

李丽,肖舜,董治宝,等.西安春季沙尘对环境空气质量的影响及来源[J].中国沙漠,2025,45(1):266–276.

## 西安春季沙尘对环境空气质量的影响及来源

李丽<sup>1</sup>,肖舜<sup>1</sup>,董治宝<sup>1</sup>,吕萍<sup>1</sup>,王娜<sup>2</sup>,张佳音<sup>3</sup>,  
韩婧<sup>4</sup>,张壮壮<sup>5</sup>,米娜<sup>5</sup>,刘随心<sup>6</sup>,刘建宝<sup>7</sup>

(1.陕西师范大学 地理科学与旅游学院,陕西 西安 710119; 2.陕西省气候中心,陕西 西安 710014; 3.陕西省环境监测中心站,陕西 西安 710054; 4.西安市环境监测站,陕西 西安 710018; 5.西安地球环境创新研究院,陕西 西安 710061; 6.中国科学院地球环境研究所,陕西 西安 710061; 7.北京大学 城市与环境学院,北京 100871)

**摘要:** 西安是中国北方沙尘过境的重要影响区域,为研究西安春季沙尘期间大气颗粒物浓度在不同时间尺度上的变化特征及潜在源区,对2023年3—5月西安市环境空气质量连续监测数据进行综合分析,并利用HYSPLIT后向轨迹模式对一次典型沙尘过程进行聚类分析、潜在源贡献因子分析(PSCF)和浓度权重轨迹分析(CWT)。结果表明:(1)2023年春季西安市共发生9次沙尘过程,一次扬沙,其余均为浮尘;沙尘分布集中在3—4月,呈现出西多东少、周边多城中少的空间格局。(2)大气颗粒物浓度在不同时间尺度上呈现出显著响应特征。春季沙尘期 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 浓度远高于非沙尘期,且 $PM_{10}$ 显著高于 $PM_{2.5}$ ;  $PM_{2.5}$ 与 $PM_{10}$ 浓度月变化整体呈现先增后减的波动性变化特征, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值3月>5月>4月, $PM_{2.5}$ 与 $PM_{10}$ 相关性3月<5月<4月。(3)4月20—21日一次扬沙过程中, $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 浓度均呈现单峰型变化; $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值呈现“U”型变化; $NO_2$ 、 $SO_2$ 和CO浓度均呈现下降趋势,而 $O_3$ 浓度呈先下降后上升再下降的趋势。(4)4月20—21日沙尘过程由蒙古高压和地面冷锋过境形成,输沙路径有西北路径、偏北路径以及偏东路径,沙尘源地为中国腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙地、蒙古国南部的戈壁沙漠以及河南北部的沙地。

**关键词:** 沙尘; 环境空气质量; 来源; 春季; 西安

文章编号: 1000-694X(2025)01-266-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00180

中图分类号: P425.6

文献标志码: A

## 0 引言

沙尘天气是由强风吹起地表粉尘导致大气浑浊、能见度降低的视程障碍天气现象,对气候变化、生态环境、人体健康、社会经济等方面均存在显著影响<sup>[1-4]</sup>,受到学界、政府和公众的广泛关注。中国西北地区深居内陆,降水较少,气候干旱,分布有大面积的沙漠戈壁,是中国乃至全球沙尘的重要源区和发生地<sup>[5]</sup>。近年来,在全球气候变化大背景下,极端气候事件频发,中国北方沙尘天气发生频次呈明显增加趋势,2023年又一次迎来沙尘暴高峰期。据陕西省气候中心统计,2023年春季沙尘日数为近10年同期最多,是开展西安春季沙尘对环境空气质量

影响及来源研究的典型时段。

关于沙尘污染对城市环境空气质量的影响,国内外学者开展了大量研究。吴兑等<sup>[6]</sup>发现北方沙尘远距离传输甚至影响到华东、华南地区,沙尘传输对空气质量的影响得到关注;呼和浩特市大气颗粒物及污染物浓度存在明显的年际、月际变化, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值在5月最低<sup>[7]</sup>;沙尘污染还受沙尘等级、气象因素等影响<sup>[8]</sup>,沙尘来源也能影响颗粒物浓度的变化<sup>[9]</sup>。另外,有学者利用WRF-Chem模型结合站点观测的数据对沙尘过境前后空气质量指数进行计算,结果表明是沙尘引起 $PM_{10}$ 污染导致AQI升高,从而影响到当地环境空气质量<sup>[10]</sup>。关于沙尘来源的研究目前普遍采用数值模拟与卫星遥感相结

收稿日期:2024-11-08; 改回日期:2024-12-11

资助项目:国家自然科学基金面上项目(42171158,41771220);陕西省重点研发计划社会发展领域一般项目(2021SF-435);国家杰出青年科学基金项目(42225105)

作者简介:李丽(2001—),女,青海西宁人,学士,主要从事自然地理研究。E-mail: 2752393817@qq.com

通信作者:肖舜(E-mail: sxiao@snnu.edu.cn)

合的方式,其中HYSPLIT后向轨迹模式能够很好地模拟水平和垂直方向上的沙尘输送情况,得到了广泛应用<sup>[11]</sup>。Chen等<sup>[12]</sup>利用WRF-Chem模型结合后向轨迹分析,对2023年3、4月中国北方不同沙尘源对沙尘浓度的贡献进行研究,结果证实了蒙古国和中国的塔克拉玛干沙漠是中国北方的两个主要沙尘源,蒙古国贡献了42%以上的沙尘;也有学者基于HYSPLIT模式对西北干旱区的沙尘传输路径进行探析,并结合潜在源贡献因子分析(PSCF)和浓度权重轨迹分析(CWT)对关中地区的沙尘贡献源及输沙路径开展了研究<sup>[13-14]</sup>。

王建鹏等<sup>[15]</sup>较早对西安沙尘天气开展研究,主要利用1971—2000年不连续空气质量数据对西安沙尘污染特征进行统计分析,指出TSP和PM<sub>10</sub>为西安市大气首要污染物;张佳音等<sup>[16]</sup>利用陕西省的环境空气质量自动监测站2017—2021年的监测数据,系统分析了包括西安在内的陕西区域空气质量的月、季节、年变化特征以及不同污染物的空间分布,对不同区域发生重度污染时段的环境空气质量污染特征和成因进行了全面探讨。此外,关于西安的研究更加关注对大气颗粒物粒子组成和有机质组分的分析<sup>[17-18]</sup>,也有利用石英氧同位素示踪法结合卫星云图和后向轨迹模式对西安沙尘源地进行的研究<sup>[19]</sup>。

本文基于环境空气质量自动监测站点资料,就2023年春季西安沙尘天气对环境空气质量的影响进行综合分析,包括西安春季沙尘事件识别与统计、环境空气质量等级变化以及春季不同时空尺度下的大气颗粒物浓度的变化特征等,同时对一次典型沙尘过程进行细致分析,结合HYSPLIT后向轨迹模式确定西安沙尘来源及其传输路径,为有效应对沙尘天气对西安环境空气质量的影响提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

西安市共有13个国控环境空气质量自动监测站点,环境空气质量小时浓度数据来源于中国环境监测总站实时发布平台(<https://quotsoft.net/air/#archive>),数据包含了PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>等6项污染物浓度及AQI数据,其中阎良区数据监测缺失,不纳入本次研究范围。气象观测资料来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA, <https://www.ncei.noaa.gov/data/global-summary-of-the-day/archive/>),含西安市(34.43°N, 108.97°E)的风速、能见度、相对湿度等数据。后向轨迹计算采用美国国家环境预报中心NCEP发布的GDAS全球大气同化数据(<ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1>),该数据空间分辨率为1°×1°,时间跨度为2005年至今,本文使用的是2023年2—6月的气象数据,时间统一为世界时。

### 1.2 研究方法

采用气象季节定义,即3、4、5月为春季,以PM<sub>10</sub>浓度高于国家二级标准线(150 μg·m<sup>-3</sup>)为界,根据PM<sub>10</sub>浓度和PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>比值来判定该地区是否受到沙尘污染的影响,将PM<sub>10</sub>日均浓度>150 μg·m<sup>-3</sup>,且PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>≤0.30认定为春季有沙尘污染,基于此确定2023年春季西安市沙尘天气日数<sup>[20]</sup>。沙尘过程的起止时间判定参考《受沙尘天气过程影响城市空气质量评价补充规定》<sup>[21]</sup>,同时对沙尘等级进行划分<sup>[22]</sup>,空气质量等级划分依据《环境空气质量标准》(GB3095—2012)进行<sup>[23]</sup>。

HYSPLIT模型可用来示踪沙尘来源和大气污染物区域间传输等<sup>[24]</sup>,本研究采用Metinfo软件中的TrajStat的欧拉聚类确定西安市沙尘来源及其输沙路径<sup>[25]</sup>,以(34.15°N, 108.90°E)为轨迹起始点,模拟2023年4月20—21日一次典型沙尘过程中500 m和1 000 m高度处的气流后向轨迹,计算时间为24 h,分辨率为1 h。

采用PSCF和CWT分析确定西安市潜在沙尘源区,PSCF分析可确定沙尘污染源地的潜在贡献源区<sup>[25]</sup>,CWT方法可以定量分析不同潜在源区的沙尘贡献度大小。

## 2 结果与分析

### 2.1 沙尘期颗粒物浓度变化

#### 2.1.1 沙尘事件与空间分布

2023年春季,西安市共发生9次沙尘事件,多集中在3—4月,沙尘日数达23 d。其中4月20—21日为春季最强的一次沙尘天气,达到了扬沙天气级别,历时短,强度大,长安PM<sub>10</sub>峰值浓度最高达到2 256 μg·m<sup>-3</sup>,超过环境空气质量二级标准(150 μg·m<sup>-3</sup>)15倍;其余均为不同程度的浮尘天气,其中4月6—9日的沙尘事件影响时长最长,达到93 h,最短一次仅有4 h(表1)。

表 1 2023年春季西安市沙尘天气过程识别结果  
Table 1 Identification results of dust weather process in Xi'an in Spring of 2023

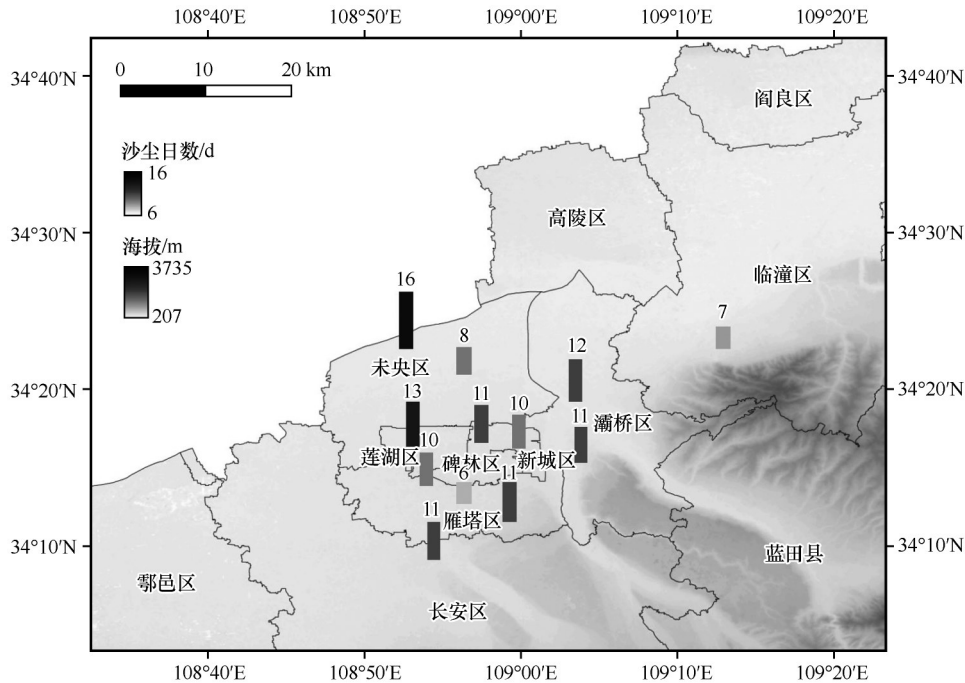
沙尘时次	开始时间	结束时间	影响时长/h	PM <sub>10</sub> 峰值/(μg·m <sup>-3</sup> )	沙尘级别
3月11日	3月11日 10:00	3月11日 18:00	8	563	浮尘
3月12—14日	3月12日 05:00	3月14日 14:00	57	247	浮尘
3月14—15日	3月14日 23:00	3月15日 03:00	4	260	浮尘
3月22日	3月22日 01:00	3月22日 23:00	2	263	浮尘
3月23—25日	3月23日 17:00	3月25日 14:00	45	372	浮尘
4月5—9日	4月5日 17:00	4月9日 14:00	93	449	浮尘
4月10—14日	4月10日 22:00	4月14日 05:00	79	709	浮尘
4月20—21日	4月20日 02:00	4月21日 06:00	28	1 769	扬沙
4月28—29日	4月28日 12:00	4月29日 19:00	31	879	浮尘

2023年春季西安市沙尘污染日数在空间分布上存在较大差异,整体上呈现出西多东少、周边多城中少的空间格局。从图1可以看出,位于郊区的草滩站沙尘日数最多,高达16 d;市中心小寨站沙尘日数最少,只有6 d;主城区(莲湖区、碑林区、新城区)沙尘日数基本维持在10~13 d,东部临潼区沙尘日数仅有7 d(图1)。

2.1.2 环境空气质量污染

2023年春季西安市PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>二级超标率变化趋势与城市三级及以上污染等级变化趋势基本保

持一致,说明PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>是影响西安市环境空气质量的主要污染物。3月PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>日均质量浓度超标率均维持在20%以上,城市空气质量受到轻微污染;4月上旬,PM<sub>2.5</sub>超标率降为零,而PM<sub>10</sub>超标率仍维持在较高水平,结合城市空气污染情况来看,此时受到沙尘影响,大气颗粒污染物以粗颗粒物为主,空气质量污染严重;4月中旬,PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>颗粒物超标率骤然回升至30%以上,城市空气受三级及以上污染占比超过30%,此时大气颗粒物污染以PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>为主;4月下旬以来,城市空气质量逐渐



注:基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2023)2763号)制作,底图边界无修改

图1 2023年春季西安市各监测站点沙尘日数

Fig.1 The number of days with sand and dust occurrence at each station in Xi'an in Spring of 2023

好转,且在5月达到“零污染”(图2)。

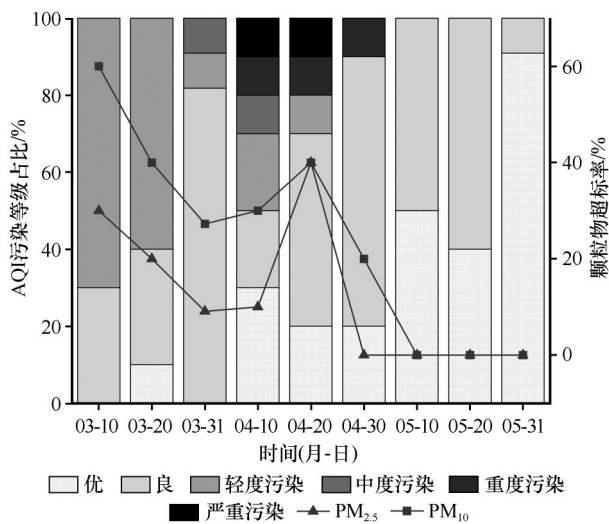


图2 2023年西安春季AQI污染等级

Fig.2 The pollution level of AQI in Xi'an in Spring of 2023

2.1.3 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>污染

2.1.3.1 沙尘期与非沙尘期颗粒物浓度对比

将受到沙尘污染的日期定义为沙尘期,其余为非沙尘期。2023年西安春季沙尘期大气颗粒物浓度呈现出明显的响应特征。沙尘期PM<sub>10</sub>颗粒物浓度远远高于非沙尘期,超出非沙尘期PM<sub>10</sub>浓度平均2倍以上(表2),说明沙尘天气对西安市PM<sub>10</sub>颗粒物浓度影响显著,是西安大气颗粒物的主要污染源。其中沙尘期PM<sub>10</sub>浓度最高的是高压开关厂站,最低的是草滩站;非沙尘期PM<sub>10</sub>浓度最高的仍是高压开关厂站,最低的是兴庆小区站;PM<sub>10</sub>浓度在沙尘期高于非沙尘期变化最大的是兴庆小区站,而变化最小的是高压开关厂站。由此可见,高压开关厂站的空气质量除了受到沙尘污染外,本地污染也较为显著。

表2 2023年西安市春季沙尘期与非沙尘期PM<sub>10</sub>浓度值的对比

Table 2 Comparison of PM<sub>10</sub> concentration between dust and non-dust storm periods in Xi'an in Spring of 2023

指标		监测站点												日均值
		高压开关厂	兴庆小区	纺织城	小寨	市体育场	高新西区	经开区	长安区	临潼区	草滩	曲江集团	广运潭	
PM <sub>10</sub> 浓度	沙尘期	255	233	241	223	249	231	243	253	230	224	252	241	240
	/(μg·m <sup>-3</sup> )													
	非沙尘期	87	69	80	75	75	74	76	81	73	80	79	74	77
	沙尘期高于非沙尘期/%	193	237	202	196	231	212	218	212	218	181	217	225	211

沙尘期PM<sub>2.5</sub>颗粒物浓度高出非沙尘期达89%(表3),但仍然不及PM<sub>10</sub>,说明沙尘运输仍然以粗颗粒为主,但也有细颗粒成分。其中沙尘期PM<sub>2.5</sub>浓度最高的是临潼区,最低的是草滩;非沙尘期PM<sub>2.5</sub>浓

度最高的是高压开关厂,最低的仍然是草滩;沙尘期PM<sub>2.5</sub>浓度值高于非沙尘期最明显的是临潼区,这可能与临潼区靠近秦岭支脉,大气层结稳定,污染物不易扩散有关。

表3 2023年西安市春季沙尘期与非沙尘期PM<sub>2.5</sub>浓度值的对比

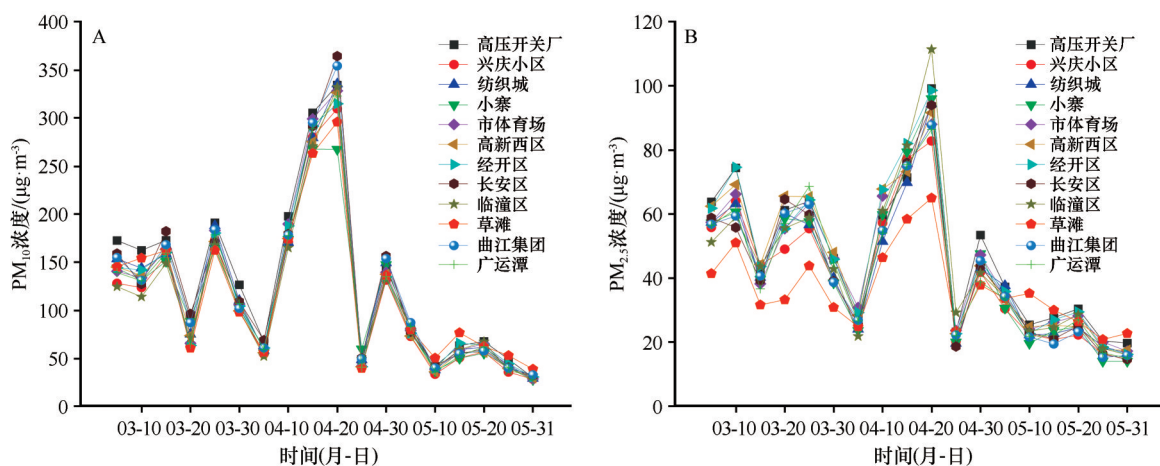
Table 3 Comparison of PM<sub>2.5</sub> concentration between dust and non-dust storm periods in Xi'an in Spring of 2023

指标		监测站点												日均值
		高压开关厂	兴庆小区	纺织城	小寨	市体育场	高新西区	经开区	长安区	临潼区	草滩	曲江集团	广运潭	
PM <sub>2.5</sub> 浓度	沙尘期	68	66	63	69	68	68	73	64	75	51	65	65	66
	/(μg·m <sup>-3</sup> )													
	非沙尘期	40	32	35	33	37	38	37	35	34	31	34	35	35
	沙尘期高于非沙尘期/%	72	105	79	110	85	79	95	85	119	63	91	87	89

2.1.3.2 颗粒物浓度月变化

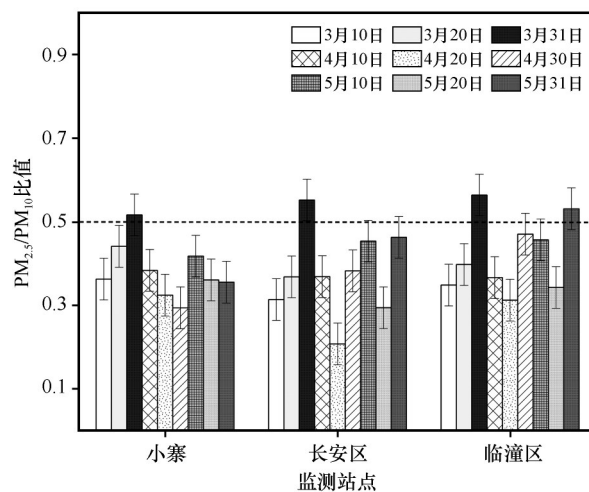
西安市12个监测站点的大气颗粒物浓度月变化特征大致相同,整体呈先增后减的倒“V”型波动变化。3月至4月上旬呈现小范围的波动增长,4月中旬颗粒物浓度骤增且达到顶峰,PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>日均

浓度最高分别达到215.5 μg·m<sup>-3</sup>和918 μg·m<sup>-3</sup>,此后开始下降,至5月上旬颗粒物质量浓度一直维持在一个较低水平,并呈现下滑趋势(图3)。PM<sub>10</sub>月平均浓度最高为长安区(364 μg·m<sup>-3</sup>)、最低为小寨(36 μg·m<sup>-3</sup>),这是因为长安区地处郊区,地势平坦

图3 2023年春季西安市各站点 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 浓度5日均值变化Fig.3 Variation of 5 d average  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  concentration at each station in Xi'an in Spring of 2023

空旷,更容易受到沙尘侵袭,长安区周边多为农田和裸露地表,本地扬尘容易发生,提高了 $PM_{10}$ 颗粒物质量浓度; $PM_{2.5}$ 日均浓度最高为临潼区( $114 \mu g \cdot m^{-3}$ )、最低为小寨( $14 \mu g \cdot m^{-3}$ )。

以小寨、临潼区和长安区为例,探究 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值在2023年春季不同时期的变化过程。3个站点的 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值随时间变化的趋势基本一致,整体呈现出3月>5月>4月的特征,在3月下旬达到峰值,3个站点颗粒物比值均在0.5以上,细颗粒物( $PM_{2.5}$ )占比明显偏高;在4月中旬达到低值,说明受粗颗粒物的影响最为显著(图4)。3月上旬,西安市平均风速较小,空气相对湿度高(图5),低风速、高湿度的气象条件为颗粒物的堆积创造了良好的条件,空气中 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 污染物在低空长时间悬浮堆积、不易扩散而造成大气颗粒物浓度升高;3月以来,风速和相对湿度逐渐增加, $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 均呈现

图4 2023年春季不同时期小寨、长安区、临潼区 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值Fig.4  $PM_{2.5}/PM_{10}$  ratio of Xiaozhai, Chang'an and Lintong in different periods in Spring of 2023

不同程度的下降,而 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值却随之升高,这说

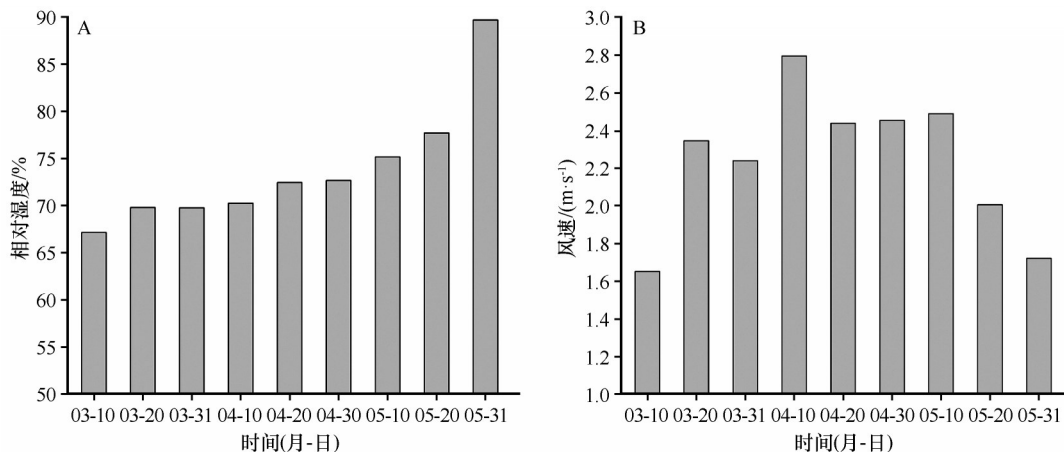


图5 2023年春季西安市平均风速、相对湿度变化

Fig.5 Changes of average wind speed and relative humidity in Xi'an in Spring of 2023

明气象因子对 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 的影响程度是不同的,气象条件的变化对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响更为显著;4月中下旬受剧烈沙尘天气的影响, $PM_{10}$ 浓度增加,导致颗粒物比值明显降低。此外,小寨颗粒物浓度比值变化幅度相对于临潼区和长安区明显更小,说明城区春季受沙尘天气污染的影响更小。

从时间序列来看,2023年春季西安市小寨和长安区不同月份的 $PM_{10}$ 与 $PM_{2.5}$ 浓度相关性整体呈现出3月<5月<4月的特征,3月相关性最差,小寨 $R^2$ 仅为0.25,长安区甚至为弱相关;5月相关系数有所回升,小寨和长安区 $R^2$ 分别达到了0.64和0.73;4月相关性非常显著,两站点的 $R^2$ 均在0.95以上(图6)。可见,西安市3月 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 污染物来源较杂,外来沙

尘传输和本地起尘均有一定的贡献;4月受沙尘天气影响较大,颗粒物污染以外来沙尘为主;5月颗粒物污染主要与生产活动等密切相关。从空间分布来看,3月和4月,小寨的颗粒物浓度相关系数明显高于长安区,说明小寨受沙尘天气的影响大于长安区,这一点与上面得到的结果一致;5月小寨颗粒物浓度的相关性又低于长安区,说明小寨地区大气颗粒物受到人类活动的影响更大,颗粒物来源呈现多元化、复杂化的发展。

## 2.2 一次典型沙尘过程

### 2.2.1 颗粒物浓度日变化

2023年4月19—20日,受蒙古气旋与冷空气从

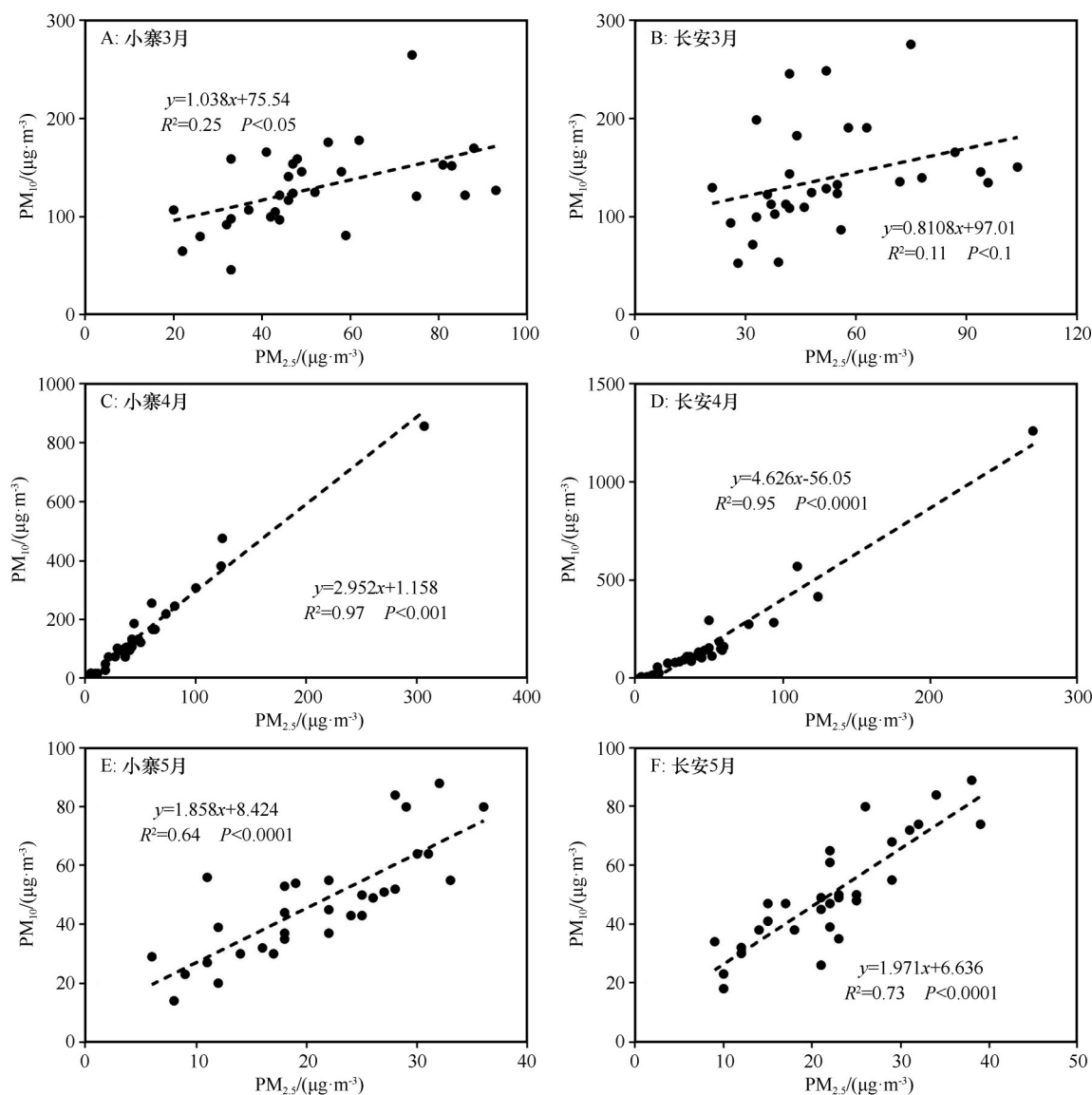


图6 2023年春季小寨和长安区不同月份 $PM_{10}$ 与 $PM_{2.5}$ 的相关性

Fig.6 Correlation of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  in Xiaozhai and Chang'an District in different months of Spring of 2023

内蒙古中西部沙源地过境形成的沙尘天气的影响,西安市 $\text{PM}_{10}$ 浓度短时间内迅速升高,达到扬沙级别,环境空气质量骤然下降,发生了以 $\text{PM}_{10}$ 为首要污染物的连续两天的五级重度污染过程。

$\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 值是判断 $\text{PM}_{10}$ 中粗细粒子含量的简易指标,也是判断一个地区是否受到沙尘污染影响的重要指标<sup>[26]</sup>。由图7A可知,此次沙尘过程 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 值小时变化曲线近似呈“U”型,具有明显的时段特征。沙尘来临前大气颗粒物以 $\text{PM}_{10}$ 为主,但细颗粒物占比较高, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 值为0.4~0.5;沙尘来临后颗粒物浓度迅速上升, $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在沙尘开始后的3 h内分别达到峰值1 769  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和422  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,

$\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 值仅为0.1~0.3,大气颗粒物以粗颗粒物为主;此后开始逐渐下降, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 值在较长时间内均维持在一个较低水平,并呈现缓慢回升趋势,直到21日04:00  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值开始迅速回升,至21日06:00,此次沙尘结束;沙尘后期,大气颗粒物浓度相比于前期显著降低, $\text{PM}_{10}$ 浓度在结束后的3 h内降至46  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,下降速率达到31  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ , $\text{PM}_{2.5}$ 在 $\text{PM}_{10}$ 中的占比达到50%以上,环境空气质量良好。在此过程中 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度表现出很强的相关性(图7B),说明此次沙尘污染过程中的 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 均来自外源污染,也反映了沙尘过程对西安环境空气质量影响巨大。

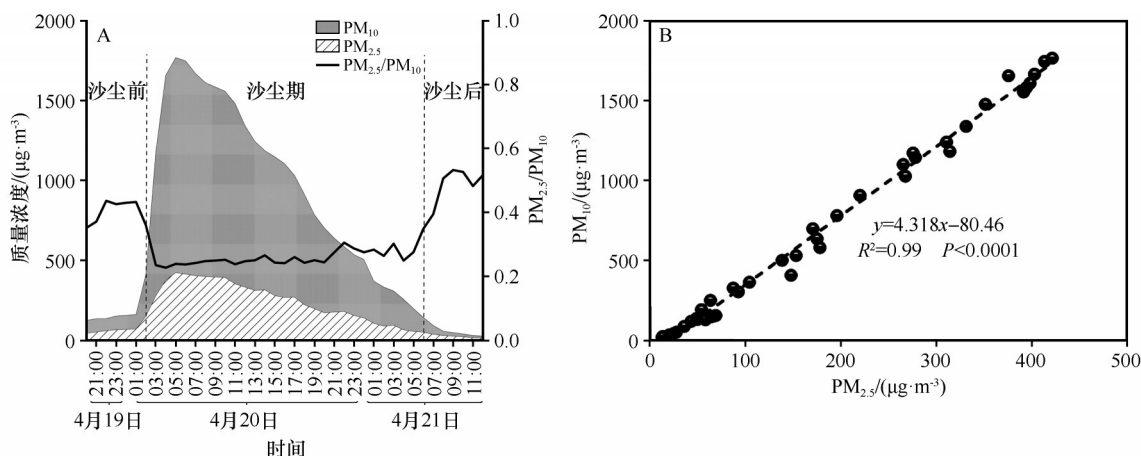


图7 2023年4月19—21日沙尘过程西安市 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度变化(A)和相关性(B)

Fig.7 Hourly changes (A) and correlation (B) of  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations in Xi'an during the dust process on April 20–21, 2023

## 2.2.2 气态污染物浓度变化

由图8可知,沙尘天气对气态污染物浓度也有一定的影响。沙尘前期, $\text{NO}_2$ 浓度开始迅速上升, $\text{O}_3$ 浓度迅速下降,而 $\text{SO}_2$ 和 $\text{CO}$ 浓度起伏并不大且均维持在较高水平,这可能与晚高峰时期汽车尾气的排放以及夜间 $\text{NO}$ 和 $\text{O}_3$ 的“滴定效应”有关。沙尘过境期间, $\text{NO}_2$ 浓度骤降,下降幅度达83.9%, $\text{CO}$ 与 $\text{SO}_2$ 均呈现不同程度的下降趋势( $\text{CO}$ 浓度下降幅度为73.5%, $\text{SO}_2$ 浓度下降幅度为30.0%),此后在较长时间内均维持在较低水平进行小幅波动。结合气象要素可知,沙尘天气往往伴随强风的出现,大风的强扩散作用使得 $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 和 $\text{CO}$ 浓度均呈现不同程度的下降趋势。沙尘后期, $\text{CO}$ 浓度开始缓慢回升, $\text{NO}_2$ 和 $\text{SO}_2$ 浓度基本趋于稳定,分别保持在15  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和5.00  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右。值得注意的是,沙尘过程中 $\text{O}_3$ 浓度整体表现为先下降后上升再下降的变化趋势,这主要与 $\text{O}_3$ 的白天光照作用下生成,夜间下降

的日变化特征有关;沙尘期,一方面由于空气中的颗粒物浓度增加,削弱了到达地面的太阳辐射,从而阻碍了 $\text{O}_3$ 生成的潜势<sup>[1]</sup>;另一方面由于沙尘期良好的气象扩散条件,加速了 $\text{O}_3$ 的扩散稀疏,使得 $\text{O}_3$ 峰值明显低于非沙尘期(4月19日西安市 $\text{O}_3$ 峰值为213  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),日变化幅度明显减小。

## 2.2.3 沙尘来源与输送路径

基于Meteoinfo软件利用HYSPLIT模式对西安市2023年4月20日02:00至21日06:00一次典型沙尘过程中500 m和1 000 m高空的 $\text{PM}_{10}$ 颗粒物进行24 h后向轨迹计算,得到了沙尘移动的路径。由图9可知,此次沙尘过程中西安市沙尘入侵路径大致可以分为3条:西北路径、偏北路径和偏东路径。500 m高空,源自蒙古国南部的沙尘由北向南起沙入境,到中国内蒙古中部的库布齐沙漠、毛乌素沙地一带,沙尘物质不断得到补充,一路南下抵达西安,最终形成偏北路径;1 000 m高空,气流轨迹一部

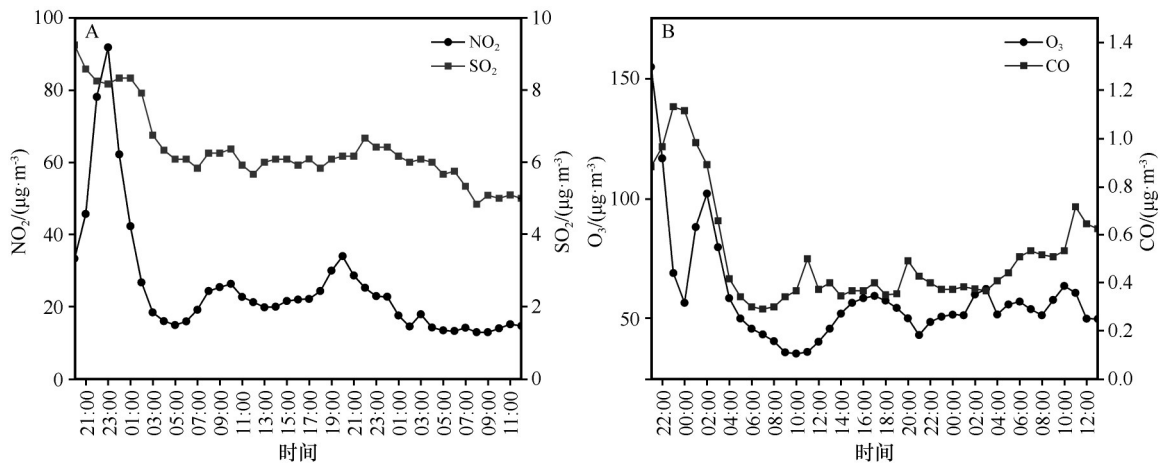
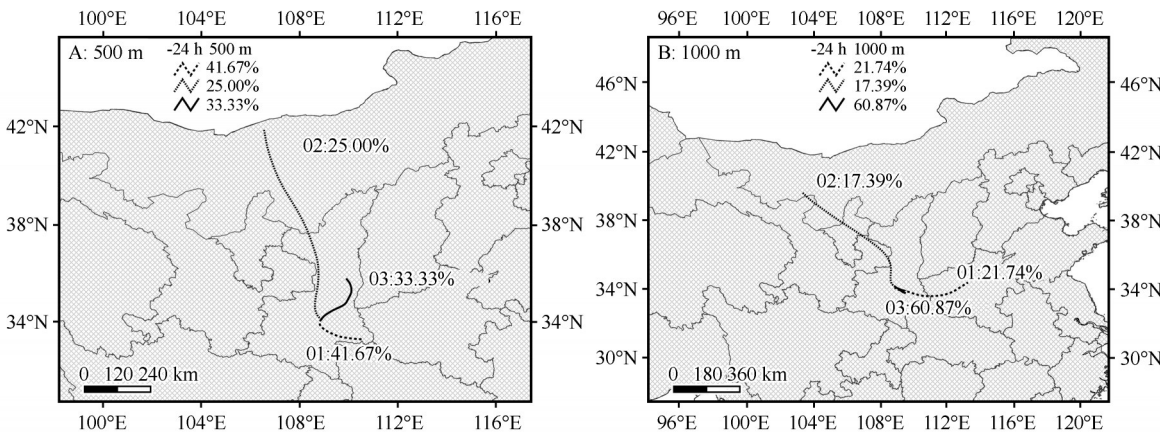


图 8 2023 年 4 月 19—21 日沙尘过程西安市气态污染物小时浓度变化

Fig.8 Change of hourly concentration of gaseous pollutants in Xi'an during the dust process on April 19–21, 2023



注：基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号：GS(2019)1822)制作，底图边界无修改

图 9 2023 年 4 月 20—21 日西安  $\text{PM}_{10}$  颗粒物 24 h 后向轨迹

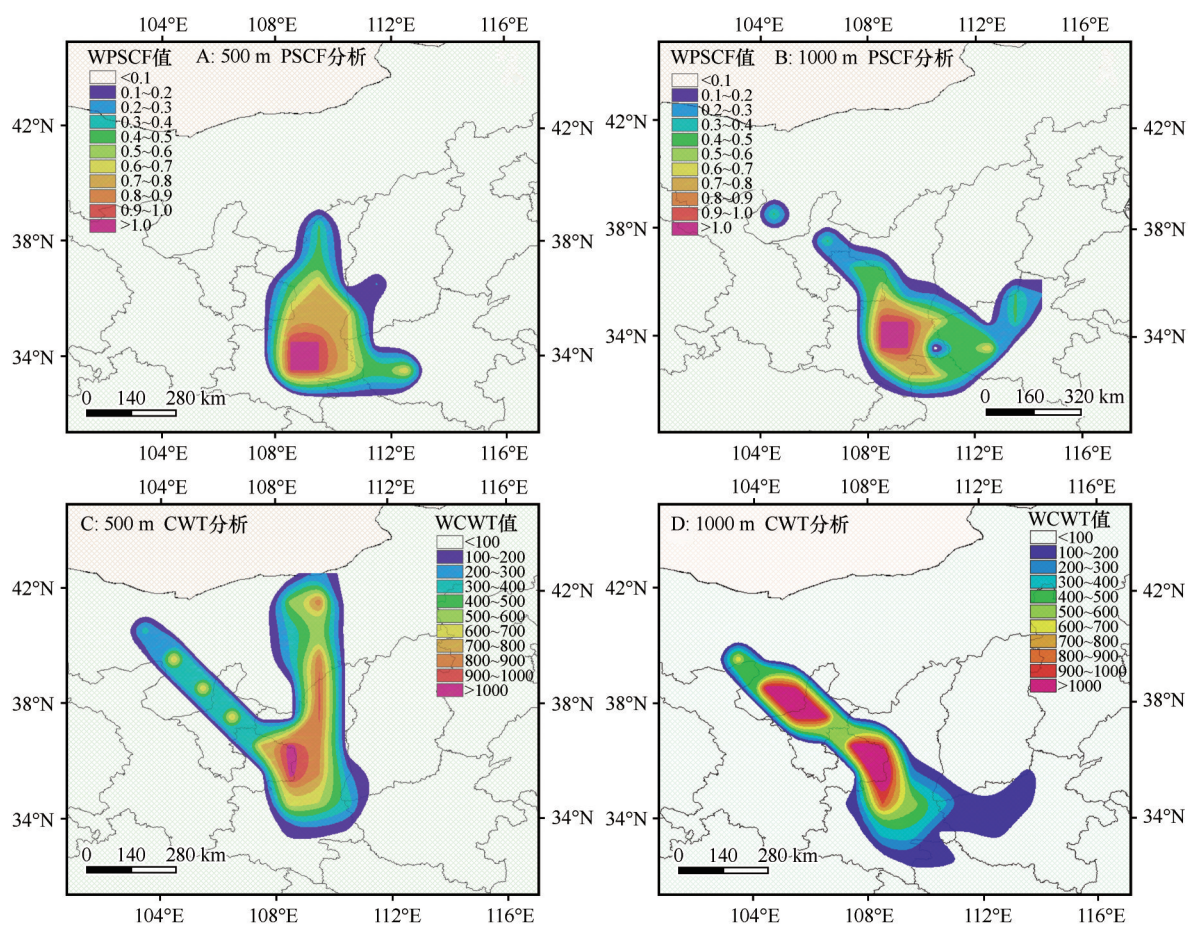
Fig.9 24-hour backward trajectory of  $\text{PM}_{10}$  particles in Xi'an on April 20–21, 2023

分来自内蒙古西部的巴丹吉林沙漠,在西北气流的裹挟下途经腾格里沙漠、乌兰布和沙漠等,最终抵达西安,形成西北路径;还有一部分气流来自河南北部的沙地,这些沙尘颗粒随上升气流运送至高空,在东北气流的裹挟下传输至西安。该路径气流轨迹最短,说明来自河南北部的气团移动速率最慢,沙尘影响最小。

PSCF 分析法是一种基于污染气流轨迹来识别源区的方法,仅反映受点城市的沙尘潜在贡献源区,WPSCF 高值区对应沙尘源地的潜在贡献区;而 CWT 分析法在 PSCF 的基础上对污染轨迹进行权重计算,可以反映该区域对受点城市的沙尘贡献大小,WCWT 值越大,代表该区域对受点城市的沙尘贡献值就越大。从图 10 可以看出,PSCF 和 CWT 分析结果存在一定差异,在 PSCF 分析中,500 m 高空下高 WPSCF 值主要分布在陕北至内蒙古中部的毛

乌素沙地一带,1 000 m 高空下高 WPSCF 值主要分布在宁夏北部、内蒙古西部巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠以及河南北部一带;而在 CWT 分析中,500 m 高空下的 CWT 结果呈“Y”型叉状分布,西北路径 WCWT 高值区域在内蒙古西部、甘肃东部的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠以及宁夏北部地区,偏北路径的高值中心在蒙古国南部以及内蒙古中部戈壁沙漠地区,1 000 m 高空下的 WCWT 高值分布区域与 500 m 高空下的西北路径高值区保持一致。由此可以看出,CWT 模拟效果与上述沙尘传输路径结果更为契合,CWT 对沙尘来源的模拟效果更好。

结合气流后向轨迹、PSCF 和 CWT 分析,对照蒙古国和中国沙漠地带分布可知,此次西安市沙尘天气沙尘输送路径主要有 3 条——西北路径、偏北路径以及偏东路径,其中以西北路径为主。沙尘潜在源区分为境内和境外,境外沙尘主要来自蒙古国南



注:基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2019)1822)制作,底图边界无修改

图10 2023年4月20—21日西安PM<sub>10</sub>颗粒物PSCF、CWT分析

Fig.10 PSCF and CWT analysis of PM<sub>10</sub> particles in Xi'an on April 20–21, 2023

部的戈壁沙漠,输沙量相对较少;境内源区主要位于中国内蒙古西部的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠以及中部的库布齐沙漠、毛乌素沙地等地区。值得注意的是,河南北部的沙地也是此次影响西安市沙尘天气的重要来源,这可能与近年来全球气候变化异常,中纬度地区气候朝暖干化发展有关。

### 3 结论

2023年春季西安市共发生9次沙尘天气过程,1次为扬沙,其余均为不同程度的浮尘天气。从时间来看,西安市沙尘天气多在3—4月,沙尘日数达23 d,4月是沙尘高发期;从空间分布来看,沙尘污染日数呈现出西多东少、周边多城中少的空间格局,草滩、长安区污染严重,小寨受沙尘污染较轻。

沙尘期大气颗粒物浓度显著升高,PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>浓度均远高于非沙尘期,且PM<sub>10</sub>浓度变化幅度大于PM<sub>2.5</sub>;PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>大气颗粒物浓度呈先增后减的波动趋势,4月达到峰值,其中PM<sub>10</sub>月平均浓度最高值

位于长安区,最低值为小寨;PM<sub>2.5</sub>最高为临潼区,最低为小寨。

小寨、长安区、临潼区3个站点的PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>比值3月>5月>4月,PM<sub>10</sub>与PM<sub>2.5</sub>相关性3月<5月<4月,说明不同月份的主要颗粒物污染不同,3月以粗细粒子混合污染为主,PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>污染物来源较杂;4月以粗粒子污染为主,5月大气颗粒物浓度较低;此外,气象因子对大气颗粒物浓度变化也有影响,低风速、高湿度的气象条件往往对应PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>浓度高值,且对PM<sub>2.5</sub>影响更为显著。

4月20—21日为春季最强一次沙尘过程,达到扬沙级别,PM<sub>10</sub>小时浓度峰值达到1 769 μg·m<sup>-3</sup>。沙尘影响期间,PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>颗粒物浓度均呈现单峰型变化;PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>比值呈现“U”型变化,且沙尘后期颗粒物浓度明显低于前期;NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>和CO浓度均呈现下降趋势,而O<sub>3</sub>浓度呈先下降后上升再下降的趋势。

4月20—21日沙尘过程由蒙古高压和地面冷锋

过境形成,输沙路径有3条:西北路径的主要沙源地在中国内蒙古西部的腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠地区,沿500~1 000 m高空传输;偏北路径的沙尘源地在蒙古国南部的戈壁沙滩以及中国库布齐沙漠、毛乌素沙地一带,主要沿500 m高空气流传输;偏东路径的沙源地在河南省北部的沙地,对于此次西安沙尘的贡献度最小。

**致谢:**感谢硕士研究生张紫微、富鸿远对文字和图片进行部分修改。

### 参考文献:

- [1] Chen S, Liu J, Ma S, et al. Holocene dust storm variations across northern monsoonal Asia and arid central Asia: contrasting impacts of climate change [J]. *Global and Planetary Change*, 2024, 240: 104524.
- [2] Kang H, Zhu B, De Leeuw G, et al. Source contributions to two super dust storms over Northern China in March 2021 and the impact of soil moisture [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 950: 175289.
- [3] Pouri N, Karimi B, Kolivand A, et al. Ambient dust pollution with all-cause, cardiovascular and respiratory mortality: a systematic review and meta-analysis [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 912: 168945.
- [4] Gholizadeh H, Zoghi pour M H, Torshizi M, et al. Gone with the wind: impact of soil-dust storms on farm income [J]. *Ecological Economics*, 2021, 188: 107133.
- [5] 咎金波, 方小敏, 宁文晓, 等. 中亚黄土粉尘与冰冻圈演化、太平洋生产力和全球变化的联系 [J]. *科学通报* 2024, 69: 4704–4715.
- [6] 吴兑, 吴晟, 李菲, 等. 粗粒子气溶胶远距离输送造成华南严重空气污染的分析 [J]. *中国环境科学*, 2011, 31(4): 540–545.
- [7] 张嘉月, 康娜, 于学普, 等. 呼和浩特市大气污染特征及气象条件影响分析 [J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(3): 1292–1300.
- [8] 刘新春, 钟玉婷, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘气溶胶质量浓度的观测研究 [J]. *中国环境科学*, 2011, 31(10): 1609–1617.
- [9] 李国翠, 王建国, 连志鸾, 等. 2006年春季石家庄市沙尘天气与PM<sub>10</sub>污染 [J]. *中国环境监测*, 2007(6): 57–60.
- [10] Karagulian F, Temimi M, Ghebreyesus D, et al. Analysis of a severe dust storm and its impact on air quality conditions using WRF-Chem modeling, satellite imagery, and ground observations [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2019, 12: 453–470.
- [11] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 等. 沙尘暴研究的进展 [J]. *中国沙漠*, 2000, 20(4): 5–12.
- [12] Chen S, Zhao D, Huang J, et al. Mongolia contributed more than 42% of the dust concentrations in Northern China in March and April 2023 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2023, 40(9): 1549–1557.
- [13] 吴芷瑜, 辛智鸣, 姜群鸥, 等. 基于HYSPLIT模式的西北干旱区典型沙尘事件沙源地及沙尘传输路径探析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(6): 1862–1868.
- [14] 王蕾, 杨震, 刘笑, 等. 关中地区沙尘输送路径及潜在源区分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(10): 109–117.
- [15] 王建鹏, 王式功, 孟小绒, 等. 沙尘天气等对西安市空气污染影响的研究 [J]. *中国沙漠*, 2004, 24(5): 558–563.
- [16] 张佳音, 郭云飞, 肖舜, 等. 陕西区域环境空气质量时空特征 [J]. *中国沙漠*, 2023, 43(3): 36–46.
- [17] Shen Z X, Cao J J, Arimoto R, et al. Ionic composition of TSP and PM<sub>2.5</sub> during dust storms and air pollution episodes at Xi'an, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(18): 2911–2918.
- [18] Li X X, Cao J J, Chow J, et al. Chemical characteristics of carbonaceous aerosols during dust storms over Xi'an in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, 25: 847–855.
- [19] Yan Y, Sun Y, Ma L, et al. A multidisciplinary approach to trace Asian dust storms from source to sink [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 105: 43–52.
- [20] 胡元洁, 蒋楠. 沙尘天气对西安市环境空气质量的影响 [J]. *中国沙漠*, 2020, 40(6): 53–60.
- [21] 中华人民共和国环境保护部. 受沙尘天气过程影响城市空气质量评价补充规定 [Z]. 北京, 2017.
- [22] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 沙尘暴天气等级: GB/T 20480–2006 [S]. 北京: 中国气象局, 2006.
- [23] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准: GB3095–2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [24] 黄丽坤, 王广智, 王琨. 哈尔滨市沙尘期大气颗粒物物化特征及传输途径分析 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(8): 1920–1926.
- [25] 杨静宜, 李亚菲, 罗忠伟, 等. 武汉市典型颗粒物污染过程演变特征及来源研究 [J]. *环境科学学报*, 2024, 44(5): 310–323.
- [26] 孙韧, 陈冠益, 董海燕. 天津市春季颗粒物污染特征及典型沙尘过程分析 [J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(6): 8–14.

## Influence and source analysis of Spring dust storm on ambient air quality in Xi'an, China

Li Li<sup>1</sup>, Xiao Shun<sup>1</sup>, Dong Zhibao<sup>1</sup>, Lv Ping<sup>1</sup>, Wang Na<sup>2</sup>, Zhang Jiayin<sup>3</sup>, Han Jing<sup>4</sup>,  
Zhang Zhuangzhuang<sup>5</sup>, Mi Na<sup>5</sup>, Liu Suixin<sup>6</sup>, Liu Jianbao<sup>7</sup>

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Shaanxi Climate Center, Xi'an 710014, China; 3. Shaanxi Provincial Environmental Monitoring Central Station, Xi'an 710054, China; 4. Xi'an Environmental Monitoring Station, Xi'an 710018, China; 5. Xi'an Institute for Innovative Earth Environment Research, Xi'an 710061, China; 6. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 7. College of Urban and Environment Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** As an important hub city of the "Silk Road Economic Belt", Xi'an is located in the Guanzhong Basin, bordering the Loess Plateau to the north, Qinling Mountains to the south, and a large number of gobi desert distributed in the northwest, which is an important influence area of sand and dust transit in northern China. In order to study the variation characteristics and potential source areas of atmospheric particulate matter concentration on different time scales during Spring dust in Xi'an, this paper comprehensively analyzes the continuous monitoring data of ambient air quality in Xi'an from March to May 2023. The cluster analysis, potential source factor analysis (PSCF) and concentration weight trajectory analysis (CWT) of a typical dust process were carried out by using HYSPLIT backward trajectory model. The results show that: (1) In the Spring of 2023, there were 9 dust processes in Xi'an, one of which was blowing sand and the rest was floating dust; The dust distribution was concentrated in March and April, showing a spatial pattern of more in the west and less in the east, more in the surrounding area and less in the city. (2) The concentration of atmospheric particulate matter presented significant response characteristics on different time scales. Specifically, the concentrations of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  in the dust period were much higher than those in the non-dust period, and  $PM_{10}$  was significantly higher than  $PM_{2.5}$ . The monthly variation of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  concentration showed a fluctuating change characteristic of first increasing and then decreasing. The ratio of  $PM_{2.5}/PM_{10}$  showed the characteristics of March > May > April, while the correlation between  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  showed the characteristics of March < May < April. (3) In the process of sand lifting from April 20 to 21, the concentration of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  showed a "single-peak" type change, the  $PM_{2.5}/PM_{10}$  ratio showed an inverted "U" pattern change. The concentrations of  $NO_2$ ,  $SO_2$  and CO all showed a decreasing trend, while the concentration of  $O_3$  showed a decreasing trend first, then increasing and then decreasing. (4) From April 20 to 21, the dust process was formed by the transit of Mongolian High Pressure and surface cold front, and the sand transport path was northwest path, north path and east path. The dust sources were Tengger Desert, Badain Jaran Desert, Kubuchi Desert, Mu Us Desert, Gobi Desert in southern Mongolia and sandy land in northern Henan Province.

**Key words:** dust storm; ambient air quality; source; Spring; Xi'an