

嘉兴市臭氧污染特征及其与气象条件的关系*

李莉¹, 杨闻达^{2,3}, 吕升¹, 吴伟超¹, 袁婧¹, 谢韶青⁴,
吴兑^{2,3}, 李梅^{2,3}, 曹明阳⁵, 程鹏^{2,3}

1. 浙江省嘉兴生态环境监测中心, 浙江 嘉兴 314000
2. 暨南大学质谱仪器与大气环境研究所, 广东 广州 510632
3. 广东省大气污染在线源解析系统工程技术研究中心, 广东 广州 510632
4. 嘉善县气象局, 浙江 嘉兴 314000
5. 广州禾信仪器股份有限公司, 广东 广州 510530

摘要: 利用 2014–2018 年嘉兴市 14 个监测站的臭氧 (O_3) 观测资料, 分析了嘉兴市 O_3 污染的时间变化趋势和空间分布特征, 并讨论了温湿度和 O_3 污染的关系。结果表明: 嘉兴市近五年来环境空气质量超标天数有所下降, 但 O_3 超标天数占比却在逐渐升高, 从 2014 年的 43% 上升到 2018 年的 64%; 嘉兴市 O_3 浓度夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, O_3 污染主要集中在春末至早秋, 4–9 月 O_3 -8h 月度超标天数平均可达到 8 天以上; 嘉兴市 O_3 污染主要集中在以市本级为中心的城市中、北部地区, 清河小学站的 O_3 小时浓度高值 ($>200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 占比最高, 7–9 月高值持续时间最长; 温度、相对湿度和 O_3 污染的相关性显著, 气温高于 33°C 或相对湿度低于 50% 时, O_3 浓度及超标率均会显著上升。

关键词: 臭氧; 超标率; 温度; 相对湿度; 嘉兴市

中图分类号: X515 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2022) 02-0147-07

Characteristics of ozone pollution and its relationship with meteorological factors in Jiaxing city

LI Li¹, YANG Wenda^{2,3}, LU Sheng¹, WU Weichao¹, YUAN Jing¹, XIE Shaoqing⁴,
WU Dui^{2,3}, LI Mei^{2,3}, CAO Mingyang⁵, CHENG Peng^{2,3}

1. Jiaxing Eco-Environmental Monitoring Center of Zhejiang Province, Jiaxing 314000, China
2. Institute of Mass Spectrometry and Atmospheric Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China
3. Guangdong Provincial Engineering Research Center for On-line Source Apportionment System of Air Pollution, Guangzhou 510632, China
4. Meteorological Bureau of Jiashan County, Jiaxing 314000, China
5. Guangzhou Hexin Instrument Co. Ltd., Guangzhou 510530, China

Abstract: Based on the ozone (O_3) observation data of 14 monitoring stations in Jiaxing city from 2014 to 2018, the characteristics of the temporal variations and spatial distribution of O_3 were analyzed, then the correlation between temperature, humidity and O_3 concentration were discussed. Results indicate that the number of days that the air quality index (AQI) exceeded the standard per year

* 收稿日期: 2020-09-21 录用日期: 2020-10-11 网络首发日期: 2021-05-28

基金项目: 广州市科技计划 (201804010115)

作者简介: 李莉 (1980 年生), 女; 研究方向: 环境监测和仪器分析; E-mail: 425754445@qq.com

通信作者: 程鹏 (1981 年生), 男; 研究方向: 大气化学; E-mail: chengp@jnu.edu.cn

decreased over the past five years. However, the proportion of days that the O_3 exceeded the standard gradually increased, from 43 % in 2014 to 64 % in 2018. O_3 concentration in Jiaxing City had seasonal variations with the order of summer>spring>autumn>winter, and the O_3 pollution mainly occurred between late spring and early autumn. Correspondingly, the number which days of exceeding the O_3 -8h standard from April to September reached 8 days per month or more. Spatially, the O_3 pollution in Jiaxing was mainly distributed in the central and northern areas of the city. At the Qinghe primary school site, the fraction of the 1h- O_3 concentrations that exceeded $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ was the highest among all stations, and the hourly peak O_3 concentration-area lasted the longest from July to September. The temperature and relative humidity were significantly correlated with ozone concentrations. O_3 concentrations as well as the ratios of exceeding the standard increased significantly when temperature was above 33°C or the relative humidity was lower than 50 %.

Key words: ozone; over-standard rate; temperature; relative humidity; Jiaxing city

O_3 是城市光化学烟雾的主要产物之一,是氮氧化物、挥发性有机物(VOCs)等一次污染物通过光化学反应产生,其形成受前体物排放、化学转化及气象驱动的共同作用^[1-4]。某城市或地区的臭氧来源大致包括全球背景、区域输送和本地生成三个方面,短期臭氧日变化主要受气象因素影响,长期臭氧变化则受气候及排放的双重影响,具体机制较为复杂且存在争议^[5-7]。 O_3 会导致大气氧化性增强,对人体健康和生态系统都会造成较大的危害^[8-10]。因此, O_3 被WHO和世界各国列入需要控制的主要大气污染物之一^[11]。

20世纪50年代美国洛杉矶区域发生了持续的光化学烟雾污染后,欧、美逐渐加强了对 O_3 及其前体污染物的观测和控制研究。经过近70年的治理,欧美发达国家臭氧污染总体呈稳中有降的趋势,与我国同处东亚季风区的日本其臭氧污染上升趋势已基本得到遏制。随着大气“国十条”的落实,我国从2013年才开始在重点城市广泛开展臭氧连续在线监测。2013-2019年,全国74个重点城市年均细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)浓度下降了47.2%,城市臭氧年评价值(日最大8h滑动平均90百分位浓度,MDA8-90)上升了28.8%。其中,京津冀、长三角、珠三角和成渝地区分别上升了34.4%、25.7%、20.3%和14.1%^[5]。臭氧污染已成为制约我国空气质量持续改善的关键问题,开展臭氧污染防治迫在眉睫^[12-17]。嘉兴地处长江下游太湖流域杭嘉湖平原,与苏杭沪三个大城市之间的距离均不到100 km^[18-21]。近年来,嘉兴市城市空气质量整体向好,但 O_3 污染日渐突出,自2015年以来 O_3 已经超过 $\text{PM}_{2.5}$ 成为嘉兴市的首要污染物,拖累了空气质量优良率。针对嘉兴市 O_3 污染日趋严重

的现状,本文通过分析2014-2018年连续5年嘉兴市 O_3 观测资料,获得了嘉兴市 O_3 的变化趋势以及 O_3 污染的空间分布特征,并讨论了嘉兴市 O_3 污染和气象条件的关系,以期为嘉兴市乃至长三角 O_3 污染治理工作提供科学依据。

1 数据来源及处理

1.1 数据来源与分析方法

大气常规污染物浓度数据和气象数据来源于嘉兴市环境监测中心站提供的全市14个环境空气质量监测站点位2014年1月1日至2018年12月31日的监测数据,这14个监测点包括主城区3个国控点(清河小学、嘉兴学院和南湖区残联)和其他各区县11个省控点(气象观测台、嘉善监测大楼、环保大楼、高级中学、南北湖、海宁监测大楼、硖石街道、陆家桥村、东湖、振东新六中、果园桥水厂),点位具体位置见图1。

O_3 评价指标有 O_3 日最大8h质量浓度滑动平均值(O_3 -8h), O_3 日最大1h质量浓度(O_3 -1h)。数据分析主要对大气 O_3 浓度的90百分位数浓度进行统计分析;各指标的含义、计算方法和评价方法详见《环境空气质量标准》(GB3095-2012)和《环境空气质量指数(AQI)技术规定》(HJ 633-2012)^[22-23]。季节划分:3-5月为春季,6-8月为夏季,9-11月为秋季,12月及次年1-2月为冬季^[17]。

1.2 观测仪器

O_3 浓度测定采用Thermo Fisher Model 49i O_3 分析仪。利用 O_3 分子在紫外光的照射下,会吸收254 nm的紫外光, O_3 的浓度跟紫外光的衰减程度符合Lambert-Beer定律。仪器连续24 h在线监测,每5

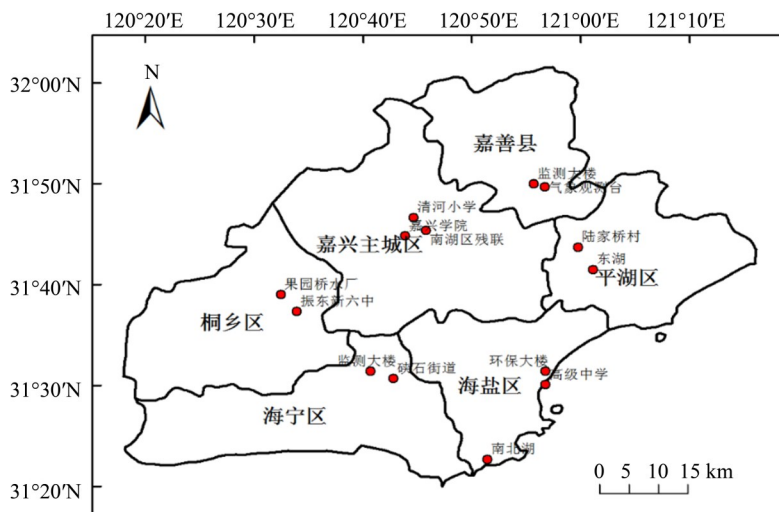


图1 嘉兴市监测点位分布

Fig. 1 Distribution of control stations in Jiaxing

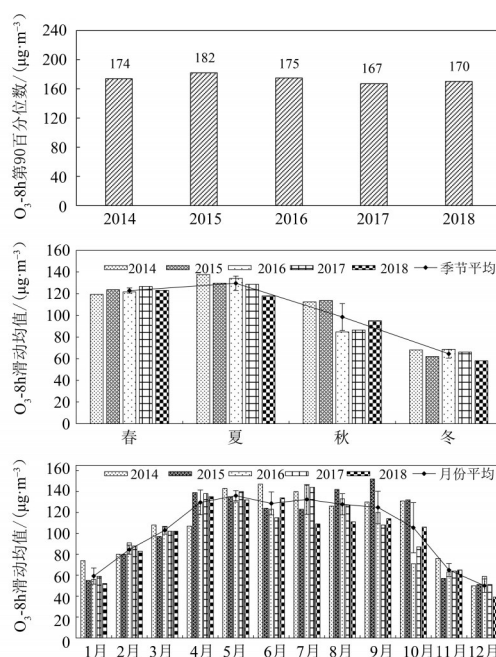
min 读取 1 次数据。设备运行期间根据《环境空气质量自动监测技术规范》(HJ/T 193-2005)^[24] 定期校准和质控, 每半年使用臭氧标准参考光度计(NIST Standard Reference Photometer, 简称 NIST SRP) 对各监测站臭氧校准仪开展臭氧传递标准。每 2 天对 O₃ 分析仪进行日常零点/跨度检查 1 次、每 2 周对精度检查 1 次和每 6 个月对多点校准检查 1 次, 以保证仪器观测数据的准确性, 并按照《环境空气质量监测规范》对异常值取舍进行数据质量控制, 确保分析的数据具有表征意义。

2 结果讨论

2.1 嘉兴市 O₃ 浓度时间变化规律

嘉兴市近些年来空气质量整体好转, 但 O₃ 浓度持续高位。以嘉兴市本级三个国控点数据(嘉兴学院、南湖区残联和清河小学)空气质量监测站近 5 年监测数据分析嘉兴市本级的年际、季度、月份空气质量变化趋势。图 2 中, 2014-2018 年 O₃-8h 第 90 百分位数持续超标, 整体呈现稳定趋势, 其中 2015 年浓度最高, 高达 182 μg/m³。从季节分布来看, 近 5 年 O₃-8h 值都在夏季最高, 可以达到 (130±7) μg/m³; 春季略低((123±2) μg/m³), 秋季更低, 冬季最低。其中, 秋季从 2015 年后出现明显的降幅。夏季节嘉兴市天气以晴好为主, 太阳紫外辐射强, 温度较高, 有利于 O₃ 前体物 VOCs、NO_x 发生光化学反应, 导致 O₃ 生成。此外, 嘉兴市东临大海, 地处北亚热带南缘, 属东亚季风区, 夏季台风较多, O₃ 污染过程与东海的台风热带气旋密切相关。受台风外围下沉气流的影响,

嘉兴为晴热高温天气, 有利于 O₃ 的光化学反应生成。从月际变化可以看出, 近 5 年来 O₃-8h 值月际变化呈凸型, O₃-8h 高值主要集中在 4-9 月, 与季节高值相对应, 4-9 月 O₃-8h 值能达到 (130±11) μg/m³。

图2 嘉兴市本级 O₃ 年际、季度、月份变化特征Fig. 2 Characteristics of annual, quarterly and monthly changes of O₃ in Jiaxing

2.2 嘉兴市 O₃ 超标情况分析

2014-2018 年间嘉兴市本级超标天数和 O₃-8h 值超标天数的年际变化如图 3 所示。从图中可以看出, 嘉兴市近五年来空气质量污染情况持续改善,

超标天数得到缓解,但 O_3 超标天数占比却在逐渐升高。空气质量超标天数和在2015年达到近五年峰值129天之后,超标天数持续下降;2018年降至73天,超标率降低了15%。与空气质量超标天数不同的是,在此五年内 O_3 超标天数在2015年达到最高71天后未持续下降,而是在40天至55天之间波动; O_3 超标天数占总超标天数的比例由2014年的43%上升到2018年的64%。这说明2015–2018年整体污染情况好转,但 O_3 污染态势依然严峻。因此,开展 O_3 污染治理、降低 O_3 污染程度、控制 O_3 超标天数对减少总超标天数有着显著的正效应。

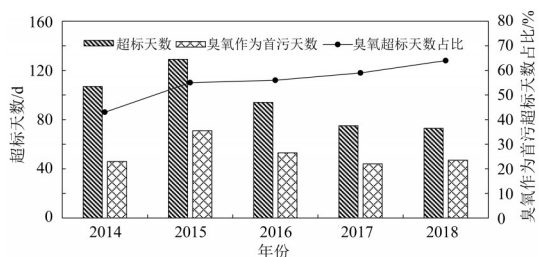


图3 2014–2018年主城区空气质量超标天数和 O_3 超标天数
Fig. 3 Days of air quality and O_3 exceeding standards from 2014 to 2018

2014–2018年嘉兴市 O_3 超标天数月际变化见图4。由图中可以看出,近五年来 O_3 超标天数与图1中 O_3 -8h值月际变化趋势一致,超标天主要集中在4–9月,即春末至早秋。且,近五年5月,7月,8月这3个月份 O_3 -8h值超标总天数最高,分别为49天、46天和47天。从月度平均超标数来看,4–9月 O_3 -8h值月度超标天数平均可达到8天以上,月度平均超标天数最高在9天以上的也是5月,7月和8月。

2.3 嘉兴市各站点 O_3 污染特征分析

2014–2018年嘉兴市各站点 O_3 -8h第90百分位数的空间分布特征,如图5所示。从图中可看出,

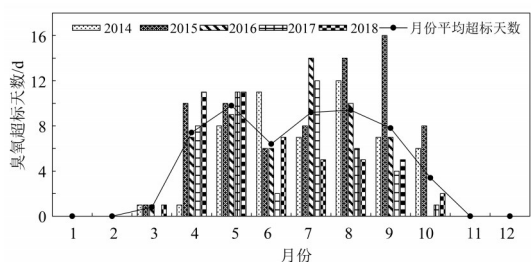


图4 2014–2018年主城区 O_3 平均浓度和超标天数月际变化
Fig. 4 Monthly changes of average O_3 concentration and days exceeding the standard from 2014 to 2018

2014年中心城区周边的嘉兴学院、清河小学、东部的陆家桥村站和桐乡的果园桥水厂等测点附近区域 O_3 浓度较高,而桐乡的振东新六中和海宁监测大楼站点的浓度较低,东部和南部区域 O_3 浓度也相对较低;2015年中心城区周边的嘉兴学院、清河小学、北部站和西部的果园桥水厂、南部的硖石街道、嘉善的气象观测台等测点附近区域 O_3 浓度较高,南部浓度偏低;2016年 O_3 浓度空间分布总体上是中北部测点 O_3 浓度较高,主要分布在中心区域的嘉兴学院、清河小学、北部站和嘉善的气象观测台、善西测点附近区域;南部的 O_3 浓度较低。从2017年 O_3 浓度空间分布来看,中北部的嘉兴学院、清河小学、南湖区残联与北部站站点较高,海宁监测大楼与硖石街道 O_3 浓度次之,而振东新六中站点、南部与东南部南北湖、高级中学、环保大楼等站点的 O_3 浓度较低。2018年 O_3 高值区仍然集中在中北部的清河小学、南湖区残联、嘉兴学院,另外东北部的气象观测台浓度也较高,南部的南北湖附近也有一定的高值分布。总而言之,近五年嘉兴市本级 O_3 浓度一直居高不下,主要集中在中北部市本级地区,主要原因是由于夏秋季嘉兴盛行东南风,而市本级处于夏秋季节主导风向的下风向,东南部的海盐区和平湖区位于城市主导风向的上风向,区域内分布较多的石化和工业园区,上风向排放较多的前驱物 NO_x 、 $VOCs$ 在主导风向的作用下随风输送到市本级,经数小时生成臭氧,从而使得中北部市本级地区臭氧浓度维持较高水平。

进一步,将嘉兴市各个监测点位的 O_3 -1h值按照 $<100 \mu g/m^3$ 、 $100 \sim 160 \mu g/m^3$ 、 $160 \sim 200 \mu g/m^3$ 、 $>200 \mu g/m^3$ 四个范围进行归类统计,结果如图6所示。图中各站点柱状图从左到右依次为2014–2018年。图中,近五年不同监测点位 O_3 -1h $>200 \mu g/m^3$ 的占比率主城区三站点(清河小学、南湖区残联、嘉兴学院)最高,均在2%以上。其中,清河小学为所有站点中最高的,达到2.22%;其次为南湖区残联站点。 O_3 -1h $<100 \mu g/m^3$ 占比率最高的是海盐区的三个站点(海盐高级中学、海盐环保大楼、海盐南北湖)。其中,海盐高级中学达到了86.1%。平湖陆家桥村在2014年受到了严重的 O_3 污染, O_3 -1h $<100 \mu g/m^3$ 的占比率仅有46.7%,之后 O_3 -1h值基本处于全市的平均水平。

统计分析2014–2018年嘉兴市各个监测点位7–9月 O_3 超标日中 O_3 -1h $>100 \mu g/m^3$ 的时间,如图7

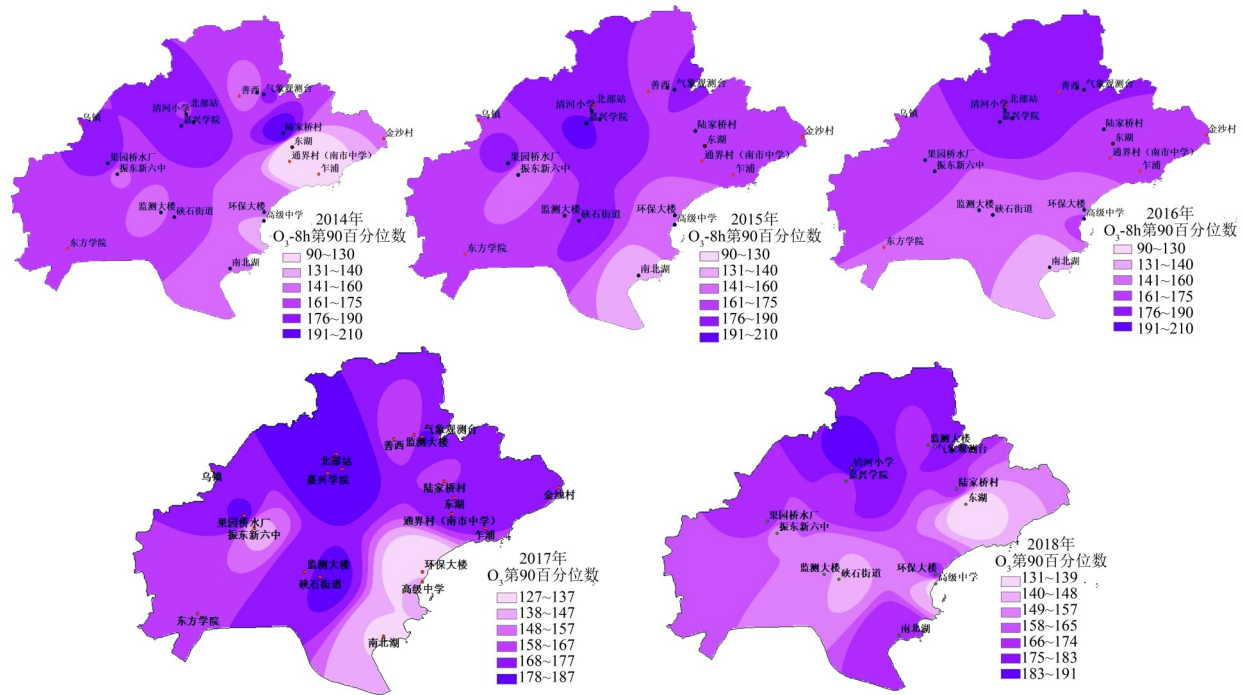


图5 2014-2018年嘉兴市空气中O₃浓度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of O₃ concentration in the air of Jiaxing from 2014 to 2018

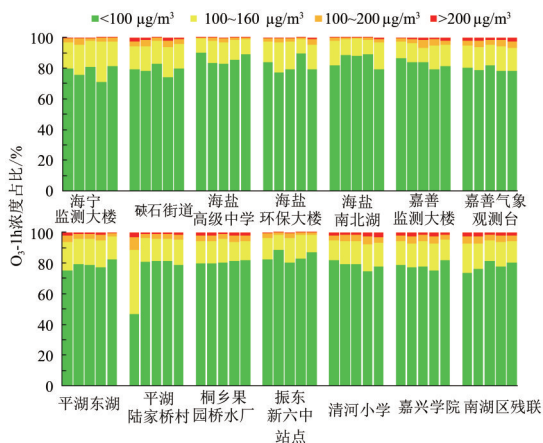


图6 2014-2018年各站点O₃-1h浓度占比

Fig. 6 Proportion of O₃-1h concentration of each station from 2014 to 2018

所示。可以看出, 清河小学 O₃ 峰值持续时间最长 (9 h), 嘉善环保大楼、嘉兴学院、平湖陆家桥村、嘉善监测大楼、气象观测台、水果园桥厂、南湖区残联和硖石街道 O₃ 峰值持续时长较长 (7 h)。而桐乡振东新六中和海盐南北湖 O₃ 峰值持续时长较短, 持续时间分别为 2 h 和 3 h。总体而言, 嘉兴市所有站点 O₃ 浓度升高时间均在 10: 00-12: 00, 上升的原因主要是由于光照强度的增加, 持续时长为 2-9 h 不等, 说明本地 O₃ 污染前体物质的排放不稳定, 不同地区可能存在不同来源。

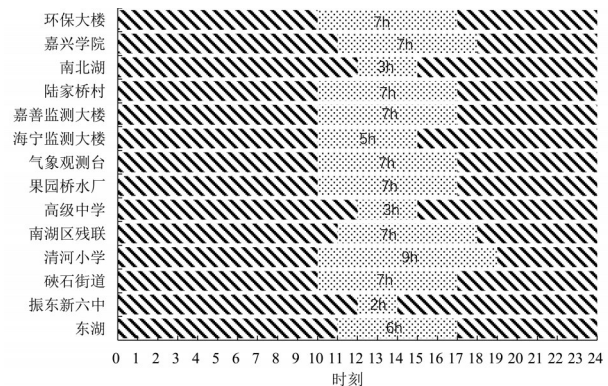


图7 2014-2018年各站点7-9月O₃-1h > 100 μg/m³的时间
Fig. 7 Duration of O₃-1h > 100 μg/m³ from July to September at each station from 2014 to 2018

2.4 气象因素对O₃浓度的影响

温度和湿度是支配 O₃ 生成的关键气象因子。温度对 O₃ 浓度的影响主要是影响 O₃ 的光化学反应生成速率, 且较高的气温往往对应着较强的太阳辐射 [25-28]。基于 2018 年的气象因子 (温度、相对湿度) 和 O₃ 的观测数据, 分析气温和相对湿度对嘉兴市 O₃ 污染的影响。如图 8 所示, 随着气温的增加, O₃-1h 平均值增加; 35 °C、36 °C 对应 O₃-1h 平均值最高, 分别为 (163±41)、(163±40) μg/m³。高温天气下, 尤其是气温高于 33 °C 时, 嘉兴地区更易出现 O₃ 污染现象。不同于气温, 随着相对湿度的增加, 尤其是在相对湿度较高时, O₃ 平均浓度

呈现显著的下降趋势。当相对湿度高于 80% 时, O_3 -1h 平均浓度下降至 $(55 \pm 33) \mu\text{g}/\text{m}^3$; 当相对湿度低于 60% 时, O_3 -1h 平均浓度在 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 其中, 当相对湿度为 30%~50% 时, O_3 平均浓度最高, 即: 较低的相对湿度有利于 O_3 污染的形成, 因其既能保证有充足的水分子提供光解形成 OH 等自由基, 也有较强的太阳辐射以促进光化学反应进行。

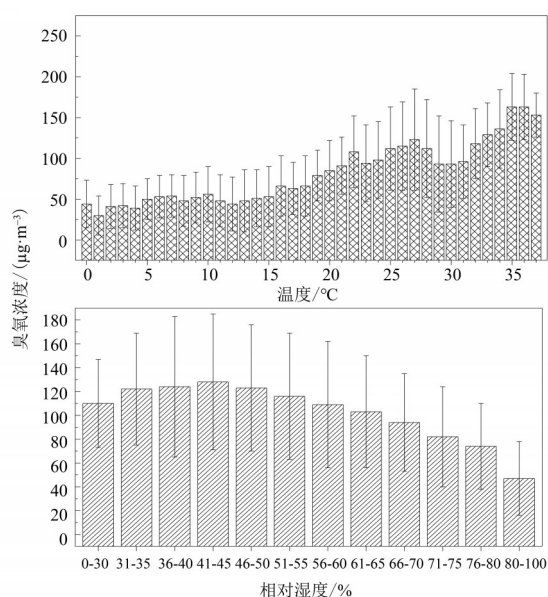


图 8 2018 年不同温度和湿度下的 O_3 平均浓度

Fig. 8 The average concentration of O_3 at different temperatures and humidity in 2018

夏天正值高温炎热, 易发生 O_3 浓度高值事件。以 2018 年 8 月 1 日至 9 月 10 日观测期间为参考, 统计白天光化学反应阶段 (取 8: 00-18: 00) O_3 -1h 平均浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 与大气温度和湿度的关系、对应大气温度和湿度下的 O_3 -1h 平均浓度超标率。不同温度下的 O_3 超标率往往能较为直观地体现夏秋季 O_3 浓度随大气温度的大致变化趋势。根据我国环境空气质量二级标准 (GB3095-2012) 定义 O_3 小时浓度限值超过 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 为小时超标^[22], 结果如图 9 所示。结果表明: 当温度在 33°C 以下, 不易诱发 O_3 的生成, 超标率低于 30%; 当大气温度大于 33°C , O_3 -1h 浓度超标率随温度增高显著上升, 到达 34°C 后超标率能达到 70% 以上; 当大气相对湿度低于 50%, O_3 平均浓度超标率在 60% 以上; 相对湿度高于 80%, 超标率低于 10%, 发生 O_3 污染的概率较小。

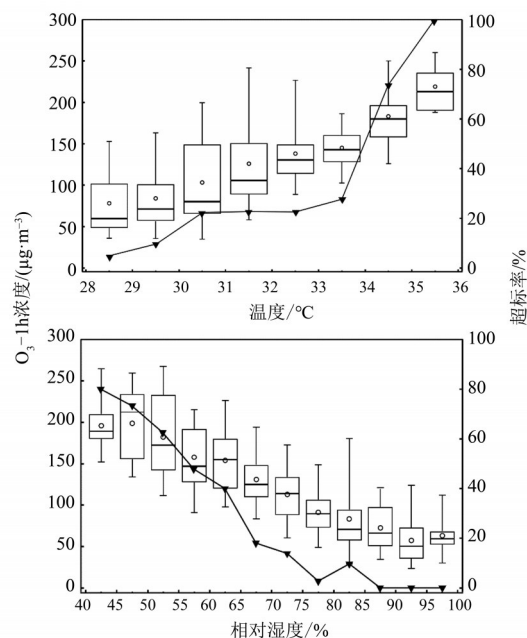


图 9 不同温湿度条件下的 O_3 平均浓度与 O_3 超标率

Fig. 9 Average O_3 concentration and O_3 over-standard rate at different temperatures and humidity

3 结 论

(1) 2014-2018 年间, 从年际变化看, 嘉兴市 O_3 -8h 第 90 百分位数持续超标, 整体呈现稳定趋势; 从季节变化看, 夏季最高、春季其次、冬季最低; 从月际变化看, 高值主要集中在 4-9 月份, 与季节高值相对应 O_3 -8h 能达到 $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

(2) 近五年来, 嘉兴市空气质量污染情况持续改善, 超标天数得到缓解, 但 O_3 超标天数占比却在逐渐升高, 从 2014 年的 43% 上升到 2018 年的 64%。超标天主要集中在 4-9 月, 即春末至早秋, 4-9 月 O_3 -8h 月度超标天数平均可达 8 天以上。

(3) 通过分析 O_3 的空间分布特征发现: 嘉兴市 O_3 污染主要集中在以市本级为中心的城市中、北部地区; 不同监测点位 O_3 -1h $> 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 占比最高、7-9 月所有站点中 O_3 -1h 超过 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 持续时间最长的站点均为清河小学。

(4) 温度和相对湿度对嘉兴 O_3 影响较为显著, 气温高于 33°C 或相对湿度低于 50% 时, O_3 浓度及超标率均会显著上升; 气温到达 34°C 后, O_3 -1h 超标率能达到 70% 以上, 相对湿度低于 50% 时, O_3 平均浓度超标率在 60% 以上。

参考文献:

- [1] 唐孝炎,张远航,邵敏. 大气环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [2] SHAO M, TANG X Y, ZHANG Y H, et al. City clusters in China: air and surface water pollution [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4 (7): 353-361.
- [3] JERRETT M, BURNETT R T, POPE C A, et al. Long-term ozone exposure and mortality [J]. *New England Journal of Medicine*, 2009, 360(11): 1085-1095.
- [4] STREETS D G, FU J S, JANG C, et al. Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(3):480-492.
- [5] 张远航,郑君瑜. 中国大气臭氧污染防治蓝皮书[R]. 中国环境科学学会,2020.
- [6] HE J, GONG S, YU Y, et al. Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 223:484-496.
- [7] CHEN Z, LI R, CHEN D, et al. Understanding the causal influence of major meteorological factors on ground ozone concentrations across China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242:118498.
- [8] 孔琴心,刘广仁,李桂忱. 近地面臭氧浓度变化及其对人体健康的可能影响[J]. *气候与环境研究*, 1999, 4(1):61-66.
- [9] TURNER M C, JERRETT M, POPE C A, et al. Long-Term ozone exposure and mortality in a large prospective study [J]. *American Journal of Respiratory & Critical Care Medicine*, 2015, 193(10):1134-1142.
- [10] ERIKA V S. Trends in surface level ozone observations from human-health relevant metrics: results from the tropospheric ozone assessment report (TOAR) [C]// *Agu Fall Meeting*. AGU Fall Meeting Abstracts, 2017.
- [11] BROOK R D, BROOK J R, URCH B, et al. Inhalation of fine particulate air pollution and ozone causes acute arterial vasoconstriction in healthy adults [J]. *Circulation*, 2002, 105(13): 1534-1536.
- [12] KATSOUYANNI K, TOULOUMI G, SAMOLI E, et al. Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA2 project [J]. *Epidemiology*, 2001, 12(5): 521-531.
- [13] ZHANG Y, ZHU X, SLANINA S, et al. Aerosol pollution in some Chinese cities [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2004, 76(6):1227-1239.
- [14] LIN W, XU X, GE B, et al. Characteristics of gaseous-pollutants at Gucheng, a rural Site Southwest of Beijing [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(D2):14.
- [15] 陆克定,张远航,苏杭,等. 珠江三角洲夏季臭氧区域污染及其控制因素分析[J]. *中国科学:化学*, 2010(4): 407-420.
- [16] 沈劲,陈多宏,汪宇,等. 基于情景分析的珠三角臭氧与前体物排放关系研究[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(10):1925-1932.
- [17] DING A, FU C, YANG X, et al. Ozone and fine particle in the Western Yangtze River Delta: an overview of 1-year data at the SORPES Station [J]. *Atmospheric Chemistry Physics*, 2013, 13(11): 5813-5830.
- [18] 陈超,林旭,叶辉,等. 杭州市臭氧污染特征及过程分析[J]. *中国环境监测*, 2019, 35(3):73-81.
- [19] 齐冰,牛彧文,杜荣光,等. 杭州市近地面大气臭氧浓度变化特征分析[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(2):443-451.
- [20] 吕升,沈利娟,李莉,等. 嘉兴市冬季不同空气质量等级下大气污染物的分布特征[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(6):1037-1048.
- [21] 邹巧莉,孙鑫,田旭东,等. 嘉善夏季典型时段大气VOCs的臭氧生成潜势及来源解析[J]. *中国环境监测*, 2017, 33(4):91-98.
- [22] 环境保护部科技标准司. 环境空气质量标准:GB3095-2012[S]. 北京:中国环境科学出版社,2012.
- [23] 环境保护部科技标准司. 环境空气质量指数(AQI)技术规范:HJ 633-2012[S]. 北京:中国环境科学出版社,2012.
- [24] 环境保护部科技标准司. 环境空气质量自动监测技术规范:HJ/T 193-2005[S]. 北京:中国环境科学出版社,2005.
- [25] ELMINIR H K. Dependence of urban air pollutants on meteorology [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 350(1/2/3): 225-237.
- [26] BOTLAGUDURU V S V, KOMMALAPATI R R, HUQUE Z. Long-term meteorologically independent trend analysis of ozone air quality at an urban site in the greater houston area [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2018, 68(10):1051-1064.
- [27] 唐贵谦,李昕,王效科,等. 天气型对北京地区近地面臭氧的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(3):573-578.
- [28] 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.