

屈丽玮,赵强,马晓华,等.西安市一次持续重污染过程的清除特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(2):8-15.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.02.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 西安市一次持续重污染过程的清除特征分析

屈丽玮,赵强,马晓华,李萍云,刘嘉慧敏,潘留杰,刘慧\*

(陕西省气象台,陕西 西安 710015)

**摘要:**对2019年1月发生在西安市的一次持续重污染过程气象条件进行研究,对污染清除阶段进行对比分析,研究冷锋活动对西安市污染物的输送和清除作用。结果表明:7日白天西风累积风速更大,污染清除速率较快,14日夜间—15日东风累积风速更大,持续半个月的污染状况消除。两次污染清除过程的不同是由冷高压的位置和移动路径不同所造成。关中盆地内的主导风向不同则是风场与地形相互作用的结果。小时加密风场表明污染清除可分为偏西路径和偏东路径。偏东风将汾渭平原的污染物输送至关中盆地,对本地污染状况具有先加重再清除的效果。污染持续期间逆温层维持,上午地面风加强导致近地面污染物浓度降低,午后晴空加热效应明显,贴地逆温减弱或消失,近地层大气垂直混合加强,污染物向上扩散稀释,地面污染物浓度迅速下降。

**关键词:**重污染;累积风速;加密风场;微波辐射计

**中图分类号:**P458.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1002-0799(2022)02-0008-08

随着社会经济的快速发展,大气污染对城市环境和公众健康构成较大威胁,引起众多学者的广泛关注,并针对京津冀、长三角、珠三角的污染特征开展了大量研究<sup>[1-8]</sup>,结果表明重污染天气形成和维持取决于污染物排放强度,并与天气形势、局地气象条件、大气边界层特征及特殊地形等密不可分。天气尺度时间内,污染排放源一般相对稳定,重污染过程的出现与当地气象条件密切相关,污染特征取决于大气输送扩散条件,天气系统的演变对大气扩散条件的预报有重要意义<sup>[9]</sup>。结合大气环流的区域污染输送及清除机制的研究,在环境和气象科学领域都具有重要意义。廖晓农等<sup>[10]</sup>认为冷锋势力较弱且不能影响到地面,致使地面弱风场维持是冷空气条件下雾霾持续的主要原因。Chen等<sup>[11]</sup>研究表明我国北方地区秋冬季空气质量与天气类型密切相关,气压

梯度较大的天气系统过境有利于污染清除。李霞等<sup>[12]</sup>研究表明,一些重大污染事件的形成与特殊地形有密切关系。复杂地形下垫面的非均匀性,对污染物的扩散传输影响很大。

西安市位于陕西关中盆地中部,关中盆地位于汾渭平原西部,西起宝鸡,东至潼关,北靠黄土高原南缘,南依秦岭山脉北坡,是三面环山向东敞开的河谷盆地,呈喇叭口形状,不利于污染物的扩散清除。针对西安市和关中盆地重污染天气,研究主要侧重于污染物气候特征<sup>[13-17]</sup>,及污染生成时的气象条件<sup>[18-20]</sup>,但对污染清除的气象条件研究不够深入。本文对2019年1月发生在西安市的一次持续重污染过程的气象条件进行研究,对过程中两次污染清除阶段进行重点分析,探究冷锋活动、风场和地形相互作用对西安市污染物的输送和清除作用,为空气污染气象条件预报提供思路和参考。

收稿日期:2021-04-21;修回日期:2021-10-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1507901)

作者简介:屈丽玮(1984—),女,高级工程师,主要从事天气预报业务及研究工作。E-mail:qlw1029@qq.com

通信作者:刘慧(1989—),女,工程师,主要从事环境气象预报及研究工作。E-mail:huizai\_2017@163.com

## 1 资料与方法

PM<sub>2.5</sub>浓度和AQI(Air Quality Index,空气质量指数)数据来源于国家环境监测总站,市小时值由13个国控站平均获得,市日值由24个时次的市小

时值平均获得。同时段的逐时气象观测资料,包括风向、风速、温度、相对湿度、能见度等地面气象要素及位势高度场、海平面气压来源于国家气象站和加密观测站。其中地面气象观测资料时间间隔为1 h,高空观测资料为每日08、20两个时次。研究时段为2019年1月1—15日。本研究将空气质量指数(AQI)作为大气污染程度的度量指标,AQI为无量纲量,其等级分为:优( $0 \leq AQI \leq 50$ )、良( $51 \leq AQI \leq 100$ )、轻度污染( $101 \leq AQI \leq 150$ )、中度污染( $151 \leq AQI \leq 200$ )、重度污染( $201 \leq AQI \leq 300$ )、严重污染( $AQI > 300$ )。

微波辐射计资料来源于布设在西安市泾河国家基准站的地基多通道微波辐射计,由中国兵器工业集团北方天穹信息技术(西安)有限公司研制(型号:MWP967KV),亮温分辨率 $\leq 0.2$  K,探测范围为地表到顶空10.0 km,垂直方向上廓线划分为58层,分辨率分别为50 m(0.5 km以下)、100 m(0.5~2.0 km)、250 m(2.0~10.0 km),通过神经网络算法反演顶空大气温度、湿度、云水分布及水汽、液态水含量等多种大气参数。

## 2 污染过程演变特征

2019年1月1—15日,西安市出现了一次持续重污染天气过程。从图1可知,1日AQI平均值 $>200$ ,西安达到重度污染,之后 $PM_{2.5}$ 与 $PM_{10}$ 质量浓度快速累积上升。3日 $PM_{2.5}$ 质量浓度达到 $290 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,空气质量指数AQI为340,属严重污染。4—5日有所回落, $PM_{2.5}$ 降至 $204 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,仍属于重度污染。6日再次攀升至 $296 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,同时AQI达347,超过3日的高值,为此次过程的峰值。7日明显回落,8日平均 $PM_{2.5}$ 为 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,AQI为132,属轻度污染,此段污染过程基本结束。1—8日定义为阶段一。9日AQI缓慢上升,10日AQI突破200,13日AQI达287,为此阶段的峰值,14日明显回落,15日空气质量恢复至良。9—15日定义为阶段二。2个阶段 $PM_{2.5}$ 与 $PM_{10}$ 质量浓度变化趋势基本一致。从 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的值看出,污染物浓度较高时,两者比值均在0.8以上,说明重污染期间的主要污染物是以 $PM_{2.5}$ 为主的细颗粒物。AQI变化趋势能基本反映污染物浓度变化趋势,本文以AQI作为反映污染严重程度的指标,对这2个阶段的演变和清除过程进行对比分析,并探讨空气质量发生如此变化的原因,气象条件如何影响,以期对影响此类重污染天气的气象条件预报提供参考。

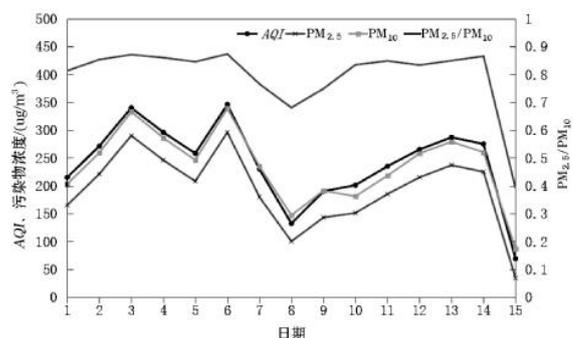


图1 2019年1月1—15日西安AQI、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 及 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 逐日变化曲线

## 3 背景环流分析

1—2日,500 hPa欧亚高纬度为宽广低值区,锋区偏北,冷空气位于贝加尔湖以西,中纬度维持平直西风气流,河套地区无明显冷空气活动。地面维持均压场形势,地面缓慢增温。3日500 hPa贝加尔湖西侧低涡向东南移动,中纬度青海东部有高原槽发展并向东移至陕西关中,850 hPa关中地区有切变线存在,西南气流发展,冷暖气流汇合,3日下午至夜间在关中西部宝鸡和咸阳产生弱降雪,3日白天受偏南气流发展影响,低层湿度增加,有利于污染物吸湿增长,日平均AQI突破300,达到严重污染。4日短波槽移过陕西,850 hPa关中为 $-12$  °C的冷中心,地面弱冷空气对污染物起到一定的清除作用,西安4日10—20时逐小时AQI呈下降趋势,但冷空气较弱,AQI仅从344降至246。5日受槽后西北气流影响,地面有弱冷空气活动,西安市AQI平均值降至252,仍为重度污染。6日500 hPa中纬度气流较平直,地面受热低压北部低压倒槽控制,湿度升高,关中盆地平均相对湿度为60%~80%,有利于霾的生成。西安市日均AQI飙升至过程最高值347,达严重污染。7—8日500 hPa蒙古横槽东移南下,受其影响,7日地面冷高压向东南扩散,冷空气南下,7日08时地面气压场上1035 hPa线压至关中以北,且四川西北部有低压倒槽发展,中心气压为1010.5 hPa,造成甘肃东部至关中西部一带气压梯度增大,10°纬距变压为30 hPa,地面风场加强,关中近地面风场转为偏北风,霾开始清除,AQI下降,日平均值为231。8日冷锋继续向南移动,08时贝加尔湖西侧高压分裂出1050 hPa的高压,其中心位于蒙古国中部,14时冷高压移至内蒙古中部河北以北一带,中心气压为1042.5 hPa。地面气压场转为经向型。8日AQI平均值为132,降至轻度污染。

9—13日500 hPa中纬度气流较平直,地面维持均压场形势,AQI逐渐升高,10日关中盆地AQI为202,达到重度污染。13日500 hPa上贝加尔湖以北的冷涡向东移动,引导冷槽向东移动,13日平均AQI为246,达到阶段二的峰值。14—15日贝加尔湖冷涡加强并南移,引导东亚大槽东移南下。14日08时地面冷高压中心气压升高至1 072.5 hPa,冷锋引导冷空气南下,地面偏北风加强,霾开始清除;14日夜间,冷空气势力强大,继续向华北平原入侵。15日华北冷高压加强,陕西关中地面风场转为偏东风,15日凌晨西安AQI再次下降。15日平均AQI降至65,空气质量达到良。

对比两个污染清除阶段的形势场,从500 hPa高空槽的演变可知,1—5日中纬度为纬向环流,有高原槽东移,有利于污染物在低层的积聚。7—8日高纬度乌拉尔山高压脊缓慢东移,脊前横槽位于贝加尔湖以南地区,7日横槽转竖,冷空气扩散南下,西安AQI迅速下降。9—13日中纬度维持平直西风气流,14日高纬度低涡中心为496 hPa,位于70°N以北,东亚大槽东移南下,为河套及下游持续输送冷空气,地面冷高压维持在贝加尔湖西南侧,且不断有冷空气补充南下,使得14—15日空气质量等级为良的水平。从地面冷高压(图2a)位置和强度来看,1月7日14时贝加尔湖西侧地面冷高压中心为1 062.5 hPa,四川有热低压发展,中心强度为1 010 hPa,两者差值为52.5 hPa。地面气压场上沿河套西部有一低压槽。14日14时(图2b)地面图上贝加尔湖西侧地面冷高压中心为1 065 hPa,四川低压中心为1 002.5 hPa,两者差值为62.5 hPa。说明14日地面冷空气强度较7日更强,更有利于污染物扩散和稀释。

#### 4 精细化探测资料分析

##### 4.1 相对湿度和风的变化特征

气象因素通过影响颗粒物的累积、稀释、化学转化等方式来影响大气气溶胶的形成和发展。通常在相对湿度较大和风速较低等不利于污染物扩散、稀释的静稳天气条件下,污染物浓度不断累积;当有明显冷空气或降水影响时,有利于污染物的扩散稀释作用,污染物浓度迅速降低<sup>[21]</sup>。使用加密气象站1 h相对湿度、平均风、能见度等高分辨率精细化探测资料(图3),对2019年1月7—8日和14—15日的污染清除阶段进行精细化分析,以探究污染清除的不同路径和机制。

1月7日,随着地面冷高压南下,风速逐渐增大

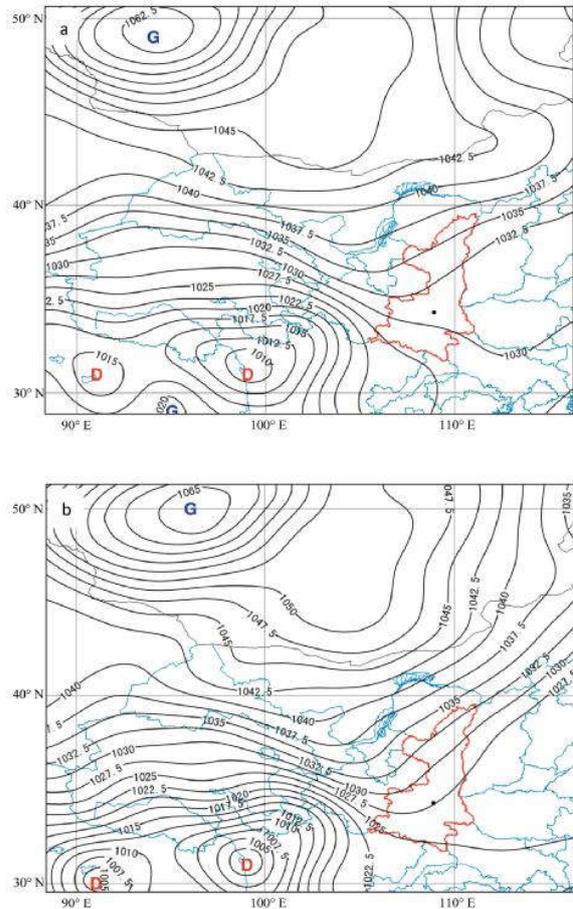


图2 2019年1月7日14时(a)、14日14时(b)海平面气压场(黑点为西安市)

(图3a,3c),10时风速增至3.1 m/s,并维持高值至15时,同时相对湿度骤降,15时达到最小值22%,此时段AQI快速下降,19时下降至83。此后风速逐渐下降,为1~2.6 m/s,且为西偏南风;相对湿度缓慢上升,AQI也略有回升,维持在100左右。

由14—15日的最大风速、风向、AQI和相对湿度变化关系(图3b,3d)可知,14日随冷空气扩散南下,西安风速开始增大,10时增至3 m/s,为偏西风;19时风速维持在3 m/s以上,同时AQI开始下降;20时西安AQI降至158,为这一阶段的最小值。21—02时维持1.5 m/s左右的较小风速,风向转为偏东风,西安市以东的污染物向西输送,西安AQI表现为缓慢回升趋势。常炉予等<sup>[22]</sup>对上海地区的研究也得到类似结论,弱冷空气改善局地扩散条件的同时也产生了明显的周边污染物输送。15日03时,冷高压加强并向东扩散,陕西关中地区气压场调整为经向型,东西向气压梯度增大,偏东风开始增强,

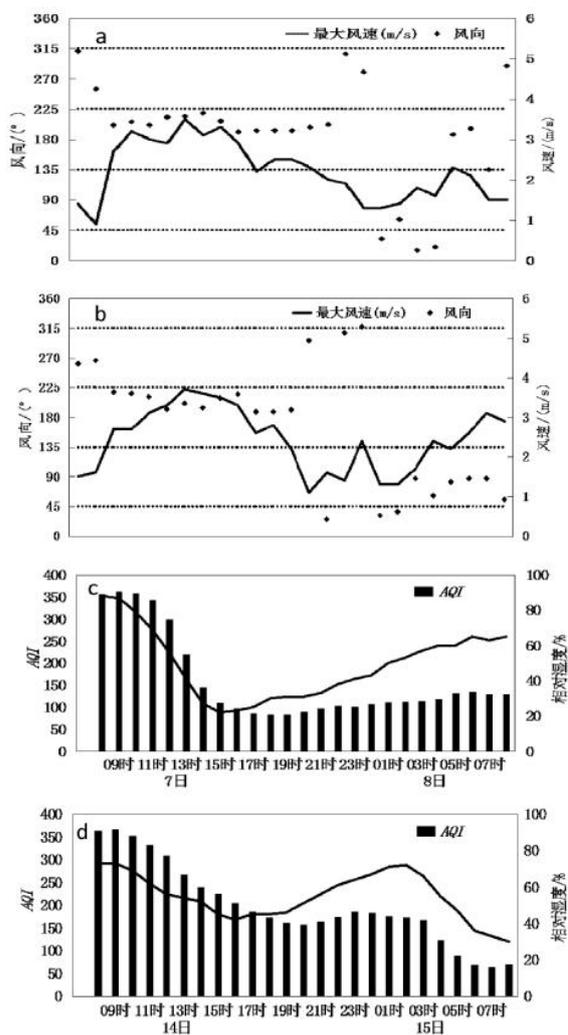


图3 2019年1月7—8日最大风速、风向(a)和相对湿度、AQI(c),1月14—15日最大风速、风向(b)和相对湿度、AQI(d)的时间序列

受东路冷空气影响,西安泾河风速增至2.4 m/s;06—08时迅速增至3 m/s以上,为偏东风,污染物逐渐清除,AQI再次下降;07时污染等级为良,污染得到有效清除。

相对湿度与AQI变化趋势一致,也表现为“下降—上升—下降”的趋势。冷空气南下往往会打破前期静稳天气形势,但不同路径和强度冷空气对污染物清除作用也各不相同<sup>[2]</sup>。冷空气扩散的快慢对污染的作用很不同,较缓慢的冷空气扩散场可造成输入性污染,并配合锋面稳定层结造成污染加重,而快速南下的冷空气配合冷锋大风可对污染起到良好的清除作用。冷空气移动路径、位置、强度对污染清除有决定性作用。

#### 4.2 风场与地形相互作用

逐小时加密站风场资料具有空间、时间分辨率高的特点,是刻画局地风场实时变化的有力工具。通过分析地面加密站风场(图4)发现,1月7日05时,新疆以东的地面冷高压增强至1 070 hPa,在河套西部有小股冷空气扩散南下,在甘肃东部形成较强的气压梯度,同时由于咸阳北部海拔高度较宝鸡西部低,因此在咸阳北部地区形成一股6~8 m/s的西北偏北风,并持续影响咸阳北部至西部,09时永寿和乾县能见度增加至13 km,空气质量转好,10时咸阳AQI开始下降;同时,位于关中盆地西部的宝鸡中部形成风速为4~6 m/s的偏西风,宝鸡的能见度开始增加。12时位于西安市西部的周至、户县为4~8 m/s的偏西风,能见度增加至9 km,而此时西安市东部能见度仍为1~2 km。14时西安市北部的泾河、高陵、泾阳、三原等站出现2~4 m/s的西南风,且这一带能见度逐渐转好,15时泾河能见度达11 km,西安市空气质量达到良。

14日白天加密站风场变化与7日过程相似,西北风进入关中盆地后转为西南风,风速逐渐增加,污染部分清除,西安AQI降至150。14日20时—15日01时AQI再次上升,15日03—07时再次快速下降,空气质量转良,这一阶段与7日过程的AQI变化特征不同。14日20时冷空气主体沿内蒙古中部向东扩散,从咸阳南下的偏北风减弱。渭南北部偏北风加强,而南部海拔较低地区受南部秦岭山脉阻挡,

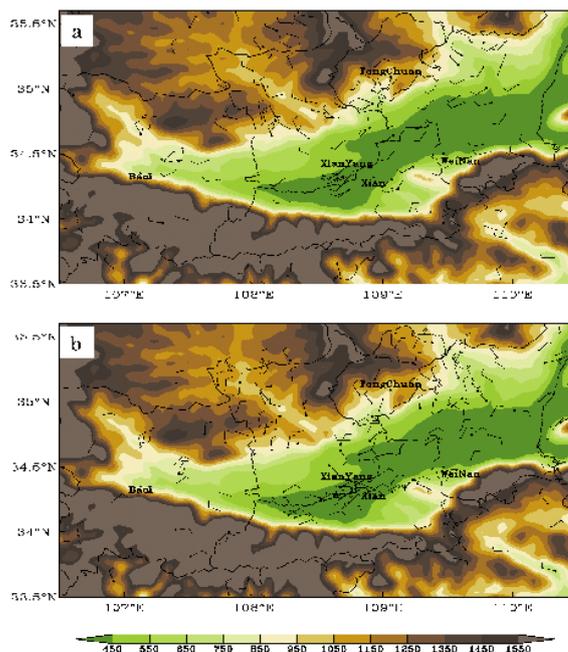


图4 1月7日12时(a)、1月15日10时(b)关中盆地地形(填色)和地面加密站风场

形成 2 m/s 的偏东风,此时能见度为 2~3 km,受较弱偏东风的输送影响,西安市北部能见度转差,空气质量下降。15 日 01 时关中盆地东侧渭南市北部的偏北风逐渐增强至 6~8 m/s,03 时西安市北部形成 6~10 m/s 的偏东风,能见度转好,为 11 km。08 时(图 4b)西安市大部形成 4~6 m/s 的偏东风,能见度自东向西逐渐增加,西安市区能见度>20 km,空气质量转好。

陕西关中盆地地形独特,北侧为渭北高原、南侧为秦岭、西侧为宝鸡峡,自西向东逐渐变宽,盆地东部与黄河之间形成通风口,呈喇叭口形状,盆地中东部从西安至渭南呈西南—东北分布。两次污染过程清除作用不同的根本原因是冷高压的位置和移动路径有别。关中盆地内的主导风向不同则是风场与地形相互作用的结果。从 7 和 14 日污染清除过程的风场变化来看,两个阶段白天时段的地面风场呈相似的特征:从咸阳北侧南下的西北风和沿宝鸡峡的偏西风,进入关中盆地后,受秦岭地形影响,会在咸阳南部一带形成地形槽,使关中盆地中东部风向转变为西南风,风速增大至 2 m/s 以上并持续 2~3 h,污染物得以清除。这是西路冷空气的污染清除路径。

当冷高压东移扩散或移入华北平原后,关中盆地东部偏北风加强,受东西向地形分布影响,位于关中盆地东部的渭南北部逐渐形成偏东风,当风速较小时,汾渭平原南部的污染物会输送至陕西关中盆地,当偏东风增大至 2 m/s 以上并持续 3~5 h,污染物得以清除,这是东路冷空气的清除路径。

### 4.3 风频分析

统计 2014 年以来发生在关中盆地的污染过程,考虑气候背景相同,发生在 1 月且以 PM<sub>2.5</sub> 为首要污染物,2019 年 1 月 1—15 日过程从持续时间、影响范围、AQI 极值来看,此过程持续时间长,影响范围大,为近年来霾污染过程之首,因此对此次过程的研究更具代表性。另外,2018 年 1 月 12—25 日关中盆地出现以 PM<sub>2.5</sub> 为首要污染物的一次污染天气过程,持续 14 d,西安市 AQI 极值为 341,为第二强的污染过程,选取此次过程进行风频对比分析(图 5a, 5b)。2018 和 2019 年两次过程西安的平均风速分别为 1.6 和 1.8 m/s,统计出现>1.8 m/s 的风频。由两次过程风频分布可知,2019 年过程最大风频为西风,占 20%;1.8 m/s 以上最大风频为西南风,占 5.1%;其次为东风,占 4.5%。而 2018 年过程中,最大风频为东

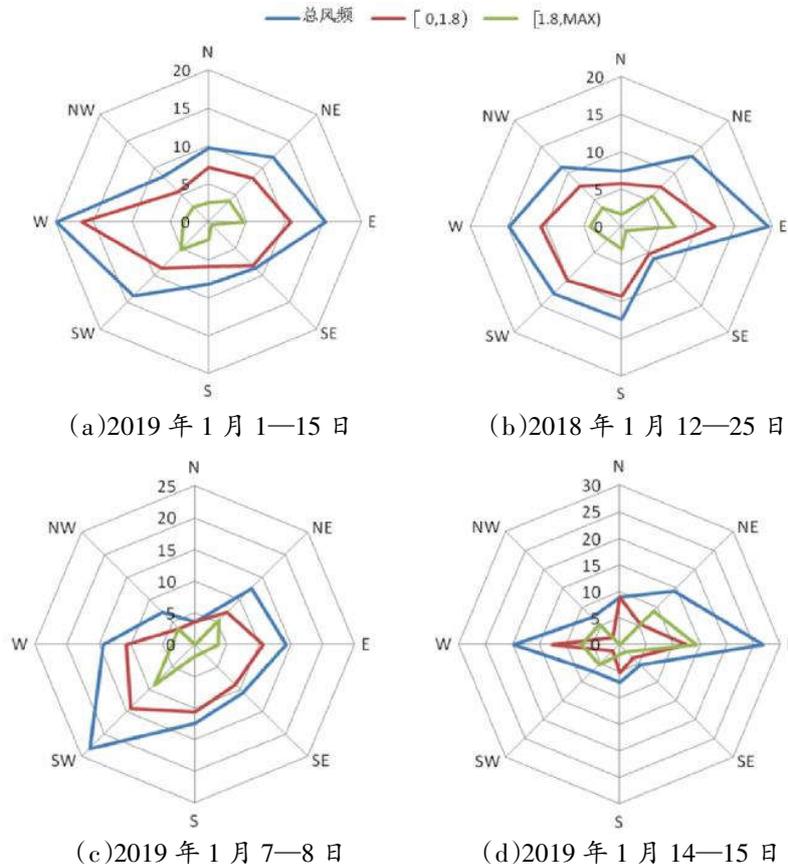


图5 西安不同时段风玫瑰图

风,占20%;1.8 m/s以上最大风频为东风,占7.1%;其次为东北风,占5.8%。较小风速(<1.8 m/s)主要起到污染输送和累积的作用,较大风速代表过程中以清除作用为主的风<sup>[29]</sup>,因此2019年过程是以西风为主导风向,而2018年过程则以偏东风为主导风向。说明西安市的污染传输和清除路径有西路和东路两条路径。

进一步分析2019年过程清除阶段的风频特征(图5c,5d),1月7—8日,西南风为最大风频风向,占23%,其中<1.8 m/s占15%,>1.8 m/s占8%,这三项在所有方向统计中均为最大,说明7—8日的清除过程以西南风为主导风向。>1.8 m/s中第二位为东北风,占5.4%,说明东北风在污染清除中也有贡献。1月14—15日,偏东风为最大风频,占27%,其中>1.8 m/s占12.5%,总风频第二位为偏西风,占20%,但其中17%为<1.8 m/s的较小风速,对污染过程主要起到传输作用。>1.8 m/s中第二位是东北风,占8%。这段时间清除过程以偏东风为主导风向。

#### 4.4 累积风速特征

对某一地区而言,风速的大小决定了上游污染物对本地是传输还是清除作用。细颗粒物的聚集和传输与风速、风向均高度相关,风速越小对应细颗粒物浓度越高,而风速增大时则对应着细颗粒物浓度的累积(远程输送)或消散<sup>[24-25]</sup>。某一时刻的累积风速是该时刻之前同一风向下的持续风速之和<sup>[29]</sup>。黄少妮等<sup>[18]</sup>研究发现累积风速比即时风速能更好地解释PM<sub>2.5</sub>的变化,对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响更加明显。

选取关中盆地自西向东的4个站点:宝鸡、周至、西安、渭南,对4站的偏西风累积风速、偏东风累积风速及转东风的时刻进行统计分析(表1)。7日10时起,西北路冷空气加强,宝鸡、周至为>3 m/s的偏西风,7日10时—8日13时维持偏西风,累积风

表1 宝鸡、周至、西安、渭南累积风速和风向

时间	项目	宝鸡	周至	西安	渭南
7—8日	偏西风累积风速/(m/s)	122.9	85	69.3	40.6
	转东风时刻	8日13时	8日13时	8日03时	8日03时
14—15日	偏东风累积风速/(m/s)	42.9	26.2	74.7	72.1
	转东风时刻	15日09时	15日06时	15日01时	15日01时
	偏西风累积风速/(m/s)	111.9	70.7	66.3	59.6
	偏东风累积风速/(m/s)	57.2	60.8	93.9	129.1

速宝鸡为122.9 m/s,周至为85 m/s。西安站偏西风累积风速为69.3 m/s。3站值均大于14—15日。宝鸡、周至、西安7日白天较14日白天分别偏大11、14.3和3 m/s,这也是7日白天AQI下降速率较14日更快的原因。

从转东风时刻看,15日早于8日。从偏东风累积风速看,阶段二的4个站点均大于阶段一,且最东部的渭南站阶段二风速比阶段一风速大,差值为57 m/s。对关中盆地东部而言,东路冷空气的影响较西路更为显著。较强冷空气进入华北平原后,陕西关中气压场转变为经向型,叠加关中盆地东部喇叭口地形影响,地面偏东风加强,污染物得到清除。各类气象要素中,近地面风通过影响污染物的水平输送扩散能力对污染物的质量浓度有重要影响。

#### 4.5 大气层结分析

近地层垂直方向上出现的逆温,使污染物在地面上停滞积聚,加剧空气污染的程度,有利于雾霾天气的形成<sup>[27]</sup>。冷空气的入侵将破坏近地面逆温层结,有利于近地层大气的垂直交换和热力对流,使污染物向上扩散稀释,污染状况得到改善。从泾河站微波辐射计观测(图6)看出,2019年1月6日凌晨,地面至1.7 km维持一贴地逆温层,03时左右地面气温降至零下,逆温层底高度上升,开始出现悬浮逆温。08时左右逆温逐渐减弱。6日夜间至7日凌晨,近地面层逆温较弱。7日12时左右,高空3~5 km有明显降温,冷空气从高层入侵。午后地面气温开始升高,13—16时地面升温,至1.8 km气温>5℃,且7日最高温较6日明显升高,这是由于14时左右近地面污染物已被清除,能见度升高,辐射增温明显。在每日的中午前后,受太阳辐射对地表增温影响,贴地逆温消失或减弱抬升为悬浮逆温层,对应的能见度为每日的最大值,而PM<sub>2.5</sub>浓度则为每日的最小值<sup>[28]</sup>。8日冷空气主体进入华北平原,冷空气降温作用明显,近

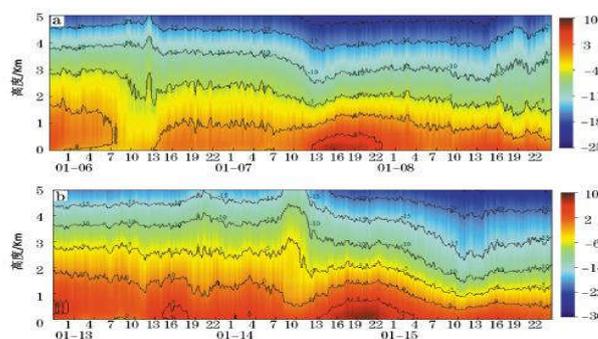


图6 2019年1月6—8日(a)、13—15日(b)西安泾河微波辐射计观测的温度剖面

地面温度降低,逆温层消失。

2019年1月13日凌晨0.2~0.8 km存在悬浮逆温层,之后夜间逆温较强且贴地,厚度在2 km左右。13日白天午后受地面加热影响,逆温消失。14日12时受冷空气扩散影响,0.5~4 km出现降温,冷锋前沿地面风的加强使污染物清除,地面接收的有效辐射增强,从12时开始增温,15日10时左右,高空3.0~5.0 km有较强降温,3.0 km处为-15℃,降温强度明显强于8日。由于此次较强降温影响,西安市逆温消失,近地层污染物垂直扩散稀释增大,地面污染物浓度大幅下降。

## 5 结论

通过对西安市的一次重污染过程的气象条件进行研究,对两个污染清除阶段进行对比分析,得出以下结论:

(1)2019年1月陕西省西安市出现一次重污染天气,其中7—8日和14—15日为污染清除阶段。对比两个清除阶段的高空和地面环流形势,14—15日地面冷空气强度较7—8日更强,使得15日日均AQI下降,污染等级为良。在7和14日两次冷高压系统南移过程中,均伴随四川热低压向北发展,较强的地面气压梯度使得地面风增强,有助于清除污染。

(2)两个污染阶段清除作用不同的根本原因是冷高压的位置和移动路径有异。关中盆地内的主导风向不同则是风场与地形相互作用的结果。加密站风场变化特征表明污染清除分为偏西路径和偏东路径。当冷高压位于蒙古国中部时,偏北风加强后,受地形影响在西安市区会形成偏西风或偏南风。这是西路冷空气的清除路径。7—8日以偏西路径清除为主。当冷高压东移扩散或移入内蒙中部后,关中盆地东部偏北风加强,受关中盆地东西向地形分布影响,关中盆地东南部逐渐形成偏东风,这是东路冷空气的清除路径。14—15日以偏东路径清除为主,持续半个月的污染状况得以消除。

(3)累积风速的大小是反映污染能否清除的有效指标。7日白天西风累积风速更大,西安市污染清除速率较快。14日夜间—15日东风累积风速更大,关中盆地污染最终得到清除。冷高压移动引起的局地风场的变化对颗粒物起到了传输加强或稀释清除的作用。相邻地区间污染物的生消具有密切的关联性。

(4)西安微波辐射计观测表明,两个阶段污染持续期间逆温层维持。上午地面风加强导致污染物浓

度降低,午后晴空加热效应明显,贴地逆温消失或减弱,近地层大气垂直对流加强,污染物向上扩散稀释,污染状况得到改善。

## 参考文献:

- [1] 张小曳,孙俊英,王亚强,等.我国雾—霾成因及其治理的思考[J].科学通报,2013,58(13):1178-1187.
- [2] 张人禾,李强,张若楠.2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J].中国科学(地球科学),2014,44(1):27-36.
- [3] 曹伟华,梁旭东,李青春.北京一次持续性雾霾过程的阶段性特征及影响因子分析[J].气象学报,2013,71(5):940-951.
- [4] 吴兑,廖碧婷,陈慧忠,等.珠江三角洲地区的灰霾天气研究进展[J].气候与环境研究,2014,19(2):248-264.
- [5] 袁东敏,马小会.2016年12月16—21日重度霾过程及大气环流异常[J].气候与环境研究,2017,22(6):757-764.
- [6] 花丛,张碧辉,张恒德.2013年1—2月华北雾、霾天气边界层特征对比分析[J].气象,2015,41(9):1144-1151.
- [7] 刘端阳,濮梅娟,严文莲,等.淮河下游连续雾—霾及转换成因分析[J].中国环境科学,2014,34(7):1673-1683.
- [8] 廖晓农,孙兆彬,唐宜西,等.高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究[J].环境科学,2015,35(3):801-808.
- [9] 俞布,朱彬,窦晶晶,等.杭州地区污染天气型及冷锋输送清除特征[J].中国环境科学,2017,37(2):452-459.
- [10] 廖晓农,张小玲,王迎春,等.北京地区冬夏季持续性雾—霾发生的环境气象条件对比分析[J].环境科学,2014,35(6):2031-2044.
- [11] CHEN Z H, CHENG S Y, LI G B, et al. Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China [J].Atmospheric Environment,2008,42:6078-6087.
- [12] 李霞,贾健.复杂地形多尺度气流对城市大气污染影响的研究进展[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(6):1-10.
- [13] 张雅斌,林琳,吴其重,等.“13·12”西安重污染气象条件及影响因素[J].应用气象学报,2016,27(1):35-46.
- [14] 姜霄.西安市空气污染物浓度统计特征及其气象影响研究[D].西安:长安大学,2012.
- [15] 胡琳,苏静,陈建文,等.西安地区霾天气特征及影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(7):41-44.
- [16] 周辉,权文婷,赵青兰.陕西省关中霾天气时空分布特征分析[J].陕西气象,2015(4):21-23.
- [17] 黄少妮,屈丽玮,姚静,等.春节燃放烟花爆竹对西安空气质量的影响[J].陕西气象,2017(6):18-22.
- [18] 黄少妮,袁媛,井宇,等.陕西关中地区冬季一次重霾污染过程及气象条件影响分析[J].干旱气象,2016,34(6):1037-1046.

- [19] 王珊,廖婷婷,王莉莉,等.西安一次霾重污染过程大气环境特征及气象条件影响分析[J].环境科学学报,2015,35(11):3452-3462.
- [20] 马晓华,黄少妮,张科翔,等.关中地区一次霾天气过程分析[J].陕西气象,2017(4):10-13.
- [21] 江琪,王飞,张恒德,等.2016年冬季京津冀豫大气污染的时空分布及影响因子研究[J].气象,2019,45(5):695-704.
- [22] 常炉予,许建明,周广强,等.上海典型持续性PM<sub>2.5</sub>重度污染的数值模拟[J].环境科学,2016,37(3):825-833.
- [23] 胡顺起,王玉亮,朱义青.临沂地区秋季一次重霾天气的特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(3):48-55.
- [24] WANG L, ZHANG N, LIU Z, et al. The influence of climate factors, meteorological conditions, and boundary-layer structure on severe haze pollution in the Beijing - Tianjin-Hebei region during January 2013[J]. *Advances in Meteorology*, 2014(7):1-14.
- [25] TAI A P, MICKLEY L J, JACOB D J. Correlations between fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM<sub>2.5</sub> to climate change [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44 (32):3976-3984.
- [26] 齐佳慧,郝巨飞,王丛梅,等.河北邢台市连续重污染天气维持与消散成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(1):122-129.
- [27] 王颖,梁依玲,王丽霞.气象条件对污染物浓度分布影响的研究[J].沙漠与绿洲气象,2015,9(2):69-74.
- [28] 郭蕊,段浩,马翠平,等.河北中南部连续12d重霾污染天气过程特征及影响因素分析[J].气象,2016,42(5):589-597.

## Analysis of Dissipation of a Consecutive Pollution Process in Xi'an

QU Liwei, ZHAO Qiang, MA Xiaohua, LI Pingyun, LIU Jiahuimin, PAN Liuji, LIU Hui  
(Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710015, China)

**Abstract** To study the transportation and removal effects of cold air activities on pollutants in Xi'an, the paper analyzed the meteorological conditions of a continuous heavy pollution process in January 2019 in Xi'an, and made a comparative analysis of the pollution removal stage. The results show that: the pollution removal stage appeared on 7-8 and 14-15 January. The accumulated wind speed of the west wind was greater in the daytime of the 7th, and the pollution removal rate was faster. While the accumulated wind speed of the east wind was greater from the nighttime of the 14th to the 15th, and the continuous pollution was removed. The pollution removal was divided into two stages: the westerly path and the easterly path. The characteristics of the wind field at the weather stations showed that the pollution in Fenwei Plain would be transported to the Guanzhong Basin when the wind speed was relatively low, and the pollution would be aggravated when the front stable stratification was combined. When the cold air moved westward and southward, the east wind in the Guanzhong Basin would be strengthened, and the pollutants would be cleared. The difference of clearing path was the result of the interaction of wind field and terrain, and was closely related to the paths and intensity of cold air. The essence of pollution removal prediction lied in the prediction of wind direction and wind speed on the ground, and the influence of topography should be considered in the Guanzhong basin of Shaanxi province.

**Key words** heavy pollution; accumulated wind speed; intensive wind field; microwave radiometer