

南海吕宋海峡 21°N 附近多潜标观测的上层海流*

宋占辉¹ 马伟伟¹ 万修全^{1,2} 韩雪双^{2,3}

(1. 中国海洋大学海洋与大气学院海洋学系 青岛 266100; 2. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室 青岛 266100;
3. 中国海洋大学船舶中心东方红 2 船实验室 青岛 266100)

摘要 为了解潮流从西北太平洋经吕宋海峡进入南海内的变化及其垂向结构, 本文利用在吕宋海峡附近沿东西方向布放的多套潜标同步获得的高分辨率 ADCP 长时间连续观测上层海流资料, 使用调和分析方法将实测海流分解成 3 部分: 不随时间变化的定常流、周期性潮流和剩余流, 并将潮流分解为正压潮流和斜压潮流。通过对实测海流中各组分分析, 得到以下结论: 该区域潮流类型在不同深度上有明显变化; M2 潮自吕宋海峡传入南海后强度显著减弱 75% 左右, K1、O1 分潮在上层强度减弱约三分之一。从垂向变化来看, 在潮流强度上, 各站点垂直方向上潮流强度均发生变化。从方向上看, 各分潮潮流椭圆东西向特征明显, 长轴变化较大, 短轴(南北向特征)垂向变化不显著; 潮流运动主要沿逆时针方向, 垂直方向上潮流明显减弱或增强时会发生转向。斜压潮流主要集中在上表层, 100m 左右以下随深度逐渐减弱。东西方向斜压潮流能量比正压潮流强, 而南北向的流比较稳定, 且斜压潮流能量远小于正压潮流。定常流强度在各站点呈现相似的变化趋势, 随深度变化减弱。

关键词 南海; 吕宋海峡; ADCP 观测; 潮流; 垂向结构

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyh20160400087

南海是亚洲三大边缘海之一, 周围存在多块陆地, 通过这些陆地之间的海峡与外界海洋联通, 其内部众多的岛屿分布与急剧变化的地形坡度可以对南海潮汐这一重要的海洋动力过程产生巨大影响。例如, 南海北部复杂的海底地形对潮能的分布、传播和削弱具有很大的影响; 吕宋海峡作为南海与西太平洋联通的最深通道, 在南海与外界的潮波能量传播中具有非常重要的作用。因此, 掌握吕宋海峡的潮流特征对中国的渔业、国防、航运、海洋工程及油气资源开发等有重要的实际意义。

已有研究指出, 南海的潮汐潮流运动主要来自通过吕宋海峡传入的西太平洋潮波(Niwa *et al.*, 2004; Jan *et al.*, 2007), 全日潮是南海海域主要的正压潮分量(Yanagi *et al.*, 1998; Fang *et al.*, 1999), 南海北部半日潮频带的斜压潮也十分显著(Duda *et al.*, 2004; Ramp *et al.*, 2004; Zhao *et al.*, 2004)。由于观测匮乏, 尤

其是对南海海流垂向结构的直接连续观测较少, 目前我们对南海内部潮流垂向特征的认识尚不完善。总体而言, 现有对南海潮汐潮流的研究主要集中于两方面。一方面是利用水位观测或数值模式模拟等对南海潮汐潮流类型、同潮图的研究。早期研究基于少量的近岸水位或海流观测, 结果误差较大(Dietrich, 1944; 郑文振等, 1964); 后来数值模式的发展推动了对南海潮波的分布和动力学性质的精确了解, 与早期的结果相比有了重大进步。例如, 方国洪等(1994)和 Wei 等(2003)分别利用二维球坐标和 MOM 等数值模式得到了较为准确的南海同潮图, 并根据计算结果给出南海(K1+O1)/2 和 M2 分潮的潮汐、潮流、潮流余流和潮能通量分布图; Zu 等(2008)利用 OTIS 潮模式也得到了相近的结果, 并详细研究了南海分潮的潮流椭圆分布。另一方面的工作主要基于近年来获得的南海内部实测海流数据, 特别是 ADCP(acoustic

* 国家自然科学基金项目, 41276013 号, 41576004 号, U1406401 号; 国家重点基础研究发展计划项目, 2014CB745001 号。宋占辉, 硕士研究生, E-mail: 1126209640@qq.com

通讯作者: 马伟伟, 博士, E-mail: skyseaweiwei@163.com

收稿日期: 2016-04-25, 收修改稿日期: 2016-06-02

Doppler current profilers)的观测数据,对南海潮流进行分析研究。大部分观测集中于南海北部及吕宋海峡西侧,研究多是基于一个或多个站位的 ADCP 实测海流资料,重点分析潮流的正压、斜压结构以及余流特征等(杜岩等, 2004; 郭朴等, 2006; 陈飞等, 2009; 司广成等, 2012),证明了南海潮流具有明显的垂向变化。何琦等(2012)分析了南海北部三个站位的 ADCP 观测到的潮流结构,发现在垂向上三个站位的潮流结构具有一致性。李子木等(2014)和胡冬等(2015)分别对吕宋海峡西侧一个站位的锚系观测数据进行分析,发现除了垂向结构的变化,南海潮流还具有明显的季节变化。可见,与渤海不同,南海的潮流具有明显的斜压结构,随深度、时间的变化明显。

尽管随着观测技术的进步和观测航次的增加,对南海海流的立体观测越来越频繁,但是已有的观测分析研究仍然大多聚焦于一个站位的潮流特征分析,多站位的观测比较研究较少,且主要集中于南海北部陆架陆坡处,并不能较好地表征潮流从西太平洋经吕宋海峡进入南海前进过程中的潮流变化情况。因此,在前人研究的基础上,我们利用吕宋海峡附近东西方向布放的几个站点长时间连续的 ADCP 海流观测数据,分析了南海潮流的垂直形态及能量结构,对比了吕宋海峡内外潮流结构的异同,初步探究从吕宋海峡东部至南海内部的潮流变化规律。

1 资料与方法

本文采用的资料是中国海洋大学“东方红 2”海洋科学考察船于 2010 年至 2011 年间在南海北部和吕宋海峡附近利用定点锚定潜标所获得的实测海流数据。使用的 ADCP 仪器型号是 75kHz RDI Workhorse Long Ranger,其最大观流量程为 500m,广泛用于海洋流场长期定点观测。表 1 给出了本文使用的 5 个 ADCP 观测站点的基本信息,包括站位位置、水深、观测深度和时间等。结合全球地形数据 ETOPO2 (<http://rda.ucar.edu/datasets/ds759.3/>)中的南海地形资料,得到

观测站点及其附近水域的水深分布(图 1)。从经纬度分布上来看,五个站点基本处于 21°N 附近,自东向西从吕宋海峡外逐渐延伸到南海北部的陆架陆坡处。从水深分布来看,大致呈由深到浅的变化。观测时间从 2010 年 8 月到次年 4 月,观测深度主要在 50—500m 之间的海洋上层。观测得到的原始数据首先使用 WinADCP 软件进行预处理,结合仪器姿态和后散射强度等信息,输出时间间隔为 1 小时、垂直采样间隔为 5m 的资料,保证了在层结变化较明显的层次具有较高的分辨率;然后对输出的资料进行质量控制,包括异常值的判断和舍弃以及利用统计值的关系进行数据鉴别等,超过均方相对误差 3 倍的测量值认定为奇异值进行剔除,并对少量的缺测值进行了插值处理。经过上述数据处理和质量控制后的数据用于本文后面的分析,该数据可从中国海洋大学海洋数据中心 (<http://coadc.ouc.edu.cn/index.php/Index/dataset/id/38>)申请获取。

本文主要利用 T_TIDE 调和程序包将上述观测海流数据分解为定常流、潮流和潮余流三部分 (Foreman *et al*, 1991; Pawlowicz *et al*, 2002; 于华明等, 2008)。其中潮流为各潮流分量总和;定常流为数据去掉潮流部分后取时间平均,在某一深度上不随时间变化;海流观测值减去前两者后定义为潮余流,是指海流中将具有周期性的天文潮去掉后的非周期性的流动,该余流包括风海流、密度流、径流和潮汐余流等。本文重点分析潮流部分。首先,根据分析得到的各分潮的最大潮流流速,计算得出不同深度的潮流类型,从而得知各分潮随着位置的不同而产生的变化,并对比各站点潮流椭圆的分布差异。其次,尝试将正压和斜压潮流分离:把提取的周期性潮流分量的垂向平均结果视为正压潮流,把潮流与正压潮流的差值视为斜压潮流(束星北等, 1985; 赵俊生等, 1992; Han *et al*, 2002),并对得到不同站点斜压潮流与正压潮流的垂向分布进行分析。最后,对定常流部分也进行了简单分析。

表 1 站位信息一览表
Tab.1 Details of station deployment

站号	纬度(°N)	经度(°E)	观测深度(m)	起始时间	终止时间	水深(m)
14	21.1096	117.8777	40—420	2010.08.23	2011.04.20	968
15	21.0598	118.4269	50—365	2010.08.25	2011.04.20	2480
13	20.8577	119.0509	170—460	2010.08.18	2011.04.21	2760
7	20.7359	120.0917	50—450	2010.08.12	2011.04.21	3745
8	20.6034	122.2837	50—480	2010.08.14	2011.04.23	3116

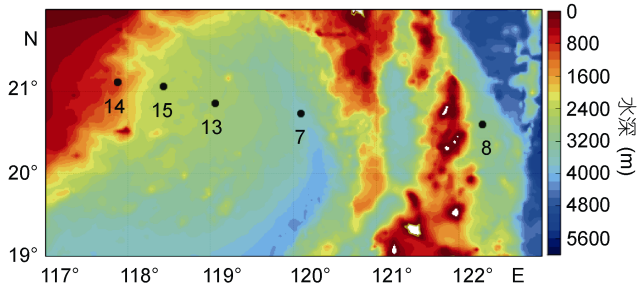


图 1 ADCP 观测站点分布及南海北部水深

Fig.1 Locations of ADCP (acoustic Doppler current profilers) stations (black dots) and bathymetry of Northern South China Sea

注: 填色为水深分布(单位: m), 数字为站点编号

2 结果与分析

关于潮汐类型的划分, 国内外有多种标准。参考胡冬等(2015)使用的方法, O1 和 K1 作为最主要的日分潮, M2 作为最主要的半日分潮, 采用日分潮 O1 和 K1 的最大潮流流速之和与半日分潮 M2 的最大潮流流速的比值来划分潮流类型, 定义特征值

$$F=(W_{O1}+W_{K1})/W_{M2}$$

其中, W_{O1} 、 W_{K1} 、 W_{M2} 分别为 O1、K1 和 M2 分潮的最大潮流流速(方国洪等, 1986; 张效谦, 2005), 具体判别标准如表 2 所示。

表 2 潮汐类型判别标准

Tab.2 The criterion of discrimination on tidal type

特征值域	类型
(0, 0.5]	正规半日潮
(0.5, 2.0]	不规则半日潮
(2.0, 4.0]	不规则日潮
(4.0, +∞)	正规全日潮

首先, 为了探究对比表层潮汐和上层潮流之间的异同, 我们先从海洋潮汐模型中大体了解站点附近南海潮汐的相关特征。TPXO7.2 模型是美国俄勒冈州立大学利用代表函数展开法同化验潮站以及 T/P、Jason-1 和 ERS-2 卫星测高资料建立的全球海洋潮汐模型(Egbert *et al*, 1994, 2002), 本文从 TPXO7.2 模型获取了各站点主要分潮的半长轴(<http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>)。根据左军成在《海洋水文环境要素的分析方法和预报》(2006)中给出的潮汐类型的判别方法同样可以定义特征值

$$F_H=(H_{O1}+H_{K1})/H_{M2}$$

其中 H_{O1} 、 H_{K1} 、 H_{M2} 分别为 O1、K1 和 M2 的平均振

幅(潮汐调和常数)。依次计算五个站点的 F_H 值(表 3), 明显看出在海表面潮波在由西太平洋经吕宋海峡进入南海的过程中, 半日潮逐渐减弱, 而全日潮则逐渐增强。

表 3 各站位分潮的振幅

Tab.3 The amplitude of tidal components at observation stations

站号	平均振幅(cm)				F_H
	M2	S2	K1	O1	
14	5.31	11.33	22.57	22.44	8.48
15	5.71	11.72	20.84	21.3	7.38
13	6.21	12.31	18.9	19.94	6.25
7	7.61	14.75	15.23	17.34	4.28
8	18.83	39.77	13.71	12.69	1.4

然后, 根据潮流类型特征值的计算方法得到五个站点在观测时间段内各观测深度层上的 F 值(图 2)。需要说明的是本文潮流类型以及下面潮流椭圆的计算均使用了观测时段全部 8 个月的数据。从整体上看, 吕宋海峡附近的 7、8 号站点潮流类型的垂向变化并不明显, 基本为不规则半日潮; 13 号站点由于观测缺失, 在观测深度内潮流类型基本表现为正规全日潮; 其余站点垂向变化显著。在 50m 层, 东西方向上 F 值从 8 号站点向南海内部自东向西基本呈逐渐增大的趋势, 与表 3 中给出的表层潮流类型变化相一致, 说明在上 50m 潮流类型没有显著的垂向变化。在 50m 至 200m 之间, 除了南海外的 8 号站外, 各个站点全日潮所占比重均表现为自上而下先增大后减小, 尤其是 15 号站点最为显著。200m 以深, 潮流类型逐渐稳定, 13 号站在观测深度上均为或接近正规全日潮, 其余四个站点为混合型潮流(不规则半日潮), 14 号站在 400m 以深全日潮比重逐渐增大, 这可能与该处水深较浅有关。有趣的是, 从潮流类型上看距离 13 号站越远, 全日潮比重越小, 半日潮比重越大。从机制上讲, 有研究表明从吕宋海峡进入到南海的 M2 分潮一部分继续向西南传播进入南海内部, 另一部分则向北传播进入台湾海峡; 其次, 通过台湾海峡传播进来的 K1 分潮会增强吕宋海峡传播进来的 K1 分潮(Zu *et al*, 2008)。可以猜测, 自吕宋海峡以西, 南海东北部陆架陡坡以东, M2 分潮减弱, K1、O1 分潮有所增强。图 3 给出的潮流椭圆的垂向分布证明了这一点, 除了靠近陆架区的 14 号站, 从 8 号站至吕宋海峡西侧的 7、13、15 号站在 200m 以浅, M2 半长轴自东向西逐渐减小, K1 与 O1 分潮半长轴增强; 200m 以深,

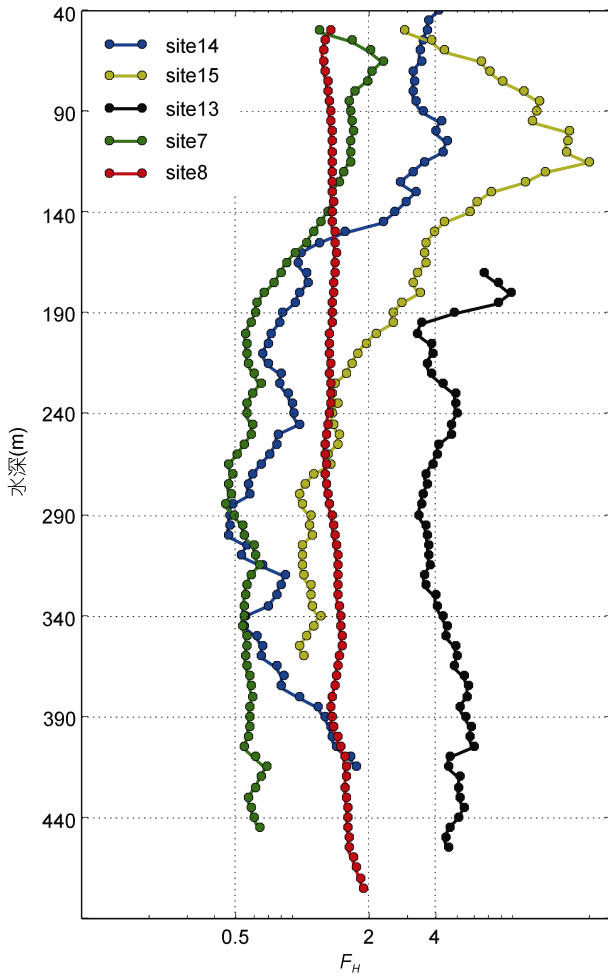


图 2 潮流类型随深度的分布

Fig.2 The vertical distribution of tidal type at observation stations

从 13 号站向东西方向两侧 M2 分潮半长轴增强, K1、

O1 分潮潮流半长轴减弱。另外, 在 14、15 号站 M2 分潮在垂向上先减弱后增强, 全日分潮变化正好相反, 因此在水深 100m 左右表现为显著的正规全日潮; 8 号站点的 M2、K1、O1 分潮在垂向上均先增强后减弱, 强度相当, 因此在 500m 以上潮流类型基本不变。

之后, 对比观测站点的 M2、S2、K1、O1 四个主要分潮的潮流椭圆(图 3)。从整体来看, S2 分潮强度远弱于其他三个分潮。在吕宋海峡外, M2 分潮最强, 最大潮流位于 70m 深度附近, 达到 27.9cm/s, K1 分潮次之, 最大潮流约为 19.3cm/s, O1 分潮强度与 K1 相当; 吕宋海峡以西, 全日潮 K1、O1 占主, M2 分潮较弱。对比不同站点的分潮强度, M2 潮自吕宋海峡传入南海后强度显著减弱, M2 分潮最大潮流在 7 号站点为 13.4m/s, 在 13、14、15 号站点不足 5cm/s; K1、O1 分潮强度在 8 号站点最大潮流约 19cm/s, 到 13 号站点, 最大潮流流速减至 8.26cm/s, 15、14 号站点则有一定程度的增强, 到 14 号站点已增强为 11.5m/s, 相比 8 号站点仍保持约三分之二的强度。O1 分潮与 K1 分潮变化相似。

从垂向变化来看, 在潮流强度方面, 14、15 号站 M2 潮流强度自上而下先减弱后增强; 其余分潮则相反, 先增强后减弱, 最强潮流发生在深度 60—100m 左右, 100m 以深潮流各分潮自东向西来看减弱速率有加快的趋势, 8 号站在 400m 层左右降到最小, 7 号站在 200m 的温跃层深度附近达到稳定, 而 14 号站在 100m 左右的混合层深度附近达到最低。各分潮潮流椭圆东西向特征明显, M2 分潮长轴在各站点均呈东南-西北走向, 下层基本为东西方向; K1、O1 长轴在

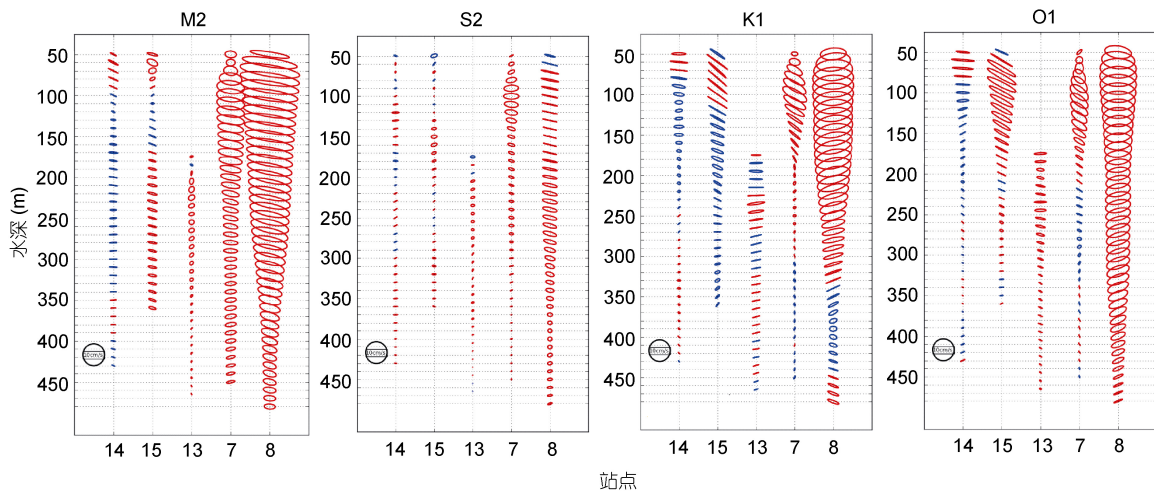


图 3 各站点不同分潮潮流椭圆的垂向分布

Fig.3 The vertical distribution of tidal ellipse at observation stations
注: 蓝色: 顺时针; 红色: 逆时针; 黑色圆圈为参考潮流流速 10cm/s

吕宋海峡外上层呈东西方向, 下层为西南-东北方向; 吕宋海峡西侧站点各分潮长轴方向基本与 M2 分潮方向相同。各站点分潮的潮流运动主要沿逆时针方向, 垂直方向上潮流明显减弱或增强时会转为顺时针, 尤其是 14、15 号站点。潮流椭圆长轴变化更为明显, 表明测点海流东西方向分量变化比较大, 短轴变化不显著, 8 号站点 M2 分潮短轴在各深度基本一致, 而吕宋海峡西侧短轴较小, 14、15 号站短轴长度接近 0, 说明在吕宋海峡附近的潮流运动接近于一个方向上的往复运动。

上述潮流在垂向上的显著变化表明南海内部斜压潮流非常显著。南海上层受到多种因素的控制和影响, 例如常年盛行的季风以及上层海水层结等因素都使得海流处于斜压作用下, 对潮流的垂向分布变化产生重要影响(杜岩等, 2004; 何琦等, 2012; 刘科峰等, 2014)。将观测潮流中的正压潮流与斜压潮流分离: 把提取的周期性潮流分量的垂向平均结果视为正压潮流, 把潮流与正压潮流的差值视为斜压潮流, 从而可以得到时间平均的正压、斜压潮流垂向变化图(束星北等, 1985; 赵俊生等, 1992; Han *et al*,

2002)(图 4a)。从图 4a 中可以看出, 从吕宋海峡外至南海陆架, 正压潮流自东向西明显减弱: 8 号站正压潮流流速约为 11cm/s; 14 号站仅为 2.8cm/s; 13 号站正压潮流流速最小, 但这可能是受潮流最强的上层部分缺测的影响。各站位的斜压潮流主要集中在上层, 100m 以下随深度逐渐减弱。然而, 斜压潮流最大流速不是出现在海表, 而在 70m 至 100m 之间。图 4b 是根据最新发布的中国南海 SCS 数据集(Zeng *et al*, 2016) 计算得到的相应站点海洋上层年平均的 Brunt-Väisala 频率, 可以表征南海上层海洋层结的垂向分布特点。图 4a 和图 4b 对比可以发现, 斜压流最强的区域基本在 200m 以上层结较强处, 由此可知斜压流可能受到密度层结的影响。随着深度的增加, 斜压潮流逐渐减小, 在 300m 以下基本消失。比较不同站点, 8 号站点的上层斜压潮流明显强于其他四个站点; 沿自东向西即潮波传播方向, 斜压潮流的最大值、产生显著影响的深度以及涉及深度的范围越来越小, 14 号站点的最大斜压潮流深度甚至可能小于 50m。说明潮波在从西太平洋向南海传播的过程中, 潮流稳定性越来越强。

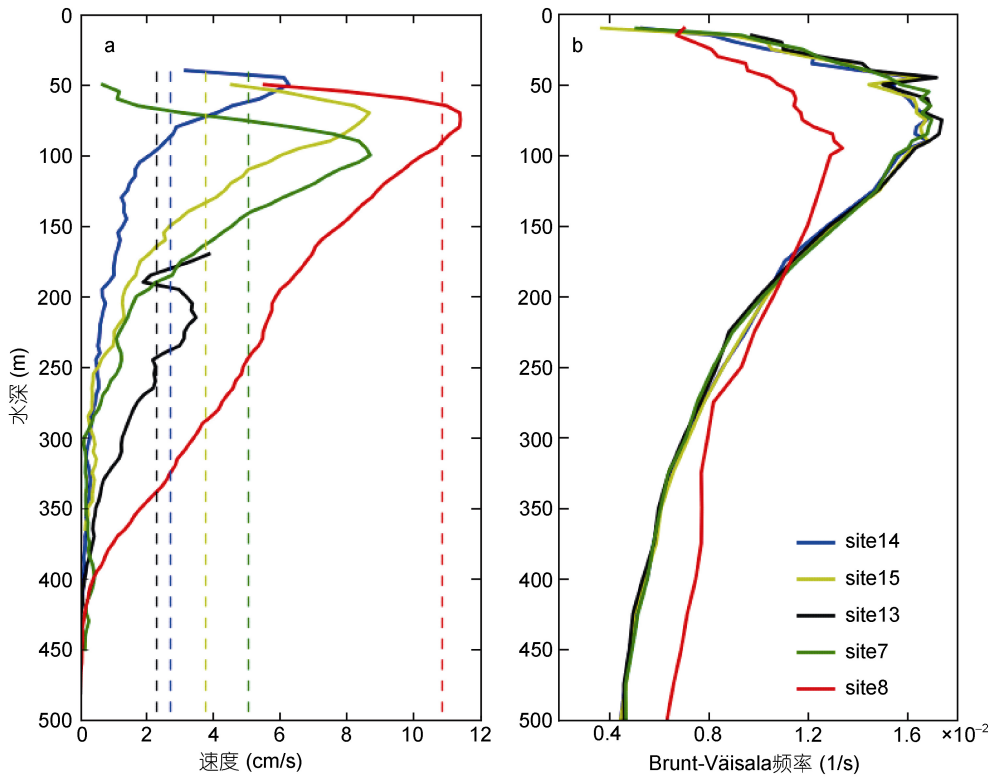


图 4 各站点时间平均斜压潮流随深度的变化

Fig.4 The vertical profiles of time-averaged baroclinic tide

注: a: 流速随深度的变化, 其中实线为时间平均斜压潮流流速, 虚线为正压潮流流速; b: Brunt-Väisala 频率

对比图4中各站点的正压、斜压潮流大小,可以看出不同位置正压潮流所占比重:8号站正压潮流与斜压潮流最大值相当,其他站点正压潮流大致为斜压潮流最大值的一半。要详细对比正压、斜压潮流的差异,可将观测流剖分之后从动能角度比较各部分所占比重,是较为常用的方法(葛人峰等,2004;于华明等,2008)。对比东西分量(u)、南北分量(v),表4给出了实测海流、潮流、定常余流以及潮余流单位体积深度平均的能量值,从整个深度来看, u 、 v 的各部分能量自西向东均表现出先减弱后增强的趋势。图5给出了各部分流能量占观测海流总能量的比重,以及

斜压与正压潮流能量比值。对于 u 分量,潮余流占比最大,在南海内部站点普遍占90%以上,潮流与定常流不到10%,定常流基本不存在,这说明东西方向上的流动受到外部因素,比如风强迫、黑潮入侵等的作用非常显著;而对于 v 分量,定常流所占的比重最大,约60%左右,且垂向变化不明显,其次是潮余流(30%),潮流所占的比重最小,这说明南北方向上的流动较为稳定,潮流以及外部因素的影响不显著。从斜压潮流与正压潮流能量的比值来看, u 分量斜压作用在150m层以浅较显著;而 v 分量的斜压潮流能量远小于正压潮流,平均不超过正压潮流能量的10%。

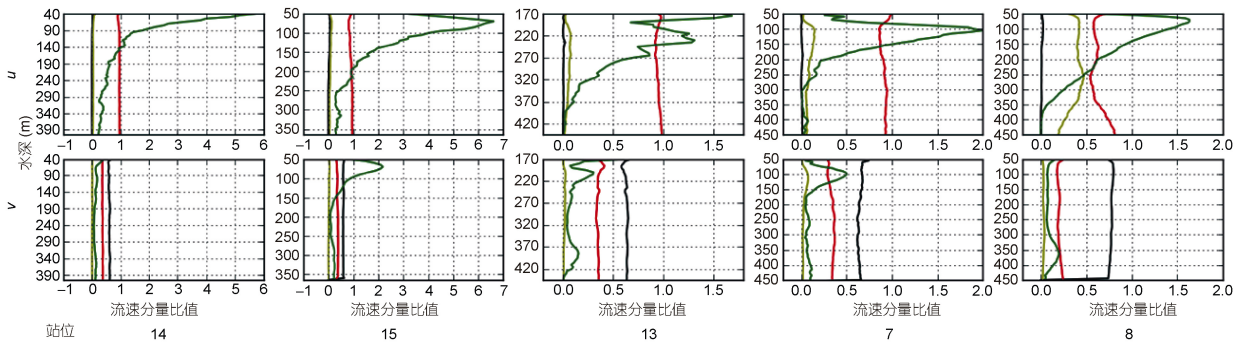


图5 不同海流成分的能量所占比重及斜压和正压潮流能量的比值

Fig.5 The vertical distribution of energy weight of different ocean current components and the ratio of baroclinic to barotropic tidal energy at observation stations

注:黑色、黄色、红色、绿色分别表示定常流能量与总观测流能量之比、潮流能量与总观测流能量之比、余流动能与总观测流能量之比、斜压潮流能量与正压潮流能量的比值

表4 实测海流、潮流、定常余流以及潮余流单位体积深度平均能量值(单位:J,海水密度 $\rho=1025\text{kg/m}^3$)
Tab.4 The depth averaged energy of different current components (unit: J, $\rho=1025\text{kg/m}^3$)

站号	u				v			
	总能量	潮流	定常流	潮余流	总能量	潮流	定常流	潮余流
14	264.4	4.9	2.3	257.2	158	0.6	96.2	61.2
15	259.4	11.3	8.8	239.3	251.5	2.8	153.1	95.6
13	171.8	5.1	1.2	165.5	139.3	1	88.3	50
7	294.8	16	1.7	277.2	210.9	4	135	71.9
8	341.3	115.8	4.1	221.4	773.3	16.6	602.2	154.5

潮流在垂向上的变化,一方面可能与背景场的海水层结有关,比如混合层、温跃层、密度跃层等的分布;另一方面还与岸界地形等因素有关,例如狭长地形约束了潮流的方向,深度不同导致底摩擦耗散差异,这些现象在其它海区也有发现(邱章等,1999;杜岩等,2004),需要通过数值模拟手段进一步研究确定。

最后,本文给出了5个站点定常流的垂向结构(图6)。定常流强度在各站点呈现相同的变化趋势,即

其强度随深度变化减弱。8号站点的定常流在各深度表现为较强的北向流,流动正压性显著,经过深度平均后东西向分量大小仅为0.02m/s,南北向分量为0.33m/s。7号站定常流在垂向上存在三种流态,在100m以浅的北向流明显受到黑潮影响,向下转为西北向流,最强可达到0.25m/s,300m以下减弱为强度约0.12m/s的东北向流。14、15站点由浅至深分别从0.23m/s、0.27m/s减弱至0.1m/s、0.12m/s,流向均从西北向流逐渐向右偏转,300m以深基本为北向流。13

号站虽然 170m 层以上缺失, 但猜测应遵循类似的变化。吕宋海峡以西四个站点较强的西北向流, 可能对应了黑潮活动的作用, 黑潮入侵造成的水位梯度产生西北向的地转流, 同时太平洋高温高盐水与南海

水的混合会强烈影响层结分布, 对垂向流结构产生作用, 吕宋海峡频繁的涡旋活动也可能对平均流的垂向变化产生影响。另外, 200m 左右的温度跃层、密度跃层可能影响流的偏转, 需要进一步研究证实。

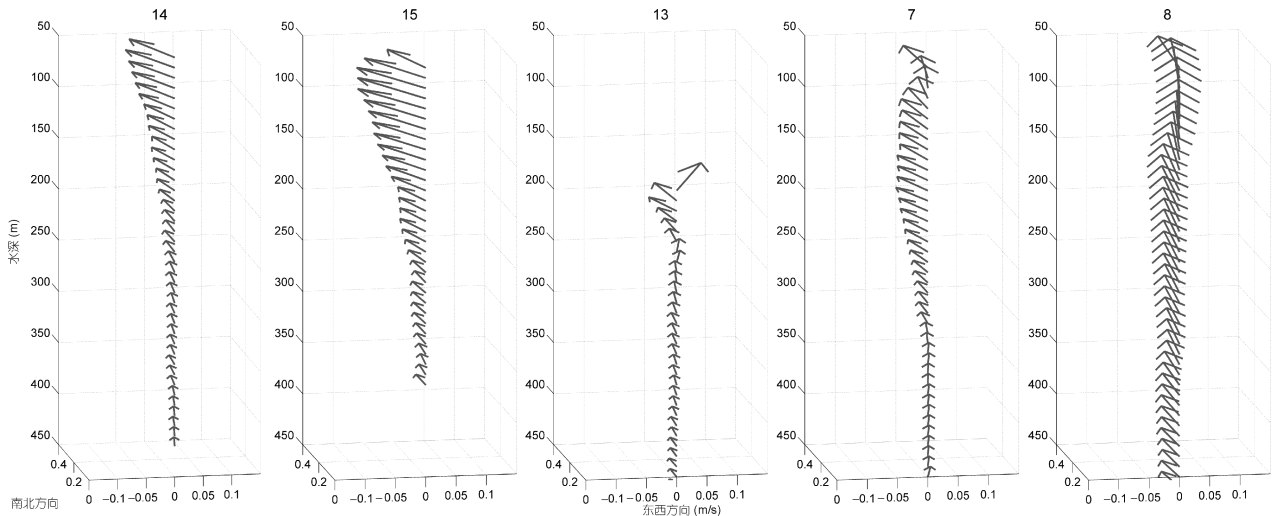


图 6 各站点定常流的垂向结构

Fig.6 The vertical structure of steady currents at observation stations

注: x 轴为定常流东西向流速(单位: m/s), y 轴为定常流南北向流速(单位: m/s), z 轴为水深(单位: m)

3 结论

本文通过对南海北部和吕宋海峡沿 21°N 附近东西方向布放的高分辨率 ADCP 长时间连续潜标观测海流资料进行分析, 得到如下结论:

(1) 整体上看, 7、8、13 号站点潮流类型垂向变化不明显, 而其余站点即 14、15 号站点, 垂向变化显著。对南海内部的 7、14、15 号站点, 50m 以上, 潮流类型没有明显变化; 50—200m 之间站点的全日潮比重呈现先增大后减小的变化; 200m 以下, 潮流类型逐渐稳定, 半日潮比重增加。各站点潮流强度均随深度发生变化, 最强潮流在 60—100m 左右, 100m 以下潮流减弱的速度自东向西加快。

(2) 在吕宋海峡外, M2 分潮最强, O1 分潮强度与 K1 相当; 吕宋海峡以西, 全日潮 K1、O1 占优, M2 分潮较弱。M2 潮自吕宋海峡传入南海后强度显著减弱 75% 左右, K1、O1 分潮的强度在上层减弱约三分之一。各分潮潮流椭圆东西向特征明显, 长轴垂向变化较大, 短轴(南北向特征)的垂向变化不显著。

(3) 斜压潮流主要集中在上表层, 100m 以下随深度逐渐减弱。斜压潮流最强的深度位于 70m 至 100m。随着深度的增加, 正压作用越来越强, 在 300m 以下, 基本都是正压潮流。潮波在从西太平洋向南海传播的

过程中, 潮流稳定性越来越强, 斜压潮流减弱加快, 正压潮流比重越来越大。

(4) 整个潮流能量中, u 分量能量以潮余流为主, 占 90%, 潮流、定常流比重很小, 说明东西方向流动易受到外部因素影响, 比如风强迫、黑潮入侵等, 且斜压潮流能量较正压潮流明显; v 分量能量, 以定常流为主, 潮流次之, 潮余流最弱, 说明南北向的流比较稳定, 受外部因素的影响较小, 且斜压潮流能量远小于正压潮流。

(5) 自东向西, 定常流强度在各站点呈现相似的变化趋势, 随深度变化减弱。吕宋海峡西侧的站点上层都存在较强的西北向流, 随深度逐渐向北向偏转, 这可能对应了黑潮入侵造成的水位梯度产生西北向的地转流。

本文在半年平均态的基础上进行初步分析, 其结果说明随着潮流从吕宋海峡外进入南海, 分潮的垂向结构会发生明显变化; 但是其机制尚需要进一步分析确定, 尤其是考虑到南海的潮流存在时间上的变化, 垂向结构在不同季节可能有显著差异。这需要对观测数据时间序列进行剖分对比。另外, 为探讨其垂向或者水平方向上的变化机理, 未来将开展数值实验进行研究。

参 考 文 献

- 于华明, 鲍献文, 朱学明等, 2008. 夏季北黄海南部定点高分辨率实测海流分析. *海洋学报*, 30(4): 12—20
- 方国洪, 郑文振, 陈宗镛等, 1986. 潮汐和潮流的分析和预报. 北京: 海洋出版社
- 方国洪, 曹德明, 黄企洲, 1994. 南海潮汐潮流的数值模拟. *海洋学报*, 16(4): 1—12
- 左军成, 2006. 潮汐潮流现象. 见: 海洋水文环境要素的分析和预报. 青岛: 中国海洋大学出版社, 56—58
- 司广成, 侯一筠, 2012. 南海北部东沙岛附近的内潮和余流特征. *海洋与湖沼*, 43(1): 10—16
- 刘科峰, 蒋国荣, 陈奕德等, 2014. 基于卫星漂流浮标的南海表层海流观测分析. *热带海洋学报*, 33(5): 13—21
- 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
- 李子木, 蔡树群, 陈举等, 2014. 2010—2011 年吕宋海峡西侧潜标观测的初步分析. *热带海洋学报*, 33(1): 10—16
- 束星北, 耿世江, 顾学俊等, 1985. 利用海流观测资料检验近海内波. *海洋学报*, 7(5): 533—538
- 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
- 何琦, 魏泽勋, 王永刚, 2012. 南海北部陆架陆坡区海流观测研究. *海洋学报*, 34(1): 17—28
- 张效谦, 2005. 南海北部陆架陆坡区内波与混合研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文
- 陈飞, 杜岩, 王东晓等, 2009. 2008 年 8—9 月份吕宋海峡西南侧锚定 ADCP 的斜压海流观测. *热带海洋学报*, 28(4): 66—71
- 郑文振等, 1964. 中国近海的潮波系统. 见: 全国海洋综合调查报告(第五册). 北京: 中华人民共和国科学技术委员会海洋组海洋综合调查办公室
- 赵俊生, 耿世江, 1992. 北黄海内波场特征. 见: 中国海洋学文集(3). 北京: 海洋出版社
- 胡冬, 陈希, 张守业等, 2015. 南海东沙群岛南侧海域的潮流特征. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 16(4): 368—373
- 郭朴, 方文东, 甘子钧等, 2006. 南海北部大陆坡区的内潮特征. *科学通报*, 51(S3): 15—22
- 葛人峰, 郭炳火, 乔方利等, 2004. 东海东南陆架外缘冬、夏季实测海流 FFT 分析. *海洋科学进展*, 22(4): 429—435
- Dietrich G, 1944. Die Gezeiten des Weltmeeres als geograph, Erseheinung Z. d. ges. Berlin: Erdkunde, 69
- 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
- Egbert G D, Bennett A F, Foreman M G G, 1994. Topex/Poseidon tides estimated using a global inverse model. *Journal of Geophysical Research*, 99(C12): 24821—24852
- Egbert G D, Erofeeva S Y, 2002. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2): 183—204
- Fang G H, Kwok Y K, Yu K J *et al*, 1999. Numerical simulation of principal tidal constituents in the South China Sea, Gulf of Tonkin and Gulf of Thailand. *Continental Shelf Research*, 19(7): 845—869
- Foreman M G G, Neufeld E T, 1991. Harmonic tidal analyses of long time series. *International Hydrographic Review*, 68(1): 85—108
- Han C M, Pan Z D, Fan D, 2002. Extraction of internal tidal currents from a portion of sea current profile. *China Ocean Engineering*, 16(2): 249—256
- Jan S, Chern C S, Wang J *et al*, 2007. Generation of diurnal K_1 internal tide in the Luzon Strait and its influence on surface tide in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 112(C6): C06019, doi: 10.1029/2006JC004003
- Niwa Y, Hibiya T, 2004. Three-dimensional numerical simulation of M_2 internal tides in the East China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 109(C4): C04027, doi: 10.1029/2003JC001923
- Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S, 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8): 929—937
- Ramp S R, Tang T Y, Duda T F *et al*, 2004. Internal solitons in the northeastern South China Sea Part I: sources and deep water propagation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(4): 1157—1181
- Wei Z X, Fang G H, Choi B H *et al*, 2003. Sea surface height and transport stream function of the South China Sea from a variable-grid global ocean circulation model. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(2): 139—148
- Yanagi T, Takao T, 1998. A numerical simulation of tides and tidal currents in the South China Sea. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 37(1): 17—29
- Zeng L L, Wang D X, Chen J *et al*, 2016. SCSPD14, a South China Sea physical oceanographic dataset derived from *in situ* measurements during 1919—2014. *Scientific Data*, 3: 160029, doi: 10.1038/sdata.2016.29
- Zhao Z X, Klemas V, Zheng Q A *et al*, 2004. Remote sensing evidence for baroclinic tide origin of internal solitary waves in the northeastern South China Sea. *Geophysical Research Letters*, 31(6): L06302, doi: 10.1029/2003GL019077
- Zu T T, Gan J P, Erofeeva S Y, 2008. Numerical study of the tide and tidal dynamics in the South China Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 55(2): 137—154

THE UPPER OCEAN CURRENTS OBSERVED BY MULTIPLE SUBSURFACE MOORED BUOYS ALONG 21°N NEAR LUZON STRAIT IN THE SOUTH CHINA SEA

SONG Zhan-Hui¹, MA Wei-Wei¹, WAN Xiu-Quan^{1,2}, HAN Xue-Shuang^{2,3}

(1. *Oceanography Department, College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*
2. *Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;* 3. *Dongfanghong 2 Laboratory, Research Vessel Center, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

Abstract To understand the changes and the vertical structures of the tidal currents flowing from northwestern Pacific to the South China Sea through the Luzon Strait, long-term successive ADCP (acoustic Doppler current profiler) data were analyzed in harmonic analysis method. The data were recorded by five subsurface moored buoys along 21°N near Luzon Strait in the northern South China Sea. The ocean currents could be decomposed into steady current, residual current, and periodical tidal currents, and further into barotropic and baroclinic ones. The statistical characteristics of the current components showed that the type and velocity of tide vary vertically. When propagating from the western Pacific into the South China Sea through the Luzon Strait in the upper ocean, the intensity of M2 tide decreases to about 75%, and those of K1, O1 tides decreases to about 33%. The tidal ellipse of every tidal component is obviously in east-west direction; the long axis (east-west) is more variable than the short axis (north-south). The baroclinic tidal current is stronger in the upper layer and gradually decreases below the depth of 100m. For the east-west component, the energy of the baroclinic is stronger than the barotropic tidal current. For the north-south component, the energy of the baroclinic is much less than the barotropic tidal current. The velocity of steady current has a similar vertical structure in each observation station and decreases with depth.

Key words the South China Sea; Luzon Strait; ADCP observation; tidal current; vertical structure