

1998~2016 年长江经济带 PM_{2.5} 时空演化的多尺度分析¹

万庆¹, 陈翥², 汪媛³, 冯兵¹

(1. 武汉工程大学管理学院, 湖北武汉 430205; 2. 中南民族大学经济学院, 湖北 武汉 430074;

3. 武汉工程大学土木工程与建筑学院 湖北 武汉 430074)

【摘要】: 基于全球大气 PM_{2.5} 年均浓度栅格数据集, 采用重力模型、变异系数和探索性空间数据分析等方法, 从区域、省域、市域、县域和栅格等多个尺度, 对长江经济带 PM_{2.5} 时空演化特征进行系统分析。结果发现: (1) 1998~2016 年, 长江经济带 PM_{2.5} 年均浓度均高于全国平均水平, 且大体呈“倒 U 型”变化趋势, 2005 年是长江经济带 PM_{2.5} 年均浓度变化的重要拐点; (2) 长江经济带 PM_{2.5} 的时空演化表现出显著的空间尺度效应, 在不同空间尺度上, PM_{2.5} 年均浓度的空间分异特征具有明显差别, 但其空间差异均呈扩大态势; (3) 长江经济带 PM_{2.5} 年均浓度存在显著的空间正相关性, 且主要表现为高值集聚特征。

【关键词】: PM_{2.5}; 时空演化; 尺度效应; 长江经济带

【中图分类号】: X513 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2019)10-2504-09

DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj201910022

改革开放以来, 由于工业化和城镇化的快速推进, 中国面临的大气污染问题日趋严重。2013 年, 中国遭遇史上最严重的雾霾天气, 导致能见度骤降、航班停飞、高速公路封闭、公交线路暂停运营、中小学停课等连锁反应, 不仅严重影响人们的日常生活和身心健康, 还对经济社会发展和国际形象产生较大的负面效应。2017 年中央政府工作报告提出“加强对大气污染的源解析和雾霾形成机理研究等, 提高应对重污染天气的科学性和精准性”。已有研究发现, 引发严重雾霾的罪魁祸首就是大气颗粒物, 尤其是细颗粒物 PM_{2.5}^[1]。

长江经济带作为中国最重要的东西轴线, 在国土空间开发中具有重要战略地位。然而, 由于沿江重化工业集聚发展, 整个长江流域的空气质量也不尽如人意。近年来, 长江中下游城市化地区雾霾污染集中激化, 给整个流域的绿色发展带来沉重压力。

¹收稿日期: 2019-05-03; 修回日期: 2019-07-08

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (71904151); 教育部人文社会科学研究青年基金项目 (18YJC790153); 湖北省社科基金一般项目 (2017125); 湖北省教育厅人文社会科学研究青年基金项目 (18Q016); 地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室开放基金项目 (2017NGCM01); 国家社科基金项目 (19BJL061, 18CJY021, 17BJY080)

作者简介: 万庆 (1989~), 男, 博士, 讲师, 研究方向为环境经济地理学. E-mail: wanqing1989@126.com

*** 通讯作者** E-mail: 34651180@qq.com

因此，从地理学的角度解析长江经济带 $PM_{2.5}$ 的时空演化特征，识别其空间集聚模式，对于打赢大气污染防治攻坚战、推动长江经济带高质量发展具有重要意义。

当前，学术界围绕中国 PM_{25} 的时空特征开展了诸多研究^[2~12]。考察以往研究成果发现，多数研究基于区域、省域、市域、县域等单一空间尺度而展开，缺少多尺度的对比分析。事实上，由于“可变面元问题”效应的存在，空间尺度也是 $PM_{2.5}$ 时空格局研究不容忽视的问题。对于不同空间尺度， $PM_{2.5}$ 空间分布格局特征通常存在较大差异，在某一空间尺度上所具有的特征规律在另一空间尺度上往往并不能得以体现。因此，若要更全面、准确地揭示 $PM_{2.5}$ 时空演化规律，需要从不同尺度展开比较研究。与此同时，专门针对长江经济带 $PM_{2.5}$ 的研究却相对较少，且大多基于地面站点观测数据^[13~16]。不可否认，地面站点观测数据时间分辨率较高，便于开展小时、日、月、季、年等多时间尺度对比分析，可深入揭示 $PM_{2.5}$ 的时序变化规律^[17~19]。然而，由于设站时间短、布点区域少，中国 $PM_{2.5}$ 站点监测数据的时空覆盖范围十分有限。不仅如此，由于监测仪器被人为干扰的事件不断被曝光，地面站点监测数据的可信度一直饱受质疑。相比之下，基于遥感影像反演的 $PM_{2.5}$ 栅格数据集不仅时间跨度长、空间分辨率高，而且受人为干扰的可能性小，数据质量更好，因而受到国内外学者的青睐^[7]。

鉴于地理学研究对象的多尺度特征，本文采用加拿大达尔豪斯大学大气成分分析小组最新公布的全球大气 $PM_{2.5}$ 年均浓度栅格数据集 (V4. GL. 02)，从区域、省域、市域、县域和栅格等多个尺度，全面揭示长江经济带 $PM_{2.5}$ 的时空演化规律，为全流域大气污染治理提供科学依据。本文的贡献主要体现在 2 个方面：(1) 采用遥感影像反演的 $PM_{2.5}$ 年均浓度数据，更加客观地反映长江经济带 $PM_{2.5}$ 的现状特征；(2) 考虑空间尺度效应，从区域、省域、市域、县域和栅格等多个空间尺度，更加全面地揭示长江经济带 $PM_{2.5}$ 的空间格局和演化过程。

1 研究方法数据来源

1.1 研究区域与数据来源

依据《长江经济带发展规划纲要》，长江经济带覆盖上海、浙江、江苏、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南和贵州等九省二市。截止 2017 年 12 月，长江经济带共有 124 个地级行政区（含 108 个地级市和 16 个自治州）、1 069 个县级行政区（含 361 个市辖区、138 个县级市、510 个县和 58 个自治县）。

本文使用的数据包括长江经济带行政区域界线矢量数据和 $PM_{2.5}$ 年均浓度数据。行政区域界线矢量数据来源于国家基础地理信息中心提供的 1 : 100 万基础地理信息数据库。 $PM_{2.5}$ 年均浓度数据来源于加拿大达尔豪斯大学国际大气成分分析小组提供的 1998–2016 年全球大气 $PM_{2.5}$ 年均浓度栅格数据集 (V4. GL. 02)。其下载网址为 http://iizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page_id=140。该数据集的生成方法比较复杂，首先将地球化学传输模型与 NASA 遥感影像反演得到的气溶胶光学深度 (AOD) 数据相结合，估计得到地面 $PM_{2.5}$ 浓度数据。然后，结合地面站点监测数据，采用地理加权回归模型对其进行校正，最终得到空间分辨率为 10 km 的栅格数据^[20]。为获取 1998–2016 年长江经济带的 $PM_{2.5}$ 年均浓度数据集，首先采用 ArcMap 10. 5 分别对各年度的全球大气 $PM_{2.5}$ 年均浓度栅格数据进行基本的空间校正，然后以不同层级的行政区划界线矢量数据作为掩膜，对校正后的栅格数据进行裁切或分区统计，最终得到不同空间尺度上各样本单元的 PM_{25} 年均浓度数值（单位为 $\mu g/m^3$ ）。

1.2 研究方法

目前，常用于地理实体和地理现象时空格局研究的定量方法主要有重力模型、变异系数和探索性空间数据分析等。其中，重力模型旨在探索地理实体和地理现象分布的空间非对称性，变异系数侧重考察地理实体和地理现象分布的非均衡性，探索性空间数据分析则聚焦地理实体和地理现象分布的空间依赖性。

1.2. 1 重力模型

借鉴周亮等^[7]的研究思路，引入重心概念揭示长江经济带 PM_{2.5} 污染重心在空间上的迁移过程。污染重心的经纬度坐标计算公式如下：

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times S_i \times X_i}{\sum_{i=1}^n W_i \times S_i}, \\ \bar{Y} &= \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times S_i \times Y_i}{\sum_{i=1}^n W_i \times S_i}\end{aligned}\quad (1)$$

式中： $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 分别为 PM_{2.5} 污染重心的经度和纬度； n 表示样本数； i 表示个体序号； X_i 、 Y_i 分别为第 i 个个体的几何中心的经度和纬度； S_i 为第 i 个个体的面积； W_i 为第 i 个个体的 PM_{2.5} 年均浓度值。

1.2.2 变异系数

采用变异系数定量表征长江经济带 PM_{2.5} 浓度的空间差异，其计算公式为：

$$CV = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中： CV 为变异系数； n 表示样本数； i 表示个体序号； x_i 为第 i 个个体的 PM_{2.5} 年均浓度值； $\bar{x}$ 为 PM_{2.5} 年均浓度的样本均值。 CV 值越大，说明样本中所有个体的 PM_{2.5} 年均浓度值差异越大，反之，说明差异越小。

1.2.3 探索性空间数据分析

(1) 全局空间自相关分析。采用全局莫兰指数测度长江经济带 PM_{2.5} 的空间关联特征。全局莫兰指数的计算公式如下^[21]：

$$\begin{aligned}I &= \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \\ z_I &= \frac{I - E[I]}{\sqrt{V[I]}}\end{aligned}\quad (3)$$

式中： I 是全局莫兰指数； n 是样本数； x_i 和 x_j 分别表示个体 i 和个体 j 的 PM_{2.5} 年均浓度值； w_{ij} 为空间权重，采用 queen 准则赋权，即相邻为 1，不相邻为 0； $\bar{x}$ 为 PM_{2.5} 年均浓度的样本均值； S^2 是 PM_{2.5} 年均浓度的样本方差； z_I 是标准化统计量，若 z_I 为正且显著，则表明 PM_{2.5} 存在空间正相关性；若 z_I 为负且显著，则表明 PM_{2.5} 存在空间负相关性；若不显著，表示 PM_{2.5} 不存在空间相关性。

(2)高/低聚类分析。采用 Getis 和 Ord 提出的 General G 指数方法进一步判断空间自相关模式，即 PM_{2.5} 是以高值集聚还是低值集聚为主导。General G 及其标准化统计量的计算公式如下^[21]：

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j}$$

$$z_G = \frac{G - E[G]}{\sqrt{V[G]}} \quad (4)$$

若 z_G 大于零且显著，则表明 PM_{2.5} 以高值集聚为主；若 z_G 小于零且显著，则表明 PM_{2.5} 以低值集聚为主；若 z_G 不显著，则表明 PM_{2.5} 不存在明显的空间集聚。

2 结果与分析

2.1 时序演变特征

从图 1 可以看出，1998~2016 年，长江经济带 PM_{2.5} 年均浓度大体呈现先增加后稳定再减小的“倒 U 型”变化趋势。PM_{2.5} 年均浓度由 1998 年的 18.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 增加至 2016 年的 24.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，年均增加 0.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，增长幅度超过全国平均水平。1998~2005 年，PM_{2.5} 年均浓度总体呈上升态势。2005 年以后，PM_{2.5} 年均浓度的上升态势在一定程度上得到控制，呈现较为稳定的波动数值。一直到 2012 年，PM_{2.5} 年均浓度始终在 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 上下波动。这表明，2005 年是长江经济带 PM_{2.5} 年均浓度变化的重要拐点。2012 年以后，PM_{2.5} 年均浓度在经历了连续两年的增长后又开始出现下降趋势。然而，相比之下，长江经济带 PM_{2.5} 浓度依然较高，不仅高于全国平均水平 (17.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 37.8 个百分点，也远远超过了世界卫生组织公布的安全值 (20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。而且，长江经济带 PM_{2.5} 浓度高于全国平均水平的趋势仍未得到根本性扭转。可以预见，在今后很长一段时期内，长江经济带依然将是中国大气污染治理的重点区域。

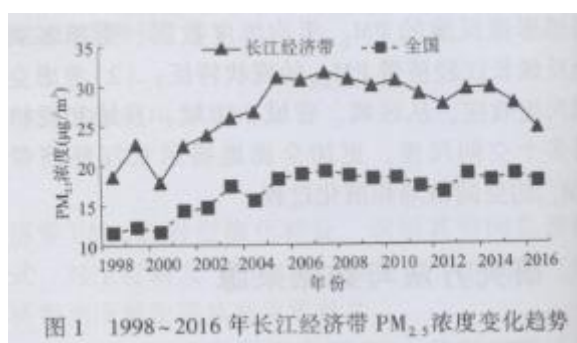


图 1 1998~2016 年长江经济带 PM_{2.5} 浓度变化趋势

2.2 空间分异特征

2.2.1 区域尺度

根据表 1，2016 年，长江三角洲、长江中游和成渝三大国家级城市群 PM_{2.5} 年均浓度均高于长江经济带平均水平，且符合下游高于中游、中游高于上游的梯度分异规律。1998~2016 年，三大城市群 PM_{2.5} 年均浓度均呈现先增加后减少的演化态势。其中，

长江三角洲城市群 $PM_{2.5}$ 年均浓度增长幅度最大, 由期初的 $27.02 \mu g/m^3$ 增加至期末的 $43.90 \mu g/m^3$, 年均增加 $0.94 \mu g/m^3$, 远高于长江经济带平均增长水平; 长江中游城市群次之, 年均增加 $0.50 \mu g/m^3$, 也高于长江经济带平均增长水平; 而成渝城市群基本保持不变。从变异系数来看, 三大城市群之间的 PM_{25} 年均浓度差异经历了先扩大、后缩小、再扩大的变化过程, 且期末远高于期初。这表明, 长江经济带 $PM_{2.5}$ 年均浓度的区域差异明显且呈扩大趋势。

表 1 长江经济带三大国家级城市群 $PM_{2.5}$ 浓度

年份	1998	2004	2010	2016
长江经济带	18.65	26.74	30.59	24.55
长江三角洲城市群	27.02	41.97	47.74	43.90
长江中游城市群	25.60	37.16	43.74	34.58
成渝城市群.	24.97	31.43	38.03	24.99
变异系数 CV	0.04	0.14	0.11	0.27

2.2.2 省域尺度

由表 2 可以看出, 2016 年, 长江经济带仅有四川和云南 2 个省份 $PM_{2.5}$ 年均浓度低于全国平均水平 ($17.82 \mu g/m^3$), 其余七省二市均高于全国平均水平, $PM_{2.5}$ 年均浓度的省域差异明显。1998-2016 年, 在省域尺度上, 长江经济带 PM_{25} 年均浓度的空间格局基本稳定。 $PM_{2.5}$ 年均浓度最高的 3 个省份始终是江苏、上海和安徽, 最低的 2 个省份则一直是四川和云南。其余省份 $PM_{2.5}$ 年均浓度的相对位次略有变化, 但变化幅度并不剧烈。值得关注的是, 浙江的 $PM_{2.5}$ 年均浓度不仅长期低于同属下游的江苏、上海和安徽, 而且还低于中游的江西、湖北和湖南。也就是说, 从省域尺度来看, 长江经济带 $PM_{2.5}$ 年均浓度并未呈现下游高于中游、中游高于上游的梯度分异规律。根据变异系数计算结果, 1998~2016 年长江经济带 11 省市 $PM_{2.5}$ 年均浓度的变异系数总体呈上升态势。这表明, 长江经济带 $PM_{2.5}$ 年均浓度的省域差异不断扩大。这主要归因于江苏、上海和安徽 3 省市 $PM_{2.5}$ 年均浓度的快速增长。

表 2 长江经济带 11 省份 $PM_{2.5}$ 浓度

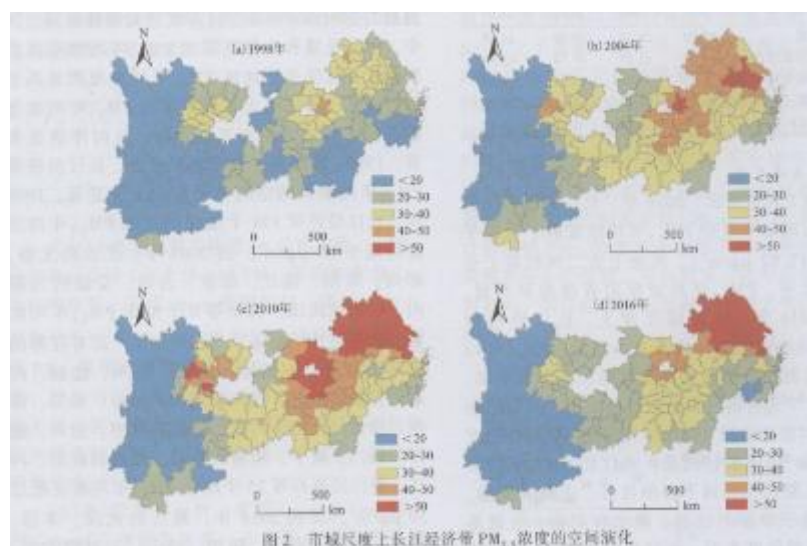
年份	1998	2004	2010	2016
上海	24.72	47.46	51.60	50.82
江苏	30.54	46.93	60.46	58.50
浙江	19.68	30.19	31.75	26.39
安徽	30.96	43.31	52.31	44.80
江西	17.68	33.77	34.05	29.93
湖北	27.35	33.13	43.35	32.98
湖南	22.96	33.57	39.38	30.72
重庆	21.69	32.03	35.47	23.29
四川	12.16	14.87	18.30	12.82
贵州	18.08	28.84	29.03	20.82
云南	12.41	17.23	17.00	14.52
变异系数 CF	0.30	0.32	0.37	0.46

2. 2. 3 市域尺度

由图 2 可知,在市域尺度上,2016 年长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度总体呈现从东北向西南梯度递减的空间分异特征,且存在三大特殊区域。其中,江苏全境和安徽东部为 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度高值聚集区,江汉平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度明显高于周边地区,浙江绝大多数地市的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度则远低于长江三角洲其他地区。从时序演变来看,1998~2016 年,在市域尺度上,长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的空间格局变化十分显著。1998 年,长江经济带 124 个地级行政区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度均低于 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。到 2004 年,江苏的无锡、苏州、常州、镇江、南京、台州,安徽的马鞍山,湖北的武汉、鄂州等 9 个地市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度开始超过 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。至 2010 年,又有江苏的徐州、宿迁、连云港、淮安、扬州、盐城、南通,安徽的淮北、宿州、亳州、蚌埠、阜阳、淮南、滁州、合肥、六安,湖北的孝感、荆州、随州、荆门、咸宁,湖南的岳阳,四川的成都、内江,浙江的嘉兴等 25 个地市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度超过 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。而到 2016 年,湖北的武汉、孝感、鄂州、荆州、荆门、随州、咸宁,安徽的六安,湖南的岳阳,四川的成都和内江等 11 个地市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度降至 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。同时,四川和云南大部以及贵州西部地市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度保持在 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以内。根据计算,在市域尺度上,长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的变异系数先缩小后增加,先由 1998 年的 0.40 降至 2004 年的 0.36,后逐步增加到 2016 年的 0.45。这表明 1998~2016 年长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的市域差异先缩小后扩大,且期末大于期初。

2. 2. 4 县域尺度

根据图 3,在县域尺度上,2016 年长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度也大体呈现由东北向西南梯度递减的空间分异特征。这一特征与市域尺度上的分析结果相一致。具体来看,江苏省绝大多数县市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度超过 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$,而贵州、云南 2 省大部分县市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度均低于 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。从时序演变来看,长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度低于 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的县级行政区数量有所减少,由 1998 年的 415 个减少至 2016 年的 388 个。同时, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度高于 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的县级行政区从无到有,至 2016 年已达到 177 个,占长江经济带国土面积的比重超过 8%。根据测算,在县域尺度上,长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的变异系数也呈现先缩小后增加的变化趋势,先由 1998 年的 0.43 降至 2004 年的 0.39,后逐步增加到 2016 年的 0.47。这表明,1998~2016 年,长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的县域差异先缩小后扩大,且期末大于期初。



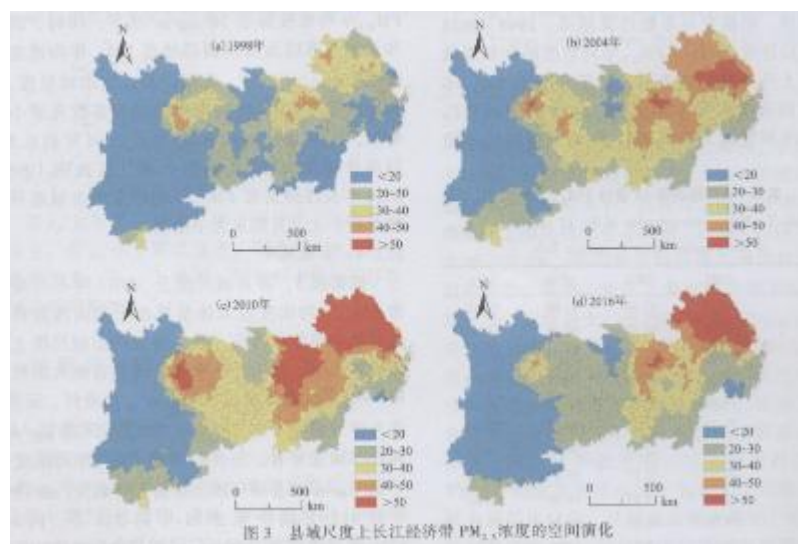


图3 县城尺度上长江经济带 $PM_{2.5}$ 浓度的空间演化

2.2. 5 栅格尺度

由图4可知，在栅格尺度上，长江经济带 $PM_{2.5}$ 年均浓度的核心边缘结构特征十分明显。1998年，长江经济带形成了皖北地区、江汉平原、四川盆地3大 $PM_{2.5}$ 年均浓度高值聚集区。至2016年，长江经济带 $PM_{2.5}$ 年均浓度高值聚集区“三足鼎立”的空间格局瓦解，开始形成双核心的空间格局。这说明，经过近20年的努力，四川盆地大气污染治理取得了显著成效，正逐步退出 $PM_{2.5}$ 年均浓度高值聚集区行列。从污染重心的变化来看，1998年长江经济带 $PM_{2.5}$ 污染重心位于湖南省慈利县境内，在2004年则向该县东南方向移动32.17 km，2010年又转向东北方向移动31.25 km至石门县境内，但仍位于长江经济带几何中心的西南方位。2016年，长江经济带 $PM_{2.5}$ 污染重心进一步向东北方向移动32.45 km至澧县境内，开始出现在几何中心的东北方位。这表明，1998~2016年长江经济带 $PM_{2.5}$ 污染重心不断东移，东部和北部 $PM_{2.5}$ 年均浓度逐渐超过西部和南部。

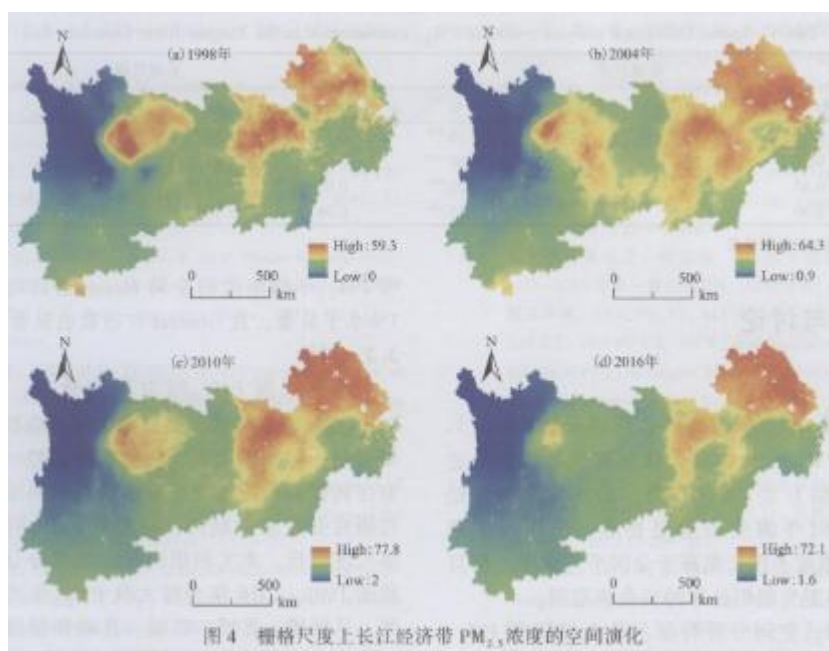


图4 栅格尺度上长江经济带 $PM_{2.5}$ 浓度的空间演化

2. 2.6 多尺度对比分析

通过上述分析可以发现,在不同尺度上,长江经济带 $PM_{2.5}$ 年均浓度所表现出的时空分异规律具有较大异质性,即存在空间尺度效应。具体而言, $PM_{2.5}$ 年均浓度“下游高于中游、中游高于上游”的梯度分异特征仅体现在区域尺度上,在其他尺度上并不显著。同时,尽管在区域、省域、市域和县域尺度上,2016 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度的空间差异均大于 1998 年,但期间的变化趋势并不一致。在区域尺度上, $PM_{2.5}$ 年均浓度的空间差异经历了先扩大、后缩小、再扩大的变化过程。在省域尺度上, $PM_{2.5}$ 年均浓度的空间差异则不断扩大。在市域和县域尺度上, $PM_{2.5}$ 年均浓度的空间差异先缩小后扩大。

表 3 长江经济带 $PM_{2.5}$ 污染重心的移动

年份	经度	纬度	所在地区	方向	距离 (km)
1998	110° 53' 45"E	29° 24' 45"N	湖南省慈利县	—	—
2004	111° 11' 14"E	29° 16' 16"N	湖南省慈利县	东南	32.17
2010	111° 21' 11"E	29° 30' 40"N	湖南省石门县	东北	31.25
2016	111.48' 53"E	29° 29' 06"N	湖南省澧县	东北	34.25

2. 3 空间关联特征

根据表 4,无论是在市域尺度上,还是在县域尺度上,长江经济带 $PM_{2.5}$ 年均浓度的全局莫兰指数均为正且在 1%水平显著。这表明,1998~2016 年长江经济带 $PM_{2.5}$ 存在显著的空间正相关。General G 指数计算结果则说明,长江经济带 $PM_{2.5}$ 的空间关联以高值集聚为主导,即 $PM_{2.5}$ 年均浓度较高的市县在空间上彼此接近、相互影响。也就是说,一些市县的 $PM_{2.5}$ 年均浓度值过高,不仅会影响本地经济社会发展,还会推高邻近县市 $PM_{2.5}$ 年均浓度,影响周边地区经济社会发展。相反,尽管有些市县 $PM_{2.5}$ 年均浓度值较低,空气质量优良,但很难对周边县市产生正的外部性,进而促进邻近地区 $PM_{2.5}$ 浓度下降。可见,长江经济带大气污染防治必须坚持联防联控,以 $PM_{2.5}$ 年均浓度值过高的区域为重点,有针对性地采取措施铁腕治理,才能彻底扭转长江经济带 $PM_{2.5}$ 年均浓度长期高于全国平均水平的趋势。

表 4 长江经济带 $PM_{2.5}$ 空间关联分析结果

年份	市域尺度				县域尺度			
	Moran I	z_1	General G	z_G	Moran I	z_1	General G	z_G
1998	0.78	13.99 ***	0.05	5.25 ***	0.93	51.55 ***	0.01	20.36***
2004	0.83	15.03 ***	0.05	5.90 ***	0.95	52.49 ***	0.01	19.33***
2010	0.85	15.28 ***	0.05	6.20 ***	0.95	52.50 ***	0.01	20.20***
2016	0.90	16.21***	0.05	7.12 ***	0.96	53.16***	0.01	21.79 ***

注:***表示在 1%水平显著。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) $PM_{2.5}$ 时序演变特征:1998~2016 年,长江经济带 $PM_{2.5}$ 年均浓度大体呈现先增加后稳定再减小的“倒 U 型”变化趋势,2005 年是长江经济带 $PM_{2.5}$ 时序演变的重要拐点。长江经济带 $PM_{2.5}$ 年均浓度不仅长期高于全国平均水平,而且远超出世界卫生组织公布的安全值范围。

(2) $PM_{2.5}$ 空间分异特征：长江经济带 $PM_{2.5}$ 年均浓度的时空演化表现出明显的空间尺度效应。 $PM_{2.5}$ 年均浓度“下游高于中游、中游高于上游”的梯度分异特征仅体现在区域尺度上，在其他尺度上并不显著。同时，尽管在区域、省域、市域和县域尺度上，2016年 $PM_{2.5}$ 年均浓度的空间差异均大于1998年，但期间的变化趋势并不一致。在区域尺度上， $PM_{2.5}$ 年均浓度的空间差异经历了先扩大、后缩小、再扩大的变化过程。在省域尺度上， $PM_{2.5}$ 年均浓度的空间差异则不断扩大。在市域和县域尺度上， $PM_{2.5}$ 年均浓度的空间差异先缩小后扩大。栅格尺度上， $PM_{2.5}$ 年均浓度呈现核心—边缘结构特征，污染重心不断东移。

(3) $PM_{2.5}$ 空间关联特征：长江经济带 $PM_{2.5}$ 年均浓度存在显著的空间正相关，且主要表现为高值集聚特征。在市域和县域尺度上，长江经济带 $PM_{2.5}$ 年均浓度的全局 Moran 指数均为正且在 1%水平显著，且 General G 指数也显著为正。

3.2 讨论

准确把握 $PM_{2.5}$ 时空演化规律，精准识别 $PM_{2.5}$ 空间关联模式，是打赢大气污染防治攻坚战的关键，可为区域大气污染联防联控、污染产业有序转移和环境政策精准落地提供科学依据。以往研究受数据的制约，缺乏对 $PM_{2.5}$ 时空演化的多尺度分析。本文利用国际大气成分分析小组提供的 1998–2016 年全球大气 $PM_{2.5}$ 年均浓度数据集，从区域、省域、市域、县域和栅格等多个空间尺度，揭示长江经济带 $PM_{2.5}$ 时空演化特征，在一定程度上弥补了已有研究在数据来源和分析思路方面的不足。本文发现，长江经济带 $PM_{2.5}$ 时空演化特征表现出明显的空间尺度效应。这一结论可为未来相关研究提供重要参考。然而，由于缺乏对长江经济带 $PM_{2.5}$ 时空演化驱动机理的深入解析，本文未能针对长江经济带大气污染有效治理提出对策建议，这将是未来研究的主攻方向。

参考文献：

- [1] GUAN D B, SU X, ZHANG Q, et al. The socioeconomic drivers of China's primary $PM_{2.5}$ emissions[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(2) : 1–9.
- [2] QIN S S, LIU F, WANG J Z, et al. Analysis and forecasting of the particulate matter (PM) concentration levels over four major cities of China using hybrid models[J]. Atmospheric Environment, 2014, 98: 665–675.
- [3] YAO L, LU N. Spatiotemporal distribution and short-term trends of particulate matter concentration over China, 2006–2010 [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(16) : 9665–9675.
- [4] LI R, CUI L L, LI J L, et al. Spatial and temporal variation of particulate matter and gaseous pollutants in China during 2014–2016[J]. Atmospheric Environment, 2017, 161: 235–246.
- [5] WANG S J, ZHOU C S, WANG Z B, et al. The characteristics and drivers of fine particulate matter ($PM_{2.5}$) distribution in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017(142) : 1800–1809.
- [6] LIU M M, BI J, MA Z W. Visibility-based $PM_{2.5}$ concentrations in China: 1957–1964 and 1973–2014[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(22) : 13161–13169.
- [7] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 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. 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 2011 [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72 (11): 2079–2092.

-
- [8] LI T W, SHEN H F, ZENG C, et al. Point-surface fusion of station measurements and satellite observations for mapping $PM_{2.5}$ distribution in China : Methods and assessment [J]. Atmospheric Environment, 2017, 152 : 477-489.
- [9] YE W F, MA Z Y, HA X Z. Spatial-temporal patterns of $PM_{2.5}$ concentrations for 338 Chinese cities [J]. Science of the Total Environment, 2018, 631-632: 524-533.
- [10] LIU J Z, LI W F, WU J S. A framework for delineating the re-gional boundaries of $PM_{2.5}$ pollution : A case study of China [J]. Environmental Pollution, 2018, 235: 642-651.
- [11] BAI K X, MA M L, CHANG N, et al. Spatiotemporal trend a-nalysis for fine particulate matter concentrations in China using high-resolution satellite - derived and ground - measured $PM_{2.5}$ data [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 233 : 530-542.
- [12] 卢德彬, 毛婉柳, 杨东阳, 等. 基于多源遥感数据的中国 $PM_{2.5}$ 变化趋势与影响因素分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3) : 651-660. LU D B, MAO W L, YANG D Y, et al. Analysis on the trend and influencing factors of $PM_{2.5}$ in China based on multi-source remote sensing data [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(3) : 651-660.
- [13] 吴传清, 吴重仪. 长江经济带环境质量测度与提升策略 [J]. 宏观质量研究, 2018, 6(1): 1-14. WU C Q, WU Z Y. Measurement of environment quality and strategies for improvement in the Yangtze River Economic Belt Zone [J]. Journal of Macro-Quality Research, 2018, 6(1): 1-14.
- [14] 杨冕, 王银. 长江经济带 $PM_{2.5}$ 时空特征及影响因素研究 [J]. 中国人口 • 资源与环境, 2017, 27(1): 91-100. YANG M, WANG Y. Spatial-temporal characteristics of $PM_{2.5}$ and its influencing factors in the Yangtze River Economic Belt [J]. China Population Resources and Environment, 2017, 27(1) : 91-100.
- [15] 左芝鲤, 郭海湘, 成金华. 长江经济带空气质量影响因素研究 [J]. 环境经济研究, 2018, 3(4): 150-167. ZUO Z L, GUO H X, CHENG J H. The study on the influential factors of air quality in the Yangtze River Economic Belt [J]. Journal of Environmental Economics, 2018, 3(4) : 150-167.
- [16] 柏玲, 姜磊, 周海峰, 等. 长江经济带空气质量指数的时空特征及驱动因素分析——基于贝叶斯空间计量模型的实证 [J]. 地理科学, 2018, 38(12) : 2100-2108. BAI L, JIANG L, ZHOU H F, et al. Spatio-temporal characteristics of air quality index and its driving factors in the Yangtze River Economic Belt: An empirical study based on Bayesian spatial econometric model [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(12) : 2100-2108.
- [17] 戴昭鑫, 张云芝, 胡云锋, 等. 基于地面监测数据的 2013~2015 年长三角地区 $PM_{2.5}$ 时空特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(5) : 813-821. DAI Z X, ZHANG YZ, HU Y, et al. Spatial-temporal characteristics of $PM_{2.5}$ in Yangtze River Delta (Yrd) region based on the ground monitoring data from 2013 -2015 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(5): 813-821.
- [18] 毛婉柳, 徐建华, 卢德彬, 等. 2015 年长三角地区城市 $PM_{2.5}$ 时空格局及影响因素分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(2) : 264-272. MAO W L, XU J H, LU D B, et al. An analysis of the spatial-temporal pattern and influencing factors of $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Delta in 2015 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(2) : 264-272.

[19] 柏玲, 姜磊, 陈忠升. 长江中游城市群 $PM_{2.5}$ 时空特征及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5) : 960-968. BAI L, JIANG L, L. HEN Z 3. Spatio-temporal characteristics of $PM_{2.5}$ and its influencing factors of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Resources and En-vironment in the Yangtze Basin, 2018, 27(5) : 960-968.

[20] van DONKELAAR A, MARTIN R V, LI C, et al. Regional es-timates 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.

[21] 徐建华. 地理建模方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015. XU J H. Geographical modelling methods [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015.