

引用格式: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 H H, Liang L W, Zeng Z, et al. Dynamic analysis of PM_{2.5} spatial-temporal characteristics in China[J]. *Resources Science*, 2017, 39(1): 136-146]. DOI: 10.18402/resci.2017.01.14

中国城市PM_{2.5}时空分布的动态比较分析

熊欢欢^{1,2}, 梁龙武^{1,3,4}, 曾 赠^{1,4}, 王振波³

(1. 南昌大学经济管理学院, 南昌 330031; 2. 南昌大学管理学院, 南昌 330031;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 南昌大学计量经济研究会, 南昌 330031)

摘 要:本文基于2014–2015年中国190个大中城市PM_{2.5}的监测数据,建立空间数据统计模型,总结两年内PM_{2.5}的浓度、空间集聚的年际变化和存在问题,为相关研究与决策提供参考。结果显示:①2015年较2014年全国平均PM_{2.5}浓度下降10%,达标天数提升了4.4%,空气质量整体改善,但改善的天数主要集中在春夏秋季,冬季改善幅度甚微,其中12月污染加重。②2015年PM_{2.5}整体污染范围缩小,污染核心区由京津冀向鲁西北和豫北地区扩散,京津冀、长三角、长江中游等城市群年均浓度降幅较大,长三角、珠三角和成渝城市群日均达标率增长较快。③2015年PM_{2.5}的集聚性更明显,浓度高值区范围减小,热点地区更密集地分布在以京津冀地区为中心的华北地区,并呈多中心格局。由此,应该加快构建制度支持的多中心监督治理模式,以华北地区为先行先试区域,构建管理支持的多区域联动治理模式,培养环境伦理支持的公众环保意识,实现民防民治。

关键词:PM_{2.5}; 时空变化; 热点演变; 多区域联动治理模式; 中国

DOI: 10.18402/resci.2017.01.14

1 引言

空气污染对居民身体健康具有直接危害^[1–3],尤其是PM_{2.5}(Fine particles less than 2.5μm)污染,已经成为社会各界广泛关注的热点。在2015年全国布有监测站点的338个地级以上城市中,有265个城市环境空气质量超标,占总数的78.4%。其中,以PM_{2.5}为首要污染组成物的污染天数最多,占超标天数的66.8%^[4]。在快速城镇化和工业化的过程中^[5],受排放源强度、地形、区位、温度、湿度等因素的影响^[6,7],中国PM_{2.5}具有显著的时空变异特征。在时间演变规律方面,Lin等运用遥感影像反演栅格数据探讨了2001–2010年中国PM_{2.5}浓度的时空变化规律^[6]。李名升等基于监测数据研究了近10年中国大气PM₁₀污染时空格局演变^[8]。戴昭鑫等基于监测数据探讨了2013–2015年长三角地区PM_{2.5}动态变化

规律^[9]。在空间分异规律方面,王占山等从市域层面探讨2013年北京市PM_{2.5}的空间分布特征,认为前体物和大气氧化性对PM_{2.5}具有显著影响^[10]。张殷俊等运用监测数据分析和总结了京津冀、长三角和珠三角等重点污染区域2013年74个城市的PM_{2.5}分布规律^[11]。王振波等基于监测数据归纳出2014年中国190个城市PM_{2.5}的时空变化规律,认为中国城市PM_{2.5}在一年内具有显著的“U”型逐月变化规律和周期性U-脉冲型逐日变化规律,以及显著的空间分异与集聚规律,城市群是PM_{2.5}的高污染城市聚集地^[12]。综合来看,越来越多的学者致力于空气污染的研究工作,研究数据主体正由遥感反演数据转向监测数据,研究区域主体正由城市和城市群转向全国和大区域,研究时序不断增长,污染物类型也在不断丰富,但尚未发现运用地级城市监测数据揭示

收稿日期:2016–08–29; 修订日期:2016–12–05

基金项目:国家社会科学基金青年项目(15CJL029);国家自然科学基金重大项目(41590842);国家自然科学基金重点项目(71433008)。

作者简介:熊欢欢,女,江西南昌人,博士,讲师,研究方向为城市化与生态经济。E-mail:jxxhh11@163.com

通讯作者:王振波,E-mail:wangzb@igsnrr.ac.cn

2017年1月

全国城市PM_{2.5}浓度年际变化的相关研究。

因受国家PM_{2.5}监测网络布设的时间与范围限制,本文选取具有完整监测数据的2014年、2015年作为研究时段,建立空间数据统计模型,揭示中国190个大中城市PM_{2.5}的年、季、月的时间变化轨迹及其空间集聚特征。本研究采用的两年监测数据只能表达空气污染的短期时空现象,虽不足以反映全国空气污染的演变规律和治理效果,却可以为相关研究和政策制定提供科学的参考依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域和数据来源

本文研究区域为中国大陆(受数据可得性限制,不含台湾,香港,澳门),研究样本为中国190个城市的945个检测点(图1)的PM_{2.5}浓度监测值,数据来源于2014年和2015年中国环境监测总站实时发布的城市空气质量监测数据。监测点运用Thermo Fisher 1405F来观测PM_{2.5},其原理是以恒定的速率切割环境空气中的PM_{2.5},使用滤膜动态测量系统以及微量震荡天平法测量PM_{2.5}浓度。根据《环

境空气质量标准》(GB3095-2012)^[12]对大气污染物浓度数据的有效性要求,参考王振波的文章^[13],本文按照有效性要求对PM_{2.5}数据进行了筛选。因城市检测点的数量和日数据时间点各异,本文对数据进行平均值处理,从而得到2014-2015年190个城市日均PM_{2.5}浓度值。根据GB 3095-2012,本文将全国城市视为二类环境功能区,即居住区、商业交通居民混合区、文化区、工业区和农村地区,PM_{2.5}浓度年、日均限值分别为35ug/m³和75ug/m³。“日平均值”指一个自然日24h平均浓度的算术平均值,“月平均值”指一个日历月内各日平均浓度的算术平均值,“季平均值”指一个日历季内各日平均浓度的算数平均值,“年平均值”指一个日历年内各日平均浓度的算数平均值^[12];春季为3-5月,夏季为6-8月,秋季为9-11月,冬季为12、1、2月。另外,PM_{2.5}污染主要集中在城市群地区,文章参考方创琳等的研究成果,将全国分为20个城市群:长三角、珠三角、京津冀、长江中游、成渝、辽中南、山东半岛、海峡西岸、哈长、中原、江淮、关中、广西北部湾、天山北坡、晋

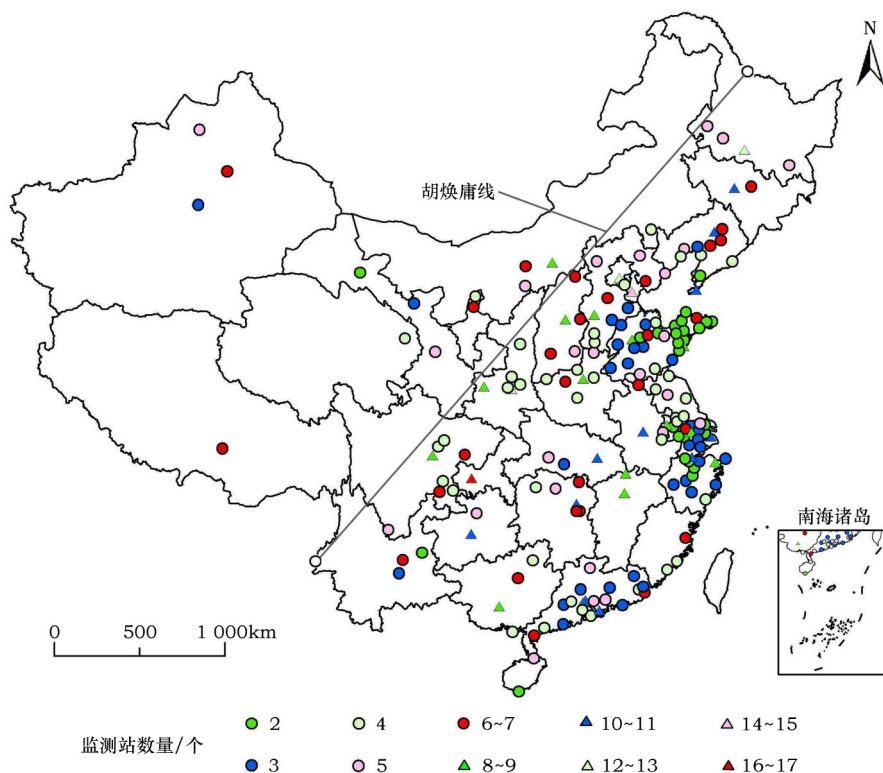


图1 研究区域空气质量监测站分布

Figure 1 Distribution diagram of air quality monitoring station in China

中、呼包鄂榆、滇中、黔中、兰西和宁夏沿黄城市群^[14,15]。

2.2 空间自相关方法

大气的流通特性致使PM_{2.5}浓度值的空间相关性更具显著性,使得探索其内在规律具有较强的学术研究价值^[16]。所以,空间自相关方法常用于分析大气污染的空间集聚与变化规律^[17,18]。在空间自相关模型中,学术界常用的是全局空间自相关和局部空间自相关两种。

2.2.1 全局空间自相关

通过求解全局Morans'I指数进行检验来判断空间邻近区域单元PM_{2.5}的空间相似程度,计算公式如下:

$$I = \frac{n}{S_0} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (1)$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}; z_i = Y_i - \bar{Y}; z_j = Y_j - \bar{Y} \quad (2)$$

式中 I 为Morans'I; Y_i 为第 i 地区的观测值; Y_j 为第 j 地区的观测值; \bar{Y} 为地区均值; n 为地区数量; w_{ij} 为空间权重矩阵; 通常取相邻单元为1, 其它为0。 $I \in [-1, 1]$, 且当 $I \in [-1, 0)$ 时, 表示区域单元之间具有负相关性; 当 $I=0$ 时, 表示区域单元之间不具有相关性; 当 $I \in (0, 1]$ 时, 表示区域单元之间具有正相关性。Morans'I指数越接近1, 说明区域单元属性值之间关系越密切; 越接近0, 说明单元之间属性值不相关; 越接近-1, 则说明单元之间属性值差异越大。

2.2.2 局部空间自相关

运用局部空间自相关来确定PM_{2.5}空间集聚的具体位置, Morans'I的计算公式为:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S_i^2} \times \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (3)$$

式中 I_i 为Morans'I指数; $S_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij}}{n-1} - \bar{x}^2$; 而 x_i 为 i 的属性; \bar{x} 为其平均值; w_{ij} 为空间权重矩阵。

学术界常用标准化统计量 Z 来检验Morans'I指数是否存在空间自相关关系, 标准化统计量的计算公式如下:

$$Z_i = \frac{I - E[I]}{\sqrt{VAR[I]}} \quad (4)$$

式中 $E(I)$ 为观测值自相关性的期望; $VAR(I)$ 为变异系数, 表达式分别为:

$$E[I] = \frac{-1}{n-1} \quad (5)$$

$$VAR[I] = \frac{n^2 w_1 + n w_2 + 3 w_0^2}{w_0^2 (n^2 - 1)} - E^2(I)$$

式中 w_0 、 w_1 和 w_2 表达式分别为 $w_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$,

$$w_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (w_{ij} + w_{ji})^2, w_2 = \sum_{i=1}^n (w_{i*} + w_{*i})^2, w_{i*} \text{ 和 } w_{*j}$$

又分别是指空间权重矩阵中 i 行和 j 列之和。

为了增强空间自相关分析结论的准确性, 本文选择0.01的显著性水平。在该显著性水平下, 若 $|Z(I)| < 2.58$, 说明PM_{2.5}浓度的空间自相关性不显著, 即PM_{2.5}浓度呈现出独立随机分布规律; 若 $Z > 2.58$, 且该单元及其邻近单元PM_{2.5}浓度均高于平均值, 则其为“热区”, 即高值呈现空间集聚; 若 $Z > 2.58$, 且该单元及其邻近单元PM_{2.5}浓度均低于平均值, 则其为“冷区”, 即低值呈现空间集聚; 若 $Z < -2.58$, 则表示该单元及其邻近单元具有空间负相关性, 其中“高-低关联”是指PM_{2.5}浓度高值单元被低值单元所包围, “低-高关联”是指PM_{2.5}浓度低值单元被高值单元所包围。

2.3 空间自相关性检验范式

运用ArcGIS平台的Spatial Autocorrelation Model进行空间自相关分析, 借助Gi_Bin字段辨别“热点”和“冷点”的统计显著性。一般置信度为99%的统计显著性是指研究要素处于置信区间[-3, 3]内; 置信度为95%的统计显著性是指分析要素处于置信区间[-2, 2]内; 置信度90%的统计显著性是指分析要素处于置信区间[-1, 1]内; 而置信值为0或者趋近于0的研究要素之间进行聚类分析是不具有统计学意义的。

运行ArcGIS软件对190个城市2014-2015年PM_{2.5}浓度的年度、季度和月度均值数据分别进行空间自相关性检验。表1, 表2结果显示, Morans'I指数均为正值, 而 $Z(I)$ 高于2.58, 均通过1%水平的显著性检验, 即中国城市的PM_{2.5}浓度具有显著的集聚特征, 同时又存在明显的季节和逐月差异。

2017年1月

表1 2014–2015年中国主要城市PM_{2.5}浓度的空间自相关指数Table 1 Spatial autocorrelation index of PM_{2.5} concentrations in the major cities of China from 2014 to 2015

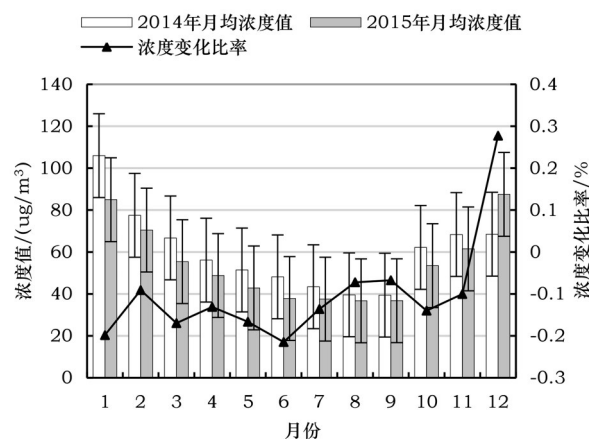
月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2014年 Moran's I	0.22	0.19	0.31	0.27	0.30	0.38	0.31	0.24	0.21	0.22	0.35	0.42
Z(I)	22.5***	19.6***	31***	27.7***	30***	38.2***	31.4***	24.7***	21.1***	22.2***	34.7***	41.7***
2015年 Moran's I	0.18	0.32	0.28	0.28	0.37	0.35	0.36	0.36	0.24	0.17	0.27	0.17
Z(I)	17.9***	32***	28.5***	28.3***	36.6***	35***	35.9***	36.1***	23.9***	17.1***	27.5***	17.6***

注:***代表在1%的显著性水平上显著。

表2 2014–2015年全国PM_{2.5}浓度季度空间自相关指数Table 2 Quarter of index of PM_{2.5} concentrations in the major cities of China from 2014 to 2015

季度	2014年PM _{2.5} 浓度	2014年PM _{2.5} 浓度季度变化	2015年PM _{2.5} 浓度	2015年PM _{2.5} 浓度季度变化
	Moran's I	Z(I)	Moran's I	Z(I)
春季	0.316	31.72***	0.276	27.84***
夏季	0.375	37.55***	0.256	25.90***
秋季	0.224	22.72***	0.274	27.70***
冬季	0.233	23.63***	0.269	27.15***
全年	0.286	28.85***	0.337	33.86***

注:***代表在1%的显著性水平上显著。

图2 2014年和2015年月均PM_{2.5}浓度变化对比Figure 2 Comparison diagram of monthly PM_{2.5} concentration variation in 2014 and 2015

3 2014–2015年中国城市PM_{2.5}浓度的时空演变规律

近两年来,中国跨区域的综合治理使PM_{2.5}的浓度有所下降。2014年,中国城市PM_{2.5}的年均浓度是61ug/m³,2015年为55ug/m³,降低了6ug/m³,下降幅度达10%。在空间上看,2015年的Moran's I指数0.337高于2014年0.286,表明2015年全国城市PM_{2.5}浓度的空间集聚性有所增强。

3.1 2014–2015年中国城市PM_{2.5}浓度的时间变化趋势

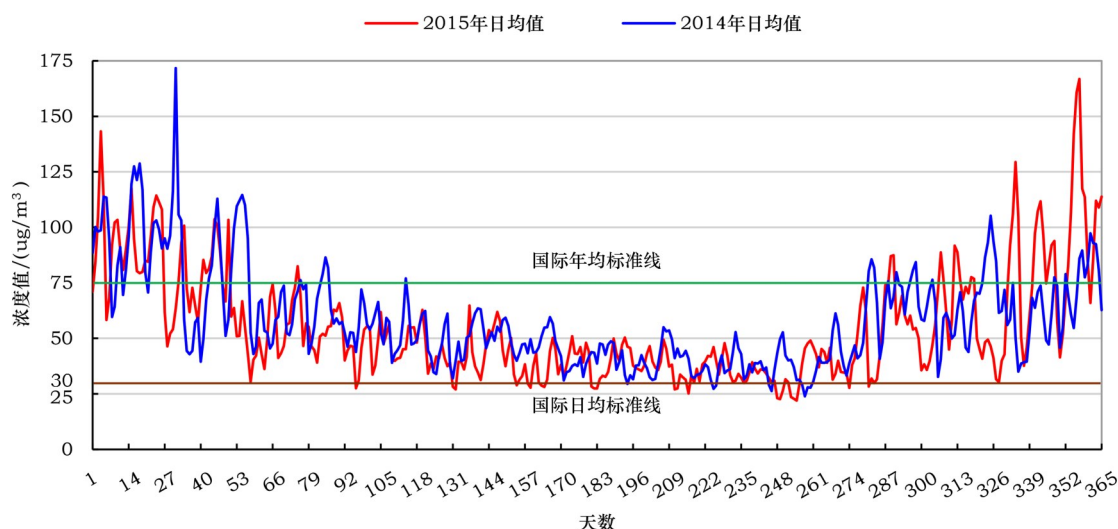
分季度来看,全国2015年空气质量较2014年均有所改善。其中,春季改善程度最大,降低9.33ug/m³,降幅16.07%,夏秋次之,分别降低6.50ug/m³(14.87%)和6.34ug/m³(11.19%);受北方地区燃煤供暖等因素影响,冬季降低幅度最小,为3.29ug/m³(3.93%)。

逐月来看,两年的PM_{2.5}月均浓度趋势均呈现1月和12月最高,8月、9月最低的U型格局,这与文献^[13]的研究结果一致(图2)。从变化趋势来看,2015年的1月到11月间,PM_{2.5}月均浓度较2014年均有所下降,平均下降8.42ug/m³。其中1月均值下降最多,21.02ug/m³;其次为3月和6月,分别下降了

11.32ug/m³和10.34ug/m³,2月、4月、5月、7月、10月和11月浓度下降值均在(5~10)ug/m³之间,8月和9月下降值均低于5ug/m³。从下降比率来看,2015年1月平均下降13.52%。其中,2月、8月和9月下降比率低于10%,6月和1月下降比率最高,分别为21.48%和19.84%,其他月份平均下降14.06%。

2015年12月的PM_{2.5}浓度高于2014年同期19ug/m³,主要原因是全国污染核心区京津冀地区出现了多次严重污染,保定与衡水等地出现连续8天的重度及以上污染天气,使当月PM_{2.5}平均浓度大幅提升,也拉升了全国全年的PM_{2.5}平均浓度。据中国环境科学研究院等部门的解释,2015年是有史以来最强的厄尔尼诺年,全球极端天气频发,尤其进入11月来,冬季燃煤增加以及华北多次强降雪天气导致了大范围的高湿度、低风速、强逆温的气象条件,从而造成污染持续累积^[19,20]。

逐日来看,近两年的PM_{2.5}逐日变化曲线均呈现周期性U-脉冲型波动规律,波动幅度秋冬高,春夏低(图3)。本文通过统计190个城市符合国家二类

图3 2014年和2015年日均PM_{2.5}浓度波动变化分布Figure 3 Distribution diagram of daily PM_{2.5} concentration fluctuation in 2014 and 2015

环境功能区PM_{2.5}浓度日均限值75ug/m³标准的达标天数来表达日均值变化趋势。2015年全部城市PM_{2.5}达标天数是290天,比2014年274天增加了16天。两年中,1月PM_{2.5}达标率最低,之后逐月持续升高,9月最高,10月因北方进入供暖季,达标率持续下降。其中2015年1月达标率52.02%,比上年(39.76%)高12.26%;2015年9月达标率94.09%,比上年(91.26%)高2.83%。虽然2015年12月达标率稍低于2014年12月,但是2015年全年空气质量比2014年有一定的改善。

3.2 2014–2015年中国城市PM_{2.5}浓度的空间变化趋势

近两年内,中国城市PM_{2.5}浓度的高值污染区主要集中在华北平原地区,但污染核心区由京津冀向鲁西北和豫北地区扩散。PM_{2.5}浓度排名来看,河北的保定、邢台、衡水、邯郸,山东的聊城和菏泽两年均位居前十位;山东德州、临沂和河南郑州、安阳则成为2015年前十位成员,河北的石家庄、廊坊和唐山,山东淄博空气质量好转,退出前十。从浓度的变化幅度来看,共有24个城市PM_{2.5}年均浓度升高,13个城市集中在山东、河南、辽宁和上海,其余城市包括兰州、九江、常熟、银川、大庆、自贡、乌鲁木齐和沈阳等工业、矿业城市。其中山东德州和章丘分别升高了39ug/m³和18ug/m³,排名前2位。PM_{2.5}年均浓度降幅较大的城市主要集中在京津冀、长三

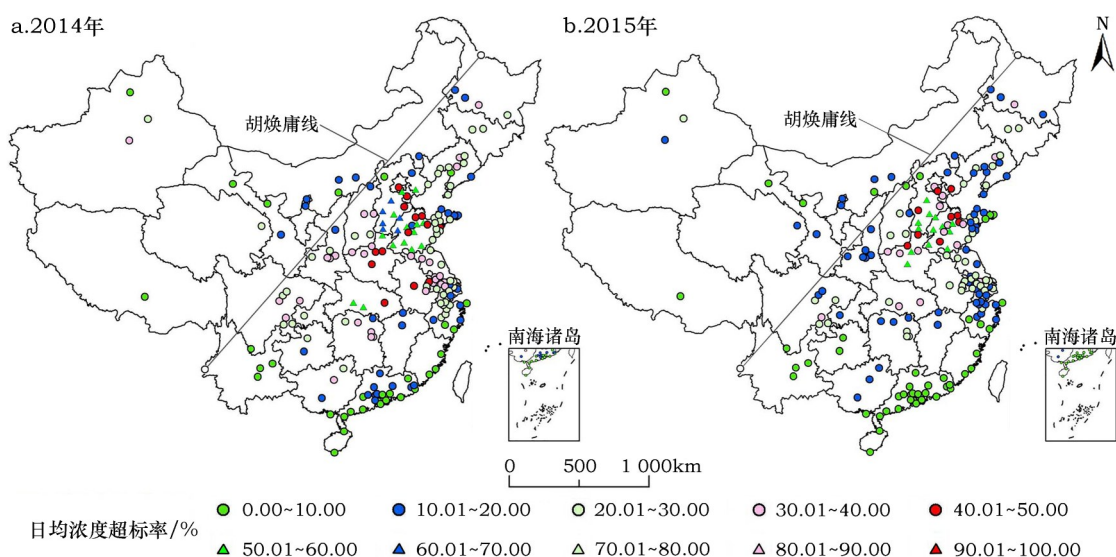
角、长江中游等城市群地区,其中47个城市降幅在10ug/m³以上,石家庄、邢台等6个城市降幅在20ug/m³以上。近两年来空气污染状况有一定的好转,表明中国区域联动空气污染治理模式的实施效果正在显现。

分季度来看,两年的PM_{2.5}污染范围均呈现冬季最广,夏季最小,春秋居中的空间分异规律,2015年污染范围较2014年明显缩小。冬季是全年污染范围最大的季节,高超标率(<50%)城市数量减少4个,低超标率(<20%)城市数量增多27个。高污染区域范围有所减少,珠三角、长三角和成渝城市群等地区空气质量明显改善。春秋季节污染范围明显向华北地区缩小,夏季的污染范围主要集中在京津冀。

逐月来看,1月全年污染范围最大,2015年超标天数大于50%的城市(99个)减少了27个,主要集中在长三角和辽中南城市群地区;超标天数小于20%的城市(34个)增加了18个,主要集中在珠三角和山东沿海地区。2月到9月,超标率呈现下降趋势,污染范围向京津冀地区缩小;10–12月污染范围开始由京津冀地区向东北、西北和东部沿海地区扩大,但是2015年整体污染范围小于2014年。

逐日来看,2015年50%以上日均超标率的污染范围显著小于2014年(图4),整体向冀南、鲁西北和豫北方向集聚。其中,PM_{2.5}日均值降低较为明显

2017年1月

图4 2014年与2015年PM_{2.5}浓度日均值超标分布对比Figure 4 Comparison of PM_{2.5} daily concentration super scale in 2014 and 2015

的地区分布在长三角(达标天数增加54天)、珠三角(达标天数增加20天)和成渝(达标天数增加20天)城市群地区。年超标天数小于10天的城市年超标天数小于10天的城市增加了7个,集中在珠三角地区。

3.3 2014–2015年中国城市PM_{2.5}浓度的空间集聚趋势

根据年均限值35ug/m³统计,中国城市PM_{2.5}的高污染城市聚集地是以长江以北地区和胡焕庸线以东地区的长江中游城市群、长江三角城市群、中原城市群、山东半岛城市群、京津冀地区城市群、辽中南城市群和哈长城市群。

从集聚趋势来看,2015年高污染城市集聚范围显著缩小,同时Moran's I指数提升0.051,表明集聚程度进一步加强。2014年热点区域主要集中在京津冀、山东半岛、中原、辽中南、晋中、长三角、呼包鄂榆以及关中城市群地区;2015年热点区域呈北移趋势,长江中游地区热点变冷点,成渝的部分无特征点转变为冷点。2014年冷点区域集聚在珠三角城市群、云南、西藏以及长江中游城市群的西部地区(图5a1),2015年则向北扩展到成渝、长江中游地区(图5b1)。所以,长江中上游地区形成污染空气与优良空气的频繁交替带,中国南方空气质量好转趋势明显。

空气污染的空间集聚动态具有显著的季节差

异。2015年春夏的Moran's I指数分别下降0.04和0.12,表明PM_{2.5}污染集聚程度降低;与此相比,秋冬两季的Moran's I指数分别提升0.05和0.04,表明PM_{2.5}污染集聚程度加强,这与PM_{2.5}污染在秋冬季高度集中在京津冀、中原、山东半岛和长三角城市群等地区相关。相比于2014年,2015年春季PM_{2.5}的热点范围缩小,表现为长江中游城市群东部的热点转为冷点,成渝城市群东部的部分无特征点转为冷点(图5a1,图5b1),表明这些地区空气质量正在好转(图5a2和图5b2);夏季成渝城市群的部分冷点变为无特征点,长江中游城市群和长三角南部的部分无特征点和热点变为冷点,陕西和内蒙古西部的部分无特征点和冷点转为热点,表明污染范围具有北上和西扩趋势(图5a3和图5b3);秋季成渝地区冷点范围扩大,长江中游城市群部分冷点转为无特征点,吉林冷点变热点,说明污染势力有南下和北上趋势(图5a4和图5b4);冬季是全年污染最严重的季节,热点在成渝、滇中、长江中游、长三角城市群出现明显变化,其中长江中上游城市群地区的部分无特征点和热点变冷点,而长三角南部的部分冷点变热点,表明长江以南空气质量正在好转,而华北、华东、中部地区的污染集聚形势仍然具有持续性和稳定性(图5a5和图5b5)。

Moran's I指数的大小代表雾霾分布空间集聚性的强弱,其值越大,空间集聚性越强。逐月来看,

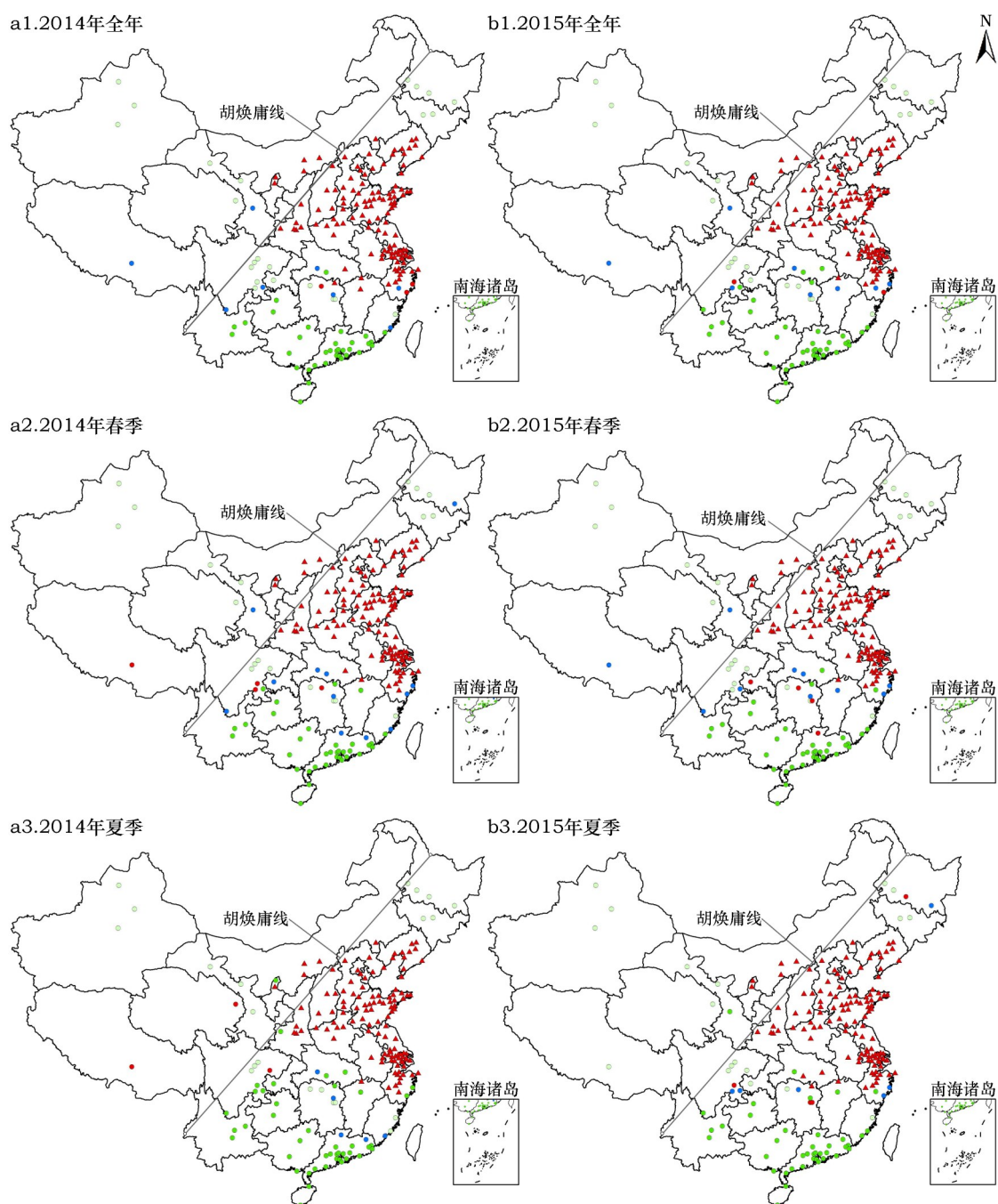
2015年1月、3月、6月、10月、11月和12月的Moran's I指数较2014年降低,表明以上月份PM_{2.5}浓度的空间集聚性和连续性整体降低,高污染区域面积减少,且分散布局于不同的城市群地区,导致全国高污染区域整体集聚程度有所降低。同时,2015年2月、4月、5月、7月和8月的Moran's I指数较2014年升高,表明以上月份PM_{2.5}浓度的空间集聚性整体上

升,高污染区域面积有所增加,且高污染区域主要集中在京津冀、中原和山东半岛等少数的城市群地区。

4 结论与建议

4.1 研究结论

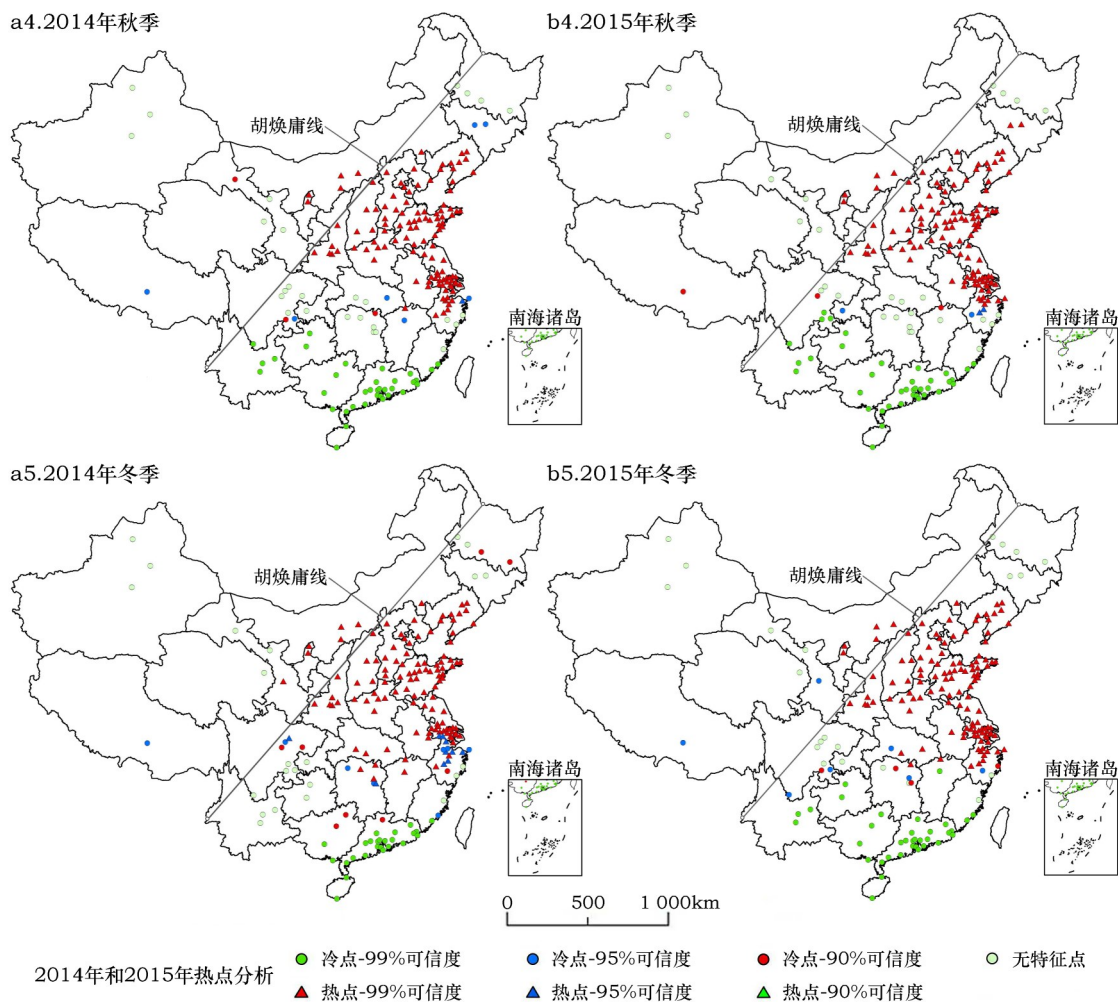
(1)2014–2015年,中国PM_{2.5}污染浓度降低了10%,空气质量有所改善。2015年,中国城市PM_{2.5}



(接下页)

2017年1月

(续前页图5)

图5 2014年与2015年PM_{2.5}浓度空间集聚变化Figure 5 Spatial agglomeration of annual and seasonal PM_{2.5} concentrations in 2014 and 2015

的年均浓度降低了10%。其中春季空气质量改善程度最大,夏秋次之,冬季污染有所加大。逐月来看,两年PM_{2.5}浓度均呈现1月和12月最高,8月、9月最低的U型格局,1月至11月PM_{2.5}浓度均有所下降,但12月浓度升高;逐日来看,两年均呈现周期性U-脉冲型波动规律,2015年全部城市PM_{2.5}达标天数(290天)比2014年增加了16天。空气质量改善的原因具有多元化,两年数据无法判定PM_{2.5}浓度变化的长期性或偶然性结论。因为除了国家大力实施区域联运共控的空气污染综合治理行动促进污染减排(2015年全国二氧化碳排放量下降1.5%,二氧化硫排放量减少3%)之外,气象条件同样发挥重要的作用。据《2015年中国气候公报》^[20],2015年超

强厄尔尼诺事件继续发展,全国平均气温较常年偏高0.95℃;降水增多,且南涝北旱,秋季偏多,冬夏偏少;冷空气频次减少,强度偏弱,导致京津鲁苏沪浙等华北和华东地区地面10m高度年平均风速减少。由此来看,华北、黄淮等地冬季频发的PM_{2.5}重污染与气象要素关系密切,国家空气污染治理效果的评价尚需较长时段的监测数据分析来实现。

(2)从PM_{2.5}浓度的空间分异来看,2015年PM_{2.5}整体污染范围小于2014年。两年内,中国城市PM_{2.5}浓度的高值污染区主要集中在华北平原地区,但污染核心区由京津冀向鲁西北和豫北地区扩散。PM_{2.5}年均浓度降幅较大的城市主要集中在京津冀、长三角、长江中游等城市群地区。分季节来看,

PM_{2.5}污染范围呈现冬季最广,夏季最小,春秋居中的空间分异规律。逐月来看,1月是全年污染范围最大的月份,2-9月超标率下降,污染范围向京津冀地区缩小;10-12月污染范围开始由京津冀地区向东北、西北和东部沿海方向扩大。逐日来看,2015年50%以上日均超标率的污染范围显著小于2014年,PM_{2.5}日均值降低较为明显的地区分布在长三角、珠三角和成渝城市群地区。

(3)从PM_{2.5}的空间集聚特征来看,胡焕庸线和长江是中国PM_{2.5}浓度的高低值分界线。两年中,中国主要城市PM_{2.5}浓度集聚热点由中、东部地区逐渐向北部地区集聚,再由长江以北地区向中东部遍布的循环周期季节性空间差异和月度空间变化规律,热点集聚地区显示出多中心集聚现象。相比于2014年,2015年的集聚性更明显,PM_{2.5}浓度高值区范围减小,热点地区更密集地分布在以京津冀地区为中心的华北地区。长三角城市群春、秋季节明显从热点分布转变为无特征点,空气质量有所好转;辽中南地区于秋季的热点分布由无特征点转变为高值频发,到冬季又得到控制,趋于无特征点分布;南部沿海地区则较为稳定的呈现出冷点分布,空气质量保持较为良好,PM_{2.5}浓度普遍较低。

4.2 对策建议

本文研究结果显示,虽然2015年比2014年空气质量有所改善,但是2015年PM_{2.5}年均浓度仍为55ug/m³,远远高于国家GB 3095-2012二类环境功能区的年均限值35ug/m³,更高于WHO(世界卫生组织)和西方发达国家所规定的PM_{2.5}年均限值。目前来看,快速城市化的城市群地区是中国PM_{2.5}污染的主要聚集地。其中,京津冀、山东半岛、中原城市群地区是染污的重灾区,长三角、长江中游、辽中南、成渝和天山北坡城市群也处于较高的污染状态。从时间来看,秋季10月、11月和冬季1月、2月、12月是一年中污染最严重的时段。为此,国家和地方政府亟需构建以城市群为核心区域的空气污染治理体系。

(1)构建制度支持的多中心监督治理模式。虽然政府在积极地探索空气污染的治理模式,但以政府为主导的治理模式无疑会把市场与社会等其它主体置于体系之外,环境问题仍然得不到有效解

决。多中心监督治理模式要求政府发挥牵头作用,加大执法力度;市场突破经济利益的引导,严格执行政府导向性指令和标准,通过价格杠杆激励新产业、新技术和新机制;社会共同参与难题的破解,公民建立主体意识,破除搭便车等投机心理,采用绿色生活方式。最终形成政府监督与治理市场行为,市场失灵约束政府;社会通过投票、信访督促政府,通过提供信息激活市场,通过社会失灵约束市场的多中心约束机制,构建政府管理与服务,市场参与与执行,社会参与与监督的制度支持多中心监督治理模式。

(2)京津冀及周边地区为先行先试区域,构建管理支持的多区域联动治理模式。目前,北京奥运会、APEC会议、上海世博会等重大活动的空气质量保障工作的成功经验证明,实施统一规划、统一检测、统一监管、统一评估、统一协调的区域大气污染联防联控工作机制是改善区域空气质量的有效途径。然而,应对重大事件的大气污染治理模式具有暂时性和区域性,无法真正解决如此复杂的大气污染问题。所以,应该在此成功经验的基础上,建立包括国家层-城市群层-城市层三个级别的立体管理机构和管理体系。自上而下实施加强组织领导、分解落实责任、严格考核问责、完善法规体系、创新经济政策和强化科技支撑等纵向管理机制;探索跨区域的环境污染补偿机制,明确定位大气污染排放主体和受害客体,完善补偿标准与补偿方式,建立信息化补偿平台。

总体来看,当前中国偏重的产业结构和偏化石原料能源结构难以快速降低能耗与排放,当前居民日益增长的高消费观念和生活方式也不利于控制污染物排放,中国空气污染的治理任重而道远。面对此“公地悲剧”,提升公众环境意识与参与机制迫在眉睫。应急来看,秋冬季节的污染企业排放控制、民众燃煤方式和机动车出行方式是当前空气污染治理首要且必须攻克的难关。

参考文献(References):

- [1] Brook R D, Rajagopalan S, Pope CA, *et al.* Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific

2017年1月

- statement from the American Heart Association[J]. *Circulation*, 2010, 121(21): 2331–2378.
- [2] Hu H, Dailey A B, Kan H, *et al.* The effect of atmospheric particulate matter on survival of breast cancer among USA females [J]. *Breast Cancer Res. Treat.*, 2013, 139(1): 217–226.
- [3] Dong G H, Qian Z M, Xaverius P K, *et al.* Association between long-term air pollution and increased blood pressure and hypertension in China[J]. *Hypertension*, 2013, 61(3): 578–584.
- [4] 中华人民共和国环境保护部. 环境保护部发布《2015 中国环境状况公报》[EB/OL]. (2016–06–02)[2016–08–29]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201606/t20160602_353078.htm. People's Republic of China Environmental Protection Department. Ministry of Environmental Protection Issued the 2015 China Environmental Status Bulletin[EB/OL]. (2016–06–02)[2016–08–29]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201606/t20160602_353078.htm.
- [5] Wang Z, Fang C. Spatial-temporal characteristics and determinants of PM_{2.5} in the Bohai Rim Urban Agglomeration[J]. *Chemosphere*, 2016, 148: 148–162.
- [6] 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*, 2014, 11(1): 173–186.
- [7] Wu J S, Li J C, Peng J, *et al.* Applying land use regression model to estimate spatial variation of PM_{2.5} in Beijing, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(9): 7045–7061.
- [8] 李明升, 张建辉, 张殷俊, 等. 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. [Li M S, Zhang J H, Zhang Y J, *et al.* Spatio-temporal pattern changes of ambient air PM₁₀ pollution in China from 2002 to 2012[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1504–1512.]
- [9] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2013 年北京市 PM_{2.5} 的时空分布[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 110–120. [Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in Beijing in 2013[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 110–120.]
- [10] 戴昭鑫, 张云芝, 胡云锋, 等. 基于地面监测数据的 2013–2015 年长三角地区 PM_{2.5} 时空特征[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(5): 813–821. [Dai Z X, Zhang Y Z, Hu Y F, *et al.* Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in Yangtze River Delta (YRD) Region based on the ground monitoring data from 2013–2015[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(5): 813–821.]
- [11] 张殷俊, 陈曦, 谢高地, 等. 中国细颗粒物(PM_{2.5})污染状况和空间分布[J]. 资源科学, 2015, 37(7): 1339–1346. [Zhang Y J, Chen X, Xie G D, *et al.* Pollution status and spatial distribution of PM_{2.5} in China[J]. *Resources Science*, 2015, 37(7): 1339–1346.]
- [12] 国家环境保护部. 中华人民共和国国家环境保护标准 (GB3095–2012), 环境空气质量标准 (试行)[EB/OL]. (2012–02–29)[2016–08–29]. http://www.cnemc.cn/news/download.jsp?filePath=/resource/crm/newsUploadFile/106/1331072093716_3837.pdf&describe=%BB%B7%BE%B3%BF%D5%C6%F8%D6%CA%C1%BF%B1%EA%D7%BCGB3095_2012. [Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. National Environmental Protection Standards of the People's Republic of China (GB3095–2012), Ambient Air Quality Standards (on trial)[EB/OL]. (2012–02–29)[2016–08–29]. http://www.cnemc.cn/news/download.jsp?filePath=/resource/crm/newsUploadFile/106/1331072093716_3837.pdf&describe=%BB%B7%BE%B3%BF%D5%C6%F8%D6%CA%C1%BF%B1%EA%D7%BCGB3095_2012.]
- [13] 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. [Wang Z B, Fang C L, Xu G, *et al.* Spatial-temporal characteristics of the PM_{2.5} in China in 2014[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1720–1734.]
- [14] 方创琳. 中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向[J]. 地理学报, 2014, 69(8): 1130–1144. [Fang C L. Progress and the future direction of research into urban agglomeration in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1130–1144.]
- [15] 方创琳. 中国新型城镇化发展报告[M]. 北京: 科学出版社, 2014. [Fang C L. Report on the Development of New Urbanization in China[M]. Beijing: Science Press, 2014.]
- [16] 陈刚强, 李郇, 许学强. 中国城市人口的空间集聚特征与规律分析[J]. 地理学报, 2008, 63(10): 1045–1054. [Chen G Q, Li X, Xu X Q. Spatial agglomeration and evolution of urban population in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(10): 1045–1054.]
- [17] 周天墨, 付强, 诸云强, 等. 空间自相关方法及其在环境污染领域的应用分析[J]. 测绘通报, 2013, (1): 53–56. [Zhou T M, Fu Q, Zhu Y Q, *et al.* Research on the application of spatial autocorrelation method in environmental pollution[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2013, (1): 53–56.]
- [18] Hu M, Lin J, Wang J, *et al.* 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(3): 70–80.
- [19] 节能环保处. 排放量大和极端天气是主因, 部分基层落实措施不到位[EB/OL]. (2015–12–01)[2016–08–29]. http://www.cenews.com.cn/sylm/hbbxwfb/201512/t20151201_799905.htm. [Energy Saving and Environmental Protection Department. Emissions and Extreme Weather Is the Main Cause, Part of the Grassroots Implementation Measures Are not in Place[EB/OL]. (2015–12–01)[2016–08–29]. <http://www.cenews.com.cn/sylm/>

hbbxwfb/201512/t20151201_799905.htm.]

19).<http://zwgk.cma.gov.cn/web/showsendinfo.jsp?id=15603China>

[20] 韩中国气象局.《2015年中国气候公报》[EB/OL]. (2016-01-

Meteorological Administration.China Climate bulletin in 2015.]

Dynamic analysis of PM_{2.5} spatial-temporal characteristics in China

XIONG Huanhuan^{1,2}, LIANG Longwu^{1,3,4}, ZENG Zeng^{1,4}, WANG Zhenbo³

(1. School of Economics and Management, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

2. School of Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

4. Econometric Research Institutions, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Based on PM_{2.5} concentration observation data for 2014 and 2015 from 190 medium and large cities in China we look at changes in PM_{2.5} concentration and trends in spatial agglomeration. We found that in 2015, the average PM_{2.5} concentrations in China decreased by 10% compared with 2014, the number of days of compliance enhanced by 4.4%, and the air quality improved obviously. Spring improved the most, followed by summer, autumn and winter. In December 2015, the pollution was worse than the same period in 2014. The other months were improved, with the largest decrease in June (21.48%), and a decline of less than 10% in February, August and September. In 2015, the pollution area of PM_{2.5} was less than that in 2014, and the pollution core area spread from Beijing, Tianjin and Hebei to the northwest and north of Henan. The areas where there were large declines in PM_{2.5} annual average concentration were mainly in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, Yangtze River Delta, middle reaches and other urban agglomerations; cities with rapid growth in the average daily standard days were mainly concentrated in the Yangtze River Delta, Pearl River Delta and Chengyu urban agglomerations. In contrast to PM_{2.5} in 2014, the concentration of PM_{2.5} was more obvious in 2015, the concentration of high-value areas decreased, and the hot spots were more densely distributed in the North China Region centered around the Beijing-Tianjin-Hebei Region. Hot agglomeration regions showed a multi-center cluster phenomenon. Based on the above situation, it is necessary to speed up the construction of institution-supported multi-center supervision and governance mode. In the North China Region we should build a management-supported multi-regional linkage governance mode, construct public environmental consciousness governance supported by environmental ethics, and incorporate these into the Chinese cultural rejuvenation system.

Key words: PM_{2.5}; spatio-temporal variability; hot-points evolution; regional linkage governance mode; China