

衢州市区臭氧浓度变化特征及影响因素^{*}

张超¹ 唐家翔² 张金祥¹ 徐宏辉^{3#} 陆沅泉⁴

(1.浙江省衢州市气象局,浙江 衢州 324000;2.海南省气象台,海南 海口 570203;

3.浙江省气象科学研究所,浙江 杭州 310008;4.浙江省衢州市生态环境监测中心,浙江 衢州 324000)

摘要 利用衢州市区2018—2020年臭氧(O₃)和前体物NO₂逐小时数据及对应的气象要素数据,分析了衢州市区O₃浓度变化特征及影响因素。结果表明:(1)2018—2020年衢州市区O₃质量浓度年均值为55.01~55.89 μg/m³,呈逐年下降趋势,O₃污染最高只到轻度水平(占比4.2%)。(2)衢州市区O₃浓度春季(64.49 μg/m³)>秋季(62.75 μg/m³)>夏季(61.20 μg/m³)>冬季(33.89 μg/m³),夏季O₃浓度偏低主要是因为衢州市区6—7月为梅雨季节。(3)衢州市区O₃浓度日变化呈单峰型分布,白天高,夜间低,最低值出现在6:00前后,最高值出现在15:00前后。(4)日照时数对O₃浓度影响最大,温度、降水量和相对湿度也有显著影响,前体物NO₂与O₃呈现明显的此消彼长关系。

关键词 臭氧 衢州市区 前体物 气象要素

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2023.05.011

Variation of O₃ concentration and the influencing factors in Quzhou urban ZHANG Chao¹, TANG Jiaxiang², ZHANG Jinxiang¹, XU Honghui³, LU Yuanquan⁴. (1. Zhejiang Quzhou Meteorological Service Bureau, Quzhou Zhejiang 324000; 2. Hainan Meteorological Observatory, Haikou Hainan 570203; 3. Zhejiang Institute of Meteorological Science, Hangzhou Zhejiang 310008; 4. Zhejiang Quzhou Ecological Environment Monitoring Center, Quzhou Zhejiang 324000)

Abstract: Based on the hourly data of O₃ and precursor NO₂ in Quzhou urban from 2018 to 2020, as well as the meteorological elements in the corresponding period, the variation of O₃ concentration and the influencing factors was analyzed. Results showed that: (1) from 2018 to 2020, the annual O₃ mass concentration in Quzhou urban was 55.01-55.89 μg/m³, with a decreasing trend. The highest concentration of O₃ was only up to the level of mild pollution, accounting for 4.2%. (2) The seasonal variation of O₃ was spring (64.49 μg/m³) > autumn (62.75 μg/m³) > summer (61.20 μg/m³) > winter (33.89 μg/m³). O₃ in summer was a little bit low because it was plum rain season in June and July. (3) The diurnal variation was unimodal, lower during nighttime and higher during daytime, with the lowest value appearing around 6:00 and the highest value around 15:00. (4) Sunshine duration had the greatest impact on O₃ concentration, and temperature, precipitation and relative humidity had significant impact, too. The precursor NO₂ and O₃ waned and waxed alternatively.

Keywords: O₃; Quzhou urban; precursor; meteorological elements

臭氧(O₃)在对流层中虽然占比很小^[1],但随着人类不断排放氮氧化物(NO_x)等前体物^[2-3],经光化学反应转化成的O₃越来越多,导致对流层中O₃浓度不断升高,成为对流层大气中的污染物。对流层大气中的O₃超过一定浓度不仅会导致植物死亡和农作物减产,还会危害人类呼吸系统^[4-7]。近年,O₃污染问题日益突出,已经成为继细颗粒物(PM_{2.5})后影响空气质量的重要污染物^[8]。

O₃浓度与气象要素息息相关。焦姣等^[9]发现,O₃小时浓度与温度、风速呈正相关,与相对湿度呈

负相关。杨溟鎏等^[10]研究表明,重庆市O₃中重度污染期间,其空间分布受山谷风环流与城市热岛效应影响。刘强军等^[11]研究发现,太行山南麓O₃浓度与温度具有明显正相关,与太阳总辐射也呈正相关。符传博等^[12]研究三亚市的O₃浓度变化特征时发现,稳定的东北风风场、高温低湿的天气是造成O₃污染发生的主要原因。而任万辉^[13]认为,造成沈阳市O₃污染的主要天气类型有暖脊型、均压场型、高空槽型和副热带高压型4种。

长三角是我国工业较为发达的地区,由于NO_x

第一作者:张超,男,1984年生,本科,工程师,主要从事环境与气象观测研究。# 通讯作者。

* 国家重点研发计划项目(No.2016YFC0201900)。

等前体物排放较多, O_3 污染较为严重。很多学者对长三角的 O_3 污染研究发现: 丽水市的 O_3 年际变化呈上升趋势^[14]; 杭州市 O_3 污染指数日均值春季最大^[15], O_3 除本地生成外, 还受到外地污染传输影响^[16]; 南京市 O_3 浓度比北京市、上海市、广州市、成都市、兰州市和武汉市都高^[17]; 台州市^[18] 本地排放源是 O_3 的主要来源, 而且春季贡献率最高。

衢州市位于长三角西南部, 有“四省通衢”之称, 交通发达, 人类活动频繁, 正处在建设“活力新衢州, 美丽大花园”的关键期, 空气质量倍受关注。衢州市及其周边地区氟化工企业较多, 又地处金衢盆地, 污染物容易积累, 然而衢州市的 O_3 污染还是鲜有关注。本研究统计了 2018—2020 年人口聚集的衢州市区 O_3 逐小时浓度, 分析其变化特征, 并与气象要素和前体物进行相关分析, 为掌握衢州市区 O_3 浓度变化规律和影响因素提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料

衢州市区有 3 个环保国控站, 分别为衢州学院、环保大楼和实验学校, 本研究利用该 3 个环保国控站 2018—2020 年的逐小时 O_3 和 NO_2 浓度数据进行分析。

气象要素数据(温度、降水量、相对湿度、日照时数和风向、风速)来自衢州市区的 3 个气象观测站, 其中有 1 个国家基本气象站, 2 个区域气象站(衢州学院气象站和黄家街道气象站), 也为 2018—2020 年逐小时数据, 3 个站点的数据取平均值。

衢州市区环保国控站和气象观测站的位置如图 1 所示。

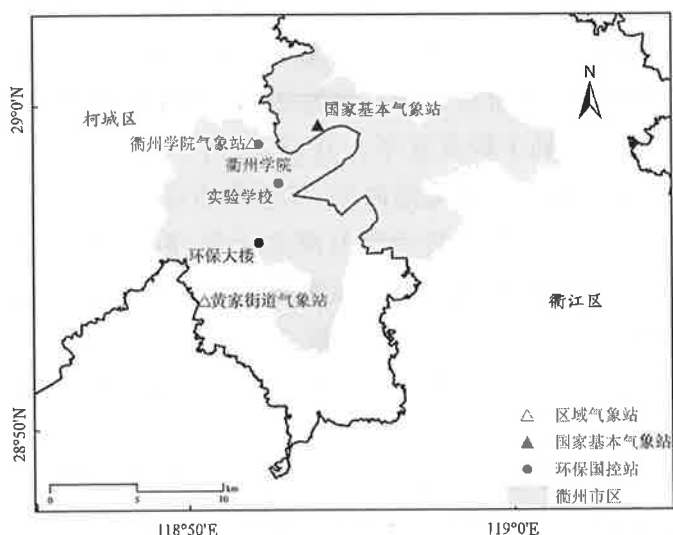


图 1 资料选取站点位置

Fig.1 Location of data selection sites

1.2 方法

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定》(HJ 633—2012), 将 O_3 年均值和日最大 8 h 滑动平均值 (O_{3-8h}) 分成 3 个级别: 一级 ($0 \sim 100 \mu g/m^3$)、二级 ($>100 \sim 160 \mu g/m^3$)、三级 ($>160 \sim 215 \mu g/m^3$), 分别对应优、良、轻度污染。 O_3 年、季、月、日平均值均用逐小时的数据平均得到。

2 结果与讨论

2.1 衢州市区 O_3 浓度年变化

衢州市区 2018—2020 年 O_3 浓度年均值和 O_{3-8h} 各级别天数见表 1。总体来看, O_3 各年均值都处于一级水平(优), 且呈连续下降趋势, 说明衢州市“蓝天保卫战”有一定成效。

统计 O_{3-8h} 各级别的天数发现, 衢州市区 2018—2020 年 O_{3-8h} 一级天数占绝大多数, 达到 60.04%, 三级天数仅占 4.20%。从变化趋势来看, 一级天数逐年上升, 从最低的 2018 年 215 d (占比 59.90%) 上升到 2020 年的 223 d (占比 60.93%); 相反, 三级天数逐年下降。

2.2 衢州市区 O_3 浓度月、季变化

衢州市区各季度 O_3 质量浓度春季最高, 为 $64.49 \mu g/m^3$, 其次秋季 $62.75 \mu g/m^3$, 夏季 $61.20 \mu g/m^3$, 冬季最低, 仅为 $33.89 \mu g/m^3$ 。

从图 2 来看, 衢州市区 O_3 月浓度变化呈现“M”双峰型, 其中峰值出现在 5、9 月。一般而言, 夏季 O_3 浓度高于其他季节, 因为 O_3 浓度与前体物发生光化学反应效率有关, 太阳辐射强、温度高的夏季有利于前体物转化生成 O_3 ^[19-21]。然而衢州市区却是春季与秋季较高, 夏季反而略低, 可见衢州市区 O_3 浓度时间变化规律与其他大多城市具有差异性。

进一步分析衢州市区 O_3 浓度夏季偏低原因, 发现衢州市区的气候特点是 6—7 月为梅雨季节, 降水量比其他月份多, 从而导致该时段太阳辐射较少, 不利于前体物转化生成 O_3 。统计 2018—2020 年衢州市区每月降水量可以看到, 6—7 月的降水量明显大于其他月份。由此可见, O_3 浓度受太阳辐射影响较大, 而降水对太阳辐射影响也较大。但仍需要指出的是, 衢州市区春季降水量比秋季略多, 但 O_3 浓度却比秋季略高, 因此断定 O_3 浓度除了受气象因素影响外, 还存在其他因素影响, 比如春季排放源增多、闪电活动增多、大气湍流运动增多等等, 其中具体机理有待于进一步研究。

表 1 2018—2020 年 O_3 质量浓度年均值和 $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 各级别天数
Table 1 O_3 annual mass concentration and days of $\text{O}_{3-8\text{h}}$ at various levels from 2018 to 2020

年份	年均值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	一级天数/d	一级占比/%	二级天数/d	二级占比/%	三级天数/d	三级占比/%
2018	55.89	215	58.90	127	34.79%	23	6.30
2019	55.56	220	60.27	133	36.44%	12	3.29
2020	55.01	223	60.93	132	36.07%	11	3.01

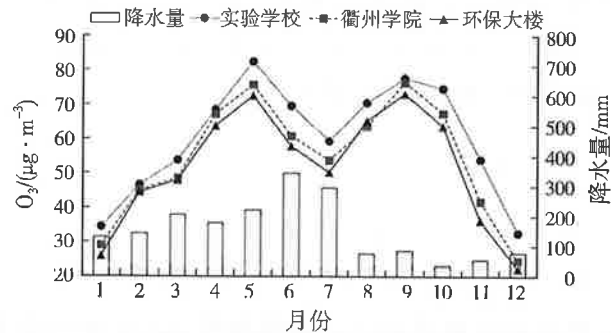


图 2 2018—2020 年 O_3 和降水量月变化
Fig.2 Monthly variation of O_3 and precipitation from 2018 to 2020

2.3 衢州市区 O_3 浓度日变化

2018—2020 年衢州市区 3 个环保国控站的平均 O_3 浓度日变化见图 3。可以看出,衢州市区 O_3 浓度日变化呈现单峰型变化,表现为白天高,夜间低,最低值出现在 6:00 前后,之后迅速上升,直到 15:00 前后达到最高值,随即逐渐下降。衢州市区 O_3 浓度日变化规律与温度和 NO_2 浓度有关。上午随着温度迅速升高, O_3 浓度随之迅速升高,而此时前体物 NO_2 浓度却迅速降低,说明温度升高有利于前体物 NO_2 转化生成 O_3 。温度在 15:00 前后达到最高值, O_3 浓度也在同时达到最高值,而 NO_2 浓度提前降到最低值,说明当温度达到最高值时,前体物 NO_2 转化生成 O_3 的效率最高。夜间,温度、 O_3 浓度、 NO_2 浓度的变化幅度都比较平缓,说明在夜间由于没有太阳辐射,且温度较低,前体物无法转化生成 O_3 ,导致 O_3 浓度较低, NO_2 浓度较高,且波动幅度较小。

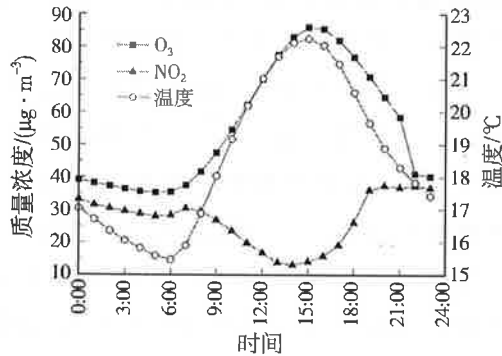


图 3 2018—2020 年 O_3 、 NO_2 和温度的日变化
Fig.3 Daily variation of O_3 , NO_2 and temperature

2.4 O_3 浓度与气象要素的关系

分别统计 $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 一级、二级、三级天的气象要素平均值(见表 2)发现, $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 一级的温度为 $16.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 三级温度升高到了 $25.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,可见温度升高会提

高前体物转化生成 O_3 的效率。 $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 一级、二级、三级日照时数依次为 5.1、7.6、9.6 h,日照是光化学反应的基本条件,日照时数越长,越有利于前体物转化成 O_3 。 $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 一级的相对湿度为 82.4%, $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 三级降为 60.7%,说明空气干燥有利于 O_3 生成。 $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 一级的降水量 12.0 mm 下降到 $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 三级的 1.1 mm,进一步验证了降水量增多造成太阳辐射减少,从而影响前体物转化生成 O_3 。 $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 一级、二级、三级的风速分别为 2.3、2.1、2.2 m/s,基本没有差别。

5 种气象要素除了风速以外,其余 4 种均通过 0.01 的显著性检验,与 O_3 浓度相关系数最大的是日照时数。

综合分析气象要素与 O_3 浓度的关系可知,在干燥、阳光充足、高温少雨的气象条件下, O_3 浓度高;相反,在潮湿、日照较少、低温多雨的气象条件下, O_3 浓度低。

2.5 O_3 浓度与前体物 NO_2 浓度的关系

分别统计 $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 一级、二级、三级天的 NO_2 平均浓度(见表 3)发现, $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 一级、二级、三级的 NO_2 质量浓度呈下降趋势,由 $30.75\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 下降到 $23.17\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,这是因为 NO_2 转化生成 O_3 后,其浓度下降,因此 NO_2 浓度和 O_3 浓度呈显著负相关关系,通过 0.01 的显著性检验,相关系数为 -0.424,反映出衢州市区 O_3 浓度主要由本地生成。

2.6 典型 O_3 污染过程分析

2019 年 9 月下旬衢州市区持续多日处于副热带高压控制下,长时间为高温、干燥、无降水天气,太阳辐射强,非常有利于前体物转化生成 O_3 ,所以 O_3 浓度一直处于较高水平。直至 10 月 1 日,台风“米娜”靠近浙江中北部沿海区,尽管衢州市区没有受台风环流影响,但也转为阴有降水天气,温度降低,使得 O_3 前体物转化减弱, O_3 浓度降低。此次污染过程中 28 日、29 日、30 日最大 $\text{O}_{3-8\text{h}}$ 分别达到了 189.00、194.01、185.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,均为三级水平(轻度污染)。

图 4 分析了 9 月 28 日 6:00 至 10 月 1 日 23:00 的逐时 O_3 浓度与气象要素。从 9 月底的每日变化可以看出,7:00 温度开始上升,相对湿度下降, O_3 浓

表 2 2018—2020 年 O_{3-8 h} 分级的气象要素统计
Table 2 Statistics of meteorological elements under different O_{3-8 h} levels from 2018 to 2020

项目	日照时数/h	相对湿度/%	降水量/mm	温度/℃	风速/(m·s ⁻¹)
O _{3-8 h} 一级	5.1	82.4	12.0	16.3	2.3
O _{3-8 h} 二级	7.6	69.2	8.7	23.4	2.1
O _{3-8 h} 三级	9.6	60.7	1.1	25.9	2.2
相关系数 ¹⁾	0.568 *	-0.545 *	-0.184 *	0.506 *	-0.047

注: ¹⁾ * 表示通过 0.01 的显著性检验, 相关系数无量纲。表 3 同。

表 3 2018—2020 年 O_{3-8 h} 分级的 NO₂ 统计
Table 3 Statistics of NO₂ under different O_{3-8 h} levels from 2018 to 2020

项目	O _{3-8 h} 一级/(μg·m ⁻³)	O _{3-8 h} 二级/(μg·m ⁻³)	O _{3-8 h} 三级/(μg·m ⁻³)	相关系数
数值	30.75	25.83	23.17	-0.424 *

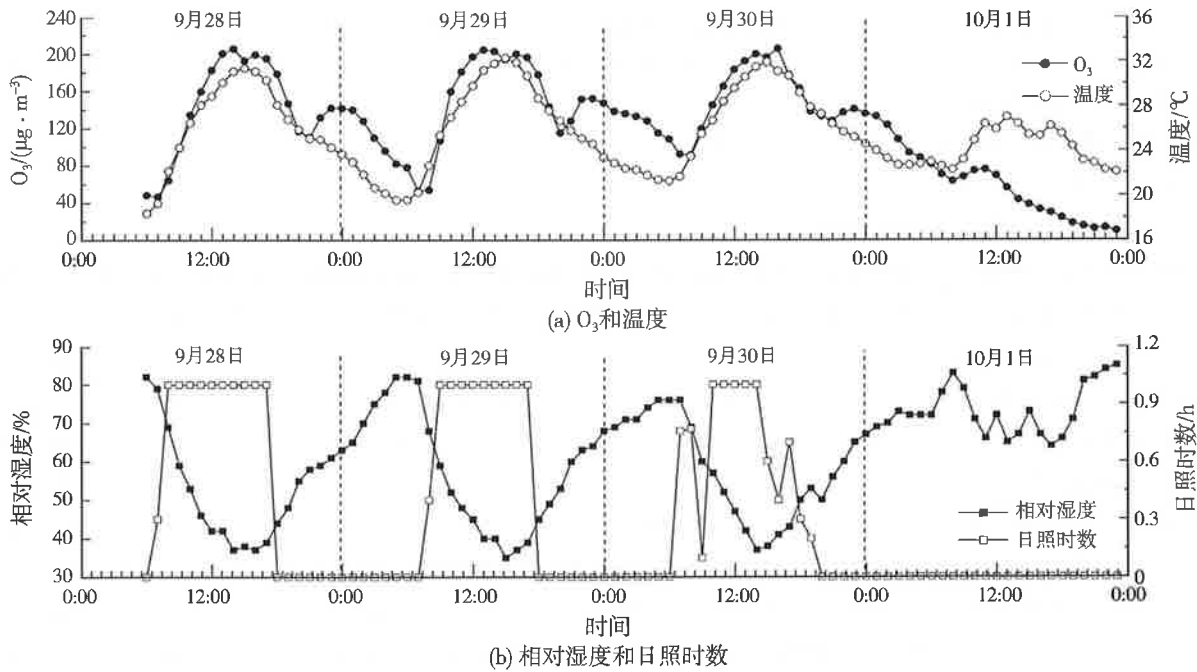


图 4 衢州市区典型 O₃ 污染过程 O₃ 与气象要素逐时变化

Fig.4 O₃ and meteorological elements hourly variation during a typical O₃ pollution in Quzhou urban

度随之快速增长;到了午后,以上变化相反。然而 10 月 1 日不再出现前面 3 天的日变化规律,表现为随着温度升高, O₃ 浓度不是显著上升,反而下降。对比 9 月底与 10 月 1 日的气象要素发现,9 月底日照时数每天有 7~9 h,而 10 月 1 日降到了 0 h,并且相对湿度一直都较高,说明日照时数对 O₃ 浓度具有重要影响,表 2 日照时数相关系数绝对值最大也说明了这一点。

3 结 论

(1) 2018—2020 年衢州市区 O₃ 质量浓度年均值为 55.01~55.89 μg/m³,呈逐年下降趋势,只有 4.20% 的时间处于三级水平(轻度污染),其他均达到优良。

(2) 衢州市区 O₃ 季节变化为:春季(64.49 μg/m³) > 秋季(62.75 μg/m³) > 夏季(61.20 μg/m³) > 冬季(33.89 μg/m³),夏季 O₃ 浓度偏低主

要是因为衢州市区 6—7 月为梅雨季节。

(3) 衢州市区 O₃ 浓度日变化呈现单峰型分布,有白天高,夜间低的明显特征,最低值出现在 6:00 前后,最高值出现在 15:00 前后。

(4) 日照时数对 O₃ 浓度的影响最大,温度、相对湿度和降水量也有显著影响。前体物 NO₂ 与 O₃ 呈现明显的此消彼长关系。

参考文献:

[1] MA Z Q, XU H H, MENG W, et al. Vertical ozone characteristics in urban boundary layer in Beijing[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(7): 5449-5460.
[2] 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 等. 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 686-694.
[3] VELLINGIRI K, KIM K H, LIM J M, et al. Identification of nitrogen dioxide and ozone source regions for an urban area in Korea using back trajectory analysis [J]. Atmospheric Research, 2016, 176: 212-221.

(下转第 660 页)