

中国大气污染时空格局演变及影响因素研究

彭丽思 孙 涵 聂飞飞*

摘要: 本文运用统计学和GIS方法分析了近11年来我国大气污染的时空分布演变趋势,应用空间计量经济学方法实证分析了PM₁₀污染的影响因素。结果表明:2004–2012年期间,各地区PM₁₀年均浓度大致上都呈平稳下降的趋势,但是2013和2014年却大幅上升;PM₁₀浓度分布区间逐渐缩小,并向低浓度方向集中;从空间上看,2004–2012年,全国PM₁₀污染程度大大减轻,重污染区域逐渐减小,华东、华北、华中及西南地区污染改善情况最为明显,但是主要污染区域格局并未发生太大变化,还是以西北和华北部分地区为主;我国省域PM₁₀污染存在显著的空间效应,与产业结构、环保投入和人口密度呈显著正相关,与城市绿化和城市降水呈显著负相关。

关键词: 大气污染;PM₁₀;污染时空格局;空间计量模型

一、引言

由于经济的高速增长和工业化、城市化的快速发展,使得世界各国对煤炭、石油、天然气等能源的消耗量增长迅猛,大量有害气体被排放到大气中,大气污染日益严重,范围越来越大,污染程度日益加深,已经严重影响到人们的健康和生活,并给社会带来了巨大的经济损失(王金南,2003;李相然,2004)。根据存在状态,大气污染物可以分为气溶胶态污染物和气态污染物。其中,颗粒物是空气污染物中较为普遍且危害较大的污染物之一(Hu et al., 2013)。大气悬浮颗粒物中的可吸入颗粒物PM₁₀(空气动力学直径小于10 μm的细颗粒)易于富集空气中的有毒重金属、酸性氧化物、有机污染物、细菌和病毒,并进入人的肺部,对人体健康的危害远比粗颗粒

*彭丽思,中国地质大学(武汉)经济管理学院,邮政编码:430074,电子邮箱:838659245@qq.com;孙涵,中国地质大学(武汉)经济管理学院,国土资源战略研究重点实验室,邮政编码:430074,电子邮箱:63979702@qq.com;聂飞飞,中国地质大学(武汉)经济管理学院,邮政编码:430074,电子邮箱:975869936@qq.com。

本文系国家自然科学基金项目“中国城市居民生活完全能源消费的测算及影响因素分析”(71103164),教育部人文社科基金项目“能源消费对空气污染的公共健康效应研究——基于空间相关性分析”(15YJC790091),中国地质大学(武汉)青年学者“摇篮计划”(CUGW17401)的阶段性成果。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见。文责自负。

物大,还可导致城市大气能见度的降低(Brunekreef & Holgate, 2002; 周凯等, 2006; Qiu et al., 2012)。所以,有关PM₁₀的污染来源、对人体健康的影响、时空分布以及影响因子等已成为国内外学者研究大气污染的热点。

国内外学者对于PM₁₀来源主要从人为来源和自然来源两个方面进行研究,现有文献表明汽车尾气、道路扬尘、能源燃烧、工地作业等是PM₁₀的主要来源。Juda-Rezler等(2011)指出PM₁₀来源广泛,包括道路扬尘、农业灰尘、河床、建筑工地、矿山作业和类似的活动等。国内学者对于PM₁₀来源的研究也取得了丰富成果,肖致美等(2012)对宁波市的研究表明,城市扬尘、烟煤尘、二次硫酸盐和机动车尾气尘是空气中PM₁₀的主要来源;包贞等(2010)对杭州市PM₁₀的来源研究也得出了相似结论,但增加了土壤尘、硝酸盐粒、建筑水泥尘、燃油尘等来源。空气污染增加了死亡率和住院率(Brunekreef & Holgate, 2002),所以对大气颗粒物污染的另一个研究热点是颗粒物对健康的影响。有学者对欧洲和美国若干城市的研究表明,PM₁₀的短期暴露浓度的增加会使人死亡率提高(Samet et al., 2000; Katsouyanni et al., 2001)。医学领域对于颗粒物引起的具体疾病的研究成果也不少,有研究指出颗粒物会穿透肺泡细胞(Ghio & Huang, 2004);李宁等(2010)对广州市的研究发现,大气中NO₂和PM₁₀的浓度的提高,会使居民呼吸系统疾病日死亡人数增加。

有学者单独研究大气污染物的时空分布特征,张凌等(2007)研究指出,广州市区SO₂、NO₂、PM₁₀、CO质量浓度存在明显的季节变化规律。段献忠和陈欢欢(2008)对珠江三角洲的研究指出,珠江三角洲地区的空气污染天气,在空间上主要分布在珠江口附近,在时间上,主要分布在华南地区的干季。更多的文献是将污染物的时空分布特征与影响因子联合起来分析,冯宏芳和隋平(2003)对福州市的研究指出夏半年的空气质量优于冬半年,且认为污染物的浓度变化与空气污染气象条件的优劣密切相关,人类活动对污染物浓度的变化影响较大。张桂芹等(2010)指出济南市采暖期的大气细粒子污染要高于非采暖期,大气细粒子与空气湿度具有较好的正相关性,与风速、气温呈一定的负相关性。王郁和侯青(2012)对2000-2010年北京空气污染特征研究指出,持续污染已成为北京空气污染的一个显著特征,持续污染的空间分布形态主要分为沙尘天气影响型、污染累积型和麦收期麦秸焚烧污染型。

对于大气污染物时空分布特征及影响因子的研究方法一般会结合统计学、GIS和回归分析方法,李名升等(2013)为分析近10年来中国PM₁₀污染时空格局演变,运用统计学和GIS方法对2002-2012年PM₁₀监测数据进行分析。马丽梅和张晓(2014)运用空间计量方法,探讨中国31个省份本地与异地之间雾霾污染的交互影响问题以及经济变动、能源结构影响。孙晓雨等(2015)基于2012年全国113个重点监测城市每日空气质量指数,采用空间计量方法,探究大气污染区域影响的空间扩散范围及溢出特征,并解析大气污染主要污染源。

综上所述,前人对于大气污染PM₁₀各方面的研究都较全面,但对于污染物时空分布的分析

大多以某一地区为研究对象,不能反映全国的整体情况,对污染物影响因子的探究也集中在气象因素方面,很少有文献对非气象因素的影响作定量分析。因此本文利用统计学和GIS方法分析近11年来我国PM₁₀年均浓度时空分布演变趋势,再应用空间计量经济学方法实证分析其影响因素是很有必要的。

二、数据来源与指标设置

(一)数据来源

本文选取了我国30个省市自治区(不包括香港、澳门、台湾和西藏地区)2004–2014年的数据为研究对象,数据主要来自于《中国统计年鉴》(2005–2015)、《中国环境统计年鉴》(2005–2015)和《中国城市统计年鉴》(2005–2015),其中少量数据缺失,本文运用SPSS 18进行插值计算得到。由于数据的可获得性,本文以各地区省会(直辖市)城市PM₁₀年均浓度值和全年降水量作为地区数据进行研究,经济类数据以2004年为基期进行了调整,以消除物价带来的影响。

(二)指标设置

污染源、气象条件、地形因素、人类活动等是我国城市空气质量的主要影响因素,各影响因素并非孤立,而是相互交织共同作用于空气质量的变化(李小飞等,2012)。莫莉等(2014)在分析北京市PM_{2.5}和PM₁₀的质量浓度与不同城市化程度地区的相关关系时,选取了常住人口密度、地区生产总值和林木覆盖率等作为指标;施益强等(2014)也选取了相似的指标对厦门市空气污染物的主要影响因素进行了分析,结果表明污染浓度总体上主要受工业排放和机动车排放的影响,PM₁₀和PM_{2.5}主要与道路面积比重、建设用地比重具有较强相关性。廖志恒等(2015)的研究表明经济下行、政府治理和气候变化均对珠江三角洲地区大气污染的逐年好转有一定作用。本文参考相关理论及已有文献,选取人口密度、产业结构、环保投入、城市绿化和城市降水五个影响因素来研究PM₁₀污染。

空气污染物排放的增加在很大程度上是由于人类越来越频繁的社会活动引起的,而人口密度的增加又是人们社会活动更频繁的重要原因,因为人口密度的增加无疑会增加住房、出行等基本需求,从而带来更多的道路扬尘和汽车尾气排放,且人口密度的增加会使休闲娱乐等商业行为越来越频繁,间接地促进了大型商场的建设和由此带来的交通压力,而越来越多的商业体反过来又会刺激人们的商业行为,由此看来,由人类活动引起的空气污染物的排放会随着人口密度的上升而不断增加。此外,过高的人口密度也不利于城市中大气污染物的降解(王伟武、陈超,2008)。但是也有研究指出人口密度与空气污染物浓度和综合污染指标并不存在显著的相关关系(李茜等,2013)。在本文的研究背景下,人口密度与空气污染的相关关系还有待进一步证实。

我国的环境污染问题是随着国内工业化进程的推进而日益严重并备受关注的。第二产业分为工业和建筑业,2013年,工业消耗的煤炭约占全国煤炭消费总量的94.99%,工业消耗的原

油约占全国原油消费总量的99.69%,而由于能源消费引起的工业污染物排放正是大气环境颗粒物污染的主要来源。产业结构的变动迫使资源在产业间流动,但是,在此过程中忽略了资源的利用率,这正是产业结构与环境污染密切相关的原因。本文以第二产业产值占地区总产值的比重表示产业结构进行研究。

经济增长本身并不能改善环境,污染减少的原因在于:经济发展到一定水平以后,政府将加大环境治理力度,从而改善环境质量(Theodore, 1997)。我国环境污染治理投资总额从2004年的2057.5亿元上升到了2013年的9516.5亿元,十年间一直处于不断增加的趋势,但空气污染似乎并没有因此大幅好转,环保投入收到的成效甚微,环保投入必定存在许多问题。本文以各地区环境污染治理投资总额表示环保投入进行研究。

绿化在城市生态系统中起着至关重要的作用。园林绿地系统是人类文明进步的产物,是具有自净功能、有生命的城市基础设施,在改善环境和空气质量、维护城市生态平衡、美化景观等方面起着十分重要的作用。在城市道路环境中,植物叶片滞尘效应具有清除大气颗粒物和促使大气颗粒物向土壤环境迁移的机制。本文以各地区建成区绿化覆盖率作为城市绿化数据进行研究。

城市空气质量与气象条件密切相关,气象因素对大气污染物浓度的影响也是空气污染领域研究的热点问题。有研究认为降水是影响城市空气质量的最重要因素之一(李霞等,2003)。这可能是由于大气中的部分颗粒物会随着雨水的降落被带到路面,而降水也可以对施工和道路扬尘起到一定的抑制作用。本文以各地区省会城市(直辖市)全年降水量作为地区城市降水数据进行研究。本文变量的描述性统计结果见表1。

表1 变量的描述性统计结果

变量	指标说明/单位	平均值	最大值	最小值	标准差
PM ₁₀ 浓度	PM ₁₀ 年均浓度值(μg/m ³)	104.68	305	33	30.62
人口密度	每平方公里人口数(人/平方公里)	409.74	2269.23	31.66	391.96
产业结构	第二产业产值占地区总产值比重(%)	48.02	61.50	21.30	7.67
环保投入	环境污染治理投资总额(亿元)	136.54	675.81	5.26	121.16
城市绿化	建成区绿化覆盖率(%)	35.82	47.69	18.33	5.25
城市降水	全年降水量(毫米)	887.40	2628.20	74.90	505.19

三、PM₁₀污染时间和空间变化特征分析

(一)PM₁₀污染年均浓度变化趋势

整体上,从2004-2014年中国30个地区PM₁₀年均浓度平均值与达标天数比例平均值变化趋势(图1)来看,2004-2012年期间PM₁₀年均浓度平均值一直处于平稳下降的趋势,从114μg/m³下降到了93μg/m³,年均下降2.4%左右,但2013年又意外的急剧增长为129μg/m³。PM₁₀年均浓

度平均值从2008年开始优于《环境空气质量标准(GB 3095-2012)》中PM₁₀年均浓度二级标准限值(100 μg/m³),但2013年又大幅超标,2014年虽有所好转但仍在二级限值之上。在2004-2012年期间,PM₁₀年均值达标天数(达到《环境空气质量标准(GB 3095-2012)》中PM₁₀浓度二级标准限值的天数)逐年平稳增多,达标天数比例从79.6%上升到了89.5%,但是2013年却急剧下降到了56.9%,2014年比例有所增加。不利的气象条件及大面积生物质燃烧可能是2013年全国各地区PM₁₀污染加重的主要原因。2004-2014年30个地区PM₁₀年均浓度平均值与达标天数比例呈反方向变化趋势。

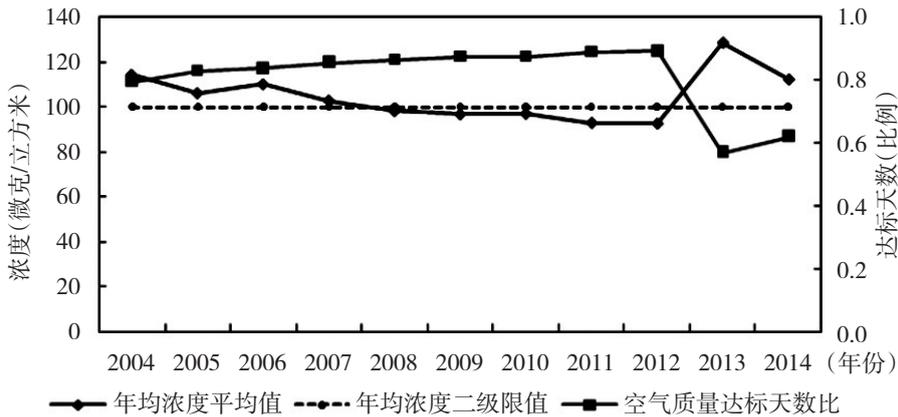


图1 2004-2014年中国30个地区PM₁₀年均浓度平均值与达标天数比例变化趋势

分区域来看,2004-2012年期间,30个区域PM₁₀年均浓度基本上呈下降趋势,但与2005年相比,2006年的华北地区、安徽、华中地区(除湖南、海南、贵州、云南)以及西北地区均出现了上升的趋势,其中新疆的增幅最大,达到了3.8%;与2009年相比,2010年的吉林、华东华中华南大部分地区、贵州、云南以及西北大部分地区也出现了上升的趋势。2013年与2012年相比,除北京出现了1 μg/m³的降幅外,其它地区PM₁₀年均浓度都出现了较大的增长,平均增幅达到了3.7%,其中河北省甚至达到了20.7%。2014年除北京、福建和新疆外,其它地区PM₁₀年均浓度与2013年相比都出现了下降趋势。在研究期间,严格来说,没有哪个地区的PM₁₀年均浓度是连续降低的。

2004-2012年期间,30个地区空气质量达标天数整体上呈上升趋势,但是每一年与上年相比,有些地区的达标天数出现了下降的情况,比如2010年,华东大部分地区的达标天数与2009年相比都下降了,平均降幅为2.6%;2011年与2010年相比,只有内蒙古和安徽两区域的达标天数出现了下降的情况,且降幅不大。与2012年相比,2013年30个地区的达标天数无一例外的全部减少,平均降幅甚至达到了37.2%,其中华北区域的降幅最大,平均值为53.32%,最小的是华南地区,但是也有18.83%。2014年,除辽宁、江苏、安徽和福建外,与2013年相比其它地区PM₁₀年均浓度达标天数都有所增加。

(二)PM₁₀污染年均浓度分布区间变化趋势

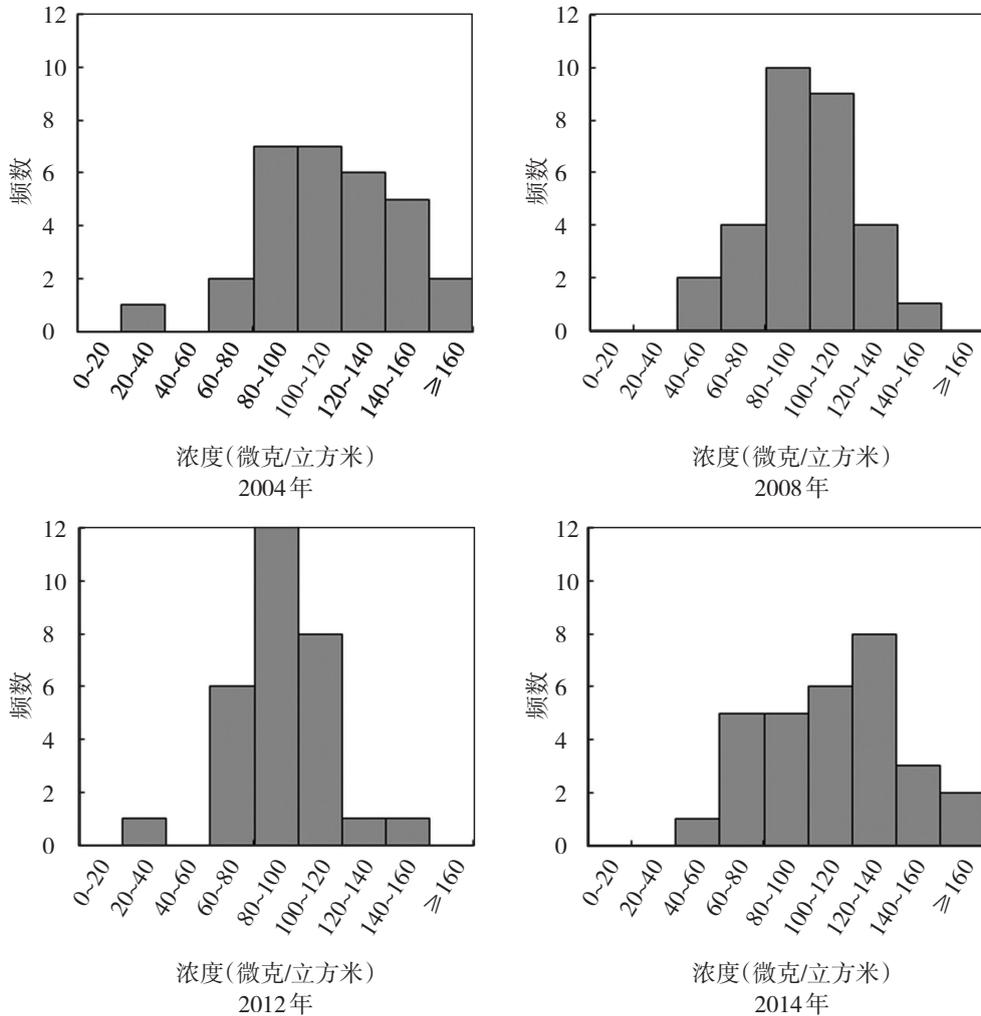


图2 2004、2008、2012、2014年PM₁₀年均浓度分布区间

从2004、2008、2012年PM₁₀年均浓度分布区间图(如图2)可以看出,随着时间的变化,浓度分布区间范围呈现逐渐缩小趋势,2004年PM₁₀年均浓度在33~175 μg/m³区间内,2008年在43~145 μg/m³范围内,2012年除海南省外,其它地区年均浓度分布区间缩小至60~145 μg/m³;其次,PM₁₀年均浓度分布越来越集中,从图2可以看出2004年浓度分布频数比较分散,主要分散在80~160 μg/m³区间内,2008年明显较2004年更集中,2012年年均浓度分布更为集中,80~120 μg/m³区间内集中了70%的地区数据;最后,PM₁₀年均浓度集中分布趋势明显,从图2可以明显看出随着时间的变化,浓度集中分布有明显减小的趋势,也就是说,2008年与2004年相比,2012年与2008年相比,PM₁₀年均浓度集中分布的区域朝着浓度降低的方向不断缩小。此外,2014年PM₁₀年均浓度分布区间一反前几年的变化趋势,主要分散在≥60 μg/m³的

区间内。

(三)大气污染空间变化特征分析

以2004、2008、2012和2014年各地区PM₁₀年均浓度平均值在ArcGIS中进行插值,得到了图3所示的主要年份PM₁₀污染的空间变化趋势图。2004-2012年,从整体上看,我国PM₁₀污染程度明显减轻,从2004年的部分地区集中重度污染减轻到2012年的个别地区年均浓度超标。2004年,除南部部分地区以及吉林和内蒙古以外,其它地区PM₁₀污染普遍较严重,特别是西北、华北、华中以及重庆、山东等地区;而2012年,全国大部分地区都表现出了较轻的污染趋势,但是西北地区的新疆和甘肃仍然处于重度污染的情况中。2004-2012年间,华南地区的污染程度一直较轻,随着全国各地污染程度的普遍好转,贵州、云南、福建等地也加入到了污染较轻地区行列。但是2014年,全国各地又出现了集中重度污染的情况,甚至比2004年更严重,西北、华北、华中等地区的PM₁₀年均浓度都严重超标。

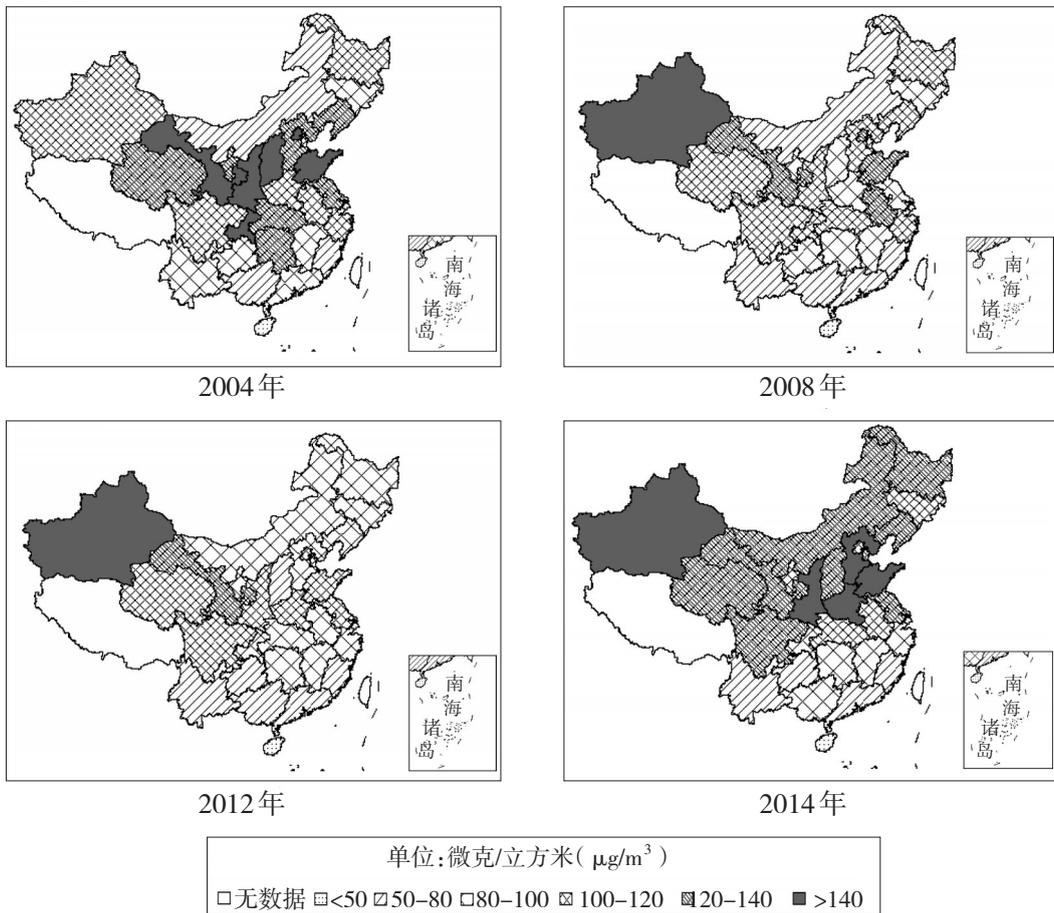


图3 2004、2008、2012和2014年全国PM₁₀污染空间分布

四、大气污染空间计量经济模型

(一)空间自相关检验模型

在进行空间计量模型估计之前,先分析被解释变量的空间自相关性,即处于相邻观测点的观测值之间的相关关系。使用由 Moran(1950)提出的全域 Moran's I 指数检验区域变量的空间相关性存在与否(Anselin, 1984), Moran's I 的计算公式如下:

$$\text{Moran's I} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (1)$$

上式中, $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$, $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$, Y_i 代表第 i 个地区的观测值(如本文中 PM_{10} 年均浓度值), W_{ij} 为二进制的临近空间权值矩阵,若两地区相邻,则 $W_{ij} = 1$,若两地区不相邻,则 $W_{ij} = 0$,反映的是空间单元的地理区位特征所带来的影响,比较适合于分析对相邻地区有重要影响的事件,且采用不同形式的空间权重矩阵并不会从本质上改变空间计量回归的结果(郝宇等, 2014),所以本文选择简单易行的空间邻接矩阵对空气污染进行分析。Moran's I 值通常位于的区间 $[-1, 1]$ 内,若统计值为正,则表示存在正的空间自相关,且越靠近 1 表示正相关性越强;若统计值为负,则表示存在负的空间自相关,且越靠近 -1 表示负相关性越强;若统计值为 0,则说明该变量在空间上服从随机分布。Moran's I 散点图将以上的空间关系分为四个象限,用以表示相邻的观测点之间不同的相关关系:右上方为第一象限,高一高(H-H)型区域;左上方为第二象限,低-高(L-H)型区域;左下方为第三象限,低-低(L-L)型区域;右下方为第四象限,高-低(H-L)型区域。第一、三象限为正空间自相关关系,而第二、四象限为负的空间自相关关系,若所有的观测点并没有出现集中分布的现象,而是分散在四个象限内,则应该考虑观测点之间不存在空间相关关系。

(二)空间计量经济模型

空间滞后模型(Spatial Lag Model, SLM)和空间误差模型(Spatial Error Model, SEM)是空间计量模型的两种基本形式,前者研究变量在观测点是否具有“溢出效应”,即某一观测点的观测值是否会对临近观测点的值产生影响;后者主要考虑观测点的地理位置对相关关系的影响。两个模型的基本形式如下:

$$\text{空间滞后模型: } Y = \rho WY + \beta X + \varepsilon \quad (2)$$

(2)式中, Y 为因变量, X 为外生解释变量, WY 为空间滞后因变量, ρ 为空间回归系数,表征的是:对于某一地区,与之相邻地区的观测值 WY 对本地区观测值 Y 的影响方向和程度, W 为 $n \times n$ 阶的空间权值矩阵, ε 为随机误差项向量。参数 β 反映了自变量 X 对因变量 Y 的影响。

$$\text{空间误差模型: } Y = \beta X + \varepsilon, \varepsilon = \lambda W\varepsilon + \mu \quad (3)$$

(3)式中,与SLM一样,参数 β 表征的是自变量 X 对因变量 Y 的影响系数, ε 为随机误差项向量; λ 为 $n \times 1$ 阶的截面因变量向量的空间误差系数,反映的是临近观测点的观测值 Y 对本地观测值 Y 的影响方向和程度, μ 为正态分布的随机误差向量。

本研究采用最大似然法(ML)对空间计量模型的参数进行估计,这样可以避免由于自变量的内生性问题产生的估计结果的偏差和不一致。Moran's I 检验、极大似然 LM-Error 检验及 LM-Lag 检验不仅可以用来测度空间自相关,亦可用做选择空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)的判断标准。此外,拟合优度 R^2 值、似然函数值的自然对数(Log likelihood, Log-L)也是比较经典的OLS回归模型和SLM模型、SEM模型的重要指标(Anselin, 2005)。

五、实证分析

(一)空间自相关分析

本文通过 Hausman 检验来确定空间面板模型的种类(固定效应模型和随机效应模型),通过 Stata12.0 来进行该检验。结果显示, Hausman 统计量的值为 23.37, 相对应的概率是 0.0003, P 值在 1% 的显著性水平上显著, 所以应拒绝随机效应的原假设, 选择固定效应模型。

表 2 2004-2014 年各地区 PM_{10} 年均浓度的 Moran's I 统计值

年份	Moran 值	期望值	平均值	标准差	z 值	p 值
2004	0.0863	-0.0345	-0.0339	0.1157	1.0383	0.159
2005	0.1988	-0.0345	-0.0309	0.1172	1.9590	0.037
2006	0.3682	-0.0345	-0.0342	0.1136	3.5409	0.001
2007	0.2657	-0.0345	-0.0317	0.1136	2.6182	0.010
2008	0.2644	-0.0345	-0.0355	0.1192	2.5162	0.011
2009	0.4181	-0.0345	-0.0403	0.1144	4.0054	0.001
2010	0.3525	-0.0345	-0.0352	0.1160	3.3418	0.003
2011	0.3345	-0.0345	-0.0391	0.1125	3.3201	0.002
2012	0.3647	-0.0345	-0.0345	0.1180	3.3829	0.004
2013	0.3476	-0.0345	-0.0337	0.1048	3.6393	0.001
2014	0.4971	-0.0345	-0.0287	0.1171	4.4895	0.001

由表 2 可以看出, 2004-2014 年期间各地区 PM_{10} 年均浓度的 Moran's I 统计值均为正, 且除了 2004 年以外均通过了 5% 的显著性水平检验, 这说明我国 30 个省域的 PM_{10} 污染在空间分布上具有显著的正相关性。在研究期间内, PM_{10} 年均浓度 Moran 值呈现出起伏上升的趋势, 并在 2014 年达到最大 0.4971, 表明 11 年内各地区间 PM_{10} 污染的正向相关程度起伏不定, 这种相关程度在 2014 年达到最高。为了进一步揭示这种相关关系的变化, 具体分析各地区所处的象限, 本

文在图4中给出了PM₁₀年均浓度 Moran 散点图,由于篇幅有限,这里只展示2004、2008、2012和2014年各地区PM₁₀污染的 Moran 散点图。

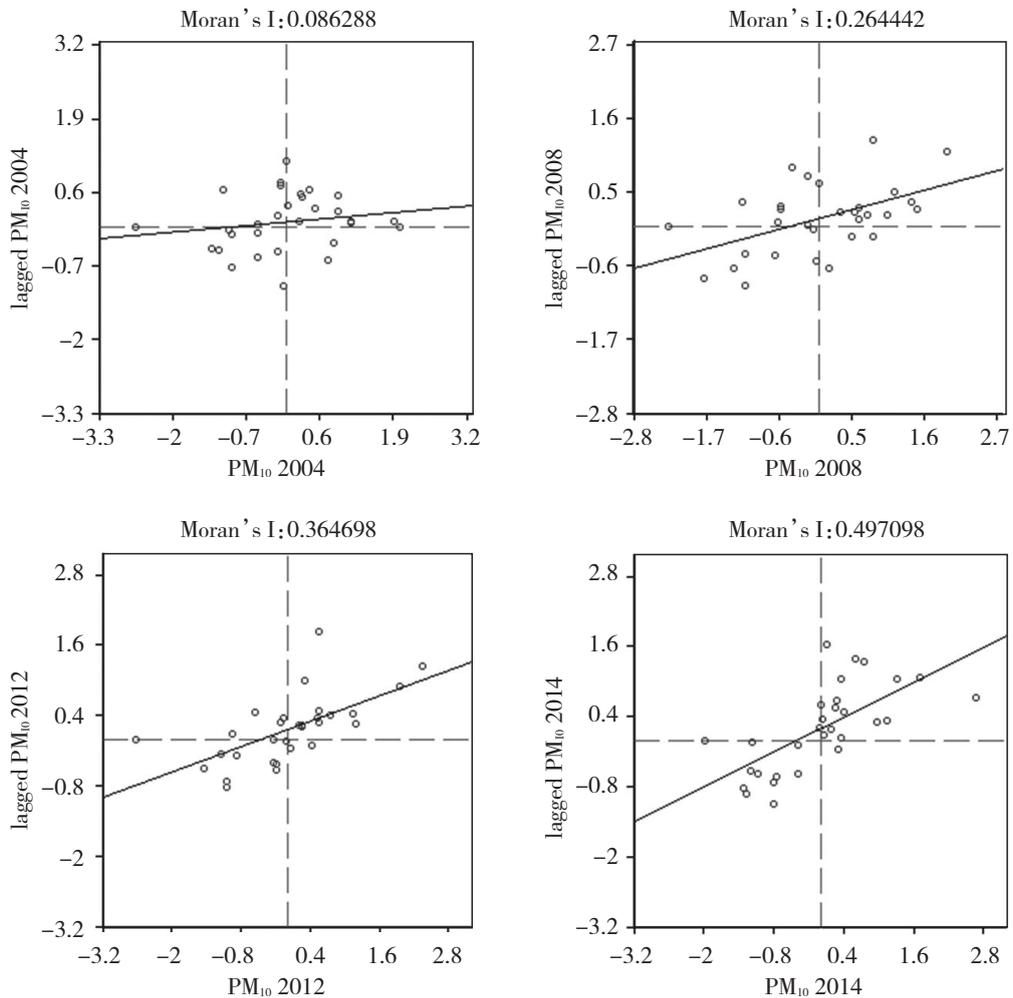


图4 2004、2008、2012和2014年PM₁₀年均浓度Moran散点图

在我国PM₁₀污染的Moran散点图中,2004、2008、2012和2014年分别有20个、18个、22个和26个省域位于第一、三象限,说明我国省域空气污染的空间自相关性特征还是比较明显的。以2014年为例具体来看,位于第一象限的有16个省域,分别为:北京、天津、河北、山西、内蒙古、吉林、辽宁、江苏、山东、安徽、河南、湖北、陕西、甘肃、青海和新疆,主要集中在华北、华中、东北、西北地区,表现出高一高(H-H)的正空间相关关系,表示空气污染较重的地区被同是空气污染较重的地区包围;第二象限表现出低-高(L-H)的负空间相关关系,表示空气污染较轻的区域被空气污染较重的区域包围,从图4可以看出没有地区位于此象限;位于第三象限的有浙江、江西、福建、湖南、广西、广东、上海、重庆、贵州和云南10个省域,全部集中的南部地区,表现出低-低(L-L)的正空间相关关系,表示空气污染较轻的区域被空气污染较轻的区域包围;位于

第四象限的只有四川一个省域,表现出高-低(L-L)的负空间相关关系,表示空气污染较重的区域被空气污染较轻的区域包围;另外,黑龙江和宁夏跨一二象限,海南跨二三象限。分析可知,我国各省域空气污染确实存在空间聚集现象,地区差异比较显著,在研究我国各地区空气污染的影响因素模型中需要引入空间分析。

(二)空间计量分析

由于MATLAB R2014a空间计量模块将固定效应分为四种,分别是无固定效应、空间固定时间不固定效应、时间固定空间不固定效应以及空间时间双固定效应。从估计结果来看,无论对于SLM或是SEM模型,时间固定空间不固定效应模型的各项参数、系数均通过了显著性检验,结果明显优于其他三种固定效应模型,所以由于篇幅有限,本文只给出了时间固定空间不固定效应模型的估计结果。

表3 2004-2014年PM₁₀年均浓度影响因素的空间计量检验结果

变量	OLS	SLM	SEM
常数项	6.0628(12.1404)***	3.0391(6.0046)***	5.1248(10.9053)***
环保投入	0.1187(6.5527)***	0.1120(6.7609)***	0.1388(8.5342)***
城市绿化	-0.5044(-4.4149)***	-0.2729(-2.4584)**	-0.2235(-2.0312)**
人口密度	0.0846(4.6688)***	0.0379(2.3389)**	0.0469(2.5327)**
产业结构	0.2777(3.7870)***	0.2607(4.0789)***	0.2201(3.5496)***
城市降水	-0.2641(-11.1689)***	-0.1663(-7.0902)***	-0.2147(-7.8735)***
λ	-	-	0.4350(7.4402)***
ρ	-	0.4390(8.4935)***	-
R ²	0.4412	0.5985	0.5011
LM(lag)	71.5822***		
R-LM(lag)	12.6109***		
LM(error)	59.0119***		
R-LM(error)	0.0406		
Log-L	22.1906	67.2553	62.9152

注:括号内为t统计量;*,**,***分别表示在10%、5%和1%的水平下显著。

表3是以PM₁₀年均浓度为被解释变量的经典OLS模型、SLM模型以及SEM模型的回归结果,可以看出与OLS模型相比,SLM模型和SEM模型具有更高的拟合优度检验值R²和对数似然函数值(Log-L值),这说明考虑了空间效应后的模型有效地消除了环境污染的空间自相关和空间误差。再对SLM和SEM模型的估计结果进行比较,可以看出SLM模型具有更优的拟合优度R²和Log-L值,这意味着一个地区环境污染的变化不仅受到区域间结构性差异的误差冲击,更主要的是受周边邻近省域环境污染的相互冲击。而且从空间依赖性检验结果可以看出,LM(lag)和LM(error)均在1%的显著性水平上显著,R-LM(lag)也通过了1%显著性水平检验,而

R-LM(error)不显著,所以应该选用SLM模型的结果作进一步分析。

由SLM模型的估计结果可知,空间自回归系数 ρ 为0.4390,且在1%水平上显著,说明我国各省域的空气污染存在显著的空间溢出效应,且各区域的空气污染受到相邻区域空气污染的正向影响。环保投入、人口密度和产业结构三个解释变量显著为正,城市绿化和城市降水两个变量显著为负。其中城市绿化对PM₁₀年均浓度的影响程度最大,建成区绿化覆盖率每提高1%,PM₁₀年均浓度就会减少约0.27%,这是因为植被叶片表面性能(如茸毛和腊质表皮等)可以截取和固定大气颗粒物(Freersmith et al., 1997),使颗粒物脱离大气环境而成为消减城市大气环境污染的重要过滤体(Beckett et al., 1998),所以绿化覆盖率的提高对减轻空气污染具有十分重要的作用。此外,全年降水量每增加1%,PM₁₀年均浓度减少约0.17%,说明自然降雨对大气污染PM₁₀能起到有效的清除和冲刷作用。

产业结构对PM₁₀年均浓度的正向影响程度最大,第二产业比重每提高一个百分比,PM₁₀年均浓度增加约0.26%。虽然我国一直以来都在积极探索能源消费减排技术,也取得了不俗的成就,但由于消费基数庞大,因此由能源消费,特别是燃煤引起的污染物的排放量仍然非常大。所以想要从源头上改善空气污染问题,“节能减排”是避不开的话题,这就需要进一步压缩一次能源消费中煤炭的比例,大力促进清洁能源、可再生能源的使用,淘汰高能耗、高排放的老旧设备等。在此基础上,更重要的是深化产业结构调整和转型升级,以好的政策和市场环境促进第三产业的发展,大力推进产业由工业化向素质化转型升级,这样才可能从根本上改善空气污染问题。

环保投入对PM₁₀污染影响的系数为正,这种显著的正效应似乎与我们的预期不符,但考虑到我国环保投入存在的诸多问题,可以在一定程度上解释这一结果。环境保护是一项需要大量投入的事业,我国环保历史欠账多,投入明显不足(龚玉荣、沈颂东,2002)。根据发达国家的经验,一个国家在经济高速增长时期,环保投入要在一定时间内持续稳定达到国民生产总值的1%~1.5%,才能有效地控制住污染;达到3.0%才能使环境质量得到明显改善(龚玉荣、沈颂东,2002)。虽然各地区环保投入总额年年攀升,但其所占各地GDP比重仍旧偏低,2014年本文研究的30个地区环保投入占各地GDP的比重均值只有1.5%左右,对控制甚至改善空气污染问题还明显不足。另外,环保投入的效率较低,政府在环保监督方面的力度不够,相关法律法规缺失,以及企业环保意识薄弱等因素,都会导致环保投入成效低微,甚至出现“空气污染会随着环保投入的增多而加重”的假象。

人口密度对PM₁₀年均浓度的影响程度相对最小,说明人类活动密集程度的加大对空气污染的加重有一定的促进作用,但这种影响远小于由能源消费引起的工业污染物排放对空气污染的影响。

六、主要结论与启示

本文选取2004–2014年中国30个地区PM₁₀年均浓度及相应指标的面板数据,首先运用统计学和GIS方法分析了近11年来我国PM₁₀年均浓度的时间和空间分布演变趋势,然后应用空间计量经济学方法,选取人口密度、产业结构、环保投入、城市绿化和城市降水五个影响因素来研究PM₁₀污染。得出的主要结论和启示如下:

(1)从时间上看,2004–2012年期间,各地区PM₁₀年均浓度大致上都呈平稳下降的趋势,且PM₁₀浓度分布区间逐渐缩小,并向低浓度方向集中,但是2014年PM₁₀年均浓度不但大幅上升,且分布区间扩大;从空间上看,2004–2012年,全国PM₁₀污染程度大大减轻,重污染区域逐渐减小,但是主要污染区域格局并未发生太大变化,还是以西北和华北部分地区为主,2014年,全国各地区又出现了集中重度污染的情况,西北、华北、华中等地区的PM₁₀年均浓度都严重超标。因此,面对不利的气象条件,不应该让群众的行为进一步加重空气污染,政府应该充分发动群众,通过宣传、建立监督机制,全面开展综合整治工作。另外,国家出台工业、城市等战略发展规划应该注意各区域的协调发展,避免出现多地区集中空气污染的情况。

(2)我国省域PM₁₀污染存在显著的空间自相关,且确实存在空间聚集现象,地区差异比较显著。因此国家在治理空气污染、保护环境时应该充分考虑到地区间的空间相关性,各地方政府在出台各自环保政策的同时,更需要大力推进跨区域的政策合作,与周边地区共同改善空气质量。

(3)第二产业比重的加大、环保投入和人口密度的增多是PM₁₀污染的主要贡献因素。控制污染排放是改善空气质量的根本措施,政府要进一步推进工业的合理布局,推广使用清洁能源和清洁生产工艺,淘汰老旧设施。在持续加大环境治理投资的同时,也应加大投资监督方面的力度,完善相关法律法规,加强对企业环保意识的教育,保证环保投入的成效。此外,大力发展公共交通,推进公交专用道的建设,也可在一定程度上缓解一些城市人口密度过大、机动车数量持续增长带来的空气污染。

(4)城市绿化的改善和城市降水的增多对PM₁₀污染有显著的遏制作用。所以政府在一系列整治空气污染的措施中,可以考虑大面积地调整城市生态环境,增加绿化率、水面面积,进一步改善城市的气候,形成良好的可持续的生态环境,以此辅助治理颗粒物污染问题。

参考文献:

- [1] 包贞,冯银厂,焦荔. 杭州市大气PM_{2.5}和PM₁₀污染特征及来源解析[J]. 中国环境监测,2010,26(2):44–48.
- [2] 段献忠,陈欢欢. 珠江三角洲空气污染时空分布特征及一次区域性污染过程气象特征数值模拟[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学、医学版),2008,29(3):42–49.
- [3] 冯宏芳,隋平. 福州市污染物浓度时空分布及影响因子分析[J]. 气象科技,2003,31(6):356–360.
- [4] 龚玉荣,沈颂东. 环保投资现状及问题的研究[J]. 工业技术经济,2002,21(2):83–84.

- [5] 郝宇,廖华,魏一鸣. 中国能源消费和电力消费的环境库兹涅茨曲线:基于面板数据空间计量模型的分析[J]. 中国软科学,2014,(01):134-147.
- [6] 李名升,张建辉,张殷俊,周磊,李茜,陈远航. 近10年中国大气PM₁₀污染时空格局演变[J]. 地理学报,2013,68(11):1504-1512.
- [7] 李宁,彭晓武,张本延,殷文军,余素君. 广州市居民呼吸系统疾病每日死亡人数与大气污染的时间序列分析[J]. 华中科技大学学报(医学版),2010,39(6):863-867.
- [8] 李茜,宋金平,张建辉,于伟,胡昊. 中国城市化对空气质量影响的演化规律研究[J]. 环境科学学报,2013,33(9):2402-2411.
- [9] 李霞,杨青,吴彦. 乌鲁木齐地区雪和雨对气溶胶湿清除能力的比较研究[J]. 中国沙漠,2003,23(5):560-564.
- [10] 李相然. 城市化环境效应与环境保护[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [11] 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学,2012,33(6):1936-1943.
- [12] 廖志恒,孙家仁,范绍,吴兑,任明忠,周健. 2006-2012年珠三角地区空气污染变化特征及影响因素[J]. 中国环境科学,2015,35(2):329-336.
- [13] 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,(04):19-31.
- [14] 莫莉,余新晓,赵阳,孙丰宾,莫楠,夏洪磊. 北京市区域城市化程度与颗粒物污染的相关性分析[J]. 生态环境学报,2014,23(5):806-811.
- [15] 施益强,王坚,张枝萍. 厦门市空气污染的空间分布及其与影响因素空间相关性分析[J]. 环境工程学报,2014,8(12):5406-5412.
- [16] 孙晓雨,刘金平,杨贺. 中国城市大气污染区域影响空间溢出效应研究[J]. 统计与信息论坛,2015,30(5):87-92.
- [17] 王金南. 中国工业污染防治的回顾与展望[J]. 中国环境政策,2003,4(2):1-26.
- [18] 王伟武,陈超. 杭州市空气污染物空间分布及其影响因子的定量分析[J]. 地理研究,2008,27(2):241-250.
- [19] 王郁,侯青. 2000-2010年北京空气持续污染特征研究[J]. 高原气象,2012,31(6):1675-1681.
- [20] 肖致美,毕晓辉,冯银厂,王玉秋,周军,傅晓钦,翁燕波. 宁波市环境空气中PM₁₀和PM_{2.5}来源解析[J]. 环境科学研究,2012,25(5):549-555.
- [21] 张桂芹,刘泽常,杜世勇. 济南市环境空气细粒子PM_{2.5}污染特征及影响因素[J]. 环境科学与技术,2010,33(12F):520-522.
- [22] 张凌,付朝阳,郑习键,叶代启. 广州市区大气污染特征与影响因子分析[J]. 生态环境,2007,16(2):305-308.
- [23] 周凯,叶有华,彭少麟,粟娟. 城市大气总悬浮颗粒物与城市热岛[J]. 生态环境,2006,15(2):381-385.
- [24] Anselin,L. Exploring Spatial Data with GeoDaTM: A Workbook[M]. USA: Center for Spatially Integrated Science, 2005.
- [25] Anselin,L. Specification Tests on the Structure of Interaction in Spatial Econometric Models[J]. Papers of the Regional Science Association, 1984, 54(1): 165-182.
- [26] Brunekreef,B. and S.T.Holgate. Air Pollution and Health[J]. Lancet, 2002, 360(9341): 1233-1242.
- [27] Beckett,K.P., P.H.Freersmith, and G.Taylor. Urban Wood-lands: Their Role in Reducing the Effects of Particulate Pollution[J]. Environmental Pollution, 1998, 99: 347-360.
- [28] Ghio,A.J. and Y.C.Huang. Exposure to Concentrated Ambient Particles (CAPs): A Review[J]. Inhalation Toxicology, 2004, 16(1): 53-59.
- [29] Freersmith,P.H., S.Holloway, and A.Goodman. The Uptake of Particulates by an Urban Woodland: Site De-

scription and Particulate Composition[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 95(1): 27–35.

[30] Hu,M., L.Jia, J.Wang, and Y.Pan. Spatial and Temporal Characteristics of Particulate Matter in Beijing, China Using the Empirical Mode Decomposition Method[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, (458–460): 70–80.

[31] Juda–Rezler,K., M.Reizer, and J.P.Oudinet. Determination and Analysis of PM₁₀ Source Apportionment during Episodes of Air Pollution in Central Eastern European Urban Areas: The Case of Wintertime 2006[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(36): 6557–6566.

[32] Katsouyanni,K., G. Touloumi, E.Samoli, A.Gryparis, A.Le–Tertre, Y. Monopolis, G.Rossi, D. Zmirou, F.Balserter, A.Boumghar, H.R.Anderson, B.Wojtyniak, A.Paldy, R.Braunstein, J. Pekkanen, C.Schindler, and J.Schwartz. Confounding and Effect Modification in the Short–term Effects of Ambient Particles on Total Mortality: Results from 29 European Cities within the APHEA2 Project[J]. *Epidemiology*, 2001, 12 (5): 521–531.

[33] Qiu,H., I.T.Yu, L.W.Tian, X.R.Wang, L.A.Tse, W.Tam, and T.W.Wong. Effects of Coarse Particulate Matter on Emergency Hospital Admissions for Respiratory Diseases: A Time–series Analysis in Hong Kong[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2012, 120(4): 572–576.

[34] Samet, J.M., F.Dominici, F.C. Curriero, I.Coursac, and S.L.Zeger. Fine Particulate Air Pollution and Mortality in 20 U.S. Cities, 1987–1994[J]. *New England Journal of Medicine*, 2000, 343(24): 1742–1749.

[35] Theodore,P. Demystifying the Environmental Kuznets Curvel: Turning a Black Box into a Policy Tool[J]. *Environment Development Economics*, 1997, 2(4): 465–484.

The Evolution of Temporal and Spatial Pattern and Influencing Factors of the Air Pollution in China

Peng Lisi^a, Sun Han^{a,b} and Nie Feifei^a

(a: School of Economics and Management, China University of Geosciences;

b: Key Laboratory of Land and Resources Strategy Research)

Abstract: The paper analyze the evolution trend of space–time distribution of atmospheric pollution in recent 11 years by using statistical and GIS methods, and analyze the influence factors of PM₁₀ by using spatial econometrics method. The results show that: the average annual concentration of PM₁₀ steadily declined in the period of 2004–2012, but had increased sharply in 2013 and 2014; The distribution range of the concentration of PM₁₀ gradually narrowed to focus on the low concentration direction; From spatial aspect, in 2004–2012, the national PM₁₀ pollution level was greatly reduced and the number of areas with heavy pollution was gradually decreased, and the improvement of air pollution in the East, North, Central and Southwest China was most obvious, but the main pollution pattern has not changed much, mainly in parts of the Northwest and North China; There is a significant spatial effect of PM₁₀ pollution in China, which has a significant positive correlation with the industrial structure, environmental protection investment and population density, and negatively correlated with urban greening and urban precipitation.

Keywords: Air Pollution; PM₁₀; Air Pollution’s Temporal and Spatial Pattern; Spatial Econometrics Model

JEL Classification: X513

(责任编辑:卢玲)