

淮海经济区 PM_{2.5} 时空特征及影响因素

宋洁¹ 徐建斌² 刘佳³ 仇方道⁴¹

(1. 中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;

2. 山西财经大学 资源环境学院, 山西 太原 030006;

3. 山西省大气探测技术保障中心, 山西 太原 030002;

4. 江苏师范大学 地理测绘与城市规划学院, 江苏 徐州 221116)

【摘要】: PM_{2.5}对区域环境和人体健康有着重要影响, 淮海经济区作为东部沿海经济发展带的重要支撑部分, 剖析其PM_{2.5}时空特征及其影响因素对于京津冀和长三角城市群开展区域空气污染的联防有着重要意义。首先采用时间序列分析对研究区PM_{2.5}浓度特征进行分析, 其次利用空间分析方法分析了淮海经济区PM_{2.5}时空特征, 最后基于淮海经济区PM_{2.5}空间自相关特征, 进一步采用地理加权回归模型探究了PM_{2.5}浓度的影响因素及其空间异质性。结果表明: (1)淮海经济区逐日PM_{2.5}浓度值呈现出周期性的脉冲型起伏变化规律, 整体呈现出秋冬季高、春夏低的“U”型趋势。逐日PM_{2.5}浓度振荡周期短周期为2~3d, 长周期为6~7d。(2)淮海经济区PM_{2.5}浓度的空间局部相关性呈现出周期性的变化规律。全年热点区域主要集中在研究区西北的菏泽市和西南的徐州市, 冷点区则主要集中在沿海区域。(3)淮海经济区PM_{2.5}浓度影响因素主要包括平均气温、平均降水、平均风速、林地比例和路网密度等因素, 不同因素对PM_{2.5}浓度影响存在显著的空间异质性。

【关键词】: 淮海经济区 细颗粒物 PM_{2.5} 时空特征 影响因素

【中图分类号】: X823 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)08-2038-10

PM_{2.5}是指近地表空气中粒径颗粒小于2.5 μm的颗粒物, 与传统的氮氧化物和硫氧化物相比, 此类颗粒物能够长时间的悬浮于空气中^[1,2], 影响太阳辐射和散射强度, 改变大气的能见度及热力学性质, 进而影响局地的气候变化^[3,4]。同时, PM_{2.5}有较大的比表面积, 能够携带大量有毒化合物深入、留存于人体肺泡^[5,6], 并随呼吸循环系统扩展到全身^[7], 诱发心血管和呼吸道等相关疾病^[8,9]。1990~2015年, PM_{2.5}造成的额外死亡人数从290万人增长至420万人, 超过了疟疾和艾滋病致死人数的总和^[10,11]。

改革开放初期, 重经济轻生态的发展模式导致我国大部分地区大气能见度在90年代之后显著下降^[4,12], 但PM_{2.5}污染问题并未能及时引起社会和公众的警觉^[13], 直至2010年加拿大学者Van及其团队发布2001~2006年间遥感反演的全球PM_{2.5}污染空间分布情况^[14]并被美国国家航天局(NASA)网站转载后, 我国严峻PM_{2.5}污染形式才开始引发社会各界的关注^[15]。2012年, 国家将PM_{2.5}污

作者简介: 宋洁(1989~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为城市地理、环境健康。E-mail:songj36@mail2.sysu.edu.cn

徐建斌 E-mail:xujb23@mail2.sysu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505702); 国家自然科学基金(41971158)

染纳入了《环境空气质量标注》(GB3095-2012), 2016年, $PM_{2.5}$ 监测在全国全面实施。有学者预测在 2030 年我国需要将空气污染水平下降 29%, 才能保持人均死亡率维持在 2010 年的水平^[11]。近年来, 随着我国居民生活水平的提高, 健康生活理念逐渐深入人心。2016 年 10 月《健康中国“2030”规划纲要》发布, 并在党的十九大报告中将健康中国战略纳入国家发展的基本方针, 对 $PM_{2.5}$ 预防与治理也提出了更高要求。因此, 对 $PM_{2.5}$ 的时空分布和影响因子进行分析具有重要的理论和现实意义。

目前, 国内外对我国 $PM_{2.5}$ 污染区域层面的研究主要集中于北京、西安、长春等典型城市以及京津冀、长三角、珠三角等经济发达地区, 对其他区域的 $PM_{2.5}$ 污染关注度较低。淮海经济区是淮河生态经济带的重要组成部分, 是国家产业转型和新旧动能转换, 国家粮食安全和国家新的经济发展支撑带的重点区域^[16]。此外, 淮海经济区位于我国南北气候过渡带, 豫鲁苏皖四省的省际边界地区, 也是华东地区重要的煤炭和能源基地, 毗邻长江三角洲城市群, 同时也是 $PM_{2.5}$ 污染较为严重的区域之一, 由于位于两大沿海城市群的中间地带, 此区域的 $PM_{2.5}$ 浓度研究被学者们忽视。分析淮海经济区 $PM_{2.5}$ 的时空分异特征, 剖析影响区域 $PM_{2.5}$ 污染的影响因素, 对于跨区域联合防治空气污染, 降低京津冀城市群和长江三角洲城市群外源性 $PM_{2.5}$ 污染具有重要意义。因此, 本研究拟采用空间分析方法对淮海经济区 $PM_{2.5}$ 时空分异规律进行分析, 采用地理加权回归模型探讨 $PM_{2.5}$ 污染的影响因素及其空间异质性, 以期为区域性空气污染联合防控提供定量支撑。

1 研究设计

1.1 研究区域

本研究中的淮海经济区为国家发展和改革委员会 2018 年 11 月发布的《淮河生态经济带发展规划》中确定的范围。淮海经济区包括徐州、连云港、宿迁、苏州、淮北、商丘、枣庄、济宁、临沂、菏泽共 10 个地级市 80 个县(市、区)。区域国土面积为 96543km²。据国务院批复的《徐州市城市总体规划(2007-2020)》明确了徐州作为淮海经济区中心城市的地位, 徐州作为区域的中心城市, 不仅对自身发展有重要意义, 对促进区域老工业基地转型也起到一定的引领作用。从统计数据来看, 2017 年研究区常住人口为 5932 万人, GDP 达到 2.9 万亿元, 人均 GDP 平均为 49790 元, 年降水量为 869.9mm, 年平均气温为 15.7℃。从 2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度的空间分布来看, 淮海经济区位于污染较严重区域, 所有县市区年平均 $PM_{2.5}$ 浓度均高于国际年均标准线 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

1.2 数据来源

$PM_{2.5}$ 污染是自然要素和人文要素综合作用的结果^[17,18], 参考已有研究中 $PM_{2.5}$ 影响因素类型, 根据科学性和可获取性原则, 本研究选取了平均海拔、地形起伏度、平均气温、平均降水、平均风速、耕地比例、建设用地比例、林地比例、城镇化率以及路网密度等共 12 个自然因素和人文因素指标作为 $PM_{2.5}$ 的影响因素。

本研究淮海经济区范围参照国家发展与改革委员会 2018 年印发的《淮河生态经济带发展规划》中确定的淮海经济区范围, 矢量数据边界和路网数据来源于国家测绘地理信息局(全国地理信息资源目录服务系统)提供的 1:100 万地图(<http://218.244.250.78:8081/>)。土地利用数据和 DEM 数据分别通过地理国情监测云(<http://www.dsac.cn/>)和地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)获取, 空间分辨率分别为 1km 和 90m。 $PM_{2.5}$ 浓度数据来源于中国环境监测总站空气质量实时发布平台监测数据(<http://www.cnemc.cn/>), 数据样本为 2017 年淮海经济区范围内监测站点的 $PM_{2.5}$ 浓度逐时监测值。城镇化率数据来源于河南省、山东省、江苏省和安徽省的《2018 年统计年鉴》。气温、降水、风速和湿度数据来源于国家气象信息中心地面气象资料数据(<http://data.cma.cn/>)。

1.3 研究方法

1.3.1 空间插值方法

PM_{2.5}浓度作为一种大气活动的标量,在受到人类活动影响的同时,还受到大气活动扩散和堆积的影响,与气温和气压等大气状态量一样,存在着显著的空间相关性,即某地点的PM_{2.5}浓度与相邻地区的浓度在统计上更加接近。因此,在分析PM_{2.5}空间分布时,多采用反距离权重法(IDW)、克里金法(Kriging)等方法。反距离插值方法受到已知点的影响较大,对于插值点的均匀分布要求比较高,但目前中国监测站点受限于监测成本,70%的监测站点分布于环渤海、长三角和珠三角三大经济发达地带^[19],站点空间分布极不均匀,难以用IDW获取良好的模拟结果,而Kriging算法弥补了IDW这一缺陷,在插值点分布不均时仍保证良好的差值精度,在PM_{2.5}时空分布模拟研究中取得良好的效果^[20]。故本文选取Kriging空间插值算法作为本文的PM_{2.5}时空特征研究方法之一。

1.3.2 PM_{2.5}的空间相关性分析

地理学第一定律认为,地理事物及其属性在空间分布上互为相关,存在集聚、随机、规则分布,并且相关性随距离增大而减小^[21]。空间相关性分析以该定律作为理论基础,通过要素的均值和方差来计算要素值与均值的偏差,并将特定范围内的偏差值进行相乘得到叉积, Moran' I 统计量的分子是这些叉积的和。如果PM_{2.5}浓度值在空间上更倾向于发生集聚(高浓度区域发生在其他高浓度区域附近,低浓度区域发生在其他低浓度区域附近),则全局空间自相关 Moran' I 值为正值;如果高PM_{2.5}浓度值排斥其他高值,而倾向于低值分布,则该指数为负。如果正的叉积值与负的叉积值相互抵消,则 Moran' I 值趋向于零。 Moran' I 指数的值将落在[-1, 1],若 Moran' I ∈ [-1, 0],说明PM_{2.5}污染更倾向于随机分布,若 Moran' I ∈ [0, 1],说明PM_{2.5}污染倾向于集聚分布。

在全局空间自相关分析的基础上,采用热点分析(Getis-OrdGi)来识别具有统计显著性的高低PM_{2.5}浓度区域。采用ArcGIS软件中的热点分析功能,结合计算结果返回的z得分值,对于具有显著统计学意义的正z得分值,z值越高,PM_{2.5}高浓度的聚集更为紧密;相反具有统计学意义的负的z得分值,z值越低,PM_{2.5}低浓度的聚集越为紧密。

1.3.3 PM_{2.5}影响因子及空间异质性分析

地理加权回归模型(Geographically Weighted Regression, GWR)是将传统的全局回归模型向局部回归改进后的结果,反映了相邻点的特征值对空间中某个点特征值的影响。因此,本文采用GWR模型分析PM_{2.5}影响因素的及其空间异质性。在GWR模型中,PM_{2.5}浓度值根据距离权重的变化进行局部线性回归,并通过输出解释变量的估计参数来分析局部趋势与全局趋势之间的空间异质性。通过GWR模型可以获得不同解释变量在研究区每个单位上的回归系数,从而可以分析因子的空间差异。其模型结构如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中: y 为PM_{2.5}观测值; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为i点的回归系数,表示解释变量对PM_{2.5}浓度的影响程度; (u_i, v_i) 是第i个样本空间单元的地理中心坐标; $\beta_k(u_i, v_i)$ 是连续函数 $\beta_k(u_i, v_i)$ 在i样本空间单元的值; x_{ik} 表示独立变量 x_k 在i点的值; ε_i 为方差为常数的正态分布函数,代表随机误差项^[22]。

2 研究结果

2.1 淮海经济区PM_{2.5}时间变化规律

通过对监测数据进行统计得到图1(剔除异常值后),可以看出淮海经济区2017年日均PM_{2.5}浓度值呈现出周期性的脉冲型起伏变化规律,这一结论与国家尺度已有研究一致^[19]。1~12月整体呈现出“U”型的浓度趋势,且从波动幅度来看,冬季的PM_{2.5}波

动幅度较大，春季和秋季次之，夏季的波幅整体较小。2017年淮海经济区PM_{2.5}浓度最高值出现在1月，达到了202 μg/m³，最低值出现在夏季，仅为18 μg/m³。此外，王振波等^[19]研究认为全国平均PM_{2.5}浓度逐日变化呈现出7日的短波动周期和15日的长波动周期，但本研究通过对波动较为典型的夏季和冬季PM_{2.5}浓度进行分析发现，淮海经济区PM_{2.5}浓度逐日振荡周期短周期为2~3d，长周期为6~7d，这可能与分析的时间分辨率存在一定的关系(图2)。

根据环境空气质量指数(AQI)技术规定(HJ633-2012)定义的中国24h环境等级划分标准，75 μg/m³以上即为轻度污染，因此将75 μg/m³视为PM_{2.5}浓度标准值。结果显示，淮海经济区2017年平均PM_{2.5}超标日数达到了98日，占全年的比例为27%。按照国际日均标准线30 μg/m³统计^[23]，淮海经济区超标日数达到了320日，占全年的比例为87%。因此，从2017年逐日的PM_{2.5}浓度来看，淮海经济区PM_{2.5}污染不容乐观。

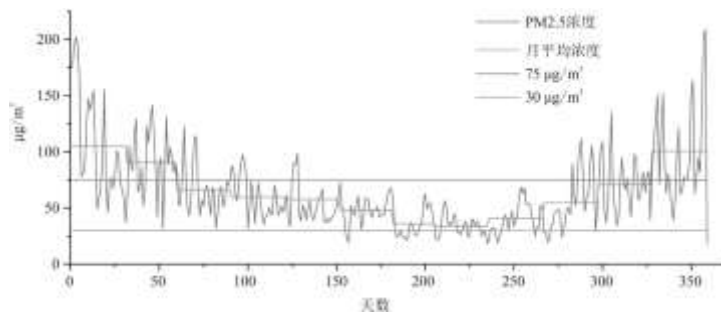


图1 2017年淮海经济区平均PM_{2.5}浓度时间变化规律图

根据图3对淮海经济区10个地级市PM_{2.5}浓度进行箱形图分析可以看出，地级市的逐月PM_{2.5}浓度也呈现出“U”型分布，夏季的7和8月整体浓度数值分布最为集中，同时冬季的12和1月PM_{2.5}浓度值分布更为分散，且区域存在异常值，说明冬季区域内整体的PM_{2.5}污染差异更大。

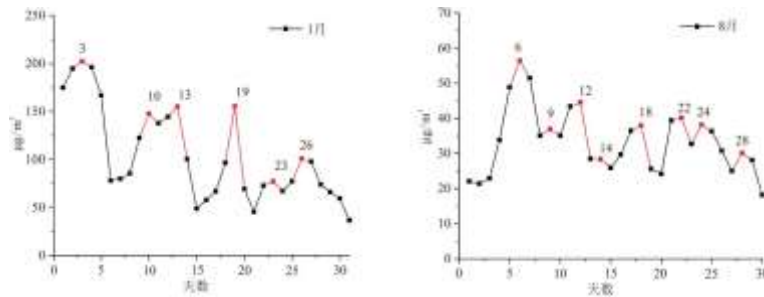


图2 淮海经济区冬季和夏季典型月份PM_{2.5}浓度(μg/m³) (标签值为天数)

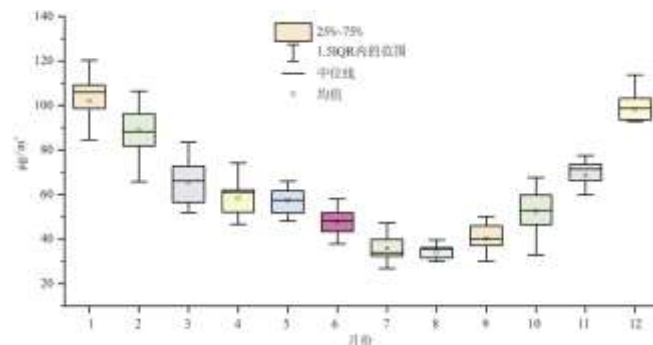


图 3 淮海经济区各地级市逐月 PM_{2.5}浓度箱形图分析

2.2 淮海经济区 PM_{2.5}空间分异规律

采用空间自相关分析方法,对淮海经济区 40 个站点的 PM_{2.5}浓度进行空间自相关检验得到表 1,结果显示, Moran' I 指数均通过显著性检验, Z 得分值均高于 1.96,通过 5%的显著性检验, Moran' I 值均为正值,说明研究区内 PM_{2.5}浓度呈现出集聚模式,即高浓度值聚集在其他高值附近,反之亦然。因此,有必要采用热点分析探究高值和低值的空间集聚特征。

利用 ArcGIS 平台中的热点分析功能,对淮海经济区 2017 年逐月的 PM_{2.5}空间分布进行热点分析,结果见图 4。从图 4 中可以看出,淮海经济区 PM_{2.5}浓度的空间局部相关性呈现出周期性的变化规律。2017 年的 1~3 月,PM_{2.5}浓度的热点区域逐步从菏泽市的东明县、牡丹区、鄄城县和梁山县等区域向徐州市区转移。其中 1 月份分布最为典型,研究区全域以不显著为主,菏泽市的热点区域一方面与北部靠近京津冀城市群,人口规模较大,冬季取暖等有着显著的关系,2 和 3 月热点区域向徐州市过渡,此时期研究区北部的燃煤取暖逐步停止,PM_{2.5}的污染区域逐步向研究区南部集中。4~6 月整体较为稳定,随着西北风的逐步减弱,基本形成了沿海冷点显著区和以徐州为核心的热点区域。随着 7 和 8 月东南季风逐步加强,徐州周边的 PM_{2.5}污染逐步向西北区域扩散,商丘市和菏泽市的部分县市区重新成为热点区域;同时低 PM_{2.5}污染区域逐步从沿海向内陆延伸,但此时徐州市及其周边地区仍为热点区域,这反映了徐州市的产业结构与能源结构仍对区域 PM_{2.5}浓度有着重要的影响。11 和 12 月热点区域有所减少,但随着冬季供暖的到来,淮海经济区西部地区热点又再次呈现出扩散趋势。总体来看,12 个月热点区域主要集中在研究区西北的菏泽市和西南的徐州市,冷点区则主要集中在沿海区域,表明区域的产业发展和域外的外源性污染对 PM_{2.5}存在显著影响^[24]。但随着东南季风和西伯利亚高压的影响,区域的 PM_{2.5}浓度又呈现出有规律的集聚和扩散格局,又同时说明自然地理条件特别是气象气候因子对于 PM_{2.5}污染的作用^[25]。

表 1 2017 年逐月及年平均 PM_{2.5}浓度的空间自相关指数

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年平均
MoranI 指数	0.44	0.37	0.39	0.36	0.29	0.35	0.39	0.35	0.27	0.34	0.31	0.28	0.33
z 得分	3.36	2.89	2.96	2.81	2.30	2.71	2.99	2.68	2.10	2.66	2.44	2.23	2.59
p 值	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.04	0.01	0.01	0.03	0.01

2.3 淮海经济区 PM_{2.5}分布影响因素

2.3.1 PM_{2.5}影响因素筛选

利用 ArcGIS10.3 平台对 2017 年 PM_{2.5}浓度年均值,以及平均温度、平均降水、平均风速进行克里金插值,获取分辨率为 500m 的栅格数据集。利用淮海经济区内 80 个县区级行政范围提取对区域的 PM_{2.5}年均值及 12 个自然因素和人文因素指标。采用探索性回归方法确定影响 2017 年淮海经济区年均 PM_{2.5}的解释变量,经过计算,得到最优的解释变量组合。结果 R²为 0.76, AICc 为 122.01, VIF 值为 2.64,组合中包括平均气温、平均降水、平均风速、林地比例和路网密度 5 个变量,自然因子中地形和地势因素没有被选入模型,影响 PM_{2.5}浓度的自然因子主要是气象因子选入了最优模型,人文因子中城镇化率和建设用地面积未被选入最优模型,说明本区域内路网密度对于 PM_{2.5}浓度的影响更为显著,这反映了区域交通运输对 PM_{2.5}浓度的影响。在探索性回归分析的基础上,使用 OLS 模型检验淮海经济区 PM_{2.5}浓度与各解释变量的关系,OLS 回归结果如表 2 所示, R²和校正 R²分别为 0.77 和 0.76,模型的 Jarque-Bera 不具有统计学意义上的显著性,说明模型预测是较为全面的, VIF 值均小于 7.5,说明模型不存在冗

余变量，模型整体拟合效果较好。表 2 的结果显示平均气温、平均降水、林地比例和路网密度与 $PM_{2.5}$ 呈正相关趋势，平均风速与 $PM_{2.5}$ 呈现出负相关趋势，说明其他变量不变的情况下，平均气温、林地比例和路网密度增加一个单位， $PM_{2.5}$ 浓度将分别增加 1.15、4.58 和 0.15 个单位；虽然平均降水与 $PM_{2.5}$ 呈现出正相关趋势，但其相关系数较低。反之，其他因素不变的情况下，平均风速增加 1 个单位， $PM_{2.5}$ 浓度会下降 0.83 个单位。从解释变量的系数大小来看，淮海经济区林地比例对于 $PM_{2.5}$ 的影响系数最大，平均降水影响系数最小。

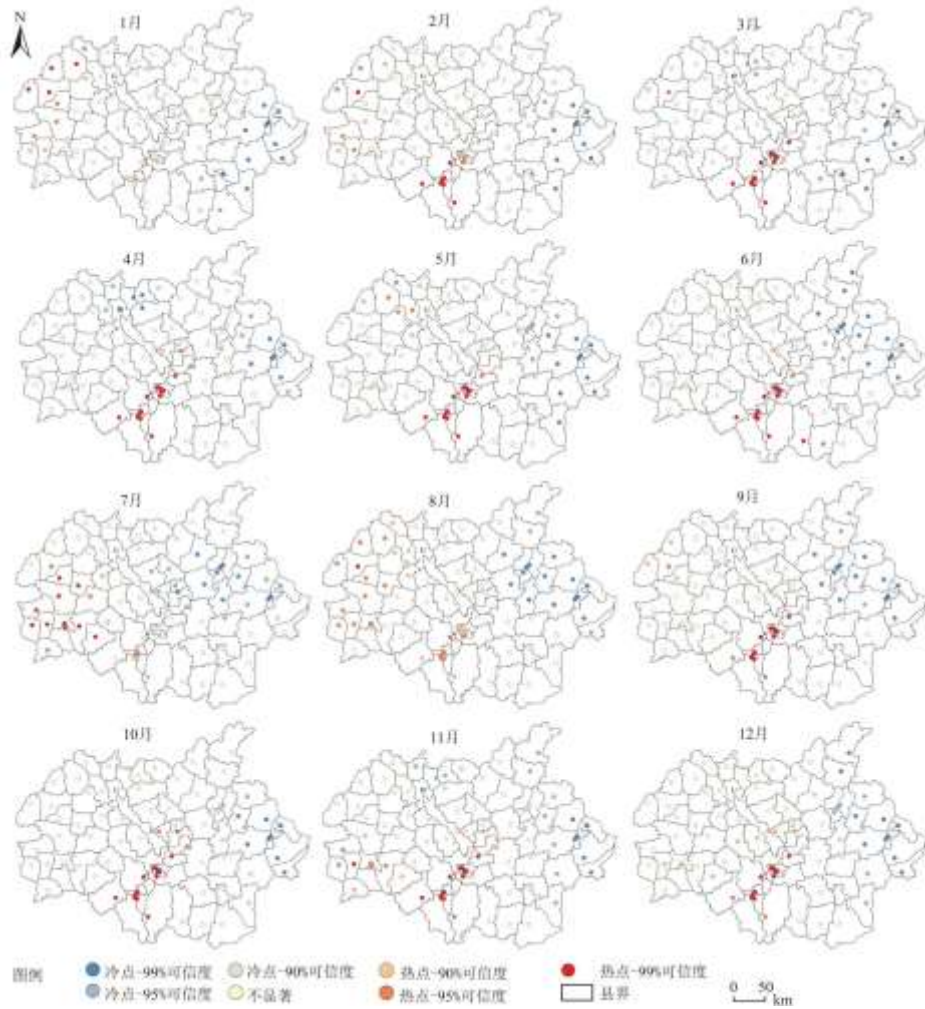


图 4 淮海经济区 2017 年逐月 $PM_{2.5}$ 热点分析

表 2 最小二乘法回归结果

变量	系数	标准差	概率	稳健概率	VIF
截距	-16.19	2.74	0.00*	0.00*	—
平均气温	1.15	0.17	0.00*	0.00*	1.63
平均降水	0.00	0.00	0.00*	0.00*	2.14
平均风速	-0.83	0.29	0.00*	0.01*	2.59

林地比例	4.58	1.25	0.05*	0.00*	1.20
路网密度	0.15	0.03	0.00*	0.00*	2.64
多重决定系数 R ²	0.77				
校正决定系数 R ²	0.76				
阿凯克信息准则 AICc	122.01				

由于 Koenker (BP) 统计量显示最小二乘法回归模型在淮海经济区内发生变化, 即区域内的 PM_{2.5} 浓度与上述解释变量不存在地理空间一致性, 因此, 需要采用地理加权回归模型分析来解决这种空间不稳定性, 探讨不同影响因素的对 PM_{2.5} 浓度影响的空间异质性问题。

2.3. 2PM_{2.5} 影响因素的空间异质性分析

地理加权回归模型运算结果如表 3 所示, 从模型模拟效果来看, 校正 R² 达到了 0.93, 高于 OLS 回归的决定系数和校正决定系数, 模型的拟合优度得到了显著提升。地理加权回归模型能够解释淮海经济区 93% 的 PM_{2.5} 浓度变化, AICc 值 GWR 回归低于 OLS 回归, 且差值大于 3, 变量之间没有出现局部多重共线性, GWR 模型具有更好的回归效果。从 GWR 回归系数的中位数来看, 路网密度对研究区 PM_{2.5} 浓度的正向影响最大, 其次为平均气温和林地面积比例, 平均风速对研究区 PM_{2.5} 浓度的负向影响最大, 其次为平均降水因子。

表 3 地理加权回归结果

变量/参数	最小值	25%分位数	中位数	75%分位数	最大值
截距	-0.35	0.16	0.24	0.61	1.46
平均气温	-0.77	0.16	0.33	0.55	0.80
平均降水	-1.47	-0.37	-0.14	0.10	0.61
平均风速	-0.94	-0.40	-0.24	-0.06	0.27
林地比例	0.03	0.09	0.16	0.21	0.56
路网密度	0.04	0.26	0.34	0.44	0.70
多重决定系数 R ²	0.95				
校正决定系数 R ²	0.93				
阿凯克信息准则 AICc	40				
带宽	77820				

自然地理环境特别是气象因素对 PM_{2.5} 影响显著, 从模型运行结果来看, 淮海经济区平均气温对于 PM_{2.5} 的影响呈现出沿海到

内陆的经度地带性影响差异, 全域大部分区域范围内平均气温对于 $PM_{2.5}$ 的影响为正向, 正相关趋势沿海地区最高、逐步向淮海经济区西南部的商丘和淮北地区递减(图 5)。平均降水与 $PM_{2.5}$ 浓度的空间分布则相反, 淮海经济区西南部的淮北和商丘部分县市区呈现出正相关, 沿海的连云港及其周边区域则呈现出负相关, 全域整体来看负相关为主导趋势, 说明降水过程对于 $PM_{2.5}$ 所造成的空气污染有一定的冲刷作用。平均风速对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响与气温和降水均存在一定的差异, 风速受到下垫面因素的影响的程度最大, 但风速对区域 $PM_{2.5}$ 污染的堆积和扩散作用最为显著, 从平均风速的参数分布来看, 负相关最为显著的地区集中在临沂市, 这主要是由于局地地形因素的影响; 临沂市分布有鲁中南低山丘陵, 地面摩擦系数较高, 对 $PM_{2.5}$ 滞留作用显著; 徐州地区整体地势较为平坦, 地面摩擦系数较低, 风速对于 $PM_{2.5}$ 污染的扩散产生了重要的助推作用。

林地面积比例与研究区域 $PM_{2.5}$ 的相关性整体为正, 相关性系数以商丘和徐州的部分县市区最高, 向中部的枣庄、济宁和临沂市部分区域递减。根据研究区年均 $PM_{2.5}$ 分布热点分析结果图 4, 高浓度区域集中在徐州、商丘和菏泽市部分区域, 中北部地区整体 $PM_{2.5}$ 污染不显著, 由此可见, 对于研究区内 $PM_{2.5}$ 污染严重的地区, 林地并未对空气污染质量表现出明显的改善作用。这与已有研究的结论存在一定差异, 如潘骁骏等^[26]2017 年通过分析杭州市 $PM_{2.5}$ 与土地利用的关系, 在夏季和秋季 $PM_{2.5}$ 浓度小于 $50 \mu g/m^3$ 的区域中林地比例均最大。因此, 林地与 $PM_{2.5}$ 浓度的关系机理较为复杂: 一方面树木灌丛对于 $PM_{2.5}$ 颗粒物存在吸附作用, 植物释放的挥发性有机物(VOCs)与大气中主要的氧化物结合进一步形成二次有机气溶胶(SOA), 导致局部地区 $PM_{2.5}$ 污染浓度加剧^[27];另一方面, 林地会增加地表的摩擦力, 使得 $PM_{2.5}$ 污染难以扩散。因此针对不同区域的 $PM_{2.5}$ 污染防控, 植树造林措施应得到充分的论证。

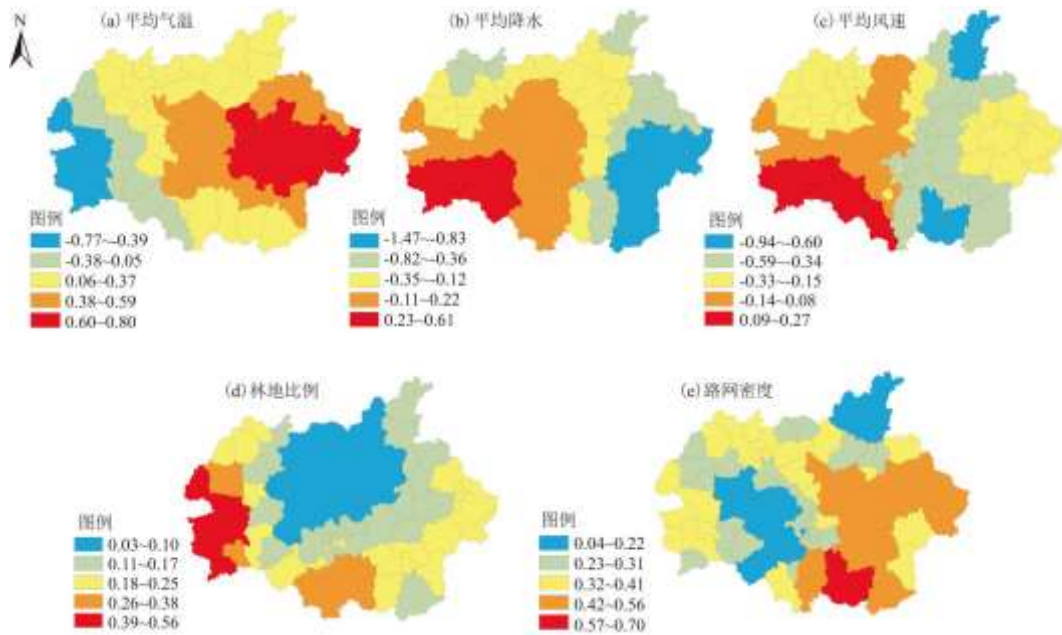


图 5 GWR 模型的参数估计空间分布

路网密度可以反映交通运输排放对于 $PM_{2.5}$ 浓度的影响, 从其参数分布来看, 交通运输排放对 $PM_{2.5}$ 浓度影响最大的区域位于宿迁市, 影响较小的区域集中在临沂市北部、徐州和淮北的部分地区, 连云港和临沂市东南部县市区交通对其影响也较大。这反映出交通运输对于 $PM_{2.5}$ 的影响存在显著的区域差异, 机动车限行的措施应结合路网密度的回归参数来分区执行。据易兰等^[28]2018 年研究, 当城市发展形态处于高经济发展水平和高污染时, 机动车限行政策并不是城市 $PM_{2.5}$ 空气污染治理的最有效手段, 因此, 徐州等区域中心城市以限行来治理污染的措施应作为区域空气污染联防的辅助措施。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 2017年淮海经济区逐日 $PM_{2.5}$ 浓度值呈现出周期性的脉冲型起伏变化规律。从1~12月整体呈现出“U”型的浓度趋势,从波幅来看,冬季的 $PM_{2.5}$ 波动幅度较大,春季和秋季次之,夏季的波幅整体较小。淮海经济区 $PM_{2.5}$ 浓度逐日振荡周期短周期为2~3d,长周期为6~7d。根据 $75\mu g/m^3$ 的国家控制标准,淮海经济区 $PM_{2.5}$ 浓度超标日数达到了98d,占全年的比例为27%。按照国际日均标准线 $30\mu g/m^3$ 统计,淮海经济区超标日数达到了320d,占全年的比例为87%。

(2) 淮海经济区 $PM_{2.5}$ 浓度的空间局部相关性呈现出周期性的变化规律。整体来看,热点区域主要集中在研究区西北的菏泽市和西南的徐州市,冷点区则主要集中在沿海区域。

(3) 淮海经济区 $PM_{2.5}$ 浓度影响因素的探索性回归分析结果显示平均气温、平均降水、平均风速、林地比例和路网密度5个变量具有统计学显著性,不同变量的空间异质性显著。平均气温对于 $PM_{2.5}$ 的影响主要呈现出正相关趋势,并且沿海到内陆的经度地带性影响差异。平均降水与 $PM_{2.5}$ 浓度的空间分布全域整体来看负相关为主导趋势。平均风速与 $PM_{2.5}$ 浓度呈现出负相关趋势。林地面积比例与研究区域 $PM_{2.5}$ 的相关性整体为正。路网密度对 $PM_{2.5}$ 浓度影响最大的区域位于宿迁市,影响较小的区域集中在临沂市、徐州和淮北的部分地区。

3.2 讨论

造成 $PM_{2.5}$ 污染的因素是多样的,包括自然环境因素和人文活动因素,其中气象气候因子对于 $PM_{2.5}$ 的影响尤为显著,如北方地区的沙尘暴会造成大气环境 $PM_{2.5}$ 的激增^[29],但并非所有的气象因素均对 $PM_{2.5}$ 浓度产生影响,如奥运期间污染物除了生态中心监测点的 $PM_{2.5}$ 小时平均浓度与小时平均温度、风速有显著相关性,与其他气象因素并无相关性^[30]。南方地区则不同,有研究表明广州市的 $PM_{2.5}$ 与气温呈现正相关,与温度风速和降水的相关性最差,长江中游城市群的降水量和相对湿度则是影响区域 $PM_{2.5}$ 浓度的两个主要气象因素^[31]。南北方交界地带 $PM_{2.5}$ 污染受到气象气候条件因素的影响,同时也受到污染源排放情况的影响,其中气象条件是主要的影响因素,污染源的排放则是根本因素^[32]。淮海经济区作为京津冀和长三角两大城市群的过渡地带,应做好区域内部和区域间的联防联控,加强大气污染防治的常态化,特别是徐州市和菏泽市等大气污染的“热点”地区,应结合大气污染的时空特征,差异化制定防控策略。其次,应针对重点地区的大气污染防控规划,提高使用燃气和电力等清洁能源比例,优化徐州、菏泽等城市能源产业结构特别是能源产业结构,促进国土空间生态修复,加大环保宣传,提高全民环保意识等,激励群众参与环保的积极性。

参考文献:

- [1] HYSLOP N P. Impaired visibility: The air pollution people see[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(1):182-195.
- [2] 韩立建. 城市化与 $PM_{2.5}$ 时空格局演变及其影响因素的研究进展[J]. 地理科学进展, 2018, 37(8):1011-1021.
- [3] CHEN L W A, WATSON J G, CHOW J C, et al. Wintertime particulate pollution episodes in an urban valley of the Western US: A case study[J]. Atmospheric Chemistry Physics, 2012, 12:10051-10064.
- [4] 杨洪斌, 邹旭东, 汪宏宇, 等. 大气环境中 $PM_{2.5}$ 的研究进展与展望[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(3):77-82.
- [5] PANDEY P, PATEL D K, KHAN A H, et al. Temporal distribution of fine particulates ($PM_{2.5}$, PM_{10}), potentially toxic metals, PAHs and Metal-bound carcinogenic risk in the population of Lucknow City, India[J]. Environmental Letters, 2013, 48(7):16.

-
- [6]ZHANG Y,LI S,LI J,et al.Developmental toxicity induced by PM2.5 through endoplasmic reticulum stress and autophagy pathway in zebrafish embryos[J].Chemosphere,2018,197:611-621.
- [7]XU D,HUANG N,WANG Q,et al.Study of ambient PM2.5 on the influence of the inflammation injury and the immune function of subchronic exposure rats[J].Journal of Hygiene Research,2008,37(4):423-428.
- [8]LU Y,LIN S,FATMI Z,et al.Assessing the association between fine particulate matter (PM2.5) constituents and cardiovascular diseases in a mega-city of Pakistan[J].Environmental Pollution,2019,252:1412-1422.
- [9]DUNEA D,IORDACHE S,POHOATA A,et al.Towards a better protection of Children's respiratory health against particulate matter pollution in Urban areas-RokidAIR project[J].Procedia Engineering,2017,198:283-292.
- [10]LIM S S,VOS T,FLAXMAN A D,et al.A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions,1990-2010:A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010[J].The Lancet,2012,380(9859):2224-2260.
- [11]Cohen A J,Brauer M,Burnett R,et al.Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution:an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015[J].Lancet,2017,389(10082):1907-1918.
- [12]孔锋,王一飞,方佳毅,等.1957-2015年中国低能见度日数时空变化特征[J].干旱区研究,2017,34(6):1203-1213.
- [13]潘小川,李国星,高婷.危险的呼吸:PM2.5的健康危害和经济损失评估研究[M].中国环境科学出版社,2012.
- [14]VAN D A,MARTIN R V,Brauer M,et al.Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth:Development and application[J].Environ Health Perspect,2010,118(6):847-855.
- [15]曹军骥.PM2.5与环境[M].科学出版社,2014.
- [16]国家发展与改革委员会.淮河生态经济带发展规划[EB/OL].(2018-11-07)[2019-12-14].
- [17]MCCARTY J,KAZA N.Urban form and air quality in the united states[J].Landscape and Urban Planning,2015,139:168-179.
- [18]WANG J,WANG S,LI S.Examining the spatially varying effects of factors on PM2.5 concentrations in Chinese cities using geographically weighted regression modeling[J].Environmental Pollution,2019,248:792-803.
- [19]王振波,方创琳,许光,等.2014年中国城市PM2.5浓度的时空变化规律[J].地理学报,2015,70(11):1720-1734.
- [20]潘竟虎,张文,李俊峰,等.中国大范围雾霾期间主要城市空气污染物分布特征[J].生态学杂志,2014,33(12):257-265.
- [21]TOBLER W A.A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J].Economic Geography,1970,46:234-240.

-
- [22] FOTHERINGHAM S A, CHRIS B, MARTIN C. Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships[M]. John Wiley & Sons, 2002.
- [23] 熊欢欢, 梁龙武, 曾赠, 等. 中国城市 PM_{2.5} 时空分布的动态比较分析[J]. 资源科学, 2017, 39(1):136-146.
- [24] WANG Z B, FANG C L. Spatial-temporal characteristics and determinants of PM_{2.5} in the Bohai Rim Urban Agglomeration[J]. Chemosphere, 2016, 148:148-162.
- [25] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 等. 冬季 PM_{2.5} 的气象影响因素解析[J]. 生态学报, 2016, 36(24):7897-7907.
- [26] 潘骁骏, 侯伟, 蒋锦刚. 杭州城区土地利用类型对 PM_{2.5} 浓度影响分析[J]. 测绘科学, 2017, 42(10):114-121.
- [27] 李洪远, 王芳, 熊善高, 等. 植物挥发性有机物的作用与释放影响因素研究进展[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(2):298-302.
- [28] 易兰, 周忆南, 李朝鹏, 等. 城市机动车限行政策对雾霾污染治理的成效分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(10):81-87.
- [29] 孟昭阳, 张怀德, 蒋晓明, 等. 太原地区冬春季 PM_{2.5} 污染特征及影响因素[J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24(5):648-656.
- [30] 曾静, 廖晓兰, 任玉芬, 等. 奥运期间北京 PM_{2.5}、NO_x、CO 的动态特征及影响因素[J]. 生态学报, 2010, 30(22):221-227.
- [31] 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):25-33.
- [32] 张思远, 吴开亚. 合肥市 PM_{2.5} 污染特征及影响因素分析研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(1):51-56.