

旷芳芳, 张俊鹏, 周喜武, 等. 基于潜标观测的牛郎海山的深海海流的低频变化特征[J]. 海洋学报, 2022, 44(5): 71–79, doi:10.12284/hyxb2022085

Kuang Fangfang, Zhang Junpeng, Zhou Xiwu, et al. Low frequency variation of deep current at Niulang Seamount based on submarine mooring observation[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(5): 71–79, doi:10.12284/hyxb2022085

# 基于潜标观测的牛郎海山的深海海流的低频变化特征

旷芳芳<sup>1</sup>, 张俊鹏<sup>1</sup>, 周喜武<sup>1</sup>, 陈航宇<sup>1</sup>, 靖春生<sup>1</sup>

(1. 自然资源部第三海洋研究所海洋动力学研究室, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 本文利用在西太平洋牛郎海山布放的两套锚系潜标获取的长时间海流观测数据, 分析了深海的海洋动力环境特征, 着重阐释了该海域海流的全水深垂向结构及其低频变化特征。结果表明: (1) 年平均海流及其变化幅度均在上层最大、中层和深层次之、中深层最小; (2) 年平均上, 150 m 以浅的海流为东向的副热带逆流, 150 m 以深和中层为西向流; 山顶处的近底层海流为较稳定的弱南向流, 山底处的近底层海流为西南向流; (3) 在山顶和山底, 各深度层次的海流在全年均表现出 100 d 左右的振荡周期; 在 2 000 m 以浅, 各深度层次的海流振荡的位相基本一致, 振荡幅度在表层最强、随深度的增加而减小; 在 2 000 m 以深, 海流变化的位相与 2 000 m 以浅相反, 振荡幅度在 4 000 m 最强。

**关键词:** 牛郎海山; 潜标; 深海海流; 低频变化

中图分类号: P714; P731.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)05-0071-09

## 1 引言

热带海洋中低频波动是研究热带海气相互作用中一个重要的问题。研究认为, 在周期短于 150 d 的波动中, 海面高度 (SSH) 的主振荡周期在全球海洋中呈显著的带状分布, 从近赤道的 1 个月逐步增加至南北纬 30°附近的 4 个月, 1、2、3、4 个月周期的主振荡分别位于 7°N(S)、14°N(S)、21°N(S) 和 28°N(S) 左右<sup>[1-3]</sup>。在西太平洋以 20°N 为中心的纬度带为向东的副热带逆流的影响区域<sup>[4-8]</sup>, 该海域涡旋频繁, 平均涡动动能达到黑潮延伸体处的平均涡动动能的一半<sup>[9]</sup>; 在以 20°N 为中心, 120°E~150°W 的纬度带内, SSH 有明显的准 90 d 振荡, 80~109 d 的变化与总的变化之比达到 0.3 以上<sup>[10]</sup>; 海流也具有显著的准 90 d 振荡特征, 该振荡信号主要存在于 150 m 以浅的海洋次表层, 对应的波长约为 865 km, 沿 19.81°N 该振荡信号自东向西传播, 相速度约为 0.09 m/s<sup>[11]</sup>。

深层海洋与上层海洋相比可能存在不同的动力

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。利用潜标观测资料, Yoshioka 等<sup>[12]</sup> 发现西马利亚纳海盆 (12.5°N, 137°E) 的 4 040 m 深的海流存在 60 d 左右周期的季节内振荡, 作者分析认为与斜压罗斯贝波的传播有关; 梁楚进等<sup>[13]</sup> 分析了热带东太平洋的中国多金属结核开辟区的潜标资料, 发现近底层流动表现出 51 d 左右的波动, 地形对离底 50 m 以内的低频流动有明显的影响; Kawabe 等<sup>[14]</sup> 发现威克岛 (20°N, 170°E) 通道东侧的深层流速及其变化远大于西侧, 这可能与水道的地形以及周边海山的分布有关, 而海流显示出的 4 个月左右的变化周期可能与深海中尺度涡的经过有关; Liu 等<sup>[15]</sup> 研究了黑潮延伸体海域深层海流的季节内振荡, 表明该海域海流变化的周期为 23~38 d, 与海表地转流之间存在正相关关系; 涡旋的经过使得 2 000 m 到 4 000 m 的深层海流沿着涡旋的方向运动且流速增强; Wang 等<sup>[16]</sup> 研究了菲律宾海西边界流 (8.0°N, 127°E) 的垂直结构和时间变化, 发现从海面到海底 60~80 d

收稿日期: 2021-08-18; 修订日期: 2021-11-17。

基金项目: 大洋“十三五”环境项目 (DY135-E2-5-01); 全球变化与海气相互作用 (二期) 专项 (GASI-04-WLHY-01)。

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

的季节内信号较为普遍,太平洋西边界的海面经向流变化可以通过低频过程到达海底;旷芳芳等<sup>[7]</sup>分析了吕宋海峡以东(19.75°N, 126.75°E)的深海海洋环境特征,发现中上层海流表现出 81~85 d 的周期振荡,近底层海流变化周期为 51 d。

然而,相比海洋上层,海洋深层的观测资料较少,研究成果也较少。另外,深海海山区由于地形变化剧烈,可能具有特殊的动力学特征。为了解西太平洋牛郎海山区深层的环流特征及其对深海生态环境的影响,我们自 2017 年 8 月至 2018 年 7 月在海山的山顶和山底各布放了一套深海潜标进行长期的海流观测,获得了近 1 年的连续观测资料。以下将对潜标观测数据进行分析,探讨该海域深海海流的垂向分布以及低频变化特征。

## 2 数据和方法

中国大洋 45 航次科考在西太平洋牛郎平顶海山区共布放了两套潜标(MX1、MX2),对海山区的海流进行长期的观测,潜标位置见图 1。两个潜标站位相距约 70 km,观测深度覆盖了海洋上表层至深海近底层。编号为 MX1 的潜标布放于牛郎海山山顶,布放水深为 2 618 m,位置为 20°28'N, 160°50'E,布放和回收日期分别为 2017 年 8 月 4 日和 2018 年 7 月 24 日;共放置 1 台 75KADCP、3 台 阔龙海流计进行海流的观测;75KADCP 放置在 200 m 的深度往上观测海流剖面,观测的深度范围为 4~196 m;阔龙海流计放置的深度分别为 533 m、1 071 m 以及 2 096 m。编号为 MX2 的潜标布放于牛郎海山山底盆地,布放水深为 5 050 m,位置为 20°11'N, 161°27'E,布放和回收日期分别为 2017 年 8 月 5 日和 2018 年 7 月 25 日;共放置 3 台 75KADCP、4 台 阔龙海流计用于观测海流;其中两台 75KADCP 放置在 120 m 的深度,分别往上和往下观测海流剖面,观测的深度范围分别为 18~106 m 和 138~530 m;另一台 75KADCP 放置在 630 m 的深度往下观测,观测的深度范围为 652~1 036 m;阔龙海流计的放置深度分别为 1 826 m、4 018 m、4 330 m 和 4 953 m。75KADCP 观测的层厚为 8 m,观测时间间隔为 1 h, 1 min 采样。阔龙海流计的观测时间间隔为 30 min, 1 min 采样。

由于 75KADCP 所在主浮球的垂直位移,每个时刻观测的深度层次各不相同。我们首先选取观测期间最大观测深度和最小观测深度作为标准层深度的上下限、8 m 作为标准层的层距,在垂向上使用线性插值来获取各标准层的观测数据;由于某些标准层在某些时刻数据会有缺失,接下来我们挑选有效数据超

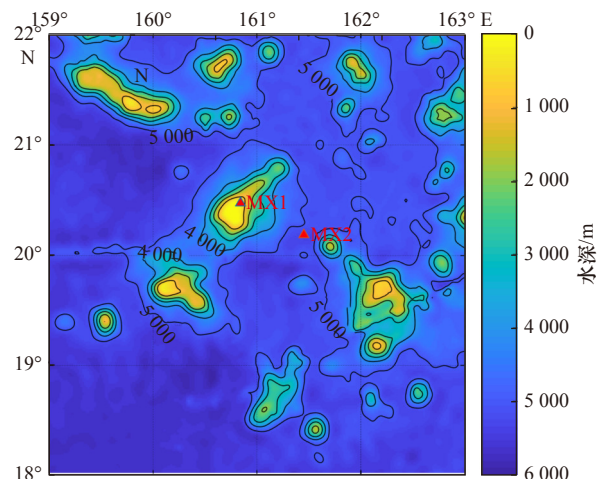


图 1 潜标位置和地形

Fig. 1 Mooring sites and topography

地形数据取自 GEBCO1

Topography data are extracted from GEBCO1

过 60% 的深度层次作为有效数据层次,通过内插对这些层次缺失的数据进行补齐,最终获得有效数据层次的完整时间序列。经数据处理后, MX1 的 1 个 75KADCP 观测的有效数据层次为 11~195 m,有效数据时间为 2017 年 8 月 5 日 0 点至 2018 年 7 月 24 日 23 点,共 354 d; MX2 的 3 个 75KADCP 观测的有效数据层次分别为 19~99 m、145~529 m 和 660~1 004 m,有效数据时间为 2017 年 8 月 6 日 0 点至 2018 年 7 月 25 日 23 点,共 354 d。

在海洋学中,各种水文气象因子都可以看作是随时间有周期性变化的信号。本文主要使用了小波分析、互谱分析等方法对潜标观测的海流数据进行分析。面对一个时间序列,小波分析方法能够有效识别信号的周期和振幅随时间的变化情况,并能准确提取出相应周期信号的时间变化序列。互谱分析用于在频域内描述两个不同信号之间的统计相关程度,从互谱密度可获得两个信号相应的频率分量之间的关系,幅值越大,说明相应频率分量关联度越高;此外还可获得两个信号相应频率分量的相位差值。小波和互谱分析方法在海洋学中被广泛应用,其原理方法可参考文献 [18],在此不再详述。

## 3 结果与讨论

以 MX1 代表山顶海域, MX2 代表山底海域,首先对观测海流进行 3 d 低通滤波提取其低频信号,分析低频段海流的平均特征及其时间变化。

### 3.1 海流的总体特征和平均值

图 2 和图 3 分别是山顶处潜标 MX1 和山底处潜标 MX2 观测的各代表深度层次的 3 d 平均海流矢

量。为便于描述,以 200 m 以浅的层次代表上层、200~900 m 代表中层、900~2 000 m 代表中深层、2 000~5 000 m 代表深层, MX1 的 2 096 m 和 MX2 的 4 953 m 分别代表山顶和山底的近底层。山顶处(图 2),上层海流的季节变化明显,且各层次流向的时间变化基本一致;中层和中深层海流变化在 2017 年的下半年与上层一致,在 2018 年的上半年与上层的一致性相对较差;近底层海流与其他层次的差异明显,流速较小,为较稳定的南向流。在山底处(图 3),潜标 MX2 观测的上层和中层海流的季节变化明显,且各层次流向的时间变化基本一致;中深层海流较弱;深层和近底层海流流向与上层和中层差异明显,流速比中深层要大。

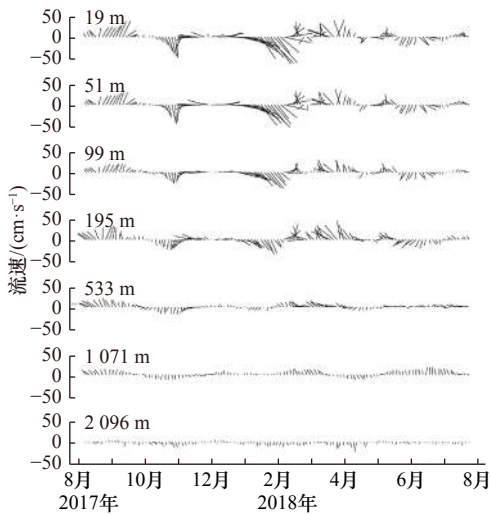


图 2 MX1 观测的不同深度层次的 3 日平均流矢图  
Fig. 2 Time series of 3-day averaged flow vectors from MX1 at different depths

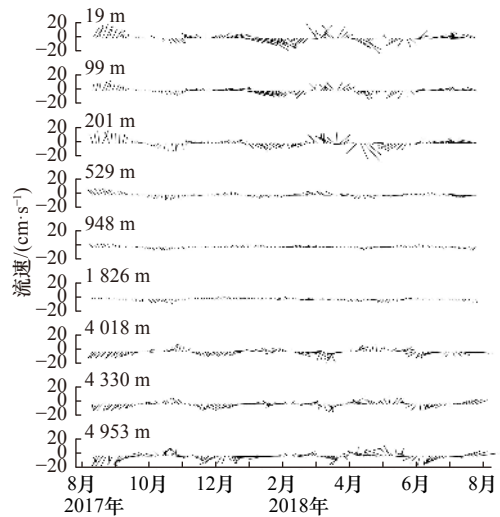


图 3 MX2 观测的不同深度层次的 3 日平均流矢图  
Fig. 3 Time series of 3-day averaged flow vectors from MX2 at different depths

低频海流的流速流向的时间平均值和流速的标准差如图 4 所示。在上层和中层,山顶和山底处的平均流速流向接近,在 150 m 以浅平均流向为东向,平均流速在表层约为 8 cm/s,随深度的增加而减小;在 150 m 以深转为西偏北向,流速随深度的增加而增加,在山顶的 200 m 层流速达到最大,接近 2 cm/s,在山底处的 250 m 层流速达到最大,接近 4 cm/s,之后随着深度的增加流速减小(图 4a, 图 4b);上层海流在 150 m 以浅为东向的副热带逆流,在 150 m 以深的上层和中层则为西向流(图 4b)。MX1 的中深层的流向为北,近底层的流向为南;中层和中深层的平均流速为 1~3 cm/s; MX2 的中深层海流为西偏北或西偏南

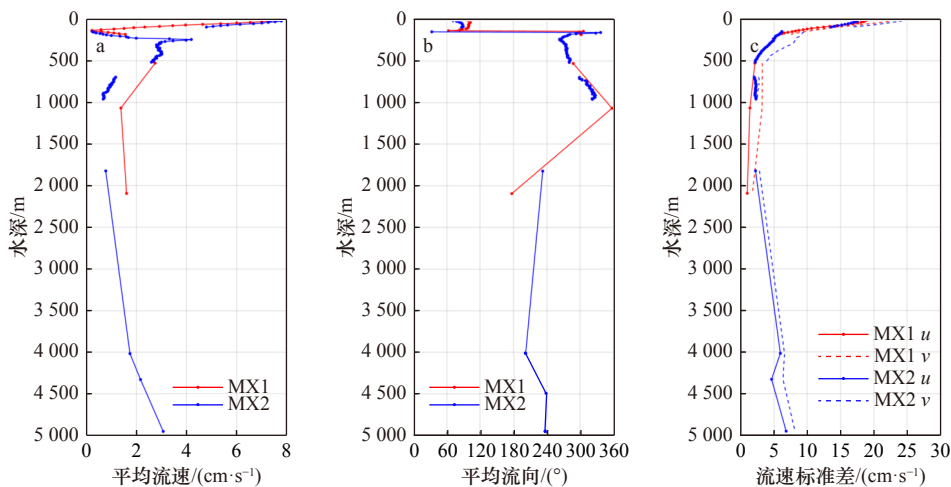


图 4 低频海流(3 d 低通滤波)的平均流速(a)、平均流向(b)和流速标准差(c)  
Fig. 4 Averaged current (3 d low-pass filtered) velocity (a), direction (b) and stand deviation (c)

$u$  代表纬向流速,  $v$  代表经向流速

$u$  denote the zonal velocity and  $v$  denote the meridional velocity

向,平均流速较小,约为 1 cm/s;深层和近底层海流为西南向,深层的平均流速约为 2 cm/s,近底层平均流速约为 3 cm/s。纬向流速和经向流速的标准差均显示海流的变化幅度在上层较大且随深度的增加而减小,在中深层达到最小,之后随着深度的增加而增大;经向流速的变化略大于纬向流速(图 4c)。

### 3.2 海流的低频变化特征

为进一步分析深海海流的低频变化特征,对日均流速进行小波分析。因为经向流速的变化幅度相比纬向流速略大,因此选取经向流速作为代表。图 5 是最强振荡所对应的周期(下文称主振荡周期)随深度的变化。由图可见两处海流在各深度层次均表现出 80~130 d 的振荡周期,并在山顶的中层、中深层(图 5a)以及山底的上层、中层和深层均通过了显著性检验。在山顶处,中层和中深层的主振荡周期为 94 d,在近底层为 83 d;在山底处,上层和深层的主振荡周期均为 99 d,中层为 94 d 和 125 d。

图 6 和图 7 分别是山顶和山底处各代表层次海

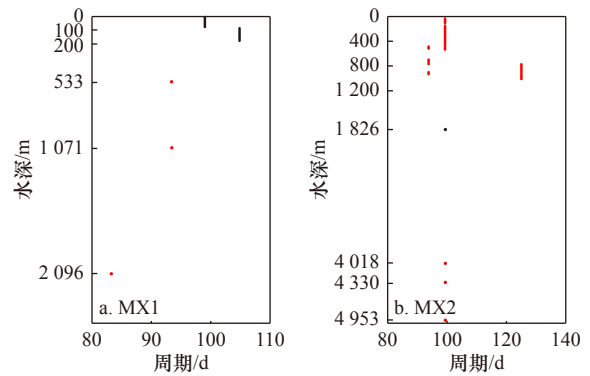


图 5 MX1 和 MX2 各深度层次日平均经向流速的主振荡周期

Fig. 5 Periods of the dominant oscillations of daily-averaged meridional velocity at MX1 and MX2

红色点代表该周期的计算值通过了 95% 显著性检验

The red dots denote values that are above the 95% significance level

流的小波谱和全球功率谱,由图可见,在山顶和山底,各深度层次海流 100 d 左右周期的振荡几乎可持续全年。

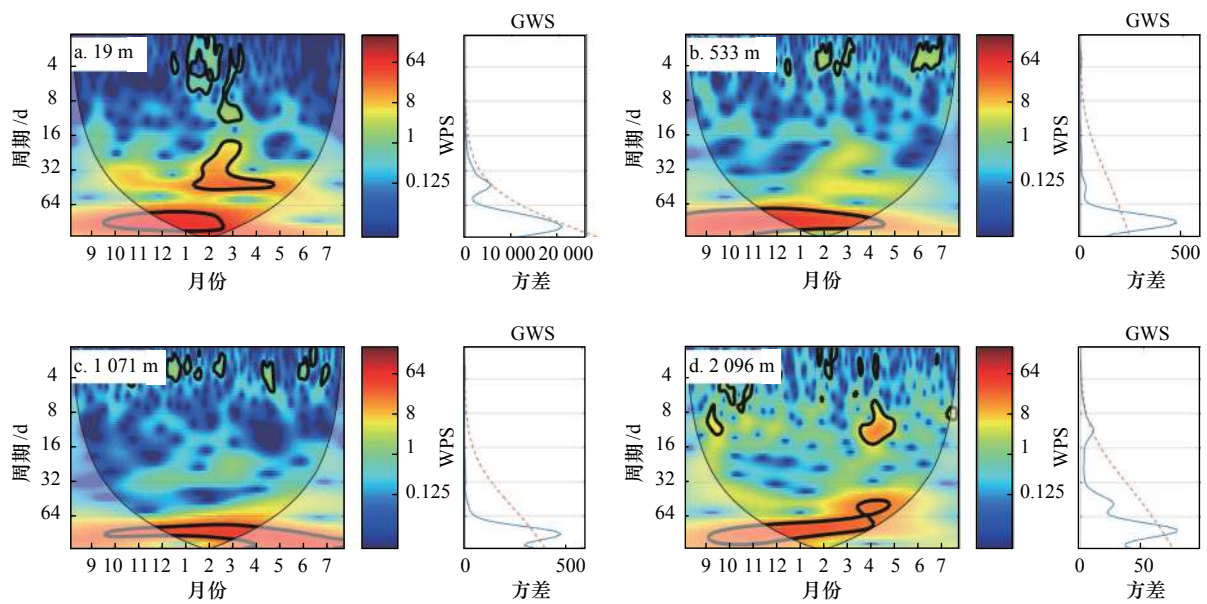


图 6 MX1 观测的山顶各层次日平均经向流速的小波谱(WPS)和全球功率谱(GWS)

Fig. 6 Wavelet power spectrum (WPS) and global wavelet spectrum (GWS) analysis of daily meridional currents at different depths from MX1

填色图为小波功率谱,曲线图为全球功率谱。填色图中粗黑线包围的范围通过了 $\alpha=0.05$ 显著性水平下的红噪声标准谱的检验;细黑线为影响锥曲线,在该曲线以外的功率谱由于受到边界效应的影响而不予考虑且显示为浅色阴影。曲线图中蓝色实线为全球功率谱密度,红色虚线为 $\alpha=0.05$ 显著性水平下的红噪声标准谱

The color filled maps represent wavelet power spectrum and the curves on the right represent global wavelet spectrum. In the color maps, the thick black contours denote the 5% significance level against red noise, the thin black line is the influence cone curve, and the cone of influence where edge effects might distort the picture is shown as in lighter shades. In the curve map, the blue line denote the global wavelet density, and the dotted red line denote the 5% significance level against red noise

为进一步分析海流的 100 d 左右周期振荡的垂向结构,对经向海流进行 80~120 d 的带通滤波,结果如

图 8 所示。在山顶处(图 8a),海流的 100 d 振荡在垂向上的位相基本一致,振荡幅度在表层最强、随深度

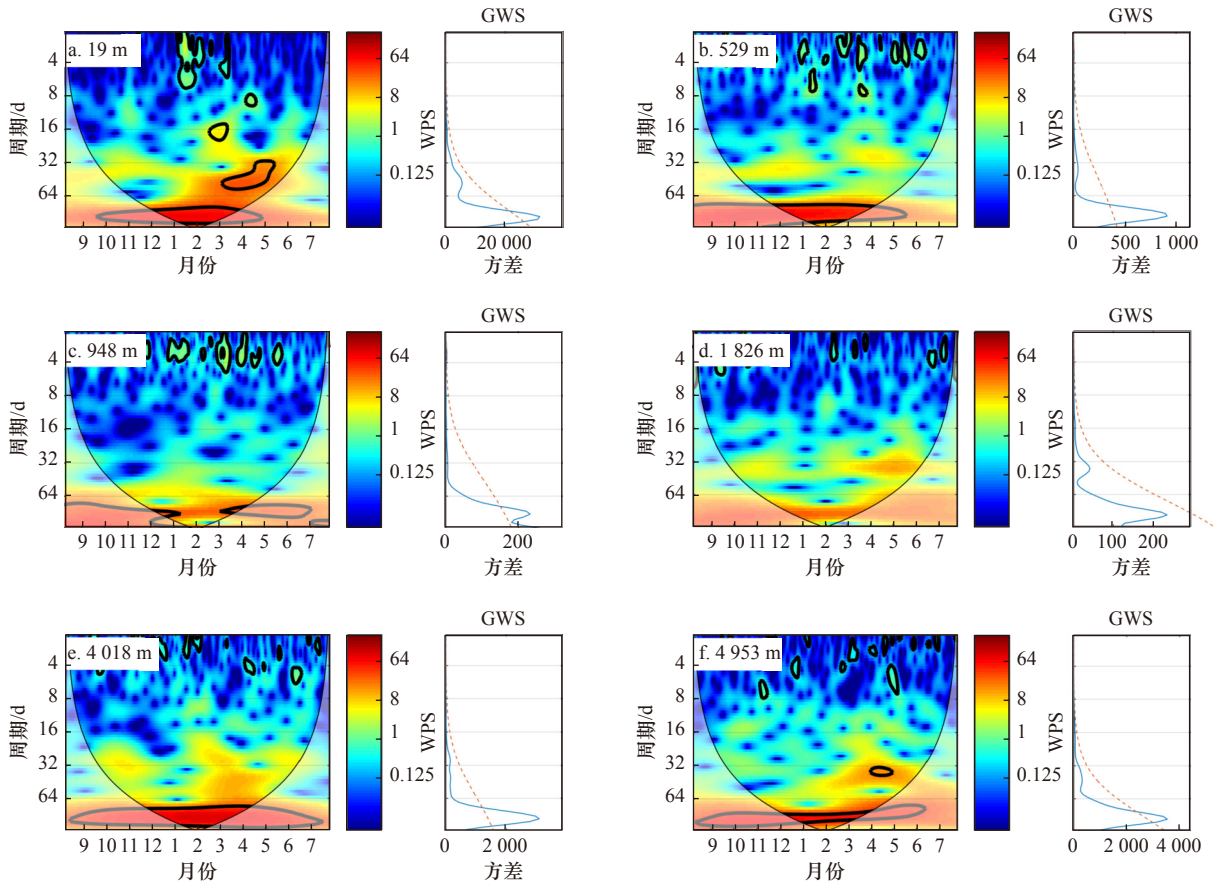


图7 MX2 观测的各深度层次日平均经向流速的小波谱和全球功率谱

Fig. 7 Wavelet power spectrum (WPS) and global wavelet spectrum (GWS) analysis of daily meridional currents at different depths from MX2

填色图为小波功率谱, 曲线图为全球功率谱。填色图中粗黑线包围的范围通过了  $\alpha=0.05$  显著性水平下的红噪声标准谱的检验; 细黑线为影响锥曲线, 在该曲线以外的功率谱由于受到边界效应的影响而不予考虑且显示为浅色阴影

The color filled maps represent wavelet power spectrum and the curves on the right represent global wavelet spectrum. In the color maps, the thick black contours denote the 5% significance level against red noise, the thin black line is the influence cone curve, and the cone of influence where edge effects might distort the picture is shown as in lighter shades

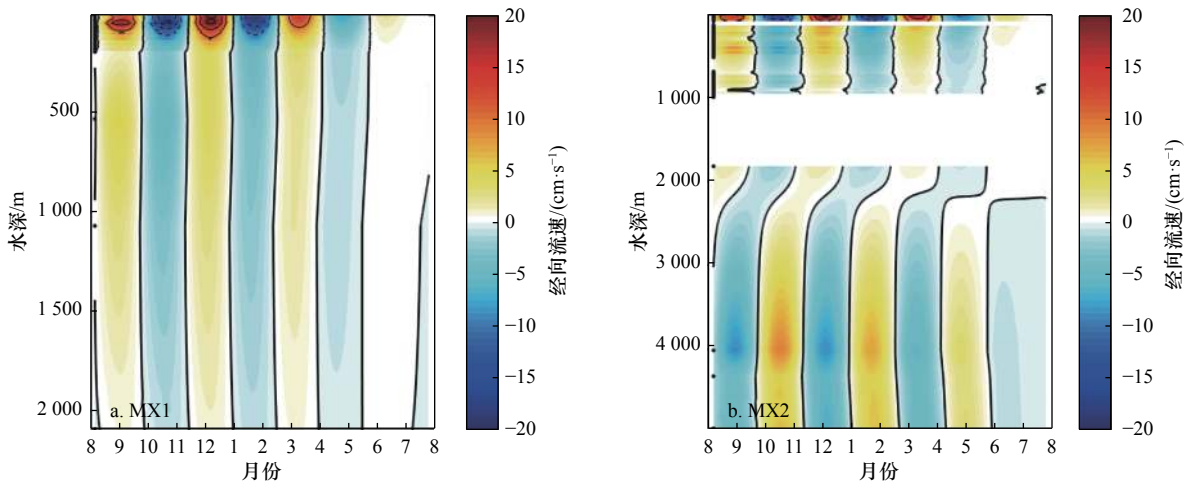


图8 经向流速的近100 d振荡的垂向结构(80~120 d滤波)

Fig. 8 Vertical structures of meridional currents at about 100 d bands (80-120 d bandpass filtered)

的增加而减小。山底与山顶类似(图8b), 2000 m以浅海流振荡的位相基本一致, 幅度随深度的增加而减

小; 然而, 在2000 m以深的位相与2000 m以浅相反, 振荡幅度在4000 m左右最大。

### 3.3 不同深度层次海流的相互关系

以山底处 MX2 为代表, 对各深度层次日平均的海流进行矢量相关分析, 计算得到的相关系数和偏角结果如图 9 所示。图 9a 显示, 上层(200 m 以浅)各层次之间的海流变化高度相关, 相关系数均在 0.8 以上; 深层(4 000 m 以深)各层之间的海流变化强相关, 相关系数均在 0.7 以上; 上层、中层和深层的海流的相关性较好, 相互间的相关系数均在 0.5 以上; 而中深层(900 m 和 1 826 m)与其他层次的海流相关性相对较弱, 相关系数均在 0.5 以下。图 9b 显示, 上层和中层各层次海流相互之间的偏角均在  $10^\circ$  以内, 深层各层次海流相互之间的偏角不大于  $35^\circ$ ; 深层海流与上层和中层海流之间的偏角为  $154^\circ \sim 178^\circ$ , 说明深层海流与上层和中层海流方向是相反的, 与图 8 的分析结果一致。综合以上分析, 我们认为上层和中层海流的一致性较好, 深层海流与上层和中层相关性好但流向相反, 中深层海流与其他层次的联系相对较弱, 可能与中深层流速较小有关。

为了进一步研究各深度层次的海流变化在不同频段上的关系, 用各层次的经向流速与表层(19 m)的经向流速进行互谱分析, 结果如图 10 所示。图中, 表层、中层和深层的互谱密度在 100 d 左右的周期达到最大, 在该频段深层海流与表层海流的相干系数达到 0.5 以上, 相位差约为  $\pi$  或  $-\pi$ , 说明深层海流与表层海流反向的特征在 100 d 左右周期的频段下最为明显。海流在深层与上层的流向相反以及深层强化的现象在其他海域也有观测到, 可能由涡旋出现时第一斜压模态振幅的增加导致<sup>[15, 19]</sup>, 也可能与中尺度涡的涡旋中心在垂向上倾斜的三维结构有关<sup>[20]</sup>, 还可能由地形罗斯贝波引起<sup>[21-22]</sup>; 由于观测资料相对缺乏, 对该现象及其形成机制仍缺乏系统研究。

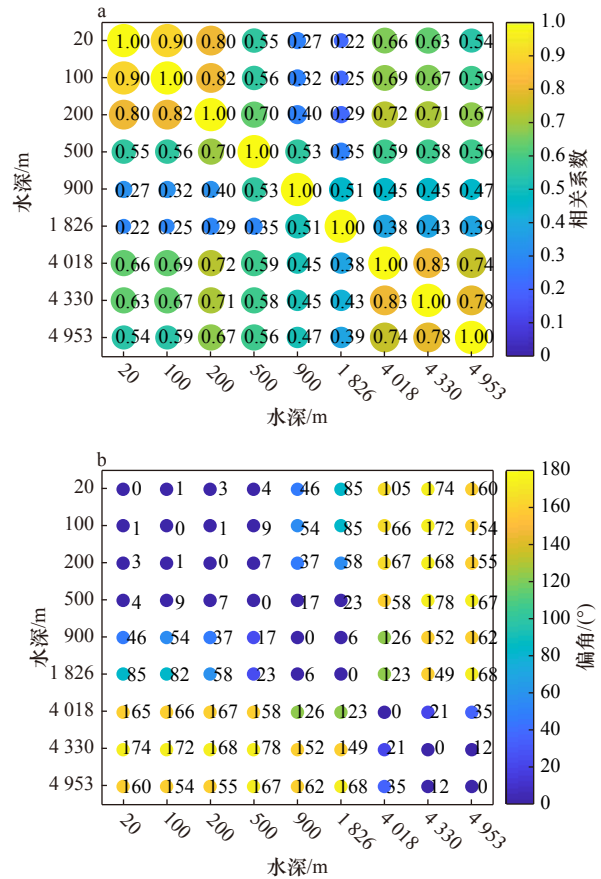


图 9 MX2 日平均海流矢量相关系数(a)和偏角(b)

Fig. 9 Complex vector correlation coefficients (a) and rotation angles in degrees (b) of current from different depths at MX2

本次的潜标观测表明深层海流与表层海流具有接近的变化周期、位相相反, 且在 2 000 m 上下的海流较弱、深层较强, 似乎符合第一斜压模的垂向特征。为进一步研究海流分布的正斜压特性, 我们对经向流速进行垂直模态分解。各垂直模态使用的海水层结(即  $N^2$ )由 WOA2013 资料的温度和盐度数据计算得到。分解结果中, 第零阶模态为正压模态; 第一

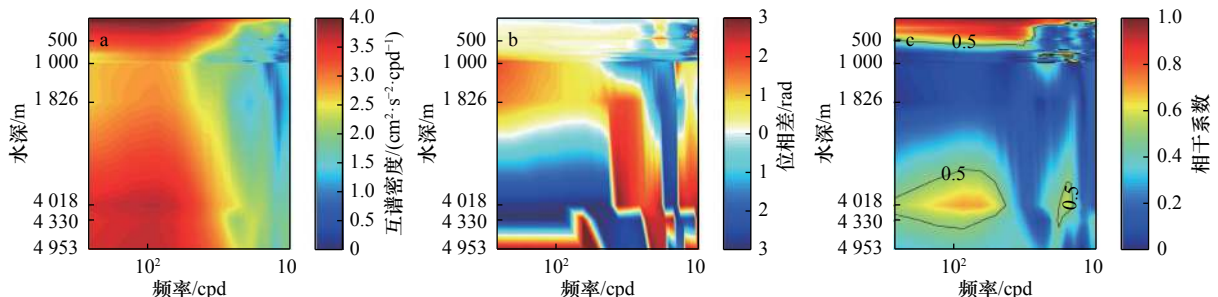


图 10 各层次与表层(19 m)的经向流速的互谱分析

Fig. 10 Cross spectrum analysis between the surface meridional current (19 m) and those at other depths

a. 互谱密度; b. 位相差; c. 相干系数

a. Cross power spectral density; b. cross power spectral phase lag; c. magnitude-squared coherence

模态为第一斜压模态(Mode 1),速度方向沿深度出现一次变换;第二模态为第二斜压模态(Mode 2),速度方向沿深度出现两次变换。以此类推,越高阶的斜压模态沿水深方向越复杂,其信号也通常越弱。本研究借鉴前人的研究方法,选取正压模态和前4个斜压模态进行分析<sup>[6]</sup>,标准化之后的各模态的垂向结构如图11所示。图12为经向流速的观测值以及正压模态与前4个斜压模态的重构值,可以发现重构值可表征经向流速的主要特征。图13是正压模态和前4个斜压模态振幅的时间序列,如图所示,经向流速整体

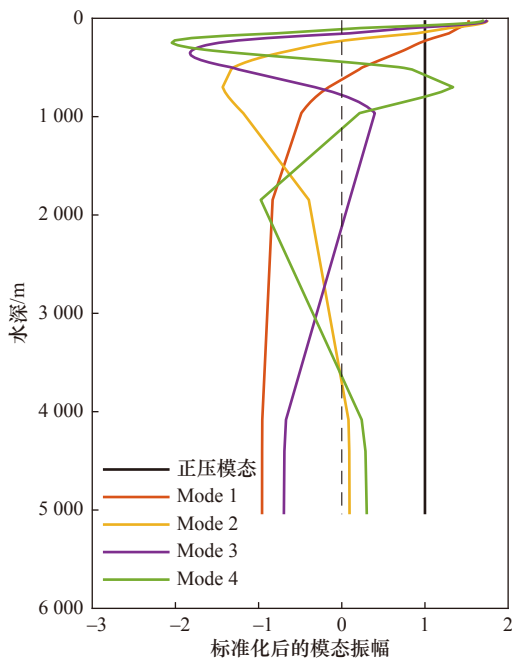


图11 MX2观测位置的正压模态和前4个斜压模态  
Fig. 11 The barotropic mode and the first four baroclinic modes at the mooring site of MX2

由第一斜压模态主导,其次为正压模态;正压模态和第一斜压模态至第四斜压模态的时间平均振幅分别为3.21 cm/s、6.79 cm/s、2.48 cm/s、1.88 cm/s和1.20 cm/s,也说明最大模态为第一斜压模态;另外,第一斜压模态振幅的时间序列也表现出显著的100 d左右的振荡周期(图略)。综合以上分析,深层海流与上层海流的流向相反且出现深层强化,主要是受第一斜压模态的主导。

#### 3.4 山顶处与山底处低频海流的相互关系

通过计算MX1和MX2邻近深度层次的低频海流(3 d低通滤波后再进行逐日平均)的矢量相关系数来分析两处海流的相互关系,其中1000 m层MX1和MX2的邻近层次的深度分别为1071 m和948 m,2000 m层MX1和MX2的邻近层次的深度分别为2096 m和1826 m。计算结果如表1所示,可见1000 m层以浅两处海流的相关性均较好,相关系数大部分在0.5以上,500 m层以浅的偏角不超过 $11^\circ$ ,1000 m层的流向偏角不超过 $30^\circ$ 。2000 m层二者的相关性较弱,因为MX1位于海山山顶,2000 m层距底约500 m,海流变化可能受局地地形的影响,而与MX2(山底处)相应深度层次的海流变化有所差异。

## 4 讨论

通过本文的分析可得到以下结论:

(1)平均海流及其变化幅度在上层最大、中层和深层次之、中深层最小。150 m以浅为东向的副热带逆流,150 m以深和中层为西向流;上层和中层海流的时间变化明显,且各深度层次的流向变化基本一致;深层海流也表现出明显的时间变化特征;在山顶

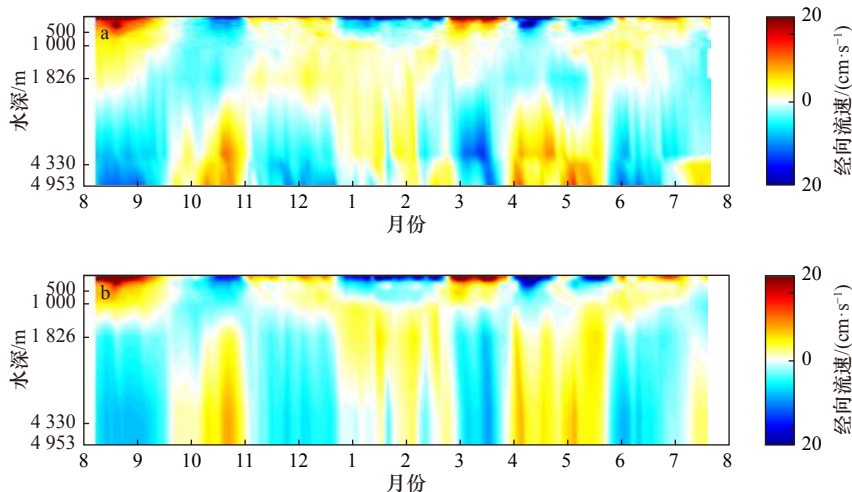


图12 经向流速的时间-深度分布观测值(a)、正压模态和前4个斜压模态重构值(b)

Fig. 12 Meridional velocity along the time-depth section observation (a), reconstructed from the barotropic mode and the first four baroclinic modes (b)

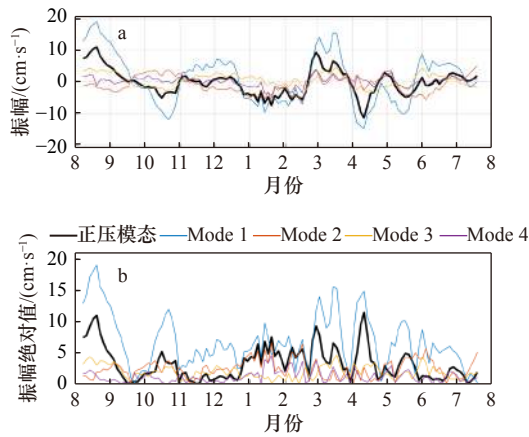


图 13 正压模态和前 4 个斜压模态的振幅

Fig. 13 Amplitudes of the barotropic mode and the first four baroclinic modes

处近底层海流为较稳定的弱南向流,在山底处近底层海流为西南向流。

(2) 在山顶和山底,各深度层次的海流在全年均表现出 100 d 左右的周期振荡;在 2 000 m 以浅,各深度层次海流振荡的位相基本一致,振荡幅度在表层最强、随深度的增加而减小;在 2 000 m 以深,海流变化的位相与 2 000 m 以浅相反,振荡幅度在 4 000 m 最强。

(3) 两处海流在大部分深度层次的相关性均较好,山顶近底层的海流可能受局地地形的影响,而与

表 1 MX1 和 MX2 邻近深度层次低频海流的矢量相关系数  
Table 1 Complex vector correlation coefficients and rotation angles of current at adjacent depths from MX1 and MX2

水深/m	相关系数	偏角/(°)
20	0.52	-1
50	0.51	-1
100	0.53	-3
200	0.45	-11
530	0.67	-1
1 000	0.64	-28
2 000	0.20	-2

山底处相应深度层次的海流有所差异。

已有研究表明,在西太平洋以 20°N 为中心的纬度带内,海面高度和表层海流都表现出明显的准 90 d 振荡<sup>[10-11]</sup>。我们的观测进一步表明,该海域海流的主振荡周期为 100 d,该振荡不仅出现在表层,同时也出现在深层,在 2 000 m 以深海流振荡的位相与 2 000 m 以浅相反且出现深层强化现象,这主要是受第一斜压模态的主导。另外,由于在近底层观测的海流层次较少,目前还不能判断深层海流是否还受到地形罗斯贝波的影响,有待于将来的进一步研究。

#### 参考文献:

- 乔方利, Tal E, 袁业立. 全球海洋高频波动主振荡周期的纬向带状分布特征[J]. 海洋学报, 2004, 26(3): 1-7.  
Qiao Fangli, Tal E, Yuan Yeli. The zonal distribution features of high frequency oscillations in the oceans derived from satellite altimeter data[J]. Haiyang Xuebao, 2004, 26(3): 1-7.
- 刘秦玉, 王启. 热带太平洋海面高度季节内振荡的空间分布特征[J]. 青岛海洋大学学报, 1999, 29(4): 549-555.  
Liu Qinyu, Wang Qi. Spatial distribution of the sea surface height intraseasonal oscillation in the Tropical Pacific[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1999, 29(4): 549-555.
- 刘秦玉, 潘爱军, 刘征宇. 太平洋北赤道流区上层海洋季节内振荡及斜压稳定性[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(1): 94-100.  
Liu Qinyu, Pan Aijun, Liu Zhengyu. Intraseasonal oscillation and baroclinic instability of upper layer ocean in the North Equator current[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2003, 34(1): 94-100.
- Uda M, Hasunuma K. The eastward subtropical countercurrent in the western North Pacific Ocean[J]. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 1969, 25(4): 201-210.
- Yoshida K, Kidokoro T. A subtropical counter-current in the North Pacific-an eastward flow near the subtropical convergence[J]. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 1967, 23(2): 88-91.
- 顾玉荷, 孙湘平, 许兰英. 137°E 经向断面上的副热带逆流[J]. 海洋学报, 1999, 21(5): 22-30.  
Gu Yuhe, Sun Xiangping, Xu Lanying. Subtropical countercurrent at the 137°E longitudinal section[J]. Haiyang Xuebao, 1999, 21(5): 22-30.
- 李薇, 刘海龙, 刘秦玉. 北太平洋副热带海区的两支东向逆流[J]. 大气科学, 2003, 27(5): 811-820.  
Li Wei, Liu Hailong, Liu Qinyu. Two branches of the eastward countercurrent in the subtropical region of the North Pacific[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(5): 811-820.
- 孙湘平. 西北太平洋副热带逆流、北赤道流、北赤道逆流几个特征的比较[J]. 黄渤海海洋, 2000, 18(1): 1-12.  
Sun Xiangping. A comparison of characteristics between the subtropical countercurrent, the North Equatorial current and the North Equatorial countercurrent in the northwestern Pacific Ocean[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 2000, 18(1): 1-12.
- Qiu Bo. Seasonal eddy field modulation of the North Pacific subtropical countercurrent: TOPEX/Poseidon observations and theory[J]. Journal of Physical Oceanography, 1999, 29(10): 2471-2486.
- 刘秦玉, 杨海军, 鲍洪彤, 等. 北太平洋副热带逆流的气候特征[J]. 大气科学, 2000, 24(3): 363-372.

- Liu Qinyu, Yang Haijun, Bao Hongtong, et al. Climatic features of subtropical countercurrent in the North Pacific[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24(3): 363–372.
- [11] 潘爱军, 刘秦玉, 胡瑞金, 等. 北太平洋副热带逆流区海流的准90天振荡[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(1): 18–24.  
Pan Aijun, Liu Qinyu, Hu Ruijin, et al. Quasi 90-day oscillation of the current in the area of subtropical countercurrent in the North Pacific[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, 32(1): 18–24.
- [12] Yoshioka N, Endoh M, Ishizaki H. Observation of the abyssal current in the West Mariana Basin[J]. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1988, 44(1): 33–39.
- [13] 梁楚进, 侯一筠, 陈琪, 等. 中国多金属结核开辟区近底低频流动特征[J]. *科学通报*, 2004, 49(11): 1184–1189.  
Liang Chujin, Hou Yijun, Chen Qi, et al. Characteristics of low-frequency components of the near-bottom current in the Chinese pioneer area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(11): 1184–1189.
- [14] Kawabe M, Fujio S, Yanagimoto D. Deep-water circulation at low latitudes in the western North Pacific[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2003, 50(5): 631–656.
- [15] Liu Yansong, Yu Fei, Nan Feng, et al. Intraseasonal oscillation of deep currents influenced by mesoscale eddies in the Kuroshio extension region[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 4147.
- [16] Wang Fujun, Zhang Linlin, Hu Dunxin, et al. The vertical structure and variability of the western boundary currents east of the Philippines: case study from in situ observations from December 2010 to August 2014[J]. *Journal of Oceanography*, 2017, 73(6): 743–758.
- [17] 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海流的低频变异[J]. 海洋学报, 2020, 42(9): 1–8.  
Kuang Fangfang, Pan Aijun, Zhang Junpeng, et al. Low frequency variation of abyssal current east of the Luzon Strait: cast study from *in situ* observation[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(9): 1–8.
- [18] Liu Lintao, Hsu H, Grafarend E W. Normal Morlet wavelet transform and its application to the Earth's polar motion[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B8): B08401.
- [19] Liang Xinfeng, Thurnherr A M. Subinertial variability in the deep ocean near the East Pacific Rise between 9° and 10°N[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(6): L06606.
- [20] Zhang Yanwei, Liu Zhifei, Zhao Yulong, et al. Effect of surface mesoscale eddies on deep-sea currents and mixing in the northeastern South China Sea[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 122: 6–14.
- [21] Ma Qiang, Wang Fan, Wang Jianing, et al. Intensified deep ocean variability induced by topographic Rossby waves at the Pacific yapa-Mariana junction[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(11): 8360–8374.
- [22] Shu Yejiang, Xue Huijie, Wang Dongxiao, et al. Persistent and energetic bottom-trapped topographic Rossby waves observed in the southern South China Sea[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24338.

## Low frequency variation of deep current at Niulang Seamount based on submarine mooring observation

Kuang Fangfang<sup>1</sup>, Zhang Junpeng<sup>1</sup>, Zhou Xiwu<sup>1</sup>, Chen Hangyu<sup>1</sup>, Jing Chunsheng<sup>1</sup>

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

**Abstract:** Based on the long-term observation obtained from two sets of submarine mooring system deployed at Niulang Seamount in the western Pacific, the vertical distribution of the deep currents and the temporal variation characteristics were analyzed in the paper. The results show that: (1) The annual mean ocean currents and the variations were the largest in the upper layer, the second in the middle and deep layers, and the smallest in the middle-deep layers. (2) The subtropical countercurrent was at the depth shallower than 150 m, and the northward current was at depth deeper than 150 m and at the middle layers; the near bottom current was weak southward at the summit of the seamount, but southwestward at the bottom of the seamount. (3) Both at the summit and bottom of the seamount, the currents showed a seasonal oscillation with the most energetic oscillation at a period of about 100 d throughout the water column; at depth above 2 000 m, currents showed a synchronous oscillation in the throughout the water column, with the oscillation amplitude decreasing with depth; current oscillation at deep layers (below 2 000 m) were in opposite phase with that at the upper layers, and the oscillation amplitude was the strongest at 4 000 m.

**Key words:** Niulang Seamount; mooring system; deep current; low frequency variation