

李培荣,姚静,张煦庭,等. 西安冬季不同环流形势下大气细颗粒物的输送特征研究[J]. 陕西气象,2022(4):7-14.

文章编号:1006-4354(2022)04-0007-08

# 西安冬季不同环流形势下大气细颗粒物的输送特征研究

李培荣<sup>1,2</sup>,姚静<sup>1</sup>,张煦庭<sup>2,3</sup>,黄鑫<sup>2,4</sup>,刘菊菊<sup>1</sup>,祁春娟<sup>1</sup>

(1. 陕西省气象台,西安 710014;

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. 陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心,西安 710016;

4. 陕西省气象信息中心,西安 710014)

**摘要:**基于2018—2020年西安市冬季的ERA5再分析资料、大气污染监测资料以及地面气象资料,采用客观天气分型方法PCT将西安地区冬季的海平面气压场和10 m风场分成6种天气类型,对不同天气类型下的空气污染状况及大气边界层污染气象参数特征进行了研究,结果表明:西安地区在冷高压前部型、冷高压后部型、均压场型、高压底部型中PM<sub>2.5</sub>污染加重,污染日出现频率高,属于污染型天气类型;在污染型天气类型下,西安地区混合层高度较低、通风系数较小、大气自净能力较弱均不利于PM<sub>2.5</sub>的扩散稀释;对污染天气类型下西安地区的PM<sub>2.5</sub>污染输送与潜在来源进行研究,认为西安本地及周边地区、陕南地区对西安PM<sub>2.5</sub>的质量浓度均有明显的影响,另外甘肃东部、宁夏及河南西部地区也是西安重要的细颗粒物污染源地,不同的污染天气类型下,污染输送通道和源区存在差异性。

**关键词:**西安;大气颗粒物;客观分型;后向轨迹;潜在源区

**中图分类号:**X513

**文献标识码:**A

污染天气的出现不仅与污染排放源有关,还依赖于气象条件,在短期内排放源固定的情况下,重污染天气的发生取决于当地气象条件的变化。在中高纬度地区,气象条件主要受到大尺度天气环流背景的影响和制约,天气环流可以影响当地的降水量、温度、风速、风向、相对湿度等各种气象参数,从而反映了当地的大气条件<sup>[1-2]</sup>;因此一些典型的高低空环流形势容易引起持续性重污染天气。识别典型的污染天气形势,分析不同污染天气形势下大气污染的特征,对于大气污染机理的研究和业务预报应用具有重要意义。近年来,利用客观算法来进行天气形势分型的方法被国内外

学者广泛应用,如杨旭等<sup>[3]</sup>采用PCT客观天气分型方法对京津冀冬半年海平面气压场进行分型,认为冷锋前部、高压场、鞍型场、高压后部等类型容易产生污染天气。张莹等<sup>[4]</sup>利用客观分型方法探究了华北地区不同月份不同天气类型对应的大气污染状况,认为高压内部型、高压后部型和均压场是3种重污染潜势天气类型,而且在不同月份下同一种天气类型对污染物扩散的影响也存在差异。许建明等<sup>[5]</sup>根据客观天气分型结果,揭示了上海秋冬季4种易发生PM<sub>2.5</sub>污染的天气环流类型,包括高压前部弱气压、冷锋和2类高压后部弱气压型,不同的天气类型下污染成因不同。

**收稿日期:**2021-09-01

**作者简介:**李培荣(1993—),男,汉族,山西平遥人,硕士,助理工程师,主要从事天气预报研究。

**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(2021Y-1,2020G-6,2021G-15);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JQ-965)

在不同的污染天气形势下,污染天气的形成、维持和清除等过程有所不同,除了本地污染排放源外,外部污染源的输送也存在差异。利用拉格朗日型轨迹扩散模型 HYSPLIT、潜在源贡献分析和浓度权重轨迹分析等方法,开展对大气颗粒物输送轨迹和来源的长时间尺度定量研究,可以进一步揭示区域颗粒物污染分布特征、来源解析及成因分析,然而目前关于大气颗粒物污染潜在源分析的研究主要集中在我国长三角、珠三角、成渝和京津冀地区,对于西安及周边地区的研究较为少见,且部分研究针对的是重污染个例,并没有在天气学机理的基础上集成分析。由于西安冬季主要为细颗粒物污染,因此本文开展对西安地区 2018—2020 年冬季不同污染天气形势下,PM<sub>2.5</sub> 污染的输送特征研究,以为西安市冬季大气颗粒物污染预报与防治提供一定的科学理论支持。

## 1 数据与方法

### 1.1 资料来源

气象形势场数据来源于 ERA5 再分析资料,主要包括 2018—2020 年西安周边地区冬季的海平面气压场和 10 m 风场资料,空间分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ,每日 4 个时次。后向轨迹和轨迹聚类分析使用的气象数据来源于美国国家环境预报中心(NECP)提供的全球资料同化系统 GDAS 资料,空间分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,每日 4 个时次。大气颗粒物污染数据和污染气象参数数据来源于陕西省气象台汾渭平原环境气象业务平台,包括 2018—2020 年西安市逐日和逐小时 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度数据、逐日混合层高度、通风系数、大气自净能力数据。文中涉及的地图是基于全国地理信息学资源目录服务系统,1:100 万全国基础地理数据库下载的审图号为 GS(2016)2556 号的标准地图制作,底图无修改。

### 1.2 方法

1.2.1 污染月的选取 通过对西安近年来逐月的 PM<sub>2.5</sub> 平均质量浓度统计分析,发现西安全年的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度呈“U”型分布(图 1),冬季 12、1、2 月的 PM<sub>2.5</sub> 平均质量浓度最高,分别为 107.8、133.1 和 91.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,远高于其他月份,因

此将冬季这 3 个月定义为“污染月”,本研究对西安地区 2018—2020 年冬季展开研究。

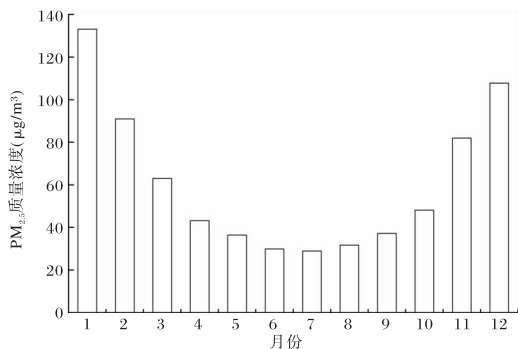


图 1 2014—2020 年西安 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度逐月分布

1.2.2 PCT 客观分型法 天气分型方法采用 PCT 客观分型法,它是在 PCA 主成分分析的基础上,进一步改进得到的 T-mode 主成分分析法,基本原理是将原始高维形势场数据  $Z$  分解为  $F$  和  $A$  两个低维矩阵, $Z=FA^T$ , $F$  为主成分, $A$  为载荷,所有的主成分按照特征值的大小即对原数据的贡献排序,最后取对原数据累计贡献率超过一定比例的特征值所对应的主成分  $F$  达到降维的目的<sup>[6]</sup>。利用 PCT 方法将西安周边地区的海平面气压场和 10 m 风场作为一个整体进行多变量斜交旋转分解,以得到一个较为合理准确的天气分型结果。

1.2.3 HYSPLIT 模型 HYSPLIT 模型是一种可模拟大气污染物远距离输送、扩散、沉降轨迹等过程的综合模式系统,由于其较好的适用性,被普遍应用于研究大气污染物的传输途径和来源解析<sup>[7-10]</sup>。本研究运用欧式距离算法对到达西安地区的气流轨迹进行聚类分析。

1.2.4 潜在源贡献分析法与浓度权重轨迹分析法 潜在源贡献分析法 PSCF(用  $P$  表示)和浓度权重轨迹分析法 CWT(用  $C$  表示)是基于后向轨迹分析来识别污染源区的方法<sup>[11]</sup>,PSCF 是以条件概率函数为原理识别污染源区的方法,可以得到不同源区污染贡献的相对大小,其不能有效判断污染物质量浓度大于污染阈值时的污染严重程度,而 CWT 是在确定了潜在源区的基础上,可以进一步计算得到不同源区污染贡献的具体质量浓度大小。PSCF 值为途经某个网格  $ij$  中的污染轨迹数

$N_{ij}$  与该区域所有轨迹数  $M_{ij}$  的比值<sup>[12-13]</sup>, 即:

$$P_{ij} = N_{ij} / M_{ij}. \quad (1)$$

而浓度权重轨迹分析法的计算公式如下:

$$C_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^l P_k \times T_{ijk}}{\sum_{k=1}^l T_{ijk}}. \quad (2)$$

式中:  $P_k$  是轨迹  $k$  经过网格  $ij$  时对应的  $PM_{2.5}$  质量浓度,  $T_{ijk}$  是轨迹  $k$  在网格  $ij$  所停留的时间。PSCF 和 CWT 分析均需要引入权重函数  $W_{ij}$  来降低不确定性, 以减少误差,  $W_{ij}$  可根据参考文献[14-16]确定。

1.2.5 大气自净能力 将大气自身运动对污染物的扩散、稀释和湿清除能力定义为大气自净能

力, 本研究中主要包括水平风的扩散能力和降水的沉降作用, 其计算公式为:

$$A = 3.1536 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{\pi}}{2} V + 1.7 \times 10^{-2} R \sqrt{S}. \quad (3)$$

式中  $V$  为通风系数 ( $m^2/s$ ),  $R$  为降水强度 ( $mm/d$ ),  $S$  为底面积, 取  $100 \text{ km}^2$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 天气分型结果

利用 PCT 方法将 2018—2020 年西安及其周边地区冬季的海平面气压场和 10 m 风场分为 6 种类型, 具体分型结果如图 2。

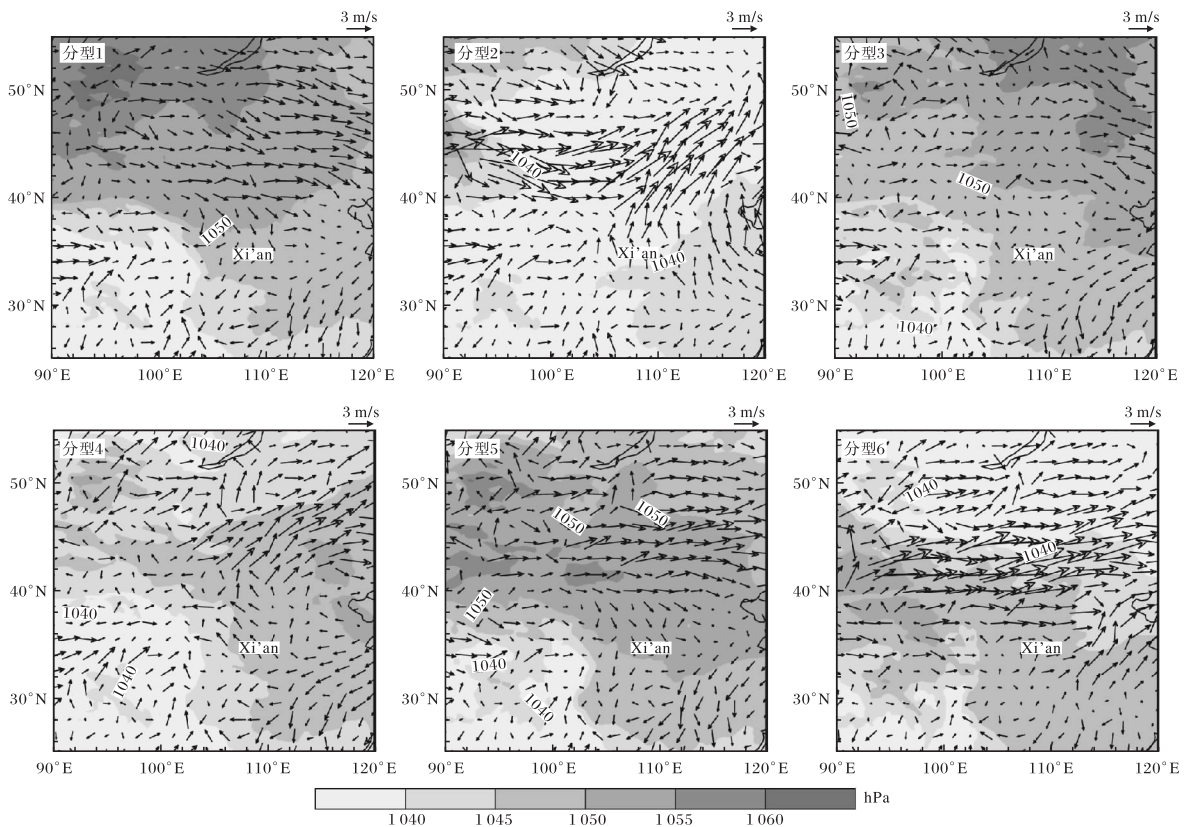


图 2 2018—2020 年西安及其周边地区冬季 6 类海平面气压场(阴影)和 10 m 风场分型结果

1 型为冷高压前部型, 出现频率为 49.1%, 冷高压主体在新疆北部及蒙古国西部, 稳定少动, 西安地区处于冷高压前侧, 近地面风速较小, 风向多变化。

2 型为弱高压顶部型, 弱高压位于我国华中、华东地区, 陕南为弱高压控制, 西安地区处于高压

边缘, 气压梯度大, 地面风速较大, 以南风为主, 这种天气形势出现频率最低, 为 4.8%。

3 型为冷高压后部型, 出现频率为 11.8%, 冷高压主体在蒙古国东部及东西伯利亚地区, 西安地区处于冷高压后侧, 近地面以较一致的东风控制。

4型为均压场型,出现频率为12.9%,我国华北、东北及西北东部地区均处于均压场控制中,等压线稀疏且未出现明显的气压梯度,西安地区处于均压场西部,以东风控制为主。

5型为高压底部型,出现频率为15.9%,高压主体位于我国北部,由华北地区向新疆、蒙古国西部延伸,西安地区处于高压底部,其上游地区近地面受北风控制,西安周边地区为弱西风。

6型为高压前部型,出现频率为5.5%,在我国青藏高原及新疆地区的海平面气压场存在一个高压区,而我国华北、东北地区为低压区,该天气类型下西安近地面风场以南风为主,风速较大。

在6种天气类型中,冷高压前部型出现的频率最高,是西安及其周边地区冬季最主要的天气形势,而弱高压顶部型和高压前部型出现频率较低,两者近地面风速较大,在其他天气类型下,西安地区的风速都较小,风向受高低压强度位置变化而无定向。

## 2.2 天气类型与PM<sub>2.5</sub>的关系

在不同的天气类型下,西安地区PM<sub>2.5</sub>的污染特征存在明显差异,图3为在各个天气类型下西安市PM<sub>2.5</sub>质量浓度分布及污染日分布特征。

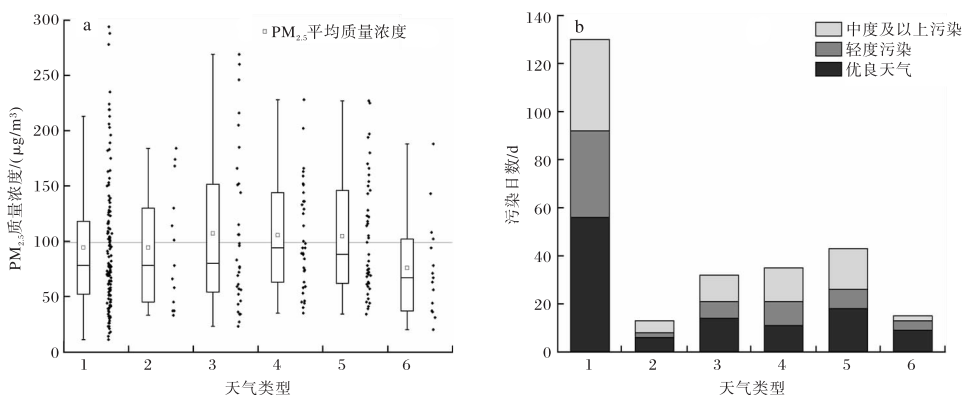


图3 2018—2020年冬季6类天气类型中西安PM<sub>2.5</sub>质量浓度分布及污染日分布特征(图3a中横直线为冬季平均值)

综合分析各种天气类型出现频率及在该天气形势下PM<sub>2.5</sub>污染状况,将冷高压前部型、冷高压后部型、均压场型、高压底部型定义为污染型天气类型,这一结果与部分学者<sup>[17-19]</sup>采用主观分型法对关中地区重污染天气分型的结果基本一致。

## 2.3 天气类型与PM<sub>2.5</sub>扩散

表1为西安不同天气类型下的PM<sub>2.5</sub>质量浓

可以看到,在2018—2020年冬季期间,西安地区PM<sub>2.5</sub>的平均质量浓度为98.6 µg/m<sup>3</sup>,但在天气类型3、4、5型中PM<sub>2.5</sub>的平均质量浓度较高,都超过了冬季平均值。其中,天气类型3型的平均质量浓度高达106.8 µg/m<sup>3</sup>,有18 d超过了75 µg/m<sup>3</sup>空气质量标准,为污染日,占总日数的56%,中度及以上污染出现的频率也较高。天气类型4型PM<sub>2.5</sub>的平均质量浓度为105.4 µg/m<sup>3</sup>,污染日占比更高,为69%,以中度及以上污染为主,出现频率为40%。天气类型5型的平均质量浓度为104.4 µg/m<sup>3</sup>,污染日出现频率为58%,同样以中度及以上污染日为主,出现频率为40%。在天气类型1型中,虽然其PM<sub>2.5</sub>的平均质量浓度低于冬季平均值,但由于其出现频率较大,几乎接近冬季总日数一半,而且其55%的日数为污染日,出现中度及以上污染日的频率也较大;所以1型也有利于污染天气的发生发展。西安地区冬季出现天气类型2、6型的频率较低,而且在其天气形势下PM<sub>2.5</sub>的平均质量浓度也都较低,最低的为6型,平均质量浓度为75.9 µg/m<sup>3</sup>。这2种天气类型相比于1、3、4、5型,污染日出现频率明显偏低。

度与气象参数平均值。在污染天气类型中,混合层高度及通风系数较小,反映了较为稳定的大气层结,不利于污染物的水平垂直扩散;大气自净能力较弱也表明降水等对污染物的湿清除作用不明显,继而导致这4种天气下对应的PM<sub>2.5</sub>质量浓度较大,从污染气象学的角度揭示了1、3、4、5天气类型为污染天气型的机理。而2、6型对应的大

气自净能力较强、混合层高度较高和通风系数较大,均有利于污染物的稀释扩散。通过计算逐日的PM<sub>2.5</sub>质量浓度与混合层高度、通风系数和大气自净能力值的相关系数,也表明它们之间存在负相关关系,均通过了0.01的显著性检验。

表1 2018—2020年冬季各类天气类型下西安PM<sub>2.5</sub>质量浓度与气象参数平均值

天气类型	PM <sub>2.5</sub> 质量浓度/( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	混合层高度/m	通风系数/( $\text{m}^2/\text{s}$ )	大气自净能力
1	96.2	409.8	1 675.4	4.2
2	95.8	426.1	1 758.5	4.5
3	105.5	395.5	1 636.1	3.9
4	105.4	363.0	1 352.2	3.3
5	104.4	371.3	1 448.6	3.6
6	75.9	436.0	1 937.7	5.3

## 2.4 污染天气类型下的PM<sub>2.5</sub>输送与潜在来源

2.4.1 后向轨迹输送特征 为研究在不同污染天气类型下,污染物输送到西安地区的通道及污染源区差异性,选取在天气类型1、3、4、5下PM<sub>2.5</sub>质量浓度 $\geq 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的时间段进行后向轨

迹模拟计算,并通过欧式距离法进行聚类分析。

由图4可知,在天气类型1中,到达西安地区的气流为西风气流。聚类1来自甘肃南部,途经汉中等地,聚类2来自青海北部,途经甘肃、宁夏、宝鸡、铜川,这两类出现频率最高;聚类3、4主要来源于关中北部至甘肃东部地区,出现频率较低。天气类型3中:聚类2、3来自青海及新疆地区,这两类气团移速较快,输送高度较高,由于途经高原地区,主要为下沉气流,这些地区污染源较少,高空空气清洁,所以这部分气团对西安地区污染影响较小;聚类1来自西安东北方向的山西、河南地区,聚类4来自于陕南地区,这类气团为短距离运输,说明大气环境较为稳定,同时水汽充足,有利于颗粒物污染的产生和积累。在天气类型4中,气团主要来自西安地区西方及西北方向,输送距离整体较短,且在关中地区有所停滞,存在明显的绕流,有利于关中地区二次污染物的发生。在天气类型5中:聚类3、4输送距离较远,风速较快,扩散条件较好;聚类1、2、5来自西安附近地区,是主要的污染气团,聚类1出现频率最大,为44.6%,途经宝鸡、甘肃南部,聚类2、5途经渭南、河南西部地区。

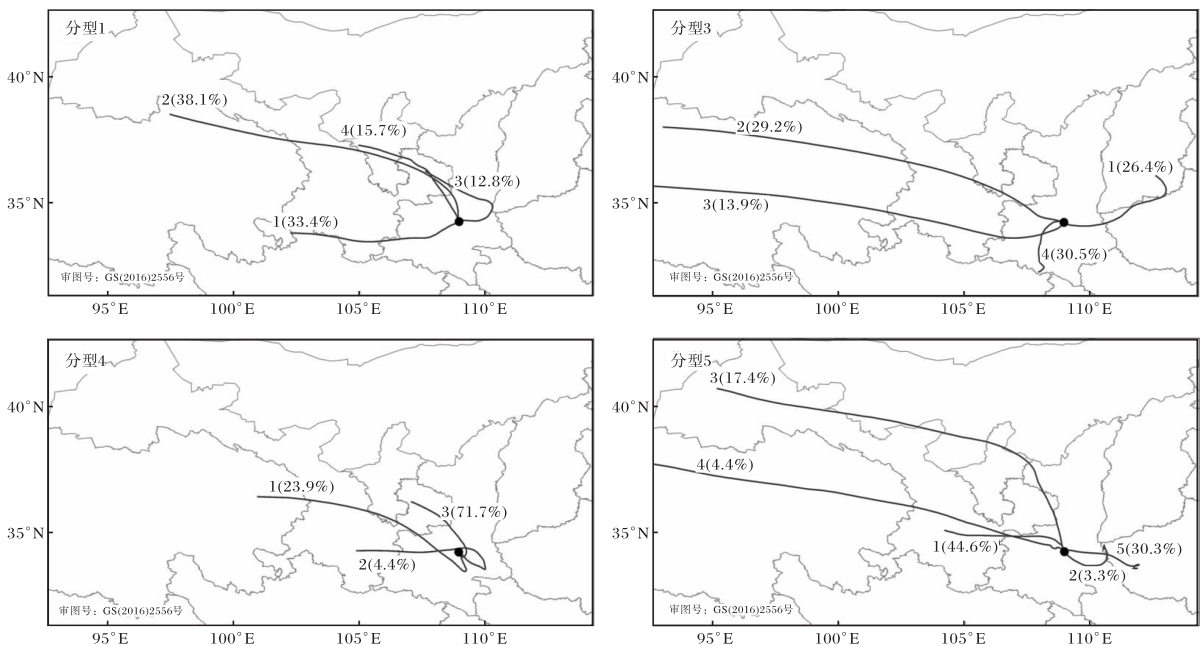


图4 2018—200年各污染天气类型下西安地区的后向轨迹聚类分析

2.4.2 PSCF 和 CWT 分析 对污染型天气类型 1、3、4、5 中  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度超过  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的污染气流进行潜在源贡献分析,结果见图 5。在天气类型 1 中,西安地区  $\text{PM}_{2.5}$  的潜在源区分布较广,陕西境内各地市及周围省份都对西安地区  $\text{PM}_{2.5}$  污染有明显贡献,根据 PSCF 大值区所示,延安、铜川、渭南、汉中、安康、商洛等地区 PSCF 值超过了 0.8,是

主要的污染源区;在天气类型 3 中,对西安  $\text{PM}_{2.5}$  有明显影响的区域主要位于陕南和关中西部地区,包括咸阳、宝鸡等地,PSCF 值在 0.6 以上;而在天气类型 4 中,PSCF 高值区东移,除了陕南地区外,河南西部地区也是重要的污染源区;在天气类型 5 中,PSCF 高值区主要位于关中中东部和陕南地区,并向河南、四川等地延伸。

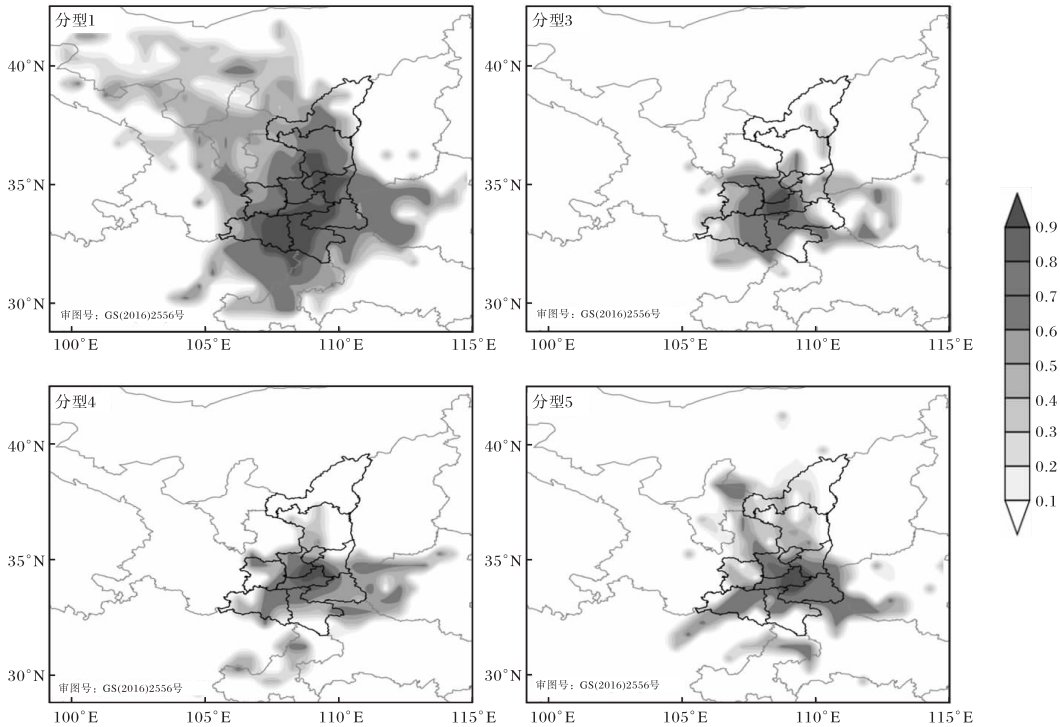


图 5 2018—2020 年冬季各污染天气类型下的 PSCF 分布

通过进一步计算污染型天气类型 1、3、4、5 中  $\text{PM}_{2.5}$  浓度权重轨迹 CWT(图 6),可以反映各区域对西安地区污染物质量浓度的贡献水平,CWT 值越大,该区域的污染贡献就越大。在各个天气类型中,西安地区的 CWT 值都较大,表明西安本地是该地区污染天气中的重要贡献源区。在天气类型 1 中,西安地区  $\text{PM}_{2.5}$  污染贡献源区还包括陕南地区,其存在一个 CWT 高值中心,其次渭南的 CWT 值也较大,这些区域的 CWT 都超过了  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;在天气类型 3 中,对西安地区  $\text{PM}_{2.5}$  污染有明显影响的区域包括铜川、咸阳和宝鸡东部、汉中东部、安康北部地区,CWT 都超过了  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;在天气类型 4 中,CWT 高值区位于咸阳、渭南、商洛、河南西部地区;在天气类型 5

中,CWT 高值区与其 PSCF 高值区较一致,主要位于关中中东部和陕南地区,并向河南、四川等地延伸,另外在宁夏、甘肃东部等地也对西安  $\text{PM}_{2.5}$  的贡献有着显著的贡献。

### 3 结论

(1)利用 PCT 客观分型法将 2018—2020 年西安及其周边地区冬季的海平面气压场和 10 m 风场分为冷高压前部型、弱高度顶部型、冷高压后部型、均压场型、高压底部型、高压前部型 6 种类型,冷高压前部型出现频率最大,为 49.1%,是西安地区冬季主要的天气形势场。

(2)在冷高压前部型、冷高压后部型、均压场型、高压底部型下,西安地区的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度高于冬季平均情况,污染日出现频率高,污染程度重,

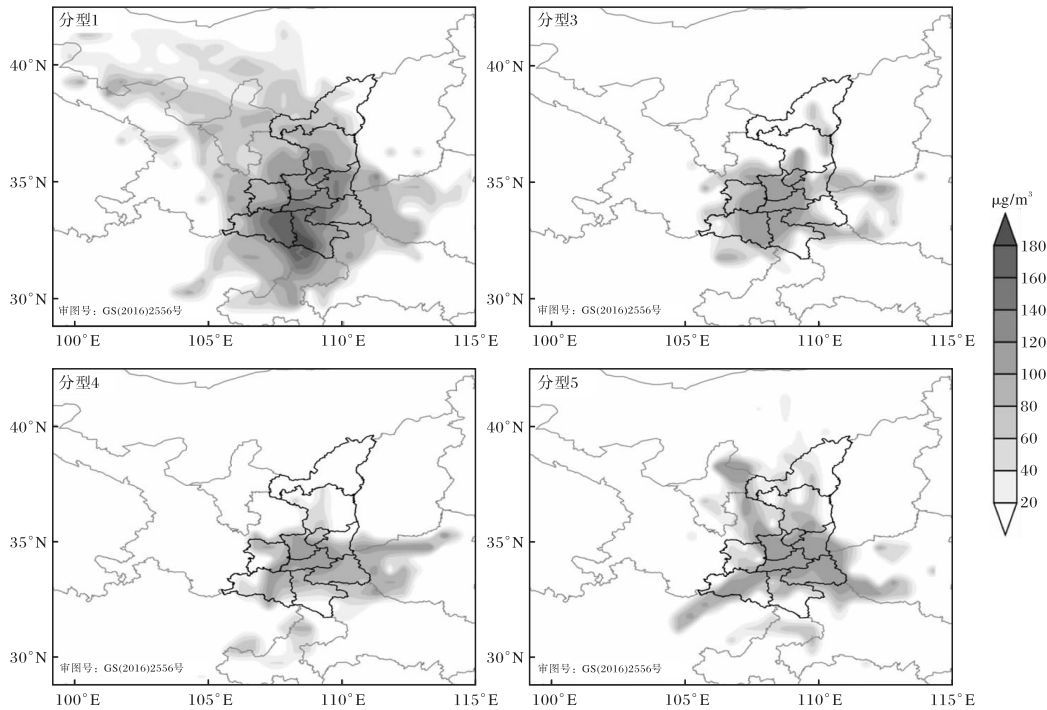


图6 2018—2020年冬季各污染天气类型下的CWT分布

因此将其定义为污染型天气类型。

(3)在污染型天气类型下,西安地区的混合层高度较低、通风系数较小、大气自净能力较弱均不利于 $PM_{2.5}$ 的扩散稀释。

(4)在各个污染天气类型下,西安本地都为重要的污染贡献源区,关中周边地区和陕南地区对其 $PM_{2.5}$ 的质量浓度均有明显的影响,主要原因是来自关中地区的气流输送距离短、移速慢,大气层结稳定,有利于污染物的积累,而来自陕南地区的气流水汽充足,有利于气溶胶吸湿增长和二次转化,从而加重污染程度。另外,甘肃东部、宁夏及河南西部也是西安地区重要的颗粒物污染源地。不同的污染天气类型下,污染输送通道和源区存在差异性。

#### 参考文献:

- [1] 李宗恺,潘云仙,孙润桥. 空气污染气象学原理及应用[M]. 北京:气象出版社, 1985:122.
- [2] 蒋维楣,孙鉴泞,曹文俊,等. 空气污染气象学教程[M]. 北京:气象出版社, 1993:5-12.
- [3] 杨旭,张小玲,康延臻,等. 京津冀地区冬半年空气污染天气分型研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(9):3201-3209.
- [4] 张莹,王武功,贾旭伟,等. 华北地区冬半年空气污染天气客观分型研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(10):3826-3833.
- [5] 许建明,常炉予,马井会,等. 上海秋冬季 $PM_{2.5}$ 污染天气形势的客观分型研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12):4303-4314.
- [6] HUTH R. An intercomparison of computer-assisted circulation classification methods [J]. International Journal of Climatology, 1996, 16(8): 893-922.
- [7] 王郭臣,王东启,陈振楼. 北京冬季严重污染过程的 $PM_{2.5}$ 污染特征和输送路径及潜在源区[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7):1931-1937.
- [8] 杨欣,陈义珍,赵好希,等. 2014—2017年北京城区霾污染态势及潜在来源[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9):3232-3239.
- [9] 张向荣,乔丹杨. 2020年西安一次持续重污染过程成因及输送特征分析[J]. 陕西气象, 2021(5):30-35.
- [10] 徐娟娟,郝丽,王百灵,等. 关中一次重污染天气过程气象特征分析[J]. 陕西气象, 2018(4):1-6.
- [11] ASHBAUGHL L, MALM W C, SADEH W Z. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at grand Canyon National Park [J]. Atmospheric Environment, 1985, 19(8): 1263-

- 1270.
- [12] ZENG Y, HOPKE P K. A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canada [J]. *Atmospheric Environment*, 1989,23(7):1499-1509.
- [13] HOPKE P K, GAO N, CHENG M D. Combining chemical and meteorological data to infer source areas of airborne pollutants [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1993,19(2):187-199.
- [14] 王芳龙,李忠勤,尤晓妮,等. 2015—2017年天水市大气污染物变化特征及来源分析[J]. *环境科学学报*,2018,38(12):4592-4604.
- [15] 李培荣,肖天贵. 成都地区秋冬季污染天气形势PM<sub>2.5</sub>的扩散与输送[J]. *中国环境科学*,2020,40(1):63-75.
- [16] 李颜君,安兴琴,范广洲. 北京地区大气颗粒物输送路径及潜在源分析 [J]. *中国环境科学*, 2019, 39(3):915-927.
- [17] 徐丹妮,王瑾婷,袁自冰,等. 汾渭平原复杂地形影响下冬季PM<sub>2.5</sub>污染分布特征、来源及成因分析 [J]. *环境科学学报*,2021,41(4):1184-1198.
- [18] 高维英,李明,李茜,等. 关中地区重污染发生和减弱天气类型及气象要素定量特征[J]. *灾害学*, 2020,35(2):102-109.
- [19] 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.