

DOI: 10.5846/stxb202001210157

张运林, 睢晋玲, 吴 娟, 林美霞, 陈龙, 陈天翼. 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. 生态学报, 2021, 41(6): 2272-2281.

Zhang Y L, Sui J L, Wu X, Lin M X, Chen L, Chen T Y. Temporal and spatial distribution characteristics of $PM_{2.5}$ and its relationship with meteorological factors in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2272-2281.

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

张运林¹, 睢晋玲^{2,3,*}, 吴 娟², 林美霞^{2,3}, 陈 龙⁴, 陈天翼²

1 贵州师范学院, 生物科学学院, 贵阳 550018

2 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 深圳市源清环境技术服务有限公司, 深圳 518000

摘要: 细颗粒物($PM_{2.5}$)污染不仅是现代社会城市化进程中的痛点,也是城市大气环境研究不可忽略的重要焦点。粤港澳大湾区作为世界级城市群,既是城市区域经济社会文化发展的重要体现,更是国家区域发展战略的重要构成与政策实施落脚点,其生态环境的优劣尤其受瞩目。对 1999—2016 年大湾区地表 $PM_{2.5}$ 浓度栅格数据集进行了时空分布特征分析,其中空间自相关分析选取莫兰指数(Moran's I 指数)作为度量;并利用多元线性回归模型探讨研究区内 $PM_{2.5}$ 与气象要素之间关系。结果表明:粤港澳大湾区 1999—2016 年历年 $PM_{2.5}$ 浓度呈先增加后减小的趋势,2008 年为时间拐点,该时间节点之后空气质量显著提高,且 1999、2009、2016 三年,年平均 $PM_{2.5}$ 浓度相似值趋于聚集分布。冷热点分析结果表明:热点区域集中于湾区行政核心区域范围内;冷点集中于核心边缘区域,空气质量较优。利用皮尔森相关分析最终筛选出实际蒸散量(aet)、太阳辐射(srads)、最低温度(tmmn)、蒸汽压(vap)、饱和水汽压差(vpd)、风速(ws)等 6 个气象因子,利用回归分析判断影响 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布的显著因子。结果表明:本研究区太阳辐射与 $PM_{2.5}$ 浓度关系呈负相关,该结果与其他城市相关研究有较大差异,最小温度与 $PM_{2.5}$ 浓度呈正相关,风速与 $PM_{2.5}$ 浓度呈负相关,饱和水汽压差与 $PM_{2.5}$ 浓度呈正相关。

关键词: 粤港澳大湾区; $PM_{2.5}$ 浓度; 空间格局; 影响因素

Temporal and spatial distribution characteristics of $PM_{2.5}$ and its relationship with meteorological factors in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

ZHANG Yunlin¹, SUI Jinling^{2,3,*}, WU Xian², LIN Meixia^{2,3}, CHEN Long⁴, CHEN Tianyi²

1 School of Biological Sciences, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China

2 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Shenzhen Yuanqing Environmental Technology Service Co., Ltd., Shenzhen 518000, China

Abstract: Fine particulate matter ($PM_{2.5}$) pollution is a serious environmental problem in the process of urbanization in modern society, and it is one of the most important research hotspots in the study of urban atmospheric environment. As a world-class urban agglomeration, Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area is not only an important embodiment of the economic, social and cultural development of urban areas, but also an important component of the national regional development strategy and the foothold of policy implementation. Therefore, the ecological environment of this region is

基金项目: 贵州师范学院 2019 年度校级博士课题研究成果(2019BS005);国家自然科学基金项目(31370656);中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23030104)

收稿日期: 2020-01-21; **网络出版日期:** 2021-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jlsui@iue.ac.cn

particularly important. The temporal and spatial distribution characteristics of PM_{2.5} concentration data in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1999 to 2016 were analyzed. Moran's *I* index was selected as the measurement in spatial autocorrelation analysis. The relationship between PM_{2.5} concentration and meteorological factors in the study area was discussed by multiple linear regression model. The results indicated that the PM_{2.5} concentration in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area increased firstly and then decreased from 1999 to 2016. The air quality improved significantly after the highest concentration in 2008, and the similar values of annual average PM_{2.5} concentration tended to aggregate distribution in 1999, 2009 and 2016. The hot spots were concentrated in the administrative core area of the bay area; the cold spots were concentrated in the core edge area, where the air quality was better. Pearson correlation analysis (actual evapotranspiration (aet), solar radiation (srad), minimum temperature (tmmn), vapor pressure (vap), saturated vapor pressure difference (vpd), wind speed (ws)) was used to select six meteorological factors for regression analysis to evaluate the significant factors affecting the temporal and spatial distribution of PM_{2.5} concentration. The results showed that there was a negative correlation between srad and PM_{2.5} in this study area, which is quite different from other related studies in other cities. The tmmn and vpd were positively correlated with PM_{2.5} concentration, while ws was negatively correlated with PM_{2.5} concentration.

Key Words: Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; PM_{2.5} concentration; spatial pattern; influencing factors

细颗粒物(PM_{2.5})指环境空气中空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物^[1-3]。随着城市化和经济增长的加速,PM_{2.5}已经成为城市大气中的典型污染物,对大气能见度、气候变化、社会经济发展、城市热岛^[4-5]、生态系统服务等方面均具有一定的负面效应^[6-7],尤其对人体健康影响很大,导致人体心脏和肺部疾病发病率明显上升^[8-9]。世界范围内每年有近三百三十余万人口间接因空气污染死亡^[10]。

当前对于 PM_{2.5}的研究主要集中在源解析^[11-12]、成分组成^[13]、时空分布模式^[14-16]、高分辨率 PM_{2.5}浓度制图^[17-19]、健康影响^[6, 20]及自然和社会因素对 PM_{2.5}浓度的影响^[21-22]等方面。具体来看影响 PM_{2.5}浓度的因素包括气象条件、社会经济条件、交通流量、工业活动、化石燃料和其他人为活动等^[6]。在这些因素当中,气象条件是最重要的影响因素之一^[23]。

国内外有诸多研究着重关注气象要素和 PM_{2.5}浓度之间的相关关系^[23-26]。Pateraki 等^[27]发现温度和湿度变动对 PM_{2.5}浓度具有重要影响。贺祥等^[3]使用 GAM 广义可加模型研究南京市 PM_{2.5}浓度和自然条件的关系,发现温度、大气压和水气压对 PM_{2.5}浓度具有重要影响。风速也对 PM_{2.5}浓度具有重要影响,且风速超过 2m/s,能减轻 PM_{2.5}污染程度^[7]。Cheng 等^[24]人研究认为湿度是影响北京市 PM_{2.5}浓度变化的重要要素。然而当前这些研究都集中于单一城市尺度,对于城市群尺度的研究关注较少,并且这些研究主要使用短期数据(如一个季度或一年),这样会造成气象要素与 PM_{2.5}浓度之间关系的研究结果存在一定程度的偏差^[28]。

粤港澳大湾区是我国经济发展重要增长极,但大气环境质量方面对比国外三大湾区城市群仍存在差距,对其开展大气污染研究具有重要意义。因此基于 PM_{2.5}遥感反演数据与气象要素长时间序列数据,利用时间序列方法和空间自相关分析法分析 PM_{2.5}时空的变化特征;基于多元回归模型确定气象要素和 PM_{2.5}浓度之间的相互关系^[29]。旨在为生态环境部门开展大气环境监管和大气污染防治等工作提供可行依据。

1 研究区概况

粤港澳大湾区位于北纬 21°30'—24°40'和东经 111°21'—114°53'之间,由广州、深圳、佛山、东莞、惠州、中山、珠海、江门、肇庆九市和香港、澳门两个特别行政区组成,总面积约 5.6 万 km²。湾区整体地势较为平坦开阔,以平原为主,占全区总面积的 66.7%,另有山地、丘陵、残丘、台地等散布其间,其中丘陵、残丘和台地的面积约占 20%左右,全区海拔超过 500 m 的山地面积仅占总面积的 3%,主要分布在肇庆、博罗、从化和惠州等

湾区边缘地带,最高点海拔 1229 m。粤港澳大湾区地处亚热带季风气候,终年温暖湿润,气候宜人。年平均气温 21—23℃,最冷月 1 月均温 13—15℃,最热月 7 月均温 28℃ 以上。日照时间长,多年平均日照天数 240 天左右。年均降水量 1600—2300 mm,汛期(4—9 月)降水量占全年的 81%—85%。湾区主要土壤类型有水稻土、赤红壤、红壤、黄壤、潮土等,其中分布最广泛的是水稻土,主要分布在河流冲积平原、三角洲及滨海平原地区,占总面积的 95.5%。

2 数据和方法

2.1 数据源

PM_{2.5} 浓度数据来自达尔豪斯大学(Dalhousie University)大气成分分析项目组出版的全球数据集(http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page_id=140#V4.CH.02)^[6],空间分辨率为 0.1°×0.1°(近 1 km)。基于美国国家航天局(NASA)的中等分辨率成像仪 MODIS、多角度成像光谱仪 MISR 和海洋观测宽视场传感仪 SeaWiFS 反演得到气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)产品,利用大气传输模型(GEOS-Chem)估算全球地表 PM_{2.5} 浓度,并通过地理加权模型(Geographically Weighted Regression, GWR)对反演数据进行校正。该数据集包括 1998—2017 年全球地表 PM_{2.5} 浓度栅格数据,范围从 54.995°S—69.995°N 至 179.995°W—179.995°E。其优势在于具有较大时间跨度和空间范围等特点,被许多学者用于国家尺度或区域尺度研究。本研究所使用 1999—2016 年粤港澳大湾区 PM_{2.5} 浓度数据,由 ArcGIS 软件平台对数据集进行切割所得^[8]。

气象要素数据采用爱达荷大学(University of Idaho)西北知识网络出版的全球陆地表面每月气候和气候水平衡的数据集(TerraClimate)^[30]。该数据集包括 1958—2018 年全球地面历年月度气候和气候水平衡数据,空间分辨率为 1/24°×1/24°(近 4 km)。TerraClimate 使用气候辅助插值,将来自 WorldClim 数据集的高空间分辨率气候均值与较低空间分辨率长时间序列的气候数据(来自 CRU Ts4.0/JRA 55 数据集)相结合,以此生成月度降水、最高和最低温度、风速、蒸气压、以及太阳辐射等数据。同时 TerraClimate 使用水平衡模型生成月度地表水平衡数据。TerraClimate 数据集依据气候和预报元数据标准,为每个变量以 NetCDF 格式创建文件(年度和月度)。用户可以在 <https://doi.org/10.7923/G43J3B0R> 上访问涵盖所有变量记录期间的 NetCDF 文件压缩存档。本研究采用 1999—2016 年全球陆地表面年度气候和气候水平衡的数据集,基于 ArcGIS 软件平台利用粤港澳大湾区边界数据对数据集进行切割,变量包括实际蒸散量(actual evapotranspiration, aet)、参考蒸散量(reference evapotranspiration, pet)、降水(precipitation accumulation, ppt)、太阳辐射(downward surface shortwave radiation, srad)、最低温度(minimum temperature, Tmmn)、最高温度(maximum temperature, tmmx)、蒸汽压(vapor pressure, vap)、饱和水汽压差(vapor pressure deficit, vpd)、风速(wind-speed, ws)。

2.2 方法

2.2.1 空间自相关分析

空间自相关分析常用于研究地理空间上的各项观测值之间的相关程度,分为全局自相关和局部自相关。一般使用莫兰指数(Moran's I 指数)作为空间自相关的基本度量,该指数又可分为全局 Moran's I 指数和局部 Moran's I 指数。

全局空间自相关可用于描述整体研究区域内,所有空间对象之间的平均关联程度、空间分布模式及显著性。全局 Moran's I 指数的范围为-1 到+1,当值接近 1 时表示 PM_{2.5} 浓度在空间上存在显著自相关;反之,当值接近-1 时表示 PM_{2.5} 浓度在空间上存在巨大差异,而当值等于 0 时,表示空间不相关。全局 Moran's I 指数计算公式如下^[29, 31]:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (1)$$

式中, n 为空间单元的数量 ($n=11$); x_i 和 x_j 分别表示空间单元 i 和 j 的观测值, $i \neq j$ 。 w_{ij} 代表 i 和 j 之间的空间关系, 当 $w_{ij}=1$ 时, 表示空间单元 i 和 j 相邻, 而当 $w_{ij}=0$ 时, 表示空间单元 i 和 j 不相邻。

局部空间自相关可以用来描述不同空间位置上存在的空间关联模式, 用于分析局部空间异质性特征。局部自相关公式如下^[31]:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (2)$$

式中, I_i 表示位置 i 的局部 Moran' I 指数, 其余符号含义同公式 (1)。 $I_i > 0$ 表示属性值相似地区相临近 (高高集聚或低低集聚); $I_i < 0$ 表示属性值差异较大的地区相临近 (高低集聚或低高集聚)。本研究中, 高高集聚区域为热点, 低低集聚区域为冷点。

全局和局部自相关显著性通过 Z 统计量得知, 计算公式如下:

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}}$$

式中, $E(I)$ 和 $\text{Var}(I)$ 分别表示 Moran' I 指数期望值和方差值。

2.2.2 多元线性回归

本研究利用多元线性回归方法来分析 PM_{2.5} 浓度和气象要素间的关系, 以确定显著影响因素。为确保所有变量数据在同一时空尺度, 对因变量和自变量数据进行归一化处理, 公式如下:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

式中, Y 表示归一化的整体 PM_{2.5} 浓度或每个自变量 (气象要素) 网格对应的 PM_{2.5} 浓度, β 是回归系数, 相互项达到三阶以上。对网格进行逐个回归分析, 基于赤池信息量准则 (Akaike information criterion, AIC) 剔除不显著因子, 选择最适合的模型。同时为了防止模型过拟合, 对自变量进行多重共线性检验。利用皮尔森 (Pearson) 相关分析法对自变量因素进行相关检验, 剔除相关性系数大于 0.8 的因子, 将剩余因子纳入回归模型中进行拟合^[25]。

2.3 数据预处理

本研究中因变量 (Y) 为 PM_{2.5} 浓度数据, 自变量 X 为气象要素数据。将数据集分成两部分, 第一部分 (原始数据集的 20%) 为评价集, 用于选择最优的模型, 另一部分 (原始数据集的 80%) 为训练集, 用于拟合模型^[32]。模型拟合效果评价选用决定性系数 (R^2) 均方误差 (Mean Square Error, MSE)、平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)、平均绝对百分误差 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) 等参数^[8]。 R^2 值越大; MSE、MAE、MAPE 值越小, 代表模型拟合效果越好。各参数公式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2}$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{e_i}{y_i} \times 100\% \right|$$

式中, y 是真实值, y_i 是预测值, e_i 是 y 的标准差和 y_i 的标准差之间的差。

以上全部过程利用 ArcGIS 10.2 软件及 R 3.6.0 软件完成。

3 结果与讨论

3.1 时间分布特征

利用粤港澳大湾区 1999—2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据,分析粤港澳大湾区整体及广州、深圳和香港各城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度。结果表明:粤港澳大湾区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度为 $32.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$,广州为 $35.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$,深圳为 $31.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$,香港为 $27.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$;粤港澳大湾区 1999—2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度呈先增加后减小的变化趋势(图 1),广州、深圳和香港 3 个城市变化趋势与湾区整体相同,广州年均浓度高于粤港澳大湾区,香港反之,深圳与湾区持平。

湾区 1999—2008 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度变化呈上升趋势,由 $26.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 上升至 $40.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$,年均增加 $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$;2009—2016 年则呈波动下降趋势, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度在经历了 2014 年的波动起伏后,2016 年下降至 $26.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$,年均下降 $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。依据环境空气质量标准(GB 3095—2012), $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的一级、二级限值分别为 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$,1999—2016 年粤港澳大湾区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度值均超过一级限值,2007—2010 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度值则已超过二级限值,大气环境质量呈恶化趋势。

由上可知,2008 年是粤港澳大湾区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染情况由持续恶化趋向逐步改善的重要“拐点”。该现象与国家“十五计划”提出的环保相关政策及后期出台的“气十条”政策,即要求减少污染物排放;严控高耗能、高污染行业新增耗能;大力推行清洁生产;加快调整能源结构;强化节能环保指标约束;推行激励与约束并举的节能减排新机制,加大排污费征收力度等举措的实施有关。2014 年, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度小幅增加,污染呈恶化趋势,该现象与极端气候相关,如 2014 年,全国平均风速为 1.9 m/s ,小风日数达到 237 d,全国共出现 13 次大范围、持续性雾霾现象^[33]。

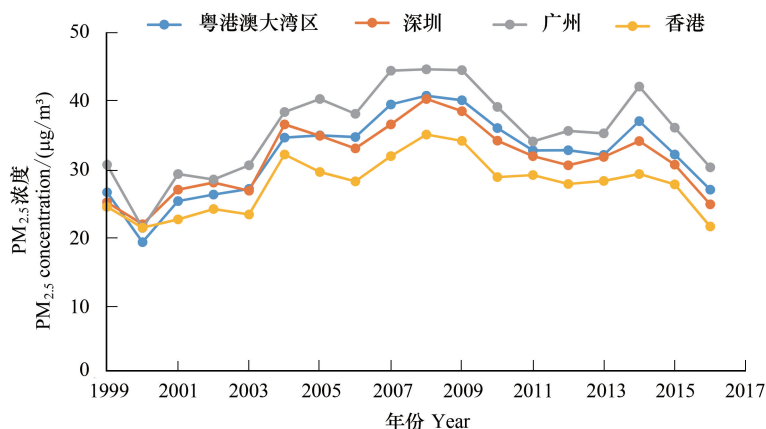
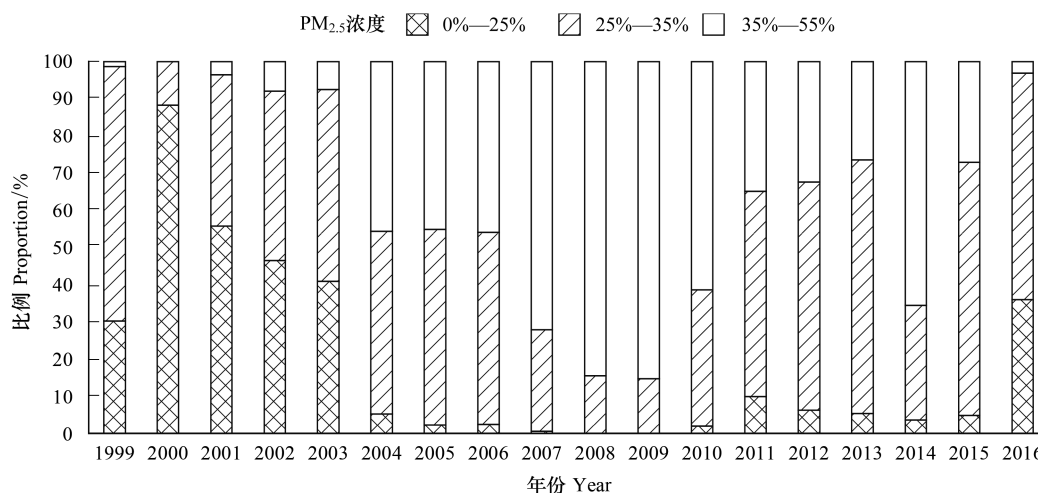


图 1 粤港澳大湾区 1999—2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度变化趋势

Fig.1 Trend of annual average concentration of $\text{PM}_{2.5}$ in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1999 to 2016

将 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度划分为 3 个区间,分别为 $0—25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $25—35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $35—55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。分析各区间内浓度值占比的变化情况(图 2)。结果表明:1999—2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度 $0—25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的区间比例呈先下降后上升“V”形趋势,由 1999 年的 30.4% 下降到 2008 年的 0 后,2016 年回升至 36.1%,2000 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度 $0—25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的区间比例最大达 88.3%,2008 年最小为 0。1999—2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度 $25—35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的区间比例呈先下降后上升再下降再上升的“W”形趋势,由 1999 年的 30.4% 下降到 2008 年的 0 后,2016 年回升至 36.1%,2000 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度 $0—25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的区间比例最大达 88.3%,2008 年最小为 0。综上, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度 $0—35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (二级标准限值)的栅格比例从 1999 年的 98.7% 下降到 2008 年的 15.7%,2016 年上升至 96.9%。由此可知,2008 年以来, $\text{PM}_{2.5}$ 污染情况得到改善,空气质量显著提高。

图2 粤港澳大湾区 1999—2016 年 PM_{2.5}年均浓度分区比例变化Fig.2 Area proportion of annual average concentration of PM_{2.5} by range in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1999 to 2016

3.2 空间分布特征

由 PM_{2.5}浓度随时间变化趋势可知,2008 年是粤港澳大湾区 PM_{2.5}浓度变化的拐点,因此本研究以 1999、2008、2016 年为时间节点,分析粤港澳大湾区 PM_{2.5}浓度空间集聚的变化特征。空间自相关分析结果表明(表 1),1999、2008、2016 年 PM_{2.5}年均浓度全局莫兰指数(Moran'*I* 指数)均通过 99%的显著性检验,粤港澳大湾区 PM_{2.5}年均浓度空间分布存在显著的自相关,即相似值趋于聚集分布。

表 1 粤港澳大湾区 PM_{2.5}浓度全局莫兰指数(Moran'*I* 指数)Table 1 Global Moran'*I* of PM_{2.5} concentration in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

指标 Index	1999 年	2008 年	2016 年
莫兰指数 Moran's <i>I</i>	0.95	0.88	0.87
<i>Z</i>	822.02	910.00	880.16
<i>P</i>	0	0	0

利用局部自相关分析方法提取粤港澳大湾区 PM_{2.5}年均浓度热冷点区(图 3)。结果表明:1999 年、2008 年和 2016 年粤港澳大湾区 PM_{2.5}浓度热点和冷点的位置变化不大,但范围变化十分明显;热点区域集中在粤港澳大湾区的核心区域,包括广州、佛山、东莞及肇庆、中山、江门市内靠近核心区的区域,即该区域为粤港澳大湾区持续稳定的 PM_{2.5}高污染区域。冷点区域集中在粤港澳大湾区的外围区域,包括惠州、深圳、香港、澳门、珠海及中山、江门和肇庆三市内远离核心区的区域,是粤港澳大湾区持续稳定的 PM_{2.5}浓度值较低的空气质量优良区域。

3.3 影响因素

本研究基于 PM_{2.5}浓度时间分布特征,分别选取 1999 年、2008 年和 2016 年三期 PM_{2.5}浓度数据及其对应年份的气象数据作为回归分析的因变量和自变量。

自变量选取实际蒸散量(aet)、参考蒸散量(pet)、降水(ppt)、太阳辐射(srads)、最低温度(tmmn)、最高温度(tmmx)、蒸汽压(vap)、饱和水汽压差(vpd)及风速(ws)共 9 个变量,利用皮尔森相关分析进行相关性检验。结果显示:参考蒸散量(pet)、降水(ppt)、最高温度(tmmx)3 个因子相关性系数较大,遂删除这些因子(图 4)。将剩余 6 个因子与 PM_{2.5}浓度数据纳入回归方程中,按数据预处理过程分析。

回归分析结果显示,模型在 99%水平下显著,决定系数(*R*²)为 0.62,校正决定系数(Adjusted *R*²)为 0.63,

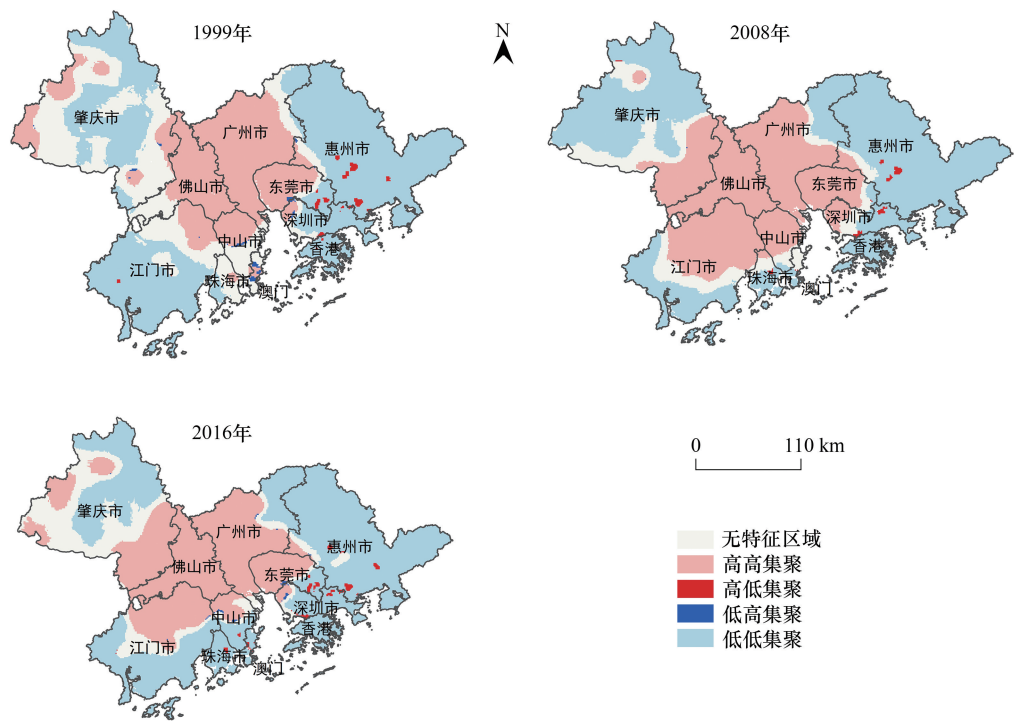


图 3 粤港澳大湾区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间集聚特征

Fig.3 Spatial agglomeration characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

均方误差 (MSE) 为 24.88, 平均绝对误差 (MAE) 为 $3.93\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均绝对百分误差 (MAPE) 为 13.17%。实际蒸散量 (aet)、太阳辐射 (srad)、最低温度 (tmmn)、蒸汽压 (vap)、饱和水汽压差 (vpd)、风速 (ws) 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有显著影响 (表 2)。

表 2 多元线性回归分析结果

Table 2 Result of multiple linear regression analysis for $\text{PM}_{2.5}$ concentration

解释变量 Explanatory variable	系数 Coefficient	标准误 Standard error	<i>t</i>	<i>P</i>
常数项 Constant	0.01	2.86	39.18	2×10^{-16}
实际蒸散量 aet	0.27	0	28.84	2×10^{-16}
太阳辐射 srad	-0.09	0	-14.35	2×10^{-16}
最低温度 tmmn	0.10	0.22	45.45	2×10^{-16}
蒸汽压 vap	-0.01	0.23	-46.06	2×10^{-16}
饱和水汽压差 vpd	0.74	2.22	-33.71	2×10^{-16}
风速 ws	-3.65	0.01	-24.95	2×10^{-16}
R^2				0.62
校正 R^2 Adjusted R^2				0.63
<i>P</i>				2.2×10^{-16}

aet;实际蒸散量 Actual evapotranspiration;srad;太阳辐射 Downward surface shortwave radiation;tmmn;最低温度 Minimum temperature;vap;蒸汽压 Vapor pressure;vpd;饱和水汽压差 Vapor pressure deficit;ws;风速 Wind-speed

辐射与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈负相关, 主要原因为: 辐射增大导致空气中 H_2O 自由基浓度增大; 地表臭氧作为一种二次生成的大气污染物, 其形成过程依赖于大气自由基的浓度, 而 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的下降, 使得其吸收的大气自由基减少, 进而增加了近地表臭氧的生成, 因此辐射增强会促进 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧的转化^[34]。近年来臭氧已成为大

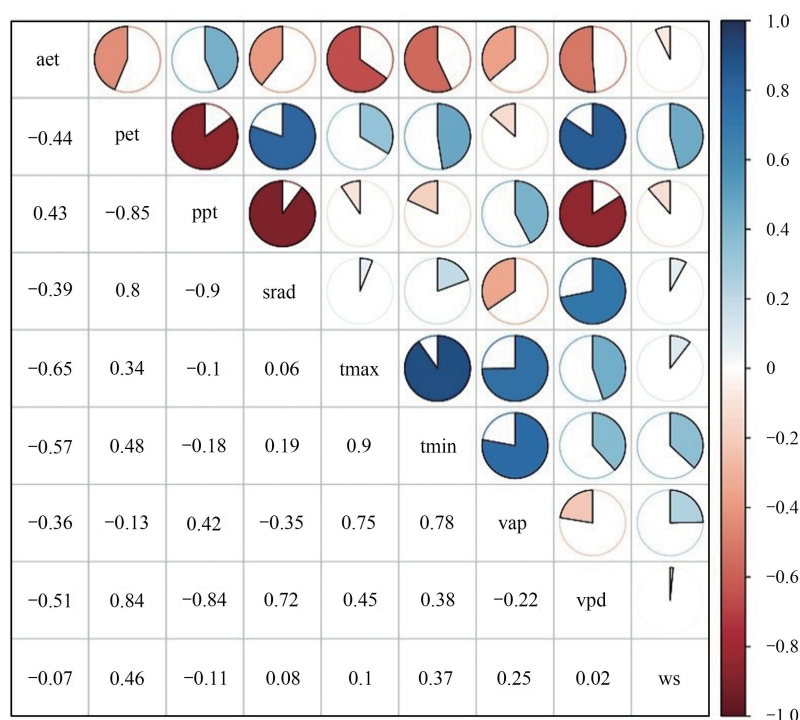


图4 自变量相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of independent variables

aet:实际蒸散量 Actual evapotranspiration; pet:参考蒸散量 Reference evapotranspiration; ppt:降水 Precipitation accumulation; srad:太阳辐射 Downward surface shortwave radiation; tmmn:最低温度 Minimum temperature; tmmx:最高温度 Maximum temperature; vap:水汽压 Vapor pressure; vpd:饱和水汽压差 Vapor pressure deficit; ws:风速 Wind-speed

湾区空气环境的首要污染物^[35-36],该现象也可证实 PM_{2.5}和臭氧的转化特征。

最小温度与 PM_{2.5}浓度呈正相关,主要原因为:温度影响颗粒物的形成,高温能促进前驱体间的光化学反应^[1];国内其他城市空气污染研究也得到类似结论^[33, 35, 37]。

饱和水汽压差,由空气温度和湿度组成,该变量代表空气的干燥程度,值越大,表示空气越干燥。该值与 PM_{2.5}浓度呈负相关;相关文献表明空气湿度越大,对颗粒物的冲刷作用越明显;湿度相对较小时,越有利于颗粒物生成^[1, 21, 24, 38-39]。

风速与 PM_{2.5}浓度呈负相关,主要原因为:风速显著影响空气污染物的扩散,风速增加有利于 PM_{2.5}的扩散。风力较小时,由于地表阻碍底层空气流动,颗粒物难以消散,伴随着外部污染缓慢输入,污染加剧;风力较大时,有利于颗粒物扩散,城市大气中颗粒物浓度降低^[1, 40]。

本研究结果多元线性回归系数较高,表明研究城市生态问题如大气污染时,使用多种数据进行长时间序列变化的研究,模型拟合效果会更好,且确定关键影响因素尤为重要^[1, 41]。

4 结论

(1)粤港澳大湾区 1999—2016 年历年 PM_{2.5}平均浓度变化呈先增加后减小趋势,广州、深圳和香港 3 个城市变化趋势和湾区全域相同,广州 PM_{2.5}年均浓度高于湾区,香港反之,深圳与湾区持平。2008 年是湾区终结 PM_{2.5}污染持续恶化现象的重要“拐点”。1999—2016 年,PM_{2.5}年均浓度 0—25 μg/m³的区间比例呈先下降后上升的变化趋势;1999、2008、2016 三个典型年份的区间比例分别为 30.4%、0、36.1%。2008 年后,大湾区空气质量明显改善,并逐步提高。

(2) 粤港澳大湾区 $PM_{2.5}$ 浓度热点和冷点的位置变化不大, 但范围变化十分明显。热点区域集中在粤港澳大湾区的核心区域, 包括广州、佛山、东莞及肇庆、中山、江门市中靠近核心区的区域。冷点区域集中在粤港澳大湾区的外围区域, 包括惠州、深圳、香港、澳门、珠海及中山、江门和肇庆三市中远离核心区的区域。

(3) 众多气象要素中, 实际蒸散量、太阳辐射、最低温度、蒸汽压、饱和水汽压差、风速对 $PM_{2.5}$ 浓度有显著影响。

参考文献 (References):

- [1] Hajiloo F, Hamzeh S, Gheysari M. Impact assessment of meteorological and environmental parameters on $PM_{2.5}$ concentrations using remote sensing data and GWR analysis (case study of Tehran). *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(24): 24331-24345.
- [2] Lin C Q, Li Y, Yuan Z B, Lau A K H, Li C C, Fung J C H. Using satellite remote sensing data to estimate the high-resolution distribution of ground-level $PM_{2.5}$. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 117-128.
- [3] 贺祥, 林振山. 基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的影响. *环境科学*, 2017, 38(1): 22-32.
- [4] Huang X, Cai Y F, Li J Y. Evidence of the mitigated urban particulate matter island (UPI) effect in China during 2000-2015. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 1327-1337.
- [5] Zheng Z F, Ren G Y, Wang H, Dou J X, Gao Z Q, Duan C F, Li Y B, Ngarukiymana J P, Zhao C, Cao C, Jiang M, Yang Y J. Relationship between fine-particle pollution and the urban heat island in Beijing, China: observational evidence. *Boundary-Layer Meteorology*, 2018, 169(1): 93-113.
- [6] Lu D B, Mao W L, Yang D Y, Zhao J N, Xu J H. Effects of land use and landscape pattern on $PM_{2.5}$ in Yangtze River Delta, China. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, 9(4): 705-713.
- [7] Zhou C S, Chen J, Wang S J. Examining the effects of socioeconomic development on fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in China's cities using spatial regression and the geographical detector technique. *Science of the Total Environment*, 2018, 619-620: 436-445.
- [8] Han X, Liu Y Q, Gao H, Ma J M, Mao X X, Wang Y T, Ma X D. Forecasting $PM_{2.5}$ induced male lung cancer morbidity in China using satellite retrieved $PM_{2.5}$ and spatial analysis. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 1009-1017.
- [9] Júnior W J R, Roig H L, Koutrakis P. A novel land use approach for assessment of human health: the relationship between urban structure types and cardiorespiratory disease risk. *Environment International*, 2015, 85: 334-342.
- [10] Huang Y P, Yuan M, Lu Y P. Spatially varying relationships between surface urban heat islands and driving factors across cities in China. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2019, 46(2): 377-394.
- [11] Suleiman A, Tight M R, Quinn A D. Applying machine learning methods in managing urban concentrations of traffic-related particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$). *Atmospheric Pollution Research*, 2019, 10(1): 134-144.
- [12] Tao J, Zhang L M, Cao J J, Zhong L J, Chen D S, Yang Y H, Chen D H, Chen L G, Zhang Z S, Wu Y F, Xia Y J, Ye S Q, Zhang R J. Source apportionment of $PM_{2.5}$ at urban and suburban areas of the Pearl River Delta region, south China-with emphasis on ship emissions. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 1559-1570.
- [13] Meng X, Hand J L, Schichtel B A, Liu Y. Space-time trends of $PM_{2.5}$ constituents in the conterminous United States estimated by a machine learning approach, 2005-2015. *Environment International*, 2018, 121: 1137-1147.
- [14] Lin G, Fu J Y, Jiang D, Hu W S, Dong D L, Huang Y H, Zhao M D. Spatio-temporal variation of $PM_{2.5}$ concentrations and their relationship with geographic and socioeconomic factors in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11(1): 173-186.
- [15] Lu D B, Xu J H, Yang D Y, Zhao J N. Spatio-temporal variation and influence factors of $PM_{2.5}$ concentrations in China from 1998 to 2014. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, 8(6): 1151-1159.
- [16] 曾浩, 丁镭. 长江经济带城市雾霾污染 $PM_{2.5}$ 时空格局演变及影响因素研究. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2019, 53(5): 724-734.
- [17] Fang X, Zou B, Liu X P, Sternberg T, Zhai L. Satellite-based ground $PM_{2.5}$ estimation using timely structure adaptive modeling. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 152-163.
- [18] Guo Y X, Tang Q H, Gong D Y, Zhang Z Y. Estimating ground-level $PM_{2.5}$ concentrations in Beijing using a satellite-based geographically and temporally weighted regression model. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 198: 140-149.
- [19] Song W Z, Jia H F, Huang J F, Zhang Y Y. A satellite-based geographically weighted regression model for regional $PM_{2.5}$ estimation over the Pearl River Delta region in China. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 154: 1-7.
- [20] Fan S X, Li X P, Han J, Gao Y, Dong L. Field assessment of the impacts of landscape structure on different-sized airborne particles in residential areas of Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 2017, 166: 192-203.

- [21] 柏玲, 姜磊, 陈忠升. 长江中游城市群 PM_{2.5}时空特征及影响因素研究. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 960-968.
- [22] 苏维, 张帅珺, 赖新云, 古新仁, 赖胜男, 黄国贤, 张志坚, 刘苑秋. 南昌市空气 PM_{2.5}和 PM₁₀的时空动态及其影响因素. 应用生态学报, 2017, 28(1): 257-265.
- [23] Zhang Z Y, Zhang X L, Gong D Y, Quan W J, Zhao X J, Ma Z Q, Kim S J. Evolution of surface O₃ and PM_{2.5} concentrations and their relationships with meteorological conditions over the last decade in Beijing. Atmospheric Environment, 2015, 108: 67-75.
- [24] Cheng Y, He K B, Du Z Y, Zheng M, Duan F K, Ma Y L. Humidity plays an important role in the PM_{2.5} pollution in Beijing. Environmental Pollution, 2015, 197: 68-75.
- [25] Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J. Correlations between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change. Atmospheric Environment, 2010, 44(32): 3976-3984.
- [26] Yang Q Q, Yuan Q Q, Li T W, Shen H F, Zhang L P. The relationships between PM_{2.5} and meteorological factors in China: seasonal and regional variations. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(12): 1510.
- [27] Pateraki S, Asimakopoulou D N, Flocas H A, Maggos T, Vasilakos C. The role of meteorology on different sized aerosol fractions (PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{2.5-10}). Science of the Total Environment, 2012, 419: 124-135.
- [28] Chen G B, Knibbs L D, Zhang W Y, Li S S, Cao W, Guo J P, Ren H Y, Wang B G, Wang H, Williams G, Hamm N A S, Guo Y M. Estimating spatiotemporal distribution of PM₁ concentrations in China with satellite remote sensing, meteorology, and land use information. Environmental Pollution, 2018, 233: 1086-1094.
- [29] Ye W F, Ma Z Y, Ha X Z. Spatial-temporal patterns of PM_{2.5} concentrations for 338 Chinese cities. Science of the Total Environment, 2018, 631-632: 524-533.
- [30] Abatzoglou J T, Dobrowski S Z, Parks S A, Hegewisch K C. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. Scientific Data, 2018, 5: 170191.
- [31] Yin C H, He Q S, Liu Y F, Chen W Q, Gao Y. Inequality of public health and its role in spatial accessibility to medical facilities in China. Applied Geography, 2018, 92: 50-62.
- [32] Benito Garzón M, Blazek R, Neteler M, Sánchez de Dios R, Ollero S H, Furlanello C. Predicting habitat suitability with machine learning models: the potential area of *Pinus sylvestris* L. in the Iberian Peninsula. Ecological Modelling, 2006, 197(3/4): 383-393.
- [33] 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬. 长江经济带 PM_{2.5}分布格局演变及其影响因素. 环境科学, 2019, 41(3): 1013-1024.
- [34] Li K, Jacob D J, Liao H, Lu S, Zhang Q, Bates K H. Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(2): 422-427.
- [35] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 宋永永. 汾渭平原 PM_{2.5}浓度的影响因素及空间溢出效应. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3539-3548.
- [36] 张海霞, 程先富, 陈冉慧. 安徽省 PM_{2.5}时空分布特征及关键影响因素识别研究. 环境科学学报, 2018, 38(3): 1080-1089.
- [37] Chen Z Y, Xie X M, Cai J, Chen D L, Gao B B, He B, Cheng N L, Xu B. Understanding meteorological influences on PM_{2.5} concentrations across China: a temporal and spatial perspective. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(8): 5343-5358.
- [38] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 郑晓欣. 冬季 PM_{2.5}的气象影响因素解析. 生态学报, 2016, 36(24): 7897-7907.
- [39] 毛婉柳, 徐建华, 卢德彬, 杨东阳, 赵佳楠. 2015 年长三角地区城市 PM_{2.5}时空格局及影响因素分析. 长江流域资源与环境, 2017, 26(2): 264-272.
- [40] 赵卉伊祺, 周卫健, 牛振川, 冯添. 西安市 2013—2017 年大气 PM_{2.5}的时空变化特征及影响因素分析. 地球环境学报, 2019, 10(3): 248-256.
- [41] 吕桅桅, 李兰. 湖北省主要观测站 PM_{2.5}污染特征及气象要素的影响分析. 生态环境学报, 2018, 27(11): 2073-2080.