

粤西沿岸海域潮汐特征

成印河¹, 梁广建², 朱凤芹¹, 陈建¹, 纪文君³, 赵辉³

(1. 广东海洋大学 电子与信息工程学院海洋技术系, 广东 湛江 524088; 2. 南海舰队水文气象中心, 广东 湛江 524001; 3. 广东省近岸海洋变化与灾害重点实验室, 广东海洋大学海洋与气象学院, 广东 湛江 524088)

摘要: 对粤西海域水东、湛江、硃州岛、南渡和海安验潮站各 1 年水位资料进行了调和分析及统计。结果表明: 粤西海域北部湛江、水东、硃洲岛、南渡 4 站主要分潮为 M_2 、 K_1 、 S_2 和 O_1 , 是不规则半日潮; 而南部海安站主要分潮为 O_1 和 K_1 分潮, 是不规则日潮。粤西沿岸各站浅水分潮和平均水位从北到南有减小趋势。在日潮不等方面, 粤西沿岸验潮站都存在明显的日潮高、日潮时不等现象。日潮时不等总体上从北到南有降低的趋势, 北部湛江、水东和硃州岛涨潮时间比落潮长 1~1.5 h, 南部南渡和海安两站涨、落潮时相差不大。另外, 调和分析和经验公式不再适用于南渡站, 南渡河入海口处堤闸工程是主要原因。这为粤西海域环境资源开发、航运活动等提供环境支持和保障。

关键词: 粤西沿岸; 潮汐; 调和分析; 日潮不等

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)06-0111-08

DOI: 10.11759/hyxx20160923004

潮汐是海洋中最常见的物理现象, 受到专家、学者的关注。尤其是沿岸港口区域的潮汐对于港口码头设计, 浴场、航运经济活动及军事活动都有重要影响, 因此掌握特定海域潮汐特征及预报具有重要科学意义和应用价值。

近年来, 专家、学者对多个区域近海潮汐和潮流特征进行了分析和研究, 如浙江近海海域的杭州湾^[1-2]、象山港^[3]、乐清湾^[4]、台州湾^[5]、南麓岛^[6]以及涉及浙江部分地区^[7-8]、台湾海峡西部沿岸^[9]、部分河流入海口地区如长江河口^[10]、珠三角八大门口^[11]和鸭绿江口^[12]、南海潮汐潮流^[13-31]。在相关南海及北部湾海域, 学者进行了较多的数值模拟研究^[13-26], 然而对南海潮汐观测的研究却较少, 仅有南海诸岛、南沙等部分海域潮汐特征分析^[27-31]。针对南海北部近岸, 只有郑有任等^[31]在 2012 年对南海北部沿岸的部分站位作过研究。粤西海域是南海重要的组成部分, 该海域港口是海上“一带一路”重要交通枢纽。在粤西海域众多港口码头中, 湛江港最为突出, 位于中国大陆最南端的广东省雷州半岛, 东临南海, 南望海南岛, 素以天然深水良港著称。它是中国大陆通往东南亚、非洲、欧洲和大洋洲航程最短的港口, 是中国大西南和华南地区货物的出海主通道。然而粤西沿岸海域潮汐水文潮汐特征却鲜有研究, 仅在部分数值模拟研究中有所涉及, 一般讨论该海域某

几个重要分潮分布情况及影响因素。然而粤西海域既有湛江湾、又有东海岛、硃洲岛等, 海陆分布复杂, 还受台风、风暴潮及雨季增水等因素影响, 对其潮汐水文特征有必要开展进一步讨论。因此, 本文针对粤西沿岸多个站位潮汐水位观测数据, 分析该海域潮汐水文特征及其规律。这对掌握该海域潮汐特征值具有十分重要的实用价值和科学意义, 为粤西海域环境资源开发、航运活动等提供环境支持和保障。

1 数据与方法

1.1 潮汐水位数据

本文收集了粤西海域湛江、水东、硃州岛、南

收稿日期: 2016-09-23; 修回日期: 2017-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41406041, 41776029); 广东省自然科学基金项目(2016A030313751); 广东省教育厅创新强校项目(GDOU2016050242); 广东海洋大学优秀青年教师专项人才培养特别资助项目(HDYQ2015008)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41406041, No. 41776029; Natural Science Foundation of Guangdong Province, No. 2016A030313751; Program for Reform and Development of School of Guangdong Educational Committee, No.GDOU2016050242; Special Foundation for Young Teachers of Guangdong Ocean University, No.HDYQ2015008]

作者简介: 成印河(1980-), 男, 山东惠民人, 博士, 副教授, 主要从事海气相互作用与数值模拟研究, E-mail: yinhe_9951@163.com; 朱凤芹(1981-), 通信作者, 女, 山东菏泽人, 在读博士, 讲师, 主要从事数据分析及信号处理, E-mail: fqzhu_07@163.com

渡和海安潮汐验潮站各 1 年的逐时水位数据。该数据是由南海舰队水文气象中心提供的纸质各站位潮汐观测记录月报表整理而成, 地理位置见图 1。其中湛江和南渡站覆盖时间分别为 2002 年和 1978 年全年 365 d, 水东站为 2002 年 12 月—2003 年 11 月, 共 365 d, 硃洲岛站为 1996 年 11 月—1997 年 10 月共 365 d, 海安站为 1960 年 7 月—1961 年 6 月, 共 365 d。

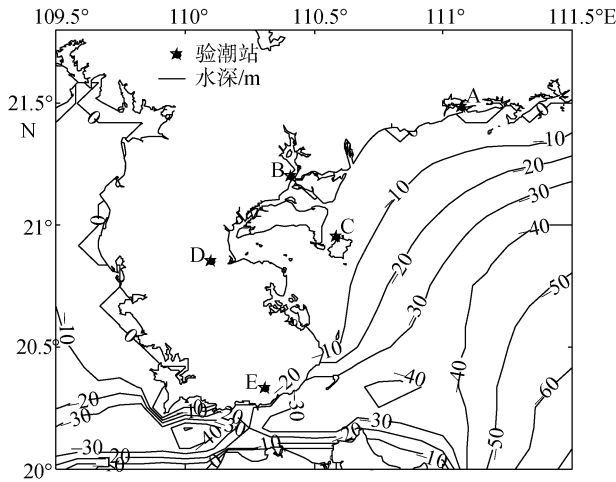


图 1 粤西沿岸海域地形及验潮站分布

Fig. 1 Distribution of bottom topography and tidal stations near coast of Western Guangdong

A. 水东站; B. 湛江站; C. 硃洲岛站; D. 南渡站; E. 海安站
A. Shuidong station; B. Zhanjiang station; C. Naozhou Island station; D. Nandu station; E. Haian station

1.2 处理方法

对潮汐的数据处理主要是调和分析方法。平衡潮理论认为实际水位是由天体运动引起的多个特定频率振动迭加的结果^[32]。因此 t 时刻实际水位可写成如下形式,

$$h(t) = S_0 + \sum_{j=1}^J H_j \cos(\sigma_j t + \phi_j) + r(t) \quad (1)$$

其中, S_0 为分析期间的平均海平面, 是待求常数;

σ_j 是选择分潮的运动角速率。 H_j 和 ϕ_j 是选择分潮的振幅和相位, 在调和分析中是需要计算的未知量, 它反映了实际海洋对这一频率天体引潮力的响应。 $r(t)$ 为余差或噪声, 它包括由气象等因素引起的不规则扰动、观测中存在的误差、数据处理中的差错和截断误差等, 由于无法事先知道噪声, 一般予以忽略处理。

求解公式(1)一般采用最小二乘法。基于此, Pawlowice 等^[32]于 2002 年根据前人研究开发了基于 MATLAB 软件 t_tide 潮汐处理程序。该程序几经升级, 能够进行几个月、1 a 及 18 a 甚至更长逐时水位数据潮汐调和分析, 包括数据分析前期缺测数据插值、分析中节点修正未定潮汐成分以及后期潮汐回报、预报和误差分析等。该程序在南海北部部分验潮站使用, 其有效性已经被验证^[31]。因此本文基于 t_tide 1.3 beta 版工具包部分程序, 针对粤西海域几个站位进行了潮汐特征分析, 同时给出了其潮汐特征值。在数据处理过程中, 引入了 M_{10} 浅水分潮, 同时使用了水文数据节点修正, 自动选择了 60 个分潮参与了调和分析。

2 结果与讨论

2.1 调和分析潮汐特征

通过对 5 个站位逐时潮高数据进行调和分析, 其主要分潮的振幅和迟角, 见图 2 和图 3。在结果分析中值得注意的是, 在通过 Rayleigh 规则可分辨的 60 个分潮中, 通过 95%置信度的有效分潮数量不同, 其中海安站最多有 45 个, 水东站 42 个, 湛江、硃洲岛站各有 40 个, 南渡站最少 22 个。这可能是由于湛江、硃洲岛及水东站位都位于相对开阔位置所以其有效分潮相当, 而南渡处于雷州半岛中东部, 相对位于内陆, 受地形限制天文影响因素较少, 因此其有效分潮最少, 仅有 22 个分潮。而海安站位于琼州

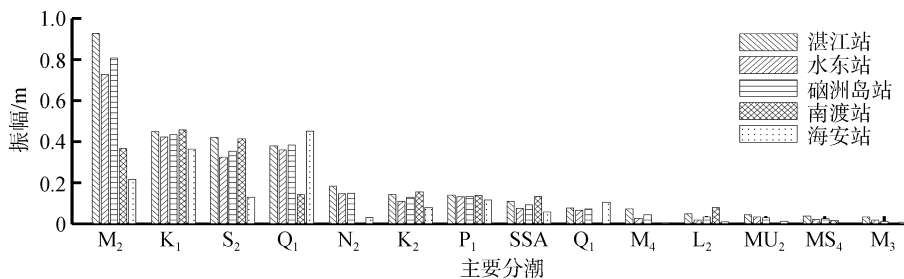


图 2 各站位主要分潮振幅

Fig. 2 Amplitude of main analyzed components at tidal stations

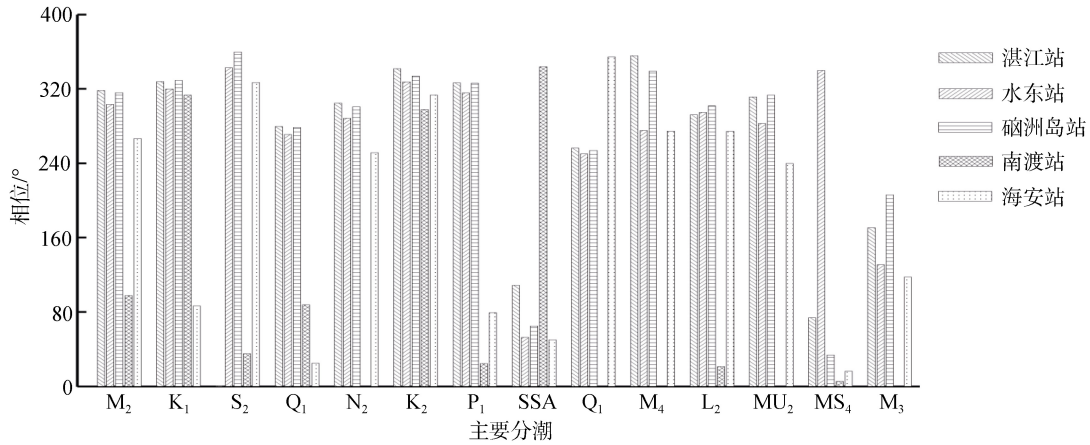


图3 各站位主要分潮格里尼治相角

Fig. 3 Greenwich phase of main analyzed components at tidal stations

海峡内部,受海底摩擦力及海流影响较大,因此其有效分潮较多,但每个分潮振幅贡献较小。

从图2中可以清晰地看出,粤西沿岸海域主要分潮为 M_2 、 K_1 、 S_2 、 O_1 ,次要分潮有 N_2 、 K_2 、 P_1 和 SSA 等,但各个站位又有所不同。粤西北部海域湛江、水东和硃洲岛三站主要分潮是 M_2 、 K_1 、 S_2 、 O_1 分潮,其中最大分潮为 M_2 分潮,湛江站振幅最大达0.93 m,其次为硃洲岛站振幅为0.81 m,再次为水东站位为0.73 m。而粤西南部海域主要分潮为 K_1 和 O_1 分潮,其次为半日分潮 M_2 、 S_2 、 K_2 等。在南渡站贡献最大为 K_1 分潮,振幅为0.45 m,其次为 MKS_2 (图中无标出)分潮和 S_2 分潮,振幅都在0.40 m左右,次要分潮都是浅水分潮 TAU_1 (图中无标出)等,但其振幅都比较小,小于0.1 m。粤西海域最南部海安站主要实际分潮为 O_1 和 K_1 分潮,最大为 O_1 分潮,振幅为0.45 m,其次为 K_1 分潮,振幅为0.36 m,其他分潮虽有组分,但贡献较小。从图3中可知粤西北部主要分潮,南部南渡和海安站的分潮迟角变化较大,其他三站,除了 SSA 、 MS_4 、 M_4 分潮,迟角变化较小,大都在 300° 左右。

2.2 潮汐类型

潮汐类型根据主要日分潮 K_1 、 O_1 振幅之和与半日分潮 M_2 振幅的比值确定,浅水分潮是否显著主要由 $1/4$ 日分潮 M_4 和半日 M_2 振幅比值表征,即^[32],

$$A = (H_{K_1} + H_{O_1}) / H_{M_2} \quad (2)$$

$$F = H_{M_4} / H_{M_2} \quad (3)$$

其中, H 代表分潮的振幅,角标表示某个分潮,下文中类似表示; A 和 F 分别表示某些分潮振幅或其组合的比值。

按照潮汐类型的标准,各站位潮汐类型的数值指标由公式(2)和(3)计算和区分。若 $A < 0.5$ 则为半日潮;若 $0.5 < A < 2.0$ 则为不规则半日潮混合潮;若 $2.0 < A < 4.0$ 则为不规则日潮混合潮;若 $A > 4.0$ 则其为全日潮。 $F > 0.04$ 视为浅水分潮显著,同时也可以表征涨、落潮时间差别。5个站位潮汐类型见表1,同时给出了各个站位的年平均水位、平均误差及实测与回报相关系数。其中平均误差值为实测值与回报值之差绝对值的平均。

表1 各站位平均水位、潮汐类型及平均误差

Tab. 1 Mean sea surface elevations, tidal types, and average errors

站位	平均水位 (m)	A	F	平均误差 (m)	相关系数
水东	2.25	1.076	0.037	0.138	0.97
湛江	2.27	0.893	0.079	0.186	0.96
硃洲岛	2.18	1.013	0.055	0.137	0.97
南渡	0.07	1.650	0.000	0.626	0.59
海安	1.24	3.778	0.022	0.099	0.95

由表1可知湛江、水东、硃洲岛和南渡站都是不规则半日潮混合型,从粤西海域北部到南部潮汐类型值越大,日潮成分越大,直到南部海安验潮站已成为不规则全日潮,潮汐类型值达3.78,接近正规全日潮值。湛江、硃洲岛站位的 F 因子都大于0.04,为显著的浅水分潮,水东、南渡和海安站浅水分潮不明显。值得注意的是南渡站的 M_4 分潮没有通过59%的显著性检验,为无效成分,因此其 F 因子为0。整体上, F 因子相对大小值表明粤西沿岸从北至南部受浅水分潮影响越来越小,南渡站基本不受浅水分潮

的影响。平均水位与 F 因子类似，从北到南有降低的趋势，其中南渡站最低为 0.07 m。从回报的整体平均误差可以看出都是比较小的，虽然有极个别的误差较大超过 1 m，但基本不影响其预报精度。这与郑有任分析的湛江站结果是一致的^[31]。图 4 为各站位部

分水文数据及其回报时间序列。但我们注意到南渡站误差序列是比较大的，同时从实测水位数据与回报数据相关性也能表现出来，南渡站相关系数为 0.6，其他站位都在 0.95 以上。这点从图 4 中南渡站部分水位数据时间序列中也能反映出来，需要重点分析。

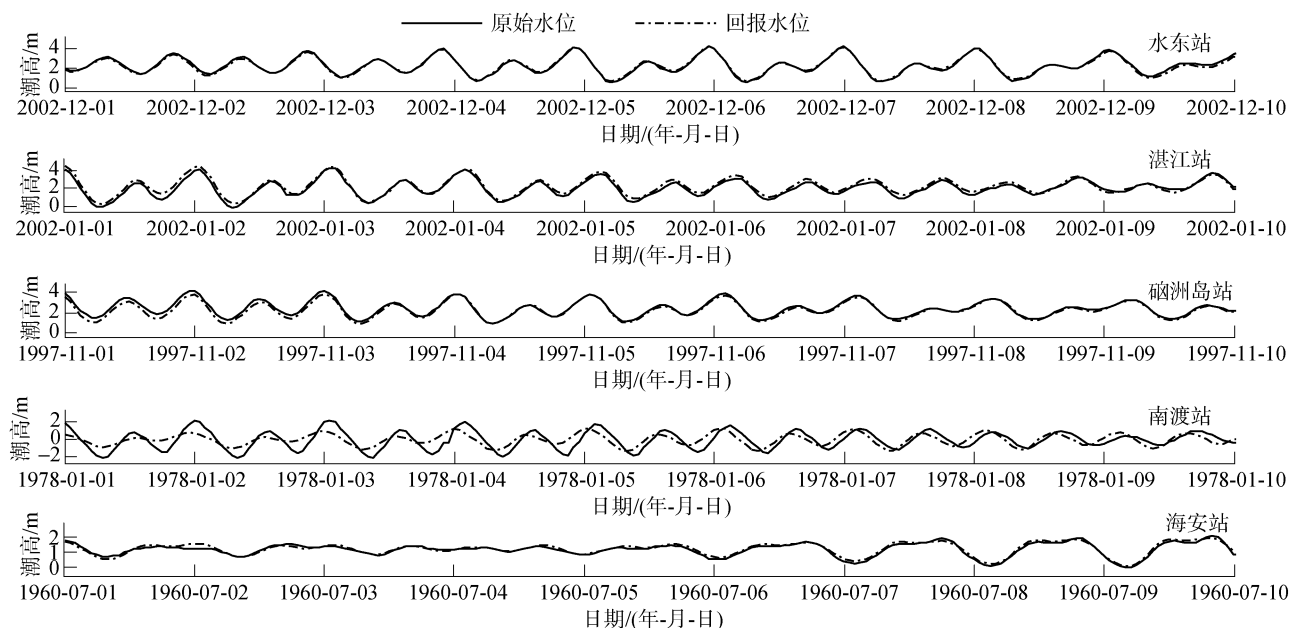


图 4 各站位部分水文数据及其回报时间序列

Fig. 4 Parts of time and synthesized tidal series with T-tide tool at tidal stations

2.3 潮汐的日潮不等

除赤道地区外任何地点一天内总会形成日潮不等现象，包括潮高日不等、涨潮时与落潮时不等。这种日潮不等现象通常用 S_2 和 M_2 分潮振幅比值表示，即 H_{S_2}/H_{M_2} 来表征日潮不等相对大小。当 $H_{S_2}/H_{M_2} > 0.4$ 时，潮高日不等现象明显。另外潮高日不等现象时也可用半日分潮和全日分潮相角差值 B 来估算即^[34]，

$$B = g_{M_2} - g_{K_1} - g_{O_1} \quad (4)$$

$$C = 2g_{M_2} - g_{M_4} \quad (5)$$

其中， g 为格里尼治相角，角标为某个特定分潮。

根据 B 的大小判断潮高日不等现象类型。 $B=0^\circ$ 或 360° 时为高潮日不等， $B=180^\circ$ 时为低潮日不等， $B=270^\circ$ 时为高低潮均出现日不等现象。涨、落潮时差别主要取决于浅水分潮的大小，一般可由(3)式计算。当 $F < 0.01$ 时，实际上不用考虑浅水分潮的影响；若 $F=0.04$ ，则落潮与涨潮时间一般相差 30 min 左右；若 $F=0.08$ ，则相差可达 1 h；若 $F > 0.5$ ，则在一个太阴日中可能会出现 4 次高潮和低潮特殊现象。另外涨、落潮时差别也可由分潮相角差 C 来表征，当 $C=90^\circ$

时，落潮历时长于涨潮历时；当 $C=270^\circ$ 时则相反。粤西 5 个站位潮汐日潮不等参数计算见表 2 和表 1 中的 F 因子。

表 2 各站位日潮不等相关参数

Tab. 2 Parameters of diurnal inequality

站位	H_{S_2}/H_{M_2}	$B(^{\circ})$	$C(^{\circ})$
水东	0.446	288	331
湛江	0.454	290	281
硃洲岛	0.437	292	293
南渡	1.132	302	194
海安	0.596	155	259

由表 2 可知粤西 5 个站位 H_{S_2}/H_{M_2} 均大于 0.4，南渡站似乎最大为 1.13，因此其潮高日不等现象明显。除了海安站不规则日潮港相位差 B 接近 180° ，低潮不等现象显著外，其他站位相角差值都接近 270° 附近，因此其他 4 站均出现高、低潮日不等现象。由表 1 中的 F 因子可知，湛江站的 $F \approx 0.08$ ，同时结合由表 2 可知湛江站 C 都比较接近 270° ，可推测涨潮历时比落潮时间长，在 1 h 左右；同理对于水东站，

$F \approx 0.04$, C 为 331° 可知其涨潮历时比落潮时间稍长, 在 30 min 左右。从图 4 也可以说明这一点。碓洲岛站浅水分潮显著, 涨潮时间比落潮时间稍长。南渡和海安站位受浅水分潮影响不明显, 其涨落潮时相当。这点在计算部分潮汐特征值时还需进一步分析。

2.4 潮汐特征值

潮汐特征值是表征一个海区基本特征的参数值, 原则上需要长期大于 18.6 a 的验潮资料统计得到。本文利用了 1 年水位数据, 作了初步统计, 提供参

考, 同时给出了工程水位中应用的平均潮差和最大可能潮差。平均潮差 H_1 和最大可能潮差 H_2 用下式计算^[32],

$$H_1 = 2.02H_{M_2} + \frac{0.58H_{S_2}^2}{H_{M_2}} + \frac{0.08(H_{K_1} + H_{O_1})^2}{H_{M_2}} \quad (6)$$

$$H_2 = 2(1.29H_{S_2} + 1.23H_{M_2} + H_{K_1} + H_{O_1}) \quad (7)$$

由公式(6)、(7)计算了各站位平均潮差和最大可能潮差, 见表 3。同时也给出了利用 1 年的统计的平均涨潮潮差、时间, 落潮潮差、时间。

表 3 各站位潮汐特征值

Tab. 3 Tidal characteristics at tidal stations

站位	H_1 (m)	H_2 (m)	潮差(m)			涨落潮时间(h)	
			最大	涨潮	落潮	涨潮	落潮
水东	1.62	4.19	3.86	1.77	1.78	6.99	5.93
湛江	2.04	5.02	4.50	2.16	2.16	6.96	5.57
碓洲岛	1.79	4.53	3.95	1.84	1.84	6.60	5.77
南渡	1.05	3.06	4.54	2.34	2.33	6.14	6.26
海安	0.73	2.49	4.47	1.14	1.14	7.30	7.04

从表 3 中可知, 由式(6)和(7)计算的平均潮差和最大可能潮差从粤西北部到南部有减小的趋势, 其中平均潮差和最大可能潮差湛江站最大分别为 2 m 和 5 m 左右, 海安站最小分别为 0.7 m 和 2.5 m。然而与 1 年水位数据统计进行比较, 其部分站位经验公式计算准确性值得商榷。南渡站和海安站误差较大, 其中海安站误差最大, 最大潮差经验公式计算值与统计值差 2 m 左右, 南渡站差 1.5 m; 平均潮差也在 1 m 左右。因此公式(6)和(7)已经不能用来估算南渡站和海安站平均潮差和最大可能潮差。湛江、水东、碓洲岛三站经验公式计算与统计初步结果基本一致。在日潮不等方面, 涨、落潮平均潮差几乎相同, 然而其涨、落潮时间与公式(3)、(5)所推断出来的趋势基本一致。涨落潮时间上, 粤西北部湛江、水东和碓洲岛站涨潮都比落潮时间长, 从北到南涨落差时间差值有降低的趋势, 最大为湛江站涨潮时间比落潮时间长 1.5 h, 最小差值为碓洲岛站 0.9 h, 与经验公式计算量值相差 0.5 h 左右。粤西海域南部南渡和海安站涨、落时间几乎相等与经验公式计算结果一致。

2.5 调和与分析误差成因分析

为了分析南渡站调和与分析存在较大误差的原因, 我们对粤西海域 5 个站位观测的 1 年水位数据进行了功率谱分析。本文采用间接法进行功率谱分析, 该

方法于 1949 年 Tukey 提出^[35], 即先由 N 个观察值, 估计出自相关函数, 求自相关函数傅里叶变换, 以此变换结果作为对功率谱的估计。除了粤西南渡站外, 其他 4 站基本类似, 因此本文选择湛江和南渡两个验潮站进行对比研究, 结果见图 5。

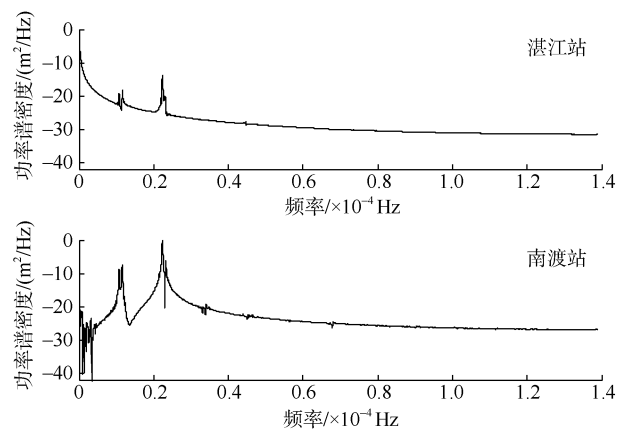


图 5 两站位 1 年水位数据功率谱分析

Fig. 5 Power spectral density analysis of one year of hourly elevations

从图 5 可知, 两站主要分潮是位于 0.11×10^{-4} 和 0.22×10^{-4} Hz 附近, 即分别位于 0.04 和 0.08 圈/h 附近的日潮和半日潮成分, 然而又有差别。两站水位数据虽然经同样的矩形窗平滑处理, 但在南渡站存在

多个其他较小谱峰, 如在 0~0.04 圈/h 范围内存在多个频率、1/3 和 1/4 日分潮附近。尤其存在的 0~0.04 圈/h 频率表明南渡站有许多较小频率的波动, 但是其能量太小, 以至于被随机噪声淹没覆盖。为了更进一步分析南渡河产生较大误差的原因, 我们对南渡河地形及水文情况重新进行了调研, 发现 1974 年 7 月南渡河堤闸工程竣工^[36], 进行了防海潮入侵、储淡水的调节。而南渡站位于南渡河中部, 位于入海口堤闸的上游, 该堤闸工程改变了南渡河水位升降, 不再完全满足天文潮的规律, 同时参与调和潮汐是离散的, 只有有限的分潮参与调和, 参与计算较低频率分潮部分能量太小, 没有通过可信度检验。因此, 在南渡站调和结果误差较大。另外, 由于南渡站地处雷州半岛中部, 海水由东向西进入狭长的南渡河, 水深较浅, 这种地形也有可能受气象及外海潮波胁迫振动, 形成假潮。这与郑淑贤利用 FVCOM 模式对琼州海峡所做的关闭西口数值实验结果相似^[25], 由东口传入该区域的外海潮波中全日分潮占优。其他粤西海域 4 站位相对处于开阔海区, 基本不受海岸影响。

3 结论

通过对粤西海域湛江、水东、硃州岛、南渡和海安验潮站 1 年水位资料分析, 得到了一些有用的结论。

粤西海域北部湛江、水东、硃洲岛 3 个站主要分潮为 M_2 、 K_1 、 S_2 和 O_1 , 是不规则半日潮, 南渡站除了上述外还包括 MKS_2 分潮, 是不规则半日潮; 而南部海安站主要分潮为 O_1 和 K_1 分潮, 是不规则日潮。粤西沿岸各站浅水分潮和平均水位从北到南有减小趋势。在日潮不等方面, 粤西沿岸 5 个站位都存在明显的日潮高不等现象, 日潮时不等有较大差异。总体上日潮时不等从北到南有降低的趋势, 涨潮时比落潮时要长, 粤西海域北部湛江、水东和硃州岛涨潮时间比落潮长 1~1.5 h, 南部南渡和海安站涨、落潮时相差不大。另外, 相对位于内陆的南渡验潮站, 有效分潮相对较少同时还存在其他频率波动, 同时南渡河入海口处堤闸工程综合因素导致该站潮汐调和分析和部分经验公式适用不准确。

参考文献:

[1] 曹颖, 林炳尧. 杭州湾潮汐特征分析[J]. 浙江水利水电学院学报, 2000, 12(3): 16-25.

Cao Ying, Lin Bingyao. Tidal characteristics of Hangzhou Bay[J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, 2000, 12(3): 16-25.

[2] 顾圣华. 杭州湾芦潮港水域潮流特性分析[J]. 上海水利, 2000, 1: 37-40.

Gu Shenghua. Tidal characteristics of Luchao Port in Hangzhou Bay[J]. Shanghai Water, 2000, 1: 37-40.

[3] 曹欣中, 唐龙妹, 张月秀. 象山港水文特征及纳污能力的分析[J]. 东海海洋, 1995, 13(1): 10-19.

Cao Xinzong, Tang Longmei, Zhang Yuexiu. Analysis of the hydrography features and the ability for containing contaminator for Xiangsha Port[J]. Donghai Marine Science, 1995, 13(1): 10-19.

[4] 陈耕心, 李伯根, 许卫忆. 乐清湾潮汐特征及对潮滩沉积作用的影响[J]. 东海海洋, 1992, 10(1): 1-9.

Chen Gengxin, Li Bogen, Xu Weiyi. The tidal features and their effects on the sedimentary process in Yueqing Bay[J]. Donghai Marine Science, 1992, 10(1): 1-9.

[5] 陈德春, 何衢. 浅析台州湾——椒江河口水文特征[J]. 水文, 1998, 5: 52-54.

Chen Dechun, He Heng. Preliminary study on the hydrography features of Jiaojiang River estuary in Taizhou Bay[J]. Journal of China Hydrology, 1998, 5: 52-54.

[6] 曾定勇, 倪晓波, 黄大吉. 南麂岛附近海域潮汐和潮流的特征[J]. 海洋学报, 2012, 34(3): 1-10.

Zeng Dingyong, Ni Xiaobo, Huang Daji. Harmonic analysis of tide and tidal current near Nanji Island sea, Zhejiang province[J]. Acta Oceanology Sinica, 2012, 34(3): 1-10.

[7] 陈倩, 黄大吉, 章本照, 等. 浙江近海潮汐的特征[J]. 东海海洋, 2003, 21(2): 1-12.

Chen Qian, Huang Daji, Zhang Benzhaoh, et al. Research of the tidal features in the coastal zone of Zhejiang Province[J]. Donghai Marine Science, 2003, 21(2): 1-12.

[8] 章渭林. 浙闽近海潮波传播类型分析[J]. 海洋通报, 1993, 12(1): 19-24.

Zhang Weilin. Analysis of propagation type of tidal wave offshore waters of Zhejiang and Fujian Provinces[J]. Marine Science Bulletin, 1993, 12(1): 19-24.

[9] 田永青, 潘爱军. 台湾海峡西部近海潮汐特征[J]. 台湾海峡, 2011, 30(4): 483-488.

Tian Yongqing, Pan Aijun. Tidal characteristics in offshore sea of western Taiwan Strait[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2011, 30(4): 483-488.

[10] 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.

Yang Zhengdong, Zhu Jianrong, Wang Biao, et al. Analysis of tidal characteristics of the tide gauges in the Chang Jiang Estuary[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2012, 3: 111-119.

- [11] 肖莞生, 卢婧青, 陈国轩, 等. 珠三角八大口门潮汐调和分析及潮性特征对比[J]. 广东水利水电, 2013, 5: 6-11.
Xiao Guansheng, Lu Jingqing, Chen Guoxuan, et al. Harmonic analysis and comparison of tide on eight tidal stations in Pearl River delta[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2013, 5: 6-11.
- [12] 白凤龙, 高建华, 汪亚平, 等. 鸭绿江口的潮汐特征[J]. 海洋通报, 2008, 27(3): 7-13.
Bai Fenglong, Gao Jianhua, Wang Yaping, et al. Tidal characteristics of Yalu River estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2008, 27(3): 7-13.
- [13] 丁文兰. 南海潮汐和潮流的分布特征[J]. 海洋与湖沼, 1986, 17(6): 468-480.
Ding Wenlan. Distribution of tides and tidal currents in the South China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1986, 17(6): 468-480.
- [14] 曹德明, 方国洪. 北部湾潮汐和潮流的数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(2): 105-113.
Cao Deming, Fang Guohong. A numerical model of tide and tidal currents in Beibu Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1990, 21(2): 105-113.
- [15] 刘爱菊, 张延廷. 北部湾潮汐数值预报及其分析[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(6): 640-645.
Liu Aiju, Zhang Yanting. Numerical prediction and analysis of tide in Beibu Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1997, 28(6): 640-645.
- [16] 夏华永, 殷忠斌, 郭芝兰, 等. 北部湾三维潮流数值模拟[J]. 海洋学报, 1997, 19(2): 21-31.
Xia Huayong, Yin Zhongbin, Guo Zhilan, et al. 3D numerical simulation of tidal currents in Beibu Bay[J]. Acta Oceanology Sinica, 1997, 19(2): 21-31.
- [17] 孙洪亮, 黄卫民. 北部湾潮汐潮流的三维数值模拟[J]. 海洋学报, 2001, 23(2): 1-8.
Sun Hongliang, Huang Weimin. 3D numerical simulation of tide and tidal currents in Beibu Bay[J]. Acta Oceanology Sinica, 2001, 23(2): 1-8.
- [18] 赵昌, 吕新刚, 乔方利. 北部湾潮波数值研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(4): 1-11.
Zhao Chang, Lü Xingang, Qiao Fangli. Numerical research on tidal wave in Beibu Bay[J]. Acta Oceanology Sinica, 2010, 32(4): 1-11.
- [19] 徐振华, 雷方辉, 娄安刚, 等. 北部湾潮汐潮流数值模拟[J]. 海洋科学, 2010, 34(2): 10-14.
Xu Zhenhua, Lei Fanghui, Lou Angang, et al. Numerical simulation on tide and tidal currents in the Beibu Bay[J]. Marine Sciences, 2010, 34(2): 10-14.
- [20] Cai Shuqun, Huang Qizhou, Long Xiaomin. Three-dimensional numerical model study of the residual current in the South China Sea[J]. Oceanologica Acta, 2003, 26(5): 597-607.
- [21] Fang Guohong, Kwok Y, Yu Kejun, et al. Numerical simulation of principal tidal constituents in the South China Sea, Gulf of Tonkin and Gulf of Thailand[J]. Continental Shelf Research, 1999, 19(7): 845-869.
- [22] Zu Tingting, Gan Jianping, Erofeeva S Y. Numerical study of the tide and tidal dynamics in the South China Sea[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2008, 55(2): 137-154.
- [23] Gao Xiumin, Wei Zexun, Lü Xianqing, et al. Numerical study of tidal dynamics in the South China Sea with adjoint method[J]. Ocean Modelling, 2015, 92: 101-114.
- [24] 杨万康, 尹宝树, 杨德周, 等. 基于 FVCOM 的南海北部海域潮汐潮流数值模拟[J]. 海洋科学, 2013, 37(9): 10-19.
Yang Wankang, Yin Baoshu, Yang Dezhou, et al. Application of FVCOM in numerical simulation of tide and tidal currents in northern South China Sea[J]. Marine Sciences, 2013, 37(9): 10-19.
- [25] 郑淑贤. 基于 FVCOM 的琼州海峡潮巧潮流数值模拟与研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Zheng Shuxian. Numerical simulation of tide and tidal currents in Qiongzhou Strait with the FVCOM model[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [26] 王彪, 朱建荣. 基于 FVCOM 模型的珠江河口及其邻近海域的潮汐模拟[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(4): 17-27.
Wang Biao, Zhu Jianrong. Numerical simulation of tide in Pearl River estuary and its adjacent sea based on FVCOM[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012, 31(4): 17-27.
- [27] 史键辉, 梁慧. 南海诸岛潮汐特征的初步分析[J]. 海洋湖沼通报, 1989, 1: 1-6.
Shi Jianhui, Liang Hui. Preliminary analysis of tidal characteristics on the islands in the South China Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1989, 1: 1-6.
- [28] Xu Zhenhua, Yin Baoshu, Hou Yijun. Multimodal structure of the internal tides on the continental shelf of the northwestern South China Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 95: 178-185.
- [29] 李维锋, 梁广健, 徐刚. 南沙永暑海区潮汐特征分析[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(5): 71-77.
Li Weifeng, Liang Guangjian, Xu Guang. Analysis on the tide characteristics at Yongshu of the Nansha Islands[J]. Journal of Ocean Technology, 2014, 33(5): 71-77.
- [30] 李近元, 方念乔, 张吉, 等. 海南岛西南海域的潮流和潮汐观测特征[J]. 海洋预报, 2016, 33(2): 45-52.
Li Jinyuan, Fang Nianqiao, Zhang Ji, et al. Characteristics of the observed tide and tidal current at the southwest of Hainan Island[J]. Marine Forecasts, 2016, 33(2):

- 45-52.
- [31] 郑有仁, 张娟, 吴立升. 南海北部沿岸海域潮汐的调和分析[J]. 台湾海峡, 2012, 31(4): 49-556.
Zheng Youren, Zhang Juan, Wu Lisheng. Tidal analysis along coast of the northern South China Sea[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2012, 31(4): 49-556.
- [32] 黄祖珂, 黄磊. 潮汐原理与计算[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005: 235.
Huang Zuke, Huang Lei. Computation and theory of tide[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005: 235.
- [33] Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(8): 929-937.
- [34] JTJ221-87. 港口工程技术规范(上册)[S].
JTJ221-87. The Standard for Port Engineering Technicians[S].
- [35] 徐德伦, 王莉萍. 海洋随机数据分析-原理、方法与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 38.
Xu Delun, Wang Liping. Analysis of ocean random data including: theory, process and its application[M]. Beijing: High Education Press, 2011: 38.
- [36] 广东省地方志编纂委员会. 广东省志·水利志[M]. 广州: 广东人民出版社, 1995: 74.
Local History Compilation Committee of Guangdong Province. Guangdong Province Chronicles --Water Conservancy[M]. Guangzhou: Guangdong People's Press, 1995: 74.

Tidal characteristics along coast of Western Guangdong Province

CHENG Yin-he¹, LIANG Guang-jian², ZHU Feng-qin¹, CHEN Jian¹, JI Wen-jun³, ZHAO Hui³

(1. Department of Ocean Technology, College of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Marine Hydro-Meteorological Center, South China Sea Fleet, Zhanjiang 524001, China; 3. Guangdong Province Key Laboratory of Coastal Ocean Variation and Disaster Prediction, College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Received: Sept. 23, 2016

Key words: coast of Western Guangdong; tide; harmonic analysis; diurnal inequality

Abstract: Based on one year of hourly elevations at the Shuidong, Zhanjiang, the Naozhou Island, Nandu, and Haian tidal stations, we investigated the tidal characteristics by harmonic and statistical analyses. The results show that the main significant constituents at all stations excepting the Haian station are the M_2 , K_1 , S_2 and O_1 bands and that the corresponding tidal type of the four stations is an irregular semidiurnal band in the north area of Western Guangdong. However, the tide for the Haian station in the south area of Western Guangdong mainly consists of the significant constituents O_1 and K_1 , whose corresponding tidal type is an irregular diurnal band. Moreover, the shallow-water constituents and mean sea-surface elevations show a decreasing trend from north to south in the west sea of Guangdong. With respect to the diurnal inequality, all the stations exhibit a tidal height difference and an obviously large discrepancy in the tidal hour difference. The mean tidal hour difference between the flood and ebb tides seems to shorten from north to south along the coast of Western Guangdong. The time of the rising tide in the north of Western Guangdong is roughly 1 to 1.5 h longer than that of the falling tide and those in the south of Western Guangdong seem to be nearly equal. In addition, the tidal harmonic analysis and related empirical formula are inexact for the Nandu station, which is mainly due to the bounded bank and sluice gate system on the Nandu River estuary.

(本文编辑: 刘珊珊)