

· 热点关注 ·

【编者按】《2018全球空气状况报告》显示,全世界95%的人口呼吸着不健康的空气,大气污染已成为威胁人类健康的最大风险因素之一,其中环境颗粒物PM_{2.5}是空气污染的一个组分,被列为早亡的第六大风险因素。2016年全球范围内因接触PM_{2.5}导致的死于心脏病、卒中、肺癌、慢性肺疾病及呼吸道感染等疾病的人数达410万,严重威胁人类健康。刘婕等分析了我国大气污染的“重灾区”——京津冀地区13个城市PM_{2.5}浓度的时空分布特征,并将2016年作为时间对照,旨在动态掌握区域性PM_{2.5}浓度时空分布特征、区域差异及变化趋势,为制定合理的PM_{2.5}污染控制战略提供信息支持。敬请关注!

2018年京津冀地区PM_{2.5}浓度的时空分布特征

刘婕, 吕祎然, 郝舒欣, 刘悦, 徐东群

【摘要】目的 分析2018年京津冀地区PM_{2.5}浓度的时空分布特征。方法 2018年京津冀地区PM_{2.5}浓度数据来源于中国环境监测总站(<http://www.cnemc.cn/>)发布的空气质量实时监测数据,采用普通克里金插值法从年、季、月尺度上对2018年京津冀地区PM_{2.5}浓度进行插值,并将2016年京津冀地区PM_{2.5}浓度作为时间对照。结果 (1)2018年京津冀地区除承德市和张家口市外,其余11个城市PM_{2.5}年均浓度仍超过《环境空气质量标准》年均值限值,PM_{2.5}季均浓度由低到高依次为夏季、秋季、春季和冬季,PM_{2.5}月均浓度曲线趋向于“M”形。(2)2018年京津冀地区PM_{2.5}年均浓度整体呈北低南高趋势,11~12月及1~2月PM_{2.5}月均浓度差值较大,3~10月PM_{2.5}月均浓度差值较小。(3)与2016年相比,2018年京津冀地区13个城市PM_{2.5}年均浓度均有不同程度降低;2018年春季PM_{2.5}季均浓度无明显改变,但夏季、秋季、冬季PM_{2.5}季均浓度均降低;京津冀地区2016年PM_{2.5}月均浓度曲线趋向于“U”形,冬季PM_{2.5}月均浓度持续上升,而2018年仅3月和11月PM_{2.5}月均浓度偏高。结论 与2016年相比,2018年京津冀地区PM_{2.5}浓度不同程度降低,环境污染减轻,且PM_{2.5}浓度时空分布特征发生改变,因此应根据实际污染情况不断调整治理重点。

【关键词】 空气污染; PM_{2.5}浓度; 时空分布; 京津冀

【中图分类号】 R 12 【文献标识码】 A DOI: 10.3969/j.issn.1008-5971.2019.06.004

刘婕, 吕祎然, 郝舒欣, 等. 2018年京津冀地区PM_{2.5}浓度的时空分布特征[J]. 实用心脑血管病杂志, 2019, 27(6): 11-16. [www.syxnf.net]

LIU J, LYU Y R, HAO S X, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of PM_{2.5} concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018 [J]. Practical Journal of Cardiac Cerebral Pneumal and Vascular Disease, 2019, 27(6): 11-16.

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of PM_{2.5} Concentration in Beijing-Tianjin-Hebei Region in 2018

LIU Jie, LYU Yiran, HAO Shuxin, LIU Yue, XU Dongqun

National Institute of Environmental and Health Related Product Safety, Chinese Center for Disease Control and Prevention, 100021, China

Corresponding author: LIU Yue, E-mail: liuyue@nieh.chinacdc.cn

【Abstract】 Objective To analyze the spatial and temporal distribution characteristics of PM_{2.5} concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018. Methods Data of PM_{2.5} concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018 was collected from the real-time air quality monitoring data published by China National Environmental Monitoring Center (<http://www.cnemc.cn/>), ordinary Kriging was used to conduct the interpolation of PM_{2.5} concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018 according to annual, quarterly and monthly scale, respectively, taking PM_{2.5} concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2016 as the temporal control. Results (1) Except for Chengde and Zhangjiakou, annual mean PM_{2.5} concentrations in the other 11 cities in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018 were all over annual mean limit stated by Ambient Air Quality Standard, quarterly mean PM_{2.5} concentrations showed a low-to-high tread in the sequence of summer, autumn, spring and

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(21677136)

100021北京市, 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所

通信作者: 刘悦, E-mail: liuyue@nieh.chinacdc.cn

winter, while curve of monthly mean PM_{2.5} concentrations showed a M-shape tread. (2) Annual mean PM_{2.5} concentrations in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018 showed a north-low and south-high trend as a whole, the difference value of monthly mean PM_{2.5} concentration is relatively great large from November to December and January to February, respectively that is relatively little from March to October. (3) Compared with that in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2016, annual mean PM_{2.5} concentrations in the 13 cities in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018 decreased to some extent; quarterly mean PM_{2.5} concentrations in the 13 cities in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018 did not significantly changed in the spring but decreased in the summer, autumn and winter to varying degrees; curve of monthly mean PM_{2.5} concentrations showed a M-shape tread in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2016, with monthly mean PM_{2.5} concentrations continuously increased in the winter, while monthly mean PM_{2.5} concentrations only increased in March and November in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018. **Conclusion**

Compared with that in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2016, PM_{2.5} concentration decreased to some extent in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018, reminders that environmental pollution has been reduced with change of spatial and temporal distribution characteristics of PM_{2.5} concentration, thus we should endlessly adjust the governance focus according to actual pollution situation.

【 Key words 】 Air pollution; PM_{2.5} concentration; Spatial and temporal distribution; Beijing-Tianjin-Hebei

随着国民经济快速发展、城市化进程加速,近年来我国空气污染问题日益严重。2013年全国平均雾霾日数为1961年以来历史同期最多,影响人口数量约为6亿,其中仅一季度我国就出现11次大范围雾霾天气,20个省份出现持续性雾霾^[1]。大量研究表明,暴露环境空气污染物会引发严重的心血管疾病、呼吸系统疾病等^[2-4]。因此,动态掌握区域性PM_{2.5}浓度时空分布特征、区域差异及其变化趋势可为PM_{2.5}治理提供信息支持并有针对性地采取干预措施,以便更好地保护居民健康。

京津冀地区是我国的“首都经济圈”,包括北京市、天津市及河北省11个地级市,人口总数约为9000万,面积约为21.8万平方公里。近几年京津冀地区空气污染物排放呈现高度集中态势。《2018年全国生态环境质量简况》中的数据显示,全国范围内环境空气质量超标的监测城市占总监测城市的64.2%,其中京津冀地区有5个城市居全国169个空气质量相对较差的重点城市的前10位^[5]。由此可见,无论从污染发生频率还是严重程度而言,京津冀地区雾霾天气均较为突出,是我国大气污染的“重灾区”,因此研究京津冀地区PM_{2.5}污染现状对科学有效治理大气污染意义重大。本研究基于2018年京津冀地区PM_{2.5}监测数据,并以2016年为时间对照,旨在分析2018年京津冀地区PM_{2.5}浓度的时空分布特征,以期京津冀地区大气污染治理工作提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源 PM_{2.5}浓度数据来源于中国环境监测总站 (<http://www.cnemc.cn/>) 发布的空气质量实时监测数据,下载并记录北京市、天津市及河北省11个地级市的国家级自动监测站点的空气质量监测数据,数据单位为PM_{2.5}浓度的小时值。2013—2016年京津冀大部分地区PM_{2.5}浓度较高,其中2016年地面监测站点运行较为完善,数据缺失率较低,因此选取2016年京津冀地区PM_{2.5}浓度作为时间对照。2016、2018年京津冀地区各城市监测点个数见表1。

1.2 数据处理

1.2.1 月均值、季均值、年均值 应用数据库软件编程,计算每个空气质量监测站点2016、2018年PM_{2.5}浓度的月均值、

表1 2016、2018年京津冀地区监测点个数(个)

Table 1 Number of monitoring sites in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2016 and 2018

| 时间 | 北京市 | 天津市 | 石家庄市 | 唐山市 | 保定市 | 沧州市 | 承德市 | 邯郸市 | 衡水市 | 廊坊市 | 秦皇岛市 | 邢台市 | 张家口市 | 合计 |
|-------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|----|
| 2016年 | 12 | 19 | 8 | 6 | 6 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 84 |
| 2018年 | 12 | 15 | 8 | 6 | 6 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 79 |

季均值、年均值。根据《环境空气质量标准》(GB3095-2012)将京津冀地区13个城市归为二类环境功能区,规定其PM_{2.5}浓度年、日均限值分别为35 μg/m³、75 μg/m³^[6]。

1.2.2 空间插值 普通克里金插值法使用成本较低、适用范围较广、无明显时空局限性,且预测精度较高^[7-9],因此本研究在ArcGIS软件支持下采用普通克里金插值法从年、季、月尺度上对2018年京津冀地区PM_{2.5}浓度进行空间插值。

2 结果

2.1 2018年京津冀地区PM_{2.5}浓度时间分布特征

2.1.1 PM_{2.5}年均浓度时间分布 2018年京津冀地区PM_{2.5}年均浓度达标的城市仅承德市和张家口市,其中承德市PM_{2.5}年均浓度为31.95 μg/m³,张家口市PM_{2.5}年均浓度为31.63 μg/m³。PM_{2.5}年均浓度较高的5个城市依次为石家庄市、邯郸市、邢台市、保定市与衡水市,分别超过PM_{2.5}年均限值的99.5%、98.8%、98.2%、91.1%、75.6%(见图1),这些城市主要受工业及企业生产排放、机动车保有量高及冬季供暖原料燃烧排放影响较大。

2.1.2 PM_{2.5}季均浓度时间分布 京津冀地区2018年春季(3、4、5月)PM_{2.5}浓度波动范围为35.25~85.82 μg/m³,季均浓度为59.58 μg/m³;夏季(6、7、8月)PM_{2.5}浓度波动范围为17.02~50.08 μg/m³,季均浓度为37.21 μg/m³;秋季(9、10、11月)PM_{2.5}浓度波动范围为23.46~78.24 μg/m³,季均浓度为53.62 μg/m³;冬季(12、1、2月)PM_{2.5}浓度波动范围为26.71~112.74 μg/m³,季均浓度为68.91 μg/m³。京津冀地区PM_{2.5}季均浓度由低到高依次为夏季、秋季、春季、冬季,见图2。

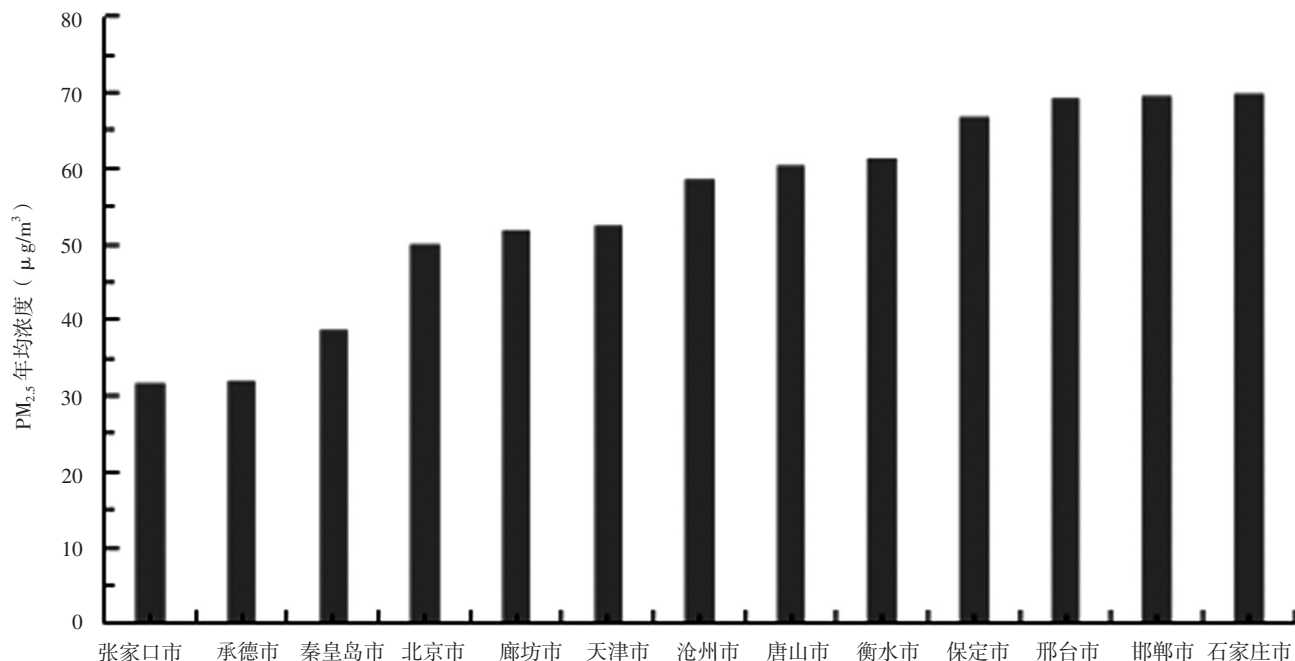


图1 2018年京津冀地区PM_{2.5}年均浓度
Figure 1 Average PM_{2.5}-year concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018

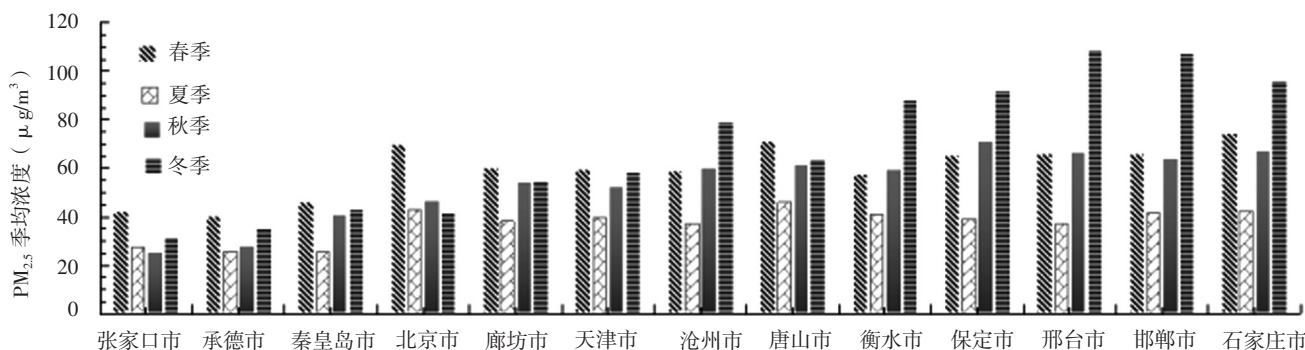


图2 2018年京津冀地区PM_{2.5}季均浓度
Figure 2 Average PM_{2.5}-quarterly concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018

2.1.3 PM_{2.5}月均浓度时间分布 2018年京津冀地区PM_{2.5}月均浓度曲线趋向于“M”形,其中3月和11月PM_{2.5}月均浓度偏高,见图3。

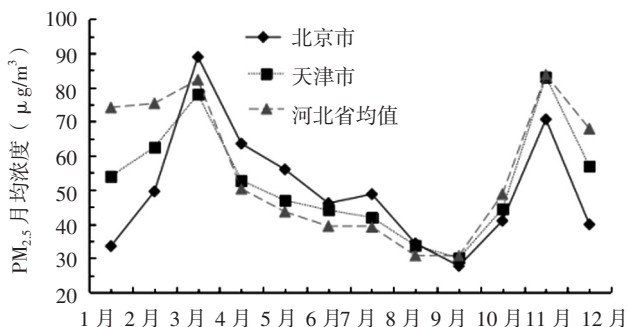


图3 2018年京津冀地区PM_{2.5}月均浓度
Figure 3 Average PM_{2.5}-monthly concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018

2.2 2018年京津冀地区PM_{2.5}浓度空间分布特征

2.2.1 PM_{2.5}年均浓度空间分布 2018年京津冀地区PM_{2.5}年均浓度整体呈北低南高趋势,就城市PM_{2.5}年均浓度而言,京津冀地区可划分为以下4个部分:处于西北部生态涵养区的张家口市、承德市、秦皇岛市PM_{2.5}年均浓度较低,空气质量较好;其次是处于中心地带的北京市、廊坊市、天津市PM_{2.5}年均浓度为50 µg/m³左右;再者为环绕在中心城市外的沧州市、唐山市、衡水市PM_{2.5}年均浓度为60 µg/m³左右,空气污染较为严重;最后是保定市、邢台市、邯郸市和石家庄市,处于PM_{2.5}年均浓度最高区域,除保定市外其余3个城市PM_{2.5}年均浓度接近70 µg/m³,空气污染严重,见图4。

2.2.2 PM_{2.5}季均浓度空间分布 2018年京津冀地区各城市PM_{2.5}季均浓度最高的季节均为冬季,最低的季节是夏季;冬季除北部污染较轻的张家口市、承德市、秦皇岛市外,其余城市PM_{2.5}季均浓度分布较为均匀;春季、秋季PM_{2.5}季均浓

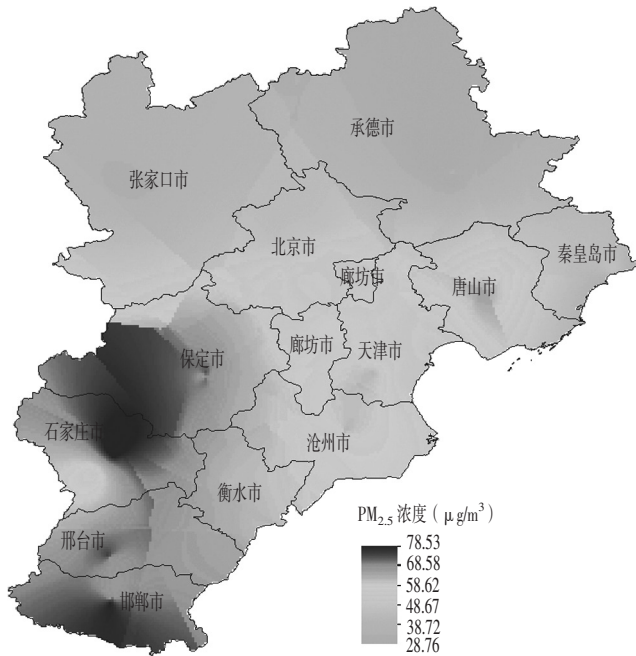


图 4 2018 年京津冀地区 PM_{2.5} 年均浓度空间分布

Figure 4 Spatial distribution of PM_{2.5}-year concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018

度空间分布与 PM_{2.5} 年均浓度空间分布相似，见图 5。

2.2.3 PM_{2.5} 月均浓度空间分布 2018 年京津冀地区 11~12 月及 1~2 月 PM_{2.5} 月均浓度差值较大，南部 PM_{2.5} 浓度较高地区 PM_{2.5} 月均浓度是北部 PM_{2.5} 浓度较低地区的 4 倍以上；3~10 月 PM_{2.5} 月均浓度差值较小。3~7 月北京市、天津市及石家庄市 PM_{2.5} 月均浓度与其他城市相比较高，12 月及 1~2 月北京市、天津市、廊坊市 PM_{2.5} 月均浓度与其他城市相比较低，见图 6。

2.3 2018 年京津冀地区 PM_{2.5} 浓度与 2016 年对比

2.3.1 PM_{2.5} 年均浓度 与 2016 年相比，京津冀地区各城市 2018 年 PM_{2.5} 年均浓度均有不同程度降低，其中降幅较大的城市有北京市、衡水市、保定市、石家庄市、天津市，降幅分别为 30.7%、29.0%、27.4%、25.6%、24.3%；年达标天数增加较多的城市为衡水市、邢台市、保定市、北京市、石家庄市，年达标天数增幅分别为 50.5%、30.3%、28.9%、

24.2%、20.2%。

2.3.2 PM_{2.5} 季均浓度 与 2016 年相比，京津冀地区 2018 年春季 PM_{2.5} 季均浓度无明显改变，夏季、秋季、冬季 PM_{2.5} 季均浓度分别降低 23.3%、27.2%、29.0%；秋季降幅较大的城市有石家庄市（43.2%）、北京市（41.1%），冬季降幅较大的城市有北京市（48.8%）、廊坊市（42.9%）；季达标天数增加较多的城市有衡水市（夏季达标天数增多 58.6%，冬季达标天数增多 113.0%）、保定市（秋季达标天数增多 62.2%）、邢台市（秋季达标天数增多 60.0%，冬季达标天数增多 62.5%）、石家庄市（秋季达标天数增多 93.9%）。

2.3.3 PM_{2.5} 月均浓度 2016 年京津冀地区 PM_{2.5} 月均浓度曲线趋向于“U”形，其中 1~3 月 PM_{2.5} 月均浓度逐渐降低、4~9 月 PM_{2.5} 月均浓度保持低值稳定、9~12 月 PM_{2.5} 月均浓度逐渐升高。2018 年京津冀地区 PM_{2.5} 月均浓度曲线趋向于“M”形，仅 3 月和 11 月 PM_{2.5} 月均浓度偏高。

3 讨论

目前，国内外学者对 PM_{2.5} 浓度的时空分布特征研究成果丰富，但针对京津冀地区的研究时间主要集中于 2014—2016 年，如周磊等^[10]借助空间数据挖掘法分析了京津冀及其周边区域 2013 年典型污染事件中 PM_{2.5} 的时空分布特征，结果显示在 PM_{2.5} 污染事件统计上存在一定污染顺序，空间上京津冀及其周边地区成河南省（山东省）-河北省-北京市（天津市）一线的带状分布特征。

本研究基于国家空气质量自动监测位点 2016、2018 年全年实时监测数据对京津冀地区 13 个城市 PM_{2.5} 时空分布特征进行分析，结果显示，2018 年京津冀地区除承德市和张家口市外，其余 11 个城市 PM_{2.5} 年均浓度均超过《环境空气质量标准》年均限值，其中石家庄市、邯郸市污染最为严重，分别超过平均限值的 99.5%、98.8%。不同季节 PM_{2.5} 季均浓度空间分布虽有很大差异，但总体上京津冀地区南部城市高于北部城市，与既往研究结果结果一致^[11]，PM_{2.5} 季均浓度由低到高依次为夏季、秋季、春季、冬季，与徐敬等^[12]研究结果相一致，分析其原因主要如下：京津冀地区冬季由于气温低、植被覆盖降低，近地面大气层处于稳定状态，逆温强度大，不利于污染物扩散且进入采暖期，排放较多等导致 PM_{2.5} 浓度升高；春季多风少雨、气候干燥，具备扬尘条件，

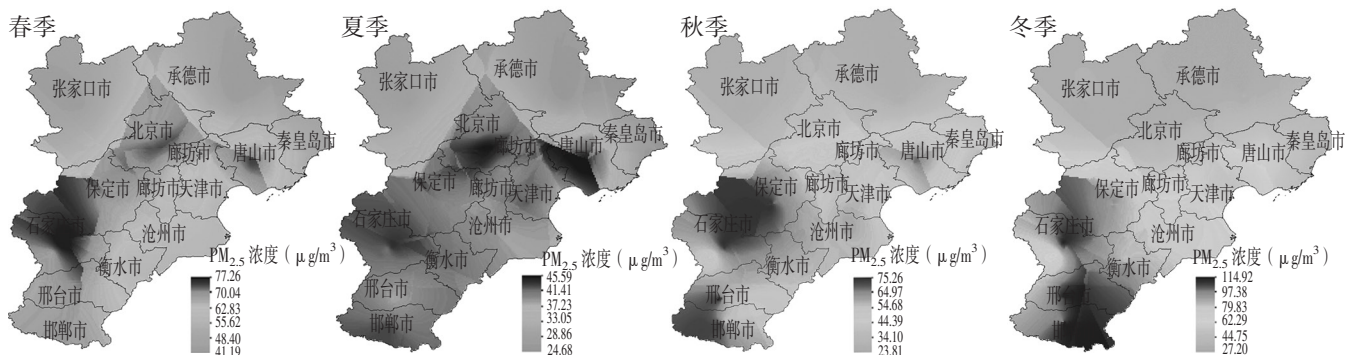


图 5 2018 年京津冀地区 PM_{2.5} 季均浓度空间分布

Figure 5 Spatial distribution of PM_{2.5}-quarterly concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018

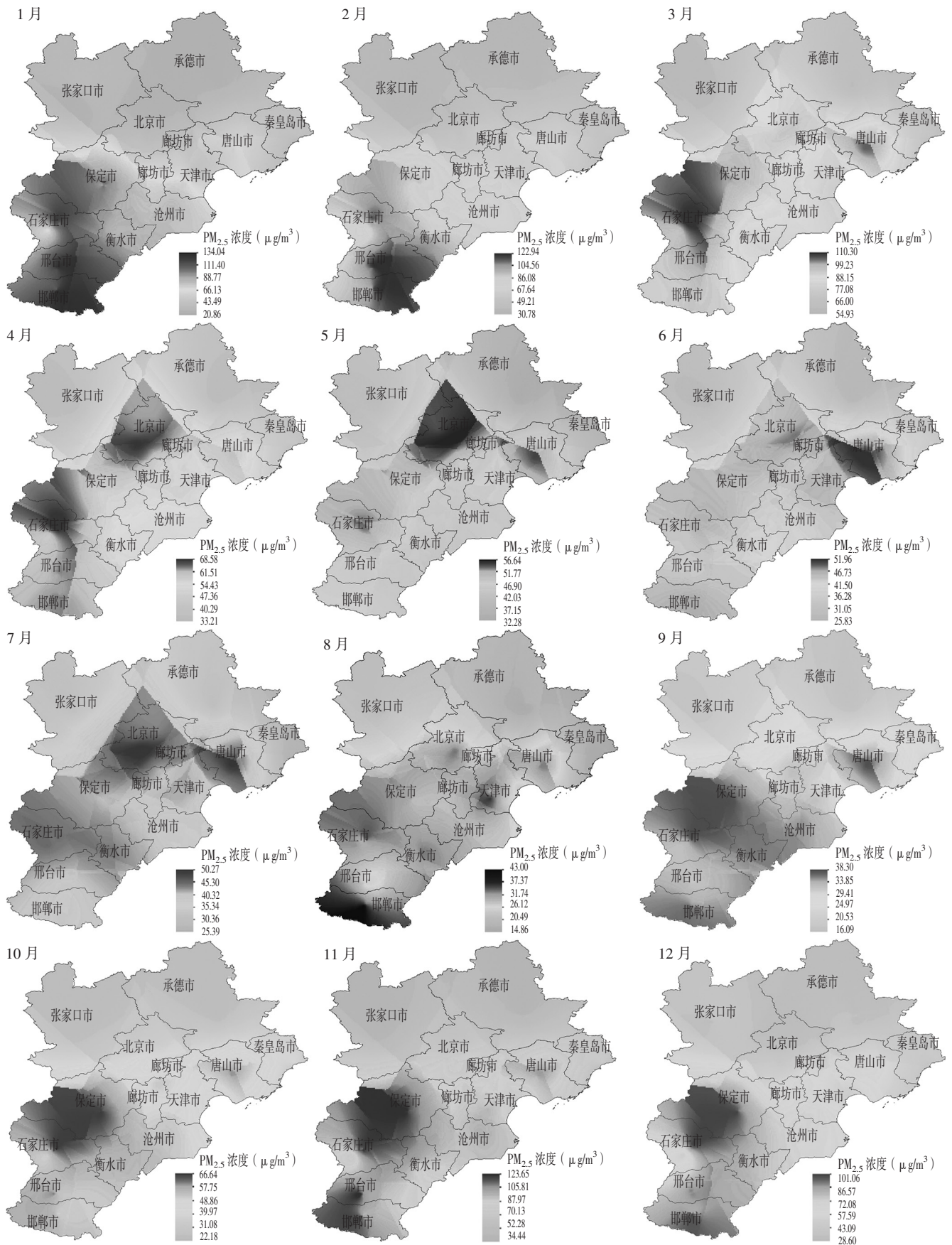


图6 2018年京津冀地区PM_{2.5}月均浓度空间分布

Figure 6 Spatial distribution of PM_{2.5}- monthly concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2018

因此PM_{2.5}浓度较高主要受降水量小、沙尘天气频发影响较大;夏季气温高,降水丰富,日照时数长并易于空气污染物扩散,因此PM_{2.5}浓度降低;秋季空气湿度大、风速低且气温偏高、大雾天气发生频率高,不利于PM_{2.5}扩散,且秋季未进入供暖季,燃煤排放等导致PM_{2.5}浓度升高^[13]。2018年PM_{2.5}月均浓度曲线趋向于“M”形,浓度较高的两个峰值月份分别是3月和11月,分析其原因主要受气象影响,2018年3月京津冀地区较常年同期气温偏高,地表土壤基本解冻,降水量极低,气象条件总体有利于沙尘天气的形成;11月京津冀地区大气扩散条件不利,同时采暖季开始,导致污染物逐步累积。3~7月,12月及1~2月部分城市PM_{2.5}浓度空间分布与该地区车辆保有量及主要区域禁煤有较强关系。

此外,本研究还将2016年作为时间对照,结果显示,2018年京津冀地区13个城市PM_{2.5}年均浓度均有不同程度降低,且污染较严重地区PM_{2.5}年均浓度改善成果更为突出;京津冀地区2016年春季与2018年春季PM_{2.5}季均浓度基本相同,由此可见春季PM_{2.5}浓度受季节因素影响较大;而2018年夏季、秋季、冬季PM_{2.5}月均浓度较2016年分别降低23.3%、27.2%、29.0%,提示秋、冬季PM_{2.5}空气污染治理效果更为明显;京津冀地区2016年PM_{2.5}月均浓度曲线趋向于“U”形,冬季PM_{2.5}月均浓度持续上升,而2018年京津冀地区PM_{2.5}月均浓度曲线趋向于“M”形,仅3月和11月PM_{2.5}月均浓度偏高。

分析导致京津冀地区2018年PM_{2.5}浓度时空分布特征变化的主要原因可能如下:(1)气象。(2)污染源:在城市建设和国民经济飞速发展的大环境下,京津冀地区污染排放量超过环境容量是大气重污染形成的主因;而在大气污染治理过程中,随着能源结构、产业结构不断调整优化,PM_{2.5}的来源也在发生变化。2018年发布的北京市PM_{2.5}来源解析结果显示,北京市2017年PM_{2.5}来源排名如下:移动源(占45%),扬尘源(占16%),工业源(占12%),生活源(占12%),燃煤源(占3%),农业及自然源等(占12%),这与北京市2014年PM_{2.5}来源排名差别较大,提示随着污染源不断被治理、改变,实际治理的重点应不断调整。(3)治理办法:近年来随着《大气污染防治行动计划》《关于京津冀大气污染传输通道城市执行大气污染物特别排放限制公告》《京津冀及周边地区2017—2018年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》等一系列文件的颁布,大气污染物网格化进一步普及、细化,针对污染源进行靶向治理,以达到源头防控的治污目标,而经过近年来大规模高强度治理,环境效益持续释放,叠加区域层面协同减排,京津冀地区空气质量总体改善、趋势向好^[14]。

综上所述,与2016年相比,2018年京津冀地区PM_{2.5}浓度不同程度降低,环境污染减轻,且PM_{2.5}浓度的时空分布特征发生改变,因此应根据实际污染情况不断调整治理重点。

参考文献

[1] LIM S S, VOS T, FLAXMAN A D, et al. A comparative risk

assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990—2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010[J]. Lancet, 2012, 380 (9859): 2224—2260. DOI: 10.1016/S0140-6736(12)61766-8.

[2] CHEN L, SHI M S, LI S H, et al. Quantifying public health benefits of environmental strategy of PM_{2.5} air quality management in Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. J Environ Sci, 2017, 57 (7): 33-40. DOI: 10.1016/j.jes.2016.11.014.

[3] YOUNG M T, SANDLER D P, DEROO L A, et al. Ambient air pollution exposure and incident adult asthma in a nationwide cohort of U.S. women [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2014, 190 (8): 914-921. DOI: 10.1164/rccm.201403-0525OC.

[4] LEE K K, MILLER M R, SHAH A S V. Air pollution and stroke [J]. J Stroke, 2018, 20 (1): 2-11. DOI: 10.5853/jos.2017.02894

[5] 生态环境部. 2018年全国生态环境质量简况 [EB/OL]. (2019-03-18) [2019-04-12]. http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk15/201903/t20190318_696301.html.

[6] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3095—2012 环境空气质量标准 [S].

[7] LLOYD C D, ATKINSON P M. Increased accuracy of geostatistical prediction of nitrogen dioxide in the United Kingdom with secondary data [J]. Int J Appl Earth Obs Geoinformation, 2004, 5 (4): 293-305. DOI: 10.1016/j.jag.2004.07.004.

[8] 王吉祥, 杨江宁, 张冬有. 黑龙江省空气负离子浓度空间分布预测 [J]. 湖北农业科学, 2018, 57 (5): 24-29. DOI: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2018.05.007.

[9] XU G, JIAO L M, ZHAO S L, et al. Spatial and Temporal Variability of PM_{2.5} Concentration in China [J]. 武汉大学自然科学学报: 英文版, 2016, 21 (4): 358-368. DOI: 10.1007/s11859-016-1182-5.

[10] 史海霞. 我国城市居民PM_{2.5}减排行为影响因素及政策干预研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.

[11] 温佳薇, 贺军亮, 赵晴, 等. 京津冀地区PM_{2.5}的时空效应研究 [J]. 环境污染与防治, 2018, 40 (9): 1033-1038, 1043. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.09.016.

[12] 徐敬, 丁国安, 颜鹏, 等. 北京地区PM_{2.5}的成分特征及来源分析 [J]. 应用气象学报, 2007, 18 (5): 645-654. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2007.05.009.

[13] 王嫣然, 张学霞, 赵静瑶, 等. 北京地区不同季节PM_{2.5}和PM10浓度对地面气象因素的响应 [J]. 中国环境监测, 2017, 33 (2): 34-41. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2017.02.06.

[14] 周磊, 武建军, 贾瑞静, 等. 京津冀PM_{2.5}时空分布特征及其污染风险因素 [J]. 环境科学研究, 2016, 29 (4): 483-493. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2016.04.03.

(收稿日期: 2019-03-16; 修回日期: 2019-06-18)

(本文编辑: 谢武英)