

大亚湾双峰水位形成及准调和分量应用的分析

彭帅星, 朱佳*, 陈照章, 孙振宇, 杨龙奇, 胡建宇

(厦门大学海洋与地球学院, 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361102)

摘要: 大亚湾潮位具有独特的“双峰”现象, 且表现为高潮时的双高水位。基于大亚湾 10 个临时潮位站 1 个月长度的冬季潮位观测资料, 分析了大亚湾海域双峰现象的形成条件及准调和分量在重构大亚湾双峰水位的应用。调和与分析结果表明: 浅水分潮 (含倍潮 M_4 与 M_6 、复合分潮 MS_4 与 $2MS_6$) 振幅的增长是造成双峰现象强度在湾内增强的主要原因; 潮波由湾口传播至湾顶时, 浅水分潮振幅有明显增长, 其中复合分潮 $2MS_6$ 增长幅度最大, 超过 300%; 单一复合分潮调制 M_2 分潮形成的双峰特征随时间呈长周期变化。运用准调和分量分析可知: 双峰水位的特征周期由浅水分潮与基础分潮振幅比决定, 分潮振幅和初相位影响特征周期内的双峰水位变化; 此外, 通过解析和分潮重构, 发现用六分之一日分潮的余弦准调和分量可以简化浅水分潮, 重现实测水位中的双峰特征。

关键词: 潮汐; 双峰现象; 复合分潮; 准调和分量

中图分类号: P 731.23 **文献标志码:** A

大亚湾是位于广东省东部的半封闭浅水湾, 湾内岛屿众多, 地形岸线复杂。惠州市大亚湾经济技术开发区的成立以及沿岸石化工业和港口码头的发展, 大大提高了人们对当地自然环境的关注。多个科研团队曾在大亚湾进行多次水文调查, 结果表明: 大亚湾浅水分潮振幅较大, 潮汐特征主要来自西太平洋的潮波制约。其中, 杨国标^[1]通过对 1996—1999 年的 3 次大型水文观测的资料分析了大亚湾海区的潮流现象, 指出其既有天文潮的一般规律, 也有外海潮波受地形、水深等因素造成的浅海潮流的普遍特点; 吴仁豪等^[2]使用三维陆架海模式 (HAMSOM) 对大亚湾海域的潮汐、潮流进行了数值模拟研究, 较好地反映出大亚湾海域的不正规半日潮特征; 李立^[3]通过分析常规时间序列谱讨论了大亚湾亚潮水位波动与各可能强迫作用的关系, 指出本地及外海气象条件因素均对大亚湾亚潮水位能量有贡献。

大亚湾潮位最典型的特征是明显的“双峰”现象, 高潮时具有双高水位, 浅水分潮在湾

收稿日期: 2020-08-20 录用日期: 2021-02-23

基金项目: 国家自然科学基金 (41776027); 惠州市海洋渔业资源环境调查项目 (F2017-01-1)

*通信作者: zhujia@xmu.edu.cn

内的快速增长是产生该现象的主要原因。Godin^[4]对欧洲港湾部分出现双高水位或双低水位的调和常数进行统计检验,提出双峰水位的产生是由于基础分潮(通常是 M_2)受到高次谐波(M_4 、 M_6 、 M_8 等)的调制而产生水位畸变。Song等^[5]基于大亚湾实测潮位数据运用数值方法证明单一 M_6 浅水分潮可以调制 M_2 分潮水位,在湾内部分区域产生双高水位。严聿晗等^[6]基于数学解析方法得出大亚湾海域的双峰现象主要是由以 M_2 为代表的半日分潮与四分之一日分潮(如 M_4 分潮)和六分之一日分潮(如 M_6 分潮)共同作用造成的。刁希梁等^[7]通过构建大亚湾FVCOM数值模型,探讨大亚湾的特殊水深地形满足浅水分潮 M_6 在湾内共振的条件,结果表明共振是 M_6 分潮振幅增长的主要原因。对于浅水港湾由于非线性效应导致的潮波显著的畸变,方国洪等^[8]提出采用准调和分量来表示浅水效应以提高浅水港口潮汐分析和预报的准确性。

以往研究对于大亚湾“双峰”现象的探讨主要集中在倍潮(M_4 和 M_6 分潮)对半日分潮 M_2 的调制,但观测资料显示,大亚湾内还存在振幅和频率与倍潮相当的复合分潮(MS_4 和 $2MS_6$),复合分潮对于双峰强度的贡献不能忽略,值得进一步分析研究。因此本文基于近期大亚湾10个潮位观测站1个月长度的潮位实测资料,着重分析其潮汐特征及各浅水分潮对双峰现象的贡献。

1 资料和方法

厦门大学在大亚湾及邻近海域沿岸线布设10个临时水位观测站(T01-T10),如图1所示。水位测量仪器为RBR TDR-2050潮位仪和KELLER DCX-22水位记录仪,其观测精度分别为满量程的0.05%和0.02%,测量时间间隔为5 min。10个站的水位观测资料时长均超过1个月,统一截取2018年1月9日—2018年2月8日的的数据,利用潮汐表中大亚湾站位的一年长度整点潮位数据,得到 P_1 与 K_1 、 S_2 与 K_2 的差比关系,使用Pawlowicz^[9]开发的T_TIDE程序包对水位观测数据进行调和分析,得到各个分潮振幅和迟角在湾内的分布特征,然后,对浅水分潮进行分组重构水位,探究各分潮对双峰水位的贡献。

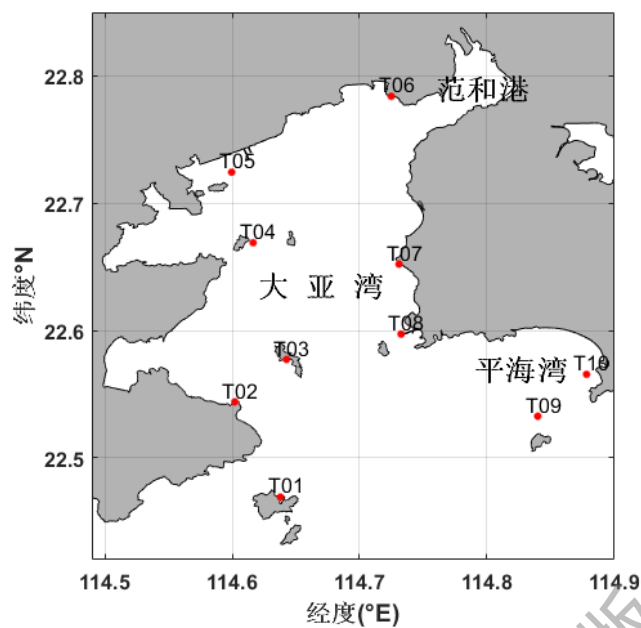


图 1 潮位站观测位置图

Fig. 1 Observation stations in Daya Bay

2 结果分析

2.1 潮位特征分布

选取 10 个水位站中的 4 个 (T02、T05、T06、T08) 作为代表性站位, 绘制水位过程曲线 (图 2), 分析大亚湾的潮位变化特征。其中 T02 和 T08 代表湾口, T05 和 T06 代表湾顶。

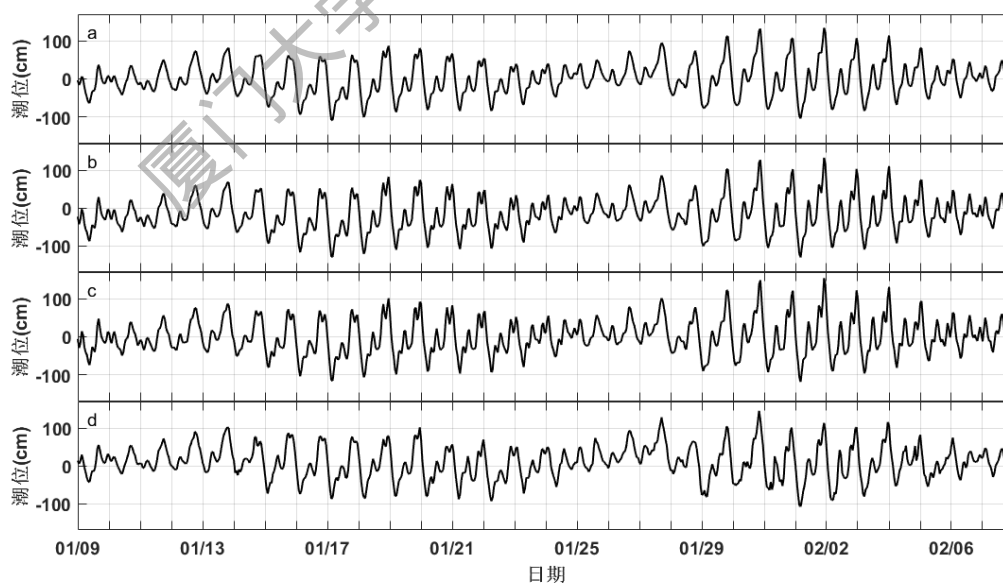


图 2 T02(a)、T05(b)、T06(c)和 T08(d)4 个代表性测站的潮位过程曲线

Fig. 2 Tidal elevation curves at T02 (a), T05 (b), T06 (c) and T08 (d) four stations

由图 2 可见，四个站位的潮位变化趋势基本一致，一天中均有两次涨潮和两次落潮，两次高潮的潮位高度差异较大；观测期间，大、小潮区别明显，大潮时高潮水位超过 100 cm，各站位的逐时潮高变化以及涨、落潮时差异不大。湾口站位（T02 和 T08）的潮位主要受天文分潮调控，不规则半日潮特征明显；而湾顶站位（T05 和 T06 站）的潮位除受天文潮影响外，还有受高频信号调制的迹象；无论是湾口或湾顶，东、西岸的潮位差距不大。10 个站位的潮位曲线表明大亚湾潮位具有两个特征：双峰水位现象明显，表现为高潮时具有两个高峰水位，双峰水位强度由湾口至湾顶逐渐增强；其次，观测期间内两次大潮期的“双峰”特征不同，1 月 20 日前后大潮期高潮时的双峰高度基本一致，而 2 月 2 日前后大潮期双峰则不对称，第二个高峰水位显著高于第一个高峰水位，双峰高度差大于 50 cm。

2.2 调和和分析结果

为探究双峰水位在大亚湾形成的因素，对 10 个站位 1 个月的潮位数据进行调和与分析。结果显示共 12 个分潮对大亚湾潮位有主要贡献，其中包括 4 个全日分潮（ K_1 、 O_1 、 P_1 和 Q_1 ）、4 个半日分潮（ K_2 、 M_2 、 N_2 和 S_2 ）以及 4 个浅水分潮（ M_4 、 MS_4 、 M_6 和 $2MS_6$ ）。全日分潮中以 K_1 和 O_1 分潮为主，半日分潮以 M_2 和 S_2 为主。将 10 个站位的浅水分潮振幅做三次样条插值得到图 3 浅水分潮振幅在湾内的分布，图中可见：四个浅水分潮的振幅随潮波传播方向，从湾口向湾顶，呈增长趋势，其中复合分潮 $2MS_6$ 振幅增长幅度超过 300%；湾口处四分之一日分潮振幅明显大于六分之一日分潮，而湾顶 T06 站复合分潮 $2MS_6$ 的振幅与 MS_4 的振幅一致，达 7 cm。

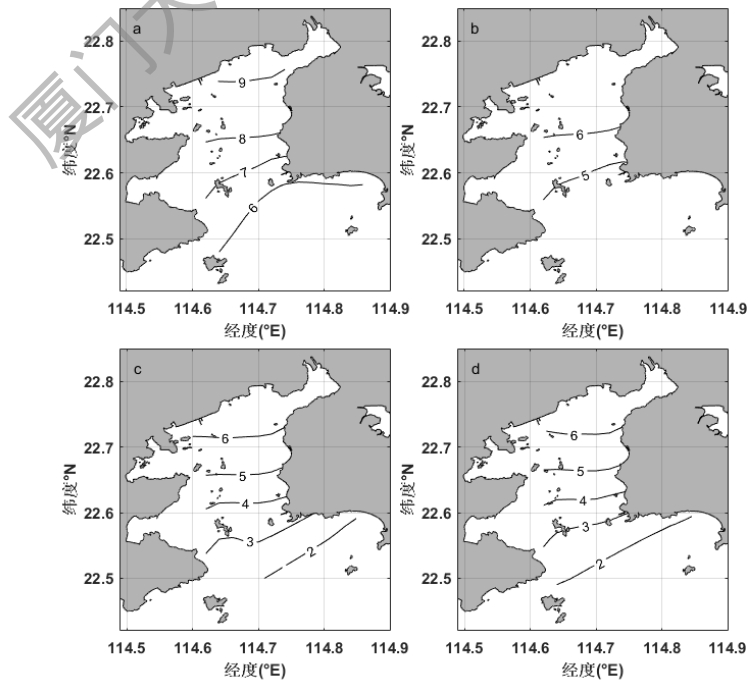
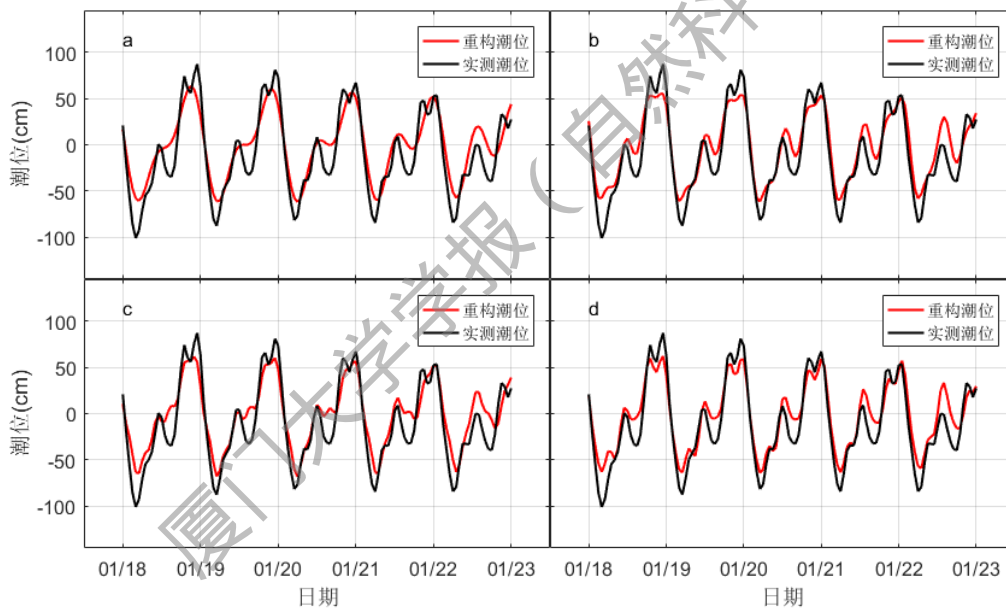


图 3 M₄(a)、(b) MS₄、M₆(c)和 2MS₆(d)浅水分潮的振幅分布 (单位: cm)

Fig. 3 Amplitude distribution (unit: cm) of M₄ (a), MS₄ (b), M₆(c) and 2MS₆ (d) shallow water tides

浅水分潮的振幅和大亚湾“双峰”现象强度在湾内具有同样的增长趋势,相较于全日、半日分潮,浅水分潮在湾口处的贡献并不显著,但随着潮波向湾顶传播,在湾顶浅水分潮振幅已超过部分主要分潮。为进一步探究湾内潮汐特征与各分潮的关系,我们将调和与分析得到的分潮进行重组,重构大亚湾 1 月 20 日前后大潮期的潮位。图 4 是湾顶 T06 站位分组重构潮位与实测潮位的对比:图 4 (a) 显示由 4 个主要全日分潮 (K₁、O₁、P₁ 和 Q₁) 和 4 个半日分潮 (K₂、M₂、N₂ 和 S₂) 重构的潮位与实测潮位高度基本一致,反映了不正规半日潮特征;图 4 (b) 和 (c) 加入倍潮 (M₄ 和 M₆) 和复合分潮 (MS₄ 和 2MS₆), 重构的潮位出现波峰不对称畸变,但未出现“双峰”水位;而当加入全部 4 个浅水分潮 (M₄、MS₄、M₆ 和 2MS₆) 后 (图 4 (d)), 双峰现象出现,且振幅与实测水位相符。



(a) K₁、O₁、P₁、Q₁、K₂、M₂、N₂、S₂; (b) K₁、O₁、P₁、Q₁、K₂、M₂、N₂、S₂、M₄、MS₄; (c) K₁、O₁、P₁、Q₁、K₂、M₂、N₂、S₂、M₆、2MS₆; (d) K₁、O₁、P₁、Q₁、K₂、M₂、N₂、S₂、M₄、MS₄、M₆、2MS₆。

图 4 T06 站的分潮重构潮位

Fig. 4 Reproduced tidal elevation at station T06

水位重构结果表明:浅水分潮对基础水位的影响使湾内水位在高潮时产生双高水位,单一类型的浅水分潮(四分之一日或六分之一日浅水分潮)均不能产生水位双峰,浅水分潮对双峰现象具有主要贡献。

2.3 双峰水位形成条件

Godin^[4]提出双峰水位是由高频分潮（ M_4 、 M_6 、 M_8 等）调制基础分潮 M_2 而形成，并给出二者在特定叠加相位时形成双峰水位的临界条件，即满足：

$$|\alpha| > \frac{1}{k^2} \quad (1)$$

其中 α 为倍潮与基础分潮 M_2 的振幅比， k 为二者频率比。例如，单一 M_4 分潮与 M_2 产生双峰水位的条件，需要当二者以 0 或 π 的相位差叠加时， M_4 分潮振幅大于 M_2 振幅的 25%。Song 等^[5]将两分潮叠加的情况拓展至 0 到 2π ，并将单一倍潮与基础分潮 M_2 的叠加简化为两列余弦波相加，即：

$$\eta = a_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + a_2 \cos(k\omega t + \varphi_2) \quad (2)$$

其中 η 为水位， ω 是 M_2 分潮的频率， a_1 和 a_2 分别是 M_2 分潮与其倍潮的振幅， φ_1 和 φ_2 分别是 M_2 分潮与其倍潮的初相位， k 是倍潮与基础分潮 M_2 的频率比值， t 是时间。

基于式（2），Song 等^[5]讨论了单一倍潮（ M_4 、 M_6 ）调制基础分潮 M_2 形成双峰水位的条件。当倍潮 M_4 与基础分潮 M_2 相位差为 0 或 π 时，产生双峰水位所需要的 M_4 分潮最小振幅为 M_2 分潮振幅的四分之一；分潮相位差越远离 0 或 π ，产生双峰水位所需要的倍潮振幅越大。对于倍潮 M_6 ，仅在二者相位差为 π 时，具有形成双峰水位的最小振幅，为 M_2 振幅的九分之一；同样当二者相位差越远离 π ，产生双峰水位所需要的 M_6 分潮振幅也越大。在一个 M_2 周期内，对于倍潮 M_4 ，其调制基础分潮 M_2 产生双峰水位的位置随着二者相位差的变化而移动，而倍潮 M_6 调制基础分潮 M_2 则在涨、落潮时形成两个中心对称的双峰水位，二者相位差同样影响双峰水位出现的位置。

复合分潮 MS_4 、 $2MS_6$ 的频率分别与倍潮 M_4 、 M_6 的频率相近，因此，单一复合分潮调制基础分潮 M_2 整体上看具有与倍潮相似的特征。但细微区别在于：由于倍潮与基础分潮的频率比值为整数，二者相位关系相对不变，那么在任意 M_2 分潮周期内产生的双峰水位特征保持一致；而复合分潮与基础分潮比值不为整数，二者叠加产生的双峰水位特征则随时间而变化。以四分之一日复合分潮 MS_4 为例，将式（2）中的倍潮水位贡献项替换为复合分潮项。为了便于与倍潮 M_4 做比较，对复合分潮角速度做以下变换：

$$\eta = a_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + a_2 \cos[2\omega t + (k - 2)\omega t + \varphi_2] \quad (3)$$

其中 k 为复合分潮与 M_2 分潮的频率比值， φ_2 为 MS_4 分潮的初相位。由式（3）可知，复合分潮水位曲线可视为初相位不断变化倍潮水位余弦曲线，因此复合分潮调制基础分潮的水位特征可以从倍潮形成双峰水位的条件中得到。复合分潮 MS_4 与基础分潮相位差 $\Delta\varphi = 2\varphi_1 -$

$(k-2)\omega t - \varphi_2$ ，随时间呈周期变化，因此其调制 M_2 分潮所需要的最小振幅也随之改变，双峰水位特征整体呈现出较长时间的周期变化特征，周期由二者频率比值决定。

图 5 给出了分潮初始相位差为 π 、振幅比为 0.4 的条件下，30 个 M_2 周期的时间长度里，复合分潮 MS_4 和 $2MS_6$ 分别与 M_2 分潮叠加的水位变化曲线。由图 5a 可知，复合分潮 MS_4 与 M_2 分潮振幅比为 0.4 时，介于 M_4 分潮形成双峰水位所需要的最大振幅比（0.5）与最小振幅比（0.25）之间，因此双峰水位只在部分时间出现； $2MS_6$ 与 M_2 分潮振幅比为 0.4 时，大于 M_6 分潮形成双峰水位所需要的最大振幅比（0.33），因此图 5（b）中，双峰水位一直存在。两个复合分潮调制的双峰水位均呈现出约 28 个 M_2 分潮周期（即 14 d）的周期变化特征。综上所述，单一复合分潮调制基础分潮的双峰特征主要由二者频率比值 k 决定，双峰水位的特征周期取决于相位差的变化频率；振幅比值则影响水位“双峰”在特征周期内出现的位置。

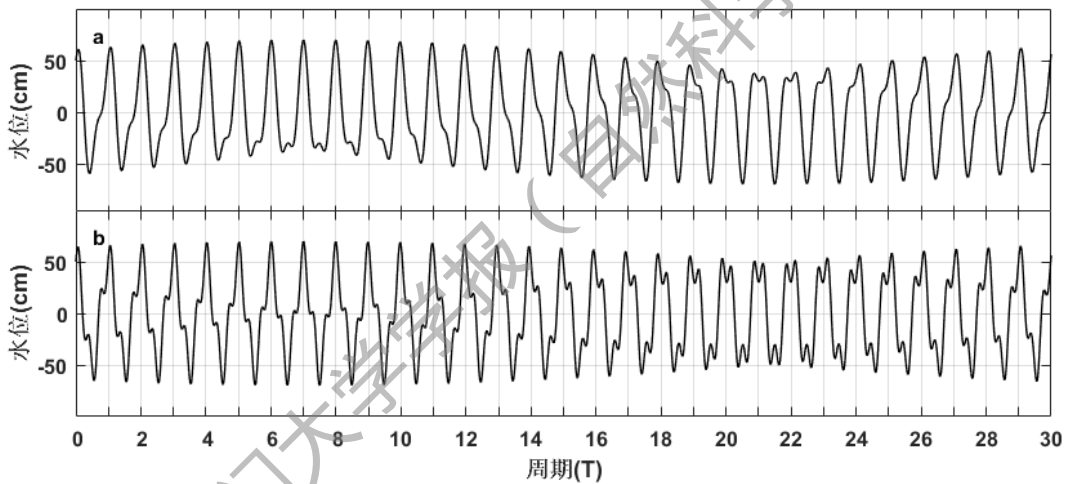


图 5 复合分潮 MS_4 (a)和 $2MS_6$ (b)调制 M_2 分潮的水位特征

Fig. 5 Tidal level characteristics of M_2 tide modulated by composite tides MS_4 (a) and $2MS_6$ (b)

单一复合分潮调制 M_2 分潮的水位曲线与实测水位相似，实测潮位中“双峰”现象在大潮期间尤为明显，而两个大潮期的时间间隔与单一复合分潮调制 M_2 分潮的特征周期一致，复合分潮 $2MS_6$ 调制 M_2 分潮的“双峰”特征也包含了观测期间两个大潮期的“双峰”特征，可见复合分潮对水位的贡献不可忽略。实际的潮位“双峰”可能受多个浅水分潮的影响，因此有必要进一步探讨多个浅水分潮同时调制 M_2 分潮的情况。

2.4 准调和分量应用

大亚湾内浅水分潮主要为倍潮 M_4 、 M_6 和复合分潮 MS_4 、 $2MS_6$ ，我们将 4 个浅水分潮

按照频率相近分类, 分别分析四分之一日分潮 (M_4 、 MS_4) 和六分之一日分潮 (M_6 、 $2MS_6$) 调制 M_2 分潮的过程。

将式 (2) 拓展为 3 列余弦波的叠加得到:

$$\eta = a_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + a_2 \cos(k_1 \omega t + \varphi_2) + a_3 \cos(k_2 \omega t + \varphi_3) \quad (4)$$

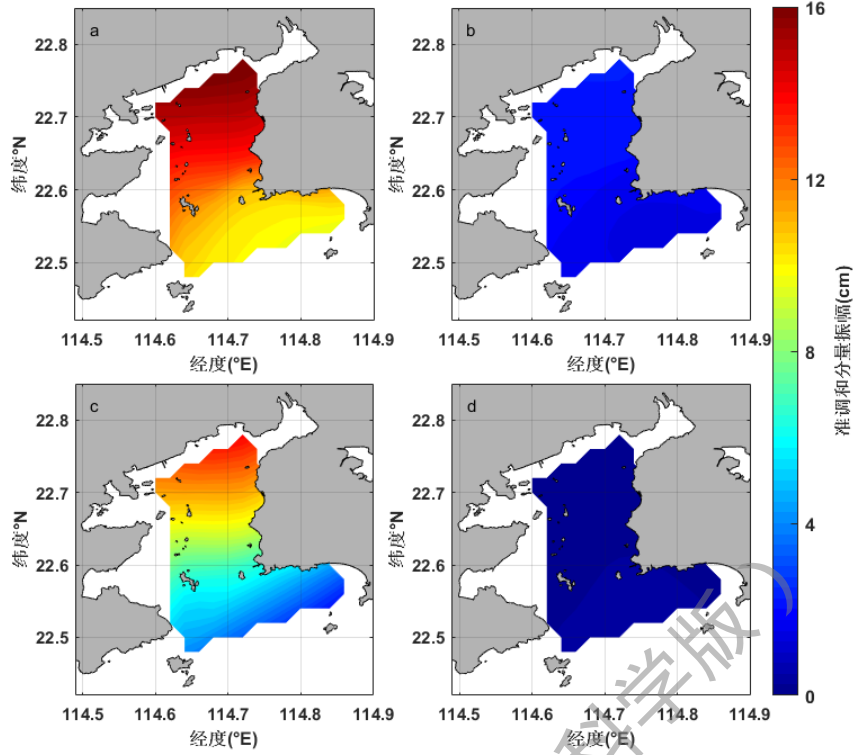
等式右侧的三项分别代表基础分潮 M_2 、倍潮以及复合分潮对水位的贡献, 讨论 M_2 、 M_4 、 MS_4 和 M_2 、 M_6 、 $2MS_6$ 两个组合的余弦波叠加, 将等式后两项合并为:

$$\begin{aligned} & a_2 \cos(k_1 \omega t + \varphi_2) + a_3 \cos(k_2 \omega t + \varphi_3) \\ = & (a_2 + a_3) \cos\left(\frac{k_1 \omega t + k_2 \omega t}{2} + \frac{\varphi_2 + \varphi_3}{2}\right) \cos\left(\frac{k_1 \omega t - k_2 \omega t}{2} + \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{2}\right) \\ & + (a_3 - a_2) \sin\left(\frac{k_1 \omega t + k_2 \omega t}{2} + \frac{\varphi_2 + \varphi_3}{2}\right) \sin\left(\frac{k_1 \omega t - k_2 \omega t}{2} + \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{2}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

可见, 倍潮与复合分潮对水位的贡献可以合并为两项分别具有类似余弦变化和正弦变化的水位变化项, 式 (5) 中等式右边两项称为准调和分量^[8], 准调和分量的变化过程虽然与余弦或正弦变化接近, 但其振幅变化率不是常量, 而是作长周期的余弦或正弦变化。结合大亚湾实测潮位调和结果, 湾内各浅水分潮振幅相近, 准调和分量中具有类似正弦变化项的振幅 $a_3 - a_2$ 远小于余弦变化项的振幅 $a_2 + a_3$ 。

对 10 个站位的正弦和余弦准调和分量振幅做三次样条插值至湾内区域, 图 6 给出了大亚湾内实测四分之一日及六分之一日浅水分潮合并为准调和分量后, 余弦和正弦准调和分量的振幅分布, 对比合并后的余弦、正弦准调和分量振幅大小, 可以看到正弦准调和分量对水位的贡献基本可以忽略, 余弦准调和分量的水位大小基本可以反映实测浅水分潮的水位高度, 因此大亚湾内浅水分潮可以用余弦准调和分量代替, 即式 (4) 可变为:

$$\eta \approx a_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + (a_2 + a_3) \cos\left(\frac{k_1 \omega t + k_2 \omega t}{2} + \frac{\varphi_2 + \varphi_3}{2}\right) \cos\left(\frac{k_1 \omega t - k_2 \omega t}{2} + \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{2}\right) \quad (6)$$



(a)四分之一日浅水分潮余弦准调和分量；(b)四分之一日浅水分潮正弦准调和分量；(c)六分之一日浅水分潮余弦准调和分量；(d)六分之一日浅水分潮正弦准调和分量。

图6 准调和分量的振幅分布

Fig. 6 Amplitude distribution of quasi-harmonic component

由式 (6) 可知，单一类型的浅水分潮调制倍潮 M_2 产生的双峰特征可以等价于余弦准调和分量对 M_2 分潮的作用，因此，复合分潮对双峰水位形成条件的影响可以从余弦准调和分量表达式中各项的意义反映出来。式 (6) 中余弦准调和分量项由倍潮与复合分潮振幅之和以及两个余弦变化项三者的乘积构成，余弦变化项的角速度分别为倍潮与复合分潮角速度的和以及差的 $1/2$ 。两个余弦变化项可以视为准调和分量的频率以及振幅的变化规律，因此准调和分量具有以下特点：准调和分量频率介于倍潮与复合分潮之间；准调和分量振幅为倍潮与浅水分潮之和，且具有长周期的余弦变化。

准调和分量频率具有与复合分潮频率相同的特点，因此其调制基础分潮 M_2 应与单一复合分潮类似，即双峰特征呈现周期变化。不同于复合分潮，准调和分量的振幅不再是常量，而是随时间呈长周期余弦变化。准调和分量的振幅为倍潮与复合分潮振幅之和，直观上更容易达到形成双峰水位所需要的振幅条件，但振幅的余弦变化对特征周期内双峰水位的影响需进一步讨论。以四分之一日准调和分量为例，由式 (6) 得到准调和分量与基础分潮相位差：

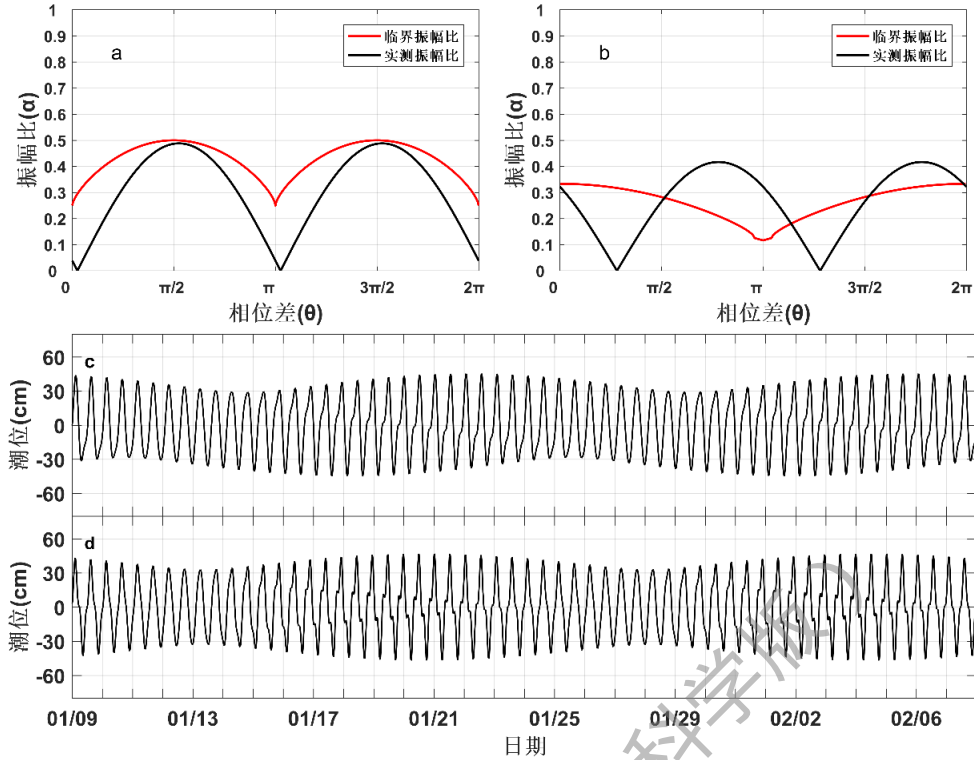
$$\Delta\varphi = k_1\varphi_1 + \left(\frac{k_1-k_2}{2}\right)\omega t - \frac{\varphi_2+\varphi_3}{2} \quad (7)$$

式中初始相位差为 $k_1\varphi_1 - \frac{\varphi_2 + \varphi_3}{2}$ ， k_1 和 k_2 分别为 M_4 、 MS_4 分潮与基础分潮 M_2 的频率比，分别为 2 和 2.035，因此相位差随时间呈 28 天的周期变化。对比式 (6)、(7) 发现，相位差的变化频率与准调和分量振幅变化的频率一致，意味着在特征周期内，准调和分量与 M_2 分潮的相位差大小和二者振幅比是一一对应的，因此在特征周期内双峰水位特征保持不变。将式 (6) 与式 (7) 联立得到准调和分量与 M_2 分潮振幅比 α 随二者相位差 $\Delta\varphi$ 的变化关系：

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{(a_2 + a_3) \cos\left(\frac{k_1\omega t - k_2\omega t}{2} + \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{2}\right)}{a_1} \\ &= \frac{a_2 + a_3}{a_1} \cos(\Delta\varphi - 2\varphi_1 + \varphi_2)\end{aligned}\quad (8)$$

上式中 $\Delta\varphi$ 的变化范围为 0 到 2π 时，对应着双峰水位的一个特征周期长度。对比 Song 等^[5]提出的单一倍潮 (M_4 、 M_6) 在不同相位差的情况下调制基础分潮 M_2 形成双峰水位所需要的最小振幅比，结合 T06 站分潮调和常数，图 7a、b 给出了不同相位差的条件下，四分之一日和六分之一日准调和分量与 M_2 分潮实测振幅比，以及形成双峰水位所需要的最小振幅比。当实测分潮振幅比大于形成双峰水位所需要的最小振幅比时，则在特征周期的对应位置形成双峰水位；当实测分潮振幅比不足时，水位曲线仅表现出轻微形变。对比图 7a、b 可以发现，准调和分量调制 M_2 分潮形成双峰水位的条件不仅与二者振幅比值有关，也与二者振幅比和相位差的初始相位关系相关，即式 (8) 中 $-2\varphi_1 + \varphi_2$ 项。初相位的大小，影响特征周期内满足形成双峰水位振幅条件的位置，初始相位关系仅由 M_2 分潮以及倍潮的迟角决定，与复合分潮迟角无关。

基于式 (6)，图 7 (c) 和 (d) 给出了 T06 站基础分潮 M_2 与余弦准调和分量代替浅水分潮的重构水位图。水位曲线表明：受准调和分量振幅余弦变化的影响，虽然四分之一日准调和分量的最大振幅已经超过了形成双峰水位所需要的最小振幅比，但依然没有双峰水位形成，仅表现出水位的轻微扭曲；六分之一日准调和分量调制 M_2 分潮只在部分时间内形成水位双峰。重构水位表现出的双峰水位特征周期为 14 d 左右，表明特征周期不仅仅受准调和分量与 M_2 分潮比值的影响。由于准调和分量与 M_2 分潮振幅比和相位差具有频率一致的余弦变化，余弦变化的周期特性使得二者在一个特征周期内形成重复的双峰特征，从而将准调和分量调制 M_2 分潮的特征周期减小一半。



(a)四分之一日准调和分量振幅比；(b)六分之一日准调和分量振幅比；(c)四分之一日准调和分量重构水位；
(d)六分之一日准调和分量重构水位。

图 7 T06 站准调和分量与 M_2 分潮振幅比和重构水位

Fig. 7 The amplitude ratio of quasi-harmonic component to M_2 tide and reproduced tidal elevation at station T06

准调和分量代替浅水分潮与基础分潮 M_2 的重构水位图基本可以反应实际水位的双峰特征。六分之一日分潮 (M_6 和 $2MS_6$) 合并的准调和分量可以在 1 月 20 日以及 2 月 2 日左右对 M_2 分潮产生的轻微扭曲，与实际观测潮位中出现明显双峰水位的两个大潮期的时间相对应。实际潮位中双峰水位还受到其他全日、半日分潮的不规则影响，但准调和分量已经可以揭示浅水分潮影响下双峰水位出现的规律。

3 结论

根据大亚湾冬季 10 个临时潮位观测站 1 个月长度的潮位观测数据，分析大亚湾内潮位双峰现象的分布特征。以双峰水位强度最高的湾顶 T06 站为例，探究各浅水分潮对大亚湾双峰现象的贡献，得出以下结论：

- 1) 从大亚湾湾口至湾顶，4 个主要浅水分潮 (M_4 、 MS_4 、 M_6 和 $2MS_6$) 的振幅显著增强，潮位曲线的“双峰”水位差也随之增大，复合分潮对双峰水位形成与倍潮具有同样贡献。
- 2) 单一浅水分潮与基础分潮 M_2 形成双峰水位的条件与二者频率比值相关。复合分潮

(MS_4 和 $2MS_6$) 与 M_2 分潮频率比值不为整数, 使得形成的双峰特征随时间呈长周期变化, 特征周期由二者频率比值决定。复合分潮振幅大小影响特征周期内水位双峰出现的位置。

3) 单一类型浅水分潮 (四分之一日或六分之一日浅水分潮) 对 M_2 分潮的调制可以用余弦准调和分量代替。准调和分量与 M_2 分潮叠加产生的双峰特征具有与单一复合分潮调制 M_2 分潮相同的特征周期。特征周期内双峰水位的变化规律由准调和分量的振幅和频率, 以及 M_2 分潮和倍潮的迟角确定。湾顶处六分之一日余弦准调和分量与 M_2 分潮叠加产生的双峰水位与大亚湾实测潮位的变化特征一致。

参考文献:

- [1] 杨国标. 大亚湾海区潮流运动特征[J]. 人民珠江, 2001, 22(1): 30-32.
- [2] 吴仁豪, 蔡树群, 王盛安, 等. 大亚湾海域潮流和余流的三维数值模拟[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(3): 18-23.
- [3] 李立. 大亚湾冬季水位的亚潮变化及其与南海的耦合[J]. 应用海洋学报, 1998, 17(4): 383-389.
- [4] GODIN G. An investigation of the phenomenon of double high water or double low water at some harbours[J]. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 1993, 45(2): 87-106.
- [5] SONG D H, YAN Y H, WU W, et al. Tidal distortion caused by the resonance of sexta-diurnal tides in a micromesotidal embayment[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2016, 121(10): 7599-7618.
- [6] 严聿晗, 武文, 宋德海, 等. 大亚湾的潮汐动力学研究——II. 潮位和潮流双峰现象的产生机制[J]. 热带海洋学报, 2017, 36(3): 46-54.
- [7] 刁希梁, 丁扬, 鲍献文. 大亚湾海域潮位“双峰”现象生成机制研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(9): 1-10.
- [8] 方国洪, 于克俊. 浅水港口潮汐预报的一个方法[J]. 海洋与湖沼, 1981, 12(5): 383-390.
- [9] PAWLOWICZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. Computers and Geosciences, 2002, 28(8): 929-937.
- [10] 蔡伟章, 陈耕心, 丁锦仁. 象山港潮汐潮流特征及成因探讨[J]. 海洋通报, 1985, 4(3): 8-12.
- [11] 杨正东, 朱建荣, 王彪, 等. 长江河口潮位站潮汐特征分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2012, 3: 111-119.

Analyses of formation of the bimodal phenomenon and application of the quasi-harmonic component in the Daya Bay

PENG Shuaixing, ZHU Jia*, CHEN zhaozhang, SUN Zhengyu, YANG

Longqi, HU Jianyu

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Ocean and Earth Sciences,
Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: Bimodal structure is a unique phenomenon of the Daya Bay, especially the double high water level at the high tide. Based on the observation data of 10 temporary stations in the Daya Bay for one month in winter, we analyzed the formation conditions of the bimodal phenomenon and application of quasi-harmonic component in the Daya Bay. The harmonic analysis reveals that the increase of the amplitude of shallow water tides (including the overtide and composite tide) is the main reason for the intensification of the bimodal phenomenon in the bay. When the tidal wave propagates from the mouth to the top of the bay, the amplitude of composite constituent $2MS_6$ increases the most with an ratio of more than 300%. The bimodal characteristic caused by single composite tide modulating the fundamental varies periodically with time. By using the quasi-harmonic component analysis, one can see the characteristic period of double high water level is determined by the amplitude ratio contribution of shallow water tide to the fundamental tide. the amplitude and initial phase of tidal component affect the change of water level in the period. In addition, by analyzing and reconstructing tides, it is found that the cosine quasi-harmonic component of sexta-diurnal tides can be used to simplify and replace the shallow water tides, and the obtained water level curve has the same “double peak” characteristic as the measured water level.

Keywords: tide; bimodal phenomenon; composite tide; quasi-harmonic component