

# 象山港潮波响应和变形研究\*

## I. 观测和分析

董礼先 苏纪兰

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

**摘要** 利用实测资料分析了象山港海湾对潮波的响应和湾内潮波变形. 结果说明象山港对外海传入的半日潮波的振幅有明显的放大作用.  $M_4$ 和 $MS_4$ 两个浅水分潮在湾内快速增长造成了潮波变形和潮不对称性. 潮波非线性的沿程变化和不同区域的潮能耗散说明潮滩与潮波变形关系不大, 而潮波非线性在牛鼻水道中的增强对湾内潮波变形是重要的,  $1/4$ 日分潮在湾内的共振作用也对 $M_4$ 和 $MS_4$ 两个浅水分潮起了放大作用.

**关键词** 潮波变形 潮能耗散 共振 象山港

## 1 引言

各海湾和河口对传入潮波的响应不尽相同, 同一海湾对各分潮波的响应也不一样. 由于地形的摩擦、反射和径流等作用, 潮波在传入海湾和河口后波形往往会发生畸变. 潮波变形后的最大特点是潮汐和潮流的涨、落潮不对称性. 某些河口和海湾中变形潮波表现出涨潮历时短、流速大; 落潮历时长、流速小的特点<sup>[1~3]</sup>. 而在另外一些河口和海湾中, 潮波变形后的表现现象则完全相反, 即落潮流占优<sup>[1,4~6]</sup>.

潮波变形引起的潮汐和潮流不对称将影响河口和海湾内的泥沙输运和水体混合, 给河口和海湾地形的稳定性、水体交换和河口生物地球化学循环带来较大的影响. 由于泥沙输运率与流速的高次方成正比, 涨潮流速大于落潮流河口产生的泥沙向上游净输运的潮泵送现象往往会造成河口和海湾内的淤积. 同时, 随着沉积物向上游的泵送, 排入海湾和河口中的有毒固体颗粒和以固体颗粒为载体的污染元素极易在河口内聚集, 危害河口的生态. 相反, 落潮流较强河口在地形上则往往表现出较大的稳定性. 较强的落潮流也有利于河口和海湾内污染物向口外的输送, 有利于河口和海湾的自净.

本文于1997-11-10收到, 修改稿于1998-03-05收到.

\* 国家自然科学基金资助项目(编号: 48907026).

第一作者简介: 董礼先, 男, 49岁, 副研究员, 主要从事河口和近岸动力学研究.

在以  $M_2$  分潮占主导地位的半日潮海区,  $M_2$  分潮在传播过程中产生  $M_4$  分潮是导致潮波变形和潮汐、潮流不对称的直接原因<sup>[7~9]</sup>. 潮波变形程度和变形后的涨、落潮流优势也由  $M_2$  和  $M_4$  两个分潮的潮振幅比率  $H_{M_4}/H_{M_2}$  和这两分潮的相对位相决定<sup>[1,10]</sup>. 由于  $M_4$  分潮产生和增长的机制是一个十分复杂的非线性物理问题, 近岸海湾和河口内潮波变形的物理机制和控制因子问题一直是海洋动力学探讨的问题之一<sup>[1,4,5,7,9,11~13]</sup>.

Nummedal 和 Humphries 对 North 湾及 Fitzgerald 和 Nummedal 对 Price 湾的研究认为高潮位时湾内潮滩被淹没, 湾内外水体通过湾口进行“交换”的低效率使得湾内高平时刻落后于湾外的时间较长, 从而造成了湾内涨、落潮不对称<sup>[4,5]</sup>. Aubrey 和 Speer 认为潮波在浅水区传播过程中各分潮间激烈地非线性相互作用导致浅水分潮的生成是 Nauset 湾的潮和潮流不对称的主要原因, 并认为水深和浅滩是决定河口和海湾潮不对称类型的主要因素<sup>[1]</sup>. 蔡伟章等利用象山港内多个断面上的实测资料统计和分析了湾内的潮汐、潮流不对称现象, 并把产生这种不对称现象归结为 1/4 日分潮的共振和湾内的大面积潮滩的影响<sup>[6]</sup>.

上述这些典型河口和海湾内的潮不对称研究均认为潮滩对潮波变形和潮不对称是至关重要的. 许多学者在研究河口和海湾潮不对称时也持相同的观点, 认为涨潮时潮滩上水体漫滩扩散, 水位徐徐上升; 落潮时束水归槽, 流速迅增, 水位骤然下降是造成湾内潮不对称的主要原因. 浙江沿岸的几个主要河口和海湾, 如象山港、三门湾、台州湾和乐清湾, 都存在大片潮滩. 但各海湾对传入潮波的响应并不一样, 潮滩面积和潮不对称程度之间也并无较好的对应关系. 象山港内的潮滩面积和潮滩在海湾中所占面积比例在 3 个海湾中都不是最大的, 而湾内潮汐、潮流的不对称程度是最为激烈的<sup>[6,14~16]</sup>. 这些现象意味着可能存在着另外的控制潮波变形及潮和潮流不对称的重要机制.

## 2 资料收集和分析方法

象山港是一个东北—西南走向的半封闭海湾, 由牛鼻水道、佛渡水道和象山港狭湾三部分组成(见图 1). 湾口宽约 20 km, 纵深约 70 km. 湾内水深一般在 7~10 m 间, 局部深潭内水深可达 40 m 以上. 在湾内 563 km<sup>2</sup> 的水域面积中, 理论深度基准面以上的潮滩面积为 171 km<sup>2</sup>.

现场调查于 1990 年 8 月和 12 月在象山港共进行了两个航次. 每个航次各有 5 条船同步进行垂线水文要素(流速、流向、温、盐、水深)的逐时周日连续观测和 Z1~Z4 站连续 1 个月的逐时水位观测. 冬季航次还在 H1 站投放了锚系, 获得 1 个月的海流资料. 此外, 我们还收集了 1970 年以来的 50 余个站点的周日流速、流向垂向剖面观测资料, H1 和 H2 两个长系列锚系测流资料和沿岸 Z5~Z9 站的潮位资料(见图 1). 其中 Z5 和 Z7 两站为长期验潮站, 采用机械自记观测和验潮井滤波, 资料长度均在 10 a 以上.

除了通常的统计分析外, 周日潮流分析以海洋调查规范中的准调和分析为主, 长期的潮流和水位资料则以最小二乘法计算调和常数并辅以谱分析方法处理<sup>[17]</sup>.

## 3 结果和讨论

### 3.1 潮波基本特征与变形演变

象山港是半日潮强潮海湾, 狭湾口多年平均潮差 3.1 m, 最大潮差达 5.6 m 以上. 潮差

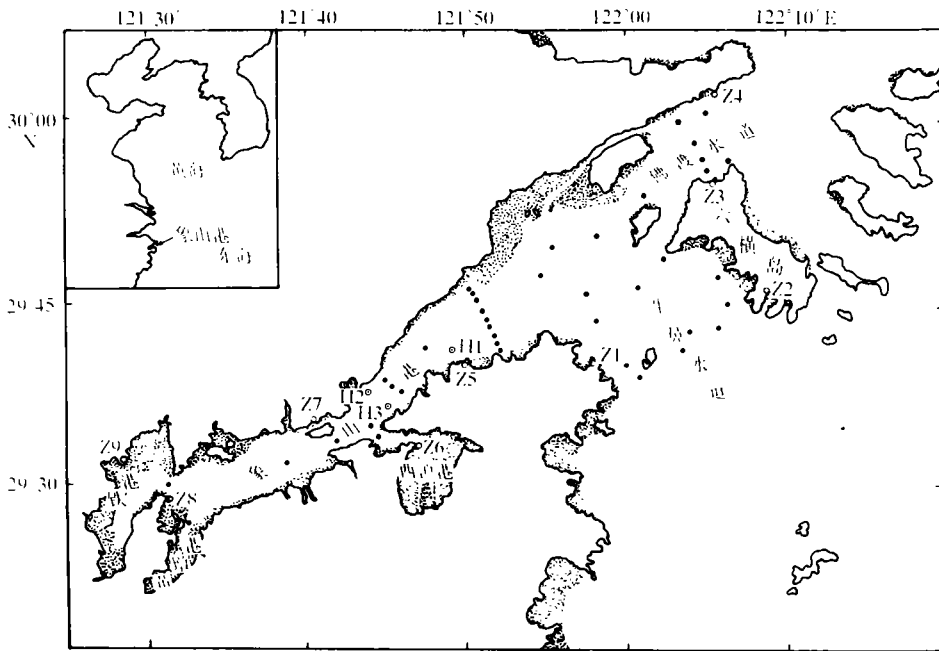


图1 象山港地形和站位

· Z1~· Z9 水位观测站点 · 潮流周日观测站点 ○ H1~○ H3 锚系观测站点

由湾口向湾顶逐渐增大,湾顶的潮差约为湾口的  $4/3$  (表 1).  $M_2$  分潮在潮位中占主导地位,狭湾内的  $M_2$  分潮振幅  $H_{M_2}$  均在  $1.3\text{ m}$  以上,约为第二个主要分潮  $S_2$  的振幅的 2 倍. Z5 站的潮位谱分析结果说明象山港潮波内包括各种天文分潮及大量由天文和水动力学方面的非线性机制衍生的浅水分潮,其中尤其以  $1/4$  日、 $1/6$  日和  $1/8$  日 3 个分潮群最为显著 (见图 2). 这些浅水分潮连同天文潮一起以各自不同的频率向湾内传播,并在传播过程中进行二阶和高阶的相互作用<sup>[7,13]</sup>.

表 1 象山港沿岸潮汐特征统计

站号	Z1	Z5	Z7	Z8	Z9
离湾顶距离/km	70	38	33	11	8
平均潮差/m	2.84	3.16	3.32		3.74
涨潮历时/h	6.30	7.03	7.03	7.48	7.70
落潮历时/h	6.13	5.38	5.35	4.95	4.72
涨落潮历时差/min	10	90	102	152	179

由于象山港的地形特点和潮波在传播过程中各分潮的能量消耗和分潮间能量的相互转移的复杂性,使得各分潮在狭湾内的响应各不相同.为便于比较,各站统一取连续 1 个月的水位逐时记录并按成安生的分析方法进行调和与分析<sup>[17]</sup>,因此分析结果只可分离出少数几个主要分潮.分析结果显示,日潮群各分潮振幅较小,看不出明显的变化规律.半日分潮群中的  $M_2$

分潮振幅具有由湾口向湾顶逐渐增大的趋势。高频的  $1/4$  日分潮和  $1/6$  日分潮群振幅由湾口向湾顶的增长速度较快。其中,  $M_4$  分潮振幅增长了约 15 倍, 由湾口的  $0.02\text{ m}$  左右增长至湾顶的  $0.36\text{ m}$  以上。  $MS_4$  分潮振幅的增长速度也在同一水平上。

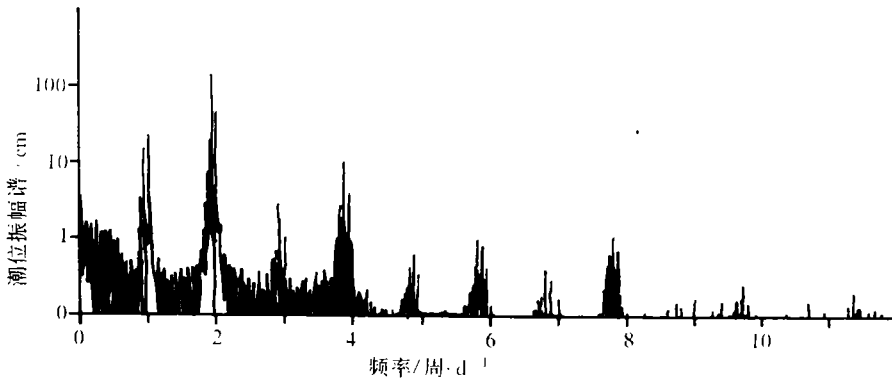


图 2 Z5 站潮位振幅谱

造成湾内  $1/4$  日分潮群振幅快速增长的机理是复杂的, 蔡伟章等根据象山港的纵深与湾内  $1/4$  日潮的  $1/4$  波长十分接近、Z1 处  $M_4$  潮位振幅最小而且潮振幅向湾顶递增等特点认为湾内存在  $M_4$  潮共振现象<sup>[6]</sup>。从位相上看,  $M_2$  和  $M_4$  分潮在湾顶的 Z8 站比在湾口的 Z1 站分别滞后 18 min 和 23 min。完全共振波在传播方向上是不存在位相差的, 造成分潮在湾内沿程位相差的主要原因是潮波传播过程中潮流的底摩擦作用。很显然, 狭湾内不存在  $M_2$  分潮共振的问题, 若湾内不存在  $M_4$  分潮共振的话, 则  $M_4$  和  $M_2$  两个分潮湾顶迟后于湾口的时间应该是相同的。以  $M_2$  分潮在狭湾顶迟后于口门的时间 (23 min) 来度量,  $M_4$  分潮在狭湾顶迟后于口门的时间 (18 min) 一方面说明底摩擦在潮波传播中的作用仍是不可忽略的, 另一方面也说明湾内确实存在  $M_4$  分潮共振现象。

湾内潮流的流向与岸线基本平行, 落潮流大于涨潮流。湾内最大流速发生在佛渡水道, 最大实测流速在  $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上。其次是狭湾口附近, 最大实测流速  $1.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上。牛鼻水道的流速也较大, 垂向平均流速大都在  $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上。狭湾内的流速由湾口向湾顶逐渐减小, 位于铁港口和黄墩港口的实测最大涨、落潮流速分别为  $0.5$  和  $0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右。但因潮流受局部地形影响较大, 某些站点上的流动可能与总的分布趋势有所差异。

潮流中的  $M_2$  分潮流在整个水域中占主导地位。除牛鼻水道东口附近略大些外, 由牛鼻水道至狭湾口之间的  $M_2$  分潮流椭圆长轴变化不大, 约在  $1.2\sim 1.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  之间。由狭湾口至西沪港口,  $M_2$  分潮流逐渐减弱, 其椭圆长轴在西沪港口附近只有  $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右。西沪港口至湾顶的  $M_2$  分潮流椭圆长轴逐渐减小, 铁港口附近只有  $0.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右。  $S_2$  分潮流是象山港内潮流中仅次于  $M_2$  分潮流的第二个重要分潮流。  $S_2$  分潮流的椭圆长轴在湾内的分布与  $M_2$  分潮流大致相同, 但只有  $M_2$  分潮流椭圆长轴的一半左右, 与潮位中两个分潮振幅的比值大体相似。  $M_4$  分潮流椭圆长轴在牛鼻水道东口和佛渡水道北口的长度很小, 只有几厘米。但该分潮流在进入牛鼻水道后发展十分迅速, 到狭湾口就增至  $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上并在西沪港口附近达到  $0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在西沪港口至湾顶的区域里,  $M_4$  分潮流逐渐减弱。铁港与黄墩港口门的  $M_4$  分

潮流的椭圆长轴已衰减到  $0.3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  左右.  $MS_4$  分潮流在整个象山港中的分布趋势与  $M_4$  分潮流极为相似, 只是其椭圆长轴比  $M_4$  分潮小  $0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右. 日潮群中的几个主要分潮流在海湾中的流动都较弱, 其椭圆长轴之和一般也不超过  $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且在海湾中的变化规律也并不十分明显.

象山港对外海潮波响应的另一个重要特点是潮波传入后其前进波特性逐渐消失而驻波特性则逐渐加强. 在牛鼻水道东口, 最大涨潮流发生在高平前后, 最大落潮流发生在低平前 1 h 左右, 转流发生在半潮面附近. 而在象山港狭湾北口的最大涨、落潮流速均发生在半潮面附近, 转流则发生在高、低平前后 1 h 附近, 驻波特性明显. 在湾顶, 潮波呈现出典型的驻波特征.

### 3.2 潮不对称和潮波传播中的非线性效应

象山港对外海潮波的响应使得湾内潮波变形激烈, 潮汐、潮流均表现出强烈的涨、落潮不对称性. 潮汐的涨潮历时大于落潮历时, 其差值由湾口向湾顶单调递增. 靠近湾顶的 Z9 站的涨潮历时比落潮历时长约 3 h (见表 1). 虽然 Prince 湾和象山港湾内都存在大片潮滩而且都是涨潮历时大于落潮历时<sup>[5]</sup>, 但这两个海湾对外海潮波的响应却大不相同, 造成涨、落潮历时不等的表现原因也大不相同. 整个象山港内的高潮时刻相差无几, 涨、落潮历时相差近 3 h 的湾顶和涨、落潮历时相差只有 10 min 的湾口几乎同时达到高潮位. 但湾顶的低潮位时刻超前湾口 2 h 余, 并由此造成湾顶涨潮历时远远大于落潮历时.

理论上说, 在以  $M_2$  潮占主导地位的海区, 潮波的变形形式由  $M_2$  和  $M_4$  两个分潮的相对位相决定. 若将这两个分潮分别写成:

$$\xi_{M_2} = H_{M_2} \cos(\sigma_{M_2} t - g_{M_2}), \quad \xi_{M_4} = H_{M_4} \cos(\sigma_{M_4} t - g_{M_4}), \quad (1)$$

其中,  $H_{M_2}$  和  $H_{M_4}$  分别是  $M_2$  和  $M_4$  分潮的振幅,  $\sigma_{M_2}$  和  $\sigma_{M_4}$  分别是两个分潮的角速度,  $g_{M_2}$  和  $g_{M_4}$  是初位相. 这两个分潮的相对位相  $\Phi$  为  $\Phi = 2g_{M_2} - g_{M_4}$ . 当  $\Phi > 0$  时,  $M_4$  分潮位相超前, 潮位的涨潮历时短于落潮历时; 当  $\Phi < 0$  时,  $M_4$  分潮位相迟后, 潮位的涨潮历时长于落潮历时. 象山港内的  $M_2$  和  $M_4$  分潮的迟角均由湾口向湾顶逐渐增大, Z8 站的  $M_2$  和  $M_4$  分潮的位相分别比 Z1 站滞后  $11^\circ$  和  $17^\circ$ . 狭湾内  $M_2$  和  $M_4$  分潮的相对位相  $\Phi$  变化于  $-41^\circ \sim -45^\circ$  之间, 并由此造成湾内涨潮历时大于落潮.

与潮位相对应, 象山港内的潮流也呈现出强烈的不对称现象. 落潮流历时短, 流速大; 涨潮流历时长、流速小. 在西沪港口以里, 涨潮流速不但量值小, 而且还常常呈双峰分布, 即在本应是涨急的时刻, 流速非但不是最大反而较前后时段内的涨潮流速小许多 (见图 3). 潮流的涨、落潮历时差值在湾口至西沪港口也呈单调递增的分布, 最大约为 2 h. 与潮位的涨落潮历时差值的分布不同的是在西沪港口以里区域内涨、落潮流差值反而呈下降的分布趋势. 从象山港潮流的分潮流分解图上也可清楚看出  $M_4$  分潮流的振幅及  $M_2$  和  $M_4$  分潮流的相对位相造成了这种潮不对称现象.

由于象山港中的潮波变形主要由  $M_4$ 、 $MS_4$  两个分潮引起, 其中  $M_4$  分潮的作用尤为显著. 我们以  $M_4$  分潮的振幅与  $M_2$  分潮振幅之比值  $H_{M_4}/H_{M_2}$  及这两个分潮流椭圆长轴比值  $W_{M_4}/W_{M_2}$  来度量潮波传播过程中非线性作用的强弱. 通常前者叫潮位的浅水分潮系数, 后者叫潮流的浅水分潮系数. 图 4 显示了沿主槽从湾顶至牛鼻水道东口的潮流浅水系数和沿程潮位浅水系数的纵向分布. 受局部地形和测量精度的影响, 潮流浅水系数的离散度较大. 但我们仍

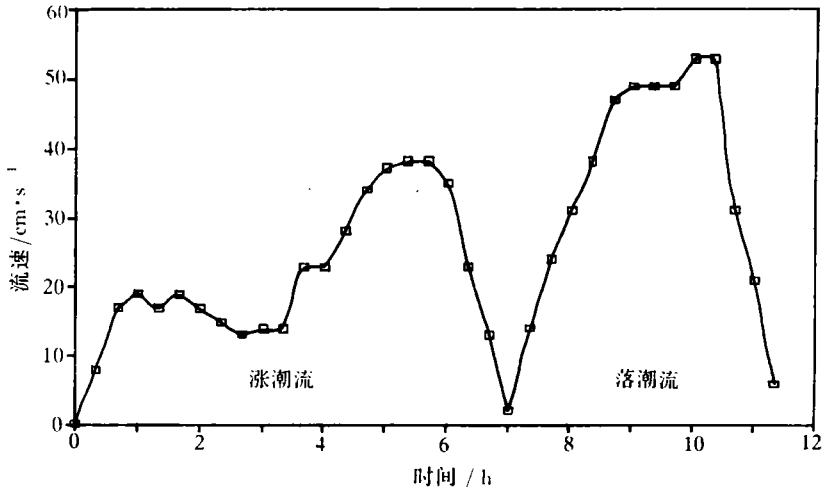


图3 象山港实测潮流速度过程曲线

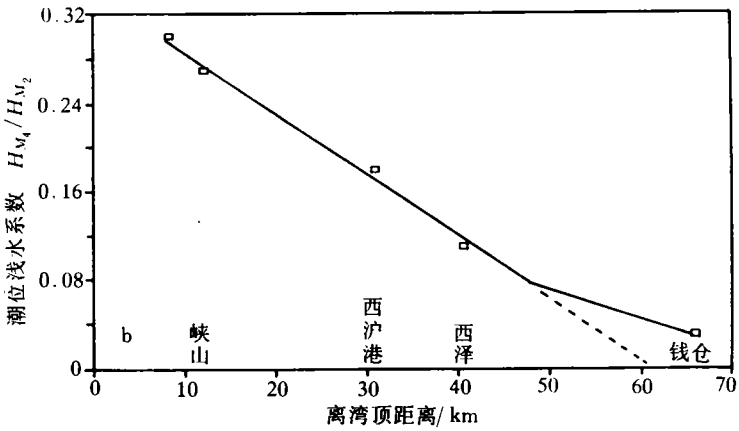
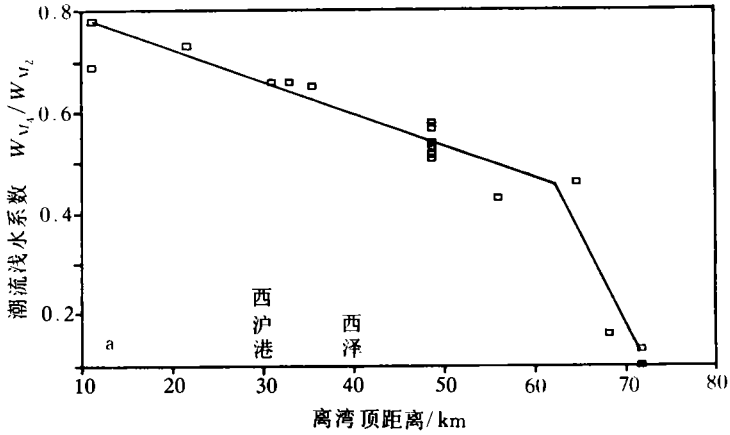


图4 象山港浅水系数纵向分布

a. 潮流浅水系数 b. 潮位浅水系数

可以看到从狭湾口至铁港口之间呈线性增长的变化规律,而牛鼻水道中存在着十分明显的突变。

潮位的浅水系数要比潮流的精度高。观测资料的计算结果说明这些使用 1 个月的逐时连续水位观测资料计算的浅水系数的误差在其量值的 5% 以内。图 4b 显示狭湾内的浅水系数是严格线性递增的,而 Z1 站不在这一直线的延长线上。虽然由于观测资料密度的原因无法断定潮位的浅水系数在 Z1 与 Z5 间的详细分布规律,但图 4b 显示潮位的浅水系数也在牛鼻水道中存在很大的增强速度。

象山港狭湾顶的潮滩面积和潮滩在水域中所占比例是最大的。虽然象山港湾顶潮波的非线性是最强的,但潮位和潮流的浅水系数在湾顶仍遵循狭湾内统一的线性分布规律而无突变发生。这说明潮波的非线性在狭湾内是逐渐均匀地得到加强的,与潮滩的关系不大。

### 3.3 底摩擦和 $M_2$ 潮能量耗散

潮波在传播过程中一方面由于摩擦而耗能,另一方面又通过潮波传播过程中的非线性效应主要向复合潮和倍潮进行能量迁移。每一分潮的能量水平主要取决于其收支平衡状况。潮波中频率高于 1/4 日潮的分潮在象山港口外是可以忽略的,在入口处的量值也很小。由于非线性底摩擦的原因,这些小分潮波比  $M_2$ 、 $S_2$  等大的分潮波耗散的更快<sup>[17,18]</sup>。如果没有通过潮波传播过程中的非线性效应从低频 (<4 周/d) 迁移来的能量进行维持和补充的话,这些高频分量将很快在传播过程中被摩擦消耗殆尽。

象山港潮波运动方程组的量纲分析显示,底摩擦项是主要非线性项,比其他的非线性项大两个量级左右。也就是潮波主要通过传播过程中的非线性的底摩擦作用进行分潮间的相互作用和能量转移。新生分潮的强弱变化主要取决于它们通过非线性底摩擦作用从生成它们的分潮中摄取能量的多少<sup>[9,13,19,20]</sup>。 $M_4$  分潮是  $M_2$  分潮的倍潮,它是  $M_2$  潮通过潮波传播过程中的非线性水动力学机制生成的。 $MS_4$  是  $M_2$  和  $S_2$  的复合潮,是这两个主要分潮通过非线性水动力学机制在潮波传播过程中相互作用产生的。这两个浅水分潮的产生和加强均需从  $M_2$  潮中摄取能量。由天文潮衍生的新分潮群是由一组频率在一个带宽内的大量的分潮组成的<sup>[7]</sup>。新生分潮与生成它们的天文潮之间又存在着二阶或高阶的相互作用。因此要精确地估算  $M_4$  和  $MS_4$  分潮从  $M_2$  分潮中摄取的能量是非常困难的,但由于这两个新生分潮的增长速度紧紧依赖于它们从生成它们的分潮中摄取能量的多少。若忽略引潮力做功, $M_2$  分潮的能量耗损主要由底摩擦引起<sup>[15,18]</sup>。因此可以通过计算湾内的  $M_2$  分潮耗能了解控制湾内  $M_4$  和  $MS_4$  两个浅水分潮变化的内在机理。

为分析方便,我们把象山港分成 7 个子区:牛鼻水道 (A1 区)、佛渡水道 (A2 区)、狭湾外段 (A3 区)、狭湾内段 (A4 区)、铁港 (A5 区)、黄墩港 (A6 区) 和西沪港 (A7 区) (见图 5)。通过各断面的潮能通量按下式计算,

$$E_i = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^n \rho g b_j h_{ij} \int_0^T \xi_{ij} u_{ij} dt, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 8, \quad (2)$$

其中,下标  $i$  代表断面编号; $j$  代表断面上的测点编号; $n$  为断面上的测点个数; $\rho$  为海水密度; $g$  为重力加速度; $b$  为宽度; $h$  为水深; $\xi$  为  $M_2$  分潮水位波动值; $u$  为垂直于断面的  $M_2$  分潮流; $T$  为  $M_2$  分潮周期。根据各断面的潮能通量,可以计算出各子区的潮能耗散情况 (见表 2)。由于使用方程 (2) 和实测资料计算各区潮能耗散的误差较大,所以又使用象山港潮波运

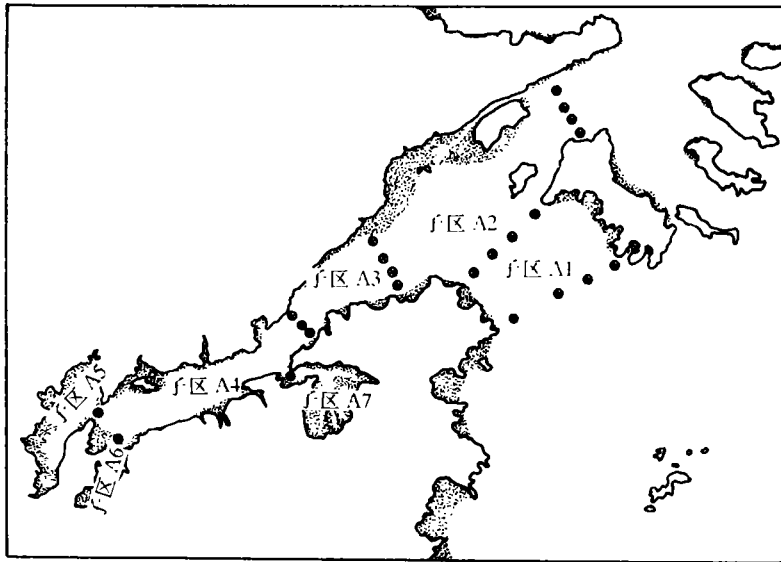


图 5 象山港潮能计算分区及潮能计算使用资料站位

动数值模型的模拟结果和方程(2)进行潮能耗散计算,各子区结果与表 2 最大差值小于 15%.

表 2 象山港潮能耗散分区统计

子区名称	牛鼻水道	佛渡水道	狭湾外段	狭湾内段	铁港	黄墩港	西沪港
子区面积/km <sup>2</sup>	70	230	95	105	125	60	110
子区每秒耗能/ $\times 10^8 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$	2.2	4.8	1.5	0.89	0.13	0.05	0.15
子区耗能占总耗能比例/%	22.4	49.4	15.7	9.1	1.3	0.6	1.5
子区耗能率/ $\times 10^6 \text{ J} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	3.0	2.1	1.6	0.8	0.10	0.08	0.14
子区内滩地面积所占比例/%	9	21	10	28	76	63	55
子区编号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7

研究区域内平均每秒耗散  $M_2$  分潮能约  $0.5 \times 10^8 \text{ J}$ , 其中占全区总量 22% 的  $M_2$  分潮能量是在水域面积只占总水域面积的 9% 的牛鼻水道中耗散的. 在这个子区域中平均每秒钟在每平方千米内耗散  $3 \times 10^6 \text{ J}$  的  $M_2$  分潮能, 比狭湾内的潮能耗散率大 2~4 倍, 比西沪、黄墩和铁港 3 个潮滩面积最大的子区域的  $M_2$  分潮能耗散率大 20~35 倍. 佛渡水道和狭湾外段两个子区 (A2 和 A3) 的潮流强盛, 潮能耗散率也较大, 它分别为  $2.1 \times 10^6$  和  $1.6 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . 狭湾内段的  $M_2$  分潮能耗散率比上述 3 个子区小, 但比西沪、黄墩和铁港 3 个子区的耗散率大. 铁港和黄墩港的潮滩面积最大, 分别为  $95 \text{ km}^2$  和  $36 \text{ km}^2$ , 占子区水域面积的 72% 左右. 但这两个子区的潮能耗散率最低, 仅为牛鼻水道的 3%, 比全区的平均耗散率低 10 倍左右. 从耗能总量看, 这两个子区的  $M_2$  分潮能耗散量之和只占湾内总量的 2%. 其原因明显是因为这两个子区均是位于湾顶,  $M_2$  分潮流微弱. 加之湾内底床浅表层沉积物颗粒较细, 糙度较小, 因此  $M_2$  分潮能摩擦耗损较小.



## 4 讨论

牛鼻水道东口以外为开阔水域,  $M_1$  和  $MS_1$  分潮的潮位和潮流的振幅均很小. 当潮波传入牛鼻水道后, 地形变化剧烈, 潮流强劲, 这两个浅水分潮得到快速增长, 潮波的非线性也得到快速加强.

$M_1$  和  $MS_1$  两个浅水分潮主要是通过潮波传播过程中的非线性底摩擦作用从  $M_2$  和  $S_2$  分潮摄取能量而得到增强的. 分区的  $M_2$  分潮能耗散的计算结果显示牛鼻水道是象山港水域内  $M_2$  分潮流非线性底摩擦耗能最为激烈的区域, 耗散率高达  $3 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 比狭湾内的潮能耗散率大 2~4 倍, 比西沪、黄墩和铁港 3 个潮滩面积最大的子区大 20~35 倍.

在象山港狭湾内, 潮波的非线性不但没有随着  $M_2$  分潮波非线性摩擦耗能的衰减而减弱, 反而越向湾顶越强. 这主要应归结于港湾 1/4 日分潮的共振效应的放大作用. 在象山港,  $M_2$ 、 $M_1$  和  $MS_1$  分潮的潮振幅均向湾顶递增, 但越靠近湾顶共振效应对  $M_1$  和  $MS_1$  两个浅水分潮的放大作用越明显. 在这种作用的帮助下, 越靠近湾顶  $M_1$  和  $MS_1$  两个浅水分潮比  $M_2$  潮增长的越快.  $M_1$  和  $MS_1$  分潮流由狭湾中部向湾顶逐渐减弱, 但越靠近湾顶  $M_1$  和  $MS_1$  两个浅水分潮流比  $M_2$  分潮流衰减得越慢. 潮位和潮流的这种变化造成潮波的非线性越向湾顶越强.

黄墩港和铁港内潮滩面积在水域所占比例最大, 但  $M_2$  分潮流非线性底摩擦耗能率最低, 仅为  $0.08 \times 10^6$  和  $0.14 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .  $M_1$  和  $MS_1$  两个浅水分潮通过潮波传播过程中的非线性底摩擦作用从  $M_2$  分潮摄取能量必然也最少. 这与潮滩相对靠近湾口的情况有很大不同. 当潮滩相对靠近港湾入口时, 滩面上的流速一般较大, 潮波的非线性底摩擦作用也较强. 潮滩对浅水分潮增长的影响必然明显, 如 Naust 湾的情况就是如此<sup>[1]</sup>.

## 5 结语

象山港对传入潮波的响应使得湾内的半日分潮和 1/4 日分潮的振幅由湾口向湾顶单调递增. 从牛鼻水道到狭湾顶, 最大半日潮流速出现在狭湾口附近, 但最大 1/4 潮流速出现在狭湾中部. 表征潮波非线性的潮位和潮流浅水系数在狭湾内呈线性向狭湾顶递增.

象山港  $M_1$ 、 $MS_1$  两个浅水分潮主要是通过潮波传播过程中的非线性底摩擦作用从  $M_2$  和  $S_2$  分潮摄取能量得到快速加强的. 这两个浅水分潮在牛鼻水道中摄取的能量最多、增长速度最快, 并导致了狭湾内潮波变形及潮和潮流的不对称. 1/4 分潮的共振现象对这两个浅水分潮也起到了一定的放大作用. 由于这两个浅水分潮在潮流中所占的比重较大而使得潮流的不对称现象更加明显, 涨潮流速过程曲线出现双峰现象.

湾内潮滩大都位于港湾的顶端, 潮面上多为淤泥质粘性沉积物, 糙度较小. 狭湾内  $M_2$  和  $S_2$  两个主要分潮流速在滩地附近较弱, 因而潮流底摩擦微弱, 对  $M_1$  和  $SM_1$  两个浅水分潮的增长和潮波变形关系不大.

## 参考文献

- 1 Aubrey D G, Speer P E. A study of nonlinear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems I. Observations. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1985, 21, 185~205
- 2 Boom T D, Byrne R J. On basin bysometry and the morphodynamic response of coastal inlet system. Marine Geology,

- 1981, **40**, 27~48
- 3 Dong Lixian, Wolanski E, Li Yan. Field and modelling studies of fine sediment transport in extremely turbid Jiaojiang River estuary, China. *Journal of Coastal Research*, 1997, **13**(4): 995~1 003
  - 4 Fitzgerald D M, Nummedal P. Response characteristics of an ebb-dominated tidal inlet channel. *Jour. Sed. Pet.*, 1983, **53**, 833~845
  - 5 Nummedal D, Humphries S M. Hydraulics and dynamics of the North Inlet, 1975~1976. G. I. T. I. Report 16, U. S. Army Coastal Engr. Res. Cent., 1978, 214
  - 6 蔡伟章, 陈耕心, 丁锦仁. 象山港潮汐潮流特征及成因探讨. *海洋通报*, 1985, **4**(3): 8~11
  - 7 Munk W H, Cartwright D E. Tidal spectroscopy and prediction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1966, **259**, 533~581
  - 8 Pringree R D, Griffiths D K. Sand transport paths around the British Isles resulting from  $M_2$  and  $M_4$  tidal interactions. *J. of the Mar. Biol. Associ. of the United Kingdom*, 1979, **59**, 497~513
  - 9 Speer P E, Aubrey D G. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems I. Theory. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1985, **21**, 207~224
  - 10 陈宗镛. 潮汐学. 北京: 科学出版社, 1980, 223~224
  - 11 Pingree R D, Maddock L. The  $M_4$  tide in the English Channel derived from a nonlinear numerical model of the  $M_2$  tide. *Deep-Sea Research*, 1978, **26**, 53~68
  - 12 钱力强, 杜勇, 俞光耀. 一维水域潮波运动的变浅效应. *海洋与湖沼*, 1995, **26** (增刊 5): 32~38
  - 13 Gallagher B S, Munk W H. Tides in shallow water: spectroscopy. *Tellus*, 1971, **23**, 346~363
  - 14 Shu Gao, Xie Qinchun, Feng Yingjun. Fine grained sediment transport and sorting by tidal exchange in Xiangshan Bay, Zhejiang, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1990, **31**, 397~409
  - 15 许卫忆, 陈耕心, 李柏根. 乐清湾动力沉积过程. *海洋与湖沼*, 1992, **23**(1): 20~29
  - 16 陈耕心, 许卫忆. 乐清湾动力特征及对潮滩沉积作用的影响. *东海海洋*, 1992, **10**(1): 1~9
  - 17 成安生. 潮汐调和分析的算法. *科学通报*, 1975, **11**, 524~528
  - 18 方国洪. 黄海潮能的消耗. *海洋与湖沼*, 1979, **10**(3): 200~213
  - 19 方国洪. 潮汐摩擦的非线性效应 (I). *海洋与湖沼*, 1981, **12**(3): 195~207
  - 20 周 滕, 方国洪.  $|U|U$  in Fourier 展开和渤海海底拖曳系数  $C_D$ . *海洋与湖沼*, 1987, **18**(1): 1~10

## Tide response and wave distortion in Xiangshan Bay

### I. Observation and analysis

Dong Lixian,<sup>1</sup> Su Jilan<sup>1</sup>

1. *Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012*

**Abstract**—The tide response and tide wave distortion are analyzed in Xiangshan Bay using a set of measurement data. The result shows that the semidiurnal tidal component propagated from open sea is amplified in the Xiangshan Bay. The tide and tidal currents are no long symmetrical, because of the  $M_4$  and  $MS_4$  component generation and their fast growing. The tidal energy dissipation and tide and tidal current nonlinear coefficients along the main channel provide that the tidal flat has little contribution to the tide wave distortion, but the enhance of the tide wave nonlinearity in Niubi Channel is important for the distortion. The effect of quarter-diurnal component co-oscillation amplifies the  $M_4$  and  $MS_4$  components in the bay.

**Key words** Distortion, tidal energy dissipation, Xiangshan Bay