

长三角雾霾突发事件 风险评估、应急决策 及联动防治机制研究

叶春明 / 著



科学出版社

长三角雾霾突发事件风险评估、 应急决策及联动防治机制研究

叶春明 著

上海市哲学社会科学规划项目（2014BGL024）

国家自然科学基金项目（71271138）

科学出版社

北京

内 容 简 介

雾霾问题对社会经济发展及百姓生活造成的不利影响,使其成为人们日益密切关心的重要问题之一。本书以长三角地区为研究区域,着重从雾霾风险因素、时间空间分布特征、风险预测与仿真、风险评估、雾霾联防联控及应急对策等方面展开了研究。全书共23章,第1章为绪论;第2~第4章对雾霾的影响指标进行了研究;第5~第10章对长三角地区雾霾时间及空间分布特征进行了研究;第11和第12章利用统计学及系统动力学知识对雾霾的影响因子进行了研究;第13~第15章对长三角地区雾霾健康经济损失及灾害影响因素进行了风险评估;第16~第20章对公众对雾霾的关注度及应急能力、企业雾霾排污行为惩罚机制设计、雾霾协同治理博弈分析、雾霾联防联控机制等进行了研究;第21和第22章对雾霾突发事件的应急预案及雾霾灾害应急对策进行了研究;第23章为结论与展望。

本书可作为高等院校经管类研究生或博士生教材,也可供相关单位与机构参阅。

图书在版编目(CIP)数据

长三角雾霾突发事件风险评估、应急决策及联动防治机制研究 / 叶春明著. —北京: 科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-058003-0

I. ①长… II. ①叶… III. ①长江三角洲—空气污染—突发事件—应急对策—研究 IV. ①X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 131904 号

责任编辑: 郝 悦 / 责任校对: 王晓茜
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

http: //www.sciencep.com

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张: 17 1/2

字数: 330 000

定价: 140.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前言

长三角地区目前是中国经济最具活力、开放程度最高、创新能力最强和吸纳外来人口最多的区域之一，承载众多的人口和环境压力。近几年雾霾天气不断增多，空气能见度越来越低，对人们的生活、健康、交通出行都造成了严重的影响，同时对城市经济发展也伤害巨大。这种情况下，开展对雾霾天气的研究意义重大。本书着重从雾霾风险因素、时间空间分布特征、风险预测与仿真、风险评估、雾霾联防联控及应急对策等方面入手，主要研究成果如下。

第一，对雾霾的影响指标进行研究。分析了研究区域雾霾天气与空气质量各个影响因子、碳排放、自然因素、社会因素及污染源因素的关系。研究结果表明，空气质量指标中 $PM_{2.5}$ 是雾霾天气的首要分析因子，要想减少雾霾天气首先应该降低空气中 $PM_{2.5}$ 的浓度，而除 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 之外的其他影响因子的实际影响力与其空气质量指数 (air quality index, AQI) 呈正相关关系；雾霾与碳排放之间的相关性为正相关；此外，部分自然、社会和污染源因素也对雾霾天气有影响。研究成果有利于提高人们对雾霾天气影响因素的认识，同时为长三角城市空气质量监测、空气污染治理等工作的展开提供一定的数据基础和理论支持。

第二，对长三角地区的雾霾天气进行时间及空间的分布特征研究。通过大量的可靠数据，分析研究地区雾霾天气的时空分布特征及变化规律，模拟预测城市发展中雾霾污染发展趋势。时间分布特征研究表明：上海市雾霾在春季和冬季的污染程度相对于夏季和秋季较为严重，波动幅度较大。AQI 也呈现出周期性的特点，每年的 12 月、1 月、2 月 AQI 较高，之后的几个月整体呈现下降趋势，7、8 月最低，且具有 40 天的多尺度主周期和 9 天的多尺度次周期，而 $PM_{2.5}$ 具有 39 天的多尺度主周期和 9 天的多尺度次周期。以上海市为例的空间分布特征研究表明：上海市雾霾风险因素得分呈黄浦江两岸差异大，浦东新区明显低于其他 6 个区，而各区之间雾霾风险因素的协调度水平相近，总体来说雾霾风险较大。西南地区 4 个季度降尘量呈现低聚集， $PM_{2.5}$ 季均浓度呈现高聚集，且聚集度高，中部地区降尘量呈现高聚集。长三角地区空间分布特征：年均 $PM_{2.5}$ 浓度呈现出由西北向东南逐级递减的“阶梯式”空间格局。 $PM_{2.5}$ 浓度年均值整体上呈现出北高南低的趋势，以泰州及湖州为中心的中部局部区域 $PM_{2.5}$ 浓度年均值略有突出。通过构建长三角 7 个城市 GARCH (generalized auto regressive conditional heteroskedasticity)

模型,对长三角重雾霾污染溢出效应进行研究,发现长三角 7 个样本城市雾霾污染具有持续性,同时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度波动具有较强的聚类现象。

第三,从统计学角度分析雾霾的 6 种影响因子对空气质量的影响,根据历史原始数据运用灰色马尔可夫模型预测的方法,预测未来雾霾指标值的走向趋势。在分析当前雾霾污染排放和人口衣食住行等基本活动的相互关系基础上,通过系统动力学模型建立了雾霾系统演化模型,对雾霾灾害风险情景进行仿真。模拟以下 4 种情景时的预测情况:经济快速增长、人口快速增加、GDP(国内生产总值)降速和环保投资额停滞。结果表明:目前的空气质量有改善的趋势,但人口的未来变化和城市经济的停滞都会影响空气质量的走势,同时雾霾治理过于依赖环保投资额,需要改革财政资源的配置,开展雾霾污染的人口活动源头治理行动。

第四,对长三角地区的雾霾污染情况及健康经济损失进行了风险评估。对上海市雾霾健康经济损失风险评估的结果显示:上海市 $\text{PM}_{2.5}$ 国家标准健康经济损失最高为 2013 年 120.89 亿元,占 GDP 比例最大为 2015 年的 0.46%,目前上海市 $\text{PM}_{2.5}$ 的健康经济损失超过 80 亿元的概率为 56.62%,2010~2015 年 5 年内会出现 144 亿元左右的健康经济损失,预计 2020 年损失值达到 261.85 亿元。接着依据指标选择原则确立了 10 个雾霾风险指标,对上海、南京、杭州和合肥 4 个城市进行风险评估,研究表明:以上 4 个城市风险等级分别为Ⅳ级、Ⅲ级、Ⅲ级、Ⅲ级,其中上海市风险等级高于其他 3 个城市。对上海、江苏和浙江的风险评价计算结果表明:上海市综合风险等级判定为严重,江苏省综合风险等级处于轻度,浙江省综合风险等级处于微度,同时使用综合指数法的计算结果检验了结果可信度。必须制定有效政策,严控雾霾发展态势,同时设置预警机制应对潜在的突发事件。

第五,分析了公众对雾霾天气的关注度,评价了公众应急能力。设计了企业雾霾排污行为的惩罚机制,用博弈模型分析了雾霾的协同治理和联防联控。研究表明:社会公众对雾霾天气的关注度提高,而城市公众应急能力水平与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染风险程度总体上较为一致,风险程度越高,该城市总体上应急能力水平也越高。运用博弈论从企业、政府和公众 3 个角度进行了分析,建立了博弈模型,得到对企业违规行为实施惩罚的“报警器”,表明对企业应实施适度惩罚和奖励。

第六,对雾霾突发事件 3 种应急预案进行评估,得出最优的预案,并结合前面的研究,提出了相应的雾霾灾害应急对策与建议。综合众多学者对雾霾对策的研究,从法律方面、经济学方面、能源调整方面、环境污染方面和政府管理条例等方面提出建议和对策。

叶春明

2019 年 4 月

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	课题研究背景及意义	1
1.2	国内外研究进展综述	3
1.3	研究内容	8
1.4	研究方法和技术路线	9
第 2 章	上海市雾霾天气影响因子研究	11
2.1	雾霾天气影响因子研究模型的建立	11
2.2	MISO 多元广义神经网络的实证分析	14
2.3	本章小结	20
第 3 章	雾霾与碳排放之间的关联效应分析	21
3.1	模型的建立	21
3.2	实证分析	21
3.3	本章小结	23
第 4 章	雾霾与其他相关指标统计分析	24
4.1	上海市统计指标数据分析	25
4.2	本章小结	35
第 5 章	上海市雾霾时间分布特征	36
5.1	ARIMA 模型建立	36
5.2	结果分析	44
5.3	本章小结	46
第 6 章	上海市空气质量动态研究	47
6.1	数据和方法	47
6.2	结果分析	50
6.3	结论	56
第 7 章	上海市雾霾风险因素及空间差异分析	58
7.1	研究区简介及数据来源	58
7.2	评价模型构建	58
7.3	实证研究——以上海市为例	62
7.4	本章小结	65

第 8 章	上海市雾霾风险差异的空间统计分析	67
8.1	数据来源及研究区概况	67
8.2	研究方法	67
8.3	上海市雾霾风险空间差异分析	69
8.4	本章小结	72
第 9 章	长三角重雾霾污染溢出效应研究	73
9.1	模型基本原理	73
9.2	重雾霾事件刻画	75
9.3	重雾霾污染溢出效应实证分析	79
9.4	本章小结	80
第 10 章	长三角 $PM_{2.5}$ 污染时空分布及影响因素研究	81
10.1	数据来源	81
10.2	研究方法	81
10.3	长三角区域 $PM_{2.5}$ 污染时空分布	84
10.4	长三角区域 $PM_{2.5}$ 污染影响因素	86
10.5	本章小结	89
第 11 章	基于统计学的上海市雾霾预测指标分析	90
11.1	主成分分析模型	90
11.2	因子分析	94
11.3	修正灰色马尔可夫模型	96
11.4	灰色马尔可夫模型分析	104
11.5	本章小结	105
第 12 章	雾霾灾害风险情景仿真	106
12.1	研究区域概况	106
12.2	研究模型及验证	106
12.3	情景模拟预测	109
12.4	结论	114
第 13 章	上海市雾霾健康经济损失风险评估	116
13.1	研究方法	116
13.2	健康经济损失风险评估	118
13.3	结论与讨论	127
第 14 章	基于集对分析法的长三角雾霾风险评估	128
14.1	基于集对分析法的雾霾风险评价模型	128
14.2	风险管理实例分析	132
14.3	结果分析及风险控制研究	135

14.4	风险管理体系构建	137
14.5	本章小结	138
第 15 章	长三角雾霾灾害影响因素综合风险评价	139
15.1	物元可拓模型基本原理	139
15.2	综合风险评价模型	142
15.3	结果分析	145
15.4	结论	148
第 16 章	基于信息扩散理论的雾霾天气关注度研究	149
16.1	数据来源	149
16.2	信息扩散理论	149
16.3	实证研究	150
16.4	本章小结	155
第 17 章	长三角城市 $PM_{2.5}$ 污染公众应急能力评价	157
17.1	理论方法	157
17.2	数据来源	165
17.3	实证分析	165
17.4	本章小结	173
第 18 章	企业雾霾排污行为惩罚机制的设计	174
18.1	基本概念的设定	174
18.2	惩罚机制设计的博弈规则	174
18.3	企业雾霾排污违规行为的效用分析	176
18.4	基于“适时性”的企业行为惩罚机制的模型	177
18.5	基于“适度性”的企业违规行为惩罚机制的模型	181
18.6	应用实例	184
18.7	本章小结	186
第 19 章	长三角地区雾霾协同治理博弈分析	188
19.1	长三角雾霾难以治理的原因	188
19.2	雾霾治理博弈分析	190
19.3	本章小结	203
第 20 章	雾霾联防联控机制研究	204
20.1	帕累托最优理论简介	204
20.2	长三角雾霾联防联控基础分析	206
20.3	长三角雾霾联防联控制约因素	207
20.4	长三角区域雾霾联防联控的帕累托改进机制分析	209
20.5	基于帕累托改进的长三角雾霾联防联控合作路径	212

20.6	京津冀雾霾治理研究简介	213
20.7	本章小结	213
第 21 章	基于纯语言多属性群决策的雾霾突发事件应急预案评估研究	215
21.1	基本概念の設定	215
21.2	基础知识	217
21.3	纯语言信息下基于混合算术集结算子的多属性群决策方法	220
21.4	纯语言信息下基于混合几何集结算子的多属性群决策方法	225
21.5	不确定语言信息下的多属性群决策方法	227
21.6	基于 GUPLHAHM 平均算子的多属性群决策方法	230
21.7	基于 UPLWGHM 算子的多属性群决策方法	233
21.8	雾霾事件应急预案评估选择问题的研究	235
21.9	本章小结	240
第 22 章	雾霾灾害应急对策研究	242
22.1	统计指标与雾霾治理对策	242
22.2	碳排放控制与雾霾对策研究	247
22.3	雾霾社会协同治理	248
22.4	建立专项应急预案, 完善预警机制	248
22.5	建立区域雾霾联动防治机制	249
22.6	法律法规与雾霾对策建议	250
22.7	总结与建言	253
第 23 章	结论与展望	256
23.1	结论	256
23.2	展望	258
参考文献		259
后记		271

第1章 绪 论

1.1 课题研究背景及意义

1.1.1 课题研究背景

随着现代化工业的发展,工业和交通运输设备污染物大量排放,大气环境污染严重,人类以环境为代价所换来的社会进步越来越显得得不偿失,各种环境突发事件频发,屡屡对人类生产生活带来了重大损失,极大地影响了社会的稳定发展。近些年来,每到秋冬季节特别是2012年入冬以后,我国中东部地区雾霾天气不断出现,带来了严重的大气污染,空气质量一度威胁人类健康和社会发展。2013年12月初,雾霾天气持续袭击全国25个省区市,而长江三角洲(简称长三角)地区最为严重,并在一周内演变为重度污染,预警上升为橙色,而在上海、南京等城市,预警甚至上升到了前所未有的红色最高等级,PM_{2.5}瞬时浓度值高达900mg/m³,是有PM_{2.5}记录以来最为严重的雾霾天气。中国各大城市的大气环境指标,只有不到1%的城市达到世界卫生组织(World Health Organization, WHO)所推荐的空气质量标准,中国的城市空气污染达到非常严峻的地步。严重的雾霾天气不但造成了高速公路封闭、航班取消,甚至严重的道路交通事故,而且造成了居民呼吸道疾病的暴发,在最为严重的南京等区域,中小學生一度停课,各项社会活动均受到了严重影响,雾霾的影响已经渗透到生活的各个角落。

一般人们所见到的低能见度的雾霾情况都是雾和霾的混合物。形成雾霾的原因众多,长三角严重雾霾虽然与特殊的气象条件如空气湿度、气团稳定性等有关,但主要原因是空气中存在大量灰尘、硫酸和有机碳氢化合物等细小霾粒子,其在与雾气结合的情况下,会造成天气灰蒙,能见度降低,同时危害人体健康。这些主要来自人为大气污染物排放,重点与车辆尾气、工业废气、燃煤烟气和扬尘等污染源有关。因此,雾霾突发事件的根源在于这些与人类息息相关的生产生活,如何对其进行合理有效的控制,是一项重要课题。有效地分析城市雾霾主要影响因素,对雾霾的多发地、风险地进行区域差异分析,以及有效地对雾霾风险源进行风险评估与区域协防来降低雾霾风险和损失,同时寻找减缓雾霾影响的有效途径是一项重要的研究。

1.1.2 课题研究意义

鉴于伦敦雾、洛杉矶光化学烟雾等发达国家的大气污染灾害事件,我国在经济发展过程中对城市突发事件和灾害预防的关注需要日益加剧。欲减少长三角地区霾日数,需深入了解引起霾日数增多的原因。目前气象部门和环境部门已经对霾污染问题和能见度下降问题逐渐展开了研究。但对于雾霾的形成机理和控制策略的研究还在探索阶段,其中雾霾引发突发事件的风险研究较少。雾霾灾害的风险研究关系整个城市生态环境的风险预防和风险应对,有利于整个社会的健康和健康发展。同时由地理学第一定律(Tobler's first law of geography)可知,空间单元之间具有连通性,从空间角度出发,所有地理事物都存在一定的相互联系或影响,且这种联系或影响与地理事物间的距离具有显著联系,跨区域影响使得环境突发性污染事件的区域空间关联性变得更复杂。因此,研究大气污染溢出规律、界定大气污染时空扩散范围和解析区域大气污染物来源,对于合理制定大气污染区域协同防治措施,推进生态社会建设具有重要现实意义。同时对我国长三角城市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染公众应急能力进行评价,有助于深入认识公众在应对空气污染突发事件时所起的基础性作用。当前国内外学者对于环境突发事件的应急能力研究成果大多着眼于政府的角度,忽视了社会公众这一城市基础力量,然而城市群众是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染事件最直接的感受者和接触者,对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染公众应急能力的评价具有重要的研究价值。

改革开放以来,我国经济社会得到快速发展,粗放的经济增长模式、居高不下的污染排放及迅速的工业化与城市化步伐,使得相关区域内空气质量日趋恶化,严重威胁了国家生态安全和人类健康,整个社会对空气污染问题尤其是细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关注程度日益提高。在哥本哈根气候大会上,我国承诺到2020年二氧化碳排放占GDP的比例比2005年下降40%~45%。2014年5月,习近平总书记首次用“新常态”描述中国经济发展阶段,指出中国经济呈现高效率、低成本、可持续的发展特点。2015年全国两会期间,雾霾防治等环保议题受到了社会各界的广泛关注。李克强总理在政府工作报告中明确提出要“打好节能减排和环境治理攻坚战”,积极应对气候变化,并在多个不同场合表达了“要向雾霾等污染宣战,不达目的决不停战”的决心。因此,深入探究我国雾霾与经济增长之间的关系,对于提升我国经济发展质量、推进生态文明建设、实现经济与环境协调发展具有重要意义。真正实现“既要金山银山,又要绿水青山”。本书从宏观和微观维度为长三角城市大气污染防治提供了一定的科学理论基础和技术支持,对政府因地制宜地制定节能减排政策具有重大的理论意义及实用价值。

1.2 国内外研究进展综述

1.2.1 雾霾影响因子综述

雾霾污染的来源众多且形成过程复杂,不同地区、气象因素、不同季节和时间点的污染状态具有显著差异。吴兑^[1]研究了我国 2002~2011 年 10 年间的灰霾天气,指出灰霾天气的本质是光化学污染引起的气溶胶污染,并且随着城市化加快和经济发展越来越频繁。张小曳等^[2]从气象角度研究了雾霾气溶胶的凝结核在大气环境中的循环规律,指出了持续性雾霾污染现象就是人为气溶胶所产生的“恶性循环”。程念亮等^[3]研究了全国不同区域的 PM_{2.5} 来源具有不同的组成结构及不同季节的特点,指出全国雾霾的主要污染源依次为工业源、燃煤源、汽车尾气。顾为东^[4]认为我国雾霾形成除了燃煤、垃圾焚烧、汽车尾气和工业废气等普遍性因素外,还存在水土环境严重富营养化导致严重污染的特殊原因。吴天魁等^[5]将雾霾原因分为:气象原因、自然原因和人为原因 3 大类 16 个来源。童玉芬和王莹莹^[6]认为除了气象因素、污染气体排放等直接原因外,人口的过快城市化及新增的各类生产生活活动也是雾霾形成的主要原因之一。Wang 等^[7]研究了中东部地区雾霾的形成机制,认为严重雾霾的外因是大气循环反常、冷空气较弱,以及不利于空气流通的地理和气候条件;内因是空气中原始污染气体向二次气溶胶的快速转变。Tao 等^[8]分析发现东部地区夏季出现的黄色雾霾云层来自空气扬尘、燃烧排放、人为活动的污染物的混合和相互作用,表明灰尘的跨区输送和湿度过高是雾霾日益严重的主要原因。Zhen 等^[9]研究了长三角地区雾霾污染成分的长期变化,认为空气中的微粒子是控制雾霾污染的关键因素。Wang 等^[10]研究了 2013 年雾霾最严重的 3 个时段,结果表明生物群落、有机碳、元素碳、含氮颗粒物和含硫颗粒物在各时期都明显增加,是雾霾的主要形成因素。施晓晖和徐祥德^[11]研究了北京地区气溶胶与大雾天气的关系及气溶胶颗粒物的影响成分。王杨君等^[12]分析了上海雾霾颗粒物中碳元素含量和结构在不同情况下的变化规律。包贞等^[13]基于环境受体样本信息剖析了雾霾颗粒物的主要来源比例。Cotton 等^[14]通过层积云与雾霾动力学机制风险研究雾霾形成。国内学者主要通过颗粒物风险源和细微粒子^[15, 16]、雾霾主要污染物^[17],同时运用统计分析方法^[18, 19]、不同气候因素^[20]等分析雾霾风险因素。丁镭等^[21]从城市化 4 个维度建立了城市化综合水平体系并结合压力响应模型建立了空气综合水平评价指标,探讨了空气综合指数对城市化程度的响应特征。张纯和张世秋^[22]认为当前国内学者局限于气象学和环境科学领域且偏重于研究污染源及其强度范围,综合研究了城市形态中相关因素与空气质量的相互关系。陈书忠等^[23]将系统动力学模型引入环境影响模拟中,以主要污染物和

能源消耗为中心,模拟分析了四种情景模式下能源结构和城市规模的变化趋势及相应的污染物排放。郑明和马宪国^[24]分析了上海市能源消费中不同类型能源对形成 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献关系,表明以煤炭和石油制品为主的能源格局是 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度过高的首要因素。Qiao 等^[25]通过对上海市 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的监测及组成进行分析,发现雾霾的污染特征及雾霾天 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的变化。Murillo 等^[26]对美国中部哥斯达黎加城市的 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 化学特征进行了分析。Sun 等^[27]对北京 2013 年 1 月严重雾霾的来源及演变过程进行了研究。

1.2.2 雾霾时空分布特征综述

对空气质量变化特征的研究已成为研究热点。陈柳和马广大^[28]基于小波分析多层次分解了西安市的 PM_{10} 浓度时间序列,并分析了时间序列的突变点。徐鸣等^[29]利用小波方法多尺度分析了乌鲁木齐市 PM_{10} 浓度振荡周期。王海鹏等^[30]基于小波变换研究了兰州市 10 年间的空气质量。余予等^[31]研究了 32 年间北京城区的能见度的季节变化规律。杨书申等^[32]采用小波分析研究了北京市 PM_{10} 浓度变化规律,在对数据进行调试降噪后,对比相应时段的气象数据并简要分析了可能原因。冯奇等^[33]基于小波分析研究了武汉市 PM_{10} 在多尺度分解后表现的振荡主周期和突变特征。鲁凤等^[34]对上海市 12 年间的 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 逐日空气污染指数应用小波变换,揭示了空气质量时间序列的具体特征、突变点和未来趋势。吴小玲等^[35]分析了上海市 10 年来 SO_2 的时间序列变化。由于新的《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)刚制定试行,两者都没有考虑对 AQI 和 $\text{PM}_{2.5}$ 进行研究。成亚利和王波^[36]及许婉婷和陈娜芃^[37]都研究了上海市日均 $\text{PM}_{2.5}$ 的时间序列,却未能挖掘其中的重要信息。张智和冯瑞萍^[38]对宁夏地区近半个世纪雾霾情况作了统计,通过直方图和折线图直观地看出宁夏地区近半个世纪各个地区的雾霾时间分布图。马晓倩等^[39]对 2013 年和 2014 年京津冀地区的雾霾分布情况进行了时间动态分析,从季节分布上总结发现秋末冬初的雾霾浓度较高,春季、夏季的浓度相对较低。韩浩等^[40]对西安市 2013~2015 年 3 年的雾霾天气污染物监测资料和中国环境监测总站的月空气质量状况进行了折线图统计,西安市 13 个检测站的数据表明,西安市的雾霾天气主要出现在一年之中的冬季和春季,还分析了雾霾影响因子之间的相关关系。上述研究利用历史数据对过去城市发生的雾霾现象作了时间周期分析,雾霾污染严重的季节一般出现在秋末冬初。da Rocha 等^[41]对雾霾气候特征进行模拟,Wang 等^[42]对不同地点雾霾进行了比较。

近年来,空间统计分析技术得到广泛运用,现阶段空间统计分析技术在区域经济^[43]、旅游经济^[44]和土地利用变化^[45]等领域有着众多研究成果,将空间统计分析技术运用到区域雾霾风险治理中,有着重要的现实意义。

1.2.3 雾霾风险研究综述

国内学者李东海和何彩霞^[46]认为雾霾天气降低了大气能见度,会引起极端气候,阻碍交通运营,引发呼吸系统疾病和传染病,降低农业品的产量和品质。Sun 和 Huang^[47]认为雾霾天气的危害可分为环境效应、气候效应和健康效应。同济大学教授蒋大和^[48]认为我国灰霾的污染会导致一定范围的酸雨沉降。

国外雾霾影响研究主要侧重不同人群和相关疾病的影响研究。Pickett 和 Bell^[49]及 Wu 等^[50]分别研究了婴儿、孕妇类敏感人群的健康影响;Billionnet 等^[51]、William 等^[52]定量分析了室内空气污染同相关疾病的关系;Zhang 和 Batterman^[53]、Liu 等^[54]探讨了空气污染对不同人群疾病致死率的影响;Ghosh 等^[55]研究了空气污染对婴儿出生状况的风险;Sun 等^[56]分析了雾霾颗粒中各类重金属对细胞质粒 DNA 的氧化破坏作用;Shuai 等^[57]研究认为雾霾发生对大米产量有负面影响。马来西亚学者 Othman 等^[58]根据东南亚的烟雾事件计算了雾霾的疾病经济损失。

除了影响能见度,干扰交通和气候环境外,雾霾等大气污染事件对空气质量周期变化的影响也是国内外研究的重点课题。杨锦伟和孙宝磊^[59]基于灰色马尔可夫模型预测了未来平顶山市空气污染物浓度的状态概率。蔡忠兰等^[60]研究了兰州市 56 年的沙尘暴和浮尘的事件,并基于马尔可夫模型预测了将来的发生概率。成亚利和王波^[61]研究了上海市每日空气质量,发现上海市空气中的主要污染物为 PM_{2.5}、O₃、NO₂、PM₁₀, PM_{2.5} 冬季的平均水平较高但没有明显的变动规律,随机性很大。张红等^[62]研究了铜陵市空气污染物的日变化规律,发现浓度日变化与气压、相对湿度和气温呈正相关,与风速和降水日的关系因污染源而变化较大。王珊等^[63]研究了西安地区的雾霾日数与气象条件的关系,发现雾霾天数波动性快速增加,且与气温呈负相关,与连续不降水日呈正相关。对雾霾灾害的风险评价目前还没有相关研究文献。Hou 和 Zhang^[64]探讨了从 2000 年起的 5 年间国内主要环境污染问题的特点,并指出建立相应的数据库来协助进行长远的风险识别防控的提议。吴伟强和王欣^[65]通过故障树模型建立以“城市雾霾”为顶事件的故障树进行城市雾霾风险分析,徐选华等^[66]运用信息扩散模型进行雾霾的社会风险演化仿真研究。Behera 等^[67]对上海冬季雾霾的化学成分和对人体有害的组成物质进行了分析。李湑湑等^[68]对雾霾中 PM_{2.5} 相关人群的死亡进行了评估。唐魁玉和唐金杰^[69]对雾霾生态污染进行了社会风险分析。

在雾霾健康经济损失方面,谢元博等^[70]运用泊松回归模型对雾霾风险所造成的人体健康风险和损失价值进行了评估,穆泉和张世秋^[71]计算了 2013 年 1 月全国雾霾直接经济损失及健康经济损失的比例。Quah 和 Boon^[72]估算了雾霾对新加坡人口死亡和发病效应的经济损失和占到当年的 GDP 比例。Matus 等^[73]研究了空气质量、

人口、收入水平与雾霾污染边际损失的关系及污染损失占 GDP 比例的变化趋势。地区城市方面,陈仁杰等^[74]估算出 2006 年 PM_{10} 对我国 113 个主要城市的健康经济总损失,刘晓云等^[75]分别就国家和国际两个标准计算了 PM_{10} 对珠江三角洲 9 个城市的急性健康经济损失及占 GDP 比例。黄德生和张世秋^[76]研究了京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 的健康和经济改善效益。潘小川等^[77]估算了北京、上海和广州等中心城市 2010 年 $\text{PM}_{2.5}$ 引起的早死人数和经济损失。谢元博等^[78]研究了 2013 年 1 月 $\text{PM}_{2.5}$ 造成的北京市健康经济损失。陈依等^[79]分析了 10 年间南京市 PM_{10} 的健康经济损失变化特征。侯青等^[80]用 Meta (元信息) 分析定量评估了兰州市 2002~2009 年 PM_{10} 健康经济损失。Kan 和 Chen^[81]分析 2001 年上海市 PM_{10} 的经济损失及占 GDP 比例。上述研究利用历史资料计算了雾霾导致的直接健康经济损失,污染因子以 PM_{10} 为主,健康终端以人口早逝为主,部分研究使用旧的国家空气标准和国外参数,对健康经济损失的概率分布规律没有深入分析,缺少对不同损失规模的预先评估。

1.2.4 雾霾区域性联防机制综述

目前国内学者对大气污染的区域性联防机制有一定的研究成果。曹锦秋和吕程^[82]对大气污染防治的跨区域合作的法律机制进行了研究。王金南等^[83]对大气污染联防的理论与方法作了详细的说明和介绍,丰富了区域联防理论的方法。燕丽等^[84]也对区域大气污染联防机制做出了相应的探讨,从统一规划、统一评估、统一政策、统一预警、统一信息管理 5 个统一来完善区域联防协作的建议。白洋和刘晓源^[85]从法律角度考虑治理雾霾问题,首先提出我国目前在雾霾防治问题上存在的不足,主要包括法律观念落后、政府没有负起应该负的责任、对于 $\text{PM}_{2.5}$ 在法律方面治理条例不规范和机动车的管理不够完善等问题,而根据雾霾对策治理的要求,我们应该从防、治和救治 3 个方面加强对雾霾的监督和治理,具体可以利用环境标准制度、区域联防制度和规划制度等手段实现。张军英和王兴峰^[86]通过分析雾霾产生的机理和形成的条件,得出关于雾霾形成的主要原因,结合国外治理雾霾的经验,他们认为应该控制雾霾的污染源,加强机动车的尾气、工业燃煤和扬尘等细小颗粒物的处理,加强区域联防控制,要求建立跨省份联动法规政策,完善企业的清洁生产制度,提高人们的绿化生活观念。王腾飞等^[87]认为雾霾与周边城市的污染有很大的关系,要治理好雾霾天气的蔓延状况,如要治理好上海市的雾霾,首先要考虑周边江苏、浙江等长三角地区的污染来源,在整个长三角地区建立一个完善的、统一的、标准的数据共享的空气监测网,综合分析减少城市雾霾天数的方法。李彬华等^[88]总结了全国各城市的雾霾预警等级划分,并且建议合理划分出 3 个等级防止应急措施滞后或超前造成资源浪费,而且对未来 72 小时内的 AQI、首要污染物和超标污染物等进行预测,采取不同的应急措施。此外,

还建议组建AQI预测预报部门和市大气重污染事件应急指挥中心两个部门来共同实现信息共享、预警发布、应急预案启动等职能。柴发合等^[89]研究了我国大气污染区域联防联控体系中的问题,提出了设立联防联控管理委员会和建立科学研究中心等措施建议。

1.2.5 雾霾对策研究综述

以雾霾为代表的空气污染问题日益严重,如何实现有效的治理模式成为研究热点。王腾飞^[90]研究了我国雾霾和气候变化的相互关系,认为大城市的雾霾治理首先需要考虑周边地区的污染来源,在全国建立互为补充、标准统一、数据共享的环境空气监测网并在重点地区加密,其次要补充雾霾灾害的大气立法以提高污染排放成本,最后调整城市郊区的工业布局,关注农村的能源使用和秸秆利用;编制一揽子计划改善气象条件;促进机构、企业、社区和个人的合作参与。刘强和李平^[91]认为我国大范围严重雾霾不是简单的气象条件和空气污染物共同作用下的结果,而是经济活动的大量化石能源消耗、排放标准过低、生态环境系统自净能力丧失一起引起的,治理雾霾首先要把经济增长引擎从自然资源转向智力与技术投入,限制城市人口无限度扩张和过度建设无用场地及过度硬化,其次需要调整能源消费与供给结构,具体而言,要提高能源资源税、降低增值税,利用进口国外优质煤炭替代国内煤炭,发展天然气、核电,重新制定火电、钢铁、水泥和玻璃等高污染行业的环保标准,恢复湿地水体和森林类生态系统,增强空气调节吸污能力。郑国娇和杨来科^[92]认为雾霾更多的是人为因素造成的,城市化进程加快、产业和能源结构失衡、环境法规和环境交易市场缺乏都是造成雾霾的经济原因,解决雾霾问题,除了调整产业能源结构外,还需要建立区域间协同联动治理机制,尤其要借鉴美国的加利福尼亚州政府跨州合作的大气质量控制计划,欧盟关于跨国界污染的长程越界空气污染公约,同时建议参考美国的产品能耗和污染排放标准、澳大利亚的税收激励政策、日本的清洁能源补偿金制度、德国的产品责任制,通过环境产权制度、污染排放交易制度等市场机制来发挥“看不见的手”的市场作用,用经济手段解决雾霾治理的困境。Zhou等^[93]提出利用城市热岛效应建造太阳上浮塔的技术手段实现疏散雾霾的同时获取电能。Zhuang等^[94]总结了各类雾霾研究途径,介绍了各种控制雾霾的应用技术。

高广阔等^[95]运用全过程分析工具,构建了雾霾综合防治模型,将具体过程分为末端、过程和源头等3个阶段,政策保障、信用契约、竞争谈判、利益分配和监督激励等5项机制。杨立华和蒙常胜^[96]回顾了主要发达国家城市的空气重污染治理历史,总结了各国现有治理措施的共同特征,提出了多方联动对空气污染进行治理的建议。李彬华等^[97]论证了大气污染事件预警机制的有效作用,对比分析

了当前我国各大城市的空气污染事件的预警等级和标准,建议采用3个等级,并用AQI预测值作为等级划分指标,同时预警中需要添加首要污染物和超标污染物的预测,并提供不同的应急措施。此外,需要成立AQI预测预报部门和市大气重污染事件应急指挥中心两个新的机构来完成信息分析、判断和预测、实施应急预案的工作。柴发合等^[98]基于北京奥运会、上海世博会和广州亚运会的空气质量保障工作,总结了举办三次世界活动中取得的短期经验,指出当前出现的跨省跨区域协调能力不佳、机制不完善等问题,提出建立统一规划、统一监测、统一评估、统一协调的机制。彭件新^[99]借鉴中级微观经济学,提出了效用最大化和社会效益最大化的雾霾治理优化模型。

雾霾灾害发生后损失巨大,事前预防和事后的应对格外重要。邵超峰等^[100]研究了大气污染源分类分级和识别分析体系、污染物扩散预测模拟、影响范围和危害损失的定量计算、预警和应急响应体系及决策支持系统等5个方面,提到了固定源应急处置等事前规避技术和污染物的快速封堵等事后控制策略。邓林等^[101]总结了发达国家重污染事件治理的历程和经验,如限制机动车、工厂排污,推广清洁能源和环境立法等,同时指出我国大部分城市的空气污染预警和应急方案中存在发布不及时、应急措施不具体、职责部门分工合作不明确等问题。钟无涯和颜玮^[102]探析了城市生活方式、生产方式与产业结构等对解决PM_{2.5}问题的效果,指出区域产业结构调整才是实现兼顾城市发展、环境保护的最佳路径。

综合以上研究情况,从国内外与本项目相关的问题研究来看,主要存在以下几个方面的局限性。

(1) 目前学者对雾霾的研究多集中在概念化的层面,没有对形成雾霾的根源进行深入研究,只是对相应的污染源进行了列举式的描述,缺乏详细的分类和危害程度的研究,更没有技术层面的支持。

(2) 尚没有进行相应的雾霾突发事件风险评估,也没有科学合理的应急管理体系作指导,以至于在雾霾发生时缺乏应急决策的支持,处于被动状态。

(3) 目前大多数对雾霾风险研究涉及的群体较小,并未对城市间甚至区域间的雾霾风险应对及联防联控进行研究,对于区域雾霾联防联控机制的研究同样非常重要。

(4) 针对雾霾天气的应对措施多集中在建议阶段,缺少量化模型的支持,这在实际推行过程中往往缺乏力度和可执行性。

1.3 研究内容

针对1.2节中提到目前研究方面的局限性,提出以下几点主要研究内容。

(1) 充分收集基础数据,对雾霾成因进行深层次的探究,确定导致雾霾的主要污染源所在,并对其进行分类。建立针对污染源的风险评估体系,对主要污染