

旷芳芳, 潘爱军, 张俊鹏, 等. 基于潜标观测的吕宋海峡以东深海潮流特征研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(1): 55–60. doi:10.12284/hyxb2021031

Kuang Fangfang, Pan Aijun, Zhang Junpeng, et al. Characteristics of abyssal tidal currents east of the Luzon Strait: Cast study from *in situ* observation[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(1): 55–60. doi:10.12284/hyxb2021031

基于潜标观测的吕宋海峡以东深海潮流特征研究

旷芳芳¹, 潘爱军^{1*}, 张俊鹏¹, 黄奖¹, 蔡尚湛¹

(1. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

摘要: 本文使用吕宋海峡以东的潜标观测的长达 1 年的海流数据, 重点对该海域海流的高频波动(潮流)的垂向分布及其时间变化特征进行了分析, 结果表明: 该海域次表层(100~160 m)的潮动能比中层(1 550 m)和深层(2 560 m)大 1~2 个数量级, 近底层(4 040 m)的潮动能略大于中、深层; 次表层为不正规半日潮流, 中、深层为不正规全日潮流; 各层次潮动能均在夏季(6–9 月)和冬季(2–3 月)增强, 与 M_2 分潮和 K_1 分潮在夏季和冬季的增强相对应; 各层次海流的高频波动以顺时针旋转为主, 次表层海流近惯性周期接近当地理论惯性周期, 中、深层略小于当地理论惯性周期。

关键词: 西太平洋; 潜标观测; 深海潮流

中图分类号: P733.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)01-0055-06

1 引言

由于深海潜标能提供长时间序列的海流的直接观测资料, 对深海海流的研究具有重要作用。于克哲^[1]使用磁罗海流计在千米潜标系统南海试验期间获取的深海海流资料, 对该海域深层海流进行了初步分析, 提出了潮流和余流的运动规律; Zhai 等^[2]使用菲律宾以东的深海潜标数据分析了近底层海流和潮流的季节变化特征; 在南海, 多名学者通过定点观测海流资料分析了观测海区的正压潮和内潮等特征^[3-9]。

深层海洋与上层海洋存在着不同的动力环境和机制, 近年来深海在全球海洋气候变化中的作用得到越来越多海洋学家的重视, 深海对海洋热量的再分配引起了全球变暖的停滞^[10], 深刻影响着全球的气候变化。菲律宾海位于副热带西太平洋, 该海域上层有北赤道流、副热带逆流等多种流系交汇, 还是黑潮的源地, 在西太平洋海气相互作用以及气候变化等的研究中具有重要作用; 针对该海域表层和次表层已经有非常多的研究成果, 但对深海的综合环境信息仍知之甚

少。为了解吕宋海峡东侧深层海水的流动特征及其对深海生态的影响, 我们在该海域布放了 1 套深海潜标进行长期观测, 获得了长达 1 年的连续观测资料。以下将对潜标观测数据进行分析, 重点讨论该海域潮流的垂向分布以及时间变化特征。

2 数据和方法

2.1 数据介绍

潜标位于西太平洋吕宋海峡以东约 500 km 的菲律宾海(图 1a), 位置为 19.75°N, 126.75°E。全球地形数据 GEBCO 显示, 潜标所在位置水深约 5 300 m, 周边 50 km 的范围内水深为 4 800~5 810 m(图 1b), 局地地形西北-东南走向。在潜标上层水深 160 m 配置了 1 个 ADCP 海流剖面仪向上观测, 层间距为 4 m, 有效观测深度为 60~160 m, 本文中选取 100 m 和 160 m 两个层次代表次表层; 在 810 m、1 550 m、2 560 m 和 4 040 m 挂载了单点海流计观测深海和近底层的海流。海流的观测时间为 2015 年 6 月至 2016 年 6 月,

收稿日期: 2019-07-26; 修订日期: 2019-09-24。

基金项目: 大洋“十三五”资源环境类项目(DY135-E2-3-03, DY135-E2-2-02, DY135-E2-5-01)。

作者简介: 旷芳芳(1985—), 女, 湖南省衡阳市人, 助理研究员, 从事海洋环流数值模拟研究。E-mail: kuangfangfang@tio.org.cn

* 通信作者: 潘爱军, 男, 从事物理海洋学研究。E-mail: aijunpan@tio.org.cn

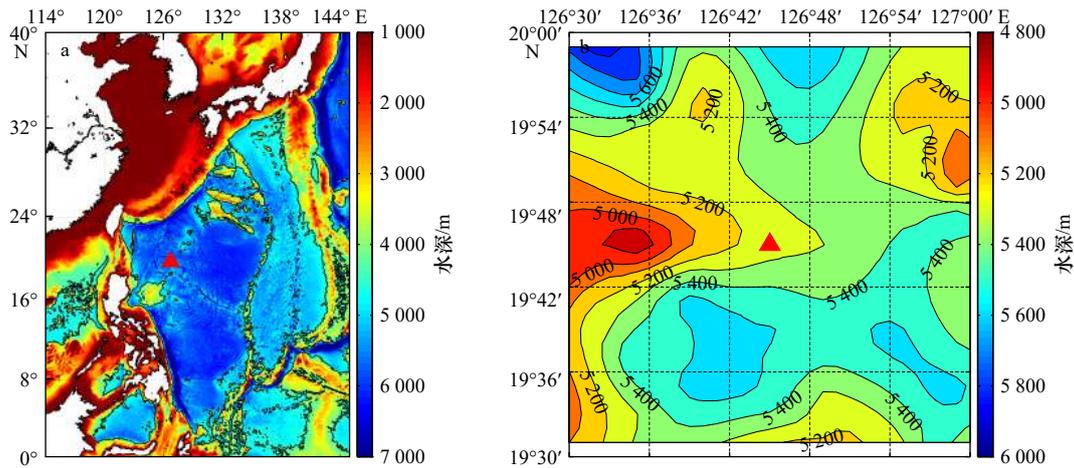


图1 潜标位置(a)和水深分布(b)

Fig. 1 Location of the mooring (a) and water depth around the mooring (b)

时间频率为 1 h^{-1} 。另外,使用 WOA2013 提供的季节平均的温盐数据计算观测点的浮力频率(图 2),其计算公式为

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \times \frac{d\rho}{dz}, \quad (1)$$

式中, N 为浮力频率; g 为重力加速度; ρ 为根据水温和盐度数据计算的位势密度。

可看到在 300 m 以浅冬季的层结相对较弱,跃层位于 50~200 m 的深度,300 m 以深季节变化不明显。

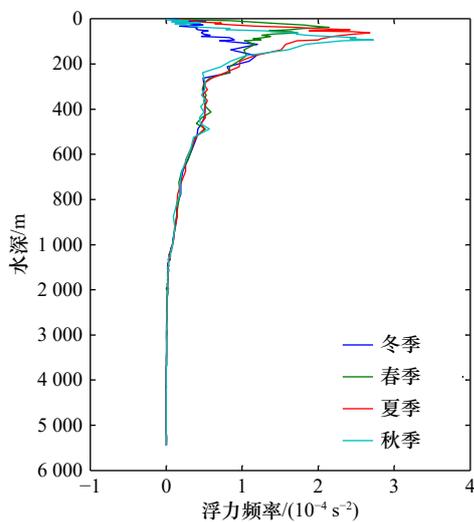


图2 通过 WOA2013 计算出的浮力频率剖面
Fig. 2 Vertical structure of buoyancy frequency calculated from data in WOA2013

2.2 潮流调和分析

使用 T_tide 程序^[1]对逐时的观测海流数据进行潮流的调和分析,计算主要分潮的潮流椭圆要素,包括长轴、短轴、倾角、相位和椭圆率。其中,长轴代表分潮的最大流速;短轴代表分潮的最小流速,当短轴为正值时表示逆时针旋转,短轴为负值时表示顺时

针旋转;倾角代表最大流速与东方向的夹角;椭圆率为短轴和长轴的比值。

2.3 动能计算公式

潮动能(Ke_{tide})和总动能(Ke_{all})的计算公式为

$$Ke_{\text{tide}} = \text{mean} \frac{1}{2} (u_{\text{tide}}^2 + v_{\text{tide}}^2), \quad (2)$$

$$Ke_{\text{all}} = \text{mean} \frac{1}{2} (u^2 + v^2), \quad (3)$$

式中, u 和 v 为观测的纬向流速和经向流速; u_{tide} 和 v_{tide} 为经 T_tide 程序提取的潮流流速。

2.4 潮流性质判断方法

通过计算潮流的形态数来判断潮流的性质,其计算公式为

$$a = (W_{K_1} + W_{O_1}) / W_{M_2}, \quad (4)$$

式中, a 为潮流形态数; W_{K_1} 、 W_{O_1} 和 W_{M_2} 分别为 K_1 、 O_1 和 M_2 分潮流的平均最大流速(即为潮流椭圆的长轴)。若 $a \leq 0.5$, 为正规半日潮流;若 $0.5 < a \leq 2$, 为不正规半日潮流;若 $2 < a \leq 4.0$, 为不正规全日潮流;若 $4 < a$, 为正规全日潮流。

3 结果与讨论

3.1 海流高频变化频谱特征分析

图 3 是各层次海流在高频段(3 d 以内)的旋转谱分析结果。如图所示,各层次海流的高频波动以顺时针(CW)旋转为主,谱密度峰值分别对应 S_2 (12 h)、 M_2 (12.4 h)、 K_1 (23.9 h)、 O_1 (25.8 h) 4 个分潮的潮周期,其中 M_2 和 K_1 分潮相对 S_2 和 O_1 分潮更为显著。另外各层次海流还表现出 31.8~35.4 h 的近惯性周期,经计算本地理论惯性周期为 35.5 h,可以看到上层(100 m 和 160 m)的近惯性周期与理论惯性周期非常接近,而中层和深层(810~4 040 m)为 32 h 左右,略小于理论惯性周期。Zhai 等^[2]对西太平洋潜标(8°N)的分析

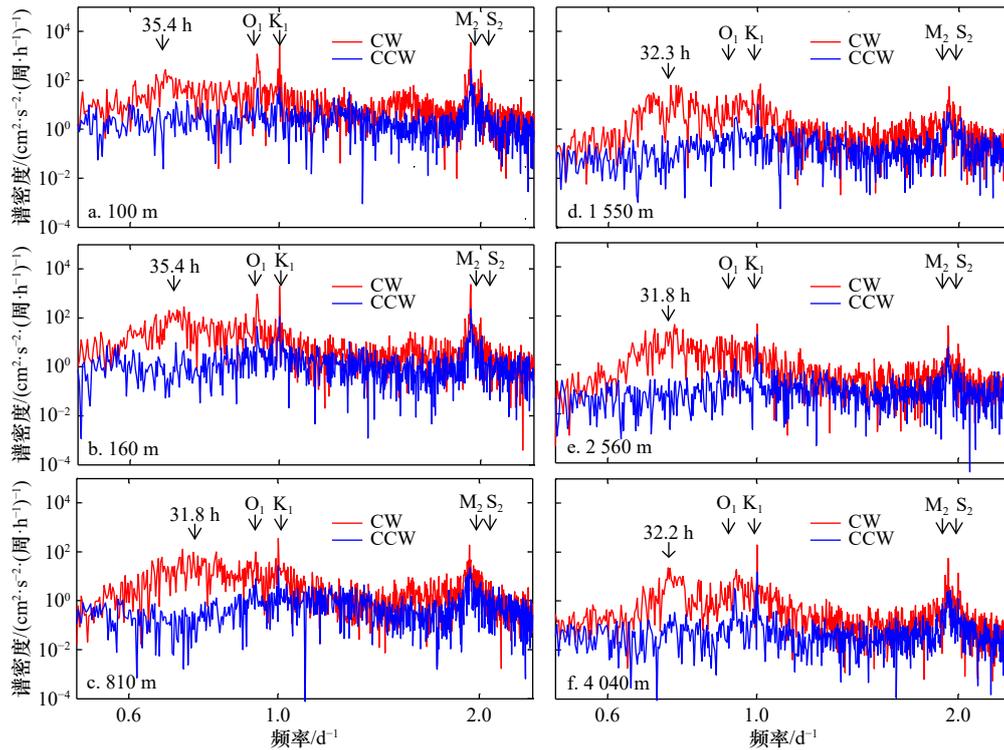


图3 各层次海流旋转谱分析

Fig. 3 Rotary spectrum analysis of currents at different depth

CW 代表顺时针旋转; CCW 代表逆时针旋转

CW: clockwise spectrum; CCW: counter clockwise spectrum

中发现该海域近底层海流的惯性振荡周期略大于理论惯性周期,与本文的分析结果有所不同。其原因还有待进一步研究。

3.2 潮流椭圆要素及潮流能量

使用全年的海流观测资料用 T_tide 程序计算各层次 4 个主要分潮 (M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1) 的潮流椭圆要素,计算后的结果见图 4。可见除 1 550 m 处的 O_1 分潮呈逆时针旋转外,其他层次的 4 个分潮都为顺时针旋转。在次表层,160 m 层各分潮的潮流椭圆与 100 m 层相似,但流速相对较小;4 个主要分潮中, M_2 分潮最大(100 m 和 160 m 的最大流速分别为 8.58 cm/s 和 7.14 cm/s)、 K_1 分潮次之(100 m 和 160 m 的最大流速分别为 6.01 cm/s 和 5.51 cm/s)、 S_2 分潮最小;各分潮的倾角为 $148^\circ \sim 174^\circ$,即各分潮的最大流速方向均为西北-东南向;椭圆率为 $-0.75 \sim -0.5$,表现出旋转流的特征。在中层(810 m),4 个主要分潮中, K_1 分潮最大(最大流速为 2.86 cm/s)、 M_2 次之(1.85 cm/s)、 S_2 分潮最小, K_1 和 S_2 分潮的最大流速方向为东北-西南向, M_2 和 O_1 为西北-东南向。在深层(1 550~4 040 m), K_1 分潮的最大流速最大, M_2 次之, S_2 分潮最小;1 550 m 层 K_1 和 S_2 分潮的最大流速方向为东北-西南向, M_2 为东-西向, O_1 为西北-东南向;在 2 560 m 和 4 040 m

层, K_1 分潮的最大流速为西北-东南向, M_2 为东北-西南向, O_1 为南-北向, S_2 为东-西向。

图 5 为各层次的潮动能、总动能以及潮动能占总动能之比。由图可见次表层(100~160 m)的潮动能比中层(810 m)和深层(1 550~4 040 m)大 1~2 个数量级,在 810~2 560 m 潮动能随深度减小,近底层(4 040 m 层)的潮动能大于深层(1 550 m 和 2 560 m)。次表层(100 m、160 m)和近底层(4 040 m)的潮动能占总动能的 20% 以上,在中层和深层(810~2 560 m)的潮动能占总动能的 10% 左右。

另外,通过计算各层次潮流的形态数,可判断次表层(100~160 m)为不正规半日潮流,中层和深层(810~4 040 m)为不正规全日潮流。

3.3 潮流的季节变化

为了探讨潮流的季节变化,在每个时间点使用 30 d 的数据(前后各 15 d)用 T_tide 程序进行潮流的调和和分析,获得了主要分潮 M_2 和 K_1 的长轴的时间序列(图 6),以及计算了潮动能的时间序列及其小波谱(图 7)。

由图 6 可见,次表层 M_2 分潮的变化范围较大,最大流速在 100 m 层可接近 20 cm/s,在 160 m 层可接近 13 cm/s,在冬季(2~4 月)和夏季(8~9 月)增强,冬季增强尤为明显(图 6a);次表层 K_1 分潮在秋季(9~10 月)

明显减弱,可由最大时的 10 cm/s 减弱到 3 cm/s (图 6b);在中层的 810 m, M_2 分潮均在夏季(7-8月)和冬季(2-4月)增强(图 6a), K_1 分潮也在夏季(8-9月)和冬季(1-3月)增强(图 6b);深层(1 550~4 040 m)各分潮的变化范围相对较小,1 550 m 处 M_2 分潮在夏季(7-8月)和冬季(2-3月)有所增强, K_1 分潮在秋季

(10-12月)有所减弱;2 560 m 处 K_1 和 M_2 分潮的变化范围均很小;4 040 m 处 K_1 分潮在夏季(7-8月)略有增强。对于 M_2 分潮的时间变化,可能与月球绕地的椭圆形轨道引起的地月距离的变化有关;经查询,观测时段(2015年6月至2016年5月)月球的近地点时间为2015年的8-10月和2016年的4-5月^[12],文中 M_2 分潮动能在夏季的增强可以用该时段地月距离的变短来解释,但2016年2-3月 M_2 分潮动能的增强应该是其他的原因导致。

图 7 表明各层次潮动能表现出较显著的季节变化特征。从图中可以看到,各层次潮动能均在2-3月份增强,在其他时间的变化则不太一致。在次表层和中层,潮动能在夏季(8-9月)和冬季(2-3月)显著增强,可达到年均值的2倍以上(图 7a, 图 7b),这主要与 M_2 分潮和 K_1 分潮在夏季和冬季的增强相对应;在深层,潮动能均在夏季(6-8月)和冬季(2-3月)增强,

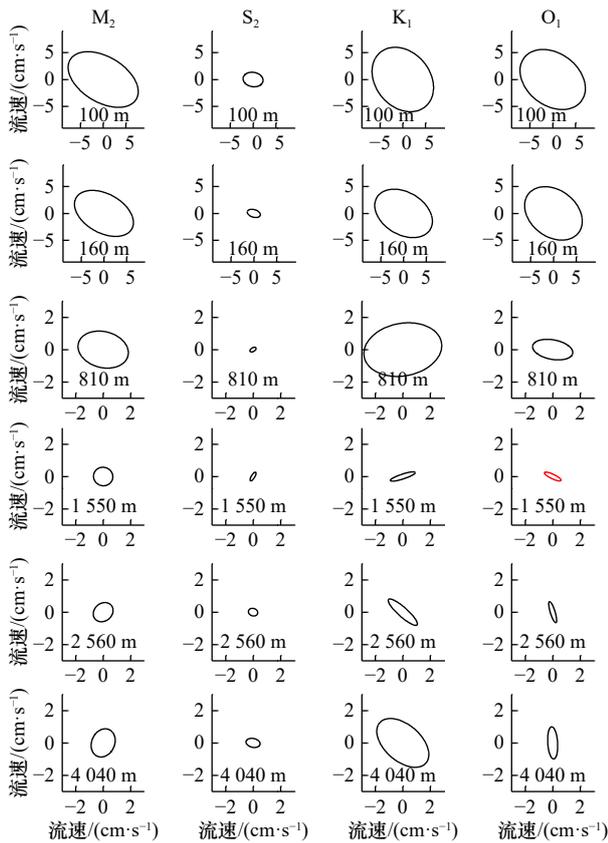


图 4 各层次各分潮的潮流椭圆

Fig. 4 Tidal ellipse at different levels

黑色为顺时针旋转,红线为逆时针旋转

Black line: clockwise rotation; red line: counter clockwise rotation

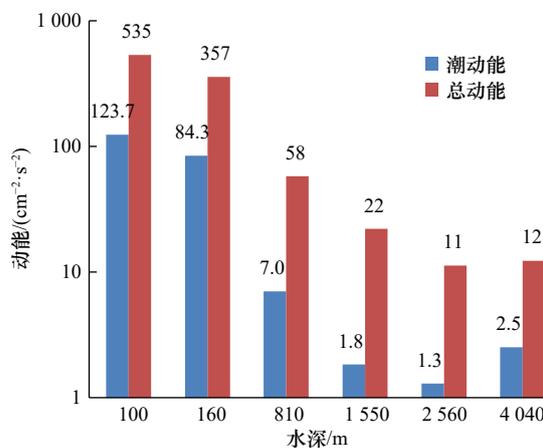


图 5 各层次潮动能及其占比

Fig. 5 Tidal kinetic energy and its portion to total kinetic energy at different levels

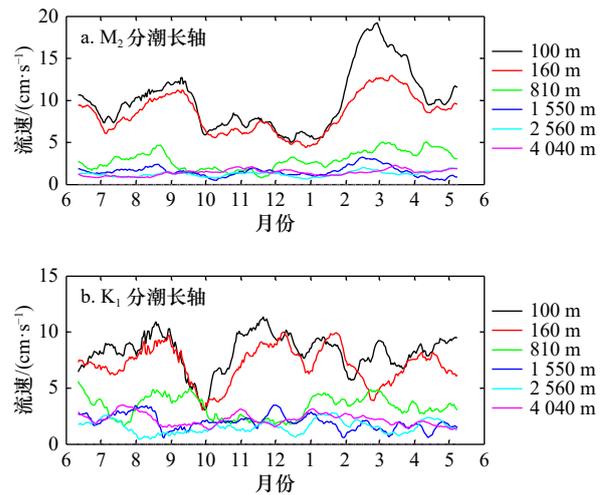
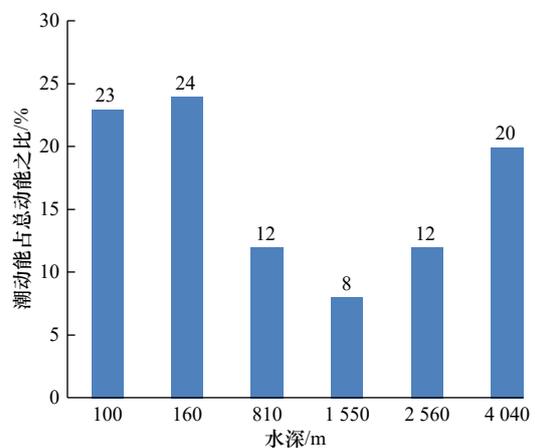


图 6 各层次 M_2 和 K_1 分潮流长轴的时间序列

Fig. 6 Time series of M_2 and K_1 constituent major axes at different layers



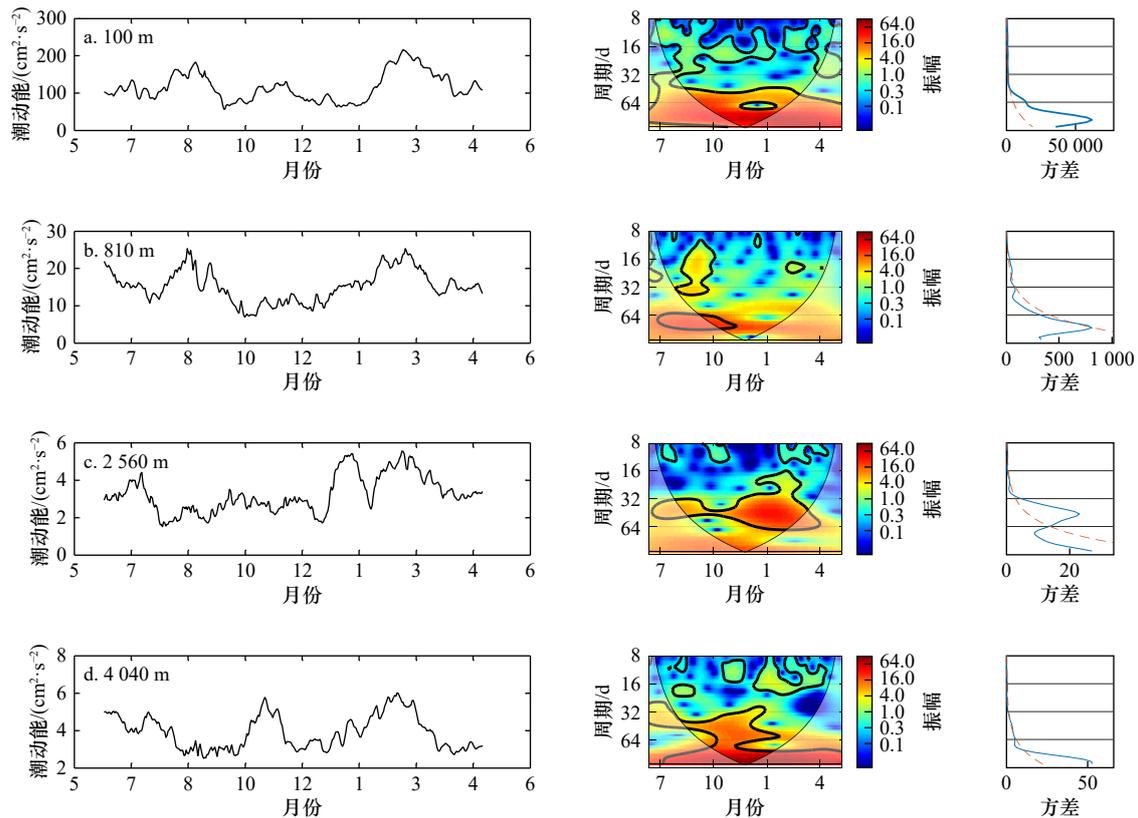


图7 各层次潮动能的时间序列及其小波分析

Fig. 7 Time series and wavelet analysis of tidal kinetic energy at different levels

填色图为小波功率谱, 曲线图为全球小波谱

The color filled maps represent wavelet power spectrum and the curves represent global wavelet spectrum

除此之外, 在 2 560 m 处潮动能在 1 月出现另一个峰值, 而在 4 040 m 处潮动能在 11 月也出现峰值。小波分析结果显示, 次表层的潮动能全年表现出了近 100 d 的振荡周期; 中层的潮动能表现出 87 d 左右的振荡周期, 在夏半年明显; 深层和近底层则为 47 d 和 114 d 左右的振荡周期。从季节平均的浮力频率剖面来看 (图 2), 在 300 m 以浅的上层, 冬季跃层较深且较弱, 其他季节跃层较浅且相对较强, 而在深层季节变化不明显, 潮动能的季节变化特征似乎与跃层的变化并不完全一致, 其背后的机制还有待将来的进一步分析。

另外值得注意的是, 在做潮流调和和分析时由于所使用的海流时间序列的长短不同, 所计算的结果也有所不同。使用 30 d 的数据比使用全年的数据计算的分潮的潮流椭圆相对较大、潮动能也相对较强。上节使用全年的数据来分析分潮及潮动能的整体特征, 而这节则重点关注其时间变化。

4 结论

通过分析一套深海潜标观测海流的高频变化特征, 本文得到以下结论:

(1) 各层次海流的高频波动以顺时针旋转为主,

次表层海流的近惯性周期与当地理论惯性周期非常接近, 而中层和深层 (810~4 040 m) 略小于当地理论惯性周期。

(2) 次表层 (100~160 m) 的潮动能比中层 (810 m) 和深层 (1 550~4 040 m) 大 1~2 个数量级, 在 810~2 560 m 潮动能随深度减小, 4 040 m 层的潮动能大于 1 550 m 和 2 560 m 层。表层 (100~160 m) 为不正规半日潮流, 中层和深层 (810~4 040 m) 为不正规全日潮流。

(3) 各层次潮动能均在夏季 (6~9 月) 和冬季 (2~3 月) 增强, 这主要与 M_2 分潮和 K_1 分潮在夏季和冬季的增强相对应; 除此之外, 在 2 560 m 处潮动能在 1 月增强, 而在 4 040 m 处潮动能在 11 月也出现峰值。小波分析结果显示, 次表层的潮动能全年表现出了近 100 d 的振荡周期; 中层的潮动能表现出 87 d 左右的振荡周期, 在夏半年明显; 深层和近底层则为 47 d 和 114 d 左右。

以上研究表明, 深海潮流在不同的深度层次具有不同特征, 这些特征背后的动力机制如何, 还需要在将来通过更多的深海观测以及数值模拟进一步地研究。

参考文献:

- [1] 于克哲. 南海深海潮流分析[J]. 海洋技术学报, 1989(1): 70–73.
Yu Kezhe. Analysis of the deepsea tidal current in South China Sea[J]. Ocean Technology, 1989(1): 70–73.
- [2] Zhai F, Wang Q, Hu D, et al. Observation of the abyssal western boundary current in the Philippine Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(5): 1188–1197.
- [3] 张效谦, 梁鑫峰, 田纪伟. 南海北部450 m以浅水层内潮和近惯性运动研究[J]. *科学通报*, 2005, 50(18): 2027–2031.
Zhang Xiaoqian, Liang Xinfeng, Tian Jiwei. Study on the internal tide and near inertial motion in shallow water at 450 m in the north of South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(18): 2027–2031.
- [4] 郭朴, 方文东, 甘子钧, 等. 南海北部大陆坡区的内潮特征[J]. *科学通报*, 2006(b11): 15–22.
Guo Pu, Fang Wendong, Gan Zijun, et al. The characteristics of internal tide in the continental slope area of the northern South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006(b11): 15–22.
- [5] 李俊德, 梁楚进, 金魏芳, 等. 南海东沙岛西南大陆坡内潮特征[J]. *海洋学研究*, 2011, 29(1): 1–8.
Li Junde, Liang Chujin, Jin Weifang, et al. Characteristics of the internal tide at the continental slope southwest of Dongsha Island, the South China Sea[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2011, 29(1): 1–8.
- [6] 王道儒, 侍茂崇, 南峰. 西沙群岛潮、余流特征研究[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2012, 42(10): 5–13.
Wang Daoru, Shi Maochong, Nan Feng. Study on features of tide and residual currents in the region of Paracel Islands[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(10): 5–13.
- [7] 司广成, 侯一筠. 南海北部东沙岛附近的内潮和余流特征[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 42(10): 5–13.
Si Guangcheng, Hou Yijun. The characteristics of the internal tides and residual tidal currents around the Dongsha Island in the northern South China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 42(10): 5–13.
- [8] 刘倩. 南海南部内潮特征[C]// 2013年中国科学院大学海洋科学学术论坛论文集. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2013: 9–19.
Liu Qian. Characteristics of internal tide in the south of South China Sea[C]// Proceedings of the Academic Forum on Marine Science of Chinese Academy of Sciences in 2013. Guangzhou: South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. 2013: 9–19
- [9] 蒋暑民, 戴德君, 乔方利, 等. 南海北部陆架海域内潮特征的观测研究[J]. *海洋与湖沼*, 2019, 50(1): 1–11.
Jiang Shumin, Dai Dejun, Qiao Fangli, et al. The internal tides on continental shelf of the northern South China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, 50(1): 1–11.
- [10] Chen X, Tung K K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration[J]. *Science*, 2014, 345(6199): 897–903.
- [11] Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_tide[J]. *Computers & Geosciences*, 2002, 28(8): 929–937.
- [12] John Walker, Lunar Perigee and Apogee Calculator [EB/OL]. (1997-05-05) [2019-07-26] <https://www.fourmilab.ch/earthview/pacalc.html>.

Characteristics of abyssal tidal currents east of the Luzon Strait: Cast study from *in situ* observation

Kuang Fangfang¹, Pan Aijun¹, Zhang Junpeng¹, Huang Jiang¹, Cai Shangzhan¹

(1. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China)

Abstract: A submarine mooring system was deployed in the east of the Luzon Strait and the vertical distribution of high frequency (mostly tidal) variations of ocean currents were analyzed in the paper. Several features were revealed that the tidal kinetic energy of the middle (1 550 m) and the deep layers (2 560 m) was one to two orders smaller than that of the subsurface layers (100–160 m), and slightly smaller than that of the near-bottom layers (4 040 m); the tidal currents were irregular semi-diurnal in the subsurface layers and were irregular diurnal in the middle and deep layers; the tidal kinetic energy was larger in summer (June to September) and winter (February to March), which mainly caused by enhancement of M_2 and K_1 tidal components in corresponding periods; the high frequency fluctuations in all layers were mainly in clockwise rotation; the near-inertial frequency in the upper layers (middle and deep layers) were close to (slightly smaller than) the local inertial frequency.

Key words: Western Pacific; mooring observation; tidal currents