

刘瑞芳,贺瑶,刘慧,等. 陕西关中大气污染时空分布特征及天气学分型[J]. 陕西气象,2021(5):23-29.

文章编号:1006-4354(2021)05-0023-06

陕西关中大气污染时空分布特征及天气学分型

刘瑞芳^{1,2},贺瑶³,刘慧⁴,黄少妮⁴

(1. 西安市气象局,西安 710016;

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. 宝鸡市气象局,陕西宝鸡 721006; 4. 陕西省气象台,西安 710014)

摘要:基于常规气象观测资料和空气质量资料,分析了2014—2018年陕西大气污染时空分布特征,并进行天气学分型。结果表明:陕西重污染主要出现在关中地区,冬高夏低,秋春居中,其月际变化呈现出明显的U型分布特征,重污染主要发生在冬季12—2月,年均20.0~33.2 d;关中5市PM_{2.5}质量浓度的日变化明显不同,咸阳、西安表现为单峰特征,而宝鸡、铜川、渭南地区则表现出明显的双峰特征,宝鸡、渭南、西安、咸阳均在17时前后出现PM_{2.5}质量浓度的最低值,而铜川则出现在07时左右。造成陕西持续性重污染天气的地面气压场可分为高压控制型、高压后部型、均压场型和低压倒槽型四种类型,陕西持续性重污染天气发生时,地面气压场往往由以上几种交替出现。持续性重污染典型过程期间,关中地区的污染呈现出明显的区域同步变化特征,PM_{2.5}质量浓度与能见度、地面风速有较好的负相关性,与相对湿度有正相关性。本地污染排放和关中城市群附近近距离输送是污染物累积增长的主要因素。

关键词:关中;持续性霾;天气分型;后向轨迹

中图分类号:X16

文献标识码:A

近年来我国严重雾霾事件频发,已威胁人民群众的身体健康和生产生活,大气污染成为制约我国可持续发展的核心问题。2013年《大气污染防治行动计划》出台后,各地采取了有效措施控制污染排放,京津冀及周边地区大气环境质量得到改善,陕西关中地区的大气污染问题逐渐凸显,成为中国大气污染的高发区。众所周知人为源排放和不利气象扩散条件是大气污染形成的主要原因,在污染源基本稳定的前提下,决定大气污染发生的关键因素是气象条件^[1-5]。张人禾等^[6]分析了我国东部雾霾持续的气象条件,指出地面弱风场和弱垂直风切变对污染物传输有抑制作用。刘厚凤等^[7]总结了近年来我国重污染过程污染气象特征,发现特定的流场、特殊的地形及污染物区域

传输等是造成重污染的气象特征。研究发现不同地区大气污染特征也存在一定差异,戴竹君、廖国莲等^[8-9]分析了江苏、广西秋冬季雾霾特征,并根据地面形势进行了天气分型。陕西地处中国内陆腹地,北部为海拔800~1 300 m的黄土高原,南部为海拔1 500~3 000 m的秦岭,中间为关中盆地,平均海拔高度520 m,西起宝鸡,东至潼关,自西向东敞开呈喇叭口形状,冬季主要受大陆冷气团影响,降水稀少,气候干燥,其特殊的地形和气候特征使得大气污染物极易在关中集聚,污染特征与沿海地区存在一定的差异^[10-11]。

针对陕西地区的重污染天气过程,不少学者^[12-15]开展了大量的研究,成果主要集中在单一某次重污染过程的污染特征及气象条件成因分

收稿日期:2021-02-04

作者简介:刘瑞芳(1978—),女,山东潍坊人,汉族,硕士,高工,主要从事高影响天气预报分析及方法研究。

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重点基金课题(2020K-5)

析。本文旨在通过分析 2014—2018 年陕西大气污染的时空分布特征,对造成关中地区持续性重污染过程的高低空环流形势进行天气学分型,并分析气象条件对污染物累积的影响,为今后陕西重污染天气的预报预警提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料来源与标准

常规气象观测资料主要包括陕西 100 个国家地面气象观测站一天 4 个时次(02、08、14 和 20 时)的地面要素观测资料及西安气象自动站温度、相对湿度、风向、风速和能见度等逐时实况资料。气象观测数据来源于陕西省气象信息中心。空气质量数据来自陕西生态环境厅公布的陕西 10 个地市环境监测站的质量浓度日值及逐小时污染物质量浓度监测结果。资料时间段为 2014 年 1 月 1 日—2018 年 12 月 31 日。

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633—2012)规定,空气质量指数划分为六级,某一个站点 24 h 空气质量指数大于国家空气质量五级标准(AQI>200)为一个重污染日。本文定义陕西出现不少于 3 站空气质量指数大于国家空气质量五级标准且连续出现 3 d 及以上,为一次持续性重污染天气事件。

1.2 后向轨迹模式

后向轨迹模式(hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model, HYSPLIT)是由美国国家海洋和大气管理局与澳大利亚气象局联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型。该模型具有处理多种气象要素输入场、多种物理过程和不同类型污染物排放源功能的较为完整的输送、扩散和沉降模式,已经被广泛应用于多种污染物在各个地区的传输与扩散研究。

2 陕西大气污染时空分布特征

从 2014—2018 年陕西 10 地市空气质量指数日均值统计(表 1)分析看出,陕北、陕南主要以轻度污染为主,中度以上污染出现次数较少,而关中地区中度以上污染出现频率偏高,咸阳、西安、渭南中度以上污染日数分别占污染总日数的 42.9%、39.9%和 37.9%。从年均重污染日数可

看出,陕西重度以上污染的空间分布极度不均,重污染天气主要出现在关中地区,年均重污染日数为 20.0~33.2 d,其中咸阳高达 33.2 d,为全省最高值。陕北、陕南的年均重污染日数明显偏少,除汉中外,其余地区年均重污染日数小于 5 d,且多发生时间在 3—5 月,结合地面气象观测实况分析,主要是由较强沙尘天气传输引起的空气重污染,首要污染物为粗颗粒物 PM₁₀。

表 1 2014—2018 年陕西十地市大气污染分级统计

单位:d

城市名	轻度污染 总日数	中度污染 总日数	重度及以上 污染总日数	年平均重 污染日数
咸阳	459	179	166	33.2
西安	457	151	153	30.6
渭南	472	149	139	27.8
宝鸡	336	94	105	21.0
铜川	417	87	80	20.0
汉中	190	81	52	13.0
安康	162	41	17	4.3
延安	249	43	14	2.8
商洛	122	23	10	2.5
榆林	233	15	5	1.3

由关中 5 市重污染日数的年际变化可以看出,2014—2018 年整体呈现波动下降趋势(图略),关中西部的宝鸡和北部的铜川下降趋势较为明显。而关中重污染月际变化(图 1)则呈现出明显 U 型分布特征,重污染主要发生在冬季 12—2 月,占全年重污染总日数的 73%~87%,其中 1 月为全年最高值。4—9 月处在重污染出现的低谷期。按季节来分,夏季出现重污染概率最低,秋、春两季处于冬季与夏季之间,秋季略高于春季。“冬高夏低,秋春居中”这种分布特征与陕西的地理位置和气候特点有关,冬季陕西主要受大陆性冷高压控制,高压系统内天空晴朗,地面有效辐射强,昼短夜长,地面和近地层空气处于净辐射负值时间长,大气层结比较稳定,叠加关中盆地地形作用和冬季供暖期的污染物排放,有利于污染物的快速积聚。

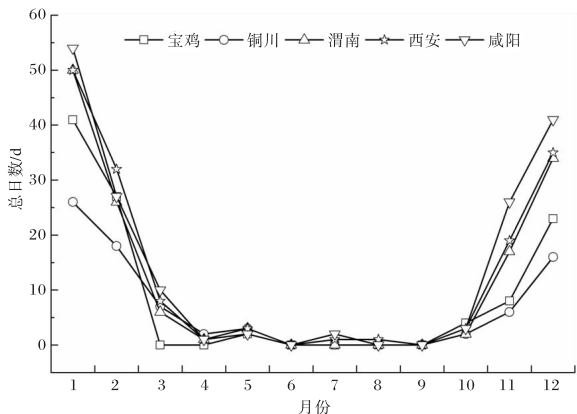
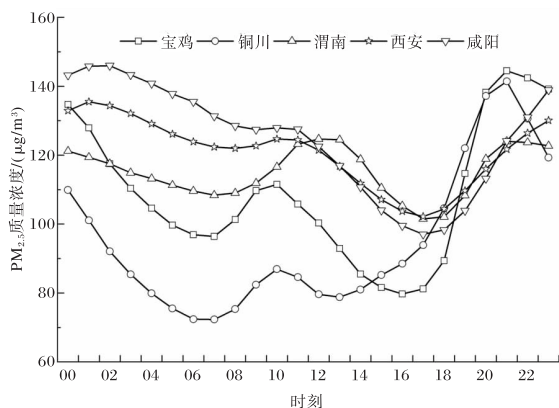


图1 2014—2018年关中5站重污染总日数月际分布

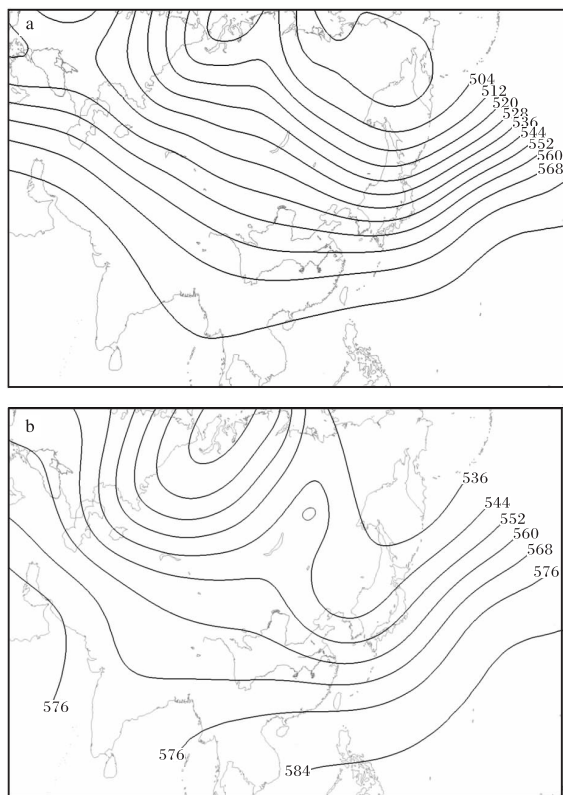
$PM_{2.5}$ 是大气污染的主要污染物,由2014—2018年冬季期间 $PM_{2.5}$ 质量浓度的日变化可看出,关中5市冬季 $PM_{2.5}$ 质量浓度均呈现出明显的日变化特征(图2),与钱婧^[14]等研究结果不同,咸阳、西安由于昼夜边界层厚度变化较大,基本表现为单峰现象,在北京时间01时左右 $PM_{2.5}$ 质量浓度达到全天最高值,17时最低,日变化幅度为日均质量浓度的30%~40%。宝鸡、渭南、铜川 $PM_{2.5}$ 质量浓度均表现为明显的双峰现象,其中宝鸡、渭南在11时左右和21时左右出现两个峰值,这两个时间段是在早晚饭和上下班高峰之后,因此早晚饭时段的居民生活排放及上下班高峰时的车辆排放可能是造成双峰现象的重要原因。与宝鸡和渭南不同,铜川 $PM_{2.5}$ 质量浓度的日变化虽然也表现为明显的双峰现象,但是最低值不是出现在边界层高度最高的下午,而是出现在07时左右,21时前后出现最大峰值。分析认为铜川受地理环境影响主要盛行山谷风,日出后以偏南风为主,持续的偏南风将关中城市群的污染物向北部铜川输送,叠加本地的污染物排放,使污染物质量浓度在21时前后达到日最高值;日落后再转为偏北风使的污染物向南输送,铜川的污染物质量浓度在07时左右降至日最低值,这与黄少妮^[15]等在一次污染个例分析中的结论较为一致。

3 持续性重污染天气分型

经统计2014—2018年陕西共发生19次持续性重污染事件(表略)。应用气象观测资料,对19次过程的地面天气图、高低空环流形势进行分析,发现造成陕西持续性重污染的天气形势按照

图2 2014—2018年冬季 $PM_{2.5}$ 质量浓度日变化曲线

500 hPa高空环流形势可分为两种类型(图3):纬向环流型和阻塞环流型。按照地面气压场可分为4种类型(图4):高压控制型、高压后部型、均压场型和地面倒槽型。

图3 陕西持续性污染期间500 hPa环流分型
(a)纬向环流型(b)阻塞环流型

3.1 高空形势场特征

纬向环流型:500 hPa高度场上以纬向环流为主,新疆至贝加尔湖一带有弱的高压脊维持,陕西上空以平直偏西气流为主,受南支槽影响低层

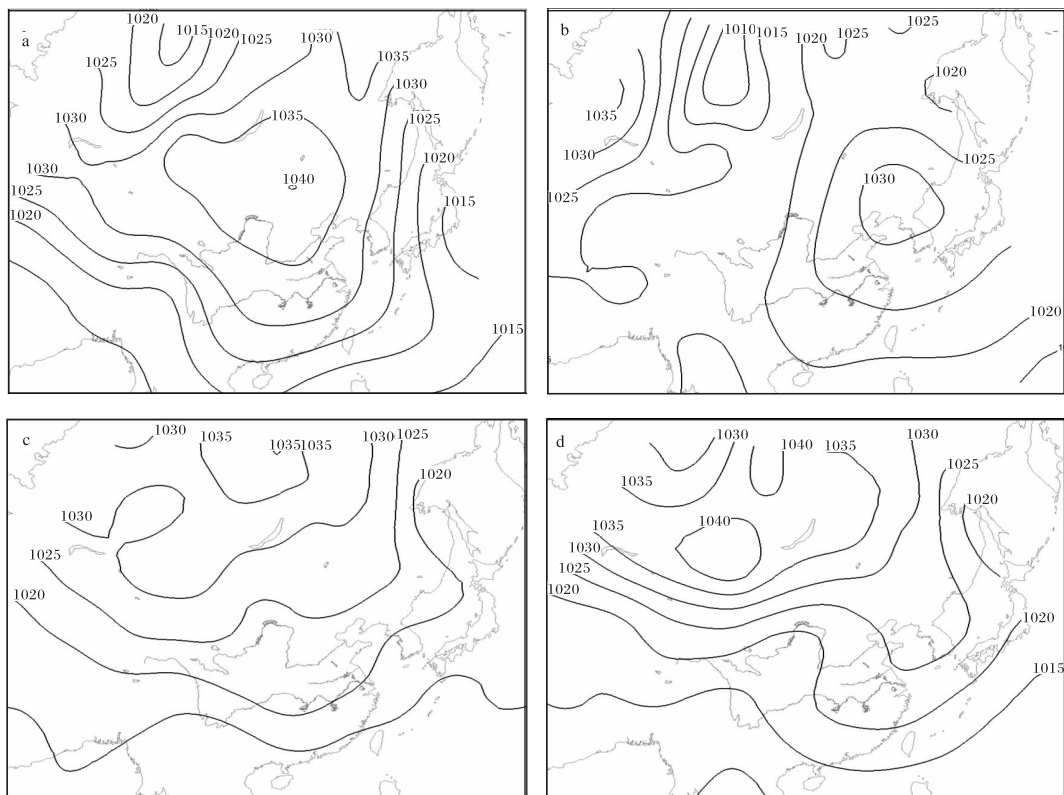


图4 陕西持续性污染期间地面环流分型(a 高压控制型;b 高压后部型;c 均压型;d 低压倒槽型)

850 hPa 有暖脊控制。

阻塞环流型:500 hPa 天气图上欧亚中高纬地区维持两槽一脊,贝加尔湖附近高压脊稳定少动,形成阻塞环流形势,陕西处于高压脊底部弱西北气流控制。

在以上两种 500 hPa 环流形势场下,中低层 700 hPa 常常受偏西气流或弱偏南风控制,而 850 hPa 有弱偏南风发展,低层弱的暖平流有利于在低空(850 hPa 上下)形成逆温层,逆温层就像一个暖盖,阻碍低层水汽向上扩散,有利于污染的形成和维持。

3.2 地面气压场特征

高压控制型:中高纬地区受蒙古高压控制,关中处于高压控制下,气压梯度小,风场较弱,且偏东风为主,受关中喇叭口地形影响,容易造成污染物累积。

高压后部型:高压主体位于我国东部地区,陕西受高压后部偏南气流影响,近地层空气暖湿,天气状况静稳,有利于污染天气的产生。

均压场型:中国中东部地区无明显的高低压

系统,陕西受均压场控制,关中地区近地面以静风或弱风为主,有利于污染物的堆积。

低压倒槽型:地面场上陕西处于西南倒槽控制,地面气压场较弱,气压梯度小,风速小,温度高,常出现逆温,易出现雾霾等污染天气。

分析发现,陕西持续性重污染天气发生时,地面气压场往往不是由一种形势场造成,而是以上多种形势场交替出现。

综上所述,陕西持续性重污染天气发生时高空盛行较平直西风气流,无明显冷空气活动,700 hPa 为弱脊控制,低层 850 hPa、925 hPa 多为偏南风,大气层结稳定。地面为弱风压场控制,风速较小,关中一带一般小于 2 m/s,地面弱风有利于污染物在边界层的湍流扩散。有利的环流背景叠加盆地易聚难散的特殊地形作用,是导致关中地区污染天气持续时间长、污染重的主要原因。

4 典型重污染过程分析

4.1 污染天气实况

2016 年 12 月 30 日—2017 年 1 月 6 日陕西关中出现了持续性重污染天气过程,首要污染物

为 $PM_{2.5}$ 。从空气质量指数 AQI 的日变化(图 5)可看出,关中地区的污染呈现出明显的区域同步变化特征,28 日起污染物开始累积,空气质量指数迅速升高,2 日微降后继续稳步上扬,到达本次污染过程的极大值,6 日迅速下降。位于核心污染区的咸阳、西安、渭南连续 6 d 出现严重污染,5 日西安站 $PM_{2.5}$ 质量浓度更是高达 $575 \mu g/m^3$,小时能见度低至 100 m,污染非常严重。

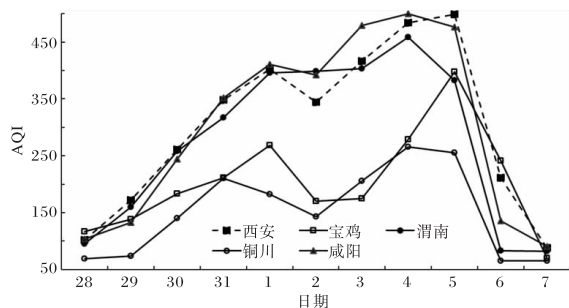


图 5 2016-12-28—2017-01-07 关中五站空气质量指数 AQI 日变化

4.2 环流形势特征

12 月 26 日污染发生前,500 hPa 高空槽后西北气流已控制陕西,地面强冷空气南下。27 日 20 时随着高空槽进一步东移,冷空气南压,地面转为高压后部控制,静稳形势建立,污染物开始较快累积。28 日至 31 日,500 hPa 我国上空盛行平直的纬向西风气流,陕西地面由高压后部逐渐转为均压场控制,静稳形势维持,污染物持续累积。1 月 1 日高空平直气流中有短波槽快速东移,引导地面弱冷锋南下,锋前冷空气扩散进入陕

西,2 日 08 时陕西关中出現 3~6 °C 负变温,关中 5 市 AQI 指数出现不同程度下降。由于此次冷空气维持时间短、强度弱,空气质量虽有所改善,但总体上对污染物清除作用十分有限。2 日起受高空平直西风气流影响,陕西地面再次转为均压场控制,污染物继续累积,青藏高原东侧有地面倒槽发展并持续加强。4 日 08 时起陕西处于西南倒槽控制中,地面风速较小,气温较高,近地层出现多层逆温,污染物垂直扩散受阻,加上盆地特殊地形,使得污染物在关中地区持续集聚,关中盆地 5 市先后达到本次持续性重污染过程的极大值。1 月 6 日高空有西风槽东移,陕西出现明显雨雪天气,关中地区降水量普遍在 2~8 mm,地面上陕西转为高压底部气压梯度密集区,关中地区风速明显加大,受雨雪及较强偏北风影响,污染天气减弱消散。

4.3 气象要素演变

为研究关中地区污染持续增大的原因,选取西安市长安站逐小时自动观测气象要素和西安市逐小时 $PM_{2.5}$ 质量浓度进行对比分析(图 6)。1 月 1 日前,西安站低层主要为弱偏南气流,风速在 2 m/s 以下,相对湿度缓慢升高。由于颗粒物质量浓度的增大,对大气的消光作用明显,西安站能见度迅速下降,出现重污染天气。1 日夜间有弱冷空气扩散南下进入西安,风向转为偏北风,相对湿度有所下降, $PM_{2.5}$ 质量浓度略有回落,能见度小幅回升;之后地面再次转为弱偏南风控制,相对湿度增大至 60%~90% 之间, $PM_{2.5}$ 质量浓度

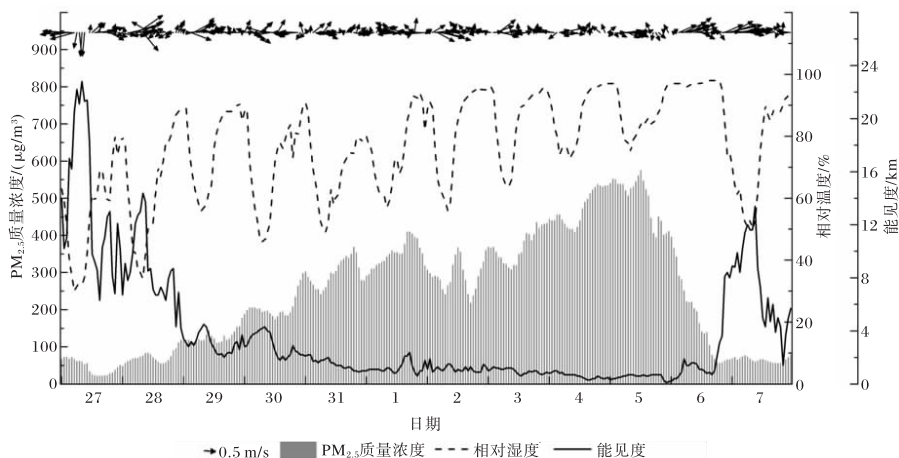


图 6 2016-12-27—2017-01-07 长安站逐小时 $PM_{2.5}$ 质量浓度、能见度、风向风速(箭头)、相对湿度

持续走高。6 日受明显降水及较强冷空气影响,西安地区污染物质量浓度迅速下降,空气质量转为良,污染过程结束。由表 2 看出 $PM_{2.5}$ 质量浓度与能见度、地面风速有较显著的负相关性,与相对湿度有正相关性。总的来说,相对湿度增大时,地面风速越小,越有利于污染物的累积,能见度下降,反之污染减弱,能见度升高。

表 2 2016-12-28—2017-01-07 西安站逐时 $PM_{2.5}$ 质量浓度与地面气象要素相关系数

站名	相对湿度	风速	能见度	海平面气压
西安	0.246*	-0.288*	-0.712*	-0.709*

注: * 表示相关系数通过 0.01 的显著性水平检验。

4.4 后向轨迹聚类分析

为研究关中地区污染物的传输路径,基于 HYSPLIT 后向轨迹模型对 2016 年 12 月 30 日—2017 年 1 月 6 日污染物到达西安的后向轨迹进行追踪和聚类分析。计算高度选取 500 m,模式顶设置为 10 km,后向轨迹计算时间为 48 h,目标点为泾河站。分析看出重污染日传输到西安的污染物和本地的污染物在关中盆地徘徊(图略),很难向外扩散,印证了有利环流背景下关中特殊地形导致污染物易积难消的特征。聚类分析(图 7)显示,整个污染过程期间后向轨迹可以分为五大类。有两类来自西北方向的长距离输送,但是由于陕西西北方向的 AQI 数值较低(图略)且占比小,不会带来太多污染物。另外三类占比高达 87.5%,其后向轨迹在关中地区停滞徘徊,48 h 后向轨迹传输很短的距离,不容易扩散。表

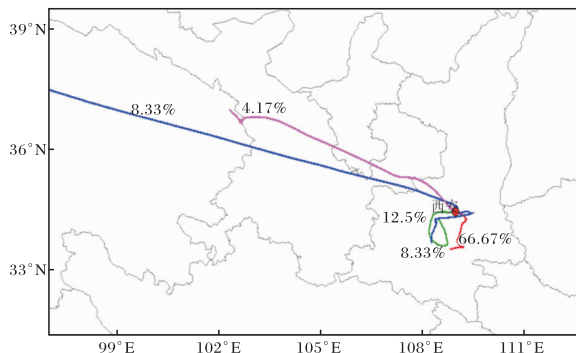


图 7 2016-12-30—2017-01-06 西安地区污染物后向轨迹聚类分析

明此次陕西关中持续性重污染过程主要是以本地污染排放和关中城市群附近近距离输送为主,远距离输送对此次重污染过程贡献较小。

5 结论

本文统计了 2014—2018 年陕西大气污染时空分布特征,对造成持续性重污染天气的高低空环流形势进行了天气分型,并选取典型个例,研究持续性重污染的发生、维持和消散演变过程。主要结论如下:

(1) 陕西重污染天气主要出现在关中地区,冬高夏低,秋春居中,其月际分布呈现出明显的 U 型分布特征,重污染主要发生在冬季 12—2 月,年平均日数约 20.0~33.2 d,冬季重污染日数约占全年重污染日数的 80% 左右。

(2) 冬季关中 5 市 $PM_{2.5}$ 质量浓度的日变化特征明显不同,咸阳、西安基本表现为单峰现象,宝鸡、渭南、铜川则表现为明显的双峰现象;宝鸡、渭南、西安、咸阳均在 17 时前后出现 $PM_{2.5}$ 质量浓度的最低值,而铜川则不同,最低值出现在 07 时左右。

(3) 陕西持续性重污染发生时地面气压场可分为高压控制型、高压后部型、均压场型、低压倒槽型四种类型。持续性重污染天气期间,地面形势往往由以上几种形势场交替出现。引起持续性重污染过程的高空形势主要有纬向环流型和阻塞环流型。

(4) 持续性重污染期间,关中地区呈现明显的区域同步变化特征, $PM_{2.5}$ 质量浓度与能见度、地面风速有较好的负相关性,与相对湿度有正相关性。相对湿度增大时,地面风速越小,则污染物越容易积聚,能见度下降。典型过程后向轨迹分析表明陕西持续性重污染过程主要是由本地污染排放和关中城市群附近近距离输送造成的。

参考文献:

- [1] 王跃思,张军科,王莉莉,等. 京津冀区域大气霾污染研究意义现状及展望[J]. 地球科学进展, 2014, 29(3): 388-396.
- [2] 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.
- [3] 唐宜西,张小玲,熊亚军,等. 北京一次持续霾天气过程气象特征分析[J]. 气象与环境学报,2013,29(5):12-19.
- [4] 王金兰,胡亮帆,李改琴,等. 新乡市大气污染特征与气象因子相关性分析[J]. 陕西气象,2020(6):55-59.
- [5] 步巧利,洪莹莹. 基于 CMAQ 的大气污染个例分析[J]. 陕西气象,2018(4):28-34.
- [6] 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.
- [7] 刘厚凤,杨鑫,陈义珍,等. 中国重霾过程污染气象研究进展[J]. 生态环境学报,2015,24(11):1971-1922.
- [8] 戴竹君,刘端阳,王宏斌,等. 江苏秋冬季重度霾的分型研究[J]. 气象学报,2016,74(1):133-148.
- [9] 廖国莲,郑凤琴,曾鹏,等. 广西霾天气系统分型[J]. 气象科技,2018,46(1):149-154.
- [10] 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.
- [11] 俞科爱,徐宏辉,黄旋旋,等. 宁波秋冬季空气污染变化特征及污染物后向轨迹分析[J]. 浙江气象,2015,36(1):27-31.
- [12] 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.
- [13] 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):41-45.
- [14] 钱婧,韩婧,阮幸. 西安市冬季重污染天 $PM_{2.5}$ 高分辨率及其中碳气溶胶污染特征分析[J]. 生态环境学报,2014,23(3):464-471.
- [15] 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.