

长江经济带空气质量指数时空异质性及 社会经济影响因素分析

柏玲^{1,2}, 姜磊³, 周海峰³, 陈忠升⁴

(1. 南昌大学 中国中部经济社会发展研究中心, 南昌 330031; 2. 南昌大学 经济管理学院, 南昌 330031; 3. 浙江财经大学 经济学院, 杭州 310018; 4. 西华师范大学 国土资源学院, 四川 南充 637002)

摘要:以长江经济带为研究对象, 基于 2015 年城市空气质量监测数据, 首先利用自然正交函数分析了 126 个城市空气质量指数(AQI)的时空演变特征, 然后采用地理加权回归方法从空间异质性视角探讨了空气质量的社会经济影响因素。研究结果表明: (1) EOF 第一模态特征向量的高值出现在长三角的江苏省, 长江中游的武汉都市圈、长株潭地区以及成渝城市群。低值区则集中在云南的大部分城市、贵州的黔南州、四川的阿坝州以及浙江的舟山、台州和丽水。(2) 月尺度的 AQI 时间系数变化大致呈 U 形分布, 即 1—5 月呈现波动下降趋势, 6—8 月 AQI 总体处于“U”的谷底, 9—12 月逐渐波动上升。就年内季节变化来看, 冬季空气质量最差, 夏季空气质量最好, 春秋两季居中。(3) 人均地区生产总值、人口密度、PM_{2.5} 浓度和 SO₂ 浓度的增加均是导致空气污染加剧的重要因素, 而 FDI 和建成区绿化覆盖率的增加有利于空气质量的改善, 并且不同城市的影响因素对空气质量作用存在显著的空间异质性。

关键词: 长江经济带; 空气质量指数; 时空异质性; 自然正交函数; 地理加权回归

中图分类号: F205; X823

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)02-0312-08

Spatiotemporal Heterogeneity of Air Quality Index and Its Socio-economic Factors in the Yangtze River Economic Belt

BAI Ling^{1,2}, JIANG lei³, ZHOU Haifeng³, CHEN Zhongsheng⁴

(1. *Research Center of the Central China Economic Development, Nanchang University, Nanchang 330031, China*; 2. *School of Economics & Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China*; 3. *School of Economics, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018, China*; 4. *College of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637002, China*)

Abstract: We employed a cross-sectional data of the Yangtze River Economic Belt at the city level to investigate spatiotemporal variation characteristics of air quality index (AQI) of 126 cities by means of the empirical orthogonal function (EOF) method, and then applied the geographically weighted regression method to analyze socio-economic factors of AQI from a perspective of spatial heterogeneity. The findings are the followings. (1) The first mode of EOF has high eigenvector values in Jiangsu Province, Wuhan metropolitan region, Chang-Zhu-Tan region and Chengdu-Chongqing urban cluster while low high eigenvector values are shown in most cities of Yunnan Province, Qiannan of Guizhou Province, Aba of Sichuan Province and Zhoushan, Taizhou and Lishui of Zhejiang Province. (2) On the monthly time scale, the time coefficient of AQI displays a U-shaped curve. Specifically, it first declines with fluctuations from January to May, and then keeps the lowest values from June to August, and finally increases from September to December. In other words, air quality is the worst in winter and the best in summer within the year of 2015. (3) The increase in per capita GDP, population density, PM_{2.5} concentration and SO₂ concentration are the important factors worsening air quality while FDI and green coverage ratio contribute to improving air quality. Finally, socio-economics factors may have impacts on air quality from city to city, presenting significant spatial heterogeneity.

收稿日期: 2018-05-10

修回日期: 2018-06-11

资助项目: 江西省高校人文社会科学重点研究基地项目(JD17125); 国家自然科学基金(41761021); 教育部人文社会科学青年资助项目(17YJC790061)

第一作者: 柏玲(1987—), 女, 河南新蔡人, 博士, 讲师, 主要从事环境经济研究。E-mail: bling1987yy@163.com

通信作者: 姜磊(1983—), 男, 山东烟台人, 博士, 助理教授, 主要从事应用空间计量经济学和区域经济学研究。E-mail: lei_jiang@zufe.edu.cn

Keywords: Yangtze River Economic Belt; air quality index, spatiotemporal heterogeneity; empirical orthogonal function; geographically weighted regression

近年来,伴随着工业化和城市化进程的加快,我国环境问题日益凸显,其中以雾霾为主要特征的空气污染问题尤为突出。如2013年初,我国遭遇了持续性的、全国大面积范围内的严重雾霾问题,影响超过800万人口,此次雾霾事件造成的直接经济损失约230亿元,被认为是上个世纪以来中国最为严重的空气污染事件^[1-2]。

作为横贯东西、地跨南北的重要腹地,长江经济带横跨11个省市,连接3个国家级城市群,即成渝城市群、长江中游城市群和长江三角洲城市群,长江经济带在中国的经济发展中极具重要的战略地位。然而,近年来长江经济带地区的空气污染问题日益突出,尤其长江中下游部分地区雾霾天数已达100 d/a以上,大气环境质量严重下降^[3]。日趋严重的大气污染不仅直接损害了当地民众的身体健康,同时对区域工业生产、交通运输及社会经济发展等造成了严重影响^[3-4]。

随着空气质量持续的恶化,国内外学者对中国空气污染问题的研究也逐渐增多。目前学术界对大气颗粒物PM_{2.5}的化学成分及来源^[5-6]、空气污染物(如PM_{2.5}、NO₂和SO₂)的时空演变格局^[7-10]、健康效应^[11-13]、自然和社会经济影响因素^[14-16]等方面开展了大量研究,这些研究成果不仅进一步提升了人们对空气质量问题在科学层面的认知,也对国家区域经济发展的重要新兴战略区,同时亦对生态环境敏感区的长江经济带空气污染问题的研究具有极高的借鉴意义和参考价值。然而,就目前而言,关于长江经济带环境问题的研究多侧重于宏观层面,主要包括可持续发展战略研究^[17-18]、生态文明建设发展研究^[19]、环境质量评价^[20-21]、资源环境约束下的生态效率测算^[3,22]等,而针对长江经济带空气污染的研究则较少,采用空间计量方法对该区域空气质量进行定量分析的文献更是缺乏。尽管有学者从空间依赖性的视角出发采用了空间滞后模型来研究长江经济带的空气污染问题^[23],但却忽略了空气污染在区域空间上的巨大差异性。传统的计量方法假设空间是均质的,无差异化的,模型的估计系数也是固定不变的,这显然违背了长江经济带明显的区域差异化的客观事实。此外,单一的空气污染物如PM_{2.5}、SO₂和NO₂等并不能全面地衡量空气质量状况,因此,这就需要一个相对权威的、受到学术界认可的能全面衡量空气污染的综合指标。2012年中国环境保护部在空气污染指数(Air Pollution Index, API)的基础之上又重新定义了空

气质量指数(Air Quality Index, AQI),AQI因其具有权威性、综合性较强和可信度较高,在出现之后受到了学术界广泛的关注和认可^[24-27]。

鉴于长江经济带在国家经济发展层面中具有战略支撑地位,迫切需要实施绿色可持续发展的经济增长模式。因此,研究该区域的空气污染演变规律及其影响因素,对促进长江经济带实现绿色、可持续发展具有极为重要的理论和现实意义。因此,本文选取长江经济带126个城市作为样本数据,采用AQI作为全面衡量空气污染的指标,首先利用自然正交函数分析126个城市空气质量指数的时空异质性特征,然后采用空间变系数模型中的地理加权回归模型来探讨不同城市之间社会经济影响因素对空气质量的影响,以期能为长江经济带大气污染治理提供科学决策依据。

1 方法与数据

本文采用AQI作为全面衡量空气质量的指标是因为AQI是由环保部制定监测空气质量状况的无量纲指数,其权威性、综合性和可信度相比现有文献所使用的指标更强。AQI不仅受到了学术界的认可,并且也逐渐被民众所广泛接受。根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ633—2012)规定,AQI数值大小可分为以下6级:(1)0~50,空气质量状况为优。(2)51~100,空气质量状况为良。(3)101~150,空气质量状况为轻度污染。(4)151~200,空气质量状况为中度污染。(5)201~300,空气质量状况为重度污染。(6)AQI大于300,空气质量状况为严重污染。

1.1 方法介绍

1.1.1 自然正交函数 自然正交函数,也称为经验正交函数。EOF最早由Pearson提出,后来于1956年被Lorenz运用于气象研究^[28-29]。EOF能对空间数据进行时空分解,从而得到相互正交的特征向量,这些特征向量代表的是空间样本,故称为空间模态;主成分则表示为时间变化,称之为时间系数。EOF能够把AQI时间的动态性和空间的异质性结合起来,从而揭示了AQI的时空动态规律^[30]。

1.1.2 OLS模型 首先给出最基本的OLS模型,在构建计量模型时,模型中所有变量采用对数形式,这样可以减少异方差性。模型如下所示:

$$\ln \text{AQI} = \alpha + \beta \ln X + \mu \quad (1)$$

式中: AQI为被解释变量,即空气质量指数; X为社会经济影响因素变量; α 为常数项; μ 为随机扰动项。

1.1.3 GWR 模型 GWR 是一种改进的空间线性回归模型,它的主要优势是把空间权重函数应用到了普通回归模型中,可以展示出不同空间的结构差异^[31]。式(1)为 OLS 回归模型,即为全局回归模型。基于全局回归模型,GWR 模型如下:

$$\ln \text{AQI}_i = \beta_0(\mu_i, v_i) + \sum_{k=1}^n \beta_k(\mu_i, v_i) \ln X_{ik} + \epsilon_i \quad (2)$$

式中: $\ln \text{AQI}_i$ 为第 i 个城市 AQI 观测值的对数形式; (μ_i, v_i) 为城市 i 的地理坐标; $\beta_0(\mu_i, v_i)$ 为城市 i 的常数项; $\beta_k(\mu_i, v_i)$ 为城市 i 第 k 个被解释变量的待估计参数; k 为解释变量的个数,取值范围 $[1, n]$; x_{ik} 为解释变量; ϵ_i 为随机误差项。

在地理加权回归中,由于地理空间信息都是用坐标来进行描述的,因此采用距离来作为权重大小的计算指标。目前存在常用的 3 种空间权重函数,分别是高斯权重函数、指数距离权重函数和三次方函数。其中,最常用的是高斯权重函数,具体形式如下所示:

$$W_i = \varphi(d_i / \delta \theta) \quad (3)$$

式中: φ 表示标准正态密度函数; δ 表示距离向量 d_i 的标准离差;参数 θ 表示衰减参数或者称之为带宽参数。

1.2 数据说明

根据数据的可获得性,并且参考已有的实证研究结果^[16,23,30],本文选取地区人均生产总值(GDP)、人口密度(Density)、规模以上工业总产值(Industry)、外商直接投资(FDI)、建成区绿化覆盖率(Green)、细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)和二氧化硫(SO_2)这 7 个变量来研究其对空气质量指数的影响。

本文采用的 AQI 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据来源于中国环境监测总站。其中,长江经济带 2015 年共有 130 个城市的监测数据,剔除县市级以及由于其他数据受限,空气质量指数时空分布研究的样本为 126 个城市。其他社会经济变量数据来源于《中国城市统计年鉴》(2016 年),由于缺少长江经济带 16 个城市的统计数据,因而空间回归部分的样本量为 110 个。

2 长江经济带空气质量指数的时空异质性

在回归分析之前,本文首先采用地图形式展示出长江经济带 126 个城市 2015 年空气质量指数(AQI)年平均值的空间分布情况,如图 1 所示。

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定》AQI 的级别可以发现,长江经济带 126 个地级市 AQI 共对应了 3 个级别,即 AQI 小于 50 的为第一个级别(优),50~100 为第 2 个级别(良),100~150 为第 3 个级别(轻度污染)。图 1 中有两种颜色表征 AQI 的良级别。

由图 1 可以看出,2015 年长江经济带 126 个城市 AQI 最大值并没有超过 150,年平均空气质量总体为良,云南和四川的部分自治州空气质量为优。轻度污染的城市仅有湖北的武汉、孝感、荆门和襄阳以及四川的自贡。由此可见,AQI 高值区主要在正处于快速工业化、城市化的武汉都市圈以及成渝城市群的自贡市。为检验长江经济带 126 个城市 AQI 是否存在空间自相关,本文选择了 k -nearest neighbors 法构建空间权重矩阵($k=4$ 时),结果发现 Moran's I 值高达 0.396 7,且通过了 1% 的显著性水平,说明长江经济带 AQI 在空间分布上呈现出显著的空间自相关,也即是说城市之间空气污染存在扩散效应。由于年均 AQI 掩盖了时节的差异,不能有效地反映城市之间的空间质量在季节上表现出的地区差异性,因而需从月尺度分析 AQI 空间分布和动态变化。

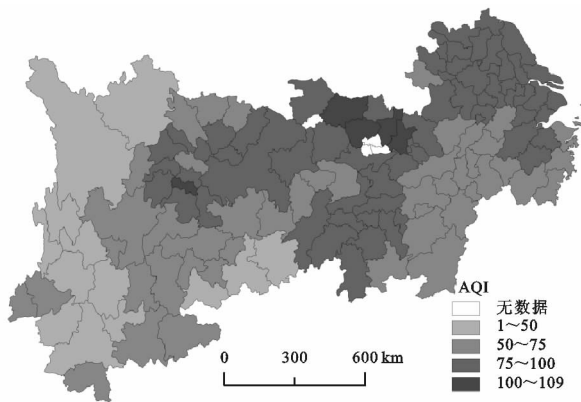


图 1 AQI 空间分布

为更好地理解 AQI 在空间上分布特征的变化以及时间上的演变规律,本文将 AQI 每小时监测数据整理成月平均数据,采用 EOF 方法对长江经济带 126 个城市 2015 年的 AQI 月数据进行时空分解,这样做的好处是可以更为明晰地分析出 AQI 的时空变化规律。结果发现前 3 个特征向量方差贡献率分别为 98.07%,0.77%,0.39%,每一特征向量场的极大值中心是 AQI 增加或减少异常变化的最敏感区域。特征向量之间表现为相互正交关系,EOF 展开的第一模态特征向量一般反映了 AQI 距平的平均状态,其余模态则反映在不同尺度 AQI 距平的变化状态。与特征向量对应的时间系数表示特征向量的权重,可以衡量不同年份对这种空间分布贡献的大小。由于第一个特征向量方差贡献率已高达 98.07%,因而可以采用第一特征向量来衡量 AQI 的时空结构特征。

EOF 第一模态反映了 AQI 的总体空间分布特征(图 2)。第一模态特征向量的极大值出现在长三角的江苏省大部分城市,长江中游的武汉都市圈、长

株潭地区以及成渝群的成都、自贡、泸州等市。低值区则集中在云南的大部分城市如丽江、玉溪和迪庆州、怒江州和楚雄州,贵州的黔南州、四川的阿坝州以及浙江的舟山、台州和丽水市。

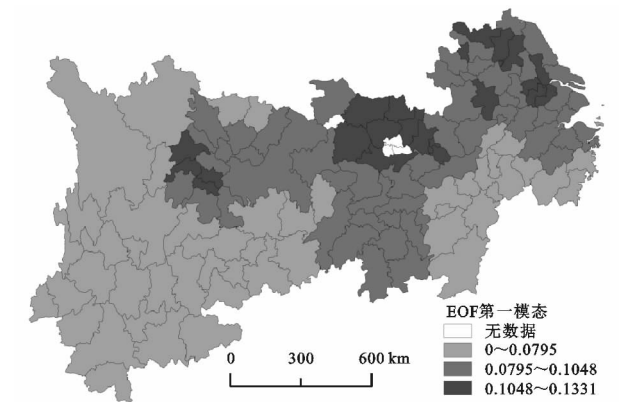


图 2 EOF 第一模态空间分布

第一模态反映了 2015 年长江经济带 126 个城市 AQI 空间年均变化分量。EOF 分解的第一模态对应的标准化时间系数(图 3)呈现出明显的年内季节变化特征。时间系数从 1 月份到 12 月份表现出先下降后上升的趋势,大致呈 U 型分布。具体来说,1—5 月呈现波动下降趋势,6—8 月 AQI 总体处于“U”的谷底,9—12 月波动逐渐上升。其中 1 月份的时间系数值最大,表明 1 月份这类 AQI 的空间分布最为典型。尤其是 1—2 月份,这一时期的长江中游城市群以及长三角城市群的污染较为严重。随着月份的推移,AQI 有了明显地下降。

但是,9—12 月份 AQI 时间系数呈上升趋势,并且 10—12 月份时间系数持续增加,12 月份达到极大值,说明随着冬季的来临,气温较低,居民冬季采暖引发了能源的大量消耗,导致了大量污染物排放,再加之冬季气象条件致使污染物的不易扩散,引发了空气质量的恶化,从而使得 AQI 增长速度较快。此外,还可以发现 AQI 第一模态的时间系数在 5 月份和 10 月份也较大,这可能是由于夏秋收时农民焚烧秸秆在一定程度上导致这两个月份空气污染加重。就年内季节变化来看,冬季空气质量最差,夏季空气质量最好,春秋两季居中。

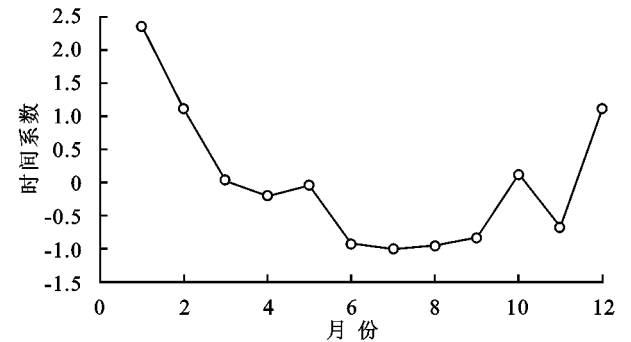


图 3 EOF 第一模态对应的标准化时间系数

3 长江经济带空气质量的社会经济影响因素分析

3.1 OLS 回归结果

首先,本文采用 OLS 方法对模型(1)进行估计,回归结果见表 1。

表 1 OLS 回归结果

变量	OLS 模型(1)			OLS 模型(2)		
	系数	标准误差	p 值	系数	标准误差	p 值
Constant	1.4128	0.1775	0.0000	1.3339	0.1591	0.0000
lnGDP	0.0346	0.0134	0.0112	0.0420	0.0112	0.0003
lnDensity	0.0291	0.0108	0.0085	0.0324	0.0103	0.0021
lnIndustry	0.0104	0.0104	0.3191			
lnFDI	-0.0160	0.0051	0.0021	-0.0130	0.0041	0.0020
lnGreen	-0.0661	0.0338	0.0532	-0.0649	0.0338	0.0576
lnPM _{2.5}	0.6707	0.0221	0.0000	0.6761	0.0214	0.0000
lnSO ₂	0.0264	0.0132	0.0492	0.0277	0.0132	0.0377
R ²	0.9490			0.9485		
调整后的 R ²	0.9455			0.9455		
残差平方和 SSR	0.2489			0.2514		
F-statistic	271.3610			316.4133		
Prob(F-statistic)	0.0000			0.0000		

首先看表 1 的第 2 列,OLS 模型(1)包含所有的变量。由结果可知,除 lnIndustry 变量之外,所有的外生变量分别在 1%,5%,10%的水平下显著。故此,剔除 lnIndustry 变量,回归结果见第 5 列。由 OLS 模型(2)结果可知,所有变量均高度显著,并且

从 R² 和 F 统计量来看,模型(2)整体拟合程度相对于模型(1)明显较好。

人均地区生产总值(GDP)对 AQI 有显著的正向影响。随着人们收入水平不断的提高,伴随而来的各种高能耗产品的使用与服务消费需求也日益旺盛,增加了

能源消耗的同时排放出大量的污染物,加剧了城市空气环境的污染程度。本文得出的结论与李静等^[32]的一致,即经济增长使得化石燃料消耗量激增,从而增加了污染物排放量,恶化了空气质量,反映了我国经济增长仍然以牺牲环境质量作为代价的现状。

人口密度(Density)与 AQI 呈现显著的正相关关系。人口密度大的城市人类活动强度较大,在日常生产和生活过程中消耗了很多资源并排放出大量污染物。如社会用电量增加导致化石燃料的燃烧量增多,排放出的硫化物和颗粒物等大气污染物也增多;汽车使用量增加后消耗的石油量增加,石油燃烧产生的污染物排放增加以及工业发展过程中排放的废气和餐饮业烹饪产生的油烟等,这些都是城市大气污染的主要来源。

外商直接投资(FDI)对 AQI 有显著的负向影响,即“污染避难所”假说在长江经济带不成立。其主要原因包含以下 3 点:第一,外资的流入通过增长效应、先进的技术溢出和科学的管理体系等影响长江经济带地区,在一定程度上减少了污染物排放,对环境起到了保护作用^[33]。第二,针对高污染高能耗行业的外资准入中国政府设置了严格的限制门槛,这也使得进入长江经济带的外资企业大都是技术水平高的、倾向使用清洁能源的企业。第三,FDI 在进行区位选择的过程中,考虑到环境治理成本因素,往往会选择治理成本较低的空气质量优质区域^[34]。

建成区绿化覆盖率(Green)与 AQI 存在显著地负向关系。由此可见,城市绿化在除尘、净化空气方面具有较强的功能。具体来说,植物可以吸收二氧化碳释放氧气,同时还对空气中的颗粒物起到吸附作

用。故此,提高城市绿化率对空气污染有一定抑制作用。最后,细颗粒物(PM_{2.5})与二氧化硫(SO₂)均与 AQI 存在显著地正相关关系。PM_{2.5}浓度和 SO₂浓度是影响 AQI 的重要指标,尤其是 PM_{2.5}与空气质量密切相关,是空气污染中最主要的污染物。

3.2 GWR 回归结果与分析

虽然 OLS 回归方法能得到各个变量对空气质量指数的影响,但是 OLS 回归方法仍然无法展示出地域间各种环境污染影响因素的空间异质性问题。因此,本文采用 GWR 方法来讨论不同影响因素对 AQI 在空间上的差异性。

首先,本文采用 3 种空间权重函数对 150 个城市进行回归,结果发现 3 种不同的空间权重函数其回归系数结果基本一致。基于这个原因,本文选择较为常用的高斯权重函数的估计结果作为分析的基础。

其次,在估计出 GWR 回归结果后,本文整理出了不同分位数上的系数,结果见表 2。在表 2 的 GWR 参数回归的 5 组分位数估计结果中,第 2—5 列的分位点分别选取最小值、1/4 分位数、中位数、3/4 分位数、最大值,第 7 列是全域估计结果,即 OLS 回归结果。

对比 OLS 模型和 GWR 模型可知,所选 6 个解释变量的 OLS 模型调整后的拟合优度为 0.945 5,而采用 GWR 的拟合优度为 0.960 9,从拟合优度来看,两者之间的差异不明显。因此,本文还计算出了赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)。OLS 模型的 AIC 为-342.879 1,而 GWR 模型的 AIC 为-698.273 1。其中,赤池信息准则统计量越小,表明模型更优。由此可见,GWR 模型相比 OLS 模型更优。

表 2 GWR 模型回归结果

变量	最小值	第一分位	中位数	第三分位	最大值	全域
Constant	0.9398	1.0130	1.2060	1.4350	1.5810	1.3339
lnGDP	0.0215	0.0360	0.0399	0.0418	0.0443	0.0420
lnDensity	0.0231	0.0263	0.0301	0.0330	0.0480	0.0324
lnFDI	-0.0143	-0.0134	-0.0125	-0.0114	-0.0111	-0.0130
lnGreen	-0.0771	-0.0644	-0.0465	-0.0390	-0.0182	-0.0649
lnPM _{2.5}	0.6165	0.6598	0.7190	0.7502	0.7584	0.6761
lnSO ₂	0.0129	0.0187	0.0232	0.0270	0.0333	0.0277

由表 2 可知,GWR 估计的各个解释变量对每一个城市的 AQI 都有一个特定的参数值,直观地揭示了各城市之间不同影响因素对 AQI 影响的空間异质性。此外,大多数分位数的参数估计值也有较大的变异,这也说明各个解释变量对区域内大部分样本点的影响是异质的。

本文重点探讨了社会经济因素人均地区生产总值(GDP)、人口密度(Density)、外商直接投资(FDI)、建成区绿化覆盖率(Green)以及细颗粒物(PM_{2.5})与二氧化硫

(SO₂)变量对 AQI 作用的空間异质性(图 4)。

人均 GDP 与 AQI 表现为显著的正相关关系。这说明我国经济发展仍以牺牲环境为代价。由 GWR 模型回归结果来看,不同城市 GDP 变量弹性系数有所差别,这也说明了不同地区人均 GDP 对 AQI 影响程度有所不同。其中,弹性系数较大的是长江中游地区,具体来说是武汉都市圈、长株潭和环鄱阳湖城市群。这是由于长江中游城市群既是我国区域经济发展的重要战略区,亦是生态环境敏感区。目前长江中游城市群处于高速发

展态势,工业化和城市化进程不断加快,从而导致了严重的空气污染问题。成渝城市群和长三角地区的弹性系数处于平均水平,这可能是由于两个区域经济发展水平在整个长江经济带处于相对较高的水平,随着人民生活水平的提高,人们的环保意识以及对空气质量的诉求也日趋见涨;而弹性系数较小的主要在经济欠发达的云贵地区,其城市化和工业化水平也相对较低。

人口密度(Density)与 AQI 呈现出显著的正相关关系,这说明人口密度越高,人类活动带来的环境污染也越严重。在人口密度方面,不同地区人口密度对 AQI 影响程度也不同。如人口密度较高的长三角地区显然对环境质量影响程度要大于长江中游城市群和成渝城市群,这主要是由于不同的人口数量带来的环境压力也具有差异性。值得注意的是,云南的昆明、丽江和大理等城市人口密度对空气质量影响的弹

性系数最大,这可能主要是由于这些城市大力发展旅游业吸引了国内外大量游客,流动人口的大量存在也增加了对生活物品及设施的需要,导致了排放更多的污染物,从而影响了当地的空气质量。

外商直接投资(FDI)与 AQI 表现为显著的负相关关系,说明外商直接投资在长江经济带对环境具有明显的改善作用,即存在“污染光环效应”。但是从 GWR 模型回归结果看,GWR 回归弹性系数有所差别,这也说明了不同地区 FDI 对 AQI 影响程度有所不同,就弹性系数大小而言,FDI 系数(绝对值)由西向东逐渐递减,其中,弹性系数绝对值最大的城市为永州(0.014 3),其次是怀化市和保山市(0.014 2),最小的为温州(0.011 1)。而弹性系数绝对值较大的城市主要在长江中游城市群及成渝城市群,FDI 对环境改善作用最小的主要是在长三角城市群。

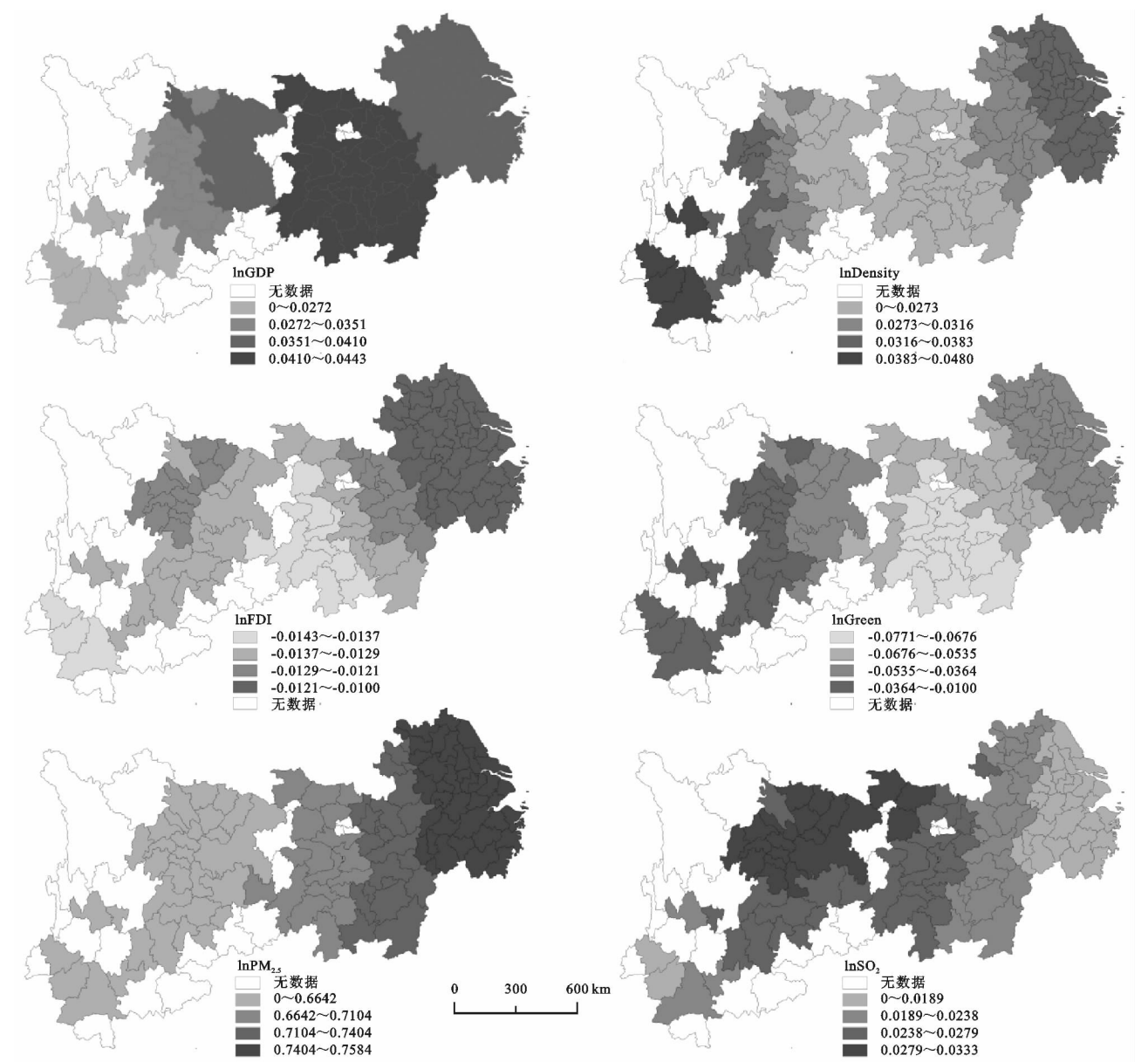


图 4 社会经济因素弹性系数的空间分布

建成区绿化覆盖率(Green)与 AQI 呈现出显著的负相关关系,说明城市绿化覆盖率的提高对 AQI 具有显著的改善作用。就弹性系数大小来说,弹性系数绝对值较大的城市以长江中游城市群较多,尤其是集中在江西。长三角地区的弹性系数大小居中。而弹性系数绝对值较小的城市主要在四川的西南部以及云南的城市如昆明、丽江和昭通等城市。由此可见,建成区绿化覆盖率对空气质量改善作用较大的是快速发展的新兴城市群如长江中游城市群,而对于经济相对欠发达的西南地区以及经济相对发达的东部地区长三角地区来说,绿化覆盖率对空气质量的改善作用较小,这主要是云南和四川相对欠发达的城市本身植被覆盖率和绿化比较好,而长三角地区经济发达,“寸土存金”的土地价值致使绿地建设空间不大,因而城市绿地给二者所带来的空气质量改善作用都较小。

细颗粒物($PM_{2.5}$)与二氧化硫(SO_2)均与 AQI 表现为显著的正相关关系,说明 $PM_{2.5}$ 与 SO_2 是环境污染的重要污染物。就弹性系数大小来说, $PM_{2.5}$ 弹性系数较大的城市主要集中在长三角地区,弹性系数较小的城市则主要集中在云南和成渝城市群;而 SO_2 弹性系数较大的城市主要集中湖北的北部如十堰、襄阳和宜昌以及成渝城市群,弹性系数较小的城市则集中在长三角和云南的西南部。

4 结论与建议

研究结果发现:(1) EOF 第一模态特征向量的高值出现在长三角的江苏省,长江中游的武汉都市圈、长株潭地区以及成渝城市群。低值区则集中在云南的大部分城市、贵州的黔南州、四川的阿坝州以及浙江的舟山、台州和丽水。(2) 月尺度的 AQI 时间系数变化大致呈 U 形分布,即 1—5 月呈现波动下降趋势,6—8 月 AQI 总体处于“U”的谷底,9—12 月逐渐波动上升。总体上,冬季空气质量最差,夏季空气质量最好,春秋两季居中。(3) 人均地区生产总值、人口密度、 $PM_{2.5}$ 浓度和 SO_2 浓度的增加均是导致空气污染加剧的重要因素,而 FDI 和建成区绿化覆盖率的增加有利于空气质量的改善,并且不同城市的影响因素对空气质量作用存在显著的空间异质性。依据研究所得出的结论,本文提出如下政策建议:

第一,空气质量问题归根到底是经济发展问题。各地方政府在追求 GDP 增长的同时不能以牺牲环境为代价,必须坚持环境与经济协调友好发展路线。因此,在保持经济稳定增长的前提下,必须注重经济发

展方式的调整,积极落实高能耗产业的升级改造工作以及协调处理地区间产业转移带来的污染转移问题;提高能源资源的利用效率,推动科学技术水平成为经济发展过程中新的增长极;大型城市(如上海和南京等)需要制定合理的人口导向政策,防治人口的过快集聚而带来的环境问题。同时,大力倡导并积极推进低碳消费模式,缓解人口对大气环境带来的压力,逐步建立资源节约型、环境友好型社会,促使经济发展与大气环境污染实现早日“脱钩”。

第二,由于空气污染存在区域差异性和空间溢出效应,因此,地方政府必须实施区域差异化的空气污染治理机制,一方面要根据各省市发展情况制定差异化的减排政策,落实各地方政府责任大小不同的减排目标,如针对云南、四川等空气质量较好的城市制定相对宽松的环保政策,将空气污染较重的城市(如武汉等)作为下阶段空气污染整治的重点核心区域。另一方面,积极促使跨省跨城市间大气污染联防联控机制的形成。与此同时,长江经济带不同省市在治理过程中需通力协作,积极探索引导城市间的环境合作,实现绿色协同发展。否则,各自为战的治理方式将导致污染长期反复,甚至是顾此失彼的窘境。

第三,考虑到 FDI 及城市绿化覆盖率对环境污染起到了改善作用,但是其影响程度呈现出较大的区域差异性。因而政府要考虑制定差异性的城市减排政策,不能搞“一刀切”的模式。具体来说,对于温州、金华和台州市等 FDI 改善空气质量作用小的城市,应当以引进高端行业外资为主,而对于 FDI 改善空气质量作用大的城市,如:永州、邵阳和保山等,在鼓励外资流入的同时更要完善相关的监管手段。在绿地建设空间不大并且“寸土寸金”的城市,更应着重保护现有的绿地面积,秉持“绿色城市,绿色生活”的发展理念。

最后,由于企业生产活动所产生的污染物排放(如 SO_2)是空气污染物的主要来源,因而清洁生产尤其重要。显然,企业的生产活动以利润为导向,企业没有激励机制主动减排,这就使得一方面需要政府制定财政激励政策鼓励减排、补贴高科技、高附加值和清洁生产的企业;另一方面,企业也应该积极开展绿色创新活动,严格履行相关环保法案,为改善空气质量承担必要的社会责任。

参考文献:

- [1] Huang R J, Zhang Y, Bozzetti C, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze

- events in China[J]. *Nature*, 2014,514(7521):218-222.
- [2] Wang H, Xu J, Zhang M, et al. A study of the meteorological causes of a prolonged and severe haze episode in January 2013 over central-eastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014,98:146-157.
- [3] 汪克亮,孟祥瑞,杨宝臣,等. 基于环境压力的长江经济带工业生态效率研究[J]. *资源科学*, 2015,37(7):1491-1501.
- [4] Song M, Wang S, Yu H, et al. To reduce energy consumption and to maintain rapid economic growth: Analysis of the condition in China based on expended IPAT model[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011,15(9):5129-5134.
- [5] Shaltout A A, Boman J, Al-Malawi D R, et al. Elemental composition of $PM_{2.5}$ particles sampled in industrial and residential areas of Taif, Saudi Arabia[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013,13(4):1356-1364.
- [6] 郑玫,张延君,闫才青,等. 上海 $PM_{2.5}$ 工业源谱的建立[J]. *中国环境科学*, 2013,33(8):1354-1359.
- [7] 郑晓霞,李令军,赵文吉,等. 京津冀地区大气 NO_2 污染特征研究[J]. *生态环境学报*, 2014,23(12):1938-1945.
- [8] 王振波,方创琳,许光,等. 2014 年中国城市 $PM_{2.5}$ 浓度的时空变化规律[J]. *地理学报*, 2015,70(11):1720-1734.
- [9] 李名升,任晓霞,于洋,等. 中国大陆城市 $PM_{2.5}$ 污染时空分布规律[J]. *中国环境科学*, 2016,36(3):641-650.
- [10] 柏玲,姜磊,刘耀彬. 长江中游城市群环境压力的时空特征:以工业 SO_2 排放为例[J]. *经济地理*, 2017,37(3):174-181.
- [11] Fang W, Yang Y, Xu Z. PM_{10} and $PM_{2.5}$ and health risk assessment for heavy metals in a typical factory for cathode ray tube television recycling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013,47(21):12469-12476.
- [12] Shen X J, Sun J Y, Zhang X Y, et al. Characterization of submicron aerosols and effect on visibility during a severe haze-fog episode in Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015,120:307-316.
- [13] Kulmala M. China's choking cocktail[J]. *Nature*, 2015,526(7574):497-499.
- [14] Lin G, Fu J, Jiang D, et al. Spatio-temporal variation of $PM_{2.5}$ concentrations and their relationship with geographic and socioeconomic factors in China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013,11(1):173-186.
- [15] 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.
- [16] 蔺雪芹,王岱. 中国城市空气质量时空演化特征及社会经济驱动力[J]. *地理学报*, 2016,71(8):1357-1371.
- [17] 岑晓喻,周寅康,单薇,等. 长江经济带资源环境格局与可持续发展[J]. *中国发展*, 2015,15(3):1-9.
- [18] 方创琳,周成虎,王振波. 长江经济带城市群可持续发展战略问题与分级梯度发展重点[J]. *地理科学进展*, 2015,34(11):1398-1408.
- [19] 宓泽锋,曾刚,尚勇敏,等. 长江经济带市域生态文明建设现状及发展潜力初探[J]. *长江流域资源与环境*, 2016,25(9):1438-1447.
- [20] 吴传清,陈文艳. 长江经济带经济增长与环境质量关系的实证研究[J]. *生态经济*, 2016,32(5):34-37.
- [21] 刘登娟,吕一清. 长江经济带成渝城市群环境与经济协调发展评价[J]. *经济体制改革*, 2017,35(2):36-42.
- [22] 卢丽文,宋德勇,李小帆. 长江经济带城市发展绿色效率研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016,26(6):35-42.
- [23] 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.
- [24] Wang M, Cao C, Li G, et al. Analysis of a severe prolonged regional haze episode in the Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015,102:112-121.
- [25] 刘华军,杜广杰. 中国城市大气污染的空间格局与分布动态演进:基于 161 个城市 AQI 及 6 种分项污染物的实证[J]. *经济地理*, 2016,36(10):33-38.
- [26] 蔺雪芹,王岱. 中国城市空气质量时空演化特征及社会经济驱动力[J]. *地理学报*, 2016,71(8):1357-1371.
- [27] 刘满凤,谢晗进. 基于空气质量指数 AQI 的污染集聚空间异质性分析[J]. *经济地理*, 2016,36(8):166-175.
- [28] Pearson K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space[J]. *the London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1901,2(11):559-572.
- [29] Lorenz E N. Statistical forecasting program: empirical orthogonal functions and statistical weather prediction[J]. *Scientific Report*, 1956,409(2):997-999.
- [30] 姜磊,周海峰,柏玲,等. 空气质量指数(AQI)的社会经济影响因素分析:基于指数衰减效应视角[J]. *环境科学学报*, 2018,38(1):390-398.
- [31] 白景锋,张海军. 基于 EOF 和 GWR 模型的中原经济区经济增长的时空分析[J]. *地理研究*, 2014,33(7):1230-1238.
- [32] 李静,彭飞. 城市空气污染与收入关系的 EKC 再检验[J]. *统计与决策*, 2013,29(20):86-89.
- [33] 白俊红,吕晓红. FDI 质量与中国环境污染的改善[J]. *国际贸易问题*, 2015,41(8):72-83.
- [34] 姜磊,周海峰,柏玲. 外商直接投资对空气污染影响的空间异质性分析:以中国 150 个城市空气质量指数(AQI)为例[J]. *地理科学*, 2018,38(3):351-360.