

北部湾北部白龙尾附近海域潮流谱分析*

郑斌鑫^{1,2}, 侍茂崇³, 廖康明², 王璐³, 何佳²

(1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 国家海洋局 第三海洋研究所, 福建 厦门 361005;
3. 中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266003)

摘要:用锚定、座底声学多普勒海流剖面仪(ADCP),对白龙尾开阔水域进行为期 1 a 的分层海流观测,通过最大熵谱分析方法,得出结论:1)日分潮 O_1 , K_1 和半日分潮 M_2 , S_2 是白龙尾主要分潮流,半日潮流能量大于日潮流能量;2)在半日潮和全日潮分量中,逆时针运动($f > 0$)是主要的,并从潮波旋转形态方面给予解释;3)周期为 6 h 左右的浅水分潮,在底层通过显著性检验,表明近底摩擦是浅水分潮生成的主要机制;4)在 $f > 0$ 情况下,周期超过 3 d 的长周期运动(余流)有 3 个,其中 8.3 d 的长周期运动,在表、中和底层都通过显著性检验,5.2 d 在中层和底层通过显著性检验,认为主要是潮余流引起的。

关键词:北部湾;白龙尾;谱分析;日潮流;半日潮流

中图分类号: P731.23

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2015)01-0000-10

广西海岸带位于我国沿海的西南端,南临北部湾,西起中越界河北仑河口,东至两广界湾英罗港口,海岸线总长 1 595 km,沿海属半封闭性的大陆架海域,自西向东有珍珠港、防城港、钦州湾、大风江口、廉州湾和铁山港等^[1]。对于广西沿岸及北部湾的水动力特征很多学者进行了大量的调查研究。20 世纪 60 年代初,中越合作开展北部湾海洋综合调查。在 20 世纪 60~70 年代,中国科学院南海海洋研究所等投放了大量漂流瓶,用来研究北部湾的表层海流状况。20 世纪 80 年代的“全国海岸带和海涂资源综合调查”以及 1988—1995 年期间的“全国海岛资源综合调查”等^[2-3],对北部湾环流和广西近岸部分的水动力有了进一步认识。在调查基础上,不少学者专门对北部湾和广西沿岸的潮汐、潮流进行分析和数值研究^[4-14]。这些研究对北部湾环流和广西沿岸流季节性特点,特别是对夏季环流结构却有着不同的认识。传统上认为北部湾受季风控制,冬季为逆时针型环流:海水从湾口东部的莺歌海沿海南岛西海岸向北流,到达浅水后主流转向西,最后沿广西、越南沿岸向南流出;夏季为顺时针型环流:外海水由越南沿岸进入湾内,沿岸北上,在广西沿岸由西向东流,靠近浅水后再分成两支,一支向东穿过琼州海峡,进入粤西海域,而另一支沿海南岛西海岸向南流出。后来许多研究表明^[6-11],北部湾常年都是气旋涡占主导地位。潮流是广西沿岸最为重要的水动力现象之一,而余流则对水体的运移和交换,对海水中悬浮及可溶性物质的稀释、扩散和输运起着重要的作用。过去使用的研究资料一般基于周日连续海流观测结果,缺乏对长序列海流资料的研究,用这些资料分析潮流和余流,有较多的偶然性和误差,不足以反映水动力长时间尺度的变化。另外,之前研究大多对不同季风下的表层流进行探讨,很少对不同深度的流动差异进行分析。本文主要对广西沿岸白龙尾附近一年连续的流速和流向垂向资料进行分析,了解其潮流、余流运动规律,从而加深对北部湾环流及广西沿岸流季节性垂向流动的认识,可对了解污染物的扩散路径,预防和治理污染起到一定的指导作用。

* 收稿日期:2014-07-24

资助项目:福建省自然科学基金——潮动力环境条件下波流输沙数值计算模式研究(2011J05130)

作者简介:郑斌鑫(1982-),男,福建福州人,博士研究生,工程师,主要从事物理海洋方面研究。E-mail:zhengbinxin@tio.org.cn

* 通讯作者:侍茂崇(1935-),男,江苏宿迁人,教授,主要从事物理海洋方面研究。E-mail:mcshi@ouc.edu.cn

1 研究与方法

1.1 资料来源

调查站位 S1 站位于广西防城港市白龙半岛南部的开阔水域(图 1)。东、南、西三面环海,海图水深约为 8 m。

观测使用的仪器为 ADCP 声学多普勒海流剖面仪。其中流速和流向采用座底方式向上进行观测,观测层间距为 0.5 m。仪器每 1 min 发射 60 个声脉冲,经平均得到整个剖面海流数据。我们从剖面数据中挑选表、中、底三层数据进行分析。这里的表层是指水面下 1 m 处,底层是指距海底约 1.5 m 处,中层是指相对于表和底层中间的位置。观测时间为 2011-05-01—2012-04-30,历时 1 a。

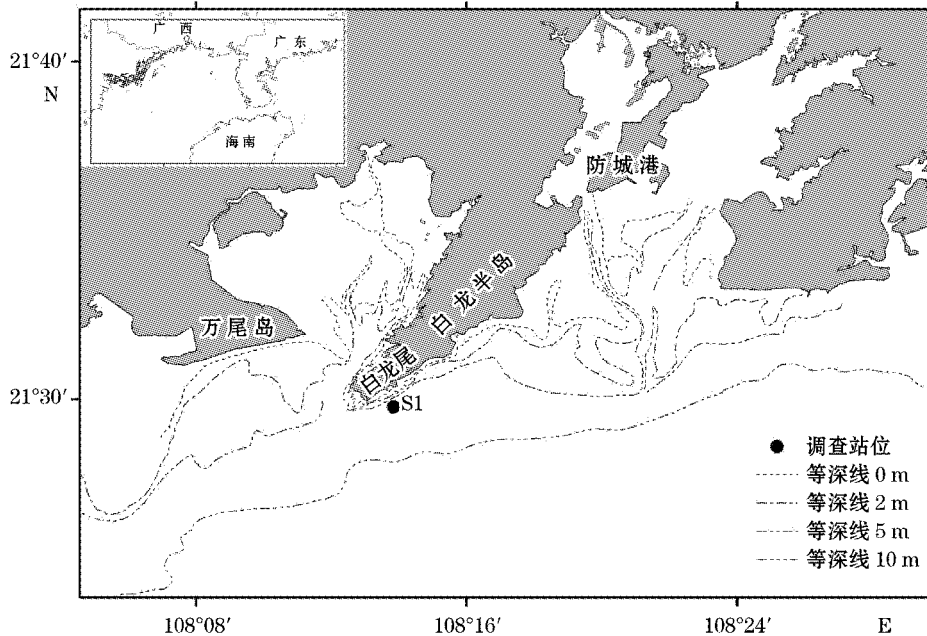


图 1 调查站位图

Fig. 1 Location of observation station

1.2 处理方法

潮流旋转谱分析:旋转谱估计较分量谱估计有明显的优越性^[15],在海洋学研究中有广泛的应用。我们采用最大熵方法计算海流旋转功率谱,取自由度 $\nu=2$,对研究锚定站海流随时间变化的特性进行分析研究。

2 分析结果

2.1 表层海流谱分析

图 2 为表层谱计算结果,从图中可知:无论是 $f>0$ (逆时针运动)或 $f<0$ (顺时针运动),日潮、半日潮和 $1/3$ 、 $1/4$ 诸分潮在谱图中都有明显表现。

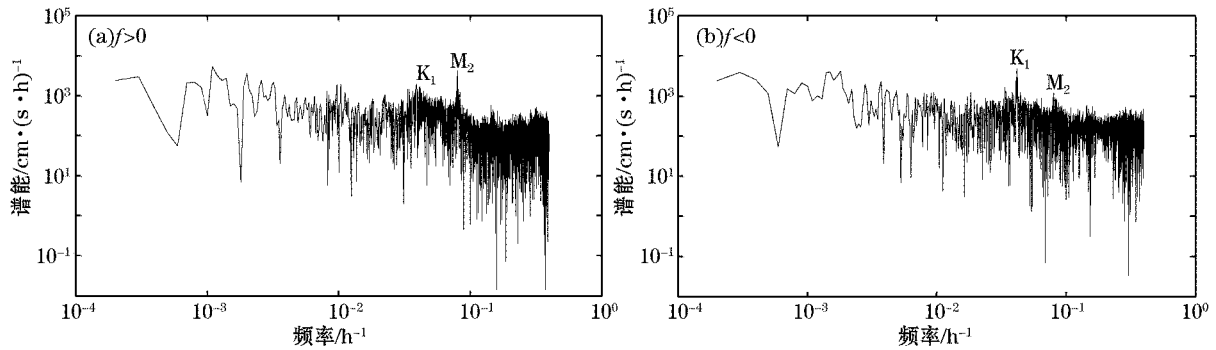


图 2 表层潮流谱

Fig. 2 Rotary spectra of tidal current of surface layer

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 1(表中 $W(f_m)$ 表示谱能量)。由表 1 可以看出其存在如下显著谱峰周期:

1) 当 $f > 0$ 时,日分潮 K_1 (周期约为 23.9 h) 通过显著性检验,半日潮 M_2 (周期约为 12.4 h), S_2 (周期约为 12 h) 通过显著性检验,半日潮谱峰高于全日潮谱峰; $f < 0$ 时,主要全日分潮和主要半日分潮未通过显著性检验。

2) 在半日潮和全日潮分量中,逆时针分量是主要的:日分潮 K_1 的顺时针能谱峰值只有逆时针的 38.8%; 半日潮 M_2, S_2 顺时针能谱峰值只有逆时针的 6.9%, 52.2%。

3) 周期为 8.3, 6.2 h 的浅水分潮也有表现,但是未通过显著性检验。

4) 周期超过 24 h 的,特别是 3 d 以上的也有明显表现,其中周期为 8.3 d 的在 $f > 0$ 时通过检验; 11.5 d 的则在 $f < 0$ 时通过显著性检验。

表 1 采用红噪声假设对表层海流谱峰进行显著性检验

Table 1 Significance test of spectrum crest of tidal current of surface layer under hypothesis of red noise

$f > 0$			$f < 0$		
周 期/h	$W(f_m)$	检 验	周 期/h	$W(f_m)$	检 验
23.9	26.078 9	通 过	23.9	10.113 6	未通过
25.8	8.946 0	未通过	25.8	5.870 0	未通过
12.4	91.479 1	通 过	12.4	6.279 2	未通过
12.0	23.609 8	通 过	12.0	12.325 2	未通过
8.3	3.291 4	未通过	8.3	2.812 3	未通过
6.2	1.264 7	未通过	6.2	4.113 9	未通过
4.1	5.097 9	未通过	4.1	4.630 6	未通过
6.1	5.332 2	未通过	6.1	2.933 4	未通过
81.0(3.4 d)	9.711 3	未通过	92.0(3.8 d)	2.995 3	未通过
124.0(5.2 d)	15.088 9	未通过	138.0(5.8 d)	7.186 5	未通过
200.0(8.3 d)	40.101 0	通 过	276.0(11.5 d)	25.208 0	通 过

2.2 中层海流谱分析

图 3 是中层海流谱计算结果,从图中可以看出:无论是 $f > 0$ 或 $f < 0$,日潮、半日潮和 1/3、1/4 诸潮分量在谱图中都有明显表现。

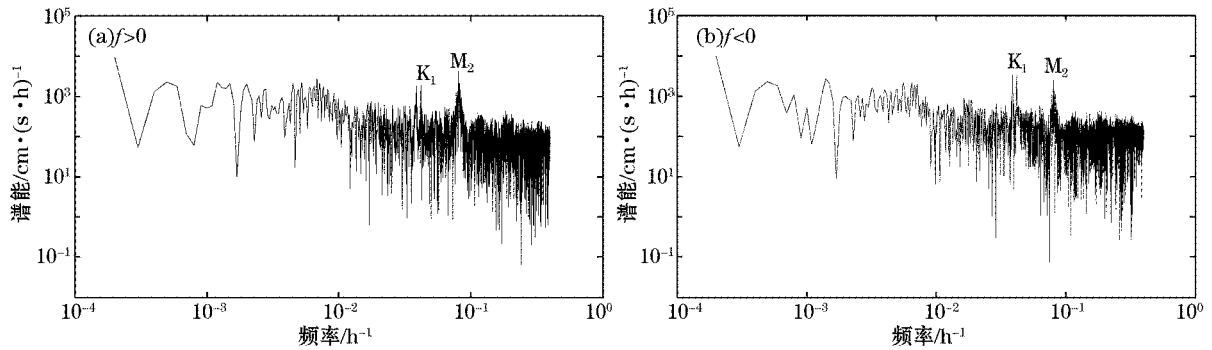


图 3 中层潮流谱

Fig. 3 Rotary spectra of tidal current of middle layer

采用红噪声假设对中层海流谱峰进行显著性检验,其检验结果列于表 2 中。从表 2 中可以看出如下规律:

1) 当 $f > 0$ 时,日分潮 K_1 (周期约为 23.9 h) 和 O_1 (周期约为 25.8 h) 通过显著性检验,半日潮 M_2 (周期约为 12.4 h) 和 S_2 (周期约为 12 h) 通过显著性检验,半日潮谱峰高于全日潮谱峰; $f < 0$ 时,只有 O_1 分潮和 M_2 分潮通过显著性检验,全日分潮和半日分潮谱峰接近。

2) 在半日潮和全日潮分量中,逆时针分量是主要的:日分潮 K_1, O_1 的顺时针能谱峰值分别只有逆时针的 17.4%, 52.0%; 半日潮 M_2, S_2 顺时针能谱峰值分别只有逆时针的 13.4%, 19.8%。

3) 周期为 8.3, 4.1 h 的浅水分潮也有表现,但是未通过显著性检验。

4) 周期超过 24 h 的,特别是 3 d 以上的也有明显表现,其中周期为 5.2, 8.3 d 的在 $f > 0$ 时通过显著性检验。

表 2 采用红噪声假设对中层海流谱峰进行显著性检验

Table 2 Significance test of spectrum crest of tidal current of middle layer under hypothesis of red noise

$f > 0$			$f < 0$		
周期/h	$W(f_m)$	检验	周期/h	$W(f_m)$	检验
23.9	73.426 4	通过	23.9	13.035 2	未通过
25.8	40.213 3	通过	25.8	20.917 6	通过
12.4	182.651 4	通过	12.4	24.509 7	通过
12.0	35.212 8	通过	12.0	7.042 6	未通过
8.3	11.038 8	未通过	8.3	7.269 1	未通过
6.2	7.680 7	未通过	6.2	5.173 0	未通过
4.1	11.144 5	未通过	4.1	15.418 9	未通过
6.1	10.729 5	未通过	6.1	7.546 0	未通过
81.0(3.4 d)	13.099 5	未通过	92.0(3.8 d)	1.577 7	未通过
124.0(5.2 d)	49.246 5	通过	138.0(5.8 d)	3.267 3	未通过
200.0(8.3 d)	24.511 9	通过	276.0(11.5 d)	3.798 4	未通过

2.3 底层海流谱分析

图 4 为底层谱计算结果,从图中可知:无论是 $f > 0$ 或 $f < 0$,日潮、半日潮和 1/3、1/4 诸潮分量在谱图中都有明显表现。

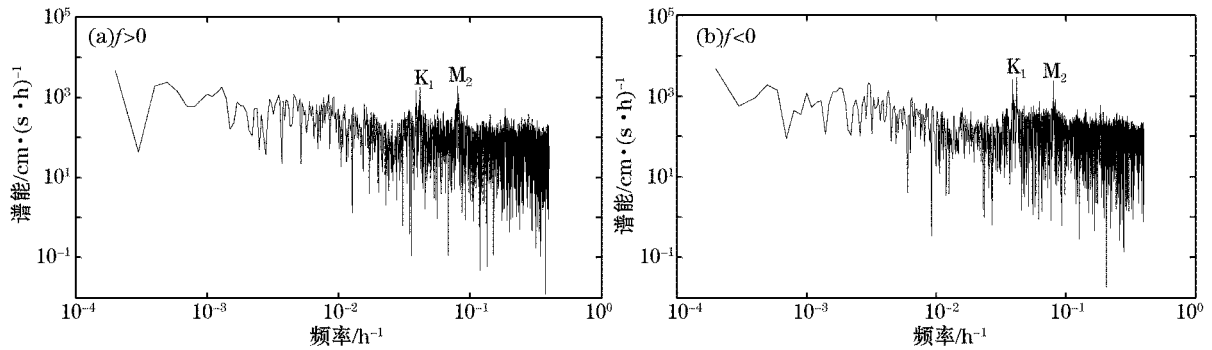


图 4 底层潮流谱

Fig. 4 Rotary spectra of tidal current of bottom layer

采用红噪声假设对底层海流谱峰进行显著性检验,其检验结果列于表 3 中。从表 3 中可以看出如下规律:

1) 当 $f > 0$ 时,日分潮 K_1 (周期约为 23.9 h) 和 O_1 (周期约为 25.8 h) 通过显著性检验,半日潮 M_2 (周期约为 12.4 h) 和 S_2 (周期约为 12 h) 通过显著性检验,半日潮谱峰高于全日潮谱峰; $f < 0$ 时,只有 K_1 分潮和 M_2 分潮通过显著性检验,全日分潮和半日分潮谱峰接近。

2) 在半日潮和全日潮分量中,逆时针分量是主要的:日分潮 K_1, O_1 的顺时针能谱峰值分别只有逆时针的 3.7%, 5.4%; 半日潮 M_2, S_2 顺时针能谱峰值分别只有逆时针的 5.1%, 5.0%。

3) 周期为 8.3, 6.2, 6.1 和 4.1 h 的浅水分潮也有表现,只有在 $f > 0$ 时,6 h 附近周期通过显著性检验。

4) 周期超过 24 h 的,特别是 3 d 以上的也有明显表现,其中周期为 3.4, 5.2 和 8.3 d 的在 $f < 0$ 时通过显著性检验。

表 3 采用红噪声假设对底层海流谱峰进行显著性检验

Table 3 Significance test of spectrum crest of tidal current of bottom layer under hypothesis of red noise

$f > 0$			$f < 0$		
周期/h	$W(f_m)$	检验	周期/h	$W(f_m)$	检验
23.9	282.326 6	通过	23.9	10.511 3	未通过
25.8	244.489 3	通过	25.8	13.113 3	未通过
12.4	624.823 7	通过	12.4	31.911 6	通过
12.0	165.389 6	通过	12.0	8.162 1	未通过
8.3	16.940 9	未通过	8.3	3.534 5	未通过
6.2	34.401 9	通过	6.2	6.141 4	未通过
4.1	16.636 7	未通过	4.1	5.837 7	未通过
6.1	36.045 4	通过	6.1	6.520 7	未通过
81.0(3.4 d)	20.576 1	通过	92.0(3.8 d)	0.978 7	未通过
124.0(5.2 d)	50.723 5	通过	138.0(5.8 d)	2.666 7	未通过
200.0(8.3 d)	30.163 5	通过	276.0(11.5 d)	0.376 2	未通过

3 讨论

3.1 潮流类型

潮流类型判别因子,可以用两个主要日潮分量 W_{O_1}, W_{K_1} 之和除以半日分潮 W_{M_2} 之和的比值来判别,即:

$$(W_{O_1} + W_{K_1}) / W_{M_2} = A \quad (1)$$

式中, $A \leq 0.5$, 属正规半日潮流型; $0.5 < A \leq 2.0$, 属不正规半日潮流型; $2.0 < A \leq 4.0$, 属不正规日潮流型; A

>4.0,属正规日潮流型。

根据一年潮流观测资料,计算的潮流调和常数为: $W_{O_1}=4.15\text{ cm/s}$, $W_{K_1}=5.84\text{ cm/s}$, $W_{M_2}=10.0\text{ cm/s}$,由此就算得到 $A\approx 1.00$,属不正规半日潮型。而广西沿海从东向西:涠洲岛、北海、防城港、东兴海关码头的潮汐类型判别因子依次为:5.34,4.76,5.54,5.72,白龙尾介于防城港和东兴中间,其潮汐类型判别系数5.63,由此可见,无一例外地都属于典型日潮类型。白龙尾海域潮汐与潮流类型是不一致的。

潮流与潮位类型不一致也表现在其他海区:广西最东部的铁山港,潮流特征判别系数 A 值为 1.45~2.89^[16],其中位于航道和深槽的大部分区域 A 值为 2.03~2.89,属于不规则日潮流,而浅水区 A 值大都在 1.45~2.00,属于不规则半日潮流。北海港潮流判别系数 A 值在 1.78~2.89 变化^[17],钦州湾的 A 值在 1.58~2.97 变化,说明那里是不规则半日潮流和不规则日潮流海域。

以白龙尾 2011-05 中层流向和潮位的变化过程为例,可以看出潮流和潮位类型的不同:在 1 个月的时间历程中,潮位是日潮,而潮流基本是半日潮;在 1 个月中,出现 60 个潮流变化周期,但振幅不等(图 5)。

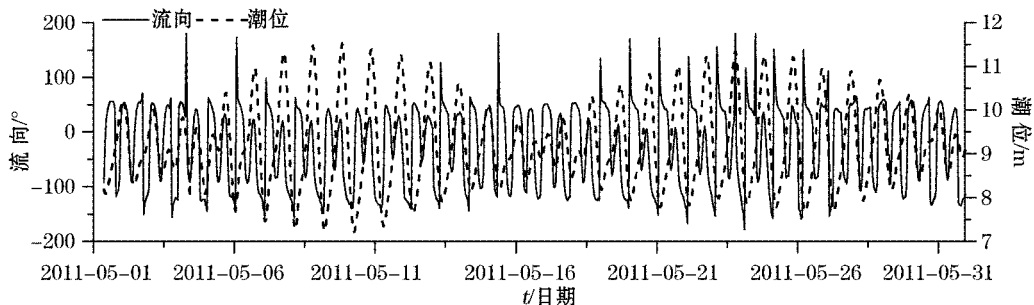


图 5 白龙尾中层流向和潮位的变化曲线

Fig. 5 Variations of tidal current direction and amplitude of middle layer

3.2 流速与潮位的对应关系

潮流最大流速不对应最大潮位,恰恰相反,最小流速对应最大潮差,最大流速对应最小潮差,这是日潮海域潮位与潮流的典型特征(图 6,以 2011-05 为例)。在半日潮海域,潮流流速与潮差基本呈正比关系。

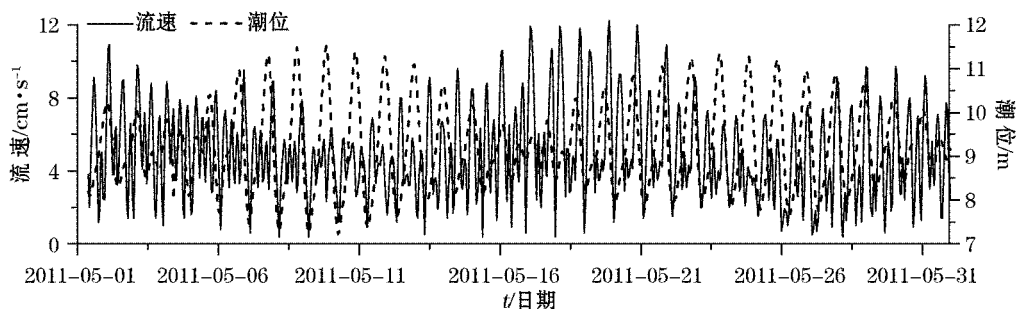


图 6 白龙尾中层潮流流速和潮位的变化曲线

Fig. 6 Variations of tidal current velocity and amplitude of middle layer

3.3 潮流主要运动特征

从表、中、底层潮流谱分析结果得知:

K_1 日潮流分量能量:相应表、中、底层, $f>0$ 时分别为 $f<0$ 的 2.6 倍,5.6 倍和 26.9 倍。 O_1 分潮流能量:相应表、中、底层, $f>0$ 时也分别为 $f<0$ 的 1.5 倍,1.9 倍和 18.6 倍。

半日分潮流 M_2, S_2 也是如此:相应表、中、底层, $f>0$ 时 M_2 分潮流能量分别为 $f<0$ 的 14.6 倍,7.5 倍

和 19.6 倍;相应表、中、底层, $f > 0$ 时 S_2 分潮流能量分别为 $f < 0$ 的 1.9 倍, 5.0 倍和 20.3 倍。

数值计算结果^[18-19, 24-25]表明,日潮(K_1)和半日潮(M_2)潮波在广西沿海也是呈逆时针运动的(图 7, 图 8),潮波先到达北海,然后向西传播。

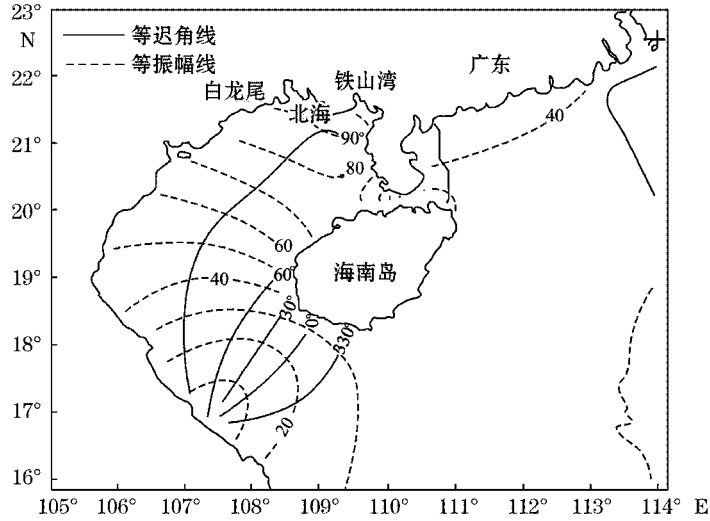


图 7 K_1 分潮同潮时图^[18-19]

Fig. 7 Co-tidal chart of K_1 ^[18-19]

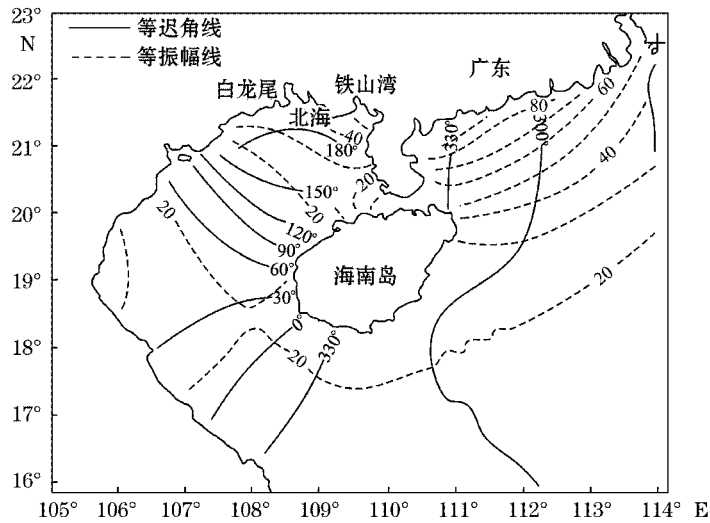


图 8 M_2 分潮同潮时图^[24-25]

Fig. 8 Co-tidal chart of M_2 ^[24-25]

实测结果也证明上述结果可信(表 4):

1) 白龙尾日分潮(K_1, O_1, P_1)的迟角比北海要大约 2° , 半日分潮 M_2 几乎同时, 而 S_2 的迟角比北海要大 2° 左右。这表明, 潮波先到北海, 然后向西传至白龙尾。

2) 在传播过程中, 受海底摩擦的影响, 能量衰减, 潮汐振幅减少, 其中日潮振幅减少较少, 只有 $2\sim 4$ cm, 而半日潮 M_2 振幅减少较多, 接近 11 cm。

表 4 白龙尾与北海东部主要日分潮和半日分潮振幅和迟角对比

Table 4 Comparison of tidal phase and amplitude of major diurnal and semi-diurnal constituents between Bailongwei and the region east of Beihai

分潮	北海		白龙尾	
	振幅/cm	迟角/°	振幅/cm	迟角/°
K_1	90.48	96.20	86.62	98.59
O_1	98.57	33.26	94.87	35.38
P_1	28.02	89.26	26.94	91.05
M_2	45.60	178.17	34.94	178.82
S_2	11.13	236.83	8.41	239.25

3.4 海底摩擦效应

表 5 中给出表、中、底层浅水分潮 $W(f_m)$ 值及其显著性检验结果。由表中可以看出,越接近海底 $W(f_m)$ 值越大,到了底层,周期为 6.2 和 6.1 h 的浅水分潮,均通过显著性检验。说明海底摩擦是浅水分潮生成的主要机制。

表 5 浅水分潮 $W(f_m)$ 的变化和显著性检验Table 5 Significance test of $W(f_m)$ of shallow water constituents

浅水分潮 周期/h	表层		中层		底层	
	$W(f_m)$	检验	$W(f_m)$	检验	$W(f_m)$	检验
8.3	3.291 4	未通过	11.038 8	未通过	16.940 9	未通过
6.2	1.264 7	未通过	7.680 7	未通过	34.401 9	通过
4.1	5.097 9	未通过	11.144 5	未通过	16.636 7	未通过
6.1	5.332 2	未通过	10.729 5	未通过	36.045 4	通过

3.5 余流

全年余流各向出现频率如图 9 所示。由图 9 可以看出:从表层到底层,东向流年出现频率逐渐增大,西向流年出现频率则逐渐减小。表、中层以 WSW 向年出现频率最大,分别为 25.4% 和 23.5%;底层则为 NE 向,年出现频率为 25.4%,可能是补偿性效应引起的。

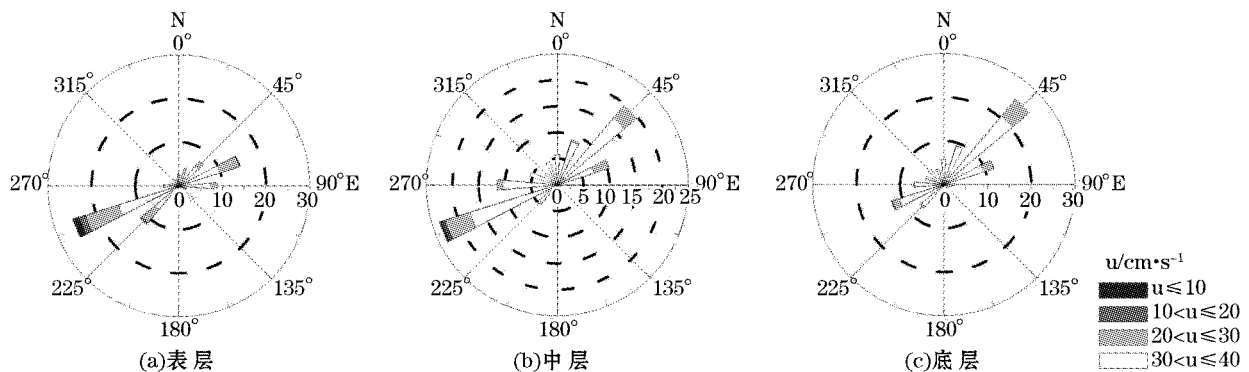


图 9 全年余流各向出现频率

Fig. 9 Rose diagrams of residual current

大于 3 d 的长周期(余流),通过显著性检验的都是 $f > 0$ 的条件下发生的,在 $f > 0$ 情况下,周期超过 3 d 以上的长周期运动(余流)有 3 个。其中 8.3 d 的长周期运动,在表中底层都通过显著性检验(表 6)。5.2 d 在中、底层都通过显著性检验,3.4 d 只在底层通过显著性检验。

表 6 余流 $W(f_m)$ 的变化和显著性检验Table 6 Significance test of $W(f_m)$ of residual currents

余流周期/d	表 层		中 层		底 层	
	$W(f_m)$	检 验	$W(f_m)$	检 验	$W(f_m)$	检 验
3.4	9.71	未通过	13.10	未通过	20.58	通 过
5.2	15.09	未通过	49.25	通 过	50.72	通 过
8.3	40.10	通 过	24.51	通 过	30.16	通 过

研究余流产生机制是比较困难的。我们对风做过小波分析,没有发现接近 8.3 d 的周期,也没有发现与 3.4,5.2 d 相近的周期。因此,8.3 d 周期的余流产生机制和天气过程特别是风不相关。我们认为,最有可能是和潮流本身引起的潮致余流有关。从图 5 可以看出,5 月中层潮流流速明显具有 3.4,5.2 和 8.3 d 的变化周期,特别是 8.3 d 变化周期表现更为明显。

4 结 论

本文在广西沿海第一次使用高精度的声学多普勒海流剖面仪,对白龙尾开阔水域进行为期一年的分层海流观测,通过谱分析方法,给出如下结论:

1) 日分潮 O_1 , K_1 和半日分潮 M_2 , S_2 是白龙尾主要分潮流。半日潮流的能量甚至大于日潮流能量。

2) 在半日潮流和全日潮流分量中,逆时针分量是主要的。这可能与潮波旋转形态有关。

3) 只有到了底层,周期为 6 h 左右的浅水分潮,通过显著性检验。表明海底摩擦是浅水分潮生成的主要机制。

4) 在 $f > 0$ 情况下,周期超过 3 d 以上的长周期运动(余流)有 3 种。其中 8.3 d 的长周期运动,在表、中、底层都通过显著性检验。5.2 d 在中、底层都通过显著性检验。根据我们研究结果,认为该现象和天气变化关系不大,可能主要是由潮余流引起的。

参考文献(References):

- [1] The editorial committee for records of bays in China. Records of bays in China; Volume 12[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993. 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志:第十二分册[M]. 北京:海洋出版社,1993.
- [2] The editorial committee for state coastal zone and tidal wetland resources investigation report. State coastal zone and tidal wetland resources investigation report[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991. 《全国海岸带和海涂资源综合调查报告》编委会. 全国海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京:海洋出版社,1991.
- [3] Hainan island resources comprehensive investigation brigade. Hainan Island resources comprehensive investigation report[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991. 海南省海岛资源综合调查大队. 海南省海岛资源综合调查报告[M]. 北京:海洋出版社,1991.
- [4] LI S H. A numerical modeling of tidal waves in the Beibu Gulf[J]. Tropic Oceanology, 1986, 5(3): 7-14. 李树华. 北部湾潮汐的数值模拟试验[J]. 热带海洋, 1986, 5(3): 7-14.
- [5] ZHONG H L. Analysis of circulations in northern part of Beibu Gulf of South China Sea in spring[J]. Marine Science Bulletin, 1995, 14(1): 81-85. 钟欢良. 北部湾北部春季环流分析[J]. 海洋通报, 1995, 14(1): 81-85.
- [6] YIN Z B, CHEN M J, LI S H, et al. Coefficient tests on the tidal simulation of the Beibu Gulf[J]. Guangxi Sciences, 1996, 3(2): 71-74. 殷忠斌, 陈明剑, 李树华, 等. 北部湾潮汐数值计算参数的试验[J]. 广西科学, 1996, 3(2): 71-74.
- [7] LIU A J, ZHANG Y T. Numerical prediction and analysis of the tide in Beibu Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1997, 28(6): 640-645. 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.
- [8] SHI M C, CHEN C H, HUANG F, et al. Characteristics of tidal current and residual current in the Qiongzhou Straits in period between end of winter and beginning of spring[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1998, 20(1): 1-4. 侍茂崇, 陈春华, 黄方, 等. 琼州海峡冬末春初潮余流场特征[J]. 海洋学报, 1998, 20(1): 1-4.
- [9] SHUN H L, HUANG W M, ZHAO J S. Three-dimensional numerical simulation of tide-induced, wind-driven and thermohaline residual currents in the Beibu Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(5): 561-568. 孙洪亮, 黄卫民, 赵俊生. 北部湾潮致、风生和热盐余

- 流的三维数值计算[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(5): 561-568.
- [10] XIA H Y, LI S H, SHI M C. A 3-d numerical simulation of wind-driven currents in the Beibu Gulf[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(6): 11-23. 夏华永, 李树华, 侍茂崇. 北部湾三维风生流及密度流模拟[J]. 海洋学报, 2001, 23(6): 11-23.
- [11] CHEN D S, CHEN B, YAN J H, et al. The seasonal variation characteristics of residual currents in the Qiongzhou Strait[J]. Oceanologia Etlimnologia Sinica, 2006, 2(2): 12-17. 陈达森, 陈波, 严金辉, 等. 琼州海峡余流场季节性变化特征[J]. 海洋湖沼通报, 2006, 2(2): 12-17.
- [12] SHI M C, CHEN C S, XU Q C, et al. The role of the Qiongzhou Strait in the seasonal variation of the South China Sea circulation[J]. Journal of Physical Oceanography, 2002, 32(1): 103-121.
- [13] YANG S Y, BAO X W, CHEN C S, et al. Analysis on characteristics and mechanism of current system in west coast of Guangdong province in the summer[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(6): 1-8. 杨士瑛, 鲍献文, 陈长胜, 等. 夏季粤西沿岸流特征及其产生机制[J]. 海洋学报, 2003, 25(6): 1-8.
- [14] ZHENG B X, LI J F, ZENG Z, et al. Characteristical analysis of tidal and residual currents in Beilun Estuary[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2012, (1): 121-129. 郑斌鑫, 李九发, 曾志, 等. 北仑河口潮流和余流特征分析[J]. 台湾海峡, 2012, (1): 121-129.
- [15] CHEN S J, MA J R. Marine data processing and analysis methods and applications[M]. Beijing: China 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.
- [16] CHEN B. Preliminary analysis of the characteristics of the residual currents in the coastal region of Guangxi province[J]. Marine Science Bulletin, 1987, 1(1): 11-15. 陈波. 广西沿岸海区余流特性的初步分析[J]. 海洋通报, 1987, 1(1): 11-15.
- [17] CHEN B. Guangxi Nanliu delta marine environmental characteristics[M]. Beijing: China Ocean Press, 1997. 陈波. 广西南流江三角洲海洋环境特征[M]. 北京: 海洋出版社, 1997.
- [18] CHEN B, LI P L, SHI M C, et al. Numerical computation and analysis of observational data of tide-induced residual currents and wind-driven currents in Beibu Bay[J]. Guangxi Sciences, 2009, 16(3): 346-352. 陈波, 李培良, 侍茂崇, 等. 北部湾潮汐余流和风生海流的数值计算与实测资料分析[J]. 广西科学, 2009, 16(3): 346-352.
- [19] CHEN C L, LI P L, SHI M C, et al. Numerical study of the tides and residual currents in the Qiongzhou Strait[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(4): 931-942.

Spectrum Analysis of Tidal Current in Adjacent Waters of Bailongwei in Northern Beibu Gulf

ZHENG Bin-xin^{1,2}, SHI Mao-chong³, LIAO Kang-ming², WANG Lu³, HE Jia²

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. The Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen 361005, China;

3. College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: Maximum entropy spectrum method is employed to analyze the one-year observations of currents in adjacent waters of Bailongwei, which are collected with bottom-mounted ADCP. Analysis shows that diurnal currents of O_1 , K_1 and the semi-diurnal currents of M_2 , S_2 , are the major tidal currents, and the tidal energy of semi-diurnal currents is greater than that of diurnal currents. Among the components of diurnal tides and the semi-diurnal tides, the anticlockwise components ($f > 0$) are dominant, which can be well explained with co-tidal chart. Shallow water constituent of bottom layer, with period of approximately 6 h, passes significance test, suggesting that bottom friction plays an important role in generating the shallow water constituents. When $f < 0$, there are three low-frequency currents whose periods are greater than three days; currents with period of 8.3 days are statistically significant in all layers; currents with period of 5.2 days are significant in the middle and bottom layers. These low-frequency currents are considered as tidal residual currents.

Key words: Beibu Gulf; Bailongwei; spectrum analysis; diurnal current; semi-diurnal current

Received: July 24, 2014