

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.

文章编号:1006-4354(2023)02-0028-07

陕西初夏臭氧污染事件及其成因

刘慧敏^{1,2},蒋伊蓉¹,高美美¹,张健康^{1,2}

(1. 榆林市气象局,陕西榆林 719000;

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)

摘要:关中平原至陕北黄土高原海拔渐次升高,大气污染物分布、排放源和下垫面特征均有较大变化。利用陕西省由南至北西安、延安、榆林三市环境空气质量监测数据和气象观测数据及 NCEP 再分析产品,对 2018 年春末夏初(5 月下旬至 6 月初)连续两次臭氧(O_3)污染过程开展研究。结果表明:三市 O_3 质量浓度(用 $C(O_3)$ 表示)皆呈昼高夜低的日变化特征;三市日均 $C(O_3)$ 表现出随海拔高度升高而增加的现象,即榆林最高,延安次之,西安最低,较高海拔的黄土高原高背景 O_3 可能是榆林、延安 $C(O_3)$ 较高的主要原因。两次 O_3 污染发生在大气环流由春季型向夏季型过渡阶段,陕西处于 500 hPa 暖性高脊、850 hPa 偏南风主导、地面静稳晴热的天气形势下,有利于光化学 O_3 生成以及大气低层 O_3 区域输送,其中西安的光化学生成对其日间 $C(O_3)$ 升高作用最明显。三市温度和 $C(O_3)$ 呈正相关,相同温度下,榆林的 $C(O_3)$ 最高;西安日间 $C(O_3)$ 与日照时数的相关关系明显好于其他二市;在低风速下,三城市 $C(O_3)$ 和风速呈正相关,而风速过大时,与 $C(O_3)$ 呈反相关; $C(O_3)$ 与风速正负相关转折的风速阈值榆林最大、西安最小。这些气象因子与 $C(O_3)$ 的关系都指向高海拔地区的高背景 O_3 可能是陕西不同海拔高度日均 $C(O_3)$ 差异的原因。结合浓度-风向及气团后向轨迹分析发现,偏东南风作用下可发生 O_3 的区域输送。

关键词:臭氧;环流形势;气象条件;后向轨迹;陕西

中图分类号: X16

文献标识码: A

近地面 O_3 污染是继 $PM_{2.5}$ 污染减轻后的又一项突出问题,引起国内外学者的广泛关注并取得了研究成果^[1-7]。气象条件在 O_3 的形成及转化过程中作用显著,是造成 O_3 浓度季节变化和昼夜变化的重要原因^[8-9]。由于 O_3 前体物排放源的差异以及 O_3 形成的气象条件的差异,造成不同地区 O_3 变化特征与前体物和气象条件的关系表现各异^[10-11]。刘建等^[12]分析前体物与气象因子对珠江三角洲 O_3 污染的影响认为, NO_x 对 O_3 有显著的滴定作用。徐锐等^[13]分析成都市夏季近地面 O_3 污染气象特征发现,高温、低湿、强辐射有利于 O_3 大量生成,大风的部分时段近地面 O_3

浓度增高,可能与大风对 O_3 及其前体物的输送和高层 O_3 湍流输入有关。梁俊宁等^[14]、卢娣等^[15]、韩洁等^[16]在陕西西安、宝鸡等地的统计分析发现,高温、强辐射有利于 O_3 污染事件发生,风速则与 O_3 质量浓度呈负相关。

陕西省从关中平原至陕北黄土高原海拔渐次升高,其下垫面特征和大气环境特征也有所变化,西安、延安和榆林处于该过渡带上,三市的城市规模、大气环境状况以及 O_3 前体物排放源特征差别也较大。西安是人口超千万的大城市,交通、工业等人为源产生的 NO_x 、VOCs 等排放较多^[17-18]。延安市地处黄土高原腹地,地形起伏大,工业规模

收稿日期:2022-03-30

作者简介:刘慧敏(1967—),女,汉族,陕西佳县人,本科,高工,主要从事天气预报与环境气象研究。

基金项目: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(2020G-5,2020Y-5);榆林市科学技术局技术研发专项(YF-2020-030)

小,但大气扩散能力不佳。而陕西省最北端的榆林市与相邻地区共属国家级能源化工基地,遍布着众多的油气田、煤矿和化工企业,虽然地势高且开阔,大气扩散条件好,但近年来 O_3 却成为首要污染物。本文针对 2018 年春末夏初大气环流由春季型向夏季型调整期间,陕西省西安、延安和榆林三城市均发生的两次 O_3 污染过程进行研究,分析 O_3 污染期间的天气形势及 O_3 质量浓度与气象条件的关系,初步探讨初夏季节陕西省区域 O_3 污染的成因,为 O_3 污染防控提供参考。

1 资料和方法

研究资料为环保部门发布的空气质量 6 要素中 O_3 和 NO_2 逐小时监测数据及常规气象资料。环境监测数据的有效性、计算及评价方法参照《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663—2013)和《环境空气质量标准》(GB 3095—2012),臭氧二级标准的质量浓度限值是日最大 8 h 平均质量浓度 $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$,或者 1 h 平均质量浓度 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。本文采用小时数据进行分析,因此取 O_3 小时平均质量浓度(用 $C(O_3)$ 表示) $\geq 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 为超标。

选取西安、延安、榆林三城市国控点的环保监测数据分别进行算术平均,代表该城市的 O_3 质量浓度。三市经度接近 109°E ,基本处于同一经线,纬度依次相距 2° 左右,间距均匀,海拔高度由南

向北从关中平原向黄土高原逐渐升高,分属不同的气候区。西安市地处关中平原中部,海拔高度为 385 m,地势平坦,属暖温带气候区;延安市地处黄土高原山区,海拔高度为 1 070 m,地势起伏较大,属中温带气候区;榆林市地处黄土高原与毛乌素沙漠过渡区,海拔高度为 1 100 m,地势高而开阔,属寒温带气候区(图略)。

2 结果分析

2.1 O_3 污染特征

图 1 为 2018 年 5 月 23 日 00 时—6 月 3 日 23 时(北京时,下同),西安、延安和榆林三市逐小时 $C(O_3)$ 时序图。由图 1 可知,三市 $C(O_3)$ 总体表现为单峰型,白天高夜间低,峰值出现在 15—17 时,谷值出现在 05—07 时,与全国其他城市一致^[9]。 $C(O_3)$ 超标出现在 2 个时段。第一时段为 5 月 24—25 日,榆林、西安超标,延安接近超标。小时最大值出现在榆林, $C(O_3)$ 达到 $237 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。第二时段为 5 月 30 日—6 月 3 日,三市均超标,小时最大值出现在西安, $C(O_3)$ 达到 $252 \mu\text{g}/\text{m}^3$,第二时段的超标时数更长, $C(O_3)$ 更高。研究期西安、延安、榆林 $C(O_3)$ 超标小时数分别为 16、19、30 h,日均 $C(O_3)$ 分别为 81、82、 $107 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。榆林 $C(O_3)$ 超标小时数最多,西安最少; $C(O_3)$ 小时值西安最高,榆林次之,延安最低。日均 $C(O_3)$ 榆林最高,延安次之,西安最低。

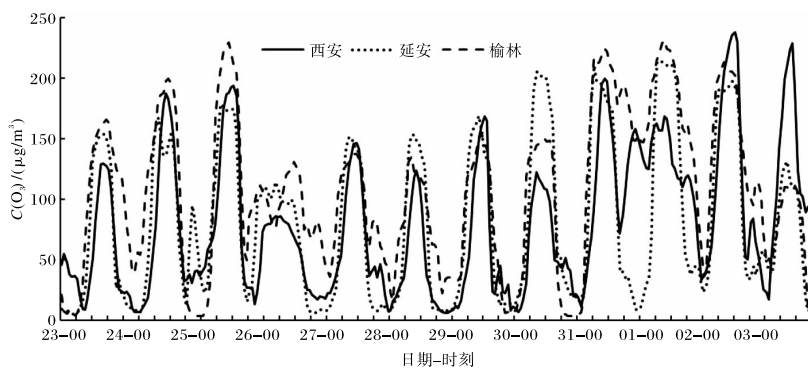


图 1 2018-05-23T00—06-03T23 西安、延安、榆林市 $C(O_3)$ 时序图

我国和世界其他大气本底站的观测研究表明,高海拔地区的 $C(O_3)$ 值明显高于低海拔地区^[19-21]。本文三市 $C(O_3)$ 分布也发现随着海拔高度升高 $C(O_3)$ 增大,西安海拔高度最低 $C(O_3)$ 均值较低,榆林海拔高度最高 $C(O_3)$ 均值最高。由

2016—2019 年三市不同季节 $C(O_3)$ 分布可知(图略),冬季(12—2 月) $C(O_3)$ 榆林最高、延安次之、西安最低,春季(3—5 月)三市基本接近,夏秋季(6—11 月)西安最高、榆林次之、延安最低。冬季光化学反应不活跃, $C(O_3)$ 往往反映了本底质量

浓度与海拔高度的对应关系,这一结论与文献[19]的研究结论一致。夏秋季太阳辐射强,西安地处关中平原而且 O_3 前体物排放强度大,光化学反应剧烈,因此 $C(O_3)$ 最高,与文献[17-18]的结论一致。

$C(O_3)$ 还与 $NO_x(NO+NO_2)$ 等前体物的质量浓度有关,环境监测公开数据并没有 NO ,但由于 $NO-NO_2-O_3$ 之间存在快速的光化学平衡, NO_2 、 NO 在与 O_3 的光化学反应中作用相近^[22]。图2为研究期西安、延安和榆林市逐小时 NO_2 质量浓度(用 $C(NO_2)$ 表示)箱线图。由图2可知,三市 $C(NO_2)$ 特征与 $C(O_3)$ 相反,中位数和均值西安最高,延安次之,榆林最低。西安汽车尾气等人为排放 NO_2 显著高于另外两市;而延安为山区地形,大气扩散条件不如开阔地形下的榆林, $C(NO_2)$ 次高。三市 $C(NO_2)$ 峰值和谷值出现时间也与 $C(O_3)$ 的分布正好相反, NO_2 作为前体物,白天促进了 O_3 的形成,而夜间通过 NO 和 O_3 的滴定反应消耗 O_3 ,增加 NO_2 。

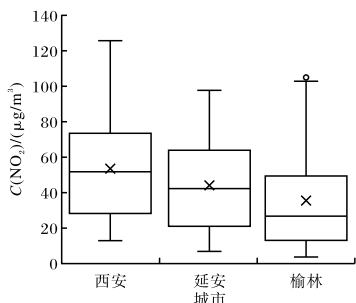


图2 2018-05-23T00—06-03T23 西安、延安、榆林市 $C(NO_2)$ 箱线图

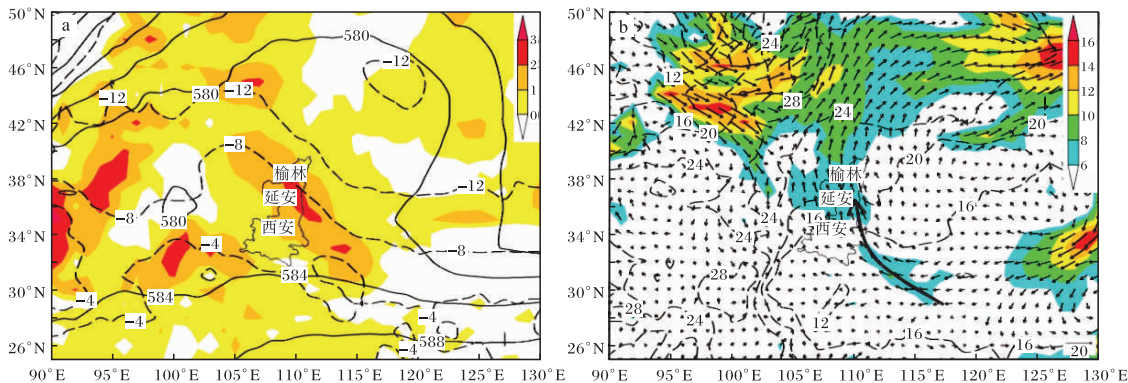


图3 2018-05-31—06-01 环流形势 (a 5月31日20时500 hPa 高度场(实线,单位为 dagpm)、温度场(虚线,单位为 $^{\circ}C$)、24 h 变温(阴影区,单位为 $^{\circ}C$); b 6月1日14时850 hPa 风场(矢量,单位为 m/s,阴影区为风速 >6 m/s 区域;虚线为等温线,单位为 $^{\circ}C$;黑色粗箭头线指示气流走向))

2.2 天气形势演变

5月下旬到6月上旬是中纬度大气环流由春季型向夏季型过渡阶段,冷空气活动减弱,大陆暖性高压发展加强。由 NCEP 再分析资料可知(图略),5月23-25日第一次 O_3 污染期间,500 hPa 欧亚大陆中高纬度由西高东低的经向型环流向纬向环流调整,陕西处在两槽间的高脊之内,陕西及周边地区有明显的正变温。低层850 hPa 风场上,陕西西北部有冷切变线向东移动,陕西处于切变线前侧的暖区弱辐合中,由偏南风转为小风(风速 <2 m/s),气温升高到 $20\sim 24^{\circ}C$,地面处于静稳晴热天气, $C(O_3)$ 上升。榆林25日白天 O_3 超标持续时间长达8 h;夜间切变线过境时段,榆林、延安 $C(O_3)$ 随着地面风速增大而升高。26-28日陕西转为西北气流控制, O_3 污染结束。

5月29日起,500 hPa 环流形势再次调整为两槽一脊,陕西处于暖性高脊区并维持至6月3日。由500 hPa 形势(图3a)和850 hPa 风场(图3b)可见,关中到陕北对流层中低层快速增温,陕北形成 $2^{\circ}C$ 以上的正变温区,850 hPa 有一支风速 >6 m/s 的东南风指向关中和陕北地区,西安、延安、榆林日最大8 h 平均质量浓度分别为 $214 \mu g/m^3$ 、 $211 \mu g/m^3$ 、 $221 \mu g/m^3$,榆林6月1日达到中度污染,其余两市接近中度污染。之后,环流形势调整,陕西转为槽区, O_3 污染由北向南先后结束。

由以上天气形势分析可知,陕西春夏之交的两次 O_3 污染过程都是500 hPa 为暖性高脊,850 hPa 为偏南风,地面处于静稳晴热天气。切变

线的辐合作用有利于 O₃ 积累,而稳定的东南风输送使陕西出现区域性 O₃ 污染,位于陕西最北部的榆林达到中度污染等级。

2.3 气象要素对 C(O₃)的影响

2.3.1 气温 张侠等^[23]分析西安地区 C(O₃)发现,夏季 C(O₃)与高温显著正相关。提取白天(08—20 时)的气温与 C(O₃)数据进行相关性分析。图 4 为西安、延安、榆林三市 2018 年 5 月 23—6 月 3 日 08—20 时逐小时 C(O₃)与气温散点图。由图 4 可见三市均表现出 C(O₃)与气温正相关,但由于地理和环境的不同,三市 C(O₃)对气

温的敏感度不同。当气温低于 20 ℃时,三市最大 C(O₃)低于或接近 100 μg/m³;当气温超过 20 ℃时,延安和榆林 C(O₃)能够达到 200 μg/m³ 出现污染,西安出现 O₃ 污染时的气温达到 28 ℃。表 1 为三市超过 200 μg/m³ 的 C(O₃)与相应的气温区间对照表。由表 1 可知,西安市 C(O₃)超标的气温值高于陕北的延安和榆林,但 C(O₃)超标的小时数最少。位于黄土高原的延安和榆林不需要很高的温度,C(O₃)就可能出现超标,榆林 C(O₃)超标的气温区间最大,超标的小时数最多。这可能与榆林较高海拔下本底 C(O₃)高有关。

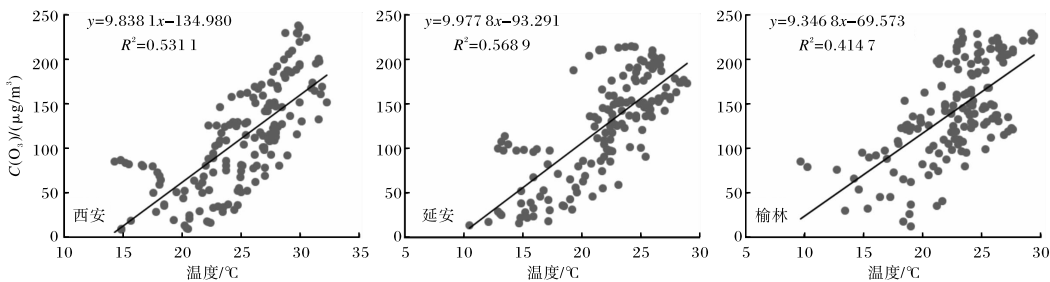


图 4 2018-05-23—06-03 白天(08—20)西安、延安、榆林逐小时 C(O₃)与气温散点图(直线为拟合线)

表 1 2018-05-23T00—06-03T23 西安、延安、榆林市 O₃ 污染与气温对照表

城市	C(O ₃)超标时数/h	C(O ₃)超标气温区间/℃	C(O ₃)超标范围/(μg/m ³)	C(O ₃)最大值对应气温/℃
西安	11	28.6~31.5	200~238	29.8
延安	13	20.6~26.7	201~215	24.2
榆林	31	21.5~29.4	202~232	23.3

2.3.2 日照时数 日照时数是常规气象观测要素,可反映太阳辐射强度。图 5 给出了研究期西安、延安、榆林三市白天 C(O₃)均值与日照时数的对比。由图 5a 可知,西安市 5 日 31 日和 6 月 2 日日照时数最长为 10.4 h,5 月 26 日和 6 月 1 日最短为 0.0 h,平均 6.0 h,O₃ 污染期间的日照时数高于非污染期间,光化学应对 O₃ 的生成作用显著。延安市 5 日 23 日日照时数最长 12 h,26 日最短 0.6 h,平均 9.2 h,O₃ 污染期间与非污染期间的日照时数比较接近。榆林市 5 日 31 日最长 12.4 h,6 月 3 日最短 5.7 h,平均 10.7 h,O₃ 污

染期间与非污染期间的日照时数无明显差异。

三市比较,榆林日照时数最长,西安最短,榆林和延安日照时数与 C(O₃)的正相关性并不明显,非污染期间也是长日照,特别是 6 月 1 日三市均表现为低日照高 C(O₃)的特征。图 5b~d 是三市 C(O₃)日间均值与日照时数的散点图,尽管研究期只有 12 d,散点数较少,但仍可发现西安市随着日照时数增大 C(O₃)升高。延安和榆林 C(O₃)与日照时数的相关性不明显。研究期晴天少云,日照时数达到 11~12 h 时,C(O₃)日间均值为 100~200 μg/m³,跨度较大。C(O₃)最高日(6 月 1 日)的日照时数分别仅为 7.1 h、6.9 h,表现为低日照高 O₃ 的现象。

由三市日照时数与 C(O₃)关系可见,西安日照时数与 C(O₃)的相关性明显高于延安和榆林,光化学反应是西安 C(O₃)升高的主要原因。而榆林和延安 O₃ 污染不完全取决于光照时间。

2.3.3 风速风向 通过天气形势分析已知污染期间中下层为偏南风,两次 O₃ 污染均为由北风转为南风后发生,南风转为北风后结束,与文献[13]

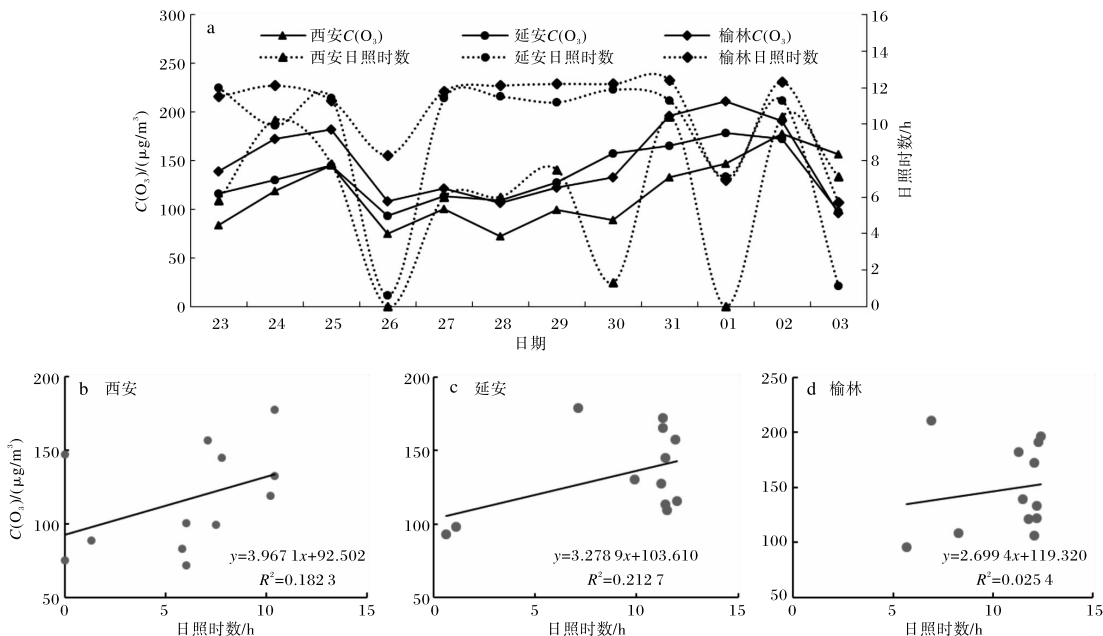


图5 2018-05-23—06-03 三市 08—20 日照时数与同时段 $C(O_3)$ 均值对比(a)及散点图(b;c;d)(直线为拟合线)

的研究结论一致。 $C(O_3)$ 与风速相关性分析表明,在低风速下,三市 $C(O_3)$ 与风速呈明显的正相关(图略),而风速过大时,则呈反相关。值得一提的是西安、延安、榆林三市 $C(O_3)$ 与风速正负相关转折的风速阈值分别为 2.5、3.0、4.0 m/s。高海拔地区的高风速阈值可能是由于高原上高风速形成的机械湍流将边界层上部高背景的 O_3 夹卷下传造成的,而西安边界层上部背景 $C(O_3)$ 低、近地面 O_3 又以光化学生成为主,致使湍流夹卷效应不强。

图6为2018年5月23日—6月3日西安、延安、榆林三市逐小时风向频次及其所对应的平均 $C(O_3)$ 玫瑰图。由图6可知,研究期西安市 $C(O_3)$ 大

于 $100 \mu g/m^3$ 的主导风向为东风(E)和西西南风(WSW),延安市为东东北风(ENE)和东南风(SE),榆林市为南风(S)和东东南风(ESE)。图6显示,关中到陕北,由南向北似乎有一条偏东转偏东南气流的 O_3 输送带,西安为偏东风,北上延安转为东南风,再向北到达榆林转为南风(与图3b所示气流方向基本一致),这条输送带可把周边地区 O_3 和其前体物输送到关中和陕北地区。例如5月31日—6月1日,三市一直处于高 O_3 状态,31夜间西安和榆林最低 $C(O_3)$ 仍高达 $72 \mu g/m^3$ 和 $148 \mu g/m^3$,风速较大的时段对应 $C(O_3)$ 高值时段。

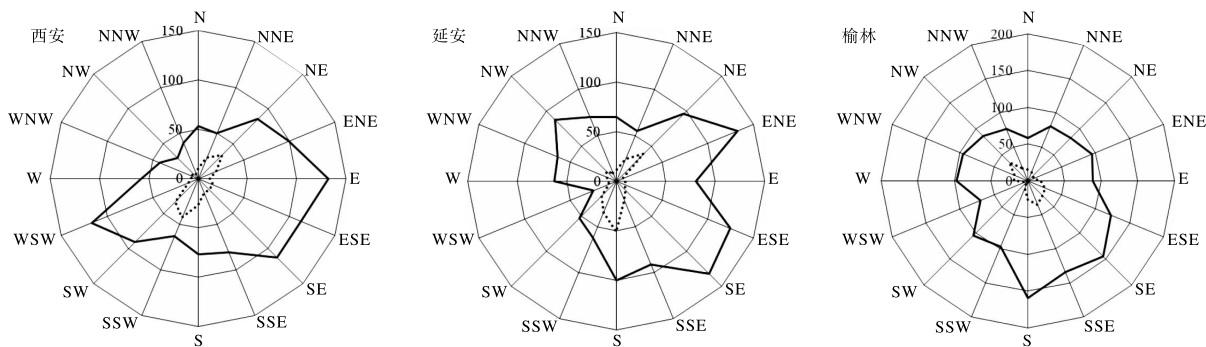


图6 2018-05-23T00—06-03T23 西安、延安、榆林逐小时风向频次(虚线;单位为次)及所对应的平均 $C(O_3)$ (实线;单位为 $\mu g/m^3$) 玫瑰图

后向轨迹模式 HYSPLIT4 已经被应用于多种污染物在各个地区的传输和扩散的研究中^[24-25]。应用该模式以污染最重的 6 月 1 日 08 时、14 时、20 时分别为起始时刻,选择西安和榆林两个点,各取 100 m 终点高度进行 48 h 后向轨迹模拟(图 7),发现榆林 3 个不同起始时刻的后向轨迹大致相同, O_3 污染存在东南气流下的 O_3 或其前体物的区域输送;西安 3 个不同起始时刻的后向轨迹较短,源地相同,表明存在本地源的 O_3 污染。图 7 的后向轨迹和图 3b 中的指示线以及图 6 中最大 $C(O_3)$ 对应的风向频率均表明,西安、延安至榆林一线的东转东南风区域输送是第二次 O_3 污染的原因之一。

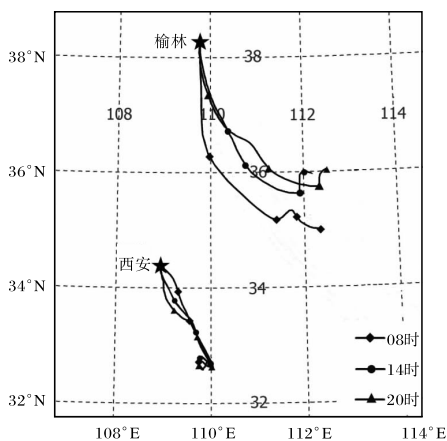


图 7 2018-06-01 西安、榆林 3 个起始时刻 48 h 近地面 100 m 高度后向轨迹

3 结论与讨论

应用陕西省西安、延安、榆林三市的环境空气质量六要素监测数据和相应的气象资料及再分析产品,对 2018 年 5 月 23 日—6 月 3 日期间连续两次 O_3 污染事件展开分析,得出以下结论。

(1)三市 O_3 日变化与其他大中城市类似,皆呈现昼高夜低的特征,而 NO_2 呈现昼低夜高特征;日均 $C(O_3)$ 随着海拔高度升高而增大,表现为榆林最高,延安次之,西安最低,黄土高原的高背景 O_3 是榆林、延安日均 $C(O_3)$ 高于西安的重要原因,光化学生成是西安午后 $C(O_3)$ 峰值最高的原因。

(2)研究期间三市两次 O_3 污染过程发生在春夏之交的大气环流由春季型向夏季型过渡阶段,

冷空气活动减弱,大陆暖性高压发展加强,500 hPa 陕西为暖性高脊,850 hPa 偏南风为主导,地面处于静稳晴热天气,有利于光化学 O_3 生成以及大气低层 O_3 区域输送;切变线暖区一侧弱的辐合作用,有利于 $C(O_3)$ 积累。

(3)气象要素影响 $C(O_3)$ 的变化,三市温度与 $C(O_3)$ 正相关,同样温度下,榆林的 $C(O_3)$ 最高;西安 $C(O_3)$ 日间平均值与日照时数正相关,其他两市不明显;在低风速下,三市 $C(O_3)$ 与风速呈正相关,而风速过大时,则呈反相关; $C(O_3)$ 与风速正负相关转折的风速阈值榆林最大、西安最小。这些气象因子与 $C(O_3)$ 的关系都指向高海拔地区的高背景 O_3 可能是陕西不同海拔高度 $C(O_3)$ 差异的原因。

(4)结合浓度-风向和气团后向轨迹分析发现,西安、延安至榆林一线的东转东南风区域输送是第二次 O_3 污染的原因之一。偏南风作用下西安、延安和榆林 $C(O_3)$ 渐次升高出现区域性 O_3 污染并达到中度污染等级。

(5)本文选择春夏季节转换期间连续两次 O_3 污染过程进行分析,尽管研究日期较短,但得到的结论与国内外大部分研究结论相类似。 O_3 的成因比较复杂,气象条件的强迫作用是短时的,区域防控是减少大气污染、抑制 $C(O_3)$ 升高的重要举措。

致谢:本文得到南京信息工程大学大气物理学院朱彬老师大力指导,特此致谢。

参考文献:

- [1] LOU S J, LIAO H, ZHU B. Impacts of aerosols on surface-layer ozone concentrations in China through heterogeneous reactions and changes in photolysis rates[J]. Atmospheric Environment 2014, 85: 123-138. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.12.004.
- [2] HOU X W, ZHU B, KANG H Q, et al. Analysis of seasonal ozone budget and spring ozone latitudinal gradient variation in the boundary layer of the Asia-Pacific region[J]. Atmospheric Environment 2014, 94: 734-741.
- [3] 吴方堃,王跃思,安俊琳,等. 北京奥运时段 VOCs

- 浓度变化、 O_3 产生潜势及来源分析研究[J]. 环境科学, 2010, 31(1): 10-16.
- [4] 周明卫, 康平, 汪可可, 等. 2016~2018年中国城市 O_3 浓度时空聚集变化规律[J]. 中国环境科学, 2020, 40(5): 1963-1974.
- [5] 折远洋, 李忠勤, 王芳龙, 等. 秦巴山地西部地区2015—2018年大气污染物变化特征及潜在来源分析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(6): 1987-1997.
- [6] 高睿娜, 孙银川, 左河疆, 等. 银川市主要污染物变化特征及其关系研究[J]. 气象与环境学报, 2022, 38(1): 33-39.
- [7] 刘长焕, 邓雪娇, 朱彬, 等. 近10年中国三大经济区太阳总辐射特征及其与 O_3 、 $PM_{2.5}$ 的关系[J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 2820-2829.
- [8] 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.
- [9] 栗泽苑, 杨雷峰, 华道柱, 等. 2013—2018年中国近地面臭氧浓度空间分布特征及其与气象因子的关系[J]. 环境科学研究, 2021, 34(9): 2094-2104.
- [10] 赵颖, 王飞, 温彦平. 煤炭工业城市近地面臭氧变化特征及其与气象条件的关联[J]. 环境化学, 2015, 34(5): 842-852.
- [11] 毛敏娟, 刘厚通, 杜荣光. 不同时间尺度杭州市 O_3 污染特征及控制因素[J]. 环境科学研究, 2019, 32(11): 1844-1851.
- [12] 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.
- [13] 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): 36-44.
- [14] 梁俊宁, 马启翔, 汪平, 等. 陕西省西咸新区空港新城夏季臭氧与气象因子关系分析[J]. 生态环境学报, 2019, 28(10): 2020-2026.
- [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] 韩洁, 徐迎春, 庞翻, 等. 近四年早春宝鸡市区气象条件对空气污染的影响[J]. 陕西气象, 2020(1): 20-25.
- [17] 关茜妍, 陆克定, 张宁宁, 等. 西安市大气臭氧污染光化学特征与敏感性分析[J]. 科学通报, 2021, 66(35): 4561-4573.
- [18] 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.
- [19] XU W, LIN W, XU X, et al. Long-term trends of surface ozone and its influencing factors at the Mt Waliguan GAW station, China - Part I: Over all trends and characteristics[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2018, 18(2): 773-798.
- [20] XU X, LIN W, WANG T, et al. Long-term trend of surface ozone at a regional background station in eastern China 1991 - 2006: enhanced variability[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2008, 8(10): 2595-2607.
- [21] MONKS P S. A review of the observations and origins of the spring ozone maximum[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(21): 3545-3561.
- [22] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气中 NO 、 NO_2 和 O_3 浓度变化的相关性分析[J]. 环境科学, 2007, 28(4): 706-711.
- [23] 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.
- [24] 夏佳琦, 陈强, 刘晓, 等. 乌海市臭氧传输特征与潜在源区[J]. 环境科学学报, 2021, 41(8): 3012-3020.
- [25] 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 等. 山东半岛近地面 O_3 浓度时空变化及潜在源区解析[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1256-1267.