

分类号 \_\_\_\_\_  
U D C \_\_\_\_\_

密级 \_\_\_\_\_  
编号 10741



# 硕士学位论文

论文题目 我国空气质量区域划分及影响因素分析

研究生姓名: 景鹏志

指导教师姓名、职称: 黄恒君、教授

学科、专业名称: 应用经济学、统计学

研究方向: 经济与社会统计

提交日期: 2021年6月6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： 景鹏志 签字日期： 2021年6月6日

导师签名： 景鹏志 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內容。

学位论文作者签名： 景鹏志 签字日期： 2021年6月6日

导师签名： 景鹏志 签字日期： 2021年6月6日

# **Research on the influence of family capital on access to higher education opportunities**

**Candidate : Jing PengZhi**

**Supervisor: Huang HengJun**

## 摘要

在深入推进蓝天碧水保卫战,提升我国空气质量的进程中,完善大气防污治理体系,实施多部门、多区域联合治理,践行新绿色发展理念既可以满足人民日益增长美好环境的需要,也是实现高质量发展的重要途径。掌握我国空气质量分布特征,厘清大气污染联动机制,把握空气质量的影响因素,对建设生态友好型社会及大气污染联防联控机制具有积极的作用。

本文以我国空气质量指数为研究范畴,着眼于区域间大气污染物联动的分类研究及空气质量影响因素的分析。首先,对近年来我国空气质量整体状况与变化情况进行总体阐述,使用核密度估计法和空间描述性统计对空气质量指数进行可视化展示,系统的展示我国空气质量的时空变化特征。其次,对我国城市间存在大气污染联动的区域进行划分,运用动态时间规划算法衡量城市间空气质量指数趋势变化的差异,以该结果作为聚类的依据对城市进行分类;并用相关分析探讨气象因素与空气质量的关系。最后,分析我国空气质量的社会经济影响因素,利用混合线性模型,将前文的聚类结果作为随机效应引入模型,以消除自然因素对空气质量的影响,将社会经济因素作为固定效应引入模型来研究其对空气质量的影响。

利用上述研究方法,可得出:(1)我国空气质量逐年改善,污染范围在逐年缩小,空气质量指数表现出冬高夏低,春秋居中的变化趋势,并且区域间存在明显差异。(2)依据AQI变化趋势,我国可分为六大区域,分别为长江流域地区,京津冀周边地区,西部地区,东北地区,珠三角地区,新疆地区。(3)气温和降水与空气质量指数负相关,湿度与空气质量的相关系数因城市而异,风速与空气质量指数相关度不高。(4)人口密度、第二产业占比和城市居民生活用电的提升会提高空气污染的水平,而建成区绿地覆盖率、每万人拥有公共汽车数和人均GDP的提升能缓解空气污染的水平。

最后,根据我国城市空气污染的时空变化规律,自然条件和社会经济因素对空气质量的影响针对性的提出了改善空气质量的改善意见,旨在为我国对空气质量的协同治理提供借鉴。

**关键词:** 空气质量指数 核密度法 时间序列聚类 混合线性模型

## Abstract

In the process of advancing the defense of blue sky and clear water and improving the air quality of our country, improving the air pollution control system, implementing multi-departmental and multi-regional joint governance, and practicing the new green development concept can not only meet the people's growing needs for a better environment, but also An important way to achieve high-quality development. Grasping the distribution characteristics of air quality in my country, clarifying the linkage mechanism of air pollution, and grasping the influencing factors of air quality have a positive effect on the construction of an eco-friendly society and the joint prevention and control mechanism of air pollution.

This article takes my country's air quality index as the research category, focusing on the classification study of the linkage of air pollutants between regions and the analysis of air quality influencing factors. First, the overall situation and changes of air quality in my country in recent years are summarized. The nuclear density estimation method and spatial descriptive statistics are used to visually display the air quality index, and systematically display the characteristics of the temporal and spatial changes of air quality in my country. Second, divide the areas where air pollution is linked between cities in my country, use dynamic time planning algorithms to measure the differences in air quality index trends between cities, and use the results as the basis for

clustering to classify cities; and use correlation analysis to explore meteorological factors The relationship with air quality. Finally, analyze the socio-economic influencing factors of air quality in my country, use the mixed linear model, and introduce the clustering results of the previous article as a random effect into the model to eliminate the influence of natural factors on air quality, and introduce socio-economic factors as a fixed effect into the model to study Its impact on air quality.

Using the above research methods, it can be concluded that: (1) my country's air quality is improving year by year, and the pollution range is shrinking year by year. The air quality index shows a trend of high in winter and low in summer, and the trend of change in spring and autumn, and there are obvious differences between regions. (2) According to the changing trend of AQI, my country can be divided into six major regions, namely the Yangtze River Basin, the surrounding area of Beijing-Tianjin-Hebei, the western region, the northeast region, the Pearl River Delta region, and the Xinjiang region. (3) Temperature and precipitation are negatively correlated with air quality index. The correlation coefficient between humidity and air quality varies from city to city, and the correlation between wind speed and air quality index is not high. (4) The increase in population density, the proportion of the secondary industry and the electricity consumption of urban residents will increase the level of air pollution, while the increase in the coverage of

green space in built-up areas, the number of buses per 10,000 people, and per capita GDP can alleviate air pollution. Level.

Finally, according to the temporal and spatial changes of urban air pollution in my country, natural conditions and socio-economic factors affect air quality, suggestions for improving air quality are proposed, aiming to provide reference for the coordinated management of air quality in my country.

**Keywords:** Air quality index; Nuclear density method; Time series clustering; Mixed linear model

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	1
1.2 国内外文献综述.....	2
1.2.1 空气质量时空分布规律.....	3
1.2.2 自然因素对空气质量的影响.....	4
1.2.3 社会经济因素对空气质量的影响.....	6
1.3 研究内容及技术路线.....	7
1.4 可能的创新点.....	9
<b>2 数据来源及理论方法</b> .....	11
2.1 数据来源及缺失值处理.....	11
2.2 空气质量指数计算方法.....	11
2.3 核密度估计方法.....	13
2.4 时间序列数据聚类方法.....	13
2.4.1 动态时间规划算法.....	13
2.4.2 系统聚类理论.....	14
2.4.3 动态时间规整算法与系统聚类的结合应用.....	15
2.5 混合线性模型计算方法.....	16
<b>3 我国空气质量时空变化特征</b> .....	18
3.1 城市空气污染时间变化规律.....	18
3.1.1 年度变化趋势.....	18
3.1.2 季节变化趋势.....	19
3.1.3 月度变化趋势.....	20
3.2 城市空气污染空间变化规律.....	21
3.2.1 年度空间分布特征.....	21
3.2.2 季度空间分布特征.....	23

<b>4 空气质量区域划分及自然影响因素分析</b> .....	25
4.1 时间序列聚类数据选取.....	25
4.2 时间序列聚类.....	26
4.3 聚类结果分析.....	27
4.3.1 区域间自然因素差异.....	28
4.3.2 气象因素对空气质量的影响.....	错误!未定义书签。9
<b>5 社会经济因素对空气质量的影响因素分析</b> .....	36
5.1 数据和指标体系选取.....	36
5.2 混合线性模型.....	38
5.3 社会经济影响因素分析.....	40
<b>6 结论与政策建议</b> .....	42
6.1 研究结论.....	42
6.1.1 城市空气质量时空变化规律.....	42
6.1.2 重点城市空气质量区域划分.....	43
6.1.3 城市空气污染的社会经济影响因素.....	43
6.2 政策建议.....	43
<b>参考文献</b> .....	45
<b>后记</b> .....	48

# 1 绪论

## 1.1 研究背景及意义

### 1.1.1 研究背景

中国是世界上发展最快的国家之一，随着城市化进程进一步发展，城市人口不断膨胀、道路交通日益拥堵，污染问题将会越来越严重。空气污染问题已受到政府、学术界和中国公众的特别关注。空气污染作为环境问题的重要组成部分，已严重威胁到国民身体健康、破坏了城市生产力，甚至引起了全球气候变化，也成为城市生活质量下降的重要原因之一。虽然近年来我国空气质量已有明显改善，但还不能满足民众对美好空气环境的需要。因此，若要有效地管理和控制大气污染，应该首先对空气质量影响因素进行分析，这对于明确治污对象，促进城市可持续、绿色发展具有重要意义。

党的十九大报告指出，我国社会的主要矛盾已经转化为人民对美好生活的向往和不平衡不充分发展之间的矛盾。在诸多不平衡的矛盾中，空气质量问题是一个极其重要的方面，区域间空气质量发展的不平衡已成为全国人民共同关心的问题，因此有必要从全国尺度综合研究空气质量问题，针对不同区域提出有效建议；从研究方法看，空间分布特征大多仅用空间统计及地理信息技术对 AQI 数值进行分布规律研究，而综合考虑 AQI 变化趋势和城市间地理距离的聚类研究很少；影响因素的分析只针对某一特定方面影响因素展开研究，而综合考虑区域因素和社会经济因素共同作用影响城市空气质量的相关研究并不多见。因此，本文在以往研究基础上，首先利用聚类的方法，根据 AQI 变化趋势和城市间地理距离将我国分为几大区域，在此基础上，利用混合线性模型从区域和社会经济因素两个方面研究其对空气质量的影响。

### 1.1.2 研究意义

2020 年国务院政府工作报告指出，接下来一年要打好蓝天、碧水、净土保

卫战，实现污染防治攻坚战阶段性目标。提高生态环境治理成效，突出依法、科学、精准治污，深化重点地区大气污染治理攻坚。随着我国大气区域性复合型污染特征日益明显，区域性大气雾霾频繁发生，区域整体环境质量恶化，严重威胁群众健康，影响环境安全。建立大气污染联防联控机制，明确大气治污方向，显得尤为迫切。空气污染问题已经从单一城市问题上升到了区域性问题，研究空气质量空间分布规律、大气污染联动情况和社会经济影响因素，对于预防和治理空气污染问题具有重要意义。建立大气污染联防联控机制，必须对大气污染治理进行科学有效的区域划分，但是目前针对空气质量的全国性区域划分研究很少，大多数都是根据特定行政区划作为研究对象，很少有真正意义上全国性区域划分的研究，而从大气联动性角度研究区域划分更是少之又少；另外，目前大多数研究对空气质量的影响因素忽视区域因素，但是每座城市会因为其特殊的地理位置，在大气污染传送网络等多种因素的作用下或多或少的受到周边城市的影响，在这种影响下，大气污染问题已成为区域性问题而不是单一城市的问题。应该注意到，空气质量的影响因素是一个多维问题，会受到多方面因素的影响，在研究社会经济因素对空气质量的影响时，自然因素必须考虑进去。

因此，本文首先利用核密度法和空间描述性统计等多种统计分析方法，分析空气质量空间分布规律，对我国空气质量大致状况进行初步了解；再提出利用动态时间规划模型和系统聚类相结合，将我国不同城市空气质量指数变动趋势及数值水平相似性强的地区聚为一类，即认为类内城市间空气质量指数和其变化趋势相近，并解释造成区域差异的原因，对我国存在大气污染联动性的城市进行有效分割，并为我国大气治理方式由城市的“单打独斗”转变为区域内的“联防联控”提供区域划分的依据，有效避免“以邻为壑”的问题。在区域划分的基础上利用混合线性模型，分析空气质量的社会经济影响因素。构建一个更加合理的空气质量影响因素的分析方法，明确社会经济因素与空气质量的影响关系，为职能部门制定政策提供相应的理论依据，做到因地制宜。

## 1.2 国内外文献综述

随着大气污染事件的频繁发生，空气质量问题已经引起了学术界的广泛关注，并且涌现了大量相关的优秀研究成果。现有对空气质量的研究主要从以下三个方

面讨论：第一，空气质量的时空分布规律研究；第二，自然因素对空气质量的影响；第三，社会经济因素对空气质量的影响。

### 1.2.1 空气质量时空分布规律

美国地理学家 Tobler 提出的地理学第一定律，所有的事物在空间上都是具有联系的，联系程度与距离有关，距离越近联系越紧密。空间自相关理论的形成与地理学第一定律有着密不可分的联系，即如果所研究对象在空间上与某一区域接近，则该区域观察对象会对所研究对象造成影响，其中包括高-高聚集和低-低聚集。刘晓红<sup>[1]</sup>利用空间计量模型分析我国城市雾霾的变化规律，包括时间和空间的动态变化规律，对影响机制进行了深入探讨，分析得出我国存在明显的雾霾区域聚集分布特征，具有较强空间聚集性和明显的一体化趋势，空间正自相关显著。龚鹏鹏<sup>[2]</sup>利用空间计量模型分析了北京市的污染物分布规律，利用相关分析揭示了北京市的大气环境受到临近省份城市空气质量的影响，相邻的城市间具有相关性，表现出明显的聚集效应，其中保定市和石家庄市对北京市空气质量的影响最为明显。

潘月云<sup>[3]</sup>结合 2015 年 9 月珠三角地区 AQI 日均浓度，利用后向轨迹模式综合分析了此次过程的污染特征及其成因，后向轨迹模式研究结果表明此次的重污染气团的传送途径是从珠三角中北部地区流向南部的沿海城市。Streets 等<sup>[4]</sup>利用 CMAQ 模型，分析得出约 35%-60%的臭氧来自北京以外的城市，邻近的天津市，河北省和山东省对北京空气质量的影响最为明显。Huang<sup>[5]</sup>使用 CAMx 模式系统分析了北京地区 PM<sub>10</sub> 的来源，结果表明来自北京以外的地区（包括河北省，山西省，天津市和内蒙古）的影响不容忽视，这些地区的总排放源贡献率为 26.65%。同时国内许多学者利用空间统计技术和地理信息技术研究了空气质量指数空间分布特征：陈彦军等<sup>[6]</sup>利用网格化和空间统计方法对珠三角地区 2001 年至 2005 年 5 年的空气质量数据展开研究，分析该区域空气质量的主要影响因素及空气质量的空间分布特征。许燕婷<sup>[7]</sup>等人以全国 2014 年至 2016 年空气质量指数为研究对象，利用空间自相关模型探究我国空气质量指数在空间上的分布规律，并使用莫兰指数解释分析空间聚集性，研究结果发现：我国 AQI 的空间聚集性态势在逐渐增强，已形成明显的聚集态势，分别形成冀鲁豫至湖北中北部以及新疆部分

地区的中度污染区，以及以珠三角为中心的南方优良空气质量区。贺冉冉等人<sup>[8]</sup>利用时间序列模型对我国城市群进行了空间自相关分析，结果表明我国存在两个高空间自相关区域：京津冀和长三角地区。

Wang 等人<sup>[9]</sup>以我国 2013-2014 年空气质量指数作为研究主题，利用 ArcGIS 对 AQI 进行了空间分析，结果表明我国大气污染存在明显的聚集效应，同时在空间分布上表现出“东重西轻、北重南轻”。孔峰等人<sup>[10]</sup>同样对我国空间分布规律进行了研究，他们对我国 2001 年-2015 年的空气污染指数进行了分析，研究结论与 Wang 的结论有很多相同之处，发现我国北方城市的空气污染指数要显著高于南方地区，西部内陆地区的空气污染指数要高于东部沿海地区。刘永伟<sup>[11]</sup>等人以全国和珠三角地区空气质量指数为研究对象，利用 GIS 技术对我国空气质量指数进行了时空分布规律的研究，得出我国大气污染具有明显的季节趋势和空间聚集特征。

Gao<sup>[12]</sup>对中国 81 个城市的 DAPI 计算皮尔逊相关系数，再对相关系数进行系统聚类，根据聚类结果，首先将中国沿着秦岭及其东部延伸至淮河分为北部区域和南部区域两部分，再将这两个区域分成七个城市群。王斌<sup>[13]</sup>同样对 API 利用系统聚类将我国不同城市划分为 11 个区域，并且分析发现同一类城市在地理距离上也都是相邻或相近的。Pierpaolo<sup>[14]</sup>对罗马 11 个气象站点检测到的 NO 浓度利用时间序列聚类，根据其变化趋势分为了两类。曲歌<sup>[15]</sup>通过对全国 146 个城市 AQI 日报数据进行聚类研究，研究我国空气质量区域联动性，认为类内城市间极大概率存在大气污染相互传播影响的可能性。

整理上述文献发现，在对大气污染空间聚集性的研究上，一部分研究者仅用空间计量方法，利用空间自相关方法，研究邻近城市空气质量的相关性，未能充分体现大气污染传送对空气质量的波动性影响；一部分学者，利用地理信息技术，研究单个城市大气污染物的传送情况，未能形成系统的区域研究，不能很好体现出大气污染存在空间聚集性；另一部分学者通过空气质量指数大小进行系统聚类研究，研究空间聚集性，但忽视区域内大气污染传送对空气质量的影响。因此，本文首先利用地理信息技术概述空气质量时空分布规律。在此基础上，利用大气污染的传送对 AQI 的变化趋势进行聚类，具体化研究空间聚集规律。

## 1.2.2 自然因素对空气质量的影响

张琪敏等<sup>[16]</sup>以 2004 年空气污染指数为研究对象,对我国十座具有代表性的城市进行了大气传送网的研究,利用各城市空气质量日报数据研究其空气污染状况和污染特征差异,用描述统计的方法研究了大气污染现状,最终结论表明大气污染输送网路与地理位置、地形有关。杨赐陆<sup>[17]</sup>通过对空气污染特征及影响因素进行分析,探讨了泉州市地形地貌,大气污染排放,气象条件等方面对空气质量的影响,有针对性地提出了污染防治的有效措施。武力<sup>[18]</sup>等以永州市环境空气质量现状为基础,结合气象和地形条件,对空气质量和主要大气污染物变化进行了分析,并提出了永州市大气污染控制的对策,以期改善其空气质量提供参考。Vardoulakis 等学者<sup>[19]</sup>以雅典娜地区的大气污染物和气象因素为研究对象,利用后向轨迹模型研究气象因素对大气污染物浓度的影响,研究结果显示,扬尘天气会对伯明翰地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度造成影响,气候因素会对雅典娜地区的 PM<sub>10</sub> 浓度造成较大影响。Giorgi 等<sup>[20]</sup>利用统计模型研究了气象因素对空气质量的影响,研究得出气候条件的不确定性会对空气质量造成影响。高煜中等人<sup>[21]</sup>以气象因素和空气质量指数作为研究对象,对污染物浓度的扩散速度进行展开研究,研究结果表明,气候条件会对污染物浓度扩散速度产生显著影响。刘焱<sup>[22]</sup>利用相关分析对空气质量较差的京津冀地区的空气质量指数与气象因素进行了研究,结果表明空气质量指数与气象因素有着密不可分的联系。Bahattin 等<sup>[23]</sup>的研究成果表明土耳其卡拉布克市的气象因素与颗粒物浓度之间呈中度相关关系。Turk 等<sup>[24]</sup>的研究表明,空气污染物的浓度与气象因素之间存在较强的负相关关系,相关系数在 0.88-0.97 之间。

刘杰等人<sup>[25]</sup>利用气象资料、污染物质量浓度和周期因素作为多元回归模型的输入、PM<sub>2.5</sub> 浓度作为输出的结果表明,预测输入的改进使得多元线性回归的拟合优度大幅提升。Li<sup>[26]</sup>采用线性回归的方法来探究 2009-2011 年成都市气象因素与颗粒物之间的关系,结果发现,除气压外,其余气象因素与颗粒物之间存在显著的负向关系。Zhang 等<sup>[27]</sup>利用多元线性回归分析了气象要素对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响,结果表明气象要素对 PM<sub>2.5</sub> 的方差贡献率为 68%。周甘霖<sup>[28]</sup>利用逐步回归模型对兰州市大气污染物 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的浓度进行预测,将预测值与实际值相比,二者的相对误差较小,说明该模型的预测性能较好,可以应用于兰州市大气污染物浓度的预测。上述学者利用不同的研究方法,探究了气象因素如何影

响空气质量，为进行影响因素分析提供了大量的理论基础。

以上文献证明了自然因素会对空气质量造成一定影响，取得了优秀的成果。由于地理条件无法定量分析，因此大部分学者利用地理信息理论描述分析了地理条件对空气质量流通的影响，证明了地理因素会影响空气质量，本文也将采取这种方式；另一部分学者仅仅考虑气象因素，通过建立回归模型单独考虑气象因素对空气质量的影响而忽视地理条件。因此本文将同时考虑地理和气象两方面自然因素对空气质量的影响。

### 1.2.3 社会经济因素对空气质量的影响

虽然自然因素对空气质量的影响显著，但是社会经济影响因素与人们的日常生活和生活更息息相关，其对政策的指导作用也更具有实际的参考价值。

Guan<sup>[29]</sup>采用投入产出建模和结构分解模型的方法对中国 1997-2010 年 PM<sub>2.5</sub> 的社会经济影响因素进行分析，结果表明中国近年来生产效率的提高抵消了经济增长和其他社会经济驱动因素产生的 PM<sub>2.5</sub> 的排放，在最终需求的部门中资本形成产生的 PM<sub>2.5</sub> 排放量最大，但排放水平逐年递减，此外，产品的出口也导致了 63.8 万吨 PM<sub>2.5</sub> 的排放。Cole 等学者<sup>[30]</sup>以城市人口密度与大气污染浓度之间的联系为研究目的，利用环境库兹涅茨曲线理论分析我国人口规模和主要污染物的相关关系，结果显示人口规模的提升会造成空气中污染物浓度的提升，表明人口密度的升高会给大气环境带来负担。Fenger<sup>[31]</sup>分析了西方城市的发展水平与空气污染程度间的联系，并指出城市化的飞速发展将导致无法控制的大气环境恶化，并给出了更加清洁、节能的城市发展战略规划路线。

姜磊等<sup>[32]</sup>以中国 2014 年 150 个地级及以上城市的 AQI 作为研究样本，使用截面回归和地理加权回归的方法研究了外商直接投资等社会经济影响因素对空气污染的影响，研究发现外商直接投资改善了我国空气质量，地区经济水平和人口密度与空气质量呈现出显著的负相关关系。郭军等<sup>[33]</sup>对河南省的经济发展与环境污染状况进行了回归分析，得出了我国人均资源贫乏的结论，并给出建议用于指导区域经济资源环境可持续发展策略的制定。Jiang<sup>[34]</sup>运用了空间计量模型研究了“污染避难所假说”在我国 2014 年 150 个地级市尺度是否成立，研究发现空气污染通过空间扩散效应影响周边地区，FDI 存在显著的空间技术溢

出改善了空气质量，第三产业的发展加剧了空气污染。因此，在研究社会经济因素对空气质量的影响时，应选择合适的研究方法。

以上文献对大气污染物的社会经济因素条件的关系做了详细的分析，取得了优秀的成果，证明了社会经济要素会对空气质量造成一定影响。一部分学者通过相关分析，证明了空气质量和社会经济因素相关，但是没有考虑到自然因素对空气质量的影响；另一部分学者虽然考虑到了地理空间因素对空气质量的影响，但是忽视其他自然条件对空气质量的影响。因此本文，控制自然因素来研究社会经济因素对空气质量的影响。

### 1.3 研究内容及技术路线

本文以中国 336 城市的 AQI 为研究对象，使用空间描述性统计方法，首先分析得出 336 个城市 2014-2018 年的 AQI 的时空分布规律，其次利用时间序列聚类将我国 168 个重点城市分为 6 大区域，并且利用混合线性模型来探讨 AQI 的社会经济影响因素，最后以研究结果为基础提出相关的政策建议。研究内容具体如下：

第一章绪论。主要依据选题的研究背景、研究意义、研究现状等方面对本文整体的研究思路、研究方向进行阐述，说明大气污染程度与我国经济运行长远可持续发展以及人民群众切身利益的紧密联系，体现本文选题的意义与价值。同时，针对本文的研究内容，对现有的文献研究成果及方法进行整理、学习、借鉴，吸取经验汲取精华，进而结合本文的研究特点，对研究方法和研究思路进行改进和创新，阐述本文的研究贡献及创新点。

第二章数据来源及理论方法。首先对整体数据情况进行阐述，说明数据来源及缺失值处理；其次说明本文研究主体的计算方法，对空气质量指数计算方法进行说明；再次说明本文数据的可视化方法，核密度估计法；最后对本文核心的研究方法进行说明，应用时间序列聚类方法进行区域划分、混合线性模型计算方法进行社会经济影响因素分析。

第三章空气质量时空变化特征。为了清晰直观的展示我国空气质量变化情况，本章使用核密度法和空间描述性统计对 AQI 的年度、季节和月度均值进行分析，并通过可视化的方式展现 2014—2018 年 AQI 的时间变化趋势和空间变化特征，

分析得出：从时间变化角度看，我国空气质量在逐年改善，空气污染呈现明显的季节趋势，表现出“冬高夏低，春秋居中；从空间变化角度看，我国污染范围在逐年缩小，中北部地区污染相对严重，我国南部地区和黑龙江北部地区空气质量优良。

第四章空气质量区域划分及自然影响因素分析。自然条件会对大气污染的传输和扩散造成影响，主要表现在空气质量指数的变化趋势相似。为研究区域间自然条件对空气质量的影响，运用动态时间规整算法计算 168 座城市间任意两座城市的空气质量指数时间序列变化趋势及数值水平的相似性，以该算法计算结果作为城市间系统聚类的衡量标准，将空气质量指数变化相似性强的聚为一类，认为类内城市间自然条件相似。其次，根据聚类结果，结合区域间自然因素差异，分析造成区域间大气污染物较少传输，区域内大气污染物较多传输的原因。

第五章社会经济因素对空气质量的影响分析。因自然条件不同会导致污染物传输扩散不同，最终会导致量的积累。因此，为研究社会经济因素对空气质量的影响，需要排除自然条件。利用混合线性模型，将人口密度、建成区绿地覆盖率、工业烟粉尘排放量、城市居民生活用电、每万人拥有公共汽车、第二产业占比、人均 GDP 作为固定效应，成为主要研究分析的对象，区域因素即自然条件相同的城市作为随机效应来排除对空气质量的影响。分析得出人口密度、第二产业占比和城市居民生活用电的提升会提高空气污染的水平，而建成区绿地覆盖率、每万人拥有公共汽车数和人均 GDP 的提升能缓解空气污染的水平。

第六章结论与政策建议。通过以上五部分的分析结果，我国大气污染治理存在重点难点城市，必须进行加强治理；另外，分析得出我国大气污染问题存在复杂的外部效应，单一城市的空气质量问题不仅与自身大气状况有关，同时区域间大气污染传播联动也会影响相邻城市的空气质量，想要解决我国大气污染的问题，仅靠单一城市的努力是不够的，必须考虑区域内大气污染物联动的影响；最后可通过出台环境治理法规，提高绿地覆盖率以及增加公交车供应量来减缓大气污染。基于上述研究思路和内容，本文技术路线图如图 1.1 所示：

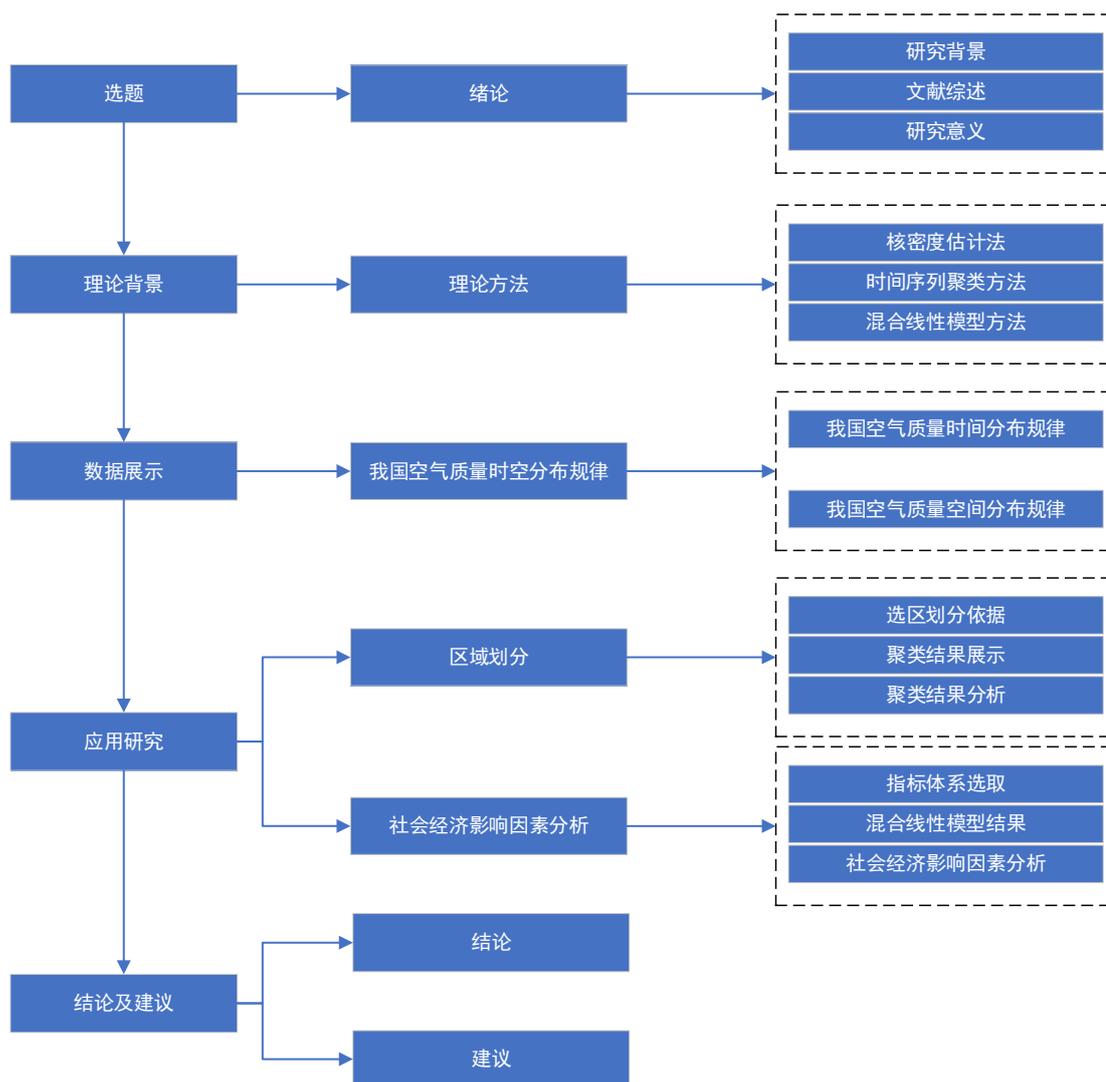


图 1.1 文章技术路线图

## 1.4 可能的创新点

(1) 多角度研究方面：使用地理学方法对空气污染进行时空分析，使用统计学方法对 AQI 变动情况进行划分，使用气象学方法对 AQI 影响因素进行分析。综合多学科研究方法来揭示空气污染的空间集聚性，并探析我国城市空气污染的区域划分。

(2) 理论应用方面：第一，本文运用动态时间规整模型和系统聚类相结合，

将我国不同城市空气质量指数变动趋势及数值水平相似性强的地区聚成一类。第二，运用混合线性模型消除区域因素，来研究社会经济因素对空气质量的影响。

## 2 数据来源及理论方法

本章主要描述了本文中用到的数据和研究方法,首先概述本文的研究对象空气质量指数及其计算方法与评价方法,对研究对象有全面清晰的理解;然后描述核密度估计方法,主要用于年度空气质量指数的可视化研究;再给出时间序列聚类的研究方法,依次展示动态时间规划算法、系统聚类理论以及动态时间规划算法与系统聚类相结合的运用,用于 AQI 变化趋势的聚类研究;最后给出混合线性模型的计算方法,用于社会经济因素对空气质量影响的分析。

### 2.1 数据来源及缺失值处理

本文所选用的数据共分为三个部分:第一部分是空气质量数据,选用的我国 336 座城市 2013 年 6 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日空气质量指数(AQI),这部分的数据来自空气质量检测站点;第二部分的数据是气象数据,选用的是我国 336 座城市 2013 年 6 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日的气象数据,这部分数据是由气象检测站点公布的数据。由于前两部分数据缺失值较多,采用矩阵填充的形式对缺失值进行插补。第三部分数据是研究区空气质量影响因素时,选用的城市 2018 年的宏观经济数据,该部分的数据来自 2019 年的《中国城市统计年鉴》。

### 2.2 空气质量指数计算方法

我国质量监督检验检疫总局与环境环保部于 2012 年联合发布了最新修改版本的《环境空气质量标准》(GB3095-2012)。在此之前,我国一直使用的空气质量评价指标体系发生改变:由原先的“旧标准”二氧化硫、二氧化氮、PM<sub>10</sub> 新增了一氧化碳、臭氧、PM<sub>2.5</sub> 变为六项污染物监测指标。同时,也将原来的评价体系名称从原来的空气污染指数(API)改为空气质量指数(AQI)。与之前的污染体系相比,新修订的 AQI 监测范围更广,评价效果更佳。按照对人体产生的伤害和各项污染物的空气质量标准,可将空气质量(AQI)按照一定的标准简化成单一的数值形式。

《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》根据各项污染物指标对人

体和自然生态环境造成的影响程度,将空气质量指数划分为六个等级。等级越高,意味着空气污染越严重,空气质量越差,对人体和生态环境造成的负面效应越大。具体分级标准,如表 2.1 所示:

表 2.1 空气质量分指数及对应的污染物项目浓度限值

空气质量 分指数 (IAQI)	污染物项目浓度限值					
	$SO_2$ ( $\mu g/m^3$ )	$NO_2$ ( $\mu g/m^3$ )	$PM_{10}$ ( $\mu g/m^3$ )	$PM_{2.5}$ ( $\mu g/m^3$ )	$CO$ ( $\mu g/m^3$ )	$O_3$ ( $\mu g/m^3$ )
0	0	0	0	0	0	0
50	50	40	50	35	2	100
100	150	80	150	75	4	160
150	475	180	250	115	14	215
200	800	280	350	150	24	265
300	1600	565	420	250	36	800
400	2100	750	500	350	48	
500	2620	940	600	500	60	

AQI 的计算方法是:根据实时监测的各项污染物值计算空气质量分指数(IAQI),把各项污染物 IAQI 中数值最大的最终确定为空气质量指数。同时,当 AQI 的数值大于 50 时,则将 IAQI 值最大的污染物项目确定为首要污染物;当 AQI 数值小于 50 时,则不报告首要污染物。

具体计算公式如下:

$$IAQI_p = \frac{IAQI_{Hi} - IAQI_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + IAQI_{Lo} \quad (2-1)$$

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

AQI:空气质量指数

$IAQI_p$ : 污染物 P ( $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $O_3$ 、 $CO$ ) 的空气质量分指数

$C_p$ : 污染物 P ( $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $O_3$ 、 $CO$ ) 的实测浓度值

$BP_{Hi}$ : 表 2.1 中与污染物项目 P 实测浓度值  $C_p$  相邻的污染物浓度限值高位值

$BP_{Lo}$ : 表 2.1 中与污染物项目 P 实测浓度值  $C_p$  相邻的污染物浓度限值低位值

$IAQI_{Hi}$ :表 2.1 中与污染物项目 P 浓度限值高位值  $BP_{Hi}$  对应的空气质量分指数

$IAQI_{Lo}$ :表 2.1 中与污染物项目 P 浓度限值低位值  $BP_{Lo}$  对应的空气质量分指数

## 2.3 核密度估计方法

核密度估计是一种非参数的估计方法,具有参数估计所不具备的优点,即函数的形式可以任意设定,解释变量和被解释变量的分布也少有限定,给建立回归函数的参数表达式提供了有力的工具。核密度估计方法的计算过程如下:

假定  $X_1, X_2 \dots X_n$  服从同分布,其密度函数  $f(x)$  未知,这时就需要通过样本来估计密度函数  $f(x)$ 。样本经验分布函数为:

$$F(x) = \frac{1}{n}(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2-3)$$

可得密度函数的估计式为:

$$\begin{aligned} f_h(x) &= \frac{[F_n(x + h_n) + F_n(x - h_n)]}{2h} \\ &= \frac{1}{nh_n} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h_n}\right) \end{aligned} \quad (2-4)$$

式种:  $K(*)$  表示核函数形式,通常取对称的单峰密度函数。

## 2.4 时间序列数据聚类方法

### 2.4.1 动态时间规划算法

AQI 变化趋势在大气污染传送网络的影响下,可能会出现趋势非当期相关,而是表现出滞后的现象。动态时间规划(Dynamic Time Warping, DTW)算法可用于衡量时间序列的相似性,解决变化趋势非当期相关的问题。DWT 采用满足一定条件的时间序列输入样本和参考的时间序列的对应关系,求解两者匹配时累计距离最小所对应的规划函数。

给定两个时间序列数据,其中样本序列为  $X$ ,测试序列为  $Y$

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2-5)$$

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_M) \quad (2-6)$$

点与点之间的距离函数:

$$d(i, j) = f(x_i, y_j) \geq 0 \quad (2-7)$$

表示样本序列中的第*i*帧与测试序列第*j*帧进行匹配时的局部距离。

*X*和*Y*时间序列中点与点的匹配关系为

$$\varphi_k = (\varphi_x(k), \varphi_y(k)) \quad (2-8)$$

其中 $\varphi_x(k)$ 的可能取值为 $X_1, X_2, \dots, X_N$ ,  $\varphi_y(k)$ 的可能取值为 $Y_1, Y_2, \dots, Y_M$ , *k*的可能取值为1, 2, ..., *T*。

DTW 寻找最适合的 $\varphi_x(k)$ 自动扭曲时间序列, 使得两个时间序列形态尽可能一致。

$$DTW(X, Y) = \min \sum_{k=1}^T d(\varphi_x(k), \varphi_y(k)) \quad (2-9)$$

## 2.4.2 系统聚类理论

系统聚类是将距离相近的样本先聚类一类, 样本距离远的后聚为一类, 如此反复进行下去, 直到每个样本聚到适合的类别中。假设有*n*个样本, 首先将*n*个样本各自分为一类; 第二步, 选取合适的距离度量(本文为 DTW 距离), 并将类间距离最近的两个样本合并为一类, 其他样本仍各自一类, 此时有*n* - 1个类别; 第三步, 再将距离最近的两个样本合并为一类, 此时有*n* - 2个类别; 如此反复进行下去, 直到*n*个类别变成一个大类为止。

在完成系统聚类时, 首先是要定义类间距离。类间距的初次计算通常采用欧氏距离:

$$s_{ij}^0 = d_{ij}^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \quad (2-10)$$

假设在系统聚类完成第 *k* 次的合并后, 即子类 *Q* 和子类 *T* 合并为子类 *U* 之后, 采取其他的距离计算方式, 来计算 *U* 与其他类别间的距离:

(1) 最短距离

$$S_{iU}^k = S_{Ui}^k = \min(S_{iQ}^{k-1}, S_{iT}^{k-1}) \quad (2-11)$$

(2) 最长距离

$$S_{iU}^k = S_{Ui}^k = \max(S_{iQ}^{k-1}, S_{iT}^{k-1}) \quad (2-12)$$

(3) 重心距离

$$S_{iU}^k = S_{Ui}^k = \left(\frac{n_Q}{n_U}\right) S_{iQ}^{k-1} + \left(\frac{n_T}{n_U}\right) S_{iT}^{k-1} - \left(\frac{n_Q n_T}{n_U^2}\right) S_{QT}^{k-1} \quad (2-13)$$

(4) 类平均距离

$$S_{iU}^2 = \left(\frac{n_Q}{n_U}\right) (1 - \beta) S_{iQ}^2 + \left(\frac{n_T}{n_U}\right) (1 - \beta) S_{iT}^2 + \beta S_{QT}^2, \beta < 1 \quad (2-14)$$

(5) 中间距离

$$S_{iU}^2 = \frac{1}{2} S_{Qi}^2 + \frac{1}{2} S_{Ti}^2 - \frac{1}{4} S_{QT}^2 \quad (2-15)$$

(6) 离差平方和

$$S_{iU}^2 = \frac{1}{n_U + n_i} [(n_U + n_i) S_{iQ}^{k-1} + (n_T + n_i) S_{iT}^{k-1} - n_i S_{QT}^{k-1}] \quad (2-16)$$

### 2.4.3 动态时间规整算法与系统聚类的结合应用

根据本文的研究目的，希望通过利用 AQI 的日报时间序列变化趋势来反映城市间变动趋势的相似性，将变动趋势类似的城市聚为一类，认为类内城市受自然条件的影响因素相同，为研究社会经济因素对空气质量的影响做准备。但是，由于大气污染传网的存在，AQI 的变动趋势可能非当期相关，出现滞后等情况。因此，在衡量两个城市 AQI 变动趋势的相似性时，需要利用动态时间规划算法来消除时间序列非当期相关的影响，更好的衡量时间序列间的相似性。即本文所采用的传统的系统聚类与动态时间规划算法相结合的方法，在衡量两个城市类间距离时，用动态时间规划算法代替传统的欧式距离。

同时，根据地理学第一定理，越是相近的事物，联系越是紧密。本文在衡量城市间差异时，还增加了城市间的地理距离。即认为城市间地理距离越近，其污染物相互传送的可能性越大，自然条件越是相似。

综上所述，本文在进行系统聚类时，将任意两城市间 DTW 距离和地理距离分别按照 0.5、0.5 的比重进行加权，以此距离作为衡量两座城市的差异进行系

统聚类。在聚类过程中最长距离可使各样本点聚成小的类别,具有良好的扩张性,不容易出现单一样本点形成独立类别,因此本文选用最长距离法衡量类别间差异。

## 2.5 混合线性模型计算方法

混合线性是对一般线性模型的延展。通常,在一般线性模型中,只含有固定效应因子。可以使用最小二乘回归方法,来对参数求解,用以描述两个或更多自变量与连续响应变量之间的相关关系。一般线性模型表达式为:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (2-17)$$

其中, $x$ 代表了自变量或者叫自变量的矩阵, $y$ 代表了响应变量的矩阵, $\beta_0$ 代表了包括截距项的矩阵, $\beta_1$ 为可能包含多个估计参数的设计矩阵, $\varepsilon$ 代表了残差的矩阵。

然而,一般线性模型有应用上的限制性:(1)响应变量 $y$ 和误差项 $\varepsilon$ 应服从正态分布,即响应变量 $y$ 和误差项都该具有正态性;并且误差矩阵 $\varepsilon$ 应是一个白噪声过程,即误差项 $\varepsilon$ 必须服从零均值假定,同方差的特性。(2)自变量 $x$ 和参数 $\beta_1$ 具有非随机性:自变量 $x$ 必须是可被测量,并且不能存在测量误差;未知参数 $\beta_1$ 同样被认为是未知的,但不具有随机性的常数。 $\beta_1$ 的求解,可以运用极大似然法或最小二乘法,估计值 $\beta_1$ 也具有正态性。

上世纪80年代,混合线性模型被研究出来用于非独立的统计数据回归研究。当统计数据非独立性的情况下,就像本文中AQI在不同区域间存在关联的情况下,则不能够使用一般线性模型。而混合线性模型可以利用随机效应,进而考虑到数据的数据聚集性和层级结构。

混合线性模型建立在一般线性模型基础之上:仅保留反应变量 $y$ 的正态性分布要求。在混合线性模型亚结构模型适用条件上:(1)随机截距模型可用随机项截距代表不同的层级,相同的随机项代表相同的层级,可用于带有聚集性数据结构。本文利用随机项截距代表不同的区域,消除区域因素对空气质量的影响。

(2)协方差结构模型:适用于带有重复测量的观察资料。(3)混合效应生长模型或叫随机系数模型:在建立协方差结构模型的基础之上,在模型中加入时间因素。

混合线性模型的模型方程为:

$$Y = X\beta + Zu + \varepsilon \quad (2-18)$$

混合线性模型是在一般线性模型基础上,引入随机变量矩阵 $Z$ 。上式中的 $Y$ 表示反应变量测量值的矩阵向量, $X$ 为固定效应自变量矩阵向量, $\beta$ 为固定效应参数矩阵向量, $Z$ 为随机效应自变量设计矩阵向量, $u$ 为随机效应参数设计矩阵向量。其中 $u$ 服从均值向量为 $0$ ,方差/协方差矩阵向量为 $G$ 的正态性分布,表示为 $u \sim N(0, G)$ , $\varepsilon$ 为随机误差设计矩阵向量,服从均值向量为 $0$ ,方差/协方差矩阵向量为 $R$ 的正态性分布,即 $\varepsilon \sim N(0, R)$ 。

目前针对固定效应和随机效应的确定一般有两种方法:(1)豪斯曼检验,即对效应因子进行 $H_0$ 检验,即该效应因子属于随机效应的零假设,如果得到 $P < 0.05$ 的结论,则认为该效应属于固定效应,否则维持原假设,认为该效应属于随机效应。(2)在混合效应模型中,根据某自变量本来的性质进行固定效应变量,和随机效应变量的选择。依据本文研究目的,采用第二种方式选择固定效应和随机效应。

### 3 我国空气质量时空变化特征

城市空气污染是城市可持续发展过程中亟待解决的核心问题,揭示城市空气污染的时空变化规律,一方面能够为污染防治工作的展开提供理论保障,另一方面,可以对国务院颁布的《大气污染防治行动计划》的完成情况进行总结,为中国下一阶段大气污染防治措施的制定提供科学依据。本章首先要分析我国城市 AQI 的时间变化趋势,再阐述我国城市 AQI 的空间变化特征。

#### 3.1 城市空气污染时间变化规律

##### 3.1.1 年度变化趋势

根据 2014-2018 年 AQI 监测数据统计显示,2014 年全国 AQI 年均值为 91.03, 2015 年均值为 84.66, 2016 年均值为 80.59, 2017 年均值为 79.72, 2018 年均值为 75.57, 5 年中 AQI 均值共下降了 17 个百分点,降幅达到 15.46,说明我国大气治污取得了明显的成效。为了更加形象的表现出空气污染 5 年的空气质量指数的年际变化趋势,本文绘制了 2014-2018 年 AQI 核密度估计图。如图 3-1 所示, AQI 的核密度估计曲线在逐年向左移动,其中左右两尾的移动幅度不明显,而中间波峰的移动幅度较大。图 3-1 说明我国 2014-2018 年空气污染逐年下降,空气质量在逐年变好,其中空气质量指数在 40-100 之间的城市空气质量改善程度较大,即左移的幅度最大;而位于两侧的城市,空气质量指数位于 0-40 和 100 以上的城市改善幅度较小,大气治污取得的成效不明显:也就是说在 0-40 的地区,空气质量已经很好,很难再有改善;另一部分 100 以上的城市,是我国大气治污的重点难点城市,空气质量改善较难。此外,从图 3-1 中的核密度曲线的右侧尾部可以发现,2014 年的核密度曲线延伸较长,部分城市空气质量指数达到 300。根据我国质量监督检验检疫总局与环境环保发布的《环境空气质量指数(AQI)技术规定》(HJ633-2012)中所规定的空气质量级别来看,这些城市的年度空气污染水平达到了严重污染,会对人体健康造成较为严重的危害,需要及时治理。另外,部分城市在 2015 年和 2016 年空气质量指数虽然没有到达 300,但达到 200 以上,说明这些城市空气质量状况较差,达到了中度污染水平,也对人体健康造

成了一定的危害；到了 2017 年，所有城市的 AQI 值均小于 200，但仍有部分城市年均值达到了 180，空气污染水平达到了中度污染；2018 年又有部分城市 AQI 值超过了 200，达到重度污染水平，说明我国空气质量在总体改善的同时，部分城市空气质量又有所恶化，大气治污成效呈现出不平衡的态势。

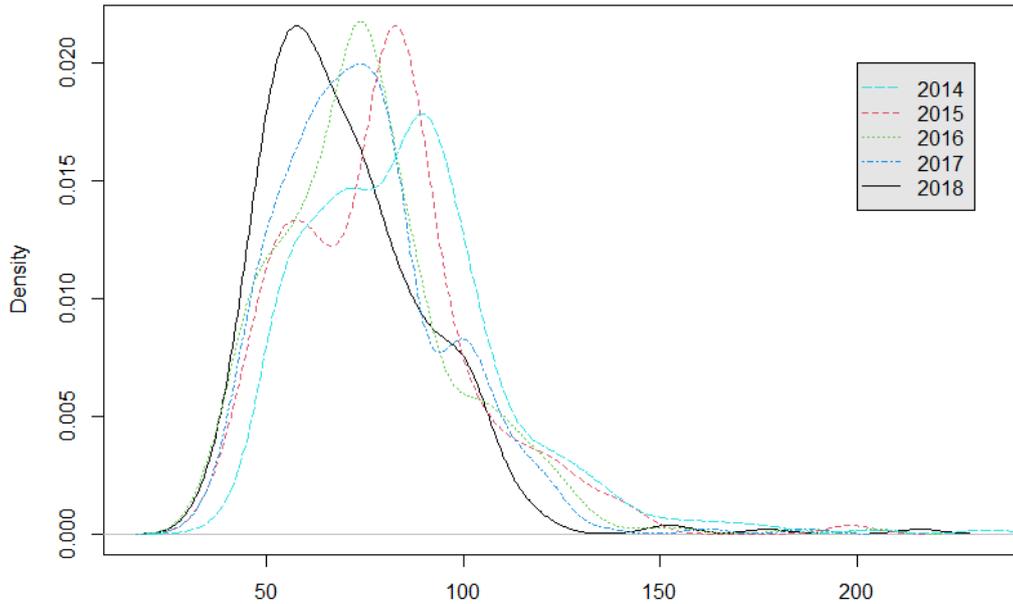


图 3-1 2014-2018 年全国 AQI 年均值核密度估计图

### 3.1.2 季节变化趋势

空气质量常常出现季节性趋势，但不同地区的季节出现有一定差距，本文为了方便研究，将本年中的 12 月至第二年的 2 月确定为冬季，本年中的 3 月至 5 月确定成为春季，本年中的 6 月至 8 月确定为夏季，本年中的 9 月至 11 月确定为秋季。为了形象地展现出空气质量情况 5 年的季度变化趋势，本文绘制了 2014-2018 年 AQI 季度柱形图，图 3-2。从季度尺度来看，只有春季和秋季的 AQI 季节均值呈现逐年下降趋势，而夏季和冬季均在 2017 年污染程度比上年严重，出现了反弹的趋势。从 5 年各季度 AQI 下降幅度来看，冬季的下降幅度最高，达到了 27.75，下降了 22.6%，春季的下降幅度达到了 8.93，下降了 10.2%，夏季的下降幅度达到了 10.29，下降了 15.3%，秋季的下降幅度最小，为 6.93，下降

了9.0%。从下降的数值来看，冬季最高，秋季最小，夏春居中，说明我国在污染较为严重的冬季取得了不错的治污成效。从5年的AQI季节均值来看，冬季均值最高，夏季均值最低，春季和秋季居中。由此可见，我国空气污染在季节上的分布规律呈现出“冬高夏低，春秋居中”的时间分布规律。这与后文要讨论的自然影响因素和社会经济因素不无关系，冬季植被稀疏加上气温低，使得污染情况的改善更加困难，另外家庭取暖产生的大气污染物，污染物的排放量也相对增加，使得冬季空气污染水平显著提高。而夏季植被茂盛，降水量充足，气温相对较高，更利于空气污染物的稀释和扩散，加之没有供暖产生的额外污染物，使得空气质量和冬季形成了鲜明的对比。由于AQI的季节均值在时间上呈现出“V”字型分布，所以我国空气质量的整治重点应该集中于冬季和秋季。

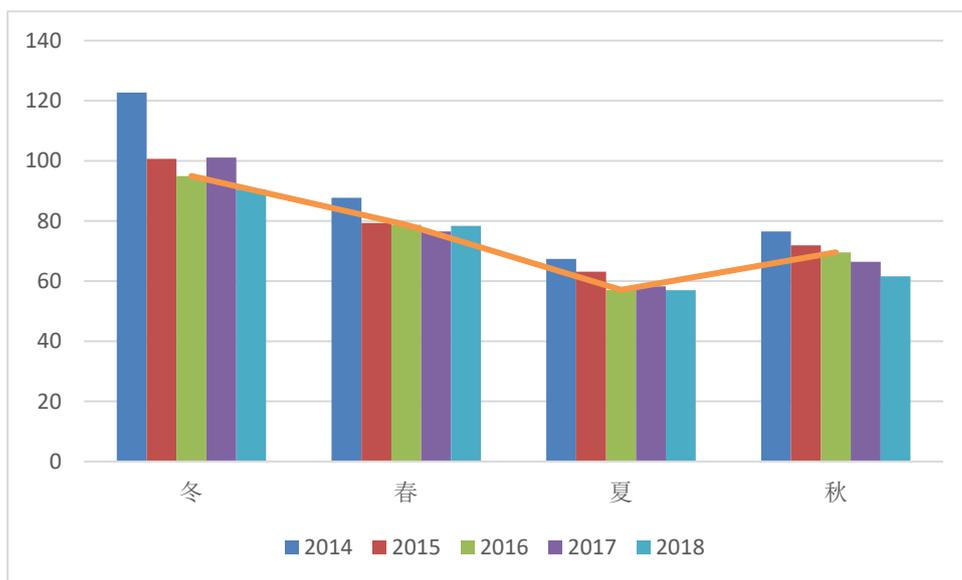


图 3-2 2014-2018 年全国 AQI 季节均值图

### 3.1.3 月度变化趋势

掌握月度 AQI 变化趋势，可以更加精确的明确治污重点。为了更加形象的表现出空气污染 5 年的月度变化趋势，绘制了 2014-2018 年 AQI 月度折线图。从月度变化图 3-3 看，2014-2018 年我国空气质量指数呈现出逐年下降的趋势。其中，2018 年每个月份的 AQI 值均小于 2014 年的 AQI 值，变化幅度最大的是 1 月份，降低了 55.38，下降了 37.6%，4 月份变化幅度最小，降低了 2.12，下降了 2.5%。由此可以得出：我国近几年空气质量得到明显改善，大气污染治理取得了良好的成效，其中，1 月份的改善最为明显，4 月份的改善情况最不明显。

从单个曲线看，各年的空气质量指数月均值都呈现出正“U”型特征，呈现出两边高，中间低的趋势。但是各月的最高值和最低值出现的月份呢不同，其中，空气质量指数最低值出现在8月份的分别是2014年，2016年和2017年，最低值出现在9月份的分别是2015年和2018年；另外，仅有2016年的AQI最高值出现在12月份，2014年，2015年，2017年和2018年AQI最高值均在1月份。这些月份AQI变化特征同样地证明了“冬高夏低，春秋居中”的上节中的AQI季节性特征：图中的高值月份出现在1月份、2月份和12月份，正好对应本文所规定的冬季，低值月份出现在6月份、7月份和8月份对应本文所规定的夏季，3月份、4月份、5月份和9月份、10月份、11月份分别对应春季和夏季。

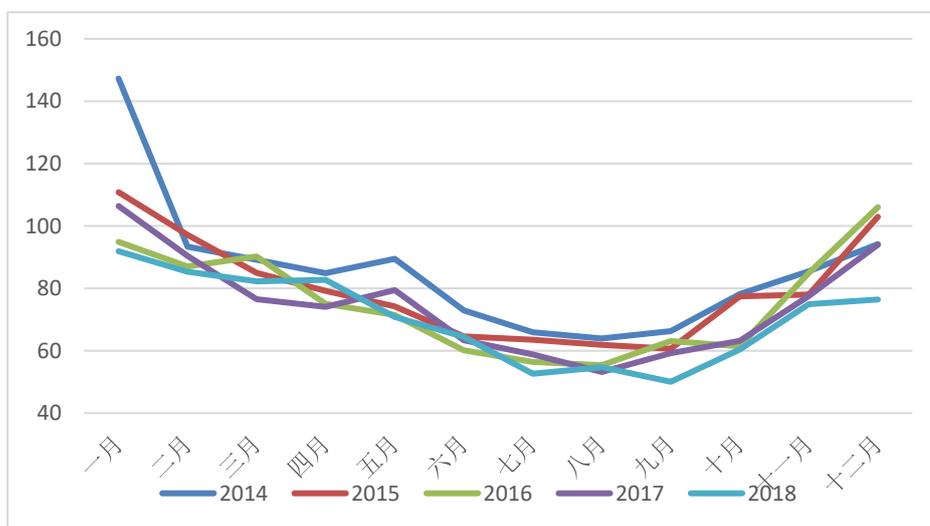


图 3-3 2014-2018 年全国月度平均 AQI

## 3.2 城市空气污染空间变化规律

上节内容基于时间变化角度分析了我国 AQI 的变化情况，为了展示说明 AQI 在区域空间上的变化情况，本节对不同城市的空气污染的分布特征以热力图的形式展开研究。

### 3.2.1 年度空间分布特征

2014-2017 年中，全国处于空气质量优良水平（AQI 值小于 100）的地区和区域已有 80% 以上，在 2018 年全国空气质量优良的地区和区域已经到达了 90%。为了探究 AQI 在年度空间上的变化情况，本文根据 AQI 年均值绘制了年度热力

图。如图 3-4 所示，存在空气污染的城市主要为西部新疆地区的乌鲁木齐市，和田地区、阿克苏地区、喀什地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州、吐鲁番地区；中部地区的中原城市群和京津冀区域；东部地区的山东半岛城市群，空气质量较差的地区主要分布在我国的中北部区域，其中西部的新疆地区污染最为严重，其中喀什地区、和田地区和阿克苏地区每年都占据空气污染的前名。从 5 年分别来看，2014-2017 年京津冀地区的保定市也总位于空气污染前 10 的位置，直到 2018 年才排到 10 名以外。2014 和 2015 空气污染的范围最广，频发地区主要位于新疆的西部地区，中部华北平原的大部分区域和湖北的中部及北部，东部地区的山东半岛。2016 年空气污染范围有较明显缩减，主要集中在新疆的西部地区，中部华北平原中的京津冀地区、河南北部、陕西中部和东部地区的山东半岛；2017 和 2018 年空气污染范围缩减为新疆西部地区，京津冀部分南部地区、河南中北部地区、陕中地区和山东半岛。

将 5 年 AQI 均值变化结合起来看，中国中东部的污染重心由西北往东北逐渐收缩，污染的中心地区位于河南和河北的交界处，而我国西部的空气污染范围始终在新疆西部地区。不仅如此，空气质量优质区始终位于我国西南地区的四川西部和云南西部、贵州南部和福建的西部及北部。其余城市在所划分区间内均未发生显著变化，且空气质量水平较为良好。

为了便于比较 AQI 变化情况，本文绘制了 AQI 变化率空间分布图，如图 3-4，空气质量改善幅度较大的地区主要位于我国西部的西藏地区北部，中部的京津冀中部区域、东部的东北地区的北部区域和山东半岛城市群。其中，那曲地区的空气质量改善幅度最大，达到 46.6%。空气质量恶化最严重的城市是临汾，增幅达到 21.1%。不仅如此，空气污染水平不断提高的城市多位于山西省、江西省、东北地区、广东省、四川北部、云南中部、新疆北部和东南沿海城市。

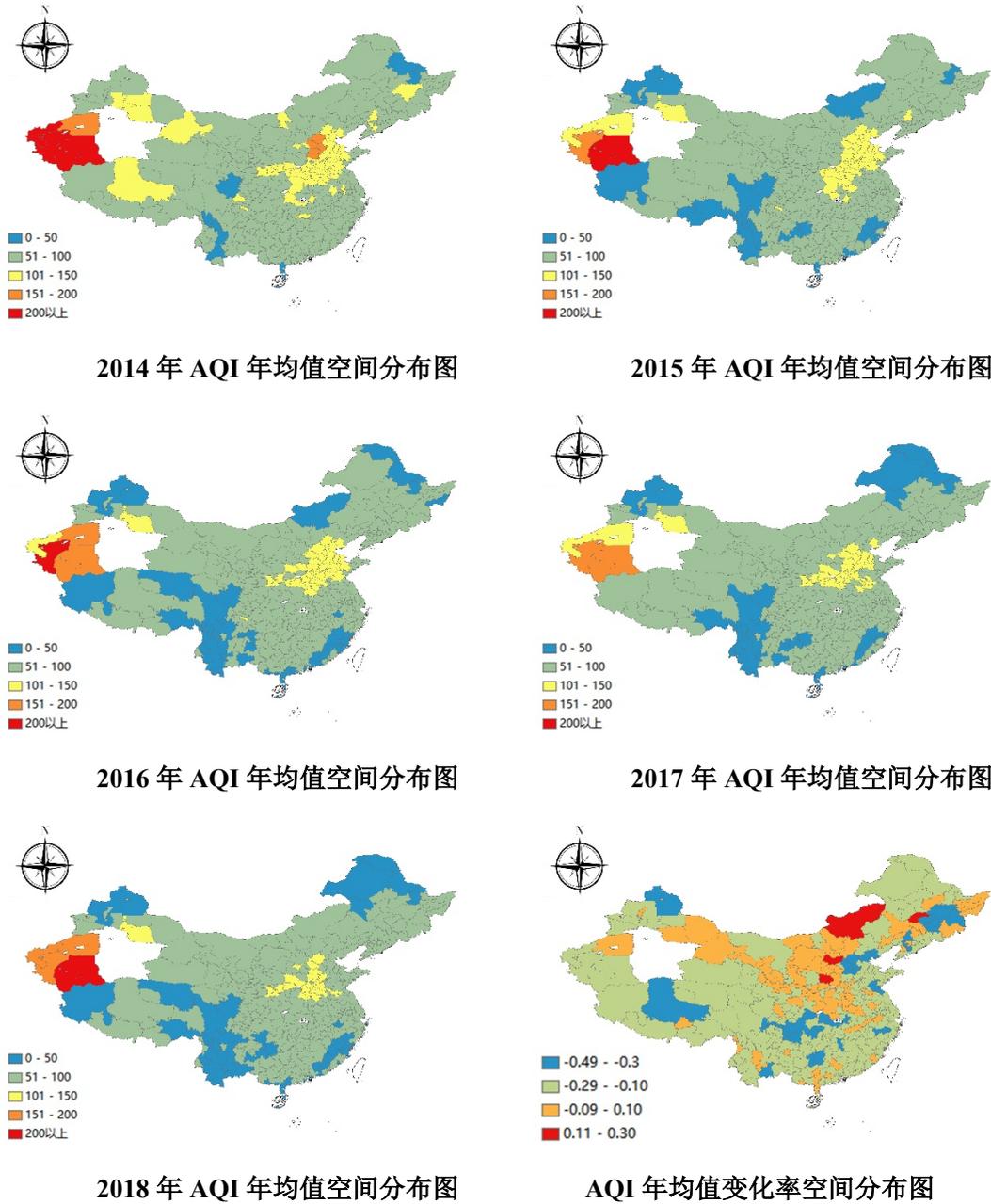


图 3-4 2014-2018 年 AQI 年均值及变化率空间分布图

### 3.2.2 季度空间分布特征

为了探究 AQI 在季度空间上的变化情况,本文根据 AQI 绘制了季度热力图。通过观察分析图 3-5, 总体我国污染呈现出“冬重夏轻”的趋势, 同时 AQI 高值点基本一致, 集中在我国中北部地区; 而我国南部地区, 空气质量大都在优良区间内。我国大气污染在冬季最为严重, 其中新疆西部地区大气污染状况最为严重, 达到了中度污染水平; 中部地区呈现出连片污染的情况, 京津冀地区在中部地区

污染更为明显，山东半岛，长江中游地区和川渝地区均呈现出污染较为严重的情况，均达到了轻度污染的水平，同时 AQI 值处于 0-50 的地区在冬季数量最少。这是因为北方城市冬季采用烧煤方式集中供暖，导致污染物排放增多，且冬季气温低，污染物不易流通扩散；春季和秋季的污染物水平相对较低，重污染地区主要集中在新疆西部区域，部分地区达到中度污染水平，中部的京津冀地区有部分城市达到轻度污染水平；夏季污染范围最小，且空气质量最好，但是新疆西部地区仍有城市达到了中度污染水平，中部城市仅有个别城市达到了轻度污染水平，同时空气质量达优的城市也最多，主要集中在我国南部区域和黑龙江北部地区。

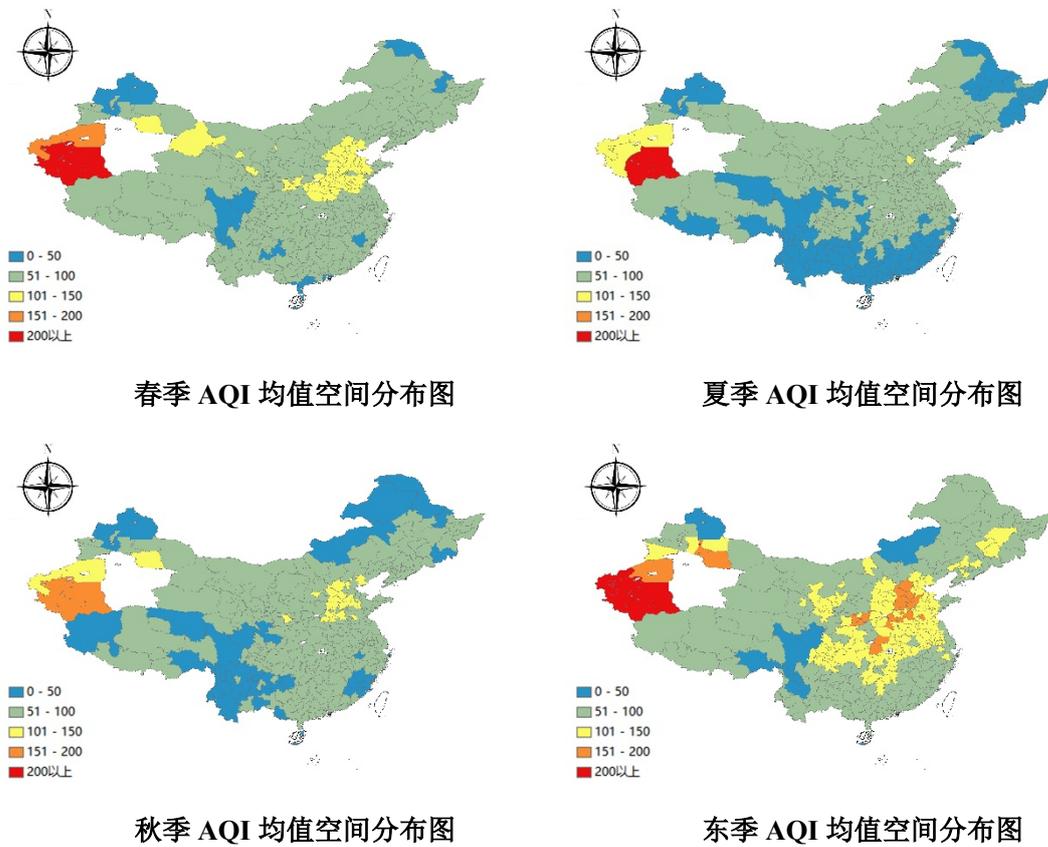


图 3-5 春夏秋冬四季 AQI 均值空间分布图

## 4 空气质量区域划分及自然影响因素分析

我国大气污染物联动性日益明显，采取联防联控措施日益紧迫，研究空气质量的区域划分可为相关部门联合出台相关法规提供区域划分的依据。研究空气质量区域划分是对上章空间差异规律的具体化研究，同时为下章研究社会经济因素对空气质量的影响提供区域划分依据，是承上启下的一章。本章采用动态时间规划算法和系统聚类相结合的方法，利用城市间地理距离和 AQI 序列距离进行时间序列聚类，将我国 168 座城市划分为 6 个主要区域；再从 6 个区域中选取代表城市分析自然因素对空气质量的影响。

### 4.1 时间序列聚类数据选取

由于我国城市数量多，样本数目多，如果对所有城市进行分类将导致分析过程繁琐复杂，难以对各个城市进行清晰的区域划分；另外为了方便与中国环境监测总站对全国 169 个城市划分情况作对比。因此本文根据国务院发布的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》中对重点城市的划分，选取其规定的 169 个重点城市进行聚类研究，但由于拉萨地区缺失值严重，本章选取 168 座城市的空气质量数据进行聚类研究。

在传统的系统聚类中样本间距离都是利用欧氏距离计算，利用两个节点的欧式距离来衡量样本间的相似性来实现聚类。但是本文的研究目的是将大气间存在污染物联动的城市区分开来，AQI 的变动趋势可以反映污染物的联动情况。因此，类内城市的 AQI 的变化趋势应尽可能相似，大气污染物会相互影响；而不同类别间的城市 AQI 变化趋势应尽可能不同，大气污染物不会相互影响。然而欧式距离无法衡量两个时间序列的相似性，需要利用动态时间规划算法衡量不同城市间 AQI 变化趋势的相似性。另外，本文认为应注重 AQI 变化趋势对聚类的影响而不是 AQI 数值，为了消除数值大小差异对衡量 AQI 变化趋势的偏差，在利用动态时间规划算法衡量 AQI 变化趋势前，对 AQI 数值进行了对数化处理。

## 4.2 时间序列聚类

本文首先计算城市间空气污染指数的 DTW 距离矩阵,即每个城市 AQI 时间序列的相似性,体现自然因素对大气污染区域流动性的影响。利用第二章的式(2-9)可计算任意两座城市间地 DTW 距离。

$$DTW(X, Y) = \min \sum_{k=1}^T d(\varphi_x(k), \varphi_y(k)) \quad (4-1)$$

其中 $\varphi_x(k)$ 的可能取值为 $X_1, X_2, \dots, X_{1826}$ ,代表 x 城市的 AQI 时间序列,共 1826 天的 AQI 数据, $\varphi_y(k)$ 的可能取值为 $Y_1, Y_2, \dots, Y_{1826}$ ,代表 y 城市的 AQI 时间序列,共取 1826 天的 AQI 数据。 $k$ 的可能取值为 $1, 2, \dots, 168$ ,代表 168 座代表城市。

再计算城市间的地理欧式距离矩阵,依据地理学第一定律,城市间地理距离越近,大气污染物相互传输的可能性越大。将两个距离指标同时作为聚类指标进行系统聚类,将自然因素相同的城市聚为一类。

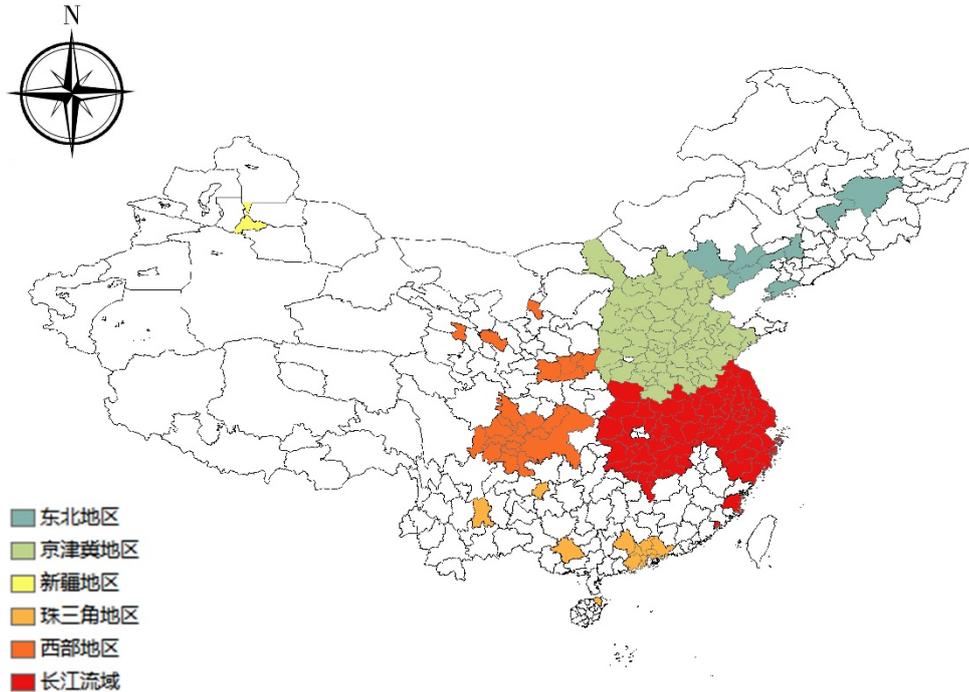


图 4-1 我国空气质量区域划分

表 4-1 168 座重点城市聚类结果

类别	城市
1	安庆 蚌埠 池州 滁州 阜阳 合肥 湖州 淮安 淮南 荆门 荆州 六安 马鞍山 南京 南阳 绍兴 随州 泰州 铜陵 芜湖 襄阳 信阳 宿迁 宣城 扬州 宜昌 镇江 常德 常州 鄂州 福州 杭州 黄冈 黄山 黄石 嘉兴 金华 九江 丽水 连云港 南昌 南通 宁波 萍乡 衢州 厦门 上海 苏州 台州 温州 无锡 武汉 咸宁 孝感 新余 盐城 宜春 益阳 岳阳 长沙 舟山 株洲
2	安阳 包头 保定 北京 滨州 亳州 沧州 大同 德州 东营 邯郸 菏泽 鹤壁 衡水 呼和浩特 淮北 济南 济宁 焦作 晋城 晋中 开封 莱芜 廊坊 聊城 临汾 临沂 洛阳 漯河 吕梁 平顶山 濮阳 青岛 日照 三门峡 商丘 石家庄 朔州 太原 泰安 唐山 天津 潍坊 忻州 新乡 邢台 宿州 徐州 许昌 阳泉 运城 枣庄 张家口 长治 郑州 周口 驻马店 淄博
3	宝鸡 成都 达州 德阳 广安 兰州 乐山 泸州 眉山 绵阳 南充 内江 遂宁 铜川 渭南 西安 西宁 咸阳 雅安 宜宾 重庆 资阳 自贡
4	朝阳 承德 大连 哈尔滨 葫芦岛 锦州 秦皇岛 沈阳 长春
5	东莞 佛山 广州 贵阳 海口 惠州 江门 昆明 南宁 深圳 肇庆 中山 珠海
6	乌鲁木齐

时间序列聚类结果如图 4-1 和表 4-1 所示，本文将 168 个城市分为 6 个不同的城市群，分别代表长江流域地区，京津冀周边地区，西部地区，东北地区，珠三角地区，新疆地区。

### 4.3 聚类结果分析

气象因素和地形因素是造成区域间大气污染变化趋势不同的主要因素，由于地形因素对大气污染物传送无法定量表达，因此本文接下来首先分析六大区域的

主要地形特征,利用地理信息理论,说明地形对空气质量的影响;再介绍气象条件的差异,接着从相关性角度分析气象因素对空气质量的影响。

由于各区域所涵盖城市数量不同,分析所有城市气象因素与 AQI 的相关关系难以得出清晰的结论,因此需要从 6 个区域中各选取代表 1 个城市。本文利用距离分析和相关分析,从 6 个区域中选取 6 个代表城市来反映该区域空气质量变化的同步性和一致性。然后利用相关系数分析气象因素对空气质量的影响,说明空气质量指数与降雨量、风速、气温和相对湿度相关关系。

#### 4.3.1 区域间自然因素差异

长江流域地区,降雨量较大且风力作用强,且大多城市靠近江河湖海,可以抑制地面尘土发生,并有助于大气污染物的扩散和稀释,改善大气质量。另外,长江流域地区属于亚热带区域,高温多雨、四季常绿的,这种气候条件对大气污染物的扩散十分有利。受季风和台风的影响,海洋性的气团可以有效稀释华南地区的空气污染物,而且还可以减少中西部地区的空气污染物向华南地区的输送。值得注意的是,信阳本属于河南省,中国环境监测总站也将其划分到京津冀区域,但是本文根据 AQI 的变化趋势聚类结果将其划分到长江流域地区,其 AQI 的变化趋势与长江流域地区更为相近。因为,虽然其位于河南,但是信阳所处位置在秦岭-淮河线以南区域,气候自然条件与长江流域地区更为相似。

京津冀及周边地区,空气污染严重且波动较大,在 2014-2018 年也是我国长期的高污染区。值得注意的是,中国环境监测总站将亳州、淮北、宿州、徐州划分为长江三角区域,来研究空气质量。然而,根据本文的时间序列聚类结果,虽然亳州、淮北、宿州属于安徽省,徐州属于江苏省,但是 AQI 变化趋势与京津冀地区更为相近。因为这四个城市也位于秦岭-淮河线以北区域,此线是我国重要的地理分界线,其不仅是我国气候分布的南方和北方的分界线,也是我国湿润和半湿润地区分界线及亚热带和北温带的分界线。由此也可证明气候和气象条件对我国区域范围空气质量起到了显著作用。

西部地区,主要包甘肃,陕西,四川和重庆地区。西部地区地处丘陵、盆地,山地的相对封闭自然条件,不利于大气污染物的扩散,因此 AQI 变化趋势相同。

东北地区地处大兴安岭山脉、小兴安岭山脉和长白山山脉包围下,中部为平

原, 周边多山水, 其地理特点使其易形成上温下冷的逆温层, 不利于空气污染物的扩散, 大气形成相对封闭区域, 区域内 AQI 变化趋势相似。

珠江三角地区, 三面环山一面环海, 以及受岭南独特的气候条件影响, 形成了相对封闭的区域。污染程度最轻, 城市气候适宜、地形特殊, 因此它们的大气环境优良。

乌鲁木齐市位于准噶尔盆地以南, 天山山系西段的西部, 天山中段偏北, 市区三面环山, 形成相对封闭区域。该区域年均降水少, 较为干旱, 地表疏松, 在强风的条件下容易造成沙尘暴和浮尘天气影响空气质量。受极低冷气团和冬季温带天气系统影响, 还受低纬度的天气系统和夏季的副热带天气影响, 加之内陆地区与海洋距离较远, 该地区极易产生环流对于大气污染的扩散不是很有利。因此乌鲁木齐单独形成一类较为合理。

#### 4.3.2 气象因素对空气质量的影响

根据本章第 2 节内容, 本文将空气质量指数变化趋势相同的城市聚为一类, 类内城市空气质量变化情况大致相同, 因此可以选择一个城市来代表该区域空气质量指数变化的特征。

相关分析可以计算区域内各个城市 AQI 与区域内城市 AQI 均值间的相关系数, 相关系数越高, 代表该城市与区域内的均值变化越接近; 距离分析可以计算各个城市 AQI 间的差异程度, 距离分析值越低, 代表该城市与区域内均值差异越小。因此, 利用综合指数法, 即利用相关分析与距离分析的比值可以从区域内众多城市中选取最具代表性的城市。

本文利用综合指数法从 6 个区域内选出 6 个代表城市, 分别代表长江流域地区、京津冀地区、西部地区、东北地区、珠三角地区和新疆地区。

首先计算标准化到 0 到 1 之间的距离分析的结果  $X$ , 然后计算相关分析的结果  $R$ , 得到  $R$  和  $X$  相除的结果即为综合指数  $S$ 。

$$S = \frac{R}{X} \quad (4-2)$$

因此, 选取综合指数  $S$  最大的城市就可代表该区域空气质量的变化特征, 下文以东北地区代表城市的选取为例来阐述此方法。

表 4-2 东北地区距离分析

	朝阳	承德	大连	哈尔滨	葫芦岛	锦州	秦皇岛	沈阳	长春
朝阳	1.000								
承德	0.428	1.000							
大连	0.331	0.399	1.000						
哈尔滨	0.368	0.341	0.428	1.000					
葫芦岛	0.576	0.567	0.636	0.429	1.000				
锦州	0.643	0.549	0.587	0.473	0.870	1.000			
秦皇岛	0.485	0.636	0.631	0.425	0.787	0.734	1.000		
沈阳	0.381	0.445	0.596	0.645	0.592	0.607	0.559	1.000	
长春	0.332	0.391	0.474	0.788	0.469	0.497	0.448	0.781	1.000
平均值	0.495	0.473	0.453	0.747	0.339	0.386	0.400	0.464	0.489

表 4-3 东北地区相关性分析

	朝阳	承德	大连	哈尔滨	葫芦岛	锦州	秦皇岛	沈阳	长春
朝阳	1.000								
承德	0.428	1.000							
大连	0.331	0.399	1.000						
哈尔滨	0.368	0.341	0.428	1.000					
葫芦岛	0.576	0.567	0.636	0.429	1.000				
锦州	0.643	0.549	0.587	0.473	0.870	1.000			
秦皇岛	0.485	0.636	0.631	0.425	0.787	0.734	1.000		
沈阳	0.381	0.445	0.596	0.645	0.592	0.607	0.559	1.000	
长春	0.332	0.391	0.474	0.788	0.469	0.497	0.448	0.781	1.000
平均值	0.505	0.528	0.565	0.544	0.658	0.662	0.634	0.623	0.576

表 4-4 东北地区综合指数结果

	朝阳	承德	大连	哈尔滨	葫芦岛	锦州	秦皇岛	沈阳	长春
平均值	1.020	1.117	1.248	0.729	1.945	1.714	1.587	1.343	1.176

表 4-5 各区域代表城市选取

区域	长江流域	京津冀	西部	东北	珠三角	乌鲁木齐
代表城市	黄冈	泰安	南充	葫芦岛	深圳	乌鲁木齐

由本文的第二章分析结果可知,我国空气质量分布特征存在明显差异,这与气象因素有着密切的联系。前文的聚类结果是基于 AQI 的变化趋势,因而区域内城市 AQI 具有同步性的特点;而根据综合指数法选择的代表性城市又可以很好的代表该区域 AQI 变化特征。因此可用 6 座城市来代表 6 个不同区域来研究自然因素对空气质量的影响。为了研究气象因素对空气质量的影响,本节计算了气象资料与空气质量指数的相关系数,以此来分析 AQI 与平均降雨量、平均风速、平均气温与平均相对湿度的相关关系。

风力作用会影响稀释和输送大气污染物速度。在一般情况下,风速与污染物传输速度成正比,风速越大,对污染物的稀释效果越明显,污染物扩散越快;但另一方面,风速与污染物传送速度成反比,风速增大会使烟云的抬升高度降低,增加污染物的地面浓度。因此,在研究风速对大气污染物的影响时,需要从两方面考虑。

随着气温的提升,地面温度与远地温度形成气温差,形成垂直气温差,产生空气对流交换,有利于污染物的扩散和转移。相反,如果温度较低,不能形成垂直温差,大气相对稳定,不利于大气污染物的扩散和转移。

相对湿度对空气污染物具有双重影响。在一般情况下,相对湿度越高,大气污染颗粒物越容易聚集在一起,在重力的作用下沉降到地面,降低大气中的漂浮颗粒物;但另一方面,地面上的粉尘和建筑粉尘在风力作用下被吹到大气中,与大气中的水汽结合形成烟雾,且这种烟雾不易扩散。

降水可以冲刷和吸收大气中的污染物,在雨雪作用下,大气污染物,尤其是颗粒物,可以溶解在雨雪中,清洁大气环境。同时在降水结束后,大气得到净化,在将来一段时间内会继续产生作用。

因此,需要分别对 6 个代表城市的月均降雨量,月均风速,月均气温,月均湿度进行详细说明。

为了展示各地区的月均降水量差异，绘制了代表城市月均降雨量的折线图。从图 4-1 可以看出，从整体看，各代表城市 5 月、6 月和 7 月降雨量最多，1 月、2 月和 12 月降雨量最少，呈现出“冬少夏多，春秋居中”的态势。从单个城市角度看，各代表城市降雨量差异较大，其中，乌鲁木齐的降雨量最低，且月降雨量变化平稳，深圳降雨量最多，且变化幅度最大。

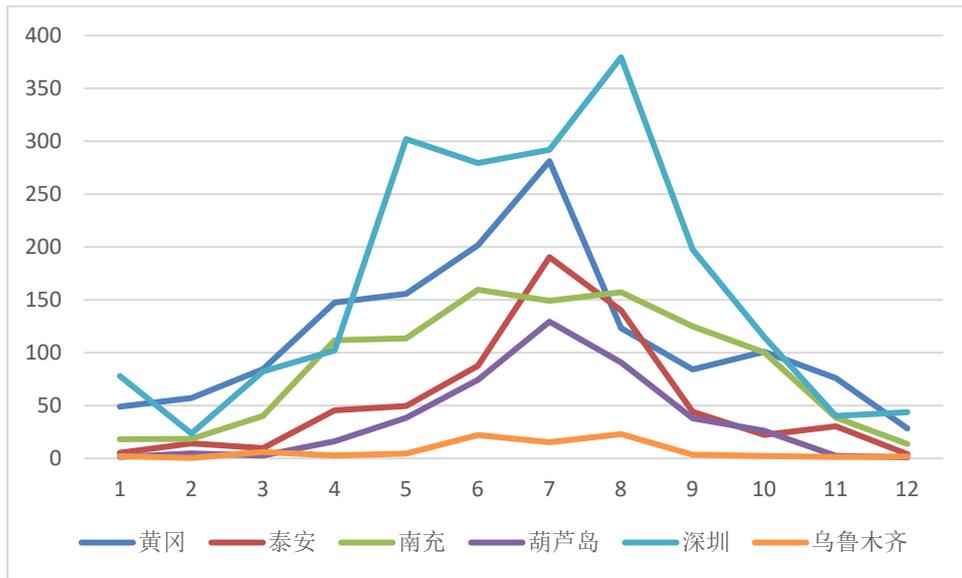


图 4-1 各地区月均降雨量折线图

为了展示各地区的月均风速差异，本节绘制了各代表城市月均风速的折线图。从图 4-2 可以看出，在整体上，各代表城市风速大小没有明显的月份趋势。但从单个城市看，各代表城市风速差异较大，其中乌鲁木齐和葫芦岛平均风速最大，且最大风速出现在 3 月、4 月和 5 月，最低风速 7 月、8 月和 9 月，黄冈、泰安、南充和深圳各月风速变化不大。其中，泰安和南充经常处于静风状态，乌鲁木齐风力作用最强，且变化幅度较大。

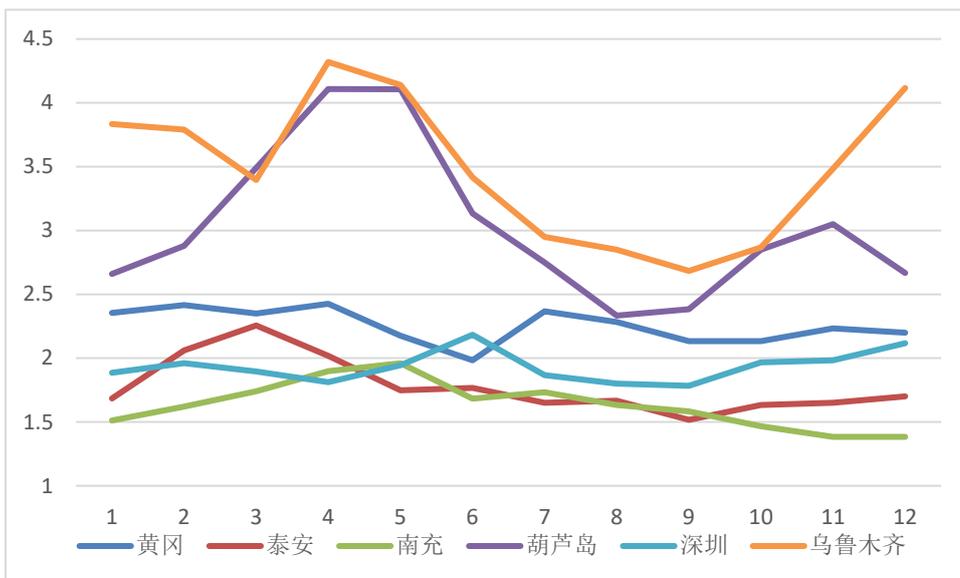


图 4-2 各地区月均风速折线图

为了展示各地区的月均气温差异，绘制了代表城市月均气温的折线图。从图 4-3 可知，在整体上，各代表城市在 6 月、7 月和 8 月气温达到最高，1 月、2 月和 12 月气温较低，且变化都比较统一。从单个城市来看，各代表城市气温差异明显，深圳各月平均气温都最高，且各月温差不大，而乌鲁木齐市各月温度都最低，而且月均气温变化幅度很大，差异比较明显。

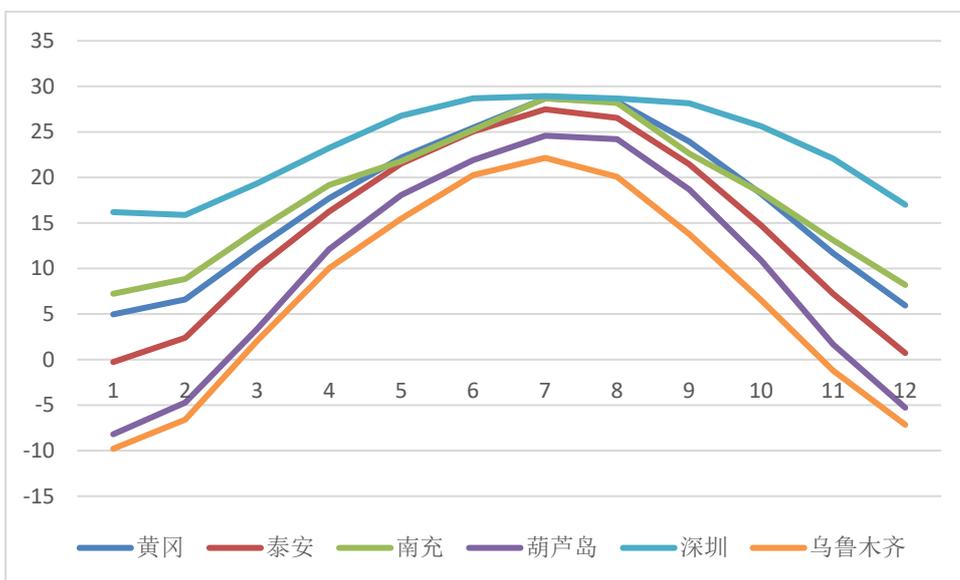


图 4-3 各地区月均气温折线图

为了展示各地区的月均湿度差异，绘制了代表城市月均湿度的折线图。由图 4-4 可知，在整体上，各代表城市月均湿度变化无明显趋势，各月湿度变化相对平稳。从单个城市看，各代表城市湿度差异明显，其中，乌鲁木齐市气月均湿度最

低，较为干旱，深圳、黄冈和南充湿度较高，相对湿润。

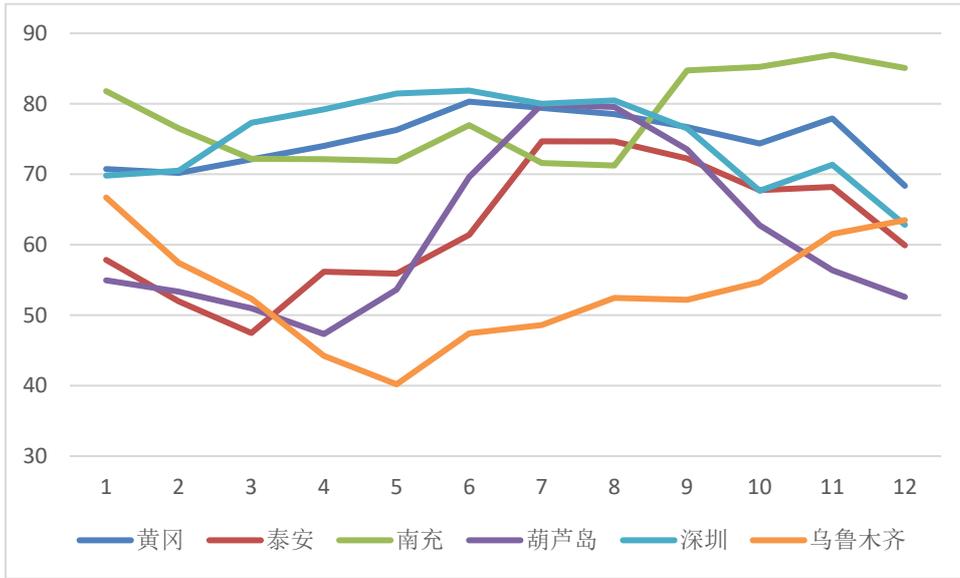


图 4-4 各地区月均湿度折线图

从上述研究可以发现，各地区气象条件差异明显，为区域内大气污染传输提供了客观条件。另外，由于地形等因素，气象因素对空气质量的影响会造成不同结果，例如湿度的上升会在不同地质条件下对空气质量产生不同的影响，下文就气象因素对空气质量的影响进行详细展开说明。

表 4-6 气象因素对空气质量的影响

代表城市	黄冈	泰安	南充	葫芦岛	深圳	乌鲁木齐
降水	-0.688*	-0.683*	-0.877**	-0.787**	-0.830**	-0.522
风速	0.324	0.014	-0.401	0.350	0.108	0.446
气温	-0.871**	-0.901**	-0.900**	-0.869**	-0.777**	-0.918**
湿度	-0.835**	-0.399	0.325	-0.878**	-0.923**	0.790**

为研究各种气象因素对空气质量的影响，本文计算了各代表城市月均 AQI 与月均降雨量、月均风速、月均气温和月均湿度的相关系数。如表 4-6 从代表城市气象因素与 AQI 的相关系数可知平均降水量，平均气温和平均相对湿度对 AQI 影响效果显著，风速对空气质量的影响不显著。

平均降水量对所有代表城市的 AQI 影响都为负值，说明降水可以有效冲刷大气污染物，有利于空气质量的改善，但也应看到降水对不同城市的 AQI 影响是不同的。其中降水对南充和深圳的改善效果最为明显，这两个城市降水多为连续的大雨，说明持续大量的雨水对空气质量的改善作用要强；而乌鲁木齐的降雨

对空气质量的改善作用较低，因为乌鲁木齐的平均降水量较少，说明少量的降雨对空气质量的改善作用较低。

平均风速对所有代表城市的影响都不显著，无法说明风速对大气污染的具体影响；同时，由于风速主要影响大气污染在水平方向的扩散，这也在另一方面说明我国空气质量状况有明显的区域特征。这与风力作用对大气污染双重效果有关，当风力较小时，风力作用会将地面上的尘土和粉尘吹入大气中，增加空气污染；当风力作用较大时，会将大气污染物从水平方向吹向其他区域，改善本地区的空气质量，在这种双重作用下，无法确定风速对大气污染的影响。表中风速对乌鲁木齐的影响最大，是因为乌鲁木齐地面粉尘较多，在风力作用下，将地面粉尘吹起，影响空气质量。

气温对所有城市的影响都显著，且为负值，说明气温升高对空气质量有改善作用。值得注意的是，深圳的绝对值最低，虽然深圳平均气温较高，但是温差相对较小，地面和近地大气的垂直温差较低，大气相比于其他城市相对稳定。

相对湿度对空气质量的影响在不同城市间有较大的差异。在西北的乌鲁木齐大气中粉尘较多，平均湿度相对较低。随着湿度的升高，粉尘与水汽融合形成烟雾，这种烟雾较难扩散，因此会恶化大气环境。在珠三角的深圳，空气中湿度较大，水汽与污染物结合在重力作用下下沉到地面，从而改善空气质量。

综上所述，气温对所有城市 AQI 都具有显著影响，且都为负值，说明气温升高有助于大气污染物的扩散；另外降水和 AQI 的相关系数也都为负值，说明降水的增多有助于大气污染物的稀释，雨雪可有效吸附大气中的污染物；风速对所有地区的影响都不显著；湿度对和大部分城市的 AQI 负相关，但和新疆的 AQI 显著正相关。

## 5 社会经济因素对空气质量的影响因素分析

相较于自然因素，对社会经济因素的管控更为容易实现。研究社会经济因素对空气质量的影响可为我国政府出台相关法律法规来改善空气质量提供意见。从长期过程来看，我国社会经济发展和生态环境之间呈现出的倒“U”型的非线性关系。本章根据当前我国的目前的发展阶段，初步假设：社会经济指标与空气质量指数的相关关系在短期内是线性的。

但是，中国空气质量影响因素多样，受到自然和社会经济两方面因素的影响。自然因素体现在区域大气污染的传送和扩散会，进而影响相邻城市的空气质量情况。为了更好的研究社会经济因素的影响，需要剔除区域流动性因素对空气质量的影响。本文根据之前的聚类结果，把研究单位划分为几个区域，将这几个区域看作随机效应来代表不同区域的异质性，利用混合线性模型分析社会经济因素对空气质量的影响。

### 5.1 数据和指标体系选取

考虑到我国自然条件不会轻易发生改变，大气传输网络相对稳定，区域间的空气流动也相对稳定，本章根据前文的聚类结果，选用 2018 年的社会经济数据，研究其对空气质量的影响。本章数据选自 2019 年的《中国城市统计年鉴》，选择前文进行聚类研究的 168 个重点城市，并对存在缺失值的城市进行了删除。

人口密度。在一般情况下，需要使用人口总量来表示地区的人口因素，即随着人口总量的增加，排放的大气污染物也随之增加，给空气环境造成的压力也越大。但是，我国城市之间的行政区规划面积和人口总数存在较大差异性，采用总人口数指标不存在科学可比性，因此本文选用城市人口密度来体现人口压力对环境的影响。一般认为，人口的密度对空气质量的影响存在两种关系。一种是区域内人口密度的提高会使地区总需求也有所提高，加大了地区能源消费总量，同时，大量生活垃圾的焚烧会排放出大量空气污染物，提高了区域空气污染水平。另一种是随着人们环保意识的增强，人口的迁移会偏向于选择空气质量优质区域，不仅如此，人口密度的高区对空气质量的总诉求也高，政府的管制力度也会较强，故而人口密度高值区的空气污染水平较低。因此，不对该变量的符号做预期判断。

建成区绿地覆盖率可以很好的反映建成区的城市绿化水平。绿化植被的叶片会对漂浮在大气中的污染物起到良好的吸附作用,而且其有助于阻挡地面扬尘发生和沙尘暴袭击,而被誉为“城市粉尘过滤器”,因此绿地覆盖率与城市空气质量密切相关。故预期系数符号为负。

工业烟粉尘排放量是造成空气中可吸入颗粒物和细微颗粒物增加的重要来源。可吸入颗粒物和细微颗粒物都是重要的大气污染物,它们的升高会造成空气质量的恶化。快速的工业化和日常的社会生产活动排放出了大量可吸入颗粒物和细微颗粒物,加剧了空气污染水平。近年频发的空气污染事件中,可吸入颗粒物和细微颗粒物污染问题引起了专家学者的广泛关注,它们是引起空气污染以及雾霾天气的重要因素。此外,它们也是 AQI 计算中包含的主要污染物之一。故此,对工业烟粉尘排放量的预期系数符号为正。

城市居民生活用电。一方面,我国发电厂多是火力发电厂,用电量的增加会导致二氧化硫的排放,造成空气质量情况恶化。另一方面,居民生活活动增加会对用电量有较大需求,同时产生生活垃圾,包括二氧化氮等有害气体,造成大气污染物排放量增加。

城市交通运输。一般情况下,应用交通工具使用总量来表示城市交通运输,但是由于所拥有数据有限,本文使用每万人拥有公共汽车数量来代表交通工具使用总量。城市公共汽车使用量的增长,既可满足居民日常出行需求,也会使私家车使用量减少,总体来看会使交通工具使用总量减少,全社会机动车尾气的排放也随之减少,给大气环境造成的压力越小。故预期系数符号为负。

第二产业占比。我国第二产业多为能源消耗性产业,对空气质量造成的压力大,因此可使用第二产业产值占 GDP 比重来反映产业结构对空气质量造成的影响。近年来随着经济的发展,国家建设不断加快,推动了钢铁和水泥等重工业的发展。不仅如此,大量工业产品的出口也拉动了工业部门的发展,工业发展过程中会消耗大量能源,加剧了城市空气污染。由此可见,第二产业的化石能源消耗和建筑扬尘是空气污染的重要来源之一。因此,对该变量的预期系数符号为正。

地区人均生产总值。社会富裕度通常使用人均生产总值来度量,然而 GDP 在人为统计的过程中存在不确定性,经济增长对空气污染有以下两方面影响。一方面随着社会经济水平的发展,人民对生活质量要求更高,对高能耗产品的需求

量也增加，进而会产生更多的污染物排放，空气污染状况会加重。另一方面，随着收入水平的提高，环保意识逐步增强，空气质量要求也提升，空气质量得到改善。因此，不对该变量的符号做预期判断。

## 5.2 混合线性模型

本章研究的主要目标是探究社会经济因素对空气质量的影响，但从上一章结论可知自然因素会对空气质量造成影响。为了抵消区域因素对空气质量的影响，可将其作为随机项截距引入模型，这样可以有效抵消个体城市间的自然效应。

$$y = X\beta + Zu + \varepsilon \tag{5-1}$$

其中

$$E \begin{bmatrix} u \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ 和 } Cov \begin{bmatrix} u \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}$$

应用于本文数据即：

$$y = \begin{bmatrix} aqi_{1,1} \\ \vdots \\ aqi_{1,62} \\ \vdots \\ aqi_{6,1} \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & X1_{1,1} & X2_{1,1} & X3_{1,1} & X4_{1,1} & X5_{1,1} & X6_{1,1} & X7_{1,1} \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 1 & X1_{1,62} & X2_{1,62} & X3_{1,62} & X4_{1,62} & X5_{1,62} & X6_{1,62} & X7_{1,62} \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 1 & X1_{6,1} & X2_{6,1} & X3_{6,1} & X4_{6,1} & X5_{6,1} & X6_{6,1} & X7_{6,1} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_7 \end{bmatrix}$$

$$Z = \begin{bmatrix} 1_{63 \times 1} & 0_{58 \times 1} & 0_{24 \times 1} & 0_{9 \times 1} & 0_{13 \times 1} & 0_{1 \times 1} \\ 0_{63 \times 1} & 1_{58 \times 1} & 0_{24 \times 1} & 0_{9 \times 1} & 0_{13 \times 1} & 0_{1 \times 1} \\ 0_{63 \times 1} & 0_{58 \times 1} & 1_{24 \times 1} & 0_{9 \times 1} & 0_{13 \times 1} & 0_{1 \times 1} \\ 0_{63 \times 1} & 0_{58 \times 1} & 0_{24 \times 1} & 1_{9 \times 1} & 0_{13 \times 1} & 0_{1 \times 1} \\ 0_{63 \times 1} & 0_{58 \times 1} & 0_{24 \times 1} & 0_{9 \times 1} & 1_{13 \times 1} & 0_{1 \times 1} \\ 0_{63 \times 1} & 0_{58 \times 1} & 0_{24 \times 1} & 0_{9 \times 1} & 0_{13 \times 1} & 1_{1 \times 1} \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix}$$

可利用最佳线性无偏估计求解：

$$BLUP(\beta) = \tilde{\beta} = (X^T V^{-1} X)^{-1} X^T V^{-1} y \tag{5-2}$$

$$BLUP(u) = \tilde{u} = G Z^T V^{-1} (y - X \tilde{\beta}) \tag{5-3}$$

其中 $aqi_{m,n}$ 代表 m 区域中的 n 市的 aqi 值，X1 代表人口密度，X2 代表建成区绿地覆盖率，X3 代表工业烟粉尘排放量，X4 代表城市居民生活用电，X5 每万人拥有公共汽车，X6 代表第二产业占比，X7 代表人均 GDP。U<sub>1</sub> 代表长江流

域， $U_2$  代表京津冀地区， $U_3$  代表西部地区，代表  $U_4$  代表东北地区， $U_5$  代表珠三角地区， $U_6$  表示新疆地区的随机项截距。

利用混合线性模型对空气质量进行影响因素分析可以得到如下结果，表 4-1 展示了固定效应的分析结果，估计值代表各指标对 AQI 的影响方向和大小，表 4-2 展示了随机效应的分析结果，代表区域影响因素显著，表 4-3 代表了不同区域的随机项截距，代表各地区 AQI 水平的差异。

表 4-1 固定效应分析结果

参数	估计值	标准误	t 值	P 值
截距	79.015	7.508	10.524	0.000
人口密度	2.456	1.150	2.136	0.034
建成区绿地覆盖率	-1.347	0.962	-1.401	0.163
工业烟粉尘排放量	-0.166	0.895	-0.185	0.853
城市居民生活用电	0.996	1.305	0.764	0.446
每万人拥有公共汽车	-1.588	1.332	-1.192	0.235
第二产业占比	2.711	1.076	2.521	0.012
人均 GDP	-2.501	1.301	-1.922	0.057

4-2 随机效应分析结果

参数	Npar	LogLik	AIC 值	P 值
none	10	-590.42	1200.8	
区域	9	-640.89	1299.8	0.000

4-3 不同区域的随机项截距

参数	随机截距
长江流域	-7.717
京津冀周边	15.347
西部地区	-4.614
东北地区	-6.272
珠三角地区	-21.837
新疆地区	25.093

从随机效应的结果上看，区域因素对空气质量的影响显著，说明在地形和气

象因素的作用下，邻近城市在大气传送网的作用下，大气污染物相互流通，形成不同的区域。区域内城市大气污染物传输较为频繁，有着相似的变动趋势，而这种传输也会形成较为接近的空气质量指数值，在模型中表现为区域内城市有着相同的截距值。从表 4-3 得出，珠三角地区随机截距为-21.837，说明珠三角地区空气质量最好，长江流域、东北地区和西部地区同样随机截距分别为-7.717、-6.272和-4.614，说明这些区域空气质量相对较好。京津冀周边地区随机截距为 15.347，说明该区域空气质量相对较差，新疆地区随机截距为 25.093，说明该区域空气质量最差，这与第二章分析结果基本一致。

表 4-4 模型比较

模型	$R^2$
线性模型	0.210
混合线性模型	0.588

从模型比较来看，线性模型的解释度是 0.210，混合线性模型的解释都是 0.588，说明在研究对空气质量的影响时，十分有必要考虑自然因素。因为区域内城市本身 AQI 值比较接近，不考虑区域因素会影响拟合结果。混合线性模型可以把区域因素以随机截距项的形式引入模型，消除自然因素对空气质量的影响，增加模型的可解释度。

因此，利用混合线性模型分析空气质量的影响因素时，随机效应可以很好的考虑到自然因素对大气污染传送的影响，从而增加拟合的效果。固定效应可以很好的衡量社会经济因素对空气质量的影响，从而为改善空气质量制定社会经济政策提供意见。

### 5.3 社会经济影响因素分析

人口密度与 AQI 存在正向关系。从实证结果来看，区域内人口密度的提高会使地区总需求也有所提高，加大了地区能源消费总量，同时，大量生活垃圾的焚烧会排放出大量空气污染物，提高了区域空气污染水平。

人均生产总值对 AQI 存在反向关系。即在我国现阶段，随着收入水平的提高，人们环保意识也逐步增强，对空气质量要求也随之提升，空气质量情况得到改善。这也表明，我国现阶段经济的发展模式已不是以牺牲生态环境为代价，已

实现了高水平的绿色发展。

第二产业占比与 AQI 存在正向关系。工业发展过程中会消耗了大量能源，排放大量污染气体，加剧了城市空气污染。由此可见，第二产业的化石能源消耗和建筑扬尘是空气污染的重要来源之一。

城市居民生活用电与 AQI 存在正向关系，但是不显著。城市居民生活用电可以在一定程度上反映对能源的消耗，一些发电厂对污染物处理做的不好，导致污染物排放，影响空气质量。但随着对污染物管控的日益严格，大多发电厂对排放物做了完善的处理，因此城市居民生活用电与 AQI 关系并不显著。

城市交通运输与 AQI 存在反向关系，但是关系并不显著。一方面，每万人拥有的公交车数量越多，可设计的公交线路越多，公交车拥挤程度越低，公交出行也会更加方便，减少私家车的使用，从而降低更多的污染物排放。但受限于数据的可得性，使用每万人拥有公共汽车来研究城市交通运输业对空气污染的影响，忽略了客运量及其他运输方式排放出来的空气污染物对空气质量的影响，因此结果并不显著。

工业烟粉尘排放量与 AQI 关系不显著。工业烟粉尘的排放只是可吸入颗粒物和细微颗粒物部分来源，可吸入颗粒物和细微颗粒物在一定程度上影响空气质量，可能因此导致关系不显著。

建成区绿地覆盖率对 AQI 关系不显著。绿色植物虽然能够进行光合作用，减少二氧化碳，增加氧气，分解有毒气体，有助于阻挡地面扬尘发生和沙尘暴袭击。但是，也有可能是城市空气质量不好，从而增加绿地覆盖率，来减少空气污染；而且绿地对空气质量的净化效果有限，对于扬尘的吸附作用有限，因此导致对空气质量的影响不显著。

综上所述：从显著性上看，城市居民生活用电、建成区绿地覆盖率、每万人拥有公共汽车量和工业烟粉尘排放量对全国空气质量的影响未通过10%的显著性水平检验，表明其对空气污染的影响不明显。而人口密度、人均 GDP、第二产业占比这 3 个指标与 AQI 有显著性影响。其中，第二产业占比和城市居民生活用电与 AQI 的相关性最高，这表明第二产业占比和城市居民生活用电是造成我国近几年空气污染的首要因素。从正负影响上看，AQI 与人口密度、第二产业占比和城市居民生活用电呈正相关，表明这些因素对全国空气污染恶化具有明显

的促进作用。而建成区绿地覆盖率、每万人拥有公共汽车数和人均 GDP 与 AQI 负相关，表明这些因素对空气污染具有改善作用。

## 6 结论与政策建议

至此，本文已运用核函数法和空间描述性统计方法分析了我国 2014-2018 年 336 个地级及以上城市空气污染的时空变化规律。利用时间序列聚类对我国 168 个重点城市进行区域划分。同时，又通过混合线性模型对空气污染的社会经济影响因素进行了全面探讨。本章将对上述研究内容做出总结，并联系实际情况提出相应的政策建议，以期为下阶段我国空气污染的防治工作提出科学有效的参考意见。

### 6.1 研究结论

#### 6.1.1 城市空气质量时空变化规律

从时间维度来看，2014-2018 年 AQI 有逐步下降趋势，AQI 年均值下降 15.46，降幅达到 17%，其中 AQI 均值处于 40-100 之间的城市改善幅度最大，AQI 在 0-40 和 100 以上的城市改善幅度最小。逐季来看，AQI 表现出“冬高夏低，春秋居中”的季节分异规律。此外，从 AQI 各季节空气污染的改善情况来看，冬季的改善较大，AQI 季均值降幅达到 22.6%，秋季改善最小，仅下降 9.0%。逐月来看，AQI 月均值在年内呈现出先下降后上升的“U”型走势，每年的 6-8 月为 AQI 的低值区间，12 月、1 月和 2 月为 AQI 高值区间，即冬高夏低的月度变化规律。

从空间分布来看，新疆西部地区、京津冀地区和山东半岛空气污染最为严重，空气污染范围表现出逐年缩小趋势。从空气质量改善幅度来看，改善幅度较大的地区主要为山东半岛城市群和苏南地区，其次为长江中游城市群。空气质量恶化最严重的城市是临汾，此外，山西、江西和广东等地的空气污染水平也均有所提高。逐季来看，空气污染城市数量表现出“冬多夏少，春秋居中”的季节规律。春季中东部地区空气污染范围逐渐收缩且存在逐年向西移动趋势，夏季污染范围无明显变化，秋季空气污染范围以河北南部为中心呈四周向中心缩减趋势，冬季

污染范围也有明显的缩减趋势，空气污染带主要在新疆西部地区、京津冀地区和山东半岛。

### 6.1.2 重点城市空气质量区域划分

根据聚类的结果，本文将 168 个城市分为 6 个不同的城市群：长江流域地区，该地区空气质量总体表现较好，降雨量大且风力作用旺盛，有效抑制地面扬尘发生并有助于大气污染物的扩散、稀释和沉降；京津冀及周边地区，位于秦岭-淮河线以北区域，空气污染严重且波动较大，是我国长期的高污染区。西部地区，地处丘陵、盆地的相对封闭自然条件，常年多静风和微风，空气湿度相对较大，不利于大气污染物的扩散；珠江三角地区，三面环山一面环海，以及受岭南独特的气候条件影响，形成了相对封闭的区域。污染程度最轻，城市气候适宜、地形特殊，部分地区人类活动相对不强烈，因此它们的大气环境优良。并且从相关性角度分了气温、风速、湿度和降雨对空气质量的影响，其中只有温度和空气质量在所有城市中是负相关，其他的气象因素和空气质量指数的相关性不明确，这是由于各地区自然条件不同，并且风速、湿度和降雨对空气质量的影响本身也具有两面性。

### 6.1.3 城市空气污染的社会经济影响因素

从混合线性模型固定效应的结果来看，AQI 与人口密度、第二产业占比、和城市居民生活用电与 AQI 存在显著的正向关系，建成区率的覆盖率、每万人拥有公共汽车数和人均 GDP 与 AQI 负相关。从随机效应角度看，珠三角地区空气质量最好，乌鲁木齐空气质量最差。从模型比较看，考虑区域因素的线性随机效应模型明显由于线性回归模型，因此在分析 AQI 的影响因素时，必须要考虑区域因素。

## 6.2 政策建议

(1) 积极应对区域性及季节性空气质量变化特征，完善适时适地的大气防污治理体系。针对发现的治污重点和难点城市，需要做到因地制宜，而不是大而化

之，如喀什地区的污染主要是  $PM_{10}$ ，沙尘天气多，最合适的措施是采用植树造林的方式缓解大气污染，扩大城市绿地覆盖面积，从而有效吸附尘土；临汾市主要是污染物是  $PM_{2.5}$  和  $SO_2$ ，对此相关部门应对工业企业加大监管，严格控制企业污染物排放量，为企业建立诚信档案，对不诚信行为实施多部门联合处罚，优化产业布局。针对大气污染在冬季呈现爆发持续的趋势，首先应从宏观上加强对空气质量的监测，气象局和环保局应对 AQI 进行实时监测，建立多个监测点，实时监测异常 AQI 值，做到早发现，早治理；其次要从源头治理，冬季对供暖公司的污染物排放进行严格监控，鼓励并补助供暖企业进行排污系统升级；最后应严格执法，对于偷排污染企业做到严惩不贷，提升犯罪成本，维护法律权威，使得工业企业不敢轻易犯罪。春季做到尽早防范西部沙尘天气，提前做好防污治理工作。

(2) 多部门、多区域联合治理，完善大气联防联控机制。应打破地域上的行政边界，成立一个职能部门，令其参与监督管理多个地市的大气治污工作，如在长江流域地区，京津冀地区，西部地区，东北等地区，珠三角地区，新疆地区成立六个职能部门，统一制定区域内大气治污政策，管理区域内大气治理工作，从而形成一体化的空气治理体系，建立有效的大气污染联防联控机制，有效避免“以邻为壑”和“搭顺风车”行为，做到区域内城市绿色健康发展，进而实现全国空气环境的改善。

(3) 践行新发展理念，做到健康绿色可持续发展。本文研究虽然已证明整体上我国目前已不是以牺牲环境为代价发展经济，但应意识到，我国仍然存在不健康发展的风险。因此，应完善官员和企业的考核指标，将绿色排放纳入考核体系中：官员政绩的考核需要考察绿色面积，政府招标会考察企业的绿色排放量。这将为改善空气治理提供源源不断的动力，真正实现又好又快发展。

(4) 协调城市发展不平衡的问题，加快构建城乡一体化。本文分析得出人口密度会加重大气污染，城市发展的不平衡导致居民向大城市流动，加重大城市的大气污染，同样农村居民向城市流动也会加剧城市污染。因此，应改善不发达城市的发展水平，科学规划城市发展，促进农村发展，实现劳动力回流，既可改善大城市空气治理，又可促进小城市和农村的经济发展。

## 参考文献

- [1]刘晓红.中国城市雾霾污染的时空分异、动态演化与影响机制[J].西南民族大学学报(人文社科版),2019. 40(2):98-113.
- [2]龚鹏鹏. 基于空间统计方法的空气质量影响因素研究——以北京市为例[D].北京: 首都经济贸易大学, 2016
- [3]潘月云等.2015年9月珠江三角洲一次区域大气污染过程特征分析[J].环境科学与技术,2017.40(1):188-192.
- [4]Streets, D.G., et al. Air Quality During The 2008 Beijing Olympic Games[J]. Atmospheric Environment, 2007. 41(3): 480-492.
- [5]Huang, Q. An Integrated MM5-CAMx Modeling Approach for Assessing PM<sub>10</sub> Contribution from Different Sources in Beijing, China[J]. Journal of Environmental Informatics, 2010. 15(2): 47-61.
- [6]陈彦军等.基于GIS的珠三角区域空气质量时空演化分析模型研究[J].中国环境监测,2012.28(5):136-141.
- [7]许燕婷,刘兴诏和王振波.基于AQI指数的中国城市空气质量时空分布特征[J].广西师范大学学报(自然科学版),2019.37(1):187-196.
- [8]贺冉冉,朱兰保和周开胜.基于时间序列模型残差的中国东部地区空气质量指数(AQI)空间自相关特征分析[J].环境科学学报,2017.37(7):2459-2467.
- [9]Dai, W. and L. Yi. Spatio-Temporal Differences and Driving Forces of Air Quality in Chinese Cities[J]. Journal of Resources & Ecology, 2016. 7(2): 77-84.
- [10]孔锋等.中国空气污染指数时空分布特征及其变化趋势(2001-2015)[J].灾害学,2017.32(2):117-123.
- [11]刘永伟等.基于GIS的中国API指数时空分布规律研究[J].生态环境学报, 2013.22(8):1386-1394.
- [12]Gao, H., et al. A Study of Air Pollution of City Clusters[J]. Atmospheric Environment, 2011. 45(18): 3069-3077.
- [13]王斌.利用空气污染指数(API)分析我国空气污染的时空变化特征[D].青岛:中国海洋大学,2008

- [14]Pierpaolo D Urso, L.D.G.R. Time Series Clustering by A Robust Autoregressive Metric with Application to Air Pollution[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2015. 141(15): 107-124.
- [15]曲歌.我国空气质量区域联动性及典型地区影响因素探究[D].北京:首都经济贸易大学,2018
- [16]张琪敏.赵景波.2004年中国典型城市大气污染现状及污染差异分析[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2007. 25(2):33-36.
- [17]杨赐陆.空气质量影响因素及污染防治对策[J].化学工程与装备,2020.277(2):257-258.
- [18]武力等.永州市大气污染变化特征及其防治对策[J].绿色科技,2020, 72(2):57-61.
- [19]Vardoulakis, S. and P. Kassomenos. Sources And Factors Affecting Pm<sub>10</sub> Levels In Two European Cities: Implications For Local Air Quality Management[J]. Atmospheric Environment, 2008. 42(17): 3949-3963.
- [20]Giorgi, F. and F. Meleux. Modelling The Regional Effects of Climate Change on Air Quality[J]. Comptes Rendus Geosciences, 2007. 339(11-12): 0-733.
- [21]高煜中等.气象条件变化对哈尔滨市空气质量的影响[J].气象科技2003.31(6): 361-365.
- [22]刘焱.京津冀地区空气质量状况及其与气象条件的关系[D].长沙:湖南师范大学,2010
- [23]Çelik, M.B. and X.B. Kadi. The Relation Between Meteorological Factors and Pollutants Concentrations in Karabük City[J]. Gazi University Journal of Science, 2007.20(4):87-95.
- [24]Turk, Y.A. and M. Kavraz, THE RELATION BETWEEN SOME METEOROLOGICAL FACTORS AND AIR POLLUTANTS IN TRABZON CITY[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2010. 19(4a): 721-729.
- [25]刘杰等.基于气象因素的PM(2.5)质量浓度预测模型[J].山东大学学报(工学版), 2015.45(6): 76-83页.
- [26] Li Y, Chen Q, Zhao H, et al. Variations in PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in an Urban

- Area of the Sichuan Basin and Their Relation to Meteorological Factors[J].  
Atmosphere,2015.6(1):150-163
- [27]Zhang, R.H., L.I. Qiang and R.N. Zhang. Meteorological Conditions for the  
Persistent Severe Fog and Haze Event over Eastern China in January 2013[J].  
Science China Earth Sciences, 2014.57(1): 30-39.
- [28]周甘霖.兰州市空气污染特征及其与气象条件关系研究[D].兰州：兰州大学，  
2012
- [29]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
- [30]Cole, M.A. and E. Neumayer. Examining the Impact of Demographic Factors on  
Air Pollution[J]. 2004. 26(1): 5-21.
- [31]Fenger, J. Urban Air Quality[J]. Atmospheric Environment, 1999. 33(29):  
4877-4900.
- [32]姜磊,周海峰和柏玲.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[J]. 地理科学, 2018.38(3):351-361.
- [33]郭军,孟守卫和赵瑞琴.河南经济资源环境之间的数量关系分析[J].河南社会科  
学,2005.13(6):148-150.
- [34]Jiang L, Zhou H F, Bai L, et al. Does Foreign Direct in Investment Drive  
Environmental Degradation in China An Empirical Study Based on Air Quality  
Index from A Spatial Perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2017.176(3):  
864-872.

## 后记

光阴似箭，日月如梭，三年的硕士研究生求学即将结束。回想期间的学习和生活，面对培育我的母校，心中无限感慨。

本篇硕士学位论文是在黄恒君老师的亲切关怀和耐心指导下完成，从选题确定、论证方式及基础资料的收集无不倾注着黄老师的心血和汗水，使我把握了论文的正确写作方向，顺利地完成了论文的写作，在此表示最诚挚的谢意！

非常荣幸能够成为黄恒君老师的硕士研究生，黄老师三年来始终保持着认真负责的教学原则，一丝不苟的学术精神，精益求精的工作作风和诲人不倦的师者风范，这些优秀的品质一直深深地感染和激励着我。在硕士期间，黄老师耐心地指导和帮助我完成了学术论文的撰写，从中不仅让我学习到了作为学者应该具有的基本学术素养和学术规范，还激起了我对科学研究的浓厚兴趣。此外，黄老师不仅是我学业上的导师，更是我生活中必不可少的知心朋友。无论是在校园生活还是生活中遇到困难，黄老师都会给予真挚且富有参考性的建议，并鼓励我克服困难勇往直前。在此，本人对黄老师三年来辛勤的付出再次表示诚挚的感谢以及真心的祝福，希望黄老师在未来的工作中能够一帆风顺、健康幸福！