

# 中国地级市尺度上细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 浓度的时空分异格局与成因探究

吴子君

同济大学建筑与城市规划学院 上海 200082

**摘要:** 改革开放以来,中国城镇化进程迅猛,伴随的是高能耗增长与生态失衡,导致PM<sub>2.5</sub>污染问题严峻。随着环保意识的提升,生态文明与高质量发展成为共识。本文基于2013至2023年中国地级市PM<sub>2.5</sub>年均浓度数据,运用ESDA方法分析时空变化。结果显示,两时段内PM<sub>2.5</sub>均呈空间聚集,但2023年聚集度减弱,总体趋势向好,呈现出“总体向好,北优南劣”的空间格局。局部地区改善显著,尤其是南部沿海,而山西、河南、河北部分地区恶化,归因于重工业生产与特殊的地理环境。进一步分析表明,煤炭消耗是PM<sub>2.5</sub>主要源头,人均GDP正相关,绿地覆盖率则负相关。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 时空分异; 空间格局; 可持续发展

## 1 引言

雾霾是空气污染的主要形式之一,而PM<sub>2.5</sub>则是引起雾霾的重要污染物。从2013到2023的十年时间内,正是我国由增量扩张转向存量挖潜的城市建设阶段,也是由粗放型增长转向高质量增长的城市发展阶段。考虑到中国高能耗的经济增长模式和不环保的城镇化模式是PM<sub>2.5</sub>污染的主要诱因<sup>[1]</sup>,PM<sub>2.5</sub>浓度的时空变化或可作为中国经济可持续发展和生态文明建设的成果的一种测度。

本文运用ESDA(探索性空间数据分析)的空间统计方法来研究全中国地级市尺度上PM<sub>2.5</sub>年平均浓度在2013-2023期间的空间分布演进规律及成因。空间依赖表现在事物和现象在空间上相互依赖、相互制约和相互作用。PM<sub>2.5</sub>存在空间扩散,是一个空间依赖性很强的问题,适合于使用ESDA方法研究。

## 2 研究方法和数据

### 2.1 数据来源

各省煤炭消耗量来源于《中国能源统计年鉴2023》,其他数据来源于《中国城市统计年鉴2013》和《中国城市统计年鉴2023》。

### 2.2 研究方法

1969年Tober提出地理学第一定律,即任何事物都是空间相关的,距离近的事物空间相关性更大。空间相关性分析包括全局空间自相关分析和局部空间自相关分析。PM<sub>2.5</sub>浓度的空间分异是多因素共同作用的结果,为

此采用双变量空间自相关分析方法对属性指标之间的空间关联特性进行测度。

由于本文数据来源均以行政单元划分,故空间自相关分析采用的空间权重矩阵定义为Queen一阶邻接,后文不再赘述。

## 3 PM<sub>2.5</sub> 浓度演变的时空分异格局

### 3.1 空间数据制图

在ArcGIS 10.5软件中利用自然间断点分类方式制图,得到2013、2023年全国各地级市的PM<sub>2.5</sub>年平均浓度分布图。根据中国《环境空气质量标准》中PM<sub>2.5</sub>的年均浓度限值为35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,将0-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 划分为优,10-35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 划分为良,35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上划分为污染(图1)。

十年间PM<sub>2.5</sub>的整体变化情况呈现“总体向好,南优北劣”格局;轻度污染城市数量减少、范围缩小,广西、广东、浙江、江苏等南部省市有明显改善;但同时浓度在0-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的优秀城市也在减少,空气质量下降的城市主要出现在我国北部。新疆东部、甘肃西部、内蒙古自治区北部等地区PM<sub>2.5</sub>浓度有所上升,从“优”降级为“良”;山西、青海与内蒙古的部分地区空气质量恶化明显,出现了若干轻度污染城市,尤其是山西省几乎全部被轻度污染城市覆盖。可能的原因是,这些城市发展较为滞后,2013年尚未受到严重污染,之后城镇化进度加快,导致污染程度加重。

### 3.2 空间自相关分析

PM<sub>2.5</sub>是以地级市为单位进行统计的,而空间依赖性不受边界划分的影响。同时,PM<sub>2.5</sub>污染是一种典型的区域性污染,能远距离传输,因此PM<sub>2.5</sub>浓度值存在空间自

**作者简介:** 吴子君(1999年12月—),女,汉族,河南省固始县人,硕士。主要研究方向为城乡社区发展与规划。

相关的可能性极大。

为了揭示2013-2023年的PM2.5浓度的空间分布是否有共同的空间趋势，运用GeoDA软件计算出2013-2023年的PM2.5的双变量莫兰指数。结果显示，双变量Moran's I为0.527，高于期望值，且结果通过了显著性检验。可

以认为二者的空间分布格局具有极强的相似性，也就是说，2023的PM2.5基本延续了2013的空间格局。这一方面说明PM2.5浓度的高低与各省市固有的空间位置有一定联系，也说明导致PM2.5的污染源尚未得到根本性改善。

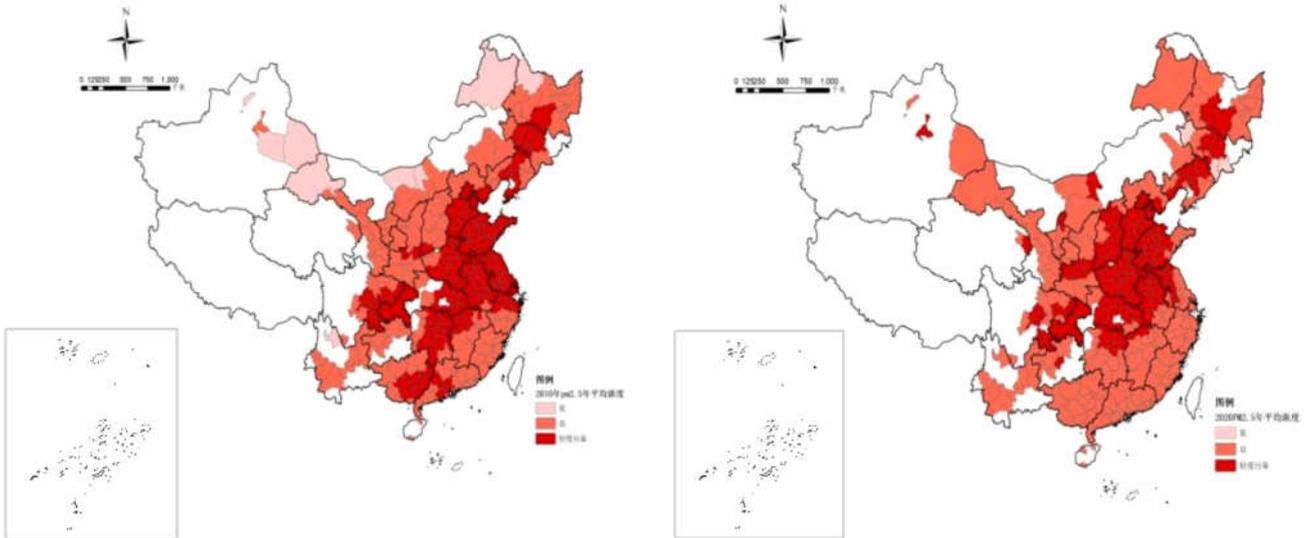


图1 2013年与2023年PM2.5年平均浓度分级图

### 3.3 聚类模式演变特征

全局双变量莫兰指数可以说明总体空间依赖性，但不能揭示局部状况。为了更好地比较十年间PM2.5空间分布的高低值聚类特征，在GeoDA中使用双变量LISA聚类图描述冷热点分布情况。

为2023年PM2.5浓度。结果显著的大部分地区都表现为“高-高”聚类和“低-低”聚类，说明2013到2023的十年时间内PM2.5的空间聚类模式没有发生太大变化，仍然保持相似程度的属性。PM2.5浓度较高的热点（“高-高”聚类）主要出现在华北的河南、河北、山东、山西，范围跨越四省，呈现出大规模的空间集聚趋势。从地理位置和气象条件上看，这里处于我国中部地区，空气不流通，降水量少，导致污染物聚集；从污染排放上看，山东、河南、河北、山西都是我国的煤炭消耗大省，碳排放和能源消耗长期位居全国前列。

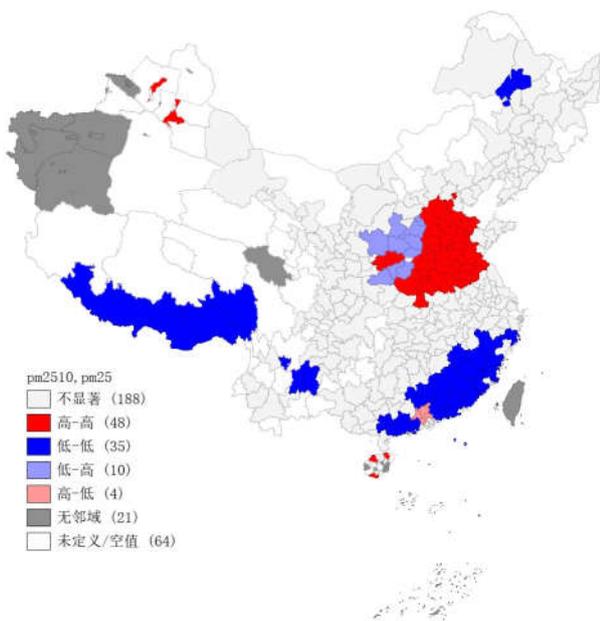


图2 2013年与2023年LISA聚类图

将第一变量定义为2013年PM2.5浓度，第二变量定义

空气质量良好的冷点（“低-低”聚类）出现在西藏、云南等地，由于海拔较高、人迹罕至，加上高大山脉阻隔了污染物扩散，PM2.5浓度长期维持在低水平；冷点还出现在南部至东南沿海一带城市，涉及广东、福建、浙江等省。这些地方多为海拔低平的台地、平原等，受亚热带季风气候影响，温暖湿润的海风流通性强，空气对流快，此外海水也会吸附一定的污染物。

“低-高”聚类则表示PM2.5浓度相对水平下降，这些地区主要集中在陕西省的延安、商洛、河南省的三门峡、洛阳以及山西省的临汾、晋城、晋中、阳泉等城市。这些城市本身地理位置处于内陆，空气不流通，静风天气较多，且降雨量少，污染物扩散和沉降能力差；陕西、山西等地位于黄土高原，土质松散，地面扬尘严

重；此外，这些地区的城市多建于环山之中，受山谷风、热岛效应等影响，污染物长期聚集在城市上空。因此如果不严格控制污染物排放量，很容易出现污染物聚集。而在2013-2023的十年时间内，由于工业污染严重、燃煤量大等原因加重了污染。以污染情况最严重的山西省为例，由于煤炭资源丰富，这里重工业企业密集。炼焦和钢铁工业是山西的支柱产业，而炼焦和钢铁行业都是PM2.5的主要来源。

“高-低”聚类出现在广东省广州、佛山等市，该地区空气质量明显改善。以广州市为例，据相关研究，广州市PM2.5来源占比最大的是机动车辆为代表的移动源，2018年来实行“减煤、控车、降尘、少油烟”大气污染防治措施取得良好效果。

#### 4 影响因素

##### 4.1 数理统计

根据PM2.5形成的原因，选取等全市常住人口、人口密度、国内生产总值、人均GDP、第二产业结构占比、各省煤炭消耗量、城市建成区面积、建成区绿地面积占

比、人均城市道路面积、城市客货运总量10个指标。

为定量表示PM2.5与影响因素的关系，利用SPSS将10个指标与2023年的PM2.5进行皮尔森相关性分析，考虑各指标可能与PM2.5浓度存在非线性关系，将每个指标的平方参与到模型的建立过程中。有5个变量通过了显著性检验：人均GDP（ $P = 0.023$ ）、建成区绿化面积百分比（ $P = 0.001$ ）、各省煤炭消耗量（ $P = 0.000$ ）、全市常住人口的平方（ $P = 0.006$ ）、客货运总量的平方（ $P = 0.006$ ）。

##### 4.2 全局空间自相关分析

上述研究表明PM2.5浓度具有显著的空间依赖性，因此其影响因素还需要考虑空间位置。利用GeoDA计算出通过Pearson相关性分析的各变量的全局莫兰指数（表1）。结果显示，PM2.5和人均GDP、建成区绿地面积百分比、各省煤炭消耗量的全局莫兰指数均大于0，空间分布表现为聚集模式，结果在0.001的水平上显著。而全市常住人口的平方、客货运总量的平方没有通过显著性检验，表现出随机分布。

表1 全局莫兰指数

	人均GDP	建成区绿地面积百分比	各省煤炭消耗量	全市常住人口的平方	客货运总量的平方
全局Moran's I	0.398	-0.455	0.672	0.045	0.012
z值	11.7	-13.96	16.759	1.43	0.319
p值(999次置换)	0.001	0.001	0.001	0.076	0.44

##### 4.3 双变量全局自相关

运用GeoDA的双变量全局Moran's I指数以此对PM2.5及上述通过显著性检验的3个变量进行研究。结果全局双变量Moran's I均大于期望值。其中，各省煤炭消耗量与人均GDP呈现出空间正相关，在99%的置信水平下，各省煤炭消耗量的全局双变量Moran's I指数达到0.409。这说明煤炭消耗量是影响PM2.5浓度的首要因素，对比PM2.5浓度的高值聚集区域，都集中在煤炭消耗和碳排放大省。

人均GDP也与PM2.5浓度呈现出正相关，全局双变量Moran's I指数为0.176。PM2.5更高的城市通常有更多重工业企业，对产值有一定贡献；这些城市通常人均小汽车保有量也较高，侧面反映出人均GDP较高。

建成区绿地面积比例与PM2.5浓度呈现出较弱的负相关，全局双变量Moran's I指数为-0.05，结果在 $p = 0.05$ 水平上显著。说明PM2.5浓度较高的城市绿化面积比例较低，不能很好吸纳城市污染。

从以上结果来看，降低PM2.5浓度最重要的是降低煤炭消耗量，加大落后产能淘汰和过剩产能压减力度，落实钢铁业去产量要求，综合整治“散乱污”企业；发展公共交通、提高小汽车污染排放标准，提高清洁能源使

用比例，降低单位GDP能耗。此外，提高建成区绿化覆盖率对降低PM2.5也有一定作用，应在污染严重城市积极选种吸附效果好的行道树，合理分级配置公园绿地，形成均衡可达的绿色网络。

#### 5 总结

本文分析2013至2023年地级市PM2.5浓度，发现空间自相关显著，聚集模式减弱，总体改善但南北差异大。改善主要在南部沿海，恶化则在山西、河南、河北，受重工业与地理影响。研究表明，煤炭消耗是关键因素，GDP增长正相关，绿化则负相关。因此，降低PM2.5浓度最重要的是加快产业结构转型，降低煤炭消耗量和单位GDP能耗，形成健康清洁可持续的经济增长方式。此外，提高建成区绿化覆盖率对降低PM2.5也有一定作用。

#### 参考文献

- [1]李春玉.新时代中国能源—经济—环境系统效能：统计测度、时空分异与提升路径[D].河北经贸大学,2024. DOI:10.27106/d.cnki.ghbj.2024.000150.
- [2]陈瑾.2017-2020年东北地区臭氧浓度时空分异及影响因素分析[D].哈尔滨师范大学,2023. DOI:10.27064/d.cnki.ghasu.2023.001191.

[3]曾穗平,田健,曾坚,等.天津市中心城区PM2.5时空分异及污染暴露度研究——以2019年为例[J].环境影响评价,2023,45(02):56-62.DOI:10.14068/j.ceia.2023.02.011.

[4]杨昆,杨玉莲,朱彦辉,李岑,孟超.中国PM2.5污染与社会经济的空间关系及成因[J].地理研究,2016,35(06):1051-1060.

[5]李花,赵雪雁,王伟军,薛冰.基于多尺度的中国城市工业污染时空分异及影响因素[J].地理研究,2019,38(08):

1993-2007.

[6]胡志强,苗健铭,苗长虹.中国地市尺度工业污染的集聚特征与影响因素[J].地理研究,2016,35(08):1470-1482.

[7]Liu F ,Li A ,Bilal M ,et al. Synergistic effect of combating air pollutants and carbon emissions in the Yangtze River Delta of China: spatial and temporal divergence analysis and key influencing factors.[J].Environmental science and pollution research international, 2024.