

# 地球极移振幅和相位的长期变化特征及预测研究

王勇<sup>1,2</sup> 刘苏峡<sup>1</sup> 邵亚平<sup>3</sup> 彭公炳<sup>1,4</sup> 王月玲<sup>1</sup>

(1中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 3 德国科隆大学地球物理与气象研究所, 科隆 50923;

4 国际欧亚科学院中国科学中心, 北京 100107)

**摘要:** 利用来自国际地球自转参数服务局 (International Earth Rotation Service, IERS) 的1900—2013年极移数据, 计算其振幅和相位序列, 基于EMD (empirical mode decomposition) 和LS-SVM (least squares support vector machines) 方法, 分析了极移振幅和相位的长期多时间尺度变化特征, 并预测了极移的未来走向。结果表明: 极移振幅变化在1900—2013年主要以增加趋势和6.2a的周期为主, 而极移相位变化主要以趋势和低频变化为主; 采用EMD对原始信号进行分解, 对得到的一系列分量进行LS-SVM建模预测, 对极移振幅和相位的预测是有效的; 未来极移振幅将进一步加大, 地极存在向约68°W的长期漂移趋势。

**关键字:** 极移, 长期变化, 预测, EMD, LS-SVM

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.002

## Long-Term Changes of the Amplitude and Phase of the Earth's Polar Motion and Their Projections

Wang Yong<sup>1,2</sup>, Liu Suxia<sup>1</sup>, Shao Yaping<sup>3</sup>, Peng Gongbing<sup>1,4</sup>, Wang Yueling<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Institute for Geophysics and Meteorology, University of Cologne, Cologne 50923

4 China Science Center, International Eurasian Academy of Sciences, Beijing 100107)

**Abstract:** The amplitude and phase time-series of polar motion were calculated by using the polar motion data in 1900-2013, which were provided by the International Earth Rotation Service (IERS). Based on EMD (empirical mode decomposition) and LS-SVM (least squares support vector machines) methods, the long-term changes characteristic of pole motion's amplitude and phase over multiple time scales were analyzed, and the future projections of polar motion were predicted. The results show that: 1) The amplitude variations of polar motion have main period of about 6.2-year and an increasing trend for 1900-2013, and the phase variations have a trends and low-frequency oscillations; 2) The EMD and LS-SVM model is very effective in the prediction of amplitude and phase variations of polar motion; (3) Polar motion amplitude is further increasing in the future, the trend of the phase has the direction of approximately 68°W.

**Keywords:** the earth's polar motion, long-term changes, projections, EMD, LS-SVM

### 0 引言

地极移动 (polar motion, 简称极移) 是地球瞬时自转轴相对于地球本体的运动导致极点在地球表面上的位置发生缓慢变化的现象。极移是一个重要的地球定向参数 (earth orientation parameters, EOP), 在天球坐标系和地球坐标系的转换中起关键作用。极移变化直接影响到卫星定轨、大地测

量、导航和极潮等, 若能预测极移将具有重要的应用价值, 故对极移变化特征及预测的研究对地球科学的发展与应用都具有重要的意义。

1888年德国的屈斯特纳才从纬度变化的观测中发现极移, 美国天文学家张德勒进一步指出, 极移包括两个主要的周期: 近14个月的周期 (张德勒摆动, Chandler wobble) 和周年周期<sup>[1, 2]</sup>。在长趋势研究方面, Wilson等<sup>[3]</sup>和Vondrák<sup>[4]</sup>都发现存在极移的长趋势变化; Gross<sup>[5]</sup>获得了长趋势项变化的方向为70°W, 大小约为3mas/a; 廖德春<sup>[6]</sup>将依巴谷暂定星表 (H37) 作为统一参考框架进行极移序

收稿日期: 2016年2月3日; 修回日期: 2016年7月18日

第一作者: 王勇 (1979—), Email:wuyong0210@163.com

资助信息: 国家重大科学研究计划 (2012CB957802)

列的计算, 获得了极移长趋势变化的漂移速度的平均值约为 $3.86\text{mas/a}$ , 方向为 $82.7^\circ\text{W}$ ; 李金岭等<sup>[7]</sup>对1978—1998年基于甚长基线干涉测量技术 (very long baseline interferometry, VLBI) 的观测资料进行分析, 发现长期极移速率为 $2.74\text{mas/a}$ , 方向为 $83.9^\circ\text{W}$ 。在长周期研究方面, Markowitz<sup>[8]</sup>、廖德春等<sup>[9]</sup>研究都得出了20多年的周期, 韩永志等<sup>[10]</sup>发现极移振幅变化中存在着约6.5和40a的主要周期。尽管上述研究在趋势和周期上结果有所差异, 但都证实了极移长趋势和长周期的存在。

目前, 极移的长趋势变化归因于第四纪冰川期后地壳的反弹<sup>[11]</sup>, 现代极移资料对地球物质重新分布比较敏感, 冰川融化和水储量变化是长趋势极移的激发源, 贡献为 $10\% \sim 20\%$ <sup>[12-14]</sup>。现代空间大地测量观测资料显示在2005年前后极移的方向发生了转变 (转向向东漂移), Chen等<sup>[15]</sup>分析了GRACE卫星重力观测资料, 发现此次转变是由全球变暖引起的南北两极和山地冰川加剧融化及海平面上升所致, 这将极移与气候变化联系在一起, 为研究全球气候变化探索了一个新的方向。另外, 采用傅里叶分析<sup>[16]</sup>、谱估计<sup>[17]</sup>和小波等<sup>[18]</sup>方法, 分析极移中各种周期变化的特征, 在探讨极移的变化特征及其与一些地球物理现象的联系方面也取得不少研究成果<sup>[19-21]</sup>。不过, 许多学者从极移的 $x$ 和 $y$ 两分量入手进行研究显得有些局限。

同时在预测极移方面的研究也不少, 主要方法有最小二乘外推法<sup>[22]</sup>、最小二乘谐波与自回归法<sup>[23-25]</sup>、人工神经网络<sup>[26,27]</sup>、小波和模糊推理系统<sup>[28]</sup>等, 其研究集中在短期预报上<sup>[29,30]</sup>, 这不能满足地球科学对长期预报结果的需求。因此, 本文采用地球极移振幅和相位数据, 基于EMD和LS-SVM方法, 试图从另一个角度讨论极移的长期变化特征及其预测, 为进一步认识极移变化特征和开展极移与气候变化关系的研究提供一些信息。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

本文中采用的地极坐标序列是近年国际地球自转参数服务 (International Earth Rotation Service, IERS) 发布的一个统一归算结果 (EOP C01), 时间跨度为1900—2013年, 每0.05a—对地极坐标值 (极移的 $x$ 、 $y$ 分量), 单位是mas, 图1给出年平均地极坐标分布图。地极坐标资料是相对于国际协议原点 (conventional international origin, CIO) 计量的, CIO位于地球的瞬时北极附近, 是1900—1905年6a 的

地球自转极的平均位置。如果对极移的 $x$ 和 $y$ 分量分别进行研究, 可能不会完全反映极移的变化本质。为此, 文中定义一个复函数:

$$z = x + iy, \quad (1)$$

式中,  $x$ ,  $y$ 分别表示地球极移的两个分量。函数 $z$ 可以表征地球极移的变化, 其模值 $|z|$ 表示极移偏离原点的大小, 即振幅; 其幅角表示极移相位的变化。文中所采用的极移的年平均振幅和相位是所用序列的每0.05a的瞬时极点与CIO的角距离 (模) 和幅角, 然后取年平均值得到的。

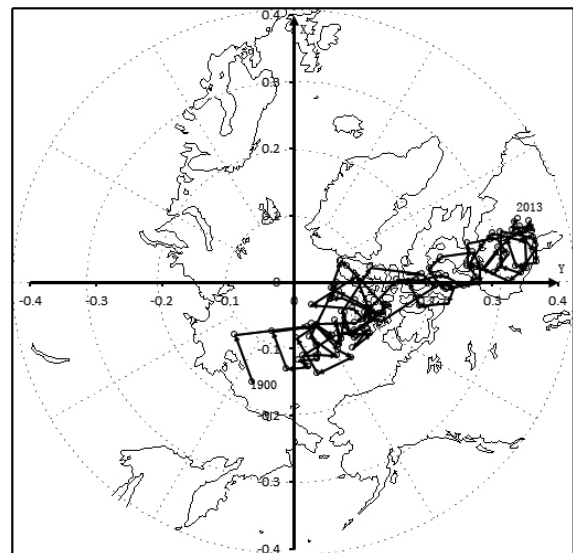


图1 极移变化示意图

Fig.1 Diagram of variations in the polar motion

## 1.2 方法

### 1.2.1 经验模态分解

经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 是Huang等<sup>[31]</sup>提出的一种全新的针对非线性非平稳信号处理的算法。EMD方法是从原信号中提取一组本征模函数 (intrinsic mode function, IMF) 分量, 且EMD分解出的各个IMF分量满足下列2个条件: ①在整个序列上极值点个数和过零点个数相等或至多相差一个; ②在任意时刻, 由极大值点定义的上包络线和由极小值点定义的下包络线的平均值为0。其分解过程如下。

假定时间序列为 $X(t)$ , 找出 $X(t)$ 所有的极大值点并用三次样条函数拟合成原始信号的上包络线; 找出 $X(t)$ 所有的极小值点并用三次样条函数拟合成原始信号的下包络线; 上、下包络线的均值为原数据序列的平均包络线 $m_1(t)$ ; 将原时间序列 $X(t)$ 减去该平均包络线 $m_1(t)$ 后得到一个去掉低频的新数据序列 $h_1(t)$ :

$$h_1(t) = X(t) - m_1(t). \quad (2)$$

此时,  $h_1(t)$  仍然不是一个平稳数据序列, 需要对它重复上述“筛”(sifting)过程。重复进行上述处理过程  $k$  次, 直到所得到的平均包络线趋于 0 为止, 这样就得到了第一个 IMF 分量  $C_1(t)$ :

$$C_1(t) = h_{1k}(t) - m_{1k}(t). \quad (3)$$

第一个 IMF 分量代表原始数据序列  $X(t)$  中最高频的组分。将原始数据序列  $X(t)$  减去第一个 IMF 分量  $C_1(t)$ , 可以得到一个去掉高频组分的差值数据序列  $r_1(t)$ 。对  $r_1(t)$  进行上述平稳化处理可以得到第二个 IMF 分量  $C_2(t)$ , 如此重复直到最后一个残余序列  $r_n(t)$  不可再被分解为止, 此时  $r_n(t)$  代表原始数据序列的均值或趋势:

$$\begin{aligned} r_2(t) &= r_1(t) - C_2(t), \\ \dots \\ r_n(t) &= r_{n-1}(t) - C_n(t). \end{aligned} \quad (4)$$

而原始的时间序列  $X(t)$  即可表示为所有的 IMF 及余量之和:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n C_i + r_n. \quad (5)$$

### 1.2.2 最小二乘支持向量机

最小二乘支持向量机 (least squares support vector machines, LS-SVM) 最早是由 Johan A K Suykens, Joos Vandewalle 等提出的, 是标准 SVM 的一种扩展<sup>[32]</sup>。与支持向量机的其他版本相比, LS-SVM 的待选参数少, 而且用等式约束来代替原有的不等式约束, 减少了一些不确定性因素, 它的损失函数直接定义为误差平方和, 将优化中的不等式约束转化为等式约束, 由此将二次规划问题转化为线性方程组求解, 降低了计算复杂性, 加快了求解速度。其基本原理如下:

非线性预测模型:

$$f(x) = (\omega, \varphi(x)) + b, \quad (6)$$

式中,  $\omega$  为法向量,  $b$  为常数,  $\varphi(x)$  是从输入空间到高维特征空间的非线性映射。给定一组数据点集  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, \dots, l$ ,  $x_i \in R^d$  是与预测量密切相关的影响因素,  $d$  为所选输入变量的维数,  $y_i \in R$  是预测量的期望值,  $l$  是已知数据点的总数。按结构最小化原理, LS-SVM 优化目标可表示为:

$$\min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^l e_i^2, \quad (7)$$

式中,  $e_i$  为误差,  $e \in R^{l \times 1}$  为误差向量,  $\gamma$  为正则化参数, 控制对误差的惩罚程度。引入拉格朗日 (Lagrange) 乘子,  $\lambda \in R^{l \times 1}$ , 式 (7) 可转化为:

$$\min J = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^l e_i^2 - \sum_{i=1}^l \lambda_i (\omega^T \varphi(x_i) + b + e_i - y_i). \quad (8)$$

为满足 Mercer 条件的核函数,  $K(x_i, x_j) = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j)$ , 用原空间的核函数取代高维特征空间中的点积运算, 使计算得以简化。因此非线性预测模型的表达式为:

$$y = \sum_{i=1}^l \lambda_i K(x_i, x) + b, \quad (9)$$

式中,  $K(x_i, x)$  表示从输入空间到高维特征空间的非线性映射。

## 2 地球极移振幅和相位的变化特征

### 2.1 极移振幅的多时间尺度变化

为了解地球极移振幅的长期变化特征, 对 1900—2013 年极移振幅变化进行多尺度分析。本文用 EMD 方法对近 114a 的年平均极移振幅进行分析, 图 2 是极移振幅原数据和用 EMD 方法对其进行逐级分解得到的 4 个 IMF 分量及其趋势分量 (Res.)。4 个 IMF 分量由高频向低频依次排列, 趋势分量 Res. 是极移振幅在近 114a 呈现增加的变化趋势。其后, 将 4 个本征模态函数 (IMF) 分量, 再经过谱分析得到每个 IMF 随时间变化的频率分布。各 IMF 分量表示不同尺度的变化, 每一个 IMF 分量只是一个窄波段的信号, 4 个 IMF 分量的主要频率分布特征, IMF1 频率比较分散, IMF2, IMF3 和 IMF4 较集中。IMF1 瞬时频率跨度较大, 其主要能量 0.14~0.18a<sup>-1</sup> 频率上, 表示约 5~7a 的周期波动; IMF2 表示约 7~9a (0.11~0.14a<sup>-1</sup>) 的波动; IMF3 是约 17~33a (0.03~0.07a<sup>-1</sup>) 的周期波动, IMF4 反映约 33~50a (0.02~0.03a<sup>-1</sup>) 的波动。表 1 列

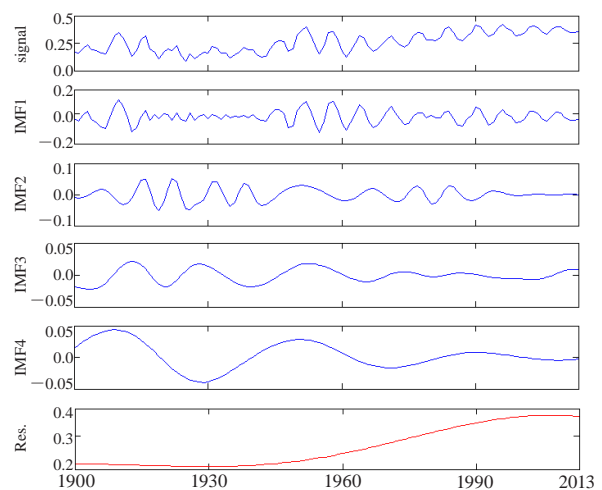


图2 1900—2013年极移振幅的EMD分解图  
(signal: 极移振幅, Res.: 趋势分量, IMF1~IMF4: 4个 IMF分量)

Fig.2 EMD of polar motion amplitude for 1900—2013  
(signal: polar motion amplitude, Res.: trend component, IMF1-IMF4: four components)

出了4个分量经过谱分析后得到的各个分量的主要周期, 给出了IMF1~IMF4依次以6.2, 8.8, 19.7及42.7a的主周期。

表1 极移振幅EMD展开分量的主要周期与方差贡献率  
Table 1 The variances and their contributions of IMFs and Res. of polar motion amplitude

	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	Res.
主要周期/a	6.2	8.8	19.7	42.7	
方差贡献率/%	27.3	5.5	1.4	5.1	60.7

经过EMD分解, 把与极移振幅相联系的主要波动周期特征都表现出来了。分量IMF1的主周期集中在6.2a, 与韩永志等<sup>[10]</sup>2006年的研究一致。由此可见, EMD经验模态分解方法对极移振幅资料的分析有非常好的效果。

为了解各个波动对极移振幅原序列的影响大小, 即各个分量(包括IMF和趋势分量)对原序列贡献, 解析方差被广泛地用来描述各个分量贡献率<sup>[33-35]</sup>。表1列出各个分量对原序列的贡献率, 极移振幅变化的增长趋势贡献最大(Res.), 贡献率为60.7%; 其次是IMF1的贡献率为27.3%; 接着贡献率细节项依次是IMF2, IMF4和IMF3, 其贡献率共12%。由此可见, 极移振幅变化在1900—2013年主要以增加趋势和6.2a的周期为主。

## 2.2 极移相位的多时间尺度变化

利用1900—2013年近114a的极移相位资料, 基于EMD方法对极移相位进行多时间尺度分析。图3是极移相位资料 and 用EMD对其进行逐层分解得到的趋势分

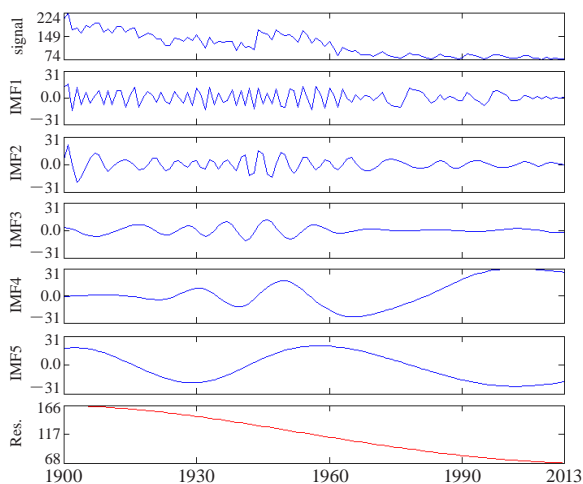


图3 1900—2013年极移相位的EMD分解图  
(signal: 极移相位, Res.: 趋势分量, IMF1~IMF5: 5个IMF分量)

Fig.3 EMD of polar motion phase for 1900—2013  
(signal: polar motion phase, Res.: trend component, IMF1—IMF5: five components)

量及其5个IMF。由趋势分量(Res.)可见, 极移相位在近114a呈现下降的变化趋势, 5个IMF由高频向低频依次排列。表2列出了5个IMF经过谱分析得到的主要周期, 结果表明IMF1~IMF5依次以3, 4.9, 9.5, 48.7及57a以上的主周期波动。

表2 极移相位EMD展开分量的主要周期与方差贡献率  
Table 2 The variances and their contributions of IMFs and Res. of polar motion phase

	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	Res.
主要周期/a	3	4.9	9.5	48.7	>57	
方差贡献率/%	3.5	2.4	1.0	15.0	14.0	64.1

表2也列出了各个分量对原序列的贡献率, 极移相位的趋势分量贡献率最大, 为64.1%; 其次是IMF4贡献率为15.0%; 接着是细节项IMF5贡献率为14.0%; 然后, 贡献率低于10%的分量依次是细节项IMF1, IMF2和IMF3, 其贡献率分别是3.5%, 2.4%和1.0%。这表明极移相位主要以趋势和低频变化为主, 其方差贡献率占93.1%。

## 3 地球极移振幅和相位的未来变化

### 3.1 预测方法的可靠性

本文采用自回归模型(AR)、LS-SVM、EMD和LS-SVM耦合模型(EMD+LS-SVM)分别对极移振幅和相位进行预测, 希望从3种方法中找出最可靠的方法, 预测未来极移的走向。以极移振幅和相位1900—2001年的训练数据进行模型训练, 以2002—2013年共12a的数据供检验。自回归模型直接对极移振幅和相位的训练数据进行回归, 建立自回归方程进行预测; 在LS-SVM和EMD+LS-SVM使用训练数据前, 为加快模型的识别精度与收敛速度, 对资料进行归一化处理, 并采用交叉验证确定正则化参数 $\gamma$ 和核函数 $\sigma^2$ , 确定嵌入维 $m=10$ , 延迟时间为1,  $d$ 设为10; LS-SVM模型直接基于1900—2001年的训练数据进行训练, 而EMD和LS-SVM耦合模型是在EMD分解基础上对各分量使用LS-SVM进行训练。最终, 基于2002—2013年极移振幅和相位数据, 对三种方法进行验证。为验证方法的有效性与可行性, 采用平均绝对相对误差(mean absolute relative error, MARE)和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)为模型预测精度的评价标准:

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_t \left| \frac{T_{\text{pred}}(t) - T_{\text{real}}(t)}{T_{\text{real}}(t)} \right| \times 100\%$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_t |T_{\text{pred}}(t) - T_{\text{real}}(t)|$$

式中,  $n$ 为预报时间长度,  $t$ 为某年,  $T_{\text{pred}}(t)$ 为某年的预

报值,  $T_{real}(t)$  为某年的实测值。

图4和表3中比较了3种预测模型。由表3可见, EMD和LS-SVM耦合模型预测效果优于单独的LS-SVM模型及自回归模型。EMD和LS-SVM耦合模型预测模型的精度较高, 预测结果满足预报要求, 表明该模型可应用于实际预测。

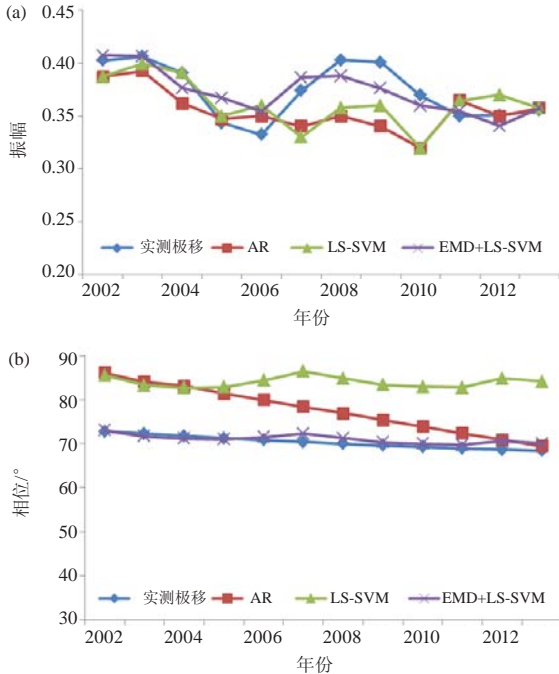


图4 3种模型的预测结果  
(a) 振幅; (b) 相位

Fig.4 Predicted results of three models  
(a) amplitude; (b) phase

表3 3种预测模型误差统计表  
Table 3 Error statistics of three prediction models

模型	振幅误差		相位误差	
	MAE	MARE/%	MAE	MARE/%
AR	0.0540	6.67	8.3400	8.78
LS-SVM	0.0407	4.89	6.3199	6.30
EMD+LS-SVM	0.0016	0.24	0.3272	4.60

### 3.2 未来极移变化特征

通过对极移振幅和相位进行EMD分解获得IMF各分量及趋势项, 如图2和图3所示。分别对各分量建立LS-SVM模型, 采用交叉验证法选择模型参数, 将获得的模型参数对各IMF分量进行训练, 并预测2014—2025年未来极移的走向(图5)。图5中是各IMF分量及趋势项进行重构的预测结果, 即获得2014—2025年未来极移的振幅和相位。可见, 未来12a极移振幅进一步加大, 同时伴随着地极向68°W方向的长期漂移。

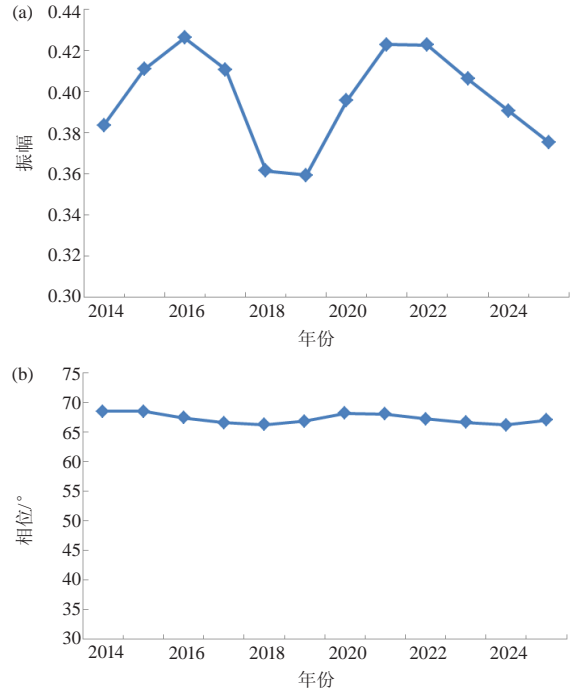


图5 基于LS-SVM模型的预测结果  
(a) 振幅; (b) 相位

Fig.5 The predicted results based on the LS-SVM model  
(a) amplitude; (b) phase

## 4 结论

本文对1900—2013年的极移振幅和相位的序列进行多时间尺度变化特征研究, 提出基于EMD和LS-SVM的预测模型, 并预测了未来12a的极移走向, 通过分析得出以下结论。

1) 极移振幅变化在1900—2013年主要以增加趋势和6.2a的周期为主, 而极移相位变化主要以趋势和低频变化为主。

2) 采用EMD对原始信号进行分解, 对得到的一系列IMF采用相应的模型参数和核函数进行LS-SVM建模预测, 该模型用于极移振幅和相位预测是有效的。

3) 通过比较, 得到了最佳的预测模型(EMD+LS-SVM), 利用其对极移振幅和相位进行预报, 发现未来12a极移振幅进一步加大, 地极存在向约68°W方向的长期漂移趋势。

### 参考文献

- [1] 张焕志, 韩延本, 郑大伟. 论地极的强德勒摆动. 中国科学, 1982, 29(9): 837-846.
- [2] 兰伯克. 地球自转的变化. 李志安, 等, 译. 北京: 地震出版社, 1988.
- [3] Wilson C R, Vicente R O. An analysis of the homogeneous ILS polar motion series. Geophys J R Astr Soc, 1980, 62(3): 605-616.
- [4] Vondrák J. Long-period behavior of polar motion between 1900.0 and 1984.0. Ann Geophys, 1985, 3:351-356.
- [5] Gross R S. The secular drift of the Rotation Pole. Earth Rotation