

张高健,曹梅,仇娜,等. 西安北郊 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>特征及其与气象要素的关系[J]. 陕西气象,2022(6):53-58.

文章编号:1006-4354(2022)06-0053-06

# 西安北郊 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>特征及其与气象要素的关系

张高健<sup>1</sup>,曹梅<sup>1</sup>,仇娜<sup>2</sup>,陈奇<sup>1</sup>

(1. 西安市气象局,西安 710016;2. 陕西省气象干部培训学院,西安 710016)

**摘要:**利用2017—2021年西安泾河站颗粒物监测数据和地面气象观测数据,统计分析了西安北郊 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>质量浓度的时间变化特征及其与气温、风向风速、降雨等气象要素的关系。结果表明:近5 a来西安北郊 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>质量浓度年均值分别为 117.5 μg/m<sup>3</sup>、75.2 μg/m<sup>3</sup>,PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>质量浓度整体呈逐年下降趋势;季节变化表现为夏季最低,冬季最高,春秋季节次之;PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>质量浓度月变化分别呈现出1—8月下降而8—12月升高,1—7月下降而7—12月升高的“单谷型”结构;PM<sub>2.5</sub>质量浓度占 PM<sub>10</sub>质量浓度的比例表现为冬季最高,春季最低,夏秋季较均匀,1月该比例最大为76.6%,5月最小为48%;PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>质量浓度日变化规律为上午和夜间高而下午低的双峰特征,整体表现为夜间浓度高于日间,但变化幅度小于日间;PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>质量浓度与气温呈负相关,当风速在4.5 m/s以下时与风速呈负相关,来自偏西北方向的污染物对颗粒物质量浓度影响较大;降雨量大时,颗粒物质量浓度相对较低,但降水对 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>的清除率均达不到100%。

**关键词:**颗粒物;变化特征;气象要素

**中图分类号:**X513

**文献标识码:**A

近年来,随着城市规模、城市人口快速增长,由于人类活动、工农业生产等引起的空气污染问题成为社会关注的热点问题之一。目前,开展大气污染特征及其与气象因素关系的科学研究较多<sup>[1-5]</sup>。唐家翔等<sup>[6]</sup>分析认为:海口市 PM<sub>2.5</sub>月质量浓度整体呈周期性波动,秋冬季高、春夏季低;降水对 PM<sub>2.5</sub>有清除作用;风速加大会使 PM<sub>2.5</sub>浓度减小。虎彩娇等<sup>[7]</sup>分析了黄石市大气 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的质量浓度水平分布特征及其与气象参数的关系,发现大气 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>质量浓度呈现显著的冬季高夏季低的变化规律,风向、风速、温度、气压和相对湿度等气象要素是影响大气 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>质量浓度分布的重要因素。曹梅等<sup>[8]</sup>分析了西安市2006—2015年3种大气主要污染物(SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>)不同时间尺度上的变化规律及其与气象条件的关系,结果表明主要污染物质量浓度的季节变化均为夏季低,冬季高,大气污染物

质量浓度与风速、气温呈明显的负相关,与逆温强度呈显著的正相关,降水对大气污染物有明显的净化作用。

西安地处西北内陆,是国务院批准的中国西部地区重要的中心城市,2020年11月全国第七次人口普查,全市常住人口1 295.29万人<sup>[9]</sup>。由于西安城市化进程加快以及人口的快速增长,对城市气候产生了很大影响,由颗粒物引起的大气污染影响城市发展及居民身体健康,大气污染防治势在必行,而气象要素对大气污染物的清洁、稀释有着重要作用<sup>[10-12]</sup>,故开展本区域大气中 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>质量浓度变化规律及其与气温、风向风速、降水等气象要素之间关系的研究有着重要意义。利用研究的理论成果,以期能为改善城市空气质量提供理论依据。

## 1 资料与方法

本文颗粒物采样仪器为安徽蓝盾光电子股份

收稿日期:2022-01-09

作者简介:张高健(1975—),男,汉族,陕西临潼人,学士,工程师,从事气象服务工作。

基金项目:西安市科技计划项目(20SF0015)

有限公司生产的 LGH-01B/E 型  $\beta$  射线大气颗粒物在线监测仪,该系统采用  $\beta$  射线吸收法组合 DHS 动态加热系统的技术原理,实现对环境大气中颗粒物  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  等不同粒径粒子进行实时在线质量浓度的测量。

选取 2017 年 1 月 1 日—2021 年 12 月 31 日  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  质量浓度小时观测数据,计算日、月、季、年均值;相应时间的常规气象数据主要包括气温、风向风速、降水等。数据分别来源于西安市泾河大气成分站和西安市泾河国家基本气象站(两站位于同一站址,以下称为泾河站,地处西安市市中心以北约 20 km,  $34^{\circ}26'N$ ,  $108^{\circ}58'E$ )。泾河站四周开阔平坦,周围无大的厂矿及污染源存在,其资料可代表西安北郊整体大气环境颗粒物质量浓度和相关气象要素实况。颗粒物质量浓度和常规气象数据日值以北京时 20 时为日界。

降水清除率是反映降水对大气污染物的湿清除能力。设某降水日大气污染物质量浓度的日均值为  $C_i$ ,其前一日的日均值为  $C_{i-1}$ ,则降水清除率  $A$  可表示为<sup>[13]</sup>

$$A = -\frac{(C_i - C_{i-1})}{C_{i-1}} \times 100\% \quad (1)$$

## 2 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征

### 2.1 年际变化特征

为了解近 5 a 西安市北郊  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  质量浓度(用  $C(PM_{10})$  和  $C(PM_{2.5})$  表示)现状和变化趋势,对泾河站 2017 年 1 月—2021 年 12 月质量浓度进行统计分析(见表 1)。近 5 a 来西安市北郊  $C(PM_{10})$  和  $C(PM_{2.5})$  均值分别为  $117.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $75.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,年际变化总体呈逐年下降趋势,其中  $C(PM_{2.5})$  下降趋势明显,平均每年下降  $8.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。日均  $C(PM_{10})$ 、 $C(PM_{2.5})$  超过《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)中 24 h 平均二级标准浓度限值( $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )的日数分别为 447 d、655 d,平均每年 89.4 d 和 131 d; $C(PM_{2.5})$  超标日数呈现明显的逐年减少趋势,平均每年减少 18.8 d。西安市经过多年的车辆限行、煤改气、禁止秸秆和垃圾焚烧、拆除小旧锅炉、抑扬施工和扬尘污染等政策的实施,空气质量逐步好转,证明这一系列措施行之有效。

表 1 2017—2021 年西安北郊  $C(PM_{10})$  和  $C(PM_{2.5})$  年际变化及超过二级标准日数

年份	$C(PM_{10})/(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$C(PM_{2.5})/(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$C(PM_{10})$ 超标日数/d	$C(PM_{2.5})$ 超标日数/d
2017	127.7	90.6	90	168
2018	112.5	84.4	82	159
2019	119.9	74.3	106	128
2020	106.4	68.4	68	107
2021	121.1	58.4	101	93

### 2.2 季变化特征

由表 2 可知: $C(PM_{10})$  冬季最高,为  $170.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,其次是春季  $131.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,夏季最低,仅为  $64.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $C(PM_{2.5})$  冬季最高,为  $126.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,其次是秋季  $68.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最低出现在夏季,为  $38.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $C(PM_{2.5})$  年平均值占  $C(PM_{10})$  的 64%,冬季占比最高达到 73.8%,春季最低为 51.8%。

表 2 2017—2021 年西安北郊  $C(PM_{10})$ 、 $C(PM_{2.5})$  及  $C(PM_{2.5})/C(PM_{10})$  年、季均值

季节	$C(PM_{10})/(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$C(PM_{2.5})/(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$C(PM_{2.5})/C(PM_{10})/\%$
春季	131.6	68.2	51.8
夏季	64.2	38.2	59.5
秋季	103.6	68.5	66.1
冬季	170.7	126.0	73.8
全年	117.5	75.2	64.0

### 2.3 月变化特征

由图 1 可知, $C(PM_{10})$  和  $C(PM_{2.5})$  1 月最高,分别为  $196.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $150.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $C(PM_{10})$  8 月最低,为  $59.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $C(PM_{2.5})$  7 月最低,为  $37.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。  $PM_{10}$  质量浓度变化呈现出 1—8 月下降,8—12 月升高,  $PM_{2.5}$  质量浓度变化呈现出 1—7 月下降,7—12 月升高的“单谷型”结构。主要原因是因为夏季太阳辐射强烈,大气边界层厚,对流旺盛且风速大,大气垂直扩散和水平扩散能力强,加之频繁降水的清除作用,有效降低颗粒物质量浓度。冬季则相反,加上北方冬季供暖,燃煤、燃气排放加大,大气污染严重,颗粒物质量浓

度高。 $C(\text{PM}_{2.5})$ 质量浓度占 $C(\text{PM}_{10})$ 的比例1月最大,为76.6%,5月最小,为48%,1—5月这一占比快速下降,6—12月逐步回升。除春季外,其他季节和月份 $\text{PM}_{2.5}$ 对颗粒物质量浓度贡献较大。

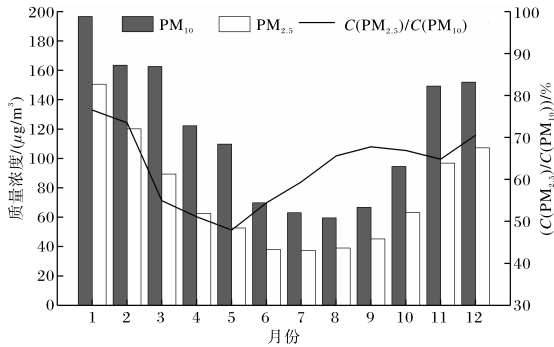


图1 2017—2021年西安北郊 $C(\text{PM}_{10})$ 、 $C(\text{PM}_{2.5})$ 及 $C(\text{PM}_{2.5})/C(\text{PM}_{10})$ 月变化

#### 2.4 日变化特征

经统计分析 $C(\text{PM}_{10})$ 和 $C(\text{PM}_{2.5})$ 逐时均值,发现其日变化曲线均呈现双峰特征(图2),夜间质量浓度高于日间,但变化幅度小于日间。07时前后,随着人们上班出行、社会生产等人类活动高峰到来,大气颗粒物开始逐渐累积,大气颗粒物质量浓度缓慢升高,09时前后形成次峰值,而后随着太阳辐射逐步增强,大气层结变的不稳定,大气扩散能力迅速增强, $C(\text{PM}_{10})$ 和 $C(\text{PM}_{2.5})$ 也随之快速下降,分别在16时和18时达到一日中最低;此后,由于太阳辐射逐渐变弱,气温降低,大气层结趋于稳定,垂直扩散能力变差,加上城市交通晚高峰汽车尾气大量排放的影响,大气颗粒物快速

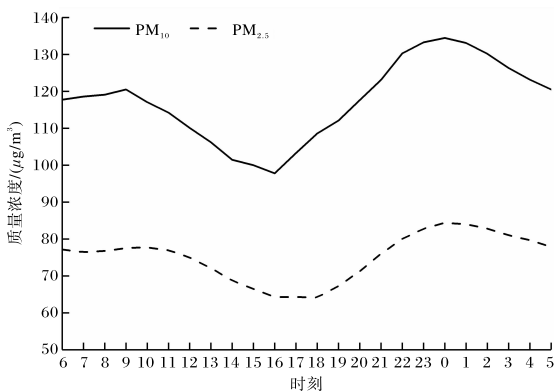


图2 2017—2021年西安北郊 $C(\text{PM}_{10})$ 、 $C(\text{PM}_{2.5})$ 日变化

累积,大气颗粒物质量浓度快速升高,00时达到夜间峰值,也是一日中的最高值;夜深人静后,随着人类活动量减少,污染物排放量也随之减少,随着大气污染物的自然沉降,颗粒物质量浓度再次逐步降低。

### 3 影响大气颗粒物质量浓度的气象因子

#### 3.1 气温

将 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度日均值分别与日平均气温进行相关分析,结果见图3。 $C(\text{PM}_{10})$ 和 $C(\text{PM}_{2.5})$ 与气温总体呈现负相关关系。夏季,太阳辐射强烈,地表升温快,空气对流强烈,大气层结稳定度较低,大气清洁力强, $C(\text{PM}_{10})$ 和 $C(\text{PM}_{2.5})$ 较低;冬季由于稳定类天气较多,特别是下垫面平坦裸露的区域,夜间接地逆温出现频繁且强度较大,另外因为冷空气活动频繁造成低空逆温频繁。频繁的逆温阻碍空气对流运动,造成冬季 $C(\text{PM}_{10})$ 和 $C(\text{PM}_{2.5})$ 升高。

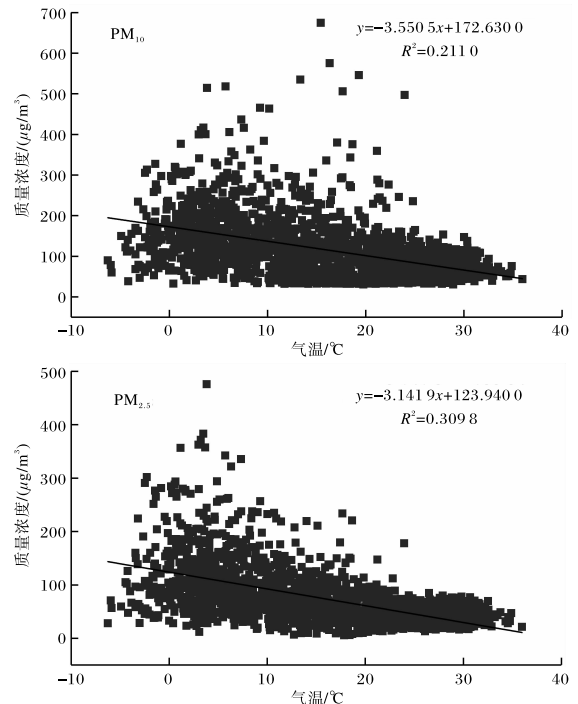


图3 2017—2021年西安北郊 $C(\text{PM}_{10})$ 和 $C(\text{PM}_{2.5})$ 随气温的变化(直线为拟合线)

#### 3.2 风向、风速

利用西安2017—2021年逐小时风向资料及所相应的 $C(\text{PM}_{10})$ 和 $C(\text{PM}_{2.5})$ 资料分析二者的关系(图4)。西安北郊主导风向为偏东北风

(NNE—NE—ENE), 占比为 41.5%, 对应的  $C(\text{PM}_{10})$  和  $C(\text{PM}_{2.5})$  平均值分别为  $113.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $73.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 其次为偏西南风 (SSW—SW—WSW), 占比为 25.9%, 对应的  $C(\text{PM}_{10})$  和  $C(\text{PM}_{2.5})$  平均值分别为  $112.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $69.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。偏西北风 (WNW—NW—NNW) 对应的  $C(\text{PM}_{10})$  和  $C(\text{PM}_{2.5})$  均值最大, 分别为  $151.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $96.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 占比为 9.3%; 偏东南风 (ESE—SE—SSE) 对应的  $C(\text{PM}_{10})$  和  $C(\text{PM}_{2.5})$  均值最小, 分别为  $103.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $65.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 占比为 2.7%。从以上分析可知,  $C(\text{PM}_{10})$  和  $C(\text{PM}_{2.5})$  在偏西北风时最高, 其他风向分布较为均匀, 说明通过偏西北风汇入的污染物对西安北郊颗粒物质量浓度影响较大。

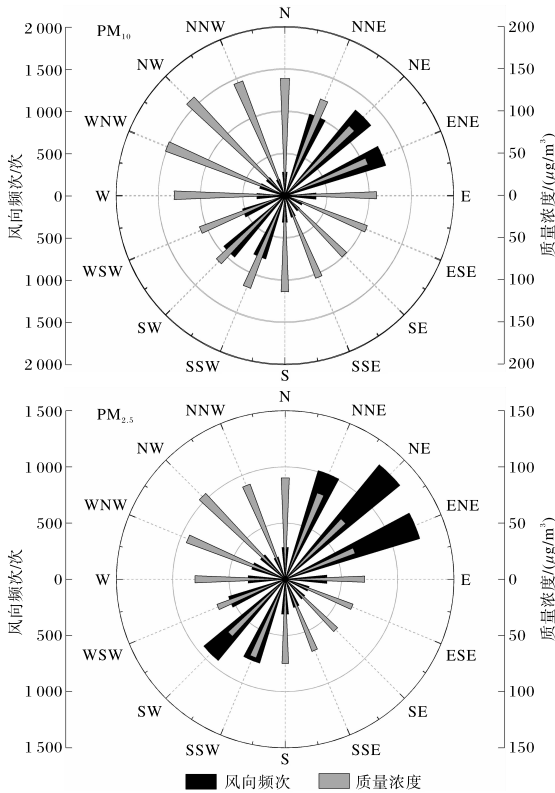


图4 2017—2021年西安北郊  $C(\text{PM}_{10})$  和  $C(\text{PM}_{2.5})$  的风向分布

进一步分析  $C(\text{PM}_{10})$  和  $C(\text{PM}_{2.5})$  日均值与平均风速的关系(表3)发现, 当风速在  $4.5 \text{ m/s}$  以下时, 随着风速增大, 颗粒物质量浓度逐步下降; 但当风速超过  $4.5 \text{ m/s}$  时, 颗粒物质量浓度快速上升, 尤其  $C(\text{PM}_{10})$  升高的幅度更大。深入分

析风速超过  $4.5 \text{ m/s}$  时的 35 个样本, 发现发生在冬春季共 30 次, 当天天气以阴雨为主, 风向均为偏东北风, 平均  $C(\text{PM}_{10})$  和  $C(\text{PM}_{2.5})$  为  $213.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $92.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 其他 5 次发生在夏秋季, 风向偏东北风, 平均  $C(\text{PM}_{10})$  和  $C(\text{PM}_{2.5})$  较低, 仅为  $53.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $41.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 均小于夏秋季平均值。从以上分析可以看出, 当风速在  $4.5 \text{ m/s}$  以下时,  $C(\text{PM}_{10})$  和  $C(\text{PM}_{2.5})$  与风速呈负相关关系, 即风速越大, 质量浓度越低; 冬春季当风速较大超过  $4.5 \text{ m/s}$ , 颗粒物质量浓度出现不降反升的情况, 原因可能是风速较大时一般有稳定的天气系统控制着西安地区, 来自偏东北方向持续的污染物输入而造成颗粒物质量浓度升高<sup>[14]</sup>。总体来看, 风速是影响颗粒物质量浓度的重要因素, 除冬春季风速  $\geq 4.5 \text{ m/s}$  特殊情况外, 风速大对颗粒物的扩散清除作用明显。

表3 2017—2021年西安北郊  $C(\text{PM}_{10})$ 、 $C(\text{PM}_{2.5})$  与风速的关系

风速/ (m/s)	$C(\text{PM}_{10})$ / ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$C(\text{PM}_{2.5})$ / ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	样本数
0~1.4	148.2	107.4	313
1.5~2.4	114.2	72.0	955
2.5~3.4	101.7	60.7	416
3.5~4.4	94.6	60.3	107
$\geq 4.5$	173.9	78.7	35

### 3.3 降水

由表4可知, 2017—2021年夏季降水量最大, 占年平均降水量的 44.8%, 对颗粒物清洁作用较明显,  $C(\text{PM}_{10})$  和  $C(\text{PM}_{2.5})$  均值最低。冬季降水量最小, 仅占年平均降水量的 3.3%, 对颗粒物清洁作用有限,  $C(\text{PM}_{10})$  和  $C(\text{PM}_{2.5})$  均值最高, 空气污染较严重。春季、夏季、秋季, 由于降水的清洁作用, 使得降水日的  $C(\text{PM}_{10})$  和  $C(\text{PM}_{2.5})$  均值低于非降水日。只有冬季会出现  $C(\text{PM}_{2.5})$  均值在降水日大于非降水日的现象, 这是由于在降水量很小或降雪天气下, 由于降水冲刷能力不强, 而此时空气湿度增大, 易形成抑制颗粒物扩散的雾罩, 导致大气中残留的污染物质量浓度较高<sup>[15]</sup>。

表 4 2017—2021 年西安北郊各季节降水日与非降水日  
C(PM<sub>10</sub>) 和 C(PM<sub>2.5</sub>)

季节	类别	降水量 /mm	出现日 数/d	C(PM <sub>10</sub> ) /(μg/m <sup>3</sup> )	C(PM <sub>2.5</sub> ) /(μg/m <sup>3</sup> )
春季 (3—5月)	降水日	118.9	97	95.6	60.0
	非降水日		363	141.8	70.6
夏季 (6—8月)	降水日	300.9	131	55.9	34.3
	非降水日		329	67.7	39.7
秋季 (9—11月)	降水日	229.7	155	82.8	57.6
	非降水日		300	114.9	74.4
冬季 (12—2月)	降水日	22.0	38	163.0	131.3
	非降水日		292	164.8	120.9

为进一步研究降水对颗粒物的清除作用,统计分析 2017—2021 年泾河站降水量及其对 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 清除率,结果见图 5。降水对 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 的清除率均值分别为 10%、7%,降水对 PM<sub>10</sub> 的清除效果好于 PM<sub>2.5</sub>。降水量 < 5.0 mm 时,降水对 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 的清除率大部分在 -50%~50% 之间,说明弱降水清除效果较差,甚至会导致颗粒物质量浓度上升;降水量 > 10.0 mm 时,降水对 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 的清除率正值逐渐增多,且随着降水量增大,清除率全部趋于正值,最大值趋向 100%,但均达不到 100%,说明降水对颗粒物无法完全清除。为探讨降水量大于 10 mm,清除率出现负值的原因,选取 2 个清除率负值较大的个例详细分析。2020 年 5 月 8 日,降水对 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 清除率分别为 -164.0%、-137.8%,降水量 15.3 mm,降水时段为 21—03 时,非降水时段 04—20 时。降水时段 C(PM<sub>10</sub>) 和 C(PM<sub>2.5</sub>) 均值分别为 32.6 μg/m<sup>3</sup>、18.9 μg/m<sup>3</sup>,非降水时段分别为 179.4 μg/m<sup>3</sup>、66.6 μg/m<sup>3</sup>;2021 年 4 月 23 日,降水对 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 清除率分别为 -86.9%、-68.1%,降水量 30.8 mm,非降水时段 21—11 时,降水时段为 12—20 时。降水时段 C(PM<sub>10</sub>) 和 C(PM<sub>2.5</sub>) 均值分别为 62.8 μg/m<sup>3</sup>、50.0 μg/m<sup>3</sup>,非降水时段分别为 118.6 μg/m<sup>3</sup>、63.7 μg/m<sup>3</sup>。从以上个例可以看出,非降水时段的清除率均值远大于降水时段,可见,降水时间分布不均匀是造成清除率为负值的主要原因。

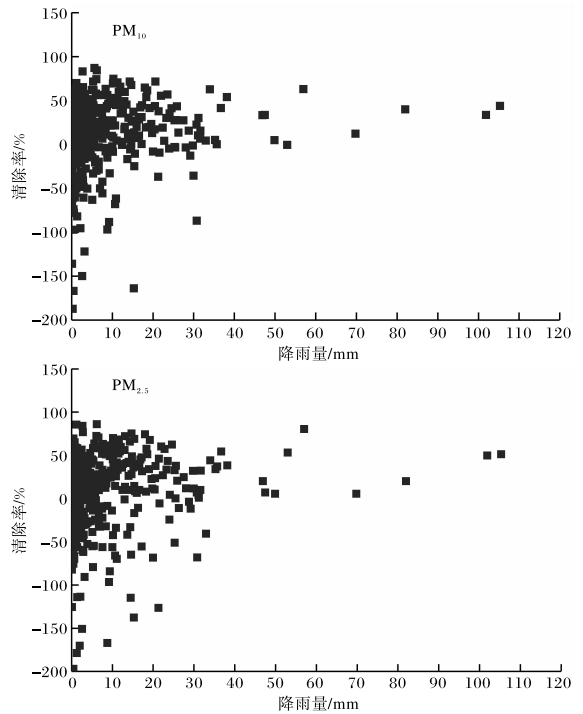


图 5 2017—2021 年西安北郊降水对颗粒物的清除率与降水量的关系

#### 4 结论

(1) 2017—2021 年西安北郊 C(PM<sub>10</sub>) 和 C(PM<sub>2.5</sub>) 年均值分别为 117.5 μg/m<sup>3</sup>、75.2 μg/m<sup>3</sup>, 呈现逐年下降趋势, C(PM<sub>2.5</sub>) 下降趋势尤为明显, 平均每年下降 8.1 μg/m<sup>3</sup>; 季节变化特征为夏季最低, 冬季最高, 春秋季节次之; 月变化分别呈现出 1—8 月下降而 8—12 月升高, 1—7 月下降而 7—12 月升高的“单谷型”结构。

(2) C(PM<sub>10</sub>) 和 C(PM<sub>2.5</sub>) 日变化曲线呈现双峰特征, 上午 08—09 时为次高峰, 夜间 00 时前后达到日最高峰; 16—18 时为一日中最低。夜间高于日间, 但变化幅度小于日间。

(3) C(PM<sub>2.5</sub>) 占 C(PM<sub>10</sub>) 的比例冬季最高, 春季最低, 夏秋季较均匀; 1 月 PM<sub>2.5</sub> 占比最大为 76.6%, 5 月最小为 48%, 1—5 月该比例快速下降, 6—12 月逐步回升。除春季外, 其他季节和月份 PM<sub>2.5</sub> 对颗粒物质量浓度贡献较大。

(4) C(PM<sub>10</sub>) 和 C(PM<sub>2.5</sub>) 与气温总体呈负相关关系。风速在 4.5 m/s 以下时, 其与风速呈负相关关系; 但当风速较大超过 4.5 m/s 时, 颗粒物质量浓度在冬春季有明显的上升趋势, 风速是

影响颗粒物质量浓度的重要因素。 $C(\text{PM}_{10})$ 和 $C(\text{PM}_{2.5})$ 在偏西北风时最高,其他风向分布较为均匀,来自偏西北方向的污染物对颗粒物质量浓度影响较大。降水对 $\text{PM}_{10}$ 清除效果好于对 $\text{PM}_{2.5}$ 的清除,降水量大时,质量浓度相对较低,但降水无法对颗粒物彻底清除。

参考文献:

[1] 陈欣昊,张蕾,杨晓春,等.近五年周至空气污染气象条件分析[J].陕西气象,2019(1):29-32.  
 [2] 王红军,何晓媛,苏静,等.关中区域主要大气污染物时空分布特征分析[J].陕西气象,2020(3):26-30.  
 [3] 范佳文,谭丽静,王文武,等.丹东市大气颗粒物质量浓度变化特征及其与气象要素的关系[J].陕西气象,2020(3):20-25.  
 [4] 蒋镇,赵美艳.重庆城区大气细颗粒物浓度特征及其与气象因子的关系[J].气象研究与应用,2020,41(3):38-42.  
 [5] 蔡惠文,吕恩奇,陈欣昊,等.高陵区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征及其与气象要素的关系研究[J].陕西气象,2021(5):42-46.  
 [6] 唐家翔,符传博,杨仁勇,等.海口市 $\text{PM}_{2.5}$ 演变特征及其与气象因素的关系[J].环境污染与防治,2018,40(4):445-454.  
 [7] 虎彩娇,李锦伦,王祖武,等.黄石市大气 $\text{PM}_{10}$ 和

$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度特征研究[J].气象与环境学报,2019,35(4):40-46.  
 [8] 曹梅,王斌,仇娜,等.西安市2006~2015年大气污染物变化特征及与气象条件的关系[J].江西农业学报,2017,29(9):109-115.  
 [9] 西安市统计局.西安市第七次全国人口普查主要数据公报[1](第二号)[EB/OL].(2021-05-31)[2022-01-05].http://tjj.xa.gov.cn/rdzt/xapc/60b47aa1f8fd1c0bdc2d59b3.html.  
 [10] 成佳丽,王颖樾,浦吉存,等.滇东地区城市空气污染变化特征及其与气象条件的关系[J].云南师范大学学报(自然科学版),2019,39(5):59-65.  
 [11] 陈渤黎,吴建秋,吴晶璐,等.2012—2014年常州市空气质量与气象要素关系分析[J].气象与减灾研究,2015,38(3):68-74.  
 [12] 严晓瑜,缙晓辉,刘玉兰,等.银川市大气污染物浓度变化特征及其与气象条件的关系[J].气象与环境学报,2015,31(2):21-30.  
 [13] 金丽娜,杨晓春,洪超.西安市 $\text{PM}_{10}$ 浓度特征及气象因子影响分析[J].干旱气象,2017,35(2):299-305.  
 [14] 洪超.西安市空气污染特征及重污染天气成因研究[D].兰州:兰州大学,2017.  
 [15] 赵卉伊褶,周卫健,牛振川,等.西安市2013—2017年大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空变化特征及影响因素分析[J].地球环境学报,2019,10(3):248-256.

《陕西气象》2021年度优秀论文和好文章

优秀论文

低涡影响下的西北地区东部暴雨个例分析 .....  
 马晓华,马青,屈丽玮,黄少妮,刘菊菊,潘留杰  
 两次下击暴流天气的环境背景及多普勒雷达特征  
 ..... 毕旭,徐军昶,杨亦典,郭庆元  
 商洛一次致灾短时强降水尺度特征及预报预警  
 分析 .....  
 陈小婷,彭力,邹长艳,马晓华,胡启元,刘菊菊  
 陕西关中大气污染时空分布特征及天气学分型  
 ..... 刘瑞芳,贺瑶,刘慧,黄少妮  
 好文章  
 第十四届全运会期间西安气象条件分析 .....  
 ..... 蔡新玲,李茜,路岑之,刘波

地基微波辐射计与探空数据对比分析 .....  
 ..... 曹梅,王斌,杨珍,张颖梅  
 陕西黄土高原短时强降水时空分布及环流特征  
 ..... 张建康,刘慧敏,康磊,胡若昕  
 基于层次分析法的蒲城酥梨综合品质评价 .....  
 ..... 马耀绒,谈会星,王红军,张艳芬  
 西安呼吸系统疾病气象风险指数等级预报研究与应用  
 ..... 张楠,徐波,刘敏茹,邓小丽  
 千阳苹果种植气象条件及其变化分析 .....  
 ..... 赵磊,吕丹