

南海北部陆坡海区春末第一模态内孤立波观测及特征分析

王火平¹, 鞠霞^{2,3,4,5*}, 孙佳^{2,3,4,5}, 于龙^{2,3,4,5}

(1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司 深水工程建设中心, 广东 深圳 518067;

2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

3. 自然资源部 海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061;

4. 山东省海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061;

5. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘 要: 为获取南海北部陆坡海区第一模态内孤立波的动力结构及时间变化特征, 本文利用该海区 1 套内孤立波浮标观测数据, 对陆坡海区的内孤立波现场观测数据分析, 识别判定了 2021 年 5 月 5 日至 6 月 3 日共 30 d 的 179 次第 1 模态内孤立波过程, 并进行了内孤立波的特征分析。南海北部陆坡海区第 1 模态内孤立波剖面流场为双层结构, 上层主要为西偏北向流动, 下层流向与之相背, 流速转向发生在 100~150 m 深度处。内孤立波期间, 最大流速多发生于上层, 流速为 60~120 cm/s, 底层流增强, 上层流与下层流流向相反。受内潮影响, 研究区域内孤立波存在半日和全日 2 个周期, 主要以 20~30 min 间隔的波列形式向西偏北方向传播。本文关于南海北部陆坡海区第一模态内孤立波的分析研究有助于提升对该海区内孤立波时空变化特征的认识, 为工程水下施工提供参考和依据。

关键词: 内孤立波; 南海; 陆坡; 现场观测; 传播方向

中图分类号: P731

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)03-0399-09

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20210707001

引用格式: 王火平, 鞠霞, 孙佳, 等. 南海北部陆坡海区春末第一模态内孤立波观测及特征分析[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(3): 399-407. WANG H P, JU X, SUN J, et al. Observation and analysis of the first mode internal solitary wave in the continental slope of the northern South China Sea in late spring[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(3): 399-407.

南海是西北太平洋最大的边缘海, 是内孤立波最频发的海域之一^[1]。内孤立波是海洋内波的一种, 是海洋密度跃层内产生的一种非线性内波, 通常是由强流通过陡峭海底地形激发产生, 在传播过程中波型近似保持不变^[2], 振幅较大^[3-4]。内孤立波是一种常见的海洋现象, 在边缘海和陆坡海域出现得尤为频繁^[1,5-6]。内孤立波具有大振幅和突发性强流等特征, 其对海洋工程施工和水下航行安全等都具有重要影响^[7-10]。

南海北部陆坡深水区油气资源潜力大, 勘探前景好^[11], 是我国深水油气开发的重点发展区域之一。由于南海台风于每年 6 月份以后显著增多^[12], 因此南海北部陆坡海区油气开采平台建设一般集中于春季进行。该海区频发的大振幅内孤立波, 主要源于吕宋海峡, 由潮地相互作用激发的内潮在西向传播过程中受非线性、非静力和旋转共同调制下激发形成。其中吕宋海峡处 M_2 内潮影响更强, 全日内潮发挥次要作用^[13-16]。

收稿日期: 2021-07-07

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——海表温度影响台风强度变化速率的量化规律研究(2020Q05); 国家自然科学基金青年基金项目——中尺度涡对台风强度的影响过程及机理研究(41706034); 国家科技重大专项——南海北部内波流监测、预报、预警系统研究及应用(2016ZX 05057015)

作者简介: 王火平(1980—), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事南海油气田开发深水工程技术方面研究。

E-mail: wanghp5@cnoc.com.cn

*** 通信作者:** 鞠霞(1983—), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事中国近海海洋动力学方面研究. E-mail: juxia@fio.org.cn

(李 燕 编辑)

受复杂地形和水文环境影响,该海区内孤立波模态信号复杂、周期性显著^[17-19]。南海北部陆坡海域频发的内孤立波过程严重威胁油气开采平台建设安全,是平台建设过程中最关注的海洋现象^[20-21]。如2011年11月,一次强烈的内孤立波过程导致处于施工过程中的流花油田半潜式平台在短时间内产生了巨大的漂移,严重影响了工程施工安全^[21]。因此,对南海北部陆坡区内孤立波特征进行分析具有重要的意义。

本文通过分析南海北部陆坡海域现场观测数据,对海域内春末第一模态内孤立波重现期以及流向和流速等动力结构特征进行统计分析,分析结果可为该海域工程水下施工提供参考和有力支撑。

1 数据

图1a为南海北部陆坡海域布放的针对内孤立波过程开展观测所布放的一套浮标周边的水深地形特征,该浮标位于(116°32′32″E, 21°26′54″N),水深305 m。为准确捕捉内波信号,浮标于距海表面0.8 m处设置1台SeaBird CTD(型号为SEB 37 SM)进行温盐连续观测,距海表面1.5 m处设置1台TRDI 75K ADCP(型号为WH LR 75)向下进行流速剖面观测,浮标设计图如图1b所示。ADCP流速剖面垂向分辨率为8 m,第一层流速数据位于水深18.3 m处,共观测33层,最底层位于274.3 m处。由于内波过程持续时间短,为准确捕捉内波信号,浮标温度、盐度和流速观测的时间分辨率均为3 min。浮标观测时间由2021年5月5日持续至6月3日,共30 d。图1所用的地形数据为SRTM(Shuttle Radar Topography Mission, 数据下载网址为<https://portal.opentopography.org/datasetMetadata?otCollectionID=OT.122019.4326.1>)^[22],由美国太空总署(National Aeronautics and Space Administration)和国防部国家测绘局(National Imagery and Mapping Agency)联合开发。本文采用的地形数据空间分辨率为15″×15″,包含了陆地高程和海洋深度数据。

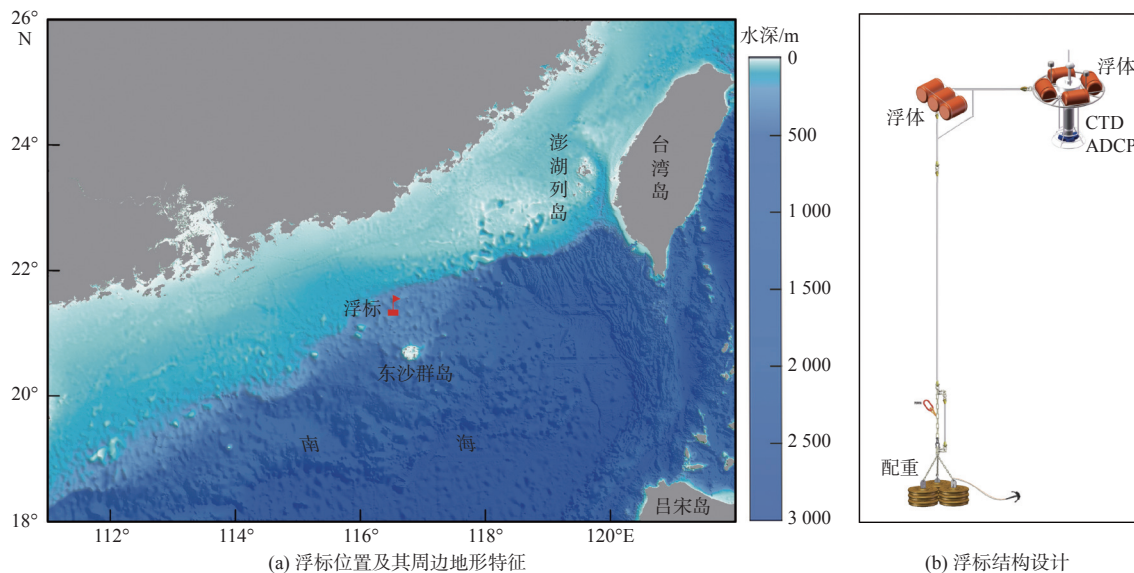


图1 浮标位置及其周边地形和浮标结构设计

Fig. 1 Buoy location and its surrounding topography, schematic diagram of the buoy design drawing

图2为观测时间内所获取的温度、盐度时间序列,以及ADCP的仪器姿态和水平流速的剖面序列。由图2a可知,整个观测期内,仪器纵摇和横摇基本在10°以内,数据良好率在95%以上,ADCP观测数据质量可靠。温度序列存在明显的日周期信号,海表温度在5月15日前逐渐升温,期间盐度无明显的线性变化趋势,5月19日至27日期间温度升高,盐度同步降低(图2b)。图2c和2d分别为观测期内的纬向和经向水平流,存在较明显的日变化。由于ADCP固定悬挂于水面浮体以下,随波浪起伏,垂向流观测误差偏大,因此本文只利用水平流观测数据进行内波信号提取。

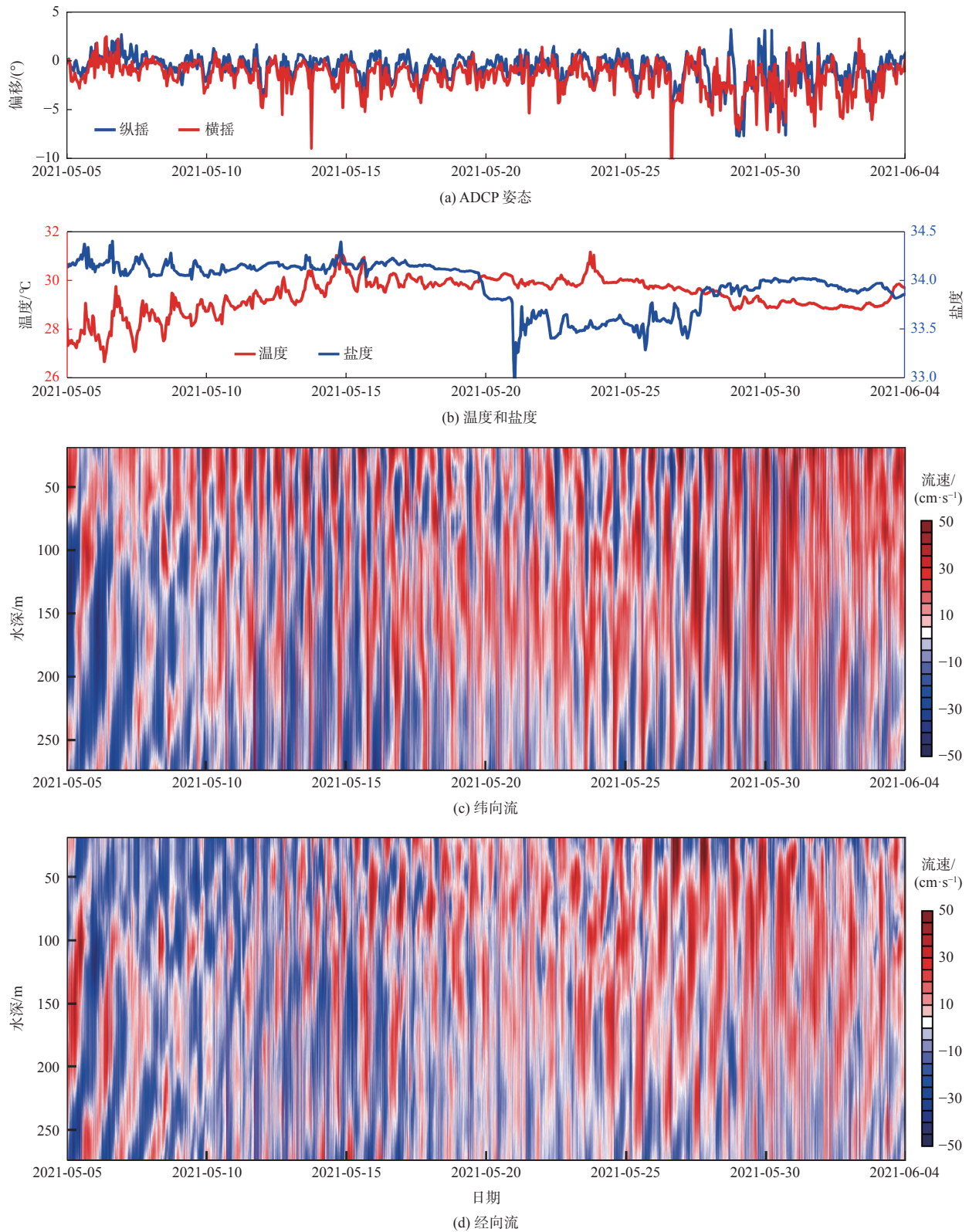
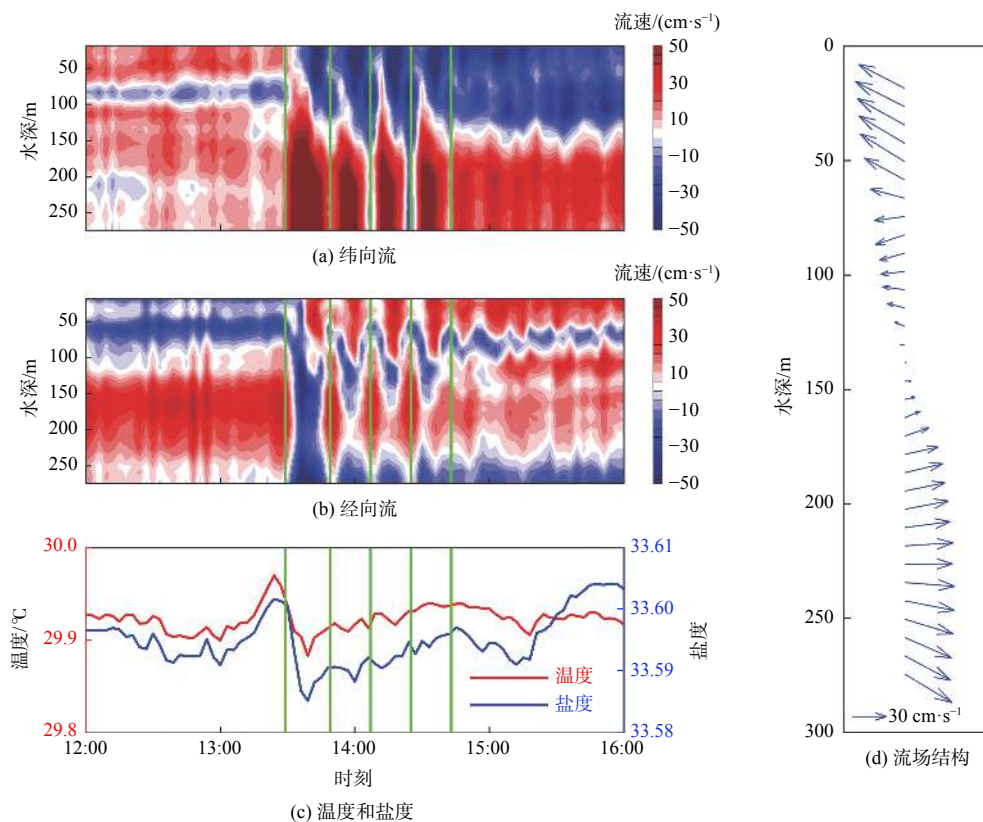


图 2 观测期 ADCP 仪器姿态和温度、盐度及水平流速剖面序列分布

Fig. 2 ADCP attitude and the observed temperature, salinity, and meridional and zonal current velocities

2 内孤立波流场结构及判定

第一模态内孤立波根据流场结构可分为2层,上层水体运动与传播方向一致,下层水体背向传播方向运动。以2021年5月24日12:00至16:00的水平流观测结果为例(图3a和3b),上层70 m以浅为西北向流,100 m以深为东向流,经向水体运动与上层流向相反,70~100 m深度范围存在一股较弱的西向水体流动。13:30左右,浮标位置潮流转向,随后伴随产生较为明显内孤立波波列信号,强度逐渐减弱,重现期约30 min。从海表温度、盐度时间序列数据可以发现,内孤立波过程期间温度和盐度曲线均有明显的下凹,结合流场结构可以判断为第一模态内孤立波信号。波列中内孤立波强度随时间降低,海表温度和盐度的波动信号逐渐消失(图3c)。对前4个信号较强的内孤立波的流场剖面进行集合平均,可发现内波流速剖面为2层结构,上层以西北向流为主,流向随深度逆时针变化,下层以NE—SE向流为主(图3d)。以此结构为依据,本文利用2021年5月5日至6月3日共30 d的流场结合温盐场数据进行人工识别判定,将内孤立波波列中的子波作为1次内孤立波过程,共选取179次内孤立波过程,并对其特征进行统计分析。



注:相邻2条绿线之间为潮流转换后的前4个内孤立波信号。

图3 2021-05-24内孤立波波列水平流速剖面序列分布

Fig. 3 Vertical structure of meridional and zonal current velocities of the internal solitary waves during 24 May, 2021

3 内孤立波重现期

内孤立波在南海北部陆坡区域多以波列形式出现,重现期较短,强度较大(图3)。南海北部主要为不规则半日潮类型,内潮对内孤立波重现期有显著影响。对浮标捕捉到的内孤立波信号进行分析,发现南海

北部的内孤立波主要存在3个重现期信号(图4a)。其中,重现期为0~1 h的内孤立波占总数的58.4%,这说明波列形式是南海第一模态内孤立波出现的主要形式。由于南海背景环流对内孤立波流场的影响以及人工判别方式可能存在的误差,部分信号较弱的内孤立波过程可能未被记录,从而导致40~60 min重现期占比较大。综合考虑上述因素的影响,波列中的内孤立波重现期应在20~30 min(图4b)。除波列形式的重现期信号外,该区域的内孤立波仍存在半日(11~12 h)和全日(24 h)两个重现期信号(图4c)。这2个信号主要是由半日内潮和全日内潮在吕宋海峡处发生潮地相互作用,以及内潮非线性变陡机制激发效应所致^[11-14],显示了南海北部陆坡海区第一模态内孤立波的主要变化周期。激发生成的半日和全日周期的内孤立波由巴士海峡生成后以波列形式向西传播,影响南海北部陆坡区域海洋流场特征。

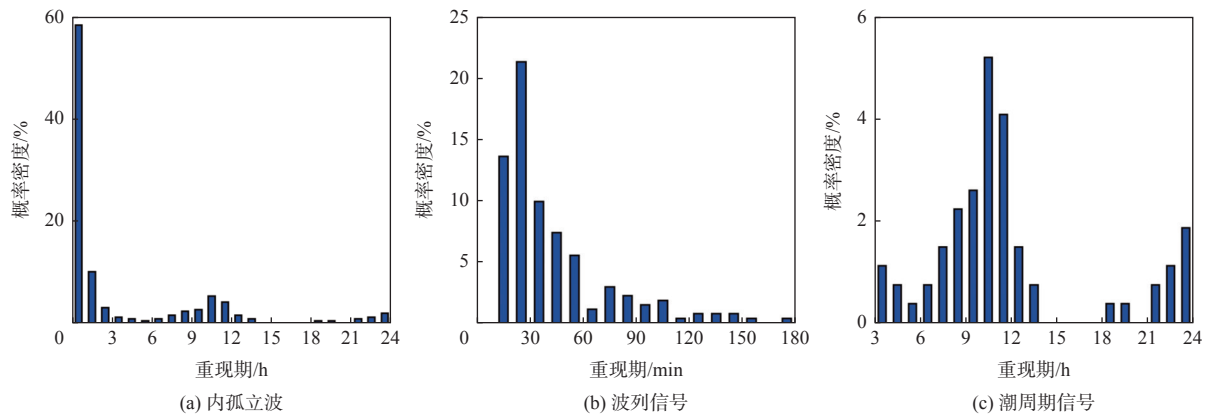


图4 内波重现期概率密度分布

Fig. 4 Histogram of the recurrence interval of internal solitary waves

4 内孤立波传播方向及流速特征

图5为陆坡区域浮标位置处观测到的179个内孤立波流向流速玫瑰图及表层(ADCP有效观测结果第一层)流流速、最大流流速以及最大流速所在深度的概率密度分布图。由图5可知,该区域内波传播方向角度多在 $281^{\circ}\sim 303^{\circ}$,以WNW传播方向为主,NW方向次之(图5a);最大流速集中在上层区域,与内波传播方向一致,少部分发生于背向内孤立波传播方向的深层区域(图5b)。表层流流速多分布于20~80 cm/s范围内,占总数的81.5%以上(图5c);最大流速多分布于40~120 cm/s,占总数的88.4%以上(图5d),较表层流速稍强,集中分布于100 m以浅,以西北向流速结构为主(图5e)。此外,近底层存在一处最大流速汇集区(图5e),表明内孤立波可能引发底流的突变,并对海底附近的施工作业产生重要影响。

图6为浮标位置处根据现场观测数据统计得到的内波传播方向示意图。浮标处水深近300 m,水深变化梯度大,等深线梯度由西逐渐向北偏转,浮标位置处地形梯度为北偏西方向。受地形变化影响,吕宋海峡传至此处的内孤立波传播方向发生改变,由西逐渐向北偏转,最终形成西偏北方向的传播特征。

由于不同内孤立波之间的结构差异性,因此本文对观测期内179个内孤立波的流速进行集合分析。图7为179个内波期间的流速分量大小和流矢量剖面结构。由图7可见,第一模态内孤立波普遍的双层结构特征,南海陆坡区域处上层水体为西北向流动,下层为东南向流动。受潮汐运动影响,流场存在明显半月周期信号。纬向流在5月16日和6月1日左右达到极大值,分别对应小潮和大潮。内孤立波流场由海表向下沿逆时针转动,流速极小值(流场转向处)主要集中在100~150 m深度层(图7c)。

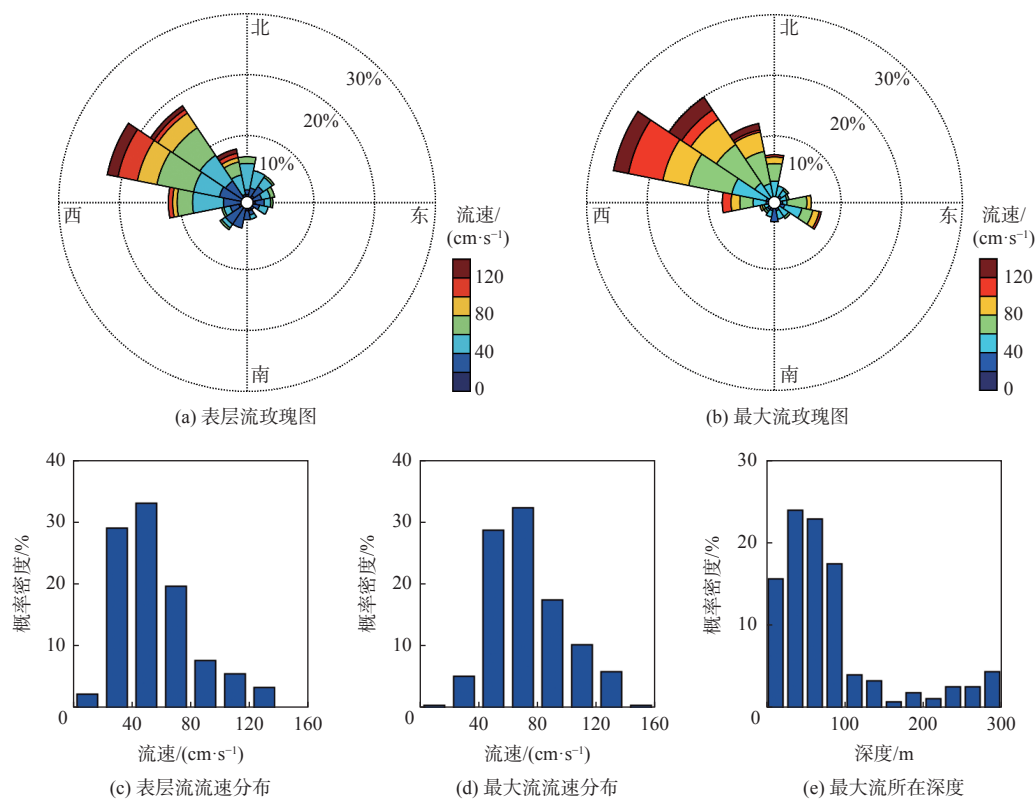


图5 内孤立波流向流速玫瑰图及表层流流速、最大流流速以及最大流速所在深度的概率密度分布

Fig. 5 Speed-direction rose maps of the internal solitary waves and histogram of surface current speed, maximum current speed, and depth of the maximum current

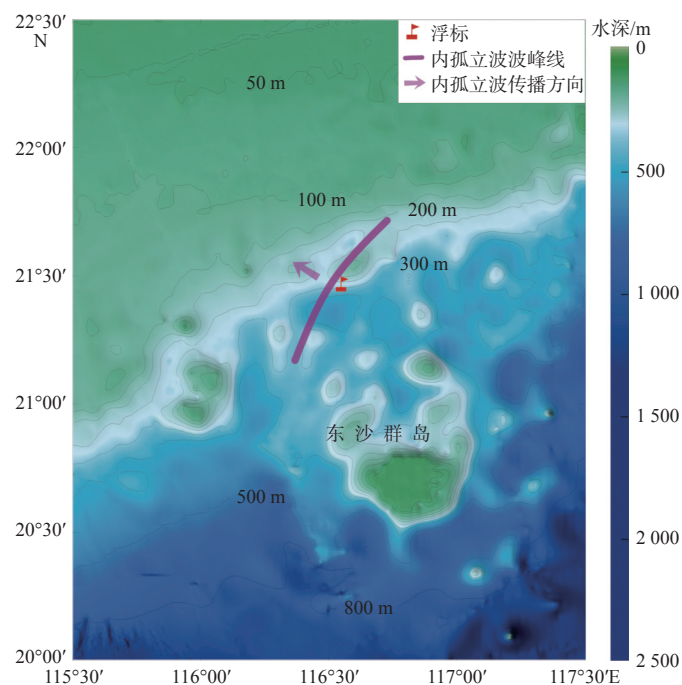


图6 浮标周边海区地形、内孤立波波峰线及传播方向示意图

Fig. 6 Topography and the diagram of peak line and propagation direction of the internal solitary waves

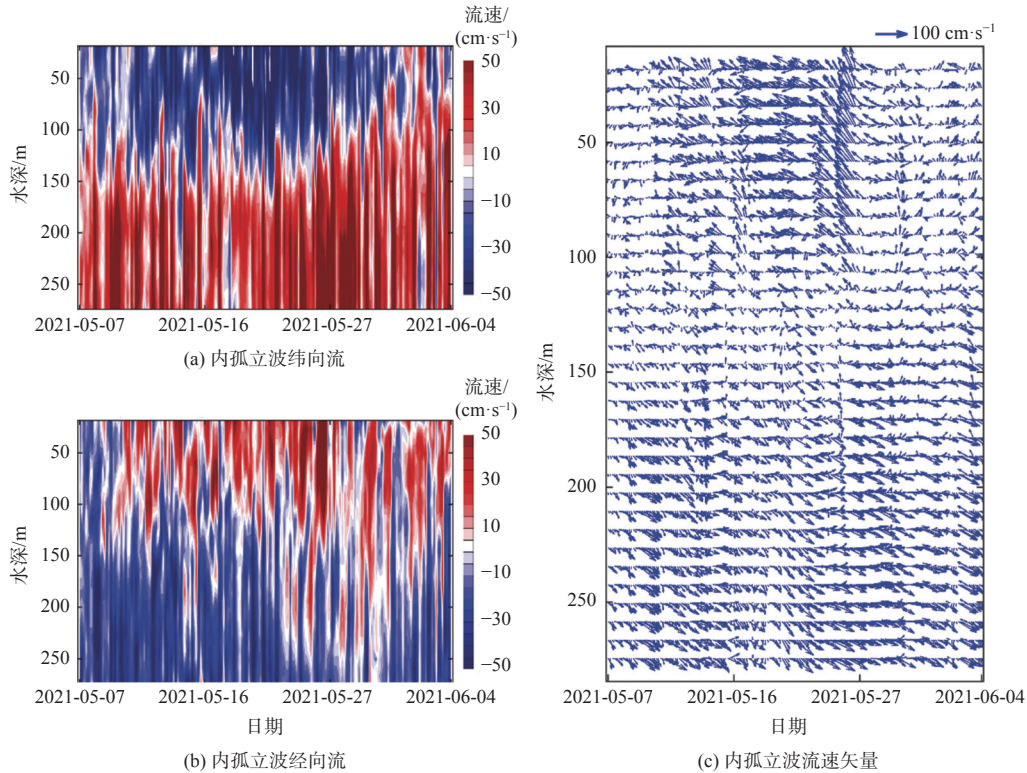


图7 内孤立波流速结构

Fig. 7 Vertical structure of the current associated with the internal solitary waves

5 结 论

本文通过分析处理南海北部陆坡海区2021年5月5日至6月3日期间1套内孤立波浮标的流速和温盐观测数据,对该海区内孤立波过程进行了识别判定和结构分析。通过对该浮标捕获的179次第一模态内孤立波信号的重现期、传播方向和流速结构等特征进行集合分析发现,南海北部陆坡海区春季第一模态内孤立波垂向流场为双层结构,上层为西偏北向流动,下层为东南向流动。受内潮的影响,南海北部陆坡区域内孤立波存在半日和全日两个重现周期,主要以20~30 min间隔的波列形式向西偏北方向传播,传播方向受陆坡海区地形梯度制约。内孤立波期间,最大流速多发生于水深100 m以浅的上表层,流速集中在60~120 cm/s ,底层流增强。流向随深度逆时针变化,并于100~150 m水深处发生层结流场转向。这些结果表明,南海北部陆坡海区内孤立波频发、规律较为明显。

内孤立波伴随的水下强流主要出现在上表层,容易引发作业船只定位漂移、对油气平台水下结构和施工人员形成猛烈冲击,造成重大安全隐患。因此,该海区油气平台建设施工时应主动进行内孤立波实时监测预警,从而有效保障生产安全。本文研究成果也提升了对该海区内孤立波时空变化规律的认识水平,丰富了内孤立波研究成果。

参考文献 (References):

- [1] JACKSON C. Internal wave detection using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(C11): C11012.
- [2] 蔡树群. 内孤立波数值模式及其在南海区域的应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2015. CAI S Q. Internal solitary wave numerical model and its application in

- the South China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2015.
- [3] 方欣华, 杜涛. 海洋内波基础和中国海内波[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005. FANG X H, Du T. Fundamentals of oceanic internal waves and internal waves in the China seas[M]. Qingdao: Ocean University of China Press, 2005.
- [4] ZIEGENBEIN J. Short internal waves in the Strait of Gibraltar[J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1969, 16(5): 479-482.
- [5] APEL J R, HOLBROOK J R, LIU A K, et al. The Sulu Sea internal soliton experiment[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1985, 15(12): 1625-1651.
- [6] ZHAO Z X, ALFORD M H. Source and propagation of internal solitary waves in the northeastern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2006, 111(C11): C11012.
- [7] BOLE J B, EBBESMEVER C C, ROMEA R D. Soliton currents in the South China Sea: measurements and theoretical modeling[C]. Houston, USA: OTC, 1994.
- [8] CAI S Q, LONG X, GAN Z. A method to estimate the forces exerted by internal solitons on cylindrical piles[J]. *Ocean Engineering*, 2003, 30(5): 673-689.
- [9] CHIU C S, RAMP S R, MILLER C W, et al. Acoustic intensity fluctuations induced by South China Sea internal tides and solitons[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(4): 1249-1263.
- [10] OSBORNE A R, BURCH T L, SCARLET R L. The influence of internal waves on deep-water drilling[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1978, 30(10): 1497-1504.
- [11] 钟广见, 金庆焕, 张宝金, 等. 南海北部陆坡深水盆地特征及其油气勘探潜力[J]. *地球科学前沿*, 2013, 3(1): 64-72. ZHONG G J, JIN Q H, ZHANG B J, et al. The structure characteristics and petroleum exploration potential of deep-water basins in northern South China Sea[J]. *Advances in Geosciences*, 2013, 3(1): 64-72.
- [12] 于龙, 孙佳, 回贞立, 等. 西行穿越南海台风的特征及机制研究[J]. *海洋科学进展*, 2019, 37(4): 543-550. YU L, SUN J, HUI Z L, et al. Study on the typhoons with westward tracks crossing the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2019, 37(4): 543-550.
- [13] FARMER D, ALFORD M, LIEN R C, et al. From Luzon Strait to Dongsha plateau: stages in the life of an internal wave[J]. *Oceanography*, 2011, 24(4): 64-77.
- [14] LIEN R C, TANG T Y, CHANG M H, et al. Energy of nonlinear internal waves in the South China Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L05615.
- [15] ZHAO Z, KLEMAS V, ZHENG Q A, et al. Remote sensing evidence for baroclinic tide origin of internal solitary waves in the northeastern South China Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L06302.
- [16] 郑全安. 卫星合成孔径雷达探测亚中尺度海洋动力过程[M]. 北京: 海洋出版社, 2018. ZHENG Q A. Satellite SAR detection of sub-mesoscale ocean dynamic processes[M]. Beijing: China Ocean Press, 2018.
- [17] 吴凡, 杨永增, 熊学军, 等. 相同尺度地形与背景流共振生成内孤立波机制[J]. *海洋科学进展*, 2022, 40(2): 197-208. WU F, YANG Y Z, XIONG X J, et al. Mechanism of internal solitary waves generated by the resonance of same-scale terrain and background current[J]. *Advances in Marine Science*, 2022, 40(2): 197-208.
- [18] 许培鹏, 熊学军, 陈亮, 等. 南海北部陆坡海域第二模态内孤立波统计特征[J]. *海洋科学进展*, 2022, 40(2): 187-196. XU P P, XIONG X J, CHEN L, et al. Statistical analysis of the second-mode internal solitary wave in the continental slope area of the northern South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2022, 40(2): 187-196.
- [19] 徐智优, 原庆东, 熊学军, 等. 南海东北部C型内孤立波的观测与分析[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(02): 211-225. XU Z Y, YUAN Q D, XIONG X J, et al. Observation and analysis of type C internal solitary waves in the northeastern South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(02): 211-225.
- [20] 王火平, 陈亮, 郭延良, 等. 海洋内孤立波预警监测识别技术及其在流花16-2油田群开发中的应用[J]. *海洋工程*, 2021, 39(2): 162-170. WANG H P, CHEN L, GUO Y L, et al. Observing, identification and early warning technology of internal solitary wave and its application in Liuhua 16-2 oilfield group development project[J]. *The Ocean Engineering*, 2021, 39(2): 162-170.
- [21] 原庆东, 冒家友, 冯丽梅, 等. 南海孤立内波对海上安装作业的影响及预防[J]. *石油工程建设*, 2013, 39(6): 27-30. YUAN Q D, MAO J Y, FENG L M, et al. Effect of internal soliton in South China Sea on offshore installation operation and its prevention[J]. *Petroleum Engineering and Construction*, 2013, 39(6): 27-30.
- [22] National Aeronautics and Space Administration and National Imagery and Mapping Agency. Global Bathymetry and Topography at 15 Arc Sec: SRTM15+ [EB/OL]. [2020-12-02]. <https://portal.opentopography.org/datasetMetadata?otCollectionID=OT.122019.4326.1>.

Observation and Analysis of the First Mode Internal Solitary Wave in the Continental Slope of the Northern South China Sea in Late Spring

WANG Huo-ping¹, JU Xia^{2,3,4,5}, SUN Jia^{2,3,4,5}, YU Long^{2,3,4,5}

(1. CNOOC Deepwater Development Co. Ltd., Shenzhen 518067, China;

2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;

3. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, MNR, Qingdao 266061, China;

4. Shandong Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, Qingdao 266061, China;

5. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: To obtain the characteristics of the first mode internal solitary wave dynamic structure and temporal variation in the continental slope region of northern South China Sea, ocean current data observed with ADCP from May 5 to June 3, 2021 are used and 179 first mode internal solitary waves are identified. Analysis of the internal solitary waves shows that, the vertical structure associated with the internal solitary waves are of double-layer, the current in upper layer is northwestward while that in lower layer is in opposite direction, and the reversal of current direction occurs at 100-150 m. The maximum ocean current were observed in the upper layer with amplitude of 60-120 cm/s. Influenced by internal tide, internal solitary waves exhibit two major periods, semidiurnal and diurnal periods, and propagate northwestward as wave trains with recurrence period of 20-30 minutes. These findings are useful for improving the understanding of the spatial-temporal variation of internal solitary waves, and provide theoretical references for underwater engineering.

Key words: internal solitary wave; South China Sea; continental slope region; in situ observation; propagation direction

Received: July 7, 2021