

# 陕西省冬春季 $PM_{2.5}$ 时空分布特征研究

易文利<sup>1</sup>, 朱婵园<sup>1</sup>, 郭 婵<sup>1</sup>, 郑浩浩<sup>1</sup>, 杨 飞<sup>1,2</sup>, 刘引鸽<sup>1</sup>

(1. 宝鸡文理学院 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721013;  
2. 新疆阜康产业园管理委员会, 新疆 阜康 831500)

**摘 要:** 根据陕西省 2016 年 12 月至 2017 年 5 月  $PM_{2.5}$  质量浓度逐小时数据, 利用 ArcGIS 分析陕西省  $PM_{2.5}$  污染时空变化格局, 并分析造成南北差异的原因, 再利用小波分析手段探讨各市  $PM_{2.5}$  污染时间序列周期和突变特性。结果表明: (1) 陕西省冬季  $PM_{2.5}$  污染重, 春季污染轻, 并表现出“关中高, 南北低”的特征, 秦岭南北经济发展差异和供暖差异是控制陕西省  $PM_{2.5}$  污染空间格局的主要原因; (2) 冬季和春季单日  $PM_{2.5}$  浓度变化趋势基本一致, 为“双峰双谷型”, 日最低值出现在 16:00~18:00; (3) Morlet 小波分析结果显示, 陕西省  $PM_{2.5}$  日均变化序列存在多时间尺度特征。陕北城市  $PM_{2.5}$  污染第 1 主周期为 40 d, 关中城市和陕南商洛市有 40 d 和 65 d 两个共同周期, 安康市和汉中市共同周期为 20 d 和 80 d; (4) 陕西省  $PM_{2.5}$  突发事件冬季频繁而春季较少, 多发生在 1 月和 2 月, 春季 1 次大范围的沙尘天气, 造成了陕西省 5 月 5 日 8 个城市  $PM_{2.5}$  污染浓度剧增。

**关键词:**  $PM_{2.5}$ ; 时空特征; 小波分析; 突变

**中图分类号:** X51 **文献标识码:** A **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2020.48.073

随着 2012 年《国家环境空气质量标准》(GB3095-2012) 的发布,  $PM_{2.5}$  在大气环境研究领域的重要性逐渐得到更广泛的关注和重视<sup>[1-4]</sup>。 $PM_{2.5}$  又称细颗粒物(粒径  $\leq 2.5 \mu m$ ), 是雾霾的主要组分, 受自然源和人为源共同作用, 主导源依当地自然、经济条件以及所处季节而变化<sup>[5-7]</sup>。研究表明, 各城市  $PM_{2.5}$  均呈现明显的季节变化、周变化及日变化规律<sup>[8-9]</sup>。其浓度变化又是一个非线性的动力系统, 采用传统的统计方法难以进行深入研究, 而小波分析法对  $PM_{2.5}$  的时间序列、时频性等方面能展开很好的研究<sup>[10-11]</sup>。当前我国对于  $PM_{2.5}$  的相关研究多集中于中部和东部经济发达地区以及西安、兰州、成都、银川等西部重点城市<sup>[12-17]</sup>, 对于西部经济欠发达地区的  $PM_{2.5}$  污染相关研究相对薄弱。

陕西省位处我国西北, 境内地形复杂多变, 秦岭以北为黄河水系, 以南则为长江水系, 秦岭山系以及渭河流域将陕西省分割为陕北地区(榆林市, 延安市)、关中地区(宝鸡市, 咸阳市, 西安市, 铜川

市, 渭南市) 和陕南地区(商洛市, 安康市, 汉中市)。目前陕西省  $PM_{2.5}$  污染相关研究以关中地区为主导<sup>[18-19]</sup>, 陕北次之, 陕南最少, 研究多为  $PM_{2.5}$  组分构成和源解析<sup>[20-22]</sup>, 少有文献以省域为尺度研究各市  $PM_{2.5}$  时空变化规律。

本文以省际为研究尺度, 基于陕西省 10 市 2016 年冬季和 2017 年春季  $PM_{2.5}$  质量浓度逐小时监测数据, 采用 ArcGIS、Matlab2014 软件, 再结合小波系数实部图和小波方差分析图, 对陕西省冬春季  $PM_{2.5}$  空间分布差异和时间变化特征进行研究, 并对原因做出讨论, 以期对陕西省各市  $PM_{2.5}$  污染空间协同治理提供一定的参考依据。

## 1 数据来源与方法

### 1.1 数据来源

本文原始数据来源于陕西省环境保护厅 (<http://113.140.66.226:8111/>), 陕西省 10 市  $PM_{2.5}$  逐小时监测数据自 2016 年 12 月至 2017 年 5 月, 各市有效数据天数均为 182 d。

**收稿日期:** 2019-11-08; **改回日期:** 2020-03-01

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41771048); 陕西省科技厅计划项目(2015JQ4114); 宝鸡市科技计划项目(2018JH-15); 陕西省重点学科自然地理学联合资助。

**第一作者简介:** 易文利(1975-), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为环境污染物分析与评价。E-mail: ywl7585@126.com.

## 1.2 方法

以《国家环境空气质量标准》(GB3095-2012)和《环境空气质量评价技术规范》(HJ663-2013)为技术指导,利用软件 ArcGIS 完成  $PM_{2.5}$  冬春季平均浓度空间分布图,采用 Matlab2014 软件实现 10 市冬春季  $PM_{2.5}$  小波系数实部图和小波方差分析,研究各市  $PM_{2.5}$  周期波动规律异同,对存在的突变点进行讨论分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 全省 $PM_{2.5}$ 污染特征比较

依据国家  $PM_{2.5}$  污染程度分级标准(表 1),计算 182 d 内 10 市不同污染程度天数占比,将统计结果绘制成图 1。从图 1 可以发现,陕北和陕南城市的污染程度明显轻于关中城市,陕北城市和陕南城市的优良天数占比均超过 60%,榆林市和商洛市高达 80%以上,安康市和延安市污染等级结构相近,在 5 个城市中仅汉中市存在了一定天数的重度污染,其余城市  $PM_{2.5}$  单日最高浓度未超出  $150 \mu g/m^3$ 。在 5 个关中城市中,铜川市污染程度相对偏轻,严重污染天数最少,其次为宝鸡市,咸阳市、西安市、渭南市污染等级分布结构高度一致,优良和轻度污染占比接近,仅在中度污染占比有较小差异,重度污染和严重污染总占比均超过了 20%,其中以西安市污染情况最为严重,可能与关中地区工业结构、城市地形、局部气象要素趋同有关。

表 1  $PM_{2.5}$  浓度分级标准

Table 1  $PM_{2.5}$  concentration classification standard

等级	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染
浓度/ $(\mu g/m^3)$	0~35	35~75	75~115	115~150	150~250	250~500

### 2.2 全省 $PM_{2.5}$ 污染空间变化和时间变化分析

#### 2.2.1 全省 $PM_{2.5}$ 污染空间变化分析

取 2016 年 12 月 1 日至 2017 年 2 月 28 日  $PM_{2.5}$  平均值代表 2016 年冬季值,取 2017 年 3 月 1 日~2017 年 5 月 31 日  $PM_{2.5}$  平均值代表 17 年春季值,利用 ArcGIS 软件对冬春季平均值空间分析,图 2 反应了陕西省冬春季  $PM_{2.5}$  浓度空间分布情况。可以看出,2016 年冬季  $PM_{2.5}$  污染最重,以咸阳市、西安市、渭南市污染最为突出,2017 年春季各市  $PM_{2.5}$  污染情况明显转好,未出现污染浓度超过  $80 \mu g/m^3$  的城市。在 2016 年冬季和 2017 年春季,均以关中城市  $PM_{2.5}$  污染严重于同期陕北和陕南城

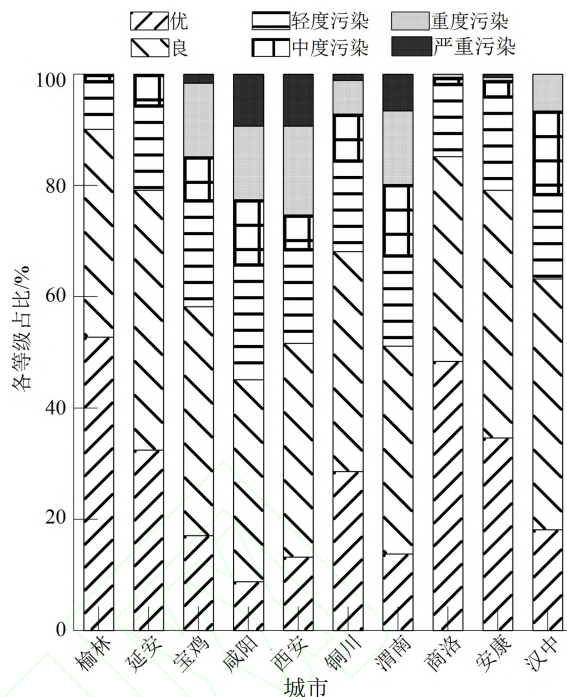


图 1 陕西省  $PM_{2.5}$  污染分级图

Fig. 1  $PM_{2.5}$  pollution classification map of Shaanxi province

市,汉中市与宝鸡市同步变化,就空间变化格局来看,陕南地区和陕北地区污染程度接近且以关中地区为轴线对称。分析认为,冬季秦岭以南地区不集中供暖,且城市化水平较低, $PM_{2.5}$  污染人为源作用不突出,陕北地区工业化和城市化水平较关中地区低,冬季受北方寒冷气团影响强烈,供暖造成的  $PM_{2.5}$  污染影响能有效削弱,关中地区工业密集城市发达,冬季近地面风速小且多变,河谷地形不利于污染物扩散,逆温、低温、少风等不利的气象条件将供暖的负面影响进一步增强<sup>[23-24]</sup>, $PM_{2.5}$  易长期累积,故冬季关中地区污染最重。春季集中供暖停止,天气转暖,植被覆盖增强,大气运动逐渐活跃,温度、风速、相对湿度等气象条件利于大气污染物扩散,关中城市  $PM_{2.5}$  浓度出现大幅度的降低,与其它城市的  $PM_{2.5}$  浓度差距逐渐缩小。

$PM_{2.5}$  一次颗粒物主要来源于燃煤、生物质燃烧等燃料燃烧源和钢铁冶金、石油化工、火力发电等工业源<sup>[25-26]</sup>,表 2 为 2017 年度陕西省 10 市主要经济指标,数据来源于陕西省统计局公布的各市国民经济和社会发展统计公报(<http://www.shaanxitj.gov.cn/>)。由表 3 可知,关中城市工业发展最好,其次是以能源开发为主导的陕北城市,陕南城市工业发展最弱,就工业实力而论,关中城市工业最发达, $PM_{2.5}$  污染最重。冬季陕北和关中集中供暖,大量

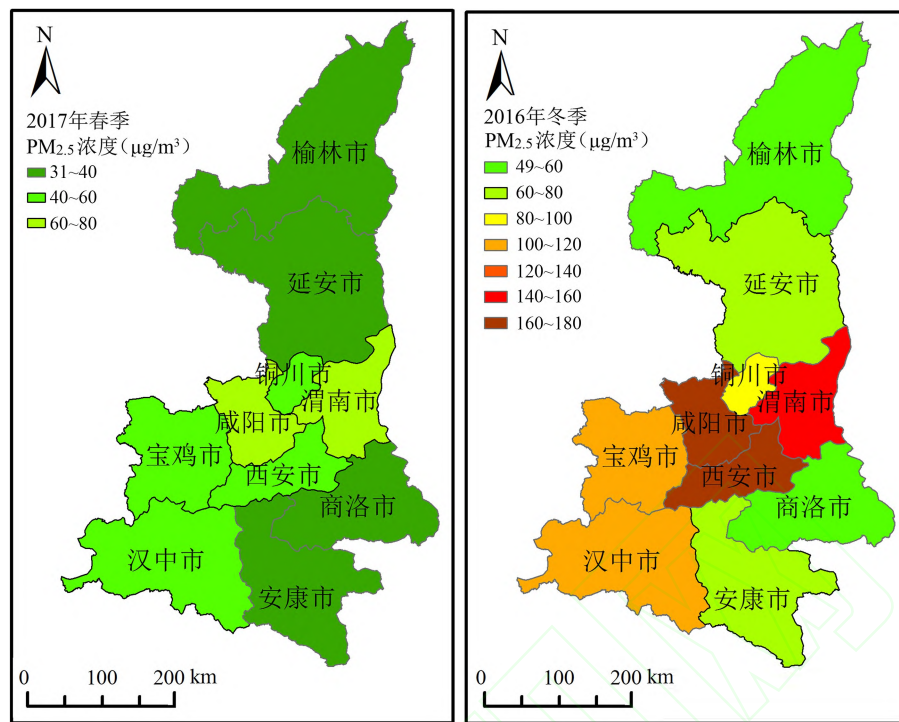
图 2 PM<sub>2.5</sub> 污染空间分布图Fig. 2 Spatial distribution of PM<sub>2.5</sub>

表 2 2017 年陕西省经济发展统计

Table 2 Economic development statistics of Shaanxi in 2017

城市	榆林市	延安市	宝鸡市	咸阳市	西安市	铜川市	渭南市	商洛市	安康市	汉中市
全年生产总值(亿元)	3 318	1 266	2 180	2 341	7 470	349	1 657	801	975	1 333
第一产业增加值(亿元)	168	120	175	312	281	25	231	98	105	210
第二产业增加值(亿元)	2 086	712	1 405	1 370	2 596	180	778	442	530	618
第三产业增加值(亿元)	1 065	434	600	659	4 593	144	648	260	340	505
人均 GDP(元)	97 811	56 086	57 697	53 546	78 346	41 484	30 808	33 695	36 662	38 671

煤炭燃烧造成 PM<sub>2.5</sub> 污染加剧,同时期陕南城市未受集中供暖影响。交通道路扬尘、机动车尾气排放、工地扬尘等在一定程度上会造成城市 PM<sub>2.5</sub> 浓度升高,此类条件多受到当地城市发展规模和经济现状影响,以西安为代表的关中城市受此类影响最重,其次为陕北城市、陕南城市。与图 2 比较发现,陕西省城市发展规模和经济结构南北差异与陕西省 PM<sub>2.5</sub> 污染空间分布特征一致,陕西省经济发展差异和供暖差异是造成陕西省冬春季 PM<sub>2.5</sub> 污染空间分布规律的主要因素。

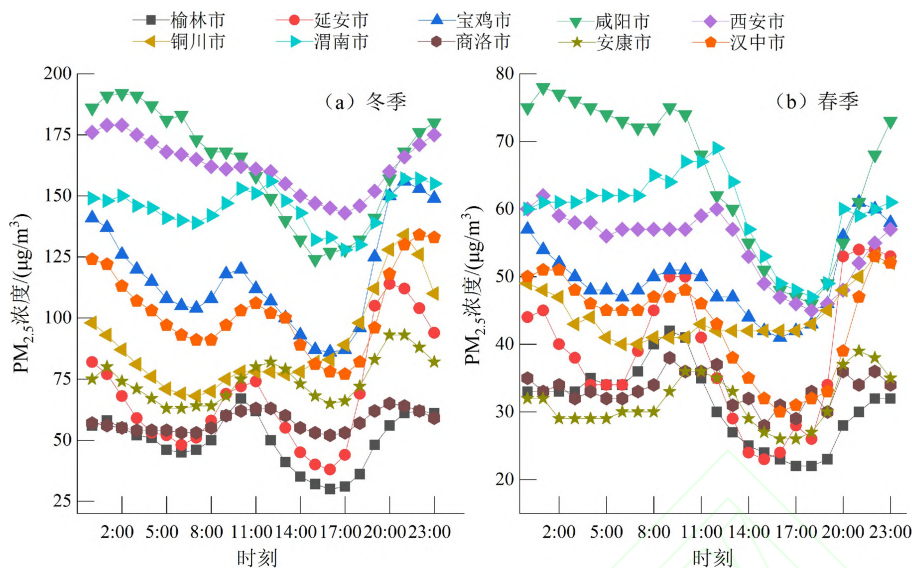
### 2.2.2 全省 PM<sub>2.5</sub> 污染逐小时变化分析

图 3 表示陕西省冬季和春季 PM<sub>2.5</sub> 浓度逐小时变化规律。冬季西安市和咸阳市 PM<sub>2.5</sub> 浓度表现为“单峰单谷型”变化趋势,其他 8 个城市变化趋势均为“双峰双谷型”,春季陕西省所有城市都为“双峰

双谷型”变化趋势。PM<sub>2.5</sub> 浓度自早上 7:00 开始快速上升,第 1 次 PM<sub>2.5</sub> 浓度峰值出现在 9:00~10:00,此时段对应居民出行“早高峰”,大气颗粒物浓度受人类活动影响大,中午大气颗粒物受气温回升和大气活动增强的影响,PM<sub>2.5</sub> 浓度出现大幅度的降低,在 16:00~18:00 降至当天最低值,之后气温回落、相对湿度增大以及“晚高峰”的出现,PM<sub>2.5</sub> 浓度又开始迅速攀升,污染较轻的城市在 21:00~22:00 处达到当日第 2 次峰值后开始缓慢降低,少数污染极重的城市在次日凌晨 1:00~2:00 达到当天峰值。总体来看,PM<sub>2.5</sub> 浓度单日变化规律受天气因子日变化规律主导,与单日人类活动规律密切相关。

对比冬季秦岭南北城市各自 PM<sub>2.5</sub> 浓度逐小时曲线,发现陕南城市与秦岭北部城市 PM<sub>2.5</sub> 浓度变



图3  $PM_{2.5}$  浓度逐小时变化图Fig. 3 Hourly changes of  $PM_{2.5}$ 

化曲线存在极高的一致性,说明冬季集中供暖只能加剧  $PM_{2.5}$  污染程度,对城市日  $PM_{2.5}$  浓度变化趋势无显著影响。对比冬季和春季  $PM_{2.5}$  浓度逐小时曲线发现,冬季  $PM_{2.5}$  浓度在 1 天内的变动幅度大于春季,以宝鸡市为例,其冬季日变化区间为  $86 \sim 156 \mu g/m^3$ ,春季为  $41 \sim 61 \mu g/m^3$ ,这是由于冬季污染源排放大和天气条件不易污染物扩散造成的,春季随着太阳直射点北移,太阳辐射增强使得气温迅速回升,大气运动活跃,大气颗粒物无法长时间累积,而且集中供暖于 3 月中旬停止,污染源减少,因此春季  $PM_{2.5}$  单日浓度波动小于冬季。冬季单日  $PM_{2.5}$  浓度谷值出现在 16:00,春季单日  $PM_{2.5}$  浓度谷值比冬季晚 2 h,出现在 18:00,猜测与冬季日照时数短有关。

### 2.3 基于小波分析 $PM_{2.5}$ 时间变化规律分析

小波分析手段近几年被逐渐引入到  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  长时间尺度变化规律分析,在大气颗粒物变化周期分析和突变点检验方面效果突出<sup>[27-28]</sup>,常用的为 Morlet 小波和 Daubechies 小波(db 小波)。本文基于 Morlet 小波函数对 182 d  $PM_{2.5}$  日均数据进行小波变换,得到陕西省 10 市对应的小波系数实部图和小波方差图(图 4)。其中图 4 左部为小波变换系数实部图,反映  $PM_{2.5}$  时间序列不同时间尺度的周期性变化及分布,横轴为时间 d,纵坐标表示时间尺度,图中小波系数越大表示大气颗粒物的污染浓度越高,反之越低,小波系数实部值为 0 表示  $PM_{2.5}$  值在偏大和偏小值之间转换的突变点<sup>[10]</sup>。由图 4 可

见,发现陕北城市、关中城市、陕南城市  $PM_{2.5}$  日变化周期存在较大差异。榆林市和延安市在时间尺度约为 10 d、20 d、40 d 和 80 d 时周期变化较为明显。其中在时间尺度约为 10 d 时,  $PM_{2.5}$  浓度值变化周期较小,浓度值大小高低交替较多,但主要体现在冬季时间段(2016 年 12 月~2017 年 2 月);在时间尺度约为 20 d 和 40 d 时,周期变化明显较为稳定,高低交替具有全域性;在时间尺度约为 80 d 时,等值线存在未闭合部分,故不考虑。小波方差图(图 4 右部)能反映时间序列中所包含的各种尺度的波动及其强弱,对应峰值处的尺度称为该序列的主要时间尺度,用以反映时间序列的主要周期<sup>[29-30]</sup>,纵坐标最高点所对应的时间尺度为第 1 主周期,其余类推。由图 4 右部可知,在陕北地区,延安市和榆林市均以 40 d 为第 1 主周期,波动能量最大,周期性振荡强,其次出现了 10 d 和 20 d 两个较弱的周期,从对应的小波系数实部图可以看出 10 d 周期多集中在冬季,猜测与短时间天气变化有关。

在关中地区,宝鸡市和铜川市变化周期整体基本一致,  $PM_{2.5}$  振荡周期主要集中在 10~20 d、35~45 d、60~70 d 的 3 个区域。其中在低尺度下(时间尺度为 10~20 d),  $PM_{2.5}$  浓度值变化周期较小,浓度值大小交替较多,也主要体现在冬季时间段。而在 35~45 d 和 60~70 d 的时间尺度时,  $PM_{2.5}$  浓度整体变化周期性强,高低交替具有全域性。小波方差图显示宝鸡市和铜川市第 1 主周期和第 2 周期分别为 40 d 与 65 d,宝鸡市在短时间尺度上仅存在 10 d 周

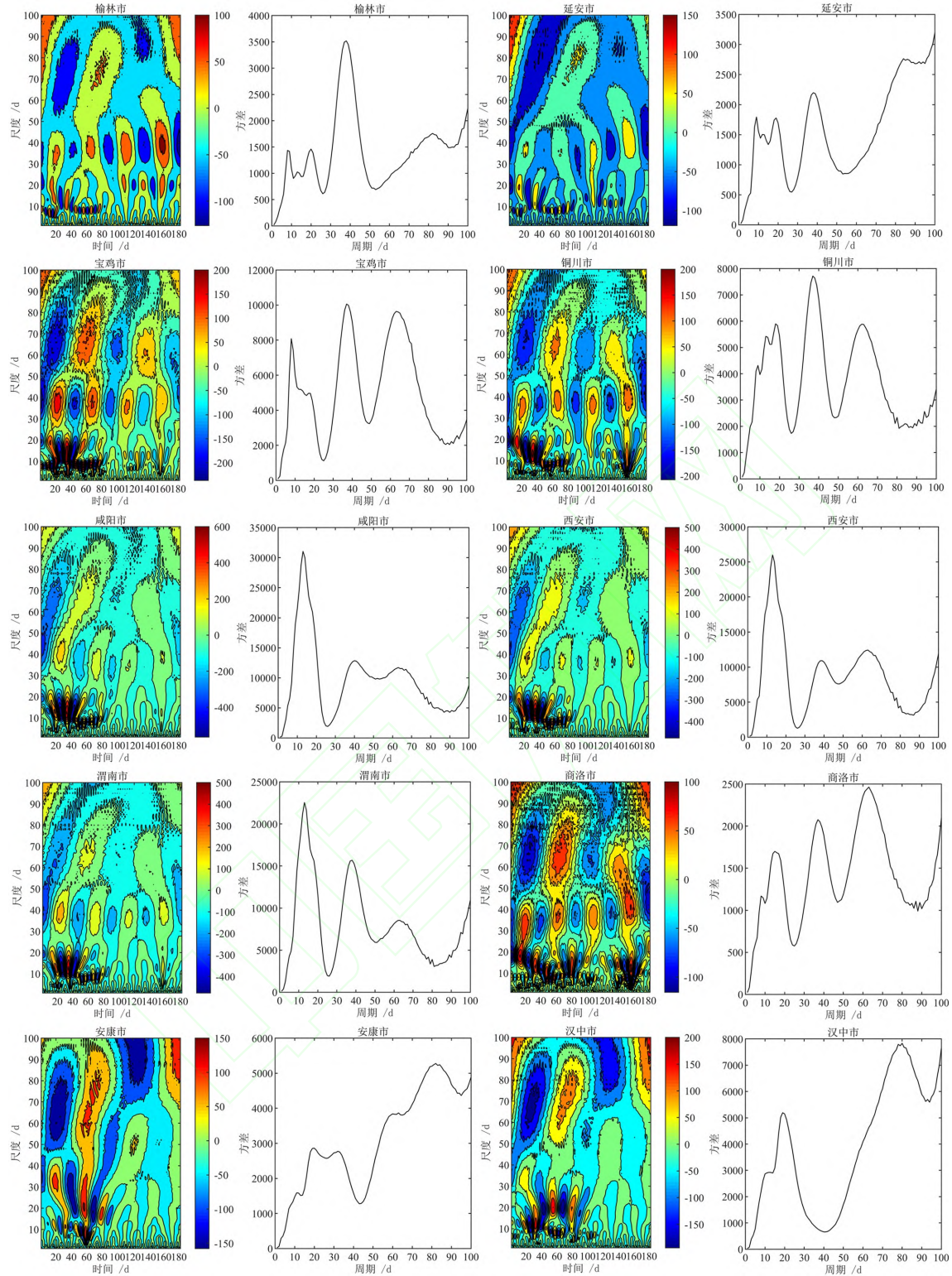


图4 小波系数实部图和小波方差图

Fig. 4 Real part of wavelet coefficient and wavelet variance

期,铜川市在10~20 d区间存在10 d、15 d、20 d三个周期,短时间周期多出现在冬季,认为关中冬季短时间天气扰动及供暖有关。 $PM_{2.5}$ 污染最严重的咸阳市、西安市、渭南市小波系数实部图变化周期

整体基本一致, $PM_{2.5}$ 存在3个振荡周期,主要集中在约10~20 d、40 d、60~70 d。在低时间尺度下10~20 d,前期(2016年12月~2017年2月)等值线及颜色变化规律明显,周期性强,但后期不强。根



据  $PM_{2.5}$  浓度时间序列波动能量大小可知这三个城市在时间尺度为 15 d 时,周期振荡最强,为第 1 主周期;渭南市和咸阳市第 2、3 周期同为 40 d 和 65 d,西安市第 2、3 周期分别为 65 d、40 d。

在陕南地区,安康市和汉中市存在有 10~20 d、70~90 d 两个明显振荡周期,小波方差分析安康市和汉中市仅有 20 d 和 80 d 两个明显周期,且在 80 d 前后的周期振荡最强,具有全域性,为第 1 主周期。商洛市周期规律与关中城市接近,第 1 主周期到第 4 周期依次为 65 d、40 d、15 d、10 d。由小波系数实部图可以看出,时间尺度越小, $PM_{2.5}$  浓度变化周期越短,大小交替循环越频繁,但具有局部性(80 d 前,即冬季时间段)。同时经对比发现,40 d 为秦岭北部城市的共同周期,考虑到陕南多数城市没有 40 d 周期,故猜测 40 d 周期与局地大气环流和城市冬季是否集中供暖有关。

为方便观察城市间  $PM_{2.5}$  浓度变化密切程度,计算陕西省 10 市冬春季逐日  $PM_{2.5}$  数据 Pearson 相关系数,结果汇成表 3,结果说明陕西省 10 市  $PM_{2.5}$  两两之间均在 0.01 置信度水平上保持较好的相关性。与图 2、4 对比验证发现,同一地形区的城市两两之间相关性最强, $PM_{2.5}$  污染程度最高的城市两两之间相关性最强, $PM_{2.5}$  变化周期基本一致的城市两两之间相关性最强。在陕北地区、关中地区、陕南地区中,各地区内部城市两两相关性高于临近地区城市的相关性,两城市地理距离越远相关性越低,表现为一定的距离衰减性,即陕北榆林市与同处陕北的延安市 Pearson 相关系数高达 0.826,与关中 5 市维持在 0.6~0.7,与陕南 3 市降至 0.5 以下。 $PM_{2.5}$  污染最严重的咸阳市、西安市、渭南市两两相关性高至 0.96 以上,却与污染程度较轻的宝鸡市和

铜川市相关性有所降低,认为污染严重程度是影响城市间相关性强弱的重要因素之一。安康市和汉中市  $PM_{2.5}$  变化周期同为 20 d 和 80 d, Pearson 相关系数达到 0.819,商洛市周期异于两市,安康市和汉中市与其相关系数为 0.615、0.607,说明 Pearson 相关系数与小波方差有较好的对应关系。

研究发现陕南城市与关中城市、陕北城市间相关系数均不高,陕南城市与关中城市相关性低于陕北城市与关中城市,且陕南各城市间相关性低于关中和陕北,分析认为,秦岭山脉将陕北和关中与陕南分割,造成了各地区间地形地貌的极大差异,关中地区和陕北地区同属黄土高原区,区内自然环境与局部气象条件相近,冬季均受到集中供暖的影响,故相关系数高,陕南属于山地地形,城市间有山脉和水系阻隔,且未受到如集中供暖此类的长时间同一活动影响,故陕南城市之间  $PM_{2.5}$  污染相关性低。

## 2.4 $PM_{2.5}$ 浓度时间序列突变点分析

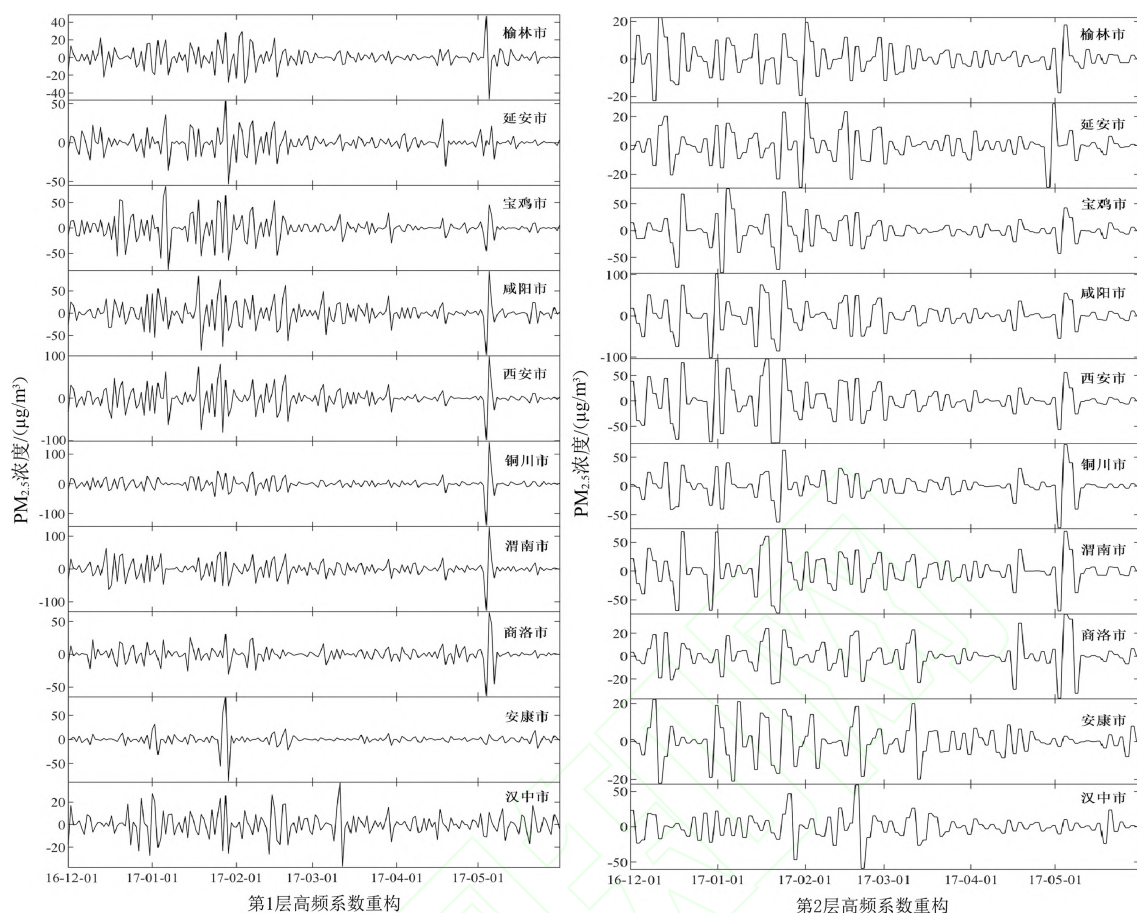
为了检测出高分辨率  $PM_{2.5}$  浓度时间序列的突变部分,选用具有较强的正则性的 db 小波进行分析。有研究通过 db 系列小波对较长时间尺度的  $PM_{2.5}$  连数据多层分解发现, $PM_{2.5}$  连续时间的突变特征能有效反映其污染较重的状态点<sup>[10,31-32]</sup>。本文采用有较好正则性的 db1 小波对陕西省冬春季  $PM_{2.5}$  逐日数据做 3 层分解,所得第一层和第二层高频系数的重构信号曲线见图 5。图中高频系数重构震幅较强的点则代表  $PM_{2.5}$  浓度突变点。由第 1 层和第 2 层高频系数重构可以发现震幅较强的点多出现在冬季,即冬季多发生  $PM_{2.5}$  浓度突变现象,春季  $PM_{2.5}$  浓度变化平稳,发生突变事件频率低。冬季陕西省不同地形区城市  $PM_{2.5}$  浓度突变次数和发

表 3  $PM_{2.5}$  Pearson 相关系数

Table 3 Correlation coefficient of  $PM_{2.5}$

城市	榆林市	延安市	宝鸡市	咸阳市	西安市	铜川市	渭南市	商洛市	安康市	汉中市
榆林市	1									
延安市	0.826 **	1								
宝鸡市	0.728 **	0.825 **	1							
咸阳市	0.638 **	0.731 **	0.853 **	1						
西安市	0.668 **	0.764 **	0.903 **	0.975 **	1					
铜川市	0.646 **	0.744 **	0.848 **	0.853 **	0.873 **	1				
渭南市	0.630 **	0.721 **	0.853 **	0.967 **	0.967 **	0.890 **	1			
商洛市	0.477 **	0.611 **	0.710 **	0.657 **	0.702 **	0.817 **	0.725 **	1		
安康市	0.408 **	0.527 **	0.575 **	0.567 **	0.595 **	0.507 **	0.593 **	0.615 **	1	
汉中市	0.491 **	0.590 **	0.661 **	0.689 **	0.732 **	0.579 **	0.696 **	0.607 **	0.819 **	1

注:\*\*表示在 0.01 置信度水平上显著相关

图5 陕西省 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度突变图Fig. 5 Mutation of PM<sub>2.5</sub> mass concentration in Shaanxi

生时间存在差异。冬季榆林市和延安市高频系数震荡规律基本一致,存在4次 PM<sub>2.5</sub> (12月12日、1月25日、2月2日、2月15日) 浓度突变,冬季关中5个城市发生了4次突变事件,分别为12月20日、1月1日、1月16日、1月25日,安康市和汉中市1月27日出现1次突变事件(正值年三十), PM<sub>2.5</sub> 浓度分别骤升至 245 μg/m<sup>3</sup>、173 μg/m<sup>3</sup>,大量烟花爆竹燃放是春节期间颗粒物浓度骤升的主要因素,商洛市未出现突变事件。春季安康市和汉中市没有突变事件发生,剩余8个城市均在5月5日发生 PM<sub>2.5</sub> 浓度骤升,铜川市当日 PM<sub>2.5</sub> 浓度高达 322 μg/m<sup>3</sup>。结合历史气象资料发现,2017年5月3~6日我国北方地区遭遇了强沙尘天气,其自西向东逐渐影响我国西北以及华北地区,覆盖内蒙古、甘肃、宁夏、陕西、北京、天津在内的10余个省市(自治区、直辖市),5月5日进入陕西境内,引起陕北地区和关中地区浮尘、扬尘迅速增加,造成了此次陕西省秦岭北部 PM<sub>2.5</sub> 浓度骤升,陕南地区由于秦岭山系的阻隔作用,受此次沙尘天气影响较小。

结合图4发现,秦岭北部城市冬季 PM<sub>2.5</sub> 浓度突变点的日期间隔与10~20 d的小波周期一致,说明多层高频系数重构的突变点时间间隔能较好的反映 PM<sub>2.5</sub> 时间周期。

### 3 结论

1) 陕西省10个城市冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染最重,春季 PM<sub>2.5</sub> 污染减轻,冬春季均表现出关中地区 PM<sub>2.5</sub> 污染最重,陕北、陕南次之的空间分布特征。冬季和春季单日 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化趋势基本一致,天气日变化规律主导 PM<sub>2.5</sub> 浓度日变化趋势,冬季 PM<sub>2.5</sub> 浓度日最低值出现在16:00,春季最低值出现在18:00,日照时数和辐射强度是潜在的影响因素。

2) 经小波分析 PM<sub>2.5</sub> 浓度时间变化特征发现,陕北城市均以40 d为第1主周期,在关中地区中,宝鸡市和铜川市变化周期基本一致,第1主周期和第2周期分别为40 d与65 d,咸阳市、西安市、渭南市存在3个时间周期,第1主周期均为15 d,陕南城市安康市和汉中市第1主周期为80 d,商洛市第1

主周期为 65 d,城市间 Pearson 相关系数与小波方差有较好对应关系。

3)对陕西省 10 个城市  $PM_{2.5}$  时间序列突变点分析,冬季是陕西省各城市  $PM_{2.5}$  浓度变化最活跃的季节,陕北城市和关中城市 1 月与 2 月多发生  $PM_{2.5}$  浓度突变事件,2017 年 5 月 3~6 日我国北方

地区强沙尘天气是造成 5 月 5 日陕西省  $PM_{2.5}$  浓度骤升的原因。

综上所述,陕西省大气颗粒物防治应以关中地区为主,同时兼顾陕北地区和陕南地区,冬季是全年防治的重点时段,大气颗粒物浓度受气象条件控制,应加强源头减污工作。

## 参 考 文 献

- [1] 刘帅,宋国君.城市  $PM_{2.5}$  健康损害评估研究[J].环境科学学报,2016,36(4):1468-1476.
- [2] 姬露露,陈长坤,王楠楠.我国六大中心城市  $PM_{2.5}$  污染特征及诱因对比分析[J].灾害学,2014,29(4):230-234.
- [3] 傅崇辉,王文军,汤健,等. $PM_{2.5}$  健康风险的空间人口分布研究—以深圳为例[J].中国软科学,2014,9:78-91.
- [4] 姚青,韩素芹,蔡子颖.天津采暖期大气  $PM_{2.5}$  中重金属元素污染及其生态风险评价[J].中国环境科学,2013,33(9):1596-1600.
- [5] 杨妍妍,李金香,梁云平,等.应用受体模型(CMB)对北京市大气  $PM_{2.5}$  来源的解析研究[J].环境科学学报,2015,35(9):2693-2700.
- [6] 郭建超,齐实,申云康,等.2 种城市林地  $PM_{2.5}$  质量浓度变化及其与气象因子的关系[J].水土保持学报,2014,28(6):88-93+100.
- [7] 高月,孙荣国,陈卓,等.南京市大气  $PM_{2.5}$  时空分布特征与潜在源区贡献分析[J].地球与环境,2019,47(3):268-274.
- [8] Wang S, Li G G, Gong Z Y, et al. Spatial distribution, seasonal variation and regionalization of  $PM_{2.5}$  concentrations in China [J]. Science China Chemistry, 2015, 58(9): 1435-1443.
- [9] Zhao S P, Yu Y, Yin D Y, et al. Annual and diurnal variations of gaseous and particulate pollutants in 31 provincial capital cities based on in situ air quality monitoring data from China national environmental monitoring center [J]. Environmental International, 2016, 86: 92-106.
- [10] 孙春媛,李令军,赵文吉,等.基于小波变换的北京市  $PM_{2.5}$  时空分布特征及成因分析[J].生态环境学报,2016,25(8):1343-1350.
- [11] Hermida L, LÓPEZ L, Merino A, et al. Hailfall in southwest france: relationship with precipitation, trends and wavelet analysis [J]. Atmospheric Research, 2015, 156: 174-188.
- [12] 段文娇,郎建垒,程水源,等.京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对  $PM_{2.5}$  影响[J].环境科学,2018,39(4):1445-1454.
- [13] 程念亮,孟凡,王继康,等.2010 年中国东部  $PM_{2.5}$  空间分布及沉降模拟研究[J].安全与环境学报,2015,15(6):305-310.
- [14] 孙荣国,范丽,冯新斌,等.2016 年宁夏回族自治区  $PM_{2.5}$  浓度时空分布特征[J].地球与环境,2018,46(4):348-354.
- [15] 王新,聂燕,陈红,等.兰州城区大气  $PM_{2.5}$  污染特征及来源解析[J].环境科学,2016,37(5):1619-1628.
- [16] 齐梦溪,赵文慧,孙爽,等.2014~2016 年北京市  $PM_{2.5}$  污染时空分布特征[J].生态环境学报,2019,28(1):97-105.
- [17] 曹宁,黄学敏,祝颖,等.西安冬季重污染过程  $PM_{2.5}$  理化特征及来源解析[J].中国环境科学,2019,39(1):32-39.
- [18] 杨佳美,戴启立,刘保双,等.关中地区背景点位环境空气  $PM_{2.5}$  来源解析与多模型结果对比[J].环境科学研究,2017,30(2):184-192.
- [19] 田鹏山,曹军骥,韩永明,等.关中地区冬季  $PM_{2.5}$  中碳气溶胶的污染特征及来源解析[J].环境科学,2016,37(2):427-433.
- [20] 徐红梅,曹军骥,沈振兴,等.西安冬季不同空气质量级别对应的  $PM_{2.5}$  化学组分变化特征[J].科技导报,2015,33(6):31-36.
- [21] 郭瑞英,沈振兴,任文祥,等.陕西省榆林市冬季  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的污染特征[J].中国粉体技术,2015,21(3):84-88.
- [22] 朱崇抒,曹军骥,刘随心,等.陕南农村冬季  $PM_{2.5}$  主要化学组分特征[J].地球环境学报,2016,7(5):494-500.
- [23] 孟媛媛,符超峰,席建建,等.渭南市冬春季  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  时间分布特征及与气象因素的关系[J].地球环境学报,2018,9(2):182-192.
- [24] 高超群,秦媛,易秀.关中地区大气污染现状及特征分析[J].应用化工,2017,46(7):1394-1397.
- [25] 刘松华,周静,谭译,等.苏州市大气细颗粒物( $PM_{2.5}$ )工业源排放清单[J].环境科学学报,2017,37(2):453-459.
- [26] 陈璐,周阳,姚立英,等.天津市各区县  $PM_{2.5}$  污染工业行业贡献构成分析[J].中国环境科学,2015,35(1):33-39.
- [27] 王勇,刘备,刘严萍.基于小波变换的北京、上海等城市  $PM_{2.5}$  浓度时空演化特征分析[J].灾害学,2017,32(2):39-42.
- [28] 周杰,杨鹏,吕文生,等.小波方差分析北京市  $PM_{2.5}$  质量浓度序列周期特征[J].环境监测管理与技术,2016,28(6):19-22.
- [29] 王涛,孜比布拉·司马义,周玄德,等.基于小波变换的石河子市近 10 年空气污染指数变化[J].安徽农业科学,2014,42(32):11460-11463.
- [30] 刘源,徐国宾,段宇,等.洪泽湖入湖水沙序列的多时间尺度小波分析[J].水利水电技术,2020,51(2):128-135.
- [31] 马跃先,孙明明,张杰,等.小波分析在郑州市供暖期  $PM_{2.5}$  浓度相关性分析中的应用[J].环境工程学报,2015,9(8):3960-3964.
- [32] 唐玉翔,黄平,钱新明,等.西安市  $PM_{2.5}$  污染的时空分布[J].安全与环境学报,2015,15(4):368-373.



## Spatio-temporal Distribution of PM<sub>2.5</sub> during Winter and Spring Seasons in Shaanxi Province

YI Wenli<sup>1</sup>, ZHU Chanyuan<sup>1</sup>, GUO Chan<sup>1</sup>, ZHENG Haohao<sup>1</sup>, YANG Fei<sup>1,2</sup>, LIU Yinge<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Disasters Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji Shaanxi 721013, China; 2. Xingjiang Fukang Industrial Park Management Committee, Changji Hui Autonomous Prefecture, Fukang Xinjiang 831500, China)

**Abstract:** Hourly data of PM<sub>2.5</sub> from December 2016 to May 2017 in Shaanxi province were employed to analyze its spatiotemporal characteristics by ArcGIS and to reveal the causes of difference in northern and southern Shaanxi, the time series and mutation characteristics of PM<sub>2.5</sub> by wavelet analysis. The results showed that: 1) The spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> concentration is higher in Guanzhong area in central province and lower in southern and northern province, the temporal distribution showed higher values in winter and lower in spring. The difference in economic development and the heating activities in different regions is the main reason for PM<sub>2.5</sub> spatial pattern; 2) The daily variation of PM<sub>2.5</sub> showed a bimodal pattern both in winter and spring, with the lowest value appeared between 16:00 to 18:00; 3) The results of Morlet wavelet analysis showed that the PM<sub>2.5</sub> daily average change sequence in Shaanxi has multi-time scale characteristic. The first main period of PM<sub>2.5</sub> pollution in northern Shaanxi is about 40 days, while there are two same periods of 40 days and 65 days for Guanzhong area and Shangluo city, and two same periods of 20 days and 80 days for Ankang city and Hanzhong city; 4) PM<sub>2.5</sub> mutation events were frequent in winter and less in spring, mostly occurred in January and February, and a large-scale dusty weather in spring has caused a sharp increase in PM<sub>2.5</sub> concentration in eight cities of the province on May 5th.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; spatial-temporal characteristics; wavelet analysis; mutation