

长三角雾霾污染的时空演变及影响因素

——兼论多方主体利益诉求下地方政府雾霾治理行为选择

宁自军 隗斌贤 刘晓红¹

【摘要】: 本文运用 Theil 指数、莫兰指数、Kendall 系数和空间计量模型等方法,对长三角都市圈城市群 2014—2017 年 $PM_{2.5}$ 的时空格局演变与影响因素进行了实证分析后发现,长三角区域空气质量持续得以改善,但呈现“北高南低”“冬高夏低”的时空差异特征,地区差异呈缩小态势,区域 $PM_{2.5}$ 污染呈现明显的“U”型曲线。同时大气污染季节变动呈高度一致性,在空间分布上具有显著的正自相关关系,各城市雾霾污染的空间分布具有邻域之间的空间关联结构。由于区域雾霾污染呈现多种污染源耦合构成的复合污染态势,并且区域内各省市具有地方性污染特征,加上雾霾污染治理中不同利益主体的不同利益诉求,这就要求针对污染源种类制定精细化的雾霾防治政策,实现地方性法规与国家法规政策的互补,并基于合作博弈选择逻辑从整个社会的利益出发,使治理法规政策体现制度性、公平性和合理性。

【关键词】: 大气污染 时空演变 影响因素 地方治理

【中图分类号】: C916 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1007—9092(2020)01—0082—011

一、引言

以江、浙、沪为核心的长三角地方经过 40 多年的高速发展,现已成为中国经济总量最大、最具活力的都市经济圈。随着工业化、城市化和长三角一体化的深入推进,长三角地区因二氧化硫、烟粉尘、碳氧化物等污染物的过度排放而导致大气环境质量下降已成为制约区域经济发展的瓶颈,并严重影响人们的健康和生活。党的十八大以来,习近平总书记多次就大气污染防治工作作出重要指示,2013 年 9 月国务院发布《大气污染防治行动计划》,长三角地区两省一市将大气污染防治列入重点民生工程,加快了雾霾治理的法规建设,通过科技支撑和管理创新等系列措施推动区域雾霾治理的工作,区域空气质量整体持续改善。2018 年长三角地区 $PM_{2.5}$ 年均浓度较 2013 年下降 39%,但区域大气环境形势依然严峻,冬季频繁发生的重雾霾天气特别是对人类健康的影响已成为群众最关心的突出环境问题。在长三角区域一体化上升为国家战略、加快生态文明建设与推进区域高质量发展等多重背景下,研究长三角雾霾污染的时空格局演进特征与影响因素,对深化区域联防联控、发挥地方政府主导作用,打赢蓝天保卫战具有重要的意义。

雾霾通常是由人为活动所排放的颗粒物和不可见的气体随后转化成的颗粒物(即二次颗粒物)所引起的^[1]。大气中悬浮的颗粒物按粒径分为 TSP(Total Suspended Particles)、 PM_{10} (粒径小于 $10\mu m$)和 $PM_{2.5}$ (粒径小于 $2.5\mu m$ 细颗粒物)等,雾霾污染的本质是地区 $PM_{2.5}$ 浓度过高,大量细颗粒物悬浮在空气中,使空气普遍混浊且能见度降低^[2]。 $PM_{2.5}$ 污染的形成除气候、地形等客观原因外,根本问题是区域二氧化硫、氮氧化物、烟粉尘、VOC 等污染物排放量远远超过了环境容量^[3]。无论是在发达国家还是在发展中国家的城市中, $PM_{2.5}$ 与 O_3 并列为最重要的两种大气污染物(Streets et al., 2007; Molina and Molina, 2004),低空 O_3 通常是在高温季节易于产生并超标,而 $PM_{2.5}$ 污染尽管呈现季节性变化,但在许多城市地区全年均可能形成高浓度污染。因此相对于 O_3 , $PM_{2.5}$

¹作者简介:宁自军,同济大学博士生;隗斌贤,浙江省社会主义学院教授;刘晓红,嘉兴学院副教授。

基金项目: 浙江省哲学社科规划重点项目“雾霾影响因素、损失评价与政府管制创新——基于浙江的成因调查与机理研究”(编号:14NDJC005Z);国家统计局全国统计科学研究重点项目“大气污染环境危害及经济社会损失定量分析——基于长三角的研究”(编号:2016LZ41)。

更能代表大气复合污染的复合性及综合信息⁽⁴⁾⁽⁵⁾。目前我国雾霾污染已从上世纪的烟煤型污染,演变为以 PM_{2.5}和污染气体(臭氧、二氧化硫、氮氧化物)组成的跨区域性、复合型污染⁽⁶⁾。

国内外学者针对 PM_{2.5} 的成因分析虽然研究方法不尽相同,但结论主要集中在区域化石能源的大量消耗、工业废气和烟尘排放、机动车尾气排放等因素对 PM_{2.5} 形成具有较高的“贡献率”。以化石能源为主的能源消耗是 PM_{2.5} 污染的直接原因,高能耗工业排放的大量废气烟尘是雾霾频繁的主要原因,汽车尾气对 PM_{2.5} 的贡献约在 10%-30%⁽⁷⁾。“源头”排放导致污染物长期累积的总量超过了区域的环境容量,遇到不利的气候条件就会形成雾霾。雾霾形成的另一特征是 PM_{2.5} 可以远距离输送,由此造成的雾霾污染不再是单独某一个城市的问题,而是跨城市、跨省际、甚至跨国界的区域性问题。Shepherd(2004)的研究表明,在北美东部某些城市地区,PM_{2.5} 中来自于区域的贡献可达 50%~75%⁽⁸⁾。程真,成长虹等(2015)利用 CALPUFF 空气质量模型,模拟测算了 2004 年长三角区域内城市间一次污染跨界输送影响,结果显示,环太湖地区的上海、苏州、无锡和常州等地由于自身排放强度大,成为长三角一次污染最严重的地区⁽⁹⁾。薛安等(2015)研究发现 PM_{2.5} 污染具有区域传输特性,对污染的治理应该以城市群或整个区域为分析对象⁽¹⁰⁾。由此可见,造成的雾霾污染不再是单独某一个城市的问题,而是跨城市、跨省际、甚至跨国界的区域性问题。有效控制 PM_{2.5} 浓度水平,需要区域协同联合采取措施。为此,本文以长三角经济圈 16 个城市为研究对象,包括上海、南京、无锡、常州、苏州、扬州、镇江、泰州、南通、杭州、宁波、嘉兴、绍兴、湖州、舟山和台州等城市,基于 Theil 指数及其分解对长三角地区的 PM_{2.5} 污染从空间差异演进特征进行分析;再运用全局 Moran' sI、莫兰指数散点图和局部莫兰指数对区域 PM_{2.5} 污染空间自相关特征进行研究;运用最后季节指数和 Kendall 协同系数就 PM_{2.5} 的季节差异与区域协同演进展开分析,并采用空间面板模型 PM_{2.5} 分析的影响因素及空间交互效应,旨在为长三角地区雾霾综合治理提供有价值的研究结论。

二、研究方法和数据来源

(一)研究方法

1. Theil 指数

采用 Theil 指数分解法对 2014-2017 年长三角 PM_{2.5} 的区域差异进行分析,计算公式为:

$$T = TB + TW = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{n} \times \frac{Y_i}{\bar{Y}} \times \ln \left(\frac{Y_i}{\bar{Y}} \right) \right]$$

$$TB = \sum_{r=1}^m \left[\frac{n_r}{n} \times \frac{\bar{Y}_r}{\bar{Y}} \times \ln \left(\frac{\bar{Y}_r}{\bar{Y}} \right) \right]$$

$$TW = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{n} \times \frac{\bar{Y}_r}{\bar{Y}} \times \frac{Y_i}{\bar{Y}_r} \times \ln \left(\frac{Y_i}{\bar{Y}_r} \right) \right]$$

式中采用 T 为 PM_{2.5} 区域总差异;n 为研究地区的城市数量;Y_i 为各城市 PM_{2.5} 浓度监测值; $\bar{Y}$ 为长三角区域 PM_{2.5} 的平均值。本

文同时将长三角 16 个城市按江浙沪三个行政区域进行划分, $\bar{Y}_r$ 代表行政区域 r 的 PM_{2.5} 的平均值, TB 和 TW 分别代表 PM_{2.5} 的行政区域组间差异与行政区域组内差异。

2. 全局自相关和局部莫兰指数

本文分别采用全局莫兰指数(Global Moran's I)和局部莫兰指数(Local Moran's I), 分别从全局和局部两个维度分析长三角 PM_{2.5} 污染的空间自相关性。全局莫兰指数 I 主要用于从全局视角评估 PM_{2.5} 污染高值和低值的空间分布与预期的空间分布演进, 局部莫兰指数 I_i 分析用于从局部视角识别某城市 i 附近的空间集聚情况, 计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}}$$

$$I_i = \frac{(Y_i - \bar{Y})}{S^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_j - \bar{Y})$$

式中, n 为评价 PM_{2.5} 变动的城市数量(n=16); Y_i 为各城市 PM_{2.5} 的监测值; $\bar{Y}$ 为长三角区域 PM_{2.5} 的平均值。S² 为 Y_i 方差, W 为基于地理空间位置的权重矩阵; w_{ij} 为空间权重矩阵的 (i, j) 元素。

3. Kendall 协同系数

Kendall 协同系数检验是一种多样本非参数检验方法, 可用于评判多地区污染物排放量在一个周期内波动的协同性和一致性。本文采用 Kendall 协同对 2014-2017 年上海等长三角 16 个城市 PM_{2.5} 季节变动的一致性进行检验。其计算公式为:

$$K = \frac{\sum_{t=1}^T (R_t - n(T+1)/2)^2}{n^2 T (T^2 - 1) / 12}$$

式中 n 为评价 PM_{2.5} 变动的城市数量(n=16); T 为评价时期长度, 这里对年度 12 个月 PM_{2.5} 浓度的周期波动进行平均; R_t 代表 16 个城市第 t 个时期 PM_{2.5} 的秩和。K 为协同系数, 取值范围在 0-1 之间, 越接近 1 代表各城市 PM_{2.5} 在周期内波动具有一致性, 接近于 0 表示不具有协同性。

4. 空间面板模型分析

空间面板模型派生于面板模型, 与传统面板模型分析相比, 该方法把空间权重矩阵应用在面板模型中, 反映变量在空间上的依赖性。本文采用空间面板计量模型主要基于 PM_{2.5} 形成会受临近地区传输的影响, 在对面板数据的固定效应模型和随机效应模型及空间面板模型进行拟合比较的基础上, 选择 SAC(Spatial Autocorrelation Model) 模型研究长三角 PM_{2.5} 污染的影响因素及空间效应, 计算模型为:

$$\begin{cases} Y_{it} = \rho w_i' Y_t + X_{it}' \beta + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \\ \varepsilon_{it} = \lambda m_i' \varepsilon_t + v_{it} \end{cases}$$

式中 Y_{it} 为城市 i 在 t 期的 PM_{2.5} 值对数值; w'_i 为空间权重矩阵 W 的第 i 行, X'_{it} 为城市 i 在 t 期的解释变量向量。

(二) 变量与数据来源

本文研究样本区间为 2014-2017 年。长三角重点城市 $PM_{2.5}$ 浓度年度数据取自 2015-2018 年《中国环境统计年鉴》，嘉兴、泰州的年度数据根据月度数据平均得到，各城市 $PM_{2.5}$ 污染的月度数据资料来自 $PM_{2.5}$ 历史数据查询网。在空间自相关模型中，假定 $PM_{2.5}$ 的影响因素包括能耗强度、工业废气排放强度、工业烟尘排放强度和机动车尾气排放量等因素。能耗强度作为一个综合性指标，用于衡量地区能源利用效率，同时可以反映地区能源结构优化、产业结构调整和科技创新等对能源消耗的影响。“十一五”以来国家统计局、国家发改委等部门采用单位 GDP 能耗(吨标煤/万元)考评地区能耗利用效率，本文采用万元 GDP 能耗(吨标煤/万元)作为解释变量，并假定单位 GDP 能耗的降低有利于改善地区 $PM_{2.5}$ 污染水平，两者具有正向关系。万元 GDP 能耗数据资料取自各省能源强度考评监测资料及相关城市的统计公报。

工业废气排放强度和工业烟尘排放强度。我国 $PM_{2.5}$ 以硫酸盐、硝酸盐和铵盐构成的无机盐类(SNA)与有机物(OM)以及粉尘为主要成分(曹军骥, 2016)。工业生产排放的二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)和氨气(NH_3)气体经过化学反应易形成硫酸盐、硝酸盐和铵盐。本文分别将万元 GDP 工业废气排放量(万标立方米)和万元 GDP 工业烟尘排放量(kg)作为解释变量，假定工业废气和烟尘排放对地区空气质量具有正向影响。浙江省的相关数据取自 2015-2017 年《浙江自然资源与环境统计》，上海和江苏省 8 个城市数据主要来自对应城市的统计年鉴。

国家生态环境部在《2018 年中国机动车环境管理年报》中指出，机动车移动污染源对各地区 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献率达到 10-50%。在衡量机动车尾气排放对区域环境影响时，国内学者通常采用汽车保有量和人均机动车拥有量作为指标衡量(陈诗一等, 2018)。但由于我国机动车的燃油品质与新车排放标准不断提升，黄标车和老旧机动车淘汰力度不断加快，新能源汽车比例大幅提升及城市道路限行等机动车尾气治理力度加大，尽管 2012-2017 年全国机动车保有量年均增长 5.9%，机动车污染物排放总量却年均削减 0.1%，因此机动车的数量并不能客观反映机动车污染排放对环境的影响(图 1)。当前国家和地方尚未公布各城市机动车污染物排放量，由于全国机动车一氧化碳(CO)的排放量约占污染物总量的 80%，并且大气中 CO 的 83%来自机动车排放，因此本文采用各城市 CO 的日均浓度(毫克/立方米)作为替代指标反映机动车污染排放强度，数据取自 2015-2018 年《中国环境统计年鉴》。

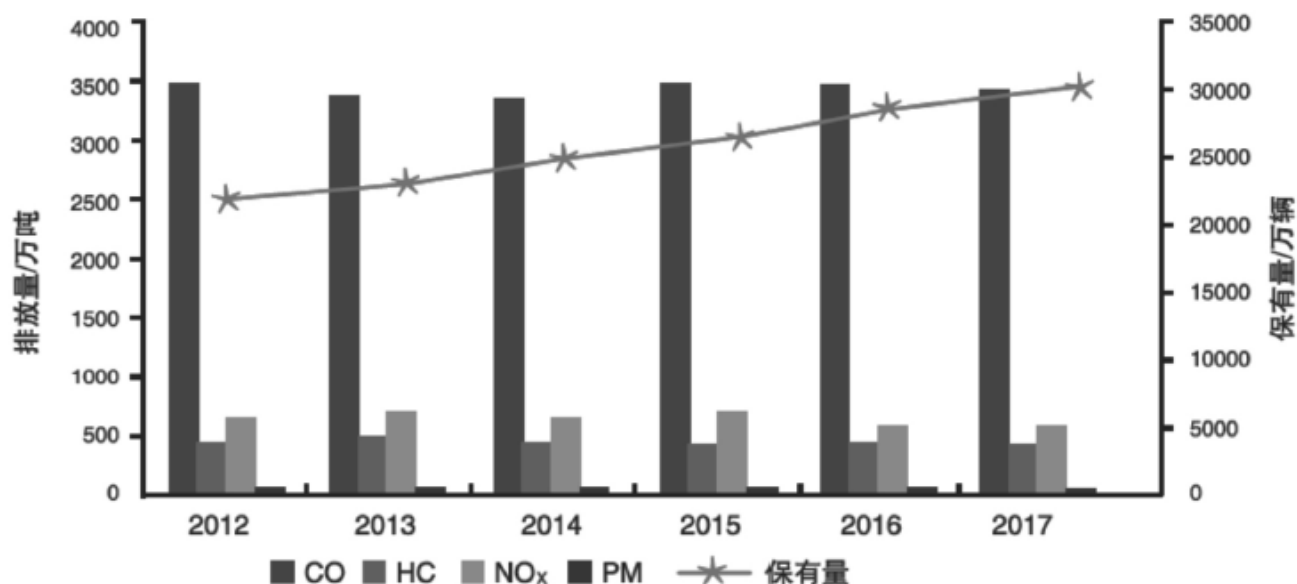


图 1 我国机动车保有量与污染物排放

三、长三角 $PM_{2.5}$ 浓度时空格局变化特征

(一)PM_{2.5} 浓度城市差异呈缩小态势

长三角地区是工业集聚程度高、大气环境污染形势较为严峻的区域(Lietal, 2008, 程真等, 2011)。党的十八大以来大气污染防治取得显著成效, PM_{2.5} 浓度年均降低 6. 81%, 但区域差异仍然明显, 空间分布上呈现“北高南低”的特征⁽¹⁾。2014 年 16 城市 PM_{2.5} 浓度的 Theil 指数为 0. 0193, 2017 年降低到 0. 0158, 表明长三角城市空气质量的总差异呈缩小态势。从 Theil 指数的分解结果看(表 1), 江浙沪三个行政区域组间差异指数大幅下降。2014 年总差异中 40. 26% 的因素来自江浙沪三个行政区域组间差异, 2017 年 29. 74% 的因素来自组间差异, 70. 26% 来自组内差异。

表 1 Theil 指数及其分解

年份	Theil 指数			PM _{2.5} 浓度均值 (μg/m ³)		
	总差异	组间差异	组内差异	江苏 8 市	浙江 7 市	上海
2014 年	0. 0193	0. 0078	0. 0116	67. 78	52. 87	52. 00
2017 年	0. 0158	0. 0047	0. 0111	46. 64	38. 32	39. 00



图 2(a)2014 年 PM_{2.5} 浓度



图 2(b) 2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度

图 2(a, b) 分别反映了 16 个城市 2014 年与 2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度演化。2014 年 16 个城市 $PM_{2.5}$ 浓度平均为 $60.27 \mu g/m^3$ 。2014 年江苏省 8 个城市和浙江省 7 个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度均值分别为 $67.78 \mu g/m^3$ 和 $52.87 \mu g/m^3$, 江苏比浙江高 28.2%, 2017 年江苏比浙江高 21.70%。2014 年江苏 8 市 $PM_{2.5}$ 浓度均超过 $60 \mu g/m^3$, 其中南京和泰州超过了 $70 \mu g/m^3$, 浙江舟山、宁波、台州和嘉兴均小于 $60 \mu g/m^3$ 。2017 年长三角 $PM_{2.5}$ 浓度整体下降, 上海市降低至 39, 浙江 7 市均小于 50, 江苏南京市治理成效最为显著, 比 2014 年降低了 45.95%, 但镇江、扬州和泰州 2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度仍超过 $50 \mu g/m^3$ 。

(二) 城市群 $PM_{2.5}$ 污染空间自相关性显著

长三角地区由于地市平坦, 城市相邻, 受人口密度和气象条件的影响, 各城市之间大气污染吸纳传输显著(程真等, 2011)。基于 stata15.0 软件测算的 $PM_{2.5}$ 浓度的全局 Moran's I 指数表明(表 2), 2014-2018 年长三角城市 $PM_{2.5}$ 浓度全局 Moran's I 值均大于 0, 且 P 值均小于 0.05, 说明长三角城市 $PM_{2.5}$ 污染存在正的空间自相关关系。区域空气质量整体持续改善, 全局 Moran's I 值总体呈下降趋势, 空间传输影响程度逐渐减弱。

表 2 $PM_{2.5}$ 浓度全局 Moran's I 指数

年份	Moran's I	z	p-value*
----	-----------	---	----------

(Low-Low 集聚)。台州、上海和嘉兴位于二三象限坐标轴附近,表现为低浓度城市被部分高浓度所影响(Low-High),这些城市 $PM_{2.5}$ 浓度相对较低,但周围又受苏州、杭州和绍兴等影响。绍兴位于四象限坐标轴附近,主要由于绍兴周边城市除杭州的浓度相对较高,其他周边城市浓度相对较低。2017 年莫兰散点图与 2014 年相比发生了显著变化,16 个城市基本分布在一三象限,江苏 8 市中除南京和南通外,其他城市位于第一象限,仍属于高一高集聚,南京和南通位于第二象限,表现为低浓度城市被高浓度城市包围,2017 年江苏和南通的局部莫兰指数分别为-0.464 和-0.095,绍兴仍位于第四象限,局部莫兰指数分别为-0.150。

(三) $PM_{2.5}$ 季节变动差异显著

图 4 描述了 16 个城市四年来 $PM_{2.5}$ 浓度季节变动趋势,长三角地区空气质量季节性差异明显,呈现的“北高南低”和“冬高夏低”时空特征,冬季重污染天气频发。月度数据分析表明,区域 $PM_{2.5}$ 排放季节指数呈现明显的“U”型曲线。秋冬季节污染浓度上升,夏季污染浓度降到最低。2014-2017 年 1 月份 $PM_{2.5}$ 浓度季节指数达到 155.9%,12 月份为 142.2%,8 月份季节指数最低仅为 63.6%(图 5)。气候因素不仅影响区域之间的雾霾污染差异,也影响了区域内雾霾污染的季节变化。秋冬季节的“逆温现象”导致污染物浓度上升,而夏秋季节地面温度较高,上下层空气流动加快,污染物扩散迅速,加上夏秋绿色植被的净化作用,因此污染物浓度在夏秋季节降到最低。Kendall 协同系数检验结果表明(表 3),2014 年长三角 $PM_{2.5}$ 季节变动城市间的 Kendall 协同系数为 0.804,2017 年提高到 0.917,表明长三角地区大气污染季节变动呈高度一致性。图 3 可见,2014 年夏季各城市间空气质量差异明显,6 月的 Theil 指数分达到 0.054,2017 年降至 0.0206。

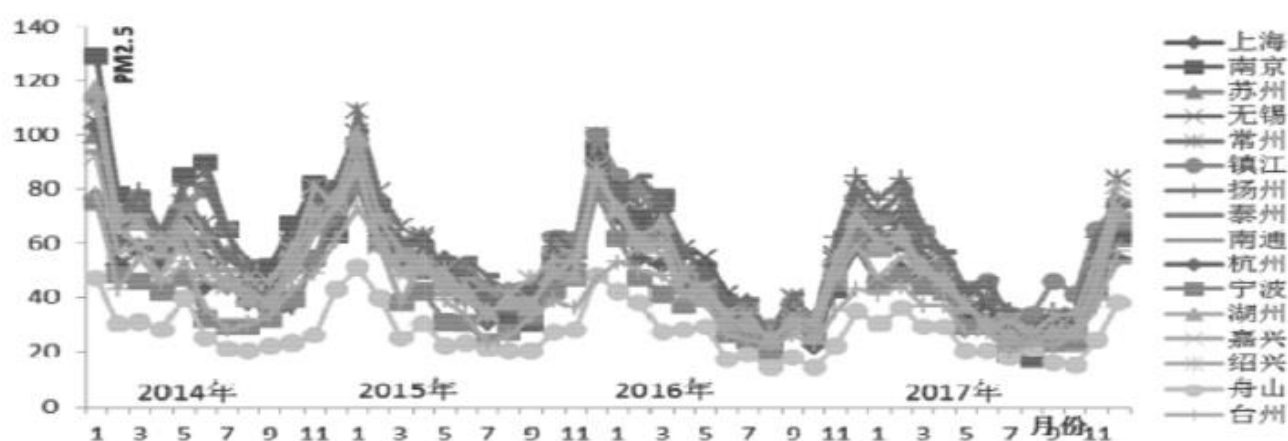


图 4 长三角城市 $PM_{2.5}$ 浓度季节变动

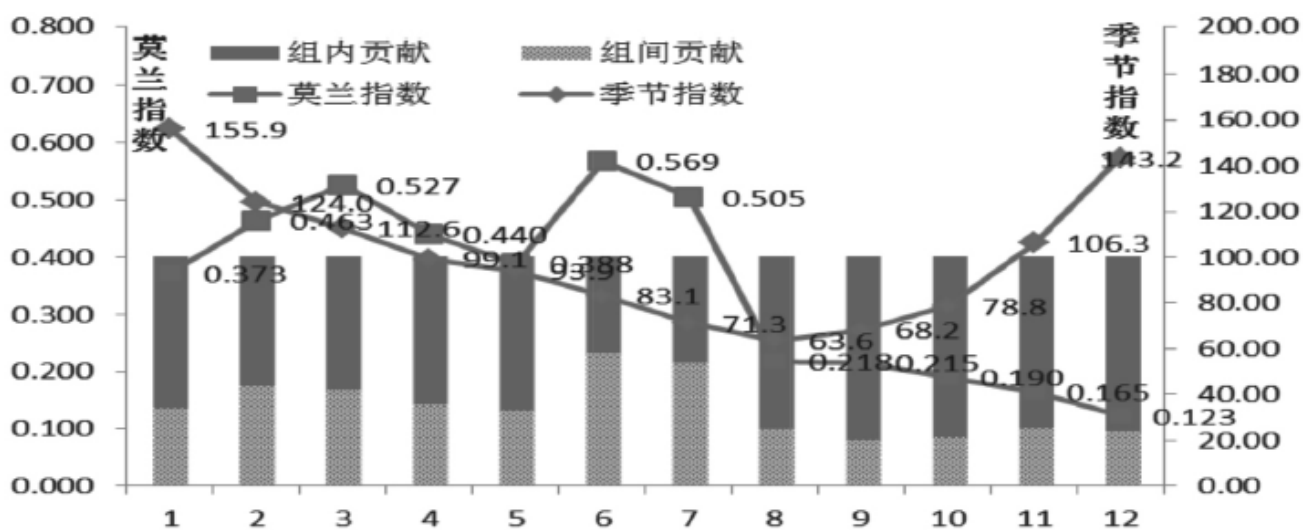


图 5 PM_{2.5}浓度季节指数与莫兰指数

表 3 Kendall's 协同系数

年份	N	Kendall's 协同系数	卡方统计量	自由度	P 值
2014 年	16	0.804	141.562	11	0.000
2017 年	16	0.917	161.469	11	0.000

受气候条件与风向影响,每年 1-3 月和 6-7 月莫兰指数分别相对较高,表明城市间相互影响较大,程真(2011)利用 CALPUFF 空气质量模型研究结果表明,由于江苏 PM_{2.5}浓度较浙北城市群高,每年以西北风为主的 1 月,浙北地区容易受江苏污染南下传输的影响,而以偏南风为主的 7 月,浙北地区的空气污染会北上影响苏中及苏北等城市。长三角地区 6-7 月份 Theil 指数组间差异明显,对总差异的贡献度超过 50%,近四年江苏 8 市 6-7 月份 PM_{2.5}平均浓度分别为 49.0 和 41.0,分别比浙江高 45.65%和 40.17%。长三角地区雾霾污染所呈现的“北高南低”和“冬高夏低”时空特征,表明气象条件是雾霾污染“区域差距”和“季节差距”的原因,但气象条件只是雾霾区域传输污染的“催化剂”,雾霾污染的“真凶”依然是污染源的排放。

四、长三角 PM_{2.5}浓度的影响因素与跨界影响

(一)模型构建与参数检验

为检验长三角地区 PM_{2.5}污染的影响因素及各因素的空间跨界传输,本文以 2014-2017 年 16 个城市 PM_{2.5}的对数值作为被解释变量,以能耗强度(X_1)、工业废气排放强度(X_2)、工业烟尘排放强度(X_3)、机动车污染排放强度(X_4)等 4 个变量的对数值作为解释变量面板模型,为

$$\ln y_{it} = \mu_i + X'_{it} + \varepsilon_{it} \quad i=1, \dots, n; t=1, \dots, T$$

表 4 给出了面板模型对 16 个城市 2014-2017 年 PM_{2.5}污染及其影响因素进行回归所得回归拟合结果。模型 I 是采用面板数

据的固定效应模型拟合结果, $F=45.19$, P 值为 0.000 , 各回归系数在 10% 的水平下检验显著, 表明模型拟合良好。个体效应 “ $\rho =0.9403$ ” 表明复合扰动项的方差来自个体效应 u_i 的变动。对原假设 “ $H_0:u_i=0$ ” 的 F 检验 P 值为 0 , 说明面板数据固定效应模型优于简单混合回归模型。模型 II 为面板数据的随机效应模型拟合结果, 从 Hausman 检验结果看, 长三角地区 $PM_{2.5}$ 污染回归模型选用固定效应模型更为适合。

长三角地区 $PM_{2.5}$ 污染的空间分布呈显著的空间正相关特征, 若不考虑空间跨界对 $PM_{2.5}$ 浓度影响的因素进行分析, 得到的结果有可能存在偏差。对固定效应模型的残差进行莫兰指数检验, $Moran's I=0.668$ ($p=0.000$) 表明直接采用面板固定效应模型的残差存在较强的空间相关性, 选用空间自相关模型 (Spatial Autocorrelation Model, SAC) 更优。

表 5 是基于空间权重矩阵构建的 SAC 模型拟合结果, SAC 模型的 R^2 均大于固定效应模型的 R^2 , 空间自回归系数 $\rho =0.124$, 且 P 值均在 5% 水平上显著。模型中的解释变量回归系数统计检验显著, 回归系数为正, 表示解释变量与 $PM_{2.5}$ 浓度呈正向关系, 总体看, 区域 $PM_{2.5}$ 对能源消耗强度弹性系数最高, 对机动车污染排放次之。

表 4 面板计量模型拟合与检验

lnY	模型 I			模型 II		
	固定效应模型			随机效应模型		
	系数	标准误	P 值	系数	标准误	P 值
lnx1	1.06317	0.2196	0.000	0.699	0.2196	0.000
lnx2	0.07824	0.0407	0.061	0.064	0.0407	0.117
lnx3	0.14267	0.0298	0.000	0.174	0.0298	0.000
lnx4	0.1655	0.0848	0.057	0.189	0.0848	0.029
cons	4.45303	0.1971	0.000	4.139	0.1971	0
R ² within	0.8042		0.8236	0.793		
R ² between	0.0506		0.0257	0.091		
模型检验	F(4, 44)=45.19		0.000	$\chi^2(4)=155.74p=0.000$		
个体效应检验	H0:ui=0F=21.25P=0.0000					
Hausman 检验	卡方统计量 $\chi^2(4)=10.01P=0.0402$					

表 4 中的 LR 直接效应给出了本区域解释变量对本区域被解释变量的平均“直接效应”, LR 总效应表示解释变量对所有区域的平均“总效应”, LR 总效应与 LR 直接效应之差为 LR 间接效应, 表示的解释变量对其他区域的平均“间接效应”。解释变量的直接效应、间接效应和总效应在 5% 显著水平下统计检验显著, 且均为正向影响。

表 5 空间自相关模型拟合与检验结果

lny	回归模型		LR_直接效应		LR_间接效应		LR_总效应	
	系数	P 值	系数	P 值	系数	P 值	系数	P 值
lnx1	0.639	0.000	0.692	0.000	0.495	0.001	1.187	0.000
lnx2	0.066	0.013	0.070	0.010	0.051	0.045	0.121	0.015
lnx3	0.076	0.000	0.084	0.000	0.060	0.001	0.144	0.000
lnx4	0.113	0.050	0.122	0.045	0.090	0.080	0.211	0.048
ρ	0.124	0.000	Meanoffixed-effects=2.5413					

λ	-0.092	0.122	R ² within=0.8657between=0.1063overall=0.0545 Log-likelihood=97.8212
σ^2_e	7.657	0.000	

(二)各解释变量对 PM_{2.5}浓度空间格局的影响分析

1. 能源消耗强度与大气污染关系最为密切。以 PM_{2.5} 为代表的各类空气污染物,其主要来源是煤炭、石油等化石燃料燃烧的直接排放及其在大气中的化学转化。近十多年来国家将能耗强度和能源消费总量作为“双控”考评指标,长三角城市能源结构的不断优化、能源效率有效提升及产业结构转型升级促进能源消耗强度不断降低,江、浙、沪煤炭消费总量持续下降,有效促进空气治理改善和 PM_{2.5} 浓度的降低。从回归结果看,能源消耗强度对 PM_{2.5} 浓度弹性系数为 0.639,标准误差为 20.08,Z 统计量为 5.03,P 值为 0.000,统计检验显著。能耗强度对本地区 PM_{2.5} 浓度的直接效应为 0.692,其他区域间接效应为 0.495,即能耗强度降低 1%促进本区域 PM_{2.5} 浓度下降 0.639%个单位,可促进其他城市 PM_{2.5} 浓度平均下降 0.6495%。

2. 万元 GDP 工业废气排放的排放量是直接影响 PM_{2.5} 的显著因素。SAC 模型中回归系数为 0.066,标准误差为 1.40,Z 统计量为 2.47,统计检验显著。2017 年江苏 8 市的万元 GDP 工业废气排放量平均值为 0.98 万标立方米,浙江 7 个城市均值为 0.612 万标立方米,江苏比浙江高 60.40%,同期江苏 PM_{2.5} 浓度比浙江高 21.68%。工业废气排放对本地区 PM_{2.5} 浓度的直接效应为 0.07,由于空间传输的影响,对其他区域间接效应为 0.051,直接效应是间接效应的 1.61 倍。即工业废气排放的有效治理若能促进本区域 PM_{2.5} 浓度下降 1%,可促进其他城市 PM_{2.5} 浓度平均下降 0.58%。

3. 工业烟尘排放不仅影响本区域的空气质量,对其他区域也造成显著影响。SAC 模型中回归系数、直接效应和间接效应系数均统计检验显著。2017 年江苏万元 GDP 工业烟尘排放量平均为 0.36kg,浙江所属 7 个城市仅为 0.26kg,江苏比浙江高 41.7%。工业烟尘排放本地区 PM_{2.5} 浓度的直接效应为 0.084,由于空间传输的影响,对其他区域间接效应为 0.060,间接效应是直接效应的 58.33%。

4. 我国城市 PM_{2.5} 来源解析结果表明,长三角地区机动车污染已成为城市 PM_{2.5} 的主要来源,上海、杭州、南京和宁波移动源排放分担率分别为 29.2%、28%、24.6%和 22%。从回归结果看,机动车污染排放对 PM_{2.5} 浓度弹性系数为 0.113,统计检验显著。直接效应为 0.122,间接效应为 0.090,直接效应是间接效应的 1.36 倍。

五、基于利益诉求视角下的地方政府雾霾治理行为

政府不仅是公共利益的代表者,也是社会公共产品的主要提供者,因而在雾霾治理过程中发挥着主导作用。从经济学的角度看,雾霾污染是一种典型的公共劣品,而雾霾治理则是一种公共益品。作为公共益品的提供,私人部门不仅会面临失灵问题,也缺乏相应的实施能力。政府不仅有责任和义务通过治理为人们提供清洁的空气,而且也有能力去协调利益相关主体的矛盾,从而能够凭借其权威推动雾霾治理工作的有效开展。政府还能够基于地域性的治理特征因地制宜、有针对性作出符合地方实际的治理安排,从而提高雾霾治理的效率。但同时也要看到,各利益主体为实现各自利益而尝试干预政府的治理行为。社会公众是雾霾污染负外部性的主要承担者,其主要利益诉求就是希望政府采取强有力措施来防治雾霾,并要求企业承担污染造成的损害。排污企业对雾霾污染负有重要责任,是雾霾治理行为中的被治理对象。由于其具备典型“经济人”特性,其利益诉求就是自身利益最大化,从而要求政府放宽污染排放监管。地方政府与中央政府既有公共利益代表者的共性,也会因为不同的定位和发展阶段的不同角色而在雾霾治理中表现出不同的利益诉求。在经济起飞阶段,无论是地方政府还是中央政府出于经济增长的需要,包括环境在内的其它问题都会考虑较少。但当发展到一定阶段,特别是社会公众开始关注环境问题后,中央政府为巩固自身政权的合法性必须把保护环境作为利益诉求的体现之一,而地方政府具有经济收益最大化的“经济参与人”和政绩最大化的“政治参与人”双重性,在现行的管理体制和考核机制下往往会将经济收益最大化作为官员晋升机会最大化的主要驱动,故而出现在与中央政府不一致的行为。显然,地方政府在雾霾治理行为选择中受到多方利益主体的干扰,进而影响其治理行为。

雾霾治理中的地方政府的行为选择是多主体之间基于不同的价值目标和利益诉求而相互博弈、妥协和合作的过程。根据博弈论旨在使利益相关主体公平公正地分享合作成果,各利益主体需要以团体理性与协同合作为价值标准,坚持效率、公平、公正和透明的原则,并从整个社会利益出发,从而实现对雾霾的有效治理。换言之,只有达到合作协同博弈状态才能使包括所有利益主体在内的整个社会从中受益。然而目前雾霾治理的相关利益主体在价值目标和利益诉求上还难以达成一致,这也是雾霾问题难以从根本上解决的主要症结所在。因此,本文认为要彻底根治雾霾污染,首先必须进一步提高生态环境治理决策的科学性,针对可能对雾霾污染产生影响的技术、经济、社会政策进行多种形式的影响评价,形成从政策环评、规划环评到项目环评的由上至下、层次分明的环评体系,提高各领域政策制定与环境保护的协同水平。同时强化中央政府对雾霾治理的法治约束、政策引导,持续推动生态环境领域的“放管服”改革,推动地方政府进一步完善空气质量改善绩效指标体系,并以其为依据加强雾霾治理工作的评价与监管;其次要进一步激励地方政府投入包括雾霾治理在内的生态环境治理,在统筹整合现有的考评指标的基础上建立健全考核激励机制并将考核结果作为中央政策领导干部考评的重要依据。要完善责任追究机制,深入推进“党政同责”“一岗双责”,强化法律监督、行政监察,并对违法违规行为实行严惩重罚。要加快建立生态产品价值实现机制,使保护生态环境更加“有利可图”;三要进一步拓展社会公众特别是独立第三方参与雾霾治理的渠道,真正形成以产业转型升级为主线、资源清洁高效利用为抓手、源头防控为重点、科技进步为动力、协同治理为基础、法治建设和监督考核为保障的区域合作、多元参与、协同治理相互促进的治理体系;此外,为更加有效地引导地方政府转变发展方式、实施利己又兼顾各方的多赢共赢政策,中央政府还应提升雾霾治理对地方政府高质量发展的倒逼效应,同时推动地方政府构建区域内环境污染监测、监管、预警、执法联合体系,并明确区域内利益协调与补偿机制。

六、主要结论与建议

长三角城市间 $PM_{2.5}$ 具有明显的空间自相关特征,且雾霾污染的城市差异较大,表明为持续改善区域环境空气质量,不仅要从小三角区域一体化的角度加以整体规划,各行政区域必须采取更加科学的方法、更加严格的手段、更大的工作力度,开展协同攻坚行动,大力削减污染物排放量,深化区域联防联控,着力降低重污染天气的不利影响。

长三角区域空气质量整体持续改善, $PM_{2.5}$ 污染呈现“北高南低”“冬高夏低”的时空特征。空间数据分析显示,我国 $PM_{2.5}$ 高排放“俱乐部”成员集中分布于长三角与京津冀及两者之间的区域,雾霾的污染呈现出空间溢出效应和集聚特征。

全年月度数据分析表明,区域 $PM_{2.5}$ 污染呈现明显的“U”型曲线。秋冬季节污染浓度上升,夏季污染浓度降到最低。2014 年长三角 $PM_{2.5}$ 季节变动城市间的 Kendall 协同系数为 0.804,2017 年提高到 0.917,表明长三角地区大气污染季节变动呈高度一致性。

MoranI 指数检验结果表明 16 个城市 $PM_{2.5}$ 浓度在空间分布上具有显著的正自相关关系,各城市雾霾污染的空间分布具有邻域之间的空间关联结构,而非完全随机状态。第二产业畸高的产业结构、石化能源为主的能源结构、人口的快速集聚以及交通运输强度的提升共同引致雾霾污染加重。尽管外商直投 FDI 对雾霾污染起抑制效应,但其影响强度较小。囿于技术进步偏向和能源回弹效应,研发强度和能源效率的提高并未发挥应有的减霾效果。空间计量模型结果同时表明,能耗强度、工业废气排放强度、工业烟尘排放强度和机动车污染排放强度对 $PM_{2.5}$ 均具有显著的正向影响,能源消耗和机动车污染排放对 $PM_{2.5}$ 浓度影响相对较高,且各影响因素对跨区域间接影响约为直接影响 50-60%。

有效实施区域雾霾治理,从战略高度看,一要实行系统科学的顶层设计,从源头上制定实施减霾法规政策,并建立相应的长效机制,保持法规的刚性和政策的连续性。长三角一体化发展上升为国家战略后,不仅其发展要迈入“快车道”,包括雾霾污染在内的生态环境保护也要跑出“加速度”,需要抓紧研究制定更高水平的专项规划、细化相关配套措施,使管控更精准、更系统、更严格、更有效,努力打造生态友好型一体化发展的“中国方案”;二要建立雾霾污染治理的区域联防机制,形成有效治霾的区域合力。雾霾污染的“空间溢出效应”和“区域集聚效应”意味着“单干”或“单边”行为会因为区域雾霾污染的“泄露效应”而徒劳无获。长三角地区已建立大气污染防治协作机制,关键在于进一步提升区域环境协同治理水平,不仅要以高水平建设一体化示范区为突破口在重点领域协同治理上体现新力度、融合发展上探索新模式,而且要充分利用物联网、大数据、云计算和互联网

+等手段,完善大气等环境质量的常态化监测,建立数据资源统筹管理和共享制度,加强相关部门的监测系统、数据库和信息平台的共建共享,形成规范统一的与其它生态环境数据库相融的基础数据库和标准体系,加快信息共建共享、标准统一的步伐。还要加强大气污染监测,构建区域雾霾污染物排放清单和污染源实时监控系统,并在排放标准、产品标准等方面力争有新突破;三要切实贯彻“高质量发展”和“绿色发展”的新理念,使区域雾霾防治有转型升级的基础性支撑。为此要全面推进产业结构、能源结构、运输结构的优化,加快新旧动能转换,走生态化、绿色化发展道路,同时要大力发展清洁能源,加快能源技术创新和节能减排技术的推广应用,推进能源生产和消费革命,促进能源利用效率的提升;四要以社会共治理念推动区域雾霾治理法规政策的制定,并根据雾霾治理程度和经济发展水平的区域差异实行有所侧重的区域治理策略。国家《大气污染防治行动计划》明确要“形成政府统筹、企业施治、市场驱动、公众参与的防治新机制”,因此要采取措施使所有利益相关者公平公开公正地参与到协作之中、分享合作成果,从而提高协作治理的效率。要充分发挥市场机制的作用,通过环境资源税、生态补偿以及资源环境交易等约束和激励性制度来促进全社会节能减排⁽¹³⁾。而实行因地制宜的区域治理方案和针对污染源种类制定精细化的防治措施,既可规避“向底线竞争”效应,又可以防止不同地区的“泄露效应”,还可以使治理法规政策更好地体现公平性和合理性;五要基于环境健康负担与区域内的不平等,进一步推进污染健康赔偿救助机制、“以人为本、预防为主、防治结合”的环境健康管理制度的建立与完善,鼓励环境友好、资源节约和环境健康技术进步与应用,促进以健康医疗、社会保障和环境保护为侧重点的基本公共服务均等化⁽¹⁴⁾。

另外还要把臭氧防治作为雾霾治理的重点,抓紧抓实治理布局。PM_{2.5}依然是大气污染的重点,但臭氧的影响已越来越突出,而且是悄悄潜伏在万里晴空的“透明杀手”,长三角已成为继京津冀以臭氧为首要污染物的天数占空气超标天数比例大幅上升后的另一重灾区。由于其排放源小而散、种类繁多、成分复杂,即使同一行业因原料构成和生产工艺不同所排放的VOCs种类、性质、浓度也不尽相同,治理难度更大。作为经济社会发展的先行地区,在臭氧治理上长三角地区也要先行一步,主动采取与PM_{2.5}协同控制、及时出台VOCs的治理标准,以及削减氮氧化物排放措施。具体而言,要从源头上控制VOCs排放,监控氮氧化物、VOCs排放重点行业;要加快制定颁布实施VOCs排放地方标准,当务之急是建筑类涂料与胶粘剂挥发性有机化合物含量限值;探索经济杠杆手段,征收VOCs排污费,并对属于产能过剩和淘汰类生产工艺加征;做好与PM_{2.5}协同治理、多主体多要素多方式综合治理、跨区域统筹联防。

注释:

1 Waston J. G., Chow J. C.. 2002. A Wintertime PM_{2.5} Episode at the Fresno, CA, Supersite. Atmos. Environ., 36(3):465—475.

2 曹军骥:《中国大气PM_{2.5}污染的主要成因与控制对策》,《科技导报》,2016年第20期。

3 曹军骥:《中国大气PM_{2.5}污染的主要成因与控制对策》,《科技导报》,2016年第20期。

4 袁振喜、白之羽、杨柳:《南京专家称雾霾成于污染排放过大》,《人民日报》,http://js.people.com.cn/n/2014/0808/c364307-21929374.html,2014-03-04。

5 Streets D. C., Fub J. S., Jang C. J., et al. 2007. Air Quality During the 2008 Beijing Olympic Games. Atmos. Environ., 41:480—492.

6 Molina M. J., and Molina L. T.. 2004. Megacities and Atmospheric Pollution. J. Air Waste Manage. Assoc., 54(6):644—680.

7 曹军骥:《PM_{2.5}与环境》,科学出版社2014年版,第1-2页。

8 马丽梅:《能源结构、交通模式与雾霾污染》,《财贸经济》,2016 年第 1 期。

9 Shepherd M. 2004. Perspective for Managing PM. McMurtry P.H., Shepherd M.F., Vickery J.S. // Particulate Matter Science for Policy Makers: A NARSTO Assessment. Cambridge University Press, 1-7.

10 程真、陈长虹、黄成、李莉、王红丽:《长三角区域城市间一次污染跨界影响》,《环境科学学报》,2011 年第 4 期。

11 隗斌贤、刘晓红:《大气污染的区际差异、影响因素与治理政策选择》,《科技通报》,2019 年第 8 期。

12 薛安、耿恩泽:《基于复杂网络的中国城市 PM_{2.5} 区域划分》,《应用基础与工程科学学报》,2015 年第 S1 期。

13 隗斌贤、揭筱纹:《基于国际经验的长三角区域碳交易市场构建》,《管理世界》,2012 年第 2 期。

14 祁毓、卢洪友:《污染、健康与不平等》,《管理世界》,2015 年第 9 期。