

周曙东, 欧阳纬清, 葛继红. 京津冀 $PM_{2.5}$ 的主要影响因素及内在关系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(4): 102–109. [ZHOU Shudong, OUYANG Weiqing, GE Jihong. Study on the main influencing factors and their intrinsic relations of $PM_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. China population, resources and environment, 2017, 27(4): 102–109.]

京津冀 $PM_{2.5}$ 的主要影响因素及内在关系研究

周曙东^{1,2} 欧阳纬清¹ 葛继红¹

(1. 南京农业大学经济管理学院, 江苏 南京 210095; 2. 南京农业大学中国粮食安全保障研究中心, 江苏 南京 210095)

摘要 大气污染物的源排放是形成灰霾天气的内因, 气象条件是形成灰霾天气的外因。本研究通过构建 $PM_{2.5}$ 浓度的两段式分布滞后模型, 结合自然环境因素及经济因素对 $PM_{2.5}$ 的影响因素进行了综合分析。在第一段模型中构建了 $PM_{2.5}$ 和大气污染物排放量的分布滞后模型, 第二段模型中构建了不同的大气污染源对大气污染物排放量的影响因素模型。大气污染物排放源主要包括工业源、生活源、机动车源、集中式污染治理设施源。在工业源中, 工业废气重度污染行业是大气污染物排放主要的贡献者; 在生活源中, 燃煤消费量对大气污染物排放影响很大, 这也是冬季供暖期间 $PM_{2.5}$ 剧增的原因; 在机动车源中, 尽管黄标车的保有量仅占汽车保有量的 10% 左右, 但却占据了颗粒物排放量的绝大部分。利用京津冀代表性城市 $PM_{2.5}$ 日度数据研究得出平均气温、平均风速、日照时数、平均气压、降雨量、平均相对湿度、沙尘暴等因素对 $PM_{2.5}$ 浓度的负向与正向作用。研究发现, 大气污染物排放量对 $PM_{2.5}$ 浓度具有聚集的滞后效应, 当期大气污染物排放量、滞后一期、滞后两期、滞后三期大气污染物对 $PM_{2.5}$ 浓度具有显著的正向作用, 且影响依次递减。构建的大气污染物排放量的污染源影响因素模型揭示一个地区煤炭消费量、工业废气重度污染行业工业增加值、黄标车保有量对该地区大气污染物排放量具有显著影响。本研究对优化能源消费结构和产业结构, 减少空气污染物排放提出了对策建议。

关键词 $PM_{2.5}$; 大气污染物排放; 两段式分布滞后模型; 京津冀

中图分类号 X513; F421 **文献标识码** A **文章编号** 1002-2104(2017)04-0102-08 doi:10.12062/cpre.20170343

$PM_{2.5}$ 的空气动力学含义是指直接小于等于 $2.5\mu m$ 的颗粒物, 也称为细颗粒物。 $PM_{2.5}$ 能较长时间悬浮于空气中, 对空气质量和能见度等有重要的影响。灰霾天气的本质是大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 的污染^[1]。与 PM_{10} 相比, $PM_{2.5}$ 粒径小, 扩散面积大, 活性强, 易附带有毒、有害物质, 且在大气中停留时间长, 因而对人体健康和大气环境质量影响更大, 灰霾污染中的 $PM_{2.5}$ 容易诱发呼吸系统疾病。2013 年, 灰霾成为年度关键词, 2013 年 1 月, 4 次灰霾笼罩全国 30 个省。京津冀过去冬春季的灰霾比较严重, 而最近几年四季都会发生灰霾天气。因此, 研究 $PM_{2.5}$ 的主要影响因素, 理顺其内在关系具有很迫切的现实意义, 可以为相关研究和政策制定提供理论依据。

京津冀都市圈是我国三大城市群之一, 在经济发展中占据重要地位, 而在空气质量最差的 10 个城市中, 7 个城市在京津冀地区, 京津冀已经成为我国空气污染最严重的地区之一。2015 年 4 月 30 日, 中共中央政治局审议通过

的《京津冀协调发展规划纲要》指出, 要在京津冀生态环境保护、产业结构升级等重点领域率先取得突破。根据《2015 中国环境状况公报》显示, 京津冀 $PM_{2.5}$ 平均浓度为 $77\text{ }\mu g/m^3$ (超过国家二级标准 1.20 倍), 远高于珠三角地区的 $34\text{ }\mu g/m^3$ 和长三角地区的 $53\text{ }\mu g/m^3$; 京津冀区域 13 个城市达标天数比例在 21.9%—86.4%, 平均为 42.8%, 重度及以上污染天数比例为 17%, 而超标天数中以 $PM_{2.5}$ 为首要污染天数最多。本研究将实证分析经济增长与大气污染的关系, 同时基于两段式的分布滞后模型, 结合自然环境因素和经济因素, 对灰霾污染严重地区京津冀的 $PM_{2.5}$ 影响因素进行综合分析。

1 文献综述

对于可吸入颗粒物 (PM) 的最早研究, 可追溯到 20 世纪 80 年代。1985 年, 美国将总悬浮颗粒物修改为 PM_{10} ,

收稿日期: 2016-12-28

作者简介: 周曙东, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为资源环境经济学、农业经济管理。E-mail: sdzhou@njau.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“农村发展中生态环境管理研究”(批准号: 70833001); 国家社会科学基金重大项目“农产品安全、气候变化与农业生产转型研究”(批准号: 13ZD160); 教育部博士点基金“环境污染梯度转移问题研究”(批准号: 20120097110034); 国家自然科学基金项目“农村化学品产业: 形成机制及其对周边农民福利的影响”(批准号: 71303116); 南京农业大学中央高校基本科研业务费专项资金项目“农村化学品产业: 形成机制及其对周边农民福利的影响”(批准号: KJQN201413); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD) 资助。

随后不久将 PM_{2.5} 纳入到大气监测范围中^[2]。2012 年 2 月 29 日,中国环境保护部将环境空气质量标准(GB-2012)作为国家质量标准,正式取代了环境空气质量标准(GB-1996),PM_{2.5} 开始纳入到空气质量监测中来。尽管 PM_{2.5} 在我国监测时间比较短,但由于 PM_{2.5} 所引发的灰霾问题频发,引发人们的普遍关注。国内外学者对 PM_{2.5} 进行的广泛深入的研究,主要集中在以下两个方面:

一是 PM_{2.5} 的污染特征、排放清单、源解析等的物理化学过程、PM_{2.5} 与其他颗粒物直接的关系。梁延刚等利用 2005 年香港能见度与 PM_{2.5} 浓度的每小时数据,研究显示 PM_{2.5} 浓度与能见度在 5% 的显著水平上呈负相关,相关系数为 80%^[3]。Chang W 等对美国南加州的颗粒物进行源解析,将 PM_{2.5} 分为机动车、道路扬尘、柴油车、海盐等主要源类^[4]。郑玫等将 PM_{2.5} 源种类分为尘类源、燃烧类源、二次元、其他源^[5]。周静、刘松华等通过对苏州 10 个区 15 个工业行业现场咨询、发放调查表等形式,研究得出工艺过程源和固定燃烧源分别占苏州工业源 PM_{2.5} 排放量的 94% 和 6%^[6]。朱增银、郭清彬、于建华等研究 PM_{2.5} 浓度与 PM₁₀ 浓度占比,分析得出 PM_{2.5} 浓度与 PM₁₀ 浓度占比通常在 29.10%—94.76% 之间,呈现出季节差异,并且这一比例夏季要明显低于秋季^[7-9]。

二是 PM_{2.5} 与气象因子及工业化、城市化、环境规制等因素之间的关系。张淑平等研究发现气象条件与 PM_{2.5} 日浓度显著相关;刘瑞婷等研究表明高浓度的大气颗粒物和特殊的气象条件是灰霾形成的有利条件,小风或静风容易造成 PM_{2.5} 浓度增加,能见度降低;孟晓艳等研究得出较小的地面风速、较高的相对湿度以及稳定的大气层增加了 PM_{2.5} 浓度的累积,导致空气质量恶化^[10-12]。何枫等应用 Tobit 模型发现城市工业增加值占 GDP 比提高 1 个百分点,灰霾天数平均增加约 4 天^[13]。马丽梅、张晓运用 Donkelaar et al 制作的首张 PM_{2.5} 全球地图,分析得出灰霾污染与 GDP 并不存在倒“U”型关系,灰霾污染与产业结构以及能源结构存在很强的正相关关系^[14]。

基于上述文献回顾,我们可以发现,现有研究主要有以下几个方面不足:

第一,灰霾的主要污染物 PM_{2.5} 的形成是一个复合的大气环境的机理形成过程,不仅与温度、相对湿度、风速、压强、降水等气象因素影响密切,同时也受机动车、燃煤、工业生产等经济因素的影响,但绝大部分的研究要么只考虑自然环境因素,要么只考虑经济因素,即将燃煤、工业生产等经济因素直接与 PM_{2.5} 进行回归,很少有将自然环境因素和机动车、燃煤、工业生产等经济因素综合起来进行研究。

第二,由于我国将 PM_{2.5} 纳入空气质量检测标准范围

时间较短,我国正式统计 PM_{2.5} 开始于 2013 年,故经济学研究领域受限于数据的连续性和系统性,大部分研究采用 PM₁₀ 的年度数据或者模拟数据。PM_{2.5} 日度数据变化幅度很大,但年度平均浓度数据的变化幅度相对于日度数据并不是很大,因为平均数将剧烈变化拉平了,所以年度数据不能很好反映大气污染物日度变化规律。另一些研究采用美国研究机构研制的根据气象条件模拟出的 PM_{2.5} 年度平均数据,如马丽梅等使用哥伦比亚大学国际科学信息网络中心与巴特利研究中心的全球 2001—2010 年 PM_{2.5} 平均值的模拟数据,但模拟数据与实际检测数据存在误差。

本研究使用中国空气质量在线监测分析平台公布的京津冀 2013 年 1 月 18 日至 2014 年 12 月 31 日的日度数据,结合影响 PM_{2.5} 浓度的气象因素和燃煤、机动车、工业产值等经济因素,对京津冀地区 PM_{2.5} 的影响因素进行综合分析。

2 模型构建

2.1 分析框架

影响空气质量的主要因素有两个:一个是污染源,还有一个是气象条件。吴兑分析得出,大气污染物的源排放是形成灰霾天气的内因,气象条件是形成灰霾天气的外因^[1]。因此,一个城市的空气质量受自然条件和人类活动两方面影响,自然条件包括风速、降雨、温度等气象条件以及地形地貌等地理条件和区域生态环境变化,人类活动包括城市工业发展、区域能源消耗。2014 年《北京市环境状况公报》对 PM_{2.5} 进行源解析显示,机动车源、燃煤、工业生产、扬尘对北京的 PM_{2.5} 贡献率分别达到了 31.1%、22%、4%、18.1%、14.3%。2014 年《天津市环境状况公报》对 PM_{2.5} 进行源解析显示,扬尘、燃煤、机动车、工业对天津的 PM_{2.5} 贡献率分别达到了 30%、27%、20%、17%。

我们对 PM_{2.5} 浓度主要影响因素及其内在关系的研究分为两个阶段,第一阶段分析形成灰霾的外部因素,综合考虑温度、湿度、日照、风力、气压、降水等气象因素。第二阶段分析不同污染源对大气污染物排放量的影响,主要包括四个方面:工业源、生活源、机动车源、集中式污染源。大气污染物是造成 PM_{2.5} 浓度上升的主要内因。

2.2 模型设定

通过以上对自然环境科学和环境经济学文献综述可以得出,PM_{2.5} 的影响因素主要有气象因素,包括温度、相对湿度、日照时数、气压、风力、降雨等气象因子,以及煤炭燃烧产生的烟尘及一氧化碳、二氧化硫、氮氧化物及挥发性有机物等、工业源排放、机动车尾气排放等因素。本文模型设定立足于自然环境科学基础,并且将煤炭燃烧烟尘、机动车尾气、工业源排放转化为经济学上容易衡量的煤

炭消费量、汽车保有量、工业增加值。一个地区污染物排放量的多少跟该地区的工业废气污染密集型产值有着密切的关系。本文借鉴张家峰对工业废气污染密集型行业的划分方法^[15],选取全国 38 个工业行业万元产出的不同污染物排放量即排放强度(Emission Intensity, EI)大于等于 0.75 的五个重污染行业,即选取电力和热力的生产工业、非金属矿物制品业、燃气生产和供应业、黑色金属冶炼及压延加工、木材加工以及木竹藤棕草制品业五个工业废气重度污染行业。选取这五个重度污染行业工业增加值,研究工业废气重度污染行业工业增加值对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响。本研究通过构建两段式的分布滞后模型来研究京津冀 $PM_{2.5}$ 的影响因素,第一段模型是研究气象因子、大气污染物排放量与 $PM_{2.5}$ 的关系,第二段模型是研究不同的污染物排放源与大气污染物排放量的关系。由于大气污染物具有聚集的滞后效应,如果直接将气象因子、经济因素放在一个模型里而忽略大气污染物排放量的作用,势必会造成模型估计结果的不精准。因此,本文的模型设定如下:

$$PM_{2.5} = \beta_1 + \beta_2 RHU_{it} + \beta_3 TEM_{it} + \beta_4 SSD_{it} + \beta_5 PRE_{it} + \beta_6 Wind_{it} + \beta_7 Rain_{it} + \beta_8 D_{it} + \delta_0 Pollution_{it} + \delta_1 Pollution_{it-1} + \delta_2 Pollution_{it-2} + \dots + \delta_k Pollution_{it-k} + \mu_{it} \quad (1)$$

$$\ln Pollution = \alpha_1 + \alpha_2 \ln PII_{it} + \alpha_3 \ln Coal_{it} + \alpha_4 \ln Y_{car_{it}} + \eta_{it} \quad (2)$$

模型(1)中, $PM_{2.5}$ 为 $PM_{2.5}$ 日浓度数值, RHU_{it} 为 i 城市 t 日的平均相对湿度, TEM_{it} 为 i 城市 t 日的平均温度, SSD_{it} 为 i 城市 t 日的日照时数, PRE_{it} 为 i 城市 t 日的平均气压, $Wind_{it}$ 为 i 城市 t 日的平均风速, $Rain_{it}$ 为 i 城市 t 日的降雨量, $Pollution_{it}$ 为 i 城市 t 日根据等距平滑法折算出来的大气污染物排放量, $Pollution_{it-1}$ 、 $Pollution_{it-2}$ 、 $\dots$ 、 $Pollution_{it-k}$ 分别是 $Pollution$ 的滞后 1 期、滞后 2 期、 $\dots$ 、滞后 k 项, D_{it} 为 i 城市 t 日沙尘暴天气虚拟变量, β_1 代表总体均值截距项; μ_{it} 代表随机误差项。模型(2)中 PII_{it} 为工业废气重度污染行业工业增加值, $Coal_{it}$ 为煤炭消费量, $Y_{car_{it}}$ 为机动车保有量, α_1 代表总体均值截距项, η_{it} 代表随机误差项。

2.3 变量与数据

$PM_{2.5}$ 数据来源于中国空气质量在线监测分析平台,部分数据来源于青悦开放环境数据中心,选取京津冀代表性城市北京、天津、石家庄的 $PM_{2.5}$ 日度数据从 2013 年 1 月 18 日至 2014 年 12 月 31 日。相对湿度、气温、日照时数、压强、风力、降雨等数据来源于中国气象数据网,沙尘暴天气数据来源于中国天气网。大气污染物排放量来源于《中国环境统计年鉴》《石家庄统计年鉴》。模型(1)中被解释变量 $PM_{2.5}$ 浓度数据和相对湿度、气温、日照时数、压强、风力、降雨等数据均是按天数据,因此,为了统一数据口径,本文首

先根据《中国环境统计年鉴》中计算大气污染物排放量方法,即根据公式大气污染物排放量 = Σ 工业源 + 生活源 + 机动车源 + 集中式污染治理设施源。其中生活源、机动车源、集中式污染治理设施源比较稳定,可直接将生活源、机动车源、集中式污染治理设施源除以每年的天数,得到按天的生活源、机动车源、集中式污染治理设施源的大气污染物排放量。对于工业源而言,根据工业源折算系数 = 工业源大气污染物排放量/工业增加值,得到工业源折算系数,并通过月度工业源大气污染物排放量 = 工业源折算系数 $\times$ 月度工业增加值,计算得到月度工业源大气污染物排放量。第二,根据 t 月度工业源大气污染物排放量增长率 = $t+1$ 月工业源大气污染物排放量/ t 月工业源大气污染物排放量,得到该月工业源大气污染物排放量增长率,并将该增长率根据等距平滑法平摊到每一天的工业源大气污染物排放量中去,得到按天的工业源大气污染物排放量。最后,根据 t 日大气污染物排放量 = t 日工业源大气污染物排放量 + t 日生活源、机动车源、集中式污染治理设施源大气污染物排放量计算出 t 日的大气污染物排放总量。

模型(2)是为了研究大气污染物排放量同工业废气重度污染工业增加值、燃煤消费量、机动车保有量三者之间的关系,大气污染物排放量计算方法跟模型 1 计算方法一样。为了更好地体现京津冀大气污染物排放量的演变规律,模型 2 中时间从 2011 年 1 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日,按天的工业源大气污染物排放量计算方法跟模型 1 中一致。工业废气重度污染行业工业增加值根据前面五个重度污染产值之和计算得到,根据北京统计局、天津统计局、石家庄统计局统计的月度工业增加值,同样根据上文中的等距平滑法,将其增长率平摊到每一天。燃煤消费量数据来源《中国能源统计年鉴》得到北京、天津、石家庄的年度煤炭消费量,同时根据张洪潮等的 BP 滤波分析得到我国 2008—2013 年月度煤炭修正系数^[6],可得到月度煤炭消费量,同样根据上文中的等距平滑法,将其增长率平摊到每一天得到按天的煤炭消费量数据。根据《2013 年机动车污染防治年报》显示,全国“黄标车”保有量仅占汽车保有量的 10.7%,但其排放的一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO_x)、颗粒物(PM)分别占汽车排放量的 49.0%、52.9%、52.4%、78.8%,因此黄标车占据了颗粒物(PM)排放量的绝大部分。由于无法获得机动车保有量的数据,本文将选择黄标车保有量作为机动车的保有量的代理变量来研究。黄标车数据来源于《2011—2014 年机动车污染防治年报》,通过 Get Data Graph Digitizer 软件抓取各省市 2011—2014 年的数据,同样根据上文中的等距平滑法将其平摊计算得到按天的黄标车保有量。变量设定见表 1。



表 1 变量设定
Tab. 1 Variable set

变量	设定
<i>PM_{2.5}</i>	细颗粒物 (小于等于 2.5 μ m) 24 小时平均浓度值/ μ g/ m^3
<i>RHU</i>	日平均相对湿度/%
<i>TEM</i>	日平均温度/ $^{\circ}$ C
<i>SSD</i>	日照时数/h
<i>PRE</i>	日平均本站气压/hpa
<i>Wind</i>	日平均风速/m/s
<i>Rain</i>	日降水量/mm
<i>D</i>	沙尘暴天气的虚拟变量,1 = 发生了沙尘暴天气,0 = 没有发生
<i>Pollution</i>	大气污染物排放量/t
<i>PII</i>	工业废气重度污染行业工业增加值 (2010 年价格)/万元
<i>Coal</i>	煤炭消耗量/t
<i>Y_car</i>	机动车保有量 (以黄标车来代替)

3 实证检验结果及分析

3.1 PM_{2.5} 浓度描述性统计分析

根据《环境空气质量标准》(GB3095—2012)中制定的环境空气质量指数(AQI)技术规定,24 小时 PM_{2.5} 的平均值标准值见表 2。当 24 小时的 PM_{2.5} 浓度超过 115 μ g/ m^3 时,空气质量处于中度污染以上,对人群心脏、呼吸系统有影响。

本文以优良天气和中度污染以上天气做比较。从图 1 可以看到,北京 2013 年优良天气比例为 56%,2014 年优良天气比例下降为 55.6%,但中度污染以上天气比例呈现出下降的趋势,由 2013 年的 26% 下降到 2014 年的 24%。天津优良天气比例有明显上升的趋势,2013 年优良天气比例为 44%,2014 年上升为 53%;中度污染以上天数比例有所下降,从 2013 年的 25% 下降到 23%。石家庄优良天气比例上升幅度是三个城市最明显的,2013 年优良天气比例 26.7%,2014 年上升到 36.7%;中度污染以上天气比例也有明显下降,从 2013 年的 53.1% 下降到 38.6%。

3.2 PM_{2.5} 浓度影响因素计量结果

排放的大气污染物会形成聚集,导致 PM_{2.5} 的浓度累积增加,前期大气污染物具有聚集形成的滞后效应,前期排放的大气污染物排放量对当期的 PM_{2.5} 浓度可能存在正向的显著影响。本研究运用阿尔蒙(Almon)提出的多项

表 2 京津冀 24 小时 PM_{2.5} 平均值标准值
Tab. 2 Average standard concentration of 24h PM_{2.5}

空气质量等级	24 小时 PM _{2.5} 平均值标准值 / μ g/ m^3
优	0—35
良	35—75
轻度污染	75—115
中度污染	115—150
重度污染	150—250
严重污染	大于 250

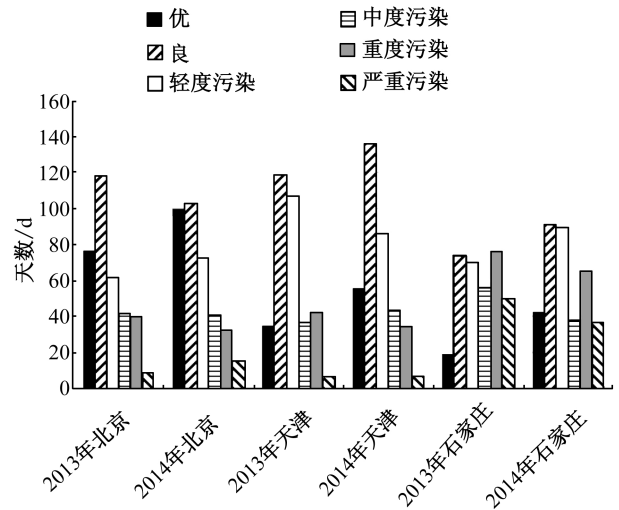


图 1 京津冀 2013—2014 年 PM_{2.5} 污染等级天数
Fig. 1 PM_{2.5} pollution level of Beijing-Tianjin-Hebei in 2013 – 2014

式分布滞后模型(PDLs)来估计滞后效应,PDLs 假设可以通过 δ_i 由 n 阶多项式很好地逼近:

$$\delta_i = \gamma_1 + \gamma_2(i - \bar{c}) + \gamma_3(i - \bar{c})^2 \cdots + \gamma_n + 1(i - \bar{c})^n$$

其中, $i = 1, 2, 3, \dots, m, m > n$ 。

首先确定模型滞后期长度。本研究采用以下两种方法决定滞后期:①根据调整后的 R^2 决定滞后期数,直到调整后的 R^2 不再增加;②通过施瓦茨信息准则(SC)、赤池信息准则(AIC)和 LR 统计量确定滞后期。通过反复检验发现滞后 3 期最符合大气污染物扩散效应的实际情况, R^2 也最大,故选用大气污染物排放量当期与滞后 3 期来检验对 PM_{2.5} 的影响,也符合施瓦茨信息准则和赤池信息准则。大气污染物的滞后系数选取了服从远端约束(大气污染物累积效应距离当期越远,对当期 PM_{2.5} 浓度影响越小)多元回归结果见表 3。

表 3 $PM_{2.5}$ 影响因素的分布滞后模型估计结果
Tab. 3 Results of the distributed-lag model of the affecting factors to $PM_{2.5}$

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic
<i>RHU</i>	1.399 0 ***	0.096 5	14.486 3
<i>TEM</i>	-3.820 7 ***	0.214 5	-17.811 9
<i>SSD</i>	-2.859 3 ***	0.413 7	-6.912 1
<i>PRE</i>	-2.376 5 ***	0.200 2	-11.868 3
<i>Wind</i>	-8.882 3 ***	1.429 8	-6.212 4
<i>Rain</i>	-2.514 3 ***	0.239 3	-10.507 1
<i>Sandstorm</i>	139.941 9 ***	10.914 9	12.821 1
<i>PDL01</i>	0.007 6 ***	0.001 1	7.315 2
<i>Pollution</i>	0.010 2 ***	0.001 4	7.315 2
<i>Pollution</i> (-1)	0.007 6 ***	0.001 1	7.315 2
<i>Pollution</i> (-2)	0.005 1 ***	0.000 7	7.315 2
<i>Pollution</i> (-3)	0.002 6 ***	0.000 4	7.315 2
<i>Cons</i>	2 482.776 ***	204.271 6	12.154 3
Adj- R^2		0.452 5	
F-statistic		220.934 5	

注: *** 代表在 1% 的水平上显著。

从表 3 可知,模型结果总体上比较好,调整 R^2 比较好,达到 0.452,即平均相对湿度、平均气温、日照时数、平均相对气压、平均风速、降雨量、沙尘天气、大气污染物排放量及滞后 3 期能够对京津冀 $PM_{2.5}$ 浓度的 45.25% 做出解释。模型总体显著性在 1% 水平上通过检验, F 值较大,说明模型中各因素对 $PM_{2.5}$ 浓度的共同影响显著。

在气象因素中,风力通过稀释扩散来降低当地 $PM_{2.5}$ 的浓度。研究表明,持续的微风或静风会抑制大气污染物的扩散,使近地面层大气污染物聚集。当风速大于 5 m/s,有利于污染物的扩散^[17]。我们的统计发现,当京津冀平均风速小于 3 m/s 时,京津冀 $PM_{2.5}$ 浓度平均值为 111.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;而当京津冀平均风速大于 5 m/s,京津冀 $PM_{2.5}$ 浓度平均值为 49.41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

温度升高时,有利于上下层空气产生对流交换,因此有利于大气污染物的稀释扩散;而温度降低,大气层相对稳定不利于污染物的稀释扩散。平均温度每增加 1℃, $PM_{2.5}$ 浓度平均减少 3.821 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。日照时数对污染物的影响主要体现在太阳辐射强时,加快了地面温度上升,大气垂直运动增强,不易产生逆温层;日照时数较短时,太阳辐射较弱,气温较低,大气层稳定,容易产生逆温,对污染物的稀释和扩散不利。因此,日照时数每增加 1 h, $PM_{2.5}$

浓度平均减少 2.859 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。降水对大气污染物可以起到冲刷和稀释清除的作用,在雨水作用下,大气中的一些大气污染物能够溶解在水中,可以降低大气污染物的浓度,因此,降雨量每增加 1mm, $PM_{2.5}$ 浓度平均减少 2.514 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。气压对污染物浓度主要体现在高气压时,空气在垂直方向的对流较弱,容易形成逆温,不利于污染物的扩散;低气压时,气流上升较强,大气污染物容易稀释和扩散,因此气压与 $PM_{2.5}$ 浓度呈现负向关系。平均气压每增加 1hpa, $PM_{2.5}$ 浓度平均减少 2.377 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。相对湿度与 $PM_{2.5}$ 有明显的正向显著关系。除有降水外,湿度大时,空气中水气较多,使得 $PM_{2.5}$ 附着在水气中,在空气中停留,因此平均相对湿度每增加 1%, $PM_{2.5}$ 浓度平均增加 1.399 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。沙尘暴发生时,强风把地面沙尘物质吹起并卷入空中,造成空气混浊,水平能见度低。因此,沙尘暴天气对 $PM_{2.5}$ 浓度具有显著的正向影响。沙尘暴天气发生时, $PM_{2.5}$ 浓度平均增加 139.942 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。而在大气污染物排放量滞后变量中,当期大气污染物每增加 1t,对当期 $PM_{2.5}$ 浓度平均增加 0.010 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;滞后一期污染物、滞后两期污染物、滞后三期污染物每增加 1t,对当期 $PM_{2.5}$ 浓度分别增加 0.007 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、0.005 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、0.002 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

3.3 主要污染源影响因素计量分析

根据北京、天津、石家庄三个城市 2013—2014 年《环境状况公报》对 $PM_{2.5}$ 进行源解析,可得知工业源、机动车、燃煤消耗量对 $PM_{2.5}$ 贡献率最大,因此构建了模型(2)。通过检验发现固定效应和随机效应均优于 OLS 模型(其中固定效应模型的 F 值为 529.29,随机效应模型 chi2(3) 检验值为 21 966.95,因为 Hausman 检验得到 chi2(2) 为 174.4, p 值为 0,所以应拒绝随机效应和固定效应的系数无系统差异的原假设,也就是说,采用固定效应模型更合适)。京津冀大气污染物排放量的主要污染源影响因素估计结果见表 4。

由回归结果表 4 可知,固定效应模型的整体显著性的 F 值为 529.29, P 值为 0.000,在 1% 显著水平上显著,表明模型(1)整体是比较显著的;工业废气重度污染行业工业增加值(P_{II})、燃煤消费量(Coal)、黄标车保有量(Y_{car})的 t 值在 1% 水平上显著,说明它们都能很好地解释大气污染物排放量的影响因素。模型(2)的整体显著性的 F 值为 557.7, P 值为 0,在 1% 显著水平上显著。

通过固定效应模型可知,工业废气重度污染行业工业增加值的对数估计系数为 0.173, t 值检验在 1% 水平上显著,表明在其他因素不变的情况下,一个地区工业废气重度污染行业工业增加值上升 1%,该地区的大气污染物排放量将上升 0.173%。黄标车保有量的对数估计系数为 0.199, t 值检验在 1% 水平上显著,表明在其他因素不变



表4 京津冀大气污染物排放量主要污染源影响因素计量分析
Tab.4 Measurement analysis of main pollution factors to Beijing-Tianjin-Hebei atmospheric pollution emission

Variables	固定效应
lnCoal	0.469 *** (0.021 7)
lnY_car	0.199 *** (0.008 66)
lnPII	0.173 *** (0.018 7)
Constant	-2.517 *** (0.365)
F	529.29
Observations	4 383
R-squared	0.266

注:*** 代表在 1% 的水平上显著,括号内为标准误。

的情况下,一个地区黄标车保有量下降 1%,该地区大气污染物排放量将下降 0.199%。煤炭消费量产值的对数估计系数为 0.469,t 值检验在 1% 水平上显著,表明在其他因素不变的情况下,一个地区燃煤消费量增加 1%,该地区大气污染物排放量将上升 0.469%,说明目前阶段,煤炭消费量是京津冀地区大气污染物排放量上升的重要因素。在该模型中经过测算发现,煤炭消费量对大气污染物排放量贡献率为 47.27%,黄标车对大气污染物排放量贡献率为 18.91%,工业废气重度污染行业工业增加值对大气污染物排放量贡献率为 18.46%。

4 结论与政策建议

4.1 结论

本研究通过使用京津冀 PM_{2.5} 近两年的日浓度数据,提出两段式的分布滞后模型将自然环境因素和经济因素结合起来,对京津冀 PM_{2.5} 的影响因素进行了综合分析。在第一段模型中构建了 PM_{2.5} 和大气污染物排放量的分布滞后模型,第二段模型中构建了不同的大气污染源对大气污染物排放量的影响因素模型。研究得出平均气温、平均风速、日照时数、平均气压、降雨量对 PM_{2.5} 浓度具有显著的负向作用,平均相对湿度、沙尘暴天气对 PM_{2.5} 浓度具有显著的正向作用,大气污染物排放量对 PM_{2.5} 浓度具有聚集的滞后效应,当期大气污染物排放量、滞后一期、滞后两期、滞后三期大气污染物对 PM_{2.5} 浓度具有显著的正向作用,且影响依次递减。最后,构建了大气污染物排放量的污染源模型,使用固定效应估计得出煤炭消费量、黄标车

保有量、工业废气重度污染行业工业增加值对大气污染物排放量具有显著的正向作用,一个地区煤炭消费量对数、黄标车拥有量对数、工业废气重度污染行业工业增加值对数每增加 1%,对该地区大气污染物的排放量对数分别增加 0.469%、0.199% 和 0.173%。

4.2 政策建议

(1) 优化能源消费结构,减少煤炭的消费,大范围推广使用集中式供暖,完善清洁能源和 PM_{2.5} 减排区域间补贴机制,分别在各空气污染严重地区的重点行业进行试点。2014 年,煤炭消费占我国能源消费总量的 66%,电力、工业锅炉、煤化工(炼焦等)以及建材窑炉消费了我国超过 90% 的煤炭,煤炭(尤其是散煤)的燃烧对 PM_{2.5} 的贡献很大。因此一是要完善优化能源消费结构,优化燃煤电厂脱硫脱硝的工艺;加大对清洁能源的利用,加强对新能源产业的补贴,同时建立政府绿色采购和补贴制度。二是要将煤炭为主的能源结构向清洁能源为主的能源结构转变,大幅度减少散煤的燃烧。

(2) 加快改造黄标车,大力推广新能源汽车,控制机动车的尾气污染。一是加速改造黄标车,要么逐步淘汰黄标车,要么强制性对黄标车的排气系统进行改造,加装三元催化转化器,使尾气排放达国六标准。二是提升我国的油品质量标准,降低油品中硫、烯烃及芳烃含量。三是大力推广新能源汽车,公交、环卫等行业和政府机关要率先使用新能源汽车、采取财政补贴等措施鼓励个人购买。

(3) 优化产业结构,限制工业废气重度污染行业。京津冀地区作为我国三大城市群之一,经济发展长期以来依赖化石能源,资源消耗大、环境污染严重,这也是京津冀大气环境质量产生问题的经济根源。因此一是调整优化产业结构,严格限制新建工业废气重度污染行业的企业,大力发展质量效益型、科技先导型和资源节约型的绿色产业。二要将现有的空气污染密集型企业向外搬迁,而且搬迁地点不能距离京津冀太近。

(4) 建议全面禁止石油焦的进口,并加强对燃烧高硫石油焦的监管。尽管中国政府正在投入巨大的努力治理空气污染和削减煤炭消费,但是却出现一个监管漏洞:一些发电厂、水泥厂、玻璃厂使用石油焦作为替代燃料,在燃煤中故意混烧 10-20% 的高硫石油焦。这些高硫石油焦含硫量较高,包含多种重金属污染(如汞、砷、铬、镍和镉),在燃烧时还可能会释放二恶英、氯化氢和氟化氢等污染物。2013 年中国燃烧了 3 300 万 t 石油焦。有关管理部门应出台政策全面禁止石油焦的进口,并加强燃烧国产高硫石油焦的监管,加快重点行业脱硫、脱硝、除尘改造工程建设,在空气重度污染地区不得使用石油焦作为燃料。

(编辑:刘照胜)

参考文献 (References)

- [1] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2):257-269. [WU Dui. Hazy weather research in China in the last decade: a review [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2012, 32(2):257-269.]
- [2] 杨洪斌, 邹旭东, 汪宏宇, 等. 大气环境中 $PM_{2.5}$ 的研究进展与展望[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(3):77-82. [YANG Hongbin, ZOU Xudong, WANG Hongyu, et al. Study progress on $PM_{2.5}$ in atmospheric environment [J]. Journal of meteorology and environment, 2012, 28(3):77-82.]
- [3] 梁延刚, WU Manchi, 杨敬基. 香港能见度、大气悬浮粒子浓度与气象条件的关系[J]. 气象学报, 2007, 66(3):461-469. [LEUNG Yinkong, WU Manchi, YEUNG Kingkay. A study on the relationship among visibility, atmospheric suspended particulate concentration and meteorological conditions in Hong Kong [J]. Acta meteorologica sinica, 2007, 66(3):461-469.]
- [4] CHANG W L, BHAVE P V, BROWN S S, et al. Heterogeneous atmospheric chemistry, ambient measurements, and model calculations of $PM_{2.5}$: a review[J], Aerosol science and technology, 2011(4):665-670.
- [5] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 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, 50(6):1141-1154. [ZHENG Mei, ZHANG Yanjun, YAN Caiqing, et al. Review of $PM_{2.5}$ source apportionment methods in China [J]. Acta scientiarum naturalium universitatis pekinensis, 2014, 50(6):1141-1154.]
- [6] 周静, 刘松华, 谭译, 等. 苏州市大气颗粒物($PM_{2.5}$)工业源排放清单[J]. 环境科学学报 2016, 2(2):1-12. [ZHOU Jing, LIU Songhua, TAN Yi, et al. The emission inventory of atmospheric fine particles from industrial sources in Suzhou City [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2016, 2(2):1-12.]
- [7] 朱增银, 李冰, 赵秋月, 等. 对国内外 $PM_{2.5}$ 研究及控制对策的回顾与展望[J]. 环境科技, 2013, 26(1):70-74. [ZHU Zengyin, LI Bing, ZHAO Qiuyue, et al. A review and outlook of the research and pollution control on $PM_{2.5}$ in domestic and overseas [J]. Environmental science and technology, 2013, 26(1):70-74.]
- [8] 郭清彬, 程学丰, 侯辉, 等. 冬季大气中 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染特征及形貌分析[J]. 中国环境监测, 2010, 26(4):55-58. [GUO Qingbin, CHENG Xuefeng, HOU Hui, et al. Pollution characteristics and morphology analysis of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in winter [J]. Environmental monitoring in China, 2010, 26(4):55-58.]
- [9] 于建华, 虞统, 魏强, 等. 北京地区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度的变化特征[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1):45-47. [YU Jianhua, YU Tong, WEI Qiang, et al. Characteristics of mass concentration variations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Beijing area [J]. Research of environmental sciences, 2004, 17(1):45-47.]
- [10] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 等. 冬季 $PM_{2.5}$ 的气象影响解析[J]. 生态学报, 2016, 36(24):1-11. [ZHANG Shuping, HAN Lijian, ZHOU Weiqi, et al. Relationships between fine particulate matter and meteorological factors in winter at typical Chinese cities [J]. Acta ecologica sinica, 2016, 36(24):1-11.]
- [11] 刘瑞婷, 韩志伟, 李嘉伟. 北京冬季雾霾事件的气象特征分析[J]. 气象与环境研究, 2014, 19(2):164-172. [LIU Ruiting, HAN Zhiwei, LI Jiawei. Analysis of meteorological characteristics during winter haze events in Beijing [J]. Climatic and environmental research, 2014, 19(2):164-172.]
- [12] 孟晓艳, 余予, 张志富, 等. 2013 年 1 月京津冀地区强雾霾频发成因初探[J]. 环境科学与技术, 2014(1):190-194. [MENG Xiaoyan, YU Yu, ZHANG Zhifu, et al. Preliminary study of the dense fog and haze events' formation over Beijing-Tianjin-and-Hebei region in January of 2013 [J]. Environmental science and technology, 2014, 37(1):190-194.]
- [13] 何枫, 马栋栋. 雾霾与工业化发展的关联研究——中国 74 个城市的实证研究[J]. 软科学, 2015(6):110-114. [HE Feng, MA Dongdong. Association study between haze pollution and industrialization [J]. Soft science, 2015(6):110-114.]
- [14] 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(4):19-31. [MA Limei, ZHANG Xiao. The spatial effect of China's haze pollution and the impact from economic change and energy structure [J]. China industrial economics, 2014, 4(4):19-31.]
- [15] 张家峰. 农村工业化与农村点源污染关系研究——以江苏省为例[D]. 南京: 南京农业大学, 2013:61-81. [ZHANG Jiafeng, Research on the relationship between rural industrialization and rural industrial point source pollution: taking Jiangsu Province as an example [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013:61-81.]
- [16] 张洪潮, 王泽江, 李晓利, 等. 中国煤炭消费需求波动规律及成因分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1):94-101. [ZHANG Hongchao, WANG Zejiang, LI Xiaoli, et al. The fluctuation pattern of Chinese coal consumption demand and cause analysis [J]. China population, resources and environment, 2014, 24(1):94-101.]
- [17] GROSSMAN G, KRUEGER A. Economic growth and the environment [J]. Quarterly journal of economics, 1995, 110(2), 353-377.
- [18] 蒋洪强, 张静, 王金南, 等. 中国快速城镇化边际环境污染效应变化实证分析[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2):293-297. [JIANG Hongqiang, ZHANG Jing, WANG Jinnan, et al. Accounting model and demonstration for marginal environmental effects of the rapid urbanization in China [J]. Ecology and environmental sciences, 2012, 21(2):293-297.]
- [19] 杨义彬. 成都市大气污染及气象条件影响分析[J]. 四川气象, 2004, 89(3):40-43. [YANG Yibin. The air pollution of Chengdu City and the impact analysis of meteorological conditions [J]. Journal of Sichuan meteorology, 2004, 89(3):40-43.]
- [20] SELDEN T, SONG D. Neoclassical growth, the J Curve for abatement and the internet U Curve for pollution [J]. Journal of environmental economics and management, 1995, 29(2), 162-

- 168.
- [21] LOPOZ R. The environment as a factor of production; the effects of economic growth and trade liberalization [J]. Journal of environmental economics and management, 1994, 27 (2), 163 – 184.
- [22] BROCK W, TAYLOR M. Economics growth and the environment; a review of theory and empirics [J]. Handbook of economic growth, 2005 (1) : 1749 – 1821.
- [23] 张凤青. 高汽车保有量果真是中国 $PM_{2.5}$ 污染的主因吗? [J]. 经济资料译丛, 2015, 2 (4) : 44 – 51. [ZHANG Fengqing. Is the high car ownership really the main cause of China ' s $PM_{2.5}$ pollution? [J]. Journal of translation from foreign literature of economics, 2015, 2 (4) : 44 – 51.]

Study on the main influencing factors and their intrinsic relations of $PM_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei

ZHOU Shu-dong^{1,2} OUYANG Wei-qing¹ GE Ji-hong¹

(1. College of Economics and Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing Jiangsu 210095, China;

2. China Center for Food Security Studies, Nanjing Agricultural University, Nanjing Jiangsu 210095, China)

Abstract Air pollutants are the internal causes of haze weather, meteorological conditions are external factors of haze weather. In this study, a two-stage distribution hysteresis model for $PM_{2.5}$ concentration was established, and the influencing factors of $PM_{2.5}$ were analyzed in combination with natural and economic factors. In the first stage, a distribution hysteresis model for $PM_{2.5}$ concentration and air pollutants emissions was established. In the second stage, an influencing factors model for air pollutants emission was constructed. Air pollutants sources include industrial emission, life emission, motor vehicles emission, and centralized pollution facilities. In industrial emission sources, the polluting intensive industries for waste gas are the major contributors to air pollutant emissions. In the life emission sources, coal consumption greatly affected air pollutant emissions, which contributed the increase of $PM_{2.5}$ concentration during winter heating season. In the motor vehicles source, although the proportion of vehicles ownership of wagons with yellow license plates is only about 10%, but they contributed a large part of particulate matters. Based on the daily data of $PM_{2.5}$ of the representative cities of Beijing, Tianjin and Hebei, the negative and positive impacts on $PM_{2.5}$ concentration of average temperature, average wind speed, sunshine hours, average air pressure, rainfall, average relative humidity, dust storm and other factors are measured. We find that the air pollutant emission has a lag effect on the accumulation of $PM_{2.5}$ concentration, e. g. current period air pollutant emissions, lag one, lag two, and lag three have significant positive effects on the $PM_{2.5}$ concentration, and the influencing effects are decreasing according to the lagging order. A model of influencing factors of air pollutant emission concluded that the consumption of coal, the industrial added value of waste gas polluting intensive industries, and the amount of wagons with yellow license plates do contribute a significant influence on air pollutant emission. Some countermeasures and policy recommendation to optimize energy consumption structure and industrial structure and reduce air pollutant emission are suggested in this paper.

Key words $PM_{2.5}$; air pollutant emission; Two-stage Distribution Hysteresis Model; Beijing-Tianjin-Hebei