

小波方差分析北京市 PM_{2.5} 质量浓度序列周期特征

周 杰¹⁾, 杨 鹏^{1,2)}✉, 吕文生²⁾, 刘阿古达木²⁾, 刘俊秀¹⁾

1) 北京联合大学北京市信息服务工程重点实验室, 北京 100101 2) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: yangpeng@bnu.edu.cn

摘 要 为分析北京市大气污染物 PM_{2.5} 质量浓度的时间序列周期性, 采用 Morlet 小波变换对 PM_{2.5} 浓度进行分析, 并利用小波方差对北京市 PM_{2.5} 日均质量浓度的主周期进行估计, 且通过了显著性检验。结果表明, 北京市 PM_{2.5} 日均质量浓度主周期为 180d 左右, 为后续大气污染物 PM_{2.5} 时间序列研究提供了参考。

关键词 时间序列; 小波变换; PM_{2.5}; 周期性

Analysis on the Periodic Characteristic of PM_{2.5} Mass Concentration in Beijing by the Wavelet Square Deviation

ZHOU Jie¹⁾, YANG Peng^{1,2)}✉, LÜ Wen-sheng²⁾, LIU Agudamu²⁾, LIU Jun-xiu¹⁾

1) Beijing Key Laboratory of Information Service Engineering, Beijing Union University, Beijing 100101, China

2) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉Corresponding author, E-mail: yangpeng@bnu.edu.cn

ABSTRACT In order to analyze the time series periodicity of atmospheric pollutant PM_{2.5} mass concentration in Beijing, Morlet wavelet transform was used to analyze the PM_{2.5} concentration, and estimates the average daily concentration of PM_{2.5} in Beijing by the wavelet variance, and it passes the significance test. The results show that the average daily concentration of PM_{2.5} in Beijing is 180d, which provides a reference for the follow-up study of time series of atmospheric pollutants PM_{2.5}.

KEY WORDS time series; wavelet transform; PM_{2.5}; periodicity

近些年, 我国绝大部分地区都遭遇着严重的空气污染问题, 尤其是华北地区, 其 PM_{2.5} 污染形势更加严峻, 甚至有多个城市 PM_{2.5} 浓度日均值一度超过 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 这是世界卫生组织所规定 PM_{2.5} 标准值的 20 倍。而首都北京近几年在空气质量指数 (AQI) 最差城市排名一度落在前十。大气颗粒物, 即大气中存在的气溶胶体系不同大小的粒子。细颗粒物, 又称 PM_{2.5}, 是指空气中空气动力学当量直径小于或等于 2.5 μm 的大气颗粒物。它能长时间存在于大气中, 其在大气中含量越高, 即说明大气污染越严重。PM_{2.5} 对人体的危害极大, 由于其直径小, 所以很容易进入人体呼吸道部位, 甚至到达肺泡, 直接影响人体的呼吸功能, 甚至引发包括哮喘、支气管炎和心血管病等方面的疾病。如果人类长期吸入 PM_{2.5} 污染的空气, 必将给人类的健康带来严重危害[1]。

收稿时间:

基金项目: 北京市属高等学校高层次人才引进与培养——“长城学者”培养计划项目“基于无线传感器网络的城市空气质量实时监测系统研究”资助项目(CIT&TCD20130320)

作者简介: 周杰 (1991~), 男, 山西忻州人, 硕士研究生, 研究方向为数据分析。

由于 $PM_{2.5}$ 及其相关的因子统计数据比较少, $PM_{2.5}$ 的形成原因和过程比较复杂, 对其关联性分析不多。因此, 到目前为止, 对于 $PM_{2.5}$ 的来源及影响因素的认识, 尚未完全统一[2,3], 全面地认识 $PM_{2.5}$ 的客观规律还是比较困难的[4]。其次, 即使建立了完整、准确的 $PM_{2.5}$ 来源及影响因素体系, 现阶段也很难满足其影响因素资料的对应, 难以准确分析其相关性[5]。对此, 可以结合 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化的周期性, 做时间序列方面的研究。本文从小波变换的角度出发, 通过小波方差对北京市 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度进行周期分析与估计, 进而为北京市大气污染物 $PM_{2.5}$ 后续的时间序列周期性的研究提供了依据。

1 小波分析及其显著性检验方法

1.1 小波分析

1.1.1 小波变换

小波变换是一种新的分析方法, 它继承发展了 Fourier 变换局部化的思想, 而且克服了窗口不随频率变换的缺点, 能够提供一个可变的时频窗口, 是对信号进行分析的理想方法。从工程角度看, 小波分析是一种信号与信息处理的工具, 是继 Fourier 分析之后的又一有效的时频方法, 可同时进行时域和频域的分析, 具有时频局部化和多分辨率特性[6]。小波方差与小波熵, 在大气污染物的分析中有较多运用[7, 8]。对于满足一定条件的小波函数, 基于时间序列的小波变换为:

$$W_f(a, b) = \int_{\mathbb{R}} |a|^{-\frac{1}{2}} f(t) \overline{\Psi[(t-b)/a]} dt \quad (1)$$

式中, a 为伸缩因子, 反映小波变换的周期, b 为平移因子, 反映小波变换在时间上的平移, $W_f(a, b)$ 为小波变换。

从式(1)得知, 小波变换能反映出时间序列函数 $f(t)$ 的时域特征。当伸缩因子 a 较小时, 小波变换对时域的分辨率较高, 可以有效地对时间序列进行分析。

1.1.2 小波方差

将不同伸缩因子 a 的所有小波系数计算平方并进行积分, 可得到小波方差为:

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (2)$$

小波方差随着尺度变化的过程, 称为小波方差变化图, 该图能反映出关于时间序列的周期波动和周期变换的特性。因此, 通过此图查找到一个时间序列中起主要作用的尺度(周期)[9]。本文主要利用小波方差图分析北京市 $PM_{2.5}$ 质量浓度分布的周期特征。

1.2 显著性检验方法

小波方差图的显著性可以利用红噪声或白噪声标准谱进行检验[10]。小波方差图服从 χ^2 分布特征[11]。通过计算小波方差图的有效自由度, 给出 χ^2 分布 95% 的置信率; 再计算出红噪声或白噪声的标准谱的理论功率谱。如果小波方差分布曲线处于理论功率谱之上, 说明小波方差该部分是显著可信的。具体公式如下:

理论功率谱

$$P = \frac{\sigma^2 P_k \chi_v^2}{v} \quad (3)$$

式中, χ_v^2 是自由度为 v 的 χ^2 的值, σ^2 是序列的方差。

P_k 是红噪声或白噪声标准谱

$$P_k = \frac{1-\alpha^2}{1+\alpha^2-2\alpha\cos(2\pi k/N)} \quad (4)$$

式中, $k = 0, 1, 2, 3 \dots N/2$ 是频率指数。注意, 当 $\alpha = 0$ 时, 式(4)是一个白色标准谱。

2 北京市 $PM_{2.5}$ 质量浓度概况

本文所采用的数据是由北京市环境保护监测中心发布的数据。由于某些天数的数据不全, 本文采用均值补全法对数据进行补全:

算法. 均值补全.

输入: 原始 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度序列 S

输出: 补全后的 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度序列 S'

- 1) $i=0$; while $i \neq S.length$
- 2) if $S(i) == none$ then set front_data = $S(i-1)$ and flag_1 = i
- 3) while $S(i) == none$ then $i++$
- 4) set behind_data = $S(i)$ and flag_2 = $i-1$
- 5) for j in [flag_1, flag_2]
- then set $S(j) = (front_data + behind_data)/2$; $j++$
- 6) $i++$
- 7) $S' = S$

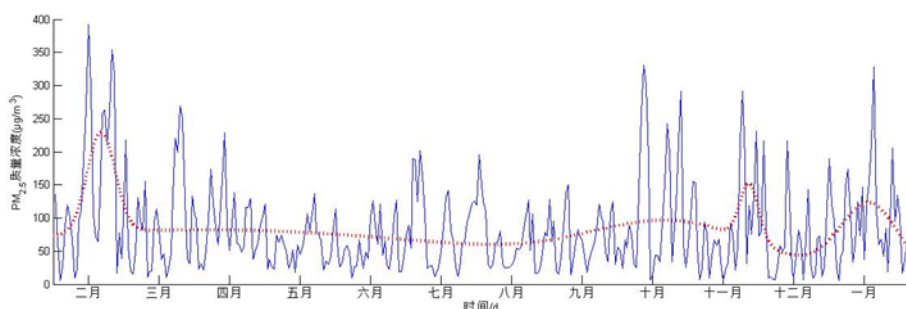


图1 PM_{2.5}日均质量浓度时间序列和二次拟合曲线

Fig.1 Time series of PM_{2.5} average mass concentration and two fitting curve

本文取 2014 年 2 月到 2015 年 1 月 AQI 指数中的 PM_{2.5} 质量浓度指数作为研究对象进行分析,研究其日均质量浓度变化的特征。

图 1 是北京市 2014 年 2 月到 2015 年 1 月 PM_{2.5} 日均质量浓度时间序列及二次拟合曲线[12],从图中可以看出在四月份至九月份期间,北京市 PM_{2.5} 浓度整体偏低,一月、二月、十月、十一月和十二月 PM_{2.5} 浓度较高,表明北京市冬季由于供暖等原因使得污染源增加,而且其地势三面环山,不利于污染物的扩散,使得 PM_{2.5} 浓度呈严重污染态势。

3 小波方差估计 PM_{2.5} 质量浓度序列周期

3.1 小波分析

为了剔除边界效应,以减小边界效应影响,在 Matlab 软件中利用小波分析中的信号延伸 (Signal Extension),将图 1 实线部分横坐标前后延拓 74 个时间单位,变换后将前后延伸部分舍弃,得到 PM_{2.5} 质量浓度序列小波变换系数实部[13]。

根据式(1),采用 Morlet 小波对 PM_{2.5} 质量浓度序列进行连续小波变换得到 PM_{2.5} 变化的小波变换系数,利用得到的小波系数实部绘制成等值线 (图 2a),并绘制该序列的小波方差图 (图 2b)。由于小波方差图服从 χ^2 分布,故根据式(3),可以得出 95% 置信度检验曲线,可以利用置信曲线检验式(1)和式(2)共同得出的小波方差图是否显著可信。图 2b 中粗线的波峰代表序列的周期,查看图中的波峰位置即可得知序列的周期特性[9]。图 2b 中的细线是由式(3)得出的 95% 的置信度检验曲线。

3.2 PM_{2.5} 质量浓度序列周期的分析及显著性检验

由图 2a 可以看出 PM_{2.5} 震荡周期主要集中在 60~90d、200~240d 和 300~330d 三个时间区域,存在时间序列的多时间尺度复杂结构现象[14]。

由式(1)可知,小波方差反应信号波动的能量随尺度 a 的分布。因此,小波方差可用来确定信号中不

同种尺度扰动的相对强度和存在的主要时间尺度,即主周期[15]。由图 2b 中的粗线可以直观地看出,北京市 PM_{2.5} 质量浓度序列存在 60d 左右的短期震荡周期和 180d 左右的长期震荡周期,其中后者波峰较高,为该序列的主周期。

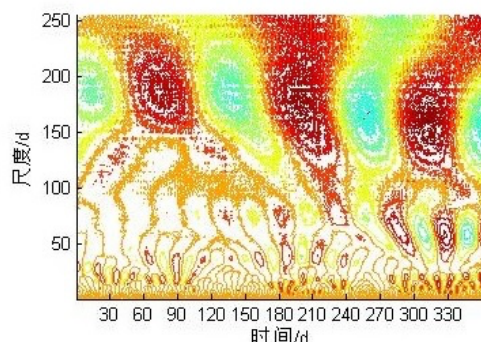


图 2a 小波方差系数实部等值线图

Fig.2a The contour map of real part of wavelet coefficients

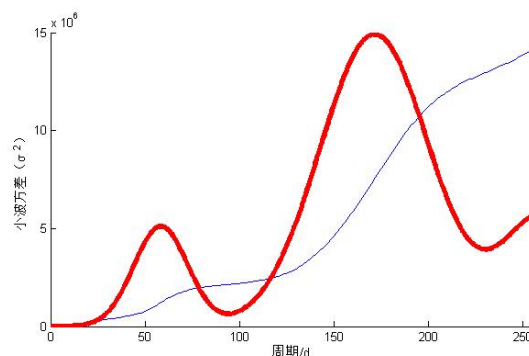


图 2b 小波方差图及 95% 置信曲线

Fig.2b The curves of wavelet variance and the confidence curve of 95%

再由图 2b 中的小波方差图和式(3)得出的 95% 的置信度检验曲线可以看出,60d 左右的短期震荡周期和 180d 左右的长期震荡周期的波峰均通过了 95% 的置信度检验曲线,故可以得出,这两个震荡周

期的置信度都超过 95%。这表明, 利用小波方差得出的 $PM_{2.5}$ 质量浓度周期的方法研究是可行的。

4 结语

通过对北京市 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度进行小波分析, 结果表明:

(1) 北京市 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度序列具有两个不同的周期, 即 60d 和 180d。主要周期为 180d 左右, 说明北京市以 $PM_{2.5}$ 为代表的大气污染物呈半年一个周期进行变化。通过小波方差得到的主周期的分布, 即可比较直观地看出 $PM_{2.5}$ 质量浓度随时间变化的情况。这对于我们对后续的北京市大气污染物在时间序列方面的相关研究提供了数据参考。

(2) 由于北京市 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度序列有 60 天左右的短周期, 可以考虑在污染较为严重的日期为起点, 每隔 60 天左右时间段, 进行短期的机动车辆限行等措施减少大气污染物排放源, 降低污染物浓度, 以加快污染物扩散, 减缓污染物浓度上升, 并且由图 1 可以看出, 在 $PM_{2.5}$ 浓度较高的月份中, 也可以提前在短期内采取上述措施以降低污染物浓度。

(3) 由于本文所采用的数据有部分缺失, 采用均值补全法对其进行补全, 降低了数据的客观性, 再加之所分析数据量不足(2014 年 2 月到 2015 年 1 月), 这对后期小波分析 $PM_{2.5}$ 质量浓度序列周期的过程有较大影响。需要在以后的研究当中使用更加准确的补全算法, 以减小由于数据不准确对小波分析时间序列周期的影响。

参考文献

- [1] 顾昊元, 肖翔, 袁陈晨, 等. 基于小波神经网络的松江区 $PM_{2.5}$ 浓度预测 [J]. 上海工程技术大学学报, 2015, 29(2): 175-178
- [2] 徐敬, 丁国安, 颜鹏, 等. 北京地区 $PM_{2.5}$ 的成分特征及来源分析[J]. 应用气象学报, 2007, 18(5): 645-654
- [3] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京大气 $PM_{2.5}$ 中微量元素的浓度变化特征与来源[J]. 环境科学, 2003, 24(6): 33-37
- [4] 徐小丽. $PM_{2.5}$ 变化趋势的多重分形分析研究[D]. 安徽: 安徽大学硕士论文, 2014.
- [5] 刘杰, 杨鹏, 吕文生, 等. 模糊时序与支持向量机建模相结合的 $PM_{2.5}$ 质量浓度预测[J]. 工程科学学报, 2014, 36(12): 1694-1702
- [6] 李建勋, 柯熙政, 郭华. 小波方差与小波熵在信号特征提取中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2007, (4): 365-369
- [7] 陈柳, 马广大. 小波分析在 PM_{10} 浓度时间序列分析中的应用 [J]. 环境工程, 2006, 24(1): 61-63
- [8] 杨书申, 陈兵, 邵龙义. 北京市 PM_{10} 浓度变化规律的小波分析[J]. 中原工学院学报, 2014, 25(1): 39-43
- [9] 张佩, 聂义波. 小波方差分析伊河流域降雨径流周期特征[J]. 水资源与水工程学报, 2009, (2): 156-158
- [10] 尹继尧, 朱元清, 宋治平, 等. Morlet 小波显著性检验和精度分析在地磁场和地震活动性周期分析中的应用[J]. 地震学报, 2011, 33(5): 663-671
- [11] Christopher, Torrence, Gilbert, P, Compo. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78
- [12] 唐冲, 惠辉辉. 基于 Matlab 的高斯曲线拟合求解[J]. 计算机与数字工程, 2013, (8): 1262-1263
- [13] 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
- [14] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 水文时间序列多时间尺度分析的小波变换法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(6): 14-17
- [15] 倪夏梅, 陈元芳, 刘勇, 等. 基于小波分析的枯水径流多时间尺度分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(3): 6-8