

南海北部海流观测结果及其谱分析*

杨庆轩 梁鑫峰 田纪伟 康建军

(中国海洋大学物理海洋实验室 青岛 266100)

提要 为了掌握南海北部海区的海流及潮流情况,利用 2000 年 8—11 月在南海北部海区 75 天的 ADCP 定点流速观测资料,对海流的观测结果、海流前进矢量图、海流的日平均流速、海流随时间和深度的变化情况、正压流速的矢量旋转谱和斜压流速的二维矢量频率波数谱以及正压潮流进行了分析研究。结果表明,此处海流主要为逆时针方向旋转,并且 K_1 和 M_2 为主要分量。这说明南海北部海区的海流及潮流变化比较复杂,需要大范围的长期观测才能更好地掌握其特征与变化规律。

关键词 南海北部,海流观测,谱分析

中图分类号 P731.21

南海是邻近我国大陆最大的边缘海,海岸线形状和海底地形复杂,吕宋海峡是它与太平洋连通的惟一深水通道。在季风、太阳辐射、地形和周边海域水交换等因素的共同作用下,南海温度、盐度的分布特征也变得较为复杂,而南海环流更是变化多端。已有很多海洋工作者对南海环流进行研究及数值模拟(方文东等, 1997; 曾庆存等, 1992; Shaw *et al.*, 1994; Takano *et al.*, 1998; 蔡树群等, 1995; Metzger *et al.*, 1996; Cai *et al.*, 2002; Yuan *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2004; 袁耀初等, 2004)等。但是上述研究存在着一些缺陷,例如计算地转流时零势面的选取、数值模式的边界条件、初始条件的确定都影响到反演出的流场的准确性。本文中作者利用 2000 年 8—11 月在南海北部陆架海区 75 天定点 ADCP 流速观测资料研究区海流随时间、深度的变化及各个分潮的特点进行了研究,同时计算了正压流速的旋转谱和斜压流速的频率波数谱,讨论了谱随时间和深度的变化情况,以期为进一步研究南海海流提供参考。

1 观测与采样

2000 年 8 月 20 日—11 月 4 日,中国科学院南海海洋研究所和国家海洋局第三海洋研究所联合在南海北部陆架海区利用 75kHz ADCP 进行了 75 天的流

速观测,观测地点为(20°34.851'N, 118°24.461'E),水深为 2474 m(图 1)。ADCP 位于锚定测流系统 500 m 处,设置观测层数为 28 层,对应深度为 6—438 m,空间采样间隔为 16 m,时间采样间隔为 15min,共获得 7237 个水平流速的垂向剖面。ADCP 的流速测量精度为 $\pm 5\text{mm/s} \pm 1\%$ 。由于海表处存在的波浪和表层流会影响流速的可靠性,所以在这里使用第 4 层到第 28 层共 25 层的流速数据,对应的深度范围为 54—438 m。

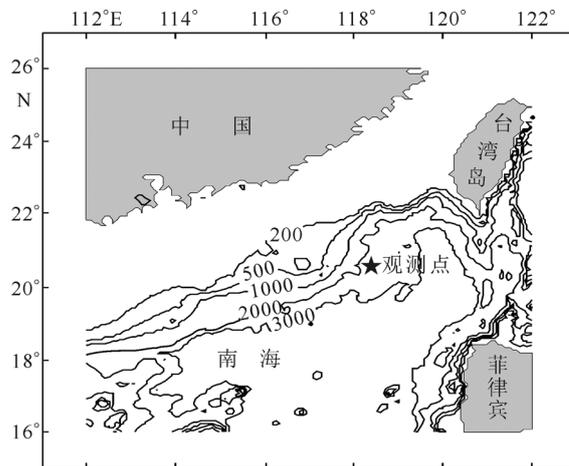


图 1 南海北部地形图,其中五角星代表观测地点
Fig.1 The bathymetry of northern South China Sea, the star denotes the observation site

* 国际科技合作重点项目, 2004DFB02700 号; 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目, 2005CB422303 号; 国家自然科学基金重点项目, 40552002 号和 40776005 号。杨庆轩, 博士, E-mail: xuanconfidence@ouc.edu.cn

收稿日期: 2007-06-05, 收修改稿日期: 2008-07-18

2 海流特征分析

2.1 海流前进矢量

由图2可以看出,全流的日平均流速随时间在整体上是逆时针方向变化的,在200 m、300 m、400 m层表现得更为突出。在南北方向上,10月3日之前,流速基本以北向为主,10月3日之后,以南向为主。在东西方向上,50 m层和100 m层的流速始终是西向的,但是200 m、300 m和400 m层却是不同的,它们在9月12日之前是东向的,在9月12日之后,基本以西向为主,这说明流场的表层结构与较深处的不同。这与袁耀初等(2002)的结果相同。正压流速(图2 f)随时间的变化与全流的变化趋势很相似,尤其是在200 m、300 m和400 m层,这说明海流中正压流的贡献是主要的。200 m、300 m和400 m处的斜压流速的轨迹和全流相似,但是速度比全流却小了很多。

2.2 海流的日平均

对正压流速和50 m、100 m、200 m、300 m和400 m处的斜压流速进行一天的时间平均,如图3所示。正压流速随时间的变化相对稳定,而斜压流速随时间变化表现出较强的脉动信号。正压流速 u 、 v 的最大值约为20 cm/s,斜压流速在50 m处的最大值约为20 cm/s,在100 m和200 m层约为10 cm/s,在300 m和400 m处约为15 cm/s。正压流速和200 m、300 m、400 m处的斜压流速的整体变化趋势是一致的, u 、 v 分量均从正值变化为负值,虽然发生转变的时间不尽相同,这也和图2的前进矢量图是一致的。

2.3 正压潮

图4为正压流速的八大分潮的潮流椭圆。由图4中可以看出,正压潮流中最显著的为 K_1 和 M_2 分潮,长轴分别为7.0和9.6 cm/s,短轴分别为3.9和1.6 cm/s。

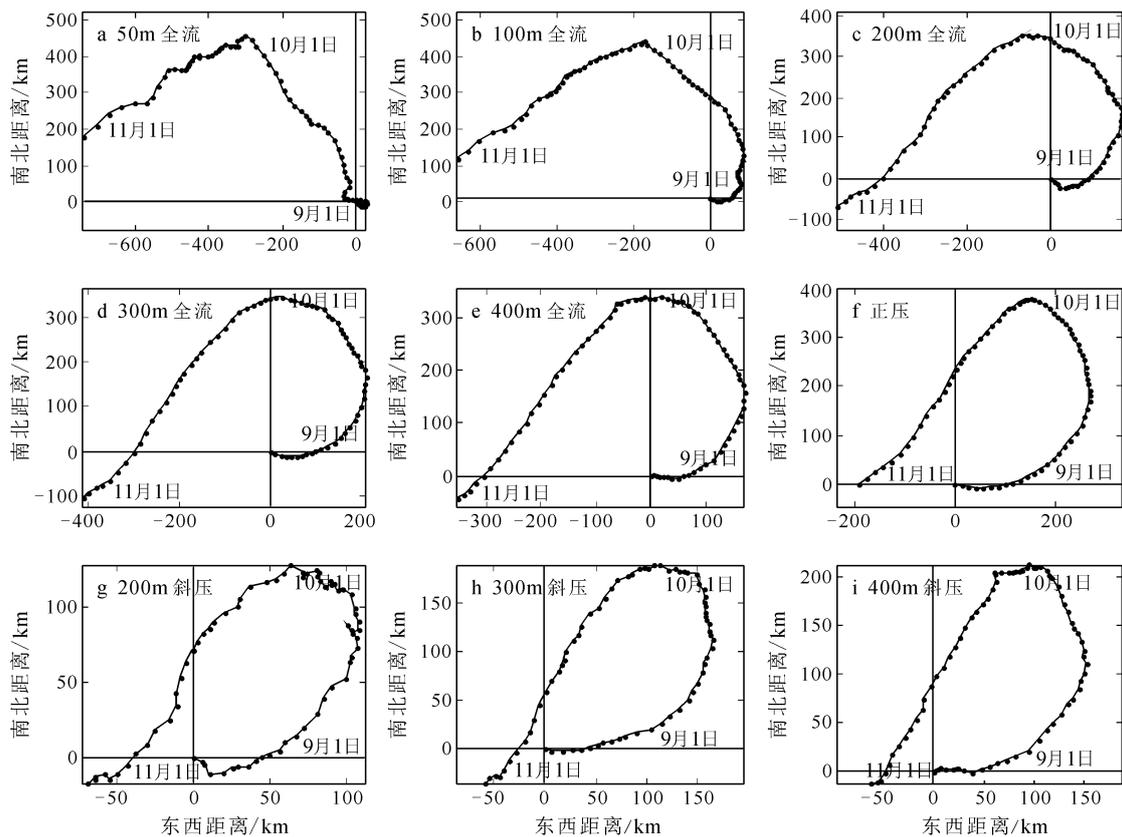


图2 日平均海流的前进矢量图(a—e为全流在50m、100m、200m、300m和400m层的情况,f为正压流的情况,g—i为斜压流在200m、300m和400m层的情况)

Fig.2 The path vector figure of day-averaged current, (a)—(e) indicate the total current at the depth of 50, 100, 200, 300, and 400 m; (f) indicates the barotropic current, and (g)—(i) indicate the baroclinic current at the depth of 200, 300, and 400 m

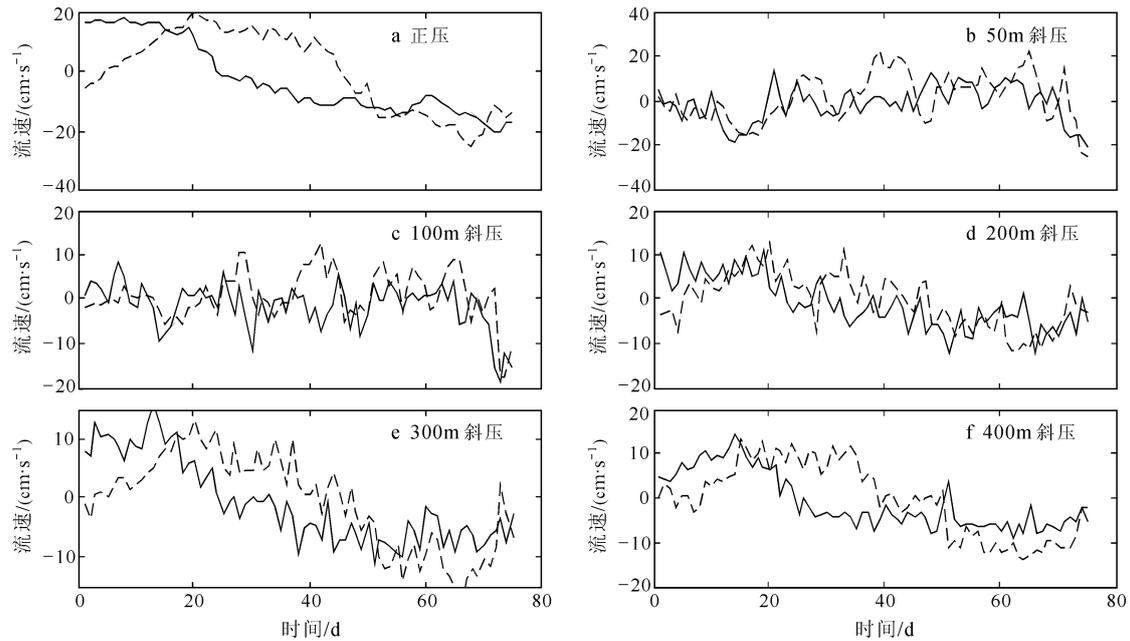


图3 日平均的正压流和斜压流在 50m、100m、200m、300m 和 400m 处随时间的变化情况

Fig.3 The variation of day-averaged barotropic and baroclinic current with time at the depth of 50, 100, 200, 300 and 400 m

其余分量从强到弱依次为 O_1 、 P_1 、 S_2 、 Q_1 、 N_2 和 K_2 。长轴从 5.5—0.3cm/s, 短轴从 2.8—0.2cm/s, 这与 Beardsley 等(2004)的结果是比较一致的。

3 旋转谱和频率波数谱

3.1 正压流速的旋转谱和斜压流速的频率波数谱

对于水平流速的时间序列, 作者把东西分量记为 u , 南北分量记为 v 。这样, 便容易构造复速度矢量序列, 即: $w(t, z) = u(t, z) + i \times v(t, z)$ 。在这里采用 Konyaev(2002)提出的方法来计算流速矢量谱, 正压旋转谱和斜压频率波数谱的计算公式分别如下:

$$b(f) = \left| \sum_t w(t) \exp(-i2\pi ft) \right| / N \quad (1)$$

$$a(f, k) = \left| \sum_t \sum_z w(t, z) \exp(-i2\pi(ft + kz)) \right| / (NH) \quad (2)$$

其中 f 是频率, k 是垂向波数, t 是时间, z 是深度(坐标原点在平面, z 轴方向竖直向下, 本文中, 如无特别说明, z 轴的方向均是如此), N 是时间点的个数, H 是深度的层数。对于以上两种谱, 当 $f < 0$ 时, 表示水平流速矢量顺时针旋转, 当 $f > 0$ 时表示逆时针旋转。对于斜压频率波数谱, 当 $k > 0$ 时, 表示能量上传, 当 $k < 0$ 时表示能量下传。在计算过程中, 需要把谱对频率或者波数进行求和, 为保持振幅的量纲不变, 应先对谱值进行平方, 在求和之后再开方, 即:

$$a_{k<0}(t, f) = \left(\sum_{k<0} a(t, f, k)^2 \right)^{0.5} / H \quad (3)$$

$$a_{k>0}(t, f) = \left(\sum_{k>0} a(t, f, k)^2 \right)^{0.5} / H \quad (4)$$

于是可以得到正压流速的旋转谱 $b(t, f)$ 及斜压流速的频率波数谱 $a(t, f, k)$ 。

为了研究正压流速和斜压流速在频率空间上的特征, 对 $a(t, f, k)$ 、 $b(t, f)$ 进行时间平均得到 $a(f, k)$ 、 $b(f)$, 并把 $a(f, k)$ 分为 $k > 0$ 和 $k < 0$ 两部分, 分别对波数积分再取平均。由时间平均的正压流速频率谱(图 5a、b)可以看出: 首先, 对于正压流速, 零频率处的振幅最强, 约为 17 cm/s; 半日潮振幅比全日潮振幅约大 1 cm/s, 顺时针旋转的振幅比逆时针旋转的振幅平均大 3 cm/s。其次, 对于斜压流速, 全日潮振幅最强, 约为 1.5 cm/s; 并且顺时针旋转的振幅稍微大于逆时针旋转的振幅, 两者之差约为 0.5 cm/s; 全日潮和半日潮的上传能量与下传能量几乎相等, 但在惯性频率处下传能量稍微大于上传能量。综合而言, 正压流速的振幅均大于斜压流速的振幅, 平均约大 5 cm/s; 两者的峰值对应得很好, 即在正压流速峰值对应的频率处也存在斜压流速的峰值; 正压半日潮的振幅大于全日潮的振幅, 但斜压半日潮的振幅却远小于全日潮的振幅, 这体现了正压流速与斜压流速

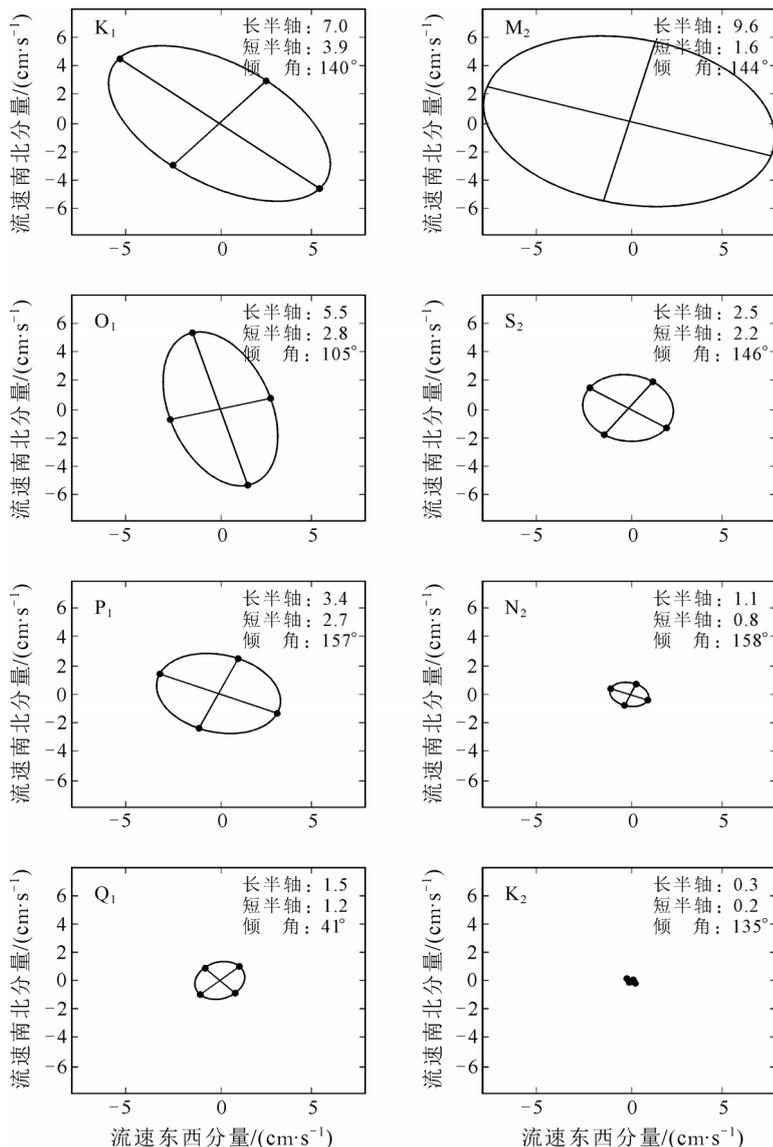


图4 正压流的八大分潮的潮流椭圆

Fig.4 Eight major constituents of barotropic tidal ellipse

不同的特征。由时间平均的斜压流速二维频率波数谱(图5c)可以看出,能量主要集中在定常斜压流、全日潮和半日潮频段上,且对应的能量依次减小。在半日潮和全日潮频段处,上传与下传的能量均近似相等,且关于波数 $k=0$ 对称。

3.2 正压流速及斜压流速的谱值随时间的变化特征

为了研究正压流速和斜压流速随着频率、时间的变化特征,对 $a(t, f, k)$ 、 $b(t, f)$ 做波数平均得到 $a(t, f)$ 及 $b(t, f)$ 。从正压流速的频率谱时间序列 $b(t, f)$ (图6a)可以看出:正压流速的能量主要集中在低频部分,平均振幅约为20 cm/s,其次是全日潮和半日潮,平均振幅约为10 cm/s;能量主要集中于负频率部分,

这说明正压流速矢量主要以顺时针旋转,这与图5的结论一致;处于低频部分的能量在75天之间,除了在30—45天内振幅稍微减小到15 cm/s外,其余时间内振幅一直较大,平均为20 cm/s;全日潮波包和半日潮波包随时间变化很明显,呈现15天左右的振荡周期,但两者之间存在约7—8天的相位差。

从斜压流速的频率谱时间序列 $a(t, f)$ (图6b)可以看出,斜压流速的能量主要集中在负频率部分,这说明斜压流速矢量主要以顺时针旋转;在负频率范围内,能量主要集中在全日潮部分,平均振幅约为1.5 cm/s,其次是低频部分和半日潮部分,平均振幅约为1.0 cm/s;处于低频部分的能量随着时间发展呈现的周期性不是很明显,由于低频处的能量主要集中于海流中,影响该海区海流的主要因素为风和中尺度涡,其中风的影响比较显著且无规律,可见这种不明显的周期性与不稳定的风场存在较大的联系;全日潮部分的能量随着时间变化比较明显,在前半段时间(1—40天)内呈现约7—8天的振荡周期,在后半段时间内,呈现约15天的振荡周期;半日潮部分的能量随着时间变化也比较明显,呈现约7—8天的振荡周期;全日潮振荡和半日潮振荡之间存在约7—8天的相位差,这在后半段时间表现得尤为明显,并且这两者的相位差与在正压流速频率谱中的相位差相同。

3.3 全日潮和半日潮随时间的变化特征

为了研究全日潮和半日潮随时间的发展特征,对 $a(t, f)$ 及 $b(t, f)$ 作频率平均得到 $a(t)$ 及 $b(t)$ 。从频率平均的正压流速谱的时间序列 $b(t)$ (图7a、b)可以看出:全日潮分量和半日潮分量均呈现15天左右的周期,两者之间存在5—8天的相位差;在前40天,全日潮振幅比半日潮振幅平均大2.0 cm/s,在40天之后,全日潮振幅比半日潮振幅平均小3.0 cm/s。从频率平均的斜压流速谱的时间序列 $a(t)$ (图7c、d)可以看出:全日潮分量和半日潮分量在前40天缺乏明显的周期性,全日潮分量负波数部分表现的尤为突出,在20—30天呈现高频振荡;在40天之后,全日潮分量

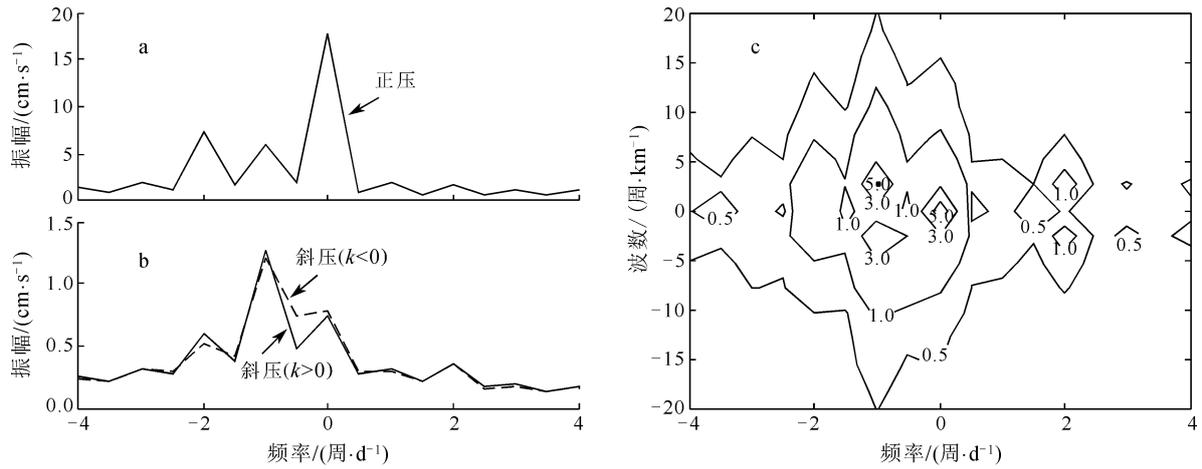


图 5 时间平均的正压频率谱(a)和斜压频率谱能量下传部分、能量上传部分(b)和时间平均的斜压频率波数谱(c)

Fig.5 The time averaged barotropic frequency spectra (a), the downward part of baroclinic frequency spectra, upward part of baroclinic frequency spectra(b), and the time averaged baroclinic frequency-wavenumber spectra (c)

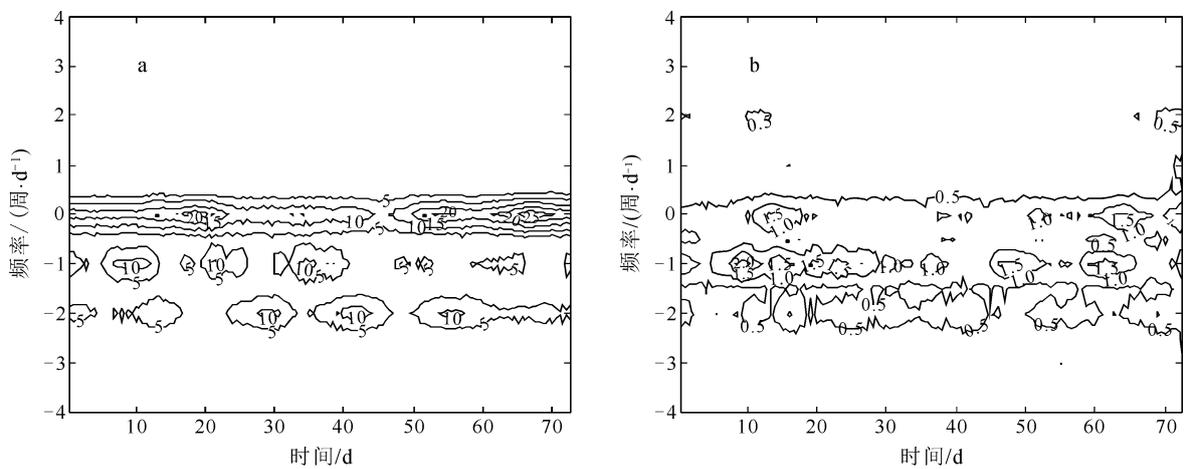


图 6 正压流速频率谱随时间的变化(a)和波数积分平均后的斜压流速频率谱随时间的变化(b)

Fig.6 The variation of barotropic frequency spectra with time (a), and the variation of wavenumber integrated and averaged baroclinic frequency spectra (b)

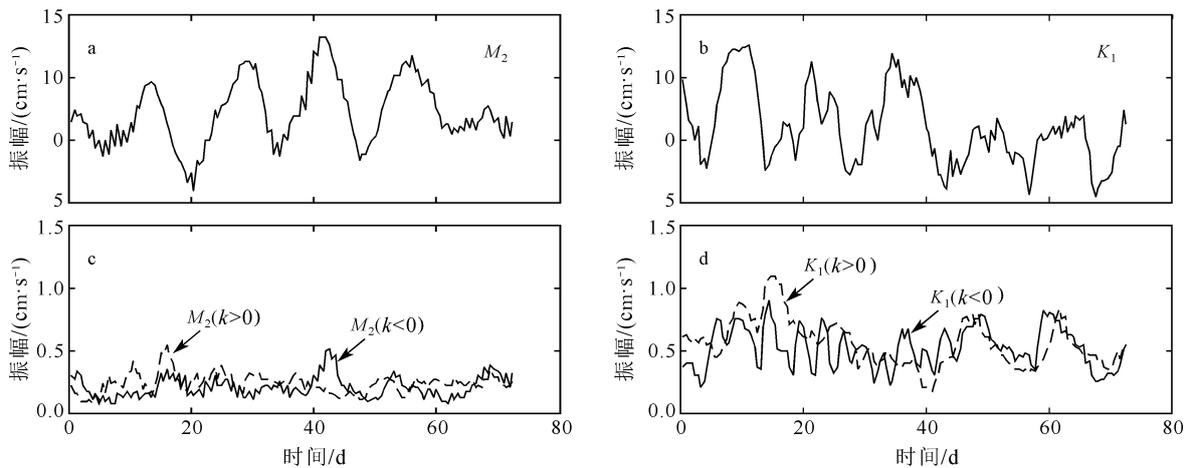


图 7 正压半日潮流(a)、全日潮流(b), 斜压半日(c)和全日潮流(d) (上传、下传)随时间的变化

Fig.7 The variation of barotropic semidiurnal (a) and diurnal current (b), baroclinic semidiurnal (c) and diurnal current (d) (up- and downward propagation) with time

和半日潮分量的周期性与正压部分比较一致, 存在 5—8 天的相位差; 斜压全日潮振幅比斜压半日潮振幅平均大 0.4 cm/s, 并且斜压潮的上传、下传能量的大小随时间呈现交替变化。比较图 7 可以看出: 正压全日潮分量与半日潮分量的振幅均远远大于斜压全日潮分量及半日潮分量的振幅, 前者约为后者的 10 倍; 正压半日潮分量在 42 天左右时振幅呈现最大, 对应于斜压部分在 42 天附近时, 其全日潮分量和半日潮分量的负波数部分均对应一峰值; 正压全日潮在 10 天、20 天及 35 天左右均对应一峰值, 同时斜压全日潮负波数部分在这些时刻附近也均有峰值与其对应。

4 结论

通过对 2000 年在南海北部陆架海区一点 75 天的 ADCP 流速观测资料进行分析, 对海流的观测结果进行了分析研究, 主要得到以下结论:

(1) 通过对海流前进矢量图的研究, 说明此处海流主要为逆时针方向旋转。

(2) 分析了海流的日平均流速, 描述了海流随时间和深度的变化情况。

(3) 对正压潮进行了分析, 结果表明此处 K_1 和 M_2 为主要分量。

(4) 计算了正压流速的矢量旋转谱和斜压流速的二维矢量频率波数谱, 以此研究了南海北部的正压潮流及斜压潮流的特征。

参 考 文 献

方文东, 郭忠信, 黄羽庭, 1997. 南海南部海区的环流观测研究. 科学通报, 42(21): 2264—2271
袁耀初, 卜献卫, 楼如云等, 2004. 1998 年冬季南海上层环流

诊断计算. 海洋学报, 26(2):1—10
袁耀初, 赵进平, 王惠群等, 2002. 南海东北部 450m 以浅水层与深层海流观测结果及其谱分析. 中国科学(D 辑), 32: 163—176
曾庆存, 李荣凤, 季仲贞等, 1992. 南海数值模拟月平均水平环流图. 海洋环流研讨会论文选集. 北京:海洋出版社, 127—168
蔡树群, 苏纪兰, 1995. 南海环流的一个两层模式. 海洋学报, 17(2):12—20
Beardsley R C, Duda T F, Lynch J F *et al*, 2004. Barotropic tide in the northeast South China Sea. IEEE J Oceanic Eng, 29(4): 1075—1086
Cai S Q, Su J L, Gan Z J *et al*, 2002. The numerical study of the South China Sea upper circulation characteristics and its dynamic mechanism in winter. Continental Shelf Research, 22: 2247—2264
Konyaev K V, 2002. Semidiurnal Internal-Wave Energy Sources and Sinks in the Ocean at High Latitudes from the Acoustic Doppler Current Profiler Data. Izv., Atmos. Ocen Phys (Engl Transl), 38: 625—636
Metzger E J, Hurlburt H E, 1996. Coupled dynamics of the South China Sea, the Sulu Sea, and the Pacific Ocean. J Geophys Res, 101(C5): 12331—12352
Shaw P T, Chao S Y, 1994. Surface circulation in the South China Sea. Deep Sea Research(I), 41(11):1663—1683
Takano K, Harashima A, Namba T, 1998. A numerical simulation of the circulation in the South China Sea—Preliminary results. Acta Oceanographica Taiwanica, 37(2): 165—186
Wang H Q, Yuan Y C, Guan W B *et al*, 2004. Circulation in the South China Sea during summer 2000 as obtained from observation and a generalized topography-following ocean model. J Geophys Res, 109: 1—12
Yuan Y C, Liu Y G, Liao G H *et al*, 2005. Calculation of circulation in the South China Sea during the summer of 2000 by the modified inverse method. Acta Oceanologica Sinica, 24(1): 14—30

OBSERVATION ON THE CURRENT IN THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA AND SPECTRUM ANALYSIS

YANG Qing-Xuan, LIANG Xin-Feng, TIAN Ji-Wei, KANG Jian-Jun
(Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao, 266100)

Abstract Characteristics of the currents in the northern South China Sea on August to November 2000 and their spectra were studied using Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) data, including current velocity vector and the day-averaged velocity. Harmonic analysis was also applied to the observation, which provided us more information of barotropic tide. The results suggest that, the velocity vector rotates anticlockwise mainly, and the principal constituents of barotropic tides are K_1 and M_2 , respectively.

Key words Northern South China Sea, Current observation, Spectrum analysis