

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2022.0421

陈彦宁, 张金谱, 裴成磊, 等. 2022. 2016—2020 年广州市 PM_{2.5} 时空分布特征[J]. 环境科学学报, 42(12): 273-285

CHEN Yanning, ZHANG Jinpu, PEI Chenglei, et al. 2022. Spatial and temporal distribution characteristics of PM_{2.5} in Guangzhou from 2016 to 2020[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 42(12): 273-285

2016—2020 年广州市 PM_{2.5} 时空分布特征

陈彦宁¹, 张金谱^{1,2,3,*}, 裴成磊^{1,2,3}, 邱晓暖¹, 陈漾¹

1. 广东省广州生态环境监测中心站, 广州 510006
2. 中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广东省环境资源利用与保护重点实验室, 广州 510640
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 对大气污染物进行时空分布特征研究是开展大气污染防治的关键技术支撑. 本研究基于广州市 52 个城市环境空气质量监测站点数据, 采用系统聚类法、经验正交函数 (EOF) 等方法分析了 2016—2020 年广州市 PM_{2.5} 浓度的时空分布特征. 结果表明: ① 2016—2020 年广州市 PM_{2.5} 污染改善显著, PM_{2.5} 年均浓度从 35.9 μg·m⁻³ 下降至 23.0 μg·m⁻³, 达标比例由 96.2% 上升至 100%; PM_{2.5} 干季平均浓度为湿季的 1.54 倍, 国控点超标天数为湿季的 10.5 倍; PM_{2.5} 浓度日变化曲线峰谷浓度差由 7.5 μg·m⁻³ 下降至 3.9 μg·m⁻³, 日变化幅度趋于平缓. ② 广州市 PM_{2.5} 浓度最高值区主要分布在东西两侧, 高值区域范围逐年减小, 全市 PM_{2.5} 浓度分布趋于均匀; 采用系统聚类法可将广州市 PM_{2.5} 分成北部、中北部、南部、中南部 4 个污染区, 其中, 北部区 PM_{2.5} 浓度下降率仅为其他污染区的 1/2, 推测其 PM_{2.5} 浓度下降可能更多地由区域背景浓度的下降贡献; EOF 分解前 3 模态累积方差贡献率达 93%, 分别可表征 PM_{2.5} 总体污染程度、在南北方向上的区域输送特征及由外围区域向中心城区聚集的污染特征.

关键词: PM_{2.5}; 广州; 时空分布; 系统聚类法; 经验正交函数 (EOF)

文章编号: 0253-2468(2022)12-0273-13 中图分类号: X513 文献标识码: A

Spatial and temporal distribution characteristics of PM_{2.5} in Guangzhou from 2016 to 2020

CHEN Yanning¹, ZHANG Jinpu^{1,2,3,*}, PEI Chenglei^{1,2,3}, QIU Xiaonuan¹, CHEN Yang¹

1. Guangzhou Sub-branch of Guangdong Ecological and Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510006
2. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Provincial Key Laboratory of Environmental Protection and Resources Utilization, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: Research on the spatial and temporal distribution characteristics of air pollutants is the key technical support for air pollution prevention and control. Based on the data of 52 urban ambient air quality monitoring stations in Guangzhou, this study used systematic clustering and empirical orthogonal function (EOF) methods to analyze the temporal and spatial distribution characteristics of PM_{2.5}. The results show that: ① the PM_{2.5} pollution in Guangzhou was significantly improved from 2016 to 2020, and the annual average concentration of PM_{2.5} decreased from 35.9 μg·m⁻³ to 23.0 μg·m⁻³. The percentage of attaining the national ambient air quality standard has increased from 96.2% to 100%. The average concentration of PM_{2.5} in the dry season is 1.54 times higher than that of the wet season, and the number of days exceeding the national ambient air quality standard at the national control sites is 10.5 times higher than that in the wet season. The peak-to-valley concentration difference of the diurnal variation curve of PM_{2.5} concentration decreased from 7.5 μg·m⁻³ to 3.9 μg·m⁻³, and the diurnal variations tended to be gentle. ② The highest PM_{2.5} concentration areas in Guangzhou are mainly distributed in the east and west, and the range of high-value areas decreases year by year, and the distribution of PM_{2.5} concentration in the city tends to be even. Using the systematic clustering method, PM_{2.5} in Guangzhou city can be divided into four pollution zones: northern, north-central, southern and south-central. The decrease rate of PM_{2.5} concentration in the northern zone is only half of that in other pollution zones, and it is presumed that the decrease of its PM_{2.5} concentration may be more contributed by the decrease of regional background concentration. The cumulative variance contribution of the first three modes of EOF decomposition reaches 93%, which can characterize the overall PM_{2.5} pollution level, the regional transport characteristics in the north-south direction and the pollution characteristics of PM_{2.5} gathering from the peripheral areas to

收稿日期: 2022-09-02 修回日期: 2022-11-01 录用日期: 2022-11-15

基金项目: 广东省科技计划项目(科技创新平台类)(No.2019B121201002); 广州市科技计划项目(No.202002020065, 202102080679)

作者简介: 陈彦宁(1966—), 男, E-mail: 13600006321@139.com; * 责任作者, E-mail: jinpu@hotmail.com

the central city, respectively.

Keywords: PM_{2.5}; Guangzhou; spatial and temporal distribution; systematic clustering method; empirical orthogonal function(EOF)

1 引言(Introduction)

PM_{2.5}不仅直接影响大气能见度(吴兑等,2012a),还会对人体健康造成多方面的危害(Vert *et al.*,2017; Chi *et al.*,2019;Zeng *et al.*,2020).在我国,与PM_{2.5}污染密切相关的霾日自20世纪80年代起明显增加(吴兑等,2010),珠三角地区表现尤为显著(吴兑等,2006).作为珠三角核心城市,广州市的PM_{2.5}污染同样不容忽视(吴兑等,2007).据吴兑等(2012a)对1951—2010年广州市灰霾天数的回顾分析,结合近20多年来不同学者对广州市大气颗粒物浓度的监测研究(陈昞等,1999;于群等,2010;李婷等,2013;黄俊等,2020),可推知广州市的PM_{2.5}污染状况自20世纪80年代起大致经历了3次大的波动,在21世纪初达到第3个峰值后至今基本呈下降趋势.在国内,广州市PM_{2.5}污染的相关科研工作开展较早(吴兑等,1994;Wei *et al.*,1999),经过多年的研究和探索,众多学者已在广州市PM_{2.5}的污染特征(朱倩茹等,2013;Mo *et al.*,2021)、光学特性(陈义珍等,2010;Chen *et al.*,2016)、粒径分布(吴兑等,1994;黄祖照等,2012)、化学组成(Lai *et al.*,2016;刘叶新等,2019)、垂直分布(王宇骏等,2016;Zhou *et al.*,2020)、污染解析(何俊杰等,2014;Cui *et al.*,2015)、气象影响(吴兑等,2012b;廖碧婷等,2018)、区域传输(申冲等,2012;刘文彬等,2013)及健康效应(Tie *et al.*,2009;Yu *et al.*,2011)等多个方面获得了大量研究成果,为全面认识广州市PM_{2.5}污染规律提供了丰富的资料.

面对当前城市PM_{2.5}污染防治工作不断趋于精细化的迫切需求,充分掌握PM_{2.5}污染的时空分布特征成为开展PM_{2.5}精准污染防治的基础工作之一.但我国大规模的PM_{2.5}自动监测于2013年才正式开展,此前国内的PM_{2.5}相关研究大多基于实验和试点监测,多站点、长时间序列的PM_{2.5}浓度分布研究较为缺乏(张殷俊等,2015).随着近年全国各地空气质量自动监测站点数量的迅速增长,已有越来越多的区域具备通过密集布设的监测站点数据获得高分辨率的PM_{2.5}浓度时空分布的条件.如王占山等(2015)利用2013年北京市35个自动空气质量监测子站的监测数据分析了PM_{2.5}的时空分布特征以及与前体物和大气氧化性的相关性关系;郭家瑜等(2017)利用2015年北京12个环境监测站点的常规污染物浓度数据和气象数据综合研究了北京2015年大气细颗粒物的空间变化特征及分布规律;陈菁等(2021)分析了2014—2020年北京市34个大气环境监测站的PM_{2.5}和O₃浓度变化特征,并评估了大气污染防治的健康效应;潘润西等(2018)基于广西14个城市的监测数据,采用EOF(经验正交函数)分析和后向轨迹聚类分析方法表征了广西PM_{2.5}的时空分布模态,分析了不同污染过程的天气类型和空气质量变化特点.蒋超等(2018)基于2013—2016年珠三角55个空气质量监测站PM_{2.5}实时浓度监测数据,采用六级分级统计、空间插值方法对珠三角地区PM_{2.5}分布时空演变进行了研究,表明珠三角PM_{2.5}浓度空间分布模式呈“西北-东南”三级递减分异特征.然而,基于多站点、长时间序列的广州市PM_{2.5}浓度时空分布特征研究仍较为缺乏,因此,本研究拟基于广州市52个城市环境空气质量监测站点数据,采用系统聚类法、EOF(经验正交函数)等方法分析2016—2020年广州市PM_{2.5}浓度的时空分布特征,对“十三五”期间(2016—2020年)广州市PM_{2.5}浓度变化规律进行总结,以期为广州市PM_{2.5}污染防治工作提供技术支撑.

2 资料与研究方法(Materials and methods)

2.1 数据

本研究所用的2016—2020年逐时PM_{2.5}浓度数据均为广州市环境空气质量自动监测网络的监测数据.2016—2020年,该监测网络由52个环境空气质量自动监测站点组成,其中包括11个国控点,因帽峰山作为国控背景点不纳入全市均值统计,故本研究所涉及的广州市全市PM_{2.5}平均浓度及国控点相关统计均以10个国控评价点(荔湾西村、海珠宝岗、公园前、天河体育西、越秀麓湖、海珠赤沙、黄埔大沙地、番禺市桥、花都新华、黄埔镇龙)计算(图1).

2.2 系统聚类法

本研究采用系统聚类法对广州市PM_{2.5}进行污染区域划分,其基本思路如下(王志铭等,2012):①将所有

样本各自视作一类;②计算样本之间的距离;③把距离最小的样本合成一类,然后用新合成的类别代替原来的样本数据;④重复第2和第3步直到所有样本归为一类为止.本研究使用Matlab的pdist函数计算样本间的欧氏距离,使用linkage函数进行聚类分析.考虑到路边站(杨箕路边站和黄沙路边站)、背景站(帽峰山)的采样环境与其余站点有较大差异,故在本研究中不作为聚类对象,而是自成一类;另外,由于番禺大学城点位样本量相对较少,也未纳入计算.本研究最终选择进行系统聚类计算的点位数量为48个.

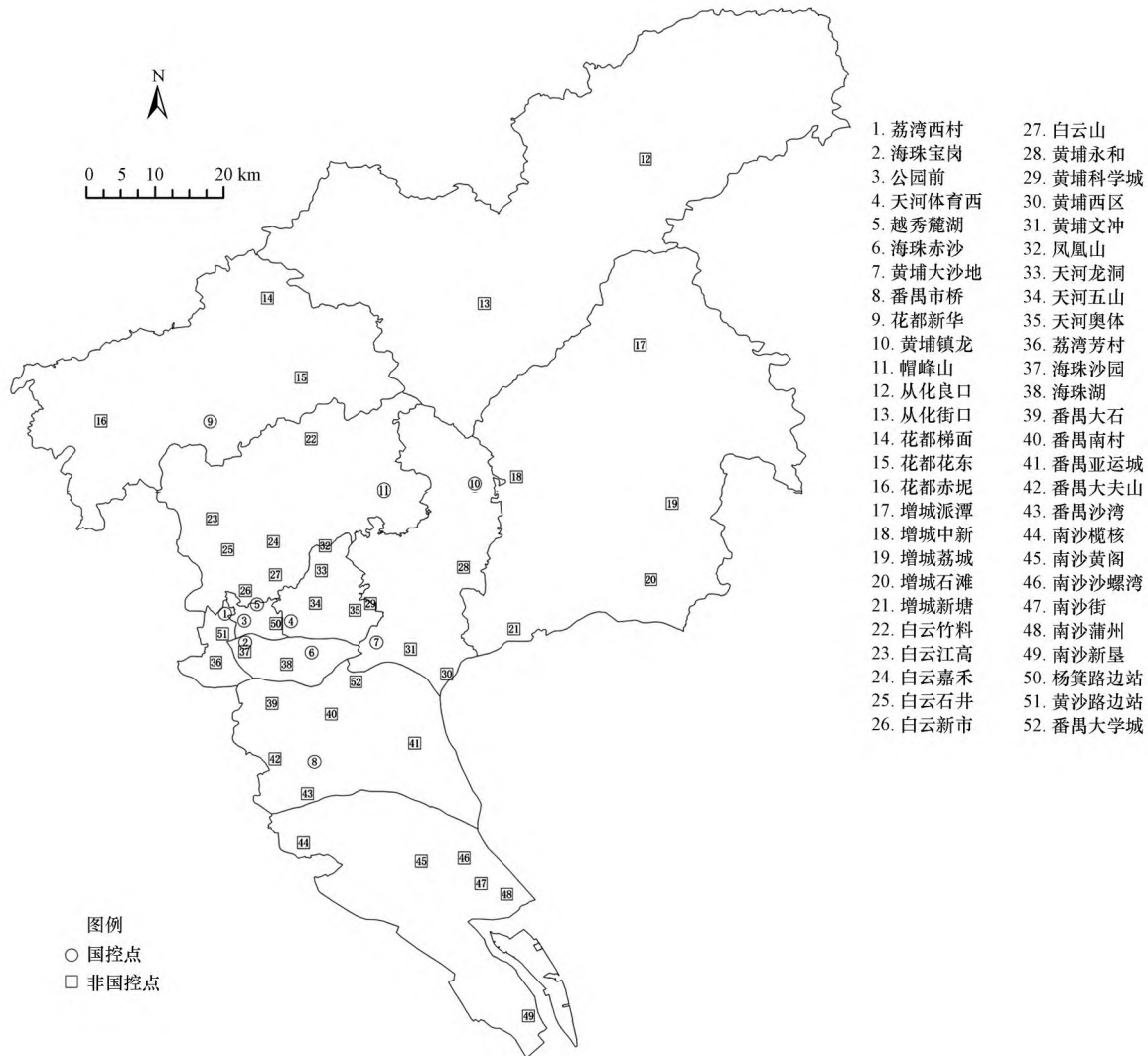


图1 广州市环境空气质量自动监测站分布

Fig.1 Location of air automatic monitoring sites in Guangzhou

2.3 经验正交函数(EOF)分析

EOF方法也称为主成分分析,是一种分析矩阵数据中的结构特征,提取主要数据特征量以达到数据降维目的的方法.EOF方法在气象问题分析中有着广泛应用,近年来也有较多研究将其应用在对环境空气质量的分析上(程麟钧等,2017;梁昱等,2018;王志铭等,2020).环境空气自动监测站网由不规则分布的监测点所组成,抽取某一段历史时期的污染物浓度监测数据,则可构成一组以监测点为空间点的随时间变化的样本矩阵用于EOF分析.通常,先将不同监测点的污染物浓度数据分别作距平化处理,处理后的数据 x_{ij} 可看成 p 个空间函数 v_{ik} 和时间函数 y_{kj} ($k=1,2,\dots,p$)的线性组合,表示成式(1).该式可以表达成矩阵形式,见式(2).

$$x_{ij} = v_{ik}y_{kj} = v_{i1}y_{1j} + v_{i2}y_{2j} + \dots + v_{ip}y_{pj} \quad (1)$$

$$X = VY \quad (2)$$

式中, X 为 $p \times n$ 矩阵, 等式右边的两个矩阵 V 和 Y 见式(3), 分别称为空间模态矩阵和时间系数矩阵. 本研究使用 Matlab 的 princomp 函数把广州市 52 个 $PM_{2.5}$ 观测点位 2016—2020 年的逐日 $PM_{2.5}$ 观测数据分解为上述两个矩阵的线性组合, 同时计算出前 p 个空间模态各自的方差贡献率和累积方差贡献率.

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ v_{p1} & v_{p2} & \cdots & v_{pn} \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1p} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2p} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{np} \end{pmatrix} \quad (3)$$

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 时间特征

2016—2020 年, 广州市 $PM_{2.5}$ 污染状况总体上呈逐年改善趋势. $PM_{2.5}$ 年均浓度值分别为 35.9、35.4、35.4、29.9 和 23.0 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 在 2017 年首次达到国家二级标准 (35 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 后一直维持达标, 并在 2020 年首次达到优于世界卫生组织第二阶段目标值 (25 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); $PM_{2.5}$ 超标天数分别为 14、15、19、3 和 0 d, 连续 2 d 及以上超标现象逐渐减少, 与 2016 年相比, 2020 年 $PM_{2.5}$ 达标比例由 96.2% 上升至 100%, 等级为优的天数比例由 57.7% 上升至 81.7%, 月均浓度低于 35 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的月数由 5 个月增加至 11 个月, 国控点无超标天月数由 4 个月增加至 10 个月; 此外, $PM_{2.5}$ 浓度标准差及不同百分位数浓度均有显著下降, 表明 $PM_{2.5}$ 浓度的波动程度减弱、变化范围收窄、高值频率减少 (图 2~3、表 1~2). $PM_{2.5}$ 浓度水平受污染源和气象条件共同影响, 通常, $PM_{2.5}$ 浓度的短期波动与气象条件密切相关, 但较长时间尺度的浓度变化则更可能归因于污染源排放强度的改变. 据悉, “十三五”期间 (2016—2020 年), 广州市政府部门以“减煤、控车、降尘、少油烟”为抓手大力开展大气污染防治工作, 在减少工业排放、公交车及出租车纯电动化、柴油车整治、落实建筑工地扬尘“六个百分百”措施以及 VOCs 整治等方面均持续加强管控, 同时在冬、春季等典型污染季节开展大气污染治理专项行动, 上述措施为广州市环境空气质量改善尤其是 $PM_{2.5}$ 浓度的下降起到了关键作用 (房鑫坤, 2021).

表 1 2016—2020 年广州市 $PM_{2.5}$ 浓度数据统计
Table 1 Statistics of $PM_{2.5}$ concentration in Guangzhou from 2016 to 2020

年份	年均浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	标准差/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	达标率	天数/d					次数	
				优	良	轻度污染	中度污染	重度污染	连续超标 (=2 d)	连续超标 (≥3 d)
2016	35.9	18.7	96.2%	211	141	12	2	0	4	0
2017	35.4	19.3	95.9%	211	139	14	0	1	1	1
2018	35.4	21.1	94.8%	223	123	13	6	0	1	2
2019	29.9	15.4	99.2%	249	113	3	0	0	0	0
2020	23.0	12.6	100%	299	67	0	0	0	0	0

广州市 $PM_{2.5}$ 月均浓度大致呈“V 型”分布 (图 2), 即上半年月均浓度呈下降趋势, 下半年趋势相反. 2016—2020 年最高月均值出现在 2018 年 1 月, 达 61.6 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 最低值出现在 2020 年 7 月, 仅 11.6 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (表 2). 有研究认为 (陈创买等, 1997), 广州没有气候学意义的冬季, 而降水主要集中在汛期 4—9 月, 通常将 4—9 月划分为湿季, 而其余月份为干季. 按干湿季划分, 干季 $PM_{2.5}$ 平均浓度 (38.7 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 为湿季 (25.2 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 的 1.54 倍, 国控点超标天数 (503 d) 为湿季 (48 d) 的 10.5 倍. 上述 $PM_{2.5}$ 污染状况的差异与对应时段的大气环流形势差异密切相关, 如不同的主导风向、边界层抬升和降水量将产生不同的扩散、传输和沉降条件 (黄俊等, 2020), 从而较大程度地影响着中小时间尺度的 $PM_{2.5}$ 浓度变化. 广州干季常为变性冷高压控制, 地面风速较小, 静风频率高, 并常伴有低层逆温, 大气层结稳定, 不利于污染物的扩散和稀释, 容易形成 $PM_{2.5}$ 污染过程. 如 2018 年 1 月 16—24 日, 受长时间持续静稳天气的影响, 广州市出现了连续 9 d 的 $PM_{2.5}$ 超标, 仅此单月已占 2016—2020 年 $PM_{2.5}$ 总超标天数的 17.6%. 而广州湿季多受热带暖气团控制, 局地强对流天气过程活跃, 降雨频繁, 有利于 $PM_{2.5}$ 的稀释清除.

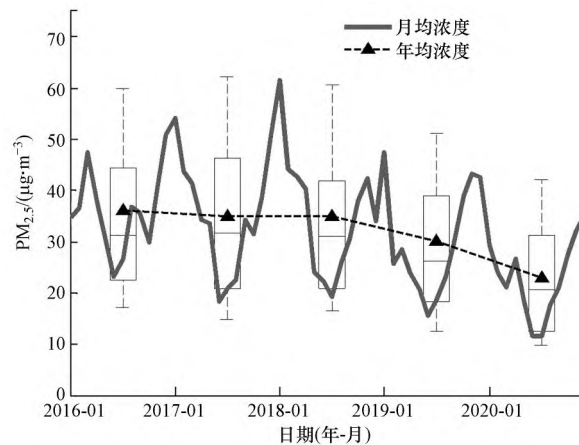


图2 2016—2020年广州市PM_{2.5}年均、月均浓度变化(箱形图中横线自下而上分别表示第10、25、50、75、90百分位数)

Fig.2 Annual and monthly average concentration changes of PM_{2.5} in Guangzhou from 2016 to 2020(The horizontal lines in the boxplot represent the 10th, 25th, 50th, 75th and 90th percentiles from bottom to top respectively)

表2 2016—2020年广州市不同时段PM_{2.5}平均浓度及国控点超标天数分布

Table 2 The distribution of average PM_{2.5} concentration in different periods of Guangzhou and the number of days exceeding the national standard at national control sites from 2016 to 2020

时间段	月均浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)					国控点超标天数/d					
	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	
干季	1月	34.8	54.1	61.6	47.5	29.2	20	62	111	24	2
	2月	36.7	43.7	44.3	25.7	23.8	10	15	17	0	0
	3月	47.5	41.4	42.6	28.5	21.1	43	8	19	0	0
湿季	4月	37.7	34.3	40.3	23.8	26.7	8	0	13	0	0
	5月	30.6	33.6	24.0	20.6	18.4	0	8	0	0	0
	6月	23.1	18.4	22.3	15.6	11.7	0	0	0	0	0
	7月	26.6	20.9	19.4	18.5	11.6	0	0	0	0	0
	8月	36.8	22.6	25.9	23.1	17.6	7	0	0	0	0
	9月	35.6	34.2	30.5	29.8	20.9	10	2	0	0	0
干季	10月	30.0	31.6	38.0	38.8	27.7	0	8	7	0	0
	11月	40.7	38.6	42.2	43.2	32.1	33	10	10	0	0
	12月	50.9	51.4	34.1	42.6	35.6	28	45	13	14	4

2016—2020年每年广州市的PM_{2.5}浓度日变化曲线均在20:00左右出现一天最高的峰值,而在15:00—16:00出现一天最低的值.此外,在上午还有两个微小的峰值,每年的出现时间相对不稳定(图4a).白天第1个峰值可能与该时段为出行高峰、人们活动较多有关;而第2个峰值通常接近中午,且该峰值在夏季相对显著(浓度值接近晚高峰)(图4b),而在冬季消失,推测与午间强光照条件促进二次颗粒物的生成有关(Zhao *et al.*2018),故在夏季表现尤为突出.午后,随着大气混合层高度增加,大气扩散条件逐渐改善,有利于PM_{2.5}浓度下降,从而达到谷值.傍晚,混合层高度逐渐下降,往往还叠加逆温层(尤其在冬季)和人们出行晚高峰的多重影响,导致PM_{2.5}浓度快速积累,形成了

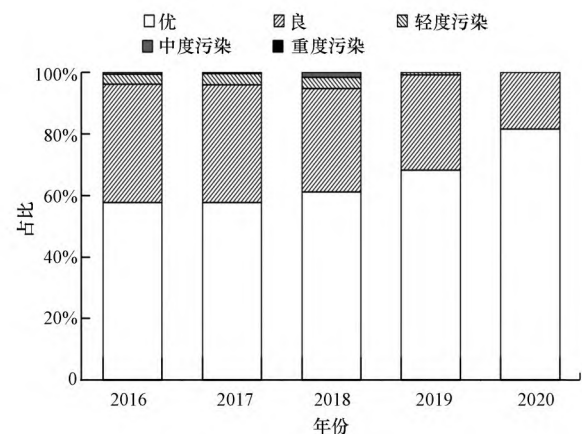


图3 2016—2020年广州市PM_{2.5}污染等级占比

Fig.3 Proportion of PM_{2.5} pollution levels in Guangzhou from 2016 to 2020

PM_{2.5}浓度日变化曲线的最高值.从PM_{2.5}浓度日变化曲线的12个月滑动平均来看(图4c),2016—2020年PM_{2.5}浓度日变化曲线形态整体变化不大,但峰谷值浓度差由7.5 μg·m⁻³下降至3.9 μg·m⁻³,一天中小时浓度的变化幅度趋于平缓.

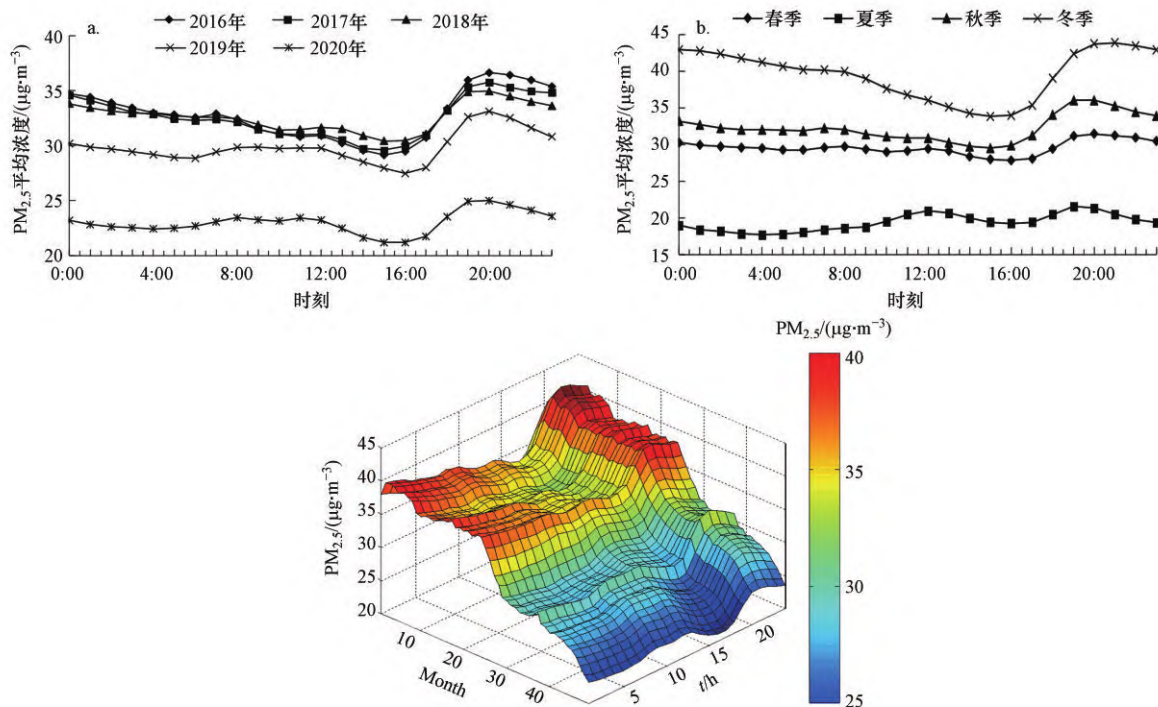


图4 2016—2020年广州市PM_{2.5}浓度日变化(a.年际变化;b.季节变化;c.12个月滑动平均变化)

Fig.4 Diurnal variation of PM_{2.5} concentration in Guangzhou from 2016 to 2020 (a. Interannual variation; b. Seasonal variation; c. 12-month moving average variation)

3.2 空间特征

3.2.1 PM_{2.5}浓度空间分布 图5展示了2016—2020年广州市PM_{2.5}浓度的空间分布状况.可见广州市PM_{2.5}浓度高值区主要分布在城市东西两侧,西部平均浓度略高于东部,北部、中部及南部浓度相对较低.通常,以荔湾区和海珠区西部为核心的中心城区西部为全市PM_{2.5}浓度最高值区,该区域与白云区西部、花都区西南部及番禺区西部连成一片,形成与佛山市接壤的西部高值区;增城区东、南部则与黄埔区东南部、番禺区东部共同组成与东莞市接壤的东部高值区.PM_{2.5}来源复杂,既有一次污染源影响,也有二次生成的来源影响,区域污染特征明显,其浓度分布跟地形、气象条件、污染源分布等因素均有关,故地势低矮、污染源密集的中心城区在不利的气象条件下较容易形成PM_{2.5}污染,而城市北部由于以山地植被为主,人口密度相对较小,污染源也较少,PM_{2.5}浓度则长期处于较低水平.2016—2020年,广州市的PM_{2.5}浓度分布基本上保持上述分布特征,但高值区域逐年减少,全市PM_{2.5}浓度分布趋于均匀.

在干季,除广州北部区域PM_{2.5}浓度相对较低外,其他大部分区域浓度均高于30 μg·m⁻³,最高值区分布在城市东西两侧;其中,1月和12月高值区范围最大,城市中部与南部连成一片成为PM_{2.5}浓度次高值区(图6).广州干季以偏北风控制为主,故北部区域PM_{2.5}浓度最低,而中南部区域由于叠加了区域传输的影响,PM_{2.5}浓度相对较高.由于干季PM_{2.5}浓度整体较高,故基本上主导了PM_{2.5}全年均值的空间分布.在广州PM_{2.5}浓度整体较低的湿季,全市高值区范围明显缩小,尤其在6—7月,除东、西部局部区域PM_{2.5}浓度仍相对较高外,全市大部分区域PM_{2.5}浓度均在20 μg·m⁻³以下.广州湿季更多受偏南风影响,城市南部区域由于处于上风向而浓度相对较低,北部区域则由于污染源较少也显示出较低浓度,故全市PM_{2.5}浓度相对高值区集中在中部地区.总体而言,无论在哪个季节,广州市PM_{2.5}最高值区始终分布在中心城区西部,如花都区、白云区西部及增城区东部等区域,最低值区则随着不同季节主导风向的变化而有所转移.

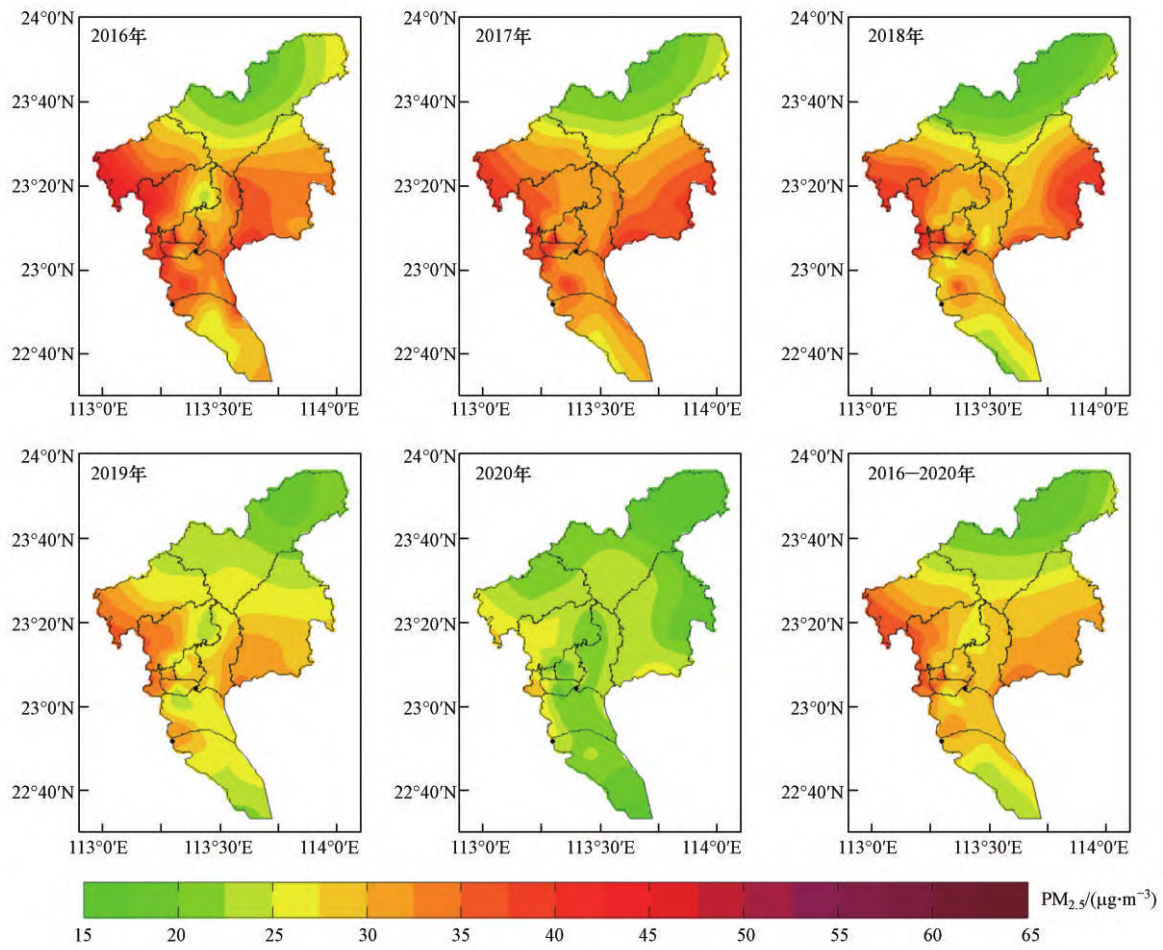
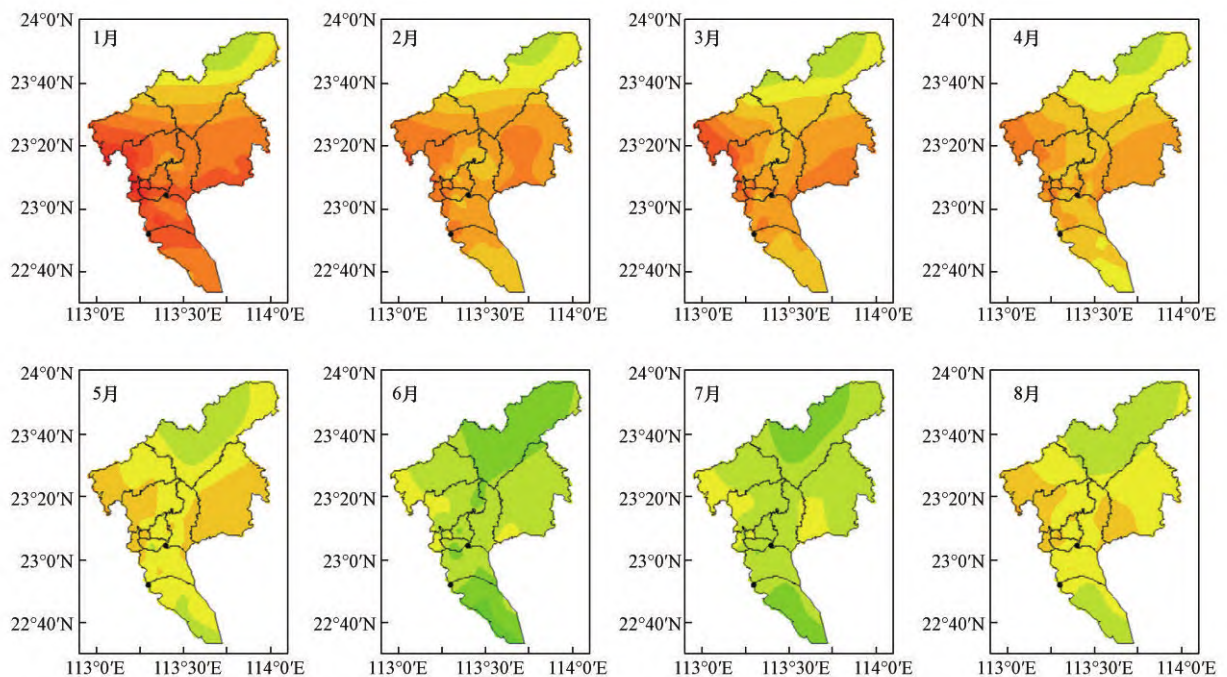


图5 2016—2020年广州市PM_{2.5}浓度空间分布

Fig.5 Spatial distribution of PM_{2.5} concentration in Guangzhou from 2016 to 2020



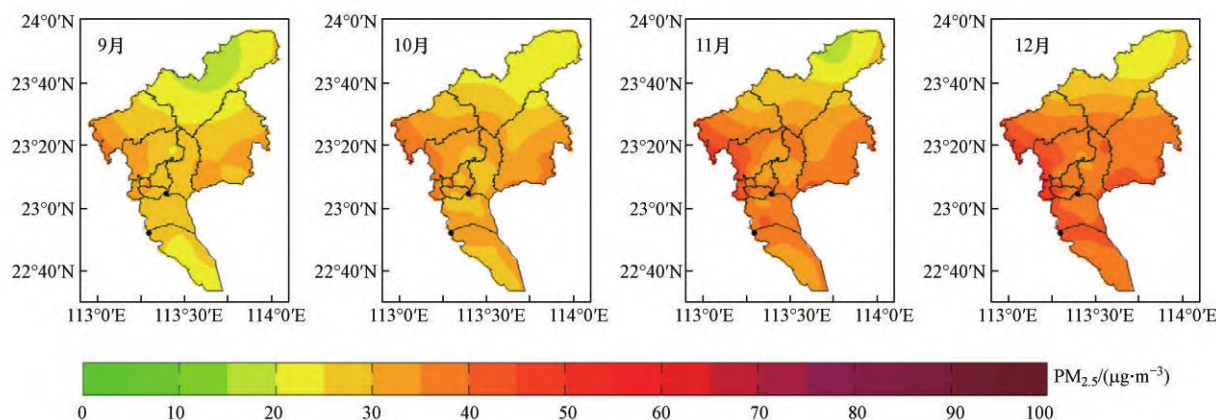


图6 2016—2020年广州市PM_{2.5}月均浓度空间分布

Fig.6 Spatial distribution of monthly average PM_{2.5} concentration in Guangzhou from 2016 to 2020

3.2.2 PM_{2.5}污染特征分区 本研究利用系统聚类方法进行广州市PM_{2.5}污染特征分区,图7是利用系统聚类方法得到的归类步骤示意图,以红线所示位置将广州市48个空气质量自动站根据其PM_{2.5}浓度特征分成7个区域.为方便分析,本研究结合实际站点位置对初始分区结果稍作调整:一是把最北部原本独立成区的从化良口站点与其南部的从化街口、花都梯面、增城派潭等站点合并为一个分区;二是考虑到由白云江高和白云石井两个站点组成的分区样本量较少,代表区域面积也较小,推测其可能受到局地污染源的影响,故不再纳入后续分析.经调整,广州市PM_{2.5}污染特征最终分区结果为北部区、中北部区、中南部区和南部区共4个区域(图8),各个区域包含的站点数量及其PM_{2.5}浓度均值见表3.本研究采用欧氏距离作为分区依据,故被分在同一区域的站点通常具有相当PM_{2.5}浓度量级和相似的变化趋势,可能有共同的PM_{2.5}源地.本研究获得的分区结果与实际的污染源分布有较好的一致性,如北部区域对应植被较多而人口较少的区域,主要包括从化区和花都北部、增城区北部;中北部对应了广州市处于快速发展状态的城郊结合部,包括花都区大部及白云区、黄埔区的北部、增城区的中部;中南部则对应着广州市建城区最密集及人口最稠密的区域,主要包括中心城区、番禺区、黄埔区、白云区和增城区的一部分,南部则主要对应于广州最南部的行划区南沙区,受区域传输影响显著.

上述4个分区与路边站和背景站组成了六大类站点(表3),图9进一步展示了这6种不同类型站点的PM_{2.5}平均浓度及变化率.可见2016—2020年PM_{2.5}平均浓度大致遵循“路边站>中北部区≈中南部区>南部区>北部区≈背景站”的排序.路边站由于靠近交通源且采样高度相对较低,PM_{2.5}浓度最高;中北部区与中南部区位于广州市交通、人口最密集的区域,两者PM_{2.5}浓度相近,仅次于路边站;南部区与中心城区有一定距离,在湿季因处于主导风上游而浓度较低,在干季则受到一定区域输送影响,PM_{2.5}浓度再次之;北部区与背景站地理位置相近,均位于广州东北部植被密集的山地,污染源相对较少,故PM_{2.5}浓度最低.总体上看,PM_{2.5}浓度越高的区域下降幅度也越大,最终导致全市各区域PM_{2.5}浓度趋向一致.但从PM_{2.5}浓度的5年变化率来看,路边站、中北部区、中南部区和南部区基本一致,均在31.5%~32.6%之间;而北部区和背景站则仅为前者的1/2,考虑到其自身排放强度较低,推测其PM_{2.5}浓度下降可能更多地由区域背景浓度的下降贡献,而其余区域的PM_{2.5}浓度变化则可看作是排放强度减弱与区域背景浓度下降两种因素共同叠加的结果.

图10为不同类型站点的PM_{2.5}浓度日变化曲线.除背景站和南部区外,其余类型站点均呈双峰或三峰结构,且在19:00—20:00有一个较明显的晚高峰.广州市交通车流晚高峰通常出现在17:00(宋洁等,2020),而PM_{2.5}浓度晚峰出现时间滞后于城市通勤高峰期,这与王占山等(2015)研究一致.推测该现象可能与夜间二次颗粒物的非均相反应生成有关(Guo *et al.*, 2020);此外,夜间大气混合层顶高度的下降(苗蕾等,2016)及海风的输送(吴蒙等,2016)等气象因素也可能影响PM_{2.5}浓度的晚高峰出现时间.南部区虽然也呈双峰结构,但其早峰出现在11:00且浓度高于晚峰.南部区地处珠江口,有研究表明该地海陆风日频率达25%~35%(邱晓暖等,2013),

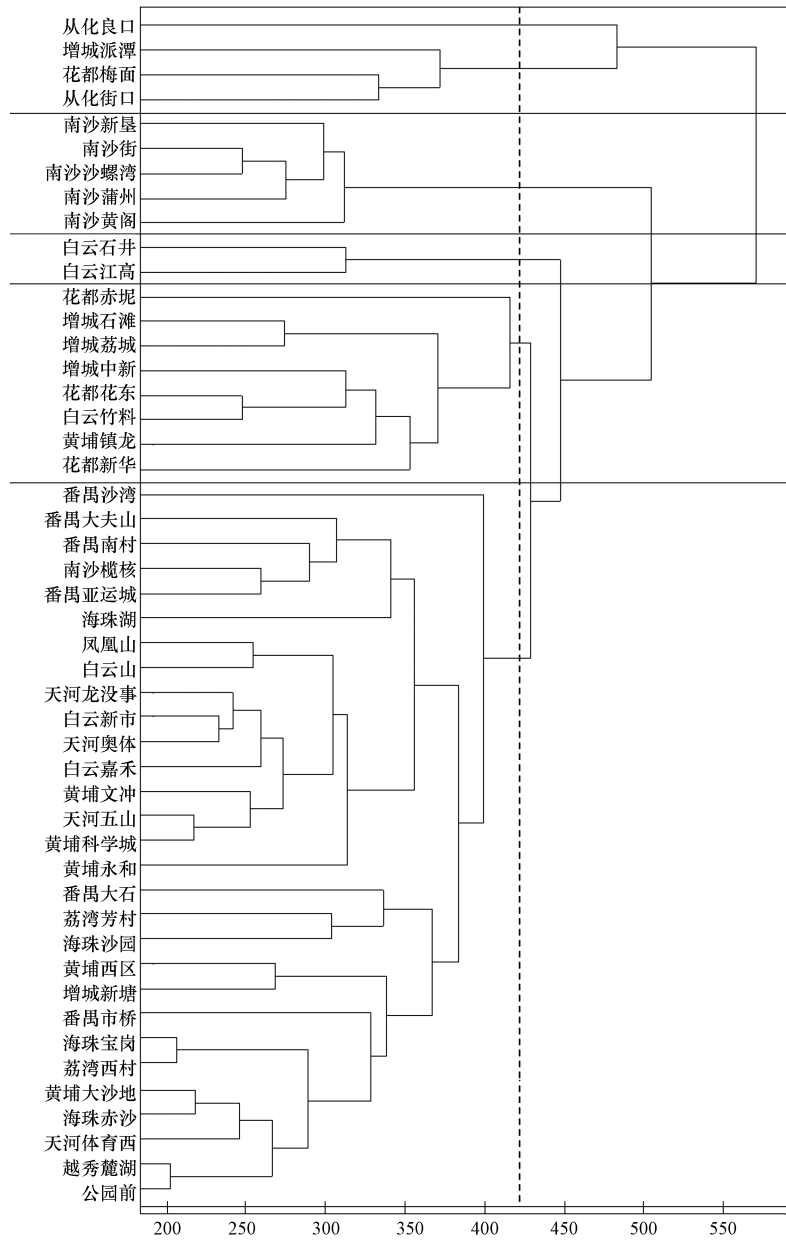


图7 系统聚类示意图

Fig.7 Systematic clustering diagram

表3 2016—2020年广州市不同类型站点PM_{2.5}浓度数据统计

Table 3 Statistics of PM_{2.5} concentration data of different types of stations in Guangzhou from 2016 to 2020

站点类型	站点数	PM _{2.5} 浓度/(μg·m ⁻³)					5年均值	5年变化率
		2016年	2017年	2018年	2019年	2020年		
北部区	4	25.1	25.7	24.3	23.8	21.2	24.0	15.6%
中北部区	8	35.0	34.4	33.0	29.5	23.7	31.1	32.3%
中南部区	30	34.6	34.7	32.4	29.5	23.3	30.9	32.6%
南部区	5	29.9	31.0	27.6	26.1	20.4	27.0	31.5%
背景站	1	24.5	30.5	31.5	24.2	20.5	26.3	16.3%
路边站	2	39.6	39.5	41.5	34.2	26.7	36.3	32.6%

故推测其可能在一定程度上受到了海陆风的影响.夜间至早上,陆风将PM_{2.5}由浓度相对较高的中心城区向南部区传输并持续积累,PM_{2.5}浓度则随着陆风的减弱而逐渐上升,在午前达到最高值,尔后由于大气边界层继续抬升,扩散条件改善,加之海风逐渐加强,PM_{2.5}浓度呈下降趋势.

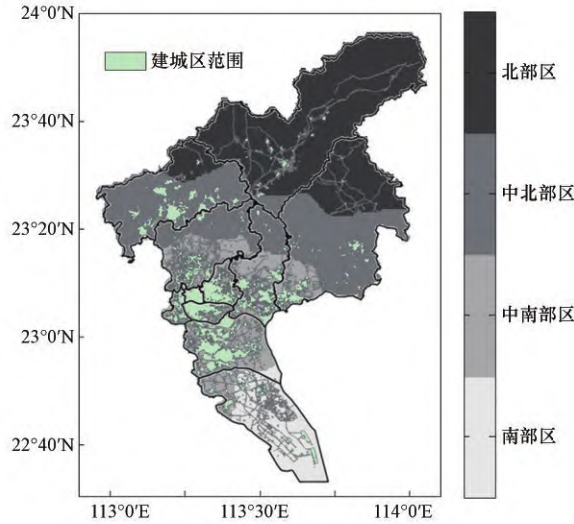


图8 广州市PM_{2.5}污染特征分区
Fig.8 PM_{2.5} pollution zone in Guangzhou

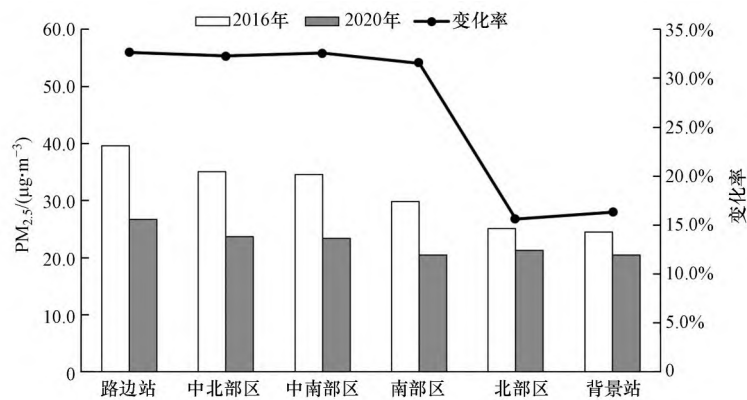


图9 2016—2020年广州市不同类型站点PM_{2.5}浓度变化率
Fig.9 Change rate of PM_{2.5} concentration at different types of stations in Guangzhou from 2016 to 2020

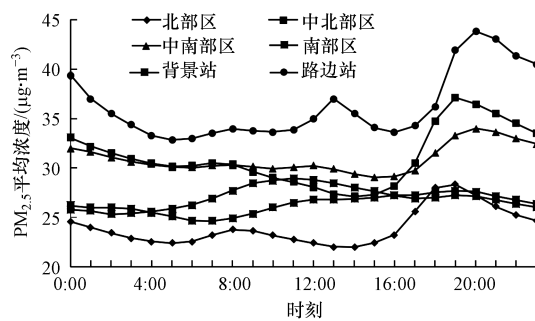


图10 2016—2020年广州市不同类型站点PM_{2.5}浓度日变化
Fig.10 Diurnal variation of PM_{2.5} concentration at different types of stations in Guangzhou from 2016 to 2020

3.2.3 PM_{2.5}污染空间模态 对广州市52个PM_{2.5}观测点位2016—2020年的逐日PM_{2.5}观测数据进行EOF分解,图11为EOF分解结果,因前3模态累积方差贡献率已达93%,故本研究仅对前3模态进行分析。

EOF第1模态的方差贡献为86%,是广州市最主要的PM_{2.5}污染空间分布类型.在该模态下特征向量呈一致的正值(图11),表明在该模态下广州市PM_{2.5}浓度的空间变化趋势具有同步性,高值区位于中心城区,同时向南北郊区递减,低值区位于从化区的北部和南沙区的南部.反映出当PM_{2.5}污染事件发生时,广州市的PM_{2.5}浓度趋向于形成以中心城区为高值中心,逐渐向南、北部郊区扩散的分布态势,这与汪宇等(2017)、潘润西等(2018)的研究结果类似.该模态时间系数的月度分布(图12a)与PM_{2.5}月均浓度有较强的相关性,可表征PM_{2.5}总体污染程度。

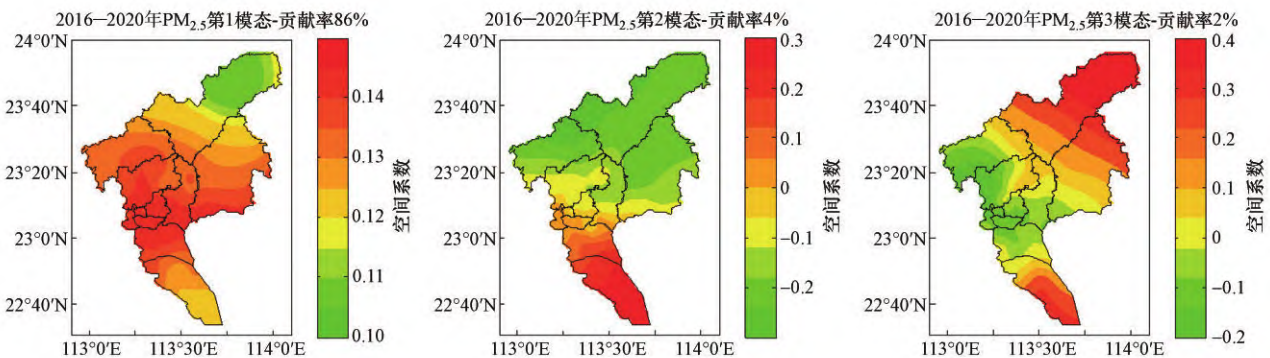


图11 2016—2020年广州市PM_{2.5}浓度EOF分解第1~3模态空间系数

Fig.11 1st to 3rd modal space coefficients of EOF decomposition of PM_{2.5} concentration in Guangzhou from 2016 to 2020

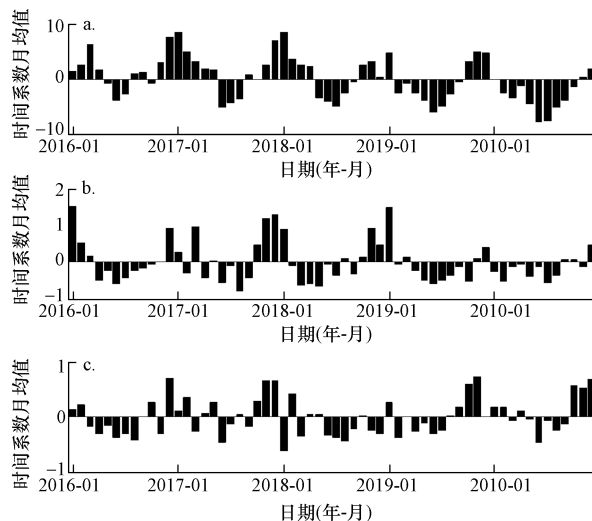


图12 2016—2020年广州市PM_{2.5}浓度EOF分解第1~3模态时间系数月均值(a.第1模态,b.第2模态,c.第3模态)

Fig.12 Monthly mean value of time coefficients of EOF decomposition of PM_{2.5} concentration in Guangzhou from 2016 to 2020 for the 1st to 3rd modal

EOF第2模态、第3模态反映了PM_{2.5}浓度差异的空间变化状态,方差贡献均相对较小.其中,第2模态显示出南北相反的系数,即在该模态下广州市的PM_{2.5}浓度表现出南北优劣状况相反的现象,体现了其经向输送特征.由第2模态时间系数的月度分布(图12b)可知,干季时间系数多为正值,而湿季多为负值,分别对应于北优南劣及南优北劣的PM_{2.5}浓度分布状况.这是因为当干季广州受偏北风控制时,上风向地区PM_{2.5}浓度较低而下风向浓度往往较高,反之亦然.第3模态则表现出中心城区与外围区域系数相反的特征,强调的是当中心城区PM_{2.5}上升时外围区域浓度反而下降的现象.当珠三角地区出现强度相当的冷暖气团交汇时,

边界层内风速很小,易出现较深厚的逆温层,使污染物在城市群内不断积累(范绍佳等,2006),此时可能导致外围区域的污染物向中心城区聚拢,从而出现此类分布.在上述气象条件下,广州市PM_{2.5}污染往往较重,故其时间系数同样多在PM_{2.5}污染程度相对较高的月份出现高值(图12c).

4 结论(Conclusions)

1)2016—2020年,广州市PM_{2.5}污染状况呈逐年改善趋势.与2016年相比,2020年PM_{2.5}年均浓度从35.9 μg·m⁻³下降至23.0 μg·m⁻³,达标比例由96.2%上升至100%;PM_{2.5}月均浓度呈“V型”分布,干季平均浓度为湿季的1.54倍,国控点超标天数为湿季的10.5倍;历年PM_{2.5}浓度日变化曲线形态整体变化不大,每年均在20:00出现最高峰值,在15:00—16:00出现最低谷值,峰谷值浓度差由7.5 μg·m⁻³下降至3.9 μg·m⁻³,日变化幅度趋于平缓.

2)广州市PM_{2.5}浓度最高值区始终分布在城市东西两侧,北部、中部及南部浓度相对较低,最低值区则随着不同季节主导风向的变化而有所转移.2016—2020年,广州市PM_{2.5}浓度空间分布状况变化不大,但高值区域范围逐年减小,全市PM_{2.5}浓度分布趋于均匀.

3)利用系统聚类法把广州市PM_{2.5}分成北部、中北部、南部、中南部4个污染区,PM_{2.5}浓度遵循“中北部区≈中南部区>南部区>北部区”的排序.北部区2016—2020年PM_{2.5}浓度的下降率仅为其他污染区的1/2,推测其PM_{2.5}浓度下降可能更多地由区域背景浓度的下降贡献,而其他污染区的PM_{2.5}浓度变化则可看作是排放强度减弱与区域背景浓度下降两种因素共同叠加的结果.

4)对2016—2020年广州市的逐日PM_{2.5}观测数据进行EOF分解,前3模态累积方差贡献率达93%.其中,第1模态与PM_{2.5}月均浓度有较强的相关性,可表征PM_{2.5}总体污染程度;第2模态南北优劣相反,可表征PM_{2.5}在南北方向上的区域输送特征;第3模态中心城区与外围区域优劣相反,可表征由PM_{2.5}由外围区域向中心城区聚集的污染特征.

责任作者简介:张金谱(1988—),男,高级工程师,主要从事空气质量监测与预报研究.E-mail:jinpu@hotmail.com.

参考文献(References):

- 陈创买,郑德娟,赵仲辉.1997.广东干湿气候的特征[J].热带气象学报,13(3):2-9
- 陈菁,彭金龙,徐彦森.2021.北京市2014—2020年PM_{2.5}和O₃时空分布与健康效应评估[J].环境科学,42(9):4071-4082
- Chen W, Wang X, Zhou S, *et al.* 2016. Chemical composition of PM_{2.5} and its impact on visibility in Guangzhou, Southern China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 16(10):2349-2361
- 陈旸,王宇骏,邢琪,等.1999.广州市空气可吸入性颗粒物的污染水平[J].中国环境监测,15(2):44-48
- 陈义珍,赵丹,柴发合,等.2010.广州市与北京市大气能见度与颗粒物质量浓度的关系[J].中国环境科学,30(7):967-971
- 程麟钧,王帅,宫正宇,等.2017.中国臭氧浓度的时空变化特征及分区[J].中国环境科学,37(11):4003-4012
- Chi R, Li H, Wang Q, *et al.* 2019. Association of emergency room visits for respiratory diseases with sources of ambient PM_{2.5}[J]. Journal of Environmental Sciences, 86:154-163
- Cui H, Chen W, Dai W, *et al.* 2015. Source apportionment of PM_{2.5} in Guangzhou combining observation data analysis and chemical transport model simulation[J]. Atmospheric Environment, 116: 262-271
- 范绍佳,王安宇,樊琦,等.2006.珠江三角洲大气边界层特征及其概念模型[J].中国环境科学,26(S1):4-6
- 房鑫坤.2021.政策因素对城市空气质量的影响[J].化工管理,(35):53-54+144
- 郭家瑜,张英杰,郑海涛,等.2017.北京2015年大气细颗粒物的空间分布特征及变化规律[J].环境科学学报,37(7):2409-2419
- Guo J, Zhou S, Cai M, *et al.* 2020. Characterization of submicron particles by time-of-flight aerosol chemical speciation monitor (ToF-ACSM) during wintertime: aerosol composition, sources, and chemical processes in Guangzhou, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 20(12):7595-7615
- 何俊杰,吴耕晨,张国华,等.2014.广州雾霾期间气溶胶水溶性离子的日变化特征及形成机制[J].中国环境科学,34(5):1107-1112
- 黄俊,廖碧婷,王春林,等.2019.广州市PM_{2.5}污染特征及潜在贡献源区分析[J].环境科学与技术,42(4):109-118
- 黄俊,王超群,周宝琴,等.2020.广州PM_{2.5}污染特征及与气象因子的关系分析[J].环境污染与防治,42(2):176-181+186
- 黄祖照,王杰,刘建国,等.2012.广州城区大气细颗粒物粒谱分布特征分析[J].中国环境科学,32(7): 1177-1181
- 蒋超,龚建周,孙家仁,等.2018.2013—2016年珠三角地区PM_{2.5}分布时空演变[J].生态环境学报,27(9):1698-1705
- Lai S, Zhao Y, Ding A, *et al.* 2016. Characterization of PM_{2.5} and the major chemical components during a 1-year campaign in rural Guangzhou, Southern

- China[J].*Atmospheric Research*,167:208-215
- 李婷,麦戈,刘永红,等.2013.近年来广州市环境空气质量变化趋势分析[J].*安全与环境学报*,13(1):124-128
- 梁昱,刘禹含,王红丽,等.2018.基于主成分分析的上海春季近地面臭氧污染区域性特征研究[J].*环境科学学报*,38(10):3807-3815
- 廖碧婷,黄俊,王春林,等.2018.广州地区灰霾过程和清洁过程的边界层特征对比分析[J].*中国环境科学*,38(12):4432-4443
- 刘文彬,刘涛,黄祖照,等.2013.利用偏振-米散射激光雷达研究广州一次浮尘天气过程[J].*中国环境科学*,33(10):1751-1757
- 刘叶新,陈伟华,王雪梅,等.2019.广州PM_{2.5}化学组分特征及其与气象因子的关系[J].*环境科学学报*,39(1):53-63
- Mo Y, Booker D, Zhao S, *et al.* 2021. The application of land use regression model to investigate spatiotemporal variations of PM_{2.5} in Guangzhou, China: Implications for the public health benefits of PM_{2.5} reduction[J].*Science of the Total Environment*,778:146305
- 苗蕾,廖晓农,王迎春.2016.基于长时间序列的北京PM_{2.5}浓度日变化及气象条件影响分析[J].*环境科学*,37(8):2836-2846
- 潘润西,陈蓓,莫雨淳,等.2020.广西PM_{2.5}时空分布特征及污染天气类型[J].*环境科学研究*,31(3):465-474
- 邱晓暖,范绍佳.2013.海陆风研究进展与我国沿海三地海陆风主要特征[J].*气象*,39(2):186-193
- 申冲,李园,王雪梅,等.2012.北方强沙尘暴天气过程对广州空气质量影响的个例分析[J].*环境科学学报*,32(7):1725-1735
- 宋洁,周素红,彭伊依,等.2020.基于移动监测的城市PM_{2.5}污染时空模式研究,一以广州市中心区为例[J].*热带地理*,40(2):229-242
- Tie X, Wu D, Brasseur G. 2009. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China[J].*Atmospheric Environment*, 43(14):2375-2377
- Vert C, Sánchez-Benavides G, Martínez D, *et al.* 2017. Effect of long-term exposure to air pollution on anxiety and depression in adults: A cross-sectional study[J].*International Journal of Hygiene and Environmental Health*,220(6):1074-1080
- Wei F, Teng E, Wu G, *et al.* 1999. Ambient concentrations and elemental compositions of PM₁₀ and PM_{2.5} in four Chinese cities[J].*Environmental Science & Technology*,33(23):4188-4193
- 汪宇,王志春,嵇萍,等.2017.珠三角区域空气质量空间分布类型和天气背景[J].*环境工程*,35(12):77-81
- 王宇骏,黄祖照,张金谱,等.2016.广州城区近地面层大气污染物垂直分布特征[J].*环境科学研究*,29(6):800-809
- 王占山,李云婷,陈添,等.2015.2013年北京市PM_{2.5}的时空分布[J].*地理学报*,70(1):110-120
- 王志铭,王雪梅,李伟铿,等.2012.珠三角SO₂污染区划及来源的定量研究[J].*环境科学与技术*,35(1):139-145
- 王志铭,张金谱,梁桂雄.2020.利用经验正交函数分解方法分析广州臭氧污染特征[J].*环境科学与技术*,43(2):60-64
- 吴兑,毕雪岩,邓雪娇,等.2006.珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究[J].*气象学报*,64(4):510-517
- 吴兑,陈位超.1994.广州气溶胶质量谱与水溶性成分谱的年变化特征[J].*气象学报*,52(4):499-505
- 吴兑,邓雪娇,毕雪岩,等.2007.细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J].*热带气象学报*,23(1):1-6
- 吴兑,廖碧婷,吴晨,等.2012b.2010年广州亚运会期间灰霾天气分析[J].*环境科学学报*,32(3):521-527
- 吴兑,刘啟汉,梁延刚,等.2012a.粤港细粒子PM_{2.5}污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J].*环境科学学报*,32(11):2660-2669
- 吴兑,吴晓京,李菲,等.2010.1951—2005年中国大陆霾的时空变化[J].*气象学报*,68(5):680-688
- 吴蒙,罗云,吴兑,等.2016.珠三角干季海陆风特征及其对空气质量影响的观测[J].*中国环境科学*,36(11):3263-3272
- Yu I, Zhang Y, Tam W, *et al.* 2012. Effect of ambient air pollution on daily mortality rates in Guangzhou, China[J].*Atmospheric Environment*,46:528-535
- 于群,杨华.2010.广州市近年空气质量现状及趋势分析[J].*中国环境监测*,26(4):74-77
- Zeng Z, Huo X, Wang Q, *et al.* 2020. PM_{2.5}-bound PAHs exposure linked with low plasma insulin-like growth factor 1 levels and reduced child height[J].*Environment International*,138:105660
- 张殷俊,陈曦,谢高地,等.2015.中国细颗粒物(PM_{2.5})污染状况和空间分布[J].*资源科学*,37(7):1339-1346
- Zhao H, Zheng Y, Li C, *et al.* 2018. Spatiotemporal distribution of PM_{2.5} and O₃ and their interaction during the Summer and Winter Seasons in Beijing, China[J].*Sustainability*,10(12):4519
- Zhou S, Wu L, Guo J, *et al.* 2020. Measurement report: Vertical distribution of atmospheric particulate matter within the urban boundary layer in southern China—size-segregated chemical composition and secondary formation through cloud processing and heterogeneous reactions[J].*Atmospheric Chemistry and Physics*,20(11):6435-6453
- 朱倩茹,刘永红,徐伟嘉,等.2013.广州PM_{2.5}污染特征及影响因素分析[J].*中国环境监测*,29(2):15-21