

分类号 C8/359
U D C

密级
编号 10741

兰州财经大学

LANZHOU UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

硕士学位论文

(专业学位)

论文题目 黄河流域雾霾污染的区域差异特征
及影响因素研究

研究生姓名: 周颖钦

指导教师姓名、职称: 邓光耀 副教授

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: 2023年5月30日

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科研成果。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：周颖波 签字日期：2023年5月30日

导师签名：邓光耀 签字日期：2023年5月30日

导师(校外)签名：张亚东 签字日期：2023年5月30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：周颖波 签字日期：2023年5月30日

导师签名：邓光耀 签字日期：2023年5月30日

导师(校外)签名：张亚东 签字日期：2023年5月30日

**Regional differences and influencing
factors of haze pollution in the Yellow River
Basin**

Candidate : Zhou Yingqin

Supervisor: Deng Guangyao

摘要

黄河流域已成为我国雾霾治理的短板,鉴于雾霾污染物对人体健康、社会经济等各方面都有较大的负面影响,对该地区的雾霾污染研究具有较大的紧迫性和必要性。本文选取黄河流域 60 个城市作为研究对象,使用核密度估计法、Dagum 基尼系数、随机森林等方法,对雾霾污染的时空演进、区域差异、影响因素等问题进行分析,得到如下结论:

雾霾浓度按下游、中游、上游的顺序逐级递减,考察期内雾霾浓度整体下降趋势明显,其中下游地区下降幅度较大,上游地区在考察后期雾霾浓度有上升趋势;流域整体两极分化趋势明显,但分化趋势在减弱;雾霾污染存在明显的空间正自相关关系,集聚特征明显,“高-高”型集聚主要集中在黄河中下游的山东、河南两省,“低-低”型集聚主要集中在黄河中上游地区的内蒙古、宁夏、甘肃、陕西等省份。

雾霾污染区域总体差异呈缩小趋势,与基期相比,考察期末总体基尼系数降幅达 14.26%,区域间差异是区域差异的主要来源;中游地区的区域内差异最大,而上游地区的区域内差异最小;就变化趋势而言,中、下游地区的区域内差异呈波动上升趋势,而上游地区区域差异则呈缩小趋势。

雾霾污染影响因素重要度排序靠前的 6 个因素依次是人口密度、年均气温、人口规模、产业集聚水平、产业结构和技术水平;演进趋势方面,考察后期经济规模、财政支出、人均 GDP 等社会经济发展相关因素对雾霾浓度的影响显著增加,而能源消耗强度、产业集聚水平等反应黄河流域工业化程度的指标的影响力在下降;作用机理方面,人口集聚、能源消耗量增加、经济规模扩大等情况都将加剧雾霾污染问题。

关键词: 黄河流域 雾霾污染 区域差异 影响因素

Abstract

Yellow River Basin has become a short board of haze control in China. Given that haze pollutants have a great negative impact on human health, social economy and other aspects, it is of great urgency and necessity to study haze pollution in this region. This paper selects 60 cities in the Yellow River Basin as research objects, uses kernel density estimation method, Dagum Gini coefficient, random forest and other methods to analyze the spatio-temporal evolution, regional differences and influencing factors of haze pollution, and draws the following conclusions:

Haze concentration decreased step by step in the order of downstream, midstream and upstream, and the overall decreasing trend of haze concentration was obvious during the investigation period, with a large decrease in the downstream region and a rising trend in the upstream region in the late period of the investigation. The trend of polarization in the whole basin is obvious, but the trend of polarization is weakening. Haze pollution has spatial positive autocorrelation and obvious agglomeration characteristics. "High-high" type agglomeration is mainly concentrated in Shandong and Henan provinces in the middle and lower reaches of the Yellow River, while "low-low" type agglomeration is mainly concentrated in Inner Mongolia, Ningxia, Gansu and Shaanxi provinces in the middle and upper reaches of the Yellow River.

Compared with the base period, the overall Gini coefficient at the end of the study period decreased by 14.26%, and inter-regional differences were the main source of regional differences. The intra-regional difference in the middle reaches is the largest, while the intra-regional difference in the upper reaches is the smallest. In terms of

the trend of change, the intra-regional differences in the middle and downstream areas showed an increasing trend, while the regional differences in the upstream areas showed a decreasing trend.

The top six influencing factors of haze pollution are population density, average annual temperature, population size, industrial agglomeration level, industrial structure and technical level. In terms of the evolution trend, the influence of social and economic development-related factors such as economic scale, fiscal expenditure and per capita GDP on smog concentration increased significantly in the later period, while the influence of energy consumption intensity, industrial agglomeration level and other indicators reflecting the degree of industrialization in the Yellow River Basin decreased. In terms of the mechanism of action, population agglomeration, increase in energy consumption and expansion of economic scale will aggravate the haze pollution problem.

Key words: Yellow River Basin; Haze pollution; Regional difference; Influence factor

目 录

1 引言	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 国内外相关研究综述	2
1.2.1 对雾霾污染时空分布特征及区域差异的研究	2
1.2.2 对雾霾污染影响因素的研究	3
1.2.3 对雾霾污染治理的研究	4
1.2.4 文献述评	5
1.3 研究思路与内容	6
1.3.1 研究思路	6
1.3.2 研究内容	7
1.4 创新点	8
2 理论依据及数据来源	9
2.1 理论基础	9
2.1.1 空间经济理论	9
2.1.2 污染天堂假说	9
2.1.3 地理学第一定律	10
2.1.4 协同治理理论	10
2.2 数据来源	11
3 黄河流域雾霾污染的时空分布特征分析	13
3.1 研究范围界定	13
3.2 雾霾污染的动态演变特征分析	14
3.3 雾霾污染的空间集聚特征分析	15
3.3.1 全局空间自相关分析	15

3.3.2 局部空间自相关分析	16
3.4 本章小结.....	18
4 黄河流域雾霾污染的区域差异特征分析	19
4.1 黄河流域雾霾污染的区域总体差异	20
4.2 黄河流域雾霾污染的区域内部差异.....	21
4.3 黄河流域雾霾污染的区域间差异.....	22
4.4 黄河流域雾霾污染区域差异来源及其贡献率.....	23
4.5 本章小结.....	24
5 黄河流域雾霾污染影响因素分析	25
5.1 影响因素选取及模型设置	25
5.1.1 影响因素选取	25
5.1.2 适用性评估	27
5.1.3 参数设置	28
5.2 关键影响因素识别及演进趋势分析.....	30
5.3 影响因素作用机理分析	31
5.4 本章小结	33
6 总结与展望	35
6.1 主要结论.....	35
6.2 政策启示.....	35
6.3 不足与展望	36
参考文献	38
作者攻读硕士期间研究成果	43
致谢	44

1 引言

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

黄河流域是我国重要的生态屏障、经济地带和能源流域。该地区人口稠密、能源丰富，各类生产要素的聚集促进了煤炭开采、能源开发、工业制造业等相关产业的形成，但粗放的经济发展模式，造成了资源开发利用效率较低等问题。近年来，又承接了发达地区高耗能、高污染产业的转移，进一步加重了环境的负担，社会经济发展与环境保护之间的矛盾日益突出，区域环境污染问题愈发严重，雾霾污染问题尤为突出。根据中国生态环保部公布的 2020 年、2021 年中国重点城市空气质量排名，在全国 168 个重点城市中，空气质量较差的前 20 个城市基本都位于黄河流域，黄河流域已成为当前我国雾霾污染最为严重的地区。

细颗粒物（PM_{2.5}）含量的增加是形成雾霾天气的主要原因，它可通过多种途径进入机体，对人体健康系统造成较大的危害，早在 2013 年，世界卫生组织（WHO）就已经将 PM_{2.5} 列为一类致癌物，其浓度越高，越容易诱发心血管系统疾病、呼吸道疾病等，有研究表明（吴春芳等，2017），PM_{2.5} 浓度每提高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，被研究者的总死亡率将增加 1%-5%。除了对人体健康造成的影响之外，雾霾污染也会对社会经济造成较大的影响，根据相关报道（穆泉等，2013），2013 年 1 月份全国雾霾污染事件频发，由此造成的交通等方面的直接经济损失保守估计达到 230 亿元。

为减轻雾霾污染带来的影响，我国政府已经出台了一系列雾霾污染防治政策，比如 2012 年发布的《重点区域大气污染防治“十二五”规划》、2018 年发布的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》、2022 年出台的《新污染物治理行动方案》等，同时在监管和污染物监测等方面也提出了要求，如 2019 年出台的《蓝天保卫战量化问责规定》、2022 年出台的《环境空气颗粒物（PM₁₀ 和 PM_{2.5}）连续自动监测系统技术要求及检测方法》等。在政策效应的影响下，近年来全国大气环境整体状况得到改善，重点城市的雾霾浓度下降幅度较为明显，蓝天保卫战取得了阶段性的胜利，但随时间推移，空气质量的改善幅度以及雾霾污染区域联防联控政策的有效程度都出现一定程度的回落，部分城市雾霾污染卷土重来，区域性雾霾污染问题依然十分严重。

1.1.2 研究意义

我国雾霾污染具有较为明显的区域性集聚特点，雾霾污染成因复杂，且不同区域雾霾污染的成因不尽相同，其他区域的研究成果并不适用于黄河流域雾霾的治理。同时，黄河流域幅员辽阔，就流域内部而言，上、中、下游地区在资源禀赋、地理地形、经济发展、能源利用效率和污染物排放程度等方面也存在较大的差异，流域内雾霾污染同样存在明显的区域差异，因此在该地理尺度上对雾霾污染展开研究，充分考虑各个地区的经济发展水平、环境治理能力等因素，提出差异化的雾霾治理措施及治理目标，具有一定的理论意义。

2019年9月，习近平总书记明确提出将黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略，同时在党的二十大报告中，对我国未来五年在“区域协调发展”、“持续深入打好蓝天、碧水、净土保卫战”、“加快实施重要生态系统保护和修复重大工程”、“加快规划建设新型能源体系”等方面提出了明确的要求，这些都与黄河流域的实际情况密切相关。在此大背景下，对黄河流域雾霾污染情况进行研究，提出具有针对性的治霾建议，对于推动黄河流域生态文明建设和高质量发展、促进上中下游协调发展具有重要的现实意义。

1.2 国内外相关研究综述

1.2.1 对雾霾污染时空分布特征及区域差异的研究

关于我国雾霾污染时空分布特征及区域差异的研究，学者们主要基于气象站点监测数据、卫星遥感数据等，采用空间自相关、莫兰指数、基尼系数、泰尔指数、收敛性分析等方法，对全国、区域等不同地理尺度上雾霾污染的季节性特征、空间关联、空间集聚、区域差异等情况进行分析。

全国层面的研究，主要通过进一步划分区域或基于省域的行政划分开展。蔡海亚等（2017）使用泰尔指数研究了中国省域雾霾污染强度的区域差异，发现中国雾霾区域异质性显著，区域内发展不平衡是区域差异的主要来源；刘晓红（2018）使用变异系数对中国省际雾霾污染水平地区差异进行了研究，发现东部地区雾霾污染指数差异最大；Ye等（2018）基于2016年中国338个城市PM_{2.5}浓度小时数据，发现PM_{2.5}日浓度变化呈双峰分布，峰值浓度出现在早晚高峰期之后，午后浓度值最低，且PM_{2.5}空间分布变

化较大，具有显著的空间自相关和聚类特征；Jin 等（2017）研究了 2005-2014 年中国 PM_{2.5} 的时空变化，结果发现，中国每个省在这十年中排放的 PM_{2.5} 都有不同程度的增长，同一地区的省份相互之间影响巨大。

区域层面的研究，主要集中在京津冀、长三角、珠三角等经济发达地区。隗斌贤等（2019）对京津冀、长三角、珠三角三大区域的大气污染进行了对比分析，发现京津冀地区大气污染最为严重，我国雾霾污染地理上呈现“北高南低”的趋势；Wang 等（2016）研究了 2014 年环渤海城市群 PM_{2.5} 浓度的变化，发现环渤海城市群是中国 PM_{2.5} 污染最严重的地区，且该地区冬季与秋季 PM_{2.5} 浓度高；张洪（2020）、安海岗等（2020）对京津冀及周边地区雾霾污染的整体网络结构、时空分布规律等问题进行了分析，指出各城市间大气污染关系紧密，存在明显空间正自相关性关系，且不同季节城市间 PM_{2.5} 浓度的相关性区别较大，采暖期的雾霾污染关系更加密切，建议根据季节制定不同的雾霾联防措施。

1.2.2 对雾霾污染影响因素的研究

雾霾污染物的来源较为丰富，浓度受多方面因素的影响，主要可分为自然环境因素和社会经济因素两种，自然环境因素是影响地面浓度的外因，与人类活动有关的社会经济因素则是雾霾污染的内因。已有研究主要采用相关性分析、灰色关联模型、地理探测器、传统线性回归模型、空间计量模型等对 PM_{2.5} 的影响因素进行分析。

自然环境因素方面，风速、气温、相对湿度等这些气象条件（何建军等，2016）以及 PM₁₀、SO₂、CO 等其他大气污染物的浓度（卢一凡等，2021）对雾霾污染有显著的影响，且驱动因素之间的交互作用也会加剧雾霾污染程度（Zhang 等，2018）。除此之外，也有学者认为，沙尘（陈杰等，2015）、地形（许文轩等，2017）等因素对大气污染物浓度的变化有较大的影响，李名升等（2016）发现 PM_{2.5} 的空间分布和土地利用情况等因素具有相关性，刘昕等（2019）指出，陕甘宁地区主要城市都属于河谷型城市，地形原因导致大气污染物不易扩散并逐步在此处堆积，造成该地区雾霾浓度始终较高，当地的空气质量面临巨大挑战。

而在社会经济因素方面的研究中，除了前述方法之外，还较多的采用结构分解分析法（Structural Decomposition Analysis, SDA）（周国富等，2017）、对数平均迪氏指数分解法（Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI）（门丹等，2020）、可拓展的随机环境影响评估模型（Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology,

STIRPAT) (任毅等, 2019) 等方法对影响因素进行分解, 普遍认为社会经济发展过程中的城市化 (邵帅等, 2016)、人口 (刘耀彬等, 2020)、产业结构 (Guan 等, 2014)、能源消耗 (Ji 等, 2018)、经贸水平 (Zhong 等, 2020)、机动车的大量使用 (陆家星等, 2019)、环境规制 (周杰琦等, 2021)、道路密度 (Wu 等, 2021)、污染物排放 (Wang 等, 2021) 等因素对 PM_{2.5} 浓度有较大的影响。

除了上述影响因素之外, 部分学者也意识到雾霾污染物具有跨区域流动特点, 邵帅等 (2016) 指出, 雾霾污染并非局部地区的环境问题, 在大气环流等自然因素以及产业转移、交通运输等社会经济因素作用下, 雾霾污染物可以轻松地在多个区域间传导; 刘华军等 (2018) 则认为人类活动在雾霾污染关联关系形成过程中发挥了重要作用, 各城市之间的空间关联也是决定区域雾霾污染水平的重要因素; 曹广翰 (2021) 使用气象模型 (Weather Research and Forecasting Model, WRF) 和空气质量模型 (Community Multiscale Air Quality, CMAQ), 结合综合源解析法 (Integrated Source Apportionment Method, ISAM), 对长三角地区 4 个重点城市的空气污染物来源进行了分析, 证明了大气污染物存在跨区域传输现象, 特别是在冬季, 各城市分别有 38.5%-52.6% 的大气污染物来自远距离传输。

1.2.3 对雾霾污染治理的研究

为应对雾霾污染跨区域传输的特点, 当前在京津冀、川渝等重点地区, 已经初步建立起雾霾污染联防联控机制, 学者们普遍认为雾霾协同治理有一定成效, 但也指出治理过程中存在较多的问题。

一部分学者从不同视角出发, 就外部因素对雾霾治理的影响及作用机制进行了分析。刘美玉 (2022) 以政府环境治理视角为切入点, 对大气污染和政府治理效应及传导机制展开了研究, 发现京津冀、长三角地区政府环境治理效率较低, 而政府环境治理会通过产业结构升级和技术创新影响大气污染; 吕俊峰 (2022) 发现地方政府环境治理能、人力资本存量和人口密度的差异性, 导致京津冀大气污染协同治理成效呈明显的区域异质性特征; 也有部分学者关注到, 雾霾污染协同治理过程中, 中央政府与地方政府, 地方政府、企业、公众三方之间诉求不一致, 都会导致雾霾治理效果不佳 (张振华等, 2021; 郑凌霄等, 2021), 而邻近地区间的环保立法会由于政策的协调成本上升加剧本地雾霾污染, 同时也会因为环保投资的空间外溢效应显著降低周边雾霾污染 (李子豪等, 2021)。

另一部分学者则重点分析了当前我国雾霾污染治理的成效及存在的问题，并就下一步如何更好的应对雾霾污染提出自己的看法。杨骞等（2016）运用双重差分法检验了山东省大气污染联防联控的实施效果，认为联防联控制度不完善、合作治污能力不足、“搭便车”行为普遍等情况是治霾效果不佳的主要原因；有学者指出当前区域大气污染治理存在政策执行力不足（何伟等，2019）、“逐底竞争”等问题（刘华军等，2019），认为为保证联防联控机制的正常运行，相关措施必须制度化、法律化（任凤珍等，2018）；还有学者关注到了联防联控范围的问题，刘华军等，2019）认为，当前“碎片化”的治理方式仍不足以应对雾霾污染在城市间大范围传导，需要在更大的空间范围内实施大气污染的协同治理；刘传明等（2019）则认为部分在全国尺度上对雾霾污染空间关联的研究，可能由于考察的地理范围过大，导致无法用合理的经济学理论解释城市间空间关联关系形成的机理，存在一定的局限性。

1.2.4 文献述评

综合现有的研究成果，总结发现现有文献较多的分析了京津冀、长三角和珠三角等大气污染重点监测区域和经济发达地区的雾霾污染情况，但当前我国雾霾污染空间格局已有了一定变化，黄河流域已成为我国雾霾治理的短板，急需对该区域的雾霾污染情况进行研究；较多的研究都关注到 PM_{2.5} 浓度具有区域异质性等特征，但大部分仅分析了雾霾污染严重的区域，鲜有研究考虑雾霾浓度低、但可能对大气污染产生较大影响的区域。由于雾霾污染具有显著的跨区域传输特点，距离较远的城市间的雾霾污染也可能通过大气环流的因素相互影响，以往只针对高浓度区域采取治理措施或对个别城市孤立分析雾霾污染问题的做法并不可取，理应从较大的地理尺度看待雾霾污染问题。例如部分黄河流域中上游城市虽然雾霾浓度相对较低，但由于能源型城市较多或自身生态环境方面的不足，仍然会产生较多的雾霾污染物，这些污染物会通过大气环流等途径显著的影响其他地区的雾霾污染水平。此外，大部分研究未就更深层次的原因进行考虑，即雾霾污染的影响因素也存在空间差异，由于不同城市的资源禀赋等情况不同，影响因素的作用机理也存在一定程度的差异。现有研究普遍认可社会经济因素是雾霾污染形成的内因，显然如果能从污染源头出发研究雾霾污染治理问题，制定合理的雾霾治理措施将更具针对性。

1.3 研究思路与内容

1.3.1 研究思路

本文旨在丰富区域雾霾治理的研究，以期为提出具有针对性的雾霾治理措施提供依据。结合当前的研究现状，本文认为为制定更加精细、有效的雾霾治理措施，一方面要从雾霾浓度区域异质性的角度出发，对黄河流域雾霾污染的动态演化特征、空间集聚特征、区域差异等情况进行分析，全方面了解该地区的雾霾污染情况；另一方面需要结合影响因素作用机理来考虑雾霾污染治理问题，找出雾霾污染的主要因素，从污染源头出发、更加高效的解决雾霾污染问题。具体研究思路如下：

首先，基于文献梳理相关理论基础。空间经济理论、污染天堂假说可解释经济的空间集聚效应如何在促进经济飞速发展的同时、导致资源的过度开发、污染物的过度排放，进而造成环境的恶化和污染的集聚，地理学第一定律则阐述了资源等各类经济要素为何会产生空间关联，协同治理理论则阐述了环境治理过程中多元主体之间的关系，对当前多方参与的雾霾治理具有指导意义；

其次，使用核密度估计法、探索性空间数据分析方法，了解黄河流域雾霾污染的整体情况，把握雾霾污染的动态演变趋势及空间集聚特征，为进一步研究雾霾污染的区域差异特征及影响因素的变化打下基础；

然后，使用 Dagum 基尼系数法对黄河流域雾霾污染的总体差异进行分解，并对区域差异来源及其贡献率进行分析，把握雾霾污染的区域差异特征，为提出差异化的雾霾治理措施提供依据；

最后，使用宏观经济数据表征社会经济活动，基于随机森林模型，根据影响因素的特征重要度差异，找出主要影响因素并对其时序变化情况进行分析，同时基于部分依赖图对影响因素的作用机理进行分析，为合理的制定或优化雾霾治理措施提供理论依据。

根据以上思路，得到本文的技术路线图，如图 1.1：

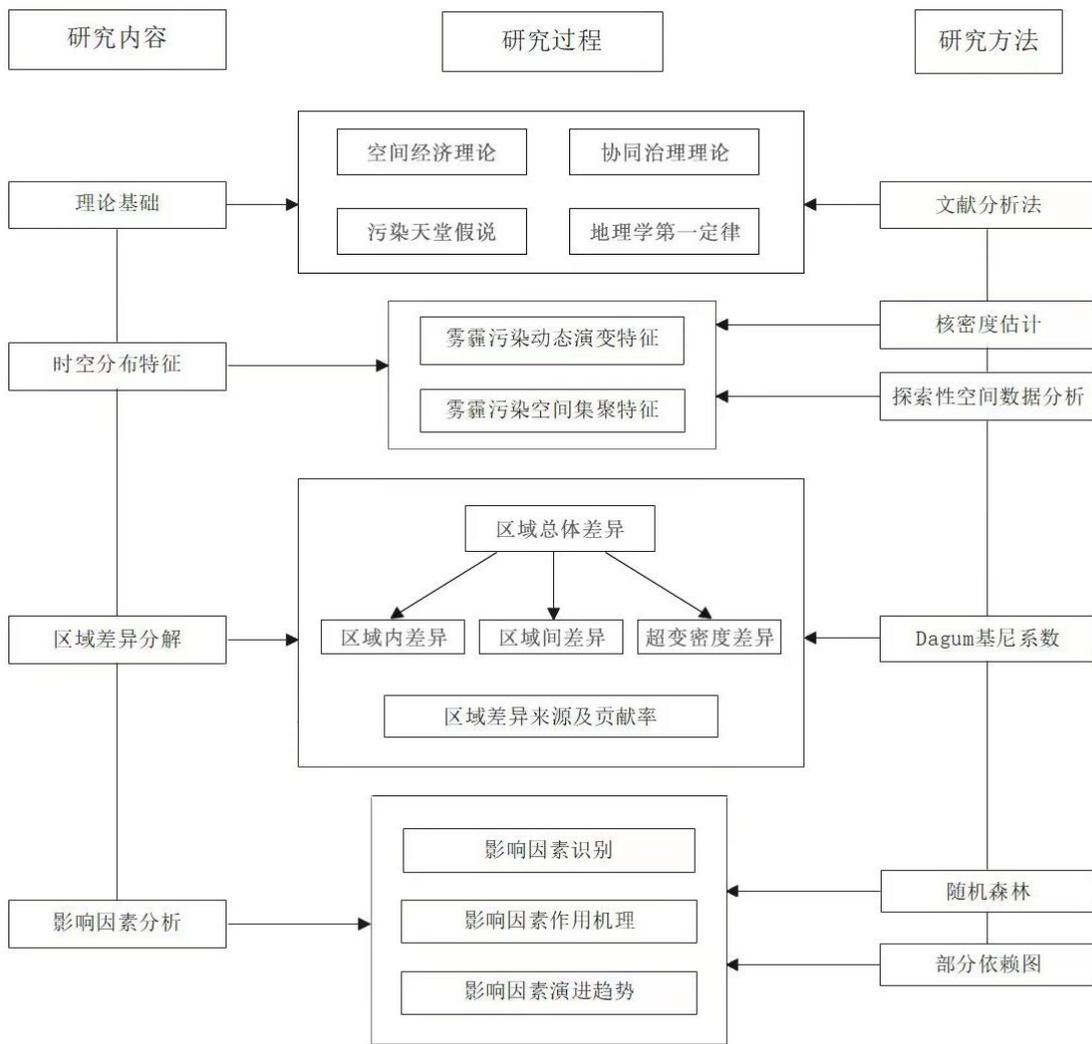


图 1.1 技术路线图

1.3.2 研究内容

基于以上的研究思路，本文的研究内容如下：

第一章是引言，主要介绍研究背景与意义、国内外相关研究综述、研究的思路与内容以及创新点，为本文的撰写奠定基础。首先结合雾霾污染对人体健康、社会经济发展等方面的危害，阐述对黄河流域雾霾污染问题展开研究的重要性和必要性；其次从雾霾污染的区域差异、影响因素和治理三个角度整理相关文献，梳理本文的研究结构、内容，并对可能的创新点进行说明。

第二章是理论依据及数据说明。主要介绍本文所涉及的相关理论基础，并对本文所

使用的数据来源及构造的评价指标进行说明，为下文的实证分析做好理论及数据的准备。

第三章是黄河流域雾霾污染的时空分布特征分析。使用核密度估计法描绘黄河流域雾霾浓度的动态演变特征，使用探索性空间分析方法刻画黄河流域雾霾污染的空间聚集特征，把握雾霾污染的整体情况。

第四章是黄河流域雾霾浓度的区域差异特征分析。通过将黄河流域划分为上游、中游、下游，使用 Dagum 基尼系数法将 PM2.5 浓度的总体差异分解为区域内差异、区域间差异和超变密度差异，并对区域差异来源及其贡献率进行分析。

第五章是黄河流域雾霾污染影响因素分析。使用各城市的宏观经济数据表征人类活动对雾霾污染的影响，对主要影响因素进行识别并对其演变情况及作用规律进行分析。

第六章是总结与展望。主要是对本文主要结论、政策启示和不足之处进行梳理，并对未来相关研究进行展望。

1.4 创新点

研究视角上，雾霾污染具有跨区域流动的特点，即使距离较远或浓度较低的城市也可能对全局的雾霾浓度产生影响，而以往的研究多以城市群为研究单位，地理尺度较小或仅关注了雾霾浓度较高的局部地区，存在明显的不足。基于以上原因，本文认为应该以更广的视角看待雾霾污染问题，选取黄河流域为研究的地理尺度，在重点分析高浓度区域的同时，同时把握低浓度区域的特征，提出具有针对性的雾霾治理措施。

研究方法上，以往对于影响因素的研究，较多关注模型的拟合精度，对模型本身的解释力关注不足，本文应用随机森林模型进行影响因素分析，随机森林模型可以通过特征重要度排序对影响因素的重要程度进行分析，同时借助部分依赖图解释影响因素的作用机理，使模型结果更具解释性。

2 理论依据及数据来源

2.1 理论基础

2.1.1 空间经济理论

产业的集聚效应是工业化时代经济发展的重要形态，在地理空间上高度聚集的产业极大地促进了区域经济的发展和技术的创新（谢晗进等，2019）。传统经济学往往将地域差别视为纯粹的自然环境差异，但并不认为地理因素是影响区域经济的主要因素。保罗·克鲁格曼等人在20世纪90年代开始将地理空间的差异纳入相关经济问题的分析中，构建了核心-外围模型，以克鲁格曼的研究为基础，针对地理空间经济的研究主要关注于区域间生产要素流动和关联性，这构成了空间经济学的基本理论框架，认为可以从经济集聚和经济扩散来阐述空间经济现象，集聚经济和贸易成本之间的均衡决定了经济活动的空间分布格局（安虎森，2021），集聚是资本、劳动和技术等生产要素在空间中有规律的流动并形成稳定均衡的过程（陈军等，2013），表现为各种产业和经济活动在空间上集中产生的经济现象。集聚的根源为区域之间要素实际收益的差别，劳动、资本、技术总是从实际收益低的区域向实际收益高的区域流动（Grossman等，1992），不仅能够满足人的社会需要，促进物质和信息的交流，而且能增加生产和分配的效率。而经济扩散则是与经济集聚恰好相反的一种经济地理现象，是指抑制更多的要素或经济活动朝某一区域过度集中的力量或现象。比如在产业集聚程度很高的地区，往往企业间的竞争强度很大，成本、工资、土地价格等因素均会限制企业的获利能力，从而起到分散经济活动的作用。

产业的集聚带来了经济的飞速发展，但也因为资源的过度开发、污染物的过度排放等原因造成环境的恶化和污染的集聚，且对某一城市环境的破坏并非孤立的存在，它也会对周围其他城市造成影响，这是本文所关注的问题。

2.1.2 污染天堂假说

污染天堂假说认为环境规制和区位选择存在一定的关系，如果发达国家（地区）实行更为严格的环境规制措施，将会阻止污染企业的进入，致使污染密集型企业会从环境标准相对严格的国家（地区）转移到环境标准相对较低的国家（地区），导致这些国

家（地区）成为了污染排放的“天堂”和“避难所”。随着发展的深入，通常会对环境标准相对弱的国家（地区）产生两方面的影响：一方面，随着污染密集型产业建设规模的扩大，产生大量的环境污染物，当地的环境承载能力将超出负荷；另一方面，发达国家（地区）的投资也将带来更为先进的环保技术，产生技术扩散，一定程度上缓解、改善环境污染问题（Grossman 等，1995）。

2.1.3 地理学第一定律

Tobler（1970）提出地理学第一定律，该定律认为事物之间是彼此关联的，不能被认为是相互独立、毫无关系的，并且两个事物之间距离越是接近，它们之间的相关性就越强。这一定律表述了距离对于空间相互作用的影响，而“距离”的含义可以从地理、经济、文化等多方面进行定义。正是因为这种空间关联关系的存在，使得我们可以解释经济活动在空间上的集聚效应以及资源、要素等在空间上的溢出效应，通常地理距离较为接近的地区之间，各类经济要素流动更为频繁，关系更为紧密。结合污染天堂假说，局部地区环境污染问题的加剧，也将对周围地区产生负面影响。

2.1.4 协同治理理论

如前文所述，雾霾污染显示出显著的跨区域传输特点，雾霾的治理需要各个区域、多个主体相互配合，而协同治理理论是关于系统中各个子系统之间相互竞争、互相合作的理论，与雾霾治理的过程具有很强的契合性。因此，用协同治理理论来诠释雾霾治理过程中各多元主体之间的关系十分恰当，可以为雾霾治理提供理论依据，指导雾霾治理的过程和机制优化。

协同治理是指多个主体通过沟通、协调最终形成合作治理的局面，是协同学与治理理论的结合。协同学由德国理论物理学家赫尔曼·哈肯于 1971 年创立，主要研究系统之间相互作用的变化规律。协同学指出，在任何一个稳定的系统内部，其子系统均依照一定的方式进行协同、有序的运动，当具备一定条件时，构成整体系统的所有子系统之间相互协同、相互竞争，会在临界点上发生质变，可以让系统形成一个新的协调有序的状态；治理是指许多管理事务方式的综合，既包括个人日常事物的管理，也包括公务等的处理，好的治理方法能够使存在冲突的主体得以调和（张振波等，2015）。随着社会的快速发展，传统的治理模式在许多领域存在较多问题，而多方参与的协同治理模式更

为适用。综合相关学者的研究（李汉卿，2014；何怡平，2016；郭玉洁，2022），协同治理理论的主要特点可以归纳如下：

（1）治理主体的多样性

在社会公共事务的管理中，政府显然是最具合法性、合理性以及权威性的角色，而民众、社会团体等其他主体，也应基于道德义务、治理要求等方面的考量，承担起自己的责任，参与到社会治理中来。协同治理的过程是多个主体围绕政策目标，出于各自利益诉求的不同而进行博弈的过程，政府、企业、民众等不同的主体会组成一个关系复杂的整体，通过分工合作、资源整合等方式，发挥各自的优势，力求实现高效的治理。

（2）政府在治理中的主导性

这部分强调政府在治理系统中的权威地位，政府应该充分发挥主导作用，促使其他主体之间相互联系，协调多方的利益纠葛，化解矛盾冲突，对公共资源、治理任务等方面进行合理分配，最终达到治理理念和步调的统一。

（3）治理过程的整体性

一方面政府应与其它治理主体保持相对平衡的关系，建立起以政府为主导，企业、民众等多方参与的协同治理体系，促进各个主体之间的交流合作、信息共享，促使多方形合理有序的治理结构，共同推动治理目标的实现。另一方面，各个治理要素之间关系紧密，各地区的治理效果也相互影响，不能将整体目标分割为多个独立的指标、各自为战，应进行系统性布局，开展协同性行动，多元主体之间通力合作，突破单一行动的困境，促使治理的过程更加高效。

（4）治理过程的动态性

由于治理环境具有复杂性和多变性的特点，协同治理理论认为治理过程是一个动态的过程。治理过程中，参与主体的利益关系、阶段性目标、奖励机制等情况都可能根据政策执行过程中的治理效果、治理进程等因素的变化而发生变化。

2.2 数据来源

本文所涉及的数据由以下 3 部分组成，个别缺失数据采用线性插值法补齐：

（1）PM_{2.5} 浓度数据。中国生态环境部从 2013 年开始建立地基监测站点，对 PM_{2.5} 进行监测，考虑到监测初期仅对少数重点城市进行了监测，缺失数据较多，本文将研究的时间范围定为 2015 年-2020 年。本文所使用的 PM_{2.5} 浓度数据来源于中国空气质量在线监测分析平台公布的日度数据（<https://www.aqistudy.cn/>），以此为基础，计算得

到黄河流域各城市 PM2.5 年平均浓度数据；

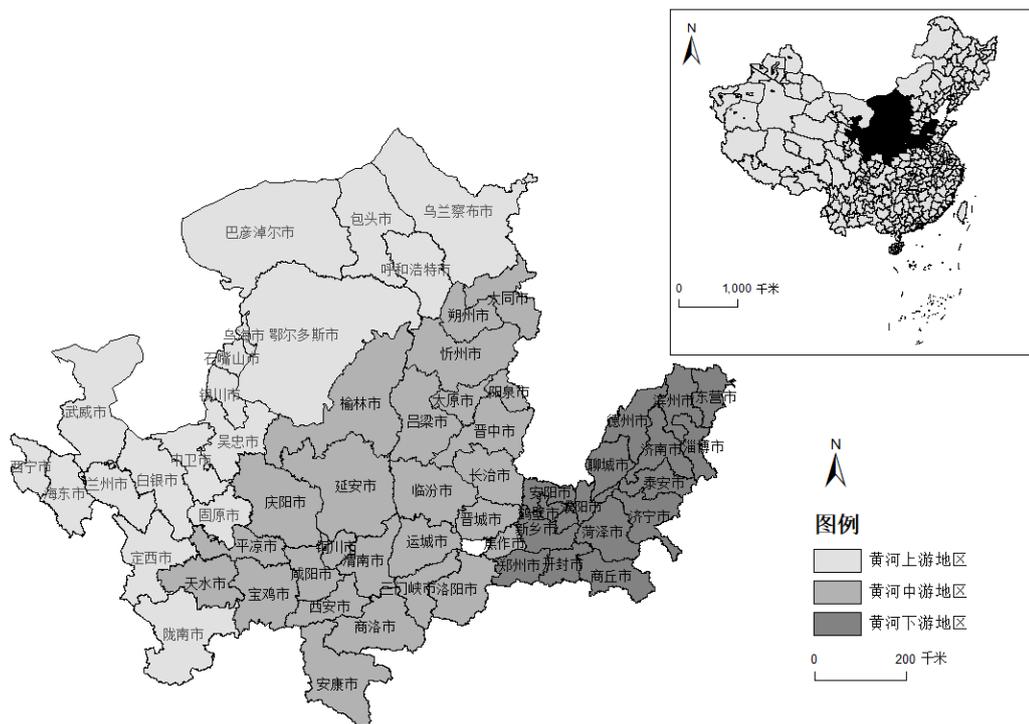
（2）社会经济数据。本文以社会经济数据表征社会经济活动，探究社会经济活动对雾霾污染的影响，原始数据来自 2015 年-2020 年对应年份的《中国城市统计年鉴》和《城市建设统计年鉴》；

（3）气象数据。气象原始数据来源于美国国家海洋和大气管理局下设的国家环境信息中心 (<https://www.ncei.noaa.gov/>)。

3 黄河流域雾霾污染的时空分布特征分析

3.1 研究范围界定

本文以国家水利部黄河水利委员会定义的自然黄河流域以及《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》中界定的流域范围为基础，在保证地级市（或州或盟）行政区划完整的基础上，借鉴相关的研究成果（周晓艳等，2016；郭付有等，2021；赵宏波等，2021），考虑到四川属于长江流域，故将其剔除，同时结合数据的可获得性，最终选取青、甘、宁、内、陕、晋、豫、鲁 8 个省（自治区）中共计 60 个地级市（或州或盟）作为研究对象，并以内蒙古托克托县的河口镇和河南郑州桃花峪为分界点，将黄河流域被划分为上、中、下游三个区域，如图 3.1 所示。



注：本文地理图均基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作，底图无修改。

图 3.1 本文所界定的黄河流域研究范围

3.2 雾霾污染的动态演变特征分析

本文借助 STATA 软件，使用核密度估计法从分布位置、分布形态、分布延展性、极化趋势四个方面对黄河流域雾霾污染的动态演进趋势进行研究。计算公式如下（杨晓军等，2020）：

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{x_i - \bar{x}}{h}\right) \quad (3.1)$$

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (3.2)$$

式中， $f(x)$ 为随机变量 x 的密度函数， N 为观测个数， x_i 为独立同分布观测值， \bar{x} 为均值。 h 为带宽，带宽越小，密度函数曲线越不光滑，估计精度越高。 $K(x)$ 为核函数，本文选用高斯核函数。

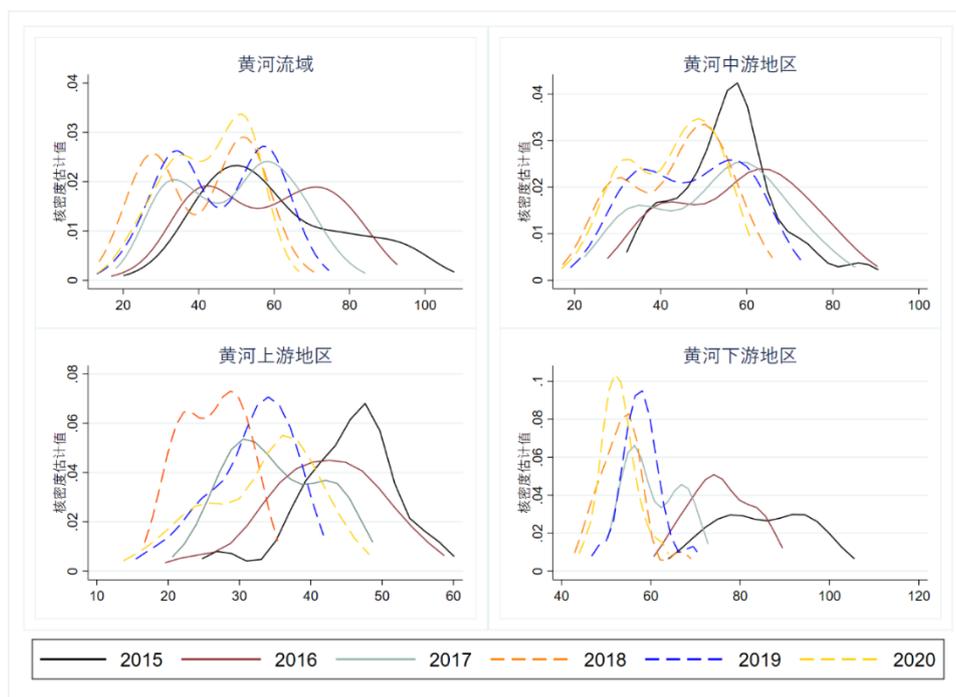


图 3.2 2015-2020 年黄河流域 PM2.5 浓度的核密度估计

具体的分析结果如图 3.2 所示，从黄河流域全局和分区域两个方面进行呈现。

从黄河流域全局来看，2015-2020 年，整体上核密度曲线的分布位置呈左移趋势，表明考察期内黄河流域的大气环境状况整体得到改善，尽管在 2018 年-2019 年分布曲线

有小幅右移趋势，雾霾浓度存在小幅上升的现象，但未影响雾霾污染状况好转的整体趋势；核密度曲线在 2016-2020 年均呈现“双峰”现象，该结果表明雾霾浓度存在一定程度的两极分化趋势，考察期内各城市雾霾污染经历了出现两极分化趋势到两极分化程度减弱的过程，分布曲线呈“单峰-双峰-双峰趋势减弱”的变化，且双峰之间的距离呈缩小趋势，反映出黄河流域雾霾污染的绝对差异整体在减小。此外，分布的延展性反映出黄河流域雾霾浓度的分布呈现明显的右偏趋势，但随时间推移拖尾现象整体呈缩小趋势，该结果也印证了雾霾污染两极分化趋势有所减弱。

从区域层面来看，黄河流域按上游、中游、下游的顺序雾霾浓度的极值依次递增。变化趋势上，考察期内黄河下游地区分布曲线左移趋势较为明显，表明该地区雾霾浓度整体下降幅度较大；黄河中游地区则经历了雾霾污染先恶化后逐步改善的趋势；以 2018 年为界，黄河上游地区分布曲线经历了由大幅度左移向大幅度右移的变化，反映了该地区雾霾浓度存在逐步下降然后雾霾浓度上升的情况。同时，黄河下游地区主峰高度上升、宽度缩小趋势明显，表明该地区各城市雾霾污染的绝对差异有所缩小；而黄河中游地区和上游地区的主峰高度均出现下降与上升多次交替的情况，变化较多，趋势并不明显。此外，三大区域在不同年份均存在一定程度的“双峰”趋势，特别是黄河中、下游地区，考察期内区域内分化趋势较为明显，而下游地区的极化趋势减弱最为明显。

3.3 雾霾污染的空间集聚特征分析

3.3.1 全局空间自相关分析

为了解黄河流域雾霾污染的空间集聚特征，本文以 queen 空间邻接矩阵作为空间权重矩阵，通过测算全局 Moran' s I 指数进行全局空间自相关分析，全局 Moran' s I 指数计算公式如下 (Haining, 2003)：

$$I_g = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.3)$$

式中， x 为 PM2.5 浓度， i 和 j 代表不同的城市， n 为城市数量， \bar{x} 为各城市 PM2.5 浓度均值， w_{ij} 为城市间空间权重矩阵。

如表 3.1 所示，全局 Moran' s I 指数在 0.612-0.797 之间波动，均通过 1% 的显著性

水平检验, Z 值始终为正, 且均大于 1.96 的临界值, 该结果表明黄河流域雾霾污染存在明显的空间正自相关关系, 呈现出显著的空间集聚效应。

表 3.1 全局莫兰指数

年份	Moran's I	Z-score	P-value
2015	0.797	9.261	0.000
2016	0.714	8.271	0.000
2017	0.621	7.223	0.000
2018	0.761	8.789	0.000
2019	0.696	8.066	0.000
2020	0.612	7.132	0.000

3.3.2 局部空间自相关分析

为进一步了解黄河流域各地级市之间的空间集聚情况, 本文使用 Geoda 软件, 基于 queen 空间邻接矩阵, 绘制了 LISA 聚类图。LISA 聚类图脱胎于局部 Moran's I 指数, 局部 Moran's I 指数计算公式如下 (Anselin, 1995):

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{S^2} \quad (3.4)$$

式中, x 为 PM2.5 浓度, i 和 j 代表不同的城市, n 为城市数量, \bar{x} 为各城市 PM2.5 浓度均值, S^2 为样本方差, w_{ij} 为城市间空间权重矩阵。

通过对结果的整理, 本文选取了考察期内空间集聚趋势有明显变化的 4 个时间节点 (2015 年、2017 年、2019 年和 2020 年) 对局部空间自相关情况进行说明, 结果如图 3.3 所示。结果表明, 黄河流域 PM2.5 浓度的空间集聚效应显著, 聚集特征较为稳定但存在空间异质性。除 2015 年的晋城市和 2020 年的包头市分别显示出了“低-高”集聚和“高-低”集聚的特征外, 其余时间黄河流域雾霾污染空间集聚类型均表现为“低-低”型集聚和“高-高”型集聚。

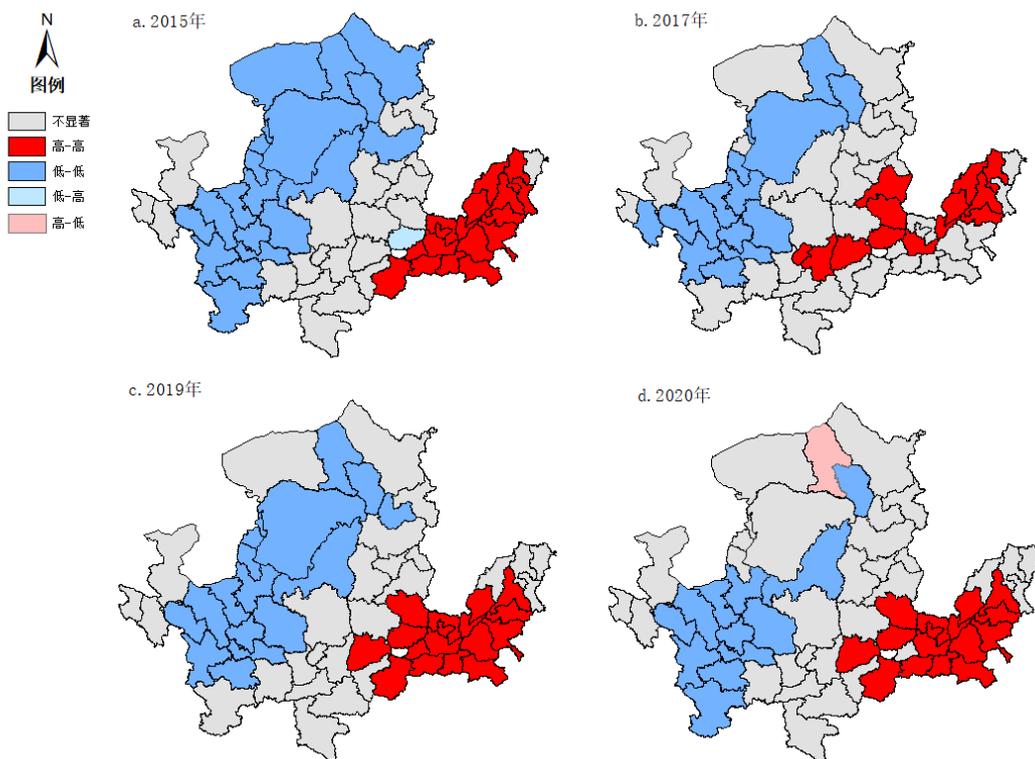


图 3.3 黄河流域 PM2.5 浓度 LISA 聚类图

“低-低”型集聚主要集中在黄河中上游地区，随时间变化，区域范围有缩小趋势。2015年“低-低”型集聚的城市有20个，区域范围主要为内蒙古、宁夏、甘肃、陕西、山西的部分城市，在地理位置上集中于研究区域的西北部和西南部。由于2018-2020年主要集中在青海、甘肃、宁夏、内蒙古四个省份的部分城市雾霾浓度呈逐年增长趋势，使得“低-低”型集聚区域范围产生了较大的变化，到2020年仅12个城市表现为“低-低”型集聚，内蒙古和宁夏的大部分城市退出“低-低”型集聚区域范围，区域范围局限于研究区域的西南部。

“高-高”型集聚主要集中在黄河中下游的山东、河南两省，2015-2017年山东、河南两省的城市雾霾浓度持续性下降，使得2017年黄河下游地区“高-高”集聚区域有所减少，但在2018-2020年，部分年份雾霾浓度也有一定程度的上升，使得整体上“高-高”集聚区域没有明显的缩小趋势。“高-高”型集聚表示本地城市雾霾浓度高，其周边城市的雾霾浓度也高，邻近城市之间雾霾污染互相关联，容易进一步加剧环境的恶化，该区域是流域雾霾污染治理的重点关注区域。

上述结果表明，雾霾污染的集聚特征已经打破了省份等行政区划的限制，高浓度区域集中在黄河中下游的经济发达地区，该现象可能与社会经济发展引起的污染物大量排

放有关。邻近城市之间由于区位条件、能源禀赋相似，当地主导产业有很多关联之处，各类要素的频繁流动，导致各城市间的空间关联愈发密切，雾霾污染的进一步治理应打破地理区划的限制，以更广的视角来看待雾霾污染问题。

3.4 本章小结

本章主要从黄河流域雾霾污染动态演变特征和空间集聚特征两方面对黄河流域雾霾污染的时空分布特征进行分析，通过核密度估计法刻画黄河流域雾霾污染动态演变特征，基于探索性空间数据分析方法对黄河流域雾霾污染的空间效应进行检验，通过测算全局莫兰指数和绘制 LISA 聚类图，刻画出黄河流域雾霾污染的空间集聚特征，得到主要结论如下：

黄河流域雾霾污染动态演变特征：从黄河流域层面来看，分布曲线整体呈左移趋势，考察期内黄河流域的大气环境状况得到改善。同时核密度曲线在 2016-2020 年均呈现“双峰”现象，且分布呈现明显的右偏趋势，该结果表明雾霾浓度存在一定程度的两极分化趋势，但随着时间的推移，双峰趋势减弱，拖尾现象也呈缩小趋势，极化趋势有所减弱；从区域层面来看，黄河下游地区分布曲线左移趋势较为明显，表明下游地区雾霾浓度整体下降幅度较大，且该地区各城市之间的雾霾污染绝对差异在缩小。黄河中游地区整体呈先恶化后逐步改善的趋势，黄河上游地区雾霾污染情况由改善向恶化更替的情况。此外，中下游地区“双峰”趋势较为明显，随时间推移，下游地区的极化趋势减弱最为明显。

黄河流域雾霾污染的空间集聚特征：黄河流域雾霾污染呈现出显著的空间正相关关系，空间集聚特征明显，区域差异较大。“高-高”型集聚主要集中在黄河中下游的山东、河南两省，且随时间推移，集聚区域没有明显的缩小趋势，“低-低”型集聚主要集中在黄河中上游地区的内蒙古、宁夏、甘肃、陕西等省份，随时间变化，区域范围有缩小趋势。雾霾污染的集聚特征，已经打破了省份等行政区划的限制，黄河流域雾霾污染的协同治理存在一定的必要性。

4 黄河流域雾霾污染的区域差异特征分析

由第三章的分析结果可知,黄河流域雾霾污染空间异质性特征明显,特别是黄河下游地区雾霾浓度明显高于中、上游地区,为进一步的量化、比较黄河流域雾霾污染的区域差异,本章将对黄河流域雾霾浓度的区域差异进行测度。

目前对区域差异的研究较多使用 Theil 指数,但 Dagum 基尼系数法比 Theil 指数更具有优势,它不但能解决区域差距的来源问题,也能通过超变密度差异指出不同区域之间的交错重叠因素对总体差异的影响^[58,59],比如雾霾浓度较低的区域中也存在部分高值城市,其雾霾浓度大于高浓度区域中部分低值城市,若低浓度区域中的高值城市浓度进一步增加且高浓度区域中的低值城市浓度持续降低,可能会同时增加区域内基尼系数、降低区域间差异净值、加剧区域间重叠部分的不平等程度,使总体基尼系数不降反升。

本文将黄河流域划分为上、中、下游三个部分,参考 Dagum (1997) 的研究,采用 Dagum 基尼系数对 PM_{2.5} 浓度的区域差异进行分解,总体基尼系数可以表示为:

$$G = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |E_{ji} - E_{hr}|}{2n^2 \bar{E}} \quad (4.1)$$

式中, E_{ji} (E_{hr}) 是区域 j(h) 内各城市的 PM_{2.5} 浓度, \bar{E} 表示黄河流域 PM_{2.5} 浓度均值, k 表示区域的总个数, j 和 h 为任意两个不同的区域,且满足 j=1、2、3、...、k, i 和 r 为区域 j(h) 内任意两个不同的城市, n 是城市个数, n_j (n_h) 为区域 j (h) 内城市总个数, G 为黄河流域雾霾的总体基尼系数。

区域 j 的基尼系数以及区域 j 与区域 h 之间的基尼系数可以分别用 G_{jj} 和 G_{jh} 表示:

$$G_{jj} = \frac{\frac{1}{2E_j} \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_j} |E_{ji} - E_{jr}|}{n_j^2} \quad (4.2)$$

$$G_{jh} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |E_{ji} - E_{hr}|}{n_j n_h (\bar{E}_j + \bar{E}_h)} \quad (4.3)$$

总体基尼系数 (G) 可分解为三部分,也即区域内差异贡献 (G_w)、区域间差异贡献 (G_{nb}) 和超变密度贡献 (G_t),其中超变密度贡献 (G_t) 反映了不同区域之间的交

互作用对总体差异的影响，相互之间的关系可由下列等式表示：

$$G = G_w + G_{nb} + G_t \quad (4.4)$$

$$G_w = \sum_{j=1}^k G_{jj} P_j S_j \quad (4.5)$$

$$G_{nb} = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (P_j S_h + P_h S_j) D_{jh} \quad (4.6)$$

$$G_t = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (P_j S_h + P_h S_j) (1 - D_{jh}) \quad (4.7)$$

式中， $p_j = n_j/n$ 表示区域 j 中城市数在黄河流域城市总数中的占比， $s_j = n_j \bar{E}_j / n \bar{E}$ ， $j=1,2,3,\dots,k$ ； D_{jh} 表示区域 j 和区域 h 之间 $PM_{2.5}$ 浓度的相对影响，计算公式为：

$$D_{jh} = \frac{d_{jh} - p_{jh}}{d_{jh} + p_{jh}} \quad (4.8)$$

$$d_{jh} = \int_0^{\infty} dF_j(y) \int_0^y (y-x) dF_h(x) \quad (4.9)$$

$$p_{jh} = \int_0^{\infty} dF_h(y) \int_0^y (y-x) dF_j(x) \quad (4.10)$$

式中， d_{jh} 是区域 j 和 h 两者之间 $PM_{2.5}$ 浓度的差值，可以理解为区域 j 和 h 中所有 $y_{ji} - y_{hr} > 0$ 的样本值的数学期望，同理 p_{jh} 表示所有 $y_{hr} - y_{ji} > 0$ 的样本值的数学期望。

4.1 黄河流域雾霾污染的区域总体差异

图 4.1 展示了黄河流域 2015-2020 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度总体基尼系数的分布情况，该值越大表明该区域雾霾浓度分布越不均匀，区域差异越显著。由图 4.1 可知，考察期内黄河流域 $PM_{2.5}$ 浓度的总体基尼系数介于 0.1467-0.1837 之间，总体基尼系数均值为 0.1672，表明黄河流域雾霾污染存在一定的区域差异。从演变趋势来看，以 2015 年为基期，总体基尼系数在观测期内先下降后上升，在 2018 年总体基尼系数达到最大值 0.1837，此后呈持续下降趋势，在 2020 年达到最小值 0.1467。整体而言，总体基尼系数由 2015 年的 0.1711 下降至 2020 年的 0.14677，降幅达 14.26%，该结果表明 2015-2020 年黄河流域 $PM_{2.5}$ 年均浓度的区域差异呈缩小趋势。该结果与前文核密度估计法得到的结论一致，黄河流域雾霾污染整体极化趋势在缩小，造成该现象的原因不难理解，结合

前文的结论，以黄河下游地区为代表雾霾污染程度较高的区域，近年来在国家政策的大力支持下，雾霾浓度下降明显，大气环境得到大幅度的改善，虽然个别城市在个别年份仍有雾霾浓度的上升现象，但流域整体雾霾浓度降低的趋同性较强，从而使得黄河流域雾霾污染的总体差异呈缩小趋势。

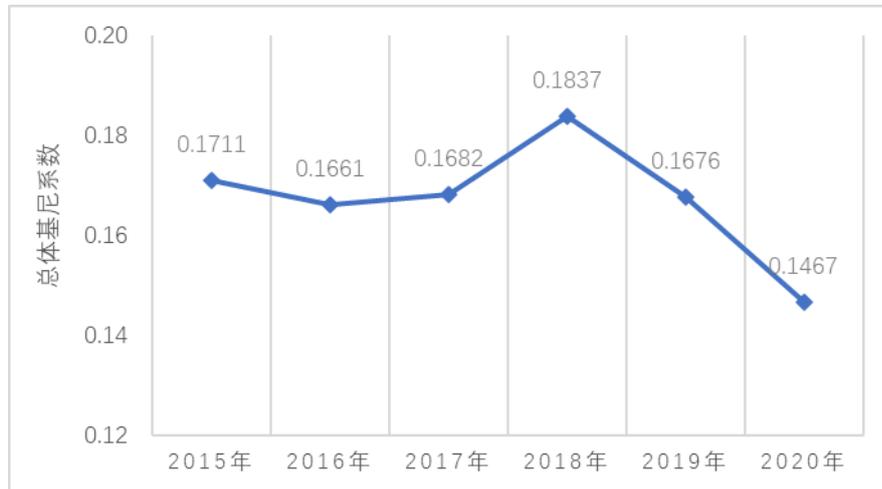


图 4.1 2015-2020 年黄河流域雾霾污染区域总体差异

4.2 黄河流域雾霾污染的区域内差异

图 4.2 展示了 2015-2020 年 PM_{2.5} 年均浓度区域内基尼系数的分布情况。由图 4.2 可知，黄河流域雾霾污染上、中、下游的区域内差异呈不同的演化趋势。考察期内，区域内差异基尼系数年平均值最高的是黄河中游地区，达 0.1394，其次为黄河下游地区（0.0993），而黄河上游地区的区域内差异基尼系数均值最小仅为 0.0502。从变化趋势来看，黄河中、下游地区的区域内差异呈波动上升趋势，特别是黄河下游地区，其区域内差异基尼系数由 2015 年的 0.0797 上升至 2020 年的 0.1212，涨幅达 52.02%，中游地区由 2015 年的 0.1138 上升至 2020 年的 0.1347，涨幅达 18.30%，而黄河上游地区区域差异则呈缩小趋势，由 2015 年的 0.0660 下降至 2020 年的 0.0407，降幅达 38.34%。

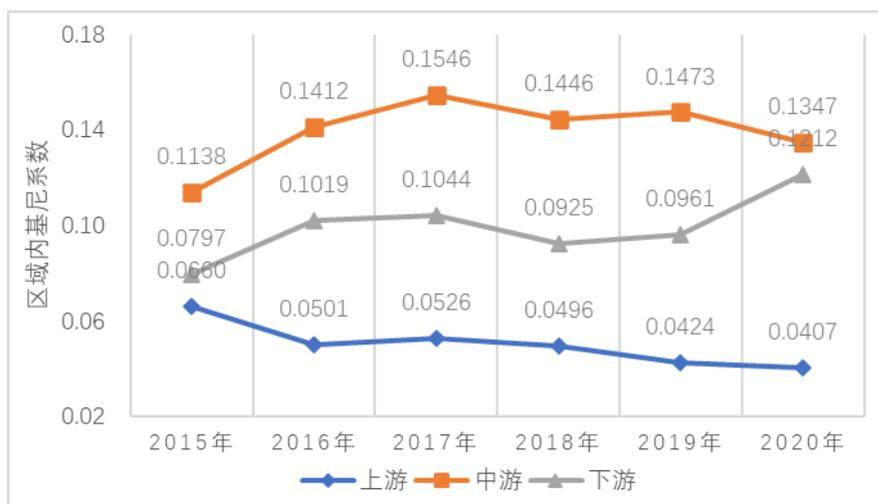


图 4.2 2015-2020 年黄河流域雾霾污染区域内差异

2015 年黄河下游地区各城市 PM_{2.5} 浓度均处于较高水平，且差异较小，到 2020 年各城市雾霾浓度均有较大幅度的下降，特别是像德州、菏泽、聊城、郑州、新乡等城市 2015 年 PM_{2.5} 浓度均在 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上，到 2020 年这些城市雾霾浓度下降幅度均在 43% 以上，但由于不同城市下降幅度不同，导致了区域内差异的扩大。黄河上游地区各城市本身雾霾浓度较低，区域内雾霾浓度相对较高的城市下降幅度较大，从而进一步降低了区域内的差异。而黄河中游地区正好处于“高浓度-低浓度”的过渡区域，区域内的焦作、洛阳等城市 PM_{2.5} 浓度与下游地区处于同一水平，而庆阳、天水等城市又与上游地区一样处于较低水平，区域内部存在一定程度的两极分化，从而导致中游地区区域内基尼系数始终保持在相对较高的水平。

4.3 黄河流域雾霾污染的区域间差异

图 4.3 展示了 2015-2020 年 PM_{2.5} 年均浓度区域间基尼系数的分布情况。从差异大小来看，“上游-下游”由于雾霾浓度差距较大，其雾霾污染水平差异最为显著，在考察期内的基尼系数年均值为 0.2883，其次为“中游-下游”，基尼系数年均值为 0.1980，而“上游-中游”的区域间差异最小，年均值仅为 0.1440。从变化趋势来看，“中游-下游”之间的差异 2015 年-2018 年呈逐年上升趋势，2018 年-2020 年有下降趋势，但整体仍呈扩大趋势，涨幅达 27.52%，而“上游-中游”、“上游-下游”的差异缩小趋势明显，降幅分别达 41.03%和 24.84%。

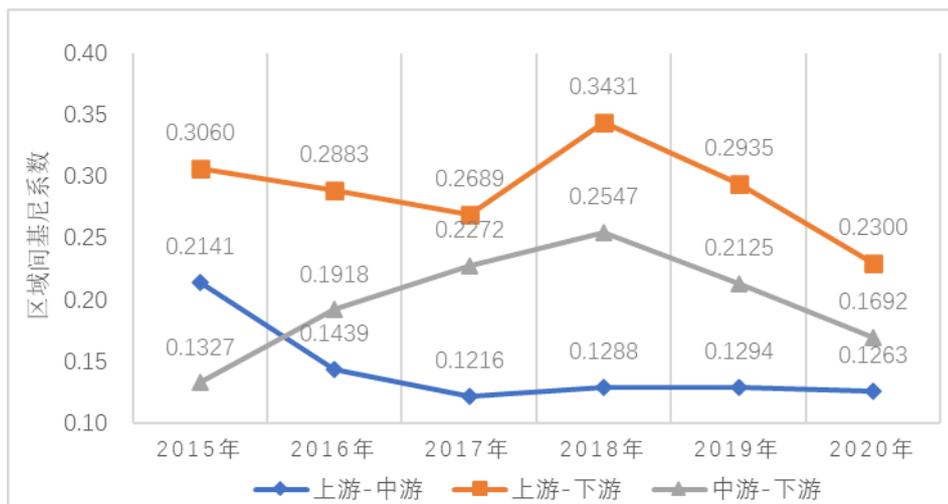


图 4.3 2015-2020 年黄河流域雾霾污染区域间差异

4.4 黄河流域雾霾污染区域差异来源及其贡献率

图 4.4 展示了 2015-2020 年 PM_{2.5} 年均浓度区域差异的来源及其贡献率的分布情况。根据贡献程度的大小可以直观地发现黄河流域雾霾污染区域差异主要来源于区域间差异，且占据非常明显的主导地位。以 2015 年为基期，考察期内，区域间差异贡献率最大，在 63.46%-77.06% 之间，而区域内差异的贡献率在 18.51%-25.47% 之间，超变密度差异的贡献率在 4.41%-11.48% 之间。从变化趋势来看，区域间差异在 2015 年-2017 年处于下降趋势，2017 年-2018 年有较大幅度的提升，2018 年之后又呈逐年下降趋势，差异贡献率占比整体呈波动下降趋势，而区域内差异和超变密度差异贡献率的变化情况与区域间贡献率完全相反，存在此消彼长的波动关系，在 2015 年-2017 年呈上升趋势，2017 年-2018 年有较大幅度的下降，2018 年之后又呈逐年上升趋势，差异贡献率占比整体均呈上升趋势。由此可见，区域间样本交叉重叠因素对雾霾污染区域差异影响程度相对较小，同时尽管区域间差异对总体差异的贡献率有下降趋势，但仍是黄河流域雾霾污染区域差异的主要来源。

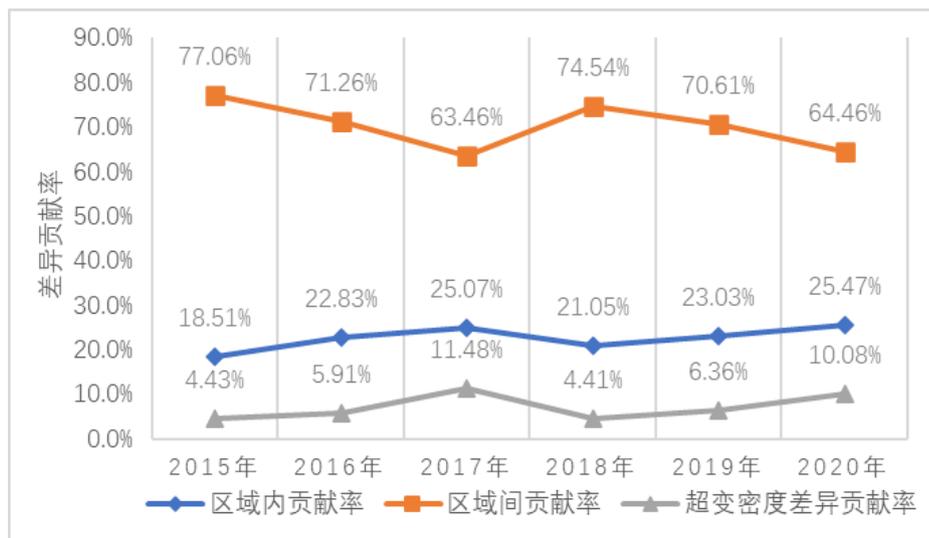


图 4.4 2015-2020 年黄河流域雾霾污染差异的来源及其贡献率

4.5 本章小结

本章的主要内容是对黄河流域雾霾污染的区域差异特征进行分析，通过将黄河流域划分为上、中、下游，使用 Dagum 基尼系数法对黄河流域 PM_{2.5} 浓度的区域差异进行分解，将总体差异分解为区域内差异、区域间差异和超变密度差异，并对区域差异来源及其贡献率进行分析，得到主要结论如下：

考察期内黄河流域 PM_{2.5} 浓度存在一定的区域差异，且区域差异呈缩小趋势，与基期相比，考察期末总体基尼系数降幅达 14.26%。黄河中游地区的区域内差异最大，而上游地区的区域内差异最小，变化趋势上，黄河中、下游地区的区域内差异呈波动上升趋势，而黄河上游地区区域差异则呈缩小趋势。黄河流域雾霾浓度的区域间差异较为明显，占据非常明显的主导地位，是区域差异的主要来源，其中“上游-下游”雾霾污染的差异最为明显。

5 黄河流域雾霾污染影响因素分析

由第四章的分析结果可知，黄河流域区域差异明显，且区域间差异是区域差异的主要来源，为更加科学、合理的制定雾霾污染的治理措施，需要进一步的分析黄河流域雾霾污染的影响因素，并掌握其作用机理。本章将通过随机森林模型对雾霾污染的影响因素进行分析，使用特征重要性排序和部分依赖图来明确影响因素对 PM_{2.5} 浓度的相对重要性和非线性响应关系，增强模型的可解释性。

随机森林模型是 Bagging 集成模型的扩展变体，Bagging 集成算法通过并行的构建 n 个模型，然后集成所有模型的建模结果作为最终的结果，通常可以提高模型的预测准确率，得到比单个模型更好的结果。而随机森林模型进一步的在抽取数据和特征的过程中都加入了随机的机制，由于每棵树都通过随机原则抽取数据和特征，使得每棵树都不一样，树之间的相关程度较低，降低了出现过拟合现象的概率，一般不需要考虑多重共线性现象，以此为基础构造出来的模型具有较强的泛化能力。具体来看，随机森林模型利用自助抽样法 (Bootstrap)，每次建模都有放回的抽取 K 个样本，依此构建决策树，最后将这些决策树组合起来形成“森林”，通过投票得分规则或求均值来获得最终结果 (Breiman, 2001)。此外在特征选取的过程中，该模型也随机的分裂每个节点，通过纯度计算获得子集特征划分的最佳分割方式。

5.1 影响因素选取及模型设置

5.1.1 影响因素选取

本文从自然环境因素和社会经济因素两方面选取影响因素，综合现有研究成果以及黄河流域的实际情况，结合数据的可获得性，自然环境因素选取年降水量、年均风速、年平均相对湿度和年均气温这 4 个气象因子，社会经济因素方面，本文从人口及城镇化因素、经济水平因素、产业因素、能源消耗水平、技术水平及外部条件这 5 个方面考虑，选取了 12 个因素，对选取这些因素的原因具体说明如下：

(1) 人口及城镇化因素：选择人口密度、人口规模、城市建设用地规模三个指标来表征。研究表明人口的集聚以及城市化的推进将加剧雾霾污染程度(王会芝等, 2020)，这类因素在推动经济发展的同时，带来大量的住房、出行、消费等物质生活需求，造成

交通拥挤、环境恶化等城市病。

(2) 经济水平因素：选择人均 GDP、财政支出、经济规模三个指标来表征。普遍认为经济发展会带来较多的环境污染，但也有学者指出（刘华军，2018），随着经济规模的扩大，经济结构将得到不断完善，反而有助于缓解大气污染状况。

(3) 产业因素：选择产业结构和产业集聚水平两个指标来表征。普遍认为对工业相关产业依赖度较高的地区，污染物的排放量比较大，环境负担较重。产业集聚水平会影响当地污染物的排放量，有学者认为（蔡海亚等，2018；李实，2021），产业的集聚有利于企业集中生产、治污，且由于存在环境规制效应，产业集聚水平越高的地区污染物的排放反而可能越小。

(4) 能源消耗水平：选择能源消耗强度和能源消耗量两个指标来表征。能源消耗，尤其是传统煤炭能源的大量消耗，是工业污染的主要来源之一。

(5) 技术水平及外部条件：选择技术水平和环境规制强度两个指标来表征。技术水平的进步将在一定程度上提高能源利用效率，环境规制政策将倒逼工业企业优化生产方式、提升技术水平，从而有效降低污染物的排放量并提升污染治理水平。

上述影响因素的具体说明如表 5.1 所示。

表 5.1 变量说明

变量	指标	说明
人口及城镇化因素	人口密度	单位面积人口数（百人/平方公里）
	人口规模	年末户籍人口（万人）
	城市建设用地规模	城市建设用地面积（平方公里）
经济水平因素	人均 GDP	人均 GDP（万元）
	财政支出	财政支出（亿元）
	经济规模	地区生产总值（亿元）
产业因素	产业结构	第二产业占地区生产总值比重（%）
	产业集聚水平	地区污染物排放量占总排放量的比例与地区面积占总面积比例的比值
能源消耗水平	能源消耗强度	单位 GDP 标准煤消耗量（吨/万元）
	能源消耗量	总吨标准煤（万吨）
技术水平及外部条件	技术水平	科学技术支出占财政支出比重（%）
	环境规制强度	单位污染物产出能力变化率（%）
气象条件	年降水量	日降水量的累加（mm）
	年均风速	日平均风速的累加平均（m/s）
	年均相对湿度	日平均湿度累加平均（%）
	年均气温	日平均气温累加平均（℃）

其中，能源消耗强度中的煤炭消耗量，根据各城市天然气、液化石油气和电的使用情况，参照《综合能耗计算通则》中能源折标准煤系数进行估算。环境规制强度的计算，本文借鉴相关学者的研究（张成等，2015），以单位污染物产出能力的变化率作为衡量环境规制强度的指标。环境规制强度的计算表达式如下：

$$ER_{it} = Ln \left(\frac{E_{it}/W_{it}}{E_{i,t-1}/W_{i,t-1}} \right) \quad (5.1)$$

式中， i 代表城市， t 代表年份， E 表示产出，以地区生产总值表征， W 为工业废气排放量，以工业二氧化硫排放量（吨）表征，若单位污染物的经济产出越大，说明环境规制强度越强。

产业集聚水平的计算，本文借鉴相关学者的研究（刘满凤等，2014），构建产业集聚水平指标，以此表征工业相关产业的集聚情况：

$$Agg_i = \frac{X_i / \sum X_i}{S_i / \sum S_i} \quad (5.2)$$

式中， i 代表城市， X 表示工业污染物排放，以工业二氧化硫排放量（吨）表征， S 表示该城市的行政区划面积（平方公里）。

5.1.2 适用性评估

在进行模型训练前，本文对所有影响因素进行相关性分析，分析影响因素两两之间的相关程度。由图 5.1 可知，大部分影响因素之间相关系数小于 0.5，表明影响因子之间产生多重共线性的可能性较小，可能有少数影响因素会存在共线性特征，但是每个影响因素对雾霾污染影响机制不同、反馈的信息不同，且随机森林模型本身对多重共线性不敏感，因此本文不考虑共线性特征对模型解释能力的影响。同时，本文以 PM2.5 浓度作为因变量，以全部影响因素作为自变量，分别构建了多元线性回归模型和随机森林模型。比较两种模型在测试集中的精度可知，随机森林模型的拟合优度 (0.71) 高于多元线性回归模型 (0.60)，可见随机森林模型在分析影响因素方面存在一定的优越性。

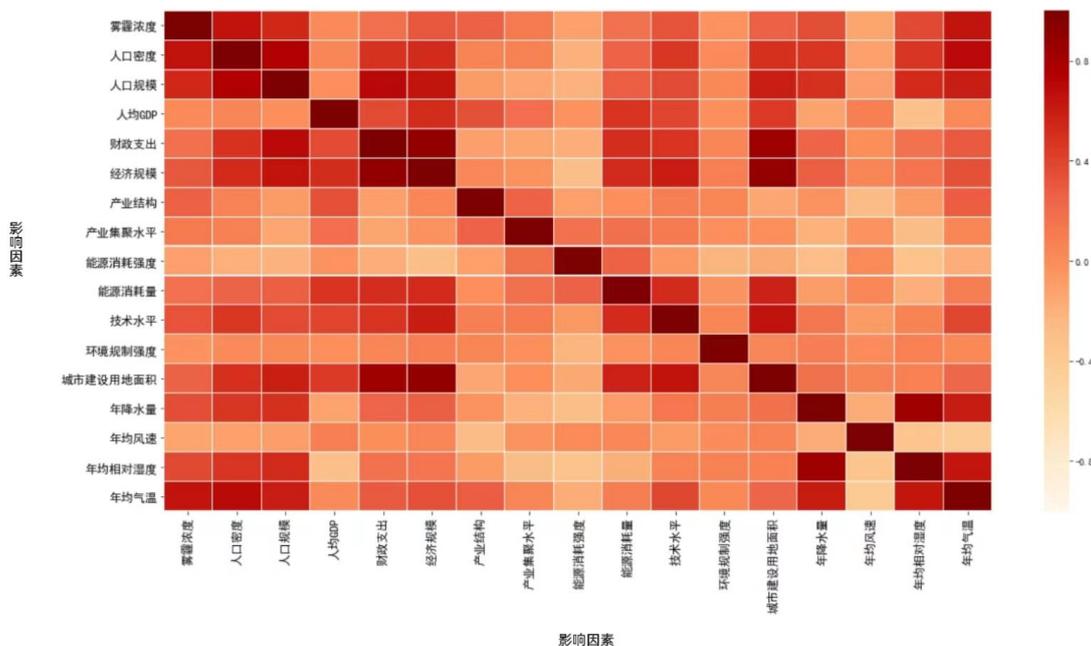


图 5.1 影响因素相关系数图

5.1.3 参数设置

本文基于 Scikit-learn 机器学习库构建随机森林模型。

构建一个性能良好的随机森林模型需要选择合理的参数，主要的调节参数是以下两个：第一个参数是每一棵回归树节点所预选的变量的个数（mtry），即每次选择多少个变量作为候选的分裂变量，在 Scikit-learn 中称为“max_features”，第二个参数是随机森林生成的树的棵树（ntree），在 Scikit-learn 中称为“n_estimators”。理论上树的棵树越多模型精度越高，但考虑到计算量等问题，通常情况下，当树的棵数到达一定数量，模型的性能趋于稳定即可。

为示范参数选择的过程，本文以 2015-2020 年 PM2.5 浓度作为因变量，以全部影响因素作为自变量进行建模，根据袋外误差来衡量决策树的数量，由图 5.2 可知，当树的数量大于 200，袋外误差无明显的下降、已基本稳定下来，综合考虑模型的拟合优度和运算速度，选取 250 作为 ntree 的参数。

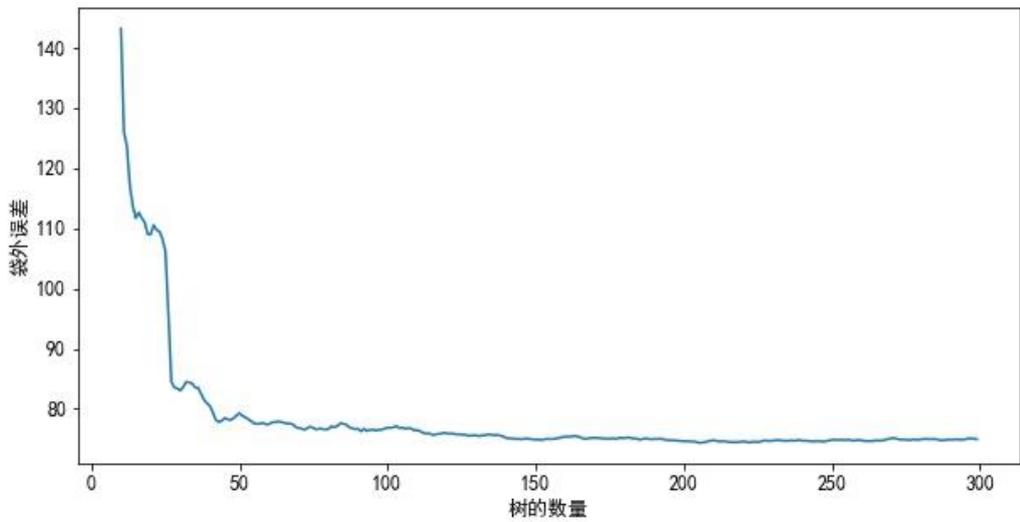


图 5.2 模型精度与树数量的关系

为选择最优的超参数 max_features ，本文针对所有可能的取值，进行十折交叉验证，以交叉验证误差最小为标准来衡量最优参数的选择，结果如图 5.3 所示，当参数设为 6 时，模型的交叉验证误差最小。

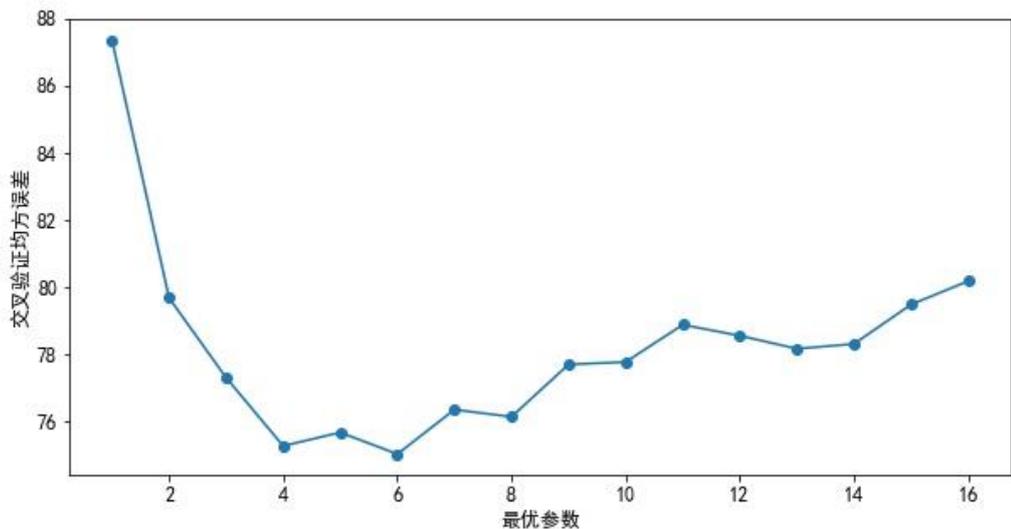


图 5.3 模型精度与节点变量个数的关系

此外，虽然随机森林模型可以采用袋外误差来衡量随机森林的性能，但该方法更适合在大样本的前提下使用，为了更科学地对模型性能进行验证，因此在训练模型前，将

数据集按照 7 比 3 的比例划分为训练集和测试集。

本文所涉及的其他参数选择均基于上述流程选取。

5.2 关键影响因素识别及演进趋势分析

根据前文分析结果，部分城市雾霾浓度在 2018-2020 年存在上升趋势，导致分析结果与 2015-2017 年相比有明显的不同，推测在不同时间段内的影响因素可能也存在差异。因此，本文将时间划分为 2015-2017 年和 2018-2020 年两个时间段，通过对影响因素特征重要性排序，来反映各影响因素对雾霾污染影响程度的变化情况，以随机森林节点不纯度平均减少量作为衡量各影响因素对雾霾污染影响程度的标准，该值越大，说明该影响因素越重要，最终的结果如表 5.2 所示。

表 5.2 2015-2020 年雾霾污染影响因素重要性变化情况

影响因素	2015-2017 年	2018-2020 年	2015-2020 年
人口密度	1	2	1
年均气温	2	1	2
人口规模	3	3	3
产业集聚水平	4	7	4
经济规模	5	4	13
年均相对湿度	6	6	7
年降水量	7	5	10
环境规制强度	8	16	12
产业结构	9	13	5
技术水平	10	12	6
城市建设用地面积	11	8	9
能源消耗强度	12	15	15
年均风速	13	14	16
财政支出	14	11	8
人均 GDP	15	10	14
能源消耗量	16	9	11

2015-2017 年，重要性排前 6 的影响因素分别是人口密度、年均气温、人口规模、产业集聚水平、经济规模和年均相对湿度，人口因素、产业因素、经济因素和气象条件等多个方面都对雾霾污染有显著的影响，反映出雾霾污染的来源广泛，治理雾霾难度较大。2018-2020 年的主要影响因素没有大幅度的变化，重要性排前 6 的影响因素分别为年均气温、人口密度、人口规模、经济规模、年降水量和年均相对湿度。与 2015-2017

年相比,2018-2020年能源消耗量的影响程度上升趋势最为明显,由第16位上升至第9位,经济规模、财政支出、人均GDP和城市建设用地面积这类社会发展因素对雾霾污染的影响普遍在提升;而环境规制强度的影响程度有较大幅度的下降,由第8位下降至第16位,能源消耗强度、产业集聚水平和产业结构这类反应黄河流域工业化程度的指标的影响力均有不同程度的下降。造成该现象可能的原因在于,在雾霾治理初期政府干预、政策指引等手段对工业产业的影响较大,形成较为明显的政策效应,工业相关产业引起的污染物排放受限,促使雾霾浓度能在较短的时间内有所下降,但随着治霾的深入,政策效应减弱,要推动雾霾浓度持续性的下降并不容易。而经济发展这类因素则对雾霾污染有着持续性的影响,一方面社会经济的发展需要消耗大量的资源,会排放较多的污染物,另一方面较高的经济水平将促使社会文明程度的提升、环境保护意识的增强,有利于雾霾治理,从而考察后期该类影响因素的影响程度普遍在上升。

总体来看,在2015-2020年影响因素特征重要度排序情况中,人口及城镇化因素对雾霾浓度的影响较大,人口密度和人口规模分别位于影响因素重要度排序的第一和第三位,城市建设用地规模排在第九位;产业因素的影响同样十分显著,产业集聚水平和产业结构分别位于影响因素重要度排序的第四和第五位;技术水平和环境规制强度则分别排在第六和第十二。该结果较为符合黄河流域实际情况,黄河流域人口稠密,特别是下游地区的山东、河南两省,总人口数在全国靠前,资源密集型产业占比较大,同时受资源禀赋、经济发展阶段等诸多因素的制约,各省份的制造业发展呈现较大差异化,产业密度、产业结构、技术水平等均呈现出空间非均衡的特点,这些因素都将对大气污染物的排放和污染物的空间非均衡性产生较大影响。

5.3 影响因素作用机理分析

本文通过绘制部分依赖关系图反映各影响因素对雾霾浓度的作用规律。它的工作原理是将机器学习模型的输出边缘化到影响因素的分布上,得到目标值和影响因素之间的关系,它通过将模型应用于一组数据、改变该影响因素的值同时保持其他影响因素的值不变,分析模型输出结果,得到影响因素对模型结果影响的函数关系。在部分依赖图中,X轴的横坐标表示各影响因素的取值大小,Y轴的纵坐标表示雾霾浓度的大小,当某个影响因素的部分依赖图曲线比较陡峭,说明这个影响因素对雾霾浓度的贡献度是比较大的。

2015-2020年影响因素对雾霾浓度的边际影响如图5.4所示,对其作用机理的分析

如下:

人口及城镇化因素方面。当人口密度小于 4 百人/平方公里时,随着人口密度的增加,雾霾浓度急剧上升,之后雾霾浓度的上升有明显的放缓趋势,但仍呈波动上升趋势。这部分城市主要集中在黄河中上游,该地区生态较为脆弱,这可能也是人口密度小幅度增长就会引起雾霾浓度较大变动的的原因;而当城市人口规模在 300-400 万之间,雾霾浓度随着人口的增加有显著上升,之后呈平缓趋势,在人口达到 600 万左右,雾霾浓度又有一个小幅度的跃升;随着城市建设用地规模的扩大,雾霾浓度有明显的下降过程,随后呈缓慢的上升过程。该结果表明,人口的集聚效应有利于雾霾污染物的排放,众所周知污染物主要来源于人类生活、生产活动产生的生活垃圾、工业垃圾等,人口的聚集会对环境的承受能力提出考验,而适当的城市扩张,有利于对雾霾浓度的控制,这可能与居民综合素质的提升及城市资源的合理配置有关。

经济水平因素方面。财政支出增加将有效改善雾霾污染状况,而人均 GDP 增加,在一定范围内能降低雾霾浓度,但当人均 GDP 大于 7.5 万元时,雾霾浓度会有显著的上升,该类城市主要是济南、郑州、西安为代表的区域核心城市及鄂尔多斯、乌海为代表的能源型城市。而经济规模扩大也主要对雾霾浓度起促进作用,显然我们在追求城市的发展的同时,也要考虑城市的环境承载能力,不应以牺牲环境为代价。

产业因素方面。随着第二产业比重的增加,雾霾污染呈先缓慢上升后快速上升再趋于平稳的趋势。由于黄河流域大多数城市的产业以能源化工、装备制造等高耗能、高污染产业为主,第二产业占比较高,将极大促进污染物排放,这也合理的反应了黄河流域雾霾污染较为严重的原因;产业集聚水平对雾霾浓度的影响呈先上升后平缓趋势,拐点值在 1.5 附近,当值大于 1.5 时,雾霾浓度并不会随产业集聚水平增加而有明显的增大趋势。产业集聚度大于 1.5 的城市主要集中在黄河中下游的山西、河南、山东三个省,此外还包括石嘴山、乌海等能源型城市,该结果印证了前述相关学者的研究(蔡海亚等, 2018; 李实, 2021),企业集中生产、治污有利于对污染的控制。

能源消耗水平方面。能源消耗量增加将持续促进雾霾浓度增加,能源消耗强度增加先促进雾霾浓度的上升,但当能源消耗强度大于 0.1 吨标准煤/万元时,雾霾浓度有小幅度的下降,该类城市主要集中在山西、内蒙古、宁夏、甘肃等经济增长对能源依赖度较大的省份。

技术水平及外部条件方面。环境规制对雾霾污染的抑制作用明显,而随着技术投入的增大,雾霾浓度整体呈先升后降再趋于平稳的趋势。由于节能减排等技术发展常以环

境需求为导向, 并会表现出效果的滞后性, 因此在前期雾霾浓度没有随着相关投入的增加有明显的下降, 但随着进一步的投入, 技术进步、环保意识提高等原因对雾霾浓度的抑制作用将逐渐显著。

气象条件方面。年均气温在 10℃-12℃时, 雾霾浓度与气温呈正相关关系; 年均相对湿度的增加也将促进雾霾浓度的增加, 而年降水量、年均风速的增加有利于细颗粒物的沉降与消散, 对雾霾污染主要起抑制作用。

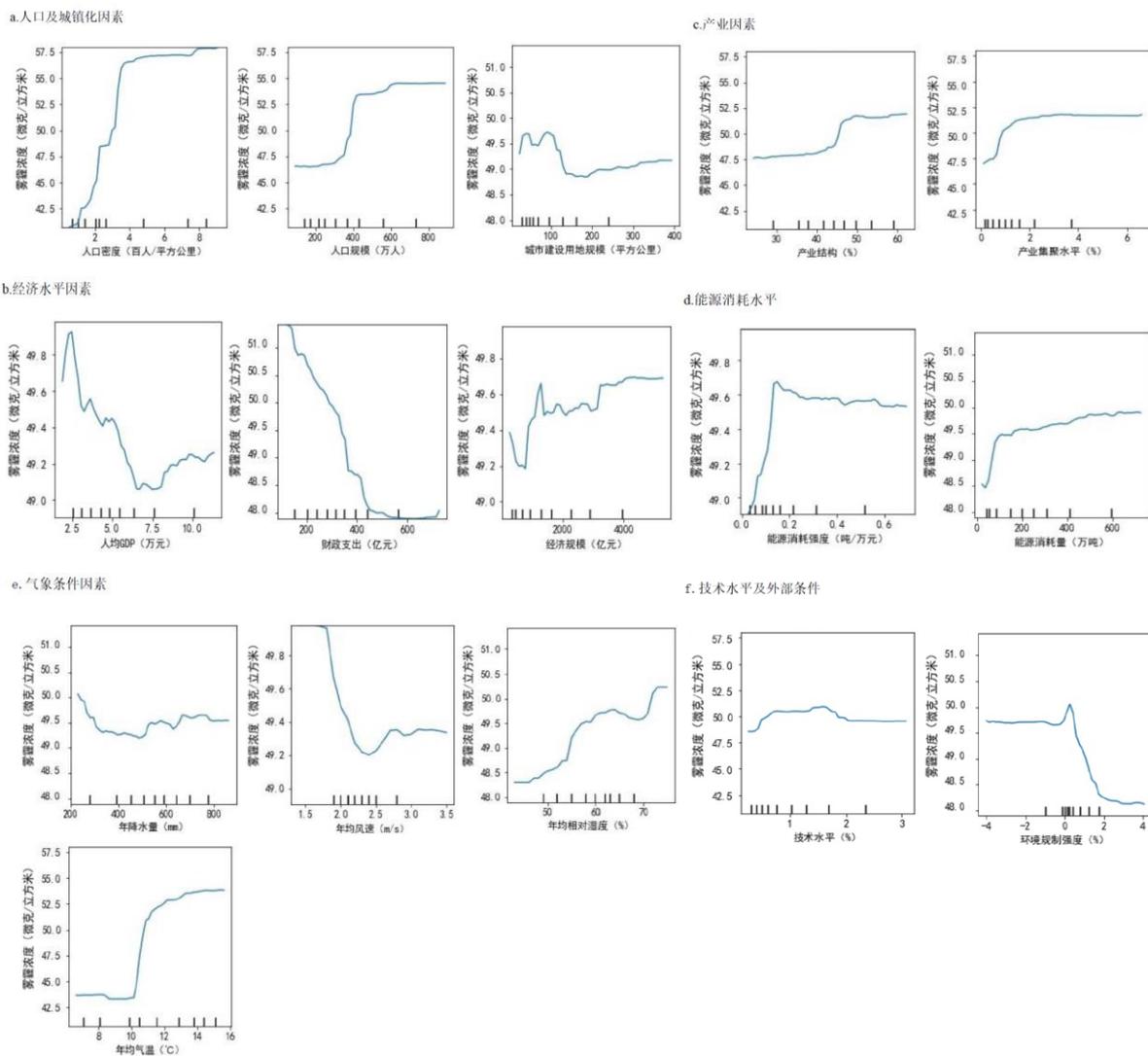


图 5.4 影响因素部分依赖图

5.4 本章小结

本章基于随机森林模型对黄河流域雾霾污染的主要影响因素的识别、影响因素的时

序演进及其作用机理等问题进行了分析，相关结果较为符合黄河流域的实际情况。

结果表明 2015-2020 年黄河流域雾霾污染影响因素重要度排序靠前的 6 个因素依次是人口密度、年均气温、人口规模、产业集聚水平、产业结构和技术水平，而从时间演变角度来看，2018-2020 年较 2015-2017 年相比，能源消耗量、经济规模、财政支出、人均 GDP 等因素的重要程度普遍在上升，而能源消耗强度、产业集聚水平等反应黄河流域工业化程度的指标的重要程度在下降。

影响因素作用机理分析结果显示，人口的集聚、能源消耗量的增加、经济规模的扩大等情况都将显著的促进雾霾污染，财政支出的增加、适度的城市扩张、技术水平的提升、环境规制的加强、年均风速的增加等情况都有利于雾霾的治理，而能源消耗强度、产业结构等情况都有着较为复杂的变化。

6 总结与展望

6.1 主要结论

黄河流域雾霾污染时空分布特征结果显示,黄河流域按上游、中游、下游的顺序雾霾浓度的极值依次递增,考察期内黄河流域雾霾污染浓度整体下降趋势明显,其中下游地区雾霾浓度下降幅度最大,上游地区在考察后期雾霾浓度有上升的趋势;流域整体两极分化趋势明显,但分化趋势在减弱,下游地区的极化趋势减弱最为明显;同时,黄河流域雾霾污染存在明显的空间正自相关关系,空间集聚特征明显,“高-高”型集聚主要集中在黄河中下游的山东、河南两省,“低-低”型集聚主要集中在黄河中上游地区的内蒙古、宁夏、甘肃、陕西等省份。

黄河流域雾霾污染区域差异特征结果显示,雾霾浓度区域差异呈缩小趋势,与基期相比,考察期末总体基尼系数降幅达 14.26%;黄河中游地区的区域内差异最大,而上游地区的区域内差异最小,变化趋势上,中、下游地区的区域内差异呈波动上升趋势,而上游地区区域内差异则呈缩小趋势;黄河流域雾霾浓度的区域间差异较为明显,是区域差异的主要来源,占据非常明显的主导地位,其中“上游-下游”雾霾污染的差异最为明显,变化趋势上,“中游-下游”之间的差异先上升后下降,整体呈扩大趋势,而“上游-中游”、“上游-下游”的差异缩小趋势明显

雾霾污染的影响因素分析结果显示,2015-2020 年黄河流域雾霾污染影响因素重要度排序靠前的 6 个因素依次是人口密度、年均气温、人口规模、产业集聚水平、产业结构和技术水平;而从演进趋势来看,在考察后期经济规模、财政支出、人均 GDP 等社会经济发展相关因素对雾霾浓度的影响显著增加,而能源消耗强度、产业集聚水平等反应黄河流域工业化程度的指标的影响力在下降;从作用机理来看,人口集聚、能源消耗的增加、经济规模的扩大、年均气温的上升都将加剧雾霾污染问题。

6.2 政策启示

根据雾霾浓度的时空分布特征和区域差异特征分析结果,黄河流域雾霾污染空间异质特征显著,应分区域推进雾霾污染治理。降低雾霾浓度仍然是雾霾污染治理的重点,因此首先应重点关注高浓度区域,主要为黄河下游地区的山东、河南两省;其次,由于

雾霾污染存在显著的空间关联关系，大气环流、产业转移等因素都会造成污染物的空间溢出，不应该忽视浓度相对较低的区域，中上游的能量型城市也会带来较多的污染物的排放，但可能由于地理地形等方面的优势，大气污染物消散的较快，最终表现为该城市雾霾浓度较低，且考察后期黄河中上游地区部分城市雾霾浓度已经有上升的趋势，这是较为危险的信号，因此理应同样关注低浓度区域的雾霾污染问题。

根据黄河流域雾霾浓度影响因素时序演进的特点，产业集聚水平、产业结构等反应黄河流域工业化程度的指标对雾霾污染的影响程度呈下降趋势，而经济规模、财政支出、城市建设用地面积等社会经济发展因素的影响力显著提升，认为一方面要完善当前联防联控制度，如前文所述，当前的联防联控存在政策强制力不足、职责定位混乱等问题，这可能是导致政策效应无法对工业企业有持续性的影响、进而导致雾霾浓度无法持续性下降的原因，另一方面要警惕部分城市仅仅考虑自身的社会经济发展而在雾霾污染协同治理过程中存在“搭便车”等现象，要提高多元主体协同参与的意识，如有必要可将大气污染联防联控制度化和法律化，将治理成效与地方财政、经济建设等绩效挂钩。

根据黄河流域雾霾浓度影响因素的重要性排序及其作用机理分析结果，首先人口集聚问题是雾霾污染最主要的影响因素，特别是黄河下游地区，山东、河南都是我国的人口的大省，理应采取提升公共交通等基础设施水平等方法，致力于减少生活、生产资源的过度消耗，同时合理的实行人才引进政策，减少因人口过度聚集而造成的雾霾污染反弹；其次，降低对石油化工等产业的依赖，推进产业结构升级，同时加快节能减排等技术创新，加大绿色创新投入和绿色技术引进，加大宣传力度，增强公众的环境保护意识；此外，环境因素也是影响雾霾浓度的重要因素，除年均气温之外，年均湿度、年降水量也处于重要度排序的前列，理应进一步贯彻落实好黄河流域生态保护相关政策。

6.3 不足与展望

本文研究黄河流域雾霾污染的区域差异及影响因素分析，对雾霾污染分区进行影响因素的区域异质性研究更为合适，但因为仅有以年为单位的经济数据，分区之后各个区域数据量较少等原因，导致整体拟合效果不佳，最终选择对雾霾污染的演进趋势进行分析。因此在未来的研究中，需要逐步加深黄河流域各个区域影响因素的研究，更有利于因地制宜的制定治霾政策。

雾霾污染是在自然环境因素和社会经济因素等方面共同作用下产生的，只有从人口、经济、社会等多维度采取措施，才能实现雾霾污染的有效治理。文本受限于数据的

可获得性，仅选取、构造了 16 个指标来对雾霾浓度的影响因素进行说明，雾霾浓度还受到地形等复杂因素的影响，同时仅仅考虑了年这个时间尺度，而雾霾污染还存在很多的季节性特征，影响因素也会发生相应的时序变化，显然本文的结果还无法较为细致的对雾霾形成的作用机理进行系统性阐释。因此在未来的研究中，要对大气污染排物的来源进行全面考虑，这样才能更科学的为制定合理、有效的治霾措施提供参考。

参考文献

- [1] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA[J]. *Geographical Analysis*, 1995,27(02): 93-115.
- [2] Breiman L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, 45(01): 5-32.
- [3] Dagum C . A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio[J]. *Empirical Economics*, 1997, 22(04):515-531.
- [4] Guan D , Su X , Zhang Q , et al. The socioeconomic drivers of China's primary PM2.5 emissions[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(2):024010.
- [5] Grossman G M , Kreuger A B .Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement. *Social Science Electronic Publishing*.1992,8(2):223-250.
- [6] Grossman G, Kreuger A. Economic growth and the environment. *Quarterly Journal of Economics*.1995,110(2):353-377.
- [7] Haining R.Spatial Data Analysis: The exploratory analysis of spatial data[J]. 2003.
- [8] Jin Q, Fang X, Wen B, et al. Spatio-temporal variations of PM2.5 emission in China from 2005 to 2014.[J]. *Chemosphere*, 2017, 183:429-436.
- [9] Ji X, Yao Y. What causes PM2.5 pollution? Cross-economy empirical analysis from socioeconomic perspective[J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2018, 119:458-472.
- [10] Tobler W R.A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region[J]. *Economic Geography*.1970,46(1):234-240.
- [11] Wang Z B, Fang C L. Spatial-temporal characteristics and determinants of PM 2.5 in the Bohai Rim Urban Agglomeration[J]. *Chemosphere*, 2016, 148(148):148-162.
- [12] Wu Q , Guo R, Luo J, et al. Spatiotemporal evolution and the driving factors of PM2.5 in Chinese urban agglomerations between 2000 and 2017[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125(7499):107491.
- [13] Wang H , Li J . Dual effects of environmental regulation on PM2.5 pollution: evidence from 280 cities in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021:1-14.
- [14] Ye W F, Ma Z Y, Ha X Z. Spatial-temporal patterns of PM2.5 concentrations for 338 Chinese cities[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 631-632:524-533.

- [15] Zhang D S. The driving factors of air quality index in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 197:1342-1351.
- [16] Zhong H C, Lian S L, Jun L. The impact of foreign direct investment on urban PM 2.5 pollution in China[J]. Journal of Environmental Management, 2020,265:110532.
- [17]安海岗, 李佳培, 张翠芝, 等. 京津冀及周边城市 PM_{2.5} 污染空间关联网络及季节演化研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(07):1377-1386.
- [18]安虎森. 空间经济学的一些理论问题[J]. 河北经贸大学学报, 2021, 42(01):71-78.
- [19]陈杰, 赵素平, 殷代英, 等. 沙尘天气过程对中国北方城市空气质量的影响[J]. 中国沙漠, 2015, 35(02):423-430.
- [20]陈军, 岳意定. 中国区域产业集聚与产业转移——基于空间经济理论的分析[J]. 系统工程, 2013, 31(12):92-97.
- [21]蔡海亚, 徐盈之, 孙文远. 中国雾霾污染强度的地区差异与收敛性研究——基于省际面板数据的实证检验[J]. 山西财经大学学报, 2017, 39(03):1-14.
- [22]蔡海亚, 徐盈之. 产业协同集聚、贸易开放与雾霾污染[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(06):93-102.
- [23]曹广翰. 长三角地区典型城市的细颗粒物来源解析模拟研究[D]. 浙江大学, 2021.
- [24]郭玉洁. 基于演化博弈的黄河流域协同治理与生态补偿机制研究[D]. 河南财经政法大学, 2022.
- [25]郭付友, 佟连军, 仇方道, 等. 黄河流域生态经济走廊绿色发展时空分异特征与影响因素识别[J]. 地理学报, 2021, 76(03):726-739.
- [26] GB/T 2589-2020, 综合能耗计算通则[S].
- [27]何建军, 吴琳, 毛洪钧, 等. 气象条件对河北廊坊城市空气质量的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(06):791-799.
- [28]何伟, 张文杰, 王淑兰, 等. 京津冀地区大气污染联防联控机制实施效果及完善建议[J]. 环境科学研究, 2019, 32(10):1696-1703.
- [29]何怡平. 协同理论视角下的地方政府雾霾治理机制研究[D]. 广西师范学院, 2016.
- [30]洪兴建. 基尼系数子群分解中剩余项的一个简洁解释[J]. 数量经济技术经济研究, 2009, 26(03):152-161.
- [31]隗斌贤, 刘晓红. 大气污染的区域差异、影响因素与治理政策选择——基于长三角与京津冀、珠三角的比较分析[J]. 科技通报, 2019, 35(08):197-202.

- [32]吕俊峰. 京津冀大气污染协同治理政策效应评估[D]. 河北地质大学, 2022.
- [33]黎智慧, 刘渝琳, 尹兴民. 基于 Dagum 方法的能源基尼系数测算与分解[J]. 统计与决策, 2019, 35(19):30-33.
- [34]陆星家. 浙江省单位 GDP-PM2.5 排放量可视化和内因分析[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(11):136-139.
- [35]卢一凡, 王娇, 于铨浩, 等. 青岛市雾、霾天时空变化特征及影响因素分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(07):34-45.
- [36]李实. 黄河流域工业污染的时空格局和影响因素研究[D]. 兰州大学, 2021.
- [37]李汉卿. 协同治理理论探析[J]. 理论月刊, 2014(01):138-142.
- [38]李子豪, 袁丙兵. 地方政府的雾霾治理政策作用机制——政策工具、空间关联和门槛效应[J]. 资源科学, 2021, 43(01):40-56.
- [39]李名升, 任晓霞, 于洋, 等. 中国大陆城市 PM2.5 污染时空分布规律[J]. 中国环境科学, 2016, 36(03):641-650.
- [40]刘满凤, 谢晗进. 中国省域经济集聚性与污染集聚性趋同研究[J]. 经济地理, 2014, 34(04):25-32.
- [41]刘晓红. 中国省际雾霾污染水平的时空特征与影响因素研究[D]. 南京航空航天大学, 2018.
- [42]刘传明, 张瑾, 孙喆. 中国北方地区大气污染的空间关联网络及其结构特征[J]. 环境经济研究, 2019, 4(04):63-77.
- [43]刘华军, 彭莹. 雾霾污染区域协同治理的“逐底竞争”检验[J]. 资源科学, 2019, 41(01):185-195.
- [44]刘美玉. 中国大气污染的时空演变特征与政府治理效应研究[D]. 河北地质大学, 2022.
- [45]刘华军, 杜广杰. 中国雾霾污染的空间关联研究[J]. 统计研究, 2018, 35(04):3-15.
- [46]刘昕, 辛存林. 陕甘宁地区城市空气质量特征及影响因素分析[J]. 环境科学研究, 2019, 32(12):2065-2074.
- [47]刘耀彬, 冷青松. 城市化、人口集聚与雾霾变化——基于门槛回归和空间分区的视角[J]. 生态经济, 2020, 36(03):92-98.
- [48]穆泉, 张世秋. 2013年1月中国大面积雾霾事件直接社会经济损失评估[J]. 中国环境科学, 2013, 33(11):2087-2094.

- [49]门丹,黄雄,易行,等.长江经济带雾霾污染的驱动效应及其空间特征研究[J].环境科学与技术,2020,43(03):10-20.
- [50]任凤珍,何昌,蒋北辰,等.论京津冀地区大气污染联防联控的立法推进[J].林业经济,2018,40(04):105-107.
- [51]任毅,郭丰,高聪聪.京津冀城市群雾霾污染的时空特征与影响因素[J].首都经济贸易大学学报,2019,21(06):80-91.
- [52]邵帅,李欣,曹建华,等.中国雾霾污染治理的经济政策选择——基于空间溢出效应的视角[J].经济研究,2016,51(09):73-88.
- [53]吴春芳,林勇,乐建培,等.空气污染物PM_{2.5}含量与某城区呼吸系统和心血管系统主要疾病指标阳性检出病例数的相关性研究[J].标记免疫分析与临床,2017,24(08):929-933.
- [54]王会芝,杜林蔚,吕建华.城市群雾霾污染的空间分异及动态关联研究——基于京津冀城市群的实证分析[J].中国环境管理,2020,12(01):80-86.
- [55]许文轩,田永中,肖悦,等.华北地区空气质量空间分布特征及成因研究[J].环境科学学报,2017,37(08):3085-3096.
- [56]谢晗进,刘满凤,江雯.我国环境经济集聚空间相关性和空间异质性分析——基于工业化与城镇化协调视角[J].生态经济,2019,35(12):102-111.
- [57]杨晓军,许嘉俊.中国城市雾霾污染的区域差异与收敛性分析[J].城市问题,2020(12):34-45.
- [58]杨骞,王弘儒,刘华军.区域大气污染联防联控是否取得了预期效果?——来自山东省会城市群的经验证据[J].城市与环境研究,2016(04):3-21.
- [59]张振波.论协同治理的生成逻辑与建构路径[J].中国行政管理,2015(01):58-61.
- [60]张成,郭炳南,于同申.污染异质性、最优环境规制强度与生产技术进步[J].科研管理,2015,36(03):138-144.
- [61]张洪.京津冀地区空气质量时空分布特征及PM_{2.5}浓度预测[D].哈尔滨师范大学,2020.
- [62]张振华.政府间协同治霾的演进逻辑及效果评价研究[D].兰州大学,2021.
- [63]赵宏波,岳丽,刘雅馨,等.高质量发展目标下黄河流域城市居民生活质量的时空格局及障碍因子[J].地理科学,2021,41(08):1303-1313.
- [64]周晓艳,郝慧迪,叶信岳,等.黄河流域区域经济差异的时空动态分析[J].人文地

理, 2016, 31(05):119-125.

[65]周国富,田孟,刘晓琦.雾霾污染、能源消耗与结构分解分析——基于混合型能源投入产出表[J].现代财经(天津财经大学学报),2017,37(06):3-14.

[66]周杰琦,刘生龙.环境管制对雾霾污染的作用机制与治理效果——基于技能溢价的视角[J].研究与发展管理,2021,33(05):79-93.

[67]郑凌霄.雾霾污染的空间特征及协同治理博弈研究[D].中国矿业大学,2021.

作者攻读硕士期间研究成果

发表论文:

- [1]邓光耀,周颖钦.我国雾霾的区域差异及与经济增长的脱钩分析[J].西华大学学报(哲学社会科学版),2022,41(01):86-101.

致谢

未来就像盛夏的一场大雨，在我还来不及撑开伞时，已扑面而来。

研究生三年，如白驹过隙。回首 20 余年的求学生涯，青春梦想，总是不完美的，有高峰、有低谷、有憧憬、有迷茫，但所有的不如意，终被沿途的风景所替代。

我深知自己在学术上没什么天分，三年求学生涯，最大的幸运就是遇到了一位好老师。邓光耀老师学识渊博，治学严谨，为人谦虚，待人真诚，在邓老师的悉心指导下，我完成了三篇学术论文的写作，每一次的论文撰写，老师都在主题的确立、文献的搜集、研究的方法与思路等方面给予全面的指导和帮助，并会在成文之后给与细致的修改意见，其一丝不苟的学术态度，对我的研究生阶段的学习和生活有着深刻的影响。感谢邓老师三年来的指导与帮助，祝您工作顺利，阖家幸福。

感谢评审专家、同师门的小伙伴们，对我毕业论文提出的宝贵意见，论文的逐步成型离不开你们的帮助，特别鸣谢张艺迪同学对论文插图等内容的修改意见。

感谢父母一路以来的包容、关怀与支持，养育之恩，无以为报，未来有我为你们遮风挡雨。

感谢周之浩、李浩智、陆杨锋、王腾、刘璐、孟航等同学，“我从远方赶来，恰巧你们也在”，一切都是最好的安排。

生逢盛世，当不负韶华；跃入人海，永保赤子之心。

谨以此文，献给我的学生时代。