

北部湾海洋环流研究进展^{*}

陈波¹, 侍茂崇^{2**}

(1. 广西科学院, 广西北部湾海洋研究中心, 广西近海海洋环境科学重点实验室, 广西南宁 530007; 2. 中国海洋大学, 山东青岛 266003)

摘要: 20世纪60年代初中越合作开展的北部湾海洋综合调查, 分析北部湾潮汐和潮流运动, 标志着北部湾物理海洋学研究工作的开始。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利用投放大量漂流瓶来研究北部湾表层海流的试验、1980—1986年全国海岸带和海涂资源综合调查、1988—1995年全国海岛资源综合调查等, 令人们对北部湾环流结构有了进一步认识。最近20年, 不少学者通过调查资料和数值模拟方法分析北部湾季节性环流结构后得到与以往研究调查相反的观点。本文回顾近年来北部湾海洋环流研究的主要进展, 阐述利用调查资料、数值计算等不同研究手段获得的对北部湾环流分布的整体认识, 以及在环流结构方面存在的不同观点, 进而介绍北部湾环流尤其是北部环流机制的一些新进展。以前的研究多认为北部湾环流主要受风场控制, 夏季为反气旋式环流, 冬季则为气旋式环流, 然而近年研究发现北部湾夏季也为气旋式环流; 也有人认为北部湾北部被气旋式环流控制, 但南部环流呈反气旋式; 在形成机制上, 北部湾环流受地形、风、外海水、海水密度分布及河流冲淡水注入等影响呈现复杂的态势; 风对北部湾北部环流形成有影响但不起主导作用; 琼州海峡东部水进入北部湾对广西沿海气旋式环流的形成有着重要的影响。北部湾海洋环流与海域物质输运扩散密切相关, 依托更精细化的数值计算手段, 结合动力场探究近海海洋环境污染净化及生态平衡问题, 是今后的重要发展趋势之一。

关键词: 环流研究 最新进展 北部湾 琼州海峡

中图分类号: P731.21 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2019)06-0595-09

0 引言

北部湾属于大陆架上一个浅海湾, 湾内平均水深为46 m, 最大水深不超过90 m。北部湾西、北、东三面为陆地和岛屿, 仅有南部湾口及东岸的琼州海峡与

南海连通。北部湾处于亚热带地区, 季风特征明显, 冬半年盛行东北季风, 夏半年则盛行西南季风, 东北季风期长于西南季风期。全年总降水量为1 100~1 700 mm。由于北部湾特定的自然环境条件, 湾内环流受地形、风、外海水、海水密度分布及河流冲淡水

* 国家自然科学基金项目(41576024)和广西重点研发计划项目(桂科 AB16380282)资助。

【作者简介】

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

【**通信作者】

侍茂崇(1937—), 男, 教授, 主要从事物理海洋学研究, E-mail: mcshi@ouc.edu.cn。

【引用本文】

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20200103.001

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.

CHEN B, SHI M C. Advances in study of Beibu Gulf circulation [J]. Guangxi Sciences, 2019, 26(6): 595-603.

注入等影响呈现复杂的态势。

北部湾物理海洋学研究工作始于 20 世纪 60 年代初。1962 年中越联合开展北部湾海洋综合调查,首次取得了一系列有关北部湾海洋科学发展的观测资料和报告^[1],填补了北部湾海洋科学研究的历史空白,奠定了北部湾物理海洋学等学科的发展基础。此后,一系列科学论文问世。

李树华^[2-3]采用线性二维潮波方程研究北部湾中 K1、O1、M2 和 S2 分潮潮波系统,周朦等^[4]发展了一个二维隐式格式研究北部湾的 K1、O1 和 M2 分潮。曹德明等^[5]则采用二维显式格式研究北部湾 M1 与 M2 分潮细致的潮汐、潮流结构以及潮能通量分布。朱耀华等^[6]发展了一个二维与三维嵌套的显式模型,并运用内外模态分离技术研究北部湾的潮汐与潮流。夏华永等^[7]根据经 Sigma 坐标变换后具有自由表面的三维非线性 N-S(Navier-Stokes)方程,以分裂算子法剖分动量方程、全隐式格式求解连续方程,求解北部湾潮汐潮流及其垂向分布。刘爱菊等^[8]以 6 个分潮同步输入,发现北部为全日潮,而南部的靠岸两侧为不正规全日潮,中间区为不正半日潮。孙洪亮等^[9]采用 POM 三维水动力模型,基于二阶湍流闭合模型模拟了北部湾海域的潮汐潮流及余流场。此外还有学者采用其他模型研究北部湾内的潮汐特征^[10-11],发现北部湾南部存在分潮无潮点,北部存在弱化分潮无潮点^[5,12-15];北部为不正规全日潮流,南部为正规全日潮流,越靠近湾北分潮振幅越大,最大潮差可达 5 m^[16-17];对潮致余流的研究发现,有一股从东向西的潮余流通过琼州海峡进入北部湾,之后沿西北向运动,至 108.5°E 附近折向南,然后与海南岛西岸北上的流汇合共同往西流动,最后在越南沿岸转为西南向流出北部湾^[18-20]。

中越联合调查报告认为,在冬、春两季,北部湾内为逆时针气旋型环流,秋季主要受逆时针环流控制,但东北部有一顺时针环流;夏季为顺时针反气旋型环流。冬季,在东北风影响下,南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。大部分文章都是建

立在风生环流的基础上,把风当作主要驱动力。

不过,最近 20 年,这种传统的观点却不断受到挑战。本文总结了多年来北部湾海洋环流的研究情况,包括其在结构、动力机制等方面的争议观点,并着重介绍北部湾北部环流形成机制研究的最新进展,并从海洋环境和生态保护的角度展望北部湾海洋环流研究的未来。

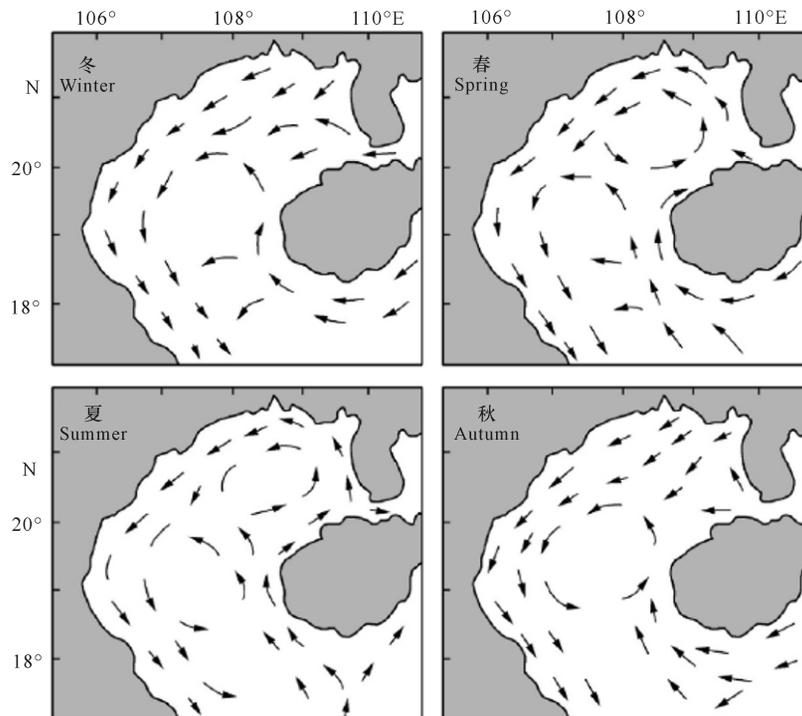
1 北部湾环流研究现状及进展

20 世纪 60 年代初,中越联合调查的结果,即北部湾的环流冬季为气旋式、夏季为反气旋式的结论深入人心。但是,当时观测仪器落后、观测时间短(连续 24 h),且分析思维是建立在风生环流基础上,所以研究结果略显粗糙。1983—2010 年,北部湾环流研究已取得长足发展。

1.1 总环流形态

总环流形态存在 3 种不同的观点;第 1 种观点认为北部湾夏季为反气旋式环流^[21-22];第 2 种观点认为北部湾夏季为气旋式环流^[23-24];第 3 种观点认为北部湾北部为气旋式环流控制,但南部环流呈反气旋式^[25-26]。对北部湾冬季环流的看法没有太大的争议,争议分歧点是夏季环流是气旋式还是反气旋式。

围绕以上不同的观点,近 10 年来多位学者展开研究。夏华永等^[12]对北部湾的风生环流和密度环流进行模拟,研究结果支持北部湾环流终年为气旋式的观点,琼州海峡水体夏季主要是西向输运。高劲松等^[27]通过 POM 模式在南海西北部建立三维后报模型,在充分考虑日平均的风场、热通量以及 6 个分潮之后的数值模拟结果表明,北部湾东北部环流受局地风场和琼州海峡流的共同作用;陈波等^[28-30]和鲍献文等^[31]利用观测资料分析广西沿岸流,发现其除受到港湾地形局部影响外,沿岸流常年也以向西为主。苏纪兰等^[32]综合以上各种观点绘制出北部湾环流模式(图 1)所示。由图 1 可以看出,北部湾环流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。很显然,北部湾环流形成受南海水、风以及北部沿岸河流淡水注入等影响呈现复杂态势,并具有多变的特点。

图1 北部湾的环流结构^[32]Fig. 1 Circulation structure in Beibu Gulf^[32]

1.2 北部湾北部环流形成机制

1.2.1 琼州海峡水交换

琼州海峡是海南省与大陆之间重要交通通道,也是南海与北部湾两个海区水交换通道,来自海峡东部的南海水进入北部湾对广西沿海的水体交换有着重要的影响。

对于琼州海峡水交换的研究,大多数研究认为,冬季由于受到东北季风的影响,琼州海峡水体输运方向是由南海北部进入北部湾,也就是从东向西;夏季受到西南季风的影响琼州海峡水体输运方向则完全相反。近20年来,琼州海峡水交换的研究取得一些新的突破,侍茂崇等^[33]、杨士瑛等^[34]、陈达森等^[35]发现琼州海峡水体输运终年为自东向西,而且通过数值计算得到西向输送水体量为0.1~0.2 Sv,揭示琼州海峡水体输运终年向西的流动现象。琼州海峡终年西向流的存在表明,风应力不是控制琼州海峡海流的主要因子,琼州海峡水交换具有更复杂的物理机制。

1.2.2 琼州海峡西向流对北部湾北部环流形成的影响

琼州海峡的独特位置使得它成为北部湾东部海水与外海水相互作用的重要通道,琼州海峡水终年西

向流动。Shi等^[36]认为,进入北部湾的流量冬季为0.2~0.4 Sv,夏季为0.1~0.2 Sv。陈波等^[37]对琼州海峡冬季水量输运进行计算得出,冬季平均水量通量为0.055 Sv,输运方向自东向西。俎婷婷^[24]按给定0.1 Sv的流量进行模拟,认为当琼州海峡为0.1 Sv西向流时,可以看到湾顶环流形成明显的逆时针弯曲,越南沿岸流速加强,除北部湾北部和海南岛沿岸,整个湾内流顺着湾中轴线从南部湾口流出;当琼州海峡给定0.1 Sv东向流的时候,仅海南岛西南沿岸始终保持沿岸北上的流动,此时湾中部涠洲岛附近环流表现为顺时针弯曲。可见,琼州海峡稳定的西向流有利于北部湾北部气旋型环流的形成,东向流则有利于反气旋型环流的形成。而对于这个气旋型环流的形成,琼州海峡东部水的影响起着重要作用。

1.3 北部湾上升流的研究

1.3.1 北部湾实测上升流

我国近海海洋综合调查与评价专项(简称“908”专项)实施后,根据2006年夏季北部湾南部J80~H11断面温盐观测结果(图2),发现夏季盐度底层明显向浅水(近岸)弯曲,这是上升流引起的。

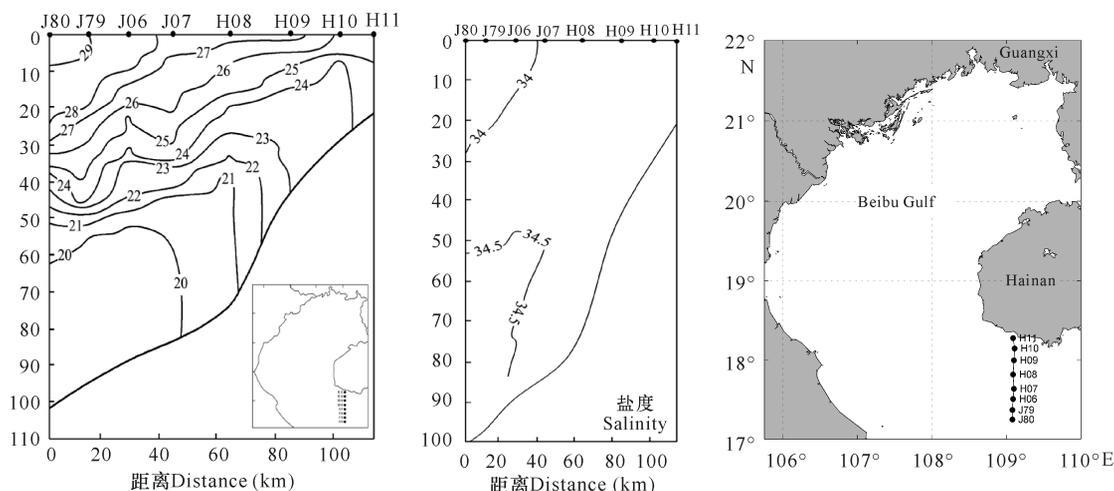


图2 2006年8月6日监测断面J80~H11温度和盐度分布^[38]

Fig. 2 Temperature and salinity distributions of monitoring section J80-H11 on August 6, 2006^[38]

1.3.2 数值计算结果

侍茂崇等^[39-40]研究认为,在坡度较大的地形附近,由于底摩擦和海底 Ekman 层影响,都会出现上升流。Lü 等^[41]利用走航数据和数值模式证实了根据卫星海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)数据发现的海南西海岸上升流的存在并探索其形成机制,认为其主要是由潮致混合锋面引起。总体而言,对北部湾上升流的数值研究较少,针对北部湾全域上升流进行模拟的研究还未见报道。

1.4 风对北部湾北部环流形成的影响

北部湾北部冬季存在气旋式环流是没有争议的,而夏季气旋式环流争议较多。有文章指出,北部湾北部夏季确实存在一个较弱的气旋式环流^[34-40],这个环流形成原因有以下几点:

(1)由于夏季入海径流量增大,大量淡水在入海口堆积,造成海平面由近岸向外海逐渐下降,混合水形成的斜压效应驱使冲淡水沿越南沿岸向南流出口,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)风对北部湾北部环流的形成有影响。夏季,由于大量淡水注入湾内,在越南沿岸形成一个低盐区,由温度与盐度引起的密度梯度分布产生一个逆时针方向的密度流;在北部湾东部的粤西沿岸 15 m 等深线以浅的水域内,夏季存在一股流幅狭窄的西南向沿岸流,这就是风应力作用下入海河流冲淡水所导致。但是风的影响不是起主导作用的。首先西南季

风是不稳定和持续的,在北部湾北部,西南季风的平均风力比东北季风小,对气旋式环流的形成有其局限性。1988年10月1日至1989年8月6日,在涠洲岛之南、水深40 m处定点进行海流观测,测流共分3层:10 m、20 m、30 m,采样间隔1 h。根据观测资料统计,7月平均风速5.0 m/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10 m、20 m、30 m层余流流向应该分别为49°、78°、107°,流速应该分别为3.1 cm/s、1.8 cm/s、1.1 cm/s。而10 m、20 m、30 m层实测余流流向分别为246°、298°、292°,平均流速分别为7 cm/s、8.4 cm/s、6.1 cm/s。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,20 m和30 m流向基本一致。

表1 实测7月余流流速、流向和 Ekman 漂流计算结果比较

Table 1 Comparison of measured residual current velocity, direction and Ekman calculation results in July

项目 Item	流速 Current velocity (cm/s)			流向 Current direction (°)			风速 Wind velocity (m/s)	风向 Wind direction (°)
	10 m	20 m	30 m	10 m	20 m	30 m		
实测 Calculation	7.0	8.4	6.1	246	298	292	5.0	155
计算 Measured	3.1	1.8	1.1	49	78	107	—	—
差值 Difference	3.9	6.6	7.0	149	220	185	—	—

显然,以往大多数文章认为建立在风生环流基础上、把风当作主要驱动力来定论北部湾北部环流形成是与实际不相符的。2017年11月份涠洲岛附近的测流结果也证实风对表层流有影响,但不是起主导作

用^[42]。因此,夏季北部湾气旋式环流形成,琼州海峡东部水持续向西流是重要原因。

2 北部湾环流与夏季水团

2.1 水团

水团为海洋中一种具有相对均匀的物理、化学和生物特征及大体一致的变化趋势而与周围海水存在明显差异的宏大水体。北部湾的水温变化较大,保守性差,应用“温—盐”关系(T-S曲线)来分析水团并不适宜,只好采用保守性较好的盐度作为划分水团的主要依据。于是,以32等盐线和34等盐线作为划分水团的指标,把北部湾的水团划分为沿岸水(≤ 32),外海水(> 34)以及混合水(32~34)3种;并在沿岸水团(A)、外海水团(C)和混合水团(B)基础上,再加两个季节性水团——湾西北冷水(D)和湾中底层冷水团(E)(图3)。

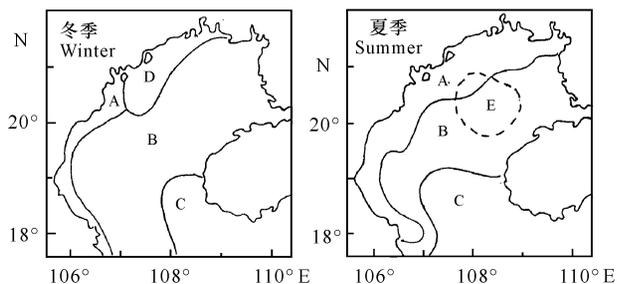


图3 北部湾水团基本模式

Fig. 3 Basic model of water masses in Beibu Gulf

2.2 环流是夏季水团形成的基本动力

由前面环流计算可以看出,该湾的海水系由3部分组成:

(1)南海高盐水,从南部湾口沿中部和东侧进入北部湾,形成C水团;

(2)A水团明显受径流影响,在这一区域低盐水沿西海岸南下,这是南海水与北部湾海水交换的主要通道;

(3)由东岸的琼州海峡、自东向西流入北部湾的外海次高盐水与南海高盐水混合,形成B水团。与8月中间层(计算水层分10层)环流非常一致(图4)。

特别要指出,湾中底层冷水团(E)与图4中琼州海峡西口的气旋涡非常一致。

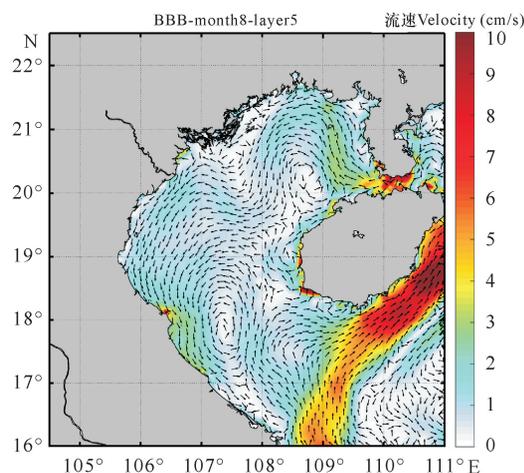


图4 北部湾8月中层环流

Fig. 4 Middle layer circulation in Beibu Gulf in August

3 北部湾环流与底质、生态关系研究

3.1 环流与底质

莫永杰等^[43]对北部湾北部沿岸水深30 m以及浅水域中642个表层沉积物样品做了粒度分析(图5),表明北部湾北部上升流的存在。

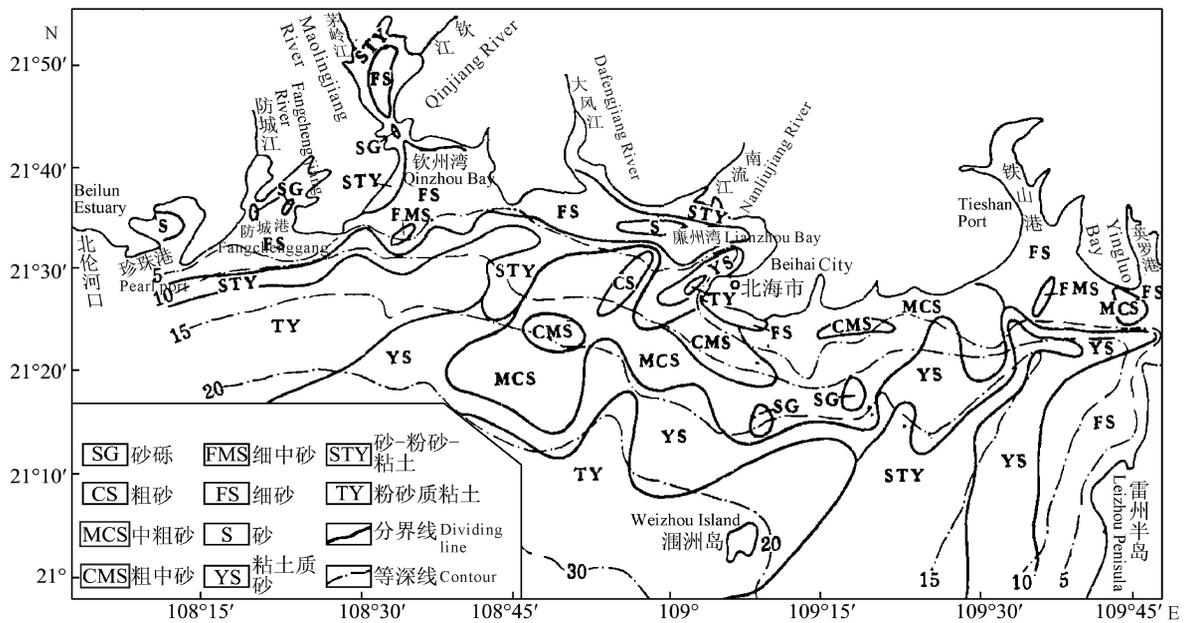
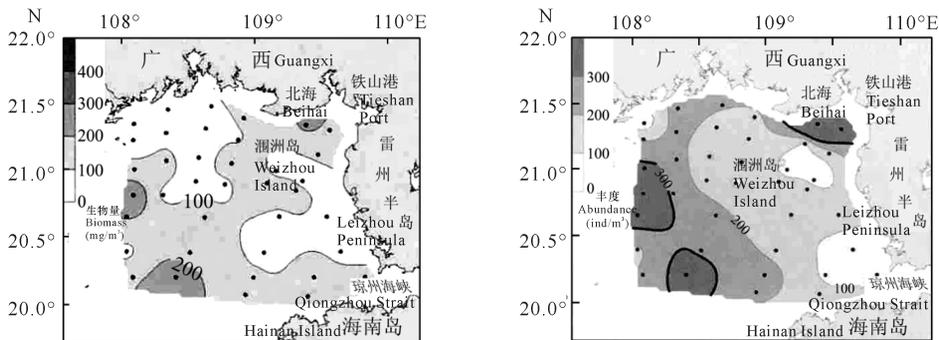
由于上升流的存在,冬、夏季北部湾深槽水向铁山港外运动过程中,必然携带一部分底层泥沙一起运动。深槽中泥沙颗粒较细,因此会形成粉砂质粘土(TY)、砂—粉砂—粘土(STY)向近岸扩散的态势。由图5中可以明显看出:粉砂质粘土(TY)可以越过涠洲岛从20 m水域进入10 m水域;砂—粉砂—粘土(STY)则直接从20 m水域西北向延伸,直达铁山港外面5 m等深线的区域。

3.2 环流与生态

(1)环流与浮游动物关系

郑白雯等^[44]为了解北部湾北部海区浮游动物数量分布规律及优势种组成,2006—2007年对北部湾进行4个航次的综合性调查。根据浮游动物样品分析结果,研究了北部湾北部浮游动物的丰度、生物量和优势种组成(图6)。

夏季近表层生物大量繁殖,会消耗大量营养盐。此时来自外海深层水,会给予近岸生物需要的营养盐以必要的补充,增加浮游生物的生物量和丰度。事实也证明:生物量高值区 200 mg/m^3 在涠洲岛东南面深水区,然后次高值区 100 mg/m^3 从深水区向西北方延伸,直到铁山港和北海外面。铁山港外面,甚至出现生物量为 200 mg/m^3 的高值区(图6)。

图5 北部湾北部浅海沉积物粒度类型图^[43]Fig. 5 Types of grain size of sediments in coastal areas in the north of Beibu Gulf^[43]图6 夏季浮游动物的生物量(a)和丰度(b)分布^[44]Fig. 6 Biomass (a) and abundance (b) distribution of zooplankton in summer^[44]

影响丰度变化的环境因素有水深、表层溶氧量、底层溶氧量、表层水温、底层水温、表层盐度、底层盐度、层叶绿素 a 浓度及底层叶绿素 a 浓度。浮游动物丰度与环境因子的等级相关结果表明,本区浮游动物丰度变化受环境因子的影响显著,其中水深、水温和叶绿素 a 浓度是重要的影响因子。

(2) 环流与叶绿素、颗粒无机碳关系

北部湾叶绿素 a 高浓度区域,主要分布在琼州海峡、雷州半岛西部、海南岛西南部、广西及越南沿岸等区域,最高值为 $4 \sim 5 \text{ mg/m}^3$ 。夏季范围缩小,秋季最大。

北部湾颗粒无机碳浓度呈现近岸河口区高、海湾中央低的特征。尤其是琼州海峡、雷州半岛西侧和海南岛西南部沿海地区(北从东方市起,绕过莺歌海,向东直到三亚止)的颗粒无机碳浓度明显高于其他区域。

这些分布特征与环流关系极为密切。在本期同时刊登的《2007 年夏季北部湾生态与环境要素分布规律研究》一文中详细介绍。

(3) 环流与赤潮的关系

2018 年我们通过大量历史数据和现场调查资料分析,结合数值模拟计算结果,研究涠洲岛赤潮发生与氮磷营养物质含量的关系,探索污染物输运过程与动力学的响应关系。研究发现,涠洲岛赤潮发生区域氮、磷营养物质含量高于周围海域,而这些高浓度氮磷营养物质与琼州海峡东部南海水传入北部湾有关。涠洲岛赤潮多发的原因是由于海水中存在高浓度的氮磷营养元素,但其并非来自广西沿岸的陆源污染,而是通过动力途经从琼州海峡东部南海输运而来,源头主要来自珠江口及粤西沿岸水域。所以,开展近海环流结构及生成机制研究意义很大。

4 展望

海洋环流运动对海域物质运输和扩散起着关键作用, 尤其是河口、港湾及其沿岸区域, 直接关系到近海海洋的生态平衡以及海洋环境污染净化等问题。沿海污染主要来源于通过河流或者排污口进入海域的陆源污染物, 其输移扩散主要受近海海域的水动力因素所控制, 尤其是余流场。通过构建基于近海局部精细化三维斜压模型是当今物理海洋学最为先进的研究手段之一, 以数模作为先导, 有针对性设置观测站位和观测项目, 观测结果作为数模检验的依据, 同时不断修正计算模型。只有通过数模为先导, 观测为验证相结合的研究方法, 才能真实地了解北部湾环流运动形态。根据其模型的计算结果揭示环流状况与近岸污染物输运扩散的关系, 揭示沿岸污染物输移扩散的动力机制, 为北部湾海洋生态环境保护、海洋工程开发、渔业生产发展需要提供科学依据, 所以开展海洋环流及其与其他环境要素关系的研究工作具有重要意义。但由于北部湾范围广阔且跨越国境线, 开展覆盖全海湾的研究水文、生物、化学等海洋调查非常困难, 至今也只有 20 世纪 60 年代初的两次中越北部湾合作海洋综合调查资料可用, 第一次是 1959 年 12 月—1960 年 12 月, 第二次是 1961 年 12 月—1962 年 12 月。然而, 时隔半个多世纪的今天, 只有 50 多年前中越进行的二次联合调查数据, 研究结果仍然建立在 1960 年的起点上, 这显然是不够的。2007 年“908”专项的调查海域虽然只有中越联合调查的一半, 但是做出的贡献却是显著的, 让我们在半个世纪后再一次看到北部湾的水文、生物、地质和化学的半个面貌。虽然中越之间再一次携手联合调查契机没有出现, 但是可以通过数模方法了解另一半; 通过中方海域调查结果, 用数模作为纽带将两半海域联系在一起也是可能的。

北部湾海域自然资源丰富, 海底蕴藏着丰富的石油和天然气, 沿岸众多河流每年携带大量的营养盐、有机质进入海湾, 加之海湾受沿岸水和来自湾口的混合水影响, 海洋生物种类众多, 水产资源丰富, 是我国著名的渔场。随着广西沿海开发建设项目增多, 各种污染物入海排放量逐步加大, 沿岸海水污染加剧。而这些问题的解决, 除去加强环境管理和资源保护之外, 还依赖于对该海域水动力环境的了解和掌握程度。位于广西沿岸海岸线蜿蜒曲折, 海湾众多, 岛礁密布, 河流、浅滩、水道交错, 构成了各自独特的地理

环境单元。而在以往的研究中大多采用有限差分方法对岸线进行拟合, 效果较差, 无法很好地体现沿岸岸线曲折和岛屿、浅滩众多的特点。因此, 结合广西海岸地形复杂的实际情况, 采用不规则三角网格和有限体积方法的 FVCOM 模式, 构建北部湾北部三维斜压数值模型, 并考虑沿岸入海径流影响等因素, 在准确模拟北部湾北部近海海洋潮流和余流特征的基础上, 进一步针对广西近海建立局部的精细模型分析潮流和余流特征及环流结构, 以此为基础, 深入分析沿岸污染物输移扩散特征, 找出沿岸的污染物输移扩散动力原因, 将是物理海洋学今后努力的方向之一。

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: 国家科学技术委员会, 1964.
- [2] 李树华. 北部湾潮汐潮流数值计算[J]. 海洋通报, 1985, 4(6): 9-12.
- [3] 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.
- [4] 周朦, 方国洪. 二维长波方程的一个无条件稳定有限差分格式[J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(2): 164-172.
- [5] 曹德明, 方国洪. 北部湾潮汐和潮流的数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(2): 105-113.
- [6] 朱耀华, 方国洪. 一种二维和三维嵌套海洋流体动力学数值模式及其在北部湾潮汐和潮流数值模拟中的应用[J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(2): 117-125.
- [7] 夏华永, 陈明剑. 北部湾三维潮流数值模拟[J]. 海洋学报, 1997, 19(2): 21-31.
- [8] 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.
- [9] 孙洪亮, 黄卫民. 北部湾潮汐潮流的三维数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(2): 1-8.
- [10] 徐振华, 雷方辉, 娄安刚, 等. 北部湾潮汐潮流的数值模拟[J]. 海洋科学, 2010, 34(2): 10-14.
- [11] 李树华, 夏华永, 李武全, 等. 北部湾物理海洋模型的建立与验证[J]. 广西科学, 2004, 11(1): 37-42.
- [12] 夏华永, 李树华, 侍茂崇. 北部湾三维风流及密度流模拟[J]. 海洋学报, 2001, 23(6): 11-23.
- [13] 孙洪亮, 黄卫民, 赵俊生. 北部湾潮流、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.
- [14] 吴自库, 王丽娅, 吕咸青, 等. 北部湾潮汐的伴随同化数值模拟[J]. 海洋学报: 中文版, 2003, 25(2): 128-135.
- [15] 徐振华. 北部湾潮汐潮流的数值模拟及数值实验[D].

- 青岛:中国海洋大学,2006.
- [16] 俞慕耕. 南海潮汐特征的初步探讨[J]. 海洋学报, 1984,6(3):293-300.
- [17] 沈育疆,胡定明,梅丽明,等. 南海潮汐数值计算[J]. 海洋湖沼通报,1985(1):1-11.
- [18] SUN H L, HUANG W M. Three-dimensional numerical simulation for tide and tidal current in the Beibu Gulf [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 20(1): 29-38.
- [19] 陈波,李培良,侍茂崇,等. 北部湾潮致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.
- [20] 赵昌,吕新刚,乔方利. 北部湾潮波数值研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(4):1-11.
- [21] 俞慕耕,刘金芳. 南海海流系统与环流形势[J]. 海洋预报, 1993, 10(2):13-17.
- [22] 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.
- [23] XIA H Y, LI S H, SHI M C. Three-D numerical simulation of wind-driven current and density current in the Beibu Gulf [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 20(4): 455-472.
- [24] 俎婷婷. 北部湾环流及其机制的分析[D]. 青岛:中国海洋大学,2005.
- [25] 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.
- [26] 徐锡祯,邱章,陈惠昌. 南海水平环流的概述[C]//中国海洋湖沼学会水文气象学会学术会议(1980)论文集. 北京:科学出版社,1982:137-145.
- [27] 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.
- [28] 陈波,侍茂崇,邱绍芳. 广西主要港湾余流特征及其对物质运输的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2003(1):13-21.
- [29] 陈波,李培良,侍茂崇,等. 北部湾潮致余流和风生海流的数值计算与实测资料分析[J]. 广西科学, 2011, 16(3):346-352.
- [30] 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.
- [31] 鲍献文,陈波,侍茂崇,等. 钦州湾三维潮流数值模拟[J]. 广西科学, 2004, 11(4):375-384.
- [32] 苏纪兰,袁业力. 中国近海水文[M]. 北京:海洋出版社,2005.
- [33] 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.
- [34] 杨士瑛,陈波,李培良. 用温盐资料分析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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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:自然科学版, 2007, 37(3):357-364.
- [38] 陈照章,胡建宇,孙振宇,等. 2006年7~8月北部湾海区温、盐度的断面分布特征[C]//北部湾海洋科学研究论文集:第一辑. 北京:海洋出版社,2008:79-81.
- [39] 侍茂崇. 北部湾环流研究述评[J]. 广西科学, 2014, 21(4):313-324.
- [40] 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.
- [41] LÜ X G, QIAO F L, WANG G S, et al. Upwelling off the west coast of Hainan Island in summer: Its detection and mechanisms [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2):1-5.
- [42] CHEN B, XU Z, YA H, et al. Impact of the water input from the eastern Qiongzhou Strait to the Beibu Gulf on Guangxi coastal circulation [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(9):1-11
- [43] 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.
- [44] 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.

Advances in Study of Beibu Gulf Circulation

CHEN Bo¹, SHI Maochong²

(1. Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Beibu Gulf Marine Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. Ocean University of China, Qingdao, Shandong, 266003, China)

Abstract: In the early 1960s, a comprehensive marine investigation of Beibu Gulf conducted by China-Vietnam cooperation to analyze the tide and tidal currents in Beibu Gulf marked the beginning of the physical oceanographic research in Beibu Gulf. The following series of investigations including the drift bottle experiments conducted by South China Sea Institute of the Chinese Academy of Sciences from 1964 to 1971, the comprehensive investigation of coastal zones and shoal resources of China from 1980 to 1986, and the comprehensive investigation of sea island resources of China from 1988 to 1995, had accumulated abundant information for further understanding the circulation structure of Beibu Gulf. In the past 20 years, researchers had tried to interpret the seasonal variation of circulation in Beibu Gulf based on numerical simulation and observational data, but they obtained opposite views compared with previous research investigation. In this paper the progress of study on Beibu Gulf circulation in recent years was reviewed. The overall understanding of the circulation distribution of Beibu Gulf obtained from different research methods such as survey data and numerical calculations was illustrated. The conflicting opinions upon the circulation structure were elaborated. Some new advances in Beibu Gulf circulation, especially the northern circulation mechanism were also introduced. Previously Beibu Gulf circulation was generally considered to be anticyclonic in summer and cyclonic in winter, which was dominantly controlled by the wind field. However, recent studies had found that Beibu Gulf was also a cyclonic circulation in summer. And some researchers believed that during summer in northern Beibu Gulf the cyclonic circulation dominated while anti-cyclonic circulation controlled the south. In terms of the formation mechanism, Beibu Gulf circulation presented a complex situation affected by terrain, wind, outer sea water, seawater density distribution and the river discharges into the sea. It was also revealed that the wind stress contributed in the formation of the northern circulation in Beibu Gulf, but it was not a predominant factor. The current from South China Sea through Qiongzhou Strait had a significant impact on the formation of cyclonic circulation in Guangxi coastal waters. The circulation of Beibu Gulf was closely related to the transportation and diffusion of substance in the sea waters. Relying on more sophisticated numerical calculation methods and combining the dynamic field to explore the offshore marine environmental pollution purification and ecological balance issues will be one of the important development trends in the future.

Key words: circulation study, review and advances, Beibu Gulf, Qiongzhou Strait

责任编辑:米慧芝



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>