

# 北部湾东北部潮锋的观测与分析\*

王 谦<sup>1</sup> 管卫兵<sup>1,2</sup> 曹振轶<sup>1</sup> 陈 琪<sup>1</sup>

(1. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室 自然资源部第二海洋研究所 杭州 310012; 2. 浙江大学 海洋学院 舟山 316021)

**摘要** 近海潮锋的分布与温度、盐度乃至海洋生产力的分布都存在紧密联系。基于北部湾东北部的实测数据,对比分析 2016—2017 年北部湾东北部海域的温度、盐度、密度等分布,并利用 ROMS (Regional Ocean Model System)正压与斜压模式,计算 Simpson-Hunter (S-H)参数,阐述了潮锋出现位置及其与温度、盐度和密度的关系。结果表明:北部湾东北部潮锋发生的主要区域位于雷州半岛附近,潮混合区温盐密混合较为均匀。利用 ROMS 模式计算所得的最大垂直平均流速来计算 S-H 参数,认为潮锋出现位置位于 S-H 参数值为 2 处,与实测结果较为一致,且认为正压模式比斜压模式更能准确模拟潮混合区。另外,分析观测数据发现,温度、盐度、密度锋终年存在。近岸处密度锋主要受盐度锋控制,而潮混合产生的盐度锋又容易被径流掩盖。风力较大时三种锋都易向水深更深处推进,潮混合区终年垂向混合较好。

**关键词** 北部湾; 潮锋; 潮混合; ROMS (Regional Ocean Model System)

**中图分类号** P731 **doi:** 10.11693/hyhz20180700177

北部湾位于南海西北部,是一个三面靠陆、一面接海的浅海半封闭海湾,其海湾面积约为  $12.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,平均水深 40m,最大水深约为 100m。北部湾的东北部有我国重要的港口城市,如广东的湛江,广西的北海、钦州、防城港等,潮汐、潮流等高频海洋动力过程与沿岸人民的生产生活息息相关。

北部湾为全世界比较典型的全日潮海区,正规全日潮主要分布于广西沿岸及雷州半岛和海南岛西岸一带,在半个月周期中有 8—13d 每天出现一次高潮和低潮(薛鸿超等,1995)。而在陆架浅水区域,潮流受底摩擦的作用,其平均运动的动能将会转化为湍流而耗散,水深越小,湍流越强。因此,湍流破坏了近岸浅水区内的季节性温跃层结构,将局地上层暖水与下层冷水进行混合,形成等温线密集的水平过渡区,即潮混合控制的潮锋(赵保仁,1985)。

对于潮锋的研究,最早是由 Simpson 和 Hunter 在研究夏季爱尔兰海中由潮混合形成的浅水海洋锋时提出的,同时建立了 S-H 参数  $k = \log_{10}(h/u^3)$ (其中  $h$

为水深,  $u$  表示潮流速率),并认为 1.8—2.0 的  $k$  值等值线近乎平行于实测潮锋锋面(Simpson *et al.*, 1974)。后来,在世界各地都有潮锋的观测与研究,且认为潮锋区域具有高生产力以及复杂的循环机制(Burchard *et al.*, 2008)。在我国,对于潮锋的研究主要集中在渤海、黄海和东海,如赵保仁(1985)、周锋等(2008)对于黄海潮锋的研究,Zhu 等(2013)等对台湾海峡的夏季潮混合研究,等等。而在南海,潮锋的研究相对于渤海、黄海、东海要少得多。Hu 等(2003)等首次利用 POM(Princeton Ocean Model)结合水色卫星的资料对南海西北部,即环海南岛区域的潮锋进行了研究,指出 S-H 参数在 2.9—3.0 与卫星观测到的叶绿素锋面比较吻合,潮锋位置主要集中在雷州半岛、琼州海峡与海南岛西南沿岸。李炎等(2009)也指出海洋生态系统中叶绿素  $a$  (初级生产力之一)的分布范围和潮锋分布范围极为类似。Lü 等(2008)在海南岛西部沿岸海域发现有由潮锋引起的上升流存在。佟景全(2009)基于 Hu 等(2003)等的研究,利用 ECOM(Estuarine Coastal

\*国家重点研发计划项目,2017YFC1404300 号;“全球变化与海气相互作用”专项,GASI-IPOVAI-04 号;卫星海洋环境动力学国家重点实验室自主项目,SOEDZZ1805 号,SOEDZZ1803 号。王谦,硕士研究生,E-mail: 369402617@qq.com

通信作者: 管卫兵,研究员,E-mail: gw@so.org.cn

收稿日期: 2018-07-23, 收修改稿日期: 2018-10-21

Ocean Model)对于南海潮锋也进行了模拟,并计算了S-H参数,同样认为在雷州半岛附近海域和海南岛西南沿岸海域存在潮锋。Jing等(2015)等认为,潮是南海区域温度锋出现的重要原因之一。

除了模拟结果,对遥感观测和再分析的温盐数据等进行分析,也是研究潮锋的重要方法。罗琳等(2003)等利用1991—1998年的卫星遥感海水表面温度资料(Advanced Very High Resolution Radiometer Sea Surface Temperature, AVHRR SST),对北部湾温度锋的季节变化和年际变化进行了探讨;朱凤芹等(2014)等利用1950—2007年的SODA(Simple Ocean Data Assimilation)数据,分析了南海上层温度锋的温度特征;上述研究结果均证实了北部湾温度锋的存在,且在春季出现的频率最大,夏季次之。北部湾春季表层冷水因太阳辐射增强而迅速升温,加之风力减弱,海水容易出现层化现象,夏季表层水温分布均匀,垂向上容易出现明显的温跃层(昝婷婷,2005)。因此,春季与夏季是北部湾潮锋观测的最佳季节。

以往有关北部湾东北部海洋锋的研究,大都是基于对模式结果或遥感资料的分析所得,现场实测数据(特别是固定断面的季节性重复观测)很少。本文将利用多航次重复观测水文数据,结合ROMS模式结果,对北部湾东北部所出现的潮锋现象进行分析,并探究其变化规律。

## 1 数据与方法

采用国家重点研发计划“我国近海致灾赤潮形成机理、监测预测及评估防治技术”项目2016—2017年在北部湾东北部海域(图1)进行的9次多学科综合调查航次资料。温、盐、密、深等站位剖面数据,主要是通过美国SEABIRD公司的CTD(Conductivity-Temperature-Depth profiler)获得的。CTD资料按照规程进行处理,并将温、盐、密度等资料按照海洋数据视图软件(Ocean Data View, ODV)格式进行整合分析。由于数据均为离散站位的实测结果,所以要得到整个区域的海洋环境变化信息,需要对上述站位数据进行必要的插值处理。

由于温、盐、密在垂直方向上的标准差(standard deviation)可以很好表示水体的混合强弱,标准差越小表示水体混合越强(Zhu *et al*, 2013)。所以将近两年的实测数据,利用ODV进行整合,并利用数据插值变分分析法(Data-Interpolation Variational Analysis, DIVA)对数据进行插值,得到重点断面的信息。再计算各个站位温盐密的标准差,同样通过插值处理,得到整个区域的信息,两者结合来找寻潮锋,并与模拟数据进行对比验证。

利用ROMS(Regional Ocean Modeling System)正压模式与斜压模式分别对该海域的水体运动进行模

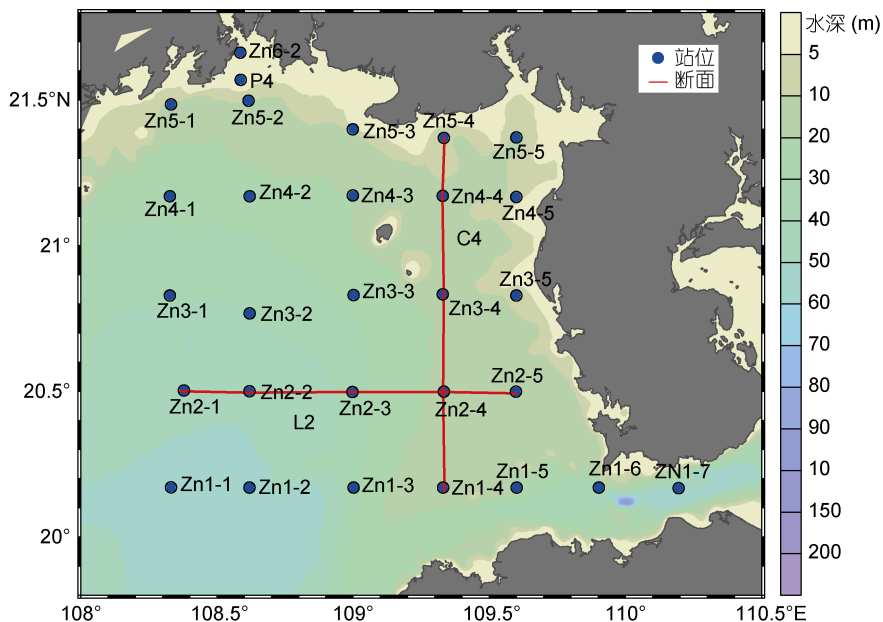


图1 北部湾东北部水文观测2016—2017年站位分布

Fig.1 The hydrological observation stations northeast of Beibu Gulf in 2016—2017

拟计算,空间分辨率为  $3\text{km}\times 3\text{km}$ 。正压模式只考虑潮的影响,斜压模式除考虑斜压影响外,也考虑潮的影响。模式中使用了 13 个分潮,包括四个全日分潮与四个半日分潮,海底粗糙度取  $0.001\text{m}$ (徐振华等, 2010)。斜压模式选用 WOA13 的温盐场作为气候态分布,用 ECMWF 的月平均风场作为强迫场,不考虑径流对潮混合的影响。通过计算 S-H 参数  $k=\log_{10}(h/u^3)$ (本研究中  $u$  取最大垂直平均潮流速度),对潮锋发生的位置进行模拟。

## 2 结果

利用模式结果计算所得的 S-H 参数如图 2,根据 Simpson 等(1974)、赵保仁(1985)、Zhu 等(2013)等的研究成果,认为在 S-H 参数为 2 左右,是发生潮锋位置的临界值。在琼州海峡、雷州半岛附近以及海南岛西岸可以观测到 S-H 参数为 2 的分布,正压模式结果与 Hu 等(2003)研究成果相似,而斜压模式比正压模式区域更广。

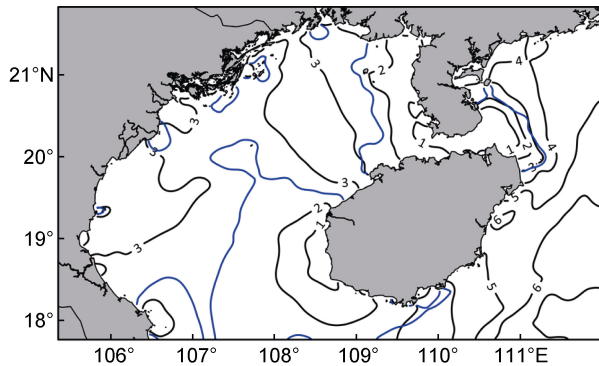


图 2 S-H 参数  $k=\log_{10}(h/u^3)$  分布

Fig.2 The distribution of S-H parameter  $k$

注: 黑色实线为正压模式下参数值,蓝色实线为斜压模式下参数值 2 所在位置,  $h$  为水深,  $u$  表示潮流速率

图 3 为 9 个航次实测盐度标准差分布,同时将 S-H 参数值为 2 的等值线进行标记。从图 3 中可以发现,在  $108.4^{\circ}\text{E}$ — $109.2^{\circ}\text{E}$ 、 $20.2^{\circ}\text{N}$ — $21^{\circ}\text{N}$  范围内盐度标准差基本终年较大,高值约为 0.8,表示垂向明显分层,冬季(2017 年 1、2 月)盐度标准差较大范围南北界线变成  $20.2^{\circ}\text{N}$ — $20.6^{\circ}\text{N}$ ,且高值约为 0.5;在钦州湾口( $108.4^{\circ}\text{E}$ — $109.2^{\circ}\text{E}$ 、 $21.2^{\circ}\text{N}$ — $21.6^{\circ}\text{N}$ ),风力较小且径流较大的月份(2016 年 9 月与 2017 年 6 月 8 月),盐度标准差较大,而在其余风力较大月份,盐度标准差较小,约为 0.1—0.2。在其余区域( $109.2^{\circ}\text{E}$  以东),除

2016 年 11 月与 12 月铁山港( $109.5^{\circ}\text{E}$ 、 $21.3^{\circ}\text{N}$ )附近可能受径流影响,以及 2017 年 6 月琼州海峡西口( $109.7^{\circ}\text{E}$ 、 $20.3^{\circ}\text{N}$ )可能受底层高盐水入侵有异常值,盐度标准差终年较小,接近于 0。而在浅水区域,标准差越小表示垂向混合越均匀,可以发现在正压模式 S-H 小于 2 的区域,盐度标准差均很小,表明模式与实测吻合较好。

图 4 为 9 个航次实测温度标准差分布,同样将 S-H 参数值为 2 的等值线进行标记。温度标准差的分析结果与盐度标准差相似,在  $108.4^{\circ}\text{E}$ — $109.2^{\circ}\text{E}$ 、 $20.2^{\circ}\text{N}$ — $21^{\circ}\text{N}$  范围内温度标准差基本终年较大,高值为  $2.0^{\circ}\text{C}$  左右,表示垂向明显分层,在冬季(2016 年 12 月与 2017 年 1 月、2 月),温度标准差较大区域北部界限被压缩至  $20.6^{\circ}\text{N}$  附近,且高值约为  $0.8^{\circ}\text{C}$  左右;在钦州湾口( $108.4^{\circ}\text{E}$ — $109.2^{\circ}\text{E}$ 、 $21.2^{\circ}\text{N}$ — $21.6^{\circ}\text{N}$ ),在 2016 年 12 月与 2017 年 1 月、2 月,温度标准差较小,约为  $0.1$ — $0.2^{\circ}\text{C}$ ,而在其余月份,温度标准差较大,高值为  $0.7$ — $1.0^{\circ}\text{C}$ ,表示垂向分层较为明显。在其余区域( $109.2^{\circ}\text{E}$  以东),温度标准差终年较小,接近于 0,表示垂向混合均匀。同样可以发现在正压模式 S-H 小于 2 的区域,温度标准差均很小,表明模式与实测吻合较好。

由于潮混合最终会导致垂向密度的趋于一致,所以在对温盐进行标准差比较之后,同样对密度进行垂向标准差计算(图 5)。其分析结果与温盐标准差均比较相似,在  $108.4^{\circ}\text{E}$ — $109.2^{\circ}\text{E}$ 、 $20.2^{\circ}\text{N}$ — $21^{\circ}\text{N}$  范围内密度标准差基本终年较大,高值为  $1.0$ — $2.0\text{kg}/\text{m}^3$  左右,表示垂向明显分层,在冬季(2017 年 1 月、2 月),密度标准差较大区域北部界限被压缩至  $20.6^{\circ}\text{N}$  附近,且高值约为  $0.3\text{kg}/\text{m}^3$  左右;在钦州湾口( $108.4^{\circ}\text{E}$ — $109.2^{\circ}\text{E}$ 、 $21.2^{\circ}\text{N}$ — $21.6^{\circ}\text{N}$ ),在 2016 年 11 月、12 月与 2017 年 1 月、2 月、3 月,密度标准差较小,约为  $0.1$ — $0.2\text{kg}/\text{m}^3$ ,在其余月份,密度标准差较大,高值为  $1.0$ — $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ ,表示垂向分层较为明显。在其余区域( $109.2^{\circ}\text{E}$  以东),密度标准差终年较小,接近于 0,表示垂向混合均匀。同样可以发现在正压模式 S-H 小于 2 的区域,密度标准差均很小,表明模式与实测吻合较好。与温盐标准差相比较可以发现,在径流较大的月份(4—9 月),北部湾东北部的水体密度受盐度影响较大,密度标准差分布与盐度标准差分布更接近,其余月份受两者共同影响,温盐密三者标准差分布均较为接近。

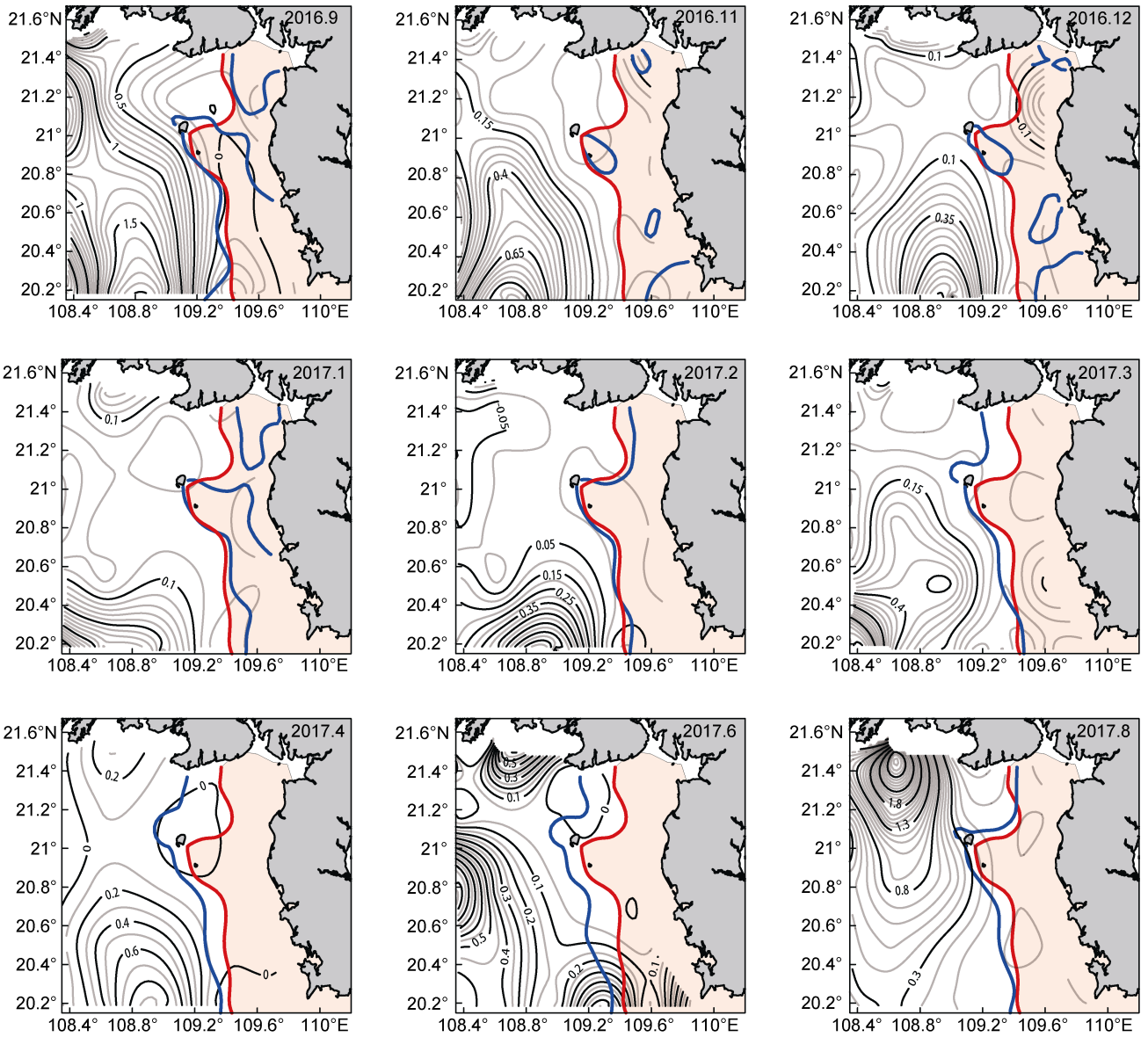
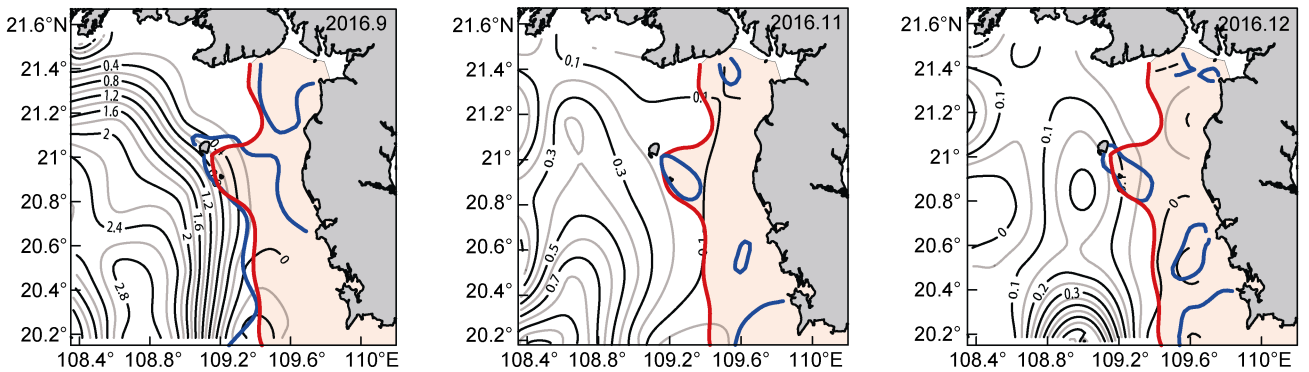


图3 9个航次盐度标准差分布与S-H参数

Fig.3 The standard deviations of salinity data in 9 cruises

注: 红色实线为正压模式下参数值2, 淡红色区域为正压模式下的潮混合区, 蓝色实线为斜压模式下参数值2



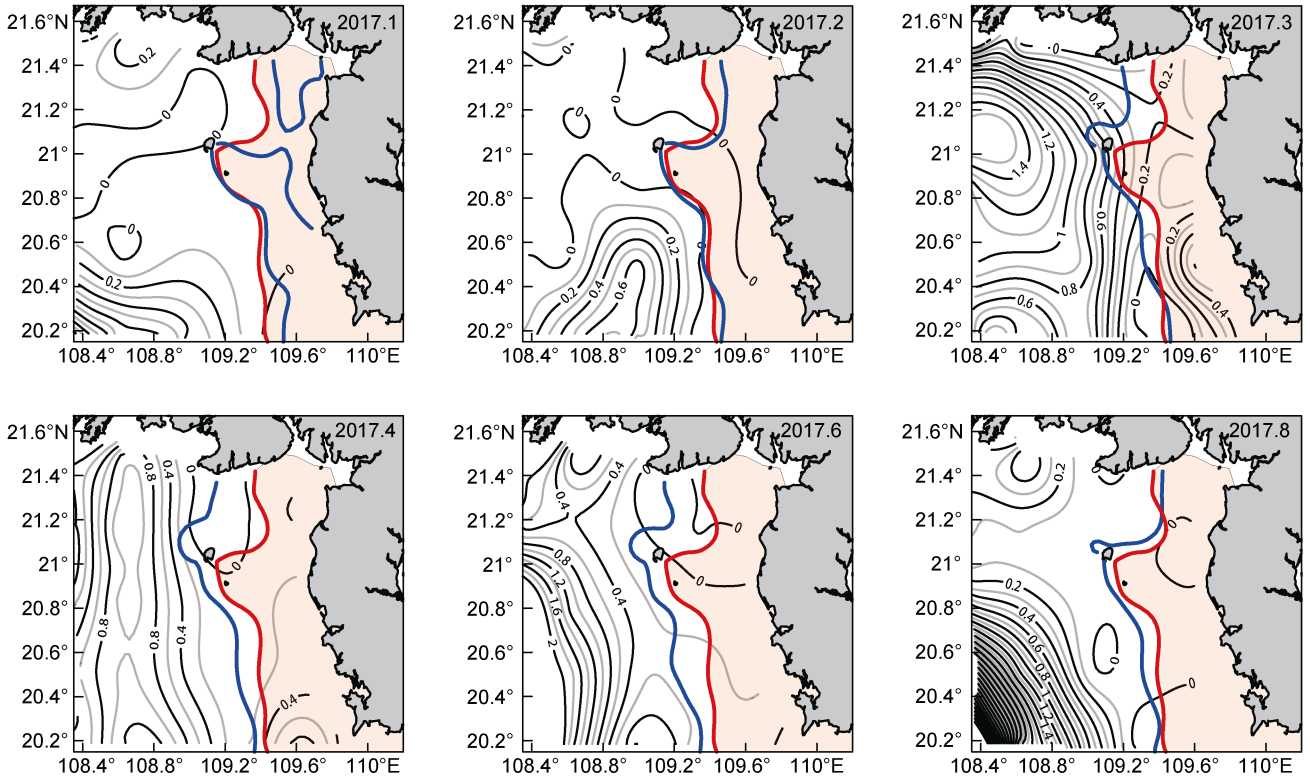


图 4 9 个航次温度标准差分布与 S-H 参数

Fig.4 The standard deviations of temperature data in 9 cruises

注: 红色实线为正压模式下参数值 2, 粉色区域为正压模式下的潮混合区, 蓝色实线为斜压模式下参数值 2

因为 4 月与 6 月潮锋分布位置与 S-H 参数为 2 的线条吻合较好, 所以取此 2 个月实测资料进行剖面分析。对于 2017 年 4 月航次得到的 CTD 资料, 利用 ODV 进行作图分析(图 6), 选用了 108.3°E、20.5°N 到 109.6°E、20.5°N(断面 L2)和 109.3°E、20.2°N 到 109.3°E、21.4°N(断面 C4)两个断面。在北部湾东北部, 地形整体上比较平滑, 没有特别剧烈的地形变化, 4 月份属于春季, 在远岸, 既水深较大的海域能看到较为明显的层化结构(焯婷婷, 2005), 表层的最高温度在 25.5°C(图 6a)、25°C(图 6d), 底层最低温度大致在 22°C(图 6a)、23°C(图 6d)。根据模拟结果, 潮锋控制区域为 S-H 参数小于 2 的区域, 对于断面 L2(图 6a、图 6b、图 6c), 潮锋出现位置位于 109.4°E, 即站点 ZN2-4 附近, 从图 6b 盐度剖面可以发现站点 ZN2-3 与 ZN2-4(图 6b 约 70km 处)是层化区域与垂直混合区域交界地带(潮锋出现位置), 与模拟结果一致。图 6c 密度剖面同样显示站点 ZN2-3 与 ZN2-4 间(图 6c 约 70km 处)是层化区域与垂直混合区域交界地带, 也与模拟结果一致。因整体水深较浅且整个断面站点间测量时间间隔较长, 温度剖面在远岸与近岸均有恢复

层化的现象, 但是在站点 ZN2-3 与 ZN2-4 间(图 6a 约 70km 处)仍可以观察到从表层到底层的等温线, 证明也有垂向混合的发生。对于断面 C4(图 6d—图 6f), 整体均在 S-H 参数小于 2 的区域, 即整体都在潮混合区域, 从图 6 温盐密度剖面中可以发现整体混合较为均匀, 也与模拟结果一致。另外, 图 6d 温度剖面显示, 近海南岛位置(站点 ZN2-5, 图 6d 约 10km 处)又出现了层化现象, 而盐度剖面该位置依旧混合均匀, 其原因也应是测量时间间隔长, 同时潮流较小时, 导致近岸处恢复轻微层化现象。图 6e、图 6f 盐度密度剖面显示, 近广西沿岸(图 6e、图 6f 约 130km 处)受到了径流的影响, 但垂向混合还是较为均匀。

对于 2017 年 6 月航次所得到的实测资料, 同样用 ODV 进行分析, 取与之前相同的两个断面(图 7)。可以发现表层最大温度在 30°C, 底层最低温度为 22°C。从图 7a 温度分布可以看到潮锋出现位置位于站点 ZN2-3 附近(图 7a 约 60km 处), 相比 4 月份出现位置偏南大约 10km, 且同区域混合层厚度比 4 月份扩大 5m 左右。从图 7b 盐度分布、图 7c 密度分布可以看到潮锋出现位置同样位于 ZN2-3 与 ZN2-4 之间

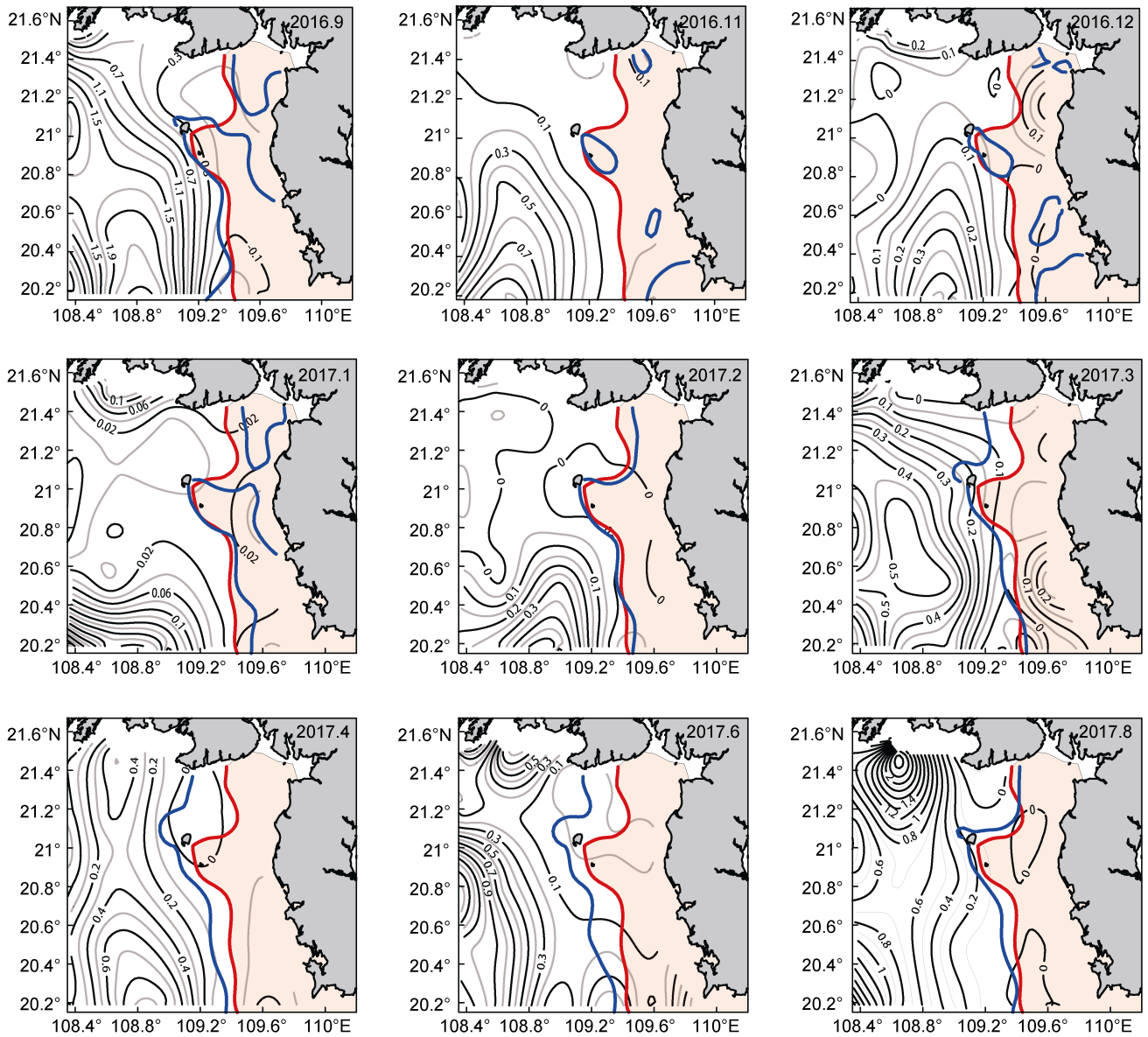


图5 9个航次密度标准差分布与S-H参数

Fig.5 The standard deviations of density data in 9 cruises

注: 红色实线为正压模式下参数值2, 粉色区域为正压模式下的潮混合区, 蓝色实线为斜压模式下参数值2

(图7b约60km处), 与温度剖面较为一致。此区域的潮锋现象与四月份相似。从图7d温度分布、图7e盐度分布、图7f盐度分布同样显示整体混合都较均匀, 即整个C4断面仍处于潮混合区。此区域的潮锋现象也与四月份相似。同时在图7e与图7f中可以发现有底层高盐水入侵。从图7a与图7d仍可以发现浅表层恢复层化现象, 主要还是因为站位之间观测间隔时间较长导致。

### 3 讨论

对于北部湾的潮锋研究目前并不多, 对于计算数值模式所得的S-H参数所用的 $u$ 也有不同取法, 主

要包括: 表层最大流速(Simpson *et al.*, 1974)、大潮垂直平均流速(Simpson, 1976)、分潮流振幅(Garrett *et al.*, 1978)、余流振幅(Schloen *et al.*, 2017)、 $M_2$ 与 $S_2$ 两个分潮叠加的潮流速度振幅(Sheehan *et al.*, 2018)、八个分潮叠加垂直平均流速(Zhu *et al.*, 2013)、月平均流速(Mao *et al.*, 2018)、年平均垂直平均流速(Hu *et al.*, 2003), 还有利用主要分潮流计算出的垂直平均近最大流速(丁文兰, 1984; 赵保仁, 1985), 等等。选取不同 $u$ 值, 导致计算潮锋区域的S-H参数临界值也不同。S-H参数的临界值与海域的底摩擦系数相关(赵保仁等, 2001), 且有代表性的临界值介于1.7—2之间

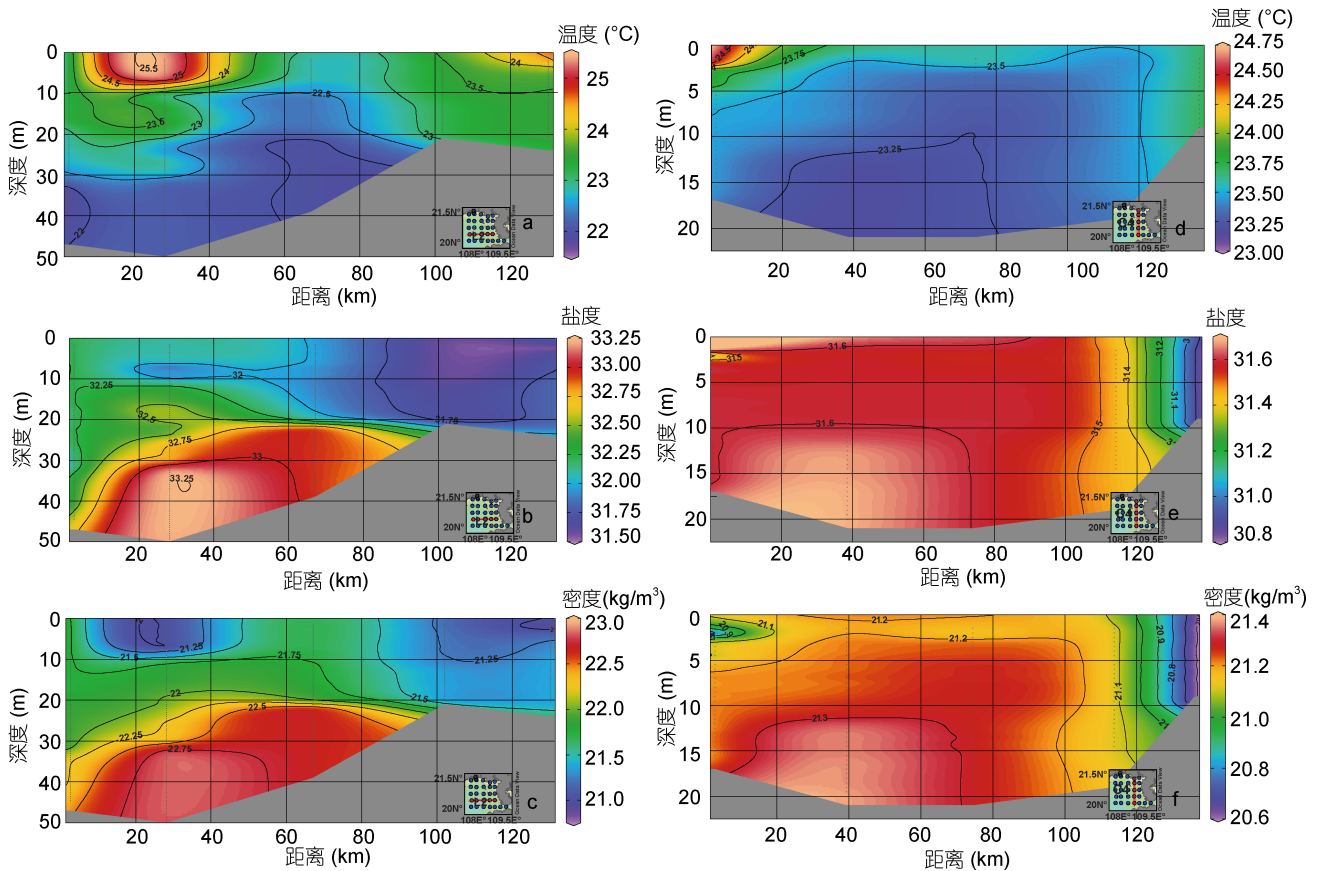


图 6 2017 年 4 月航次不同断面的温盐密度剖面图

Fig.6 The section of temperature, salinity and density section in April 2017

注: a、b、c 分别表示 L2 断面温盐密度剖面, d、e、f 分别表示 C4 断面温盐密度剖面

(赵保仁, 1985), 例如台湾海峡的临界值为 1.78(Zhu *et al*, 2013)。本文认为潮锋是一个终年存在的现象, 所以取最大垂直平均潮流速度来进行计算, 且潮锋发生位置与 S-H 参数为 2 的等值线区域较为接近。计算得到的潮锋发生区域与 Hu 等(2003)的结果相比, 虽趋势较为一致, 但区域更大。我们认为, 潮锋区域估算结果出现差异的原因除了选取不同的  $u$  与 S-H 临界值以外, 本文所取的分潮更多, 且设置 ROMS 模式的时间和空间分辨率更细。

防城港与涠洲岛海域为正规全日潮, 钦州湾与铁山港为不正规全日潮, 且上述区域的潮流场均由全日潮和半日潮组成, 为混合潮(张伯虎等, 2010)。在航次执行过程中, 站位与站位之间的观测并不同步, 存在时间差异, 全日潮海区在潮流较小时容易恢复层化现象; 同时, 佟景全(2009)认为南海西北部海表温度的空间分布不能指示出“潮锋”位置所在, 所以表层锋的资料不一定准确, 也导致模拟潮锋位置与实

测锋面有一些偏差。

正压模式与斜压模式均认为在琼州海峡两侧、雷州半岛西侧以及海南岛西侧存在潮锋现象, 但是斜压模式的范围明显大与正压模式(图 2)。对于各个月份而言, 从图 3—图 5 中可以发现, 在西南风强盛的月份(如 2017 年 4 月、6 月), 斜压模式的范围比正压模式更大, 而在东北风强盛的季节(如 2016 年 11 月、12 月), 斜压模式的范围比正压模式小, 且更为分散, 其余月份两者相差不大。此结果与李树华等(2001)根据实测资料得到夏冬两季北部湾最大涨落潮流速结果相一致, 即冬季的最大涨落潮流速要小于夏季。但潮锋应是一个终年存在的现象, 无风的时候仍可以发生明显的潮混合现象, 所以由月平均风场作为强迫场的斜压模式对于潮锋的模拟不如正压模式准确。

在水深较大的区域(如琼州海峡西口与涠洲岛以南区域), 温度锋、盐度锋与密度锋终年存在, 且分布

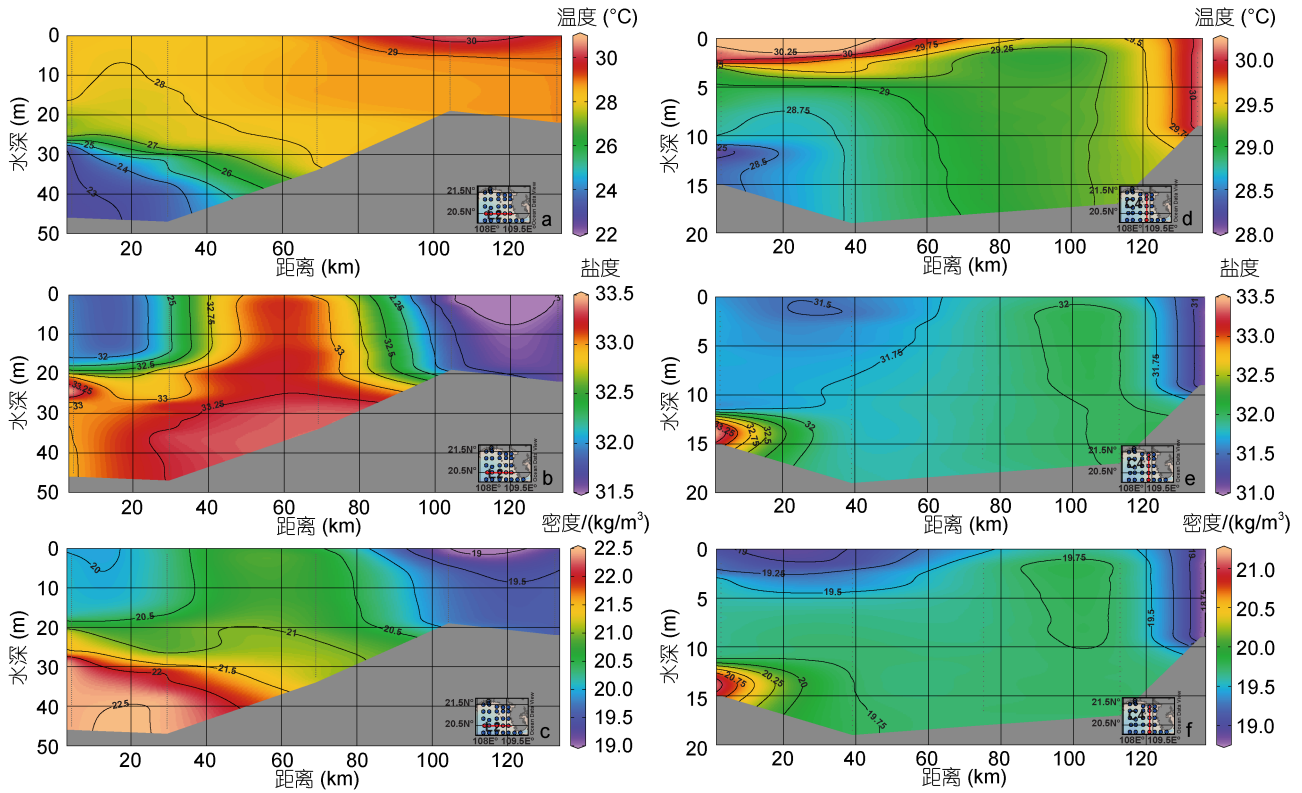


图7 2017年6月航次不同断面的温盐密度剖面图

Fig.7 The section of temperature, salinity and density section in June 2017

注: a、b、c 分别表示 L2 断面温盐密度剖面, d、e、f 分别表示 C4 断面温盐密度剖面

较为一致, 冬季整体向南偏移, 其余季节温度锋、盐度锋与密度锋向近岸靠拢。在水深较小的区域(如铁山港、涠洲岛东侧区域、钦州湾口), 在径流较大季节, 盐度锋极为明显, 密度锋受盐度锋控制, 其余时间温度锋、盐度锋与密度锋的分布均较为接近。在锋面的终年变化中, 计算所得到的潮混合区基本均在锋面以外, 且实测资料证明此区域垂向混合终年均匀, 此区域就是受潮控制的区域。

不同航次所得数据还显示了混合层厚度的变化。春季调查海域风场较弱, 因此风场对于上混合层影响很小, 潮混合是导致该海域海洋锋形成的主要原因。而在夏季, 即8月与9月航次, 层化现象显著, 且近岸冲淡水对调查海域影响明显, 导致近岸盐度锋的出现。但同时混合层厚度较春季有增大现象, 其原因可能是风力变化导致, 也可能是由于海水平流流速增大导致。秋冬季航次混合层厚度最大, 其原因主要是强烈的东北风导致海水垂向混合均匀, 即可能由潮引起的垂向混合现象被由风引起的垂向混合现象所掩盖, 也导致模拟潮锋位置与实测锋面有一些偏差。

## 4 结论

通过现场实测 CTD 资料与数值模式的结合, 研究了北部湾东北部潮锋分布的特征。通过分析资料发现北部湾东北部潮锋发生的主要区域位于雷州半岛和琼州海峡附近, 而通过利用 ROMS 模式计算的所得半年最大垂直平均流速来计算 S-H 参数, 确认潮锋出现位置位于 S-H 参数值为 2 的位置, 两者结果较为一致。正压模式较斜压模式更准确反映潮混合区所在位置。温度、盐度、密度锋终年存在, 近岸盐度锋容易被径流掩盖, 且密度锋受盐度锋控制, 风力较大时三种锋都易向水深更深处推进。模拟所得的潮混合区终年垂向混合较好。

从生态学角度来看, 部分营养物质、藻类等可能从琼州海峡或海南岛西北部海域进入雷州半岛附近潮混合区, 受强的潮混合作用, 从较深层运动到浅层, 并一路北上影响雷州半岛与广西近海区域, 因此潮锋研究对生态环境研究也有重要的意义。

致谢 本研究得到了厦门大学李炎教授和澳大利亚新南威尔士大学王小华教授的悉心指导, 也得益于审稿人的建设性意见, 谨致谢忱。



## 参 考 文 献

- 丁文兰, 1984. 东海潮汐和潮流特征的研究. 见: 海洋科学集刊: 第 21 集. 北京: 科学出版社, 135—148
- 朱凤芹, 谢玲玲, 成印河, 2014. 南海温度锋的分布特征及季节变化. 海洋与湖沼, 45(4): 695—702
- 李 炎, 胡建宇, 2009. 北部湾海洋科学研究论文集(第 2 辑)——物理海洋与海洋气象专辑. 北京: 海洋出版社, 173—186
- 李树华, 夏华永, 梁少红等, 2001. 广西近海的潮流和余流特征. 海洋通报, 20(4): 11—19
- 佟景全, 2009. 基于 ECOM 模式的南海潮能耗散与潮锋研究. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文
- 张伯虎, 陈沈良, 谷国传, 2010. 广西沿岸重点港湾的潮型与潮汐特征. 海洋学研究, 28(3): 9—16
- 罗 琳, 王东晓, 刘 赞等, 2003. 北部湾温度锋的季节与年际变化. 热带海洋学报, 22(4): 60—67
- 周 锋, 黄大吉, 万瑞景等, 2008. 南黄海西北部夏季潮锋的观测和分析. 海洋学报, 30(3): 9—15
- 赵保仁, 1985. 黄海冷水团锋面与潮混合. 海洋与湖沼, 16(6): 451—460
- 赵保仁, 曹德明, 李徽翡等, 2001. 渤海的潮混合特征及潮汐锋现象. 海洋学报, 23(4): 113—120
- 俎婷婷, 2005. 北部湾环流及其机制的分析. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文
- 徐振华, 雷方辉, 娄安刚等, 2010. 北部湾潮汐潮流的数值模拟. 海洋科学, 34(2): 10—14
- 薛鸿超, 谢金赞, 1995. 中国海岸带水文. 北京: 海洋出版社, 144
- Burchard H, Craig P D, Gemmrich J R *et al*, 2008. Observational and numerical modeling methods for quantifying coastal ocean turbulence and mixing. *Progress in Oceanography*, 76(4): 399—442
- Garrett C J R, Keeley J R, Greenberg D A, 1978. Tidal mixing versus thermal stratification in the Bay of Fundy and gulf of Maine. *Atmosphere-Ocean*, 16(4): 403—423
- Hu J Y, Kawamura H, Tang D L, 2003. Tidal front around the Hainan Island, northwest of the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C11): 3342
- Jing Z Y, Qi Y Q, Du Y *et al*, 2015. Summer upwelling and thermal fronts in the northwestern South China Sea: Observational analysis of two mesoscale mapping surveys. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(3): 1993—2006
- Lü X G, Qiao F L, Wang G S *et al*, 2008. Upwelling off the west coast of Hainan Island in summer: Its detection and mechanisms. *Geophysical Research Letters*, 35(2): L02604
- Mao Y, Wang S Q, Qiu Z F *et al*, 2018. Variations of transparency derived from GOCI in the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Optics Express*, 26(9): 12191—12209
- Schloen J, Stanev E V, Grashorn S, 2017. Wave-current interactions in the southern North Sea: The impact on salinity. *Ocean Modelling*, 111: 19—37
- Sheehan P M F, Berx B, Gallego A *et al*, 2018. Shelf sea tidal currents and mixing fronts determined from ocean glider observations. *Ocean Science*, 14(2): 225—236
- Simpson J H, Hunter J R, 1974. Fronts in the Irish Sea. *Nature*, 250(5465): 404—406
- Simpson J H, 1976. A boundary front in the summer regime of the Celtic Sea. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 4(1): 71—81
- Zhu J, Hu J Y, Liu Z Y, 2013. On summer stratification and tidal mixing in the Taiwan Strait. *Frontiers of Earth Science*, 7(2): 141—150

## OBSERVATIONS AND ANALYSIS OF TIDAL FRONT IN NORTHEAST OF BEIBU GULF, SOUTH CHINA SEA

WANG Qian<sup>1</sup>, GUAN Wei-Bing<sup>1,2</sup>, CAO Zhen-Yi<sup>1</sup>, CHEN Qi<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, China;*  
2. *Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China*)

**Abstract** The distribution of coastal tidal fronts is closely related to the distribution of temperature, salinity and even marine productivity. Based on the measurement data of the northeastern Beibu Gulf, South China Sea, we analyzed and compared the temperature and salinity distributions in the gulf in 2016—2017. Using ROMS (Regional Ocean Modeling System) barotropic and baroclinic models, we calculated the Simpson-Hunter (S-H) parameters and determined the mixing areas and relationships among tidal front and temperature, salinity, and density. The results show that tidal front occurred mainly around the Leizhou Peninsula in which temperature, salinity, and density were well mixed and homogenized. With the maximum vertical average speed determined in the ROMS, the tidal fronts could be placed when the S-H parameter was set to 2, which agrees with the observation result. Therefore, we believe that the barotropic model is more accurate to simulate the tidal mixing area than the baroclinic model. The fronts of temperature, salinity, and density are there in a whole year. Nearshore density fronts depend on the salinity, while salinity fronts could be disturbed easily by runoff. In a strong wind condition, fronts of temperature, salinity, and density could be forced to deeper oceanic areas and the tidal mixing area well mixed in all seasons.

**Key words** Beibu Gulf; tidal front; tidal mixing; ROMS (Regional Ocean Model System)