

许雅姿,杨亦成,刘永吉,等.典型大气环流对天津市大气 PM_{2.5} 与 O₃ 复合污染的影响特征 [J]. 中国环境科学, 2023,43(10):5078-5087.

Xu Y Z, Yang Y C, Liu Y J, et al. Impact characteristics of typical atmospheric circulation on the combined pollution of PM_{2.5} and O₃ in Tianjin [J]. China Environmental Science, 2023,43(10):5078-5087.

典型大气环流对天津市大气 PM_{2.5} 与 O₃ 复合污染的影响特征

许雅姿¹,杨亦成¹,刘永吉²,孟 鹏²,孙乃秀¹,吴 琳^{1*},毛洪钧¹ (1.南开大学环境科学与工程学院,天津市城市交通污染防治研究重点实验室,国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室,天津 300071; 2.天津经济技术开发区生态环境局,天津 300450)

摘要: 为探究海陆风环流对沿海城市 PM_{2.5} 和 O₃ 污染的影响特征,基于 2016~2020 年中国环境监测总站的污染物观测数据和同期气象资料以及 ERA5 气象再分析数据,分析了海陆风环流特征对天津市区域大气污染物 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度变化的影响.结果表明:2016~2020 年天津共有海陆风日 411d,6~9 月出现最为频繁,12 月频率最低.海陆风环流的季节特征差异造成了对 PM_{2.5} 和 O₃ 的影响不同,冬季陆风环流会使 PM_{2.5} 在沿海区域积累,海风环流对沿海地区 PM_{2.5} 污染有稀释作用.夏季海陆风环流会改变沿海地区 O₃ 分布情况,使 O₃ 谷值更低且峰值更高,市区点、郊区点和沿海点 O₃ 峰值浓度分别高于平均峰值 4.1, 8.9, 16.0 μg/m³,海陆风对峰值的影响程度随着站点与海岸线距离的增长逐渐减弱.2016~2020 年间共有 PM_{2.5} 和 O₃ 复合污染日 94d,17 次出现海陆风环流.海陆风型复合污染日中陆风环流将 PM_{2.5} 由中心城区传输至沿海,海风环流清洁海风对 PM_{2.5} 有清除作用.陆风环流时 O₃ 光化学净消耗速率较高,海风环流时光化学净生成 O₃ 时间更久,使 O₃ 峰值出现时间延后,浓度提高.环流对 O₃ 和 PM_{2.5} 的不同作用降低了 PM_{2.5} 和 O₃ 复合污染的频率,海陆风对沿海地区污染物的输送和再分配使得区域污染成因更加复杂.

关键词: 海陆风环流; PM_{2.5}; O₃; 复合污染; 分布特征

中图分类号: X51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2023)10-5078-10

Impact characteristics of typical atmospheric circulation on the combined pollution of PM_{2.5} and O₃ in Tianjin. XU Ya-zi¹, YANG Yi-cheng¹, LIU Yong-ji², MENG Peng², SUN Nai-xiu¹, WU Lin^{1*}, MAO Hong-jun¹ (1.State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, Tianjin Key Laboratory of Urban Transport Emission Research, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2.TEDA Ecology and Environment Bureau, Tianjin 300450). *China Environmental Science*, 2023,43(10): 5078-5087

Abstract: To investigate the impact of sea-land breezes on PM_{2.5} and O₃ pollution in coastal cities, the observation pollution and meteorological data of China National Environmental Monitoring Centre and ERA5 hourly data from 2016 to 2020 were analyzed to elucidate the influence of sea-land breezes circulation characteristics on PM_{2.5} and O₃ levels in the coastal areas of Tianjin. The results showed there were 411 sea-land breezes days between 2016 and 2020, the sea-land breezes circulation frequently occurred from April to September, with the lowest frequency in December. The variation in seasonal characteristics of sea-land breezes circulation led to different impacts on PM_{2.5} and O₃ levels. Land breeze circulation leads to PM_{2.5} accumulation in coastal areas, and sea breeze circulation has a certain diffusion effect on PM_{2.5} in winter. Sea-land breezes circulation change the distribution of O₃ in coastal areas, resulting in reduced valley values and increased daytime peaks of O₃. The peak concentration of O₃ in urban, suburban, and coastal locations were 4.1, 8.9, 16.0 μg/m³ higher than the average peak value. The influence on peak value decreases as the distance from the coastline increases. A total of 94 days of PM_{2.5} and O₃ combined pollution from 2016 to 2020, and sea-land breezes occurred during 17 of these days. On PM_{2.5} and O₃ combined pollution days with sea-land breezes, land breeze circulation transmitted PM_{2.5} from the central urban area to the coast, while the sea breeze exhibited a scavenging effect on PM_{2.5}. The photochemical net decomposition rate of O₃ during land breeze circulation was higher than those days without sea-land breezes, while the photochemical net generation time of O₃ was longer during the sea breeze circulation. The effects of sea-land breezes circulation on O₃ and PM_{2.5} reduced the frequency of PM_{2.5} and O₃ composite pollution. Sea-land breezes' transport and redistribution of PM_{2.5} and O₃ to coastal areas have a complex impact on regional pollution.

Key words: sea-land breezes; PM_{2.5}; O₃; combined pollution; distribution characteristics

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3703600, 2022YFE0135000); 天津市科技支撑计划项目(20YFZCSN01000)

* 责任作者, 副研究员, wulin@nankai.edu.cn

近年来,在我国城市环境空气质量持续改善、颗粒物污染显著降低的形势下,PM_{2.5}和O₃复合污染问题逐渐显现,已成为大气环境研究的热点^[1].国内外学者针对PM_{2.5}和O₃的研究主要集中在复合污染特征和影响机制上,对污染源排放的研究表明机动车排放标准的提升及限行等环境政策的实施对PM_{2.5}的下降有一定贡献,而O₃水平的提升主要是由较高的人为源前体物排放导致^[2-4],但有研究表明PM_{2.5}和O₃的污染水平除受机动车、工业排放等影响之外,还受到气象条件影响,温度、湿度及海陆风环流等是形成PM_{2.5}和O₃复合污染的重要因素^[5-6],沿海城市独特的大气环流使得沿海区域PM_{2.5}和O₃污染特征易受到气象变化影响,而目前对沿海区域气象因素的相关研究仍有不足.

海陆风环流是在沿海地区所特有的气象条件,是由海陆热力性质差异产生的中尺度环流,以一日为周期,具有明显的日变化特征^[7].研究表明,海陆风环流的发生对沿海地区的气候及污染物的传输与扩散具有重要的影响,并与空气质量密切相关^[8-9].

国内外目前关于海陆风环流对污染物影响特征的研究已广泛报道.海陆风环流的演变受纬度、海岸线形状等地理因素限制,区域之间存在较大的差异性,纬度越低发生频率越低,并随季节呈现明显的年周期变化^[10-11].地区背景风能够影响海陆风环流强度,减弱其对污染物的传输作用^[12].山谷风、城市热岛效应与海陆风环流的耦合作用,会在不同时期增强或降低海陆风强度,使海陆风环流对地区大气污染影响变得更加复杂^[13-15].国内外学者在对海陆风环流的研究中采用了观测以及数值模拟等多种方法总结出海陆风特征^[16-18].海陆风环流转换时地面湿温廓线变化、湍流活动加剧,使O₃垂直结构发生变化^[7],海风发生时冷湿气流与干热气流接触导致了边界层的变化,在辐合线位置产生逆温,使污染物浓度提高^[19].对不同地区的研究表明海陆风环流会对海洋和陆地的O₃及PM_{2.5}进行再分配,使O₃日变化幅度提高并导致高O₃污染事件^[20-23].海风锋的移动使污染物出现空间分布的差异性并在不同时期对污染物的扩散效果产生不同影响^[24-25].

天津作为环渤海地区的重要城市,位于渤海湾西部,海岸线走势情况复杂,地理位置的特殊性造成天津市空气质量极易受到海陆风的影响,再加

上天津是国际港口城市和我国主要工业区,虽然在2013~2020年间空气质量提升,但与全国范围内城市污染物变化趋势相似,天津市PM_{2.5}及O₃仍存在超标情况^[26-27].因此本研究选取天津市为研究对象探讨海陆风环流的作用,探究海陆风对PM_{2.5}和O₃的作用,以期促进建立城市污染预警机制,更有针对性的应对突发状况.本研究利用2016~2020年气象和污染物资料,从气象要素、季节角度分析天津地区海陆风环流对PM_{2.5}、O₃的影响,为天津市PM_{2.5}和O₃协同控制政策提供参考.

1 材料和方法

1.1 数据资料来源

天津市2016~2020年污染物浓度数据来源于中国环境监测总站,本研究使用了O₃和PM_{2.5}的观测数据,在计算光化学反应速率时使用NO₂的观测数据,数据时间分辨率为1h,有效数据105万条,研究采用沿海、郊区、及市区三点为代表站点,代表站在天津市的位置分布如图1所示.

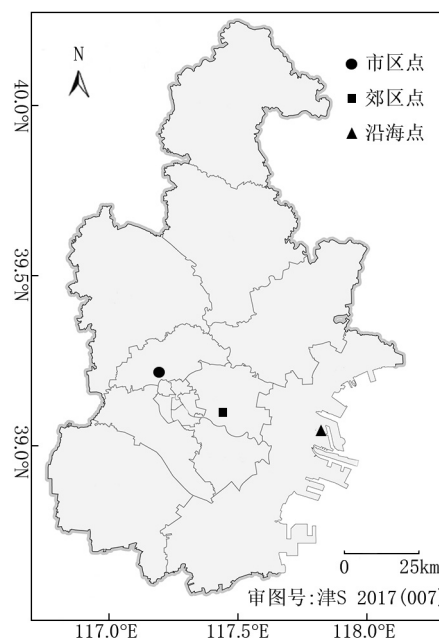


图1 监测站位置示意

Fig.1 Location of the monitoring station

海陆风环流一般可深入内陆70~100km,三站所在位置与渤海海岸线垂直距离分别为3km、40km和65km,属于海陆风环流影响范围,能够真实反映城市空气质量状况及海陆风环流下大气污染特征.研

研究所使用的地面气象数据包括温湿度、风向、风速数据,气象数据分辨率为 1h,有效数据共 25 万条,其他气象资料来源于欧洲天气预报中心发布的 ERA5 数据,包含 10m 风向和风速、边界层高度、太阳辐射、海平面温度等参数资料,数据时间分辨率为 1h,总数据 39 万条。

1.2 海陆风日识别方法

在海风发生时,通常伴随有风向的转变、温度下降、相对湿度升高等特征^[28],因此可以通过对气象因素的总结构建海陆风日识别的方法。海陆风的定义方法受海岸线地形、纬度等因素影响,各地有所差异,对海陆风日的识别方法多集中在对背景风场、气压场、海陆温差转变、近地面风向风速改变和云量等方面的限定^[29]。陆风和海风的交替转换和转换的持续性是海陆风的基本特征^[30],为了精确识别海陆风,选取沿海点的地面气象数据进行海陆风日的筛选,结合孟丽虹^[31]对天津市海陆风进行研究时的应用,本文所采用的海陆风的识别方法是①从日出到日落的时间内具有海陆温差大于 0℃的时刻(定义夏季(6~8 月)日出时刻 05:00,日落时刻 20:00,冬季(12~次年 2 月)日出 07:00,日落 18:00);②日出到日落后的 2h 内,有连续 3h 海风风向(50°~190°)出现,且海风风速大于 1m/s;③00:00 到日出后 1h 内,有连续 2h 陆风风向(230°~10°)出现,并且陆风风速大于 0.5m/s。定义海陆风日的日出前为陆风环流阶段,夏季为 00:00~05:00,冬季为 00:00~07:00,海陆风日日出至日落间为海风环流阶段,夏季为 05:00~20:00,冬季为 07:00~18:00。

为了更全面的探究海陆风日的发生规律和对污染物扩散的影响,同步对非海陆风日进行分类,确定一日内符合以下气象参数条件的日期为静稳日:①日最大风速小于 2.5m/s;②日平均风速小于 1.5m/s;③24h 内变压低于 3hPa;④边界层高度低于 450m。并以一日主要风向作为海风日和陆风日分类依据,定义海风日为每日 02:00~20:00 之间有至少 15h 呈现海风风向,定义陆风日为每日 02:00~20:00 之间有至少 15h 呈现陆风风向。

1.3 光化学反应速率的计算

本地 NO_x 排放后会发生 NO + O₃ → NO₂ 反应,即 O₃ 的滴定反应,定义 Ox = O₃ + NO₂,ΔOx 表示 Ox 每小时的浓度变化量,ΔOx 可剔除本地排放对 O₃ 的

影响,表示区域光化学反应带来的 O₃ 浓度变化量,代表光化学反应速率,反映区域 O₃ 的净生成或消耗^[24]。

2 结果与讨论

2.1 污染时空分布特征

由图 2 及表 1 可见,2016~2020 年市区、郊区和沿海三个站点 PM_{2.5} 变化规律相同,呈逐年下降趋势,与肖致美等^[32]研究结果相似,2016~2019 年 PM_{2.5} 年均值浓度呈现市区点>郊区点>沿海点的空间分布特征,从源排放的角度来看,由于受到新型冠状病毒肺炎疫情影响,天津市 2020 年启动重大突发公共卫生事件响应,多行业停止生产,机动车活动水平降低^[33],受此影响 2020 年市区点和郊区点 PM_{2.5} 水平发生较大程度降低,沿海点港口船舶及车辆 PM_{2.5} 本地排放等受卫生响应政策影响程度低,在 2020 年 PM_{2.5} 浓度为三站点中的最高值。PM_{2.5} 受到早晚高峰时期交通源排放影响,市区点 PM_{2.5} 日变化呈现“双峰”趋势,沿海点 PM_{2.5} 日小时均值变化则较为平缓,早高峰峰值浓度较低。

市区点、郊区点、沿海点 O₃ 日最大 8h 滑动平均值(MDA8)年九十分位值在 2016~2019 年上升,受污染排放下降因素影响,2020 年下降^[34],浓度呈现市区点>郊区点>沿海点的空间分布差异。O₃ 浓度日变化主要受太阳辐射强度变化影响,小时均值在一天中呈现“倒 U 型”变化,2016 年市区点和郊区点 O₃ 峰值时间分别为 15:00 和 14:00,2020 年分别提前至 13:00 和 12:00,沿海点峰值时间稳定在 13:00~14:00,市区点和郊区点 O₃ 峰值浓度在 2016~2018 年上升,2019~2020 年下降,沿海点 O₃ 浓度峰值在 2017~2020 年未发生明显波动。

表 1 PM_{2.5} 及 MDA8 年变化

年份	PM _{2.5} 年均值(μg/m ³)			MDA8 年 90 分位值(μg/m ³)		
	市区点	郊区点	沿海点	市区点	郊区点	沿海点
2016	76	67	63	170	158	145
2017	67	64	61	202	184	182
2018	55	54	52	210	197	182
2019	54	52	51	212	209	184
2020	50	48	50	195	190	175

2.2 海陆风日特征

由表 2 可见,2016~2020 年海陆风日共 411 日,占

比 23%, 海陆风日出现频率最高的为夏季 6~9 月(图 3),这与孙璐^[35]、王宏等^[36]研究结果相似,12 月份海陆风日频率最低; 2016~2020 年数据较为稳定,与孟丽虹等^[31]对于天津市 2015 年海陆风日的统计结果基本一致.本研究地区海风盛行是最常见的情况,海风日的频率为 31%,占比最高,多分布于 3~7 月份.陆风日的频率为 24%,占比最高,多分布于 3~7 月份.陆风日和海陆风日的比例接近,盛行陆风的天数共 444 日,

占比 24%,受西伯利亚高压冷气流影响,秋季和冬季陆风日频率较高,而夏季出现次数较少.静稳日占比 15%,主要是由于夏秋季地面气压场较弱,易产生静稳天气条件^[37].其他日是指不属于以上四情形的日期,共占比 6.9%.由于不具有典型特征,在后续分析中忽略其他日,以海陆风日、海风日、陆风日和静稳日为主要分析对象探讨其对 PM_{2.5} 和 O₃ 复合污染的影响.

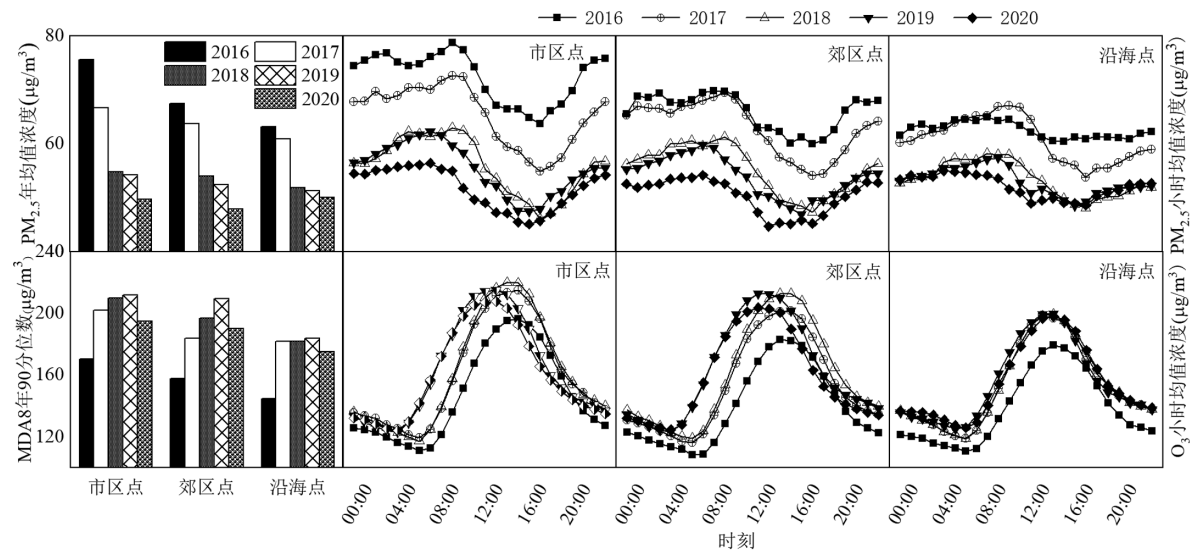


图 2 2016~2020 年环境站点污染物情况
Fig.2 Air pollution in Tianjin in 2016~2020

海陆风日的气象条件在不同季节存在差异.由图 4 可见,夏季和冬季海陆风日陆风环流下边界层高度低于海风日和陆风日,日出后边界层高度上升,至 11:00 后超过海风日边界层高度,夏季和冬季分别在 13:00 和 14:00 有最大厚度 0.01km 和 0.66km,海风日边界层高度变化平缓;陆风日边界层较高,夏季和冬季日均厚度分别为 0.56km 和 0.58km,拥有良好的垂直扩散条件;静稳日边界层最低,夏季和冬季日均厚度值为 0.27km 和 0.20km.夏季和冬季海陆风日最高大气压强差分别为 1.9hPa 和 2.9hPa,夏季气压差更低;同时在夏季海陆风日与海风日、陆风日和静稳日气压接近,冬季则较为分散.各类型日大气压强差距小,冬季则有较为明显的分别.夏季海陆风日日出前平均温度高于陆风日并低于海风日,日出后温度开始上升,上升速率大于海风日和陆风日,14:00 有日最高温度 28℃,此时已超过海风日温度,随后开始下降,静稳日多为高温天气;冬季海陆风日 15:00 有最高温度 3℃,该时刻的平均温度大于海风日、陆风

日和静稳日.夏季最高太阳辐射强度:海陆风日>海风日>静稳日>陆风日,在冬季为:海陆风日>陆风日>海风日>静稳日,海陆风日较高的太阳辐射强度对光化学反应进程有重要影响.夏季与冬季海陆风日风速变化规律存在差异,夏季风速日变化量较高,11:00 有最低风速 0.78m/s,最大风速出现在 16:00,为 1.5m/s;在冬季风速凹字型变化,最低风速出现在 15:00,最小风速值 0.91m/s.

表 2 2016~2020 年海陆风天数(d)及频率(%)
Table 2 Sea-land breezes in 2016~2020

项目	海陆风日	海风日	陆风日	静稳日	其他
2016 年	65	103	108	67	23
2017 年	88	103	90	51	33
2018 年	83	127	91	45	19
2019 年	89	110	73	65	28
2020 年	86	120	82	55	23
天数	411	563	444	283	126
频率	23	31	24	15	6.9

注:频率(%) = 天数/ 2016~2020 年总天数(d).

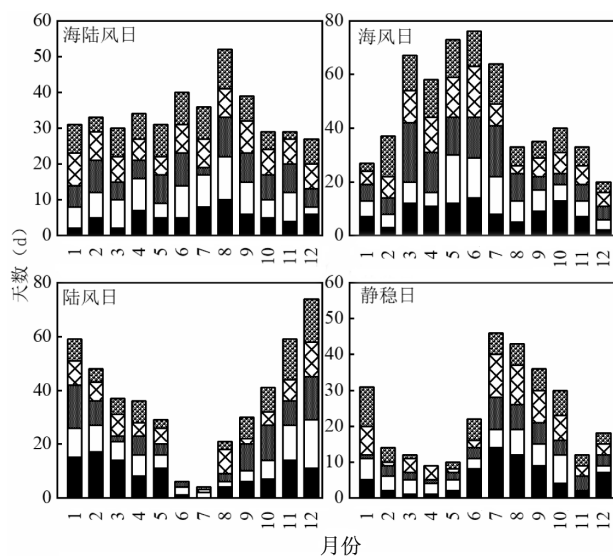


图3 2016~2020 海陆风日及其他类型月频次

Fig.3 Frequency of sea-land breezes and others in 2016~2020

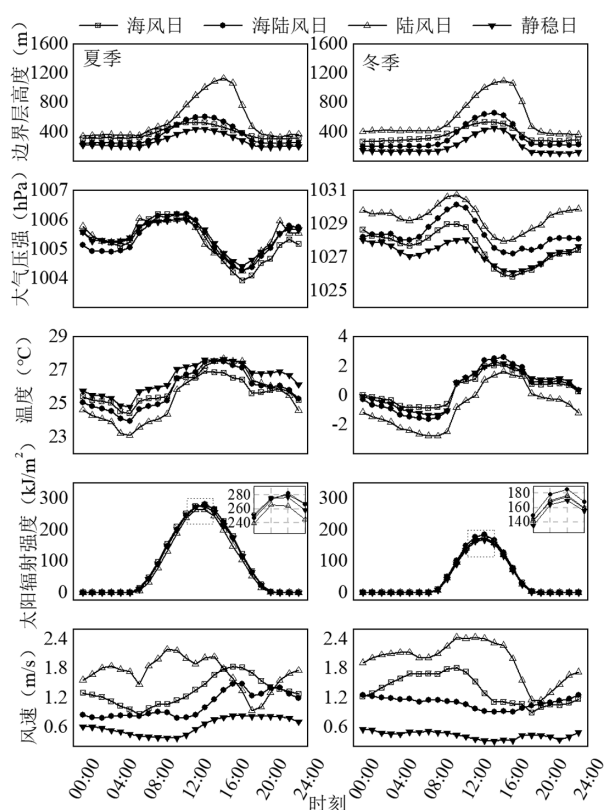


图4 海陆风及其他类型日气象条件

Fig.4 Meteorological parameters of sea-land breezes and other days

2.3 海陆风环流对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染的影响特征

2.3.1 海陆风环流对冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响 冬季为 $\text{PM}_{2.5}$ 污染高发期^[38],海陆风日背景风强度低,边界层相对海风日及陆风日厚度较低,且较为稳定,中尺

度的海陆风环流对污染物的垂直结构以及传输和扩散具有重要作用^[39].由图 5 可见,海陆风日 00:00~10:00 间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度稳定在较高水平,主要是由于海陆风日扩散条件较差,前一天 $\text{PM}_{2.5}$ 排放后无法及时扩散,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 积累,这一现象在沿海站表现的比市区点和郊区点更加明显,是由于在沿海站在陆风环流时期处于近地面环流的下风向, $\text{PM}_{2.5}$ 积累速率较快;10:00 后随着海风环流强度升高,污染扩散条件迅速转变,伴随着下午本地排放水平下降, $\text{PM}_{2.5}$ 水平下降,沿海站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 11:00 开始低于平均小时浓度值,郊区点和市区点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 12:00 开始低于平均小时浓度值,存在滞后效应;17:00 市区点、郊区点和沿海点有一日中最低小时值浓度,分别为 (57 ± 34) 、 (60 ± 36) 、 $(55 \pm 27) \mu\text{g}/\text{m}^3$,随着海风环流强度降低,市区点及郊区点受交通源影响, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 17:00 后开始上升,而沿海点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度维持在较低水平,未产生积累,珠三角地区也有类似现象^[40].结果表明海陆风日内,陆风环流会加剧沿海地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染程度,海风的进行对 $\text{PM}_{2.5}$ 有清扫作用.海风日 $\text{PM}_{2.5}$ 日变化幅度较小,这种现象在沿海点和郊区点更为突出,沿海点 $\text{PM}_{2.5}$ 峰值时刻为 12:00,未出现主要由交通源排放导致的晚高峰峰值,郊区点海风日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度不断浮动,市区点 $\text{PM}_{2.5}$ 日变化为典型的双峰结构,受海风影响程度低于沿海区域;冬季陆风日多为高压冷气团过境,由于风速高、边界层较高,垂直扩散条件良好,冬季陆风日相较于海陆风日和海风日不易出现 $\text{PM}_{2.5}$ 污染,陆风日前一天及凌晨积累的 $\text{PM}_{2.5}$ 在白天逐渐下降,至 16:00~17:00 后,随着陆风日边界层高度下降,风速降低,受本地交通源等排放量上升,大气垂直扩散能力下降等因素影响, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随之升高;三个站点在静稳日内 $\text{PM}_{2.5}$ 小时平均浓度较高,日均浓度分别为 (134 ± 69) 、 (121 ± 59) 、 $(106 \pm 46) \mu\text{g}/\text{m}^3$,主要是由于静稳天气下,污染物水平及垂直扩散条件差,容易发生污染物的积累,同时由于污染源差异,呈现 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在市区点、郊区点和沿海点阶梯下降的空间分布特征.

2.3.2 海陆风环流对夏季 O_3 的影响 O_3 为大气二次污染物,海陆风环流主要通过通过对 O_3 前体物再分配,影响 O_3 生成条件,从而引起 O_3 浓度的改变,夏季太阳辐射强度高,光化学反应活性较强, O_3 生成条件好,

易产生高浓度 O₃ 污染^[41-42].由图 6 可见,海陆风日内各点 O₃ 初始积累情况存在差异,市区点、郊区点和沿海点 O₃ 浓度 00:00 较其均值分别低 12, 7.9, 5.0 μg/m³,沿海点差距最低,随着夜晚 O₃ 的干沉降和 NO 对 O₃ 滴定作用的进行,O₃ 浓度逐渐下降达到谷值,市区点、郊区点和沿海点 O₃ 谷值浓度较平均值分别低 6.4, 6.1, 5.9 μg/m³.日出后,太阳辐射强度升高,O₃ 不断生成并积累,O₃ 浓度与均值浓度差距开始缩小,至 09:00~10:00 海陆风日 O₃ 浓度开始高于平均值水平,14:00~15:00 达到 O₃ 峰值,市区点、郊区点和沿海点 O₃ 峰值浓度分别高于平均值 4.1, 8.9, 16 μg/m³,结果表明海陆风环流会改变沿海地区 O₃ 分布情况,使 O₃ 谷值更低且峰值更高,对峰值的影响程度随着

站点与海岸线距离的增长而逐渐减弱,与何礼等^[43]在上海市的研究结果相近.海风日市区点、郊区点和沿海点 O₃ 峰值浓度分别高于其平均峰值浓度 9.1, 3.7, 1.2 μg/m³,表明沿海地区受海风影响较大,海风日海风将海上清洁空气向内陆地区传输,能够稀释海风到达地区污染物浓度,降低污染水平.根据 2.2 节结果,陆风日气象条件表现为温差大,风速高,边界层高,污染扩散条件好,同时太阳辐射强度低,不利于 O₃ 的生成,陆风日市区点、郊区点和沿海点 O₃ 峰值出现在 12:00,较平均峰值提前 2h.O₃ 浓度低于平均峰值 49, 41, 32 μg/m³,差值依次减少,这表明陆风日 O₃ 积累时间较短,O₃ 及其前体物会被传输至沿海区域,使海岸线附近 O₃ 水平更高.

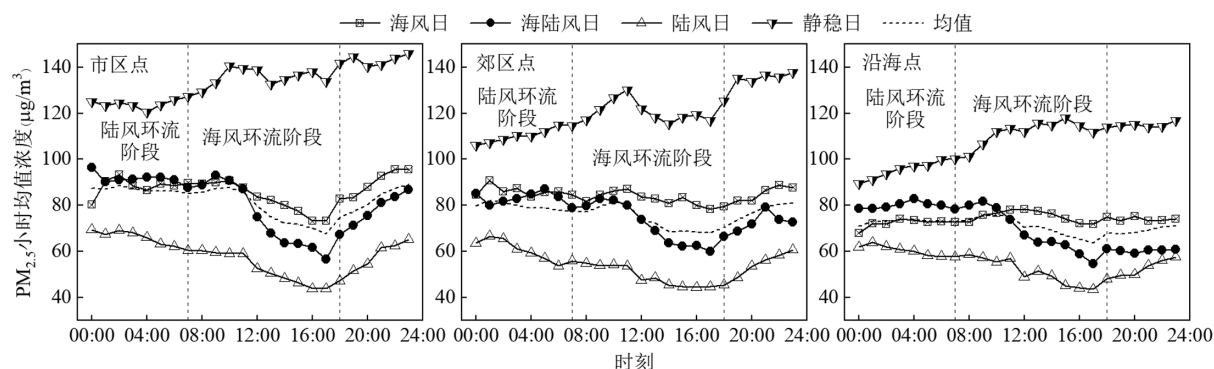


图 5 冬季不同类型日 PM_{2.5} 小时均值变化

Fig.5 Hourly PM_{2.5} concentration in winter

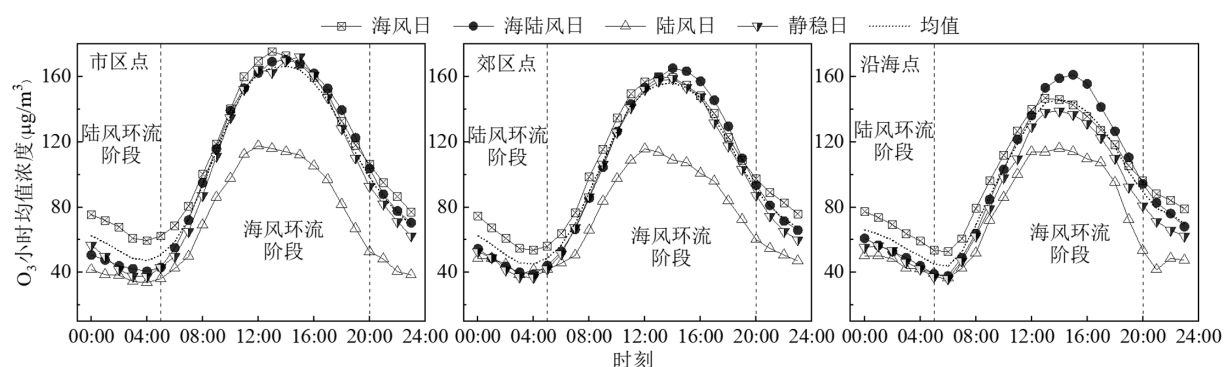


图 6 夏季不同类型日 O₃ 小时均值变化

Fig.6 Hourly O₃ concentration in summer

2.3.3 海陆风环流对 PM_{2.5} 和 O₃ 复合污染的影响
结合国家环境空气质量标准,本研究定义 PM_{2.5} 日均值高于 75 μg/m³ 且 MDA8 高于 160 μg/m³ 的日期为复合污染日,由表 3 可见,2016~2020 年共有复合污染日 94d,多出现在 4~9 月中,其中有 17d 出现海陆风环

流,定义为海陆风型复合污染日,海陆风型复合污染日陆风环流阶段为 00:00~05:00,海风环流阶段为 05:00~20:00;剩余 77d 定义为其他型复合污染日.海陆风环流这种独特的天气形势会造成地区污染特征变化,为比较海陆风型与其他型复合污染日污染

特征差异,将海陆风型复合污染日 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 小时均值与其他型复合污染日作差得到 $\Delta\text{PM}_{2.5}$ 和 ΔO_3 ,以消除部分区域背景值的影响,更直观的进行表示两种类型复合污染日的污染特征。

由图 7 可见,其他型复合污染日市区点 $\text{PM}_{2.5}$ 两次峰值分别出现在 09:00 和 22:00,浓度为 (109 ± 33) , $(87 \pm 36)\mu\text{g}/\text{m}^3$,郊区点 08:00 和 22:00 的两次 $\text{PM}_{2.5}$ 峰值浓度为 (109 ± 33) , $(87 \pm 42)\mu\text{g}/\text{m}^3$,沿海点 $\text{PM}_{2.5}$ 未出现夜晚的峰值,09:00 出现的峰值浓度也较低,为 $(100 \pm 30)\mu\text{g}/\text{m}^3$.市区点、郊区点及沿海点海陆风型复合污染日的日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度皆低于其他型复合污染日 $\text{PM}_{2.5}$,能反映海陆风环流对 $\text{PM}_{2.5}$ 的清扫作用.海陆风型复合污染日陆风环流开始后,市区点 $\Delta\text{PM}_{2.5}$ 下降,郊区点和沿海点 $\Delta\text{PM}_{2.5}$ 上升,表明陆风将 $\text{PM}_{2.5}$ 由中心城区传输至沿海,造成 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间差异分布.随后陆风环流强度下降,市区点 $\text{PM}_{2.5}$ 开始产生积累, $\Delta\text{PM}_{2.5}$ 上升;海风环流发生后,污染扩散条件提升, $\Delta\text{PM}_{2.5}$ 明显下降,在 12:00 和 13:00 市区点和郊区点 $\Delta\text{PM}_{2.5}$ 出现峰值,与其他型复合污染日的差距缩小,是由于海风锋前端携带的污染气团使 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度小幅升高,当海风锋深入内陆后, $\Delta\text{PM}_{2.5}$ 下降;海风对污染物清除作用明显,日落后海风环流结束,污染扩散条件下降, $\Delta\text{PM}_{2.5}$ 逐渐升高至接近 0,表明海陆风环流结束后的污染特征逐渐接近其他型复合污染日.复合污染日气压场弱,湍流扩散能力的下降和混合层厚度降低是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染发生的主要因素^[44],海陆风环流由中尺度气象场控制,全天污染物的循环再分配被限制在局地范围内,对 $\text{PM}_{2.5}$ 的积累有负效应。

其他型复合污染日市区点、郊区点和沿海点的 O_3 谷值都在 06:00 出现,浓度为 (51 ± 27) , (42 ± 24) , $(42 \pm 23)\mu\text{g}/\text{m}^3$,市区点和郊区点 O_3 峰值在 14:00 达到,沿海点峰值在 13:00 达到,浓度分别为 (206 ± 30) , (192 ± 24) , $(171 \pm 36)\mu\text{g}/\text{m}^3$.海陆风型复合污染日相比其他型复合污染日存在 O_3 谷值更低且峰值更高的特征,对市区、郊区和沿海点的影响程度不同,市区点和郊区点海陆风型复合污染日内 O_3 谷值时间提前至 04:00,市区点、郊区点和沿海点的谷值浓度分别为 (34 ± 26) , (34 ± 29) , $(39 \pm 23)\mu\text{g}/\text{m}^3$,郊区点和沿海点 O_3 峰值时间延后 1h,三个站点的峰值浓度

分别为 (227 ± 39) , (211 ± 37) , $(184 \pm 42)\mu\text{g}/\text{m}^3$.陆风环流阶段内三个站点 ΔO_3 呈现先下降再上升的趋势,沿海点 ΔO_3 高于市区点和郊区点,也证明海陆风日此时 O_3 在沿海地区相较于其他日有更高的积累,日出后太阳辐射增强,陆风环流向海风环流转变,海陆风日较高的太阳辐射强度能促进 O_3 生成,使 ΔO_3 达到第一次峰值, 10:00 沿海点 ΔO_3 有最高峰值为 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$,08:00 郊区点 ΔO_3 有最高峰值 $26\mu\text{g}/\text{m}^3$,下午海陆风辐合区向内陆推进,海风锋携带的前体物在近地面加速了 O_3 的积累, ΔO_3 达到第二次峰值,海风锋经过后海风环流带来清洁空气使 ΔO_3 下降;市区点两次峰值时间在 10:00 和 13:00,第二次峰值有最高 ΔO_3 ,浓度为 $28\mu\text{g}/\text{m}^3$.海陆风环流不利于前体物垂直扩散,对复合污染时 O_3 的生成和积累起重要作用.总体上复合污染日海陆风环流能降低 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,提高 O_3 峰值浓度,对两者的不同影响导致了海陆风型复合污染日占比较低。

表 3 复合污染天数及海陆风日频率
Table 3 Pollution days and frequency of sea-land breezes days

指标	$\text{PM}_{2.5}>75$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\text{MDA8}>160$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\text{PM}_{2.5}>75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 且 $\text{MDA8}>160\mu\text{g}/\text{m}^3$
总天数(d)	510	425	17
海陆风天数(d)	104	100	94
海陆风出现频率(%)	20	24	18

2.3.4 海陆风环流对光化学反应速率的影响 由图 8 可见,海陆风型复合污染日内,市区点、郊区点和沿海点陆风环流阶段最低 ΔOx 分别为-10, -9.3, $-12\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$,低于其他型复合污染日,表明海陆风型复合污染日 O_3 消耗速率更高,环流对 O_3 的输送作用使 O_3 向海平面积累.光化学反应速率受前体物浓度影响,市区点和郊区点 ΔOx 转为正值时刻早于沿海点,说明内陆地区 O_3 前体物在海风环流开始前较高,并随着陆风环流向沿海区传输和积累,海风环流发生后,太阳辐射强度持续增加,站点 ΔOx 继续上升,市区点、郊区点、沿海点 O_3 净生成速率最高时刻出现在 09:00~10:00,最高 ΔOx 分别为 25, 20, $17\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$,存在区域间的阶梯分布;市区点、郊区点、沿海点 ΔOx 分别在 14:00、15:00 和 16:00 转为负值,表明海风环流使沿海区域 O_3 污染光化学积累时间更久,峰值出现时间易推迟;随太阳辐射强度下降,

O₃ 消耗速率高于生成速率, ΔO_x 转为负值, O₃ 浓度下降。其他型复合污染日内, 市区点和郊区点在 10:00~11:00 光化学反应生成 O₃ 速率最高, 分别为 26,

24 $\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, 晚于沿海点 ΔO_x 峰值时刻, 三个环境站点 ΔO_x 差距较小, 说明区域间光化学反应速率差距较低, O₃ 浓度差距稳定。

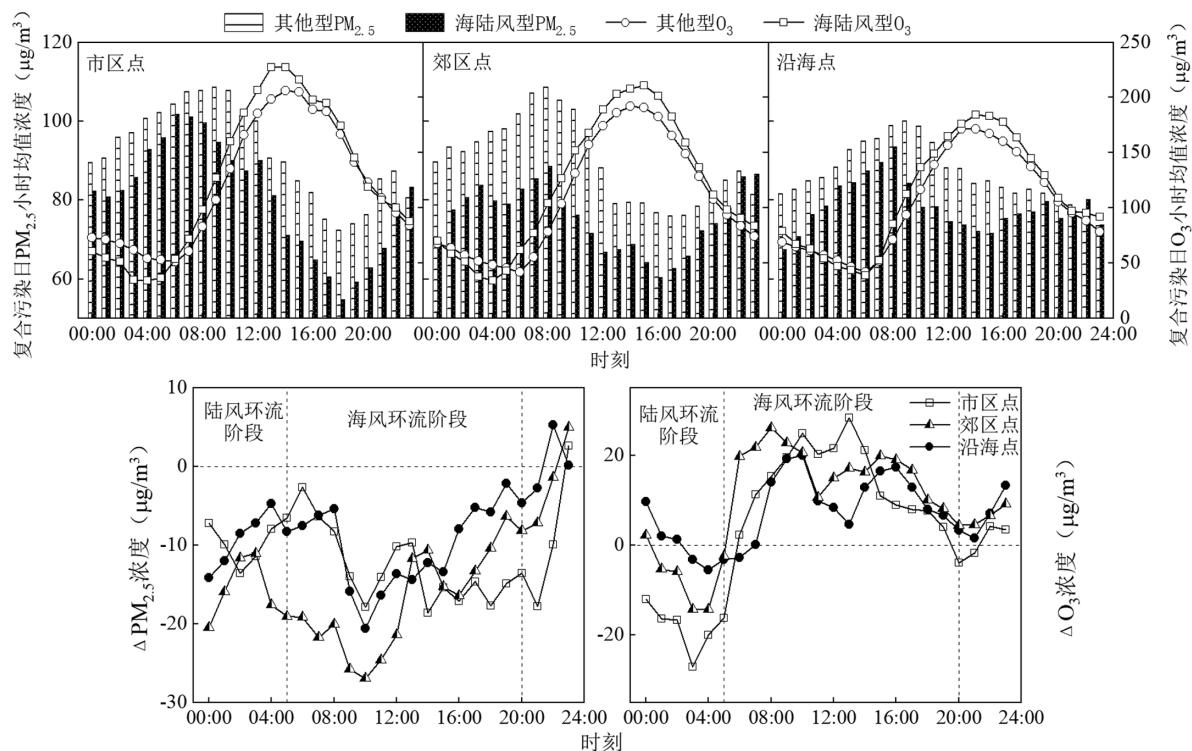


图7 海陆风型与其他型复合污染日 PM_{2.5} 和 O₃ 小时均值浓度及浓度差值

Fig.7 Hourly concentration difference of PM_{2.5} and O₃ between sea-land breezes and other days

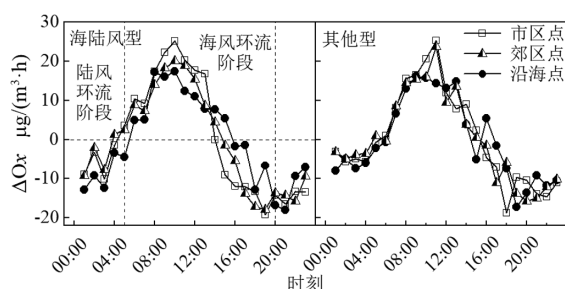


图8 海陆风型与其他型复合污染日 ΔO_x 日变化

Fig.8 ΔO_x in sea-land breezes and other days with PM_{2.5} and O₃ combined pollution

3 结论

3.1 2016~2020 年海陆风日共有 411 次, 发生频率 23%, 6~9 月更易出现海陆风环流, 12 月份海陆风日频率最低; 海风日频率为 31%, 多分布于 3~7 月份; 陆风日占比 24%, 主要在秋季和冬季盛行; 静稳日多在夏、秋季出现, 占比 15%;

3.2 海陆风日 PM_{2.5} 峰值时间改变, 陆风环流会使

PM_{2.5} 在沿海区域积累, 海风环流对沿海地区 PM_{2.5} 污染有稀释作用; 海洋气流携带污染物水平稳定, 导致海风日 PM_{2.5} 日变化幅度较小; 陆风日空气较为清洁, 静稳天气下 PM_{2.5} 更易积累。海陆风环流会改变沿海地区 O₃ 分布情况, 使 O₃ 谷值更低且峰值更高, 市区点、郊区点和沿海点 O₃ 峰值浓度分别高于平均峰值 4.1, 8.9, 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 海陆风对峰值的影响程度随着站点与海岸线距离的增长逐渐减弱。海风日海风将海上清洁空气向内陆地区传输, 能够稀释海风到达地区污染物浓度, 陆风日 O₃ 峰值会提前, 市区点、郊区点和沿海点 O₃ 峰值浓度低于平均峰值 49, 41, 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 差值依次减少, 表明陆风传输作用使海岸线附近 O₃ 水平更高。

3.3 2016~2020 年间共有 PM_{2.5} 和 O₃ 复合污染日 94 天, 多出现在 4~9 月中。海陆风型复合污染日中陆风环流将 PM_{2.5} 由中心城区传输至沿海, 造成 PM_{2.5} 的空间差异分布, 海风环流下海风锋前端携带的污染气团会使 PM_{2.5} 浓度出现小幅升高, 海风锋过后,

清洁海风对 $\text{PM}_{2.5}$ 有清除作用.海陆风型复合污染日陆风环流时 O_3 光化学净消耗速率较高,海风环流时光化学净生成 O_3 时间持续更久,使得沿海区域复合污染日 O_3 峰值出现时间延后, O_3 峰值浓度提高,加重沿海区域 O_3 污染水平.

参考文献:

- [1] 罗悦函,赵天良,孟 凯,等.华北平原和山区城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 变化关系比较分析 [J]. 中国环境科学, 2021,41(9):3981-3989.
Luo Y H, Zhao T L, Meng K, et al. Comparative analysis of the relationship between $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 in plain and mountainous cities in North China [J]. China Environmental Science, 2021,41(9):3981-3989.
- [2] Feng Y Y, Ning M, Lei Y, et al. Defending blue sky in China: effectiveness of the "Air Pollution Prevention and Control Action Plan" on air quality improvements from 2013 to 2017 [J]. Journal of Environmental Management, 2019,252:109603-109615.
- [3] Lyu Y, Ju Q R, Lv F M, et al. Spatiotemporal variations of air pollutants and ozone prediction using machine learning algorithms in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2014 to 2021 [J]. Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987), 2022,306:119420-119429.
- [4] Ma X Y, Jia H L, Sha T, et al. Spatial and seasonal characteristics of particulate matter and gaseous pollution in China: implications for control policy [J]. Environmental Pollution, 2019,248:421-428.
- [5] 毛卓成,许建明,杨丹丹,等.上海地区 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 复合污染特征及气象成因分析 [J]. 中国环境科学, 2019,39(7):2730-2738.
Mao Z C, Xu J M, Yang D D, et al. Analysis of characteristics and meteorological causes of $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 compound pollution in Shanghai [J]. China Environmental Science, 2019,39(7):2730-2738.
- [6] 周明卫,康 平,汪可可,等.2016~2018 年中国城市臭氧浓度时空聚集变化规律 [J]. 中国环境科学, 2020,40(5):1963-1974.
Zhou M W, Kang P, Wang K K, et al. The spatio-temporal aggregation pattern of ozone concentration in China from 2016 to 2018 [J]. China Environmental Science, 2020,40(5):1963-1974.
- [7] Zhao D D, Xin J Y, Wang W F, et al. Effects of the sea-land breeze on coastal ozone pollution in the Yangtze River Delta, China [J]. Science of the Total Environment, 2022,807:150306.
- [8] 王中杰,霍 娟,杜惠云,等.2015~2019 年日照市 $\text{PM}_{2.5}$ 长期变化特征及其潜在源区分析 [J]. 中国环境科学, 2021,41(9):3969-3980.
Wang Z J, Huo J, Du H Y, et al. Long term characteristics and potential sources of $\text{PM}_{2.5}$ in Rizhao City from 2015 to 2019 [J]. China Environmental Science, 2021,41(9):3969-3980.
- [9] Brook J R, Makar P A, Sills D M L, et al. Exploring the nature of air quality over southwestern Ontario: main findings from the border air quality and meteorology study [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013,13(20).
- [10] Lu X, Chow K C, Yao T, et al. Seasonal variation of the land-sea breeze circulation in the Pearl River Delta region [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2009,114:17112-17125.
- [11] 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 Y, 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.
- [12] Xu J J, Jia H W, Zhou H Y, et al. Influences of offshore background wind on the formation of sea-land breeze and the characteristics of pollutant diffusion [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021,28(48):68318-68329.
- [13] Huang W R, Chan J C L, Wang S Y. A planetary-scale land-sea breeze circulation in East Asia and the western North Pacific [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010,136(651):1543-1553.
- [14] Hu Y, Tan J G, Grimmond S, et al. Observed and modeled urban heat island and sea-breeze circulation interactions: a Shanghai case study [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2022,61(3): 239-259.
- [15] Bei N F, Zhao L N, Wu J R, et al. Impacts 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.
- [16] 王栋成,邱 黎,董旭光,等.基于风廓线雷达资料的蓬莱海陆风时空结构特征 [J]. 气象与环境科学, 2021,44(5):71-78.
Wang D C, Qiu C, Dong X G, et al. Temporal and spatial structure characteristics of sea-land breeze based on wind profiling radar data in Penglai, Shandong provinc [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2021,44(5):71-78.
- [17] 杨沈斌,谢 锋,李梦琪,等.基于 WRF 模拟的晋江市海陆风特征分析 [J]. 大气科学学报, 2019,42(3):459-468.
Yang S B, Xie F, Li M Q, et al. Analyzing the characteristics of sea-land breeze in Jinjiang based on WRF simulations [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2019,42(3):459-468.
- [18] Xu J W, Huang X, Wang N, et al. Understanding ozone pollution in the Yangtze River Delta of eastern China from the perspective of diurnal cycles [J]. Science of the Total Environment, 2021,752:141928-141938.
- [19] 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(8):1734-1748.
- [20] Wang Y, Guo H, Lyu X P, et al. Photochemical evolution of continental airmasses and their influence on ozone formation over the South China Sea [J]. Science of the Total Environment, 2019,673:424-434.
- [21] Wang H, Lyu X P, Guo H, et al. Ozone pollution around a coastal region of South China Sea: Interaction between marine and continental air [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018,18(6):4277-4295.
- [22] Liao Z H, Xie J L, Fang X Q, et al. Modulation of synoptic circulation to dry season $\text{PM}_{2.5}$ pollution over the Pearl River Delta region: An investigation based on self-organizing maps [J]. Atmospheric Environment, 2020,230.
- [23] In't Veld M, Carnerero C, Massague J, et al. Understanding the local and remote source contributions to ambient O_3 during a pollution episode using a combination of experimental approaches in the Guadalquivir valley, southern Spain [J]. Science of the Total Environment, 2021,777:144579-144596.
- [24] Geddes J A, Wang B, Li D. Ozone and nitrogen dioxide pollution in a coastal urban environment: the role of sea breezes, and implications of their representation for remote sensing of local air quality [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2021,126(18):e2021JDO 35314.
- [25] 肖 犇,贾洪伟,徐佳佳,等.上海北侧区域海陆风对污染物扩散的影响 [J]. 中国环境科学, 2022,42(4):1552-1561.
Xiao B, Jia H W, Xu J J, et al. Effects of land and sea breeze on pollutant diffusion in northern Shanghai [J]. China Environmental Science, 2022,42(4):1552-1561.

- [26] Zhao H, Chen K Y, Liu Z, et al. Coordinated control of PM_{2.5} and O₃ is urgently needed in China after implementation of the "Air Pollution Prevention and Control Action Plan" [J]. *Chemosphere*, 2021,270: 129441–129452.
- [27] 郭鑫,李红柳,李燃,等.2013~2019 年天津市环境空气污染研究 [J]. *环境科技*, 2021,34(1):51–54.
Guo X, Li H L, Li R, et al. Study on ambient air pollution in Tianjin from 2013 to 2019 [J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 34(1):51–54.
- [28] 沈傲,田春艳,刘一鸣,等.海陆风环流中海盐气溶胶对大气影响的模拟 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(4):1427–1435.
Shen A, Tian C Y, Liu Y M, et al. The influence of sea salt aerosols on atmospheric environment under sea-land-breeze circulation: a numerical simulation [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(4): 1427–1435.
- [29] 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.
- [30] 毛卓成,许建明,瞿元昊,等.上海海陆风分类特征、环流背景及对 O₃ 的影响 [J]. *中国环境科学*, 1–14.
Mao Z C, Xu J M, Qu Y H, et al. Classification characteristics, circulation background and its effect on O₃ of land and sea breeze in Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 1–14.
- [31] 孟丽红,李英华,韩素芹,等.海陆风对天津市 PM_{2.5} 和 O₃ 质量浓度的影响 [J]. *环境科学研究*, 2019,32(3):390–398.
Meng L M, Li Y H, Han S Q, et al. Influence of sea-land breeze on the concentrations of PM_{2.5} and O₃ in Tianjin city [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019,32(3):390–398.
- [32] 肖致美,徐虹,蔡子颖,等.天津市“十三五”期间 PM_{2.5} 减排效果评估 [J]. *环境科学*, 2023,44(6):3054–3062.
Xiao Z M, Xu H, Cai Z Y, et al. Assessment of emission reduction effect of major air pollution control measures on PM_{2.5} concentrations during 13th Five-Year Period in Tianjin [J]. *Environmental Sciences*, 2023,44 (6):3054–3062.
- [33] 孟丽红,郝团,邱晓滨,等.新冠肺炎疫情期间天津市重污染天气的边界层特征 [J]. *环境工程技术学报*, 2022,12(3):701–709.
Meng L H, Hao J, Qiu X B, et al. Boundary layer characteristics of heavy pollution process in Tianjin during the epidemic period of COVID-19 [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022,12(3):701–709.
- [34] 李婷苑,陈靖扬,翁佳烽,等.广东省臭氧污染天气型及其变化特征 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(5):2015–2024.
Li T Y, Chen J Y, Weng J F, et al. Ozone pollution synoptic patterns and their variation characteristics in Guangdong Province [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(5):2015–2024.
- [35] 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.
- [36] 王宏,郑秋萍,洪有为,等.2017 年漳州海陆风特征与冬春季污染物浓度关系 [J]. *气象与环境学报*, 2020,36(3):33–40.
Wang H, Zheng Q P, Hong Y W, et al. Characteristics of sea-land breeze and its relationship with pollutant concentrations during winter and spring in 2017 in Zhangzhou [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2020,36(3):33–40.
- [37] 李源,陆彦彬,白宇,等.基于天津臭氧污染特点的气象条件与天气分型研究 [J]. *中国环境监测*, 2022,38(5):56–64.
Li Y, Lu Y B, Bai Y, et al. Study of meteorological conditions and weather types based on ozone pollution characteristics in Tianjin [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022,38(5):56–64.
- [38] 董志超,徐占杰,王爽,等.天津市 PM_{2.5} 中氮含量及同位素的昼夜及季节变化 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(3):1014–1023.
Dong Z C, Xu Z J, Wang S, et al. Diurnal and seasonal variations of nitrogen contents and isotopic composition of total nitrogen in PM_{2.5} in Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(3):1014–1023.
- [39] Miao Y C, Li J, Miao S G, et al. Interaction between planetary boundary layer and PM_{2.5} pollution in megacities in China: a review [J]. *Current Pollution Reports*, 2019,5(4):261–271.
- [40] 吴蒙,罗云,吴兑,等.珠三角干季海陆风特征及其对空气质量影响的观测 [J]. *中国环境科学*, 2016,36(11):3263–3272.
Wu M, Luo Y, Wu D, et al. Observation on the characteristics of sea-land breezes and its influence to air quality over Pearl River Delta region during dry season [J]. *China Environmental Science*, 2016,36(11):3263–3272.
- [41] 姚青,马志强,郝天依,等.京津冀区域臭氧时空分布特征及其背景浓度估算 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(11):4999–5008.
Yao Q, Ma Z Q, Hao T Y, et al. Temporal and spatial distribution characteristics and background concentration estimation of ozone in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(11):4999–5008.
- [42] 谢静晗,李飒,肖钟湧.50 年来中国臭氧总量时空变化特征 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(7):2977–2987.
Xie J H, Li S, Xiao Z Y. Investigating the temporal and spatial variabilities of total ozone over China for the past 50 years [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(7):2977–2987.
- [43] 何礼,束炯,钟方潜,等.上海海陆风特征及其对臭氧浓度的影响 [J]. *环境监测管理与技术*, 2019,31(3):17–21.
He L, Shu J, Zhong F Q, et al. Characteristics of sea-land breeze and its impact on ozone concentrations in Shanghai [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019,31(3):17–21.
- [44] 郝团,蔡子颖,韩素芹,等.基于模式过程分析技术天津地区 PM_{2.5} 污染气象成因分析 [J]. *环境科学*, 2022,43(5):2373–2382.
Hao J, Cai Z Y, Han S Q, et al. Research on causes of severely polluted weather in Tianjin based on process analytical technology [J]. *Environmental Science*, 2022,43(5):2373–2382.

致谢: 本研究的数据收集工作由天津市经济技术开发区生态环境局协助完成,在此表示感谢

作者简介: 许雅姿(1999–),女,河北邢台人,南开大学硕士研究生,主要方向为大气臭氧和颗粒物特征研究.xyzyhebei@163.com.