

党超琪,张曦,王华媛,等.西安市臭氧污染特征及天气分型研究[J].陕西气象,2024(5):32-37.

文章编号:1006-4354(2024)05-0032-06

西安市臭氧污染特征及天气分型研究

党超琪^{1,2},张曦¹,王华媛³,卢晔⁴,沈姣姣¹,王丹¹

(1. 陕西省气象服务中心,西安 710014;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016;

3. 博尔塔拉蒙古自治州气象局,新疆博乐 833400;4. 宝鸡市气象局,陕西宝鸡 721006)

摘要:利用 2015—2022 年西安市环境监测数据和气象观测数据及欧洲中期天气预报中心的 ERA5 再分析资料,分析西安市 O₃ 质量浓度变化特征及气象影响因素,并对臭氧污染的天气形势进行分型。结果表明:(1)2015—2022 年西安市 O₃ 平均质量浓度呈波动上升趋势,月、日变化均呈单峰型变化特征,其中 6 月和 7 月 O₃ 污染最明显,07—08 时为 O₃ 质量浓度谷值,15—16 时为峰值。(2)O₃ 质量浓度与气温、风速、日照时数呈显著正相关关系,与相对湿度呈显著负相关关系;当日最高气温在 32~39 °C 之间,日照时数 5 h 以上,日平均湿度在 33%~74% 之间,日平均风速在 1~3 m/s 之间时,O₃ 污染概率明显增加,且强度也增强,更易出现 O₃ 中度污染。(3)西安市臭氧污染的天气形势分为脊前西北气流型、平直气流型、槽前西南气流型和副高型,占比最高的天气形势为脊前西北气流型和平直气流型。(4)西安市 O₃ 污染呈现明显西高东低的空间分布特征,当脊前西北气流和槽前西南气流控制时,O₃ 污染区域相对更广,城西和城北 O₃ 污染较明显。

关键词:臭氧污染;变化特征;气象条件;天气分型;西安市

中图分类号:X16:X515

文献标识码:A

2013 年以来,我国大气污染防治取得显著进展,PM_{2.5} 污染水平持续降低,但臭氧(O₃)污染问题凸显,成为实现优良天数约束性指标的主要障碍^[1]。近地面的 O₃ 是排放的氮氧化物和挥发性有机物等在强烈的紫外线照射下进行一系列光化学反应产生的二次气态污染物^[2-3]。气象条件是影响臭氧质量浓度变化的关键因素,气温、相对湿度及太阳辐射影响近地面生成 O₃ 的光化学反应速率,风速则影响 O₃ 的稀释、扩散及输送^[4-5],因此,研究 O₃ 污染与气象条件的关系对提升 O₃ 污染预报能力有重要意义。

近年来许多学者针对 O₃ 污染的气象条件开展了大量研究。赵洁等^[6]发现气温、辐射、湿度、

降水等是重庆市 O₃ 质量浓度变化的主要气象因子;徐琨等^[7]研究发现高温、低湿、强辐射有利于成都市夏季 O₃ 质量浓度升高;黄蕾等^[8]研究了关中地区 O₃ 质量浓度超标的主要气象条件,发现最高气温越高,O₃ 超标率越大。目前针对西安市 O₃ 污染的研究主要集中在污染过程分析^[9-11]、O₃ 污染变化特征^[12]以及影响气象条件分析^[13-14]等,而针对较长时间序列 O₃ 污染下天气形势的研究较少。利用 2015—2022 年西安市环境监测数据和气象观测数据,分析气象条件对 O₃ 质量浓度的影响以及 O₃ 污染的天气形势,以期对臭氧污染精细化预报提供理论依据。

收稿日期:2023-07-31

作者简介:党超琪(1988—),女,汉族,陕西渭南人,学士,工程师,主要从事专业气象服务工作。

通信作者:王华媛(1991—),女,汉族,甘肃兰州人,学士,工程师,主要从事灾害性天气机理研究。

基金项目:秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2019Y-5);新疆气象局创新发展专项面上项目(MS202305)

1 资料与方法

1.1 资料说明

空气质量数据来源于西安市 13 个空气质量评价点自动监测国控站(图 1),监测项目包括细颗粒物($PM_{2.5}$)、可吸入颗粒物(PM_{10})、二氧化硫(SO_2)、二氧化氮(NO_2)、一氧化碳(CO)、臭氧(O_3)等。气象观测数据来源于西安市泾河气象站,包括气温、相对湿度、10 m 风向风速等。高低空形势场和地面气压场资料来源于欧洲中期天气预报中心提供的 ERA5 再分析资料,包括 500 hPa 和 700 hPa 位势高度场和风场、海平面气压等。

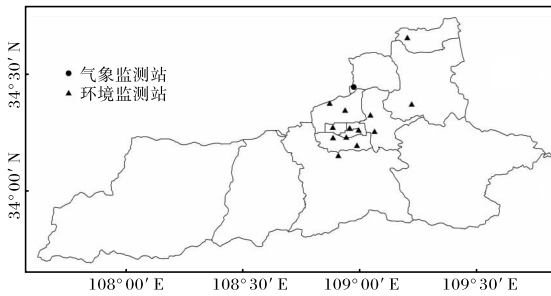


图 1 西安市环境监测站和气象监测站分布
(审图号为 GS(2019)3082 号,下同)

1.2 研究方法

依据《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663—2013),采用 O_3 质量浓度的 1 h 平均值($C(O_3)$)作为小时评价指标,日最大 8 h 滑动平均值($C_{8h}(O_3)$)作为日评价指标(当 $C_{8h}(O_3)$ 大于 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时则当天为 O_3 污染日),以某一年(月)内 O_3 质量浓度日最大 8 h 滑动平均值的第

90 百分位数作为年(月)评价指标。采用 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 等污染物质量浓度的年平均值作为该污染物的年评价指标,以 CO 质量浓度 24 h 平均值的第 95 百分位数作为 CO 的年评价指标。

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633—2012), O_3 污染物质量浓度($C_{8h}(O_3)$)的评价标准为:[0,100) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,空气质量分指数为一级(优);[100,160) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,为二级(良);[160,215) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,为三级(轻度污染);[215,265) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,为四级(中度污染);[265,800) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,为五级(重度污染)。

选取 $30^\circ\text{N} \sim 40^\circ\text{N}$, $100^\circ\text{E} \sim 115^\circ\text{E}$ 为关键区域,采用主观天气分型方法,对臭氧污染天气的大气环流场的高空和地面环流背景进行分类。考虑到高空环流的引导作用,提取 08 时 500 hPa 高空环流形势场进行分型。

2 结果与分析

2.1 臭氧污染特征

2015—2022 年,西安市 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 等大气主要污染物质量浓度呈下降趋势,环境优良日数增加,而 O_3 是唯一质量浓度不降反升的污染物(表 1)。西安市的 $C_{8h}(O_3)$ 呈波动上升趋势,其中 2016—2022 年连续 7 a 超过二级质量浓度限值($160 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。2017 年 $C_{8h}(O_3)$ 达到 $199 \mu\text{g}/\text{m}^3$,是二级限值的 1.24 倍,较 2015 年上升 28.4%,污染日数达 62 d。而 2022 年 $C_{8h}(O_3)$ 达到 $188 \mu\text{g}/\text{m}^3$,是二级限值的 1.18 倍,较 2015 年上升 21.2%,污染日数达 68 d。

表 1 2015—2022 年西安市空气质量状况

| 年份 | 污染物质量浓度/ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ | | | | | | 空气质量 达标日数/d | O_3 超标 日数/d |
|------|-------------------------------------|-----------|--------|--------|-------------------|-------|----------------|------------------|
| | $PM_{2.5}$ | PM_{10} | SO_2 | NO_2 | CO | O_3 | | |
| 2015 | 58 | 127 | 24 | 44 | 3.7×10^3 | 155 | 272 | 18 |
| 2016 | 71 | 137 | 20 | 53 | 3.6×10^3 | 173 | 231 | 37 |
| 2017 | 74 | 132 | 19 | 59 | 3.0×10^3 | 199 | 243 | 62 |
| 2018 | 62 | 120 | 15 | 54 | 2.4×10^3 | 189 | 246 | 46 |
| 2019 | 59 | 104 | 9 | 48 | 1.8×10^3 | 182 | 266 | 45 |
| 2020 | 51 | 91 | 8 | 41 | 1.7×10^3 | 176 | 280 | 38 |
| 2021 | 43 | 97 | 8 | 41 | 1.4×10^3 | 178 | 282 | 33 |
| 2022 | 52 | 96 | 7 | 38 | 1.5×10^3 | 188 | 259 | 68 |

分析 2015—2022 年 $C_{8h}(O_3)$ 月变化(图 2a)发现,西安市 $C_{8h}(O_3)$ 总体呈单峰型分布,1—6 月为上升趋势,6 月达到全年峰值($222 \mu\text{g}/\text{m}^3$),从 7 月开始下降,于 12 月达到全年谷值($62 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。 O_3 污染多发生在夏季,5—9 月 $C_{8h}(O_3)$ 维持较高水平,超过 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

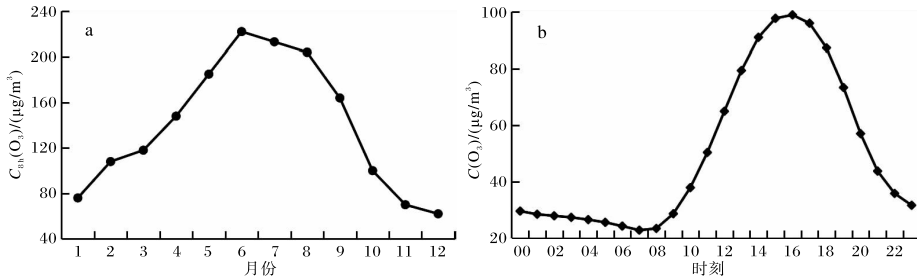


图 2 2015—2022 年西安市 O_3 质量浓度月变化和日变化

2.2 臭氧污染气象条件分析

气温、湿度、风速、日照时数等是影响近地面 O_3 质量浓度的重要气象因素^[13,15]。采用 Pearson 相关分析方法,分析西安市各气象要素与 O_3 质量浓度的相关关系,结果表明气温、风速、日照时数与 O_3 质量浓度呈正相关关系,相对湿度与 O_3 质量浓度呈负相关关系,且均通过 0.05 的显著性检验。其中日最高气温与 O_3 质量浓度相关系数最大,为 0.843,日照时数次之,相关系数为

选取典型 O_3 污染月份(4—9 月)的监测数据绘制 $C(O_3)$ 日变化曲线(图 2b),发现 $C(O_3)$ 日变化呈单峰型特征,从 08 时开始升高,15—16 时达到峰值($99 \mu\text{g}/\text{m}^3$),之后逐渐开始下降,且夜间变化较白天平缓,与太阳辐射的变化相似。

0.580,相对湿度和风速与 O_3 质量浓度相关系数较小,分别为 -0.259 和 0.116 。

为进一步讨论 O_3 污染与气象要素的关系,挑选了 2015—2022 年西安地区 344 个 O_3 污染日进行重点分析。由图 3a 可知:当日最高气温在 25°C 以下时,一般不会出现 O_3 污染;日最高气温在 $25\sim 32^\circ\text{C}$ 范围内或超过 39°C 时,易出现 O_3 污染,以轻度污染为主;而当日最高气温在 $32\sim 39^\circ\text{C}$ 范围时, O_3 污染出现概率明显增加,且强度

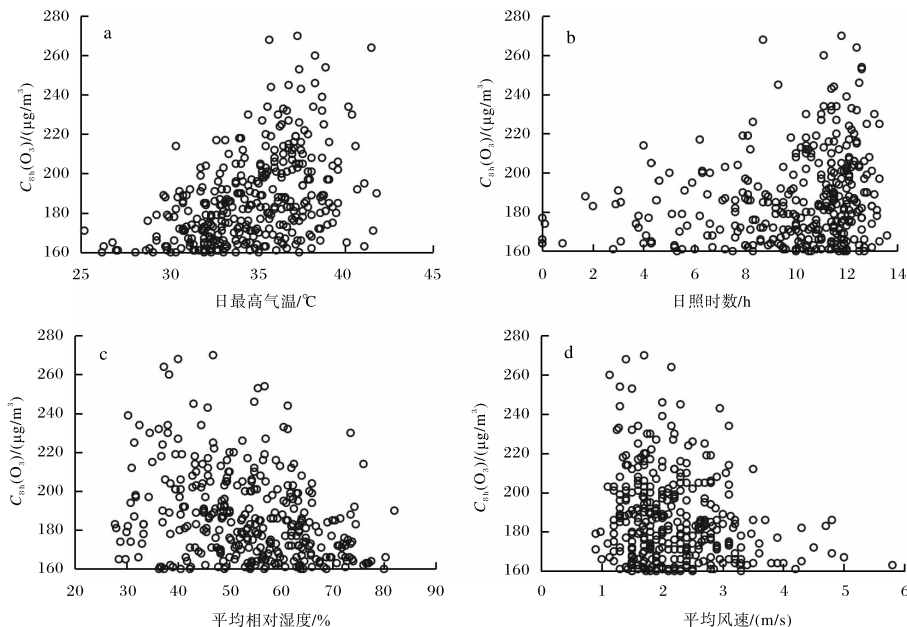


图 3 2015—2022 年西安市 O_3 污染日不同气象要素与 O_3 质量浓度散点分布

也增强,更易出现 O_3 中度污染。由图 3b 可知:当日日照时数 < 5 h,多为 O_3 轻度污染,且即使日照时数为 0 h,也会出现 O_3 污染;当日日照时数 ≥ 5 h,尤其是 7 h 以上, O_3 污染出现概率明显增加,且强度也增强,出现 O_3 中度污染过程明显增多。由图 3c 可知:当相对湿度在 33%~74% 范围时, O_3 污染频次明显较多,且出现中度污染过程较多;当相对湿度 $> 74\%$ 时, O_3 污染强度又趋于减弱,且多为轻度污染。由图 3d 可知,当日平均风速 > 1 m/s 时,有利于 O_3 污染发生,且日平均风速在 1~3 m/s 时, O_3 污染出现概率明显增加,且强度增加。因此,在晴空条件下,高温、低湿、小风时,更有利于 O_3 污染发生。

2.3 臭氧污染天气分型

2.3.1 O_3 污染的主要天气分型及其气象要素特

征 经统计分析,2015—2022 年西安市臭氧污染的天气形势主要划分为槽前西南气流型、副高型、脊前西北气流型和平直气流型四大类,不同天气型下西安市 O_3 污染日数及气象要素平均值见表 2。可以看出:脊前西北气流型、平直气流型和槽前西南气流型等三种天气形势下往往天气晴好,日照时间较长(8 h 以上),相对湿度较低(53%左右),有利于 O_3 的生成;平均风速较小(2.0~2.6 m/s),水平扩散条件一般,易造成 O_3 污染。而副高型天气形势对应晴热、高湿天气,日最高气温均值达 37.3 $^{\circ}C$,日照时间 10.5 h,相对湿度 59.2%,有利于 O_3 在近地面快速生成,同时副高控制下有强烈的下沉运动,有利于高空 O_3 向近地面输送^[16]。

表 2 2015—2022 年西安市不同天气类型下 O_3 污染日数和气象要素平均值

| 天气分型 | 超标日数/d | 超标日数占比/% | 轻度污染日数/d | 中度污染日数/d | 重度污染日数/d | 日最高气温/ $^{\circ}C$ | 相对湿度/% | 平均风速/(m/s) | 日照时数/h |
|---------|--------|----------|----------|----------|----------|--------------------|--------|------------|--------|
| 脊前西北气流型 | 186 | 56.7 | 159 | 26 | 1 | 34.3 | 53.5 | 2.0 | 10.3 |
| 平直气流型 | 60 | 18.3 | 52 | 7 | 1 | 34.2 | 53.2 | 2.1 | 9.3 |
| 槽前西南气流型 | 43 | 13.1 | 41 | 2 | 0 | 34.4 | 52.1 | 2.6 | 8.5 |
| 副高型 | 39 | 11.9 | 38 | 1 | 0 | 37.3 | 59.1 | 2.5 | 10.5 |

从环流形势看,脊前西北气流型控制下,500 hPa西安市为明显的槽后脊前西北气流控制,中低层 700 hPa 或 850 hPa 常配合脊或反气旋环流,地面多为暖高压或均压场控制,近地面风场以

偏南风为主(图 4a)。这种天气形势下 O_3 污染程度最严重,共出现 O_3 超标 186 d,占 O_3 超标日总数的 56.7%,其中中度污染达 26 d,重度污染 1 d,且 O_3 超标质量浓度均值也最高,为 188 $\mu g/m^3$ 。

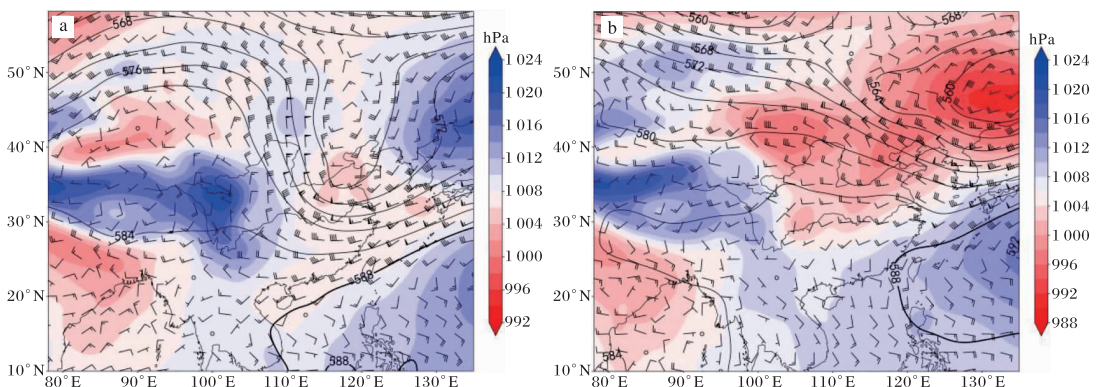


图 4 西安 O_3 污染日的脊前西北气流型(a)和平直气流型(b)环流形势

(等值线为 500 hPa 高度场,单位为 dagpm; 填色为海平面气压; 风杆表示 500 hPa 风矢)

平直气流型下,500 hPa 高度场上西安市为较平直的偏西气流控制,低层 700 hPa 或 850 hPa 常配合脊或偏南气流,地面多为低压或均压场控制,近地面风场以偏北风为主(图 4b)。该形势下共出现 O₃ 超标日 60 d,占 O₃ 超标日总数的 18.3%,其中中度污染 7 d,重度污染 1 d,O₃ 超标质量浓度均值为 186 μg/m³。

槽前西南气流型和副高型下出现污染日数较少,分别为 43 d 和 39 d,对应 O₃ 超标日数占比分别为 13.1%和 11.9%,其中中度污染分别为 2 d 和 1 d。

2.3.2 不同月份 O₃ 污染主导天气型 不同季节的主要影响天气形势往往不同,同一种天气形

势在不同季节造成的污染也存在差异^[16-17]。统计 O₃ 污染高发季(4—9 月)不同天气形势下的污染情况(图 5)发现:4 月和 5 月西安市 O₃ 污染期间主导天气形势均为平直气流型和脊前西北气流型,且以轻度污染为主,污染日数分别为 6 d 和 45 d;6 月 O₃ 污染期间主导天气形势为脊前西北气流型和平直气流型,期间出现轻度污染 80 d、中度污染 20 d、重度污染 1 d;7 月的主导天气形势为脊前西北气流型和槽前西南气流型,出现轻度污染 86 d、中度污染 14 d;8 月的主导天气形势为脊前西北气流型和副高型,出现轻度污染 64 d、中度污染 4 d、重度污染 1 d;9 月的主导天气形势为脊前西北气流型和平直气流型,出现轻度污染 19 d。

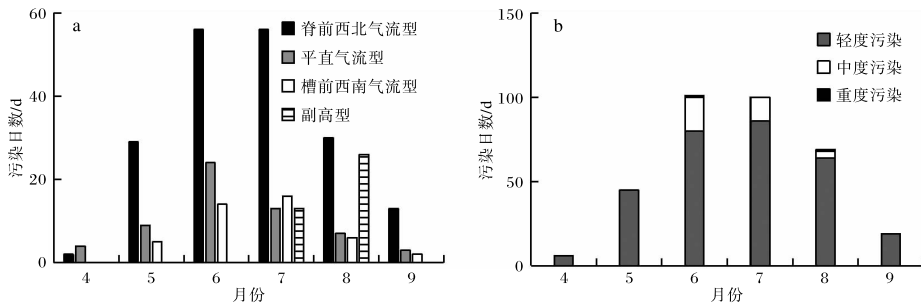


图 5 2015—2022 年西安市不同天气类型下 O₃ 污染日数(a)及各等级污染日数月分布(b)

2.3.3 不同天气类型下 O₃ 污染的空间分布特征 不同天气类型下 O₃ 污染的空间分布也有所差异^[6]。从西安市 O₃ 污染日数的空间分布(图

6)来看,O₃ 污染的空间分布呈现明显的自西向东逐渐减弱的特征,这可能是由于西安市的石油、化工、钢铁等高耗能企业多集中于城西和城北的经

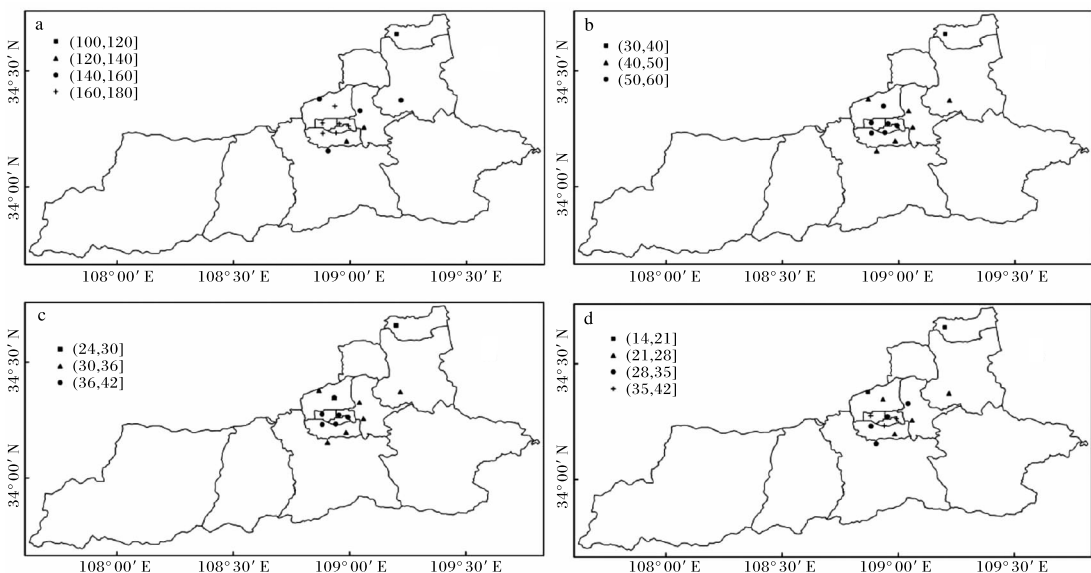


图 6 西安市不同天气类型下 O₃ 污染日数空间分布(单位:d)
(a 脊前西北气流型;b 平直气流型;c 槽前西南气流型;d 副高型)

济技术开发区^[18]。当西安市处于脊前西北气流和槽前西南气流控制时(图 6a、图 6c),城西和城北 O₃ 污染均很明显,污染区域且较其他天气型相对更广;当处于平直气流时(图 6b),仅在城西污染较多;当处于副高控制时(图 6d),主城区西南部污染更为明显。

3 结论与讨论

利用 2015—2022 年污染物监测数据和气象观测数据,统计分析西安市臭氧污染特征和气象条件,并对臭氧污染的天气形势进行分型。

(1)O₃ 是西安市近 8 a 唯一质量浓度不降反升的污染物,O₃ 平均质量浓度呈波动上升趋势,其中 2016—2022 年连续 7 a 超过二级限值(160 μg/m³)。O₃ 污染多发生在夏季前后(4—9 月),O₃ 质量浓度维持较高水平,且以 6 月和 7 月 O₃ 污染最明显。O₃ 质量浓度日变化呈单峰型,07—08 时为谷值,15—16 时达到峰值后迅速下降。

(2)O₃ 质量浓度与气温、风速、日照时数呈显著正相关关系,与相对湿度呈显著负相关关系。当日最高气温在 32~39 ℃之间,日照时数 5 h 以上,日平均湿度在 33%~74%之间,日平均风速在 1~3 m/s 之间,O₃ 污染概率明显增加,且强度也增强,更易出现 O₃ 中度污染。

(3)西安市臭氧污染的天气形势分为脊前西北气流型、平直气流型、槽前西南气流型和副高型,占比最高的为脊前西北气流型和平直气流型,地面多为均压场或低压控制。主城区 O₃ 污染的空间分布呈现明显的西高东低特征。脊前西北气流和槽前西南气流控制时,城西和城北 O₃ 污染较明显,污染区域相对更广;平直气流控制时,仅在城西 O₃ 污染较多;副高控制时,主城区西南部 O₃ 污染更多。

参考文献:

[1] 柴发合. 我国大气污染治理历程回顾与展望[J]. 环境与可持续发展, 2020,45(3):5-15.
 [2] 唐孝炎,张远航,邵敏. 大气环境化学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:232.
 [3] HAMER P D, BOWMAN K W, HENZE D K, et al. The impact of observing characteristics on the a-

bility to predict ozone under varying polluted photochemical regimes[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015,15(18): 10645-10667.

- [4] 王芳,陈东升,程水源,等. 基于气流轨迹聚类的大气污染输送影响[J]. 环境科学研究, 2009, 22(6): 637-642.
 [5] 樊文雁,蔡子颖,姚青,等. 区域输送对天津臭氧污染的影响[J]. 中国环境科学, 2022, 42(11): 4991-4999.
 [6] 赵洁,丁俊傑,刘芮伶,等. 重庆市臭氧污染特征分析及天气分型研究[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(11): 62-69.
 [7] 徐锟,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): 36-45.
 [8] 黄蕾,王丽,杜萌萌,等. 2014—2020 年关中地区近地面臭氧污染特征及气象条件分析[J]. 干旱气象, 2023,41(3):413-422.
 [9] 贝耐芳,冯添,吴佳睿,等. 西安地区夏季臭氧的模拟研究[J]. 地球环境学报, 2017, 8(6):552-567.
 [10] 屈丽玮,赵强,马晓华,等. 西安市一次持续重污染过程的清除特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(2): 8-15.
 [11] 刘慧敏,蒋伊蓉,高美美,等. 陕西初夏臭氧污染事件及其成因[J]. 陕西气象, 2023 (2):28-34.
 [12] 马文静. 西安主城区近地面大气中臭氧浓度时空分布特征分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014.
 [13] 卢娣,董自鹏,曹慧萍,等. 西安市臭氧污染特征及其气象条件的关系[J]. 陕西气象, 2020 (1):14-19.
 [14] 杜怡心,胡琳,王琦,等. 2016 年西安市气象条件对大气污染影响评价[J]. 陕西气象, 2018 (1): 30-33.
 [15] 张灿,蒋昌潭,罗财红,等. 气象因子对臭氧的影响及其在空气质量预报中的应用[J]. 中国环境监测, 2017,33 (4):221-228.
 [16] 翁佳峰,梁晓峰,谭浩波,等. 基于 K-means 聚类分析法的肇庆市干季 PM_{2.5} 污染天气分型研究[J]. 环境科学学报, 2020,40(2): 15-29.
 [17] 李婷苑,陈靖扬,翁佳峰,等. 广东省臭氧污染天气型及其变化特征[J]. 中国环境科学, 2022,42 (5): 2015-2024.
 [18] 胡琳,程路,王琦,等. 西安近地面臭氧浓度特征及关键气象因子分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021,35 (6): 102-109.