

◆水动力与生态环境◆

防城港外海海域夏冬季周日潮流的准调和分析*

张继云, 陈波**

(广西科学院, 广西近海海洋环境科学重点实验室, 广西南宁 530007)

摘要:为深入研究防城港外海海域的潮流特征,通过引入差比关系,对防城港外海海域4个站点夏、冬季2个周日观测所得的表、中、底层海流的短期资料进行准调和分析。结果表明:防城港外海潮流属于混合潮流,部分海域属于正规全日潮流;潮流中旋转流和往复流同时存在,以旋转流为主,潮流椭圆长轴为东北-西南向;最大可能流速出现在表层,由表层至底层余流流速逐渐减小。夏季,防城港湾西侧余流方向为西南向或西北向,而东侧余流方向为东北向;冬季,除湾口为西南向外,其余海域余流方向均为东北向,余流与地形、风场、温度和盐度等因素有关。周日潮流资料时间较短,受天气、海况、观测时间等因素影响较大,计算的潮流性质略有差异。

关键词:防城港湾 准调和分析 潮流特征 余流 潮流椭圆 周日变化

中图分类号:P731.2 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2022)06-1058-09

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20230110.005

防城港位于中国大陆海岸线的最西南端,湾门口向南敞开,东邻企沙半岛,西邻白龙半岛^[1]。防城港湾是我国西南第一大港湾,是中国重要战略物资的中转基地,是中国向东南亚贸易输出的窗口,其特殊的地理位置对广西的经济发展有不可替代的作用^[1]。准确地掌握潮汐潮流的运动变化规律对海上工程建设、海洋生物运动、海洋污染物输运、海上贸易输运、水面舰船航行、水下探测器应用及某些测量仪器的潮流响应改正等多方面应用有重要作用^[2]。

北部湾的海洋研究始于20世纪60年代的中越

联合调查,之后中国也先后进行了两次全面的海洋普查工作,为北部湾海洋环境的基本特征研究奠定了基础,同时也使人们对防城港的潮波系统有了初步了解^[3]。防城港湾的潮汐属于正规全日潮流,但是关于潮流的性质仍有不同的观点。孙洪亮等^[4]和李树华等^[5]根据实测水位和潮流资料,认为防城港的潮流属于不正规全日潮流。周争桥等^[6]对2019年秋季实测周日潮流资料进行准调和分析,认为防城港附近海域以不正规全日潮流为主,部分水层为不正规半日潮流。防城港湾中,往复流与旋转流同时存在,但以旋

收稿日期:2022-10-12

修回日期:2022-10-27

*国家自然科学基金项目(42066002)和广西科学院发展基金项目“基于台风影响下广西近岸风暴流产生及风流、增减水模式研究”(022107438)资助。

【作者简介】

张继云(1992-),女,助理研究员,主要从事海洋动力学研究,E-mail:jiyun_zhang@outlook.com。

【**通信作者】

陈波(1954-),男,研究员,主要从事海洋动力学研究,E-mail:gxkxyzb@163.com。

【引用本文】

张继云,陈波. 防城港外海海域夏冬季周日潮流的准调和分析[J]. 广西科学, 2022, 29(6): 1058-1066.

ZHANG J Y, CHEN B. Quasi Harmonic Analysis of Diurnal Current in Summer and Winter in Fangchenggang Offshore Area [J]. Guangxi Sciences, 2022, 29(6): 1058-1066.

转流为主。潮流以逆时针运动为主,运动方向主要是东北-西南向^[6]。而陈波等^[7]根据白龙尾站点近一年的海流资料,得出白龙尾附近潮流属于不正规半日潮流。防城港湾内余流受潮致余流、风生流和密度流的影响,但潮致余流较弱^[8]。当台风登陆时,余流流速可能超过正常值的3倍以上^[9]。防城港湾的潮能主要来源于四大主要天文分潮,外海的潮波传至近岸时,在地形的作用下衰减变形,在底摩擦的作用下,形成浅水分潮。防城港湾中浅水分潮的作用不可忽略^[6,10]。

除了实测海流资料的研究外,诸多学者还应用数值模型的方法对防城港近海海域的海洋动力特征进行深入研究。李树华等^[11]利用二维潮波基本方程,计算了防城港附近海域的潮汐和潮流,认为防城港受地形影响,潮致余流较为复杂。李谊纯等^[12]通过数值模型,得出防城港潮汐不对称主要是由 K_1 、 O_1 、 M_2 分潮组合引起。另外,刘爱菊等^[13]、施华斌等^[14]、高劲松等^[15,16]多位学者利用不同数值模型对北部湾的环流结构进行模拟,揭示了北部湾海域环流的基本特征。Gao等^[17]的研究表明,冬季北部湾呈逆时针环流,而夏季北部湾的环流结构较为复杂,整体上,北部湾南部海域呈顺时针环流结构,而北部海域呈逆时针环流。不同的数值模型最终都需要通过近海海域实测水位、海流等资料的验证,但是北部湾北部夏季环流结构比较复杂,如今对于夏季环流的结构及形成机制仍存在争议^[18-21],还需要更多的实测数据进行验证和研究。北部湾沿海海域实测水文要素将是北部湾海洋动力研究的基础和前提。

为了探究防城港附近海域的水文特征,本研究根据防城港外海4个站点夏、冬季2个周日连续潮流实测资料,通过引入差比关系,对防城港外海的潮流进行准调和和分析,细致分析和探讨潮流、余流的特征,以便进一步对北部湾环流和物质运输的数值进行研究。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

采用的野外观测资料为防城港外海4个站点夏、冬季周日实测潮流数据,调查站位如图1所示,其中B02、C03、D01、E02(D02)为观测站点。数据来源于声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)所得的观测数据,采样频率为1次/10 min,垂向采样间隔0.5 m,观测时间见表1。数据处理时,首先对所得观测资料进行质量控制,过滤噪

音,然后对各站点表、中、底层潮流数据进行准调和和分析。由于疫情原因,冬季时E02站点属于防控区而被取消,更改为D02站。由于ADCP固定在船体上,海水运动时,引起船体晃动,对海流的观测结果产生一定的噪音。

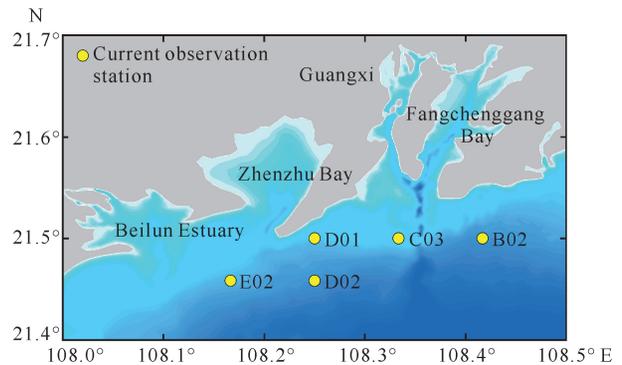


图1 观测站站位

Fig. 1 Position of observation station

表1 周日海流的观测时间

Table 1 Observation time of diurnal current

| 季节 Season | 站点 Station | 观测时间 Observation time |
|--------------|---------------|-------------------------------------|
| Summer | B02, C03 | 2021-07-27 14:00 - 2021-07-28 14:00 |
| | D01, E02 | 2021-07-28 16:00 - 2021-07-29 16:00 |
| Winter | B02, C03 | 2022-01-08 12:00 - 2022-01-09 12:00 |
| | D01, D02 | 2022-01-09 14:00 - 2022-01-10 14:00 |

1.2 准调分析方法

海洋的潮波系统是由不同周期的分潮波叠加而来。当观测数据时间较长时,可以采用调和原理对潮流进行调和,并分离出不同频率的众多分潮,但当实测数据时间较短或者显著小于分潮之间的会合周期时,只有几个主要分潮可以被辨别出来,其余相似频率的分潮族都被归纳于主要分潮中而无法被分离。对1个月的数据进行调和时,需要引入 P_1 、 K_1 、 S_2 和 K_2 分潮的差比关系;而对1个周日的潮流资料,则需要引入 K_1 、 O_1 、 M_2 、 S_2 分潮之间的差比关系,将频率相近的分潮进行分离,这便是引入差比关系的准调和和分析方法。目前,沿海海域潮汐的调和常数已十分准确,由于长时间观测的潮流数据较为缺乏,因此一般采用潮汐调和常数的差比关系来近似代替^[22]。对于短期的周日潮流资料的处理,准调和和分析方法已经被逐渐应用。诸多学者应用潮流准调和和分析的方法对不同海域的短期海流资料进行了分析,研究了各海域的潮流基本特征^[23-27]。

根据北部湾数值模型中的计算结果^[28], 计算各站位的差比关系, 各站点计算的差比关系数值一致, 差异可忽略不计。故, $H_{O_1}/H_{K_1} = 1.15$, $g_{O_1} - g_{K_1} = -57$, $H_{S_2}/H_{M_2} = 0.25$, $g_{S_2} - g_{M_2} = 38$ (其中, H 表示分潮流振幅, g 表示分潮流迟角)。通过引入上述差比关系利用 T_TIDE 调和分析程序包^[29,30], 对防城港夏、冬季周日潮流资料进行准调和, 获得每一站点表、中、底层分潮流的调和常数 and 潮流椭圆要素以及观测期间的余流数据。由于防城港潮波能量主要来源于 O_1 、 K_1 、 M_2 分潮^[12], 因此重点列举和分析 O_1 、 K_1 、 M_2 分潮流。

2 结果与分析

2.1 潮流调和常数

夏季各站点潮流的调和常数如表 2 所示。总体

表 2 夏季 4 个站点潮流的调和常数

Table 2 Tidal current harmonic constants at four station in summer

| 站点 Station | 层次 Layer | 分量 Component | O_1 | | K_1 | | M_2 | | S_2 | |
|---------------|-------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | | | 振幅 (cm/s) Amplitude (cm/s) | 迟角 (°) Phase lag (°) |
| B02 | Surface | North | 32.9 | 230 | 28.7 | 172 | 5.3 | 120 | 1.3 | 81 |
| | | East | 5.7 | 203 | 5.0 | 146 | 6.4 | 114 | 1.6 | 76 |
| | Medium | North | 32.6 | 195 | 28.4 | 137 | 5.9 | 107 | 1.5 | 68 |
| | | East | 31.6 | 221 | 27.5 | 164 | 8.1 | 109 | 2.0 | 70 |
| | Bottom | North | 17.5 | 204 | 15.2 | 147 | 3.1 | 115 | 0.8 | 76 |
| | | East | 24.0 | 186 | 20.8 | 128 | 6.8 | 106 | 1.7 | 67 |
| C03 | Surface | North | 41.9 | 225 | 36.4 | 168 | 14.0 | 107 | 3.5 | 69 |
| | | East | 28.8 | 196 | 25.0 | 139 | 10.3 | 121 | 2.5 | 83 |
| | Medium | North | 38.9 | 210 | 33.8 | 153 | 11.0 | 88 | 2.7 | 49 |
| | | East | 34.2 | 174 | 29.8 | 116 | 9.6 | 116 | 2.4 | 77 |
| | Bottom | North | 24.9 | 209 | 21.6 | 152 | 7.9 | 70 | 2.0 | 32 |
| | | East | 21.7 | 159 | 18.9 | 102 | 7.1 | 110 | 1.7 | 71 |
| D01 | Surface | North | 9.2 | 172 | 8.0 | 114 | 7.5 | 66 | 1.9 | 28 |
| | | East | 11.3 | 159 | 9.8 | 101 | 10.0 | 129 | 2.5 | 91 |
| | Medium | North | 5.5 | 138 | 4.8 | 81 | 4.0 | 126 | 1.0 | 88 |
| | | East | 9.3 | 130 | 8.1 | 72 | 5.9 | 95 | 1.5 | 57 |
| | Bottom | North | 4.5 | 203 | 3.9 | 146 | 6.4 | 114 | 1.6 | 76 |
| | | East | 5.4 | 102 | 4.7 | 44 | 5.1 | 79 | 1.3 | 41 |
| E02 | Surface | North | 17.4 | 234 | 15.2 | 177 | 12.3 | 91 | 3.0 | 54 |
| | | East | 6.0 | 189 | 5.2 | 131 | 9.2 | 85 | 2.3 | 48 |
| | Medium | North | 13.6 | 233 | 11.8 | 176 | 12.6 | 93 | 3.1 | 55 |
| | | East | 5.5 | 218 | 4.7 | 161 | 9.9 | 113 | 2.4 | 76 |
| | Bottom | North | 9.1 | 238 | 7.9 | 181 | 13.2 | 100 | 3.3 | 63 |
| | | East | 5.6 | 151 | 4.9 | 94 | 6.1 | 75 | 1.5 | 37 |

来看, 该海域各站点的全日潮流明显占优。 K_1 和 O_1 分潮流的振幅明显高于 M_2 振幅, 其余分潮流的振幅更小, 对海域潮流的性质影响可忽略。在空间上, C03 站和 E02 站的北分量明显大于东分量; 而 B02 站仅表层的北分量明显大于东分量, 中、底层的北分量和东分量的流速量值相差较小。相反地, D01 站潮流的北分量小于东分量。总而言之, 在外海北分量流速大于东分量流速。当潮波从外海向陆地传播时, 受陆地边界的影响, 北分量流速明显减弱, 因而北分量流速小于东分量流速, 如 D01 站潮流运动方向与陆地边界平行, 流向防城港湾。

冬季 4 个站点潮流的调和常数如表 3 所示。在空间上,各站点中半日分潮流占优,且东分量明显大于北分量;而全日分潮流的北分量和东分量差距较小。整体来看,东侧 B02 和 C03 站全日分潮流的北分量略大于东分量,而西侧 D01 和 D02 站全日分潮流

流的北分量略小于东分量。以半日分潮 M_2 分潮为例,越靠近陆地,潮流振幅衰减越显著,如 D01 站。在垂直方向上,表层振幅最大,底层振幅最小。表层容易受外界冬季风等影响,导致调和分析后的结果中东分量显著大于北分量,如 D02 站。

表 3 冬季 4 个站点潮流的调和常数
Table 3 Tidal current harmonic constants at four station in winter

| 站点 Station | 层次 Layer | 分量 Component | O_1 | | K_1 | | M_2 | | S_2 | |
|---------------|-------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | | | 振幅 (cm/s) Amplitude (cm/s) | 迟角 (°) Phase lag (°) |
| B02 | Surface | North | 9.4 | 32.2 | 8.1 | 334.8 | 9.1 | 331.9 | 2.2 | 293.0 |
| | | East | 9.2 | 59.7 | 8.0 | 2.3 | 11.8 | 265.9 | 2.9 | 227.0 |
| | Medium | North | 8.1 | 203.1 | 7.1 | 145.8 | 6.1 | 86.5 | 1.5 | 47.7 |
| | | East | 4.6 | 156.2 | 4.0 | 98.9 | 10.0 | 77.4 | 2.5 | 38.6 |
| | Bottom | North | 2.6 | 172.5 | 2.3 | 115.1 | 3.1 | 98.3 | 0.8 | 59.5 |
| | | East | 2.3 | 16.9 | 2.0 | 319.5 | 3.2 | 47.4 | 0.8 | 8.6 |
| C03 | Surface | North | 11.8 | 162.1 | 10.2 | 104.7 | 6.0 | 110.8 | 1.5 | 72.4 |
| | | East | 11.5 | 138.8 | 10.0 | 81.4 | 16.1 | 78.7 | 4.0 | 40.3 |
| | Medium | North | 9.9 | 166.1 | 8.6 | 108.7 | 4.6 | 89.6 | 1.1 | 51.1 |
| | | East | 10.4 | 138.8 | 9.0 | 81.4 | 16.4 | 83.1 | 4.0 | 44.7 |
| | Bottom | North | 6.9 | 158.8 | 6.0 | 101.4 | 4.2 | 121.7 | 1.0 | 83.3 |
| | | East | 7.0 | 129.8 | 6.1 | 72.5 | 9.9 | 86.4 | 2.5 | 48.0 |
| D01 | Surface | North | 3.4 | 138.2 | 3.0 | 80.8 | 3.5 | 54.3 | 0.9 | 16.4 |
| | | East | 3.8 | 86.2 | 3.3 | 28.8 | 3.8 | 40.4 | 0.9 | 2.6 |
| | Medium | North | 3.1 | 113.7 | 2.7 | 56.3 | 3.7 | 59.0 | 0.9 | 21.1 |
| | | East | 3.8 | 53.8 | 3.3 | 356.4 | 2.9 | 59.6 | 0.7 | 21.7 |
| | Bottom | North | 2.2 | 137.4 | 1.9 | 80.0 | 2.2 | 54.5 | 0.5 | 16.7 |
| | | East | 2.4 | 86.6 | 2.1 | 29.2 | 2.4 | 41.7 | 0.6 | 3.8 |
| D02 | Surface | North | 8.9 | 173.7 | 7.7 | 116.3 | 4.6 | 97.7 | 1.1 | 60.4 |
| | | East | 19.4 | 235.7 | 16.8 | 178.3 | 19.3 | 122.9 | 4.8 | 85.7 |
| | Medium | North | 5.4 | 171.5 | 4.7 | 114.0 | 8.1 | 85.8 | 2.0 | 48.6 |
| | | East | 3.4 | 109.0 | 2.9 | 51.6 | 5.5 | 56.1 | 1.3 | 18.8 |
| | Bottom | North | 2.9 | 163.2 | 2.6 | 105.7 | 2.5 | 89.0 | 0.6 | 51.8 |
| | | East | 1.9 | 91.6 | 1.6 | 34.1 | 4.2 | 58.8 | 1.0 | 21.6 |

2.2 潮流性质

根据《港口工程技术规范》潮流类型公式可知,判别系数 $F = (W_{K_1} + W_{O_1}) / W_{M_2}$, 其中, W 为分潮流的椭圆长轴。 $F > 4$, 为正规全日潮流; $2 < F \leq 4$, 为不正规全日潮流; $0.5 < F \leq 2$, 为不正规半日潮流, $F \leq 0.5$, 为正规半日潮流。夏季, 东侧站点 B02 和 C03 为正规全日潮流, D01 站为不正规全日潮流, 而 E02

站为不正规半日潮流(表 4)。自东向西, 防城港外海海域由全日分潮占优转化为半日分潮占优。E02 底层中 M_2 分潮流振幅最大, 其次是 O_1 分潮。除此站外, 其余各站分潮流中 O_1 分潮流振幅最大, 其次是 K_1 分潮流。然而, 冬季各站潮流均属于不正规半日潮流, 且 M_2 分潮流振幅略大于 O_1 分潮流。

表4 夏、冬季潮流椭圆要素

Table 4 Current elliptical elements in summer and winter

| 站点 Station | 层次 Layer | 分潮 Tidal comp- onent | 最大流速 (cm/s) W (cm/s) | | 最小流速 (cm/s) w (cm/s) | | 旋转率 κ | | 最大流发生 时刻(h) τ (h) | | 最大流 流向($^\circ$) θ ($^\circ$) | | 最大可能 流速(cm/s) W_h (cm/s) | | 判别 系数 F | |
|---------------|-------------|-------------------------------|----------------------------|--------------|----------------------------|--------------|-------------------|--------------|------------------------------|--------------|--|--------------|----------------------------------|--------------|-------------------|--------------|
| | | | 夏季 Sum- mer | 冬季 Winter | 夏季 Sum- mer | 冬季 Winter | 夏季 Sum- mer | 冬季 Winter | 夏季 Sum- mer | 冬季 Winter | 夏季 Sum- mer | 冬季 Winter | 夏季 Sum- mer | 冬季 Winter | 夏季 Sum- mer | 冬季 Winter |
| | | | B02 | Surface | O ₁ | 33 | 13 | 3 | -3 | 0.1 | -0.2 | 14 | 8 | 229 | 46 | |
| | | K ₁ | 29 | 11 | 2 | -3 | 0.1 | -0.2 | 14 | 8 | 172 | 348 | 76 | 44 | 7.5 | 1.9 |
| | | M ₂ | 8 | 13 | 0 | 8 | 0.0 | 0.6 | 7 | 5 | 116 | 284 | | | | |
| | Medium | O ₁ | 44 | 9 | -10 | 3 | -0.2 | 0.4 | 8 | 11 | 207 | 194 | | | | |
| | | K ₁ | 38 | 8 | -9 | 3 | -0.2 | 0.4 | 8 | 11 | 150 | 137 | 99 | 35 | 8.3 | 1.4 |
| | | M ₂ | 10 | 12 | 0 | 1 | 0.0 | 0.1 | 6 | 5 | 108 | 80 | | | | |
| | Bottom | O ₁ | 29 | 3 | 5 | 1 | 0.2 | 0.2 | 6 | 22 | 192 | 183 | | | | |
| | | K ₁ | 26 | 3 | 4 | 1 | 0.2 | 0.2 | 6 | 22 | 135 | 125 | 67 | 13 | 7.3 | 1.6 |
| | | M ₂ | 7 | 4 | 0 | 2 | 0.1 | 0.5 | 4 | 7 | 108 | 71 | | | | |
| C03 | Surface | O ₁ | 49 | 16 | 12 | 3 | 0.2 | 0.2 | 9 | 8 | 216 | 151 | | | | |
| | | K ₁ | 43 | 14 | 10 | 3 | 0.2 | 0.2 | 9 | 8 | 159 | 93 | 120 | 57 | 5.3 | 1.8 |
| | | M ₂ | 17 | 17 | -2 | 3 | -0.1 | 0.2 | 9 | 3 | 112 | 82 | | | | |
| | Medium | O ₁ | 49 | 14 | 16 | 3 | 0.3 | 0.2 | 8 | 7 | 195 | 152 | | | | |
| | | K ₁ | 43 | 12 | 14 | 3 | 0.3 | 0.2 | 8 | 7 | 137 | 94 | 115 | 53 | 6.5 | 1.5 |
| | | M ₂ | 14 | 17 | -3 | 1 | -0.2 | 0.0 | 8 | 3 | 100 | 84 | | | | |
| | Bottom | O ₁ | 30 | 9 | 14 | 2 | 0.5 | 0.3 | 9 | 7 | 189 | 144 | | | | |
| | | K ₁ | 26 | 8 | 12 | 2 | 0.5 | 0.3 | 9 | 7 | 131 | 87 | 72 | 35 | 5.6 | 1.7 |
| | | M ₂ | 10 | 11 | -4 | 2 | -0.4 | 0.2 | 8 | 3 | 87 | 91 | | | | |
| D01 | Surface | O ₁ | 14 | 5 | 2 | 2 | 0.1 | 0.5 | 7 | 7 | 164 | 109 | | | | |
| | | K ₁ | 13 | 4 | 1 | 2 | 0.1 | 0.5 | 7 | 7 | 106 | 52 | 45 | 17 | 2.5 | 1.7 |
| | | M ₂ | 11 | 5 | -6 | 1 | -0.6 | 0.1 | 5 | 7 | 112 | 47 | | | | |
| | Medium | O ₁ | 11 | 4 | 1 | 2 | 0.1 | 0.6 | 5 | 6 | 132 | 75 | | | | |
| | | K ₁ | 9 | 4 | 1 | 2 | 0.1 | 0.6 | 5 | 6 | 74 | 17 | 31 | 16 | 2.9 | 1.7 |
| | | M ₂ | 7 | 5 | 2 | 0 | 0.3 | 0.0 | 5 | 9 | 104 | 59 | | | | |
| | Bottom | O ₁ | 6 | 3 | 4 | 1 | 0.8 | 0.5 | 26 | 7 | 263 | 109 | | | | |
| | | K ₁ | 5 | 3 | 4 | 1 | 0.8 | 0.5 | 26 | 7 | 206 | 51 | 23 | 11 | 1.3 | 1.7 |
| | | M ₂ | 8 | 3 | 2 | 0 | 0.3 | 0.1 | 9 | 7 | 101 | 48 | | | | |
| E02/ D02 | Surface | O ₁ | 18 | 20 | 4 | -8 | 0.2 | -0.4 | 13 | 2 | 231 | 230 | | | | |
| | | K ₁ | 16 | 17 | 4 | -7 | 0.2 | -0.4 | 13 | 2 | 173 | 173 | 58 | 69 | 2.2 | 1.9 |
| | | M ₂ | 15 | 20 | 1 | -2 | 0.0 | -0.1 | 9 | 2 | 89 | 122 | | | | |
| | Medium | O ₁ | 15 | 6 | 1 | 3 | 0.1 | 0.5 | 11 | 11 | 231 | 160 | | | | |
| | | K ₁ | 13 | 5 | 1 | 2 | 0.1 | 0.5 | 11 | 11 | 174 | 103 | 53 | 26 | 1.7 | 1.1 |
| | | M ₂ | 16 | 10 | -3 | 2 | -0.2 | 0.2 | 9 | 10 | 100 | 77 | | | | |
| | Bottom | O ₁ | 9 | 3 | 6 | 2 | 0.6 | 0.6 | 15 | 12 | 237 | 154 | | | | |
| | | K ₁ | 8 | 3 | 5 | 1 | 0.6 | 0.6 | 15 | 12 | 179 | 96 | 40 | 13 | 1.2 | 1.2 |
| | | M ₂ | 14 | 5 | 2 | 1 | 0.2 | 0.2 | 11 | 5 | 96 | 66 | | | | |

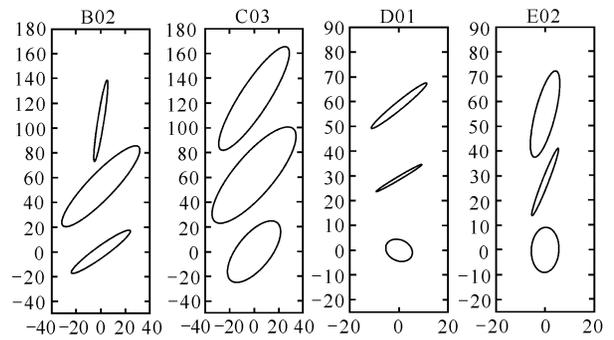
综上可知,防城港属于混合潮,夏季以全日潮流占优,冬季以半日潮流占优,这与周争桥等^[6]得出的9月份防城港属于不正规全日潮流的结果基本一致。但周争桥等^[6]认为 O_1 分潮流小于 K_1 分潮流,与本文结果不一致,这是由于用于计算差比关系的原始数据的长度和位置不同。陈波等^[7]分析白龙尾附近近一年的海流数据,得出 D01 附近海域属于不正规半日潮流,与本研究结果也略有差异,这与短期资料的不确定性有关。周日潮流的观测时间较短,受天气、海况等多种环境因素影响,导致准调和分析的结果略有差异。

2.3 潮流椭圆要素

各站点主要分潮流的椭圆要素如表4所示。潮流的运动形式可以由潮流旋转率 κ 来表征,正号表示逆时针旋转,负号表示顺时针旋转。当 $|\kappa| > 0.25$,潮流表现为较强的旋转流;当 $|\kappa| < 0.25$,潮流表现为较强的往复流。根据夏季的潮流结果可知,B02 站表、中、底层潮流均一致表现为往复流;C03 站表层潮流为往复流,而中、底层表现为旋转流。在 C03 站,全日分潮与半日分潮呈相反的旋转性,全日分潮为顺时针,而半日分潮则表现为逆时针。D01 站表、中层全日分潮表现为往复流,而半日分潮则表现为逆时针旋转流,同时底层表现为顺时针旋转流。E02 站表、中层为往复流,底层全日潮流表现为旋转流,而半日潮流表现为往复流。由此可见,防城港外海海域往复流与旋转流同时存在,表层多为往复流,而底层多为旋转流。

由于 O_1 分潮流的流速最大,因此以 O_1 分潮流为代表绘制潮流椭圆(图2)。B02 站的潮流椭圆长轴中层最大,其次是表层,底层最小,其余各站点的潮流椭圆长轴均由表层至底层逐渐减小。该海域潮流椭圆长轴方向为东北-西南向,其中 E02 站潮流椭圆长轴方向更偏南北,而 D01 站的潮流椭圆长轴与岸线平行,这是外海传入的潮波与近岸地形相互作用的结果。

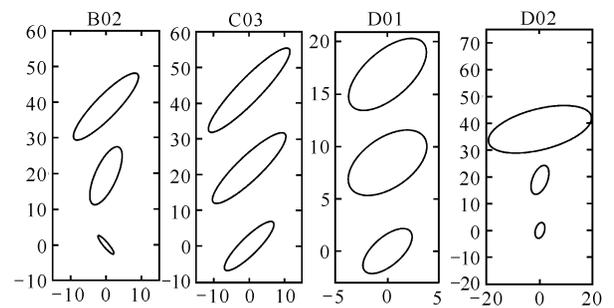
冬季该海域往复流和旋转流同时存在,总体上以旋转流为主(表4)。C03 站表、中层表现为往复流,其余站点整体上均表现为旋转流。冬季 O_1 分潮流的潮流椭圆如图3所示,可知潮流椭圆长轴方向为东北-西南向,各站点由表层至底层潮流椭圆长轴逐渐减小。综上可知,冬季潮流的旋转性强于夏季,而潮流大小明显小于夏季。



Circles from top to bottom represent the surface layer, medium layer and bottom layer respectively

图2 夏季 O_1 分潮流的潮流椭圆

Fig. 2 O_1 tidal current ellipses in summer



Circles from top to bottom represent the surface layer, medium layer and bottom layer respectively

图3 冬季 O_1 分潮流的潮流椭圆

Fig. 3 O_1 tidal current ellipses in winter

根据最大可能流速的计算公式 $W_h = 1.29 \times W_{M_2} + 1.23 \times W_{S_2} + W_{O_1} + W_{K_1}$ 可知,夏季该海域 C03 站的最大可能流速最大,表层流速达 120 cm/s;其次是 B02 站,最大可能流速为 67 - 99 cm/s;D01 站的最大可能流速最小,流速为 23 - 45 cm/s。冬季该海域 D02 站表层的最大可能流速最大,流速为 69 cm/s;其次是 C03 站的表层,最大可能流速是 57 cm/s;D01 站的最大可能流速最小,流速为 11 - 17 cm/s。整体上,冬季的最大可能流速明显小于夏季。

2.4 夏、冬季余流

夏、冬季4个站点余流观测结果如表5所示。从整体上看,夏季余流流速由表层至底层逐渐减小,但是靠近岸边的海域,如 D01 站中层余流流速明显小于底层。冬季该海域余流流速显著大于夏季,最大值为 48 cm/s,位于 D02 站表层。整体上来看,冬季余流的变化趋势与夏季较为一致,均为由表层至底层余流流速逐渐减小。

表5 夏、冬季各站点余流

Table 5 Residual current at each station in summer and winter

| 站点 Station | 季节 Season | 表层 Surface | | 中层 Medium | | 底层 Bottom | |
|---------------|--------------|--|--------------------------------|--|--------------------------------|--|--------------------------------|
| | | 余流流速(cm/s) Current velocity (cm/s) | 流向(°) Flow direction (°) | 余流流速(cm/s) Current velocity (cm/s) | 流向(°) Flow direction (°) | 余流流速(cm/s) Current velocity (cm/s) | 流向(°) Flow direction (°) |
| B02 | Summer | 5.1 | 92 | 1.3 | 114 | 2.2 | 327 |
| | Winter | 34.0 | 60 | 0.1 | 91 | 1.3 | 121 |
| C03 | Summer | 2.8 | 39 | 2.8 | 0 | 2.5 | 31 |
| | Winter | 8.3 | 225 | 8.2 | 221 | 5.4 | 226 |
| D01 | Summer | 3.5 | 280 | 0.7 | 111 | 1.9 | 37 |
| | Winter | 8.0 | 54 | 8.5 | 60 | 5.0 | 54 |
| E02/ D02 | Summer | 9.0 | 236 | 6.9 | 208 | 4.9 | 215 |
| | Winter | 48.0 | 73 | 1.7 | 151 | 1.8 | 169 |

不同站点不同层次的余流方向差异较大。由图4可知, B02站余流在表、中层均为东南向, 底层为西北向; C03站余流由表层至底层均为东北向; D01站余流在表层为西北向, 底层为东北向; E02站余流由表层至底层均表现为统一的西南向。从垂向平均余流来看, E02站平均余流流速最大, 为7 cm/s; D01站平均余流流速最小, 为3 cm/s。在防城港湾东侧的站点, 平均余流为东北向; 而西侧的两站点, 平均余流分别为西北向和西南向。夏季, 北部湾北部海域的环流结构比较复杂, 整体上呈现气旋式环流, 同时局部又存在多个反气旋式涡旋结构, 因此导致防城港外海的余流结构比较复杂。夏季, 西南季风增强, 外海水由西南向东北堆积, 外海水在C03站进入防城港湾, 导致湾内海平面升高^[31], 在海面压力梯度和入海径流的作用下, 湾内海水从西侧流出, 从而在防城港湾西侧形成西南向流动。

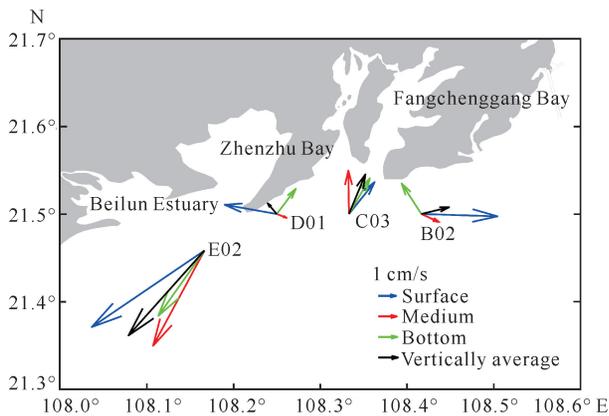


图4 夏季余流分布

Fig. 4 Residual current distribution in summer

从图5可以看出, 冬季余流方向由表层的东北向逐渐向右旋转, 转至东北偏东向或东南向; 平均余流为东北向; 从外海到沿岸越靠近陆地余流越小。东北季风在冬季比较强劲, 导致整个北部湾的水体由北向南堆积, 北部湾南部水面高于北部, 在北部沿岸海域形成向北的补偿流^[16]。然而, 有一个表现异常特殊的站点, 即C03站, 该站点的余流方向为西南向, 与其他站点截然相反。当外海水均呈东北向流动时, 外海水将流入湾内, 如D01站, 外海水从西侧进入海湾, 导致防城港湾内涨水、水位升高。根据压力梯度的原理, 湾内将形成向外的流动, 沿东侧(C03站)流出海湾, 从而保证海湾内海水平衡。

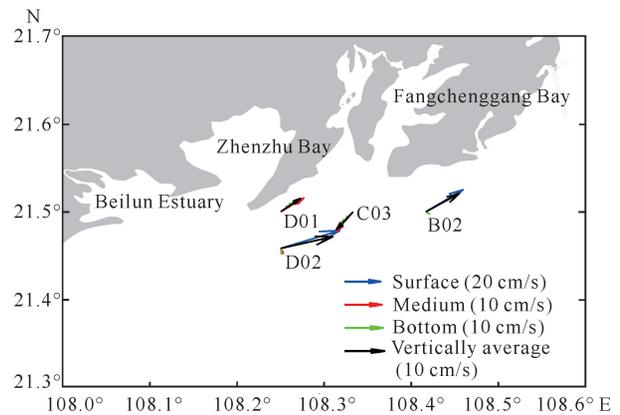


图5 冬季余流分布

Fig. 5 Residual current distribution in winter

3 结论

通过引入差比关系, 对防城港外海海域4个站点的夏、冬季2个周日潮流的短期资料进行准调和和分析, 得到以下结论: (1) 防城港外海海域属于混合潮流

域,其潮流基本属于不正规全日潮流或者不正规半日潮流,部分海域属于正规全日潮流。夏季以全日潮流占优,冬季以半日潮流占优。(2)该海域的潮流中旋转流和往复流同时存在,但以旋转流为主。潮流椭圆长轴以东北-西南方向为主。(3)整体上,余流流速由表层至底层逐渐减小。夏季,防城港西侧 D01 和 E02 站余流方向为西北向或西南向;而东部 B02 和 C03 站余流方向为东北向。冬季,余流方向较为一致,除防城港湾口为西南向外,其余海域均为东北向。

由于周日海流数据长度较短,同时受天气、海况、观测时间、船只等因素影响,准调和分析的结果可能略有不同,但整体上呈现了防城港外海潮流的基本特征,有助于加深对该海域潮流特性的认知,并为后续的潮汐潮流及物质输运的数值模型研究提供验证资料,为防城港海域的海洋工程建设、海洋生态保护、海洋经济发展等提供研究基础。

参考文献

- [1] 庞国涛,阎琨,李伟.广西防城港近岸表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J].中国地质调查,2022,9(1):82-90.
- [2] 管喆.防城港海域潮流、风浪及其耦合作用影响的数值模拟研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- [3] 侍茂崇.北部湾环流研究述评[J].广西科学,2014,21(4):313-324.
- [4] 孙洪亮,黄卫民.广西近海潮汐和海流的观测分析与数值研究——I.观测与分析[J].黄渤海海洋,2001,19(4):1-11.
- [5] 李树华,夏华永,梁少红,等.广西重点港湾的潮流和余流[J].广西科学,2001,8(1):74-79.
- [6] 周争桥,夏维.防城港海域潮流特征分析[J].海洋湖沼通报,2021,43(4):62-67.
- [7] 陈波,侍茂崇,郭佩芳,等.北部湾北部潮流谱分析和余流特征研究[J].广西科学,2014,21(1):54-63.
- [8] 陈宜展,杨威,曹永港,等.北部湾北部环流的季节特征[J].广东海洋大学学报,2020,40(4):68-74.
- [9] 陈波,陈宪云,侍茂崇,等.“纳沙”台风期间广西白龙尾近岸海域余流特征及产生机制[J].广西科学,2018,25(1):36-42.
- [10] 郑斌鑫,侍茂崇,廖康明,等.北部湾北部白龙尾附近海域潮流谱分析[J].海洋科学进展,2015,33(1):1-10.
- [11] 李树华,陈文广,彭云胜,等.防城港湾潮流数值模拟试验[J].广西科学院学报,1994,10(1):63-69.
- [12] 李谊纯,董德信,王一兵.防城港湾潮余流及潮汐不对称特征[J].广东海洋大学学报,2021,41(4):50-57.
- [13] 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.
- [14] 施华斌,牛小静,余锡平.北部湾及广西近海潮流数值模拟[J].清华大学学报(自然科学版),2012,52(6):791-797.
- [15] 高劲松,陈波,侍茂崇.北部湾夏季环流结构及生成机制[J].中国科学,2015,45(1):99-112.
- [16] 高劲松,陈波.北部湾冬半年环流特征及驱动机制分析[J].广西科学,2014,21(1):64-72.
- [17] GAO J S, ZHU D L, WU G D, et al. Tidal and tidal current characteristics in the Guangxi Gulf of Tonkin, South China Sea [J]. Ocean Dynamics, 2019, 69: 1037-1051.
- [18] 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.
- [19] 陈振华.北部湾环流季节变化的数值模拟与动力机制分析[D].青岛:中国海洋大学,2013.
- [20] 陈波,侍茂崇.北部湾海洋环流研究进展[J].广西科学,2019,26(6):595-603.
- [21] 方雪原,娄安刚,贺成奇.北部湾冬季风生环流的数值模拟及其对海洋环境的影响分析[J].海洋湖沼通报,2015(1):129-133.
- [22] 唐岩,刘雁春,暴景阳,等.关于潮流(准)调和与分析方法中的几个问题[J].测绘科学,2010,35(S1):33-35.
- [23] 王凯,叶冬.东海三定点周日海流观测的准调和分[J].海洋科学,2007,31(8):18-25.
- [24] 邱婷,王鼎琦,姜佩林,等.基于周日观测的岚山海区水文要素分析[J].中国水运(下半月),2013,13(11):280-282.
- [25] 张静,王忠良,汤保贵,等.后水湾网箱养殖区五测站两周日海流观测的准调和分[J].海洋通报,2014,33(1):56-61.
- [26] 张锋,李瑞杰,孙杰,等.长江口及其邻近海域两定点周日海流观测的准调和分[J].海洋湖沼通报,2019(5):57-63.
- [27] 张静,孙省利,吴灶和,等.广东流沙湾4个测站2个周日潮流观测的准调和分[J].台湾海峡,2010,29(3):408-413.
- [28] ZHANG J, CHEN B, ZHU D. Numerical study of the circulation and water transport in Beibu Gulf: a short communication [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 869: 012069.
- [29] PAWLOWICZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE [J]. Computers & Geosciences, 2002, 28: 929-937.

- [30] PELLING H E, UEHARA K, GREEN J A M. The impact of rapid coastline changes and sea level rise on the tides in the Bohai Sea, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118: 3462-3472.
- [31] 侍茂崇, 陈波, 丁扬, 等. 风对北部湾入海径流扩散影响的研究[J]. *广西科学*, 2016, 23(6): 485-491.

Quasi Harmonic Analysis of Diurnal Current in Summer and Winter in Fangchenggang Offshore Area

ZHANG Jiyun, CHEN Bo * *

(Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

Abstract: In order to deeply study the tidal current characteristics offshore area in Fangchenggang, a quasi harmonic analysis on the short-term data of the surface, medium and bottom currents obtained from the observations at four stations over two days in summer and winter in the offshore area of Fangchenggang is carried out by introducing the difference ratio relationship. The results showed that the offshore tidal current of Fangchenggang belongs to mixed tidal current, and parts of the area belong to regular diurnal tidal current. Rotating flow and reciprocal flow exist simultaneously, mainly rotating flow. The long axis of current ellipse was northeast - southwest. The maximum possible velocity appeared in the surface layer, and the residual flow velocity decreased gradually from the surface to the bottom. In summer, the direction of residual current on the west side of Fangchenggang Bay was southwest or northwest, while the direction of residual current on the east side was northeast. In winter, the direction of residual current was northeast, only southwest near the mouth of Fangchenggang Bay. The residual current was related to topography, wind field, temperature and salinity. The diurnal current data is relatively short, which is greatly affected by weather, sea conditions, observation time and other factors, and the calculated tidal current properties are slightly different.

Key words: Fangchenggang Bay; quasi harmonic analysis; tidal characteristics; residual current; current ellipse; diurnal variation

责任编辑: 唐淑芬



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxxk@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>