

基于小波变换的上海市近 10 年 SO₂ 污染指数的变化

吴小玲¹, 张斌², 艾南山^{1*}, 刘丽君²

(1. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065; 2. 西华师范大学国土资源学院, 南充 637009)

摘要:对上海市近 10 年逐日 SO₂ 污染指数时间序列进行一维连续 Mexican Hat 小波变换分析, 研究了 SO₂ 污染物的多尺度演化特征、主周期、突变点和变化因素。结果表明, 上海市 SO₂ 污染指数在不同时间尺度上具有不同的“高-低”交替变化规律, 且以 100 d 左右的变化为主周期; SO₂ 污染受气象条件的影响, 呈现出“冬重夏轻”的格局, 春、秋分日前后是一年中 SO₂ 污染轻重状况转换的突变点; 经济高速发展对能源需求的增长, 使上海市为改善 SO₂ 的努力“事倍功半”: 污染总体仍呈上升趋势。小波变换方法用于 SO₂ 污染时间序列的分析是有效的, 也适用于其他污染物的时间演变规律研究。

关键词:小波分析; SO₂ 污染指数; 时间-尺度变换; 上海市

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)08-2193-06

Wavelet Analysis on SO₂ Pollution Index Changes of Shanghai in Recent 10 Years

WU Xiao-ling¹, ZHANG Bin², AI Nan-shan¹, LIU Li-jun²

(1. School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. School of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong 637009, China)

Abstract: Based on the continuous Mexican Hat wavelet transformation of time series of daily SO₂ pollution index during last 10 years in Shanghai, the multiscale variations, primary period, catastrophe point and influencing factors are analyzed. The result shows that periodical fluctuation of SO₂ pollution index varies at diverse time-scales, and the primary period of the daily variations is about 100 days; pollution pattern takes on serious in winter and light in summer in most scales due to meteorological conditions, and the catastrophe point of serious-light transformation of SO₂ pollution index in a year is vernal and autumnal equinox; energy demand and socioeconomic development result in more seriousness in recent years and half result with twice the effort of endeavors of pollution elimination. Wavelet analysis is an effective method to time series of SO₂ pollution index, also to multiscale variations of other pollutants.

Key words: wavelet analysis; SO₂ pollution index; time-scale transform; Shanghai City

大气环境质量优劣不仅直接关系到公众健康, 而且影响投资环境、社会经济发展、城市形象与综合竞争力。据 2007 年中国环境状况公报, 我国二氧化硫(SO₂)排放总量达 2468.1 万 t, 成为主要大气污染物之一。SO₂ 源于含硫石油、煤、天然气的燃烧, 硫化矿的熔炼和焙烧, 含硫原料的加工生产过程等。SO₂ 可对呼吸系统造成伤害, 并可能促进机体癌变、致突变, 也对大脑皮质机能、体内维生素代谢等具有一定影响; 还可与大气中的氧和水汽结合形成酸雨, 是导致硫酸型烟雾的主要原因。

对大中城市大气污染物的研究, 主要以 TSP 或 PM₁₀ 为对象^[1~7], 研究方法多基于统计学原理^[8~13], 而对 SO₂ 的时间变化特征及驱动力尚缺少研究。小波分析法是研究具有不同时间尺度的、非静态时间序列演变规律的有用工具^[14~18], 已经在水文与水质^[14, 19~22]、地震和地磁^[15, 23, 24]、气象和气候^[16, 21, 25]、灾害学^[26]、生态学^[27, 28]等领域得到充分应用, 但用于大气污染物时间序列的研究还极少。

20 世纪 90 年代以来, 上海市在空气污染治理方面做出了不懈的努力, 并从 1997 年开始发布城市空气质量周报和日报。本研究应用一维连续小波变换, 旨在对上海市近 10 年来逐日 SO₂ 污染指数演变特征进行诊断, 揭示其在不同时间尺度上的变化规律, 从而认识其演变过程、因素和趋势, 以期为大气环境监测和保护提供决策支持。

1 数据与方法

1.1 数据来源与处理

以上海市环境监测中心提供的上海市空气质量日报 SO₂ 污染指数为数据源, 每日数据在上海环境热线网站(<http://www.envir.gov.cn/airnews/>)上即日发布。本研究的数据起止时间为 1998 年 7 月 1 日~2008 年 6 月 30 日, 10 a 的逐日 SO₂ 污染指数数据

收稿日期: 2008-09-17; 修订日期: 2008-12-22

作者简介: 吴小玲(1966~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境管理与公共政策, E-mail: wxl@mail.scst.gov.cn

* 通讯联系人, E-mail: ainanshan@126.com

3 653条, 1998年7月1日序号为1, 2008年6月30日为3 653. 其中1999年有5 d的SO₂污染指数数据缺失, 根据前后2 d的数据取算术平均值的方法补上. 为了消除边界效应, 对数据采用周期法进行了延展. 主要的数据处理和小波变换在MATLAB中实现.

1.2 小波分析方法^[16,29~31]

小波变换是一种时间-频率的局域变换, 能有效地从信号中提取信息, 并通过伸缩和平移等功能对函数或信号进行多尺度细化分析. 目前对性质随时间稳定不变的信号, 处理的理想工具仍然是Fourier分析; 但在实际应用中, 绝大多数信号是非稳定的, 小波分析正是适用于非稳定信号的处理工具. 小波分析相对于传统的时频分析的优势在于它可以在任意的时频分辨率上将信号分解, 具有良好的时、频多分辨率功能和自适应性特点, 可以聚焦到任意细节, 从而观察到不同时间尺度上的变化情况^[32,33].

如果 $\phi(t) \in L^2(R)$ 满足允许性条件:

$$C_\phi = \int_R \frac{|\phi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$$

那么 $\phi(t)$ 叫做基小波. 式中, $\phi(\omega)$ 是 $\phi(t)$ 的Fourier变换. 由基小波函数 $\phi(t)$ 进行伸缩和平移, 得到连续小波:

$$\phi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

式中 $a, b \in R, a > 0$. 对于任意函数 $f(t) \in L^2(R)$, 则对其基小波函数 $\phi_{a,b}(t)$ 的连续小波变换为:

$$\begin{aligned} W_f(a, b) &= \langle f(t), \phi_{a,b}(t) \rangle \\ &= |a|^{-1/2} \int_R f(t) \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \end{aligned}$$

式中, a, b 分别是伸缩、平移尺度因子, $W_f(a, b)$ 称为小波系数.

选择适当的小波函数是进行时间序列分析的前提^[34], 实际选取小波主要依据自相似原则、判别函数、支集长度等. 据此本研究选择Mexican Hat基小波, 其解析形式为:

$$\phi(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-1/4} (1-t^2) e^{-t^2/2}$$

该式为Gauss函数的二次导数, 在时域和频域都具有很好的局部化性质.

为了判断序列的主要周期, 进行小波方差检验, 其计算公式为:

$$W_p(a) = \int_R |W_f(a, b)|^2 db$$

式中, $W_p(a)$ 为小波方差.

2 结果与分析

2.1 SO₂ 时间序列

上海市近10年逐日SO₂污染指数的时间序列如图1. SO₂污染程度受污染源排放强度及气象条件等因素的综合作用, 污染指数信号是非稳定的, 呈现出混沌性, 具有非线性和多时间尺度特性. 近10年来, SO₂污染指数超过国家二级标准(≥ 100)的日数仅有23 d, 最大值出现在1999年12月25日(115), 另有2 d污染指数超过110, 即2007年12月14、15日. 超过二级标准的天数中有18 d出现在12月和1月. 达二级标准(≥ 50)的天数有1 398 d, 达一级标准(< 50)的天数有2 232 d, 最低值仅为5(1999年6月7日), 不超过10的共有9 d. 达一级标准的天数, 60%出现在5~10月, 40%出现在11月~次年4月. 这表明上海市SO₂冬天污染情况相对严重, 而夏天较轻.

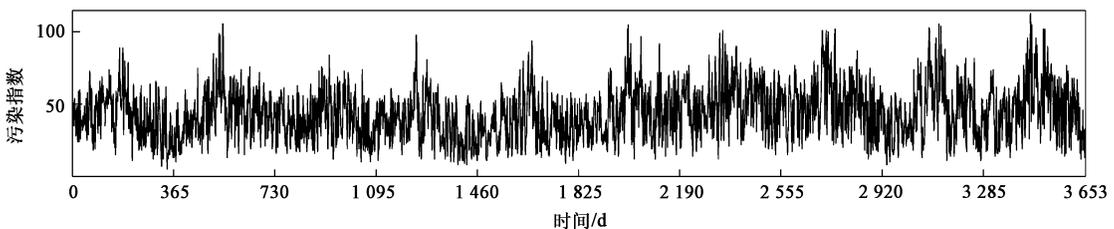


图1 上海市近10年来SO₂污染指数的逐日变化

Fig. 1 Daily SO₂ pollution index during last 10 years in Shanghai City

2.2 SO₂ 污染指数的多尺度变化特征

图2显示了上海市近10年来逐日SO₂污染指数在不同时间尺度上的周期性振荡特征, 振荡信号强弱通过小波系数的大小来表示: 灰度图中灰度值

越小表示小波系数越大, SO₂污染指数越大, 污染越严重; 灰度值越大表示小波系数越小, SO₂污染指数越小, 污染越轻. 图2中上半部分对应较长尺度的周期性振荡, 下半部分对应较短时间尺度的周期性振

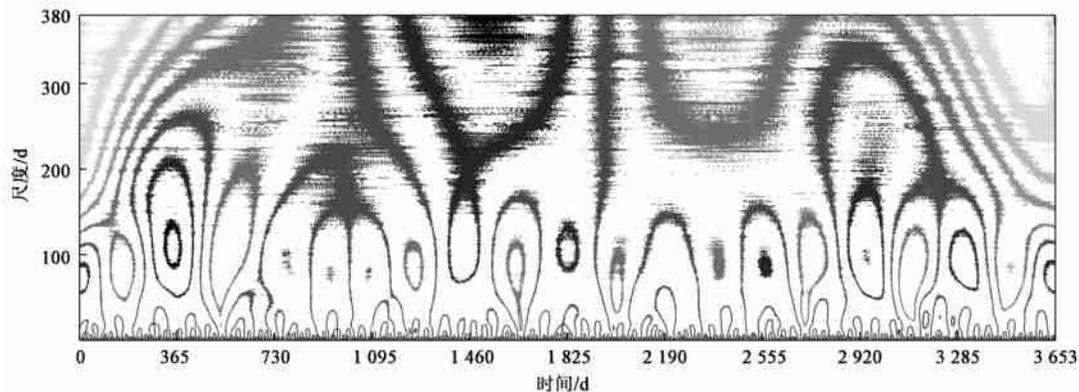


图 2 上海市近 10 年来 SO₂ 污染指数的时间尺度分布

Fig. 2 Time scale distribution of SO₂ pollution index during last 10 years in Shanghai City

荡. 在给定时间和尺度下, 从小波系数图可大致了解污染物的浓度在“时间-尺度”平面上的分布: 不同尺度下的 SO₂ 污染指数演化规律是不同的, 小尺度的变化表现为嵌套在较大尺度下的较为复杂的污染变化结构.

更详细的几个时间尺度上的清晰变化如图 3 所示. 在准 1 年(360d)的时间尺度上, 近 10 年来逐日 SO₂ 污染指数表现出“高→低→次高→次低→高”变

化特征: 从 1998 年底~ 1999 年初 SO₂ 污染相对严重的时期, 缓慢变化到 2002 年夏季污染最轻, 之后又较快地恶化; 到 2005 年冬达到次高后又在 2006 年夏略有减缓, 之后再次更快速地恶化, 2007 年底~ 2008 年初再次达到污染更严重的状态, 之后又趋于减轻[图 3(a)]. 在 5 个月(150 d)的时间尺度上则表现为初期振荡显著、而后期振荡相对较弱的特征, 在前一年半里表现出“高→低→次高”, 之后呈现相对

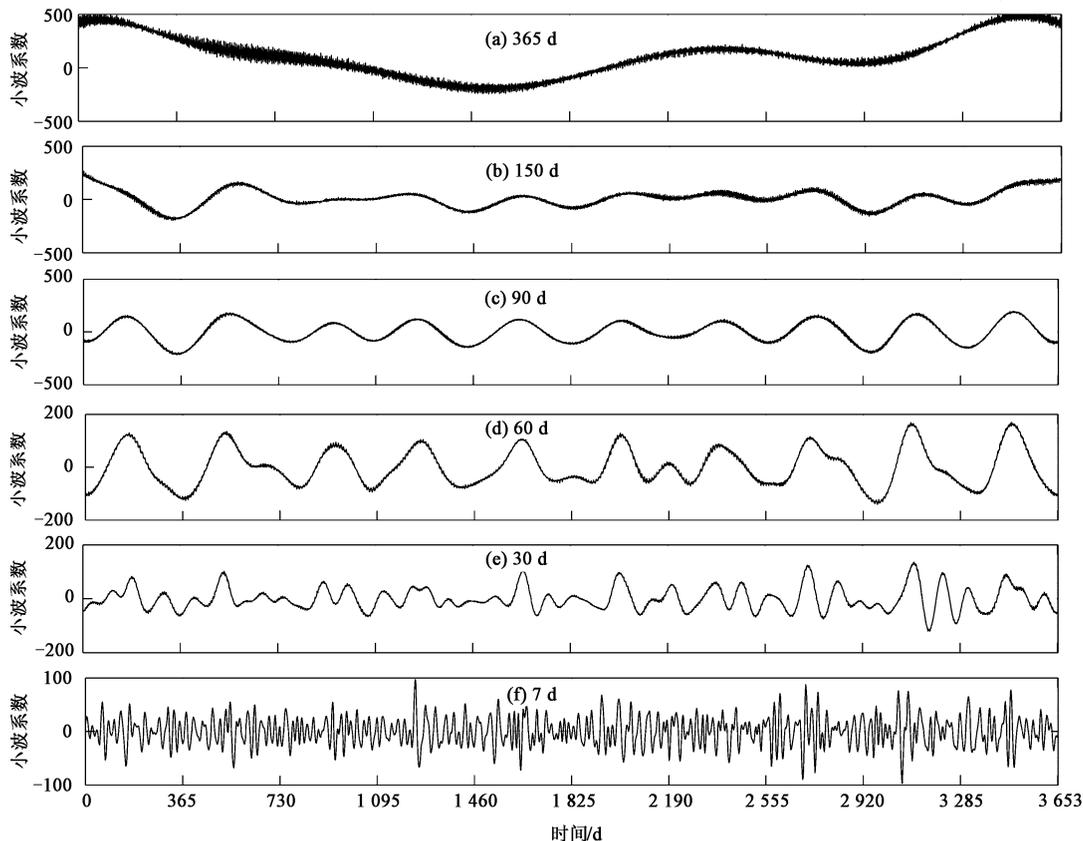


图 3 特定尺度下的 SO₂ 污染指数的小波系数

Fig. 3 Wavelet coefficients of SO₂ pollution index at some scales

平缓的轻重交替状态,直到2006年夏才进入污染相对轻的状态,最近又总体上趋于严重[图3(b)].在3个月(90 d)的准季节尺度上,呈现出“高→低”反复交替的规律性,非常类似于正弦波形特征.前2 a和后3 a的振幅较大,而中间的5 a振幅较小[图3(c)].而2个月与3个月尺度的小波系数曲线的波峰具有高度的一致性,只是在3个波谷出现了明显的扰动,对应于2000、2003、2004年的夏秋季前后[图3(d)].而1个月[图3(e)]和1周[图3(f)]时间尺度的小波系数曲线图显示,在该尺度上SO₂污染状态具有强烈的波动性,振荡的周期很短,振动频率较高,具有高频的特性.

以上各尺度的波峰(局部极大值,污染相对严重)基本上都出现在冬季,而波谷(局部极小值,污染相对较轻)往往出现在夏季,这也表明冬季污染严重而夏季污染较轻.

2.3 SO₂ 污染指数变化的周期与极值

各种尺度扰动的相对强度中,最大峰值处的尺度称为该时间序列的主要时间尺度,用以反映时间序列的主要周期^[6].在一定尺度下,小波方差表示时间序列中该尺度(周期)波动的强弱(能量大小);小波方差图能反映时间序列中所包含的各种尺度(周期)的波动及其强弱(能量大小)随尺度变化的特性.通过小波方差图可非常方便的寻求(查找)一个时间序列中起主要作用的尺度(周期)^[18].因而利用小波方差可以准确地诊断出多长周期的振动最强,即起主要作用的周期.

从图4可以看出,上海市近10年逐日SO₂的污染状况变化具有近100 d(准季节)左右的主周期.

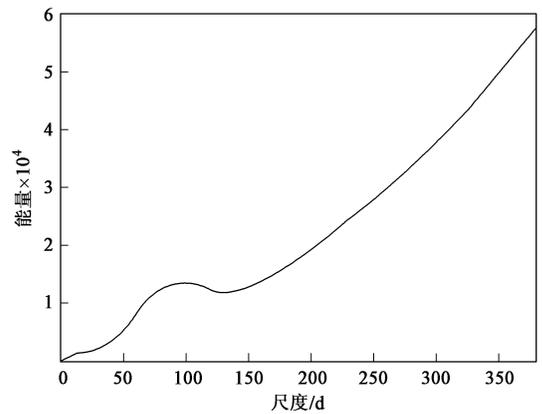
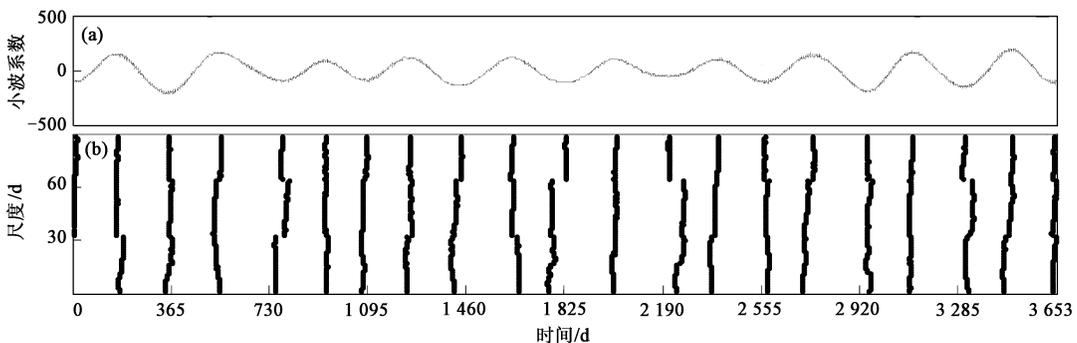


图4 小波系数方差

Fig. 4 Wavelet variance analysis

以准季节为尺度的SO₂污染指数的变化规律,从该尺度小波系数对应的局部极值可以准确定位极大或极小值出现的日期.从图5可以看出,波谷大都出现在每年7月1日前后,即每年6~7月是上海市SO₂污染最轻的时期;而波峰出现在每年1月1日前后,即每年12月~次年1月是上海市SO₂污染最严重的时期.更精确的定位,在1999年7月1日前后、2000年7月1日之后、2001年7月1日之前、2002年7月1日之前、2003年7月1日之前、2004年7月1日之后、2005年7月1日之后、2006年7月1日之后、2007年7月1日之后出现SO₂污染指数局部最小;同样,也可识别出SO₂污染局部最严重的时间.每年上海市的SO₂污染从1月的最严重状态,到夏季转变为污染程度最轻,到下半年底又复趋严重.这表明上海市SO₂污染指数的季节性变化显著.



(a) 表示时间尺度为90 d的小波系数线;(b) 表示尺度为0~90 d的小波系数局部极值线

图5 小波系数局部极值

Fig. 5 Local maxima lines of wavelet coefficients

2.4 SO₂ 污染指数的突变特征

信号的突变部分往往包含着比较重要的信息,

它是信号的重要特征之一.目前小波变换中检测信号的突变点主要有2种方法:一是模极大值法,即在

不同尺度上对信号进行光滑,再由光滑后信号的一阶和二阶导数检测出信号的突变点^[35,36];二是小波变换的系数包含的不同时间尺度下的周期变化特征及可能的污染状态突变点,是小波系数在该尺度下曲线的过零点。从图 2 和图 3 可以看出,随时间尺度的减小,可以看到更精细的结构。突变点只有在确定的时间尺度上才有意义,随时间尺度的变化,一些平常点随着层次的升降而进化为突变点;相反随着层次的升降,一些突变点又退化为平常点^[37]。但对于小波系数曲线的过零点,需要经过检验才能确定其是否为真正的污染突变点,采用 Yamamoto 方法^[38],通过计算 SO₂ 污染指数序列的信噪比(S/N)判断小波系数的穿零点是否就是污染指数突变点:

$$S/N = \frac{|x_b - x_a|}{S_b + S_a}$$

式中, a 、 b 分别表示过零点前、后 10 d 的 2 个时段; x_a 、 x_b 、 S_a 、 S_b 分别表示相应时段污染指数平均值和标准差。当 $S/N \geq 1.0$ 时认为存在突变现象,故可计算出准季节尺度下过零点的信噪比(表 1)。

从低向高变化的 9 个过零点中,只有第 1 544 d 的过零点为突变点,该天为 2002 年 9 月 21 日,接近秋分日。而在从高向低过渡的 10 个过零点中,只有第 1 724 d 的过零点为突变点,该天为 2003 年 3 月 20 日,接近春分日。这表明,春、秋分日前后是上海市一年中 SO₂ 污染状况转换的突变点。

表 1 准季节尺度下的小波系数过零点的信噪比

Table 1 Signal-to-noise ratio of zero-crossing points of wavelet coefficient at seasonal scale

从高向低		从低向高	
天数/d	S/N	天数/d	S/N
243	0.260 0	452	0.169 7
677	0.426 3	866	0.080 5
1 015	0.653 8	1 159	0.010 1
1 337	0.034 5	1 544	1.438 5
1 724	1.263 5	1 929	0.618 2
2 113	0.026 4	2 299	0.393 5
2 484	0.787 1	2 652	0.063 4
2 843	0.101 0	3 042	0.329 7
3 218	0.038 4	3 400	0.477 8
3 573	0.086 2	—	—

3 讨论

上海市近 10 年 SO₂ 污染指数的变化明显受到气象条件的影响,年内变动非常显著。在冬季,上海处于内陆地区的下风向,内陆风长距离输送污染物;受季节性影响,能耗增加、降水减少;频繁发生的逆

温影响了大气扩散条件,造成了空气污染“冬重夏轻”的格局。因而冬季的大气污染需要给予特别关注。

然而气象条件只是外部因素,SO₂ 污染源的涨落是多尺度变化的内因。以世纪之交的前后以及 2010 年世博会的契机,上海市为治理大气污染从工程、管理、结构方面开展了大量工作,如编制和批准实施了《上海市“两控区”二氧化硫污染综合防治规划》、《上海市节能减排工作实施方案》、积极调整能源结构、控制燃煤总量和煤的含硫率、实施烟气脱硫工程、燃煤炉灶改造和清洁能源替代、实施 SO₂ 排污许可证制度和开征 SO₂ 排污费、机动车尾气治理等,同时环保投资从 1998 年的 102.1 亿元增至 2007 年的 366.12 亿元,城区绿化覆盖率也从 18.8% 增至 37.6%,这些措施对于减轻 SO₂ 排放和污染起到了积极的效果,故而 SO₂ 污染在一定时期内具有减缓之势。但是经济高速发展和能源需求的增长,煤炭消耗量仍从 1998 年的 3 758 万 t 增至 2007 年的 4 239 万 t,机动车保有量从 1996 年的 46.4 万辆增至 2007 年的 227 万辆,使为改善 SO₂ 污染的努力“事倍功半”:近年来 SO₂ 污染总体呈上升趋势,排放总量 10 年间始末期大体相等,期间有下降;酸雨频率急剧攀升,从 1998 年的 15% 增至 2007 年的 75.6%;酸雨 pH 值从 1998 年的 5.58 降至 2007 年的 4.55。

小波分析具有时、频同时局部化的优点,可以“聚焦”大气污染时间序列的精细结构,即展现任意尺度上的大气污染变化的准确、详细的频率。SO₂ 污染指数的变化在时域上存在多层次时间结构特征,利用小波变换可以准确分析它的变化阶段和序列特征。对各尺度上大气污染变化的周期、局部极值以及突变点等特征的刻画,较其它分析方法具有其独特性,是可行且有效的,其研究结果对于认识大气污染的特点、进行大气污染监测和预报具有重要参考价值。本文虽以 SO₂ 为研究对象,对其它类型的污染物时间序列研究同样具有参考价值。

4 结论

(1) 上海市近 10 年 SO₂ 污染指数的变化具有多尺度的特征,在各时间尺度上具有不同的变化规律,且以 100 d 左右的变化为主周期。从污染的轻重交替情况来看,目前处于污染相对较严重的阶段,且持续一定时期,SO₂ 污染前景不容忽视。

(2) 上海市近 10 年 SO₂ 污染受气象条件的影

响,呈现出“冬重夏轻”的格局,春、秋分日前后是一年中 SO₂ 污染轻重状况转换的突变点.

(3) 尽管上海市努力治理大气污染,但经济高速发展对能源需求的增长,使得为改善 SO₂ 的努力“事倍功半”,污染总体仍呈上升趋势.

(4) 小波变换方法用于 SO₂ 污染时间序列的分析是科学有效的,也适用于其它污染物的时间演变规律研究.

参考文献:

- [1] 张元勋,王荫淞,李德禄,等. 上海冬季大气可吸入颗粒物的 PIXE 研究[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(增刊): 1-5.
- [2] 黄鹂鸣,王格慧,王荟,等. 南京市空气中颗粒物 PM₁₀、PM_{2.5} 污染水平[J]. 中国环境科学, 2002, **22**(4): 334-337.
- [3] Kim M K, Jo W K. Elemental composition and source characterization of airborne PM₁₀ at residences with relative proximities to metal-industrial complex [J]. Int Arch Occ Env Hea, 2006, **80**(1): 40-50.
- [4] Alastuey A, Moreno J, Negral L. Natural and Anthropogenic Contributions to PM₁₀ and PM_{2.5} in an Urban Area in the Western Mediterranean Coast [J]. Wat, Air, Soil Poll, 2008, **192**(1-4): 227-238.
- [5] Kuvargua A T, Taru P. Ambient dust speciation and metal content variation in TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} in urban atmospheric air of Harare (Zimbabwe) [J]. Environ Monit Assess, 2008, **144**(1-3): 1-14.
- [6] 冯银厂,吴建会,朱坦,等. 济南市环境空气中 TSP 和 PM₁₀ 来源解析研究[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(2): 1-5.
- [7] Wu Y F, Liu C Q, Tu C L. Atmospheric Deposition of Metals in TSP of Guiyang, PR China [J]. Bul Env Contam Toxicol, 2008, **80**(5): 465-468.
- [8] Chen L, Omaye S T, Yang W. A comparison of two statistical models for analyzing the association between PM₁₀ and hospital admissions for chronic obstructive pulmonary disease [J]. Toxicol Mech Method, 2001, **11**(4): 233-246.
- [9] Cheng Y H, Lin Y L, Liu C C. Levels of PM₁₀ and PM_{2.5} in Taipei Rapid Transit System [J]. Atmos Environ, 2008, **42**(31): 7242-7249.
- [10] 陈魁. 天津市空气质量时间变化规律及相关性分析[J]. 中国环境监测, 2007, **23**(1): 50-53.
- [11] 尚可政,王式功,杨德保,等. 兰州城区空气污染预报的动力统计模型[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2002, **38**(3): 114-119.
- [12] 张菊,苗鸿,欧阳志云,等. 近 20 年北京市城近郊区环境空气质量变化及其影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(11): 1886-1892.
- [13] Kurt A, Gulbagci B, Karaca F. An online air pollution forecasting system using neural networks [J]. Environ Int, 2008, **34**(5): 592-598.
- [14] Kang S, Lin H. Wavelet analysis of hydrological and water quality signals in an agricultural watershed [J]. J Hydrol, 2007, **338**(1-2): 1-14.
- [15] Cooper G R J. Interpreting potential field data using continuous wavelet transforms of their horizontal derivatives [J]. Comput Geosci, 2006, **32**(7): 984-992.
- [16] 许月卿,李双成,蔡运龙. 基于小波分析的河北平原降水变化规律研究[J]. 中国科学(D 辑), 2004, **34**(12): 1176-1183.
- [17] 张军涛,李哲,郑度. 温度与降水变化的小波分析及其环境效应解释——以东北农牧交错区为例[J]. 地理研究, 2002, **21**(1): 55-60.
- [18] 陈克龙,李双成,周巧富,等. 江河源区达日县近 50 年气候变化的多尺度分析[J]. 地理研究, 2007, **26**(5): 526-533.
- [19] Chou C. Efficient nonlinear modeling of rainfall-runoff process using wavelet compression [J]. J Hydrol, 2007, **332**(3-4): 442-455.
- [20] Labat D, Rondail J, Guyot J L. Recent advances in wavelet analyses: Part 2- Amazon, Parana, Orinoco and Congo discharges time scale variability [J]. J Hydrol, 2005, **314**(1-4): 289-311.
- [21] Andreo B, Jimenez P, Duran J J, et al. Climatic and hydrological variations during the last 117-166 years in the south of the Iberian Peninsula, from spectral and correlation analyses and continuous wavelet analyses [J]. J Hydrol, 2006, **324**(1-4): 24-39.
- [22] Liu L T, Hsu H T, Gafarend E W. Wavelet coherence analysis of Length-Of-Day variations and El Niño-Southern Oscillation [J]. J Geodyn, 2005, **39**(3): 267-275.
- [23] Grossmann A, Morlet J. Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape [J]. SIAM J Math Anal, 1984, **15**(4): 723-736.
- [24] Capilla C. Application of the Haar wavelet transform to detect microseismic signal arrivals [J]. J Appl Geophy, 2006, **59**(1): 36-46.
- [25] Domingues M O, Jr M O, Costa A M. On wavelet techniques in atmospheric sciences [J]. Adv Spa Res, 2005, **35**(5): 831-842.
- [26] Panizzo A, Bellotti G, Girolamo P D. Application of wavelet transform analysis to landslide generated waves [J]. Coast Eng, 2002, **44**(4): 321-338.
- [27] Cho E, Chon T S. Application of wavelet analysis to ecological data [J]. Ecol Inform, 2006, **1**(3): 229-233.
- [28] Xie J, Liu T, Wei P, et al. Ecological application of wavelet analysis in the scaling of spatial distribution patterns of *Ceratoides eversmanniana* [J]. Acta Ecol Sinica, 2007, **27**(7): 2704-2714.
- [29] 高志,余啸海. Matlab 小波分析与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 1-28.
- [30] 邵晓梅,许月卿,严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, **42**(4): 503-509.
- [31] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 418-435.
- [32] Percival D B, Walden A T. 程正兴译. 时间序列分析的小波分析法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 411-487.
- [33] 刘明才. 小波分析及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 1-138.
- [34] Glen S W, George W B. Wavelet-based correlation (WBC) of zoned crystal populations and magma mixing [J]. Earth Planet Sc Lett, 2002, **202**(1): 133-145.
- [35] 胡昌华,张军波,夏军,等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计—小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999. 1-33.
- [36] 庞茂,周晓军,胡宏伟,等. 基于解析小波变换的奇异性检测和特征提取[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, **40**(11): 1994-1997.
- [37] 刘晓宏,秦大河,邵雪梅,等. 西藏林芝地区近 350 a 来降水变化及突变分析[J]. 冰川冻土, 2003, **25**(4): 375-379.
- [38] Yamamoto R, Iwashima T, Sanga N K. Climatic jump a hypothesis in climate diagnosis [J]. J Meteor Soc JPN, 1985, **63**(6): 1157-1160.