

孙继平,侯兰功.成渝城市群 $PM_{2.5}$ 时空分布及影响因素研究[J].江苏农业科学,2020,48(13):297-302.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.13.059

成渝城市群 $PM_{2.5}$ 时空分布及影响因素研究

孙继平,侯兰功

(西南科技大学土木工程与建筑学院,四川绵阳 621010)

摘要: $PM_{2.5}$ 是雾霾污染的主要成因,对其时空分布和影响因素展开研究,可为城市 $PM_{2.5}$ 防治提供空间信息和社会经济政策层面的科学依据,对相应地区的生产组织和城市管理具有一定的现实意义。基于空间杜宾模型,利用 Stata 统计软件和地理信息系统(GIS)分析技术,结合 2015—2018 年成渝城市群 16 个城市的相关数据对该地区 $PM_{2.5}$ 时空分布特征和影响因素进行研究。研究结果表明:(1)在空间分布上,研究区间内 $PM_{2.5}$ 浓度整体表现为中部低,西部和北部边缘地区偏高,西南部偏低,在时间变化上,2015—2018 年成渝城市群年均 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈下降趋势;(2)在 2015—2018 年期间成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度在空间上正向自相关,高值集聚区域发生明显变化,在 2017 年增多 2018 年减少,低值集聚范围稳定。(3)基于空间杜宾模型的回归分析结果可知,对 $PM_{2.5}$ 浓度起正向影响的社会经济因素相关系数表现为能源强度 > 人口密度 > 建筑施工面积 > 私人汽车拥有量 > 建筑业产值 > 人均 GDP,对 $PM_{2.5}$ 浓度起负向影响的社会经济因素相关系数表现为第三产业产值占 GDP 比重 > 第二产业产值占 GDP 比重 > 绿化覆盖率 > 环境规制 > 工业产值 > 城市全年公共汽(电)车客运总量。在气象影响因素方面, $PM_{2.5}$ 浓度与降水量和气温呈负相关关系,与湿度呈正相关关系。

关键词: $PM_{2.5}$;雾霾污染;时空分布;空间自相关;空间杜宾模型;成渝城市群

中图分类号:X51 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)13-0297-06

城市化和工业化的快速发展推动了社会前进,但也产生了一系列环境问题,其中就包括雾霾污

染,造成社会经济损失的同时亦严重威胁城乡居民的健康。国内外已有的研究表明,大气污染程度和肺癌等呼吸道疾病的发病率和死亡率密切相关^[1],此外,雾霾污染的区域性特征与空间交互影响日益显著,空间溢出效应明显^[2]。对城市群层面雾霾污染主要成分之一 $PM_{2.5}$ 的时空分布及影响因素进行研究可为城市化发展过程中的污染风险规避提供一定依据,为城市群大气污染联动治理提供空间信息和政策建议参考。

收稿日期:2019-11-25

基金项目:国家自然科学基金(编号:41701172);四川省教育厅自然科学(编号:15ZA0123)。

作者简介:孙继平(1995—),女,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事区域发展与规划研究。E-mail:473243910@qq.com。

通信作者:侯兰功,博士,副教授,主要从事区域发展与规划研究。E-mail:soundskyhl@163.com。

[17]殷旭旺,渠晓东,李庆南,等.基于着生藻类的太子河流域水生生态系统健康评价[J].生态学报,2012,32(6):1677-1691.

[18]国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.

[19]刘奕伶,葛继稳,李艳元,等.古夫河着生藻类优势种体积与水质因子的相关性研究[J].中国环境科学,2015(7):2182-2191.

[20]Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana and Chicago: University of Illinois Press, 1949:31-108.

[21]Margalef R. Perspectives in ecological theory [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1968.

[22]Clarke K R, Warwick R M. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation [M]. 2nd ed. Primmer - E; Plymouth, 2001.

[23]吉正元,刘绍俊.抚仙湖浮游植物群落结构、影响因子及水质评价[J].中国环境监测,2019,35(4):1-11.

[24]张爱菊,丁新新,刘金殿,等.浙江老虎潭水库后生浮游动物群落组成及其环境影响因子[J].水生生态学杂志,2016,37(1):62-69.

[25]Tang T, Cai Q H, Liu R Q, et al. Distribution of epilithic algae in the Xiangxi River system and their relationships with environmental factors[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2002, 17(3):345-352.

[26]Blinn D W. Diatom community structure along physicochemical gradients in saline lakes[J]. Ecology, 1993, 74(4):1246-1263.

[27]贾海燕,徐建锋,雷俊山.丹江口库湾浮游植物群落与环境因子关系研究[J].人民长江,2019,50(5):52-58.

[28]丁娜,徐东坡,刘凯,等.太湖五里湖着生藻类群落结构特征分析[J].江西农业大学学报,2015,37(2):346-352.

雾霾污染成因比较复杂,现有研究指出,人类社会经济活动是导致雾霾污染的根源^[3-4],同时,气象因素也与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度紧密相关^[5-7]。在雾霾污染频发区域社会经济层面影响因素的研究方面,张生玲等认为,第二产业产值占国内生产总值(GDP)比重过高和民用汽车保有量增多对雾霾污染有显著正向促进作用^[8]。Zhang 等认为,人口密度和工业废气及汽车尾气等人为气体排放可造成 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度偏高^[9]。王嫣然等指出,增加植被面积对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降有着积极的影响^[10]。在气象影响因素方面,相关学者研究指出,温度、湿度和风速等是影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的主要因素。王慧丽等研究发现,陕西省雾霾污染程度与温度、风力呈负相关^[5]。毛卓成等指出,上海地区 $\text{PM}_{2.5}$ 的气象成因是温度和风力^[6]。马晓倩等通过统计分析得出,京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与降水量、气温、湿度、气压和风速相关^[7]。总的来说,除特殊地形地貌条件外,气温、降水、湿度、风力等气象条件和人口、经济发展、产业结构的比例、化石燃料的燃烧、汽车尾气的排放、建筑施工的扬尘等诸多社会经济问题是影响雾霾污染的主要因素。

现有对城市群范围内雾霾污染的研究大多集中在京津冀城市群^[6-11]、长三角城市群^[12]等经济发达地区,对中西部经济发展较为快速,近年来,雾

霾污染较为突出的城镇密集区的关注还有待提高。成渝城市群位于我国西部地区,近年来区内经济发展快速、城镇人口规模扩张明显,城市化和人类活动引起 $\text{PM}_{2.5}$ 等污染物的排放量显著增加。因此,本研究综合运用地理统计、空间自相关和空间计量模型,分析成渝城市群 16 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空分布特征,对成渝城市群雾霾污染的主要影响因素及其影响程度进行甄别和量化,以期为该地区城市发展和环境质量改善提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究以《成渝城市群发展规划》中确定的成渝城市群作为研究区域,包括重庆市和四川省成都市、自贡市、泸州市、德阳市、绵阳市、遂宁市、内江市、乐山市、南充市、眉山市、宜宾市、广安市、达州市、雅安市、资阳市等,研究范围见图 1。成渝城市群位于我国西南部,总面积为 18.5 万 km^2 ,占全国国土面积的 1.92%;2017 年城镇常住人口为 10 664.31 万人,占全国总人口(不含港澳台地区)的 7.67%;2017 年地区 GDP 为 53 841.48 亿元,占全国(不含港澳台地区)的 6.56%。

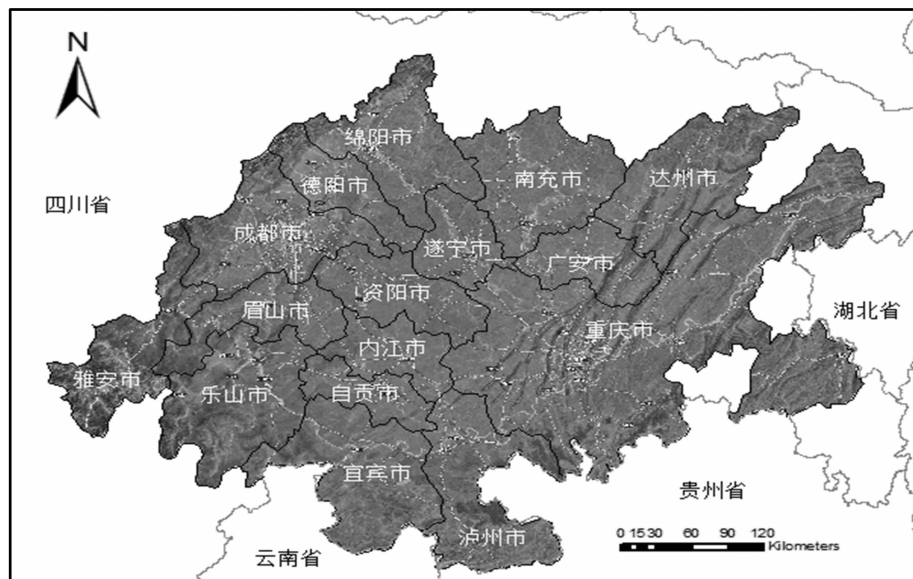


图1 研究区范围

1.2 研究方法

1.2.1 空间相关性检验 本研究采用 Moran's I 指数来测度成渝城市群的 $\text{PM}_{2.5}$ 全局和局部空间自相关性。其中,全局空间自相关表达式为

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

式中: k 是样本数; x_i 和 x_j 分别为城市 i 和城市 j 的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度观测值; \bar{x} 为研究区域内所有城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度观测值的平均值; W_{ij} 是空间权重矩阵。 I 值范围是 $[-1, 1]$, I 值大于 0 表示观测值在地区内正相关, 小于 0 则表示负相关, 等于 0 表示空间上不相关。

局部空间自相关表达式为

$$I = \frac{(x_i - \bar{x})}{\frac{1}{k} \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sum_j W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (2)$$

若 I 值大于 0, 表示高值与高值集聚或低值与低值集聚, 空间正相关; 若 I 值小于 0, 则表示高值被低值包围或低值被高值包围, 空间关联为负。

1.2.2 空间杜宾模型 地区环境污染不仅受自身社会经济的影响, 还会受到周边地区环境的影响。本研究选用空间杜宾模型分析各因素对成渝城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响, 基本形式如下:

$$Y = \rho WY + \beta X + WX\theta + \varepsilon \quad (3)$$

式中: X 、 Y 为自变量和因变量; ρ 表示内生交互效应系数, 其数值大小反映其他地区因变量变化空间扩散或空间溢出程度; β 表示回归系数; W 表示空间权重矩阵; θ 表示外生交互效应系数, 其数值大小反映自变量交互作用强弱; ε 表示误差项。

引入空间权重矩阵是传统计量模型和空间计量模型的主要区别之一, 在进行模型计算时需要量化空间单元的位置, 根据“距离”而定, 通常采用邻接距离、地理距离、经济距离、产业距离和技术距离等, 本研究选用邻接距离, 将所有地理单元列成一个二维表, 用 0 或 1 表示, 即“1”表示空间相邻, “0”表示空间不相邻^[13]。对于一个具有 n 个空间单元的系统, 空间矩阵 W 表达为 $n \times n$ 的二值矩阵, 具有对称性, 对角线元素为 0, 相邻元素为 1。

1.3 研究变量及数据来源

1.3.1 被解释变量 本研究中的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据来源于第三方网站真气网 (<https://www.aqistudy.cn/>), 计算 2015—2018 年研究区范围内 16 个城市的年均 $\text{PM}_{2.5}$ 数据即单位面积内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度来分析成渝城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空分布和影响因素。

1.3.2 解释变量 本研究中的解释变量数据来源于《四川统计年鉴》《重庆统计年鉴》。考虑到数据的可获取性, 选取温度、湿度、降水量作为影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的气象影响因素, 选取人均地区生产总值、人口密度、城镇化率、第二产业产值占 GDP 比重、第三

产业产值占 GDP 比重、建筑业产值、工业产值、建筑施工面积、城市绿化覆盖率、能源强度、环境规制 (用城市环境和公共设施管理业从业人员人数与城市总就业人数比值表示)、城市全年公共汽 (电) 车客运总量、民用汽车拥有量共 13 个变量作为影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的社会经济因素。通过 SPSS 17.0 进行多重共线性分析可知, 变量城镇化率的方差膨胀系数 (VIF) 为 22, 大于 7.5, 说明它可能与人口密度和地区生产总值存在多重共线, 所以在进行模型分析时去掉此变量, 保留剩下的 12 个变量。

2 结果与分析

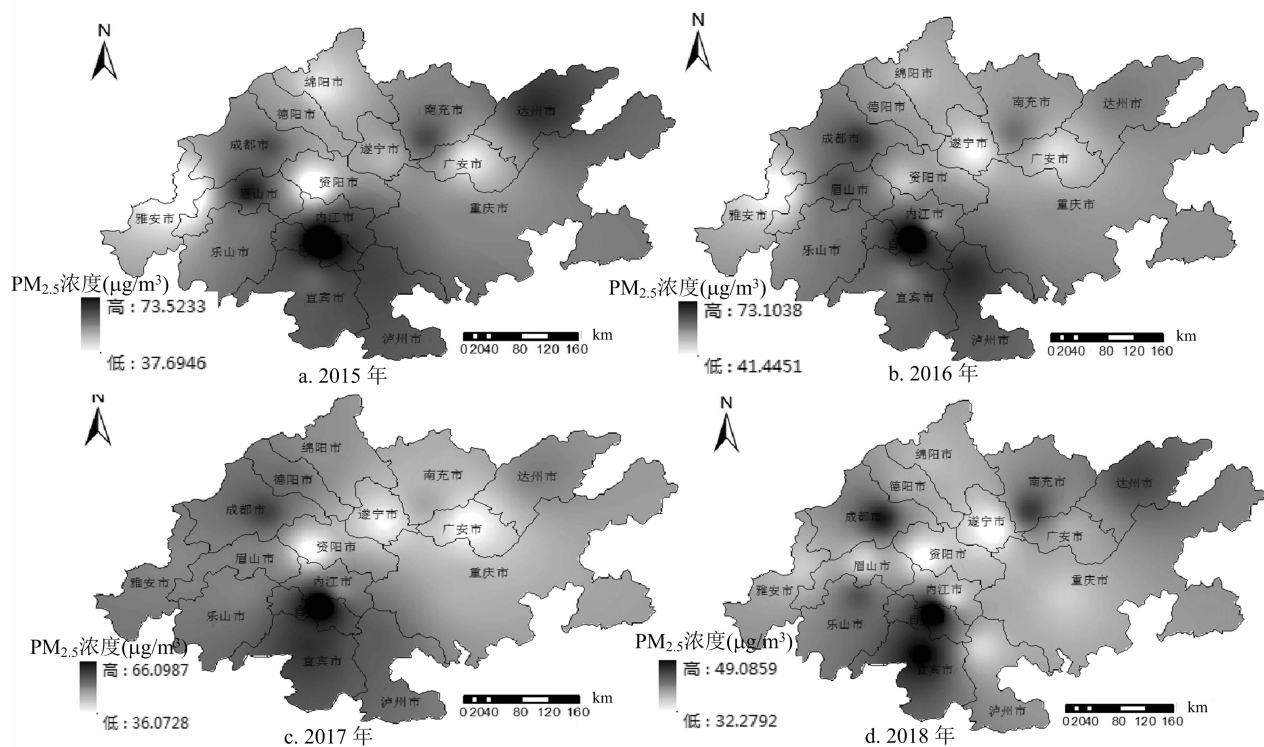
2.1 成渝城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 时空分布特征与空间自相关分析

运用 ArcGIS 10.2 克里金插值法对 16 个城市年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行空间插值分析, 分别得到成渝城市群地区不同年份年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布 (图 2)。从图 2 可以看出, 2015—2018 年期间, 研究区内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分布表现为中部低, 西部和北部边缘地区偏高, 偏高地区主要包括成都市、乐山市、自贡市、宜宾市、泸州市和达州市等, 其中自贡市地区年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 2015—2018 年期间保持研究区内最高。

在时间上, 成渝城市群整体年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现下降趋势 (图 3、图 4)。成都市、泸州市、乐山市、资阳市、绵阳市 5 个市的年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值在 2016 年上升到最高值后开始下降。雅安市在 2015—2017 年年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈上升趋势, 在 2017 年达到最高值后开始下降。重庆市、德阳市、遂宁市、内江市、眉山市、自贡市、南充市 7 个市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 2015—2018 年呈持续下降趋势。

结合时间和空间分析可以发现, 成渝城市群年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度整体呈下降趋势, 高值分布空间范围也在逐渐缩减, 表明当地空气质量有所改善。

通过 ArcGIS 10.2 软件计算得出, 2015—2018 年成渝城市群 Moran's I 指数均为正, 且通过了 0.01 水平的显著性检验, 表明该地区内 $\text{PM}_{2.5}$ 分布存在空间正相关。绘制 2015—2018 年研究区年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 LISA 聚集分布图。从图 5 可以看出, 2015—2018 年 4 年间遂宁市持续呈现明显的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值集聚, 即“高—高”集聚, 成都市在研究时段内分别与不同城市呈现 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低值集聚, 即“低—低”集聚。其他地级市在研究时段内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度局部聚集

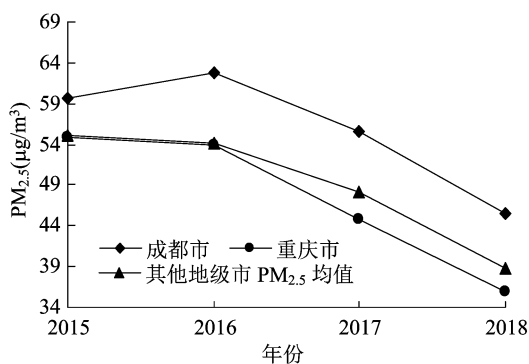
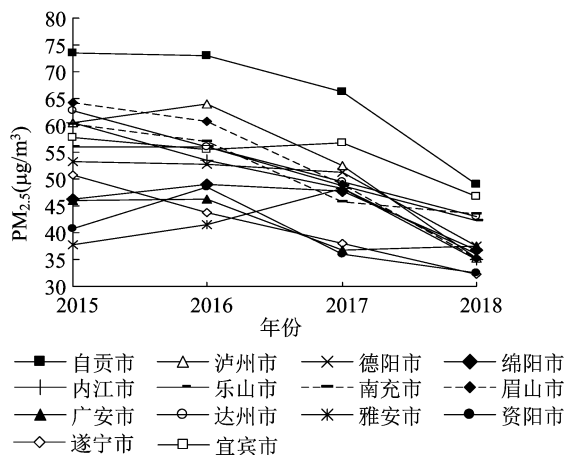
图2 2015—2018 年成渝城市群年均 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布

情况不明显。总体来看,高值集聚区域逐渐由研究区内西部向东部转移。

2.2 空间杜宾模型估计结果分析

对表 1 中空间杜宾模型估计结果进行分析。变量人均 GDP、能源强度、人口密度、建筑业产值、建筑施工面积和私人汽车拥有量、湿度回归系数为正,回归系数绝对值表现为能源强度 > 人口密度 > 建筑施工面积 > 私人汽车拥有量 > 建筑业产值 > 人均 GDP > 湿度;变量第二产业产值占 GDP 比重、工业产值、绿化覆盖率、环境规制、城市全年公共汽(电)车客运总量、降水量、气温回归系数为负,回归系数绝对值表现为气温 > 第三产业产值占 GDP 比重 > 第二产业产值占 GDP 比重 > 绿化覆盖率 > 环境规制 > 工业产值 > 降水量 > 城市全年公共汽(电)车客运总量。

在气象影响因素方面, $PM_{2.5}$ 浓度与降水量和气温呈负相关关系,与湿度呈正相关关系。分析原因可能是 $PM_{2.5}$ 的扩散与大气流动联系紧密,气温高时,大气流动性强,气流不稳定,有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散,从而降低空气中 $PM_{2.5}$ 的浓度,低温状态则不利于 $PM_{2.5}$ 的扩散;稳定的气象条件不利于 $PM_{2.5}$ 的扩散,而降水的冲刷作用会使得空气中 $PM_{2.5}$ 浓度降低;有些地区受降水和地面水蒸发的影响,近地面空

图3 成渝城市群 2015—2018 年均 $PM_{2.5}$ 变化趋势图4 成渝城市群地级市 2015—2018 年均 $PM_{2.5}$ 变化趋势

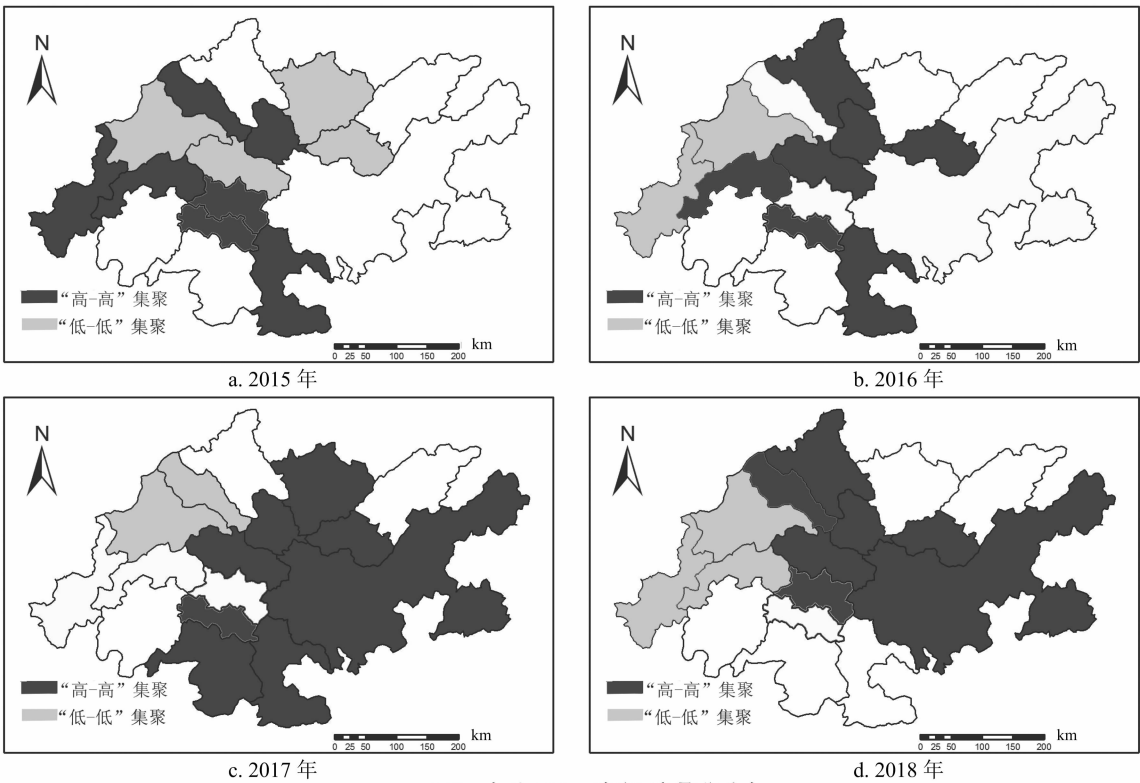


图5 年均PM_{2.5}浓度局部聚集分布

表1 回归模型结果分析

变量名称	相关系数
人均 GDP	0.026 9 *
能源强度	0.706 ***
人口密度	0.659 ***
第二产业产值占 GDP 比重	-0.895 *
工业产值	-0.014 3 *
建筑业产值	0.087 6
建筑施工面积	0.577 *
第三产业产值占 GDP 比重	-1.197 **
绿化覆盖率	-0.386 *
环境规制	-0.086 5 *
城市全年公共汽(电)车客运总量	-0.008 6
私人汽车拥有量	0.303 **
降水量	-0.009 66
气温	-2.094 **
湿度	0.004 2
lg Likelihood	66.004 3
R ²	0.967

注：***、**、* 分别表示在 0.01、0.05、0.1 水平上通过显著性检验。

气的相对湿度越来越大,却极少降水,因此,在这种稳定的天气形势下,PM_{2.5}不易向外扩散,使得污染

物在大气的浅层积聚,从而导致 PM_{2.5}浓度升高。这些气象因素与 PM_{2.5}浓度的相关系数对大气污染防治具有参考意义。

在社会经济影响因素方面,能源强度对成渝城市群地区 PM_{2.5}浓度存在最大正向影响,其次是该地区人口密度、建筑施工面积和私人汽车拥有量,人均 GDP(经济发展水平)对 PM_{2.5}浓度的影响较弱,说明加剧成渝城市群 PM_{2.5}浓度的主要因素是能源强度、人口密度和建筑施工产生的粉尘。能源强度高表示所消耗能源数量多,对于原油、原煤等一次能源消耗量大,燃烧产生的废气多,对空气污染程度高。人口密度大即人口集聚程度高,人口消费和出行需求增加,引起汽车尾气排放和能源消耗增加,从而加重该地区的雾霾污染。建筑行业产生的粉尘是 PM_{2.5}的主要来源。此外,机动车尾气排放也是造成研究区 PM_{2.5}浓度高的原因之一。

变量第二产业产值占 GDP 比重对成渝城市群 PM_{2.5}浓度的负向影响显著,这与相关文献研究结果^[13-16]不同。将第二产业进一步分为工业和建筑业,计算其产值相关系数,发现建筑业产值相关系数为正(0.087 6),而工业产值相关系数为负(-0.014 3),工业产值占第二产业产值比重远大于

建筑业产值,所以对 $PM_{2.5}$ 浓度起决定性负向影响的是成渝城市群的工业发展。本研究认为,主要原因为成渝城市群工业以烟草制品业、酒、饮料和精制茶制造业、食品制造业等轻工业为主,而这类工业产生的工业废物对 $PM_{2.5}$ 产生影响并不显著。变量第三产业产值占 GDP 比重对成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度的负向影响高于变量第二产业产值占 GDP 比重,说明提高产业结构中第三产业比重,发展服务业对抑制雾霾污染有帮助。变量绿化覆盖率对变量 $PM_{2.5}$ 浓度的影响显著为负,说明绿地有净化空气、降低空气中 $PM_{2.5}$ 浓度的作用^[17]。环境规制对 $PM_{2.5}$ 浓度的负向影响体现在有效的环境规制能够促进产业结构变革,加速企业绿色产业链构建,减少工业废气的排放。城市全年公共汽(电)车客运总量对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响虽然在统计上不显著,但统计结果对雾霾污染防治具有参考意义。

3 结论

本研究通过分析成渝城市群 $PM_{2.5}$ 的时空分布特征和系统甄别对其产生影响的社会经济因素,得出如下结论:(1)空间上在研究区间内 $PM_{2.5}$ 浓度整体表现为中部低,西部和北部边缘地区偏高,西南部偏低,2015—2018 年期间成渝城市群年均 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈下降趋势。(2)在 2015—2018 年期间成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度在空间上正向自相关,呈现高值集聚区域发生明显变化,高浓度集聚区域在 2017 年增多 2018 年减少,低值集聚范围稳定。(3)基于空间杜宾模型的回归分析结果可知,对 $PM_{2.5}$ 浓度起正向影响的社会经济因素贡献强度为能源强度 > 人口密度 > 建筑施工面积 > 私人汽车拥有量 > 建筑业产值 > 人均 GDP,对 $PM_{2.5}$ 浓度起负向影响的社会经济因素相关系数表现为第三产业产值占 GDP 比重 > 第二产业产值占 GDP 比重 > 绿化覆盖率 > 环境规制 > 工业产值 > 城市全年公共汽(电)车客运总量,第二产业产值占 GDP 比重对 $PM_{2.5}$ 浓度的负面影响较大,这与其他文献研究结果不同。在气象影响因素方面, $PM_{2.5}$ 浓度与降水量和气温呈负相关关系,与湿度呈正相关关系。

根据上述结论提出以下参考建议:(1)调整成渝城市群能源结构,降低能源结构中煤炭所占的比重,减少化石燃料的使用,推广使用清洁能源。(2)优化成渝城市群工业结构,优先承接发展电子信息、轻工、纺织、医药等行业,同时优化产业结构,增

加第三产业所占的比重。合理增加高新技术研发投入,发展绿色生产,推进节能减排。提高城市绿化水平,增加城市绿化覆盖面积。加大环境规制力度,减少工业三废排放。

参考文献:

- [1] 谢 杨,戴瀚程,花岡達也,等. $PM_{2.5}$ 污染对京津冀地区人群健康影响和经济影响[J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(11): 19-27.
- [2] 刘晓红,江可申. 我国城镇化、产业结构与雾霾动态关系研究——基于省际面板数据的实证检验[J]. 生态经济,2016,32(6):19-25.
- [3] 刘华军,裴延峰. 经济发展与中国城市雾霾污染——基于空间关联网情形下的考察[J]. 城市与环境研究,2018(3):15-41.
- [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] 王慧丽,赵 芸,胡 素. 陕西省雾霾污染时空分布特征及相关性分析[J]. 环境工程,2019,37(4):122-125,162.
- [6] 毛卓成,马井会,瞿元昊,等. 2015 年上海地区空气质量状况及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境学报,2018,34(2):52-60.
- [7] 马晓倩,刘 征,赵旭阳,等. 京津冀雾霾时空分布特征及其相关性研究[J]. 地域研究与开发,2016,35(2):134-138.
- [8] 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,2017,27(9):15-22.
- [9] Zhang T X, Zang L, Wan Y C, et al. Ground-level $PM_{2.5}$ estimation over urban agglomerations in China with high spatiotemporal resolution based on Himawari-8[J]. Science of the Total Environment, 2019, 676: 535-544.
- [10] 王嫣然,张学霞,赵静瑶,等. 2013—2014 年北京地区 $PM_{2.5}$ 时空分布规律及其与植被覆盖度关系的研究[J]. 生态环境学报,2016,25(1):103-111.
- [11] 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.
- [12] 李廉水,王长源,石喜爱. 长三角城市群雾霾排放效率分析与提升策略[J]. 管理现代化,2018,38(5):116-121.
- [13] 吴 浪,周廷刚,温 莉,等. 基于遥感数据的 $PM_{2.5}$ 与城市化的时空关系研究——以成渝城市群为例[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(9):2142-2152.
- [14] 李雪梅,许东明. 京津冀城市群 $PM_{2.5}$ 的空间分布及相关性分析[J]. 生态与农村环境学报,2019,35(2):174-179.
- [15] 任 毅,郭 丰. 长江经济带雾霾污染空间效应与影响因素分析[J]. 经济与管理,2019,33(1):43-50.
- [16] 祝丽云,李 彤,马丽岩,等. 产业结构调整对雾霾污染的影响——基于中国京津冀城市群的实证研究[J]. 生态经济, 2018,34(10):141-148.
- [17] 张建设,冯万富,史晓海,等. 不同绿地结构对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的消减作用[J]. 江苏农业科学,2019,47(21):302-304.