

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 Ling, Jiang Lei, Zhou Haifeng 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. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(12): 2100-2108.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.12.019

# 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

柏玲<sup>1,2</sup>, 姜磊<sup>3</sup>, 周海峰<sup>3</sup>, 陈忠升<sup>4</sup>

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

**摘要:** 基于2015年长江经济带126个城市空气质量监测数据, 首先利用探索性空间数据分析方法揭示了空气质量指数(AQI)的时空演变特征, 然后采用贝叶斯空间滞后模型探讨了长江经济带空气质量指数的社会经济驱动因素。研究结果表明: ① 长江经济带年AQI在空间上整体具有东高西低, 长江以北高长江以南低的分布特点, 具有明显的空间集聚特征。空气污染严重的热点地区主要集中长三角城市群的江苏省、浙北地区、皖北大部分地区以及上海市。空气质量较好的冷点地区则主要集中在云南省、四川的攀枝花以及贵州的大部分地区。② 长江经济带AQI在季节上呈现冬春高、夏秋低的变化趋势。总体而言, 四季的高值集聚主要分布在鄂皖苏, 低值集聚主要分布在云贵地区。③ 贝叶斯空间滞后模型回归结果显示, 长江经济带空气质量存在显著的空间溢出效应。此外, 模型结果证实了“环境库兹涅兹曲线”假说; FDI回归系数为正, 支持了“污染避难所”假说; 人口密度、公路客运量均是导致空气污染加剧的重要因素, 而第三产业比重和建成区绿化覆盖率增加有利于长江经济带空气质量的改善。

**关键词:** 长江经济带; 空气质量指数; 空间自相关; 热点分析; 贝叶斯空间计量模型

**中图分类号:** F205; X196      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0690(2018)12-2100-09

长江经济带作为地跨中国南北、横贯东西的重要腹地, 包含9个省及2个直辖市, 连接3个国家级城市群, 在中国的经济发展中具有重要的战略地位。然而, 近年来随着工业化和城市化进程的加快, 尤其是长江经济带资源密集型的重工业行业如火力发电、石化和钢铁冶炼等行业的迅速发展, 排放出大量的污染物, 致使长江经济带空气污染问题日益突出。特别是长江中下游部分城市雾霾天数已达100 d/a以上, 个别城市甚至超过200 d/a, 大气环境质量严重下降<sup>[1]</sup>。日趋严重的大气污染不

仅损害了当地人民的身体健康, 也对区域工业生产、交通运输及社会经济发展等造成了严重影响<sup>[1,2]</sup>。长江经济带在国家经济发展层面中具有战略支撑地位, 因而研究该区域空气质量时空演变特征及驱动因素, 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。

近年来, 随着中国大气污染问题日趋严重, 有关空气质量问题研究也日益增多。目前学术界对空气污染问题展开了大量的多角度研究, 如空气污染物PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>的时空演变格局分

**收稿日期:** 2017-11-28; **修订日期:** 2018-01-26

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41761021)、教育部人文社会科学青年基金项目(17YJC790061, 18YJC790111)、江西省高校人文社会科学重点研究基地项目(JD17125)、浙江省自然科学基金项目(LY19G030013, LQ19D050001)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41761021), The Project of Humanities and Social Science Youth Fund of Ministry of Education (17YJC790061, 18YJC790111), Key Research Base Project of Social Sciences and Humanities in Jiangxi Province (JD17125), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LY19G030013, LQ19D050001).]

**作者简介:** 柏玲(1987-), 女, 河南新蔡人, 博士, 讲师, 研究方向为区域经济和生态经济。E-mail: bling1987yy@163.com

**通讯作者:** 姜磊。E-mail: jiang@zufe.edu.cn

析<sup>[3-6]</sup>、大气颗粒物PM<sub>2.5</sub>的化学成分析<sup>[7,8]</sup>、健康效应<sup>[9,10]</sup>、自然和社会经济驱动因素<sup>[11,12]</sup>等。这些研究成果有利于提升人们对空气污染问题在科学层面的认知,对进一步研究长江经济带空气质量及驱动因素极具参考价值。然而,以上研究多选择单一的空气污染物如PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>来直接表征区域空气污染水平,无法客观全面地衡量区域空气污染状况。基于此,现有部分研究选用中国环境保护部提出的空气质量指数(Air Quality Index, AQI)来作为全面衡量空气污染的综合指标,且主要集中于中国城市空气质量指数的时空分布特征<sup>[13,14]</sup>,城市空气质量自然和社会经济驱动因素分析<sup>[15-22]</sup>。然而,以整个长江经济带为研究范围,基于地面监测数据研究AQI时空特征及驱动因素的成果较少,并且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,采用空间滞后模型来研究长江经济带的PM<sub>2.5</sub>影响因素<sup>[23]</sup>,但仍然存在不足之处。第一,PM<sub>2.5</sub>是单一污染物,不能全面地衡量长江经济带的空气污染状况。第二,由于长江经济带各个城市的空气污染存在较大的差异,因此,计量模型的估计结果很可能存在异方差性问题。而异方差问题得不到有效解决将会使得相关空间计量模型估计结果有偏,从而影响科学判断。

本文选取长江经济带地级及以上城市作为样本区域,采用AQI作为全面衡量空气污染的指标。首先,利用探索性空间数据分析方法揭示地级及以上城市空气质量指数的时空特征;然后,建立长江经济带空气质量影响因素的空间计量模型;最后,采用贝叶斯方法回归估计空间计量模型,并分析和探讨影响长江经济带空气质量的社会经济的驱动因素,以期对长江经济带大气污染治理提供科学的决策依据。

## 1 模型与数据来源

本文采用AQI作为全面衡量空气质量的指标。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。根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定》(HJ633-2012)<sup>[24]</sup>规定,AQI数值大小可分为6级:① 0~50为优;② 51~100为良;③ 101~150为轻度污染;④ 151~200为中度污染;

⑤ 201~300为重度污染;⑥ AQI大于300为严重污染。此外,本文定义的“平均”指统计期内各日均值的算术平均值;春季为3~5月;夏季为6~8月;秋季为9~11月;冬季为12月、1月和2月。

### 1.1 方法与模型

#### 1.1.1 探索性空间数据分析方法

采用探索性空间数据分析方法中的全域空间自相关分析方法和局域空间自相关的热点分析方法对长江经济带地级及以上城市的AQI进行分析。其中,全域空间自相关分析可以定量地描述城市AQI值与相邻城市AQI值的相似性。全域空间自相关分析一般采用的测度指标是Moran's I指数<sup>[25,26]</sup>。

局域空间自相关用来度量长江经济带某个城市的AQI与其周围区域AQI的差异程度,其中常用的一种方法就是热点分析。热点分析需要计算出每个空间单元Getis-Ord  $G_i^*$ 统计量,得到相应的Z得分和P值。作为热点区域,不仅自身区域体现出高值,还将被同样的高值城市所包围<sup>[27]</sup>。

#### 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,这样做的好处是可以减少模型的异方差性<sup>[28]</sup>。模型如下所示:

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

式中,AQI为被解释变量,X表示社会经济影响因素变量, $\alpha$ 为常数项, $\beta$ 为待估计的自变量参数, $\mu$ 为随机扰动项。

#### 1.1.3 空间计量模型

空间滞后模型(Spatial lag model, SLM)主要用于研究区域经济现象中某地区对其相邻区域属性值产生的影响,在研究空气污染时用来检验一个地区的空气污染是否具有扩散效应<sup>[29]</sup>。该模型的表达式为:

$$\ln AQI = \rho W \ln AQI + \ln X\beta + \mu \quad (2)$$

式中,AQI是被解释变量, $\rho$ 为空间自回归系数; $X$ 是 $n \times k$ 的外生解释变量矩阵,其中 $n$ 表示样本个数, $k$ 表示解释变量个数;是 $k \times 1$ 的待估计自变量系数, $\mu$ 是随机扰动项, $W$ 为空间权重矩阵。

贝叶斯空间滞后模型(Bayesian estimates of spatial lag model, BSLM)是通过贝叶斯统计方法进行参数估计后得到的空间滞后模型。相比传统的空间滞后模型参数估计方法,BSLM模型在进行参数估计时不需要满足残差项同方差的前提假设条件。本文采用MCMC(Markov Chain Monte

Carlo)参数估计思想,并选择吉布斯抽样方法(Gibbs sampling approach)进行估计,最终得到待估参数的贝叶斯估计值<sup>[30]</sup>。

## 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<sup>[12,23,29]</sup>,本文选取了地区人均生产总值(GDP)、地区人均生产总值平方项(GDP2)、人口密度(Density)、第三产业比重(Third)、外商直接投资(FDI)、建成区绿化覆盖率(Green)、公路客运量(Tranint)7个变量来研究其对AQI的影响。

本文采用的AQI数据来源于中国环境保护部数据中心(<http://datacenter.mep.gov.cn/index>)。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)<sup>[31]</sup>,由于缺少长江经济带中16个城市的统计数据,因而空间计量模型部分的样本量为110个。

## 2 AQI的时空特征分析

图1展示了2015年长江经济带126个城市年均空气质量指数的分布情况,其中湖北的天门、潜江、仙桃市和神农架林区数据缺失。可以看出,长江经济带大部分城市AQI值介于50~100,即空气质量处于良好状态。从AQI的空间分布来看,整体表现为东高西低,长江以北高长江以南低的分布格局。其中,AQI低值区主要集中于长江上游,如云贵川地区。这是因为长江经济带西南部城市位于云贵高原,该地区海拔较高,人口稀少,工业化水平低,人类生产生活排放的污染物较少,因此空气质量较好。AQI高值区主要集中在鄂苏皖及成渝地区,如湖北的武汉、荆门和襄阳等。主要原因是武汉都市圈以及成渝城市正处于快速工业化和城市化的进程中,其排放出的大气污染物总量较大,造成了严重的空气污染,是长江经济带污染最严重最集中的地区。

从AQI的季节变化空间分布来看(图2),长江经济带夏季AQI的空间分异规律不明显;但是冬、春、秋三季AQI的空间分异性显著,且与年度AQI的空间分布格局相似,即整体呈现为东高西低的格局。从季节动态来看,长江经济带中AQI明显呈现冬春高、夏秋低的季节变化特点,且冬季与夏季浓度差异显著。冬季AQI的均值高于其他3个

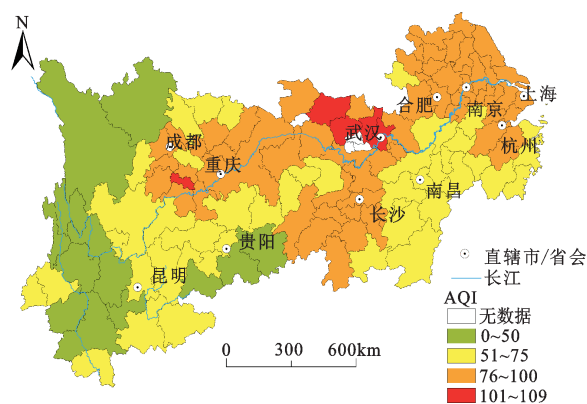


图1 2015年长江经济带地级及以上城市AQI空间分布  
Fig.1 Spatial distribution of AQI in the Yangtze River Economic Belt in 2015

季节,达到97.71;夏季AQI的均值最低,为56.78。

从空间分布情况来看,城市之间的空气质量在季节上表现出显著的地区差异性,如冬季污染比较严重的有江苏、浙江和安徽等地区,其中大部分为轻度污染,中度污染主要集中在湖北的武汉、荆门、襄阳和宜昌。春季空气污染程度较低,污染范围较小,轻度空气污染的仅有江苏的徐州和湖北的襄阳。夏季空气质量最佳,未出现轻度污染,主要表现为良和优。秋季空气质量仅次于夏季,总体为良。

为检验长江经济带地级及以上城市AQI是否存在空间自相关,首先采用了全局空间自相关进行分析。本文采用K-nearest最近邻居空间权重矩阵法构建空间权重矩阵。当 $3 \leq k \leq 7$ 时,长江经济带地级及以上城市AQI的Moran's I值均显著且差异较小。考虑到空气污染的空间范围,本文选取 $k=5$ 进行分析,结果发现Moran's I值高达0.710 0(图3),且通过1%的显著性水平检验,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现象,换言之,城市之间空气污染存在扩散效应,一个城市空气质量受到邻近地区的影响。

为进一步揭示长江经济带地级及以上城市AQI四季的空间自相关问题,基于5个最近邻居空间权重矩阵计算了长江经济带AQI的Moran's I值,结果显示,春、夏、秋和冬季的Moran's I值分别为0.558 0、0.715 8、0.729 4、0.685 5,均通过1%的显著性水平检验,说明长江经济带四季AQI都具有较强的空间自相关性,且全域表现为“高-高”或者“低-低”的集聚状态。



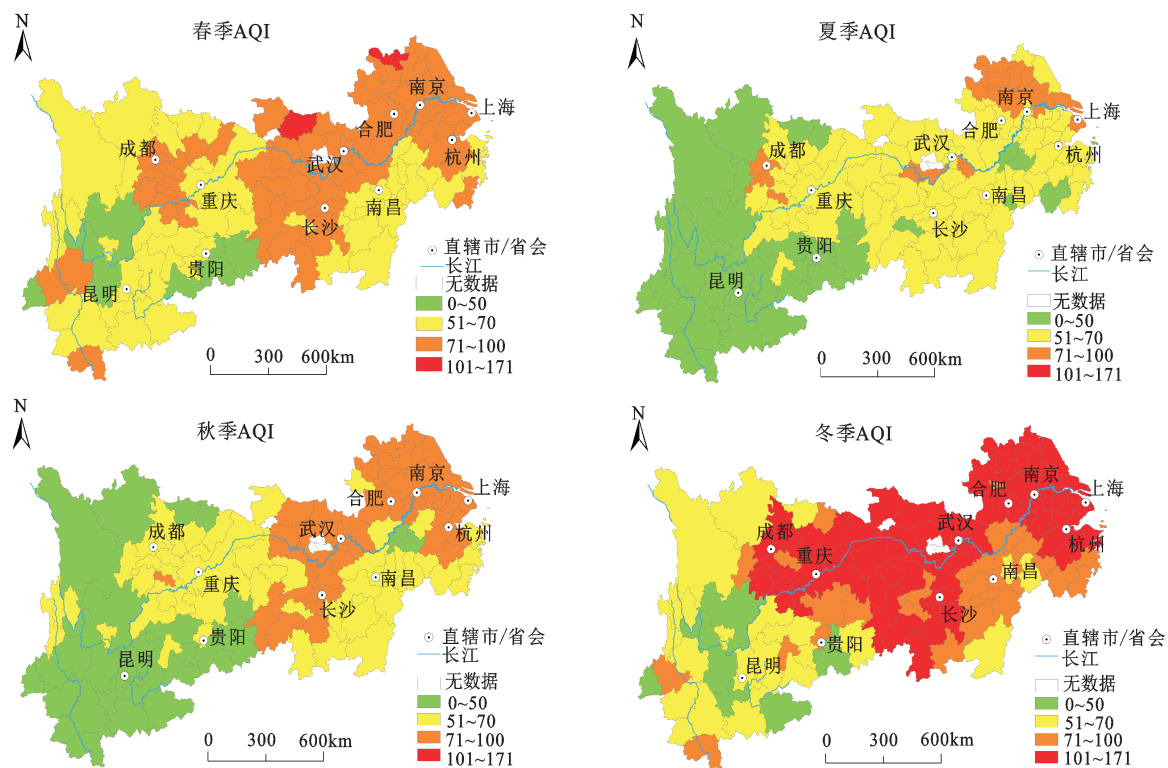


图2 长江经济带AQI四季的变化

Fig.2 Seasonal variation of AQI in the Yangtze River Economic Belt

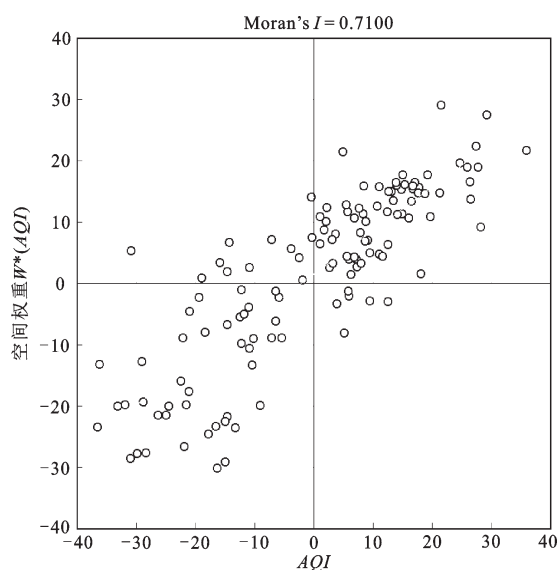


图3 长江经济带地级及以上城市AQI的Moran散点图

Fig.3 Moran scatterplot of AQI in the Yangtze River Economic Belt

此外,长江经济带地级及以上城市的AQI不仅在全局范围内存在空间溢出效应,在局部也表现出

明显的局域集聚特征。由热点分析结果可以看出(图4),空气污染严重的热点地区主要集中长三角城市群的江苏省全部城市、浙北地区、皖北大部分地区以及上海市。空气质量较好的冷点地区则主要集中在云南省绝大部分城市、四川的攀枝花以及贵州的贵阳、黔南、安顺和六盘水等地。

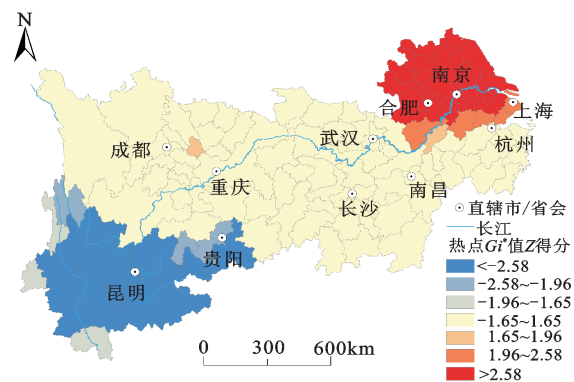


图4 基于热点分析的长江经济带AQI空间集聚特征

Fig.4 Spatial cluster feature of AQI by hotspot analysis in the Yangtze River Economic Belt

3 长江经济带空气质量的驱动因素

首先,本文采用OLS方法对长江经济带经济质量影响因素进行分析,结果如表1所示。由回归结果可知,所有的自变量分别在1%、5%和10%的显著性水平下通过了检验。并且,从调整的 $R^2$ 和 $F$ 统计量来看,OLS模型整体拟合程度较好。

表1 OLS回归结果

Table 1 Results of OLS model

变量	系数	标准误差	$t$ 统计量	$P$ 值
常数	-7.2306	6.0213	-1.2008	0.2326
LnGDP	2.1296	1.1174	1.9058	0.0595
LnGDP2	-0.0977	0.052	-1.8767	0.0634
LnDensity	0.1838	0.0276	6.6637	0.0000
LnFDI	0.0334	0.01272	2.6275	0.0099
LnThird	-0.3142	0.0839	-3.7454	0.0003
LnGreen	-0.1736	0.1016	-1.7091	0.0905
LnTranint	0.03349	0.0183	1.8306	0.0701
$R^2$	0.5474			
调整后的 $R^2$	0.5163			
$F$ -statistic	17.6237			0.0000
Log likelihood	58.8105			
AIC	-0.9238			
SC	-0.7274			

空白天为无值。

虽然OLS回归方法能得到各个变量对空气质量指数的影响,但却无法展示出城市之间空气污染的空间交互效应,并且根据城市AQI的自相关检验结果也可以看出空气质量存在显著的空间相关性。因此,需要考虑采用空间滞后模型来探讨空气质量的扩散效应及影响因素。

由表2可以看出,空间滞后模型(SLM)的空间自回归系数 $\rho$ 为0.671 0,且通过了1%的显著性水平检验,说明邻近城市的空间污染越严重,那么本地区的空气质量就越差,即空气污染存在显著的空间扩散效应。影响空气污染的空间扩散效应不仅包括大气环流、大气化学等自然因素,而且也包括产业转移、工业集聚等经济机制的扩散与转移<sup>[32]</sup>。

为了说明空间滞后模型优于OLS模型,本文比较3个统计量,即对数似然值,AIC值以及SC的值。比较2个模型可以发现,空间滞后模型的对数似然值(65.297 6)大于OLS模型的对数似然值(58.810 5),而空间滞后模型的AIC和SC值(-1.041 8,-0.845 4)均小于OLS模型的AIC和SC值(-0.923 8,-0.727 4),总体来看,空间滞后模型相比OLS模型拟合更好,即考虑空气污染的扩散效应在计量模型中是不可或缺的。

然而,对模型进行怀特检验,可以发现OLS模型和SLM模型均存在严重的异方差问题。鉴于此,本文使用贝叶斯方法重新估计空间滞后模型

表2 空间滞后模型与贝叶斯空间滞后回归结果

Table 2 Results of SLM model and BSLM

变量	空间滞后模型			贝叶斯空间滞后模型		
	系数	$t$ 统计量	$P$ 值	系数	$t$ 统计量	$P$ 值
常数	-5.6947	-1.4464	0.1481	-4.6538	-1.0925	0.1347
LnGDP	1.3951	1.9084	0.0563	1.1853	1.5168	0.0633
LnGDP2	-0.0631	-1.8535	0.0638	-0.0528	-1.4502	0.0722
LnDensity	0.0910	4.5603	0.0000	0.1011	4.483	0.0000
LnFDI	0.0246	2.9592	0.0031	0.0206	2.1612	0.0184
LnThird	-0.2295	-4.1196	0.0000	-0.2496	-3.4843	0.0002
LnGreen	-0.1736	-1.7091	0.0905	-0.1806	-2.5504	0.0069
LnTranint	0.0335	1.8306	0.0701	0.0206	1.498	0.0629
$\rho$	0.6710	10.3839	0.0000	0.6724	10.2179	0.0000
$R^2$	0.5971			0.5861		
调整后的 $R^2$	0.5695			0.5576		
Log likelihood	65.2976					
AIC	-1.0418					
SC	-0.8454					

空白为无值。

(Bayesian estimates of spatial lag model, BSLM), 并通过Gibbs方法抽样3 000次。贝叶斯空间滞后模型的估计结果如表2所示。结果发现,空间自回归系数为0.672 4,并且通过了1%的显著性水平的检验。由BSLM估计结果可知,所有的自变量均通过了显著性检验。

人均GDP一次方( $GDP$ )系数显著为正,而二次方系数( $GDP^2$ )显著为负,验证了“环境库兹涅兹曲线”假说<sup>[33]</sup>,即人均GDP与AQI呈现倒U形关系。换言之,在经济发展初期,随着收入水平提高,空气质量在不断地恶化。当经济增长越过拐点后,人们的环境保护意识逐步增强,对环境质量诉求变高。随着人均GDP的继续提高,环境质量也随之改善。由发达国家经验可知,人均GDP在6 000~8 000美元区间内是环境质量转优的临界点<sup>[12]</sup>,联合国国民账户主要汇总数据库(<https://unstats.un.org/unsd/snaama/dnList.asp>)可知,中国2015年人均GDP达到8 036美元。通过回归结果可以计算出,长江经济带的人均GDP拐点出现在10 866美元,仅有少数城市越过了拐点,例如长三角的上海、南京、杭州、苏锡常地区以及长江中上游的省会城市合肥、长沙、武汉、南昌和成都。而大部分城市还处于倒U型曲线的左侧,即随着收入水平地提高,空气质量会逐渐恶化。然而,作为国家经济发展层面中极具战略支撑地位的长江经济带经济发展程度差异较大,大部分城市经济发展仍然以牺牲环境作为代价,对于环保的投入较为欠缺。应充分利用自身的资源和区位优势,加快产业结构升级,争取早日越过以牺牲环境为代价的不可持续发展模式,实施绿色可持续发展的经济增长模式。

人口密度( $Density$ )对AQI有显著地正向影响。人口密度大的城市人类活动强度较大,生产和生活消耗了很多资源,并排放出大量污染物。如高能耗高污染的重工业的发展、社会用电量和汽车保有量等的增加,不仅导致区域能源消耗和汽车尾气排放量持续攀升,也使得城区建筑比较密集,交通流量不畅,导致城市污染从工业型污染向交通建筑型污染逐渐转变,加重了空气污染。

外商直接投资( $FDI$ )对AQI有显著地正向影响。从实证结果可以看出,外商直接投资对长江经济带的空气质量并未起到改善作用,反而加剧了空气污染,这说明“污染避难所”假说在长江经

济带成立。这可能是由于外资准入门槛低,引入了高污染行业的外资企业所致,这就需要政府针对高污染高能耗行业的外资准入设置严格的限制门槛,引进技术水平高的、倾向使用清洁能源的外资企业。同时,鼓励并推广外资企业使用清洁能源,鼓励和支持工业企业进行技术改造和升级,使得外资对中国环境治理起到积极作用。

第三产业比重( $Third$ )对AQI有显著地负向影响,说明第三产业比重的提高有利于空气质量的改善。这是由于第三产业相当一部分是高新技术产业、服务业,对空气质量的影响远小于第二产业。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转变升级,积极落实产业结构调整升级换代。

建成区绿化覆盖率( $Green$ )对AQI具有显著的改善作用,由此可见城市绿化在除尘、净化空气方面具有较强的功能,因此,仍需进一步加强城市绿化水平的提高。

最后,公路客运量( $Tranint$ )与AQI存在显著地正相关关系。由于缺乏完整的各城市的汽车拥有量的数据,这里选择公路客运量作为衡量交通强度的指标。汽车数量的激增导致排放出来的尾气也随之急剧增加,会直接影响空气质量。因此,需要大力提倡使用清洁能源汽车,同时鼓励民众选择绿色环保的交通工具出行,不仅有利于减少汽车尾气的排放,也是一种切实可行的改善城市空气质量的有效途径。

## 4 结论与建议

本文首先采用探索性空间数据分析方法分析了长江经济带2015年各城市AQI的时空特征,然后通过贝叶斯空间滞后模型考察了长江经济带空气质量指数的社会经济驱动因素。研究结果表明:①长江经济带年AQI在空间上整体表现出自东向西,即从上海到云南降低的趋势,具有长江以北高长江以南低,局部地区略有突出的特点。长江经济带AQI不仅在全局范围内存在空间扩散效应,在局部也存在着明显的集聚特征,空气污染严重的热点地区主要集中长三角城市群的江苏省、浙北地区、皖北大部分地区以及上海市。空气质量较好的冷点地区则主要集中在云南省、四川的攀枝花以及贵州的贵阳、黔南、黔西南、安顺和六盘水等地。②长江经济带AQI在季节上呈现冬春



季高、夏秋季低的季节变化趋势。总体而言,四季的高值集聚主要分布在鄂皖苏,尤其是苏南苏北为高-高集聚区。低值集聚主要分布在云贵地区,尤其是云南的大部分地区为低-低值集聚区,空气质量四季基本为优。③ 贝叶斯空间滞后模型回归结果显示,长江经济带空气污染存在显著的空间溢出效应,各城市间空气质量的交互影响作用很强。人均GDP一次方系数为正,二次方系数为负,佐证了“环境库兹涅兹曲线”假说;FDI回归系数为正,支持了“污染避难所假说”;人口密度、公路客运量均是导致空气污染加剧的重要因素,而第三产业比重和建成区绿化覆盖率增加有利于空气质量的改善。

依据研究所得出的结论,本文提出如下政策建议。第一,由于空气污染存在显著空间扩散效应,因此,各城市应当加强环境合作,打破地方行政分割。具体来说,不同省市在空气污染治理方面需要加强联防联控,针对重点问题重点污染区域进行统筹规划,积极探索城市间通力协作的新方式,形成空间上的合力,树立绿色、开放、共享的发展理念。不仅如此,各地更要加强环境监测手段,全面构建地方空气质量监测预报预警体系。第二,考虑到第三产业发展对空气质量起到了改善作用,因而,政府在制定政策时必须注重经济发展方式的调整,积极落实产业结构调整升级。同时,地方政府加大落后产能的淘汰力度,对重点高污染行业进行实时监控。大力发展高新技术产业,全面推进老产业链关键领域的创新升级。考虑到空气污染的空间扩散效应,在进行产业布局时应合理规划,避免污染行业的过度集中,进行产业转移时减少产业承接产生的负外部效应。各地政府积极探索城市经济增长的新方式,实施绿色可持续发展的经济增长模式。第三,鉴于FDI、人口密度、公路客运量均是导致空气污染加剧的重要因素,建成区绿化覆盖率有利于空气质量的改善。因此,政府在大力引进外资时必须将环境因素考虑在内,限制高污染行业的外资流入,以减少对环境的污染。经济发展水平较高的城市应当控制人口集聚速度,积极引导人口向中小型城市迁移。不仅如此,绿地建设空间不大并且土地资源紧张的大中型城市应当着重倡导“绿色优先,低碳先行”的绿色环保理念,鼓励民众在生活中使用清洁能源,选择绿色环保的交通工具出行,大力推进

绿色交通的发展。只有加强群众环保意识、提高政府监管水平,才能实现长江经济带绿色、和谐可持续发展。

## 参考文献(References):

- [1] 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. [Wang Keliang, Meng Xiangrui, Yang Baochen et al. The industrial eco-efficiency of the Yangtze River Economic Zone based on environmental pressure. Resources Science, 2015, 37(7): 1491-1501.]
- [2] 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.
- [3] 郑晓霞, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀地区大气NO<sub>2</sub>污染特征研究[J]. 生态环境学报, 2014(12): 1938-1945. [Zheng Xiaoxia, Li Lingjun, Zhao Wenji et al. Spatial and temporal characteristics of atmospheric NO<sub>2</sub> in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Ecology and Environment Sciences, 2014(12): 1938-1945.]
- [4] 王振波, 方创琳, 许光, 等. 2014年中国城市PM<sub>2.5</sub>浓度的时空变化规律[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1720-1734. [Wang Zhenbo, Fang Chuanglin, Xu Guang et al. Spatial-temporal characteristics of the PM<sub>2.5</sub> in China in 2014. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(11): 1720-1734.]
- [5] 李名升, 任晓霞, 于洋, 等. 中国大陆城市PM<sub>2.5</sub>污染时空分布规律[J]. 中国环境科学, 2016, 36(3): 641-650. [Li Mingsheng, Ren Xiaoxia, Yu Yang et al. Spatiotemporal pattern of ground-level fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) pollution in mainland China. China Environmental Science, 2016, 36(3): 641-650.]
- [6] 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<sub>2</sub>排放为例[J]. 经济地理, 2017, 37(3): 174-181. [Bai Ling, Jiang Lei, Liu Yaobin. Spatio-temporal characteristics of environmental pressures of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River—A case study based on Industrial SO<sub>2</sub> Emissions. Economic Geography, 2017, 37(3): 174-181.]
- [7] Shaltout A A, Boman J, Al-Malawi D. Elemental composition of PM<sub>2.5</sub> particles sampled in industrial and residential areas of Taif, Saudi Arabia[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2013, 13(4): 1356-1364.
- [8] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 上海PM<sub>2.5</sub>工业源谱的建立[J]. 中国环境科学, 2013, 33(8): 1354-1359. [Zheng Mei, Zhang Yanjun, Yan Caiqing et al. Establishing PM<sub>2.5</sub> industrial source profiles in Shanghai. China Environmental Science, 2013, 33(8): 1354-1359.]
- [9] 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 Environ-

- ment, 2015, 120: 307-316.
- [10] Lin G, Fu J Y, Jiang D et al. Spatio-temporal variation of  $PM_{2.5}$  concentrations and their relationship with geographic and socio-economic factors in China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013, 11(1): 173-186.
- [11] 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. [He Xiang, Lin Zhenshan, Liu Huiyu et al. Analysis of the driving factors of  $PM_{2.5}$  in Jiangsu province based on grey correlation model. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(7): 1119-1129.]
- [12] 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. [Lin Xueqin, Wang Dai. Spatio-temporal variations and socio-economic driving forces of air quality in Chinese cities. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(8): 1357-1371.]
- [13] 姜磊, 周海峰, 柏玲, 等. 中国城市空气质量指数(AQI)的动态变化特征[J]. *经济地理*, 2018, 38(9): 87-95. [Jiang Lei, Zhou Haifeng, Bai Ling et al. The spatio-temporal variation of air quality index of cities in China. *Economic Geography*, 2018, 38(9): 87-95.]
- [14] 肖悦, 田永中, 许文轩, 等. 中国城市大气污染特征及社会经济影响分析[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(3): 518-526. [Xiao Yue, Tian Yongzhong, Xu Wenxuan et al. Study on spatiotemporal characteristics and socioeconomic driving factors of air pollution in China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(3): 518-526.]
- [15] 熊洁, 陈楠, 操文祥, 等. 武汉市一次重霾天气 AQI 演变及气象因子特征分析[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(12): 183-187. [Xiong Jie, Chen Nan, Cao Wenxiang et al. Study on heavy smog days in Wuhan in terms of AQI index and characteristics of meteorological factors. *Environmental Science Technology*, 2015, 38(12): 183-187.]
- [16] 王景云, 张红日, 赵相伟, 等. 2012 - 2015 年北京市空气质量指数变化及其与气象要素的关系[J]. *气象与环境科学*, 2017, 40(4): 35-41. [Wang Jingyun, Zhang Hongri, Zhao Xiangwei et al. Variation of air quality index and its relationship with meteorological elements in Beijing from 2012 to 2015. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2017, 40(4): 35-41.]
- [17] 康恒元, 刘玉莲, 李涛. 黑龙江省重点城市 AQI 指数特征及其与气象要素之关系[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(4): 692-703. [Kang Hengyuan, Liu Yulian, Li Tao. Characteristics of air quality index and its relationship with meteorological factors in key cities of Heilongjiang Province. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(4): 692-703.]
- [18] 刘满凤, 谢哈进. 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. [Liu Manfeng, Xie Hanjin. The spatial heterogeneity analysis of pollution agglomeration based on the AQI. *Economic Geography*, 2016, 36(8): 166-175.]
- [19] Liu H M, Fang C L, Zhang X L et al. The effect of natural and anthropogenic factors on haze pollution in Chinese cities: A spatial econometrics approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 323-333.
- [20] Jiang L, Zhou H F, Bai L et al. Does foreign direct investment drive environmental degradation in China? An empirical study based on air quality index from a spatial perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 176: 864-872.
- [21] Zhan D S, Kwan M P, Zhang W Z et al. The driving factors of air quality index in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197: 1342-1351.
- [22] Huang W Y, Wang H W, Wei Y G. Endogenous or exogenous? examining trans-boundary air pollution by using the Air Quality Index (AQI): A case study of 30 provinces and autonomous regions in China [J]. *Sustainability*, 2018, 10(11): 4200-4220.
- [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. [Yang Mian, Wang Yin. Spatial-temporal characteristics of  $PM_{2.5}$  and its influencing factors in the Yangtze River Economic Belt. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(1): 91-100.]
- [24] 中国环境保护部. 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[Z]. 2012. [China Environmental Protection Department. Technical regulation on ambient Air Quality Index (on trial). 2012.]
- [25] Moran P P. Notes on continuous stochastic phenomena[J]. *Biometrika*, 1950, 37(1/2): 17-23.
- [26] Cliff A D, Ord J K. Spatial processes: Models & applications[M]. London: Pion, 1981.
- [27] 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. [Xiong Huanhuan, Liang Longwu, Zeng Zeng et al. Dynamic analysis of  $PM_{2.5}$  spatial-temporal characteristics in China. *Resources Science*, 2017, 39(1): 136-146.]
- [28] 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. [Jiang Lei, Zhou Haifeng, Bai Ling. Spatial heterogeneity analysis of impacts of foreign direct investment on air pollution: Empirical evidence from 150 cities in China based on AQI. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(3): 351-360.]
- [29] 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. [Jiang Lei, Zhou Haifeng, Bai Ling et al. The analysis of socio-economic factors of air quality index (AQI) based on the perspective of the exponential decay effects. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(1): 390-398.]
- [30] 方丽婷. 空间滞后模型的贝叶斯估计[J]. *统计研究*, 2014, 31(5): 102-106. [Fang Liting. Bayesian estimation of the spatial lag model. *Statistical Research*, 2014, 31(5): 102-106.]
- [31] 中华人民共和国国家统计局. 中国城市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China city statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2016.]
- [32] 邵帅, 李欣, 曹建华, 等. 中国雾霾污染治理的经济政策选择



——基于空间溢出效应的视角[J].经济研究, 2016 (9): 73-88.  
[Shao Shuai, Li Xin, Cao Jianhua et al. China's economic policy choices for governing smog pollution based on spatial spillover effects. *Economic Research Journal*, 2016(9): 73-88.]

[33] Grossman G, Krueger A. Economic environment and the economic growth [J]. *Quarterly journal of economics*, 1995, 110(2): 353-377.

## 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

Bai Ling<sup>1,2</sup>, Jiang Lei<sup>3</sup>, Zhou Haifeng<sup>3</sup>, Chen Zhongsheng<sup>4</sup>

(1. *Research Center of the Central China Economic Development, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China;*

2. *School of Economics & Management, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China;* 3. *School of Economics, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018, Zhejiang, China;*

4. *College of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong 637002, Sichuan, China)*

**Abstract:** Based on a cross-sectional data at the city level in the Yangtze River Economic Belt, this paper firstly employs the exploratory spatial data analysis method to investigate the spatio-temporal variation characteristics of air quality index (AQI) of 126 cities in 2015, and then applies the Bayesian spatial econometric model to explore the socio-economic driving factors of air quality index of the Yangtze River Economic Belt. The findings are the following: 1) The distribution of the annual average AQI values in the Yangtze River Economic Belt exhibits a significant spatial cluster pattern, specifically high AQI values in the north and low AQI values in the south. Moreover, the hot spot analysis results show that the most polluted areas are mainly Jiangsu province, the northern Zhejiang province, Shanghai and the most areas of northern Anhui province while Yunnan province, Panzhihua city of Sichuan and the most areas of Guizhou province show better air quality. 2) Regarding the seasonal characteristics of AQI values in the Yangtze River Economic Belt, it also shows a typical seasonal characteristic, specifically, high AQI values in both winter and spring, and low AQI values in both summer and autumn. Overall, during the whole year high AQI values are mainly concentrated on Hubei province, Anhui province and Jiangsu province while low AQI values on Yunnan province. 3) The Bayesian spatial lag model indicates that the urban AQI values of the Yangtze River Economic Belt show significant spatial spillover effects. Moreover, the environmental Kuznets curve hypothesis has been verified, indicating that as GDP per capita increases, air quality worsens. However, when GDP per capita continues to increase, air quality becomes better. Besides, the coefficient of FDI variable is significant and positive, indicating the pollution haven hypothesis. Finally, the increase in population density and highway passenger transportation are important driving factors worsening air quality while the higher proportion of the tertiary industry and green coverage ratio improvements contribute to improving air quality of the Yangtze River Economic Belt.

**Key words:** Yangtze River Economic Belt; air quality index(AQI); spatial autocorrelation; hot spot analysis; Bayesian spatial econometric model