

基于经验模态分解的西安市 空气质量预报订正方法

毛明策^{1,2} 王繁强² 王琦¹

(1 陕西省气象局气候中心, 2 陕西省气象科学研究所, 西安 710014)

摘要 为提高城市空气质量预报的准确率, 研制了针对数值预报模式 CAPPS2 的订正方法, 对 2001—2007 年西安市逐日 PM₁₀、SO₂、NO₂ 浓度均值和相应的降水、风速作经验模态分解(EMD)分析, 用最大熵谱方法检验各本征模态函数(IMF)周期, 计算其方差贡献率, 制定订正方法并进行数值试验。结果表明: PM₁₀ 浓度波动以周尺度为主, 有明显周末效应, 与主要清除过程匹配较好; SO₂、NO₂ 浓度波动与主要清除过程不同步; 基于周末效应的订正规则对 PM₁₀、SO₂ 订正效果较理想, 对 NO₂ 订正效果不确定。

关键词 空气质量预报 经验模态分解 订正

引言

大气污染物浓度变化在时域中存在多层次时间尺度结构和局部化特征^[1], 大气污染物浓度变化同时也具有非线性特征^[2], 同时大气污染物浓度与气象因子的关系也并不是线性的^[3], 因此必须采用非线性非平稳的分析工具来研究大气污染物浓度的时间序列特征及其与气象因子的匹配关系, 才能够合理订正大气质量数值模式预测的结果, 进一步提高预测准确率。

Huang, N. E. 等^[4-5]于 1998 年提出了 HHT (Hilbert-Huang Transform) 方法, 这种变换非常适合具有非线性和非平稳特征的时间序列。HHT 方法将信号作经验模态分解(EMD: Empirical Mode Decomposition), 即逐级进行平稳化处理, 把不同周期的波动从原信号中分离出来, 最后得到的是趋势分量, 不同尺度的波动被定义成为本征模态函数(IMF: Intrinsic Mode Function), 分解得到的 IMF 分量是基于序列本身的局部特征时间尺度, 本征模态分量表征了原序列的不同时间尺度的振荡变化, 而趋势分量则是单调函数或者均值函数, 基本反映了序列的趋势。目前, EMD 方法已经成功应用于水利、古气候和大气科学研究领域^[6-8]。

本文采用西安污染物日均浓度监测值和相应的降水、风速数据, 通过 EMD 分解, 计算每个特征分量的主要周期, 结合每个特征分量的方差贡献, 分析大气污染物与主要清除机制的匹配关系, 试图制定数值大气质量预报模式 CAPPS2 的订正规则, 提高预报准确率。

1 数据和方法

1.1 西安空气质量数据

西安空气质量数据为 2001—2007 年西安市环境站监测资料, 包括 SO₂、NO₂ 和 PM₁₀ 日平均浓度, 气象要素选取日平均降水量、风速, 选用包含污染监测点的西安站和长安站同期资料平均值, 共连续 2477 日资料。

1.2 方法

采用 Huang 等于 1998 年提出的经验模态分解方法^[4-5], 从近年污染物浓度和气象要素序列中逐级分解出 IMF 分量, 通过分析这些分量提示原序列内在的多尺度振荡变化。分离筛选过程是把序列 t 中的极大值和极小值分别用样条函数连结起来, 构成上下包络线, 它们的均值为 m_1 。由原序列 t 与 m_1 之差得到 h_1 ; 经过 k 次筛选, 使得 h_1 的全部极大值都为正, 极小值都为负, 且局部峰谷的波形关于横轴

是基本对称的,这样得到第 1 个 IMF1:

$$C_1(t) = h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t)$$

式中 C_1 是原序列中时间尺度最短即最高频的分量(模态),把 C_1 从原序列中分离出来,得到剩余序列 R_1 ,再对 R_1 重复上述过程,得到第 2 个 IMF 分量,如此进行下去,可以逐级分离出 IMF 分量,最后剩余一个趋势项,它可以表示序列的总趋势,详细的计算方法见文献[9]~[10]。在构建上下包络线时采用镜像法延拓两端^[11]。编制程序,分别对污染资料和气象数据进行 EMD 分析,得到各 IMF 分量,计算各 IMF 的方差、方差贡献率,利用最大熵谱法^[12],计算每个 IMF 分量的周期,进行 Fisher 检验,列出通过 0.05 显著性水平检验的周期。

对于污染物在一周内的平均浓度变化,统计 2001 年 4 月 8 日至 2008 年 1 月 15 日共 352 周 PM10 日均浓度,按周次平均后作图。

1.3 西安市空气质量数值预测模式应用

研究者对于城市空气质量已经作了很多研究工作^[13-15],分析了西安空气质量环境的气象学成因^[16]。

陕西省气象局针对西安市空气质量预报需要,建立了 CAPPS2 与中尺度模式 MM5 嵌套的数值空气质量预报模式^[17]。CAPPS2 模式预报污染物的污染指数或质量浓度时,需要前一天的污染物日均质量浓度值作为初始值,在假设两天之间日平均污染源强的变化可以忽略不计的前提下,由气象条件计算污染物质量浓度的变化,从而预报第 2 天的日平均污染物质量浓度或污染指数,因此不需要污染源强资料。但是日常的污染物浓度波动规律与城市生产生活的规律非常密切,实际两日之间的平均污染源强总是不同的,因此对预报结果的修订成为进一步提高预报准确性的重要问题。

1.4 西安空气质量预测数据

对 2008—2010 年 605 个预测样本进行订正数值试验结果显示,预测值均值与观测值均值间有明显差值,考虑到预测值和观测值存在系统误差^[17],首先计算平均系统误差,预测值扣除平均系统误差后作为数值试验样本。

2 大气污染物日均浓度和气象要素的 EMD 分解

已有研究证明了北京、西安等北方城市 PM10 浓度存在着多时间尺度的变化特征^[18-19],根据

EMD 分解结果可以很容易得到 PM10 浓度的年际(IMF8)、年内(IMF7)、半年(IMF6)、季(IMF5)和尺度更小的波动,对 NO₂ 和 SO₂ 日均浓度也有类似的结果,说明 EMD 方法可以很好地对原始信号进行合理分解,生成原始信号的各种尺度的分解结果。

2.1 大气污染因子浓度 EMD 分解

分解 PM10 浓度时间序列得到的各 IMF 中,方差贡献率最大波动包含了 4.5~8.9 d 的波动,可以近似看作周尺度变化。图 1 为西安市 PM10 日均浓度的周变化。由图 1 可见,PM10 浓度在周内存在明显的波动过程,从周六开始下降,周一达到最低浓度点,周二上升,周三至周五维持在一个较高的浓度水平,表现出一个典型的“周末效应”(Weekend effect),而且这一周末效应与其他城市空气污染指数的周循环不同^[20],因此污染物的周末效应随城市不同,具有多态性。

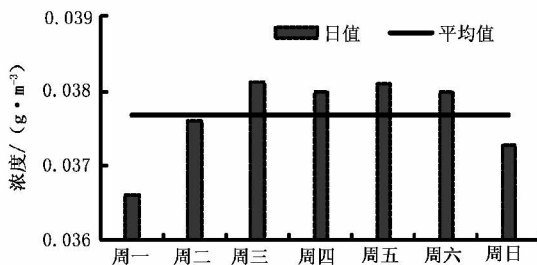


图 1 西安市 PM10 日均浓度的周变化

表 1 为污染物浓度和气象要素本征模态函数(IMF)的显著周期及方差贡献率。从表 1 可见,对 NO₂ 日均浓度波动贡献最大的是约 0.5 a(191 d)和 1 a(354.2 d)尺度上的振荡,而对 SO₂ 日均浓度波动贡献最大的是约 1 a(354.2~413 d)左右的振荡。由于 NO₂ 和 SO₂ 的浓度波动中周尺度也是显著的,因此这两种污染也存在着周末效应的特征。但根据方差贡献率排序,短周期变化并不是 NO₂ 和 SO₂ 浓度波动的主要原因,对全球 NO_x 周末效应进行的研究^[21]甚至指出中国多个城市不存在 NO_x 周浓度循环。

2.2 气象要素的 EMD 分解

考察同期日降水量各 IMF 的方差贡献率,得到西安日降水量的波动主要包含着 2 周(13.9 d)、4 周(29 d)的波动,两个波动可以解释 64.2% 的降水波动,已有的研究指出 PM10 日均浓度波动与日降水量的周期有关^[20],降水频次比降水量周末效应更为

明显^[22],因此 PM10 与降水周期有较好同步关系。同时 PM10 浓度的优势 IMF 与日平均风速的优势 IMF 也都出现在短周期内,表明 PM10 浓度的波动与污染物平流扩散能力的波动匹配较好。

NO₂ 和 SO₂ 周尺度的浓度变化波动对长时间

浓度变化贡献较小,NO₂ 和 SO₂ 与湿清除和平流扩散能力不相匹配,清除能力波动并不是西安 NO₂ 和 SO₂ 浓度波动的主要原因,表明西安仍然是源主导的污染类型。

表 1 污染物浓度和气象要素本征模态函数(IMF)的显著周期及方差贡献率

		本征模态函数										
		IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9	IMF10	IMF11
SO ₂	方差贡献率/%	5.2	4.1	2.6	2.7	4.3	22.4	20.3	5.7	32.8	/	/
	周期/d	4.2	9.8	21.5	38.6	118.4	413.2	354.2	—	—	/	/
NO ₂	方差贡献率/%	4.3	4.9	4.9	3.5	1.7	12.1	7.8	7.8	52.9	/	/
	周期/d	5.3	10.2	15.9	32.7	73.3	191.0	354.2	—	—	/	/
PM10	方差贡献率/%	26.5	23.9	11.8	10.4	4.2	2.6	17.2	0.1	3.5	/	/
	周期/d	4.5	8.9	19.5	45.5	80.4	124.3	354.2	825.8	—	/	/
降水	方差贡献率/%	43.8	18.7	20.4	7.5	3.7	2.0	1.4	1.9	0.4	0.1	0.0
	周期/d	13.9	—	29.0	23.0	54.3	83.0	155.3	275.6	825.8	—	—
风速	方差贡献率/%	27.8	19.5	15.0	7.5	3.5	1.8	11.8	5.0	2.3	5.9	/
	周期/d	3.2	8.4	13.7	41.1	54.3	130.8	619.5	619.5	—	—	/

注:IMF1~IMF11,为经过 EMD 分解得到的污染物浓度序列和气象要素本征模态分量;“—”为没有明显趋势或存在更长时间的波动,“/”为没有这个分解项。

3 预测订正规则

因为假设逐日源排放量的波动很小,导致空气质量预报模型 CAPPS2 会在源主导型的污染预报中出现误差。根据对日均浓度和气象要素多时间尺度的分析,可以得出西安主要大气污染因子浓度具有周循环特征。在此基础上试验合理规则对预测结果进行订正。试验的过程是:根据图 1 的统计结果,计算一周内各日相对平均浓度的百分比,对此百分比随机的增加或者减少±5%,得到多组周内各日浓度权重序列;根据 CAPPS2 预报结果,计算各组权重修订后的预报结果序列,对于每组权重得到的序列,利用 GB 3095—1996 要求进行分级;参照王繁强的评分办法(式 1)^[17],对 CAPPS2 数值预报和订正规则执行的修正结果进行评分,计算各监测点评分的绝对变化和相对变化。

$$S=\frac{R}{T}\times 100\%$$

(1)

式(1)中 R 表示分级预报正确样本数,T 表示总样

本数,S 为 Score 评分。

经过数值试验,基于周末效应合理的周内污染物浓度订正系数如表 2。

表 2 西安空气质量数值预测订正系数

	周一	周二	周三	周四	周五	周六	周日
订正系数	0.95	1.05	1.1	1.2	1.2	1.2	1.05

表 3 为西安空气质量预报订正前后评分及其绝对变化和相对变化。由表 3 可见,数值预报经过系统误差订正后,等级预报均可达到 70%左右的正确率,使用表 2 权重规则订正后,对各污染因子预报水平提高能力不同,依次是 SO₂>PM10>NO₂,其中 SO₂ 平均提高 22.2 分,PM10 平均提高 7.18 分,评分均有较明显的提高,表明订正规则有一定的实践意义,而 NO₂ 评分有增有减,平均提高 3 分,订正规则作用不明显,这与 NO₂ 周内浓度波动不明显有关,需要进一步研究合理的订正规则。

表 3 西安空气质量预报订正前后评分及其绝对变化和相对变化

	SO ₂					NO ₂					PM10				
	KGC	XQXQ	FZC	XZ	CT	KGC	XQXQ	FZC	XZ	CT	KGC	XQXQ	FZC	XZ	CT
数值预报评分	72	76	70	74	75	76	73	74	71	80	74	77	72	78	78
订正后评分	94	92	95	94	94	73	79	78	81	78	86	83	81	84	82
评分绝对变化	22	16	24	20	19	−3	5.5	3.8	9.7	−1	12	6	8.3	5.7	3.9
评分相对变化/%	30↑	22↑	35↑	26↑	25↑	−4↓	7.5↑	5.1↑	14↑	−2	16↑	7.8↑	12↑	7.3↑	5↑

注:KGC、XQXQ、FZC、XZ、CT 分别为开关厂、兴庆小区、纺织城、小寨和草滩观测站。

4 结论和讨论

(1)西安市 PM10 浓度日均值变化有较明显的周末效应,与降水波动有较明显的匹配关系。同时,西安 PM10 日均浓度也表现出一定的滞后现象,多数情况下,周一是城市人群活动的一个高峰,但周一却出现了一周的最低浓度值,周六相对活动要减少许多,但浓度与周三到周五接近,表明西安 PM10 浓度的变化受到人群活动的强烈影响,但时间上存在着明显的滞后。这一滞后现象也可能与污染观测与气象观测不同步有关,污染观测日界比气象观测日界提前 8 h,是造成滞后的一个重要原因,也是在空气质量预报订正时应注意的问题之一。

(2)SO₂、NO₂ 的浓度波动虽然也存在着周末效应,但周末效应对浓度波动的贡献并不大,年尺度上的浓度波动贡献最大。SO₂、NO₂ 的浓度的波动与主要清除机制的波动并不同步,因此西安 SO₂、NO₂ 的污染可能是排放主导污染类型,因此必须进一步降低排放量,才可能表现出自然清除机制对污染物浓度的影响。

(3)基于周末效应的订正规则对 SO₂ 和 PM10 有理想的订正能力,对 NO₂ 订正效果不确定,需要进一步研究相应的订正规则。

应该指出的是,数值空气质量预报理论和方法还不成熟,订正方法也多以经验的方式给出,定量的订正方法需要不断试验和发展。

致谢:感谢中国气象局培训中心提供学习机会,感谢 Gabriel Rilling 博士无偿为本项工作提供了 EMD 程序。

参考文献

[1] 陈柳,马广大.小波变换在大气污染物时间序列分析中的应用[J].西安科技大学学报,2006,26(1):58-61.
[2] 刘呈,李听,胡非.大气污染物浓度变化的非线性特征分析[J].

气候与环境研究,2001,6(3):328-336.
[3] 周江兴.北京市风种主要污染物浓度与气象要素的相关分析[J].应用气象学报,2005,16:421-721.
[4] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves ; the Hilbert spectrum [J]. Ann Rev Fluid Mech, 1999,31:417-457.
[5] Huang W,Shen Z, Huang N E , et al. Engineering analysis of biological variables: An example of blood pressure over 1 day [J]. Proc Natl Acad Sci, 1998, 95 (9):4816-4821.
[6] 万仕全,封国林,周国华,等.基于 EMD 方法的观测数据信息提取与预测研究[J].气象学报,2005,63(4):516-525.
[7] 郭航忠,丛培江. Hilbert-Huang 变换在大坝监测资料分析中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2007,32(9):774-777.
[8] Sol’el J, Turiel A, Llebot J E. Using empirical mode decomposition to correlate paleoclimatic time-series [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2007,7:299-307.
[9] 邓拥军,王伟,钱长春,等. EMD 方法 Hilbert 变换边界问题的处理[J].科学通报,2001,46(3):257-263.
[10] 孙炯,林振山.经验模态分解下中国气温变化趋势的区域特征[J].地理学报,2007,62(11):1132-1141.
[11] 郑祖光,刘莉红.经验模态分析及其应用[M].北京:中国气象局培训中心,2008.
[12] 聂士忠,王玉泰.最大熵谱分析方法和 MATLAB 中对短记录资料的谱分析[J].山东师范大学学报(自然科学版),2005,20(3):40-41.
[13] 王淑云,节江涛,熊险平,等.城市空气质量与气象条件的关系及空气质量预报系统[J].气象科技,2006,34(6):688-692.
[14] 王宏,冯宏芳,隋平.福州市空气高污染与气象条件关系[J].气象科技,2009,37(6):676-681.
[15] 朱蓉,徐大海,赵珊珊.第 2 代大气污染物排放源强反演模式 SSIM2 及其在城市规划大气环境影响评价中的应用[J].气象科技,2009,37(6):641-645.
[16] 蔡新玲,王繁强,姜创业,等.西安城市 PM10 污染特征及持续重污染过程分析[J].气象科技,2008,36(6):697-700.
[17] 王繁强,王建鹏,胡琳,等. CAPPS2 在西安市大气污染分区预报中的应用[J].陕西气象,2006,5:8-12.
[18] 王淑英,张小玲.北京地区 PM10 污染的气象特征[J].应用气象学报,2002,13(特刊):177-184.
[19] 王健鹏,王式功,孟小绒,等.沙尘天气等对西安市空气污染影

响的研究[J]. 中国沙漠,2004,24(5):58-564.

[20] 章志芹,唐健,汤剑平. 无锡空气污染指数气象要素的周末效应[J]. 南京大学学报(自然科学版),2007,43(6):643-654.

[21] Beirle S, Platt U, Wenin M, et al. Weekly cycle of NO₂ by GOME measurements: a signature of anthropogenic sources [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2003, 3: 2225 - 2232.

[22] 程承旗,何华伟,马廷,等. 厦门市 2001—2002 年 PM10 浓度时间序列变化分析[J]. 干旱地区研究,2005,12(6):11-13.

Correcting Rules for Xian Urban Air Quality Forecasts with Empirical Mode Decomposition

Mao Mingce¹ Wang Fanqiang² Wang Qi¹

(1 Shaanxi Climate Center, 2 Shaanxi Institute of Meteorological Sciences, Xi'an 710014)

Abstract: The daily average concentrations of PM10, SO₂, NO₂ and meteorological factors (precipitation and wind) of the corresponding time from 2001 to 2007 in Xi'an, Shaanxi Province, are analyzed with Empirical Mode Decomposition (EMD). The periods are tested and the variance contribution rates are calculated of each intrinsic mode function (IMF) by the maximum entropy spectral analysis as well, for improving the accuracy rate of the urban air quality forecast system (CAPPS2) and instituting the correcting rules for the numerical forecast model. The results show: the main period of PM10 concentration fluctuation is about a week, has clear weekend-effect, and matches well with major scavenging process, but the concentration fluctuations of SO₂ and NO₂ do not synchronize the scavenging processes, suggesting that the pollution of Xi'an is emission-guided, and the correction rules based on the weekend-effect are ideal for the improvement of PM10 and SO₂ numerical forecast results, and uncertain for NO₂.

Key words: air quality forecast, correction, empirical mode decomposition