

分类号 \_\_\_\_\_  
U D C \_\_\_\_\_

密级 \_\_\_\_\_  
编号 10741



# 硕士学位论文

(专业学位)

论文题目 中原城市群大气污染时空分布特征  
及影响因素分析

研究生姓名: 吴俊珺

指导教师姓名、职称: 韩君 教授

学科、专业名称: 统计学 应用统计硕士

研究方向: 大数据分析

提交日期: 2021.06.06

# 独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 吴俊琪 签字日期： 2021年6月6日

导师签名： 韩元 签字日期： 2021年6月6日

导师(校外)签名： 杜英 签字日期： 2021年6月6日

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定，同意（选择“同意” / “不同意”）以下事项：

1. 学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；
2. 学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入 CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名： 吴俊琪 签字日期： 2021年6月6日

导师签名： 韩元 签字日期： 2021年6月6日

导师(校外)签名： 杜英 签字日期： 2021年6月6日

**Temporal and Spatial Distribution  
Characteristics of Air Pollution in Central  
Plains Urban Agglomeration  
And influencing factors analysis**

**Candidate: Wu Junjun**

**Supervisor: Han Jun**

## 摘 要

中原城市群正处于加速崛起的关键时期,在其发展的进程中注入生态文明理念,对于中原城市群的绿色、高质量发展具有十分重要的意义。但是近年来,中原城市群部分城市空气污染问题日益突出,严重阻碍了中原城市群的可持续发展。因此,探究中原城市群空气质量时空分布特征,并对其影响因素进行研究,有助于推动中原城市群更好地实现可持续发展。

结合研究目的,本文首先对大气污染的时空分布特征、大气污染影响因素的指标选择以及大气污染影响因素的研究方法的相关文献进行整理与归纳。发现,现有以中原城市群为研究范围,探索其空气质量指数(AQI)的空间分布特征的文献较少,并且采用地理加权回归模型对该区域空气质量影响因素进行异质性分析的文献更是缺乏。因此,本文选用中原城市群 2015~2018 年空气质量指数(AQI)数据对该区域大气污染的时空分布特征及影响因素进行分析。

其次,研究中原城市群大气污染时空分布特征时,采用核密度估计、空间自相关法、空间描述性统计分析和数据可视化等方法对 29 个城市 2015~2018 年 AQI 数值进行梳理。研究表明,考察期内中原城市群大气污染范围显著缩小,空气质量逐年向好;从季节特征来看,春、秋季节 AQI 数值大小居中,夏季 AQI 数值较低,冬季 AQI 数值较高,且春、冬季 AQI 数值呈逐年下降的趋势;从月度特征来看,AQI 月均值呈现出“U”型分布的特征,且 6、7、8 月 AQI 数值最小;从日度特征来看,空气质量优良日总数逐年增加,空气污染聚集特征明显,空气质量优良区位于中原城市群东南部,而空气质量相对劣质区域则始终出现于中北部地区。

然后,结合环境污染影响因素的理论框架 STIRPAT 模型和 EKC 假设,选取经济发展、人口聚集、产业结构、对外开放、科技进步、尾气排放、环境规制等 7 个方面的因素,对影响大气污染的社会经济因素进行了研究。且从空间异质性的视角出发,运用地理加权回归模型对各因素进行逐年分析。研究结果表明:人均 GDP、城市人口密度和汽车尾气排放的增加是促进中原城市群城市空气质量恶化的重要因素,城市绿化水平、对外开放水平和科技水平的提高对中原城市群空气质量改善具有显著的推动作用。此外,各因素对大气污染的影响具有明显的空间异质性。对人均 GDP 弹性系数敏感的城市主要分布在中原城市群的南部;

对外开放水平弹性系数大的城市已经从 2015 年的西南地区转变为 2018 年的北部地区；城市绿化水平的提高对空气质量改善较大的城市位于中原城市群的东南部，且其改善程度逐年增大；科技水平的提高对空气质量的改善作用也在逐年增强；对于汽车尾气排放弹性系数敏感的城市主要分布在东部及东南部地区，影响程度由东向西逐渐递减，对空气污染的恶化程度越来越强烈。

最后，将中原城市群 AQI 的时空分布特征及影响因素分析所得到的结果进行归纳，得出其主要结论，并给出相应的建议及展望。

**关键词：**中原城市群 空间自相关 地理加权回归 空间异质性

## Abstract

The Central Plains urban agglomeration is in a critical period of accelerating its rise. Injecting the concept of ecological civilization into its development process is of great significance to the green and high-quality development of the Central Plains urban agglomeration. However, in recent years, the problem of air pollution in some cities of the Central Plains urban agglomeration has become increasingly serious, which has seriously hindered the sustainable development of the Central Plains urban agglomeration. Therefore, exploring the temporal and spatial distribution characteristics of air quality in the Central Plains urban agglomeration and researching its influencing factors will help promote the better sustainable development of the Central Plains urban agglomeration.

Combining the research purposes, this article first sorts out and summarizes the relevant literature on the temporal and spatial distribution characteristics of air pollution, the index selection of air pollution influencing factors, and the research methods of air pollution influencing factors. It is found that there are fewer documents exploring the spatial distribution characteristics of the air quality index (AQI) with the Central Plains urban agglomeration as the research scope, and there are more documents using geographically weighted regression models to analyze the heterogeneity of the regional air quality influencing factors. It is lacking. Therefore, this paper selects the air quality index (AQI) data of the Central

Plains urban agglomeration from 2015 to 2018 to analyze the spatial and temporal distribution characteristics and influencing factors of air pollution in the region.

Second, when studying the spatial and temporal distribution characteristics of air pollution in the Central Plains urban agglomeration, methods such as nuclear density estimation, spatial autocorrelation, spatial descriptive statistical analysis, and data visualization were used to sort out the AQI values of 29 cities from 2015 to 2018. Studies have shown that during the inspection period, the air pollution range of the Central Plains urban agglomeration has been significantly reduced, and the air quality has been improving year by year; from the perspective of seasonal characteristics, the AQI value in spring and autumn is in the middle, the summer AQI value is lower, the winter AQI value is higher, and the spring , The winter AQI value shows a downward trend year by year; from the monthly characteristics, the monthly average AQI presents a "U"-shaped distribution, and the AQI value in June, July, and August is the smallest; from the daily characteristics, the air quality is good The total number of days has increased year by year, and air pollution has obvious characteristics. Areas with good air quality are located in the southeast of the Central Plains urban agglomeration, while areas with relatively poor air quality always appear in the central and northern regions.

Then, combined with the STIRPAT model and EKC hypothesis, the

theoretical framework of environmental pollution influencing factors, seven factors including economic development, population agglomeration, industrial structure, opening to the outside world, technological progress, exhaust emissions, and environmental regulations are selected to affect the society that affects air pollution. Economic factors were studied. And from the perspective of spatial heterogeneity, the geographically weighted regression model is used to analyze each factor year by year. The results of the study show that the increase in per capita GDP, urban population density and automobile exhaust emissions are important factors that promote the deterioration of urban air quality in the Central Plains urban agglomeration. The improvement of urban greening, opening to the outside world and technological level have significant improvements in the air quality of the Central Plains urban agglomeration. The driving role of the. In addition, the influence of various factors on air pollution has obvious spatial heterogeneity. Cities sensitive to the elastic coefficient of per capita GDP are mainly distributed in the southern part of the Central Plains urban agglomeration; the cities with a large elastic coefficient of opening to the outside world have changed from the southwest region in 2015 to the northern region in 2018; the improvement of urban greening has improved air quality Larger cities are located in the southeast of the Central Plains urban agglomeration, and the degree of improvement is increasing year by year; the improvement of technology level is increasing year by year; the



cities sensitive to the elastic coefficient of automobile exhaust emission are mainly distributed in the east and southeast. In the region, the degree of influence gradually decreases from east to west, and the degree of deterioration of air pollution is getting stronger and stronger.

Finally, the results obtained from the analysis of the temporal and spatial distribution characteristics and influencing factors of the Central Plains urban agglomeration are summarized, and the main conclusions are drawn, and corresponding suggestions and prospects are given.

**Keywords:** Central Plains urban agglomeration; spatial autocorrelation; spatial heterogeneity; geographically weighted regression

# 目 录

<b>1 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 国内外文献综述	3
1.2.1 大气污染的时空分布特征研究	3
1.2.2 大气污染影响因素的指标选择	4
1.2.3 大气污染影响因素的研究方法	5
1.2.4 文献述评	6
1.3 研究内容及技术路线	7
1.4 研究的创新点	9
<b>2 相关理论与方法</b>	<b>10</b>
2.1 空气质量指数 AQI	10
2.2 研究区域及数据来源	10
2.3 STIRPAT 模型与 EKC 假说	11
2.3.1 STIRPAT 模型	11
2.3.2 EKC 假说	12
2.4 空间自相关分析	12
2.5 地理加权回归模型	13
<b>3 大气污染的时空分布特征</b>	<b>15</b>
3.1 大气污染的时间变化特征	15
3.1.1 AQI 年度变化特征	15
3.1.2 AQI 的季节变化特征	16
3.1.3 AQI 月变化特征	16
3.1.4 AQI 日变化特征	17
3.2 大气污染的空间分布特征	19
3.2.1 AQI 年度空间分布特征	19

3.2.2 AQI 季节空间分布特征 .....	21
3.2.3 AQI 日度空间分布特征 .....	24
3.3 AQI 空间集聚特征 .....	25
3.3.1 全局相关性分析 .....	26
3.3.2 局部热点分析 .....	26
3.4 本章小结 .....	28
<b>4 大气污染影响因素分析 .....</b>	<b>29</b>
4.1 影响因素变量选取与数据收集 .....	29
4.2 基于 OLS 模型的影响因素综合分析 .....	30
4.3 基于 GWR 模型的影响因素时空差异分析 .....	33
4.3.1 GDP 对大气污染影响的时空分异 .....	33
4.3.2 人口密度对大气污染影响的时空分异 .....	35
4.3.3 产业结构对大气污染影响的时空分异 .....	36
4.3.4 对外开放对大气污染影响的时空分异 .....	39
4.3.5 绿化水平对大气污染影响的时空分异 .....	41
4.3.6 科技水平对大气污染影响的时空分异 .....	43
4.3.7 汽车尾气排放对大气污染影响的时空分异 .....	45
4.4 本章小结 .....	46
<b>5 结论与启示 .....</b>	<b>48</b>
5.1 结论 .....	48
5.2 启示 .....	49
5.3 展望 .....	50
<b>参考文献 .....</b>	<b>51</b>
<b>后记 .....</b>	<b>57</b>

# 1 绪论

本章首先在大气污染日益严重的背景下,阐述了对中原城市群大气污染进行研究的目的是和意义;其次,从大气污染的时空分布特征研究,大气污染影响因素指标的选择以及大气污染影响因素的研究出发,从三个角度探讨了国内外的研究现状,指出了本文的研究主题和改进方向;然后介绍了本文的主要研究内容和研究思路;最后对本文可能的创新之处进行说明。

## 1.1 研究背景和意义

### 1.1.1 研究背景

在我们享受到经济增长带给我们好处的同时,伴随而来的还有严重的大气污染问题。已有不少研究表明,大气污染正在威胁着人类的生命健康,我国每年死于大气污染因素的人口数已达 100 万。此外,大气污染问题还严重阻碍了我国的可持续发展,对经济和社会的发展带来了严重的负面影响。因此,大气污染问题一直是社会各界重点关注的对象。

一直以来,党中央、国务院将大气污染防治问题提高到足够高度来对待。2013 年 9 月,国务院发布《大气污染防治行动计划》,指出环境保护关系到人民的根本利益、经济的持续健康发展和全面建成小康社会的实现,同时提出了“加强综合治理,减少多种污染物排放”等多项具体的污染防治措施。2014 年 4 月,十二届全国人大常委会第八次会议对污染防治和环境保护提出了更高的要求,并修订了《中华人民共和国环境保护法》。国务院发布的《2016 年生态环境保护“十三五”规划》强调,“提高环境质量,加强生态环境综合治理”是将生态文明建设作为国家战略的核心任务,并要求“提高预报精度,及时发布空气质量预报信息”、“开展大气污染成因及控制技术研究”。中共中央、国务院在 2018 年 6 月印发《关于全面加强生态环境保护坚决打击污染防治的意见》,其中对“污染防治战役”工作进行明确部署。中共十九大报告中强调“建设美丽中国”,再一次强调要重视环境污染问题,继续落实大气污染防治措施。党中央、国务院相继出台的保护生态环境和防治空气污染的计划和措施,充分体现了国家对生态保护、污染

预防和污染控制的重视。所以对有关大气污染方面的问题进行研究，其意义不言而喻。

中原城市群在 2016 年 12 月被国家发展和改革委员会认定为“绿色生态发展示范区”，且制定并发布了《中原城市群发展规划》，其中对中原城市群的绿色发展提出了建设性的意见，体现出国家对中原城市群发展的重视与认可。习近平总书记于 2019 年 9 月在河南省郑州市召开了黄河流域生态保护与高质量发展座谈会。会议提出，黄河流域的生态保护和高质量发展已成为一项重大的国家战略，明确要求黄河流域各省（区）要共同努力，做好重大保护工作，协同推进重大治理工作，努力促进整个流域的高质量发展。中原城市群属于黄河流域中游的国家战略城市群，在许多方面拥有发展潜力与发展优势，如它处于城市化国家战略格局的中心位置，遍布的交通网为其发展提供了基础，人口众多，人力资源较为丰富，自然资源优势明显（韩燕等，2020）。同时，中原城市群大部分区域地势平坦，城市间污染物排放影响作用较强（苗青青等，2020），加剧了环境污染的程度。此外，近年来中原城市群的环境污染日益加剧，严重阻碍了其可持续发展。由生态环境部发布的《2019 年中国生态环境公报》可知，在我国污染排名前 20 座城市中，中原城市群有 9 座城市位于其中，包括安阳市、邢台市、邯郸市、焦作市、晋城市、新乡市、鹤壁市、洛阳市、郑州市，这进一步表明中原城市群环境质量不容乐观。

### 1.1.2 研究意义

一味地追求增长速度已经不再适应我国现阶段的发展要求。中原城市群各个城市要紧跟政策步伐，将绿色发展理念与城市群发展相结合，将生态文明理念注入发展过程中，对其实现高质量发展至关重要。所以，对中原城市群大气污染现状进行分析，探索其大气污染的时空分布特征及形成原因，有利于协调环境保护与城市经济建设之间的关系，对生态文明城市的建设具有重要的指导意义。这不仅有助于促进中原城市群实现高质量发展，甚至对黄河流域实现高质量发展也具有重要价值。

此外，目前区域大气污染的相关研究主要是围绕京津冀城市群、珠三角城市群、长三角城市群等地区来开展的，而对中原城市群大气污染的相关研究较为匮

乏。因此，本文对中原城市群大气污染分布特征及大气污染形成原因进行分析，丰富了城市群大气污染的相关研究。

## 1.2 国内外文献综述

随着空气质量的不断恶化，国内外学者对大气污染的研究逐渐增多，且研究内容主要包括大气污染物的时空分布特征，污染物的来源和化学组成，影响大气污染的自然和社会经济因素以及对污染物的预测研究等。本节主要从大气污染物的时空分布特征研究、大气污染影响因素的指标选择、大气污染影响因素的研究方法三个研究方向入手，对现有研究进行简要回顾，并提出本文的研究方法及主要研究内容。

### 1.2.1 大气污染的时空分布特征研究

从研究区域的角度来看，目前研究对象主要是全国尺度和空气污染较严重的地区，例如长三角城市群、京津冀城市群、珠三角城市群等。

李名升等（2013）、蔺雪芹和王岱（2016）的研究表明，我国冬季  $PM_{2.5}$  浓度较高，夏季、春末、秋初  $PM_{2.5}$  浓度较低，且我国东部、北部城市  $PM_{2.5}$  浓度较高，西部、南部城市  $PM_{2.5}$  浓度较低。王斌和高会旺（2008）对我国 23 个沿海城市的空气污染的分布特征进行了研究，随着我国雾霾天气的恶化，高会旺等（2014）又对我国 73 个城市的空气污染分布特征进行了研究，结果表明，我国南、北部城市的污染状况存在差异，且北部城市污染状况正在逐渐好转，而南部城市空气污染状况正在逐渐恶化。贺祥等（2016）以江苏省为例，研究  $PM_{2.5}$  浓度分布状况，结果显示，该省  $PM_{2.5}$  浓度沿海低、内陆高、南高北低，南国卫等（2017）对江苏省  $PM_{2.5}$  分布特征进行研究也得到了同样的结论。韩婧等（2019）研究我国  $PM_{2.5}$  浓度的时空分布特点，结果表明山东西部、河南北部、河北南部、塔里木盆地四个区域中  $PM_{2.5}$  浓度最高，污染最严重。陈优良等（2017）、黄小刚等（2020）研究了长三角城市群空气质量的时空分布特征，发现其变化趋势为：空气质量指数的月变化曲线呈 U 型，且春、秋、冬季空间梯度变化显著，呈现北高南低的分布格局。赵辉等（2020）发现，京津冀地区  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $CO$  和  $NO_2$  浓度在冬季最高，其次是春、秋季，夏季最低，月变化呈倒“V”型；在

空间分布上,  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $CO$  和  $NO_2$  呈南高北低。还有大量学者, 如罗宇翔等 (2012)、Wang 等 (2015)、Tian 等 (2016)、Huang 等 (2018) 在分析我国大气污染特征的基础上进一步探究各项污染物之间的关联性, 并给出控制污染物的政策建议。

### 1.2.2 大气污染影响因素的指标选择

针对大气污染物影响因素的指标选择, 国内外相关学者主要从自然因素和社会经济因素两方面选取影响指标。

从自然因素角度来看, Vardoulakis (2006) 选取了风速、相对湿度、气温等气象数据, 研究在雅典和伯明翰两座城市中气象数据与可吸入颗粒物 ( $PM_{10}$ ) 之间是否存在相关关系。周伟东、梁萍 (2013) 以上海为例, 探讨风速、风向变化是如何对空气质量指数 (AQI) 造成影响的。李文杰、张时煌 (2012) 同样选取一系列气象数据: 相对湿度、气压、日照时数、温度、风速、风向, 探究在北京、天津、石家庄三座城市中它们与空气质量指数 (AQI) 之间存在的关系。周兆媛等 (2014) 以京津冀为例, 探讨气压、气温、降水量和相对湿度是怎样对空气污染指数 (API) 产生影响的。基于上述气象指标, 刘海猛等 (2018) 依旧以京津冀地区为例, 加入植被指数 (NDVI)、海拔和地形地貌等地理因素, 研究空气污染的成因。孟昭伟等 (2020) 认为影响西安市  $PM_{2.5}$  的气象指标为: 最高温度、最低温度、风速、湿度、降水量、气压, 并探讨了这些气象因素对  $PM_{2.5}$  影响程度及方向。

从社会经济因素来看, Khan 等人 (2009) 以人口增长速度作为研究对象, 考察不同的人口增长速度会对环境带来怎样的影响。孟小峰等 (2011) 对重庆市空气质量的时空分布进行了研究, 认为产业结构调整、增加城市绿地、控制主城区的汽车尾气污染、控制粉尘以及促进清洁能源和发展清洁生产可以有效控制空气污染。章异平等 (2012) 探讨洛阳空气质量的影响因素, 认为机动车数量、废气排放、烟尘排放的增加会对空气质量产生负效应, 人均公园绿化面积的提高会对空气质量产生正效应。Mo 等人 (2014) 选取城市化率、植被覆盖率及人均生产总值作为影响  $PM_{2.5}$  的因素, 结果表明植被覆盖率的提高会起到减少  $PM_{2.5}$  浓度的作用, 而人均生产总值和城市化率的提高则会相应的增加  $PM_{2.5}$  浓度。杜颖

(2016)认为河北省作为我国煤炭大省,是全国污染最严重的地区之一。为研究河北省环境污染的影响因素,选取第二产业产值占比、能源结构中煤炭占比、工业废气排放、工业烟粉尘排放等因素。宋海鸥等(2016)认为工业结构不合理是造成京津冀城市群大气污染最重要的因素,并建议要通过有效的手段淘汰落后产能和低效产能。王一辰等(2017)选取京津冀地区13个城市的民用车拥有量、人均GDP、房屋建筑施工面积、煤炭消费比重、工业增加值比重指标来研究雾霾的影响因素。回莹等(2018)选取人均国内生产总值、人口密度、外商直接投资、公路里程数、第二产业产值占GDP的比重、城镇化水平和等因素,探讨了河北省雾霾污染的形成原因。

### 1.2.3 大气污染影响因素的研究方法

研究大气污染影响因素的方法多种多样,本文主要总结以下几种。

(1)灰色关联法。章异平等(2012)采用2006~2009年 $PM_{10}$ 浓度数据,采用灰色关联法对洛阳市大气污染成因进行分析。郑宇、张慧明(2015)采用2000~2013年AQI监测数据和相应的社会经济指标,采用灰色关联分析对南京市大气污染的影响因素进行了研究。湛社霞等(2018)以珠三角为研究对象,采用2006~2016年大气污染相关数据和相应社会经济数据,使用灰色关联分析法分析各种污染物的成因。李慧杰等(2019)以京津冀地区为例,采用灰色关联分析法探究2013~2017年AQI指数的影响因素,并针对该地区大气污染的防治提出建议。

(2)相关分析法。赵晨曦等(2014)以北京市为研究对象,采用Spearman秩相关分析方法并选取一系列气象指标对大气中 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 浓度的成因进行研究。Jiang等(2015)对雾霾的成因进行研究,选取 $PM_{2.5}$ 作为雾霾污染的衡量指标,采用相关分析法分析发现, $SO_2$ 、 $NO_2$ 、CO等污染物浓度与 $PM_{2.5}$ 浓度之间有很强的关联性。张淑平等(2016)以我国114个城市作为研究对象,采用相关分析方法,并使用2013年相关数据,研究城市规模与 $PM_{2.5}$ 和 $NO_2$ 浓度之间的相关关系。肖建能等(2016)采用相关分析和统计分析的方法,对厦门市空气质量指数的气象影响因素进行了研究。黄俊等(2018)利用2015年广州市臭氧监测资料和气象资料,通过相关分析,计算臭氧与气象因子的偏相关系数。



(2) 空间计量方法。使用空间计量方法研究大气污染影响因素的学者,大多根据数据的类型来选择合适的计量模型进行分析。Maddison (2007) 认为使用空间杜宾模型能够很好地研究欧洲国家空气质量的影响因素, 并发现二氧化硫、二氧化氮在欧洲国家间具有明显的溢出效应。Hosseini (2013) 以 1990~2007 年间亚洲国家为例, 采用空间滞后模型研究考察期内亚洲国家大气污染的影响因素, 研究结论与 Maddison (2007) 相似, 发现二氧化氮和可吸入颗粒物在亚洲国家间具有明显的溢出效应, 认为空气具有流动性是出现溢出效应的主要原因。马丽梅、张晓 (2014) 采用空间误差模型 (SDM)、空间滞后模型 (SLM) 对我国 31 个省的雾霾污染影响因素进行分析, 认为能源结构不合理、产业结构不合理是产生雾霾污染的主要原因, 且我国雾霾污染具有显著的空间聚集特征。随后, 马丽梅 (2016) 等人又构建了空间杜宾模型 (SDM), 对区域雾霾污染进行了更为详细的研究。杨勉等 (2017) 以长江经济带为例, 运用空间滞后模型 (SLM) 对该地区  $PM_{2.5}$  浓度的影响因素进行研究。王一辰 (2017)、刘海猛 (2018) 均以京津冀地区为例, 采用空间杜宾模型 (SDM) 对该地区大气污染的影响因素进行研究, 并同时考虑到了直接效应和间接效应。

除此之外, 对于大气污染影响因素的研究, 不少学者还采取因子分析、主成分分析、分位数回归分析、时间序列分析等方法。如王翠云等 (2015) 采用主成分分析、因子分析等方法对影响大气污染的因素进行研究; 晏振、田茂再 (2015), 梅波、田茂再 (2016) 在提出一种新的分位数回归模型的基础上, 将其运用到探讨气象因素对北京市大气污染的研究中来; 孟昭伟等 (2018) 以西安市两城区为例, 使用 2015~2018 年气象数据  $PM_{2.5}$  污染物数据, 采用多重线性回归方法对研究影响  $PM_{2.5}$  浓度的气象因子。

#### 1.2.4 文献述评

综述国内外学者对大气污染的时空分布特征及其影响因素研究, 发现现有研究仍存在一些不足, 主要体现在以下两个方面:

首先, 研究区域需要丰富。目前, 对区域大气污染的研究主要集中在京津冀城市群、珠三角城市群和长三角城市群等经济发达地区, 而研究中原城市群空气污染状况的文献较少。但是, 近年来由于中原城市群经济、人口、资源等因素的

矛盾积累，城市与环境资源之间的不协调性加剧，城市群的空气污染问题日益突出，对中原城市群的大气污染问题进行研究已经势在必行。因此，研究区域需要进一步拓展。

其次，相关研究方法需要扩展。在研究大气污染的影响因素时，多数学者考虑了大气污染的空间依赖性，且多以分析解释变量对大气指标的影响程度为主，较少的学者能够考虑到大气污染的空间异质性。因此，关于大气污染影响因素分析的研究方法仍需进一步扩展。

因此，本文将中原城市群 29 个城市作为大气污染的研究对象，使用空气质量指数 AQI 作为大气污染的衡量标准。首先，利用空间自相关，描述性统计和数据可视化等方法探究中原城市群大气污染的时空分布特征。然后，建立中原城市群空气质量影响因素的地理加权回归模型，讨论影响中原城市群空气质量的社会经济驱动因素及各因素的时空差异，有望为中原城市群的大气污染防控举措提供建议。

### 1.3 研究内容及技术路线

基于 2015~2018 年中原城市群 29 个城市的日度、月度、季度和年度的 AQI 数据和社会经济数据，采用空间描述统计，空间自相关和数据可视化分析方法，首先分析得出 2015~2018 年中原城市群 29 个城市 AQI 指数的时空分布特征；其次，使用普通最小二乘回归和地理加权回归模型研究 AQI 的影响因素以及各影响因素的时空分异；最后，根据研究结论提出相应的政策建议。具体内容如下所示：

第一章绪论。介绍了选题背景和研究意义、国内外研究现状、研究内容与研究思路。着重说明中原城市群大气污染研究的重要性和意义，并阐述了国内外研究现状。回顾上述文献，总结了现有研究思路和方法，指出了可以进一步改善的地方。

第二章相关理论与方法。明确研究区域及数据来源，介绍环境污染影响因素的基本理论框架 STIRPAT 模型与 KEC 假说，以及空间自相关分析、地理加权回归模型，为下文空气质量时空特性与影响因素分析提供理论基础。

第三章大气污染的时空分布特征。本章使用核密度估计、空间描述统计和空

间自相关方法来分析 AQI 的日度、月度、季度、年度均值，并将 2015~2018 年 AQI 的时间变化趋势、空间分布特征、分布格局和集聚模式进行可视化展示。

第四章大气污染的影响因素分析。本章使用 2015~2018 年的相关数据，首先在扩展的 STIRPAT 模型和 KEC 假说的基础上，从社会经济角度选择指标作为本文的影响因素指标；其次，采用普通最小二乘回归法分析各影响因素对 AQI 的影响程度及影响方向；最后，使用地理加权回归模型探讨不同影响因素在不同年份对 AQI 在空间上的异质性。

第五章结论与启示。本章首先对前文分析得出的结论进行总结，并针对中原城市群大气污染问题提出相应的建议，最后对文章提出进一步的展望。

根据以上的研究思路和研究内容，可得到技术路线图，如图 1 所示。

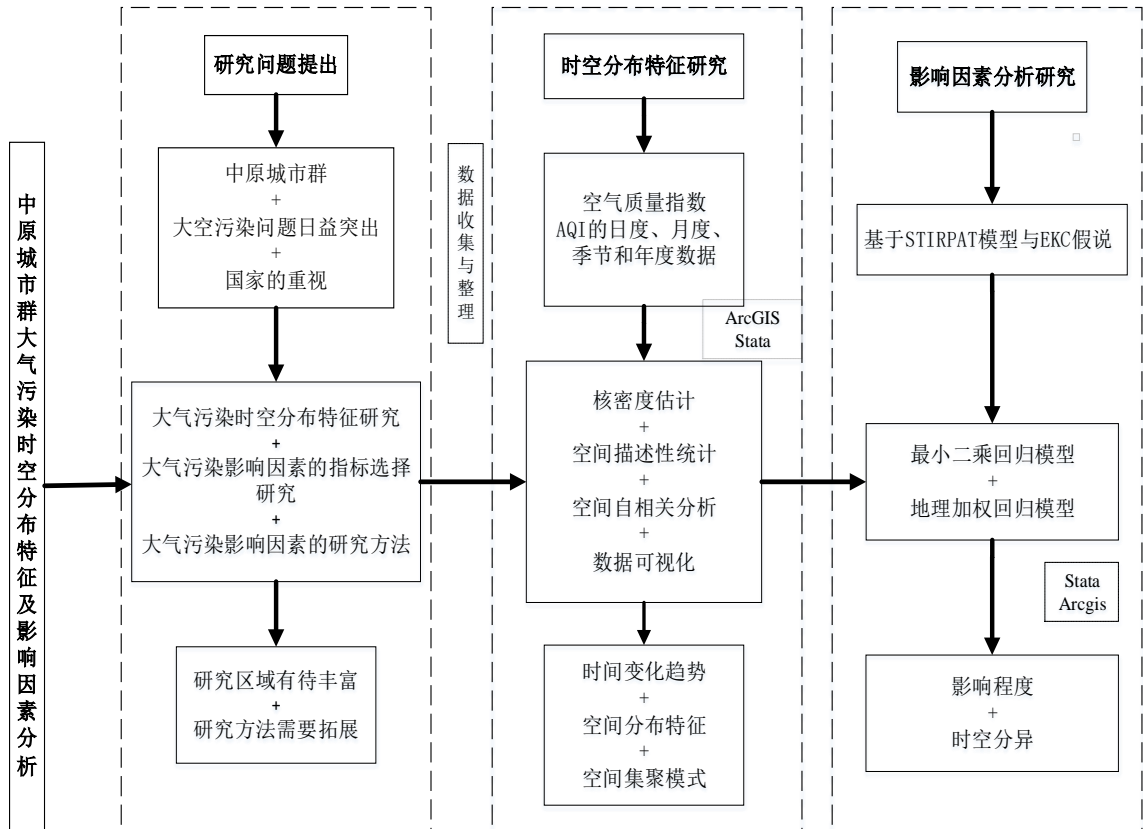


图 1 技术路线图

## 1.4 研究的创新点

研究视角的创新。目前，区域大气污染的研究对象主要是京津冀城市群、珠三角城市群和长三角城市群等经济发达地区。但是，针对中原城市群大气污染的相关研究较为匮乏。此外，黄河流域生态保护和高质量发展已成为一项重要的国家战略，且中原城市群属于黄河流域中游的国家战略城市群，对中原城市群大气污染状况进行研究，切实改善环境空气质量，不仅有利于推动中原城市群高质量发展，对于黄河流域实现高质量也发挥着重要的作用。

研究方法的创新。目前，对于大气污染影响因素的研究，大多数学者考虑到了大气污染的空间依赖性，且多以分析解释变量对大气指标的影响程度为主，较少的学者能够考虑到大气污染的空间异质性。本文同时考虑了大气污染的空间依赖性和空间异质性，解析中原城市群大气污染的影响因素。

## 2 相关理论与方法

前文详细的阐述了选题背景及意义、国内外研究现状、研究内容和可能的创新之处，本章将对理论基础进行介绍，明确本文所涉及到的空气质量指数的相关概念、研究区域，并对 STIRPAT 模型、EKC 假说以及空间自相关分析、地理加权回归模型进行阐述，为后文的时空分布特征和影响因素分析奠定基础。

### 2.1 空气质量指数 AQI

2012 年 2 月，环保部发布通知，将空气质量指数（airqualityindex, AQI）作为定量描述空气质量的无量纲指标，并规定空气质量指数值与污染级别呈正相关关系，基于此我国拥有了全新的评价空气质量的指标，从侧面反映出我国对大气污染的重视程度逐渐加深。此外，《环境空气质量指数技术规定（试行）》中明确指出，有六项污染物参与空气质量的评定，包括二氧化硫、二氧化氮、可吸入颗粒物、细颗粒物、臭氧和一氧化碳。空气质量指数级别划分的具体内容如表 2.1 所示。

表 2.1 空气质量指数级别划分

空气质量指数	空气质量指数级别	空气质量指数类别及表示颜色
0~50	一级	优（绿色）
51~100	二级	良（黄色）
101~150	三级	轻度污染（橙色）
151~200	四级	重度污染（红色）
201~300	五级	重度污染（紫色）
大于 300	六级	严重污染（褐红色）

### 2.2 研究区域及数据来源

根据《中原城市群发展规划》，本文研究区域包括河南省 17 个城市（济源市因数据严重缺乏而不包括在内），山西省的晋城市、长治市和运城市，河北省的邯郸市、邢台市，山东省聊城市、菏泽市，安徽省的亳州市、苏州市、淮北市、

阜阳市、蚌埠市共 29 个地级市。

研究时间为 2015 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日，使用具体数据主要分为两个部分：空气质量指数数据和社会经济数据。空气质量指数数据源于中国环境监测总站（<http://www.cnemc.cn>），社会经济数据源于各城市发布的国民经济与社会发展公报及《中国统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》。其中，AQI 数据 102 万余条，其中有 0.2% 的数据存在缺失，约为 2032 条。本文采用前后两天均值对单一缺失值进行计算，采用三级移动平均法对连续缺失值进行计算。

## 2.3 STIRPAT 模型与 EKC 假说

本文将基于 STIRPAT 模型和 EKC 假说研究影响中原城市群大气污染的社会经济因素。

### 2.3.1 STIRPAT 模型

反映经济增长对环境影响的 IPAT 模型是由 Ehrlich 和 Holdren（1971）首次提出的。其将环境影响（Impact）分解为三个相关因素的恒等式，并对哪些因素会对环境产生影响进行讨论，IPAT 模型可以表示为：

$$Impact = Population \times Affluence \times Technology \quad (2.1)$$

其中，Impact 代表环境影响，可以是能源消耗、特定资源、废物排放或碳排放等；Population 代表人口，通常指的是区域的总人口数；Affluence 代表富裕度，通常用 GDP 来代表，表明区域的经济状况；Technology 代表技术水平，通常用单位 GDP 的环境影响来代表，即  $T=I/GDP$ ，刻画区域经济增长对环境的依存度。为了反映现实世界中的随机性，随后 Dietz 等人（1994）提出了环境影响的随机回归模型，简称 STIRPAT 模型（(Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology, STIRPAT)）。模型可表示为：

$$Impact = \alpha Population^b Affluence^c Technology^d e \quad (2.2)$$

2.2 式两边取对数后：

$$\ln Impact = \ln \alpha + b \ln Population + c \ln Affluence + d \ln Technology + \ln e \quad (2.3)$$

上式中， $\alpha$  为常数项， $b$ 、 $c$  和  $d$  是待估计系数， $e$  是残差项。

### 2.3.2 EKC 假说

工业化、城镇化的快速发展带动了经济社会的快速增长，经济集聚的外部负效应逐渐凸显，局部污染聚集问题日益突出。经济与环境之间存在着矛盾统一的关系，二者相互促进、相互制约。环境库兹涅茨曲线（EKC）理论是分析两者关系的经典假说，它源于美国经济学家西蒙·库兹涅茨（1955）的著作《经济发展与收入不平等》。该假设认为，如果某个国家发展程度较低，随着经济的发展，人均收入水平的提高与空气质量呈负相关，即人均收入水平高，空气质量变差，空气污染程度加深；当经济发展到一定的水平后，此时人均水平再进一步提高，环境污染程度不升反降，环境质量有所改善。

Grossman 等人（1991）将其引入环境领域。他们认为经济发展对环境的影响可以从以下三个路径实现。第一条路径：要素的投入是实现经济增长的基础，一旦有要素投入，就会增加对资源的利用，且产出增长的同时也会带来各种污染物的排放，从而对环境造成影响，此路径被称为规模效应；第二条路径：在国家经济增长的过程中，会伴随着技术的不断进步。技术进步一定程度上会提高生产率，相应的提高资源利用率。此外，发展清洁技术，可以从源头上对污染物的排放进行控制，此路径被称为技术效应；第三条路径：经济的不断增长，会相应的带来要素投入结构的改变，随之产出结构也会发生变化，当经济发展方式以高耗能重工业为主转变为以知识密集型产业为主时，空气污染问题自然而然就得到了缓解，此路径被称为结构效应。

## 2.4 空间自相关分析

由地理学第一定律可知，区域内变量值存在一定的相互依赖关系，且依赖关系与距离呈负相关，距离越远，依赖性就越弱，相反依赖性就越强（Geary, 1956）。已有研究证明大气污染物在京津冀城市群、长三角城市群、珠三角城市群等地区均具有显著的自相关特征（潘竟虎等，2014；徐伟嘉等，2014；周磊等，2016）。基于此，本文选取全局莫兰指数对中原城市群空气质量指数（AQI）的空间自相关进行检验。可知，当全局 Moran's  $I > 0$  时，说明中原城市群 AQI 存在正的空间自相关关系；当全局 Moran's  $I < 0$  时，说明中原城市群 AQI 存在负的空间自相关

关系。全局 Moran's I 指数的公式如下：

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij}} \quad (2.4)$$

上式中： $I$  为全局 Moran's  $I$  指数值； $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ,  $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ ； $n$  为本文研究的中原城市群的城市个数， $n=1, 2, \dots, 29$ ； $x_i, x_j$  分别为城市  $i$  与  $j$  对应 AQI 数值， $W_{ij}$  为空间权重矩阵（本文使用邻接矩阵）。此外，还需对 Moran's  $I$  值进行  $Z$  值检验，验证其是否存在空间自相关关系。计算公式如下：

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \quad (2.5)$$

上式中， $\text{Var}(I)$  和  $E(I)$  为 Moran's  $I$  指数的方差与期望。

假设中原城市群 AQI 指数存在空间自相关，为了进一步确定 AQI 指数在中原城市群空间集聚的具体位置，利用局部 Getis-Ord 指数识别大气污染的局部空间自相关特征，即区分区域单元  $i$  和附近单元之间的空间分布格局是高-高聚集还是低-低聚集。对于给定的区域单元  $i$ ，其 Getis-Ord 指数的计算公式如下：

$$G_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (2.6)$$

上式中，统计量  $G_i$  表示局部 Getis-Ord 指数值。当统计量  $G_i$  显著性大于 0 时，表示研究单元和相邻单元的空气品质指数值均较高，该区域为高值-高值聚集区；当  $G_i$  显著性小于 0 时，表明研究单元及相邻单元的空气品质指数值均较低，为低值-低值聚集区。

## 2.5 地理加权回归模型

地理加权回归模型（GWR）在传统模型的基础上做出了改变，将线性回归与空间相关性进行结合，使得 GWR 模型可以研究被忽略的局部特征，因为变量之



间的关系可以随着变量所处位置的不同而发生变化(张耀军等, 2012; 姬露露等, 2014)。GWR 模型形式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^7 \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (2.7)$$

式中:  $y_i$  为研究城市  $i$  的空气质量指数 AQI;  $(u_i, v_i)$  为城市  $i$  所处的位置;  $\beta_k(u_i, v_i)$  为城市  $i$  的回归参数;  $x_{ik} (k=1, 2, \dots, 7)$  为影响城市  $i$  空气质量的 7 个社会经济因素;  $\varepsilon_i$  为随机扰动项。

本文采用加权最小二乘法来估计  $\beta(u_i, v_i)$ , 计算公式如下:

$$\beta(u_i, v_i) = (X^T W(u_i, v_i) X)^{-1} X^T W(u_i, v_i) y \quad (2.8)$$

式中:  $X$  为解释变量的矩阵;  $X^T$  为矩阵  $X$  转置;  $y$  表示被解释变量, 即空气质量指数 AQI。模型中  $\beta(u_i, v_i)$  的估计值与空间权重矩阵  $W(u_i, v_i)$  密切相关, 随  $W(u_i, v_i)$  的不同而不同, 所以为了估计参数  $\beta(u_i, v_i)$ , 首先需选择一个权重函数来确定  $W(u_i, v_i)$ 。在此采用 Gauss 函数法来确定  $W(u_i, v_i)$ , 其表达如下:

$$w_{ij} = \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{b}\right) \quad (2.9)$$

式中:  $w_{ij}$  为两个城市之间的权重;  $d_{ij}$  表示两个城市之间的距离;  $b$  为带宽, 表示随着距离  $d_{ij}$  的增加, 权重影响衰减的速度, 决定了权重计算方案。  $b$  越大, 权重影响衰减的速度就越慢, 反之权重影响衰减的速度就越快。本文采用 AIC 准则来优化带宽:

$$AIC = 2n \ln(\sigma) + n \ln(2\pi) + n \frac{n + \text{tr}(S)}{n - 2 - \text{tr}(S)} \quad (2.10)$$

所用模型中的最优带宽为最小 AIC 值所对应的带宽, 其中 AIC 值称为赤池信息值;  $n$  为所研究的城市个数;  $\text{tr}(S)$  为带宽的函数, 表示地理加权回归模型中  $S$  矩阵的迹;  $\sigma$  为误差项估计的标准离差。

### 3 大气污染的时空分布特征

本章将从年度、季节、月度和日度四个不同的时间尺度出发来分析中原城市群 2015~2018 年 AQI 的时间变化趋势及空间分布特征，并结合四年 AQI 的变化特征得到年份间的动态变化规律和空间演变规律。

#### 3.1 大气污染的时间变化特征

##### 3.1.1 AQI 年度变化特征

根据 2015~2018 年 AQI 监测数据统计，2015 年 AQI 年平均值为 110.64，2016 年平均值为 105.46，2017 年平均值为 104.77，2018 年平均值为 100.04，四年平均值下降 10.60，下降率为 9.6%，说明中原城市群大气污染水平近四年有所下降，但 AQI 年平均值仍处于轻度污染范围。为直观反映四年来空气污染的年际变化趋势，绘制了 2015~2018 年 AQI 核密度估算图（周海峰，2019）。从图 3.1 可以看出，从 2015 年到 2018 年，AQI 核密度估算曲线峰度逐渐增高，曲线峰度和右尾逐渐向左移动，表明中原城市群各城市 AQI 指数值越来越集中，空气污染水平逐年下降。

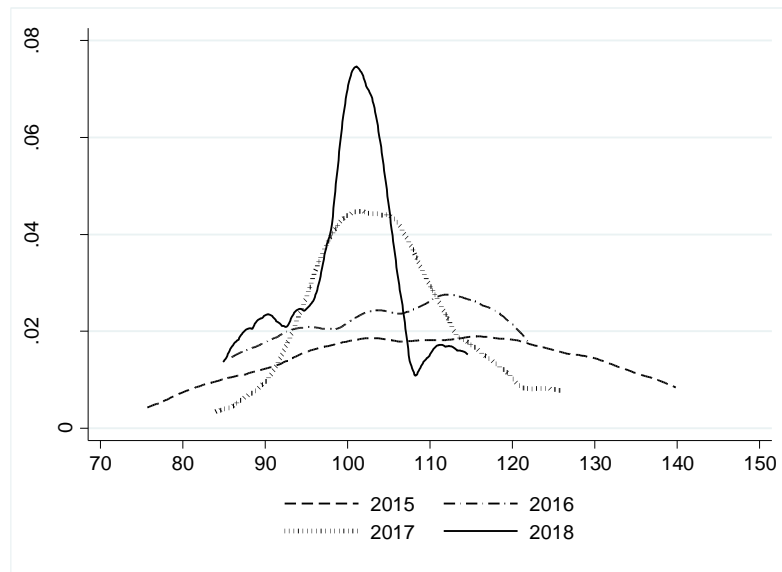


图 3.1 2015~2018 年中原城市群 AQI 年均值核密度估计图

### 3.1.2 AQI 的季节变化特征

根据气候统计方法，一年分为春、夏、秋、冬四季，时间划分分别为 3~5 月、6~8 月、9~11 月、12~2 月。根据上述划分方法分别计算了 2015~2018 年四季 AQI 指数，图 3.2 为中原城市群各季度 AQI 的变化情况。

从图 3.2 可以看出，春、冬季空气质量指数季节平均值呈逐年下降趋势。从四年各季节下降情况看，冬季 AQI 下降幅度最大，达 13.9%，数值下降 21.08；秋季降幅最小，为 6.4%，数值下降了 6.15；春季和夏季降幅分别为 6.6%和 10.7%，数值下降 7.03 和 9.31。根据四年 AQI 季节平均值，四季极差为 64.73。夏季为 79.18，属最低水平，冬季为 144.91，属最高水平，春秋两季 AQI 均值分别为 103.58、92.90，属居中水平。可以看出，中原城市群大气污染季节特征明显，为冬季污染程度高，夏季污染程度低，春秋两季污染程度居中。

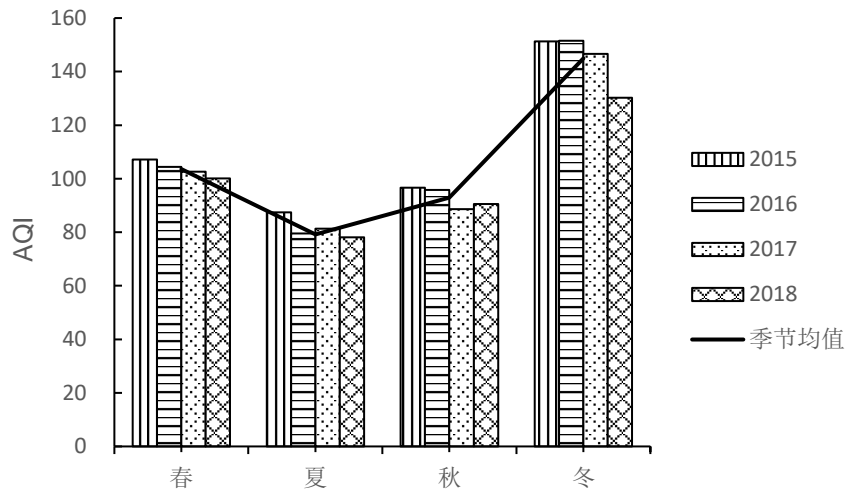


图 3.2 2015~2018 年中原城市群 AQI 季均值趋势图

### 3.1.3 AQI 月变化特征

图 3.3 为 2015~2018 年中原城市群 AQI 的月均值趋势图。由图可知，2015~2018 年 AQI 均为 U 型的月度变化趋势。2018 年，9 月份空气质量最好，AQI 指数为 63.78，2015 年、2016 年和 2017 年 8 月份空气质量最好，AQI 指数分别为 78.92、65.20 和 73.69。此外，从图中还可以看出，各年的污染水平在时间上呈先降后升的动态趋势。1 月、2 月和 12 月的空气质量指数值较大，6 月、7 月和 8

月的空气质量指数值处于一年中的最低水平，其他月份数值介于两者之间，这也证明了 3.1.2 中得出的结论：中原城市群大气污染季节特征明显，冬季污染程度高，夏季污染程度低，春秋季节污染程度居中。从四年的对比情况来看，2018 年月空气质量状况整体要优于其他年份，表明中原城市群空气质量正在逐年改善。

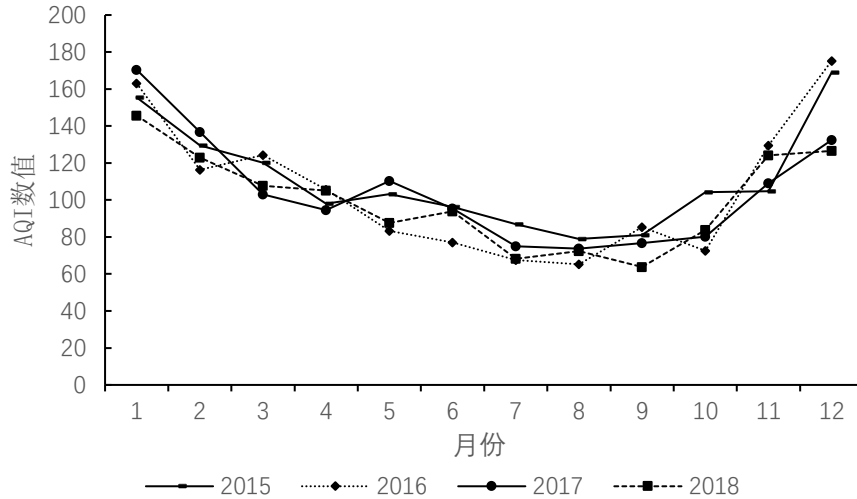


图 3.3 2015~2018 年 AQI 的月均值趋势图

### 3.1.4 AQI 日变化特征

日度 AQI 变化趋势用日历热图表示（周海峰，2019）。如图 3.4 所示，四年中，6 月、7 月、8 月 AQI 数值较低，表明此期间空气质量相对较好，12 月、1 月、2 月 AQI 数值较高，表明此期间空气质量相对较差，再次证明了 3.1.2 中得出的结论。对比四年历年热图可以看出，中原城市群空气质量优良天数逐年增加，从 2015 年的 173 天增加到 2018 年的 226 天，增加了 53 天。此外，从日历热图的颜色分布来看，冬季色差表现为最大，说明冬季 AQI 数值具有不稳定性，而夏季色差表现为最小，说明夏季 AQI 数值较为稳定，空气质量变化幅度较小。

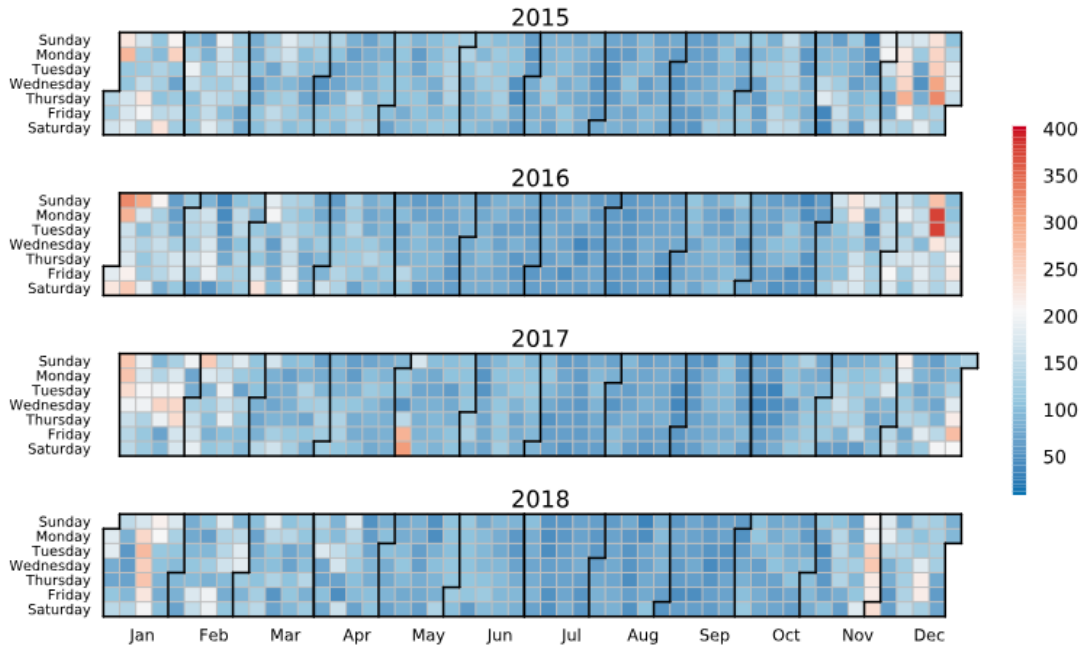


图 3.4 2015~2018 年中原城市群 AQI 日均值日历热图

为进一步分析中原城市群空气质量变化程度，绘制了 2015~2018 年空气质量等级比例折线图。如图 3.5 所示，整体来看，空气质量优良率四年来有所提高。2015 年空气质量优良率为 40.5%，2016 为 60.3%，2017 年为 58.3%，2018 年为 61.9%，2015~2018 年间，空气质量优良率增长了 14.5%。从各污染程度的天数变化情况来看，相比于 2015 年，2016 年轻度污染天数下降幅度最大，降幅为 15.6%，2017、2018 年，轻度污染天数基本保持不变。中度污染天数在 2016 年有所上升，增幅达 1.9%，而在 2017 年、2018 年中度污染天数又保持下降趋势。四年来，有 4% 左右的天数（15 天左右）处于重度污染，2015、2016 及 2017 年，有 0.5% 左右的天数（2 天左右）处于严重污染，2018 年无严重污染天气。可以看出，2015~2018 年，中原城市群对轻度污染水平的大气污染控制效果显著，对中度和重度污染的防控力度有待加大。

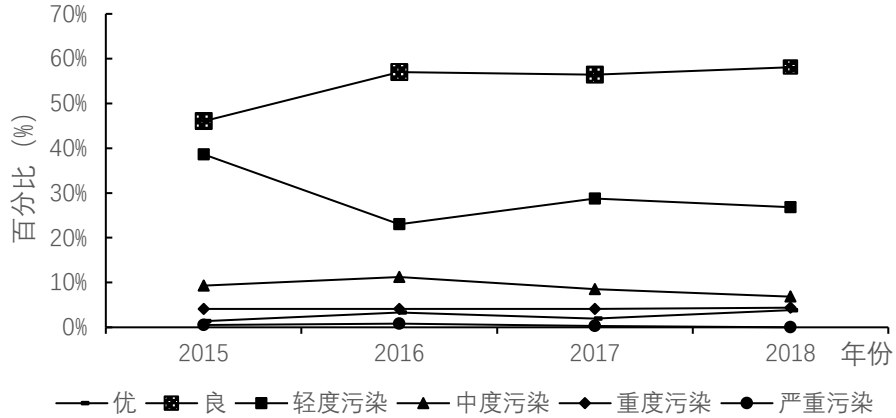


图 3.5 2015~2018 年中原城市群空气质量等级变化图

### 3.2 大气污染的空间分布特征

在分析中原城市群大气污染的时间变化特征后,接下来研究中原城市群不同城市大气污染的空间分布特征。

#### 3.2.1 AQI 年度空间分布特征

图 3.6 为 2015~2018 年中原城市群 29 个城市 AQI 的年均值和 4 年间 AQI 的变化率。由图可知,4 年间中原城市群各城市 AQI 年均值基本处于空气质量良好与轻度污染水平。从 4 年分别来看,2015 年中原城市群中空气质量处于良好状态的城市有 8 个,且这些城市处于中原城市群的西北部与东南部,即山西省南部 3 个地级市和河北省部分地区;有 21 个城市处于轻度污染水平,占所考察城市的 72%。2016 年,有 9 个城市的年均空气质量处于良好状态,有 20 个城市的年均空气质量处于轻度污染水平,占所考察城市的 69%。相比于 2015 年,山西省长治市由空气质量良好转变为轻度污染,河南省南阳市、信阳市由轻度污染转变为空气质量良好。2017 年中原城市群中空气质量处于良好状态的城市个数与处于轻度污染水平的城市个数与 2016 年一致,分别为 9 个和 20 个,但城市分布状况差别较大,空气质量处于良好状态的城市多处于中原城市群南部,即河南省部分地区。2018 年,中原城市群中空气质量处于良好状态的城市有 11 个,且这些城市多处于中原城市群的南部地区;处于轻度污染水平的城市有 18 个,占所考察城市的 62%。由此可以看出,中原城市群整体空气质量有所好转。此外,河北省邢台市、邯郸市每年都占据空气污染的前 5 名,且河南省郑州市四年内在空

气污染前五名中出现三次，山东省聊城市出现两次。安徽省蚌埠市、亳州市、阜阳市年均空气质量均处于良好状态，安徽省宿州市、淮北市和山西省长治市有三年年均空气质量处于良好状态，山西省运城市、晋城市空气质量有两年表现为良好。可见，中原城市群空气污染集中于中部和北部城市，主要包括河北省南部 2 个地级市、山东省西部 2 个地级市及河南省部分地区，空气质量优良区位于中原城市群西北部和东南部，即山西省长治市和安徽省地区。还可从图中看出，中原城市群南部地区城市空气质量逐渐好转。

接下来讨论的是 AQI 的变化幅度，如图的 d 所示。具体来说，空气质量改善幅度较大的地区主要位于中原城市群的西北部和东南部地区。其中，空气质量改善幅度最大的是山西省晋城市，为 15.64%，紧接着是阜阳市和运城市分别为 14.43%和 8.93%。此外，苏州市、淮北市和亳州市也有较小的改善。

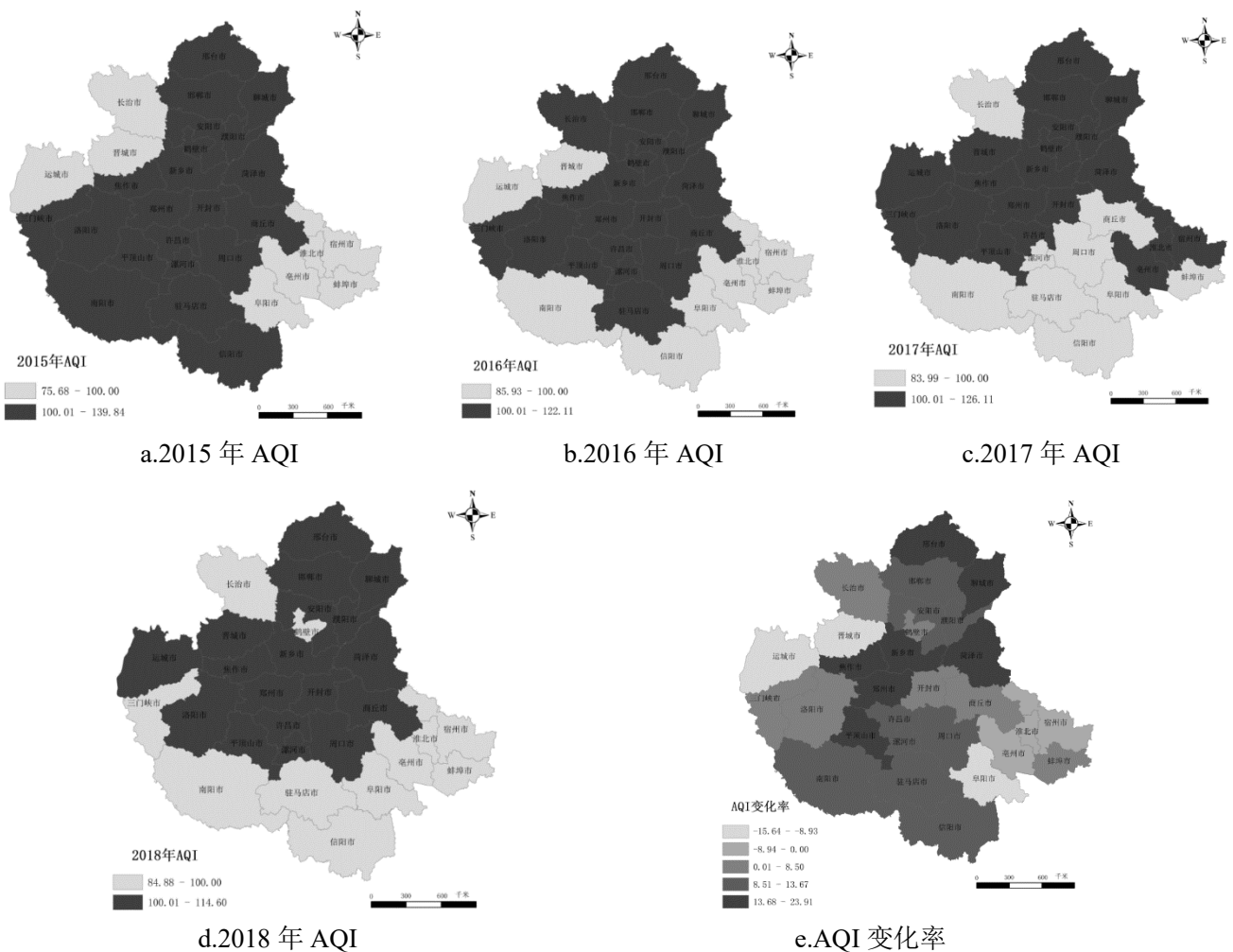


图 3.6 2015~2018 年中原城市群 AQI 年均值及变化率空间分布图

### 3.2.2 AQI 季节空间分布特征

图 3.7 展示了 2015~2018 年中原城市群空气污染城市数目变化情况。从 4 年来看,空气污染城市数目均在冬季最多,夏季最少,春、秋季节居中。2015 年,春、夏、秋、冬四季空气污染城市数目分别为 20 个、5 个、11 个、29 个,2016 年分别为 19 个、0 个、10 个、29 个,2017 年分别为 16 个、2 个、2 个、29 个,2018 年分别为 14 个、0 个、4 个、28 个。且在考察年内,四季的空气污染城市数目大体上均呈现下降趋势。

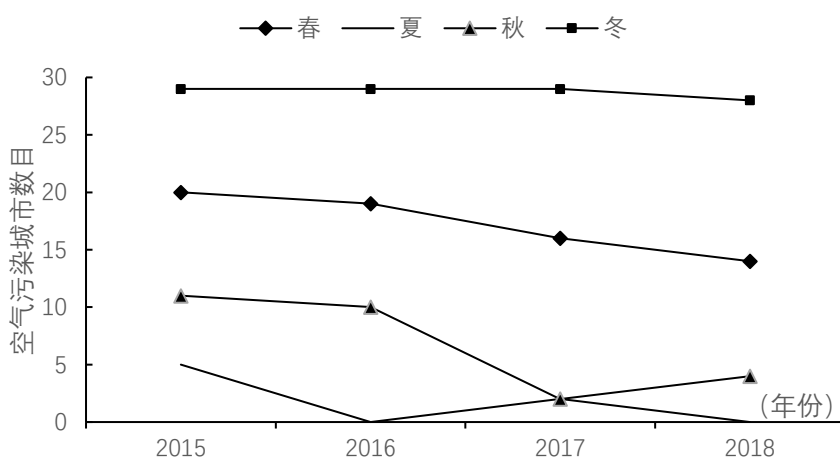
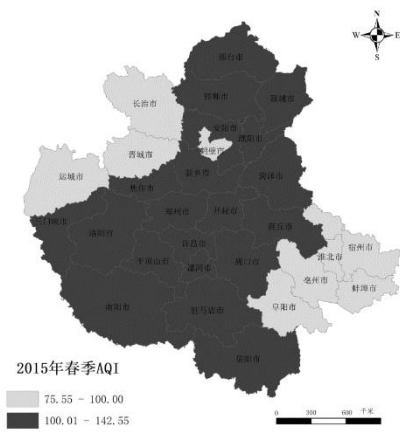


图 3.7 2015~2018 年中原城市群空气污染城市数目变化图

图 3.8 展示了 2015~2018 年 AQI 的季节分布情况,可知春季空气污染范围逐年缩减,且污染范围逐渐向西北移动,污染区主要集中在河北省的邢台、邯郸市,河南省的焦作、开封、郑州、商丘、平顶山、许昌、洛阳和安阳市。在 2016 年、2018 年夏季,中原城市群各城市空气质量均处于良好状态。2015 年,河北省邢台、邯郸市,山东省的聊城市,河南省的郑州、平顶山市空气质量表现为轻度污染;2017 年,河北省的邯郸市,山西省的晋城市空气质量表现为轻度污染,其 AQI 指数较小,分别为 101.58、102.52。综合来看,夏季空气质量总体表现为良好,且空气质量水平逐年提高。空气质量改善程度最大的季节为秋季,且秋季污染范围逐年缩小。2015 年秋季,中原城市群的中南部和中北部城市为主要污染范围,即在河北省、山东省和河南省部分地区,2016 年秋季,空气污染范围逐渐向北移动,此时中原城市群的中北部为主要污染范围,到了 2017 年、2018 年中东部的空气污染中心只在中原城市群北部。从冬季空气质量来看,2015 年冬



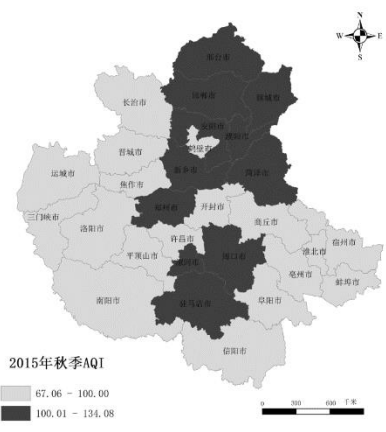
季，河北省邢台市的空气质量处于重度污染，中原城市群中南部城市空气质量处于中度污染，南部和西北部处于轻度污染，没有出现空气质量优良区；2016年冬季，中原城市群的中部和北部地区空气质量处于中度污染，西北部和南部空气质量处于轻度污染，同样没有出现空气质量优良区；相对于2016年冬季，2017年冬季空气污染范围有所减少；2018年冬季，河南省许昌市为空气质量优良区，除南阳、安阳市空气质量属于中度污染外，其余城市空气质量均处于轻度污染状态。可见，中原城市群冬季空气质量逐年向好。从春、夏、秋、冬四季的空气污染范围来看，针对中原城市群空气污染季节性的特点，应该把污染防治重点落在河北、河南以及山东三省的交界处，以期提升其空气质量。



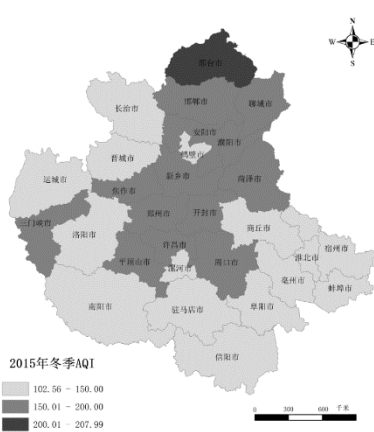
a.2015年春季AQI



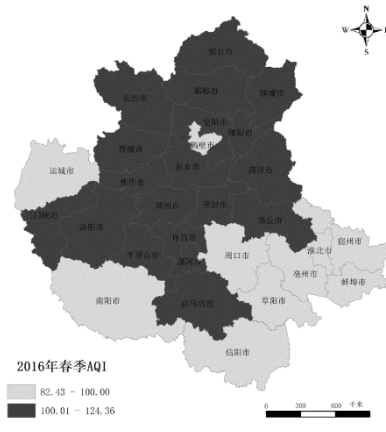
b.2015年夏季AQI



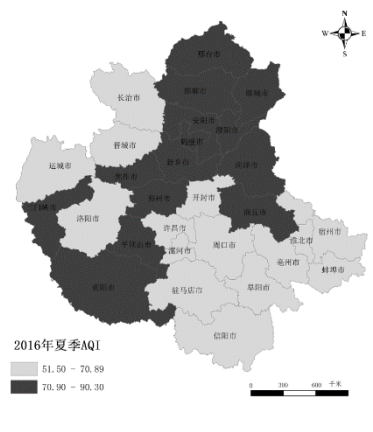
c.2015年秋季AQI



d.2015年冬季AQI



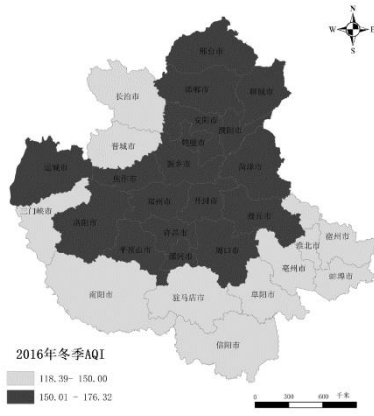
e.2016年春季AQI



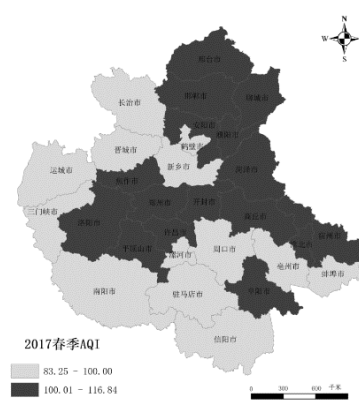
f.2016年春季AQI



g.2016年秋季 AQI



h.2016年冬季 AQI



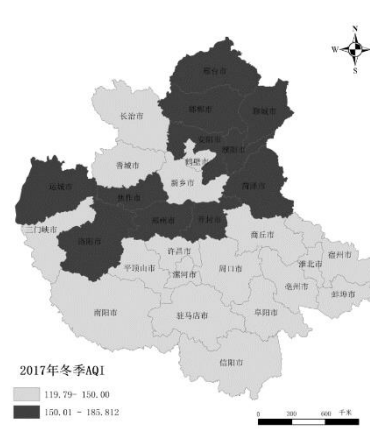
i.2017年春季 AQI



j.2017年夏季 AQI



k.2017年秋季 AQI



l.2015年冬季 AQI



m.2018年春季 AQI



n.2018年夏季 AQI

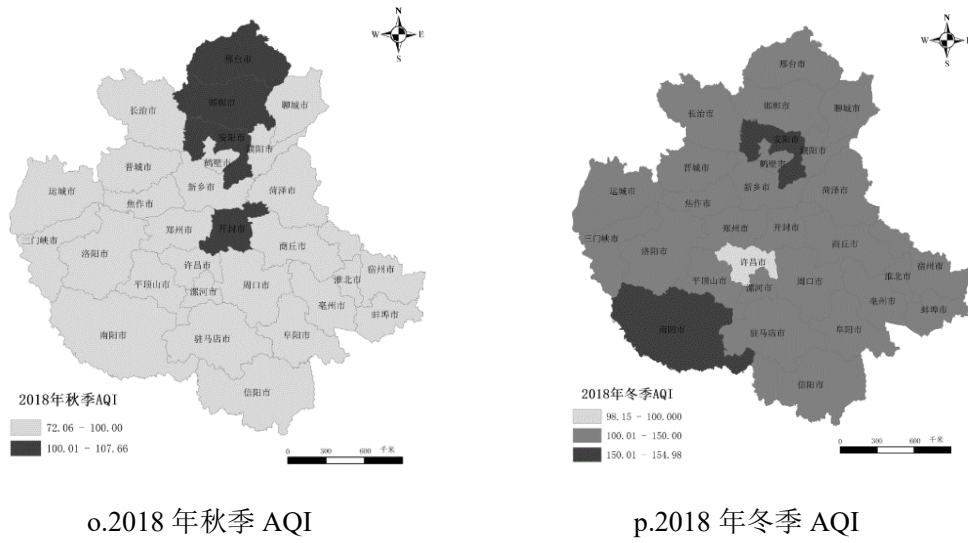


图 3.8 2015~2018 年全国 AQI 季节均值空间分布图

### 3.2.3 AQI 日度空间分布特征

图 3.9 展示的是 2015~2018 年中原城市群 AQI 日均值优良达标率。从各年 AQI 日均值的达标率来看：2015 年，河北省邢台市、邯郸市，山东省聊城市、菏泽市，河南省新乡市、郑州市、平顶山市日均 AQI 优良达标率不足 40%，山西省晋城市、运城市及安徽省地区日均 AQI 优良达标率均在 70%以上。可见，2015 年中原城市群中北部城市空气质量较差，西北及东南部城市空气质量相对较好。2016 年，河北省邢台市，山东省聊城市日均 AQI 优良达标率不足 50%，安徽省城市及河南省信阳市日均 AQI 优良达标率在 70%以上。相较于 2015 年，2016 年空气质量整体趋于好转。2017、2018 年，中原城市群日均 AQI 优良达标率呈现出由北向南逐渐递增的趋势。此外，空气质量优良达标率增长最多的是菏泽市，由 34.5%上升到 64.7%，增幅达 27.2%。此外，宿州市、淮北市、阜阳市、亳州市、运城市及晋城市，空气优良达标率下降的城市有 6 个，其中晋城市空气优良达标率下降了 14.9%，再者是运城市和阜阳市，降幅分别为 10.8%和 5.4%。降低最少的是宿州市，降幅为 0.5%。

总体而言，中原城市群空气质量优质区域在不断扩大，而空气质量相对劣质区域则始终出现于中北部地区，紧邻河南、河北、山东省的周边地区为空气污染的重点防范区。

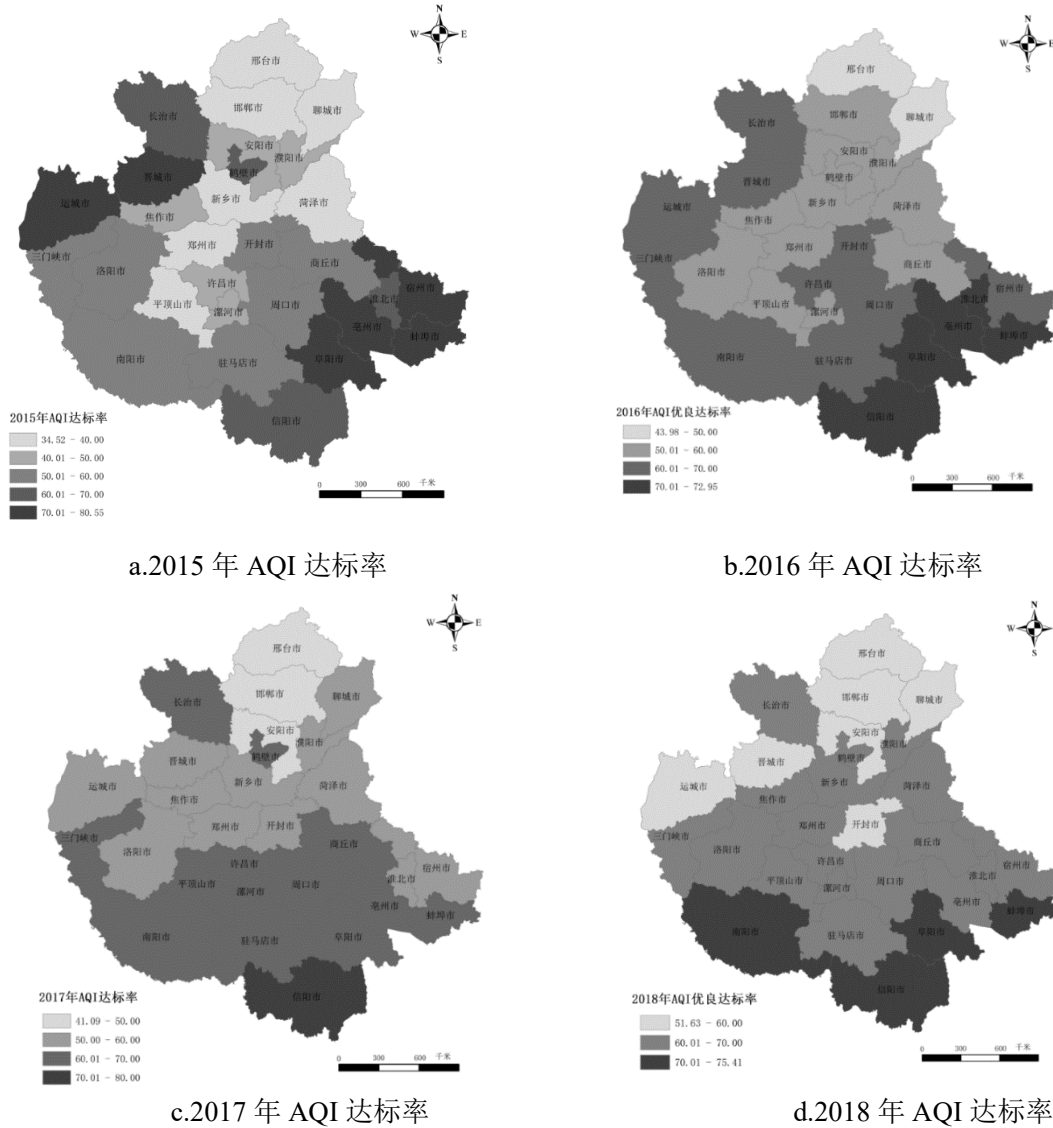


图 3.9 2015~2018 年中原城市群 AQI 日均值优良达标率

### 3.3 AQI 空间集聚特征

空间自相关分析可以用来研究变量之间的相关程度和集聚状况，可以分为全局空间自相关和局部空间自相关。其中，全局自相关分析能够判断变量之间是否具有相关性以及相关性的大小，局部空间相关分析可以进一步判断出变量的集聚模式。本文采用 ArcGIS 软件，对中原城市群 AQI 的全局空间自相关和局部热点进行了分析。

### 3.3.1 全局相关性分析

通过对中原城市群 2015~2018 年历年 AQI 均值和四年 AQI 均值进行全局自相关分析, Moran's I 指数、Z 值和 I 值如下表所示。

表 3.1 中原城市群 AQI 全局 Moran's I 指数及其检验

指标	I	Z	P
2015 年	0.47	3.26	0.001
2016 年	0.59	3.98	0.000
2017 年	0.31	2.25	0.024
2018 年	0.38	2.71	0.006
四年均值	0.52	3.55	0.000

由表 3.1 可知, 2015~2018 年历年和四年 AQI 均值的 Z 值分别为 3.26、3.98、2.25、2.71 和 3.55, Z 值均大于 1.96, 表明中原城市群各城市之间空气质量具有显著的空间自相关, 且不是随机分布。Moran'I 统计量为正, 表明各城市之间存在正的空间自相关, 即空气污染严重的城市附近聚集着其他污染严重的城市, 空气质量较好的城市附近聚集着其他空气质量较好的城市。

### 3.3.2 局部热点分析

由上文可知, 中原城市群各城市之间 AQI 存在显著的空间自相关, 为了确定 AQI 指数在中原城市群空间集聚的热点和冷点区域, 利用局部 Getis-Ord 指数进行识别。对四年均值和各年 AQI 数值进行局部热点分析, 结果如下图所示。

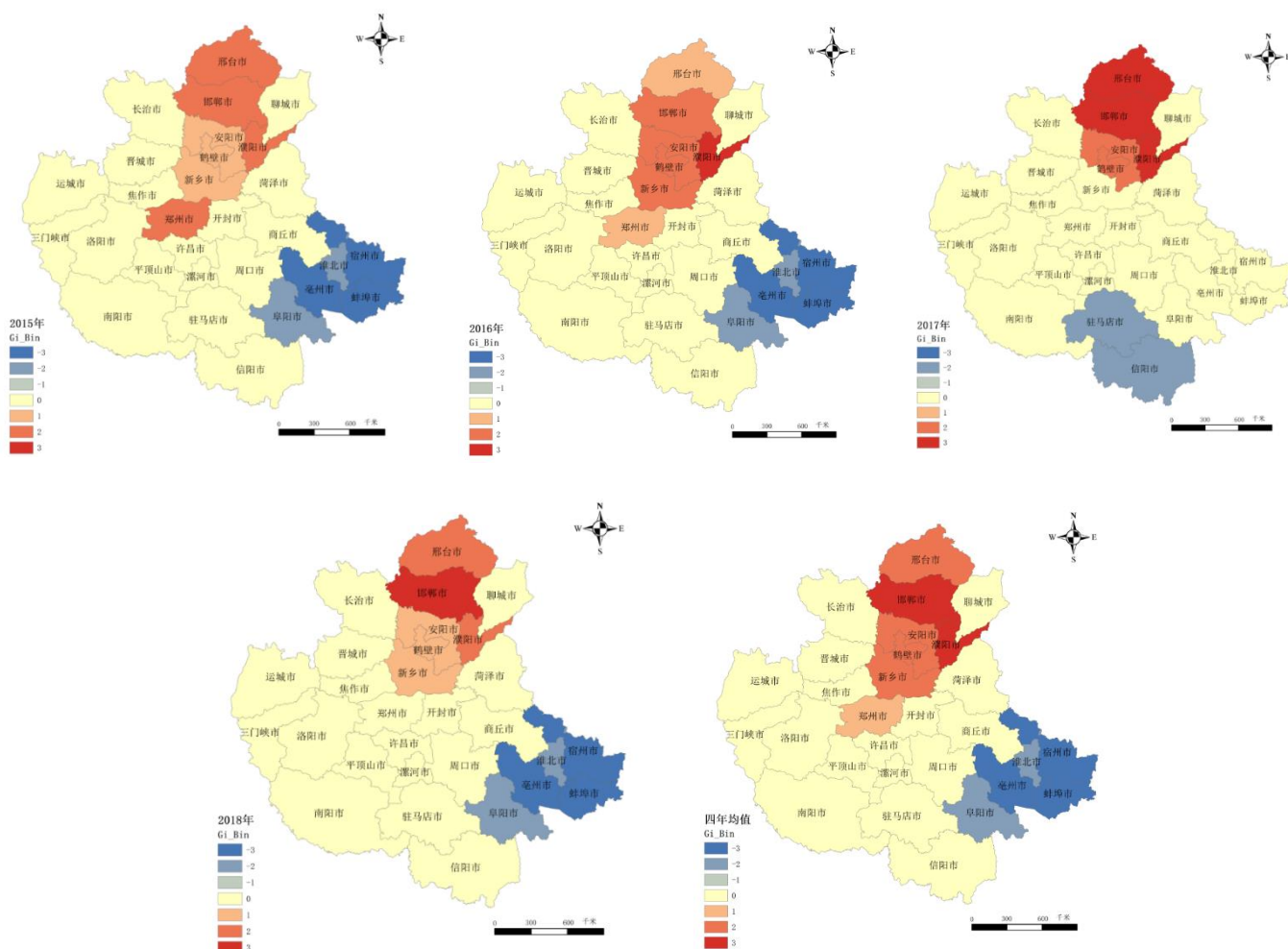


图 3.10 中原城市群历年空气质量空间集聚图

从图 3.10 可以看出，中原城市群 AQI 数值空间集聚性较高的地区主要位于中原城市群的中北部地区和东南部地区。其中，热点区域主要集中在河北省邢台市、邯郸市和河南省的濮阳市、新乡市、鹤壁市、安阳市、郑州市，表明这些地区为污染聚集区，即空气质量指数在这些地区为高值-高值聚集区，空气质量指数较高，污染程度较为严重；冷点区域主要集中在安徽省的淮北市、宿州市、阜阳市、亳州市及蚌埠市，表明这些地区属于低值-低值聚集，即空气质量指数较低，污染程度较弱是中原城市群持续稳定的空气质量优良区；中原城市群西部及南部地区，包括山西省的长治市、晋城市、运城市和河南省部分城市 AQI 数值没有表现出明显的空间集聚性。

### 3.4 本章小结

本章使用 AQI 来表征大气污染水平，从年度、季节、月度和日度四个不同的时间尺度出发来分析中原城市群 2015~2018 年内 AQI 的时间变化趋势及空间分布特征，同时进行 AQI 空间自相关分析，研究中原城市群空气污染的聚集性。

从 AQI 年度特征来看，四年间中原城市群空气污染水平有所下降，但年 AQI 均值仍处于为轻度污染范围。此外，中原城市群空气污染集中于中部和北部城市，主要包括河北省南部 2 个地级市、山东省西部 2 个地级市及河南省部分地区，空气质量优良区位于中原城市群西北部和东南部，即山西省长治市和安徽省地区，空气质量改善幅度较大的地区主要位于中原城市群的西北部和东南部地区。

从 AQI 季节特征来看，四年间春、冬季空气质量指数季节平均值呈逐年下降趋势，且季节特征明显，冬季污染程度高，夏季污染程度低，春秋季节污染程度居中；空气污染城市数目均在冬季最多，夏季最少，春、秋季节居中，且在考察年内，四季的空气污染城市数目大体上均呈现下降趋势；春、秋季空气污染范围逐年缩减；夏季空气质量总体表现为良好，且空气质量水平逐年提高；冬季空气污染状况也正在逐年改善。

从 AQI 月变化特征来看，2015~2018 年 AQI 均为 U 型的月度变化趋势。2018 年，9 月份空气质量最好，AQI 指数为 63.78，2015 年、2016 年和 2017 年 8 月份空气质量最好，AQI 指数分别为 78.92、65.20 和 73.69。从四年的对比情况来看，2018 年月空气质量状况整体要优于其他年份。

从 AQI 日度特征来看，中原城市群四年间空气质量优良日总数逐年增加，空气质量优良率逐年提升；2015 年中原城市群中北部城市空气质量较差，西北及东南部城市空气质量相对较好，相较于 2015 年，2016 年空气质量整体趋于好转。2017、2018 年，中原城市群日均 AQI 优良率呈现出由北向南逐渐递增的趋势；总体而言，中原城市群空气质量优质区域在不断扩大，而空气质量相对劣质区域则始终出现于中北部地区。

通过 AQI 空间自相关分析研究发现，中原城市群各个城市之间的空气污染状况具有明显的空间自相关性，且 AQI 数值空间集聚性较高的地区主要位于中原城市群的中北部地区和东南部地区。



## 4 大气污染影响因素分析

上一章主要介绍了中原城市群 29 个城市大气污染的时空分布规律，发现大气污染存在空间依赖性和空间异质性。在此基础上，进一步探讨中原城市群大气污染的影响因素。考虑到影响空气质量的自然因素，通过查阅相关文献，一个城市的空气质量不仅与其地理位置、地形和气象条件有关，还与沙尘天气、森林火灾等自然灾害相关，但这些客观因素无法人为控制。因此，本文重点研究可控的人为因素。

本章首先说明影响因素变量选取及数据来源，然后再采用普通最小二乘回归模型（OLS）和地理加权回归模型（GWR）对影响中原城市群空气质量的因素进行分析。

### 4.1 影响因素变量选取与数据收集

本节以环境污染影响因素的基本理论框架 STIRPAT 模型和 EKC 假说为基础，来研究中原城市群大气污染的社会经济因素。依据 STIRPAT 理论模型，首先选取人口因素、社会富裕程度和技术水平作为影响因素。STIRPAT 模型通常用总人口来表示区域人口因素，认为总人口与环境污染呈正相关关系。然而，在我国总人口指标不具有可比性，因为我国城市规划面积和总人口方面相比有较大偏差。人口密度（Density）可以用来衡量人类的活动强度，且生产中要素的投入及污染物的排放很大程度上取决于当地人类的活动强度，所以用人口密度来表征人口因素较为合理。社会富裕程度通常以人均生产总值（GDP）来衡量，而技术水平（Tec）则以每万人拥有专利的数量来衡量。除上述三个核心解释变量外，参考已有的研究成果和 EKC 假说，选取以下四个变量作为模型的控制变量。

产业结构（Ind）。由 EKC 假说可知，随着经济的不断增长，要素投入结构和产出结构也会发生相应变化，当经济发展方式由高耗能重工业为主转变为以知识密集型产业为主时，空气污染问题自然而然就得到了缓解，这种因果关系被称为结构效应。可以采用第二产业产值占 GDP 比重来表征结构效应。经济的发展离不开三次产业的发展与进步，其中第二产业贡献尤为突出，但工业发展过程中会消耗大量能源，产生大量工业三废，这些无疑加剧了城市的空气污染，给城市



环境带来压力。

对外开放(Open)。在环境影响研究中,必不可少的会考虑到对外开放因素。外商直接投资(FDI)是指外国投资者为获得对我国相关企业的一定控制权和追求利润而将资本或生产要素投资到我国的行为。不同学者对于 FDI 对环境质量的影响持不同观点。部分学者认为 FDI 对改善空气质量有积极的影响,他们认为外商引进环境友好型技术和产品确实可以起到改善环境的效果,这种观点被称为“污染晕轮”假说;还有学者认为 FDI 对改善空气质量有消极的影响,他们认为外商向东道国转移高污染高耗能产业,会促使环境恶化,这种观点被称为“污染避难所”假说(许和连等,2012)。本文利用 FDI 在 GDP 中的比重来衡量对外开放程度,考察其对中原城市群大气污染的影响。

汽车尾气排放(Aee)。由于数据可用性的限制及大量研究表明,机动车尾气排放是造成大气污染的直接原因,而公路客运量的增加势必会带来机动车使用量的增长,可见公路客运量与汽车尾气排放量呈正相关关系,所以本文使用公路客运量指标来表征汽车尾气排放。机动车尾气中含有一氧化碳、氮氧化物和二氧化硫等污染物质,且这些污染气体是 PM<sub>2.5</sub> 的直接来源。

绿化水平(Green)。由于城市绿化在除尘、净化空气、改善环境等方面的强大功能,所以认为城市绿化水平也是影响大气污染程度的重要因素之一。本文绿化水平用“建成区绿化覆盖率”来衡量。

综上所述,本文选取人均生产总值、人口密度、第二产业产值比重、外资投资强度、每万人拥有专利数、公路客运量、建成区绿化覆盖率等具体指标,对应经济发展(GDP)、人口集聚(Density)、工业化(Ind)、对外开放(Open)、科技进步(Tec)、汽车尾气排放(Aee)、环境规制(Green)等宏观影响因素,来对中原城市群大气污染的社会经济影响因素进行实证分析。

## 4.2 基于 OLS 模型的影响因素综合分析

首先,运用最小二乘法(OLS)模型对中原城市群 2015~2018 年的空气质量的影响因素进行分析。根据上文选取的影响因素,对 STIRPAT 模型(公式 2.3)进行补充和改进,构建了以下模型:

$$\begin{aligned} \ln AQI = & \alpha + \beta_1 \ln GDP + \beta_2 \ln Density + \beta_3 \ln Tec + \beta_4 \ln Ind \\ & + \beta_5 \ln Open + \beta_6 \ln Aee + \beta_7 \ln Green + \varepsilon \end{aligned} \quad (4.1)$$

上式中，为了避免遇到异方差问题，首先对各变量值进行了对数化处理。AQI 指数值为 STIRPAT 模型中的环境影响变量，即因变量，GDP、Density、Tec、Ind、Open、Aee、Green 为模型的自变量， $\alpha$  为常数项， $\beta_1$  到  $\beta_7$  为模型的待估参数， $\varepsilon$  为残差项。

表 4.1 OLS 模型回归结果

指标	2015 年系数	2016 年系数	2017 年系数	2018 年系数
<i>LnGDP</i>	0.0592**	0.0534**	0.0304*	0.0286*
<i>Ln Density</i>	0.0414*	0.0442**	0.0472**	0.0501**
<i>Ln Ind</i>	0.0394*	0.0193	-0.0351	-0.0165
<i>Ln Open</i>	-0.0541***	-0.0392**	-0.0374	-0.0064
<i>LnGreen</i>	-0.0063	-0.0037	-0.0316**	-0.0246
<i>Ln Tec</i>	0.0523	-0.0174	-0.0501***	-0.0400
<i>Ln Aee</i>	0.0234	0.0361**	0.0634***	0.0413***
Koenker(BP)统计量	3.0460*	2.722*	8.728*	1.940*
Adjusted R <sup>2</sup>	0.399	0.471	0.473	0.456

注：\*、\*\*、\*\*\* 分别表示在 10%、5%、1%水平上显著。

由表 4.1 可知，稳态评估系数 Koenker(BP)统计量均在 10%的水平上显著，说明数据集为显著非稳态，可以进行地理加权回归分析。在影响 AQI 的 7 个解释变量中，地区 GDP 回归系数在四年考察期内均显著为正值，表明地区 GDP 对空气污染有显著的正向影响，即伴随着人均 GDP 的提高，中原城市群空气质量不断下降。这在全国（Han 等，2014；段杰雄等，2018）、区域（贺祥等，2016；吴浪等，2018）和城市（Han 等，2016）等不同尺度的研究已得到证实。中原城市群正处于加速崛起的关键时期，经济增长带来的各种高耗能产品的使用，使得化石燃料的消费激增，从而增加了污染物的排放，恶化了空气质量，侧面反映出中原城市群经济增长方式仍较为粗放。

人口密度回归系数在四年考察期内同样均显著为正，而且与李光勤(2018)、杨冕(2017)、王少剑(2020)等人的研究相一致。人口密度越大，空气污染越严重，主要是因为随着人口密度的增加，人类活动会变得越来越频繁，对物质生活的要求也就越高，住房、交通等生产生活方式的压力也会加大，这将增加各种

污染物的排放，最终使空气污染更加严重。结合实际情况，人口密度大的地方大多集中在河南省和山东省，两省也是中原城市群空气污染极为严重的地区。

产业结构回归系数在 2015、2016 年考察期内为正值，2017、2018 年考察期内均为负值，且回归系数在 2015 年表现为显著，其他年份则表现为不显著，这可能是由于近年来中原城市群正处于城市转型、城市重新规划阶段，部分经济比较发达的城市在产业升级方面已经有所突破，但部分城市仍处于转型滞后阶段，多种因素进行融合使得中原城市群环境产业结构对环境的影响效应具有不确定性。

汽车尾气排放回归系数在四年考察期内均为正值，且除 2015 年回归系数不显著外，其他年份均表现为显著，即汽车尾气排放对中原城市群空气污染总体均呈现正相关效应。中原城市群人口稠密，机动车的需求市场巨大，要想控制机动车尾气排放带来的危害，就要大力推行新能源汽车，或者在机动车排气口安装净化装置，并建议人们绿色出行。

已有研究对外商投资、科技进步这两个因素的影响效应多存在不同结论。例如，严雅雪、齐绍洲（2017）认为外商投资对大气污染具有显著的促进作用，姜磊等（2018）持相反观点，认为外商直接投资可以优化城市环境。本文研究表明，外商投资改善了中原城市群的空气质量。究其原因，外商直接投资通过技术效应对中原城市群产生影响，包括先进的管理经验、较高的资源利用效率、人力资本的培养等，有效的减少了污染物的排放，对空气质量产生了积极影响。另外，就科技进步而言，除 2015 年外，科技进步回归系数在其他考察年均均为负值，且在 2017 年表现为显著。这可能是由于技术水平的提高能够有效的提高清洁能源的使用率，提升能源利用效率，从源头上减少污染物的排放。

绿化水平回归系数在 2015、2016 年考察期内为负值，且不显著，2017、2018 年考察期内均显著为负。因为植物不仅可以美化环境，给城市增添活力，还可以吸附大气中的颗粒物，涵养水分，在净化空气方面有很强的作用。因此，提高城市绿化水平对于大气污染防治具有重要意义。

### 4.3 基于 GWR 模型的影响因素时空差异分析

前文采用最小二乘法得到中原城市群 29 个城市中各研究变量对空气质量指数的平均影响，即地区 GDP、人口密度、汽车尾气排放、外商直接投资强度的增加对大气污染有显著的正向影响等，但此结论不能反映出各研究变量在不同城市不同年份之间对空气质量影响的区别。因此，该部分将采用地理加权回归方法探讨不同区域不同年份不同因素引起的 AQI 的空间差异。基于方程 (4.1) 全局回归和方程 (2.7)，可以构建以下 GWR 模型：

$$\begin{aligned} \ln AQI_i = & \alpha(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i) \ln GDP_i + \beta_2(u_i, v_i) \ln Density_i \\ & + \beta_3(u_i, v_i) \ln Tec_i + \beta_4(u_i, v_i) \ln Ind_i + \beta_5(u_i, v_i) \ln Open_i \\ & + \beta_6(u_i, v_i) \ln Aee_i + \beta_7(u_i, v_i) \ln Green_i + \sum_{k=1} \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (4.2)$$

(4.2) 式中模型变量的具体含义已在前文有所阐述。

#### 4.3.1 GDP 对大气污染影响的时空分异

2015~2018 年，地区 GDP 与空气污染之间均呈正相关关系（如表 4.2 所示），表明中原城市群各城市社会富裕度提高的同时空气污染水平也在提高。从地理加权回归模型结果可知，各个城市 GDP 变量弹性系数是不一致的，表明不同的社会经济发展水平对大气污染的影响程度存在差异。从弹性系数的空间分布来看，2015 年弹性系数高值区主要集中在中原城市群东南部地区，具体来说为安徽省北部 5 个地级市和河南省南部的信阳市，且系数呈现出由东南部向西北部逐渐递减的趋势，表明 2015 年地区 GDP 对中原城市群空气质量的恶化程度由东南部城市向西北部城市不断降低；2016、2017 年回归系数高值区和空间分布形态与 2015 年基本保持一致；2018 年系数高值区主要为中原城市群南部地区，包括河南省的南阳市、驻马店市、信阳市和安徽省的阜阳市，且回归系数呈现出由南向北逐渐递减的趋势，表明 2018 年地区人均生产总值对中原城市群空气污染的影响程度由南部城市向北部城市不断减弱。从弹性系数的范围来看，2015 年地区人均生产总值对空气污染的弹性系数为[0.048861, 0.068959]，2016 年为[0.049661, 0.058966]，2017 年为[0.023694, 0.037407]，2018 年为[0.018901, 0.032669]，总体上地区 GDP 弹性系数值呈现出缩小趋势，表明中原城市群各城市 GDP 对空气污染的影响程度在不断降低，表明实现经济增长以牺牲环境质量

作为代价的发展模式有望退出中原城市群。

综上，地区 GDP 对中原城市群空气污染产生正向影响，即随着人均 GDP 的提高，空气污染水平也有所加剧，但这种状况正在逐渐被改善。对于人均 GDP 弹性系数敏感的城市主要分布在中原城市群南部地区，包括安徽省北部城市和河南省南部城市，且弹性系数由南向北逐渐递减。

表 4.2 2015~2018 年地区人均生产总值估计系数空间分布

2015 年系数范围	所属区域	2016 年系数范围	所属区域
0.048861-0.052881	长治市、晋城市、运城市、三门峡市	0.049661-0.051522	长治市、晋城市、运城市、三门峡市
0.052882-0.056901	邢台市、邯郸市、安阳市、鹤壁市、焦作市、洛阳市	0.051523-0.053383	邢台市、邯郸市、安阳市、鹤壁市、焦作市、洛阳市
0.056902-0.060920	聊城市、濮阳市、新乡市、开封市、郑州市、许昌市、平顶山市、漯河市、南阳市	0.053384-0.055244	聊城市、濮阳市、新乡市、郑州市、开封市、许昌市、漯河市、平顶山市、南阳市
0.060921-0.064940	菏泽市、商丘市、周口市、驻马店市	0.055245-0.057105	菏泽市、商丘市、周口市、驻马店市
0.064941-0.068959	宿州市、淮北市、蚌埠市、亳州市、阜阳市、信阳市	0.057106-0.058966	宿州市、淮北市、蚌埠市、亳州市、阜阳市、信阳市
2017 年系数范围	所属区域	2018 年系数范围	所属区域
0.023694-0.026436	长治市、晋城市、运城市、三门峡市	0.018901-0.021654	邢台市、长治市、邯郸市、聊城市
0.026437-0.029179	邢台市、邯郸市、安阳市、鹤壁市、焦作市、洛阳市	0.021655-0.024408	运城市、晋城市、焦作市、安阳市、鹤壁市、新乡市、濮阳市、菏泽市
0.029180-0.031922	聊城市、濮阳市、新乡市、郑州市、开封市、许昌市、漯河市、平顶山市、南阳市	0.024409-0.027165	三门峡市、洛阳市、郑州市、开封市、商丘市
0.031923-0.034664	菏泽市、商丘市、周口市、驻马店市	0.027166-0.029915	平顶山市、许昌市、漯河市、周口市、亳州市、淮北市、宿州市、蚌埠市
0.034665-0.037407	宿州市、淮北市、蚌埠市、亳州市、阜阳市、信阳市	0.029916-0.032669	南阳市、驻马店市、阜阳市、信阳市

### 4.3.2 人口密度对大气污染影响的时空分异

2015~2018年,人口密度与空气污染支间均呈正相关关系(如表4.3所示),表明人口密度的增加,会空气污染状况。从地理加权回归模型结果可知,各个城市人口密度变量弹性系数是不一致的,表明中原城市群各个城市人口密度对大气污染的影响程度具有差异性。从弹性系数的空间分布来看,2015年弹性系数高值区主要集中在中原城市群北部地区,包括河北省南部2个地级市,山东省的聊城市和山西省的长治市,且系数呈现出由北向南逐渐递减的趋势,表明2015年人口密度对中原城市群空气污染的影响由北部城市向南部城市不断降低;2016年弹性系数高值区主要集中在西北部地区,包括山西省南部3个地级市和河南省的三门峡市,弹性系数呈现出由西北向东南逐渐递减的趋势;2017年系数高值区域集中在中原城市群的东南部地区,主要有安徽省北部5个地级市及河南省的信阳市,且系数表现为从东南向西北逐渐递减,表明2017年人口密度对中原城市群空气污染的影响程度由东南部城市向西北部城市不断降低,这与2015、2016年的空间分布形态完全相反;2018年弹性系数高值区和分布形态与2017年基本保持一致。可以看出,2015~2018年,人口密度对中原城市群空气污染的影响发生了空间分布形态的变化,敏感地区由南部城市转移到了北部城市。从弹性系数的范围来看,2015年人口密度对空气污染的弹性系数为 $[0.034527, 0.054575]$ ,2016年为 $[0.042781, 0.045339]$ ,2017年为 $[0.044479, 0.056223]$ ,2018年为 $[0.048179, 0.053450]$ ,回归系数值基本没有发生较大变化,表明人口密度对空气污染的影响程度在考察期内较为稳定,这可能是因为在考察期内一个地区的人口因素在较短时间内不会发生太大的波动。

综上,人口密度对中原城市群空气污染产生正向影响,即人口密度越大的城市,空气质量较差,且2015、2016年影响较大的城市主要分布在西北部地区,影响系数由西北向东南逐渐递减,2017、2018年则恰好相反。此外,2015~2018年,人口密度对中原城市群空气污染的影响程度较为稳定。

表 4.3 2015~2018 年人口密度估计系数空间分布

2015 年系数范围	所属区域	2016 年系数范围	所属区域
0.034527-0.038537	南阳市、驻马店市、阜阳市、信阳市	0.042781-0.043292	宿州市、淮北市、蚌埠市、亳州市、阜阳市、信阳市
0.038538-0.042546	平顶山市、许昌市、漯河市、周口市、亳州市、淮北市、宿州市	0.043293-0.043804	菏泽市、商丘市、周口市、驻马店市、漯河市
0.042547-0.046556	三门峡市、洛阳市、郑州市、开封市、商丘市	0.043805-0.044316	聊城市、濮阳市、开封市、许昌市、平顶山市、南阳市
0.046557-0.050565	运城市、晋城市、焦作市、安阳市、鹤壁市、新乡市、濮阳市、菏泽市	0.044317-0.044827	邢台市、邯郸市、安阳市、鹤壁市、新乡市、焦作市、郑州市、洛阳市
0.050566-0.054575	长治市、邯郸市、邢台市、聊城市	0.044828-0.045339	长治市、晋城市、运城市、三门峡市
2017 年系数范围	所属区域	2018 年系数范围	所属区域
0.044479-0.046828	邢台市、邯郸市、长治市、晋城市、运城市、三门峡市	0.048179-0.049233	长治市、晋城市、运城市、三门峡市、洛阳市
0.046829-0.049176	聊城市、濮阳市、安阳市、鹤壁市、新乡市、焦作市、郑州市、洛阳市	0.049234-0.050287	邢台市、邯郸市、安阳市、鹤壁市、新乡市、焦作市、郑州市、平顶山市、南阳市
0.049177-0.051525	菏泽市、开封市、许昌市、平顶山市、漯河市、南阳市	0.050288-0.051341	聊城市、濮阳市、开封市、许昌市、漯河市
0.051256-0.053874	商丘市、周口市、驻马店市	0.051342-0.052395	菏泽市、商丘市、周口市、驻马店市、信阳市
0.052875-0.056223	宿州市、淮北市、蚌埠市、亳州市、阜阳市、信阳市	0.052396-0.053450	宿州市、淮北市、蚌埠市、亳州市、阜阳市

### 4.3.3 产业结构对大气污染影响的时空分异

众所周知,工业化是大部分地区空气污染的主要驱动因素,即工业化程度越高的地方空气污染越为严重。这是因为工业生产会增加能源消费量,而化石燃料大量使用所产生的排放物是城市大气污染的重要来源之一。黄河流域的能源资源较为丰富,而处于黄河流域中下游地区的中原城市群如何在生产生活中以较低的

能源消耗和较小的环境压力带来较高的经济社会效益是中原城市群生态文明建设和经济高质量发展的重要目标。

产业结构在 2015 年、2016 年对空气污染的影响表现为正相关（如表 4.4 所示），在 2017 年、2018 年对空气污染的影响表现为负相关，表明 2015、2016 年第二产业产值比重的增加导致了空气质量的恶化，这是符合我们认知的。但回归结果显示，2017、2018 年第二产业产值比重的增加，会改善中原城市群的空气质量，这与我们的预期相反，可能的原因在 4.2 节中也给出了解释。但是，4.2 节中针对 2017、2018 年产业结构与空气污染呈负相关问题，我们推测这可能是因为近年来中原城市群正处于城市转型、城市重新规划阶段，部分经济比较发达的城市在产业升级方面已经有所突破，但部分城市仍处于转型滞后阶段，多种因素进行融合使得中原城市群环境产业结构对环境的影响效应具有不确定性。但经过 GWR 回归发现，2017、2018 年中原城市群各个城市的影响系数均为负值，并没有像预期的那样出现正负交替的情况，究其原因，可能是在研究中原城市群工业化对大气污染的影响时，仅使用第二产业产值比重来代表工业化程度有些片面。在此我们仅讨论 2015、2016 年的情况。从地理加权回归模型结果可知，不同城市产业结构变量弹性系数有所差别，说明了中原城市群不同地区产业结构对 AQI 影响程度具有差异性。从弹性系数的空间分布来看，2015 年弹性系数高值区主要集中在中原城市群北部和西北部地区，如河北省南部 2 个地级市和山西省南部的 3 个地级市，且系数呈现出由西北向东南逐渐递减的趋势，表明 2015 年第二产业产值比重对中原城市群空气污染的影响由西北部城市向东南部城市不断降低；2016 年弹性系数高值区和空间分布形态与 2015 年基本保持一致。从弹性系数的范围来看，2015 年第二产业产值比重对空气污染的回归系数为 $[0.032415, 0.042461]$ ，2016 年为 $[0.016304, 0.020501]$ ，回归系数值基本呈现出越来越小的趋势，第二产业产值比重对空气污染的影响程度在不断缩小，表明中原城市群在产业结构方面的优化升级，侧面也反映出在工业化的进程中，中原城市群在控制排放方面所作出的努力。

综上，产业结构在 2015 年、2016 年对中原城市群空气污染产生正向影响，影响较大的城市主要分布在西北部地区，影响系数由西北向东南逐渐递减。此外，第二产业产值比重对中原城市群空气污染的影响程度在不断缩小。



表 4.4 2015~2018 年产业结构估计系数空间分布

2015 年系数范围	所属区域	2016 年系数范围	所属区域
0.032415-0.034424	驻马店、信阳市、阜阳市、亳州市、淮北市、宿州市、蚌埠市	0.016304-0.017144	阜阳市、亳州市、淮北市、宿州市、蚌埠市
0.034425-0.036433	南阳市、漯河市、周口市、商丘市	0.017145-0.017983	南阳市、漯河市、周口市、商丘市
0.036434-0.038443	平顶山市、郑州市、许昌市、开封市、菏泽市	0.017984-0.018822	平顶山市、郑州市、许昌市、开封市、菏泽市
0.038444-0.040452	三门峡市、洛阳市、焦作市、新乡市、鹤壁市、安阳市、濮阳市、聊城市	0.018823-0.019661	三门峡市、洛阳市、焦作市、新乡市、鹤壁市、安阳市、濮阳市、聊城市
0.040453-0.042461	运城市、晋城市、长治市、邯郸市、邢台市	0.019662-0.020501	运城市、晋城市、长治市、邯郸市、邢台市
2017 年系数范围	所属区域	2018 年系数范围	所属区域
-0.039122--0.03692	运城市、三门峡市、洛阳市、南阳市	-0.026171--0.023594	长治市、邢台市、邯郸市、聊城市
-0.036919--0.034718	长治市、焦作市、晋城市、郑州市、许昌市、平顶山市、漯河市、驻马店市、信阳市	-0.023593--0.021017	晋城市、安阳市、鹤壁市、新乡市、濮阳市、菏泽市
-0.034717--0.032516	安阳市、鹤壁市、新乡市、开封市、周口市、阜阳市	-0.021016--0.018440	运城市、焦作市、郑州市、开封市、商丘市
-0.032515--0.030314	邢台市、邯郸市、濮阳市、菏泽市、商丘市、亳州市	-0.018439--0.015864	三门峡市、洛阳市、平顶山市、许昌市、漯河市、周口市、亳州市、淮北市、宿州市
-0.030313--0.028112	聊城市、宿州市、淮北市、蚌埠市	-0.015863--0.013287	南阳市、驻马店市、信阳市、阜阳市

#### 4.3.4 对外开放对大气污染影响的时空分异

2015~2018年,对外开放与空气污染之间的关系为负相关(如表4.5所示),说明中原城市群外商直接投资强度的增加可以降低空气污染程度。从地理加权回归模型结果看,各个城市对外开放弹性系数不同,表明了不同地区外商投资强度对空气质量的影响程度也是不一致的。从弹性系数的空间分布来看,2015年弹性系数高值区主要集中在中原城市群西南部地区,主要包括河南省的西南部城市和山西省的运城市,且系数呈现出由西南向东北逐渐递减的趋势,表明2015年外商投资强度对中原城市群空气质量的改善程度由西南部城市向东北部城市不断降低;2016年弹性系数高值区主要集中在西部地区,如山西省的晋城市及河南省的三门峡市,弹性系数呈现出由西向东逐渐递减的趋势;2017年系数高值区域集中在中原城市群的东南部地区,主要有河南省的信阳市,安徽省的阜阳市、蚌埠市,且弹性系数表现为从南向北逐渐递减;2018年系数高值区域集中在北部地区,主要有河北省南部2个地级市,山西省的长治市及山东省的聊城市,且系数呈现出由北向南逐渐递减的趋势,与2017年的系数空间分布格局相反。从弹性系数的范围来看,2015年外商投资强度对空气污染的弹性系数为 $[-0.06789, -0.047814]$ ,2016年为 $[-0.048622, -0.032169]$ ,2017年为 $[-0.004195, -0.002998]$ ,2018年为 $[-0.008151, -0.004590]$ ,2015、2016及2017年回归系数绝对值值呈现出越来越小的趋势,2018年这一趋势稍有所反弹。

综上,对外开放程度对中原城市群空气污染产生负向影响,即随着对外开放程度的提高,中原城市群的空气质量能够得到一定的改善,且考察期内弹性系数较大的城市由2015年的西南部变为2018年的北部地区。这可能是由于中原城市群北部城市面临着较大的空气治理压力,对于外商投资更为谨慎,建立了一系列较高的准入门槛。因此,外商直接投资的“污染晕轮”效应较强。

表 4.5 2015~2018 年对外开放水平估计系数空间分布

2015 年系数范围	所属区域	2016 年系数范围	所属区域
-0.06789--0.063866	邢台市、邯郸市、聊城市、濮阳市、宿州市	-0.048622--0.045331	宿州市、淮北市、蚌埠市、亳州市、阜阳市
-0.063865--0.059853	安阳市、鹤壁市、菏泽市、商丘市、淮北市、蚌埠市	-0.045330--0.042041	聊城市、濮阳市、菏泽市、开封市、商丘市、周口市、驻马店市、信阳市
-0.059853--0.055840	长治市、新乡市、开封市、亳州市	-0.042040--0.03875	邢台市、邯郸市、安阳市、鹤壁市、新乡市、郑州市、许昌市、平顶山市、漯河市
-0.055839--0.051827	晋城市、焦作市、郑州市、许昌市、平顶山市、漯河市、驻马店市、信阳市	-0.038749--0.035459	长治市、晋城市、焦作市、洛阳市、南阳市
-0.051826--0.047814	运城市、三门峡市、洛阳市、南阳市	-0.035458--0.032169	运城市、三门峡市
2017 年系数范围	所属区域	2018 年系数范围	所属区域
-0.004195--0.003956	长治市、邢台市、邯郸市、聊城市	-0.008151--0.007439	驻马店市、信阳市、阜阳市
-0.003955--0.003716	运城市、晋城市、焦作市、安阳市、鹤壁市、新乡市、濮阳市、菏泽市	-0.007438--0.006726	南阳市、平顶山市、漯河市、周口市、亳州市、淮北市、宿州市
-0.003715--0.003477	三门峡市、洛阳市、平顶山市、郑州市、许昌市、开封市、商丘市	-0.006725--0.006014	三门峡市、洛阳市、郑州市、许昌市、开封市、菏泽市、商丘市
-0.003476--0.003237	南阳市、驻马店市、漯河市、周口市、亳州市、淮北市、宿州市	-0.006013--0.005302	运城市、晋城市、焦作市、安阳市、鹤壁市、新乡市、濮阳市
-0.003236--0.002998	信阳市、阜阳市、蚌埠市	-0.005301--0.004590	长治市、邢台市、邯郸市

#### 4.3.5 绿化水平对大气污染影响的时空分异

2015~2018年,城市绿化水平与空气污染之间为负相关关系(如表4.6所示),表明城市绿化覆盖率的提高对中原城市群空气质量具有显著的改善作用。从地理加权回归模型结果可知,各个城市绿化水平变量弹性系数是不一致的,说明了中原城市群不同地区绿化水平对空气质量的改善程度也有所差别。从弹性系数的空间分布来看,2015年弹性系数绝对值高值区主要集中在中原城市群东南部地区,主要包括安徽省的宿州、蚌埠及淮北市,且系数呈现出由东南向西北逐渐递减的趋势,表明2015年城市绿化水平对中原城市群空气质量的改善程度由东南部城市向西北部城市不断降低;2016年弹性系数绝对值高值区和分布形态与2015年基本保持一致;2017年弹性系数高值区相对于2015年增加了山东省聊城市,其分布形态与2015年基本保持一致;2018年系数绝对值高值区域同样集中在东南部,主要包括安徽省北部5个地级市和河南省南部的信阳市,且系数绝对值呈现出由东南向西北逐渐递减的趋势。从弹性系数的范围来看,2015年城市绿化水平对空气污染的回归系数为 $[-0.013598, -0.003524]$ ,2016年为 $[-0.003411, -0.003847]$ ,2017年为 $[-0.032937, -0.029028]$ ,2018年为 $[-0.028944, -0.020678]$ 。整体上来看,弹性系数绝对值基本呈现出越来越大的趋势,表明加强绿化面积建设对提高中原城市群的空气质量有越来越显著的影响。

综上,城市绿化水平对中原城市群空气污染产生负向影响,即随着城市绿化覆盖率的提高能够改善中原城市群的空气质量,且考察期内影响较大的城市为中原城市群东南部城市,影响系数由东南向西北逐渐递减。此外,2015~2018年,绿化水平对中原城市群空气污染的改善程度逐年增大。

表 4.6 2015~2018 年绿化水平估计系数空间分布

2015 年系数范围	所属区域	2016 年系数范围	所属区域
-0.013598--0.011583	邢台市、聊城市、宿州市、淮北市、蚌埠市	-0.003411--0.003518	宿州市、淮北市、蚌埠市、亳州市、阜阳市
-0.011582--0.009568	邯郸市、濮阳市、菏泽市、商丘市、亳州市	-0.003517--0.003625	聊城市、濮阳市、菏泽市、商丘市、周口市、驻马店市、信阳市
-0.009567--0.007554	长治市、安阳市、鹤壁市、新乡市、开封市、周口市、阜阳市	-0.003624--0.003733	邢台市、邯郸市、安阳市、鹤壁市、新乡市、郑州市、开封市、许昌市、漯河市
-0.007553--0.005539	晋城市、焦作市、郑州市、许昌市、平顶山市、漯河市、驻马店市、信阳市	-0.003732--0.003840	长治市、晋城市、焦作市、洛阳市、平顶山市、南阳市
-0.005538--0.003524	运城市、三门峡市、洛阳市、南阳市	-0.003839--0.003847	运城市、三门峡市
2017 年系数范围	所属区域	2018 年系数范围	所属区域
-0.032937--0.032155	聊城市、宿州市、蚌埠市、淮北市	-0.028944--0.027290	宿州市、淮北市、蚌埠市、亳州市、阜阳市、信阳市
-0.032154--0.031373	邢台市、邯郸市、濮阳市、菏泽市、商丘市、亳州市	-0.027289--0.025637	商丘市、周口市、驻马店市
-0.031372--0.030592	安阳市、鹤壁市、新乡市、开封市、周口市、阜阳市	-0.025636--0.023984	菏泽市、开封市、许昌市、漯河市、平顶山市、南阳市
-0.030591--0.029810	长治市、晋城市、焦作市、郑州市、许昌市、漯河市、平顶山市、信阳市	-0.023983--0.022331	聊城市、濮阳市、安阳市、鹤壁市、新乡市、焦作市、郑州市、洛阳市
-0.029809--0.029028	运城市、三门峡市、洛阳市、南阳市	-0.022330--0.020678	邢台市、聊城市、长治市、晋城市、运城市、三门峡市

#### 4.3.6 科技水平对大气污染影响的时空分异

2015年,科技水平对空气污染的影响为正相关(如表4.7所示),表明技术水平的提高同样也会带来环境问题。分析原因可能是,中原城市群提升科技水平的主要目的可能更侧重于促进经济增长,忽视了经济、资源与环境的协调发展,科技水平提升带来的环境负效应超过了它带来的经济正效应,因此对空气质量产生反作用。但在2016、2017、2018年间,科技水平又对空气污染的影响表现为负相关,即中原城市群科技水平的提高促进了空气质量的改善,主要原因可能是在2016年颁布《中原城市群发展规划》,随后国家批复了郑洛新国家自主创新示范区,要求各省市的科研投入力度,激发创造活力,特别是在绿色发展方面。中原城市群各省市积极响应号召,加大科技投入推动城市绿色健康发展,对改善空气质量发挥了积极作用。从GWR模型结果可知,各个城市科技水平变量弹性系数是不一样的,表明中原城市群不同地区科技水平对空气质量的改善程度也有所差别。从弹性系数的空间分布来看,2015年弹性系数高值区主要集中在中原城市群东北部地区,主要包括河北南部2个地级市及山东省的聊城市,且系数呈现出由东北向西南逐渐递减的趋势,表明2015年技术水平对中原城市群空气污染的正向影响由东北部城市向西南部城市不断降低;2016年弹性系数绝对值高值区主要集中在西南部地区,如山西省的运城市,河南省西南部的三门峡、洛阳、南阳市,回归系数的绝对值呈现出由西南向东北逐渐递减的趋势,表明2016年技术水平对中原城市群空气质量的改善作用由西南部城市向东北部城市不断降低;2017年系数绝对值高值区域集中在中原城市群的南部地区,主要有河南省南部的南阳、驻马店、信阳市及安徽省的阜阳、蚌埠市,且弹性系数表现为从南向北逐渐递减;2018年系数绝对值高值区域及空间分布形态与2017年基本保持一致。从回归系数的范围来看,2015年外商投资强度对空气污染的弹性系数为 $[0.010557, 0.111276]$ ,2016年为 $[-0.021384, -0.013365]$ ,2017年为 $[-0.053565, -0.048727]$ ,2018年为 $[-0.043609, -0.037617]$ ,除2015年外,弹性系数的绝对值基本呈现增大的趋势,表明2015年以来,科技水平的提高对空气质量的改善程度逐渐增强。

综上,除2015年外,考察年间技术水平对中原城市群空气污染产生负向影响,即科技的进步能够改善空气质量。此外,2016、2017及2018年,科技水平

对空气质量的改善程度逐渐增强。

表 4.7 科技水平估计系数空间分布

2015 年系数范围	所属区域	2016 年系数范围	所属区域
0.010557-0.030701	南阳市、驻马店市、信阳市	-0.021384--0.019780	运城市、三门峡市、洛阳市、南阳市
0.030702-0.050845	运城市、三门峡市、洛阳市、平顶山市、许昌市、漯河市、周口市、阜阳市、亳州市	-0.019779--0.018176	晋城市、焦作市、郑州市、平顶山市、许昌市、漯河市、驻马店市
0.050846-0.070988	晋城市、焦作市、新乡市、郑州市、开封市、商丘市、淮北市、宿州市、蚌埠市	-0.018175--0.016572	长治市、安阳市、鹤壁市、新乡市、开封市、周口市、信阳市
0.070989-0.091132	长治市、安阳市、鹤壁市、濮阳市、菏泽市	-0.016571--0.014968	聊城市、濮阳市、菏泽市、商丘市、亳州市、阜阳市
0.091133-0.111276	邢台市、邯郸市、聊城市	-0.014967--0.013365	邢台市、聊城市、淮北市、宿州市、蚌埠市
2017 年系数范围	所属区域	2018 年系数范围	所属区域
-0.053565--0.052597	南阳市、驻马店市、阜阳市、信阳市	-0.043609--0.042410	南阳市、驻马店市、信阳市
-0.052596--0.051629	平顶山市、洛阳市、周口市、亳州市、淮北市、宿州市	-0.042409--0.041212	三门峡市、洛阳市、平顶山市、许昌市、漯河市、周口市、阜阳市
-0.051628--0.050662	三门峡市、洛阳市、郑州市、许昌市、开封市、商丘市	-0.041511--0.040013	运城市、焦作市、郑州市、开封市、商丘市、亳州市
-0.050661--0.049694	运城市、晋城市、焦作市、安阳市、鹤壁市、新乡市、濮阳市、菏泽市	-0.040012--0.038815	晋城市、安阳市、鹤壁市、新乡市、濮阳市、淮北市、宿州市、蚌埠市
-0.049693--0.048727	长治市、邢台市、聊城市、邯郸市	-0.038814--0.037617	长治市、邢台市、邯郸市、聊城市、濮阳市

#### 4.3.7 汽车尾气排放对大气污染影响的时空分异

2015~2018, 汽车尾气排放与中原城市群空气污染之间为正相关关系(如表 4.8 所示), 表明尾气排放的越多, 对空气污染的影响越严重, 导致空气质量指数越高。从地理加权回归模型结果可知, 汽车尾气排放对中原城市群各个城市空气污染的影响程度并不是完全一致的, 说明其在不同区域有着不同的影响成效。从弹性系数的空间分布来看, 2015 年弹性系数高值区主要集中在中原城市群东北和东南部地区, 主要包括山东省的聊城市, 安徽省的宿州市、淮北市、蚌埠市, 表明对这些地区汽车客运量对空气质量的正向作用较强。且系数呈现出由东向西逐渐递减的趋势, 表明 2015 年公路客运量对中原城市群空气污染的影响由东部城市向西部城市不断降低; 2016、2017 年弹性系数高值区和空间分布状态与 2015 年基本保持一致; 2018 年系数高值区域集中在东南部地区, 主要有安徽省北部 5 个地级市及河南省的信阳市, 且系数呈现出由东南向西北逐渐递减的趋势。从弹性系数的范围来看, 2015 年公路客运量对空气污染的回归系数为[0.021345, 0.031465], 2016 年为[0.032214, 0.040825], 2017 年为[0.052104, 0.075826], 2018 年为[0.035677, 0.046790], 弹性系数范围在 2015~2018 年基本呈现出增加的趋势, 表明汽车尾气排放对空气质量的负向影响越来越显著。

综上, 汽车尾气排放量对中原城市群空气污染产生正向影响, 且影响较大的城市主要分布在东部及东南部地区, 影响程度由东向西逐渐递减。此外, 2015-2018 年, 汽车尾气排放对中原城市群空气污染的恶化程度越来越强烈。



表 4.8 汽车尾气排放估计系数空间分布

2015 年回归系数范围	所属区域	2016 年回归系数范围	所属区域
0.021345-0.023369	运城市、三门峡市、 洛阳市、南阳市	0.032214-0.033936	运城市、三门峡市、 洛阳市、南阳市
0.023370-0.025393	长治市、晋城市、焦 作市、郑州市、许昌 市、平顶山市、漯河 市、驻马店市	0.033937-0.035659	长治市、晋城市、焦 作市、郑州市、许昌 市、平顶山市、漯河 市、驻马店市
0.025394-0.027417	安阳市、鹤壁市、新 乡市、开封市、周口 市、信阳市	0.035660-0.037381	安阳市、鹤壁市、新 乡市、开封市、周口 市、信阳市
0.027418-0.029441	邢台市、邯郸市、濮 阳市、菏泽市、商丘 市、亳州市、阜阳市	0.037382-0.039103	邢台市、邯郸市、濮 阳市、菏泽市、商丘 市、亳州市、阜阳市
0.029442-0.031465	聊城市、宿州市、淮 北市、蚌埠市	0.039104-0.040825	聊城市、宿州市、淮 北市、蚌埠市
2017 年回归系数范围	所属区域	2018 年回归系数范围	所属区域
0.052104-0.057648	运城市、三门峡市	0.035677-0.037900	长治市、晋城市、运 城市、三门峡市
0.057649-0.062493	长治市、晋城市、焦 作市、洛阳市、平顶 山市、南阳市	0.037901-0.040122	邢台市、邯郸市、安 阳市、鹤壁市、焦作 市、洛阳市
0.062194-0.066737	邢台市、邯郸市、安 阳市、鹤壁市、新乡 市、郑州市、开封市、 许昌市、漯河市、驻 马店市	0.040123-0.042345	聊城市、濮阳市、新 乡市、郑州市、开封 市、许昌市、平顶山 市、漯河市、南阳市
0.066738-0.071281	聊城市、濮阳市、菏 泽市、商丘市、周口 市、阜阳市、信阳市	0.042346-0.044568	菏泽市、商丘市、周 口市、驻马店市
0.071282-0.075826	宿州市、淮北市、蚌 埠市、亳州市	0.044569-0.046790	亳州市、淮北市、蚌 埠市、宿州市、阜阳 市、信阳市

#### 4.4 本章小结

本章以空气质量指数（AQI）作为大气污染衡量指标，选取 7 个主要变量研究影响中原城市群大气污染的因素，首先采用最小二乘法进行影响因素方向的判别，然后从空间异质性的角度出发，采用地理加权回归模型进行各影响因素在不同空间上的异质性分析。

研究表明：经济水平的增长、人口密度的提升和汽车尾气排放的增加会提高空气污染的水平，而城市绿化水平的提高、科技水平的发展以及对外开放水平的加深能缓解城市空气污染水平。此外，空气污染的影响因素存在明显的空间异质性。对于人均 GDP 弹性系数敏感的城市主要分布在中原城市群南部地区，包括安徽省北部城市和河南省南部城市，且四年间弹性系数由南向北逐渐递减，但这种负面影响正在逐渐被改善；2015、2016 年人口密度对空气污染影响较大的城市主要分布在西北部地区，影响系数由西北向东南逐渐递减，2017、2018 年则恰好相反，且影响强度在考察年间较为稳定；对外开放水平弹性系数较大的城市由 2015 年的西南部变为 2018 年的北部地区；城市绿化水平对空气质量改善较大的城市为中原城市群东南部城市，影响系数由东南向西北逐渐递减，且在这种改善程度逐年增大；考察年间科技水平对空气质量的改善程度逐渐增强；对于汽车尾气排放弹性系数敏感的城市主要分布在东部及东南部地区，影响程度由东向西逐渐递减，且对空气污染的恶化程度越来越强烈。

## 5 结论与启示

### 5.1 结论

中原城市群在 2016 年 12 月被国家发展和改革委员会认定为“绿色生态发展示范区”，且制定并发布了《中原城市群发展规划》，其中对中原城市群的绿色发展提出了具有建设性的意见，体现出对中原城市群发展的重视与认可。然而，近年来大气污染严重制约了中原城市群生态文明建设和高质量发展的进程。本文基于 2015~2018 年中原城市群的空气质量指数 AQI 数据，在进行时序和空间特征分析的基础上，运用核密度估计、空间自相关法、空间描述性统计分析和数据可视化方法探讨中原城市群空气污染的时空演变格局，最后结合地理加权回归模型揭示了社会经济因素对其影响的空间异质性，主要结论如下所示。

(1) 通过对 2015~2018 年中原城市群空气质量指数的时间变化趋势分析，可知近 4 年来，中原城市群空气质量逐步改善，但空气质量仍处于轻度污染范围；从季度特征来看，春、冬季 AQI 季节均值呈逐年下降趋势，且具有明显的季节分布特征，冬季污染程度高，夏季污染程度低，春秋季节污染程度居中；从月度特征来看，每年的 AQI 月均值均呈“U”型分布，且底部处于 6~8 月；从日度特征来看，冬季 AQI 数值具有不稳定性，夏季 AQI 数值较为稳定，空气质量优良天数逐年增加，空气质量优良率逐年增高。

(2) 分析 2015~2018 年中原城市群空气质量指数的空间分布特征结果显示：空气污染在空间上具有显著的集聚特征，空气污染区集中于中部和北部城市，主要包括河北省南部 2 个地级市、山东省西部 2 个地级市及河南省部分地区，空气质量优良区位于中原城市群东南部，即安徽省北部 5 个地级市；空气质量改善幅度较大的地区主要位于中原城市群的西北部和东南部地区；且中原城市群空气质量优质区域在不断扩大，而空气质量相对劣质区域则始终出现于中北部地区，需对紧邻河南、河北、山东省的周边地区的空气污染问题进行重点关注。

(3) 分析中原城市群空气质量的影响因素结果显示：人均 GDP、城市人口密度和汽车尾气排放的增加是推动中原城市群城市空气质量恶化的重要因素，城市绿化水平、科技水平、对外开放水平的提高对城市空气质量改善具有显著的推动作用。根据地理加权回归模型结果，不同社会经济指标对不同城市空气质量

的影响具有差异性。对于人均 GDP 弹性系数敏感的城市主要分布在中原城市群南部地区,包括安徽省北部城市和河南省南部城市,且四年间弹性系数由南向北逐渐递减,但这种负面影响正在逐渐被改善;2015、2016 年人口密度对空气污染影响较大的城市主要分布在西北部地区,影响系数由西北向东南逐渐递减,2017、2018 年则恰好相反,且影响强度在考察年间较为稳定;对外开放水平弹性系数较大的城市由 2015 年的西南部变为 2018 年的北部地区;城市绿化水平对空气质量改善较大的城市为中原城市群东南部城市,影响系数由东南向西北逐渐递减,且这种改善程度逐年增大;考察年间科技水平对空气质量的改善程度逐渐增强;对于汽车尾气排放弹性系数敏感的城市主要分布在东部及东南部地区,影响程度由东向西逐渐递减,且对空气污染的恶化程度越来越强烈。

## 5.2 启示

根据以上分析,本文就中原城市群大气污染治理工作提出如下方面的对策建议:

(1) 针对中原城市群空气质量“夏好冬劣,春秋居中”的季节特征,大气污染防治的重点应放在冬季。比如,继续大力推进“煤改气、煤改电”,最大限度地减少冬季取暖的危害;针对空气质量相对劣质区域则始终出现于中原城市群中北部地区,所以应将河南、河北、山东省的周边地区作为空气污染的重点防范区,及时关注这些地区的空气质量动态变化,并建立相应的防控机制;针对中原城市群大气污染具有强烈的空间相关性,中原城市群不同城市在治理大气污染防治的过程中要通力合作,共同朝着一个目标努力,在空间上形成合力,积极探索区域联合防控的协调机制。否则,各自治理将可能导致治理效率不佳,甚至可能造成反复污染。

(2) 现阶段,我国经济的发展伴随着空气质量的恶化,这一点已经得到了广泛的认同,许多学者通过实证研究也证实了这一点。本文也认为人均 GDP 的增加会加剧中原城市群空气污染。所以,解决这一矛盾的关键就是要最大限度的化解经济发展带来的负面影响。“十四五”规划中指出要大力发展绿色经济,坚决抵制高耗能企业的发展,加大对高耗能企业的惩罚力度,促进绿色转型,实现积极发展。且由上文分析可知,对于人均 GDP 弹性系数敏感的城市主要分布在中

原城市群南部地区，包括安徽省北部城市和河南省南部城市。所以对于这些城市而言，在“十四五”规划的浪潮中更要利用自身优势，把握政策机遇，集中精力实现发展方式的转变。

(3)中原城市群各城市大气污染的影响因素在作用强度和效果上存在差异，这也要求中原城市群在推进大气污染防治的过程中采取差异化的推进策略。针对工业发展加剧大气污染的问题，一方面从国家的角度来看，可以制定负面清单，针对区域性产业于外国投资，实施严格的环境准入政策；另一方面，要加大培育“三新”力度，以加快新旧动能转换进程，实现经济高质量发展。另外，在推进城市规划时，一方面要加强绿地的管理和维护，提高植被带来的空气净化效果；另一方面在改善城市道路状况以及大力推进汽车使用清洁能源的同时，还可通过发展轨道交通、构建共享单车和共享汽车等方法从交通基础设施的角度为城市大气污染治理提供新的解决思路。

### 5.3 展望

科学探究大气污染的时空规律、分布特征和影响因素，是推进中原城市群生态文明建设和高质量发展的重要前提。本文以 2015~2018 年的空气质量监测数据为基础，既验证和补充了现有的研究结论，又丰富了中原城市群的相关研究。但由于文章结构、研究方法和数据获取等原因，本文在实证分析影响因素时只考虑了一些经济社会因素，没有涉及自然地理因素，也没有考虑影响因素之间的相互作用。因此，在今后研究中可以将社会经济因素和自然因素相结合来探讨大气污染的影响因素。此外，还可以对不同流域的大气污染进行比较分析，为区域大气污染治理提供更好的建议和政策支持。

## 参考文献

- [1] Dietz T., Rosa E.A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology[J]. *Human Ecology Review*, 1994,2(1):277-300.
- [2] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth[J]. *Science*, 1971,17(1):1212-1217.
- [3] Geary R C. The contiguity ratio and statistical mapping[J]. *The Incorporated Statistician*,1954,5(3):115-127.
- [4] Grossman G M, Krueger A B. Environmental impacts of a North American trade agreement[J]. *National Bureau of Economic Research Working Paper*,1991,9(14):165-251.
- [5] Han L J, Zhou W Q, Li W F, et al. Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles (PM<sub>2.5</sub>) in Chinese cities[J]. *Environmental Pollution*,2014,19(4):163-170.
- [6] Han L J, Zhou W Q, Li W F. Fine particulate (PM<sub>2.5</sub>) dynamics during rapid urbanization in Beijing,1973-2013[J]. *Scientific Reports*,2016,36(4):63-94.
- [7] Hosseini H M, Kaneko S. Can environmental quality spread through institutions?[J]. *Energy Policy*.2013,56(2):312-321.
- [8] Huang Y, Liu Y, Zhang L, et al. Characteristics of carbonaceous aerosol in PM<sub>2.5</sub> at Wanzhou in the southwest of China[J]. *Atmosphere*,2018,9(2):37-60.
- [9] Jiang J, Zhou W, Cheng Z, et al. Particulate matter distributions in China during a winter period with frequent pollution episodes(January 2013)[J]. *Aerosol Air Qual*,2015,15(2):494-U157.
- [10] Khan H, Inamullah E, Shams K. Population, environment and poverty in Pakistan: linkages and empirical evidence[J]. *Environment Development & Sustainability*.2009, 11(2): 375-392.
- [11] Kuzntts S. Economic growth and income inequality[J]. *American Economic Review*,1955,45(1):1-28.
- [12] Maddison D. Modelling sulphur emissions in Europe: a spatial econometric approach[J]. *Oxford Economic Papers*.2007,59(4):726-743.

- [13] Mcmillen D P. Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships[J]. American Journal of Agricultural Economics,2004,86(2):554-556.
- [14] Mo L, Yu X X , Zhao Y, et al. Correlation analysis between urbanization and particle pollution in Beijing[J]. Ecology and Environmental Sciences,2014,23(5):806-811.
- [15] Tian M, Wang H B, Chen Y, et al. Characteristics of aerosol pollution during heavy haze events in Suzhou, China[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2016,16(11):7357-7371.
- [16] Vardoulakis S, Kassomenos P. Sources and factors affecting PM 10 levels in two European cities: Implications for local air quality management[J]. Atmospheric Environment.2006,42(17):502-530.
- [17] Wang J, Ho S S, Cao J, et al. Characteristics and major sources of carbonaceous aerosols in PM<sub>2.5</sub> from Sanya, China [J]. Science of the Total Environment,2015,24(6):530-540.
- [18]陈优良,陶天慧,丁鹏.长江三角洲城市群空气质量时空分布特征[J].长江流域资源与环境,2017,26(5):687-697.
- [19]杜颖.河北省经济增长与大气污染关系研究[D].中国地质大学(北京),2016.
- [20]段杰雄,翟卫欣,程承旗,等.中国 PM<sub>2.5</sub> 污染空间分布的社会经济影响因素分析[J].环境科学,2018,39(5):2498-2504.
- [21]高会旺,陈金玲,陈静.中国城市空气污染指数的区域分布特征[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2014,44(10):25-34.
- [22]关伟,许淑婷,郭岫垚.黄河流域能源综合效率的时空演变与驱动因素.资源科学,2020,42(1):150-158.
- [23]韩婧,李元征,李锋.2000—2015 年中国 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空分布特征及其城乡差异[J].生态学报,2019,39(08):2954-2962.
- [24]韩燕,邓美玲.中原城市群生态效率时空演变及影响因素[J].生态学报,2020,40(14):4774-4784.
- [25]贺祥,林振山,刘会玉,等.基于灰色关联模型对江苏省 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响因素的分

- 析[J].地理学报,2016,71(7):1119-1129.
- [26]贺祥,林振山,刘会玉,齐相贞.基于灰色关联模型对江苏省 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响因素的分析[J].地理学报,2016,71(07):1119-1129.
- [27]黄俊,廖碧婷,吴兑,等.广州近地面臭氧浓度特征及气象影响分析[J].环境科学学报,2018,38(1):23-31.
- [28]黄小刚,邵天杰,赵景波,曹军骥,岳大鹏,吕晓虎.长江经济带空气质量的时空分布特征及影响因素[J].中国环境科学,2020,40(02):874-884.
- [29]回莹,毛培,戴宏伟.河北省雾霾污染的空间分布及其影响因素的实证分析[J].经济与管理.2018(03):65-71.
- [30]姬露露,陈长坤,王楠楠.我国六大中心城市 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及诱因对比分析.灾害学,2014,29(4):230-234.
- [31]姜磊,周海峰,柏玲,等.空气质量指数(AQI)的社会经济影响因素分析——基于指数衰减效应视角[J].环境科学学报,2018,38(1):390-398.
- [32]姜磊,周海峰,柏玲.外商直接投资对空气污染影响的空间异质性分析——以中国 150 个城市空气质量指数(AQI)为例.地理科学,2018,38(3):351-360.
- [34]李光勤,秦佳虹,何仁伟.中国大气 PM<sub>2.5</sub> 污染演变及其影响因素.经济地理,2018,38(8):11-18.
- [35]李慧杰,王秀兰,王计平,李梦捷,杨晓潇.2013—2017 年间京津冀地区空气质量及影响因素分析[J].环境监测管理与技术,2019,31(02):21-25.
- [36]李名升,张建辉,张殷俊,等.近 10 年中国大气 PM<sub>10</sub> 污染时空格局演变[J].地理学报,2013,68(11):1504-1512.
- [38]李文杰,张时煌,高庆先,等.京津石三市空气污染指数(API)的时空分布特征及其与气象要素的关系[J].资源科学.2012(08):1392-1400.
- [37]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(08):1357-1371.
- [38]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(01):177-191.
- [39]罗宇翔,陈娟,郑小波.近 10 年中国大陆 MODIS 遥感气溶胶光学厚度特征[J].生态环境学报,2012,21(5):876-883.



- [40]马丽梅,刘生龙,张晓.能源结构、交通模式与雾霾污染——基于空间计量模型的研究[J].财贸经济.2016(01):147-160.
- [41]马丽梅,张晓.中国雾霾污染的空间效应及经济、能源结构影响[J].中国工业经济.2014(04):19-31.
- [42]梅波,田茂再.贝叶斯时空分位回归模型及其对北京市  $PM_{2.5}$  浓度的研究[J]统计研究.2016(12).
- [43]孟小峰.重庆主城区空气质量时空分布及其影响因素研究[D].西南大学,2011.
- [44]孟昭伟,雷佩玉,张同军,常锋.2015—2018 年西安市两城区  $PM_{2.5}$  质量浓度变化特征及气象影响因素[J].卫生研究,2020,49(01):75-79+85.
- [45]苗青青,姜楠,张瑞芹,赵孝囡,齐静文.中原城市群典型城市秋冬季大气  $PM_{2.5}$  污染特征及溯源[J].环境科学,2021,42(01):19-29..
- [46]南国卫,孙虎.基于灰色关联模型对陕西省  $O_3$  浓度影响因素分析[J].环境科学学报,2017(12):4519-4527.
- [47]潘竟虎,张文,李俊峰,等.中国大范围雾霾期间主要城市空气污染物分布特征.生态学杂志,2014,33(12):3423-3431.
- [48]宋海鸥,王滢.京津冀协同发展:产业结构调整与大气污染防治[J].中国人口·资源与环境.2016(S1):75-78.
- [49]王斌,高会旺.中国沿海城市空气污染指数的分布特征[J].生态环境,2008(02):542-548.
- [50]王翠云,胡学平,相旭东. $PM_{2.5}$  影响因素的主成分回归分析与预测[J].安庆师范学院学报(自然科学版),2015,21(04):24-27.
- [51]王少剑,高爽,陈静.基于 GWR 模型的中国城市雾霾污染影响因素的空间异质性研究[J].地理研究,2020,39(03):651-668.
- [52]王一辰,沈映春.京津冀雾霾空间关联特征及其影响因素溢出效应分析[J].中国人口·资源与环境.2017(S1):41-44.
- [53]吴浪,周廷刚,温莉,等.基于遥感数据的  $PM_{2.5}$  与城市化的时空关系研究——以成渝城市群为例[J].长江流域资源与环境,2018,27(9):2142-2152.
- [54]肖建能,杜国明,施益强,温宥越,姚杰,高宇婷,林锦耀.厦门市环境空气污染时空特征及其与气象因素相关分析[J].环境科学学报,2016,36(09):3363-3371.

- [55]徐伟嘉,何芳芳,李红霞,等.珠三角区域  $PM_{2.5}$  时空变异特征.环境科学研究,2014,27(9):951-957.
- [56]许和连,邓玉萍.经济增长、FDI 与环境污染——基于空间异质性模型研究[J].财经科学,2012(09):57-64.
- [57]严雅雪,齐绍洲.外商直接投资对中国城市雾霾( $PM_{2.5}$ )污染的时空效应检验.中国人口·资源与环境,2017,27(4):68-77.
- [58]晏振,田茂再.基于分位回归的北京市  $PM_{2.5}$  的影响分析[J].统计与决策,2015(17):103-105.
- [59]杨冕,王银.长江经济带  $PM_{2.5}$  时空特征及影响因素研究[J].中国人口·资源与环境.2017(01):91-100.
- [60]湛社霞,匡耀求,阮柱.基于灰色关联度的粤港澳大湾区空气质量影响因素分析[J].清华大学学报(自然科学版),2018(8):761-767.
- [61]张淑平,韩立建,周伟奇,等.城市规模对大气污染物  $NO_2$  和  $PM_{2.5}$  浓度的影响[J].生态学报,2016,36(16):5049-5057.
- [62]张耀军,任正委.基于地理加权回归的山区人口分布影响因素实证研究——以贵州省毕节地区为例.人口研究,2012,36(4):53-63.
- [63]章异平,徐军亮,赵西平.基于灰色关联的洛阳市空气质量影响因素分析[J].河南科技大学学报(自然科学版),2012(1): 100-034+10.
- [64]赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清.北京地区冬春  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J].环境科学,2014,35(02):418-427.
- [65]赵辉,郑有飞,张誉馨,王占山.京津冀大气污染的时空分布与人口暴露[J].环境科学学报,2020,40(01):1-12.
- [66]郑宇,张慧明.基于灰色关联的南京市空气质量主要影响因素的分析[J].科技和产业,2015(12):131-134.
- [67]周海峰.中国城市空气污染的时空变化规律及其社会经济影响因素[D].浙江财经大学,2019.
- [68]周磊,武建军,贾瑞静,等.京津冀  $PM_{2.5}$  时空分布特征及其污染风险因素.环境科学研究,2016,29(4):483-493.
- [69]周亮,周成虎,杨帆,等.2000-2011 年中国  $PM_{2.5}$  时空演化特征及驱动因素解析.

地理学报,2017,72(11):2079-2092.

[70]周伟东,梁萍.风的气候变化对上海地区秋季空气质量的可能影响[J].资源科学.2013(05):1044-1050.

[71]周兆媛,张时煌,高庆先,等.京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析[J].资源科学.2014(01):191-199.

## 后记

时光荏苒，不知不觉研究生时光就要落下帷幕。在这三年里，哭闹过、欢笑过、争吵过，但也学习过、收获过、成长过。蓦然回首，一件件往事都是如此可爱，都是如此令人怀念。

感谢所有教导过我的老师，是你们将知识一点一滴地灌输给我，不厌其烦一次又一次地教导着我，不仅教会我专业知识，更是教会了我如何为人处世。其中最为感谢的是我导师韩君教授。韩老师除了是我研究生导师外，更是我科研路上的领路人。三年的相处时光早已让韩老师和我之间如同家人般融洽，不仅关心我的学习，更是关心我的生活。在学习方面，韩老师带着我完成过多次课题的写作，在这过程中不断地学习新的知识，学习新的模型。在生活方面，韩老师经常打电话询问近期的生活状态。此次论文的定稿韩老师也是提出了许多修改意见，给予了我细心的指导和无私的帮助。韩老师的处世作风，治学态度更是我一生学习的典范，在此向韩老师致以深深的谢意。

感谢所有研究生期间的同学及朋友，是你们让我的研究生生涯多姿多彩。感谢我的室友王霞、王娜、轩媛媛，是你们在研究生三年期间不离不弃，愿意听我烦闷的事情，愿意陪我度过所有难关；感谢同门师兄袁慎、李文星、杨鑫环，挚友杜文豪，是你们在背后一直默默支持着我，成为我坚实的后盾；感谢父母一直以来无怨无悔的包容与谅解，是你们成为我一路披荆斩棘，实现梦想，到达成功彼岸的动力。

感谢兰州财经大学带给我三年的美好时光，感谢所有支持我、关爱我的人。