

学号_____

密级_____

武汉大学本科毕业论文

基于大气信息的专题数据分析技术研究

院（系）名 称：遥感信息工程学院

专 业 名 称 ： 地理国情监测

学 生 姓 名 ： 祝琳

指 导 教 师 ： 肖锐 讲师

陈楠 高级工程师

二〇一八年六月

郑 重 声 明

本人呈交的学位论文，是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，所有数据、图片资料真实可靠。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确的方式标明。本学位论文的知识产权归属于培养单位。

本人签名：_____

日期：_____

摘 要

大气污染已经成为了全球关心的问题，湖北省地处中国中部、长江中下游地区，具有特殊的地理环境特征。随着省内经济水平的提高以及居民对健康环境需求的增大，对湖北省近几年的大气污染的时空分布特征进行分析，评价省内空气质量状况对省内经济与生态的可持续发展具有重要的意义。

本文利用湖北省大气环境监测站所收集到的 2015-2017 年空气污染物日均浓度监测数据，以环境空气质量指数 (AQI) 以及湖北省三大主要空气污染物 ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , O_3) 为研究对象。首先，对湖北省大气污染物浓度随着时间的变化特征进行探索，分析大气污染物的时间分布差异；之后，针对不同的大气污染物比较不同空间插值模型和参数下的插值精度，选择最合适的插值结果对省内大气污染物进行整体的趋势分析；最后，利用正交经验函数对湖北省三大主要空气污染物进行时空分解，与之前的大气污染物时空特征分析结果进行比较，分析 2017 年三种污染物的空间上区域分布特征以及浓度随时间变化的差异。本文的研究结果如下：

- 1) 湖北省的空气质量状况在 2015-2017 整体呈现好转的趋势。作为湖北省内的三大主要空气污染物，颗粒污染物所占的污染比重在三年间始终保持最高值但是其对大气质量的影响时间和影响的空间范围在逐年减小，相比之下臭氧污染的情况逐年加重。
- 2) 在大气污染物的空间分布特征上，湖北省的空气污染严重地区主要集中在以襄阳、荆州、宜昌、武汉为首的中部城市地区，在 2015-2017 年间各个城市的空气污染状况有逐年改善的趋势，全省境内以神农架林区为主的省西部地区空气质量情况最佳。
- 3) 在湖北省内不同空气污染物之间，污染物浓度的时间分布特征以及空间分布特征具有明显的差异。其中颗粒污染物的高浓度时间主要发生在冬季集中分布在鄂中地区；臭氧的高浓度时段主要发生在夏季集中分布在鄂东地区并在近几年间有向北部扩散的趋势。

关键词：空气质量；地统计插值；时空分析；GIS

ABSTRACT

Hubei province is located in the center of China and has special geographical features. With the development of provincial economical level and the increased demand for healthy environment, it is meaningful to analyze the spatial-temporal characteristics of air quality in the latest few years for Hubei province. The research results would serve a great function on formulating environment protection policies and other parts.

This article focuses on three major air pollutants ($PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3) and uses the daily average air pollutant concentration monitoring data from 2015-2017 collected by Hubei Atmospheric Environment Monitoring Station to evaluate the atmospheric environmental quality level in Hubei province. Firstly, the temporal characteristics of air pollutants were been analyzed; then, by comparing the accuracies of different interpolation methods for air pollutant concentration monitoring data, the best interpolation method is chosen and the trend of spatial distribution for air pollutants is presented. Finally, using orthogonal experience function to do space-time decomposition for air pollutants. Overall, the results could be summarized to three parts.

- 1) The air quality situation in Hubei province showed an improvement trend in 2015-2017. As the three major air pollutants in Hubei Province, the proportion of particulate pollutants has remained the highest in three years, but its impact on atmospheric quality and the spatial extent of the impact have been decreasing year by year. In the contrast, the situation of ozone pollution became more serious.
- 2) For the spatial distribution characteristics of air pollutants, the most polluted cities in Hubei Province are concentrated in Xiangyang, Jingzhou, Yichang and Wuhan. In the western part of the province (Shennongjia area) has the best air quality in Hubei.
- 3) There are significant differences in the spatial-temporal distribution characteristics of pollutant concentrations between different air pollutants in Hubei province. The high concentration time of particulate pollutants mainly occurs in winter in the central Hubei region. The high concentration period of ozone mainly occurs in the eastern Hubei in summer and has spread to north in recent years.

Keywords: Air quality; Geostatistical interpolation; spatial-temporal analysis; GIS

目 录

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 空气污染物的时空特征分析.....	1
1.2.2 空气污染物的影响因素分析.....	2
1.3 研究内容.....	2
1.4 技术路线.....	3
1.5 论文组织结构.....	4

第二章 研究区域概括与数据介绍

2.1 研究区域概况.....	5
2.2 数据采集和来源.....	5
2.3 本章小结.....	6

第三章 湖北省大气环境污染时间分布特征分析

3.1 2015-2017 年湖北省主要污染占比统计.....	7
3.2 湖北省主要污染物浓度逐日变化特征.....	8
3.2.1 AQI 值逐日变化特征分析.....	8
3.2.2 颗粒物污染物逐日变化特征分析.....	9
3.2.3 臭氧逐日变化特征分析.....	11
3.3 湖北省大气污染物季节变化特征.....	12
3.4 本章小结.....	12

第四章 湖北省大气环境污染空间特征分析

4.1 2015-2017 年湖北省 17 个重点城市污染状况分析.....	13
4.1.1 2015-2017 年湖北省 17 个重点城市空气质量达标率分析.....	13
4.1.2 2015-2017 年湖北省 17 个重点城市重污染天数统计.....	14
4.2 空间插值方法原理介绍.....	15
4.2.1 确定性插值.....	16
4.2.2 基于地统计插值.....	17
4.3 探索性数据分析.....	22
4.3.1 数据正态性检验.....	22
4.3.2 数据趋势性分析.....	24

4.3.3	空间自相关及方向变异分析.....	24
4.4	空间插值方法模型的选取.....	25
4.5	污染物的空间分布特征分析.....	27
4.5.1	AQI 空间分布特征.....	29
4.5.2	颗粒物污染的空间分布特征.....	29
4.5.3	臭氧的空间分布特征.....	31
4.6	本章小结.....	31
第五章 湖北省空气污染物时空变化的 EOF 分析		
5.1	经验正交函数原理介绍.....	33
5.1.1	经验正交函数（EOF）分析	33
5.1.2	旋转经验正交函数（REOF）分析	34
5.2	污染物时空变化 EOF 分析.....	35
5.2.1	颗粒物污染的时空变化 EOF 分析	35
5.2.2	臭氧的时空变化 EOF 分析	37
5.3	本章小结.....	37
第六章 结论与展望		
6.1	结论	39
6.2	存在的问题及展望	39
参考文献		41
致 谢		43

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

工业化、城市化的快速发展不仅推动了社会经济的发展也加速了对煤炭、天然气、石油等能源的消耗，能源燃烧所产生的有害气体加重了空气污染情况，并且其影响范围和程度也一直保持着扩大和加重的趋势。空气污染成为了全球关注的社会性问题。

当前中国的空气污染状况加剧，很多城市的空气质量状况不容乐观。特别是冬季期间，空气中的悬浮颗粒和可吸入颗粒所引发的雾霾天气成为了人们日常生活和健康的巨大威胁。总结来看中国城市的大气污染情况主要有以下五大特点^[1]：

1. 悬浮颗粒物和可吸入颗粒物是影响城市空气质量的主要污染物成分，
2. 燃煤是加重空气污染的主要原因，
3. 基于现今城市地区的高人口密度和低绿化面积的现状，改善空气质量的任务艰巨，
4. 许多城市不惜牺牲环境来追求经济的发展；
5. 北方空气污染状况比南方严重，大城市空气污染状况比中小城市严重。

从宏观意义上来讲，研究大气信息的专题数据涉及到对大气污染物的时空分布特征等的分析所获得的成果对环境的可持续发展以及气候变化的预测等方面都具有非常重要的意义。从微观意义上来说，通过对大气信息的专题数据进行分析，决策者们可以获得不同污染物的分布信息，这些都为城市的合理规划、能源的有效利用等提供的重要的依据。

湖北省空气质量状况逐年好转但改善任务仍然任重道远。根据《2017 年湖北省环境空气质量报告》，全省空气质量情况较去年相比有所改善，但仅神农架林区达到年均二级标准。17 个重点城市空气优良天数比例平均为 79.1%；其中二氧化硫、二氧化氮、可吸入颗粒物、细颗粒物、一氧化碳年均浓度相比 2016 年分别下降 22.2%、7.1%、9.4%、9.3%、5.6%；二氧化氮浓度相比 2016 年来说上升 7.7%，臭氧（O₃）浓度保持不变^[2]。湖北省作为长江中游城市群中的重要区域引领着中部的崛起，因此研究湖北省的空气污染时空分布特征及其演化规律对我国中部地区的环境规划、产业布局等方面的完善具有重要的意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 空气污染物的时空特征分析

随着 GIS 技术的发展，国内外许多学者运用 GIS 技术来分析大气中污染物的时空分布特征，来为大气污染的预测和治理提供依据。特别是随着空间插值方法的广泛运用，科学家们利用地统计的方法将监测点数据转换成区域数据而代替了最开始利用单个监测点数据代替整个区域浓度值得情况，更加准确地展现了某个区域内空气污染物的分布情况。

马小明和孟健在对 SO_2 的空间变异的特征的分析上结合了克里格插值方法并且以此为依据定义了大气指示函数^[3]；在对巴黎城市周围空气质量监测站的 NO_2 的日监测浓度进行时空分析过程中，R.Romanpawicz 等比较分析了不同的空气污染物浓度的时空插值方法^[4]；Clins 等对不同插值模型在气象要素上的运用进行了系统的比较分析，在不同时间和区域内不同模型的插值误差大小明显不同^[5]；Bytnerowicz 等针对臭氧在喀尔巴千山脉森林的时空分布特征的研究对不同空间插值模型进行了对比^[6]；在大范围的研究区域中，通过对月降水量均值的插值分析，Tabios 发现克里金插值方法比反距离加权和泰森多边形等更精确^[7]；郝明途等^[8]通过对济南市的颗粒污染物浓度的分析发现在冬季（即北方供暖季节） PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染严重。

1.2.2 空气污染物的影响因素分析

空气中各种污染物的浓度值收到了多种因素的影响如地形因素，天气情况和不同地区的工业污染源等，许多研究者结合多种概率函数来分析空气中污染物浓度的分布情况和影响因子。多项研究表明，气象条件是影响空气质量的重要因素，许多高污染天气的发生都与气象条件的变化有关^[9]。Chaloulakou 对大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度影响条件分析中发现，风速和温度的变化对颗粒污染物特别是 PM_{10} 的浓度影响显著^[10]USEPA 的研究表明由于不断变化的气候状态以及冷暖气流交替变化等因素， O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 等污染物浓度都受到了一定程度的影响^[11]Hussein 通过研究发现颗粒物污染物的浓度与相对湿度、温度、风速等气象因素有着密切的关系^[12]。国内何宗健等通过采集南昌市的监测站点的颗粒物浓度数据发现城市中空气质量的分布与城市功能区有着密切的关系，其中颗粒物污染最严重的地区主要分布在交通干线上，工业区位居第二而城市的远郊地区空气质量最好^[13]。

1.3 研究内容

本论文将湖北省大气中的三种主要污染物（ O_3 , PM_{10} , $PM_{2.5}$ ）以及 AQI 值作为研究对象，对 2015-2017 年大气污染物监测浓度数据进行整理和分析，来研究湖北省大气环境污染的时空变化特征并对其大气环境质量进行综合性评价，获得湖北省境内大气环境在不同时间和地区的优劣程度，本论文的研究思路具体如下：

(1) 数据的收集与整理

1) 研究的所有数据都来自湖北省空气质量联网监测平台，按日、月、年的时间分类方法以及城市与站点分类收集空气质量监测数据并整理成可利用的数据

(2) 空气质量总体情况分析

1) 利用综合污染指数法对湖北省大气环境质量进行综合评价，对湖北省整体空气质量情况进行时空分析，分析获得大气环境质量在不同的地点和不同的时间上的优劣程度，探索获得湖北省的主要污染物和主要污染城市

2) 对湖北省主要空气污染城市进行分析，统计不同级别天气情况的天数和各种污染物浓度的变化趋势

(3) 颗粒物污染特征和污染趋势分析

1) 将颗粒污染物作为具有空间连续性的区域化变量进行处理，运用空间插值的方法对浓度数据进行分析 and 估算生成趋势表面，分析颗粒污染物在湖北省范围内的时空变化特征

2) 根据颗粒物日均浓度进行旋转经验正交函数（REOF）分析，得到湖北省地区颗粒物浓度的 4 类空间分布模态以及时间系数（时间系数与污染物浓度变化同步，时间系数大于零则污染物浓度升高）

(4) 臭氧污染特征和污染趋势分析

1) 将臭氧作为具有空间连续性的区域化变量进行处理，运用空间插值的方法对浓度数据进行分析 and 估算生成趋势表面，分析臭氧在湖北省范围内的时空变化特征

2) 根据臭氧日均浓度进行旋转经验正交函数（REOF）分析，得到湖北省地区臭氧浓度的 4 类空间分布模态以及时间系数（时间系数与污染物浓度变化同步，时间系数大于零则污染物浓度升高）

1.4 技术路线

根据本论文的研究内容所制定的技术路线如图 1.1。

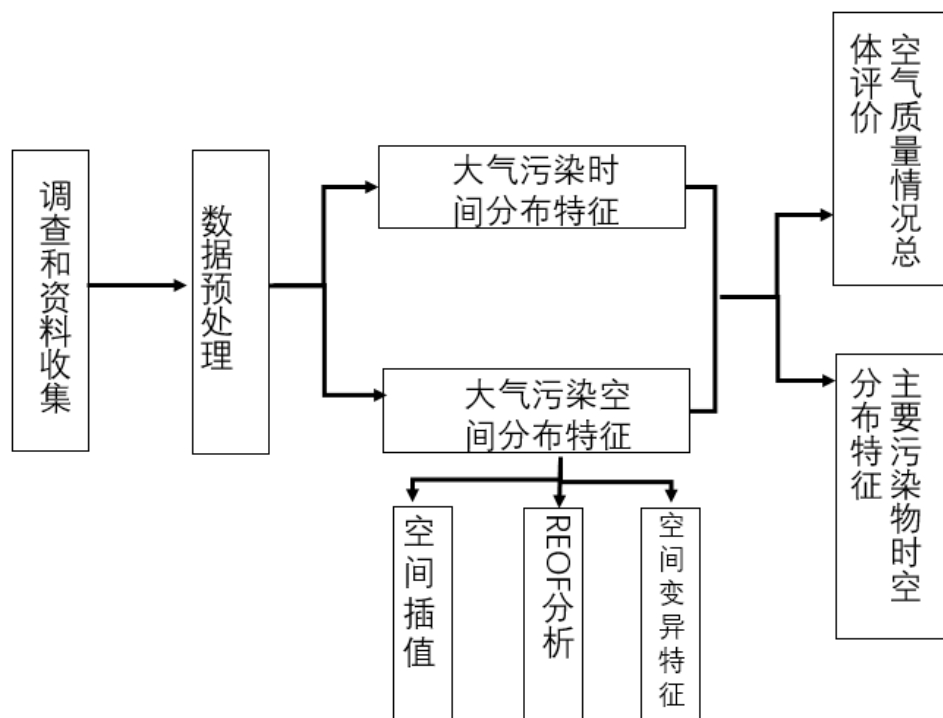


图 1.1 技术路线

1.5 论文组织结构

本论文主要分为六个部分：

第一章：论文的综述部分，介绍了本论文的研究意义与背景、国内外相关的研究现状以及本论文的具体内容介绍

第二章：该部分对研究区域以及研究所用的数据进行了具体介绍

第三、四、五章是论文的主体部分，介绍湖北省大气污染物浓度时空变化特征的研究方法，包括污染物浓度的空间插值，利用经验正交函数方法对污染物浓度进行时空分析

第六章是本论文的结论，包括研究结论和研究成果的未来展望。总结了本研究的主要研究成果，分析本文的不足之处和未来的改进方向。

第二章 研究区域概括与数据介绍

2.1 研究区域概况

湖北省地处于中国地势第二阶梯向第三阶梯的过渡带，位于长江中下游地区，东经 $108^{\circ}21'42''\sim 116^{\circ}07'50''$ 北纬 $29^{\circ}01'53''\sim 33^{\circ}16'47''$ ，全省总面积有 18.59 万 km^2 。湖北省的整体轮廓略呈向南开放式椭圆形盆地，其中平原湖区占 20%，丘陵岗地占 24.5%，山原和山地占 55.5%；以丹江口-荆门-宜昌-松滋线为界，以西为鄂西山地，向东则为鄂中鄂东地区。湖北总体属于亚热带季风性湿润气候，北部接近我国北亚热带北界，南部跨越中亚热带的北界，从三峡谷地向东沿长江一线至鄂东河谷地带及鄂东南地区属于“中亚热带”气候；全省具有从亚热带向暖温带过渡的特征。

2.2 数据采集和来源

本文中所使用的大气污染物浓度数据来自湖北省环境监测中心站所开发管理的湖北省环境空气质量监测数据管理系统。监测数据为布设在湖北省内 51 个国控监测站连续、自动监测系统监测的浓度日均值数据，监测时间为 2015 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日。涉及的监测项目包括 AQI, SO_2 , NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, O_3 , CO。研究区域以及湖北省内国控站点点位分布情况如图 2.1 所示。

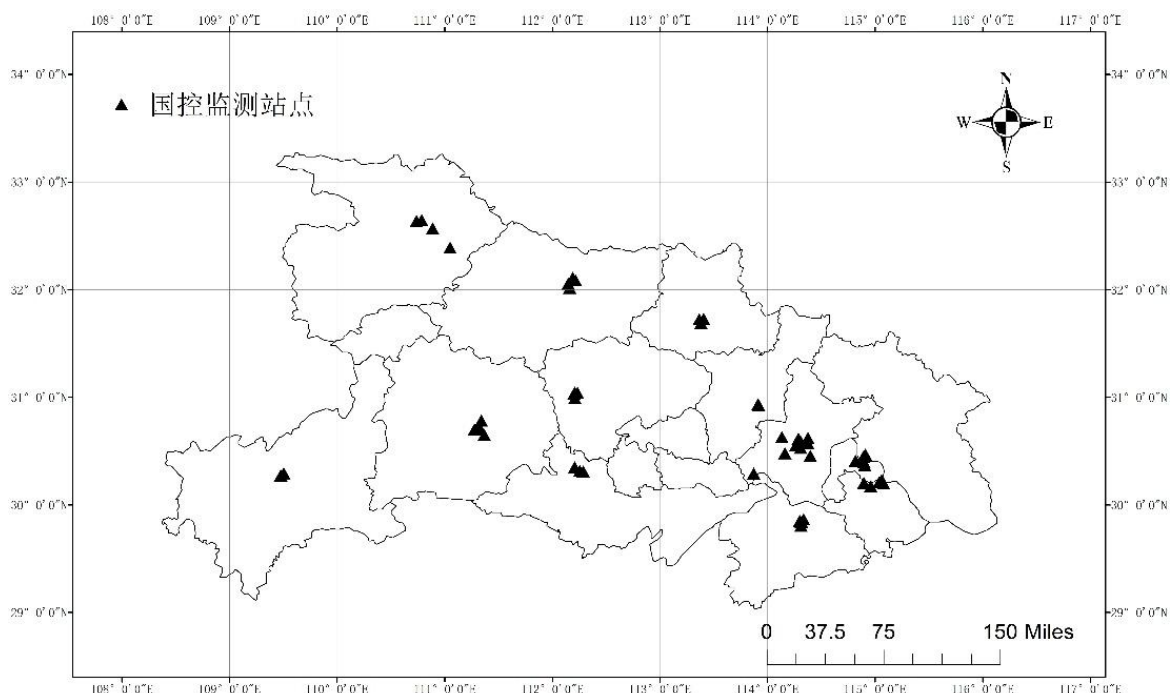


图 2.1 研究区域及监测点位分布图

2.3 本章小结

本章对研究区域湖北省的自然环境特征做了说明，了解了研究区域特殊的地理位置和气候状况，同时介绍了本研究所需数据的来源以及性质，阐述了在本研究当中对数据处理的具体方法，保证了研究数据的精度和完整性。

第三章 湖北省大气环境污染时间分布特征分析

3.1 2015-2017 年湖北省主要污染占比统计

在探索湖北省主要污染物之前计算各种污染物之间的相关系数探索他们之间的相关关系，如图 3.1 所示。从计算结果可知，湖北省内的总体空气质量指标值主要受到污染物 $PM_{2.5}$ 的影响，AQI 和 $PM_{2.5}$ 之间的相关系数达到 0.94。对于湖北省地区的大气污染物来说， PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 之间的相关性最高相关系数达 0.93，两者具有相似的浓度变化趋势。相对来说， O_3 和其他污染物之间呈现负相关关系，浓度随时间的变化趋势与其他五种污染物相反。

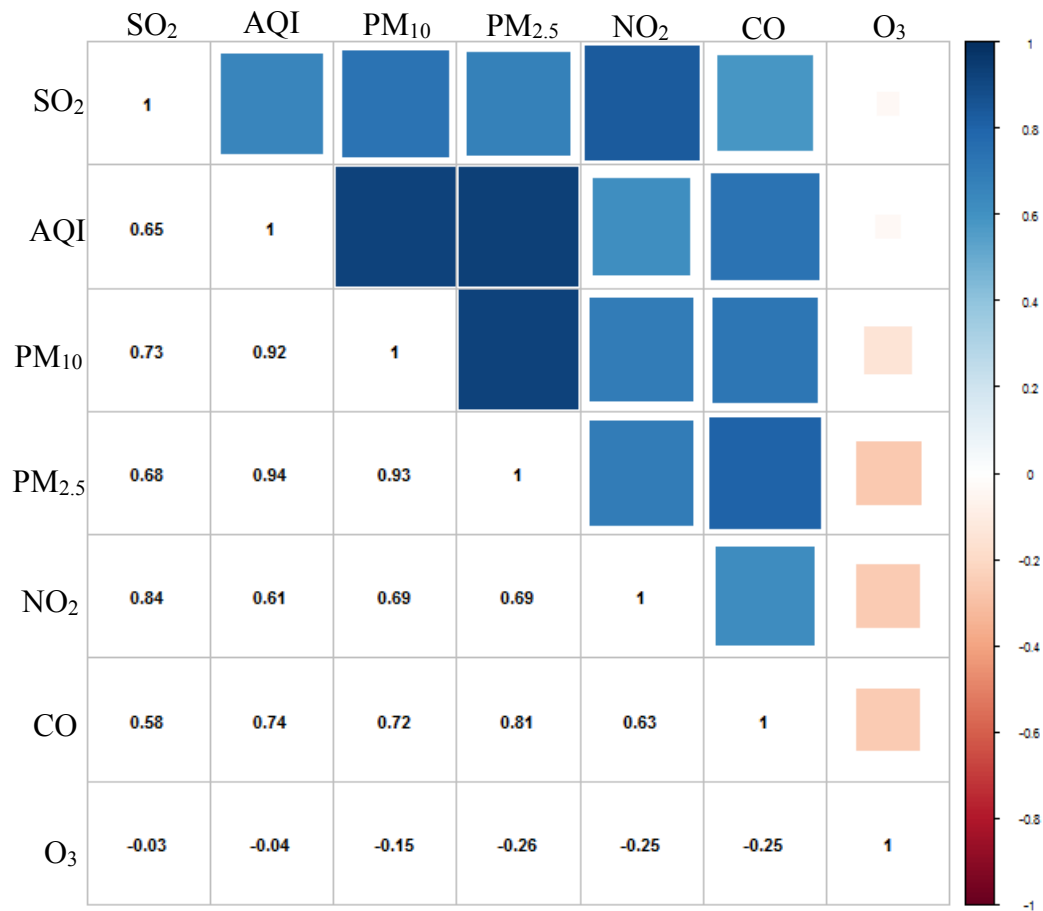


图 3.1 各个污染物之间的相关系数

本文以湖北省的三大主要污染物为研究对象，在具体分析之前利用 2015-2017 年湖北省首要污染物统计报表，获得连续三年来湖北省主要污染物的分布情况，如表 3.1 所示，具体统计比例如图 3.2 所示。在 2015-2017 年间 $PM_{2.5}$, O_3 和 PM_{10} 始终都为湖北省的三大主要污染物，其中 $PM_{2.5}$ 作为首要污染物的污染天数比例在

三年中都排名第一但由 2015 年的 64.43%下降至 46.8%。相反，O₃ 作为首要污染物的天数比重逐年加大从 2015 年的 20.05%上升至 2017 年的 30.08%。

表 3.1 主要污染物所占天数统计

年份	污染物类型	所占天数(天)	所占比例(%)
2017	PM _{2.5}	136	46.8
	O ₃	86	30.08
	PM ₁₀	62	22.14
2016	PM _{2.5}	165	55.11
	O ₃	78	25.64
	PM ₁₀	57	18.99
2015	PM _{2.5}	202	63.43
	O ₃	64	20.05
	PM ₁₀	56	17.55

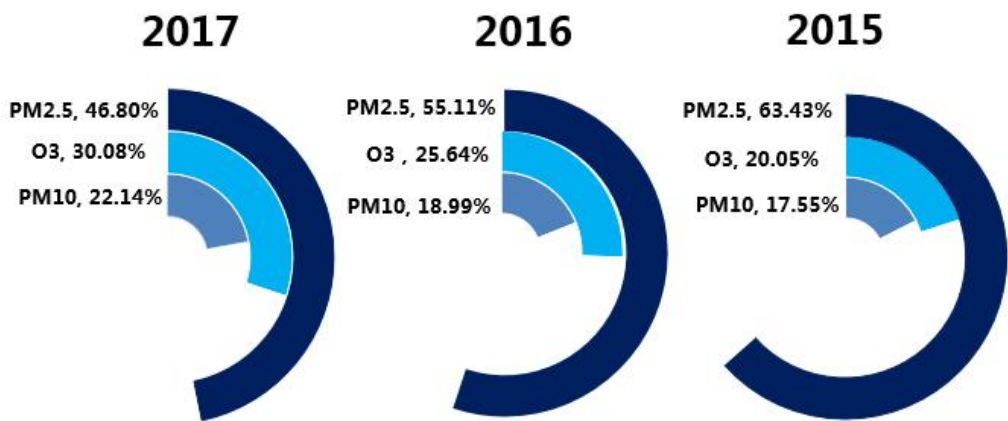


图 3.2 2015-2017 年主要污染物比例比较

3.2 湖北省主要污染物浓度逐日变化特征

3.2.1 AQI 值逐日变化特征分析

空气质量指数（Air Quality Index）是用来描述空气质量状况的无量纲指数^[14]。AQI 的计算和评价的过程大致可以分为三个步骤：1）依照不同类型污染物的分级方法设定浓度阈值，并使用 PM_{2.5}，PM₁₀，SO₂，NO₂，O₃，CO 等污染物被测量。浓度值分别用于计算相应的空气质量指数（IAQI）；2）从每种污染物的 IAQI 中选择最大值作为 AQI。当 AQI 大于 50 时，IAQI 得到最大化。相应的污染物被确定为主要污染物；3）根据 AQI 分级标准。确定空气质量水平，类别，并指示颜色，健康影响和建议的操作。概括来说，AQI 是每种污染物的空气质量指数（IAQI）的最大值。当 AQI 大于 50 时，相应的污染物是主要污染物^[15]。表 3.2^[14]显示了不同空气质量指数值所代表的相关信息。

表 3.2 空气质量指数及相关信息

空气质量指数	空气质量指数级别	空气质量指数类别	对健康影响情况
0-50	一级	优	空气质量状况良好
51-100	二级	良	空气质量可接受, 对少数极易感人群来说少数污染物会对其有轻微影响
101-150	三级	轻度污染	易感人群对空气中污染物的反应加剧, 污染物会刺激部分正常群体
151-200	四级	中度污染	易感人群对空气中污染物的反应更加强烈, 污染物同时对正常人群的心脏、肺等器官有所损害
201-300	五级	重度污染	心脏病和肺病患者症状变得更加严重, 健康人群普遍开始出现不同程度的症状
>300	六级	严重污染	健康人群也表现出对污染天气的强烈反应并体现出某些疾病症状

图 3.3 根据 AQI 指标水平对 2015-2017 年湖北省空气质量指数进行分割并可视化可以看出 2015-2017 这三年期间湖北省空气质量逐年改善重污染天数也在逐年减少, 重污染天数发生的时间也主要集中在秋冬季节。

2015~2017年度湖北省空气质量水平可视化
数据根据AQI指标水平进行分段分割

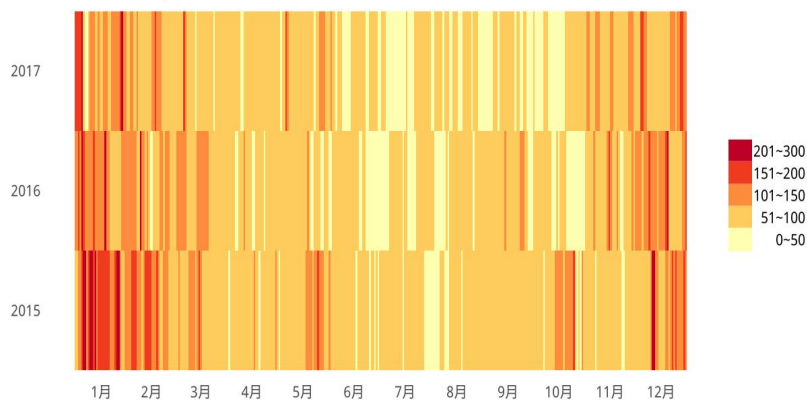


图 3.3 2015-2017 年度湖北省空气质量水平可视化

3.2.2 颗粒物污染物逐日变化特征分析

表 3.3 2015-2017 年颗粒物污染物浓度日历图



表 3.3 中所列的为 2015-2017 年间颗粒物污染物 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的日历图。2015-2017 年期间 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的浓度值总体下降，影响的时间范围逐年减小，两污染物浓度的高值发生时间主要集中在冬季，2015-2017 年间 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度高于 150 微克/立方米的天数分别为 9、4、2 天和 54、29、23 天；湖北省夏季 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的浓度较低，2015-2017 年间 PM_{2.5} 浓度低于 35 微克/立方米的天数分别为 50、105 和 140 天 PM₁₀ 浓度低于 50 微克/立方米的天数分别为 32、67 和 89 天。

3.2.3 臭氧逐日变化特征分析

表 3.4 2015-2017 年 O₃_8h(90 百分位) 浓度日历图

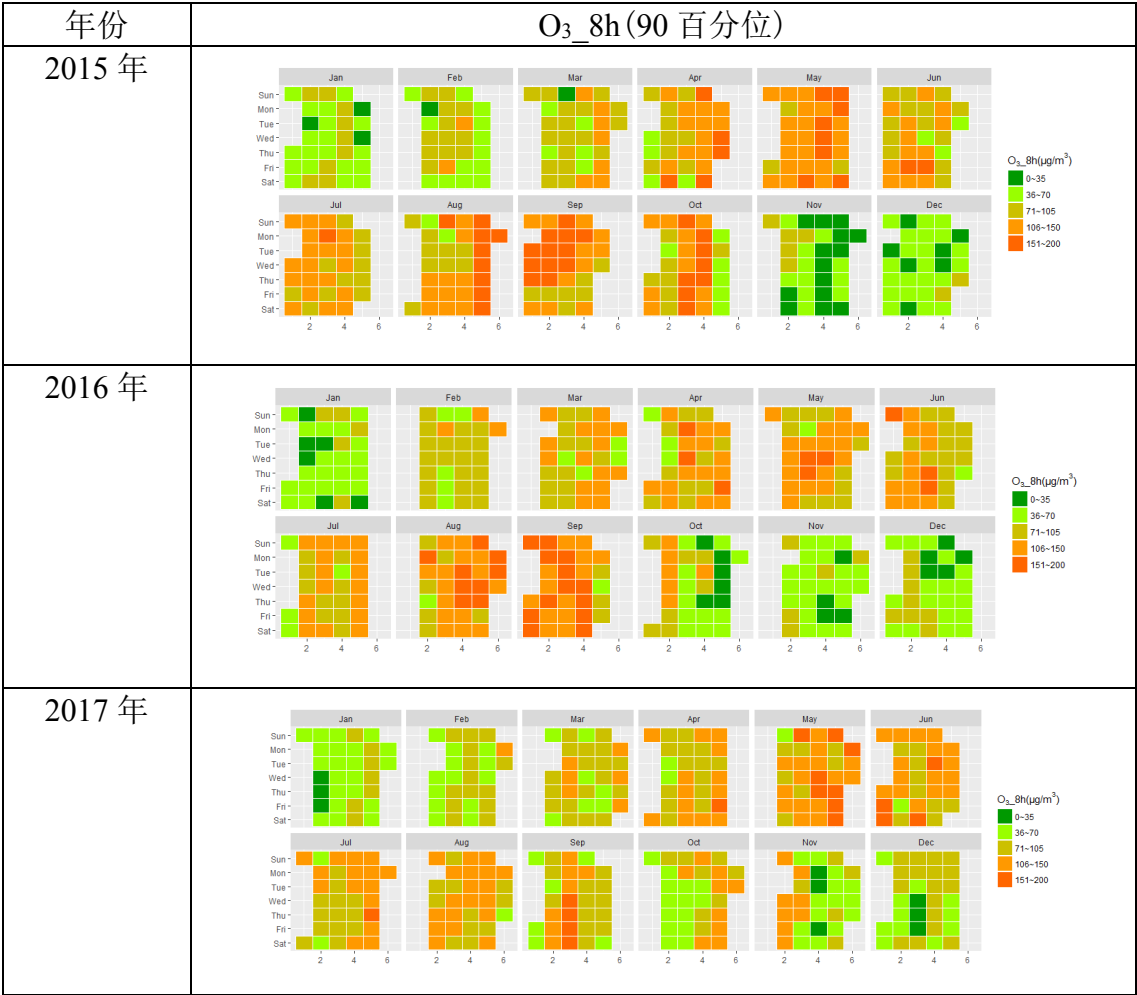


表 3.4 中所列的为 2015-2017 年间 O₃_8h(90 百分位) 浓度的日历图。2015-2017 年期间，湖北省内 O₃_8h(90 百分位) 浓度总体数值上减小但是影响的时间范围变大，其浓度的高值发生时间主要集中在春季和夏季，2015-2016 年间 O₃_8h(90 百分位) 浓度高于 150 微克/立方米的天数分别为 9、4 和 2 天。冬季期间 O₃_8h(90 百分位) 浓度的浓度总体较低，2015-2017 年期间 O₃_8h(90 百分位) 浓度低于 35 微克/立方米的天数分别为 50、105 和 140 天。

3.3 湖北省大气污染物季节变化特征

针对湖北省大气污染物的季节变化特征的探索，图 3.4 展示了 2017 年不同月份里不同空气质量类别所占的天数，可知湖北省在冬季期间空气质量为优良的天数少 12-2 月期间优良天数共 48 天占全年空气质量优良总天数的 15.9%，同时冬季也是全省重污染天气发生最多的季节。图 3.5 展示了空气质量六参数在 1-12 月份期间的浓度变化情况。其中臭氧浓度随时间变化的趋势与其他五种污染物的趋势相反，其浓度水平在冬季较低在夏秋季节升高。

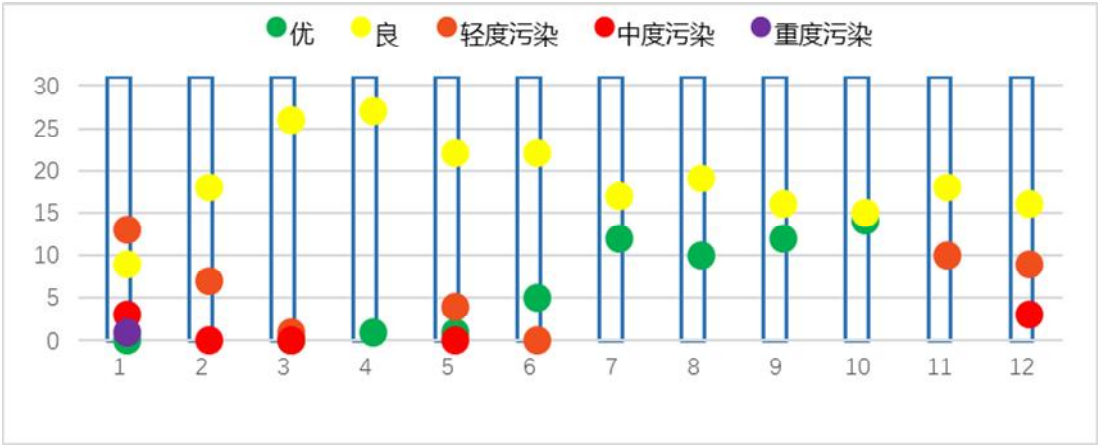


图 3.4 2017 年各级别空气质量天数统计

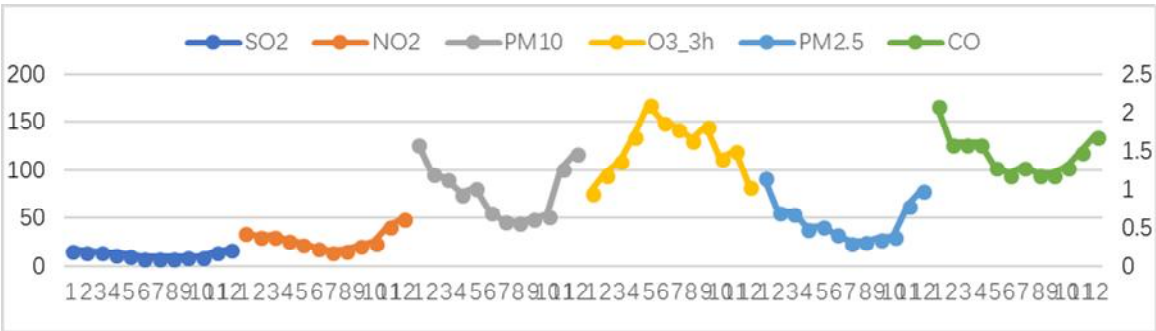


图 3.5 2017 年污染物月均浓度统计

3.4 本章小结

本章借助各种可视化分析方法分析湖北省空气质量以及大气主要污染物的时间分布特征。首先通过计算各个污染物之间的相关系数分析空气中主要的六种污染成分之间的相关关系，通过统计数据得知 2015-2017 年期间 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 为湖北省三大主要空气污染物。2015-2017 年期间，湖北省空气污染状况逐年改善，颗粒物污染的影响时间逐年减少，相比之下臭氧的污染情况加重。不同大气污染物的浓度分布季节性差异明显，颗粒物污染物高浓度发生时间主要集中在夏季，臭氧的高浓度发生时间主要集中在冬季。

第四章 湖北省大气环境污染空间特征分析

4.1 2015-2017 年湖北省 17 个重点城市污染状况分析

4.1.1 2015-2017 年湖北省 17 个重点城市空气质量达标率分析

空气质量达标率是指区域内城镇空气质量优良以上的监测天数占全年监测总天数的比例，利用城市的空气质量达标率可以获知空气质量较好的城市分布情况。如图 4.2 展示了全省 17 个重点城市空气质量达标率在 2015-2017 年间极值得变化情况。2017 年全省空气质量达标率范围在 65.2%-95.6%之间，各个城市的达标率都有提升达标率的极小值从 2015 年的 52.9%上升至 2017 年的 65.2%，达标率的极大值从 2015 年的 92.1%上升至 2017 年 95.6%。图 4.1 分别展现了 2015-2017 年三年间湖北省 17 个重点城市的空气质量达标率的空间分布情况。2015-2017 年空气质量达标率的空间格局基本没有改变，空气质量达标率较高的城市主要集中在湖北省西部地区。

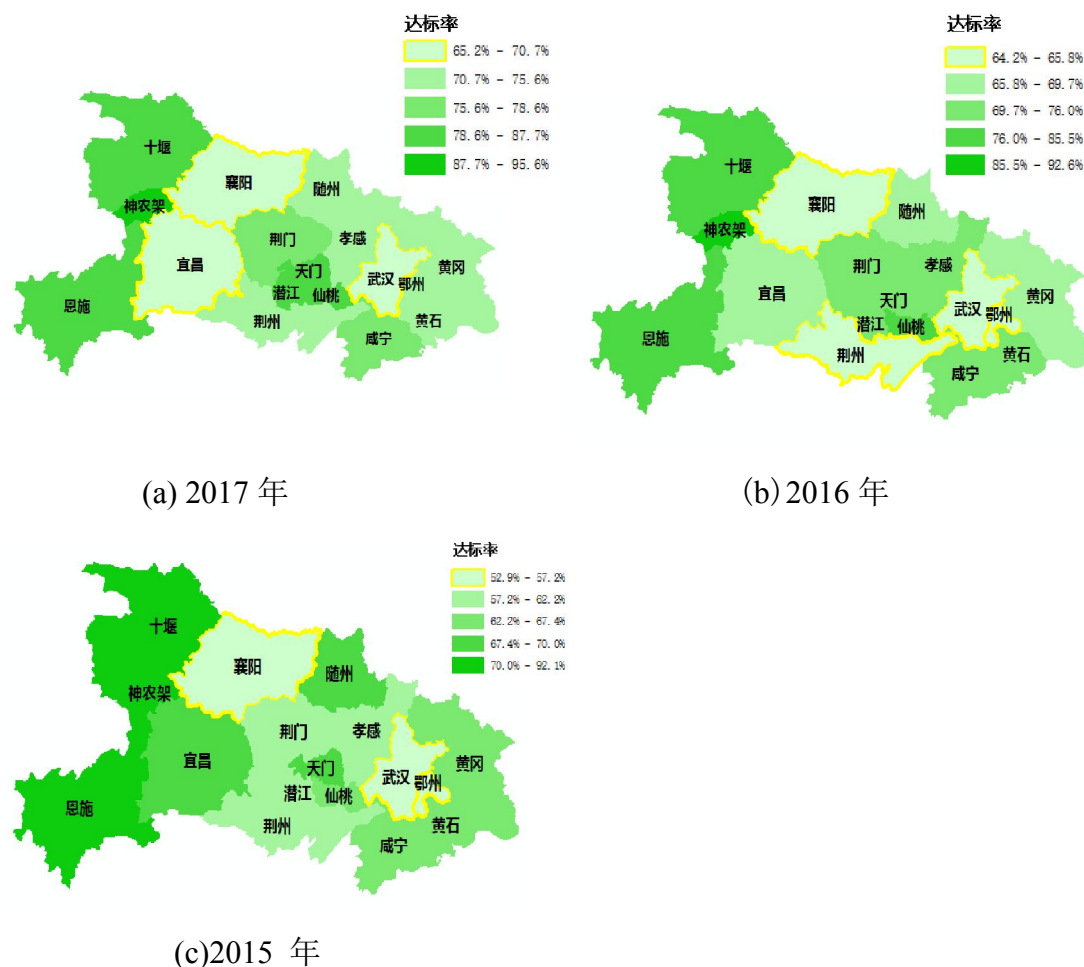


图 4.1 2015-2017 年湖北省空气质量达标率分布图

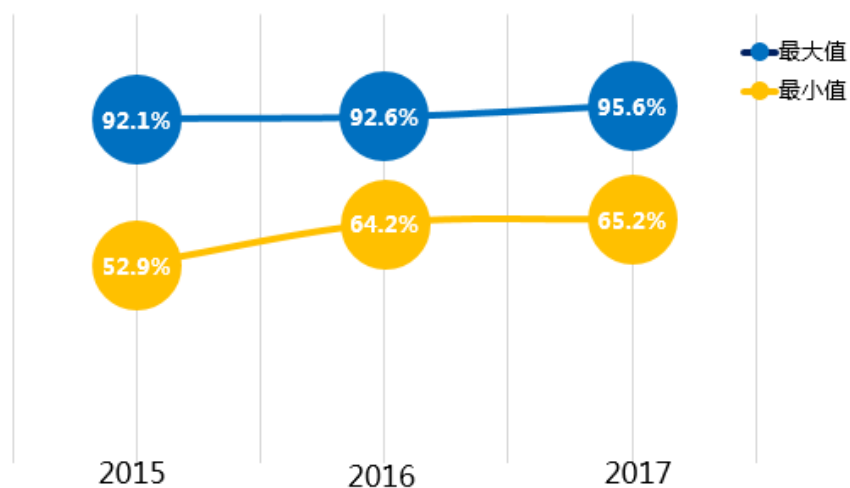


图 4.2 空气质量达标率极值变化

4.1.2 2015-2017 年湖北省 17 个重点城市重污染天数统计

当城市内的空气污染指数 (AQI) 日平均值大于 150 值就视为重污染天气。该部分统计湖北省 17 个重点城市 2015-2017 年间重污染天数情况。图 4.3 展现了这三年间湖北省内重污染天数极值得变化情况。2017 年, 全省 17 个重点城市重污染天数在 0-31 天之间, 全省重污染情况逐年改善, 重污染天数极小值从 2015 年的 5 天下降至 2017 年的 0 天, 天数的极大值从 2015 年的 67 天下降至 2017 年的 31 天。三年来重污染天数的空间分布格局为发生太大的改变, 全年重污染天数值较高的城市都集中在湖北省中部地区。

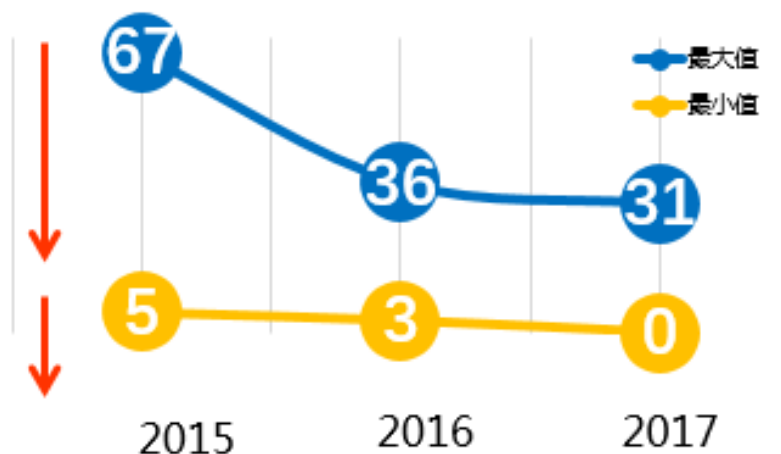


图 4.3 2015-2017 年湖北省重污染天数极值变化

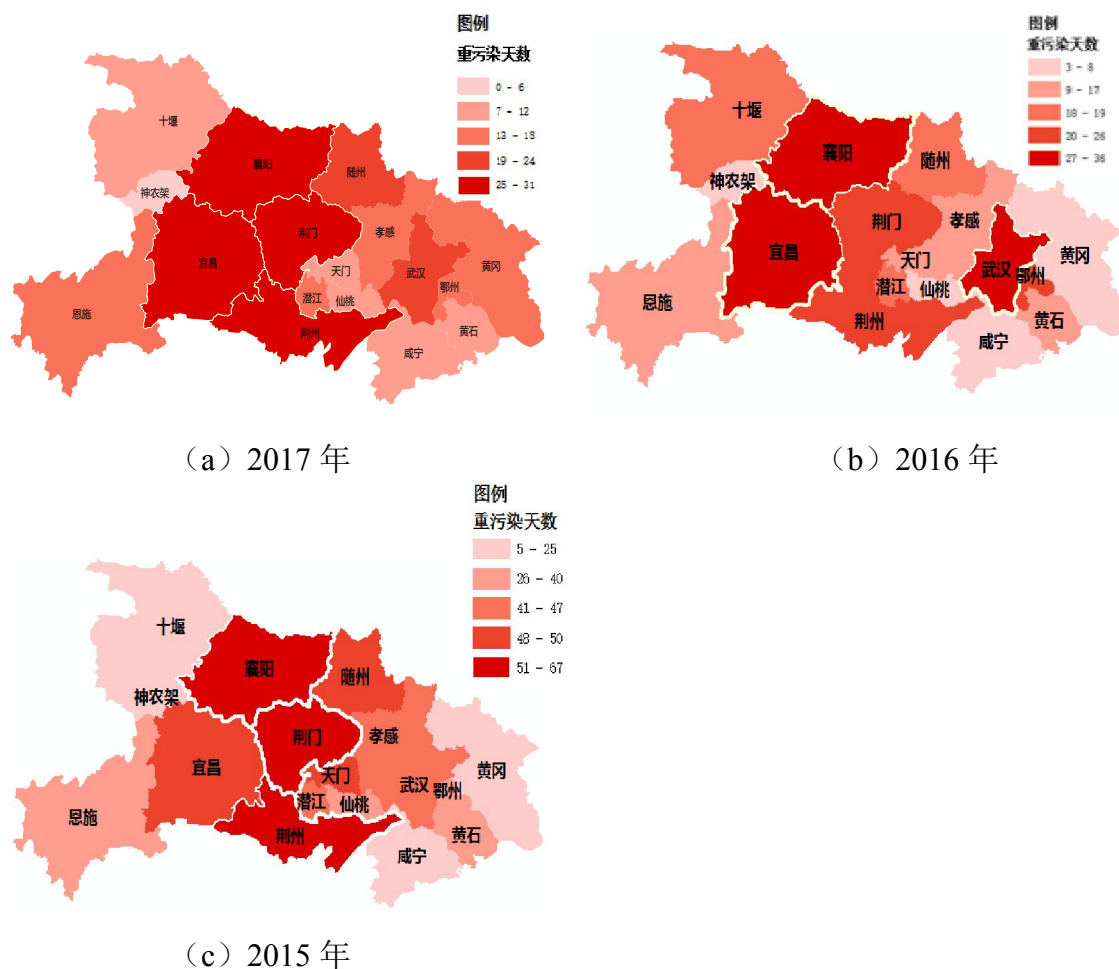


图 4.4 2015-2017 年湖北省重污染天数分布

4.2 空间插值方法原理介绍

空间插值是指利用一个区域内部已知点的数值来估算出其他未知点数据的方法。支持空间插值法的理论基础是地理学第二定律：空间上位置越靠近的点具有相似特征的可能性越大，相距越远的点相似性越小^[16]。空间插值主要有三大功能：

- 1) 估算出缺失数据的数值。由于监测点布设的位置和密度的问题，不能将所有空间上的点的数据都获得利用空间插值方法可以获得完整的数据空间分布状况
- 2) 通过插值可以获得研究区域内的等值线分布图，能够更加直观地来展现数据的空间分布状况
- 3) 同时也可以利用空间插值的方法来获得其他研究区域内的未观测数据。具体来说，空间插值的方法分为确定性插值以及基于地统计的插值方法^[17]。空间插值的基本理论和分类方法如图 4.5 所示。

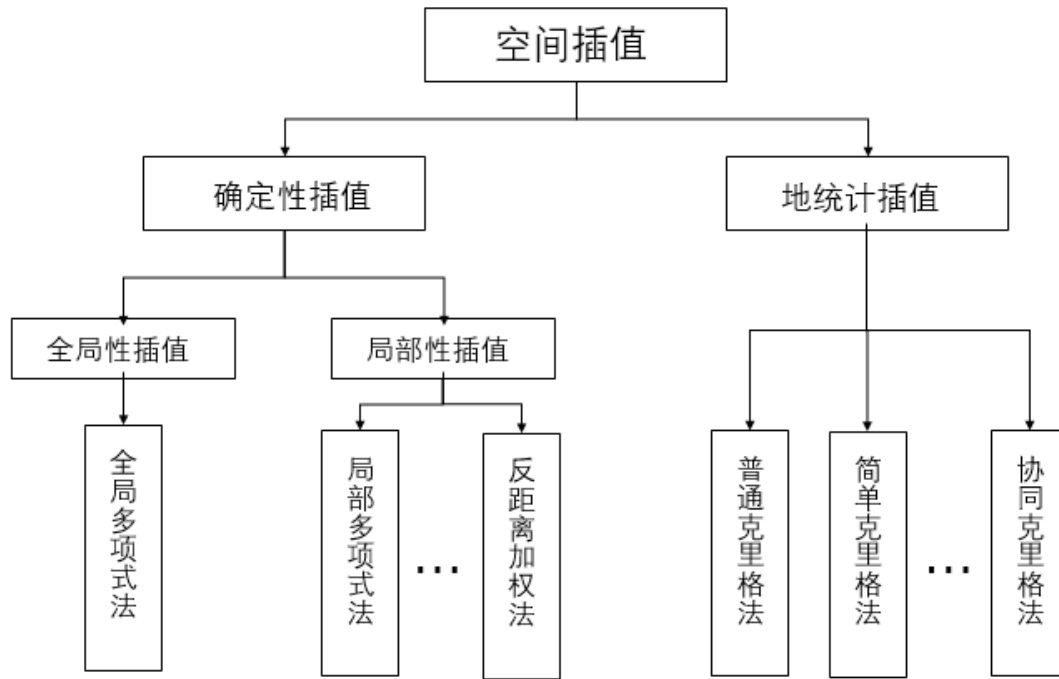


图 4.5 空间插值的基本理论和方法

4.2.1 确定性插值

确定性插值方法是使用数学函数进行插值。确定性插值中最典型的方法是反距离加权（Inverse Distance Weighted, IDW）插值法。该方法将待求点与已知点之间的距离的倒数作为权重，即与样本已知点距离越近的点所获得的权重值越大反之越小，以此来确定未知点的数据值。IDW 插值方法一般适用于研究区域内已知样本点的分布比较均匀且方向性差异小的情况。具体计算方法如公式(4.1)所示：

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (4.1)$$

其中 $Z(s_0)$ 是待求点 s_0 的预测值， N 是参加计算未知点 s_0 预测值的已知样本点的数目， λ_i 是每一个样本点所对应的权重值，权重值的计算方法如公式(4.2), (4.3)所示， $Z(s_i)$ 是指已知点 s_i 所对应的观测值大小。

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^p} \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (4.3)$$

在以上的公式当中， d_{i0} 指的是未知点 s_0 到已知点 s_i 之间的距离， p 是计算距离权重所用到的指数值大小。所有权重值之和为 1。

4.2.2 基于地统计插值

基于自相关的统计模型是地统计学插值方法的数学基础，地统计插值不仅具有生成预测表面的能力，而且还为计算获得的预测值提供精准性度量。具体来说，基于地统计学模型有五个步骤：1) 检查已知数据 2) 计算经验半变异函数或协方差 3) 对模型进行拟合 4) 利用构造的生成克里格矩阵 5) 求解预测值和输出表面中每个位置的相对误差^[18]。以下，将具体针对每个步骤所涉及的原理进行具体的解释。

4.2.2.1 前提假设

1) 平稳性假设

在统计学中，通常使用数据重现性的假设来获取更可靠的估计值，即通过重复观测数据来获得估计值的变化和不确定性。在空间统计学中，假设空间数据之间的平稳性具有重要意义。具体来说平稳性假设可以被分为两类：1. 平均稳定性（假设平均值是定值）。2. 基于协方差的二阶平稳假设，它是构造半变异函数的前提假设。二阶平稳假设的定义是在任意方向内相同距离的两点之间的相关程度相同及两点值得协方差大小相等。两个样本间的距离大小是协方差值的决定因素，其相对位置关系对两点之间的空间相关性大小没有影响。同理，对于半变异函数，固有平稳性假定差异的方差在具有相同距离和不同方向的任意两点之间相同。

2) 非独立随机过程假设

地统计学假设的内容是在研究区域范围中的所有点代表的数值都是随机发生的，但是这种随机性并不意味着所有事件都相互独立，而是只样本值之间具有某种内在的关联性，这种关联性使得他们随机而相互并不独立。地统计就是基于非独立的随机过程。

4.2.2.2 空间变异理论

在经典统计学当中一组数据的特征值往往利用均值、方差等一类的参数来表述，该类参数计算方便但只能从宏观上反映总体的变化规律不能够分析出局部范围内的情况，特别是对具有方向性差异的数据，经典统计学的方法就更有局限性。地统计学方法在经典统计学的基础上加入空间的概念，利用半变异函数来变数区域化变量之间的空间相关性，来反映研究区域中区域化变量的结构性特征。

半变异函数和协方差函数将“两事务相距越近更相似”这一假设加以量化。对半变异函数和协方差函数进行建模的过程也是为了达到最佳拟合效果，并将半变异函数或协方差曲线拟合为经验数据。

(1) 协方差函数

协方差函数的定义如公式(4.4)所示

$$C(S_i, S_j) = \text{cov}(Z(S_i), Z(S_j)) \quad (4.4)$$

其中 cov 是指协方差。当两个位置 S_i 和 S_j 彼此相近时它们的协方差（相关性）会变大，当 S_i 和 S_j 之间的距离变大时它们会变得越来越不相似，协方差值也会变成0，如图 4.6 是典型的协方差解析图。

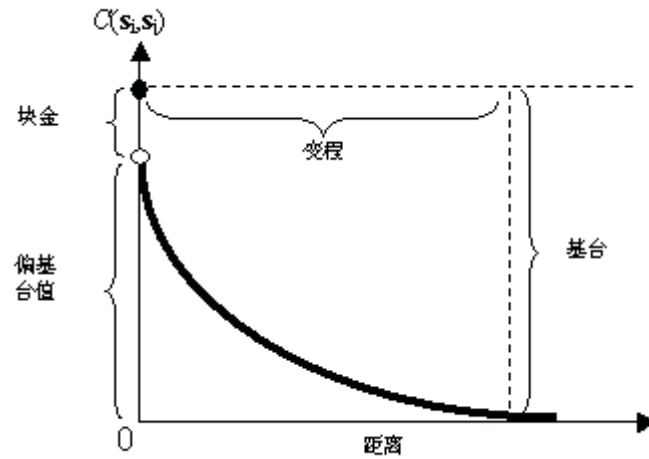


图 4.6 协方差解析图

(2) 半变异函数

半变异函数具体定义如公式(4.5)所示

$$\gamma(S_i, S_j) = \frac{1}{2} \text{var}(Z(S_i) - Z(S_j)) \quad (4.5)$$

其中 var 指的是方差。当两个位置 S_i 和 S_j 在距离上彼此相近，相似性高，两个位置之间的差值 $Z(S_i) - Z(S_j)$ 也会缩小，当 S_i 和 S_j 的距离逐渐增大时两者会变得越来越不相似，差值 $Z(S_i) - Z(S_j)$ 也会增大，半变异函数的解析图如图 4.7 所示

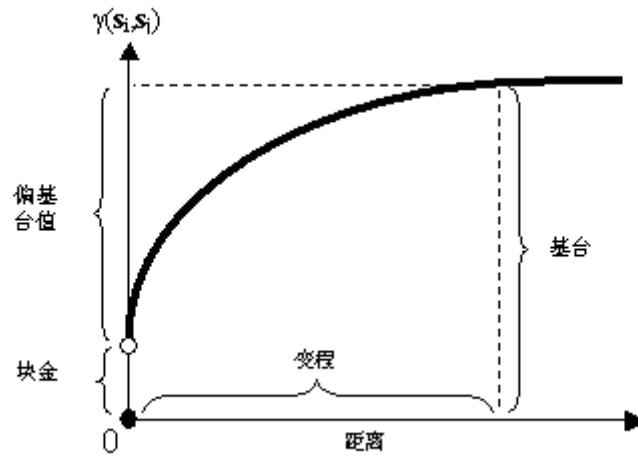


图 4.7 半变异函数解析图

稳定状态下半变异函数图所达到的高度被称为基台，而半变异函数模型第一次出现高度不变时所对应的距离称为变程。这些样本之间的距离在变程范围之内存在空间自相关关系，大于该距离的样本之间不存在空间自相关。理论上，半变异函数在距离为 0 处（步长= 0）具有零值，但图中显示半变异函数在该点处出现了非常小的波动（极值大于 0）该现象被称为块金效应。块金效应一般由于测量误差或采样距离过大等因素导致。

半变异函数模型是不确定的它根据不同采样数据的结构的变化而变化，在统计学领域中典型的半变异理论函数模型有：1. 指数模型 2. 球状模型 3. 高斯模型

1) 指数模型

指数模型的公式如公式(4.6)所示

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left(1 - e^{-(h/R)}\right) & h > 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

在式中， R 并非为变程值 R 为变程值得三分之一 C_0 代表的是块金值 C 指的是偏基台值。

2) 球状模型

球状模型的公式如公式(4.7)所示

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left[1.5 \left(\frac{h}{R} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{R} \right)^3 \right] & 0 < h \leq R \\ C_0 + C & h > R \end{cases} \quad (4.7)$$

该式中 R 即代表的是变程值， C_0 代表的是块金值 C 指的是偏基台值。

3) 高斯模型

高斯模型的公式如公式（4.8）所示

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left(1 - e^{-\left(\frac{h}{R} \right)^2} \right) & h > 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

在该式中， $\sqrt{3}R$ 代表该模型的变程， C_0 代表的是块金值 C 指的是偏基台值。

4.2.2.3 克里格插值方法

克里格插值方法依赖于自相关的概念，在创建含有测量数据的统计属性表面的过程中有两大功能：将数据的空间结构数值化并预测未知点数据。数值化空间结构的过程也被称为变异性分析，是指将空间相关性模型拟合到已知的样本数据。在预测特定未知点的位置时，将使用基于变异性分析，空间数据配置和未知周围测量采样点值的预测拟合的模型实施克里格插值。

常用的克里格插值方法分为普通克里格法、简单克里格、泛克里格、指示克里格和协同克里格方法等。

(1) 普通克里格法

普通克里格法的假设模型如公式（4.9）所示

$$Z(s) = \mu + \varepsilon(s) \quad (4.9)$$

其中 μ 是一个未知常量，对于普通克里格方法来说需要确定 μ 这个未知常量的平均值假设是合理的，普通克里格方法的模拟过程如图 4.8 所示，如图虚线代表所的平均值 μ 是一个常量，它是一个真值但是未知， $\mu(s)$ 的值随着位置的变化而变化， $\varepsilon(s)$ 是预测值的误差，普通克里格方法可以用于某种带有一定趋势的数据。

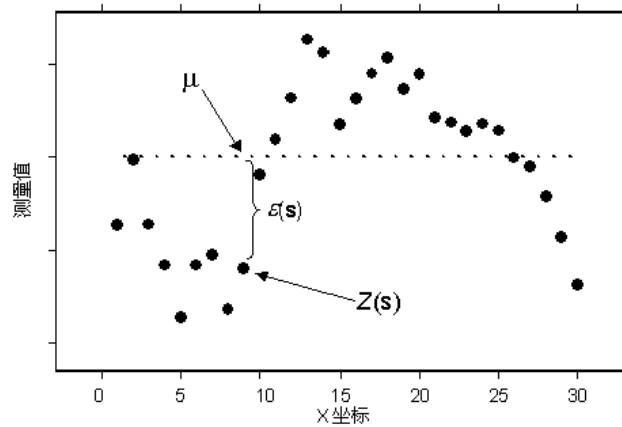


图 4.8 普通克里格法模拟图

(2) 简单克里格法

与普通克里格所不同的是，简单克里格法中 μ 是一个已知常量，简单克里格法的插值模拟过程与普通克里格方法相同。虚线表示的已知常量 μ ，相应的已知位置上的 $\varepsilon(s)$ 也能够获得，这样就能够更好地估算出数据之间的自相关关系获得数据的变化趋势。但是这样的情况往往难以出现，所以一般在数据的残差中使用简单克里格法。

(3) 泛克里格法

泛克里格法的假设模型如公式（4.9）所示

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s) \quad (4.9)$$

泛克里格法的模拟过程如图 4.9 所示

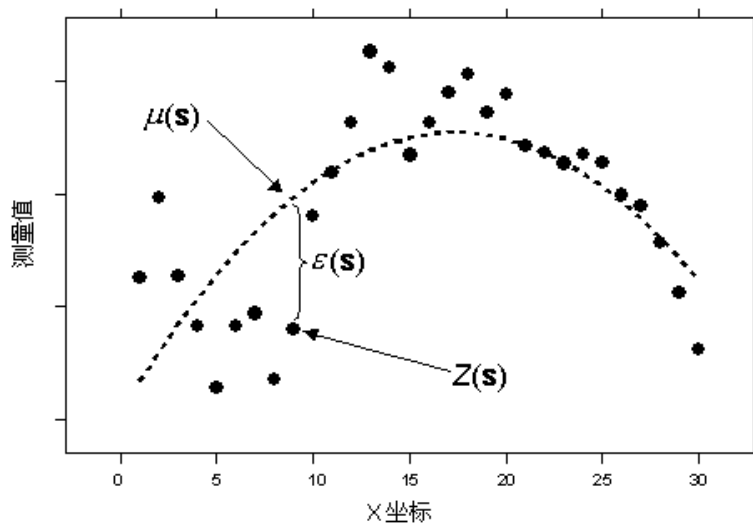


图 4.9 泛克里格法模拟图

在泛克里格法中 $\mu(s)$ 是某一确定性函数或者多项式，在图中利用二阶多项式来表示，误差 $\varepsilon(s)$ 由原始数据减去多项式的值其期望值为 0，利用残差值来分析获得数据的相关关系。具体步骤为： 1) 确定数据的拟合模型 2) 对数据残差进行普通克里格预测 3) 利用残差所获的相关性与趋势面进行叠加

(4) 指示克里格法

指示克里格法的假设模型如公式(4.10)所示

$$I(s) = \mu + \varepsilon(s) \tag{4.10}$$

指示克里格法的模拟图如图 4.10 所示，指示克里格法中 μ 是一个未知常量 $I(s)$ 是一个二进制的变量，在预测的过程中不需要获得每个值得准确的大小只需要获得属性值是否超过了某一个设定的阈值，具体的步骤包括： 1) 确定阈值 2) 根据确定阈值将原始的数据转换为二进制数据 3) 计算指示变异函数 4) 利用个普通克里格法计算各个数据点上的指示克里格函数值。

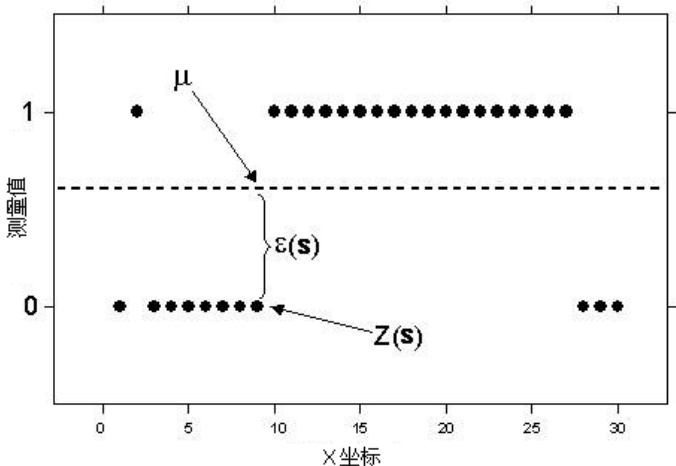


图 4.10 指示克里格模拟图

4.3 探索性数据分析

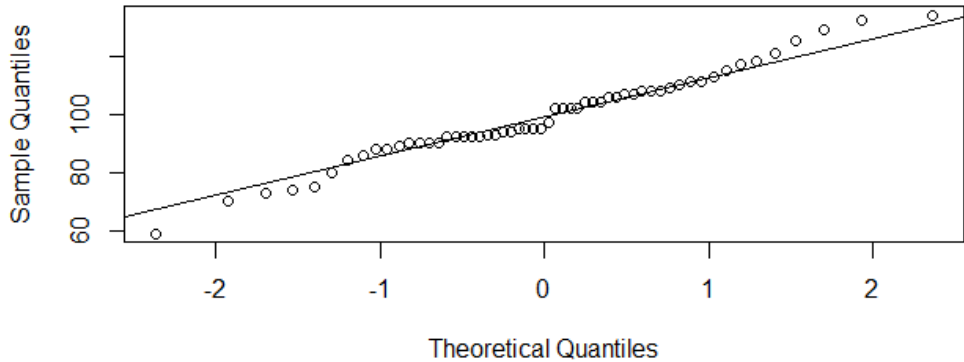
4.3.1 数据正态性检验

对数据进行插值预测时数据如果满足正态分布条件则最终的插值结果越好，对于克里金方法来说其前提假设就是样本数据具有正态分布特征，如果数据不满足正态分布则利用对数变换等方法将原始数据进行转换。

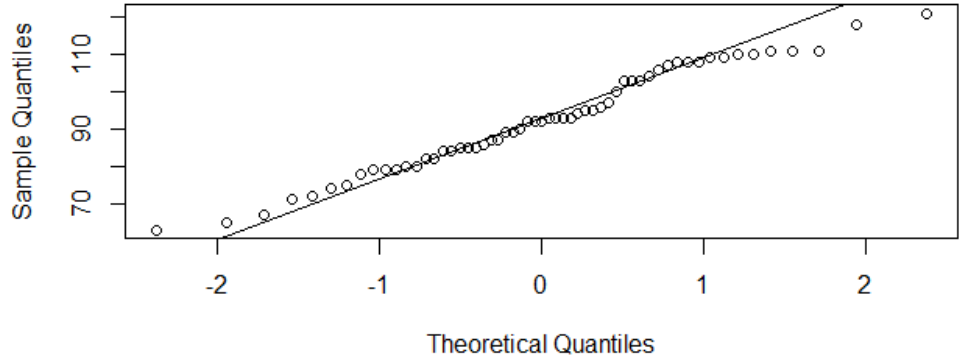
直方图和 QQ 图是在分析数据的正态性分布时所采用的常用方法。在直方图当中，首先对样本数据按照一定的规则进行分级然后通过柱状图来表现出每一个

区间内数据的分布频率，通过直方图所展现出来的位置、离散度和形状等特征来分析样本数据是否符合正态分布特征。具体来说，对于正态分布来说样本数据的中数和平均值是相等的，所以当平均值和中位数越接近时，样本数据的正态性就越明显。如果样本数据满足正态分布的，在 QQ 图的检测中，数据样本点将落在 45 度参考线上。如果数据不是正态分布的，则点将偏离参考线。

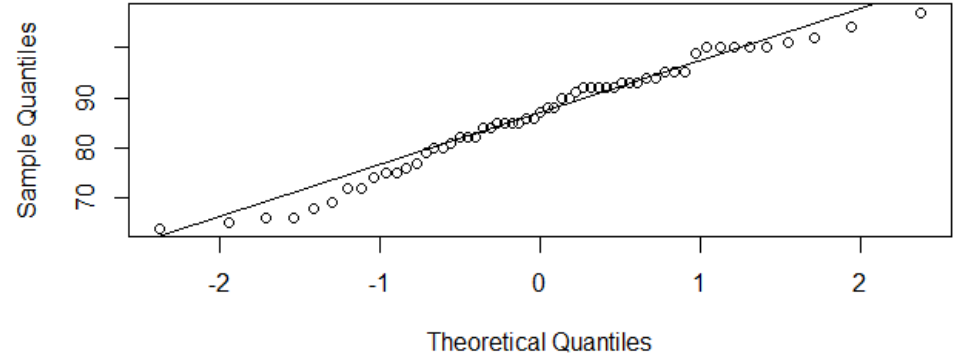
以 2015-2017 年湖北省空气质量监测站国控站点所获得 AQI 的年均数据为例，图 4.11 展现了这三年 AQI 数据的正态 QQ 图。



(a) 2015 年



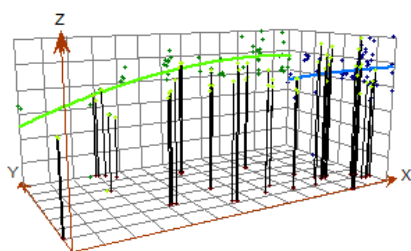
(b) 2016 年



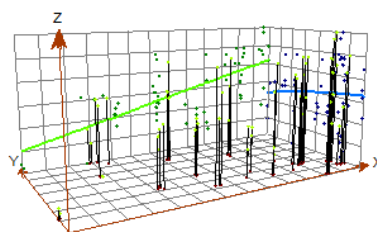
(c) 2017 年

图 4.11 2015-2017 年 AQI 正态检验 QQ 图

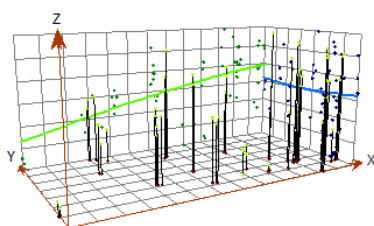
4.3.2 数据趋势性分析



(a) 2015 年



(b) 2016 年



(c) 2017 年

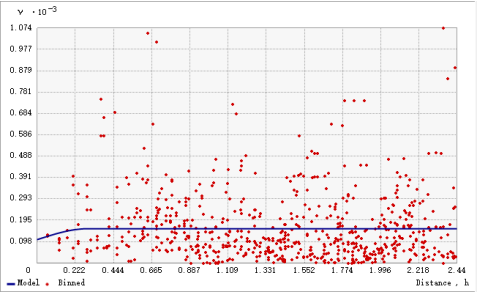
图 4.12 2015-2017 年 AQI 趋势面分析

数据在空间上的分布趋势反映出了具有空间数据特征的数据的空间变化特征。为了获得数据的全局趋势以及局部变化，趋势面分析利用一个数学曲面来拟合空间采样数据。利用 Arcgis 软件提供的“趋势分析”工具可以对数据进行三维透视并在绘制 XY 平面上绘制出已知采样点的空间位置。Z 维的数据杆来标定采样点的数据，空间上的采样点会作为散点图投影到 XZ 和 YZ 面上，在各个投影面上都会有多向式来拟合散点图，默认情况下，工具会选择二阶多项式来显示数据中的趋势。如图 4.12 所示为 2015-2017 年湖北省空气质量监测站国控站点所获得 AQI 的年均数据趋势面分析。

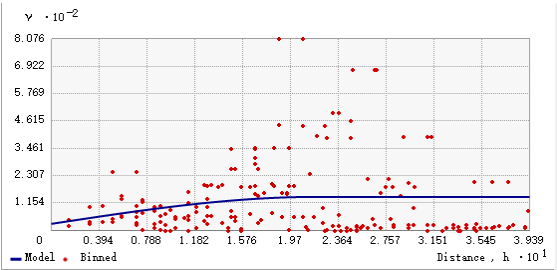
4.3.3 空间自相关及方向变异分析

对数据进行空间插值的基础是保证所插值的数据具有空间上的相关性。在 Arcgis 中提供了 ESDA 功能来制作数据的半变异函数/协方差函数云图以此来量化表示样本数据的空间相关性。在半变异函数云中，X 轴表示样本点之间的距离大小，Y 轴表示 X 轴所对应的距离大小的样本点之间差值的平方。其中，半变异函数中的每个点都对应一个空间坐标。如果样本数据之间存在空间相关性，那么靠近 X 轴左侧的点对所对应 Y 轴上的数值就会偏小。

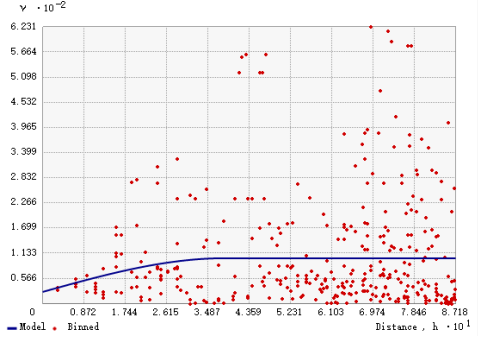
随着空间上各个点之间的距离逐渐增大即 X 轴上的数值增大 Y 轴上的数值也会跟着增大，当到达一定的距离之后保持不变，在这个距离范围之外空间点之间不具有相关性。如图 4.13 所示为 2015-2017 年湖北省空气质量监测站国控站点所获得 AQI 的年均数据半变异函数图。



(a) 2015 年



(b) 2016 年



(c) 2017 年

图 4.13 2015-2017 年 AQI 值得半变异函数

从图中可以看出 2015-2017 年之间湖北省 AQI 数据具有空间上的相关性，其中 2017 年数据的空间相关半径（变程值）最大 2015 年的空间相关半径值最小。

4.4 空间插值方法模型的选取

为了确定比较获得最佳的空间插值模型需要对模型进行交叉验证，在验证的过程中运用到了五个参数：预测误差均值（Mean）、标准化误差均值（Mean Standardized, Mean Std）、均方根预测误差（Root-Mean-Square, PMS）、平均标准误差（Average Standard Error, Av.Std）和标准均方根预测误差（Root-Mean-Square Standardized, RMS std）^[19]具体来说：

(1) 标准化误差

由于希望得到的预测值是无偏的那么预测误差均值将会接近 0，由于受到尺度的影响，标准化后误差均值 (Mean Std) 被用来估算预测结果的误差大小，Mean Std 越接近 0，预测效果越好。

(2) 均方根预测误差

均方根预测误差（RMS）等于预测值与测量值之间平方差的平均值的平方根。RMS 值越小则代表所选模型所计算出的样本数据预测值越接近真值，其实际插值效果越好。

（3） 标准预测误差

评估模型的有效性有两种方法，具体来说：

- 1) 平均标准误差（Av.Std）和均方根预测误差（RMS）的比较：当 Av.std 与均方根预测误差（RMS）接近是则说明正确估算了预测过程当中的变异度；如果 Av.std 小于 RMS 则说明低估了变异度；如果 Av.std 大于 RMS 则说明高估了变异度
- 2) 利用标准均方根误差（RMS std）。当 RMS std 接近 1 模型有效，如果 RMS std 小于 1 则高估了变异度；RMS std 大于 1 则低估了变异度。

模型比较可以被分为两大类型：一个是在不同类别模型之间进行比较，另一个是在相同模型基础上针对不同参数所对应的结果进行较，比较主要基于模型的最优性和可行性。比如，如果某个模型的 RMS 对于不同类型的模型而言相对较小，则该模型被认为是“最优”的；对于具有不同参数的同一模型，如果某一参数下模型的平均标准差接近 0，则认为模型越优；如果模型的 Av.std 更接近 RMS 或 RMS.Std 更接近 1，则该模型被认为是最可行的^[19]。

在本节中以对 2015-2017 年湖北省 AQI 数据进行插值模型为例，分析对比不同模型下的预测误差值并选择出合适的模型。

表 4.1 2017 年 AQI 插值模型参数选择

方法	变异函数模型	输入参数				
		P	最大变程 (km)	最小变程 (km)	方向	步长 (m)
IDW	无	1	1.57	1.57		
IDW	无	2	1.57	1.57		
OK	球状	无	0.6	0.226	142	0.05
OK	指数	无	0.6	0.483	159	0.05
OK	高斯	无	0.58	0.195	142	0.05
SK	球状	无	1.44	0.72	167	0.12
SK	指数	无	1.44	0.67	163	0.12
SK	高斯	无	0.6	0.2	142	0.12
UK	球状	无	1.8	0.7	168	0.15
UK	指数	无	1.8	0.72	167	0.15
UK	高斯	无	1.56	0.52	173	0.13

表 4.2 2016 年 AQI 插值模型参数选择

方法	变异函数模型	输入参数				
		P	最大变程 (km)	最小变程 (km)	方向	步长 (m)
IDW	无	1	1.6	1.6		
IDW	无	2	1.6	1.6		
OK	球状	无	0.21	0.07	28	0.03
OK	指数	无	0.36	0.12	36	0.03
OK	高斯	无	0.21	0.07	24	0.03
SK	球状	无	1	0.8	131	0.15
SK	指数	无	1.1	0.9	136	0.15
SK	高斯	无	1.2	0.9	146	0.15
UK	球状	无	0.9	0.8	128	0.09
UK	指数	无	0.5	0.4	53	0.09
UK	高斯	无	0.6	0.4	112	0.09

表 4.3 2015 年 AQI 插值模型参数选择

方法	变异函数模型	输入参数				
		P	最大变程 (km)	最小变程 (km)	方向	步长 (m)
IDW	无	1	1.6	1.6		
IDW	无	2	1.6	1.6		
OK	球状	无	1.2	0.72	74	0.1
OK	指数	无	1	0.7	75	0.1
OK	高斯	无	0.8	0.55	153	0.1
SK	球状	无	0.9	0.7	85	0.08
SK	指数	无	1	0.7	81	0.08
SK	高斯	无	0.8	0.4	76	0.08
UK	球状	无	0.8	0.3	73	0.09
UK	指数	无	0.9	0.3	77	0.09
UK	高斯	无	0.7	0.3	74	0.09

表 4.4 2017 年 AQI 插值模型估算误差参数比较

方法	变异函数模型	估算误差参数					
		Mean	RMS	Av.Std	Mean.Std	RMS.Std	RMS-Av.std
IDW	无	0.34343	7.43781				
IDW	无	0.12535	7.42458				
OK	球状	-0.05076	7.44575	7.67943	-0.00554	0.95915	-0.23368
OK	指数	-0.01427	7.48968	8.11756	-0.00373	0.91823	-0.62788
OK	高斯	-0.15731	7.57822	7.42289	-0.01165	1.00065	0.15533
SK	球状	0.14981	7.33998	7.77164	0.01794	0.95064	-0.43166
SK	指数	0.10987	7.37566	7.65169	0.01323	0.96108	-0.27603
SK	高斯	-0.10584	7.71597	7.19983	-0.00504	1.04947	0.51614
UK	球状	0.29542	7.39323	7.91834	0.03881	0.93606	-0.52511
UK	指数	0.1811	7.48682	7.85941	0.02518	0.95258	-0.37259
UK	高斯	0.17919	7.3952	8.2353	0.02319	0.90801	-0.8401

表 4.5 2016 年 AQI 插值模型估算误差参数比较

方法	变异函数模型	估算误差参数					
		Mean	RMS	Av.Std	Mean.Std	RMS.Std	RMS-Av.std
IDW	无	-0.04631	10.53782				
IDW	无	-0.74679	10.80915				
OK	球状	-0.45765	9.82149	9.69773	-0.0411	0.9913	0.12376
OK	指数	-0.40949	10.06327	9.74544	-0.0325	1.00994	0.31783
OK	高斯	-0.27873	9.92179	9.61727	-0.0242	1.0217	0.30452
SK	球状	0.08594	10.23986	10.29207	0.00923	0.98988	-0.05221
SK	指数	-0.00789	10.14263	10.10219	0.0022	0.9964	0.04044
SK	高斯	0.10288	10.56355	10.55479	0.00937	0.99903	0.00876
UK	球状	0.10014	10.68373	10.85781	0.01735	0.98396	-0.17408
UK	指数	0.20634	10.61903	10.50684	0.01783	1.02036	0.11219
UK	高斯	0.12899	11.07644	10.76073	0.02911	1.01189	0.31571

表 4.6 2015 年 AQI 插值模型估算误差参数比较

方法	变异函数模型	估算误差参数					
		Mean	RMS	Av.Std	Mean.Std	RMS.Std	RMS-Av.std
IDW	无	0.67492	11.96359				
IDW	无	-0.08131	12.1555				
OK	球状	0.1238	12.15764	12.66175	0.00439	0.96164	-0.50411
OK	指数	-0.06468	12.07688	12.54778	-0.00944	0.96385	-0.4709
OK	高斯	0.22401	12.11397	12.91529	0.01428	0.94602	-0.80132
SK	球状	0.51711	12.03289	12.40524	0.03656	0.96798	-0.37235
SK	指数	0.4622	11.97945	12.32738	0.03314	0.96993	-0.34793
SK	高斯	0.63889	12.08182	12.17857	0.04596	0.98838	-0.09675
UK	球状	-0.46704	13.71081	14.03717	-0.00413	0.97785	-0.32636
UK	指数	-0.3688	14.4544	14.24899	-0.015	0.99173	0.20541
UK	高斯	-0.64653	13.91308	13.98803	-0.0138	1.00804	-0.07495

4.5 污染物的空间分布特征分析

4.5.1 AQI 空间分布特征

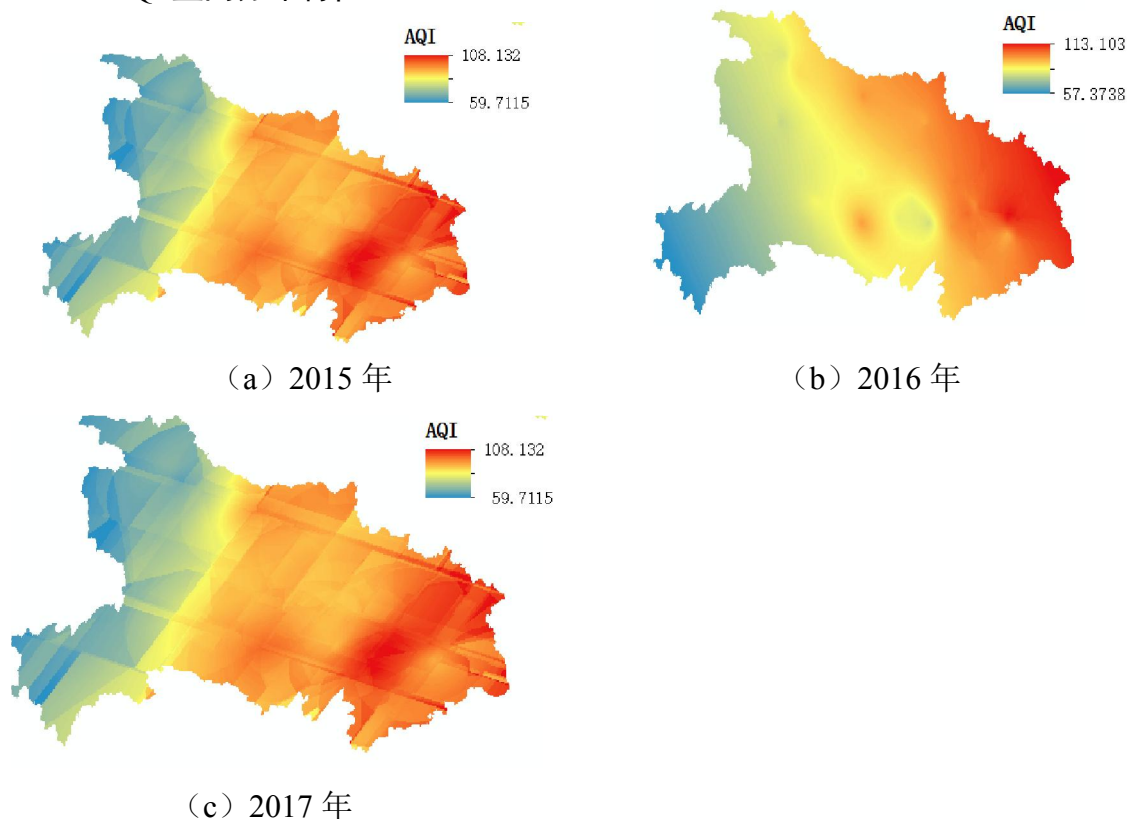


图 4.14 AQI 浓度空间分布图

图 4.14 是湖北省 AQI 的空间分布特征图，从图中可以看出 2015 年 AQI 值在 $64.06\text{--}118.034\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间从鄂西到鄂东地区，AQI 浓度逐渐升高，在 2015-2017 年间，这种空间分布格局并未发生明显改变，2017 年相较于 2015 年来说湖北省西北部的 AQI 浓度升高，但全省各地 AQI 浓度最大值降到 $108.132\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最小值降到 $59.7115\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，空气质量指数有总体改善的趋势。

4.5.2 颗粒物污染的空间分布特征

图 4.15, 4.16 分别表示 2015-2017 年两种颗粒污染物的空间分布情况，根据环境空气质量标准 $\text{PM}_{2.5}$ 的年均浓度的一级浓度限值为 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，二级浓度限值为 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，对于 PM_{10} 的年均浓度的一级浓度限值为 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，二级浓度限值为 $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

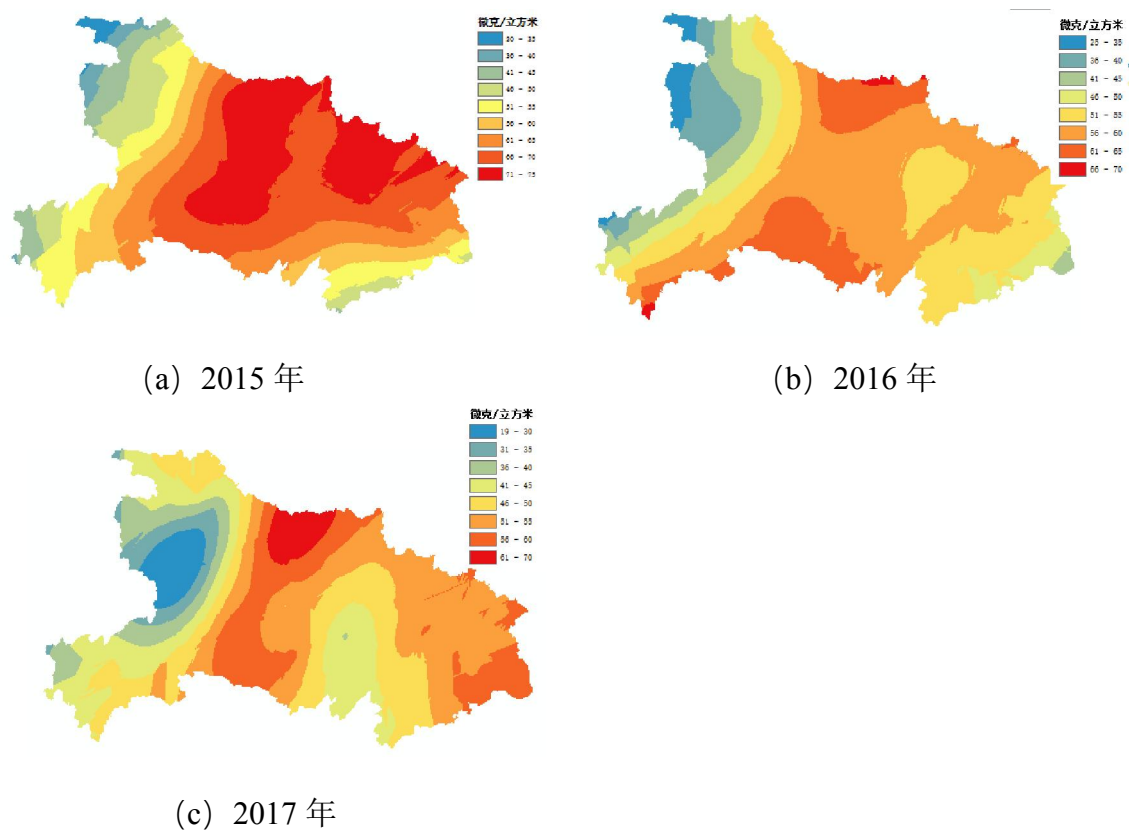


图 4.15 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布

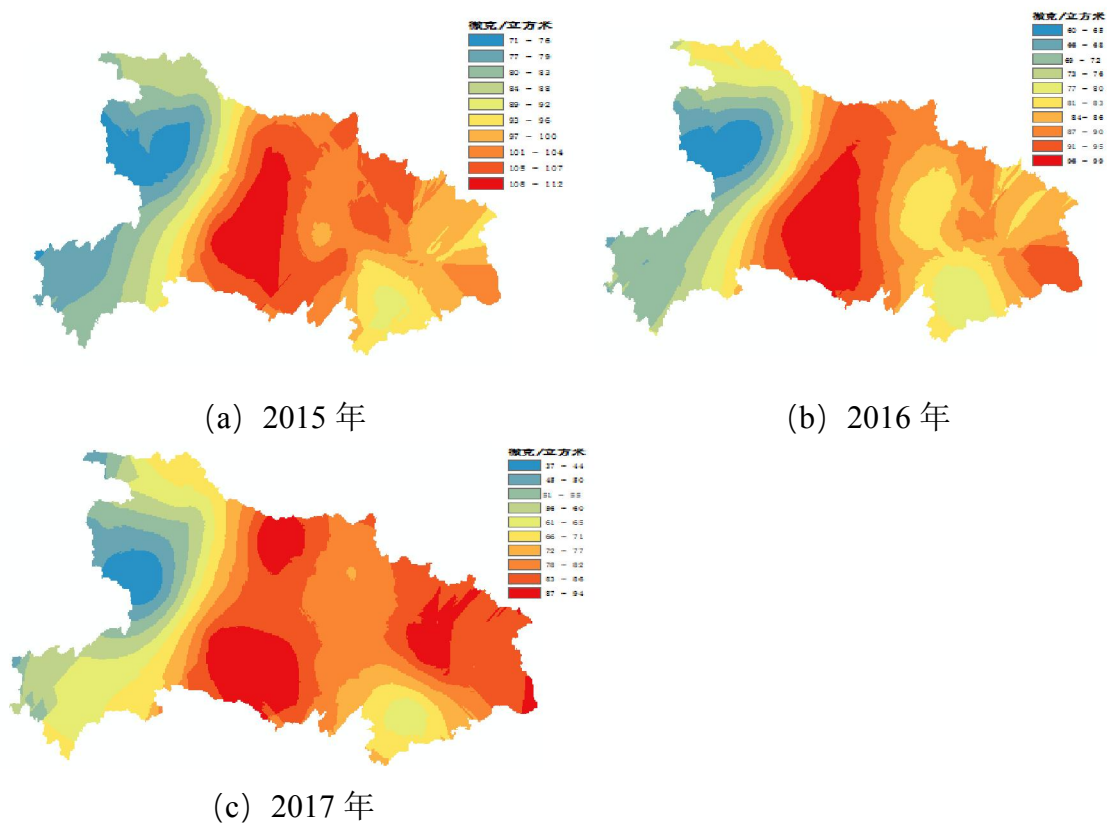


图 4.16 PM_{10} 浓度空间分布图

从图中可以看出从 2015 至 2017 年， $PM_{2.5}$ 低于二级浓度限值的地区范围在逐渐增大，主要集中在神农架林区的西部地区，全省 $PM_{2.5}$ 浓度从东部往西部降低，

三年来湖北省内 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度无达到一级浓度限值的地区。2015-2016 年湖北省内 PM_{10} 年均浓度无达到一级浓度限值的地区，2017 年在湖北省西部小范围地区内 PM_{10} 年均浓度达到了一级浓度限值标准。2015-2016 年间， PM_{10} 的浓度高值地区主要集中在湖北省中部地区，2017 年省东部 PM_{10} 的年均浓度值相比前两年有所升高。

4.5.3 臭氧的空间分布特征

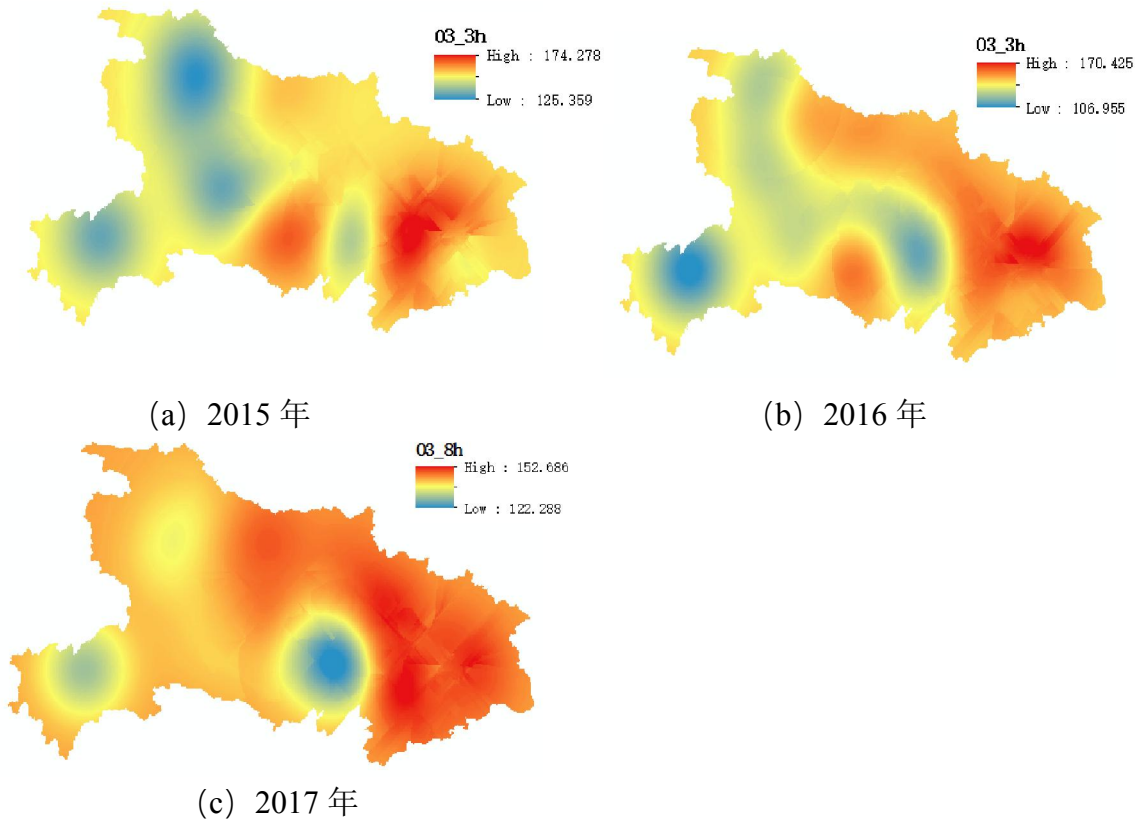


图 4.17 O_3_{8h} 浓度空间分布图

图 4.17 展现了 2015-2017 年间湖北省 O_3_{8h} 浓度的空间分布情况。 O_3_{8h} 的一级浓度限值是 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 其二级浓度限值是 $160\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2015 年，湖北省 O_3_{8h} 浓度的最高值为 $174.278\mu\text{g}/\text{m}^3$ 浓度的最低值为 $125.359\mu\text{g}/\text{m}^3$ ， O_3_{8h} 浓度的较低地区主要分布在省西北部地区，相比 2015 年来说，2017 年湖北省 O_3_{8h} 浓度的最低值 $122.288\mu\text{g}/\text{m}^3$ 最高值是 $152.686\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全省地区的 O_3_{8h} 浓度都满足二级浓度限值，省内有两个 O_3_{8h} 浓度低值圈分布在鄂中南以及西南地区，省东北部地区 O_3_{8h} 浓度最高。

4.6 本章小结

本章分析了湖北省大气空气质量状况以及大气环境中主要的三大污染物的空间分布特征，结合地统计学中的插值方法，利用有限的空气监测站点数据获得湖北省整体的空气污染物分布趋势。综合来看，湖北省内空气污染物的浓度分布具有明显的低于差异，从 2015-2017 年湖北省内空气质量状况逐年转好，各种空气污染物严重的地区主要分布在省东部及北部的小部分地区，省西部地区的空气质量状况普遍较好。

第五章 湖北省空气污染物时空变化的 EOF 分析

5.1 经验正交函数原理介绍

5.1.1 经验正交函数（EOF）分析

经验正交函数分析方法（Empirical orthogonal function, EOF）是一种从矩阵格式数据中提取数据特征向量的分析方法。从 1950 年代开始 Lorenz 将 EOF 方法引入气象和气候的研究中，到现在 EOF 方法在地学领域中也获得了广泛的运用。在地学领域中也常将 EOF 分析称为时空分解，具体来说，EOF 模型所提取的特征向量对应的是空间模态主成分所对应的是时间变化也成为时间系数。

EOF 的计算过程一共分为 4 个步骤：

- 1) 对所要进行分析的数据进行数据的预处理，删除原始数据当中的极端值，异常值和缺省值等然后将待处理的数据整理成一个数据矩阵 $X_{m \times n}$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

- 2) 在这个矩阵当中 m 代表空间上的数据采样点， n 代表时间，具体来说 x_{ij} 表示的是第 i 个空间采样点在时间 j 时的值，经验正交函数的是指就是将变量场矩阵 $X_{m \times n}$ 分解为时间向量 T 和空间向量 V ，如公式(5.2)所示

$$X = VT \quad (5.2)$$

以下为计算出空间和时间特征向量方法。

- 3) 计算矩阵 X 及其转置矩阵 X^T 的交叉积得到方阵 C

$$C_{m \times m} = \frac{1}{n} X * X^T \quad (5.3)$$

- 4) 计算方阵 C 的特征根以及特征向量 $V_{m \times m}$

$$C_{m \times m} \times V_{m \times m} = V_{m \times m} \times P_{m \times m} \quad (5.4)$$

$$P_{m \times m} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \lambda_m \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

在矩阵 $P_{m \times m}$ 中 λ_i 为对应第 i 个空间模态的特征根，特征根所对应的一列向量也称为 EOF。具体来说特征根 λ_i 所对应的特征向量是矩阵 P 的第 i 列， $EOF_k = V(:, k)$ 。

5) 计算主成分，将 EOF 投影到数据矩阵 $X_{m \times n}$ 上获得空间特征向量所对应的时间系数，

$$T_{m \times n} = P_{m \times n}^T \times X_{m \times n} \quad (5.6)$$

矩阵 T 所对应的行向量所对应的是每一个特征根的时间系数，例如 $T(1, :)$ 所代表的是 EOF 的第一个时间系数。

5.1.2 旋转经验正交函数 (REOF) 分析

经验正交函数分析虽然可以利用分离出来的特征向量来表现变量场的结构特征但是它的局限性在于不能够反映地理空间的区域性差异，旋转经验正交函数 (Rotated Empirical Orthogonal Functions, REOF) 在经验正交函数的基础上利用正交旋转矩阵，获得更加清晰的旋转后的变量场不仅能够反映出地域之间的变化特征还能表现不同地域之间的空间相关性。

在经验正交函数的基础上原空间向量 V 可以利用旋转矩阵 A 变换成新的空间向量，由于原始数据矩阵始终满足(5.2)，所以 REOF 公式变换如下

$$\bar{V} = VA \quad (5.7)$$

$$X = \bar{V}\bar{T} \quad (5.8)$$

对于新的空间矩阵中的元素因子所需要满足方差

$$S^2 = \frac{m \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^m (\bar{v}_{ij}^2 / h_i^2) - \sum_{j=1}^q (\sum_{i=1}^m (\bar{v}_{ij}^2 / h_i^2))^2}{m^2} \quad (5.9)$$

要最大，其中 q 代表主成分的个数即旋转正交函数的个数

$$h_{ij}^2 = \sum_{j=1}^q \bar{v}_{ij}^2 \quad (5.10)$$

一般来 q 的数目由经验正交函数的累计方差值来确定，当累计方差的贡献率达到 85% 时便可确定 q 的个数。

5.2 污染物时空变化 EOF 分析

根据各种污染物的日最大浓度进行旋转经验正交函数（REOF）分析，借助 MATLAB 工具，分别得到 2017 年全年湖北省三种主要污染物的 4 类空间分布模态及其时间系数（时间系数与污染物浓度变化同步，时间系数为正代表臭氧浓度升高，为负代表降低）

5.2.1 颗粒物污染的时空变化 EOF 分析

表 5.1 $PM_{2.5}$ 的 REOF 分析

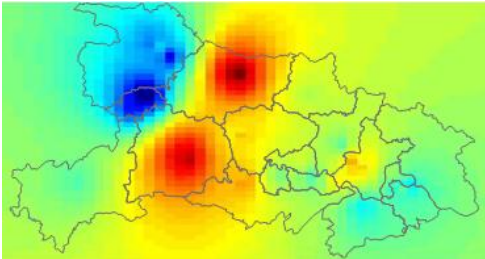
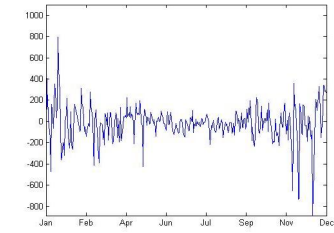
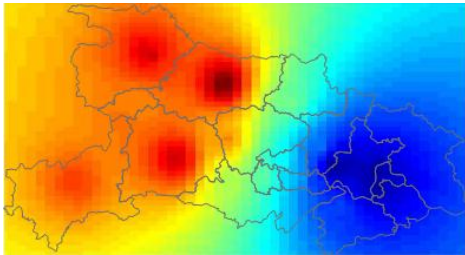
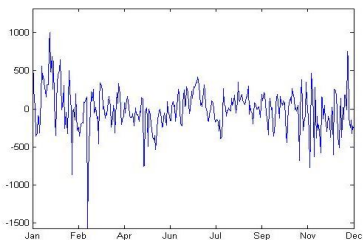
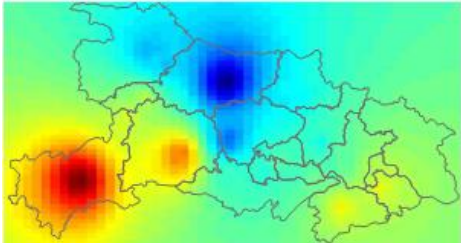
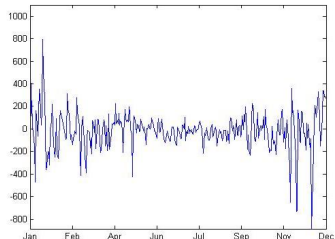
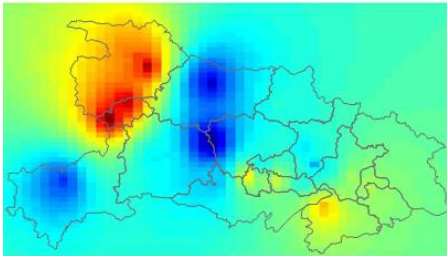
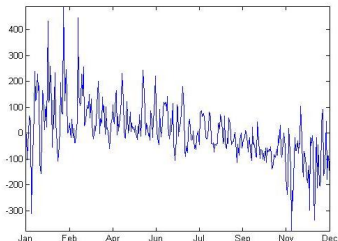
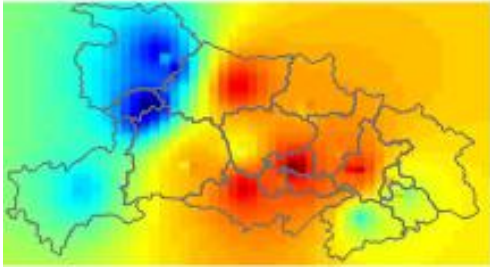
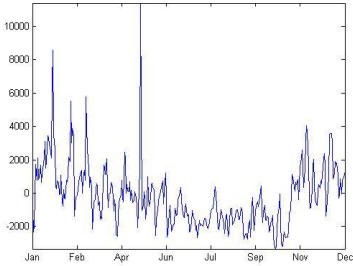
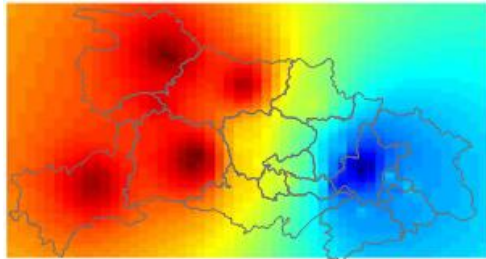
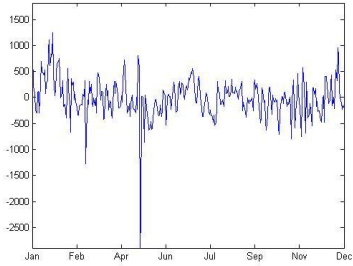
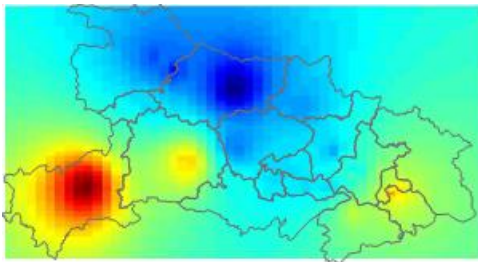
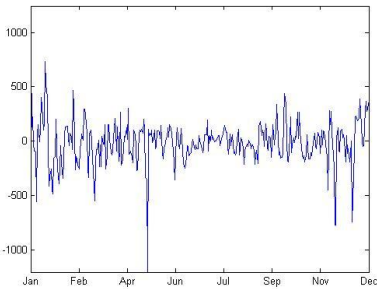
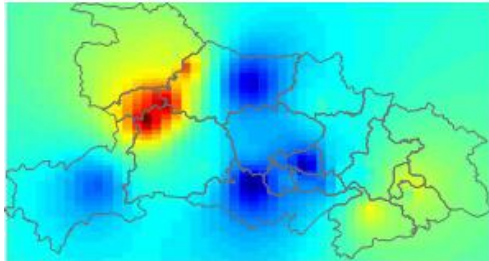
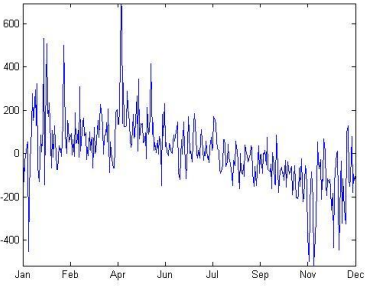
	空间分布	时间系数
第一模态		
第二模态		
第三模态		
第四模态		

表 5.2 PM₁₀ 的 REOF 分析

	空间分布	时间系数
第一模态		
第二模态		
第三模态		
第四模态		

对于 PM_{2.5} 来说，在第一模态中反映的是在襄阳宜昌这两个地区内 PM_{2.5} 的浓度水平在 1~2 月和 11~12 月这两段时间内较高，PM_{2.5} 的污染时间段主要集中在冬季；第二种模态中反映的是再襄阳、宜昌、十堰、恩施以及神农架地区内的 PM_{2.5} 污染问题在 1 月份比较突出，其他月份中 PM_{2.5} 浓度变化并不明显；第三模态反映的是在恩施土家族自治区、宜昌一带 PM_{2.5} 污染的季节性变化比较小；第四模态反

映的是在十堰地区 $PM_{2.5}$ 的污染问题在 1~3 月份比较突出，从 4 月份开始 $PM_{2.5}$ 的浓度开始逐渐下降。

对于 PM_{10} 来说，在第一模态中反映的是在襄阳、荆州、天门和武汉地区内 PM_{10} 的浓度水平在 1~2 月和 11~12 月这两段时间内较高， PM_{10} 的浓度总体来说在冬季升高在春夏季节降低；第二种模态中反映的是在宜昌、十堰、恩施以及神农架地区内的 PM_{10} 全年浓度值变化比较平稳无较大波动；第三模态反映的是在恩施土家族自治区、宜昌一带 PM_{10} 污染的季节性变化比较小；第四模态反映的是在神农架林区大部、十堰市南部和宜昌北部地区 PM_{10} 的浓度在冬春季节上升，在秋季和夏季浓度下降。

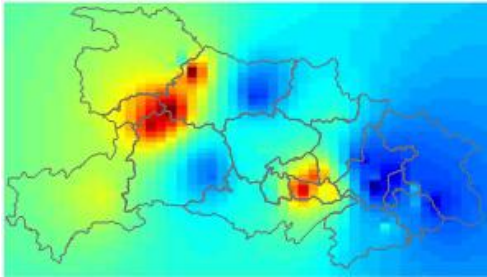
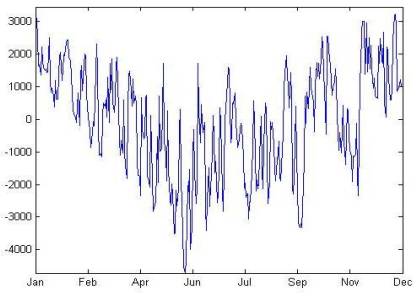
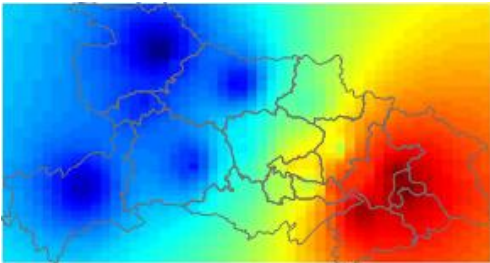
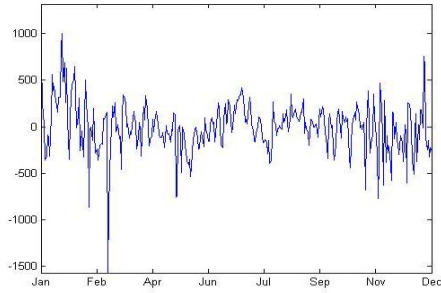
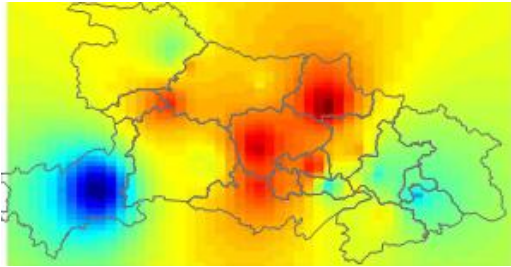
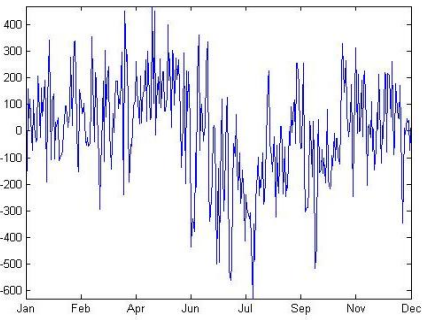
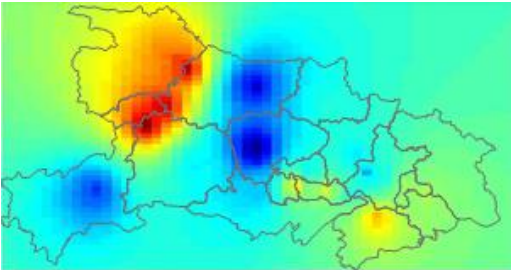
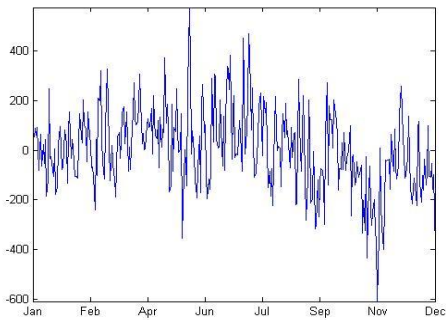
5.2.2 臭氧的时空变化 EOF 分析

第一模态反映的是在神农架林区和仙桃地区 O_3 的浓度水平在 2017 年呈 U 型变化的趋势，浓度的高值出现在冬季；第二模态反映的是在黄冈、黄石、咸宁、鄂州以及武汉地区 O_3 的污染程度在不同季节间的变化并不明显；第三模态反映的是在随州、荆州、荆门以及天门地区 O_3 的污染问题主要集中在 4~6 月份；第四模态反映的是在十堰、神农架林区地区 O_3 污染问题的季节性差异明显尤其在夏季的 6~9 月份间 O_3 的污染问题严重。

5.3 本章小结

本章利用 2017 年湖北省污染物浓度的日监测值通过旋转经验正交函数分析方法对湖北省污染物的污染情况进行时空分解，针对湖北省三大主要的污染物利用 REOF 分析方法分别获得四种模态，在不同模态下对应了不同的空间区域，其污染物浓度随时间变化的规律也不尽相同。2017 年间空气污染物 $PM_{2.5}$ ， PM_{10} ， O_3 具有明显的时空分布差异。

表 5.3 O₃ 的 REOF 分析

	空间分布	时间系数
第一模态		
第二模态		
第三模态		
第四模态		

第六章 结论与展望

6.1 结论

本文利用湖北省大气环境监测站所收集到的 2015-2017 年空气污染物日均浓度监测数据，以环境空气质量指数（AQI）以及湖北省三大主要空气污染物（PM_{2.5}，PM₁₀，O₃）为研究对象。首先，对湖北省大气污染物浓度随着时间的变化特征进行探索，分析大气污染物的时间分布差异；之后，针对不同的大气污染物比较不同空间插值模型和参数下的插值精度，选择最合适的插值结果对省内大气污染物进行整体的趋势分析；最后，利用正交经验函数对湖北省三大主要空气污染物进行时空分解，与之前的大气污染物时空特征分析结果进行比较，分析 2017 年三种污染物的空间上区域分布特征以及浓度随时间变化的差异。本文的研究结果如下：

- 1) 2015-2017 年期间，湖北省空气污染状况逐年改善。作为湖北省内的三大主要空气污染物，颗粒污染物所占的污染比重在三年间始终保持最高值但是其对大气质量的影响时间和影响的空间范围在逐年减小，相比之下臭氧污染的情况逐年加重。
- 2) 湖北省的空气污染严重地区主要集中在以襄阳、荆州、宜昌、武汉为首的中部城市地区，在 2015-2017 年间各个城市的空气污染状况有逐年改善的趋势，全省境内以神农架林区为主的省西部地区空气质量情况最佳。
- 3) 在湖北省内不同空气污染物之间，污染物浓度的时间分布特征以及空间分布特征具有明显的差异。其中颗粒污染物的高浓度时间主要发生在冬季集中分布在鄂中地区；臭氧的高浓度时段主要发生在夏季集中分布在鄂东地区并在近几年间有向北部扩散的趋势。

6.2 存在的问题及展望

本文虽然取得了一定的研究成果但是由于条件和时间上的限制导致本文的研究存在一些不足之处，以下对本文存在的问题进行阐述，对今后的研究提供参考。

- 1) 在空间插值方面：本文利用空气质量监测站点数据通过地统计学的方法将离散点数据转换为连续的面数据，所默认的插值基础是大气污染物浓度之间存在空间上的相关性。但是大气污染物浓度的分布是一个复杂的过程，受到气象、交通等多种因素的影响，基于地统计的大气污染物的空间插值方法只能够在一定程度上反映大气污染物的空间分布特征。

2) 本文在对大气环境质量的评价方法上主要依据环境质量指数值以及各污染物的浓度值,这种方法简单易行并且易于进行插值。但是大气环境的总体情况更为复杂,对空气质量的总体评价需要依据研究区域的时间的差异给出一个更加全面的评价方案。

3) 由于数据的局限性,本文并没有对空气污染情况的影像因子进行深入的分析。湖北省地处中国中部地区省内各市地表覆盖特征、经济水平等方面的差异明显。在探索获得省内大气污染物时空分布特征的基础上,分析各污染物的影响因子和相关性对制定大气污染治理决策方案具有重要的意义。

参考文献

- [1] 李华松. 城市大气污染现状及对策[J]. 环境与发展, 2017,29(10):61+63.
- [2] 2017 年湖北省环境空气质量报告[R]. 湖北省环境监测中心站, 2018
- [3] 孟健, 马小明. Kriging 空间分析法及其在城市大气污染中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2002(02):309-312.
- [4] R. Romanowicz, P. Young, P. Brown, P. Diggle. A recursive estimation approach to the spatio-temporal analysis and modelling of air quality data[J]. Environmental Modelling and Software, 2005, 21(6).
- [5] 刘实, 王宁, 朱其文, 王新国, 胡中明, 陈长胜. 长春市空气污染潜势预报的统计模型研究[J]. 气象, 2002(01):8-12.
- [6] R. Romanowicz, P. Young, P. Brown, P. Diggle. A recursive estimation approach to the spatio-temporal analysis and modelling of air quality data[J]. Environmental Modelling and Software, 2005, 21(6).
- [7] Iii G Q T, Salas J D. A COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNIQUES FOR SPATIAL INTERPOLATION OF PRECIPITATION[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1985, 21(3):365-380.
- [8] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 等. 气象要素空间插值方法优化[J]. 地理研究, 2004, 23(3):357-364.
- [9] 陈静, 钤伟妙, 韩军彩, 等. 石家庄市秋季典型天气背景下重污染特征分析[J]. 气象与环境学报, 2015(4):42-50.
- [10] Chaloulakou A, Kassomenos P, Spyrellis N, et al. Measurements of PM and PM_{2.5} particle concentrations in Athens, Greece[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(5):649-660.
- [11] Dye T S. Guidelines for developing an air quality (ozone and PM_{2.5}) forecasting program[J]. Books on Demand, 2003, 4(4):206-207.
- [12] Hussein T, Karppinen A, Kukkonen J, et al. Meteorological dependence of size-fractionated number concentrations of urban aerosol particles[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(8):1427-1440.
- [13] 何宗健, 袁胜林, 肖美. 夏季南昌市大气颗粒物 PM₁₀·PM_{2.5}污染水平研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(3):1336-1338.

- [14] HJ633-2012. 环境空气质量指数（AQI）日报技术规定[S]. 2012.
- [15] 尹群.2015 年吉安市环境空气质量现状评价与分析[J]. 江西化工, 2016(04):95-98.
- [16] 李思米. 基于 GIS 的中尺度土壤重金属空间插值分析及污染评价——以江苏省南通市为例[D]. 南京农业大学, 2005.
- [17] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006, 363-428
- [18] 地统计分析及 ArcGIS 软件操作 - 豆丁网 - 《互联网文档资源 (<http://www.docin.com>)》
- [19] 李淑婷. 成都市大气环境污染时空特征分析及质量评价[D]. 电子科技大学, 2012.

致 谢

大学四年一晃而过，在武汉大学我度过了人生中重要的四年。如今我即将告别这所美丽的学校，我由衷地感谢所有的老师，同学和家人的关心和支持。

首先，我要感谢我本科毕业设计的导师肖锐老师，他在我本科毕业设计期间提供了很大的帮助，保障了我毕业设计地顺利进行；我要感谢卓工班的卢宾宾导师，在每次遇到科研问题的时候老师都耐心和我讨论并予以指导，是他让我对地统计和空间分析领域产生了浓厚的兴趣。感谢班级导师姚春静老师和年级辅导员赵文强老师，他们在我本科四年中一直关心我的学习和生活，帮助我适应武汉生活，平衡好学业与日常生活。

同时我要感谢我亲爱的家人，大学四年期间他们给予了巨大的支持和理解，在我许多的选择中都给予我勇气和鼓励，让我对未来充满信心并能够顺利地完成我的学业。

感谢与我大学同窗四年的蔡昊君等同学们，他们乐观地生活对学业专注，对未来有着积极的规划，给我树立了榜样。大学四年期间我与同学们之间建立了深厚的友谊，这是我的一笔宝贵的财富。

最后感谢湖北省环境监测中心站提供给我的一段宝贵的实习经历和用于本次毕业设计所需的大气环境监测站点数据，感谢站内的陈楠博士以及其他各位同事，我从他们的身上学习到了很多实践的经验。