

王陆潇,蔡哲,刘海涵,等.重庆夏季不同气象条件下的臭氧特征[J].海洋气象学报,2024,44(3):68-77.
WANG Luxiao, CAI Zhe, LIU Haihan, et al. Characteristics of ozone under different meteorological conditions in Chongqing during summer[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(3): 68-77. DOI:10.19513/j.cnki.hyqxxb.20230808001. (in Chinese)

重庆夏季不同气象条件下的臭氧特征

王陆潇¹,蔡哲²,刘海涵¹,刘夏雪²,刘强²,葛鹏²,刘祎²,周德荣^{2,3},江飞^{4,5}

(1.重庆市生态环境大数据应用中心,重庆 410025;2.南京创蓝科技有限公司,江苏 南京 211135;3.南京大学大气科学学院,江苏 南京 210023;4.南京大学江苏省地理信息技术重点实验室,江苏 南京 210023;5.南京大学关键地球物质循环前沿科学中心,江苏 南京 210023)

摘要 2022年8月重庆月最高气温达41.3℃,高温日数长达28d,在此高温天气下8月重庆市区臭氧未出现超标情况,7月整体气温低于8月,出现7d臭氧超标的情况。利用观测资料、天气研究与预报(Weather Research and Forecasting, WRF)模式,对此现象进行分析,并综合探讨不同片区臭氧与气象条件的关系,结果表明:(1)8月的气温和边界层高度偏高、风速偏大,而相对湿度偏低,这可能有利于8月臭氧污染状况改善。整体来看,重庆臭氧质量浓度随气温和边界层高度升高均呈现先升高再降低的趋势,当气温高于30℃、边界层高度高于1000m、相对湿度低于59%、风速小于6.3 m·s⁻¹时,臭氧质量浓度及超标率均显著上升,而当气温、边界层高度、相对湿度、风速分别超过39℃、2800m、59%、6.3 m·s⁻¹时,臭氧质量浓度及超标率均显著下降。(2)主城区和郊区县(区)的气温分别超过38℃和37℃后,臭氧质量浓度升幅变小或出现下降,个别县(区)气温为38~40℃时,臭氧质量浓度仍保持上升趋势。(3)沙坪坝区和长寿区在污染日臭氧和边界层高度2h升幅峰值同时出现在11时或13时,合川区和荣昌区在污染日臭氧和边界层高度2h升幅峰值出现时间不一致。研究成果可为重庆夏季臭氧污染的预测、防控和管控提供参考。

关键词 高温;边界层高度;臭氧质量浓度;气象条件

中图分类号: X51 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)03-0068-10

DOI:10.19513/j.cnki.hyqxxb.20230808001

Characteristics of ozone under different meteorological conditions in Chongqing during summer

WANG Luxiao¹, CAI Zhe², LIU Haihan¹, LIU Xiaoxue², LIU Qiang², GE Peng²,
LIU Yi², ZHOU Derong^{2,3}, JIANG Fei^{4,5}

(1. Chongqing Ecological Environment Big Data Application Center, Chongqing 410025, China; 2. Nanjing Climblue Technology Co., Ltd., Nanjing 211135, China; 3. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 5. Frontiers Science Center for Critical Earth Material Cycling, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract The highest monthly temperature in Chongqing reached 41.3℃ in August 2022, and the hot

收稿日期:2023-08-08;修回日期:2024-02-07

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42377102)

第一作者简介:王陆潇,女,博士,正高级工程师,主要从事环境信息大数据研究及3S应用工作,wangluxiao_wlx@163.com。

共同第一作者简介:蔡哲,女,博士,工程师,主要从事区域大气环境模拟与空气质量预报工作,erin@climblue.com。

weather lasted for 28 d. Under the high-temperature weather, the ozone does not exceed the standard in Chongqing city in August; while the overall temperature in July is lower than that in August, there are 7 ozone pollution days. By using observations and the WRF (Weather Research and Forecasting) model, this phenomenon is analyzed and the relationship between ozone and meteorological conditions in different areas is comprehensively explored. The results are as follows. (1) The temperature, boundary layer height and wind speed in August are relatively high, while the relative humidity is relatively low, which may be conducive to the improvement of ozone pollution in August. On the whole, the mass concentration of ozone in Chongqing first increases and then decreases with the increase of air temperature and boundary layer height. When the air temperature is higher than 30 °C, the boundary layer height is higher than 1 000 m, the relative humidity is lower than 59% and the wind speed is lower than $6.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the mass concentration and excess rate of ozone go up significantly. However, when the air temperature, boundary layer height, relative humidity and wind speed exceed 39 °C, 2 800 m, 59% and $6.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively, the mass concentration and excess rate go down significantly. (2) When the temperature in the main urban area and suburban counties (districts) exceed 38 °C and 37 °C, respectively, the increase in the mass concentration of ozone becomes smaller or the mass concentration appears to decline; when the temperature in several counties (districts) is between 38 and 40 °C, the mass concentration still maintains an upward trend. (3) On pollution days, the 2-h peak of increase of ozone and boundary layer height in Shapingba and Changshou districts occurs at 11:00 or 13:00 at the same time, while that in Hechuan and Rongchang districts occurs at different times. The study provides reference for the prediction, prevention and control of summer ozone pollution in Chongqing.

Keywords high temperature; boundary layer height; mass concentration of ozone; meteorological condition

引言

近年来,随着社会经济的快速发展和工业化进程的加快,由此引发的环境问题日益严重,其中空气污染问题尤为突出^[1]。臭氧是重要的全球性污染气体,尽管其在大气中的含量微量,却是大气的重要组成部分,对大气环境和人类健康有重要影响^[2]。大部分臭氧存在于平流层中,只有10%左右分布在对流层中,平流层中的臭氧能够吸收紫外线,对人类有益,而对流层大气中,特别是近地面臭氧质量浓度增高,则会对人类健康有害甚至严重危害生态环境^[3]。对流层臭氧由大气中的氮氧化物(NO_x)和挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)在阳光下发生二次反应生成^[4]。臭氧的形成既受人为源和自然源的影响,也受大气环流、温度、湿度、辐射、边界层高度等气象条件的影响。当污染物排放总量基本稳定时,气象条件对污染物质量浓度的影响便会起决定性作用^[5]。严重的臭氧污染通常发生于气温相对偏高的夏季^[6],且近年来高温异常事件显著,这与南印度洋海面温度异常、南亚高压增强、西太平洋副热带高压异常等存在联系^[7-8]。

目前,中国对臭氧与气象条件关系的研究多集

中于京津冀、珠三角、长三角等平原地区。茅晶晶等^[9]通过对江苏臭氧和气象条件的研究发现臭氧质量浓度与相对湿度呈负相关关系,与温度呈正相关关系。楚翠姣等^[10]利用中尺度天气研究与预报(Weather Research and Forecasting, WRF)模式和区域多尺度空气质量(Community Multiscale Air Quality, CMAQ)模式(WRF-CMAQ)分析了江苏典型城市的臭氧污染过程,结果表明稳定高值的光化学贡献叠加传输影响是导致高温条件下臭氧质量浓度爆发式增长的主要原因。李莉等^[11]利用嘉兴2014—2018年14个监测站的臭氧观测数据研究臭氧与气象条件的关系,发现在气温高于33 °C或相对湿度低于50%时,臭氧质量浓度及超标率均出现显著上升。欧林冲等^[12]统计了中国2013—2020年暖季的臭氧抑制事件,发现在极端高温下,臭氧质量浓度不升反降。重庆是典型的以山地地形为代表的城市,气温高、湿度大、辐射强等气象条件决定了其臭氧污染的独特性,对该城市的臭氧污染研究具有重要意义^[13]。曾有专家学者对重庆臭氧做过一些研究,包括气象条件、前体物相关性等方面。刘姣姣等^[14]讨论了重庆18个国家环境空气质量监测网自动监测站点(以下简称“国控站点”)臭氧质量浓度

变化特征,认为城市站臭氧质量浓度具有“上升快下降快”的特征。陈昌维等^[15]研究了重庆主城区臭氧污染状况与成因,主城区大体呈西边污染程度大于东边的趋势,臭氧质量浓度和二氧化氮有较强的负相关性。

大气边界层作为处于地表与自由大气之间、直接受地表强迫影响并且所受影响响应时间不超过1 h的大气层,也是污染物集中存在的大气层^[16],了解大气边界层对臭氧污染的影响有重要意义。此前Cai等^[17]对PM_{2.5}质量浓度和边界层高度的关系做过一些研究,发现两者关系密切;而Athanasiadis等^[18]对美国费城和休斯顿的研究表明,较高的边界层高度是促使臭氧污染高发的有利气象条件。相反,曹庭伟等^[19]利用国控站点监测数据对比分析川渝15个城市,发现边界层较低的区域,污染扩散能力较弱,极易产生臭氧污染。整体来看,有关边界层高度变化对臭氧污染影响方面的研究较少,并且可能受到复杂地形等的影响,不同地区有不同影响特征,且川渝地区臭氧污染对边界层高度变化也较为敏感。

2022年8月为重庆2015年以来气温最高的一个月,中心城区国家级地面气象观测站平均日最高气温达40℃,全市各国家级地面气象观测站平均日最高气温超过40℃的日数达到17 d。在此高温天气下,8月重庆臭氧未出现超标情况,而7月平均日最高气温比8月低4℃,却出现7 d臭氧超标的情况。为研究在极端高温天气情况下臭氧污染特征,以2022年7—8月重庆72个国控站点、地方环境空气质量监测网自动监控站点(以下简称“市控站点”)的臭氧观测数据、气象观测数据及模拟数据为基础,分别探讨夏季臭氧质量浓度与气温、边界层高度、相对湿度和风速的关系,并对不同气温臭氧质量浓度空间差异特征进行分析。

1 资料和方法

1.1 数据

臭氧质量浓度数据来自中国环境监测总站和重庆市生态环境监测中心,研究时段为2022年7—8月,2019—2021年7—8月作为对比时段。选取72个国控、市控站点作为本次研究的观测点位,重庆市主城区臭氧日最大8 h(MDA8-O₃)质量浓度数据取自72

个国控、市控站点MDA8-O₃的平均值,重庆各县(区)MDA8-O₃质量浓度数据取自各县(区)所属国控、市控站点MDA8-O₃的平均值。根据环境保护部HJ 633—2012《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》^[20]分级方法:AQI大于100,即MDA8-O₃大于160 μg·m⁻³时为超标日;AQI大于100且小于或等于150,即MDA8-O₃大于160 μg·m⁻³且小于或等于215 μg·m⁻³时为轻度污染日;AQI大于150且小于或等于200,即MDA8-O₃大于215 μg·m⁻³且小于或等于265 μg·m⁻³时为中度污染日。选取72个国控、市控站点MDA8-O₃的平均值超标日作为重庆市主城区臭氧污染日,各县(区)所属国控、市控站点MDA8-O₃的平均值超标日作为各县(区)臭氧污染日。

同时段气温、相对湿度、风速等气象条件的小时数据来自国家气象信息中心中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),共32个国家级地面气象观测站。同时段的边界层高度数据来自WRF模式的模拟结果。

根据地形地貌、区域扩散特征2个层面将重庆划分为6个片区:渝东北山区、渝东北、渝东南、主城区、渝西北、渝西南(图1)。渝东北山区和渝东南地形以山地为主,常年扩散条件较差;其余4个片区地形相对平坦,渝西北和渝西南扩散条件常年较好,但其分别与四川广安、内江接壤,易受到四川污染传输影响,主城区臭氧生成条件较好,渝东北扩散条件一般。

1.2 WRF 模式

边界层高度数据来源于WRF模式,WRF是新一代完全可压缩的非静力模式,由美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)、美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)、美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的预报系统试验室及俄克拉荷马大学的暴雨分析预报中心等多单位共同开发。模式使用Arakawa C网格,计算分辨率可从几公里至几千公里,在气象领域中可用于天气个例分析、资料同化研究、物理过程参数化研究等。驱动WRF模式的数据来自NCEP-Final(NCEP-FNL;<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>),该资料时间分辨率为6 h,空间分辨率为1°×1°。

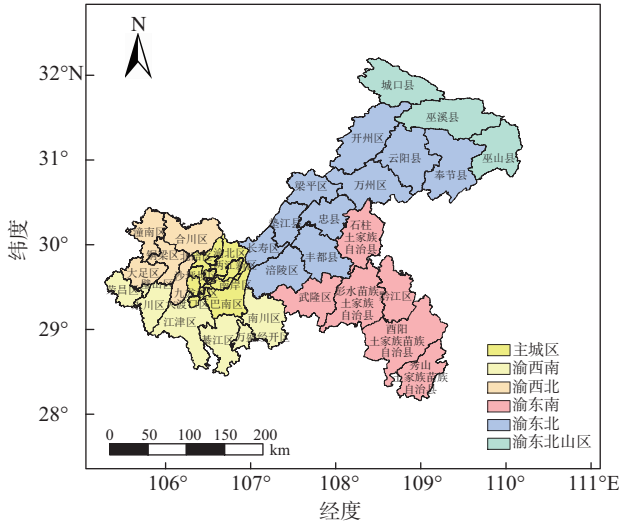


图1 重庆片区划分示意图
Fig.1 Schematic diagram of area division

2 结果与讨论

2.1 模式准确率评估

此研究分别统计了32个国家级地面气象观测站2022年7、8月小时气温观测值、模拟值的平均值,观测值与模拟值的偏差、均方根误差和相关系数。结果(表1)显示,7、8月气温的观测值与模拟值的偏差及均方根误差均较小,相关系数均大于0.800,呈高度正相关关系。7—8月小时气温模拟值与观测值样本各41 374个(图2),相关系数为0.730,整体来看模式准确率较高。

表1 气温模拟效果检验

Table 1 Verification of temperature simulation effect

| 月份 | 2 m 气温 | | | | 相关系数 |
|----|------------|------------|----------|-------------|-------|
| | 模拟均值/ ℃ | 观测均值/ ℃ | 偏差/ ℃ | 均方根误差/ ℃ | |
| 7 | 28.9 | 29.4 | -0.5 | 2.72 | 0.836 |
| 8 | 31.0 | 33.5 | -2.5 | 3.36 | 0.874 |

2.2 臭氧质量浓度及气象条件特征

整体来看,7月空气质量相比8月较差,7月重庆臭氧平均质量浓度超标日数达到7 d,8月重庆臭氧平均质量浓度未出现超标(仅统计重庆市区国控站点)。进一步基于重庆各县(区)所属国控、市控站点统计各县(区)臭氧污染情况(表2),7月重庆有26个县(区)出现臭氧污染日,主城区、渝西北、渝西南、渝东北和渝东南片区内县(区)平均臭氧污染日数分别为12、9、6、4、1 d。8月重庆有19个县(区)出现臭氧污染日,各县(区)污染日数显著降低,主城区、渝西

北、渝西南和渝东北片区内县(区)平均臭氧污染日数分别为4、4、2、1 d,渝东南片区无臭氧污染日。需要注意的是,8月重庆整体臭氧质量浓度均值未超标是由于仅统计了国控站的数据,不涉及市控站,因此与县(区)统计结果存在差异。

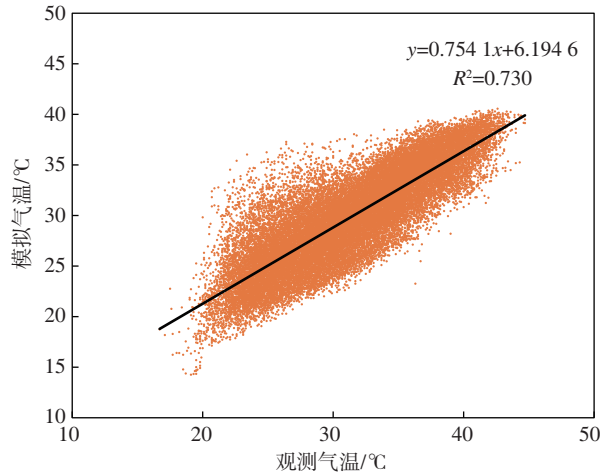


图2 7—8月小时气温模拟值与观测值相关性
Fig.2 Correlation between simulated and observed hourly temperature from July to August

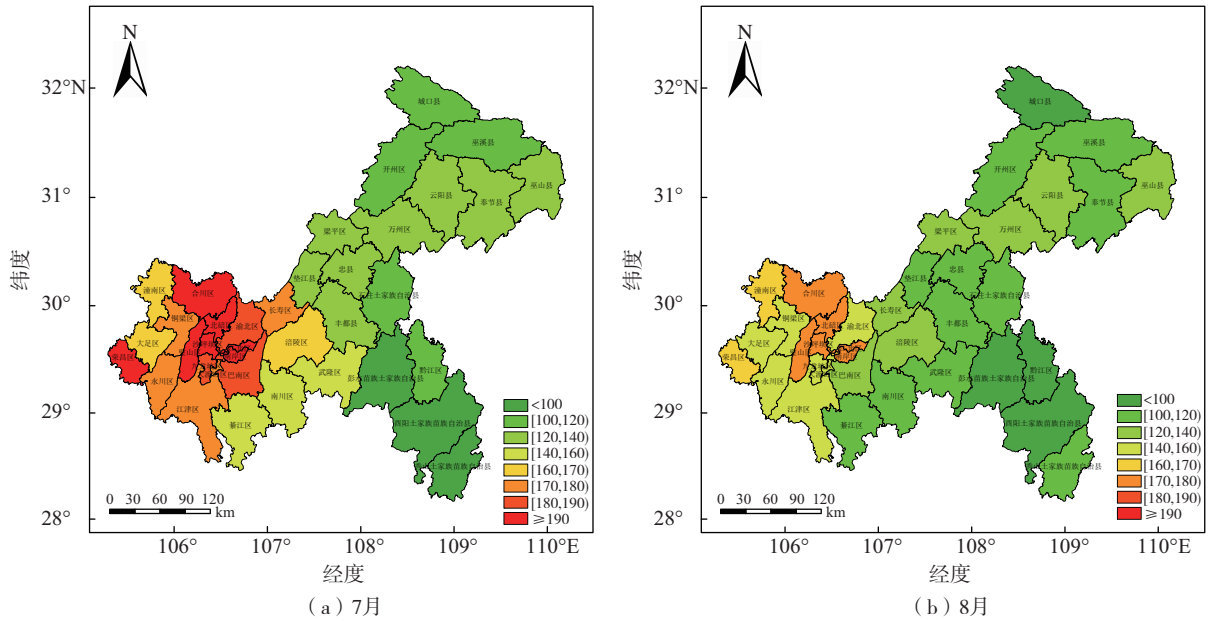
表2 7、8月重庆各县(区)臭氧污染日数统计
Table 2 Statistics of ozone pollution days in each county (district) of Chongqing in July and August

单位:d

| 片区 | 县(区) | 7月污染日数 | 8月污染日数 | |
|-------|-------|--------|--------|---|
| 渝东南 | 武隆区 | 1 | 0 | |
| | 长寿区 | 7 | 0 | |
| 渝东北 | 涪陵区 | 6 | 0 | |
| | 丰都县 | 0 | 1 | |
| 主城区 | 渝中区 | 15 | 4 | |
| | 南岸区 | 14 | 4 | |
| | 北碚区 | 14 | 7 | |
| | 沙坪坝区 | 13 | 8 | |
| | 江北区 | 12 | 4 | |
| | 九龙坡区 | 11 | 2 | |
| | 两江新区 | 11 | 3 | |
| | 高新区 | 11 | 4 | |
| | 大渡口区 | 10 | 0 | |
| | 渝北区 | 9 | 3 | |
| 渝西南 | 巴南区 | 7 | 2 | |
| | 荣昌区 | 13 | 7 | |
| | 永川区 | 9 | 3 | |
| | 双桥经开区 | 9 | 5 | |
| | 江津区 | 7 | 1 | |
| | 綦江区 | 2 | 0 | |
| | 南川区 | 1 | 0 | |
| | 万盛经开区 | 1 | 0 | |
| | 渝西北 | 合川区 | 16 | 8 |
| | | 璧山区 | 12 | 6 |
| 铜梁区 | | 6 | 3 | |
| 大足区 | | 5 | 0 | |
| 渝东北山区 | 潼南区 | 5 | 4 | |

由7、8月重庆各县(区)MDA8-O₃第90分位数空间分布结果(图3)来看,7月臭氧质量浓度高于8月,臭氧高值区域范围大于8月,MDA8-O₃第90分位数县(区)最高值高于8月。利用站点小时臭氧质量浓度数据绘制日变化箱线图(图4),发现7月日间臭氧质量浓度高于8月,夜间臭氧质量浓度

低于8月。7、8月小时臭氧质量浓度峰值均出现在16时,7月(133 μg·m⁻³)高于8月(117 μg·m⁻³);7、8月小时臭氧质量浓度最低值均出现在07时,7月(33 μg·m⁻³)低于8月(40 μg·m⁻³)。臭氧高值时段(12—18时)7月小时数据样本的第99分位数和最大值均高于8月。



色阶—臭氧质量浓度, 单位为μg·m⁻³。

图3 7、8月重庆MDA8-O₃第90分位数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the 90th percentile of the maximum daily 8-h average of ozone (MDA8-O₃) in Chongqing in July and August

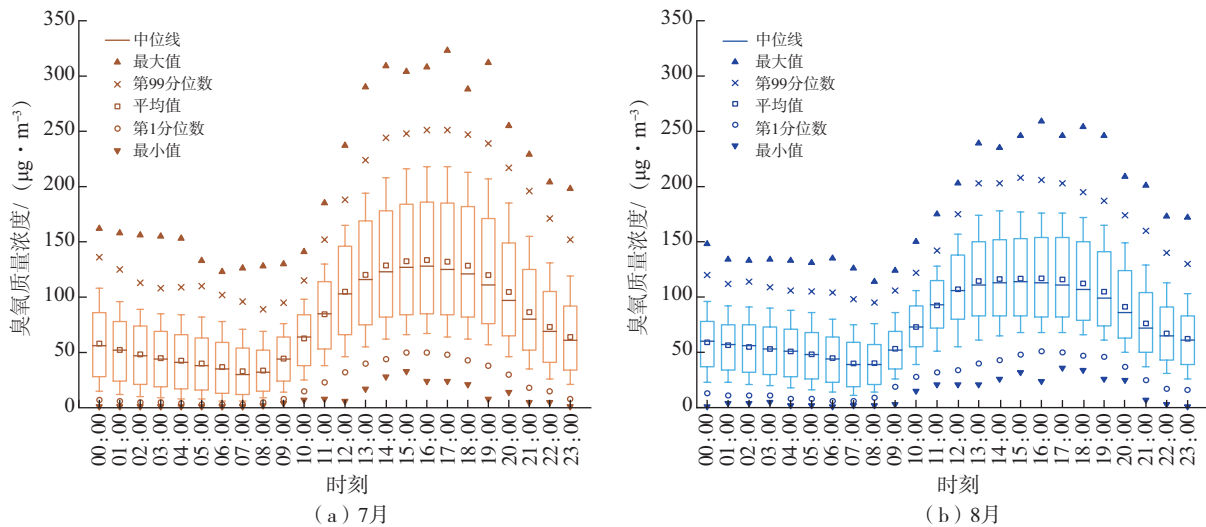


图4 7、8月重庆臭氧日变化箱线图

Fig.4 Boxplot of daily ozone changes in Chongqing in July and August

2022年8月重庆高温日(以气象学上日最高气温在35.0℃及以上的定义为高温日)持续时间达28d,最高气温达41.3℃,月均气温为33.5℃,月最低气温为25.4℃;而7月重庆月最高气温为39.0℃,月均气温为29.4℃,月最低气温为21.7℃。与历史同期(2015—2021年)相比,2022年8月重庆月最高气温为历史最高、高温日持续时间最长,为近年来最热的一个月。

由图5可看出8月重庆小时气温平均值高于7月,7、8月日最高气温分别为34℃、39℃,均出现在16时,8月重庆最高气温较7月升高5℃;7、8月日最低气温分别为26℃、29℃,均出现在06时,8月日最低气温较7月升高3℃。7、8月重庆日最大边界层高度分别为1631m、1920m,均出现在16时,8月重庆

日最大边界层高度较7月升高289m;7、8月重庆日最低边界层高度分别为172m、175m,均出现在07时,8月日最低边界层高度与7月基本持平。8月重庆相对湿度日变化均低于7月,7、8月的日最高相对湿度均出现在07时,分别为75%和66%,日最低相对湿度均出现在18时,分别为47%和41%,且在温度升高的午后,相对湿度逐渐下降。重庆8月的风速显著高于7月,表明8月有利于臭氧的扩散和稀释,7、8月日最大风速分别为2.7m·s⁻¹和3.3m·s⁻¹,均出现在19时,而07时风速最小,分别为1.5m·s⁻¹和1.9m·s⁻¹,且在上午至下午时段,风速呈增大趋势,可有效降低臭氧质量浓度。总得来说,与7月相比,8月气温和边界层高度偏高,风速偏大,相对湿度偏低,在此综合影响下,使得臭氧质量浓度相对偏低。

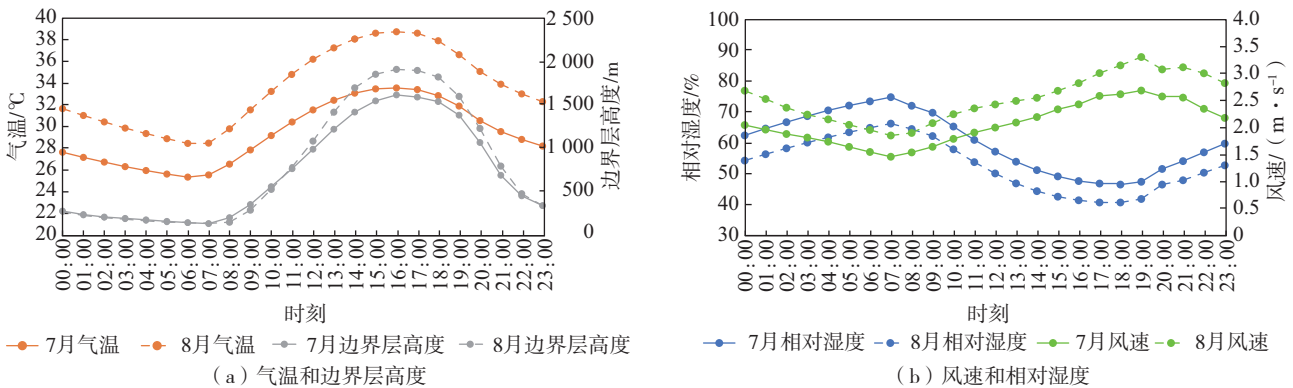


图5 7、8月重庆气象条件日变化
Fig.5 Variation of meteorological conditions in Chongqing in July and August

2.3 臭氧质量浓度和气象条件的关系

根据重庆7月1日—8月31日32个国家级地面气象观测站的小时气象数据及气象站所属县(区)的小时臭氧质量浓度观测数据得到图6a、c、d,由重庆7月1日—8月31日WRF模式模拟边界层高度数据及42个县(区)小时臭氧质量浓度观测数据得到图6b。图中黑色趋势线绘制方法如下:以图6a为例,气温以1℃为间隔,取30~31℃范围内的臭氧第98分位数作为30℃对应的值,取31~32℃范围内的臭氧第98分位数作为31℃对应的值;类似地,边界层高度间隔100m取值,相对湿度间隔3%取值,风速间隔0.5m·s⁻¹取值。

图6a中趋势线与轻度污染等级的交点分别为30℃和39℃,在所有臭氧超标样本中,气温在30~

39℃区间的样本占比为87%。趋势线顶点对应气温为34℃、臭氧质量浓度为181μg·m⁻³;当气温超过42℃时,臭氧超标的样本量为0,说明臭氧质量浓度随气温上升呈先上升后下降的趋势。

图6b中趋势线与轻度污染等级的交点分别为1000m和2800m,在所有臭氧超标样本中,边界层高度在1000~2800m区间的样本占比为92%;趋势线与中度污染等级的交点分别为1800m和2200m,边界层高度在1800~2200m区间时,臭氧达中度污染等级的概率为40%。趋势线顶点对应边界层高度为2050m,对应臭氧质量浓度峰值为219μg·m⁻³,当边界层高度超过2800m时,臭氧超标概率仅为0.63%,说明臭氧质量浓度随边界层高度上升呈先上升再下降的趋势。

图6c中趋势线与轻度污染等级的交点为59%,趋势线顶点对应的相对湿度为37%,臭氧质量浓度为 $216 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在所有臭氧超标样本中,相对湿度低于59%的样本占比为96%,相对湿度高于59%的样本占比仅为0.3%,表明在高湿条件下,臭氧质量浓度急剧下降。同时,结合图6c可见,臭氧质量浓度随相对湿度上升呈先上升后下

降的变化趋势。

图6d中趋势线与轻度污染等级的交叉点为 $6.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,趋势线顶点对应的风速为 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,臭氧质量浓度为 $208 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在所有臭氧超标样本中,风速低于 $6.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的样本占比约为99.8%,风速大于 $6.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,臭氧超标的样本量仅为6,臭氧质量浓度随风速增大呈先增后降的趋势。

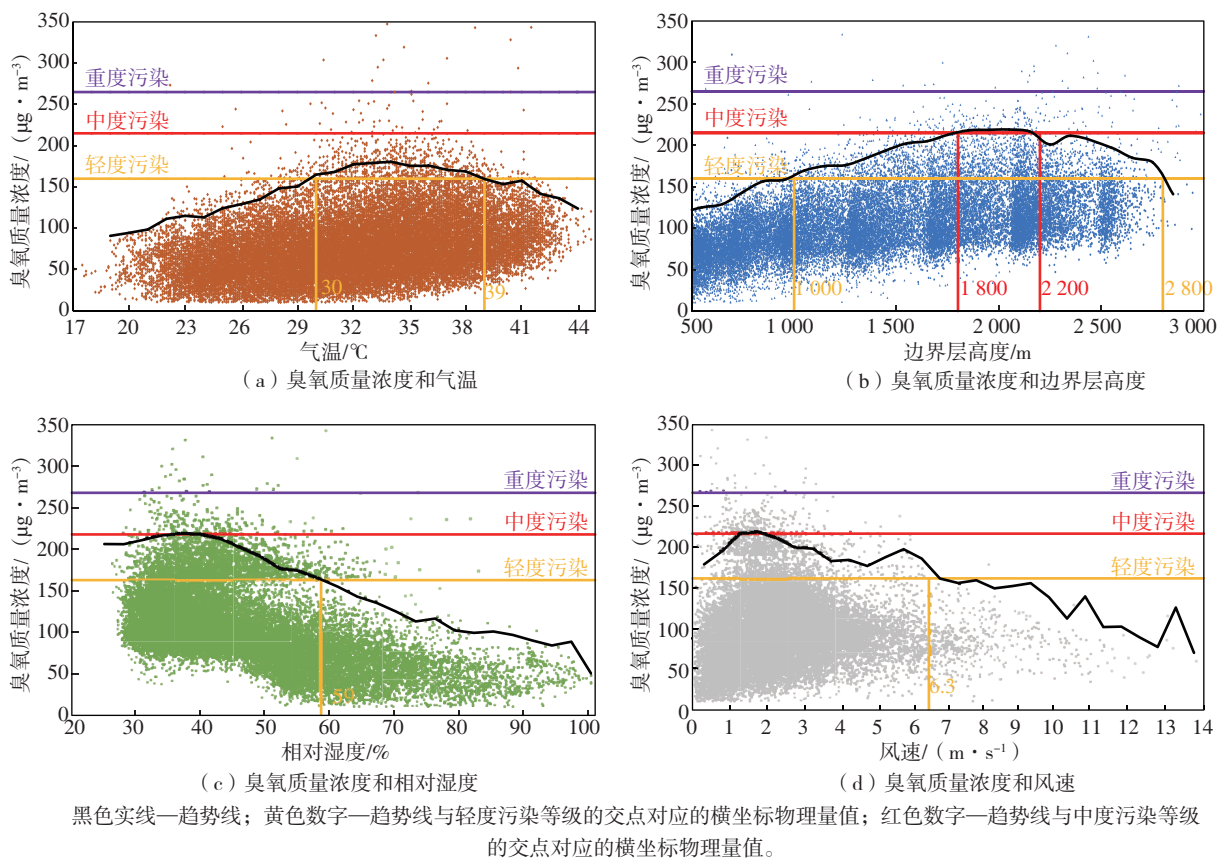


图6 7月1日—8月31日(08—20时)臭氧质量浓度和气象条件散点图

Fig.6 Scatter diagram of mass concentration of ozone and meteorological conditions between 08:00 and 20:00 from 1 July to 31 August

2.4 不同气象条件下臭氧质量浓度的空间差异

为进一步研究不同片区之间的臭氧质量浓度特征,根据各县(区)7、8月的空气质量情况(表2),在6个片区中分别挑选1个污染较重的县(区)为代表,研究不同气象条件下臭氧质量浓度的空间差异。主城区挑选沙坪坝区,渝西北片区挑选合川区,渝西南片区挑选荣昌区,渝东北片区挑选长寿区,渝东南片区挑选武隆区,渝东北山区挑选巫山县。

由2.3节分析得到臭氧质量浓度随气温升高呈

先上升后下降趋势的结论,为进一步研究各县(区)臭氧质量浓度随气温变化的差异,利用2022年7—8月小时气温观测数据和小时臭氧质量浓度观测数据,每隔 1°C 计算该县(区)臭氧质量浓度平均值,结果如图7a所示。可看出各县(区)在气温升高过程中臭氧质量浓度上升速率先增大后减小,普遍在 $34\sim 35^{\circ}\text{C}$ 时臭氧质量浓度升幅最大,在气温超过 38°C 后臭氧质量浓度变化幅度较小甚至不再上升。其中沙坪坝区、合川区和荣昌区臭氧随气温变化趋

势较为一致,在气温为 32~37 °C 时,臭氧质量浓度升幅较大,气温每升高 1 °C,臭氧升幅超过 10%,气温超过 41 °C 后臭氧质量浓度变化幅度较小或开始下降;长寿区、武隆区和巫山县在气温为 30~35 °C 时,臭氧质量浓度升幅较大,气温每升高 1 °C 臭氧质量浓度升幅超过 11%,气温超过 37 °C 后臭氧质量浓度变化幅度较小或开始下降。

为验证这一结论是否具有普适性,选取 2019—2021 年作参照,用相同计算方法统计 2019—2021 年每年 7—8 月不同气温下对应的臭氧质量浓度,将所得结果求平均得到 2019—2021 年平均臭氧质量浓度

随气温变化趋势,如图 7b 所示。与 2022 年不同的是,2019—2021 年臭氧随气温变化幅度较小、质量浓度较低,各县(区)普遍在气温超过 39 °C 后,臭氧质量浓度变化幅度较小,甚至不再上升。沙坪坝区在气温为 32~34 °C 时,臭氧质量浓度升幅较大,气温每升高 1 °C,臭氧升幅超过 10%,气温超过 38 °C 后臭氧质量浓度开始下降;合川区、荣昌区、长寿区、武隆区和巫山县变化趋势较为一致,气温超过 37 °C 后臭氧质量浓度开始下降,在 38~40 °C 区间内个别县(区)臭氧质量浓度可能有小幅上升趋势。可见,这与上文分析结论一致。

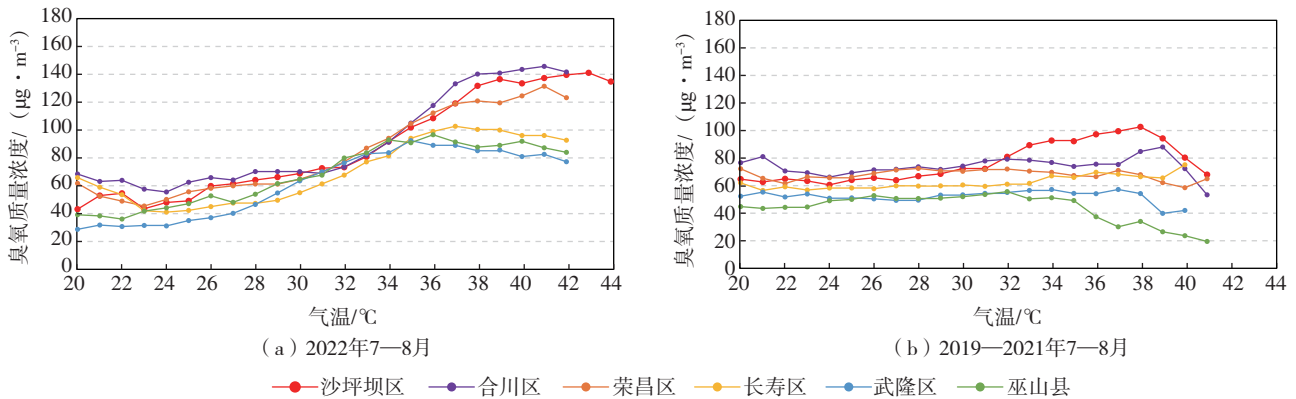


图7 重庆6个代表县(区)臭氧在不同气温下的平均质量浓度变化
Fig.7 Changes of average mass concentration of ozone under different temperatures in 6 representative counties (districts) of Chongqing

进一步地以沙坪坝区作为典型个例分析时,发现臭氧质量浓度和边界层高度小时增幅峰值无明显变化规律,进而研究 2 h 增幅峰值变化,发现污染日臭氧质量浓度和边界层高度 2 h 增幅峰值出现时间一致,而非污染日存在错峰现象。为进一步分析臭氧和边界层高度的日变化特征,统计 4 个片区代表县(区)(因 2022 年 7—8 月渝东南片区仅有 1 d 污染日、渝东北山区无污染日,这两个片区不计入统计)在不同臭氧污染形势下的臭氧质量浓度和边界层高度 2 h 增幅峰值变化,其中臭氧 2 h 增幅计算方法为每间隔 2 h 计算臭氧质量浓度差值,例如 03 时的增幅为 03 时臭氧质量浓度减去 01 时臭氧质量浓度,污染日和非污染日分别统计每日 00—23 时的臭氧 2 h 增幅最大值出现时刻,边界层高度 2 h 增幅统计方法同上。根据臭氧和边界层高

度 2 h 增幅峰值在每个时刻的出现频次统计结果得到图 8,可看出臭氧质量浓度和边界层高度 2 h 增幅峰值基本都出现在 11 时和 13 时,部分出现在 09 时和 15 时。

各县(区)的情况略有差异,沙坪坝区(图 8a)和长寿区(图 8d)污染日臭氧和边界层高度 2 h 增幅峰值均出现在 13 时,非污染日中臭氧 2 h 增幅峰值较边界层高度 2 h 增幅峰值提前;合川区(图 8b)和荣昌区(图 8c)在污染日臭氧 2 h 增幅峰值较边界层高度 2 h 增幅峰值提前,非污染日中臭氧和边界层高度 2 h 增幅峰值均出现在 11 时。沙坪坝区、合川区、荣昌区地势较平坦,扩散条件良好,沙坪坝区可能由于高排放导致污染日臭氧和边界层高度增幅峰值同时出现,削弱了扩散的作用;合川区和荣昌区污染日的臭氧增幅峰值提前,表明扩散在一定程

度上降低了臭氧质量浓度。长寿区以山地为主,扩散较差,虽然边界层高度出现峰值,但可能仍然无法有效降低臭氧质量浓度。

3 结论

文中讨论了夏季不同气象条件下重庆臭氧的特征,得出以下结论:

(1)夏季重庆臭氧质量浓度随气温、边界层高度、相对湿度、风速等气象条件上升均呈先上升再下降的趋势,8月在较高气温和边界层高度、较大风速和较低相对湿度的影响下,臭氧质量浓度偏低。当气温为 $30\sim 39\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、边界层高度为 $1\ 000\sim 2\ 800\text{ m}$ 、相对湿度低于 59% 、风速低于 $6.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,臭氧更容易出现超标现象,需加强污染防治管控。

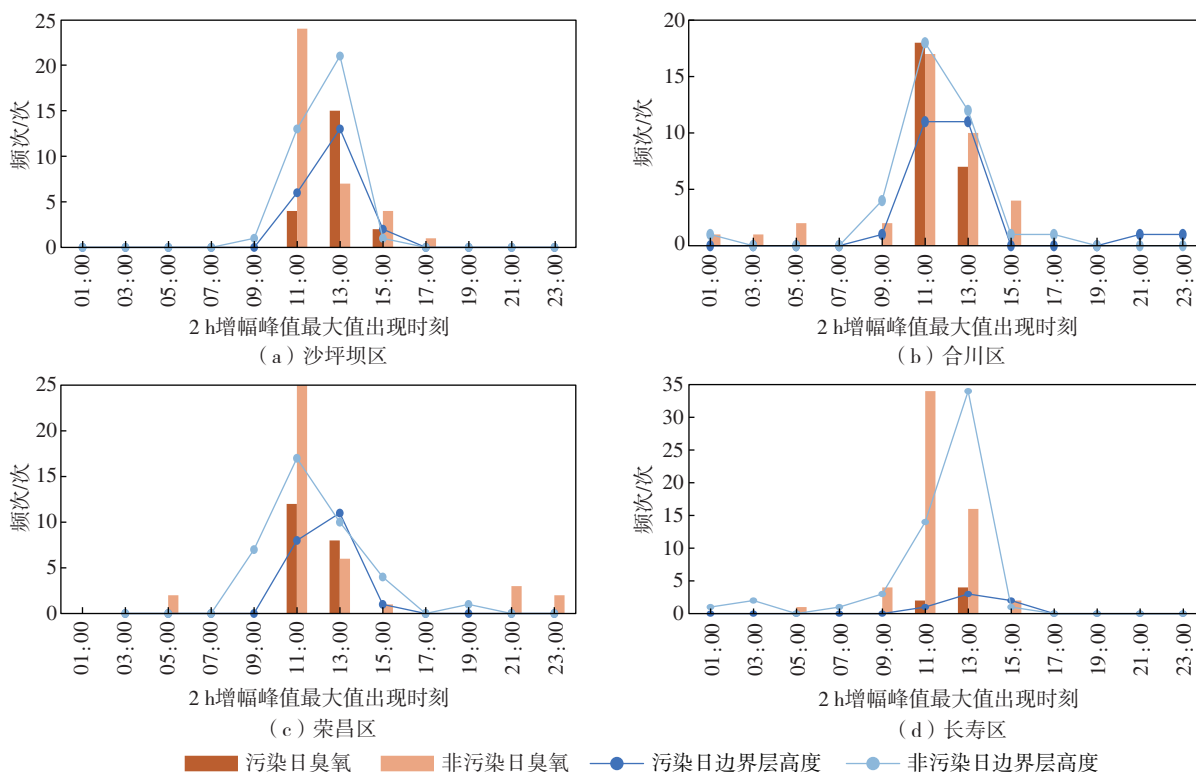


图8 4个代表县(区)在2022年7—8月的污染日和非污染日中臭氧质量浓度、边界层高度2 h增幅峰值最大值出现时刻频次分布

Fig.8 Frequency distribution histogram of time of the maximum 2-h increase of mass concentration of ozone and boundary layer height in pollution and non-pollution days from July to August 2022 in 4 representative counties (districts) of Chongqing

(2)主城区在气温为 $32\sim 34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,气温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,臭氧升幅超过 10% ,气温超过 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,臭氧质量浓度升幅较小或开始下降;主城区以外的县(区)气温超过 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后臭氧质量浓度升幅较小或开始下降,在 $38\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间内个别县(区)臭氧质量浓度可能有小幅上升趋势,有关这一差异现象在未来可开展进一步分析。

(3)沙坪坝区和长寿区在污染日臭氧和边界层高度2 h增幅峰值一致,均出现在11时或13时,非污染日两者出现错峰现象;合川区和荣昌区在非污

染日臭氧和边界层高度2 h增幅峰值一致出现在11时,污染日两者出现错峰现象。该结论对重庆夏季降低臭氧污染,提升空气质量具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 刘玉红.中国臭氧污染时空分布特征及影响因素研究[D].大连:大连理工大学,2021.
- [2] 赵川鸿,赵鹏国,周筠珺.西南地区臭氧空间分布及变化趋势[J].气象科学,2018,38(2):149-156.
- [3] 严晓瑜,缙晓辉,杨婧,等.中国典型城市臭氧变化特征及其与气象条件的关系[J].高原气象,2020,39(2):

- 416-430.
- [4] SEINFELD J H, PANDIS S N, NOONE K. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change[J]. *Phys Today*, 1998, 51(10): 88-90.
- [5] WU P, DING Y H, LIU Y J. Atmospheric circulation and dynamic mechanism for persistent haze events in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Adv Atmos Sci*, 2017, 34(4): 429-440.
- [6] 王厚文,曾欣然,寇文彬,等.长江三角洲臭氧污染特征及天然源排放影响的模拟研究[J].*海洋气象学报*, 2022, 42(4): 67-76.
- [7] 闫尊,金大超.2021年9月长江以南地区高温异常及其和南印度洋海面温度异常的联系[J].*海洋气象学报*, 2023, 43(2): 42-52.
- [8] 谭桂容,张祎.2022年夏季中国高温的环流异常特征[J].*海洋气象学报*, 2023, 43(2): 31-41.
- [9] 茅晶晶,杨雪,秦玮,等.2019年江苏省臭氧污染与气象条件影响分析研究[J].*四川环境*, 2023, 42(1): 68-74.
- [10] 楚翠姣,梁进,孙旭光,等.高温热浪下江苏省典型臭氧污染过程的特征及成因分析[J].*气象科学*, 2022, 42(6): 742-753.
- [11] 李莉,杨闻达,吕升,等.嘉兴市臭氧污染特征及其与气象条件的关系[J].*中山大学学报(自然科学版)*, 2022, 61(2): 147-153.
- [12] 欧林冲,陈伟华,伍永康,等.中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素[J].*环境科学*, 2023, 44(12): 6586-6597.
- [13] 杨溟璠,王咏薇,张丹,等.重庆臭氧时空分布特征及其污染成因的初步分析[J].*环境科学学报*, 2021, 41(12): 5026-5037.
- [14] 刘姣姣,叶堤,刘芮伶.重庆市臭氧污染特征研究[J].*环境科学与管理*, 2020, 45(9): 59-62.
- [15] 陈昌维,杨炜明.重庆市主城区臭氧污染空间效应研究[J].*统计理论与实践*, 2021(9): 53-58.
- [16] STULL R B. An introduction to boundary layer meteorology[M]. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 1988.
- [17] CAI Z, JIANG F, CHEN J M, et al. Weather condition dominates regional PM_{2.5} pollutions in the eastern coastal provinces of China during winter[J]. *Aerosol Air Qual Res*, 2018, 18(4): 969-980.
- [18] ATHANASSIADIS G A, RAO S T, KU J Y, et al. Boundary layer evolution and its influence on ground-level ozone concentrations[J]. *Environ Fluid Mech*, 2002, 2(4): 339-357.
- [19] 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*, 2018, 38(4): 1275-1284.
- [20] 中华人民共和国环境保护部.环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行):HJ 633—2012[S].北京:中国环境科学出版社,2012.