

京津冀地区 PM_{2.5} 驱动因素灰色关联差异分析*

李云燕, 王立华

(北京工业大学循环经济研究院, 北京 100124)

摘要:该文通过分析京津冀地区的 PM_{2.5} 污染特征及细颗粒物组分, 梳理 PM_{2.5} 污染的主要成因。从人口增长、城市化进程、经济发展、能源结构、工业过程、交通运输、建筑行业以及环境保护投资等方面研究了影响该地区 PM_{2.5} 污染的内在驱动力, 应用灰色关联度差异量化分析了京津冀地区 PM_{2.5} 污染的主要驱动因素。研究结果表明: 北京市 PM_{2.5} 污染主要的污染源类的驱动因素为工业过程、城市化进程、交通运输等, 环保投资的加大能够较大幅度地减轻 PM_{2.5} 污染, 改善空气质量; 天津市主要的驱动因素为工业过程、交通运输、城市化进程, 建筑扬尘仍然是天津市雾霾的主要驱动因素之一; 河北省 PM_{2.5} 污染源为工业过程、城市化进程、交通运输、能源结构, 燃煤对于 PM_{2.5} 污染的影响逐年增大。环保投资作为治理大气污染, 改善空气质量的重要举措, 与 PM_{2.5} 污染呈现显著的负相关关系。在治理 PM_{2.5} 污染的过程中, 三省市应该打破行政区域的壁垒, 改变原来属地治理模式中各自为政的状况, 落实 PM_{2.5} 污染治理的联防联控措施。

关键词: 细颗粒物; 驱动因素; 灰色关联; 差异分析

中图分类号: X21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-2404(2018)87-0013-13

1 京津冀地区雾霾污染现状

近年来, 随着工业化和城市化进程的不断加快, 中国空气质量状况日益严峻, 雾霾天气逐渐增多。京津冀地区位于环渤海地区的中心位置, 是国家经济发展的重要引擎, 然而在经济的高速发展背景下, 京津冀地区的大气质量则遭到了威胁, 雾霾天气频发, 严重影响了人们的正常工作和生活。对 PM_{2.5} 污染驱动因素进行研究, 是认识和理解 PM_{2.5} 污染过程, 解释 PM_{2.5} 污染内在机制, 进而分析未来雾霾变化趋势的重要基础, 对制定相关的 PM_{2.5} 污染防治政策也有重要的理论意义。为掌握目前京津冀地区的空气污染程度, 研究选取了北京市、天津市以及河北省的石家庄、保定两个城市作为研究对象, 结合各城市 2014 年 - 2015 年的空气质量指数变化状况, 分析近几年该地区的空气污染程度。

河北省四个城市的空气质量与北京市、天津市相比整体较差。2014 年, 石家庄市空气质量优良率为 28.25%, 保定市为 22.99%, 唐山市为 36.39%, 邯郸市为 25.82%, 空气质量达标天数都远远少于北京和天津, 不足全年天数的一半; 河北四个城市 2014 年污染天数占全年天数的百分比分别为 71.75%, 77.01%, 63.61%, 74.18%, 由此可见, 四个城市 2014 年大多数时间均处于污染状况之中。其中重度污染和严重污染天数占比为石家庄 12.64%, 保定 27.15%, 唐山 16.67%, 邯郸 23.34%。除唐山全年出现频率最高的空气质量级别为良外, 其他三个城市均为轻度污染。2015 年石家庄市、保定市、唐山市和邯郸市的空气质量优良率均比 2014 年有了很大程度的提高, 上升幅度分别为 18.45%、16.3%、31.62%、12.36%。由此可见, 四个城市空气质量状况有了很大程度的改善, 但与北京市、天津市相比仍有一定的差距, 空气质量达标天数仍然不足全年天数的一半。在污染天数中, 石家庄市重度污染和严重污染所占的百分比为 12.64%, 保定市为 20.60%, 唐山市为 10.17%, 邯郸市为 9.62%, 石家庄市该比率与 2014 年持平, 其他三个城市均有较大幅度的下降。石家庄、保定全年出现频率最高的空气质量级别由轻度污染变为良, 邯郸市仍为轻度污染, 但是空气质量级别为良的天数所占比例也较大。北京市 PM_{2.5} 污染状况呈现的特点是整体质量浓度适中,

收稿日期: 2018-06-21

作者简介: 李云燕, 教授, 博士生导师, 主要从事环境经济、环境规划与管理、环境影响评价等领域的研究; 王立华, 硕士研究生, 主要从事环境污染防治与管理等方面的研究。

E-mail: liyunyan2016@163.com

* 基金项目: 国家社会科学基金项目(编号: 15BJY059)“基于 DPSIR 模型框架的京津冀雾霾成因分析及综合治理对策研究”; 北京市社科基金项目(编号: 14JGB036)“京津冀地区雾霾污染控制政府绩效评估模式的构建”。

良或轻度污染天数较多。天津市 $PM_{2.5}$ 污染特点为空气质量状况以良居多,但是整体质量浓度仍较高。而河北省的 $PM_{2.5}$ 污染特点为质量浓度较高,以轻度污染天气出现最多,重度及以上污染也较为频繁。因此河北省的空气质量状况在京津冀地区最

差,大气环境质量改善刻不容缓。由于京津冀地区三个省市的空气质量都有一定的改善,特别是天津和河北改善幅度均较大,说明大气污染控制工作起到了一定成效。

表 1 2014 年 - 2015 年京津冀地区典型城市空气质量级别分布

城市	年份	优	良	轻度污染	重度污染	重度污染	严重污染
北京	2014	15.75%	35.91%	21.55%	14.64%	4.42%	7.73%
	2015	21.21%	35.26%	18.46%	13.22%	4.13%	7.72%
天津	2014	5.53%	40.33%	29.28%	12.98%	8.01%	3.87%
	2015	13.46%	45.06%	25.00%	9.89%	3.57%	3.02%
石家庄	2014	3.60%	24.65%	29.64%	15.24%	10.80%	16.07%
	2015	9.89%	36.81%	30.22%	10.44%	6.32%	6.32%
保定	2014	0.55%	22.44%	30.19%	19.67%	8.31%	18.84%
	2015	5.77%	33.52%	25.82%	14.29%	7.69%	12.91%
唐山	2014	2.50%	33.89%	30.55%	16.39%	8.89%	7.78%
	2015	9.61%	35.16%	29.40%	15.66%	6.87%	3.30%
邯郸	2014	0.82%	5.00%	35.28%	15.56%	14.17%	9.17%
	2015	1.92%	36.26%	36.54%	15.66%	3.57%	6.05%

表 2 2014 年 - 2015 年北京各区 $PM_{2.5}$ 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

区县	$PM_{2.5}$ 浓度		区县	$PM_{2.5}$ 浓度	
	2014 年	2015 年		2014 年	2015 年
东城区	86.3	84.3	通州区	105.9	92.5
西城区	88.4	83.0	顺义区	84.0	81.4
朝阳区	88.4	83.4	大兴区	104.4	96.4
海淀区	89.5	80.0	昌平区	79.3	70.6
丰台区	95.0	86.7	平谷区	83.2	78.8
石景山区	89.2	83.5	怀柔区	76.4	70.1
门头沟区	84.3	77.0	密云区	73.0	67.8
房山区	100.8	96.2	延庆区	74.8	61.0

北京市共有 16 个行政区划单位(包括东城、西城、海淀、朝阳、丰台、门头沟、石景山、房山、通州、顺义、昌平、大兴、怀柔、平谷、密云、延庆 14 个市辖区)。根据 2014 年 - 2014 年北京环境状况统计公报,各区县的 $PM_{2.5}$ 浓度均值如上表所示。从中可见,北京市各区县的 $PM_{2.5}$ 浓度有所差异,2014 年的浓度范围在 $73.0 \sim 105.9\mu\text{g}/\text{m}^3$,2015 年的范围为 $61.0 \sim 96.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。从北京市区县地理位置及 $PM_{2.5}$ 浓度可知,北京市 $PM_{2.5}$ 浓度体现为南高北低的分布特征。2014 年 $PM_{2.5}$ 浓度最低的是位于京北部的密云区,其次是延庆区和怀柔区;2015 年

最低浓度为延庆区,其次为密云区和怀柔区。2014 年最高浓度是位于京南部的通州区,其次是大兴区和房山区;2015 年 $PM_{2.5}$ 浓度最高值出现在大兴区,其次是房山区和通州区。由此可知,北京市雾霾污染呈现南高北低的空间分布特征,而位于城区中心的几个区, $PM_{2.5}$ 浓度则介于京北区和京南区之间。

表 3 2014 年 - 2015 年天津各区县 $PM_{2.5}$ 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

区县	$PM_{2.5}$ 浓度		区县	$PM_{2.5}$ 浓度	
	2014 年	2015 年		2014 年	2015 年
滨海新区	79	70	西青区	82	70
和平区	86	71	津南区	79	69
河东区	84	70	北辰区	92	76
河西区	83	72	武清区	87	68
南开区	86	71	宝坻区	84	68
河北区	84	74	宁河区	85	70
红桥区	84	69	静海区	93	73
东丽区	85	66	蓟州区	79	66

天津市现辖 16 个行政区(包括滨海新区、和平区、河北区、河东区、河西区、南开区、红桥区、东丽区、西青区、津南区、北辰区、武清区、宝坻区、宁河

区、静海区、蓟州区)。根据2014年-2015年天津市环境状况公报,各区 $PM_{2.5}$ 浓度如上表所示。由此可见,与北京相比,天津市各区县的 $PM_{2.5}$ 浓度变化范围较小,2014年为 $79 \sim 93 \mu\text{g}/\text{m}^3$,2015年为 $66 \sim 76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2014年 $PM_{2.5}$ 浓度较小的行政区为滨海新区、津南区、蓟州区,浓度较大的行政区为静海县、北辰区;2015年 $PM_{2.5}$ 浓度较小的行政区为东丽区、蓟州区,浓度较大的行政区为北辰区、河北区。通过对比各区县的地理位置及其对应的 $PM_{2.5}$ 浓度可知,天津市的 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布差异不明显,基本呈现城区浓度较大,郊区浓度较小的分布特征, $PM_{2.5}$ 浓度的差异主要与不同地区污染类工业企业分布及交通密集度等因素相关。

表4 2014年-2015年河北省各市 $PM_{2.5}$ 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

区县	$PM_{2.5}$ 浓度		区县	$PM_{2.5}$ 浓度	
	2014年	2015年		2014年	2015年
石家庄	126	89	张家口	35	34
唐山	101	85	承德	52	43
秦皇岛	60	48	沧州	88	70
邯郸	116	91	廊坊	100	85
邢台	131	101	衡水	108	99
保定	129	107			

河北省共有11个地级以上城市(包括石家庄、唐山、秦皇岛、邯郸、邢台、保定、张家口、承德、沧州、廊坊、衡水),根据2014年-2015年河北环境状况公报,各市 $PM_{2.5}$ 浓度如表4所示。由此可知,河北省 $PM_{2.5}$ 浓度变化范围较大,2014年为 $35 \sim 131 \mu\text{g}/\text{m}^3$,2015年为 $34 \sim 107 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2014年河北省 $PM_{2.5}$ 浓度最低的是张家口,其次是承德和秦皇岛;2015年 $PM_{2.5}$ 浓度最低的同样为张家口、承德和秦皇岛三个城市。由地理位置可知, $PM_{2.5}$ 浓度最低的三个城市的空气质量水平较低,皆分布于河北的最北部。2014年 $PM_{2.5}$ 浓度最高的是邢台,其次是石家庄、邯郸、衡水;2015年浓度最高的为保定市,其次为邢台、衡水、邯郸。结合各市地理位置可知, $PM_{2.5}$ 浓度最高的几个城市均位于河北最南部,而河北省其他城市的 $PM_{2.5}$ 浓度则介于二者之间。因此,通过对比河北省各市 $PM_{2.5}$ 年均浓度得知,河北省 $PM_{2.5}$ 污染程度存在明显的空间分布差

异,大致表现为南高北低的空间分布特征。

2 京津冀地区雾霾组成成分分析

大气中的细颗粒物 $PM_{2.5}$ 不是一种单一成分的空气污染物,而是含有多种污染物的气溶胶颗粒,由直接排入空气中的一次粒子和空气中的气态污染物通过化学转化生成的二次粒子组成。由于大气细颗粒物的来源广泛,且来源不同的细颗粒物其形成机理不同等原因,细颗粒物的组成成分差异较大且十分复杂。不同时间和空间,细颗粒物的化学成分都是不同的,化学组分不同的颗粒物对人体健康和大气能见度的影响亦不相同。因此,根据某一地区大气细颗粒物的组成成分以及该地区的污染源,可以对细颗粒物的来源进行分析,有利于掌握细颗粒物的污染源以及对人类的危害。

一般来说,细颗粒物的组成成分包括:有机污染物、非金属的水溶性离子、痕量的金属元素、多种微生物等。细颗粒物中的有机污染物种类多,危害大,包括一些常见的碳氧化合物,如醇、酸、脂、简单的脂肪烃、芳烃以及不溶于有机溶剂的复杂成分等。另外,细颗粒物中还含有多环芳烃及多环苯类化合物,这些有机物是强致癌物质,对人体有巨大的危害。非金属水溶性离子主要包括燃料燃烧过程中释放的元素碳以及在大气中经二次转化形成的硫酸盐、硝酸盐、氨盐、卤素离子、碱以及碱土金属离子等。痕量的金属主要指一些地壳元素,主要由硅、铝、铁、钙、镁、钠、钾等元素的氧化物组成,它能反映土壤中成土母质的特征,除此之外还包括铅、锌、砷、镉、铜等主要源自人为污染的重金属元素。细颗粒物在迁移过程中还会吸附空气中的细菌、病毒等微生物,这些组分复杂多变,量化过程十分复杂。通常认为,有机污染物、硫酸盐、硝酸盐、铵盐、元素碳是细颗粒物的主要组分。

根据2014年北京环保局公布的环境状况公报,北京大气中 $PM_{2.5}$ 组成成分包括有机污染物(占26%)、硝酸盐(占17%)、硫酸盐(占16%)、地壳元素(12%)、铵盐(11%)、其他(18%),其中有机污染物、硝酸盐、硫酸盐占据 $PM_{2.5}$ 组成成分的前三位。硝酸盐、硫酸盐及铵盐均为气态污染物通过化学转化生成的水溶性离子,其形成的主要过程为大气中的一次气态污染物(SO_2 和 NO_x 等)通过均相或非均相的氧化形成酸性气溶胶,这些酸性气溶胶

再和大气中的偏碱性气体 NH_3 反应,生成硫酸铵(亚硫酸铵)和硝酸铵等铵盐气溶胶粒子。三者相加占北京市 $PM_{2.5}$ 组分的 44%,因此,水溶性离子是北京市 $PM_{2.5}$ 的主要组成成分。除水溶性离子外,有机污染物占比也较大为 26%,城市机动车的尾气排放、工业排放及人类生活做饭、取暖的燃料燃烧都会有大量的有机污染物排放。

3 京津冀地区 $PM_{2.5}$ 污染驱动机理分析

2014 年,京津冀地区中北京、天津、石家庄等城市相继公布了 $PM_{2.5}$ 的源解析结果。北京市源解析结果显示, $PM_{2.5}$ 来源中,约 28% ~ 36% 来自区域传输,本地排放约占 64% ~ 72%,其中机动车占 31.1%,燃煤占 22.4%,工业生产占 18.1%,扬尘占 14.3%,其他如餐饮、畜禽养殖、汽车修理等活动排放占 14.1%。由此可见,外地传输是北京 $PM_{2.5}$ 污染的一个重要因素,机动车尾气则是最主要的本地污染源。天津市的源解析结果显示, $PM_{2.5}$ 来源中区域传输占 22% ~ 34%,其余 66% ~ 78% 来自本地排放,其中扬尘占 30%,燃煤占 27%,机动车占

20%,工业生产占 17%,其他占 6%。即天津受周边污染源影响也较大,本地排放中,扬尘为首要污染源,其次为燃煤及机动车。石家庄的源解析结果为区域传输占 23% ~ 30%,本地污染占 70% ~ 77%,其中燃煤 28.5%,工业生产 25.2%,扬尘 22.5%,机动车 15.0%,其他生物质燃烧、餐饮等占 8.8%。因此,京津冀地区雾霾的污染成因主要为燃煤过程、机动车尾气排放、工业生产过程、扬尘污染以及其他如餐饮、畜禽养殖等活动。

3.1 燃煤污染

大量的研究及数据表明,巨大的能源消费量和以煤为主的能源消费结构是中国长期以来空气污染的最主要原因,中国煤炭年生产量与年消费量均居全球首位,燃煤消耗量以每年超过 2 亿吨的速度增长,目前燃煤消耗量已超过世界总量的 48%。在中国能源消费结构中,煤炭为 68%,石油为 23.45%,天然气为 3%,且近期内中国以煤炭为主的能源消耗结构短期内不会改变。京津冀地区作为中国经济社会发展迅速的区域,能源消费总量也相当巨大,而煤炭占能源消费总量的比重也较高。

表 5 京津冀地区煤炭消费量

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
北京(万吨)	2634.61	2365.54	2269.89	2019.23	1736.54	1165.18
天津(万吨)	4756.21	5202.50	5233.37	5278.67	5027.28	4538.83
河北(万吨标准煤)	23576.03	25012.04	25558.33	26309.34	25936.66	-

注:数据来源于 2011 年 - 2016 年北京、天津、河北统计年鉴。

根据北京、天津、河北统计年鉴,得出近几年京津冀地区能源消费中煤炭的消费量。由数据可知,北京市 2010 年 - 2015 年煤炭消费量呈现下降的趋势,2015 年比 2010 年的下降幅度为 55.77%。天津市在 2010 年 - 2013 年一直处于上升的趋势,2014 年 - 2015 年开始下降,相比于 2010 年煤炭消费水平也有了一定程度的下降。而河北省 2010 年 - 2013 年间,煤炭消费量一直处于增长的状态,2014 比 2010 年增长了 10.01%。因此,京津冀地区出北京外,天津和河北省的煤炭消费量都基本呈现增长的趋势。

煤炭燃烧过程产生的大量污染物对空气质量的改善带来极大的威胁。根据环保部的统计数据来看,全国烟尘排放量的 70%、二氧化硫排放量的 90%、氮氧化物的 67% 以及二氧化碳的 70% 都来自

于燃煤排放,特别是燃煤火电厂和工业锅炉的排放。燃煤不仅可以直接排放出颗粒物、烟尘等构成 $PM_{2.5}$ 的组分,其排放的二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物等大气污染物也可以作为 $PM_{2.5}$ 的前体物。排放到大气中二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物等,在一定的条件下,可以进行化学反应,经过一系列的二次反应后,进而形成漂浮在空气中的气溶胶颗粒,降低大气能见度,并给人类的生产和生活带来损害。因此,燃煤是导致大气 $PM_{2.5}$ 污染的主要因素之一,要改善京津冀大气环境质量,必须严格控制燃煤,调整能源结构,降低煤炭在能源结构中的比例,提倡并推广使用天然气、风能、水能、生物质能等清洁能源。

3.2 尾气排放

京津冀地区城市的源解析结果显示,机动车尾气的排放是 $PM_{2.5}$ 的重要来源之一,特别是北京市,机动车尾气是 $PM_{2.5}$ 最主要的本地污染源。机动车尾气的污染主要集中在城市地区,因此容易造成城市的污染物浓度上升。机动车保有量的不断

增加和城市规模的发展和城市人口的增加有着直接的关系,人口的增加将导致机动车保有量的增加。目前京津冀地区经济发展迅速,外来人口增多,对汽车的需求也逐渐变大,而机动车尾气引发的大气污染问题也日益突出。

表6 京津冀地区机动车保有量(万辆)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
北京	480.90	498.30	520.00	543.70	559.10	561.90
天津	179.49	210.11	236.36	275.86	287.57	285.09
河北	1344.42	1421.70	1558.92	1580.88	1521.37	-

注:数据来源于2011~2016年北京、天津、河北统计年鉴。

根据北京市、天津市、河北省统计年鉴,得出近几年京津冀地区机动车保有量数据。由数据可知,北京市、天津市、河北省2010年-2015年机动车保有量均呈现逐渐增长的趋势。北京是中国的首都,是经济社会发展高度发达的城市,外来人口众多,机动车保有量也处于全国较高的水平,2015年相比于2010年的增长幅度为16.84%。天津市的机动车保有量相对低于北京市,2015年比2010年增长幅度为58.83%。由此可知,天津市的机动车保有量虽低于北京市,但是增长速度却更大,2010年天津市的机动车数据约为北京市的37.32%,而2015年该比例增长为50.74%。河北省由于总体人口较多,机动车保有量也十分巨大。2014年比2010年增长幅度为13.16%。由数据分析可知,京津冀地区机动车保有量基数较大,北京市空气质量受机动车尾气影响最大,而天津市机动车数量增长速度最快,大气环境受机动车尾气的影 响也将更为明显。

车用燃料的燃烧是机动车排放污染物产生的主要方式,燃料燃烧所排放的一氧化碳(CO)、碳氢化合物(CH_x)和氮氧化物(NO_x)、可吸入颗粒物(PM)分别占机动车污染物总排放的七成和九成。机动车排放的可吸入颗粒物是一种复合物,主要由碳的颗粒物、高分子化合物及其他物质组成。其中碳的颗粒物能够降低空气的能见度,能够附着在物体表面,对金属物质有腐蚀作用。高分子是一种极强的吸附物质,能够吸附空气中原有的有害物质,比如苯、细菌、重金属、病原体等。而其他碳氢化合物(CH_x)和氮氧化物(NO_x)等则作为 $PM_{2.5}$ 的前体

物,经过二次反应成为漂浮在空气中的气溶胶颗粒,对大气环境造成污染。因此,机动车尾气的排放直接造成的 $PM_{2.5}$ 污染作用虽然较小,但其经过二次反应之后,却可以对大气环境产生极大的影响。机动车油品标准过低、人口过度聚集城市以及老旧机动车、黄标车继续行驶等也是京津冀地区控制机动车尾气排放必须解决的关键问题,在此基础上,应加紧重视和预防非机动车排放,包括道路移动机械排放等。

3.3 工业排放

工业生产过程是 $PM_{2.5}$ 污染的主要源头之一,京津冀地区 $PM_{2.5}$ 源解析结果显示,北京市工业生产过程对 $PM_{2.5}$ 的贡献是18.1%,天津为17.0%,而河北省则达到了25.2%。目前中国工业的发展,基本上走的是粗放型的增长道路,各地经济的增长基本上是靠消耗大量的物质和能源资源实现,由此带来了二氧化硫、氮氧化物以及其他废气、废水和废弃物的大量排放,对环境造成了严重污染。

京津冀地区集聚了大量的水泥、钢铁、炼油石化等高污染产业和遍布各地的无组织零散高危害产业,它们产生的大气污染物排放量非常巨大。京津冀地区工业生产产生的废气是该地区各类大气污染物的主要来源,工业生产产生的烟粉尘及细颗粒物是雾霾污染的重要成因,二氧化硫及氮氧化物等的排放及二次反应的发生,在一定程度上加重了雾霾的污染程度。

根据《中国环境统计年鉴》,得出近几年京津冀地区工业生产排放的大气污染物数据。

表 7 京津冀地区烟粉尘排放总量及工业排放量(万吨)

	2010		2011		2012		2013		2014	
	总量	工业	总量	工业	总量	工业	总量	工业	总量	工业
北京	6.6	3.8	6.6	2.9	6.68	3.08	5.93	2.72	5.73	2.27
天津	7.3	6.2	7.6	6.5	8.41	5.90	8.75	6.28	13.9	11.2
河北	82.1	64.4	132.2	122.4	123.6	105.6	131.3	118.7	179.8	145.1

注:数据来源于 2011 年 - 2015 年《中国环境统计年鉴》。

由表 7 可知,京津冀地区烟粉尘的排放中,主要来源是工业过程排放。北京市 2010 年 - 2014 年,工业粉尘排放量占粉尘排放总量的比例为 57.58%、43.94%、46.11%、45.87%、39.62%,即大约占全部粉尘排放量的一半,但有逐年下降趋势。天津市则分别为 84.93%、85.53%、70.15%、71.77%、80.57%,

该比例与北京市相比更大,说明天津市的大气中烟粉尘大多由工业过程排放。河北省的烟粉尘排放量最大,工业生产所占比例也比较高,分别为 78.44%、92.59%、85.42%、90.40%、80.70%,有的年份超出 90% 均来自于工业排放,由此可见工业生产是京津冀地区大气环境中的烟粉尘的主要排放源。

表 8 京津冀地区二氧化硫排放总量及工业排放量(万吨)

	2010		2011		2012		2013		2014	
	总量	工业	总量	工业	总量	工业	总量	工业	总量	工业
北京	-	5.68	9.8	6.1	9.38	5.93	8.70	5.20	7.89	4.03
天津	-	21.76	23.1	22.2	22.45	21.55	21.68	20.78	20.9	19.5
河北	-	99.42	141.2	131.7	134.1	123.9	128.5	117.3	119.0	104.7

注:数据来源于 2011 年 - 2015 年《中国环境统计年鉴》。

大气中二氧化硫和氮氧化物虽然不是 $PM_{2.5}$ 的主要组分,但是当其排放到大气中后,会发生一系列的化学反应,最终由硫酸盐、硝酸盐、铵盐等形式成为 $PM_{2.5}$ 的组成成分,是 $PM_{2.5}$ 主要的前体物。与烟

粉尘相似,工业生产排放的大气污染物约占该污染物排放总量的一半以上。对于北京市工业排放约占总量排放的 50%,而在天津市、河北省这一比例将会更大,一般大于 80%,对于河北省,甚至会超过 90%。

表 9 京津冀地区氮氧化物排放总量及工业排放量(万吨)

	2010		2011		2012		2013		2014	
	总量	工业	总量	工业	总量	工业	总量	工业	总量	工业
北京	22.3	10.9	18.8	9.0	17.75	8.53	16.63	7.59	15.10	14.05
天津	24.6	23.6	35.9	30.0	33.42	27.56	31.17	25.06	28.23	21.69
河北	111.6	95.8	180.1	122.1	176.1	119.5	165.3	110.6	151.2	98.7

注:数据来源于 2011 年 - 2015 年《中国环境统计年鉴》。

工业生产在消耗大量的资源和能源的同时也会排放大量的污染物,对大气环境造成污染。京津冀地区目前仍有较多的重工业,特别是河北省,工业结构中重工业仍然占据较大的比例。这些工业具有高污染、高能耗等特征,对京津冀地区大气环境质量构

成极大的威胁。因此,调整京津冀地区工业结构,避“重”就“轻”,减少高污染的重工业比例,并采取有效地除尘及脱氮除硫控制措施,减少工业过程大气污染物的排放,这是京津冀地区控制 $PM_{2.5}$ 污染,改善大气质量的关键。

3.4 扬尘污染

建筑业的发展是城市发展的重要组成部分,然而与此同时,在建筑施工或者市政和道路施工过程中产生的灰尘就形成了建筑扬尘。建筑工程施工过程具有工程量大、周期长等特点。在施工过程中容

易引起周边一些扬尘污染问题。无论一个工程项目是新建、扩建或改建,在施工过程中都会给周边环境甚至全国范围带来一定空气污染、噪声污染、灰尘污染,甚至给整个区域的气候和生态系统带来负面影响。

表 10 京津冀地区房屋建筑施工面积(万平方米)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
北京	15572.10	18065.20	20045.40	21526.00	21677.70	20009.10
天津	13606.48	17640.80	18490.36	21524.51	22664.99	22239.19
河北	48769.16	57110.61	67400.10	78002.04	66068.42	

注:数据来源于 2011 年 - 2016 年北京、天津、河北统计年鉴。

根据北京市、天津市、河北省统计年鉴,得出近几年京津冀地区建筑施工面积数据。有数据可知,北京市 2010 年 - 2015 年房屋建筑施工面积逐渐增加,2015 年相比于 2010 年的增长幅度为 28.49%。由此可见,北京市建筑施工面积增长幅度较为迅速,源解析结果也显示,北京市受扬尘污染的贡献率为 14.3%。因此,建筑施工过程产生的扬尘是北京市 PM2.5 污染的重要因素。天津市的建筑施工面积也呈现逐年增长的趋势,从 2010 年到 2015 年,增长幅度为 63.45%,增长速度高于北京市。河北省房屋建筑施工面积虽然也逐年现增长,但增长速度略高于北京市,而与天津市相比略低,2014 年与 2010 年相比,增长幅度为 35.47%。由此可见,京津冀地区的房屋建筑施工面积大且增长速度快,由此引发的扬尘是京津冀地区 PM2.5 污染的重要因素之一。

4 京津冀地区 PM2.5 污染驱动因素分析

4.1 PM2.5 污染驱动因素及其指标选取

为进一步分析京津冀地区 PM2.5 污染的驱动因素,拟从人口增长、城市化进程、经济发展、能源结构、工业过程、交通运输、建筑行业以及环境保护投资等方面研究影响该地区 PM2.5 污染的内在驱动力,通过灰色关联度分析方法,得出京津冀地区 PM2.5 污染的主要驱动因素。

4.2 灰色关联度方法步骤

灰色关联度分析方法是灰色系统理论的方法之一,其基本思想是分析有关数据的几何相似性。利用灰色关联度分析方法,首先要比较研究对象不同时间段数据的几何特点,然后根据其特点进行描述

和分析。通过选定的参考数列与比较数列的对比分析,得出两者之间几何形状的差异以及相似程度,判断出灰色过程的发展状态的关联程度,最后进一步确定各个比较数列对参考数列的发展的影响程度。

灰色关联度分析方法分为以下几个步骤:

① 原始序列的确定

由于 PM2.5 监测时间的限制性,将主行为因素 PM10 的监测数据序列为参考数列:

$$X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$$

影响 PM10 浓度的 N 个相关因素的原始数据序列为比较数列,选取人口增长、城市化进程经济发展、能源结构、工业过程、交通运输、建筑行业以及环境投资八个因素,研究其对于 PM2.5 污染的影响程度。七个因素对应的指标分别为常住人口数量、城市化率、实际地区生产总值 GDP(以 2005 年为基准)、燃煤总量、产业结构中第二产业占比、机动车保有量、全社会房屋建筑施工面积以及水利、环境及公共设施管理投资。

$$X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)) \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

其中, n 为所选的年数, N 为所选影响因素的个数,其中 $n = 10, N = 7$ 。

② 对参考数列和比较数列进行无量纲化处理

由于各影响因素的意义不同,所以单位不同,不能用于横向比较,为了使得数据可以相互比较,需要利用一定的方法对上述序列进行无量纲化处理。目前常用的无量纲化的方法有初值化方法、均值化方法、区间相对值法等。初值化方法是指所有数据均除以第一个数据,得到一个新的数列,这个新的数列即是各不同时刻的值相对于第一个时刻的值得百分

比;均值化方法是指将所有数据除以序列平均值,即得到一个占平均值百分比的数列。选取均值化方法对各影响因素的数据进行无量纲化。

③ 求参考数列与比较数列的灰色关联系数

对于一个参考数列 X_0 有若干个比较数列 X_1, X_2, \dots, X_n 。各比较数列 $k = X$, 与参考数列在各个时刻,即曲线中的各点的关联系数可由下列公式算出,其中 ζ 为分辨系数, $\zeta > 0$ 。

通过一系列运算计算出 X_0 与 X_1, X_2, \dots, X_n 的关联度系数。

$$r(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_k |x_0'(k) - x_i'(k)| + \zeta \max_k |x_0'(k) - x_i'(k)|}{|x_0'(k) - x_i'(k)| + \zeta \max_k |x_0'(k) - x_i'(k)|}$$

式中 $i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, n, \zeta$ 为分辨系数。

④ 求关联度

因为关联系数是比较数列与参考数列在各个时刻的关联程度值,所以它的数不止一个,而信息过于分散不便于进行整体性比较。因此我们将各个时刻

的关联系数集中为一个值,即求各时期关联度的平均值。将得到的关联度平均值作为比较数列与参考数列间关联程度的数值,据此分析各比较数列对参考数列的影响程度。

$$r_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r(x_0(k), x_i(k)) \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

其中, r_{0i} 表示影响因素 X_i 与主行为因素 X_0 的关联程度, r_{0i} 越大,说明该因素 X_i 对 X_0 的影响程度越大。

⑤ 关联度排序

对上述已计算得到的各个比较数列对于参考数列的关联度进行排序,得出上述各因素对 PM2.5 污染影响程度的大小顺序。

4.3 京津冀地区 PM2.5 污染驱动因素分析

4.3.1 北京市 PM2.5 污染驱动因素分析

按照灰色关联度的计算原理得到北京市 PM2.5 污染各驱动因素与可吸收颗粒物浓度 2005 年 - 2014 年的灰色关联系数。

表 11 北京市 2005 年 - 2014 年 PM2.5 污染驱动因素的灰色关联系数

年份 / 指标	常住人口数量	实际 GDP	燃煤总量	机动车保有量	第二产业占比	建筑施工面积	城市化率	环保投资
2005	0.8333	0.5054	0.7045	0.9853	0.9840	0.3333	0.9802	0.9994
2006	0.8344	0.4847	0.7148	0.9845	0.9818	0.3429	0.9784	0.9899
2007	0.8327	0.4617	0.7284	0.9795	0.9841	0.3520	0.9810	0.9818
2008	0.8254	0.4451	0.7480	0.9715	0.9875	0.3572	0.9847	0.9809
2009	0.8244	0.4323	0.7624	0.9667	0.9881	0.3641	0.9855	0.9716
2010	0.8274	0.4271	0.7783	0.9608	0.9891	0.3636	0.9866	0.9717
2011	0.8360	0.4311	0.8118	0.9619	0.9907	0.3510	0.9885	0.9699
2012	0.8429	0.4323	0.8296	0.9624	0.9918	0.3454	0.9898	0.9647
2013	0.8476	0.4285	0.8538	0.9624	0.9923	0.3425	0.9905	0.9648
2014	0.8491	0.4176	0.8760	0.9627	0.9918	0.3469	0.9901	0.9591

北京市 2005 年 - 2014 年 PM2.5 污染驱动因素的灰色关联系数变化趋势如下图所示。

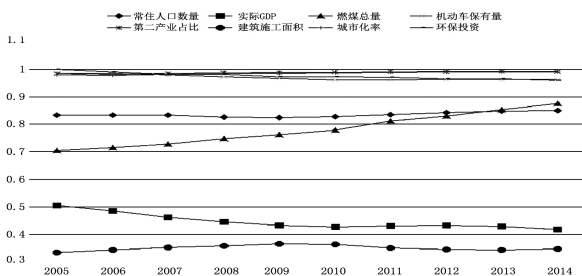


图 1 2005 年 - 2014 年北京市 PM2.5 污染驱动因素灰色关联系数趋势图

根据灰色关联度分析原理,将北京市 2005 年 - 2014 年 PM2.5 污染驱动因素灰色关联系数进行算数平均,得出 10 年来北京市 PM2.5 污染各驱动因素的综合灰色关联度结果。

从表中可以看出,与可吸入颗粒物关联系数较大的是第二产业占比、城市化率、机动车保有量及环保投资四个指标,均大于 0.9,常住人口数量及燃煤总量与可吸入颗粒物的灰色关联系数介于 0.7 ~ 0.9 之间,灰色关联系数也较高,而实际 GDP 对于可吸入颗粒物的灰色关联系数变化范围在 0.4 ~ 0.5 之间,房屋建筑施工面积与可吸入颗粒物的灰色关联

系数变化范围在 0.3 ~ 0.4 之间,相比于其他驱动因素来说,灰色关联系数较低。

表 12 北京市 2005 年 - 2014 年 PM_{2.5} 污染驱动因素的综合关联度分析结果

PM _{2.5} 污染驱动因素指标	灰色关联度
常住人口数量(万人)	0.8353
城市化率(%)	0.9855
实际地区生产总值 GDP(亿元)	0.4466
燃煤总量(万吨)	0.7808
产业结构中第二产业占比(%)	0.9881
机动车保有量(万辆)	0.9698
全社会房屋建筑施工面积(万平方米)	0.3499
水利、环境及公共设施管理投资(亿元)	0.9754

2005 年 - 2014 年,不同的指标 10 年来灰色关联系数的变化趋势也呈现一定的差异性。对于灰色关联系数较大的四个影响因素对应的指标,由于本身的关联系数较高,因此其灰色关联系数变化趋势不太明显。机动车保有量的灰色关联系数在 2005 年 - 2010 年以较小的幅度呈现减小的趋势,而 2010 年 - 2014 年又缓慢的逐年增大,但总体均高于 0.96。城市化率及第二产业占比十年来的变化趋势基本呈现小幅度上升的趋势,而且均在 2014 年有了较小程度的下降。环保投资的灰色关联系数 10 年来则呈现较有规律的小幅度逐年下降的趋势。而常住人口数量及燃煤总量的灰色关联系数则呈现出较为明显的上升趋势,常住人口数量的灰色关联度从 2005 年的 0.8333 上升为 2014 年的 0.8491,上升幅度不大,而燃煤总量的灰色关联系数由 2005 年的 0.7045 上升

为 2014 年的 0.8760,上升幅度高达 24%,这可能与近几年来北京市的限煤政策的执行有较大关系。房屋建筑施工面积及实际 GDP 的灰色关联系数均呈现波动下降的趋势,整体的灰色关联系数均相对较低。

根据灰色关联度分析过程,得出北京市 PM_{2.5} 污染驱动因素的灰色关联度普遍较高,八项指标的关联度排序为产业结构中第二产业占比 > 城市化率 > 水利、环境及公共设施管理投资 > 机动车保有量 > 常住人口数量 > 燃煤总量 > 实际地区生产总值 GDP > 全社会房屋建筑施工面积,对应的 PM_{2.5} 污染驱动因素排序为工业过程 > 城市化进程 > 环境保护投资 > 交通运输 > 人口增长 > 能源结构 > 经济发展 > 建筑行业。因此可知,影响北京市 PM_{2.5} 污染的最重要的污染源类的驱动因素为工业过程、城市化进程、交通运输等,环保投资的增加与 PM_{2.5} 污染的灰色关联系数较大,说明环保投资的加大能够较大程度上减轻 PM_{2.5} 污染,改善空气质量。

为减轻北京市的 PM_{2.5} 污染程度,应该主要在降低工业过程排放、减少机动车尾气污染、减缓人口增长速度及增加环保投入等方面制定更为严格的制度及规定,采取相应的措施并保证各项政策的准确落实。

4.3.2 天津市 PM_{2.5} 污染驱动因素分析

按照灰色关联度的计算原理得到天津市 PM_{2.5} 污染各驱动因素与可吸收颗粒物浓度 2005 年 - 2014 年的灰色关联系数。

表 13 天津市 2005 年 - 2014 年 PM_{2.5} 污染驱动因素的灰色关联系数

年份 / 指标	常住人口数量	实际 GDP	燃煤总量	机动车保有量	第二产业占比	建筑施工面积	城市化率	环保投资
2005	0.7952	0.4891	0.4962	0.9982	0.9861	0.4161	0.9719	0.9801
2006	0.8077	0.4807	0.5222	0.9984	0.9859	0.4016	0.9730	0.9745
2007	0.8201	0.4783	0.5485	0.9932	0.9919	0.3795	0.9806	0.9744
2008	0.8339	0.4791	0.5838	0.9916	0.9940	0.3643	0.9843	0.9318
2009	0.8450	0.4704	0.6046	0.9910	0.9924	0.3627	0.9841	0.9114
2010	0.8596	0.4749	0.6126	0.9888	0.9941	0.3530	0.9872	0.9077
2011	0.8756	0.4829	0.6347	0.9870	0.9954	0.3359	0.9897	0.9214
2012	0.8792	0.4680	0.6499	0.9864	0.9944	0.3411	0.9892	0.9068
2013	0.8900	0.4683	0.6759	0.9884	0.9908	0.3335	0.9862	0.9135
2014	0.8906	0.4570	0.6971	0.9865	0.9926	0.3333	0.9884	0.9105

天津市 2005 年 - 2014 年 $PM_{2.5}$ 污染驱动因素的灰色关联系数变化趋势如图 2 所示。

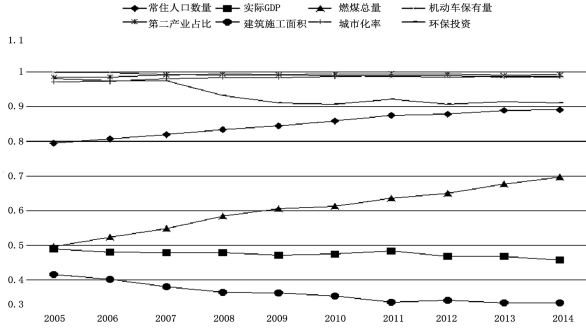


图 2 2005 年 - 2014 年天津市 $PM_{2.5}$ 污染驱动因素灰色关联系数趋势图

根据灰色关联度分析原理,将天津市 2005 年 - 2014 年 $PM_{2.5}$ 污染驱动因素灰色关联系数进行算数平均,得出 10 年来天津市 $PM_{2.5}$ 污染各驱动因素的综合灰色关联度结果。

表 14 天津市 $PM_{2.5}$ 污染驱动因素的灰色关联度分析结果

$PM_{2.5}$ 污染驱动因素指标	灰色关联度
常住人口数量(万人)	0.8497
城市化率(%)	0.9835
实际地区生产总值 GDP(亿元)	0.4749
燃煤总量(万吨)	0.6026
产业结构中第二产业占比(%)	0.9918
机动车保有量(万辆)	0.9909
全社会房屋建筑施工面积(万平方米)	0.3621
水利、环境及公共设施管理投资(亿元)	0.9332

从表中可看出,与可吸入颗粒物关联度较高的是第二产业占比、城市化率、机动车保有量及环保投资四个指标,十年来的灰色关联系数均大于 0.9。其次常住人口数量与可吸入颗粒物之间的灰色关联系数约介于 0.8 ~ 0.9 之间,说明人口数量对 $PM_{2.5}$ 污染也有较大的驱动作用。而实际 GDP 与燃煤总量对于天津市 $PM_{2.5}$ 污染的驱动作用适中,灰色关联系数介于 0.4 ~ 0.7 之间,房屋建筑施工面积的灰色关联系数则为 0.3 ~ 0.4 之间。

天津市的 $PM_{2.5}$ 污染驱动因素指标的变化趋势与北京市的相似,也呈现出一定的差异性。第二产业占比与城市化率 10 年来的灰色关联度均较高,

基本呈现缓慢波动的上升趋势,在 2005 年 - 2011 年,灰色关联系数逐渐上升,2011 年 - 2014 年则出现了较小程度的下降。机动车保有量的灰色关联系数在 2005 年 - 2014 年一直保持较高的水平,虽然有微小的下降,但是下降的幅度较小。天津市的环保投资对于可吸入颗粒物的灰色关联系数变化趋势较为明显,从 2005 年 - 2014 年在微小的波动过程中呈现为较明显的下降趋势,由 2005 年的 0.9801 下降至 2014 年的 0.9105。常住人口数量及燃煤总量的变化趋势较为一致,与其他指标不同,呈现明显的上升趋势。常住人口数量的灰色关联系数从 2005 年的 0.7952 增长为 2014 年的 0.8906,上升幅度为 12%,而燃煤总量的灰色关联系数则由 2005 年的 0.4962 增长至 2014 年的 0.6971,上升幅度高达 40%,说明近几年来天津市 $PM_{2.5}$ 污染的变化与人口总量增长及燃煤总量的变化之间的相关性不断增大。而房屋建筑面积的灰色关联系数整体呈现下降的趋势,且灰色关联系数较低,这与天津市的雾霾源解析结果有一定出入,原因可能是房屋建筑施工面积的数据没有很好地反映出施工场地的降尘措施的实施效果,建筑场地产生的扬尘以及二次污染也是雾霾的主要污染因素之一。

根据灰色关联度分析过程,得出天津市 $PM_{2.5}$ 污染驱动因素的灰色关联度普遍较高,八项指标的关联度排序为产业结构中第二产业占比 > 机动车保有量 > 城市化率 > 水利、环境及公共设施管理投资 > 常住人口数量 > 燃煤总量 > 实际地区生产总值 GDP > 全社会房屋建筑施工面积,对应的 $PM_{2.5}$ 污染驱动因素排序为工业过程 > 交通运输 > 城市化进程 > 环境保护投资 > 人口增长 > 能源结构 > 经济发展 > 建筑行业。说明与天津市 $PM_{2.5}$ 污染关联度较高的几个驱动因素为工业过程、交通运输、城市化进程等,人口增长及能源结构与 $PM_{2.5}$ 污染的关联度适中,但呈现增大的趋势。虽然房屋建筑施工面积与可吸入颗粒物的关联度较低,但是建筑扬尘仍然是天津市 $PM_{2.5}$ 污染的主要驱动因素之一,不能被忽视。与北京市相似,天津市的环保投资与 $PM_{2.5}$ 污染的关联度也较大,说明环保投资对于天津市 $PM_{2.5}$ 污染的控制也起到了较大的作用。

为改善天津市的大气质量,应该在减少工业过程中污染物的排放、减缓机动车保有量的增长速度、

严格控制道路及建筑扬尘等方面做出更大的努力,并在控制污染源的基础上,加大环保投资力度,以期从源头及治理上共同减轻大气污染,提高空气质量。

4.3.3 河北省 PM2.5 污染驱动因素分析

按照灰色关联度的计算原理得到河北省 PM2.5 污染各驱动因素与可吸收颗粒物浓度的 2005 年 - 2014 年的灰色关联系数。

表 15 河北省 2005 年 - 2014 年 PM2.5 污染驱动因素的灰色关联系数

年份 / 指标	常住人口数量	实际 GDP	燃煤总量	机动车保有量	第二产业占比	建筑施工面积	城市化率	环保投资
2005	0.6937	0.6431	0.4578	0.9491	0.9970	0.4599	0.9936	0.9953
2006	0.7041	0.6266	0.4486	0.9502	0.9965	0.4748	0.9933	0.9917
2007	0.7232	0.6216	0.4519	0.9517	0.9974	0.4647	0.9945	0.9873
2008	0.7419	0.6230	0.4701	0.9538	0.9984	0.4388	0.9957	0.9806
2009	0.7770	0.6470	0.5083	0.9532	0.9988	0.3935	0.9967	0.9581
2010	0.7981	0.6546	0.5449	0.9572	0.9991	0.3662	0.9973	0.9552
2011	0.8142	0.6550	0.5573	0.9589	0.9993	0.3550	0.9976	0.9694
2012	0.8295	0.6593	0.5793	0.9595	0.9993	0.3426	0.9978	0.9690
2013	0.8449	0.6660	0.5983	0.9655	0.9965	0.3333	0.9952	0.9675
2014	0.8323	0.6325	0.5816	0.9635	0.9968	0.3521	0.9954	0.9547

河北省 2005 年 - 2014 年 PM2.5 污染驱动因素的灰色关联系数变化趋势如图 3 所示。

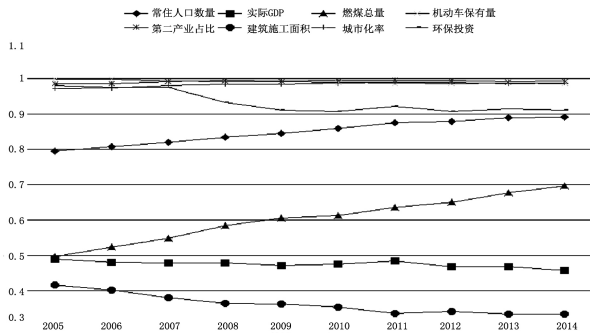


图 3 2005 年 - 2014 年河北省 PM2.5 污染驱动因素灰色关联系数趋势图

根据灰色关联度分析原理,将河北省 2005 年 - 2014 年 PM2.5 污染驱动因素灰色关联系数进行算数平均,得出 10 年来河北省 PM2.5 污染各驱动因素的综合灰色关联度结果(表 16)。

从表中可以看出,与可吸入颗粒物关联度较高的是第二产业占比、城市化率、环保投资以及交通运输,灰色关联系数均大于 0.9。常住人口数量及实际 GDP 的灰色关联系数适中,介于 0.6 ~ 0.9 之间,常住人口数量的灰色关联系数较实际 GDP 更高一些,多数介于 0.7 ~ 0.9 之间。燃煤总量与可吸入颗粒物之间的灰色关联系数相对前几个较低,约为 0.4 ~

0.6 之间,但却一直呈现增加的趋势。房屋建筑施工面积对于可吸入颗粒物的灰色关联系数相对较低,为 0.3 ~ 0.4 之间。

表 16 河北省 PM2.5 污染驱动因素的灰色关联度分析结果

PM2.5 污染驱动因素指标	灰色关联度
常住人口数量(万人)	0.7759
城市化率(%)	0.9957
实际地区生产总值 GDP(亿元)	0.6429
燃煤总量(万吨)	0.5198
产业结构中第二产业占比(%)	0.9979
机动车保有量(万辆)	0.9562
全社会房屋建筑施工面积(万平方米)	0.3981
水利、环境及公共设施管理投资(亿元)	0.9729

2005 年 - 2014 年,河北省 PM2.5 污染八项驱动因素指标的灰色关联系数的变化趋势也有所不同。同北京市及天津市的情况相似,机动车保有量的灰色关联度 10 年来一直保持较高的水平,从 2005 年 - 2013 年基本呈现逐年增加的趋势,2014 年有了小幅度的降低。而第二产业占比及城市化率的变化趋势相对来说较不明显,10 年来基本呈现微小波动且保持稳定的状态,且灰色关联系数一直保持在 0.99 以上。河北省环保投资对于可吸入颗粒物的灰色关联系数的变化则较明显,2005 年 - 2010 年呈现下降的

趋势,然而2010年-2013年有主见回升,直到2014年又有了下降的迹象,整体从2005年的0.9953,下降为2014年的0.9547,但仍然与可吸入颗粒物具有较高的相关度。房屋建筑施工面积的灰色关联系数也逐年下降,由0.4599下降至0.3521。常住人口数量及燃煤总量灰色关联系数变化趋势则与其他指标不同,呈现明显的上升趋势,常住人口数量的灰色关联度由2005年的0.6937上升为2014年的0.8323,上升幅度约为20%左右,高于北京市及天津市的上升幅度,燃煤总量的灰色关联度由2005年的0.4578上升为2014年的0.5816,上升幅度27%,介于北京市及天津市之间。河北省作为燃煤大省,燃煤造成的污染物排放是 $PM_{2.5}$ 污染的关键因素之一。

河北省 $PM_{2.5}$ 污染驱动因素的灰色关联度普遍较高,八项指标的关联度排序为产业结构中第二产业占比 > 城市化率 > 水利、环境及公共设施管理投资 > 机动车保有量 > 常住人口数量 > 燃煤总量 > 实际地区生产总值GDP > 全社会房屋建筑施工面积,对应的 $PM_{2.5}$ 污染驱动因素排序为工业过程 > 城市化进程 > 环境保护投资 > 交通运输 > 人口增长 > 经济发展 > 能源结构 > 建筑行业。说明河北省 $PM_{2.5}$ 污染最重要的几个因素为工业过程、城市化进程、交通运输、能源结构等,虽然能源结构的灰色关联系数相对较低,但是其逐年增长的趋势,说明了燃煤对于雾霾的影响越来越大。环保投资作为治理大气污染,改善空气质量的重要举措,与 $PM_{2.5}$ 污染程度的相关性也较高。

河北省 $PM_{2.5}$ 污染的主要驱动因素集中在工业过程、能源结构、机动车保有量等方面,为改善河北省的空气质量,应该进一步减少省内重污染企业的数量,减少过剩产能,调整能源结构,减少煤炭在能源结构中比例,继续淘汰黄标车及老旧车,禁止报废汽车继续上路等。并在控制污染源的基础上,持续加大环保投资,治理大气污染。

综上,京津冀地区 $PM_{2.5}$ 污染的驱动因素在差异性基础上存在较大相似性,在治理 $PM_{2.5}$ 污染过程中,三个省市应打破行政区域的壁垒,改变原来属地治理模式中各自为政的状况,尽快实行 $PM_{2.5}$ 污染治理的联防联控措施。京津冀地区各政府及相关部门应形成治污合力,构建区域统一的环境监测网和环境信息网,统一大气环境质量标准,并通过三省市进行联合执法,共同保障区域的环境质量。

5 结论

从人口增长、城市化进程、经济发展、能源结构、工业过程、交通运输、建筑行业以及环境保护投资等方面研究影响该地区 $PM_{2.5}$ 污染的内在驱动力,利用灰色关联度方法得出京津冀地区 $PM_{2.5}$ 污染的主要驱动因素,为区域 $PM_{2.5}$ 污染联防联控提供了理论基础。

(1)北京市 $PM_{2.5}$ 污染的主要驱动因素为工业过程、城市化进程、交通运输等,环保投资的增加与 $PM_{2.5}$ 污染的灰色关联系数较大,说明环保投资加大能较大程度上减轻 $PM_{2.5}$ 污染,改善空气质量。

(2)天津市 $PM_{2.5}$ 污染关联度较高的几个驱动因素为工业过程、交通运输、城市化进程等,人口增长及能源结构与 $PM_{2.5}$ 污染的关联度适中,但呈现增大的趋势。虽然房屋建筑施工面积与可吸入颗粒物的关联度较低,但是建筑扬尘仍然是天津市 $PM_{2.5}$ 污染的主要驱动因素之一,不能被忽视。

(3)河北省 $PM_{2.5}$ 污染较核心的驱动因素为工业过程、城市化进程、交通运输、能源结构等,虽然能源结构的灰色关联系数相对较低,但是其逐年增长的趋势,说明了燃煤对于 $PM_{2.5}$ 污染的影响越来越大。环保投资作为治理大气污染,改善空气质量的重要举措,与 $PM_{2.5}$ 污染程度的相关性也较高。

(4)京津冀地区 $PM_{2.5}$ 污染的驱动因素在差异性的基础上存在较大的相似性,在治理 $PM_{2.5}$ 污染的过程中,三个省市应该打破行政区域的壁垒,改变原来属地治理模式中各自为政的状况,尽快实行 $PM_{2.5}$ 污染治理的联防联控措施。

参考文献

- [1] 曹伟华,李青春.北京地区雾霾气候特征及影响因子分析[C].2012.
- [2] 李润奎,李志鹏,高文举,等.北京市大气 $PM_{2.5}$ 的季节特征和空间趋势(英文)[J].Science Bulletin, 2015(3).
- [3] 孙蕾,孙绍荣.基于模糊博弈行为的京津冀跨域大气污染联合治理机制研究[J].运筹与管理,2017,26(7):48-53,63.
- [4] Okuda T, Cheng Y, Liang L, et al. The Impact of the Pollution Control Measures for the 2008 Beijing Olympic Games on the Chemical Composition of Aerosols [C]. 2011.

- [5] 于水,帖明. 变化环境下的地方政府雾霾污染治理研究——基于 354 个城市 2001–2010 年 PM_{2.5} 数据的分析[J]. 江苏社会科学, 2015(6):86–93.
- [6] 王雪青,巨欣,冯博. 我国雾霾主要前驱物排放绩效省际差异分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016,30(4):190–196.
- [7] Haberzettl P, Mccracken J P, Bhatnagar A, et al. Insulin sensitizers prevent fine particulate matter – induced vascular insulin resistance and changes in endothelial progenitor cell homeostasis [J]. American Journal of Physiology Heart & Circulatory Physiology, 2016, 310(11):369–2015.
- [8] Duan Z H, Gao X F, Hui-Lan D U, et al. Analysis on the relationship between PM_{2.5} concentration in ambient air and hospital outpatients with respiratory diseases in Chengdu [J]. Modern Preventive Medicine, 2015.
- [9] Wang S, Zhao B, Wu Y, et al. Target and Measures to Prevent and Control Ambient Fine Particle Pollution in China [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2015.
- [10] 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[J]. 中国行政管理, 2017(8):126–132.
- [11] Giannadaki D, Lelieveld J, Pozzer A. Implementing the US air quality standard for PM_{2.5} worldwide can prevent millions of premature deaths per year [J]. Environmental Health, 2016, 15(1):88.
- [12] 许光清,董小琦. 基于合作博弈模型的京津冀散煤治理研究[J]. 经济问题, 2017(2):46–50.
- [13] 董战峰,高晶蕾,严小东,等. 重点区域大气污染防治行动计划实施的社会经济影响对比[J]. 环境科学研究, 2017,30(3):380–388.
- [14] 冯贵霞. 大气污染防治政策变迁与解释框架构建——基于政策网络的视角[J]. 中国行政管理, 2014(9):16–20.
- [15] 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.
- [16] 孙晓雨,刘金平,杨贺. 中国城市大气污染区域影响空间溢出效应研究[J]. 统计与信息论坛, 2015(5):87–92.
- [17] Li X, Gong Y. Design of Polymeric Nanofiber Gauze Mask to Prevent Inhaling PM_{2.5} Particles from Haze Pollution [J]. Journal of Chemistry, 2015, 2015:1–5.
- [18] 孙丽欣,穆书涛,吴婧. 成本有效性视角下京津冀空气污染协同治理制度创新研究[J]. 石家庄经济学院学报, 2016(3):21–25.
- [19] 周振海,李晓春,董延茂. 大气污染物总量减排与空气质量的分析与对策研究——以苏州市高新区为例[J]. 环境科学与管理, 2017(2):22–26.

Grey Relational Difference Analysis of PM_{2.5} Drivers in Beijing–Tianjin–Hebei

LI Yunyan, WANG Lihua

(Institute of Recycling Economy, Beijing University of Technology, Beijing100124, China)

Abstract: By analyzing the characteristics of air pollution and the composition of PM_{2.5} in Beijing–Tianjin–Hebei, this paper summarizes the main causes of PM_{2.5} pollution. The internal driving force in Beijing–Tianjin–Hebei includes population growth, city urbanization, economic development, energy structure, industrial process, transportation, construction industry and environmental protection investment. The application of grey correlation analysis quantitatively compares the difference between Beijing, Tianjin and Hebei, and provides a theoretical basis for the regional joint prevention and control of PM_{2.5} pollution. The results show that the PM_{2.5} pollution driving factors of Beijing mainly include industrial pollution and transportation. The increase of environmental protection investment could improve air quality to a large extent. The main driving factors of Tianjin include industrial pollution and construction dust. The PM_{2.5} pollution driving factors of Hebei mainly include industrial pollution and energy structure. As an important measure to improve air quality, environmental investment has a high correlation with the degree of PM_{2.5} pollution. In the process of controlling PM_{2.5} pollution, this region should break the barriers of administrative area, change the situation of territorial governance mode, and implement joint prevention and control measures of PM_{2.5} pollution control.

Key words: fine particulate matter; driving factors; grey correlation; difference analysis