



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202205169 中图分类号 X51 文献标识码 A

代园园, 龚绍琦, 张存杰. 粤港澳大湾区空气污染物的时空分布及其影响因素[J]. 环境工程学报, 2022, 16(12): 4001-4017. [DAI Yuanyuan, GONG Shaoqi, ZHANG Cunjie. Analysis on the temporal and spatial distribution and influencing factors of air pollutants in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(12): 4001-4017.]

# 粤港澳大湾区空气污染物的时空分布及其影响因素

代园园<sup>1</sup>, 龚绍琦<sup>1,✉</sup>, 张存杰<sup>2</sup>

1. 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 南京 210044; 2. 国家气候中心, 北京 100081

**摘要** 基于粤港澳珠三角空气质量监测数据, 利用克里金插值法和 Spearman 秩系数相关法分析了 2015—2021 年大湾区空气污染物的时空分布特征, 利用灰色关联分析法分析了自然、社会因素对空气污染物的影响。结果表明, 近 7 年大湾区的空气质量整体向好,  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  年均值分别为  $40.32$ 、 $23.38 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 均低于新标准二级限值,  $O_3$ 、 $NO_2$ 、 $SO_2$  年均值分别为  $51.68$ 、 $33.45$  和  $6.61 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。其中,  $SO_2$  质量浓度低于新标准一级限值,  $CO$  年均值为  $0.68 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $CO$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{10}$  和  $SO_2$  年均质量浓度呈下降趋势, 降幅分别为 23.67%、39.48%、27.02%、33.75% 和 41.21%, 季节上表现为冬季最高、春秋季节次之、夏季最低。 $O_3$  年均质量浓度呈波浪上升趋势, 升幅为 14.54%, 季节变化为: 秋季>春季>冬季>夏季,  $O_3$  质量浓度升高的原因可能是副热带高压带和台风外围的大气环流形式等不利气象条件和  $O_3$  前体物高排放逐渐升高等人为排放因素等共同影响的结果。 $O_3$  的空间分布表现为东莞、深圳、港澳和江门南部等东部沿海地区高于中西部内陆地区, 高值质量浓度达  $48\sim 70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 其他污染物质量浓度呈“中西—东部”递减趋势。气温、日照时数和风速与  $CO$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  和  $SO_2$  质量浓度呈负相关, 与  $O_3$  呈正相关, 相对湿度与  $O_3$  呈负相关, 与其他污染物呈正相关, 降水量对珠三角三地污染物质量浓度影响不一。能源消耗、工业生产、人口和机动车数据等是影响大湾区空气质量的主要因素。本研究结果可为粤港澳大湾区在大气污染防治、环保策略制定等方面提供参考。

**关键词** 空气污染物; 时空分布; 灰色关联分析; 粤港澳大湾区

影响生态环境质量的常规空气污染物主要包括: 一氧化碳 ( $CO$ )、臭氧 ( $O_3$ )、细颗粒物 ( $PM_{10}$ )、可吸入颗粒物 ( $PM_{2.5}$ )、二氧化氮 ( $NO_2$ ) 和二氧化硫 ( $SO_2$ )。为监测污染排放状况, 我国在 2012 年发布《环境空气质量标准》(GB3095-2012) (以下简称“新标准”), 并实施《环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 (试行)》(HJ633-2012) (以下简称“新评价体系”) [1]。污染物质量浓度不仅可指示区域污染排放情况, 还可反映区域的空气质量状况。当前国内外学者对空气污染物的研究主要集中在成分组成分析 [2-3]、时空演变格局 [4-6]、健康风险评估 [7-8]、影响因子研究 [9-10]、预测模型研究 [11-12] 等方面。严重的大气污染不仅降低大气能见度和影响局部地区的气候, 还会引发各种疾病, 危害人群健康 [7-8]。探索空气污染物的时空分布特征和影响机制可以准确把握污染物变化规律, 有利于有效控制污染物排放和改善大气环境, 从而减少对人类的危害。

收稿日期: 2022-05-28; 录用日期: 2022-11-26

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFA0608203); 中国气象局气象软科学重点项目 (2021ZDIANXM19); 江苏省研究生科研创新项目 (KYCX22\_1215)

第一作者: 代园园 (1996—), 女, 硕士研究生, [dyy18567171446@163.com](mailto:dyy18567171446@163.com); ✉通信作者: 龚绍琦 (1979—), 男, 副教授, [shaogong@163.com](mailto:shaogong@163.com)

2013年以来,我国各地的 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $CO$ 等空气污染物质量浓度显著下降, $O_3$ 质量浓度则逐年上升,在空间上具有明显的异质性。 $O_3$ 高质量浓度区集中在中东部地区,东部沿海和西部人烟稀少地区的污染物质量浓度较低<sup>[4-6]</sup>。区域空气污染物质量浓度受自然环境因素和社会经济因素的共同影响<sup>[9-10,13-16]</sup>,人类生产生活导致的污染物排放是空气污染物的重要来源之一,其中交通流量、人口密度、化石燃料等与污染物质量浓度呈正相关关系<sup>[14-15]</sup>。在人为因素和污染物排放特征相对稳定下,气象条件占主导地位,风速、气压、降水量和相对湿度等对空气污染物质量浓度有显著影响,其中强降水和风速可以净化空气和稀释污染物<sup>[17-18]</sup>。各污染物间也会相互影响、转化,促使其他污染物质量浓度升高或者减少<sup>[19-20]</sup>。有部分学者利用社会和气象影响因子来建立预测污染物质量浓度的模型<sup>[11-12]</sup>,了解污染物变化趋势。因此,掌握区域污染物质量浓度变化特征、准确了解影响污染物质量浓度的因子,是准确估算污染物质量浓度的前提,也是有效防控防治污染物质量浓度的必要条件。

2017年,创建粤港澳大湾区(以下简称“大湾区”)已被提升至国家战略层面。近年来,大湾区经济水平不断提高,但生态环境质量与世界其他湾区相比仍存在一定差距<sup>[21-22]</sup>。提升生态环境质量是大湾区协同发展的紧要任务,也是“双碳”政策下的现实追求。目前,对京津冀<sup>[6]</sup>、长江三角洲<sup>[13,23]</sup>地区空气污染物的研究颇多,仅有少量学者对大湾区部分污染物或部分城市的短期历史数据进行了整理归纳<sup>[24-25]</sup>,而对大湾区提出以来的各种污染物时空分布及影响因素的精细化研究相对有限。

本研究利用2015—2021年大湾区空气质量地面监测数据,分析各个空气污染物的年、月、季节的时序变化特征及空间分布特征,定量分析污染物空间变化趋势,并基于灰色关联分析法确定气象因素、社会经济因素对该区域空气污染物的相关关系,旨在摸清大湾区空气污染物时空演变特征和影响因素,以为环保部门在大气污染防治、环保策略制定等方面提供可行依据,也为大湾区世界级城市群的建设提供参考。

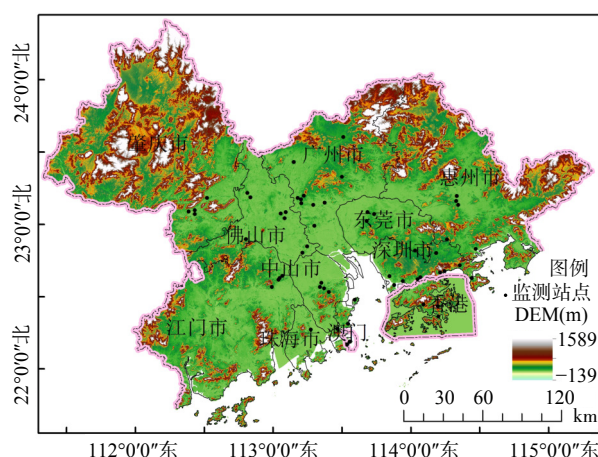
## 1 研究区概况

大湾区是由广东省的广州、深圳两个副省级市和珠海、佛山、东莞、中山、江门、惠州、肇庆7个地级市及2个特别行政区(香港特别行政区、澳门特别行政区)组成的城市群(图1)。以下将珠江三角洲的9个城市简称为“珠三角9市”。大湾区三面环山,一面沿海,海岸带长达1479 km,海拔为-139~1589 m。大湾区属热带、亚热带气候,年均气温在21~23℃,年日照时数为2000 h,四季分布均匀,年降水量在1500 mm以上,雨季集中在4—9月,全年温热湿润,受季风气候影响,冬季盛行偏北风,天气干燥,夏季盛行偏南风,湿润多雨。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据获取

珠三角9市57个国控站的 $CO$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $O_3$ 污染物逐小时数据来自中国环境监测总站。香港特别行政区3个站点逐小时数据来自特区环境保护署。澳门特别行政区逐月的数



注:文本所有地图基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4632号标准地图制作,底图边界无修改。

图1 大湾区空气质量监测站点分布图

Fig. 1 Distribution of air quality monitoring stations in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

据则是来自广东省生态环境厅发布的粤港澳珠三角区域空气监测网络监测结果报告。数据时间跨度均为 2015 年 1 月 1 日—2021 年 12 月 31 日。根据气候统计法将大湾区季节划分：3—5 月为春季，6—8 月为夏季，9—11 月为秋季，12 月至次年 2 月为冬季。

气象数据来源于欧洲中期天气预报中心再分析数据集 (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)。空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，时间分辨率为逐月，数据日期与空气质量数据一致。选取的气象数据主要有气温、相对湿度、风速、总降水量和日照时数。社会经济因素来源于中国统计年鉴，根据文献 [15,24]，选择人口密度、GDP 总值、GDP 增速、人均 GDP、工业生产总产值、第二产业增长率、能源消耗总量和工业电力消耗量、机动车数量、环境治理资金等因素。

## 2.2 分析方法

1) Kriging 插值法。克里金插值法是基于变异函数理论和结构分析，根据空间上已知若干离散点的观测值，来估计空间上任意一点的属性值<sup>[26]</sup>。对研究区域各污染物站点质量浓度数据进行 Kriging 插值，分析污染物空间分布状况。

2) Spearman 秩系数法。Spearman 秩系数相关法是常用于评价各项污染物随时间变化规律，对各项污染物变化趋势做定量分析，也可以评估变量之间的相关性<sup>[24]</sup>。利用 Spearman 秩相关法定量分析污染物空间变化趋势，并分析各污染物与气象因素、社会经济因素的相关关系。

3) 灰色关联分析法。灰色关联分析法即根据参考数列与比较数列的变化曲线的相似程度来判断各因素之间的关联程度<sup>[27]</sup>。利用灰色关联分析法确定社会经济因素对珠港澳三地空气污染物的关联度。

## 3 结果与分析

### 3.1 粤港澳大湾区污染物质量浓度的时间变化特征

将研究区域分为珠三角 9 市、香港特别行政区、澳门特别行政区，以及整个大湾区 4 个研究子区，重点分析相关区域内 6 个污染物质量浓度的时间变化特征。表 1 是常规环境空气污染物质量浓度限值<sup>[1]</sup>。

#### 3.1.1 珠港澳 3 子区内污染物质量浓度的年际变化特征

图 2 和表 2 分别为 2015—2021 年珠港澳 3 个研究子区内各污染物年均质量浓度变化特征图 and 变化幅度。2015—2021 年大湾区 CO、PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub> 和 SO<sub>2</sub> 质量浓度年均值分别为  $(0.68 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $(23.38 \pm 5.815) \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $(33.45 \pm 5.36) \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $(40.32 \pm 8.99) \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $(6.61 \pm 2.31) \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，其中 PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub> 和 PM<sub>10</sub> 低于新标准二级限值，SO<sub>2</sub> 低于新标准一级限值<sup>[1]</sup>，且呈下降趋势，降幅分别为 23.67%、39.48%、

27.02%、33.70% 和 41.21%。这说明大湾区环境污染程度降低，空气质量逐渐提高。O<sub>3</sub> 质量浓度年均值为  $(51.67 \pm 3.67) \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，呈上升趋势，升幅为 14.54%，造成大湾区 O<sub>3</sub> 质量浓度升高的原因是副热带高压带和台风外围的大气环流形式、稳定大气层、风速较小等不利气象条件和 O<sub>3</sub> 前体物高排放等人为排放因素的共同影响<sup>[28-32]</sup>。受疫情的影响，工业生产、交通排放污染物减少，大湾区

表 1 常规环境空气污染物质量浓度限值

Table 1 Concentration limits of conventional ambient air pollutants

污染物	平均时间	质量浓度限值		单位
		一级	二级	
CO	24 h 平均	4	4	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
	24 h 平均	80	80	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
NO <sub>2</sub>	年平均	40	40	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
	日最大 8 h 平均	100	160	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
PM <sub>10</sub>	24 h 平均	50	150	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
	年平均	40	70	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
PM <sub>2.5</sub>	24 h 平均	35	75	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
	年平均	15	35	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
SO <sub>2</sub>	24 h 平均	50	150	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
	年平均	20	60	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$



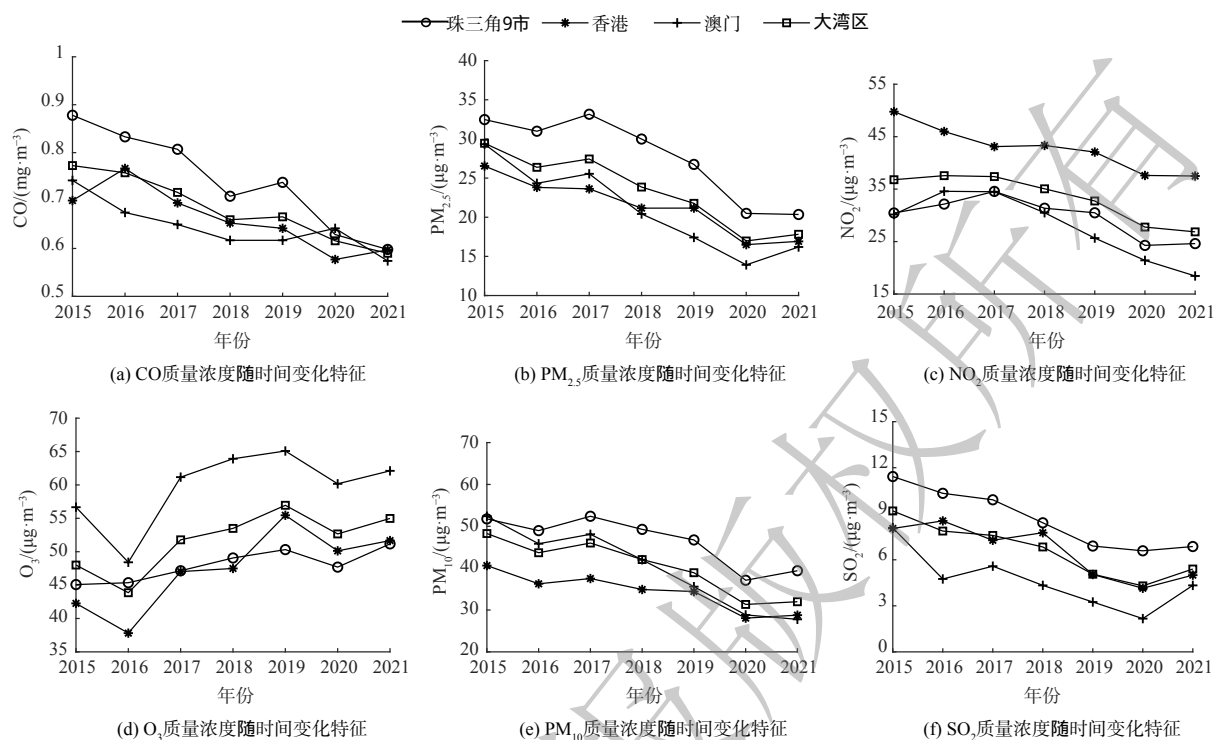


图2 珠港澳3个子区各污染物年均质量浓度时间变化特征

Fig. 2 Temporal variation characteristics of annual average concentrations of pollutants in Pearl River Delta, Hong Kong and Macao

2020年O<sub>3</sub>质量浓度较2019年同期下降7.53%，一次污染源为主的CO、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>和SO<sub>2</sub>分别下降7.61%、15.20%、19.48%、22.08%、15.05%。

珠三角9市CO、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>和SO<sub>2</sub>质量浓度高于整个大湾区，但仍低于新标准二级限值<sup>[1]</sup>，其变化趋势与整个大湾区一致，2015—2021年降幅分别为31.89%、38.32%、23.92%和39.91%。NO<sub>2</sub>质量浓度低于整个大湾区，为下降趋势，降幅为19.17%。O<sub>3</sub>质量浓度低于整个大湾区，变化趋势与整个大湾区一致，升幅为13.52%。

香港特别行政区的PM<sub>2.5</sub>、O<sub>3</sub>、PM<sub>10</sub>质量浓度低于整个大湾区的平均值。PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>均为下降趋势，降幅分别为36.26%、30.92%；O<sub>3</sub>为上升趋势，升幅为22.25%；CO、SO<sub>2</sub>质量浓度与整个大湾区平均浓度相当，变化趋势与整个大湾区一致，降幅分别为24.68%、37.83%；NO<sub>2</sub>质量浓度高于整个大湾区的平均值，变化趋势与大湾区一致，降幅为24.64%，2020年质量浓度降为37.60μg·m<sup>-3</sup>，低于新标准一级限值。这可能与香港特别行政区政府在2019年开始应用行车隧道空气净化系统有关<sup>[30]</sup>。

澳门特别行政区的CO、PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>质量浓度均低于整个大湾区的平均值，变化趋势与整个大湾区一致，降幅分别为22.64%、44.77%、38.86%、46.39%。PM<sub>10</sub>质量浓度与整个大湾区平

表2 珠港澳3个子区各污染物年均质量浓度变化幅度  
Table 2 Variation range of annual average concentration of pollutants in Zhuhai, Hong Kong and Macao

污染物	珠三角9市	香港特别行政区	澳门特别行政区	整个大湾区
CO	-31.89%	-24.68%	-22.64%	-23.67%
PM <sub>2.5</sub>	-38.32%	-36.26%	-44.77%	-39.48%
NO <sub>2</sub>	-19.17%	-24.64%	-38.86%	-27.02%
O <sub>3</sub>	13.52%	22.25%	9.61%	14.54%
PM <sub>10</sub>	-23.92%	-30.92%	-47.01%	-33.70%
SO <sub>2</sub>	-39.91%	-37.83%	-46.39%	-41.21%

均浓度相当, 降幅为 47.01%;  $O_3$  质量浓度高于整个大湾区, 2015—2021 年升幅为 9.61%, 为 48.42~65.08  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。尤其是 2019 年,  $O_3$  年均质量浓度达最高, 是澳门特别行政区  $O_3$  污染最严重的一年, 区域排放、大气环流是  $O_3$  主要来源, 而移动源、面源和植物源是主要内源<sup>[28,33]</sup>。

### 3.1.2 珠港澳地区污染物质量浓度的月、季变化特征

图 3 是珠港澳 3 个研究子区内各污染物月度、季度质量浓度变化特征图。整个大湾区  $CO$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  和  $SO_2$  质量浓度月均值变化趋势呈“U”型。其中, 6—7 月为谷值, 最低质量浓度分别为 0.53  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、21.55  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、21.87  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、10.60  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 5.08  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 12 月至次年 1 月为峰值, 最高质量浓度分别为 0.89  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、48.96  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、61.75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、36.71  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 9.27  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。冬季最高、春秋季次之、夏季最低, 与文献<sup>[31,34]</sup>的研究结果一致。分析其原因可能有: 夏季以东南风为主导, 日降雨量大, 扩散条件适宜,  $CO$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{10}$  和  $SO_2$  与温度、风速和日照时数呈负相关, 高温会促进污染物的氧化速率加快; 大风天气有利于扩散污染物, 从而降低污染物质量浓度<sup>[31]</sup>; 冬季低温、小雨量等不利气象条件对  $PM_{2.5}$  等颗粒物的冲刷和扩散作用不明显, 并且低温使汽车燃油燃烧不充分、生物质燃烧, 导致污染物的排放量增加; 受西伯利亚高压和北半球地转偏向力的影响, 易受内陆污染物的影响, 也会导致大湾区冬季污染物质量浓度升高<sup>[35-36]</sup>。

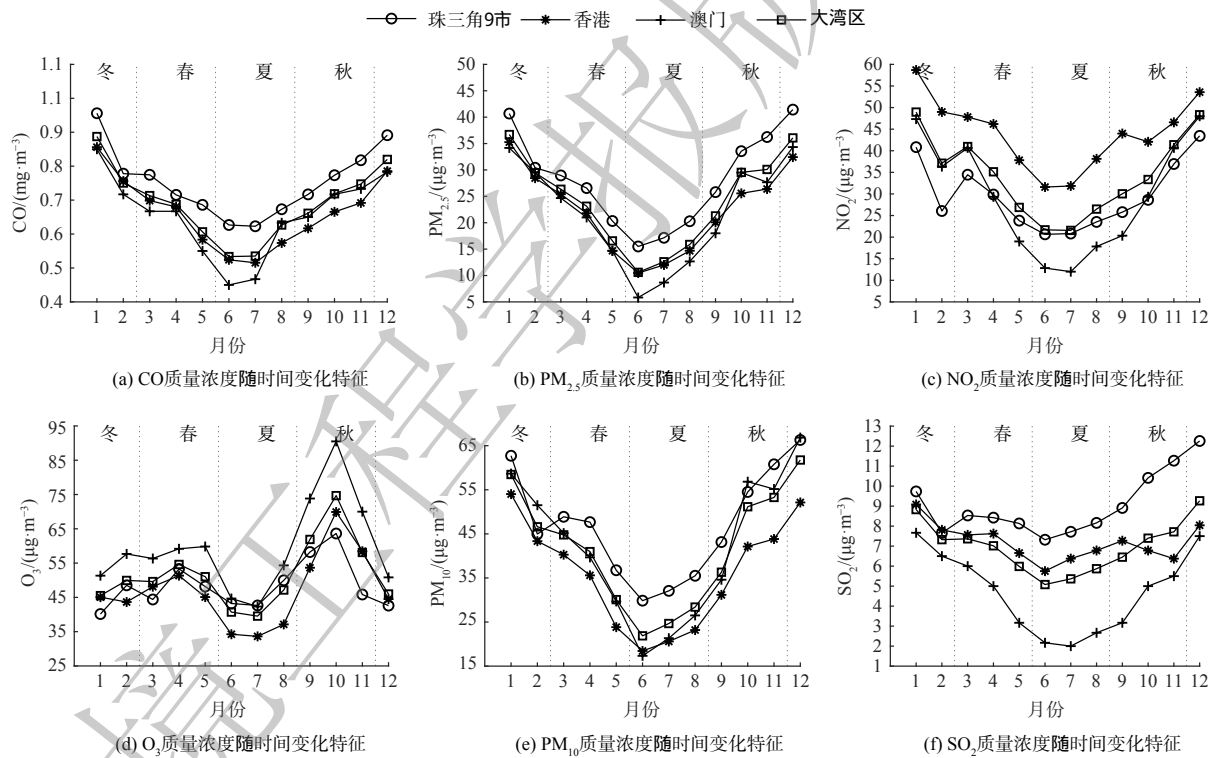


图 3 珠港澳各污染物月均质量浓度时间变化特征

Fig. 3 Temporal variation characteristics of monthly average concentrations of pollutants in the Pearl River Delta, Hong Kong and Macao

$O_3$  月均质量浓度在大湾区表现为不规则“M”型, 4、7、10 月为拐点, 污染最严重出现在 10 月, 为 74.68  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。这与文献<sup>[28-32]</sup>的研究结果一致。秋季副热带高压、冷高压出海、均压强等系统是引起整个大湾区秋季  $O_3$  污染的典型天气模式, 区域输送、移动源、面源、排放源等都会使  $O_3$  质量浓度升高。珠三角 9 市、香港特别行政区和澳门特别行政区三地各污染物月均质量浓度变化趋势与大湾区一致,  $CO$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{10}$  和  $SO_2$  月均质量浓度表现为“U”型,  $O_3$  为“M”型。其中, 澳门特别行政区  $CO$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  质量浓度在 6 月份为全域最低, 分别为 0.45  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、

$5.83 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $17.33 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；澳门特别行政区  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  质量浓度在7月份为全域最低，分别为  $12.00$ 、 $2.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；香港特别行政区  $\text{O}_3$  质量浓度在7月份为全域最低，为  $33.63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

### 3.1.3 粤港澳大湾区污染物质量浓度的日变化特征

图4是整个大湾区各污染物日均质量浓度的变化特征图。结合图4和表1发现，2015—2021年  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{SO}_2$  的日平均质量浓度分别为  $0.42\sim 1.78 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $7.18\sim 93.46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $7.25\sim 151.03 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $5.81\sim 157.83 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $2.96\sim 113.86 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $4.71\sim 24.04 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，日平均质量浓度一级达标率分别为 100%、99.65%、98.39%、63.17%、72.12%、100%，二级达标率分别为 100%、99.65%、1.61%、36.79%、26.50% 和 100%，达标率较高。这表明近几年大湾区空气质量较优。

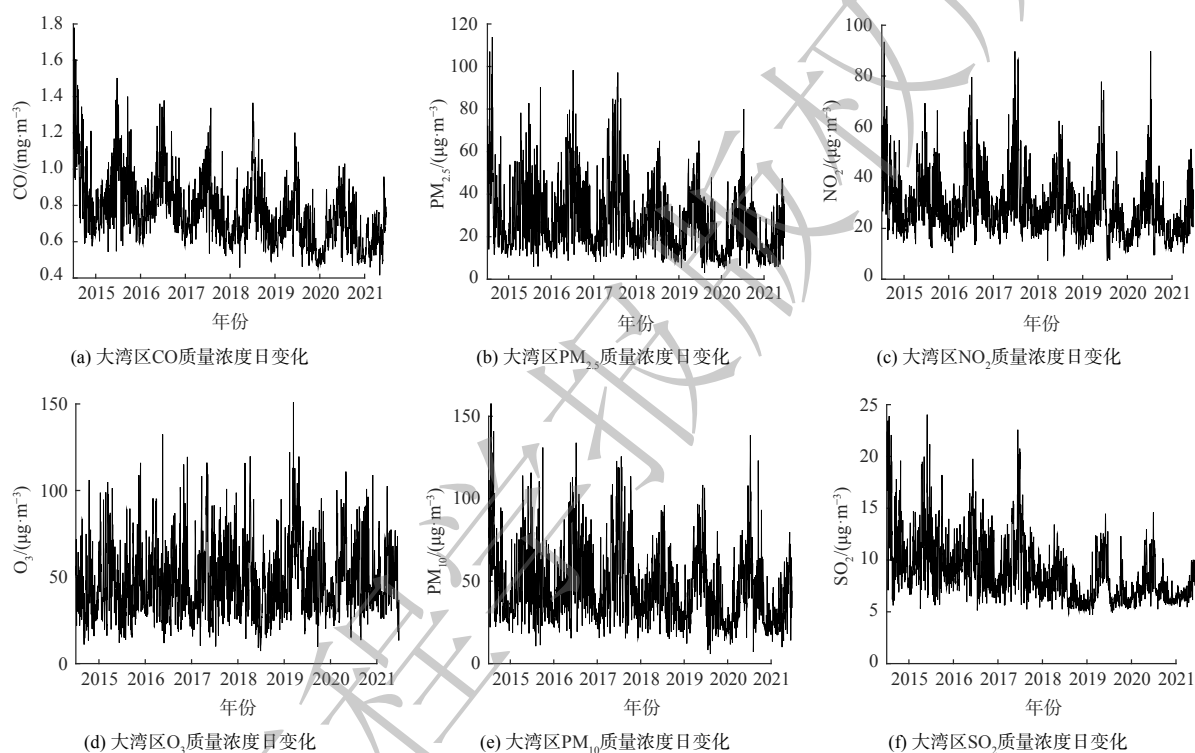


图4 大湾区各污染物日均质量浓度变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of daily concentrations of pollutants in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

### 3.2 粤港澳大湾区污染物质量浓度空间分布特征

利用地理信息系统软件 Arcgis 10.2 对 2015—2021 年整个大湾区每个站点的空气污染物年均质量浓度进行克里金插值，然后对每个污染物插值结果进行 7 年的平均，绘制大湾区各污染物质量浓度的空间分布图 (图 5)，克里金差值精度见表 3。

$\text{CO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{SO}_2$  误差较小，说明可利用克里金插值法进行空间分析。图 5 表明，各污染物质量浓度分布存在显著的空间差异性。 $\text{CO}$  质量浓度呈现由“西北-东南”逐渐递减分布 (图 5 (a))，肇庆西部最高，肇庆地区是珠三角地区的重工业区，工业生产和化石燃烧会排放大量的大气污染物，且位于下风向，在偏东风或东南风的作用下，受广佛等地区排放的影响，导致污染物堆积<sup>[34]</sup>；佛山东部、广州西部、中山北部、江门地区质量浓度较高，广佛地区经济发达、人口密度大、民用汽车拥有量较多，中山、江门地区以传统工业发展为主，易产生  $\text{CO}$  污染物，并且大气传输和地形累积效应也会使其  $\text{CO}$  质量浓度升高<sup>[15]</sup>；惠州东部、深圳、中山南部、珠海、香港特别行政区质量浓度等沿海地区较低，澳门特别行政区的  $\text{CO}$  质量浓度最低，2015—

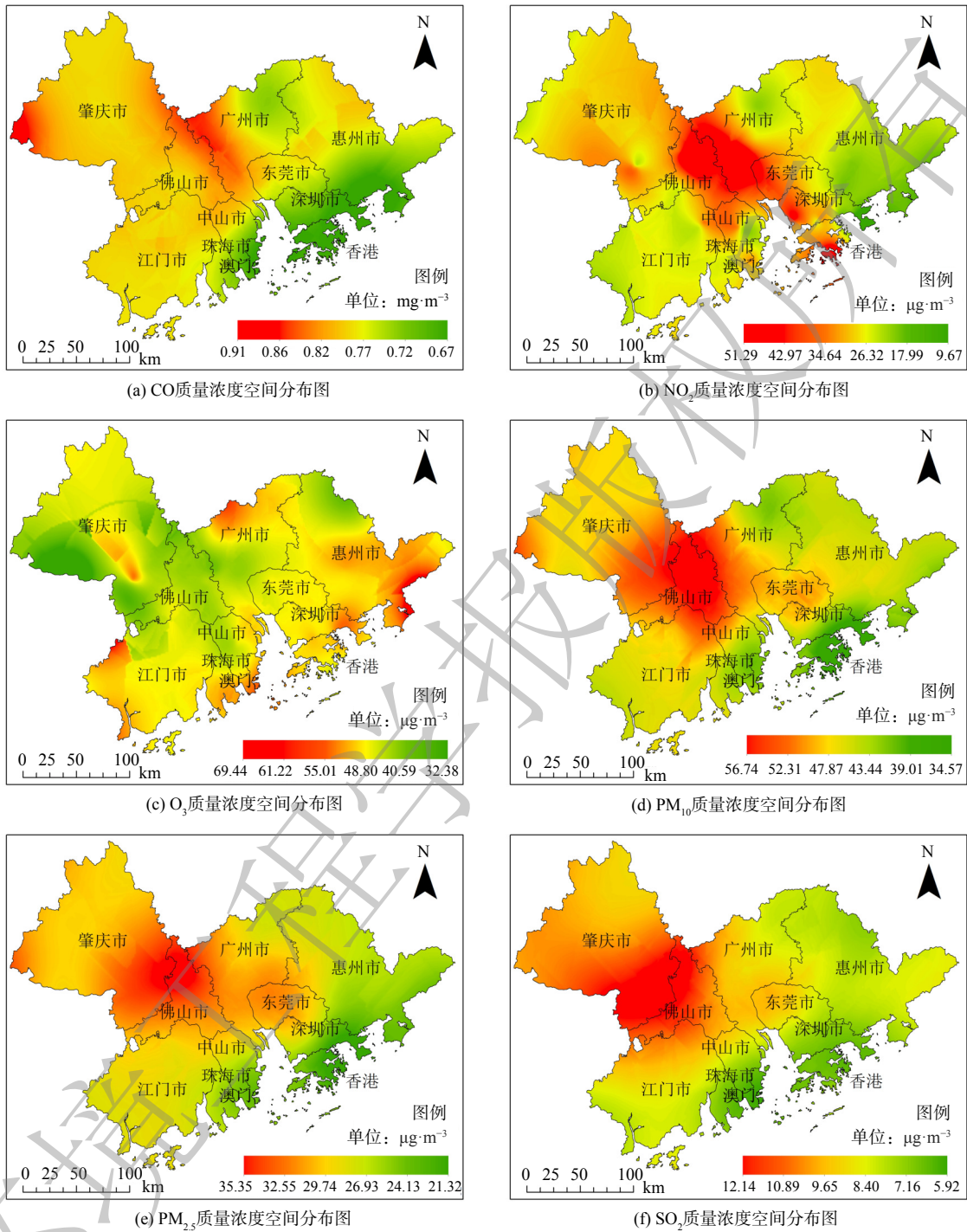


图 5 2015—2021 年大湾区污染物年均质量浓度空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of average concentrations of pollutants in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2015 to 2021

2021 年澳门特别行政区工业电力消耗量下降 7.87%，机动车数量减少 1.98%，人口密度仅增长 5.61%，是本地产生的 CO 质量浓度较少的社会原因。图 5 (b) 表明， $\text{NO}_2$  质量浓度呈“中部高、四周低”趋势分布，高污染区域聚集，城市效应显著，质量浓度较高的地区集中在佛山、广州、中山、东莞西部和深圳、香港特别行政区。香港特别行政区的  $\text{NO}_2$  质量浓度最高， $\text{NO}_2$  主要来自于



汽车尾气排放。香港特别行政区机动车采取管控措施较晚<sup>[30]</sup>,导致质量浓度较高。最低值分布在广州东北部、惠州、江门西南部地区。这些地区地形复杂,污染物在输送过程中受到山体的阻碍,不易输入<sup>[36]</sup>。图5(c)表明:O<sub>3</sub>质量浓度在空间上表现不均衡,最高值分布在惠州东部、东莞、深圳、港澳、广州北部、肇庆中部和江门南部等地区,达48~70 μg·m<sup>-3</sup>;佛山东北部、广州西南部、肇庆和中山北部地区等工业区的O<sub>3</sub>质量浓度相对较低,为32~48 μg·m<sup>-3</sup>。O<sub>3</sub>的形成既受人为源、自然源的影响,也受气象条件的影响<sup>[28]</sup>,大气PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>质量浓度显著下降也会导致O<sub>3</sub>质量浓度加重<sup>[32,37]</sup>。PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>和SO<sub>2</sub>质量浓度具有一致的空间分布(图5(d)、(e)和(f)),均表现为“中西部高、东部低”。佛山、广州、肇庆地区O<sub>3</sub>质量浓度最高;广佛地区经济发展水平高、人类活动频繁,导致污染物排放量高;肇庆地区以重工业生产为主,易产生高质量浓度污染物,三面环山、常年风速较小,不利于大气污染物扩散<sup>[25]</sup>。低值区集中在沿海地区的香港特别行政区、深圳东部和惠州东北部等地区。

空气质量指数(air quality index, AQI)描述了空气清洁或污染的程度,可用于评估污染空气对人体健康的影响。AQI按照0~50、51~100、101~150、151~200、201~300和301~500划分为6个等级:一级优、二级良、三级轻度污染、四级中度污染、五级重度污染、六级严重污染。大湾区在2015—2021年AQI年质量浓度呈现“西北-东南”递减的空间异质性(图6),即污染物质量浓度由内陆地区向沿海地区逐渐降低,其中佛山、肇庆东部、广州西部、东莞地区的AQI值较高,AQI值为51.52~55.47,属于二级良,表明空气质量是可接受,仅少数异常敏感人群会受到污染物的影响。香港特别行政区、澳门特别行政区、珠海和深圳东部AQI值在35.78~39.65,表明空气质量等级为优,基本无空气污染。大湾区的空气质量处于优良状态,主要归于大气污染物排放总量下降。这说明近几年大湾区大气环境治理体系在不断完善和现代化的环境治理能力提升<sup>[29]</sup>。

### 3.3 粤港澳大湾区污染物秩系数空间分布特征

通过计算污染物的Spearman秩系数以定量地反映2015—2021年大湾区6种污染物的变化趋势,绘制秩系数空间分布图(图7)。

CO质量浓度的秩系数为-0.99~-0.5(图7(a))。这说明近7年大湾区的CO质量浓度整体在下降,与前面的年际变化趋势一致。其中,江门市西北部、佛山西南部、东莞北部以及惠州东南部和中部的质量浓度下降缓慢,而其它城市的CO质量浓度下降趋势显著,特别在肇庆西部、深圳、

表3 各污染物克里金插值精度

Table 3 Precision of Kriging interpolation for each pollutant

污染物项目	均方根误差	标准均方根	平均标准误差	单位
CO	0.07	0.99	0.07	mg·m <sup>-3</sup>
PM <sub>2.5</sub>	0.08	0.84	2.46	μg·m <sup>-3</sup>
NO <sub>2</sub>	0.39	1.52	4.34	μg·m <sup>-3</sup>
O <sub>3</sub>	0.60	5.75	2.16	μg·m <sup>-3</sup>
PM <sub>10</sub>	3.77	0.98	3.88	μg·m <sup>-3</sup>
SO <sub>2</sub>	1.15	0.85	1.33	μg·m <sup>-3</sup>
AQI	2.67	1.01	2.84	无

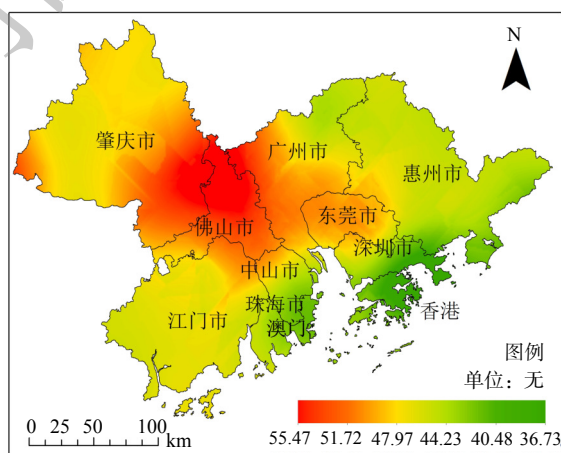


图6 2015—2021年大湾区空气质量指数年均值的空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution of the annual average air AQI in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2015 to 2021



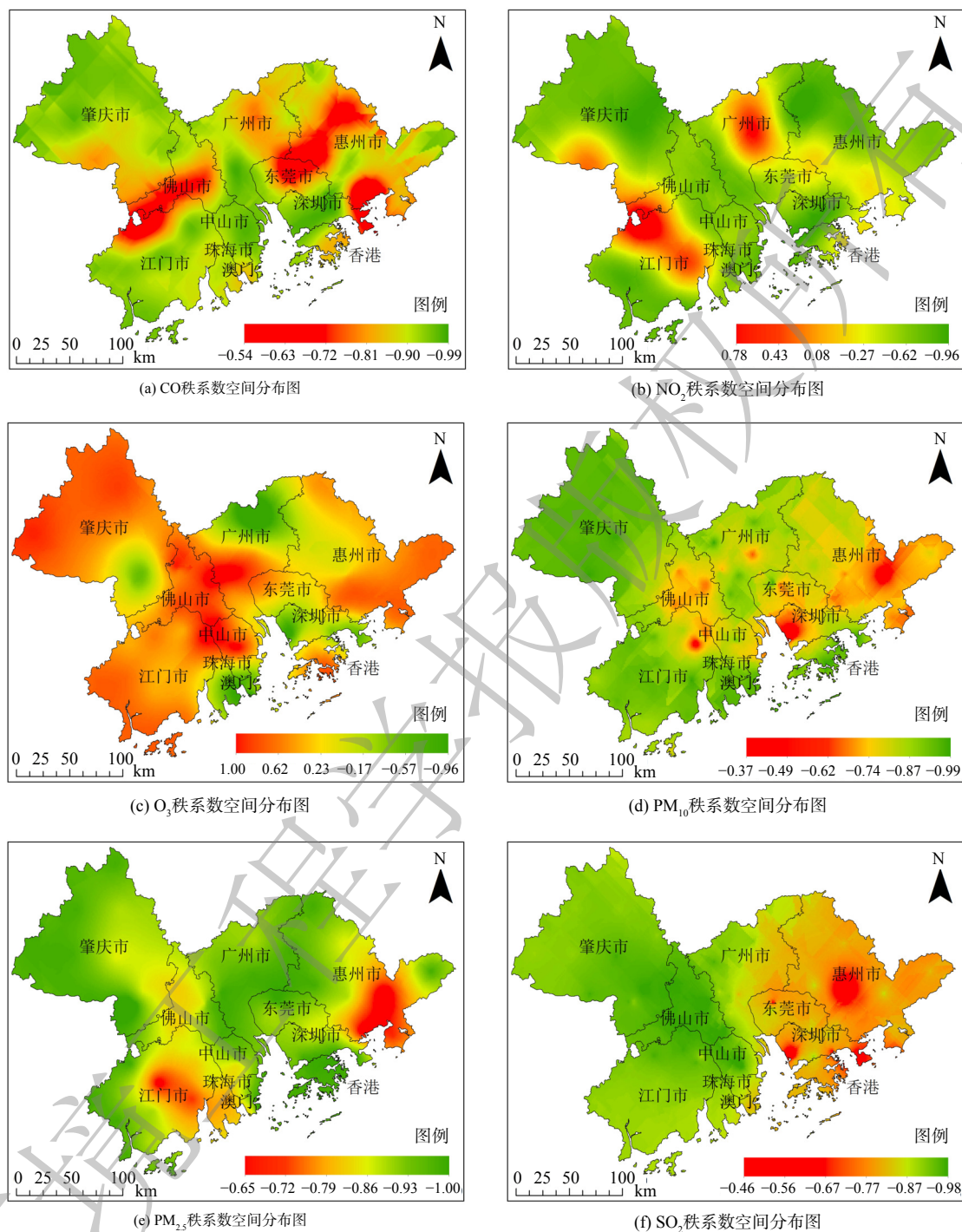


图 7 大湾区空气污染物秩相关系数空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of rank correlation coefficients of air pollutants in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

中山的秩系数达-0.91。

广州中部、肇庆南部、佛山东部和江门中西部地区 NO<sub>2</sub> 秩系数为 0.08~0.78 (图 7 (b))，表明这些地区的 NO<sub>2</sub> 质量浓度在上升，其他大部分地区的秩系数为-0.96~-0.27。这说明大湾区的 NO<sub>2</sub> 质量浓度总体在下降。肇庆东北部、深圳和惠州北部等地区的秩系数在-0.99~-0.8 之间，下降趋势较明显。

O<sub>3</sub> 质量浓度秩系数有正有负值(图7(c))。这说明大湾区的 O<sub>3</sub> 质量浓度变化特征复杂, 质量浓度上升的地区包括肇庆西北部、佛山东北部、广州西南部和中山北部地区; 在惠州西部、深圳和东莞、珠海、香港特别行政区等沿海一带地区秩系数为负值, 为下降趋势; 广州东北部、深圳、澳门特别行政区的 O<sub>3</sub> 质量浓度表现为显著下降。

图7(d)和图7(e)分别是 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度和 PM<sub>10</sub> 质量浓度的秩系数空间分布图。整体上二者的秩系数均为负值, 表现为下降趋势。在佛山、惠州东部地区的质量浓度下降趋势缓慢, 在香港特别行政区、肇庆西北部地区质量浓度下降趋势显著。二者变化趋势大体一致, 又略有差异。PM<sub>2.5</sub> 质量浓度在珠海市、江门东部地区的秩系数表现为缓慢下降趋势, 而 PM<sub>10</sub> 质量浓度在这些地区表现为在 99% 置信水平上显著下降。深圳、东莞和广州中部的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的秩系数为-1~-0.9, 下降趋势明显, 而 PM<sub>10</sub> 在这些地区的下降趋势不明显。

大湾区在 2015—2021 年的 SO<sub>2</sub> 质量浓度的秩系数为-0.98~-0.46(图7(f)), 表现为下降趋势, 西部下降趋势显著于东部。特别是佛山、肇庆、江门和中山地区质量浓度在 99% 置信水平上表现为显著下降趋势; 广州中部、澳门特别行政区等地区的 SO<sub>2</sub> 质量浓度在 95% 置信水平上表现为下降趋势; 惠州、香港特别行政区、深圳、东莞等粤东地区的质量浓度下降趋势不明显。

### 3.4 粤港澳大湾区空气质量的影响因素

1) 自然因素对空气质量的影响。用 Spearman 秩相关法和灰色关联分析法对 2015—2021 年大湾区 6 种空气污染物质量浓度与气象因素进行相关性分析(表4)。珠港澳 3 个研究子区内 CO 质量浓度与气温、日照时数、风速等秩系数均为负值。这说明气温、日照时数和风速与污染物质量浓度成反比, 且风速与 CO 质量浓度的关联度为 0.693, 风速愈大, 单位时间内污染物被输送的距离愈远, 混入的空气愈多, 污染物质量浓度愈低。相对湿度与 3 个子区的 CO 质量浓度的秩系数分别为 0.857、0.636、0.791, 呈正相关关系, 且珠三角 9 市、澳门特别行政区的秩系数在 95% 置信水平上显著。这表明相对湿度对珠三角 9 市、澳门特别行政区的 CO 质量浓度影响作用较大。降水量与珠三角 9 市、香港特别行政区的 CO 质量浓度为正相关, 并且关联度最高, 与澳门特别行政区的 CO 质量浓度表现为负相关, 但关联度较低。珠三角地区和香港特别行政区的 CO 质量浓度受降水量的影响明显, 而澳门特别行政区的 CO 质量浓度变化情况主要受相对湿度和气温的影响。

珠港澳地区 NO<sub>2</sub> 质量浓度的影响机制一致, 与气温、日照时数、风速呈负相关, 香港特别行政区 NO<sub>2</sub> 质量浓度与日照时数的秩系数绝对值大于 99% 置信水平的临界值 0.893, 二者具有显著相关性。气温、日照时数与澳门特别行政区 NO<sub>2</sub> 质量浓度在 95% 置信水平上显著相关, NO<sub>2</sub> 质量浓度作为光化学反应的主要前体物, 延长日照时间、气温升高有利于 NO<sub>2</sub> 质量浓度的扩散<sup>[36]</sup>。降水量与香港特别行政区 NO<sub>2</sub> 呈负相关, 与珠三角 9 市、澳门特别行政区呈正相关, 降水量对珠三角地区的 NO<sub>2</sub> 质量浓度关联度最大。这表明珠三角 9 市 NO<sub>2</sub> 质量浓度受降雨量的影响最大。相对湿度与 3 个研究子区 NO<sub>2</sub> 的秩系数均为正值, 说明相对湿度与大湾区的 NO<sub>2</sub> 呈正相关, 且与港澳地区关联度最高。

气温、日照时数与珠港澳三地的 O<sub>3</sub> 质量浓度呈正相关。这与文献[33]的研究结果一致, 即加强日照条件和提高温度会促进 O<sub>3</sub> 质量浓度的升高。相对湿度、降雨量与 O<sub>3</sub> 质量浓度呈负相关, 且相对湿度与香港特别行政区 O<sub>3</sub> 质量浓度关联度较高。这说明增大相对湿度有助于降低 O<sub>3</sub> 质量浓度。风速与珠三角地区呈负相关, 与港澳地区呈正相关。

珠港澳 3 个子区内 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与气温、日照时数和风速呈负相关, 与相对湿度呈正相关, 日照时数与港澳地区污染物的秩系数大于 95% 置信水平临界值 0.714, 表现为显著相关性。降雨量与珠三角 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 质量浓度呈正相关, 与港澳地区 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 质量浓度呈负相关, 这表明不同量级的降水对污染物的影响不同<sup>[38]</sup>。与珠三角地区的颗粒物质量浓度关联度最大的气

表 4 自然因素对珠港澳地区污染物的影响因素

Table 4 Influencing factors of natural factors on pollutants in Zhuhai, Hong Kong and Macao

污染物	影响因素	珠三角地区			香港特别行政区			澳门特别行政区		
		秩系数	关联度	排序	秩系数	关联度	排序	秩系数	关联度	排序
CO	气温	-0.286	0.689	4	-0.750*	0.556	4	-0.523	0.635	2
	相对湿度	0.857*	0.723	2	0.636	0.595	2	0.791*	0.666	1
	日照时数	-0.701	0.641	5	-0.964**	0.530	5	-0.757*	0.593	4
	降水量	0.821*	0.729	1	0.214	0.647	1	-0.360	0.582	5
	风速	-0.429	0.693	3	-0.468	0.591	3	-0.445	0.632	3
NO <sub>2</sub>	气温	-0.571	0.699	3	-0.750*	0.660	3	-0.857*	0.642	3
	相对湿度	0.464	0.731	2	0.618	0.714	1	0.414	0.669	1
	日照时数	-0.607	0.580	5	-0.929**	0.615	5	-0.857*	0.596	4
	降水量	0.500	0.794	1	-0.107	0.648	4	0.214	0.588	5
	风速	-0.086	0.677	4	-0.523	0.681	2	-0.072	0.668	2
O <sub>3</sub>	气温	0.500	0.865	1	0.821*	0.664	3	0.536	0.645	3
	相对湿度	-0.643	0.811	2	-0.491	0.727	1	-0.721*	0.671	2
	日照时数	0.357	0.775	3	0.893**	0.620	5	0.536	0.607	5
	降水量	-0.536	0.668	5	-0.143	0.649	4	0.214	0.608	4
	风速	-0.143	0.741	4	0.468	0.692	2	0.577	0.681	1
PM <sub>10</sub>	气温	-0.357	0.659	4	-0.571	0.676	3	-0.571	0.708	2
	相对湿度	0.429	0.719	2	0.455	0.738	1	0.468	0.731	1
	日照时数	-0.357	0.562	5	-0.857*	0.624	5	-0.821*	0.658	4
	降水量	0.464	0.753	1	-0.036	0.652	4	-0.321	0.614	5
	风速	-0.371	0.666	3	-0.324	0.699	2	-0.180	0.704	3
PM <sub>2.5</sub>	气温	-0.464	0.620	4	-0.500	0.710	3	-0.536	0.792	2
	相对湿度	0.571	0.658	2	0.709	0.750	1	0.324	0.742	3
	日照时数	-0.429	0.588	5	-0.893**	0.666	5	-0.786*	0.739	4
	降水量	0.536	0.695	1	-0.107	0.668	4	-0.214	0.621	5
	风速	-0.314	0.657	3	-0.450	0.711	2	-0.234	0.803	1
SO <sub>2</sub>	气温	-0.393	0.585	4	-0.786*	0.790	2	-0.505	0.818	3
	相对湿度	0.786*	0.601	3	0.582	0.787	3	0.191	0.874	1
	日照时数	-0.571	0.541	5	-0.929**	0.862	1	-0.649	0.792	4
	降水量	0.821*	0.678	1	-0.071	0.674	5	-0.234	0.645	5
	风速	-0.257	0.605	2	-0.577	0.779	4	-0.300	0.833	2

注：\*、\*\*分别表示在95%和99%置信水平上相关显著。

象因子分别是降水量、相对湿度和风速，与港澳地区关联度最大的是相对湿度、风速和气温。

气温、日照时数和风速与珠港澳地区的 SO<sub>2</sub> 质量浓度呈负相关，特别是香港特别行政区气温、日照时数与 SO<sub>2</sub> 分别在 95%、99% 置信水平上显著相关。相对湿度与珠港澳三地的 SO<sub>2</sub> 质量浓度呈正相关，秩系数分别为 0.786、0.582、0.191。这说明增加相对湿度促进大湾区 SO<sub>2</sub> 质量浓度的升高。降水量与珠三角地区 SO<sub>2</sub> 质量浓度呈正相关，与港澳两地呈负相关，降水对大气污染物质



量浓度的影响机制比较复杂,受降雨时长、季节和空间分异、雨滴粒径大小和污染物溶解度大小、气溶胶颗粒物粒径等的影响<sup>[39]</sup>。港澳地区的降水量与SO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>质量浓度呈负相关,但关联度较低。这说明降水在一定程度上可清洁港澳地区空气中的粉尘,溶解NO<sub>2</sub>质量浓度,对空气有一定净化作用。

**2) 社会经济因素对空气质量的影响。**采用灰色关联分析法对2015—2021年整个大湾区空气污染物与10个社会经济因素进行相关性分析(表5~7)。与珠三角9市CO、SO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>质量浓度关联度最大的前3位社会经济因素是GDP增速、人口密度和能源消耗总量(表5)。2015—2021年珠三角地区人口密度、能源消耗总量和GDP增速分别上升13.51%、14.45%和-72.09%,人口密度和能源消耗总量增速都较缓慢,GDP增速呈负增长,期间珠三角地区的一次污染物呈下降趋势。这说明控制人口数量、减少能源消耗在一定程度上有利于提高空气质量,其次是人均GDP、工业电力消耗量和第二产业增长率。2015—2021年,珠三角地区的第二产业增长率由

表5 珠三角9市社会经济因素对污染物的灰色关联度

Table 5 The grey correlation degree of social and economic factors in the Pearl River Delta region to pollutants

影响因素	CO		NO <sub>2</sub>		O <sub>3</sub>		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>		SO <sub>2</sub>	
	关联度	序号	关联度	序号	关联度	序号	关联度	序号	关联度	序号	关联度	序号
人口密度	0.742	2	0.790	1	0.962	1	0.773	1	0.734	2	0.648	2
GDP总值	0.653	9	0.686	9	0.860	8	0.683	9	0.663	9	0.585	9
GDP增速	0.745	1	0.737	4	0.685	10	0.743	3	0.798	1	0.798	1
人均GDP	0.702	5	0.745	3	0.926	3	0.733	4	0.702	4	0.621	5
工业总产值	0.715	4	0.709	8	0.886	6	0.700	8	0.673	8	0.640	4
第二产业增长率	0.686	6	0.723	6	0.909	4	0.717	6	0.691	5	0.608	6
能源消耗总量	0.737	3	0.785	2	0.964	2	0.769	2	0.731	3	0.645	3
工业电力消耗量	0.684	7	0.726	5	0.903	5	0.718	5	0.69	6	0.607	7
机动车数量	0.646	10	0.677	10	0.848	9	0.675	10	0.656	10	0.578	10
环境治理资金	0.677	8	0.71	7	0.883	7	0.706	7	0.68	7	0.605	8

表6 香港特别行政区社会经济因素对污染物的灰色关联度

Table 6 Grey correlation between socioeconomic factors and pollutants in Hong Kong

影响因素	CO		NO <sub>2</sub>		O <sub>3</sub>		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>		SO <sub>2</sub>	
	关联度	序号	关联度	序号	关联度	序号	关联度	序号	关联度	序号	关联度	序号
人口密度	0.971	3	0.958	3	0.955	4	0.961	3	0.952	3	0.908	3
GDP总值	0.952	6	0.94	6	0.970	1	0.941	6	0.933	6	0.891	6
GDP增速	0.660	9	0.662	9	0.623	9	0.659	9	0.672	9	0.694	9
人均GDP	0.956	5	0.944	5	0.967	2	0.946	5	0.937	5	0.894	5
工业总产值	0.959	4	0.948	4	0.964	3	0.947	4	0.941	4	0.898	4
第二产业增长率	0.481	10	0.479	10	0.48	10	0.480	10	0.485	10	0.484	10
能源消耗总量	0.976	2	0.963	2	0.953	5	0.964	2	0.956	2	0.911	2
工业电力消耗量	0.981	1	0.971	1	0.946	7	0.970	1	0.963	1	0.918	1
机动车数量	0.895	8	0.893	8	0.874	8	0.893	7	0.902	7	0.887	7
环境治理资金	0.895	7	0.888	7	0.952	6	0.885	8	0.884	8	0.845	8

表 7 澳门特别行政区社会经济因素对污染物的灰色关联度

Table 7 The grey correlation between socioeconomic factors and pollutants in Macao

影响因素	CO		NO <sub>2</sub>		O <sub>3</sub>		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>		SO <sub>2</sub>	
	关联度	序号	关联度	序号	关联度	序号	关联度	序号	关联度	序号	关联度	序号
人口密度	0.981	3	0.961	5	0.985	2	0.954	5	0.946	6	0.922	6
GDP总值	0.942	7	0.956	6	0.959	7	0.950	6	0.947	5	0.932	3
GDP增速	0.699	9	0.693	9	0.692	9	0.705	9	0.715	9	0.734	9
人均GDP	0.914	8	0.944	7	0.927	8	0.932	8	0.932	7	0.911	7
工业总产值	0.954	6	0.972	1	0.970	6	0.967	1	0.961	1	0.936	1
第二产业增长率	0.679	10	0.691	10	0.682	10	0.685	10	0.687	10	0.680	10
能源消耗总量	0.975	4	0.966	4	0.986	1	0.956	4	0.949	4	0.925	5
工业电力消耗量	0.983	2	0.972	2	0.979	3	0.964	2	0.956	2	0.932	2
机动车数量	0.990	1	0.967	3	0.978	4	0.961	3	0.954	3	0.929	4
环境治理资金	0.959	5	0.940	8	0.975	5	0.934	7	0.927	8	0.905	8

7.5% 下降至 1.7%，仍与 CO、SO<sub>2</sub> 等一次污染物质量浓度关联度较大；工业生产总产值增长了 28.57%，对 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 颗粒物的关联程度较小。这说明大湾区提出的侧重产业升级优化的“气十条”有利于降低颗粒物质量浓度<sup>[29]</sup>，但工业生产活动产生的氮氧化物和硫化物对大气中 CO、SO<sub>2</sub> 的关联度仍较高。GDP 总值、环境治理资金和机动车数量与各种污染物质量浓度的关联度最小。2015—2021 年珠三角地区的机动车数据增加了 34%，并没有导致 CO、PM<sub>2.5</sub> 等污染物的升高，得益于环保车辆的推广、汽油品质的严格管控、当地政府对机动车尾气排放的严格控制及管理等措施的实施<sup>[29]</sup>。

人口密度、能源消耗总量和人均 GDP 是影响珠三角地区 NO<sub>2</sub> 质量浓度的主要社会经济因素，随着经济发展、人口密度升高、能源消耗量不断增加。特别是肇庆高耗能地区，根据《广东省统计年鉴》数据显示，2021 年相比于 2015 年，一次能源消耗量增加了 11.16%，一次能源消耗主要来自化石能源，煤炭在能源结构中占很大比例，易使 NO<sub>2</sub> 质量浓度增加。其次是 GDP 增速、工业电力消耗量和第二产业增长率，GDP 总值、工业生产总产值、环境治理资金和机动车数据与 NO<sub>2</sub> 质量浓度关联度较小。珠三角 9 市产业结构保持着“二，三，一”的格局，制造业一直占据着优势，源于“气十条”倡导的产业结构升级优化，使得 GDP 总值和工业总产值对 NO<sub>2</sub> 质量浓度影响程度降低<sup>[36]</sup>。

影响珠三角 9 市 O<sub>3</sub> 质量浓度程度最大的社会经济因子是人口密度，影响程度最小的是 GDP 增速。能源消耗总量、人均 GDP 和第二产业增长率、工业电力消耗量和工业生产总产值对 O<sub>3</sub> 质量浓度的关联度较大。珠三角 9 市产业结构以第二产业为主导，一直在不断地调整优化，迄今已达到工业化中期的中后期阶段，但仍是致使污染物增长的主要因素<sup>[29]</sup>，关联度较小的是 GDP 增速、机动车数量和 GDP 总值。2015—2021 年，O<sub>3</sub> 质量浓度居高不下，与人类活动和工业生产排放密不可分<sup>[24]</sup>，为缓解 O<sub>3</sub> 质量浓度，珠三角 9 市应着手于控制工业排放和能源消耗等方面管理措施，协同控制挥发性有机化合物和氮氧化物的排放。

表 6 是香港特别行政区各经济因素与空气污染物质量浓度的相关分析的结果。影响 CO、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 SO<sub>2</sub> 质量浓度的社会经济因子主要有工业电力消耗量、能源消耗总量和人口密度，随着工业电力消耗量、能源消耗总量分别降低了 52.22%、16.05%。2015—2021 年香港特别行政区一次污染物质量浓度的下降，说明针对本地空气污染源的改善措施，如推行节能措施和监察用电量、减少化石燃料、淘汰老旧柴油商业车辆、降低能源强度、“以气代煤”等<sup>[40]</sup>，有助于

NO<sub>2</sub>、CO等空气污染物质量浓度下降。其次，工业总产值、人均GDP和GDP总值等数值也表明香港特别行政区在采取产业升级优化、增加第三产业占比<sup>[40]</sup>等措施，除了缓慢增长GDP，亦促进了经济与环境协调绿色发展。最后，第二产业增长率、GDP增速、机动车数量和环境治理资金，香港特别行政区第二产业增长率和GDP增速在2015—2021年平均为0.38%和3.01%，放慢第二产业经济增长速度，对空气污染在一定程度上起缓解作用，香港特别行政区机动车数量从8194千辆增至9400千辆，但对空气污染物的影响不大。这说明近几年香港特别行政区针对机动车尾气排放和汽车燃料出台的政策和标准是切实可行的<sup>[30]</sup>。香港特别行政区O<sub>3</sub>与其他污染物的影响因素有所不同，关联度较大的是GDP总值、人均GDP和工业总产值。经政府各级实施一系列政策，香港特别行政区的O<sub>3</sub>质量浓度仍为上升趋势。为降低O<sub>3</sub>质量浓度，香港特别行政区应针对O<sub>3</sub>污染源着手多方面管理措施，考虑气象、区域污染和污染物相互作用的影响<sup>[28-32]</sup>；其次是人口密度、能源消耗总量、工业电力消耗量和环境治理资金，香港特别行政区在2021年人口数达750万人，人口密度较大，人为活动对香港特别行政区的O<sub>3</sub>质量浓度影响也很大；与香港特别行政区O<sub>3</sub>质量浓度关联程度较低的是第二产业增长率、GDP增速、机动车数据。

表7表明，机动车数量、工业电力消耗量和人口密度是影响澳门特别行政区CO质量浓度的主要因素，2015—2021年澳门特别行政区机动车数量、工业电力消耗量分别降低1.98%、7.87%。同期CO质量浓度呈下降趋势说明控制机动车数量、工业电力消耗量可有效降低CO质量浓度；其次是能源消耗量、环境治理资金、GDP总值和工业总产值；第二产业增长率、GDP增速和人均GDP与CO质量浓度的关联度最低，在2015—2021年，第二产业增长率从14.2%降至-9.6%，在一定程度上对环境有良好的促进作用。

影响澳门特别行政区NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>和SO<sub>2</sub>质量浓度的社会经济因素主要有工业生产总产值、工业电力消耗量、能源消耗总量和机动车数量。近几年澳门特别行政区的能源消耗总量从3280×10<sup>4</sup>t降至3015×10<sup>4</sup>t，工业生产总产值下降29.47%。2015—2021年澳门特别行政区颗粒物质量浓度不断降低，表明降低能源消耗量、工业生产量可以改善空气质量。2021年澳门特别行政区SO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>等质量浓度升高99.95%、16.40%，可能与工业排放量、机动车数量等上升有关；其次是人口密度、GDP总量、人均GDP和环境治理资金，澳门特别行政区在2015—2021年人口、GDP总量平均增长5.61%、-10.68%，人口增长速度较慢，GDP负增长，这表明控制人口数量和GDP增长速度有助于改善澳门特别行政区空气质量；与NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>和SO<sub>2</sub>质量浓度关联度最小的是第二产业增长率、GDP增速，2015—2021年澳门特别行政区的第二产业增长率、GDP增速均为负值，经济增长缓慢或下降，在一定程度上有利于空气质量的好转。

影响澳门特别行政区O<sub>3</sub>质量浓度的社会经济因子主要是能源消耗总量、人口密度、和工业电力消耗量。2015—2021年澳门特别行政区的人口密度上升5.61%，工业电力消耗量、能源消耗总量分别下降7.87%、8.08%，但澳门特别行政区的O<sub>3</sub>质量浓度仍稳升不降，原因可能是工业生产和能源消耗会产生氮氧化物和硫化物<sup>[37]</sup>。这些前体物易经过化学反应生成O<sub>3</sub>，促进澳门特别行政区O<sub>3</sub>质量浓度不断上升。其次是机动车数量、环境治理资金，机动车数量降低了1.98%，环境治理资金上升47.71%。这说明机动车对澳门特别行政区环境质量影响作用较大。对O<sub>3</sub>质量浓度影响最小的是第二产业增长率、GDP增速、GDP总量和人均GDP。

#### 4 结论

1) 大湾区2015—2021年空气质量有所改善，CO、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>和SO<sub>2</sub>的质量浓度呈下降趋势，秋冬高、春夏低；O<sub>3</sub>质量浓度表现为上升趋势，季节上春秋高于夏冬季，O<sub>3</sub>污染最严重的月份是10月。珠三角3个研究子区内污染物变化趋势与整个大湾区一致，珠三角9市CO、



PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub> 质量浓度高于整个大湾区平均值, 而港澳反之。香港特别行政区 NO<sub>2</sub> 质量浓度高于整个大湾区平均值, 珠三角 9 市、澳门特别行政区反之。澳门特别行政区 O<sub>3</sub> 质量浓度高于整个大湾区平均值, 珠三角 9 市、香港特别行政区反之。整个大湾区 O<sub>3</sub> 质量浓度持续上升, 而 3 个研究子区内应采取不同的措施以控制 O<sub>3</sub> 污染源, 从而减少 O<sub>3</sub> 排放。

2) 各类污染物分布具有明显的空间差异性, CO、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 SO<sub>2</sub> 质量浓度呈现“中西—东南”递减分布, O<sub>3</sub> 质量浓度反之。CO、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub> 质量浓度在大湾区全域下降趋势显著, 广州中部、江门中部等地区的 NO<sub>2</sub> 质量浓度呈上升趋势, 其他地区均表现为下降, 广州、深圳、珠海地区的 O<sub>3</sub> 质量浓度下降幅度大, 其他地区均表现为上升。O<sub>3</sub> 成为是大湾区主要的污染物。

3) 珠港澳 3 个研究子区 CO、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 SO<sub>2</sub> 质量浓度与气温、日照时数和风速呈负相关。这说明高温、长日照时数、高风速有利于以上污染物的扩散和分解与转化。降水量对污染物质量浓度影响不一, 降水对大气污染物质量浓度的作用机制比较复杂, 受降雨时长、季节和空间分异、雨滴粒径大小和污染物溶解度大小等的影响。O<sub>3</sub> 质量浓度与日照时数、气温、风速呈正相关, 与相对湿度呈负相关。

4) 通过灰色关联分析发现, 社会经济因素对珠港澳 3 个研究子区的影响不尽相同, 影响珠三角 9 市空气质量的 因素主要是人口密度、GDP 增速和能源消耗总量, 经济发达、人口密度大导致珠三角 9 区的 CO、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和 SO<sub>2</sub> 质量浓度高于整个大湾区, GDP 增速放慢、能源消耗量降低有助于改善空气质量; 影响香港特别行政区空气质量的 因素主要包括工业电力消耗量, 能源消耗总量和人口密度, O<sub>3</sub> 与其他污染物的影响因素有所不同, 受社会经济规模活力的影响最大; 影响澳门特别行政区各污染物质量浓度主要是机动车数据、工业电力消耗量、人口密度和能源消耗总量。环境治理资金对大湾区 6 种污染物具有一定的影响, 各地政府实施多项大气污染治理措施, 投入大量资金进行产业升级整改, 对环境治理具有一定的积极作用。为进一步改善环境质量, 大湾区应加强联防联控, 对污染物实施具有针对性的措施。

## 参 考 文 献

- [1] 环境保护部. 环境空气质量标准 GB 3095-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [2] 沈劲, 汪宇, 潘月云, 等. 粤东北地区秋季 PM<sub>2.5</sub> 组分模拟与来源分析[J]. 环境工程, 2016, 34(9): 84-88.
- [3] 孙玺, 周声圳, 高敏, 等. 珠海 2019 年秋季一次大气污染过程的特征、成因及来源分析[J]. 环境科学学报, 2022, 42(8): 64-75.
- [4] LEI R Y, NIE D Y, ZHANG S M, et al. Spatial and temporal characteristics of air pollutants and their health effects in China during 2019—2020. *Journal of Environmental Management*. 2022 Sep 1;317: 115460. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115460. Epub 2022 Jun 1. PMID: 35660829.
- [5] 裴彦挺, 吴志军, 尚冬杰, 等. 我国城市大气 PM<sub>2.5</sub> 与 O<sub>3</sub> 质量浓度相关性的时空特征分析[J]. 科学通报, 2022, 67(18): 2008-2017.
- [6] 程雪雁, 朱磊, 周艺萱. 2015~2018 年京津冀城市群空气污染时空变化特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 523-531.
- [7] 胡翠玲, 徐婕, 沈国妹, 等. 上海市空气污染物与儿童呼吸系统疾病门诊量的时间序列研究[J]. 环境与职业医学, 2021, 38(1): 23-29.
- [8] 史亚妮, 董继元, 刘玉荣. 兰州市空气污染对儿童呼吸疾病的影响[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(4): 1792-1799.
- [9] 张运江, 雷若媛, 崔世杰, 等. 2015~2020 年我国主要城市 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染时空变化趋势和影响因素[J]. 科学通报, 2022, 67(18): 2029-2042.
- [10] 王迪, 边曦琛, 聂锐. 长三角工业 SO<sub>2</sub> 排放驱动因素全周期因素分解及其区域差异[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(16): 91-99.
- [11] 夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 等. 基于随机森林模型的中国 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度影响因素分析[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2057-2065.
- [12] 康俊锋, 黄烈星, 张春艳, 等. 多机器学习模型下逐小时 PM<sub>2.5</sub> 预测及对比分析[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(5): 1895-1905.
- [13] 周侗, 张帅倩, 闫金伟, 等. 长江经济带三大城市群 PM<sub>2.5</sub> 时空分布特征及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(4): 878-889.
- [14] 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 等. 中国 PM<sub>2.5</sub> 污染空间分布的社会经济影响因素分析[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2498-2504.
- [15] 孙涵, 胡雪原, 聂飞飞. 空气污染物的时空演化及社会经济驱动因素研究——以长江三角洲地区为例[J]. *中国环境管理*, 2019, 11(4): 71-78.
- [16] 刘立, 胡辉, 李娟, 等. 东莞市大气 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>1</sub> 中多环芳烃/正构烷烃的污染特征和来源解析[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(9): 5138-

- 5151.
- [17] 颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 等. 珠江三角洲大气光化学氧化剂(O<sub>x</sub>)与PM<sub>2.5</sub>复合超标污染特征及气象影响因素[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 1600-1614.
- [18] 廖志恒, 孙家仁, 范绍佳, 等. 2006~2012年珠三角地区空气污染变化特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2015, 35(2): 329-336.
- [19] 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 等. 2015年中国近地面臭氧特征分析[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 4976-4982.
- [20] TAN Z F, LU K D, JIANG M Q, et al. Exploring ozone pollution in Chengdu, southwestern China: A case study from radical chemistry to O<sub>3</sub>-VOC-NO<sub>x</sub> sensitivity[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 775-786.
- [21] 邓志新. 粤港澳大湾区与世界著名湾区经济的比较分析[J]. *对外经贸实务*, 2018(4): 92-95.
- [22] 文小明, 刘佳, 陈传忠, 等. 粤港澳大湾区生态环境监测发展现状与展望[J]. *中国环境监测*, 2021, 37(5): 14-20.
- [23] 林永生. 中国大气污染防治重点区污染物排放的驱动因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(S2): 65-68.
- [24] 湛社霞. 粤港澳大湾区常规大气污染物变化趋势与影响因素研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [25] 常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 等. 肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析[J]. *环境科学*, 2019, 40(10): 4310-4318.
- [26] 韩会庆, 苏志华, 张娇艳, 等. 1960~2013年贵州省强降水天数时空变化特征[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(11): 1-5.
- [27] 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 等. 四川盆地PM<sub>2.5</sub>质量浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析[J]. *环境科学*, 2021, 42(7): 3136-3146.
- [28] 汪瑶, 刘润, 辛繁. 大气环流型对珠三角2015~2020年臭氧变化的影响[J/OL]. *环境科学*: 1-11 [2022-10-15].
- [29] 牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 等. 2015—2020年中国城市PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub>复合污染时空演变特征[J/OL]. *环境科学*: 1-16 [2022-10-15].
- [30] 香港特别行政区中环绕道通车空气净化系统首次应用于香港特别行政区行车隧道[J]. *隧道建设(中英文)*, 2019, 39(1): 74.
- [31] 陈婉莹, 陈懿昂, 褚晰晰, 等. 珠三角地区臭氧来源特征的数值模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(3): 293-308.
- [32] 贾海鹰, 马晶昊, 程念亮, 等. 珠三角地区大气污染物质量浓度改善气象与减排影响分析[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(7): 172-180.
- [33] 王毓铮, 黄志炯, 肖笑, 等. 珠三角典型城市大气污染减排措施的PM<sub>2.5</sub>改善评估研究[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(7): 2530-2539.
- [34] 王肖汉, 徐翼洲, 张成敬, 等. 基于EMI观测的珠三角地区对流层NO<sub>2</sub>柱质量浓度时空变化特征分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2021, 16(3): 197-206.
- [35] WU J S, WANG Y, LIANG J T, et al. Exploring common factors influencing PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> concentrations in the Pearl River Delta: Tradeoffs and synergies. *Environmental Pollution*. 2021 Sep 15;285: 117138. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117138. Epub 2021 Apr 20. PMID: 33964563.
- [36] 郑石明, 何裕捷. 制度、激励与行为: 解释区域环境治理的多重逻辑——以珠三角大气污染治理为例[J]. *社会科学研究*, 2021(4): 55-66.
- [37] MENG X, WANG W D, SHI S, et al. Evaluating the spatiotemporal ozone characteristics with high-resolution predictions in mainland China, 2013-2019. *Environmental Pollution*. 2022 Apr 15;299: 118865. doi: 10.1016/j.envpol.2022.118865. Epub 2022 Jan 18. PMID: 35063542.
- [38] 武高峰, 王丽丽, 董洁, 等. 北京城区降水对PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>清除作用分析[J]. *中国环境监测*, 2021, 37(3): 83-92.
- [39] 王晓琦, 周颖, 程水源, 等. 典型城市冬季PM<sub>2.5</sub>水溶性离子污染特征与传输规律研究[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(8): 2289-2296.
- [40] 许堞, 马丽. 粤港澳大湾区环境协同治理制约因素与推进路径[J]. *地理研究*, 2020, 39(9): 2165-2175.

(责任编辑: 靳炜)

## Analysis on the temporal and spatial distribution and influencing factors of air pollutants in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

DAI Yuanyuan<sup>1</sup>, GONG Shaoqi<sup>1,\*</sup>, ZHANG Cunjie<sup>2</sup>

1. School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 2. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

\*Corresponding author, E-mail: shaoqigong@163.com

**Abstract** Based on the monitoring station data of six kinds of conventional air pollutants in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2015 to 2021, the spatial and temporal distribution characteristics and influencing factors of each pollutant are analyzed by Kriging interpolation method, Spearman rank coefficient correlation method and grey correlation analysis method. The results show that the air quality in the Greater Bay Area has improved in the past seven years. The average annual concentrations of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in the Greater Bay Area are 40.32 and 23.38  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , which are lower than the secondary concentration limit of China's Ambient Air Quality Standard (GB 3095-2012). The annual mean values of O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> were 51.68, 33.45 and 6.61  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , and the concentration of SO<sub>2</sub> met the primary standard limit, the annual mean value of CO was 0.68  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . The concentration of CO, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> decreased by 23.67%, 39.48%, 27.02%, 33.75% and 41.21%, respectively, with the highest concentration in winter, followed by spring and autumn, and the lowest in summer. The concentration of O<sub>3</sub> shows a wave upward trend, with an increase of 14.54%, and the order of O<sub>3</sub> concentration from high to low is autumn, spring, winter and summer. The increase of O<sub>3</sub> concentration may be caused by the combined influence of adverse meteorological conditions such as atmospheric circulation patterns in the subtropical high pressure zone and the periphery of the typhoon, and anthropogenic emission factors such as high emission of O<sub>3</sub> precursor. The spatial distributions of O<sub>3</sub> in the eastern coastal areas such as Dongguan, Shenzhen, Hong Kong, Macao and the southern of Jiangmen are higher than that in the central and western inland areas, with the highest concentration of 48~70  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , and the concentrations of other pollutants decrease from the central and western regions to the east. The air temperature, the sunshine duration and the wind speed are negatively correlated with the concentrations of CO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>2</sub>. The air temperature and the sunshine duration are positively correlated with O<sub>3</sub> concentration, and relative humidity is negatively correlated with O<sub>3</sub>. Precipitation is strongly correlated with the concentration of pollutants. Total energy consumption, industrial production, such as population density and motor vehicle data are the main socio-economic factors affecting air quality in the Greater Bay Area. This study provides a scientific basis for the prevention and control of air pollution and the formulation of environmental protection strategies in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area.

**Keywords** air quality; spatiotemporal analysis; grey relational analysis; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area