

## 北部湾北部潮流谱分析和余流特征研究\*

# Analysis of Tidal Current Spectrum and Study of Residual Current in Northern Beibu Gulf

陈波<sup>1</sup>, 侍茂崇<sup>2</sup>, 郭佩芳<sup>2</sup>, 高劲松<sup>1</sup>, 陈宪云<sup>1</sup>

CHEN Bo<sup>1</sup>, SHI Mao-chong<sup>2</sup>, GUO Pei-fang<sup>2</sup>, GAO Jing-song<sup>1</sup>, CHEN Xian-yun<sup>1</sup>

(1. 广西科学院 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)

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

**摘要:**【目的】研究北部湾北部的潮流谱和余流特征。【方法】利用 1988 年 10 月至 1989 年 8 月的涠洲岛附近 10m、20m 和 30m 海流观测资料进行谱分析。【结果】无论频率  $f > 0$  或  $f < 0$ , 全日潮谱峰都高于半日潮谱峰。其中, 主要半日潮周期为 12h、12.4h, 主要日潮周期分别为 23.9h 和 25.8h。在半日潮和全日潮分量中, 顺时针分量是主要的。从余流前进矢量可以看出: 冬半年, 10m、20m 和 30m 层平均余流矢量方向分别为 302°、338°和 43°。夏季, 10m、20m 和 30m 层平均余流矢量方向分别为 246°、298°和 292°。【结论】风对 1988 年 10 月至 1989 年 2 月余流影响明显, 但是制约余流运动的主要因素是北部湾北部环流。

**关键词:** 北部湾 谱分析 潮流 余流

**中图分类号:** P731.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2014)01-0054-10

**Abstract:**【Objective】To reveal the characteristics of tidal current spectrum and residual current in the northern Beibu Gulf.【Method】The tidal current data at 10m, 20m and 30m layer, respectively, observed near the Weizhou Island from October 1988 to August 1989, were analyzed using the spectrum method.【Result】The peaks of diurnal tidal spectrums were higher than that of semi-diurnal no matter  $f > 0$  or  $f < 0$ . The periods of two major semi-diurnal tides were 12 h and 12.4 h, respectively, whereas the periods of two main diurnal tides were 23.9 h and 25.8 h, respectively. Among the semi-diurnal and diurnal component tides, the clockwise components were dominant. The averaged residual current direction was 302°, 338° and 43° in winter at 10m, 20m and 30m layer, respectively, whereas it was transformed to be 246°, 298° and 292° in summer.【Conclusion】Although the monsoon wind had important effect on the residual current in the Beibu Gulf from October to February, the residual currents in the northern Beibu Gulf was dominated by the general circulation structure in the Beibu Gulf.

**Key words:** Beibu Gulf, spectrum analysis, tidal current, residual current

收稿日期: 2013-09-04

作者简介: 陈波(1954-), 男, 研究员, 主要从事近海海洋动力学研究。

\* 国家自然科学基金(批准号: 41266002)资助。

**【研究意义】**北部湾位于南海西北部, 在北纬 17°00'~21°30' 和东经 105°40'~110°00', 北临广西壮族自治区, 东靠海南岛和广东省的雷州半岛, 西靠越南民主共和国, 南连南海, 以海南岛莺歌嘴与越南来角之间的连线为界(图 1)。北部湾全部位于大陆棚内, 平均深度约为 50m, 属于大陆架上一个浅海湾,

水下地形平坦,最大水深不超过 100 m。由于观测数据局限,北部湾北部的潮流谱研究还较少。【前人研究进展】20 世纪 60 年代初,中越合作开展北部湾海洋综合调查<sup>[1,2]</sup>,一举奠定了北部湾海洋研究的基础。此后还有一些调查,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”<sup>[3]</sup>,1988~1995 年,“全国海岛资源综合调查”<sup>[4]</sup>等。基于这些调查,我们对北部湾环流,特别是近岸部分有了进一步认识。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<sup>[5~15]</sup>。这些研究对于北部湾的季节性环流结构的特点,尤其是北部湾夏季环流结构有着不同的认识,甚至是截然相反的观点。传统上认为北部湾受季风控制,冬季为逆时针型环流,夏季为顺时针型环流。与此对应,琼州海峡冬季为西向流,夏季为东向流,风生流在环流中占主要的成分;事实上近期对琼州海峡和粤西沿岸流的研究结果<sup>[16~19]</sup>表明:琼州海峡终年为西向流,并且对北部湾夏季逆时针环流的形成有着重要贡献。【本研究切入点】由于过去使用的资料基本都是周日连续海流观测结果,用这些资料分析余流,有较多的偶然性和误差。基于此,本文采用由涠洲岛之南,水深 40m 处定点观测的海流数据,测流共分 3 层:10m、20m、30m,采样间隔 1h。从 1988 年 10 月 1 日起,至 1989 年 8 月 6 日止,持续时间 11 个月,观测站位如图 1 中“☆”号所示。【拟解决的关键问题】(1) 使用一整年的观测资料分析涠洲岛附近的潮流谱特征;(2) 分析北部湾北部的余流生成机制。

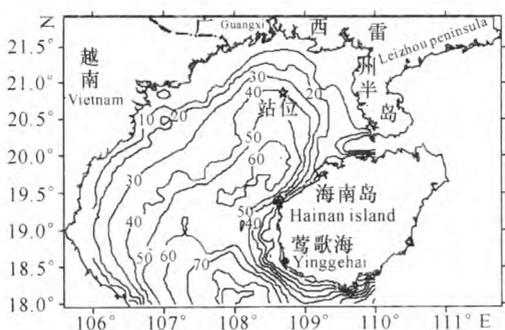


图 1 北部湾观测站位

Fig. 1 The observation stations in the Beibu Gulf

## 1 时间序列谱分析方法

在海洋中广泛地存在各种现象,他们大多可用标量过程或矢量过程来描述。在其研究方法上又可以分为两类:一是用统计方法研究外观量,即在时空域内对所描述的现象进行研究;另一类方法就是谱分析

方法,企图从内部结构上,即在频率域或波数域内对描述的过程进行研究。尽管谱分析方法是最近几十年提出的,但他却随着计算机的普及、计算技术的改进而得到迅猛的发展和广泛应用。所谓功率谱分析,就是通过能量相对于频率的分布来确定构成波面  $\xi(t)$  各组成波的相对大小,并依据在线性下导出的功率谱矩与外观特征量之间的理论关系,来确定该标量过程的外观统计特征。而高阶谱分析则是企图揭示各组成波之间的相互作用程度,即研究该过程的非线性特征。

为了研究锚定站海流随时间变化的特性,我们采用最大熵方法<sup>[20]</sup>,取自由度  $\nu = 2$ ,计算海流旋转功率谱。

为了检验功率谱中主要周期是否存在,采用以下红噪声假设。

定义:

$$W(f_m) = \bar{\nu} S_x(f_m) [\eta(f_m)]^{-1}, \quad (1)$$

其中,  $\nu$  为自由度,  $S_x(f_m)$  为样本序列平滑谱,  $m$  为样本序列数,  $m = 1, 2, 3, \dots$ , 函数  $\eta(f_m)$  参见文献<sup>[7]</sup>中的表达式(10.6.14),  $f_m$  为相应的频率。给出显著性水平  $\alpha$ , 功率谱  $\bar{S}_x(f_m)$  的  $100(1-\alpha)\%$  的置信区间可用下式估计:

$$\left( \frac{\bar{\nu} S_x(f_m)}{\chi^2_{\nu}(1-\alpha/2)}, \frac{\bar{\nu} S_x(f_m)}{\chi^2_{\nu}(\alpha/2)} \right). \quad (2)$$

当  $\alpha = 0.1$  和自由度  $\nu = 2$ , 上述区间中,  $\chi^2_{\nu}(1-\alpha)$  可由常用数学手册中  $\chi^2_{\nu}$  分布表中查得, 则

$\left( \frac{\nu}{\chi^2_{\nu}(1-\alpha/2)}, \frac{\nu}{\chi^2_{\nu}(\alpha/2)} \right)$  为  $(0.333, 19.417)$ 。通常用

双对数坐标绘制谱图, 功率谱的置信区间表示形式将显得既简单又直观, 只要  $W(f_m) > 19.417$ , 就满足显著性检验。

## 2 时间序列谱分析结果

### 2.1 1988 年 10 月至 1989 年 3 月海流谱分析

#### 2.1.1 10m 层海流谱分析

根据现场风的观测, 10 月至第 2 年 3 月期间, 风向基本是东北风, 且观测资料最为完整, 因此, 我们将这 5 个月放在一起进行谱分析。图 2a, b 是 10m 层谱计算结果, 可以看出: 无论是  $f > 0$  或  $f < 0$ , 日潮、半日潮和 1/3、1/4 诸潮分量在谱图中都有明显表现。

采用红噪声假设对 10m 海流谱峰进行显著性检验, 其检验结果列于表 1 中。表 1 中所列的分潮流, 从文献<sup>[21]</sup>中可以找到对应分潮名称。

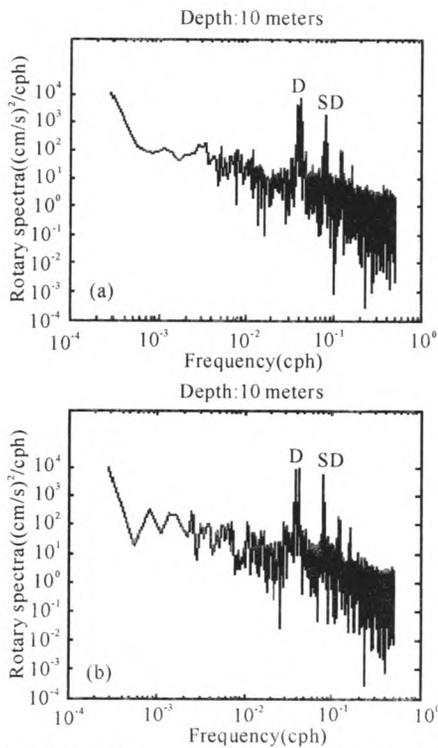


图2 10~3月10m层  $f > 0$  (a)和  $f < 0$  (b)潮流谱

Fig. 2 The tidal current spectrum at 10 m layer from October to next March with  $f > 0$  (a) and  $f < 0$  (b)

表1 10m层海流谱峰显著性检验结果

Table 1 The significant test results of current spectrum peaks at 10 m layer

$f > 0$			$f < 0$		
周期 Period(h)	$W(f_m)$	检验 Test	周期 Period(h)	$W(f_m)$	检验 Test
23.9	235.1	通过 Pass	23.9	362.3	通过 Pass
25.8	155.4	通过 Pass	25.8	285.2	通过 Pass
12.4	44.9	通过 Pass	12.4	237.6	通过 Pass
12.0	4.6	未通过 Failed	12.0	27.5	通过 Pass
8.3	2.5	未通过 Failed	8.3	7.5	未通过 Failed
6.2	1.8	未通过 Failed	6.2	2.1	未通过 Failed
81(3.4d)	2.1	未通过 Failed	92(3.8d)	2.4	未通过 Failed
124(5.2d)	2.6	未通过 Failed	138(5.8d)	2.5	未通过 Failed
200(8.3d)	3.1	未通过 Failed	276(11.5d)	1.8	未通过 Failed

由表1可以看出10m层海流存在如下显著峰周期:

(1)无论是  $f > 0$  或  $f < 0$ ,全日潮谱峰都高于半日潮谱峰。其中,半日潮周期约为12h、12.4h,日潮存在2个,分别在23.9h、25.8h。

(2)在半日潮和全日潮分量中,顺时针分量是主要的:日潮周期为23.9h、25.8h的反时针能谱峰值只有顺时针的63%和48%;顺时针的周期为12.4h

的半日潮谱峰值只有反时针的33%。

(3)周期为12.0h的半日潮,只有在顺时针情况下通过检验。

(4)浅水分潮8.3h、6.2h也很明显,但是未通过显著性检验。

(5)超过24h的3d以上也有明显表现,但是未通过显著性检验。

### 2.1.2 20m层海流谱分析

图3a,b给出20m层海流谱结果。采用红噪声假设对20m海流谱峰进行显著性检验的结果则列于表2中。

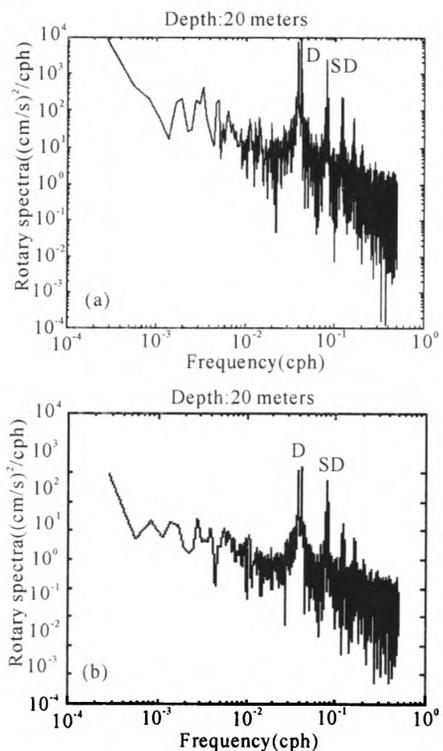


图3 10~3月20m层  $f > 0$  (a)和  $f < 0$  (b)潮流谱

Fig. 3 The tidal current spectrums at 20 m layer from October to next March with  $f > 0$  (a) and  $f < 0$  (b)

从表2可以看出,20m层海流存在如下显著峰周期:

(1)无论是  $f > 0$  或  $f < 0$ ,全日潮谱峰都高于半日潮谱峰。其中,半日潮周期约为12h、12.4h,日潮存在2个,对应周期为23.9h和25.8h。

(2)在半日潮和全日潮分量中,顺时针分量是主要的:日潮周期为23.9h、25.8h的反时针能谱峰值只有顺时针的61%和59%;顺时针的周期为12.4h的半日潮谱峰值只有反时针的85%。

(3)周期为12.0h的半日潮,只有在顺时针情况下通过检验。

(4)浅水分潮8.3h、6.2h也很明显,但是未通过显著性检验。

(5)超过 24h 的 3d 以上也有明显表现,但是未通过显著性检验。

表 2 20m 海流谱峰显著性检验结果

Table 2 The significant test results of current peaks at 20 m layer

$f > 0$			$f < 0$		
周期 Period(h)	$W(f_m)$	检验 Test	周期 Period(h)	$W(f_m)$	检验 Test
23.9	251.3	通过 Pass	23.9	481.3	通过 Pass
25.8	201.0	通过 Pass	25.8	478.2	通过 Pass
12.4	171.9	通过 Pass	12.4	175.6	通过 Pass
12.0	5.1	未通过 Failed	12.0	25.5	通过 Pass
8.3	7.5	未通过 Failed	8.3	7.5	未通过 Failed
6.2	1.9	未通过 Failed	6.2	2.1	未通过 Failed
81.8(3.4d)	2.3	未通过 Failed	156(6.5d)	2.1	未通过 Failed
124(5.2d)	1.6	未通过 Failed	200(8.3d)	2.5	未通过 Failed
200(8.3d)	1.6	未通过 Failed	300(12.5d)	2.5	未通过 Failed
360(15.0d)	0.6	未通过 Failed	360(15.0d)	2.6	未通过 Failed

### 2.1.3 30m 层海流谱分析

图 4a, b 给出 30m 层海流谱结果。采用红噪声假设对 30m 海流谱峰进行显著性检验结果则列于表 3 中。

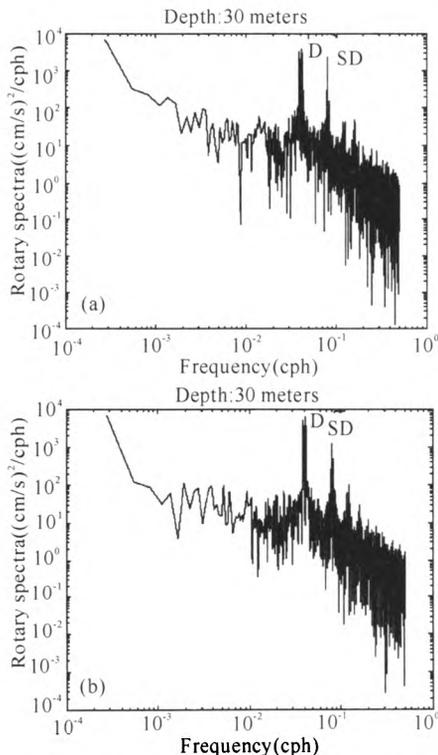


图 4 10~3 月 30m 层  $f > 0$ (a)和  $f < 0$ (b)潮流谱

Fig. 4 The tidal current spectrums at 30 m layer from

October to next March with  $f > 0$  (a) and  $f < 0$  (b)

表 3 30m 海流谱峰进行显著性检验结果

Table 3 The significant test results of current peaks at 30 m layer

$f > 0$			$f < 0$		
周期 Period(h)	$W(f_m)$	检验 Test	周期 Period(h)	$W(f_m)$	检验 Test
23.9	100.3	通过 Pass	23.9	200.3	通过 Pass
25.8	75.0	通过 Pass	25.8	175.2	通过 Pass
12.4	37.1	通过 Pass	12.4	37.6	通过 Pass
12.0	3.1	未通过 Failed	12.0	15.5	通过 Pass
8.3	2.5	未通过 Failed	8.3	5.5	未通过 Failed
6.2	1.1	未通过 Failed	6.2	1.8	未通过 Failed
276(11.5)	1.1	未通过 Failed	276(11.5d)	1.2	未通过 Failed
300(12.5d)	1.6	未通过 Failed	300(12.5d)	1.7	未通过 Failed
360(15.0d)	0.6	未通过 Failed	360(15.0d)	0.7	未通过 Failed

由表 3 可以看出,30m 层海流谱峰存在如下显著峰周期:

(1)无论是  $f > 0$  或  $f < 0$ ,全日潮谱峰都高于半日潮谱峰。其中,半日潮周期,约为 12h、12.4h,日潮存在 2 个,对应周期为 23.9h 和 25.8h。

(2)在半日潮和全日潮分量中,顺时针分量是主要的:日潮周期为 23.9h、25.8h 的反时针能谱峰值只有顺时针的 61%和 65%;和 10m、20m 不同的是:顺时针的周期为 12.4 h 的半日潮谱峰值小于反时针的谱峰值,只有反时针的 54%。

(3)周期为 12.0h 的半日潮,只有在顺时针情况下通过检验。

(4)浅水分潮 8.3h、6.2h 也很明显,但是未通过显著性检验。

(5)超过 24h 的 10d 以上也有明显表现,但是未通过显著性检验。

### 2.1.4 前进矢量

前进矢量是将通过低通滤波<sup>[22]</sup>之后的余流逐日运动轨迹矢量连接起来形成的一条曲线,从中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。图 5a, b, c 分别是 10m、20m、30m 的前进矢量图。

由图 5 可以看出,10m 层前进矢量沿着 310°方向前进;20m 层前进矢量则沿着 330°方向前进;而 30m 层前进矢量则沿着 50°方向前进。

### 2.1.5 余流产生机制

#### 2.1.5.1 风的影响

表 4 给出 10m、20m、30m 处月平均余流速度和

表 4 实测的余流和海面风

Table 4 The observed residual currents and the surface winds

月份 Month	10m		20m		30m		海面风 Wind	
	流速 Current velocity (cm/s)	流向 Current direction (°)	流速 Current velocity (cm/s)	流向 Current direction (°)	流速 Current velocity (cm/s)	流向 Current direction (°)	风速 Wind velocity (m/s)	风向 Wind direction (°)
10	5.7	275	5.0	349	5.3	87	7.1	55
11	6.7	301	7.3	347	5.6	45	5.1	56
12	5.3	310	5.2	324	4.5	33	4.1	75
1	6.3	300	6.6	323	4.7	16	8.6	60
2	4.9	320	4.2	345	4.1	50	5.6	55
3	4.9	304			3.0	25	2.7	121
平均 Average	5.6	302	5.7	338	4.5	43	5.5	62

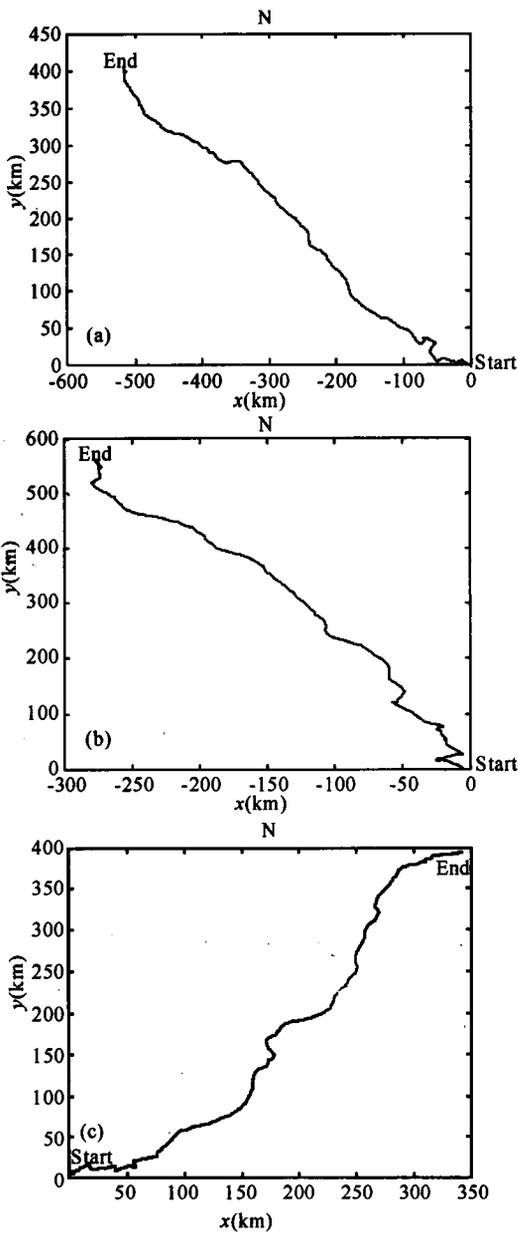


图 5 10~3月 10m(a),20m(b)和 30m(c)层前进矢量

Fig. 5 The forward vector at 10 m (a), 20 m (b) and 30 m (c) layer, respectively, calculated from October to next March

方向,以及海面 10m 高度处不同月份平均风速、风向。可以看出,随着深度加深,余流方向产生顺时针旋转,流速也有减少趋势。

按照 Ekman 漂流计算公式<sup>[23]</sup>,得到的结果如表 5 所示。

从表 5 中可以看出,3 月风已经从冬半年 ENE 方向,转变为 ESE,且平均风速也大大减少。如果不考虑 3 月,我们计算 10 月至 2 月实测余流值与相应的 Ekman 风漂流值(利用 10 月至 2 月平均风速、风向,列于表 6 中)。从表 6 中可以看出如下特征:

(1)10m 与 20m 的流向比较接近;10m 层,Ekman 计算结果,比实测值多 13°;20m 层,Ekman 计算结果,比实测值多 5°;到 30m 层,两者相差较大,到 35°。

(2)流速 10m 层相差不大,相对误差为 16%;20m、30m 层相差越来越大,相对误差分别为 47%和 63%。

总的看来,风的影响是明显的。

表 5 3 个层次的 Ekman 漂流流速、流向

Table 5 The Ekman drift current velocities and directions at three levels

月份 Month	10m		20m		30m	
	流速 Current velocity (cm/s)	流向 Current direction (°)	流速 Current velocity (cm/s)	流向 Current direction (°)	流速 Current velocity (cm/s)	流向 Current direction (°)
10	6.7	309	4.1	338	2.5	7
11	3.5	310	2.1	339	1.3	8
12	1.6	329	1.0	358	0.6	27
1	9.8	314	6.0	343	3.5	12
2	4.2	309	2.5	348	1.5	7
3	1.0	15	0.6	44	0.4	73
平均 Average	4.5	324	2.7	355	1.6	22

### 2.1.5.2 其他因素的影响

(1)北部湾北部冬夏季环流都是自东南指向西北

风的影响是明显的,但是不是唯一的,例如3月,风向已经变为ESE,但是余流仍然是冬季型的,和10月至2月余流方向基本一致,与Ekman风漂流计算结果比较,相差甚大(表7)。造成这种现象的原因,是北部湾北部环流决定的。侍茂崇等<sup>[17]</sup>指出,一年四季,琼州海峡水通量总是从东向西进入北部湾。进入北部湾的水量在北部湾北部形成自东向西的海流;夏华永<sup>[10]</sup>,高劲松等<sup>[24]</sup>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。

### (2) 补偿效应

从表7可以看出,10m、20m的实测流和Ekman理论计算结果比较,流向误差是小的,而30m层流向误差竟达到35°,这不能简单归结为观测误差。我们认为:受雷州半岛的影响(图1),涠洲岛东北部水域在东北风作用下,海水流走,底层水必须流向那里加以补充,这才是实测流向显著向东北方向偏离的主要原因。

表6 实测的10月至下一年2月余流平均值与相应的Ekman漂流值

Table 6 The observed residual currents and the corresponding drift currents at three levels, averaged from October to next February

海流 Current	10m		20m		30m	
	流速 Current velocity (cm/s)	流向 Current direction (°)	流速 Current velocity (cm/s)	流向 Current direction (°)	流速 Current velocity (cm/s)	流向 Current direction (°)
实测平均 Observed residual current	5.8	301	5.7	338	4.8	46
Ekman 计算 Calculated Ekman drift current	4.9	314	3.0	343	1.8	11
差 Difference	0.9	-13	2.7	-5	3.0	35

## 2.2 1989年7月海流谱分析

### 2.2.1 10m层海流谱分析

选择7月海流资料进行谱分析。图6a,b是10m层谱计算结果,从图6a,b可以看出:无论是 $f > 0$ 或

表7 实测的3月余流和Ekman漂流计算结果比较

Table 7 The comparison of observed residual currents and Ekman drift currents in March

海流 Current	10m		20m		30m		海面风 Wind	
	流速 Current velocity (cm/s)	流向 Current direction (°)	流速 Current velocity (cm/s)	流向 Current direction (°)	流速 Current velocity (cm/s)	流向 Current direction (°)	风速 Wind velocity (m/s)	风向 Wind direction (°)
实测 Observation	4.9	304			3.0	25	2.7	121
计算 Calculation	1.0	15	0.6	44	0.4	73		
差值 Difference	3.9	-71			2.6	-48		

$f < 0$ ,日潮、半日潮和1/3、1/4诸潮分量在谱图中都有明显表现。采用红噪声假设对10m海流谱峰进行显著性检验结果列于表8中。

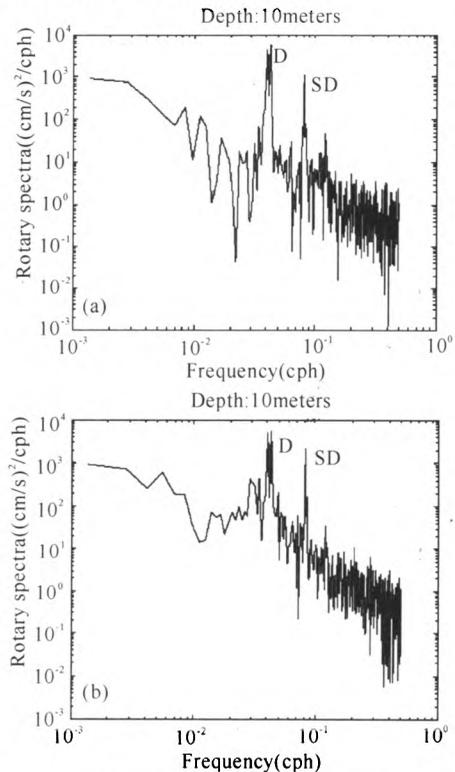


图6 7月10m层 $f > 0$ (a)和 $f < 0$ (b)潮流谱

Fig. 6 The tidal current spectrums at 10 m layer in July with  $f > 0$  (a) and  $f < 0$  (b)

由表8可以看出10m层海流存在如下显著峰周期:

(1)无论是 $f > 0$ 或 $f < 0$ ,全日潮谱峰都高于半日潮谱峰。其中,半日潮周期,约为12h、12.4h,日潮存在2个,1个在23.9h、25.8h左右。

(2)在半日潮和全日潮分量中,顺时针分量是主要的:日潮周期为23.9h、25.8h的反时针能谱峰值只有顺时针的75%和87%;反时针的周期为12.4h的半日潮谱峰值仅为顺时针的谱峰值41%。

(3)周期为12.0h的半日潮,只有在顺时针情况下通过检验。

表 8 7月10m海流谱峰显著性检验结果

Table 8 The significant test results of current spectrum peaks at 10 m layer in July

$f > 0$			$f < 0$		
周期 Period(h)	$W(f_m)$	检验 Test	周期 Period(h)	$W(f_m)$	检验 Test
23.9	225.3	通过 Pass	23.9	237.3	通过 Pass
25.8	145.0	通过 Pass	25.8	150.2	通过 Pass
12.4	25.8	通过 Pass	12.4	75.6	通过 Pass
12.0	3.8	未通过 Failed	12.0	15.5	通过 Pass
8.3	0.8	未通过 Failed	8.3	5.0	未通过 Failed
6.2	0.3	未通过 Failed	6.2	0.8	未通过 Failed
90(3.6d)	3.2	未通过 Failed	34.3(1.4d)	4.5	未通过 Failed
120(5.0d)	2.8	未通过 Failed	120(5.0d)	2.7	未通过 Failed

(4)浅水分潮 8.3h、6.2h 也很明显,但是未通过显著性检验。

(5)由于观测流速时间记录仅仅为 1 个月左右时间,分析对于大于 10d 周期的谱意义不大,我们仅仅讨论小于或等于 10d 周期的谱特征。但是结果发现超过 24h 的周期谱也未通过显著性检验。

2.2.2 20m 层海流谱分析

图 7a, b 是 20m 层谱计算结果,采用红噪声假设对 10m 海流谱峰进行显著性检验结果则列于表 9 中。

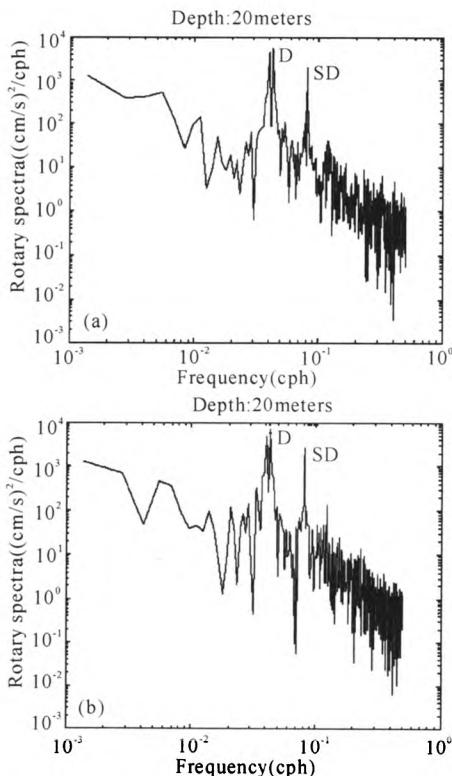


图 7 7月20m层  $f > 0$  (a)和  $f < 0$  (b)潮流谱

Fig. 7 The tidal current spectrums at 20 m layer in July with  $f > 0$  (a) and  $f < 0$  (b)

表 9 7月20m层海流谱峰显著性检验结果

Table 9 The significant test results of current spectrum peaks at 20 m layer in July

$f > 0$			$f < 0$		
周期 Period(h)	$W(f_m)$	检验 Test	周期 Period(h)	$W(f_m)$	检验 Test
23.9	175.3	通过 Pass	23.9	200.3	通过 Pass
25.8	100.0	通过 Pass	25.8	103.2	通过 Pass
12.4	99.8	通过 Pass	12.4	120.6	通过 Pass
12.0	3.8	未通过 Failed	12.0	4.5	未通过 Failed
8.3	3.8	未通过 Failed	8.3	3.9	未通过 Failed
6.2	0.3	未通过 Failed	6.2	0.4	未通过 Failed
90(3.8d)	0.8	未通过 Failed	34(1.4d)	7.4	未通过 Failed
103(4.3d)	2.8	未通过 Failed	144(6.0d)	3.8	未通过 Failed
180(7.5d)	2.2	未通过 Failed	180(7.5d)	5.5	未通过 Failed

由表 9 可以看出,20m 层海流存在如下显著峰周期:

(1)无论是  $f > 0$  或  $f < 0$ ,全日潮谱峰都高于半日潮谱峰。其中,半日潮周期,约为 12h、12.4h,日潮存在 2 个,对应周期为 23.9h 和 25.8h。

(2)在半日潮和全日潮分量中,顺时针分量是主要的:日潮周期为 23.9h、25.8h 的反时针能谱峰值只有顺时针的 77%和 95%;反时针的周期为 12.4 h 的半日潮谱峰值仅为顺时针的谱峰值 43%。

(3)周期为 12.0h 的半日潮,未通过检验;

(4)浅水分潮 8.3h、6.2h 也很明显,但是未通过显著性检验。

(5)由于观测流速时间记录仅仅为 1 个月左右时间,分析对于大于 10d 周期的谱意义不大,所以仅仅讨论小于或等于 10d 周期的谱特征。但还是发现超过 24h 的周期谱也未通过显著性检验。

2.2.3 30m 层海流谱分析

图 8a, b 是 30m 层谱计算结果,采用红噪声假设对 30m 海流谱峰进行显著性检验结果则列于表 10。

由表 10 可以看出 30m 层海流存在如下显著峰周期:

(1)无论是  $f > 0$  或  $f < 0$ ,全日潮谱峰都高于半日潮谱峰。其中,半日潮周期,约为 12h、12.4h,日潮存在 2 个,对应周期为 23.9h 和 25.8h。

(2)周期为 12.4 h 半日潮分量中,顺时针分量是主要的:反时针只有顺时针的 35%。

(3)日潮周期为 25.8h 的反时针能谱峰值只有顺

时针的 94%，但是周期 23.9h 分潮却是反时针大于顺时针(约为顺时针 1.1 倍)。

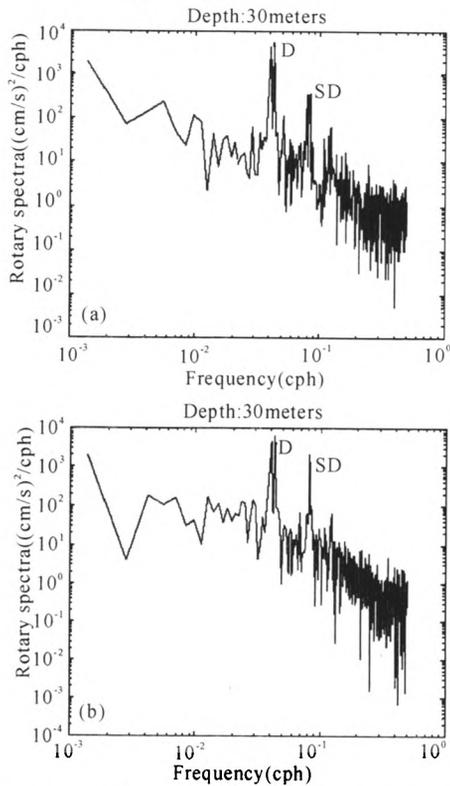


图 8 7 月 30m 层  $f > 0$  (a) 和  $f < 0$  (b) 潮流谱

Fig. 8 The tidal current spectrums at 30 m layer in July with  $f > 0$  (a) and  $f < 0$  (b)

表 10 7 月 30m 层海流谱峰显著性检验结果

Table 10 The significant test results of current spectrum peaks at 30 m layer in July

$f > 0$			$f < 0$		
周期 Period(h)	$W(f_m)$	检验 Test	周期 Period(h)	$W(f_m)$	检验 Test
23.9	155.3	通过 Pass	23.9	200.3	通过 Pass
25.8	96.0	通过 Pass	25.8	103.2	通过 Pass
12.4	10.1	未通过 Failed	12.4	75.6	通过 Pass
12.0	3.8	未通过 Failed	12.0	4.5	未通过 Failed
8.3	3.8	未通过 Failed	8.3	3.9	未通过 Failed
6.2	0.3	未通过 Failed	6.2	0.4	未通过 Failed
90(3.8d)	0.8	未通过 Failed	34(1.4d)	2.4	未通过 Failed
103(4.3d)	0.8	未通过 Failed	144(6.0d)	1.8	未通过 Failed
180(7.5d)	1.2	未通过 Failed	180(7.5d)	1.5	未通过 Failed
240(10.0d)	0.5	未通过 Failed	240(10.0d)	1.5	未通过 Failed

(4) 周期为 12.0h 的半日潮, 浅水分潮 8.3h、6.2h 也很明显, 但是未通过显著性检验。

(5) 由于观测流速时间记录仅仅为 1 个月左右时间, 分析对于大于 10 d 周期的谱意义不大, 所以仅仅讨论小于或等于 10 d 周期的谱特征。但是同样发现超过 24h 的周期谱也未通过显著性检验。

#### 2.2.4 前进矢量

图 9 中的 a, b, c 是 10m、20m、30m 的前进矢量图。由图 9 可以看出, 10m 层余流, 基本沿着南和西方向前进; 20m 层余流, 基本沿着西和西北方向前进; 30m 层余流则沿着西北方向前进。

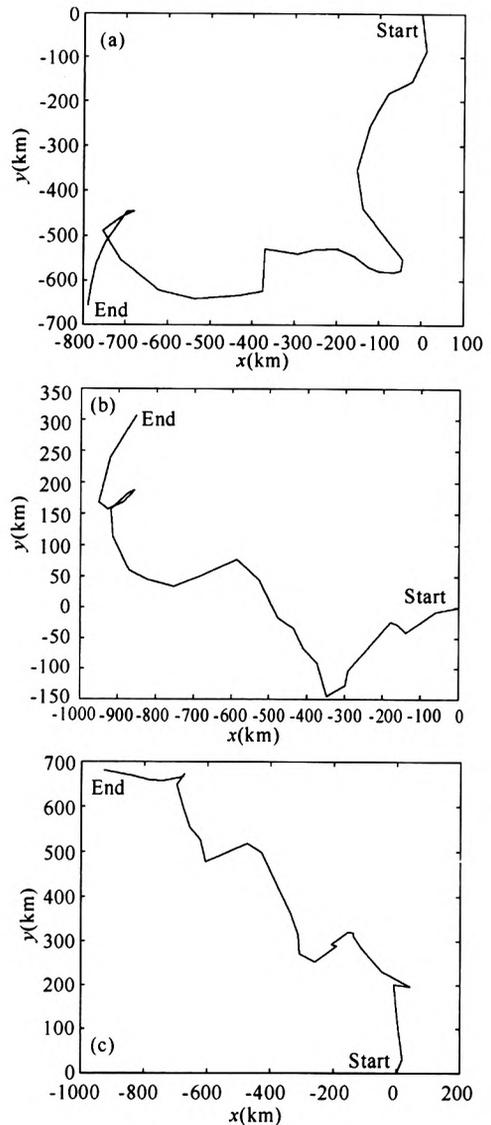


图 9 10m(a)、20m(b) 和 30m(c) 层前进矢量

Fig. 9 The forward vector at 10 m (a), 20 m (b) and 30 m (c), respectively

#### 2.2.5 夏季余流产生机制

##### 2.2.5.1 和风的直接关系不大

根据统计: 7 月平均风速 5.0m/s, 风向 155°。若按照 Ekman 风海流计算方法计算, 10m、20m、30m 层余流流向, 分别为 49°、78°、107°; 流速应该分别为 3.1cm/s、1.8cm/s、1.1cm/s。而 10m 层平均余流流速 7cm/s, 方向 246°; 20m 层平均余流流速 8.4cm/s,

表 11 实测 7 月余流和 Ekman 漂流计算结果比较

Table 11 The comparison of observed residual currents and Ekman drift currents in July

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

方向 298°; 30m 层平均余流流速 6.1cm/s, 方向 292°, 和实测结果相比, 流速、流向相差都很大(表 11), 且没有 Ekman 螺旋结构; 20m 和 30m 流向基本一致。

### 2.2.5.2 琼州海峡影响仍然是确定性的

夏季受西南季风的影响, 珠江口只有磨刀门西口、鸡啼门、虎跳门和崖门出来的径流直接向西, 这部分径流量约为总径流量的 1/3。虽然夏季径流向西扩散范围减少, 但是由于总径流量显著多于冬季, 所以西向流还是具有很强势力。对于低盐混合水在沿岸的堆积与淡水在沿岸的堆积情况类似, 同样产生压强梯度流, 沿着粤西沿岸向西南流, 自东向西通过琼州海峡进入北部湾。虽然进入北部湾水量只有冬季一半(冬季 0.2~0.4Sv), 但是夏季东南风引起广西沿岸水位升高, 从而导致西向的正压流, 会加强来自琼州海峡的西向流。使得夏季余流反而强于冬季余流: 是冬半年 10~30m 平均流速的 2.5 倍; 是最强的 1 月余流平均值的 1.1 倍。

## 3 结论

(1) 无论是  $f > 0$  或  $f < 0$ , 全日潮谱峰都高于半日潮谱峰。其中, 半日潮周期, 约为 12h、12.4h, 日潮存在 2 个, 周期为 23.9h、25.8h 左右。

(2) 在半日潮和全日潮分量中, 顺时针分量是主要的。

(3) 余流前进矢量: 冬半年, 10m、20m 和 30m 层平均余流矢量方向分别为 302°、338°和 43°; 夏季, 10m、20m 和 30m 层平均余流矢量方向分别为 246°、298°和 292°。

(4) 风对 1988 年 10 月至 1989 年 2 月余流影响是明显的, 但是制约余流运动的主要因素, 是由北部湾北部环流决定的。

### 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.

Oceanic comprehensive survey office of ocean group of State science and technology commission. China-Vietnam Joint Beibu Gulf comprehensive survey report[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-Vietnam Joint oceanic comprehensive survey team. China-Vietnam Beibu Gulf comprehensive survey report [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 national coastal zone and resources comprehensive survey report. China coastal zone and resources comprehensive survey report [M]. Beijing: 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 team of island resources in Hainan. Comprehensive survey report of island resources in Hainan [M]. Beijing: 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. Numerical simulation of tide and tidal current in the 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 the tidal wave in the Beibu Gulf[J]. Tropical Oceanography, 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.  
Liu A J, Zhang Y T. Numerical prediction and analysis of the tide in Beibu Gulf [J]. Chinese Journal Oceanologia Limnologia, 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):21-30.  
Xia H Y, Yin Z B, Guo Z L, et al. Three-D numerical simulation of tidal current in the Beibu Gulf [J]. Acta Oceanologica Sincia, 1997, 19(2): 21-30.
- [11] 侍茂崇,陈春华,荒方,等. 琼州海峡冬末春初朝余流场特征[J]. 海洋学报,1998,20(1):1-4.  
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 Sincia, 1998, 20(1): 1-4.
- [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 of the dynamic-thermodynamic mechanic of Beibu Gulf cool water masses [D]. Qingdao: Ocean University of China, 1998.
- [13] 孙洪亮,黄卫民,赵俊生. 北部湾潮汐、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, 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. Three-D numerical simulation of wind-driven current and density current in the Beibu Gulf [J]. Acta Oceanologica Sincia, 2001, 23(6): 11-23.
- [15] 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.  
Zu T T. Analysis of the current and its mechanism in the Beibu Gulf [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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 Sincia, 2003, 25(6): 1-8.
- [19] 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.
- [20] 陈上及,马继瑞. 海洋数据处理分析方法及其应用[M]. 北京:海洋出版社,2000.  
Chen S J, Ma J R. The analysis method of marine data processing and its application [M]. Beijing: Ocean press, 2000.
- [21] 黄祖珂,黄磊. 潮汐原理与计算[M]. 青岛:中国海洋大学出版社,2005.  
Huang Z K, Huang L. The principle and calculation of tides [M]. Qingdao: Press of ocean university of China, 2005.
- [22] Thompson R O R Y. Low-pass filters to suppress inertial and tidal frequencies [J]. J P Oceanogr, 1983, 13(6):1077-1083.
- [23] 侍茂崇. 物理海洋学[M]. 济南:山东教育出版社,2005.  
Shi M C. Physical oceanography [M]. Jinan: Shandong Education press, 2005.
- [24] Gao J S, Xue H J, Chai F, et al. Modeling the circulation in the Gulf of Tonkin [J]. South China Sea Ocean Dynamics, 2013, 63(8): 979-993.

(责任编辑:尹 闯)