

麦健华,于玲玲,邓涛,等.海陆风对环珠江口地区臭氧污染的影响[J].中国环境科学,2025,45(3):1198-1209.

Mai J H, Yu L L, Deng T, et al. Impact of sea-land breezes on the ozone pollution over the Pearl River Estuary [J]. China Environmental Science, 2025,45(3):1198-1209.

海陆风对环珠江口地区臭氧污染的影响

麦健华¹,于玲玲²,邓涛^{3*},吴道航¹,倾鹏程¹,余欣洋¹(1.中山市气象局,广东 中山 528400;2.广东省气象台,广东 广州 510641;3.中国气象局广州热带海洋气象研究所,粤港澳大湾区气象研究院,广东 广州 510641)

摘要: 利用地面气象和空气质量观测数据及第五代欧洲中心大气再分析数据(ERA5),对2022年环珠江口地区在海陆风环流影响下的臭氧(O₃)污染特征进行研究.结果表明,环珠江口7市2022年海陆风日天数在40~64d,海陆风日主要集中在春季及秋季.区域海陆风日各市平均O₃日最大8h滑动平均浓度(O₃-8h)中位数及超标率分别为141μg/m³和38%,非海陆风日仅为74μg/m³和11%.海陆风环流对珠江口西岸的珠海、中山、江门三市O₃污染影响最大,3市海陆风日O₃-8h相比非海陆风日分别偏高26%、41%和29%.海陆风环流使珠中江地区O₃峰值浓度的出现时间比非海陆风日平均偏晚0.5h,平均峰值浓度偏高29%.当海风在17:00或18:00首次出现,该时段O₃小时增长率为正增长的比例分别达72%和41%,平均增长率比非海陆风日分别偏高5%和7%,但海风出现1h后O₃小时增长率明显下降.珠中江地区海陆风日平均回流指数(RF)比北风日和南风日偏低39%,陆风转海风时段平均RF比陆风及海风时段分别偏低14%和15%,海陆风超标日平均RF比非海陆风超标日偏低28%,海陆风环流使大气扩散能力减弱,因此O₃污染比非海陆风日更趋严重.

关键词: 海陆风; 珠江口; O₃污染; 回流指数

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)03-1198-12

Impact of sea-land breezes on the ozone pollution over the Pearl River Estuary. MAI Jian-hua¹, YU Ling-ling², DENG Tao^{3*}, WU Dao-hang¹, QING Peng-cheng¹, YU Xin-yang¹ (1.Zhongshan Meteorological Service, Zhongshan 528400, China; 2.Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510641, China; 3.GBA Academy of Meteorological Research, Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510641, China). *China Environmental Science*, 2025,45(3): 1198~1209

Abstract: Using surface meteorological and air quality observational data and the 5th Generation of ECMWF Reanalysis data (ERA5), the characteristics of ozone(O₃) pollution impact by the sea-land breezes(SLBs) over the Pearl River Estuary(PRE) in 2022 were studied. The results showed that the SLBs days in the seven cities of PRE were at the range of 40~64, and most of SLBs days occurred in spring and autumn. The averaged median of maximum daily 8-hour average of O₃(O₃-8h) and over-standard rate of regional SLBs days were 141μg/m³ and 38%, respectively, while only 74μg/m³ and 11% were found in non-SLBs days. The averaged O₃-8h were 26%, 41% and 29%, respectively, higher in SLBs days than those of non-SLBs days in Zhuhai, Zhongshan and Jiangmen (ZZJ), the three cities located in the western part of PRE, indicating that the impact of SLBs was the most significant in those areas. The averaged time of peak concentration in SLBs days was 0.5h later than that of non-SLBs days, with 29% increase in averaged peak concentration. When the sea breezes firstly occurred at 17:00 and 18:00, 72% and 41% of the hourly growth rates of ozone concentrations were positive, and the averaged growth rates were 5% and 7% higher, respectively, than those of non-SLBs days. But the growth rates declined obviously 1h after the occurrence of sea breezes. The averaged recirculation factor (RF) of SLBs days was 39% lower than those of north wind days and south wind days. RF of transition periods was 14% and 15% lower than those of land and sea breezes periods, respectively. Besides, compared to non-SLBs over-standard days, RF in SLBs over-standard days was 28% lower. The atmospheric diffusion capability was weakened by the SLBs, and that exacerbated the ozone pollution.

Key words: sea-land breezes; Pearl River Estuary; ozone pollution; recirculation factor

随着经济社会的快速发展,空气污染事件日益增多.近年来,得益于多项大气污染防治政策的有效落实,大气颗粒物浓度不断下降^[1],但同时臭氧(O₃)浓度却持续上升^[2-3],并且已取代颗粒物成为影响我国部分城市空气质量的最主要污染物^[4-5].O₃是O₂的同素异形体^[6],大气中90%的O₃分布在平流层中^[7],但在对流层低层,氮氧化物及可挥发性有机物

收稿日期: 2024-08-02

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3709201);国家自然科学基金资助项目(42275123);广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2023A1515012448);中国气象局重点创新团队项目(CMA2023ZD08);广东省社会发展科技协同创新项目(2024A1111120022)粤港澳大湾区气象科技协同攻关项目(GHMA2024Y03);广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2023M26);中山市气象局科学技术研究项目(ZSKT202401)

* 责任作者, 研究员, tdeng@gd121.cn

等前体物通过光化学作用也能生成 O_3 ^[8-9]. 近地面高浓度 O_3 不仅会影响气候变化, 还会使空气质量恶化, 从而对人体健康、植被生长等造成不利影响^[10-13].

O_3 污染事件的发生发展及其严重程度与前体物排放以及气象条件密切相关^[14]. 前体物是光化学反应生成 O_3 的物质基础, 是 O_3 局部污染形成的主要原因, 其浓度变化趋势与 O_3 呈显著的负相关性^[15]; 但也有研究指出前体物对 O_3 的影响同样要通过气象条件实现, 如气温越高, 前体物对 O_3 的正向影响力越大^[16]. 在气象影响上, 众多研究表明我国的 O_3 污染事件大多发生在副热带高压、台风外围、地面高压脊等大尺度天气系统控制之下^[17-19]. 而在具体的气象要素上, 强辐射以及高温加快了光化学反应的速率, 弱小风降低了 O_3 的传输与扩散效率, 无雨或少雨减弱了污染物的沉降, 这些气象要素特征均有利于 O_3 污染的出现^[20-24]. 此外, 在大气垂直层结上, 逆温层以及大范围的下沉气流抑制了大气对流运动, 使 O_3 在近地面积聚, 从而污染进一步加重^[25-27].

除了容易引起 O_3 污染的一般气象特征外, 由于各个地区地理位置的差异, 局地气候特征也会对空气污染事件造成明显影响^[28-29]. 海陆风是沿海地区一种常见的中尺度大气环流系统, 其发生的原因主要是陆地和海面热容量差异导致的下垫面受热不均匀^[30]. 海陆风影响着沿海地区的温湿、风场以及大气层结状况, 从而对 O_3 污染造成影响^[31-32]. 一方面, 海风通过传输作用把吹离陆地的 O_3 及其前体物重新输送回陆地, 使污染物浓度上升^[33-34], 即污染回流; 另一方面, 海陆风影响了沿海地区的气象条件, 例如降低了陆地风速和边界层高度等, 使污染物的水平及垂直扩散减弱, 从而加重污染^[35-36]. 但也有部分研究指出, 当海洋气团较为清洁时, 海风可促进陆地污染物的稀释扩散, 从而使污染缓解^[37].

珠江三角洲作为我国经济最为发达的地区之一, 其三面环山、一面靠海的地形特征使空气污染物易于积聚, 近年来 O_3 污染事件频发^[38-39]. 而作为近海地区, 海陆风环流对珠三角空气质量的影响不容忽视. 近年来部分学者就海陆风对珠三角 O_3 污染的影响进行了探讨, 指出海陆风的回流作用会加重珠江口附近城市的 O_3 污染^[40-41], 但这些研究多是基于污染个例或短时期内的加密观测, 评估海陆风对污染状况的总体影响, 而利用长时期的气象及空气质量

观测数据全面评估海陆风对珠江口地区 O_3 污染的影响, 探讨海陆风对该地区不同城市 O_3 污染影响的差异, 特别是把研究重点细化到小时量级, 重点分析海风出现的时间对 O_3 污染影响的研究目前仍较缺乏. 因此, 本文利用环绕珠江口的珠海、中山、江门、佛山、广州、东莞和深圳 7 个城市 2022 年全年的地面空气质量和气象观测数据以及欧洲中心 (ECMWF) 的 ERA5 再分析资料, 对该地区在海陆风环流影响下的 O_3 污染特征进行研究, 以为该地区 O_3 污染的预报预警及治理提供参考.

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文使用的地面空气质量观测数据来源于广东省生态环境监测中心, 包括了 2022 年全年珠江口附近的珠海、中山、江门、佛山、广州、东莞和深圳 7 个城市的空气质量监测站逐小时的 O_3 浓度和全天的 O_3-8h (O_3 日最大 8h 滑动平均) 实况数据, 气象数据来源于 7 市的国家基本气象站, 包括了 2022 年逐小时的气温、相对湿度、降水量、风向、风速等数据, 7 市的地理位置、空气质量及气象观测站点分布如图 1 所示. 气象再分析资料采用了 ECMWF 的 ERA5 海平面气压再分析数据, 数据空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间分辨率为 3h, 该数据主要用于绘制区域海陆风日的天气形势.

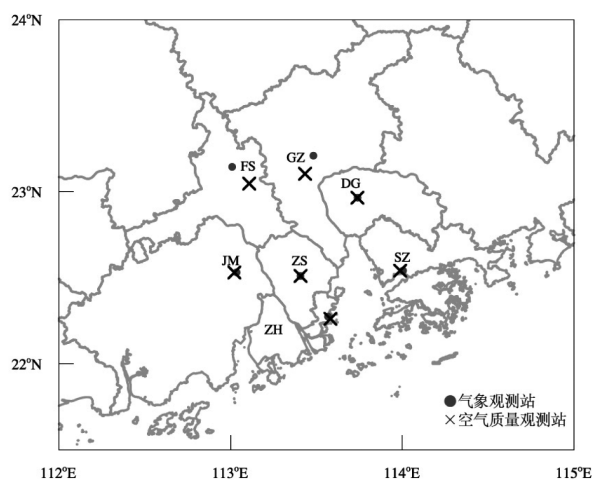


图 1 珠江口 7 市及空气质量和气象观测站点位置

Fig.1 Locations of the cities around the PRE, the air quality and the meteorological monitoring stations

ZH 珠海; JM 江门; ZS 中山; FS 佛山; GZ 广州; DG 东莞; SZ 深圳

审图号: GS(2019)1822 号

1.2 海陆风日判定标准

海陆风的判定标准因各地区的地理位置、海岸线形状以及沿海地形的不同而存在一定差异^[42],国内外学者根据常规观测资料大体上从大尺度环流形势、海陆温差、近地面风向转变等方面对海陆风进行判定^[43-44].本文根据前人对海陆风判定的相关研究,结合广东海岸线的东北-西南走向,基于以下条件对珠江口 7 市进行海陆风日的筛选:

(1)弱环流场条件:在研究范围内(21.5~24°N, 112~114.5°E),每日 08:00 和 20:00 最多有一条等压线通过,其中每条等压线间隔 2.5hPa.在弱环流场形势下,大气背景风较弱,有利于海陆风环流的形成.

(2)风向转换条件:气象观测站点整点风向在 1d 内存在明显的海、陆风转换,考虑到广东海岸线呈东北-西南走向,规定陆风的风向为 292.5~67.5°(WNW~ENE),海风风向为 112.5~247.5°(ESE~WSW),且陆风、海风的连续持续时间不少于 4 个时次,或连续 5 个时次内至少有 4 个时次同为陆风或海风.

(3)无降水条件:为了排除降水等对流天气对地面风向及 O₃ 浓度的影响,规定在陆风转换为海风的时刻前后各 3h 内气象观测站没有降水出现.

当某市的气象观测站点在某天 0:00~23:00 同时满足以上 3 个条件时,则称该市出现 1 个海陆风日,把海陆风日之外的其他日期称为非海陆风日.若某日环珠江口 7 市中有 3 市或以上为海陆风日,则称该日为区域海陆风日.另外定义 1d 内风向均在 292.5~67.5°或 112.5~247.5°变化,且日间 08:00~20:00 没有出现降雨的日期分别为北风日和南风日.

1.3 研究方法

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》^[45],O₃ 污染等级根据某天的 O₃-8h 划分为 6 个级别,分别为优(0~100μg/m³)、良(101~160μg/m³)、轻度污染(161~215μg/m³)、中度污染(216~265μg/m³)、重度污染(266~800μg/m³)和严重污染(>800μg/m³),当 O₃-8h 超过 160μg/m³ 时,则认为出现了 O₃ 超标.一年中 O₃-8h 的第 90 分位数为 O₃ 年评价值.

定义 O₃ 小时增长率为连续两个观测时次中,后一时次 O₃ 浓度相比于前一时次 O₃ 浓度的增长率,若为正增长,则代表 O₃ 浓度上升,若为负增长,则代表 O₃ 浓度下降.其计算公式如下:

$$GR = \frac{c_t - c_{t-1}}{c_{t-1}} \cdot 100\% \quad (1)$$

式中:GR 表示 O₃ 小时增长率,%;c 表示不同时次的 O₃ 浓度,μg/m³;t 表示时次.

基于地面风观测数据,本文采用回流指数对海陆风环流发生期间的大气扩散特征进行分析.回流指数(RF)^[46-47]反映了风场对污染物的有效输送能力.当 RF 接近 1 时,代表风场对污染物为平直输送,当 RF 接近 0 时,代表风场对污染物无有效输送.其计算公式如下:

$$RF = \frac{\sqrt{(\Delta T \sum_{k=st}^{k=et} u_k)^2 + (\Delta T \sum_{k=st}^{k=et} v_k)^2}}{\Delta T \sum_{k=st}^{k=et} \sqrt{u_k^2 + v_k^2}} \quad (2)$$

式中:k 为相应的数据时刻;st 和 et 分别是研究时段内的起始时刻和结束时刻;ΔT 为时间间隔,h;u 和 v 分别是水平风速的东西分量和南北分量,m/s.

2 结果与讨论

2.1 珠江口各市海陆风日及 O₃ 污染总体特征

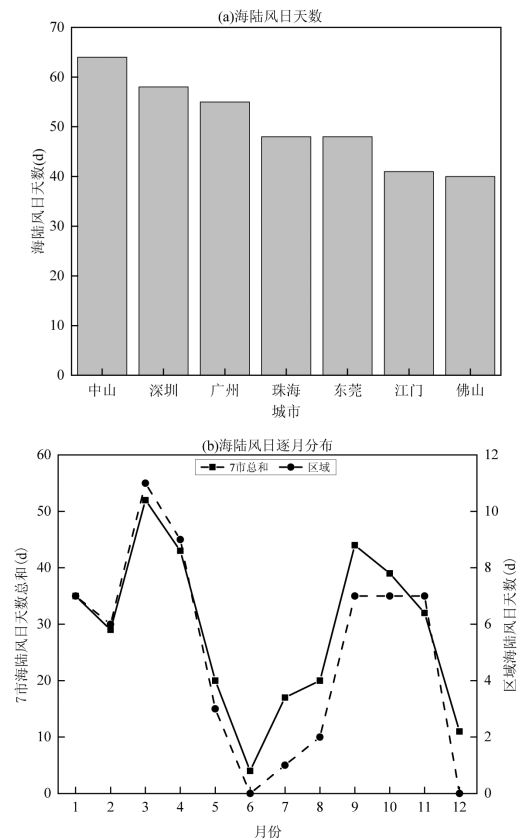


图2 环珠江口各市 2022 年海陆风日天数及海陆风日逐月分布

Fig.2 SLBs days of the cities around the PRE and the monthly variations of the SLBs days

根据本文的海陆风日判定标准,得到珠江口 7 市 2022 年的海陆风日天数及海陆风日的逐月分布如图 2 所示.7 市的全年海陆风日天数为 40~64d,其中海陆风日天数最多的中山比最少的佛山偏多 60%,但海陆风日的多少并无明显的地域性特征.从海陆风日的逐月分布来看,各月 7 市海陆风日天数总和及区域海陆风日天数均呈现出明显的双峰分布特征,其中 3 月的海陆风日最多,6 月最少,两个峰值集中在 3~4 月及 9~11 月,即春季和秋季.这是因为这两个时期是入夏及入冬的过度时期,地面天气系

统及背景风较弱,且降雨较少,因此海陆风日较多;而 6 月份处于“龙舟水”季节,降雨频繁,地面盛行南风,因此海陆风日最少.

图 3 为 4 类区域海陆风日的地面天气形势.其中 a 类大陆高压型的占比高达 48%,是占比最高的天气形势;c 类均压场型次之,占比 30%;b 类变性高压脊型及 d 类台风外围型分别占比 17%和 5%,为占比比较少的两类天气型.该 4 类地面天气形势控制下,珠江口地区地面风较弱,除了有利于海陆风环流的形成外,对 O₃ 污染的形成也相对有利^[48].

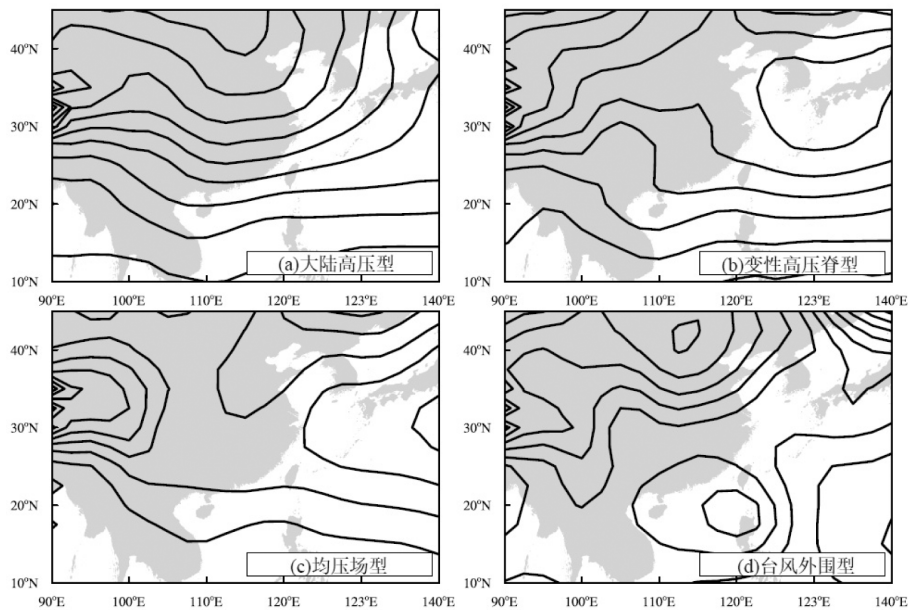


图 3 四类区域海陆风日地面天气形势

Fig.3 Four surface circulation patterns of the regional SLBs days

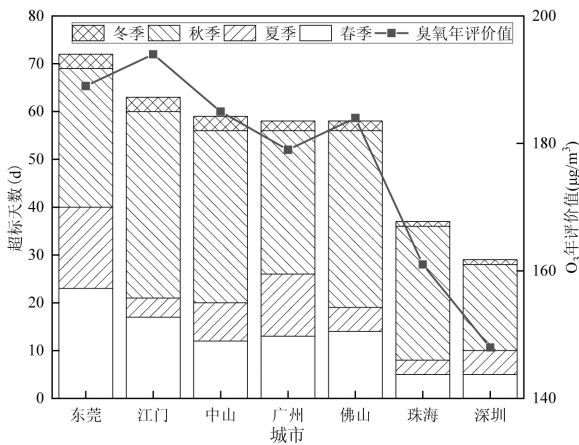


图 4 环珠江口各市 2022 年 O₃ 超标天数季节分布及 O₃ 年评价值

Fig.4 Seasonal variations of ozone over-standard days and the ozone annual assessment value of cities around PRE in 2022

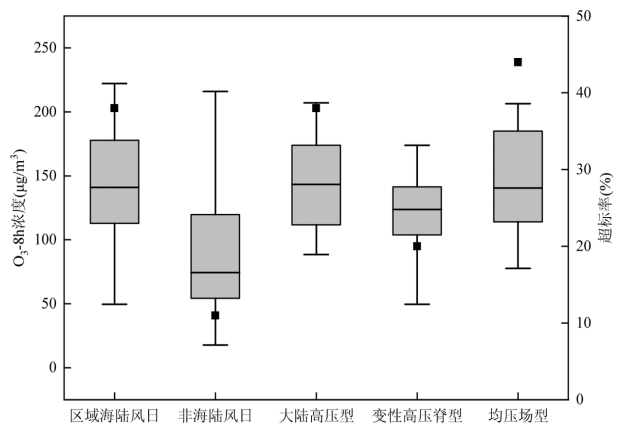


图 5 区域海陆风日、非海陆风日以及不同形势海陆风日 O₃-8h 指标(箱线图)及超标率(点图)

Fig.5 O₃-8h and the over-standard rate of regional SLBs days, non-SLBs days and SLBs days of different circulation patterns

图 4 为珠江口 7 市 2022 年的 O_3 超标天数及其季节分布以及各市的 O_3 年评价值。可以看出 7 市虽处于同一地区,但受各自地理位置影响, O_3 超标天数有较大差异。7 市 2022 年 O_3 超标天数 29~72d,其中超标天数最多的东莞是最少的深圳的 2.5 倍,与深圳同处南部沿海的珠海超标天数次少,其余 4 市的超标天数较为接近。各市出现在秋季的超标天数均为最多,占比 40%~75%,其次为春季,占比 14%~32%,而夏季和冬季超标较少。这与当地秋季气温高、日照强、降雨少的气候特征密切相关。7 市的 O_3 年评价值在 148~194 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,年评价值最高的江门比最低的深圳偏高 31%。

2.2 海陆风日 O_3 污染特征

如图 5 所示,在区域海陆风日及非海陆风日两种不同形势下,珠江口附近各项 O_3 浓度指标差异明显(O_3 -8h 为 7 市平均)。区域海陆风日的 O_3 -8h 中位数为 141 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,相比非海陆风日的 74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 偏高 91%,区域海陆风日 O_3 超标率达到 38%,而非海陆风日仅为 11%。在 3 类主要的海陆风天气形势中,大陆高压型及均压场型的 O_3 -8h 指标较为接近, O_3 -8h 中位数均为 143 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,而变性高压脊型仅为 121 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;均压场型、大陆高压型、变性高压脊型的 O_3 超标率分别为 44%、38%、20%,差异同样明显。另外,台风外围型虽然仅有 3d,但其平均 O_3 -8h 达到了 191 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,远超其余 3 种天气形势,这与台风外围影响下珠江口地区容易出现大范围 O_3 污染^[49]的结果一致。

从图 6(a)可以看出,与整个环珠江口区域类似,区域内各市的非海陆风日 O_3 -8h 均比海陆风日明显偏高,但各市的浓度偏差存在较大差异,其中偏差最大的中山达到了 83%,其次为江门的 78%,该二市的

偏差远大于其余 5 市,但偏差最小的深圳也达到了 42%。从表 1 可以看出,与非海陆风日相比较,各市海陆风日地面气象要素均体现出气温及日照时数偏大,湿度、风速及降水偏小的特点^[41],因此更有利于 O_3 浓度的上升。

由上文可知,当海陆风环流发生时,各种地面气象要素的差异会对 O_3 浓度造成影响,为进一步排除其余气象要素的影响,以各市海陆风日的气象要素为准,对各市非海陆风日中气象要素不符合条件的日期进行筛选,具体方法为:①日最高气温不低于海陆风日的最低日最高气温;②08:00~20:00 时无降水;③日平均风速不高于海陆风日的最大日平均风速;④进行以上筛选后,日照时数、相对湿度的筛选对 O_3 -8h 影响已不大,因此不再继续筛选。经过筛选后,各市非海陆风日和海陆风日的 O_3 -8h 及偏差如图 6(b)所示,虽然海陆风日的 O_3 -8h 仍然高于非海陆风日,但各市的浓度偏差与筛选前相比下降了 25%~49%,这与筛选前海陆风日与非海陆风日各气象要素的差距明显减小有关(表 2)。其中广州、佛山的偏差下降至 10%以下,中山、江门、珠海的偏差最大,其中最大偏差为中山的 41%。图 6(c)为各市海陆风超标日与非海陆风超标日的 O_3 -8h 及偏差,可以看出偏差进一步减小,其中佛山、东莞、深圳为负偏差,即海陆风日的浓度比非海陆风日要小,而偏差最大的同样是中山、江门和珠海三市,偏差分别为 11%、7%和 7%。从以上讨论可知,海陆风日各市的 O_3 浓度均比非海陆风日明显偏高,但海陆风对各市的实际影响程度差异较大,位于珠江口西岸的珠海、中山、江门三市(珠中江地区) O_3 浓度受海陆风的影响最大,因此下文将着重分析海陆风对珠中江地区 O_3 污染的影响。

表 1 环珠江口各市海陆风日与非海陆风日地面气象要素平均值

Table 1 Averaged values of surface meteorological factors of cities around the PRE in SLBs days and non-SLBs days

城市	日最高气温($^{\circ}\text{C}$)		相对湿度(%)		风速(m/s)		08:00~20:00 降水(mm)		日照时数(h)	
	海陆风	非海陆风	海陆风	非海陆风	海陆风	非海陆风	海陆风	非海陆风	海陆风	非海陆风
广州	29.6	26.8	77	79	1.7	2.3	0.2	3.9	7.6	4.4
佛山	29.9	26.8	69	73	1.6	2.4	0.3	3.8	6.4	4.5
东莞	28.3	26.9	70	77	1.7	2.3	0	3.4	7.9	4.6
江门	28.6	26.7	69	74	1.9	2.7	0	3.4	6.8	4.4
中山	27.5	27.1	70	78	1.4	1.8	0	4.0	7.6	4.1
珠海	27.1	26.1	72	79	2.5	2.7	0	4.4	8.2	4.5
深圳	29.1	27.5	75	82	0.9	1.0	0	3.6	7.4	4.5

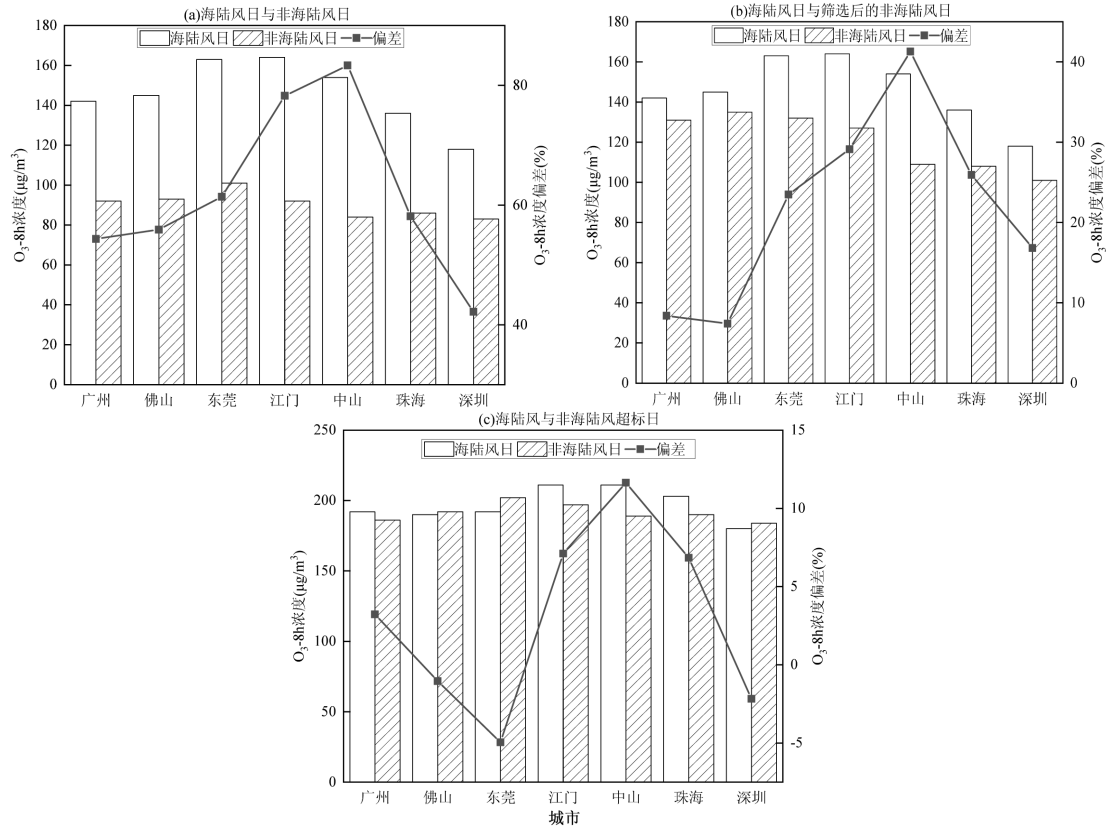


图 6 环珠江口各市海陆风日与非海陆风日平均 O₃-8h 及浓度偏差

Fig.6 The O₃-8h and their bias of cites around the PRE in SLBs days and non-SLBs days

表 2 对气象要素进行筛选后各市海陆风日与非海陆风日地面气象要素平均值

Table 2 Averaged values of surface meteorological factors of cities around the PRE in SLBs days and non-SLBs days after sifting

城市	日最高气温(°C)		相对湿度(%)		风速(m/s)		08:00~20:00 降水(mm)		日照时数(h)	
	海陆风	非海陆风	海陆风	非海陆风	海陆风	非海陆风	海陆风	非海陆风	海陆风	非海陆风
广州	29.6	30.0	77	76	1.7	1.8	0.2	0	7.6	7.3
佛山	29.9	29.5	69	66	1.6	1.8	0.3	0	6.4	7.5
东莞	28.3	29.1	70	71	1.7	1.9	0	0	7.9	7.0
江门	28.6	28.9	69	71	1.9	2.0	0	0	6.8	6.4
中山	27.5	29.6	70	74	1.4	1.6	0	0	7.6	6.2
珠海	27.1	27.7	72	75	2.5	2.3	0	0	8.2	6.7
深圳	29.1	29.7	75	77	0.9	1.0	0	0	7.4	6.8

2.3 海陆风对珠中江地区 O₃ 污染的影响

图 7 为珠中江三市海陆风日与非海陆风日 O₃ 峰值浓度出现时次的占比及各时次的平均峰值浓度.可见无论是否出现海陆风环流,O₃ 峰值浓度均是出现在 14:00~17:00 的占比最高.非海陆风日峰值浓度出现在 16:00 的占比最高,为 24%;而海陆风日占比最高为 17:00 的 25%.在 16:00 前,非海陆风日各个时次的占比大多高于海陆风日,而 17:00 后则是海陆风日的占比高于非海陆风日,说明出现海陆风环流时,O₃ 峰值浓度出现的时次总体上要晚于非海陆风日,该地区海陆风日的峰值浓度出现时

间比非海陆风日平均偏晚 0.5h.而在峰值浓度方面,除 13:00 外,其余各时次海陆风日的平均峰值浓度均显著高于非海陆风日,平均偏差达 29%,其中 14:00 峰值浓度偏差 54%,为各时次最大.综上,海陆风环流使珠中江地区 O₃ 峰值浓度更高,且峰值浓度出现时间更晚.

当近地面风从陆风转为海风时,风向的转换使陆风时段向下输送的污染物回流,从而使 O₃ 浓度上升^[50].从图 8 可以看出,在下午 14:00 之前,海风出现后 O₃ 正增长的占比较高,但与非海陆风日相比变化不明显.15:00 非海陆风日的正增长占比减

小,但海陆风日反而增加.到 17:00,非海陆风日的正增长占比下降至 38%,而海陆风日正增长占比仍高达 72%,与非海陆风日差距明显.18:00 海陆风日的正增长占比下降至 41%,但仍远高于非海陆风日的 19%.19:00 后海陆风日正增长占比明显减小,且与非海陆风日相比差距不大.由此可见,海风出现后的污染回流使傍晚 17:00 前后 O₃ 浓度继续出现正增长,从而令污染峰值出现时间延后,且污染更为严重.如图 9,11:00~12:00 海陆风日的 O₃ 增长率远高于非海陆风日,但这两个时次海陆风日样本较少,代表性不大.从 14:00~18:00,海陆风日的增长率均大于非海陆风日,其中非海陆风日从 17:00 起增长率从正转负,比海陆风日早 2h.18:00 和 17:00 海陆风日的增长率与非海陆风日相差最大,海陆风日比非海陆风日分别偏高 7%和 5%.19:00 起海陆风日和非海陆风日均为负增长,且海陆风日负增长明显高于非海陆风日,说明入夜后海风的出现能使 O₃ 浓度快速下降.从海陆风日的平均 O₃-8h 来看,海风在 16:00 首次出现的 O₃-8h 最大,达 167 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,其次为 17:00 的 163 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.另外,海风在 20:00 和 21:00 首次出现时,O₃-8h 再次上升,这可能是由于海风出现较晚时,在珠中江地区近地面白天长时间吹陆风,有利于上游地区的污染物向下游输送,同样有利于该地区出现 O₃ 污染.

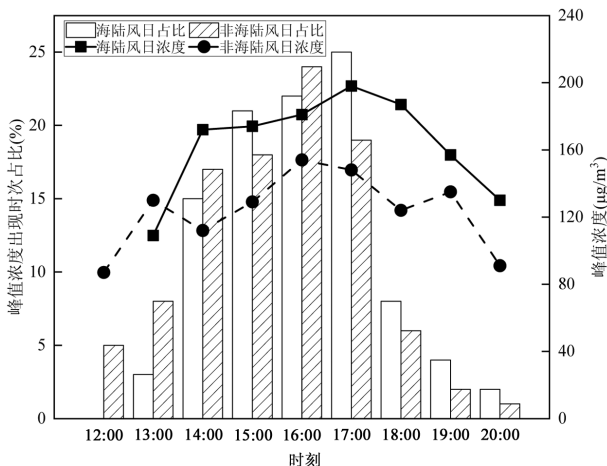


图 7 珠中江海陆风日与非海陆风日 O₃ 峰值浓度出现时次占比及该时次的平均峰值浓度
 Fig.7 Percentages of the occurrence of ozone peak concentrations and the averaged peak concentrations at different times over ZJJ in SLBs days and non-SLBs days

图 10 分别为上午(13:00 前)、下午(13:00~15:00)、傍晚(16:00~18:00)、入夜后(18:00 后)4 个不同时段,海风出现后 0~3h 内各小时的平均 O₃ 小时增长率.上午出现的海风,在海风出现后正处于午间 O₃ 快速增长的时段,因此在 0~3h 内 O₃ 小时增长率全为正,但由于陆风转为海风的时间较早,海风气流内的污染物浓度不高,因此随时间推移,较为清洁的海风气流使 O₃ 小时增长率从 45%迅速下降至 4%.

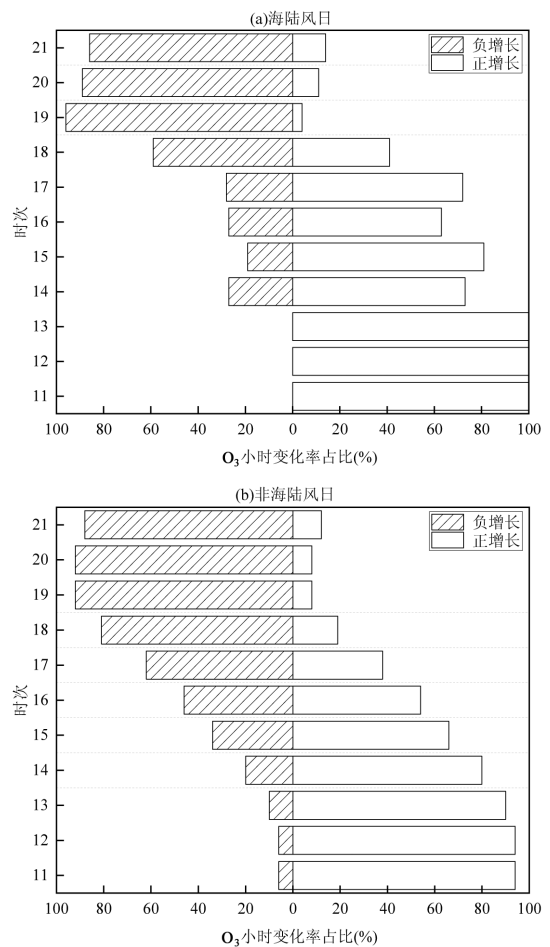


图 8 珠中江地区海陆风日海风出现的首个时次与非海陆风日同一时次的 O₃ 小时增长率正负增长占比
 Fig.8 Percentages of positive and negative growth of the ozone hourly growth rates at the first hour of the occurrence of sea breezes in SLBs and those of the same hour in non-SLBs days

而下午和傍晚出现的海风,0h 增长率分别为 11%和 2%,之后由于太阳辐射强度下降,光化学作用随之减弱,O₃ 增长率逐渐下降,其中傍晚出现的海风,海风出现后逐渐入夜,因此 1h 增长率已经下降至 -12%.而入夜后出现的海风,由于光化学作用消失,

加上 NO 对 O₃ 的滴定作用,污染回流虽然能令部分日期的 O₃ 浓度出现增长,但平均 O₃ 小时增长率全为负,另外,由于入夜后 O₃ 浓度的下降会逐渐减缓,因此海风出现后 2~3h 负增长率反而低于海风刚出现时.综上,海风出现后虽然能令 O₃ 浓度在短时间内上升,但一般 1h 后 O₃ 小时增长率将明显下降,或变为负增长.另外,受边界层内日照强弱的影响,近地面 O₃ 的日变化表现出日间高、夜间低的单峰分布特征,其浓度小时增长率在上午和中午增速较快,之后随着太阳辐射的减弱,增长率逐渐下降,已有大量的研究表明珠江口地区的平均 O₃ 峰值浓度出现在 15:00~16:00^[51-53],之后 O₃ 浓度快速下降.而海陆风环流的存在使大气扩散能力减弱,因此在傍晚时分太阳辐射已明显减弱的情况下,O₃ 浓度仍能出现正增长,其变化趋势与平均态的 O₃ 浓度日变化曲线存在明显差异,使 O₃ 峰值浓度上升,峰值浓度出现时间延后,因此污染更加严重.

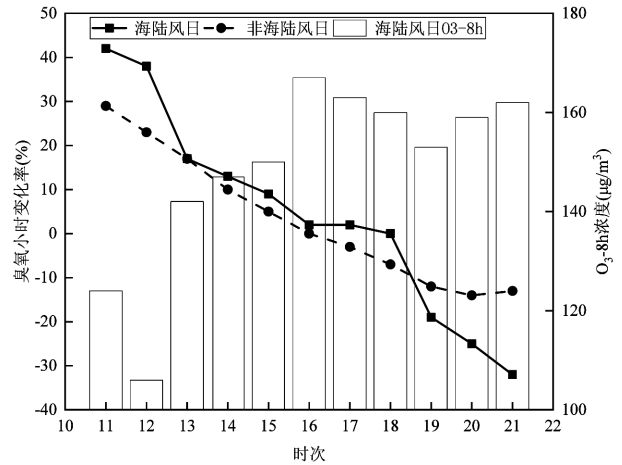


图9 海陆风日中海风出现的首个时次与非海陆风日同一时次的平均 O₃ 小时增长率及海风在各个时次首次出现的海陆风日平均 O₃-8h

Fig.9 The averaged ozone hourly growth rates at the occurrence of the first hour of sea breezes in SLBs days and those of the same hour in non-SLBs days, and the averaged O₃-8h of the first hour of the occurrence of sea breezes in SLBs days

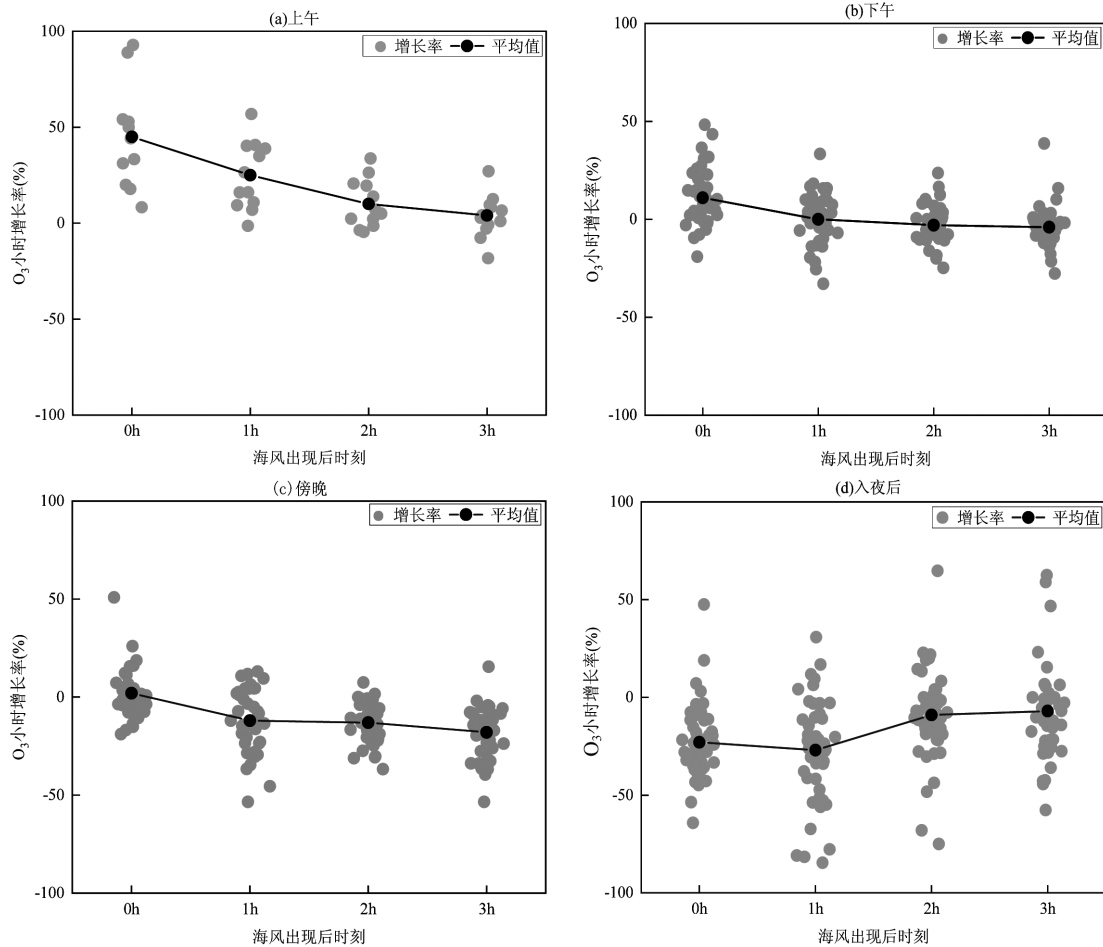


图 10 不同时段海风出现后 0-3h 的 O₃ 小时增长率及增长率平均值

Fig.10 The ozone hourly growth rates and their averaged values at 0-3h after the occurrence of sea breezes at different periods

2.4 海陆风日大气扩散特征分析

本文采用地面风的 RF 对海陆风日、非海陆风日及海陆风日陆风向海风转换期间的大气扩散特征进行分析.研究表明,当 RF 较小时,大气水平扩散能力差,污染容易加重^[54-55].图 11(a)是海陆风日与北风日、南风日及 O₃ 超标日的 RF 对比.受到海风回流影响,海陆风日的平均 RF 比北风日与南风日明显偏小,结合表 3,海陆风日平均 RF 为 0.59,比北风日和南风日(同为 0.96)偏低 39%,且海陆风日的 RF 随不同日期变化明显,变化范围从 0.08~0.91,而北风日和南风日的 RF 变化范围相比海陆风日明显要小.受较低的 RF 及较高的气温影响,海陆风日平均 O₃-8h 达到 152μg/m³,相比北风日和南风日分别偏高 92%和 167%.在北风日由于受到上游污染物输送的影响,珠中江地区时有 O₃ 超标出现,而南风日的平均日最高气温最高,但 O₃-8h 却为最低,最大 O₃-8h 仅为 81μg/m³,这除了得益于较大的 RF 外,也说明来自海洋的清洁气流对 O₃ 污染起到明显的遏制作用.另外,珠、中、江三市的平均 RF 分别为 0.73、0.55 和 0.50,中山、江门的 RF 相当,而珠海比中山、江门明显偏大,这是因为珠海更加靠近海洋,海陆风日中陆风小、海风大,且海风维持时间较长,导致陆风、海风转换对 RF 的影响相对较小.因此,虽然珠海、中山气温条件类似,但珠海在海陆风日的平均 O₃-8h 为 136μg/m³,相比中山偏低 12%,而江门在海陆风日 RF 最小,气温最高,平均 O₃-8h 达 167μg/m³,为三市最高.

如图 11(b),在海风出现前,风向较为一致的陆风把污染物向海洋方向输送,其平均 RF 为 0.92;陆风转海风时段由于地面风出现了明显的风向转变,其平均 RF 下降为 0.79;海风出现后,一致的南风使平均 RF 重新加大到 0.93.因此,3 个时段中陆风转海风时段的大气扩散及输送能力最弱,其平均 RF 比陆风及海风时段分别偏低 14%和 15%.海风时段 RF 迅速加

大,使污染物得到有效扩散,与图 10 中海风出现后 1~3h 内 O₃ 小时增长率明显下降结论一致.另外,RF 也与 u、v 风的大小相关,若海风出现前北风较少,且海风出现后南风迅速加大,则陆风转海风时段也能出现较大的 RF.

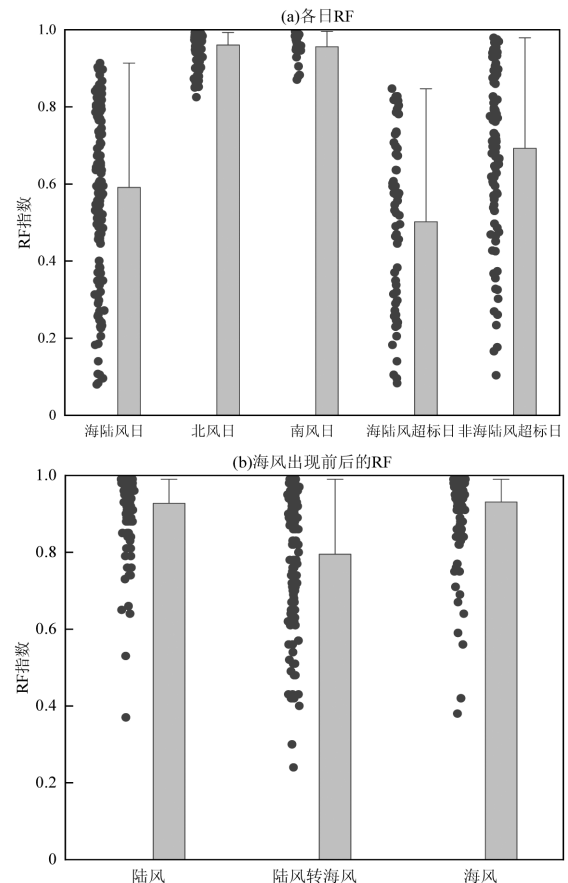


图 11 珠中江海陆风日与北风日、南风日和 O₃ 超标日的 RF 与海陆风日中海风出现前后的 RF

Fig.11 The RF of ZZJ in SLBs days, north wind days, south wind days and over-standard days(a), and the RF during the transition periods, the land breezes periods and the sea breezes periods

图中,散点代表每天的 RF 平均值,箱线图代表 RF 的平均值及最大值;图(b)中,陆风转海风时段指海风出现的第一个时次及其前后各 1h 的平均值;陆风、海风时段分别指陆风转海风时段的前 3h 及后 3h 平均值

表 3 海陆风日与北风日、南风日和 O₃ 超标日的平均 RF、日最高气温及 O₃-8h

Table 3 The averaged RF, daily maximum temperature and O₃-8h in SLBs days, north wind days, south wind days and over-standard days

项目	RF			日最高气温(°C)			O ₃ -8h(μg/m ³)		
	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
海陆风日	0.59	0.91	0.08	27.7	36.6	14.6	152	274	37
北风日	0.96	0.99	0.83	20.0	33.4	10.6	79	225	13
南风日	0.96	1.00	0.87	31.9	34.6	28.9	57	81	41
海陆风超标日	0.50	0.85	0.08	30.6	36.5	22.7	209	274	161
非海陆风超标日	0.69	0.98	0.10	31.6	37.4	21.2	193	274	161

图 11(a)对比了海陆风超标日与非海陆风超标日的 RF,结合表 3,可见海陆风超标日的平均、最小及最大 RF 均比非海陆风超标日要小,且海陆风超标日的 RF 变化范围小于非海陆风超标日.其中海陆风超标日平均 RF 为 0.50,相比非海陆风超标日的 0.69 偏低 28%.由图 12 的拟合曲线可见,由于海陆风日的大气扩散能力较弱,因此日最高气温相同时,海陆风日的 O_3 -8h 要大于非海陆风日,且随日最高气温的上升,非海陆风日的 O_3 -8h 增长明显放缓,而海陆风日却仍有明显增长.从表 3 可知,海陆风超标日的平均日最高气温相比非海陆风超标日偏低 1.0°C ,而其平均 O_3 -8h 反而比非海陆风超标日偏高 8%.综上,当气温条件相近时,海陆风环流的出现使大气扩散能力明显减弱,因此 O_3 污染更趋严重.

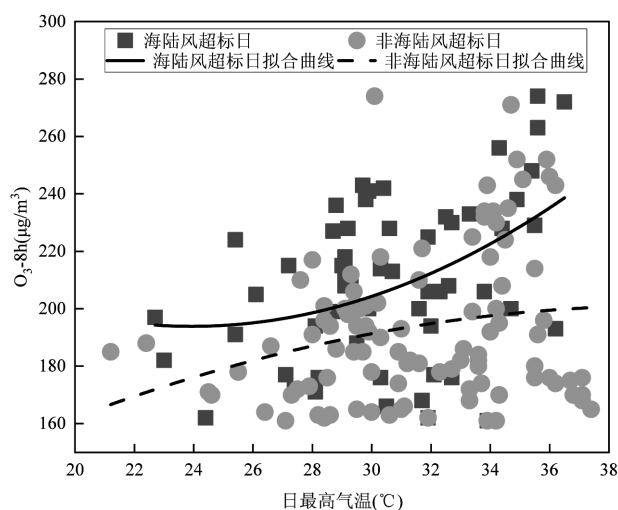


图 12 海陆风与非海陆风超标日的日最高气温与 O_3 -8h 分布
Fig.12 The distribution of the daily maximum temperature and the O_3 -8h in SLBs and non-SLBs over-standard days

3 结论

3.1 环珠江口地区 7 市 2022 年全年海陆风日天数在 40~64d 之间,海陆风日主要集中在 3~4 月及 9~11 月.大陆高压型、变性高压脊型、均压场型和台风外围型是主要的海陆风日天气形势.7 市 2022 年 O_3 超标天数 29~72 天,其中秋季的超标天数占比 40%~75%,为全年最高.

3.2 区域海陆风日的 O_3 -8h 中位数及超标率分别为 $141\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 38%,非海陆风日仅为 $74\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 11%.海陆风日地面气象要素体现出气温及日照时数偏

大,湿度、风速及降水偏小的特点,海陆风对珠江口西岸的珠海、中山、江门市 O_3 污染影响最大,对地面气象要素进行筛选后 3 市海陆风日 O_3 -8h 相比非海陆风日分别偏高 26%、41%和 29%,海陆风污染日 O_3 -8h 相比非海陆风日分别偏高 7%、11%和 7%.

3.3 珠中江地区海陆风日平均 O_3 峰值浓度出现在 17:00 的占比最高,海陆风环流使该地区 O_3 峰值浓度的出现时间平均偏晚了 0.5h,海陆风日的平均峰值浓度比非海陆风日平均偏高 29%.当海风在 14:00~18:00 出现,海陆风日的平均 O_3 小时增长率均大于非海陆风日,其中当海风在 17:00 或 18:00 出现,该两个时次 O_3 小时增长率为正的比例分别达 72%和 41%,平均增长率比非海陆风日分别偏高 5%和 7%,差异最为明显.海风出现后能令 O_3 浓度在短时间内上升,但一般 1h 后 O_3 小时增长率将明显下降.

3.4 珠中江地区海陆风日平均 RF 为 0.59,比北风日和南风日均偏低 39%.陆风转海风时段平均 RF 为 0.79,比陆风及海风时段分别偏低 14%和 15%.海陆风超标日平均 RF 为 0.50,相比非海陆风超标日偏低 28%,当气温条件相近时,海陆风环流的出现使大气扩散能力明显减弱,因此 O_3 污染比非海陆风日更趋严重.

参考文献:

- [1] Xue T, Liu J, Zhang Q, et al. Rapid improvement of $\text{PM}_{2.5}$ pollution and associated health benefits in China during 2013~2017 [J]. Science China (Earth Sciences), 2019,62(12):1847-1856.
- [2] 赵伟,高博,卢清,等.2006~2019 年珠三角地区臭氧污染趋势 [J]. 环境科学, 2021,42(1):97-105.
Zhao W, Gao B, Lu Q, et al. Ozone pollution trend in the Pearl River Delta Region during 2006~2019 [J]. Environmental Science, 2021, 42(1):97-105.
- [3] Lu X, Zhang L, Wang X, et al. Rapid increases in warm season surface ozone and resulting health impact in China since 2013 [J]. Environmental Science & Technology, 2020,7(4):240-247.
- [4] 程麟钧,王帅,宫正宇,等.中国臭氧浓度的时空变化特征及分区 [J]. 中国环境科学, 2017,37(11):4003-4012.
Cheng L J, Wang S, Gong Z Y, et al. Spatial and seasonal variation and regionalization of ozone concentrations in China [J]. China Environmental Science, 2017,37(11):4003-4012.
- [5] Wang M, Chen W T, Zhang L, et al. Ozone pollution characteristics and sensitivity analysis using an observation-based model in Nanjing, Yangtze River Delta Region of China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2020,93:13-22.
- [6] 吴锴,康平,于雷,等.2015~2016 年中国城市臭氧浓度时空变化规律研究 [J]. 环境科学学报, 2018,38(6):2179-2190.
Wu K, Kang P, Yu L, et al. Pollution status and spatio-temporal

- variations of ozone in China during 2015–2016 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018,38(6):2179–2190.
- [7] 迟雨蕾,赵传峰.臭氧卫星遥感反演进展及挑战 [J]. *光学学报*, 2023, 43(18):72–89.
Chi Y L, Zhao C F. Progress and challenges of ozone satellite remote sensing inversion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023,43(18):72–89.
- [8] Fishman J, Crutzen P J. The origin of ozone in the troposphere [J]. *Nature*, 1978,274(5674):855–858.
- [9] Monks P S, Granier C, Fuzzi S, et al. Atmospheric composition change—global and regional air quality [J]. *Atmospheric Environment*, 2009,43(33):5268–5350.
- [10] Lelieveld J, Dentener F J. What controls tropospheric ozone [J]. *Journal of Geophysical Research—Biogeosciences*, 2000,105(D3): 3531–3551.
- [11] 冯兆忠,李品,袁相洋,等.我国地表臭氧生态环境效应研究进展 [J]. *生态学报*, 2018,38(5):1530–1541.
Feng Z Z, Li P, Yuan X Y, et al. Progress in ecological and environmental effects of ground-level O₃ in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(5):1530–1541.
- [12] 曾贤刚,阮芳芳,姜艺婧.中国臭氧污染的空间分布和健康效应 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(9):4025–4032.
Zeng X G, Ruan F F, Jiang Y J. Spatial distribution and health effects of ozone pollution in China [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(9):4024–4032.
- [13] Pu X, Wang T J, 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.
- [14] 黄小刚,邵天杰,赵景波,等.气象因素和前体物对中国东部 O₃ 浓度分布的影响 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(6):2273–2282.
Huang X G, Shao T J, Zhao J B, et al. Impact of meteorological factors and precursors on spatial distribution of ozone concentration in Eastern China [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(6):2273–2282.
- [15] 王占山,李云婷,陈添,等.北京城区臭氧日变化特征及与前体物的相关性分析 [J]. *中国环境科学*, 2014,34(12):3001–3008.
Wang Z S, Li Y T, Chen T, et al. Analysis on diurnal variation characteristics of ozone and correlations with its precursors in urban atmosphere of Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2014,34(12): 3001–3008.
- [16] 陈志青,邵天杰,赵景波,等.东北地区臭氧浓度空间格局演变规律及影响因素 [J]. *环境科学学报*, 2020,40(9):3071–3080.
Chen Z Q, Shao T J, Zhao J B, et al. Evolution and influencing factors of ozone concentration spatial distribution in Northeastern region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020,40(9):3071–3080.
- [17] 张嘉月,康娜,邵生成,等.杭州地区臭氧污染及台风烟花过程影响 [J]. *中国环境科学*, 2024,44(3):1195–1203.
Zhang J Y, Kang N, Shao S C, et al. Ozone pollution in Hangzhou and the impact of typhoon fireworks process [J]. *China Environmental Science*, 2024,44(3):1195–1203.
- [18] 曹梅,范绍佳,靳春,等.2015–2020 年广东臭氧污染特征、污染天气分型及局地气象要素影响 [J]. *环境科学学报*, 2023,43(1):19–31.
Cao M, Fan S J, Jin C, et al. O₃ pollution characteristics, weather classifications and local meteorological conditions in Guangdong from 2015 to 2020 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023,43(1):19–31.
- [19] 蒲茜,李振亮,张悦,等.重庆市 O₃ 污染日的大气环流分型与传输特征 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(1):18–27.
Pu X, Li Z L, Zhang Y, et al. Characterization of atmospheric circulation and transmission in Chongqing City during ozone polluted days [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(1):18–27.
- [20] 麦健华,邓涛,于玲玲,等.中山市 2015–2019 年臭氧发标特征及其与气象条件的关系 [J]. *热带气象学报*, 2022,38(6):833–844.
Mai J H, Deng T, Yu L L, et al. Characteristics of standard-exceeding ozone and the relationship with meteorological conditions in Zhongshan from 2015 to 2019 [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2022,38(6):833–844.
- [21] 王玫,郑有飞,柳艳菊,等.京津冀臭氧变化特征及与气象要素的关系 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(7):2689–2698.
Wang M, Zheng Y F, Liu Y J, et al. Characteristics of ozone and its relationship with meteorological factors in Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(7):2689–2698.
- [22] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, et al. Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. *Science of The Total Environment*, 2017,575:1582–1596.
- [23] 杨显玉,易家俊,吕雅琼,等.成都市及周边地区严重臭氧污染过程成因分析 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(5):2000–2009.
Yang X Y, Yi J J, Lu Y Q, et al. Characteristics and formation mechanism of a severe O₃ episode in Chengdu and surrounding areas [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(5):2000–2009.
- [24] Liu C X, He C, Wang Y M, 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.
- [25] 麦健华,于玲玲,邓雪娇,等.珠三角西部一次冬季臭氧污染过程分析 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(12):6235–6245.
Mai J H, Yu L L, Deng X J, et al. Analysis of a winter ozone pollution process in the western Peral River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(12):6235–6245.
- [26] He G W, Deng T, Wu D, et al. Characteristics of boundary layer ozone and its effect on surface ozone concentration in Shenzhen, China: A case study [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,791,148044.
- [27] 杨旗,向卫国,陈志航,等.低层通风量及逆温对四川盆地空气质量的影响分析 [J]. *环境科学学报*, 2022,42(3):322–333.
Yang Q, Xiang W G, Chen Z H, et al. Impacts of low level ventilation and temperature inversion on air quality in Sichuan Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022,42(3):322–333.
- [28] 刘玉,佟磊,何莲,等.沿海天气系统对中国大气臭氧的影响研究概述 [J]. *环境科学与技术*, 2023,46(S1):26–34.
Liu Y, Tong L, He L, et al. The impact of typical coastal weather systems on atmospheric ozone in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023,46(S1):26–34.
- [29] Bei N F, Zhao L N, Wu J R, et al. Impact of sea-land and mountain-valley circulations on the air pollution in Beijing–Tianjin–Hebei (BTH): A case study [J]. *Environmental Pollution*, 2018,234: 429–438.
- [30] 邱晓暖,范绍佳.海陆风研究进展与我国沿海三地海陆风主要特征 [J]. *气象*, 2013,39(2):186–193.
Qiu X N, Fan S J. Progress of sea-land breeze study and the characteristics of sea-land breeze in three coastal areas in China [J]. *Meteorological Monthly*, 2013,39(2):186–193.
- [31] 郝天依,陈树成,蔡子颖,等.天津地区海风对大气污染物浓度的影响 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(9):3247–3257.

- Hao T Y, Chen S C, Cai Z Y, et al. Influence of sea breeze on atmospheric pollution concentration over Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(9):3247-3257.
- [32] Ueda H, Mitsumoto S, Kurita H. Flow mechanism for the long-range transport of air pollutants by the sea breeze causing inland nighttime high oxidants [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1988,27(2):182-187.
- [33] 孙璐,田文寿,张文煜,等.上海周边地区海陆风特征及其对PM_{2.5}和O₃浓度的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2022,42(9):339-350.
- Sun L, Tian W S, Zhang W Y, et al. Characteristics of sea-land breezes and their impact on PM_{2.5} and O₃ in Shanghai and adjacent areas [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022,42(9):339-350.
- [34] Caicedo V, Delgado R, Luke W T, et al. Observations of bay-breeze and ozone events over a marine site during the OWLETS-2 Campaign [J]. *Atmospheric Environment*, 2021,263:118669.
- [35] Hu B Y, Liu T T, Yang Y X, et al. Characteristics and formation mechanism of surface ozone in a coastal island of southeast China: Influence of sea-land breezes and regional transport [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2019,19:1734-1748.
- [36] Finardi S, Agrillo G, Baraldi R, et al. Atmospheric dynamics and ozone cycle during sea breeze in a Mediterranean complex urbanized coastal site [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2018,57(5):1083-1099.
- [37] Miao Y C, Liu S H, Zheng Y J, et al. Numerical study of the effects of local atmospheric circulations on a pollution event over Beijing-Tianjin-Hebei, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 30:9-20.
- [38] 陈多宏,沈劲,陈瑶瑶,等.2020年珠三角区域O₃污染特征及主要成因[J]. *中国环境科学*, 2022,42(11):5000-5007.
- Chen D H, Shen J, Chen Y Y, et al. Characteristics and main causes of ozone pollution in the Pearl River Delta in 2020 [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(11):5000-5007.
- [39] 洪莹莹,翁佳烽,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.
- Hong Y Y, Weng J F, Tan H B, et al. Meteorological conditions and contribution quantification of typical ozone pollution during autumn in Pearl River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(1):1-10.
- [40] Zeren Y Z, Guo H, Lyu X P, et al. An ozone "pool" in south China: Investigations on atmospheric dynamics and photochemical processes over the pearl river estuary [J]. *Journal of Geophysical Research*, D.Atmospheres, 2019,22:12340-12355.
- [41] 张亮,林洁萍,邵英贤,等.珠海地区海陆风对臭氧污染的影响[J]. *环境科学学报*, 2024,44(1):74-85.
- Zhang L, Lin J P, Shao Y X, et al. Understanding the impact of sea and land breezes on ozone pollution in the Pearl River Delta [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024,44(1):74-85.
- [42] 高佳琦,苗峻峰,许启慧.海陆风识别方法研究进展[J]. *气象科技*, 2013,41(1):97-102.
- Gao J Q, Miao J F, Xu Q H. Research on progresses in methods for identifying sea and land breezes [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2013,41(1):97-102.
- [43] Papanastasiou D K, Melas D. Climatology and impact on air quality of sea breeze in an urban coastal environment [J]. *International Journal of Climatology*, 2009,29(2):305-315.
- [44] 张立凤,张铭,林宏源.珠江口地区海陆风系的研究[J]. *大气科学*, 1999,23(5):581-589.
- Zhang L F, Zhang M, Lin H Y, et al. Study of sea-land breeze system in the mouth area of the Zhujiang river [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1999,23(5):581-589.
- [45] HJ633-2012 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行) [S].
- HJ633-2012 Technical regulation on ambient air quality index(on trial) [S].
- [46] 潘巧英,李婷苑,陈靖扬,等.广州地区臭氧污染天气条件垂直结构特征分析[J]. *气象与环境科学*, 2023,46(2):92-100.
- Pan Q Y, Li T Y, Chen J Y, et al. Analysis of vertical structure characteristics of ozone pollution weather conditions in Guangzhou [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2023,46(2):92-100.
- [47] Allwine K J, Whiteman C D. Single-station integral measures of atmospheric stagnation, recirculation and ventilation [J]. *Atmospheric Environment*, 1994,28(4):713-721.
- [48] 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类型分析[J]. *环境科学学报*, 2018,38(5):1708-1716.
- Gao X R, Deng X J, Tan H B, et al. Characteristics and analysis on regional pollution process and circulation weather types over Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018,38(5): 1708-1716.
- [49] Deng T, Wang T J, Wang S Q, 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.
- [50] Yin Y Q, Shan W P, Ji X, et al. Analysis of the surface ozone during summer and autumn at a coastal site in East China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020,85:10-14.
- [51] 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.
- Huang J, Liao B T, Wu D, et al. Guangzhou ground level ozone concentration characteristics and associated meteorological factors [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018,38(1):23-31.
- [52] 刘建,吴兑,范绍佳,等.前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响[J]. *中国环境科学*, 2017,37(3):813-820.
- Liu J, Wu D, Fan S J, et al. Impact of precursors and meteorological factors on ozone pollution in Pearl River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(3):813-1820.
- [53] 蒲义良,吴斯敏,叶朗明,等.江门市城区臭氧浓度变化特征及气象影响因素分析[J]. *热带气象学报*, 2020,36(5):650-659.
- Pu Y L, Wu S M, Ye L M, et al. Variation characteristics and meteorological factors of ozone concentration in the urban area of Jiangmen [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2020,36(5):650-659.
- [54] 李培荣,肖天贵,王铭杨.基于风廓线雷达对成都地区典型持续性重污染天气的研究[J]. *环境科学学报*, 2019,39(12):4174-4186.
- Li P R, Xiao T G, Wang M Y. Study on typical continuous heavily polluted weather in Chengdu area based on wind profiler radar [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019,39(12):4174-4186.
- [55] 黄俊,廖碧婷,王春林,等.新型垂直探测资料在污染天气分析中的应用[J]. *中国环境科学*, 2019,39(1):92-105.
- Huang J, Liao B T, Wang C L, et al. Application of new vertical detection data in the analysis of a heavy pollution weather [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(1):92-105.

作者简介: 麦健华(1985-),男,广东中山人,高级工程师,硕士,主要从事环境气象研究工作.发表论文10余篇.maigua@163.com.