

南海北部陆坡海域第二模态内孤立波统计特征

许培鹏^{1,2}, 熊学军^{1,2,3,4*}, 陈亮^{2,3,4}, 官庆龙⁵,
郭延良^{2,3,4}, 于龙^{2,3,4}, 吴凡²

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;

2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

3. 青岛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;

4. 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;

5. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 根据南海北部陆坡海域潜标观测数据, 对该海域第二模态内孤立波统计特征进行分析。观测期间共发现 72 个第二模态内孤立波, 包含 101 个第二模态内孤立波孤立子。该海域第二模态内孤立波以凸型为主, 且最大振幅多为下凹振幅, 占 79.2%。KdV 方程波速计算结果表明, 波速可用三角函数描述, 整体表现为夏季大、冬季小, 且第二模态内孤立波流速呈明显的三层结构。最大流速深度及人工判别得到的上下层转向深度的统计结果表明: 上层内波流速转向平均深度约为 97.7 m, 中层内波流最大流速深度约为 134.6 m, 下层内波流转向平均深度约为 204.2 m, 内波流最大流速多发生在中层, 流向主要为西北向, 流速主要分布于 $0.2 \sim 0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区间范围内, 占 82.2%; 上层流向主要为东南向, 流速主要分布于 $0 \sim 0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区间范围内, 占 98.0%; 中层流向主要为西北向, 流速主要分布于 $0.2 \sim 0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区间范围内, 占 93.1%; 下层流向主要为东南向, 流速主要分布于 $0 \sim 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区间范围内, 占 94.1%。本文系统性地给出了南海北部陆坡海域第二模态内孤立波统计特征, 可为相关研究、水下航行及工程应用提供重要的资料和参考。

关键词: 第二模态内孤立波; 陆坡海域; 特征分析; 转向深度

中图分类号: P731

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)02-0187-10

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.2022.02.003

引用格式: 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分析[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.

海洋内孤立波是发生在密度稳定层化的海洋内部的一种波动^[1]。按照其垂向结构特征, 可以将内孤立波分为 n 个模态。对于第 i 模态, 其垂向位移在垂向上有 i 个极值点, 即其振幅在垂向上有 $i-1$ 次变化 ($i=1, 2, 3, \dots, n$)^[2]。在同等背景场条件下, 第二模态内孤立波的振幅、流速及波速相比第一模态内孤立波较小。但其产生的强流发生的深度更深, 这对于水下航行和水下施工可能产生更大的威胁。同时, 根据目前的文献记载, 第二模态内孤立波水平流的垂向切变最大可达到 0.045 s^{-1} , 相当于典型第一模态内孤立波的 2

收稿日期: 2021-07-30

资助项目: 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(2016ZX05057015); 海洋工程装备科研项目——500 米水深油田生产装备 TLP 自主研发—内波流预警方案研究及内波流监测系统研制; 国家自然科学基金项目——黄海暖流的多时相特征及其发生机制研究(41376038); 国家海洋局全球变化与海气相互作用专项子课题——黑潮结构时空变化特征对中国近海环流的影响分析(GASI-03-01-01-02)、黑潮不稳定性及多核结构(GASI-IPOVAI-01-05)和东印度洋南部水体综合调查夏季航次(GASI-02-IND-STSum); 国家自然科学基金青年基金项目——东海黑潮三维结构及季节变化研究(40406009)

作者简介: 许培鹏(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事区域海洋动力学及调查技术方面研究. E-mail: xupp@fio.org.cn

* **通信作者:** 熊学军(1976—), 男, 研究员, 博士, 主要从事区域海洋动力学及调查技术方面研究. E-mail: xiongxi@fio.org.cn

(李 燕 编辑)

倍,这将会导致更强的垂向混合^[3]。

以往的观测和理论研究大多聚焦于第一模态内孤立波,而对第二模态内孤立波的研究分析较为缺乏。近年来,关于南海第二模态内孤立波的观测报道开始出现。Yang 等^[4]基于潜标观测数据分析发现,南海北部陆坡上的第二模态内孤立波在夏季只是偶尔发生,而在冬季发生较为频繁。这是因为冬季跃层深度变深有利于第二模态内孤立波激发产生^[5]。Ramp 等^[6]在 2011 年 8 月 5 日至 16 日的两次南海现场随船观测中发现多个第二模态内孤立波,其观测结果表明,第二模态内孤立波保持长距离传播,不是一种能穿越南海海盆的波动现象。Chen 等^[7]基于潜标观测周年数据对南海西北部海域第二模态内孤立波研究发现,其非线性特征可很好地用 KdV 方程进行描述,同时观测到有文献记载以来最强第二模态内孤立波。范文豪等^[8]则利用地震海洋学方法对第二模态内孤立波波群进行了研究。目前,关于第二模态内孤立波生成机制的说法大致可以分为两类:一类是第一模态内孤立波与海底突变地形相互作用容易激发产生第二模态内孤立波^[9-13];另一类是由于内潮、中尺度涡等海洋现象引起层结变化导致产生第二模态内孤立波^[14-17]。例如:Vlasenko 和 Hutter^[10]基于实验室试验结果研究发现,当第一模态内孤立波经过海底小山时会分裂形成第一模态和第二模态两种内孤立波;Lamb 和 Warn-Varnas^[13]基于二维数值模拟研究结果表明,第一模态内孤立波在陆坡上传播过程中,上凸型和下凹型第二模态内孤立波均有可能产生;Dong 等^[16]基于 SAR 影像资料研究表明,中尺度涡的发生改变了水体层化条件,为内潮的产生提供了便利的水文条件,当第一模态内潮与气旋涡发生共振时会激发产生第二模态内孤立波。

然而,基于现场观测资料的第二模态内孤立波研究还是相对较少。本文将基于布放在南海东沙群岛西侧陆坡海域的潜标周年观测数据,对第二模态内孤立波的振幅、波速、转向深度及流速流向等要素进行系统性统计分析。

1 数据与方法

1.1 数据资料介绍

1.1.1 潜标观测数据

观测数据来源为 2020 年 4 月 1 日至 2021 年 5 月 7 日在南海北部陆架坡折区域布放的一套锚系潜标。潜标布放位置为(115°48'00"E,20°48'00"N),布放站位水深约 330 m(图 1)。

该潜标为全剖面观测潜标,测量系统主要采用 4 种观测仪器:美国 TRDI 公司生产的型号为 WHLR-150 型 150 kHz ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 和 WHS-300 型 300 kHz ADCP、加拿大 RBR 公司生产的 concerto³ 温盐深测量仪(Conductivity Temperature Depth,CTD)以及美国 SeaBird 公司生产的 SBE56 温度测量仪(Temperature Logger,T)。潜标设备信息见表 1,该潜标系统一共包含 17 台 CTD、16 台 T、1 台 300 kHz ADCP、1 台 150 k ADCP、1 台 1 MHz ADCP。温盐链深度范

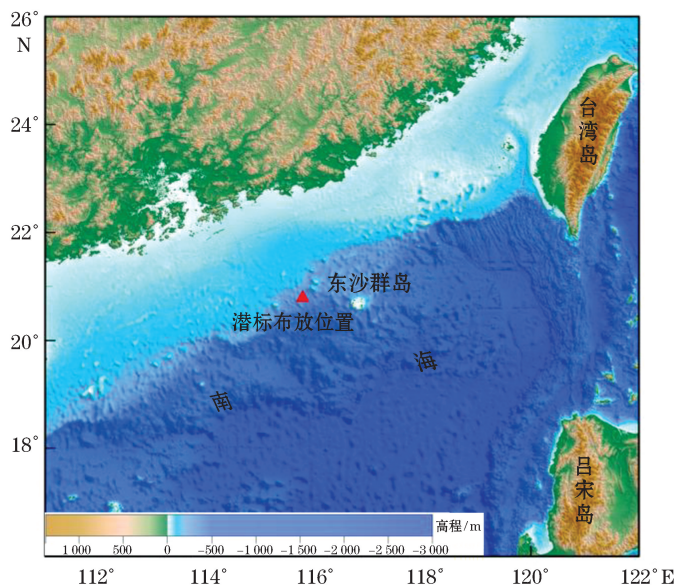


图 1 潜标布放位置及周边海域地形

Fig.1 Mooring location and surrounding topographic features

围为 20~320 m,采用的是 CTD 和 T 交替式安装,垂向间隔为 10 m;水深 20~100 m 的海水流速剖面数据采集采用 300 kHz ADCP,采样间隔设为 4 m;水深 100~320 m 的海水流速剖面数据采集采用 150 kHz ADCP,采样分层间隔设为 4 m。温盐观测的采样时间间隔为 30 或 10 s,海流观测的采样时间间隔为 2 min。

表 1 潜标设备信息

Table 1 Mooring equipment information

布放站位水深/m	仪 器	仪器布放深度/m	采样垂向分层间隔/m	采样时间间隔/s
330	T	2		10
	CTD	20		30
	T	30~75	15	10
		75~315	20	10
	CTD	35~305	20	30
		322		30
	300 kHz ADCP	7~105	4	120
	150 kHz ADCP	105~320	4	120

1.1.2 World Ocean Atlas 2013(WOA13)数据

由于潜标在海面至 20 m 水深部分无温度和盐度观测数据,而实际计算需要完整的温盐剖面,故采用 WOA13 月均温盐剖面数据对全剖面数据进行补齐。WOA13 数据由美国国家海洋数据中心(National Oceanographic Data Center, NODC)发布,包括年平均、季平均与月平均三种类型,水平分辨率为 0.25°,垂直分辨率在 0~100 m 处为 5 m^[18]。

1.2 数据分析方法

1.2.1 振幅计算

第二模态内孤立波存在上凸振幅和下凹振幅,本文将上凸振幅定义为正值,下凹振幅定义为负值。振幅计算过程如下:①确定极性。采用某一等温线第二模态内孤立波初始时刻深度 η_{st} ,与中间时刻深度 η_{mid} 进行比对,若 $\eta_{st} > \eta_{mid}$ 则为下凹,若 $\eta_{st} < \eta_{mid}$ 则为上凸。②确定振幅。计算该温度等值线在内孤立波发生时刻位移 η_{ISW} :

$$\eta_{ISW} = \pm \max(\eta_{\max_i} - \eta_{\min_i}), \tag{1}$$

式中: $\eta_{\min_i}$ 、 $\eta_{\max_i}$ 分别为该温度等值线最小深度和最大深度;本文以 0.5 °C 为间隔,对各温度等值线最大位移进行统计,并选取绝对值最大值 $\max|\eta_{ISW}|$ 作为该第二模态内孤立波振幅。

1.2.2 波速计算

根据 Korteweg-de Vries (KdV)方程^[19],内孤立波波速(非线性波速) C_p 为:

$$C_p = C_a + C_{\text{non}}, \tag{2}$$

式中: C_a 为线性波速, C_{non} 为非线性项。

C_a 可以通过求解 Taylor-Goldstein 方程^[20-21]得到:

$$\frac{d}{dz} \left\{ [C_a - U_a]^2 \frac{df_2}{dz} \right\} + N^2 f_2 = 0, \tag{3}$$

$$f_2(0) = f_2(H) = 0, \tag{4}$$

式中: U_a 为背景剪切流的流速,此处采用内孤立波开始时刻的前 30 min 内每一层流速的平均值; f_2 为内波垂向位移的模式函数; H 为水深; N^2 为垂向浮力频率,在实际计算中可利用潜标温盐数据计算,其上层缺失部分采用 WOA 数据进行补齐,计算公式为:

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}, \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度, ρ 为海水密度。

非线性项 C_{non} 为:

$$C_{\text{non}} = \frac{1}{3} \alpha \eta_0, \quad (6)$$

式中: η_0 为内孤立波最大振幅, α 为非线性系数。 α 可由下式计算得到:

$$\alpha = \frac{3}{2} \int_{-H}^0 [C_a - U_a]^2 \frac{d^3 f_2}{dz^3} dz / \int_{-H}^0 [C_a - U_a] \frac{d^2 f_2}{dz^2} dz. \quad (7)$$

1.2.3 内波流流速与流向计算

内波流流速可根据以下公式计算得到^[7]:

$$u_{\text{ISW}} = u - u_0, \quad (8)$$

$$v_{\text{ISW}} = v - v_0, \quad (9)$$

$$w_{\text{ISW}} = w - w_0 - w_c, \quad (10)$$

式中: u_{ISW} 、 v_{ISW} 、 w_{ISW} 分别为去除背景流后的内波流东西向、南北向、垂向流速分量; u 、 v 、 w 分别为现场实测流的东西向、南北向、垂向分量; u_0 、 v_0 、 w_0 分别为内孤立波开始时刻前 30 min 内的东西向、南北向、垂向流速分量的平均值; w_c 为 ADCP 自身起伏速度, 采用与其一起固定在浮体上的 CTD 水深数据计算获得。

内波流流向 dir_{ISW} 由去除背景流后的 u_{ISW} 、 v_{ISW} 计算得到:

$$\text{dir}_{\text{ISW}} = 180 \times i + \arctan\left(\frac{u_{\text{ISW}}}{v_{\text{ISW}}}\right) \times \frac{180}{\pi} \quad i = 0, 1, 2, \quad (11)$$

式中: 当 $u_{\text{ISW}} > 0$ 且 $v_{\text{ISW}} > 0$ 时, i 取 0; 当 $u_{\text{ISW}} > 0$ 且 $v_{\text{ISW}} < 0$ 时或当 $u_{\text{ISW}} < 0$ 且 $v_{\text{ISW}} < 0$ 时, i 取 1; 当 $u_{\text{ISW}} < 0$ 且 $v_{\text{ISW}} > 0$ 时, i 取 2。

2 统计结果与特征分析

2.1 第二模态内孤立波结构特征与发生频次

图 2 为 2020 年 12 月 31 日观测到的一个典型第二模态内孤立波的特征分布(图 2a~图 2d 中对应红色虚线框内部分)。由其温盐结构(图 2a)可以看出, 其振幅存在 2 个极值点, 其中 180 m 水深以上振幅向上, 最大振幅为 51.1 m; 180 m 水深以下振幅向下, 最大振幅为 76.1 m。图 2b、图 2c 和图 2d 分别为其东西向、南北向及垂向内波流流速剖面。水平内波流流速剖面呈现明显的三层结构, 上层和下层流向为东南向, 中层流向为西北向, 上层转向深度为 106 m, 下层转向深度为 263 m。其垂向内波流流速也存在明显结构特征, 180 m 水深以上, 波峰之前为上升流, 波峰之后为下降流; 180 m 水深以下, 波峰之前为下降流, 波峰之后为上升流。根据 Chen 等^[7]对第二模态内孤立波的研究, 这些显著特征均说明该内波信号为第二模态内孤立波。

由根据东西向内波流与垂向内波流绘制的海流矢量特征图(图 2e)可以看出, 180 m 水深以上水层内波流呈“顺时针涡旋”; 180 m 水深以下水层内波流呈“逆时针涡旋”。且两“涡旋”涡轴与波锋线平行。

该站共观测到 72 个第二模态内孤立波, 其中含第二模态内孤立波孤立子共 101 个。将其与 Chen 等^[7]2016 年 4 月至 2017 年 3 月第二模态内孤立波的发生频次进行对比(图 3), 二者在各月份变化趋势相似。由图 3 可以看出, 第二模态内孤立波在冬季发生频次较高, 在夏季偶尔发生, 这与 Yang 等^[4]的观测结果一致。

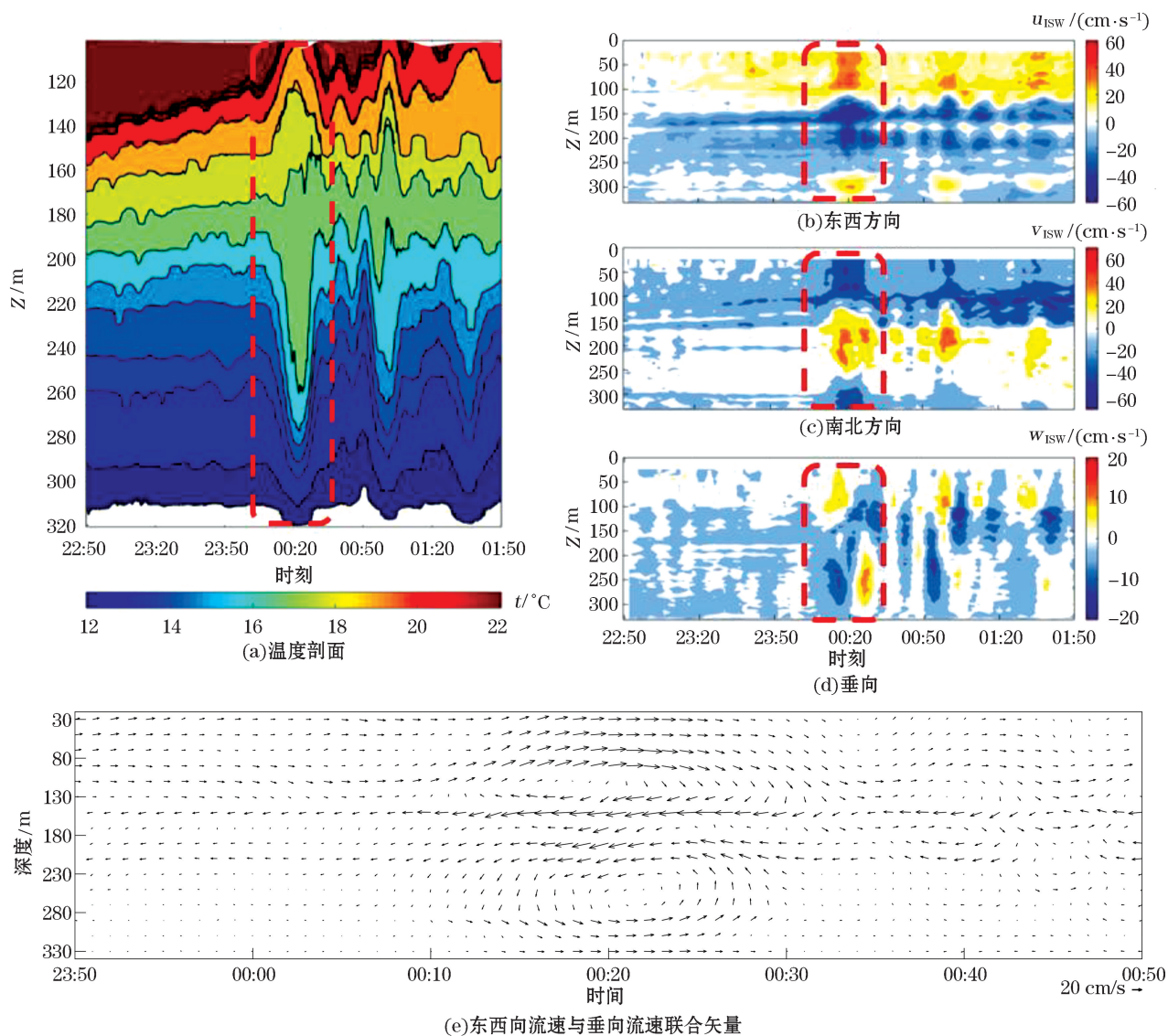
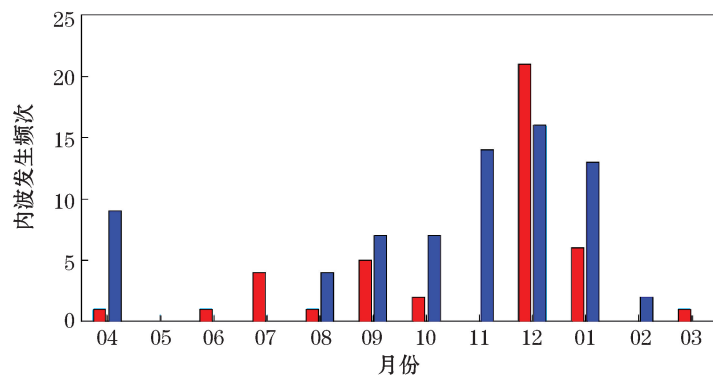


图2 2020年12月31日观测到的一个典型第二模态内孤立波温度、流速及流速联合矢量剖面

Fig.2 Vertical profiles of temperature-salinity, velocity, and velocity vector of a typical mode-2 solitary wave observed on December 31, 2020



注: ■为Chen等^[7]2016年4月至2017年3月的统计结果, ■为本站位2020年4月至2021年3月潜标观测资料的统计结果。

图3 第二模态内孤立波月发生频次逐月分布对比

Fig.3 Monthly frequency distribution of mode-2 solitary waves

2.2 振幅统计特征

图 4 为观测到的所有第二模态内孤立波的振幅分布情况,由图 4 可见,在观测的 101 个第二模态内孤立波中,最大振幅为下凹振幅的内波占比较大,约 79.2%,说明大多数第二模态内孤立波的最大振幅为下凹振幅。从其平均振幅来看,上凸振幅的平均值为 (23.5 ± 10.0) m,下凹振幅的平均值为 $-(30.0\pm12.3)$ m,可见下凹振幅比上凸振幅大。总体来看,观测海域第二模态内孤立波的最大振幅是下凹振幅,为 76.3 m,平均振幅为 31.1 m(表 2)。

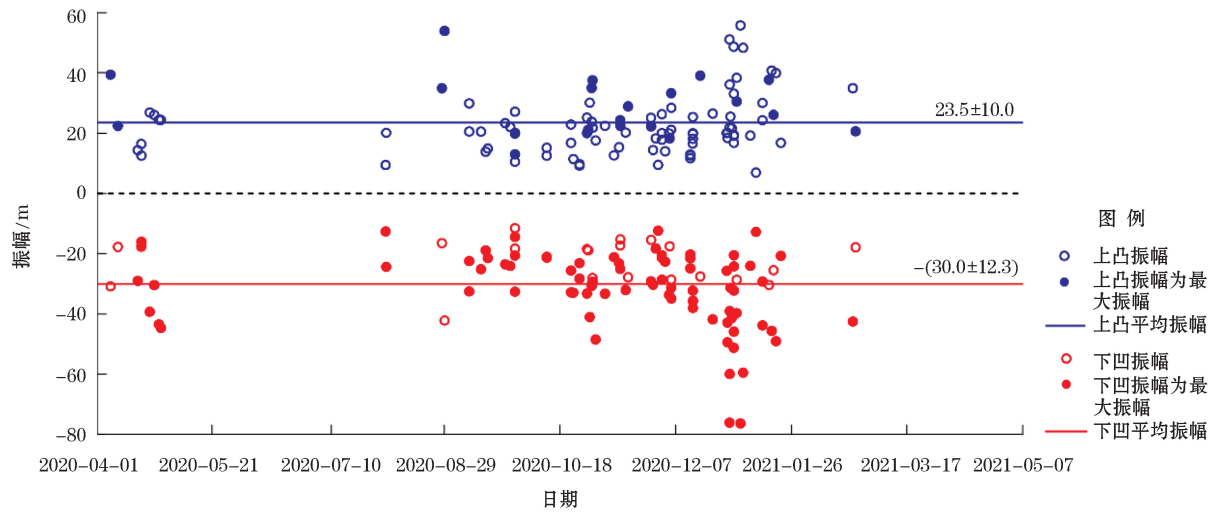


图 4 上凸振幅与下凹振幅分布及各平均振幅

Fig.4 Amplitudes of the convex and concave solitary waves and their mean values

表 2 观测期间振幅统计

Table 2 Amplitude statistics during the observation period

观测要素	上凸振幅/m		下凹振幅/m		最大振幅/m	
	平均值	最大值	平均值	最小值	平均值	最大值
振幅	23.5 ± 10.0	55.7	$-(30.0\pm12.3)$	-76.3	31.1	76.3

2.3 波速统计特征

由利用式(2)计算得到的第二模态内孤立波非线性波速分布(图 5)可以看出,第二模态内孤立波的传播速度呈明显的季节性变化,夏季传播速度较快,冬季传播速度较慢,这是因为夏季海水层结较强,非线性作用对内孤立波波速的贡献率增大,而冬季海水层结较弱,非线性作用对内孤立波波速贡献率减小^[2]。最大波速为 $0.67\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,发生在 9 月 28 日。其季节变化过程可以采用三角函数进行表达,如图 5 中黑色曲线所示,其相关系数为 0.72,这一结果与 Chen 等^[7]的结果接近。表 3 为其非线性波速与线性波速均值与最大值统计结果,从表中可以看出,非线性波速与线性波速均值相差 $0.01\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大值相差 $0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

表 3 观测期间非线性波速与线性波速均值、最大值统计结果

Table 3 Statistics of the average and the maximum values of nonlinear wave velocity and linear wave velocity during the observation period

观测要素	$C_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		$C_a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	
	平均值	最大值	平均值	最大值
波速	0.55	0.67	0.54	0.65

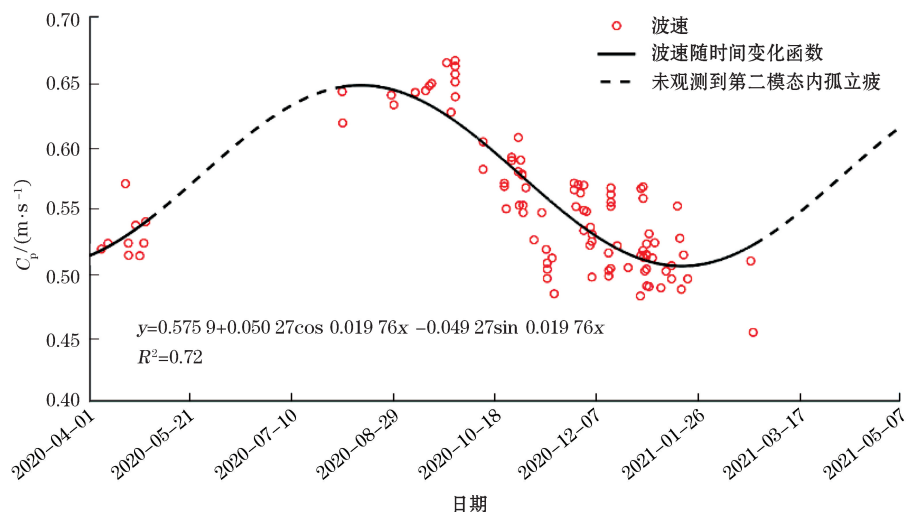


图5 非线性波速变化分布图

Fig.5 Variation of wave velocity

2.4 转向深度、流速流向统计特征

由图2可见,第二模态内孤立波为上、中、下三层结构,在3层结构中存在2个转向点。为了更好地了解该海域第二模态内孤立波在整个水层的分布情况,对观测到的第二模态内孤立波转向深度进行统计。

图6为第二模态内孤立波上层、下层转向深度与中层最大流速深度统计结果。可以看出,上层转向深度(图6a)在60~140 m,平均值为97.7 m,夏季转向深度略高于平均值,冬季转向深度略低于平均值。在对101个第二模态内孤立波全水深最大流速深度统计时发现,有83个最大流速发生在中层,占82.2%。据此我们可以认为第二模态最大流速基本都发生在中层。从图6b可以看出,中层最大流速深度在60~220 m,平均值约为134.6 m,分布较为均匀,无明显季节变化。下层转向深度(图6c)在140~270 m,平均值约为204.2 m,分布较为均匀。

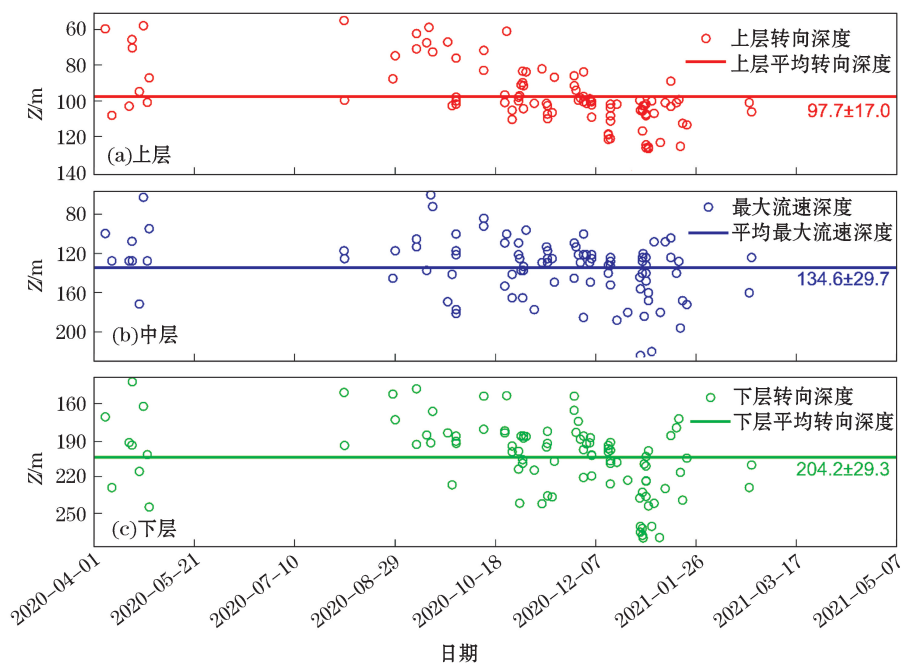


图6 第二模态内孤立波上下层转向深度、平均转向深度及中层最大流速深度、平均最大流速深度分布

Fig.6 Distribution of upper and lower turning depth, middle layer maximum velocity depth, and their mean values

根据统计结果可知,该海域第二模态内孤立波上、中、下三层结构的两条分界线在其平均值附近波动,且其最大流速深度变化不大。在实际工程中,可根据该海域第二模态内孤立波的特征,在水下施工时采取有针对性的保护措施。

图 7 给出了第二模态内孤立波上、中、下三层最大内波流的流速($V_{\max}$)、流向联合概率分布情况。可以看出,第二模态内孤立波的上层和下层最大内波流主要以 SE 和 SSE 为主,中层最大内波流主要为 NW、NNW 向。从流速分布来看,中层内波流最大,流速主要分布于 $0.2\sim 0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间范围内,占 93.1%;上层次之,流速主要分布于 $0\sim 0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间范围内,占 98.0%;下层最小,流速主要分布于 $0\sim 0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间范围内,占 94.1%。由于上层实测流受多种因素干扰,其背景流量值与第二模态内波上层内波流相当甚至更大,因此上层内波流在计算时可能存在更大的误差。

由观测期间第二模态内孤立波内波流与实测流最大流速和平均流速统计结果(表 4)可知,上层与中层内波流最大值大于实测流,下层内波流小于实测流。

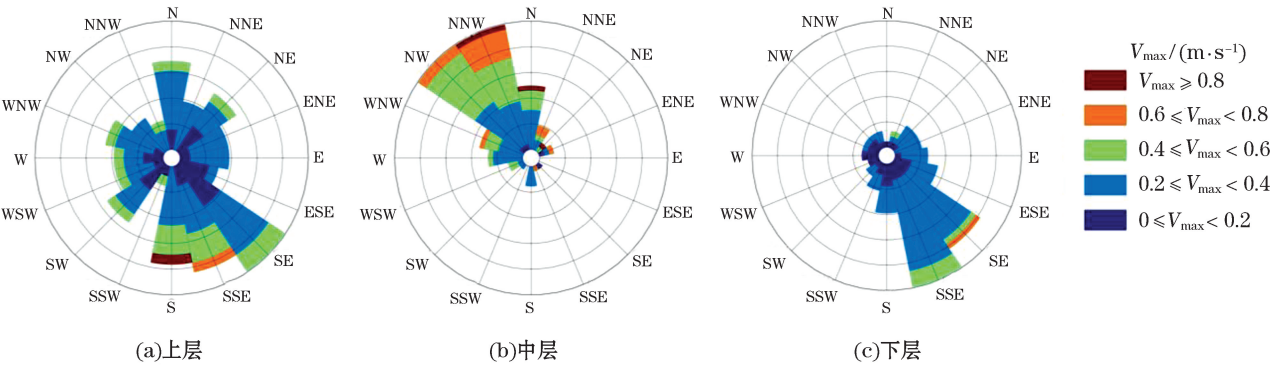


图 7 各层最大内波流流速及传播方向玫瑰图

Fig.7 Rose diagram of the maximum internal wave flow velocity and propagation direction of each layer

表 4 观测期间内波流与实测流各层最大值与平均值

Table 4 The maximum and average values of each layer of internal wave current and the measured current during the observation period

流 层	内波流/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		实测流/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	
	平均值	最大值	平均值	最大值
上层	0.29	1.20	0.44	1.17
中层	0.44	1.09	0.52	0.85
下层	0.25	0.65	0.35	0.73

3 结 论

本文基于南海北部陆坡海域 2020 年 4 月 1 日至 2021 年 5 月 7 日一套周年全剖面潜标观测数据,开展了海域第二模态内孤立波及其特征的分析研究,共发现 72 个第二模态内孤立波,包含 101 个第二模态内孤立波孤立子。分析结果表明:

1)该海域第二模态内孤立波多发生 9 月至翌年 1 月份,冬季相对多发,这与 Chen 等^[7]和 Yang 等^[4]观测结果相似。第二模态内孤立波形态以上凸型为主,本次观测中未发现凹型,其中 79.2%的最大振幅为下凹振幅,最大振幅是下凹振幅,达 76.3 m,平均振幅为 31.1 m。

2)该海域第二模态内孤立波波速呈明显季节变化,夏季波速大,冬季波速小,变化过程可以用三角函数很好地表达,拟合结果与 Chen 等^[7]非常相似,且非线性波速与线性波速相差不大,说明该海域第二模态内孤立波受非线性作用影响较小。

3)该海域第二模态内孤立波上层转向深度约为 98 m,下层转向深度约为 204 m;在发生第二模态内孤立波期间,最大流速多发生于中层,流速集中分布在 $0.2\sim 0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,主要传播方向为西北向,最大流速平均深度为 134.6 m。

本文是在科学研究和实际工程应用相结合基础上开展的观测、数据分析及研究工作。关于南海北部这一内波高发区的第二模态内孤立波的相关研究结果有助于加深对这一海域内波的认识,对南海北部陆架坡折区这一重要海区的水下航行和水下施工活动具有重要的参考意义,并可为后人的进一步研究提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 陈亮. 南海北部陆坡海域内孤立波的潜标观测与研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2020. CHEN L. Mooring observation and study of internal solitary waves on the continental slope in the northern South China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2020.
- [3] 钱洪宝,黄晓冬,田纪伟. 一个典型南海北部第二模态内孤立波的观测分析[J]. 海洋学报,2016, 38(9): 13-20. QIAN H B, HUANG X D, TIAN J W. Observational study of one prototypical mode-2 internal solitary waves in the northern South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(9): 13-20.
- [4] YANG Y J, FANG Y C, CHANG M H, et al. Observations of second baroclinic mode internal solitary waves on the continental slope of the northern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2009, 114: C10003.
- [5] CHEN L, XIONG X, ZHENG Q, et al. Mooring observed mode-2 internal solitary waves in the northern South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2020, 39(11): 44-51.
- [6] RAMP S R, YANG Y J, REEDER D B, et al. The evolution of mode-2 nonlinear internal waves over the northern Heng-Chun Ridge south of Taiwan[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2015, 22(4): 413-431.
- [7] CHEN L, ZHENG Q, XIONG X, et al. Dynamic and statistical features of internal solitary waves on the continental slope in the northern South China Sea derived from mooring observations[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(6): 4078-4097.
- [8] 范文豪,宋海斌,龚屹,等. 中美洲海域第二模态内孤立波的地震海洋学研究[J]. 地球物理学报,2021, 64(1): 95-208. FAN W H, SONG H B, DONG Y, et al. Seismic oceanography study of mode-2 internal solitary waves offshore Central America[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(1): 195-208.
- [9] HELFRICH K R, MELVILLE W K. On long nonlinear internal waves over slope-shelf topography[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 167: 285-308.
- [10] VLASENKO V I, HUTTER K. Generation of second mode solitary waves by the interaction of a first mode soliton with a sill[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2001, 8(4/5): 223-239.
- [11] GUO C, CHEN X. Numerical investigation of large amplitude second mode internal solitary waves over a slope-shelf topography[J]. Ocean Modelling, 2012, 42: 80-91.
- [12] LIU A K, SU F C, HSU M K, et al. Generation and evolution of mode-two internal waves in the South China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2013, 59: 8-27.
- [13] LAMB K G, WARN-VARNAS A. Two-dimensional numerical simulations of shoaling internal solitary waves at the ASIAEX site in the South China Sea[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2015, 22(3): 289-312.
- [14] GRISOUARD N, STAQUET C, GERKEMA T. Generation of internal solitary waves in a pycnocline by an internal wave beam: a numerical study[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 676: 491-513.
- [15] CHEN Z W, XIE J, WANG D, et al. Density stratification influences on generation of different modes internal solitary waves[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(10): 7029-7046.
- [16] DONG D, YANG X, LI X, et al. SAR observation of eddy-induced mode-2 internal solitary waves in the South China Sea[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(11): 6674-6686.
- [17] LIANG J, LI X M. Generation of second-mode internal solitary waves during winter in the northern South China Sea[J]. Ocean Dynamics, 2019, 69(3): 313-321.

- [18] National Oceanographic Data Center. World Ocean Atlas(2013)[EB/OL]. [2021-07-29]. <https://www.nodc.noaa.gov/cgi-bin/OC5/woa13/woa13.pl>.
- [19] ZHENG Q, KLEMAS V, YAN X H, et al. Nonlinear evolution of ocean internal solitons propagating along an inhomogeneous thermocline[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, 106(C7): 14083-14094.
- [20] GRIMSHAW R, PELINOVSKY E, TALIPOVA T, et al. Simulation of the transformation of internal solitary waves on oceanic shelves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34(12): 2774-2791.
- [21] HOLLOWAY P E, PELINOVSKY E, TALIPOVA T, et al. A nonlinear model of internal tide transformation on the Australian North West Shelf[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1997, 27(6): 871-896.

Statistical Analysis of the Second-mode Internal Solitary Wave in the Continental Slope Area of the Northern South China Sea

XU Pei-peng^{1,2}, XIONG Xue-jun^{1,2,3,4}, CHEN Liang^{2,3,4}, GONG Qing-long⁵,
GUO Yan-liang^{2,3,4}, YU Long^{2,3,4}, WU Fan²

(1. *College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;*

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

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

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

5. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The mode-2 internal solitary waves in the continental slope region of northern South China Sea are analyzed based on the mooring-observed ocean current data. During the observation period, a total of 72 mode-2 solitary waves were found, which includes 101 mode-2 solitons. The mode-2 internal solitary waves are mainly upward in upper layer and downward in lower layer, and the maximum amplitude occurs mostly in the downward part, which accounts for 79.2%. The wave speed is calculated with the KdV equation and can be described with cosine function, which is large in summer and small in winter. From the velocity profile, it can be found that the solitary wave velocity of the second mode has an obvious three-layer structure. In this paper, the maximum velocity depth and the turning depth of the upper and lower layers are calculated by manual discrimination. The statistical results show that the average turning depth of the upper internal wave flow is at 97.7 m, the maximum velocity depth of the middle internal wave flow is at 134.6 m, and the average depth of the lower internal wave flow is at 204.2 m. The maximum flow velocity mostly occurred in the middle layer, accounting for 82.2%. The upper flow direction was mainly south-eastward, and the velocity was mainly in the range of $0-0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, accounting for 98.0%. The middle flow direction was mainly northwestward, and the velocity was mainly in the range of $0.2-0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, accounting for 93.1%. The flow direction of the lower layer is mainly southeastward, and the velocity is mainly in the range of $0-0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, accounting for 94.1%. This paper systematically presents the statistical characteristics of mode-2 solitary waves in the continental slope region of northern South China Sea, which provides a reference for future research.

Key words: mode-2 internal solitary waves; continental slope sea area; characteristic analysis; velocity direction reversing depth

Received: July 30, 2021