

张洪欣,唐声全,刘祥宇,等.基于潜标资料的中南半岛外海水文特征分析[J].海洋气象学报,2017,37(1):54-66.  
Zhang Hongxin, Tang Shengquan, Liu Xiangyu, et al. Hydrological characteristics analysis of the Eastern Indochina Peninsula based on mooring measurements[J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(1): 54-66. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.006. (in Chinese)

## 基于潜标资料的中南半岛外海水文特征分析

张洪欣<sup>1</sup>,唐声全<sup>2</sup>,刘祥宇<sup>1</sup>,张小波<sup>1</sup>,张莹<sup>1</sup>,陈学恩<sup>2</sup>

(1.国家海洋局北海海洋技术保障中心,山东 青岛 266033;2.中国海洋大学海洋与大气学院,山东 青岛 266100)

**摘要:** 基于2012年9月—2013年12月中南半岛外海累计16个月的长时间序列潜标观测数据,结合AVISO海表面高度异常(sea level anomaly, SLA)数据,首次详细分析了中南半岛外海典型中尺度涡的运动规律和垂向特征及其对环境水文特征的影响,揭示了该海域深层海流的时间变化特征。在观测期间共捕捉到3次中尺度涡过程,中尺度涡对站位所在海域主温跃层深度变化的最大影响振幅可达50 m。研究发现:1)观测站位所在海域各深度的温度异常时间变化与站位SLA时间变化的相关性随深度增加逐渐减弱。2)上层和中层的海水流动受中尺度涡影响显著。1 500 m和2 000 m的深层环流主要表现为季节变化;在强中尺度涡暖涡经过期间,中尺度涡能影响到1 500 m的环流场,同时出现30 d周期震荡。2 000 m流场则不受中尺度涡影响。3)中南半岛以东南海1 500 m处深层海流月平均流速夏季大于冬季,月平均可达 $3.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;2 000 m处深层海流最大流速出现在冬季,月平均可达 $2.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。深层海流受潮汐影响显著,潮汐作用主要影响深层海流东西向流速的变化。

**关键词:** 南海;潜标;中尺度涡;深层环流;季节变化

**中图分类号:** P731 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)01-0054-13

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.006

## Hydrological characteristics analysis of the Eastern Indochina Peninsula based on mooring measurements

ZHANG Hongxin<sup>1</sup>, TANG Shengquan<sup>2</sup>, LIU Xiangyu<sup>1</sup>,  
ZHANG Xiaobo<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>, CHEN Xueen<sup>2</sup>

(1. North China Sea Marine Technical Support Center, SOA, Qingdao 266033, China; 2. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract** Using the 16 months' mooring data measured from September 2012 to December 2013 and the AVISO sea level anomaly data (SLA), we study the hydrological characteristics of mesoscale eddy and the deepwater circulation variations east of Indochina Peninsula. During the observation period, three mesoscale eddies are captured. Maximum amplitude of thermocline depth displacements, which are induced by local mesoscale eddies, on the mooring site can reach up to 50 m. The main conclusions are as follows. 1) In the mooring region, the time series correlation between temperature anomaly and the SLA weakens with the depth. 2) In the mooring region, mesoscale eddies affect the upper and

收稿日期:2017-02-03; 修订日期:2017-03-01

基金项目:国家重点研发计划专项项目(2016YFC1401300);山东省超级计算科技专项项目;泰山学者计划

作者简介:张洪欣(1978—),男,研究员,主要从事海洋调查观测技术和数据分析研究,zhxm40m@163.com。

通信作者:陈学恩(1971—),男,博士,教授,主要从事海洋环流动力学理论与数值模拟以及海洋仪器装备海上试验平台技术的研究,xchen@ouc.edu.cn。

intermediate hydrological conditions significantly. Deepwater circulation at 1 500 m and 2 000 m is primarily characterized by seasonal variations. Strong warm mesoscale eddies can influence deepwater circulation at 1 500 m depth, in the meanwhile, the deepwater velocity has strong 30-day periodical oscillations. However, the deepwater circulation at 2 000 m is not influenced by mesoscale eddies. 3) In the mooring region, the monthly mean velocity of deepwater circulation at 1 500 m in summer is larger than that in winter, the monthly mean velocity is up to  $3.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Strong velocity of the deepwater circulation at 2 000 m depth appears in winter, the monthly mean velocity is up to  $2.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . The tide significantly influences the deepwater circulation, and the influences can reach 2 000 m depth and mainly on zonal direction.

**Key words** the South China Sea (SCS); mooring; mesoscale eddy; deepwater circulation; seasonal variation

## 引言

南海位于中国大陆南端、吕宋海峡以西,是西北太平洋最大的边缘海。受季风、地形以及黑潮入侵等因素的影响,南海呈现出复杂的多涡结构。多涡结构对于南海的温盐、流速分布以及动量、热量的输送有重要影响<sup>[1]</sup>。Wang 等<sup>[1]</sup>利用 1993—2000 年的卫星高度计数据进行南海中尺度涡的统计工作,发现中南半岛外海在西南季风时期存在中尺度涡偶极子现象。程旭华等<sup>[2]</sup>基于卫星高度计数据分析了南海中尺度涡的季节和年际变化特征,指出 5 月在南海中部会有 2 个暖涡成对出现,8 月在越南以东因上升流作用会产生冷涡现象。为分析南海中尺度涡的产生机制,Hwang 等<sup>[3]</sup>将 T/P 高度计数据与风应力、风应力旋度进行相干分析,指出涡的角速率与风应力旋度成正相关关系。除受风应力旋度的影响外,南海东部的中尺度涡还受由陆地山脉所产生的地形风的影响<sup>[4]</sup>。

南海深层环流是指南海海盆内 1 500 m 以深的环流,是南海深海大尺度、中尺度、小尺度和微尺度等多尺度动力过程以及复杂突变海底地形相互作用的宏观表征<sup>[5]</sup>。南海深层环流会受到较强中尺度涡的影响,同时也存在自身的时空变化规律<sup>[6]</sup>。Zhang 等<sup>[7]</sup>利用长时间序列的潜标数据分析台湾西南部的中尺度涡现象以及涡对深层环流的影响。王斌<sup>[8]</sup>运用 HYCOM 模式模拟吕宋海峡及南海深层环流,揭示南海深层环流沿等位涡线(等深线)流动,在整个南海深海盆呈气旋式结构。Wang 等<sup>[9]</sup>利用 GDEM-Version3.0 月平均气候态数据,分析南海深层中央纬向(经向)断面的水文特征,也得出南海深层环流呈气旋式结构的结论。

上述关于南海中尺度涡以及深层环流的研究,

为认识南海环流的总体特征奠定了良好基础。但是,针对中南半岛外海中尺度涡、该海域深层环流时间变化特征<sup>[10]</sup>以及中尺度涡对该海域局地深层环流影响的研究尚未见报道。本文收集和分析了中南半岛外海 2012 年 8 月—2013 年 12 月长时间序列的潜标观测数据,结合法国航空局 AVISO (Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic Data) 的海表面高度异常(SLA)数据,捕捉到 3 个典型的中尺度涡,研究了观测期间观测站位所在海域局地深层环流的时间变化特征,分析了中尺度涡对该海域局地深层环流的影响。

## 1 数据与方法

### 1.1 潜标数据

本文的观测数据来源于布放在中南半岛外海的潜标,其地理坐标为:  $12^{\circ}58'N$ 、 $111^{\circ}31'E$ (图 1);

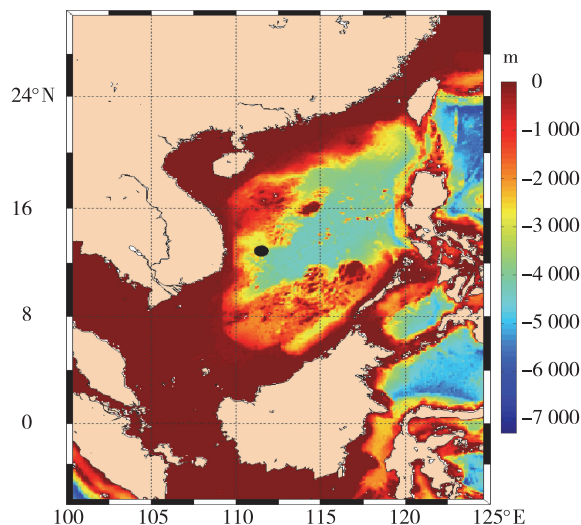


图 1 南海地形和水深(黑点代表潜标站位)

Fig.1 Geography and isobaths of the South China Sea (The black dot indicates the location of mooring)

水深为2 442 m。观测时段为:2012年8月30日10:00:00—2013年12月11日10:00:00。潜标上挂载的仪器包括自容式温盐深仪(SBE 37-SM CTD),温度仪(SBE 56),75k声学多普勒流速剖面

表1 仪器信息

Table 1 Informations of the instruments

仪器	精度	测量范围	采样时间/min	设备深度/m
SBE 37-SM CTD	$\pm 0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+35\text{ }^{\circ}\text{C}$	10	0~2 000
SBE 56	$\pm 0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+45\text{ }^{\circ}\text{C}$	10	100~400
75k ADCP	$\pm 1\% \pm 5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$0\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	60	500(up and down)
RCM	$\pm 0.15\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$0\sim 300\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$	30	1 500,2 000

注:up 和 down 分别代表 ADCP 向上采集数据和向下采集数据。

仪器所在深度:100 m、200 m、300 m、400 m、1 500 m、2 000 m 各悬挂一个 SBE 37-SM CTD;100 m~200 m 之间平均悬挂有 9 个 SBE 56 测温仪,200 m~300 m 之间平均悬挂有 9 个 SBE 56 测温仪,300 m~400 m 之间平均悬挂有 8 个 SBE 56 测温仪;500 m 处悬挂有 2 个 ADCP(1 个向上采集数据,1 个向下采集数据),用于测量 100 m~1 000 m 之间的流速;1 500 m 和 2 000 m 处各悬挂一个海洋卫士海流计(RCM),用于测量深层海流的水平流速。

## 1.2 海表面高度异常数据和中尺度涡判别标准

为分析观测期间经过潜标站位附近的中尺度涡,收集了 2012 年 9 月—2013 年 12 月法国航空局 AVISO 的 SLA 数据,数据的空间分辨率为  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ,时间分辨率为 1 d。

分析 SLA 数据时采用的中尺度涡判别标准为:

1)在海面高度异常图上,必须有封闭的等值线;

2)涡中心的水深要大于 1 000 m;

3)涡的中心与其最外围闭合等值线的高度差要大于 7.5 cm;

4)在上述 3 个标准下,涡的持续存在时间须大于 20 d;

5)如果前 4 个标准都满足,追踪涡的发展期间,涡中心与最外围等值线的高度差也须大于 4 cm。

## 2 观测期间的中尺度涡过程及其对潜标站位垂向温度、流场的影响

### 2.1 观测期间捕捉到的中尺度涡过程

利用 AVISO 提供的 SLA 数据,基于上述中尺度涡判别标准,可识别和分析在观测期间出现的中尺度涡。观测海域出现中尺度涡的时间分别为:2012

年 9 月—2012 年 10 月、2013 年 4 月—2013 年 5 月、2013 年 9 月。

2012 年 9 月—2012 年 10 月期间(图 2a-i),在中南半岛以东海域出现冷涡现象。9 月上半月,11°N 以北的冷涡 A 与以南的暖涡 B 成对出现,形成偶极子现象。潜标站位此时位于冷涡 A 的东部,靠近冷涡 A 中心。冷涡 A 中心与最外围闭合等值线的高度差为 18 cm。从 9 月 17 日开始,冷涡 A 逐渐向南移动,对站位水文的影响逐渐减小。9 月底—10 月初,原冷涡分裂成东西两个冷涡 A1、A2,西部的冷涡 A1 继续向南移动,而东部的冷涡 A2 则转向北移动。在 10 月 15 日,冷涡 A2 再次移动到 11°N 以北位置,从而潜标站位再次受到冷涡的影响。

2013 年 4—5 月期间(图 3a-i),在中南半岛以东海域出现中尺度暖涡现象。4 月,两个暖涡 C、D 结构分别分布在 113°E 东西两侧。潜标站位此时主要受西部暖涡 C 的影响。随着时间的推移,暖涡 C 快速向东北移动,而暖涡 D 则缓慢向西南移动,两涡中心间距离逐渐减小。5 月初,两涡合并为一个更强的暖涡 CD。暖涡 CD 中心位于潜标站位东北部,涡中心与最外围闭合等值线的高度差达到 20 cm。合成之后的暖涡 CD 继续向西移动,潜标站位由暖涡 CD 的西南部位置逐渐变为暖涡的东南部位置,站位处流速的方向也发生相应的改变(参见图 7 中虚框内流速的变化)。图 4 为暖涡期间两个暖涡中心与潜标站位的距离变化图,由图 4 可见,在合并过程中,暖涡 C 涡中心的 SLA 等值线与暖涡 D 涡中心附近的 SLA 等值线融合,两涡涡中心并没有重合。4 月 27 日,暖涡 C 完全并入暖涡 D,暖涡 C 涡中心消失,对应的暖涡 C 涡中心与潜标站位的距离也不再存在(图 4 中虚线)。6 月,暖涡 CD 开始向北移动,涡中心与潜标站位的距离逐渐增大,对潜

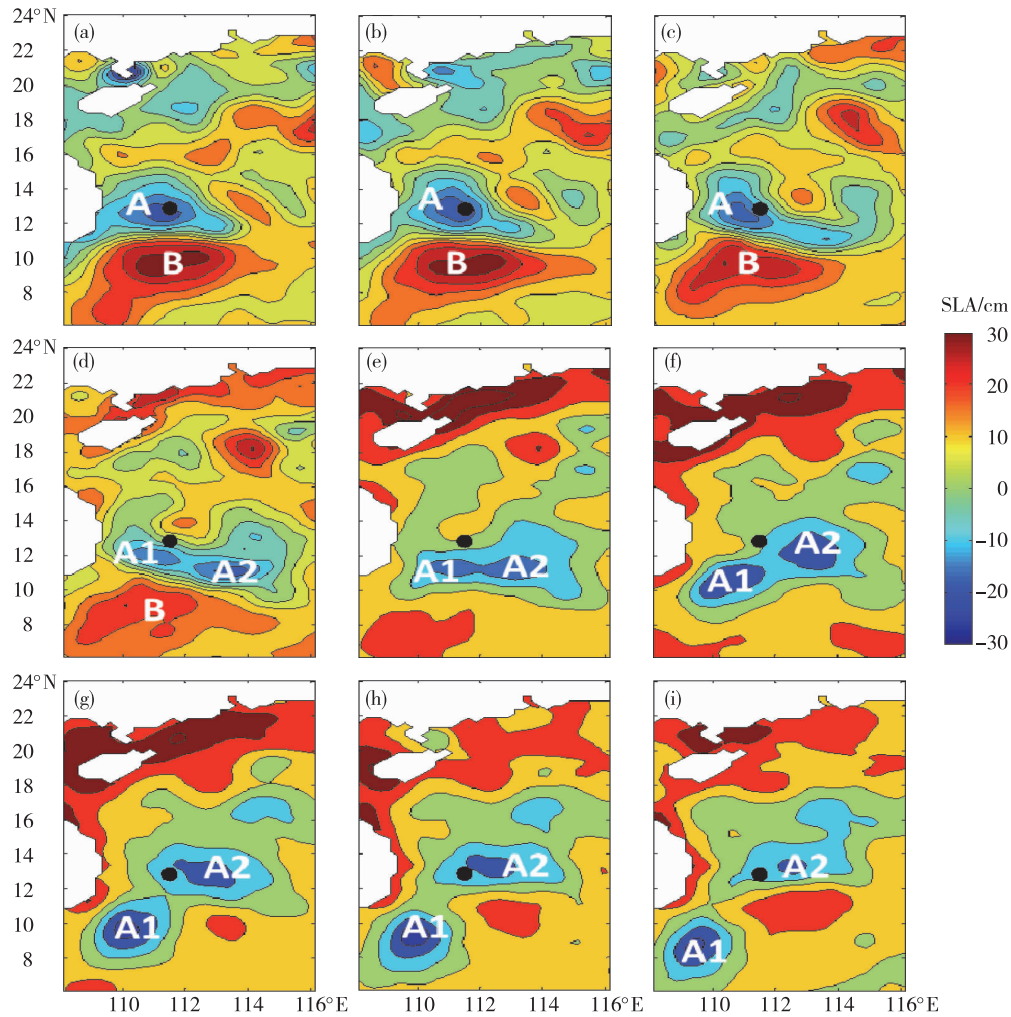


图 2 第 1 个中尺度涡(冷涡)期间(2012 年 9—10 月)海表面高度异常 SLA(单位:cm)(a. 9 月 1 日,b. 9 月 9 日,c. 9 月 17 日,d. 9 月 25 日,e. 10 月 1 日,f. 10 月 9 日,g. 10 月 17 日,h. 10 月 25 日,i. 11 月 1 日)

Fig.2 SLA (unit: cm) during the first mesoscale eddy ( from September to October 2012)(a. Sep. 1st, b. Sep. 9th, c. Sep. 17th, d. Sep. 25th, e. Oct. 1st, f. Oct. 9th, g. Oct. 17th, h. Oct. 25th,i. Nov. 1st)

标站位水文的影响也会迅速减弱。

在 2013 年 9 月期间(图 5a-i),与 2012 年 9 月相似,在中南半岛以东海域出现偶极子现象。11°N 以北为冷涡 E,11°N 以南为暖涡 F。此次冷涡 E 强度较弱(涡中心与最外围闭合等值线的高度差为 10 cm),持续时间较短(24 d 左右),对潜标站位的影响较弱。在这段时间内,冷涡 E 相对潜标站位静止,并没有太大移动,10 月初冷涡 E 消失。

此次观测期间出现的 3 个中尺度涡均属于南海典型中尺度涡,类似的中尺度涡在前人研究工作中均有提及。例如,对于每年 9 月出现的冷涡结构及伴随其出现的偶极子结构,Hwang 等<sup>[3]</sup>、Wang 等<sup>[1]</sup>、程旭华等<sup>[2]</sup>利用长时间的卫星高度计数据,统计南海中尺度涡也发现类似冷涡现象。在冷涡对环境的影响方面,钟超等<sup>[6]</sup>研究了南海西部浮游

植物对于此冷涡的响应。在 5 月暖涡及暖涡对结构研究方面,Chu 等<sup>[11]</sup>利用 1995 年 5 月在南海进行的温度调查数据,证明南海中央暖池结构的存在,Hwang 等<sup>[3]</sup>和程旭华等<sup>[2]</sup>的统计工作中也提到类似暖涡及暖涡对结构的存在。前人的研究有力地支撑了文中的分析,然而,前人的研究仅仅提到了上述中尺度涡的存在,很少就中尺度涡和环境场的相互影响做深入分析,此文将利用长时间的现场潜标观测数据对上述过程及研究海域深层环流的特征进行深入分析。

### 2.2 观测站位附近中尺度涡的形成机制分析

在 4 月、5 月期间所出现的暖涡对结构(之后合并为一较强的暖涡),其出现时期正是西南季风爆发期<sup>[12]</sup>,即为春-夏季风转换期。在这期间产生的较强风应力旋度使南海中央海水形成反气旋流动,

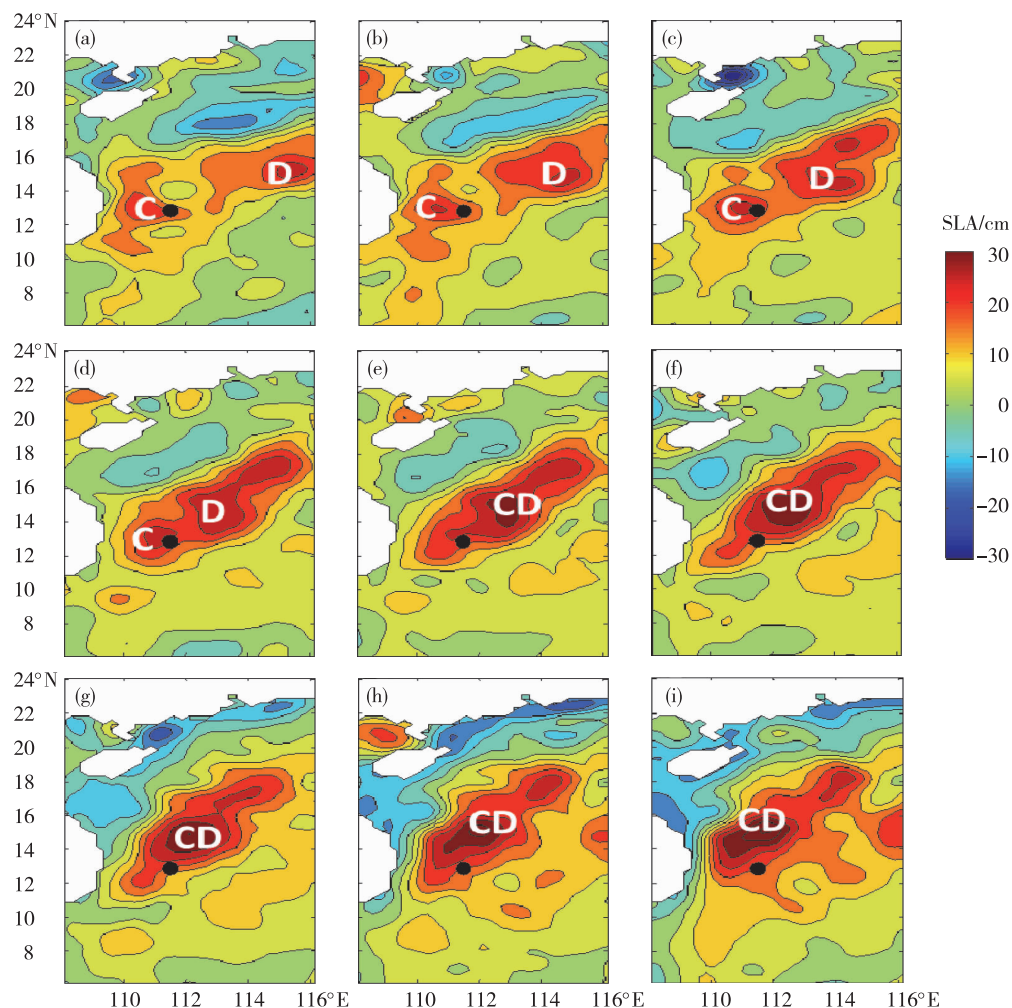


图3 第2个中尺度涡(暖涡)期间(2013年4—5月)海表面高度异常SLA(单位:cm)(a. 4月1日,b. 4月9日,c. 4月17日,d. 4月25日,e. 5月1日,f. 5月9日,g. 5月17日,h. 5月25日,i. 6月1日)

Fig.3 SLA (unit: cm) during the second mesoscale eddy (from April to May 2013) (a. Apr. 1st, b. Apr. 9th, c. Apr. 17th, d. Apr. 25th, e. May 1st, f. May 9th, g. May 17th, h. May 25th, i. Jun. 1st)

导致中尺度涡暖涡现象的出现。Chu等<sup>[13]</sup>利用ECMWF(European Center for Medium-range Weather Forecast)风应力旋度和NCEP SST数据,得到海面风应力旋度与海表面温度异常有很大的正相关性,证明风应力旋度导致了南海中央暖涡的形成。此外,反气旋环流引发的下降流阻碍深层海水的向上运动,也起到了加强南海中央暖涡的效应。

在2012年9月和2013年9月都出现的越南冷涡现象表明,此冷涡是有规律的年循环现象。同时2013年的冷涡比2012年的冷涡要弱,表明冷涡的强度有年际变化规律。该冷涡的形成原因是:西南季风存在向北的分量,因埃克曼效应在中南半岛外海产生离岸流,从而引发深层冷水补充上涌,形成冷涡结构,冷涡的产生时间可向前追溯到8月。9月下旬冷涡出现的时期一般伴随有偶极子结构(在

南部有一暖涡结构),同时也正是西南—东北季风相互转换的时期,在中南半岛外海有较强的东风向风。此期间,在东风向以南产生的负风应力旋度促使暖涡的形成。

### 2.3 中尺度涡对上层海洋温度的影响

绘制潜标所在站位处的温度时间序列和温度异常时间序列,可以获得中尺度涡对于该海域温跃层的影响。为此,首先利用WOA13温度数据,计算得到潜标所在海域主温跃层典型深度为150 m,主温跃层典型温度值为17℃。因此,使用17℃等温线代表潜标站位所在海域的主温跃层深度。图6是绘制潜标所在站位处400 m以浅的温度时间序列和温度异常时间序列。由图6a可见,在2012年9—10月和2013年9—10月期间,受中尺度涡冷涡的影响,主温跃层深度变浅,最浅时为100 m,环境温度

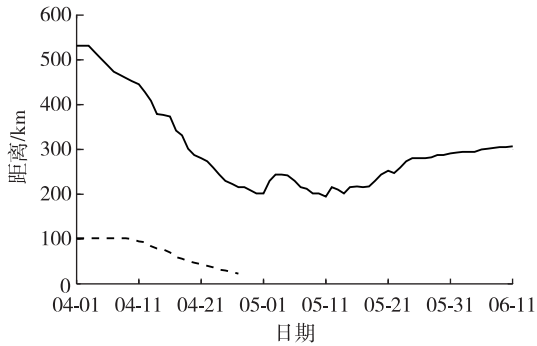


图 4 2013 年 4—6 月,暖涡期间涡中心与潜标站位的距离(单位:km)(实线表示暖涡 D 与站位距离;虚线表示暖涡 C 与站位距离;4 月 27 日暖涡 C 完全并入暖涡 D,对应的暖涡 C 涡中心与站位的距离不再统计)

Fig.4 Distance (unit: km) between the warm-eddy center and the mooring site during the warm-eddy from April to June 2013 (The solid line denotes the distance between the center of warm-eddy D and the site; the dashed line denotes the distance between the center of warm-eddy C and the site; On April 27, as the warm-eddy C fully incorporates into the warm-eddy D, the distance between the warm-eddy C and the site is given up counting)

降低;在 2013 年 4—6 月期间,受中尺度涡暖涡的影响,主温跃层深度变深,最深时达到了 180 m,环境温度升高。在不受中尺度涡影响的时间段里,主温跃层深度稳定在 150 m 左右。由此可以得到结论:在该海域,受中尺度涡的影响,主温跃层深度水下浮动最大振幅可达 50 m。由温度异常时间序列图 6b 可见,在中尺度涡影响期间,主温跃层附近出现较大的温度异常值,且冷涡导致的温度异常影响深度大于暖涡导致的温度异常影响深度。在 2012 年 9—10 月期间和 2013 年 9—10 月期间,冷温度异常影响深度分别达到 380 m 和 400 m。而在 2013 年 4—6 月期间,暖温度异常影响深度最深仅达到 350 m;在上混合层以及主温跃层附近,温度异常最大值达到 4 °C,随着深度的增加,温度异常值逐渐减小,表明随着深度的增加,中尺度涡对温度的影响作用逐渐减弱。

#### 2.4 中尺度涡对上层海洋流场的影响

基于潜标上 ADCP 所测得流速数据,结合 SLA 数据,可以分析潜标站位处垂向各层流场随时间的变化情况。图 7 是潜标上 ADCP 所测得 800 m 以浅各层流速的变化图,时间间隔为 1 d。由图 7 可见,2012 年 9—10 月,潜标站位所在海域受冷涡的影响,9 月上半月,冷涡在这段时间内向西北方向移

动,但站位的位置始终位于冷涡的东北部,因此在表层 100 m 对应的流场为西北方向。随着深度的增加,流速方向在下层逐渐转为正北方向,可能原因是该冷涡的垂向结构随深度增加发生倾斜,导致流场方向也产生相应的变化。虽然流场方向随深度增加有相应的变化,但流速大小变化不大,表明该冷涡能一直影响到站位所在海域中层的海水。10 月下半月—11 月初,潜标站位位于冷涡的西部,对应的流速方向为向南流动。

2013 年 4—5 月,潜标站位所在海域受暖涡的影响。潜标站位位于西侧暖涡右边,100 m~800 m 层的流速方向向南。4 月末—5 月初,西侧暖涡与东侧暖涡合并成一个较强的中尺度暖涡,此时站位位于暖涡西南部,对应 100 m~800 m 层流速方向为西北方向。随着暖涡向西移动,潜标站位位置变为暖涡东部,对应 100 m~800 m 层流速方向为正南方向。

2013 年 9 月,潜标站位所在海域受冷涡影响。潜标站位位于冷涡的西部,对应 100 m~800 m 层流速方向为正南方向。该冷涡的强度较弱(冷涡中心与外围等值线高度差约为 9 cm),持续时间较短(24 d 左右),因此这段时间内向南的流速较小。

中层(800 m)流速的大小受中尺度涡影响时段明显大于不受中尺度涡影响时段。中尺度涡影响期间,中层流速方向与表层流速方向基本一致,100 m~800 m 层的流速大小随深度变化不大;而受中尺度涡影响期间,100 m~800 m 层的流速大小随深度增加迅速减小(如 2012 年 12 月—2013 年 2 月),表明上、中层的海水流速受中尺度涡影响显著。

#### 2.5 中尺度涡对深层海洋温度的影响

利用 1 500 m 和 2 000 m 的 CTD 所测得的深层温度,绘制海域深层温度时间变化序列以及温度异常时间序列,结合潜标站位 SLA 数据,分析中尺度涡对于深层海水温度的影响。图 8a 和图 8b 给出了 1 500 m 和 2 000 m 深度处 CTD 获得的温度时间序列。由图 8a-b 可见,第 1 次冷涡期间(2012 年 9 月),1 500 m 温度有所上升,温度异常值达到 +0.17 °C,与表层负的温度异常值相反,与潜标站位海面高度异常变化成负相关关系。结合 CTD 仪器深度变化,分析其原因为:中尺度涡会对深层海水产生垂向抽吸作用,2012 年 9 月冷涡期间,气旋涡经过潜标系统而影响到其姿态,使 CTD 所测温度产生正异常值(1 500 m 的 CTD 深度向上抬升了 20 m,2 000 m 的 CTD 深度向上抬升了 4 m)。在暖涡最

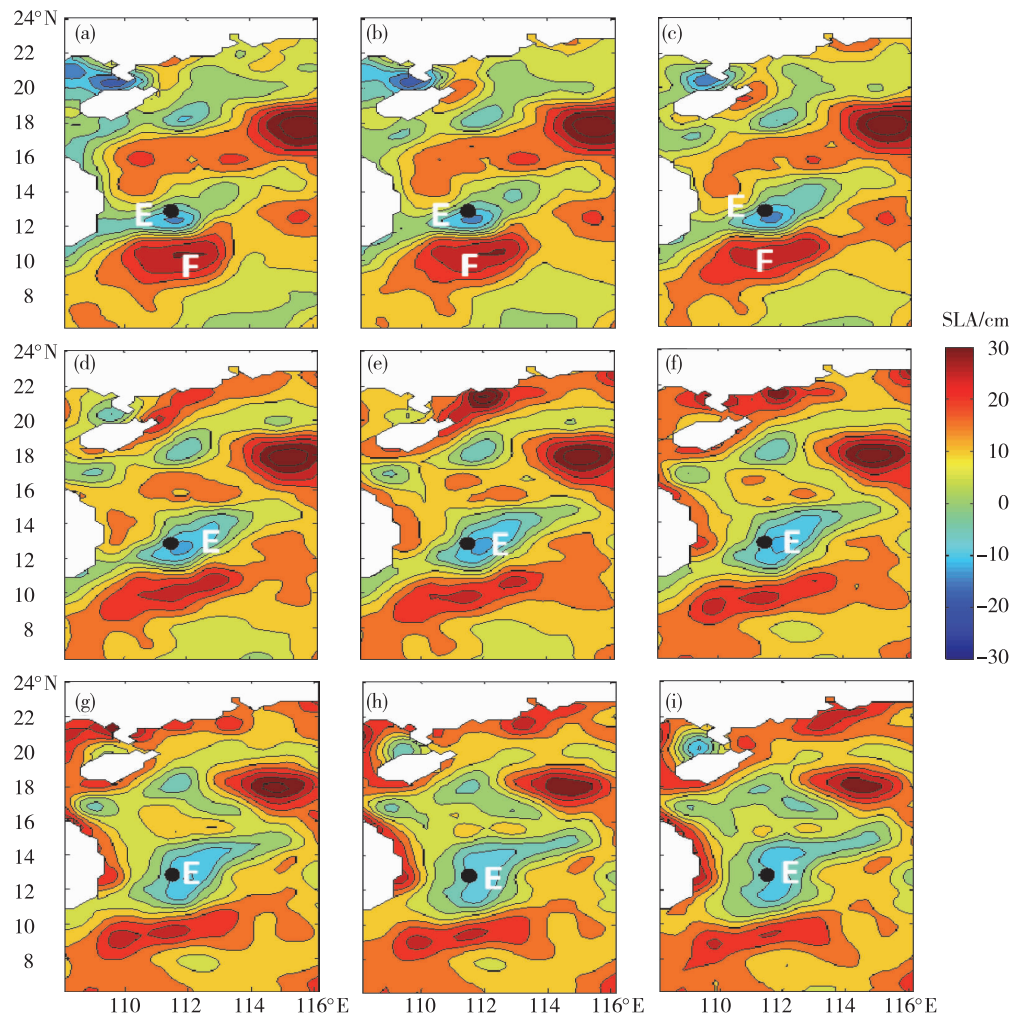


图5 第3个中尺度涡(冷涡)期间(2013年9月)海表面高度异常SLA(单位:cm)(a. 9月10日, b. 9月13日, c. 9月16日, d. 9月19日, e. 9月22日; f. 9月25日, g. 9月28日, h. 10月1日, i. 10月3日)

Fig.5 SLA (unit: cm) during the third mesoscale eddy (in September 2013) (a. Sep. 10th, b. Sep. 13th, c. Sep. 16th, d. Sep. 19th, e. Sep. 22th, f. Sep. 25th, g. Sep. 28th, h. Oct. 1st, i. Oct. 3rd)

强盛期间(2013年5月), 1500 m处的温度异常值为正(达到+0.19℃), 与站位海表面高度异常变化成正相关关系, 其原因为: 反气旋暖涡期间, 海表面高度抬升, 产生下降流, 将上层暖水带入深层; 同时结合CTD深度分析, 在此暖涡最强盛期间, CTD深度仍保持在1500 m左右(原因可能与仪器所受浮力有关), 因此此次CTD所测温度受CTD深度变化的影响不大, 仅与下降流有关。在第2次冷涡期间(2013年9月), 1500 m深度并没有出现明显的温度异常, 结合前文分析, 再次证明此次冷涡强度较弱, 对深层海水影响不大。

图9a-c给出了潜标站位100 m、1500 m和2000 m温度异常变化分别与潜标站位SLA变化的对比图, 探索了上层、下层温度异常变化与站位SLA变化之间的相关关系。进一步计算100 m、1500 m

和2000 m温度异常变化与站位SLA变化的相关系数分别为74.65%、43.54%和37.26%, 可以得出: 上层海水温度异常变化与站位SLA变化成明显的正相关关系, 随着深度的增加, 相关性减弱, 在深层海洋, 相关性低于50%。分析原因: 表层海水受中尺度涡影响, 暖涡时海表面抬升, 冷涡时海表面下沉, 从而出现较大的正相关关系; 结合前文分析, 较强的中尺度涡能影响到深层海水(1500 m以下), 而较弱的中尺度涡对于深层海水的影响较小, 且涡的经过而导致CTD深度的变化而测得与表层相反的温度异常变化, 从而导致温度异常变化与站位SLA变化的相关性随深度增加逐渐减弱。

## 2.6 中尺度涡对深层海洋流场的影响

图10a-b给出了潜标站位单点1500 m和2000 m深处海流计所测的流速数据, 体现了中尺度涡对

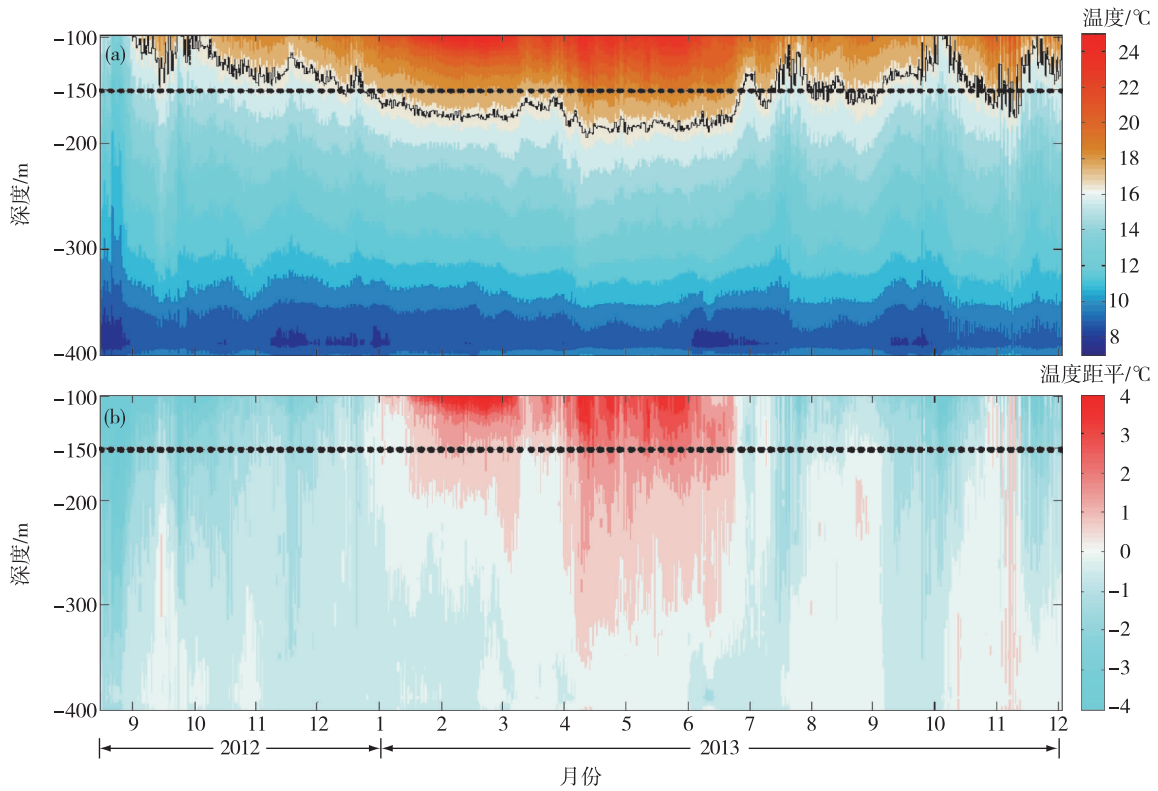


图 6 站点温度时间序列(a,黑实线表示 17 °C 等温线)和站点温度异常时间序列(b,原始温度时间序列减去各层平均温度)(黑虚线为 150 m 深度所在位置)

Fig.6 Temperature (unit: °C) time series at the site (a, the black solid line denotes the 17 °C isotherm) and temperature anomaly (unit: °C) time series at the site (b, calculated by subtracting the mean temperature of the observed temperature series) (The black dashed lines in each plot are the isobaths of 150 m)

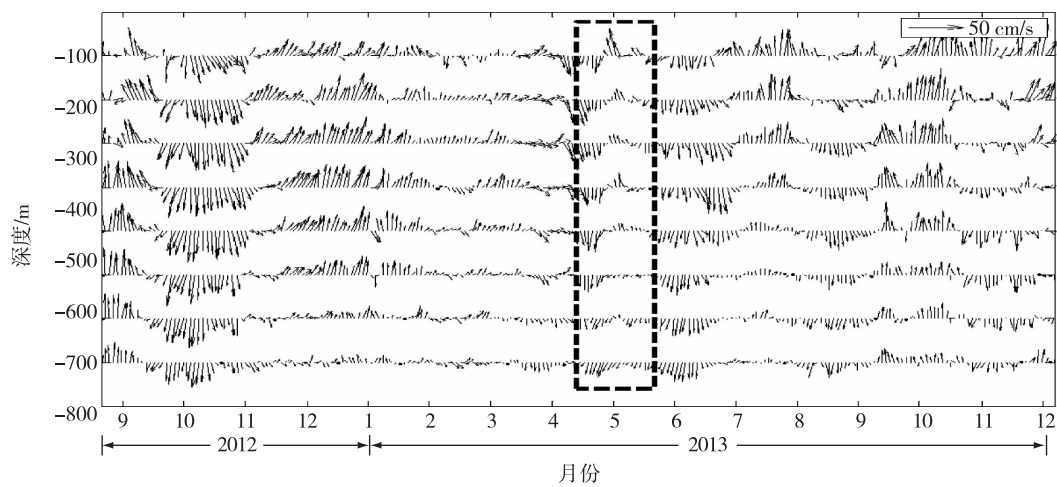


图 7 站点各层速度矢量分布(箭头向上方向为正北方向,单位:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;虚框中为 2013 年 4 月底中尺度涡 C 和中尺度涡 D 合并时的流速变化情况)

Fig.7 Stick plots of the velocity at different depths at the mooring site (unit:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; The upward direction of stick represents northward. The velocity in the black frame indicates the variation of velocity during the period of the warm-eddy C merging with the warm-eddy D)

于深层环流的影响。第 1 次中尺度涡冷涡期间(2012 年 9—10 月),深层 1 500 m 流场为先向东北

流动后转为向南流动,而表层 100 m 流场为先向西北方向流动后转为向南流动,结合前文分析,表明



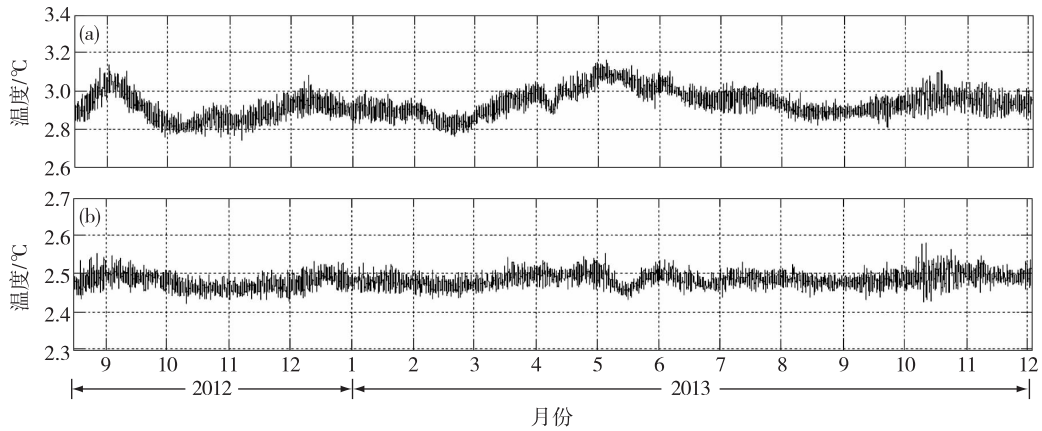


图8 1500 m(a)和2000 m(b)温度时间序列(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig.8 Temperature time series (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) at 1500 m (a) and 2000 m (b)

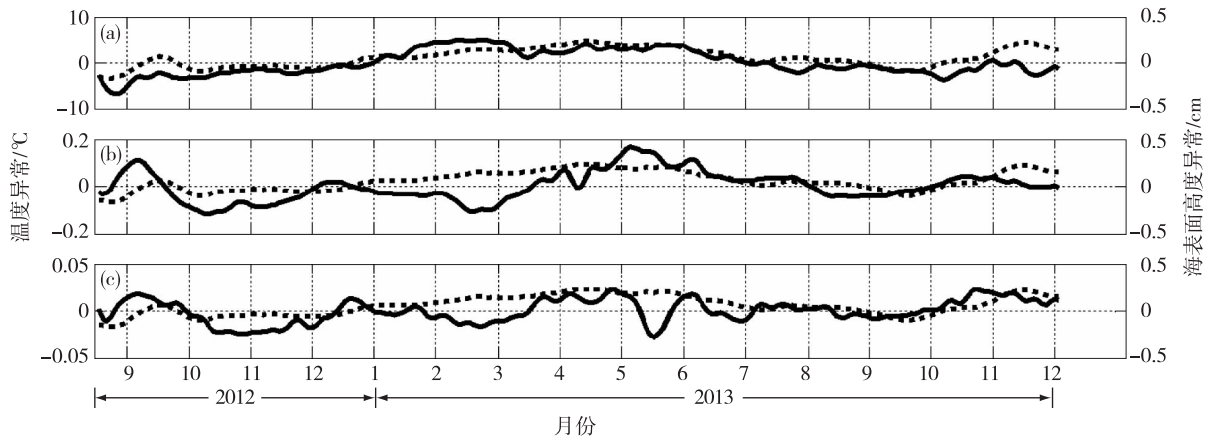


图9 站位100 m层(a)、1500 m层(b)和2000 m层(c)温度异常(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )变化与SLA(单位: cm)变化对比(黑虚线为SLA变化;黑实线为各层温度异常变化)

Fig.9 The comparison between SLA (cm) and temperature anomaly (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) at 100 m (a), 1500 m (b) and 2000 m (c) (The black dashed line indicates the SLA at the site; the black solid lines indicates temperature anomaly at the different depths)

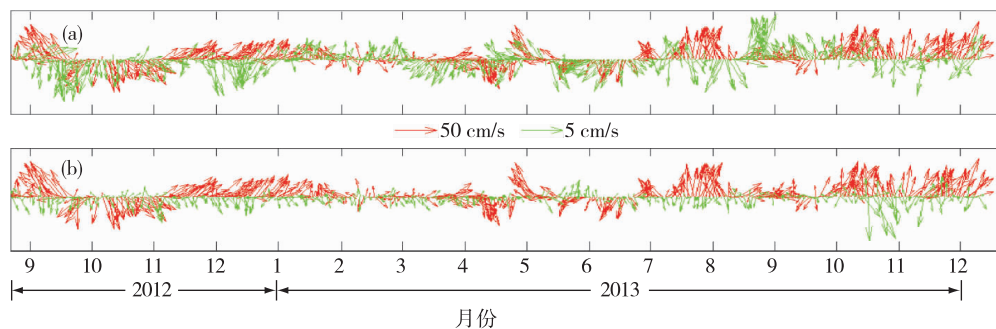


图10 1500 m流速(单位:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )与表层100 m流速(单位:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )对比(a)及2000 m流速(单位:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )与表层100 m流速(单位:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )对比(b)(红色箭头为表层流速,绿色箭头为深层流速)

Fig.10 The comparison between velocity (unit:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 1500 m and that at 100 m (a), and the comparison between velocity (unit:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 2000 m and that at 100 m (b) (The green stick indicates the deepwater velocity; the red stick indicates the upper water velocity)

该冷涡虽然能影响到深层,但涡的垂向结构可能随深度增加发生了倾斜。在中尺度涡暖涡期间(2013年4—5月),1 500 m 流场方向随时间变化情况与表层 100 m 流场相似,表现为先向南流动,再转为西北流动,最后转为向南流动,证明此次中尺度涡暖涡能显著影响到1 500 m 的环流场。在第2次中尺度涡冷涡期间(2013年9—10月),1 500 m 流场方向与表层 100 m 基本不同,表明此次较弱的冷涡对于1 500 m 流场没有明显影响。中尺度涡期间,2 000 m 深处的流场变化规律与表层流场完全不同,表明中尺度涡不会对2 000 m 流场产生明显影响。中尺度涡会对深层环流产生影响,但同时深层环流也存在自身的运动规律,论文第3部分将具体分析深层环流的时间变化特征。

### 3 深层海流的变化

#### 3.1 深层海流的周期性变化

潜标观测的深层海流时间序列数据为半小时记录一次。图 11a-f 给出了1 500 m 和2 000 m 深层海流南北流速、东西流速、总流速角度的时间序列

及其日平均曲线,体现了深层海流的时间变化特征。原始数据相对于其日平均时间序列波动明显,表明深层海流受潮汐作用影响显著<sup>[14-16]</sup>。1 500 m 处海流流向与南北、东西向流速的相关系数分别为 2.56%和-69.19%;2 000 m 处海流流向与南北、东西向流速的相关系数分别为 1.02%和-66.69%,表明潮汐作用主要影响东西向流速的变化。1 500 m 和2 000 m 处南北(东西)向的流速平均值分别为  $-0.59 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-1.45 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ( $-0.42 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.43 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )。在南北方向上,2 000 m 的流速要大于1 500 m 的流速;在东西方向上,2 000 m 的流速与1 500 m 的流速在数值上基本相同,但方向相反。因此,对于中南半岛深层海洋海流,1 500 m 处的流速方向与2 000 m 处的流速方向并不相同。

利用小波分析法,分析潜标观测深层流速的时间变化特征,图 12a-d 给出了1 500 m 和2 000 m 深层海流的小波分析图。结合小波全谱图分析,在1 500 m 和2 000 m 的深层海流场,都存在有较强的2 d 短周期信号;对于长周期信号,较强的信号在15 d 以上,且长周期信号随季节变化明显。在1 500 m

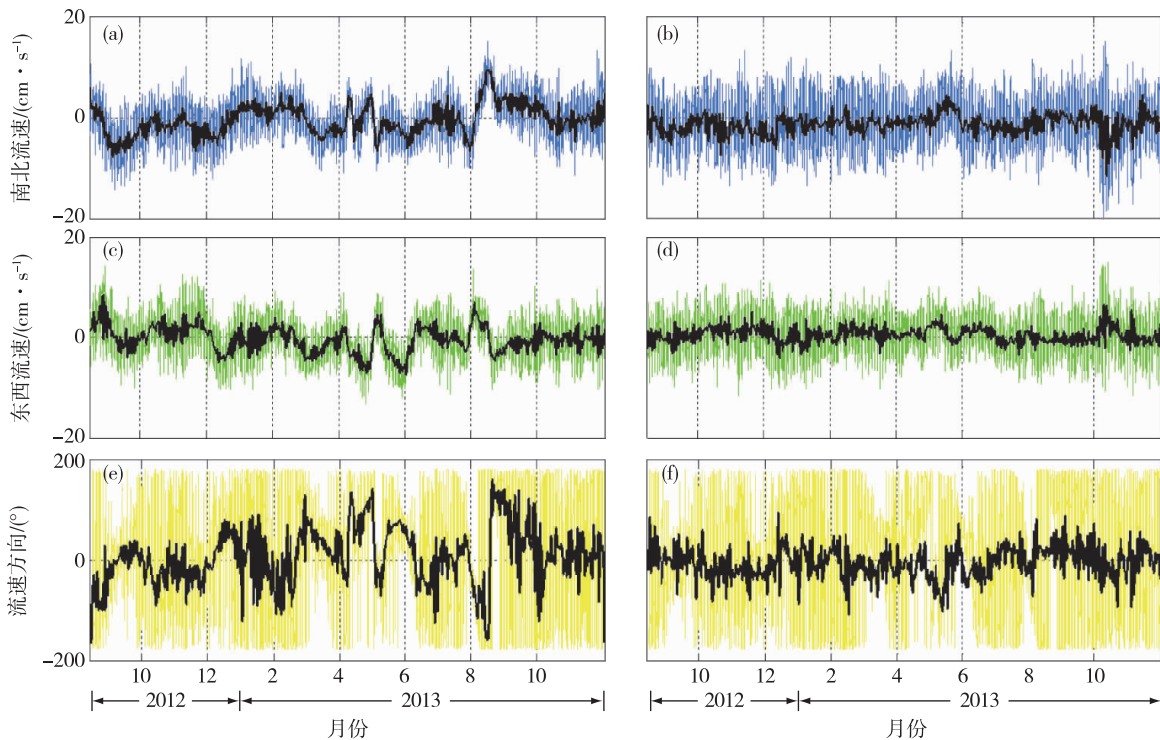


图 11 深层海流南北流速(单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )、东西流速(单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )、流速方向(单位: $^{\circ}$ )时间序列图(a. 1 500 m 层的流场南北流速, b. 2 000 m 层的流场南北流速, c. 1 500 m 层的流场东西流速, d. 2 000 m 层的流场东西流速, e. 1 500 m 层的流场流速方向, f. 2 000 m 层的流场流速方向;黑线为日平均)

Fig.11 Deepwater south-north velocity (unit:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ), east-west velocity (unit:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ), velocity direction (unit:  $^{\circ}$ ) (a. 1 500 m south-north velocity, b. 2 000 m south-north velocity, c. 1 500 m east-west velocity, d. 2 000 m east-west velocity, e. 1 500 m velocity direction, f. 2 000 m velocity direction. The black lines indicate daily mean time series)

层,较强的长周期信号(大于 15 d)出现在夏秋季;在 2 000 m 层,较强的长周期信号出现在冬季。

因此,得出结论:深层流场的变化主要表现为季节变化,体现为 15 d 以上的周期变化。

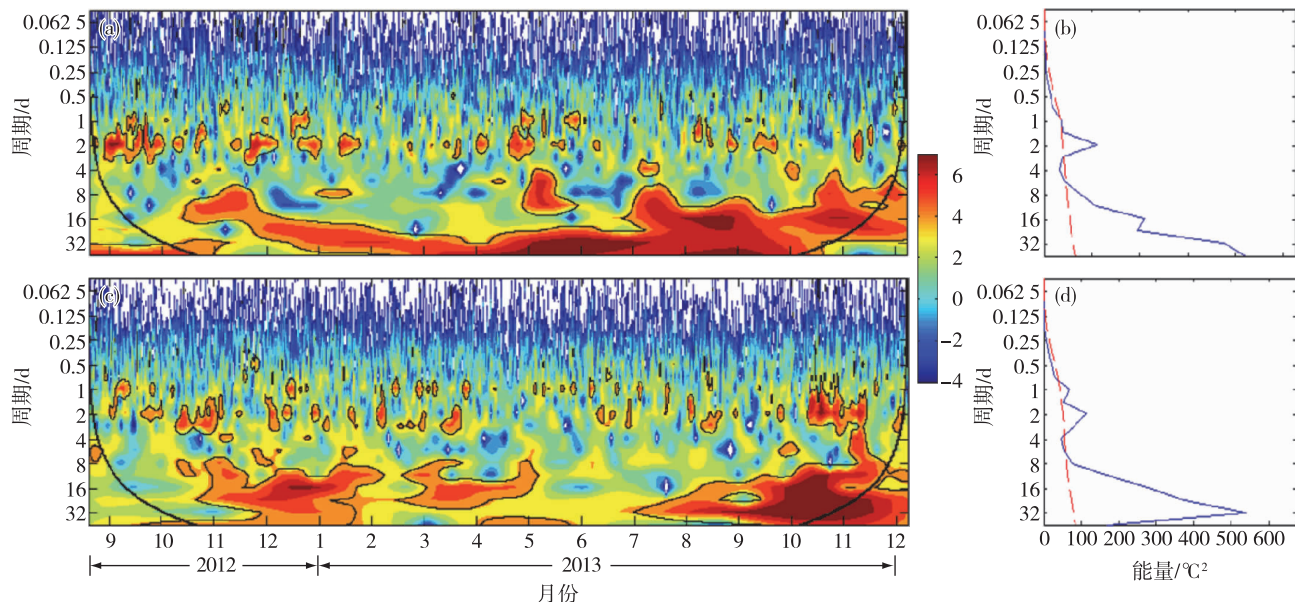


图 12 1 500 m 流速小波分析图(a)和对应的小波全谱(b)及2 000 m 流速小波分析图(c)和对应的小波全谱(d)(图 a、c 中的黑实线与图 b、d 中的红虚线表示 95%的置信度)

Fig.12 The wavelet analysis of 1 500 m velocity (a) and global wavelet spectrum of 1 500 m velocity (b), wavelet analysis of 2 000 m velocity(c) and global wavelet spectrum of 2 000 m velocity (d) (The black solid lines in figure a, c and the red dashed lines in figure b, d both indicate the 95% confidence level)

### 3.2 深层海流的季节性变化

为分析深层流场的季节变化规律,对潜标深层流速、深层温度进行 15 d 和 120 d 低通滤波,时间序列见图 13a-c。观测期间,1 500 m 流速较大(大于  $7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )的时期为:2012 年 9—10 月,2013 年 5—

6 月,2013 年 9 月。在时间上与中尺度涡发生时间相对应,表明中尺度涡能影响 1 500 m 的海水流速;同时,结合 1 500 m 的小波分析图,在 2013 年 5 月暖涡最强盛期间,流速出现强的 30 d 周期震荡。在 2012 年 9 月冷涡最强盛期间,因受小波分析边缘效

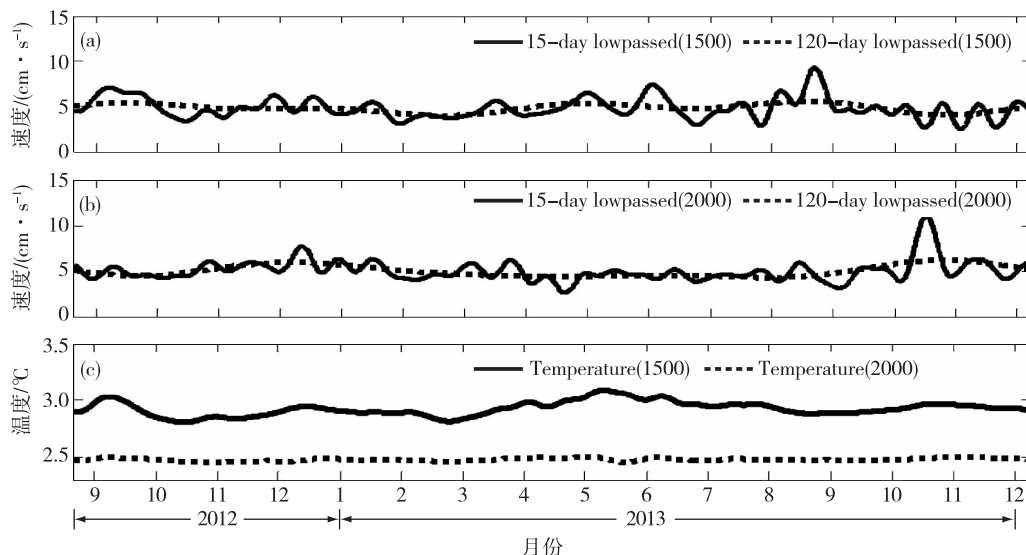


图 13 1 500 m(a,单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )和2 000 m 流速(b,单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )的 15 d 和 120 d 低通滤波时间序列及 1 500 m 和 2 000 m 温度(c,单位:  $^{\circ}\text{C}$ )的 15 d 低通滤波时间序列

Fig.13 The 15-day and 120-day low-passed velocity (unit:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 1 500 m (a) and 2 000 m (b); the 15-day low-passed temperature (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) at 1 500 m and 2 000 m (c)

应的影响,无法分析这段时间内1 500 m 深层环流的周期震荡规律。2 000 m 流速较大的时间为每年的11月—次年1月,流速最大时可达 $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;流速较小的时间为每年的4月—6月,流速最小时仅为 $2.8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。结合2 000 m 流速小波分析图,冬季出现强的15 d 以上周期震荡特征。因此,得出深层海流周期变化规律:1 500 m 层流场会受强中尺度涡影响,在中尺度涡发生期间出现30 d 周期的震荡;2 000 m 层流场不受中尺度涡影响;2 000 m 层流场变化规律以季节变化为主,夏季流速较小,冬季流速较大;2 000 m 层流场在冬季出现强的15 d 以上周期震荡。

图14给出了1 500 m 和2 000 m 深度处的潜标观测流速的月平均值分布。从深层海流的时间变化特征来说,1 500 m 处,流速季节变化较明显,9月—次年2月流速较小,平均流速为 $2.3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;3—8月,除7月流速小于 $2.3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以外,其他月份流速均在 $3.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。2 000 m 处,冬季流速最大(达到 $2.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ),平均流速为 $2.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。分析表明:中南半岛以东南海1 500 m 处深层海流月平均流速夏季大于冬季;2 000 m 处深层海流最大流速出现在冬季。

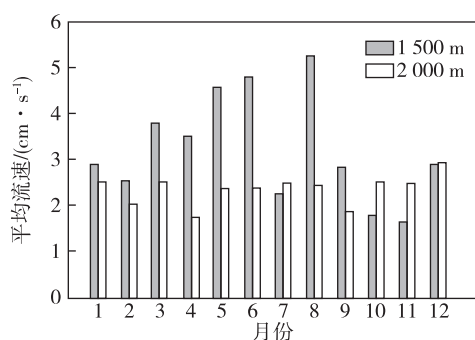


图14 1 500 m 和2 000 m 月平均流速分布(单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 14 The distribution of the monthly mean velocity (unit:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 1 500 m and 2 000 m

## 4 结论

基于潜标资料和SLA数据,采用低通滤波、小波分析、相关分析方法,分析了中南半岛外海典型中尺度涡的运动规律和垂向特性,该海域深层海流的季节变化规律,以及该海域中尺度涡对深层海流的影响。得到如下主要结论:

1)在观测期间一共捕捉到3次中尺度涡现象:第1次和第3次为每年9月出现的越南冷涡现象,

并伴随有冷暖涡偶极子现象;第2次为5月出现的南海中央暖涡及暖涡对结构现象。

2)观测期间中尺度涡对站位所在海域主温跃层深度变化的最大影响振幅可达50 m。观测站位所在海域各深度的温度异常时间变化与站位SLA时间变化的相关性随深度增加逐渐减弱。

3)上、中层的海水流动受中尺度涡影响明显。受中尺度涡影响期间,100 m~800 m 层流速大小随深度变化不大;不受中尺度涡影响期间,100 m~800 m 内流速大小随深度迅速减小。

4)1 500 m 和2 000 m 的深层环流主要表现为季节变化。在强中尺度涡暖涡经过期间,中尺度涡能影响到1 500 m 的海流场,同时出现30 d 周期震荡;2 000 m 流场则不受中尺度涡影响。

5)中南半岛以东南海1 500 m 处深层环流月平均流速夏季大于冬季,月平均可达 $3.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;2 000 m 处深层环流最大流速出现在冬季,月平均可达 $2.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。深层海流受潮汐影响显著,潮汐作用主要影响深层环流东西向流速的变化。

## 参考文献:

- [1] Wang G H, Su J, Chu P C. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(21):1-4.
- [2] 程旭华,齐义泉,王卫强.南海中尺度涡的季节和年际变化特征分析[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(4):51-59. DOI:10.3969/j.issn.1009-5470.2005.04.008.
- [3] Hwang C, Chen S A. Circulations and eddies over the South China Sea derived from TOPEX/Poseidon altimetry [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012)*, 2000, 105(C10):23943-23965.
- [4] Wang G H, Chen D, Su J. Winter eddy genesis in the eastern South China Sea due to orographic wind jets [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2008, 38(3):726.
- [5] Tian J W, Qu T D. Advances in research on the deep South China Sea circulation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(24):3115-3120.
- [6] 钟超,肖武鹏,黄邦钦.中国南海西部浮游植物对中尺度涡的响应[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(2):213-220. DOI:10.3969/j.issn.1671-6647.2013.02.007.
- [7] Zhang Z W, Zhao W, Tian J, et al. A mesoscale eddy pair southwest of Taiwan and its influence on deep circulation [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2013, 118(12):6479-6494.
- [8] 王斌.吕宋海峡及南海深层环流的观测与数值模拟研究及机制分析[D].青岛:中国海洋大学,2012.

- [9] Wang G H, Xie S, Qu T, et al. Deep South China Sea circulation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38 (5):3115-3120.
- [10] Zhou C, Zhao W, Tian J, et al. Variability of the deep water overflow in the Luzon Strait[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2014, 44:2972-2986.
- [11] Chu P C, Fan C, Lozano C J, et al. An airborne expendable bathythermograph survey of the South China Sea, May 1995 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012)*, 1998, 103(C10): 21637-21652.
- [12] 阎俊岳. 南海西南季风爆发的气候特征[J]. *气象学报*, 1997, 55(2):174-186.
- [13] Chu P C, Lu S, Chen Y. Temporal and spatial variabilities of the South China Sea surface temperature anomaly [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012)*, 1997, 102(C9): 20937-20955.
- [14] 朱晓婷,陈学恩. 南海西部海流和温度长期定点观测分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2014, 44 (4):15-21.
- [15] 展鹏,陈学恩,胡学军,等. 夏季长江口外东海海域实测海流资料分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(8): 34-42. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5174.2010.08.005.
- [16] Chao S Y, Shaw P T, Wu S Y. Deep water ventilation in the South China Sea [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1996, 43 (4): 445-466.