

红海湾西北海区海流特征分析

刘广平^{1,2}, 何伟宏¹, 邹晓理¹, 王昭正¹, 孙天山¹

1. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 利用 2008 年夏季和冬季的海流资料分析了红海湾西北海区潮流性质、运动形式、涨落潮流特性、余流特征。结果表明: 红海湾西北海区属不规则半日潮海域, 潮流性质属往复流, 大致呈东—西向往返运动, 具有一定的旋转流性质; 平均涨潮流最大可达 $17.8\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均退潮流最大可达 $19.3\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$; 实测流受风和地形影响明显。余流受风和地形的影响也比较明显, 在偏北风作用下, 余流流向西偏南; 在偏南风作用下, 余流流向东偏北, 余流最大可达 $18.9\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。潮能主要由东部向西传播至红海湾西北海区, 潮能进入量值可达 $4.8 \times 10^3\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

关键词: 红海湾; 海流; 余流

中图分类号: P731.21

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2018)05-0040-10

Characteristics of currents in northwest of Honghai Bay

LIU Guangping^{1,2}, HE Weihong¹, ZOU Xiaoli¹, WANG Zhaozheng¹, SUN Tianshan¹

1. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Based on the data observed during the summer and winter cruises in 2008, the type and the motion form of tidal currents, the characteristics of flood current, ebb current and the residual current in the Northwest Honghai Bay were analyzed. The results show that the tidal property in the Northwest Honghai Bay belongs to irregular semidiurnal tide. The tidal current is a reversing current with a rotary current, mainly in the east–west direction. The current is mostly affected by wind and topography. The maximum averaged velocities during flood tide and ebb tide are, respectively, 17.8 and $19.3\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Under the northerly wind and southerly wind, the residual current flows west by south and east by north, respectively. The maximum residual current can reach $18.9\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. The tidal energy flux propagates from east to west in the area, whose maximum value is about $4.8 \times 10^3\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$.

Key words: Honghai Bay; current; tidal residual current

红海湾位于南海北部粤东沿岸中段($22^\circ39'—22^\circ51'N$, $114^\circ56'—115^\circ27'E$), 为半封闭海湾, 面积约 300km^2 , 水深 $10\sim50\text{m}$ 。湾北部较平缓, 自北向南倾斜, 西部沿岸坡度较大。湾西北有赤石河注入, 年径流量 $5.27 \times 10^8\text{m}^3$, 径流量较小。湾内渔

业资源丰富, 甲壳类(虾和蟹)资源尤为丰富, 分别是相邻的大亚湾及碣石湾的 39.2 和 10.6 倍, 是粤东海水养殖的主产区(贾晓平等, 2012; 宁加佳等, 2016)。近年来, 特别是深汕特别合作区的设立以来, 红海湾西北沿岸经济高速发展, 临海工业

收稿日期: 2017-12-27; 修订日期: 2018-01-23。卢冰编辑

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41430964); 中国科学院前沿科学重点研究计划项目(QYZDJ-SSW-DQC034)

作者简介: 刘广平(1982—), 男, 河北省沙河市, 博士研究生, 从事物理海洋学研究

通信作者: 刘广平。liugp@scsio.ac.cn

Received date: 2017-12-27; Revised date: 2018-01-23. Editor: LU Bing

Foundation item: Key Project of Natural Science Foundation of China (41430964); Key Research Program of Frontier Sciences CAS (QYZDJ-SSW-DQC034)

Corresponding author: LIU Guangping. liugp@scsio.ac.cn

的开发和渔业生产规模的扩大给海洋环境带来了巨大压力(孙钦帮等, 2017)。面对新的威胁与挑战, 人类活动对海湾生态环境的影响机理与调控原理逐渐成为研究热点, 海湾水文动力的研究为海湾生物地球化学过程的研究提供了重要的理论支撑(武文等, 2017)。

对粤东海湾及南海北部潮流动力的研究, 已有大量工作。曹德明等(1990)和方国洪等(1994)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; 夏综万等(2013)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; 杨万康等(2013)基于 FVCOM 对南海北部海域进行了精细化潮汐、潮流数值模拟; 吴伦宇等(2015)分析了粤东甲子海域潮汐和各层潮流的分布特征及其形成原因; 杨国标(2001)利用实测数据分析了大亚湾海区的潮流性质、运动形式及余流特征。还有一些学者(吴仁豪等, 2007; 武文等, 2017; 严聿晗等, 2017), 利用数值模式研究了大亚湾水文特征和潮汐动力学特征。对于粤东沿岸流, 曾流明(1986)、于文泉(1987)、韩舞鹰和马克美(1988)通过对不同年份航次资料的分析, 报道了夏季粤东沿岸海域的风生上升流。进一步的研究发现, 西南季风的强弱是影响该上升流时空变化的重要因素(吴日升和李立, 2003; 庄伟等, 2005; Wang et al, 2012; Gan et al, 2009; Jing et al, 2009; 许金电等, 2014)。这些研究使人们对粤东海域潮汐和环流特征有了初步的认识。但由于观测资料缺乏, 以往对粤东海域的研究多分布在红海湾周围, 对红海湾浅水区的潮流特征研究很少, 为此本文利用 2008 年夏季和冬季的调查数据, 分析红海湾西北海区(图 1)的潮流动力学特征。

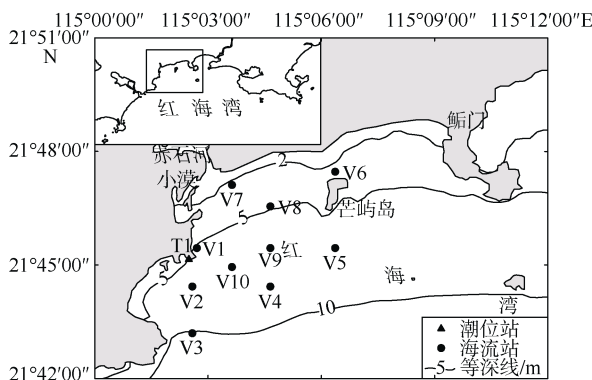


图 1 研究海区观测站位及水深图

Fig. 1 Observation stations and topography in the study area

1 资料来源

2008 年 8 月 30 日—9 月 7 日和 12 月 6 日—13 日, 中国科学院南海海洋研究所进行了红海湾西北海区的海洋调查, 每次调查分为大潮、中潮和小潮三个阶段进行, 每个阶段连续观测 26 小时, 观测分表、中、底三层(V6 站只有表层和底层), 每小时观测一次, 10 个站同步观测(表 1)。调查仪器采用挪威 AANDERAA 仪器公司生产的 RCM9 型海流计, 配有精确的 GPS 定位仪。在 T1 站采用加拿大 RBR 公司生产的 TGR-2050 型潮位仪进行了潮位同步观测, 采样间隔 10 分钟, 并利用上海风云气象仪器公司生产的 DYM3 型气压表进行了同步气压观测, 用来订正潮位数据到平均海平面。在 V8 站(夏季)和 V5 站(冬季)利用天津气象仪器厂生产的 DEM6 型风速风向仪分别进行了风速、风向观测(每 3 小时间隔)。

由于流场的随机扰动或某种偶然误差会导致流速、流向产生个别的跳跃; 因此, 在计算分析前, 首先对观测数据进行了平滑处理, 消除了噪声的影响(方国洪等, 1986)。接着通过引入差比关系, 进行潮流的准调和分析(方国洪, 1974; 方国洪等, 1986), 获得每一测点每层的 O_1 , K_1 , M_2 , S_2 , M_4 , MS_4 等 6 个主要分潮流的调和常数、椭圆要素和观测期间的余流值。在差比数的计算上, 均采用长期验潮站汕尾站的潮汐调和常数。

表 1 夏季和冬季观测时间

Tab. 1 Observation times in summer and winter

季节	大潮	中潮	小潮
夏季	2008-8-30 8:00—	2008-9-2 14:00—	2008-9-6 12:00—
	2008-8-31 9:00	2008-9-3 15:00	2008-9-7 13:00
冬季	2008-12-12 12:00—	2008-12-9 10:00—	2008-12-6 8:00—
	2008-12-13 13:00	2008-12-10 11:00	2008-12-7 9:00

2 海流特征

图 2 为观测期间 V5 和 V8 站的风矢量图, 图中显示, 夏季大潮期间, 由偏南风转为偏北风, 偏南风较强, 偏南风最大风速达到 $5.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 之后, 在中潮期间, 研究海区主要由偏北风控制, 偏北风最大风速达到 $2.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 小潮期间, 偏南风强于偏北风, 偏南风最大风速达到 $3.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。冬季, 小潮期间, 研究海区由偏北风控制, 其风速最大达到 $6.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 中潮期间, 由较强的偏南风转偏北风; 大潮期间, 以较弱的偏北风为主。夏季, 研究海区没有显示出明显的西南季风, 这可能是由于观测时间处于夏末秋初, 西南季风较弱。

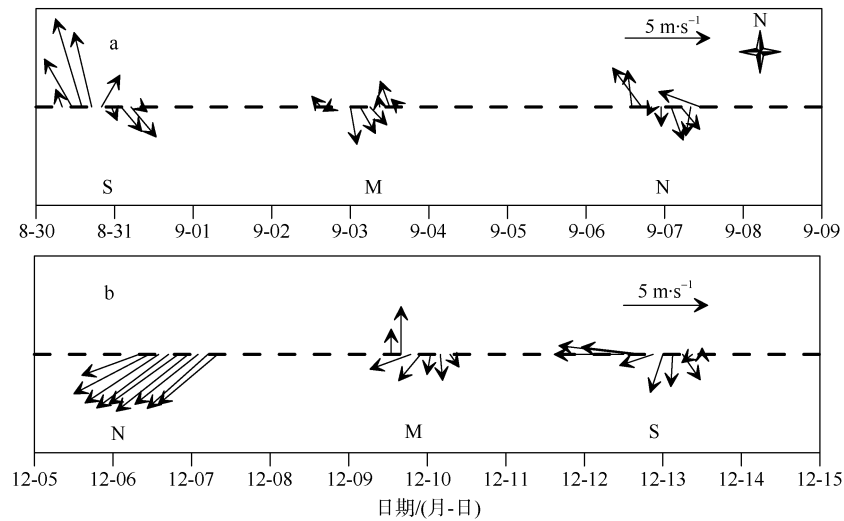


图2 观测期间 V8 站(a), V5(b)站风矢量图

S、M、N 分别代表大潮、中潮、小潮

Fig. 2 Wind vectors at stations V8 (a) and V5 (b) during observations. S, M, and N represent spring tide, moderate tide and neap tide, respectively

2.1 夏季

图3和图4分别是夏季涨潮期和退潮期的实测平均流速、流向图。图3显示,在夏季涨潮期,在红海湾西北海区,各站各层实测平均涨潮流流向大致呈偏西

向。大潮期,最大平均涨潮流在 V4 站表层, $15.3\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 流向 224° (图3a); 中潮期,最大平均涨潮流在 V5 站表层, $16.8\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 流向 272° (图3d); 小潮期,最大平均涨潮流在 V3 站表层, $15.1\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 流向 263° (图3g)。

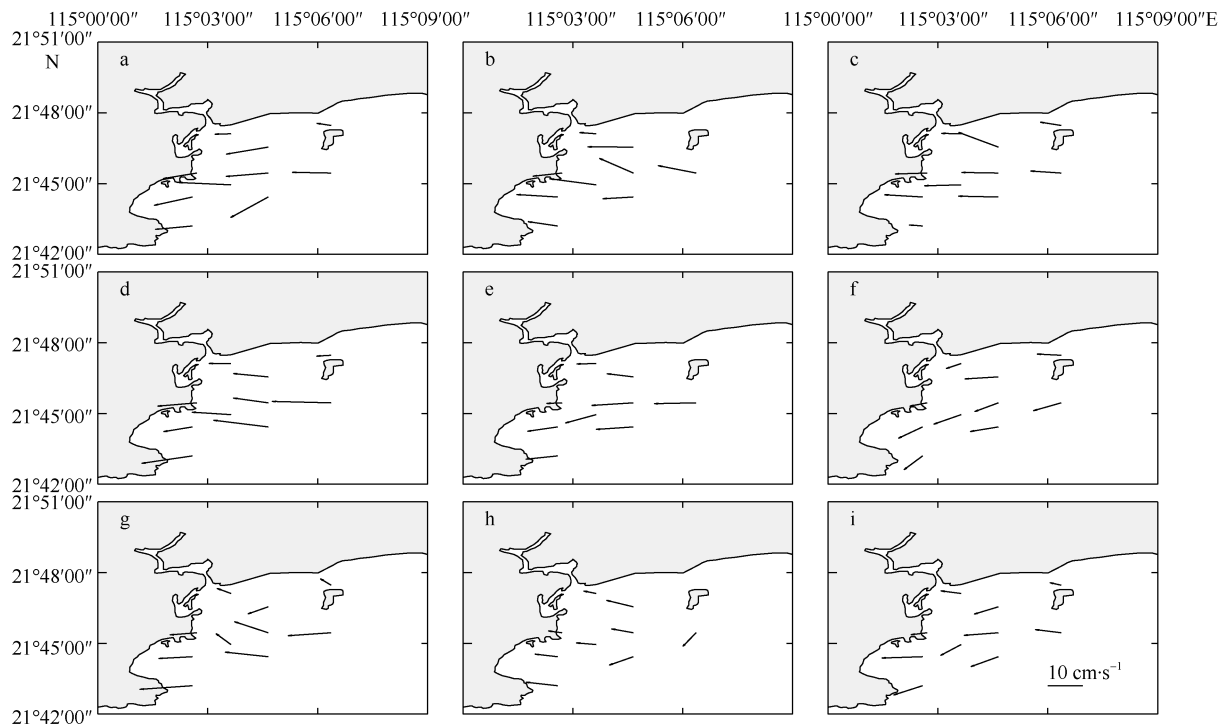


图3 夏季涨潮期平均流矢图

大潮表层(a), 大潮中层(b), 大潮底层(c), 中潮表层(d), 中潮中层(e), 中潮底层(f), 小潮表层(g), 小潮中层(h), 小潮底层(i)

Fig. 3 Averaged velocity during the flood tide in summer 2008. Surface (a), middle (b) and bottom (c) layers in the spring tide; surface (d), middle (e) and bottom (f) layers in the moderate tide; surface (g), middle (h) and bottom (i) layers in the neap tide

图 4 显示, 在夏季退潮期, 在红海湾西北海区, 各站各层实测平均退潮流流向大致呈偏东向。中潮期, 各站各层平均退潮流以东偏南为主, 大潮期和小潮期各站各层以东偏北为主。大潮期, 最大平均

退潮流在 V4 站表层, $13.0\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 流向 77° (图 4a); 中潮期, 最大平均退潮流在 V4 站表层, $14.0\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 流向 138° (图 4d); 小潮期, 最大平均退潮流在 V5 站中层, $14.0\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 流向 102° (图 4h)。

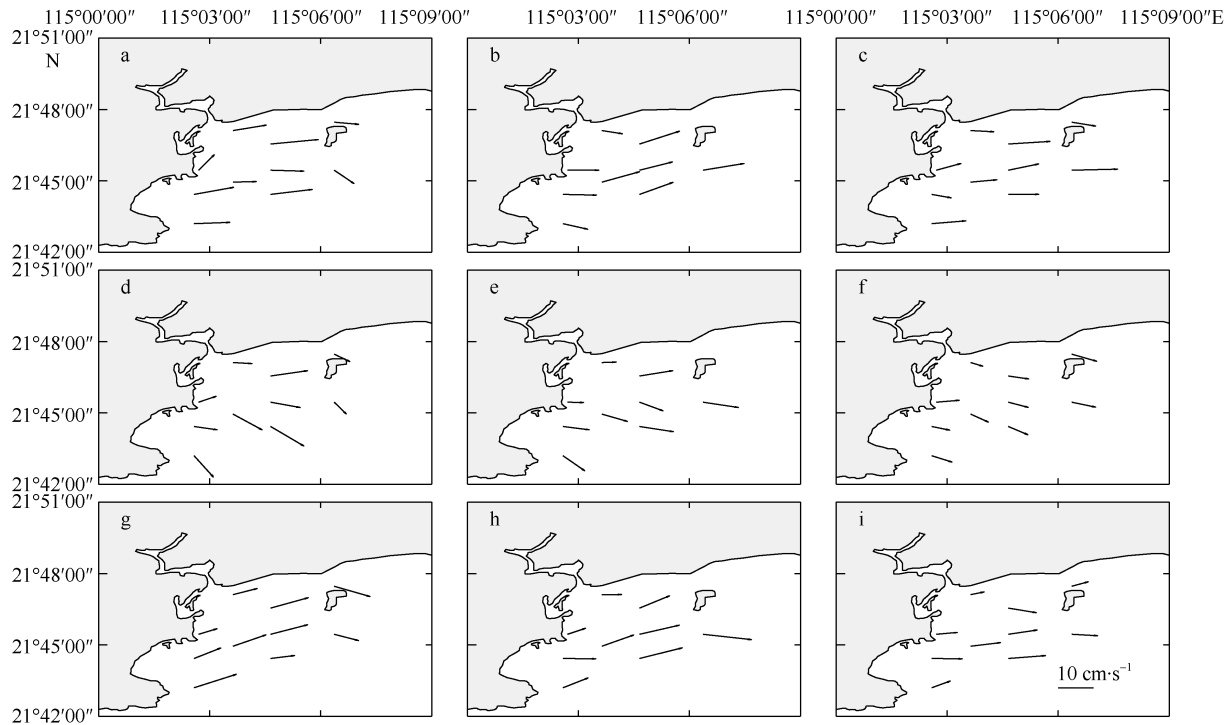


图 4 夏季退潮期平均流矢图

大潮表层(a), 大潮中层(b), 大潮底层(c), 中潮表层(d), 中潮中层(e), 中潮底层(f), 小潮表层(g), 小潮中层(h), 小潮底层(i)

Fig. 4 Same as Fig. 3, except during the ebb tide in summer 2008

夏季大潮期, 在偏北风和偏南风的作用下, 涨潮平均流和退潮平均流分别以偏西向和偏东向为主(图 3a、图 3b、图 3c 和图 4a、图 4b、图 4c); 中潮期, 在偏北风的控制下, 涨潮平均流和退潮平均流均出现南偏, 涨潮平均流呈流向西南的趋势, 退潮平均流流向东南(图 3d、图 3e、图 3f 和图 4d、图 4e、图 4f); 小潮期, 在偏南风与偏北风的交替作用下, 涨潮平均流以西向为主, 退潮平均流以东北向为主(图 3g、图 3h、图 3i 和图 4g、图 4h、图 4i)。涨潮平均流在研究海区北部(V8 站以北)以西偏北为主, 在南部以西偏南为主; 退潮平均流在大潮期和小潮期以东偏北为主, 在中潮期受偏北风影响以东偏南为主。大潮期流向与陈丕翔等(2013)通过数值模式模拟的潮流场结果基本一致。

2.2 冬季

图 5 和图 6 分别是冬季涨潮期和退潮期的实测平均流速、流向图。图 5 显示, 冬季涨潮期, 红海湾西北海区, 各站各层实测平均涨潮流流向大致呈偏

东向, 与夏季分布相似。在小潮期, 平均涨潮流明显大于大潮期和中潮期的平均涨潮流, 这可能是由于小潮期观测时段, 以较强的东北风为主, 而大潮期和中潮期东北风较弱。大潮期, 最大平均涨潮流在 V4 站底层, $10.4\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 流向 241° (图 5c); 中潮期, 最大平均涨潮流在 V5 站中层, $17.8\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 流向 277° (图 5e); 小潮期, 最大平均涨潮流在 V3 站底层, $16.5\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 流向 214° (图 5i)。

图 6 显示, 在冬季涨潮期, 在研究海区, 大潮期和中潮期的各站各层平均退潮流流向大致呈偏东向, 与夏季分布相似, 小潮期受东北风影响, 南部海区平均退潮流以东南向为主。大潮期, 最大平均退潮流在 V3 站底层, $10.1\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 流向 85° (图 6c); 中潮期, 最大平均退潮流在 V4 站中层, $19.3\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 流向 50° (图 6e); 小潮期, 最大平均退潮流在 V5 站底层, $13.3\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 流向 164° (图 6i)。冬季小潮期间, 受较强的东北风影响, 各站涨潮平均流流速普遍大于退潮平均流流速。

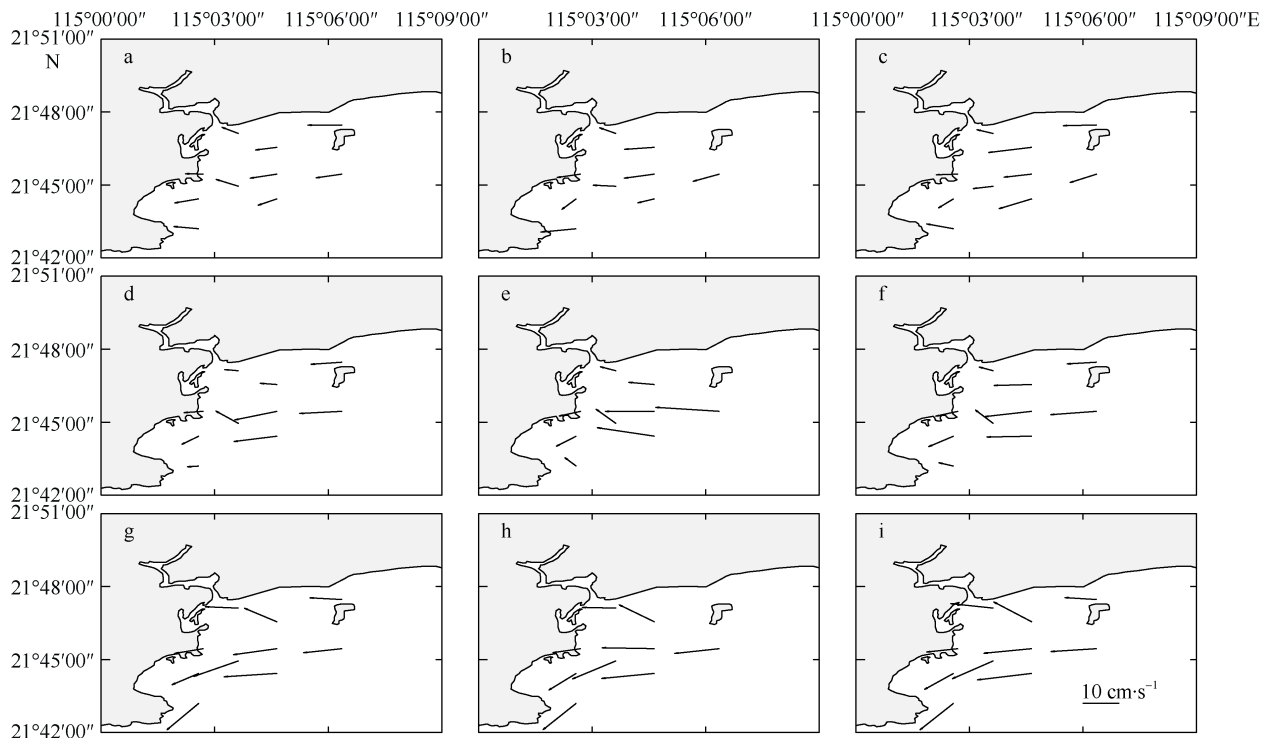


图5 冬季涨潮期平均流矢图

大潮表层(a), 大潮中层(b), 大潮底层(c), 中潮表层(d), 中潮中层(e), 中潮底层(f), 小潮表层(g), 小潮中层(h), 小潮底层(i)

Fig. 5 Same as Fig. 3, except during the flood tide in winter 2008

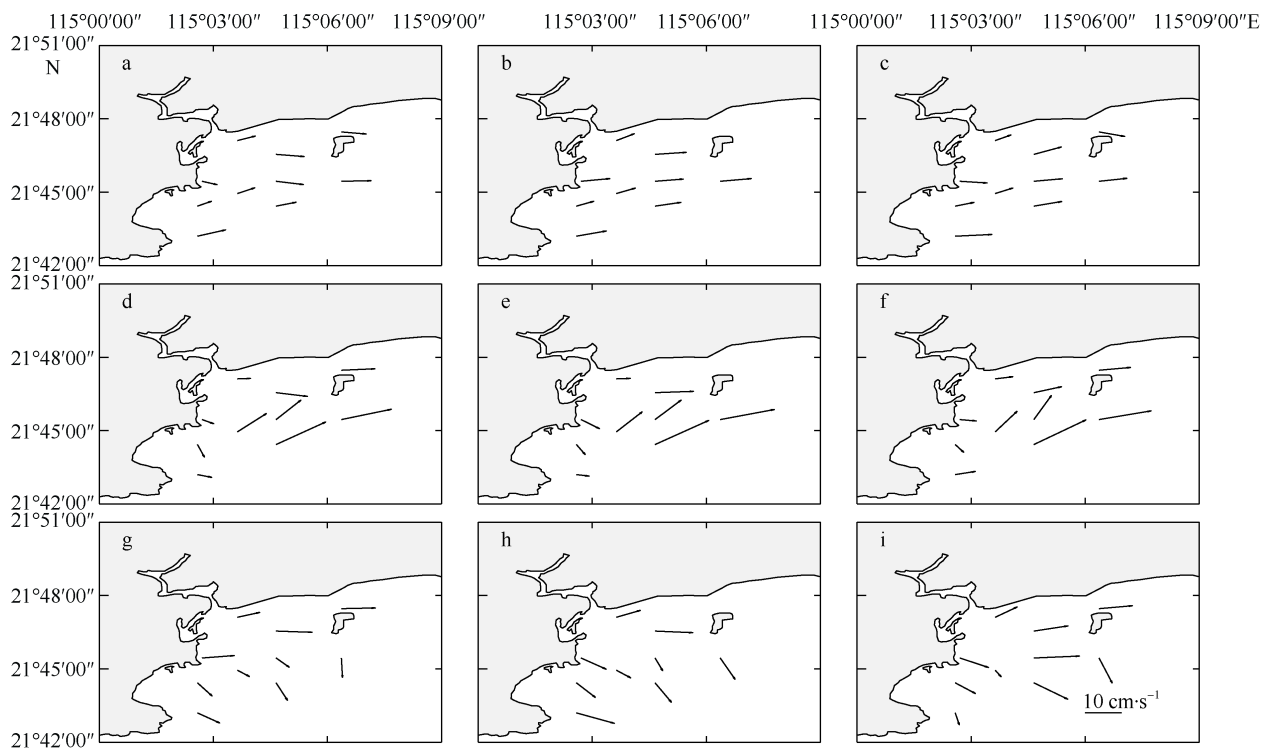


图6 冬季退潮期平均流矢图

大潮表层(a), 大潮中层(b), 大潮底层(c), 中潮表层(d), 中潮中层(e), 中潮底层(f), 小潮表层(g), 小潮中层(h), 小潮底层(i)

Fig. 6 Same as Fig. 3, except during the ebb tide in winter 2008

冬季大潮期, 在较弱的偏北风影响下, 涨潮平均流和退潮平均流分别以西偏南和东偏北向为主(图 5a、图 5b、图 5c 和图 6a、图 6b、图 6c); 中潮

期, 在偏北风和偏南风的影响下, 涨潮平均流以西向为主, 退潮平均流以东偏北向为主(图 5d、图 5e、图 5f 和图 6d、图 6e、图 6f); 小潮期, 在偏北风的

控制下, 涨潮平均流以西偏南向为主, 退潮平均流以东偏南向为主(图 5g、图 5h、图 5i 和图 6g、图 6h、图 6i)。涨潮平均流在研究海区北部(V8 站以北)以西偏北为主, 流向赤石河河口, 在南部以西偏南为主; 退潮平均流以东偏北为主。

由上述可知, 无论冬季还是夏季, 研究海区涨潮期间实测流平均流向大致呈偏西向, 退潮期间实测流平均流向大致呈偏东向, 实测海流受风和地形影响流向出现一定的变化。

3 潮流准调和分析

3.1 潮流性质

根据潮流特征值 $F(F=(WK_1+WO_1)/WM_2)$, WO_1 、 WK_1 、 WM_2 分别为主太阴日分潮流、太阳太阳赤纬日分潮流、主太阴半日分潮流的椭圆长半轴长度)来判断各站位的潮流性质(方国洪等, 1986)。调查期间, 各测站潮流特征值大部分在 0.5~2.0 之间(表 2), 平均值为 1.54, 表明红海湾西北海区属不规则半日潮流型海域, 与数值模式计算结果一致(杨万康等, 2013)。与部分测站表、中、底层性质不一致, 这主要是日潮流最大流速(WK_1+WO_1)的垂直变化要比半

日潮流(WM_2)的垂直变化大的原因(方国洪, 1984)。

表 2 各测站潮流特征值

Tab. 2 Tidal current characteristics at 10 stations

层次	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
表层	1.94	1.87	2.13	1.48	1.35	1.13	2.68	1.11	1.21	1.23
中层	1.73	1.77	1.78	1.44	1.26	—	1.40	0.89	1.22	1.25
底层	2.67	1.99	1.87	1.52	1.26	1.77	1.78	1.05	1.00	1.05

3.2 潮流椭圆

图 7 为各站 O_1 、 K_1 、 M_2 分潮潮流椭圆示意图, 从图中可知, 各站潮流椭圆长轴大于短轴, 表现出一定的往复流性质, 以 M_2 分潮最为明显, M_2 分潮各站表、中、底三层的长轴均大于短轴。部分站位(如 V3、V4 和 V5) O_1 和 K_1 分潮潮流椭圆短轴也较长, 表现出一定的旋转流性质。各站表、中、底 M_2 分潮潮流椭圆长轴方向基本一致, 而 O_1 和 K_1 分潮潮流椭圆长轴方向表现出一定的不一致性。 O_1 和 K_1 分潮潮流椭圆长轴方向表层与中层相差约 90° , 表层与底层长轴方向基本一致。 M_2 分潮椭圆旋转率绝对值最小值出现在 V6 站, 仅为 0.1, 表明 V6 站所在位置潮流运动形式以往复流为主, 分析其原因可能是该站处于芒屿岛与陆地之间, 受地形约束作用较明显。

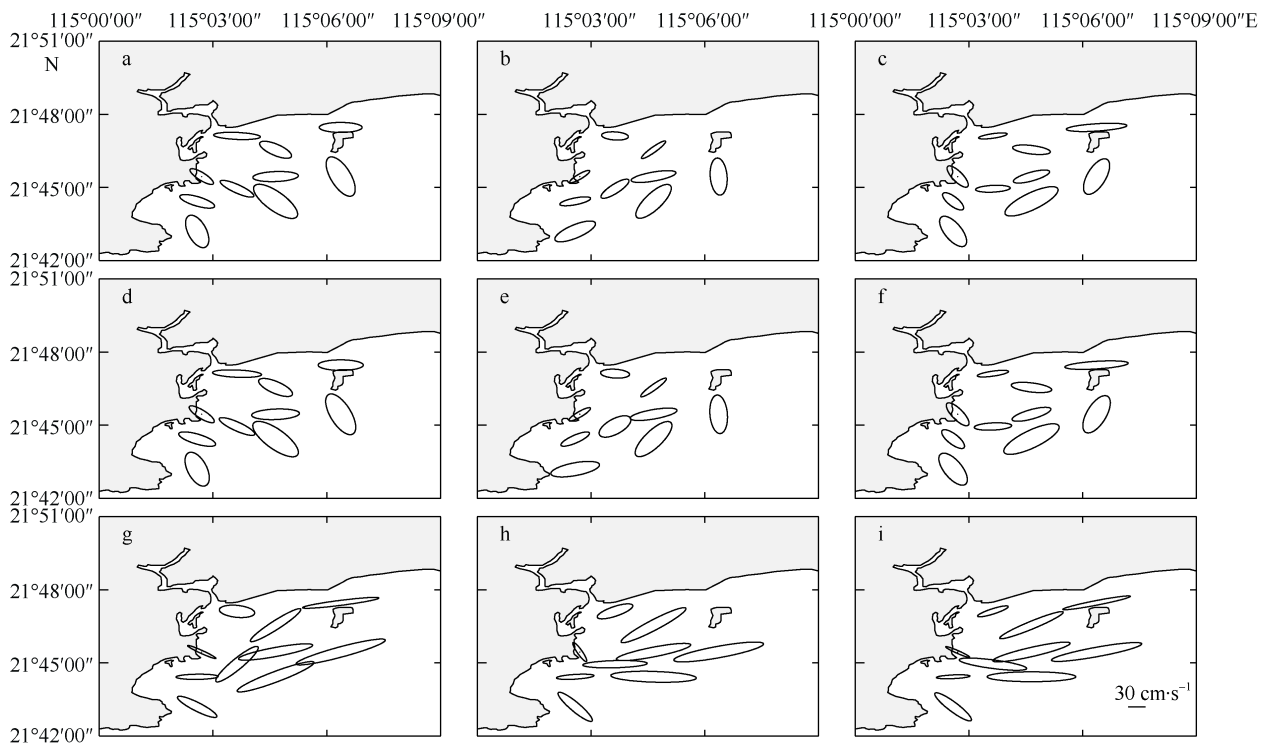


图 7 O_1 、 K_1 、 M_2 分潮潮流椭圆示意图

O_1 表层(a), O_1 中层(b), O_1 底层(c), K_1 表层(d), K_1 中层(e), K_1 底层(f), M_2 表层(g), M_2 中层(h), M_2 底层(i)

Fig. 7 O_1 , K_1 and M_2 tidal current ellipses at 10 stations. O_1 tidal current ellipses at surface (a), middle (b) and bottom(c) layers; K_1 tidal current ellipses at surface (d), middle (e) and bottom(f) layers; M_2 tidal current ellipses at surface (g), middle (h) and bottom(i) layers

3.3 余流

余流主要是指从实测海流中消除周期性流(如潮流)后的剩余部分(方国洪, 1984), 受诸多因素的影响。图 8 为各测站夏季余流图。从图中可知, 夏季, 在研究海区, 大潮期, 表、中、底三层流向明显不一致, 最大余流流速在 V5 站中层, 达到 $7.8\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 方向 61° (图 8b); 中潮期, 各站层余流流向以西南向为主, 最大余流流速在 V5 站表层, 达到 $12.2\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 方向 279° (图

8d); 小潮期, 各站层余流流向以东北向为主, 中层最大, 最大余流流速在 V4 站, 达到 $11.5\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 方向 62° (图 8h)。结合图 2 分析可知, 夏季大潮期, 可能由于风向的转变, 导致余流流向的不规则; 中潮期, 海区主要由偏北风控制, 余流在偏北风的作用下, 以西南向为主; 小潮期, 在较强的偏南风作用下, 余流流向东北。虽然夏季赤石河径流量稍大, 但 V7 站余流受其影响较小, 最大余流仅为 $4.3\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

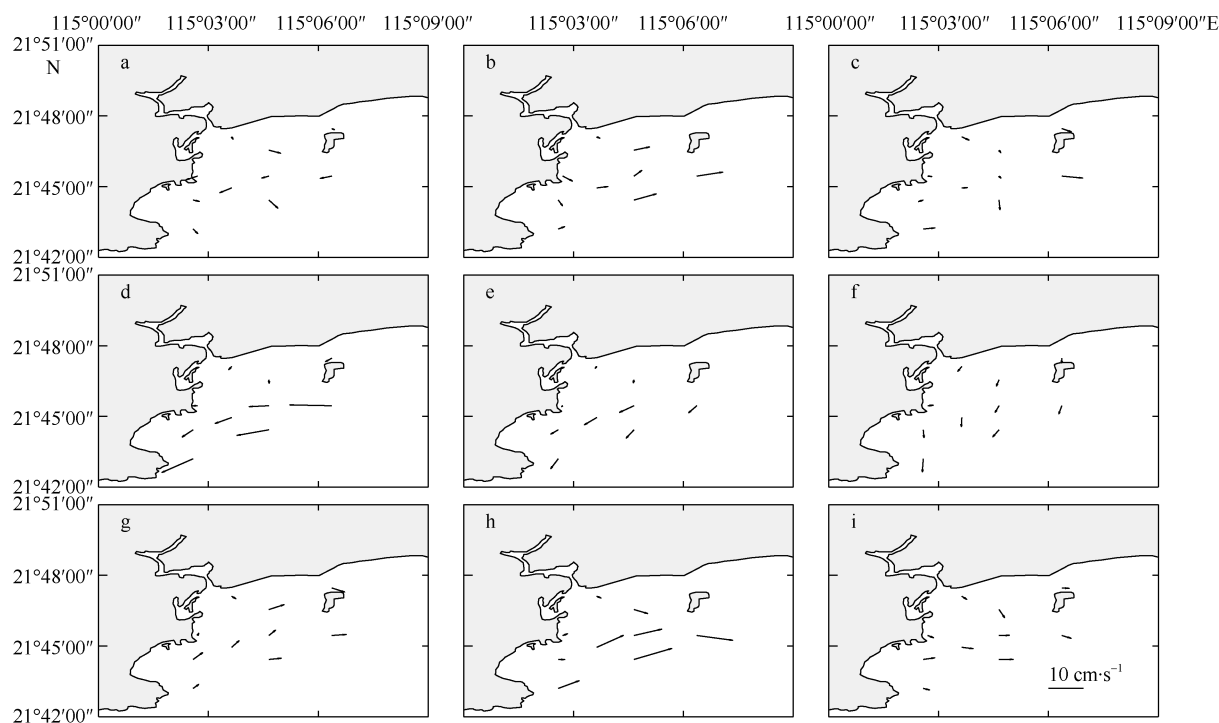


图 8 夏季余流图

大潮表层(a), 大潮中层(b), 大潮底层(c), 中潮表层(d), 中潮中层(e), 中潮底层(f), 小潮表层(g), 小潮中层(h), 小潮底层(i)

Fig. 8 Tidal residual current in summer 2008. Surface (a), middle (b) and bottom (c) layers in the spring tide; surface (d), middle (e) and bottom (f) layers in the moderate tide; surface (g), middle (h) and bottom (i) layers in the neap tide

图 9 为冬季余流图。图 9 显示, 冬季研究海区南部海域, 大潮期, 余流流向东偏北, 最大流速在北部海域 V8 站底层, 达到 $4.7\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 方向 258° (图 9c); 中潮期, 余流流向西偏南, 最大流速在 V4 站底层, 达到 $18.9\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 方向 51° (图 9f); 小潮期, 余流流向西偏南, 最大流速在 V3 站表层, 达到 $15.1\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 方向 207° (图 9g)。结合图 2 分析可知, 冬季大潮期, 风力较弱, 海区南部余流受地形影响流向东北; 中潮期, 在较强的偏北风影响下, 海区南部余流流向西南; 小潮期, 在偏北风的控制下, 余流流向西南。冬季赤石河径流量较小, V7 站余流受其影响比夏季更小, 最大余流仅为 $3.2\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由图 8 和图 9 可知, 无论冬季还是夏季, 海

区南部余流流速普遍大于北部余流流速。

红海湾西北海区潮波系统受海底地形及海岸边界条件的影响, 特别是岸线形态、风和浅海地形的摩擦作用, 导致红海湾西北海区余流变化复杂。观测时间段内风速、风向变化复杂, 红海湾西北海区水深又较浅, 响应强迫因子的时间比较短, 导致余流变化更加复杂。赤石河河口附近水深只有 2m 左右, 潮流受径流(冲淡水)、风的影响较大, 变化最为复杂; 芒屿岛北部, 受地形约束明显, 但因其水深也较浅, 海流也受风的影响; 研究海区南部水域相对开阔, 除近岸受岸线形态影响, 潮流受风和底摩擦的影响比较大, 余流方向比较统一。

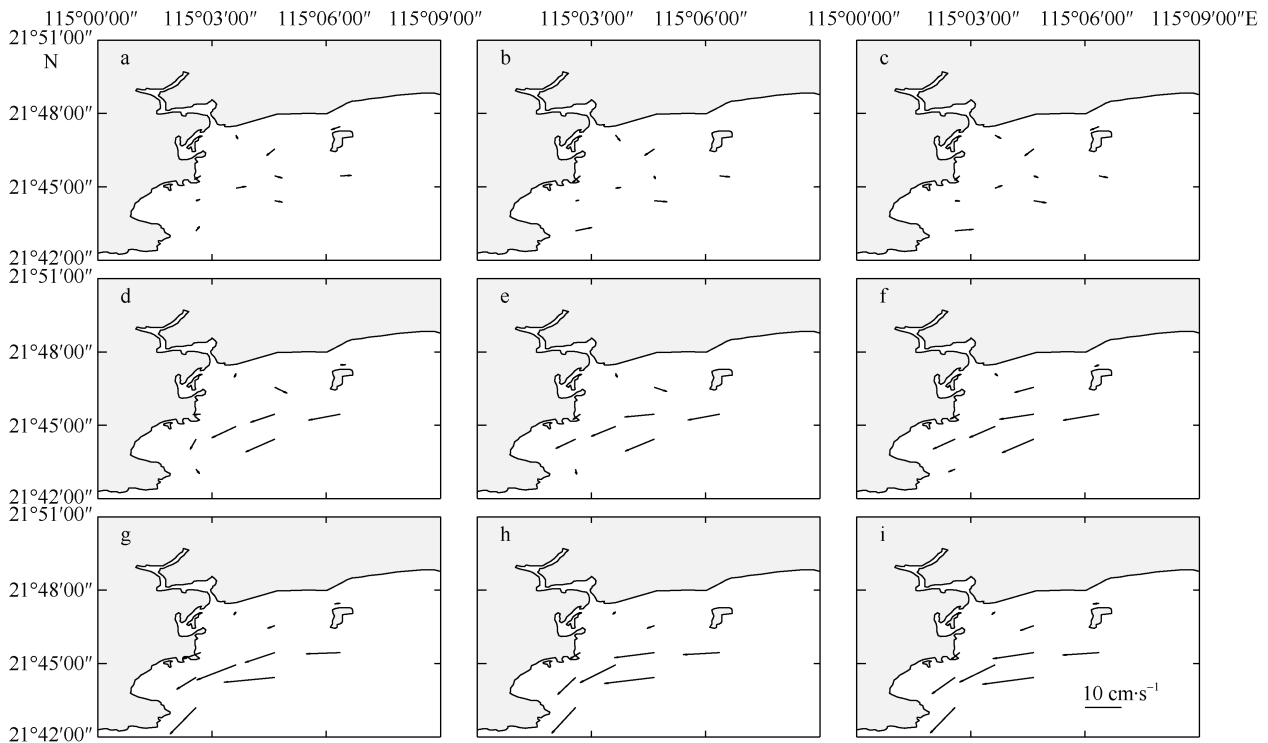


图 9 冬季余流图

大潮表层(a), 大潮中层(b), 大潮底层(c), 中潮表层(d), 中潮中层(e), 中潮底层(f), 小潮表层(g), 小潮中层(h), 小潮底层(i)

Fig. 9 Same as Fig. 8, except in winter 2008

4 潮能分析

潮能通量为单位时间内通过自海底至海面单位密度宽度断面的潮能(方国洪等, 1994), 其计算公式为:

$$P = \frac{\rho g h}{T} \int_0^T \xi V dt$$

式中的 P 为潮能通量, 单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$, T 为观测周期, g 为重力加速度 ($9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$), V 为速度矢量, h 为水深, ρ 为海水的密度, 本文取 $1020 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, ξ 表示该观测点的水位变化, 选用 T1 站的水位数据来代表整个海区的水位变化, 计算得到夏季和冬季不同潮期各个站的潮能通量, 再通过插值得到研究海区潮能通量平面分布(图 10)。

在 2008 年夏季, 大潮期的潮能主要由东南外海输送进来, 而中潮期和小潮期的潮能主要由东部向西传播至红海湾西北海区, 大潮期潮能通量最大, 潮能进入量值可达 $1.0 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ 。冬季的数据表示, 潮能主要由东部向西传播至红海湾西北海区, 小潮期潮能通量最大, 潮能进入量值可达 $4.8 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$, 明显大于夏季。夏季大潮期和其他潮期平均潮能传播方向有所不同, 主要受观测所

在大小潮周期影响。冬季观测时段潮位正处在较高的水位, 潮能主要向近岸堆积, 潮能通量的传播方向与 M_2 的分潮长轴走向相似。

5 小结

本文利用 2008 年夏季和冬季的潮流资料, 分析了红海湾西北海区海流特征, 结果如下:

1) 红海湾西北海区属不规则半日潮流型海域, M_2 分潮比较明显, 潮流性质属往复流带一定旋转流性质。

2) 涨潮期间实测流平均流向大致呈偏西向, 退潮期间实测流平均流向大致呈偏东向, 海流流向受地形和风的影响而出现变化。夏季, 最大平均涨潮流为 $16.8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大平均退潮流为 $14.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; 冬季, 最大平均涨潮流为 $17.8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大平均退潮流为 $19.3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3) 余流受风和地形的影响比较明显, 在偏北风作用下, 余流流向西偏南, 在偏南风作用下, 余流流向东偏北。夏季, 最大余流可达 $12.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 冬季最大余流可达 $18.9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

4) 潮能主要由东部向西传播至红海湾西北海区, 潮能进入量值可达 $4.8 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

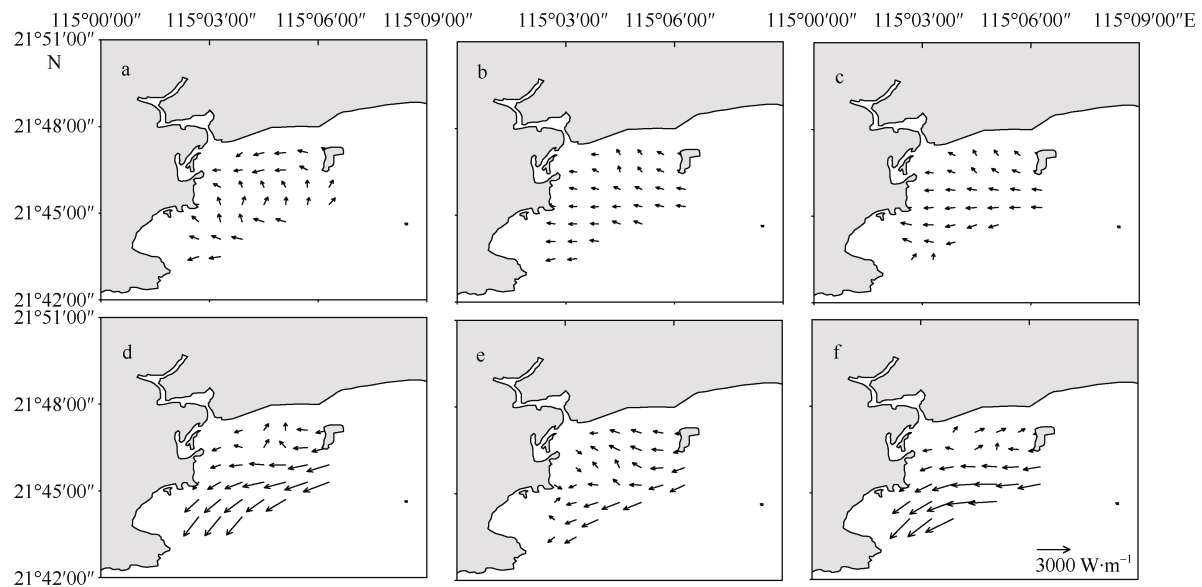


图 10 红海湾西北海区潮能通量

夏季大潮(a), 夏季中潮(b), 夏季小潮(c), 冬季大潮(d), 冬季中潮(e), 冬季小潮(f)

Fig. 10 Vectors of tidal energy flux. Spring tide (a), moderate tide (b) and neap tide (c) in summer; spring tide (d), moderate tide (e) and neap tide (f) in winter

参考文献 References

- 曹德明, 方国洪, 1990. 南海北部潮汐潮流的数值模型[J]. 热带海洋, 9(2): 63-70. CAO DEMING, FANG GUOHONG, 1990. A numerical model for tides and tidal currents in northern South China Sea[J]. Tropic Oceanology, 9(2): 63-70 (in Chinese with English abstract).
- 陈丕翔, 倪培桐, 黄健东, 2013. 华润电力海丰电厂 $2 \times 1000\text{MW}$ 机组工程温排水数值模拟研究[J]. 广东水利水电, (4): 21-24 (in Chinese).
- 方国洪, 1974. 潮汐分析和预报的准调和分潮方法 I: 准调和分潮[J]. 海洋科学集刊, (9): 1-15 (in Chinese).
- 方国洪, 1984. 潮流垂直结构的基本特征——理论和观测的比较[J]. 海洋科学, (3): 1-11. FANG GUOHONG, 1984. Basic characteristics of the vertical structure of tidal currents—A comparison of theory and observations [J]. Marine Science, (3): 1-11 (in Chinese with English abstract).
- 方国洪, 郑文振, 陈宗镛, 等, 1986. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社: 161-191(in Chinese).
- 方国洪, 曹德明, 黄企洲, 1994. 南海潮汐潮流的数值模拟[J]. 海洋学报, 16(4): 1-12 (in Chinese).
- 韩舞鹰, 马克美, 1988. 粤东沿岸上升流的研究[J]. 海洋学报, 19(1): 52-59 (in Chinese).
- 贾晓平, 李纯厚, 陈作志, 等, 2012. 南海北部近海渔业资源及其生态系统水平管理策略[M]. 北京: 海洋出版社: 1-490 (in Chinese).
- 宁加佳, 杜飞雁, 李亚芳, 等, 2016. 红海湾远海梭子蟹 *Portunus pelagicus* 的食物组成及营养位置分析[J]. 海洋学报, 38(10): 62-69. NING JIAJIA, DU FEIYAN, LI YAFANG, et al, 2016. Dietary composition and trophic position of blue swimmer crab (*Portunus pelagicus*) in Honghai bay[J]. Haiyang Xuebao, 38(10): 62-69 (in Chinese with English abstract).
- 孙钦帮, 张冲, 乌立国, 等, 2017. 广东红海湾表层沉积物重金属含量的空间分布特征与污染状况评价[J]. 生态环境学报, 26(5): 843-849. SUN QINBANG, ZHANG CHONG, WU LIGUO, et al, 2017. Concentration distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments in Honghai Bay[J]. Ecology and Environmental Sciences, 26(5): 843-849 (in Chinese with English abstract).
- 吴伦宇, 郑斌鑫, 曾志, 等, 2015. 粤东甲子附近海域潮流特征研究[J]. 海洋科学进展, 33(2): 131-141. WU LUNYU, ZHENG BINXIN, ZENG ZHI, et al, 2015. Tidal current characteristics in the sea area near Jiazi in East Guangdong[J]. Advances in Marine Science, 33(2): 131-141 (in Chinese with English abstract).
- 吴仁豪, 蔡树群, 王盛安, 等, 2007. 大亚湾海域潮流和余流的三维数值模拟[J]. 热带海洋学报, 26(3): 18-23. WU RENHAO, CAI SHUQUN, WANG SHENG'AN, et al, 2007. Three-dimensional numerical simulation of tidal current and residual current at Daya bay[J]. Journal of Tropical Oceanography, 26(3): 18-23 (in Chinese with English abstract).
- 吴日升, 李立, 2003. 南海上升流研究概述[J]. 台湾海峡, 22(2): 269-277. WU RISHENG, LI LI, 2003. Summarization of study on upwelling system in the South China Sea[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 22(2): 269-277 (in Chinese with English abstract).
- 武文, 严聿晗, 宋德海, 2017. 大亚湾的潮汐动力学研究

- I. 潮波系统的观测分析与数值模拟[J]. 热带海洋学报, 36(3): 34–45. WU WEN, YAN YUHAN, SONG DEHAI, 2017. Study on the tidal dynamics in Daya Bay, China Part I. Observation and numerical simulation of tidal dynamic system [J]. Journal of Tropical Oceanography, 36(3): 34–45 (in Chinese with English abstract).
- 夏综万, 廖世智, 冯砚青, 2013. 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. XIA ZONGWAN, LIAO SHIZHI, FENG YANQING, 2013. 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, 35(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- 许金电, 蔡尚湛, 宣莉莉, 等, 2014. 粤东至闽南沿岸海域夏季上升流的调查研究[J]. 热带海洋学报, 33(2): 1–9. XU JINDIAN, CAI SHANGZHAN, XUAN LILI, et al, 2014. Observational study on summertime upwelling in coastal seas between eastern Guangdong and southern Fujian[J]. Journal of Tropical Oceanography, 33(2): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- 严聿晗, 武文, 宋德海, 等, 2017. 大亚湾的潮汐动力学研究——II. 潮位和潮流双峰现象的产生机制[J]. 热带海洋学报, 36(3): 46–54. YAN YUHAN, WU WEN, SONG DEHAI, et al, 2017. Study on the tidal dynamics in Daya Bay, China Part II. The generation of double high waters and double-peak flood-current flows[J]. Journal of Tropical Oceanography, 36(3): 46–54 (in Chinese with English abstract).
- 杨国标, 2001. 大亚湾海区潮流运动特征[J]. 人民珠江, 22(1): 30–32 (in Chinese).
- 杨万康, 尹宝树, 杨德周, 等, 2013. 基于 FVCOM 的南海北部海域潮汐潮流数值模拟[J]. 海洋科学, 37(9): 10–19. YANG WANKANG, YIN BAOSHU, YANG DEZHOU, et al, 2013. Application of FVCOM in numerical simulation of tide and tidal currents in the northern South China Sea[J]. Marine Sciences, 37(9): 10–19 (in Chinese with English abstract).
- 于文泉, 1987. 南海北部上升流的初步探讨[J]. 海洋科学, (6): 7–10. YU WENQUAN, 1987. A preliminary approach of the upwelling for the northern South China Sea[J]. Marine Science, (6): 7–10 (in Chinese with English abstract).
- 曾流明, 1986. 粤东沿岸上升流迹象的初步分析[J]. 热带海洋, 5(1): 68–73. ZENG LIUMING, 1986. A preliminary analysis of indicators of offshore upwelling off eastern Guangdong [J]. Tropic Oceanology, 1986, 5(1): 68–73 (in Chinese with English abstract).
- 庄伟, 王东晓, 吴日升, 等, 2005. 2000 年夏季福建、广东沿海上升流的遥感与船舶观测分析[J]. 大气科学, 29(3): 438–444. ZHUANG WEI, WANG DONGXIAO, WU RISHENG, et al, 2015. Coastal upwelling off eastern Fujian—Guangdong detected by remote sensing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 29(3): 438–444 (in Chinese with English abstract).
- GAN JIANPING, CHEUNG A, GUO XIAOGANG, et al, 2009. Intensified upwelling over a widened shelf in the northeastern South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 114(C9): C09019.
- JING ZHIYOU, QI YIQUAN, HUA ZULIN, et al, 2009. Numerical study on the summer upwelling system in the northern continental shelf of the South China Sea[J]. Continental Shelf Research, 29(2): 467–478.
- WANG DONGXIAO, ZHUANG WEI, XIE SHANGPING, et al, 2012. Coastal upwelling in summer 2000 in the northeastern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 117(C4): C04009.