

北部湾环流研究述评*

Study Comments on Circulation in Beibu Gulf

侍茂崇

SHI Mao-chong

(中国海洋大学,山东青岛 266003)

(Ocean University of China, Qingdao, Shandong, 266003, China)

摘要:针对北部湾环流的季节变化和琼州海峡水体输送的传统观念,根据近 20 多年的海流、底质、浮游生物的实地调查资料,对众多的研究结果进行对比和评述。认为:从平均态来说,琼州海峡水体输送全年都是从东向西,冬季多于夏季;冬季北部湾环流是气旋式,夏季,北部湾北部环流是气旋式,南部是反气旋式,其中分界线大致在 $19^{\circ}30'N$ 处。北部湾存在多处上升流区域,不计越南沿岸,仅靠近我国大陆,就有广西沿海铁山港和北海的上升流区;海南省西部,从八所—莺歌海的上升流区;海南省南部上升流区。虽然,北部湾环流研究已取得长足进步,但是,还存在许多不足之处,如潮汐余流的研究:未能在充分考虑水体边界、实际风场、真实地形、潮汐余流、密度流等诸多要素情况下,计算出北部湾真实环流。

关键词:北部湾 琼州海峡 环流 上升流

中图分类号:P731 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2014)04-0313-12

Abstract: According to nearly 20 years of field survey data of marine currents, bottom substrate, plankton, this paper compared numerous research results and commented on them against the traditional concept of the seasonal variation of circulation in Beibu Gulf and Qiongzhou Strait water conveying. It points out that from the mean state, Qiongzhou Strait water conveying goes from east to west all year round, and is more in winter than in summer. Beibu Gulf circulation is cyclonic in winter; in summer, north circulation in Beibu Gulf is cyclonic, while south one is anticyclonic, and the demarcation line is approximately at $19^{\circ}30'N$. There are many upwelling regions in Tonkin Gulf, regardless of the coast of Vietnam. Only near mainland China, there are Guangxi coastal upwelling regions near Tieshan Port and Beihai, the upwelling region from Basuo to Yinggehai in the west of Hainan Province, and the southern Hainan upwelling area. Although great progress has been achieved on circulation study, however, there are still many deficiencies, for example, there are still lack of the evaluation of the tidal residual current, and the calculation of real circulation in Beibu Gulf in the cases of fully considering factors such as the water boundary, the actual wind field, the real terrain, the tidal residual current and density current.

Key words: Beibu Gulf, Qiongzhou Strait, circulation, upwelling

北部湾全部位于大陆架内,平均深度为 46m,属于大陆架上一个浅海湾,水下地形平坦,最大水深不

超过 90m,仅南部湾口及东岸的琼州海峡与南海沟通,是一个半封闭呈扇面形的陆架浅海(图 1)。环绕北部湾西、北、东三面的陆地和岛屿,多为起伏不平的丘陵山地。从空中俯视北部湾,该湾似一个扇面形的海盆,盆口朝南,这样的自然环境,使该湾的海水运动形态,不仅与南海环流有关,还具有多变的特点。北部湾处于亚热带,季风特征明显,冬半年盛行东北季

收稿日期:2014-04-20

作者简介:侍茂崇(1937-),男,教授,主要从事物理海洋学研究。

* 广西自然科学基金重大项目(2012GXNSFEA053001)资助。

风,夏半年则盛行西南季风,东北季风期长于西南季风期。全年总降水量都在 1100~1700mm,5~9 月为雨季,雨量充沛,月平均降水量都在 100mm 以上。

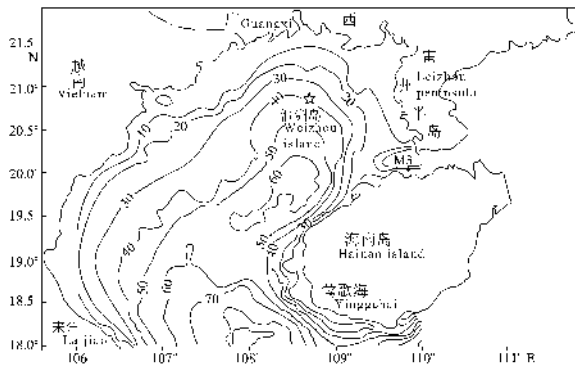


图 1 涠洲岛长期观测所在站位

到不断的挑战。

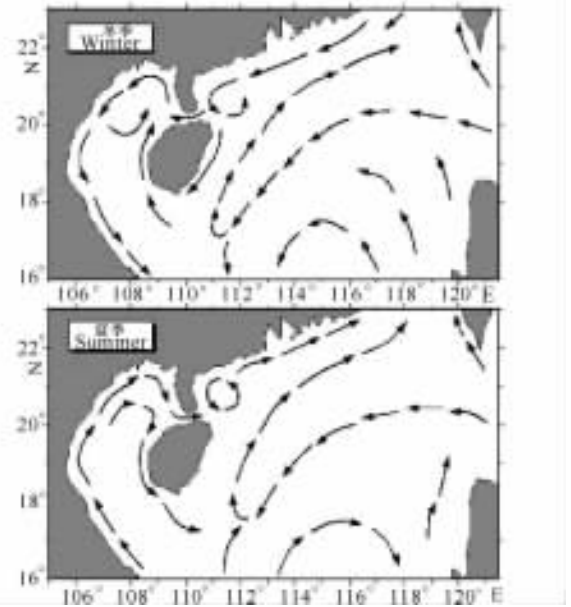


图 2 北部湾冬夏季环流示意图^[1,2]

Fig. 2 Schematic diagram of the circulation in Beibu Gulf in winter and summer, respectively^[1,2]

Fig. 1 Long-term observation station around Weizhou Island

湾内环流受风、海水密度分布、外海水及河流淡水注入等影响呈现复杂态势,这对海水的长期输送起着重要作用。20 世纪 60 年代初,中越合作开展北部湾海洋综合调查^[1,2],从而奠定了北部湾海洋研究的基础。此后的一些调查,例如:1964~1971 年,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;1980~1986 年“全国海岸带和海涂资源综合调查”^[3]、1988~1995 年,“全国海岛资源综合调查”^[4]等,对北部湾环流,特别是近岸部分有了进一步认识。

2 针对北部湾环流的新观点

2.1 夏季琼州海峡的水体输运方向

在调查的基础上,不少学者专门对北部湾潮汐、潮流进行分析和数值研究^[5~17]。这些研究对于北部湾的潮汐、潮流进行较为详细的描述,但是,对季节性环流结构的特点,尤其是北部湾夏季环流结构却有着不同的认识,甚至是截然相反的观点。本文针对北部湾环流的季节变化和琼州海峡水体输送的传统观念,根据近 20 多年的海流、底质、浮游生物的实地调查资料,对众多的研究结果进行对比和评述。

琼州海峡位于 20° N,109°~111° E,是连通西部的北部湾和东部南中国海东北海盆的水通道。海峡长约 70km,宽约 29.5km,最深处 120m,是物理过程非常复杂的典型区域。海底地形差异带来的强烈潮汐调整,日潮、半日潮间存在显著的非线性作用,这一切都直接影响通过海峡的余流的形成。

1 针对北部湾环流的传统观点

根据以前调查者绘制的南中国海环流图得出:冬季,南中国海主盆地存在一个气旋式环流,北海岸为西南向流,大部分在琼州海峡东口折转向南,沿着海南岛东岸向南流去,还有一小部分穿过琼州海峡进入北部湾,加强了北部湾的气旋式环流。夏季,所有这些环流模式都逆转过来,南海和北部湾都形成反气旋环流,从而导致一支东向流通过琼州海峡进入粤西。这些论述,与中越联合调查结果是不谋而合的。

中越合作北部湾海洋综合调查报告(1964)中描述,冬、春两季,北部湾湾内为逆时针气旋型环流,秋季湾内主要受逆时针环流控制,但东北部有一顺时针环流;夏季湾内为顺时针反气旋型环流(图 2)。

2.1.1 观测资料得出的结果

由图 2 可知,冬季,在东北风影响下,南海海水通过琼州海峡进入北部湾;夏季在西南风影响下,北部湾水体则通过琼州海峡流向南海。对北部湾来说,经过琼州海峡的水交换,是冬进夏出的收支形式。之前,大部分论文都是建筑在风生环流的基础上,把风当做主要驱动力。但是,最近 15 年,传统的观点却受

随着仪器不断优化,观测资料不断增多,观测时间系列不断加长等因素影响,传统结论受到挑战应该是极为正常的现象。Shi 等^[18]通过 37 年历史资料(1963~1999)分析发现:琼州海峡终年存在西向平均余流。上层 10m 处的余流强,中层相对弱一些,底层更弱。冬季表层最大流速大约为 20~40cm/s,夏季表层则为 10~30cm/s(图 3,4)。冬季,近底层平均流可达到 10~15cm/s,与表层相差不大。虽然夏季

通过整个水柱的平均流的速度相对弱一些,但是仍可发现同样的现象(图3)。

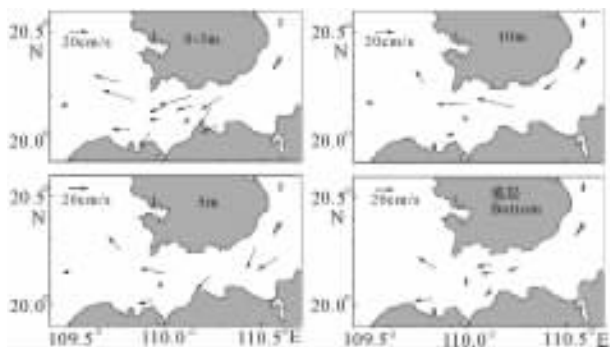


图3 冬季(12~2月)余流^[18]

Fig. 3 The residual current in winter(from December to February)^[18]

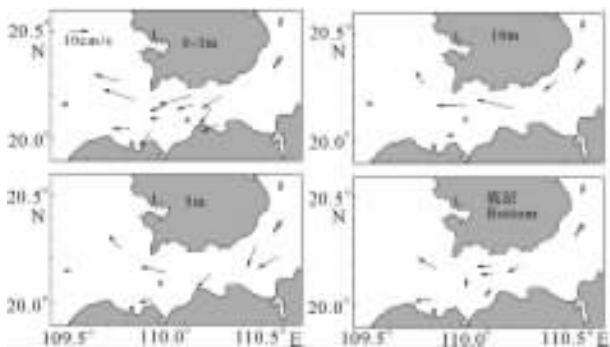


图4 夏季(6~8月)余流^[16]

Fig. 4 The residual current in summer(from June to August)^[18]

后来有众多学者从实际资料出发,陆续发表了支持夏季西流的说法,并且计算了不同季节的流量^[11,19~23]。从琼州海峡流向北部湾的流出量的平均运输由一个平均宽度为29.5km、平均深度为46m的与海峡走向垂直的断面来衡量。流出量的平均运输分别是:冬季约为0.2~0.4 Sv,夏季约为0.1~0.2 Sv。在琼州海峡观测到的冬季余流场和以往观察者基于南海上风驱动环流理论得出的模式一样,但是风生海流模式并不能解释夏季在琼州海峡观测到的余流情况;琼州海峡气温的季节性变化相对较小,冬夏最大温差为7℃,年平均温度为23.8℃。但风场却表现出显著的季节性变化,冬、春季节时由东北风支配,平均风速为2.7m/s;夏、秋季节由西南风支配。平均风速为2.8m/s。夏季风引起的漂流,和实际流向相反。

2.1.2 最新的调查结果

陈照章等^[24]给出琼州海峡M3站点用ADCP持续1个月的逐层海流观测资料,然后用滤波方法,滤去周期性潮流,剩余的低频流(即通常所说余流)分别在图5、图6中给出。M3站位于琼州海峡西口偏向南岸(图1),和北岸相比,这里余流较弱,流向较乱,

即使如此,从图5中可以看出,冬季,仅2月8~10日、2月21日,余流方向指向SE,其余时间,则多指向偏西方向;图6中夏季余流,要比冬季更清晰地表达偏西向运输的趋势。即使7月23~28日表层余流指向东北,15m层以下,流向指向西南,和表层相反。

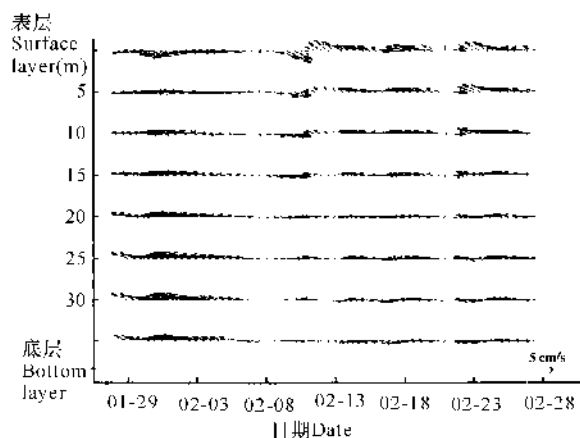


图5 冬季M3站余流

Fig. 5 The residual current at M3 in winter

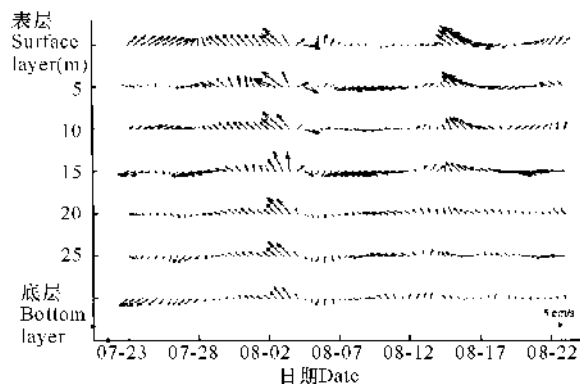


图6 夏季M3站余流^[24]

Fig. 6 The residual current at M3 in summer^[24]

2.1.3 海水颗粒有机碳和颗粒氮观测结果

何映雪等^[25]对北部湾北部开展海水颗粒有机碳(POC)、颗粒氮(PN)等要素调查(图7)。从图7中可以看出,POC、PN的水平分布,总体表现为湾顶部铁山港外水域较高,其次是钦州湾外围海域,低值区位于琼州海峡西侧海域。琼州海峡西侧海域的颗粒有机碳POC、PN浓度是3个区域中最低的。这些结果说明,琼州海峡西侧海域水体受到了南海外海水的较明显影响,从而呈现低浓度的特征。

2.2 夏季北部湾北部环流

夏华永等^[14]指出,夏季北部湾环流主导因素是密度梯度,而不是风应力,环流为逆时针运动(图8)。北部的气旋环流中心偏向红河口,而南部气旋中心则在北部湾与南海分界的中间。整个北部湾都是气旋式环流。琼州海峡的余流由东而西,和文献^[11,18]结果相符。琼州海峡夏季的西向流对北部湾夏季逆

时针环流的形成有着重要贡献。

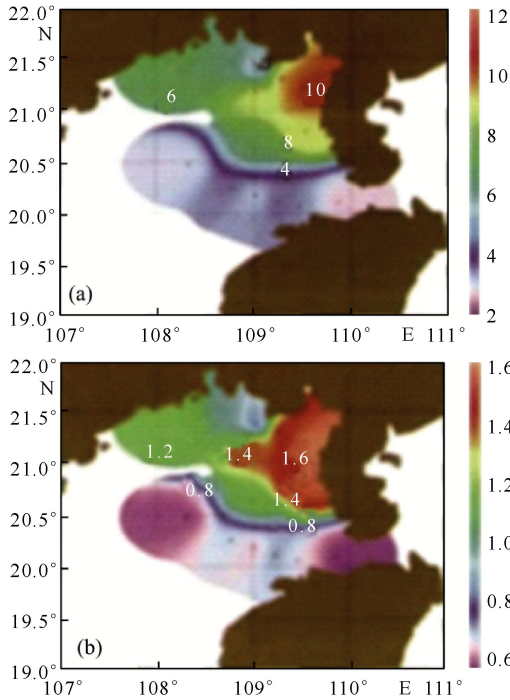


图7 北部湾北部海域水柱平均 POC(a, $\mu\text{mol/L}$)、PN(b, $\mu\text{mol/L}$)

Fig. 7 The distribution of POC(a, $\mu\text{mol/L}$) and PN(b, $\mu\text{mol/L}$) averaged in the whole water column in the northern-Beibu Gulf

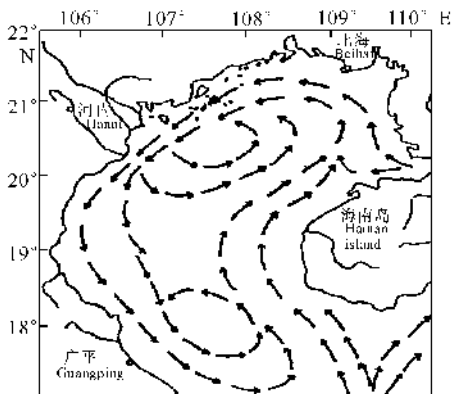


图8 夏季环流^[14]

Fig. 8 The summer circulation^[14]

2.2.1 涠洲岛观测资料结果

本研究团队从1988年10月1日起,至1989年8月6日止,持续时间11个月,在涠洲岛之南,水深40m处定点观测的海流结果,观测站位如图1中“☆”号所示,测流共分3层:10m,20m,30m,采样间隔1h。

由图9可见:从10月至第2年5月,风基本是NNE~NE方向,6~7月,风向基本变为SW、SE方向。而10m层余流,从10月至第2年5月,基本是

NW向,6月以后,基本转换为NW~SW向。风的影响是明显的,但是不是唯一的。例如3月,风向已经多变,风速减小,但是余流仍然是冬季型的,和10~2月余流方向基本一致,流速也没有显著减小。与Ekman风漂流计算结果比较,相差甚大。造成这种现象原因,是北部湾北部环流决定的。侍茂崇等^[11]指出,一年四季,琼州海峡水通量总是从东向西进入北部湾的。进入北部湾的水量,形成北部湾北部形成自东向西的海流;夏华勇^[10]对北部湾环流的计算表明,无论冬季还是夏季涠洲岛附近余流,都是自东南指向西北的。

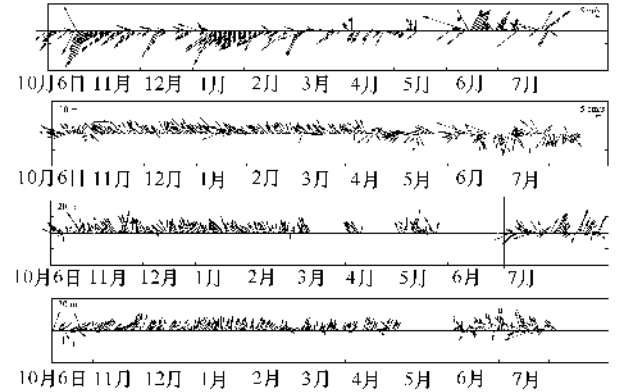


图9 涠洲岛风(顶部)和10~30m层余流

Fig. 9 The top of wind and residual current at 10~30m layer

2.2.2 漂流瓶观测结果

20世纪60年代,中国科学院南海研究所在北部湾北部释放大量漂流瓶^[26],从回收结果来看,这些漂流瓶都是在北部湾西部和北部被捡到(图10)。

由图10可以看出:冬季1月,有64%的漂流瓶运动方向是W和SW,有14%漂流瓶运动方向向NW,只有22%漂流瓶是在海南岛东部和南部捡到;春季4月,漂流瓶运动方向都是在W~NW~N这个90°象限内;夏季7月,漂流瓶运动基本都在SW、NW、N这3个方向,洋浦港外运动方向较乱,琼州海峡中只有2个浮标向东;秋季11月,方向少乱,但是偏西方向仍然是主流。由此可以判断,北部湾北部4个季节的环流,基本是气旋式环流。这里要指出的是,漂流瓶释放地点是有选择的,但是回收时间和地点是随机的。我们只能根据渔民捡到漂流瓶之后,在瓶内的漂流卡上填写的时间和位置来确定漂流瓶位置。至于漂流瓶是通过怎样的运动方式到达那个地点却不得而知。因此,通过漂流瓶释放和捡拾地点,只能简单判断这里存在何种形式流动,其中自然不能排除风的影响。例如,7月北向运动增加,就是夏季西南风影响结果。

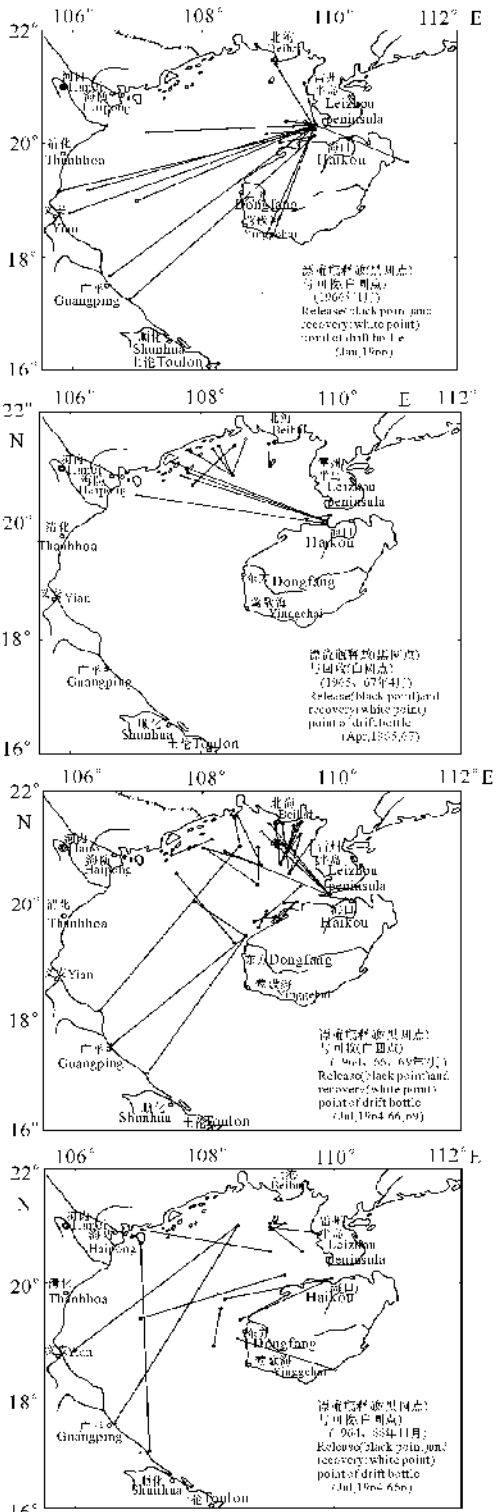


图 10 漂流瓶 4 个季度月释放(●)与检回(○)位置

Fig. 10 Release(●) and recovery(○) points of drift bottles in four seasons

2.2.3 洋浦港外余流夏季也向北

洋浦港位于海南岛西北部,西邻北部湾,北靠琼州海峡。2006年7月研究者曾在洋浦外面水深12m处,设置锚系海流计,进行表中底层海流观测^[27]。用滤波器滤去周期性潮流之后剩余的余流绘于图(11)中。由图11可以看出:表中层余流方向基本为 0° ,底

层余流方向偏向 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ (未画出)。表层余流流速在 $3\sim 17\text{cm/s}$,中、底层略有降低。由此可见,假如北部湾北部夏季不是气旋式环流,洋浦港外余流就不可能向北。

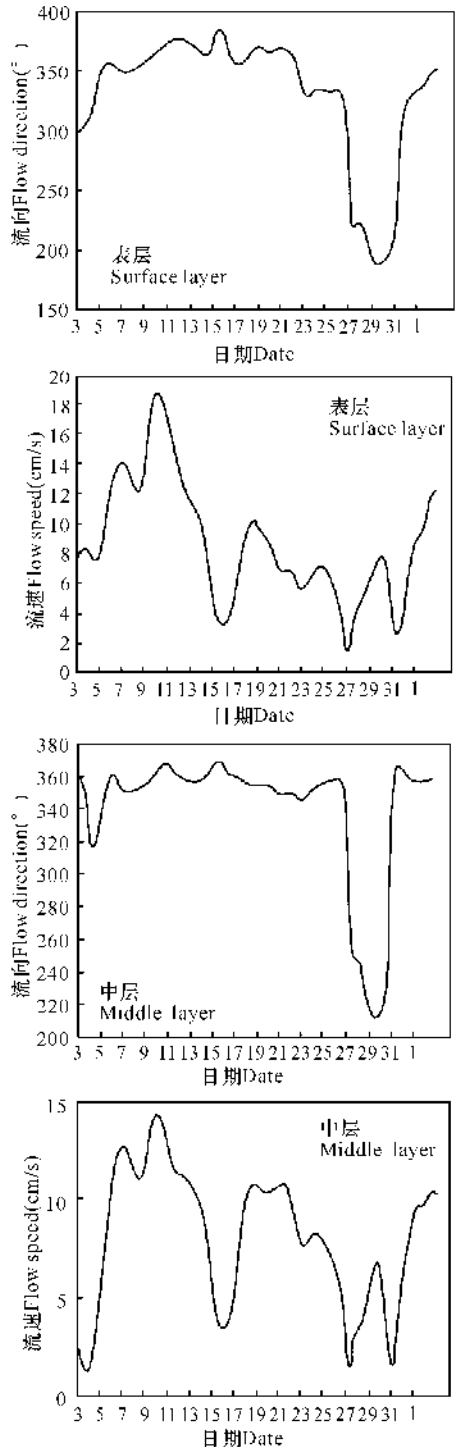


图 11 洋浦近岸 7 月中层余流^[26]

Fig. 11 The residual currents at surface and middle layer of Yangpu Port in July^[26]

2.3 北部湾南部的环流形式

夏华永等^[14]认为,夏季整个北部湾都是气旋式环流。在南北两处分别出现闭合的小气旋环流:北面

的气旋环流中心偏向红河口,而南部气旋中心则在北部湾与南海分界的中间。

文献[28]综合6种不同观点绘出了北部湾环流模式(图12)。由图12可以看出:北部湾都是气旋涡占主导地位,冬、秋季是一个气旋涡;春夏季是两个气旋涡。对于北部湾北部气旋涡的存在似乎取得共识,只是出现的位置和强度还存在分歧。北部湾南部的气旋式环流却与观测资料不符:夏季海南岛南部近岸上升流的存在,无法用气旋环流解释。

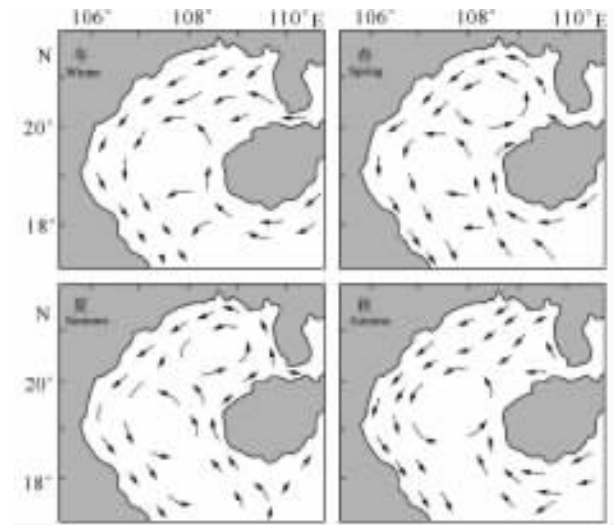


图12 《中国近海水文》^[28]给出的余流

Fig. 12 The circulation structures given by《Hydrography of China Seas》^[28]

2.3.1 2002年7月卫片显示结果

图13是2002年7月海南岛周边海表面温度。与此同时,图13中还给出2002年7月7~10日平均的QuikSCAT风应力($N \cdot m^{-2}$)。

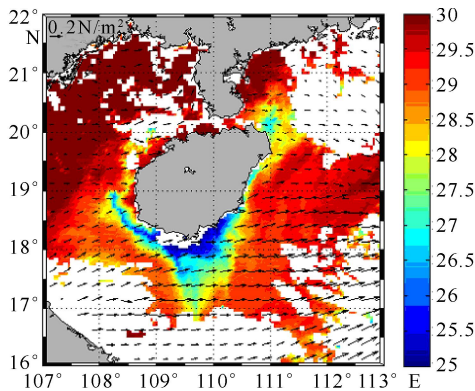


图13 2002年7月10日海南岛区域海表面温度(°C)

Fig. 13 Sea surface temperature(°C) around Hainan Island on July 10th, 2002

由图13明显看出,海南岛南部,西从莺歌海起,绕过三亚,向东北直到陵水,长达200km的范围,都是低温区,比非低温区要低3~4°C。这片低温水的存在是由上升流引起的。当时的平均风应力表明,这

里存在自西向东的海流,由于艾克曼的离岸输送,才引起外海底层水在近岸上升。

2.3.2 2006年8月实测资料结果

假如2002年的卫片还不足以证明,这里存在自西向东海流(因为偶发性事件总是存在的)。那么,2006年专项调查结果,再次表明海南岛南部存在上升流,就不能简单用“偶然性”来解释。图14是三亚西部一条自北向南断面,H11站靠近岸边,水浅,J80站在最外面,水深达100m。水温观测结果表明,外海底层20°C低温水沿着海底向岸爬升,使得近岸水温要比外海降低4°C。如果这里是气旋环流,将出现自东向西的流动,那就不会出现离岸的艾克曼输送,反而会出现向岸艾克曼输送,在这里不是产生上升流,而是下降流。由此可见,夏季,三亚以南海域平均环流形式应该有反气旋式结构。只有这个环流存在,才会出现沿岸上升流。

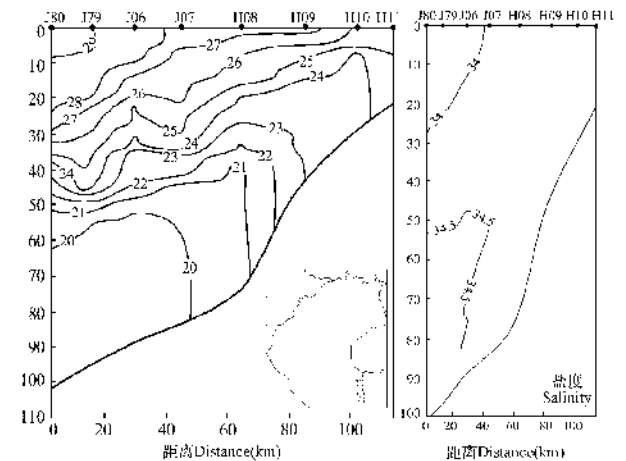


图14 2006年8月6日监测断面J80~H11温度和盐度分布^[24]

Fig. 14 The distribution of temperature and salinity at section J80~H11 on Aug 6th, 2006^[24]

查阅当前关于北部湾的计算结果,只有李树华^[29]的计算和此相符(图15)。他的基本思路是:由潮波运动方程出发,考虑海底摩擦和水平湍流粘滞系数,当潮波运动受到海底地形、边界形状等因子影响,导致潮流出现非线性现象而产生局地余流,就是欧拉余流。实际是潮汐余流。

该文的计算结果显示:非线性底摩擦项以及动量方程中的惯性项,这两种不同的非线性项所导致的非线性效应,使得潮波运动发生严重畸变。这是北部湾欧拉余流产生的基本原因。从图15可以明显看出:北部湾及其南部相邻水域存在两个环流。北部是气旋式,中心位置20°30'N,107°45'E,南部是反气旋式,

19°30'N 是南北不同形式环流的分界线。这个模式可以解释如下 6 个问题：(1) 琼州海峡水体西向输运；(2) 北部湾北部气旋式环流的范围和中心位置；(3) 洋浦港西面北向余流的终年存在；(4) 昌江附近西南向余流的出现；2008 年 7 月，在 19°28'.4N、108°45'.4E 站位，观测到表层余流 2.3cm/s，方向 250°；底层余流 4.9cm/s，方向 239°；全层平均余流 7.7cm/s，方向 214°。(5) “908”专项中东方断面上升流产生的机制(图 16)；(6) 对海南岛南部上升流存在给予合理解释。

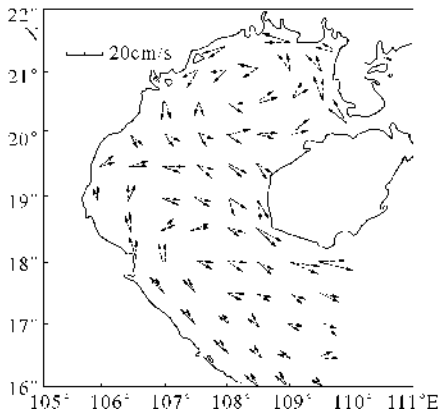


图 15 不考虑底摩擦(实线)和考虑底摩擦(虚线)的欧拉余流^[29]

Fig. 15 The modeled Euler residual current with(solid line)and without(dotted line)bottom friction^[29], respectively

但是，许多学者也提出不少质疑：(1) 欧拉余流受制于地形、底形，面对复杂的北部湾地形和底形，作者的结果过于理想和规范。而且有一些作者，例如祖婷婷^[15]的计算结果就复杂得多(图 17)。(2) 一般来说，潮致余流的量级要比潮流小 1 个量级(图 17)，而图 15 中欧拉余流的流速量级和潮流相当，普遍认为偏大。(3) 虽然欧拉余流中不考虑风，但是实际环流中不能回避风的作用。风虽然不是决定性因子，可是他对表层水体运动影响是不容忽视的。图 5、图 6、图 11 中都明显看出这一点。现在还无法预测图 15 中加入实际风场之后环流的式样。

2.4 北部湾的上升流

把本研究团队在涠洲岛的近一年实测海流资料低通滤波之后，对剩余的余流绘制前进矢量。即余流逐日运动轨迹矢量连接起来形成的一条曲线，从中(图 18)可以看出余流的基本特征。实际是将欧拉余流用拉格朗日来表达。

由图 18 可以看出，10m 层水体基本向 300°方向运动，30m 层，则转向 45°方向运动。高劲松等^[30]的广西科学 2014 年 8 月 第 21 卷第 4 期

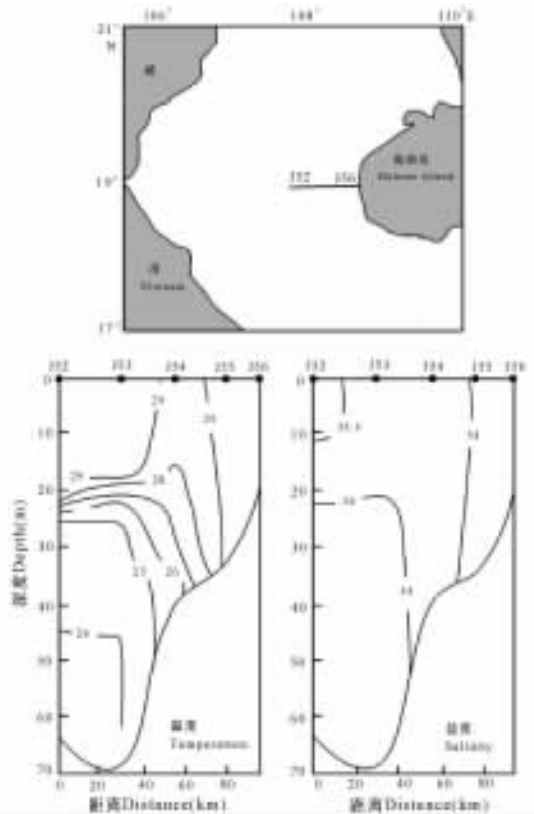


图 16 “908”专项得到的东方断面温度盐度分布^[23]

Fig. 16 The profiles of temperature and salinity from project“908”^[23]

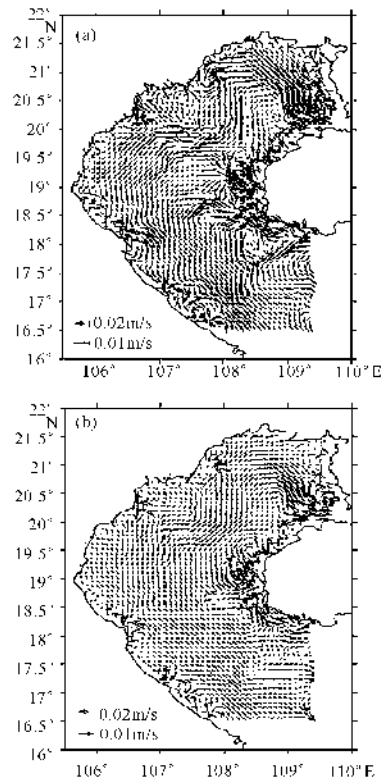


图 17 北部湾表层(a)与底层(b)潮致余流^[15]

Fig. 17 The tide-induced residual current in Beibu Gulf^[15] at surface (a) and bottom layer (b), respectively

数值计算表明,北部湾的底层水确实有向北岸爬升的趋势(图 19)。冬季爬升速度快,夏季爬升速度慢。产生上升流原因:北部湾北部终年存在气旋式环流,东部近岸水西流,引起外面底层水流向近岸加以补充,从而导致上升流的形成。

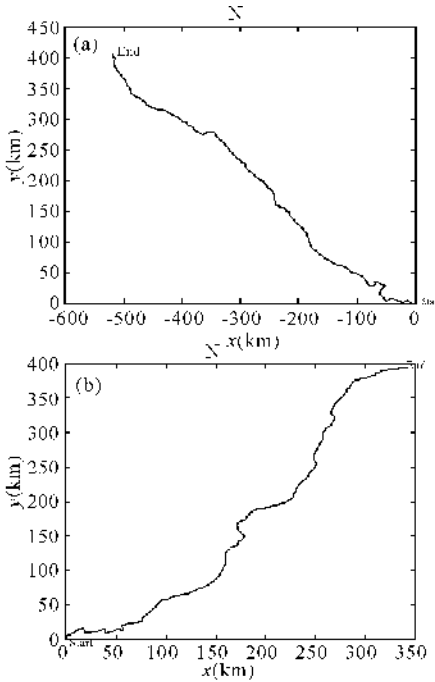


图 18 涠洲岛附近石油井架观测的 2 层余流前进矢量, (a)10m, (b)30m.

Fig. 18 The forward vectors of observed residual currents at two layers at the oil derrick around Weizhou Island, with and representing 10m(a) and 30m(b) layer, respectively

莫永杰^[31]对北部湾北部表层沉积物粒径分析整理,说明上升流的存在。图 20 是北部湾北部沿岸水深 30m 以下浅水域中 642 个表层沉积物样品作了粒度分析之后得出的结果。可以看出,由于上升流的存在,冬、夏季北部湾深槽水向铁山港外面运动过程中,

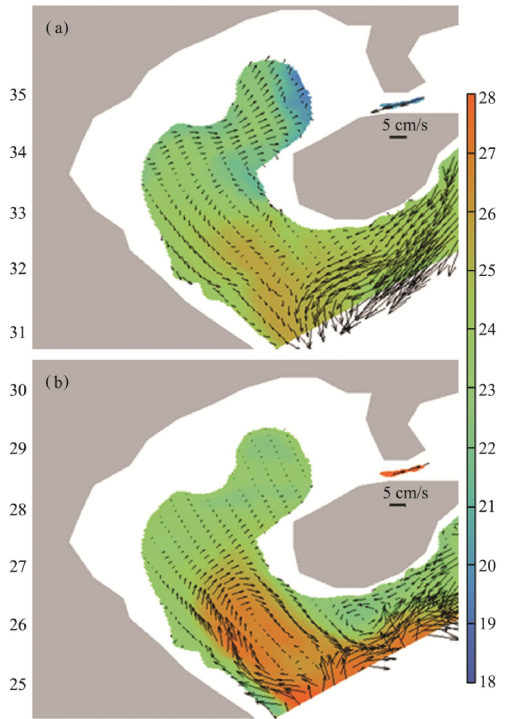


图 19 北部湾 40 层冬季(b)和夏季(d)环流^[30]

Fig. 19 The winter(a) and summer(b) circulation at 40m layer in Beibu Gulf^[30]

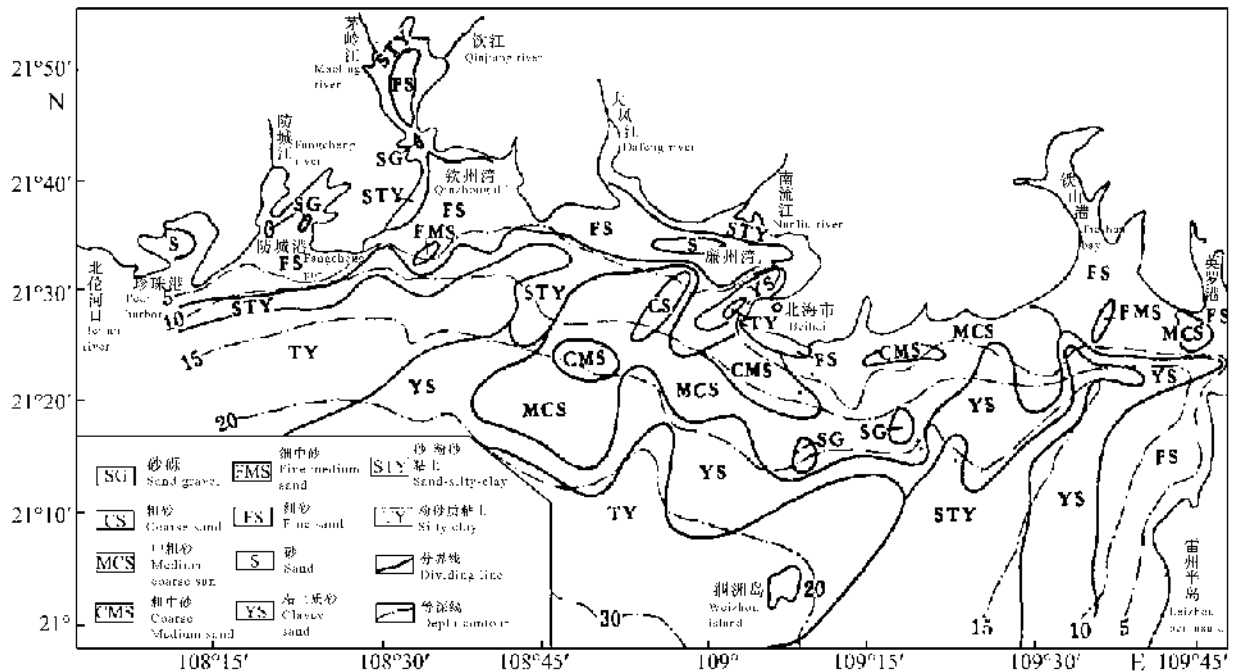


图 20 北部湾北部浅海沉积物粒度类型^[31]

Fig. 20 Grain size types of sediments in the shallow waters in the northern Beibu Gulf^[31]

必然携带一部分底层泥沙一起运动。深槽中泥沙颗粒较细,因此会形成粉砂质粘土(TY)、砂-粉砂-粘土(STY)向近岸扩散的态势。还可以明显看出:粉砂质粘土(TY)可以越过涠洲岛从 20m 水域进入 10m 水域;砂-粉砂-粘土(STY)则直接从 20m 水域西北向延伸,直达铁山港外面水深 5m 的区域。

同样,可以从生态学角度分析。郑白雯等^[32] 于 2006~2007 年北部湾 4 个航次的调查结果分析了北部湾北部浮游动物的丰度、生物量和优势种组成(图 21)。

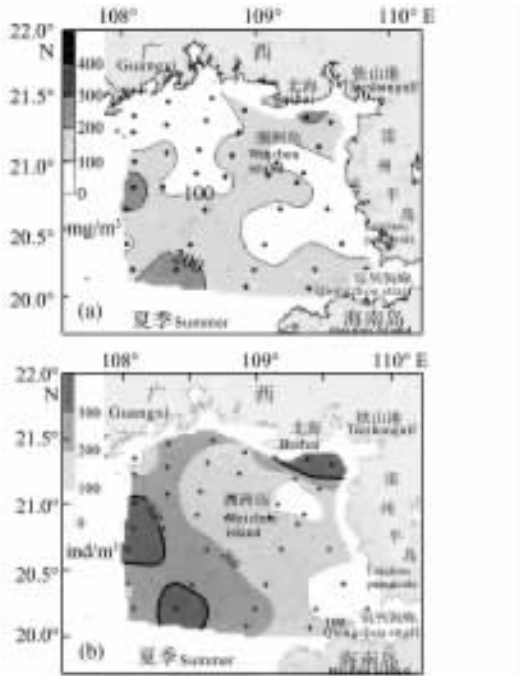


图 21 夏季浮游动物生物量 mg/m^3 (a) 和丰度 $\text{个}/\text{m}^3$ (b) 分布^[32]

Fig. 21 The distribution of biomass mg/m^3 (a) and abundance ind/m^3 (b) of zooplankton in summer^[32]

发现本区浮游动物丰度变化受环境因子的影响显著。夏季近表层生物大量繁殖,会消耗大量营养盐,但涠洲岛附近的生物量与丰度仍然处于高值区,尤其涠洲岛的东北区域,这与外海深层水对近岸的营养盐进行补充有关,说明在涠洲岛附近存在底层水爬坡现象,即存在上升流。

3 讨论

3.1 琼州海峡水西向输送机制分析

本文认为导致琼州海峡水西向运输的主要机制是潮汐余流。根据侍茂崇等^[18]的研究和计算结果,琼州海峡的潮汐余流是从东向西的(图 22)。由于日潮分量是由粤西通过琼州海峡进入北部湾,在海峡北部形成比南部要强大得多的潮汐余流,并且已得到实

测资料验证。李树华^[5]、祖婷婷^[15]也得到同样的结论。但是,风的影响也是不容忽视的。图 6 中夏季 M3 站余流表明,当表层余流受风的影响转向偏东方向时,底层反而增强西向余流,这是补偿作用造成的。高劲松等^[30]的研究表明,个别月份海峡形成整体东向输送。

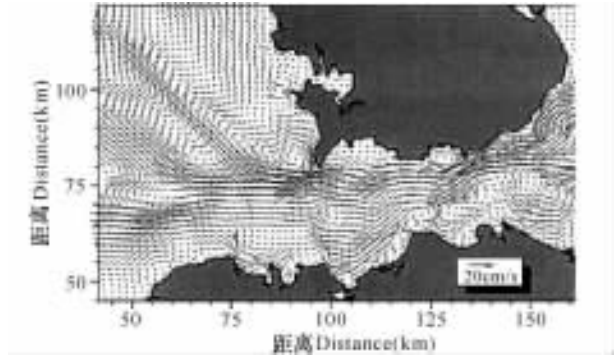


图 22 琼州海峡余流^[18]

Fig. 22 The residual current in Qiongzhou Strait^[18]

3.2 北部湾北部终年气旋式环流的形成原因

冬季气旋式环流存在是没有争议的,唯独夏季气旋式环流争议较多。现在的认识似乎趋于一致,即北部湾北部夏季确实存在一个较弱的气旋式环流。形成这个环流原因有以下几点:

(1) 由于夏季入海径流量增大很多,大量淡水在入海口堆积,形成海面由近岸向外海逐渐下降,混合水形成的斜压效应,驱使淡水沿越南沿岸向南流出湾口,促使气旋环流形成;

(2) 夏季西南风向北岸吹刮,使得外海水在广西近岸堆积,岸边海平面高于远岸。按照地转流计算方法,由岸向外海面倾斜的正压效应,将驱使沿岸水向西运动,也加强了气旋环流形成;

(3) 琼州海峡持续向西流,也是夏季气旋式流形成的重要原因。

(4) 风的影响是存在的,但是不起主导作用。首先西南季风是不稳定和持续的,在湾的北部西南季风的平均风力比东北季风小。根据统计,7 月平均风速 $5.0\text{m}/\text{s}$,风向 155° 。若按照 Ekman 风海流计算方法计算,涠洲岛附近石油井架测流点 10m、20m、30m 层余流流向应该分别为 49° 、 78° 、 107° ;流速应该分别为 $3.1\text{cm}/\text{s}$ 、 $1.8\text{cm}/\text{s}$ 、 $1.1\text{cm}/\text{s}$ 。而 10m 层实测的平均余流流速 $7\text{cm}/\text{s}$,方向 246° ;20m 层实测平均余流流速 $8.4\text{cm}/\text{s}$,方向 298° ;30m 层实测平均余流流速 $6.1\text{cm}/\text{s}$,方向 292° ,和实测结果相比,流速、流向相差都很大(表 1),且没有 Ekman 螺旋结构;20m 和 30m 流向基本一致。

表 1 实测 7 月余流速、流向和 Ekman 漂流计算结果比较

Table 1 Comparison of computational and measured residual current speed, direction and Ekman drift in July

项目 Item	10m		20m		30m		海面风 Sea-surface wind	
	流速 Speed (cm/s)	流向 Direction (°)	流速 Speed (cm/s)	流向 Direction (°)	流速 Speed (cm/s)	流向 Direction (°)	风速 Speed (cm/s)	风向 Direction (°)
实测 Observed value	7.0	246	8.4	298	6.1	292	5.0	155
计算 Calculated value	3.1	49	1.8	78	1.1	107		
差值 difference value	3.9	149	6.6	220	7.0	185		

3.3 北部湾上升流的形成原因

北部湾上升流形成是由于离岸水体输运引起底层水上升时出现的,其主要原因:

(1)广西沿海气旋式环流导致雷州半岛西岸水流走,琼州海峡水密度高于北部湾(夏季,琼州海峡东部低温高盐),不能直接从表层加以补充,只有从底层上升,弥补当地水的损失。这就是广西沿海东部(铁山港、北海)上升流特别明显的原因;

(2)海南岛西部从昌江口向南到莺歌海这一岸段上升流是由反气旋环流引起离岸输送造成的。至于这个区域反气旋环流形成机制尚不十分清楚,风、潮汐余流、密度流可能都是影响因素;

(3)海南岛南部三亚一线上升流则和风密切相关。西南风在这里比北部湾强盛且持续时间长。风形成自西向东的环流,造成离岸输送,导致上升流出现。

参考文献:

[1] 国家科委海洋组海洋综合调查办公室. 中越合作北部湾海洋综合调查报告[R]. 北京:国家科委,1964.
The Comprehensive Marine Survey Office of Marine Group of State Science and Technology Commission. A report of comprehensive marine survey of Beibu Gulf lead by between China and Vietnam[R]. Beijing: State Science and Technology Commission, 1964.

[2] 中越北部湾海洋综合调查队. 中越北部湾海洋综合调查报告[R]. 北京:国家科委,1965.
China and Vietnam Beibu Gulf Comprehensive Marine Survey Group. A report of China and Vietnam comprehensive marine survey of Beibu Gulf[R]. Beijing: State Science and Technology Commission, 1965.

[3] 《全国海岸带和海涂资源综合调查报告》编委会. 中国海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京:海洋出版社, 1991.
The Editorial Board of the National Coastal Zone and Coastal Resources Comprehensive Survey Report. The comprehensive survey of coastal zone in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991.

[4] 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.
Comprehensive Survey Group of Island Resources of Hainan Province. Report of the comprehensive survey of island resources of Hainan Province[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991.

[5] 李树华. 北部湾潮汐潮流数值计算[J]. 海洋通报, 1985, 4(6):6-9.
Li S H. A numerical computation of the tides and tidal currents in Beibu Gulf [J]. Marine Science Bulletin, 1985, 4(6):6-9.

[6] 李树华. 北部湾潮波的数值模拟试验[J]. 热带海洋, 1986, 5(3):7-14.
Li S H. A numerical modeling of tidal waves in the Beibu Gulf[J]. Tropic Oceanology, 1986, 5(3):7-14.

[7] 钟欢良. 北部湾北部春季环流分析[J]. 海洋通报, 1995, 14(1):81-85.
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.

[8] 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.
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.

[9] 刘爱菊,张廷延. 北部湾潮汐数值预报及其分析[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(6):640-645.
Liu A J, Zhang Y T. Numerical prediction and analysis of the tide in Beibu Gulf[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1997, 28(6):640-645.

[10] 夏华永,殷忠斌,郭芝兰,等. 北部湾三维潮流数值模拟[J]. 海洋学报, 1997, 19(2):21-31.
Xia H Y, Yin Z B, Guo Z L, et al. A three-dimensional numerical simulation of tidal current in Beibu Gulf[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1997, 19(2):21-31.

[11] 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):1-10.
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):1-10.

- [12] 王道儒. 北部湾冷水团的动力-热力机制研究[D]. 青岛:中国海洋大学,1998.
Wang D R. Study on the hydrodynamic of cold water mass in Beibu Gulf-Thermal mechanism research[D]. Qingdao:Ocean University of China,1998.
- [13] 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.
Sun H L, Huang W M, Zhao J S. Three-dimensional numerical simulation of tide-induced, wind-driven and thermohaline residual currents in the Beibu Gulf[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2001, 32(5): 561-568.
- [14] 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.
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.
- [15] 俎婷婷. 北部湾环流研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2002.
Zu T T. Study on the current in the Beibu Gulf[D]. Qingdao:Ocean University of China,2002.
- [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(1):64-72.
Gao J S, Chen B. Modeling the winter boreal circulation in the Beibu Gulf[J]. Guangxi Sciences, 2014(1): 64-72.
- [17] 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(1):54-63.
Chen B, Shi M C, Guo P F, et al. Analysis of tidal current spectrum and study of residual current in Northern Beibu Gulf of SCS[J]. Guangxi Sciences, 2014(1): 54-63.
- [18] 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]. Jour Physic Ocean, 2002, 32(1):103-121.
- [19] 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.
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.
- [20] 杨士瑛,陈波,李培良. 用温盐资料研究夏季南海水通过琼州海峡进入北部湾的特征[J]. 海洋湖沼通报,2006(1):1-7.
Yang S Y, Chen B, Li P L. A study of the characteristics of water transport from the south China sea into Beibu Gulf via the Qiongzhou strait in summer in terms of temperature and salinity data[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2006(1): 1-7.
- [21] 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,2006,2:12-17.
Chen D S, Chen B, Yan J H, et al. The seasonal variation characteristics of residual currents in the Qiongzhou strait[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2006, 2: 12-17.
- [22] 陈波,严金辉,王道儒,等. 琼州海峡冬季水量输运计算[J]. 中国海洋大学学报,2007,37(3):357-364.
Chen B, Yan J H, Wang D R, et al. The transport volume of water through the Qiongzhou strait in the winter season[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(3): 357-364.
- [23] 严昌天,陈波,杨仕英,等. 琼州海峡中间断面冬季水量输运计算[J]. 海洋湖沼通报,2008,1:1-9.
Yan C T, Chen B, Yang S Y, et al. The transportation volume of water through the Qiongzhou strait in winter season[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2008, 1: 1-9.
- [24] 陈照章,胡建宇,孙振宇,等. 北部湾东部海区夏季和冬季温盐平面分布特征比较[M]. 北部湾海洋科学论文集(第2辑). 北京:海洋出版社,2008:64-76.
Chen Z Z, Hu J Y, Sun Z Y, et al. Comparison of the horizontal distribution of thermohaline of the eastern part of Beibu Gulf in the summer and winter[M]. Proceedings of the symposium of marine science in Beibu Gulf(II). Beijing:China Ocean Press,2008:64-76.
- [25] 何映雪,林峰,陈敏,等. 春季北部湾北部海域颗粒有机物的碳、氮同位素组成[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2014,53(2):246-251.
He Y X, Lin F, Chen M, et al. Carbon and Nitrogen isotopic composition of particulate organic matter in the northern Beibu Gulf in spring[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2014, 53(2): 246-251.
- [26] 国家科委海洋组海洋综合调查办公室. 北部湾水气象参考资料[M]. 北京:国家科委,1966.
The Comprehensive Marine Survey Office of marine group of State Science and Technology Commission. A reference material of hydrometeorology of Beibu Gulf[M]. Beijing:State Science and Technology Commission,1966.
- [27] 严昌天,高劲松,吴碧玉,等. 洋浦港附近夏季潮余流特征分析[J]. 海洋湖沼通报,2008,3:35-40.
Yan C T, Gao J S, Wu B Y, et al. Analysis of tide-induced residual current characters near the Yangpu port in summer[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2008, 3: 35-40.
- [28] 苏纪兰,袁业力. 中国近海水文[M]. 北京:海洋出版

社,2005.

Su J L, Yuan Y L. Hydrological characteristics in coastal waters in China [M]. Beijing: China Ocean Press,2005.

[29] 李树华. 北部湾欧拉余流的初步研究[J]. 海洋湖沼通报,1987,3:8-14.

Li S H. Preliminary study on the Eulerian current in the Beibu Gulf [J]. Transactions of Oceanology and Limnology,1987,3:8-14.

[30] Gao J S, Xue H J, Chai F, et al. Modeling the circulation in the Gulf of Tonkin, South China Sea [J]. Ocean Dynamics,2013,63(8):979-993.

[31] 莫永杰. 北部湾北部浅海沉积物的粒度类型[J]. 热带海洋,1990,9(1):87-91.

Mo Y J. Grain size types of sediments in the shallow waters in northern Beibu Gulf [J]. Tropic Oceanology, 1990,9(1):87-91.

[32] 郑白雯,曹文清,林元烧,等. 北部湾北部生态系统结构与功能研究. II. 浮游动物数量分布及优势种[J]. 海洋学报,2014,34(4):83-89.

Zheng B W, Cao W Q, Lin Y S. Ecosystem structure and function in northern Beibu Gulf II. Quantitative distribution and dominant species of zooplankton [J]. Acta Oceanologica Sinica,2014,34(4):83-89.

(责任编辑:尹 闯)