

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2017.05.008

典型海湾风暴潮增水特征与机理研究

杨万康^{1,3}, 杨青莹¹, 伊小飞², 尹宝树³, 张峰¹

(1. 国家海洋局第二海洋研究所 工程海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 2. 广东海洋大学 海洋与气象学院, 广东 湛江 524088; 3. 中国科学院海洋研究所 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘 要: 以三门湾为例, 基于经验模态分解方法 (EMD) 将原始风暴潮增水过程进行分解, 并对各个子模态进行能量谱分析, 研究每种波动对应的生成机制。结果表明: 半封闭海湾内的风暴潮增水较为严重, 造成三门湾内强增水的台风为三门湾南侧的西北向登陆台风。EMD 分解结果显示三门湾内的风暴潮增水包含 6 h, 12 h, 20 h 左右的波动, 其中 6 h 左右的波动来源于海湾共振, 共振的频率是由海湾的形状、水深等固有性质所决定的。12 h 的波动是由于天文潮与风暴潮耦合作用导致, 20 h 左右的波动是由于台风移动过程中外海波动的传入。结果表明 EMD 方法为风暴潮波动增水特征的精细认知提供了一种新的思路和方法, 可以加深对海湾内风暴潮波动增水特征的研究。

关键词: 半封闭海湾; 经验模态分解; 风暴潮增水; 共振

中图分类号: P731.23

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2017)05-0532-06

Characteristics and mechanism of storm surge in typical bay

YANG Wan-kang^{1,3}, YANG Qing-ying¹, YI Xiao-fei², YIN Bao-shu³, ZHANG Feng¹

(1. Key Laboratory of Engineering Oceanography, the Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; 2. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 3. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanography, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China)

Abstract: Taking Sanmen Bay for instance, Empirical Mode Decomposition method (EMD) was applied to decompose surge data and power spectrum was calculated to study the mechanism of the corresponding model. The results indicate that the storm surge is particularly high and the most powerful path is northwest landing typhoon. Through EMD decomposition, storm surge contains 6 hours, 12 hours, 20 hours period of oscillation. The period of 6 hours due to resonance response in semi-enclosed bay is highly dependent on the bay length and average water depth. The period of 12 hours oscillation results from the interaction of the astronomical tide and storm surge. The period of 20 hours is caused by incoming wave due to typhoon moving process. The research suggests that the EMD method provides a new way of thinking for storm surge characteristics and improves the understanding of surge mechanism.

Keywords: semi-enclosed bay; Empirical Mode Decomposition method; storm surge; resonance

风暴潮是指由于强烈的大气扰动 (如强风和气压骤变) 所导致的海平面异常升降现象, 当风暴潮发生时如恰遇天文高潮阶段, 往往会造成风暴潮灾害。风暴潮灾害发生时, 海水会漫过堤坝, 淹没农田及生活设施, 造成严重的人员伤亡和经济损失,

目前风暴潮灾害已经成为影响我国东部沿海地区最严重的自然灾害之一。

针对海湾内的风暴潮增水特征, 许多学者进行了大量研究, 其中既包含理论公式推导 (修日晨, 1983), 又有数值实验方法 (Blain et al,

收稿日期: 2016-08-30; 修订日期: 2016-11-03

基金项目: 广东海洋大学近海海洋变化与灾害重点实验室开放基金 (GLOD1405); 中央科研院所基本科研业务费专项资金 (JG1408); 中科院海洋所环流与波动实验室开放基金 (KLOCAW1406)

作者简介: 杨万康 (1987-), 硕士, 工程师, 主要从事海洋预报和数值模拟研究。电子邮箱: yangwankang@126.com。

通讯作者: 杨青莹, 硕士, 工程师。电子邮箱: qingying0411@163.com。

1994; Rego et al, 2009)。首先基于半封闭的矩形海湾, 通过理论公式推导, 可以分析浅水项、摩擦项对风暴潮水位的影响机制 (Proudman, 1957); 在长岛海湾的研究中发现, 由于共振效应, 半日分潮的振幅增加了 4 倍 (Wong et al, 1998); 其次通过简化拉普拉斯方程, 可以推导共振发生的前提条件 (Clarke et al, 1981); 通过对大陆架共振理论模型和数值实验的研究, 可以验证观测数据周期与共振模型周期的一致性 (Bertin et al, 2012); 利用数值方法计算 Chesapeake 湾的共振频率, 发现在共振频率上湾口和湾顶的振幅之比较小, 说明 Chesapeake 湾是一个强耗散系统 (Zhong et al, 2008)。利用经验模态分解方法分析福建沿岸的风暴潮增水特征时, 发现台风在东海的增水会以开尔文波的形式到达福建沿岸 (杨金湘 等, 2016)。

之前的研究大多是将风暴潮增水特征作为一个整体形态来研究, 由于海湾内的风暴潮增水一般呈现波动状态, 这些波动分别对应于真实的物理过程, 如地形海湾的共振, 潮汐的非线性作用, 外海陆架波的传播, 局地风作用等, 因此如何将原始的风暴潮增水结果进行分解, 并研究每种波动对应的生成机制, 具有重要的科学意义。本文基于时频分析的新方法—经验模态分解方法 (EMD) 分析三门湾内风暴潮增水的波动特征, 并分析每种模态增水的机制原理。

1 理论方法

经验模态分解方法 (Empirical Mode Decomposition, 简称 EMD) 是一种新的数据分析方法 (Huang et al, 1998; 2008), 经 EMD 分解变换得到的各个子模态是直接从原始时序数据中分离出来的, 无需事先确定分解阶次, 能更好反映原始数据固有的物理特性, 每个子模态序列都代表了某种特定意义的频带信息, 所以它在各种资料处理中应用非常广泛。

经验模态分解方法的大体思路是对原始数据进行平稳化处理, 得到多个本征模态函数。计算过程如下:

① 找出数据序列 $x(t)$ 的极值, 然后用三阶样条函数的极值序列进行插值拟合, 得到 $x(t)$ 的上包络线序列值 $x_{\max}(t)$ 和下包络线序列值 $x_{\min}(t)$;

② 计算各个时刻上下包络线的平均值 $x_m(t) = [x_{\max}(t) + x_{\min}(t)]/2$;

③ 用 $x(t)$ 减去平均值 $x_m(t)$, 得到序列 $h(t) = x(t) - x_m(t)$;

④ 判断 $h(t)$ 是否为本征模态函数。如果不是用 $h(t)$ 代替原序列 $x(t)$, 重复步骤①–③, 直到满足本征模态函数判据, 得到一个本征模态函数 $IMF_1(t)$;

本征模态判据如下:

第一: $h(t)$ 中极值点与跨零点的数目差小于等于 1。

第二: 各个时刻平均值 $x_m(t)$ 均等于零。

⑤ 继续计算其它模态函数。先用原序列减去 $IMF_1(t)$, 得到剩余值序列 $r_1(t)$, 然后把 $r_1(t)$ 作为一个新的原序列, 按照以上步骤依次提取第二、第三直至第 n 个本征模态函数 $IMF_n(t)$ 。直到 $r_n(t)$ 没有本征模态函数能被提取出来为止, 只剩下最终趋势项。

⑥ 最终原序列 $x(t)$ 分解为各分量和趋势项的线形叠加。

2 海湾内风暴增水统计特征

三门湾地处浙江中部, 是典型的半封闭型海湾, 受热带气旋影响会导致较强的增水, 三门湾内长期潮位站为健跳站, 自 1975 年至今, 连续观测超过 40 a, 风暴潮增水时间序列较为完整, 可以作为研究三门湾内风暴增水特征的代表站, 风暴潮增水值则由实测潮位减去预报天文潮位的得到。研究区域和潮位站位置如图 1 所示。本文计算了 1990–2014 年期间健跳站的风暴增水过程, 然后根据计

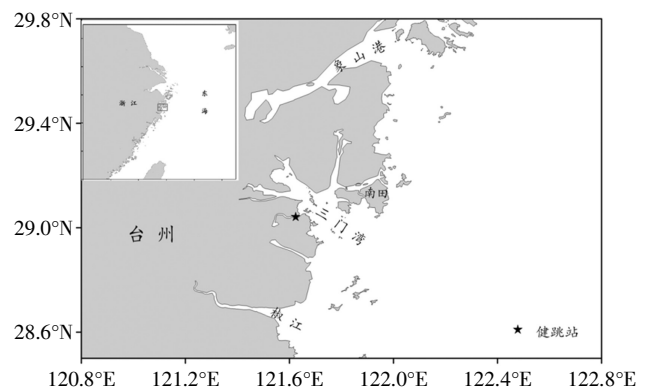


图 1 健跳站位置示意图

算结果分析研究三门湾内的风暴潮增水的时空变化规律。

本文统计了健跳站风暴增水超过 0.6 m 以上的台风增水过程,具体统计结果如图 2 所示,由图可知,三门湾内风暴增水较为严重,增水超过 1.5 m 的台风过程有 5 个,超过 2 m 的台风增水过程有 3 个,增水超过 1.8 m 的台风路径如图 3 所示。由图 3 可知,造成三门湾内强增水的台风为三门湾南侧的西北向登陆台风,此时三门湾正好位于台风右半圈危险区,而且湾口走向与台风路径平行,在强东南风的作用下,外海海水快速涌入三门湾,加之三门湾地形为口袋型,海水容易堆积从而造成强增水。风暴增水极值一般发生在台风登陆前后 1~2 h 左右。通过对健跳站风暴潮增水过程统计可知,超过 1.5 m 的强增水大部分出现在 8、9 月份,因此每年这个时间段需要重点防范强风暴潮灾害。

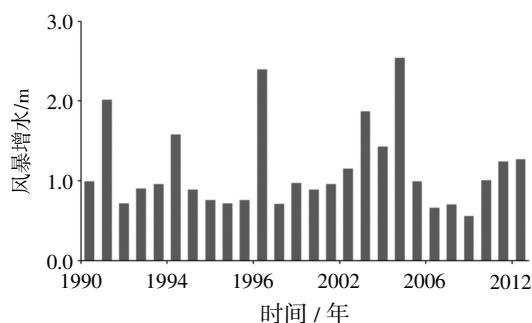


图 2 健跳站历年风暴潮增水序列

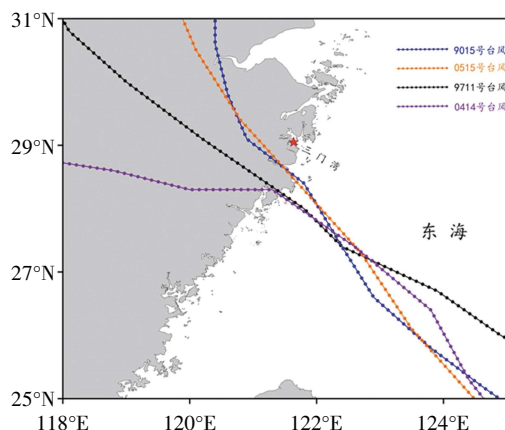


图 3 强风暴潮增水台风路径示意图

3 波动增水特征分析与机理研究

经过分离得到的风暴潮增水依然是各种波动信号的叠加,为了进一步提取增水过程中的波动信

号,我们采用 EMD 方法对三门湾历史上最强的四次风暴潮增水过程进行了分解,研究风暴增水在不同尺度的波动特征,图 4~7 为增水过程的 EMD 分解图, $IMF1$ 到 $IMF3$ 表示从原始数据分离得到的各个子模态,然后对各个子模态进行了傅里叶变换得到能量谱,列于图右侧。

首先针对 $IMF1$ 第一模态进行分析,功率谱显示存在一个 6 h 左右的周期性波动,由于三门湾外海主要受 M2 分潮所主导,但是 M2 分潮周期为 12.42 h,因此第一模态不可能是天文潮和风暴潮的非线性作用所引起的波动,其他解释就是海湾引起的共振现象,下面进行具体分析。

三门湾可看作是半封闭常水深矩形港湾,其共振周期可按照下面公式计算

$$T_n = \frac{4L}{(2n+1)\sqrt{gh}}$$

n 为从 0 开始的整数,等于波节点的个数。当模态数 $n = 0$ 时即为 Helmholtz 共振,假设三门湾长度 L 为 42 km,平均水深取为 6 m,其共振周期约为 6 h 左右,跟风暴潮增水 EMD 分解第一模态波动周期基本一致。由此可知,第一模态波动是海湾特殊地形引起的共振导致的。当外海扰动产生的波动以重力长波形式向三门湾内移动,然后在湾顶处发生反射,产生驻波,从而引起共振,共振的频率是由海湾的形状、水深等固有性质所决定的。

$IMF2$ 第二模态显示的波动周期为 12 h 左右,与 M2 分潮周期基本一致,因此引起此模态波动的原因是风暴潮和天文潮的相互作用,两者的耦合作用在台风登陆前后达到最大。其中,9711 号台风第一模态和第二模态混合较为严重,在各自的功率谱中仍然有残余周期性波动。

$IMF3$ 第三模态增水波动周期在 20 h 左右,由于周期较长,基本可以判定是外海传播而来的波动,如陆架波、边缘波等,由于从观测数据中很难判定是哪种波动造成的,可以假设此波动是由于台风的移动所造成的,那么此波动就依赖于台风移动速度,台风尺度等参数,可以简单的用下面的公式进行一下估计:

$$T_{surf} = \frac{L_{typhoon}}{V_{typhoon}}$$

$L_{typhoon}$ 为台风空间尺度, $V_{typhoon}$ 为台风移动速度,通过查阅天气云图的气压分布,这几个典型台风的空间尺度分别为 500 km 和 450 km 左右,台风

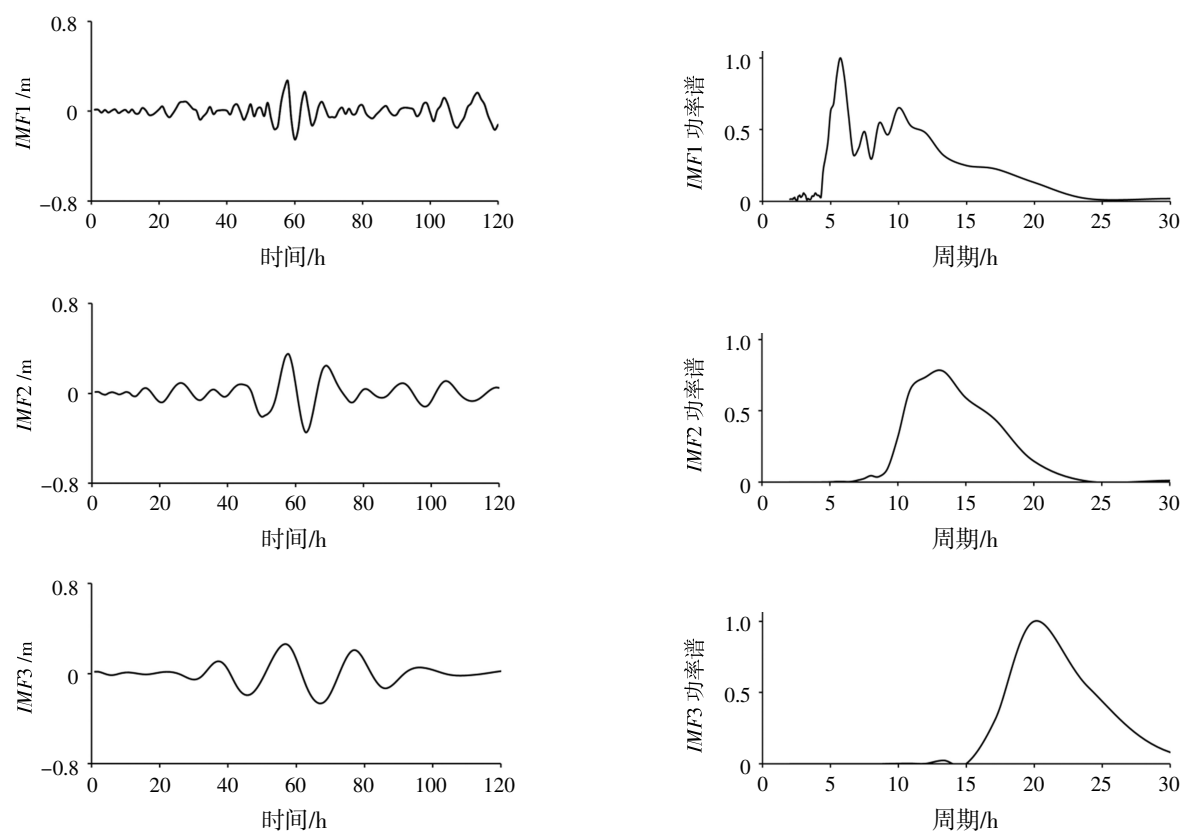


图 4 9015 号台风 EMD 模态分解与对应模态的功率谱计算

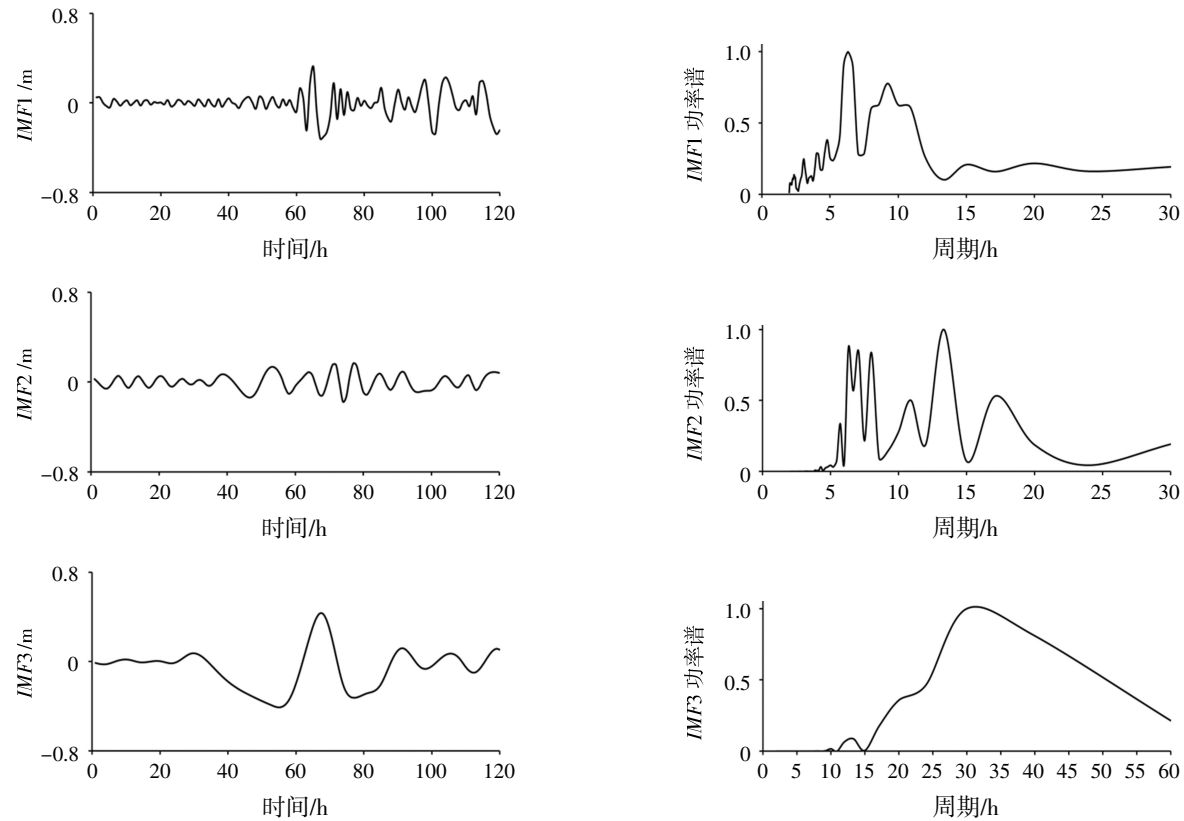


图 5 9711 号台风 EMD 模态分解与对应模态的功率谱计算

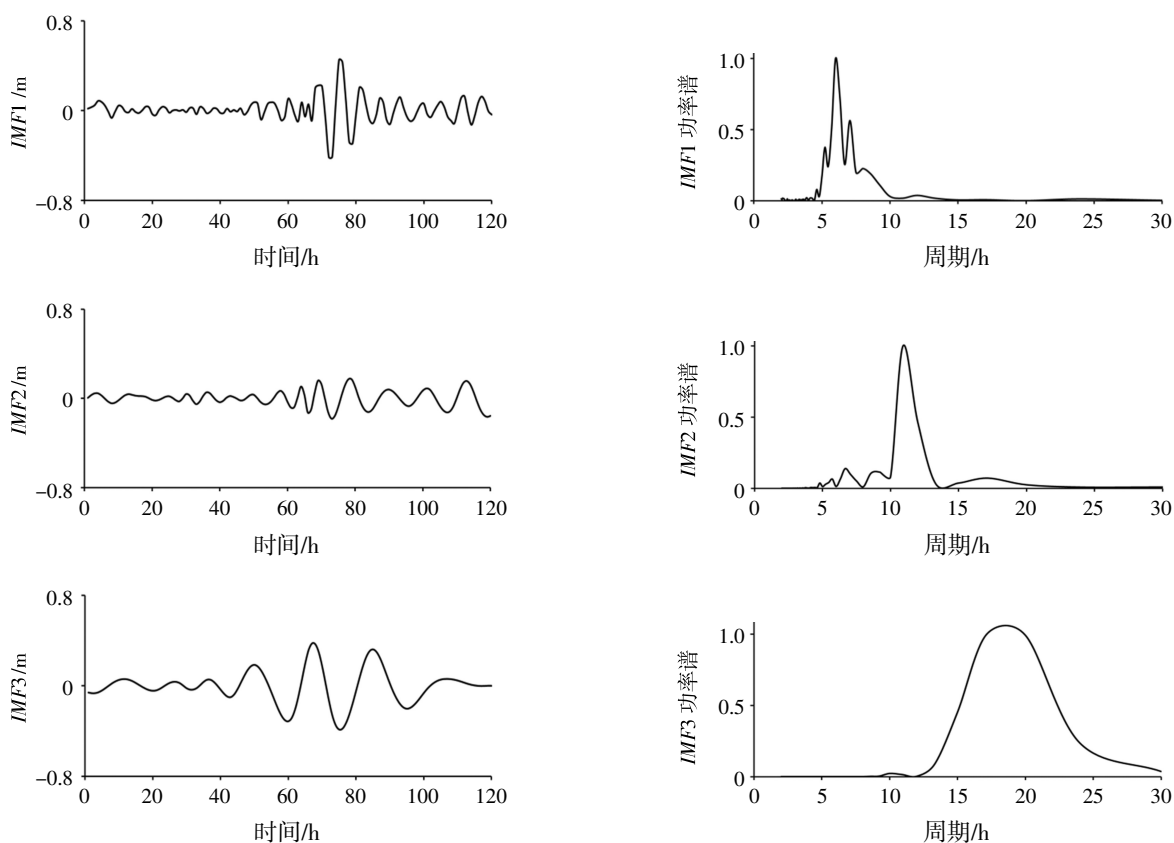


图6 0414号台风 EMD 模态分解与对应模态的功率谱计算

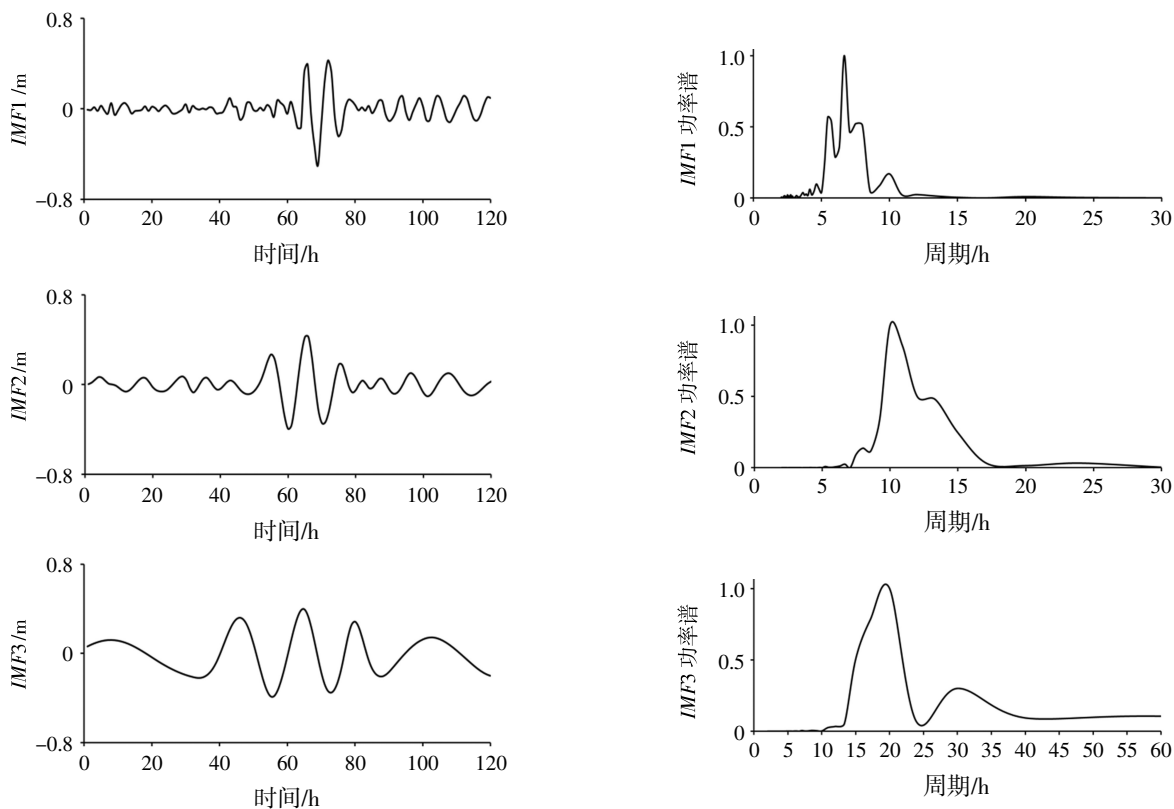


图7 0515号台风 EMD 模态分解与对应模态的功率谱计算

移动速度在 20~25 km/h 左右, 波动周期大约在 20 h 左右。

4 结论

风暴潮灾害是对中国影响最严重的海洋灾害之一, 它对海洋工程、沿岸居民防洪安全等都有着重要的影响, 因此了解风暴潮增水的分布特征和生成机制具有重要的意义。然而传统的风暴潮研究中, 不同尺度的波叠合在一起, 不利于对风暴潮增水内在机制的精细认知。本研究利用当今时频分析的新方法—经验模态分解方法对三门湾波动增水特征进行了研究, 由 EMD 分解结果可知, 三门湾内的风暴潮增水包含 6 h、12 h、20 h 左右的波动, 其中 6 h 左右的波动来源于海湾共振, 共振的频率是由海湾的形状、水深等固有性质所决定的; 12 h 的波动是由于天文潮与风暴潮耦合作用导致; 20 h 左右的波动是由于台风移动过程中外海波动的传入。结果表明 EMD 方法为风暴潮波动增水特征的精细认知提供了一种新的思路和方法, 可以清楚地揭示风暴潮增水中不同尺度的结构特征, 加深对风暴潮波动增水的研究。

参 考 文 献

- Bertin X, Bruneau N, Breilh J F, et al, 2012. Importance of wave age and resonance in storm surges: The case Xynthia, Bay of Biscay, Ocean Modeling, 42: 16–30.
- Blain C A, Westerink J J, Luetich R A, 1994. The influence of domain size on the response characteristics of a hurricane storm surge model, Journal of Geophysical Research: Oceans, 99 (C9) : 18467–18479.
- Clarke A J, Battisti D S, 1981. The effect of continental shelves on tides, Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 28 (7) : 665–682.
- Huang N E, Shen Z, Long S R, et al, 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society, 454 (1971) : 903–995.
- Huang N E, Wu Z, 2008. A review on Hilbert–Huang transform: Method and its applications to geophysical studies, Reviews of Geophysics, 46 (2) : RG2006.
- Proudman J, 1957. Oscillations of tide and surge in an estuary of finite length, Journal of Fluid Mechanics, 2 (4) : 371–382.
- Rego J L, Li C, 2009. On the importance of the forward speed of hurricanes in storm surge forecasting: A numerical study, Geophysical Research Letters, 36 (7) : 48–50.
- Wong K C, Moses Hall J E, 1998. On the relative importance of the remote and local wind effects to the sub tidal variability in a coastal plain estuary, Journal of Geophysical Research: Oceans, 103 (C9) : 18393–18404.
- Zhong L, Li M, Foreman M G G, 2008. Resonance and sea level variability in Chesapeake Bay, Continental Shelf Research, 28 (18) : 2565–2573.
- 修日晨, 1983. 关于协振潮的共振问题, 海洋湖沼通报, (2) : 16–18.
- 杨金湘, 袁方超, 李郅明, 等, 2016. EMD 方法在中国沿岸风暴潮增水分析中的应用. 海洋通报, 35 (2) : 158–169.
- (本文编辑: 袁泽轶)
- (上接第 511 页)
- 胡乔木, 1989. 中国大百科全书 (军事). 北京: 中国大百科全书出版社, 562.
- 黎鑫, 张韧, 卢扬, 等, 2016. “海上丝绸之路”自然环境风险分析. 海洋通报, 35 (6) : 609–616.
- 李爽, 2008. 大型社会活动安全风险评估指标研究. 中国安全科学学报, 18 (9) : 147–151.
- 史志富, 张安, 2012. 贝叶斯网络理论及其在军事系统中的应用. 北京: 国防工业出版社, 56–60.
- 孙德刚, 邓海鹏, 2012. 海外军事基地的理论解析. 国际论坛, 14 (6) : 21–27.
- 托尔钦诺夫, 1956. 美国在国外的军事基地是对全世界人民和平安全的威胁 (姚嘉政译). 北京: 新知识出版社, 1.
- 杨理智, 张韧, 白成祖, 等, 2014. 基于贝叶斯网络的我国海上能源通道海盗袭击风险分析与实验评估. 指挥控制与仿真, 36 (2) : 51–57.
- 殷洁, 戴尔阜, 吴绍洪, 2013. 中国台风灾害综合风险评估与区划. 地理科学, 13 (10) : 1370–1375.
- 张继权, 李宁, 2007. 主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用. 北京: 北京师范大学出版社, 109–115.
- 张洁, 2015. 海上通道安全和中国战略支点的构建—兼谈 21 世纪海上丝绸之路建设的安全考量. 国际安全研究, 2045 (2) : 100–118.
- 张韧, 葛珊珊, 洪梅, 等, 2013. 气候变化与国家海洋战略——影响与风险评估. 气象出版社, 176–185.
- 周娟, 2014. 印度洋海面变化特征研究. 青岛: 中国海洋大学, 22–23.
- 朱斌, 2014. 基于偏好关系决策方法及应用研究. 南京: 东南大学, 85–89.
- (本文编辑: 袁泽轶)