

西安市臭氧污染特征及其与气象条件的关系

卢娣^{1,2},董自鹏^{2,3},曹慧萍¹,李星敏^{2,3}

(1. 陕西省气象服务中心,西安 710014;

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. 陕西省气象科学研究所,西安 710016)

摘要:基于2014—2017年西安市环保局臭氧观测资料、泾河气象站总辐射和气象资料以及长安气象站紫外辐射和气象资料,对西安市臭氧污染特征及其与气象条件的关系进行了研究。结果表明:西安市臭氧质量浓度的日变化和月变化均呈明显的单峰形态;日最小值 $22.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和最大值 $100.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 分别出现在07时和16时;臭氧日最大8 h平均质量浓度(用 $C_{8h}(\text{O}_3)$ 表示)月均值最大为 $148.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$,最小为 $30.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$,分别出现在7月和11月。总辐射日最大辐照度、日总辐射曝辐量和日紫外辐射曝辐量与 $C_{8h}(\text{O}_3)$ 之间具有显著的正相关关系,并且以日紫外辐射曝辐量与 $C_{8h}(\text{O}_3)$ 的相关性最高,表明紫外辐射对近地面臭氧质量浓度的影响更为强烈。日最高气温、平均气温、日照时数和 $C_{8h}(\text{O}_3)$ 正相关,风速、相对湿度与 $C_{8h}(\text{O}_3)$ 负相关,表明晴空时高温、低湿、小风更有利于近地面臭氧的形成。统计关系显示,在5—8月,当日最高气温大于 35°C 或日最低相对湿度小于40%时,需要警惕臭氧超标污染的发生。

关键词:臭氧;气象要素;辐射;西安

中图分类号:X16

文献标识码:A

自《陕西省“治污降霾·保卫蓝天”五年行动计划(2013—2017年)》实施以来,关中地区大气污染防治取得了明显成效,可吸入颗粒物(PM_{10})和细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)质量浓度显著下降^[1-2](<http://www.shaanxi.gov.cn/gk/zfwj/47050.htm>),但臭氧(O_3)污染日数却逐渐增多^[3-4],给人体健康和生态环境带来不利影响,引起了人们的广泛关注。目前,我国地面 O_3 观测研究主要集中在华北、珠三角和长三角等地区^[5-7]。已有的研究表明,对流层臭氧的来源主要有平流层输入、区域输送和光化学反应,即交通、石化产业、燃煤排放的氮氧化物和挥发性有机物(VOCs)等臭氧前体物,在阳光照射下经一系列化学反应而生成 O_3 ^[8-9]。近年来,我国 O_3 污染不再局限于前体物

排放源附近,已形成区域性污染^[5]。 O_3 污染的形成,不仅受其前体物影响,还与气象条件密切相关。吴锴等^[10]在成都市的研究表明,当相对湿度大于85%时, O_3 质量浓度小于 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$,不会出现 O_3 超标情况;当相对湿度介于40%~60%时, O_3 超标率呈上升趋势^[11]。谈建国等^[12]研究发现上海市 O_3 污染多发生在日照强、温度高、风速低的气象条件下,并且郊区污染高于市区^[13]。王磊等^[14]发现南京近地面 O_3 质量浓度与气温、能见度、日照时数、总(净)辐射显著正相关,与相对湿度、总(低)云量负相关。张灿等^[15]研究认为影响重庆 O_3 质量浓度的主要气象因素为最高温度、温差、太阳辐射、降水量、相对湿度、水气压和压差,并据此建立了 O_3 质量浓度预报方程。

收稿日期:2019-06-21

作者简介:卢娣(1983—),女,汉族,江苏连云港人,学士,助工,主要从事专业气象服务。

基金项目:陕西省科技厅重点研发计划项目(2019SF-269);秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室基金课题(2019Z-7)

位于关中平原中部的西安市是关中最大的城市,在西安开展 O_3 污染研究对关中平原大气污染防治具有重要意义。目前,关于西安市 O_3 污染的研究仍较少,马文静^[16]以 O_3 日最大 8 h 平均质量浓度作为判定依据,对比了西安城区 O_3 超标日(最大 8 h 平均质量浓度 $>160 \mu\text{g}/\text{m}^3$)和非超标日(最大 8 h 平均质量浓度 $<100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)的气象条件,认为 O_3 超标日的气温和紫外辐射均明显高于非超标日,且在气压和湿度较低的情况下易发生 O_3 超标的情况。贝耐芳等^[17]利用 WRF-Chem (weather research and forecasting model coupled with chemistry) 模式对关中地区 2015 年 7 月 25—30 日的一次 O_3 污染事件进行了数值模拟。本文利用 2014—2017 年西安泾河、长安气象站和西安市环保局观测资料,对西安

析,以期为西安市臭氧污染预报与防治提供科学参考。

1 资料选取

所选用的臭氧资料包括西安市环保局监测的逐时 O_3 质量浓度数据($C(O_3)$)和逐日 O_3 最大 8 h 平均质量浓度(以下用 $C_{8h}(O_3)$ 表示)数据, $C(O_3)$ 数据选取时段为 2014 年 4 月 1 日—2017 年 7 月 31 日, $C_{8h}(O_3)$ 数据为 2014 年 1 月 1 日—2017 年 12 月 31 日;其中, $C(O_3)$ 数据主要用于臭氧质量浓度的日变化分析, $C_{8h}(O_3)$ 主要用于臭氧污染特征及其与气象参数和辐射关系的分析。臭氧污染等级的划分参照《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》(HJ633—2012), $C_{8h}(O_3)$ 与空气质量分指数(IAQI)的对应关系见表 1。

表 1 $C_{8h}(O_3)$ 及其对应的空气质量分指数和空气质量指数类别

$C_{8h}(O_3)/(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	≤ 100	101~160	161~215	216~265	> 265
IAQI	0~50	51~100	101~150	151~200	201~300
空气质量指数类别	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染

所采用的气象数据包括泾河气象观测站的日最高气温(T_{\max})、日平均气温(T_{mean})、日平均相对湿度(U_{mean})、日最小相对湿度(U_{\min})、日平均风速和日照时数,数据的选取时段与臭氧相同。应用到的辐射数据包括泾河气象站观测的总辐射日最大辐照度(F_{\max})和日总辐射曝辐量,以及长安气象站观测的日紫外辐射曝辐量。其中,泾河站辐射数据的选取时段为 2015 年 8 月 23 日—2017 年 7 月 31 日,长安站紫外辐射数据的选取时段为 2015 年 1 月 1 日—2017 年 3 月 30 日。

2 西安市臭氧质量浓度变化特征

2014—2017 年西安市轻度以上($C_{8h}(O_3) \geq 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$)臭氧污染主要出现在 5—8 月,并且以 7 月最多,8 月次之。研究期内,西安市年臭氧超标污染日数逐年显著增加,其中,2014 年仅出现 7 d,2015 年出现 14 d,2016 年出现 18 d,而 2017 年达到了 47 d。

2.1 O_3 质量浓度的日变化

图 1 给出西安市 O_3 质量浓度日变化情况,

可以看出,西安 O_3 质量浓度呈单峰型日变化,最小值 $22.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 出现在 07 时,随着太阳辐射和光化学反应的增强,日间 O_3 质量浓度逐渐上升,并在 16 时达到峰值 $100.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$,此后单调下降至次日 07 时。由于 20 时之后光化学反应基本停滞,同时,臭氧受 NO 滴定作用不断消耗^[18],夜间臭氧维持在低值。值得指出的是,西安市 O_3 质量浓度日变化幅度较大,最大值可是最小值的几倍。

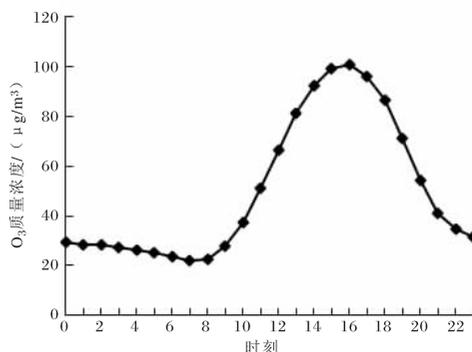


图 1 2014—2017 年西安市 O_3 平均质量浓度日变化

2.2 O₃ 质量浓度的月变化

图 2 给出 2014—2017 年 C_{8h}(O₃) 的逐月平均值,其月变化表现为明显的单峰型结构,峰值 148.5 μg/m³ 出现在 7 月,谷值 30.0 μg/m³ 出现在 11 月,谷峰之间单调递增,反之亦然。这种变化与京津冀地区相似^[6],但与华南城市地区 O₃ 质量浓度“M”型的月变化^[19] 有所不同。

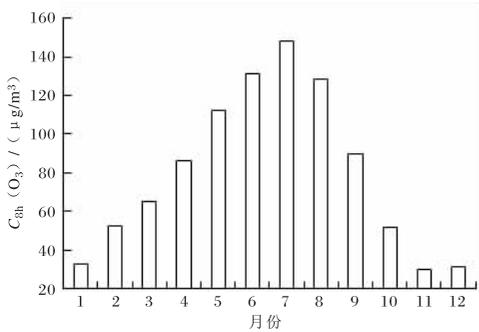


图2 2014—2017 年西安市各月 C_{8h}(O₃) 平均值

3 C_{8h}(O₃) 与辐射关系分析

3.1 C_{8h}(O₃) 与总辐射关系

辐射是触发光化学反应进而生成臭氧的重要条件之一,图 3 给出 2015 年 8 月 23 日—2017 年 7 月 31 日西安泾河气象站 F_{max} 与 C_{8h}(O₃) 的拟合曲线,可以看到,两者具有明显的指数关系,C_{8h}(O₃) 随 F_{max} 增大而增大。在 C_{8h}(O₃) > 160 μg/m³ 的样本中,F_{max} 最小值为 798 W/m²;然而,在 F_{max} > 800 W/m² 的条件下,仍然有 31% 的

染形成的必要但非充分条件。对日总辐射曝辐量与 C_{8h}(O₃) 的拟合分析(图略)表明,两者间也存在着类似的指数关系。

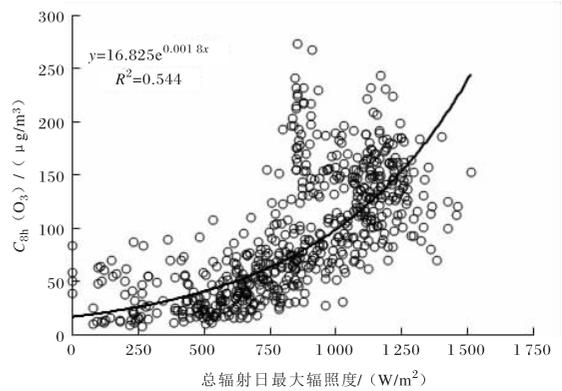


图 3 2015-08-23—2017-07-31 西安泾河 C_{8h}(O₃) 与总辐射日最大辐照度散点图

3.2 C_{8h}(O₃) 与紫外辐射关系

近紫外波段的太阳辐射能够影响 NO₂ 的光解反应速率,进而控制臭氧的生成速率^[20],对臭氧污染的形成至关重要。图 4 给出 2015 年 1 月 1 日—2017 年 3 月 30 日西安市长安区气象观测站日紫外辐射曝辐量与西安市环保局长安观测点 C_{8h}(O₃) 的拟合关系,可以看到,两者间显著正相关,表明紫外辐射的增加促进了近地面臭氧污染的形成。

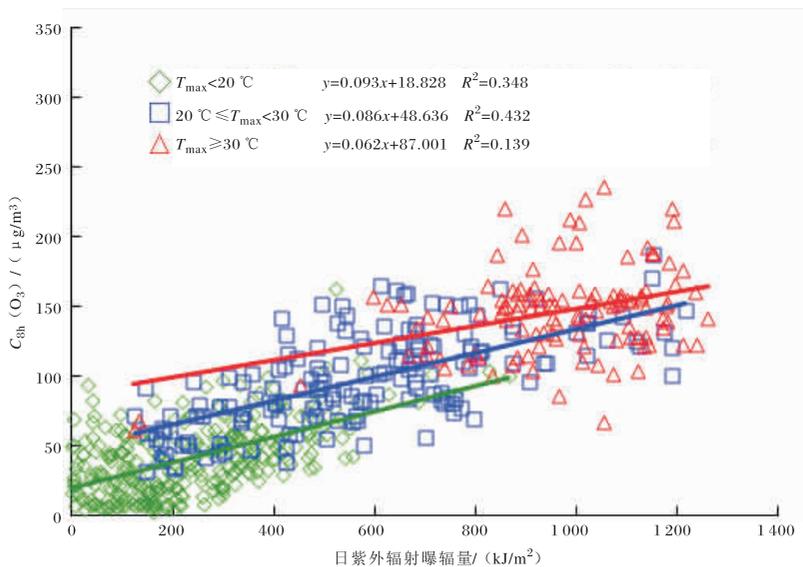


图 4 2015-01-01—2017-03-30 西安市长安区不同温度下日紫外辐射曝辐量与 C_{8h}(O₃) 散点图

鉴于辐射与气温关系密切,因此,在分
辐射与臭氧质量浓度的关系时,进一步考虑了
 T_{\max} 在其中的影响,并将之划分为: $T_{\max} < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{\max} < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $T_{\max} \geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 三个区间。图
4 同时给出了不同温度区间内紫外辐射与
 $C_{8h}(\text{O}_3)$ 的关系。当 $T_{\max} < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,日紫外辐射
曝辐量的平均值为 242.5 kJ/m^2 , $C_{8h}(\text{O}_3)$ 平均值
为 $41.5\text{ }\mu\text{g/m}^3$,且仅有 2.6% 的 $C_{8h}(\text{O}_3) >$
 $100\text{ }\mu\text{g/m}^3$;当 T_{\max} 在 $20\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,日紫外辐射
曝辐量平均值增大至 586.1 kJ/m^2 , $C_{8h}(\text{O}_3)$ 随之
增大,平均值达到 $98.9\text{ }\mu\text{g/m}^3$,有 47.5% 的
 $C_{8h}(\text{O}_3) > 100\text{ }\mu\text{g/m}^3$;而当 $T_{\max} \geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,日紫
外辐射曝辐量平均值增大到 957.4 kJ/m^2 ,相应
地, $C_{8h}(\text{O}_3)$ 平均值增大至 $146.3\text{ }\mu\text{g/m}^3$, 79.3%
的 $C_{8h}(\text{O}_3) > 100\text{ }\mu\text{g/m}^3$,其中, 17.9% 的 $C_{8h}(\text{O}_3)$
超过 $160\text{ }\mu\text{g/m}^3$,形成臭氧超标污染。

由于 5—8 月是臭氧污染的集中期,因此,对
于 $C_{8h}(\text{O}_3)$ 与气象要素关系的分析仅采用 2014—
2017 年 5—8 月的数据。此外,气温、相对湿度等
气象要素的季节变化与臭氧质量浓度的季节变化
具有较高的相关性,只采用 5—8 月的数据,能够
一定程度上剔除气象要素和臭氧协同变化对两者
关系的影响。

表 2 为西安在不同 $C_{8h}(\text{O}_3)$ 情况下对应的泾
河气象站日最高气温 (T_{\max})、日平均气温 (T_{mean})、
日平均相对湿度 (U_{mean})、日最低相对湿度 (U_{min})、
日平均风速及日照时数的平均值,可以看出,随着
 $C_{8h}(\text{O}_3)$ 的增大,相应的 T_{\max} 、 T_{mean} 的平均值在上
升,而 U_{mean} 、 U_{min} 和日平均风速在下降,表明高
温、低湿、弱风有利于 O_3 生成和 O_3 质量浓度的
增加。

表 2 2014—2017 年 5—8 月西安在不同 $C_{8h}(\text{O}_3)$ 情况下泾河站各气象要素平均值

$C_{8h}(\text{O}_3)/(\mu\text{g/m}^3)$	≤ 100	101~160	161~215	216~265	$> 265^{\text{①}}$
日最高气温/ $^{\circ}\text{C}$	26.3	32.1	34.9	37.0	39.9
日平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	21.8	26.1	28.5	30.3	32.2
日平均相对湿度/ $\%$	69.3	57.0	52.5	43.6	37.5
日最低相对湿度/ $\%$	47.9	34.9	31.3	24.7	20.5
日平均风速/(m/s)	2.5	2.6	2.2	1.8	1.7
日照时数/h	2.5	8.1	10.5	11.3	11.8

注:①表示研究时段内样本数仅有 2 个。

4.1 $C_{8h}(\text{O}_3)$ 与气温的关系

从泾河 T_{\max} 与 $C_{8h}(\text{O}_3)$ 的对应关系(表 2)来
看:当 $C_{8h}(\text{O}_3) > 160\text{ }\mu\text{g/m}^3$ 时, T_{\max} 的平均值为
 $34.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{\max} 的最小值为 $26.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{mean} 的平均值
为 $28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;当 $C_{8h}(\text{O}_3) > 215\text{ }\mu\text{g/m}^3$ 时, T_{\max} 平均
值为 $37.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_{mean} 的平均值为 $30.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明温度
越高越有利于 O_3 的生成。从西安泾河站 T_{\max} 与
 $C_{8h}(\text{O}_3)$ 散点图(图 5)来看,两者具有明显的正相
关关系, T_{\max} 越高, O_3 质量浓度越大,当 T_{\max} 高于
 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,就应警惕臭氧超标污染的发生。

4.2 $C_{8h}(\text{O}_3)$ 与相对湿度的关系

从表 2 可以看出,随着 O_3 质量浓度的增加,
 U_{mean} 平均值在减小。当 $C_{8h}(\text{O}_3) > 160\text{ }\mu\text{g/m}^3$ 时,

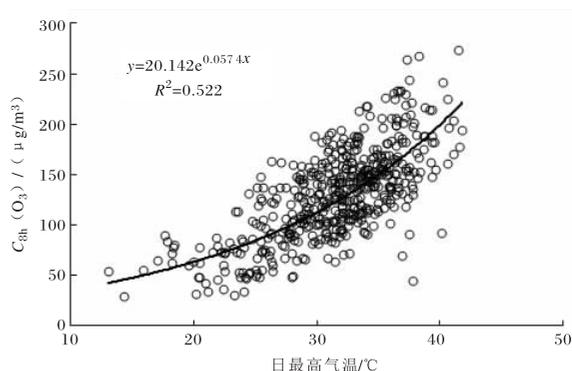


图 5 2014—2017 年 5—8 月西安泾河站日
最高气温与 $C_{8h}(\text{O}_3)$ 散点图

U_{mean} 的平均值为 52.5% ;当 $C_{8h}(\text{O}_3) > 215\text{ }\mu\text{g/m}^3$
时, U_{mean} 的平均值为 43.6% 。这表明湿度低更有

利于 O_3 的生成。图 6 为 $C_{8h}(O_3)$ 与 U_{mean} 的关系。由图 6 可以看出: 在 $U_{mean} > 75\%$ 的样本中, 80.6% 的 $C_{8h}(O_3) < 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $C_{8h}(O_3)$ 超过 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的仅有 1 d; 在 $50\% < U_{mean} \leq 75\%$ 的样本中, 18.5% 的 $C_{8h}(O_3)$ 超过 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 并且有 1 d 的 $C_{8h}(O_3) > 215 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 达到了中度污染; 而在 $U_{mean} \leq 50\%$ 的样本中, 41.8% 的 $C_{8h}(O_3) > 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 发生臭氧超标污染的天数占整个研究时段内臭氧超标污染总天数的 55.7%, 其中有 17 d 的 $C_{8h}(O_3) > 215 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 达到中度污染, 占研究时段内中度以上臭氧污染总天数(18 d)的 94.44%。

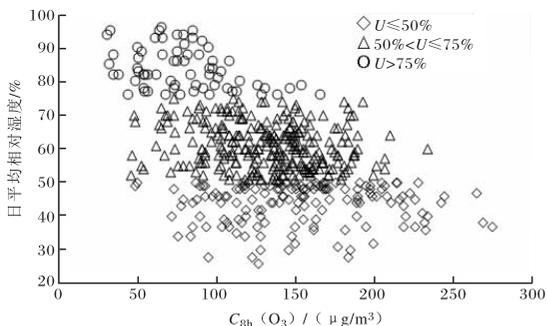


图 6 2014—2017 年 5—8 月西安泾河站日平均相对湿度与 $C_{8h}(O_3)$ 散点图

考虑到臭氧超标污染主要出现在白天, 而相对湿度(U)日变化的低值也主要出现在白天, 因此, 进一步分析 U_{min} 与 $C_{8h}(O_3)$ 的关系(表 2)。当 $U_{min} > 70\%$ 时, 仅有 2 d 的 $C_{8h}(O_3)$ 超过 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 但仍小于 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 未出现臭氧超标污染; 当 $40\% < U_{min} \leq 60\%$ 时, 71.3% 的 $C_{8h}(O_3)$ 超过 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 10.7% (13 d) 的 $C_{8h}(O_3) > 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 出现轻度臭氧污染天气, 但未出现中度污染; 在 $U_{min} \leq 40\%$ 的样本中, 84.2% 的 $C_{8h}(O_3) > 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。研究时段内臭氧超标污染天气共出现 115 d, 其中有 102 d 的 $U_{min} \leq 40\%$, 占 88.7%, 而中度以上臭氧污染全部出现在这一相对湿度条件下; 因此 U_{min} 小于 40% 时, 需要警惕臭氧超标污染的发生。

4.3 $C_{8h}(O_3)$ 与日照时数、日平均风速关系

分析 5—8 月 $C_{8h}(O_3)$ 与日照时数的关系发现: 当 $C_{8h}(O_3) > 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时, 日照时数的平均值在 10.5 h 以上(表 2), 96.5% 的臭氧超标污染

日照时数大于 8 h; 而 $C_{8h}(O_3) < 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的天数中, 72.8% 的日照时数小于 3 h。因此, 较长的日照更有利于臭氧的生成。

从表 2 可以看出, 随着臭氧质量浓度的增大, 日平均风速的平均值也在减小, 臭氧超标污染日的平均风速小于非臭氧超标污染日。综合 $C_{8h}(O_3)$ 与日照时数和日平均风速的分析结果来看, 在晴天、小风情况下, 更容易出现臭氧污染。

5 结论与讨论

(1) 西安市臭氧质量浓度的日变化和月变化具有明显的单峰型特征, 研究时段内日最大值($100.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)和最小值($22.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)分别出现在 16 时和 07 时, $C_{8h}(O_3)$ 月最大值($148.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)和最小值($30.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)分别出现在 7 月和 11 月; 近年来, 西安市臭氧超标污染天数增加明显。

(2) 总辐射日最大辐照度、日总辐射曝辐量和日紫外辐射曝辐量与 $C_{8h}(O_3)$ 均具有显著的正相关关系。其中, 前两者与 $C_{8h}(O_3)$ 表现为指数函数关系, 而日紫外辐射曝辐量与 $C_{8h}(O_3)$ 表现为线性函数关系, 并且紫外辐射与 $C_{8h}(O_3)$ 的相关系数高于总辐射, 表明其在臭氧形成过程中所起的作用更为重要。

(3) 日最高气温、平均气温、日照时数和 $C_{8h}(O_3)$ 正相关, 风速和相对湿度与 $C_{8h}(O_3)$ 负相关, 表明晴空条件下, 高温、低湿、小风更有利于大气中臭氧的形成。在 5—8 月, 当日最高气温大于 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 或者日最低相对湿度小于 40% 时, 应警惕臭氧超标污染的发生。

参考文献:

- [1] 金丽娜, 李雄飞, 李军. 关中地区 PM_{10} 质量浓度及 MODIS 气溶胶光学厚度时空特征分析[J]. 干旱气象, 2018, 36(1): 110-116.
- [2] 孙铎, 周秀艳. 西安市环境空气中颗粒物的年际变化特征[C]// 二氧化氯研究与应用进展——2017 年全国水质安全与二氧化氯应用技术研讨会论文集. 青岛: 全国化工标准物质委员会二氧化氯专业委员会, 2017: 78-81.
- [3] 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)

- [4] 张侠, 胡琳, 王琦, 等. 2017 年陕西气象条件对大气环境质量影响分析[J]. 陕西气象, 2018(1): 25-29.
- [5] 徐晓斌. 我国霾和光化学污染观测研究进展[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5): 604-619.
- [6] 潘本锋, 程麟钧, 王建国, 等. 京津冀地区臭氧污染特征与来源分析[J]. 中国环境监测, 2016, 32(5): 17-23.
- [7] 程麟钧, 王帅, 宫正宇, 等. 京津冀区域臭氧污染趋势及时空分布特征[J]. 中国环境监测, 2017, 33(1): 14-21.
- [8] 安俊琳. 北京大气臭氧浓度变化特征及其形成机制研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- [9] 包艳英, 徐洁, 张明明, 等. 大连市臭氧污染特征及典型污染日成因[J]. 中国环境监测, 2017, 33(4): 167-178.
- [10] 吴锴, 康平, 王占山, 等. 成都市臭氧污染特征及气象成因研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4241-4252.
- [11] 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.
- [12] 谈建国, 陆国良, 耿福海, 等. 上海夏季近地面臭氧浓度及其相关气象因子的分析和预报[J]. 热带气象学报, 2007, 23(5): 515-520.
- 臭氧及硫酸盐气溶胶时空分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2214-2222.
- [14] 王磊, 刘端阳, 韩桂荣, 等. 南京地区近地面臭氧浓度与气象条件关系研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1285-1296.
- [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] 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.
- [17] 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.
- [18] 林莉文, 卞建春, 李丹, 等. 北京城区大气混合层内臭氧垂直结构特征的初步分析——基于臭氧探空[J]. 地球物理学报, 2018, 61(7): 2667-2678.
- [19] 李霄阳, 李思杰, 刘鹏飞, 等. 2016 年中国城市臭氧浓度的时空变化规律[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1263-1274.
- [20] 刘姝岩, 包云轩, 金建平, 等. 重霾天气气溶胶辐射效应对近地面臭氧峰值的影响[J]. 高原气象, 2017, 37(1): 296-304.