

长江经济带大气污染非对称性研究

张康康 徐德义 朱永光 孙涵*

摘要:大气污染的空间外溢性导致了非对称性的特征。大气污染非对称性的研究不仅能够深入认识大气污染的时空演变特征,而且为大气污染区域协同治理提供重要支撑和参考。本文首先将大气污染定义为雾霾污染和废气排放污染,通过对比分析定义了大气污染非对称性特征;然后以2011—2019年长江经济带130个城市为研究对象,从时空演变特征探讨了大气污染非对称性,并且研究了大气污染非对称性的形成机制、作用机制和影响机制。研究发现,雾霾污染的重心轨迹呈现“北进南退”特征,废气排放污染的重心轨迹呈现“南进北退”特征。雾霾污染程度严重的城市并不全是废气排放污染程度严重的城市,反之亦然,大气污染呈现非对称性特征。大气污染非对称性特征阻碍了经济发展,大气污染的空间流动特征是其形成的主要原因,废气排放污染和环境规制是其主要的影响因素。因此,相关部门在制定大气污染治理目标时应考虑大气污染非对称性特征,认清各城市共同但有区别的治污责任,激励各城市间增强大气污染治理的协同程度。

关键词:长江经济带;大气污染;非对称性;空间分析

一、引言

作为重要的污染治理对象,大气污染具有极强的负外部性(Xue et al., 2021),对人们的健康产生严重的危害(DeCicca & Malak, 2020;刁贝娣等, 2021)。随着雾霾和酸雨等极端天气频发,大气污染问题越来越受人们的重视(韦宝婧等, 2021)。耶鲁大学发布的《2020年环境绩效指数报告》显示,我国环境绩效指数在参评的180个国家和地区中排名第120位,空气质量排名第137位,成为大气污染的“重灾区”。由于大气污染扩散范围广、流动性强,具有较强的空间溢出性和关联性,易大范围快速扩散,严重抑制了大气污染的高效治理。对

*张康康,中国地质大学(武汉)经济管理学院,邮政编码:430074,天津社会科学院生态文明研究所,邮政编码:300191,电子邮箱:zkk@cug.edu.cn;徐德义,中国地质大学(武汉)经济管理学院,邮政编码:430074,电子邮箱:xdy@cug.edu.cn;朱永光,中国地质大学(武汉)经济管理学院,邮政编码:430074,电子邮箱:zhuyongguang@cug.edu.cn;孙涵,中国地质大学(武汉)经济管理学院,邮政编码:430074,电子邮箱:sunhan2004@126.com。

本文是国家社会科学基金项目“城市群雾霾污染对公共健康影响的空间效应和治理策略研究”(17BJY063)的阶段性成果。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见。文责自负。

大气污染非对称性特征的研究不仅能够增强对大气污染空间转移特征的认识程度,而且是对大气污染属地治理的深入反思,有助于促进大气污染的区域协同治理,实现大气污染的高效治理。

大气污染的时空特征是研究大气污染治理的重要参考依据,逐渐成为学者和政府部门关注的重点,衍生出大量大气污染特征的研究成果,为相关部门的决策提供了重要参考。而相关学者在对大气污染特征的研究成果中,主要以时间特征和空间特征两个视角进行探讨。关于大气污染时间特征的探究,污染物排放时间调整对治污具有显著的有效性(蔡银寅、黄有光,2021),因此,现有文献主要以不同区域的大气污染特征以及不同污染物的时间特征为主。首先从全球视角对比发现,大气污染大致呈现先加重后减缓的态势,污染最严重的地区主要分布于亚洲地区,而且国家间也存在较大的差异(刘华军、吉元梦,2021)。中国的大气污染存在季节性特征,尤其是雾霾,污染程度遵循夏季、春秋和冬季依次递增(张生玲等,2017)。与此同时,大气污染呈现显著的时间粘性特征(王红梅等,2021)。针对不同大气污染物的时间特征的研究结果发现,随着中国实施有史以来最严厉的清洁空气政策,大气污染有了非常显著的改善(Zhang et al.,2019)。其中赵艳艳等(2021)研究发现中国6种大气污染物中,仅有O₃污染加剧,SO₂浓度降幅最大。

随着经济地理学逐渐成为主流经济学,大气污染的空间特征被广泛地讨论。当前有大量的研究基于环境经济地理学对大气污染的空间特征进行讨论,加深了对大气污染特征的认识程度(贺灿飞等,2021)。大气污染可以通过区域间的经济供应链的途径进行空间传播(Chen et al.,2019),因此大气污染存在显著的时空特征。大气污染的空间异质性存在且十分显著(Ravishankara et al.,2020),相同空气质量标准下,不同城市之间的污染物排放强度差异度可以达到数倍之多(蔡银寅、黄有光,2021)。由于大气污染的空间流动性(Zhang et al.,2021;Fu et al.,2022),导致大气污染的局部相关关系。相关研究发现,中国大气污染呈现显著的空间正相关特征(王红梅等,2021),而且南北方的集聚程度存在差异。大气污染的空间相关性一方面是经济集聚的结果,另一方面也是大气污染空间转移的表现。而大气污染空间转移特征极易导致污染排放和受污染程度存在非对称性特征。

学界对大气污染时空特征已经开展了较为系统的研究并取得了丰富的成果,对本文具有重大借鉴作用。但是现有研究主要针对大气污染的时空特征展开讨论,虽然已有研究对比了各类大气污染的时空演变趋势,但是缺乏对大气污染时空变化特征导致的大气污染非对称性的讨论。针对大气污染的时空复杂特征,本文首先将大气污染定义为雾霾污染和废气排放污染,对比分析了长江经济带130个城市的雾霾污染和废气排放污染的时空差异及空间集聚特征。其次,进一步讨论了大气污染的时空演变特征,并提出了雾霾污染和废气排放污染的非对称性特征,不仅增强了对大气污染的时空演变特征的认识,而且更清晰地发现大气污染的

空间转移特征。最后,根据对大气污染非对称性特征的讨论,研究了大气污染非对称性的机制特征,从新视角验证了大气污染空间流动特征,增强了地方政府对大气污染区域协同治理的重要性的认识。

二、大气污染属性特征

根据国际标准化组织(ISO)的定义,大气污染通常是指由于人类活动或自然过程而导致的一些物质进入大气,显示出足够的浓度,达到足够的时间,从而危及人的舒适、健康、福利或环境。大气污染有别于其他污染,流动性更强,扩散范围更广,具有极强的空间流动性和关联性,区域性较为突出。《中华人民共和国大气污染防治法(第二次修订)》(简称《大气污染防治法》)在第二章明确将大气污染防治标准划分为大气环境质量和大气污染排放标准。大气环境质量标准是指在一定时间和空间内大气中污染物质含量的标准,是大气环境质量管理的目标值,也是制定大气污染物排放标准,进行大气污染防治的基本依据。而大气污染排放标准指由于人类活动或自然过程将对环境或人产生有害影响的物质排入大气的最高量。

根据大气污染的流动特征,属地大气污染的变化可分为两个阶段:排放和扩散(王焕顺、矫学成,2014)。排放阶段指大气污染物被作为生产过程中的副产物被排放到大气中,而扩散阶段指大气污染物由于其空间流动特征,随着大气的流动及物质的无规则运动转移到其他地区。根据相关文献可知(邵帅等,2016;刘净然等,2021),城市大气污染的主要来源可分为三类:第一类是该城市的经济发展造成的污染排放量(L);第二类是由于自然条件和污染物的自然属性特征,其他城市的大气污染扩散到该城市的污染量(FW);第三类是该城市的大气污染扩散到其他城市的污染量(FL)。前两类情况导致该城市大气污染程度的增强,而第三类情况减弱了该城市的大气污染程度。三者之间的关系是 $EP=L+FW-FL$ 。

导致大气污染难以有效治理的最根本原因是大气污染具有自然和社会双重属性特征。首先是大气污染的自然属性特征,是指大气污染在空间上的流动性。污染物排放导致本地区域和邻近区域的污染程度增强,但是跨区域污染贡献率各省市差异较大。其次是大气污染的社会属性特征,主要是指其负外部性特征,即某种经济行为或活动造成他人或社会的损失,而没有为此承担一定成本。大气污染具有公共产品属性,大气污染的负外部性体现在某一城市或地区的大气污染会随着大气的流动而影响其周边城市或区域,造成周边区域的大气环境质量下降。但由于我国的属地治理模式,对大气污染治理所耗费的成本严格限制在各行政区域内部,并不会承担行政区域外部的治理成本。

基于此,本文将大气污染划分为雾霾污染和废气排放污染。 EP 表征大气污染程度,

用雾霾污染程度表示,是污染空间流动后的结果。而 L 表征大气污染排放程度,即废气排放污染,表示实际向大气中排放的污染物,仅受污染产生地的经济发展水平等的影响,不受邻近城市大气污染的空间溢出影响。也有相关文献从排放端和雾霾污染对大气污染等进行研究,比如严雅雪(2017)分析了碳排放和雾霾污染的协同关系,赵立祥等(2020)也构建了 SO_2 排放和雾霾的协同关系,研究了碳排放权交易政策对我国大气污染的协同减排有效性问题。

三、实证策略

(一)模型设定

1. 空间相关性检验

由于长江经济带贯穿中国的东中西部地区,各城市的经济和大气污染程度的差异较大,导致长江经济带大气污染呈现空间差异特征。无论是经济发展还是大气污染,都存在空间溢出效应。因此本文首先采用全局 Moran's I 指数检验长江经济带大气污染空间集聚特征。计算公式如式(1)所示。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

其中, I 表示全局 Moran's I 指数; n 表示长江经济带 130 个城市数量; w_{ij} 表示空间权重矩阵; x_i 和 \bar{x} 分别表示第 i 个城市的大气污染程度值和所有城市的大气污染程度值均值。 I 的取值范围是 $[-1, 1]$, I 大于 0 表示长江经济带各城市间的大气污染呈现正的相关关系,大气污染程度较高的城市的邻近城市的大气污染程度也较高,或者大气污染程度较低的城市邻近城市的大气污染程度也较低, I 越接近 1 表示正相关程度越强; I 小于 0 表示大气污染呈现负的相关关系,大气污染程度值较高的城市的邻近城市的大气污染程度较低,或者大气污染程度较低的城市邻近城市的大气污染程度较高, I 越接近 -1 表示负相关程度越强。

一般使用 Z 指数对全局 Moran's I 结果的显著性进行检验。 Z 指数的计算公式如式(2)所示。

$$Z = \frac{\text{Moran's } I - E(I)}{\sqrt{\text{VAR}(I)}} \quad (2)$$

其中, $E(I)$ 表示 Moran's I 的均值; $\text{VAR}(I)$ 表示 Moran's I 的方差。在不存在空间相关性的原假设下, Z 指数服从标准正态分布。

全局 Moran's I 虽然能够识别总体的相关程度,但是无法识别大气污染程度的极值区域,

即无法识别某城市在总样本中所占等级。因此,本部分运用 ArcGIS 10.2 软件中热点分析“Getis-Ord G_i^* ”测算大气污染的“热点”和“冷点”区域,分析大气污染的地理空间分布特征。计算公式如式(3)所示。

$$G_i = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n x_i x_j} \quad (3)$$

其中, G_i 表示大气污染程度局部统计量。本部分将 G_i 指数分为6个等级,对应的城市分别是“高热点区”“中热点区”“低热点区”“低冷点区”“中冷点区”和“高冷点区”, n 表示长江经济带130个城市数量; w_{ij} 表示空间权重矩阵; x_i 和 x_j 分别表示第 i 个城市和第 j 个城市的大气污染程度。

2. 空间计量模型

随着区域间的交通和合作的便利,本地区的政策、经济发展等逐渐对周边也会产生影响,尤其是大气污染的空间溢出效应增强了区域间的相关程度,因此本文使用空间计量模型研究大气污染非对称性问题。为了更深入地验证空间溢出效应是大气污染非对称性的主要原因,本部分构造仅包含大气污染 EP 的空间滞后项 $\sum_{j=1}^N w_{ij} EP_{jt}$ 作为邻近城市的大气污染程度,通过分析滞后项的系数研究大气污染的空间溢出效应。同时,由于大气污染存在粘性特征,因此在模型中添加大气污染的时间滞后项验证大气污染事件粘性的存在性(李婧等,2010;孙宇、刘海滨,2020;刘贤赵等,2021)。大气污染的空间转移模型如式(4)所示。

$$EP_{it} = \alpha_1 EP_{i,t-1} + \alpha_2 \sum_{j=1}^N w_{ij} EP_{jt} + \alpha_3 \sum_{j=1}^N w_{ij} EP_{j,t-1} + \beta X_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

其中, EP_{it} 表示第 i 城市第 t 年的大气污染程度, $EP_{i,t-1}$ 表示第 i 城市第 $t-1$ 年的大气污染程度; $\sum_{j=1}^N w_{ij} EP_{jt}$ 表示第 i 城市第 t 年邻近城市的大气污染程度,同理, $\sum_{j=1}^N w_{ij} EP_{j,t-1}$ 表示第 i 城市第 $t-1$ 年邻近城市的大气污染程度。 α_1 为大气污染事件粘性的估计参数, α_2 表示大气污染空间流动强度的估计值, α_3 是大气污染时空粘性的估计值,表示该城市受邻近城市上一年的大气污染程度的影响。 w_{ij} 是空间权重矩阵中的元素, N 表示城市的个数, X_{it} 表示城市层面的控制变量, μ_i 和 v_t 分别表示城市固定效应和时间固定效应。 ε_{it} 表示误差项。

在空间计量的众多模型中,空间杜宾模型不仅度量了因变量的空间滞后项对因变量的影响,同时也考虑了自变量的空间滞后项对因变量的影响情况,计算结果较为全面。Elhorst (2014)认为空间滞后模型和空间自回归模型的结果都包含在空间杜宾模型中,空间杜宾模型的分析更为全面,不仅包含因变量的空间滞后项,而且还包含自变量的空间滞

后项,是最佳的空间计量模型。因此,本文采用的空间计量模型为空间杜宾模型,如式(5)所示。

$$inequal_{it} = \alpha \sum_{j=1}^N w_{ij} inequal_{it} + \beta_1 ef_{it} + \beta_2 \sum_{j=1}^N w_{ij} ef_{jt} + X_{it} \theta + \mu_i + \eta_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

其中, $inequal_{it}$ 表示大气污染非对称性,该数值越大,表明非对称性越强。 ef_{it} 表示影响因素,本部分分别表示排放端影响因素的SO₂程度和治理端影响因素的环境规制程度。 $\sum w_{ij} ef_{jt}$ 表示邻近城市的其他因素, β_2 表示邻近城市的其他因素对本城市大气污染非对称性的影响程度。

大气污染非对称性不仅抑制了治理效果,而且还对经济增长存在影响,大气污染非对称性带来的经济问题是最值得关注的问题。为了测度长江经济带大气污染非对称性的经济影响,本部分构造包含大气污染非对称性空间滞后项的空间杜宾模型,如式(6)所示。

$$pgdp_{it} = \alpha + \beta_1 inequal_{it} + \beta_2 \sum_{j=1}^N w_{ij} inequal_{jt} + X_{it} \theta + \mu_i + \eta_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

其中, $pgdp_{it}$ 表示经济发展程度,并且在控制变量中剔除人均国内生产总值变量。

(二)变量选取与数据来源

1. 研究区域

长江经济带中的地级市数量在2011年前都在不断的变化,有部分城市逐渐被设为地级市,也有部分地级市被取消。其中,2007年经国务院批准成立的普洱市为地级市,2011年经国务院批准成立的毕节市和铜仁市为地级市,巢湖市于2011年调整为县级市,划归合肥市代管。因此,为了更完整地研究长江经济带所有区域,研究时间起始点为2011年。本文的主要研究内容是城市间大气污染区域协同治理关系,删除部分城市会导致关联特征中断,影响最终的研究结果。因此,将研究单元设置为长江经济带所有的地级及以上城市,包括110个地级市、16个自治州、3个省直辖市和1个林区,研究数据时间选择2011—2019年。研究区域覆盖长江经济带全部地区,不存在非样本区域,更能够深入研究大气污染区域协同治理问题。

2. 大气污染程度

人们对于大气环境质量最为关注的莫过于雾霾污染,雾霾治理是打好污染防治的第一要务,而PM_{2.5}是其最主要的成分。2012年中国政府出台了新的环境空气质量标准(GB 3095-2012),首次将PM_{2.5}列为常规关键监测指标,PM_{2.5}成为中国大气污染防治的重点,是我国主要的大气污染物(Ravishankara et al., 2020),也是国际大气环境研究的热点之一(周亮等, 2017)。而且高浓度PM_{2.5}是形成雾霾的主要原因之一,科学识别PM_{2.5}浓度的空间异质性与驱动因素对区域大气联动治理意义重大。而且PM_{2.5}悬浮在空气中,不仅受到污染排放地的影响,由于自然因素等的影响,还受空间流动的影响,是最能够表示大气环境质量的污染物,因

此,将 $PM_{2.5}$ 作为雾霾污染的代表污染物。

在众多大气污染排放物中, SO_2 不仅是大气污染治理的主要目标物,而且严重影响了公众的身体健康。自2005年以来,中国成为全球 SO_2 排放量最大的国家(任胜钢等,2019), SO_2 污染比较严峻,我国早在1995年8月29日第一次修正的《中华人民共和国大气污染防治法》提出了划分酸雨控制区和二氧化硫污染控制区(两控区)的政策。因此, SO_2 污染不仅是政府部门重要的治理目标,而且是最受关注的废气排放污染物,本文将 SO_2 作为废气排放污染的代表污染物。

虽然在空气质量指数中还对 CO 、 NO_2 和 O_3 的浓度进行了统计,但是由于其与 $PM_{2.5}$ 同根同源,且其化学性质不稳定,在空气中易受氧化等的干扰导致无法对其精准统计,尤其是 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染具有同源性,呈高度非线性关系(Wang et al.,2017),物理化学过程又密切相关(陈楠等,2022;姜华等,2022),并受 NO_x 、 $VOCs$ 、 $HONO$ 、 NH_3 以及人为氯等排放的多种外界环境因素的影响(张涵等,2022)。而 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的数据离散性与浓度变化规律一致,而且年均值在空间分布上的变化规律基本一致。与此同时,AQI将 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 CO 和 O_3 这6项污染物用统一的评价标准呈现,结果仅表示城市的短期空气质量状况和变化趋势,无法分析其数值变化的来源。

本文选用的 $PM_{2.5}$ 数据来自达尔豪斯大学大气成分分析组, SO_2 数据为工业 SO_2 排放量。彭智敏和向念(2019)在研究汉江生态经济带工业二氧化硫排放影响因素时提出,第二产业是 SO_2 排放量的主要来源,而第二产业中以工业为主。因此,使用工业 SO_2 排放量的计算结果可以从污染源的角度对大气污染排放量进行度量(Qian et al.,2021)。但是本文研究区域为长江经济带市级的城市,其中包括地级市、省直辖市和自治州等,其中省直辖市和自治州的工业 SO_2 排放数据严重缺失,研究数据不完整。为了弥补自治州和省直辖市的工业 SO_2 排放数据的缺失,本文选择各城市的工业增加值在全省的占比乘以所在省份的工业 SO_2 排放量表示各城市的工业 SO_2 排放量。

关于工业增加值和工业 SO_2 排放量之间的关系,相关研究发现两者存在密切的相关关系。Jiang等(2020)通过研究中国270个地级市 SO_2 污染的社会经济影响因素发现,工业增加值占比与 SO_2 污染呈现显著的正向相关关系,工业是 SO_2 污染的重要来源。Xu等(2021)也通过对工业 SO_2 排放的影响因素分析发现,工业增加值占比对 SO_2 排放有显著的正向影响。因此,工业增加值与 SO_2 排放有显著的正向相关关系,基于各城市工业增加值计算的 SO_2 排放程度能够表示各城市的废气排放程度。工业增加值数据和省级工业 SO_2 排放量数据来源于各省、市、州的统计年鉴或统计公报。

3. 大气污染非对称性

大气污染非对称性是城市雾霾污染和废气排放污染之间的关系,一方面是对城市大气污

染过程的分解,根据我国《大气污染防治法》对大气污染防治目标,测度了城市大气污染排放和受影响之间的差异性;另一方面解释了大气污染治理的复杂性,包括策略性行为、“搭便车”倾向和相互“模仿”行为等。因此,将大气污染非对称性定义为城市大气污染排放和受污染影响的非一致性。大气污染非对称性的测度主要是城市雾霾污染和废气排放污染之间差值,但是由于两类大气污染的测度标准、测度单位等的差异,无法对其直接进行计算。为了突出城市间大气污染程度的差异性和不同种类大气污染程度的差异性,首先分别对两种城市大气污染程度进行有序度测算,如式(7)所示。

$$AP_{it}^s = \frac{EP_{it}^s - \alpha_{it}^s}{\beta_{it}^s - \alpha_{it}^s} \quad (7)$$

其中, AP_{it}^s 表示城市 i 第 t 年的大气污染有序度值; s 表示大气污染种类, $s=1$ 表示雾霾污染种类, $s=2$ 表示废气排放污染种类, β_{it} 和 α_{it} 分别表示城市 i 第 t 年对其他城市的序参量的上限和下限。

将处理后的两类大气污染之间的差值作为大气污染非对称性程度,如式(8)所示。

$$inequal_{it} = AP_{it}^1 - AP_{it}^2 \quad (8)$$

4. 环境规制程度

本部分参考董直庆和王辉(2019)的测算方法,通过计算各城市各类污染物排放的综合指数来衡量环境规制程度。首先将各城市单位污染物排放标准化, $DE_{it}^s = [DE_{it} - \min(DE_i)] / [\max(DE_i) - \min(DE_i)]$ 。其中, DE_{it} 为第 i 城市第 t 年污染物的实际排放, $\max(DE_i)$ 与 $\min(DE_i)$ 分别为第 i 城市污染物的最大排放量和最小排放量, DE_{it}^s 为第 i 城市第 t 年污染物标准化后的值。其次设定调整参数。由于不同城市的污染物排放比重与程度相差较大,因此使用调整参数反映各城市污染的差异,计算公式为: $DR_{it} = DE_{it} / GDP_{it}$ 。 GDP_{it} 表示第 i 城市第 t 年的地区生产总值, DR_{it} 为第 i 城市第 t 年污染物的单位排放平均水平。最后各城市环境规制程度为 $ER_{it} = DR_{it} DE_{it}^s$ 。其中,以大气污染排放程度表征的环境规制程度,根据计算方法可知,排污量越大,则该指标的数值越大。大气污染排放程度的数值越大,该城市的环境规制程度越弱;反之,则说明该城市的环境规制程度越强。因此,根据指标背景的解释可知,本部分构建的环境规制程度变量是负向指标,环境规制的强弱与治污效果呈负相关关系,数值越大,环境规制程度越弱,治污效果越差;反之,环境规制程度越强,治污效果越强。

5. 控制变量

参考相关文献(沈坤荣等,2017;金刚、沈坤荣,2018),在回归中加入其他控制变量。包括:经济发展水平($pgdp$)、失业率($unemploy$)、产业结构($struc$)、对外开放程度($opene$)、

对内开放程度(*openi*)、财政分权程度(*fiscal*)、人口密度(*density*)、职工平均工资(*wage*)和政府支出规模(*scale*)。数据指标如表1所示。

表1 控制变量选取与度量方式

指标	简称	度量方式
经济发展水平	<i>pgdp</i>	人均GDP的对数
产业结构	<i>struc</i>	第二产业产值占城市生产总值的比重
对外开放程度	<i>opene</i>	城市实际利用外商直接投资占GDP总额的比重
对内开放程度	<i>openi</i>	城市社会消费品零售总额占GDP总额的比重
财政分权程度	<i>fiscal</i>	城市本级预算内财政收入占本级预算内财政总支出的比重
人口密度	<i>density</i>	年末总人口与行政区域面积的比值
失业率	<i>unemp</i>	城镇登记失业人员占单位从业人员的比重
平均工资	<i>wage</i>	职工平均工资对数值
支出规模	<i>scale</i>	政府支出/城市GDP

6. 空间权重矩阵

空间权重矩阵表示城市在空间中的关系,比如邻近关系和非邻近关系。一般对城市在空间上的关系刻画方法通常采用地理为主的邻近、经济距离的邻近和地理距离的邻近等,也有通过经济和距离邻近的混合邻近关系。本文研究的对象是大气污染,而大气污染的空间转移路径比较简单,主要以地理为主,而大气污染程度也会存在经济上的相关性。因此,参考相关研究(金刚、沈坤荣,2018;董直庆、王辉,2019),主要选择3种空间权重矩阵刻画邻近城市。第一,Queen型0-1邻接矩阵(WQ)。当城市*i*与城市*j*边界相邻时, w_{ij} 等于1;当城市*i*与城市*j*不相邻时, w_{ij} 等于0。由于本文所使用的数据无缺失,覆盖长江经济带130个城市,因此使用空间邻近权重矩阵比较有意义。第二,经济距离权重矩阵(WE)。 $w_{ij} = 1/|pgdp_i - pgdp_j + 1|$,其中 $pgdp$ 表示人均GDP。第三,地理距离权重矩阵(WD)。 w_{ij} 等于城市*i*与*j*之间直线距离的倒数。与0-1型矩阵相比,经济距离权重矩阵和地理距离权重矩阵假定任何城市间都可能存在互动行为,只是距离更近或经济水平相近的城市具有更为明显的互动行为。为了使得空间滞后项具有加权平均的含义,上述3种矩阵均进行了行标准化处理,并且设定对角线元素为0。

所有价格型变量均为当年价,为消除通货膨胀对数据的影响,采用地级市层面GDP指数进行平减处理,基期为2011年。GDP指数来源于《中国区域经济统计年鉴》和《中国统计年鉴》。实际利用外商直接投资经汇率调整为以人民币计价,汇率来自于国家统计局网站。PM_{2.5}数据来自达尔豪斯大学大气成分分析组,工业增加值数据和省级工业SO₂排放量数据来源于各省、市、州的统计年鉴或统计公报,其他数据来源于城市统计年鉴和各城市统计公报。

为了减少异方差和数量级的不一致,对部分变量进行对数处理。

四、大气污染非对称性识别

(一)大气污染空间集聚特征

上文分析了长江经济带大气污染的空间分布特征,研究发现长江经济带大气污染存在空间集聚特征,同等污染程度的城市在空间上相邻。但是上文的空間集聚特征仅表现为污染等级的空间集聚,未能准确测度大气污染程度在空间上的集聚程度。而某一城市的大气污染不仅来源于该城市的废气排放污染,而且由于自然环境等因素对大气污染空间流动的影响,使其受到周边城市污染的空间影响,导致雾霾污染在空间上呈现较强集聚。相对于雾霾污染,废气排放污染仅受该城市的经济发展、产业程度等影响,不受自然因素的影响,其空间集聚程度将低于雾霾污染。本部分利用 ArcGIS 软件基于式(3)识别长江经济带 130 个城市的雾霾污染和废气排放污染的热点和冷点的空间聚类,如表 2 所示。

表 2 大气污染冷热点空间分布特征

年份	类别	雾霾污染	废气排放污染
2011	中高冷点区	甘孜、迪庆、凉山、怒江、丽江、攀枝花、大理、楚雄、昆明、临沧、玉溪、普洱、红河、德宏、保山	大理
	中高热点区	资阳、眉山、内江、自贡、随州、荆门、孝感、天门、武汉、潜江、仙桃、荆州、咸宁、黄石、鄂州、黄冈、益阳、宿州、淮北、蚌埠、亳州、淮南、滁州	泰州、南通、无锡、常州、苏州、上海、湖州、嘉兴、宣城
2015	中高冷点区	甘孜、迪庆、凉山、怒江、丽江、攀枝花、大理、楚雄、昆明、临沧、玉溪、普洱、红河、保山、曲靖	怀化、甘孜、迪庆、丽江、大理
	中高热点区	随州、荆门、孝感、天门、武汉、潜江、仙桃、荆州、咸宁、黄石、鄂州、黄冈、六安、阜阳、合肥、淮北、蚌埠、亳州、宿州、徐州、宿迁、滁州、淮南、南京、马鞍山、芜湖、宣城、常州、镇江、无锡、苏州、泰州、盐城、连云港、淮安	泰州、南通、镇江、无锡、常州、苏州、上海、宣城、湖州、嘉兴、宁波
2019	中高冷点区	甘孜、迪庆、凉山、怒江、丽江、攀枝花、大理、楚雄、昆明、临沧、玉溪、普洱、红河、保山、曲靖	怀化
	中高热点区	荆门、孝感、天门、仙桃、荆州、潜江、武汉、黄冈、安庆、六安、阜阳、淮南、亳州、淮北、蚌埠、宿州、徐州、连云港、宿迁、淮安、扬州、泰州、镇江、南京、马鞍山、常州、芜湖	宜春、扬州、泰州、南通、镇江、南京、马鞍山、常州、无锡、苏州、上海、宣城、湖州

长江经济带大气污染的冷热点区域分布存在显著的差异性。雾霾污染的热点区主要分布在东北部城市,如皖北、长江中游城市群北部等地区,冷点主要分布在西部城市,如川西、滇西南、贵南和浙南等地区;但废气排放污染的热点区主要分布在长三角地区等较少城市,冷点区主要集中在川西等少量地区,分布比较分散。对比雾霾污染和废气

排放污染的冷热点的分布状况,考虑大气污染空间转移因素可知,长江中游城市群中武汉及其周边城市是雾霾污染的热点区域,但不是废气排放污染的热点区域,说明该地区的大气污染受其他地区的废气排放污染的影响。上海和苏东南及邻近地区是长三角地区废气排放污染的热点区域,但不属于雾霾污染的热点区域,因此可以判断该地区的大气污染向皖西北地区扩散,导致皖西北地区成为雾霾污染热点区。而长江上游部分城市处于连片的雾霾污染冷点区域,但是并不对应废气排放污染冷点区,由此可知,虽然长江上游城市的雾霾污染较轻,环境表现较优,但是仍然存在废气排放污染严重的地区,由于大气污染的空间转移特征,污染源产出的污染转移到了其他地区。

通过对比雾霾污染和废气排放污染冷热点空间分布的时间变化,雾霾污染的热点逐渐向长三角北部城市集聚,冷点逐渐向长江经济带西部城市集聚。以2011年的冷热点空间分布为例,热点主要分布于三个区域,分别是四川的内江及其周边、湖北的武汉及其周边和安徽的蚌埠及其周边;冷点主要分布于浙江的温州及其周边和长江经济带的西部城市两个区域。随着时间的变化,长江经济带雾霾污染的热点主要分布于湖北的武汉及其周边和安徽的蚌埠及其周边两个区域,而且安徽的蚌埠及其周边的热点等级更高;冷点区分布于除长江经济带的西部城市外,仅分布于浙江的丽水和台州两个城市,而且冷点等级为低冷点区。而废气排放污染的冷热点空间分布随时间的变化较小,热点主要分布于上海及其周边城市,随着时间变化逐渐向西南扩散,但是扩散速度较低,除上海及其周边城市向外扩散,其中江西的宜春在2019年成为热点区。而冷点区主要集中于长江经济带西部城市,但是随时间的变化,冷点区逐渐由长江经济带西部城市扩散到长江中游的城市,其中怀化及其周边城市在2019年成为冷点区,而且怀化为中冷点区。通过对比分析长江经济带大气污染冷热点空间分布随时间的变化结果可知,雾霾污染在空间上随时间变化的轨迹是向东北转移,废气排放污染在空间上随时间变化的轨迹是向西转移。

(二)大气污染空间分布特征演变

通过对长江经济带大气污染的空间集聚特征的分析结果,初步发现长江经济带雾霾污染和废气排放污染在空间上的变化轨迹特征,然后对2011—2019年长江经济带雾霾污染和废气排放污染的重心迁移轨迹进行可视化分析,如图1所示。

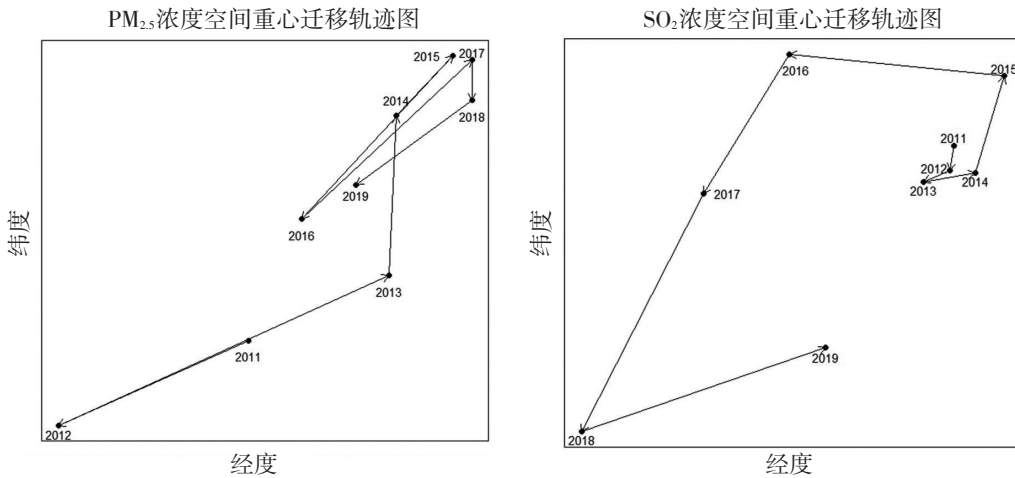


图1 大气污染重心迁移轨迹特征

长江经济带雾霾污染和废气排放污染的空间变化轨迹分别呈现“北进南退”和“南进北退”的特征。湖北省内的潜江、仙桃和荆州是雾霾污染的重心轨迹经过的城市,而废气排放污染的重心轨迹主要在湖南省的常德市。整体而言,无论是雾霾污染还是废气排放污染,污染程度总重心偏东,并向东北倾斜,长江经济带东北地区的雾霾污染程度比西南地区严重。而长江经济带雾霾污染与废气排放污染重心转移轨迹相反,雾霾污染的重心转移轨迹呈“北进南退”特征,废气排放污染的重心转移轨迹呈“南进北退”特征。重心轨迹显示,雾霾污染期初受川渝经济圈和长江中游经济圈影响较大,期末受皖北地区大气污染的牵引影响明显。废气排放污染期初受长三角地区影响较大,期末由于长江东部城市环境规制的有效执行,导致东部的废气排放污染治理效果显著强于其他地区。除了经济社会因素、政府调控、自然地理因素外,雾霾污染也受到空间外溢效应的影响。据此初步判断,长江经济带大气污染东北地区的降污效率高于西北地区,同时大气污染从西南向东北外溢。

五、大气污染非对称性机制分析

上文通过对大气污染在“地-空”的时空演变特征的对比分析发现了大气污染具有非对称性特征,主要表现在大气污染排放程度与受大气污染影响程度的非一致性,导致大气污染排放地严重的城市受大气污染的影响程度并不一定强,反之受大气污染影响严重的城市的废气排放污染程度不一定强。大气污染非对称性特征一方面解释了当前“属地”治污低效性的原因。由于大气污染非对称性的存在,导致地方政府更倾向于享受邻近城市的治污成果,呈现“搭便车”等行为,抑制了治污政策的制定和执行程度,形成相互推诿的治污责任,不利于大气

污染的高效治理。另一方面为大气污染高效治污提供了方向。大气污染非对称性增强了中央政府对大气污染治理的认识程度,为更高效的区域治污和联防联控治污政策的出台提供重要的参考,以高效地治理大气污染问题。

本部分将分别从大气污染的排放端和治理端两个方面讨论其对大气污染的影响。大气污染的排放端是大气污染的根源,而讨论大气污染排放端与大气污染非对称性的关系,一方面是分析当前大气污染的空间转移程度,大气污染排放对大气污染非对称性的影响程度越强,说明大气污染空间流动程度越强,也说明了当前的治污效率不足,无法对大气污染实现较高效率的治理。另一方面是更深入地分析大气污染非对称性的弊端,进一步说明大气污染排放程度和受大气污染影响程度的非对称性。大气污染的治理端关乎着能否抑制大气污染非对称性,促进大气污染的高效治理。环境规制的实施能够有效抑制大气污染程度,但是能否减弱大气污染非对称性,是地方政府更关注的问题。如果环境规制能够抑制大气污染非对称性,则为环境规制的实施提供了参考,促使大气污染非对称性的城市增强环境规制程度,反之,则解释了当前环境规制治污低效率和地方政府“搭便车”行为的原因,为中央政府制定更有效的治污政策提供参考。

(一)大气污染非对称性的形成机制

大气污染非对称性的表现形式是大气污染排放程度和受大气污染影响程度的非对称性,究其原因是由于大气污染的空间流动特征导致大气污染从污染排放地转移到了邻近地区,减弱了污染排放地受大气污染的影响程度,增强了其邻近城市受大气污染的影响程度。最终该城市的污染排放程度大于受污染影响程度,而其邻近城市的污染排放程度小于受污染影响程度。根据非对称性的含义,则该地区的大气污染呈现负的非对称性,而其邻近城市呈现正的非对称性。因此,大气污染的空间转移是大气污染非对称性形成的最主要原因。

大气污染非对称性的形成主要是由于雾霾污染程度和废气排放污染程度的差异性,对经济发展等有较大的影响,导致一系列社会问题,如“搭便车”等问题(金刚、沈坤荣, 2018; Currie et al., 2023)。参考相关研究可知(沈坤荣等, 2017),大气污染具有显著的空间流动特征,而雾霾污染和废气排放污染的流动性差异是导致大气污染非对称性的主要原因(Sun et al., 2022)。上文通过分析长江经济带大气污染时空演变趋势发现雾霾污染和废气排放污染在空间上呈现非对称特征,雾霾污染严重的城市的废气排放污染程度不一定强,而废气排放污染严重的城市的雾霾污染程度不一定强,研究发现长江经济带大气污染非对称性特征。为了验证这一结论,本部分首先分别对比分析了雾霾污染和废气排放污染的空间溢出程度,如果两种污染的空间溢出程度存在较大差异,则说明空间溢出效应是

大气污染非对称性的主要形成原因。基于 Moran's I 和 Z 统计量计算方法对长江经济带 130 个城市 PM_{2.5} 和废气排放污染程度进行空间自相关性检验,结果如表 3 所示。

表 3 大气污染程度的全局莫兰指数变化

年份	PM _{2.5}			SO ₂		
	Moran's I	Z 统计量	P 值	Moran's I	Z 统计量	P 值
2011	0.707	13.334	<0.001	0.063	2.321	0.020
2012	0.688	13.001	<0.001	0.057	2.114	0.003
2013	0.722	13.594	<0.001	0.048	1.847	0.065
2014	0.755	14.215	<0.001	0.039	1.566	0.117
2015	0.771	14.505	<0.001	0.026	1.131	0.258
2016	0.733	13.821	<0.001	0.147	4.661	<0.001
2017	0.759	14.306	<0.001	0.093	3.077	0.002
2018	0.768	14.465	<0.001	0.100	3.261	0.001
2019	0.728	13.5727	<0.001	0.086	2.858	0.004

大气污染程度具有显著的空间集聚与空间依赖特征。无论是雾霾污染还是废气排放污染,大气污染程度的全局 Moran's I 均显著为正,而且总体上呈现上升趋势,表明长江经济带大气污染呈现空间集聚特征,污染程度相似的城市相邻且相互影响。与此同时,这种空间集聚和空间依赖性的特征也呈增强的趋势,长江经济带大气污染“集群化”特征明显。雾霾污染和废气排放污染的空间集聚程度差异明显。无论是雾霾污染还是废气排放污染,两种大气污染的全局 Moran's I 都显著为正。但是雾霾污染的全局 Moran's I 介于 0.688~0.768 之间,废气排放污染的全局 Moran's I 介于 0.026~0.147 之间,说明雾霾污染的空间集聚程度显著强于废气排放污染,也证实了雾霾污染的空间流动性强的特征。

首先研究长江经济带大气污染空间集聚特征,验证长江经济带大气污染的空间溢出效应。根据表 3 中长江经济带大气污染程度的全局 Moran's I 变化情况可知,长江经济带大气污染在空间上呈现显著的空间集聚特征,满足空间计量模型的应用前提。而且大气污染的空间相关性呈现随时间逐渐增强趋势,雾霾污染的空间相关性更强,雾霾污染的空间流动性较强。为了测度长江经济带大气污染的空间关联程度,分别测算了雾霾污染和废气排放污染在三种空间权重矩阵下的空间关系,如表 4 所示。

表4 大气污染时空影响特征

变量	PM _{2.5}			SO ₂		
	WQ	WE	WD	WQ	WE	WD
EP_{t-1}	0.471*** (4.596)	0.447*** (7.952)	0.631*** (10.575)	1.070*** (25.810)	0.979*** (26.803)	0.921*** (25.288)
$W \times EP_{t-1}$	-0.415*** (-3.281)	0.006* (1.949)	0.563*** (3.516)	-0.950*** (-18.487)	-0.769*** (-10.706)	-0.795*** (-15.777)
$W \times EP$	0.827*** (45.318)	0.517*** (12.432)	-0.317 (1.434)	0.892*** (57.454)	0.803*** (20.276)	0.922*** (58.194)
控制变量	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是
R ²	0.991	0.975	0.981	0.992	0.984	0.984
Log L	1525.029	1130.025	1216.318	785.917	463.820	462.288

注:括号内为t值,*、**、***分别代表在10%、5%和1%显著性水平下显著。下表同。

大气污染呈现显著的空间集聚特征,大气污染在空间上存在空间转移特征。根据表4中 $W \times EP$ 的系数可知,无论是雾霾污染,还是废气排放污染,长江经济带大气污染呈现污染集聚特征。大气污染受到邻近城市显著正向相关影响,大气污染呈现由邻近城市向中心城市显著集聚的特征,同时验证了本文的数据适合使用空间计量经济分析方法。但是雾霾污染在地理距离邻近空间上不显著,说明雾霾污染仅在地理位置邻近和经济水平邻近的空间路径上呈现空间聚类特征,但与长距离城市的雾霾污染的相关性不显著,符合雾霾污染的空间转移特征。而地理位置邻近是雾霾污染集聚的最强路径,地理距离邻近是废气排放污染集聚的最强路径。

大气污染程度逐年增强,呈现显著时间粘性的特征。表4中不同污染类型的时间滞后项 EP_{t-1} 的系数都显著为正,说明大气污染程度逐年增强,而且呈现显著的时间粘性特征,本年的大气污染程度受上一年的大气污染程度的影响。大气污染作为经济发展的产物,随着经济的高质量发展,虽然环境规制程度不断加强,但是大气污染程度平均水平没有明显改善,而且受上一年的大气污染程度的影响,在时间上呈现粘性特征。其中雾霾污染以0.447~0.631的倍速增强,废气排放污染则以0.921~1.070的倍速增强。长江经济带大气污染程度不仅受城市经济发展、环境保护政策等的影响,而且还与上一年的大气污染程度密切相关,导致大气污染无法发生质的改变。对比雾霾污染和废气排放污染的粘性程度发现,废气排放污染粘性显著强于雾霾污染。雾霾污染的时间粘性不仅表现在经济发展的基础设施,而且受自然因素影响较大,因此,雾霾污染的时间粘性更具有不确定性。而废气排放污染的时间粘性与城市的经济发展、基础结构等息息

相关。虽然中国将高质量发展作为经济发展目标,并加强了大气污染治理程度,但是城市的基础建设、产业结构的调整并非一朝一夕可以转变,需要循序渐进地优化。虽然城市发展产生的大气污染副产物的流量逐渐得到控制,由于存量较大,流量的控制无法对存量造成质的影响,最终导致废气排放污染的时间粘性显著大于雾霾污染。

大气污染在空间上呈现显著的溢出效应。一个城市的大气污染能够通过大气流动对邻近城市产生影响,还能够通过经济外溢路径呈现空间溢出效应,增强了大气污染空间集聚程度。但是雾霾污染和废气排放污染在空间上存在差异化的空间溢出效应,导致了大气污染非对称性特征。雾霾污染基于大气流动在空间上呈现空间转移特征,空间流动性较强;而废气排放污染在空间上的溢出主要基于经济发展的外溢,空间流动性较弱,两种大气污染的差异化空间流动性导致了大气污染非对称性。

(二)大气污染非对称性的作用机制

上文研究发现长江经济带大气污染存在非对称性特征,即大气污染排放和受污染程度存在差异。而大气污染非对称性主要影响当地政府的的行为,与大气污染治理相关的政府行为主要是环境治理成本,即经济行为。如果不存在大气污染非对称性,该城市排放的大气污染通过空间转移到其他城市,则该城市会降低大气污染的治理成本,将更多的公共资源投向经济发展中,反之则由于中央政府和群众的监督,导致不得不加大环境治理的力度,进而耗费更多的公共资源,减弱了经济发展程度。本部分首先对雾霾污染和废气排放污染按照年份进行标准化处理,然后定义雾霾污染和废气排放污染之间的差值为大气污染非对称性程度,数值越大,表明非对称性程度越强,并且还将大气污染非对称性按照其值的正负性划分为正非对称性和负非对称性。其中,正非对称性表明本地区的雾霾污染程度显著强于废气排放污染,在大气污染问题中处于非对称性的一方;而负非对称性表明本地区的雾霾污染程度显著弱于废气排放污染,在大气污染问题中处于负非对称性的一方,该地区不存在非对称性问题。大气污染非对称性的统计描述如表5所示。

表5 大气污染非对称性数据的统计特征

变量	均值	最大值	最小值	标准差
非对称性	37.392	92.334	-46.033	24.859
正非对称性	40.806	92.334	0.198	21.280
负非对称性	-17.693	-0.560	-46.033	13.817

大气污染非对称性不仅抑制了治理效果,而且还对经济增长存在影响,大气污染非对称性带来的经济问题是最值得关注的问题。结果如表6所示。

表6 大气污染非对称性的经济影响

变量	经济发展		
	WQ	WE	WD
<i>inequal</i>	-0.004*** (-8.582)	-0.002*** (-6.418)	-0.002*** (-4.841)
<i>W × inequal</i>	0.004*** (5.305)	0.001 (0.278)	0.001 (0.128)
<i>W × pgdp</i>	0.466*** (15.193)	0.279*** (6.194)	-0.663*** (-5.391)
控制变量	是	是	是
时间固定效应	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
R ²	0.981	0.978	0.978
Log L	1324.746	1252.118	1249.371

大气污染非对称性抑制了地方经济的发展。大气污染非对称性对经济发展呈现显著为负的影响,随着大气污染非对称性的加剧,阻碍了本地区的经济发展。大气污染非对称性表明本地区受到外来污染的影响,呈现大气污染净流入的现状。而在面临更严重的大气污染时,仅实施符合本地区污染排放治理的环境规制程度已经不满足规定的治污效果,当地政府不得不增强更多的大气污染治理程度,采取增强环境规制程度、制定更多大气污染治理规章制度等措施治理额外的大气污染。而在增强大气污染治理程度的同时,虽然能够更有效地治理大气污染,但是却阻碍了当地的经济的发展。

大气污染非对称性增强了空间位置邻近城市的经济发展。通过表6大气污染非对称性的空间溢出效应测度结果发现,大气污染非对称性对经济发展在空间位置邻近的空间权重矩阵下存在正向溢出效应,说明大气污染非对称性能够增强邻近城市的经济发展。当一个城市的大气污染非对称性增强时,该城市实施或增强了更高效的环境规制,显著阻碍了该城市的经济发展。由于大气污染的空间溢出效应,根据整体性的假设,其他城市面临的大气污染将减少,间接地增强了其他城市的经济发展。对比三种空间关系发现,大气污染非对称性仅对地理位置邻近的城市存在显著的经济溢出效应,对地理距离邻近和经济邻近的城市的影响程度不显著。结合大气污染的空间转移特征和各城市参差不齐的面积,大气污染非对称性的经济外溢特征符合大气污染的空间转移路径。

大气污染非对称性会阻碍经济的发展。如果存在大气污染非对称性,降低了治污效率,占用更多的公共资源,最终影响了经济发展。但是这种影响是否存在异质性,比如对于负非对称性的城市,大气污染非对称性是否对该城市的经济有激励影响?本部分分别验证了正非对称性和负非对称性对经济的影响程度,如表7所示。

表7 大气污染非对称性异质性经济影响

变量	大气污染正非对称性			大气污染负非对称性		
	WQ	WE	WD	WQ	WE	WD
<i>inequal</i>	-0.037*** (-5.213)	-0.038*** (-5.478)	-0.031*** (-4.313)	0.017* (1.828)	0.019* (1.919)	0.019* (1.837)
<i>W × inequal</i>	0.011 (0.937)	-0.011 (-0.641)	0.068 (1.313)	0.023 (0.995)	0.033 (1.344)	-0.333* (-1.918)
<i>W × Y</i>	0.427*** (13.431)	0.275*** (6.088)	-0.609*** (-4.747)	0.427*** (13.442)	0.274*** (6.071)	-0.631*** (-5.095)
控制变量	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是
R ²	0.981	0.977	0.978	0.981	0.977	0.977
Log L	1301.035	1246.113	1247.672	1287.495	1232.296	1238.272

大气污染正非对称性对经济发展呈现显著的负向影响,但是大气污染负非对称性对经济发展呈现显著的正向影响。根据对大气污染正非对称性和负非对称性的定义,正非对称性表示该城市受大气污染流入程度较强,强于本城市排放的大气污染,而负非对称性表示该城市排放的大气污染通过空间流动的形式转移到其他城市,导致本城市所受的大气污染影响程度显著小于排放程度。根据表7的实证结果可知,大气污染正非对称性对经济发展呈现显著为负的影响,而大气污染负非对称性对经济发展呈现显著为正的影晌,虽然上文发现大气污染非对称性抑制了经济发展,但是该现象仅存在正非对称性的情形下,而针对大气污染负非对称性,非对称性反而促进了经济发展。该结果验证了上文针对大气污染非对称性机理的分析,即当一个城市的大气污染非对称性增强时,该城市实施或增强了更高效的环境规制,显著阻碍了该城市的经济发展。由于大气污染的空间溢出效应,根据整体性的假设,其他城市面临的大气污染将减少,间接地增强了其他城市的经济发展。

大气污染治理存在污染容易治理难的现象。对比大气污染正非对称性和负非对称性对经济发展的影响程度可知,正非对称性对经济发展的影响程度呈现2倍强于负非对称性。大气污染对经济发展的影响呈现非对称的程度。当某一城市存在大气污染非对称性现象时,该地区为了治理更多的大气污染导致的经济发展损失强于当该城市处于大气污染负非对称性现象时对经济发展促进程度的2倍。因此,大气污染治理存在污染容易治理难的现象,大气污染治理所导致的经济发展损失显著强于经济发展导致的大气污染损失。

(三)大气污染非对称性的影响机制

大气污染非对称性对政府行为有极强的影响,导致了“搭便车”和环境规制策略互动特征,严重抑制了大气污染的高效治理。大气污染非对称性抑制了地方政府对环境治理的积极

性,减弱了属地治理的效率,导致大气污染治理的低效性。为了进一步分析大气污染非对称性的特征,对大气污染非对称性的影响因素进行了研究。通过上文对大气污染非对称性的分析,本部分从排放端和治理端两个方面研究大气污染非对称性的影响因素。

1. 废气排放污染对大气污染非对称性的影响

虽然本文将大气污染划分为雾霾污染和废气排放污染两类污染,但是两类污染的本质是同一类大气污染的两种阶段。大气污染被作为生产过程中的副产物的排放阶段的程度称为废气排放污染程度,而大气污染被排放到大气后,随着大气的流动及物质的无规则运动,最终形成了城市大气环境质量,即环境治理污染程度。因此,雾霾污染和废气排放污染并非是并列关系,而是大气污染的两个不同的阶段。而雾霾污染的主要来源是废气排放污染,废气排放污染对雾霾污染具有显著的影响(刘华军等,2017)。但由于雾霾污染具有较强的空间流动性,导致大气污染非对称性。因此,废气排放污染是引起大气污染非对称性的主要原因。首先分析废气排放污染对雾霾污染的影响,验证了雾霾污染和废气排放污染之间的关系。其次,分析废气排放污染对大气污染非对称性的影响,对大气污染非对称性的影响因素进行讨论(表8)。

表8 废气排放污染对大气污染非对称性的影响

变量	PM _{2.5}			大气污染非对称性		
	WQ	WE	WD	WQ	WE	WD
SO ₂	0.082*** (5.847)	0.171*** (15.631)	0.168*** (9.463)	0.499 (1.122)	0.138* (1.720)	0.569*** (3.676)
W×SO ₂	-0.079*** (-5.475)	-0.188*** (-7.945)	0.191*** (7.627)	-0.432 (-0.945)	-0.409** (-2.385)	0.551*** (2.624)
W×Y	0.992*** (666.562)	0.164*** (3.325)	-1.281*** (-107.955)	0.672*** (27.368)	0.188*** (3.696)	-1.114*** (-23.716)
控制变量	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是
R ²	0.999	0.993	0.996	0.955	0.929	0.940
Log L	196.207	-1517.011	-1753.168	-3668.122	-3871.111	-3792.996

废气排放污染是大气污染非对称性的主要影响因素。首先,废气排放污染对雾霾污染的影响程度显著为正,废气排放污染程度越强,雾霾污染程度也会越强,两种污染之间存在密切关联。而雾霾污染可以视为废气排放污染的存量,废气排放污染则是增量,废气排放污染对雾霾污染具有主导作用,但是又存在差异,导致废气排放污染和雾霾污染呈现非对称性特征。而废气排放污染对大气污染非对称性的影响程度也显著为正,表示废气排放污染程度越强,大气污染非对称性越强,废气排放污染影响着大气污染非对称性的变化,是其主要的影

因素。

大气污染非对称性呈现空间差异化的溢出效应。通过对比表8中大气污染非对称性不同空间路径的溢出影响可知,大气污染非对称性在空间位置邻近和经济水平邻近的空间关系中呈现正向相关关系,但是在地理距离邻近的空间关系中呈现负向相关关系,与雾霾污染的空间关联特征一致。由于我国各城市的大小差异性和上文雾霾污染空间特征,雾霾污染的外溢最强路径是空间位置邻近的短距离流动,而且同等经济水平的外溢特征一致。而且大气污染呈现片状的分布特征,同一经济发展水平的城市也相邻,因此同一区域内的大气污染非对称性一致,且存在正相关关系。该结论也说明大气污染非对称性的城市较为分散。而由于大气污染的溢出受限于距离因素和大气污染呈现流动特征,因此远距离城市间的大气污染呈现此消彼长的关系,导致大气污染非对称性在空间距离邻近的城市间呈现显著为负的相关关系。因此,大气污染非对称性的空间溢出特征与大气污染流动路径、经济发展和距离有关。大气污染非对称性的空间相关关系也是以短距离为主,在长距离上呈现负向关系。

2. 环境规制对大气污染非对称性的影响

环境规制是治理大气污染最有效的措施之一,已经得到了众多学者和政府部门的验证和认可。那么环境规制能否改善大气污染非对称性程度?环境规制对大气污染非对称性的影响程度如表9所示。

表9 环境规制对大气污染非对称性的影响

变量	大气污染非对称性		
	WQ	WE	WD
<i>ER</i>	-1.618*** (-5.049)	-1.785*** (-5.451)	-2.129*** (-7.033)
<i>W</i> × <i>ER</i>	0.698 (1.533)	-1.487* (-1.651)	-4.961 (-1.252)
<i>W</i> × <i>inequal</i>	0.661*** (26.311)	0.181*** (3.551)	-1.123*** (-25.452)
控制变量	是	是	是
时间固定效应	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
R^2	0.956	0.931	0.942
Log L	-3653.737	-3856.098	-3774.586

环境规制不能有效抑制大气污染非对称性,反而对大气污染非对称性有促进效应。表9中环境规制对大气污染非对称性的影响呈现显著为负的相关关系,而环境规制是负向指标,表明环境规制不能有效抑制大气污染非对称性。环境规制能够有效治理大气污染问题,随着环境规制程度的增强,本地区的大气污染程度将减弱。但是根据本文研究发现大气污染可划分为废气排放污染和雾霾污染,而雾霾污染具有空间转移特征,因此环境规制对其的影响程

度较弱,主要抑制了废气排放污染。当一个地区增强环境规制时,会对废气排放污染呈现更有效的抑制作用,大幅地降低了废气排放污染程度,但是由于雾霾污染的空间流动特征,导致其他城市的雾霾污染流入到本地区,加剧了本地区的雾霾污染程度,进而增强了大气污染非对称性程度。因此,环境规制程度对大气污染非对称性的抑制效果不显著。

六、结论与启示

本文基于长江经济带130个城市2011—2019年大气污染数据,运用探索性空间分析方法和空间计量模型对比研究了长江经济带大气污染的时空特征及非对称性的机制特征。主要结果如下:(1)长江经济带大气污染空间集聚特征差异性较大,雾霾污染严重的城市逐渐向皖北、鄂中和川东转移,而废气排放污染严重的城市呈现点状分布特征。对比雾霾污染和废气排放污染空间分布特征发现,雾霾污染严重的城市并不都是废气排放污染严重的城市,同时,废气排放污染严重的城市不都是雾霾污染严重的城市,再次验证了雾霾污染和废气排放污染不一致特征和雾霾污染空间转移特征。(2)长江经济带大气污染在空间层面呈现显著的集聚特征,城市间的大气污染程度存在空间相关关系。同时,长江经济带大气污染程度的冷热点城市存在差异,研究发现长江中游城市群和皖东北地区是主要的雾霾污染被扩散范围。(3)长江经济带雾霾污染和废气排放污染重心迁移轨迹相反,雾霾污染程度重心轨迹呈现“北进南退”特征,废气排放污染程度重心轨迹呈现“南进北退”特征。(4)通过对大气污染非对称性机制分析发现,大气污染的空间溢出效应是大气污染非对称性形成的主要原因,而废气排放污染和环境规制是大气污染非对称性的主要影响因素,与此同时,大气污染非对称性阻碍了经济发展,而且呈现污染容易治理难的特征,但是环境规制能够有效抑制大气污染非对称性。

大气污染空间转移是导致大气污染非对称性产生的根源所在,也是导致地方政府治污行动力低效的原因。而雾霾污染和废气排放污染中心点的非对称性表明高污染排放城市与高污染城市表现为不一致特征。高污染排放城市的大气污染并不一定严重,而低污染排放城市的大气污染并不一定轻。地方政府面临区域性的大气污染时的低效治理促使协同治理的必要性。在同一大气污染程度下的城市通过联合协作的方式形成协同区域,由于面临的大气污染程度相同,各城市承担的责任也一致。基于大气污染程度的区域协同不仅能够增强各城市治污的积极性,而且还能够有效抑制大气污染因治理低效而外溢的风险,最终达到对大气污染的可持续、高效治理。长江经济带大气污染的非对称性表明同一大气污染程度区域内的城市存在着共同但有区别的责任,满足协同理论中开放性和非对称性的要求,验证了大气污染区域协同治理的必要性。

参考文献:

- [1] 蔡银寅,黄有光. 大气环境资源的时空异质性及其经济含义[J]. 环境经济研究,2021,6(01):93-119.
- [2] 陈楠,陈立,王莉莉,等. 2015—2020年湖北省PM_{2.5}和臭氧复合污染特征演变分析[J]. 环境科学研究,2022,35(03):659-672.
- [3] 刁贝娣,丁镭,成金华. 不同类型城市的PM_{2.5}健康风险及影响因素差异[J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(08):90-100.
- [4] 董直庆,王辉. 环境规制的“本地—邻地”绿色技术进步效应[J]. 中国工业经济,2019,(01):100-118.
- [5] 贺灿飞,毛熙彦,彭建. 环境经济地理研究的理论演进与展望[J]. 经济地理,2021,41(10):70-78.
- [6] 姜华,高健,李红,储王辉,柴发合. 我国大气污染协同防控理论框架初探[J]. 环境科学研究,2022,35(03):601-610.
- [7] 金刚,沈坤荣. 以邻为壑还是以邻为伴?——环境规制执行互动与城市生产率增长[J]. 管理世界,2018,34(12):43-55.
- [8] 李婧,谭清美,白俊红. 中国区域创新生产的空间计量分析——基于静态与动态空间面板模型的实证研究[J]. 管理世界,2010,202(07):43-55+65.
- [9] 刘华军,吉元梦. 大气污染全球不平等的时空格局与演进趋势[J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(06):39-44.
- [10] 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·资源与环境,2017,27(03):74-81.
- [11] 刘净然,范庆泉,储成君,潘文卿. 雾霾治理的经济基础:动态环境规制的适用性分析[J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(08):80-89.
- [12] 刘贤赵,杨旭,张国桥,王天浩. 碳排放空间依赖视角下环境分权的碳排放效应[J]. 地理科学,2021,41(09):1654-1666.
- [13] 彭智敏,向念. 空间溢出视角下汉江生态经济带地级市工业二氧化硫排放影响因素研究[J]. 生态经济,2019,35(11):182-187+193.
- [14] 任胜钢,郑晶晶,刘东华,陈晓红. 排污权交易机制是否提高了企业全要素生产率——来自中国上市公司的证据[J]. 中国工业经济,2019,(05):5-23.
- [15] 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,2016,51(09):73-88.
- [16] 沈坤荣,金刚,方娴. 环境规制引起了污染就近转移吗?[J]. 经济研究,2017,52(05):44-59.
- [17] 孙宇,刘海滨. 中国区域对外直接投资空间效应及影响因素研究——基于空间计量模型的实证考察[J]. 宏观经济研究,2020,60(07):138-152+164.
- [18] 王红梅,谢永乐,张驰,孙静. 动态空间视域下京津冀及周边地区大气污染的集聚演化特征与协同因素[J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(03):52-65.
- [19] 王焕顺,矫学成. 大气雾霾污染的原因与防治对策分析[J]. 环境污染与防治,2014,36(06):111.
- [20] 韦宝婧,胡希军,朱满乐,彭琳玉,徐凯恒. 基于CiteSpace的我国绿色生态网络研究热点与趋势[J]. 经济地理,2021,41(09):174-183.
- [21] 严雅雪. 碳排放与雾霾污染的协同关系分析[J]. 环境经济研究,2017,2(02):52-63.
- [22] 张涵,姜华,高健,李红. PM_{2.5}与臭氧污染形成机制及协同防控思路[J]. 环境科学研究,2022,35(03):611-620.
- [23] 张生玲,王雨涵,李跃,张鹏飞. 中国雾霾空间分布特征及影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境,2017,27(09):15-22.

- [24] 赵立祥, 赵蓉, 张雪薇. 碳交易政策对我国大气污染的协同减排有效性研究[J]. 产经评论, 2020, 11(03): 148–160.
- [25] 赵艳艳, 张晓平, 陈明星, 高珊珊, 李润奎. 中国城市空气质量的区域差异及归因分析[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2814–2829.
- [26] 周亮, 周成虎, 杨帆, 王波, 孙东琪. 2000–2011年中国PM_{2.5}时空演化特征及驱动因素解析[J]. 地理学报, 2017, 72(11): 2079–2092.
- [27] Chen, L., S. Liang, M. Liu, et al. Trans-Provincial Health Impacts of Atmospheric Mercury Emissions in China[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(14): 1–12.
- [28] Currie, J., J. Voorheis, and R. Walker. What Caused Racial Disparities in Particulate Exposure to Fall? New Evidence from the Clean Air Act and Satellite-Based Measures of Air Quality[J]. *American Economic Review*, 2023, 113(1): 71–97.
- [29] Decicca, P. and N. Malak. When Good Fences Aren't Enough: The Impact of Neighboring Air Pollution on Infant Health[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2020, 102: 102324.
- [30] Elhorst, J. P. *Spatial Econometrics from Cross-Sectional Data to Spatial Panels*[M]. Heidelberg: Springer, 2014.
- [31] Fu, S., V. B. Viard, and P. Zhang. Trans-Boundary Air Pollution Spillovers: Physical Transport and Economic Costs by Distance[J]. *Journal of Development Economics*, 2022, 155: 102808.
- [32] Jiang, L., S. He, Y. Cui, H. Zhou, and H. Kong. Effects of the Socio-Economic Influencing Factors on SO₂ Pollution in Chinese Cities: A Spatial Econometric Analysis Based on Satellite Observed Data[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 268: 110667.
- [33] Qian, H., S. Xu, J. Cao, et al. Air Pollution Reduction and Climate Co-Benefits in China's Industries[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(5): 417–425.
- [34] Ravishankara, A., L. M. David, J. R. Pierce, and C. Venkataraman. Outdoor Air Pollution in India Is Not Only an Urban Problem[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(46): 28640–28644.
- [35] Sun, Y., Y. Wang, and Z. Zhang. Economic Environmental Imbalance in China—Inter-City Air Pollutant Emission Linkage in Beijing–Tianjin–Hebei (BTH) Urban Agglomeration[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 308: 114601.
- [36] Wang, T., L. Xue, P. Brimblecombe, et al. Ozone Pollution in China: A Review of Concentrations, Meteorological Influences, Chemical Precursors, and Effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 1582–1596.
- [37] Xu, Y., W. Zhang, J. Wang, et al. Investigating the Spatially Heterogeneous Impacts of Urbanization on City-Level Industrial SO₂ Emissions: Evidence from Night-Time Light Data in China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 133: 108430.
- [38] Xue, S., B. Zhang, and X. Zhao. Brain Drain: The Impact of Air Pollution on Firm Performance[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2021, 110: 102546.
- [39] Zhang, Q., Y. Zheng, D. Tong, et al. Drivers of Improved PM_{2.5} Air Quality in China from 2013 to 2017[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(49): 24463–24469.
- [40] Zhang, S., Y. Wang, Z. Liu, and Y. Hao. The Spatial Dynamic Relationship between Haze Pollution and Economic Growth: New Evidence from 285 Prefecture-Level Cities in China[J]. *Journal of Environmental Planning Management*, 2021, 64(11): 1985–2020.

Asymmetry of Air Pollution in the Yangtze River Economic Belt

Zhang Kangkang^{a,b}, Xu Deyi^a, Zhu Yongguang^a, Sun Han^a

(a: School of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan;

b: Research Institute for Eco-civilization, Tianjin Academy of Social Sciences)

Abstract: The spatial spillover of air pollution leads to the asymmetric characteristics. The study of the asymmetry of air pollution can not only provide an in-depth understanding of the spatial and temporal evolutionary characteristics of air pollution, but also provide important support and reference for the synergistic regional management of air pollution. This paper first defines air pollution as haze pollution and exhaust emission pollution, and defines the characteristics of air pollution asymmetry through comparative analysis. Then, 130 cities in the Yangtze River Economic Zone from 2011–2019 are taken as the research objects to explore the air pollution asymmetry from the spatial and temporal evolution characteristics, and the formation mechanism, action mechanism and influence mechanism of air pollution asymmetry are studied. It is found that the trajectory of the center of gravity of haze pollution shows the characteristic of "north in south out", and the trajectory of the center of gravity of exhaust emission pollution shows the characteristic of "south into the north". The cities with serious haze pollution degree are not all cities with serious exhaust emission pollution degree, and the converse is also true. Air pollution is characterized by asymmetry. The asymmetric character of air pollution hinders economic development, and the main reason for its formation is the spatial flow characteristics of air pollution, and the main influencing factors are exhaust emission pollution and environmental regulation. Therefore, the relevant departments should take into account the asymmetric characteristics of air pollution when setting targets for air pollution management, recognize the common but differentiated responsibilities of cities for pollution management, and motivate cities to enhance the degree of synergy in air pollution management.

Keywords: Yangtze River Economic Belt; Air Pollution; Asymmetry; Spatial Analysis

JEL Classification: O13, Q53, Q56

(责任编辑:卢 玲)