DOI:10.19789/j.1004-9398.2019.05.012

京津冀地区 $PM_{2.5}$ 时空变异性规律研究*

程 蕊[1,2] 许甜甜[2,3] 朱 琳[1,2,3**] 郑丽萍[2,3] 李蕙君[1,2]

(1. 首都师范大学地球空间信息科学与国际化示范学院,北京 100048;
2. 首都师范大学城市环境过程和数字模拟国家重点实验室培育基地,北京 100048;
3. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048)

摘要: 空气污染已成为全球关注的重要问题,亦是当前中国大气质量面临的主要问题. 本文基于2014年6月—2017年8月京津冀地区13个城市的 $PM_{2.5}$ 监测站点数据,利用数理统计、GIS空间自相关和克里金插值等方法研究了不同时间尺度下 $PM_{2.5}$ 的时空变化规律. 研究结果表明:(1) $PM_{2.5}$ 在时间上的分布特征为,季均值冬高夏低,春秋居中,季均值与月均值表现为连续平缓U型模式,日均值呈峰、谷交替变化,每日最低值在16点左右出现;(2) $PM_{2.5}$ 空间分布差异较大,中南部城市浓度远高于北部城市,具有空间自相关性和聚类特征,表现为污染区域关联性;(3) 不同时间尺度下 $PM_{2.5}$ 浓度均呈南高北低分布,各季节高浓度区域面积逐年缩减并向南转移,在秋冬季节形成以石家庄为高浓度中心向外逐渐降低的阶梯式分布模式.

关键词: 京津冀地区; $PM_{2.5}$; 监测数据; 时空变化规律
中图分类号: X513

0 引 言

随着我国经济的迅速发展,工业化程度进一步加深,工矿业发展、机动车尾气排放等产生大量 $PM_{2.5}$、SO_2 等空气污染物,其中 $PM_{2.5}$ 是导致城市空气质量下降的主要污染物之一[1-5]. 京津冀地区是我国 $PM_{2.5}$ 高污染典型区,2014—2017年环境公报显示全国空气污染最严重的十个城市中京津冀地区城市个数占60%以上,同时 $PM_{2.5}$ 也是2014—2017年京津冀地区空气主要污染物,能够直接影响其空气质量状况. $PM_{2.5}$ 会对人类生产生活产生严重影响,如形成的灰霾、雾霾会影响交通运输、诱发呼吸系统疾病等[6-8]. 人口众多、经济发达、产业多样的京津冀地区在交通运输、人类健康等方面受 $PM_{2.5}$ 危害更加严重. 因此开展京津冀地区不同尺度下 $PM_{2.5}$ 时空分布研究变得更有必要,对其大气质量联防治理措施的制定与实施、经济社会发展、生态环境安全等具有积极意义.

$PM_{2.5}$ 已成为国内大气质量、生态安全等诸多领域的研究热点,受到各界学者的重视. 吴建生等[9]基于AOD数据反演得到 $PM_{2.5}$ 浓度,但并未对其时空分布进行深入分析. Lee 等[10]结合前人研究结果,校正了MODIS数据反演得到的 $PM_{2.5}$ 浓度,对局部地区进行了预测. 王占山等[1]研究分析了2013年北京市 $PM_{2.5}$ 时空分布特征. 王振波等[11]对2014年190个城市 $PM_{2.5}$ 监测数据进行空间分析,得到了中国 $PM_{2.5}$ 的时空分布特征. 熊欢欢等[12]则在王振波等人的研究基础上[11],将数据的时间长度拓宽为两年(2014—2015年). 目前,区域尺度上 $PM_{2.5}$ 时空变化分析主要包括两类,一类是基于传统的遥感反演方法,结合相关模型揭示 $PM_{2.5}$ 空间分布特征,在揭示近地面小尺度 $PM_{2.5}$ 空间分布精度方面略有不足,对不同时间尺度上 $PM_{2.5}$ 的变化规律刻画也具有较大局限性;另一类是基于地面监测站数据,得到不同时间、空间下的 $PM_{2.5}$ 时序演变规律与空间分布信息,但研究时间跨度多为1年,基于长时间序列数据开展的研究较少.

本文针对这些问题,选取京津冀为研究区,采用2014—2017年京津冀地区 $PM_{2.5}$ 站点监测数据,利用数理统计方法与空间分析工具获取 $PM_{2.5}$ 的时间变化与空间分异特征,以期为监测防控 $PM_{2.5}$ 危害提供科学合理的借鉴性依据.

收稿日期:2018-08-27
* 科技创新服务能力建设(011/19530050175)
** 通信作者:hi-zhulin@163.com

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　数据与方法

1.1　数据源

京津冀地区位于 113°27′～119°50′E,36°05′～42°05′N 之间,东临渤海,北枕燕山,西倚太行,地势西北高、东南低,由西北向东南呈半环状逐级下降. 属温带大陆性气候,降水量集中于夏季,冬季寒冷干燥. $PM_{2.5}$ 浓度数据来源于中国环境监测总站(http://www.cnemc.cn/)全国空气质量实时发布平台发布的站点监测数据.

京津冀 13 个城市 80 个国控空气质量监测站点(北京市 12 个、天津市 15 个、河北省 53 个)于 2013 年开始对外发布数据. 为保证不同时间尺度下的数据完整性,本文收集、整理了 2014 年 6 月—2017 年 8 月京津冀地区国控站点监测数据. 同时根据《环境空气质量监测规范(试行)(GB3095—2012)》中大气污染物浓度数据的相关规定,剔除部分因日常维护行为或仪器故障、停电等原因造成数据缺失的站点,参照王振波等[11]数据质量控制方法,对 $PM_{2.5}$ 站点数据进行筛选,获得符合质量要求的 69 个站点(北京市 12 个、天津市 10 个、河北省 47 个)数据(站点位置分布见图 1). 同时将 0—23 时平均值作为日均值,基于日均值获得月均值,根据月均值获得季均值.

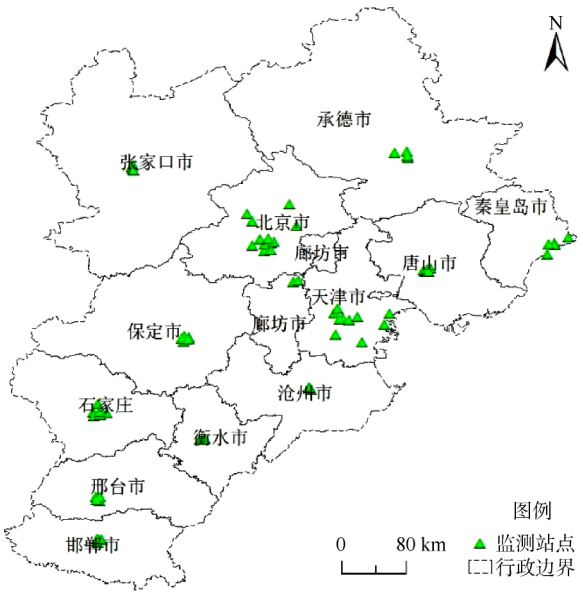


图 1　京津冀地区监测站点分布位置图

1.2　分析方法

1.2.1　空间插值方法

空间数据插值是用已知点数值来估算其他位置数值的方法,常用于将离散点的测量数据转换为连续的数据曲面处理中,以便获取空间变量在区域面上的分布信息. Lee 等[13]指出区域尺度上插值结果精度比遥感反演精度更准确. $PM_{2.5}$ 监测站数据常用插值方法为反距离权重法与克里金插值法[14]. 反距离权重插值仅以距离为权重,忽略了方位等其他因素,易产生“牛眼”现象[15];克里金插值法基于半变异函数理论,对有限区域范围变量取值进行无偏最优估计[16],可以反映空间变量的相关性和变异性,能够补充站点分布较少的问题. 王振波等[11]采用交叉验证法证明克里金插值结果优于反距离加权插值结果. 国家布控的空气质量监测站点密度较小,考虑到京津冀区域面积尺度较大,为获取 $PM_{2.5}$ 科学合理的空间分布信息,本次选用普通克里金插值法对其进行插值处理.

1.2.2　全局 Moran′s I

空间自相关是通过统计方法分析对象的空间分布特性,得到空间对象自相关性的强弱情况. 空间自相关统计量是度量一定区域内,邻近位置上数据间的相互依赖程度. 已有很多研究将空间自相关引入到人口、大气、资源环境等多个学科领域,证明了其对大气环境等方面研究的科学性与可用性. 近邻区域 $PM_{2.5}$ 浓度会受大气流通性影响而存在一定相关性[17],因此本文使用空间自相关统计量分析 $PM_{2.5}$ 空间分异情况.

莫兰指数(Moran′s I)是应用最为广泛的一种空间自相关统计量[17],分为全局 Moran′s I 和局部 Moran′s I 两类. 前者用于分析整个研究区空间变量的关联程度,探明空间变量之间是否存在显著的空间分布模式[18];后者则用于分析局部地区空间单元与邻近单元就空间变量的相关程度. 本文旨在获取研究区 $PM_{2.5}$ 整体的空间分布模式,故选用全局 Moran′s I 进行相关运算. 全局 Moran′s I 用公式(1)表示:

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

式中: n 为监测站点个数; x_i 和 x_j 分别为监测站点 i 和 j 的观测值(单位为 $\mu g \cdot m^{-3}$); W_{ij} 是权重矩阵. 其中:

$$S^2 = \frac{1}{n}\sum_{i}^{n}(x_i - \bar{x})^2, \quad (2)$$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \quad (3)$$

I 的取值一般在 $[-1,1]$ 之间,小于 0 表示负相关,等于 0 表示不相关,大于 0 表示正相关. Moran´s I 是否具有显著性,通常用标准化统计量 $Z(I)$ 来检验:

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{Var(I)}}, \quad (4)$$

$E(I)$ 与 $Var(I)$ 与分别是 Moran´s I 的期望与方差;当 $Z(I)$ 为正且显著时,表明存在正的空间自相关性,即相似的观测值(高值或者低值)趋于空间集聚;当 $Z(I)$ 为负且显著时,表明存在负的空间自相关,相似的观测值趋于分散分布;当 $Z(I)$ 为 0 时,观测值呈独立随机分布.

2 结果与分析

2.1 $PM_{2.5}$浓度时序变化

2.1.1 季节变化

按照气象学划分,春季为 3—5 月、夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月、冬季为 12 月到次年 2 月. 利用 origin 对 $PM_{2.5}$季均值进行绘图,得到季均值箱形图(图 2). 由图可知季均值呈连续的 U 型起伏变化,表现为冬高夏低,春秋居中的周期变化规律. 对比研究时段内各季节浓度增降情况,明显看出除 2016 年冬季较上一年浓度反弹增高(123.2 μg·m^{-3})外,春、夏、秋 3 季 $PM_{2.5}$浓度均呈下降趋势. 根据《2016 年中国气候公报》知,2016 年受超强厄尔尼诺现象影响,秋冬京津冀及周边地区霾天气频繁,故 2016 年冬季出现反弹增高现象. 此外,京津冀地区各季标准差相差较大,由高到低依次为冬、秋、春、夏,表明 $PM_{2.5}$在时序变化上呈现明显的非均匀性分布,在不同季节出现不同特征. 冬、秋季 $PM_{2.5}$标准差大(离散程度大),说明 $PM_{2.5}$浓度变化剧烈,短时间内容易出现大的浓度波动,形成雾霾天气;春、夏季标准差较小且上下四分位间距小,表明其浓度较低且变化较为稳定,不易在短时间内出现污染天气.

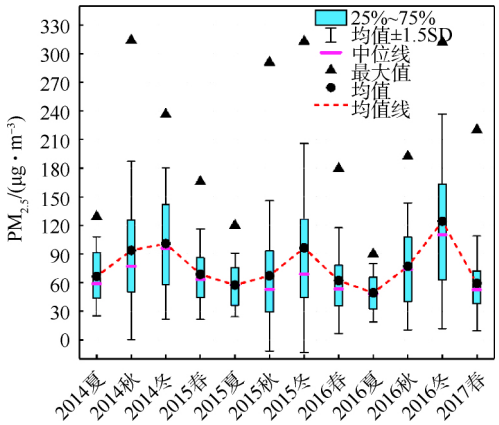


图 2 京津冀 2014—2017 年 $PM_{2.5}$浓度季节变化箱形图

经上述分析可知,京津冀 $PM_{2.5}$浓度冬季最高、波动最大,为典型污染季节;夏季浓度最低,起伏较小,为污染最轻季节,故对冬、夏季 $PM_{2.5}$变化特征做进一步分析(图 3(a)、(b)). 由图 3(a)可知,2014—2017 年间 $PM_{2.5}$夏季浓度逐渐降低且呈稳定趋势,2015 年夏北京、天津各出现一次异常值,2016 年夏天津出现一次异常值,说明研究区内夏季 $PM_{2.5}$浓度变化平缓,不易出现剧烈变化;分析图 3(b)知,冬季先降后增、波动较大,各地区在 2014 年冬浓度最低,2016 年冬浓度最高,且三年冬季异常值出现次数较多,表明其 $PM_{2.5}$浓度变化较为剧烈.

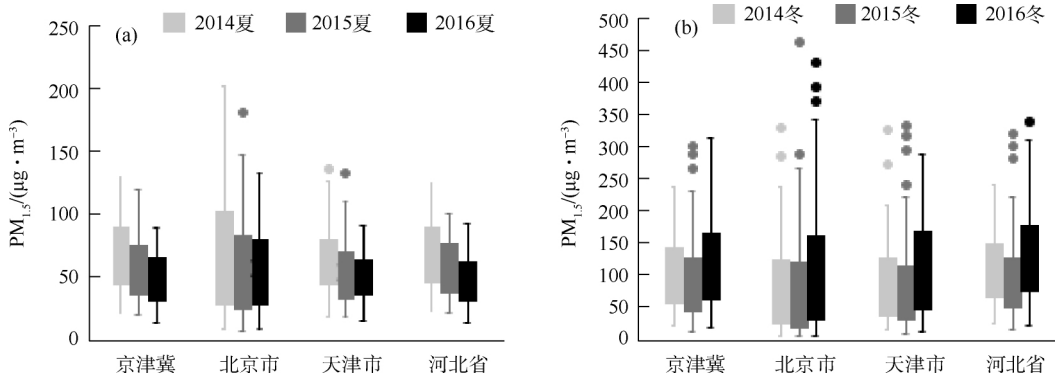


图 3 京津冀 2014—2017 年夏、冬季 $PM_{2.5}$浓度变化图

2.1.2 月变化与逐日变化

了解和掌握 $PM_{2.5}$月变化规律,有利于研究区针对不同月份采取相应的污染防治措施. 由研究区 $PM_{2.5}$月变化(图 4)知,2014—2017 年间京

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

津冀地区 $PM_{2.5}$ 月浓度呈平缓连续的 U 型循环变化模式，逐日浓度呈尖峰深谷交替的锯齿状周期性变化. 整体上，月变化与逐日变化的趋势相似，每年 10 月浓度逐渐升高至 12 月或次年 1 月左右达到峰值，随后下降至 8 月达到一年的最低值. 每年 10 月到次年 3 月相邻峰值浓度远高于谷值浓度，表明其波动较大，主要受冬季供暖影响. 每年 7—8 月间会出现峰值异常高于谷值、夏季均值的情况，主要受夏季逆温等气候因素影响[19].

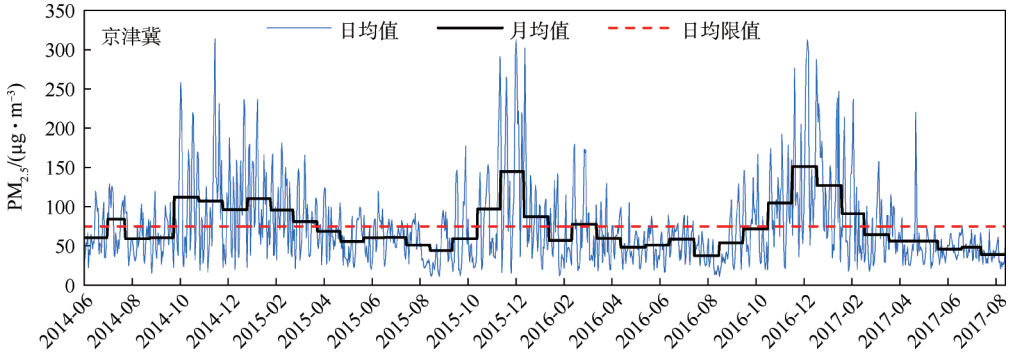


图 4　京津冀 $PM_{2.5}$ 浓度逐日、月变化

经统计，2014—2017 年京、津、冀 $PM_{2.5}$ 浓度变化剧烈. 天津地区 $PM_{2.5}$ 浓度最大值为 376.2 μg·m^{-3}，最小值 9.2 μg·m^{-3}，浓度差为 367.0 μg·m^{-3}; 河北 $PM_{2.5}$ 浓度最大值为 338.4 μg·m^{-3}，最小值 10.8 μg·m^{-3}，浓度差为 327.6 μg·m^{-3}; 对比津、冀两地，北京日变化波动更大，规律性差，最高值达 471.3 μg·m^{-3}，最小值 5.7 μg·m^{-3}，浓度差达 465.6 μg·m^{-3}，突出表现在 2014 年 7 月、2015 年 6 月、2017 年 5 月.

2.1.3　日变化

基于京、津、冀三地各月 0—23 时 $PM_{2.5}$ 数据，利用 origin 处理得到 $PM_{2.5}$ 月度日变化(如图 5 所示). 分析图 5 可知，天津、河北日变化特征相似. 冬季月整体的日浓度最高，夏季月整体的日浓度最低. 夏季全天浓度较低、波动小，峰值出现在 7—8 点，谷值出现在 16—17 点或 23 点左右，与夏季降雨量大、多风天气、无供暖因素有关; 春、秋、冬季第 1 个谷值出现在 6—7 点; 随温度升高，污染物经二次转化浓度上升，9—10 点出现第 1 个峰值; 污染物发生扩散效应，第 2 个谷值出现在下午 16—18 点; 晚高峰产生大量污染物，受 $PM_{2.5}$ 传播滞后性影响，晚间 22—23 点出现第 2 个峰值. 北京 $PM_{2.5}$ 日变化规律性较差，但其早晚高峰值及下午最低值同津、冀规律相似.

2.2　$PM_{2.5}$ 浓度空间分布变化

2.2.1　$PM_{2.5}$ 空间变异性

基于监测数据插值得到 2014—2017 年各季节 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布情况，结果如图 6 所示. 空间上各季 $PM_{2.5}$ 浓度呈现南高北低分布，由高到低依次为冬、秋、春、夏. 季节上，春、夏季 $PM_{2.5}$ 浓度逐年降低，秋、冬季浓度总体呈降低趋势(具体为先降低后增高)，高浓度值逐渐向中南部转移，除张家口、承德、秦皇岛外，其余城市 $PM_{2.5}$ 浓度均较高，尤以中部地区的石家庄、保定、邢台最为突出. 2015—2017 年的 3 个春季，$PM_{2.5}$ 高浓度的地区(>75 μg·m^{-3})逐年缩减至基本消失，$PM_{2.5}$ 浓度<75 μg·m^{-3}的地区逐渐变大. 2014—2017 年的 4 个夏季，$PM_{2.5}$ 浓度较高的地区逐渐减小至消失. 2014—2016 年的 3 个秋季，高值分布范围明显缩减后有所增大. 2014—2016 年的 3 个冬季，高浓度分布区域逐渐缩小、向西南转移，表现为以石家庄为高值中心向外逐渐降低的阶梯式分布.

2.2.2　$PM_{2.5}$ 空间自相关分析

利用全局 Moran′s I 对站点数据进行空间自相关分析，分别得到置信度 99.9%($p=0.001$)下各监测站点在不同季节和不同月份的 Moran′s I、$Z(I)$ 值(表 1、表 2). 由表 1 可知，2014—2017 年间各季 Moran′s I 最小值为 2017 年夏季的 0.673，其余季节 Moran′s I 均大于 0.800，表明在季节尺度上京津冀地区 $PM_{2.5}$ 呈明显的正空间自相关; $Z(I)$ 最小值、最大值分别为夏季的 7.541 和冬季的 24.536，均大于临界值 2.600，表明其呈现显著的空间集聚现象.

分析京津冀地区 $PM_{2.5}$ 月均浓度空间自相关性(表 2)可知，2014—2017 年间各月 Moran′s I 最小值

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

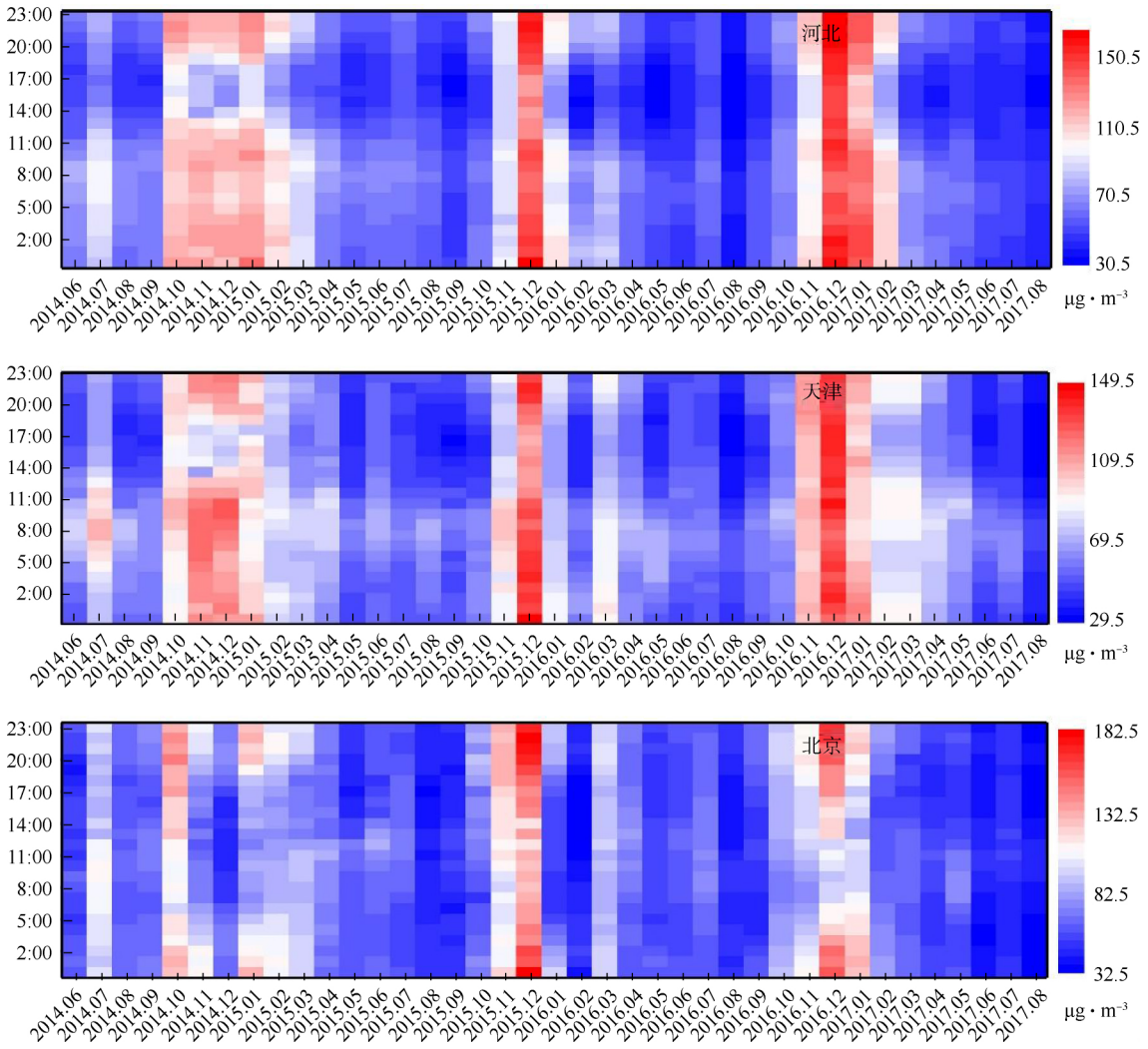


图 5 京津冀三地 $PM_{2.5}$ 日变化

表 1 2014—2017 年京津冀地区 $PM_{2.5}$ 季均浓度空间自相关值($p=0.001$)

季节	2014 年		2015 年		2016 年		2017 年	
	Moran´s I	$Z(I)$	Moran´s I	$Z(I)$	Moran´s I	$Z(I)$	Moran´s I	$Z(I)$
春季			0.956	17.069	0.940	17.371	0.965	17.442
夏季	0.975	15.413	0.907	21.687	0.984	12.703	0.673	7.541
秋季	0.902	20.316	0.971	18.195	0.986	13.910		
冬季	0.950	16.255	0.801	24.536	0.973	17.824		

为 2017 年 6 月的 0.203,其余月份 Moran´s I 均大于 0.485,表明在月尺度上京津冀地区 $PM_{2.5}$ 呈现正空间自相关关系; $Z(I)$ 值最小值、最大值分别为 2017 年 6 月的 5.723 和 2016 年 5 月的 25.247,均大于临界值 2.600,研究区呈现明显的空间集聚现象.

综上可知,研究区 $PM_{2.5}$ 在空间上呈现较为明显的正空间自相关,空间集聚现象显著,表现为区域之间污染的关联性,即该地区 $PM_{2.5}$ 浓度的大小对其周边地区呈正相关影响. 总结京津冀 $PM_{2.5}$ 空间分布的主要特征: 一是随时间推移整体上 $PM_{2.5}$ 浓度逐渐降低; 二是季节性明显; 三是城市间关联性显著. 高浓度范围明显缩减,污染程度显著减轻,呈向南移动趋势; 浓度由低到高依次为夏春秋冬; 中南部城市浓度显著高于北部,石家庄、保定、邢台等地污染最为严重,张家口、承德、秦皇岛等地污染较轻.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

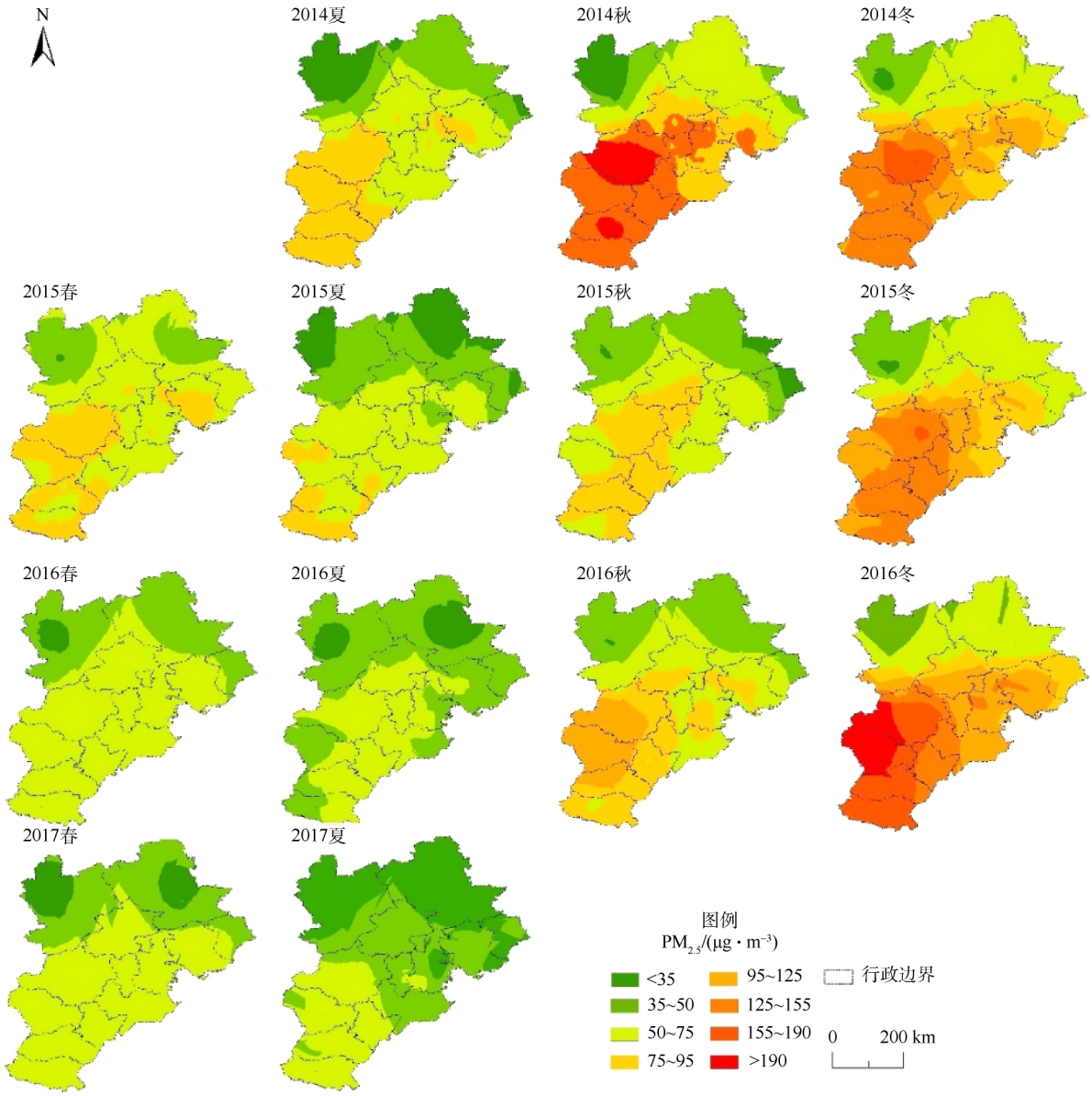


图 6　京津冀 $PM_{2.5}$季节浓度变化空间分布图

表 2　2014—2017 年京津冀地区 $PM_{2.5}$月均浓度空间自相关值(p =0. 001)

月份	2014 年		2015 年		2016 年		2017 年	
	Moran´s I	$Z(I)$	Moran´s I	$Z(I)$	Moran´s I	$Z(I)$	Moran´s I	$Z(I)$
1 月			0. 856	24. 367	0. 948	20. 288	0. 974	19. 612
2 月			0. 971	14. 465	0. 985	15. 821	0. 984	14. 365
3 月			0. 976	15. 184	0. 930	19. 653	0. 904	20. 954
4 月			0. 864	23. 583	0. 890	21. 457	0. 881	21. 051
5 月			0. 964	17. 063	0. 655	25. 247	0. 615	6. 878
6 月	0. 954	17. 414	0. 866	21. 536	0. 731	22. 469	0. 203	12. 797
7 月	0. 922	18. 593	0. 822	23. 117	0. 924	20. 451	0. 517	5. 723
8 月	0. 854	23. 137	0. 925	20. 003	0. 939	18. 702	0. 485	20. 798
9 月	0. 965	16. 315	0. 954	15. 988	0. 985	14. 278		
10 月	0. 953	16. 001	0. 965	17. 388	0. 977	16. 778		
11 月	0. 621	10. 386	0. 974	17. 904	0. 993	11. 444		
12 月	0. 962	17. 537	0. 638	21. 073	0. 997	12. 712		

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 讨 论

$PM_{2.5}$浓度高低与诸多因子相关,其中气象因子、人为活动(冬季取暖、限制污染物排放等)是最为主要的两类因素. 一般 $PM_{2.5}$浓度与风速、温度呈反比. 夏季炎热干燥,近地面气压较低,四周气流向中间流动形成向上的气流,对流运动强,降水增多,带动污染物的扩散与转移,故 $PM_{2.5}$浓度低且波动小[19]. 冬季与之相反,空气流动慢,在人为供暖燃煤的影响下,$PM_{2.5}$浓度易增高、波动变化大,易在短时间内产生高浓度污染.

21 世纪以来中国经济的迅速发展,促使京津冀等以工业产业为主的地区出现 $PM_{2.5}$异常增高、雾霾频发等现象,在此之前中国并未发现大规模雾霾天气,因而表明人类活动对 $PM_{2.5}$污染的影响十分严重. 各种人类活动以不同形式,对 $PM_{2.5}$的升高"贡献""源"动力. 一是以"固定污染源"形式,如发电、冶金、石油、化学、纺织印染等各种工业过程产生工业气体;供热、烹调过程中燃煤、燃气排放的烟尘. 二是以"流动源"形式进行的污染,主要是各类交通工具向大气中排放的尾气. 因此,合理颁布相关人为措施与政策对 $PM_{2.5}$浓度升高具有一定抑制作用. 2013—2017 年间国家发布的相关政策(表 3)表明,近年来京津冀地区对空气污染治理尤为重视,在政策层面限制相关污染行为活动,主要从企业工业污染排放、清洁能源使用、机动车尾气排放、产业结构调整等方面控制污染物的产生和排放,对区域空气质量控制起到了一定作用.

因此,在对 $PM_{2.5}$分布成因机理进行研究时,需综合考虑分析气象因子与人类活动对其产生的影响,进而得到切实合理的分析结果.

表 3 2013—2017 年环境保护相关政策

部门	年份	名称	措施内容概况
环保部	2013 年	《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》	实施综合治理,强化污染物协同减排;统筹城市交通管理,防治机动车污染;控制煤炭消费总量,推动能源利用清洁化;强化基础能力,健全监测预警和应急体系.
中共中央政治局	2015 年	《京津冀协同发展规划纲要》	联防联控区域环境污染,建立一体化环境准入和退出机制,加强环境污染治理.
交通运输部	2015 年	《船舶与港口污染防治专项行动实施方案(2015—2020 年)》	设立船舶排放控制区,要求靠港船舶使用低硫燃油或采取尾气处理、靠泊使用岸电等效替代,控制船舶大气污染物排放量.
	2016 年	《城市公共交通"十三五"发展纲要》	在北京、天津、石家庄等京津冀主要城市推进"公交都市"示范工程,鼓励采用公共交通及自行车等交通方式绿色低碳出行.
环保部、京津冀三省市	2016 年	《京津冀地区大气污染防治强化措施(2016—2017 年)》	限时完成农村散煤清洁化替代、燃煤锅炉窑炉"清零"任务;划定禁煤区和煤炭质量控制区;限时完成关停淘汰任务;提高城市管理水平;加强机动车污染治理;加大挥发性有机物(VOCs)综合治理力度.
环保部	2017 年	《京津冀及周边地区 2017 年大气污染防治工作方案》	全面调整产业结构,取缔"小散乱污"企业,推进取暖清洁能源使用;加强工业大气污染综合治理;实施工业企业采暖季错峰生产;严格控制机动车排放.

此外,本文对研究区 $PM_{2.5}$空间分布分析发现,遥感反演估算得到的 $PM_{2.5}$结果[21-23]与利用监测站数据插值得到的 $PM_{2.5}$结果相比,二者在空间分布趋势上相似,但数值上相差较大,主要受反演算法影响. 如,使用普通回归模型反演京津冀高污染区 $PM_{2.5}$浓度会在数值上产生很大误差,秋、冬季体现尤为显著. 因此利用监测数据进行空间插值得到的数值结果更为准确,但相比而言遥感反演 AOD 结果的空间连续性及可视化效果更好[21-24]. 因此,在对 $PM_{2.5}$空间分布情况进行展示与分析时,可进一步结合遥感反演与地面监测二者优势开展研究.

4 结论与建议

4.1 结论

本文基于 2014—2017 年京津冀地区 $PM_{2.5}$站点监测数据,统计获得不同时间尺度下研究区 $PM_{2.5}$浓度的变化特征,利用 ArcGIS、OpenGeoda 空间分析软件的数理统计、空间插值和 Moran's *I* 工具获得其

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

空间分布信息，进而综合分析 $PM_{2.5}$ 污染现状及空间分异特征，结果表明:

(1) 时间上，$PM_{2.5}$ 季均值与月均值呈连续 U 型起伏变化，冬季高夏季低，春秋居中; 日均值表现为峰、谷值交替变化，每日最低值出现在下午 16 点左右，夏季整体浓度偏低.

(2) 空间上，南高北低，京津冀中南部城市 $PM_{2.5}$ 浓度远高于北部城市. 随时间推移，高浓度值中心逐渐向南转移，由张家口、承德、秦皇岛等低浓度城市向南过渡到邯郸、邢台、石家庄等高浓度地区(尤以秋冬季最为明显)，最终形成以石家庄为高值中心向外辐射降低的阶梯式分布模式.

(3) 空间分布差异较大，全局 Moran´s *I* 均大于 0 且接近 1，且通过 99.9% 的置信水平检验知，$PM_{2.5}$ 具有显著的空间自相关性和聚类特征，表现为 $PM_{2.5}$ 空气污染的区域关联性，即某地区 $PM_{2.5}$ 浓度值对其周边地区 $PM_{2.5}$ 浓度大小影响较大. 如，京津冀中南部城市 $PM_{2.5}$ 浓度呈现高值集聚，北部城市 $PM_{2.5}$ 浓度呈低值集聚.

4.2　建议

文章分析研究 2014—2017 年京津冀地区 $PM_{2.5}$ 污染状况及时空分布信息，以期为京津冀地区空气质量区域联合治理提供科学借鉴基础. 但数据获取方面，国控监测站点一般分布于城区、城郊等地，今后的研究需要进一步结合遥感气溶胶反演 $PM_{2.5}$ 等方法，在提高近地面 $PM_{2.5}$ 浓度精度的基础上获得分布连续的面状数据，获得更加符合实际的 $PM_{2.5}$ 时空分布信息.

此外，结合近年来京津冀地区环境保护政策的颁布情况，以及本文分析结果可知，相关政策的合理制定与严格实施，对京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度变化影响较大. 表明政府可以通过人为治理的方式在一定程度上降低区域 $PM_{2.5}$ 浓度，进而保护空气质量. 因此，建立健全京津冀区域联防联控协作机制是当前阶段控制空气污染的有效手段和方式.

参 考 文 献

[1] 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.

[2] CHAN C K，YAO X. Air pollution in mega cities in China[J]. Atmospheric Environment，2008，42(1)：1－42.

[3] 曹军骥. $PM_{2.5}$ 与环境[M]. 北京: 科学出版社，2014：65－72.

[4] 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.

[5] 田欣，赵文吉，崔梦莹，等. 近地层大气颗粒物垂直分布特征: 以北京某高校为例[J]. 首都师范大学学报(自然科学版)，2018，39(1)：89－94.

[6] 谢鹏，刘晓云，刘兆荣，等. 我国人群大气颗粒物污染暴露反应关系的研究[J]. 中国环境科学，2009，29(10)：1034－1040.

[7] BELLM L，EBISUK，BELANGERK. Ambient air pollution and low birth weight in Connecticut and Massachusetts[J]. Environmental Health Perspectives，2007，115(7)：1118－1124.

[8] KANH，LONDONS J，CHENGG et al. Season，sex，age，and education as modifiers of the effects of outdoor air pollution on daily mortality in Shanghai，China：the public health and air pollution in Asia (PAPA) Study[J]. Environmental Health Perspectives，2008，116(9)：1183－1188.

[9] 吴健生，王茜. 基于 AOD 数据反演地面 $PM_{2.5}$ 浓度研究进展[J]. 环境科学与技术，2017，40(8)：68－76.

[10] LEE H J，LIUY，COULLB A，et al. A novel calibration approach of MODIS AOD data to predict $PM_{2.5}$ concentrations[J]. Atmospheric Chemistry and Physics，2011，11(15)：7991－8002.

[11] 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.

[12] 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.

[13] LEE S J，SERRE M，van DONKELAAR A，et al. Comparison of geostatistical interpolation and remote sensing techniques for estimating long-term exposure to ambient $PM_{2.5}$ concentrations across the Continental United States[J]. Environmental Health Perspectives，2012，120(12)：1727－1732.

[14] 赵文慧，宫辉力，赵文吉，等. 基于地统计学的北京市可吸入颗粒物时空变异性及气象因素分析[J]. 环境科学

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

学报,2010,30(11):2154 -2163.
[15] 靳国栋,刘衍聪,牛文杰. 距离加权反比插值法和克里金插值法的比较[J]. 长春工业大学学报(自然科学版),2003,24(3):53 -57.
[16] 杨兴川,赵文吉,熊秋林,等. 2016 年京津冀地区 $PM_{2.5}$ 时空分布特征及其与气象因素的关系[J]. 生态环境学报,2017,26(10):1747 -1754.
[17] MORANP A P. The interpretation of statistical maps[J]. Journal of the Royal Statistical Society,1948,10(2):243 -251.
[18] JIN F,LEE L F. On the bootstrap for Moran´s *I* test for spatial dependence[J]. Journal of Econometrics,2015,184(2):295 -314.
[19] 廖晓农,张小玲,王迎春,等. 北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析[J]. 环境科学,2014,35(6):2031 -2044.
[20] 张淑平,韩立建,周伟奇,等. 冬季 $PM_{2.5}$ 的气象影响因素解析[J]. 生态学报,2016,36(24):7897 -7907.
[21] 张云芝. 基于地面监测和遥感反演的京津冀地区 $PM_{2.5}$ 时空分布研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2016.
[22] 李丽娟. 基于卫星遥感的京津冀地区 $PM_{2.5}$ 反演研究[D]. 北京:中国地质大学,2017.
[23] 王旭. 京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度的遥感反演方法研究[D]. 石家庄:河北师范大学,2016.
[24] 陈辉,厉青,王中挺,等. 利用 MODIS 资料监测京津冀地区近地面 $PM_{2.5}$ 方法研究[J]. 气象与环境学报,2014(5):27 -37.

Spatial – temporal Characteristics of the $PM_{2.5}$ in Beijing – Tianjin – Hebei Region

CHENG Rui[1,2] XU Tiantian[2,3] ZHU Lin[1,2,3] ZHENG Liping[2,3] LI Huijun[1,2]

(1. College of Geospatial Information Science and Technology, Capital Normal University, Beijing 100048;
2. Laboratory Cultivation Base of Environment Process and Digital Simulation, Beijing 100048;
3. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048)

Abstract: Air pollution has become a global issue, which is also the major challenge of air quality in China. This paper analyzed the spatial-temporal characteristics of $PM_{2.5}$ using mathematical statistics methods and spatial analysis tools, based on the collected $PM_{2.5}$ data that obtained from the monitoring stations of 13 cities in BTH region from June 2014 to August 2017. Results showed: (1) The concentration of $PM_{2.5}$ was high in winter, low in summer and at a medium level in spring and autumn. The continuous U-shape distributions were observed both in the monthly and seasonal average of $PM_{2.5}$ concentration. The daily average of $PM_{2.5}$ concentration changed alternately from peak to valley, with the lowest value appearing at about 16:00 pm. (2) The spatial distribution of $PM_{2.5}$ concentration was quite heterogeneous. The concentrations of $PM_{2.5}$ in the central and southern cities were significantly higher than those in the northern part. And the $PM_{2.5}$ concentrations had spatial autocorrelation and clustering characteristics, which reflecting the regional correlation of air pollution. (3) The concentrations of $PM_{2.5}$ at different time scales all showed a high concentration in the south and low in the north. The areas with high $PM_{2.5}$ concentration decreased year by year and shifted to the south. Especially, the $PM_{2.5}$ concentrations showed a spatial pattern that high value concentrated in Shijiazhuang region and gradually decreasing outward in autumn and winter.

Keywords: Beijing-Tianjin-Hebei region; $PM_{2.5}$; monitoring data; spatial-temporal characteristics

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net