

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. [WANG Yong, LIU Bei and LIU Yanping. Spatial and Temporal Evolution of  $PM_{2.5}$  Concentration in Beijing and Shanghai Based on Wavelet Transform[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2): 39-42. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.02.007.]

## 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\*

王勇<sup>1</sup>, 刘备<sup>1</sup>, 刘严萍<sup>2</sup>

(1. 天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384; 2. 天津城建大学 经济与管理学院, 天津 300384)

**摘要:** 选取北京、沈阳、上海、广州和成都5个城市近年来的  $PM_{2.5}$  浓度观测序列, 利用小波变换方法开展  $PM_{2.5}$  浓度时空演化特征分析。在对5个城市的  $PM_{2.5}$  浓度观测序列进行缺失值处理的基础上, 采用小波变换方法对  $PM_{2.5}$  浓度序列进行小波分解与重构, 并对重构后的  $PM_{2.5}$  浓度序列进行比较分析。 $PM_{2.5}$  浓度变化呈现明显的年变化特征, 在年以内的  $PM_{2.5}$  浓度变化中, 冬季  $PM_{2.5}$  浓度最高, 夏季  $PM_{2.5}$  浓度最低;  $PM_{2.5}$  浓度日变化为双峰型变化; 南方的  $PM_{2.5}$  浓度整体低于北方的  $PM_{2.5}$  浓度。

**关键词:** 小波变换;  $PM_{2.5}$  浓度; 时空演化; 北京; 上海; 沈阳; 广州; 成都

**中图分类号:** X43; P426.615; X51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)02-0039-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.02.007

伴随着社会经济发展、城市化进程的加快, 出现了越来越多的大气环境污染问题,  $PM_{2.5}$  已成为影响我国大气环境质量的主要污染物之一。根据全球  $PM_{2.5}$  浓度数据显示, 我国的环渤海、珠三角、长三角以及成渝地区是浓度最高的地区, 这些地区多次出现霾污染。目前国内外的雾霾研究工作主要有三个方面<sup>[1-3]</sup>: 根据历史的气象资料, 结合能见度数据对雾霾的年际变化进行分析; 基于卫星遥感监测数据的大气污染研究; 利用颗粒物和气态污染物观测数据分析城市污染物的浓度变化以及雾霾的形成机理。Salameh 等通过对欧洲5个地中海城市  $PM_{2.5}$  的监测, 发现  $PM_{2.5}$  浓度的变化具有明显的季节性<sup>[4]</sup>。我国城市的  $PM_{2.5}$  浓度普遍呈现出冬季高、夏季低的状态, 且  $PM_{2.5}$  浓度的日变化为双峰型(早晚上下班时段)<sup>[5-7]</sup>。

美国驻华使馆分别在2008年、2012年和2013年开始对北京、上海、广州、成都和沈阳等驻华使馆所在地开展了  $PM_{2.5}$  浓度监测, 本文收集了美国驻华使馆五地的  $PM_{2.5}$  历史观测数据。通过5个城市多年的  $PM_{2.5}$  浓度序列分析有助于探寻不同区域的  $PM_{2.5}$  浓度的时空演化特征。由于  $PM_{2.5}$  序列的波动比较大, 且存在着噪声的干扰, 只能依据经验大致判断其演变趋势, 无法深入分析演变过程

中的多尺度特性。小波变换具有多分辨率特性, 通过对  $PM_{2.5}$  序列多尺度细分可分析其演变的周期性和规律性。本文将采用小波变换方法对五个城市的  $PM_{2.5}$  浓度序列进行小波分解与重构, 并对重构后的  $PM_{2.5}$  浓度序列开展  $PM_{2.5}$  浓度时空演化特征分析。

### 1 研究方法和数据处理

#### 1.1 小波变换

小波变换具有多分辨率的特性。把某一基本小波的函数作位移  $\tau$ , 然后在不同尺度  $a$  下与分析信号  $f(t)$  作内积:

$$Wf(a, \tau) = \langle f(t), \Psi_{a, \tau}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi^* \left( \frac{t-\tau}{a} \right) dt. \quad (1)$$

式中:  $a$  称为尺度因子, 其作用是对基本小波  $\Psi_{a, \tau}(t)$  函数作伸缩,  $\tau$  反映位移。在不同尺度下小波的持续时间随值的加大而增宽, 幅值  $\sqrt{a}$  则与反比减少, 但波的形状保持不变。

经典小波函数主要有 Haar 小波、Daubechies 小波、Symlets 小波、Meyer 小波和 Mexican Hat 小波等, 这些小波在对称性、紧支性、消失矩、正

\* 收稿日期: 2016-10-14 修回日期: 2016-01-19

基金项目: 河北省自然科学基金(D2015209024)

第一作者简介: 王勇(1978-), 男, 江西宁都人, 博士, 教授, 主要从事 GPS 气象学研究. E-mail: wangyongjz@126.com

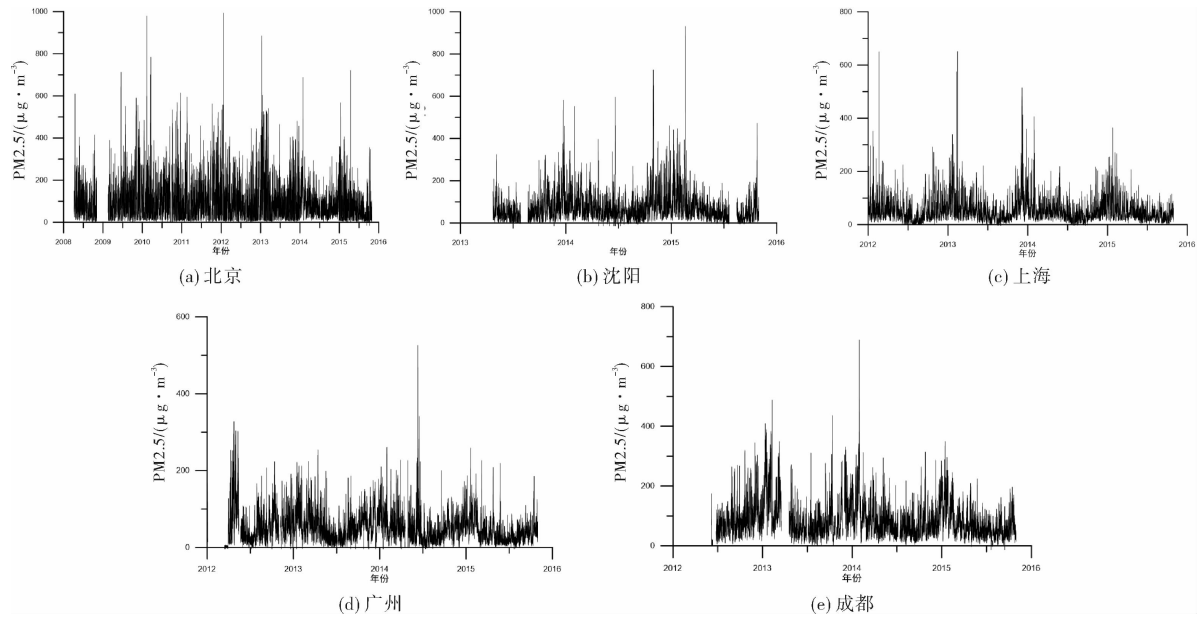


图1 北京、沈阳、上海、广州和成都五站的  $PM_{2.5}$  浓度序列

则性等方面均具有不同的特点。在选择小波基的时候要根据信号特征和实际应用效果进行选择。考虑到要对  $PM_{2.5}$  浓度序列进行多尺度分析、信号重构, 本文选择紧支撑标准正交小波 DbN 小波系。DbN 系列小波随着阶次增加, 消失矩阶数增加, 频带划分的效果更好, 但会使时域紧支撑性减弱, 同时计算量大大增加, 实时性变差<sup>[8]</sup>。

### 1.2 研究资料

$PM_{2.5}$  浓度序列为小时观测, 5 个观测站点的数据时间分别为: 北京(2008 年 04 月 09 日 - 2015 年 10 月 31 日)、沈阳(2013 年 04 月 24 日 - 2015 年 10 月 31 日)、上海(2012 年 01 月 01 日 - 2015 年 10 月 31 日)、广州(2012 年 01 月 01 日 - 2015 年 10 月 31 日)、成都(2012 年 06 月 06 日 - 2015 年 10 月 31 日)。

$PM_{2.5}$  浓度序列有部分时段数据缺失(如图 1 所示), 本文利用 SPSS 软件对缺失部分的数据进行缺失值处理, 使得  $PM_{2.5}$  数据保持完整性。由于  $PM_{2.5}$  原始数据具有噪声干扰, 对  $PM_{2.5}$  的变化趋势和特征很难准确分析判断, 本文利用小波变换方法对  $PM_{2.5}$  序列进行小波分解与重构, 并对重构结果开展相关分析。

### 1.3 小波基函数与小波分解层数的确定

通过小波变换对 5 个城市的  $PM_{2.5}$  浓度序列进行分解, 得到不同时间尺度上的小波系数, 这些小波系数可用来描述  $PM_{2.5}$  浓度的多尺度结构和变化特征。另外  $PM_{2.5}$  浓度序列经小波分解后得到低频系数和高频系数, 其中低频系数主要由确定性成分构成, 反映了  $PM_{2.5}$  演变的主要特征, 如演变趋势和周期; 高频部分是由各种干扰噪声、异常突变随机波动构成, 反映了  $PM_{2.5}$  的突变和扰动等。

为了减少各种高频噪声对  $PM_{2.5}$  浓度序列的干扰, 更好的反映出  $PM_{2.5}$  的演变趋势和变化规律, 需要在分解后选择合适的级数进行重构。

实验过程如下: 通过这 5 个城市的  $PM_{2.5}$  浓度序列小波分解与重构, 对比各小波基分解后各层的  $PM_{2.5}$  浓度序列, 寻找对应关系最好的层数。经过试验比较, 综合考虑算法的分析效果和计算效率, 最终选定 Db10 小波来进行  $PM_{2.5}$  浓度序列的分解与重构。经实验, 第 13 层低频数据能够很好的反映  $PM_{2.5}$  浓度序列的变化趋势, 小波分解层数设定为 13。

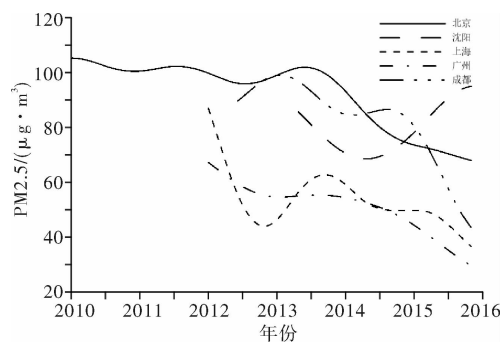
## 2 结果与分析

### 2.1 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势

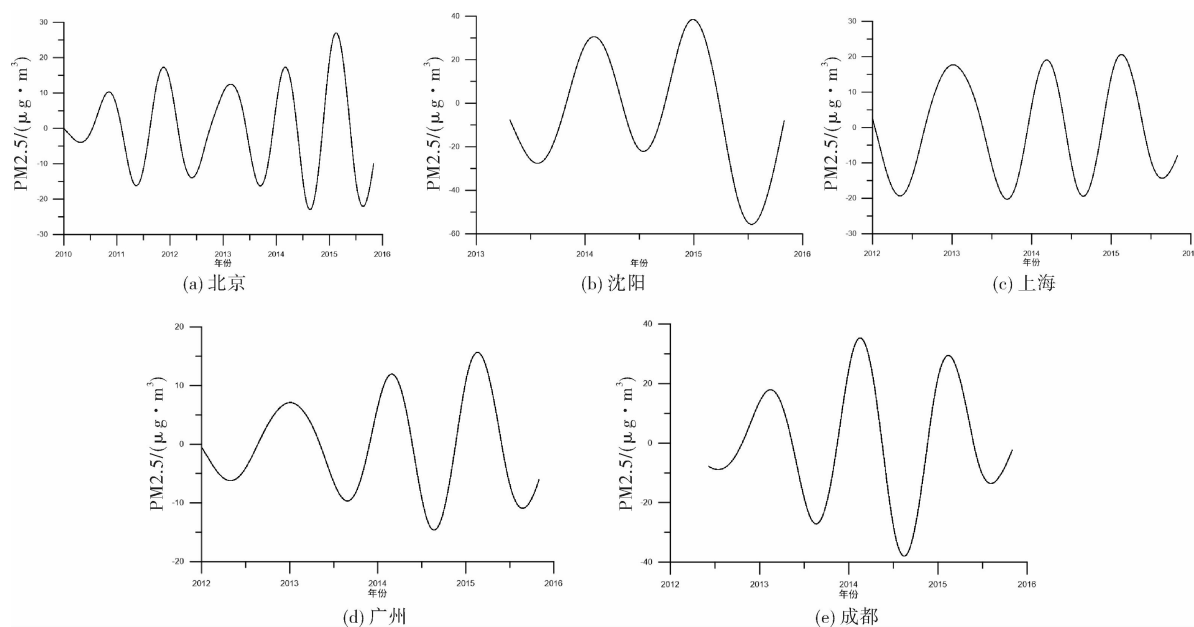
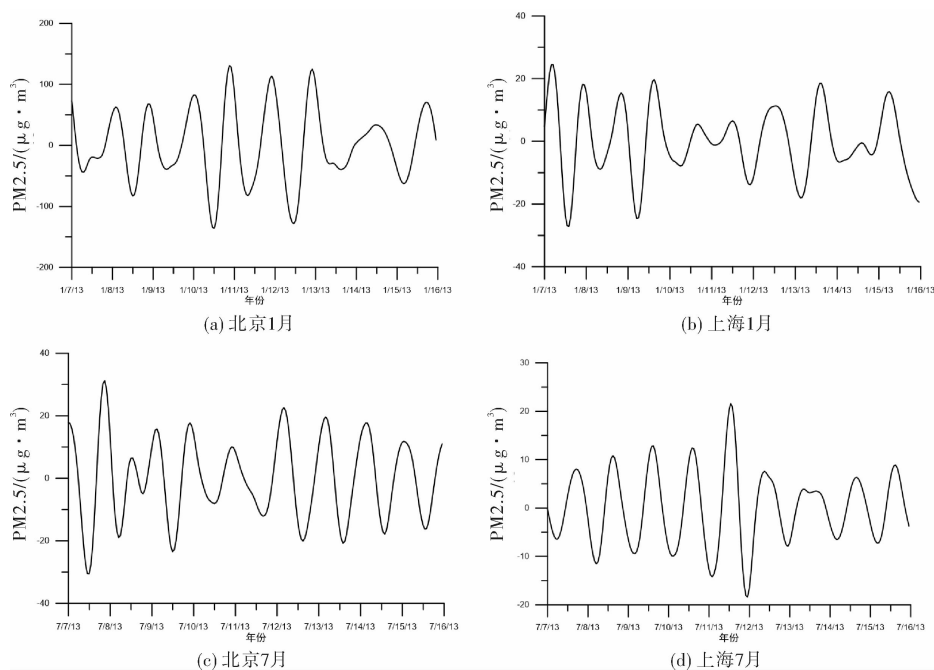
表 1 为北京、沈阳、上海、广州和成都 5 个城市的  $PM_{2.5}$  浓度原始数据的年均值统计表, 图 2 为这 5 个城市的  $PM_{2.5}$  浓度变化趋势图(选取分解重构后 a13 数据, 由于北京 2008 年和 2009 年数据缺失数据过多, 故在小波分解重构的时候没有用这两年的数据)。

表 1 北京、沈阳、上海、广州和成都  $PM_{2.5}$  浓度年均值

年份	$\mu\text{g}/\text{m}^3$				
	北京	沈阳	上海	广州	成都
2008	84.0				
2009	91.4				
2010	100.3				
2011	98.8				
2012	91.1		50.0	47.8	67.4
2013	101.7	63.6	59.3	54.4	85.8
2014	80.0	77.5	49.5	46.8	80.0
2015	70.4	64.8	46.7	40.1	70.1

图2 北京、沈阳、上海、广州和成都  $\text{PM}_{2.5}$  浓度变化趋势

由图2可以看出: 经过小波分解后, 选取合适的层数进行重构所得到的数据能够很好的拟合  $\text{PM}_{2.5}$  浓度数据的变化趋势。 $\text{PM}_{2.5}$  浓度的年变化特征为: 5 个城市的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度均在 2013 年开始逐年下降。 $\text{PM}_{2.5}$  浓度下降的主要原因是自 2013 年开始, 我国开始对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度进行控制, 例如北京市将一些排污量大的工厂搬出北京市; 进行供暖方式的升级以及拆迁一些小的老式供暖公司; 对机动车辆进行控制。由图2可以明显看出,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的分布具有一定的地域性, 南方的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度低

图3 高频系数 d13 重构的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度序列图4 高频系数 d4 重构的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度序列

于北方的  $PM_{2.5}$  浓度。这是因为北方燃煤量高于南方,而燃煤是  $PM_{2.5}$  形成的主要方式;南方降水高于北方,降水有利于  $PM_{2.5}$  的净化。

## 2.2 $PM_{2.5}$ 浓度月、季变化特征

利用 db10 小波基函数对  $PM_{2.5}$  浓度序列进行小波分解,并选择高频信号 d13 进行重构,重构后的  $PM_{2.5}$  如图 3 所示。

从图 3 中可以看到,  $PM_{2.5}$  浓度在每年的 6–8 月(夏季)之间的时候最低,并且 8 月过后  $PM_{2.5}$  的质量浓度逐渐升高,到了 1 月份左右的时候达到最高值。即  $PM_{2.5}$  的浓度在每年的夏季最低,冬季最高,春季和秋季属于过渡期。其主要原因是因为夏季降水高于其他季节,而降水过程对  $PM_{2.5}$  具有一定的清除作用,使得夏季  $PM_{2.5}$  低于其他季节;冬季降水少且温度低,不利于  $PM_{2.5}$  的扩散,容易导致  $PM_{2.5}$  的集聚,使得冬季  $PM_{2.5}$  明显高于其他季节。

## 2.3 $PM_{2.5}$ 浓度日变化特征

本文选取了北京和上海两个站点的 2013 年 1 月 7–15 日,以及 2013 年 7 月 7–15 日两个时间段的高频系数 d4 重构的  $PM_{2.5}$  浓度序列,如图 4 所示。

根据图 4 可以看出  $PM_{2.5}$  浓度在 1d 内的变化为双峰型,即每天早晚高峰时段的  $PM_{2.5}$  浓度高于其他时段。造成这种情况的主要原因是早晚高峰汽车尾气的排放高于其他时间段,使得  $PM_{2.5}$  浓度升高。该研究结果与文献[5–7]的结果是一致的。从图 4 还可知,  $PM_{2.5}$  在 1 年中的每 1d 都是呈双峰型变化,不受季节变化的影响。

## 3 结论

本文利用北京、沈阳、上海、广州和成都 5 个美驻华使馆的  $PM_{2.5}$  浓度序列,利用小波变换方法

开展了  $PM_{2.5}$  浓度序列的时空演化特征分析,得到以下结论:

(1)  $PM_{2.5}$  浓度在每年的 6–8 月之间的时候最低,并且 8 月过后  $PM_{2.5}$  的浓度逐渐升高,到了 1 月份左右的时候达到最高值,即  $PM_{2.5}$  的浓度在每年的夏季最低,冬季最高,春季和秋季属于过渡期。

(2)  $PM_{2.5}$  的浓度在一天中的变化为双峰型。

(3) 南方的  $PM_{2.5}$  浓度整体低于北方的  $PM_{2.5}$  浓度。

**致谢:** 感谢美国驻华使馆提供的  $PM_{2.5}$  浓度观测序列数据。

## 参考文献:

- [1] Anne Boynard, Cathy Clerbaux, Lieven Clarisse, et al. First simultaneous space measurements of atmospheric pollutants in the boundary layer from IASI: A case study in the North China Plain [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(2): 645–651.
- [2] 孟晓艳, 王瑞斌, 张欣, 等. 2006–2010 年环保重点城市主要污染物浓度变化特征 [J]. *环境科学研究*, 2012, 25(6): 622–627.
- [3] 戴永立, 陶俊, 林泽建, 等. 2006–2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析 [J]. *环境科学*, 2013, 34(8): 2925–2932.
- [4] Salameh D, Detournay A, Pey J, et al. Chemical composition in five European Mediterranean cities: a 1-year study [J]. *Atmospheric Research*, 2015, 155: 102–117.
- [5] Wang P, Cao J J, Shen Z X, et al. Spatial and seasonal variations of  $PM_{2.5}$  mass and species during 2010 in Xi'an, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 508: 477–487.
- [6] 雷瑜, 张小玲, 唐宜西, 等. 北京城区  $PM_{2.5}$  及主要污染气体“周末效应”和“假日效应”研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, 35(5): 1520–1528.
- [7] 陈添. 气象条件对北京市空气质量的影响 [J]. *环境保护*, 2006, 5(10): 46–49.
- [8] 张德丰. MATLAB 小波分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

# Spatial and Temporal Evolution of $PM_{2.5}$ Concentration in Beijing and Shanghai Based on Wavelet Transform

WANG Yong<sup>1</sup>, LIU Bei<sup>1</sup> and LIU Yanping<sup>2</sup>

(1. School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. School of Economics and Management, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** The  $PM_{2.5}$  concentration series of five cities in Beijing, Shenyang, Shanghai, Guangzhou and Chengdu are selected and the spatial and temporal characteristics of  $PM_{2.5}$  concentration are analyzed by the method of wavelet transform. Based on the  $PM_{2.5}$  observation sequence of five cities, the missing value processing is carried out. Wavelet transform is used to decompose and reconstruct the  $PM_{2.5}$  concentration sequence, and the reconstructed  $PM_{2.5}$  concentration sequence is compared and analyzed.  $PM_{2.5}$  concentration showed a significant annual change characteristics, the  $PM_{2.5}$  concentration within the year, the highest concentration of  $PM_{2.5}$  in winter, summer  $PM_{2.5}$  concentration of the lowest;  $PM_{2.5}$  diurnal changes in the concentration of bimodal change; the South of the  $PM_{2.5}$  mass concentration is lower than the  $PM_{2.5}$  concentration in the north.

**Key words:** wavelet transform;  $PM_{2.5}$  concentration; spatial and temporal evolution; Beijing; Shanghai; Shen Yang; Guang Zhou; Cheng Du