

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2020042304

符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 2015—2018年海南省城市臭氧时空分布特征[J]. 环境化学, 2020, 39(10): 2823-2832.

FU Chuanbo, XU Wenshuai, DAN Li, et al. Spatiotemporal distribution of ozone in cities of Hainan from 2015 to 2018 [J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(10): 2823-2832.

## 2015—2018年海南省城市臭氧时空分布特征\*

符传博<sup>1,3,4</sup> 徐文帅<sup>2\*\*</sup> 丹利<sup>3</sup> 佟金鹤<sup>1,4</sup>

- (1. 海南省气象科学研究所, 海口, 570203; 2. 海南省环境科学研究院, 海口, 571126;  
3. 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京, 100029;  
4. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口, 570203)

**摘要** 基于2015—2018年海南省18个市县O<sub>3</sub>浓度监测数据和气象观测资料, 结合Cressman客观插值方法对城市O<sub>3</sub>浓度时空分布特征进行深入分析. 结果表明, 海南省O<sub>3</sub>最大8小时平均值(O<sub>3</sub>-8 h)浓度空间分布呈西部、北部和东部沿海高, 中部山区和南部沿海低的分布特征. 四季O<sub>3</sub>-8 h浓度的空间分布与年平均基本一致, 但是季节变化特征明显. O<sub>3</sub>-8 h浓度受气象因子影响显著, 其中与年平均气温、年日照时数和平均风速呈正相关关系, 与年降水量、年降水日数和相对湿度呈反相关关系. O<sub>3</sub>浓度日变化呈现单峰型变化特征, 高值主要出现在15:00—18:00之间, 其中夏季峰值出现最早, 冬季最晚, 春季和秋季介于两者之间. O<sub>3</sub>-8 h浓度逐月变化表现为单峰单谷型, 7月最低, 10月最高. 区域性O<sub>3</sub>污染(O<sub>3</sub>-8 h浓度超标市县≥3个)特征分析表明, 近4年海南省共有40 d发生了区域性O<sub>3</sub>污染, 发生概率为2.73%, 其中2017年的区域性O<sub>3</sub>污染强度最强, 年平均的O<sub>3</sub>-8 h浓度超标市县数达到7.38个, 超标率为41%.

**关键词** O<sub>3</sub>, 时空分布, Cressman插值, 海南省.

## Spatiotemporal distribution of ozone in cities of Hainan from 2015 to 2018

FU Chuanbo<sup>1,3,4</sup> XU Wenshuai<sup>2\*\*</sup> DAN Li<sup>3</sup> TONG Jinhe<sup>1,4</sup>

- (1. Hainan Institute of Meteorological Science, Haikou, 570203, China; 2. Hainan Research Academy of Environmental Sciences, Haikou, 571126; 3. Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029, China; 4. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou, 570203, China)

**Abstract:** Based on the O<sub>3</sub> concentrations monitored data and meteorological data from 18 cities and counties in Hainan Province from 2015 to 2018, combined with the Cressman interpolated method, the temporal and spatial distribution characteristics of O<sub>3</sub> concentration in Hainan were analyzed. The results showed that O<sub>3</sub>-8 h (defined as maximum result of 8 hour average) was lower in the central mountainous and southern coast than that in the western coast, northern coast and eastern coast. Additional, the spatial distribution of O<sub>3</sub>-8 h in four seasons was similar with the annual average with obvious seasonal variation. O<sub>3</sub>-8 h in Hainan Province was affected by meteorological factors significantly, which showed that there was a positive correlation between O<sub>3</sub>-8 h and annual average temperature, annual sunshine hours and average wind speed, and a negative correlation with annual

2020年4月23日收稿(Received: April 23, 2020).

\* 国家自然科学基金(4265010, 41775011), 海南省自然科学基金(419MS108)和海南省气象局科研项目(HNQXT202002)资助.

**Supported by** Project of National Natural Science Foundation of China (4265010, 41775011), Natural Science Foundation of Hainan (419MS108) and Scientific Research Project of Hainan Meteorological Bureau (HNQXT202002).

\*\* 通讯联系人, E-mail: xuwenshuai@hotmail.com

**Corresponding author**, E-mail: xuwenshuai@hotmail.com

precipitation, annual rainy days and relative humidity. The diurnal variation of  $O_3$  showed a single peak distribution, high values mainly occurring between 15:00 and 18:00, and the peak appearing earliest in summer, spring and autumn followed, winter was the latest. Otherwise, Monthly variation of  $O_3$ -8 h showed a single peak and single valley type, the lowest value occurred in July, and the highest value occurred in October. Characteristic analysis of regional  $O_3$  pollution (defined as  $\geq 3$  cities and counties with  $O_3$ -8 h concentration exceeding the standard) indicated that there had 40 d of regional  $O_3$  pollution in the pasted 4 years over Hainan Province, with an occurrence probability of 2.73%. Among them, the intensity of regional  $O_3$  pollution in 2017 was strongest, the number of polluted cities and counties reached 7.38, and with 41% polluted rate.

**Keywords:**  $O_3$ , temporal and spatial distribution, Cressman interpolation, Hainan Province.

空气污染是我国大部分城市在快速发展过程中亟待解决的难题<sup>[1]</sup>.自改革开放以来,人民物质财富得到快速积累,生活水平大幅提高,然而相伴随的是大量化石燃料消耗和生态环境恶化<sup>[2]</sup>,特别是2000年之后灰霾、光化学烟雾等复合型大气环境问题日趋严重<sup>[3-4]</sup>.大量的研究表明,臭氧( $O_3$ )和细粒子( $PM_{2.5}$ )是对城市大气环境和人类健康影响最大的两类污染物<sup>[5-6]</sup>.近几年随着国家大气环境保护政策地实施,我国大部分城市的  $PM_{2.5}$  浓度超标问题有所缓解<sup>[7]</sup>,但  $O_3$  浓度却稳步上升,部分城市  $O_3$  已经代替  $PM_{2.5}$ , 成为最主要的大气污染物,尤以低纬地区的城市更为突出<sup>[8-9]</sup>.相比较于  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$  污染治理难度将更大.

早在20世纪中期,随着欧洲及北美的许多大城市相继发生光化学烟雾事件<sup>[10-13]</sup>,科学家开始关注城市  $O_3$  污染问题,并在城市  $O_3$  来源方面得出了较为一致的结论,即  $O_3$  主要是通过一系列复杂的链式反应生成<sup>[14]</sup>,而这需要大气中同时满足紫外光、 $NO_x$  和  $VOC_s$  的3个基本条件.我国从20世纪80年代就开始研究城市  $O_3$  污染问题<sup>[15]</sup>,同时已经积累了很多宝贵的研究成果,其中包括城市  $O_3$  产生机理<sup>[16-18]</sup>、 $O_3$  浓度变化和气象影响因素<sup>[19-20]</sup>、与前体物的关系<sup>[21-22]</sup> 以及数值模拟<sup>[23-24]</sup> 等方面.

海南省作为中国唯一的热带海岛旅游省份,其城市环境空气质量对海南国际旅游岛、中国(海南)自由贸易试验区(港)的形象有举足轻重的作用.近些年来也陆续有关于海南省城市空气污染方面的研究,苏超<sup>[25]</sup>分析了海口市2010—2015年污染物浓度变化特征及其影响因素,发现海口市  $O_3$  浓度有上升的趋势.徐文帅等<sup>[26]</sup>统计了2013—2015年海口市  $O_3$  污染的天气形势表明,台风外围型和北方冷高压底部型是造成海口市  $O_3$  超标的2类典型天气形势.赵蕾等<sup>[27]</sup>的研究发现,海口市  $O_3$  污染可能与外源输送有关.前人的研究主要集中于单个城市或污染个例分析,均没有涉及到海南全省尺度的  $O_3$  浓度时空分布和演变规律等方面的研究.

本文基于2015—2018年海南省18个市县32个监测站  $O_3$  浓度和同期气象观测资料,利用多种统计方法和相关分析,摸清海南省  $O_3$  浓度水平及变化趋势,以期当地政府制定切实可行的环境管理政策和气象与环保部门的预报服务工作等提出理论依据.

## 1 资料和方法(Data and methods)

### 1.1 资料来源

目前海南省生态环境厅实时对外发布18个市县共计32个市区空气质量监测站(<http://kq.hnsthb.gov.cn:8088/EQGIS/>),站点分布如图1所示.监测的大气污染物要素包括  $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $O_3$ 、 $CO$ 、 $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$ ,其中  $O_3$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  采用瑞典某公司的长光程仪器, $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $CO$  分别采用美国某公司点式5030、FH62C14和48i型监测仪器自动监测.考虑到各个市县自动监测仪器安装的开始时间不同,而2015年之后资料才较为完整,因此本研究选取了2015年至2018年逐时  $O_3$  浓度资料进行分析.同期的气象资料来自海南省气象局信息中心,要素包括平均气温、年降水量、年降水日数、年日照时数、相对湿度和平均风速等.

## 1.2 研究方法

Cressman 客观分析方法是基于 Cressman 客观分析函数,对有限区域内的猜测场进行逐步订正的方法,由于该方法差值结果与原始资料较为接近,误差较小<sup>[28]</sup>,已被广泛应用于各种数据分析和气候诊断中<sup>[29-30]</sup>.这种方法先给定第一猜测场,然后用实际观测场逐步修正第一猜测场,直到订正后的场逼近观测记录,具体公式如下:

$$\alpha' = \alpha_0 + \Delta\alpha_{ij}$$

$$\Delta\alpha_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K (W_{ijk}^2 \Delta\alpha_k)}{\sum_{k=1}^K W_{ijk}}$$

其中:

式中,  $\alpha$  为任一观测要素,  $\alpha_0$  是变量  $\alpha$  在格点  $(i, j)$  上的第一猜测值,  $\alpha'$  是变量  $\alpha$  在格点  $(i, j)$  上的订正值;  $\Delta\alpha_k$  是观测点  $k$  上的观测值与第一猜测值之差;  $W_{ijk}$  是权重因子,在 0.0—1.0 之间变化;  $K$  是影响半径  $R$  内的站点数. Cressman 客观分析方法最重要的是权重函数  $W_{ijk}$  的确定,它的一般形式为:

$$W_{ijk} = \begin{cases} \frac{R^2 - d_{ijk}^2}{R^2 + d_{ijk}^2}, & (d_{ijk} < R) \\ 0, & (d_{ijk} \geq R) \end{cases}$$

其中,影响半径  $R$  的选取具有一定的人为因素,一般取常数.  $R$  选取的原则是由近及远进行扫描,常用的几个影响半径是 1、2、4、7 和 10.  $d_{ijk}$  是格点  $(i, j)$  到观测点  $k$  的距离. 本研究首先根据《环境空气质量标准》(GB3095—2012)中的规定,计算出各个站点  $O_3$  浓度的 8h 滑动平均最大值 ( $O_3$ -8 h),再算出各个市县所有站点的  $O_3$ -8 h 算数平均值,最后利用 Cressman 插值方法进行空间插值.

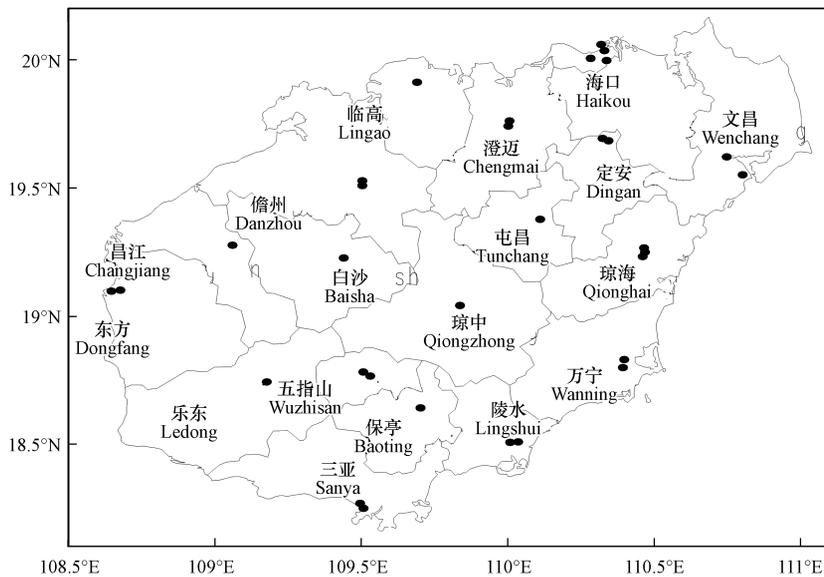


图1 海南地区 18 市县 32 个国控站分布示意图

Fig.1 Spatial distribution of 32 automatic air monitoring stations in 18 cities over Hainan region

## 2 结果与讨论 (Results and discussion)

### 2.1 年平均 $O_3$ -8 h 浓度空间分布

基于 Cressman 插值法的海南省近 4 年平均  $O_3$ -8 h 浓度空间分布如图 2 所示,  $O_3$ -8 h 浓度呈西部、北部和东部沿海高,中部山区和南部沿海低的分布特征.  $O_3$ -8 h 浓度超过  $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的市县有东方市和文昌市,其中东方市高达  $97.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,为全省最高.超过  $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的市县还有临高县、儋州市、海口市、

昌江县、乐东县、三亚市和万宁市,而北部内陆、中部山区和东南沿海的定安县、琼中县和陵水县  $O_3$ -8 h 浓度在  $65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以下,其中陵水县  $O_3$ -8 h 浓度只为  $61.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,为全省最低。 $O_3$ -8 h 浓度空间分布主要受  $O_3$  前体物排放、气象条件、植被覆盖等影响因子控制。一般而言,经济越发达的市县,工业化程度越高,其大气污染程度越严重<sup>[4]</sup>。海南省沿海市县经济发展快速,人口密度高,汽车保有量多,开发建设活动大, $O_3$ -8 h 浓度有较大分布;中部市县植被覆盖率较高,绿化覆盖面积大,气候条件较好,汽车保有量少,人为建设活动小,能够更好的对污染物进行调控,致使  $O_3$ -8 h 浓度分布较低。

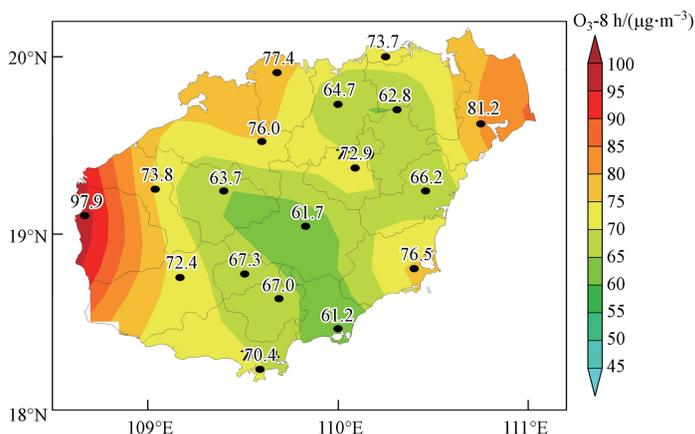


图2 海南省年平均  $O_3$ -8 h 浓度空间分布

Fig.2 Spatial distribution of annual average of  $O_3$ -8 h in Hainan Province

## 2.2 四季 $O_3$ -8 h 浓度空间分布

图3给出了海南省四季  $O_3$ -8 h 浓度的空间分布。图3表明,  $O_3$ -8 h 浓度有明显的季节变化特征。春季,  $O_3$ -8 h 浓度高值区主要分布在西北地区,而东南半部  $O_3$ -8 h 浓度明显偏低。临高县、儋州市、昌江县和东方市都超过了  $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其中最大值出现在东方市,为  $102.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。定安县、琼海市、琼中县、保亭县、陵水县和三亚市  $O_3$ -8 h 浓度均在  $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以下。春季影响海南省的冷空气强度明显偏弱,降水偏少,西北部地区气温偏高,湿度较低,光化学反应比较强烈,因此春季西北地区的市县  $O_3$ -8 h 浓度显著偏高。

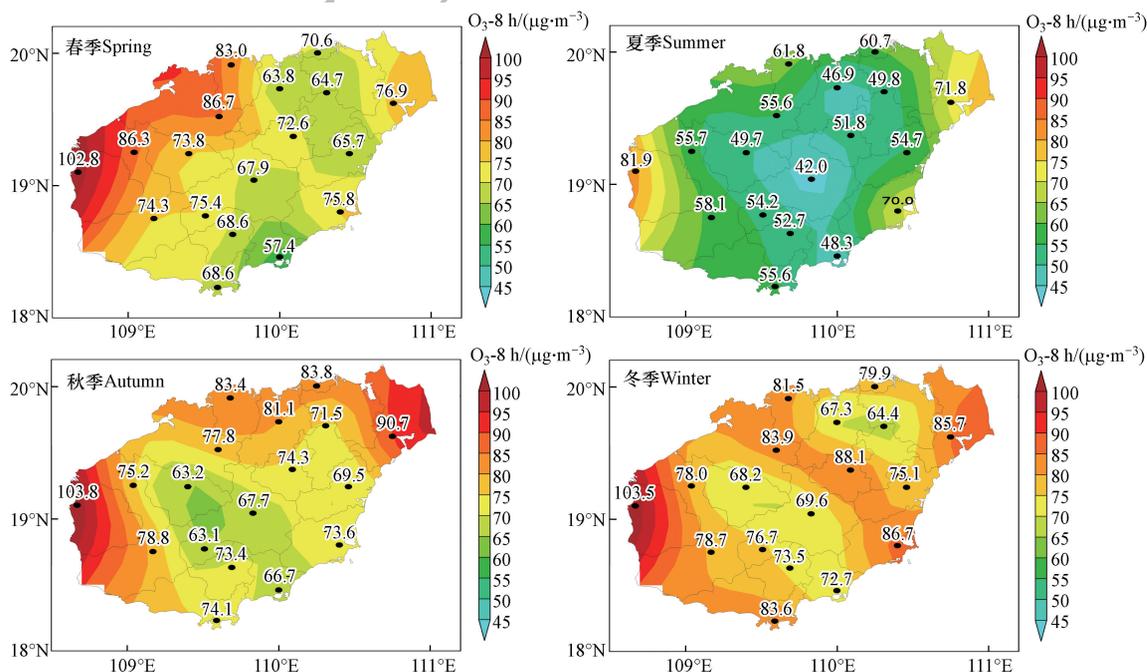


图3 海南省四季  $O_3$ -8 h 浓度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of  $O_3$ -8 h concentration in four seasons over Hainan Province



$80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的市县有东方市、临高县、澄迈县和文昌市,其中文昌市达到了  $90.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,超过了东方市,为2018年  $\text{O}_3$ -8 h 浓度最高的市县.东部的琼海市,中部的琼中县,南部的陵水县和乐东县  $\text{O}_3$ -8 h 浓度低于  $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .4年全省平均的  $\text{O}_3$ -8 h 浓度从大到小排列为2015年>2018年>2016年>2017年.

$\text{O}_3$ 浓度的变化会显著受气象因子的影响.表1进一步给出了海南省近4年与  $\text{O}_3$ 浓度关系密切的气象要素统计对比.从表中可以看出,海南省  $\text{O}_3$ -8 h 浓度与年平均气温、年日照时数和平均风速呈明显的正相关关系,相关系数分别为0.915、0.984和0.799.与年降水量、年降水日数和相对湿度呈明显的反相关关系,相关系数分别为-0.958、-0.983、-0.933.2015年  $\text{O}_3$ -8 h 浓度是近4年的最高值( $77.77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),年平均气温、年日照时数和平均风速都达到了近4年的最大值,分别为  $25.24 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $2273.19 \text{ h}$ 和  $2.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,年降水量、年降水日数和相对湿度为近4年的最小值,分别为  $1276.48 \text{ mm}$ 、 $1023.89 \text{ d}$ 和  $81.11\%$ .2016—2018年  $\text{O}_3$ -8 h 浓度变化不大,分布在  $69\text{--}70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,而相关气象要素也较为相近,这也说明海南省  $\text{O}_3$ -8 h 浓度显著受气象因子地影响.

表1 2015—2018年海南省  $\text{O}_3$ -8 h 浓度和气象要素的对比

Table 1 Comparison of  $\text{O}_3$ -8 h concentration and meteorological elements in Hainan Province from 2015—2018

年份 Year	$\text{O}_3$ -8 h 浓度 $\text{O}_3$ -8 h concentration/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	年平均气温 Annual average air temperature/ $^\circ\text{C}$	年降水量 Annual precipitation/mm	年降水日数 Annual rainy days/d	年日照时数 Annual sunshine duration/h	相对湿度 Relative humidity/%	平均风速 Mean wind speed/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
2015	77.77	25.24	1276.48	123.89	2273.19	81.11	2.08
2016	69.40	24.66	1960.94	156.67	1951.89	82.72	2.00
2017	69.22	24.66	1883.96	164.67	1869.13	83.67	1.98
2018	69.88	24.93	2076.64	155.11	1953.82	82.83	1.91

#### 2.4 24 h $\text{O}_3$ 浓度日变化

图5给出了海南省四季  $\text{O}_3$ 浓度日变化的曲线.

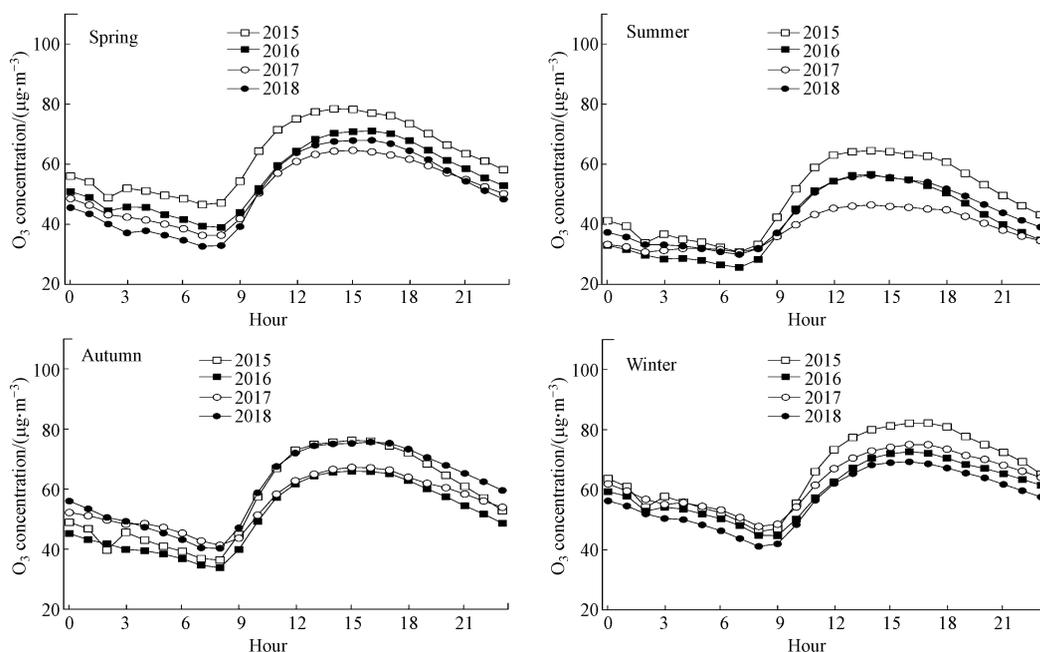


图5 海南省四季  $\text{O}_3$ 浓度日变化曲线

Fig.5 Diurnal variation of ozone concentrations in four seasons of Hainan

从图5可以看出,四季  $\text{O}_3$ 浓度均表现为单峰型的变化特征,高值出现在下午15:00至18:00之间.  $\text{O}_3$ 是一种二次污染物,其光化学反应过程受温度、光照、和太阳辐射等因子的强烈影响<sup>[20]</sup>.夜间由于没有太阳辐射和光照,气温较低,光化学反应弱,因而  $\text{O}_3$ 浓度较低,基本分布在  $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下.早上8:00

之后,随着太阳辐射的增强和气温的升高,光化学反应剧烈, $O_3$ 的生成大于消耗, $O_3$ 浓度开始积累升高,并在 15:00 至 18:00 之间达到峰值,之后随着太阳辐射和气温的降低, $O_3$ 浓度也稳定下降.从不同季节上看,春季和秋季  $O_3$ 浓度的日变化幅度要大于夏季和冬季,这可能与这两个季节气温日较差较大有关.从峰值出现时段来看,夏季峰值出现最早,分布在 13:00—15:00 之间,冬季最晚,为 16:00—18:00,春季和秋季介于两者之间.夏季气温随着太阳的升起上升较快,光化学反应也会偏早与其他季节,因而  $O_3$ 浓度达到峰值时段偏早.冬季由于气温总体偏低,光化学反应出现时间偏晚,因此  $O_3$ 浓度峰值的出现时间也偏晚 2—3 h.从平均峰值来看, $O_3$ 浓度由高到低的季节排列为冬季>春季>秋季>夏季.从不同年份来看,2015 年四季的  $O_3$ 浓度均超过了其余 3 年.2017 年夏季  $O_3$ 浓度峰值偏小与其余 3 年,但冬季  $O_3$ 浓度峰值超过了 2016 年和 2018 年,日变化差异较大.

## 2.5 $O_3$ -8 h 浓度月季变化

根据全省 32 个空气质量监测站点的 2015 年—2018 年  $O_3$ 监测数据,通过平均值处理,得到近 4 年海南省城市  $O_3$ -8 h 逐月变化(图 6). $O_3$ -8 h 浓度的逐月变化呈现单峰单谷型特征,1 月至 4 月  $O_3$ -8 h 浓度变化不大,分布在  $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 附近,5 月之后快速下降,并在 7 月达到最低值,平均值为  $54.27 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .8 月至 10 月上升迅速,10 月是  $O_3$ -8 h 浓度全年最高的月份,平均值为  $91.04 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .11 月和 12 月  $O_3$ -8 h 浓度也较高,维持在  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 附近.

从总体变化趋势上看,6—8 月  $O_3$ -8 h 浓度最低,此时海南省正处于夏季,尽管气温较高,但是夏季也是海南省最主要的降水季节,雨水的冲刷作用不利于  $O_3$ 浓度的升高,同时较高的水汽条件能有效降低光化学反应,致使  $O_3$ 浓度降低<sup>[19]</sup>.10 月份海南省正处于秋季,北方冷空气开始活跃,从内陆地区南下的干冷气团携带了大量污染物影响着海南地区,湿度较低,加上海南省纬度偏低,此时温度还没有大幅度下降,光化学反应剧烈, $O_3$ -8 h 浓度最高.从不同年份上看,2015 年  $O_3$ -8 h 浓度总体比其他 3 年要高,这与前面的分析一致.另外 2015 年  $O_3$ -8 h 浓度最高值出现在 1 月,与其余 3 年不同,这还有待于进一步分析.

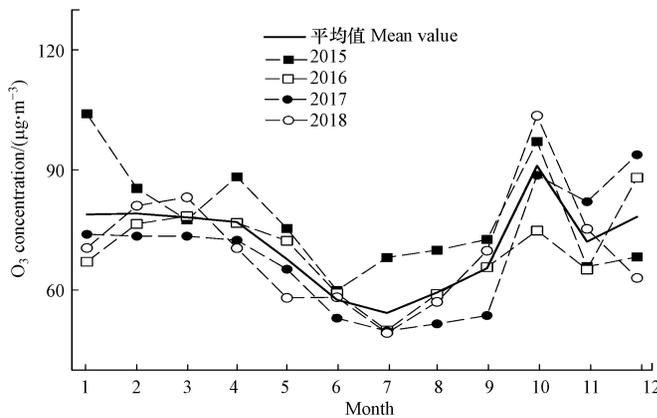


图 6 海南省  $O_3$ -8 h 浓度逐月变化曲线

Fig.6 Monthly variation of  $O_3$ -8 h concentrations in Hainan Province

## 2.6 海南省区域性 $O_3$ 污染分析

为了进一步研究海南省  $O_3$ 污染的区域性特征,本小节定义了海南省区域性  $O_3$ 污染日,其概念为 1 d 中有 3 个及其以上市县  $O_3$ -8 h 浓度超过  $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (国家环境空气质量标准二级浓度限值),则认为当天为海南省区域性  $O_3$ 污染日.图 7 给出了海南省 2015—2018 年  $O_3$ -8 h 浓度和区域性  $O_3$ 污染日的逐日变化.从图中可以看出,海南省  $O_3$ -8 h 浓度有明显的季节性变化特征, $O_3$ -8 h 浓度超过  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的时段主要出现在冬半年,夏半年  $O_3$ -8 h 浓度的明显偏低.从区域性污染天气上看,近 4 年共有 40 d 发生了区域性  $O_3$ 污染,发生概率为 2.73%.其中 2015 年和 2017 年达到了 13 d(表 2),区域性  $O_3$ 污染发生概率为 3.56%,2018 年也有 11 d(3.01%),2016 年最低,只为 3 d(0.82%).值得关注的是 2017 年的区域性  $O_3$ 污染日主要发生在 10 月,是一次持续性的污染过程,其内在机理还有待于进一步分析.另外年平均的

O<sub>3</sub>-8 h 浓度超标市县数中,2017 年最多,为 7.38 个,超标率达 41%,这也说明 2017 年的区域性 O<sub>3</sub> 污染强度最强,其主要成因可能与不同年份的气象条件差异有关.从单日 O<sub>3</sub>-8 h 浓度超标市县最大值上看,2015 年达到了 13 个,2017 和 2018 年也分别达到了 12 个和 11 个,2016 年最小,为 9 个.

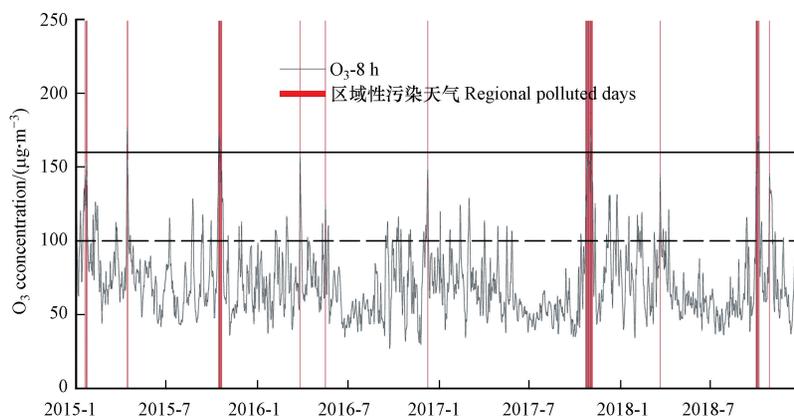


图 7 海南省 2015—2018 年 O<sub>3</sub>-8 h 浓度与区域性 O<sub>3</sub> 污染日的逐日变化

Fig.7 Daily variation of O<sub>3</sub>-8 h concentration and regional O<sub>3</sub> polluted days in Hainan Province during 2015 to 2018

表 2 2015—2018 年海南省区域性 O<sub>3</sub> 污染统计

Table 2 Statistics of regional O<sub>3</sub> pollution in Hainan Province from 2015—2018

年份 Year	出现日数 Appeared days/d	平均 O <sub>3</sub> -8 h 浓度值 Mean O <sub>3</sub> -8 h concentration/ (µg·m <sup>-3</sup> )	O <sub>3</sub> -8 h 浓度超标市县数 Number of cities and counties with O <sub>3</sub> -8 h excessive concentration/个	单日 O <sub>3</sub> -8 h 浓度 超标市县数最大值 The maximum number of cities and counties with O <sub>3</sub> -8 h excessive concentration in a single day/个
2015	13	153.33	7.15	13
2016	3	143.02	6.67	9
2017	13	149.95	7.38	12
2018	11	148.78	7.36	11
4 年平均	10	148.77	7.14	11.25

### 3 结论 (Conclusion)

(1) 海南省 O<sub>3</sub>-8 h 浓度空间分布呈西部、北部和东部沿海高,中部山区和南部沿海低的分布特征,与海南省各市县的工业化差异、气象条件、植被覆盖、污染物的输送与扩散差异等影响因子有很好的相关关系.西部的东方市 O<sub>3</sub>-8 h 浓度最高,为 97.9 µg·m<sup>-3</sup>.四季 O<sub>3</sub>-8 h 浓度的空间分布与年平均基本一致,但是季节变化特征明显.受降水、气温和湿度等气象条件影响,夏季海南省各个市县 O<sub>3</sub>-8 h 浓度普遍偏低,而其余三季均有不同程度的升高.

(2) 年际变化的分析表明,O<sub>3</sub>-8 h 浓度受气象因子影响显著.O<sub>3</sub>-8 h 浓度与年平均气温、年日照时数和平均风速呈正相关关系,与年降水量、年降水日数和相对湿度呈反相关关系.4 年中 2015 年 O<sub>3</sub>-8 h 浓度是最高的一年,平均 O<sub>3</sub>-8 h 浓度为 77.77 µg·m<sup>-3</sup>,其中年平均气温、年日照时数和平均风速明显偏多与其余 3 年,年降水量、年降水日数和相对湿度显著偏少与其余 3 年.4 年全省平均的 O<sub>3</sub>-8 h 浓度从大到小排列为 2015 年>2018 年>2016 年>2017 年.

(3) 海南省 O<sub>3</sub> 浓度日变化呈现单峰型变化特征,高值主要出现在 15:00—18:00 之间,其中夏季峰值出现最早,冬季最晚,春季和秋季介于两者之间.受气温日较差较大影响,春季和秋季 O<sub>3</sub> 浓度的日变化幅度大于夏季和冬季.从平均峰值来看,O<sub>3</sub> 浓度由高到低的季节排列为冬季>春季>秋季>夏季.O<sub>3</sub>-8 h 浓度的逐月变化呈现单峰单谷型特征,最低值出现在 7 月,10 月最高,平均值为 91.04 µg·m<sup>-3</sup>.

(4) 区域性 O<sub>3</sub> 污染特征分析表明,近 4 年海南省共有 40 d 发生了区域性 O<sub>3</sub> 污染,发生概率为 2.73%。2015 年和 2017 年达到了 13 d(3.56%),2018 年为 11 d(3.01%),2016 年最低,只为 3 d(0.82%)。2017 年的区域性 O<sub>3</sub> 污染强度最强,年平均的 O<sub>3</sub>-8 h 浓度超标市县数达到 7.38 个,超标率为 41%。

#### 参考文献 (References)

- [ 1 ] 蒯雪芹,王岱.中国城市空气质量时空演变特征及社会经济驱动力[J].地理学报,2016,71(8):1357-1371.  
LIN X Q, WANG D. Spatio-temporal variations and socio-economic driving forces of air quality in Chinese cities [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(8): 1357-1371 (in Chinese).
- [ 2 ] 张小曳,孙俊英,王亚强,等.我国雾-霾成因及其治理的思考[J].科学通报,2013,58(13):1178-1187.  
ZHANG X Y, SUN J Y, WANG Y Q, et al. Factors contributing to haze and fog in China [J]. Chin Sci Bull, 2013, 58(13): 1178-1187 (in Chinese).
- [ 3 ] 丁一汇,柳艳菊.近 50 年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系[J].科学通报,2014,44(1):37-48(in Chinese).  
DING Y H, LIU Y J. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(1): 37-48(in Chinese).
- [ 4 ] 符传博,丹利.重污染下我国中东部地区 1960—2010 年霾日数的时空变化特征[J].气候与环境研究,2014,19(2):219-226.  
FU C B, DAN L. Spatiotemporal characteristics of haze days under heavy pollution over central and eastern China during 1960—2010[J]. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(2): 219-226(in Chinese).
- [ 5 ] 李莉.典型城市群大气复合污染特征的数值模拟研究[D].上海:上海大学,2013.  
LI L. The numerical simulation of comprehensive air pollution characteristics in a typical city-cluster [D]. Shanghai:Shanghai University, 2013(in Chinese).
- [ 6 ] 朱彤,尚静,赵德峰.大气复合污染及灰霾形成中非均相化学过程的作用[J].中国科学:化学,2010,40(12):1731-1740.  
ZHU D, SHANG J, ZHAO D F. The roles of heterogeneous chemical processes in the formation of an air pollution complex and gray haze [J]. Scientia Sinica: Chimica. 2010, 40(12): 1731-1740(in Chinese).
- [ 7 ] 李云燕,葛畅.我国三大区域 PM<sub>2.5</sub> 源解析研究进展[J].现代化工,2017,37(4):1-5.  
LI Y Y, GE C. Research progress of PM<sub>2.5</sub> source analysis in three main regions of China [J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(4): 1-5(in Chinese).
- [ 8 ] 邓爱萍,陆维青,杨雪.2013 年-2017 年江苏省环境空气中首要污染物变化分析研究[J].环境科学与管理,2017,42(12):23-26.  
DENG A P, LU W Q, YANG X. Analysis on change of primary pollutant in ambient air of Jiangsu Province during 2013 and 2017 [J]. Environmental Science and Management, 2017, 42(12): 23-26(in Chinese).
- [ 9 ] 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.  
SHEN J, HUANG X B, WANG Y, et al. Study on ozone pollution characteristics and source apportionment in Guangdong Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(12): 4449-4457(in Chinese).
- [ 10 ] HAAGEN S A J. Chemistry and Physiology of Los Angeles smog [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1952, 44: 1342-1346.
- [ 11 ] MOUSSIOPOULOS N, SAHM P, KESSLER C. Numerical simulation of photochemical smog formation in athens, greece-a case study [J]. Atmospheric Environment, 1995, 29: 3619-3632.
- [ 12 ] SEINFELD J H, PANDIS S N. Atmospheric chemistry and physics [M]. New York: A Wiley Interscience Publication, 1998.
- [ 13 ] VINGARZAN R, TAYLOR B. Trend analysis of ground level ozone in the greater Vancouver Fraser Valley area of British Columbia [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 2159-2171.
- [ 14 ] 赵颖,王飞,温彦平.煤炭工业城市近地面臭氧变化特征及其与气象条件的关联[J].环境化学,2015,34(5):842-852.  
ZHAO Y, WANG F, WEN Y P. Temporal variation of surface ozone in coal industrial city and its relations with meteorological parameters [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(5): 842-852(in Chinese).
- [ 15 ] 程念亮,李云婷,张大伟,等.2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系[J].环境科学,2016,37(6):2041-2051.  
CHENG N L, LI Y T, ZHANG D W, et al. Characteristics of ozone over standard and its relationships with meteorological conditions in Beijing City in 2014 [J]. Environmental Sciences, 2016, 37(6): 2041-2051(in Chinese).
- [ 16 ] PANDIS S N, SEINFELD H. Sensitivity analysis of a chemical mechanism for aqueous-phase atmospheric chemistry [J]. J. Geophys. Res., 1989, 94: 1105-1126.
- [ 17 ] CHAMEIDES W L. The photochemistry of a remote marine stratiform cloud [J]. J. Geophys. Res., 1984, 89: 4739-4755.
- [ 18 ] LELIEVELD J, CRUTZEN P J. Influences of cloud photochemical progresses on tropospheric ozone [J]. Nature, 1990, 343: 227-233.
- [ 19 ] 徐锴,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.  
XU K, LIU Z H, HE M Q, et al. Meteorological characteristics of O<sub>3</sub> pollution near the ground in Summer of Chengdu [J]. Environmental Monitoring in China. 2018, 34(5): 41-50(in Chinese).

- [20] 张春辉, 刘群, 徐徐, 等. 贵阳市臭氧浓度变化及与气象因子的关联性[J]. 中国环境监测, 2019, 35(3): 32-92.  
ZHANG C H, LIU Q, XU X, et al. The correlation between the characteristics of ozone concentration and meteorological factors in Guiyang [J]. Environmental Monitoring in China. 2019, 35(3): 32-92 (in Chinese).
- [21] 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.  
LIU Z, ZHU Y F, GUO W K, et al. Formation potential of ozone and secondary organic aerosol of VOCs from fossil fuel combustion in Lanzhou City [J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2069-2077 (in Chinese).
- [22] 伏志强, 戴春皓, 王章玮, 等. 长沙市夏季大气臭氧生成对前体物的敏感性分析[J]. 环境化学, 2019, 38(3): 531-538.  
FU Z Q, DAI C H, WANG Z W, et al. Sensitivity analysis of atmospheric ozone formation to its precursors in summer of Changsha [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(3): 531-538 (in Chinese).
- [23] 王帅, 王琦, 刘闽, 等. 沈阳环境空气臭氧浓度及累计速率时序曲线模拟研究[J]. 中国环境监测, 2019, 35(5): 26-36.  
WANG S, WANG Q, LIU M, et al. Simulation of environmental air ozone concentration and cumulative rate time series curve in Shenyang [J]. Environmental Monitoring in China, 2019, 35(5): 26-36 (in Chinese).
- [24] 周广强, 耿福海, 许建明, 等. 上海地区臭氧数值预报[J]. 中国环境科学, 2015, 35(6): 1601-1609.  
ZHOU G Q, GENG F H, XU J M, et al. Numerical ozone forecasting over shanghai [J]. China Environmental Science, 2015, 35(6): 1601-1609 (in Chinese).
- [25] 苏超. 海口市环境空气质量、污染特征及其影响因素研究[D]. 海口: 海南大学, 2016.  
SU C. The research on Haikou air quality, Pollution characteristics and its influence factors [D]. Haikou: Hainan University, 2016 (in Chinese).
- [26] 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.  
XU W S, XING Q, MENG X X, et al. Characteristics of ozone pollution in Haikou [J]. Environmental Monitoring in China, 2017, 33(4): 186-193 (in Chinese).
- [27] 赵蕾, 吴坤梯, 陈明. 2013—2016年海口市空气质量特征及典型个例污染物来源分析[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(5): 63-69.  
ZHAO L, WU K T, CHEN M. Characteristics of air quality in Haikou from 2013 to 2016 and pollutant source analysis during typical pollution events [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019, 35(5): 63-69 (in Chinese).
- [28] 冯锦明, 赵天保, 张英娟. 基于台站降水资料对不同空间内插方法的比较[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 261-277.  
FENG J M, ZHAO T B, ZHANG Y J. Intercomparison of spatial interpolation based on observed precipitation data [J]. Climatic and Environmental Research, 2004, 9(2): 261-277 (in Chinese).
- [29] 符传博, 吴润, 丹利. 近 50 年云南省雨日及降水量的气候变化[J]. 高原气象, 2011, 30(4): 1027-1033.  
FU C B, WU J, DAN L. Climatic changes of rainfall and rain days in Yunnan Province [J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(4): 1027-1033 (in Chinese).
- [30] 符传博, 丹利, 吴润, 等. 近 46 年西南地区晴天日照时数变化特征及其原因初探[J]. 高原气象, 2013, 32(6): 1729-1738.  
FU C B, DAN L, WU J, et al. The regional and spatiotemporal characteristics of sunny sunshine duration in Southwest China during recently 46 years and its formation reason [J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(6): 1729-1738 (in Chinese).
- [31] 符传博, 唐家翔, 丹利, 等. 基于卫星遥感的海南地区对流层 NO<sub>2</sub> 长期变化及成因分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1402-1410.  
FU C B, TANG J X, DAN L, et al. Satellite-based long-term trends analysis in Tro NO<sub>2</sub> over Hainan Island and its possible reason [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(4): 1402-1410 (in Chinese).