

段丽瑶, 丁一汇, 任雨. 2014. 1921~2010 年天津气温和降水量序列的多尺度分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (4): 515–522, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13020. Duan Liyao, Ding Yihui, Ren Yu. 2014. Multiscale examination on the temperature and precipitation series in Tianjin during 1921–2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (4): 515–522.

1921~2010 年天津气温和降水量序列的多尺度分析

段丽瑶¹ 丁一汇² 任雨³

¹ 天津市气象台, 天津 300074

² 国家气候中心, 北京 100081

³ 天津市气候中心, 天津 300074

摘 要 基于集成经验模态分解 (EEMD) 方法, 对 1921~2010 年天津年平均气温和降水量序列进行了多尺度分析。并结合功率谱对年平均气温和年降水量及其本征模态函数 (IMF) 分量进行周期分析。结果表明: 天津年平均气温的变化主要是由第 1、第 2 本征模态分量和趋势项构成, 即准 5 a 和 2~3 a 的振荡与“先降后升”的长期趋势变化起主要作用。而第 4、第 5 本征模态分量则反映出天津近 90 年来气温年代际尺度的冷暖变化, 它们对 1920 年代至 1940 年代的暖期以及 1950 年代至 1970 年代的冷期有重要贡献。降水量的变化主要由第 1、第 2 本征模态分量构成, 即 4.5 a、准 9 a 和 2~3 a 的振荡起主要作用。与气温序列相比, 降水序列中年年代际尺度的变化和长期趋势的贡献明显要小得多, 但也反映了 1980 年代以后降水减少的趋势。

关键词 EEMD 天津 气温 降水

文章编号 1006-9585 (2014) 04-0515-08

中文分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13020

Multiscale Examination on the Temperature and Precipitation Series in Tianjin during 1921–2010

DUAN Liyao¹, DING Yihui², and REN Yu³

¹ Tianjin Municipal Meteorological Observatory, Tianjin 300074

² National Climate Center, Beijing 100081

³ Tianjin Climate Center, Tianjin 300074

Abstract A multiscale examination of temperature and precipitation in Tianjin during 1921–2010 was performed using the EMD (Empirical Mode Decomposition) method. Moreover, power spectrum analysis was performed on the IMFs (Intrinsic Mode Functions) derived from EMD. This analysis indicates that the variations of the annual mean temperature are mainly characterized by high-frequency oscillations, with 2–3-year periods and quasi-5-year periods detected in the first two IMFs, and a long-term V-shaped variation in the trend component. In addition, interdecadal variations were detected in the fourth and fifth IMFs. The precipitation series are also mainly characterized by high-frequency oscillations, with periods of 2–3, 4.5, and 9 years detected in the first two IMFs. It is concluded that the interdecadal variations and the long-term trend are more apparent in the temperature series, and therefore have a much smaller contribution to precipitation variation.

Keywords EEMD, Tianjin, Temperature, Precipitation

收稿日期 2013-01-23收到, 2014-02-10收到修定稿

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项GYHY201306091、GYHY201206012, 中国气象局关键技术集成与应用项目CAMGJ2012M05

作者简介 段丽瑶, 女, 1967 年出生, 学士, 高级工程师, 主要从事应用气象和气候变化研究。E-mail: tjlyduan@163.com

1 引言

Huang et al. (1998, 1999) 提出的经验模态分解法 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 可将非平稳时间序列平稳化, 得到一系列不同频率的分量——本征模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF)。近年来, EMD 方法及相应的 Hilbert 变换正成为处理非线性/非平稳时间序列的有力手段, 在长时间尺度分析、时间序列预测、故障诊断等多个方面获得了较好的应用效果 (万仕全等, 2005)。刘莉红等 (2008) 应用 EMD 对近百年来全国年平均气温序列以及东部地区年降水量序列的振荡模态结构特征进行了分析, 通过分析各个本征模态的演变特点, 观察到了原序列的多尺度变化特征, 认为 EMD 方法可以把对复杂的、非平稳的气温和降水量的预测转化为对较平稳较规则的各个 IMF 分量的预测, 然后合成为对原序列的预测, 从而提高预测的准确性。毕硕本等 (2010) 把 EMD 方法引进到广西的降水预测中, 得到了较满意的效果。孙娴和林振山 (2007) 利用 EMD 提取出全国月平均气温变化趋势项, 得到了中国平均气温的空间分型。

然而, EMD 方法存在模态混叠的缺陷, 导致每个基本模态分量的物理意义并不清晰。为弥补这一缺陷, Wu and Huang (2009) 等提出了集成经验模态分解 (EEMD) 方法, 通过噪声辅助处理, 可以明确分离不同的时间尺度。之后, 针对加噪处理的不确定性问题, 蔡艳平等 (2011) 提出了加噪的自适应准则, 比较好的解决了这一问题。

天津地处环渤海经济中心, 异常的气候往往会造成严重的气象灾害, 影响人们的生产生活。天津地区经济的快速发展, 气候的变化趋势及其影响一直为人们所关注。对于天津气温和降水的研究以往大多是根据气候资料原序列或者经过某种平滑后的新序列的整体变化特征进行分析 (毛凤莲, 1996; 郭军等, 2011; 杨艳娟等, 2011; 段丽瑶等, 2012), 而对于造成气候变化序列内在的多尺度振荡结构研究较少。本文采用 EEMD 方法, 对 1921~2010 年天津年平均气温和年降水量序列进行分析, 揭示不同时间尺度的振荡模态结构特征, 了解不同时间尺度的振荡对整个气候变化起的作用, 对天津近 90 年气候变化的认识, 以及短期气候预测等提供新的认识。

2 资料和方法

天津自 1891 年开始有完整的气象记录资料, 由于 1921 年以前观测站点的地理位置和周围环境不详, 本文使用 1921~2010 年天津气温和降水观测资料进行统计分析, 数据由天津市气象信息中心整理提供。

序列分析采用集成经验模态分解 (EEMD) 方法, 计算程序来自该方法的提出者 Wu and Huang (2009)。加入噪声的大小和集成的次数依照蔡艳平等 (2011) 提出的自适应准则来确定。

另外, 由于针对 EEMD 分解所得的高频 IMF 分量计算瞬时频率的误差很大 (Wu and Huang, 2009), 本文使用功率谱方法 (魏凤英, 1985) 对气温和降水序列以及 EEMD 分解所得的不同时间尺度的 IMF 分量和趋势项进行周期分析, 以检测其周期特征。同时使用 Morlet 小波方法 (魏凤英, 1985) 分析了天津年降水量的变化特征。

3 结果与分析

3.1 气温多时间尺度变化特征

3.1.1 模态特征

用 EEMD 方法计算天津 1921~2010 年年平均气温距平序列的 IMF 分量 (C1、C2、C3、C4、C5 和趋势项 C6) (图 1)。从图中可以看出, IMF 分量都呈现出围绕零均值振荡, 局部极大值和极小值基本对称。考察各 IMF 分量对于原序列的影响程度时, 可以根据各分量振荡的幅度振幅或能量 (振幅的平方) 大小 (图 1 的纵坐标数值); 还可以参照谐波分析, 用方差贡献表现各分量对原序列的重要性。表 1 给出了 IMF 分量的方差贡献率及其与原序列的相关系数, 可以看出各 IMF 分量与原序列都呈密切相关性 (通过 0.01 显著性检验), 但是方差贡献率相差很大, C1、C2 和 C6 的方差贡献分别为 23.6%、20.5% 和 33.6%, 累积方差达 77.7%, 比 C3、C4 和 C5 大 1 个量级。因此, 天津年平均气温的变化主要由前 2 个高频振荡和趋势项所决定。从图 1 可以看到, C1 表示原序列振荡的时间尺度最短的最高频分量; C2 的振幅变化规律与 C1 类似, 由大变小, 1920 年代至 1940 年代振幅变化较大, 1940 年代至 1980 年代后期振幅变化均匀, 1990 年代以后

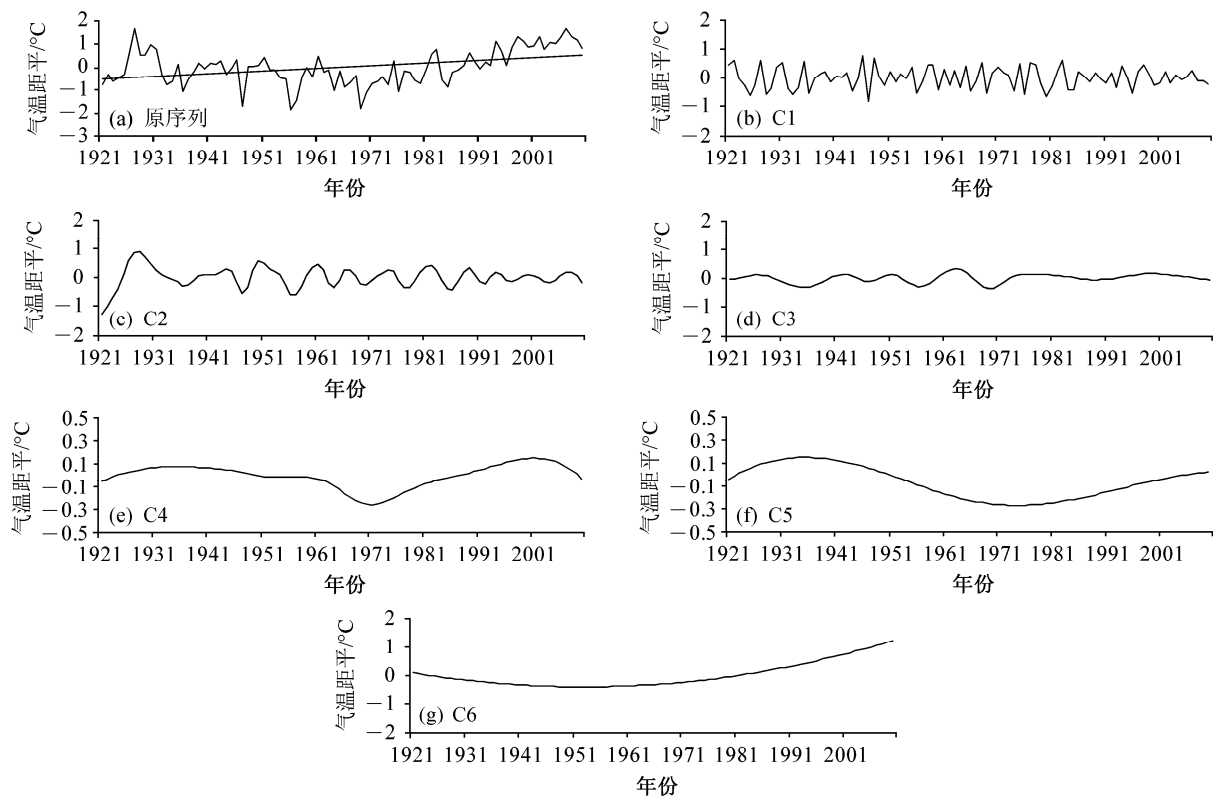


图1 1921~2010 年天津 (a) 年平均气温距平及其 IMF 分量 (b) C1、(c) C2、(d) C3、(e) C4、(f) C5 和 (g) 趋势项 C6

Fig. 1 (a) Annual temperature anomalies and the IMFs (b) C1, (c) C2, (d) C3, (e) C4, (f) C5, and (g) trend component C6 in Tianjin during 1921–2010

表 1 年平均气温序列的 IMF 分量的方差贡献率以及与原序列的相关系数

Table 1 The variance contribution rates of the IMFs (Intrinsic Mode Functions) decomposed from the annual temperature anomalies and their correlation coefficients with the annual temperature anomalies

	方差贡献率	与原序列相关系数
C1	23.6%	0.41
C2	20.5%	0.46
C3	3.8%	0.44
C4	1.9%	0.56
C5	3.4%	0.27
C6	33.6%	0.65

振幅变小。C3 在 1920 年代至 1970 年代振幅变化均匀，1970 年代至 2010 年代振幅接近于零。C4、C5 反应的是天津气温年代际变化，从 C4、C5 中可以看出，1920 年代气温是一个上升趋势，1930 年代中期开始下降，到 1970 年代温度达到最低，1970 年代后期开始呈现出明显升温趋势。C4、C5 对 1920 年代至 1940 年代的暖期以及 1950 年代至 1970 年代的冷期有重要贡献。C6 趋势项反应了近 90 年天津气温“先降后升”的特征，且后期升高幅度大于

前期的下降幅度。C4、C5 在 1970 年代以后与趋势项 C6 是基本一致的，这导致了从 1980 年代以后天津的明显增暖。因而，年代际尺度的变化对天津近百年的气温演变也具有十分重要的作用，尤其是 C4 和 C5 分量和趋势项。

从图 1a 天津年平均气温的距平序列及线性趋势线也可以看到，1921~2010 年天津年平均气温呈现明显的上升趋势，但阶段性变化显著。其中，1920 年代至 1940 年代为偏暖阶段，尤以 1920 年代最为显著，自 1930 年代中期开始气温下降，但至 1940 年代仍处于暖期，1950 年代开始气温处于偏低态势且一直持续到 1970 后期，此后天津气温又开始进入一个快速上升阶段。天津气温的这种“升—降—升”的趋势与全国气温的变化趋势大体相当（王绍武，1990；丁一汇和戴晓苏，1994；林学椿等，1995；王遵亚等，2004；唐国利和任国玉，2005；刘莉红等，2008），但也存在差异。王绍武（1990）、丁一汇和戴晓苏（1994）等的研究表明，1920~1940 年是 20 世纪我国最暖的 30 年，最暖的年代为 1940 年代。而天津 1920 年代的气温比 1940 年代明显偏暖，这一结论与谢庄和王桂田（1994）研究得到的

20 世纪北京气温 1920 年代最暖,其次是 1980 年代和 1940 年代相一致。

任国玉等(2005)的研究表明,1961~2000 年的 50 年中国气温呈明显增暖趋势,在增温明显的华北地区,城市化引起的增温速率达 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$,占全部增温的 38%。郭军等(2009)对天津城市热岛的研究表明:1964~2006 年天津市区年平均气温以 $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$ 的速率快速增加,明显高于其他 3 个区县 $0.48\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$ 的平均值,城市化引起的增温速率达 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (10 a)}^{-1}$ 。这说明城市热岛效应对天津 1970 年代后的增温贡献是不容忽视的,需要进一步研究。

3.1.2 周期分析

功率谱分析是以傅里叶变换为基础的频域分析方法,其意义为将时间序列的总能量分解到不同频率上的分量,根据不同频率波的方差贡献诊断出序列的主周期,从而确定序列隐含的显著周期(魏凤英,1985)。

应用功率谱对天津年平均气温及其 IMF 分量做周期分析,重点分析了天津年平均气温以及 C1、C2 两个方差贡献最大的高频分量(图 2),结果表明:原序列存在 2~3 a 的显著周期,通过了 95% 的红噪声检验(图 2a)。主要的高频 IMF 分量 C1 在 4.5~7.2 a 的周期上都通过了 95% 的红噪声检验,在 5.1 a 上为谱曲线峰值(图 2b),因此准 5 a 是 C1 的显著周期。C2 存在 2.0~3.3 a 的显著周期(图 2c)。可以看出年平均气温 2.0~3.0 a 的显著周期主要是由 C2 贡献的,而 C1 中的准 5 a 周期没有在原序列中表现出来。

3.2 降水量多时间尺度变化特征

3.2.1 模态特征

用 EEMD 方法计算天津 1921~2010 年年降水

量距平序列的 IMF 分量和趋势项,得到 5 个 IMF 分量和 1 个趋势项(图 3)。表 2 给出了各分量的方差贡献率及其与原序列的相关系数。可以看出,前 3 个 IMF 分量与原序列呈显著相关,前 2 个分量的方差贡献远远大于其他分量,占总方差的 88.2%,表明天津近 90 年来的年降水量以高频特征为主,年际变化较大,而长周期变化特征不明显。趋势项不论在量级上还是在方差贡献上也都很小。

表 2 年降水量序列的 IMF 分量的方差贡献率以及与原序列的相关系数

Table 2 The variance contribution rates of the IMFs decomposed from the annual precipitation and their correlation coefficients with the annual precipitation

	方差贡献率	与原序列相关系数
C1	63.3%	0.76
C2	24.9%	0.52
C3	6.7%	0.31
C4	4.1%	0.22
C5	0.2%	0.12
C6	0.9%	0.03

从图 3a 天津年降水量距平序列及线性趋势线可以看到,近 90 年来天津年降水量无明显的增加或者减少趋势。1930 年代至 1940 年代降水偏少,1950 年代至 1970 年代降水偏多和偏少的年份基本相等,但年际差异很大,1980 年代开始降水偏少的年份明显多于降水偏多的年份,但年际差异变小。C1 和 C2(图 3b、3c)表征的是年降水量年际尺度的振荡,从图 4b(C1)可以看到,天津年降水量在 1930 年代中期、1940 年代后期、1960 年代的振幅较大,这些年的降水变化强度比较剧烈,1970 年代以后振幅大小变化不大;C2 分量(图 4c)中 1921~1950 年、1975~1990 年这两个时段振幅较大,

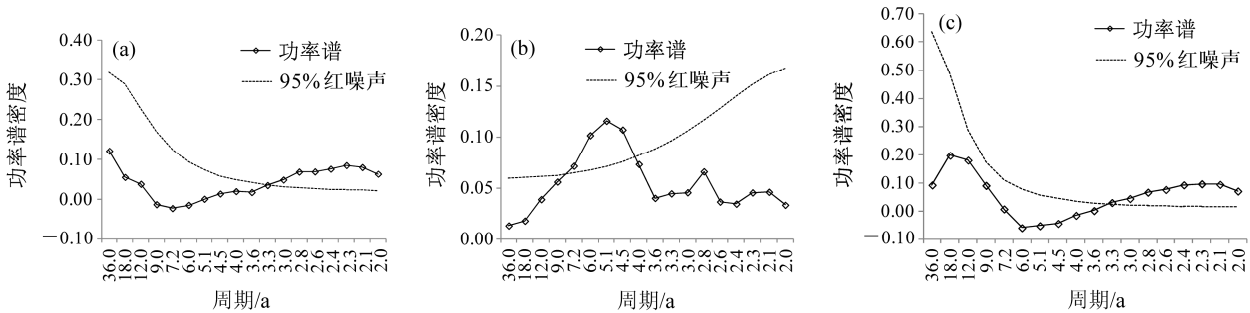


图 2 1921~2010 年天津 (a) 年平均气温和 IMF 分量 (b) C1、(c) C2 的功率谱分析
Fig. 2 Power spectrum analysis on the annual mean temperature anomalies and the first two IMFs (b) C1, (c) C2 of Tianjin during 1921-2010

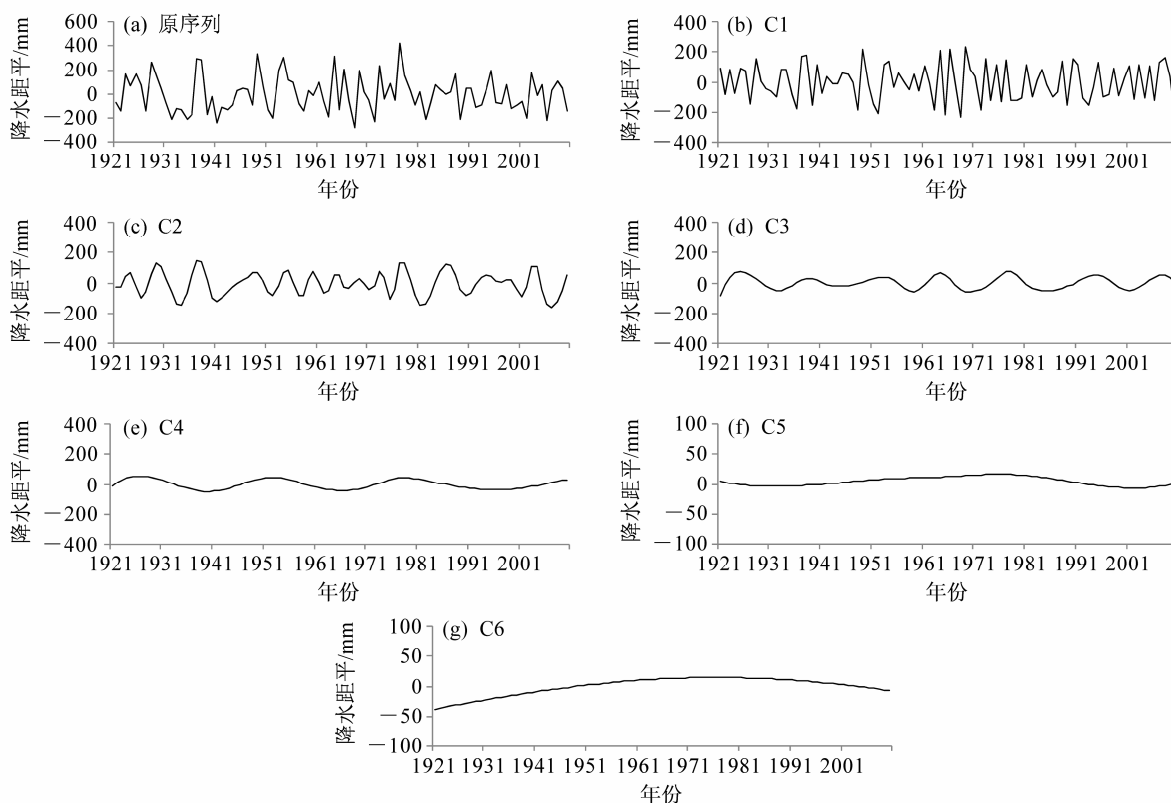


图3 1921~2010 年天津 (a) 年降水量距平及其 IMF 分量 (b) C1、(c) C2、(d) C3、(e) C4、(f) C5 和 (g) C6

Fig. 3 (a) Annual precipitation anomalies and the IMFs (b) C1, (c) C2, (d) C3, (e) C4, (f) C5, and (g) C6 in Tianjin during 1921–2010

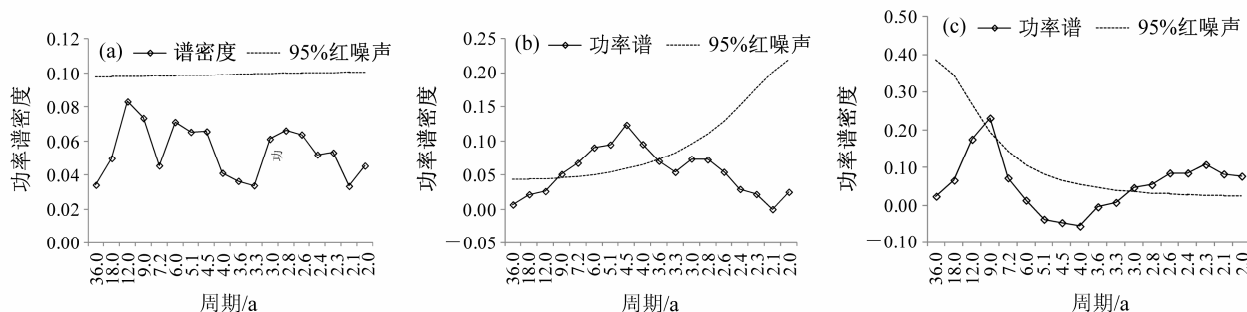


图4 1921~2010 年天津 (a) 年平均降水及其 IMF 分量 (b) C1、(c) C2 的功率谱分析

Fig. 4 Power spectrum analysis on (a) the annual precipitation and the first two IMFs (b) C1, (c) C2 in Tianjin during 1921–2010

1951~1975 年振幅较小, 1990 年代以来振幅逐渐变大, 表明近 10 年来的降水变化强度在增加。C3、C4、C5 显示了原序列年代际尺度的特征。从表 2 可以看出, C3–C5 分量不论在振幅大小、方差贡献, 还是与原序列相关系数上都比前 2 个分量小很多。虽然他们对原序列的方差贡献小, 但也表达了原序列长周期的一些特征, 比如 C4 分量表现了 1921~2010 年来降水量具有“3 多 3 少”的变化, 而趋势项 C6 则显示出年降水量在 1970 年代以前的上升趋势以及 1980 年代开始的下降趋势。C4、C5、C6 对 1930 年代至 1940 年代以及 1980 年开始的降水减少

都有贡献, 这与许多研究指出的华北降水 1980 年代开始减少的现象相一致 (Ding et al., 2008; 郝立生等, 2010; 郝立生和丁一汇, 2012)。因此, 虽然天津年降水量的变化中年际尺度的贡献更加显著, 但年代际尺度的变化在原序列中也起到一定的影响。

3.2.2 周期分析

对天津年降水量及其 IMF 分量和趋势项进行功率谱分析, 重点分析了天津年降水量以及 C1、C2 两个方差贡献最大的高频分量 (图 4)。结果表明, 原序列存在准 12 a、准 6 a 和准 3 a 的周期 (图

4a), 但都没有通过 95% 的红噪声检验, 说明降水原序列没有显著的周期性。主要的高频 IMF 分量 C1 在 4.0~9.0 a 的周期上都通过了 95% 的红噪声检验, 在 4.5 a 上为谱曲线峰值, 可以认为 4.5 a 的周期为 C1 的显著周期 (图 4b)。而 C2 存在准 9 a 和 2~3 a 的显著周期 (图 4c)。

以上降水周期分析表明, 天津近 90 年年平均降水量无明显的周期变化, 其显著周期存在于分解得到的低频分量中, 由于这些低频分量是平稳的随机序列, 因此这些具有显著周期的低频分量可以改善针对气候系统的非线性 (或非平稳性) 的预测缺陷 (万仕全等, 2005)。为了进一步分析年降水量这些低频分量周期的合理性, 我们利用目前使用较多的 Morlet 小波方法对天津年降水序列进行分析 (图 5), 可以看到天津年降水的变化是由不同周期振荡叠加而成, 从小波方差中可以看出 (图 5), 准 2 a 以及准 10 年的周期振动最强, 可以认为准 2 a 和准 10 a 的周期是该序列的主要周期, 这说明使用 EEMD 分解得到的隐藏在低频分量中的 2~3 a 和准 9 a 周期在小波分析中也有体现。

天津年降水量 2~3 a 的周期与全国大部分台站的降水普遍存在准 2 a 振荡的结论是一致的 (Si and Ding, 2011), 而准 10 a 的周期在 Ren et al. (2011) 的研究中也有相关结论。Ren et al. (2011) 研究表明, 过去 500 年中国旱涝存在明显的周期变

化, 在北方存在 10.5 a 和 25 a 的周期, 其中 25 a 振荡信号在过去的两个世纪变得更弱一些。而这个 25 a 的振荡信号从图 3e 第 4 个 IMF 分量中可以看到。

4 结论与讨论

本文应用集成经验模态分解法 (EEMD) 把天津 1921~2010 年的年平均气温和降水量分解成具有平稳信号的本征模态函数分量及趋势分量, 对起主要作用的分量进行了分析, 利用功率谱分析方法计算了 IMF 分量及趋势项的显著周期。主要结论如下:

(1) 天津年平均气温的变化主要是由第 1、第 2 分量和趋势项的振荡所造成。分别反应了准 5 a 和 2~3 a 的周期变化以及近 90 年天津平均气温“先降后升”的特征, 后期升高幅度大于前期的下降幅度。C4 和 C5 是年代际变化, 他们对 1920 年代至 1940 年代的暖期与 1950 年代至 1970 年代的冷期有重要贡献。C4、C5 在 1970 年代以后与趋势项 C6 基本一致, 这导致了从 1980 年代以后天津的明显增暖。这说明在对天津近 90 年的气温变化序列进行 EEMD 后, 可以清楚地看出气温原序列的多尺度变化特征。

(2) 天津年降水量的变化主要是由第 1、第 2 分量的振荡所造成, 分别表示 4.5 a、9.0 a 和 2~3 a

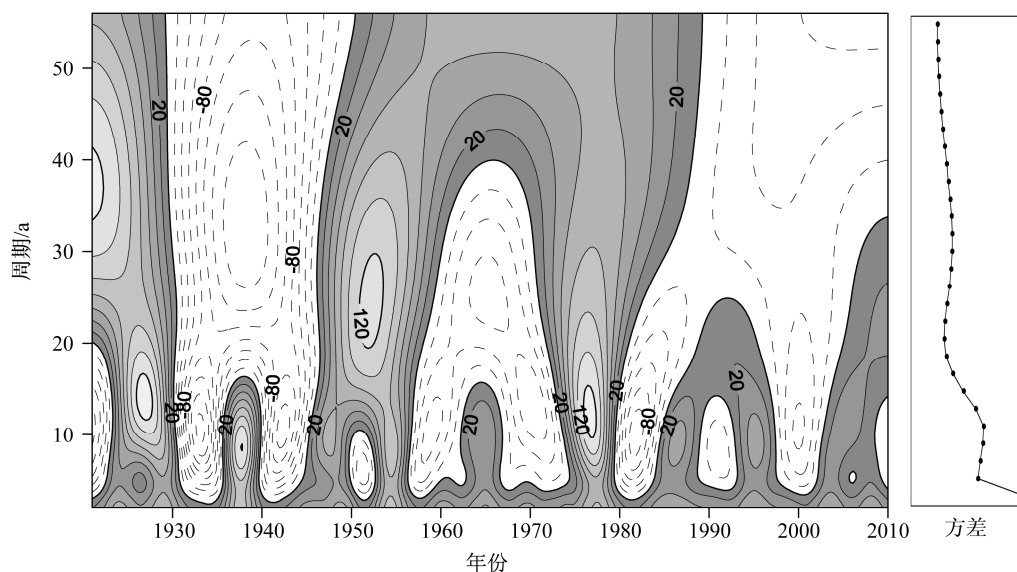


图 5 1921~2010 年天津年平均降水小波周期分析 (左图小波系数, 阴影代表小波系数正值区; 右图小波方差)

Fig. 5 Wavelet analysis of annual precipitation in Tianjin (the positive wavelet coefficient values in left panels are shaded and the wavelet variances are plotted in right panels)

的变化特征, 其中 4.5 a 的振荡起主要作用。这与刘莉红等 (2008) 得出的中国东部降水由 3~5 a 的振荡起主要作用的结论基本一致。虽然年代际尺度的振荡对原序列的贡献较小, 但仍然反映了原序列的一些特征, C4 分量呈现了天津降水“3 多 3 少”的阶段变化特征, C5 分量呈现出 1980 年代以来降水的减少趋势以及 2000 年代后期开始的增加趋势。而趋势项反应出天津年降水量总体上 1970 年代以前的偏多以及 1970 年代以后的减少趋势。概括来说, C4、C5、C6 对 1930 至 1940 年代以及 1980 年开始的降水减少都有贡献, 这与许多人指出的华北降水 1980 年代开始减少的现象相一致 (Ding et al., 2008; 郝立生等, 2010; 郝立生和丁一汇, 2012)。

(3) 天津气温的两年振荡在原序列以及 IMF 分量中均有明显表现, 降水的两年振荡使用功率谱方法在原序列中表现不明显, 在经过 EEMD 后第 2 分量则存在 2~3 a 的显著周期, 说明通过 EEMD 可以把原始序列中不明显的 2~3 a 周期反映出来。小波分析方法虽然也能从降水序列中得到明显的 2 a 周期, 但通过 EEMD 后, 可以更加清晰地看出降水序列的多尺度变化特征。天津年降水量 2~3 a 的周期与全国大部分台站的降水普遍存在准 2 a 振荡的结论是一致的 (Si and Ding, 2011)。这种降水的两年振荡被认为是由东亚和热带西太平洋上空夏季风驱动的水汽输送的准 2 a 振荡引起的 (黄荣辉等, 2006), 也被王遵亲 (2007) 发现是海洋—亚洲季风系统准 2 a 振荡的一个组成部分。事实上中国夏季降水、季风降水、热带海温以及亚洲—太平洋夏季风等也都存在着准 2 年振荡 (Chang and Li, 2000; Chang et al., 2000; 刘芸芸和丁一汇, 2012)。郭其蕴等 (2004) 的研究发现弱季风时期中国东部气温偏低, 强季风时期中国东部气温以偏高为主, 东亚夏季风强度的准 2 a 振荡变化可能是造成气温准 2 年周期的原因之一。ENSO 存在的 2~7 a 的准周期主要由 2 a、3~4 a 和 6~8 a 3 个不同尺度的波动组成 (孙娴和林振山, 2006), 而天津年平均气温和降水都存在的 4~5 a 的振荡可能与 ENSO 的周期振荡有关。

致谢 感谢上海市气象局梁萍博士提供 EMD 计算程序对本文的帮助。

参考文献 (References)

- [J]. 应用气象学报, 21 (3): 3676–371. Bi Shuoben, Xu Yin, Qin Zhiqian, et al. 2010. Application of EMD to seasonal precipitation forecast in Guangxi [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21 (3): 3676–371.
- 蔡艳平, 李艾华, 徐斌, 等. 2011. 集成经验模态分解中加入白噪声的自适应准则 [J]. 振动、测试与诊断, 31 (6): 609–714. Cai Yanping, Li Aihua, Xu Bin, et al. 2011. Adaptive ensemble empirical mode decomposition using adding white noise method [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis (in Chinese), 31 (6): 609–714.
- Chang C P, Li T. 2000. A theory for the tropical tropospheric biennial oscillation [J]. J. Atmos. Sci., 57 (14): 2209–2224.
- Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge [J]. J. Climate, 13 (24): 4310–4325.
- 丁一汇, 戴晓苏. 1994. 中国近百年来的温度变化 [J]. 气象, 20 (12): 19–26. Ding Yihui, Dai Xiaosu. 1994. Temperature variation in China during the last 100 years [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 20(12): 19–26.
- Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Interdecadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I. Observed evidences [J]. International Journal of Climatology, 28 (9): 1139–1161.
- 段丽瑶, 刘爱霞, 史珺. 2012. 1918–2010 年天津降水指数变化特征[J]. 气候变化研究进展, 8 (3): 171–177. Duan Liyao, Liu Aixia, Shi Jun. 2012. Variations of precipitation indexes in Tianjin during 1918–2010 [J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis (in Chinese), 8 (3): 171–177.
- 郭军, 李明财, 刘德义. 2009. 近 40 年来城市化对天津地区气温的影响 [J]. 生态环境学报, 18 (1): 29–34. Guo Jun, Li Mingcai, Liu Deyi. 2009. Effects of urbanization on air temperature of Tianjin in recent 40 years [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 18 (1): 29–34.
- 郭军, 任国玉, 任雨. 2011. 近 100 年天津平均气温与极端气温变化 [J]. 高原气象, 30 (5): 1399–1405. Guo Jun, Ren Guoyu, Ren Yu. 2011. Changes of mean and extreme temperatures in Tianjin in recent 100 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (5): 1399–1405.
- 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 2004. 1873~2000 年东亚夏季风变化的研究 [J]. 大气科学, 28 (2): 206–216. Guo Qiyun, Cai Jingning, Shao Xuemei, et al. 2004. Studies on the variations of East Asian summer monsoon during 1873–2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 28 (2): 206–216.
- 郝立生, 丁一汇. 2012. 华北降水变化研究进展[J]. 地理科学进展, 31 (5): 593–601. Hao Lisheng, Ding Yihu. 2012. Progress of precipitation research in North China [J]. Progress in Geography (in Chinese), 31 (5): 593–601.
- 郝立生, 闵锦忠, 史印山. 2010. 1961~2008 年华北地区降水变化内在特征分析 [J]. 安徽农业科学, 38 (24): 13269–13274, 13324. Hao Lisheng, Min Jinzhong, Shi Yinshan. 2010. Analysis of the intrinsic characteristics of precipitation change in North China from 1961 to 2008[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 38 (24): 13269–13274, 13324.
- Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and nonstationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society A:

- Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 454 (1971): 903–995.
- Huang N E, Shen Z, Long S R. 1999. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 31 (1): 417–457.
- 黄荣辉, 陈际龙, 黄刚, 等. 2006. 中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因 [J]. *大气科学*, 30 (4): 545–560. Huang Ronghui, Cheng Bialong, Huang Gang, et al. 2006. The quasi-biennial oscillation of summer monsoon rainfall in China and its cause [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science* (in Chinese), 30 (4): 545–560.
- 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 1995. 中国近百年温度序列 [J]. *大气科学*, 19 (5): 525–534. Lin Xuechun, Yu Shuqiu, Tang Guoli. 1995. Series of average air temperature over China for the last 100-year period [J]. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 19 (5): 525–534.
- 刘莉红, 郑祖光, 琚建华. 2008. 基于 EMD 方法的我国年气温和东部年降水量序列的振荡模态分析 [J]. *高原气象*, 27 (5): 1060–1065. Liu Lihong, Zheng Zuguang, Ju Jianhua. 2012. Vacillations of the time series of annual temperature and precipitation in China based on EMD method [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 27 (5): 1060–1065.
- 刘芸芸, 丁一汇. 2012. 亚洲—太平洋夏季风系统的基本模态特征分析 [J]. *大气科学*, 36 (4): 673–685. Liu Yunyun, Ding Yihui. 2012. Analysis of the leading modes of the Asian–Pacific summer monsoon system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (4): 673–685.
- 毛凤莲. 1996. 北京天津等地气温降水量历史资料诊断[J]. *水科学进展*, 7(1): 37–41. Mao Fenglian. 1996. Diagnostic analysis of historic temperature and precipitation in Beijing and Tianjin[J]. *Advances in Water Science* (in Chinese), 7 (1): 37–41.
- 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 2005. 中国气温变化研究最新进展 [J]. *气候与环境研究*, 10 (4): 701–716. Ren Guoyu, Chu Ziyang, Zhou Yaqing, et al. 2005. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (4): 701–716.
- Ren G Y, Liu H B, Chu Z Y, et al. 2011. Climate change over eastern China and implications for south-north water diversion project [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 12 (8): 600–617.
- Si D, Ding Y H. 2011. The tropospheric biennial oscillation in the East Asian monsoon region and its influence on the precipitation in China and large-scale atmospheric circulation in East Asia [J]. *International Journal of Climatology*, 32 (11): 1697–1716.
- 孙娴, 林振山. 2006. HHT 新技术及其对 ENSO 的诊断 [J]. *气象*, 32 (9): 17–22. Sun Xian, Lin Zhenshan. 2006. A new technology HHT and its diagnosis for ENSO [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 32 (9): 17–22.
- 孙娴, 林振山. 2007. 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*, 62 (11): 1132–1141. Sun Xian, Lin Zhenshan. 2007. The regional features of temperature variation trends over China by empirical mode decomposition method [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 62 (11): 1132–1141.
- 唐国利, 任国玉. 2005. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析[J]. *气候与环境研究*, 10 (4): 791–798. Tang Guoli, Ren Guoyu. 2005. Reanalysis of surface air temperature change of the last 100 years over China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (4): 791–798.
- 王绍武. 1990. 近百年我国及全球气温变化趋势 [J]. *气象*, 16 (2): 11–15. Wang Shaowu. 1990. Variations of temperature in China for the 100 year period in comparison with global temperatures [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 16 (2): 11–15.
- 魏凤英. 1985. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 71–76. Wei Fengying. 1985. *Modern Diagnosis and Prediction of Climate Statistics*(in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 71–76.
- 王遵娅. 2007. 中国夏季降水的气候变率及其可能机制研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 59–88. Wang Zunya. 2007. China summer precipitation in the rate of climate change and its possible mechanism research [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 59–88.
- 王遵亚, 丁一汇, 何金海, 等. 2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析 [J]. *气象学报*, 62 (2): 228–236. Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2004. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (2): 228–236.
- 万仕全, 封国林, 周国华, 等. 2005. 基于 EMD 方法的观测数据信息提取与预测研究 [J]. *气象学报*, 63 (4): 516–525. Wan Shiquan, Feng Guolin, Zhou Guohua, et al. 2005. Extracting useful information from the observations for the prediction based on EMD method [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 63 (4): 516–525.
- Wu Z H, Huang N E. 2009. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1 (1): 1–41.
- 谢庄, 王桂田. 1994. 北京地区气温和降水百年变化规律的探讨 [J]. *大气科学*, 18 (6): 683–690. Xie Zhuang, Wang Guitian. 1994. The changes of temperature and precipitation in Beijing during last 100 years [J]. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 18 (6): 683–690.
- 杨艳娟, 任雨, 郭军. 2011. 1951~2009 年天津市主要极端气候指数变化趋势 [J]. *气象与环境学报*, 27 (5): 21–26. Yang Yanjuan, Ren Yu, Guo Jun. 2011. Variation trends of main extreme climatic indices from 1951 to 2009 in Tianjin [J]. *Journal of Meteorology and Environment* (in Chinese), 27 (5): 21–26.