

文章编号: 1671-4229(2022)03-0067-07

粤港澳大湾区秋冬季节 PM_{2.5} 浓度时空模拟分析

李天翔¹, 蒋超², 龚建周^{2*}

(1. 广州龙腾园林景观设计有限公司, 广东 广州 510520; 2. 广州大学 地理科学与遥感学院, 广东 广州 510006)

摘要: 粤港澳大湾区城市高质量发展和空气污染治理进入精细化阶段, 需要加强针对空气污染超标期、典型区的相关研究, 促进下一阶段空气质量全面达标。文章采用逐步回归模拟 2015 年日均浓度超标时的 PM_{2.5} 浓度空间特征, 分析了 2019–2021 年重点时段的浓度值演变、同期数值增减情况。结果表明: ①2015 年超标期下 PM_{2.5} 浓度空间上呈现“中心–外围”浓度值递减的特征, 全域浓度值介于 50~60 μg·m⁻³ 之间, 当中心浓度值显著超标发生时, 高值范围会向外扩散。②经过检验, ARIMA 模型模拟短期城市群 PM_{2.5} 浓度的精度较高, 2019–2021 年来, 1~2 月的浓度值增减不明显, 数值保持稳定; 1 月份的浓度值为全年最高, 需在该时段重点管控 PM_{2.5} 浓度, 各市 10~12 月浓度值均呈现递减的趋势。

关键词: 粤港澳大湾区; 空气污染; 超标期; 浓度模拟

中图分类号: X 322 **文献标志码:** A

Temporal and spatial simulation analysis of PM_{2.5} concentration in autumn and winter in the Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area

LI Tian-xiang¹, JIANG Chao², GONG Jian-zhou^{2*}

(1. Guangzhou Long-term Landscape Architecture Design Co., Ltd., Guangzhou 510520, China;

2. School of Geographic Science and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The high-quality urban development and air pollution control in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area has entered the refinement stage. It is necessary to strengthen the relevant research on air pollution exceeding the standard period and typical areas, so as to promote the overall air quality reaching the standard in the next stage. In this paper, stepwise regression is used to simulate the spatial characteristics of PM_{2.5} concentration when the daily average concentration exceeded the standard in 2015. The evolution of concentration values and the increase and decrease of values in the same period in key periods from 2019 to 2021 are analyzed. The results show that under the exceeding standard period in 2015, the concentration of PM_{2.5} shows the characteristics of “center periphery” concentration value decreasing in space, and the global concentration value is between 50~60 μg·m⁻³, when the central concentration value significantly exceeds the standard, the high value range will spread outward. After testing, ARIMA model has high accuracy in predicting PM_{2.5} concentration in short-term urban agglomeration. From 2019 to 2021, the concentration value in January and February has not increased significantly, and the value remains stable. The concentration value in January is the highest in the whole year. It is necessary to focus on the control of PM_{2.5} concentration in this period. The concentration value of each city from October to December shows a decreasing

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42071123)

作者简介: 李天翔(1992—),男,硕士. E-mail:279885614@qq.com

*通信作者. E-mail: gongjzh66@126.com

引用格式: 李天翔, 蒋超, 龚建周. 粤港澳大湾区秋冬季节 PM_{2.5} 浓度时空模拟分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2022, 21(3):

trend.

Key words: Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; air pollution; exceedance period; concentration simulation

伴随国家层面赋予了大湾区新的发展内涵,大湾区正成为我国现代区域发展新的增长极,但也需关注增长给大湾区生态环境安全带来的压力^[1-2]。广东省政府联合港、澳特区政府于 2014 年建立了我国首个区域空气监测网络——粤港澳珠江三角洲区域空气监测网络,网络监测数据显示:①2015 年 PM_{2.5} 年均浓度值超过了国家《环境空气质量标准》(GB3095-2012)规定的二级质量浓度限值 35 μg·m⁻³;②2016-2018 年连续 3 年的年均浓度均未超过二级质量浓度限值^[3-5];③2020 年各子站相关达标率在 98.6% 及以上,大湾区空气质量正逐年改善(资料来源于广东省生态环境厅,网址为 http://gdee.gd.gov.cn/kqjc/content/post_2725979.html)。

PM_{2.5} 能直接进入呼吸道深部和肺泡,危害人体健康。同时,由于 PM_{2.5} 对可见光具有消光作用,使能见度降低,导致城市环境健康水平下降。随着城市高质量发展和空气污染治理进入精细化阶段,通过协调大湾区的规划与管理降低超标期 PM_{2.5} 浓度将是下一阶段空气质量全面达标的重点内容,因此,需要加强针对空气污染超标期、典型区的相关研究。在浓度监测方面,因气溶胶与 PM_{2.5} 有相近的物理机制,卫星遥感亦可大空间、多时相监测气溶胶^[6-8],因此,卫星遥感监测气溶胶间接估测 PM_{2.5} 浓度被广泛应用在大气环境研究中^[9],相较于地表覆被、人类活动等要素^[10-11],温度^[12]、湿度^[13-14]和大气压^[15]等气象条件对单一城市尺度或城市群的 PM_{2.5} 浓度影响更加显著^[16-17]。

2015 年 PM_{2.5} 年均浓度值超过了《环境空气质量标准》(GB3095-2012)规定的二级质量浓度限值,若对全年的逐日浓度进行数据分析,可获取 2015 年逐日浓度超标发生的日期,即可作为本次研究的超标期。在此基础上,本文将利用 2015 年超标期的气溶胶光学厚度与气象要素数据构建多元回归模型,采用逐步回归模拟 2015 年日均浓度超标时的 PM_{2.5} 浓度空间特征。此外,浓度序列数据可识别浓度演变趋势,对精准防控具有重要意义,序列数据已揭示研究区秋冬月份为 PM_{2.5} 浓度管控的重点时段^[4]。在各类序列数据模拟方法中,ARIMA 模型(AutoRegressive Integrated Moving

Average model)能根据时序数据变量的自身特征构建模型以实现短期模拟,具有精度高、易操作的优势^[18]。彭斯俊等^[19]、牟敬锋等^[20]运用 ARIMA 模型分别对 PM_{2.5} 浓度和空气质量指数(AQI)进行分时段的短期预测,发现其预测模拟的结果均优于灰色 GM(1,1)模型和全年时间序列模型。对大湾区 PM_{2.5} 浓度季节变化规律的研究表明,冬季和秋季是浓度最高的重点时段^[21-22],本文将利用 2019 年以来秋冬季节的浓度序列数据,通过构建 ARIMA 模型模拟 2021 年 11~12 月的浓度状况,进而分析 2019-2021 年重点时段的浓度值演变、同期数值增减情况。从综上两方面识别超标期下大湾区 PM_{2.5} 浓度的时空演变,为粤港澳联防、联控区域大气污染研究提供参考资料。

1 研究区域

粤港澳大湾区(111°21'~114°53'E,21°27'~24°24'N)大部分位于北回归线以南,属热带、亚热带气候,年均温在 21℃~23℃,年平均降水量在 1300~2500 mm,全年温暖湿润^[23]。湾区城市群由广东省 9 市及 2 个特别行政区组成,总面积 5.6 万 km²(图 1)。截止 2020 年底,大湾区共有约 7000 万,区域经济总量达 1.4 万亿美元,是我国最具经济活力、创新氛围最浓、人口素质较高的地区之一。

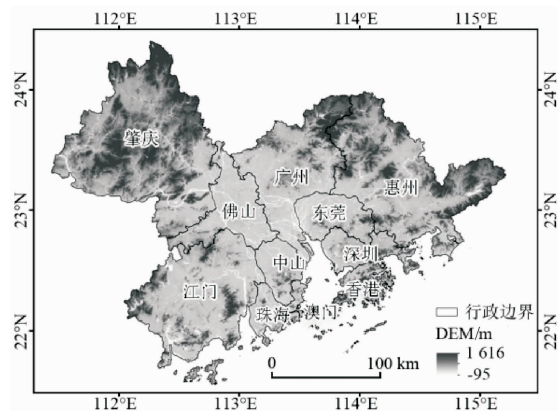


图 1 研究区区位示意图

Fig. 1 Location sketch map of research area

注:底图来源于广东省地理信息公共服务平台 <http://nr.gd.gov.cn/map/bzdt/>(审图号:粤 S(2018)012 号)

2 数据及方法

2.1 数据及预处理

本文使用的数据包括 PM_{2.5}逐时浓度数据集、MODIS AOD 和气象数据。

(1) PM_{2.5}逐时浓度数据集来源于中国环境监测总站空气质量监测发布平台,该数据涵盖了粤港澳区域空气监测网络 56 个子站的常规空气质量监测指标。本研究所用为 2015 年以来 56 个子站的 PM_{2.5}逐时浓度数据,并于建模前采用湿度订正的方法进行 PM_{2.5}湿度订正以提高模拟精度。湿度订正的公式如下所示^[24]:

$$PM'_{2.5} = PM_{2.5} f(RH) \quad (1)$$

式中, $f(RH) = \frac{1}{1 - RH/100}$ 为湿度影响因子函数, RH 为日相对湿度(%), $PM_{2.5}$ 、 $PM'_{2.5}$ 分别是未经订正和湿度订正后的 PM_{2.5} 浓度。

(2) MODIS AOD 是空气污染研究中最为常用的 AOD 产品数据之一,在全球、区域大气污染的宏观分布方面具有很大潜力^[14]。本研究所使用的 MODIS 数据 L1B 产品可从 NASA 官方遥感影像数据下载 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>), 并利用 AERONET(AEROSOL ROBOTIC NETWORK)提供的监测数据作为真实值,检验 AOD 反演数据的精度^[24]。

(3) PM_{2.5}浓度相关的气象要素^[7],包括各站点气压(P)、气温(T)、相对湿度(U)、风向风速(W),以上要素通过克里金插值以生产与反演 AOD 数据空间分辨率一致的栅格数据集。气象数据由中国科学院资源环境科学数据中心提供 (<http://www.resdc.cn/Default.aspx>)。

2.2 研究方法

2.2.1 AOD 数据反演

我国华南区域四季植被覆盖度较高,适用“暗像元算法”反演气溶胶光学厚度数据^[17],本文利用 MODIS L1B 数据反演大湾区气溶胶光学厚度,包括辐射校正、几何纠正、重采样、角度数据的几何校正、去云处理和气溶胶光学厚度反演等流程,采用绝对百分比对反演 AOD 数据进行误差检验^[25]。

2.2.2 多元逐步回归

逐步回归的思路:将自变量逐个引入方程,每添加一个变量后,对已选入的原变量进行显著性

检验,若已引入变量因新引入变量而对被解释变量的影响不再显著时,将剔除已引入变量。在方程中引入新变量或剔除不显著变量被称为逐步回归的一个步骤。对逐步回归的每一个步骤反复进行 F 检验,确保显著变量被引入,不显著变量被删除。

相较于其他多元线性回归分析,逐步回归分析优势表现为在多元线性回归的基础上,模型逐步引入、剔除变量,从而建立最优的回归模型,避免模型中变量的多重共线性,变量量纲不同也会影响分析结果,本研究使用归一法对数据进行标准化处理,消除数据量纲^[26]。

2.2.3 基于 ARIMA(AutoRegressive Integrated Moving Average)时序模拟模型

ARIMA 模型是基于 Box-Jenkins 模型提出的一种针对时间序列的模拟模型,由自回归模型(AR 模型)和移动平均模型(MA 模型)构成,即 ARIMA(p, d, q) 模型^[27]。ARIMA 模型的建模步骤如下:①序列平稳性检验;②根据自相关和偏相关图对模型进行定阶,确定 p, q 值;③在保证 SIC 与 AC 最小的原则下,选择最佳的 p, q 值。在此基础上对所建模型进行白噪音检验,利用所建模型检验其对原序列的拟合效果,最后利用模型 ARIMA(p, d, q) 进行未来短期时间尺度模拟,并用雷达图分析 2019-2021 年浓度高值月份下 PM_{2.5} 浓度时序特征。

3 结果与分析

3.1 超标期确定与 AOD 反演

表 1 显示了 2015 年内大湾区 PM_{2.5} 日浓度超标详情,浓度最大值出现在 2 月 11 日,最大浓度为 $107.48 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,超标出现月份为 1 月、2 月与 12 月。由于每月出现超标的时间相对集中,将超标时间进行合并,然后下载超标时间内的遥感影像(T_1, T_2, T_3),利用绝对百分比误差检验本研究反演 AOD 数据,误差通过检验,可开展下一步研究。

3.2 2015 年 PM_{2.5} 浓度超标时的空间模拟

利用 ArcGIS 的数据提取工具在各变量图层分别提取建模所需变量数据,构建多元逐步回归模型,模型汇总见表 2。逐步回归分析依次引入变量(大气压) X_2 , (AOD) X_1 , (风速) X_5 , (相对湿度) X_3 , 随着模型中变量数量的增加,调整后 R^2 逐渐增加,模型中变量 X_2, X_1, X_5, X_3 能共同解释因变

量变异的 68.2%。

表 1 研究区 PM_{2.5} 污染超标详情及 AOD 反演误差检验

Table 1 Details of PM_{2.5} pollution exceeding the standard and AOD inversion error inspection in the study area

日期	持续/d	最大值 /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	最小值 /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	影像时间	编号	实测	反演	误差/%
Jan 18th	1	79.29	66.19	A2015022.0250.006	T1	0.276	0.235	14.86
Jan 20 ~ 21th	2	107.31	92.74					
Feb 6 ~ 7th	2	96.31	83.49	A2015041.0320.006	T2	0.239	0.236	1.26
Feb 11 ~ 12th	2	107.48	92.13					
Feb 15th	1	81.91	69.66					
Dec 22 ~ 23th	2	82.05	80.82	A2015352.0325.006	T3	0.241	0.276	14.52

注: A2015022.0250.006 中, 字符 A 表示上午星 Terra, 2015022 表示数据采集的日期是 2015 年第 22 天, 0250 表示数据过境的时间(格林尼治时间), 006 代表产品版本为 Version006

表 2 模型汇总统计表

Table 2 Model summary statistics

模型汇总(标准化系数)	模型汇总(非标准化系数)	调整 R 方	F
$Y = 0.71 * X_2$	$Y = 123.26 * X_2$	0.51	173.06
$Y = 0.54 * X_2 + 0.37 * X_1$	$Y = -17.47 + 93.40 * X_2 + 108.43 * X_1$	0.62	134.93
$Y = 0.53 * X_2 + 0.32 * X_1 + 0.18 * X_5$	$Y = -45.61 + 90.86 * X_2 + 92.39 * X_1 + 72.30 * X_5$	0.64	101.33
$Y = 0.4 * X_2 + 0.24 * X_1 + 0.23 * X_5 + 0.26 * X_3$	$Y = -53.65 + 69.57 * X_2 + 69.03 * X_1 + 89.96 * X_5 + 46.63 * X_3$	0.68	90.46

依据《环境空气质量标准》(GB3095-2012), 将浓度低于 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (优) 定义为第一级; 鉴于污染等级为“良”的范围较大, 为进一步细化浓度值结构特征, 将浓度介于 $(35 \sim 75]$ 细分为 4 级, 步长为 10, 各浓度区间依次为 $(35 \sim 45]$ 、 $(45 \sim 55]$ 、

$(55 \sim 65]$ 和 $(65 \sim 75]$, 浓度等级依次记为: 良(1)、良(2)、良(3)和良(4); 将浓度高于 $75 \sim 115 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (轻度污染) 定义为第 6 级, 以上共包括 6 个浓度等级。2015 年超标期内 PM_{2.5} 的浓度状况模拟结果见图 2。

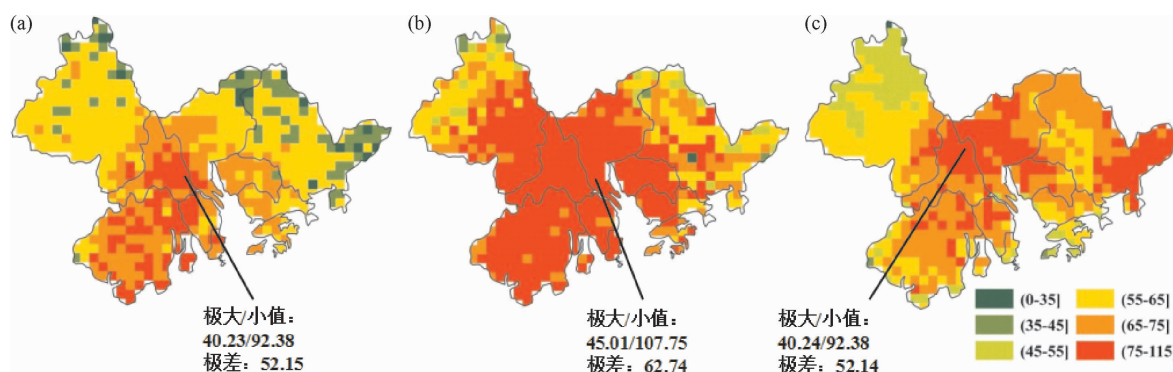


图 2 超标期内 PM_{2.5} 浓度值空间模拟结果/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 2 Spatial simulation results of PM_{2.5} concentration value during exceeding standard period/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

由图 2 可知, 浓度出现超标时, 模拟结果显示区域的极小值为 $40.23 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 极大值为 $107.75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 3 次的极差分别为 $52.15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $62.74 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $52.14 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 超标情况下, 全域浓度值差异较大, 大部分介于 $50 \sim 60$

$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间; 3 次浓度超标中, 浓度极大值与极差最大均发生在 T_2 。浓度超标时, 空间上整体呈现“中心-外围”浓度值递减的特征, 广佛交界, 中山以北为高浓度典型中心, 此外, 东莞等靠近该中心的区域会形成次级高值区; 结合各浓度等级范

围占全域面积比例(表3),可知当中心浓度值显著超标发生时(超标期 T_2),浓度等级在良(4)及以上约占了全域 3/4 的范围,此类情况下,次级高值区将会向外扩散至更广范围(图2(b))。

表3 各浓度等级占全域面积比例

Table 3 Proportion of each concentration level in the whole area

浓度区间	污染等级	T_1	T_2	T_3
		面积 比/%	面积 比例/%	面积 比例/%
(0~35]	优	0.00	0.00	0.00
(35~45]	良(1)	0.52	0.00	0.52
(45~55]	良(2)	12.17	9.57	13.04
(55~65]	良(3)	27.13	14.78	26.26
(65~75]	良(4)	36.70	25.04	36.70
(75~115]	轻度污染	23.48	50.61	23.48

3.3 时序浓度模拟结果

以广州市建模过程为例,具体说明建模过程,浓度时序数据一阶差分后序列的自相关图(ACF)和偏自相关图(PACF)见图3。据图可知序列基本位于置信区间,说明序列是平稳的。由图判断自相关函数在 $K=8$ 截尾,偏相关函数在 $K=3$ 截尾,则 p, q 值分别为 3 和 8。

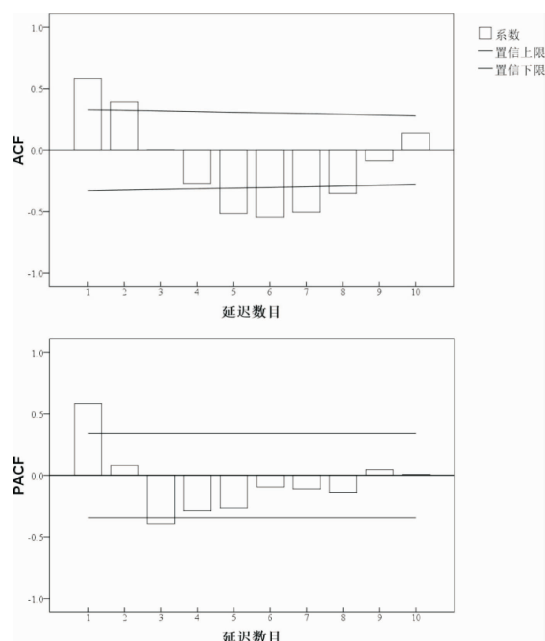


图3 一阶差分后自相关、偏自相关函数

Fig. 3 Autocorrelation and partial autocorrelation function after first-order difference

根据 p, q 值初步建立的模型,模型 ARIMA(3, 1, 8) 的模型拟合与模拟图见图4, ARIMA(3, 1, 8) R^2 为 0.41, 利用 2021 年 10 月观测值进行模拟精度检验, 10 月观测值为 $24.22 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 模拟值为 $21.47 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 相对误差为 0.11, 精度检验满足模拟要求, 说明 ARIMA 的短期模拟精度较高。模拟结果显示, 2021 年 11 月和 12 月浓度值分别为 $25.88 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $26.36 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

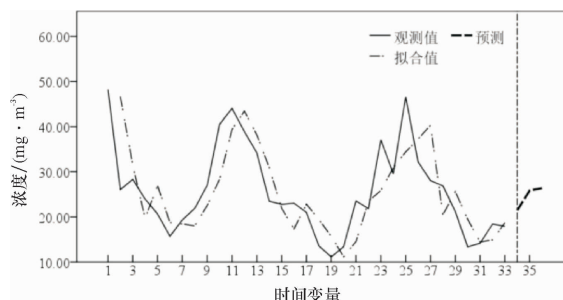


图4 2019 - 2021 年浓度高值月份浓度值拟合与模拟结果

Fig. 4 Concentration fitting and simulation results of high concentration months in 2019 - 2021

绘制雷达图来分析 2019 - 2021 年浓度高值易发月份的浓度值时序的演变与同期数值增减规律见图5。根据图5的结果,各子区域显示 1~2 月的浓度值在全年较高,且 1 月浓度值明显高于 2 月份浓度值,但进入 10 月以后,相较于上一年同期,各市浓度值均呈现递减的态势。

以广州市为例具体分析,2019 年 1 月和 2021 年 1 月浓度值分别为 $48.30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $46.58 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 2020 年 1 月浓度值为 $34.20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 增减趋势不稳定, 2 月份浓度值变化幅度较小。进入 10 月份, 2019 年浓度值为 $40.51 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 而 2020 年与 2021 年浓度值已降至 $21.86 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $24.22 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 变化幅度较大, 据观测数据, 2020 年 11~12 月浓度, 相较 2019 年同期, 呈现递减的变化, 变化幅度在 $5 \sim 10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 而根据模拟数据, 2021 年 11~12 月的浓度将继续延续这一规律, 浓度值继续减小。

东莞、深圳和惠州浓度特征在时序上也呈现年初浓度高, 增减幅度小的特征, 但进入 10 月后浓度值显著减小, 且降幅也强于广州市。与珠三角各市相比, 香港与澳门年初的浓度值也较高, 在 $30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右, 10~12 月数值稳定保持在 $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右, 低于同一时段的珠三角各市域。

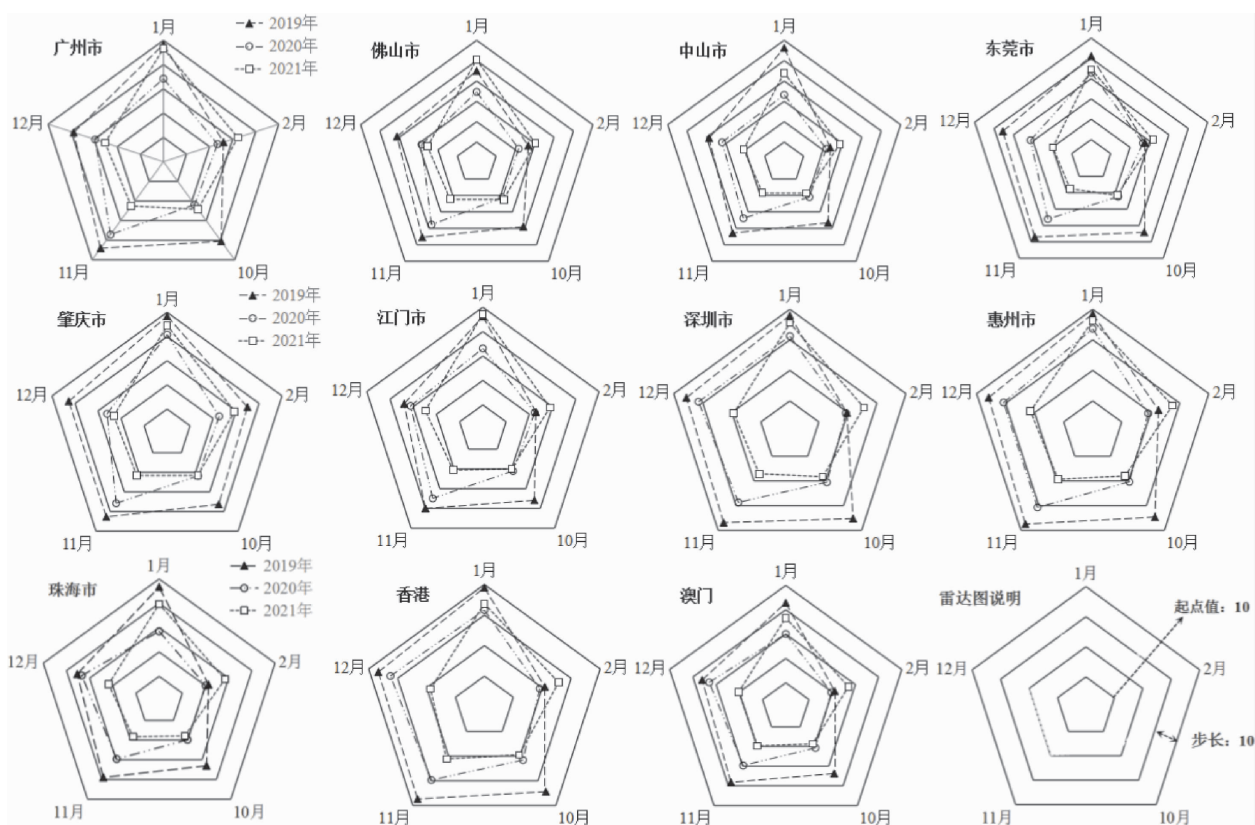


图 5 粤港澳各市及特区 2019–2021 年浓度高值月份月均浓度状况/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$

Fig. 5 Monthly average concentration of cities and the special zone in high concentration months from 2019 to 2021/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$

4 结论与讨论

本文以粤港澳大湾区超标期的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度特征为研究对象,一方面,利用气溶胶与气象要素数据模拟超标期时大湾区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间特征;另一方面,结合 ARIMA 模型分析了研究区 2019–2021 年秋冬季节的浓度值演变情况,得出了以下结果:

在 2015 年超标期下, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间上呈现“中心–外围”浓度值递减的特征,全域浓度值介于 $50 \sim 60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间。当中心浓度值显著超标发生时,高值范围会向外扩散。

经过检验, ARIMA 模型模拟短期城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的精度较高, 2019–2021 年的观测与模拟结果显示,近年来, 1~2 月的浓度值增减不明显,数值保持稳定; 1 月的浓度值为全年最高,需在该时段重点管控 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,各市 10~12 月浓度值均呈现递减的趋势。地域上相邻的单元其浓度值增减规律具有共性,如广、肇、佛等市,又如莞、

深、惠等市。

由此得到以下结论:相较于研究区全年浓度值在空间上呈“东南–西北”的三级梯度分异^[27],浓度发生超标时,研究区浓度值呈现“中心–外围”递减,2019–2021 年秋冬季节,研究区仅 1 月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值相对较高,需要开展整治专项行动,如综合运用热点网格、移动监测车等科技执法手段,在浓度重点防控区域逐步建立“监测–通报–溯源–整改”的长效机制。

尽管如此,由于研究认知水平的局限,本文的研究还有待进一步完善:①本研究选取了与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有关联性的因子构建多元回归模型,但地形条件、时间序列变化等因素也会影响浓度值^[28]。同时,由于粤港澳大湾区空间监测站较少且分布不均衡,将此数据与 AOD 数据结合开展 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的反演可能会存在不确定性;②空间统计模型适用于中长期的浓度空间静态评估,而短期的浓度可能会受到各种因素影响,仍用空间统计模型来模拟浓度,可能会与真实情况出现偏差,研究结果对制定浓度管控措施的参考价值有限,因此,对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间模拟尚需长期、深入研究。

参考文献:

- [1] 王枫云,任亚萍,刘鉴萱. 粤港澳大湾区城市群协同发展研究:理论进展与未来走向[J]. 探求, 2021(2): 65-74.
- [2] 罗雅红,龚建周,简钰清,等. 粤港澳大湾区 SO₂ 平均浓度与制造业、生产性服务业集聚的空间关联特征[J]. 生态经济, 2021, 37(2): 176-182.
- [3] 李登辉. 中国城市与城市群 PM_{2.5} 污染时空动态及影响因素[D]. 开封:河南大学, 2020.
- [4] 蒋超. 基于 MODIS 和地面监测的粤港澳大湾区 PM_{2.5} 浓度时空分异特征[D]. 广州:广州大学, 2020.
- [5] 张运林,睢晋玲,吴娴,等. 粤港澳大湾区 PM_{2.5} 时空分布特征及其与气象要素的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2272-2281.
- [6] 孙梦雨. 1998-2017 年黄土高原地区雾霾污染时空演变及其影响因素研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2019.
- [7] 赵秀玲. 中国城市典型空气污染物时空分布特征与影响因素研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2021.
- [8] 王德冬,秦聪. 区域 PM_{2.5} 时空回归建模与预测[J]. 中国环境监测, 2019, 35(5): 107-113.
- [9] 高吉喜,赵少华,侯鹏. 中国生态环境遥感四十年[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 705-719.
- [10] Xie Y Y, Zhao B, Zhang L, et al. Spatiotemporal variations of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations between 31 Chinese cities and their relationships with SO₂, NO₂, CO and O₃[J]. Particuology, 2015, 20(3): 141-149.
- [11] 赵冠伟,黄勋,李青莞,等. 广州市环境保护信访事件时空演变特征及对策研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(S1): 67-69.
- [12] 王德冬,秦聪. 区域 PM_{2.5} 时空回归建模与预测[J]. 中国环境监测, 2019, 35(5): 107-113.
- [13] 徐丹妮,王瑾婷,袁自冰,等. 汾渭平原复杂地形影响下冬季 PM_{2.5} 污染分布特征、来源及成因分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(4): 1184-1198.
- [14] 李婷苑,谭浩波,王春林,等. 卫星遥感 AOD 反演地面细颗粒物浓度方法与效果[J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 13-23.
- [15] 王睿. 京津冀及珠三角地区空气质量时空模式分析[D]. 武汉:武汉大学, 2019.
- [16] 刘畅,彭端,杜尧东,等. 珠三角地区典型浓雾和灰霾天气过程气象条件对比研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(9): 1818-1828.
- [17] 侯磊. 基于高分辨率遥感影像的气溶胶光学厚度反演研究[D]. 成都:电子科技大学, 2020.
- [18] 刘超,金梦怡,朱星航,等. 多尺度时空 PM_{2.5} 分布特征、影响要素、方法演进的综述及城市规划展望[J]. 西部人居环境学刊, 2021, 36(4): 9-18.
- [19] 彭斯俊,沈加超,朱雪. 基于 ARIMA 模型的 PM_{2.5} 预测[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(6): 125-128.
- [20] 牟敬锋,赵星,樊静洁,等. 基于 ARIMA 模型的深圳市空气质量指数时间序列预测研究[J]. 环境卫生学杂志, 2017, 7(2): 102-107, 117.
- [21] 岳玎利,钟流举,张涛,等. 珠三角地区大气 PM_{2.5} 理化特性季节规律与成因[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(4): 1-6, 12.
- [22] 张莹,赵燕. 珠三角区域 PM_{2.5} 浓度特征及时空变化规律[J]. 科技与创新, 2017(13): 138-139.
- [23] 简钰清,陈颖怡,谢圆圆,等. 1980-2015 年广东省乡村聚落的空间特征与演变[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(6): 698-706.
- [24] 夏志业,刘志红,王永前,等. MODIS 气溶胶光学厚度的 PM_{2.5} 质量浓度遥感反演研究[J]. 高原气象, 2015, 34(6): 1765-1771.
- [25] 康颖,王莉莉,辛金元,等. 基于 AERONET 和 OMI 数据分析中国北方典型地区气溶胶单次散射反照率的变化趋势[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(5): 537-551.
- [26] 薛薇. 统计分析与 SPSS 的应用[M]. 北京:中国人民大学出版社, 2014.
- [27] 杨文涛,譙鹏,刘贤赵,等. 2011-2017 年中国 PM_{2.5} 多尺度时空分异特征分析[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5236-5244.
- [28] 汪伟舵,吴涛涛,张子振. 基于 ARIMA 模型的杭州市 PM_{2.5} 预测[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2018, 34(3): 49-55.

【责任编辑:孙向荣】