

时空交互视角下长三角城市群雾霾污染的 时空演进特征及跃迁机制

张新林¹ 仇方道¹ 谭俊涛¹ 王长建²¹

(1. 江苏师范大学 地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州 221116;

2. 广东省科学院广州地理研究所 广东省地理空间

信息技术与应用公共实验室, 广东 广州 510070)

【摘要】: 区域性、持续性的雾霾污染对城市环境质量造成了严重的影响, 对经济发展、外商投资、旅游等方面均有负面影响。研究雾霾污染的时空特征及其机理, 可为雾霾污染的有效治理提供依据。论文以长三角城市群为研究对象, 探讨其雾霾污染的演化规律及其时空跃迁机制。结果表明: 长三角城市群雾霾污染存在较明显的空间集聚特征, 并且集聚趋势越来越明显; 局部空间结构较稳定, 空间依赖效应较弱; 空间格局的演变具有较强的正向空间整合性; 城市雾霾污染的类型更趋向于保持不变, 不同类型之间的转移较少; 调控—经济制约、投资—外资驱动、调控—结构制约三种驱动/制约模式呈现出自北至南由同向发展向同向制约分布的空间格局。最后, 提出差异化的治理措施。

【关键词】: 雾霾污染 时空跃迁 驱动机制 长三角城市群

【中图分类号】: X51; X196 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)09-195-08

近年来, 中国雾霾频发, 区域性、持续性的雾霾污染对城市的环境质量造成了严重影响^[1], 并威胁人体的健康^[2,3]。此外, 雾霾污染对城市形象、经济发展、外商投资、旅游等方面均有负面影响^[4], 雾霾污染问题也成了当前政府、学术界等关注的焦点。随着中央及众多地方政府陆续出台雾霾污染治理的行动计划, 中国雾霾污染治理取得了阶段性成果, 2018 年全国 $PM_{2.5}$ 平均浓度相对 2015 年降低 17.2%, 但污染程度仍然较重, 远未达到合格标准^[1]。因此, 研究雾霾污染的时空特征及其机理, 为实现雾霾污染的有效治理提供决策依据, 已经成为学术研究的当务之急^[5]。

近年来, 许多学者对雾霾污染问题进行了研究, 研究内容涉及多个方面, 根据本文研究内容, 主要从时空演变及影响因素两方面来阐述已有研究。(1) 时空演变。①在时间层面, 主要从日变化、季节变化和年变化的视角进行研究。在日变化特征上, 于建华等^[6]、魏玉香等^[7]分别发现北京和南京 $PM_{2.5}$ 浓度均呈现出双峰型的变化特征; 在季节变化特征上, 刘永林等^[8]、李会霞和史

作者简介: 张新林, 博士, 副教授, 研究方向为经济地理与区域可持续发展。E-mail: smilezhang89@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目“长三角地区产业生态化空间网络形成机理的多尺度研究”(42101164); 江苏省高等学校自然科学研究项目“转型期江苏省空间异质性与产业生态转型比较研究”(20KJB170015); 江苏高校哲学社会科学一般项目“区域一体化背景下江苏省产业结构调整对生态效率演化的影响机制研究”(2020SJA1022); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

兴民^[9]分别对重庆、西安等城市的研究发现, PM_{2.5}呈现出明显的夏季低、冬季高的特征;在年变化特征上,不同区域表现出不同的变化特征,例如 Van Donkelaar 等^[10]认为 2000—2012 年北京 PM_{2.5}年平均浓度逐渐上升;黄永源等^[11]认为广东 PM_{2.5}平均质量分数在 1998—2015 年呈现出先上升后缓慢下降的过程。②在空间层面,已有研究对雾霾污染的空间分布与对比、空间集聚特征、空间溢出效应等内容进行了分析。例如刘海猛等^[12]对京津冀 PM_{2.5}空间格局进行研究,发现整体上呈现出东南高、西北低的态势,并且具有显著的空间集聚性;刘华军和彭莹^[13]的研究发现,中国雾霾污染呈现出显著的空间相关性和空间溢出效应,并且空间溢出效应应随时间推移加强。(2) 影响因素。分别从自然因素和社会因素两个方面进行分析。①在自然因素方面,已有研究分析了气温、气压、风向、风速、湿度、植被等自然因素的影响。郭春颖等^[14]研究发现,降水量对长三角地区的雾霾污染影响最大。②在社会因素方面,已有研究分析了人口集聚、城镇化、工业化、FDI、技术进步、产业集聚、环境规制等社会要素的影响。张生玲等^[15]研究发现,二产畸高、民用汽车保有量增多对雾霾污染具有显著的促进作用,但人口密度和绿化水平的影响不明显;邵帅等^[16]认为中国城市化水平与雾霾污染之间呈现正向单调线性关系。综上,已有研究已经取得了丰富的成果,但仍存在以下不足:首先,在时空演变特征方面,已有研究主要采用 ESDA 方法,对空间截面数据进行时序分析,忽视了雾霾污染在时间维度的变化,缺乏时空交互视角的分析;其次,已有研究雾霾污染的时空格局演化特征对影响因素及其作用关系的研究相对缺乏,对演化机理剖析不够透彻;第三,缺乏针对不同污染程度的机理的分析,进而在制订“共同但有区别”的雾霾污染治理对策方面存在不足。Rey 提出的 ESTDA 框架能够有效克服 ESDA 只针对截面数据,而忽略时间维度的问题^[17];将分位数回归结果与不同时空跃迁类型进行深度嵌套,嵌套结果能够很好地揭示时空跃迁的作用机制^[18]。因此,本文以长三角城市群为研究对象,借助 ESTDA 框架的 LISA 时间路径和时空跃迁等方法分析雾霾污染的时空联动特征,并将时空跃迁与分位数回归模型进行嵌套,探索不同时空跃迁驱动机制模式。最后针对不同城市提出不同的对策建议。

长三角城市群是我国经济发达、城市集聚和人口密集地区,其经济发展模式具有典型性^[19]。长三角城市群整体上 PM_{2.5}浓度较高,大部分城市未达到国家环境空气质量二级标准,是中国雾霾污染的重点区域^[20]。因此,研究长三角城市群雾霾污染,一方面为长三角城市群不同程度雾霾污染的城市提出相关对策建议,另一方面能够为其他区域雾霾污染治理提供借鉴性思路。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 LISA 时间路径

LISA 时间路径是一种 LISA 马尔科夫转移矩阵的连续性表达方式,可以对 Moran's I 散点图中不同空间单元的坐标转移进行连续性的表达^[21]。LISA 时间路径可以分析地理现象的时空动态性,揭示区域内地理现象变化的协同演化和局部差异^[17, 22]。根据其几何特征,可分解为路径长度和弯曲度。其中,相对长度反映局部空间结构的动态性特征,相对长度越长,表明局部范围内,某城市或其相邻城市雾霾污染增长更具潜力;弯曲度反映局部空间结构波动性特征,弯曲度越大,表明某城市的雾霾污染空间依赖效应较强,即受相邻城市的影响较大,同时,自身雾霾污染随着时间推移波动越显著。不同年份的 LISA 坐标的移动路径可以表示为 $[(y_{i,1}, y_{Li,1}), (y_{i,2}, y_{Li,2}), \dots, (y_{i,t}, y_{Li,t})]$,其中 $L_{i,t}$ 为城市 i 在第 t 年的雾霾污染的标准化值(应用 z-score 标准化进行处理), $y_{Li,t}$ 为城市 i 在 t 年的空间滞后项^[23]。

$$d = \frac{N \sum_{i=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})} \quad (1)$$

$$f = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{d(L_{i,t}, L_{i,t+1})} \quad (2)$$

式中: d 表示时间路径长度,其值越大,说明局部空间结构动态性越强烈; f 表示路径弯曲度,其值越大,说明 LISA 时间路径越弯曲,则局部空间结构的波动性越曲折; N 表示城市数量; T 表示时间间隔; $d(L_{i,t}, L_{i,t+1})$ 是 i 城市在 t 和 $t+1$ 年的移动距离。

1.2 时空跃迁

为了进一步探索在局部空间中，相邻城市雾霾污染空间关系的演变，引入时空跃迁分析^[24]。基于 LISA 时间路径，Rey 结合 Moran' sI 散点图中不同单元的局部空间类型转移情况，提出时空跃迁，并将时空跃迁并划分为 4 种类型。

1.3 分位数回归模型

分位数回归模型可以估计在不同分位数下的解释变量和被解释变量的线性关系，其对分布假设的要求不高，把加权平均残差绝对值作为最小化目标函数^[25]，所以估计结果受极端值的影响较小，具有较强的稳健性^[26]。分位数回归的结果可以与不同时空跃迁类型进行深度嵌套^[18]，可以揭示不同影响因素对城市雾霾污染时空跃迁的作用机制。

假设随机变量 Y 的概率分布为：

$$F(y)=Prob(Y<y) \quad (3)$$

Y 的 τ 分位数定义为满足 $F(y)$ 的最小 y 值，即：

$$q(\tau)=inf, \quad 0 < \tau < 1 \quad (4)$$

$F(y)$ 的 τ 分位数 $q(\tau)$ 可以由最小化关于 ξ 的目标函数得到，即：

$$\begin{aligned} q(\tau) &= \operatorname{argmin}_{\xi} \left\{ \tau \int_{y>\tau} |y-\xi| dF(y) + (1-\tau) \int_{y<\tau} |y-\xi| dF(y) \right\} \\ &= \operatorname{argmin}_{\xi} \left\{ \int \rho_{\tau}(y-\xi) dF(y) \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $\operatorname{argmin}_{\xi} \{\}$ 函数表示取函数最小值时 ξ 的取值。

1.4 数据来源

鉴于数据来源问题，本文研究期限为 2000—2016 年。其中，雾霾数据以美国哥伦比亚大学社会经济数据和应用中心公布的、卫星监测的全球 $PM_{2.5}$ 浓度年均值的栅格数据为基础，并将其解析为不同城市 $PM_{2.5}$ 浓度的具体数值。为了保证数据的可靠性与平稳性， $PM_{2.5}$ 浓度数据为原始数据的三年滑动平均值，其他数据也做相应的滑动平均处理。其余数据来源于 2000—2016 年的《中国城市统计年鉴》《上海统计年鉴》《江苏统计年鉴》《浙江统计年鉴》《安徽统计年鉴》以及各城市统计年鉴。为消除价格波动的影响，相关数据均转变为 2000 不变价。

2 结果分析

2.1 雾霾污染的时空演变特征及空间自相关分析

首先对长三角城市群的雾霾污染的变化趋势及区域差异进行分析,结果如图 1 所示。2000—2016 年,各城市平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现出波动变化趋势;2000—2008 年,呈现出波动上升的趋势,2000 年平均浓度最低,为 $30.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$,2008 年达到 $52.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$;2008—2012 年,呈现出下降趋势,2012 年平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为 $43.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$;2012—2015 年,呈现出上升趋势,2015 年的浓度最高,达到 $53.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$;2016 年, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度再次下降,达到 $45.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。借助基尼系数可知,城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的区域差异也呈现出波动趋势,大部分年份围绕在 0.120 上下波动,2014 年之后明显上升,2016 年达到 0.159,区域差异达到最大值。由此可知,长三角城市群各城市平均雾霾污染呈现出波动变化趋势,近年来区域差异变大。

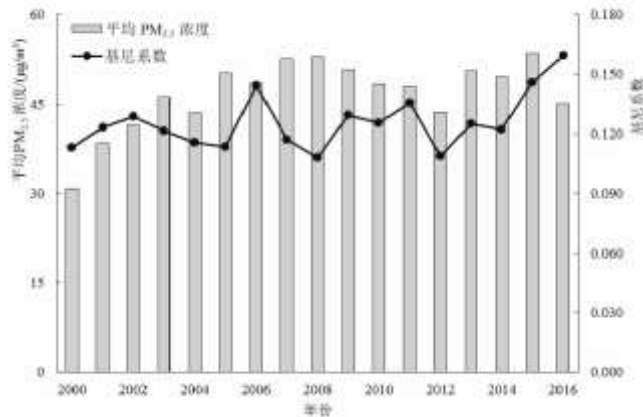


图 1 长三角城市群平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及其基尼系数演化

从空间分布来看(图 2),2000 年,城市雾霾污染呈现出东高西低的特征,常州、无锡、镇江等城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,而台州、舟山等城市的浓度较低;2008 年,逐渐呈现出北高南低的空间分布特征,无锡成为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高的城市,苏州、镇江等城市浓度也较高,台州、舟山仍为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最低的城市;2016 年,城市雾霾污染则呈现出东北高西南低的空间分布特征,泰州 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高,与扬州、盐城成为前三甲,而台州、舟山浓度仍然最低。由图 2 看出,雾霾的集聚较为明显,再通过计算 2000—2016 年长三角城市群 26 个城市的雾霾污染的全局 Moran' s I 来更加精确地分析其集聚程度。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的全局 Moran' sI 指数全部为正并且数值较大,而且通过了 1% 的显著性水平检验,所以长三角城市群的雾霾污染存在较为明显的正向的空间自相关性,即具有较明显的空间集聚特征。此外, Moran' sI 呈现出波动上升趋势,表明空间集聚的趋势越来越明显。由此看出,长三角城市群的雾霾污染较严重的城市在空间上邻近,而雾霾污染较低的城市在空间上也相邻,具有“空间俱乐部”的特征。

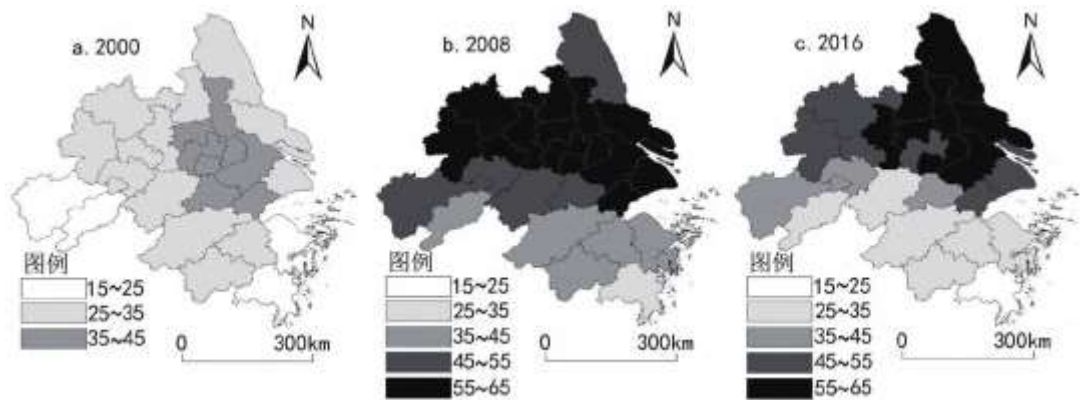


图 2 2000—2016 年长三角城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 的空间分布

2. 2PM_{2.5}时空联动特征

2. 2. 1LISA 时间路径几何特征分析

借助于 LISA 时间路径几何特征分析长三角城市群雾霾污染的局部空间结构的动态性及其在空间依赖方向上的波动性,依据自然断点法将 LISA 时间路径相对长度及弯曲度划分为 4 种类型。如图 3 所示。整体上看,LISA 时间移动路径较长的城市主要在东北—西南方向上分布,移动路径较短的城市主要在东南—西北方向上分布。这表明以盐城、南通为代表的东北部地区及以宣城、芜湖为代表的西南部地区雾霾污染变动幅度较大,具有更加动态的局部空间结构;以金华、宁波为代表的东南部地区及以南京、镇江等为代表的西北部地区雾霾污染变动幅度较小,具有更加稳定局部空间结构。依据图 3,移动长度大于 1.025 的共有 10 个城市,小于 1.025 的有 16 个城市,总体上来看,长三角城市群雾霾污染具有稳定的局部时空依赖关系的城市更多,整体上,具有稳定的局部空间结构。其中盐城(1.821)的 LISA 时间路径移动长度最大,表明盐城及其相邻城市形成了长三角城市群雾霾污染最为波动的局部空间结构,雾霾污染变动幅度较大;金华(0.553)的 LISA 时间路径移动长度最短,表明金华及其相邻城市形成了长三角城市群雾霾污染最为稳定的局部空间结构。

通过图 3 可知,LISA 时间路径弯曲度较高的城市主要位于长三角城市群的西北部,其中,泰州(21.642)、马鞍山(19.194)的 LISA 时间路径弯曲度最高,表明泰州及马鞍山雾霾污染的空间依赖效应较强,受相邻城市雾霾污染影响较大。杭州(2.733)、常州(2.875)、绍兴(2.889)等城市的 LISA 时间路径弯曲度较小,表明这些城市雾霾污染的空间依赖性较小,进一步可以反映出这些城市及其领域城市的雾霾污染变化相对稳定。依据图 3,弯曲度大于 8.092 的城市有 10 个,小于 8.092 的城市有 16 个,总体上,长三角城市群雾霾污染的空间依赖效应较弱的城市较多。

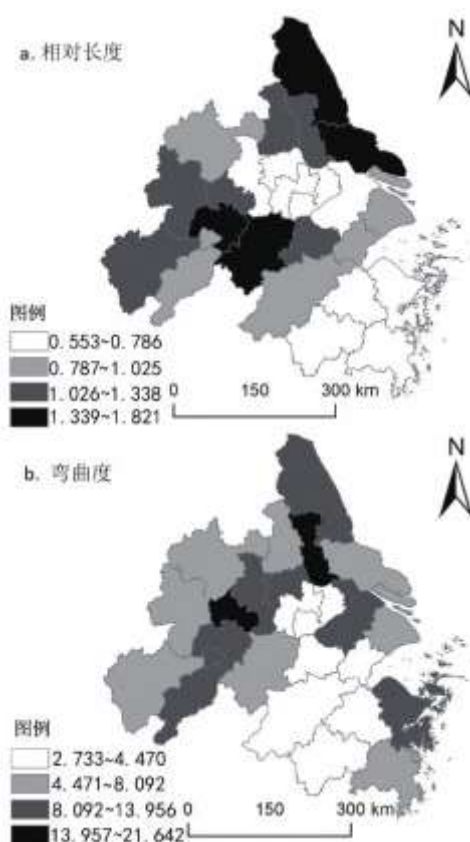


图 3 LISA 时间路径的几何特征

2.2. 2LISA 时间路径移动方向分析

通过对 2000—2016 年长三角城市群 26 个城市 Moran' sI 散点图位置的变化来计算各个城市 LISA 坐标点的移动方向。如果一个城市移动方向位于 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 之间, 则此城市与其相邻城市的雾霾污染呈现出正向协同增长; 位于 $90^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 之间, 则此城市雾霾污染呈现低增长趋势, 而相邻城市呈现高增长趋势; 位于 $180^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 之间, 则此城市与其相邻城市的雾霾污染呈现出负向协同增长; 位于 $270^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 之间, 则此城市雾霾污染呈现出高增长趋势, 而相邻城市呈现出低增长趋势^[27]。计算结果整体来看, 共有 19 个城市是协同增长, 占总数的 73.01%, 表明长三角城市群雾霾污染空间格局在演化过程中具有较强的空间整合性。其中, 正向协同增长的城市有 10 个, 略多于负向协同增长的城市, 正向整合略大于负向整合。表明长三角地区雾霾污染的空间格局的演变具有较强的正向空间整合性。

2.2. 3LISA 时空跃迁分析

利用时空跃迁分析方法来分析长三角城市群雾霾污染的局部空间关联类型的转移特征, 得到 Local Moran' sI 转移概率矩阵。所有对角线上的数值要大于非对角线上的数值, 说明城市雾霾污染的类型更趋向于保持不变, 不同类别之间的转移较少。在非对角线上, $LH_t \rightarrow LL_{t+1}$ 上的转移概率最大, 达到了 0.219; $LH_t \rightarrow HH_{t+1}$ 的转移数量最多, 有 8 个城市发生类型转移; 其余各种类型转移的概率及城市数量较少, 表明了长三角地区雾霾污染的空间结构具有较高的稳定性。

通过对空间离散程度计算可知, 长三角城市群雾霾污染为类型 IV 型时空跃迁的城市占 88.2%, 表明雾霾污染的局部空间联动性较弱, 空间集聚性存在相对较高的路径锁定特征; I、II、III 时空跃迁类型的比例分别为 6.3%、4.3% 和 1.1%。从跃迁类型的比例来看, 长三角城市群的大部分城市的雾霾污染受相邻城市雾霾污染的溢出效应影响较小, 城市自身因素对雾霾污染空间结构的改变影响较大。

2.3 $PM_{2.5}$ 的时空跃迁机制

2.3.1 影响因素分析

为探析长三角城市群雾霾污染的驱动机制, 本文选取人口密度 (PI, 常住人口总数/行政区面积)、经济发展水平 (PG, 人均 GDP)、产业结构 (IS, 第二产业增加值比重)、外资强度 (FO, 实际利用外资占 GDP 的比重)、政府调控 (GR, 政府财政支出占 GDP 的比重)、投资强度 (FI, 固定资产投资占 GDP 的比重) 和技术水平 (TC, 政府财政支出中科技支出所占比例) 等影响因素进行分位数回归。分位数回归结构所示。人口密度在低分位阶段, 对雾霾污染呈现出促进作用; 经济发展在低分位阶段能够制约雾霾浓度的增加, 而到了高分位阶段转变为促进作用; 产业结构在低分位阶段起促进作用, 高分位阶段起制约作用; 外资强度和投资强度在高、低分位阶段均起促进作用; 政府调控在高、低分位阶段均起制约作用; 技术水平在低分位阶段起促进作用, 在高分位阶段起制约作用。

2.3.2 驱动机制构建

分位数回归模型可以较好地解释不同影响因素对雾霾污染时空跃迁的机理, 不同响应阶段影响因素的分位数与时空跃迁类型之间具有很强的嵌套性, 根据分位数回归模型, 可以将分位值划分为两种类型: 低分位 ($0.1 \sim 0.5$) 和高分位 ($0.5 \sim 0.9$)。依据不同分位点驱动因素的系数的正负可以划分为四种类型: 低分位驱动、低分位制约、高分位驱动和高分位制约。

低分位制约能够解释 $LH_t \rightarrow LH_{t+1}$ 、 $LH_t \rightarrow LL_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow LL_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow LH_{t+1}$ 类型的时空跃迁机制, 此类型在低分位阶段自身状态保持不变, 即雾霾污染保持在较低水平。同向制约类型包括 $LH_t \rightarrow LL_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow LL_{t+1}$ 两种跃迁类型, 表示临近城市雾霾污染受阻, 污染水平降低或者维持低水平, 这两种类型包括杭州、宁波等 10 个城市。反向发展类型包括 $LH_t \rightarrow LH_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow LH_{t+1}$, 即临近城市雾霾

污染发生跃迁或维持较高污染水平，宣城市属于 $LH_t \rightarrow LH_{t+1}$ 类型。

低分位驱动能够解释 $LH_t \rightarrow HL_{t+1}$ 、 $LH_t \rightarrow HH_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow HL_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow HH_{t+1}$ 类型的时空跃迁机制，此类型在低分位阶段使自身单元由低向高发生跃迁，即城市自身雾霾污染加重。同向发展包括 $LH_t \rightarrow HH_{t+1}$ 、 $LL_t \rightarrow HH_{t+1}$ 类型，临近城市雾霾污染增加或者保持较高水平，这两种类型包括上海、合肥等四个城市。本研究区域中，并没有城市属于反向发展类型。

高分位制约能够解释 $HL_t \rightarrow HL_{t+1}$ 、 $HL_t \rightarrow HH_{t+1}$ 、 $HH_t \rightarrow HL_{t+1}$ 、 $HH_t \rightarrow HH_{t+1}$ 类型，此类型城市的雾霾污染在高分位段上发展受阻，雾霾污染由高向低跃迁。 $HL_t \rightarrow LL_{t+1}$ 、 $HH_t \rightarrow LL_{t+1}$ 属于同向制约，表示临近城市雾霾污染受到抑制； $HL_t \rightarrow LH_{t+1}$ 、 $HH_t \rightarrow LH_{t+1}$ 属于反向发展，表示邻近城市污染增加。在高分位制约相应类型中，只有湖州属于 $HH_t \rightarrow LH_{t+1}$ 类型。

高分位驱动能够解释 $HL_t \rightarrow HH_{t+1}$ 、 $HH_t \rightarrow HH_{t+1}$ 、 $HL_t \rightarrow HL_{t+1}$ 、 $HH_t \rightarrow HL_{t+1}$ ，此种类型表示在高分位阶段，城市本身能够保持较高污染水平。其中 $HL_t \rightarrow HH_{t+1}$ 、 $HH_t \rightarrow HH_{t+1}$ 为同向发展，表示临近城市污染增加或者保持较高污染水平，南京、无锡、常州等 9 个城市属于此种类型。 $HL_t \rightarrow HL_{t+1}$ 、 $HH_t \rightarrow HL_{t+1}$ 属于反向发展，表示临近城市雾霾污染受到抑制，嘉兴属于此种类型。

2.3.3 要素模式构建

将雾霾污染时空跃迁类型与分位数回归模型进行嵌套，对长三角城市群雾霾污染的时空动态性演变机理进行分析，建立调控—经济制约、投资—外资驱动、调控—结构制约三种城市雾霾污染时空跃迁的驱动/制约模式，如图 5 所示。

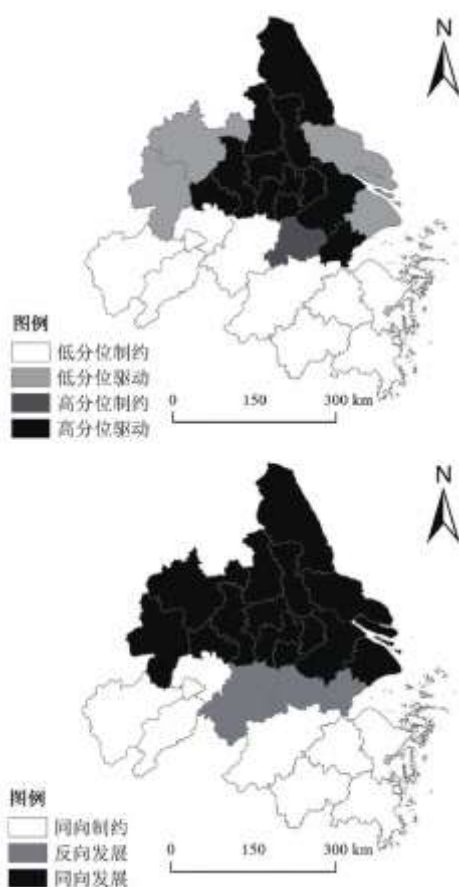


图 4 长三角城市群分位数响应及发展方向空间格局

调控—经济制约：低分位制约类型属于此模式，政府调控、经济发展水平是抑制雾霾污染最显著的因素。在此模式下，随着当地政府调控的加强及经济发展水平的提高，有助于雾霾污染程度的减弱。低分位制约模式的城市数量多于低分位驱动模式的城市，表明雾霾污染位于低分位的城市，更多是抑制雾霾污染的增加。在空间上，此制约模式的城市主要位于长三角城市群的浙江及安徽部分，分布较为集聚，具有明显的集聚特征。除宣城之外，杭州、宁波、芜湖等城市均为同向制约，与其相邻城市均能够在政府调控或经济发展水平的影响下，使雾霾维持较低水平。宣城属于反向发展，临近城市雾霾污染加重。

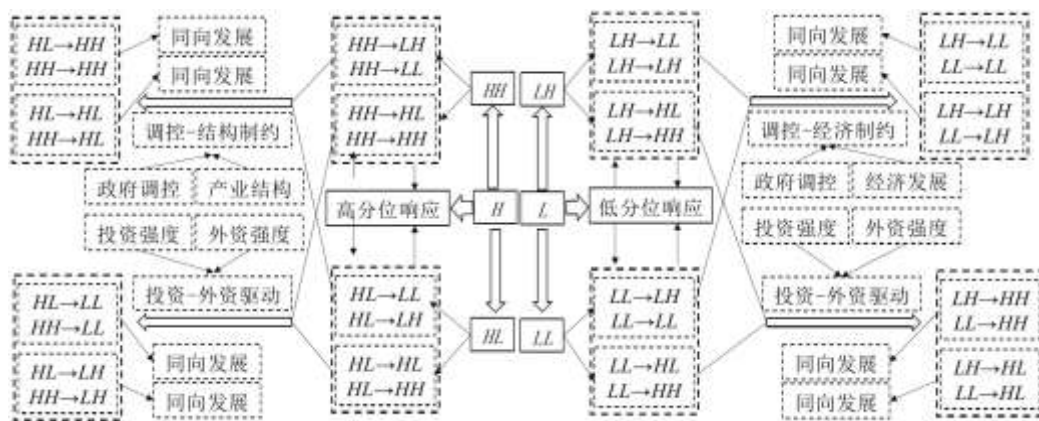


图 5 长三角城市群雾霾污染时空跃迁驱动机制模式

投资—外资驱动：低分位驱动及高分位驱动类型均属于此种驱动模式。在低分位驱动模式中，投资强度、外资强度、产业结构是促进雾霾污染的主要因素。在雾霾污染相对较低的情况下，固定资产投资及实际利用外资强度的增加以及第二产业增加值比重的增加均促进了上海、合肥、南通和滁州四个城市雾霾污染实现跃迁，雾霾污染程度增加。低分位驱动类型的城市均为同向发展，在自身雾霾污染实现跃迁的同时，相邻城市的雾霾污染变化也呈现出协同发展趋势。在高分位驱动类型中，投资强度、外资强度及经济发展水平是促进雾霾污染增加的主要因素。其中，投资强度和外资强度的影响系数较大，对此类型的雾霾污染浓度增加的影响较大。经济发展水平仅在 0.7 和 0.8 分位数上通过显著性检验，但是影响系数要远小于投资强度和外资强度。此类型的城市包括南京、苏州等城市，主要位于长三角城市群的江苏部分，在空间上具有集中分布的特征。除浙江嘉兴以外，其他城市均为同向发展，因此，南京、苏州等城市雾霾污染增加的同时，也对周围城市的雾霾增加起到了推动作用。嘉兴属于反向发展城市，自身雾霾污染虽然增加，但是其邻近城市的雾霾污染得到了抑制。

调控—结构制约：高分位制约属于此种模式，产业结构、政府调控和技术水平对雾霾污染呈现抑制作用。仅有湖州属于此模式，并且表现为反向发展，此类型城市数量远少于其他类型的城市数量，表明高分位制约的瓶颈相对较高，不易冲破。

总体上，长三角城市群雾霾污染的时空跃迁驱动模式呈现出自北至南由同向发展向同向制约分布的空间格局。其中，在低分位阶段，雾霾污染受要素制约的城市比较多，要素驱动的城市比较少；在高分位阶段，雾霾污染受要素驱动的城市比较多，要素制约的城市比较少。

3 结论与对策建议

本文通过对 2000—2016 年长三角城市群雾霾污染的时空演化特征及驱动机制进行分析，得到以下结论。

(1) 长三角城市群各城市平均雾霾污染呈现出波动变化的趋势，近年来区域差异变大。雾霾污染存在较明显的空间集聚特征，并且空间集聚的趋势越来越明显，具有“空间俱乐部”的特征。

(2)LISA 时间移动路径较长的城市主要在东北—西南方向上分布,移动路径较短的城市主要在东南—西北方向上分布。总体上,具有稳定的局部空间结构的城市更多。LISA 时间路径弯曲度较高的城市主要位于长三角城市群的西北部,总体上,具有相对稳定的空间依赖方向。长三角地区雾霾污染的空间格局演变具有较强的正向空间整合性。

(3) 长三角地区雾霾污染的空间结构具有较高的稳定性,城市雾霾污染的类型更趋向于保持不变,不同类别之间的转移较少。大部分城市雾霾污染受相邻城市雾霾污染溢出效应的影响较小,城市自身因素对雾霾污染空间结构改变的影响较大。

(4) 长三角城市群雾霾污染的时空跃迁驱动模式呈现出自北至南由同向发展向同向制约分布的空间格局。其中,在低分位阶段,雾霾污染受要素制约的城市比较多,要素驱动的城市比较少;在高分位阶段,雾霾污染受要素驱动的城市比较多,要素制约的城市比较少。低分位制约类型的城市属于调控—经济制约模式,分布较为集聚,具有明显的集聚特征。低分位驱动及高分位驱动类型均属于投资—外资驱动模式;上海等低分位驱动类型的城市均为同向发展,在自身雾霾污染实现跃迁的同时,相邻城市的雾霾污染变化也呈现出协同发展趋势;高分位驱动类型的城市包括南京、苏州等城市,在空间上具有集中分布的特征。高分位制约属于调控—结构制约模式,仅有湖州属于此模式,并且表现为反向发展,此类型城市数量远少于其他类型的城市数量,表明高分位制约的瓶颈相对较高,不易冲破。

通过对长三角城市群雾霾污染及其时空跃迁机制的分析,可采取差异化的雾霾污染治理措施。经济发展水平对杭州、宁波等低分位制约城市的雾霾污染起抑制作用,在经济新常态下,树立高质量发展意识,提升经济发展水平,有利于此类城市雾霾污染的治理。产业结构对湖州等高分位制约类型城市的雾霾污染起抑制作用,优化产业结构,减少高污染、高消耗的产业的比重,有利于此类型城市雾霾污染的治理。投资强度和外资强度对上海等低分位驱动类型和南京等高分位驱动类型城市的雾霾污染起促进作用,因此,应该优化投资结构,合理引导外资投资,同时设置投资的环境门槛。政府调控对高分位制约和低分位制约城市的雾霾污染均起到了抑制作用,对于此类型的城市,应该积极发挥政府的资源配置和宏观调控能力,同时应该建立起规范化和约束性体制,合理引导政府的调控功能,规范政府行为。此外,技术水平对高分位制约类型城市的雾霾污染起抑制作用,加大科技投入,发展和引进绿色节能、污染治理等新技术,加大对资源的利用程度,有利于雾霾污染的治理。

参考文献:

- [1]汪聪聪,王益澄,马仁锋,等.经济集聚对雾霾污染影响的空间计量研究——以长江三角洲地区为例[J].长江流域资源与环境,2019(1):1-11.
- [2]Lelieveld J,Evans J S,Fnais M,et al.The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale[J].Nature,2015,525(7569):367-371.
- [3]韩婧,李元征,李锋.2000—2015 年中国 PM_{2.5} 浓度时空分布特征及其城乡差异[J].生态学报,2019(8):2954-2962.
- [4]马丽梅,张晓.中国雾霾污染的空间效应及经济、能源结构影响[J].中国工业经济,2014(4):19-31.
- [5]邵帅,李欣,曹建华,等.中国雾霾污染治理的经济政策选择——基于空间溢出效应的视角[J].经济研究,2016(9):73-88.
- [6]于建华,虞统,魏强,等.北京地区 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度的变化特征[J].环境科学研究,2004(1):45-47.
- [7]魏玉香,银燕,杨卫芬,等.南京地区 PM_{2.5} 污染特征及其影响因素分析[J].环境科学与管理,2009(9):29-34.

-
- [8]刘永林,孙启民,钟明洋,等.重庆市主城区PM_{2.5}时空分布特征[J].环境科学,2016(4):1219-1229.
- [9]李会霞,史兴民.西安市PM_{2.5}时空分布特征及气象成因[J].生态环境学报,2016(2):266-271.
- [10]Van Donkelaar A,Martin R V,Brauer M,et al.Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter[J].Environmental Health Perspectives,2015,123(2):135-143.
- [11]黄永源,朱晟君,王少剑.基于制度背景与经济活动交互效应的广东省PM_{2.5}污染驱动因素分析[J].热带地理,2020(1):74-87.
- [12]刘海猛,方创琳,黄解军,等.京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J].地理学报,2018(1):177-191.
- [13]刘华军,彭莹.雾霾污染区域协同治理的“逐底竞争”检验[J].资源科学,2019(1):185-195.
- [14]郭春颖,施润和,周云云,等.基于遥感与地理探测器的长江三角洲空气污染风险因子分析[J].长江流域资源与环境,2017(11):1805-1814.
- [15]张生玲,王雨涵,李跃,等.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(9):15-22.
- [16]邵帅,李欣,曹建华.中国的城市化推进与雾霾治理[J].经济研究,2019(2):148-165.
- [17]张子昂,黄震方,曹芳东,等.浙江省县域入境旅游时空跃迁特征及驱动机制[J].地理研究,2016(6):1177-1192.
- [18]赵桂梅,赵桂芹,陈丽珍,等.中国碳排放强度的时空演进及跃迁机制[J].中国人口·资源与环境,2017(10):84-93.
- [19]张新林,仇方道,王长建,等.长三角城市群工业生态效率空间溢出效应及其影响因素[J].长江流域资源与环境,2019(8):1791-1800.
- [20]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(3):74-81.
- [21]Ye X,Rey S.A framework for exploratory space-time analysis of economic data[J].Annals of Regional Science,2013,50(1):315-339.
- [22]Wang C,Wang F,Zhang X,et al.Influencing mechanism of energy-related carbon emissions in Xinjiang based on the input-output and structural decomposition analysis[J].Journal of Geographical Sciences,2017,27(3):365-384.
- [23]Rey S J,Ye X.Comparative spatial dynamics of regional dsystems[M].Heidelberg:Springer,2010.
- [24]毕斗斗,王凯,王龙杰,等.长三角城市群产业生态效率及其时空跃迁特征[J].经济地理,2018(1):166-173.
- [25]Parente P M D C,Silva J M C S.Quantile regression with clustered data[J].Journal of Econometric Methods,2016,5(1):1-15.

[26]王少剑, 黄永源. 中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素[J]. 地理学报, 2019(6):1131-1148.

[27]郭永锐, 张捷, 卢韶婧, 等. 中国入境旅游经济空间格局的时空动态性[J]. 地理科学, 2014(11):1299-1304.