

2017—2019年佛山市臭氧污染特征 及其与气象条件的关系*

司徒淑婷¹, 陈辰², 莫海华³, 何焯燃¹, 安丽娜¹,
邓思欣¹, 周炎⁴, 邝敏儿¹, 陈伟华³

1. 广东省佛山生态环境监测站, 广东 佛山 528000
2. 佛山市气象局, 广东 佛山 528000
3. 暨南大学环境与气候研究所, 广东 广州 510308
4. 广东省生态环境监测中心 / 国家环境保护区域空气质量监测重点实验室, 广东 广州 510308

摘要: 利用2017—2019年佛山市环境空气监测站点监测的臭氧(O₃)数据, 结合同期气象观测资料, 分析O₃污染的时空分布特征及其与气象条件的关系, 并开展污染天气分型研究。结果显示, 2017—2019年佛山市O₃污染呈恶化趋势, 污染主要集中在9~10月, 其次是5~6月; 日变化显示出“单峰”型分布特征, 一般在15时达到峰值; 从空间上看, O₃污染主要集中在南部。O₃与日总辐射量、日最高气温、日均气温均呈正相关关系, 与日均相对湿度、日总降雨量、降雨时长和风速均呈负相关关系; 当日总辐射量高于10.1 MJ/m²、日最高气温高于24.3 °C, 偏西风和风速不高于5 m/s时, 有利于当地出现O₃污染; 降雨发生和持续时间影响降雨对O₃污染缓解的效果, 短时降雨和夜间降雨不能缓解O₃污染。诱发O₃污染的大气环流类型能分成8种, 副高控制型、台风外围型、均压场型和弱高压脊型诱发的O₃污染次数最多、污染浓度最高; 不同季节诱发O₃污染的大气环流类型不同, 夏季和冬季的污染大气环流类型相对单一, 春季和秋季的污染大气环流类型相对复杂。

关键词: 臭氧; 污染特征; 气象; 天气分型

中图分类号: X515 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2022) 06-0028-08

Characteristics of ozone pollution in Foshan city and its relationship with meteorology during 2017–2019

SITU Shuping¹, CHEN Chen², MO haihua³, HE Zhuoran¹, AN Lina¹,
DENG Sixin¹, ZHOU Yan⁴, KUANG Min'er¹, CHEN Weihua³

1. Foshan Ecological and Environmental Monitoring Station of Guangdong Province, Foshan 528000, China
2. Foshan Meteorological Bureau, Foshan 528000, China
3. Institute for Environmental and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 510308, China
4. Ecological and Environmental Monitoring Center of Guangdong Province / State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Air Quality Monitoring, Guangzhou 510308, China

* 收稿日期: 2021-10-12 录用日期: 2021-12-27 网络首发日期: 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(41905086); 中国博士后科学基金(2020M683174); 国家环境保护区域空气质量监测重点实验室开放基金(SRAQM01202001, SRAQM02202001); 广东省气象局科研项目(GRMC2019M30); 佛山市科技项目(2020001004318)

作者简介: 司徒淑婷(1984年生), 女; 研究方向: 环境空气质量预报预警; E-mail: yjxstsp2@163.com

通信作者: 陈伟华(1989年生), 女; 研究方向: 碳氮组分地气交换环境效应评估; E-mail: chenwh26@jnu.edu.cn

Abstract: This study analyzes the pollution properties of ozone(O_3) and their relationship with meteorological factors, and classifies the synoptic weather on O_3 pollution using observed O_3 and relevant meteorological data in Foshan city during 2017–2019. The results show that the O_3 pollution was deteriorating, generally with the summit in September and October, followed by May to June. The diurnal variation of O_3 shows a “single peak” distribution characteristic, which generally reaches its peak at 15:00. The spatial distribution indicates that the O_3 pollution is relatively heavy in southern Foshan. Ozone(O_3) shows a positive correlation with the total daily radiation, the maximum daily temperature, and the daily averaged temperature; in contrast, a negative correlation with the daily averaged relative humidity, the daily accumulated precipitation, the rainfall duration, and the wind speed. The O_3 pollution preferentially occurs when the total radiation amount is higher than 10.1 MJ/m^2 , the maximum daily temperature is higher than $24.3 \text{ }^\circ\text{C}$, west wind and the wind speed is lower than 5 m/s . The impacts of rainfall on O_3 pollution depend on the duration and occurrence time of rainfall; short-term rainfall and rainfall at night cannot mitigate O_3 pollution. Among the 8 patterns of the synoptic systems inducing O_3 pollution, the subtropical high, the typhoon periphery, the uniform pressure field, and the week ridge of high pressure induce the most O_3 pollution events and the highest pollution concentration in Foshan. It is aware that the dominant synoptic weather patterns inducing O_3 pollution vary seasonally: only a few synoptic patterns induce O_3 pollution in summer and winter; while all patterns can worsen O_3 pollution in spring and autumn.

Key words: ozone(O_3); pollution characteristics; meteorology; synoptic systems classification

近地面臭氧(O_3)是一种重要的大气污染物,影响对流层生态、农业生产^[1-3]、气候变化和人体健康。随着社会经济的发展和《大气污染行动计划》的颁布与实施,近年来中国大气颗粒物污染得到明显改善,然而近地面 O_3 污染物却在加剧^[4]。尤其是在京津冀、长三角和珠三角等3大城市群^[5], O_3 已取代细颗粒物($PM_{2.5}$)成为影响空气质量的首要污染物,并显示出逐年加剧态势。

O_3 是二次生成污染物,其浓度的高低除了受排放影响外,也受气象环境的影响。目前国内外在 O_3 污染和环境气象关系方面的研究多集中在利用观测数据分析气象要素和 O_3 浓度的相关性^[6-9],普遍认为低湿、高温、强日照、低风速的情况有利于 O_3 浓度升高。研究也发现,大尺度天气环流形势对区域 O_3 污染具有重要影响。环流形势及其演变不仅能影响污染物的时空分布,还能直接影响污染过程的持续时间和严重程度^[10-13]。因此,区分污染环流形势对于 O_3 污染的防治显得尤其重要。北美洲夏季 O_3 浓度的高低与所在地面高压前后部有关^[14-15],停滞的暖气流是影响美国东部高浓度 O_3 发生率至关重要的因素^[16]。早期国内对这方面的研究集中在大气环流形势变化对 $PM_{2.5}$ 污染影响^[17-20],最近几年陆续有关于大气环流与 O_3 污染关系的报道^[21]。当北京地区处于低压前部时当

地容易出现 O_3 高值^[22],副热带高压控制时上海出现的 O_3 污染程度最高^[23]。珠三角地区,副热带高压控制和台风外围对 O_3 污染影响最突出^[24-25]。

佛山市位于广东省珠江三角洲地区,是粤港澳大湾区的重要组成城市。由于正处于城市化、工业化快速发展时期,佛山市的大气环境问题突出。近年随着当地政府对 $PM_{2.5}$ 污染的大力整治, $PM_{2.5}$ 污染得到缓解,但 O_3 年均浓度呈波动上升趋势^[26]。 O_3 已经成为制约该地空气质量持续向好最关键的污染物。目前,针对佛山市 O_3 污染的研究多为污染过程分析、数值模拟和前体物污染特征分析等^[27-29],针对多年污染与不同气象要素或天气系统间关系的分析工作很少。本文利用2017—2019年佛山市 O_3 和气象监测数据,梳理辖区内 O_3 污染特征,并进一步研究其与不同气象条件,包括不同气象要素和大气环流等的关系,相关成果可为辖区内 O_3 污染防治提供科技支撑。

1 资料与方法

1.1 污染物与气象资料

2017—2019年佛山市 O_3 监测数据均来源于佛山市8个大气国控监测站点监测结果(图1)。 O_3 污染评价采用《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663-2013)^[30]等为标准,即采用 O_3 日最大8 h

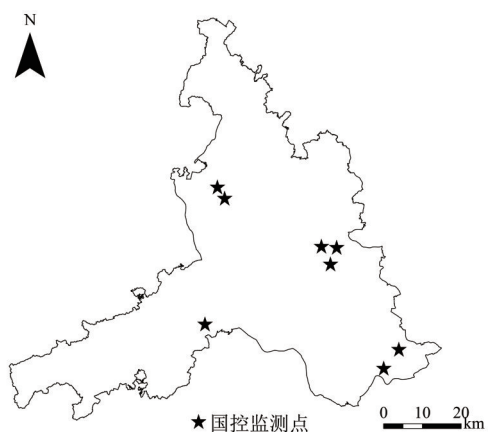


图1 佛山市大气国控监测点位置

Fig. 1 Location of national control atmospheric monitoring sites

滑动平均质量浓度($\rho(\text{MDA8 O}_3)$)评价某日是否产生 O_3 污染,采用臭氧(O_3)日最大8 h滑动平均的第90百分位数质量浓度($\rho(90^{\text{th}} \text{MDA8 O}_3)$)评价某年 O_3 污染情况。相关浓度限值按《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)^[31]要求执行。当 $\rho(\text{MDA8 O}_3) \geq 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,当日即为 O_3 污染日;小于该标准值,则为 O_3 清洁日。

地面气象观测数据来源于佛山市气象局位于南海的地面观测场。由于佛山市没有太阳辐射监测站点,采用最临近的广州站日总太阳辐射的监测结果,数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)。地面和500 hPa天气图来自

佛山市气象局。

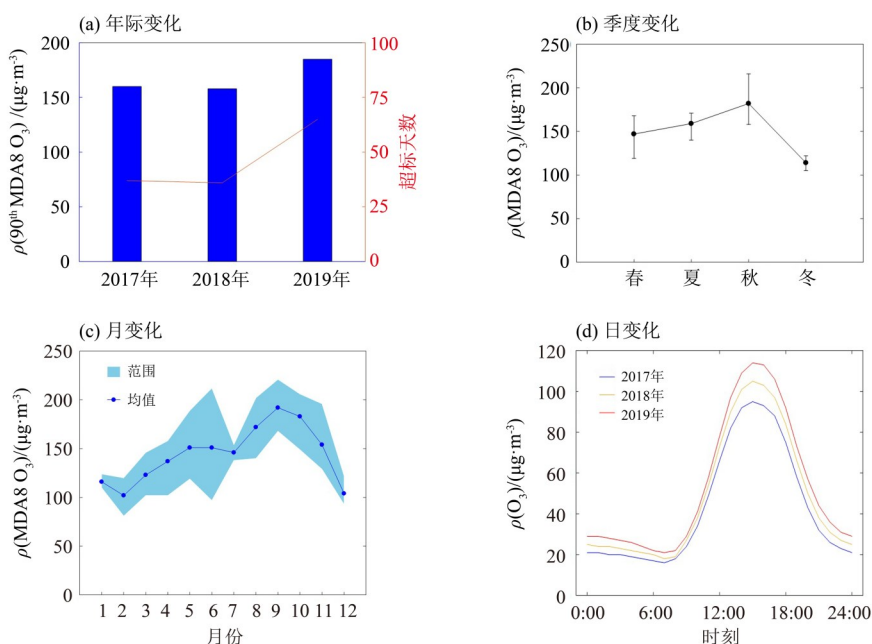
1.2 污染天气分型方法

污染天气分型方法包括主观分型和客观分型两种。主观分型方法是基于天气图,利用天气学原理对空气污染过程进行分类研究^[20, 32],具有容易开展的优点,但分型结果依赖于预报员的经验,主观性较强;客观分型方法是利用主成分分析等特征向量分析及最优化等基于相关性分析法对天气过程进行分型研究^[24],表现出分型过程不依赖预报员的主观经验,能处理大量样本的优点,但客观分型方法众多,同时分型结果依靠机器判断,存在一定的误差,不同地区应用前需要筛选适合本地的分型方法^[25]。由于佛山市尚未开展适合本地的污染天气客观分型方法筛选,本文采用主观分型方法,分析2017—2019年污染日的天气图,得出影响佛山市 O_3 污染的大气环流形势。

2 结果与讨论

2.1 O_3 质量浓度时空分布特征

2017—2019年佛山市 $90^{\text{th}} \text{MDA8 O}_3$ 和年超标天数整体呈现上升趋势(图2),平均值为 $168 \mu\text{g}/\text{m}^3$,超标天数合计发生138 d。从季节分布上看, $\rho(\text{MDA8 O}_3)$ 在秋季(9~11月)最高,平均为 $182 \mu\text{g}/\text{m}^3$;夏季(6~8月)和春季(3~5月)的浓度略低,分别为 159 和 $147 \mu\text{g}/\text{m}^3$;冬季(12、1、2月)最低,平均仅为秋季的62.5%。佛山市 O_3 的季节变化特

图2 2017—2019年佛山市 O_3 浓度随时间变化Fig. 2 Annual (a), seasonal (b), monthly (c), and diurnal (d) variations of O_3 in Foshan city during 2017-2019

征与嘉兴^[33]、上海^[34]、石家庄^[35]等中纬度城市的结果不同。这是由于其位于亚热带季风气候区, 夏季虽然温度高, 但由于雨热同期, 丰富的降雨有利于O₃及其前体物的清除^[36]; 而秋季降雨减少, 太阳辐射增强, 主导风向从夏季风开始转向冬季风, 大气湿度降低, 有利于诱发O₃污染。 ρ (MDA8 O₃)月变化呈双峰型, 峰值主要出现在9~10月, 其次是5~6月。造成5~6月 ρ (MDA8 O₃)高的主要原因是因为冬季风转春季风, 容易出现均压场, 不利于O₃扩散, 从而诱发O₃污染。O₃浓度日变化的峰值普遍出现在15时, 2017—2019年峰

值浓度呈升高趋势, 与 ρ (90th MDA8 O₃)变化趋势一致。

基于佛山市8个国控测点 ρ (90th MDA8 O₃), 应用反距离权重(IDW)插值方法绘制2017—2019年 ρ (90th MDA8 O₃)空间分布图(图3)。从整体上看, ρ (90th MDA8 O₃)呈南高北低的分布特征。其形成原因主要有2方面: O₃的主要前体物挥发性有机化合物(VOCs)排放分布主要在中部和南部^[37], 导致这些地区O₃的生成潜势相对北部高; 以北风为主(图4), 容易在其下风方向地区出现O₃浓度高值。

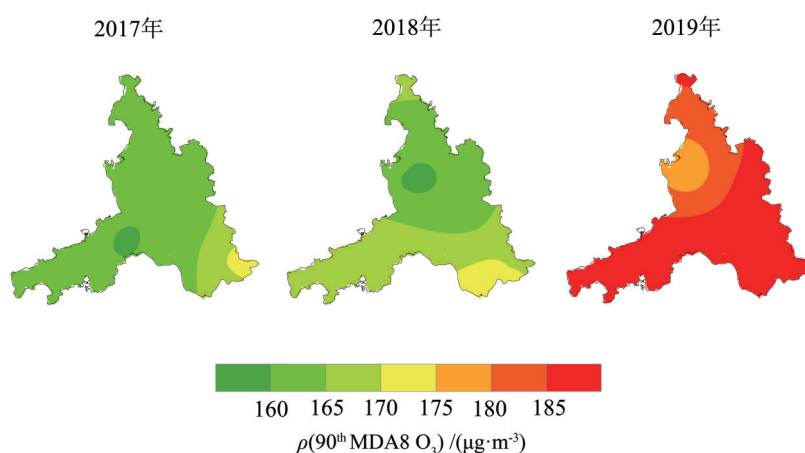


图3 2017—2019年佛山市90th MDA8 O₃浓度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of annual evaluated 90th MDA8 O₃ concentration in Foshan city during 2017-2019

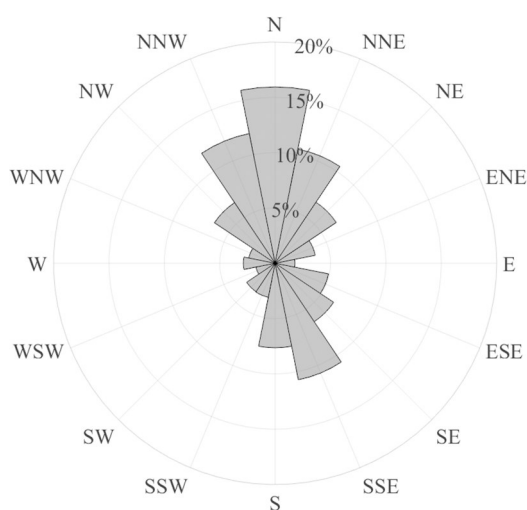


图4 2017—2019年佛山市风向玫瑰图

Fig. 4 Wind rose in Foshan city during 2017-2019

2.2 局地气象因素对O₃质量浓度的影响

对2017—2019年佛山市MDA8 O₃质量浓度与不同气象参数进行相关性分析。总体来看, MDA8 O₃质量浓度和日总辐射量、日最高气温、

日均气温均呈正相关关系, 和日均相对湿度、日总降雨量、降雨时长和风速均呈负相关关系。这说明太阳辐射、日均气温和日最高气温的升高有利于MDA8 O₃质量浓度 ρ (MDA8 O₃)的升高, 日均相对湿度、日总降雨量、降雨时长和风速的升高有利于 ρ (MDA8 O₃)的下降。日总辐射量升高对 ρ (MDA8 O₃)升高的影响最大, 相关系数为0.755; 日最高气温次之, 相关系数为0.505。水平风能直接影响O₃输送和浓度分布, 但统计结果显示 ρ (MDA8 O₃)与日均风速间的相关系数只有-0.300。这主要是因为不同上风方向污染情况不同, 对下风方向地区污染的影响有差异。

ρ (MDA8 O₃)与日总降雨量的相关性低于其与降雨时长的相关性。这主要是因为降雨量相同的情况下, 降雨发生时间和持续时间可能不同, 造成对大气污染物的冲刷作用有差异。2017—2019年佛山市O₃污染日白天降雨量很小, O₃质量浓度日变化峰值前后时段的降雨量基本为0, 不利于O₃污染的缓解(图5)。说明短时降雨由于冲刷时

间较短,对大气污染的湿清除作用不够;此外,短时强降雨后容易导致到达近地面的太阳辐射增加,反而更有利于降雨后 O_3 的生成^[38]。

经统计发现,当日总辐射量、日最高气温超

过 10.1 MJ/m^2 和 $24.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 阈值的时候,佛山市有发生 O_3 污染的风险(图6)。同时,偏西风、风速 $<5 \text{ m/s}$ 时,当地平均MDA8 O_3 质量浓度最高。

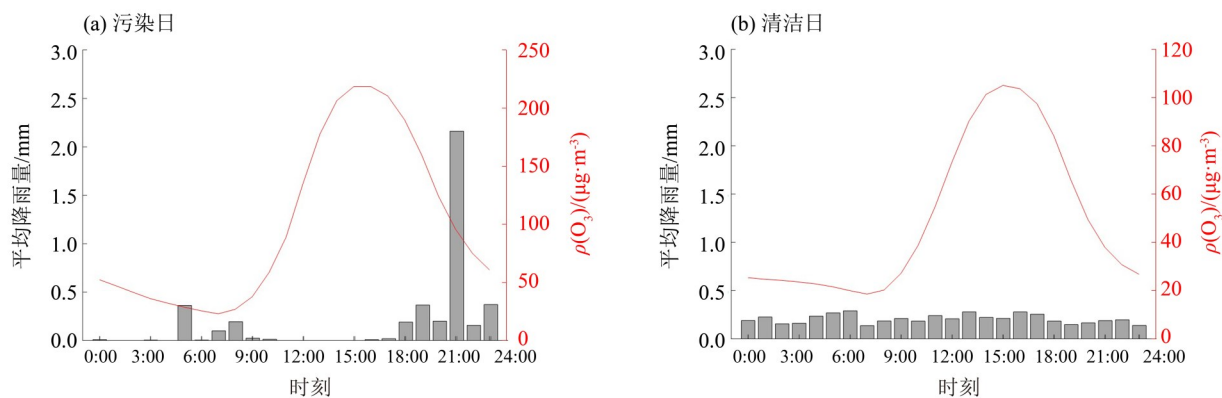


图5 2017—2019年佛山市污染日和清洁日 O_3 浓度和降雨量日变化

Fig. 5 Diurnal variation of O_3 and rainfall on pollution day and clean day in Foshan during 2017-2019

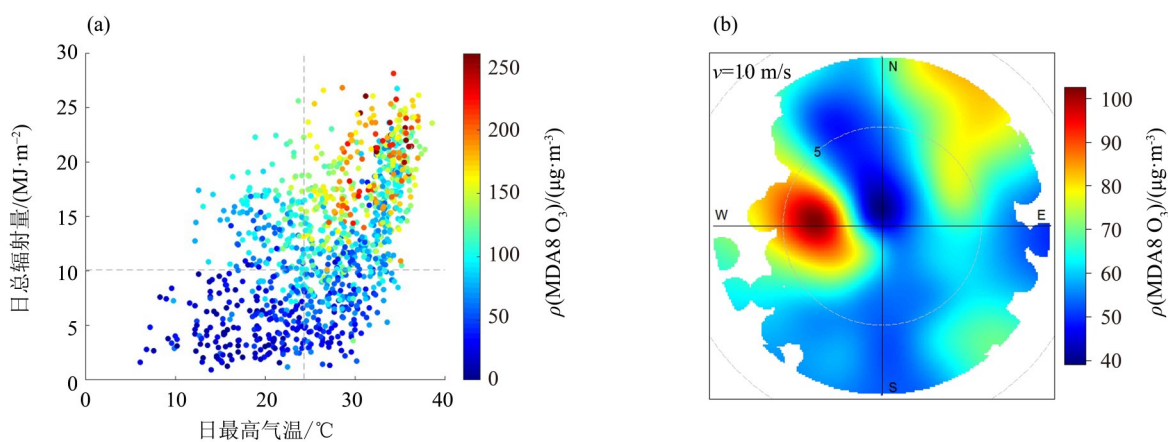


图6 2017—2019年佛山市 (a) MDA8 O_3 浓度、日总辐射量和日最高气温分布;

(b) 平均MDA8 O_3 浓度、风速(v)和风向分布

Fig. 6 Distribution of MDA8 O_3 , total daily radiation and the maximum daily mean temperature (a); mean MDA8 O_3 , wind speed (v) and wind directions (b) in Foshan

2.3 大尺度环流形势对 O_3 浓度的影响

采用主观分型的方法对2017—2019年 O_3 污染日地面和500 hPa的大气环流形势进行分析,并将影响佛山市 O_3 污染的天气系统分为8种类型,分别为副高控制型(SH)、台风外围型(TD)、均压场型(HP)、变性高压脊型(HR)、副高叠加台风外围型(SH+TD)、冷高压变性出海型(CH)、冷锋前型(CF)、弱高压脊型(WR)。结果和广东省 O_3 污染天气主观、客观分型研究结果接近^[24-25]。各型主要的环流特征列于表1,各型环流特征区分明显。

副高控制型、台风外围、均压场型和弱高压脊型诱发的 O_3 污染天数多、浓度高,是佛山市 O_3 污染最重要的天气型(表2)。以副高控制型和台风

外围型出现频率最高,发生 O_3 污染日占比合计超过50%。冷锋前型、变形高压脊型、冷高压变性出海型出现的频率不高,发生污染的程度较轻,未见有中度或以上 O_3 污染发生。同时,大气环流与 O_3 污染的关联具有季节变化特征,不同季节诱发佛山市发生 O_3 污染主要的大气环流类型不同。夏季和冬季由于大气环流相对稳定,诱发 O_3 污染的大气环流类型相对单一,主要分别受台风外围和冷高压变性出海的环流影响。春季和秋季诱发佛山市发生 O_3 污染的大气环流类型丰富,前文中提及的8类天气型均可能发生。这与春、秋季节为转季节,大气环流相对不稳定有关^[39]。这说明佛山市春季、秋季 O_3 污染的大气环流成因复杂,在

这两个季节开展O₃污染预警预报的时候, 需要注意大气环流形势的变化, 谨慎研判。

在不同大气环流控制下, 诱发佛山市出现O₃

污染最关键的气象因子不同(表3)。副高控制型、台风外围型、副高叠加台风外围型等大气环流类型光热条件充足, 在这些大气环流控制下, 诱发

表1 佛山市O₃污染天气主观分型结果及其主要特征

Table 1 Subjective weather classifications and main characteristics of O₃ pollution in Foshan

| 污染天气型 | 主要环流特征 |
|-----------|---|
| 副高控制型 | 500 hPa本地受副热带高压控制, 地面处于弱气压场控制, 地面风力弱 |
| 台风外围型 | 南海或西北太平洋海域有低压或以上系统生成, 并向大陆移动, 中心位置在巴士海峡附近或台湾岛附近海域 |
| 均压场型 | 地面处于弱气压场控制, 气压梯度极稀疏, 大气层结稳定, 容易发生逆温 |
| 弱高压脊型 | 北方受冷高压控制, 但中心压强较弱, 本地受其高压脊影响, 处于弱气压场中, 地面风力弱 |
| 冷锋前型 | 北方受冷高压控制, 本地处于冷锋前, 地面气压梯度稀疏, 风力一般 |
| 变性高压脊型 | 冷高压中心东移出海, 本地受其向西延伸出的高压脊控制, 地面气压梯度稀疏 |
| 冷高压变性出海型 | 冷高压中心在福建、江苏、浙江和上海一带出海, 本地处于高压后部, 地面气压梯度稀疏或处于弱气压场控制 |
| 副高叠加台风外围型 | 500 hPa受副热带高压控制, 西北太平洋海域有低压或以上系统生成, 并向大陆移动, 中心位置在巴士海峡或台湾岛以东海域, 本地地面气压梯度稀疏 |

表2 佛山市不同污染天气型的季节分布¹⁾

Table 2 Seasonal distributions of synoptic patterns in Foshan

| 天气型 | 全年 | | 春季 | | 秋季 | |
|-----------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|
| | 占比/% | $\rho(\text{MDA8 O}_3)$ | 占比/% | $\rho(\text{MDA8 O}_3)$ | 占比/% | $\rho(\text{MDA8 O}_3)$ |
| 副高控制型 | 30.4 | 195 | 19.2 | 210 | 42.0 | 260 |
| 台风外围型 | 21.0 | 197 | 0.0 | — | 13.6 | 216 |
| 均压场型 | 16.7 | 192 | 30.8 | 260 | 8.6 | 216 |
| 弱高压脊型 | 9.4 | 201 | 15.4 | 255 | 11.1 | 231 |
| 冷锋前型 | 7.3 | 172 | 7.7 | 172 | 9.9 | 200 |
| 变性高压脊型 | 6.5 | 173 | 15.4 | 203 | 6.2 | 180 |
| 冷高压变性出海型 | 5.1 | 182 | 11.5 | 181 | 2.5 | 205 |
| 副高叠加台风外围型 | 3.6 | 190 | 0.0 | — | 6.2 | 217 |

1) $\rho(\text{MDA8 O}_3)$ 单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

表3 不同污染天气型本地气象要素与MDA8 O₃相关性¹⁾

Table 3 Correlation coefficients between different local meteorological factors and MDA8 O₃

| 天气型 | 日总辐射量 | 日均气温 | 日最高气温 | 日总降雨量 | 降雨时长 | 风速 |
|-----------|--------|---------|--------|---------|---------|--------|
| 副高控制型 | 0.102 | 0.095 | 0.167 | -0.134 | -0.125 | -0.240 |
| 台风外围型 | 0.098 | 0.186 | 0.166 | -0.058 | 0.008 | -0.448 |
| 均压场型 | 0.408 | -0.186 | -0.234 | -0.056 | -0.227 | -0.228 |
| 弱高压脊型 | 0.208 | 0.422 | 0.396 | -0.007 | -0.007 | -0.197 |
| 冷锋前型 | -0.200 | 0.613 | 0.524 | -0.138 | -0.138 | -0.358 |
| 变性高压脊型 | -0.267 | 0.857** | 0.724* | 0.815** | 0.815** | -0.296 |
| 冷高压变性出海型 | -0.304 | 0.605 | 0.759 | — | — | -0.039 |
| 副高叠加台风外围型 | -0.454 | -0.069 | 0.373 | — | — | -0.743 |

1) 置信水平均为 $\alpha=0.01$ 水平(2-tailed)。

佛山市出现 O_3 污染最关键的气象因子是风速, 其与 $\rho(\text{MDA8 } O_3)$ 的相关系数为 $-0.743 \sim -0.240$, 高于同一类型控制下 $\rho(\text{MDA8 } O_3)$ 与其他气象要素的相关系数。弱高压脊型、冷锋前型、变性高压脊型和冷高压变性出海型等大气环流类型光热条件相对不足, 气温是影响上述天气型 O_3 污染最关键的气象因子。

在不同大气环流驱动下, 佛山市 O_3 污染表现

出空间分布的差异(图7)。除弱高压脊型、均压场型和变性高压脊型外, 其他各型均呈现 MDA8 O_3 质量浓度南高北低的分布特征。在弱高压脊环流驱动下, 中部地区 $\rho(\text{MDA8 } O_3)$ 最高。均压场和变性高压脊环流驱动下, $\rho(\text{MDA8 } O_3)$ 空间分布相对均匀。这说明要实现佛山市 O_3 污染精准防治, 需要结合大气环流类型开展区域差别化管控。

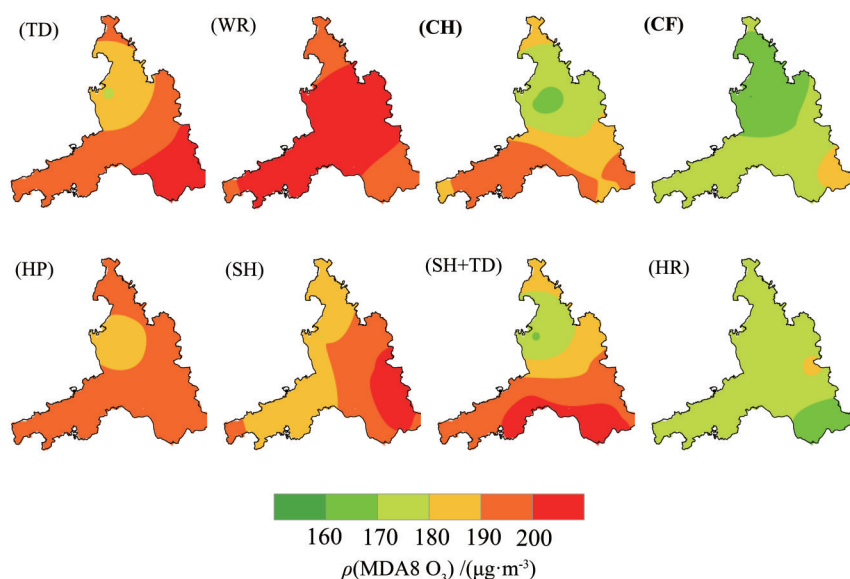


图7 佛山市不同天气型 MDA8 O_3 浓度空间分布特征

Fig. 7 Spatial distributions of MDA8 O_3 for different synoptic patterns in Foshan

3 结 论

1) 2017—2019年佛山市 90th MDA8 O_3 质量浓度呈上升趋势, 平均为 $168 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 共发生超标 138 d。

2) MDA8 O_3 质量浓度变化与气象要素密切相关, 受日总辐射量影响最为显著, 其次为日最高气温。日总辐射量 $>10.1 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 、日最高气温高于 $24.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 容易出现 O_3 污染; 偏西风和风速小于 5 m/s 时候当地 O_3 污染相对较重。降雨对 MDA8 O_3 质量浓度影响取决于降雨持续时间和发生时间, 短时降雨和夜间降雨不能缓解 O_3 污染。

参考文献:

- [1] YANG C X, YANG H B, GUO S, et al. Alternative ozone metrics and daily mortality in Suzhou: the China air pollution and health effects study (CAPES)[J]. Science of the Total Environment, 2012, 426: 83–89.
- [2] 冯兆忠, 袁相洋, 李品, 等. 地表臭氧浓度升高对陆地生态系统影响的研究进展[J]. 植物生态学报, 2020, 44(5): 526–542.
- [3] 金陶胜, 辛严超, 殷小鸽, 等. 大气臭氧: 天然分布、人为影响及其健康损害[J]. 科技导报, 2018, 36(15): 39–47.
- [4] LU X, HONG J Y, ZHANG L, et al. Severe surface ozone pollution in China: A global perspective [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2018, 5: 487–494.

- [5] 孟晓艳,宫正宇,张霞,等. 全国及重点区域臭氧污染现状[J]. 中国环境监测,2017,33(4):17-25.
- [6] 王占良,段燕楠,杨芳园,等. 昆明市臭氧污染特征及与气象因子关系初步研究[J]. 环境科学导刊,2020,39(3):44-49.
- [7] 周学思,廖志恒,王萌,等. 2013—2016年珠海地区臭氧浓度特征及其与气象因素的关系[J]. 环境科学学报,2019,39(1):143-153.
- [8] 黄俊,廖碧婷,吴兑,等. 广州近地面臭氧浓度特征及气象影响分析[J]. 环境科学学报,2018,38(1):23-31.
- [9] 王磊,刘端阳,韩桂荣,等. 南京地区近地面臭氧浓度与气象条件关系研究[J]. 环境科学学报,2018,38(4):1285-1296.
- [10] RUSSO A, TRIGO R M, MARTINS H, et al. NO₂, PM₁₀ and O₃ urban concentrations and its association with circulation weather types in Portugal [J]. Atmospheric Environment, 2014, 48: 768-785.
- [11] 张人禾,李强,张若楠. 2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. 中国科学:地球科学,2014,44(1):27-36.
- [12] 贺克斌,贾英韬,马永亮,等. 北京大气颗粒物的区域性本质[J]. 环境科学学报,2009,29(3):482-487.
- [13] 吴蒙,范绍佳,吴兑,等. 广州地区近十年来霾天气近地层流场特征研究[J]. 环境科学与技术,2014,37(5):82-88+98.
- [14] HEIDORN K C, YAP D. A synoptic climatology for surface ozone concentrations in southern Ontario 1976-1981 [J]. Atmospheric Environment, 1986, 20(4):695-703.
- [15] COMRIE A C, YARNAL B. Relationships between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations in metropolitan Pittsburgh [J]. Atmospheric Environment (Part B): Urban Atmosphere, 1992, 26(3):301-312.
- [16] HOGREFE C, BISWAS J, LYNN B, et al. Simulating regional-scale ozone climatology over the eastern United States: Model evaluation results [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38: 2627-2638.
- [17] 许建明,常炉予,马井会,等. 上海秋冬季PM_{2.5}污染天气形势的客观分型研究[J]. 环境科学学报,2016,36(12):4303-4314.
- [18] 周宁芳,李峰,饶晓琴,等. 2006年冬半年我国霾天气特征分析[J]. 气象,2008(06):81-88.
- [19] 戴竹君,刘端阳,王宏斌,等. 江苏秋冬季重度霾的分型研究[J]. 气象学报,2016,74(1):133-148.
- [20] 邹旭东,李岱松,杨洪斌. 我国北方地区的污染天气分型[J]. 气象与环境学报,2006,22(6):53-55.
- [21] 常炉予,许建明,瞿元昊,等. 上海市臭氧污染的大气环流客观分型研究[J]. 环境科学学报,2019,39(1):169-179.
- [22] 唐贵谦,李昕,王效科,等. 天气型对北京地区近地面臭氧的影响[J]. 环境科学,2010,31(3):573-578.
- [23] 余钟奇,马井会,毛卓成,等. 2017年上海臭氧污染气象条件分析及臭氧污染天气分型研究[J]. 气象与环境学报,2019,35(6):46-54.
- [24] 高晓荣,邓雪娇,谭浩波,等. 广东四大区域污染过程特征与影响天气型分析[J]. 环境科学学报,2018,38(5):1708-1716.
- [25] 洪莹莹,翁佳峰,谭浩波,等. 珠江三角洲秋季典型O₃污染的气象条件及贡献量化[J]. 中国环境科学,2021,41(1):1-10.
- [26] 汪宇,彭钰雯,陈多宏,等. 珠三角城市近地面臭氧污染分布特征及变化趋势[J]. 环境污染与防治,2019,41(9):1103-1107.
- [27] 陈辰,洪莹莹,吴蒙,等. 2019年佛山臭氧污染及污染气象条件变化[J]. 环境科学与技术,2020,43(Suppl 2):16-22.
- [28] 刘一谋,刘一鸣,田春艳,等. 降低佛山市臭氧高质量浓度的数值模拟[J]. 中山大学学报(自然科学版),2019,58(6):64-72.
- [29] 邓思欣,刘永林,司徒淑娉,等. 珠三角产业重镇大气VOCs污染特征及来源解析[J]. 中国环境科学,2021,41(7):2993-3003.
- [30] 环境保护部. 环境空气质量评价技术规范(试行): HJ 663-2013[S]. 北京:中国环境出版社,2013.
- [31] 环境保护部. 环境空气质量标准: GB 3095-2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [32] 赵娜,马翠平,李洋,等. 河北重度污染天气分型及其气象条件特征[J]. 干旱气象,2017,35(5):839-846.
- [33] 李莉,杨闻达,吕升,等. 嘉兴市臭氧污染特征及其与气象条件的关系[J/OL]. 中山大学学报(自然科学版),2021:1-8. [2021-10-11]. <https://doi.org/10.13471/j.cnki.acta.snus.2020B097>.
- [34] 吴俊,肖彬. 上海城区近地面臭氧污染研究[J]. 广州化工,2020,48(9):112-116+156.
- [35] 张晓,张艳品,铃伟妙. 石家庄市主城区臭氧污染特征及气象成因分析[J]. 环境科学研究,2021,34(2):245-253.
- [36] 唐孝炎,张远航,邵敏. 大气环境化学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2014.
- [37] HUANG Z J, ZHONG Z M, SHA Q E, et al. An updated model-ready emission inventory for Guangdong Province by incorporating big data and mapping onto multiple chemical mechanisms [J]. Science of the Total Environment, 2021, 15(769):144535.
- [38] 赵伟,高博,刘明,等. 气象因素对香港地区臭氧污染的影响[J]. 环境科学,2019,40(1):55-66.
- [39] 周淑贞,张如一,张超,等. 气象学与气候学[M]. 北京:高等教育出版社,2013.

(责任编辑 秦社彩)