

粤东甲子附近海域潮流特征研究^{*}

吴伦宇¹, 郑斌鑫^{2,3}, 曾志³, 何佳³, 陈志杰³

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 3. 国家海洋局第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

摘要:针对2012-04—07甲子以东海域3个站的潮位和海流连续观测资料,采用潮汐和潮流调和、海流旋转功率谱等方法,研究了它们的潮汐和各层潮流的分布特征,探讨了这些特征形成的原因。结果表明:1)甲子港及其以东40 km海域典型日潮的形成是由于 M_2 分潮的无潮点的存在和潮能在甲子外海的辐散两种原因引起的;2)日潮海域的潮流则是正规半日潮流的性质;3)研究海域的潮波较为复杂,驻波性质不明显,前进波性质较为突出;4)通过类比黄河口 M_2 分潮的无潮点,认为该海区存在一个退化到岸上的 M_2 无潮点是可能的。

关键词:粤东;甲子海域;潮流;潮流谱分析

中图分类号:P731.2

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2015)02-0131-11

本文研究区域为南海北部陆架区甲子港附近海域。该海域东北方毗邻台湾海峡,地形复杂多变,潮汐分别受台湾岛南、北两个方向潮波的影响。对南海包括南海北部潮波以及台湾海峡潮波的研究,已有大量工作,俞嘉耕^[1]利用英文版潮汐表上刊出的调和常数,选取了320个站的资料,计算了南海的潮汐性质、潮差、半日潮和全日潮的同潮时线,绘制了 K_1 , O_1 , M_2 , S_2 四个分潮的潮时和潮差分布;方国洪等^[2-3]和曹德明等^[4-5]采用二维流体动力学差分法计算了南海北部的潮汐潮流特征,得到了南海北部的潮汐潮流性质分布图,用沿岸和岛屿200多个验潮站的调和常数给出了 K_1 , O_1 , M_2 , S_2 四个主要分潮新的同潮图;朱佳等^[6]建立二维潮波模式,模拟了台湾海峡及其邻近海域8个主要分潮。夏综万等^[7-8]对粤东甲子海域潮波异常和南海北部潮波的传播进行了分析讨论,并指出该区域的潮能辐散,可能是造成甲子站附近潮型系数变化的重要原因之一;杨万康等^[9]基于FVCOM对南海北部海域进行了精细化潮汐、潮流数值模拟。但是,以往对南海北部海域的研究多以数值计算为主,对粤东甲子附近海域不同水深的潮流特征研究很少,且过去使用的潮流资料多为周日连续观测结果,缺乏对长序列海流资料的分析与研究。由此必然会带来较多的偶然性和误差。为此,本研究采用2012-05—07期间甲子附近海域3个站连续的流速、流向剖面资料进行分析,较好地反映了该海域晚春和初夏的潮流特征。

1 资料与方法

1.1 资料来源

我们于2012-04—07在粤东靖海至神泉附近海域20 m等深线处布设3个锚碇站(图1),取得了海流垂向剖面数据和潮位观测资料。使用的仪器为挪威诺泰克生产的AWAC波浪海流剖面仪(1 MHz),其测量范围为0~25 m,其中海流观测层厚为0.5 m。

^{*} 收稿日期:2014-11-13

资助项目:国家自然科学基金——南海东北部开敞性海湾余环流特征及形成机制研究(41406031);国家海洋局青年海洋科学基金——基于VF方法的近岸波致流研究(2013204);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——高可靠性防拖网海床基观测系统的研发、实验及应用(GY0213T02)

作者简介:吴伦宇(1982-),男,山东莱州人,助理研究员,博士,主要从事海洋数值模拟方面研究. E-mail: wuly@fio. org. cn

* 通讯作者:郑斌鑫(1982-),男,福建福州人,博士研究生,主要从事物理海洋方面研究. E-mail: hysszbx@163. com

(李 燕 编辑)

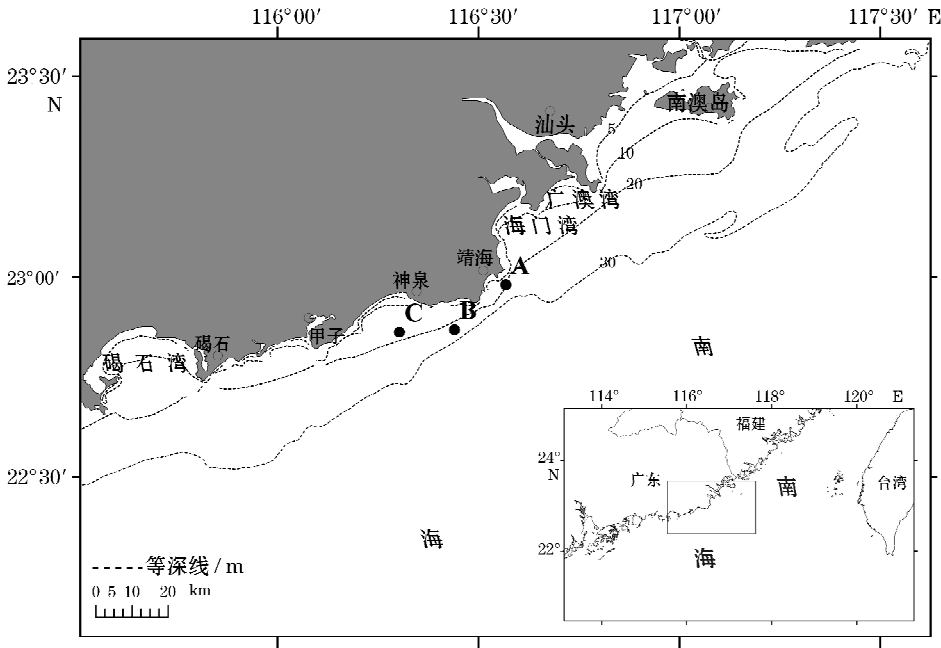


图 1 观测站位分布

Fig. 1 Locations of observational stations

表 1 A,B,C 三锚碇站的位置、观测仪器和持续时间

Table 1 Locations, observation instruments and durations at stations A, B and C

站 名	位 置	水深/m	观测设备	观测要素	观测时间/d	观测时段	采样间隔/min
A	(116°34'08"E, 22°59'53"N)	25.2	AWAC	剖面海流、潮位	64	2012-04-30—07-03	10
B	(116°26'28"E, 22°52'08"N)	22.3	AWAC	剖面海流、潮位	72	2012-04-22—07-03	10
C	(116°18'11"E, 22°51'43"N)	18.8	AWAC	剖面海流、潮位	65	2012-05-14—07-19	10

1.2 处理方法

1)利用 AWAC 海流剖面仪自带的 ExploreP. exe 软件对各站的流速、流向原始数据进行高频滤波处理, 将实测数据中的高频噪声成分基本滤掉, 得到潮流和定常余流为主的流动。然后从剖面数据中挑选表、中、底三层逐时数据进行分析, 这里表层指水面下 1 m 处, 底层指离海底高度约 1.5 m 处, 中层指相对于表、底层中间的位置。

2)潮流调和分析: 采用 T-Tide^[10] 程序包, 计算得到各层的 K_1, O_1, M_2, S_2 等主要分潮潮流调和常数、椭圆要素。

3)功率谱分析: 就是通过能量相对于频率的分布来确定构成波面 $\xi(t)$ 各组成波的相对大小, 并依据在线性假设下导出的功率谱矩与外观特征量之间的理论关系, 来确定该标量过程的外观统计特征。而高阶谱分析则是企图揭示各组成波之间的相互作用程度, 即研究该过程的非线性特征。

本文采用最大熵方法^[11], 取自由度 $\nu=2$, 计算海流旋转功率谱, 对研究锚碇站海流随时间变化的特性进行分析研究。

为了检验功率谱中主要周期是否存在, 本文采用以下红噪声假设:

$$W(f_m) = \nu \bar{S}_x(f_m) [\eta(f_m)]^{-1} \tag{1}$$

式中, ν 为自由度; $\bar{S}_x(f_m)$ 为样本序列平滑谱; m 为样本序列数, $m=1, 2, 3, \dots$; 函数 $\eta(f_m)$ 参见文献[11]中的表达式; f_m 为相应的频率。给出显著性水平 α , 功率谱 $\bar{S}_x(f_m)$ 的 $100(1-\alpha)\%$ 的置信区间可用下式估计:

$$\left(\frac{\nu \bar{S}_x(f_m)}{\chi_\nu(1-\alpha/2)}, \frac{\nu \bar{S}(f_m)}{\chi_\nu(\alpha/2)} \right) \quad (2)$$

当 $\alpha = 0.1, \nu = 2$ 时,利用 MATLAB 中的 chi2inv 函数来计算对应的 χ^2 分布,得到 $\left(\frac{\nu}{\chi_\nu(1-\alpha/2)}, \frac{\nu}{\chi_\nu(\alpha/2)} \right)$ 为 $(0.3, 19.4)$ 。使用双对数坐标绘制谱图,功率谱的置信区间表示形式会简单又直观,只要 $W(f_m) > 19.4$ 就满足显著性检验。

2 结果分析

2.1 潮汐性质

潮汐类型是一个重要的指标,指的是两个重要的全日分潮 K_1 加 O_1 与主要半日分潮 M_2 的振幅之比^[12]:

$$F = \frac{H_{K_1} + H_{O_1}}{H_{M_2}} \quad (3)$$

式中, F 为潮汐性质判别系数; H 为分潮潮汐振幅。 $F \leq 0.5$ 为正规半日潮性质, $0.5 < F \leq 2.0$ 为不正规半日潮, $2.0 < F \leq 4.0$ 为不正规日潮, $F > 4.0$ 为正规日潮。若把潮汐振幅换为潮流振幅,则所得 F 值为潮流性质判别系数。

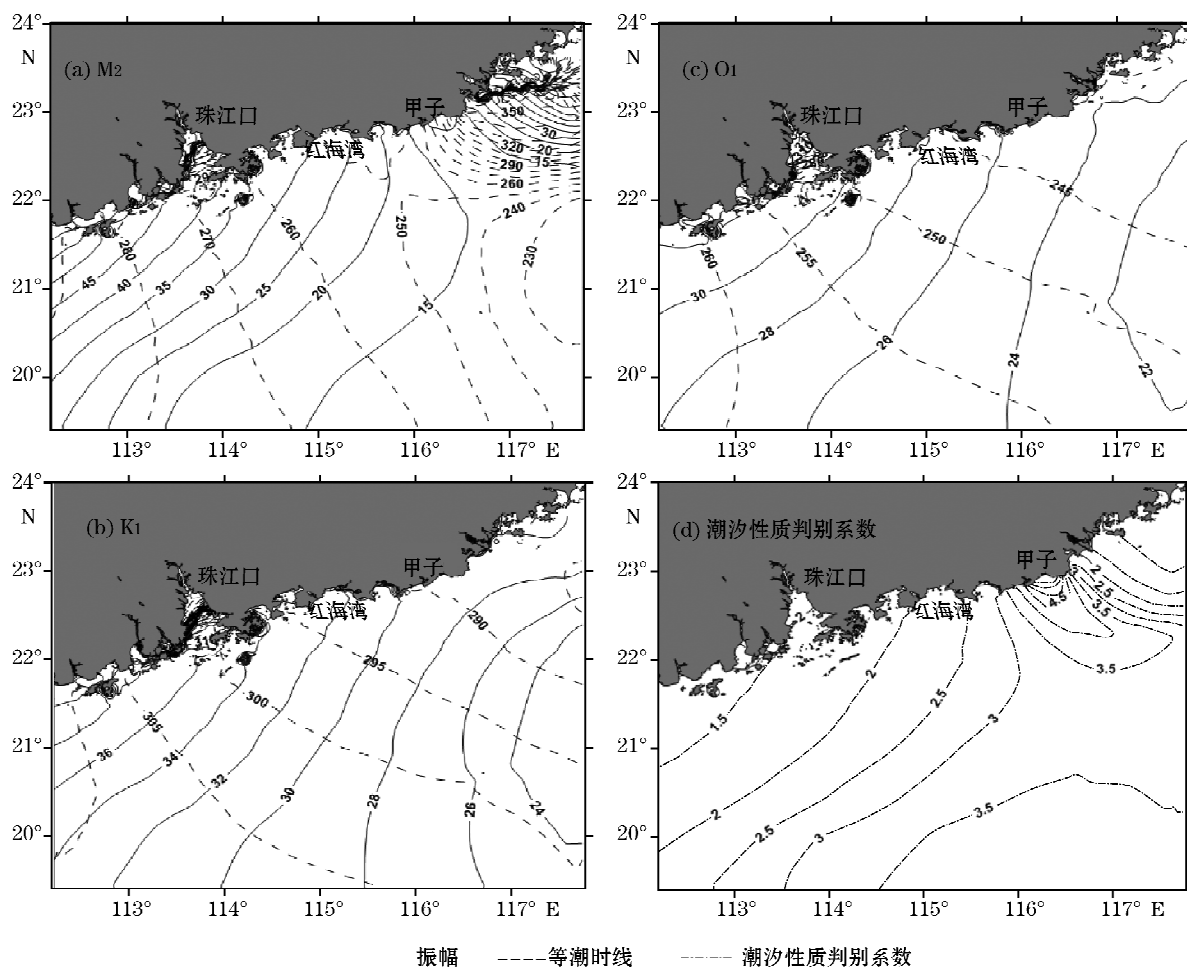


图 2 分潮振幅、等潮时线及潮汐性质判别系数分布图^[9]

Fig. 2 Co-tide charts and of tidal characteristics^[9]

根据 3 个站的潮位资料进行调和分析得到:A 站的 F 值为 2.96,B 站为 6.46,C 站为 7.92。A,B 站之间相距约 18 km,B,C 站之间相距约 14 km,这 3 个站距离相近而潮型系数却相差很大。图 2 为广东沿岸潮汐性质判别系数分布图^[9],由图可以看出: M_2 分潮从巴士海峡西传到 116°E 附近,然后分成两部分:一部分转向东北,与台湾海峡西传的 M_2 分潮相遇,造成等潮时线非常密集;另一部分转向西北,向珠江口方向传递。在甲子的麒麟山($116^\circ05'54''\text{E}$, $22^\circ49'00''\text{N}$)以东、B 站以西(石碑山附近—— $116^\circ29'48''\text{E}$, $22^\circ56'06''\text{N}$)这个海域是 M_2 潮能辐散区,所以振幅最小。而 K_1 , O_1 分潮则无振幅降低的现象,故潮型系数 F 值增大(图 2d)。我们认为,这至少是形成日潮的原因之一。

2.2 潮流性质与椭圆要素

2.2.1 潮流性质

对 A,B,C 这 3 个站各层的流速、流向进行潮流调和分析,得出各层各分潮的调和常数,然后再进行性质判别。其结果是:A 站各层 F 值介于 $0.05\sim0.10$,B 站介于 $0.12\sim0.25$,C 站介于 $0.25\sim0.30$,均属于正规半日潮范围。

上述结果也为数值计算证实:从图 3 可以看出,南海北部大部分陆架区域潮流性质判别系数在 $1.0\sim2.0$,属于不规则半日潮流,但在甲子以东,潮流判别系数比较小,在 0.4 以下,属于正规半日潮性质。

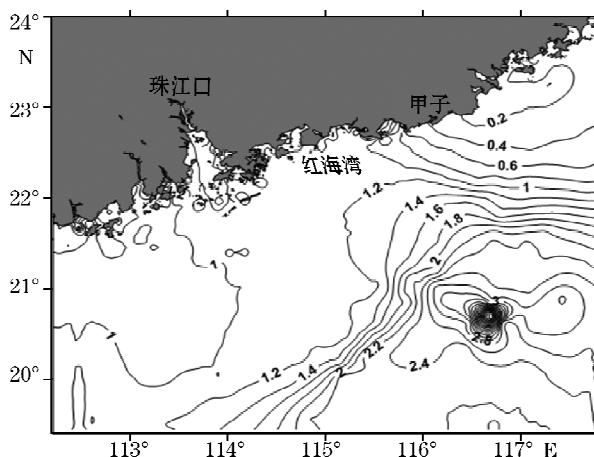


图 3 潮流性质判别系数分布图^[9]
Fig. 3 Tidal current characteristics^[9]

2.2.2 潮流椭圆

从潮流椭圆要素计算结果来看,这个海域潮流运动具有如下规律:

1) 半日潮分量中 M_2 是主要的

A 站 S_2 分潮流椭圆长轴为 M_2 的 24.84%,B 站 S_2 分潮流椭圆长轴为 M_2 的 31.25%,C 站 S_2 分潮流椭圆长轴为 M_2 的 24.48%。

2) 全日潮流和半日潮流相比,半日潮流是主要的

从表 2 中可以看出,A 站表中底层($O_1 + K_1$)值只占 M_2 的 9.6%,5.8%和 5.7%;B 站表中底层($O_1 + K_1$)值只占 M_2 的 25.1%,17.0%和 12.9%;C 站表中底层($O_1 + K_1$)值只占 M_2 的 35.0%,27.1%和 24.7%;

表 2 各站各层 M_2 、 K_1 、 O_1 分潮流长轴值 (cm)

Table 2 Major axis of tidal ellipses of M_2 , K_1 and O_1 at different layers of the three stations (cm)

潮分量	A 站			B 站			C 站		
	表层	中层	底层	表层	中层	底层	表层	中层	底层
M_2	40.5	43.1	29.9	25.5	28.2	21.0	20.6	21.8	17.4
K_1	2.9	1.8	1.0	2.3	3.7	2.2	2.2	4.4	3.3
O_1	1.0	0.7	0.7	4.1	1.1	0.5	5.0	1.5	1.0

3) 从东向西 M_2 潮流迅速减小

表层流速 A 站是 B 站的 1.6 倍,几乎是 C 站的 2.0 倍;对于表、中、底层平均值流速,A 站是 B 站的 1.5 倍,是 C 站的 1.9 倍,和表层流速特征基本一致。

4) 潮流基本是往复流性质

图 4 给出这 3 个观测站 M_2 的潮流椭圆,由图可以看出,潮流椭圆的短轴很短,除 B 站外潮流椭圆几乎退化成直线。潮流椭圆长轴和等深线平行。

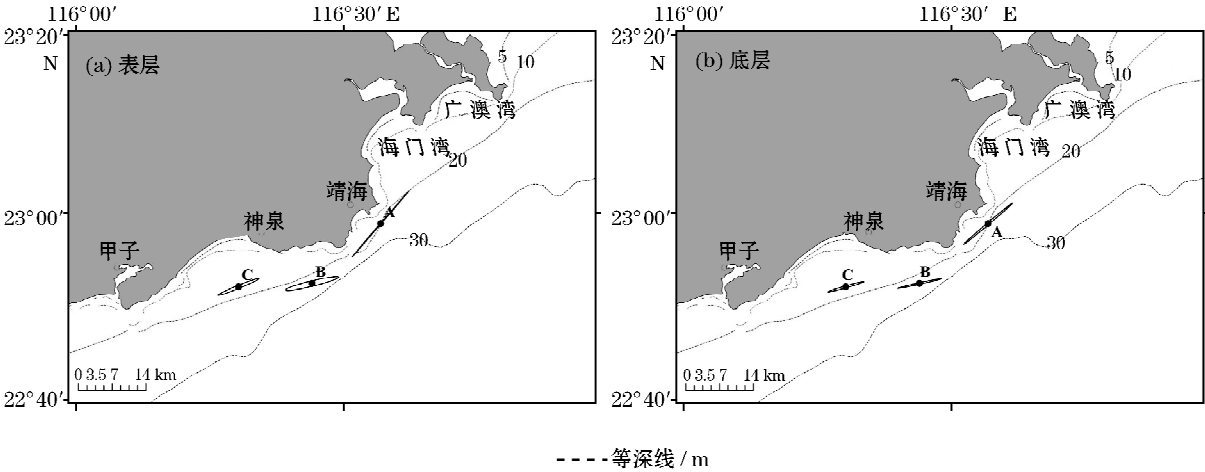


图 4 各站 M_2 潮流椭圆

Fig. 4 M_2 tidal current ellipses at each station

2.3 潮流与潮位关系

历史海流观测结果表明,那里的潮波显示驻波的性质,即最大潮流流速出现在半潮面附近。观测结果显示,上述结论并不完全正确。以 B 站中层海流观测为例(图 5),在 2012-04-22—05-14(农历初二—二十四)这一时段中,潮流与潮位对应有以下几个特征:

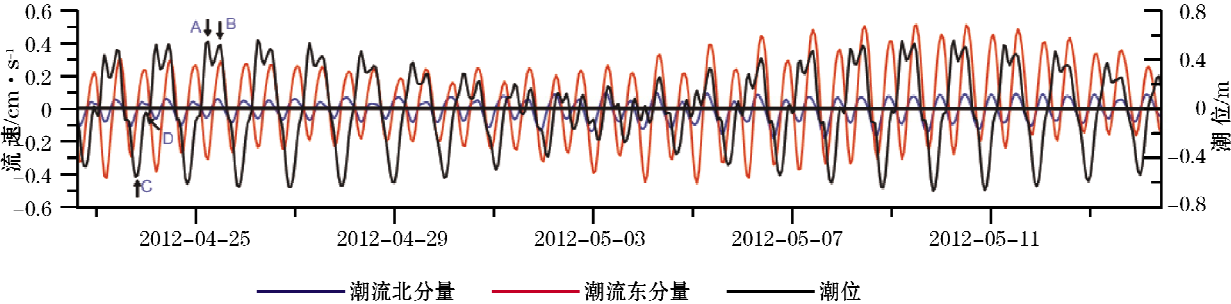


图 5 B 站中层潮流北、东分量与潮位的关系

Fig. 5 Relationship between the north/east component of the tidal current and tidal level of the middle layer at station B

1) 高潮位的两个峰值基本与以东分量最大正、负流速对应,如图 5 中 A,B 位置所示;对应于低潮(图 5 中 C 位置),最大流速一般出现在其约 3 h 之后。可见研究海域的潮波性质较为复杂,如果从高潮对应的最大流速来看,前进波的性质还是较为明显的,但是从低潮位与流速对应关系来看,又接近驻波运动性质。

2) 潮位最高值出现在农历初四—初七和十八—二十这两个时段。同样,东分量流速最大值也是出现在这个时段,而不是与渤、黄、东海半日潮流总是出现在农历初一—初二和十六—十七相一致。

3) 它也不具有典型的日潮海区潮位与潮流的对应关系(图 6)。

由图 6 可以看出,潮位最高是在农历初六—初九、二十一—二十三这个时段,但是这个时段的流速却是

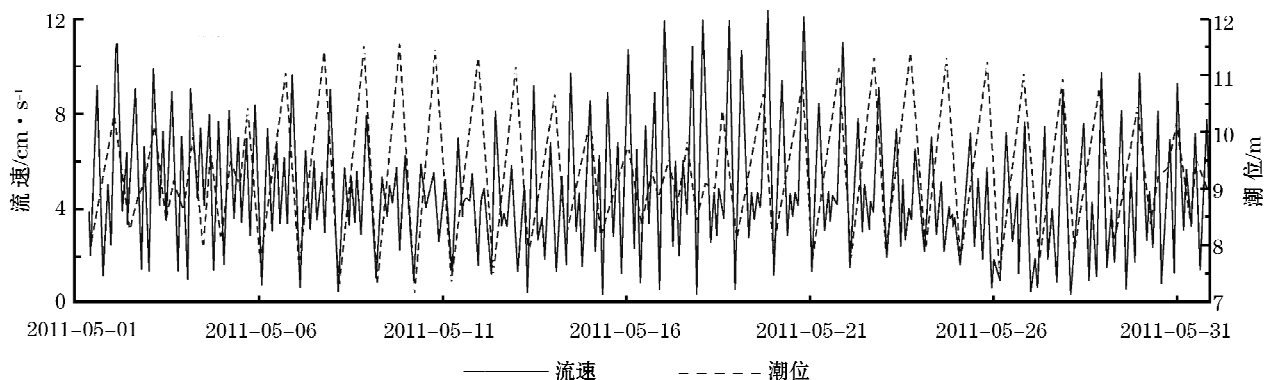


图 6 广西白龙尾潮位与流速对应关系

Fig. 6 Relationship between tidal level and tidal current at Bailongwei of Guangxi

4) 它具有 M_2 无潮点海域潮流与潮位对应关系。

例如,1976 年以前老黄河口附近 M_2 无潮点有些相像:首先,潮位变化是日潮型,潮型系数为 12.1;其次,潮流为典型半日潮流,潮流性质判别系数为 0.20~0.43;第三,潮差小,但是潮流流速大:黄河大港平均潮差 76 cm,但是最大流速接近 1 m/s;B 点观测平均潮差 84 cm,但是最大流速接近 0.5 m/s,是南海北部陆架区(除台湾海峡)潮流较强区域;第四,潮流流速强弱也与水位高低有关。例如,老黄河口 2009-04-27—05-03 测流结果:04-27—28 潮差 1.15 m,8 个测站垂直平均涨落潮流速分别为 0.39 和 0.42 m/s;05-02—03 潮差 0.92 m,8 个测站垂直平均涨落潮流速分别为 0.31 和 0.35 m/s;而观测的 B 点,也能够看出流速与潮位之间存在正比的关系。

2.4 潮流谱分析

1) A 站

图 7 是 A 站表、中、底层谱计算结果,可以看出:无论是 $f > 0$ (逆时针运动) 还是 $f < 0$ (顺时针运动),各层日分潮在谱图中均无明显的峰值出现,而在半日分潮和 1/4 分潮附近均有明显的谱峰。如果采用红噪声假设对各层海流谱峰进行显著性检验,其检验结果列于表 3 中:

(1) 不论是 $f > 0$ 还是 $f < 0$,各层日分潮 O_1, K_1 均未通过显著性检验;各层半日分潮 M_2 则均通过显著性检验;各层半日分潮 S_2 基本通过显著性检验,但在 $f < 0$ 分量上,中层并未通过显著性检验。

(2) 由于日分潮均为通过显著性检验,且半日分潮 M_2 分潮在各分潮中占据绝对的谱峰,本文以 M_2 分潮为参照,可以看出,其顺时针和逆时针分量相差很小。

(3) 不论是 $f > 0$ 还是 $f < 0$,表层和底层 1/4 分潮 M_4 也均通过显著性检验,但中层则无法通过。

(4) 此外,在中层的 $f > 0$ 分量上,6.8~8.0,12.3~13.0,59.5 和 69.4 d 等一些周期也通过显著性检验。

表 3 A 站采用红噪声假设对 layers 海流谱峰进行显著性检验

Table 3 Significance test for current spectrum peak of each layer based on red noise hypothesis at station A

分潮	周期 /d	$f>0$						$f<0$					
		表 层		中 层		底 层		表 层		中 层		底 层	
		$W(f_m)$	检 验	$W(f_m)$	检 验	$W(f_m)$	检 验	$W(f_m)$	检 验	$W(f_m)$	检 验	$W(f_m)$	检 验
O_1	25.8	0.1	未通过	2.4	未通过	1.1	通过	0.1	未通过	0.4	未通过	0.8	未通过
K_1	23.9	1.3	未通过	4.0	未通过	1.8	通过	2.0	未通过	0.8	未通过	1.4	未通过
M_2	12.4	261.0	通过	298.0	通过	514.0	通过	301.0	通过	218.0	通过	527.0	通过
S_2	12.0	23.0	通过	26.0	通过	27.1	通过	23.0	通过	12.0	未通过	23.6	通过
M_4	6.2	37.0	通过	11.8	未通过	23.3	通过	37.0	通过	10.6	未通过	21.2	通过

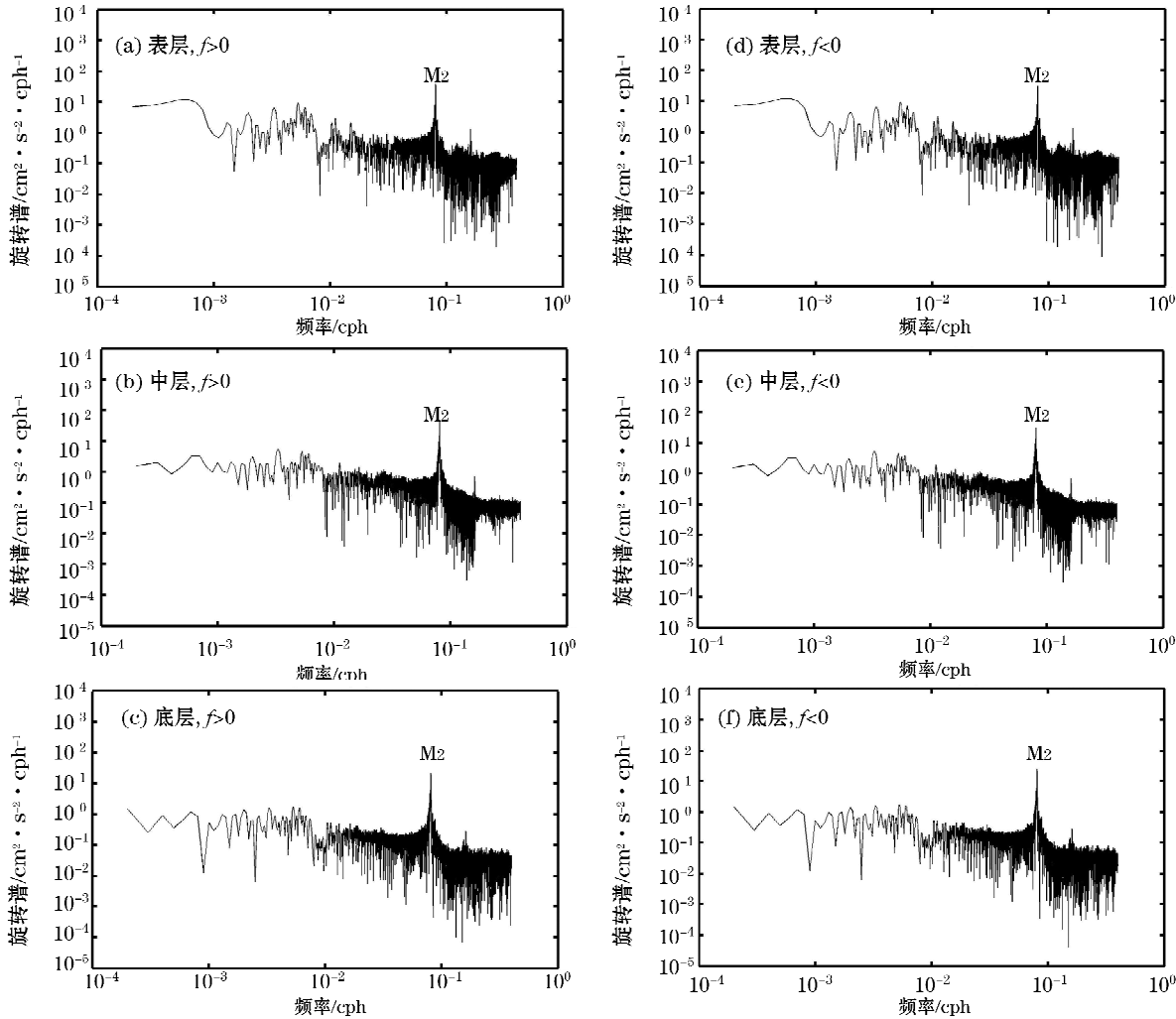


图 7 A 站表、中、底层潮流谱

Fig. 7 Tidal current spectrum of surface, middle and bottom layers at station A

2)B 站

图 8 是 B 站表、中、底层谱计算结果,可以看出:无论是 $f>0$ (逆时针运动)还是 $f<0$ (顺时针运动),各层日分潮在谱图中均无明显的峰值出现,在半月分潮和 1/4 分潮附近均有明显的谱峰。采用红噪声假设对 layers 海流谱峰进行显著性检验,其检验结果列于表 4 中:

(1)不论是 $f>0$ 还是 $f<0$,各层日分潮 O_1, K_1 均未通过显著性检验;各层半月分潮 M_2 和 S_2 则均通过显著性检验,其顺时针和逆时针分量相差很小。

(2)不论是 $f>0$ 还是 $f<0$, $1/4$ 浅水分潮 M_4 只有在底层才通过显著性检验,在表层和中层则无法通过。

(3)此外,表层在 6.8~7.7,52.1,59.5,69.4 和 83.3 d 等一些周期也通过显著性检验;中层在 6.8 和 6.9 d 通过了显著性检验;底层在 2.1~2.4,4~8,12~14,18~20 和 59.5 d 均有一系列周期通过显著性检验。

表 4 B 站采用红噪声假设对各层海流谱峰进行显著性检验

Table 4 Significance test for current spectrum peak of each layer based on red noise hypothesis at station B

分潮	周期 /d	$f>0$						$f<0$					
		表 层		中 层		底 层		表 层		中 层		底 层	
		$W(f_m)$	检验	$W(f_m)$	检验	$W(f_m)$	检验	$W(f_m)$	检验	$W(f_m)$	检验	$W(f_m)$	检验
O_1	25.8	7.1	未通过	0.5	未通过	-4.5	通过	6.0	未通过	0.5	未通过	-4.5	未通过
K_1	23.9	0.6	未通过	3.1	未通过	-2.4	通过	0.6	未通过	3.2	未通过	-2.4	未通过
M_2	12.4	158.0	通过	372.0	通过	187.8	通过	147.0	通过	373.0	通过	187.6	通过
S_2	12.0	20.8	通过	51.0	通过	25.6	通过	19.5	通过	51.1	通过	25.5	通过
M_4	6.2	11.0	未通过	15.0	未通过	20.3	通过	10.9	未通过	15.0	未通过	20.3	通过

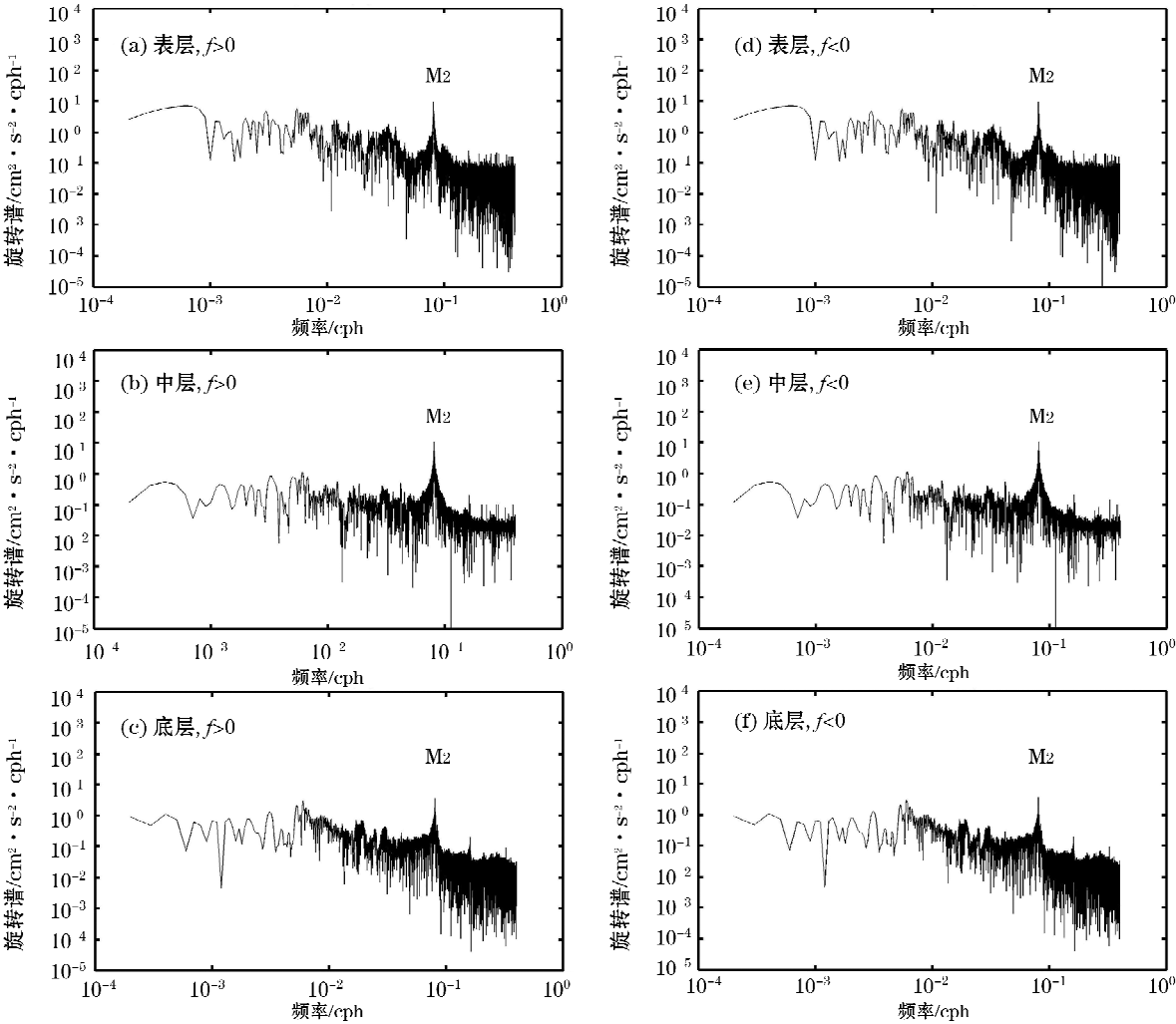


图 8 B 站表、中、底层潮流谱

Fig. 8 Tidal current spectrum of surface, middle and bottom layers at station B

3)C 站

图 9 是 C 站表、中、底层谱计算结果,可以看出:无论是 $f>0$ (逆时针运动)还是 $f<0$ (顺时针运动),各层日分潮在谱图中均无明显的峰值出现,在半月分潮和 $1/4$ 分潮附近均有明显的谱峰。采用红噪声假设对表层海流谱峰进行显著性检验,其检验结果列于表 5 中:

(1)不论是 $f > 0$ 还是 $f < 0$, 各层日分潮 O_1 、 K_1 均未通过显著性检验; 各层半日分潮 M_2 则均通过显著性检验; 中层和底层半日分潮 S_2 基本通过显著性检验, 但表层并未通过显著性检验。

(2)不论是 $f > 0$ 还是 $f < 0$, 各层 $1/4$ 分潮 M_4 均通过显著性检验。

(3)此外, 表层 59.5, 69.4 和 83.3 d 等一些长周期分潮也通过显著性检验; 中层在 29.8, 32.1, 34.7, 69.4 和 83.3 d 均通过显著性检验; 底层在长周期分潮则无法通过显著性校验。

表 5 C 站采用红噪声假设对各层海流谱峰进行显著性检验

Table 5 Significance test for current spectrum peak of each layer based on red noise hypothesis at station C

分潮	周期 /d	$f > 0$						$f < 0$					
		表 层		中 层		底 层		表 层		中 层		底 层	
		$W(f_m)$	检验	$W(f_m)$	检验	$W(f_m)$	检验	$W(f_m)$	检验	$W(f_m)$	检验	$W(f_m)$	检验
O_1	25.8	8.4	未通过	-3.2	未通过	1.7	通过	7.6	未通过	-3.2	未通过	1.7	未通过
K_1	23.9	4.3	未通过	-14.9	未通过	-17.0	通过	4.0	未通过	-14.9	未通过	-17.0	未通过
M_2	12.4	272.0	通过	351.0	通过	379.0	通过	268.0	通过	352.0	通过	359.0	通过
S_2	12.0	14.9	未通过	34.6	通过	36.4	通过	14.1	未通过	34.6	通过	36.4	通过
M_4	6.2	27.1	通过	25.2	通过	48.9	通过	26.1	通过	25.3	通过	48.9	通过

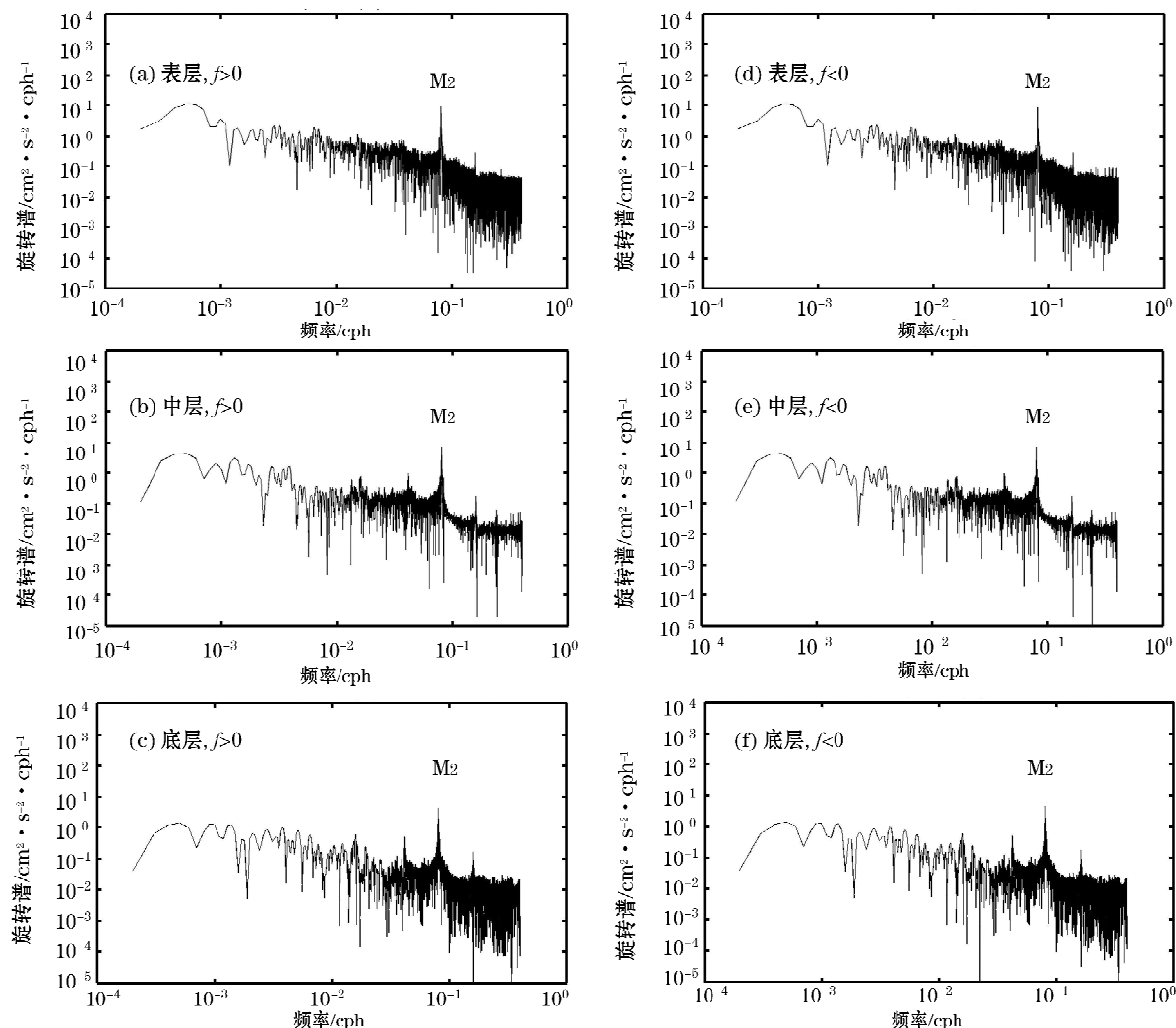


图 9 C 站表、中、底层潮流谱

Fig. 9 Tidal current spectrum of surface, middle and bottom layers at station C

3 结 论

本文在前人大量研究的基础上,通过对粤东甲子附近海域 3 个站长序列的潮位和海流观测资料进行研究,得出主要结论如下:

1) 甲子港附近潮位是日潮特征。俞慕耕^[1]认为,这是 M_2 分潮量值显著降低引起的。 M_2 分潮出现小值的原因是该海域附近存在一个退化到岸上的 M_2 无潮点,不过 Fang 等^[13]并没有认为 M_2 无潮点退化到岸上,而是在结构上退化成为由甲子到台湾岛西南端之间的略呈弧形的波节带 (nodal band),两种观点说法不同,实质都是台湾海峡潮波和吕宋海峡传来的 M_2 潮波在此处产生干涉的结果(振幅基本相等,位相基本相反);夏综万等^[8]认为, M_2 分潮潮汐弱小的一个重要原因,是由于 M_2 分潮在甲子外海分成两股,分别向东北和西南向传播,潮能辐散,导致 M_2 分潮潮高降低。我们认为,这个区域两个原因都同时存在,且无潮点是主要原因。其理由是:单一的 M_2 无潮点水域,潮差小,但是 M_2 分潮流强。例如,黄渤海 4 个 M_2 无潮点处,潮差小,潮流却是这个区域最大者。但是我们研究海域, M_2 分潮流却是从外围向 M_2 无潮点中心减少:A 站的 M_2 分潮流长轴 40.5 cm, B 站的 M_2 分潮流长轴降到 25.5 cm, C 站的 M_2 分潮流长轴只是 20.6 cm,只有 A 站的 1/2。其中固然有岬角地形的影响,但是, C 站与 B 站处于岬角同一侧,其可比性是非常强的。由此可见, M_2 分潮的辐散,削弱了 M_2 分潮流的能量;如果仅用 M_2 分潮流辐散来解释,那就无法说明潮位是日潮型、潮流是半日潮流型这种混合出现的特征:既然 M_2 分潮辐散,潮流能量降低,那么日潮流应该突出,实际表现却恰恰相反。

2) 潮汐调和分析表明, A 站潮型系数 2.96, B 站为 6.46, C 站为 7.92。说明前人研究的粤东日潮区,只集中在甲子向东这 40 km 范围内,不会超过 A 站,因为 A 站已经变成不规则日潮型了。

3) 浅水分潮流 M_4 也大多通过著性检验,且 M_4 分潮流能量超过 S_2 分潮流能量 1.2 倍。说明海底摩擦起到显著作用。

4) 研究海域的潮波较为复杂,驻波性质不明显,前进波性质较为突出。

5) 旋转谱计算结果表明, 3 个站的 M_2 分潮流、 M_4 分潮流的能量,对 $f > 0$ 和 $f < 0$ 都基本相当,表明这里 M_2 分潮潮波逆时针旋转和顺时针旋转出现的概率是相同的;然而,日潮分量 O_1 和 K_1 能量, A 站 $f > 0$ 是主要的, B, C 站 $f > 0$ 和 $f < 0$ 都基本相当。

参考文献(References):

- [1] YU M G. The primary discussion of tidal characteristics in South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1984, 6(3): 293-300. 俞慕耕. 南海潮汐特性的初步探讨[J]. 海洋学报, 1984, 6(3): 293-300.
- [2] FANG G. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1986, 4(1): 1-16.
- [3] FANG G H, CAO D M, HUANG Q Z. The numerical simulation for tides and tidal currents in South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1994, 16(4): 1-12. 方国洪, 曹德明, 黄企洲. 南海潮汐潮流的数值模拟[J]. 海洋学报, 1994, 16(4): 1-12.
- [4] CAO D M, FANG G H. A numerical model for tides and tidal currents in Northern South China Sea[J]. Tropical Oceanology, 1990, 9(2): 63-70. 曹德明, 方国洪. 南海北部潮汐潮流的数值模型[J]. 热带海洋, 1990, 9(2): 63-70.
- [5] CAO D M, FANG G H, HUANG Q Z, et al. Tidal regime in the nansha sea area and ITS adjacent southwest waters[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1997, 28(2): 198-208. 曹德明, 方国洪, 黄企洲, 等. 南沙及其西南海域的潮波系统[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(2): 198-208.
- [6] ZHU J, HU J Y, ZHANG W Z, et al. Numerical study on tides in the Taiwan Strait and its adjacent areas[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2007, 26(2): 165-176. 朱佳, 胡建宇, 张文舟, 等. 台湾海峡及其邻近海域潮汐数值计算[J]. 台湾海峡, 2007, 26(2): 165-176.
- [7] XIA Z W. Ocean tidal wave of Taylor[M]. Beijing: Ocean Press, 2011. 夏综万. 海洋潮波的 Taylor 问题[M]. 北京: 海洋出版社, 2011.

- [8] XIA Z W, LIAO S Z, FENG Y Q. Traveling of tidal wave in the north part of the South China Sea and the tidal energy divergence appearing in the area off Jiazi Station[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(1): 1-8. 夏综万, 廖世智, 冯砚青, 等. 粤东甲子海域潮波异常和南海北部潮波的传播[J]. *海洋学报*, 2013, 35(1): 1-8.
- [9] YANG W K, YIN B S, YANG D Z, et al. Application of FVCOM in numerical simulation of tide and tidal currents in the northern South China Sea[J]. *Marine sciences*, 2013, 37(9): 10-19. 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.
- [10] RICH P, BOB B, STEVE L. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. *Computers and Geosciences*, 2002, 28(8): 929-937.
- [11] CHEN S J, MA J R. Marine random data analysis: the principle, method and application[M]. Beijing: Ocean Press, 2000. 陈上及, 马继瑞. 海洋数据处理分析方法及其应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2000.
- [12] FANG G H, ZHENG W Z, CHEN Z Y, et al. Analysis and prediction of tides and tidal currents[M]. Beijing: Ocean Press, 1986. 方国洪, 郑文振, 陈宗镛, 等. 潮汐和潮流的分析与预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
- [13] FANG G H, KWOK Y K, YU K J, 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.

Tidal Current Characteristics in the Sea Area Near Jiazi in East Guangdong

WU Lun-yu¹, ZHENG Bin-xin^{2,3}, ZENG Zhi³, HE Jia³, CHEN Zhi-jie³

(1. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China*)

(2. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China*)

(3. *The Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen 361005, China*)

Abstract: The characteristics of the tide and the tidal current at three stations to the east of Jiazi are studied based on measurements from April to July, 2004 and methods of harmonic analysis and rotary spectrum. Results show that: 1) The typical diurnal tide formed at Jiazi port and its east waters is due to the existence of M_2 tidal amphidromic point and the divergence of the tidal energy in the waters off Jiazi; 2) Although the tide is diurnal, the tidal current is regular semidiurnal; 3) Tidal wave in the concerned area is relatively complicated where the characteristic of progressive wave properties is more obvious than that of standing wave; 4) In analogy with the M_2 tidal amphidromic point in Yellow River mouth, a M_2 tidal amphidromic point degenerated on land is considered possible there.

Key words: East Guangdong; waters adjacent to Jiazi; tidal current; tidal current spectrum analysis

Received: November 13, 2014