

长江经济带 PM_{2.5} 时空演变及影响因素分析

刘笑杰 王丽丽 何博汶 李丁¹

(兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

【摘要】: 大气雾霾防治不仅是打赢蓝天保卫战的有力支撑,也是经济新常态下实现高质量发展的必然要求。基于遥感反演数据,运用重力模型与空间自相关分析探究了 2000~2018 年长江经济带 PM_{2.5} 时空演变特征,并采用空间计量模型甄别和量化自然与人文影响因子贡献及空间溢出效应。结果表明:(1)长江经济带 PM_{2.5} 浓度整体呈先升后降的倒 U 形趋势,区域间保持“上游<中游<下游”的阶梯式格局。PM_{2.5} 浓度重心位于湖北省内的潜江、荆州与仙桃三市交界处,重心格局变动明显;(2)长江流域 PM_{2.5} 浓度水平总体呈现中下游高于上游,北岸大于南岸的对角分布格局,空间异质性明显;(3)PM_{2.5} 污染存在显著的空间正相关,高-高型集聚主要分布在上游的成渝地区和中下游的鄂苏皖地区,低-低型集聚基本稳定在上游的川西、云贵等地区,呈现差异显著的两大组团空间俱乐部;(4)PM_{2.5} 污染的内源性相互作用显著,邻域 PM_{2.5} 浓度每增加 1%,将导致本地 PM_{2.5} 浓度至少增加 0.4%。自然要素和人为因素直接或间接地影响着 PM_{2.5} 水平,其中,气象环境因子主要是负向效应,社会经济因子主要起正向效应。

【关键词】: PM_{2.5} 时空动态 影响因素 空间溢出效应 长江经济带

【中图分类号】: F126 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)03-0647-12

改革开放以来,伴随我国经济的高速增长、城市化与工业化的快速推进以及化石能源消耗的激增,由细颗粒物引发的雾霾在许多城市已经达到了流行水平,并呈现出复合型、累积性和跨区域污染特征^[1]。PM_{2.5}(指空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物)是一种危害,因其粒径小,携带毒害物质,在空气中滞留时间长、输送距离远等特性,对人类健康和大气环境的影响更大。PM_{2.5} 不仅降低大气能见度,影响居民生产生活,还能改变辐射平衡影响局地生态与气候变化^[2]。大量医学研究证实,PM_{2.5} 能够损害人体免疫系统,诱发呼吸道和心血管疾病,增加暴露人群死亡风险^[3]。全球疾病负担研究显示,中国每年有超过 25 万人因空气污染而过早死亡,其中 80%可归咎于 PM_{2.5} 污染^[4]。此外,持续的雾霾天气损害城市的整体形象,削弱了旅游、人才、投资的吸引力,严重制约着经济社会的可持续发展,有关清洁空气的问题已经引起了公众的广泛关注。

当前,PM_{2.5} 的时空分布和驱动因素等环境问题受到地理学、生态学和环境科学界的高度关注。其中,针对空间格局的研究主要通过识别其分布状态及空间效应来提出环境应对政策。研究者基于地面站点数据空间插值、卫星反演气溶胶光学厚度(AOD)、回归模型及混合模型等方法估测 PM_{2.5} 的空间浓度^[5,6,7],借助泰尔指数^[8]、变差函数^[9]、重力模型^[10]、贝叶斯模型^[11]、收敛分析法^[12]、层次聚类分析^[13]、神经网络模型^[14]、空间自相关分析^[15,16](全局 Moran' sI 指数和局部 G*系数)等来揭示 PM_{2.5} 污染的区域差异、时空演化特征和空间集聚规律。由于 PM_{2.5} 可通过大气环流或人类活动等扩散或转移到邻近地区,造成空间溢出效应,因此,具备空间特征的 PM_{2.5} 的识别和估算应采用空间分析方法进行研究^[17]。鉴于准确识别 PM_{2.5} 的影响因素可为大气污染防治提供理论支撑,近年来探究其驱动因子成为自然科学和社会科学等领域研究的重点。从方法论来看,研究者多采用灰色关联模型、动态因子分析(DFA)、贝叶斯最大熵映射法(BME)、土地利用回归模型(LUR)、地理加权回归模型(GWR)、地理探测器和空间计量模型等方法^[18,19,20,21,22,23,24],围绕着 PM_{2.5} 的来源解析、排放清单、化学转化和区域输送等方面展开研究,成果丰富。一般认为,PM_{2.5} 与人类社会

作者简介: 刘笑杰(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为经济地理与区域可持续发展.E-mail:liuxj2018@lzu.edu.cn;李丁 E-mail:liding@lzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271141);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(lzujbky-2017-it100)

生产生活密切相关,主要来源于汽车尾气、工业活动、土壤扬尘、生物质和煤炭燃烧等一次源,以及其它气体污染物经过复杂化学反应形成的二次源^[25]。气象、地形、植被等自然环境状况也是影响颗粒物形成和变化的关键因素,在其产生、积累、扩散和沉降过程中扮演着重要角色,并深刻地影响着局地浓度水平^[26]。此外,受大气环流和极端气象条件的影响,部分来源于区域传输^[27]。综合来看,PM_{2.5}质量变化是自然与人为因素共同作用的结果,其中,气象环境条件是影响地面浓度的外因,与人类活动有关的社会经济因素则是污染的内因。现有研究为从自然和社会经济因素的角度理解城市空气污染的决定因素提供了诸多见解,尽管具体因素存在较高的不确定性,但厘清这些随机机制,甄别和量化它们与PM_{2.5}之间的关系,可以揭示雾霾积累和消散的演化规律,为改善大气环境质量提供理论支撑。

长江经济带作为新时期国家发展全局的重大战略,是支撑中国经济持续增长的关键地带,但长期以来粗放型发展方式使得资源环境约束日益趋紧,给经济带绿色发展带来沉重压力。长江经济带是我国重要的工业走廊和城镇密集区,持续的高排放生产生活、高强度开发建设、高密度人口布局和落后的环境治理模式造成流域生态功能退化、环境质量恶化等问题日益严重^[28]。特别是近年来长江中下游空气污染集中激化,部分地区霾雾事件天数超过100d,个别城市甚至达到200d,灰霾已成为当地群众的“心肺之患”。然而我国现有大气雾霾研究多集中在东部地区和污染敏感型城市,对长江流域的研究相对较少,开展流域PM_{2.5}防治模式与机制探索可缩小研究差距。长江流域是我国环境污染防治攻坚重点区,研究雾霾对区域生态文明建设、保障国家生态安全意义重大。随着长江经济带发展上升为国家战略,其经济增长与环境保护之间的潜在矛盾可能比以往任何时候都要多,探究雾霾影响机理对流域可持续发展具有重要意义。另一方面,我国空气监测站点的时空覆盖范围有限,缺乏大尺度、长时序的数据集,而先前研究对地理空间维度重视不够,忽视了PM_{2.5}污染的空间依赖性。鉴于此,本文从地理学重视空间关联与空间异质性出发,基于2000~2018年卫星遥感反演数据,以长江经济带130个市州为研究单元,运用重力模型和空间自相关探讨PM_{2.5}的时空演化特征,采用多种空间计量模型甄别并量化影响因子及空间溢出效应,为合理制定流域雾霾污染减排策略提供依据。

1 研究方法和数据来源

1.1 研究区概况

长江经济带是我国重要的经济走廊,生态地位显著,综合实力强劲,发展潜力巨大,具有高质量发展的雄厚基础和区位优势,在国家发展战略中发挥着不可比拟的作用。如图1所示,长江经济带以长江为纽带,横跨我国地理三大阶梯,包括2个直辖市(沪、渝)和9个省(苏、浙、皖、赣、鄂、湘、川、滇、黔),总面积约为205.23万km²,占全国的21.4%。2018年经济带的人口与生产总值分别为5.99和40.3万亿元,分别占全国的42.9%和44.1%,人口、经济和城市等密度分别是全国的4.5、6.2和2.2倍,年均GDP增速则高出同期全国平均水平近2个百分点,成为我国新时期经济增长的重要引擎。本文以长江经济带11个省市下辖的130个市州为基本研究单元,依据《长江经济带生态环境保护规划(2017)》将其划分成上游、中游和下游3个片区。其中,上游地区包括川、渝、黔、滇4省市的47个城市;中游地区包括鄂、湘、赣3省的42个城市;下游地区包括苏、浙、沪、皖4省市的41个城市。

1.2 研究方法

1.2.1 重力模型

为探索PM_{2.5}的时空格局与迁移过程,首先引入物理学的重心概念与计算方式^[22],利用重力模型揭示PM_{2.5}的时空动态特征。设定长江经济带PM_{2.5}浓度重心坐标($\bar{X}, \bar{Y}$)分别为:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \times S_i \times X_i}{\sum_{i=1}^n M_i \times S_i}, \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \times S_i \times Y_i}{\sum_{i=1}^n M_i \times S_i} \quad (1)$$

式中： $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 分别表示 $PM_{2.5}$ 浓度重心的经度与纬度； n 为研究区栅格数； X_i 、 Y_i 分别为 i 栅格的经度与纬度； S_i 为 i 栅格的面积； M_i 为 i 栅格的 $PM_{2.5}$ 年均值。

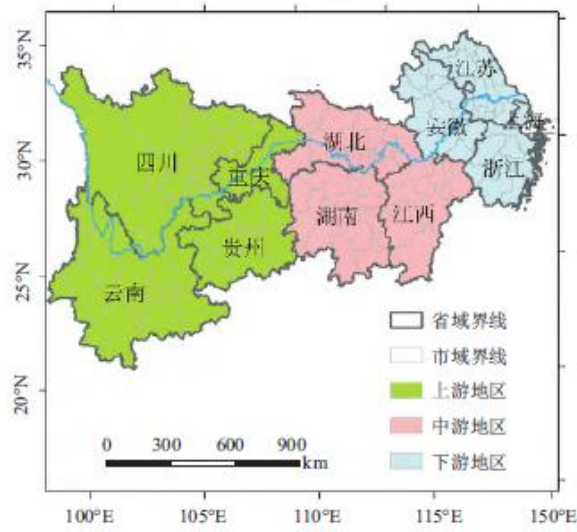


图 1 研究区

1.2.2 空间自相关分析

空间自相关表示临近观测单元具有相似的变量取值，常用于揭示区域变量的空间依赖性和空间异质性，它分为全局与局部的空间自相关^[23]。为定量测度临近区域 $PM_{2.5}$ 的空间依赖程度，本文采用经典的全局 Moran' sI 指数作为长江经济带 $PM_{2.5}$ 污染空间自相关检验指标。计算公式为：

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

式中： x_i 为 i 城市 $PM_{2.5}$ 水平； $\bar{x}$ 为所有城市 $PM_{2.5}$ 均值； n 为研究单元总数 (130 个)； w_{ij} 是空间权重矩阵； I 取值 $[-1, 1]$ ， $I > 0$ ($I < 0$) 为正 (负) 自相关， $I \approx 0$ 则空间分布随机。Moran' sI 指数可视为观测值与其空间滞后的相关系数，在散点图中对应 LL、LH、HL 和 HH 四种局部关联类型。其中，LL (HH) 表示邻近单元间的空间正自相关，即 $PM_{2.5}$ 污染低 (高) 的城市存在空间集聚效应，LH (HL)

表示邻近单元间为空间负自相关，即 PM_{2.5}污染低(高)的城市被污染高(低)的城市包围。

1.2.3 空间计量模型

空间计量模型嵌套空间与时间效应能有效解决传统线性回归无法处理的空间依赖问题，使模型设定和估计结果更符合实际^[23]。当前常用的空间计量模型主要有空间滞后模型(SLM)、空间误差模型(SEM)和空间杜宾模型(SDM)。其中，SDM 是相较 SLM 和 SEM 更为通用形式，它纳入了因变量与自变量的空间依赖效应，参数估计不受遗漏变量空间依赖程度的影响，应用范围更广^[24]。本文采用 SDM 探究关键因素对长江经济带 PM_{2.5}污染格局变化的影响。设定 SDM 基本形式为：

$$Y_{it} = \beta X_{it} + \gamma \sum_{j=1}^n W_{ij} X_{jt} + \delta \sum_{j=1}^n W_{ij} Y_{jt} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \tag{3}$$

式中：X_{it}和 Y_{it}分别为 i 和 j 城市在 t 时期自变量与因变量的观测值；β 为自变量的参数向量；W_{ij}为空间权重矩阵；γ 为空间回归系数；δ 为空间滞后系数；μ_i、λ_t分别为空间效应和时间效应；ε_{it}为扰动项。当 γ=0& δ≠0 时，式(3)为 SLM 模型；当 γ=-β δ 时，式(3)为 SEM 模型。

1.3 数据采集与处理

本文数据源主要由以下 4 个部分组成(表 1)：(1)PM_{2.5}反演数据。卫星遥感反演气溶胶光学厚度(AOD)产品具有成本低、空间覆盖广、模拟精度高等优点，被普遍认为是地表 PM_{2.5}的重要指标，近年来广泛应用于地面浓度遥感监测。美国大气成分分析组织(ACAG)发布的全球表面 PM_{2.5}数据集是全球精度最高、覆盖面最大、时间跨度最长的 PM_{2.5}遥感反演数据，该数据结合遥感监测、模拟和观测数据，在中国得到广泛有效的验证^[23,29]；(2)自然环境数据。包括植被覆盖度、年均风速、年均气温、年均气压、相对湿度、年降水量等指标，其中，归一化植被指数(NDVI)是地表植被生长状态与覆盖的最佳指示器；(3)社会经济数据。涵盖表征人口集聚水平的人口密度、表征经济发展水平的人均 GDP、表征城市发展水平的城市化率，表征产业结构的第二产业比重、表征社会能源消耗量的能源消耗指数。其中，能源消费指数涵盖生物质能、石油煤炭等能源类型的消费。研究表明，DMSP/OLS 夜景灯光数据与能源消耗量呈显著的线性相关^[30]。本文采用 Xie 等^[30]的方法将灯光亮度转换成灰度像素值，以各区域所有灰色像元值之和作为表征该地区能源消耗的指标。同时选择上海不同年份的夜间灯光数据与平均耗电量进行交叉验证，其相关性大于 0.75，说明二者具有密切关系；(4)基础地理信息数据。本文以 2019 年行政区划为基准，利用 ArcGIS 软件归并处理最终得到 130 个城市单元。空间矢量图来自全国地理信息资源目录服务系统 1：100 万基础地理数据库。

表 1 数据来源说明

数据名称	数据来源	空间精度
PM _{2.5} 数据	美国大气成分分析组织：2000~2018 年中国 PM _{2.5} 浓度遥感反演数据集(V4.CH.03)网址： http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page_id=140%E3%80%822014	0.01°
年均风速相对湿度	国家地球系统科学数据中心：中国年平均风速数据集和中国年相对湿度数据集网址： http://www.geodata.cn/	1km
年均气温年均	中国科学院资源环境科学与数据中心：中国 1980 年以来逐年平均气温、逐年平均气压和逐年年降	1km

气压年降水量	水量空间插值数据集网址: http://www.resdc.cn/	
植被覆盖度	中国科学院资源环境科学与数据中心: 中国年度植被指数 (NDVI) 空间分布数据集网址: http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=257	1km
城镇化率二产 比重人口密度 人均 GDP	《中国城市统计年鉴》(2001-2019)、《中国区域经济统计年鉴》(2001-2014) 以及经济带 11 个省市的国民经济和社会发展统计公报 (2001-2019) 网址: http://data.cnki.net/Yearbook	地级市
能源消费	美国国家海洋和大气管理局环境信息中心: 1992~2013 年 DMSP/OLS 稳定夜间灯光影响数据集集合; 2013~2018 年 VIIRS/DNB 平均灯光辐射数据集网址: https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html	1km

为避免根据文献综述选定的解释变量间的多重共线性问题, 首先结合方差膨胀因子 (VIF) 对全部解释变量进行多重共线性诊断, 发现解释变量的 VIF 值均小于 5, 表明各解释变量间不存在多重共线性 (表 2)。从各变量与 $PM_{2.5}$ 的 Pearson 相关性检验结果来看, 除年均风速和相对湿度外, 其他变量与 $PM_{2.5}$ 均存在显著的相关性。另外, 因部分城市指标数据缺失严重, 考虑数据可得性与完整性, 在解析 $PM_{2.5}$ 污染驱动因素时, 本文剔除掉湖北省的 3 个直辖县 (仙桃、潜江、天门) 和 1 个直辖林区 (神农架), 以及湘、鄂、川、黔和滇 5 省的 16 个少数民族自治州, 最终选取经济带 110 个地级及以上城市单元纳入回归模型。此外, 鉴于短期内我国多数城市雾霾难以根治, 忽略环境库兹涅茨曲线 (EKC) 中环境污染与经济增长的倒 U 型关系并不现实, 故在模型中加入人均 GDP 的二次项以验证 EKC 假说。为消除异方差及减少变量波动, 所有原始数据统一对数化处理。

表 2 解释变量描述性统计

变量	单位	缩写	极小值	极大值	均值	标准误	VIF	相关系数
城镇化水平	%	U	9.17	89.64	22.33	18.42	2.30	0.22***
产业结构	%	S	16.20	75.86	46.99	10.20	1.34	0.15***
人口密度	人/km ²	D	46.05	2275.67	473.30	291.00	3.21	0.52***
人均 GDP	元/人	PGDP	2161.00	134982.00	24521.57	23773.49	3.11	0.22***
能源消费	—	E	2501.68	5556010.04	66337.33	72246.25	2.62	0.14***
植被覆盖度	%	NDVI	0.43	0.88	0.75	0.06	1.77	-0.05**
年均风速	m/s	F	0.55	15.88	2.24	1.65	1.13	-0.03
年均气温	℃	T	10.66	20.21	16.82	1.41	1.47	0.16***
年均气压	pa	P	77.69	101.76	97.14	5.52	1.81	0.66***
相对湿度	%	H	53.28	83.41	74.28	4.03	1.44	0.05
年降水量	mm	R	556.13	2678.17	1273.99	333.78	1.68	-0.21***

注：***、**和*分别表示 1%、5%和 10%的显著性水平。

2 长江经济带 PM_{2.5} 的时空动态格局

2.1 PM_{2.5} 的时序演进特征

2000~2018 年长江经济带 PM_{2.5} 浓度总体呈先升后降的倒 U 型变化趋势，而上、中、下游地区始终保持着阶梯递增的变化态势(图 2a)。具体来看，2000~2007 年经济带雾霾污染在波动中加剧，PM_{2.5} 浓度由 23.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 增至 37.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，增幅达 59.07%。此期间，下游地区增幅最高，为 73.84%，中、上游地区的增幅也分别达到 45.45%和 63.94%；2007~2018 年经济带雾霾污染总体趋于缓解，PM_{2.5} 浓度由 37.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 25.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，降幅为 31.52%。此期间，中游地区浓度降幅最大，为 38.30%，而上、下游地区的降幅也分别达到了 27.05%和 27.52%。可见 2007 年是经济带雾霾污染由持续恶化向趋于改善的拐点，这与该年底环保部公布的结果基本一致。可能与“十五”规划提出的控制重大污染排放总量、加快产业结构调整、建立节能减排统计、监督、考核体系等政策有关。特别是 2013 年国务院批准实施《大气污染防治行动计划》以来，经济带雾霾天气改善的趋势更加明显。经济带省域 PM_{2.5} 浓度变化趋势存在较大差异(图 2b)，其中，苏沪皖等地区的浓度变化较为波动，而滇川浙等地区变化较为平稳。从变化幅度来看，滇(65.83%)、沪(51.10%)、赣(45.95%)、皖(40.89%)、苏(38.96%)、湘(2.48%)等省域浓度有所升高，增幅依次降低，而川(-2.07%)、黔(-2.39%)、浙(-13.14%)、鄂(-17.78%)和渝(-27.04%)等省域浓度有所减少，降幅依次增加。此外，省际间 PM_{2.5} 浓度水平存在较大差异(图 2c)，年均浓度值从高至低依次为：苏、皖、鄂、沪、湘、渝、赣、浙、黔、川、滇。综合来看，长江经济带 PM_{2.5} 浓度高值区主要分布在下游的苏、皖、鄂等省域，这些地区具有快速工业化和大规模城市化的特征，低值区则集中分布在上游的云贵等欠发达省域。

基于中国《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中规定的 PM_{2.5} 年均浓度限值，本文将长江经济带 PM_{2.5} 年度值划分为 6 个区间来探讨研究期内各区间栅格面积占比变化(图 2d)。结果显示：(1)PM_{2.5} 年均浓度低于 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (一级浓度限值)的比例由 2000 年的 34.48%先逐渐降至 2011 年的 19.62%(最低点)，后回升至 2018 年的 25.14%，但总体占比有所下降；(2)PM_{2.5} 年均浓度高于 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (二级浓度限值)的比例由 2000 年的 23.46%先持续增至 2007 年的 58.38%(最高点)，随后在波动中回落至 2018 年的 27.53%，但总体占比有所上升；(3)PM_{2.5} 年均浓度超过 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的高污染区比例集中出现在 2005~2011 年、2013~2014 年等时期，其中 2007 年该比例最高，为 5.73%。总的来看，研究时段长江经济带 PM_{2.5} 污染恶化蔓延趋势虽有所遏制，但低污染区在波动中减少，且仍有近 1/3 的地区浓度高于国家目标限值(35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)，整体污染形势仍然较为严峻。

2.2 PM_{2.5} 的空间分异特征

精准识别 PM_{2.5} 空间格局演化特征与分布规律对制定跨区联动污染治理具有重要意义。本文借助 ArcGIS 可视化功能，基于 2000、2007 和 2018 年的 PM_{2.5} 栅格空间数据分析，来探讨长江经济带 PM_{2.5} 污染的空间分布特征(图 3)。具体来看：(1)2000 年 PM_{2.5} 年均浓度超过 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的区域主要分布在武汉、仙桃、潜江、天门、荆门、孝感等鄂东北地区，至 2007 年已蔓延到长江中下游平原的大部分地区，同时在上游的川渝地区也有明显连片分布，成为 PM_{2.5} 污染的重灾区；(2)PM_{2.5} 年均浓度低于 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的区域主要集中在上游的川西、云贵等地区，这些区域是我国少数民族集聚区，生态环境较佳，空气质量较好但出现小幅持续恶化，应予以关注和重视；(3)2018 年 PM_{2.5} 年均浓度较高的区域相较 2007 年已明显减少，高值区主要分布在苏皖北部和武汉周边地区，其余大部分地区的质量浓度低于 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，流域整体空气质量有所好转；(4)长江流域 PM_{2.5} 浓度水平总体呈现中下游高于上游，北岸大于南岸的对角空间分布格局，低地平原指向性明显，期间大体形成了上游的成渝地区、长江中游地区和下游的苏皖北部地区 3 个 PM_{2.5} 污染中心，这可能与区域人口密度、经济强度存在较为密切的联系。

2.3 PM_{2.5} 的空间集聚特征

基于 Queen 空间邻近规则，利用 GeoDa 软件计算 2000~2018 年长江经济带 PM_{2.5} 污染的全局 Moran' sI 指数。由表 3 可知，

研究期内经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的全局 Moran' sI 指数均显著为正, 表明 $\text{PM}_{2.5}$ 污染存在稳定的空间正相关, “马太效应”显著, 具体表现为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平较高的城市趋于同浓度水平较高的城市形成“高高”聚类阵营, 质量浓度较低的城市趋于同质量浓度较低的城市形成“低低”聚类阵营, 呈现差异显著的两大组团空间俱乐部, 地理空间在其集聚变化过程中发挥了重要作用。分时段来看, 2000~2015 年全局 Moran' sI 指数在波动中呈上升态势, 其值由 0.8358 增至 0.8892, 说明此期间的污染集聚程度趋于增强, 而 2015~2018 年全局 Moran' sI 指数在波动中从 0.8892 减少到 0.8363, 表明此期间的污染集聚程度趋于减弱。总的来看, 经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 污染具有明显的空间溢出效应, 意味着局地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化会影响到周边的地理区域, 因此在减少雾霾污染方面应具有全局视野。

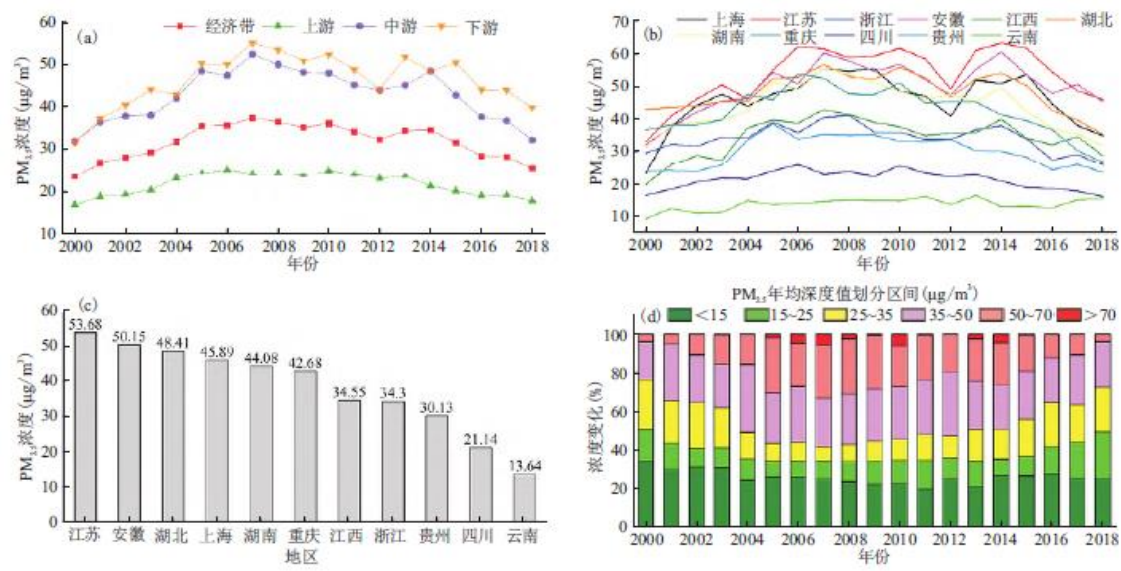


图2 2000~2018 年长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化趋势

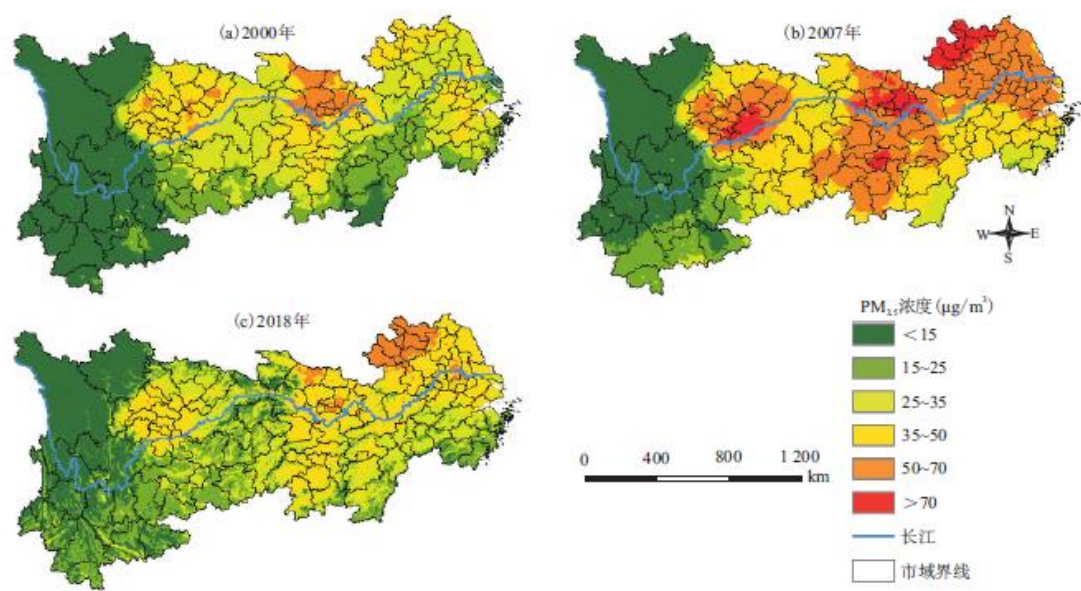


图3 2000~2018 年长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 污染空间分布

表 3 2000~2018 年长江经济带 PM_{2.5} 污染的全局 Moran' sI 指数及检验值

年份	Moran' sI	z-value	p-value	年份	Moran' sI	z-value	p-value	年份	Moran' sI	z-value	p-value
2000	0.8358	14.9358	0.001	2007	0.8634	15.4274	0.001	2014	0.8771	15.7768	0.001
2001	0.8491	15.1476	0.001	2008	0.8554	15.4618	0.001	2015	0.8892	15.9475	0.001
2002	0.8277	14.9821	0.001	2009	0.8620	15.5762	0.001	2016	0.8714	15.6502	0.001
2003	0.8268	14.9601	0.001	2010	0.8485	15.3238	0.001	2017	0.8341	14.8743	0.001
2004	0.8293	14.9058	0.001	2011	0.8433	15.3543	0.001	2018	0.8363	14.9021	0.001
2005	0.8299	15.1192	0.001	2012	0.8315	15.2076	0.001	-	-	-	-
2006	0.8225	14.9746	0.001	2013	0.8388	15.1309	0.001	-	-	-	-

由于全局自相关未能反映具体区域 PM_{2.5} 污染的空间集聚分布,故采用 LISA 集聚图刻画长江经济带 PM_{2.5} 污染的局部集聚特征(图 4),局部集聚分布是空间格局纹理的体现。经济带 PM_{2.5} 污染的局部空间关联表现出以下特征:(1)PM_{2.5} 污染总体呈显著的 HH 型和 LL 型的空间聚类趋同现象,2000 年 HH 型和 LL 型的数量分别为 25 个和 24 个,比例分别为 19.23%和 18.46%,其中,高-高型聚类主要集中在成渝地区和长江中下游地区,这些地区处在快速工业化和城市化进程,能源密集型产业集聚发展,资源要素流动频繁,污染物排放量大,特别是四川盆地受地形条件影响,易形成大气污染高集聚状态,低-低型聚类则分布在川西、云南、黔西南和赣东南等空气质量优良区;(2)2007 年 HH 型与 LL 型的数量分别是 27、22 个,占比分别为 20.77%、16.92%,期间,高-高型聚类有所增加,主要分布在长江中游城市群和苏皖北部地区,而低-低型聚类有所减少,主要集中在川西、云贵等地区,这些区域地广人稀,城市间作用较弱,经济发展水平低,污染排放量小,同时生态稀释能力较强,地形阻碍作用突出,形成稳定的低值集聚区;(3)2018 年 HH 型与 LL 型的数量分别为 32 和 21 个,比例分别为 24.62%、16.15%,期间,高-高型聚类有所增强且呈集中连片分布,主要集中在中游的武汉城市群和苏皖大部分地区,而低-低型聚类持续减少,其空间分布基本保持不变。总的来看,成渝地区近年来通过调整产业结构和加强清洁能源利用,PM_{2.5} 污染治理取得显著成效。长三角核心区通过实行严格的环保规制迫使部分能源密集型产业实现外围就近转移,一定程度上缓解了本地空气污染状况。但长期来看,仅通过污染转移难以根本改变自身的污染状况,反而扩大 PM_{2.5} 的空间负外部性影响范围,造成区域性大气污染。

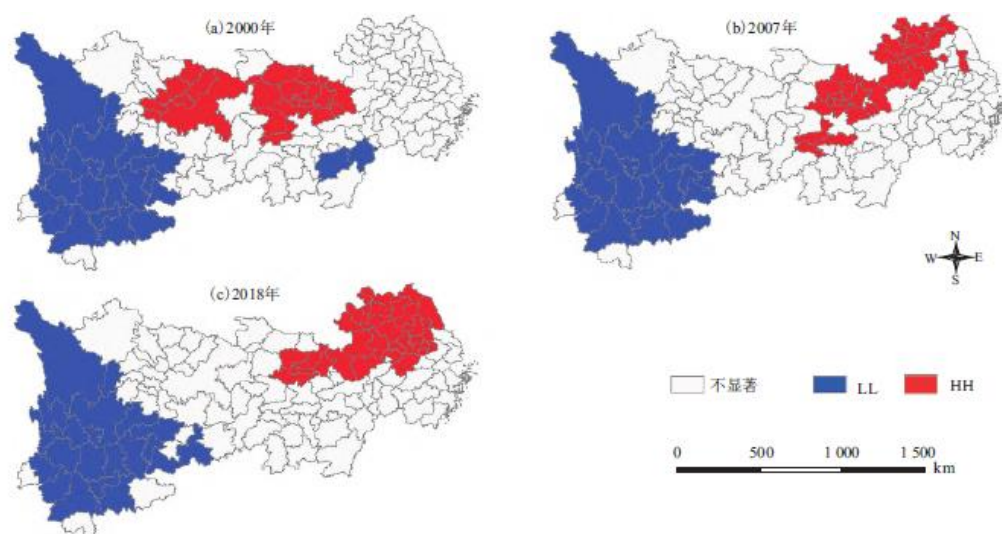


图 4 2000~2018 年长江经济带 $PM_{2.5}$ 污染局部空间聚类

2.4 $PM_{2.5}$ 的时空迁移特征

本文利用重力模型来考察 2000~2018 年间长江经济带 $PM_{2.5}$ 浓度重心的移动轨迹、移动方向与移动速率。重心时空分析表明：研究时段，经济带 $PM_{2.5}$ 质量浓度重心总体位于湖北省内的潜江、荆州与仙桃三市交界处(图 5)，重心格局变动明显。具体来看：2000~2007 年间， $PM_{2.5}$ 浓度重心总体呈东移态势，移动距离约为 45.85km，年均移动距离约为 18.82km，此期间，长江经济带迎来新一轮发展热潮，特别是中下游地区城镇化，工业化发展迅猛，高能耗的经济发展方式以及非生态的城镇化模式使得 $PM_{2.5}$ 浓度迅速上升；2007~2012 年浓度重心呈西(南)方向移动的趋势，相对移动距离约为 42.03km，而年均移动距离约为 11.23km；2012~2014 年整体浓度重心在东北方向快速移动，相对移动距离约为 64.41km，年均移动距离约为 32.82km；2014~2018 年浓度重心总体向西(南)方向移动，相对移动距离约为 31.86km，年均移动距离约为 10.75km。这可能是由于上游和中游地区仍处在加速工业化的阶段，而下游地区逐渐进入工业化后期阶段，随着资源能源、化工重工业等要素的配置不断从下游地区到中上游地区的梯度转移，这为污染重心向上游迁移提供了一定的现实动力。

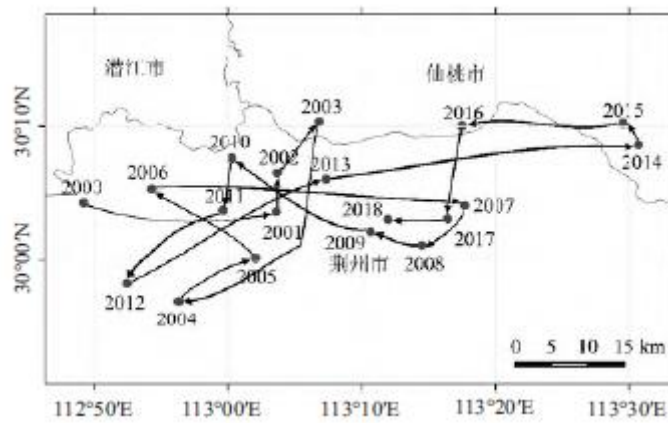


图 5 2000~2018 年长江经济带 $PM_{2.5}$ 污染重心迁移轨迹

3 长江经济带 $PM_{2.5}$ 的影响因素分析

3.1 估计模型识别

空间相关性检验表明大气 $PM_{2.5}$ 具有显著的空间关联，普通最小二乘法 (OLS) 运算会导致估计系数存在误偏。空间计量模型能有效处理经典计量法在面对空间数据时的缺陷，考察地理观测值之间的关联^[25]。模型估计前，结合拉格朗日乘子 (LM) 及其稳健形式 (RobustLM) 来识别空间关联性的形式是以误差项还是滞后项存在，其次综合 Walds 和似然比 (LR) 判断 SDM 可否简化为 SEM 和 SLM。从表 4 看出，在地理距离空间权重矩阵设定下，SLM 与 SEM 的 LM、RobustLM 统计量均在 1% 水平上显著。进一步通过 Walds 和 LR 检验筛选模型，其统计量均通过了 1% 的显著性检验，即拒绝 SDM 简化为 SEM 或 SLM。最后，由 Hausman 统计值为 245.80 ($P=0.000$)，选择固定效应的 SDM 并采用最大似然法 (ML) 来定量甄别长江经济带 $PM_{2.5}$ 污染的影响因素。

3.2 估计结果分析

比较三种空间模型的估算结果 (表 4)，SDM 的拟合效果最好，SEM 略优于 SLM。SEM 结果显示， γ 值为 0.476 且在 1% 水平下显著，说明可能存在对 $PM_{2.5}$ 有影响且具有空间相关性的遗漏变量，或不可观测的随机冲击存在空间相关性。SLM 和 SDM 的 δ 值分

别为 0.412 和 0.443, 在 1% 水平下显著, 表明 $PM_{2.5}$ 污染具有较强的空间内源性交互作用效应。控制住其他解释变量, 邻域 $PM_{2.5}$ 每增加 1%, 导致本地 $PM_{2.5}$ 至少增加 0.4%, 区域间 $PM_{2.5}$ 的传输扩散受到邻近单元的显著影响。回归结果显示, 年均风速、年均气压和植被覆盖度对 $PM_{2.5}$ 浓度有显著的负向影响; 相对湿度、人均 GDP、人口密度、产业结构和能源消耗对 $PM_{2.5}$ 浓度具有显著的正向影响; 降水在 SEM 和 SDM 中分别在 10% 和 5% 水平上显著, 而温度在 SLM 中仅在 5% 水平上显著。理论上讲, 风对污染物有一定的稀释和扩散作用, 较好的植被覆盖有利于颗粒物的吸收和沉降, 一般有助于降低 $PM_{2.5}$ 水平, 而较高的湿度有利于促进硝酸盐和二次有机气溶胶的形成, 易于增加 $PM_{2.5}$ 水平。人口密度、产业结构、能源消费与 $PM_{2.5}$ 之间存在显著的正向影响, 这与以往不同尺度的研究结果相一致^[31]。由于城市是 $PM_{2.5}$ 污染发生的主阵地, $PM_{2.5}$ 水平与人口、产业集聚及能源消耗存在着密切联系。高收入水平导致能源密集型产品和服务的消费增加, 如车辆和供暖系统, 从而产生大量颗粒污染物。值得注意的是, 在 1% 的显著性水平下, $\ln PGDP$ 的一次项为正, 二次项为负, 表明人均 GDP 与 $PM_{2.5}$ 浓度之间存在着倒 U 形关系, 这在某种程度支持了经典的环境库兹涅茨曲线假设。也就是说, 城市 $PM_{2.5}$ 污染先随着经济增长而加重, 当经济增长到一定水平后, $PM_{2.5}$ 污染随着经济水平的提高而降低。但 $\ln^2 PGDP$ 的系数较小, 说明该变化趋势并不是太明显。这可能与经济带大部分城市没有越过发展门槛, 大量资源被分配用于维持地区经济增长, 导致环境保护长期被忽视有关。

表 4 空间计量模型检验与估计结果

变量	SLM	SEM	SDM		
$\ln F$	-0.022***(-3.37)	-0.056***(-4.56)	-0.051***(-3.99)	$W \times \ln F$	0.047**(2.15)
$\ln R$	0.006(0.58)	0.033*(1.66)	-0.041**(-1.97)	$W \times \ln R$	-0.039(-1.51)
$\ln T$	-0.151**(-2.04)	-0.199(-1.35)	-0.178(-1.13)	$W \times \ln T$	0.058(0.31)
$\ln P$	-0.490***(-4.91)	-0.289***(-4.49)	-0.299***(-4.66)	$W \times \ln P$	0.212*** (5.88)
$\ln H$	0.013*(1.81)	0.215*(1.78)	0.165** (2.30)	$W \times \ln H$	-0.165(-1.09)
$\ln NDVI$	-0.187***(-3.48)	-0.122**(-2.06)	-0.093**(-2.22)	$W \times \ln NDVI$	-0.136*(-1.67)
$\ln PGDP$	0.196*** (4.37)	0.187*** (3.70)	0.181*** (3.50)	$W \times \ln PGDP$	0.042(0.54)
$\ln^2 PGDP$	-0.007***(-3.31)	-0.008***(-3.13)	-0.007***(-2.90)	$W \times \ln^2 PGDP$	0.004(0.95)
$\ln D$	0.008*** (3.11)	0.014** (2.34)	0.013** (2.31)	$W \times \ln D$	-0.016**(-2.50)
$\ln S$	0.031** (1.97)	0.025* (1.69)	0.023** (2.34)	$W \times \ln S$	0.019(0.64)
$\ln E$	0.017*** (3.61)	0.042*** (3.27)	0.037*** (2.88)	$W \times \ln E$	0.059*** (3.35)
$\ln U$	-0.004(-0.83)	-0.001(-0.01)	-0.002(-0.47)	$W \times \ln U$	-0.011(-1.30)
δ / γ	0.412*** (2.65)	0.476*** (2.97)	0.443*** (2.80)		
R^2	0.794	0.815	0.839		
Log-likelihood	2612.15	2626.67	2649.92		
LM-spatiallag	24.70***		Wald-spatiallag	43.84***	
LM-spatialerror	27.02***		Wald-spatialerror	33.53***	

Robust LM-spatiallag	70.65***		LR-spatiallag	43.29***	
Robust LM-spatialerror	72.97***		LR-spatialerror	33.44***	

注：***、**、*分别在 0.01、0.05、0.1 水平上显著； $W \times \ln F$ 、 $W \times \ln R$ 、 $W \times \ln T$ 、 $W \times \ln P$ 、 $W \times \ln H$ 、 $W \times \ln NDVI$ 、 $W \times \ln PGDP$ 、 $W \times \ln D$ 、 $W \times \ln S$ 、 $W \times \ln E$ 和 $W \times \ln R$ 分别表示 F、R、T、P、H、NDVI、PGDP、D、S、E 和 R 的空间滞后；括号内为 t 统计值。

3.3 空间效应分解

为了更好地研究具体因素对 $PM_{2.5}$ 污染的边际效应，将空间效应进行分解，从直接效应(含反馈效应)和间接效应两方面考察空间相互作用(表 5)。其中，对本地 $PM_{2.5}$ 污染直接效应的显著性如下：年均气压[#]>人均 GDP>年降水量[#]>能源消费>人口密度>植被覆盖度[#]>相对湿度>年均风速[#]>产业结构(“#”表示负向效应)。可见，本地的气压、降水、植被、湿度和风速等自然环境要素对当地 $PM_{2.5}$ 污染有显著的直接影响，而城市自身的经济发展、能源消费、人口密度和二产比重的增加直接加剧了当地 $PM_{2.5}$ 污染程度。长江经济带大部分城市的产业结构不可持续，污染物排量放高、能源效率低、资源依赖性强，城市人口密度过大，导致交通强度、能源消耗和土地开发利用增加，这些因素又导致更多的细颗粒物排放到大气环境中，显著加重了城市 $PM_{2.5}$ 污染。各解释变量的空间溢出效应顺序为：年均气压>能源消费>年均风速>人口密度[#]>植被覆盖度[#](“#”表示负向效应)。这说明邻域的植被覆盖度对本地 $PM_{2.5}$ 污染有减弱作用，而邻域的气压、风速及能源消费加剧了本地 $PM_{2.5}$ 污染。另外，邻近地区人口集中度的增加对当地的 $PM_{2.5}$ 污染产生了负面影响，可能是由于大城市吸引了大量从周边地区迁移过来的人口，从而减轻了周边小城市的环境负担。此外，年降水量、年均气温、相对湿度、人均 GDP、产业结构和城市化率对 $PM_{2.5}$ 的空间溢出效应不显著。

表 5 SDM 的直接效应与间接效应估计

变量	直接效应	间接效应	变量	直接效应	间接效应
$\ln F$	-0.049**(-2.48)	0.019**(2.42)	$W \times \ln PGDP$	0.227*** (3.37)	0.155(1.52)
$\ln R$	-0.039***(-2.96)	-0.023(-0.29)	$W \times \ln^2 PGDP$	-0.008***(-2.63)	-0.015(-0.75)
$\ln T$	-0.202(-1.41)	-0.584(-1.08)	$W \times \ln D$	0.006*** (3.11)	-0.012**(-2.36)
$\ln P$	-0.443***(-3.00)	0.633*** (3.81)	$W \times \ln S$	0.022** (2.02)	-0.001(-0.01)
$W \times \ln H$	0.160** (2.35)	-0.141(-0.29)	$W \times \ln E$	0.025*** (2.72)	0.163*** (2.98)
$W \times \ln NDVI$	-0.180**(-2.30)	-0.289*(-1.73)	$W \times \ln U$	-0.008(-1.06)	-0.077(-1.59)

注：***、**、*分别在 0.01、0.05、0.1 水平上显著；括号内为 t 统计值。

4 结论与建议

4.1 结论

运用探索性空间数据分析框架，从时序演进、空间分异、空间集聚、时空动态等方面探究长江经济带 $PM_{2.5}$ 的时空格局特征，并进一步采用空间计量模型甄别和量化自然与社会经济因素贡献程度及空间溢出效应，主要结论如下：

(1)2000~2018 年来长江经济带 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈先升后降的倒 U 形趋势,空间格局呈现下游高于上游,北岸大于南岸的对角分布态势,空间异质性明显。 $PM_{2.5}$ 整体浓度重心位于湖北省内的潜江、荆州与仙桃三市交界处,重心格局变动明显。

(2)长江经济带 $PM_{2.5}$ 污染存在显著的空间正相关,“马太效应”显著。高-高型集聚主要分布在上游的成渝地区和中下游的鄂皖苏地区,低-低型集聚稳定分布在上游的川西、云贵等地区,总体呈现出显著的空间趋同现象和路径依赖特征。

(3) $PM_{2.5}$ 污染内源性相互作用显著,邻域 $PM_{2.5}$ 浓度每增加 1%,将导致本地 $PM_{2.5}$ 浓度至少增加 0.4%。自然和人为因素直接或间接影响着 $PM_{2.5}$ 水平,其中,直接效应强度为:年均气压>人均 GDP>年降水量>能源消费>人口密度>植被覆盖度>相对湿度>年均风速>产业结构;空间溢出效应顺序为:年均气压>能源消费>年均风速>人口密度>植被覆盖度。

4.2 建议

本文通过量化 $PM_{2.5}$ 影响因素,发现自然因子显著性较高,但相比自然系数难以有大的变动,人文因子的实际弹性更好,故面对显著的气象因素,更要找到有效的适应性措施,如合理设计城市风道与道路绿带、加强生态廊道建设等。另一方面,人类不健康的生产方式是造成污染的根本原因,从雾霾频发的社会经济根源着手,严控人为污染物排放是破解 $PM_{2.5}$ 问题的关键。首先,要构建流域大气污染联防联控机制,为实现雾霾统一监测、环境信息共享及突发应急响应提供支撑。其次,雾霾防治应以高污染的城市群为重点,统筹考虑环境承载力与社会经济发展现状,合理划定污染“红线”,建立配套的雾霾防治成效评估考核体系。最后,因地制宜制定污染减排策略,上游地区多处在城市化加速阶段,土地欲望扩张较强,应优化建设用地结构和控制扬尘污染,推动新能源利用设施建设和清洁能源产业发展;中游地区应加强污染源监测与管治,加快产业升级与能源结构调整,严控“三高一低”产业过度膨胀,在承接产业就近转移过程中合理设置环保门槛,警惕成为高能耗、高污染企业的避难所;下游地区应树立绿色城市规划的理念,着重关注城市内涵式发展,适度推动产城融合,积极构建循环产业链条,加快产业基础高级化、产业链现代化,并在绿色技术创新、污染防治攻关、科研合作、成果转化等方面发挥模范带头作用。

参考文献:

- [1]WANG Z B, LIANG L W, WANG X J. Spatiotemporal evolution of $PM_{2.5}$ concentrations in urban agglomerations of China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(6): 878-898.
- [2]KAN H, CHEN R, TONG S. Ambient air pollution, climate change, and population health in China[J]. Environment International, 2012(42): 10-19.
- [3]YUP, XUR B, COELHO M S. The impacts of long-term exposure to $PM_{2.5}$ on cancer hospitalizations in Brazil[J]. Environment International, 2021(154): 1-7.
- [4]PENG Y, BRAUER M, et al. The effect of air pollution on deaths, disease burden, and life expectancy across China and its provinces, 1990-2017: An analysis for the Global Burden of Disease Study 2017[J]. The Lancet Planetary Health, 2020(4): 386-398.
- [5]万庆, 陈鑫, 汪媛, 等. 1998~2016 年长江经济带 $PM_{2.5}$ 时空演化的多尺度分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(10): 2504-2512.
- [6]VAN D A, MARTIN R V, LI C, et al. Regional estimates of chemical composition of fine particulate matter using a combined Geoscience-Statistical method with information from satellites, models, and monitors[J]. Environmental

Science & Technology, 2019, 53(5):2595-2611.

[7]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, 39(8):2954-2962.

[8]蔡海亚, 徐盈之, 孙文远. 中国雾霾污染强度的地区差异与收敛性研究——基于省际面板数据的实证检验[J]. 山西财经大学学报, 2017, 39(3):1-14.

[9]SONG W Z, JIA H F, LI Z L, et al. Using geographical semi-variogram method to quantify the difference between NO₂ and PM_{2.5} spatial distribution characteristics in urban areas[J]. Science of the Total Environment, 2018, 631: 688-694.

[10]夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 等. 2000-2019 年中国 PM_{2.5} 时空演化特征[J]. 环境科学, 2020, 41(11):4832-4843.

[11]朱亚杰, 李琦, 侯俊雄, 等. 运用贝叶斯方法的 PM_{2.5} 浓度时空建模与预测[J]. 测绘科学, 2016, 41(2):44-48.

[12]JIANG L, HE S X, ZHOU H F. Spatio-temporal characteristics and convergence trends of PM_{2.5} pollution: A case study of cities of air pollution transmission channel in Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020 (256):120631.

[13]张殷俊, 陈曦, 谢高地, 等. 中国细颗粒物 (PM_{2.5}) 污染状况和空间分布[J]. 资源科学, 2015, 37(7):1339-1346.

[14]杜震洪, 吴森森, 王中一, 等. 基于地理神经网络加权回归的中国 PM_{2.5} 浓度空间分布估算方法[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(1):122-135.

[15]李光勤, 秦佳虹, 何仁伟. 中国大气 PM_{2.5} 污染演变及其影响因素[J]. 经济地理, 2018, 38(8):11-18.

[16]昌晶亮, 余洪, 罗伟伟. 珠三角地区 PM_{2.5} 浓度空间自相关分析[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(6):853-858.

[17]向堃, 宋德勇. 中国省域 PM_{2.5} 污染的空间实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(9):153-159.

[18]贺祥, 林振山, 刘会玉, 等. 基于灰色关联模型对江苏省 PM_{2.5} 浓度影响因素的分析[J]. 地理学报, 2016, 71(7):1119-1129.

[19]WU W Q, ZHANG M, DING Y T. Exploring the effect of economic and environment factors on PM_{2.5} concentration: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Environmental Management, 2020(268):110703.

[20]杨婉莹, 刘艳芳, 刘耀林, 等. 基于 LUR 模型探究城市景观格局对 PM_{2.5} 浓度的影响——以长株潭城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(9):2251-2261.

[21]王少剑, 高爽, 陈静. 基于 GWR 模型的中国城市雾霾污染影响因素的空间异质性研究[J]. 地理研究, 2020, 39(3):651-668.

[22]ZHOU L, ZHOU C H, YANG F, et al. Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM_{2.5} in China

between 2000 and 2015[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29 (2) :253-270.

[23] 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, 73 (1) :177-191.

[24] HAO Y, LIU Y M. The influential factors of urban PM_{2.5} concentrations in China: A spatial econometric analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112 (2) :1443-1453

[25] 杨昆, 杨玉莲, 朱彦辉, 等. 中国 PM_{2.5} 污染与社会经济的空间关系及成因[J]. 地理研究, 2016, 35 (6) :1051-1060.

[26] CHENG Z H, LI L S, LIU J. Identifying the spatial effects and driving factors of urban PM_{2.5} pollution in China[J]. Ecological Indicators, 2017 (82) :61-75.

[27] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国 PM_{2.5} 跨区域传输特征数值模拟研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34 (6) :1361-1368.

[28] 杨桂山, 徐昔保, 李平星. 长江经济带绿色生态廊道建设研究[J]. 地理科学进展, 2015, 34 (11) :1356-1367.

[29] HAMMER M S, VAN D A, LI C, et al. Global estimates and long-term trends of fine particulate matter concentrations (1998-2018) [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54 (13) :7879-7890.

[30] XIE Y, WENG Q. World energy consumption pattern as revealed by DMSP-OLS nighttime light imagery[J]. GIScience & Remote Sensing, 2016, 53 (2) :265-282.

[31] WANG S J, LIU X P, Yang X, et al. Spatial variations of PM_{2.5} in Chinese cities for the joint impacts of human activities and natural conditions: A global and local regression perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2018 (203) :143-152.