

高星星,李双双,张思楠,等,2026. 2019—2023年暖季陕西O₃天气特征与来源解析[J]. 气象,52(2):204-215. Gao X X, Li S S, Zhang S N, et al, 2026. Analysis on characteristics and sources of O₃ weather in Shaanxi Province in the warm season of 2019—2023[J]. Meteor Mon, 52(2):204-215(in Chinese).

2019—2023年暖季陕西O₃天气特征与来源解析^{*}

高星星^{1,2} 李双双^{1,2} 张思楠¹ 桂海林³ 何卷雄⁴

1 陕西省气象台,西安 710014

2 中国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 国家气象中心,北京 100081

4 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

提 要: 基于地面气象和环境监测站数据、O₃气象条件评估指数、O₃来源解析产品和GDAS等资料,结合HYSPLIT模型等方法,分析了2019—2023年5—10月(暖季)陕西O₃污染时空变化特征,定量评估了气象条件对O₃浓度变化影响、O₃生成的本地和传输贡献以及不同前体物贡献,并探讨了O₃污染传输路径。结果表明:2022年暖季陕西O₃污染最重,2020年最轻;O₃浓度呈典型单峰型月际、日变化,月均峰值出现在6月,日最大值出现在15—16时(北京时,下同),最小值出现在07时;关中O₃污染最重,且污染主要集中在喇叭口地形内侧,陕南最轻;2022年暖季陕西O₃综合气象条件最差,这是导致2022年陕西O₃污染最重的主要原因;2022年暖季陕西O₃浓度较上一年同期增加了8.1%,其中气象条件贡献为7.7%;若排放源不变,2020年暖季陕西O₃浓度应比2019年同期增加4.4%,但实际O₃浓度减少了5.3%,体现了区域大气污染治理的积极成效;陕北O₃综合气象条件最差,但关中O₃浓度却最高,这主要与关中O₃前体物的高排放以及区域输送有关;2023年暖季陕西O₃浓度以前体物NO_x影响为主,外来传输贡献大于本地贡献,以东南输送路径为主,其中,对陕西传输影响最大省份是河南和湖北,贡献分别为6%和4%。

关键词: O₃污染,气象条件评估,源解析,区域传输,暖季

中图分类号: P49,X16

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.072401

Analysis on Characteristics and Sources of O₃ Weather in Shaanxi Province in the Warm Season of 2019—2023

GAO Xingxing^{1,2} LI Shuangshuang^{1,2} ZHANG Sinan¹ GUI Hailin³ HE Juanxiong⁴

1 Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014

2 CMA Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau, Xi'an 710016

3 National Meteorological Centre, Beijing 100081

4 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract: Based on the data from meteorological and environmental monitoring stations, O₃ meteorological condition evaluation index, O₃ source apportionment products, GDAS and other data, combined with HYSPLIT model and other methods, the spatio-temporal variation characteristics of O₃ pollution in Shaanxi Province from May to October (warm season) in 2019—2023 are analyzed. The impact of meteorological conditions on the changes of O₃ concentration is quantitatively evaluated. At the same time, the

* 国家重点研发计划(2024YFF0809004)、陕西“三秦英才”一流团队特殊支持计划项目、陕西省自然科学基础研究计划(2024JC-YBMS-217)、秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放研究基金课题(2023G-2、2025G-5)共同资助

2024年10月11日收稿; 2025年11月28日收修定稿

第一作者:高星星,主要从事环境气象研究. E-mail:1276015279@qq.com

通讯作者:桂海林,主要从事环境气象研究. E-mail:ghlnj@sina.com

contributions of local source, transport and different precursors to O₃ pollution are quantitatively separated. Finally, the transport path of O₃ pollution is explored. The results show that in the warm season of 2022, O₃ pollution in Shaanxi was the heaviest, while in 2020 the pollution was the lightest. The O₃ concentration showed a typical unimodal pattern in monthly and daily variations, with monthly peak occurring in June, daily peak appearing from 15:00 BT to 16:00 BT and daily minimum value at 07:00 BT. The O₃ pollution in Guanzhong Region was the heaviest, mainly concentrated in the inner layer of the trumpet mouth terrain, whilst the O₃ pollution was the lightest in southern Shaanxi. During the warm season of 2022, the O₃ comprehensive meteorological conditions were the worst, which was the main reason for the heaviest O₃ pollution in Shaanxi in 2022. So the O₃ concentration in Shaanxi increased by 8.1% in 2022 compared to that in the previous year, and meteorological conditions contributed 7.7% to it. If the emission source remained unchanged, the O₃ concentration in Shaanxi during the warm season of 2020 should have increased by 4.4% compared to that in 2019, but the observed O₃ concentration decreased by 5.3%, which fully reflects the positive effects of regional air pollution control. The O₃ comprehensive meteorological conditions in northern Shaanxi were the worst, but the O₃ concentration in Guanzhong Region was the highest, which was mainly related to the high emissions of O₃ precursors and regional transport in Guanzhong Region. In the warm season of 2023, the concentration of O₃ in Shaanxi was mainly affected by precursor NO_x, and the contribution of external transport was greater than local contribution. The main transport pathway was the southeast path, along which Henan and Hubei provinces had the greatest impact on the O₃ transport in Shaanxi, contributing 6% and 4%, respectively.

Key words: O₃ pollution, meteorological condition evaluation, source apportionment, regional transport, warm season

引言

近年来,随着大气污染防治工作相继开展,大气污染情况发生了一定变化,我国PM_{2.5}浓度持续下降的同时,O₃污染问题日益凸显,O₃已成为部分城市空气质量不达标的首要因素(Lu et al, 2020; Zhang et al, 2021; 丁一汇等,2025)。如果近地面O₃浓度较高,则会对人体健康和生态环境产生有害影响(Pan et al, 2015; Bei et al, 2022; 陈晨等,2022; Yan et al, 2023; 陈鹏等,2023)。陕西关中城市群是汾渭平原的重要组成部分,目前该地区O₃污染问题已经逐渐显现,成为陕西改善空气质量的重要难题之一(周涛等,2023)。

O₃的形成与其前体物VOCs和NO_x的总量和比例密切相关,同时O₃污染治理措施开展的成效与气象条件变化也有着密切的关系。由于不同地区的排放条件、人为管控政策和气候条件不同,导致O₃与气象要素之间的相互关系存在区域性差异(米艺华等,2024)。目前,已有一些针对陕西O₃与气

象要素之间关系的研究。紫外辐射量、气温、风、相对湿度、气压和边界层高度是影响陕西O₃浓度的主要因素,其中紫外辐射量、气温和相对湿度等气象条件会影响O₃的光化学反应速率,风和边界层高度则影响O₃的稀释、扩散及输送过程;O₃浓度与紫外辐射量、气温和边界层高度呈正相关,与风速、相对湿度和气压呈负相关,O₃浓度与10 m纬向风之间正相关性较为特殊,这与关中地区特殊的簸箕地形有关(陈佳源和赵景波,2017;赵伟等,2022;郑小华等,2021)。然而,以往这些研究都是在讨论单个气象要素对O₃浓度的影响,无法定量分离气象条件和污染减排对O₃浓度的影响,而定量评估气象条件如何影响O₃污染则是制定污染防治措施的科学基础,是实现O₃减排调控的决策依据。地面气象要素、高空环流形势等都是O₃污染天气形成的条件,在环境气象预报和评估中需要制定综合指数定量描述气象条件是否有利于形成O₃污染天气。本研究将基于O₃气象条件评估指数、O₃来源解析产品、全球数据同化系统(GDAS)气象数据等资料,结合聚类分析、潜在源贡献因子(PSCF)等方法,分

析 2019—2023 年 5—10 月(暖季)陕西 O₃ 污染时空变化特征,定量评估气象条件对 O₃ 浓度变化的影响、O₃ 生成的本地贡献和传输贡献以及不同前体物贡献,并探讨 O₃ 污染传输路径。

1 资料与方法

1.1 资 料

选取 2019—2023 年暖季逐月地面气象常规观测资料,主要包括降水日数、日最高气温和日照时数;目前陕西辐射台站资料来自延安、泾河和安康站,选取时段内三个辐射台站的逐小时辐射资料,分别代表陕北(榆林和延安)、关中(铜川、宝鸡、咸阳、西安和渭南)和陕南(汉中、安康和商洛)辐射情况;地面气象常规观测和辐射资料以及 500 hPa 高空环流形势场资料均来自陕西气象大数据云平台“天擎”;逐小时地面环境空气质量资料来自国控自动监测站(以下简称国控站),O₃ 质量浓度观测资料来自中国环境监测总站(陕西共 47 个站)。O₃ 浓度日均值为 O₃ 日最大 8 h 平均浓度值。全文所用时间为北京时。

O₃ 气象条件评估指数是表征 O₃ 浓度变化中气象条件贡献的无量纲指标。该指数综合考虑多个相关气象要素,能够定量反映气象条件对 O₃ 光化学生成、消耗、传输扩散等一系列物理化学过程的影响,可用于对 O₃ 污染气象条件的定量评估。O₃ 气象条件评估指数主要构建思路为,研究气象要素对 O₃ 生消和传输的影响,筛选并确定温度、地面风、相对湿度、降水、气压、日照、辐射相关气象要素,分时段统计不同站点各气象要素值落在不同区间条件下 O₃ 污染出现概率相比于气候态概率的倍数作为各要素值区间对应的分指数,该值越大表明 O₃ 污染出现概率越高,按各要素分指数最大值和最小值的比值进行排序,该分指数比值越大表明要素对 O₃ 污染和非 O₃ 污染区分度越大(高星星等,2024)。高星星等(2024)发现在陕西 O₃ 气象条件评估指数与浓度的相关系数可达 0.93,具有较好的适用性。选取 2019—2023 年暖季国家级气象观测站逐日 O₃ 气象条件评估指数(陕西共 97 个站,该指数来自国家气象中心)。

1.2 方 法

基于 O₃ 气象条件评估指数开展气象条件对 O₃

浓度变化影响评估时,所采用的评估方法、时空统计原则等均按照《气象条件对 O₃ 浓度变化影响评估服务规范》(高星星等,2024) 中规定。气象条件对 O₃ 浓度变化影响的分析评估则采用 O₃ 气象条件评估指数的变化率,以其表征综合气象条件对 O₃ 浓度变化的贡献:

$$R_w = \frac{I_1 - I_0}{I_0} \quad (1)$$

式中:I₁ 和 I₀ 分别为时段 1 和时段 0 对应的 O₃ 气象条件评估指数,R_w 为时段 1 相对时段 0 的综合气象条件对 O₃ 浓度变化的贡献。对于任意范围、任意时段的评估,应先计算单日该范围内所有站点的算术平均,作为该范围的日值;再计算评估时段内该范围日值的算术平均,即为该范围在评估时段内的平均值。

O₃ 污染来源解析产品以中国气象局全球同化预报系统(CMA-GFS)模式气象场驱动大气化学模式 CAMx7.1,综合考虑人为污染源和自然排放源的影响,可实现对 O₃ 生成的本地贡献和区域传输贡献的定量评估以及不同前体物贡献的定量评估。主要参数化方案为:气象化学机制为 CB05,气溶胶热力学平衡模式为 ISORROPIA,二次有机化学方案为 SOAP。OSAT 技术是一种耦合在 CAMx 数值模型中的源解析技术,有关 CAMx7.1 模式和 OSAT 源解析技术的详细介绍可参见 CAMx 用户手册(Ramboll Environment and Health, 2020)。O₃ 浓度变化主要与气象因素、前体物排放和区域输送有关(宿兴涛等,2023)。CAMx-OSAT O₃ 来源解析技术是以污染源示踪的方式获取有关 O₃ 及其前体物生成(或排放)和消耗的信息,并统计不同地区、不同类型的 O₃ 生成前体物对 O₃ 生成的贡献量,同时还对已生成的 O₃ 进行示踪,因此可以分析本地生成和外部传输 O₃ 的占比,统计不同地区、不同种类的前体物对环境中 O₃ 生成的贡献量。研究表明,CAMx 模式在 O₃ 浓度模拟中表现出较好的性能,可以较为准确地模拟出 O₃ 浓度的变化趋势及其高值出现的时间(Ge et al, 2021; 刘得守等,2021)。高星星等(2024)验证了本研究所用 O₃ 来源解析产品在陕西复杂地形下的适用性,发现该产品中模拟的 O₃ 浓度偏差较小,与实况 O₃ 浓度相关系数可达 0.78,在陕西具有较好的适用性。受该产品可用时间范围限制,选取 2023 年暖季逐时 O₃ 来源解析产品,空间分辨率为 25 km,产品来自国家气象中心,包括 O₃V 和 O₃N 两部分,分别代表 VOCs

和NO_x控制下生成的O₃浓度。变量O₃V和O₃N的第一维都表示38个区域,其中第1个区域为背景浓度,第29个区域为陕西,代表本地生成,其余区域构成远距离输送。某个区域j对陕西VOCs(NO_x)控制下生成的O₃浓度的贡献率E_j等于VOCs(NO_x)控制下该区域对陕西的O₃浓度贡献C_j与所有区域对陕西的O₃浓度贡献之和的比值:

$$E_j = \frac{C_j}{\sum_{i=0}^{37} C_i} \quad (2)$$

式中C_i为某一区域对陕西的O₃浓度贡献。

利用后向轨迹模型(HYSPLIT)结合国控站O₃小时浓度自动监测数据以及GDAS数据,模拟2023年暖季抵达西安泾河站(34.43°N, 108.97°E)500 m高度的每日14时大气气团的72 h后向轨迹,并通过聚类、PSCF、浓度权重轨迹(CWT)等分析方法,研究以西安市为代表的陕西O₃传输路径和潜在源区(庄晓翠等,2022;郑秀丽等,2025)。

2 结果与讨论

2.1 O₃污染基本特征

2019—2023年暖季,2022年陕西O₃污染日数最多,达86 d,2023年则较2022年有改善,减少了31 d,2020年最少,仅36 d。近地面O₃浓度日均值年变化呈先减小再增加后减小趋势,2020年和2023年暖季陕西O₃浓度日均值分别较上一年同期减少了5.4%和1.9%,2021年和2022年暖季分别较上一年同期增加了1.9%和8.1%,其中2020年最低,为104 μg·m⁻³,2022年最高,达115 μg·m⁻³(图1a)。2019年和2020年暖季O₃浓度,陕北高于关中,关中高于陕南;2021—2023年暖季关中高于陕北,陕北高于陕南。总体来看,关中O₃浓度高于陕北,陕北高于陕南,且O₃主要集中在关中城市群,尤其是关中平原喇叭口地形内侧(图1b),这主要与该处地势较低污染不易扩散,及其上游的河南、山西等地高污染易随东风沿关中平原东开喇叭口地形倒灌至关中平原等有关(肖致美等,2023;黄蕾等,2023)。

不同区域O₃浓度高值均主要集中在5—9月,但不同区域浓度月均值变化特征不同,主要表现在峰值类型及峰值出现时间存在差异(米艺华等,2024)。2019—2023年暖季陕西近地面O₃浓度年变化整体上呈波动趋势(图1a),月变化总体上呈现

为单峰型(图2a),除2020年外,其余年份O₃浓度月均峰值均出现在6月,10月O₃浓度最低,这与黄蕾等(2023)和高美美等(2023)研究结论一致。O₃浓度从5月开始上升,达最高值后呈下降趋势,夏季O₃浓度高与气温高、日照强共同导致太阳辐射增强,光化学反应速率加剧有关;7月和8月的O₃浓度大多低于6月,主要是由于主汛期降水日数多,尤其是陕西暴雨天气多集中在这两个月份,降水的冲刷和清除作用不利于O₃浓度累积;9月,随着大气环流的转换,气温降低,光化学反应速率减缓,O₃浓度下降。

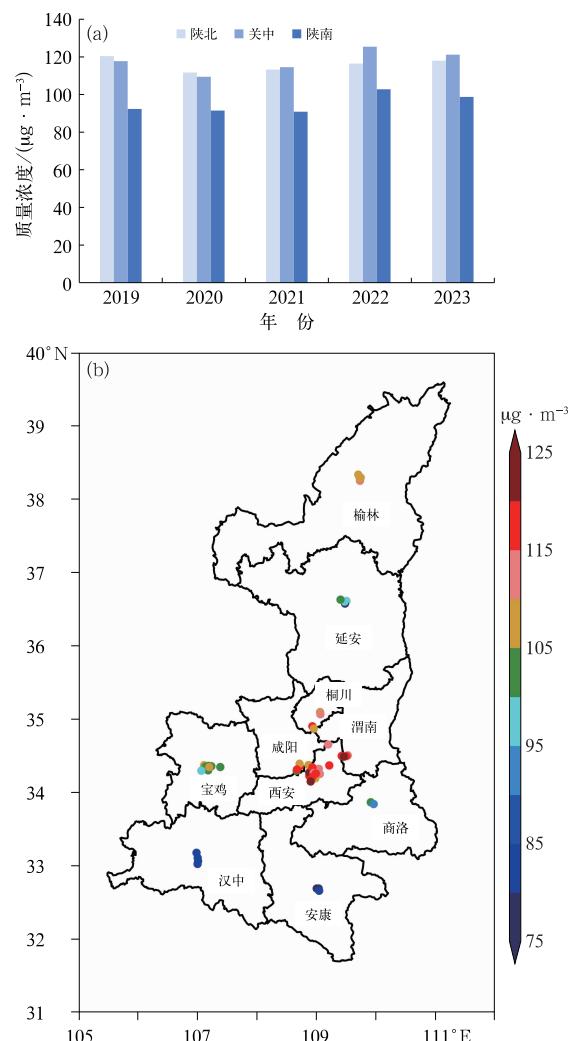


图1 2019—2023年暖季陕西近地面O₃浓度

(a)逐年变化和(b)年均空间分布

Fig. 1 (a) Annual variation of O₃ concentration and (b) spatial distribution of annual average O₃ concentration near the surface in Shaanxi Province in the warm season from 2019 to 2023

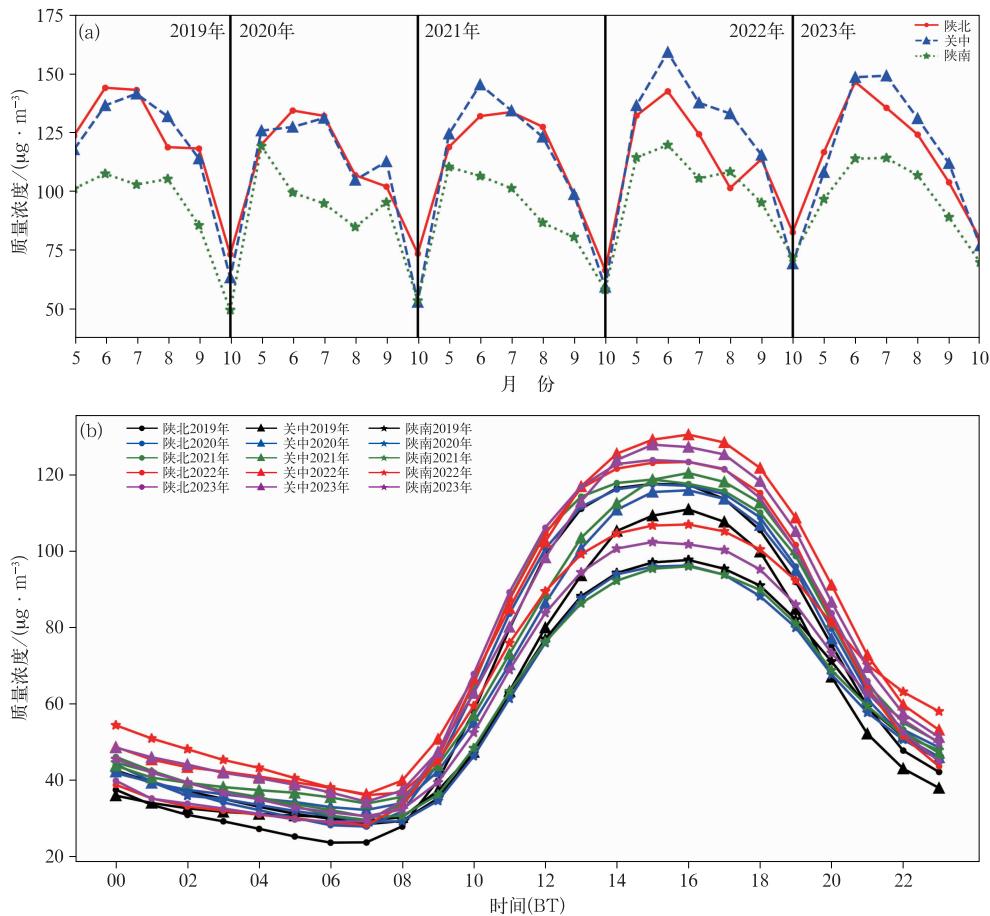


图 2 2019—2023 年暖季陕西近地面 O₃ 浓度(a)月变化和(b)日变化

Fig. 2 (a) Monthly and (b) diurnal variations of O₃ concentration near the surface in Shaanxi Province in the warm season from 2019 to 2023

陕北和关中 O₃ 浓度月变化特征与陕西基本一致，陕南 O₃ 浓度月变化总体虽然也表现为单峰型，但峰值出现时间与关中和陕北略有不同，峰值后更易出现小幅反弹，严晓瑜等(2020)也发现 O₃ 浓度月变化特征受纬度影响较大，随纬度增高单峰结构越明显。陕南 O₃ 月均浓度和月均最大浓度基本最小，关中基本最大，陕南和关中月均最大浓度都出现在 2022 年。陕西近地面 O₃ 浓度日变化总体表现为单峰型(图 2b)，从 07 时或 08 时随着气温升高、太阳辐射强度增加、人为活动增多而开始迅速上升，于 15 时或 16 时达到最高峰值，之后随着辐射强度和气温下降，O₃ 浓度开始下降，直至次日 07 时再次达到最低值。白天 O₃ 浓度变化剧烈，夜间平缓，同时，低值区间各年度都比较相近，而高值区间却相差较大。最大日峰值($120 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)出现在 2022 年，最小日值($27 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)出现在 2019 年，关中最大日峰值和最小日值均最大，陕南均最小。

2.2 O₃ 污染气象条件

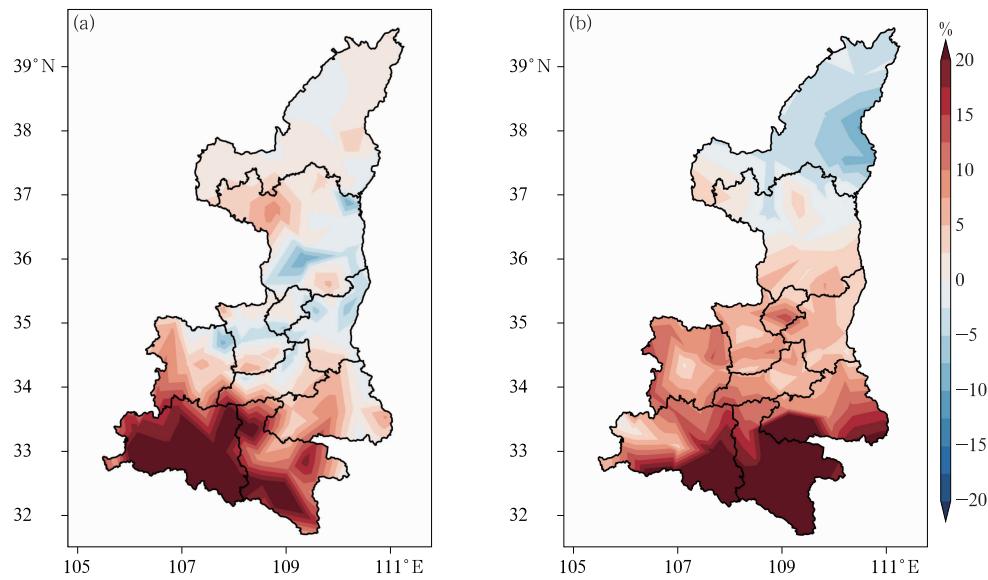
O₃ 气象条件评估指数是定量表征大气辐射、气温、相对湿度、风等气象要素对 O₃ 污染综合影响的气象指数，其值越高表示气象条件越有利于 O₃ 污染的发生。2019—2023 年暖季陕西 O₃ 气象条件评估指数呈波动变化。其中，2022 年 O₃ 气象条件评估指数最大(表 1, 10.86)，表明 2022 年 O₃ 综合气象条件最差，有利于 O₃ 浓度上升，这是导致 2022 年陕西 O₃ 污染最重的主要原因之一；2019 年 O₃ 气象条件评估指数(9.70)最小，表明 2019 年 O₃ 综合气象条件最好，有利于 O₃ 浓度下降。2022 年暖季陕西 O₃ 气象条件评估指数较 2019 年和 2021 年同期分别增加了 12.0% 和 7.7%，尤其是陕南南部，气象条件可使 2022 年暖季 O₃ 浓度较 2019 年和 2021 年同期分别增加 12.0% 和 7.7%(图 3b)。2023 年暖季陕西 O₃ 气象条件评估指数较 2022 年同期减小

了7.6%，气象条件明显转好，对O₃浓度下降有所贡献。若排放源不变，2020年暖季陕西O₃浓度应比2019年同期增加4.4%，但实际O₃浓度较2019年减少了5.3%，体现了区域大气污染治理的积极

成效（图3a）。陕北、关中和陕南在地形和气候上均存在一定的差异，且对O₃生成前体物的敏感性也存在一定的差异，陕南O₃气象条件评估指数较上一年同期变化趋势与陕西一致（表略），变化幅度

表1 2019—2023年暖季陕西O₃形成相关气象要素Table 1 Meteorological elements related to the formation of O₃ in Shaanxi Province in the warm season from 2019 to 2023

年份	地区	O ₃ 气象条件评估指数	总辐射曝辐量/(MJ·m ⁻²)	降水日数/d	日最高气温/℃	日照时数/h
2019	陕西	9.70	17.20	75	26.1	4.6
	陕北	10.47	17.74	68	26.1	5.1
	关中	9.72	20.10	72	26.1	4.6
	陕南	8.90	13.77	83	26.2	3.9
2020	陕西	10.12	17.07	78	26.1	6.9
	陕北	10.50	17.44	75	25.9	7.2
	关中	9.80	18.70	78	26.0	6.8
	陕南	10.34	15.06	83	26.6	6.7
2021	陕西	10.09	15.74	77	26.5	5.4
	陕北	10.91	17.64	71	26.5	5.7
	关中	9.92	16.44	75	26.4	5.4
	陕南	9.59	13.15	85	26.8	5.0
2022	陕西	10.86	17.28	56	27.7	6.4
	陕北	10.75	18.37	54	27.2	6.8
	关中	10.60	17.09	54	27.5	6.3
	陕南	11.43	16.38	60	28.3	6.1
2023	陕西	10.04	16.09	71	26.7	5.8
	陕北	10.60	17.26	66	26.6	6.1
	关中	9.88	16.46	70	26.6	5.7
	陕南	9.78	14.55	76	27.0	5.6

图3 (a)2020年和(b)2022年暖季陕西O₃气象条件评估指数较上一年同期变化率的空间分布Fig. 3 Spatial distribution of changes in O₃ meteorological condition evaluation index

in Shaanxi Province in the warm season of (a) 2020 and (b) 2022

compared to that in the same period of the previous year

大于陕北和关中,对陕西 O_3 气象条件评估指数变化起着主导作用。2019 年和 2020 年暖季陕北 O_3 浓度日均值均最高, O_3 气象条件评估指数最大, 2021—2023 年关中 O_3 浓度日均值均最高,但关中 O_3 气象条件评估指数并不是最大,陕北最大, 2019—2023 年陕南 O_3 浓度日均值均最低,但陕南 2020 年和 2022 年 O_3 气象条件评估指数并不是最小,关中最小,这充分体现了近地面 O_3 浓度变化不仅与气象要素有着密切关系,而且取决于前体物排放(柯碧钦等,2022)。

辐射影响光化学反应的强弱,较强的辐射有利于 O_3 的生成。总辐射曝辐量是指某地在某一时间段内接收到的太阳辐射能量的总和,可用来表征某地太阳辐射的强度,是导致 O_3 浓度变化最直接的气象要素之一。 O_3 浓度与总辐射曝辐量日均值变化趋势有关,但不完全一致。总辐射曝辐量总体上

呈波动变化趋势,2022 年为其日均值最大年,较 2021 年同期偏强 9.8%,有利于 O_3 生成,2022 年 O_3 污染最为严重(表 1 和图 1a)。2020 年和 2023 年暖季总辐射曝辐量日均值较上一年同期分别减小了 0.8% 和 6.9%,均有利于 O_3 浓度下降。总辐射曝辐量月变化特征总体与 O_3 浓度类似(图 4a),表现为单峰型,峰值多出现在 5—7 月,陕北、关中和陕南最大总辐射曝辐量月均值分别为 25.20、27.61 和 24.08 $MJ \cdot m^{-2}$,关中总辐射曝辐量月均峰值最大,10 月总辐射曝辐量最小。春末夏初陕西 O_3 浓度最高与 5—7 月太阳辐射增强进而导致光化学反应速率加剧有关。总辐射曝辐量日变化总体表现为单峰型(图 4b),与 O_3 浓度日变化特征相似,但总辐射曝辐量峰值一般出现在 12—13 时, O_3 浓度峰值比总辐射曝辐量变化滞后 4 h 左右,这说明 O_3 是由于太阳辐射经过一系列复杂光化学反应而形成的二次污

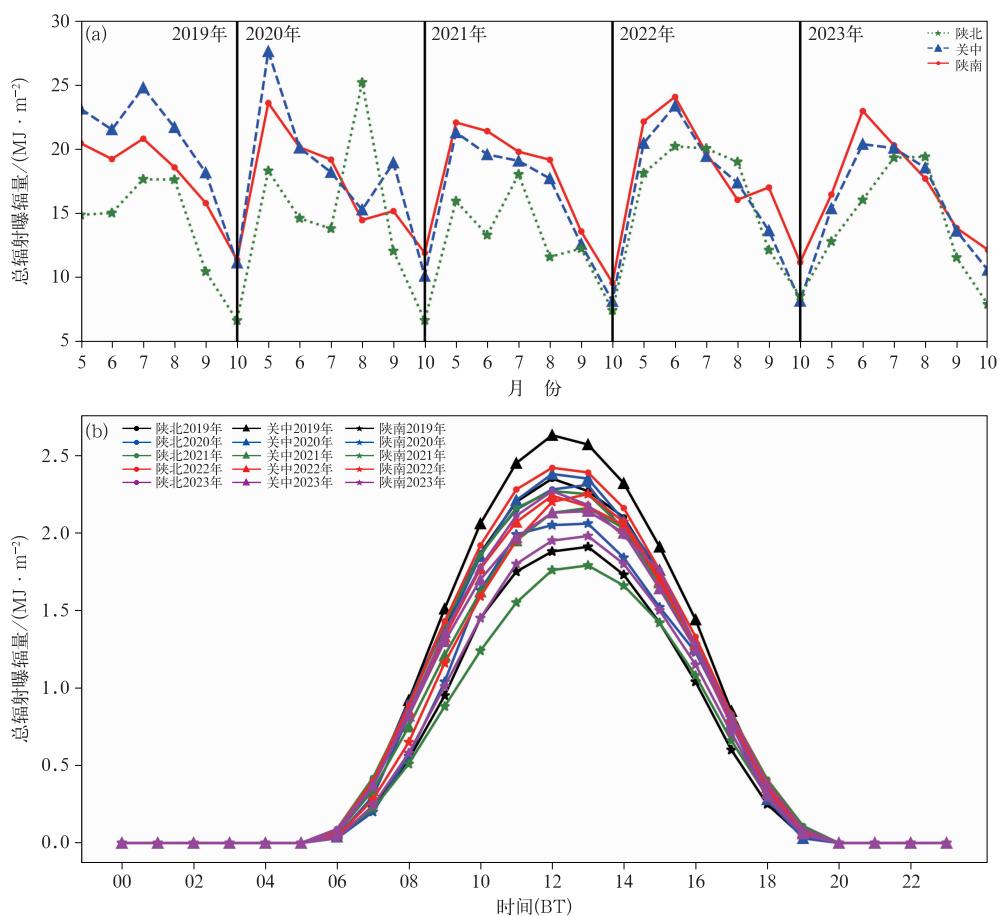


图 4 2019—2023 年暖季陕西总辐射曝辐量(a)月变化和(b)日变化

Fig. 4 (a) Monthly and (b) diurnal variations in total radiation exposure in Shaanxi Province in the warm season from 2019 to 2023

染物(徐栋夫等,2023)。总辐射曝辐量从08时开始上升,气温的升高和辐射量的增加均有利于光化学反应速率增加,但光解生成O₃并累积增加的过程需要一定时间,这可能是O₃浓度峰值相较于总辐射曝辐量峰值滞后的主要原因,16时O₃浓度达最高值,随后呈下降趋势,辐射量减小导致光化学反应速率减缓,O₃浓度下降。2019年和2020年暖季总辐射曝辐量日均值和日均峰值关中大于陕北,2020年之后陕北大于关中,这与O₃浓度变化趋势相反;陕南总辐射曝辐量日均值和日均峰值一直最小。辐射因子与O₃的影响机理比较复杂,可能与在夏季出现高温天气时,午后局地对流带来的强降水和高湿度对O₃浓度升高产生负作用有关。

日最高气温、降水、日照等也是影响近地面O₃浓度的重要气象要素。较高的气温能够加速O₃生成反应速率,使其分解速度减慢,从而导致O₃浓度

增加。降水天气对应着云量较大、辐射较弱,较多的降水日数有利于O₃浓度下降,降水主要通过三方面对O₃浓度产生影响(曹庭伟等,2018;郑小华等,2021):一是在较高的湿度条件下,光化学反应以消耗O₃反应过程为主导,从而降低了近地面O₃浓度;二是降水蒸发的水汽增加会因消光机制使得太阳辐射强烈衰减,进而减缓近地面光化学反应速率;三是湿度增加有利于O₃干沉降,从而达到清除O₃的作用。较长的日照与强辐射和高温有密切关系,也有利于光化学反应和O₃浓度增加(Tian et al., 2021)。2019—2023年暖季,2020年陕西平均日最高气温最低,降水日数最多,日照时数最长(表1),与2019—2023年同期多年平均相比,2020年陕西大部地区日最高气温偏低0.3~0.8℃,降水日数偏多5~13 d,日照时数偏长0.5~2.5 h(图5a~5c),较低的气温和较多的降水日数不利于O₃生成,使

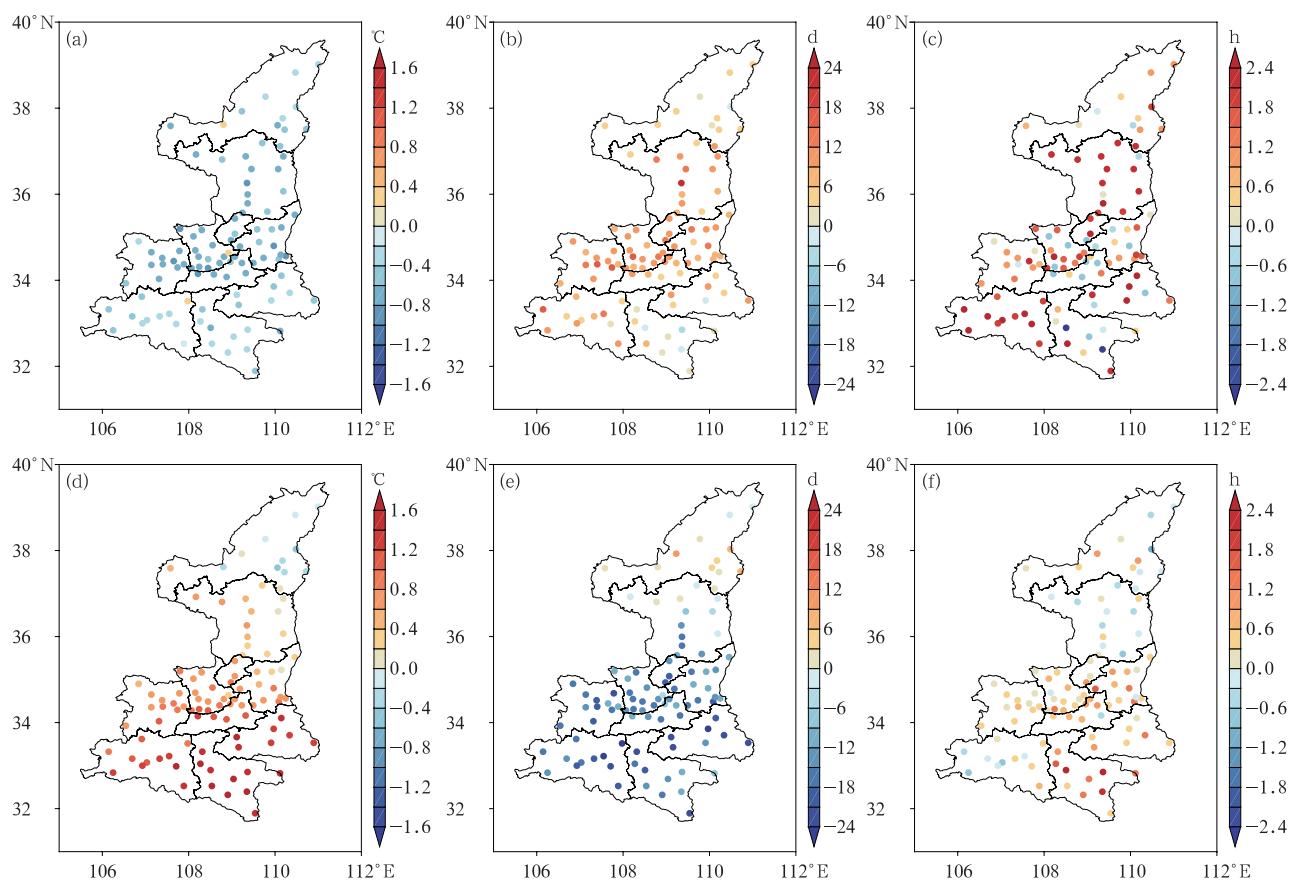


图5 (a~c)2020年和(d~f)2022年暖季陕西(a,d)日最高气温,(b,e)降水日数以及(c,f)日照时数较2019—2023年同期多年平均的差值的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the differences between (a, d) daily maximum temperature, (b, e) number of precipitation days, (c, f) sunshine duration in Shaanxi Province in the warm season of (a~c) 2020 and (d~f) 2022, and those averaged in the same period from 2019 to 2023

得 2020 年 O_3 浓度最低。2022 年陕西平均日最高气温最高,降水日数最少,日照时数较长,较过去五年同期平均来看,除榆林日最高气温略偏低,降水日数略偏多外,其他大部地区日最高气温偏高 0.5~1.5℃,降水日数偏少 10~20 d,日照时数偏长 0.1~1.5 h(图 5d~5f),均有利于 2022 年 O_3 浓度达最高。相较于关中和陕南,2019—2023 年暖季陕北降水日数均最少,日照时数均最长,尤其是榆林,日最高气温除 2021 年较低外其余年份均最低;陕南降水日数均最多,日照时数均最短,日最高气温均最高。日照时数与各地所处的纬度及海拔高度密切相关,陕北为黄土高原,地势高、日出早、日落晚、日照时间最长,同时远离海洋,加上山岭重重阻挡,夏季风到达时的风力较弱,影响较小,降水日数最少,有利于 O_3 的生成和累积,使得陕北 O_3 浓度较高。此外陕北海拔高,空气稀薄,日最高气温最低。陕南部有秦岭阻挡,从印度洋来的西南季风和从太平洋过来的东南季风在此汇集易形成降水,降水日数最多,日照时数最短,不利于 O_3 的生成和累积,使得陕南 O_3 浓度最低,同时受秦岭阻挡冷空气不易侵入,故陕南日最高气温最高。关中日最高气温和日照时数高值,以及降水日数低值站点空间分布与喇叭口地形较为吻合,可见地形对气候有着重要影响,从而影响 O_3 浓度分布,使得喇叭口地形内侧的 O_3 污染较重(钱朋等,2023)。

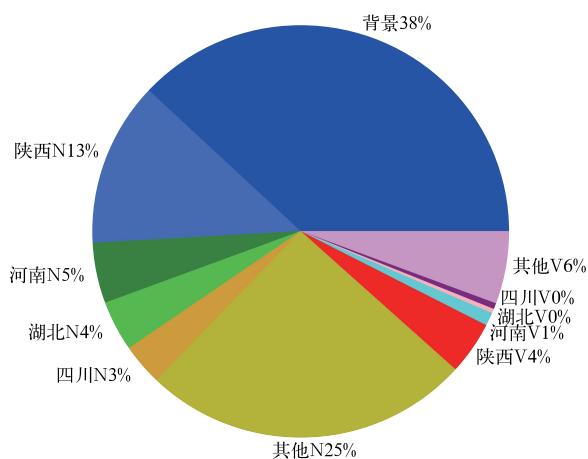
分析触发不同类型污染过程的主导天气系统特征,能够更深入地理解污染天气特征和形成机制,对准确开展重污染预报具有指导意义。同时考虑到高空环流的引导作用,依据 08 时 500 hPa 高空环流形势场,采用主观天气分型方法对造成陕西 O_3 污染的天气系统进行分型。定义某日陕西任四个或以上的地市 O_3 浓度日均值超过《环境空气质量标准》(环境保护部和国家质量监督检验检疫总局,2012)中的二级标准限值($160 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)时,则为一个陕西区域性 O_3 污染日。筛选 2019—2023 年暖季陕西 O_3 污染日,共计 135 d。统计结果表明,近五年暖季影响陕西的 O_3 天气形势主要划分为五大类:槽前西南气流型、西太平洋副热带高压型、脊前西北气流型、平直气流型和大陆高压型。其中,脊前西北气流型控制下 O_3 污染日出现频率最高,达 68.1%,且中度及以上等级污染日数也最多, O_3 污染最为严

重。脊前西北气流在陕西强烈的下沉增温现象,配合地面强盛的大陆高压,天空晴朗少云,相对湿度小,气温上升快,强烈的太阳辐射使集聚的 O_3 前体物光化学反应加快,造成 O_3 污染。槽前西南气流型 O_3 污染日出现频率其次,为 23.0%,其余三类分型下 O_3 污染日出现频率均不超过 5.0%。

2.3 O_3 污染来源解析

2.3.1 陕西 O_3 污染区域输送贡献

图 6 和图 7 中的其他指 38 个模拟源区中除已列出的几个主要贡献区外的区域。2023 年暖季陕西 O_3 浓度背景及边界条件、本地和外来源分别贡献为 38%、17% 和 45%(图 6),外来传输贡献明显大于本地贡献,其中,对陕西传输影响最大的省份是河南和湖北,贡献分别为 6% 和 4%,以东南输送路径为主;本地贡献和外来传输贡献均以前体物 NO_x 影响为主; O_3 污染来源具有明显的日变化特征(图 7),与 O_3 浓度日变化特征相似,本地生成和传输作用均呈现日内“一峰一谷”特征,但两者位相相反,本地生成与 O_3 浓度位相同步。在不同类型污染过程中, O_3 来源存在差异,导致污染特征也发生相应变化。如 2023 年陕西污染程度最重、影响范围最广的 O_3 污染过程(7 月 8—10 日),以本地排放和外来传输共同影响为主,传输路径以西南通道上的



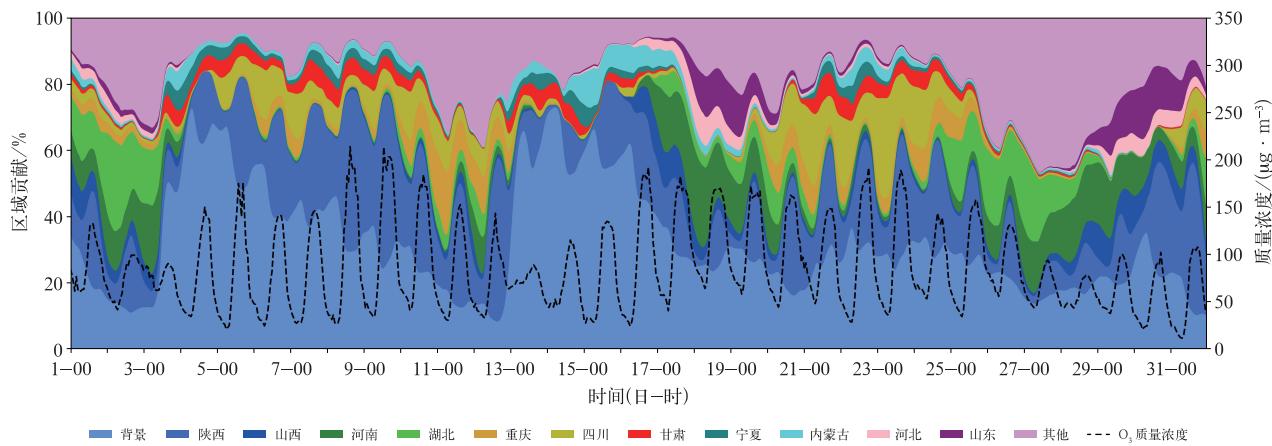
注: N 和 V 分别代表前体物 NO_x 和 VOCs。

图 6 2023 年暖季陕西 O_3 来源解析

Fig. 6 Apportionment of O_3 sources

in Shaanxi Province in the

warm season of 2023

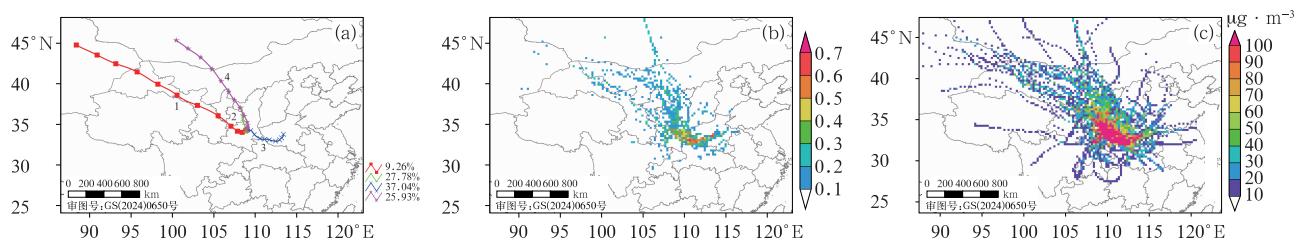
图 7 2023 年 7 月陕西 O₃ 来源逐时解析Fig. 7 Hourly analysis of O₃ sources in Shaanxi Province in July 2023

四川、重庆和甘肃贡献为主;而 2023 年持续时间最长的 O₃ 污染过程(7 月 16—19 日),以外来传输影响为主,传输路径以东路通道上的河南、山东和山西贡献为主。

2.3.2 西安 O₃ 污染传输路径

为了进一步了解 O₃ 传输特征,以 O₃ 污染最重的西安为例,对其气流后向轨迹做聚类分析。当 O₃ 质量浓度日均值超过 160 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,认为该日为污染日。2023 年暖季西安 O₃ 超标日中来自河南、湖北的东南向气流轨迹 3 出现频率最高(37.04%),对应的 O₃ 浓度值较高(178 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),对 O₃ 的贡献率最大(35%,图 8a);西北向气流轨迹 2 和轨迹 4 分别来自陕北和蒙古国,对 O₃ 的贡献率分别为 27% 和 28%;途经新疆和甘肃的偏西向气流轨迹 1 也对 O₃ 超标具有一定的贡献。潜在源区分析可以进一步了解西安 O₃ 污染源区(图 8b)。西安西北部

对应的权重潜在源贡献因子(WPSCF)<0.2,途经内蒙古和宁夏等地;西安偏东南方向潜在污染源区概率较大,河南对应的 0.1<WPSCF<0.7,湖北西北部多为 0.2<WPSCF<0.8。加权浓度权重(WCWT)轨迹分布特征与 WPSCF 类似(图 8c),WCWT 高值出现在西安本地及西安东南方向的湖北和河南,这些地区排放的污染物会对西安 O₃ 污染造成严重影响。综上所述,西安 O₃ 污染输送路径主要来自偏东南方向湖北和河南的中距离输送,其次是西北方向的长距离输送。这与关中平原东开喇叭口地形有关,此路径 O₃ 污染物主要源自河南中西部和湖北西北部地区,上述地区人口密集、工业生产源及移动源较多,易出现 O₃ 重污染(黄蕾等,2023),在偏东风下易输送到西安,造成西安出现 O₃ 高浓度,因此有必要加强与周边城市在 O₃ 减排方面联防联控机制的建立(宋梦迪等,2022)。

图 8 2023 年暖季西安污染日 O₃(a) 后向轨迹聚类,(b) 权重潜在源贡献因子和(c) 加权浓度权重轨迹分布Fig. 8 Distributions of (a) backward trajectory clustering, (b) weighted potential source contribution function and (c) weighted concentration-weighted trajectory of O₃ on pollution days in Xi'an City in the warm season of 2023

3 结 论

利用国控站数据分析了 2019—2023 年暖季陕西 O_3 浓度时空变化特征,结果表明,2022 年暖季陕西 O_3 污染日数最多, O_3 浓度日均值、月均峰值、日峰值均最高,污染最重;2020 年暖季陕西 O_3 污染最轻。 O_3 浓度呈典型单峰型月际、日变化,月均峰值出现在 6 月,日最大值出现在 15—16 时,最小值出现在 07 时。从空间分布来看,关中 O_3 污染最重,且 O_3 污染主要集中在关中平原喇叭口地形内侧,陕南 O_3 污染最轻。

基于 O_3 气象条件评估指数的分析表明,2022 年暖季陕西总辐射曝辐量日均值最大、日最高气温最高、降水日数最少、日照时数较长, O_3 综合气象条件最差,这是导致 2022 年陕西 O_3 浓度最高的主要原因。2022 年暖季陕西 O_3 浓度较上一年同期增加了 8.1%,其中气象条件可使其较上一年同期增加 7.7%。若排放源不变,2020 年暖季陕西 O_3 浓度应比 2019 年同期增加 4.4%,但实际 O_3 浓度减少了 5.3%,这充分体现了区域大气污染治理的积极成效。陕北总辐射曝辐量日均值较大,降水日数最少,日照时数最长, O_3 综合气象条件最差,但陕北 O_3 浓度并非最高,关中最高,这主要与 O_3 浓度变化不仅取决于气象条件,还与前体物 VOCs 及 NO_x 的大量排放有关。天气分型分析发现脊前西北气流型控制下 O_3 污染出现频率最高,达 68.1%,污染最为严重。

基于 CAMx 模式的 O_3 来源解析产品以及 HYSPLIT 模型的聚类、PSCF 和 CWT 分析发现,2023 年暖季陕西 O_3 浓度以前体物 NO_x 影响为主,表明 VOCs 减排取得成效更显著,下一步需协同强化区域 NO_x 控制。外来传输贡献(45%)大于本地贡献(17%),以东南输送路径为主,其中,对陕西传输影响最大省份是河南和湖北,分别为 6% 和 4%,应加强上述区域联防联控。 O_3 污染来源具有明显日变化特征;在不同类型污染过程中, O_3 来源存在差异,导致污染特征也发生相应变化。

参考文献

曹庭伟,吴锴,康平,等,2018. 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,38(4):1275-1284. Cao T W, Wu K, Kang P, et al, 2018. Study on ozone pollution characteristics and

- meteorological cause of Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. Acta Sci Circ, 38(4):1275-1284(in Chinese).
- 陈晨,张梦雪,刘晶,等,2022. 京津冀及周边地区大气细颗粒物和臭氧对医院日门诊量的急性影响及季节性差异[J]. 气象学报,80(3):366-374. Chen C, Zhang M X, Liu J, et al, 2022. Acute impact of ambient fine particulate matter and ozone on daily outpatient visits and its seasonal differences in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas[J]. Acta Meteor Sin, 80(3):366-374(in Chinese).
- 陈佳源,赵景波,2017. 陕西师范大学长安校区夏冬季节臭氧垂直变化特征[J]. 地球环境学报,8(6):568-577. Chen J Y, Zhao J B, 2017. Temporal and vertical variation of ozone in the Chang'an Campus of Shaanxi Normal University[J]. J Earth Environ, 8(6):568-577(in Chinese).
- 陈鹏,李永炽,景国乐,等,2023. 青藏高原平流层臭氧谷形成机制分析[J]. 高原气象,42(5):1182-1193. Chen P, Li Y Z, Jing G L, et al, 2023. Analysis of the Qinghai-Xizang Plateau ozone valley of stratospheric formation mechanism[J]. Plateau Meteor, 42(5):1182-1193(in Chinese).
- 丁一汇,柳艳菊,梅梅,等,2025. 气候变化和空气污染双赢应对战略的简要评述[J]. 气象学报,83(3):637-651. Ding Y H, Liu Y J, Mei M, et al, 2025. A concise review of co-benefit strategies for addressing both climate change and air pollution[J]. Acta Meteor Sin, 83(3):637-651(in Chinese).
- 高美美,朱彬,施双双,等,2023. 黄土高原典型城市臭氧特征及其影响因子分析[J]. 环境科学学报,43(4):1-13. Gao M M, Zhu B, Shi S S, et al, 2023. The analysis on ozone characteristics in various typical cities over Loess Plateau and their influencing factors [J]. Acta Sci Circ, 43(4):1-13(in Chinese).
- 高星星,李双双,张思楠,2024. 臭氧环境气象评估新指导产品在陕西初次释用[J]. 陕西气象, (6):46-53. Gao X X, Li S S, Zhang S N, 2024. Analysis on the application of the new guiding product for ozone environmental meteorological assessment in Shaanxi Province[J]. J Shaanxi Meteor, (6):46-53(in Chinese).
- 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局,2012. 环境空气质量标准: GB 3095—2012[S]. 北京:中国环境出版社. Ministry of environmental protection, general administration of quality supervision, inspection and quarantine of China, 2012. Ambient air quality standard: GB 3095—2012[S]. Beijing: China Environmental Science Press(in Chinese).
- 黄蕾,王丽,杜萌萌,等,2023. 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, 41(3):413-422. Huang L, Wang L, Du M M, et al, 2023. Characteristics of near-ground ozone pollution and relationships with meteorological conditions in Guanzhong Region from 2014 to 2020[J]. J Arid Meteor, 41(3):413-422(in Chinese).
- 柯碧钦,何超,杨璐,等,2022. 华北地区地表臭氧时空分布特征及驱动因子[J]. 中国环境科学,42(4):1562-1574. Ke B Q, He C, Yang L, et al, 2022. The spatiotemporal variation of surface ozone and the main driving factors in North China[J]. China Environ Sci, 42(4):1562-1574(in Chinese).

- 刘得守,李景,苏筱倩,等,2021.基于CAMx-OSAT方法的西宁臭氧来源解析[J].环境科学学报,41(2):386-394. Liu D S, Li J, Su X Q, et al, 2021. Source apportionment of ozone in Xining using CAMx-OSAT method[J]. Acta Sci Circ, 41(2):386-394(in Chinese).
- 米艺华,杜惠云,李杰,等,2024.我国重点地区臭氧变化特征及与气象要素的关系[J].中国环境科学,44(4):1894-1904. Mi Y H, Du H Y, Li J, et al, 2024. Ozone pollution characteristics and its relationship with meteorological factors of key regions in China [J]. Chin Environ Sci, 44(4):1894-1904(in Chinese).
- 钱朋,朱彬,刘慧敏,等,2023.汾渭平原至黄土高原不同海拔高度地区近地面臭氧浓度差异[J].中国环境科学,43(1):77-87. Qian P, Zhu B, Liu H M, et al, 2023. Analysis on the difference of near-surface ozone concentration between the Fenwei Plain and the Loess Plateau at different altitudes[J]. China Environ Sci, 43 (1):77-87(in Chinese).
- 宋梦迪,冯森,李歆,等,2022.成都市臭氧重污染成因与来源解析[J].中国环境科学,42(3):1057-1065. Song M D, Feng M, Li X, et al, 2022. Causes and sources of heavy ozone pollution in Chengdu[J]. China Environ Sci, 42(3):1057-1065(in Chinese).
- 宿兴涛,冯静,安豪,等,2023.2015~2021年京津冀典型城市PM_{2.5}和O₃污染趋势变化分析[J].大气科学,47(5):1641-1653. Su X T, Feng J, An H, et al, 2023. Trends analysis of fine particulate matter and ozone pollution in typical cities in the Beijing-Tianjin-Hebei Region during 2015–2021[J]. Chin J Atmos Sci, 47(5): 1641-1653(in Chinese).
- 肖致美,李鹏,孔君,等,2023.天津市持续高温强光照天气下臭氧污染差异性[J].中国环境科学,43(7):3322-3330. Xiao Z M, Li P, Kong J, et al, 2023. Difference of ozone pollution under the continuous high temperature and strong sunlight weather in Tianjin [J]. China Environ Sci, 43(7):3322-3330(in Chinese).
- 徐栋夫,温李明,曹萍萍,2023.2015—2019年成都夏季地面臭氧浓度与气象要素关系及臭氧污染天气分型[J].气象与环境科学,46(5):25-32. Xu D F, Wen L M, Cao P P, 2023. The relationship between ozone concentration and meteorological factors and synoptic classification of ozone pollution during summer of 2015—2019 in Chengdu[J]. Meteor Environ Sci, 46(5):25-32(in Chinese).
- 严晓瑜,缑晓辉,杨婧,等,2020.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,39(2):416-430. Yan X Y, Gou X H, Yang J, et al, 2020. The variety of ozone and its relationship with meteorological conditions in typical cities in China[J]. Plateau Meteor, 39(2):416-430(in Chinese).
- 赵伟,王硕,庞晓蝶,等,2022.2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势[J].环境科学,43(12):5399-5406. Zhao W, Wang S, Pang X D, et al, 2022. Trends of ozone pollution in Guanzhong urban agglomeration from 2015 to 2021[J]. Environ Sci, 43 (12):5399-5406(in Chinese).
- 郑小华,李明星,娄盼星,2021.不同时间尺度下汾渭平原臭氧浓度变化及气象环境影响[J].高原气象,40(4):954-964. Zheng X H, Li M X, Lou P X, 2021. Different-scale changes in ozone concentration and meteorological environment in Fenwei Plain[J]. Plateau Meteor, 40(4):954-964(in Chinese).
- 郑秀丽,林小红,关辉,等,2025.三次不同冷空气过程对登闽台风极端降水影响的对比分析[J].气象,51(6):660-674. Zheng X L, Lin X H, Guan H, et al, 2025. Comparative analysis of the effect of three different cold air events on extreme rainfall brought by landfall typhoons in Fujian[J]. Meteor Mon, 51(6):660-674(in Chinese).
- 庄晓翠,李博渊,赵江伟,等,2022.基于HYSPPLIT模式分析的塔克拉玛干沙漠南缘暴雨水汽特征[J].气象,48(3):311-323. Zhuang X C, Li B Y, Zhao J W, et al, 2022. Water vapor characteristics of rainstorm in southern Taklimakan Desert based on HYSPPLIT model analysis[J]. Meteor Mon, 48(3):311-323(in Chinese).
- 周涛,周青,张勇,等,2023.汾渭平原PM_{2.5}-O₃复合污染特征及气象成因分析[J].气象,49(11):1359-1370. Zhou T, Zhou Q, Zhang Y, et al, 2023. Characteristics of PM_{2.5}-O₃ compound pollution and meteorological impact in Fenwei Plain[J]. Meteor Mon, 49(11):1359-1370(in Chinese).
- Bei N F, Liang J Y, Li X, et al, 2022. Worsening summertime ozone pollution in the Guanzhong Basin, China from 2014 to 2018: impacts of synoptic conditions and anthropogenic emissions[J]. Atmos Environ, 274:118974.
- Ge S J, Wang S J, Xu Q, et al, 2021. Source apportionment simulations of ground-level ozone in Southeast Texas employing OSAT/APCA in CAMx[J]. Atmos Environ, 253:118370.
- Lu X, Zhang L, Wang X L, et al, 2020. Rapid increases in warm-season surface ozone and resulting health impact in China since 2013[J]. Environ Sci Technol Lett, 7(4):240-247.
- Pan X, Kanaya Y, Tanimoto H, et al, 2015. Examining the major contributors of ozone pollution in a rural area of the Yangtze River Delta Region during harvest season[J]. Atmos Chem Phys, 15 (11):6101-6111.
- Ramboll Environment and Health, 2020. User's guide, comprehensive air quality model with extensions (CAMx), Version 7.10 [EB/OL]. https://www.camx.com/Files/CAMxUsersGuide_v7.10.pdf.
- Tian J Q, Fang C S, Qiu J X, et al, 2021. Analysis of ozone pollution characteristics and influencing factors in northeast economic cooperation region, China[J]. Atmosphere, 12(7):843.
- Yan Y, Shi W B, Wang C, et al, 2023. Source attribution and process analysis of summertime ozone pollution in Guanzhong Basin, northwestern China[J]. Atmosphere, 14(12):1742.
- Zhang Y Q, Shindell D, Seltzer K, et al, 2021. Impacts of emission changes in China from 2010 to 2017 on domestic and intercontinental air quality and health effect[J]. Atmos Chem Phys, 21 (20):16051-16065.

(本文责编:何晓欢)