

南海北部东沙岛附近的内潮和余流特征*

司广成^{1,2} 侯一筠¹

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋环流与波动重点实验室 青岛 266071;

2. 中国科学院研究生院 北京 100049)

提要 采用东沙岛附近的一个长达 9 个月的锚定潜标的观测资料对南海北部的正压潮、内潮和余流情况进行了分析,得到了当地正压潮和内潮的特征。此处正压潮流以全日潮为主,秋、冬季相对较大,春季相对较小;正压余流受海盆尺度环流和地形的限制,在潜标观测期间的秋、冬、春三季基本以偏西向的正压流为主。内潮同正压潮一样,也以全日分潮为主,潮流椭圆随水深发生旋转,在 110—120 m 附近存在内潮非常弱的一层。斜压余流在 2009 年 2—3 月比较异常,这是由于在此其间有一个中尺度涡经过。对此潜标数据采用经验正交函数分解的方法进行分析,发现海流的各个主要 EOF 模态与内波的垂向模态结构有一定的关联。

关键词 南海,东沙,内潮,经验正交函数

中图分类号 P737

南海北部海域水深由几百米变化到几千米(张武昌等, 2010),岛屿众多,大陆架西宽东窄,地形非常复杂。其中间部分为位于大陆坡折处的东沙群岛海域,西侧为宽广的大陆架,东北面通过较浅的台湾海峡连接东海,东面通过较深的吕宋海峡连接太平洋(吴时国等, 2009)。吕宋海峡处有一道水深相对较浅的海槛,海槛东侧为黑潮流经的活跃海区。受此特殊地形条件的影响,南海北部呈现为一片内波现象复杂、内潮现象显著的海区。

在此海域,特别是东沙海域附近,对于海流的潮余流的分析,较早的是邱章等(1996),其采用功率谱分析和调和分析方法对南海北部一观测点连续 9 天的海流情况进行了分析,发现了此点存在周期 24 h 的内潮现象。后来,许多作者(张爱军等, 1999; 邱章等, 2000; 杜岩等, 2004)采用不同的观测资料和方法对此处的内潮特征进行了研究。值得注意的是方文东等(2000)发现突发性强流与内潮强盛期对应较好。在亚洲海国际声学实验中,Beardsley 等(2004)利用大量的观测,比较详细地研究了此海域的正压潮特征,

Duda 等(2004)对此外海域的内潮在陆坡上的发展变化情况进行了描述。张效谦等(2005)利用两个半月的流速资料研究了观测海区的正压潮、内潮及近惯性内波的特征。郭朴等(2006a, b)对于此前的这些研究成果进行了阶段性的总结并采用此海域大陆坡区 21 天定点观测的海流和温度数据得到海区的内潮特征信息。而对于余流的情况,邱章等(1999)利用观测站的海流资料指出此海区平均余流呈偏西向流动。本文中作者以 CTD 获得的温盐数据为基础,采用 9 个月的潜标测流数据,通过 EOF 分解和功率谱分析的方法来进行分析,以期获得此海区的潮余流特征。

1 观测资料来源

2008 年 9 月,在南海北部东沙海域附近(115.5°E, 20.5°N)布放了一个锚定潜标(图 1 五星所示),并于次年 6 月成功回收。获得的有效数据时间为 2008 年 9 月 14 日至 2009 年 6 月 16 日,历时 9 个月,共计 276 天。潜标上加挂的 ADCP 盲区长度为 11.91 m, bin 间距设置为 4 m,共 54 个 bin,采样频率为 1 次/h,共计

* 中国科学院重大项目, KZCX1-YW-12 号; 国家高技术研究发展计划 863 项目, 2008AA09A402 号。司广成, 在读博士, E-mail: siguangcheng@qdio.ac.cn

通讯作者: 侯一筠, E-mail: yjhou@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2010-01-13, 收修改稿日期: 2011-08-03

6600 多次记录。

潜标上加挂的 ADCP 的压力计显示其深度比较稳定, 除个别天数的个别时刻, 仪器均在水下 223—228 m 之间稳定摆动。ADCP 平均深度为 225.3 m, 最大的上下起伏为 3.4 m, 相对变化不超过 1.5%, 深度变化均方差约为 0.5 m, 绝大多数时刻探头光束都能够照射至海表面。

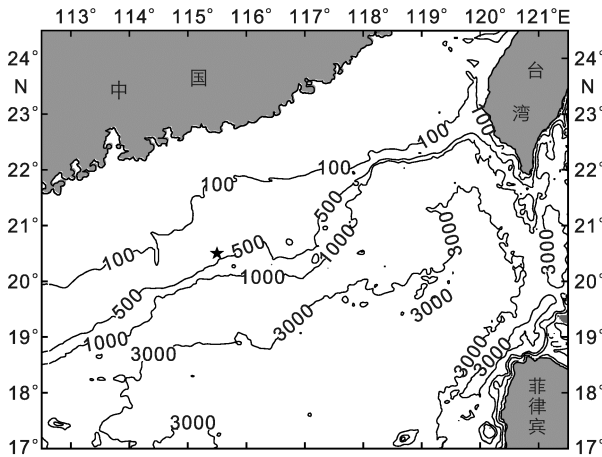


图 1 潜标布放位置示意
Fig.1 The location of the mooring

2 观测点的背景水文信息

内潮是内波中具有潮频率的一种, 而内波的频率界于惯性频率 f 与浮力频率 N 之间, 所以了解内潮存在位置的背景温、盐信息、特别是密度和浮力频率的垂向分布, 对于掌握内潮的特征具有重要的指导意义。2009 年 6 月回收潜标时, 由 CTD 得到的温度和盐度剖面如图 2A 所示。可以看出, 温跃层大概在 60—80 m 之间, 强度约 0.15—0.2°C/m。由盐度剖面可以分辨出盐度相对较高的次表层水, 往下是盐度

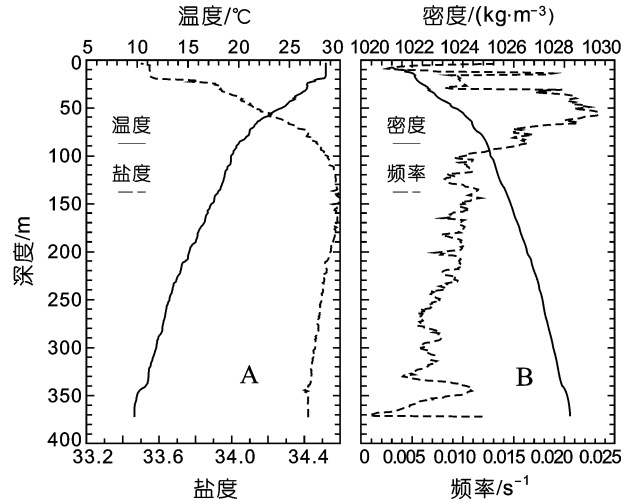


图 2 温度和盐度 (A)、密度和浮力频率 (B) 剖面
Fig.2 The profiles of temperature and salinity (A) and density and buoyancy frequency (B)

相对较低的中层水。由图 2B 可以看出, 浮力频率在 60—80 m 上下有一个较大的峰值, 超过 0.02 s^{-1} , 最大值可达 0.023 s^{-1} , 是密度跃层的位置。

3 正压潮流特征

观测的海流可分为正压流和斜压流, 由内潮运动产生的海流为斜压流。假设实际的海流为 $\bar{U}(z, t)$, 正压海流为 $\bar{U}_t(t)$, 与深度无关, 斜压海流为 $\bar{U}_c(z, t)$, 其中 $\bar{U}_t(t)$ 是 $\bar{U}(z, t)$ 的垂向平均, 它们之间有: $\bar{U}(z, t) = \bar{U}_t(t) + \bar{U}_c(z, t)$ 。

按照上述方法, 将 ADCP 测到的海流进行垂向平均, 得到正压流, 对其进行调和解析, 分离正压潮流和正压余流。潮流曲线如图 3(左)所示, 上下两图分别为潮流的东西分量和南北分量。潮流在整个观测期

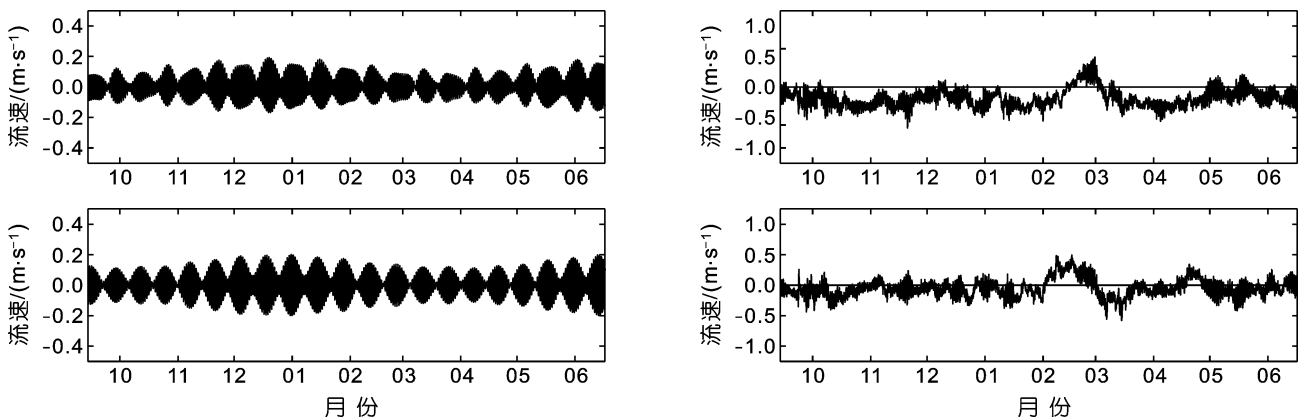


图 3 正压潮流 (左) 和余流 (右) 过程曲线
Fig.3 The tidal currents (left) and the residual currents (right) of the barotropic tide

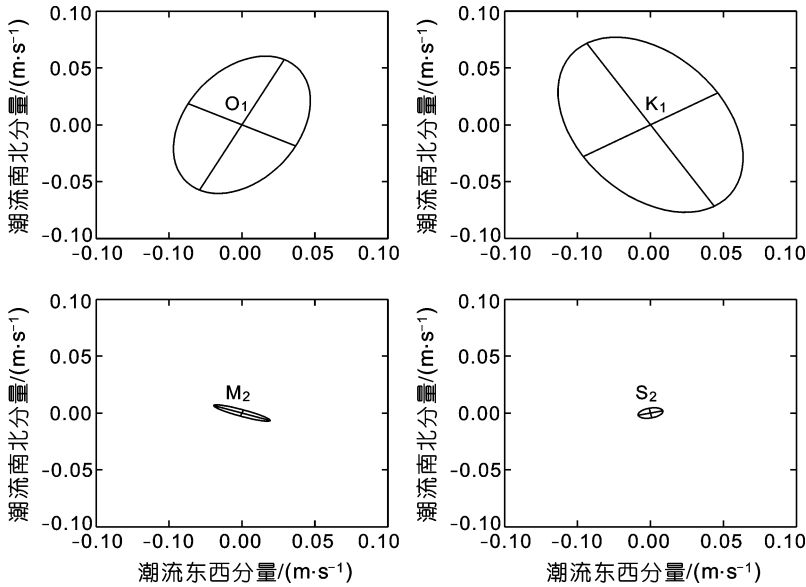


图4 正压潮流椭圆

Fig.4 The tidal ellipses of the barotropic tide

间表现出一定的季节变化特征, 冬季潮流相对较大, 振幅最大时可达 0.2 m/s; 春、秋两季潮流相对较小, 最小时不到 0.1 m/s。在整个观测时间内, 南北分量比东西分量稍大, 但都不超过 0.2 m/s。

图 3(右)为正压流余流过程曲线。可以看出, 两分量流速都不超过 0.5 m/s。其中东西方向分量除 2009 年 2—3 月和 5 月的个别天数之外, 都为负值, 而南北分量上下比较对称, 说明观测期间的秋、冬、春三季的正压流基本都以偏西向的流为主, 并于西北方向和西南方向间不规则振荡。

对正压潮流进行调和, 得到 O_1 、 K_1 、 M_2 和 S_2 四个分潮的潮流椭圆(图 4)及要素(表 1), 可以看出, 此处正压潮流以全日潮流占绝对优势。 K_1 分潮长轴最长, 最大流速可达 8.4 cm/s, O_1 分潮长轴较 K_1 分潮略小, 为 6.4 cm/s, 两分潮最大流速方向与正东向夹角分别 63° 和 121° , 即均以偏南北向为主, 旋转方向都是顺时针方向。椭圆的椭率为 0.64, 表现出一定的旋转流的特征。 M_2 和 S_2 两半日分潮相比全日分潮要小得多, 分别为 2.0 cm/s 和 0.9 cm/s, 最大流速方向

分别为 161° 和 13° , 即运动方向以偏东西向为主。潮流旋转方向与全日分潮不同, 为逆时针方向。 M_2 分潮椭率很小, 只有 0.15, 表现出往复流的特征。

4 斜压流特征

4.1 内潮流特征

从潜标各层数据中去掉正压海流, 然后分层进行调和, 分离出斜压的潮流和余流, 得到各层的潮流椭圆随深度的变化, 如图 5 所示。可以看出, 海流的斜压性导致每层的潮流椭圆随水深发生旋转。明显地, 此处的内潮以全日分潮为主, K_1 分潮的斜压性最强, 从表层开始潮流椭圆随深度逐渐减小, 到约 120 m 上下由于去掉垂向平均, 出现了内潮流非常小的一层, 再往下潮流椭圆逐渐增大。在 30—50 m 层, 长轴主要呈南北走向, 往深层逐渐向西偏转至内潮最弱层, 其下 140—160 m 层长轴走向旋转至南北走向。200 m 层左右, 长轴呈西北-东南走向。 O_1 分潮的潮流椭圆大小随深度的变化与 K_1 分潮类似, 也从表层向下变小到 110 m 层附近达到最小, 再向下逐渐增大。倾角变化在无内潮层之上两者也类似, 都是由南北走向转到东西走向, 但不同的是, 至 150 m 层上下, O_1 分潮长轴呈东西走向, 而 K_1 分潮长轴呈南北走向。整个观测深度范围内, O_1 分潮最大潮流将近 5 cm/s, K_1 分潮最大潮流将近 10 cm/s。半日分潮 M_2 和 S_2 的潮流椭圆相比全日分潮非常小, 只在局部深度略有所体现, 对此处的内潮特征影响不大。

4.2 2009 年 2—3 月斜压余流分析

此处的斜压余流, 在观测时间内, 整体上变化不大。但在个别时间, 特别是前述正压余流分析中看到的在 2009 年 2—3 月期间, 流速出现了明显的异常现象。图 6 为此段时间内的一段余流剖面。由图 6 中可以看到, 2 月 11 日开始, 余流呈北偏西的方向, 但深

表 1 正压潮流椭圆要素表

Tab.1 The elliptic elements of the barotropic tide

分潮名	长轴(cm/s)	短轴(cm/s)	椭率	旋转方向	最大流速方向($^\circ$)
O_1	6.4	4.1	0.64	顺时针	63.2
K_1	8.4	5.4	0.64	顺时针	121.3
M_2	2.0	0.3	0.15	逆时针	161.0
S_2	0.9	0.4	0.44	逆时针	12.8

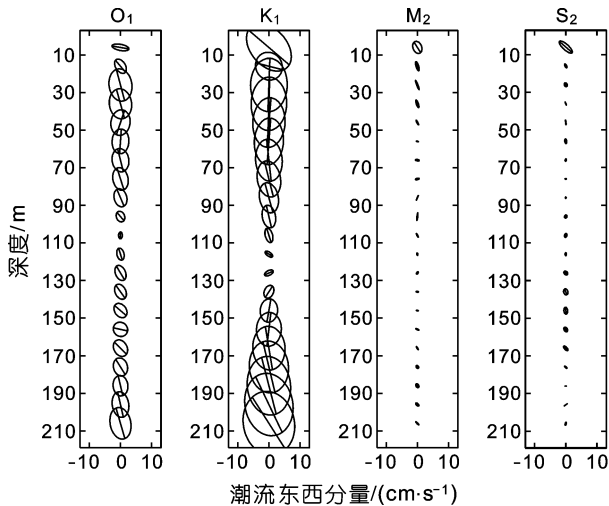


图5 各层内潮潮流椭圆

Fig.5 The tidal ellipses of the internal tide in different layers

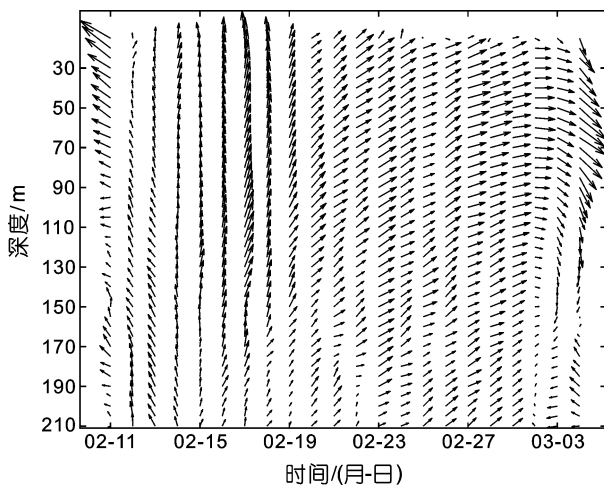


图6 2009年2月中—3月初余流剖面

Fig.6 The profiles of residual currents from February to March in 2009

度不大,垂向剪切最大处约在80 m。至15日,流速转向正北,剪切最大处深度约130 m。18日,流速转向北偏东,剪切最大处深度增加。23—27日流速达到最大,方向为东向稍微偏北,深度可达200 m,甚至可能更深。之后,至3月3日,流速逐渐偏东南方向,剪切最大处深度逐渐变浅。整个时间段内流速由西北向转至东南向。

根据 AVISO 数据集(<http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/sea-surface-height-products/global/index.html>)中的海表面高度异常数据,此段时间内的4张南海海表面高度异常图如图7所示。可以看出此段时间,潜标处恰好有一个暖涡经过。2月11日,暖涡逐渐向潜标靠近。由于暖涡是顺时针方向旋

转,所以此时,潜标处的流速应为北偏东向。但由于此时暖涡中心离此处较远,所以只对此处几十米造成影响。至2月15日,潜标正好处于暖涡的西侧,所以测得的流速偏北向,此时影响深度较11日更深。25日左右,潜标达到最靠近暖涡中心的位置,流速方向偏向正东,相比其它时间流速最大,影响深度最深。至3月4日,暖涡移动到其西南一侧,潜标位置处流速呈现东南向,影响深度也逐渐减小。潜标的观测结果与海表面高度异常所反映的中尺度涡的经过过程吻合良好。

由此可见,2009年2月中—3月初的流速异常现象是由经过此处的中尺度涡造成的,此中尺度涡的涡中心处影响深度可达200 m甚至更深。由潜标的流速剖面还可以看出,此中尺度涡的最大流速位于上层60—80 m处。

5 海流经验正交分解

经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分解方法是处理随时间变化的一维或多维空间数据的一种常用分析方法。它把随时间变化的标量场分解为不随时间变化的空间函数部分和只依赖时间变化的时间函数部分。原标量场就是这些时空函数分量的线性累加。这些分量的前几个占有原标量场内空间点时间变化总方差的很大比例,含有原来标量场的主要变化信息。因而研究主要分量随时间变化的规律就可以反映原标量场的主要时间变化特征。对逐小时的流速剖面的 U 分量进行EOF分解,其前5个主要EOF模态空间分布如图8所示。

各个EOF模态的前7天的时间演变系数如图9及其对应功率谱如图10所示。从第一个EOF模态的时间演变系数图上可以看到明显的日周期变化,功率谱的谱峰周期分别为23.9 h和25.8 h,分别对应前述 K_1 分潮和 O_1 分潮,此模态贡献率最大,达到67.8%。此EOF模态中 U 分量在所有深度上都保持同号,即此EOF模态的所有深度上的点都保持同位相的变化,含有很大的正压成分。

第二至第五个EOF模态在垂向上有变号,且变号次数随EOF模态数的增加而增加。第二个EOF模态贡献率为15.3%,谱峰周期为23.8 h,仍属于周日变化。在70 m的位置变号,此位置大约在此处温跃层附近,上下层流速位相相反,与第一斜压模态的内波有一定的关系;第三模态贡献率为6.1%,能量广泛分布于1—1.5日周期范围内,并向1日和1.5日两

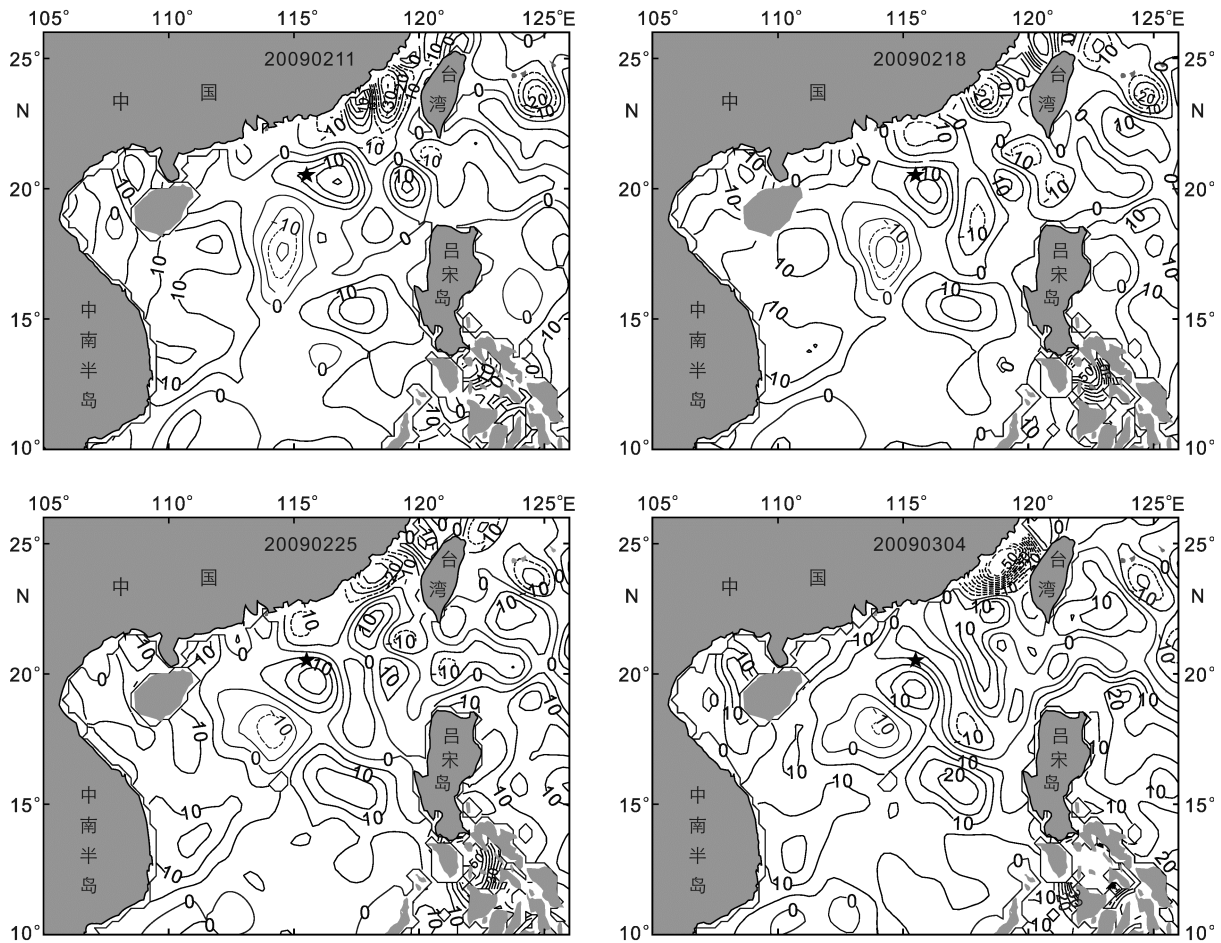


图 7 2009 年 2 月中—3 月初南海海表面高度异常分布

Fig.7 The sea level anomaly of the South China Sea from February to March in 2009

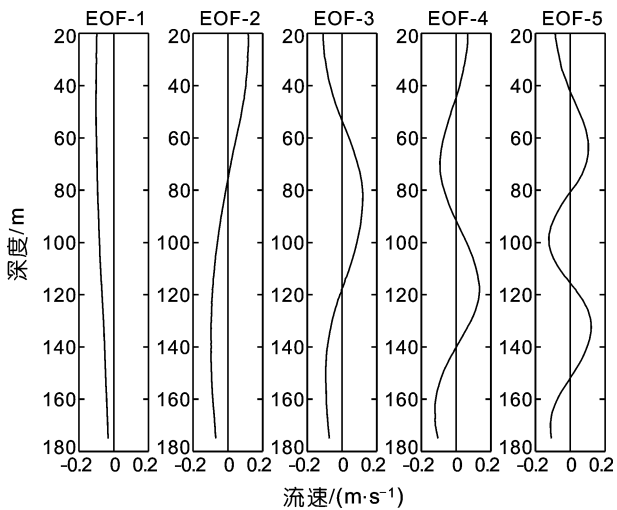


图 8 流速 U 分量前五个模态
Fig.8 The first five EOF modes

个周期略有集中，垂向上存在两次变号，与第二斜压模态的内波有关。此三个模态贡献率达到 89.1%，最后两个模态贡献率较小，周期仍以日周期为主，半日

周期在图中略有体现，变号次数分别是 3 次和 4 次，分别与第 3 和第 4 斜压模态的内波相关。

另外， V 分量和 U 分量在模态和时间演变系数上有一定程度的一致性，在垂向上也是呈现明显的模态化结构，能量主要集中于全日周期，半日周期较小。

6 结论

南海北部东沙附近是内潮频发的海区，经过对于资料采用调和分析，功率谱分析和 EOF 分析方法进行的研究，可以得到如下主要结论：

(1) 潜标锚定处的正压潮流秋、冬季相对较大，春、秋相对较小；正压余流受地形和南海海盆尺度环流的影响，在潜标观测期间的秋、冬、春三季基本都以偏西向为主。

(2) 潜标锚定处的内潮也以全日分潮为主， K_1 和 O_1 分潮流椭圆随水深发生旋转，旋转的方式大体一致。各层余流的情况受海盆环流和地形的约束，大体呈偏西方向。

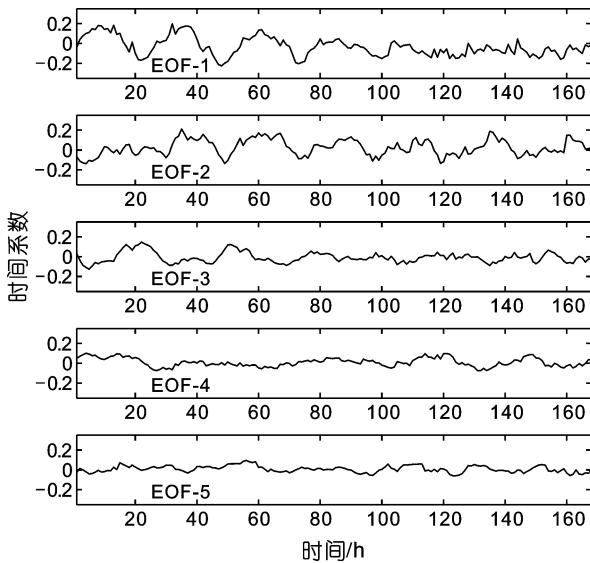
图9 流速 U 分量时间系数前 7 天

Fig.9 The first 7 days of the time coefficients

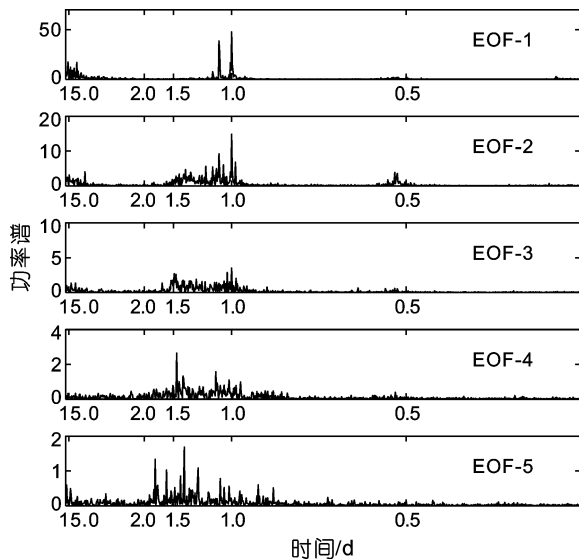
图 10 流速 U 分量前五个模态时间系数的功率谱

Fig.10 The power spectrums of the time coefficients of the first five EOF modes

(3) 对于 2009 年 2—3 月流速异常情况, 通过南海的海表面高度异常分析发现其原因是中尺度涡的经过, 而另一方面, 垂向流速变化也在一定程度上揭示了此中尺度涡的垂向结构。

(4) 采用经验正交函数分解的方法对此潜标数

据进行分析, 发现海流的各个 EOF 模态与内波的斜压模态结构有所关联。第一个 EOF 模态垂向流速不变号, 含有一定的正压潮成分。其谱峰周期分别对应 K_1 分潮和 O_1 分潮。后几个 EOF 模态垂向流速变号数逐次增加, 与内波模态结构颇为相似。

作者采用 9 个月的潜标测流数据比较全面地分析了南海北部东沙岛附近的潮流和余流特征, 发现了内潮斜压模与 EOF 模态的关系, 对于进一步分析南海的内潮特征以及研究垂向流速与中尺度涡的关系都具有进一步的指导意义。

参 考 文 献

- 方文东, 陈荣裕, 毛庆文, 2000. 南海北部大陆坡区的突发性强流. 热带海洋, 19(1): 70—75
- 杜 岩, 王东晓, 陈荣裕等, 2004. 南海西边界 ADCP 观测海流的垂直结构. 海洋工程, 22(2): 31—38
- 邱 章, 方文东, 1999. 南海北部春季海流的垂向变化. 热带海洋, 18(4): 32—39
- 邱 章, 方文东, 2000. 南海北部大陆坡区斜压海流的垂向结构. 台湾海峡, 19(4): 405—412
- 邱 章, 徐锡祉, 龙小敏, 1996. 南海北部一观测点内潮特征的初步分析. 热带海洋, 15(4): 63—67
- 张爱军, 江明顺, 1999. 东沙群岛西南海域单站潮流及温盐特征分析. 热带海洋, 18(1): 23—30
- 张效谦, 梁鑫峰, 田纪伟, 2005. 南海北部 450 m 以浅水层内潮和近惯性运动研究. 科学通报, 50(18): 2027—2031
- 张武昌, 高尚武, 孙 军等, 2010. 南海北部冬季和夏季浮游哲水蚤类群落. 海洋与湖沼, 41(3): 448—458
- 吴时国, 袁圣强, 董冬冬等, 2009. 南海北部深水区中新世生物礁发育特征. 海洋与湖沼, 40(2): 117—121
- 郭 朴, 方文东, 于红兵, 2006a. 近海陆架区内潮观测研究进展. 地球科学进展, 21(6): 617—624
- 郭 朴, 方文东, 甘子钧等, 2006b. 南海北部大陆坡区的内潮特征. 科学通报, 51(增刊): 15—22
- Beardsley R C, Duda T F, Lynch J F *et al*, 2004. Barotropic tide in the northeast South China Sea. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 29(4): 1075—1086
- Duda T F, Lynch J F, Irish J D *et al*, 2004. Internal Tide and Nonlinear Internal Wave Behavior at the Continental Slope in the Northern South China Sea. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 29(4): 1105—1130

THE CHARACTERISTICS OF THE INTERNAL TIDES AND RESIDUAL TIDAL CURRENTS AROUND THE DONGSHA ISLAND IN THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA

SI Guang-Cheng^{1,2}, HOU Yi-Jun¹

(1. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071;
2. Graduate School, the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049)

Abstract The characteristics of the barotropic tides, baroclinic tides and residual tidal currents were analyzed based on a 9-month current record from a mooring site near the Dongsha Island in the northern South China Sea. The barotropic tides were dominated by diurnal tides, which were much stronger in autumn and winter than in spring. Forced by the basin-scale circulation and the bottom topography, the barotropic residual currents were the strongest in winter and were mainly towards the west during the observation period. The baroclinic tides were also dominated by the diurnal tides. The tidal current ellipses rotated with depth and there was a layer at 110—120 m depth where the tidal currents were very weak. Compared to the sea level anomaly, the abnormality of residual currents in February and March of 2009 was due to the passage of a mesoscale eddy. Finally, the EOF analyses of the currents showed that the EOF modes were related to the mode structure of the internal wave.

Key words South China Sea, Dongsha Island, internal tides, EOF

2011 年度《海洋与湖沼》动态

(1) 《海洋与湖沼》2011 年最新公布的总被引频次在海洋科学期刊中名列第一位; 影响因子为 1.404, 学科影响指标和综合评价总分均列海洋科学期刊首位; 综合评价总分在全国科技期刊中排第 18 位。

(2) 荣获 2011 年度百种中国杰出学术期刊奖。

(3) 荣获 2011 年度中国精品科技期刊奖。