

政策关联性与协同防治：基于城市大气政策的实证分析

张培德¹, 彭彬彬¹, 米志付², 林忠国¹, 杜慧滨¹

(1. 天津大学 管理与经济学部, 天津市 300072; 2. University College London The Bartlett School of Sustainable Construction, 伦敦 WC1E 6BT)

摘要 大气环境治理由属地管理模式向联合防控过渡, 区域联防联控已经成为大气污染治理的重要举措。但联防联控也无法完全脱离属地治理而存在, 如何协调联防联控与属地治理成为大气污染治理的关键。本文利用 2000-2018 年我国 311 个城市所颁布的 12166 条大气污染防治政策文本, 并结合无监督学习与空间计量模型, 从政策治理角度对属地治理的政策关联性及其影响效应进行了探究。研究发现, 地方防控政策以监督监管为主, 包括重污染天气应急管理、污染物排放总量控制、项目管控扬尘控制、移动污染源控制等, 但在具体防控方面各有侧重; 并且地区政策关联性越高, 其污染排放、能源消耗、产业发展也越具有相似性。结果表明, 污染排放与一些影响因素如环境规制的空间溢出效应, 也是由相似的政策防控体系所导致。属地治理中潜在的政策关联性可以成为区域联合治理的基础, 通过进一步整合政策关联性较高的地区推进区域环境协同治理。本研究为大气污染的空间溢出与传导提供了新的解释, 并为区域联防联控提供了可行性方向。

关键词 联防联控; 属地治理; 政策关联性; 政策距离; 空间依赖性

Policy Relevance and Collaborative Governance——Empirical analysis Based on Urban air policies

ZHANG Peide¹, PENG Birbin¹, MI Zhifu C², LIN Zhongguo¹, DU Huibin¹

(1. College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. The Bartlett School of Sustainable Construction, University College London, London WC1E 6BT, Britain)

Abstract As a result of the transition of atmospheric environmental governance from territorial administration to joint management, regional joint prevention and control has become a crucial air pollution control measure. However, joint prevention and control cannot exist wholly without territorial governance, and how to coordinate joint prevention and control with territorial governance has become the key to air pollution control. This paper explores the policy relevance and impact of territorial governance from the perspective of policy governance, using 12166 air pollution prevention and control policy texts issued by Chinese local governments from 2000 to 2018, and combining unsupervised learning and spatial econometric models. Research has found

收稿日期: XXXX-XX-XX

作者简介: 张培德 (1993-), 男, 博士研究生, 研究方向: 能源与环境政策, E-mail: zpdglxy1138@126.com; 通讯作者: 彭彬彬 (1989-), 男, 副教授, 研究方向: 能源与环境政策, E-mail: pengbinbin@tju.edu.cn; 米志付 (1989-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 气候变化经济学, E-mail: z.mi@ucl.ac.uk; 林忠国 (1983-), 男, 副教授, 研究方向: 公司金融, E-mail: lzg2011@tju.edu.cn; 杜慧滨 (1977-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向: 资源与环境管理, E-mail: duhuibin@tju.edu.cn

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (72225013); 国家自然科学基金 (71834004, 71904141)

Foundation item: National Science Foundation for Distinguished Young Scholars (72225013); National Natural Science Foundation of China (71834004, 71904141)

that local prevention and control policies mainly focus on supervision and regulation, including emergency management of heavily polluted weather, total pollutant emission control, project control and dust control, and mobile pollution source control, but each has its own emphasis on specific prevention and control; And the higher the correlation between regional policies, the more similar their pollution emissions, energy consumption, and industrial development are. The results indicate that pollution emissions and some influencing factors, such as the spatial spillover effect of environmental regulations, are also caused by similar policy prevention and control systems. The prospective policy relevance in territorial governance can serve as the foundation for regional joint governance, and promote regional environmental collaborative governance by further integrating regions with high policy relevance. This study provides a new explanation for the spatial dispersal and transmission of air pollution, and a feasible direction for regional joint prevention and control.

Keywords joint prevention and control; territorial governance; policy relevance; policy distance; spatial dependence

1 引言

大气污染物在大气环流的作用下很容易由一个行政区域蔓延到其它地区。而以往各自为政的属地管理模式与大气污染传播规律明显不符,导致总体治理效果的可持续性较差^[1]。联防联控机制开始提上日程,从2014年开始写入《大气污染防治法》修订草案到2016年正式实施,标志着中国大气环境治理由属地管理模式开始向联合防控过渡^[2]。在2018年全国生态环境保护大会上,习近平总书记再次强调:“要以空气质量明显改善为刚性要求,强化联防联控,基本消除重污染天气,还老百姓蓝天白云、繁星闪烁”。相应地,生态环境部、国家发展与改革委员会、财政部等部门联合颁布《重点区域大气污染防治“十二五”规划》、《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》等一系列政策,划分重点区域开展联防联控工作。区域联防联控成为治理大气污染的重要手段^[3,4]。

区域联防联控现阶段主要通过地域接邻与经济关联两个方面进行合作来应对大气污染。政策协同理论强调不同的政府单位应制定统一的政策目标与行动方案进行协同合作。其中,政府单位的选择主要基于地域是否接邻以及经济的关联性。考虑到污染的外溢程度以及污染企业搬迁成本,相邻地区间具有更大的联合治理需求^[5]。此外,经济互动与交流可以为地区联合提供合作基础,使得联合治理更有效率^[1]。基于属地间的地理和经济联系,相关研究进一步考察了环境规制^[6,7]、能源消费^[8]以及产业结构^[9]等的空间溢出效应以及治理主体间的竞争合作关系。这些研究认为地理距离和经济距离是这些因素的主要作用路径,提出了以经济关联和地理相邻作为防止污染转移、促进地区联合的主要条件。

然而,区域联防联控无法完全脱离属地治理^[10]。地区间的协同治理在打破属地管理藩篱的同时,还需要各地方完成各自的防控任务以实现联防联控的总体目标。并且现有的政策防控体系既体现了各地方政府的重点防控方面,也与当地的实际发展相适应^[3]。联防联控机制的实施需要兼顾各地的实际情况,若完全脱离属地原有的防控体系,可能导致地方政府难以适应政策协同防控的新要求,进而增加政策执行难度。向下兼容地方政府原有的政策防控体系,是促进区域协同治理的重要手段^[11]。因此,属地政策防控的潜在关联性如何影响大气污染的排放及其关键因素(如产业发展、能源消费),以及能否成为区域联合治理的基础是亟需探讨的重要方面。

属地的政策防控体系本身具有一定的相似性^[12],也可能成为联防联控基础。我国是中央推动和地方执行的政体^[13]。各地方的政策防控延续中央政府的目标要求,其实施内容本身具有一定的关联性。此外,地区间也存在一定的示范学习效应,相邻地区的政策防控也可以为当地防控体系的设计提供借鉴^[14]。并且一些大气污染排放的影响因素(如:环境规制、产业排污、能源消耗等)在很大程度上取决于环境政策的实施^[15,16]。这些因素在地方政府间表现出的空间溢出效应也很可能是由政策防控的相似性所导致。

但既有研究忽视了地方防控政策的关联性及其影响。已有研究主要关注属地治理的差异性,通过平

衡地区防控的差异性,防止污染产业转移进而促进联合治理^[6,7,9]。但属地防控也具有一定的关联性或相似性。若完全摒弃以往的属地政策体系既不现实,也会产生过高的制度成本。合理利用属地治理的政策关联性,有助于平衡属地防控的差异性以及降低区域联合防控的阻力,对于推动大气污染治理具有重要的意义。然而,政策关联性在大气污染治理中所发挥的作用还不明确。本文将通过量化评估政策关联性对于大气污染排放及其关键因素(如:产业发展,能源消费)的影响作用,考察属地政策防控是否能够成为联合治理的防控基础。

本文基于2000-2018年我国311个城市所颁布的12166条大气污染防治政策,考察政策关联性的影响作用。本文首先基于无监督学习模型提炼了属地防控政策的具体维度;其次,以政策维度为基础构建了反映政策关联度的“政策距离”矩阵;最后,通过空间计量模型探究了大气污染在政策上的空间依赖性与传导机制。研究发现,地方政府政策防控主要以重污染天气的应急预警、污染物排放的总量控制、扬尘治理、移动源污染控制等为主,但在具体防控方面各有侧重;并且在防控维度关联性较高的地区,其污染排放、能源消耗、产业结构均表现出一定的相似性。因此,地区联防联控可以通过整合防控政策的相似方面,对政策关联性较高的地区进行一体化防治,将联防联控与属地管理有效结合。

本研究的主要贡献如下:首先,本文在大气污染区域协同防控中引入属地政策关联性因素,缓和了属地执行压力,提高了防控政策的协同性。现有研究更多的是从合作竞争、地理位置等角度以经济利益的最大化以及合作的便利性等为基础评估联防联控的可行性,而没有考虑新政策的出台以及不断增加所带来的执行压力。本研究将联防联控与属地政策相结合,既减缓了政策执行的行政负担,也为区域联防联控政策的出台提供了支撑。其次,本研究利用文本大数据测算了属地防控的政策距离,揭示了属地防控的差异性和一致性,为区域合作提供政策借鉴。政策关联性研究主要通过某一案列的分析或某项政策的比较,来分析政策差异性和协调机制,可能存在主观性和不确定性问题。本文借鉴地理学第一定律的思想以及欧式距离的计算方式,运用大规模政策文本进行无监督分析,测算了各地区间的政策距离。此外,本研究结合政策词典既提高文本分析的准确性,也避免了少量政策引起的选择性偏误问题和内容量化的主观性问题。并且这一方法也可以用于其它领域(如:金融、经济、科技创新等)的政策距离效果评价。

2 文献综述

大气污染联防联控是基于大气污染跨界传输而建立的管理体系,涉及到地方政府间环境、经济、能源等的空间交互以及在此基础上衍生出的协同合作关系。因此,本文将从地方政府间的空间关联性以及府际协同两个方面论述相关文献。

在地方政府的空间关联性方面,已有文献从地理相邻、经济关联等角度探讨了对大气污染排放的影响作用。地理位置代表了区域防控的划定范围,通过地理位置可以直观地刻画出不同影响因素对大气污染跨界传输的影响作用^[18,19]。向回和宋德勇^[8]利用空间计量模型考察了能源消费对本地区和相邻地区大气污染排放的影响作用;Zeng等^[9]构建空间自回归模型考察了在清洁政策的影响下,产业结构的变化对大气污染的影响效应。还有些研究同样利用空间计量模型探讨了环境规制^[7,20]、经济发展水平^[21]等因素对本地区以及相邻地区大气污染的影响效应。此外,地区之间的相互贸易也伴随着污染的转移,现有探究了经济关联性对大气污染排放的影响效应。Du和Sun^[22]利用投入产出模型探讨了经济要素的流动对于大气污染的影响作用;Wang等^[22]通过构建经济距离矩阵探讨了经济发展的相似程度对大气污染的影响作用。

在府际协同方面,相关文献也探讨了相邻地区协同合作的重要性及其影响因素。邻近地区的协同合作是解决一些诸如贫困、竞争、环境污染、气候变化等负外部性问题的重要手段^[23,26]。鄞益奋^[27]认为如果忽视政策执行者的多层次性、异质性以及互相之间的协同,将会导致政府治理失灵。这种质性讨论为政府间的协同合作奠定了理论基础。另外一些学者探讨了经济关联的地区间如何通过政策干预来促进府际合作^[28,29]。例如:Hafezalkotob^[29]分别研究了政府干预和财政预算对绿色生产供应链和工业生产污染减排的影响效应。此外,区域污染防控也涉及到治理主体间的政策交互^[30]。Li等^[31]通过构建

多种政策目标的交互参数, 探究了政策目标组合对大气污染排放的影响效应; 张国兴等^[32] 与 Martin 和 Saikawa^[33] 通过构造政策交互项, 探讨了多种政策组合的治理效果.

已有研究存在以下值得深入研究之处. (1) 现有研究从地域相邻、经济关联性以及府际关系等角度对区域联合防控进行了大量的探讨, 但缺乏对潜在政策关联性的考虑. 由于中央到地方的纵向管理模式与地区间横向的示范学习效应, 各地区的政策防控会具有一定的相似性与关联性. 并且环境政策不仅会影响到环境规制、能源消费以及产业结构调整等导致污染排放的因素, 也会影响地区的进出口贸易^[34]、劳动力流动^[35]、企业利润^[36] 等经济要素. 因此, 不同影响因素的空间溢出效应很可能是由这种潜在的政策关联性所驱动. 它既会对相邻地区的污染排放及其影响因素产生影响, 也会影响地区间的经济关联性. 已有研究均没有考虑这一潜在作用, 难以从根本上解释影响因素在地理距离和经济距离上所表现出的空间溢出效应. (2) 现有文献多以“联合发文”为基础, 构建相关指标度量协同程度^[1,37,38]. 此种方法在一定程度上反映了地方政府之间的协同程度, 但忽略了由于我国行政体制下各部门纵向关联较深而导致的横向关联性^[39], 无法精确反映地方政府在政策内容方面的相似性或一致性. (3) 在府际协同和政策组合的相关研究中, 只考虑了少数几项政策措施的影响效应, 分析结果可能存在选择性偏误. 已有文献主要通过构造几项政策或措施的交乘项等^[32] 来探讨多种政策或措施的综合规制效果. 但评估过程可能受限于代表性政策的选择, 无法避免同一时间其它权威部门所发布政策的影响. 鉴于上文所述, 本文基于地区大气污染防治政策文本大数据, 在构建反映政策关联性的距离矩阵的基础上, 探讨了大气污染、能源消耗以及产业发展水平等在政策距离上的空间依赖性. 本研究为空间溢出效应的传导机制提供了新的解释, 也为区域联合提了政策协同防控的可行性方向.

3 模型与方法

本文探讨了城市间潜在的政策关联性对大气污染排放及主要影响因素的影响效果. 本文首先运用无监督学习技术对各城市大气污染政策防控维度进行了深入挖掘. 其次, 通过计算欧式距离, 评估了属地防控“政策距离”, 以研究各地政策防控的潜在关联性. 最后, 本文构建空间计量模型, 分析了政策关联性对大气污染排放及其直接影响因素(产业发展与能源消费)的空间传导效应, 并将其与地理空间近邻效应进行了比较.

并且在空间传导效应的具体分析中, 本文首先基于全国城市数据分析了政策关联性的总体影响效应, 然后根据《重点区域大气污染防治“十二五”规划》、《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》、《深入打好重污染天气消除、臭氧污染防治和柴油货车污染治理攻坚战行动方案》等政策文件划分了联防联控的重点区域城市群, 在此基础上探讨了政策关联性的区域异质性. 这些重点区域城市群的分析结果既可以互相验证评估结果的稳健性, 也为总效应提供了区域性解释. 具体地, 本文在考察总体效应的基础上, 分别探讨了政策关联性在成渝地区、哈长城市群、汾渭平原、京津冀及其周边地区、辽宁城市群、陕西城市群、武汉城市群、长三角地区、中原城市群、珠三角地区等十大重点防控区域或城市群的影响效应. 这些重点区域城市群的分析结果既可以验证总效应结果的稳健性, 也可以提供局部区域性解释.

为了尽可能全面地提炼政策防控维度, 本文从北大法宝法律数据库网站 (<https://www.pkulaw.com/>) 收集了 2000-2018 年中国地方政府颁布的 12166 条大气污染防治政策进行了聚类分析. 然后随机选取了三个地区, 将所收集的政策集与政府网站上公示的内容进行了对比, 以测试政策文本收集的完整性. 所收集整理的政策与政府网站上显示的政策一致. 其余变量的数据来源如表 1 所示.

关于大气污染排放及其影响因素(产业发展与能源消费水平), 本文分别以污染物的平均浓度、第二产业产值与占比、万吨标准煤的能源消费总量及其与 GDP 的比值来反映. 污染排放主要与产业发展和能源消费有关. 大气污染物的产生主要以第二产业为主^[4,40], 本文使用第二产业产值与占比考察产业发展水平在政策距离上的相似性. 此外, 本文也考虑了经济发展、人口变化以及电力需求等相关因素, 包括人均 GDP, 人口密度, 全社会用电量. 本文主要观测因变量在政策距离上的空间依赖性, 探究政策关联性对于污染排放及其影响因素的影响效应. 而这些控制变量一方面可能与因变量的空间依赖性相关,

另一方面也可以保证整个信息矩阵有足够的特征来估计参数的渐进协方差矩阵^[41].

表 1 变量描述

变量描述	时间	数据来源	样本数量	均值	标准差
因变量					
PM _{2.5} 平均浓度 (mg/m ³)	2003-2018	加拿大达尔豪斯大学大气成分分析组	2304	0.0539	0.019
PM ₁₀ 平均浓度 (mg/m ³)	2007-2018	城市监测站站点	1728	0.0922	0.0185
SO ₂ 平均浓度 (mg/m ³)	2007-2018	城市监测站站点	1728	0.0357	0.0105
NO ₂ 平均浓度 (mg/m ³)	2007-2018	城市监测站站点	1728	0.0361	0.029
第二产业产值 (万元)	2003-2018	中国城市统计年鉴	2304	1.11e+09	1.35e+09
第二产业产值/GDP (%)	2007-2018	中国城市统计年鉴	2304	50.931	9.537
能源消费总量 (万吨标准煤)	2007-2018	中国能源统计年鉴; 中国城市统计年鉴	1872	4.755	1.196
能源消费总量/GDP (吨/元)	2007-2018	中国能源统计年鉴; 中国城市统计年鉴	1872	9.05e-06	7.04e-06
控制变量					
人均 GDP(元)	2003-2018	中国城市统计年鉴	2304	39177.87	32044.22
人口密度 (人/平方公里)	2003-2018	中国城市统计年鉴	2304	573.2921	312.8051
全社会用电量 (万千瓦时)	2003-2018	中国城市统计年鉴	2304	1288910	1896312

3.1 政策主题挖掘

本文在构建停用词与政策词典的基础上, 使用 Latent Dirichlet Allocation (LDA 模型) 对所有政策文本进行综合分析. LDA 模型是 Blei^[42] 提出的一种常见的无监督机器学习模型, 广泛应用于文本分类、语义识别等领域. 在政策内容分析方面, 现有研究一般是通过精度文本制定分类量化标准, 然后根据标准组织多组人员进行评分或编码取平均值. 无论是标准的制定还是后续的量化过程, 传统方法不可避免地会受到主观因素的影响, 使得分析结果缺乏稳健性. 相应地, LDA 主题不需要事先制定量化分类标准. 它根据文档单词的概率分布生成每个主题的单词摘要, 并通过单词摘要进一步推断每篇文档的主题离散分布. 但是, 有效的切词是准确提炼政策主题的关键, LDA 主题模型对中文词汇的划分准确率较差. 政策词汇与日常用语词汇存在差别, 即使使用了中文语料库, 也难以完全准确划分政策文档. 为了确保切词的准确性, 本文构建了停用词词典和大气污染政策词典, 并在此基础上提炼政策主题, 具体步骤如下:

首先, 随机抽取并阅读了 100 篇政策文档, 根据政策语义构建政策词典与停用词词典. 并根据分词结果对词典进行不断调整. 政策词典决定了词汇识别的准确性, 例如原始分词将文本中的“酸雨”识别为“酸”和“雨”两个词; 或者将“提升节能减排技术”整体分为“提升”, “节能减排”, “技术”等多个部分. 停用词词典去除了文本中无意义的词, 例如: 日期, 数字, 序数, 地名等. 上述词汇的错误识别以及无意义词汇的存在, 均会干扰正确词汇与政策主题的概率分布.

然后, 通过试验确定主题数, 确保词向量的相似度最低. 本文测试了从 10 到 100 的主题范围, 然后选择相似度最小的主题数为 30, 并将相似主题的词向量进行了合并, 最终得到 22 个主题向量. 在此基础上, 本文将进一步确定政策与主题的对应关系. LDA 的计算过程中涉及到两个重要的概率分布, 即主题-单词概率分布和政策-主题概率分布. LDA 假设每个主题都由单词构成的概率分布来表示. 这意味着每个主题都有一组概率, 表示在该主题下每个单词出现的概率. 通过计算每个主题的单词概率分布, 我们可以了解到该主题与哪些单词相关联以及它们之间的相关程度. 最后选取概率最大的前十个词汇作为主题的代表词, 形成主题词向量 (表 2). 此外, LDA 还计算了每条政策的主题概率分布, 即将每个文档分配到不同主题的概率. 这种分布可以告诉我们每个政策与各个主题之间的相关性. 通过分析政策的主题概率分布, 我们可以确定哪些主题在每个政策中起主导作用, 进而获得政策与主题的对应关系.

表 2 变量描述

政策主题	词向量
财政税收	环保税, 排污费, 征收, 申报, 专项资金, 项目, 审计
防治技术	技术, 处理, 采用, 脱硫, 去除率, 烟气除尘, 循环
污染监测	污染物, 排放量, 监测, 标准, 采样, 自动化, 污染源
宣传引导	信息公开, 环保, 发布, 培训, 通知, 确认, 环保部门
应急管理	应急, 事件, 风险, 突发, 预警, 重污染天气, 应急预案
生态建设	环境管理, 生态系统, 制度, 规划, 生态保护, 湿地, 绿化
标准规定	标准, 发布, 公告, 排放标准, 排放量, 法规, 效力, 撤销
企业管控	企业, 调查, 监控, 数据, 统计数据, 生产, 二恶英, 行业
污染物防治	污染物, 氮氧化物, 颗粒物, 烟气, 处理, 脱硫, 除尘
VOCs 污染	VOCs, 挥发性有机化合物, 有机化合物, 颗粒物, 汽车, 废气
废物处置	废物, 危险废物, 处置, 消毒, 焚烧, 贮存, 焚化炉, 烟气
工程项目管控	项目, 环境影响评价, 施工, 批复, 工程, 建设, 监督, 规划
扬尘治理	扬尘, 措施, 水膜, 施工, 运输, 治理, 绿化, 工地, 工程
移动源污染	机动车, 检测, 排放, 环保, 黄标车, 淘汰, 净化器
综合防控	区域环境, 大气质量, 排放总量, 规划, 监督, 系统, 执行
监管执法	行政处罚, 违法行为, 监督, 规范, 法制, 违反, 时限
秸秆禁烧管控	秸秆, 评价, 保护区, 指标, 燃烧, 收集, 存储, 综合利用
燃煤污染控制	燃煤, 削减, 清洁能源, 发电, 能源转型, 标准化, 火电
排污市场	排污权, 交易, 征收, 排污税, 许可证, 污染物, 碳, 排放量
臭氧管控	臭氧, 重污染, 前体物, 挥发性有机化合物, 氮氧化物, 停产
总量控制	总量, 项目, 指标, 污染物, 总量控制, 治理, 重点行业
清洁生产	生产, 企业, 清洁生产, 部门, 审计, 执行, 技术, 循环

3.2 政策距离计算

根据地理学第一定律, 所有事物都与其它事物相关联, 但较近的事物比较远的事物更关联[43]. 已有研究广泛探讨了地理距离与经济距离的空间效应. 地理距离矩阵既可以根据相邻关系定义, 也可以根据直线距离或大圆距离定义, 后者能够较为容易的观测到距离效果的连续性变化; 经济距离度量了经济联系的密切程度, 例如林光平等[44] 使用地区间的人均 GDP 差额作为地理距离的指标, 发现相对于地理距离矩阵, 经济距离可以更好地拟合我国的经济发展状况.

无论地理距离还是经济距离, 可以比较容易的从单一维度进行度量[45], 而公共政策往往涉及到多个防控维度. 借鉴欧氏距离的计算方式, 本文以政策主题作为防控维度, 利用余弦相似度计算地方政府防控的政策距离. 在多维空间中, 某两个地方政府的余弦相似度越大, 表示政策向量的夹角越小, 两地的防控越相似. 此外, 考虑到各地方的政策基数不同, 政策防控的维度空间存在差异, 对其进行了标准化处理, 具体计算如式(1)所示:

$$Sim(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^n (t_{ik} - \bar{t}_i)(t_{jk} - \bar{t}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (t_{ik} - \bar{t}_i)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n (t_{jk} - \bar{t}_j)^2}},$$

(1)

其中, Sim 为政策相似度; i, j 分别为地方政府 i 与地方政府 j ; k 为政策主题数; t_{ik} 为 i 地政策主题为 k 的政策总数; t_{jk} 为 j 地主题为 k 的政策总数; \bar{t}_i 为 i 地平均每个主题的政策数量; \bar{t}_j 为 j 地平均每个主题的政策数量; 并且每一地方政府的主题向量维数一致, i 地政府的政策维度为 $(t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in})$; j 地政府的政策维度为 $(t_{j1}, t_{j2}, \dots, t_{jn})$. 在此基础上, 定义了政策距离矩阵 w :

$$w_{ij} = \begin{cases} sim_{ij}; & i \neq j \\ 0; & i = j \end{cases}, \quad (2)$$

其中, w_{ij} 为空间矩阵 w 的第 i 行, 第 j 列元素, 表示地方政府 i 与地方政府 j 的政策距离.

3.3 空间计量模型构建

本文采用空间计量模型评估政策联系对大气污染空间相关性的影响效应以及环境规制在政策距离上的空间依赖性。大气污染具有显著的空间依赖性。邵帅等^[10] 使用地理矩阵、经济矩阵、地理与经济的嵌套矩阵，探究了PM2.5空间溢出效应的影响因素。借鉴已有文献方法，本文在空间计量模型中引入政策距离矩阵，考察大气污染在政策距离上的空间依赖性，模型构建如(3)所示：

$$y_{it} = \tau y_{i,t-1} + \rho \mathbf{w}'_i \mathbf{y}_t + \mathbf{x}'_{it} \boldsymbol{\beta} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it}, \quad (3)$$

其中， y_{it} 为各地的污染情况、能源消费情况、产业发展水平； $y_{i,t-1}$ 为因变量的时间滞后项； \mathbf{w}'_i 为政策距离矩阵的第*i*行， $\mathbf{w}'_i \mathbf{y}_t = \sum_{j=1}^n w_{ij} y_{ij}$ ， w_{ij} 为政策距离矩阵W的(i, j)元素； \mathbf{x}'_{it} 为控制变量向量，包括人均GDP，人口密度以及全社会用电量； μ_i 为城市个体固定效应； γ_t 为时间固定效应； ε_{it} 为扰动项。此外，区域污染防控不可避免的会受到地理位置的影响，本文在政策距离矩阵的基础上纳入地理距离矩阵，模型构建如(4)所示：

$$\begin{cases} y_{it} = \rho \mathbf{w}'_i \mathbf{y}_t + \mathbf{x}'_{it} \boldsymbol{\beta} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \\ \varepsilon_{it} = \boldsymbol{\theta} \mathbf{m}'_i \boldsymbol{\varepsilon}_t + \vartheta_{it} \end{cases}, \quad (4)$$

其中， \mathbf{m}'_i 为地理矩阵的第*i*行，所包含的元素为城市*i*与其它城市的地理距离，数值越大代表距离越远。上述模型同时估计了政策距离矩阵与地理距离矩阵的影响作用。

4 结果与讨论

4.1 政策防控特征识别

4.1.1 政策主题分布

本文依据“政策词典 +LDA 模型”的无监督学习方法，首先对政策文本内容进行分析，以明确现有的政策防控基础。考虑到大气污染传输的空间范围，本文首先探讨了重点区域城市群的政策防控特征(图1)。

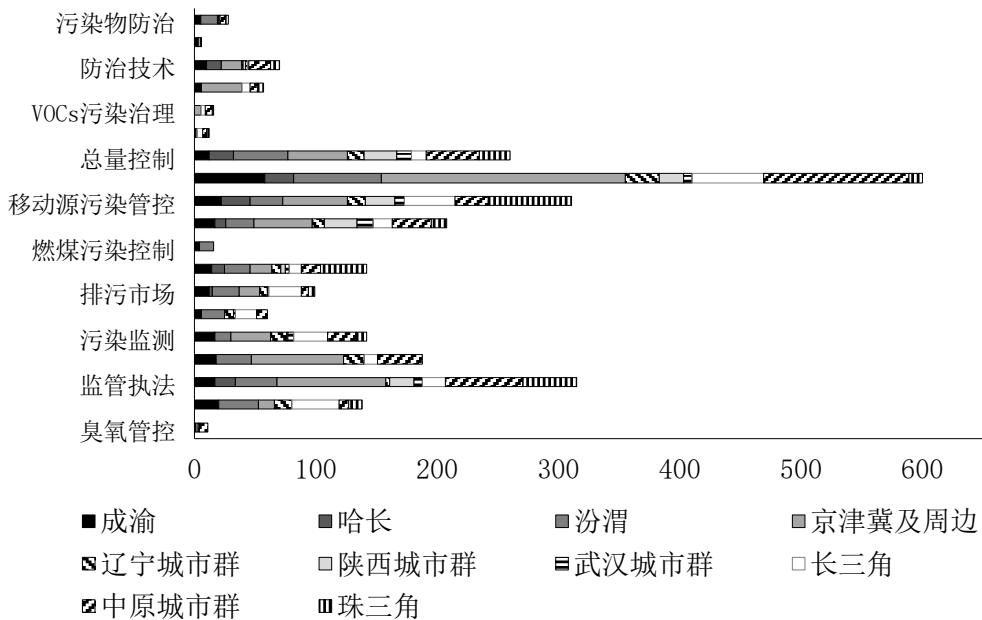


图1 政策主题分布

可以看出，各区域在政策防控方面表现出一定的相似性，并且主要以监督监管为主。这可能是由于

国家统一的政策导向,地方政府在执行和参考制定自己的标准时本身具有一定的相似性[12]。并且具体的一些措施手段,如:重污染天气应急管理、污染物排放总量控制等监管措施,是应对大气污染的基本手段,进而各区域之间表现出一定的相似性。此外,在大气污染防控领域,各地区之间存在着技术和经验的共享与交流,从而形成相似的政策和措施[14]。而清洁生产、臭氧控制和污染排放市场等方面政策涉及到复杂的监测和治理体系。例如,清洁生产需要对生产过程中的污染物排放进行实时监测和控制;臭氧控制需要综合考虑大气化学反应过程和不同污染源的贡献;污染排放市场需要建立和管理排放权益交易体系。这些方面需要政府及相关部门具备相应的监测技术、管理手段和能力,这可能需要一定的时间和资源来完善和建立。

4.1.2 政策关联性分析

在此基础上,本文利用式(1)和式(2)计算了属地间的政策距离,进行了政策关联性分析。各重点防控城市群的政策关联性如图2所示:

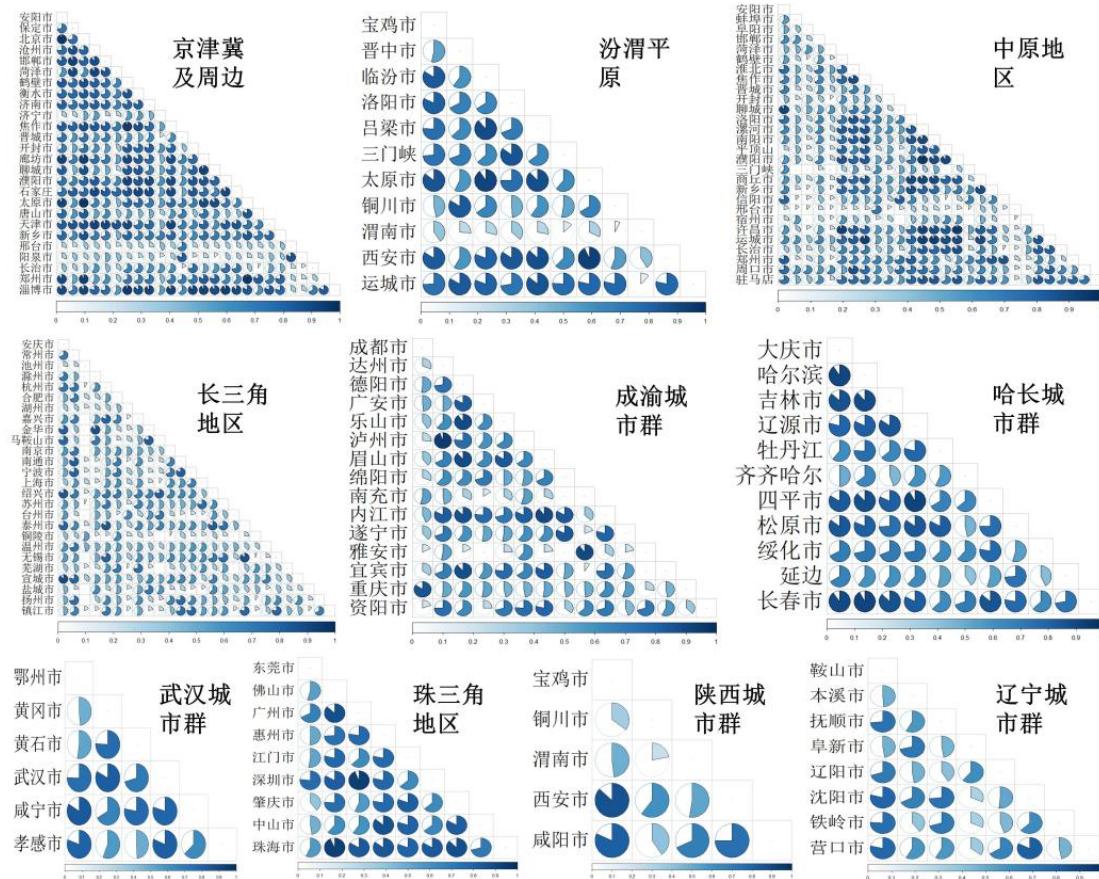


图2 京津冀及周边地区的政策相似度

可以看出,即便是在重点防控区域内,一些城市也表现出明显的差异性。这些关联性较低的城市产业结构单一,均以一类产业为核心带动整个城市的经济发展。例如:京津冀及其周边地区中的邢台市与阳泉市以煤炭及其伴生的化工产业为主;长三角地区中的池州市以农业为主,铜陵市以铜产业为主;中原地区中的阜阳市以农业为主、汾渭平原中的渭南市以有色金属产业为主。相对单一的产业结构更容易导致政策防控的差异性。首先,这些城市的政策防控重点可能与所属地区的其他城市表现出一定差异。其次,这些城市在制定和执行有关支柱产业的规制政策时,往往更倾向于保守的做法。具体表现为相关

政策较少,政策法规制度不健全等.

4.2 政策距离的影响效应

本文探究了污染排放、产业发展以及能源消耗在政策距离上的空间依赖性. 空间依赖性是指距离较近的地区具有相似的变量取值. 如果取值的高低在政策距离上完全随机分布, 则不存在空间相关性, 也就没必要使用空间计量模型. 因此, 在回归分析之前, 本文首先使用莫兰指数对因变量的空间依赖性进行初步检验. 因为考虑的是空间集聚的整体情况, 所有使用全局莫兰指数对历年因变量在政策距离上的空间依赖性进行检验. 结果显示 PM2.5, 第二产业产值以及能源消费总量的历年变化均存在政策距离上表现出显著的空间依赖性(表 3).

表 3 空间自相关检验

	PM2.5 平均浓度			第二产业产值			能源消费总量		
	I	Z	P	I	Z	P	I	Z	P
2003	0.0138	6.3251	0.000	0.0179	7.5677	0.000	—	—	—
2004	0.0077	4.4883	0.000	0.0196	8.1101	0.000	—	—	—
2005	0.0115	5.6635	0.000	0.0204	8.3497	0.000	—	—	—
2006	0.0103	5.2954	0.000	0.021	8.5326	0.000	0.0165	7.1667	0.000
2007	0.0096	5.0853	0.000	0.0215	8.6654	0.000	0.0178	7.5541	0.000
2008	0.0095	5.0414	0.000	0.0215	8.6745	0.000	0.0186	7.7967	0.000
2009	0.0066	4.1854	0.000	0.0202	8.2804	0.000	0.0181	7.6564	0.000
2010	0.0133	6.1954	0.000	0.02	8.2196	0.000	0.0177	7.5296	0.000
2011	0.0143	6.5248	0.000	0.0188	7.8505	0.000	0.0169	7.2804	0.000
2012	0.0124	5.9274	0.000	0.0179	7.5791	0.000	0.0193	8.0069	0.000
2013	0.0171	7.3326	0.000	0.0166	7.1817	0.000	0.0207	8.4422	0.000
2014	0.0153	6.7735	0.000	0.014	6.388	0.000	0.0177	7.5297	0.000
2015	0.0133	6.1744	0.000	0.012	5.7923	0.000	0.0199	8.1982	0.000
2016	0.0139	6.3658	0.000	0.0084	4.6936	0.000	0.0208	8.4885	0.000
2017	0.0152	6.7611	0.000	0.0111	5.5218	0.000	0.0274	10.5359	0.000
2018	0.0124	5.8917	0.000	0.0135	6.2574	0.000	0.0291	10.9935	0.000

注: 上述检验为双边检验; I 为莫兰指数; Z 为检验的统计量.

在此基础上, 本文利用式(3)探讨了政策关联性对于大气污染排放的影响效应. 如表 4 所示, 第(1)列为政策关联性的总体影响效应, 第(2)-(11)列为重点防控城市群的异质性结果. 总体上, 各属地(Wlnpm2.5)在政策空间上表现出了相似的大气污染排放. 即, 无论地理距离有多远, 各城市的污染排放(0.762)在政策空间上呈现出显著的相似性. 这说明属地间潜在的政策关联产生了相似的防控效果. 大气污染不仅会受到气候因素的影响在地理空间上跨界传输, 也会在相似政策的作用下表现出相似的排放现状. 这是由于政策关联性使得各个地区具有相似的控制措施与减排目标. 一方面得益于我国中央制定, 地方执行的政策体制, 各地区的排放标准和规定具有一定的相似性. 这种相似的目标和减排措施极有可能产生相似的减排效果. 另一方面, 各城市间相似的措施和目标也可能会对地方的产业发展和能源消费等因素产生相似的影响, 进而影响到大气污染排放效果. 尤其对于环境规制的空间溢出效应, 对相邻城市的这种作用可能是由政策距离所传导. 由于污染排放政策距离上的相似性, 环境规制既会作用于当地的污染排放, 也会对其他政策相似地区的污染排放表现出作用.

表4 污染排放的空间依赖性

	(1) ALL	(2) CSJ	(3) CY	(4) LN	(5) FW	(6) JJJ	(7) SX	(8) WH	(9) ZSJ	(10) ZY	(11) HC
W.lnPM2.5	0.762*** (0.024)	1.010*** (0.029)	1.136*** (0.035)	0.826*** (0.033)	0.996*** (0.041)	-6.928*** (0.030)	0.741*** (0.055)	1.319*** (0.032)	1.208*** (0.039)	-12.67*** (0.027)	0.992*** (0.040)
L.lnPM2.5	0.351*** (0.017)	0.115*** (0.033)	0.124** (0.039)	0.000 (0.040)	0.117** (0.044)	0.471*** (0.031)	0.091 (0.069)	0.105* (0.045)	0.095** (0.037)	0.764*** (0.031)	0.083 (0.046)
lnrgdp	-0.021 (0.016)	0.119*** (0.019)	0.020 (0.047)	0.059* (0.025)	0.091* (0.046)	-0.037 (0.035)	0.211* (0.083)	0.014 (0.035)	0.021 (0.015)	-0.267*** (0.027)	0.025 (0.051)
lnpop	-0.062** (0.022)	-0.017 (0.013)	0.514* (0.259)	-0.303 (0.377)	0.087 (0.206)	-0.062 (0.049)	0.173 (0.153)	-0.706** (0.225)	0.003 (0.023)	-0.101** (0.039)	0.512 (0.501)
lnpower	-0.001 (0.006)	0.001 (0.009)	0.016 (0.012)	-0.014 (0.017)	0.000 (0.012)	0.013 (0.011)	-0.005 (0.011)	-0.014 (0.009)	0.007 (0.012)	0.051*** (0.009)	-0.008 (0.025)
sigma2e	0.012*** (0.000)	0.003*** (0.000)	0.004*** (0.000)	0.004*** (0.001)	0.008*** (0.001)	0.003*** (0.000)	0.003*** (0.001)	0.001*** (0.000)	0.002*** (0.000)	0.001** (0.000)	0.013*** (0.001)
CityFE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
YearFE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
N	2160	390	225	120	165	390	75	90	135	420	150
R2	0.498	0.187	0.023	0.085	0.254	0.573	0.441	0.305	0.649	0.004	0.163
Likelih	1734	585	300	144	164	447	101	160	240	557	108
Hausman	226***	385***	146***	384***	291***	18248***	4.7e ¹¹ ***	2.3e ⁹ ***	648***	79576***	164***

注: *、**、*** 分别表示 10%、5% 和 1% 的显著性水平; 括号中为使用聚类稳健标准误计算的 z 统计量; CSJ, JJJ, ZSJ, CY, ZY, FW, WH, SX, LN, HC 分别代指长三角, 京津冀及周边, 珠三角, 成渝, 中原城市群, 汾渭平原, 武汉城市群, 陕西城市群, 辽宁城市群, 哈长城市群; lnPM2.5 表示对 PM2.5 平均浓度取对数, 代表了大气污染水平; W.lnPM2.5 表示大气污染水平在政策距离上的空间滞后项; L.lnPM2.5 表示污染水平的时间滞后项; lnrgdp、lnpop、lnpower 分别为人均 GDP、人口密度、全社会用电量的对数表示; CityFE 表示控制了城市固定效应; YearFE 表示控制了时间固定效应; N 代表样本数量。

此外, 政策关联性的影响效应也在不同的防控区域表现出差异性。第(6)列和第(10)列的结果显示, 京津冀及其周边 (-6.928) 与中原城市群 (-12.67) 中的污染排放表现出了显著的负相关。而其它区域(如: 长三角、成渝城市群、汾渭城市群等)均表现出污染排放政策距离上的相似性。一方面, 这可能是由于在局部地区产业发展与能源消耗差异性较大所导致。地区污染排放状况主要是由地区产业发展和能源消耗所决定^[47], 污染排放的相似性或相异性可能是由于产业发展和能源消耗在政策距离上的相似或相异所导致。另一方面, 大气污染具有跨界传输的性质, 政策距离的作用效果可能会受到地理距离的影响。各区域的政策距离和地理距离的相关性存在差异。在一些区域中, 各属地的地理距离越近, 其政策相似度也越高。而在另一些区域中, 由于经济社会发展的不平衡, 即便是地理距离比较近, 但政策防控的差异性较大, 京津冀及周边以及中原城市群可能属于这种情况。距离较远城市个体的政策相似度较高, 但空气污染的传输能力减弱。因此, 本文进一步考察了产业发展和能源消费在政策空间上的依赖性(表5)。

表 5 产业发展和能源消耗的空间依赖性

	(1) ALL	(2) CSJ	(3) CY	(4) LN	(5) FW	(6) JJJ	(7) SX	(8) WH	(9) ZSJ	(10) ZY	(11) HC
W.InIn	0.212*** (0.023)	0.190*** (0.057)	0.272*** (0.046)	0.205* (0.104)	0.064 (0.071)	0.176** (0.056)	-0.535*** (0.107)	0.395*** (0.091)	0.503*** (0.133)	0.146*** (0.039)	1.769*** (0.096)
W.InEn	0.201*** (0.029)	-0.099 (0.064)	-0.133* (0.066)	0.282** (0.094)	0.144* (0.067)	0.091* (0.042)	0.098 (0.128)	-0.195*** (0.039)	0.116 (0.133)	0.130*** (0.035)	0.175 (0.155)
Control	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
CityFE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
YearFE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
N	2160	390	225	120	165	390	75	90	135	420	150

注: W.InIn 与 W.InEn 分别表示产业发展水平与能源消费总量在政策距离上的空间滞后项; 其余符号的含义与表 4 相同.

由表 5 可知, 在第 (1)-(4) 列、(6) 列及 (8)-(11) 的回归结果中, W.InIn 与 W.InEn 的系数均显著为正, 即第二产业产值和能源消耗在政策空间中基本呈现出正向的空间依赖性. 这说明相似的政策防控总体上会使一些地区的产业与能源发展趋同, 进而产生相似的大气污染状况. 但在一些区域也产生了不显著或相反的结果. 汾渭平原 (FW) 中政策关联性较高的城市在产业发展和能源消费方面没有表现出明显的相似性. 这可能是由于能源消费情况和产业在各城市间分布较为均衡, 没有随政策关联性变化而变化. 即无论政策关联性较高还是较低, 各城市都具有相似的能源消费情况和产业布局. 汾渭平原一共包含 12 个城市, 根据《汾渭平原深入打好污染防治攻坚战煤炭总量控制研究报告》显示, 汾渭平原中关东地区的五个市和山西四个市既是产煤大户也是煤炭消费大户, 其整体的煤炭在能源消费中占比近 90%, 远高于全国 60% 的平均水平. 其次, 整个区域偏重焦化、钢铁等重化工企业. 以三门峡、洛阳、太原、运城、渭南、咸阳和铜川七市为代表, 高耗煤的重化工行业对城市经济的贡献度相对较高. 陕西城市群 (SX) 的第二产业发展和武汉城市群 (WH) 的能源消费均在政策空间上表现出显著的负向依赖性. 上述两个区域是分别以西安和武汉为核心的城市群, 在相似的政策防控下, 体现出其它城市与核心城市在第二产业发展和能源消耗的不平衡性. 此外, 在京津冀及周边地区 (JJJ) 和中原城市群 (ZY) 中, 政策关联性较高地区的第二产业发展和能源消费也表现出了相似性. 这说明京津冀及其周边与中原城市群中, 各属地大气污染排放在政策距离上所表现出的负相关, 可能主要由地理距离驱动. 因此, 本文利用式 (4) 考察了地理距离在其中所起的作用 (表 6).

表 6 产业发展和能源消耗的空间依赖性

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
	ALL	CSJ	CY	LN	FW	JJJ	SX	WH	ZSJ	ZY	HC
P.lnpm25	0.957*** (0.007)	0.946*** (0.009)	0.904*** (0.015)	0.928*** (0.019)	0.909*** (0.016)	0.949*** (0.010)	0.692*** (0.097)	0.912*** (0.029)	0.946*** (0.010)	0.946*** (0.008)	0.946*** (0.012)
G.lnpm25	-2.283*** (0.068)	-2.093*** (0.092)	-1.171*** (0.168)	-0.917*** (0.235)	-1.261*** (0.143)	-1.657*** (0.109)	0.072 (0.266)	-0.371 (0.292)	-1.171*** (0.189)	-2.029*** (0.102)	-1.535*** (0.193)
P.lnindus	0.448*** (0.013)	0.761*** (0.027)	0.455*** (0.066)	0.094* (0.046)	0.016 (0.032)	0.276*** (0.026)	-0.282*** (0.057)	0.431*** (0.072)	0.648*** (0.112)	0.191*** (0.052)	0.056 (0.046)
G.lnindus	-2.108*** (0.138)	-1.872*** (0.097)	0.131 (0.181)	-0.020 (0.161)	-0.060 (0.156)	-1.051*** (0.184)	0.163 (0.132)	-0.353 (0.205)	-0.289 (0.313)	0.415*** (0.095)	-0.210 (0.215)
P.lnener	0.189*** (0.024)	-0.243*** (0.067)	-0.016 (0.056)	0.241 (0.161)	0.144* (0.071)	0.054 (0.046)	0.126 (0.142)	-0.205*** (0.032)	0.490*** (0.112)	0.115*** (0.033)	-1.898 (0.972)
G.lnener	-0.769*** (0.184)	-0.374 (0.246)	-0.992*** (0.224)	0.109 (0.233)	-0.043 (0.236)	-0.018 (0.206)	-0.165 (0.193)	-0.488* (0.205)	-1.042*** (0.281)	-0.120 (0.211)	0.700*** (0.140)
Control	Yes										
CityFE	Yes										
YearFE	Yes										
N	2304	416	240	128	176	416	80	96	144	448	160

注: P, G 分别表示政策距离矩阵和地理距离矩阵, 它们与不同变量的结合分别代表了政策距离和地理距离上的空间滞后项; 其余数字与符号的含义与表 4 相同.

如表 6 所示, 地区污染水平受到地理距离和政策距离双重的影响. 使用模型 (4) 将自回归系数和自相关系数分离后, 污染状况随着政策相似度的提高均呈现出显著的正向空间依赖性, 而随着地理距离的增加呈现出负向的空间依赖性. 地理距离的影响效应与已有研究结论一致: 在气象因素的影响下, 地理距离越近的地区越容易呈现出污染积聚效应, 距离越远的地区受到大气污染传输的影响越小, 污染水平的差异性越大^[10, 18]. 但政策距离也同时发挥着重要的作用, 政策防控相似的地区呈现出相似的污染排放水平. 特别地, 在京津冀及周边地区与中原城市群中, 剔除了个体间关于地理距离的自相关性后, 大气污染的空间自回归系数 (P.lnpm2.5) 与表 4 相比发生了变化, 呈现出与其它区域结果一致的正向空间依赖性. 这说明在局部性分析中, 地理位置也会影响政策关联性的作用效果. 如果政策相似度随着地理距离的增加而降低, 污染排放地理相邻和政策相似的双重作用下表现出相似性. 但如果政策相似度随着地理距离的增加而增加, 地理空间和政策空间的作用效果会相互抵消, 地理距离的影响效应会“覆盖”政策距离的实际作用. 此外, 产业发展情况与能源消耗在政策距离上的作用效果也与之前的结果基本一致. 但在考虑地理距离后, 长三角地区能源消耗呈现出显著的负向空间依赖性, 表明了此区域中政策防控相似城市存在能源消费的不平等性.

4.3 稳健性检验

空间计量模型的分析结果主要依赖于空间矩阵与变量指标的选择, 不同类型的空间矩阵与衡量方式可能产生不一致的结果[48]. 本节通过使用政策矩阵与因变量的其它衡量方式考察分析结果的稳健性. 政策距离是通过地方政府在不同防控维度上的余弦相似度衡量的, 数值越大代表两地的防控越相似. 在此基础上, 依据相似度的取值将距离矩阵转化为 0-1 邻接矩阵, 将相似度大于等于 0.5 的矩阵元素设为 1, 小于 0.5 的元素设为 0, 考察重新设置的政策矩阵是否会产生不一样的结果 (表 7).

表 7 替换政策矩阵后的回归结果

	(1) ALL	(2) CSJ	(3) CY	(4) LN	(5) FW	(6) JJJ	(7) SX	(8) WH	(9) ZSJ	(10) ZY	(11) HC
SAR model											
lnpm2.5	0.571*** (0.023)	0.778*** (0.030)	0.841*** (0.036)	0.811*** (0.035)	0.892*** (0.044)	1.042*** (0.031)	0.676*** (0.061)	0.971*** (0.032)	0.981*** (0.038)	0.898*** (0.028)	0.898*** (0.040)
lnindus	0.203*** (0.015)	0.153*** (0.028)	0.268*** (0.037)	0.097* (0.044)	0.016 (0.022)	0.166*** (0.026)	-0.204*** (0.058)	0.417*** (0.059)	0.224** (0.079)	0.109*** (0.026)	0.044 (0.044)
lnenergy	0.177*** (0.028)	-0.094* (0.047)	-0.080 (0.063)	0.161* (0.066)	0.047 (0.062)	0.064 (0.036)	0.300* (0.129)	-0.202*** (0.047)	0.096 (0.134)	0.093** (0.031)	0.175 (0.148)
SAC model											
P.lnpm2.5	0.943*** (0.008)	0.936*** (0.009)	0.903*** (0.016)	0.904*** (0.028)	0.865*** (0.030)	0.935*** (0.011)	0.481** (0.147)	0.908*** (0.030)	0.948*** (0.010)	0.919*** (0.009)	0.948*** (0.012)
G.lnpm2.5	-2.172*** (0.070)	-2.073*** (0.098)	-1.189*** (0.172)	-0.664* (0.269)	-0.688*** (0.207)	-1.615*** (0.118)	0.465* (0.187)	-0.324 (0.291)	-1.162*** (0.190)	-1.892*** (0.120)	-1.586*** (0.186)
P.lnindus	0.455*** (0.013)	0.614*** (0.032)	0.435*** (0.065)	0.092* (0.043)	0.005 (0.020)	0.266*** (0.025)	-0.225*** (0.055)	0.456*** (0.069)	0.680*** (0.093)	0.267*** (0.045)	0.039 (0.045)
G.lnindus	-2.030*** (0.143)	-1.477*** (0.134)	0.144 (0.177)	-0.009 (0.159)	-0.052 (0.154)	-1.056*** (0.184)	-0.004 (0.149)	-0.378 (0.204)	-0.353 (0.293)	0.378*** (0.099)	-0.198 (0.215)
P.lnenergy	0.179*** (0.024)	-0.167** (0.053)	0.023 (0.052)	0.116 (0.109)	-0.035 (0.127)	0.031 (0.041)	0.241 (0.137)	-0.224*** (0.039)	0.472*** (0.118)	0.087** (0.031)	-0.813 (0.670)
G.lnenergy	-0.756*** (0.186)	-0.332 (0.246)	-1.043*** (0.218)	0.211 (0.207)	0.255 (0.303)	0.013 (0.207)	-0.208 (0.190)	-0.517* (0.209)	-0.988*** (0.290)	-0.078 (0.213)	0.496* (0.225)
Control	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
CityFE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
YearFE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
N	2304	416	240	128	176	416	80	96	144	448	160

注: 表中数字与符号的含义与表 6 相同。

表 7 显示, 回归结果与之前的分析基本一致, 仅有 SAR 模型中京津冀及周边地区和中原城市群关于空气污染 (lnpm2.5) 的回归结果产生了变化。相对于政策矩阵中的连续性元素, 0-1 元素体现出了明显的区分度, 这种区分度更能体现出因变量在是否“接近”的个体上的变化。因此, 0-1 矩阵放大了污染排放在原矩阵上的影响, 京津冀及周边地区和中原城市群的空气污染在政策距离上也展现出了相似性。并且, 同时考虑地理矩阵与政策 0-1 矩阵的 SAC 模型结果也展现了上述两个区域在政策距离上的相似性。

其次, 本文选取其它关于空气污染、产业发展和能源消耗的替代性指标, 检验回归结果的稳健性 (表 8)。PM2.5 平均浓度是经栅格处理后估计得到的, 具有一定估计偏误。为了检验估计结果的有效性, 本文使用我国城市监测站站点数据: PM10, SO2 和 NOx 等污染物指标进行了稳健性回归。在产业发展和能源消耗方面, 本文分别使用第二产业产值以及全社会用电量与 GDP 的占比作为替代变量进行分析。结果如表 8 所示, PM10, SO2 和 NOx 的排放量第二产业产值与 GDP 的比值、全社会用电量与 GDP 的比值均在政策距离上表现出显著的空间正相关性, 即政策相似度较高的地区, 其污染排放、产业发展、能源消耗也具有一定相似性。

表 8 多种污染物排放的政策依赖性

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
	ALL	CSJ	CY	LN	FW	JJJ	SX	WH	ZSJ	ZY	HC
P. lnpm10	0.954*** (0.005)	0.927*** (0.016)	-0.158 (0.536)	-0.812 (0.658)	0.858*** (0.053)	0.938*** (0.017)	0.591 (0.330)	0.713*** (0.088)	0.891*** (0.033)	0.917*** (0.033)	-3.277*** (0.846)
G.lnpm10	-2.617*** (0.067)	-1.435*** (0.203)	0.809*** (0.103)	0.884*** (0.058)	-0.557 (0.369)	-0.928** (0.291)	0.303 (0.566)	-0.657* (0.334)	-0.657* (0.293)	-0.461 (0.434)	0.934** (0.027)
P.lnso2	0.908*** (0.016)	0.738*** (0.048)	0.590*** (0.126)	0.664*** (0.094)	-0.163 (0.418)	0.915*** (0.023)	0.507** (0.168)	0.587*** (0.154)	0.153 (0.275)	0.841*** (0.045)	0.639*** (0.127)
G.lnso2	-2.368*** (0.130)	-1.388*** (0.234)	-0.184 (0.283)	-0.440 (0.331)	0.665*** (0.123)	-1.053*** (0.250)	-0.634 (0.343)	-0.275 (0.392)	0.053 (0.318)	-0.569 (0.350)	-0.327 (0.393)
P.lnnox	0.831*** (0.024)	0.658*** (0.068)	0.547*** (0.084)	0.139 (0.334)	0.666*** (0.071)	-0.185 (0.764)	0.079 (0.257)	0.681*** (0.078)	0.190 (0.405)	0.481 (0.246)	-0.014 (0.368)
G.lnnox	-2.309*** (0.134)	-1.784*** (0.152)	-1.019*** (0.223)	0.098 (0.350)	-1.117*** (0.250)	0.725*** (0.184)	-0.706 (0.370)	-1.139*** (0.214)	0.190 (0.412)	0.158 (0.422)	-0.003 (0.352)
P.ln(indus/gdp)	0.383*** (0.026)	0.547*** (0.061)	0.765*** (0.049)	0.166 (0.138)	-0.119 (0.103)	0.299*** (0.068)	-0.997*** (0.126)	0.230 (0.195)	0.481*** (0.123)	0.274* (0.123)	0.028 (0.128)
G.ln(indus/gdp)	-1.586*** (0.170)	-1.388*** (0.146)	-1.075*** (0.240)	-0.113 (0.224)	0.068 (0.163)	-1.209*** (0.200)	0.298* (0.124)	0.162 (0.284)	-1.000*** (0.220)	-0.199 (0.280)	-0.283 (0.248)
P.ln(energy/gdp)	0.251*** (0.024)	0.036 (0.074)	-0.013 (0.058)	0.266*** (0.081)	0.174** (0.061)	0.081 (0.041)	0.153 (0.135)	-0.081 (0.060)	0.653*** (0.104)	0.106** (0.035)	-0.827* (0.388)
G.ln(energy/gdp)	-0.471* (0.202)	-0.027 (0.175)	-0.627* (0.244)	0.023 (0.205)	-0.157 (0.238)	-0.022 (0.191)	-0.174 (0.193)	0.486*** (0.114)	-0.773* (0.327)	-0.014 (0.184)	0.470** (0.149)
Control	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
CityFE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
YearFE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
N	1728	312	180	96	132	312	60	72	108	336	120

注: lnpm10, lnso2, lnnox 分别表示对 PM10, SO2, NOX 的平均浓度取对数; Indus/gdp 表示第二产业产值与 GDP 的比值, 体现了产业发展状况; Energy/gdp 表示全社会用电量和 GDP 的比值, 体现了能源消耗情况; 其余数字和符号与表 6 相同。

5 结论

结合无监督学习与空间计量模型, 本文探讨了政策关联性的影响作用。结果显示, 地方防控政策主要以重污染天气的应急预警、污染物排放的总量控制、扬尘治理、移动源污染控制等为主; 并且这些政策防控维度关联性较高的地区, 其能源消费、产业结构以及污染排放情况也具有较高的相似性。区域联防联控应以属地潜在政策关联性为基础进行协同政策制定与执行, 避免区域政策和属地政策之间的重复与冲突, 提高政策的一致性和有效性, 具体建议如下:

首先, 区域联合防控政策的制定可以以各属地政策历史为基础, 提高政策的可行性和可接受性。特别地, 联合防控政策设计应着重考虑应急预警、总量控制、扬尘治理和移动源污染控制等属地政策关联性较高的方面。在这些方面, 各属地具有较高的政策一致性, 有利于充分利用和借鉴当地在这些措施执行方面的经验和教训, 制定出更加符合实际情况的政策措施, 避免“一刀切”的情况发生。

其次, 政策关联性较低的地区应通过经济补偿、技术共享等行为平衡其政策防控的差异性。一些地区主要以单一的产业和能源消费结构为主, 政策防控重点和执行力度相异于其它城市。相关政府部门可以设计一些经济补偿机制, 例如: 提供经济支持、资源倾斜等方式, 帮助这些建立更全面的政策防控体系, 缩小地区间的发展差距。还有些城市经济发达, 清洁生产, 新能源利用等方面的发展相对于其它地区居于前列。相关职能机构可以促进城市之间技术、经验的分享和合作交流, 进而加速其他城市的发展, 并形成整个区域范围内的可持续发展模式。

本研究为大气污染治理的空间依赖性提供了关于政策关联性的创新性解读。在一些影响因素的空间溢出效应中, 由于政策关联性较高, 本地区与其它地区影响因素具有较高的相关性。因此, 其它地区因素对本地区大气污染排放发挥的作用很可能是本地区同种因素作用效果的体现。这些因素本身可能不具有空间溢出效应, 是政策关联性的存在导致了这一结果。例如环境规制的空间溢出效应, 环境规制来源于环境政策[49], 其溢出效应很可能是由于政策关联性较高而导致的。此外, 本文提供了利用大规模文本数据度量政策关联性的具体方法, 可以进一步扩展到对各领域政策组合于协同的衡量与效果评估。

本研究仍存在一定局限性。政策关联性的实际效果受到制度、机制、执行人特征等多种因素影响，基于政策主题数量的度量难以全面反映政策实施的实际效力。并且在内容分析上，虽然避免了多种政策工具难以有效组合的困境，但也牺牲了内容分析的精细化，难以反映治理主体对政策工具的选择偏好。对于内容的精细化分析，需要制定细粒度的评分词典或者在对政策内容进行大量人工标注的基础上进行有监督学习，这也是本文的未来研究方向。

参考文献

- [1] 胡志高, 李光勤, 曹建华. 环境规制视角下的区域大气污染联合治理——分区方案设计、协同状态评价及影响因素分析 [J]. 中国工业经济, 2019 (05): 24–42.
Hu Zhigao, Li Guangqin, Cao Jianhua. Joint Governance of Regional Air Pollution from the Perspective of Environmental Regulation: Sub-regional Scheme Design, Collaborative State Evaluation and Factor Analysis[J]. China's Industrial Economics, 2019 (05): 24–42.
- [2] Du J, Sun L. A benefit allocation model for the joint prevention and control of air pollution in China: In view of environmental justice[J]. Journal of Environmental Management. 2022, 315. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115132>.
- [3] Du H, Guo Y, Lin Z, Qiu Y, Xiao X. Effects of the joint prevention and control of atmospheric pollution policy on air pollutants-A quantitative analysis of Chinese policy texts[J]. Journal of Environmental Management. 2021, 300. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113721>.
- [4] 张国兴, 温俊娜, 林伟纯, 等. 城市群建设改善还是恶化了城市空气质量?——基于双重差分模型的实证检验 [J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(5): 1245–1259.
Zhang Guoxing, Wen Junna, Lin Weichun, and others. Does the Construction of Urban Agglomerations Improve or Worsen Urban Air Quality? — Empirical Test Based on Double Difference Model[J]. Systems Engineering— Theory & Practice, 2022, 42(5): 1245–1259.
- [5] Jordan G, Schubert K. A preliminary ordering of policy network labels[J]. European journal of political research, 1992, 21(1–2): 7–27.
- [6] 马丽梅, 张晓. 中国雾霾污染的空间效应及经济, 能源结构影响 [J]. 中国工业经济, 2014 (4): 19–31.
Ma Limei, Zhang Xiao. Spatial Effects and Economic, Energy Structure Impacts of China's Haze Pollution[J]. China's Industrial Economics, 2014 (4): 19–31.
- [7] Sun, C., Xu, S., Yang, M., & Gong, X. Urban traffic regulation and air pollution: A case study of urban motor vehicle restriction policy[J]. Energy Policy, 2022, 163. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112819>.
- [8] 向回, 宋德勇. 中国省域PM2.5 污染的空间实证研究 [J]. 中国人口·资源与环境. 2015, 25(9): 153–159.
Xiang Kun, Song Deyong. Empirical Study on the Spatial Distribution of PM2.5 Pollution in China[J]. China Population Resources and Environment. 2015, 25(9): 153–159.
- [9] Zeng, J., Bao, R., & McFarland, M. Clean energy substitution: The effect of transitioning from coal to gas on air pollution[J]. Energy Economics, 2022, 107. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105816>.
- [10] 邵帅, 李欣, 曹建华, 等. 中国雾霾污染治理的经济政策选择——基于空间溢出效应的视角 [J]. 经济研究, 2016, 51(9): 73–88.
Shao Shuai, Li Xin, Cao Jianhua, and others. Economic Policy Choices for China's Haze Pollution Control— Based on the Perspective of Spatial Spillover Effects[J]. Economic Research Journal, 2016, 51(9): 73–88.
- [11] 李辉, 黄雅卓, 徐美宵, 等.“避害型”府际合作何以可能?——基于京津冀大气污染联防联控的扎根理论研究 [J]. 公共管理学报, 2020, 17(4): 53–61.
Li Hui, Huang Yazhuo, Xu Meixiao, and others. How is "Avoidance-Type" Inter-city Cooperation Possible?— Grounded Theory Study Based on the Joint Prevention and Control of Atmospheric Pollution in Beijing— Tianjin—Hebei[J]. Journal of Public Management, 2020, 17(4): 53–61.
- [12] 金太军. 当代中国中央政府与地方政府关系现状及对策 [J]. 中国行政管理, 1999 (7): 67–71.
Jin Taijun. Current Situation and Countermeasures of the Relationship Between the Central Government and Local Governments in Contemporary China[J]. Chinese Public Administration, 1999 (7): 67–71.
- [13] 潘峰, 西宝, 王琳. 基于演化博弈的地方政府环境规制策略分析 [J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(6): 1393–1404.
Pan Feng, Xi Bao, Wang Lin. Analysis of Local Government Environmental Regulation Strategy Based on Evolutionary Game[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2015, 35(6): 1393–1404.

- [14] Shipan, C.R. and Volden, C. The mechanisms of policy diffusion[J]. *American journal of political science* 2008, 52 (4): 840–857.
- [15] Zhang Y, Sun M, Yang R, et al. Decoupling water environment pressures from economic growth in the Yangtze River Economic Belt, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107314>.
- [16] Charlier D, Risch A. Evaluation of the impact of environmental public policy measures on energy consumption and greenhouse gas emissions in the French residential sector[J]. *Energy Policy*, 2012, 46: 170–184.
- [17] Zhang G, Zhang P, Zhang Z G, et al. Impact of environmental regulations on industrial structure upgrading: An empirical study on Beijing—Tianjin—Hebei region in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117848>.
- [18] Fu, S., Viard, V. B., & Zhang, P. Trans-boundary air pollution spillovers: Physical trans-port and economic costs by distance[J]. *Journal of Development Economics*, 2022, 155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2021.102808>.
- [19] Hza, B., Jie, C., & Zhen, W. A. Spatial heterogeneity in spillover effect of air pollution on housing prices: evidence from China[J]. *Cities*, 2021, 113: 103145.
- [20] 王岭, 刘相锋, 熊艳. 中央环保督察与空气污染治理——基于地级城市微观面板数据的实证分析 [J]. *中国工业经济*, 2019 (10): 5–22.
Wang Ling, Liu Xiangfeng, Xiong Yan. Central Environmental Inspection and Air Pollution Control - Empirical Analysis Based on Micro Panel Data of Prefectural-level Cities[J]. *China's Industrial Economics*, 2019 (10): 5–22.
- [21] Zhu, L., Hao, Y., Lu, Z. N., Wu, H., & Ran, Q. Do economic activities cause air pollution? Evidence from China's major cities[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101593>.
- [22] Wang, X., Zhang, Q., & Chang, W. Y. Does economic agglomeration affect haze pollution? Evidence from China's Yellow River basin[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022. 335. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130271>.
- [23] Budolfson, M., Dennig, F., Errickson, F., Feindt, S., Ferranna, M., Fleurbaey, M., & Zuber, S. Climate action with revenue recycling has benefits for poverty, inequality and well-being. *Nature Climate Change*, 2021, 11(12): 1111–1116.
- [24] Cui, J., Wang, C., Zhang, J., & Zheng, Y. The effectiveness of China's regional carbon market pi-lots in reducing firm emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(52). doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.210991211>.
- [25] Jiang, Q., Ma, X., & Wang, Y. How does the one belt one road initiative affect the green economic growth? [J]. *Energy Economics*, 2021, 101. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105429>.
- [26] Finus M, Kotsogiannis C, McCriston S. International coordination on climate policies[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*. 2013, 66 (2): 159–165.
- [27] 鄭益奮. 網絡治理: 公共管理的新框架 [J]. *公共管理學報*, 2007(01): 89–96.
Yin Yifen. Network Governance: A New Framework for Public Administration[J]. *Journal of Public Management*, 2007(01): 89–96.
- [28] 张亚明, 刘海鸥. 协同创新博弈观的京津冀科技资源共享模型与策略 [J]. *中国科技论坛*, 2014 (1): 34–41.
Zhang Yaming, Liu Haio. Model and Strategy of Beijing—Tianjin—Hebei Science and Technology Resources Sharing from the Perspective of Collaborative Innovation Game[J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2014 (1): 34–41.
- [29] Hafezalkotob, A. Competition of two green and regular supply chains under environmental protection and revenue seeking policies of government. *Computers & Industrial Engineering* 2015, 82: 103–114.
- [30] Magro E, Wilson J R. Complex innovation policy systems: Towards an evaluation mix[J]. *Research policy*, 2013, 42 (9): 1647–1656.
- [31] Li, N., Zhang, X., Shi, M., & Hewings, G. J. Does China's air pollution abatement policy matter? An assessment of the Beijing—Tianjin—Hebei region based on a multi-regional CGE model[J]. *Energy Policy*, 2019, 127: 213–227.
- [32] 张国兴, 叶亚琼, 管欣, 尹江河, 吕绚丽. 京津冀节能减排政策措施的差异与协同研究 [J]. *管理科学学报*, 2018, 21 (05): 111–126.

- Zhang Guoxing, Ye Yaqiong, Guan Xin, Yin Jianghe, Lu Xuanli. Study on the Differences and Synergy of Energy-saving and Emission-reducing Policies in Beijing—Tianjin—Hebei[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2018, 21 (05): 111–126.
- [33] Martin, G. and Saikawa, E. Effectiveness of state climate and energy policies in reducing power-sector CO₂ emissions[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7 (12): 912–919.
- [34] Holladay J S, Mohsin M, Pradhan S. Emissions leakage, environmental policy and trade frictions[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2018, 88 (2): 95–113.
- [35] Kunce M, Shogren J F. Destructive interjurisdictional competition: Firm, capital and labor mobility in a model of direct emission control[J]. *Ecological Economics*, 2007, 60 (3): 543–549.
- [36] Si S, Lyu M, Lawell C Y C L, et al. The effects of environmental policies in China on GDP, output, and profits[J]. *Energy Economics*, 2021, 94. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105082>.
- [37] 姜玲, 叶选挺, 张伟. 差异与协同: 京津冀及周边地区大气污染治理政策量化研究. *中国行政管理*, 2017, (08): 126–132.
- Jiang Ling, Ye Xuanting, Zhang Wei. Differences and Synergy: Quantitative Study on Air Pollution Control Policy of Beijing—Tianjin—Hebei and Surrounding Areas. *Chinese Public Administration*, 2017, (08): 126–132.
- [38] 孙静, 马海涛, 王红梅. 财政分权、政策协同与大气污染治理效率——基于京津冀及周边地区城市群面板数据分析. *中国软科学*, 2019, (08): 154–165.
- Sun Jing, Ma Haitao, Wang Hongmei. Fiscal Decentralization, Policy Coordination and Air Pollution Control Efficiency—Based on the Panel Data Analysis of Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Urban Agglomerations. *China Soft Science magazine*, 2019, (08): 154–165.
- [39] 王金南, 宁淼, 孙亚梅. 区域大气污染联防联控的理论与方法分析. *环境与可持续发展*, 2012, 37 (05): 5–10.
- Wang Jinnan, Ning Miao, Sun Yamei. Analysis of Theories and Methods of Regional Air Pollution Joint Prevention and Control. *Environment and Sustainable Development*, 2012, 37 (05): 5–10.
- [40] 曹慧丰, 毕巍强, 曾诗鸿. 产业结构调整的大气污染治理效应——以河北省为例 [J]. *管理世界*, 2015 (12): 182–183.
- Cao Huifeng, Bi Weiqiang, Zeng Shihong. The Air Pollution Control Effect of Industrial Structure Adjustment—Taking Hebei Province as an Example[J]. *Journal of Management World*, 2015 (12): 182–183.
- [41] Paulelhorst, J. 空间计量经济学: 从横截面数据到空间面板 [M]. 中国人民大学出版社, 2015.
- Paulelhorst, J. *Spatial Econometrics: From Cross-Sectional Data to Spatial Panel* [M]. China Renmin University Press, 2015.
- [42] Blei DM, Ng AY, Jordan MI. Latent dirichlet allocation[J]. *Journal of machine Learning research*. 2003, 3 (01): 993–1022.
- [43] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. *Economic geography*, 1970, 46(sup1): 234–240.
- [44] 林光平, 龙志和, 吴梅. 我国地区经济收敛的空间计量实证分析: 1978—2002 年 [J]. *经济学 (季刊)*, 2005, 4(B10): 67–82.
- Lin Guangping, Long Zhihe, Wu Mei. Empirical Analysis of Regional Economic Convergence in China from a Spatial Econometric Perspective: 1978—2002[J]. *China Economic Quarterly*, 2005, 4(B10): 67–82.
- [45] Anselin L. Thirty years of spatial econometrics[J]. *Papers in regional science*. 2010, 89 (1): 3–25. [46] 郑易生, 阎林, 钱薏红. 90 年代中期中国环境污染经济损失估算 [J]. *管理世界*, 1999 (2): 189–197.
- Zheng Yisheng, Yan Lin, Qian Yihong. Estimation of Economic Losses from Environmental Pollution in China in the Mid-1990s[J]. *Journal of Management World*, 1999 (2): 189–197.
- [47] Zhu, Q., Li, X., Li, F., Wu, J., Zhou, D. Energy and environmental efficiency of China's transportation sectors under the constraints of energy consumption and environmental pollutions[J]. *Energy Economics*, 2020, 89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104817>.
- [48] Zhang, X. and Yu, J. Spatial weights matrix selection and model averaging for spatial autoregressive models[J]. *Journal of Econometrics*, 2018, 203 (1): 1–18.
- [49] 周晓光, 汤心萌. 时空一致视角下异质性环境规制与绿色经济效率 [J]. *系统工程理论与实践*, 2022: 2114–2128.
- Zhou Xiaoguang, Tang Xinneng. Heterogeneous Environmental Regulation and Green Economic Efficiency from the Perspective of Spatiotemporal Consistency[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2022: 2114–2128.