

京津冀 PM_{2.5} 问题的环境—经济—社会系统分析

刘祎芳 杨育聪 季 曦

摘 要: PM_{2.5} 问题中的自然环境和社会经济等多要素相互关联,其形成机制、发酵过程、作用结果和防护治理牵连广泛,直接或间接地影响了人们的生产生活。基于系统思想、系统方法和京津冀地区近年来大气污染状况的文献研究,对京津冀 PM_{2.5} 的来源、自然地理与气象环境以及社会经济作用的机理及其导致的社会问题开展系统分析,从京津冀 PM_{2.5} 来源、发酵过程和综合影响三方面绘制了京津冀 PM_{2.5} 问题的环境—经济—社会系统图。系统分析结果显示:第一,交通、工业和电力的污染物排放是京津冀 PM_{2.5} 的主要来源。第二,自然和社会经济因素的发酵过程加剧了京津冀 PM_{2.5} 问题的复杂性。第三,京津冀 PM_{2.5} 问题牵涉众多利益相关者,对经济发展、社会公平和公众身心健康产生极大的影响。基于系统分析的内涵,文章从局部与整体、短期与长期、效率与公平三个方面对京津冀 PM_{2.5} 的治理进行系统分析,从源头控制、完善激励机制以及平衡利益主体之间的关系三个方面提出系统优化建议。

关键词: 京津冀; PM_{2.5}; 系统分析; 系统优化

DOI: 10.3773/j.issn.1006-4885.2020.03.068

中图分类号: C93-03 文献标识码: A 文章编号: 1002-9753 (2020) 03-0068-25

1 引言与文献综述

近几年,京津冀地区以 PM_{2.5} 为主的大气污染问题十分严重,雾霾严重程度居全国之首。2013年,京津冀区域的空气质量平均达标天数比例仅为 37.5%,全国空

基金项目: 国家社会科学基金重点项目(项目编号: 14AZD010); 国家自然科学基金项目(项目编号: 71673014)。

作者简介: 刘祎芳(1993-),河北保定人,北京大学经济学院博士研究生,研究方向:宏观环境经济学。

杨育聪(1992-),四川广元人,北京师范大学环境学院硕士研究生,研究方向:量化决策。

季 曦(1980-),湖南郴州人,北京大学经济学院副教授,博导,研究方向:生态经济学、宏观环境经济学,本文通讯作者。

气质量最差的 10 个城市中有 7 个在京津冀地区。2014 年,我国中东部地区大部分省份出现灰霾,其中重霾面积约为 81 万平方公里,主要集中在京津冀及周边地区。2015 年进入采暖期后,我国北方大部分区域均出现了重污染天气;其中,京津冀区域污染程度最重、持续时间最长。2016 年 11 月,空气质量相对较差的前 10 位城市中,京津冀地区占了 6 位(石家庄、保定、邢台、唐山、邯郸和衡水)。2017 年 5 月,与长三角、珠三角地区相比,京津冀地区的空气质量平均优良天数比例明显较低,在空气质量相对较差的 10 个城市中,京津冀地区占了 6 个。虽然 2017 年冬季京津冀地区空气质量大幅转好:根据国家环保部公布的数字,2017 年 11 月,北京 PM_{2.5} 平均浓度为 46 微克/立方米,同比下降了 54%,低于 60 微克/立方米的年度目标,天津、石家庄 PM_{2.5} 浓度分别同比下降 49% 和 54.1%^①。然而,在 2018 年春季,PM_{2.5} 又以严峻的形势席卷京津冀地区,北京和天津 3 月份的 PM_{2.5} 平均浓度分别骤升至 88 微克/立方米和 80 微克/立方米,达到历史新高,随后虽然有所缓解,但仍旧保持在 50 微克/立方米的平均浓度水平。河北的主要污染地区石家庄、邯郸及邢台的 PM_{2.5} 浓度均超过 110 微克/立方米。生态环境部曾提出 2018-2019 年京津冀及周边地区 PM_{2.5} 平均浓度要同比下降 3% 左右的目标,但当前京津冀地区已经进入冬季采暖季,恶化的空气质量再度引起人们关注,污染物排放可否持续减少还存在很大的不确定性。

大气污染是一项长久性的综合性问题,涉及地理、气候、化学、环境、经济、社会等诸多领域。目前学者关于京津冀 PM_{2.5} 问题的分析主要着眼于 PM_{2.5} 的来源与特征、PM_{2.5} 的健康与经济损失和 PM_{2.5} 的协同治理。例如郑玫等(2014)^[1]系统综述了 PM_{2.5} 的分析方法和解析手段。穆泉和张世秋(2015)^[2]对中国 2001-2013 年的 PM_{2.5} 重污染数据进行整理,评估了中国各省因 PM_{2.5} 重污染导致的健康损害和经济损失;黄德生和张世秋(2013)^[3]估算出 2009 年京津冀地区 PM_{2.5} 未达标造成的健康损失综合相当于该地区 GDP 的 4.7%。马丽梅和张晓(2014)^[4]运用空间计量方法研究了 31 个省份本地与异地之间 PM_{2.5} 污染的交互影响问题及经济变动、能源结构的影响。潘慧峰等(2015)^[5]利用 AR 模型和马尔科夫区制转换模型研究了京津冀地区各城市雾霾污染的持续性特征,并进一步探究了相邻城市间雾霾污染的空间溢出效应。石敏俊等(2017)^[6]分析了京津冀大气污染的环境特征,基于环境承载力对京津冀 PM_{2.5} 治理进行了政策评估。刘华军等(2017)^[7]在向量自回归模

① <http://www.cnelc.com/text/1/171214/AD1007791021.html>

型框架下识别雾霾污染的城市间动态交互影响效应，运用社会网络分析方法刻画出了雾霾污染空间关联的网络结构特征。

城市雾霾污染之间存在普遍的动态关联关系且呈现出联系紧密、稳定性强、带有明显特征的多线程复杂网络结构形态，但现有研究在对京津冀 PM_{2.5} 问题的研究对象、研究变量和研究目标的选取上较为单一，一般是从能源结构、工业集聚、交通运输和空间效应等对京津冀 PM_{2.5} 问题进行研究。大体来说，目前的研究多着眼于 PM_{2.5} 问题的某一个方面。事实上，PM_{2.5} 的形成和作用机制非常复杂，PM_{2.5} 问题中的自然环境和社会经济多要素相互关联，其形成机制、发酵过程、作用结果和防护治理牵连广泛，既有环境、经济和社会多方利益的相互博弈，又有局部利益和整体利益、短期增长和长期发展的相互权衡，同时还涉及社会公平与效率的侧重，是一个复杂的环境—经济—社会复合系统问题，基于局部的研究无法展现问题的全貌。而系统分析是既见树木、又见森林，既见眼前、又见未来的着眼于整体和长期的分析思路（Donella, 2008^[8]），因此，本文认为对京津冀 PM_{2.5} 的分析和治理需要引入系统分析。

本文主要选取了 2009-2016 年间关于京津冀地区 PM_{2.5} 形成来源及其作用机理的相关文献，对京津冀 PM_{2.5} 问题的影响因素和空间传输进行归纳。基于系统论的思想和方法，对京津冀地区 PM_{2.5} 的来源、发酵过程和综合影响进行“经济 - 社会 - 环境”三维度的系统分析，并鉴于此构建了“京津冀 PM_{2.5} 问题的环境—经济—社会系统图”来展现京津冀 PM_{2.5} 问题的全貌。本文研究 PM_{2.5} 的时空特征和作用机制，为深入了解京津冀地区 PM_{2.5} 污染来源和机理提供科学依据，对于制定切实有效的防治 PM_{2.5} 污染措施具有重要意义。本文基于系统分析的结果总结出当前京津冀 PM_{2.5} 问各要素相互关联，动态变化的系统特征，根据京津冀 PM_{2.5} 问题的环境—经济—社会系统结构图刻画出京津冀 PM_{2.5} 问题的作用机制。京津冀 PM_{2.5} 治理是一个系统工程，牵涉众多利益主体。因此，明确京津冀 PM_{2.5} 治理的问题中存在的各方利益权衡对整体系统优化具有关键作用。本文进一步对京津冀 PM_{2.5} 问题治理的局部利益与整体利益、短期治理与长期治理、效率与公平等利益机制进行了系统讨论，并针对上述系统分析提出相应的系统优化建议。

2 京津冀 PM_{2.5} 问题的环境 - 经济 - 社会系统分析

贝塔朗菲（1969）^[9] 首先对一般系统理论进行了全面阐述，之后，学者在此基础上又做了很多的引申（Checkland, 1981^[10]；Hilda 和 Calvo-Amodio, 2017^[11]）。系统分析以系统的整体最优为目标，对系统的各个方面进行定性和定量分析，它关注要素的识别和要素关联的研究、系统自身结构和系统之间的相互影响、子系统的

功能和整体系统优化的目标。各个子系统之间通过相互作用、相互影响产生协同效应，形成高效有序性整合，从而使整体的系统效应远远大于各个子系统效应的简单叠加。一般而言，系统具有彼此联系、相互影响、动态变化的特征。

京津冀 PM_{2.5} 问题是一个多层次多因素复杂的系统问题，构成这一复杂系统的各要素彼此相互影响相互制约，共同作用于总系统。京津冀 PM_{2.5} 问题的产生、发酵和影响是经济、社会、生态各系统之间以及系统内部各要素之间相互作用的结果，具体表现为各子系统间的相互协作、发展状态的动态调整和系统协调度的不断提高。同时这三个系统多层次环环相扣，反馈回路相互关联，形成一个动态变化的整体。本文从京津冀 PM_{2.5} 的产生入手，系统整合了其产生的自然因素和社会经济因素，并完整体现了其贡献权重。以产生源头进行延伸，从气象地理要素、地域间经济交通等高度相关性和政府指令三方面入手，本文进一步基于系统的方法对京津冀 PM_{2.5} 问题严峻的形势进行系统分析。根据京津冀 PM_{2.5} 这个系统中各系统以及系统内部各要素间的因果关系（连接方式），以及三者之间的相互联系和变动规律对整个系统进行调整，从而达到最终系统优化的目的。

2.1 京津冀 PM_{2.5} 来源的系统分析

首先，PM_{2.5} 的形成原因十分复杂，包含多种物理和化学反应。图 1 简单概括了 PM_{2.5} 形成的途径。由图 1 可以看出，大气中的 PM_{2.5} 来自直接排放（即一次排放）和二次生成。直接排放涉及多种社会经济活动，包括交通运输、工业生产、建筑施工、餐饮、取暖等；二次生成主要涉及光照、湿度等自然因素。为了对京津冀 PM_{2.5} 的来源有更加深入的了解，我们借鉴已有的源解析方法（李璇等，2015^[12]；Li 等，2018^[13]），利用 2013 年之后的关于京津冀 PM_{2.5} 来源的相关研究成果，对京津冀 PM_{2.5} 进行源系统分析，结果如表 1 所示。

从表 1（社会经济活动的贡献率）可以看出：机动车尾气、工业排放和燃煤成为京津冀 PM_{2.5} 的主要源头。其中，机动车尾气污染物排放是京津冀 PM_{2.5} 颗粒物的主要来源；工业排放占比也比较显著，主要是指工业废气（SO₂）/烟粉尘/VOC/NO 等的排放；此外，燃煤在 PM_{2.5} 来源中占比也很大，体现在散煤的燃烧、工业燃煤和电厂燃煤等^①。

我们将 PM_{2.5} 来源分为交通、工业和电力三个相关系统，不同类型的来源纳入相应的子系统中。交通系统、工业系统和电力系统分别强调了机动车尾气排放、工业粉尘排放和燃煤在 PM_{2.5} 形成中发挥的作用。

① 一般文献中做源分析时，会把电厂燃煤排放和工业排放分开

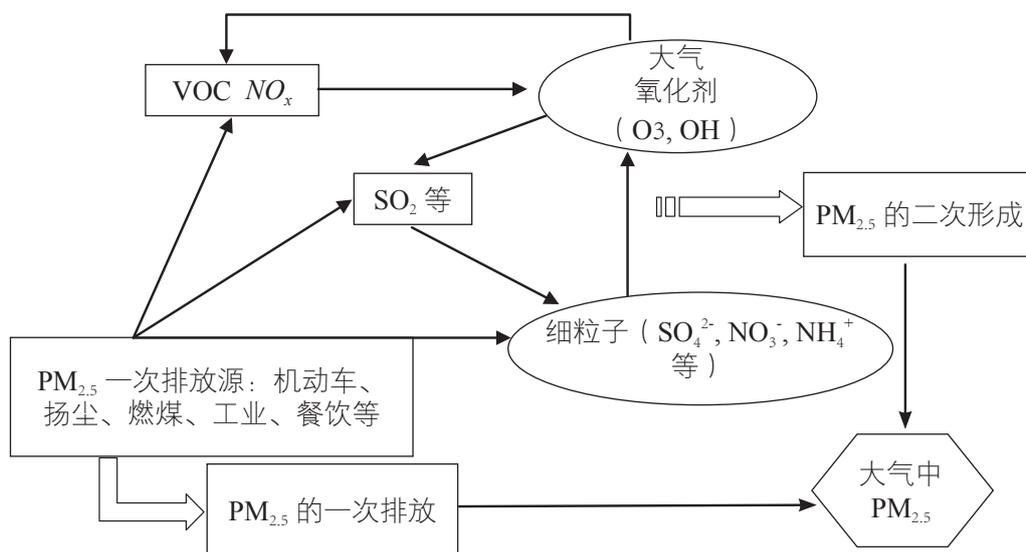


图 1 PM_{2.5} 形成示意图

表 1 京津冀城市 and 地区 PM_{2.5} 来源研究结果：社会经济活动贡献率

时间	地区	PM _{2.5} 来源
2012-2013 年	北京	本地贡献来源：机动车 (31.1%)、燃煤 (22.4%)、工业生产 (18.1%)、扬尘 (14.3%)、餐饮汽修养殖涂装等 (14.1%) ^①
2014 年 12 月 2 日	北京	机动车排放污染物占 PM _{2.5} 中相应污染物比例：一氧化碳 (CO, 86%)、碳氢化合物 (HC, 32%)、氮氧化物 (56%)； 机动车排放占 PM _{2.5} 中本地来源比例：31.1% ^②
2014 年 12 月 2 日	天津	机动车排放占 PM _{2.5} 中本地来源比例：20%
2014 年 12 月 2 日	石家庄	机动车排放占 PM _{2.5} 中本地来源比例：15%
2015 年 7 月 17 日	北京	机动车保有量：554.9 万辆；机动车占 PM _{2.5} 本地排放源比例：近 33.3%；机动车排放污染物占 PM _{2.5} 中相应污染物比例：一氧化碳 (CO, 86%)、氮氧化物 (56%)、挥发性有机物 (VOCs, 32%) 柴油车保有量：22 万辆；占机动车比例 (4%)；柴油车排放占机动车相应污染物排放比例：氮氧化物 (NO _x , >50%)、颗粒物 (PM, >90%)
2015 年 12 月	北京	机动车对 PM _{2.5} 贡献比：32% (12 月 6 日应急措施前)、7% (12 月 8 日上午应急措施后)
2016 年 3 月 25 日	北京	机动车保有量：561 万辆； 柴油车保有量：23 万辆；占机动车比例 (4%)；柴油车排放占机动车相应污染物排放比例：氮氧化物 (NO _x , >50%)、颗粒物 (PM, >90%)
2017 年 2 月 14 日	北京	机动车保有量：570 万辆；机动车年排放污染物总量：约 50 万吨；机动车贡献 PM _{2.5} 本地源比例：31.1%>40% (非采暖季)
2015 年 5 月 25-30 日	北京	春季 PM _{2.5} 中金属元素主要三大来源：地壳来源 (土壤尘和建筑尘)、机动车源、冶金源 ^[14]

① <http://www.bjepb.gov.cn/bjhrb/xxgk/jgzj/jgsz/jjgjszjzz/xcyj/xwfb/607219/index.html>

② <http://www.bjepb.gov.cn/bjhrb/xxgk/jgzj/jgsz/jjgjszjzz/xcyj/xwfb/607490/index.html>

续表

2014年 10月4-27日	北京	有机细颗粒物来源：生物质燃烧（18.9%）、机动车排放（36.9%）、二次污染物（41.9%） ^[15;16]
--	北京	PM _{2.5} 来源：二次无机气溶胶（26%）、工业（25%）、燃煤（18%）、土壤尘（15%）、生物质燃烧（12%）、汽车尾气与垃圾焚烧（4%） ^[17]
2014年8月	北京	夏季污染来源：二次生成（50.2%）、机动车（23%）、扬尘（8.5%）、燃煤（5.8%）、其他（12.1%） ^[18;19]
2014年12月	北京	冬季染来源：燃煤（26.6%）、机动车（21.5%）、扬尘（20.9%）、二次生成（12.9%）、其他（17.9%） ^[18;19]
2016年11月	京津冀地区	空气污染主要来源：燃煤 > 工业 > 机动车排放 > 扬尘 ^[20]
2016年11月	北京	PM _{2.5} 来源：机动车（约30%，主要成分：机碳、硝酸盐）、燃煤（主要成分：有机碳、硫酸盐） ^[20]
2016年11月	北京、天津、石家庄	颗粒物来源：燃煤（23.3-46.6%）、机动车（19.4-29.8%）、工业（8.1-24.8%） ^[20]
2014年 24日-26日	北京	餐饮源排放的PM _{2.5} 占到PM10的80%以上，其中PM1.0占到PM _{2.5} 的50%~85% ^[21]
2016年 1月1-26日	北京	市区PM _{2.5} 来源：二次污染源（42.35%）、扬尘（21.16%）、生物质燃烧（16.31%）、海盐气溶胶（5.44%） ^[22]
2012年8月- 2013年7月	北京	PM _{2.5} 来源：机动车/燃油（16%）、燃煤（15%）、土壤尘（6%）、二次无机盐（36%）、有机物（20%）、其他（7%） ^[23]
2010年12-2013 年1月	北京	采暖期PM _{2.5} 中含碳物质来源：燃煤（39.8%）、生物质燃烧（15.5%）、机动车（44.7%）；汽油车（36.3%）、柴油车（8.4%） ^[2]
--	北京	PM _{2.5} 排放源：工业（38%）、居民（8%）、电厂（4%）、机动车（50%） ^[2]
--	天津	PM _{2.5} 排放源：工业（42%）、居民（3%）、电厂（5%）、机动车（50%） ^[2]
--	河北	PM _{2.5} 排放源：工业（42%）、居民（5%）、电厂（3%）、机动车（50%） ^[2]
--	京津冀	PM _{2.5} 排放源：工业（37%）、居民（5%）、电厂（8%）、机动车（50%） ^[2]
--	北京	城区PM _{2.5} 来源：机动车（约25%）、燃煤（20%）、外来输送（20%） ^[24]
2012年	北京	PM _{2.5} 来源：燃煤（28.06%）、机动车（19.73%）、扬尘（17.88%）、工业（16.5%）、餐饮（3.43%）、其他（14.4%）
2012年 8月-2013年7月	北京	PM _{2.5} 年均来源：二次源（42%）、燃煤（19%）、地面扬尘（19%）、机动车排放（10%）、工业（6%）、建筑尘等（4%）； 季节PM _{2.5} 来源：春季-地面扬尘（37%）、春季-二次源（29%）；夏季-二次源（56%）；秋季-二次源（38%）、秋季-地面扬尘（26%）；冬季-燃煤（25%）、冬季-二次源（42%）； 重污染过程不同季节PM _{2.5} 二次源来源比：春（65%）、夏（65%）、秋（54%）、冬（51%） ^[25]
--	北京	PM _{2.5} 来源：二次生成（50-80%，一般情况）；重污染期间，二次生成PM _{2.5} 比例会增加
2010年12 月-2013年1月	北京、唐山、石家庄	常规时期PM _{2.5} 来源：一次组分（32.1-36.9%）、二次组分（39.6-43.3%）； 重污染时期PM _{2.5} 来源：一次组分（25.7-26.4%）、二次组分（54.9-56.6%）

续表

2015 年 11 月 30 日	北京	PM _{2.5} 来源: 交通本地 (4.04%)、民用本地 (38.83%)、工业本地 (21.38%)、交通外地 (1.89%)、民用外地 (16.93%)、工业外地 (13.93%)、电力外地 (0.73%)、其他外地 (1.2%) ; PM _{2.5} 一次组分来源: 交通本地 (3.74%)、民用本地 (42.08%)、工业本地 (21.98%)、交通外地 (0.91%)、民用外地 (18.09%)、工业外地 (12.82%)、电力外地 (0.21%)、其他外地 (0.14%) ; PM _{2.5} 二次组分来源: 其他本地 (8.3%)、民用本地 (15.5%)、工业本地 (17.09%)、交通外地 (8.96%)、民用外地 (8.57%)、工业外地 (21.85%)、电力外地 (4.51%)、其他外地 (8.71%)
2014-2015 年	北京	PM _{2.5} 来源: 区域传输 (24%)、燃煤 (16%)、机动车 (29%)、工业 (14%)、扬尘 (8%)、其他 (9%) ^[26]
2013 年 2 月 10 月 -3 月 11 日	北京	PM _{2.5} 来源: 燃煤 (34%)、机动车 (16%)、工业、外来输送、扬尘、餐饮和其他 (50%) ^[27]
2009 年 -2011 年	北京	PM _{2.5} 来源: 燃煤 (30%)、机动车 (22%)、工业 (9%)、扬尘 (13%) ^[28]
2009 年 -2011 年	天津	PM _{2.5} 来源: 燃煤 (25%)、机动车 (21%)、工业 (18%)、扬尘 (12%) ^[28]
2009 年 -2011 年	河北	PM _{2.5} 来源: 燃煤 (44%)、机动车 (14%)、工业 (9%)、扬尘 (13%) ^[28]
2013 年 1 月	北京	重污染时段 PM _{2.5} 来源: 燃煤 (28%)、机动车 (42%)、工业 (13%)、扬尘 (12%) ; 清洁时段 PM _{2.5} 来源: 燃煤 (45%)、机动车 (13%)、生物质燃烧 (17%)、扬尘 (15%) ^[28]

2.2 京津冀 PM_{2.5} 发酵过程的系统分析

由京津冀 PM_{2.5} 来源的系统要素推演, 本文进一步从环境状况、经济发展和社会制度三维度对京津冀 PM_{2.5} 问题进行系统分析, 来全面展示造成京津冀 PM_{2.5} 问题愈演愈烈、难以改善的严峻形势的原因。我们发现京津冀地区气候和地形等外部自然要素、经济间的高度关联性和政府与市场在社会经济活动中的失衡直接加剧了 PM_{2.5} 问题的严峻性。

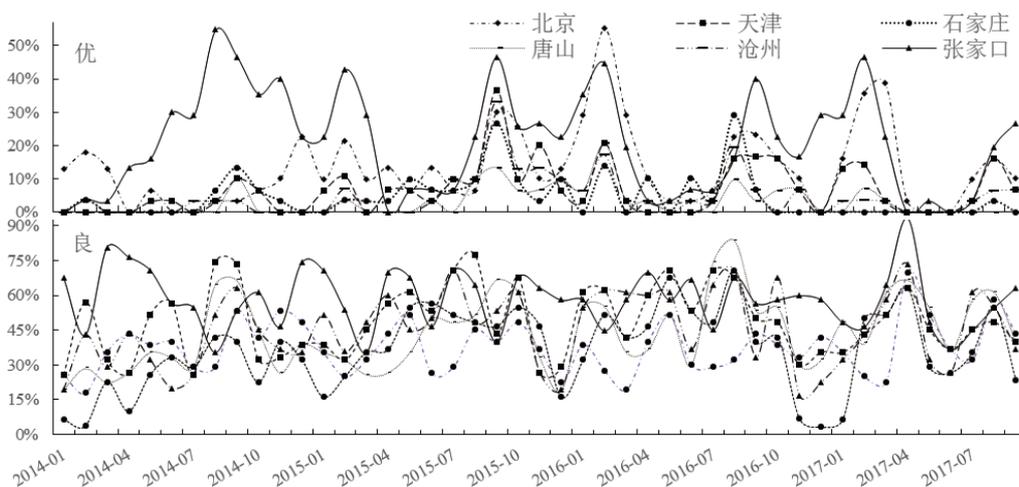
(1) 气象要素和地理要素是京津冀 PM_{2.5} 系统中不可忽视的要素

PM_{2.5} 的形成受光照、湿度、温度的影响, 其转移和消散主要依靠风力作用或者雨雪天气 (周一敏和赵昕奕, 2017^[29])。高广阔等 (2016)^[30] 通过对雾霾污染的形成机理进行研究, 提出自然条件对雾霾污染的形成和扩散起到很强的推动作用, 不利的地形和自然灾害方便雾霾的形成, 静风、逆温等气象条件阻碍污染扩散。本文从气象和地形条件出发分析京津冀 PM_{2.5} 的形成及扩散过程。一方面, 地形条件影响其形成和消散的效率。京津冀区域呈现“空心拳头”形状: 三面环山, 一面临海。太行山脉拦截西北风, 空气的流动和交换能力弱, 从而导致污染的累积。另一方面, 京津冀地区 (尤其是冬季) 以静稳天气居多, 平均风速小, 这一气象条件增加了 PM_{2.5} 的扩散难度。

(2) 京津冀经济活动的高度相关性是京津冀 $PM_{2.5}$ 形成的关键要素

京津冀 $PM_{2.5}$ 不仅与气象地理要素相关, 也与区域社会经济活动的强关联、高流通、高密度的经济特点密切相关。北京、天津和河北地缘相接, 是我国重工业和高新技术产业的主要基地。从产业结构来看, 河北省以重工业为主, 发展方式粗放, 第二产业比重过高的失衡产业结构和以煤炭为主的能源结构使得河北成为重污染的源地 (Zhang 等, 2016^[31]), 而 $PM_{2.5}$ 在空气中的高流动性的特点又使得污染直接波及毗邻地区。从交通运输强度来看, 北京天津以消费为主, 第三产业发达, 京津冀区域的其他城市更多的是为其提供各类产品与服务, 完善的公路、铁路运输网使得机动车在区域内活动频繁, 区域的电力能源运输强度大, 这些特点无疑加强了该区域的城市紧密程度。从人口分布来看, 京津冀地区属于人口稠密地区, 高度的人口集聚使得该区域的经济活动频繁, 对电力、能源、交通等产生极大的需求 (Wu 和 Chen, 2017^[32]), 直接提高了污染的频率和强度。

图 2 直观地显示了京津冀地区主要城市之间的空气质量数据和 $PM_{2.5}$ 浓度数据, 两者具有显著的高度相关性。



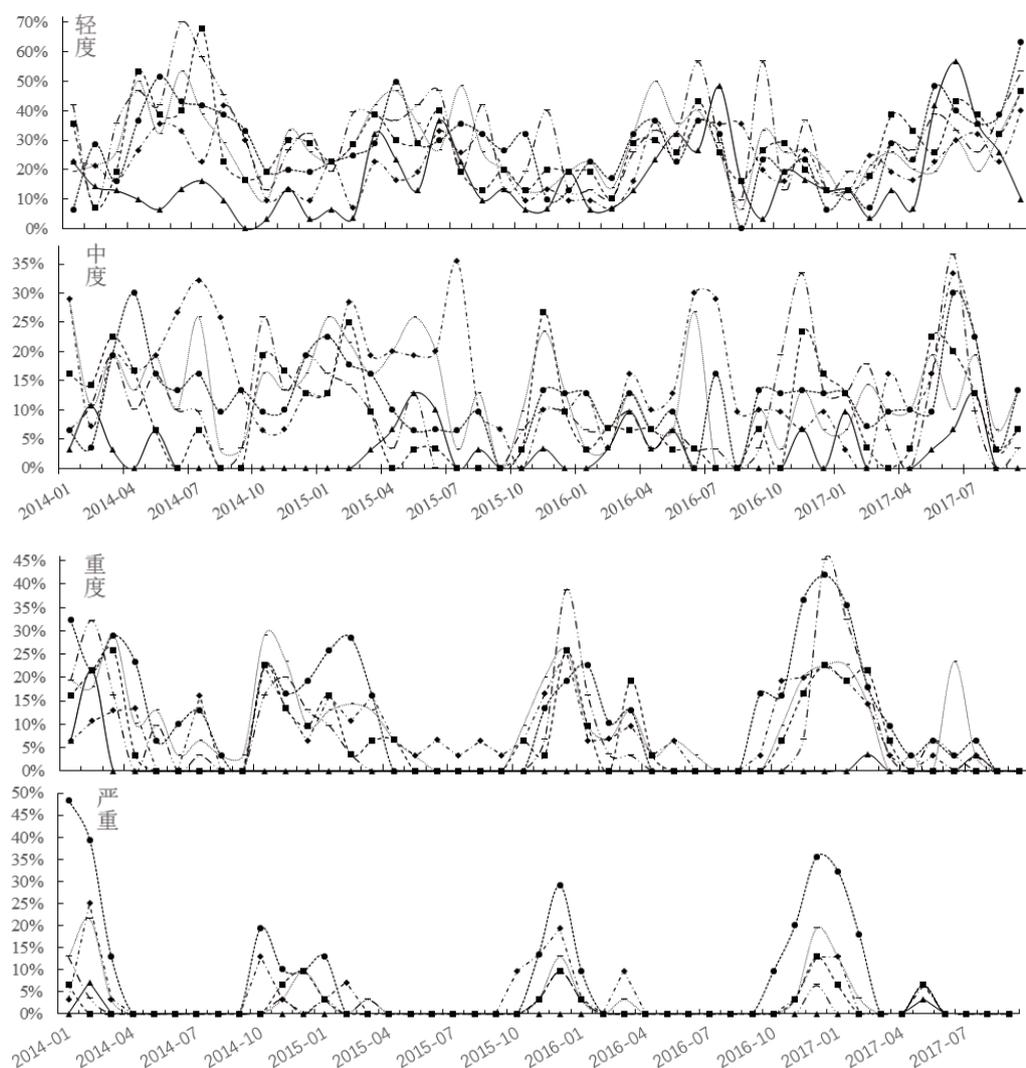


图2 2014-2017年京津冀部分城市各类空气质量的的天数月占比

由此可见，系统各要素之间相互关联，京津冀经济发展的高度相关性和由地理位置引致的集聚性加剧了该地区对电力、交通和工业的需求，并直接反馈到污染源头，提高了京津冀 PM_{2.5} 的污染强度。京津冀高度相关的经济活动使得雾霾污染空间效应显著，单方治理不能解决京津冀的雾霾问题，必须运用综合治理手段（潘慧峰，2015^[33]）。

（3）政府行政指令和市场机制不平衡加剧京津冀 PM_{2.5} 问题的复杂性

政府与市场机制不平衡是加剧京津冀 PM_{2.5} 问题复杂性的主要推动力。市场经济具有自发性的特点，企业把实现自身经济利益最大化作为主要目标。大气环境是具有排他性的公共资源，大气治理工程投资大、回报周期长、外部性强，短期成本

远大于收益，在市场机制不完善的情况下，企业排放的真实社会成本无法内部化为企业自身的成本。治理成本和收益的不对等使得企业缺乏积极承担环境责任的主动性。过去京津冀 PM_{2.5} 治理措施以命令控制型政策为主，这些指令型政策具有明确的目标和规定，约束性较强，能在实施的初期取得较显著的效果。诸如在政治需要时期，我国政府会采取行政指令对高污染企业强制关停，营造“政治性蓝天”（石庆玲等，2016^[34]）。但也正因为规定过于明确、约束过强，执行成本过高，长期易导致制度僵化，甚至产生副作用。“政治性蓝天”过后的 PM_{2.5} 污染愈演愈烈，以更加严峻的姿态席卷重来。

企业是排污的直接主体，依靠高强度的约束和惩罚手段无法从根本上解决企业的超标排污问题。在当前的治理领域，仍以排污许可证制度、污染全面达标排放制度等指令性政策为主，排污权交易制度等市场手段并不完善^①，环境要素等交易市场并不活跃，环境领域的市场交易制度在全国范围内没能切实有效实施。京津冀地区市场经济发展水平不平衡，环境治理领域的市场机制并不完善，缺乏统一有效的环境标准。加之各自为政的行政体系和较高的行政壁垒，市场交易活动难以大范围有效实施。这种硬性指令政策的广泛实施和尚未成熟的市场机制之间的不平衡加剧了京津冀 PM_{2.5} 问题的复杂性。

2.3 京津冀 PM_{2.5} 综合影响的系统分析

从京津冀 PM_{2.5} 源头和发酵作用的系统分析来看，京津冀 PM_{2.5} 的产生是社会发展与自然环境保护失衡的一种表现。一方面，在一定的自然条件下，人类社会经济活动的高能耗、高排放成为雾霾天气产生的直接诱因。另一方面，雾霾天气也对人体健康和人类的社会经济活动产生不可逆的危害，造成了一系列新的社会问题。京津冀 PM_{2.5} 产生的社会问题主要体现在对人类身心健康的危害、社会经济活动损失和社会福利的重新分配导致的效率与公平问题上。

京津冀 PM_{2.5} 污染问题最直接的影响是损害人类的生存环境和身心健康，对人的健康造成长期的、累积式的、不可逆的损害，并可能诱发各种强烈的急性疾病（谢杨等，2016^[25]）。大量研究表明，雾霾中含有的有害颗粒物（尤其是 PM_{2.5}）能够直接进入人体呼吸道，极大损害人们的呼吸系统，甚至会增加人们罹患肺癌的风险。因此雾霾污染会显著降低居民的生活满意度，并给他们带来身体和精神上的双重伤

^① 排污许可证制度和排污权交易制度：排污许可证制度是关于排污许可证的申请、审核、颁发、中止、废止与监督管理等方面所作的规定的总称；排污权交易指在污染物排放总量控制指标确定的条件下，利用市场机制，建立合法的机制来允许排污权像商品那样被买入和卖出，以此来进行污染物的排放控制。因此，前者属于命令控制型措施，而后者属于市场机制型措施。

害（储德银等，2017^[35]）。

京津冀 PM_{2.5} 污染问题同时会对各行业的生产活动产生影响，造成社会经济损失。PM_{2.5} 会显著降低能见度，增加各类交通事故频次，公路和航空等对空气质量有严格要求的运输方式首当其冲。这些问题又会进一步造成防护和医疗成本增加、社会经济活动停滞等衍生问题，直接或间接增加了社会的经济负担（曹彩虹和韩立岩，2015^[36]）。同时，由污染引发的疾病成本是一种直接的经济损失。穆泉和张世秋（2015）^[2] 基于 2013 年重度雾霾污染月份的门诊数据，综合采用直接损失评估法、疾病成本法和人力资本法，对雾霾造成的交通和健康的直接经济总损失进行测度。研究显示，因健康影响导致的经济损失占直接损失的 98%，是已有文献研究中非重污染情况下颗粒物污染造成的所有健康损失的近两倍。最后，民众身心健康受损同时也会影响他们的生产活动，降低劳动效率和生产积极性。

京津冀 PM_{2.5} 污染问题背后蕴藏着更为深刻的公平问题。公平与效率问题不仅体现在普通民众身上，也体现在不同地域上。京津冀 PM_{2.5} 污染问题的持续爆发催生了新风系统、空气净化器、防霾口罩等新的生产和消费模式，处于高收入阶层的优势群体可以实现“空气特供”；而一些无力承担这些防护成本并长期暴露在 PM_{2.5} 污染中的社会弱势群体（比如低产阶级的老百姓、污染企业的一线工人）成为了 PM_{2.5} 污染问题的主要受害者。京津冀地区最大的特点是地区政治利益和经济实力差异较大。首先，北京作为全国的政治和文化中心，具有发展高新技术产业的优势。一些大型污染项目转移到弱势和落后地区成为必然趋势，这种强加的负外部性无疑加剧了地区的不公平。其次，考虑到优化首都空气环境的要求，周边地区众多高投入项目是被禁止发展的，因而失去很多经济发展的机会。以北京为首的政治优势地区通过极化效应积累了先天禀赋，京津冀周边的经济落后地区由于长期落后条件的积累和经济利益让渡，没有同等收益。面对着共同的 PM_{2.5} 污染，他们的承担能力是悬殊的。

京津冀 PM_{2.5} 引发的各种问题也会使得京津冀地区的社会经济活动受到影响，这就需要政府和市场做出相应的调整。同时各地方政府也要考虑到地区的公平和经济发展问题而出台相应的政策法规，完善市场机制，加强区域联控共同应对。

2.4 京津冀 PM_{2.5} 问题的环境 - 经济 - 社会系统分析图

由上述分析可知，京津冀 PM_{2.5} 问题是一个复杂的系统问题，涉及环境、经济和社会各个方面、多个层次。自然、社会和经济因素在京津冀 PM_{2.5} 的形成和发酵过程中都有重要的影响：工业粉尘、电力燃煤和机动车尾气排放等社会经济活动成为 PM_{2.5} 的主要污染源；京津冀地区自身的气象和地理要素以及相互毗邻的空间特

征在京津冀 $PM_{2.5}$ 形成和扩散过程中起到了关键作用；政府指令过强和市场机制缺陷等因素无法实现京津冀 $PM_{2.5}$ 治理过程中可持续性的要求。这一系列系统的作用与反馈引发了民众身心健康受损、社会经济损失和社会弱势群体利益受损等一系列问题。

综上所述，京津冀的 $PM_{2.5}$ 系统呈现出环境、经济和社会多因素、多层次的特征。我们把这个系统进行了整理，描绘出京津冀 $PM_{2.5}$ 问题的环境—经济—社会系统图（图 3）。图 3 对实际的系统进行了合理的简化、凝练和抽象，而且没有考虑时滞效应，是一个静态的系统图。在该系统循环中，各要素是与 $PM_{2.5}$ 形成相关的环境以及经济社会活动，连接线用带 S 或 O 的有向曲线表示（S 表示连接线两端在箭头所指方向是‘向相同方向变动’的因果关系，与一些文献中的“同”或“+”同意；O 表示连接线两端在箭头所指方向是‘向相反方向变动’的因果关系，与“反”或“-”同意），以描述 $PM_{2.5}$ 问题是如何形成、发酵并产生各种严重问题。

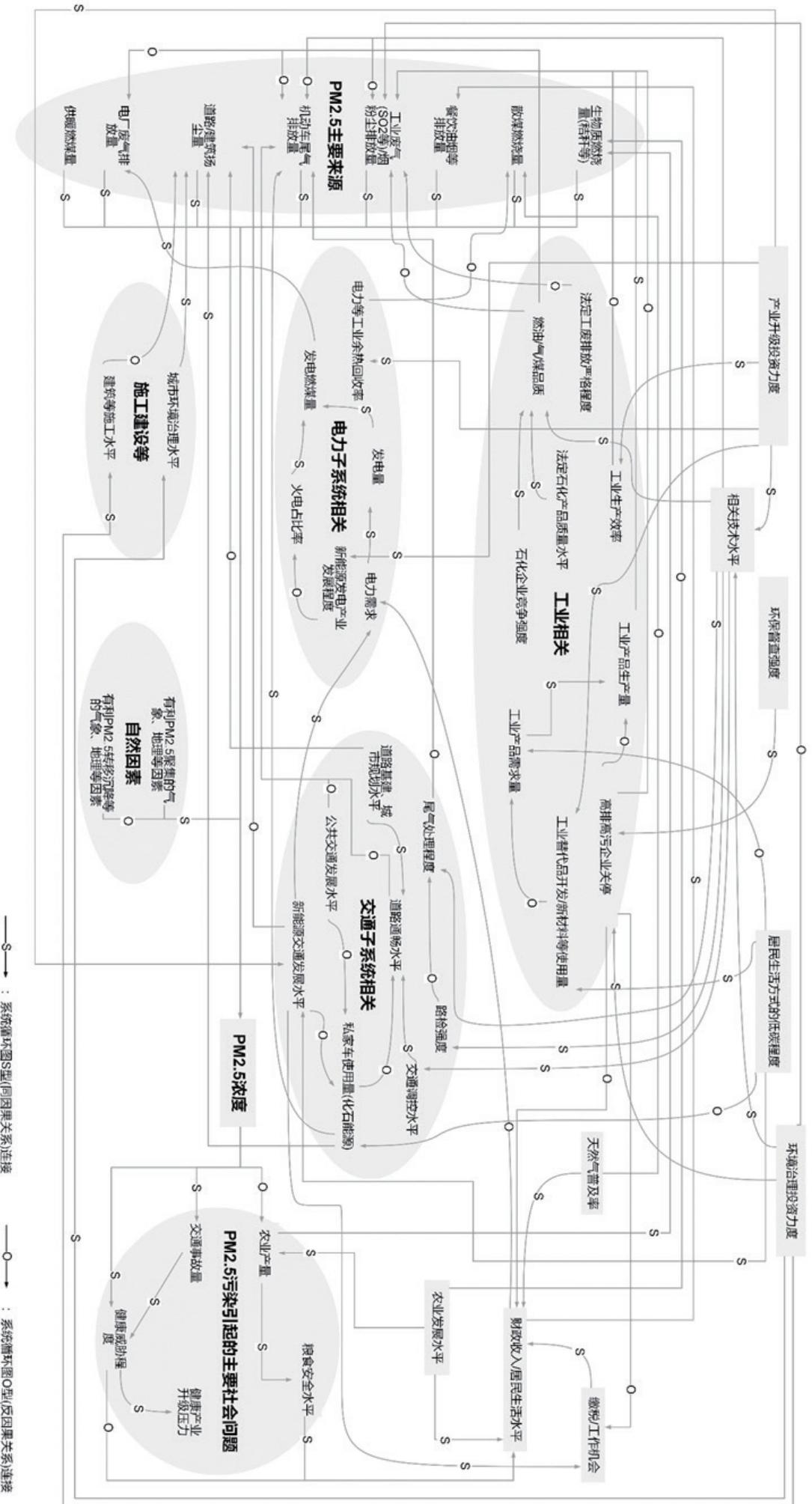


图 3 京津冀 PM2.5 问题的环境 - 经济 - 社会系统图

3 京津冀 PM_{2.5} 治理的利益平衡机制系统分析

结合上述分析和京津冀 PM_{2.5} 问题的环境—经济—社会系统图，我们对本文的系统研究思路进一步凝练，并描述为图 4。京津冀 PM_{2.5} 系统是一个各要素彼此相互影响、动态变化的过程，京津冀 PM_{2.5} 的源头、形成过程以及导致结果是相互作用的。京津冀 PM_{2.5} 的发酵过程与相应的社会经济活动密切相关，其引致的经济、社会、环境问题会对京津冀 PM_{2.5} 来源做出反馈，使得相应的社会经济活动做出调整。政府指令与市场机制也会在这一系列反馈中相互平衡，来调整社会经济活动和社会公平与效率目标。

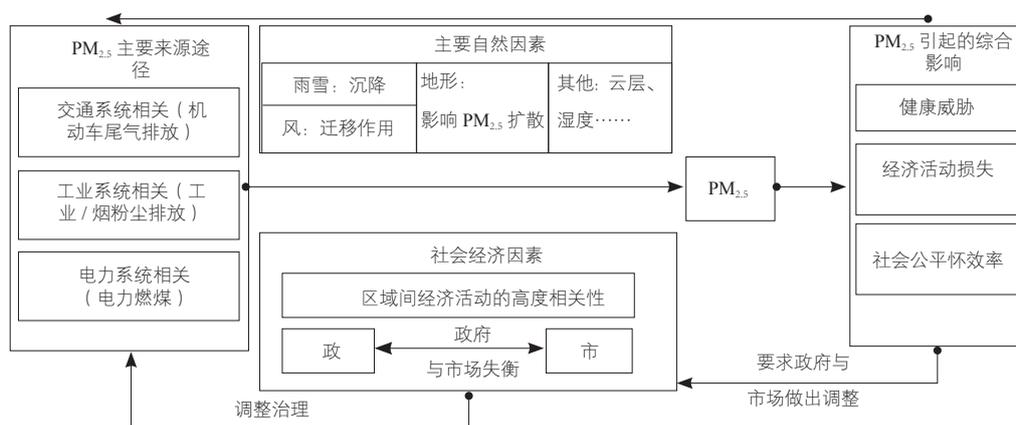


图 4 京津冀 PM_{2.5} 问题的环境 - 经济 - 社会系统结构图

由上述京津冀 PM_{2.5} 问题的环境—经济—社会系统结构图可知，若要解决 PM_{2.5} 超标引起的一系列社会问题，我们应从其主要来源、综合影响以及政府指令与市场机制之间的权衡做出相应调整，方能达到治理的目标。京津冀 PM_{2.5} 治理是一个系统工程，牵涉众多利益主体，不同的经济主体之间会存在不同的利益格局，进行不同的行为选择。因此，明确京津冀 PM_{2.5} 治理的问题中存在的各方利益权衡对整体系统优化具有关键作用。

3.1 局部利益和整体利益的权衡

京津冀三省市在过去一直保持着各自为战的状态，相互竞争导致该区域资源配置浪费的情况大量出现。由于区域内各地区发展不平衡、存在多种利益困境和较高的行政壁垒等原因，有些地方执政者会无视当地企业转移污染造成的外部成本，为了自身利益而表现出机会主义和地方保护主义行为。而京津冀地区空气相通，地理位置相连，经济活动高度相关，雾霾天气的相互影响非常明显。为了进一步说明京津冀地区 PM_{2.5} 空间转移上的高度相关性，我们利用 2013 年之后的文献研究结果对

北京 PM_{2.5} 的区域传输和本地贡献进行了总结。从表 2 (区域传输和本地贡献) 可以看出: 北京地区 PM_{2.5} 的来源以本地贡献为主, 受到了以河北省为主的区域传输的严重影响(王一辰和沈映春, 2017^[37])。此外, 天津对北京 PM_{2.5} 中硫酸盐、硝酸盐、铵盐等物质的贡献比例甚至超过了北京本地。华北平原和黄淮平原也是北京城四季 PM_{2.5} 的主要贡献区。PM_{2.5} 外地贡献是北京城区空气质量下降的主要原因。北京市环保局在 2014 年 4 月发布的源解析结果中明确提出, 北京市全年区域传输对 PM_{2.5} 贡献占 28% 至 36%, 在遭遇传输性重污染时, 区域传输的比例超过 50%。

因此, 局部利益和整体利益的权衡是在进行京津冀地区 PM_{2.5} 的治理时利益平衡机制的重要方面。京津冀协同治理, 打破各自为政的行政区划格局, 实现信息共享, 加强合作机制, 实现跨区域的利益诉求具有必要性。

表 2 京津冀城市和区域 PM_{2.5} 来源研究结果: 区域传输和本地贡献

时间	地区	PM _{2.5} 来源
2012-2013 年	北京	区域传输 (28%-36%)、本地贡献 (64%-72%)
2015 年 1-9 月	通州区	PM _{2.5} 来源: 京外来输 (27%-49%)、京本地排放 (51%-73%); 通州区 PM _{2.5} 京本地源中: 本区污染源 (35%-39%)、京内其他区县 (16%-34%)
2015 年 8 月 15 日-9 月 3 日	北京	本地日均贡献 (48.6%)、河北东南部日均贡献 (21.1%)、河北中部日均贡献 (17.6%)、河南日均贡献 (16.4%)
2013 年 1 月 20-24 日	北京	PM _{2.5} 来源: 本地贡献 (34%)、河北贡献 (26%)、天津贡献 (4%)、京津冀周边贡献 (12%) ^[38] ; PM _{2.5} 中硫酸盐来源: 本地贡献 (14%)、河北贡献 (3%)、天津贡献 (18%)、京津冀周边贡献 (6%); PM _{2.5} 中硝酸盐来源: 本地贡献 (17%)、河北贡献 (6%)、天津贡献 (32%)、京津冀周边贡献 (14%); PM _{2.5} 中铵盐来源: 本地贡献 (35%)、河北贡献 (4%)、天津贡献 (34%)、京津冀周边贡献 (15%); PM _{2.5} 中二次有机气溶胶来源: 本地贡献 (13%)、河北贡献 (6%)、天津贡献 (20%)、京津冀周边贡献 (19%); PM _{2.5} 中其他成分来源: 本地贡献 (48%)、河北贡献 (3%)、天津贡献 (23%)、京津冀周边贡献 (10%) ^[39]
2014 年 5 月 1 日-2015 年 4 月 30 日	北京	城区 PM _{2.5} 夏季主要贡献区: 山东、苏北、黄海地区; 城区 PM _{2.5} 秋季主要贡献区: 冀南、鲁中、鲁西、苏鲁豫皖交界地区; 城区 PM _{2.5} 冬季主要贡献区: 冀南、鲁西北、晋北、陕西、蒙中、蒙古国南部; 城区四季 PM _{2.5} 的主要贡献源区: 华北平原、黄淮平原 ^[40,41]
2014 年 12 月 29 日-2015 年 1 月 28 日	北京	城区冬季 PM _{2.5} 中金属元素主要来源: 燃煤和生物质燃烧 (34.2%)、交通和工业 (25.5%)、地面扬尘 (17.1%) ^[42]
2013 年 1 月-2 月; 2014 年 1 月-2 月	北京	空气质量优升至严重过程中 PM _{2.5} 来源: 本地贡献 (57.1% 降至 32.6%)、外地贡献 (42.9% 升至 67.4%); 河北省 (27.6%-34.5%)、山西省 (1.0%-6.7%)、山东省 (3.8%-7.5%)、天津市 (3.6%-5.8%)、河南省 (1.2%-3.9%); 外地二次生成 (20.2% 升至 39.8%)、本地二次生成 ((12.2%-14.2%)、一次排放 (6.6% 降至 45.7%) ^[43]
2015 年	北京	PM _{2.5} 来源: 本地贡献 (66%)、河北输送 (18%)、天津输送 (4%)、山东输送 (4%) ^[44,45]

3.2 短期治理和长期治理的取舍

从治理主体来看,京津冀 PM_{2.5} 问题治理的两大主体是企业 and 政府。企业以追求自身利益最大化为目标,地方政府受到政绩考核和晋升的利益驱使。各地方政府和企业之间存在相同的经济利益诉求,若没有合理的制度进行约束,双方在短期内会因经济利益的驱使而结成联盟,弱化治理力度。因此若要实现京津冀 PM_{2.5} 的治理,就要帮助经济主体树立长远的大局观,意识到 PM_{2.5} 治理的长期性和艰巨性。

从经济发展方式来看,要想从根本上治理京津冀 PM_{2.5} 问题,就要实现区域产业结构和能源消费结构的调整,实现经济发展方式的转变,从源头上扼制 PM_{2.5} 的形成。在短期内,我国实现能源消费结构和经济发展模式的转变十分困难,改善我国长期以煤炭为主的能源消费结构也会对经济产生暂时的负面影响(魏巍贤和马喜立,2015^[46])。以河北省为例,重污染的工业企业是 PM_{2.5} 形成的罪魁祸首,但也是维持当地经济发展的主要支撑。不论是进行产业升级还是产业转移,在短期内都无法实现。因此要树立长期的环境收益理念,切实落实产业结构调整升级的目标,提高生产效率和能源利用效率。

从制度安排来看,制度安排服务于社会发展,更是决定长期经济发展的重要因素。合理的制度安排有助于长期促进京津冀 PM_{2.5} 的治理。目前,政府主要采取行政命令、强制关停、大额罚款和突击检查等手段来约束企业的污染行为,具有明显的可变性、临时性和不可持续性。长期来看,政府的“铁腕政策”使得企业处于被动选择的地位,这样的低灵活性无法对污染企业治理 PM_{2.5} 污染和提高减污的研发能力起到有效的激励作用。因此,从长远发展的目标来看,应当避免对企业采取过度的行政干预,更多地采取市场化工具鼓励其进行技术研发与创新(王书斌和徐盈之,2015^[47])。经济发展方式的根本性改变需要发挥市场机制的基础性作用。

因此,从治理主体、经济发展方式和制度安排来看,京津冀 PM_{2.5} 问题短期治理更具有经济激励,却难以满足稳定的经济转型、产业转型及能源转型的可持续发展需求。从长远来看,要从根本上解决京津冀地区甚至更广范围上的空气污染问题,还是要靠长期政策的实施落地及更精细的管理和技术投入,从源头采取针对性减排措施,对城市的能源发展、交通发展、产业布局等做出约束,完善市场机制,建立成熟有效的市场环境,推进能源结构调整。

3.3 效率与公平的侧重

大气污染不仅仅涉及国家社会经济发展,更涉及每一个人的基本呼吸权利,这必然牵扯到效率和公平的权衡。效率和公平的合理权衡一直是人类永恒追求的目标,对于公共政策而言,效率更多关注过程而公平更加关注结果,不同利益主体在过程

和结果间存在差别。因此，公共行为更应该考虑到个人、代际和机会公平等多样的公平类型，从而弥补禀赋和基础不同带来的结果差异（弗雷德里克森，2011^[48]）。Ernst（2019）^[49]提出在环境决策中，来自国家、社会和企业等不同行动者的决策很难达成一致。大气污染治理涉及众多利益主体，处于不同地位的利益主体拥有不同的利益诉求。本文将从国家、地方政府、企业和普通民众这四个方面来分析京津冀 PM_{2.5} 问题牵涉的效率与公平问题。这些利益主体的政治地位、经济实力、资源禀赋、地理位置、发展阶段、个体认知等差异，在大气治理措施的选择上面存在着偏见，因此难以做出对弱势群体公平的决策。

国家面临着经济发展和环境保护两大目标，经济发展是国家综合实力和人民生活水平提升的重要条件，而环境保护是人们生存的基本要求，因此国家的决策往往要在经济发展和人们生存之间进行平衡。地方政府在雾霾治理问题上需要耗费巨大的人力、物力和财力，而环境政绩对自身政绩考核和职位晋升作用较弱。在现行考核制度下，地方官员的政治利益高于经济利益，经济利益又高于环境利益，因此政府在保证自身政治权益的前提下，很难兼顾到整个社会的公共利益。企业是最具备“经济人”特征的经济主体，其根本诉求就是自身经济利益最大化。企业独自享有排污的收益而将成本转嫁给社会大众，这就体现出明显的成本与收益的不对称性。对于普通民众来说，他们是 PM_{2.5} 问题负外部性的主要承担者。由于其自身禀赋和内在实力的差异，他们承担着不同的大气污染成本。由于经济实力、社会地位、工作性质等的差异，不同的群体在大气污染治理（或不治理）过程中的受益（或受损）的程度不同。自身禀赋优越的高阶层公民则可以通过诸如新风系统、空气净化器等物品的消费实现“空气特供”，但这反过来会促进了它们的生产和消费，从而直接或间接的导致了更多的资源环境成本，并由包括社会弱势群体在内的所有人共同分担；一些身处污染企业一线的工人，他们短期就业得以保障，但承担起了本不属于他们的额外消费刺激的生产所造成的环境恶化的成本，长期身体受损，经济层面和生活层面都得不到长足的保障和发展。

从上述分析可知京津冀 PM_{2.5} 问题的治理关乎每个人的切身利益，不同的利益主体有不同的诉求，因此实现治理过程中污染成本的分担和治理收益的公平分配尤为重要，经济发展必然会产生污染排放，社会公平要求保障民众，尤其是弱势群体的基本生存权益，因此京津冀 PM_{2.5} 问题治理最重要的就是平衡经济发展和民众生存权益，坚持公平效率和正义原则，实现共同的利益诉求。

4 京津冀 PM_{2.5} 问题的系统优化建议

基于上述对京津冀 PM_{2.5} 问题现状以及自然、社会和经济系统的分析，我们不

难发现, 京津冀 PM_{2.5} 问题各要素相互关联, 其形成机制、发酵过程、作用结果和防护治理牵连广泛: 既有环境、经济、社会多方因素的相互作用, 又有局部利益和整体利益、短期增长和长期发展的相互权衡, 同时还涉及社会公平与效率的侧重, 是一个复杂的环境—经济—社会复合系统问题。

基于以上对京津冀 PM_{2.5} 问题的系统分析, 本文从源头控制、激励机制和利益平衡三点提出以下政策建议:

4.1 源头控制: 控制机动车尾气和燃煤废气排放

根据第二部分系统分析, 京津冀 PM_{2.5} 的主要来源是自然气象地理因素、机动车尾气和燃煤废气排放。虽然气象和地理因素对 PM_{2.5} 的产生影响很大, 但从此来源出发进行 PM_{2.5} 的治理会导致人力物力财力耗费过大。因此, 本文从人为可控的两个来源——机动车尾气和燃煤废气排放出发进行治理。第一, 加大绿色交通投资, 促进公共交通绿色化; 发展绿色经济 (褚大建, 2012^[50]), 提高传统能源的使用效率、减少自然能源的输入; 政府和市场协同配合, 长短期分别采取不同措施, 推动能源结构调整。加大对清洁能源利用的投资力度, 减少火电投资强度, 提升风能、太阳能、水能、核能等清洁能源的占比 (邵帅等, 2016^[51])。

4.2 完善激励机制: 政府绩效考核机制多元化

从效率与公平的系统分析来看, 地方政府在雾霾治理问题上成本投入巨大但成效缓慢, 而环境政绩对自身政绩考核和职位晋升作用较弱。在以经济为导向的政府绩效考核制度下, 地方官员的更关注经济利益给其带来的政治利益, 而难以兼顾牵涉社会公众的环境利益。因此, 除了 PM_{2.5} 的直接源头外, 单一的以经济为导向的政府绩效考核机制也是地方政府治理大气污染驱动力不足的一个重要因素。因此, 本文建议应进一步将环境治理绩效纳入到政府绩效考核体系中来, 例如引入空气达标、绿色经济占比等指标进行考核, 使政府绩效考核机制多元化, 以此提高政府治理 PM_{2.5} 的积极性。

4.3 平衡各利益主体间关系

从制度安排上来看, 京津冀 PM_{2.5} 问题政府短期治理具有临时性、可变性和不可持续性, 要从根本上解决京津冀地区甚至更广范围上的空气污染问题, 还是要靠长期完善市场机制, 建立成熟有效的市场环境, 推进能源结构调整来完成。因此, 为实现 PM_{2.5} 长期可持续治理, 应建立起有效的市场机制, 而政府所扮演的角色应该是市场秩序的维持者, 恰当的引导、规范市场力量推动 PM_{2.5} 问题的治理。短期内, 成熟完善的市场机制不能一蹴而就, 建设过程中甚至可能导致社会中的强势群体获利、弱势群体受损等问题, 这又牵涉到利益主体间的公平和效率问题, 因此在京津

冀 PM_{2.5} 治理的过程中, 要秉持“污染者支付”的原则, 明确废气偷排中的受益者和受损者, 对偷排废气的获利者——污染企业的管理层实施严重惩处, 适当引入行政处罚; 而对直接接触工厂废气导致健康受损的工人、因为污染企业关停而失业的职工和其它受 PM_{2.5} 危害的社会公众应给予一定补贴, 提供绿色培训和绿色就业, 减少 PM_{2.5} 治理过程中受害群体的损失, 以实现 PM_{2.5} 治理过程中社会公平和效率的平衡, 形成一个长足有效、健康稳定的 PM_{2.5} 治理体系。

参考文献:

References:

- [1] 郑玫, 张延君, 闫才青, 朱先磊, James J. Schauer, 张远航. 中国 PM_{2.5} 来源解析方法综述[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 6: 1141-1154.
Zheng M, Zhang Y J, Yan C Q, Zhu X L, James J. Schauer, Zhang Y H. Review of Methods to Analyze PM_{2.5} Sources in China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 6: 1141-1154.
- [2] 穆泉, 张世秋. 中国 2001-2013 年 PM_(2.5) 重污染的历史变化与健康影响的经济损失评估[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 4: 694-706.
Mu Q, Zhang S Q. Evaluation of the Historical Changes of Heavy Pollution of PM_{2.5} and the Economic Loss of Health Effects in China from 2001 to 2013 [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 4: 694-706.
- [3] 黄德生, 张世秋. 京津冀地区控制 PM_(2.5) 污染的健康效益评估[J]. 中国环境科学, 2013, 1: 166-174.
Huang D S, Zhang S Q. Evaluation of Health Benefits of Controlling the Pollution of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. China Environmental Science, 2013, 1: 166-174.
- [4] 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 L M, Zhang X. Spatial Effects of Haze Pollution in China and Its Impacts on Economy and Energy Structure [J]. China Industrial Economy, 2014, 4: 19-31.
- [5] 潘慧峰, 王鑫, 张书宇. 雾霾污染的持续性及空间溢出效应分析——来自京津冀地区的证据[J]. 中国软科学, 2015, 15:134-143.
Pan H F, Wang X, Zhang S Y. Analysis on the Sustainability and Spatial Spillover Effects of Haze Pollution - Evidence from Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. China Soft Science, 2015, 15:134-143.
- [6] 石敏俊, 李元杰, 张晓玲, 相楠. 基于环境承载力的京津冀雾霾治理政策效果评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 9: 66-75.

- Shi M J, Li Y J, Zhang X L, Xiang N. Evaluation of the Effects of Haze Control Policies in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Environmental Carrying Capacity [J] . China Population, Resources and Environment, 2017, 9: 66-75.
- [7] 刘华军, 孙亚男, 陈明华. 雾霾污染的城市间动态关联及其成因研究 [J] . 中国人口·资源环境, 2017, 3: 74-81.
- Liu H J, Sun Y N, Chen M H. Dynamic Correlation between Cities and its Causes of Haze Pollution [J] . China Population, Resources and Environment, 2017, 3: 74-81.
- [8] Donella H Meadows. Thinking in Systems: A primer [M] . Chelsea Green, 2008.
- [9] Ludwig von Bertalanffy, General System Theory: Foundations, Development, Applications [M] . New York, 1969.
- [10] Checkland, Peter. Systems Thinking, Systems Practice [M] . John Wiley & Sons, 1981.
- [11] Hilda C. Martínez León, Calvo-Amodio, Javier. Towards Lean for Sustainability: Understanding the Interrelationships between Lean and Sustainability from a Systems Thinking Perspective [J] . Journal of Cleaner Production, 2017, 142:4384-4402.
- [12] 李璇, 聂滕, 齐珺, 周震, 孙雪松. 2013 年 1 月北京市 PM_(2.5) 区域来源解析 [J] . 环境科学, 2015, 4: 1148-1153.
- Li X, Nie T, Qi J, Zhou Z, Sun X S. Analysis of Regional Sources of PM_{2.5} in Beijing in January 2013 [J] . Environmental Science, 2015, 4:1148-1153.
- [13] Li J S, Zhou H W, Meng J, Yang Q, Chen B, Zhang Y Y. Carbon Emissions and Their Drivers for a Typical Urban Economy from Multiple Perspectives: A Case Analysis for Beijing City. Applied Energy, 2018, 226: 1076-1086.
- [14] 程春英, 尹学博. 雾霾之 PM_{2.5} 的来源、成分、形成及危害 [J] . 大学化学, 2014, 5: 1-6.
- Cheng C Y, Yin X B. Source, Composition, Formation and Harm of PM_{2.5} [J] . University Chemistry, 2014, 5: 1-6.
- [15] 江亿, 唐孝炎, 倪维斗, 王静怡, 胡姗. 北京 PM_{2.5} 与冬季采暖热源的关系及治理措施 [J] . 中国能源, 2014, 1: 7-13+28.
- Jiang Y, Tang X Y, Ni W D, Wang J Y, Hu S. The Relationship between PM_{2.5} and Winter Heating in Beijing and its Treatment Measures [J] . Energy of China, 2014, 1: 7-13+28.
- [16] 李丽珍, 曹露, 王磊, 刘辉, 史学峰, 巩鑫磊. 谈中国 PM_(2.5) 的污染来源及危害 [J] . 能源与节能, 2013, 4: 77-78.
- Li L Z, Cao L, Wang L, Liu H, Shi X F, Gong X L. Sources and Hazards of PM_{2.5} Pollution in China [J] . Energy and Energy Conservation, 2013, 4: 77-78.
- [17] 钱萌. 京津冀地区雾霾及影响因素研究 [J] . 资源节约与环保, 2014, 8: 116.
- Qian M. Study on Haze and its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J] . Resources Economization & Environmental Protection, 2014, 8: 116.

- [18] 吴善兵 . 我国 PM_(2.5) 的组成来源及控制技术综述 [J] . 海峡科学 , 2013, 9: 28-30+40.
Wu S B. A Review of the Composition, Sources and Control Technologies of PM_{2.5} in China [J] . Straits Science, 2013, 9: 28-30+40.
- [19] 戴海夏, 宋伟民 . 大气 PM_(2.5) 的健康影响 [J] . 国外医学 (卫生学分册), 2001, 5: 299-303.
Dai H X, Song W M. Health Effects of Atmospheric PM_{2.5} [J] . Foreign Medical Sciences (Section of Hygiene), 2001, 5: 299-303.
- [20] 戴海夏, 宋伟民, 高翔, 陈立民, 胡敏 . 上海市 A 城区大气 PM₍₁₀₎、PM_(2.5) 污染与居民日死亡数的相关分析 [J] . 卫生研究 , 2004, 3: 293-297.
Dai H X, Song W M, Gao X, Chen L M, Hu M. Correlation Analysis of Atmospheric PM₍₁₀₎ and PM_(2.5) Pollution and Daily Death of Residents in A Urban Area of Shanghai [J] . Journal of Hygiene Research, 2004, 3: 293-297.
- [21] 郭新彪, 魏红英 . 大气 PM_(2.5) 对健康影响的研究进展 [J] . 科学通报 , 2013, 13: 1171-1177.
Guo X B, Wei H Y. Research Progress on Health Effects of Atmospheric PM_(2.5) [J] . Chinese Science Bulletin, 2013, 13: 1171-1177.
- [22] 胡颖, 邵龙义, 沈蓉蓉, Schaefer K, 王静, Suppan P, 王建英 . 北京市 PM_(2.5) 对 DNA 的氧化性损伤规律分析 [J] . 中国环境科学 , 2013, 10: 1863-1868.
Hu Y, Shao L Y, Shen R R, Schaefer K, Wang J, Suppan P, Wang J Y. Analysis of Oxidative Damage of DNA by PM_(2.5) in Beijing [J] . China Environmental Science, 2013, 10: 1863-1868.
- [23] 刘帅, 宋国君 . 城市 PM_(2.5) 健康损害评估研究 [J] . 环境科学学报 , 2016, 4: 1468-1476.
Liu S, Song G Q. Study on Health Damage Assessment of Urban PM_(2.5) [J] . Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 4: 1468-1476.
- [24] 谢杨, 戴瀚程, 花岡達也, 增井利彦 . PM_(2.5) 污染对京津冀地区人群健康影响和经济影响 [J] . 中国人口·资源与环境 , 2016, 11: 19-27.
Xie Y, Dai H C, Hua G D Y, Zeng J L Y. Health and Economic Effects of PM_(2.5) Pollution on Population in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J] . China Population, Resources and Environment, 2016, 11: 19-27.
- [25] 张恒, 周自强, 赵海燕, 熊正琴 . 青奥会前后南京 PM_(2.5) 重金属污染水平与健康风险评估 [J] . 环境科学 , 2016, 1: 28-34.
Zhang H, Zhou Z Q, Zhao H Y, Xiong Z Q. Assessment of Heavy Metal Pollution Levels and Health Risks of PM_{2.5} in Nanjing before and after the Youth Olympic Games [J] . Environmental Science, 2016, 1: 28-34.
- [26] 王芳 . 理性的困境 : 转型期环境问题的社会根源探析——环境行为的一种视角 [J] . 华东

- 理工大学学报 (社会科学版), 2007, 1: 6-10.
- Wang F. The Dilemma of Rationality: An Analysis of Social Root of Environmental Problems in the Transition Period - A Perspective of Environmental Behavior [J] . Journal of East China University of Science and Technology (Social Science Edition), 2007, 1: 6-10.
- [27] 王芳 . 京津冀地区雾霾天气的原因分析及其治理 [J] . 求知 , 2014, 7: 40-42.
- Wang F. Cause Analysis and Control of Haze in Beijing-Tianjin-Hebei [J] . Knowledge, 2014, 7: 40-42.
- [28] 王洛忠, 丁颖 . 京津冀雾霾合作治理困境及其解决途径 [J] . 中共中央党校学报 , 2016, 3: 74-79.
- Wang L Z, Ding Y. The Dilemma of Beijing-Tianjin-Hebei Haze Cooperative Governance and its Solutions [J] . Journal of The Party School of The Central Committee, 2016, 3: 74-79.
- [29] 周一敏, 赵昕奕 . 北京地区 PM_(2.5) 浓度与气象要素的相关分析 [J] . 北京大学学报 (自然科学版), 2017, 1:111-124.
- Zhou Y M, Zhao X Y. Correlation Analysis of PM_{2.5} Concentration and Meteorological Elements in Beijing [J] . Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017, 1: 112-124.
- [30] 高广阔, 吴世昌, 韩颖 . 中国雾霾污染问题的分析与测度方法探讨 [J] . 统计与决策 , 2016, 24: 31-34.
- Gao G K, Wu S C, Han Y. Discussion on Analysis and Measurement Methods of Haze Pollution in China [J] . Statistics and Decision-Making, 2016, 24: 31-34.
- [31] Zhang B, Qiao H, Chen Z M, Chen B. Growth in Embodied Energy Transfers via China's Domestic Trade: Evidence from Multi-Regional Input-Output Analysis [J] . Applied Energy, 2016, 15:1093-1105.
- [32] Wu X F, Chen G Q. Energy Use by Chinese Economy: A System Cross-Scale Input-Output Analysis [J] . Energy Policy, 2017,108: 81-90.
- [33] 潘慧峰, 王鑫, 张书宇 . 重雾霾污染的溢出效应研究——来自京津冀地区的证据 [J] . 科学决策 , 2015, 2: 1-15.
- Pan H F, Wang X, Zhang S Y. Severe Haze Pollution Spillover Effect: Evidence from Beijing-Tianjin-Hebei Region [J] . Scientific Decision Making, 2015, 2: 1-15.
- [34] 石庆玲, 郭峰, 陈诗一 . 雾霾治理中的“政治性蓝天”——来自中国地方“两会”的证据 [J] . 中国工业经济 , 2016, 5: 40-56.
- Shi Q L, Guo F, Chen S Y. “Political Blue Sky” in Haze Control - Evidence from China's Local “Two Sessions” [J] . China Industrial Economy, 2016,5: 40-56.

- [35] 储德银,何鹏飞,梁若冰.主观空气污染与居民幸福感——基于断点回归设计下的微观数据验证 [J] . 经济动态 , 2017, 2: 88-101.
Chu D Y, He P F, Liang R B. Subjective Air Pollution and Residents' Happiness - Microscopic Data Verification Based on Breakpoint Regression Design [J] . Economic Dynamics, 2017, 2: 88-101.
- [36] 曹彩虹,韩立岩.雾霾带来的社会健康成本估算 [J] . 统计研究 , 2015, 7: 19-23.
Cao C H, Han L Y. Estimation of Social Health Cost Caused by Haze [J] . Statistical Research, 2015, 7: 19-23.
- [37] 王一辰,沈映春.京津冀雾霾空间关联特征及其影响因素溢出效应分析 [J] . 中国人口·资源与环境 , 2017, S1:41-44.
Wang Y C, Shen Y C. Spatial Correlation Characteristics of Haze in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Spillover Effect Analysis of its Influencing Factors [J] . China Population, Resources and Environment, 2017, S1: 41-44.
- [38] 杨奔,黄洁.经济学视域下京津冀地区雾霾成因及对策 [J] . 经济纵横 , 2016, 04: 54-57.
Yang B, Huang J. Causes and Countermeasures of Haze in Beijing-Tianjin-Hebei Region from the Perspective of Economics [J] . Economic Review, 2016, 04: 54-57.
- [39] 张永安,邬龙.京津冀经济增长与细颗粒物污染的区域联动关系 [J] . 城市问题 , 2015, 1: 33-40.
Zhang Y A, Wu L. The Regional Linkage between Economic Growth and Fine Particulate Matter Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J] . Urban Problems, 2015, 1: 33-40.
- [40] 顾为东.中国雾霾特殊形成机理研究 [J] . 宏观经济研究 , 2014, 6: 3-7+123.
Gu W D. Study on the Special Formation Mechanism of Haze in China [J] . Macroeconomics, 2014, 6: 3-7+123.
- [41] 洪纲,周静博,姜建彪,杨丽丽,冯媛.空气细颗粒物 (PM_(2.5)) 的污染特征及其来源解析研究进展 [J] . 河北工业科技 , 2015, 1: 64-71.
Hong G, Zhou J B, Jiang J B, Yang L L, Feng Y. Research Progress on Pollution Characteristics and Source Analysis of Fine Particulate Matter (PM_(2.5)) in Air [J] . Hebei Journal of Industrial Science & Technology, 2015, 1: 64-71.
- [42] 曾静,王美娥,张红星.北京市夏秋季大气 PM_(2.5) 浓度与气象要素的相关性 [J] . 应用生态学报 , 2014, 9: 2695-2699.
Zeng J, Wang M E, Zhang H X. Correlation between Atmospheric PM_(2.5) Concentration and Meteorological Factors in Summer and Autumn in Beijing [J] . Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 9: 2695-2699.
- [43] 马忠玉,肖宏伟.中国区域 PM_{2.5} 影响因素空间分异研究——基于地理加权回归模型的实证分析 [J] . 山西财经大学学报 , 2017, 5: 14-26.

- Ma Z Y, Xiao H W. Spatial Differentiation of PM_{2.5} Influencing Factors in China -- An Empirical Analysis Based on Geographical Weighted Regression Model [J] . 2017, 5: 14-26.
- [44] 王嫣然, 张学霞, 赵静瑶, 于新晓, 蒋群鸥. 北京地区不同季节 PM_(2.5) 和 PM₍₁₀₎ 浓度对地面气象因素的响应 [J] . 中国环境监测, 2017, 2: 34-41.
- Wang Y R, Zhang X X, Zhao J Y, Yu X X, Jiang U O. Response of PM_(2.5) and PM₍₁₀₎ Concentrations to Surface Meteorological Factors in Different Seasons in Beijing Area [J] . Environmental Monitoring in China, 2017, 2: 34-41.
- [45] Chang, X., Wang, S., Zhao, B., Xing, J., Liu, X., Wei, L., Song, Y., Wu, W., Cai, S., Zheng, H., Ding, D., Zheng, M., 2019. Contributions of Inter-City and Regional Transport to PM_{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and its Implications on Regional Joint Air Pollution Control [J] . Science of The Total Environment, 660: 1191-1200.
- [46] 魏巍贤, 马喜立. 能源结构调整与雾霾治理的最优政策选择 [J] . 中国人口·资源与环境, 2015, 7: 6-14.
- Wei W X, Ma X L. The Optimal Policy Choice for Energy Structure Adjustment and Haze Control [J] . China Population, Resources and Environment, 2015, 7: 6-14.
- [47] 王书斌, 徐盈之. 环境规制与雾霾脱钩效应——基于企业投资偏好的视角 [J] . 中国工业经济, 2015, 4: 18-30.
- Wang S B, Xu Y Z. Decoupling Effects of Environmental Regulation and Haze - From the Perspective of Enterprise Investment Preference [J] . China Population, Resources and Environment, 2012, 5: 40-47.
- [48] 乔治·弗雷德里克森. 新公共行政 [M], 丁煌等译, 中国人民大学出版社, 2011.
- Fredrickson G. New Public Administration [M] . Trans. Ding H et al., China Renmin University Press, 2011.
- [49] Ernst A. How Participation Influences the Perception of Fairness, Efficiency and Effectiveness in Environmental Governance: An Empirical Analysis [J] . Journal of Environmental Management, 2019, 238:368-381.
- [50] 诸大建. 绿色经济新理念及中国开展绿色经济研究的思考 [J] . 中国人口·资源与环境, 2012, 5: 40-47.
- Zhu D J. New Concept of Green Economy and Thoughts on China' s Green Economy Research [J] . China Population, Resources and Environment, 2012, 5: 40-47.
- [51] 邵帅, 李欣, 曹建华, 杨莉莉. 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, 9: 73-88.
- Shao S, Li X, Cao J H, Yang L L. Economic Policy Choice for Haze Pollution Control in

China - From the Perspective of Spatial Spillover EffectS [J] . Economic Research Journal, 2016, 9: 73-88.

(本文责编：宁 远)

Environmental, Economic and Social System Analysis of PM_{2.5} Problems in Beijing-Tianjin-Hebei Region

LIU Yi-fang, YANG Yu-cong, JI Xi

Abstract: The natural environment, social economy and other factors in PM_{2.5} problems are interrelated, whose formation mechanism, fermentation process, effects and protection and treatment have a wide range of implications. Based on system thinking and method, we made a system analysis of the sources of PM_{2.5}, natural geographical and meteorological environment as well as the role of social and economic mechanism and social problems, then drew the system graph of Beijing-Tianjin-Hebei PM_{2.5} problem of environment, economy and society, the result show that firstly pollutant emissions from transportation, industry and electricity are the main sources of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei. Secondly, the fermentation process of natural and socio-economic factors aggravates the complexity of PM_{2.5} problems. Finally, PM_{2.5} problems in Beijing-Tianjin-Hebei involve many stakeholders and have a great impact on economic development, social equity and public physical and mental health. Based on the connotation of systematic analysis, this paper systematically analyzed the treatment of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei from three aspects: local and overall, short-term and long-term, efficiency and equity. Based on the results of system analysis, we proposed system optimization suggestions from three aspects: source control, improvement of incentive mechanism and balance of the relationship among stakeholders.

Key words: beijing-tianjin-hebei; PM_{2.5}; system analysis; system optimization