

北部湾潮致余流和风生海流的数值计算与实测资料分析* Numerical Computation and Analysis of Observational Data of Tide-induced Residual Currents and Wind-driven Currents in Beibu Bay

陈波¹, 李培良², 侍茂崇², 邱绍芳¹, 庄军莲¹, 何碧娟¹, 蒋磊明³

CHEN Bo¹, LI Pei-liang², SHI Mao-chong², QIU Shao-fang¹, ZHUANG Jun-lian¹,
HE Bi-juan¹, JIANG Lei-ming³

(1. 广西科学院, 广西南宁 530007; 2. 中国海洋大学, 山东青岛 266003; 3. 广西大学, 广西南宁 530004)

(1. Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. China Ocean University, Qingdao, Shandong, 266003, China; 3. Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要:北部湾潮致余流的流速只有 1~2cm/s 左右, 靠近海南岛一侧, 潮致余流的环流基本为气旋式, 分别位于洋浦以北、东方以西、莺歌海西南方。只有靠近越南红河口, 有一个反气旋涡; 风生海流呈现冬季模式和夏季模式。冬季, 表层 19°N 以北为西南向的流动, 19°N 以南, 靠近海南岛水域为西向流动, 越南沿岸为南向流动。大部分区域流速为 5~12cm/s, 流速最大位于琼州海峡西面及海南岛西南部, 可达 10~20cm/s, 底层流速明显比表层小。夏季, 表层, 大部分海区为东北向流动, 海南岛以南的海区为向东流动, 流速大都在 3~7cm/s, 越南沿岸和海南岛西岸及西北沿岸流速为 7~9cm/s, 最大流速出现在海南岛西和西北沿岸, 可以达到 12cm/s。底层, 大部分地区流速均小于 1cm/s。

关键词:潮致余流 风生海流 模拟计算 北部湾

中图分类号:P731.21 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2009)03-0346-07

Abstract: The velocity of tide-induced residual currents in Beibu Bay is about 1~2cm/s. Near Hainan island, cyclonical circulations of residual currents are located on the north of Yangpu, west of Dongfang and south-west of Yingge Sea respectively. There is an anti-cyclonical eddy near estuary of Hong river in Vietnam. Wind-driven current presents different models. In winter, the surface current on the north of 19°N is mainly SW, while westward near Hainan island and southward in Vietnam coastal on the south of 19°N. In most area the velocity is 5~12cm/s and the maximum is 10~20cm/s appearing on the west of Qiongzhou strait and south-west of Hainan island. The bottom velocity is obviously small than the surface velocity. In summer, the surface current in most area is mainly NE, while eastward(3~7cm/s) on the south of Hainan island. The velocity is 7~9cm/s in Vietnam coastal and on the west and north-west of Hainan island, and the maximum is 12cm/s appearing on the west and north-west of Hainan island. The bottom velocity is mostly small than 1cm/s.

Key words: tide-induced residual currents, wind-driven currents, numerical computation, beibu bay

一般来说,在近岸和河口区域,水质点经过一个潮汐周期之后,并不回到原先的起始位置之上,这是由于常流、湍流以及潮流本身的非线性现象所引起

的^[1]。潮流出现非线性现象所导致的余流叫潮致余流,又称潮汐余流。在海区中由潮汐余流产生的环流叫潮汐环流。潮汐余流的流速可从每秒几厘米到几十厘米,与月平均风生流具有相同的量级。潮汐余流自成环流体系,是浅海环流的重要组成部分。

北部湾是南海的一个内湾,由于受地理环境条件的影响,北部湾的环流结构较为复杂。湾内的水体除

收稿日期:2008-07-09

作者简介:陈波(1954-),男,研究员,主要从事海洋学研究。

* 国家自然科学基金项目(No. 40566001)资助。

了从南部湾口流入外,还从东部琼州海峡流入,对广西沿海水体流动产生重要的影响。北部湾环流的数值计算已有不少文章^[2~5]介绍,但是对琼州海峡东部水流入北部湾,从而对广西沿海影响的研究尚不多见。本文采用笛卡尔坐标变换方法建立潮流数值计算控制方程,根据文献^[6~9]对琼州海峡冬夏季水体通量计算结果,模拟计算北部湾潮流致余流和风生海流,了解湾内及其广西沿海的水体流动状况,为广西海洋开发和环境保护提供动力学方面的科学依据。

1 POM 基本方程组

基本方程式建立在 σ -坐标系(图 1)下,其中各参数与笛卡尔坐标系的坐标关系如下:

$$x=X; y=Y; \sigma = \frac{z-\eta}{H+\eta}; t=T, \quad (1)$$

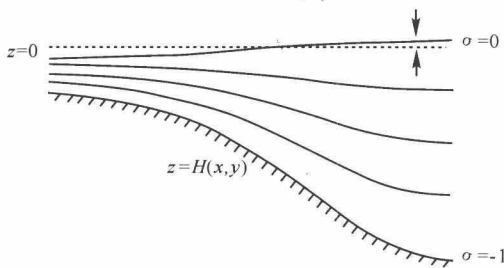


图 1 σ -坐标系

Fig. 1 σ -Coordinate system

其中 X, Y, Z 为传统的笛卡尔坐标; $D = H + \eta$, 其中 $H(X, Y)$ 为平均海平面下的水深, η 为自由表面相对于海平面的位置。 $-1 < \sigma < 0$, 自由表面处 $\sigma = 0$, 海底 $\sigma = -1$ 。

在 σ -坐标下, 控制方程为

连续方程:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial UD}{\partial x} + \frac{\partial VD}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0; \quad (2)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} + \frac{\partial U \omega}{\partial \sigma} = fVD - \\ & gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \frac{\partial \rho'}{\partial x} d\sigma' + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} d\sigma' + \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right] + F_x, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UV D}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V \omega}{\partial \sigma} = -fUD - \\ & gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \frac{\partial \rho'}{\partial y} d\sigma' + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} d\sigma' + \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right] + F_y; \end{aligned} \quad (4)$$

温盐守恒方程:

$$\frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial TUD}{\partial x} + \frac{\partial TVD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} =$$

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right] + F_T - \frac{\partial R}{\partial z}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} = \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_S; \end{aligned} \quad (6)$$

湍流二阶闭合方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial U q^2 D}{\partial x} + \frac{\partial V q^2 D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2}{\partial \sigma} = \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right] + \frac{2K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \\ & \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{\Lambda_1} + F_q, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 l D}{\partial t} + \frac{\partial U q^2 l D}{\partial x} + \frac{\partial V q^2 l D}{\partial y} + \frac{\partial \omega q^2 l}{\partial \sigma} = \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma} \right] + E_1 l \left\{ \frac{K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \right. \\ & \left. \frac{gE_3}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right\} \tilde{W} - \frac{Dq^3}{B_1} + F_l. \end{aligned} \quad (8)$$

方程(2)~(8)中, U 和 V 分别为 x 方向和 y 方向的流速, ω 为 σ 坐标的垂直速度。方程(3)和(4)中 ρ_0 为平均密度, $\rho' = \rho - \rho_0$, 在模式计算斜压之前, 先从 ρ 中减去 ρ_{Ekman} 生成 ρ' , 这样做可以减小斜压梯度力的截断误差, 特别是在地形变化比较剧烈的地方。将 ω 转换为直角坐标系下的 w :

$$\begin{aligned} w = \omega - u \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - v \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) - \\ \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

水平粘滞项和扩散项 DF_x, DF_y 可表示为:

$$\begin{aligned} F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M H \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(A_M H \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right), \end{aligned} \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} F_y = \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_M H \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(A_M H \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right). \end{aligned} \quad (10b)$$

在温度方程、盐度方程及湍流方程中:

$$F_\phi = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H H \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H H \frac{\partial \phi}{\partial y} \right), \quad (11)$$

其中, ϕ 分别代表 T, S, q^2 和 $q^2 l$ 。

水平扩散系数由 Smagorinsky 参数化公式计算得出:

$$A_M = C \Delta x \Delta y \frac{1}{2} |\nabla V + (\nabla V)^T|, \quad (12)$$

其中, $\frac{1}{2} |\nabla V + (\nabla V)^T| = [(\partial v / \partial x)^2 + (\partial u / \partial y)^2 + (\partial u / \partial y + \partial v / \partial x)^2 / 2]^{1/2}$, C 为 Horcon 数, 一般介于 0.10 到 0.20 之间, 如果网格足够小的话, C 也可以取为 0。

K_M, K_H 为垂直扩散参数, 分别表示为 $K_M = lqS_M; K_H = lqS_H, S_M, S_H$ 和 S_q 为稳定函数:

$$(S_M, S_H, S_q)^T = F\left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}, \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}, q, l\right), \quad (13)$$

$$S_M[6A_1A_2G_M] + S_H[1 - 2A_2B_2G_H - 12A_1A_2G_H] = A, \quad (14)$$

$$S_M[1 + 6A_1^2G_M - 9A_1A_2G_H] - S_H[12A_1^2G_M + 9A_1A_2G_H] = A_1(1 - 3C_1), \quad (15)$$

$$S_q = 0.20, \quad (16)$$

$$G_M \equiv \frac{l^2}{q^2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (17)$$

$$G_H \equiv \frac{l^2}{q^2} \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}. \quad (18)$$

1.1 边界条件

海底和自由表面运动学边界条件:

$$\omega(0) = \omega(-1) = 0. \quad (19)$$

方程(3)和(4)的边界条件为:

自由表面:

$$\frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial U}{\partial \sigma}, \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) = -(\langle \omega u(0) \rangle, \langle \omega v(0) \rangle), \sigma \rightarrow 0, \quad (20)$$

右端为风应力除以海水标准密度。

海底(底摩擦近似):

$$\frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial U}{\partial \sigma}, \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) = C_z [U^2 + V^2]^{1/2} (U, V), \sigma \rightarrow -1, \quad (21)$$

其中

$$C_z = \max \left[\frac{k^2}{[\ln \{ (1 + \sigma_{bb-1}) H / z_0 \}]^2}, 0.0025 \right], \quad (22)$$

式中, $k=0.4$ 是 Karman 常数, z_0 是糙率参数。在我们的模式里面 C_z 为常数, 方程(5)、(6)的边界条件为:

自由表面:

$$\frac{K_H}{D} \left(\frac{\partial T}{\partial \sigma}, \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) = -(\langle \omega \theta(0) \rangle), \sigma \rightarrow 0; \quad (23)$$

$$\text{海底(不可入条件): } \frac{K_H}{D} \left(\frac{\partial T}{\partial \sigma}, \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) = 0, \sigma \rightarrow -1; \quad (24)$$

湍流闭合模式的边界条件为:

$$(q^2(0), q^2l(0)) = (B_1^{2/3} u_r^2(0), 0), \quad (25)$$

$$(q^2(-1), q^2l(-1)) = (B_1^{2/3} u_r^2(-1), 0), \quad (26)$$

其中, B_1 是一个湍流闭合常数, u_r 代表摩擦流速。

1.2 数值模式设置

计算区域和网格分布见图 2, 网格空间分辨率是 $5' \times 5'$, 在经向, 底摩擦系数为 0.0025, 在开边界加上水位边界条件:

$$\zeta = \sum f_c H_c \cos[\omega_c + (V_0 + u)_c - g_c]. \quad (27)$$

这里 H 和 g 分别是调和常数的振幅和迟角, 下标 C 代表 M_2, S_2, K_1, O_1 4 个分潮中的 1 个。 ω 代表分潮频率, f 为交点因子, u 为交点订正角, V_0 是天文潮的初位相。在开边界处采用 FES95.2 全球大洋模式提供的

调和常数。

模式初始条件为 $\zeta = u = v = 0$, 模式外模态的时间步长为 20s, 内模态的时间步长为 600s。模式从开始运行到稳定状态期间, 每隔 1h 输出每个网格上的 ζ, u 和 v 。为了准确地分析出水位调和常数和潮流椭圆要素, 一共输出 15d 的计算结果, 然后对计算结果进行分析和比较。

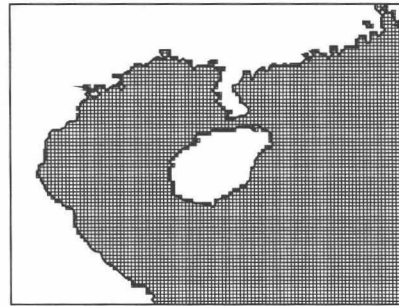


图 2 模式的计算网格

Fig. 2 The computational grid of the models

1.3 模拟结果验证

为了验证模拟结果, 我们利用琼州海峡和海南岛至广西沿岸 15 个潮位站的潮汐调和常数和实测值与计算值进行对照, 得出绝对平均误差: K_1 分潮 H (cm) 为 2.9, G ($^\circ$) 为 0.607; O_1 分潮 H (cm) 为 -1.894, G ($^\circ$) 为 -0.784。与此同时, 为弥补验证资料的不足, 我们还利用琼州海峡西部历史上夏冬两个季节不同站位 25 个小时海流观测资料和 1995 年涠州岛附近历时 1 年的定点上 20m 层的 Aandraa 海流计 10min 采样资料计算潮致余流, 以及根据南海海洋研究所 1964 年~1966 年间冬季(1 月和 2 月)和夏季(7 月和 8 月)的漂流瓶资料分析其漂流瓶的漂流轨迹来进一步验证模拟结果。

2 计算结果分析

2.1 潮致余流

由于潮致余流仅随潮流强弱而变, 不包含风的影响, 因此各个季节应该基本一样。

从图 3 可以看出北部湾潮致余流有如下特征:

(1) 潮致余流量级较小, 只有 $1 \sim 2$ cm/s, 最强的潮致余流位于琼州海峡的西端和海南岛的西南部分靠近雷州壮举岛的水域; (2) 潮致余流的环流基本是气旋式: 除去北部有一个明显构成闭合的环流(位于洋浦港的西北面, 其中心大致在 $20.2^\circ\text{N}, 108.5^\circ\text{E}$) 之外, 其余大都没有闭合; 只有靠近近岸部分出现反气旋环流: 例如, 最明显的一个位于越南红河口外, 其中心大致在 $20.5^\circ\text{N}, 107.5^\circ\text{E}$ 。

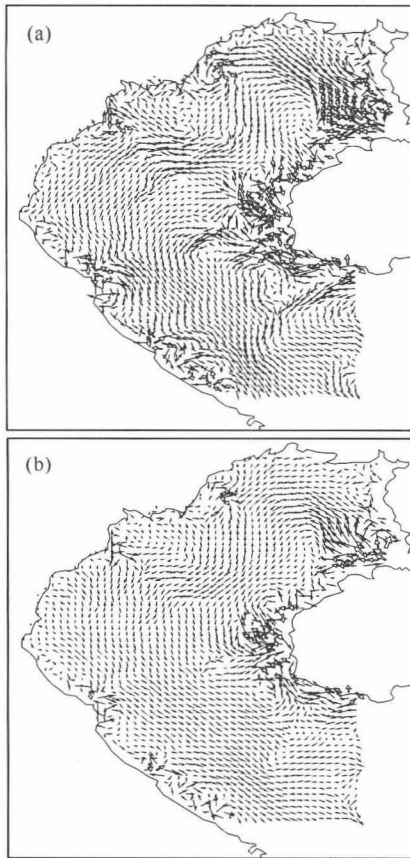


图3 琼州海峡作为开边界时候的北部湾潮汐余流
Fig. 3 The tide-induced residual currents with the Qiongzhou strait as the open boundary conditions
(a)表层, (b)底层。(a)surface, (b)bottom.

2.2 风生海流

对于风生海流,由于冬季北部湾在强劲的东北风搅拌作用下垂直对流混合很强,除了南部湾口水深急剧变化的地方,温度和盐度从表层到底层基本一致,密度梯度较小,密度流很弱,平均流速为1cm/s左右,仅在南部湾口处流速较大,并且冬季正压风生流场和斜压风生流场结构相似,主要受东北风的影响,表现为气旋型环流^[10~12]。因此我们仅对其冬季的正压环流场进行分析,认为整个海域在水平和垂直方向上没有温盐的梯度变化,全场密度均一不变。

风生流的模拟采用夏威夷大学国际太平洋研究中心提供的经多年平均的气候态月平均 QuikScat 风场资料,选取1月份的风场(图4)作为冬季的代表进行诊断计算。1月份的平均风速为5~7m/s。模拟时海表风应力由 QuikScat 风速资料计算获得,若以 K_1 分潮的调和常数计算出开边界水位作为强迫条件,将计算所得的流速进行 K_1 潮周期平均,去掉潮流的成分,就可以获得含潮作用的潮致—风生余流;若不考虑由分潮引起的水位变化则可获得风生余流。

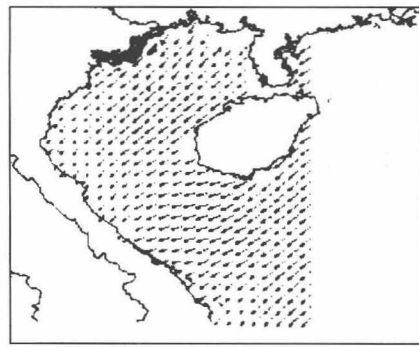


图4 北部湾1月份风场分布

Fig. 4 Wind distribution of the Beibu Bay in January

由于北部湾的特殊地理位置,使得其不同季节的风场、温盐有着很大的差别,这些因素在不同季节对环流的贡献大小也有所不同。过去的研究都认为夏季海水的斜压性强于冬季,密度流在夏季对总环流的贡献大于冬季,但是这些研究对于夏季究竟是风生流还是密度流占主要成分有着不同的认识。因此,我们选择西南季风较为强盛的7月风场(图5)作为夏季的代表,利用最新的 QuikScat 气候态风场资料、垂向分辨率较高的月平均温、盐场资料,在考虑潮汐余流作用下北部湾的环流形式。

2.2.1 冬季潮汐余流与风的联合作用

受东北季风的影响,冬季表层(图6)19°N以北为西南向的流动,19°N以南海南岛西南岸为西向的流动,越南沿岸为南向的流动;海南岛西北琼州海峡口、海南岛西南部和19.5°N以北越南沿岸流速最大,可达10~20cm/s,而18.5°N以南越南沿岸流速最小,不及5cm/s,大部分区域流速为5~12cm/s。底层流(图7)呈现出风生补偿流的性质,在湾中部18°N以北出现明显的东北向流动,以19.5°N、107.75°E为中心形成一不闭合的气旋型环流,越南沿岸为较强的东南向流动,流速为3~7cm/s;整个底层流速较小,大部分区域的流速都在1~5cm/s,仅在琼州海峡西口处流速可达8cm/s。深度平均后气旋型环流的中心移至18.75°N、107.25°E附近的,没有明显的东北向流,除了环流中心大部分区域流速为1~10cm/s。但是无论是表层、底层或者深度平均的结果,琼州海峡都是西向流,并且流速最大,越南沿岸都是顺岸向南的流动。

2.2.2 夏季潮汐余流与风的联合作用

夏季西南风风力较冬季弱,大部分海区表层流(图8)为东北向流动,海南岛以南的地方为向东的流动,流速大都在3~7cm/s,湾西北部越南沿岸和海南岛西岸及西北沿岸流速为7~9cm/s,最大流速出现在海南岛西和西北沿岸,可以达到12cm/s。底层(图

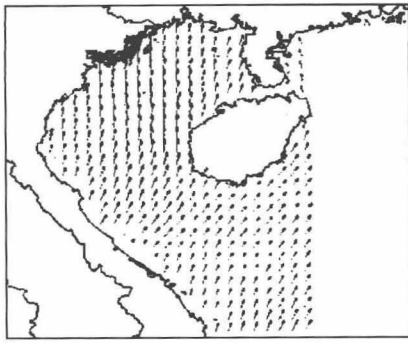


图5 北部湾7月份风场分布

Fig. 5 Wind distribution of the Beibu bay in July

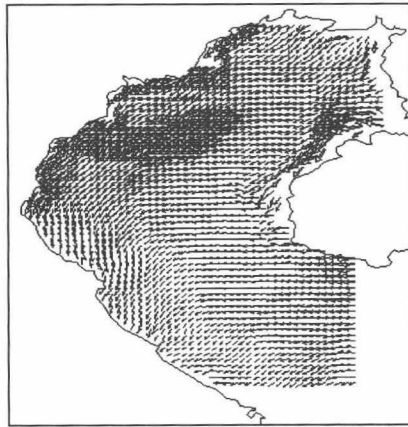


图6 冬季表层正压风生余流(含潮汐作用)

Fig. 6 Wind-driven residual currents at the positive pressure of the surface in winter(include tidal action)

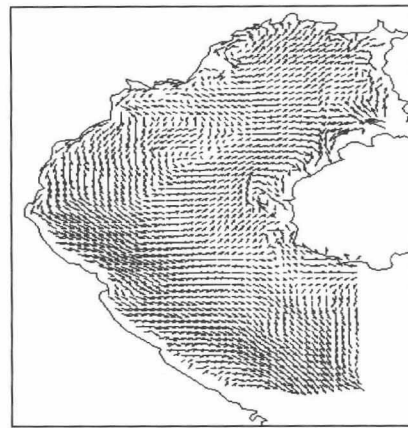


图7 冬季底层正压风生流(含潮汐余流)

Fig. 7 Wind-driven currents at the positive pressure of the bottom in winter(include tidal residual action)

9), 18°N 以北湾中轴出现较强的西南向风生补偿流, 与湾西北部越南沿岸东北向流组成一椭圆形扁长的顺时针环流, 该环流内部还套有两个小的顺时针环流。越南南部沿岸为西北向流动, 却未能在湾南形成顺时针环流, 只是在海南岛南部 17°N、109°E 位置出现一不闭合顺时针型环流。底层流速较小, 仅在海南岛西岸和琼州海峡口出现大于 5cm/s 的流速; 越南、广西、海南岛沿岸和湾北中轴位置的西南向流动流速

为 1~3cm/s, 其他大部分地区均小于 1cm/s。深度平均后(图 10)湾西北的椭圆形扁长的顺时针环流变得非常显著, 19°N 以北近岸是北上的顺风流, 湾中轴是南下的逆风补偿流, 除了湾西北部底层存在的 3 个顺时针环流, 在 21°N、108.75°E 和 19°N、107.5°E 分别出现一个逆时针环流, 18°N 以南出现较为明显的不闭合顺时针型环流。湾沿岸流速大于 1cm/s, 最大流速仍然出现在海南岛西岸和琼州海峡口, 约 6~10cm/s。湾西北越南沿岸、海南岛西北部沿岸、越南顺化附近流速为 2~5cm/s, 其他区域流速均小于 1cm/s。

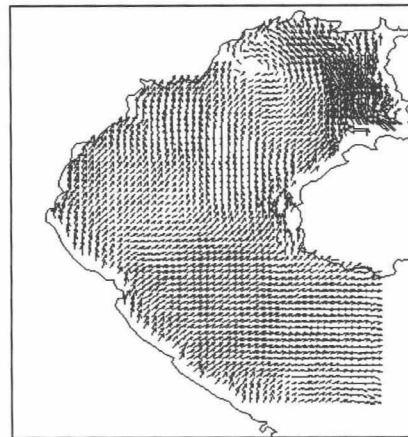


图8 夏季表层斜压风生余流(含潮汐余流)

Fig. 8 Wind-driven residual currents at the baroclinic pressure of the surface in summer(include tidal residual action)



图9 夏季底层平均斜压风生余流(含潮汐余流)

Fig. 9 Average wind-driven residual currents at the baroclinic pressure of the bottom in summer (include tidal residual action)

3 实测资料分析

3.1 25 个小时观测资料分析

图 11 和图 12 是根据琼州海峡西部历史上夏冬两个季节和不同站位 25 个小时海流观测资料计算的余流。由于观测时间总是选择在好天气下进行, 因此, 25 个小时海流观测系列分离出来的余流更多的是反

映潮致余流结果。由图 11 和图 12 可以看出:(1)夏冬两个季节,琼州海峡的西部余流基本都是西北向,这和计算结果非常一致;(2)雷州半岛的西缘的尖角—灯楼角附近,由于岬角地形的影响,余流方向从西偏北指南,这是一个局部小尺度反气旋环流;(3)海南岛的西北部靠近洋浦附近会出现西北向余流,这和计算结果的气旋式环流南界基本一致。

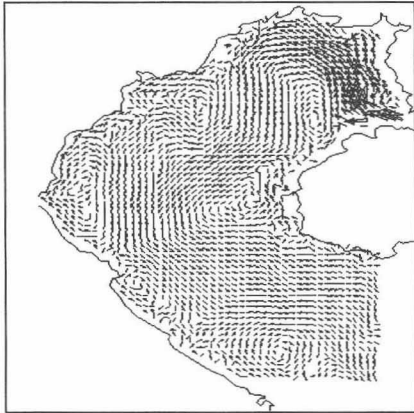


图 10 夏季全层平均斜压风生余流(含潮汐余流)

Fig. 10 Wind-driven residual currents at the baroclinic pressure of the whole depth in summer (include tidal residual action)

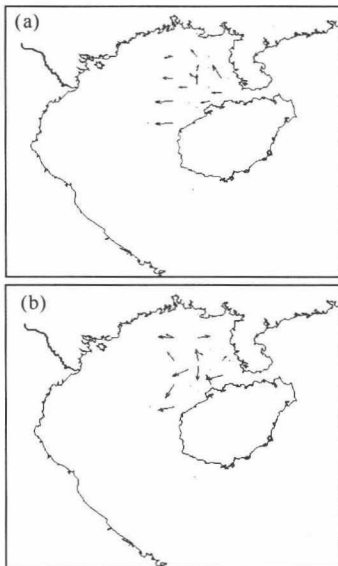


图 11 夏季表层(a)和中层(b)余流

Fig. 11 The surface (a) and the bottom (b) residual currents in Summer

3.2 1 年连续观测资料计分析

从图 13 和图 14 可以看出:(1)20m 层,余流方向基本都是东北向,有少部分时间是东南向。只有 4 次是南和西南向。(2)5 月以前,基本是东北风(风矢量指向西南),5 月以后,东北风开始减弱,6 月以后东北风和西南风(风矢量指向东北),交替出现,但是和流矢量对照起来看,20m 层余流和风的关系并不密切,

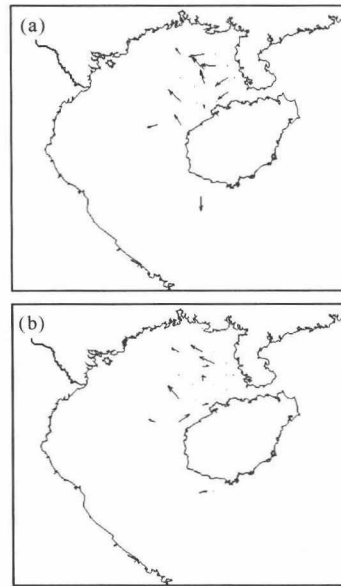


图 12 冬季表层(a)和中层(b)余流

Fig. 12 The surface (a) and the bottom (b) residual currents in Winter

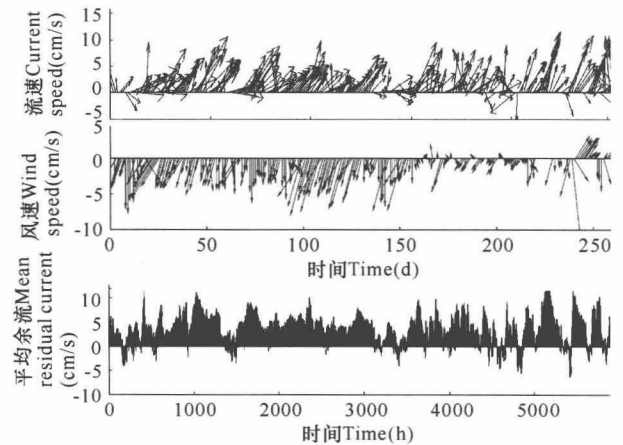


图 13 涠州岛附近实测的 1 年资料计算的余流(20m)

Fig. 13 Residual currents calculated according the one year data observed near the Weizhou island

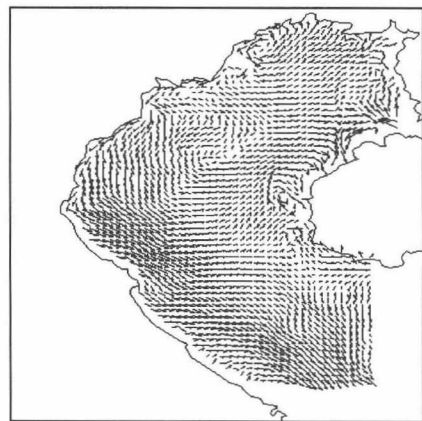


图 14 冬季涠州岛附近 20m 层海流观测系列

Fig. 14 Current observation series of the 20 meters layer near the Weizhou island in Winter
甚至多数情况下,出现流、风方向相反的情况。由此可

知,北部湾虽属浅海,但是流型却比较复杂。海流的驱动力也是多种多样。我们认为,底层流和风向相反,主要来自补偿流效应:表层在风驱动下,向南流动,底层为了补偿表层水的流走,必须反向流向湾底。1年连续的观测结果与计算的冬季底层余流结果非常一致。

3.3 漂流瓶漂流轨迹

由图 15 可以看出,无论冬季还是夏季,绝大多数的漂流瓶都是从琼州海峡西口附近流向西北、西和西南方向。这和我们计算结果(图 6 和图 10)非常一致。

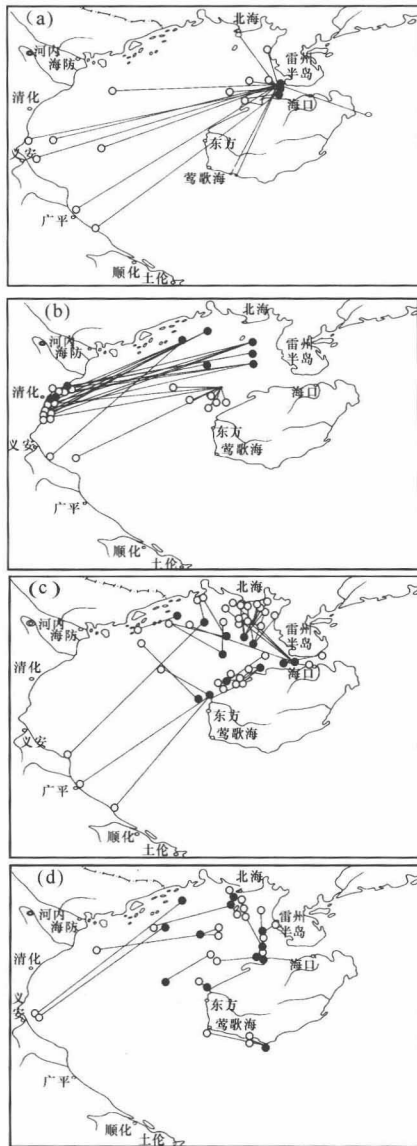


图 15 漂流瓶的漂流轨迹

Fig. 15 Motion trajectory of the drift bottle

●:漂流瓶释放点 Release point of the drift bottle; ○:漂流瓶回收点 Recovery point of the drift bottle.

(a)1966.01;(b)1964.02;(c)1964.07,1965.07,1969.07;(d)1964.08,1966.08.

4 结论

(1) 北部湾潮致余流具有量级小和气旋式的特

征。潮致余流流速只有 1~2cm/s,潮致余流的环流基本为气旋式。

(2) 冬季,受东北季风的影响,在潮汐余流与风的联合作用下,表层 19°N 以北为西南向的流动;19°N 以南:海南岛西南岸为西向的流动,越南沿岸为南向的流动;大部分区域流速为 5~12cm/s。最大流速位于洋浦以北、越南沿岸,可达 10~20cm/s。底层流速较小,约为 1~5cm/s,流向和表层趋势相反,具有明显补偿流特征。

(3) 夏季,西南风风力较冬季弱,在潮汐余流与风的联合作用下,夏季大部分海区表层流为东北向流动,流速大都在 3~7cm/s,最大流速位于北部靠近中国大陆水域。流速为 7~12cm/s。底层,湾中间基本为西南向,流速为 1~3cm/s;靠近海南岛有 3 个气旋涡。最大流速仍然出现在海南岛西岸和琼州海峡口,约 6~10cm/s。

(4) 观测资料表明:琼州海峡西口存在 1 个气旋式环流,环流中心大致位于 20.2°N,108.5°E 处;北部湾北部下层终年存在北上的补偿流,冬季更为明显;无论冬季还是夏季,漂流瓶回收点大都在投放点西面和西南面出现;这些结果与计算的潮汐余流较为一致,说明数值计算结果是可信的,同时对广西沿岸水交换提供一个全新认识:表层流向东南,底层以补偿性流向东北,水体更新是迅速的。

参考文献:

- [1] 侍茂崇. 物理海洋学[M]. 济南:山东教育出版社,2004.
- [2] 曹德明,方国洪. 北部湾潮汐与潮流的数值模拟[J]. 海洋与湖沼,1990,21(2):105-113.
- [3] 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.
- [4] 夏华永,殷忠斌,郭芝兰,等. 北部湾三维潮波数值模拟[J]. 海洋学报,1997,19(2):21-23.
- [5] 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):650-645.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 严昌天,陈波,扬仕英,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.
- [9] 侍茂崇,陈春华,黄方,等. 琼州海峡冬末春初潮流场特征[J]. 海洋学报,1998,20(1):1-10.
- [10] 袁叔尧,邓九仔. 北部湾环流数值研究[J]. 南海海洋研究与开发,1999,12(2):41-46.
- [11] 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.
- [12] 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.

(责任编辑:邓大玉)