

大亚湾海域夏、冬季的潮汐特征及余水位与风的相关性初步探讨*

朱 佳¹ 胡建宇¹ 陈照章¹ 孙振宇^{1,2} 杨龙奇¹ 彭帅星¹ 吉皎月¹

(1. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室 厦门 361012; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室 珠海 519082)

摘要 大亚湾及其邻近海域冬、夏季各 14 个临时水位观测点 1 个月的实测潮位资料显示: 各站的水位曲线均呈现明显的“双峰”现象, 且湾顶比湾口更为明显。本文采用了调和分析方法, 给出 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 四个主要分潮及 M_4 、 M_6 、 $2MS_6$ 三个浅水分潮的振幅和迟角同潮图, 分析大亚湾的主要潮汐特征, 探讨了浅水分潮对双峰结构的贡献, 并采用交叉谱分析对余水位与风的相关性进行了讨论。结果表明: (1)大亚湾海域各主要分潮振幅均由湾口向湾顶递增, 高潮发生时间由湾口向湾顶推迟; 涨潮历时均大于落潮历时; 平均潮差在湾顶达到最大; (2)大亚湾内属于不正规半日潮, 而考洲洋及其湾外海域则属于不正规全日潮; (3)大亚湾内浅水效应明显, 从湾口至湾顶, 六分之一日分潮的振幅呈 5—7 倍的增长, 主导了大亚湾潮波系统的形变; (4)分潮重构结果显示, 四分之一日和六分之一日浅水分潮(尤其是 $2MS_6$ 分潮)的异常增长, 是导致大亚湾潮汐双峰现象的主要原因; (5)冬季大亚湾内各点的余水位与风速呈现正相关, 相关系数均在 0.53 以上; (6)周期为 0.45—0.53 d 的沿岸风对各站余水位的影响最大。

关键词 大亚湾; 水位双峰; 潮汐特征; 浅水分潮; 余水位与风的相关性

中图分类号 P717 **doi:** 10.11693/hyhz20200800230

大亚湾是南海沿岸的重要海湾, 北靠海岸山脉, 东、西两侧分别为平海半岛与大鹏半岛, 湾内水深自北向南逐渐增加, 中部水深 10 余米, 湾口水深可达 20 多米。

鉴于其重要地理位置, 已有多位学者开展了大亚湾海域潮汐、潮流以及水交换的研究工作。李立(1998)应用谱分析和线性模型研究了大亚湾内冬季亚潮水位变化的特征和原因。杨国标(2001)运用 19 个站的实测数据分析了大亚湾六个主要分潮的潮流及余流特征。周巧菊(2007)采用了 POM(princeton ocean model)模型研究了大亚湾温排水交换过程, 并对潮汐进行了模拟。王聪等(2009)通过数值模拟研究了风场和潮致余流对大亚湾水交换能力的影响。

双峰结构是大亚湾潮波的主要特征, 即在半日

潮汐周期中, 水位停止上升, 略有下降, 然后再次上升, 而后又迅速下降至低潮的状态(Godin, 1993)。这种由于高频振荡叠加半日潮产生的双峰现象出现在不少港湾中, 如美国的 Buzzards 湾(Redfield, 1980), 英国的 Solent 海峡、荷兰的 Den Helder 港(Pugh, 1987)和英格兰南海岸的 Swanage 湾(Godin, 1993)都观测到了该现象。Dyer(1973)指出, 当潮波传播至浅水时, 受到漏斗效应和浅水成分的影响, 越靠近上游潮差越大。Boon III (1975)认为 M_6 和 M_8 这类高频潮可导致涨潮和落潮历时的差异。Blanton 等(2002)的研究证明在美国佛罗里达州的 Charles Creek, M_6 分潮对潮流形变的影响甚至大于 M_4 分潮。Kim 等(2001)推测 Narragansett 湾的 M_4 分潮振幅可能因共振增大了 2—3 倍。双峰现象目前在国内的报道和研究并不多, 且

* 国家自然科学基金项目, 41776027 号; 惠州市 2017 年市级统筹油补资金项目, F2017-01-1 号。朱 佳, 工程师, E-mail: zhujia@xmu.edu.cn

通信作者: 胡建宇, 教授, E-mail: hujy@xmu.edu.cn

收稿日期: 2020-08-06, 收修改稿日期: 2020-11-12

多集中于大亚湾。多位学者根据 2 个潮位站 1 个月的水位数据, 对潮汐做了系列研究, 指出 M_6 分潮的异常增长是引起大亚湾潮位双峰的主要原因(Song *et al*, 2016; 刁希梁等, 2017); 用三维潮汐、潮流数值模型(武文等, 2017)和数学解析方法(严聿晗等, 2017)揭示了水位双峰、涨潮双峰以及高频分潮的强耗散等现象。由以上研究可见, 浅水分潮的振幅虽不大, 但在港湾内的作用却不容忽视, 其在港湾内的浅水效应及与地形呼应导致的潮汐共振, 是引起双峰结构、潮波变形以及振幅剧增的重要原因。

近海海域的海平面及水位变化, 除受地形、浅水成分等的影响之外, 对风的响应也较明显。Chuang等(1983)调查了墨西哥湾北部陆架的沿岸风和海陆风(包括向岸风和离岸风)对海平面变化的影响, 发现不同的响应主要是由水深变化引起的。Craig (1989a, 1989b)建立了海洋对固定频率的周期性风强迫的响应理论。根据观测和数值模拟结果, 多位学者探讨了海平面和潮流在不同海域里对海陆风的响应(Clancy *et al*, 1979; Vesecky *et al*, 1997; Gallop *et al*, 2012; Lin *et al*, 2016), 特别是在临界纬度附近(约 30°N 和 30°S),

由于昼夜强迫的频率与当地惯性频率重合而出现近共振, 还经常能观察到增强的海洋响应(Simpson *et al*, 2002; Zhang *et al*, 2009; Nam *et al*, 2013)。

目前对大亚湾水文动力方面的研究虽包含了实测、模型及数学解析等方法, 但仍需更多的实测数据进行补充和佐证。因此, 我们在大亚湾及其邻近海域布设了冬、夏季各 14 个临时水位观测点, 进行了一个月的同步观测, 旨在分析冬季和夏季的潮汐特征、季节差异及成因, 探讨浅水分潮及共振对潮汐畸变的贡献和影响, 并初步讨论余水位与风速、风向及周期的相关性。

1 数据及方法说明

1.1 水位及余水位数据

选用大亚湾内冬季、夏季各 14 个临时水位观测点的连续水位数据, 水位观测点分布见图 1, 其基准面是以平均海平面为准, 所有站位都统一。虽然部分站点的实际观测时间远大于 1 个月, 为求一致, 我们均截取一个月的长度。冬季的水位观测时间为 2018 年 1 月 8 日—2 月 8 日, 夏季的观测时间为 2018 年 5 月 17 日—6 月 17 日。

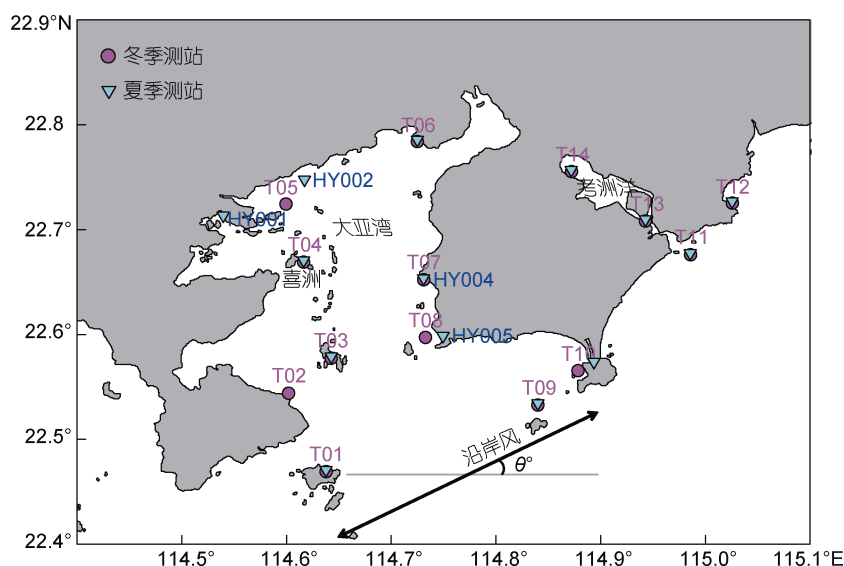


图 1 大亚湾内冬季、夏季的临时水位观测点分布图

Fig.1 The temporary stations for water level observation in winter and summer in the Daya Bay

注: θ 表示风向角度; T01—T14、HY001、HY002、HY004、HY005 表示站位名称

水位观测使用的仪器为 RBR TDR-2050 潮位仪及 KELLER DCX-22 水位记录仪。所用仪器在施测之前均通过调试检验, 且比测结果一致性良好。数据采样间隔分为两种, RBR TDR-2050 采样间隔为 1 min, KELLER DCX-22 采样间隔为 5 min, 两者精度均为 0.01 m。

使用 t_tide Matlab 软件包(Pawlowicz *et al*, 2002)进行潮汐分析。与经典的谐波分析相似, t_tide 预测潮汐信号系与天文参数相关的特定频率的有限组正弦信号的和(Pawlowicz *et al*, 2002)。余水位由原始水位减去潮汐信号得到。在 t_tide 谐波分析中使用了 35

个潮汐成分, 频率为每小时 0.0015 (M_2 潮汐成分)至 0.3220 (M_8 潮汐成分)周期。

1.2 风场数据

采用对应冬季、夏季水位观测期间的欧洲气象中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 风场数据, 其空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$, 时间分辨率为 3 h。为减小全球模式近岸区域个别网格点的误差, 取调查海域 $114^\circ\text{—}115^\circ\text{E}$, $22.0^\circ\text{—}23.0^\circ\text{N}$ 区域内的平均风场进行计算。

文中对余水位和风应用了相关分析和交叉谱分析方法, 当两类数据时间分辨率不同时, 选较低时间分辨率做插值计算。例如, 水位数据和风场数据的时间分辨率分别为 1 h 和 3 h, 两者进行相关分析时取时

间分辨率为 3 h。

2 潮汐特征

2.1 潮位特征

选择水位变化特征较有代表性的湾顶 T06 站为例, 绘制冬季和夏季的水位时序曲线。从图 2 中可看出水位过程曲线在每个太阴日经历了 2 次高潮和 2 次低潮, 且每次高潮或低潮的水位高度均不相同, 故存在潮汐的日不等现象。此外, 无论是高潮还是低潮, 水位曲线存在明显的双峰现象。双峰之间的时间间隔约为 3.77—4.32 h 不等; 双峰值间的波峰和波谷的平均水位差约为 40 cm, 最大水位差可达 93 cm。

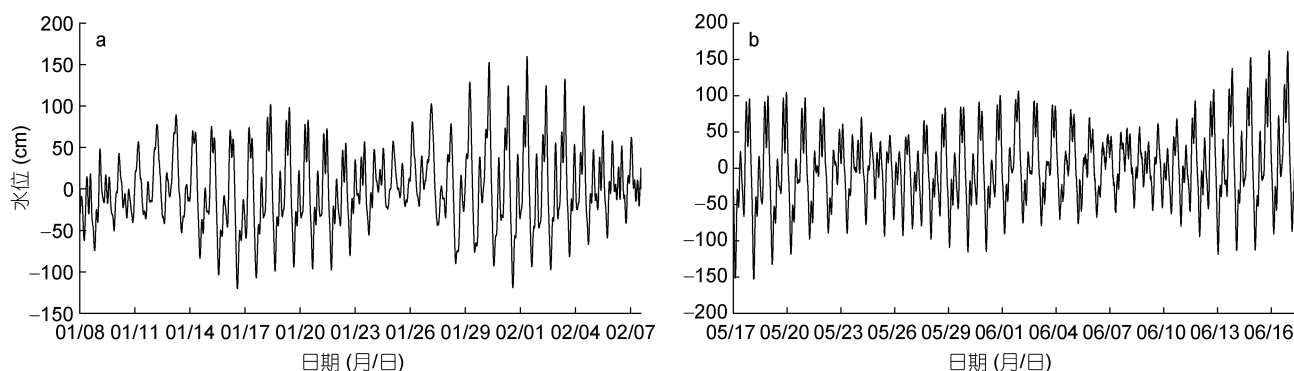


图 2 大亚湾 T06 冬季(a)和夏季(b)水位过程曲线

Fig.2 The tidal level curves at Station T06 in winter (a) and summer (b)

2.2 潮汐特征

在冬季和夏季, 平均潮差由湾口向湾顶逐渐增大, 在湾顶达到最大。各站涨潮历时均远大于落潮历时。整体上看, 湾顶的高潮时要早于湾口, 湾顶的低潮时要晚于湾口(图 3)。

冬季, 湾内平均潮差最大值出现在 T06 站, 为 115 cm; 而 T09、T11 和 T14 站的平均潮差则最小, 均为 80 cm。各站平均涨潮历时大于平均落潮历时, 平均涨潮历时在 6.38—7.65 h 范围内, 平均落潮历时在 4.78—7.11 h 范围内。

夏季, 平均潮差最大值出现在 T06 站, 为 121 cm; 而 T10 站的平均潮差最小, 为 85 cm。平均涨潮历时大于平均落潮历时, 平均涨潮历时在 6.42—7.43 h 范围内, 平均落潮历时在 4.98—5.96 h 范围内。

由大亚湾冬季和夏季各水位站的潮汐特征值 $(H_{K_1} + H_{O_1})/H_{M_2}$ (H_{K_1} 、 H_{O_1} 、 H_{M_2} 分别为 K_1 、 O_1 和

M_2 分潮的振幅)分布图(图 4)可看出, 冬季大亚湾内的 10 个观测点的潮汐特征值均大于 1.7 且小于 2, 而考洲洋及其外侧的 4 个站点 T11—T14 的潮汐特征值大于 2, 因此冬季大亚湾内潮汐类型属于不正规半日潮, 而考洲洋及其湾外则属于不正规全日潮。夏季, 大亚湾内的 10 个观测点及考洲洋内的 T14 和 T13 的潮汐特征值均大于 1.7 且小于 2, 而考洲洋外侧的 T11、T12 两个观测点的潮汐系数略大于 2, 故夏季大亚湾和考洲洋内的潮汐类型属于不正规半日潮, 考洲洋外的调查海域则属于不正规全日潮。

海洋图集编委会(2004)曾指出: 在南海海域, 几乎没有正规半日潮出现, 而是以不正规全日潮类型占优势, 并有明显的日不等现象; 而考洲洋的地理位置恰好位于南海北部不正规半日潮和不正规全日潮的分界点上。这就是大亚湾湾内和湾口为不正规半日潮, 而考洲洋湾内、湾口有时是不正规全日潮的原因。

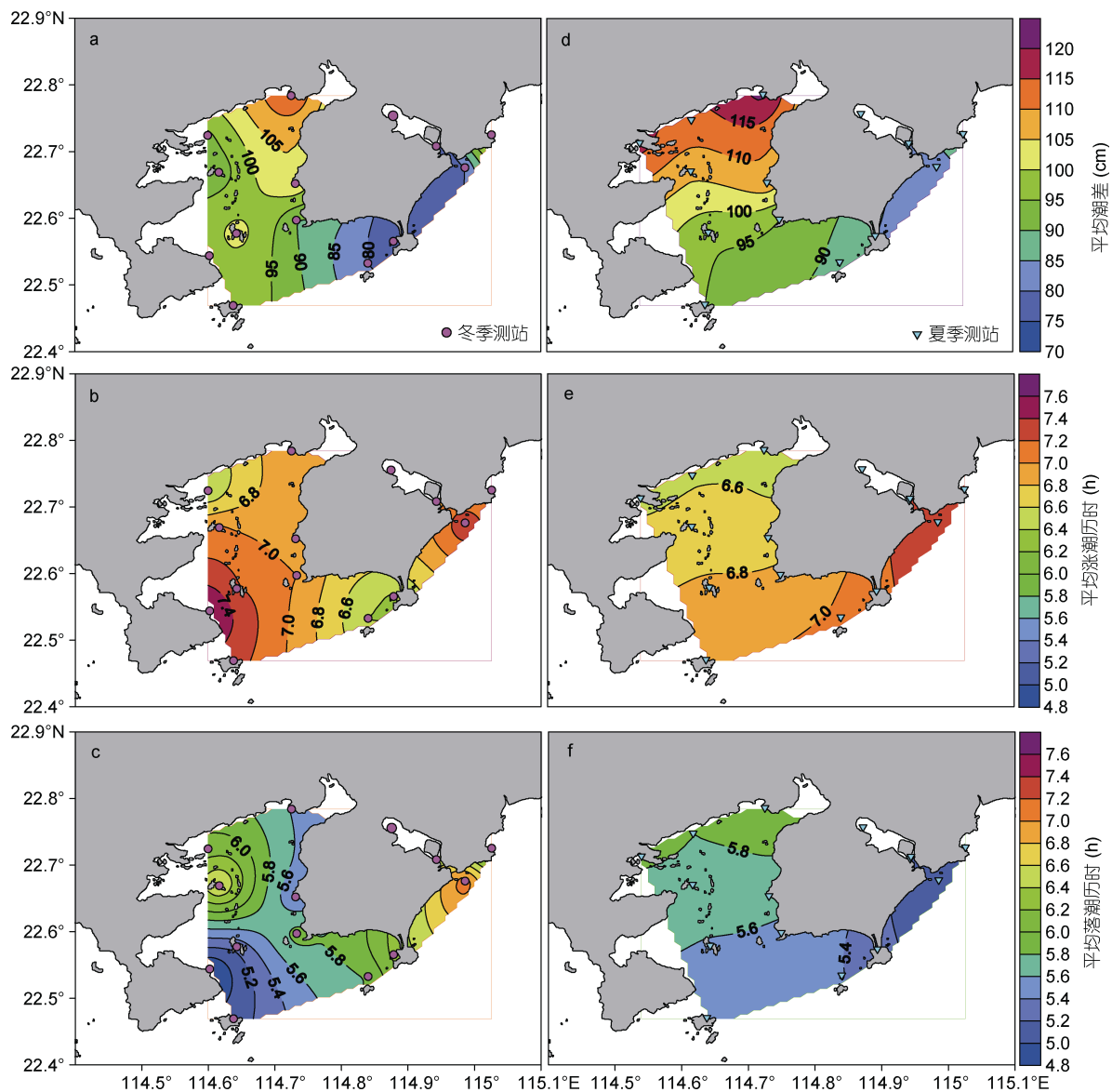


图 3 冬季(a—c)和夏季(d—f)各站潮汐分布特征图

Fig.3 Characteristics of tidal distribution in winter (a—c) and summer (d—f)

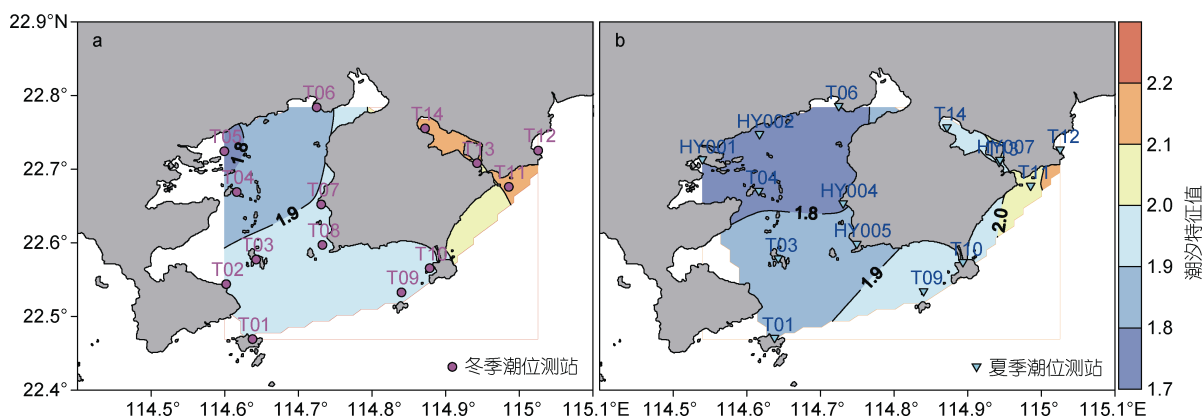


图 4 冬季(a)和夏季(b)大亚湾及其邻近海域潮汐特征值分布

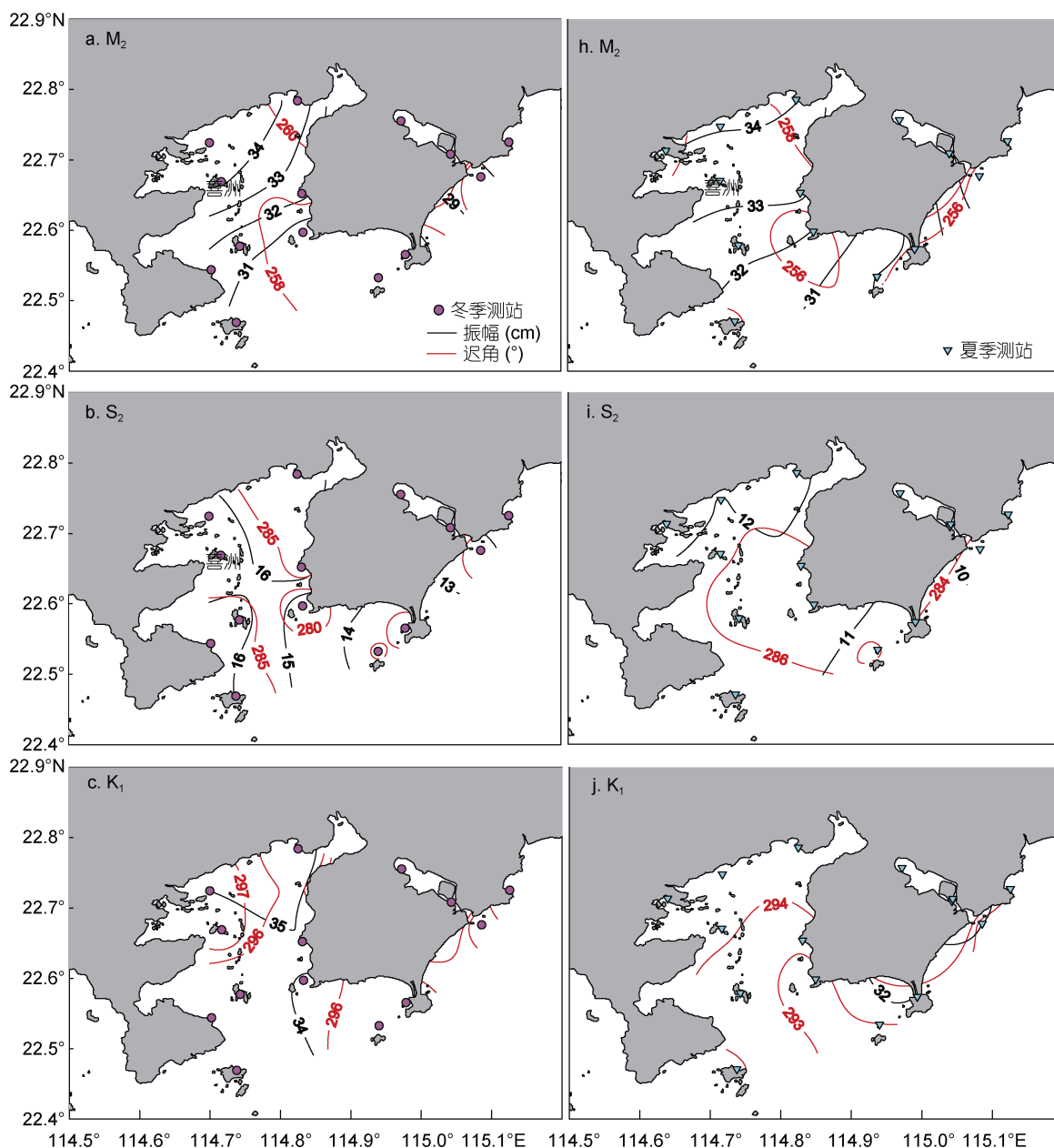
Fig.4 Distribution of tidal types in Daya Bay and its adjacent waters in winter (a) and summer (b)

2.3 同潮图

为了解大亚湾及其邻近海域的潮汐特征, 绘制 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 、 K_2 、 N_2 、 M_4 、 M_6 、 MS_4 、 $2MS_6$ 十二个分潮的同潮图, 但限于篇幅, 本文仅列出冬季、夏季 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 四个主要分潮及 M_4 、 M_6 、 $2MS_6$ 三个浅水分潮的同潮图(图 5)。由结果可得: 在 14 个水位测站中, 振幅最大的分潮为 M_2 和 K_1 , 其次是 O_1 分潮, 而后依次是 S_2 分潮, P_1 和 M_4 分潮, N_2 、 Q_1 、 MS_4 、 M_6 、 K_2 分潮, 最后是 $2MS_6$ 分潮; 大多数分潮的振幅均由湾口至湾顶逐

渐增大。

冬季, M_2 分潮振幅由大亚湾湾口 T09 站的 30 cm 到湾顶 T05 站的 35 cm, 增长了 15%, K_1 、 O_1 、 S_2 分潮振幅分别增长了 6%、4%和 27%, 而振幅增幅较大的是浅水分潮 M_4 、 MS_4 (图略)、 M_6 和 $2MS_6$ 分潮, 增幅分别为 81%、97%、525%和 616%。夏季, 从湾口到湾顶, M_2 分潮振幅增幅为 14%, K_1 、 O_1 、 S_2 分潮振幅增幅为 3%、2%和 16%, 而浅水分潮 M_4 、 MS_4 (图略)、 M_6 和 $2MS_6$ 的增幅则分别达到 60%、86%、547%和 707%。



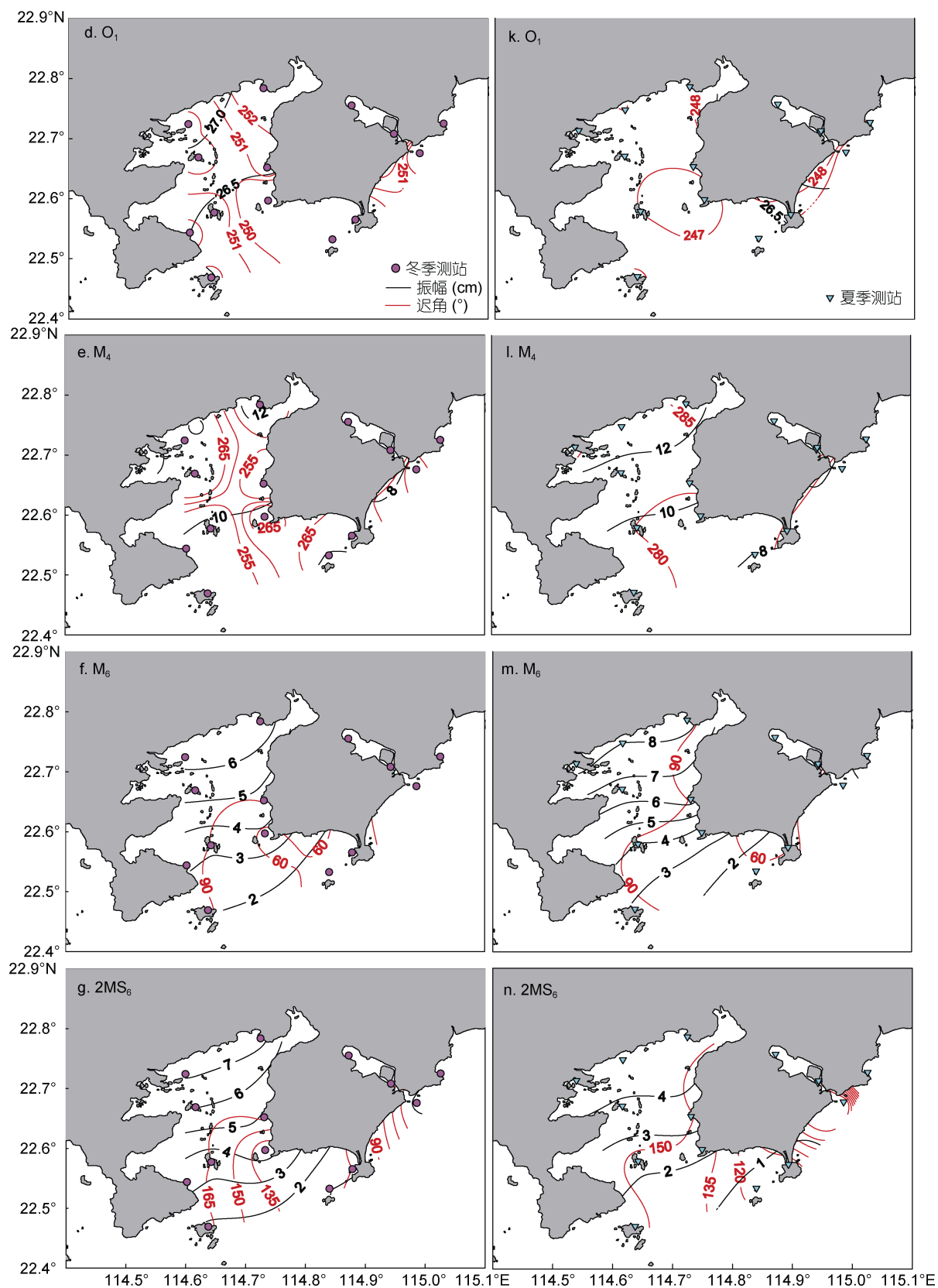


图 5 冬季(a—g)和夏季(h—n) M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 M_4 、 M_6 、 $2MS_6$ 分潮的振幅与迟角同潮图

Fig.5 The cotidal charts of the amplitude and the phase lag of M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , M_4 , M_6 , $2MS_6$ in winter (a—g) and summer (h—n)

迟角方面, M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 和 P_1 、 Q_1 、 K_2 、 N_2 (图略)这八个主要分潮的等迟角线在大亚湾内分布稀疏,从湾口到湾顶迟角变化不大,尤其是全日分潮,湾顶站位的位相比湾口站位仅滞后 2° — 4° ,说明全日分潮的潮波在大亚湾内传播最快,半日分潮次之;而 M_4 、 M_6 、 MS_4 (图略)和 $2MS_6$ 四个浅水分潮的迟角分布呈现从考洲洋湾口到大亚湾湾顶迅速增大的趋势。尤其是 M_6 和 $2MS_6$ 这两个六分之一日浅水分潮,其等值线在T11—T10站之间分布密集,表明在这些海域,六分之一日分潮的传播速度最慢。

2.4 潮位双峰现象的成因分析

2.4.1 分潮共振现象 由上述分析可见,在潮波传入大亚湾之后,六分之一日分潮的振幅呈5—7倍的增长,主导了大亚湾潮波系统的形变。这是由于分潮共振现象引起的,即当某分潮的频率与半封闭海湾的固有(本征)频率相近时,激发出潮汐共振(董礼先等, 1999a, 1999b; Zhong *et al.*, 2008; 刁希梁等, 2017; 武文等, 2017; 严聿晗等, 2017)。

根据四分之一波长理论公式(Proudman, 1952; Defant, 1961; Song *et al.*, 2016)计算大亚湾的固有共振周期。

$$L = \frac{n}{4} c T_0 = \frac{n}{4} \sqrt{gh} T_0 \quad n = 1, 3, 5 \dots, \quad (1)$$

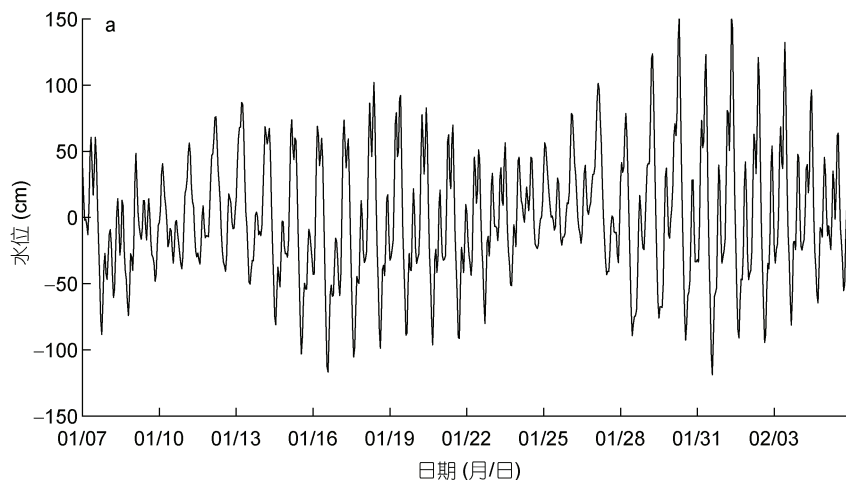
$$\text{即 } T_0 = \frac{4L}{n\sqrt{gh}} \quad n = 1, 3, 5 \dots, \quad (2)$$

式中, L 为半封闭海湾长度, c 是潮波传播速度, h 为海湾平均水深, g 为重力加速度, T_0 为周期, 单位为 d, n 取 1。大亚湾平均水深约为 7—8 m, 海湾长度约为 25—30 km。由此大致算出大亚湾的固有周期约为 0.140—0.168 d。可见, 四分之一日和六分之一日分潮周期

与该固有周期相近, 尤其是 M_6 分潮和 $2MS_6$ 分潮, 其周期为 0.173 d 和 0.171 d, 最接近大亚湾的固有周期, 因此六分之一日分潮在大亚湾内的浅水效应最明显, 产生的潮汐共振现象最大, 而这主要是由地形特征决定的(Song *et al.*, 2016)。

2.4.2 分潮重构 从调查海域冬季、夏季各 14 个水位站所绘制水位过程曲线图上看, 无论是高高潮还是低高潮, 无论是大潮期还是小潮期, 都存在明显的水位双峰现象, 而且这一现象在湾顶要明显强于湾口。为探究到底是哪些分潮导致双峰现象的出现, 我们利用调和常数对各站潮位进行了重构。在重构过程中逐步剔除某个分潮, 而后用剩余分潮回构潮位。经过多次尝试, 发现四分之一日和六分之一日的浅水分潮(尤其是 $2MS_6$ 分潮)的异常增长是导致大亚湾及其邻近海域潮汐双峰现象的主要原因。

以水位双峰现象最明显的湾顶站位 T06 站为例。首先剔除振幅增幅最大的浅水分潮 $2MS_6$, 回构曲线中的双峰程度已大幅削减, 仅在个别波峰处存在小于 10 cm 水位差(图略); 而后剔除 M_6 和 $2MS_6$ 分潮, 在回构曲线(图 6b)中可见, 双峰现象几乎消失, 仅有略微残存的双峰且水位差小于 2 cm; 而在剔除 M_4 、 MS_4 、 M_6 、 $2MS_6$ 这四个浅水分潮之后, 图 6c 中的回构潮位曲线中已完全不见双峰现象。由此可见, 大亚湾内潮位的双峰现象是由 M_4 、 MS_4 、 M_6 、 $2MS_6$ 产生的, 尤其是 M_6 及 $2MS_6$ 这两个六分之一日分潮占主导的, 说明六分之一日分潮主导了大亚湾及其邻近海域潮波系统的形变, 该结论进一步佐证了以往的研究结果 (Song *et al.*, 2016; 武文等, 2017)。



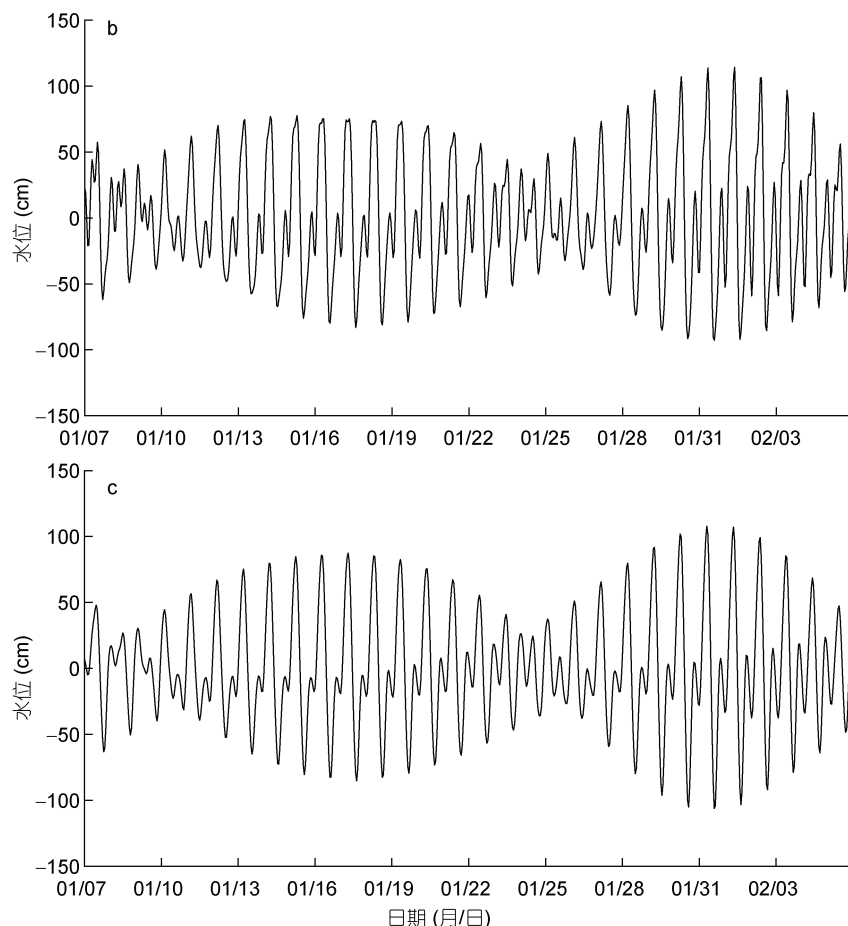


图 6 实测与回构潮位曲线

Fig.6 The measured and reconstructed tide level

注: a: 冬季 T06 站的实测潮位曲线; b: 剔除 M_6 和 $2MS_6$ 分潮的潮位回构曲线; c: 剔除 M_6 、 $2MS_6$ 、 M_4 、 MS_4 四个浅水分潮的潮位回构曲线

3 讨论

3.1 余水位与风速的相关性

为了探讨余水位与风速的关系, 取冬季调查期间的风场为例。由图 7 可见(选取湾口、中部及湾顶 4 个测点展示), 冬季大亚湾内水位测点的余水位与风速曲线的变化趋势较吻合, 风速大时余水位也相应升高, 两者相关系数 r 均在 0.53 以上, 呈现正相关关系。

3.2 余水位与风向及周期的相关性

为进一步探究余水位与风的关系, 我们对两者进行交叉谱分析, 目的是找出与余水位相关性最高的风向与频率(周期)。如图 1 所示, 风向以西风为 0° (指向正东为 0°), 逆时针旋转增大, 东风为 180° (指向正西为 180°), 例如, $\theta=30^\circ$ 即表示东偏北 30° 。由图 8 可见, 风与余水位的相关性最高值约为 0.75, 其对应的风频率为 $1.9\text{--}2.2\text{ d}^{-1}$ (平均 2.1 d^{-1}), 风转角 θ 为 $20^\circ\text{--}79^\circ$ (平均 $\theta=36^\circ$)。也就是说, 对各站余水位影响

最大的风周期约为 $0.45\text{--}0.53\text{ d}$, 对各站余水位影响最大的平均风向为东偏北 36° (或 $36^\circ+180^\circ=216^\circ$), 该风向基本与大亚湾岸线平行(标注于图 1), 因此可以认为, 沿岸风对各站余水位的影响最大。此外, 图 8 中还可见相关系数大于 0.6 的等值线分布在转角 $10^\circ\text{--}120^\circ$ 、频率 $1.7\text{--}3.5\text{ d}^{-1}$ 的范围里, 可能与陆海风与局地天气变化有关。考虑到北半球的大气变量在冬季最为活跃, 我们将在接下来的工作里, 用小波分析进一步研究余水位与其他气象因子以及陆海风之间的关系。

4 结论

本文根据大亚湾及其邻近海域冬季、夏季各 14 个临时水位观测点的同步观测数据, 分析其潮汐特征及成因, 结论总结如下:

(1) 冬季和夏季的水位曲线存在明显双峰现象, 且湾顶明显强于湾口。

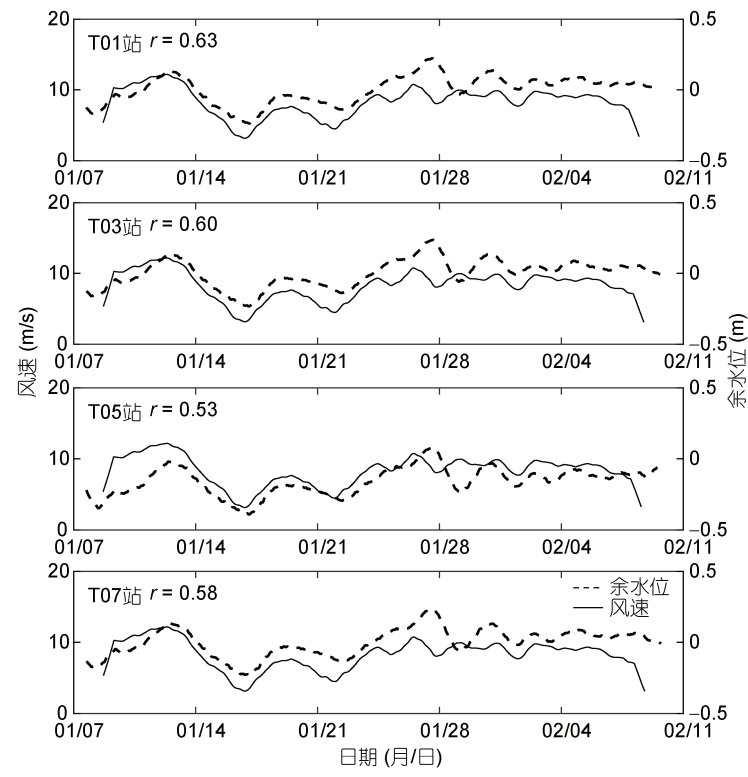


图 7 余水位与风速的相关性
Fig.7 Correlation between residual water levels and wind speed
注: r 表示相关系数

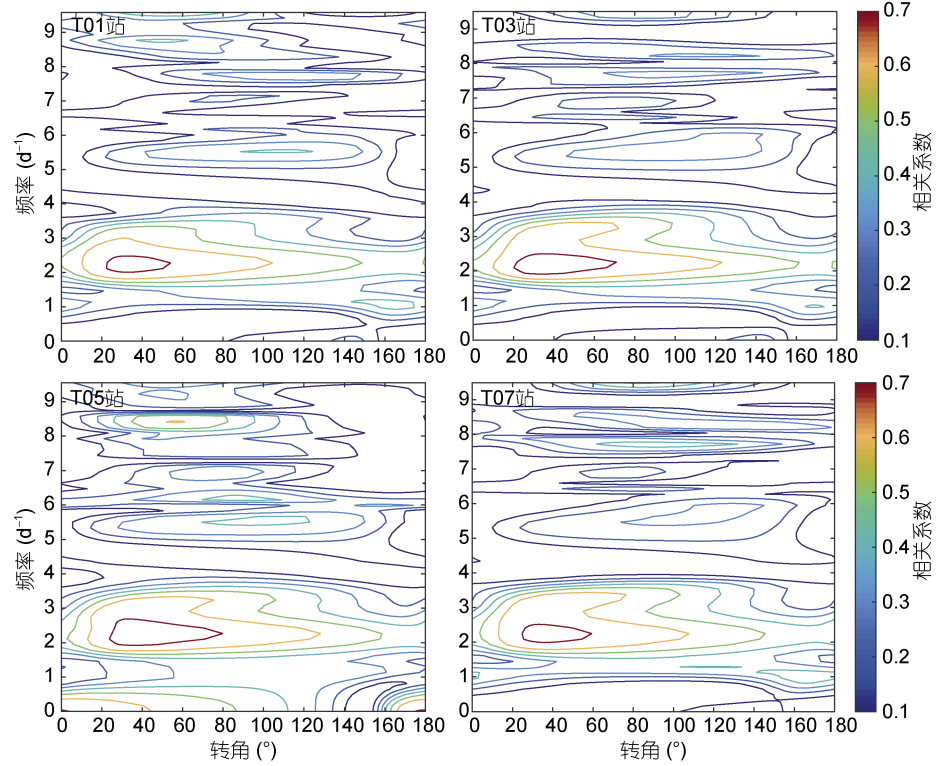


图 8 T01、T03、T05、T07 站的余水位与风向及频率的相关性
Fig.8 Coherence between residual water level and wind with different directions
注: 横坐标的转角表示风向, 风向按逆时针旋转, 0°为西风(指向正东为 0°)

(2)各站涨潮历时均远大于落潮历时。平均潮差由湾口向湾顶逐渐增大,在湾顶达到最大。

(3)大亚湾内各站潮型属于不正规半日潮,而考洲洋湾内和湾口海域则属于不正规全日潮。

(4)大多数分潮振幅均呈现从湾口向湾顶递增的趋势;各站高潮发生时间由湾口向湾顶推迟。

(5)湾内浅水效应明显,浅水分潮的振幅递增幅度远大于八个主要分潮。从湾口至湾顶, M_6 和 $2MS_6$ 分潮冬季增幅分别可达 525% 和 616%, 夏季分别可达 547% 和 707%。

(6)由分潮重构和潮汐共振分析结果来看,六分之一日浅水分潮(尤其是 $2MS_6$ 分潮)的异常增长是导致大亚湾潮汐双峰现象的主要原因。

(7)冬季大亚湾内的余水位与风速呈现正相关,两者相关系数 r 均在 0.53 以上;

(8)风向为东偏北 36° (或 216°)且周期为 0.45—0.53 d 的沿岸风对余水位影响最大,相关系数值为 0.75。此外,陆海风与局地天气变化对余水位的影响也不可忽视。

参 考 文 献

- 刁希梁, 丁 扬, 鲍献文, 2017. 大亚湾海域潮位“双峰”现象生成机制研究. 中国海洋大学学报, 47(9): 1—10
- 王 聪, 林 军, 陈丕茂等, 2009. 年平均风场作用下大亚湾水交换的数值模拟. 上海海洋大学学报, 18(3): 351—358
- 严聿晗, 武 文, 宋德海等, 2017. 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. 热带海洋学报, 36(3): 46—54
- 李 立, 1998. 大亚湾冬季水位的亚潮变化及其与南海的耦合. 台湾海峡, 17(4): 383—390
- 杨国标, 2001. 大亚湾海区潮流运动特征. 人民珠江, (1): 30—32
- 武 文, 严聿晗, 宋德海, 2017. 大亚湾的潮汐动力学研究——I. 潮波系统的观测分析与数值模拟. 热带海洋学报, 36(3): 34—45
- 周巧菊, 2007. 大亚湾海域温排水三维数值模拟. 海洋湖沼通报, (4): 37—46
- 海洋图集编委会, 2004. 南海海洋图集——水文分册. 北京: 海洋出版社
- 董礼先, 苏纪兰, 1999a. 象山港潮波响应和变形研究 I. 观测和分析. 海洋学报, 21(1): 1—10
- 董礼先, 苏纪兰, 1999b. 象山港潮波响应和变形研究 II. 象山港潮波数值研究. 海洋学报, 21(2): 1—8
- Blanton J O, Lin G Q, Elston S A, 2002. Tidal current asymmetry in shallow estuaries and tidal creeks. Continental Shelf Research, 22(11—13): 1731—1743, doi: 10.1016/S0278-4343(02)00035-3
- Boon III J D, 1975. Tidal discharge asymmetry in a salt marsh drainage system. Limnology and Oceanography, 20(1): 71—80, doi: 10.4319/lo.1975.20.1.0071
- Chuang W S, Wiseman Jr W J, 1983. Coastal sea level response to frontal passages on the Louisiana-Texas shelf. Journal of Geophysical Research: Oceans, 88(C4): 2615—2620
- Clancy R M, Thompson J D, Hurlburt H E *et al*, 1979. A model of mesoscale air-sea interaction in a sea breeze-coastal upwelling regime. Monthly Weather Review, 107(11): 1476—1505
- Craig P D, 1989a. Constant-eddy-viscosity models of vertical structure forced by periodic winds. Continental Shelf Research, 9(4): 343—358
- Craig P D, 1989b. A model of diurnally forced vertical current structure near 30° latitude. Continental Shelf Research, 9(11): 965—980
- Defant A, 1961. Physical Oceanography. New York, USA: Pergamon Press, 1—598
- Dyer K R, 1973. Estuaries: A Physical Introduction. Chichester, UK: Wiley-Interscience, 1—140
- Gallop S L, Verspecht F, Pattiaratchi C B, 2012. Sea breezes drive currents on the inner continental shelf off southwest Western Australia. Ocean Dynamics, 62(4): 569—583
- Godin G, 1993. An investigation of the phenomenon of double high water or double low water at some harbours. Deutsche Hydrografische Zeitschrift, 45(2): 87—106, doi: 10.1007/BF02226316
- Kim H S, Swanson J C, 2001. Modeling of double-flood currents in the Sakonnet River. In: Proceedings of the Seventh International Conference on Estuarine and Coastal Modeling. St. Petersburg, Florida: American Society of Civil Engineers, 418—433
- Lin H Y, Hu J Y, Zhu J *et al*, 2017. Tide- and wind-driven variability of water level in Sansha Bay, Fujian, China. Frontiers of Earth Science, 11(2): 332—346, doi: 10.1007/s11707-016-0588-x
- Nam S, Send U, 2013. Resonant diurnal oscillations and mean alongshore flows driven by sea/land breeze forcing in the coastal southern California Bight. Journal of Physical Oceanography, 43(3): 616—630
- Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S, 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. Computers & Geosciences, 28(8): 929—937
- Proudman J, 1952. Dynamical Oceanography. London, UK: Methuen, 1—409
- Pugh D T, 1987. Tides, Surges and Mean Sea-Level. New York, USA: John Wiley, 1—472
- Redfield A C, 1980. The Tides of the Waters of New England and New York. Woods Hole, USA: Woods Hole Oceanographic Institution, 1—108, doi: 10.1575/1912/1136
- Simpson J H, Hyder P, Rippeth T P *et al*, 2002. Forced oscillations near the critical latitude for diurnal-inertial resonance. Journal of Physical Oceanography, 32(1): 177—187
- Song D H, Yan Y H, Wu W *et al*, 2016. Tidal distortion caused by the resonance of sexta-diurnal tides in a micromesotidal embayment. Journal of Geophysical Research: Oceans, 121(10): 7599—7618

- Vesecky J F, Teague C C, Onstott R G *et al*, 1997. Surface current response to land-sea breeze circulation in Monterey Bay, California as observed by a new multifrequency HF radar. In: Proceedings of Oceans '97. MTS/IEEE Conference Proceedings. Halifax, NS, Canada: IEEE, 1019—1024
- Zhang X Q, DiMarco S F, Smith IV D C *et al*, 2009. Near-resonant ocean response to sea breeze on a stratified continental shelf. *Journal of Physical Oceanography*, 39(9): 2137—2155
- Zhong L J, Li M, Foreman M G G, 2008. Resonance and sea level variability in Chesapeake Bay. *Continental Shelf Research*, 28(18): 2565—2573

A PRELIMINARY STUDY ON THE TIDAL CHARACTERISTICS IN SUMMER AND WINTER AND THE CORRELATION BETWEEN RESIDUAL WATER LEVEL AND WIND IN DAYA BAY

ZHU Jia¹, HU Jian-Yu¹, CHEN Zhao-Zhang¹, SUN Zhen-Yu^{1,2}, YANG Long-Qi¹,
PENG Shuai-Xing¹, JI Jiao-Yue¹

(1. *State Key Laboratory of Marine Environmental Science (Xiamen University), Xiamen 361012, China*; 2. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China*)

Abstract One-month tidal data were measured at 14 temporary observation stations in winter and summer in Daya Bay, and the data show that the water level at each station presented obvious bimodal phenomenon, which is more obvious at the top than at the mouth of the bay. By using harmonic analysis method, the cotidal charts of the amplitude and the phase lag of four main tidal components M_2 , S_2 , K_1 and O_1 , and three shallow water tidal components M_4 , M_6 , and $2MS_6$ were plotted; and the major tidal characteristics were analyzed. In addition, the contribution of shallow water tide to the bimodal structure was deduced through the tidal constituent reconstruction, and the correlation between residual water level and wind was discussed. The results are as followed. First, the amplitudes of each tidal constituent in the Daya Bay increased from the mouth to the endpoint of the bay, the occurrence time of high tide was postponed from the mouth to the endpoint of the bay, and the flood duration lasts much longer than the ebb duration, the mean tidal range reached its maximum at the endpoint. Secondly, the tidal type in the Daya Bay was irregular semidiurnal tide, while those in the Kaozhouyang and the areas outside the bay were irregular diurnal tide. Thirdly, the shallow water effect dominated the deformation of the tidal wave system in the Daya Bay, and the amplitude of the quarter-diurnal and sexta-diurnal tides increased 5-7 times from the mouth to the endpoint of the bay. Fourthly, the abnormal growth of the quarter-diurnal and sexta-diurnal tides (especially $2MS_6$) was the main cause of the bimodal phenomenon in the bay. Fifthly, in winter, the residual water level in Daya Bay was correlated positively with the wind speed, and the correlation coefficient was above 0.53. Sixthly, the alongshore wind with a period of 0.45—0.53 d had the greatest influence on the residual water level of each station.

Key words Daya Bay; water level bimodality; tidal characteristics; shallow water constituents; correlation between residual water level and wind