

海口市臭氧污染特征及影响因素分析数据集 (2016–2020)

蔡今子¹, 王韶辉², 胡佳欣^{3*}

1. 海南省海口市综合行政执法局生态环境保护行政执法支队, 海口 570000;

2. 海南省海口市生态环境局, 海口 570000;

3. 中国环境监测总站, 北京 100012

摘 要: 为研究热带岛屿城市臭氧 (O_3) 污染变化特征及其与气象因子的关系, 选取海口市 2016–2020 年间逐日、逐时空气质量自动监测数据以及气象观测进行分析。结果表明: 海口市 O_3 浓度峰值出现时期与内陆城市具有明显区别, 主要集中在秋冬季节 10–12 月期间, 区域气候差异是海口 O_3 时间分布异于内陆城市的主要原因; 日变化呈现明显的单峰特征, 8:00 出现谷值, 14:00–16:00 出现峰值; 近年来市区 O_3 污染范围在逐渐扩大, 程度加深; O_3 浓度与 CO 浓度呈正相关, 与湿度呈负相关, 与风速呈正相关, 秋冬季影响海口市 O_3 浓度变化的主要气象因子并非气压和气温。

关键词: 海口市; 变化特征; 臭氧; 相关性分析; 气象因子

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.03.16>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.03.16>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2022.05.04.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.05.04.V1>.

1 前言

近年来, O_3 已经成为影响我国城市空气质量最主要的污染物之一, 城市及区域性 O_3 污染呈上升态势^[1]。据《2019 中国生态环境状况公报》表明, 我国 337 个地级及以上城市中, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 年均浓度分别为 $36 \mu g/m^3$ 、 $63 \mu g/m^3$ 、 $148 \mu g/m^3$ 、 $11 \mu g/m^3$ 、 $27 \mu g/m^3$ 和 $1.4 mg/m^3$, 与 2018 年相比, O_3 浓度有所上升, 超标天数比例也在上升, O_3 污染问题日趋凸显^[2]。目前, 随着经济快速发展和城市规模的不断扩大, O_3 污染已成为我国城市发展过程中迫切需要解决的重要环境问题, 是当今大气化学与环境科学领域

收稿日期: 2022-06-10; 修订日期: 2022-08-11; 出版日期: 2022-09-25

基金项目: 海口市生态环境局 (HXSJ-CG-2021102)

*通讯作者: 胡佳欣, 中国环境监测总站, hujx@cnemc.cn

数据引用方式: [1] 蔡今子, 王韶辉, 胡佳欣. 海口市臭氧污染特征及影响因素分析数据集 (2016–2020) [J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(3): 448–458. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.03.16>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.03.16>.

[2] 蔡今子, 王韶辉, 胡佳欣等. 海口市臭氧污染特征及影响因素分析数据集 (2016–2020) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.05.04.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.05.04.V1>.

的热点研究课题之一。通常认为， O_3 污染的变化趋势会受到前体物质的排放、气象条件和化学反应等三方面因素的共同作用，并且 O_3 浓度变化与气象条件之间具有显著的相关性，存在明显的季节变化特征^[3,4]。然而国内关于 O_3 污染的剖析和研究还主要集中在一些重点城市和经济发达地区。近年来海南省经济的发展和城市规模的扩大致使海南岛的空气质量也有所下降， O_3 污染态势越来越严峻^[5,6]。海口市属于热带岛屿城市，拥有独特的自然条件，分析其 O_3 污染特征和气象影响具有一定的典型性。因此，文章基于“十三五”期间（2016–2020 年）海口市 4 个国控监测站点的 O_3 、 CO 和 NO_2 浓度数据分析 O_3 污染的总体特征以及 O_3 与前体物质之间的潜在关系。另外利用国控监测站点的 O_3 浓度分析月变化和日变化特征，通过研究 O_3 与气象因子间的关系，探讨易触发 O_3 污染的天气类型，为海口市 O_3 污染预警和防治提供参考。

2 数据集元数据简介

《海口市臭氧污染特征及影响因素分析数据集（2016–2020）》^[7]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

3 数据研发方法

3.1 基础数据

研究所使用的 2016–2020 年 O_3 、 CO 、 NO_2 及同期气象资料（气压、气温、湿度、风速）分别来自海口市 4 个国控空气质量自动监测站（站点分布如图 1 所示）和海南省气象局信息中心。4 个国控站点分别为：海南大学子站（海大站）、秀英海南医院子站（秀英站），海南师范大学子站（海师站）、龙华路环保局宿舍子站（龙华站），国控站具有代表性、可比性和整体性，可以较为准确地反映海口市空气质量状况。

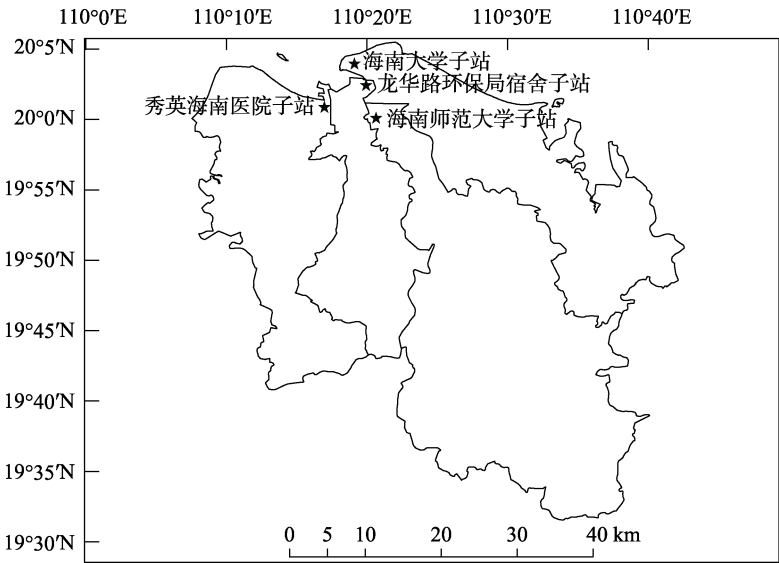


图 1 海口市空气质量自动监测站分布图

3.2 算法原理

监测结果的评价参考《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)、《环境空气质量评价技术规范》(试行)(HJ 633—2012)。海口市 2016–2020 年 O₃ 总体污染特征以 4 个站点 O₃-8h-90PER 的平均值进行统计分析,以 CO-95PER 和 NO₂ 分析 O₃ 浓度与前体物的关系,O₃ 月污染和日污染变化分别采用国控站点的 O₃-8h-90PER 和 O₃-1h 进行研究。

表 1 《海口市臭氧污染特征及影响因素分析数据集(2016–2020)》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	海口市臭氧污染特征及影响因素分析数据集(2016–2020)
数据集短名	O3_Haikou2016-2020
作者信息	蔡今子,海口市综合行政执法局生态环境保护行政执法支队, caijz@haikou.gov.cn 王韶辉,海口市生态环境局, wangshaohui@haikou.gov.cn 胡佳欣,中国环境监测总站, hujx@cnemc.cn
地理区域	海南海口站点
时间分辨率	月度
数据量	33 KB
数据集组成	(1)站点的地理位置;(2)2016–2020 年海口市 O ₃ 、CO、NO ₂ 月浓度数据;(3)2016–2020 年四个监测点的 O ₃ 月度和年度浓度;(4)2016–2020 年 4 个监测点 O ₃ 浓度日变化数据;(5)四个监测点的 O ₃ 浓度、气压、气温、湿度和风速数据。由 9 个数据文件组成
基金项目	海口市生态环境局(HXSJ-CG-2021102)
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据(中英文)、通过《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报(中英文)》发表的数据论文。其共享政策如下:(1)“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放,用户免费浏览、免费下载;(2)最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源;(3)增值服务用户或以任何形式散发和传播(包括通过计算机服务器)“数据”的用户需要与《全球变化数据学报(中英文)》编辑部签署书面协议,获得许可;(4)摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则,即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%,同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[8]

数据和论文检索系统 DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

另外, O₃ 与前体物和气象因子之间的关系选用斯皮尔曼相关系数法和皮尔森相关系数法进行相关性分析,相关系数 $0.1 < |r| \leq 0.3$ 为弱相关, $0.3 < |r| \leq 0.5$ 为中度相关, $|r| > 0.5$ 为强相关。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集包括:(1)站点的地理位置;(2)2016–2020 年海口市 O₃、CO、NO₂ 月浓度数据;(3)2016–2020 年四个监测点的 O₃ 月度和年度浓度;(4)2016–2020 年 4 个监测点 O₃ 浓度日变化数据;(5)四个监测点的 O₃ 浓度、气压、气温、湿度和风速数据。数据集以.shp 和 .xlsx 数据格式存档,由 9 个数据文件组成。

4.2 数据结果

4.2.1 O₃ 污染总体特征

图2为2016–2020年O₃-8h-90PER平均浓度，CO-95PER和NO₂平均浓度的逐月变化情况。由图可知，各年度O₃浓度在9–12月份出现浓度峰值，分别为136、163、183、178和156 μg/m³，2016–2019年O₃污染总体呈逐年增加的趋势，2020年有所下降，另外2017–2019年O₃浓度峰值均超过了标准所规定的二级限值浓度，初步说明海口市在秋、冬季节O₃污染较夏季严重，该现象一方面与海口市夏季多雨，低太阳辐射及湿沉降作用不利于O₃生成有关^[9]，另一方面由于秋冬季海南省受到地面冷高压控制影响，天气形势稳定，加上低层偏北风场控制，可能受到外源传输影响，在本地排放与外源输送的共同作用下致使O₃浓度有所上升^[10]。

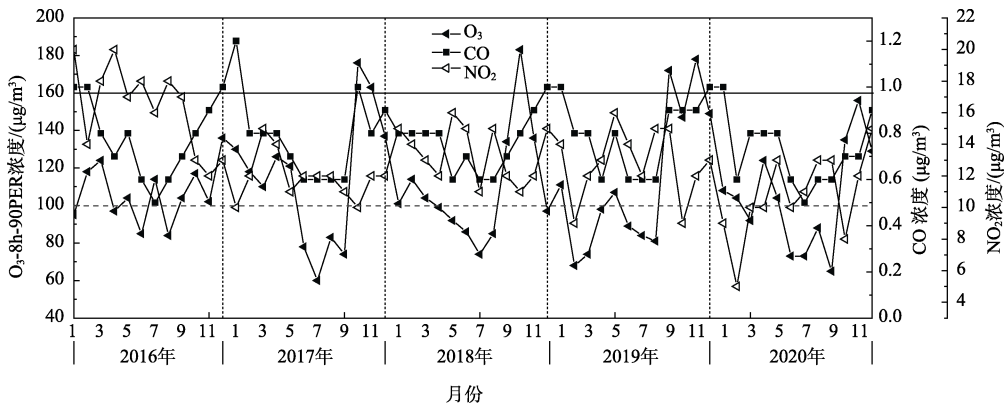


图2 2016–2020年O₃-8h浓度与CO和NO₂浓度的逐月变化（灰色虚线：一级标准限值100 μg/m³，黑色实线：二级标准限值160 μg/m³）

另外海口市秋季气温依然相对较高，属于热带季风气候类型，太阳辐射强度为中等水平，光化学反应良好，有利于O₃的生成和积累，12月后有冷空气入侵，O₃浓度下降，因此O₃浓度在9–12月达到全年最高。2016年与其他年份相比，O₃日均浓度变化幅度最小，其浓度值主要分布在84–136 μg/m³，2017年O₃浓度变化幅度最大，其浓度值主要分布在60–163 μg/m³，同时2016年和2020年全年O₃的浓度值均在二级限值以下，O₃浓度总体偏低。O₃的前体物众多。从图2可分析得到CO和NO₂浓度变化分别呈冬春季高和春夏季高的特征。表2为O₃-8h与CO和NO₂浓度相关系数，可知O₃与CO相关系数是0.552，为强正相关，与NO₂相关系数是–0.14，为弱负相关。从CO及O₃月均浓度分布来看，CO与O₃在2016–2020年大部分时段均呈现正位相变化特点，2016年CO与O₃均在12月份出现最高浓度值，2017–2020年当O₃浓度在10月和11月出现急剧增大时，对应时段的CO浓度也呈现较明显的浓度上升。从O₃光化学形成过程来看，CO不断被氧化，因此多数情况下CO与O₃呈现负相关^[11]，而海口市却呈正相关，推测可能原因是与气团污染程度^[12]有关，另外随着海口市交通的快速发展，汽车尾气排放量增加使得CO量增大，对大气环境造成污染。O₃浓度的变化趋势受到前体物浓度、气象条件和化学反应等多种因素的共同作用。从NO₂及O₃月均浓度分布来看，NO₂及O₃在2016年除了2–3月份以外其他月份二者都呈

负位相变化特点，2017–2020 年大部分时段均呈现负位相变化特点，在夏季短时段范围内出现正相位变化特点。一般来说，海南省夏季气温高、日照时长充足，在强太阳辐射作用下发生光化学反应，O₃ 浓度通常也会达到全年最高值^[13]。但是海南省的夏季是主汛期，降水充沛，雨水的冲刷作用和偏高的相对湿度，都会对光化学反应产生一定的抑制作用，减弱了 NO₂ 对 O₃ 的影响，因此在夏季 O₃ 浓度并未出现最高值^[14,15]。另外，在 CO 和 NO₂ 浓度出现较为稳定的平台期时，O₃ 浓度依然有波动变化，这体现了海口市 O₃ 浓度变化影响因素的复杂性。前体物无法全面表征 O₃ 污染的发生情况，因此需进一步分析 O₃ 浓度时间变化特征及气象因子的影响。

表 2 2016–2020 年 O₃-8h 浓度与前体物浓度的相关系数

类别	相关系数	<i>p</i> 值
O ₃ -CO	0.552	<i>p</i> <0.01
O ₃ -NO ₂	-0.14	<i>p</i> >0.05

对海大站、秀英站、海师站和龙华站 4 个重要国控监测站点在 2016–2020 年期间的 O₃-8h-90PER 月均浓度进行统计，并以最大值、最小值、平均值 3 个指标作为特征值绘制各个站点 O₃ 浓度概要图（图 3）。可以看出，研究期间海大站、秀英站、海师站和龙华站 O₃ 浓度最大值的平均值分别为 105、85、94、109、92 μg/m³，最小值的平均值分别为 53、36、31、36、31 μg/m³，将各站点的平均值进行平均分析得 O₃ 浓度值为 74、62、55、64、60 μg/m³。从以上 O₃ 浓度数据可以看出，海口市与广东省、成都等发达地区的 O₃ 污染程度相比未达到显著的高污染水平^[15–17]。从 4 个站点的 O₃ 浓度情况分析，2016 年海大站为高值区，秀英站为低值区，2017–2020 年，高值区与低值区不再显著，表明海口市区内发生 O₃ 污染的区域范围在不断扩大。

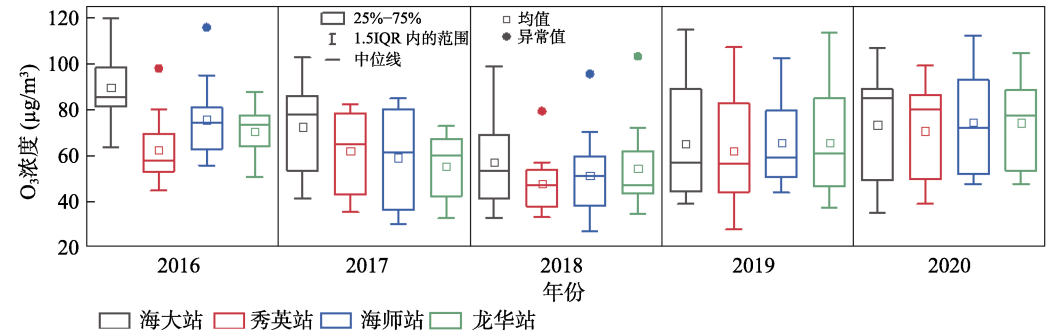


图 3 2016–2020 年 4 个市区监测站点年均 O₃ 浓度值对比

4.2.2 O₃ 浓度时间变化特征

4.2.2.1 点位月变化特征

图 4 为 2016–2020 年国控监测站点 O₃-8h-90PER 平均浓度的月变化情况。在月尺度上，按照春季（3–5 月）、夏季（6–8 月）、秋季（9–11 月）、冬季（12 月至次年 2 月）进行分类，由此可看出 O₃ 季节变化明显，4 个站点 O₃ 浓度峰值集中出现在 10–12 月(秋冬季)，其中 2016

和 2017 年 O_3 月平均最高值出现在 12 月，2018 年 O_3 月平均最高值出现在 10 月，而 2019 和 2020 年出现在 11 月，这与海口市 2016–2020 年 O_3 浓度峰值出现的时间范围一致。这与我国大气污染严重的城市不同，例如广东、上海等地夏季的 O_3 浓度偏高于秋冬季^[15,16,18,19]。海口市在秋冬季 O_3 浓度高主要因为冬季海口市以东北风为主，极易受内陆污染输送影响，且秋季气温不低，光化学反应条件良好，利于 O_3 产生^[5]。

另外，海口市 10 月台风频发，在外围下沉气流作用下，污染物不易扩散。进一步分析发现，2016 和 2017 年 5–7 月份各站点 O_3 浓度出现下降趋势，2020 年 4–8 月出现下降趋势，查阅相应时段气候资料显示，这些时段尽管气温较高，但是此时海口市主要受西南季风影响，来自海洋上空的清洁气团稀释了海口市的空气，导致 O_3 浓度降低，且较高的湿度也会抑制 O_3 浓度升高，区域气候差异是海口 O_3 时间分布异于内陆城市的主要原因。从图中还发现 2016 年 1–2 月 O_3 处于上升阶段，其他年份均处于下降阶段，2019 年 1–3 月 O_3 浓度均低于其他年份，表明有必要提早应对 O_3 春季污染。此外，2016–2020 年 8–10 月 O_3 呈现加重趋势，增长幅度显著高于其他月份，进一步凸显出秋季污染形势的严峻，说明该月份时段是开展 O_3 污染防治的重点时段。

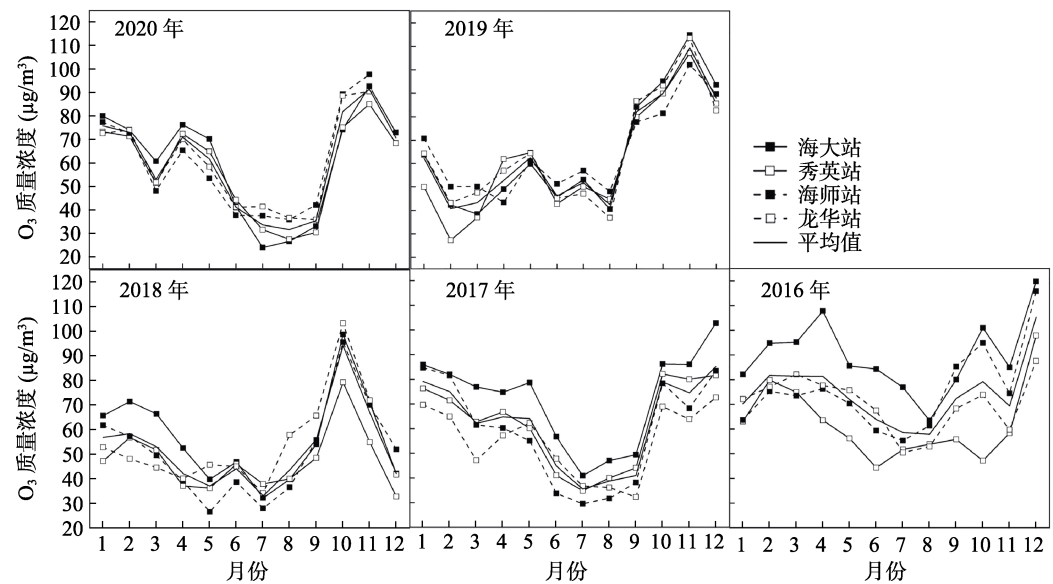


图 4 2016–2020 年国控监测站点 O_3 浓度的月变化

4.2.2.2 点位日变化特征

图 5 为 2016–2020 年国控监测站点 O_3 -1h 平均浓度的日变化情况。从日尺度上看，4 个站点 O_3 浓度的变化特征都呈单峰型，并且全天最大的 O_3 浓度集中出现在 14:00–16:00，与我国其他城市 O_3 浓度的日变化规律相似^[20,21]。此变化特征源于 O_3 的日收支机制，与光化学反应速率和大气扩散能力有关。00:00–8:00 O_3 浓度呈现出持续下降的趋势，并且在 8:00 降低到最低，出现谷值，这是由于该时间段人为活动减弱，前体物质的排放量减少，加上夜间气温低，光化学反应几乎为零， O_3 以消耗为主，收支为负，所以保持在浓度低值区。

8:00–16:00 O₃ 浓度呈现持续上升的趋势并达到一天中的浓度峰值，这是因为日出后太阳辐射强度不断增强，气温逐渐升高，再加上交通源、工业源、生物源等产生的 O₃ 前体物质浓度增大，光化学反应速率增大，O₃ 持续积累，收支为正。16:00 以后 O₃ 浓度逐渐回复到低值范围，这主要是由于 16:00 以后太阳辐射开始减弱、垂直混合、水平辐散加强，光化学反应减弱以及下班高峰期排放的 NO 会消耗 O₃，使积累的 O₃ 回归到以消耗作用为主，收支重新为负，出现浓度不断减小的趋势，如此循环^[17,22]。此外 2019 年 O₃ 日浓度整体水平高于其他年份，这可能与市内排放加强及气象条件有关。

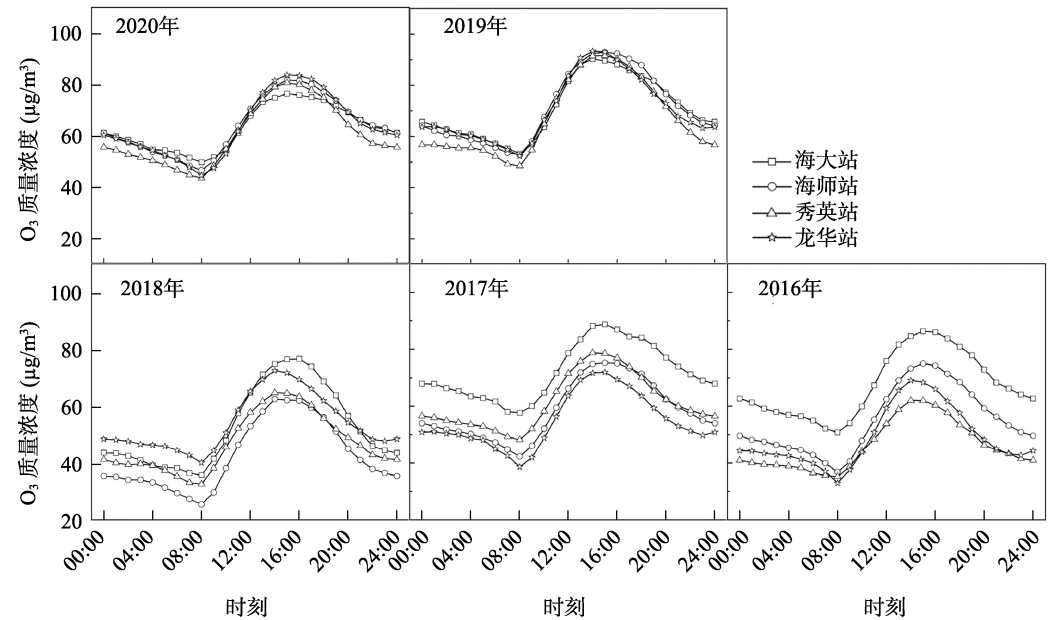


图 5 2016–2020 年国控监测站点 O₃ 平均浓度的日变化

4.2.3 气象因子对典型 O₃ 污染日的影响

气象因子会影响 O₃ 的形成、传输、沉降和消散。基于前述结果的分析，可知海口市全年 O₃ 污染高发时段为秋冬季节（9–12 月），为更好地研究 O₃ 浓度和气象因子之间的关系，选取 4 个国控监测站点在 2016–2020 年 9–12 月份的 O₃-8h 浓度数据和同期气象因子数据进行分析，并计算 O₃-8h 与各气象因子之间的相关性系数（表 3），得到易触发海口市 O₃ 污染天气的气象要素特征。

4.2.3.1 气压与气温对 O₃ 污染的影响

图 6 为国控监测站点 O₃ 浓度与气压、气温变化情况。由图 6 可知海口市 O₃ 浓度与气压和气温呈正相关。量化分析两者间的关系（表 2），结果显示，O₃ 浓度与气压的相关系数为正，然而仅秀英站的正相关关系通过了显著性检验（ $p<0.01$ ），其他三个站点 O₃ 浓度与气压的相关性较弱；O₃ 浓度与气温的相关系数为正，但四个站点的 O₃ 浓度与气温的相关系数都未通过显著性检验（ $p>0.05$ ）。由于海口市地处低纬度热带边缘，属于热带海洋性季风气候，秋季凉爽，气温较春夏季偏低，冬季因大陆冷气团向南伸展而时常有冷气流侵袭

且带有阵寒，这表明，影响海口市 9–12 月份 O₃ 浓度变化的主要气象因子并非气压和气温。

表 3 O₃-8h 与各气象因子之间的相关性系数

监测站点	O ₃ -气压		O ₃ -气温		O ₃ -湿度		O ₃ -风速	
	相关系数	<i>p</i> 值	相关系数	<i>p</i> 值	相关系数	<i>p</i> 值	相关系数	<i>p</i> 值
海大站	0.398	<i>p</i> >0.05	0.417	<i>p</i> >0.05	-0.539	<i>p</i> <0.05	0.630	<i>p</i> <0.01
海师站	0.216	<i>p</i> >0.05	0.374	<i>p</i> >0.05	-0.170	<i>p</i> >0.05	0.327	<i>p</i> >0.05
龙华站	0.244	<i>p</i> >0.05	0.032	<i>p</i> >0.05	-0.425	<i>p</i> >0.05	0.454	<i>p</i> <0.05
秀英站	0.553	<i>p</i> <0.01	0.193	<i>p</i> >0.05	-0.622	<i>p</i> <0.01	0.297	<i>p</i> >0.05

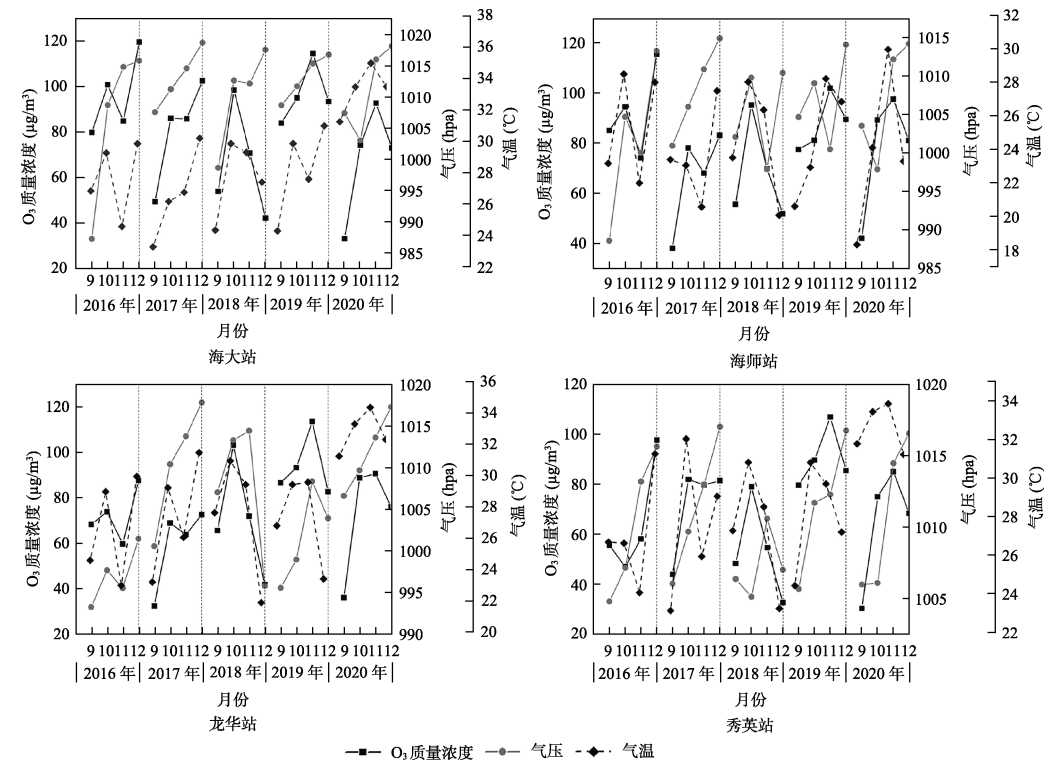


图 6 国控监测站点 O₃ 浓度与气压、气温变化情况

4.2.3.2 湿度和风速对 O₃ 污染的影响

图 7 为国控监测站点 O₃ 浓度与湿度、风速变化情况。由图可知，O₃ 浓度与湿度呈负相关，与风速呈正相关。量化分析 O₃ 浓度与湿度和风速的关系（表 2）发现，各监测站点 O₃ 与湿度的相关系数都为负，海大站 O₃ 浓度与湿度的负相关关系显著（*p*<0.05），秀英站 O₃ 浓度与湿度呈强负相关关系（*p*<0.01）；各监测站点 O₃ 与风速的相关系数都为正，龙华站 O₃ 浓度与风速的正相关关系显著（*p*<0.05），海大站 O₃ 浓度与风速呈强正相关关系（*p*<0.01）。这表明，在 9–12 月份，海口市 O₃ 浓度的变化更容易受到湿度的负向影响和风速的正向影响。

海口市秋季多暴雨，冬季时有阴雨，所以在 9–12 月份，海口市 O₃ 浓度与湿度的变化

趋势相反。风速大小能反映污染物输送效率以及清除效率^[23]。风速增大对 O₃ 浓度有双重影响且同时发生：一是气团输送动力增加，大气边界层高度增大，垂直动量输送增强，有利于上层区域的 O₃ 向地面传输，当局部地区以积累为主时，就会造成 O₃ 浓度的增大；二是增强水平扩散作用，当其占主导时，风速增加使 O₃ 稀释加快^[24]。当风速减小时，其对 O₃ 的清除作用有限，此时累积效应占主导使得 O₃ 浓度增加^[25]。由图 8 可知 2016–2020 年四个国控站点在 9–12 月份监测到的风速范围在 0.1–3.8 m·s⁻¹，风速较小，O₃ 垂直向下的输送作用强于水平方向的扩散作用，有利于 O₃ 积累。因此，在 9–12 月份海口市 O₃ 浓度与风速的变化趋势为正相关。可见，在强化海口市现有的污染防控基础上，加强与上层区域联防联控是有效控制 O₃ 二次污染问题的关键。

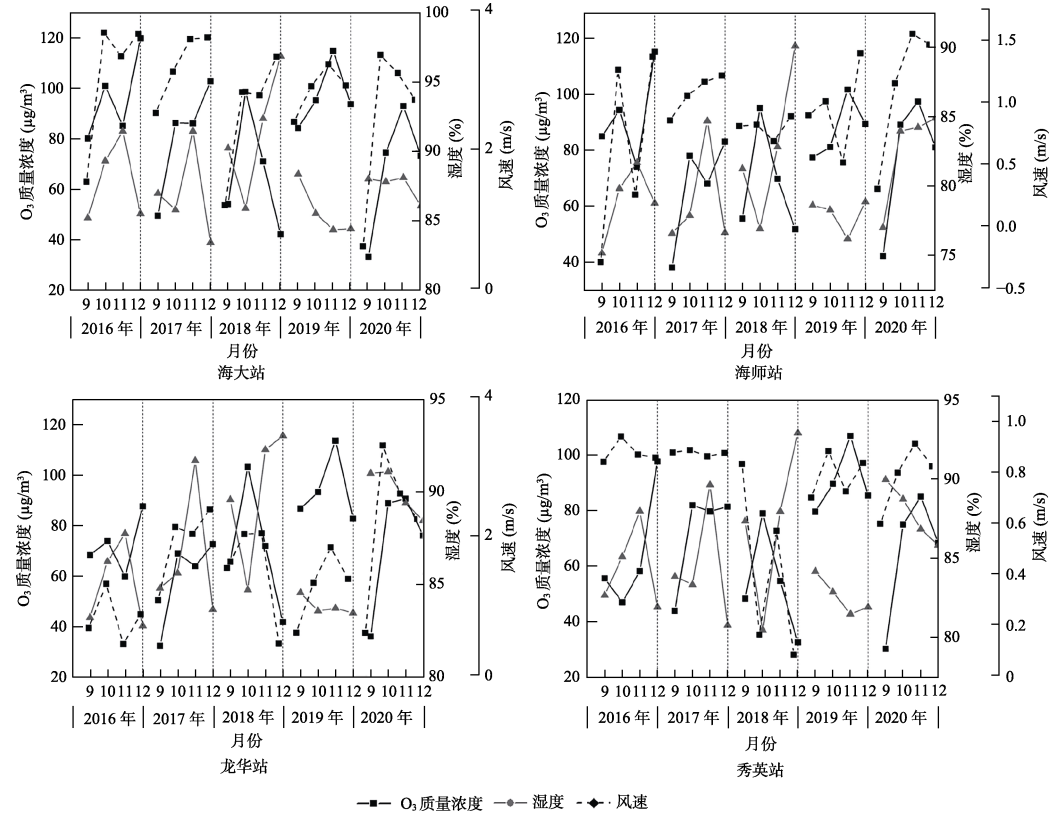


图 7 国控监测站点 O₃ 浓度与湿度、风速变化情况

综上所述，在 O₃ 污染高发的秋冬季（9–12 月份），气象因子对 O₃ 浓度的影响依次为湿度 > 风速 > 气压 > 气温。这表明湿度和风速是影响秋冬季节海口市 O₃ 污染的主要气象因子，整体来看，低湿、低风速易发生 O₃ 污染。O₃ 浓度的变化受前体物、大气细颗粒物和气象因子等诸多因素的影响，是一个复杂综合的交互作用过程，所以气象因子对 O₃ 浓度的影响必然受到其它各类非气象因子及气象因子之间相互作用的影响，因此，在研究 O₃ 污染特征及气象影响时，需要考虑各种可能因素的作用，及时调整污染防治策略，加强各区域的协同控制，从而提高海口市 O₃ 污染防治的精准性。

5 讨论和总结

(1) 2016–2020 年, 海口市 O_3 浓度峰值出现时期与内陆城市具有明显区别, 主要集中在秋冬季节 10–12 月期间, 区域气候差异是海口 O_3 时间分布异于内陆城市的主要原因。

(2) O_3 浓度日变化呈现明显的单峰特征, 8:00 出现谷值, 14:00–16:00 出现峰值, 由 O_3 浓度特征值可知, 近年来市区 O_3 污染范围在逐渐扩大, 程度加深。

(3) O_3 浓度与 CO 浓度呈正相关, 与湿度呈负相关, 与风速呈正相关, 秋冬季影响海口市 O_3 浓度变化的主要气象因子并非气压和气温。

(4) 结合海口市 O_3 污染特征, 通过鼓励购买新能源汽车、与各区政府及有关部门建立责任体系、工业企业实施错峰生产、实施机动车错峰出行、提升第三服务餐饮企业污染防治手段、强化环境监管和监测能力, 加强与上层区域联防联控等措施, 海口市 O_3 污染有望得到改善。

作者分工: 蔡今子对数据集的开发做了总体设计; 王韶辉做了数据采集及处理; 胡佳欣撰写了数据论文等。

利益冲突声明: 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 生态环境部. 2019 年中国生态环境状况公报[EB/OL]. (2020-06-02)[2021-5-7]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202006/P020200602509464172096.pdf>.
- [3] Yang, L., Luo, H., Yuan, Z., *et al.* Quantitative impacts of meteorology and precursor emission changes on the long-term trend of ambient ozone over the pearl river delta, China, and implications for ozone control strategy [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19: 12901–12916.
- [4] Jacob, D. J., Winner, D. A. Effect of climate change on air quality [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(1): 51–63.
- [5] 徐文帅, 邢巧, 孟鑫鑫等. 海口市臭氧污染特征[J]. 中国环境监测, 2017, 33(4): 186–193.
- [6] 符传博, 丹利, 佟金鹤等. 2013–2018 年海口市臭氧浓度变化特征[J]. 中国环境监测, 2020, 36(5): 38–46.
- [7] 蔡今子, 王韶辉, 胡佳欣等. 海口市“十三五”期间臭氧污染特征及影响因素分析数据集(2016–2020) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.05.04.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.05.04.V1>.
- [8] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [9] Awang, N. R., Ramli, N. A., Yahaya, A. S., *et al.* Multivariate methods to predict ground level ozone during daytime, nighttime, and critical conversion time in urban areas [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2015, 6(5): 726–734.
- [10] 符传博, 陈有龙, 丹利等. 近 10 年海南岛大气 NO_2 的时空变化及污染物来源解析[J]. 环境科学, 2015, 37(9): 18–24.

- [11] 曹庭伟, 吴锴, 康平等. 成渝城市群臭氧污染特征及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2017, 38(4): 1275–1284.
- [12] 杨玉香, 陈乃华, 胡宝叶等. 海峡西岸清洁岛屿臭氧污染特征及影响因素[J]. 环境化学, 2020, 39(7): 1733–1743.
- [13] 符传博, 徐文帅, 丹利等. 前体物与气象因子对海南省臭氧污染的影响[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(07): 45–50.
- [14] 董昊, 程龙, 王含月等. 安徽省臭氧污染特征及气象影响因素分析[J]. 中国环境监测, 2021, 37(1): 58–68.
- [15] 徐锬, 刘志红, 何沐全等. 成都市夏季近地面臭氧污染气象特征[J]. 中国环境监测, 2018, 34(5): 41–50.
- [16] 沈劲, 黄晓波, 汪宇等. 广东省臭氧污染特征及其来源解析研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(12): 4449–4457.
- [17] 吴锴, 康平, 王占山等. 成都市臭氧污染特征及气象成因分析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4241–4252.
- [18] 刘镇, 朱玉凡, 郭文凯等. 兰州市化石燃料燃烧源排放 VOCs 的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2069–2077.
- [19] 赵辰航, 耿福海, 马承愚等. 上海地区光化学污染中气溶胶特征研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(2): 356–363.
- [20] 潘本峰, 程麟钧, 王建国等. 京津冀地区臭氧污染特征与来源分析[J]. 中国环境监测, 2016, 32(5): 17–23.
- [21] 于世杰, 尹沙沙, 张瑞芹等. 郑州市近地面臭氧污染特征及气象因素分析[J]. 中国环境监测, 2017, 33(4): 140–149.
- [22] 宋雪燕, 高丽枝, 罗迪等. 云南省臭氧污染特征及气象影响分析[J]. 中国环境监测, 2020, 36(4): 16–28.
- [23] 严茹莎, 陈敏东, 高庆先等. 北京夏季典型臭氧污染分布特征及影响因子[J]. 环境科学研究, 2013(1): 47–53.
- [24] 谢汶静, 王盛繁, 何林宴等. 2015–2019 年贵港市臭氧污染特征及其与气象要素的关系[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(1): 58–62.
- [25] 李顺姬, 李红, 陈妙等. 气象因素对西安市西南城区大气中臭氧及其前体物的影响[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(4): 59–67.