

气候变化与公共政策

QIHOU BIANHUA YU GONGGONG ZHENGCE YANJIU BAOGAO 2016

研究报告2016

——科学认识雾霾影响，积极应对雾霾问题

史 军 戈华清 ◆ 编著

资助项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)“雾霾监测预

气候变化与公共政策研究报告 2016

——科学认识雾霾影响,积极应对雾霾问题

史 军 戈华清 编著

 气象出版社
China Meteorological Press

图书在版编目(CIP)数据

气候变化与公共政策研究报告. 2016 : 科学认识雾霾影响,积极应对雾霾问题 / 史军,戈华清编著. --北京 : 气象出版社, 2016.10

ISBN 978-7-5029-6442-9

I. ①气… II. ①史… ②戈… III. ①气候变化-对策-研究报告-中国②空气污染-污染防治-中国 IV. ①P467②X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 253311 号

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮政编码: 100081

电 话: 010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址: <http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑: 张盼娟 简学东

终 审: 邵俊年

责任校对: 王丽梅

责任技编: 赵相宁

封面设计: 易普锐创意

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

印 张: 14.75

字 数: 378 千字·

版 次: 2016 年 11 月第 1 版

印 次: 2016 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 68.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

前 言

2013年“雾霾”成为年度关键词。自此以后,“雾霾”一词成为某些地区(尤其是城市)人们口中的热词,“雾霾”成因分析、防治机制等问题也成为地方与中央政府面临的重大环境问题与社会问题。雾和霾是自然界使能见度降低的两种不同的天气现象。雾是由大量悬浮在近地面空气中的微小水滴或冰晶组成的水汽凝结物,常呈乳白色,使水平能见度低于1 km。霾(灰霾)是指大量极细微的颗粒物均匀地浮游在空中,使水平能见度小于10 km的空气普遍浑浊现象。但目前人们所关注的“雾霾”主要是天气现象与环境污染所共同导致的灰霾,这种意义上的“雾霾”是特定气候条件与人类活动所产生的污染物相互作用的结果。空气中的各类污染物排放一旦超过大气循环能力和承载度,细颗粒物浓度将持续积聚,若此时受静稳天气或其他气象条件等影响,极易出现大范围的雾霾。由于大范围霾天气的出现会对人们的工作、生活与学习造成影响,中央与地方政府都采取一系列措施来预防重霾现象的产生、应对或有效处理灰霾所产生的一系列问题。2013年以来,针对“雾霾”现象进行研究的论述也越来越多,其范围涵盖了雾和霾的成因、对经济社会发展以及人体健康的影响、治理机制、法律制度与法律责任的承担、经济措施等。南京信息工程大学气候变化与公共政策研究院亦选择将“雾霾”问题作为近期的研究重心,并非为了应景或追逐某一学术思潮,而是从问题出发,希望能凝聚此方面的研究人员,对此类问题开展有深度的研究。正是基于此目标,自2014年起,研究院开始着手准备此方面的研究,此次研究的主题是“科学认识雾霾影响,积极应对雾霾问题”。

关于“雾霾”成因,典型观点认为,不利气象条件是雾、霾天形成的“元凶”,空气污染物是“帮凶”^①。事实上,被动地等风来吹散“雾霾”的消极应对,反映了我们在“雾霾”防治中的捉襟见肘、制度乏力;以末端治理的方式通过“防霾水炮”这一所谓的“神器”来化解“雾霾”危机,亦是治标难治本;实践中以环保和气象部门为主导的“雾霾”监测与监管体系,也反映出我们在“雾霾”防治的协作与合作方面力度不够。我们都知道“雾霾”问题的产生与发展,非一日一事之过。经济活动总体规模巨大,导致污染物排放量严重超标,致使总量控制难以达标;污染物排放标准较低使得排量过高,污染物排放浓度难以有效控制;生态环境系统自净功能丧失,导致污染物无法消散,这是大面积“雾霾”形成的原因^②。因此,防治“雾霾”,并非一日一事之劳。这表明,科技治霾不是一个管理部门就能做的“家务事”,也不是哪一家企业就能“搞定”的^③。科技治霾的首要条件是我们必须摸清“雾霾”产生的根源与一定气象条件下的污染物扩散状况;污染源来自哪里,从何处着手能减少污染物的排放;“雾霾”对社会、人体、生态等各方面的

① 张军英,王兴峰. 雾霾的产生机理及防治对策措施研究. 环境科学与管理,2013(10):157-159,165.

② 刘强,李平. 大范围严重雾霾现象的成因分析与对策建议. 中国社会科学院研究生院学报,2014(5):63-68.

③ 胡阳. 广场摆放“水炮”是治霾还是在瞎折腾? 2014-05-05. <http://big5.news.cn/gate/big5/huyang4681.home.news.cn/blog/a/0101004F4EEC0CFC25F3997B.html>.

影响究竟是什么,通过哪些措施可以减缓不利影响,保障社会的良性发展。因此,从总体上说,要想有效防治“雾霾”,需要全社会从不同层面打破利益格局、扩大地区联动治污模式,加快推动产业结构与能源结构调整,促进新兴环保产业与环境治理产业的发展,才能取得良好的效果。

本书主要围绕理性认识“雾霾”问题,科学评估“雾霾”影响、防治“雾霾”危害、应对“雾霾”问题的实践机制与制度体系,以及“雾霾”防治中的其他相关理论问题展开探讨。

在理性认识“雾霾”问题与科学评估“雾霾”影响中,吉中会、王桂芝、马玉霞等人的研究提供了可供借鉴参考的理论依据。吉中会等人采用的三维联合概率模型,描述了雾霾灾害特征的变量(致灾因子、暴露度及脆弱性),并在此模型分析基础上,得出中国各区域雾霾的风险程度,为灾害风险评估提供新的思路和方法,并为提升我国各区域应对雾霾灾害的能力提供可靠的理论参考依据。吉中会等人的研究表明,单要素中致灾因子危险性指标呈正态分布,承灾体暴露度指标呈威布尔分布,承灾体脆弱性呈广义极值分布;三维联合概率分析结果显示,雾霾风险三要素的值越大,相应的三维联合风险概率就越高;条件概率分析发现,致灾因子的给定阈值越小,雾霾发生的风险越高。这一研究与当下其他学者对于三区十群及重点区域雾霾防治的研究结果具有一致性。王桂芝、马玉霞等人针对区域性雾霾多发的现象,就北京与南京两地展开了相关研究。王桂芝等人以北京市雾霾为例,使用静态和动态的投入产出模型评估雾霾对部门经济冲击下的产业关联间接损失;并以 $PM_{2.5}$ 造成的劳动力损失和居民额外医疗费用支出作为传导变量,评价 $PM_{2.5}$ 污染所导致的居民健康损害及其对社会经济的影响。马玉霞利用南京站、六合站、江浦站、江宁站、溧水站、高淳站等六个观测站 1960 年 1 月 1 日—2015 年 12 月 31 日的地面气象观测资料,对南京地区雾与霾的气候特征及其与气象要素的关系进行了分析;结果表明,雾和轻雾在秋冬两季多发,而在春夏两季少发;灰霾日数在夏季最低而在冬季最高;较高相对湿度、静小风有利于雾、霾天气的出现,其中雾、轻雾的出现还与较高的气温日较差有关;雾霾天气的增加可能与南京市颗粒物污染尤其是细颗粒物的污染加重有关。上述这些基础性研究,对于我们弄清楚雾霾的产生原因、社会影响等有重要的参考意义。

科学治霾不仅是认识问题,更是一种复杂的实践机制。单海燕分析了长三角区域的雾霾治理现状,得出雾霾治理应是一个复杂的系统工程。单海燕的研究表明雾霾治理需要采取多层次的措施,如从产业共生、政府监管、社会监督三方面共同着手,应加强联动协作形成政府监管层的网络结构,各职能部门间、与产业共生主体间以及社会监督层之间也存在相互影响及相互作用关系;雾霾泛滥非一朝一夕所形成,所以,治理亦非一朝一夕之能事。从制度设计的角度来看,政府应该在顶层统一设计下,动员全民参与、全民行动。彭本红等在详细分析三种治理模式优劣的基础上,提出了长三角区域雾霾跨域治理的多元协同对策,指出了构建雾霾跨域治理的多元协同创新、协调、绿色、开放和共享机制的重要性。此文正好与单海燕的研究相互关联。这两篇文章在一定程度上解决了雾霾治理的路径选择问题,为我国雾霾治理方向及模式的选择提供了重要参考。

徐骏的《雾霾信息公开机制构建研究》、董勤的《低碳技术国际转让与雾霾治理问题研究》、杨慧宇的《雾霾治理背景下我国的垃圾分类模式:现状与对策研究》以及戈华清等的《雾霾治理背景下中国重污染天气应对机制》则从具体公共对策的选择、具体制度的适用等方面对我国雾霾治理进程中所面临及亟待解决的问题进行了实证研究,并提出相应的解决对策。徐骏认为知情权是公民实现监督权和参与权的前提,因此雾霾相关信息的公开是实现上述理想图景的坚实基础。探讨雾霾污染过程中,信息公开的主体、内容、程序和责任机制,对保障雾霾治理的

透明度,集中优势资源,降低防治成本具有重要的意义。董勤认为雾霾问题产生与气候变化问题同根同源。气候变化技术国际转让有助于减少化石能源消耗和温室气体排放,因此同样有助于解决雾霾问题。在应对气候安全挑战方面,人类能够利用的时间已经不多,加速低碳技术国际转让迫在眉睫。诚如杨慧宇所说,多中心治理模式在我国垃圾等固体废物处理中的地位也十分重要,这恰好与上述单海燕、彭本红等人的观点不谋而合。雾霾严重往往导致重污染天气,对于此类现象或问题的应对,并非环保或气象部门可以单独解决,我们需要通过完善的法律制度、一体化的应对机制、具体可行的措施等来提高对大气重污染灾害的预防、预警和应急处置能力,降低大气重污染危害程度。凌萍萍的《气候变化与雾霾治理的公法研究》与郭刚的《从运气学说探究雾霾治理与人体健康研究》则为探索解决雾霾问题提供了新的视野。

编 者

2016年7月

目 录

前言

中国雾霾综合风险评估及对策研究	(1)
一、研究背景及意义	(2)
二、国内外研究进展综述	(3)
三、研究内容与方法	(5)
四、结果分析	(8)
五、雾霾治理的对策思考	(15)
六、结论与讨论	(17)
雾霾对北京地区的公共健康与经济社会影响评估——基于 CGE 模型	(21)
一、国内外相关研究的学术史梳理及研究动态	(22)
二、研究意义及应用价值	(24)
三、基于投入产出模型的北京市雾霾间接经济损失评估	(25)
四、基于 CGE 模型的北京市雾霾社会经济影响评估	(33)
南京市雾与霾天气变化规律及其健康效应研究	(43)
一、概述	(44)
二、雾与霾的时间变化特征及其成因	(48)
三、南京市雾与霾的空间分布特征及其成因	(52)
四、南京市雾、霾与气象条件的关系	(54)
五、南京市大气污染物时间变化特征	(55)
六、雾、霾事件的污染特征及成因分析	(61)
七、灰霾天气对健康的影响	(66)
八、总结与讨论	(66)
产业共生视角下长三角区域雾霾治理研究	(72)
一、文献综述	(73)
二、长三角区域雾霾治理现状	(76)
三、产业共生视角下长三角区域雾霾应对策略	(84)
雾霾跨域治理的多元协同机制研究	(91)
一、引言	(92)
二、雾霾跨域治理的多元协同的理论分析	(94)

三、雾霾跨域治理的多元协同模式和机制	(97)
四、雾霾跨域治理的多元协同案例	(102)
五、长三角地区雾霾跨域治理的多元协同对策	(106)
六、结论	(108)
雾霾信息公开机制构建研究	(110)
一、雾霾信息公开的研究现状与趋势	(111)
二、雾霾信息公开的正当性	(112)
三、雾霾信息公开的可能性	(113)
四、雾霾信息公开的主要障碍	(115)
五、雾霾信息公开的制度完善	(119)
低碳技术国际转让与雾霾治理问题研究	(125)
一、引言	(126)
二、《联合国气候变化框架公约》及其议定书下技术机制概述	(126)
三、气候变化问题安全化凸显加速气候变化技术国际转让的重要性	(131)
四、现行气候技术国际转让模式不能适应应对全球气候安全挑战的需要	(132)
五、加速气候变化技术国际转让迫在眉睫	(135)
六、气候变化技术国际转让有助于解决雾霾问题	(136)
七、抓住《巴黎协定》通过的契机推动气候技术转让促进解决雾霾问题	(136)
八、结语	(138)
雾霾治理背景下我国的垃圾分类模式：现状与对策研究	(140)
一、引言	(141)
二、文献回顾及研究框架	(142)
三、宏观层次制度分析：缺乏“社会资本”	(144)
四、对三种具体垃圾分类模式的比较制度分析	(146)
五、对几种现有模式的评估	(152)
六、对于建设我国垃圾分类治理模式的对策建议	(153)
我国重污染天气应对机制研究	(156)
一、重污染天气	(157)
二、重污染天气预警与霾预警	(160)
三、重污染天气应对机制建设现状	(161)
四、我国重污染天气应对机制存在的问题	(167)
五、如何完善重污染天气应对机制	(171)
雾霾治理的环境法理研究	(175)
一、雾霾应对措施之争议及其法律问题	(176)
二、雾霾治理的理论依据：行政紧急权及其反思	(179)

三、国家环保义务：雾霾治理的深层法理·····	(182)
四、对雾霾治理措施的司法审查·····	(186)
气候变化与雾霾治理的公法研究·····	(191)
一、引言·····	(192)
二、气候变化与雾霾治理的公法的基础理论·····	(193)
三、大气污染防治法·····	(195)
四、气候安全法·····	(203)
五、气候变化与雾霾治理的刑法研究·····	(208)
从运气学说探究雾霾治理与人体健康研究·····	(215)
一、文献综述·····	(216)
二、运气学说的思维方式·····	(217)
三、评价措施·····	(221)

中国雾霾综合风险评估及对策研究

摘要:近年来我国雾霾逐渐成为影响大并且急需关注的气象灾害之一。本文首先分析了2001—2010年我国人口加权平均 $PM_{2.5}$ 浓度的时空变化格局,发现以江苏、安徽为代表的长三角地区的雾霾,在此时间段有显著的上升趋势,雾霾在空间上具有显著的空间集聚现象,“高-高”值集聚的省份大多在东、中部地区,如河北、山东、河南、安徽、北京、湖北等;“低-低”值集聚的省份在西部和东北地区,如吉林、新疆等。从风险评估需要综合考虑的致灾因子危险性,承灾体暴露度和脆弱性的角度出发,选择人口加权平均 $PM_{2.5}$ 浓度、人均GDP密度以及承灾体脆弱性指数作为指标,采用三维非对称Gumbel联合函数及相应条件概率模型分析了我国21世纪前10年的雾霾灾害风险。单要素结果显示,致灾因子危险性指标呈正态分布,承灾体暴露度指标呈威布尔分布,承灾体脆弱性指标呈广义极值分布;三维联合概率分析结果显示,雾霾风险三要素的值越大,相应的三维联合风险概率越高;条件概率分析发现,致灾因子的给定阈值越小,雾霾发生的风险越高。此外,我国雾霾风险超出美国环保署健康标准值的概率较高,大多数承灾体暴露度和脆弱性组合条件下的超越概率值在0.80~0.99之间;而超过我国雾霾一级平均浓度限值的风险概率在0~0.9之间变化,承灾体暴露度和脆弱性指标与雾霾风险呈正相关的关系。

关键词:雾霾;时空变化;风险评估;联合概率;治理对策;中国

The Comprehensive Assessment for Haze Risk and Countermeasures in China

Abstract: Haze has become one of the most damaging and pressing meteorological disasters in recent years in China. This paper firstly analyzed of the weighted $PM_{2.5}$ of the average population in 2001—2010 in China from the spatio-temporal perspective, the results show that there were a significant upward trend in the provinces of Jiangsu and Anhui as the representation in the Yangtze river delta region during this time period. And the fog has notable spatial agglomeration phenomenon in space, high-high values gathered together in the east and central regions of China, including Hebei, Shandong, Henan, Hubei, Anhui, Beijing; Low-Low values concentrated in the west and northeast of China, such as Jilin and Xinjiang. The con-

centration of $PM_{2.5}$ about the weighted population, the per capital GDP density, and vulnerability index are the selected indicators as the representative elements about hazard, exposure and vulnerability for the haze risk assessment from the comprehensive risk perspective. The asymmetrical Gumbel copula model and the related conditional probability are used to analyze the haze risk. The results show the hazard follows normal distribution, the exposure of the hazard-affected body obeys the Weibull distribution, and the vulnerability index of the hazard-affected body comply with generalized extreme value distribution. The tri-variable joint probability model reveals the joint risk will increase with the three elements rising. The conditional probability analysis shows the smaller the threshold, the higher the haze risk. Therefore, the values of haze risk in China are higher than the health standard of Environment and Protection Association (EPA), and the exceeding probability values are changing between 0.80 and 0.99 under the most condition of the combination of the exposure and vulnerability for hazard-affected bodies. While the probability values exceed the level one of the threshold in China about the haze risk are changing between 0 and 0.9, and the indexes about exposure and vulnerability are positively correlated with the haze risk.

Keywords: Haze; Spatio-temporal change analysis; Risk assessment; Joint probability analysis; Countermeasure; China

一、研究背景及意义

雾霾是特定气候条件与人类活动相互作用的结果。《迈向环境可持续的未来——中华人民共和国国家环境分析》报告显示,中国最大的 500 个城市中,只有不到 1% 的城市达到世界卫生组织推荐的空气质量标准,与此同时,世界上污染最严重的 10 个城市有 7 个在中国,说明中国受雾霾的影响已经达到了非常严重的程度。国家减灾办和民政部于 2014 年 1 月 4 日首次将危害健康的雾霾天气纳入 2013 年的灾害灾情统计中,由此可见,雾霾的影响已经引起国家相关部门的高度重视。

(一) 研究背景

随着现代化进程的加快和人类活动的加剧,人类社会的风险性和不确定性特征日益显著,人类在风险面前的脆弱性也显著增加。雾霾作为近年来频繁爆发的一种自然灾害,给生产生活秩序和社会发展的稳定性带来的冲击愈发严重,同时也对政府的危机管理能力提出了严峻考验。雾霾形成的自然因素、人为因素、波及范围、危害性等方面均受到各领域的广泛关注,从风险的角度对雾霾进行的分析和探索内容亦方兴未艾,如雾霾对人类健康影响的风险评估、人类对雾霾灾害风险的感知等,但是从灾害系统理论的角度去分析雾霾风险的研究还非常缺乏,已有的仅从风险源角度进行的分析只是风险评估中的危险性评估部分,完整的分析还需要综合考虑承灾体的情况,因此,将自然危险源因子和承灾体因子同时考虑,是风险评估的必然趋势。

(二) 研究意义

由于雾霾一直被视为大气环境污染现象之一,因此研究角度仍主要集中于气象气候或生态环境方面,切换到灾害学角度进行研究的时间还较短,而雾霾目前已经成为公认的自然和人为作用灾害种类,因此有必要从新的专业角度来考虑。本研究专门从灾害系统论角度,考虑雾霾的时空分布规律,并从整体上对中国雾霾进行综合风险分析,以弥补当前雾霾灾害风险在理论研究上的不足,同时对其他类型灾害的风险评估具有借鉴意义。从灾害系统论角度出发,研究我国雾霾灾害的风险,可以弥补现有灾害风险理论中的不足。

本研究所采用的三维联合概率模型,描述雾霾灾害特征变量(致灾因子、暴露度,以及脆弱性),得出中国各区域雾霾的风险程度,并针对风险评估结果提出相关对策和建议,为灾害风险评估提供新的思路和方法,为提升我国各区域应对雾霾灾害的能力提供可靠的理论参考依据。

二、国内外研究进展综述

目前,雾霾研究主要集中于已经发生的雾霾属性特征、形成机理影响,以及雾霾的治理方面,对于未来雾霾可能造成危害的风险问题研究则十分缺乏,雾霾风险评估领域新兴的研究方向主要包括人类的健康风险和风险感知等,从灾害系统角度出发的相关研究理论和成果则非常少。

(一) 国外研究现状

雾霾最显著的表现就是通过大气中的污染物影响大气的能见度,其时空变化很早就引起国外学者的关注。关于雾霾的研究主要集中在雾霾的颗粒成分、形成原因、雾霾数据获取,以及雾霾的危害机理和治理等方面。在颗粒组成及成因方面,相关研究表明 SO_4^{2-} 是形成雾霾的关键因素, NO_3^- , NH_4^+ 和有机组分是 $\text{PM}_{2.5}$ 中含量最高的成分^[1-2]。Senaratne 等分析讨论了造成霾天气的可能污染源^[3]。Shooter 等采集了 Auckland 冬季的颗粒物样品,认为雾霾成因是静风、机动车尾气排放以及家庭燃烧^[4]。在雾霾数据获取方面,早期以基地观测为主,后来由于遥感卫星技术的发展和运用,大大提高了雾霾的观测效率和精度,相关学者也在遥感影像获取雾霾数据方面做了较多的研究^[5-6]。此外,相关研究显示气象参数,如相对湿度、风速、风向等都对雾霾的产生有重要影响,而这些气象参数中,风速和相对湿度则被认为是最重要的两个因素^[7-8]。Malm 对美国大陆性霾天气的化学成分的时空分布进行了分析,并对其污染源进行了追踪和模拟^[9],还有一些学者研究了区域性雾霾对气候的影响^[10]。

雾霾的机理和影响方面,主要集中探讨了雾霾中吸入人体的颗粒物可能产生的对人体健康产生危害的致病机理的研究^[11-12]。在雾霾治理方面,主要考虑通过立法、控制污染物排放,以及生态治理等手段来实现,相关研究为这些措施手段提供参考依据^[13]。

雾霾的健康风险评估方面,主要是研究雾霾和各类疾病之间的相关定量关系,以及雾霾对各年龄阶段人群致癌风险的影响。例如,Zhang 等将人群根据年龄、性别、季节、滞后日期,以及疾病类型划分,采用污染物模型分析发现,前 1 天的雾霾、前 5 天累计的 NO_2 和前 3 天的 SO_2 对 19~64 岁之间的人群及女性的影响非常大,雾霾和心血管疾病的关系密切,污染物中的 NO_2 是导致呼吸道疾病住院的最大风险因素^[14]。Zhang 等通过单变量分析发现雾霾和心

血管、脑血管,以及呼吸道疾病有明显的正相关关系,其后期的影响比前期更加严重^[15]。Lu 等研究 PM_{2.5} 中多环芳烃化合物浓度、组成、来源,以及相关癌症的风险,结果显示雾霾发生时期的苯丙致癌潜力要高于非雾霾时期,30 岁以上的中年人群受多环芳烃化合物影响的癌症风险更高^[16]。

雾霾风险感知方面研究处于起步阶段,相关成果较少。例如,Ho 等通过网络征集参与者的方式评估了雾霾暴露的心理压力因子,对 298 名被调查者进行关于人口调查问卷、身体状况检查表、感知危险污染物的标准指数值,以及修订版的事件影响量表等方面的调查,研究发现雾霾危机与急性的身体症状及轻微的心理压力有密切的关系^[17]。

(二)国内研究现状

我国雾霾研究始于 20 世纪 80 年代,早期研究集中于雾与霾的识别,后来逐渐发展为对较长时期内雾霾过程光化学特征分析,并基于地面气象数据对雾与霾天气的特征进行统计分析和气候学统计分析^[18-19]。此外还有不少学者对一次持续性雾霾过程进行了研究分析,认为雾霾的成因可能与频繁出现的鞍形场静稳天气及细颗粒物排放源有关,另外还与污染物的排放有关^[20]。随着研究的深入,区域雾霾研究越来越引起人们的重视,比较有代表性是珠三角地区,其气溶胶污染相当严重^[21],另外,京津冀地区、东北地区也有部分相关研究^[22]。

雾霾的机理和影响方面,主要通过对大气环境和社会经济背景的分析,从理论上阐述和解释雾霾的形成和产生的影响。例如,张军英等通过对雾与霾产生条件及机理的分析,认为空气湿度接近饱和、大气层结稳定、存在冷却条件及大量霾粒子是导致中国中东部产生雾霾的条件及原因,同时认为,雾霾产生的条件中天气及气候因素目前人类难以控制,因此提出防治雾霾的关键是要控制目前受人类影响的霾离子的防治思路^[23];李文健分析了中国城市雾霾的现状和成因,采用库兹涅茨曲线分析了雾霾对中国人口和经济的影响,并提出了相关控制雾霾的措施^[24]。

雾霾的健康风险评估方面,主要是考虑 PM_{2.5} 浓度与各类疾病的关系,来反映雾霾风险的程度。例如,谢元博等采用泊松回归模型评估了北京居民对高浓度 PM_{2.5} 暴露的急性健康损害风险,并用环境价值评估法对各类疾病人群的健康经济损失进行了评估^[25];李湉湉等采用时间序列分析模型和应用比例风险模型分别计算北京市 PM_{2.5} 对人群死亡的暴露-反应关系和重度雾霾时期 PM_{2.5} 污染造成的超额死亡风险,研究结果显示心脑血管和呼吸系统疾病是 PM_{2.5} 污染的敏感性疾病,在重度雾霾天气期间,PM_{2.5} 可增加人群超额死亡风险,并表现出一定地区差异,以人口密集和污染浓度高的中心城区健康风险最高^[26]。

雾霾风险感知方面,相关研究主要通过调查问卷结合相关统计分析完成。例如,李娟等通过发放调查问卷的方式研究了南京市江宁区年龄超过 6 岁,居住时间超过 2 年的居民对雾霾影响健康的风险感知状况,结果显示当地居民对雾霾有一定了解,雾霾对居民生活造成了一定的影响^[27]。曾贤刚等运用权变评价法调查了北京市居民对大气细颗粒物 PM_{2.5} 健康风险的认知状况、行为选择及降低健康风险的支付意愿,分析发现 82.5% 的居民认为北京市空气污染较为严重,52.4% 的居民知道雾霾天气是由 PM_{2.5} 引起的并认为其会给自己和家人的健康带来影响,92% 的居民认为政府应该承担更多降低 PM_{2.5} 健康风险的责任^[28]。

综上所述,可以看出目前雾霾的研究已经从早期的仅对已经发生的雾霾属性特征及影响方面的关注,逐步拓展到对人类健康研究的领域,相关学者已经逐步意识到此类灾害的风险研

究对人类发展的意义重大,但是相关研究尤其是风险研究仍然十分缺乏,作为主要承灾体之一的人类更加准确而全面地对其发生风险作出分析和预测,可以为相关部门雾霾治理的决策提供有意义的理论参考依据。

三、研究内容与方法

(一)研究思路及数据资料

1. 雾霾灾害的时空分布规律研究

雾霾以 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 为主要成分,但国内自 2012 年才开始正式统计 $PM_{2.5}$ 的相关数据,且数据的获取非常困难。目前,国内外学者除采用自行观测的数据外,大部分均采用巴特尔研究所(Battelle Memorial Institute)和哥伦比亚大学国际地球科学信息网(Center for International Earth Science Information Network)研发的全球 2001—2010 年 $PM_{2.5}$ 年均值。该数据利用 Donkelaar^[29] 等人的研究思路,将遥感气溶胶光学厚度(remotely sensed aerosol optical depth)通过物理和化学模型反演、解析,得到不同湿度下的区域 $PM_{2.5}$ 的年均值。同时,该团队成员还制成了人口加权的全球 2001—2010 年各省的 $PM_{2.5}$ 值。因此,本文从时空角度出发,研究中国近几十年来雾霾灾害的时空演变规律。根据搜集整理的中国各省 2001—2010 年 10 年人口加权平均 $PM_{2.5}$ 浓度(单位: $\mu g/m^3$)资料,通过趋势分析方法以及空间相关分析法,借助于 ArcGIS 系统平台分析我国雾霾灾害随时间发展呈现的变化趋势特征以及空间分布差异及演变规律,并将其作为进一步分析雾霾综合风险的基础。

2. 雾霾灾害风险评估的指标体系的构建

本文在分析雾霾时空演变规律的基础上,根据我国雾霾的空间分布差异特征,结合文献和相关统计资料,整理归纳各区域雾霾形成原因,从致灾因子、暴露度、脆弱性三方面寻找合适指标,分区域构建雾霾综合风险评估指标体系。IPCC 第五次评估报告提出的风险概念认为,灾害风险应当包括致灾因子的危险性,承灾体的暴露度和脆弱性三大要素。从灾害风险系统角度来看,致灾因子是指自然灾害的危险性因子,它是可能造成生命伤亡与人类社会财产损失的自然变异因子;暴露度是指社会经济财产、资源和基础设施有可能受到不利影响的位置,也是灾害影响的最大范围;脆弱性是指受到不利影响的倾向或趋势,内含两方面要素:一是承受灾害的程度,即灾损敏感性(承灾体本身的属性),二是可恢复的能力和弹性(应对能力)^[30-31]。

因此,本文根据雾霾灾害的特征以及最新的风险概念,构建了表征我国雾霾风险的指标体系。致灾因子选取中国各省(由于数据限制,未考虑港澳台地区)人口加权平均 $PM_{2.5}$ 浓度($\mu g/m^3$)作为造成危害的自然变异因子;考虑到研究区域的覆盖范围,将区域人均 GDP 密度(元/人/ km^2)作为承灾体的暴露程度指标;脆弱性指标考虑灾损敏感性和恢复力两方面,分别选取易感人群比重(老年人与儿童人口之和占总人口的比重)和人均医疗机构数量来反映雾霾风险影响对象的敏感程度和应对雾霾的能力。致灾因子数据来源于巴特尔研究所和哥伦比亚大学在研制的全球数据基础之上,估算的中国全境 $PM_{2.5}$ 污染物浓度年平均(2001—2010 年),承灾体暴露度和脆弱性数据来源于相应年份的中国统计年鉴数据(中国 2002—2011 年统计年鉴)。

3. 三维 Copula 函数的雾霾综合风险评估及对策建议

本文在构建的雾霾风险评估指标体系的基础之上,分析各指标的最优边缘分布,选择合适的三维联合概率模型,并进行参数估计,实现雾霾的综合风险评估。在风险评估结论的基础之上,结合已有研究的相关成果,归纳、凝练并提出雾霾风险管理的对策及建议。

(二)研究方法

1. 时间序列的线性回归趋势分析

时间序列回归分析(time series analysis)是一种动态数据处理的统计方法。统计根据收集的人口加权的中国 2001—2010 年各省的 $PM_{2.5}$ 值数据,分析各省 10 年的雾霾浓度的变化趋势,确定并分析变化趋势显著的区域。

2. 空间相关分析法

Tobler^[32]曾提出“地理学第一定律”(first law of geography),认为“任何事物在空间上都是关联的;距离越近,关联程度就越强;距离越远,关联程度就越弱”。由于中国的人口分布和经济发展程度存在着空间集聚现象, $PM_{2.5}$ 值也可能存在着类似特征。本文采用了 Moran^[33]提出的 Moran's I 指数,以检验 $PM_{2.5}$ 值的全局空间相关性。其计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (A_i - \bar{A})(A_j - \bar{A})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (A_i - \bar{A})^2} \quad (1)$$

其中, n 为所研究的省份数,这里为除重庆、港澳台之外的 30 个省份(含直辖市、自治区,下同); i, j 表示各省份, A_i, A_j 表示第 i, j 个省份的人口加权的 $PM_{2.5}$ 值; $S^2 = (A_i - \bar{A})^2$ 为 30 个省份的人口加权 $PM_{2.5}$ 值的方差; I 是指数值,用于衡量全局空间相关性的,其取值为 $[-1, 1]$ 。 I 取值为正,表示 A_i 和 A_j 是同向变化,数据呈正相关;取值越接近 1,表示正向空间自相关性越强, $PM_{2.5}$ 的高值与高值(或低值与低值)相邻; I 取值为负,表示 A_i 和 A_j 是反向变化,数据呈负相关;取值越接近 -1,则负向空间自相关性越强, $PM_{2.5}$ 的高值与低值(或低值与高值)相邻; I 取值接近于 0,则数据呈随机分布,不具有相关性。

w_{ij} 为空间权重矩阵,其取值规则为:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当省份 } i, j \text{ 相邻} \\ 0 & \text{当省份 } i, j \text{ 不相邻} \\ 1 & \text{当省份 } i = j \end{cases} \quad (2)$$

相邻指的是两个省份有共同的边或点。在计算空间权重矩阵时,将四川与重庆合并为一个省。全局和局域空间相关计算均用软件 GeoDA1. 4. 0 完成。

全局空间自相关所采用的 Moran's I 散点图检验的是整体层面上的聚类特征,但不能检验局部地区一些省份的 $PM_{2.5}$ 值是否存在聚类现象。因此,这里采用 Anselin^[34]提出的 LISA (Local Indicator of Spatial Association) 指数检验中国各省份 $PM_{2.5}$ 值的局部空间自相关特征。某区域 i 的 LISA 指数的计算公式为:

$$I_i = \frac{(A_i - \bar{A})}{S^2} \sum_{j \neq i}^n w_{ij} (A_j - \bar{A}) \quad (3)$$

其中, $n, i, j, A_i, \bar{A}, S^2$ 均与前设定相同。 I_i 是指数值,用于衡量 i 区域的空间相关性的, $I_i > 0$, 表示 i 区域中各省份的 $PM_{2.5}$ 的高值与高值(或低值与低值)相邻,即 $PM_{2.5}$ 值较高(或

PM_{2.5} 值较低)的省份在空间上集聚; $I_i < 0$, 表示 PM_{2.5} 的高值与低值(或低值与高值)相邻,即 PM_{2.5} 值较高的省份与 PM_{2.5} 值较低的省份(或 PM_{2.5} 值较低的省份与 PM_{2.5} 值较高的省份)在空间上集聚。

3. 三维 Gumbel Copula 风险评估模型

Copula 函数是求解多变量概率问题的工具,对边缘分布没有特定限制,能够描述多维变量间非线性、非对称关系,并能够灵活构造边缘分布为任意分布的联合分布函数^[35],其优势在金融风险、水文分析领域得到广泛验证。目前,Copula 函数在灾害风险评估中的应用已有学者作了相关探讨,但是主要是考虑致灾因子的联合概率,综合考虑致灾因子和承灾体而进行多变量风险评估的较少。

Copula 可以将若干个边缘分布不一致的变量联合起来构建成一个联合函数,定义域为 $[0, 1]$,其基本形式为:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_N) = P\{X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_N \leq x_N\} = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_N(x_N)) = C(u_1, u_2, \dots, u_N) \quad (4)$$

式中, F 是随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_N$ 的 N 维分布函数, C 为联合分布函数, $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_N(x_N)$ 分别为随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_N$ 的边缘分布函数,为简化表达,可令 $u_1 = F_1(x_1), u_2 = F_2(x_2), \dots, u_N = F_N(x_N)$ 。

Copula 类型主要包括椭圆型、Archimedean 型(Gumbel、Clayton、Frank, 以及 Ali-Mikhail-Haq)、极值型(Gumbel、Tawn、Husler-Reiss、Galambos, 以及 t-EV),以及其他类型,如 Plackett, Farlie-Gumbel-Morgenstern 等。其中最为常用的为椭圆型和 Archimedean 型。

由于不同类型的 Copula 函数适合不同相关关系的变量,已有研究表明非对称的 Archimedean 型 Copula 函数中的 Gumbel 型在构建三变量联合分布时具有一定的优越性^[36],因此,本文尝试采用 Gumbel Copula 函数去构建三变量的联合分布函数,其计算公式为:

$$C_1[C_2(u_1, u_2), u_3] = \exp\{-\{[(-\ln u_1)^{\theta_2} + (-\ln u_2)^{\theta_2}]^{\frac{\theta_1}{\theta_2}} + (-\ln u_3)^{\theta_1}\}^{\frac{1}{\theta_1}}\} \quad (5)$$

式中, θ_1 和 θ_2 为联合函数中的待估参数($\theta_1 < \theta_2$, 且 θ_1, θ_2 均大于 1),其他变量同公式(4)。

本文首先构建雾霾综合风险评估的指标体系,利用常见的 Anderson-Darling(AD)拟合优度检验方法确定单个指标的最优分布模型,然后尝试利用 Copula 函数构建致灾因子危险性,承灾体暴露度和脆弱性三变量的联合分布函数,并利用条件概率分析,考虑给定阈值条件下的致灾因子,承灾体暴露度和脆弱性的联合变化情况,以及给定暴露度和脆弱性条件下,不同致灾强度下的雾霾风险。

Copula 函数的参数估计主要分为最大似然估计、分步估计,以及半参数估计三种。其中最大似然估计是使用最为广泛、相对比较灵活的一种方法,因此,本文采用最大似然法估计变量边缘分布,Copula 函数中的参数通过分步估计法(IFM)^[37]确定。联合函数的拟合优度采用均方根误差和 Bias 计算理论联合分布和经验分布之间的偏离程度,计算公式如下^[38]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_{\text{exp}} - C_{\text{the}})^2} \quad (6)$$

$$MSE = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_{\text{exp}} - C_{\text{the}})^2 \quad (7)$$

$$Bias = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_{\text{exp}} - C_{\text{the}}}{C_{\text{exp}}} \right) \quad (8)$$

其中, n 为样本数, C_{exp} 和 C_{the} 分别为联合分布的经验概率和理论概率, $RMSE$ 和 $Bias$ 值越小, 代表模型的拟合程度越好。

三维变量的条件联合分布函数中, 当 $X_1 \leq x_1$ 时, 式(5)的条件概率可以表示为:

$$F(X_2 \leq x_2, X_3 \leq x_3 \mid X_1 \leq x_1) = \frac{C(u_1, u_2, u_3)}{u_1} \tag{9}$$

当变量 $X_2 = x_2$ 且 $X_3 = x_3$ 时, 变量 X_1 的条件分布函数的基本形式为:

$$F(x_1 \mid X_2 = x_2, X_3 = x_3) = \frac{\partial^2 C(u_1, u_2, u_3)}{\partial u_2 \partial u_3} \tag{10}$$

在公式(10)基础上, 可以计算给定的 $X_2 = x_2$ 、 $X_3 = x_3$ 时, $X_1 > x_1$ 的概率 P :

$$P(X_1 > x_1 \mid X_2 = x_2, X_3 = x_3) = 1 - F(x_1 \mid X_2 = x_2, X_3 = x_3) \tag{11}$$

四、结果分析

(一)中国雾霾的时间变化趋势分析

将 2001—2010 年全国各省(除重庆、香港、澳门外)共 31 个行政区域的人口加权 $PM_{2.5}$ 值数据分别进行线性回归拟合, 分析各区域 $PM_{2.5}$ 浓度的变化趋势, 结果如表 1 所示。

表 1 中国各省 2001—2010 年人口加权 $PM_{2.5}$ 线性变化趋势及显著性

省份	变率	R^2	省份	变率	R^2	省份	变率	R^2	省份	变率	R^2
山西	-0.417	0.181	台湾	-0.076	0.486	青海	0.023	0.005	天津	0.264	0.053
河北	-0.257	0.030	河南	-0.041	0.001	江西	0.031	0.001	安徽	0.332	0.221
北京	-0.227	0.030	陕西	-0.041	0.003	浙江	0.046	0.009	山东	0.448	0.082
宁夏	-0.17	0.162	贵州	-0.030	0.002	吉林	0.090	0.010	江苏	0.635	0.448
西藏	-0.136	0.361	广东	-0.026	0.000	新疆	0.094	0.083			
云南	-0.126	0.028	上海	-0.024	0.000	辽宁	0.099	0.018			
福建	-0.114	0.042	广西	-0.020	0.000	湖北	0.121	0.025			
内蒙古	-0.098	0.023	黑龙江	-0.019	0.001	湖南	0.178	0.066			
甘肃	-0.090	0.038	海南	-0.013	0.028	四川	0.243	0.054			

由于数据时间序列相对较短, 有多个区域没有表现出明显的变化趋势, 但是仍然可以看出部分区域在这 10 年里的变化是显著的。上升速率较快的有江苏、山东、安徽、天津、四川等省份, 但是山东、天津、四川的上升趋势显著性较低; 下降速率较快的有山西、河北、北京、宁夏、西藏等省份, 但是下降趋势的显著性均较低。

对线性拟合的回归系数的显著性($\alpha = 0.05$)检验, 选取变化趋势显著的省份进行分析(图 1)发现: 江苏省的上升速度最快($0.635 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{a}$), 上升趋势的显著性水平最高($R^2 = 0.448$)。山西省的下降速度最快($0.417 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{a}$), 但显著性水平不是很高; 台湾的下降速率虽不是很快, 但下降的趋势显著性水平却是最高的($R^2 = 0.486$)。

通过查阅相关资料分析发现, 江苏和安徽的雾霾除了与所处的长江三角洲为全国的“四大雾霾带”(京津冀、长江三角洲、珠江三角洲和川渝)之一有关之外, 江苏省雾霾的主要形成