

引文格式: 吴益玲, 李成名, 戴昭鑫, 等. 城区空气质量指数时空分布特征及影响机制分析[J]. 测绘通报, 2020(4): 81-86. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2020.0116.

城区空气质量指数时空分布特征及影响机制分析

吴益玲^{1,2}, 李成名², 戴昭鑫², 吴政²

(1. 聊城大学环境与规划学院, 山东 聊城 252059; 2. 中国测绘科学研究院, 北京 100089)

摘要: 济南市是中国雾霾最严重的城市之一, 探究该地区大气污染的时空分布及影响机制具有重要意义。利用地统计插值分析了济南市主城区 AQI 的时空分布特征, 并利用地理探测器定量分析了 AQI 的风险因子及影响机制。研究结果表明, 年际尺度上, 济南市主城区 AQI 在时间上呈逐年降低趋势, 在空间上大致呈现出东南低西北高的分布态势; 季节尺度上, 济南市主城区 AQI 在时间上具有鲜明的季节性差异, 从高到低依次为冬季、春季、秋季、夏季, 在空间上则呈现出春季和冬季东南低北部高、夏季整个主城区均低、秋季南低北高的分布态势; 月尺度上, 济南市主城区 AQI 呈现出典型的“U”形分布特征, 最高值为 1 月和 12 月, 最低值为 8 月; 各因子交互作用的影响力远大于单因子的影响力, 其中, 土地利用类型与年均降水量的交互作用对济南市主城区 AQI 的影响力最大。研究显示, 济南市主城区 AQI 受土地利用类型和年均降水量的共同影响最大。

关键词: 空气质量指数; AQI; 时空分布; 地理探测器; 影响机制

中图分类号: P208

文献标识码: A

文章编号: 0494-0911(2020)04-0081-06

Spatial and temporal distribution characteristics and influencing mechanisms of air quality index in urban areas

WU Yiling^{1,2}, LI Chengming², DAI Zhaoxin², WU Zheng²

(1. School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;

2. Chinese Academy of Surveying and Mapping Sciences, Beijing 100089, China)

Abstract: Jinan is one of the cities with the most severe fog and haze in China. It is of great significance to explore the spatial and temporal distribution of air pollution and its impact mechanism in this area. Geostatistical interpolation is used to analyze the spatial and temporal distribution characteristics of AQI in the main urban area of Jinan, and the risk factors and influencing mechanism of AQI are quantitatively analyzed by using geographic detector. The results show that, on the interannual scale, the AQI in the main urban area of Jinan city decreases year by year in time, and generally presents the distribution trend of low southeast and high northwest in space. On the seasonal scale, the AQI in the main urban area of Jinan has distinct seasonal differences in time. The order from high to low is winter, spring, autumn and summer. Spatially, the AQI in the main urban area of Jinan presents a distribution pattern of high in spring and winter, low in southeast and north, low in summer, low in south and high in north in autumn. On the monthly scale, AQI in the main urban area of Jinan city presents typical “U” distribution characteristics, with the highest value in January and December and the lowest value in August. The influence of each factor interaction is far greater than that of single factor. Among them, the interaction of land use type annual average precipitation has the greatest influence on AQI in the main urban area of Jinan. The study shows that AQI in the main urban area of Jinan is most affected by land use types and annual average precipitation.

Key words: air quality index; AQI; spatial and temporal distribution; geographic detector; influence mechanism

随着我国经济的快速发展和工业化水平的不断提高, 人类生产生活对大气环境造成的污染问题越来越严重^[1]。大气污染不仅会造成重大的经济损失, 而且会对人类的健康产生严重的危害^[2]。空气质量问题引起了国家环境保护部门的高度重视并逐渐走进了国内环境保护学者的视野^[3]。2012 年, 中华人民共和国环境保护部对《环境空气质量标准》

进行了第三次修订^[4], 并发布了《环境空气质量指数(AQI)技术规定》(HJ 633—2012)^[5]。自此, 越来越多的学者通过对空气质量指数(air quality index, AQI)的时空分布特征进行研究来分析我国各城市和地区空气质量的时空分布状况。文献[6]利用山东省 17 个地级市的 AQI 逐日监测数据分析了山东省空气污染的时空分布特征, 得出山东省东部沿海

收稿日期: 2019-09-06; 修回日期: 2020-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871375)

作者简介: 吴益玲(1995—), 女, 硕士生, 主要研究方向为智慧城市设计与规划。E-mail: 2734345058@qq.com

地区空气质量普遍较好、内陆城市污染相对严重等结论;文献[7]分析了华北地区71个主要城市的AQI时空分布特征并分析了其影响因素,得出华北地区污染最严重的区域集中在河南北部、河南南部和山东西部及降水、风和地形与AQI关系密切等结论。

2013年1月国家环保部门开始发布全国74个主要城市的空气质量排名,据统计,济南市长期位于“全国十大污染城市”之列。而目前针对济南市AQI时空分布特征及其影响机制的研究还比较少,并且已有的针对AQI影响因素的分析大多使用相关性分析方法,没有考虑各因素与AQI在空间上的联系^[8-9]。为此,本文利用2015—2018年济南市主城区16个空气质量监测站点的大气污染物浓度逐日监测数据,对济南市主城区AQI的时空分布特征进行研究,并以2015年为典型年,利用地理探测器揭示AQI的环境影响风险因子,以期对济南市主城区的大气污染治理和生态环境保护提供科学的理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

济南市位于山东省中西部,南依泰山、北傍黄河,地处鲁中南低山丘陵与鲁西北冲积平原的交接带上,是山东省的政治、经济、交通和文化中心。济南地处中纬度地带,地势南高北低,受太阳辐射、大气环流和地理环境的影响,属于温带季风气候,四季分明。本文的研究区域为济南市主城区(天桥区、槐荫区、历下区、市中区、历城区)。

1.2 数据来源

1.2.1 污染物浓度数据

本文使用的污染物浓度数据为山东省城市环境空气质量信息发布平台(<http://58.56.98.78:8801/AirDeploy.Web/AirQuality/MapMain.aspx>)上收集的2015年1月1日—2018年12月31日济南市主城区内的16个空气质量自动监测站点的CO、NO₂、SO₂、O₃、PM_{2.5}、PM₁₀等6项常规大气污染物的逐日监测数据(由于数据缺失,2015—2017年均有365d的数据,2018年有341d的数据),而后经逐日监测数据求得月均值,经月均值求得季度均值和年均值。其中,本文四季划分标准为:春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12—2月)。

1.2.2 其他数据

AQI受自然因素和人类活动的影响,结合近几年中国AQI的时空分布及AQI影响因素的相关研

究成果^[10-11],并考虑数据的可得性,本文从自然和社会经济因素两方面选取了土地利用类型、年均降水量、年均气温、海拔高度、坡度、人口、GDP共7个风险因子对济南市主城区AQI的影响机制进行分析。所使用的2015年平均气温、平均降水量、DEM、土地利用分类数据及人口、GDP等数据均来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>),数据的分辨率均为1 km×1 km。其中,坡度数据提取自DEM数据。

1.3 方法

1.3.1 空气质量指数评价法

AQI是一种定量描述空气质量状况的无量纲指数。它首先计算各参评因子(CO、NO₂、SO₂、O₃、PM_{2.5}、PM₁₀)的空气质量分指数(individual air quality index, IAQI),然后以各IAQI的最大值作为AQI的值。其中,首要污染物是指AQI大于50时,IAQI最大的污染物;优良率指AQI的值小于101的天数所占比率。

污染物P的IAQI按式(1)计算

$$IAQI_p = \frac{IAQI_{Hi} - IAQI_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}}(C_p - BP_{Lo}) + IAQI_{Lo} \quad (1)$$

式中:IAQI_p指污染物P的空气质量分指数;C_p是污染物P的质量浓度值;BP_{Hi}是与C_p相近的污染物浓度限值的高位值;BP_{Lo}是与C_p相近的污染物浓度限值的低位值;IAQI_{Hi}是与BP_{Hi}对应的空气质量分指数;IAQI_{Lo}是与BP_{Lo}对应的空气质量分指数。

分别计算n个参评因子的IAQI之后,AQI为

$$AQI = \max\{IAQI_1, IAQI_2, IAQI_3, \dots, IAQI_n\} \quad (2)$$

计算出AQI之后,按照表1进行空气质量的分级评价。

表1 AQI分级

AQI	AQI 级别	AQI 类别
0~50	一级	优
51~100	二级	良
101~150	三级	轻度污染
151~200	四级	中度污染
201~300	五级	重度污染
>300	六级	严重污染

1.3.2 克里金插值法

克里金插值法是以变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法^[12]。与其他空间插值方法相比,克里金插值法考虑了观测点和被估计点的位置关系,同时也考虑到了各个观测点之间的位置关系。文献

[13]分别采用反距离加权法、规则样条函数法和普通克里金插值法对珠三角区域 62 个监测站点的空气污染物浓度数据进行插值处理,并结合交叉验证法从各个方面比较分析 3 种插值方法的插值精度,最终得出了克里金插值法能够得到整体最优的插值精度的结论。为此,本文采用的空间插值方法为克里金插值法。

1.3.3 地理探测器

地理探测器(<http://www.geodetector.org/>)是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法。其核心思想是基于假设:如果某个自变量对某个因变量有重要影响,那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性^[14]。主要包括风险探测器、因子探测器、生态探测器、交互探测器 4 个部分^[15],其中,本文使用因子探测器和交互探测器揭示自然因子和社会经济因子对 AQI 的解释力及各因子之间的交互作用。

本文首先将各因子数据均重分类为 6 类,而后将研究区划分为 1 km×1 km 的格网,分别提取各网格中心点的 2015 年 AQI 年均值及各风险因子的数值,最后将每个格网点的变量数值输入地理探测器软件,分析各风险因子对济南市主城区 AQI 的解释力及各因子之间的交互作用。

2 结果与讨论

2.1 济南市主城区 AQI 年际时空分布特征

2.1.1 时间演变特征

2015—2018 年济南市主城区 AQI 时间变化见表 2。2015—2018 年,济南市主城区年平均 AQI 呈逐年降低趋势,至 2018 年,年平均 AQI 已低于 AQI 三级标准线,但离 AQI 二级标准线相差还比较大;不同级别 AQI 出现的天数方面,2015 年 AQI 主要以三级为主、二级次之、重污染(AQI>200)天数为 34 d,2016—2018 年则以二级为主、三级次之、重污染天数逐年减少,但 2015—2018 年 AQI 为一级的天数均在 10 d 以下;年平均优良率方面,2015—2018 年平均优良率呈逐年升高趋势,但 2018 年也仅为 0.6,还比较低,并且这四年重污染天数均在 10 d 以上。综上所述,2015—2018 年济南市主城区空气质量状况逐年好转,这主要是与济南市自 2014 年 11 月启动实施大气污染防治“十大行动”以来,不断调整能源结构、优化工业布局、控制污染物的排放等有关,可以看出济南市采取的一系列大气污染治理措施具有一定的成效,但是到 2018 年,主城区年平均 AQI 仍比较高,仍有 12 d 为重污染状况,甚至还有 1 d 的空气质量状况为严重污染,因此仍需加强对济南市主城区大气污染治理的力度。

表 2 2015—2018 年济南市主城区 AQI 年际演变特征

年份	平均 AQI	不同级别 AQI 出现天数						优良率	重污染天数
		一级	二级	三级	四级	五级	六级		
2015 年	129	7	116	155	53	25	9	0.34	34
2016 年	117	5	152	144	42	20	3	0.43	23
2017 年	110	9	174	138	27	11	6	0.5	17
2018 年	100	5	201	106	17	11	1	0.6	12

2.1.2 空间分布特征

空间上,由图 1 可知,2015 年,济南市主城区 AQI 低值区出现在东南山区且分布面积比较小、高值区为主城区北部低海拔平原地区,整个济南市主城区 AQI 呈现出东南低北部高的分布态势,并且整个济南市主城区有绝大部分地区 AQI 值均高于三级标准线;2016 年,AQI 低值区仍分布在东南山区,但分布面积有所扩大,而高值区则从北部转为西部,呈现出东南低西部高的分布态势;2017 年,AQI 低值区从东南山区扩展至整个南部地区,而 AQI 高值区则从西部转回北部,呈现出南低北高的分布态势,

但是 AQI 高值区分布面积明显减少且整个济南市主城区有一半地区的 AQI 值已低于三级标准线;2018 年,济南市主城区已无 AQI 高值区,但西北地区 AQI 值仍高于三级标准线,整个济南市主城区 AQI 呈现出从东南到西北逐渐升高的分布态势。综上,济南市主城区 AQI 呈现出东南低西北高的分布态势,这主要是由于济南市主城区东南部为高海拔山区,植被覆盖面积比较广、人口密度比较小,且高海拔地区利于大气污染物的扩散;而西部和西北部则为低海拔平原地带,人口比较集中,且海拔较低不利于污染物的扩散造成。

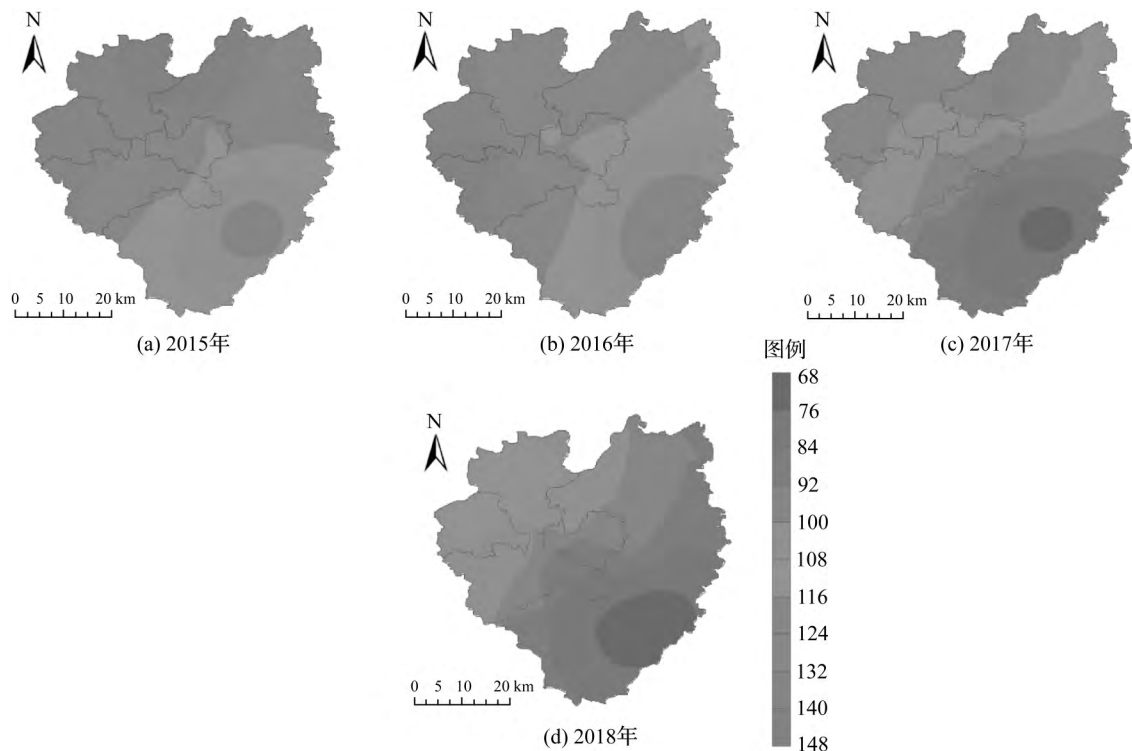


图1 2015—2018年济南市主城区AQI空间分布

2.2 济南市主城区AQI季度时空分布特征

2.2.1 时间演变特征

由表3可知,济南市主城区AQI季节性差异显著,AQI值从高到低依次为:冬季、春季、秋季、夏季;冬季AQI值最高、重污染天数最多,夏季AQI值最低、无重污染出现。2015—2018年,济南市主城区各季度平均AQI均呈降低趋势,且冬季降幅最大、春秋次之、夏季降幅最小;可以看出,济南市自启动“十大行动”以来实施的篷布覆盖、路面硬化、定期洒水、土方湿法作业等防尘降尘措施,以及关停淘汰燃煤小锅炉、清洁取暖“双替代”、燃煤锅炉超低排放等调整产业结构措施具有显著的成效。

表3 2015—2018年济南市主城区AQI季度演变特征

年份	AQI				重污染天数			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
2015年	122	109	126	160	2	0	11	21
2016年	122	92	109	146	5	0	2	16
2017年	113	92	92	140	4	0	0	12
2018年	97	93	97	112	2	0	4	6

2.2.2 空间分布特征

由图2可知,春季,济南市主城区AQI呈现出东南低北部高的分布态势;夏季,AQI低值区范围扩大,整个济南市主城区绝大部分的AQI值均在AQI

三级标准线以下;秋季,AQI低值区范围缩小,呈南低北高的分布态势;冬季,AQI低值区范围明显缩小,整个济南市主城区西北部均属于AQI高值区范围,AQI呈现出东南低北部高的分布态势;造成以上现象的原因主要有:济南市夏季盛行东南风,从东南高海拔地区吹向西北部低海拔平原的气流加速了主城区污染物的扩散,同时,夏季的集中降水很好地抑制了道路和施工扬尘;冬季,风向转为西北风,从西北方向吹向东南山区的气流受山体的阻碍在西北部沉积,使得从济南市西北部带来的污染物及济南市主城区本地区产生的污染物在西北部集聚,同时,冬季稀少的降水量使得空气中出现了大量的扬尘。

2.3 济南市主城区AQI月度时空分布特征

月份上,济南市主城区AQI呈现出典型的“U”形变化趋势(如图3所示)。其中,最低值出现在8月,最高值出现在12月和1月;从多年月平均AQI来看,1—8月,济南市主城区AQI逐渐降低,至8月降至最低值,而后从8月开始逐渐升高,至12月升至最高值;这主要是由于降水量集中在8月使得扬尘得到很好的抑制,而冬季供暖燃烧大量的煤炭而排放过量的污染物并且冬季几乎为零的降水量使得颗粒物在空气中集聚等导致的。此外,2015—2018年12月的月均AQI呈逐渐降低趋势。

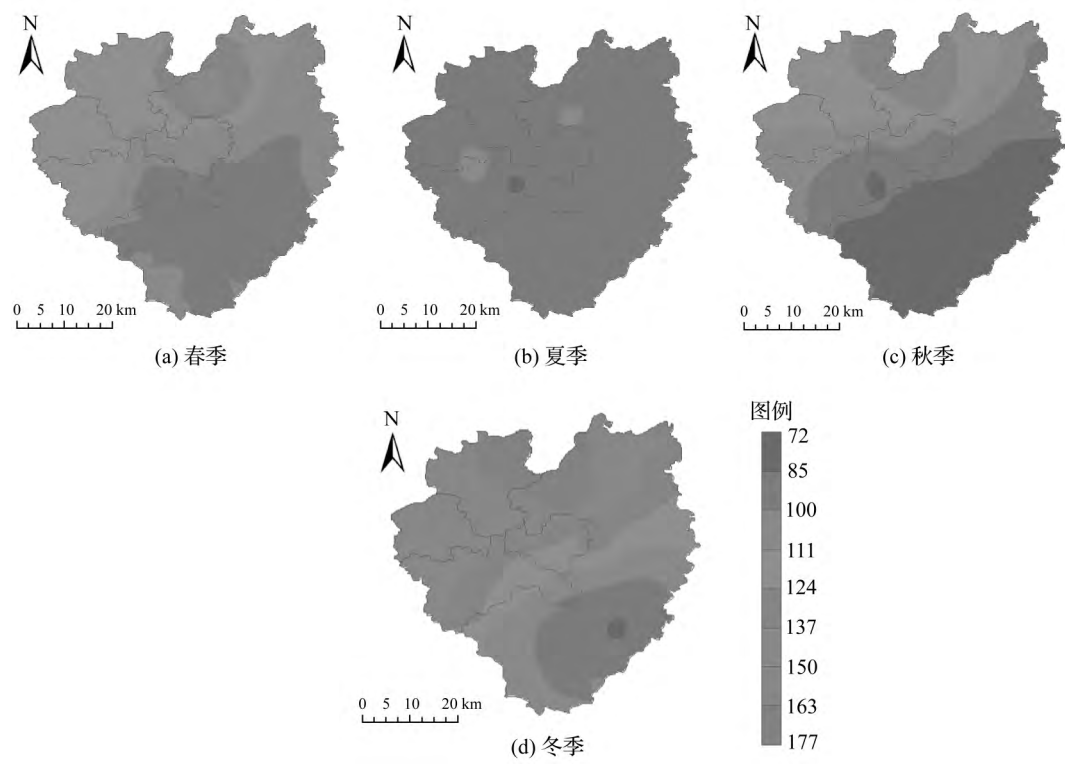


图 2 2015—2018 年济南市主城区 AQI 季度分布

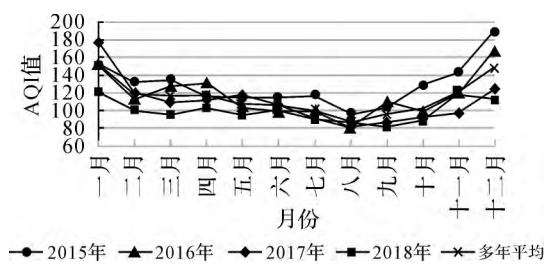


图 3 2015—2018 年济南市主城区 AQI 逐月演变特征

2.4 济南市主城区 AQI 影响机制分析

2.4.1 风险因子探测

衡量风险因子对 AQI 分布的影响强度通过因子探测器实现,其中统计量 q 值表示自变量 X 对因

变量 Y 空间分异的影响力, q 值越大,影响力越大; p 值表示因子解释力, p 值越小,解释力越大^[16]。因子探测结果见表 4。这 7 个风险因子对济南市主城区 AQI 的影响力介于 0.005 3~0.688,按 q 值从大到小排序依次为:年均降水量、年均气温、海拔高度、坡度、土地利用类型、人口、GDP,其中年均降水量、年均气温、海拔高度、坡度及土地利用类型的 p 值均为 0,人口和 GDP 的 p 值均为 1。表明年均降水量、年均气温及海拔高度对济南市主城区 AQI 的影响力较大,坡度和土地利用类型的影响力一般,人口和 GDP 的影响力较小,其中年均降水量(影响力为 0.688,下同)的影响力最大。

表 4 因子探测器结果

值	土地利用类型	人口	年均气温	年均降水量	GDP	海拔高度	坡度
q	0.282 6	0.036 6	0.616 3	0.688 0	0.005 3	0.568 3	0.310 6
p	0.000	1.000 0	0.000	0.000	1.000 0	0.000	0.000

2.4.2 各因子交互作用

AQI 值不仅受单因子的影响,还可能受多因子交互作用的影响,衡量各因子的交互作用机制是通过交互探测器实现的。各因子交互探测结果见表 5。各因子交互作用下对济南市主城区 AQI 的影响力介于 0.047 9~0.767 0,远高于单因子作用结果,

除土地利用类型 $\cap$ 人口、土地利用类型 $\cap$ GDP、土地利用类型 $\cap$ 坡度、人口 $\cap$ GDP、人口 $\cap$ 坡度、GDP $\cap$ 坡度外,其余交互作用对济南市主城区 AQI 的影响力均高于 0.6,其中土地利用类型 $\cap$ 年均降水量(0.767)交互作用的影响力最大,年均降水量 $\cap$ 海拔高度(0.756 9)的交互作用次之。

表 5 交互探测器结果

类别	土地利用类型	人口	年均气温	年均降水量	GDP	海拔高度	坡度
土地利用类型	0.282 6	—	—	—	—	—	—
人口	0.314 7 [#]	0.036 6	—	—	—	—	—
年均气温	0.691 9 [#]	0.656 8 [*]	0.616 3	—	—	—	—
年均降水量	0.767 0 [#]	0.723 9 [#]	0.692 9 [#]	0.688 0	—	—	—
GDP	0.307 3 [*]	0.047 9 [*]	0.658 3 [*]	0.724 0 [*]	0.005 3	—	—
海拔高度	0.648 6 [#]	0.606 4 [*]	0.692 5 [#]	0.756 9 [#]	0.608 9 [*]	0.568 3	—
坡度	0.469 5 [#]	0.343 3 [#]	0.662 7 [#]	0.732 5 [#]	0.334 6 [*]	0.603 9 [#]	0.310 6

注: 数字后带#表示双因子增强, 带* 表示非线性增强。

3 结论与讨论

通过对 2015—2018 年济南市主城区 AQI 的时空分布特征及影响机制进行分析, 得出以下结论:

(1) 年际尺度上, 济南市主城区 AQI 呈逐年降低趋势; 空间上, 济南市主城区 AQI ≤ 100 的范围呈逐年扩大趋势, 并且在空间分布上大致呈现出东南低西北高的分布态势。

(2) 季节尺度上, 济南市主城区 AQI 季节性差异显著, AQI 从高到低依次为: 冬季、春季、秋季、夏季; 空间上, 济南市主城区 AQI 大致呈现出春季和冬季东南低北部高、夏季均低、秋季南低北高的分布态势。

(3) 月尺度上, 济南市主城区 AQI 呈现出典型的“U”形变化趋势, 最高值出现在 1 月和 12 月、最低值出现在 8 月。

(4) 在所选的济南市主城区 AQI 的 7 个风险因子中, 年均降水量(0.688)的单因子影响力最大, 各因子交互作用的影响力远大于单因子的影响力, 其中土地利用类型∩年均降水量(0.767)交互作用的影响力最大。

本文研究了济南市主城区 2015—2018 年 AQI 的时空分布特征, 并以 2015 年为典型年研究了济南市主城区 AQI 的影响机制, 能够为济南市主城区的大气污染治理提供科学依据。但由于山东省城市环境空气质量信息发布平台只公布了国控点和省控点的历史数据, 因此本文依据相关监测点的位置最终选择研究区域为主城区。下一步将会把研究区域扩大至整个济南市, 并增加 AQI 的风险因子。

参考文献:

- [1] 陈广仁. 科学保护环境系统治理污染[J]. 科技导报, 2014, 32(33): 2.
- [2] HUANG D, XU J, ZHANG S. Valuing the health risks of particulate air pollution in the Pearl River Delta, China[J]. Environmental Science & Policy, 2012, 15(1): 38-47.
- [3] DAI J N, WANG X M, DAI W et al. The impact of inhomogeneous urban canopy parameters on meteorological conditions and implication for air quality in the Pearl River Delta region[J]. Urban Climate, 2019, 29: 100494.
- [4] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量标准: GB 3095—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [5] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量指数(AQI)技术规定: HJ 633—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [6] 许海超, 李子君, 姜爱霞, 等. 山东省空气质量指数的时空分布特征[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2017, 31(2): 168-175.
- [7] 许文轩, 田永中, 肖悦, 等. 华北地区空气质量空间分布特征及成因研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 3085-3096.
- [8] 邓艳君, 赵卓勋, 李玲, 等. 2014—2016 年荆州城区空气质量与气象要素的关系分析[J]. 气象科技进展, 2018, 8(5): 67-71.
- [9] 陶天慧. 长江三角洲城市群空气质量时空格局及影响因素分析[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018.
- [10] 王晓玲, 岳岩裕, 陈赛男, 等. 湖北三种地形下 AQI 特征及其与气象因子的关系[J]. 气象科技, 2018, 46(5): 1012-1019.
- [11] 潘燕芳, 戴雅文, 李壮, 等. 郑州市空气质量变化及影响因素研究[J]. 环境与发展, 2018, 30(9): 95-101.
- [12] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [13] 丁卉, 余志, 徐伟嘉, 等. 3 种区域空气质量空间插值方法对比研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(3): 309-315.
- [14] WANG J F, HU Y. Environmental health risk detection with GeogDetector[J]. Environmental Modelling and Software, 2012, 33: 114-115.
- [15] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [16] 朱琪, 周旺明, 贾翔, 等. 长白山自然保护区及其周边地区生态脆弱性评估[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1633-1641.

(责任编辑: 杨瑞芳)