刘雨林,黎梓欣,吴燕星,等.热带气旋–热浪复合事件对珠三角暖季臭氧污染的影响 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):6552-6559.
Liu Y L, Li Z X, Wu Y X, et al. Impact of tropical cyclone-heatwave compound events on ozone pollution in the Pearl River Delta during the warm season [J]. China Environmental Science, 2025,45(12):6552-6559.

热带气旋–热浪复合事件对珠三角暖季臭氧污染的影响

刘雨林[1],黎梓欣[1],吴燕星[1],刘 润[1,2*] (1.暨南大学环境与气候学院,广东 广州 511443；2.粤港澳环境质量协同创新联合实验室,广东 广州 511443)

摘要：基于 2015~2023 年暖季(6~9 月)珠三角臭氧(O_3)每小时浓度数据、热带气旋数据和气象再分析数据,对比分析其他事件、单独热浪事件(HW)、单独热带气旋事件(TC)和热带气旋-热浪复合事件(TC–HW)对珠三角O_3的影响以及与O_3污染事件的年际变化关系.结果表明,TC–HW 复合事件发生时,珠三角 O_3 浓度为(143.8±41.7) μg/m^3,O_3 浓度的平均增长率为 21.4%,O_3 超标率为 36.8%.相比于其他事件、单独 HW 事件和单独 TC 事件,TC–HW 复合事件使整个珠三角区域 O_3 浓度提高了 38.3 μg/m^3.TC–HW 复合事件与珠三角 O_3 污染事件的年际变化呈现显著的正相关关系,其相关系数为 0.68(P<0.05).TC–HW 复合事件期间低云量、低湿度、低风速和强太阳辐射是导致珠三角 O_3 污染事件发生的关键气象因素.

关键词：热带气旋-热浪复合事件(TC–HW)；O_3 污染事件；年际变化；珠三角(PRD)
中图分类号：X511 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)12-6552-08

Impact of tropical cyclone-heatwave compound events on ozone pollution in the Pearl River Delta during the warm season.

LIU Yu-lin[1], LI Zi-xin[1], WU Yan-xing[1], LIU Run[1,2*] (1.College of Environmental and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China；2.Guangdong-Hong Kong-Macau Joint Laboratory of Collaborative Innovation for Environmental Quality, Guangzhou 511443, China). *China Environmental Science*, 2025,45(12)：6552~6559

Abstract：Based on the hourly ozone (O_3) concentration data, tropical cyclone (TC) data and meteorological reanalysis data in the Pearl River Delta (PRD) during the warm season (June-September) from 2015 to 2023, the impacts of various meteorological events, including isolated heat wave (HW) events, isolated TC events, and TC-HW compound events on O_3 in PRD and their interannual variation relationship with O_3 pollution events were compared and analyzed. The results showed that TC-HW compound events were associated with an average O_3 concentration of (143.8±41.7) μg/m^3, representing a mean growth rate of 21.4%, and a 36.8% likelihood of O_3 pollution occurrence. Compared with other event categories, TC-HW compound events lead to an average regional O_3 increase of 38.3μg/m^3. A statistically significant positive correlation (r=0.68, P<0.05) was identified between the frequency of TC-HW compound events and the interannual variability of O_3 pollution episodes. Meteorological conditions characterized by reduced cloud cover, low relative humidity, weakened wind speed, and enhanced solar radiation during the TC-HW compound events were identified as key drivers of increased O_3 concentrations in the PRD.

Key words：tropical cyclone-heatwave compound events (TC-HW)；O_3 pollution events；interannual variation；Pearl River Delta (PRD)

自 2013 年中国政府颁布《大气污染防治行动计划》以及实施一系列严格的减排措施以来,全国空气质量明显改善,SO_2、NO_x、CO、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度大幅下降[1-4].相反,地表 O_3 浓度呈现上升趋势,2013~2022 年我国 O_3 平均浓度增长速率为 2.54μg/(m^3·a)[5],O_3 污染形势依然严峻[6-9].地表 O_3 浓度受其前体物 NO_x、VOC_s 排放和气象条件的双重影响[10],O_3 主要通过 NO_x 和 VOC_s 的一系列光化学反应生成[11],气象因素影响 O_3 前体物的自然排放、光化学反应和损失以及传输过程[12].在全球变暖背景下,气候变化引起的 O_3 污染问题日益凸显,厘清气象条件对 O_3 的影响具有重要意义[13-15].

极端气象事件,如热浪、大气静稳和逆温,都有利于 O_3 的光化学生成和积累,导致 O_3 污染事件发生[16-20].东亚季风、西太平洋副热带高压和热带气旋等大尺度环流与 O_3 的形成和传输密切相关[21-24].在京津冀地区,夏季热浪加剧是 O_3 污染恶化的重要驱动因素.随着热浪事件显著增加,平均 $MDA8O_3$ 和 O_3 超标频次分别显著增加了约 20μg/m^3 和 976 次[25].

收稿日期：2025-05-06
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFC3706204)
* 责任作者, 副研究员, liurun@jnu.edu.cn

大气静稳事件日期间低云量、低风速、降雨减少和下沉气流增强等不利气象条件加速珠三角秋季 O_3 的形成,大气静稳事件下珠三角秋季 O_3 超标率为36.5%,是非大气静稳事件(7.6%)的 4.8 倍[26].此外,严重的 O_3 污染事件也与西太平洋副热带高压和台风外围天气模式有关.在西太平洋副热带高压控制阶段,逆温层和静风综合作用能够阻碍 O_3 扩散,使地面 O_3 浓度最高达到 106×10^{-9}μg/m^3,而在台风外围控制阶段,强烈的下沉气流能够促进 O_3 从残留层向下输送,从而导致地面 O_3 浓度升高到 170×10^{-9}μg/m^3[27].

珠三角位于华南沿海地区,属于典型的亚热带季风气候,夏秋季容易受到热带气旋和西太平洋副热带高压的影响[28-30]. 近年来,珠三角地区经历了频繁的热带气旋活动和热浪事件[31-33],同时伴随着 O_3 污染事件的发生[34-35],这种复合事件的危害比单独事件更具破坏性[36].目前已有大量研究报道了单独气象事件对 O_3 污染事件的影响,而对于复合事件影响因素和年际变化趋势尚缺乏深入探讨.基于此,本研究通过对比其他事件和单独事件,重点探究了2015~2023 年热带气旋–热浪(TC–HW)复合事件对珠三角暖季 O_3 污染事件的影响机制及年际变化特征,以期为未来复合事件频发背景下 O_3 防控措施的制定提供科学依据.

1　数据与方法

1.1　数据资料

1.1.1　污染物数据　本研究使用的 O_3 逐小时浓度数据由中国环境监测总站(http://www.cnemc.cn/en/)提供,选取珠三角地区 9 个城市(包括广州、佛山、深圳、中山、珠海、东莞、江门、惠州和肇庆)作为研究区域,分析 2015~2023 年暖季(6~9月)O_3 日最大 8h 滑动平均浓度[MDA8O_3, ρ(O_3_8h)].为了保证研究数据的可靠性,将珠三角地区数据缺失值大于 10%的站点剔除,最后选择 51 个有效站点数据.

1.1.2　气象数据　气象数据来自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)分辨率为 0.25°×0.25°的 ERA5 再分析数据集,包括 2m 温度(T_{2m})、10m 风速(WS_{10})、总云量(TCC)、地表向下太阳辐射(SSRD)、相对湿度(RH)、850hPa、500hPa 位势高度和风场,选取时间范围为 2015~2023 年暖季(6~9 月).本研究从 51 个监测站位置对应的 25 个网格中选择 T_{2m} 格点数据用于计算该监测站点的 TC–HW 复合事件.当计算整个珠三角地区其他气象因子的平均值时选取的空间范围(20°~26°N,109°~120°E).T_{2m} 采用日最大值,其他气象资料取 0:00~23:00 的平均值.

1.1.3　热带气旋数据　TC 数据来源于中国气象局热带气旋资料中心(https://tcdata.typhoon.org.cn/)提供的西北太平洋(含南海,赤道以北,东经 180°以西)海域 TC 的最佳路径数据集,包括自 1949 至今的西北太平洋海域热带气旋最佳路径数据资料.本研究选取 TC 数据时间范围为 2015~2023 年 6~9 月.

1.2　研究方法

1.2.1　O_3 污染事件的定义　基于中国环境空气功能区域的二级空气质量标准(《环境空气质量标准》(GB 3095–2012))[37],当珠三角地区全部空气质量监测站日平均 MDA8O_3 超过 160μg/m^3 时,定义为珠三角 O_3 污染天.

1.2.2　热浪事件的定义　本研究参考 Lin 等[30]以及 Huang 等[38]对 HW 的定义,并结合珠三角地区的实际情况,将 HW 定义为珠三角所有站点区域平均日最高气温连续 3d 或 3d 以上超过 32.1℃温度阈值的天气过程.

1.2.3　TC–HW 复合事件的定义　将 2015~2023 年 6~9 月热带气旋最佳路径数据集中有 TC 记录的天,即东经 180°以西,赤道以北,包括南海在内的区域有 TC 的天,定义为 TC 天,其余天定义为非 TC 天.TC–HW 复合事件是指 TC 事件和 HW 事件在同一天同时发生.同理,当天发生 HW 事件但未发生 TC 活动记为单独 HW 事件;当天发生 TC 活动但未发生 HW 事件记为单独 TC 事件;当天均未发生 TC 活动和 HW 事件记为其他事件.

1.2.4　O_3 增加速率　为了对比和分析不同事件期间 O_3 浓度的变化情况,采用 O_3 增加速率来进行评估,参考了 Lu 等[16]的研究方法,计算公式如下:

$$O_3\text{增加速率}(\%)=\frac{O_{3(t+1)}-O_{3(t)}}{O_{3(t)}}\times100\% \quad (1)$$

式中:$O_{3(t)}$表示第 t 小时的 O_3 浓度(μg/m^3);$O_{3(t+1)}$表示下一个小时(t+1)的 O_3 浓度(μg/m^3).O_3 增加速率是 O_3 浓度变化幅度的一个重要指标,增加速率越大,表明 O_3 浓度变化越大.

2 结果与讨论

2.1 O_3 污染事件的年际变化特征

2015~2023 年珠三角暖季 $MDA8O_3$ 与 O_3 污染天数均呈现增加趋势,其中年均 $MDA8O_3$ 在 2019 年达到峰值,O_3 峰值浓度为 121.4μg/m^3,与 2015 年(95.8μg/m^3)相比增加了 25.6μg/m^3(图 1). 尽管 $MDA8O_3$ 在 2020 年有所回落,但到 2021 年 $MDA8O_3$ 迅速上升,从 2020 年的 95.7μg/m^3 上升到 2021 年的 111.7μg/m^3,增加浓度约为 16.0μg/m^3.O_3 污染在 2019 年和 2022 年最严重,2019 年和 2022 年 O_3 污染天数分别为 34d 和 36d.其中,O_3 污染天增幅最大的是 2019 年,相较于 2018 年增加了 20d.O_3 年均浓度与 O_3 污染天数的年际变化高度一致,其相关系数为 0.91(P<0.01).

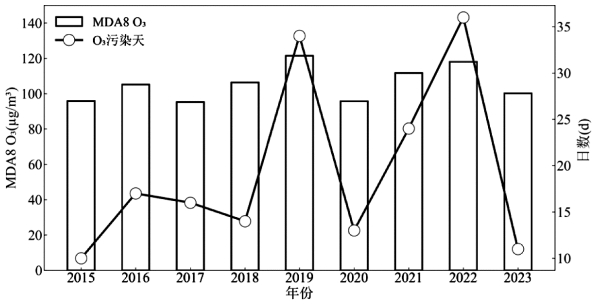


图 1 2015~2023 年珠三角暖季年均 $MDA8O_3$ 与 O_3 污染天数的年际变化

Fig.1 Interannual variations in the annual mean of $MDA8O_3$ and the number of O_3 pollution days in the PRD during the warm season (June–September) from 2015 to 2023

2.2 TC–HW 复合事件对珠三角 O_3 的影响

2015~2023 年暖季珠三角地区共发生了 285d 的 TC–HW 复合事件(图 2(a)),其中 2019 年记录的 TC–HW 复合事件最多,总计 43d.此外,TC–HW 复合事件的年际变化趋势与珠三角 O_3 污染天的年际变化趋势相似,两者表现为显著的正相关关系,其相关系数为 0.68(P<0.05).而其他事件、单独 HW 事件和单独 TC 事件与珠三角 O_3 污染天年际变化趋势的相关系数分别为 0.55(P=0.13)、0.01(P =0.97)和 −0.56(P=1.19).由此说明,TC–HW 复合事件是驱动 2015~2023 年珠三角暖季 O_3 污染天年际变化的关键因子.在 175d 的 O_3 污染日中,大部分 O_3 污染日均发生在 TC–HW 复合事件中.其他事件、单独 HW 事件、单独 TC 事件和 TC–HW 复合事件期间分别发生了 9, 15, 46 和 105d 的 O_3 污染日,分别占珠三角全部 O_3 污染日的 5.1 %、8.6 %、26.3 %和 60.0%,表明在 TC–HW 复合事件下更有利于 O_3 污染事件的发生.

四种事件下珠三角 $MDA8O_3$ 均呈波动上升的趋势(图 2(b)).除 2018 年外,TC–HW 复合事件下珠三角 $MDA8O_3$ 均显著高于其他事件、单独 TC 事件和单独 HW 事件.TC–HW 复合事件与珠三角 $MDA8O_3$ 在年际变化上表现为不显著的正相关关系(r=0.56, P=0.12),而两者在去线性趋势后的相关系数为 0.61(P=0.09),表明 TC–HW 复合事件主要控制珠三角 $MDA8O_3$ 的年际波动,而不是其长期增加趋势.

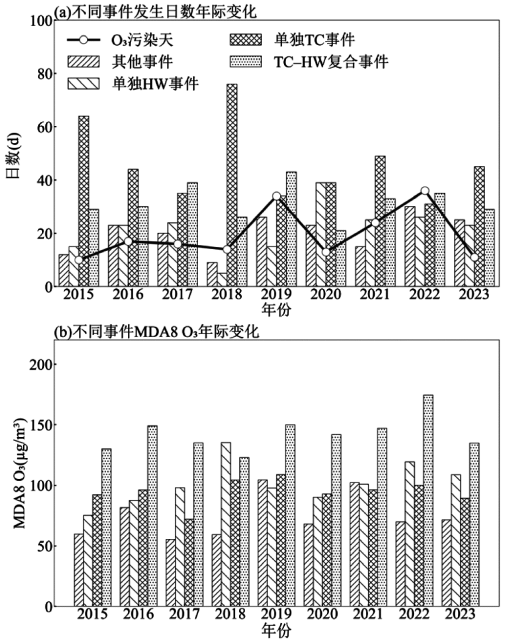


图 2 2015~2023 年不同事件发生日数和 $MDA8O_3$ 年际变化

Fig.2 Interannual variations in the number of days with different events and O_3 concentrations from 2015 to 2023

图 3 对比了不同事件下珠三角 $MDA8O_3$、O_3 超标率和 O_3 日变化特征.当其他事件、单独 HW 事件、单独 TC 事件和 TC–HW 复合事件发生时,珠三角 O_3 浓度分别为(76.1±35.2),(98.9±34.3),(95.3±41.2)和(143.8±41.7)μg/m^3,O_3 超标率分别为 4.9%、7.7%、11.0%和 36.8%(图 3(a)和 3(b)).在 TC–HW 复合事件期间 O_3 浓度大约是单独 HW 事件期间的 1.4 倍,是单独 TC 事件的 1.5 倍.这与 Qi 等[39]研究一致,相比于单一的气象事件,TC–HW 复合事件对珠三角 O_3 污染有显著影响.

此外,TC–HW 复合事件对珠三角 O_3 浓度的影响也体现在 O_3 日变化特征上(图 3(c)).其他事件、单独 TC 事件、单独 HW 事件和 TC–HW 复合事件下的 O_3 日变化特征相似,均为早上 07:00~08:00 之间 O_3 浓度迅速上升,14:00~15:00 之间达到最高值.其中,TC–HW 复合事件发生时全天的 O_3 浓度均显著高于其他事件、单独 HW 事件和单独 TC 事件,在下午 15:00 时 O_3 浓度达到了 155.3μg/m^3,分别比其他事件、单独 HW 事件和单独 TC 事件高 73.7, 47.3 和 54.8μg/m^3.从 O_3 增加速率来看,TC–HW 复合事件期间珠三角 O_3 浓度在上午 07:00~12:00 之间的上升速度明显快于其他事件、单独 HW 事件和单独 TC 事件,从上午 07:00~15:00,其他事件、单独 HW 事件、单独 TC 事件和 TC–HW 复合事件 O_3 浓度的平均增长率分别为 15.9%、20.3%、15.2%和 21.4%,而在 16:00~次日 06:00,O_3 浓度平均增长率分别为 −11.5%、−13.6%、−10.9%和−13.0%.以上结果表明,TC–HW 复合事件显著提高了 O_3 在白天的光化学反应速率,使 O_3 在白天维持较高的浓度水平.

2.3　TC–HW 复合事件对珠三角 O_3 影响的机制

2.3.1　TC–HW 复合事件下珠三角 O_3 浓度变化的气象影响因素　复合事件对大气中 O_3 的影响是通过改变气象条件,进而改变 O_3 的浓度[40-42].O_3 是光化学反应的产物,其浓度高低与温度、湿度、太阳辐射和边界层高度等气象要素密切相关[43-45].

图 4 为 2015~2023 年珠三角暖季不同事件期间的气象异常合成场.TC–HW 复合事件下珠三角地区总云量、相对湿度和 10m 风速表现为显著的负异常(图 4(h)、4(l)和 4(p)),太阳辐射表现为显著正异常(图 4(d)).总云量的减少有利于更多的太阳辐射到达地面,太阳辐射的增加通过影响 NO_2 的光解作用而加剧了光化学反应速率,从而加重了局部 O_3 污染[46].

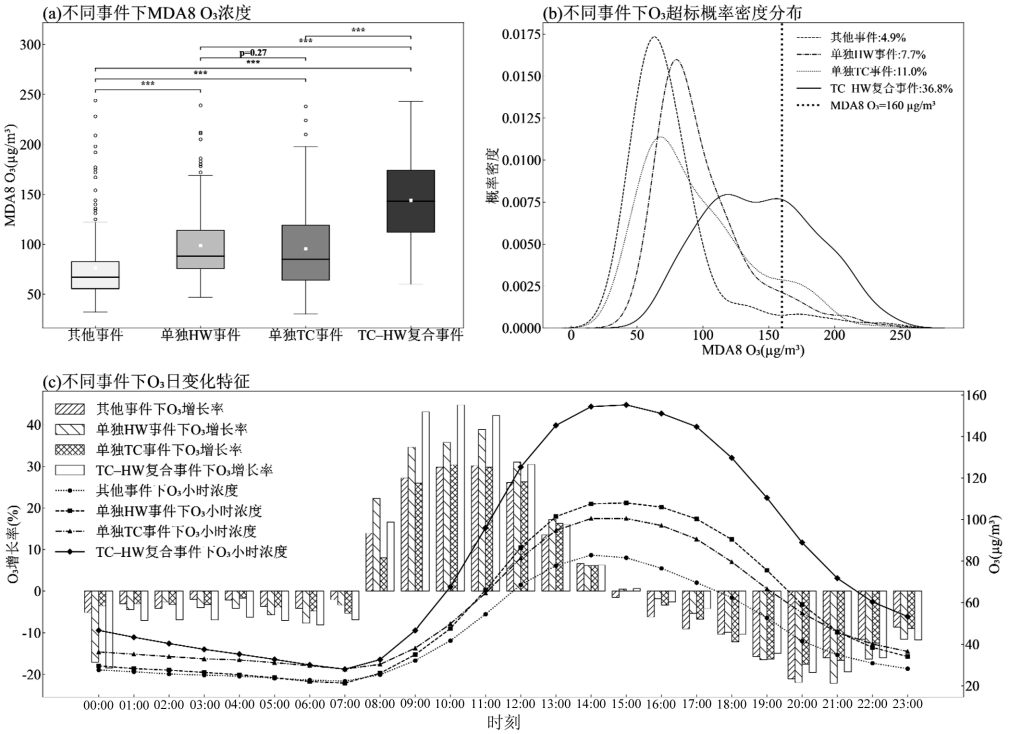


图 3　不同事件下 O_3 浓度、概率密度分布和日变化特征

Fig.3　Comparisons of O_3 concentration, probability density and diurnal characteristics under different events

“***”表示通过 99%的置信度显著性检验

Kou 等[47]证明了太阳辐射的增加刺激了更高的生物源排放,从而在很大程度上促进 O_3 污染事件的发生.大气中的 O_3 浓度与相对湿度呈负相关,较高的相对湿度也有利于 O_3 通过化学反应损失[48-49].在 TC–HW 复合事件期间珠三角地区相对湿度负异常,O_3 不易在大气中扩散或通过化学反应清除.低风速(图 4(p))阻碍了 O_3 的扩散和区域传输,使 O_3 浓度仍以较高水平停留在大气环境中.

为了定量比较不同事件期间各气象因子对 O_3 浓度的贡献,采用多元线性回归方法[50]获得不同事件下各气象因子的标准化回归系数,最后得到各气象因子的相对贡献率,结果如表 1 所示.

表 1 不同事件下各气象因子相对贡献率(%)

Table 1 Relative contribution of each meteorological factor under different events(%)

气象因子	其他事件	单独 HW 事件	单独 TC 事件	TC–HW 复合事件
SSRD	7.2	23.1	2.3	11.5
RH	68.7	46.7	54.2	48.6
TCC	0.7	9.2	18.6	9.8
WS_{10}	23.5	21.0	25.0	30.1

不同事件下各气象因子的相对贡献率差异明显,其他事件、单独 HW 事件、单独 TC 事件和 TC–HW 复合事件下对 O_3 浓度相对贡献率最高的气象因子均为相对湿度,其相对贡献率分别为 68.7%、46.7%、54.2%和 48.6%.在其他事件、单独 TC 事件和 TC–HW 复合事件下相对贡献率次高的气象因子为 10m 风速,其相对贡献率分别为 23.5%、25.0%和 30.1%,而在单独 HW 事件中相对贡献率次高的气象因子为太阳辐射,相对贡献率为 23.1%.对不同事件中相对贡献率最大的两个气象因子(即相对湿度和 10m 风速)的区域平均异常值进行比较,其他事件、单独 HW 事件、单独 TC 事件和 TC–HW 复合事件下的相对湿度异常值分别为 4.0%、−2.1%、3.0%和−5.0%,10m 风速异常值分别为−0.02, −0.002, 0.2 和−0.3m/s.结果表明,其他事件和单独 TC 事件的相对湿度均高于正常值,而单独 HW 事件和 TC–HW 复合事件下的相对湿度均低于正常值,且 TC–HW 复合事件下相对湿度异常值的绝对值比单独 HW 事件下的高 2.9%,表明偏离程度更大.此外,TC–HW 复合事件下的 10m 风速异常值的绝对值也均高于其他事件和单独 HW 事件.因此,相比于其他事件、单独 HW 事件和单独 TC 事件,TC–HW 复合事件中的低相对湿度和低风速共同作用可能更有利于珠三角 O_3 浓度的升高,与前文得出的 TC–HW 复合事件下的 $MDA8O_3$ 在四类事件中最高的结果一致(图 3(a)).

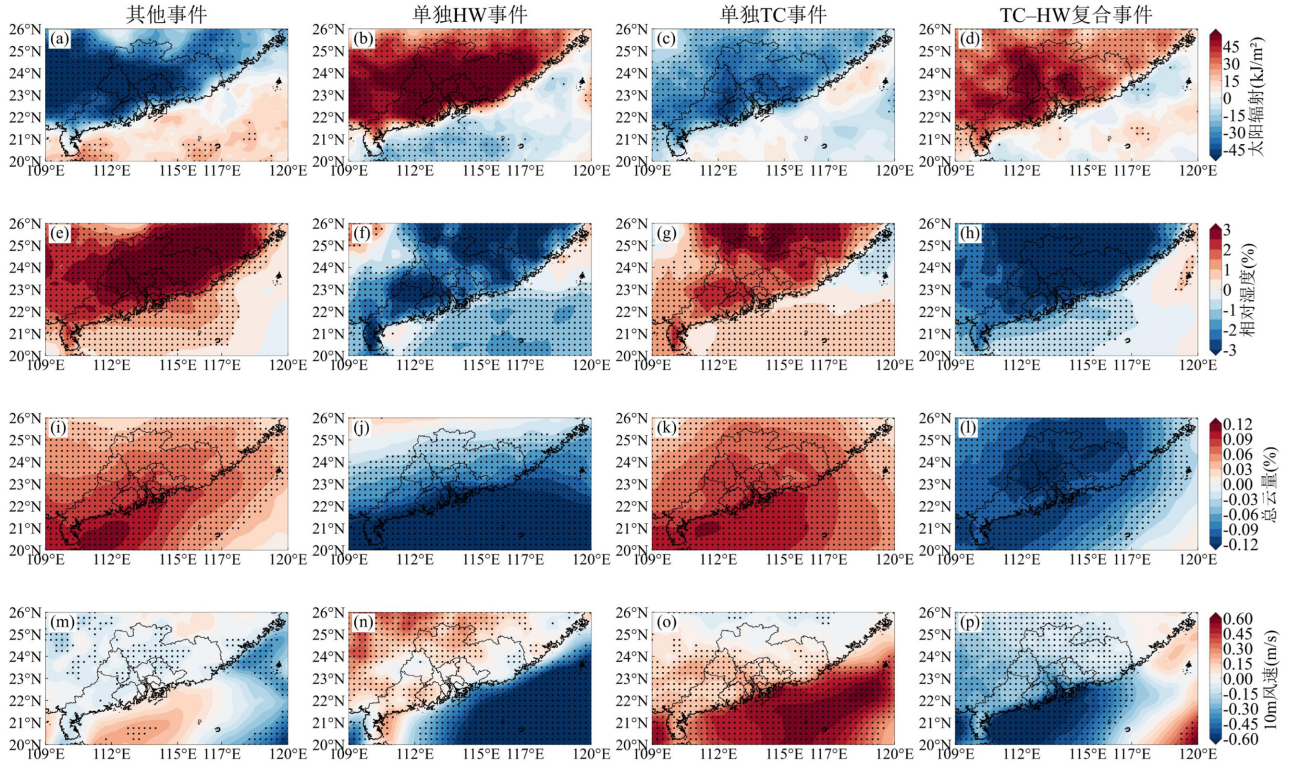


图 4 不同事件地表向下太阳辐射、相对湿度、总云量、10m 风速的气象异常合成场

Fig.4 Composite anomalies of downward surface solar radiation, relative humidity, total cloud cover, and 10m wind speed during different events

通过 95%置信度显著性检验的区域被打点

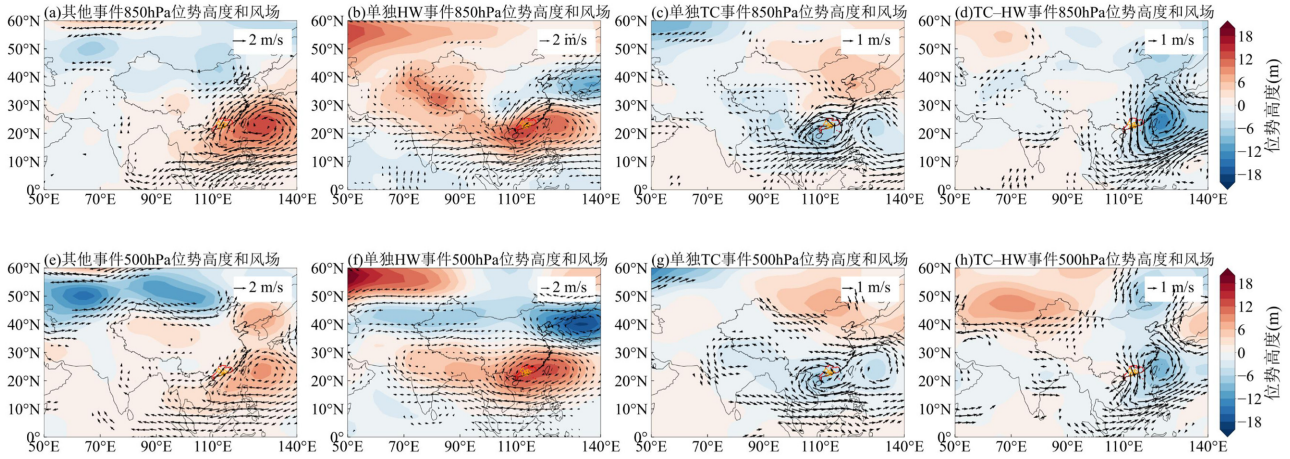


图 5　不同事件 850hPa 和 500hPa 水平位势高度(阴影)和水平风(矢量)异常合成场

Fig.5　Composite anomalies of potential height (shaded) and horizontal wind vectors at 850hPa and 500hPa during different events

通过 95%置信度显著性检验的风向和风速被绘出

2.3.2　TC–HW 复合事件的大气环流形势　图 5 为其他事件、单独 HW 事件、单独 TC 事件和 TC–HW 复合事件期间 850 和 500hPa 位势高度和风场异常合成图.在 TC–HW 复合事件期间,850 和 500hPa 等压面上均观测到东海区域存在显著的异常气旋环流(图 5(c)和 5(d)),导致中国东南部出现异常东北风,与夏季风环流驱动的西南风呈反向分布,这种环流配置使向北的水汽输送显著减弱,致使珠三角地区总云量和相对湿度同步降低[38],进而加剧了 O_3 污染的形成.Qi 等[39]通过 GEOS-Chem 模拟验证了在 TC–HW 复合事件期间,珠三角更易受强烈东北风影响,通过跨区域运输从污染地区输送 O_3 至珠三角,从而加剧珠三角 O_3 污染.此外,不同移动路径的 TC 对珠三角 O_3 污染具有差异化影响,尤其当东海转向型 TC 生成时,珠三角地区太阳辐射强度和地表温度显著提升,总云量、相对湿度和风速同步下降[51],形成有利于 O_3 光化学反应的气象条件,最终诱发 O_3 污染事件.此外,TC 西侧的下沉运动可通过垂直输送机制,将高浓度 O_3 自高空向近地面层输送,加剧局地 O_3 浓度积累[52].对比分析表明,在其他事件期间,西北太平洋区域低层(850hPa)和高层(500hPa)分别存在显著反气旋异常,其西侧的东南风将南海清洁气团平流输送至珠三角地区,促进 O_3 的扩散,从而有效降低大气 O_3 浓度.在单独 HW 事件中,珠三角受反气旋异常控制,此类高压系统往往诱发持续晴空天气和稳定高压场,通过增强太阳辐射通量及抑制热量耗散,导致地面气温显著抬升[53].而在单独 TC 事件中,珠三角和西北太平洋区域出现气旋异常,伴随低压系统、强降水及大气不稳定等特征[54].总云量和相对湿度较高,削弱太阳辐射到达地表的强度,抑制对流层 O_3 光化学生成.同时,低压系统内的强风切变与湍流混合作用可增强 O_3 的水平扩散和垂直混合效率,从而实现 O_3 浓度的降低.

3　结论

3.1　2015~2023 年珠三角暖季 $MDA8O_3$ 与污染日数均呈上升趋势,其年际变化趋势高度同步(r=0.91, P<0.01).

3.2　不同类型事件下 $MDA8O_3$ 差异显著.TC–HW 复合事件期间 $MDA8O_3$ 最高((143.8±41.7) μg/m^3), O_3 超标率达 36.8%,显著高于单独 TC(11.0%)、单独 HW(7.7%)及其他事件(4.9%).白天 O_3 浓度增长率表明 TC–HW 复合事件期间增强的光化学反应主导 O_3 生成.

3.3　TC–HW 复合事件贡献 60%的 O_3 污染日,显著高于单独 TC(26.3%)和单独 HW(8.6%).TC–HW 复合事件日数的年际变化与 O_3 污染日数显著正相关(r=0.68,P<0.05),是驱动 O_3 污染年际波动的关键因子.

3.4　TC–HW 复合事件期间的低云量、低相对湿度、低风速和强太阳辐射有利于 O_3 光化学生成,导致珠三角 O_3 污染频发.

参考文献:

[1]　Wang Y, Gao W, Wang S, et al. Contrasting trends of $PM_{2.5}$ and

surface-ozone concentrations in China from 2013 to 2017 [J]. National Science Review, 2020,7(8):1331–1339.

[2] Ding A, Huang X, Nie W, et al. Significant reduction of $PM_{2.5}$ in eastern China due to regional-scale emission control: evidence from SORPES in 2011~2018 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(18):11791–11801.

[3] Ren J, Guo F, Xie S. Diagnosing ozone–NO_x–VOC sensitivity and revealing causes of ozone increases in China based on 2013~2021 satellite retrievals [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, 22(22):15035–15047.

[4] Sicard P, Agathokleous E, Anenberg S C, et al. Trends in urban air pollution over the last two decades: a global perspective [J]. Science of The Total Environment, 2023,858:160064.

[5] Du S, He C, Zhang L, et al. Policy implications for synergistic management of $PM_{2.5}$ and O_3 pollution from a pattern–process–sustainability perspective in China [J]. Science of the Total Environment, 2024,916:170210.

[6] Fu Y, Liao H, Yang Y. Interannual and decadal changes in tropospheric ozone in China and the associated chemistry-climate interactions: a review [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019,36(9):975–993.

[7] Li K, Jacob D J, Shen L, et al. Increases in surface ozone pollution in China from 2013 to 2019: anthropogenic and meteorological influences [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020,20(19): 11423–11433.

[8] Liu H, Liu S, Xue B, et al. Ground–level ozone pollution and its health impacts in China [J]. Atmospheric Environment, 2018,173:223–230.

[9] Yue X, Unger N, Harper K, et al. Ozone and haze pollution weakens net primary productivity in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017,17(9):6073–6089.

[10] 沈 劲,杨土士,晏平仲,等.广东省臭氧污染特征及其成因分析 [J]. 环境科学与技术, 2020,43(12):90–95.
Shen J, Yang T S, Yan P Z, et al. Characteristics and causes of ozone pollution in Guangdong Province [J]. Environmental Science & Technology, 2020,43(12):90–95.

[11] 王 芃,朱盛强,张梦媛,等.大气氧化性及其对二次污染物形成的贡献 [J]. 科学通报, 2022,67(18):2069–2078.
Wang P, Zhu S Q, Zhang M Y, et al. Atmospheric oxidation capacity and its contribution to secondary pollutants formation [J]. Chinese Science Bulletin, 2022,67(18):2069–2078.

[12] Lu Y, Wang T. Decisive role of atmospheric circulation in the troposphere on ozone pollution in the Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. Atmospheric Pollution Research, 2024,15(3):102024.

[13] Han H, Liu J, Shu L, et al. Local and synoptic meteorological influences on daily variability in summertime surface ozone in eastern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020,20(1):203–222.

[14] Yan D, Zhang Z, Jin Z, et al. Ozone variability driven by the synoptic patterns over China during 2014~2022 and its implications for crop yield and economy [J]. Atmospheric Pollution Research, 2023,14(9): 101843.

[15] 胡安琪,谢晓栋,龚康佳,等.气候变化对中国夏季臭氧影响 [J]. 环境科学, 2023,44(4):1801–1810.
Hu A Q, Xiao X D, Gong K J, et al. Impact of climate change on summer ozone in China [J]. Environmental Science, 2023,44(4): 1801–1810.

[16] Lu P, Liu R, Luo Z, et al. Impacts of compound extreme weather events on summer ozone in the Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. Atmospheric Pollution Research, 2024,15(3):102030.

[17] Pu X, Wang T, Huang X, et al. Enhanced surface ozone during the heat wave of 2013 in Yangtze River Delta region, China [J]. Science of the Total Environment, 2017,603–604:807–816.

[18] Wang P, Yang Y, Li H, et al. North China Plain as a hot spot of ozone pollution exacerbated by extreme high temperatures [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022,22(7):4705–4719.

[19] Wang L, Yang X, Dong J, et al. Evolution of surface ozone pollution pattern in eastern China and its relationship with different intensity heatwaves [J]. Environmental Pollution, 2023,338:122725.

[20] 丁嘉豪,谢晓栋,龚康佳,等.2014~2020 年夏季高温热浪期间臭氧变化特征—以长三角地区典型城市为例 [J]. 中国环境科学, 2024,44 (12):6549–6558.
Ding J H, Xie X D, Gong K J, et al. Characteristics of ozone variations during summer heat waves in typical cities in the Yangtze River Delta Region from 2014 to 2020 [J]. China Environment Science, 2024,44 (12):6549–6558.

[21] Li M, Yang Y, Wang H, et al. Unique impacts of strong and westward–extended western Pacific subtropical high on ozone pollution over eastern China [J]. Environmental Pollution, 2024,358:124515.

[22] Lu S, Gong S, Chen J, et al. Composite effects of ENSO and EASM on summer ozone pollution in two regions of China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2022,127(22):e2022JD036938.

[23] Zhou Y, Yang Y, Wang H, et al. Summer ozone pollution in China affected by the intensity of Asian monsoon systems [J]. Science of the Total Environment, 2022,849:157785.

[24] Ding H, Kong L, You Y, et al. Effects of tropical cyclones with different tracks on ozone pollution over the Pearl River Delta region [J]. Atmospheric Research, 2023,286:106680.

[25] Wang R, Bei N, Hu B, et al. The relationship between the intensified heat waves and deteriorated summertime ozone pollution in the Beijing–Tianjin–Hebei region, China, during 2013~2017 [J]. Environmental Pollution, 2022,314:120256.

[26] Xu J, Zhao Z, Wu Y, et al. Impacts of meteorological conditions on autumn surface ozone during 2014~2020 in the Pearl River Delta, China [J]. Earth and Space Science, 2023,10(2):e2022EA002742.

[27] Liu C, He C, Wang Y, et al. Characteristics and mechanism of a persistent ozone pollution event in Pearl River Delta induced by typhoon and subtropical high [J]. Atmospheric Environment, 2023, 310:119964.

[28] Deng T, Wang T, Wang S, et al. Impact of typhoon periphery on high ozone and high aerosol pollution in the Pearl River Delta region [J]. Science of the Total Environment, 2019,668:617–630.

[29] Lam Y, Cheung H, Ying C. Impact of tropical cyclone track change on regional air quality [J]. Science of The Total Environment, 2018,610–611:1347–1355.

[30] Lin X, Yuan Z, Yang L, et al. Impact of extreme meteorological events on ozone in the Pearl River Delta, China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2019,19(6):1307–1324.

[31] Xiao Y, Duan Z, Xiao Y, et al. Typhoon wind hazard analysis for

southeast China coastal regions [J]. Structural Safety, 2011,33(4/5): 286–295.

[32] Wang P, Yang Y, Xue D, et al. Increasing compound hazards of tropical cyclones and heatwaves over southeastern coast of China under climate warming [J]. Journal of Climate, 2023,36(7):2243–2257.

[33] Zhang M, Yang Y, Zhan C, et al. Tropical cyclone–related heatwave episodes in the Greater Bay Area, China: synoptic patterns and urban–rural disparities [J]. Weather and Climate Extremes, 2024,44:100656.

[34] Hu T, Lin Y, Liu R, et al. What caused large ozone variabilities in three megacity clusters in eastern China during 2015~2020? [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2024,24(3):1607–1626.

[35] Hu W, Liu R, Chen Z, et al. Processes conducive to high ozone formation in Pearl River Delta in the presence of pacific tropical cyclones [J]. Atmospheric Environment, 2023,307:119859.

[36] Matthews T, Wilby R, Murphy C. An emerging tropical cyclone–deadly heat compound hazard [J]. Nature Climate Change, 2019, 9(8):602–606.

[37] GB 3095–2012　环境空气质量标准 [S].
GB 3095–2012　Ambient air quality standard [S].

[38] Huang Z, Luo M, Gao M, et al. Different characteristics of independent and compound extreme heat and ozone pollution events in the Greater Bay Area of China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023,124:103508.

[39] Qi C, Wang P, Yang Y, et al. Impacts of tropical cyclone–heat wave compound events on surface ozone in eastern China: comparison between the Yangtze River and Pearl River Deltas [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2024,24(20):11775–11789.

[40] Wang T, Zhong Z, Sun Y, et al. Impacts of tropical cyclones on the meridional movement of the western Pacific subtropical high [J]. Atmospheric Science Letters, 2019,20(5):e893.

[41] Chang L, Xu J, Tie X, et al. The impact of climate change on the western Pacific subtropical high and the related ozone pollution in Shanghai, China [J]. Scientific Reports, 2019,9(1):16998.

[42] Shen L, Diao Y, Zhao T, et al. Meteorological influence on persistent O_3 pollution events in Wuxi in the Yangtze River Delta, China [J]. Science of the Total Environment, 2024,917:170484.

[43] 米艺华,杜惠云,李　杰,等.我国重点地区臭氧变化特征及与气象要素的关系 [J]. 中国环境科学, 2024,44(4):1894–1904.
Mi Y H, Du H Y, Li J, et al. Ozone pollution characteristics and its relationship with meteorological factors of key regions in China [J]. China Environmental Science, 44(4):1894–1904.

[44] 邬双双,陈梓超,薛　鑫,等.基于 KZ 滤波分析气象对珠三角臭氧趋势的影响 [J]. 中国环境科学, 2024,44(4):1905–1911.
Wu S S, Chen Z C, Xue X, et al. Analysis of meteorological effects on the trend of ozone in the Pearl River Delta using the KZ filtering method [J]. China Environmental Science, 2024,44(4):1905–1911.

[45] Yang X, Zeng G, Iyakaremye V, et al. Effects of different types of heat wave days on ozone pollution over Beijing–Tianjin–Hebei and its future projection [J]. Science of the Total Environment, 2022,837: 155762.

[46] 单文坡,殷永泉,杜世勇,等.夏季城市大气 O_3 浓度影响因素及其相关关系 [J]. 环境科学, 2006,27(7):1276–1281.
Shan W P, Yin Y Q, Du S Y, et al. Ozone pollution, influence factors and their correlation at urban area in summer [J]. Environmental Science, 2006,27(7):1276–1281.

[47] Kou W, Gao Y, Zhang S, et al. High downward surface solar radiation conducive to ozone pollution more frequent under global warming [J]. Science Bulletin, 2023,68(4):388–392.

[48] Dang R, Liao H, Fu Y. Quantifying the anthropogenic and meteorological influences on summertime surface ozone in China over 2012~2017 [J]. Science of The Total Environment, 2021,754:142394.

[49] Liao W, Wu L, Zhou S, et al. Impact of synoptic weather types on ground–level ozone concentrations in Guangzhou, China [J]. Asia–Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2021,57(2):169–180.

[50] Li K, Jacob D J, Liao H, et al. Anthropogenic drivers of 2013~2017 trends in summer surface ozone in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019,116(2):422–427.

[51] 赵　伟,吕梦瑶,卢　清,等.热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响 [J]. 环境科学, 2022,43(6):2957–2965.
Zhao W, Lv M Y, Lu Q, et al. Effects of typical cyclones on ozone pollution in the Pearl River Delta in autumn [J]. Environmental Science, 2022,43(6):2957–2965.

[52] Ouyang S, Deng T, Liu R, et al. Impact of a subtropical high and a typhoon on a severe ozone pollution episode in the Pearl River Delta, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022,22(16):10751–10767.

[53] 董少柔,林爱兰,董彦彤.1961~2017 年华南区域性持续高温过程年际变化成因分析 [J]. 大气科学, 2023,47(5):1325–1340.
Dong S R, Lin A L, Dong Y T. Analysis of interannual variation of regionally persistent high–temperature events in South China during 1961~2017 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2023,47(5): 1325–1340.

[54] 王　宁,马梁臣,霍　也.一次爆发性气旋引发东北地区暴雨成因分析 [J]. 气象与环境学报, 2022,38(3):19–28.
Wang N, Mang L C, Huo Y. Analysis of rainstorm caused by an explosive cyclone in Northeast China [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2022,38(3):19–28.

作者简介：刘雨林(1999–),女,广西北海人,暨南大学硕士研究生,主要研究方向为气象条件对臭氧的影响.发表论文 1 篇.yuuul0630@163.com.