

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.04.004

中国城市空气质量的时空演化特征及影响因素

李喜妍¹, 蔺雪芹¹, 王 岱²

(1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 为研究中国城市空气质量的时空演化特征及影响因素, 本文采用 2015—2018 年中国城市空气质量 AQI 指数和自然、社会、经济数据, 利用 ArcGIS 空间分析和空间计量模型, 从年份、月度、季节以及天数等尺度分析中国城市空气质量的时空演化特征, 并从整体及区域的角度解析影响城市空气质量的自然、社会经济因素。主要得出如下结论: ① 2005—2018 年中国城市空气质量状况整体得到改善。空气质量月际变化呈“U”型, 季节特征总体符合“冬季高, 夏季低, 春季秋季居中”, 空气质量在秋冬季改善显著, 春夏恶化明显。四年间空气质量重度污染天数减少, 达标天数增加。② 空气质量指数空间分布格局为“中东高, 东南低; 西北高, 西南低”; 城市空气质量空间集聚现象明显, 相邻城市的相互影响作用显著。③ 从全国来看, 人口密度、用电水平和科技投入以及民用汽车保有量与中国城市 AQI 指数呈显著正相关, 经济发展水平、园林绿化、平均气温与 AQI 指数呈显著负相关。④ 在区域层面来看, 驱动要素作用方向和强度存在规律性和特异性变化特征。

关键词: 空气质量; 空气污染; 经济活动; 影响因素

中图分类号: K901

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)04-0487-13

Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of urban air quality in China

LI Xiyan¹, LIN Xueqin¹, WANG Dai²

(1. College of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: To study the spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of China's urban air quality, we use the AQI index and natural, social and economic data of China's urban air quality from 2015 to 2018, and use the ArcGIS spatial analysis and spatial econometric model to analyze the spatial-temporal evolution characteristics of China's urban air quality at the scale of year, month, season and day. The natural, social and economic factors affecting urban air quality are analyzed from the overall and regional perspectives. The main conclusions are as follows: ① From 2005 to 2018, air quality in Chinese cities has been improved on the whole, and some areas have been effectively controlled. The monthly variation of air quality is U-shaped, and the seasonal characteristics generally conform to “high in winter, low in summer, medium in spring and autumn.” In recent years, air quality has improved in autumn and winter while deteriorated significantly in spring and summer. Over the four years, the number of days with air quality standards increase, with the number of days with severe pollution decreasing. ② The air quality index's spatial distribution pattern is “high in the east, central and northwest, and low in the southeast and southwest.” The spatial aggregation of urban air quality is apparent, and the inter-

收稿日期: 2022-03-24; 网络出版日期: 2022-10-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20221012.1148.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42071148)

第一作者: 李喜妍, 女, 硕士生, 研究方向为区域可持续发展。E-mail: xiyan_li0326@163.com

通信作者: 蔺雪芹, 女, 博士, 副教授, 研究方向为区域可持续发展。E-mail: linxueqin@cnu.edu.cn

action of neighboring cities is significant. ③From a national perspective, population density, electricity consumption level, investment in science and technology, and civil vehicle ownership are significantly positively correlated with Chinese cities' AQI index. Economic development level, landscaping, and average temperature are significantly negatively associated with the AQI index. ④At the regional level, the inverted U-shaped law of economic development and air quality change is not obvious; the relationship between urbanization level and AQI index is inverted U-shaped. The role of scientific and technological progress in promoting the improvement of air quality has not really taken shape. The impact of the increase of electricity consumption level, population density and the number of civil cars on air quality in each region shows a significant deterioration effect, with it expanding with the increase of the numerical value. Green space can improve the regional AQI index.

Key words: air quality; air pollution; economic activities; influence factor

改革开放以来,我国经济发展迅速,工业化与城市化水平显著提高,但能源消耗增加,由此带来的环境污染问题日益严重。2013年中国遭遇有观测纪录以来最严重的雾霾天气^[1],给社会经济和公众健康造成了直接的损失^[2]。特别是在人口高度集中的城市,人类活动频繁,空气污染状况更为严重,城市空气污染治理已成为政府以及社会广泛关注的热点话题。为应对中国日益严重的空气污染状况,各部门出台多项措施加大力度整治空气污染。

一般认为,城市空气质量状况与人类活动及自然环境密切相关,学术界对空气质量的时空演化及影响因素的识别给予了一定程度的关注,然而对于其研究结论尚存在分歧。已有研究将关注视角从基于时间序列的分析^[2]转为关注空间特征^[3]。研究尺度则较多选取单一城市^[4]、省域^[5-6]、区域^[7-10]、城市群^[11]或全国整体^[12-14]层面,鲜见于对全国各城市的研究探讨。

从时空演化特征上,学者多以1~2年为研究区间,分析空气质量的变化特征,中国空气质量整体表现出的“秋冬高、春夏低”的季节特征是学界得出的较一致结论^[15]。在空间上存在明显的空间集聚和分异规律,“东重西轻、北重南轻”是中国空气质量的总体分布格局^[11,16]。然而伴随着近年来政府持续增强的管控力度与城市居民不断提升的环保意识,空气质量状况有所改善,关于空气污染的讨论热度下降,空气污染治理效果未知,中国各城市总体空气质量的空间分布格局有待进一步细化。

有关空气质量的影响因素和作用机制,部分学者关注污染物及污染物之间的复合影响和其时空演化评价^[17-20],讨论各污染物自身变化从而带来的协同变化效应,例如王占山等^[21]认为前体物和大气氧化性对PM_{2.5}浓度有显著影响,赵艳艳等^[22]认为多

种空气污染物浓度之间存在显著的相互影响关系,城市空气复合污染特征明显。部分学者关注经济与社会因素对空气质量的作用方向及强度,更侧重讨论单一评价指标的影响,其中人口^[23]、经济发展^[24]、城市化^[25-27]、能源消耗^[28]及技术水平^[16]是空气质量的主要评价指标,一般认为人口的过度集聚会造成城市空气质量恶化。然而也有学者发现在均衡的城市规模下,分工合作的合理化会导致地区空气质量发生优化^[29]。城市化和经济发展水平,对于不同发展状况和阶段城市的空气质量往往呈现出不同的作用方向,技术进步往往会带来生产方式的优化并有利于地区空气质量改善。也有学者认为技术进步会造成生产规模持续扩大从而加剧空气污染程度^[11]。除此之外,外商直接投资^[30]、产业结构^[31]、土地利用类型^[32]、城市形态^[33]、煤炭和生物质能源消费^[34]、政策^[35]、秸秆焚烧^[36]也是许多学者考虑的重要评价指标。在自然要素上,部分学者探讨了气象因素^[37-38]、土地覆盖^[25]、气候变化^[39-40]、海拔高度^[41]等对大气污染物的扩散与集聚的影响,然而自然要素通常不具备人为可控性,因而以优化地区空气质量状况为出发点,仍需选择社会经济要素作为主要的分析评价指标。可见,对于中国城市空气质量的时空演化特征及其影响因素的问题,现有研究并没有在观点上达成一致,主要影响因素的作用方向及强度需要进一步探究深化。

综上所述,本文主要利用中国的城市尺度空气污染、社会经济及自然数据,弥补了目前有关于中国整体空气质量时空演化及影响因素分析在城市尺度分析研究的欠缺。此外对空气污染治理状况进行跟踪,并根据城市散布范围和AQI分布形态划分类别,识别判断整体和区域影响空气质量的影响因素,从而为不同类型地区城市的空气污染治理策略提供

思路及意见。

1 研究区域与数据来源

1.1 数据来源

本文采用 2012 年中国颁布的《环境空气质量标准》(GB3095—2012)中提出的空气质量指数数据 (air quality index, AQI), 获取自生态环境部数据中心, 2013 年开始发布几十个城市, 到 2015 年实时发布全国 329 个地级以上城市的 AQI 每日 24 小时动态数据。由于 2020 年全国和各地方的经济统计年鉴还未更新完全, 因此所采用的社会经济数据包括城市尺度常住人口数量、人均国民生产总值、工业增加值、科学研究与试验发展经费支出 (R&D)、城市

供气总量、全社会用电量、民用汽车保有量数据主要获取自 2016—2019 年《中国城市统计年鉴》, 部分地区城市缺失值依据各城市《统计年鉴》作为补充。各城市降雨量、平均气温及园林绿地面积主要获取自各城市统计年鉴及部分地区《气象公报》, 数据缺失值通过相邻年份或相邻地区加减取平均求得。由于统计年鉴均为上一年的经济数据, 因而与社会经济自然要素数据相匹配的 AQI 指数数据的时间尺度则选取 2015—2018 年。

1.2 研究区域

本文以“十一五”国民经济和社会发展规划划分的八大经济区并根据当前区域协调发展战略提出的各个地区为标准, 划分全国为 10 个区域 (见表 1)

表 1 中国 10 个区域划分及城市数量

Tab. 1 Description of the study area in China

区域	省份	城市数量	区域	省份	城市数量
京津冀地区	北京、天津、河北	13	黄河中游地区	陕西、山西、河南、内蒙古	50
东北地区	辽宁、吉林、黑龙江	36	长江中游地区	湖北、湖南、安徽、江西	52
黄河下游地区	山东	17	西南地区	云南、广西、贵州、四川、重庆	56
长三角地区	上海、江苏、浙江	26	西北地区	甘肃、青海、宁夏、新疆	41
南部沿海地区	福建、广东、海南	31	西藏地区	西藏	7

1.3 空气质量空间效应检验模型

1.3.1 全局自相关模型

空气污染数据在地域空间上具有扩散性, 因而不同城市之间存在相互作用, 即具有空间相关性。为判断空气质量在城市尺度上的整体分布格局及空间关联性, 采用全局自相关的方法。检验模型选择全局 Moran I 指数^[42-44], 计算公式如下:

$$I_G = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中: x_i, x_j 为各城市 AQI 值; W_{ij} 为 i, j 城市的空间权重, 取值为 1 或 0, 分别表示两城市相邻或相离; i 与 j 城市选择应不同; n 为样本城市总数; m 为邻接城市个数。当 I_G 为正值时, 表示研究区域内城市的空气污染呈集聚分布状态, 且数值越接近 1, 集聚越显著。

1.3.2 局域自相关模型

利用全局空间自相关描述空间关联具有局限性, 因为其只能在整体上说明分布状态及关联, 而对内部各区域之间及各属性地区的关系判断缺失, 而局域自相关模型可以度量局部空间单元相互间的相关程度, 其计算公式如下^[42-44]:

$$I_L = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: x_i, x_j 为各城市 AQI 值; W_{ij} 为 i, j 城市的空间权重; n 为样本城市总数; m 为邻接城市个数。局域自相关空间关联模式有四种, 分别为 HH、HL、LH 和 LL。其中 HH(LL) 表示集聚城市观测值属性相同的地区临近, 即高值区与高值区集聚、低值区与低值区集聚; HL(LH) 表示观测值相反地区的局部空间集聚特征。

1.4 基于空间效应的城市空气质量驱动力模型

1.4.1 基本模型的设定

影响城市空气质量的因素主要有自然及社会经济因素。根据已有理论和经济活动规律, 选取人口密度 (X_1)、人均 GDP (X_2)、城市化水平 (X_3)、工业增加值占 GDP 比重 (X_4)、R&D 经费支出占 GDP 的比重 (X_5)、城市供气总量 (X_6)、全社会用电量 (X_7)、民用汽车保有量 (X_8)、第二产业占比 (X_9)、园林绿地面积 (X_{10})、降水量 (X_{11})、平均温度 (X_{12}), 分析探究人口集聚、经济发展、城市化、工业化、技术进步、能源消耗、社会发展、二产占比、城市园林绿地面

积、气象因素等对我国城市空气质量变化的影响。从长时期的地区发展看,经济发展、城市化与生态环境之间存在非线性的倒“U”型曲线关系。本研究根据当前中国的发展阶段,初步假设:在短时期内,人口集聚、经济发展、城市化、工业化、能源消耗、社会发展、环境规划、技术进步与城市空气质量存在线性相关关系。基于此,本文设定研究的基本分析模型为:

$$\ln Y = \alpha_0 + \alpha_1 \ln X_1 + \alpha_2 \ln X_2 + \alpha_3 X_3 + \alpha_4 X_4 + \alpha_5 X_5 + \alpha_6 \ln X_6 + \alpha_7 \ln X_7 + \alpha_8 X_8 + \alpha_9 \ln X_9 + \alpha_{10} \ln X_{10} + \alpha_{11} \ln X_{11} + \alpha_{12} \ln X_{12} + \varepsilon \quad (3)$$

式中: Y 为AQI指数; X_1, \dots, X_{12} 依次分别为人口密度、人均GDP、城市化水平、工业增加值占GDP比重、R&D经费支出占GDP的比重、能源消耗总量、全社会用电量、民用汽车总量、第二产业占比、园林绿地面积、降水量、平均气温; $\alpha = [\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{12}]$ 为待估计的模型参数; ε 为模型的误差随机项,服从正态分布 $N(0, \sigma_2)$ 。对空气质量指数、人口密度(X_1)、人均GDP(X_2)、能源消耗总量(X_6)、民用汽车总量(X_7)、园林绿地面积(X_9)、全社会用电量(X_{10})、降水量(X_{11})和平均温度(X_{12})取自然对数,以减小异方差对模型估计的影响^[43]。

为与前述AQI指数数据选择时间尺度相对应,并方便判断影响因素的四年变化特征,因而选择2015年及2018年两个时间截面,分析此两年影响中国空气质量的影响因素。

1.4.2 空间效应模型的设定

在现实生活中,任何事物及对象均与其周边事物存在联系,因而不同城市空气质量会受到相邻或周围城市的不同程度影响。且当距离越近,联系越紧密强烈。因此空间效应在影响因素判断上不可忽视。常用的空间计量回归模型有两种^[20],分别为空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)。在进行空间模型选择时,需要采用最小二乘法(OLS)的计算结果对模型进行评价,通过比较拉格朗日乘数确定模型选择。空间距离权重计算、OLS回归和空间模型运行均在GeoDa软件中进行^[11]。

2 结果分析

2.1 中国城市空气质量的时空演化特征

2.1.1 城市空气质量指数缓慢下降,空气质量整体得到改善

全国城市AQI指数均值下降明显,由2015年的83.300降低至2018年的77.900,年均减少2.180%,虽然2017年较2016年的AQI指数回升

了1.200%,但总体呈下降趋势,空气质量得到改善。除黄河中游地区,全国各区域的AQI年均值均呈现下降趋势,东南部沿海地区的城市AQI指数在较低水平保持稳定状态,黄河中游和西北地区的城市则在较高值区间波动。京津冀地区、黄河下游地区、黄河中游地区和西北地区处于AQI指数的高值区,东北地区、长三角地区、长江中游地区处于中值区,南部沿海地区、西南地区和青藏高原地区则处于低值区(见图1)。

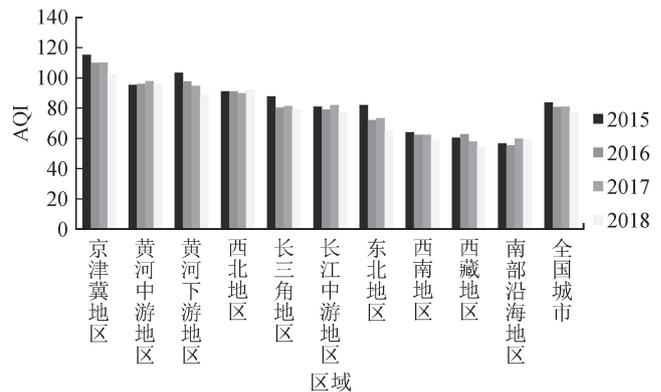


图1 2015—2018年中国各区域空气质量指数AQI年均值变化

Fig. 1 Annual average of AQI in all regions of China from 2015 to 2018

2.1.2 空气质量指数月际变化呈“U”型,季节变化表现为秋冬有所下降,春夏升高

全国城市AQI月际间变化状况呈“U”型,1~9月AQI指数总体下降,9~12月增长速度较快,平均每月增长14.220%,远高于1~9月5.360%的平均变化率。月际差变化的多年比较来看,2015—2018年全国AQI指数除了4、5、6月有小幅度上升外,其他月份均有明显下降,说明近年来空气治理有效,空气质量整体上得到改善。

各年份季节变化趋同,大致符合“冬季高,夏季低,春季秋季居中”的变化规律,7~9月为AQI指数的低值区间,12~1月为AQI指数的高值区间,且1月为全年的最大值。推测形成如此差异的原因可能为冬季供暖所产生的化石燃料污染导致空气污染程度加重,夏季降水与地表植被覆盖率高且太阳辐射带来的空气对流促使污染物扩散。

各区域城市AQI指数变化曲线与全国变化状况大致拟合,月际间变化曲线呈“U”型。长三角地区、西藏地区和南部沿海地区月际间变动幅度较小。京津冀地区AQI指数月际间波动状况最大,年均变异系数为0.281且四年间AQI均值呈下降趋势。黄河中游地区的月际间变动状况仅次于京津冀地区,年均变异系数为0.258。西北地区AQI指数月

际间波动状况也较明显,四年的变异系数均值为 0.257。东北地区、西南地区、黄河下游地区以及长

江中游地区四年的月际 AQI 指数波动居中,四年均值均呈下降趋势(见图 2)。

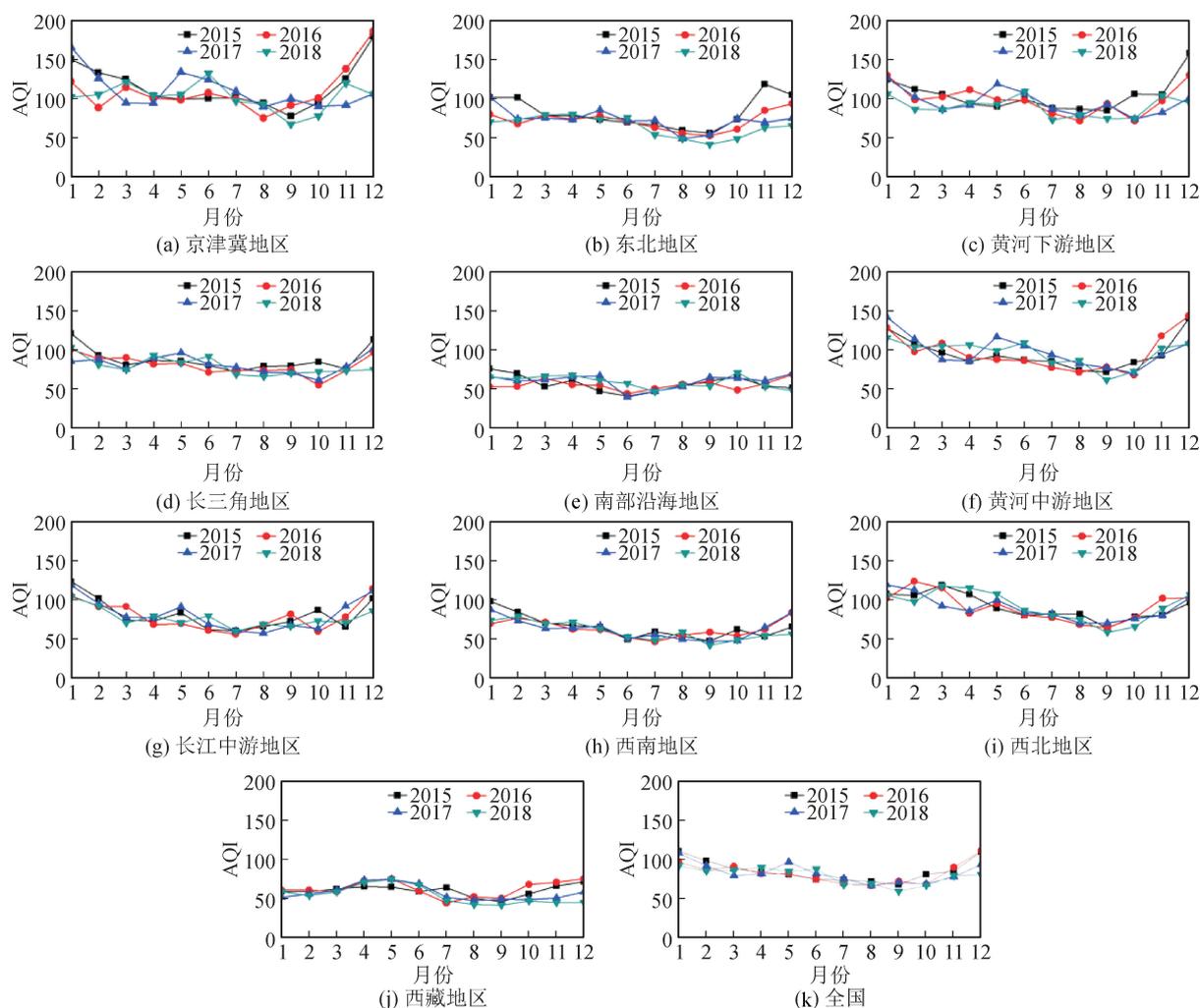


图 2 2015—2018 年中国各区域空气质量指数 AQI 月际变化

Fig. 2 Monthly changes of AQI in various regions of China from 2015 to 2018

各区域 AQI 指数的季节变化也与全国 AQI 指数的季节变化基本一致。其中冬季改善最明显的地区是京津冀地区,变动率为 32.500%,其次为东北地区(31.690%)和黄河下游地区(27.350%),其余地区的变动率在 15%左右分布。春夏季 AQI 指数增幅最大的是南部沿海地区和黄河中游地区,南部沿海地区春季 AQI 指数增大了 19.860%,夏季增加了 11.660%,黄河中游地区对应季节分别增大了 13.090%和 13.900%。

2.1.3 城市空气质量平均达标天数增加,污染天数占比下降

见图 3,2015—2018 年中国城市达标天数(全国城市达到国家二级标准,即 AQI 指数小于 100)占总天数的平均比例分别为 76.450%、79.320%、78.900%和 80.450%,轻度污染分别为 18.510%、16.830%、17.230%、16.380%,严重污染天数分别

占比 1.460%、1.070%、1.120%和 0.640%,达标天数在数量上增加,严重污染天数及轻度污染天数占比显著下滑。从区域层面看,2015 年污染天数占比较高的区域为京津冀地区、黄河下游地区和黄河中游地区,分别为 55.100%、43.800%和 31.680%,2018 年污染天数占比较高的区域为京津冀地区、黄河中游地区和西北地区,占比分别为 45.660%、37.250%和 32.770%。2015 年达标天数占比高的区域为西藏地区、南部沿海地区、西南地区以及东北地区,占比分别为 99.720%、97.520%、92.560%和 81.810%,2018 年达标天数占比较高的区域同样为西藏地区、西南地区、南部沿海地区和东北地区,占比分别为 100%、98.880%、97.760%和 92.200%。2015—2018 年,污染天数增加的地区为黄河中游地区和西北地区,其余地区污染天数均在逐年少。

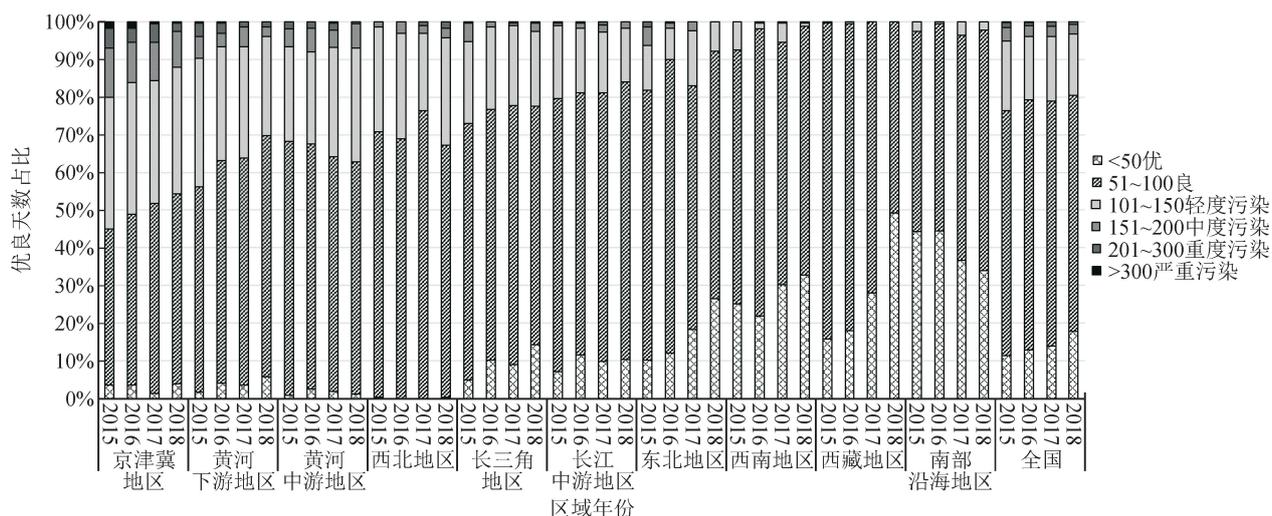


图3 2015—2018 中国各区域城市优良天数占比

Fig. 3 Proportion of good days in cities in various regions of China from 2015 to 2018

2.1.4 城市空气质量指数呈现“东部、中部、西北部高,东南、西南低”的空间分布特征

利用自然间断点分级,将2015年和2018年中国329个城市的年均AQI指数分为六个等级。中国城市AQI指数空间分布格局总体表现为“东部、中部、西北部高,东南、西南低”。中国东部、中部以及西北地区的部分城市是AQI的高值区,2015年AQI年均值位于高值区间的城市主要分布在中部河南省的郑州、新乡、焦作、平顶山、安阳和邯郸,东部山东省的济南、菏泽、济宁、临沂、枣庄、德州、聊城、东营和淄博,京津冀地区的北京、石家庄、廊坊、唐山、保定、邢台、衡水和邯郸以及西北新疆喀什、和田、阿图什和阿克苏地区。2018年年均值位于较高值区间的城市仅分布在新疆西北部的城市喀什、和田、阿图什和阿克苏地区,该地区由于荒漠化,空气污染多受自然环境影响。AQI指数位于较高值区间的城市两年间有差异。2015年AQI较高值区间城市分布在东北地区如沈阳市、长春市、哈尔滨市等以及中部长江中游地区的湖北省部分城市和长三角地区江苏省境内部分城市AQI指数也较高。2018年在较高值区间的城市分布在中国中部、东部,例如黄河中游地区的河南省大部分城市,山西省部分城市如太原、临汾、阳泉和运城市,陕西省的西安、咸阳和渭南市,东部的京津冀地区城市以及山东省内大部分城市(胶东半岛除外)。以上涉及到的AQI高值和较高值区多为中国人口和经济活动密集区域,另山西省、东三省和京津冀的河北省内部分城市是以煤炭、化工、钢铁等重工业作为产业支柱,工业污染排

放推动了区域空气质量指数升高。南部沿海和西南地区的城市AQI值较低,从产业结构上,这些区域产业多以服务业、旅游业、小商品产业以及互联网等高新技术产业的三次产业为主。从自然条件上,中国南方地区空气湿润、海岸线长、植被覆盖率高,更利于空气污染扩散等。以上种种原因都可能是造成AQI指数地域分异的原因。

2.1.5 城市空气质量指数空间集聚性不断加强

2015年、2018年329个城市AQI指数的Moran指数分别为0.6929和0.7167,通过了0.05水平的显著性检验,可见中国各城市AQI指数呈显著正相关,说明中国AQI指数在整体空间上具有集聚特征。根据全国城市AQI指数局域空间自相关结果,2015年京津冀地区城市(石家庄市和廊坊市除外)、山东省(胶东半岛城市除外)、河南省、江苏省北部连云港市和徐州市等以及西北地区新疆省部分城市为AQI指数“高-高”集聚区域,云南省、西藏自治区以及西南地区部分少数民族自治区、海南省为AQI指数“低-低”集聚区域,“高-低”集聚分布在西藏阿里地区和河北省石家庄市。2018年空间分布总体格局与15年相似,甘肃省酒泉市、内蒙古阿拉善盟和乌海市为新增AQI高值集聚区,西南低值集聚区减少,内蒙古的呼伦贝尔市为新增低值集聚区。总体来看,中国城市AQI指数的空间集聚现象明显,说明相邻城市空气质量的相互影响作用较为显著。因此在进行大气治理时,尤其是在京津冀地区、黄河中游地区、黄河下游地区以及长江中游地区等区域,应加强城市间的联防联控,注重空气污染的整

体防治。

2.1.6 基于城市散布范围和分布形态的城市空气污染类型变化

利用 2015 和 2018 年中国 329 个城市的 AQI 指数均值,绘制全国十个区域 AQI 指数的 BOX 分布图(见图 4),按照 AQI 指数高于或低于区域平均值城市个数占比,将区域城市空气质量类型划分为 6 个类型,分别为高值峰度上偏型(见图类型 I)、高值峰度下偏型(见图类型 II)、中值峰度上偏型(见图类型 III)、中值峰度下偏型(见图类型 IV)、中值均衡型(见图类型 V)、低值均衡型(见图类型 VI)。

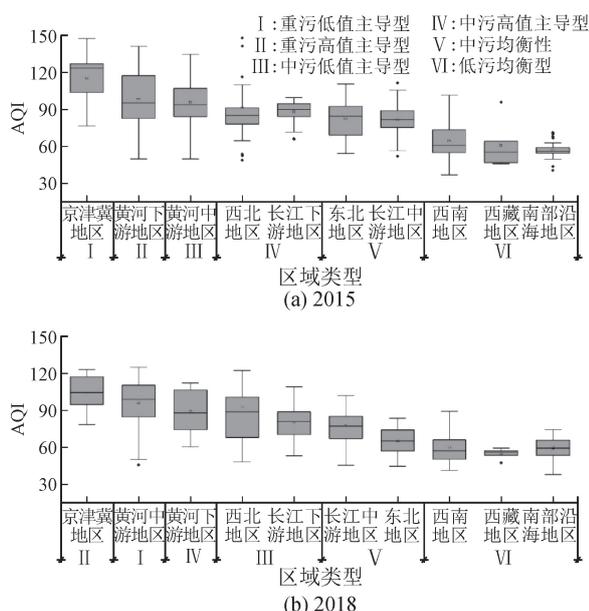


图 4 2015、2018 年全国各区域城市 AQI 分布 BOX 图
Fig. 4 BOX map AQI distribution of cities in various regions of China in 2015 and 2018

第一类为高值峰度上偏型,为京津冀地区。该区域整体空气污染最严重,区域内城市 AQI 高值数量低于低值数量。这类地区表现为大气污染高值城市导致的区域内污染加重,空气污染扩散作用显著。针对这类地区,不仅要加强区域联防联控,还要推进重点城市大气污染防治工作。第二类为高值峰度下偏型,为黄河下游地区,该类地区整体大气污染严重,且区域内 AQI 低值城市数量高于高值城市数量,说明区域空气污染一体化态势明显,这类地区如仅采取重点城市监控策略收效甚微,必须加强各行政区间合作,建立跨行政区的空气污染联防联控机制。第三类为中值峰度上偏型,为黄河中游地区,这类地区城市防控应采取与高值峰度上偏地区相仿策略,并进行定期监控防止恶化。第四类为中值峰

度下偏型,为西北地区和长三角地区。第五类为中值均衡型,包括东北地区和长江中游地区,这类地区城市 AQI 指数均值较高,高低值城市个数基本持平,呈均衡分布态势。这两类地区整体的空气质量处于临界状态,污染防治应根据城市 AQI 指数的分布形态,处理好整体推进和重点突破的关系,重点污染城市整治和污染扩散预警并重,及时控制区域空气质量的进一步恶化。第六类是低值均衡型,包括南部沿海、西南地区以及西藏地区,这类地区整体和区域内部城市 AQI 指数均较低,大气污染程度较低,大气治理应以坚持“预防为主,防治结合”的原则,推动区域大气环境质量的保持和持续改善。

在各个区域 AQI 均值均有所下降的基础上,2018 年各区域城市空气污染类型仍为 6 种,但不同区域所属类型有所变化。京津冀地区变为高值峰度下偏型,黄河中游地区变为高值峰度上偏型,黄河下游地区变为中值峰度下偏型,长三角和西北地区类型变为中值峰度上偏型,东北地区、长江中游地区类型变化为中值均衡型,南部沿海地区、西南地区以及西藏地区类型未发生改变。

2.2 中国城市空气质量空间演化的影响因素

2.2.1 城市空气质量的影响因素解析

根据式(1),分析 2015 和 2018 年的中国城市空气质量的影响因素。排除数据的多重共线性问题可能性后,比较 OLS 模型结果,由于模型结果的拉格朗日乘数 LM(error)比 LM(lag)在统计上更显著,且稳健的 RLM(error)比 RLM(lag)更显著,故选择空间误差模型进行分析估计。OLS 估计中 2015 年和 2018 年 R^2 分别为 0.605 和 0.558,空间误差模型估计中, R^2 分别为 0.991 和 0.985,可见考虑空间相关性显著地提高了模型的拟合优度。

从表 2 可以看出,2015 年、2018 年中国城市 AQI 指数中,呈显著正相关的指数由大到小依次为人均 GDP、人口密度、民用汽车保有量和全社会用电量。人均 GDP 对 AQI 指数正向影响最明显,即经济发展使中国城市空气污染加剧,这与一些学者的研究结果相左^[21]。2015 年中国人均 GDP 为 49 228 元,2018 年中国人均 GDP 为 64 520 元,根据环境 Kuznets 理论,二者关系尚处于倒 U 型曲线的左侧,因此经济增长与空气污染之间呈现协同增长效应。人口密度对中国城市 AQI 指数的正向影响较为突出,这是因为人口稠密地区的人类活动更为频繁,因而排放的大气污染物质更多,会导致城市更为

严重的大气污染。民用汽车拥有量越大,意味着来自于汽车尾气排放的大气污染物越多,2015年中国民用汽车拥有量为16 284万辆,2018年为23 231万辆,相关系数增大表明二者不仅仅表现为简单的线性协同增大,汽车尾气排放的规模扩大,污染物会在现有

条件下产生累积效应。由于中国能耗数据难获取,全社会用电量在一定程度上可反映居民生产生活的能源消耗程度,模型拟合结果显示全社会用电量水平对中国城市AQI指数在两年间均呈现显著的正向影响作用,说明用电量高的城市,空气污染水平也较高。

表2 2015—2018年中国城市空气质量的社会经济影响因素回归解析
Tab. 2 Socio-economic factors affecting urban air quality in China from 2015 to 2018

参 数	2015				2018			
	OLS		SEM		OLS		SEM	
	系数值	T 值	系数值	Z 值	系数值	T 值	系数值	Z 值
a_0		13.137		-0.532		12.562		0.139
a_1 人口密度	0.224***	3.413	0.036**	2.031	0.319***	5.481	0.035***	2.261
a_2 人均GDP	-0.022	-0.245	0.437***	39.184	-0.229**	-2.976	0.442***	42.807
a_3 城市化水平	-0.093	-1.233	-0.546***	-7.075	0.003	0.036	-0.770***	-7.575
a_4 工业增加值占比	0.026	0.462	0.013	0.210	0.081	1.506	-0.070	-1.179
a_5 R&D经费占比	-0.022	-3.610	-5.011***	-3.600	-0.067	-1.257	-2.246	-1.502
a_6 能源消耗	0.288***	3.630	0.010	1.476	0.256***	3.148	-0.004	-0.715
a_7 全社会用电量	-0.156	-1.512	0.006*	1.699	0.259**	2.717	0.011**	2.859
a_8 民用汽车总量	0.301***	3.657	0.010**	2.964	0.072	1.147	0.012**	3.179
a_9 第二产业占比	0.106	1.560	-0.174	-1.116	0.083	-1.296	-0.046	-0.428
a_{10} 园林绿地面积	-0.102	-1.120	-0.022***	-3.596	-0.338***	-3.982	-0.025***	-3.77
a_{11} 降水量	-0.588***	-11.374	-0.011*	-1.772	-0.403***	-4.598	0.004	0.412
a_{12} 平均气温	-0.032	-0.661	-0.003**	-2.523	-0.203**	-2.143	-0.009**	-2.533
λ			0.686***	16.987			0.710***	18.570
R^2	0.605		0.991		0.558		0.985	

注:*代表10%水平下显著,**代表5%水平下显著,***代表1%水平下显著。

2015年、2018年与中国城市AQI指数呈显著负相关的指标由大到小依次为城市化水平、园林绿地面积、平均温度。人口城市化对AQI指数具有负向影响,且2018年人口城市化系数值高于2015年,这是由于城镇人口比重增大会促使消费结构的改变,因而促进经济结构转型,污染密集型企业被取代。园林绿地面积一定程度能够反映城市的绿化水平,园林绿地面积越高代表城市对绿化的投入越多,此时AQI指数越低,即空气污染程度越低。平均温度对AQI指数在2015和2018年同样呈现显著的负向效应,然而平均气温属于自然因素,很难通过人为而产生较大波动,因此我们应找到适应性的策略,例如优化产业和居住区布局,城市通风廊道设计等。R&D经费支出占GDP比重在2015年与城市AQI指数呈显著负相关,从技术进步的阶段性规律看,技

术发展水平越高,单位工业产值的生产效率越高,资源利用效率越高,单位产出污染排放越低^[15],因此技术进步对于空气质量有明显的改善优化作用,到2018年R&D经费支出占比与城市AQI指数相关系数增大,但是变得不显著。

2.2.2 区域空气质量空间影响因素分析

对中国不同区域城市AQI的影响因素进行分析,为避免样本数少带来的模型不稳定,综合考虑污染程度、经济发展阶段以及区位分布等因素,剔除西藏和西北地区,对京津冀地区、长三角地区、南部沿海地区、黄河下游地区、长江中游地区、东北地区、黄河中游地区、西南地区8个地区进行分析。自变量选取在全国层面显著的指标。经检验,空间滞后模型对8个地区均适用,模型结果见表3。

表3 2015年和2018年中国不同地区城市空气质量社会经济影响因素回归分析
 Tab.3 Regression analysis of socio-economic influencing factors of urban air quality in different regions of China in 2015 and 2018

参数	类别	京津冀地区		长江下游地区		南部沿海地区		黄河下游地区	
		2015	2018	2015	2018	2015	2018	2015	2018
X ₁ 人口密度	系数值	1.591***	-0.033	0.021	0.059	0.012	-0.013	-0.288	-0.144
	Z值	5.198	-0.751	0.637	1.063	0.374	-0.289	-1.730	-2.305
X ₂ 人均GDP	系数值	2.228***	-0.356***	0.061	0.090	-0.063	-0.086	-0.076	-0.169***
	Z值	6.527	-5.869	1.235	0.915	-1.058	-1.001	-0.617	-3.374
X ₃ 城市化水平	系数值	-2.625***	-0.050	-0.013	-0.169	0.397	0.396	0.908	0.163
	Z值	-6.652	-0.230	-0.037	-0.253	1.719	1.096	0.846	0.340
X ₅ R&D	系数值	-4.875	-2.840	1.965	1.831	-10.471***	-3.839	-16.135**	2.594
	Z值	-1.136	-1.457	1.277	0.696	-2.916	-0.854	-2.378	0.714
X ₇ 全社会用电量	系数值	-1.637	0.273***	0.023	0.070	0.056**	0.332***	-0.037	0.038
	Z值	-5.793	5.489	0.986	0.716	2.206	4.219	-0.545	1.471
X ₈ 民用汽车总量	系数值	1.153***	0.005	0.020	-0.043	0.021	0.253**	0.036	-0.011
	Z值	6.875	0.117	0.829	-0.454	0.498	2.181	0.728	-0.334
X ₁₀ 园林绿地	系数值	-0.187***	0.009	0.002	-0.003	-0.035	0.026	0.010	0.068
	Z值	-3.238	0.244	0.098	-0.075	-1.007	0.399	0.098	1.409
λ		-9.531***	2.279***	4.210***	5.162**	3.260***	2.728***	3.199**	1.006*
R ²		0.968	0.977	0.868	0.712	0.791	0.795	0.843	0.955

参数	类别	长江中游地区		黄河中游地区		西南地区		东北地区	
		2015	2018	2015	2018	2015	2018	2015	2018
X ₁ 人口密度	系数值	0.027	0.084***	0.126***	0.159***	0.225***	0.151***	0.213***	0.214***
	Z值	0.660	3.894	6.506	4.987	8.301	7.084	3.375	4.863
X ₂ 人均GDP	系数值	0.132*	0.019	0.157***	0.079*	0.050	0.071	0.049	-0.078
	Z值	1.773	0.441	3.716	1.118	0.967	1.516	0.843	-1.890
X ₃ 城市化水平	系数值	0.144	-0.072	-0.628***	-0.460*	-0.136	-0.251*	-0.124	-0.337**
	Z值	0.422	-0.365	-3.877	-1.759	-0.954	-1.730	-0.868	-2.418
X ₅ R&D	系数值	1.581	-1.080	2.455	3.746	0.816	2.998*	9.123*	2.098
	Z值	0.623	-0.644	0.977	0.914	0.495	1.902	1.747	0.465
X ₇ 全社会用电量	系数值	0.021	0.063**	0.026*	0.057*	0.016***	0.066***	0.038	0.141***
	Z值	0.548	2.086	1.656	1.731	2.600	3.010	0.661	2.696
X ₈ 民用汽车总量	系数值	0.041*	-0.014	0.005	0.019	0.011*	0.008*	-0.003	0.010**
	Z值	1.838	-0.694	0.266	0.710	1.864	1.723	-0.385	2.053
X ₁₀ 园林绿地	系数值	-0.105***	-0.038	-0.045**	-0.029	-0.014	-0.068***	-0.082*	-0.094***
	Z值	-2.940	-1.598	-2.239	-0.866	-0.544	-2.761	-1.741	-2.791
λ		5.745***	6.103***	3.429***	3.174***	3.042***	3.510***	3.880***	3.809***
R ²		0.674	0.720	0.832	0.760	0.741	0.797	0.682	0.779

注:*代表10%水平下显著,**代表5%水平下显著,***代表1%水平下显著。

2.2.3 中国城市空气质量演化的驱动规律

见图5,纵坐标为2015年和2018年各地区AQI值,横坐标为各地区按对应自变量指标由小到大排列。

可以看出2015年人口密度越高的地区,其对各地区AQI指数的影响程度越强,尤其是在京津冀地区的相关系数值明显高于其他地区。而2018年人

口密度的越大的地区,其对AQI的影响强度越小。说明伴随时间的变化,高人口密度的城市对空气质量恶化的影响作用减弱,推测由于人口增加引发了产业和技术创新的规模集聚,致使人口密度对AQI指数的贡献作用减小。

2015年人均GDP与AQI指数相关系数均为正值,且伴随着人均GDP增大,相关系数呈“倒U

型”变化趋势。2018 年人均 GDP 与 AQI 指数相关系数多为负值,二者呈正 U 型变化趋势。即伴随时间推进,经济发展对各城市 AQI 指数的作用方向发

生变化,由正向转变为负向,且人均 GDP 高值地区对 AQI 指数的负向影响作用弱化,即合理经济规模的城市更能有效调控空气质量状况。

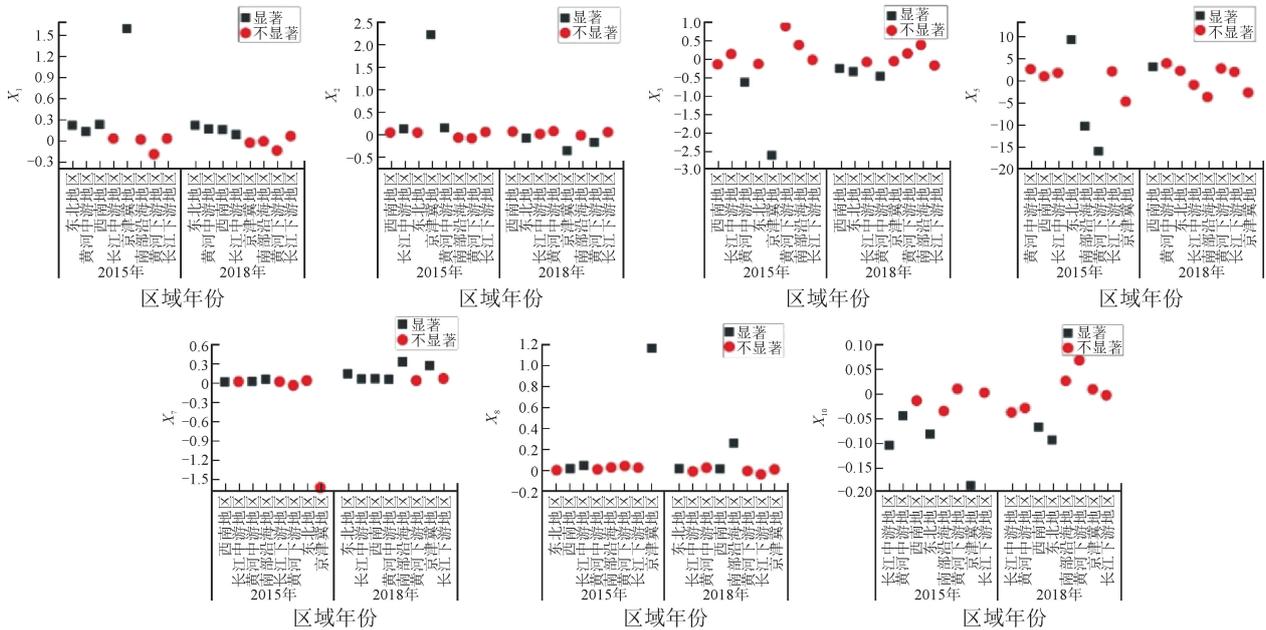


图 5 2015、2018 年不同区域 AQI 的社会经济影响因素系数分布

Fig. 5 Scatter plot of social and economic impact factor coefficient of AQI in different regions in 2015 and 2018

地区城市化水平对 AQI 指数的作用规律多年间较为一致,表现为高城市化水平地区,对 AQI 的负向作用越强,空气质量改善越明显,也即中国既有的城市化发展路径可以达到改善城市空气质量的目的。

R&D 经费投入占 GDP 的比重与 AQI 的关系多年间表现出波动下降的态势,但在多数地区二者关系都不显著,这说明在大部分地区科技进步对空气质量改善的推动作用尚未真正形成。

全社会用电量与 AQI 指数的关系多年表现较为一致,随着全社会用电量的增加,与 AQI 指数的相关系数增大。这说明能源消耗在不同时期对城市空气质量均存在恶化作用,且城市能源消耗量越大,这种影响越为明显。因而对于有条件的城市,想要降低空气污染水平,就要考虑调整能源消耗及利用结构,使其对空气质量的影响作用降到最低。

民用汽车保有量与 AQI 指数相关系数表现为缓慢波动变化且略有增大,多年间这种关系较为一致,即汽车保有量越多的地区,其对空气质量恶化的影响越大。因而要鼓励高汽车保有量城市加大清洁能源汽车的普及力度,淘汰高污排放量车型,提升尾气治理水平。

园林绿地面积增大,对 AQI 指数的负向作用增

大,即改善空气质量的作用增大。

3 结论与讨论

3.1 结论

1) 中国城市空气污染治理初现成效,然而整体形势仍然严峻,空气污染的空间集聚性加强。2015—2018 年中国城市空气质量指数缓慢下降,污染整体得到改善。空气质量指数月际变化呈“U”型,变化表现为秋冬季污染减少,春夏季污染恶化。各城市空气质量平均达标天数增加,污染天数比降低,空气治理初显成效。然而空气污染仍然严峻,具体表现在 AQI 指数空间上的整体集聚性与局部分异明显。高-中-低值城市间存在污染物一体化和扩散趋势,因而应做好联防联控,切断空气污染的演化路径。

2) 各城市空气污染类型分布明显,不同类型城市应采取针对性的污染治理策略。中国各城市空气质量状况根据散布形态和分布范围可划分为高值峰度上偏型、高值峰度下偏型、中值峰度上偏型、中值峰度下偏型、中值均衡型、低值均衡型六类。对不同类型的城市应采取不同的针对性策略,高值上偏型应做好重点城市的大气污染防治,中值上偏型城市在此基础上还要加强定期监控,高值下偏型城市则

应建立跨行政区的联防联控从而打破区域污染整体偏高的局面。对于中值下偏型及中值均衡型城市则应注重整体改善和重点突破,建立污染扩散预警防止污染恶化。低值均衡型城市应以采取预防为主,防止结合的治理策略。

3) 中国空气质量整体治理策略应以调整发展模式为主要方向,协调经济、人口、能源、城市与环境的关系。从全国层面看,一方面经济水平、人口数量、机动车数量、能源消耗对城市空气质量指数影响为正向,因而要控制城市空气质量污染,应注意改变经济粗放发展模式、合理调配人口容量、做好机动车分类管控限号出行,鼓励使用清洁能源截污减排。另一方面城市化、城市绿化投入对空气质量影响为负向,说明在倡导“治污”同时也应注意“改善”,注意推动城市消费结构转型,按建设标准严格管控城市绿化面积。

4) 中国城市空气质量区域治理措施应结合区域各城市发展阶段进行统筹治理与调控。不同区域基于自身所处发展阶段和外部环境的不同,各驱动要素作用方向和强度存在规律性和特异性。其中人口密度和人均 GDP 指数在不同区域的作用强度随时间发生特异性变化,城市化水平、R&D 经费投入占比、全社会用电量、民用汽车保有量、园林绿地面积在多年间则表现为规律性变化特征。因此探讨大气污染治理,对于人口调控策略和经济发展模式的选择应结合区域各经济要素发展现状,尊重城市发展规律,制定针对性策略,而对于其余要素指标应制定长效机制,促进空气质量的改善。

3.2 讨论

本文对 2015—2018 年的中国城市空气质量 AQI 指数变化及影响因素进行分析研究,结果显示虽然中国的环境治理取得了初步的效果,但是总体上仍然处于较为严峻的阶段。未来城市的空气污染治理过程中,需要加大环保投入力度,调整产业结构,优化产业布局,转变生产方式,并且应结合区域城市经济发展现状,明确关键因素,制定针对性的防控治污措施,同时要注意各城市之间的交互影响,加强区域间的联防联控与合作治理,完善环保规划和环境立法。

本文受制于数据获取,自然因素指标仅考虑了温度和降水,但不可忽视其他自然因素对空气质量的影响,并且未分析各因素指标的交互耦合对城市空气质量变化的影响,因此在未来的研究中,将综合完善各因素指标及其相互作用影响,从而进行更深入系统的研究。

参考文献:

- [1] LELIEVELD J, EVANS J S, FNAIS M, et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale [J]. *Nature*, 2015, 525 (7569):367-371.
- [2] 梁四玄,肖明,陈长坤. 2006-2010 年间四大城市 API 的时间序列上的分析研究[J]. *北京测绘*, 2018, 32(2): 165-169.
LIANG Siyao, XIAO Ming, CHEN Changming. An analysis of the time series of air pollution indexes in four cities in 2006-2010 [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2018, 32(2):165-169.
- [3] 赵文斐,于占江,王让会,等. 石家庄市 PM_{2.5} 时空特征及其对土地利用变化的响应[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(12):2404-2413.
ZHAO Wenfei, YU Zhanjiang, WANG Ranghui, et al. Spatial and temporal characteristics of PM_{2.5} and its response to land use change in Shijiazhuang [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(12):2404-2413.
- [4] 崔继宪,郎建垒,陈添,等. 2016 年北京市空气质量特征及 PM_{2.5} 传输规律[J]. *北京工业大学学报*, 2018, 44 (12):1547-1556.
CUI Jixian, LANG Jianlei, CHEN Tian, et al. Characteristics of Beijing's air quality and regional transport of PM_{2.5} in 2016 [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2018, 44 (12):1547-1556.
- [5] FAN Wenping, WANG Hongkang, LIU Yan, et al. Spatio-temporal variation of the coupling relationship between urbanization and air quality: a case study of Shandong Province[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272:122812.
- [6] 丁镭,刘超,黄亚林,等. 湖北省城市环境空气质量时空演化格局及影响因素[J]. *经济地理*, 2016, 36 (3): 170-178.
DING Lei, LIU Chao, HUANG Yalin, et al. Spatial and temporal characteristics of urban ambient air quality and its main influence factors in Hubei Province [J]. *Economic Geography*, 2016, 36 (3):170-178.
- [7] TONG C H M, YIM S H L, ROTHENBERG D, et al. Projecting the impacts of atmospheric conditions under climate change on air quality over Pearl River Delta region [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 193: 79-87.
- [8] 周侃,樊杰. 中国环境污染源的区域差异及其社会经济影响因素——基于 339 个地级行政单元截面数据的实证分析[J]. *地理学报*, 2016, 71(11):1911-1925.
ZHOU Kan, FAN Jie. Regional disparity of environmental pollution source and its socio-economic influencing factors: based on the cross-section data of 339 cities

- at prefecture level or above in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11):1911-1925.
- [9] 王艳,柴发合,王永红,等. 长江三角洲地区大气污染物输送规律研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(5):1430-1435.
WANG Yan, CHAI Fahe, WANG Yonghong, et al. Transport characteristics of air pollutants over the Yangtze Delta [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(5): 1430-1435.
- [10] ESTELLANO V H, POZO K, SILIBELLO C, et al. Characterization of urban pollution in two cities of the Puglia region in Southern Italy using field measurements and air quality (AQ) model approach [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2014, 5(1): 34-41.
- [11] 郭一鸣,蔺雪芹,边宇. 中国城市群空气质量时空演化特征及其影响因素[J]. *生态经济*, 2019, 35(11): 167-175.
GUO Yiming, LIN Xueqin, BIAN Yu. The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air quality in China's urban agglomerations [J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(11):167-175.
- [12] YANG Jun, XU Lan. How does China's air pollution influence its labor wage distortions? Theoretical and empirical analysis from the perspective of spatial spillover effects [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 745:140843.
- [13] 刘华军,杜广杰. 中国城市大气污染的空间格局与分布动态演进——基于161个城市AQI及6种分项污染物的实证[J]. *经济地理*, 2016, 36(10):33-38.
LIU Huajun, DU Guangjie. Spatial pattern and distributional dynamics of urban air pollution in China: an empirical study based on AQI and six sub-pollutants of 161 cities [J]. *Economic Geography*, 2016, 36(10): 33-38.
- [14] XIE Yu, WU Desheng, ZHU Shujin. Can new energy vehicles subsidy curb the urban air pollution? Empirical evidence from pilot cities in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142232.
- [15] 王振波,方创琳,许光,等. 2014年中国城市PM_{2.5}浓度的时空变化规律[J]. *地理学报*, 2015, 70(11): 1720-1734.
WANG Zhenbo, FANG Chuanglin, XU Guang, et al. Spatial-temporal characteristics of the PM_{2.5} in China in 2014 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1720-1734.
- [16] 蔺雪芹,王岱. 中国城市空气质量时空演化特征及社会经济驱动力 [J]. *地理学报*, 2016, 71(8):1357-1371.
LIN Xueqin, WANG Dai. Spatio-temporal variations and socio-economic driving forces of air quality in Chinese cities [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(8): 1357-1371.
- [17] HE Qinging, ZHANG Ming, SONG Yimeng, et al. Spatiotemporal assessment of PM_{2.5} concentrations and exposure in China from 2013 to 2017 using satellite-derived data [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286:124965.
- [18] LI Rui, FU Hongbo, CUI Lulu, et al. The spatiotemporal variation and key factors of SO₂ in 336 cities across China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210: 602-611.
- [19] XIE Yangyang, ZHAO Bin, ZHANG Lin, et al. Spatiotemporal variations of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations between 31 Chinese cities and their relationships with SO₂, NO₂, CO and O₃ [J]. *Particuology*, 2015, 20(3): 141-149.
- [20] GEHRIG R, BUCHMANN B. Characterising seasonal variations and spatial distribution of ambient PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations based on long-term Swiss monitoring data [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(19): 2571-2580.
- [21] 王占山,李云婷,陈添,等. 2013年北京市PM_{2.5}的时空分布[J]. *地理学报*, 2015, 70(1):110-120.
WANG Zhanshan, LI Yunting, CHEN Tian, et al. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in Beijing in 2013 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 110-120.
- [22] 赵艳艳,张晓平,陈明星,等. 中国城市空气质量的区域差异及归因分析 [J]. *地理学报*, 2021, 76(11): 2814-2829.
ZHAO Yanyan, ZHANG Xiaoping, CHEN Mingxing, et al. Regional variation of urban air quality in China and its dominant factors [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11):2814-2829.
- [23] CHEN Jiandong, WANG Bo, HUANG Shuo, et al. The influence of increased population density in China on air pollution [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 735:139456.
- [24] ZHU Lingyun, HAO Yu, LU Zhinan, et al. Do economic activities cause air pollution? Evidence from China's major cities [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 49:101593.
- [25] HERNANDEZ K, PRUD'HOMME J, SCLISON S, et al. Spatio-temporal analysis of the impact of airborne pollen, ambient air pollution, and land cover on the sales of medications used to treat asthma and allergies, in 8 cities, in metropolitan France [J]. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2020, 145(2):AB113.
- [26] FANG Chuanglin, LIU Haimeng, LI Guangdong, et

- al. Estimating the impact of urbanization on air quality in China using spatial regression models [J]. *Sustainability*, 2015, 7(11): 15570-15592.
- [27] 韩立建. 城市化与 PM_{2.5} 时空格局演变及其影响因素的研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(8): 1011-1021.
HAN Lijian. Relationship between urbanization and urban air quality: an insight on fine particulate dynamics in China [J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(8): 1011-1021.
- [28] ZHANG Shaohui, WORRELL E, CRIJINS-GRAUS W, et al. Co-benefits of energy efficiency improvement and air pollution abatement in the Chinese iron and steel industry [J]. *Energy*, 2014, 78:333-345.
- [29] 王好, 孙斌栋, 李琬. 城市规模分布与空气质量的关系——基于 LandScan 数据的跨国研究 [J]. *地理研究*, 2021, 40(11):3173-3190.
WANG Yu, SUN Bindong, LI Wan. Relationship between city size distribution and air quality: a cross-country study based on LandScan data [J]. *Geographical Research*, 2021, 40(11):3173-3190.
- [30] CHENG Zhonghua, LI Lianshui, LIU Jun. The impact of foreign direct investment on urban PM_{2.5} pollution in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 265:110532.
- [31] SHI Tao, ZHANG Wei, ZHOU Qian, et al. Industrial structure, urban governance and haze pollution: spatiotemporal evidence from China [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 742:139228.
- [32] SIDER T, ALAM A, ZUKARI M, et al. Land-use and socio-economics as determinants of traffic emissions and individual exposure to air pollution [J]. *Journal of Transport Geography*, 2013, 33:230-239.
- [33] SHE Qiannan, PENG Xia, XU Qian, et al. Air quality and its response to satellite-derived urban form in the Yangtze River Delta, China [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 297-306.
- [34] 张保留, 洪洁, 罗宏. 煤炭消费结构对中国大气污染的影响及对策建议 [J]. *中国煤炭*, 2015, 41(7):9-14.
ZHANG Baoliu, HONG Jie, LUO Hong. Impacts of coal consumption structure on China air pollution and countermeasures [J]. *China Coal*, 2015, 41(7):9-14.
- [35] 李佳乐, 吴立新, 任传斌, 等. APEC 区域减排对北京 PM_{2.5} 浓度时空变化的影响分析 [J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(3):110-115.
LI Jiale, WU Lixin, REN Chuanbin, et al. Impact of APEC regional emission reduction on spatio-temporal variation of PM_{2.5} concentration in Beijing [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2016, 32(3): 110-115.
- [36] 吴立新, 吕鑫, 秦凯, 等. 秸秆焚烧期间徐州市空气污染物时空分布特征分析 [J]. *地理与地理信息科学*, 2014, 30(1):18-22, 31.
WU Lixin, LÜ Xin, QIN Kai, et al. On spatio-temporal features of air pollutions in Xuzhou City during straw burning period [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2014, 30(1):18-22, 31.
- [37] 周伟东, 甄新蓉, 顾松强, 等. 浦东地区秋末冬初冷空气风雨对 PM_{2.5} 质量浓度影响研究 [J]. *干旱区地理*, 2016, 39(5):1089-1095.
ZHOU Weidong, ZHEN Xinrong, GU Songqiang, et al. Late autumn and early winter cold air effects on PM_{2.5} mass concentration over Pudong, Shanghai [J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(5):1089-1095.
- [38] LI Rui, WANG Zhenzhen, CUI Lulu, et al. Air pollution characteristics in China during 2015 - 2016: spatiotemporal variations and key meteorological factors [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 648:902-915.
- [39] SARRAT C, LEMONSU A, MASSON V, et al. Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(10): 1743-1758.
- [40] RAMANATHAN V, FENG Y. Air pollution, greenhouse gases and climate change: global and regional perspectives [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(1): 37-50.
- [41] ALVAREZ H B, ECHEVERRIA R S, ALVAREZ P S, et al. Air quality standards for particulate matter (pm) at high altitude cities [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 173:255-256.
- [42] CLIFF A D, ORD J K. *Spatial processes: models and applications* [M]. London: Pion, 1981.
- [43] 古扎拉蒂 D N, 波特 D C. *计量经济学基础* [M]. 第五版. 北京: 中国人民大学出版社, 2010.
- [44] 黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析 [J]. *地理研究*, 2003, 22(2):211-220.
HUANG Jinchuan, FANG Chuanglin. Analysis of coupling mechanism and rules between urbanization and eco-environment [J]. *Geographical Research*, 2003, 22(2):211-220.

(责任编辑 王绪迪)