增加,大量污染物的排放,使得空气污染问题日益严重。为有效改善城市空气质量,2018年国务院印发了《打赢蓝天保卫战三年行动计划》,持续开展大气污染防治行动。随着空气污染治理政策的实施,空气质量持续改善,但与改善目标还存在着差距。然而,城市空气质量与公共环境和居民健康密切相关^[1]。空气污染问题不仅影响了国民经济的可持续发展,而且严重威胁了人们的健康生活。有研究表明,空气污染物影响人体的心血管系统和呼吸系统,增加了人们患上心血管疾病和呼吸道疾病的概率^[2-4]。空气污染问题已成为不容忽视的重要问题,因此,改善城市空气质量具有重要意义。济南市地处中国华东地区,属于暖温带大陆性季风气候,冬冷夏热,四季分明。济南市是工业城市,也是人口大市,生活燃煤、工业生产、汽车尾气等带来的大量烟尘、气体排放到空气中,使得空气污染问题不断加剧,济南市成为近年来空气污染较严重的城市之一。2018年以来,济

南市持续深入实施打赢蓝天保卫战计划,空气质量也呈好转趋势,但总体改善效果并不显著^[5]。加快推进空气质量改善工作,持续改善空气质量,有助于济南市深入实施工业强市发展战略,实现城市经济高质量发展。

空气污染问题受到众多国内外学者的关注,为进一步探究空气质量的变化趋势及原因,更好地改善空气质量,许多学者从不同角度对城市空气质量问题进行了研究。从空气质量变化特征上,学者们多采用空气常规污染物质量浓度及空气质量指数来衡量空气质量,并以此分析空气质量变化趋势及变化特征^[6-8]。通过对空气质量变化特征以及特殊时期空气质量变化的研究,掌握空气污染特征,为完善空气质量改善方案提供科学依据。从空气质量影响因素的研究上,部分学者探讨了气象因素和经济因素对空气质量的影响,研究表明,温度、湿度等气象因素以及GDP、人口数量、能源消费等经济因素都对空气质量有重要影响^[9-11]。在研究方法上,大多基于地理探测器、回归模型、灰色关联分析等方法对单个

收稿日期:2023-06-03;修回日期:2023-08-23

基金项目:山东省重点研发计划(软科学项目)一般项目(2019RKB01459);校级教改面上项目(W2022-057)

通信作者简介:刘冠权(1971—),男,副教授,硕士研究生导师,博士,研究方向为现代工业工程理论研究、绿色经济与可持续发展。

E-mail:lgq1971@163.com

或多个空气污染物及空气质量指数进行分析研究。Zhan等^[12]利用中国338个城市的空气质量指数(AQI)数据,采用地理探测器模型的方法探究了驱动因素对空气质量的影响强度。周梦鸽等^[13]运用地理加权回归模型和小波分析等方法对山东省空气质量进行了研究,结果表明,山东省空气质量受社会经济和气象因素的综合影响。朱海勇等^[14]采用灰色关联法研究了山东省空气主要污染物与经济和非经济影响因子间的关系。周敏丹等^[15]采用地理探测器方法揭示了广州市自然因素与社会经济因素对PM_{2.5}的影响机制与差异。

上述文献基于大尺度区域及城市层面,通过对不同地区空气质量的变化特征及影响因素进行分析,为空气质量的改善提供了思路,但在空气质量变化趋势以及特殊时段的分析上还可以进一步深化研究;在研究方法上,灰色关联法适用性强,对样本量的多少无限制。本文以济南市为研究对象,探究济南市2018—2022年空气质量变化趋势、分析变化特征及原因,并采用灰色关联分析法,研究经济因素和气象因素对空气质量的影响程度,为今后济南市空气污染防治和高质量发展提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究使用的济南市2018—2022年空气质量逐月数据来源于山东省生态环境监测中心的历史数据。气温、降水量及风速等气象数据来源于2019—2022年的《山东省统计年鉴》和空气质量在线监测分析平台,经济因素等数据来源于2019—2022年的《济南市统计年鉴》。

1.2 研究方法

本文采用Sen's斜率估计和Mann-Kendall检验法分析了济南市2018—2022年空气质量的变化趋势,两种方法均在软件MATLAB R2020a上实现;利用Origin软件绘制了各项污染物质量浓度的逐月变化图以及采暖期各项污染物质量浓度变化率图,更加具体地展示了济南市空气质量的时间变化特征;并运用灰色关联法分析了影响空气质量的经济因素和气象因素。

1.2.1 Sen's斜率估计

Sen's斜率估计方法具有计算效率高、对于测量误差不敏感的优点,适用于长时间序列数据的趋势分析。对于时间序列 $X_n = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,其斜率计算公式为:

$$\beta = f\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i, \quad (1)$$

式中: $f(\cdot)$ 代表取中值; β 为时间序列的斜率; x_j 和 x_i 为时间序列数据,即2018—2022年济南市空气污染物质量浓度的月均值。斜率 β 用于判断时间序列的总体变化趋势,当 $\beta > 0$ 时,时间序列呈上升趋势;当 $\beta < 0$ 时,时间序列呈下降趋势;当 $\beta = 0$ 时,序列无明显趋势。

1.2.2 Mann-Kendall检验法

1) Mann-Kendall趋势检验。Mann-Kendall趋势检验是一个非参数检验,用于判断时间序列数据的变化趋势,并且不受异常值的干扰。本文采用Mann-Kendall检验法对济南市2018—2022年空气质量进行趋势分析。具体步骤如下^[16]。

构建时间序列 $X_n = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, x 为2018—2022年济南市空气常规污染物质量浓度的月均值, n 为样本量。可定义检验统计量 S :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), \quad (2)$$

其中, $\text{sgn}(x_j - x_i)$ 为符号函数。当 $x_j - x_i > 0$ 时, sgn 的值为1;当 $x_j - x_i = 0$ 时, sgn 的值为0;当 $x_j - x_i < 0$ 时, sgn 的值为-1。

S 为正态分布,其方差计算公式如下:

$$V_s = \frac{1}{18}n(n-1)(2n+5)。 \quad (3)$$

S 标准化后得到统计检验值 Z :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V_s}}, & S > 0, \\ 0, & S = 0, \\ \frac{S+1}{\sqrt{V_s}}, & S < 0. \end{cases} \quad (4)$$

在检验的显著性水平 α 上, $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时,时间序列存在显著性单调趋势。

2) Mann-Kendall突变检验。当Mann-Kendall检验用于检验序列突变时^[17],根据济南市空气质量综合指数的月均值时间序列 (y_1, y_2, \dots, y_n) ,构造一个秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_{ij}, k = 2, 3, \dots, n, \quad (5)$$

其中, $r_{ij} = \begin{cases} 1, & y_i > y_j, \\ 0, & y_i \leq y_j, \end{cases}$ 且 $1 \leq j \leq i$ 。

定义统计变量为

$$U_{F_k} = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{V(s_k)}}, k = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

式中:

$$E(s_k) = \frac{k(k+1)}{4},$$

$$V(s_k) = \frac{k(k+1)(2k+5)}{72}。$$

U_{F_k} 为标准正态分布, 给定显著性水平 α 。若

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}, \quad (7)$$

式中: $\varepsilon_i(k)$ 是第 k 年的某项污染物(参考序列)与当年的第 i 个影响因子(比较序列)的关联系数; x 指的是序列中指标因子的年均值; ρ 是分辨系数, $\rho \in [0, 1]$, 本文中取值为 0.5。

2 结果分析

2.1 2018—2022 年济南市空气质量变化分析

2.1.1 空气常规污染物及空气质量综合指数变化趋势分析

采用 Sen-MK 趋势分析法对济南市 2018—2022 年空气常规污染物(SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、 CO)及空气质量综合指数的变化趋势进行分析, Sen's 斜率估计和 MK 检验结果如表 1 所示。Sen's 斜率值 β 是指样本中所有数据形成的斜率的中值, 当 β 大于 0 时, 则样本数据变化趋势为上升趋势, β 的数值即为样本数据随间隔时间的变化量。

表 1 Sen's 斜率估计与 MK 检验分析结果
Tab.1 Results of the analysis of Sen's slope estimation and MK test

污染物	Sen's 斜率 β	Z 值	变化趋势
SO_2	-0.109	-3.536	显著下降
NO_2	-0.263	-3.061	显著下降
PM_{10}	-0.800	-3.655	显著下降
$\text{PM}_{2.5}$	-0.333	-3.093	显著下降
O_3	-0.333	-0.746	无明显趋势
CO	-0.007	-3.514	显著下降

$|U_{F_k}| > U_{\alpha/2}$, 则说明时间序列存在显著性的变化趋势, 将时间序列按逆序排列, 得到 U_B 统计量的值, 再按照上述进行计算。通过分析序列 X 的趋势变化, 可以确定序列趋势突变的时间。

1.2.3 灰色关联分析

灰色关联分析是一种多因素统计分析的方法。研究对象数据量较少时, 往往采用灰色关联法^[18], 通过此方法可以确定各个因素对结果的影响程度。本文采用均值化的方法, 得到参考序列和比较序列的无量纲化矩阵。通过计算比较序列中各个指标与参考序列的关联系数, 来确定关联度的大小, 其计算公式为:

综合指数 -0.033 -4.586 显著下降

由表 1 可知, 空气中六项常规污染物及空气质量综合指数的 Sen's 斜率值 β 均小于 0, 表明常规污染物质量浓度与空气质量综合指数在 2018—2022 年整体呈下降趋势, 济南市空气质量整体变好趋势明显。济南市是打赢蓝天保卫战三年行动计划的重点区域之一, 空气污染治理计划的实施表现在: 优化产业结构; 深化对工业污染排放和燃煤污染的治理; 调整能源结构, 推动绿色化发展。而空气中主要污染物的来源都与工业生产的直接排放以及车辆尾气排放形成的残留物有关, 因此产业结构的调整和工业污染排放的治理是各污染物质量浓度显著降低的主要原因。通过表 1 中 Z 值可知, 除 O_3 质量浓度的变化趋势不显著外, 其他污染物(SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO)质量浓度和空气质量综合指数变化趋势均为显著性下降。

采用 Mann-Kendall 法对空气质量综合指数值形成的时间序列数据进行仿真, 绘制 U_F 和 U_B 统计量曲线图如图 1 所示。由 U_F 统计量曲线可知空气质量综合指数在各时间段的变化趋势: 若 U_F 线在临界线内(两条 0.01 显著水平线之间, 置信区间)变动, 表明曲线变化趋势和突变不明显; U_F 的值大于 0, 表示序列呈上升趋势, 反之则为下降趋势; 当超过临界线时表明上升或下降趋势显著。若两条曲线在临界线之间出现交叉, 则交点对应时刻即为突变开始的时间。

通过观察 U_F 曲线的变化可知: 空气质量综

合指数值在2018年6月至2018年10月、2020年7月至2020年11月、2021年5月至2022年12月这三个时间段中变化趋势明显,呈显著下降的趋势;在2019年1月到4月空气质量综合指数值上升,但上升趋势并不显著。由 U_F 统计量曲线与 U_B 统计量曲线交点可知,在2020年4月份空气质量综合指数值发生突变。除2019年外,在每年的夏秋季济南市空气质量都呈好转趋势,这与济南的气候有密切关系,济南市属于北方城市,春冬季节与夏秋季节气候方面差异较大,夏秋季节气旋活动频繁,有频繁的降雨和大风天气,有利于空气中污染物的扩散,对空气中污染物的冲刷效果明显。但在2019年空气质量状况相比2018年出现反弹,可能由于污染物排放量增加、空气质量治理工作存在的问题显露以及在2019年受不利气象条件的影响,空气中污染物持续累积,导致在2019年上半年济南市空气质量明显变差。2019年底突发的新冠肺炎疫情对人类活动与企业生产造成了严重影响,为避免人员流动造成疫情扩散,济南市陆续出台了人员隔离和交通管制等措施,大气污染物排放水平随之下降,由图1可以看出,自2020年下半年,济南市空气质量综合指数显著下降,空气质量状况变好。由山东省全部城市环境空气质量状况对比可知,虽然济南市的空气质量近几年有明显改善,但空气质量状况在全省各城市排名中仍处于中后位置^[19]。因此为保证空气质量能够得到持续的改善,济南市在对空气质量的防治与治理工作上仍不能放松。

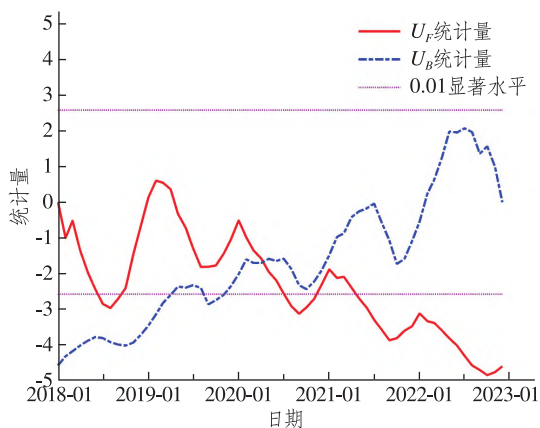


图1 空气质量综合指数值的MK检验曲线

Fig.1 MK test curve of the composite air quality index values

2.1.2 空气常规污染物季节性变化趋势

济南市2018—2022年空气常规污染物质量

浓度随月份变化的趋势如图2所示,其中, SO_2 、 NO_2 、 CO 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度均表现出春冬高、夏秋低的特点,一方面受到气候环境的影响,另一方面受到人类活动的影响也较大。济南市夏秋与春冬季节平均气温相差较大,且夏季炎热多雨,空气对流运动易使污染物稀释与沉降,从而造成污染物质量浓度降低。而冬季为济南市的采暖期,是每年污染物的强排放时期,燃煤采暖造成 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO 等质量浓度的升高。在采暖期空气污染物质量浓度明显升高,这与学者们的相关研究结论一致^[20-21]。除供暖影响外,一方面,济南市人口多,交通需求大,机动车尾气排放也是造成济南市污染严重的重要原因之一,并且冬季温度低,汽车发动机工作受到影响,混合气体的燃烧速度减慢,引起不完全燃烧,污染物排放增加;另一方面,受大陆性季风气候的影响,济南市冬季寒冷干燥,地面温度低,导致贴近地面的下层大气温度也很低,高度增加而气温升高,因此发生“气温逆转”的现象,在逆温层中空气无法对流运动,空气中污染物很难得到及时扩散,加重了空气污染。

O_3 质量浓度值随时间变化呈倒“V”型,在夏季达到峰值,成为济南市夏季的首要污染物(如图2所示)。对人类生活和环境造成危害的 O_3 存在于对流层,主要源自人为源排放前体物的化学生成,人类活动排放了大量氮氧化物和挥发性有机物(VOCs),在环境中通过复杂的光化学反应生成 O_3 。根据相关研究, O_3 的质量浓度与气温存在正相关关系^[22],并且夏季大风天气较多,风力增大可以使颗粒物质量浓度得到稀释扩散,进而使得紫外线增强。较高的气温和太阳辐射使得夏季 O_3 质量浓度升高。

2.1.3 采暖期空气污染物质量浓度变化分析

济南市属于我国北方城市,在冬季,空气质量受采暖的影响较大。济南市供暖时间是每年的11月15日至次年的3月15日,此外为非供暖时间。济南市采暖方式主要是燃煤统一供暖,消耗了大量化石燃料,其燃烧产生的污染物加重大气污染从而危害公众健康,因此对济南市采暖期的空气质量分析是非常有必要的。为更好地探究济南市采暖期空气污染物质量浓度的变化,对2018—2022年采暖期污染物质量浓度变化趋势进行分析,变化曲线如图3所示。

由图 3 可知,济南市 2018—2022 年采暖期间空气污染物质量浓度呈逐渐下降趋势,这与济南市在采暖期采取的空气治理措施密切相关,如深入实施清洁取暖建设工作、分户式发放资金补贴等。济南市空气质量除受上述原因影响外,与济

南市地形和气候也密切相关。济南市位于黄河的下游地带,三面环山,北面缺口是黄河,在冬季,受西北季风的影响,大量灰尘被带入而无法及时得到扩散,加重了空气质量问题。因此,今后对冬季采暖期空气质量的治理工作仍不能放松。

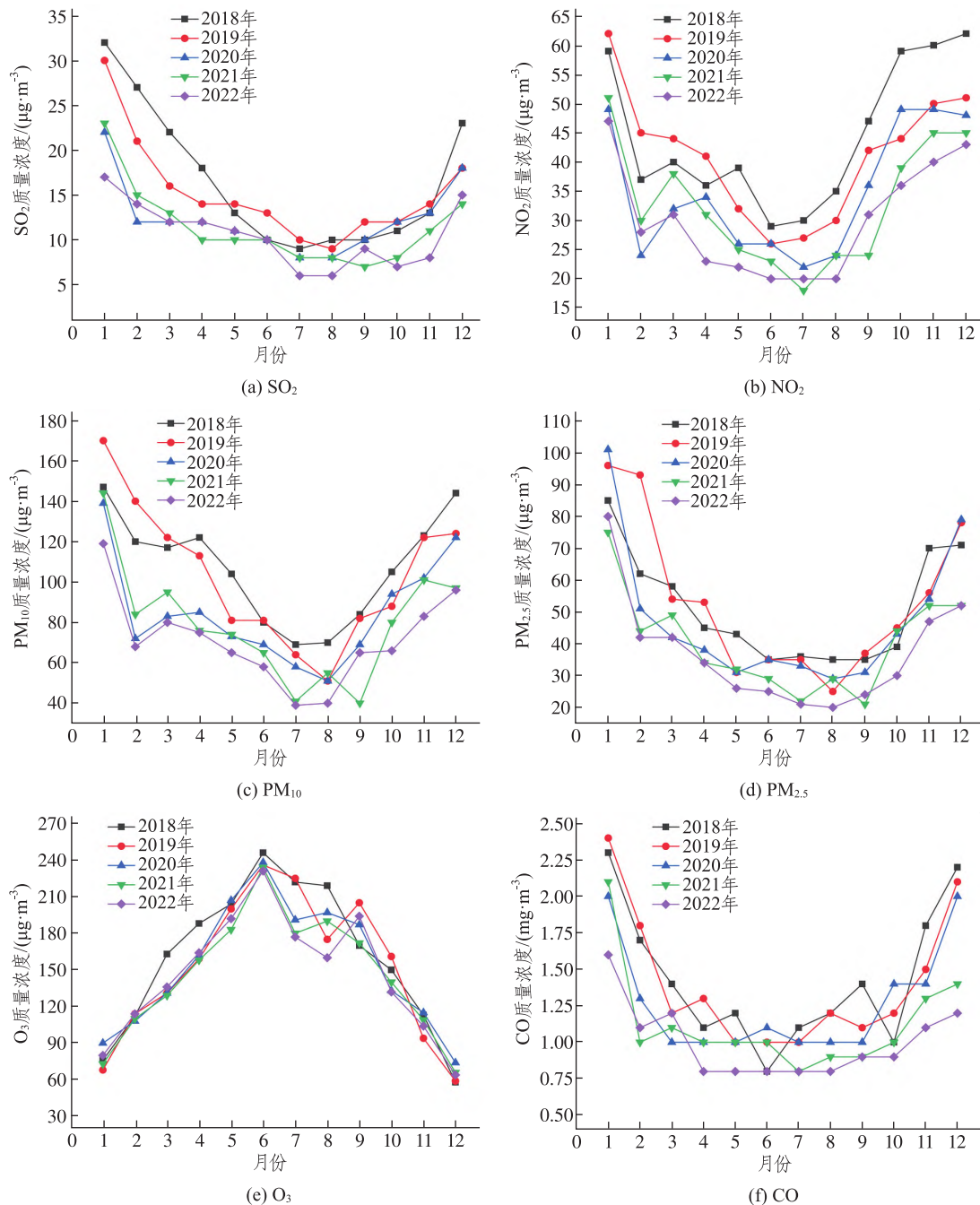


图 2 六项常规污染物质量浓度的月均值变化

Fig.2 Monthly average changes in mass concentrations of six conventional pollutants

通过对济南市 2022 年采暖期与非采暖期空气常规污染物质量浓度对比分析(图 4)可知,除 O₃ 外,其他污染物质量浓度在采暖期都有很明显的

升高,其中 PM_{2.5} 的质量浓度升高最明显,而 O₃ 质量浓度明显下降,PM_{2.5} 与 O₃ 质量浓度变化对比明显。主要因为 PM_{2.5} 的主要来源是化石燃料

在燃烧时排放的残留物,而济南市燃煤供暖时产生大量烟尘、CO、氮氧化物、SO₂ 以及有机化合物等物质,因此,PM_{2.5}、SO₂、NO₂ 等污染物质量浓度在采暖期明显升高。而冬季气温较低、太阳辐射也弱,光化学反应不易发生,故而 O₃ 质量浓度较非采暖期更低。

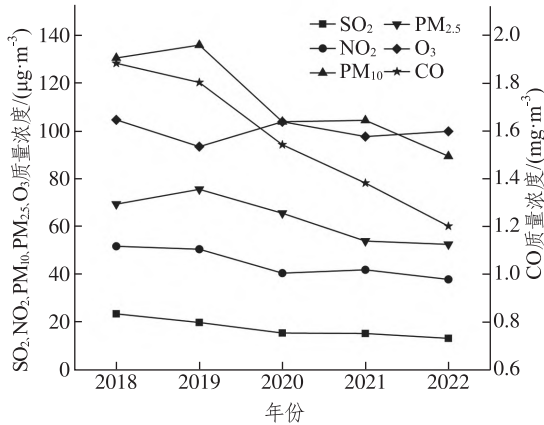


图3 济南市采暖期空气污染物质量浓度变化

Fig.3 Changes in air pollutant mass concentrations in Jinan during the heating period

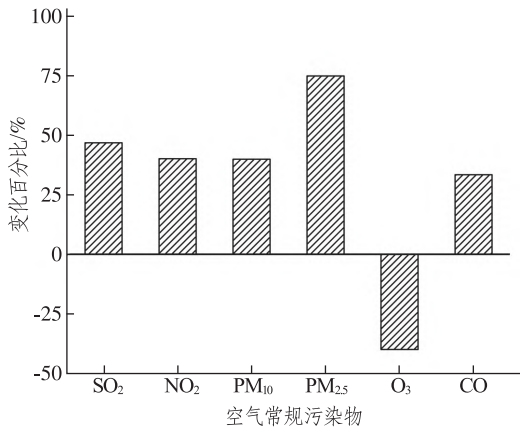


图4 2022年采暖期相比非采暖期空气常规污染物质量浓度变化

Fig.4 Changes in mass concentrations of conventional pollutants in the air during the heating period compared to the non-heating period in 2022

2.2 济南市空气质量影响因素分析

2.2.1 经济因素和气象因素分析

经济因素和气象因素均是影响空气质量的重要因素。气象因素对空气污染物的扩散和累积都有较明显的影响,温度、风速和降水是影响空气质量最主要的气象热力因素和气象动力因素,气温的垂直分布影响着大气的稳定度,大气不稳定时,

对流作用明显,利于空气污染物的扩散和稀释。随着城市经济的快速发展,人口、机动车辆以及工业企业的不断增多,大量污染物的排放导致城市空气污染问题愈加严重。为研究经济因素和气象因素对济南市空气质量的影响,选择了12项影响因子(见表2),其中,GDP、各产业占比、规模以上工业企业数量、用电量和绿化面积表示工业化发展程度和能源结构,民用汽车拥有量可以反映交通带来的污染物排放状况。

表2 经济和气象因素指标

Tab.2 Indicators of economic and meteorological factors

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	人口密度	人·km ⁻²
X6	用电量	亿 kW·h
X7	绿化面积	hm ²
X8	规模以上工业企业数量	个
X9	民用汽车拥有量	辆
X10	平均气温	℃
X11	平均降水量	mm
X12	平均风速	m·s ⁻¹

为解决影响因素之间的共线性问题,利用皮尔逊相关系数来衡量线性相关关系,各变量相关系数如表3所示。相关系数的绝对值越接近于1,说明两者之间相关度越强,相关系数越接近于0,相关度越弱。根据皮尔逊相关系数,以及综合考虑影响因子间的相关性,对在0.05和0.01水平上显著相关的变量进行剔除,最终选定第二产业占比、人口密度、用电量、规模以上工业企业数量、民用汽车拥有量共5个经济影响因子。

2.2.2 建立灰色关联分析模型

济南市空气常规污染物质量浓度与影响因素间的关联系数如表4所示。由表4可知,对空气污染物影响最大的气象因素为年平均气温,其次为平均降水量和平均风速。一般情况下,大气温随高度增加而下降,但在某些气候条件下,会出现逆温的反常现象,济南市冬季较为寒冷,且受地形的影响,大气逆温现象常有发生,出现逆温时,空气流动缓慢,空气中污染物无法向上扩散,造成污染物累积,使得年平均气温成为影响空气质量的重要因素。

根据关联系数的大小,各项经济因素对济南市空气质量的影响程度由大到小排序依次为:第二产业占比、规模以上工业企业数量、人口密度、民用汽车拥有量、用电量。不同的经济指标反映了不同的人类活动,空气常规污染物与各经济因素间的关联度不同,说明经济因素对空气质量的影响程度也不同。第二产业占比和规模以上工业企业数量是对济南市空气质量影响居前位的两项经济因素,第二产业主要是指工业和建筑业,而工业企业包括采矿业、制造业和电力、燃气及水的生

产供应业,在工业生产过程中会形成废气、废水和固体排放物,各种污染物的排放以及污染治理不彻底,导致空气污染更加严重。大气中 NO_2 与 CO 的重要来源是工业生产和机动车尾气排放,但由表 4 中关联系数大小可知,民用汽车拥有量与 NO_2 和 CO 的质量浓度值的关联度较小,原因在于济南市在 2020 年开始推广新能源汽车的使用,并在 2021 年 6 月发布了关于加快新能源汽车推广应用的多条政策,减少了机动车尾气排放对济南市空气质量的影响。

表 3 皮尔逊相关系数
Tab.3 Pearson's correlation coefficients

影响因子	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
X1												
X2	0.624											
X3	-0.807	-0.961 *										
X4	0.823	0.950 *	-0.999 **									
X5	0.918	0.823	-0.947	0.958 *								
X6	0.963 *	0.799	-0.933	0.943	0.986 *							
X7	0.930	0.791	-0.929	0.941	0.999 **	0.987 *						
X8	0.889	0.299	-0.500	0.517	0.635	0.743	0.658					
X9	0.995 **	0.656	-0.837	0.854	0.949	0.978 *	0.961 *	0.839				
X10	0.033	-0.310	0.294	-0.298	-0.318	-0.158	-0.309	0.459	-0.105			
X11	0.317	-0.488	0.287	-0.264	-0.074	0.051	-0.032	0.684	0.211	0.707		
X12	0.709	0.118	-0.283	0.296	0.384	0.525	0.405	0.949	0.605	0.715	0.794	

注: * 是指在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 是指在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 4 空气常规污染物质量浓度与影响因素间的关联系数
Tab.4 Correlation coefficients between routine air pollutant mass concentrations and influencing factors

影响因素	$\rho(\text{SO}_2)$	$\rho(\text{NO}_2)$	$\rho(\text{PM}_{10})$	$\rho(\text{PM}_{2.5})$	$\rho(\text{O}_3)$	$\rho(\text{CO})$
平均气温	0.782 5	0.827 7	0.806 2	0.829 6	0.891 4	0.835 1
平均降水量	0.718 1	0.738 9	0.732 8	0.684 8	0.693 2	0.707 1
平均风速	0.556 9	0.553 9	0.552 7	0.536 5	0.536 2	0.534 4
第二产业占比	0.781 1	0.826 7	0.804 2	0.853 7	0.892 3	0.858 2
人口密度	0.707 7	0.742 8	0.722 8	0.750 0	0.775 2	0.765 7
用电量	0.659 4	0.688 7	0.671 1	0.690 5	0.706 6	0.710 2
规模以上工业企业数量	0.714 7	0.748 5	0.733 3	0.773 3	0.787 9	0.779 8
民用汽车拥有量	0.669 4	0.697 8	0.683 0	0.708 7	0.721 0	0.720 3

注:分辨系数 $\rho = 0.5$ 。

3 结论

1) 2018—2022 年,济南市空气质量总体呈好转趋势,除 O_3 外其他污染物质量浓度显著下降,但在 2019 年出现反弹,并且与山东省其他城市相比,济南市空气质量状况排名仍处于中后位

置。因此,对空气质量的改善工作更加不能懈怠。

2) 济南市空气常规污染物质量浓度季节性变化特征明显,其中 SO_2 、 NO_2 、CO、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度均表现出春冬高,夏秋低的特点,主要是因为济南市冬季采暖燃煤使得污染物排放增加,且济南市冬冷夏热,又受地形的影响,冬季空气污染物易累积且不易扩散,使得污染物质量浓度升高。 O_3

质量浓度呈倒“V”型,主要因为夏季气温高、紫外线强,环境中光化学反应更易发生进而形成 O_3 。

3) 济南市冬季燃煤供暖是造成冬季空气常规污染物质量浓度升高的重要原因,与非采暖时期相比,除 O_3 外其他污染物质量浓度明显升高。虽然济南市对冬季采暖时期的污染开展了相关的治理工作,但冬季供暖对空气污染仍有较大影响,因此加大对冬季采暖期的污染治理仍是改善空气质量工作的重点。

4) 通过灰色关联分析,对济南市空气质量影响较大的气象因素和经济因素分别是平均气温和第二产业占比,这说明济南市高耗能、高排放产业基数大,产业结构转型不明显。因此,为切实改善济南市空气质量,应降低对第二产业的依赖,大力推进产业结构调整,加强对工业污染的治理,降低工业排放对空气的污染。

参考文献:

- [1] BAI R Q, LAM J C, LI V O. A review on health cost accounting of air pollution in China[J]. *Environment International*, 2018, 120: 279-294.
- [2] 陶燕, 刘亚梦, 米生权, 等. 大气细颗粒物的污染特征及对人体健康的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(3): 592-597.
- [3] POPE III C A, DOCKERY D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, 56(6): 709-742.
- [4] 殷永文, 程金平, 段玉森, 等. 上海市霾期间 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析[J]. *环境科学*, 2011, 32(7): 1894-1898.
- [5] 张亚茹, 陈永金, 郭庆春, 等. 济南市大气污染物时空变化及预测分析[J]. *环境工程*, 2020, 38(2): 114-121.
- [6] XU C Q, ZHANG Z, LING G J, et al. Air pollutant spatiotemporal evolution characteristics and effects on human health in North China[J]. *Chemosphere*, 2022, 294: 133814.
- [7] 武祺然, 周力凯, 孙金金, 等. 浙江省空气质量变化特征研究: 基于函数型数据分析[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2021, 56(7): 53-64.
- [8] 付和成, 朱云波, 黄建洪, 等. 典型高原城市空气质量变化特征及驱动因素分析[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 47(6): 126-136.
- [9] 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.
- [10] 王敏, 冯相昭, 杜晓林, 等. 黄河流域空气质量时空分布及影响因素分析[J]. *环境保护*, 2019, 47(24): 56-61.
- [11] 李喜妍, 蔺雪芹, 王岱. 中国城市空气质量的时空演化特征及影响因素[J]. *西安理工大学学报*, 2022, 38(4): 487-499.
- [12] ZHAN D S, KWAN M P, ZHANG W Z, et al. The driving factors of air quality index in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197: 1342-1351.
- [13] 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 等. 2016—2020年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2022, 43(6): 2937-2946.
- [14] 朱海勇, 张守鑫, 刘加珍, 等. 山东省空气质量的时空特征及影响因素分析[J]. *环境污染与防治*, 2022, 44(9): 1228-1233.
- [15] 周敏丹, 匡耀求, 云国梁. 基于地理探测器的广州市大气 $PM_{2.5}$ 浓度驱动因素分析[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(2): 271-279.
- [16] 张洪波, 李哲浩, 席秋义, 等. 基于改进过白化的Mann-Kendall趋势检验法[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(6): 34-46.
- [17] 于浩. 基于时间序列的延河流域水沙周期分析及趋势预测[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2008.
- [18] HUANG M Q, WANG B. Evaluating green performance of building products based on gray relational analysis and analytic hierarchy process[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2014, 33(4): 1389-1395.
- [19] 山东省生态环境监测中心. 2018—2022年全省环境空气质量状况[EB/OL]. [2023-07-15]. <http://www.sdein.gov.cn/zwgk/sqcsqm/>.
- [20] 张文娟, 孙晓艳, 李敏, 等. 济南市空气质量特征及重污染期间 $PM_{2.5}$ 成分谱分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(S1): 71-75.
- [21] 陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 等. 东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析[J]. *环境科学*, 2019, 40(11): 4810-4823.
- [22] 张淼, 丁椿, 李彦, 等. 山东省 O_3 时空分布及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2021, 42(12): 5723-5735.

Change Characteristics and Influencing Factors of Air Quality in Jinan City

ZHU Wenjing¹, LIU Guanquan^{1,2}, YANG Yulin¹

(1.School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2.Shandong University Research Center for Smart City Construction and Management, Qingdao 266525, China)

Abstract: The problem of urban air pollution has been widely concerned by the society, and the study of air quality change trends in Jinan City is of great significance for the future prevention and control of air pollution in Jinan City. Based on the monitoring data of the air mass concentration of conventional pollutants in Jinan City from 2018 to 2022, the trend of air quality change and influencing factors in Jinan City were analyzed by using Sen's slope estimation, MK test analysis, and gray correlation analysis. The results are as follows. 1) In the past five years, the mass concentrations of various air pollutants in Jinan City have decreased significantly, and the air quality has become better overall, and the overall change trend of air quality has become more significant since the second half of 2021. 2) The seasonal variation of air pollutant mass concentrations is obvious, and except for the mass concentration of O_3 that shows an inverted "V" shape with highest concentration in summer, the mass concentration of other pollutants changes with time in a "V" shape, with high concentrations in spring and winter, and low concentrations in summer and fall. 3) In the winter heating period, in addition to O_3 , the mass concentrations of other air pollutants in the air routines have risen significantly, of which the most significant changes in the mass concentration of $PM_{2.5}$. 4) Through the gray correlation analysis, it can be seen that the meteorological factors and economic factors that have a greater impact on the air quality in Jinan City are the average annual temperature and the proportion of the secondary industry, respectively.

Keywords: air quality; MK test; grey correlation analysis; influencing factors

(责任编辑 李秀芳)