

蔡惠文,陈欣昊,郑珊珊,等. 高陵区近5年臭氧污染变化及输送路径分析[J]. 陕西气象,2023(6):47-51.

文章编号:1006-4354(2023)06-0047-05

# 高陵区近5年臭氧污染变化及输送路径分析

蔡惠文<sup>1,2</sup>,陈欣昊<sup>3</sup>,郑珊珊<sup>4</sup>,钟鸣<sup>1</sup>,周孟樵<sup>5</sup>,杨涛<sup>5</sup>

(1. 高陵区气象局,陕西高陵 710200;

2. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710016;

3. 西安市气象台,西安 710016;4. 鄠邑区气象局,陕西鄠邑 710300;

5. 西安市公共气象服务中心,西安 710016)

**摘要:**利用西安市高陵区2018—2022年臭氧( $O_3$ )逐小时质量浓度资料,统计分析 $O_3$ 质量浓度(用 $C(O_3)$ 表示)的年、月、日变化特征,并利用Mann-Kendall检验法和Theil-sen斜率法分析 $C(O_3)$ 年际变化趋势;基于HYSPLIT-4后向轨迹模式,研究以高陵为受点的 $O_3$ 输送特征。结果表明:(1)近5a高陵 $C(O_3)$ 呈波动升高趋势, $O_3$ 日最大8h平均质量浓度(用 $C_{8h}(O_3)$ 表示)呈波动下降趋势, $C_{8h}(O_3)$ 超标日数呈减少趋势。(2) $C(O_3)$ 日变化呈“单峰型”,午后高,凌晨低; $C(O_3)$ 和 $C_{8h}(O_3)$ 月均最高值出现在6月,最低值在12月。(3)近5a高陵 $O_3$ 质量浓度评价值和年均值增加趋势不显著,背景值升高趋势显著,平均每年增加 $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $C_{8h}(O_3)$ 年际变化趋势表现为秋冬季升高趋势显著,春夏季升高趋势不明显。(4)经聚类分析得到晴天到达高陵的气团输送路径共4条,分别来自西北、东南偏南、东南三个方向,其中东南偏南与东南方向两类气团出现频率最高,分别为43.15%和20.54%,且该来向气团对应的 $C(O_3)$ 较高,对高陵 $O_3$ 污染贡献较大。

**关键词:**臭氧污染;趋势变化;后向轨迹;聚类分析

中图分类号:X515

文献标识码:A

2013年《大气污染防治行动计划》实施以来,我国污染物排放标准不断提高,污染控制措施日渐严格,人为污染物的排放大幅削减,导致重污染天气日数和以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的超标日数明显减少<sup>[1]</sup>。有学者研究发现,近地层 $O_3$ 质量浓度却呈逐年上升趋势,2013—2019年除少数地区外,全国范围内 $O_3$ 质量浓度持续增长,年平均增加 $2\sim 4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ <sup>[2]</sup>。 $O_3$ 为光化学反应产生的二次污染物,大量和空气质量相关的流行病学研究表明, $O_3$ 会对公众健康、生态环境、作物产量等造成影响<sup>[3]</sup>,因此 $O_3$ 污染引起了国内外的普遍关注<sup>[4]</sup>。国内针对京津冀地区、长江三角洲、珠江三

角洲地区 $O_3$ 污染已开展了一系列研究<sup>[5-7]</sup>。

近几年来,关中地区连续发生了污染范围广、持续时间长、污染程度重、累积效应大的重污染天气,关中城市群已成为全国大气污染最严重的区域之一,被列入全国大气污染重点防治区域。相关研究表明,关中城市群 $O_3$ 质量浓度呈逐年升高趋势, $O_3$ 已成为关中地区仅次于颗粒物的第二大空气污染物<sup>[8]</sup>,2015—2021年关中城市群 $O_3$ 质量浓度背景值平均每年增加 $2.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ <sup>[9]</sup>。高陵作为关中的“白菜心”,是万亿级制造业的核心区,随着区政府对生态环境的重视度日益增高,环境质量改善和污染治理压力不断增大。分析该

收稿日期:2022-12-15

作者简介:蔡惠文(1988—),女,汉族,陕西西安人,硕士,工程师,从事预报服务及空气污染研究。

通信作者:陈欣昊(1992—),女,汉族,陕西西安人,硕士,工程师,从事天气预报和数值模拟研究。

基金项目:中国气象局创新发展专项(CXFZ2022P021);陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2023Y-11)

地区 O<sub>3</sub> 污染特征、变化规律及潜在输送路径,为当地 O<sub>3</sub> 污染防护和减排决策,以及大气污染治理提供科学依据。

## 1 资料来源与研究方法

气象数据为高陵国家气象观测站的气温、日照时数、降水量、相对湿度等气象要素日均值。逐时 O<sub>3</sub> 质量浓度(用 C(O<sub>3</sub>)表示)数据来自全国城市空气质量实时发布平台(https://air.cnemc.cn:18007/),选取高陵区无线电监控中心站(国控空气质量监测站)资料,质量控制后做均值处理得出逐日、逐月及年平均 C(O<sub>3</sub>)值,采用 8 h 滑动平均计算得出臭氧 8 h 滑动平均质量浓度值和日最大 8 h 平均质量浓度值(用 C<sub>8h</sub>(O<sub>3</sub>)表示)。

选取 Mann-Kendall 检验法和 Theil-sen 斜率法,定量诊断高陵区 2018—2022 年 O<sub>3</sub> 的年际变化趋势。Mann-Kendall 是一种基于秩的非参数统计方法,能客观地表征样本序列变化趋势,可用来分析 O<sub>3</sub> 年际变化过程是处于自然波动还是存在确定的变化趋势<sup>[10]</sup>。Theil-sen 斜率法是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,该方法对于测量误差和离群数据不敏感,通常与 Mann-Kendall 检验法结合使用,即首先计算 Sen 趋势值,然后使用 Mann-Kendall 方法判断趋势显著性。

采用美国海洋与大气管理局开发的 HYS-PLIT4 (hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory model4) 模式计算后向轨迹数据,并对气流轨迹进行聚类分析。该模式具有多种气象输入场、多种物理过程和不同类型排放源,可以直观地了解大气中气团和粒子运动轨迹,常用于研究大气污染物的平流输送、气团来源<sup>[11-12]</sup>。

使用 MeteoInfo 软件画图和轨迹聚类,并统计每类轨迹的出现频率及对应的 C(O<sub>3</sub>)。

## 2 O<sub>3</sub> 污染基本特征

### 2.1 年变化特征

按照《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》(HJ 633-2012)以及《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)的污染物项目质量浓度限值对 O<sub>3</sub> 质量浓度进行分级(见表 1),空气质量指数等级为轻度污染及以上即为超标<sup>[13]</sup>。近 5 a 高陵区 C(O<sub>3</sub>)和 C<sub>8h</sub>(O<sub>3</sub>)的逐年变化见图 1。由图 1 可知,近 5 a 高陵 C(O<sub>3</sub>)呈波动升高趋势,C<sub>8h</sub>(O<sub>3</sub>)呈波动降低趋势。近 5 a C(O<sub>3</sub>)平均值为 53.1 μg/m<sup>3</sup>,最大值为 141.4 μg/m<sup>3</sup>;2022 年的平均值为近 5 a 峰值,达到 57.8 μg/m<sup>3</sup>,2021 年最低为 48.1 μg/m<sup>3</sup>。近 5 a C<sub>8h</sub>(O<sub>3</sub>)平均值为 92.7 μg/m<sup>3</sup>,最大值为 266.0 μg/m<sup>3</sup>;2022 年平均最高达 100.8 μg/m<sup>3</sup>,2021 年平均最低为 85.0 μg/m<sup>3</sup>。

表 1 O<sub>3</sub> 质量浓度分级对应的质量浓度阈值

| 单位:μg/m <sup>3</sup> |          |                    |                                   |
|----------------------|----------|--------------------|-----------------------------------|
| 空气质量指数级别             | 空气质量指数等级 | C(O <sub>3</sub> ) | C <sub>8h</sub> (O <sub>3</sub> ) |
| 一级                   | 优        | (0, 160]           | (0, 100]                          |
| 二级                   | 良        | (160, 200]         | (100, 160]                        |
| 三级                   | 轻度污染(超标) | (200, 300]         | (160, 215]                        |
| 四级                   | 中度污染(超标) | (300, 400]         | (215, 265]                        |
| 五级                   | 重度污染(超标) | (400, 800]         | (265, 800]                        |

注:C<sub>8h</sub>(O<sub>3</sub>)高于 800 μg/m<sup>3</sup> 不参与空气质量指数计算。

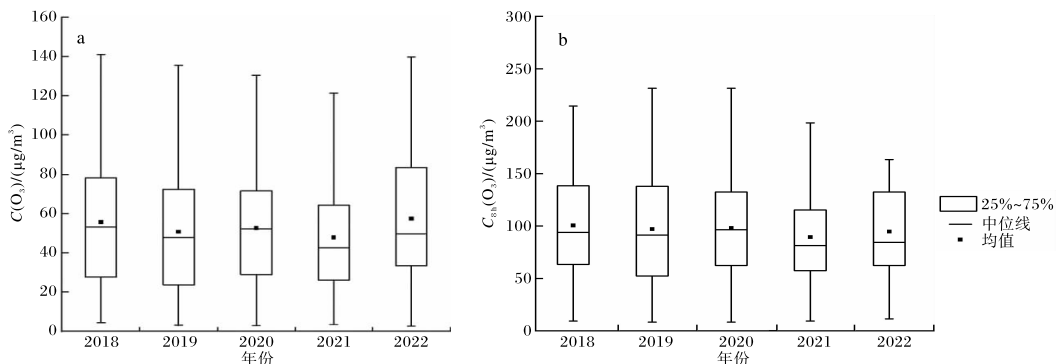


图 1 2018—2022 年西安市高陵区平均 C(O<sub>3</sub>) (a) 和 C<sub>8h</sub>(O<sub>3</sub>) (b) 逐年变化箱线图

经统计,高陵近5 a  $C(O_3)$ 日均值均未超过一级限值  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $C_{8h}(O_3)$ 超标日数整体上呈减少趋势,具体表现为:一级(优)和四级(中度污染)波动增多,二级(良)与三级(轻度污染)波动减少,五级(重度污染)仅在2021年出现1 d。如图2所示:2019年  $C_{8h}(O_3)$ 超标日数最多,为45 d;其次是2018和2022年,分别为39 d、42 d;2021年  $C_{8h}(O_3)$ 超标日数最少,为25 d。

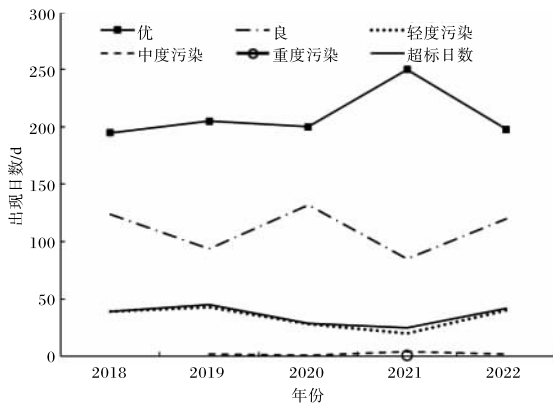


图2 2018—2022年西安市高陵区不同级别  $C_{8h}(O_3)$  出现日数逐年变化

按照《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663—2013)中规定,城市  $O_3$  污染水平年评价采用的是  $C_{8h}(O_3)$  的第90百分位数。本研究还选用了  $C_{8h}(O_3)$  年均值和第五百分位数代表  $O_3$  质量浓度的平均水平和背景水平<sup>[14]</sup>。近5 a 高陵  $O_3$  质量浓度评价值多年平均值为  $160.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $O_3$  背景值多年平均值为  $24.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $C_{8h}(O_3)$  多年平均值为  $94.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

利用 Mann-Kendall 检验法和 Theil-Sen 斜率法对高陵近5 a  $O_3$  质量浓度评价值、年均值以及浓度背景值的年际变化趋势进行分析。结果显

示:  $O_3$  质量浓度评价值、年均值增加趋势不显著,平均每年增加为  $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;背景值增加趋势显著,平均每年增加  $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

以  $C_{8h}(O_3)$  季均值为例分析  $O_3$  质量浓度年际变化趋势的季节差异:  $C_{8h}(O_3)$  春季和夏季增加趋势不明显;秋季和冬季增加趋势显著,平均每年增加  $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

## 2.2 月变化特征

高陵近5 a  $O_3$  质量浓度、轻度及以上污染日数和气象条件的月变化见图3。可以看出,  $C(O_3)$  月均值和  $C_{8h}(O_3)$  月均值的最大值均出现在6月,最低值出现在12月。  $C(O_3)$  全年均未出现超标日。  $C_{8h}(O_3)$  在10月一次年3月未出现超标日,6—8月出现中度及以上污染日,其他月份无中度及以上污染日。其中6月的  $C_{8h}(O_3)$  超标日数最多,为13.5 d。在氮氧化物和挥发性有机污染物等  $O_3$  前体物排放量相对稳定的情况下,太阳辐射、气温、湿度等气象因子通过影响  $O_3$  光化学反应,影响近地面  $O_3$  质量浓度。研究表明高温、强辐射(少云)、低湿和少风的气象条件更有利于  $O_3$  污染的形成<sup>[15-16]</sup>。经统计,近5 a 高陵6月的平均日照时数及平均气温为全年第3高月份,相对湿度、降水量为夏季最低(少)月份,该月气象要素有利于  $O_3$  污染的形成。7月和8月虽然气温较6月高,但同时降水量也较大,对抑制  $O_3$  污染有一定作用。以上分析表明,4—9月为高陵  $O_3$  污染高发时段。

## 2.3 日变化特征

$C(O_3)$  日变化呈“单峰型”特征(图4),表现为午后高,凌晨低。傍晚随着太阳辐射减弱,气温降低,  $C(O_3)$  呈减小趋势,波谷出现在07时左右。

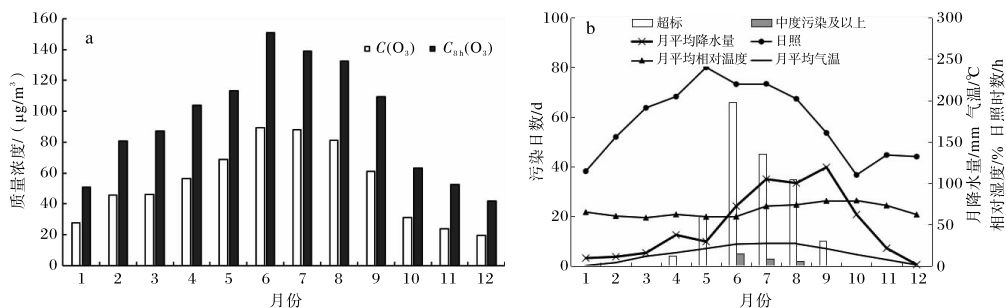


图3 2018—2022年西安市高陵区  $C(O_3)$ 、 $C_{8h}(O_3)$ (a),轻度及以上污染日数和气象要素(b)月变化

之后,随着  $O_3$  前体物的逐渐累积,以及太阳辐射逐渐增强,气温不断升高,光化学反应增强,导致  $C(O_3)$  逐渐增大,峰值出现在 16 时左右,之后缓慢降低。傍晚太阳辐射逐渐减弱,随着光化学反应减弱,  $C(O_3)$  持续降低。

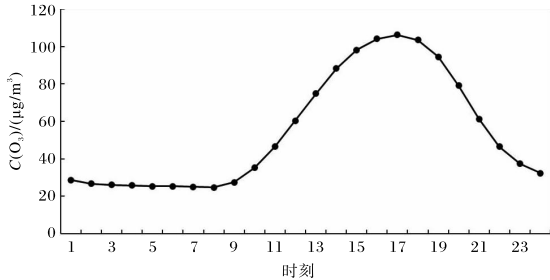


图4 2018—2022年西安市高陵区  $C(O_3)$  日变化

### 3 $O_3$ 输送路径研究

上节分析得出每年 4—9 月为高陵  $O_3$  污染高发时段,由于晴天辐射和紫外线强有利于  $O_3$  生成,因此重点针对 4—9 月的晴天,利用后向轨迹模式聚类分析方法,分析高陵  $O_3$  的主要输送路径。按照《天气预报基本术语》(GB/T 35663—2017)中规定的天空总云量 0~2 成为晴天,根据常规气象观测资料筛选出 2021、2022 年 4—9 月晴天共 55 d。以高陵环境监测站点无线电监控中心作为后向轨迹的起始点,推算时间为 24 h,后向轨迹起始高度为距地面 100 m,轨迹时间分辨率为 1 h,得到 1 320 条后向轨迹(图略),其中超标轨迹约占 13.6%。

通过欧式距离算法将相似速率与方向的轨迹进行合并,代表一个特定的输送路径,发现气团输送路径共有 4 条(图 5),分别来自西北、东南偏南、东南 3 个方向。其中轨迹 1 属于长距离输送气团,来自西北方向,起源于甘肃东部、途径关中中部地市(咸阳)到达高陵,占总轨迹数的 16.96%。轨迹 3 属于中长距离输送气团,来自东南方向,起源于河南西部,途径关中中部地市(商洛北部、渭南)、高陵东临区县(临潼)到达高陵,占比为 20.54%。轨迹 2 和轨迹 4 属于短距离输送气团,分别来自西北方向和东南偏南方向,占比分别为 19.35%和 43.15%。轨迹 2 起源于高陵西临地市(咸阳)。轨迹 4 起源于陕西南部商洛市,

穿过西安南部区县和城区向北输送到达高陵。从聚类轨迹的分布看,高陵 24 h 气团后向轨迹多集中在陕西南部,传输距离相对较短。

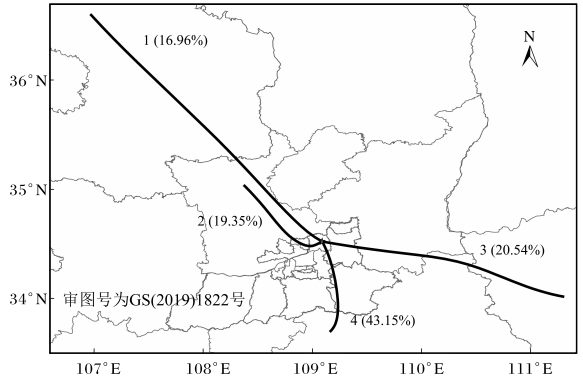


图5 2021、2022年4—9月西安市高陵区晴天 100 m 高度的后向轨迹聚类分析

结合气流轨迹  $C(O_3)$  数据(图 6),分析不同轨迹污染物特征:中长距离输送轨迹 3 的  $C(O_3)$  均值最高,为  $120.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。占比最大的短距离输送轨迹 4 的  $C(O_3)$  均值为  $91.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。轨迹占比较低的西北来向轨迹 1 和轨迹 2 的  $C(O_3)$  均值也较小,分别为  $63.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $82.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,说明轨迹 1 和轨迹 2 的气团相对较为清洁,西北来向轨迹的气团输送对高陵  $C(O_3)$  影响较小。轨迹 3 和轨迹 4 的气团输送对  $C(O_3)$  均值综合影响较大,说明东南来向和东南偏南来向的气团对高陵的  $C(O_3)$  贡献较高,更容易导致高陵出现  $O_3$  污染天气。

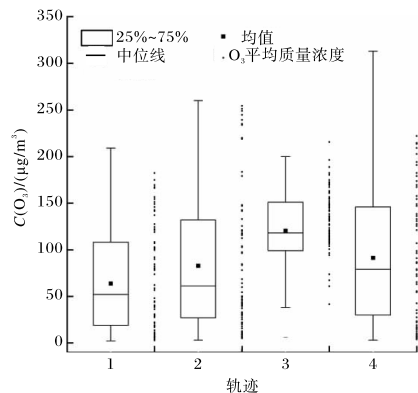


图6 2021、2022年4—9月西安市高陵区晴天各类轨迹  $C(O_3)$  箱线图

## 4 结论

(1)2018—2022年高陵 $C(O_3)$ 呈波动升高趋势, $C_{8h}(O_3)$ 呈波动降低趋势。近5a $C(O_3)$ 最大值为 $141.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ , $C_{8h}(O_3)$ 最大值为 $266.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 $C(O_3)$ 月均值和 $C_{8h}(O_3)$ 的最高值均出现在6月,最低出现在12月。

(2) $C(O_3)$ 日变化呈“单峰型”特征,峰值出现在16时左右,谷值出现在07时左右。

(3)近5a $C_{8h}(O_3)$ 超标日数总体为减少趋势,具体表现为一级(优)和四级(中度污染)波动增多,二级(良)与三级(轻度污染)波动减少。其中,6月的超标日数最多,10月一次年3月未出现 $O_3$ 超标日。

(4)高陵 $C(O_3)$ 评价值和 $C_{8h}(O_3)$ 年均值上升趋势不显著, $C(O_3)$ 背景值上升趋势显著,平均每年增加 $2.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 $C_{8h}(O_3)$ 年际变化趋势表现为秋冬季上升趋势显著,春夏季上升趋势不明显。

(5)从聚类结果分析来看,到达高陵的气团输送路径共4条,分别来自西北、东南偏南、东南3个方向。其中东南与东南偏南方向两类气团占比最高,分别为20.54%和43.15%,且该来向的气团对应的 $C(O_3)$ 均较高,对高陵 $O_3$ 污染贡献较大。

### 参考文献:

- [1] 生态环境部. 中国空气质量改善报告(2013—2018年)[R]. 北京:生态环境部,2019:1-5.
- [2] LI K, JACOB D J, LIAO H, et al. Anthropogenic drivers of 2013–2017 trends in summer surface ozone in China[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2019, 116(2): 422–427.
- [3] WANG F, QIU X, CAO J, et al. Policy-driven changes in the health risk of  $PM_{2.5}$  and  $O_3$  exposure in China during 2013–2018[J]. Science of The Total Environment, 2021:143775.
- [4] HU X M, DOUGHTY D C, SANCHEZ K J, et al. Ozone variability in the atmospheric boundary layer in Maryland and its implications for vertical transport model[J]. Atmospheric Environment, 2012, 46: 354–364.
- [5] 张蕊, 孙雪松, 王裕, 等. 北京市城区夏季大气VOCs变化特征及臭氧生成潜势[J]. 环境科学, 2023, 44(4): 1954–1961.
- [6] 邓雪娇, 周秀骥, 吴兑, 等. 珠江三角洲大气气溶胶对地面臭氧变化的影响[J]. 中国科学:地球学, 2011, 41(1): 93–102.
- [7] 易睿, 王亚林, 张殷俊, 等. 长江三角洲地区城市臭氧污染特征与影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2370–2377.
- [8] 芮守娟. 关中地区臭氧浓度变化特征及其形成过程的数值模拟[D]. 西安:长安大学, 2019.
- [9] 赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 等. 2015—2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势[J]. 环境科学, 2023, 43(12): 5399–5406.
- [10] LIBISELLER C, GRIMVALL A. Performance of partial Mann–Kendall tests for trend detection in the presence of covariates [J]. Environmetrics, 2002, 13(1): 71–84.
- [11] 张向荣, 乔丹杨. 2020年西安一次持续重污染过程成因及输送特征分析[J]. 陕西气象, 2021(5): 30–35.
- [12] 李培荣, 姚静, 张煦庭, 等. 西安冬季不同环流形势下大气细颗粒物的输送特征研究[J]. 陕西气象, 2022(4): 7–14.
- [13] 丁丽佳, 凌良新, 谢汉良. 潮州市 $O_3$ 质量浓度变化及其与气象因子的关系[J]. 广东气象, 2022, 44(5): 28–35.
- [14] YAN Q Y, WANG Y H, CHENG Y, et al. Summertime clean-background ozone concentrations derived from ozone precursor relationships are lower than previous estimates in the southeast United States[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(19): 12852–12861.
- [15] 卢娣, 董自鹏, 曹慧萍, 等. 西安市臭氧污染特征及其与气象条件的关系[J]. 陕西气象, 2020(1): 14–19.
- [16] 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.