

南海东沙岛北部第二模态内孤立波特性研究*

崔海吉, 李志鑫, 张 猛, 黄松松, 梁可达, 王 晶**

(中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 高分一号是中国自主发射的光学遥感卫星,空间分辨率达到 2、8 和 16 m,因此可以为尺度较小的第二模态内孤立波研究提供强有力的数据支撑。本文基于 2014—2020 年共 7 年高分一号光学遥感图像研究了南海东沙岛北部第二模态内孤立波特性,研究结果表明:在海水层结不变,海域第二模态内孤立波的光学遥感图像条纹亮暗次序与第一模态内孤立波的相反;第二模态内孤立波的波峰线远短于第一模态内孤立波的波峰线;南海东沙岛北部第二模态内孤立波在夏季被光学遥感观测到的概率最大;绝大部分第二模态内孤立波尾随在第一模态内孤立波之后,可能是第一模态内孤立波与地形凸起相互作用而产生了第二模态内孤立波。这一研究结果对于进一步研究全球海域第二模态内孤立波的特性奠定了良好基础。

关键词: 高分一号卫星; 光学遥感图像; 第二模态内孤立波; 东沙岛北部

中图法分类号: P733.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2021)11-016-06

DOI: 10.16441/j.cnki.hdx.20210040

引用格式: 崔海吉, 李志鑫, 张猛, 等. 南海东沙岛北部第二模态内孤立波特性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(11): 16-21.

Cui Haiji, Li Zhixin, Zhang Meng, et al. Study on the characteristics of the second mode internal solitary wave in the north of Dongsha Island of the South China Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(11): 16-21.

内孤立波是一种非常常见的海洋现象,在多个海域被广泛研究^[1-3]。南海是世界公认的海洋内孤立波频发海域,已有多名学者从遥感观测^[4-5]、数值模拟^[6-7]、现场实测^[8-10]等多个角度展开研究,其中南海北部^[11]具有显著的海水垂直层化季节变化和剧烈变化的海底地形特征,是海洋内波活动的多发区。虽然第二模态内孤立波引起的能量输送通常不如第一模态内孤立波大,但近年来由于其在混合陆架水域中起着重要作用而引起了广泛的关注。因为有学者从海洋现场观测中发现了第二模态内孤立波的存在,进而从理论与数值模拟以及内波水槽实验等方面对第二模态内孤立波的产生机理与传播特性展开了研究。

关于第二模态内孤立波的现场观测主要集中在南海, Yang 等^[12]的研究最为详细。Yang 在著名的亚洲海声学实验(ASIAEX)中研究了东沙岛东北部的内波,将测量到的内波细分为四类,第一次提出了南海存在第二模态内孤立波。Yang 等^[13]又利用夏季(2005-04-29—07-28)和冬季(2005-11-02—2006-02-24)阶段实测数据分析,发现夏季南海北部大陆坡处 90% 第二模态内孤立波跟随在第一模态内孤立波后方传播,并在 2001

年的 1 景 MODIS 图像观测到此现象。Liu 等^[14]根据 2006 年 5 月 21—27 日东沙岛的实测数据,提出第二模态内孤立波由第一模态内孤立波的破碎、耗散和湍流混合生成,并利用 1992 年台湾东北部的 1 景 ERS-1SAR 图像说明第二模态内孤立波跟随在第一模态内孤立波后方传播的现象。

学者们也将视角聚焦在用数值模拟、实验室实验等方法研究第二模态的生成机理和传播特性。Qian 等^[15]利用 1 景 MODIS 卫星遥感图像和数值模拟结果研究了南海北部大陆架的内孤立波,结果表明,第一模态下降型内孤立波在上坡的过程中与局部地形相互作用产生了第二模态内孤立波,随后第二模态内孤立波在近岸传播过程中迅速消散。Xie 等^[16]研究了起伏地形对大振幅内孤立波演变的影响,他们的模拟结果显示,斜坡上的凹凸地形能够产生第二模态内孤立波包。Wang 等^[17]基于非静力二维高分辨率模型,数值研究了南海北部典型斜坡-陆架地形上的内孤立波的演化,通过多组数据验证了地形隆起有利于第二模态内孤立波的产生。Brandt 等^[18]在实验室建造 6 m×7.6 cm×20.3 cm 的长方体水槽,并将其

* 基金项目:国家自然科学基金项目(61871353)资助

Supported by the National Natural Science Foundation of China(61871353)

收稿日期:2021-01-09;修订日期:2021-02-18

作者简介:崔海吉(1995—),女,硕士生,主要从事内孤立波光学遥感探测研究。E-mail:haiji_cui@163.com

** 通讯作者:E-mail:wjing@ouc.edu.cn

设计成对称的两层结构。利用重力塌陷法产生第二模态内孤立波,研究了第二模态内孤立波的相速度、波长与振幅。Carr 等^[19]在实验室的三层水槽结构条件下,利用重力塌陷法产生第二模态内孤立波波列,研究水体结构与第二模态内孤立波稳定性的关系,结果表明随跃层偏移程度增大,内孤立波的结构会变得不稳定。这些研究对分析第二模态内孤立波的特性提供了帮助。

目前第一模态内孤立波在海洋内波领域被广泛研究,第二模态内孤立波由于其生成、传播、耗散等方面还远不及第一模态内孤立波研究广泛,所以逐渐引起学者们的关注。基于遥感图像第二模态内孤立波时空分布还尚未见报道,本文基于高分一号光学遥感图像分析了有典型特征的南海东沙岛第二模态内孤立波遥感图像,高分一号遥感图像具有高的空间分辨率,为小尺度的第二模态内孤立波观测提供了有力条件。通过实验室实验验证了遥感图像判别第二模态内孤立波的方法以及可能的产生机制。这对于深入了解海洋内孤立波特征提供了科学数据支撑。

1 东沙岛海域水文参数和层化结构分析

东沙岛(20°43'N, 116°42'E)位于南海大陆坡的过渡区域,受背景流场、水体层结和底地形变化等多因素影响。图 1 为东沙岛及周围区域(19°N—22°N, 115°E—118°E)三维水深地形图,红色五角星表示为东沙岛地理位置。从图中看出东沙岛附近的地形凹凸不平,水深自东南向西北逐渐变浅。东沙岛周围水深集中在 500 m 以内。

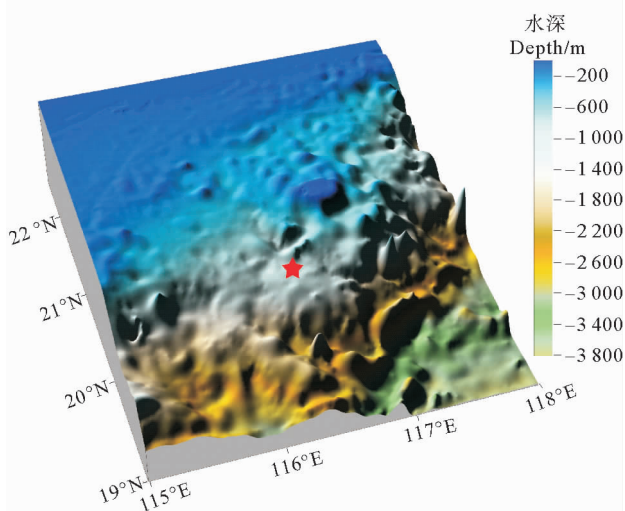


图 1 东沙岛三维水深地形图

Fig.1 Three dimensional bathymetric topographic map of Dongsha Island

稳定层结是内孤立波发生的必要条件之一,而浮频率是描述海水运动特性和海水密度层化结构的一个重要物理量^[20],定义为:

$$N(z) = \left(-\frac{g}{\bar{\rho}} \frac{d\rho(z)}{dz} \right). \quad (1)$$

式中: g 为重力加速度; $\bar{\rho}$ 为密度常量; $\frac{d\rho(z)}{dz}$ 为密度的垂直变化。浮频率最大值所对应的深度为密度跃层深度。利用最大曲率点法提取了的东沙岛附近水域(19°N—22°N, 115°E—118°E)密度跃层对应的深度,利用插值法绘制了东沙岛附近四季密度跃层深度空间分布图(见图 2)。图 2 所用的平均温、盐数据选自世界海洋图集(2013)季节平均数据。空间分辨率为 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ 。垂直方向共 1 500 m,分辨率间距不等,0~100 m 间距为 5 m,100~500 m 间距为 25 m,500~1 500 m 间距为 50 m。

从 WOA13 数据分析得出,在图 2 所示的区域范围内春季密度跃层的深度平均值为 48 m,夏季密度跃层深度平均值为 49 m,秋季和冬季密度跃层的深度平均值分别为 75 和 73 m。

2 遥感数据及时空分布

首先分析了 2014—2016 年南海(18°N—23°N, 110°E—120°E)高分一号遥感图像,下载无云图像共 623 景,挑选出有第二模态内孤立波的有 24 景,其中在夏季的有 20 景,春季 3 景,秋季 1 景,冬季 0 景。发生位置为东沙岛西北部。随后针对东沙岛附近海域处理了 2017—2020 年(19°N—22°N, 116°E—118°E)的高分一号光学遥感图像,下载无云图像共 855 景,挑选出具有第二模态内孤立波的图像 30 景。

通过 ENVI、Arcmap 等软件采用人机交互的方式,对 54 景高分一号遥感图像的第二模态内孤立波和第一模态内孤立波的波峰线进行勾勒,得到了空间分布(见图 3)。

图 3 中黄色的波峰线代表第一模态内孤立波,红色的波峰线代表第二模态内孤立波。

从高分一号遥感图像分析得出,第二模态内孤立波多发生在东沙岛海域附近,有 4 景图像的第二模态出现在第一模态后面,与文献[13]的现场实测结果一致。第二模态内孤立波的波峰线较第一模态内孤立波相比非常短,第二模态内孤立波的长度大约为第一模态的 10%~30%。第二模态内孤立波与第一模态内孤立波一样有向西北方向传播的趋势(见图 3)。

在 7 年共 54 景有第二模态内孤立波特征的遥感图像中,共有 40 景第二模态内孤立波图像在 6—8 月,占总数的 74%(见图 4)。从遥感观测角度分析南海海域夏季内孤立波产生的较为频繁。由于光学遥感图像受

云雾、太阳高度和角方位角等多因素影响,通常11和12月光学遥感观测内孤立波受到较大影响,更不容易

观测到第二模态内孤立波。

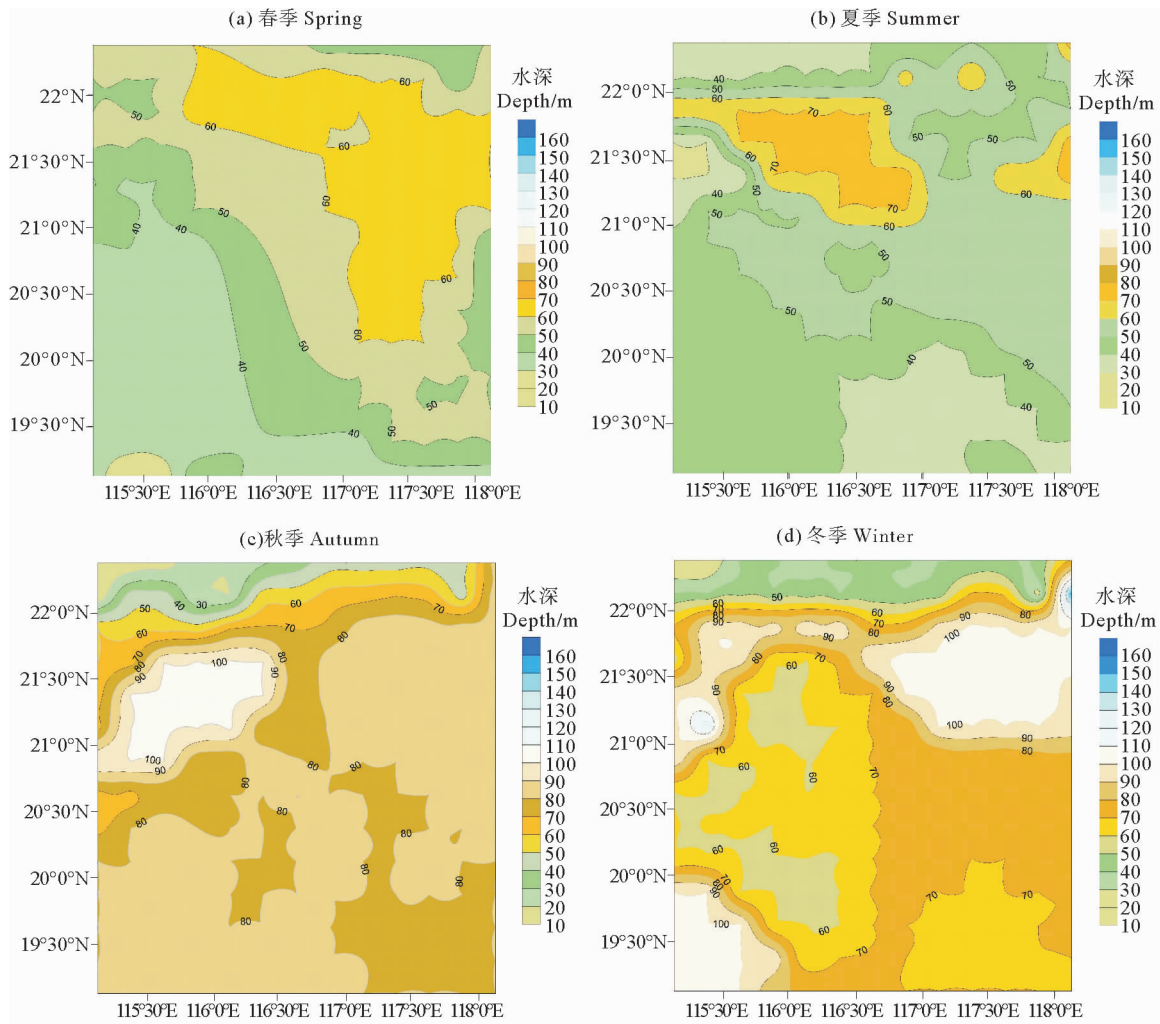


图2 东沙岛附近海域不同季节密度跃层深度空间分布

Fig.2 Spatial distributions of pycnocline depth in different seasons near Dongsha Island

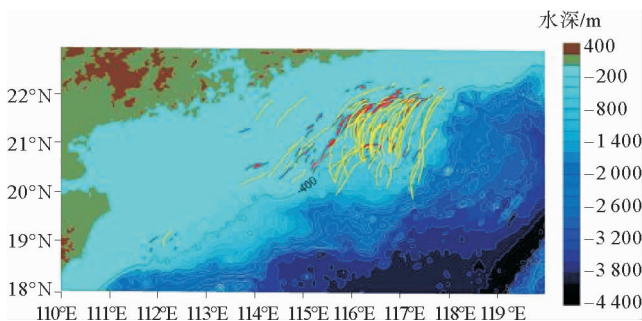


图3 2014—2020年南海第一模态与第二模态内孤立波空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of the first and second mode internal solitary waves in the South China Sea from 2014 to 2020

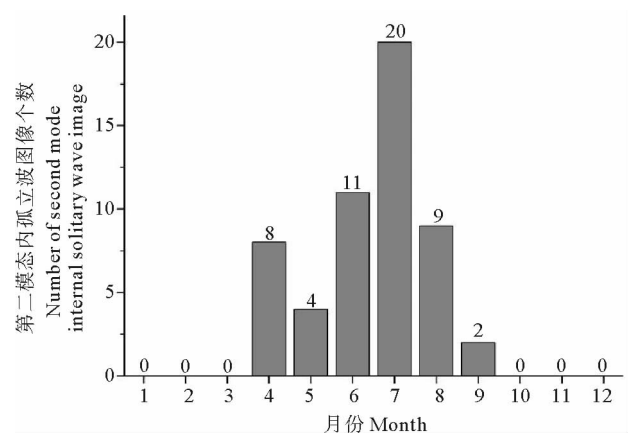
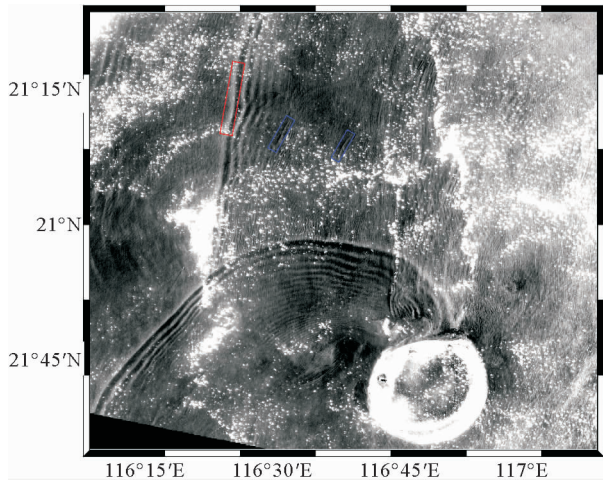


图4 2014—2020 高分一号遥感图像第二模态内孤立波时间分布

Fig.4 Temporal distribution of the second mode internal solitary waves in GF-1 images from 2014 to 2020

3 实验室实验验证光学遥感图像判断方法

光学遥感图像中,内孤立波呈现或直或曲的亮暗相间条纹,同一水深分层情况下,在非耀斑区第一模态内孤立波在遥感图像上呈现先亮后暗条纹,第二模态内孤立波在遥感图像上呈现先暗后亮条纹。



(红框:第一模态内孤立波;蓝框:第二模态内孤立波。Red frame: First mode internal solitary wave; Blue frame: Second mode internal solitary wave.)

图5 2017年8月5日3时23分(UTC)
GF-1 南海东沙岛北部图像

Fig.5 GF-1 image of the northern part of Dongsha Island, South China Sea at 3:23 on August 5, 2017 (UTC)

图5展示了非耀斑区第一模态内孤立波和第二模态内孤立波光学遥感图像,此图像已进行直方图匹配调节灰度。图像拍摄于2017年8月5日。提取了光学遥感图像中第一模态内孤立波和第二模态内孤立波的灰度变化,剖面图如图6所示。其中图6(a)表示非耀斑区第一模态内孤立波灰度剖面呈现先亮后暗,6(b)表示非耀斑区第二模态内孤立波灰度剖面呈现先暗后亮,二者的条纹亮暗次序相反。

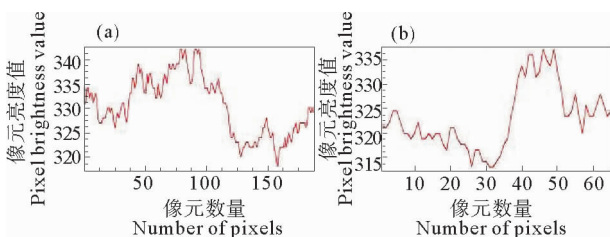


图6 第二模态内孤立波灰度剖面图(a)及第一模态内孤立波灰度剖面图(b)

Fig.6 Grayscale profiles of remote sensing image of the first mode internal solitary wave(a) and grayscale profile of remote sensing image of the second mode internal solitary wave(b)

针对上述遥感图像第一模态内孤立波与第二模态内孤立波的条纹特征,设计了实验室内孤立波水槽实验。在实验室条件下进行了第二模态内孤立波的光学遥感仿真探测。通过控制分层比例与塌陷高度对第二模态内孤立波遥感图像的成像特征进行研究。

实验在规格为15 m×0.35 m×0.7 m的水槽中进行。将面光源放置在水槽右端代替太阳作为辐射源,利用CCD传感器作为接收源进行探测,本实验中共有两台CCD同步进行信息采集(见图7)。其中CCD1放置在水槽上方作为遥感传感器以获得水体表面信息,CCD2放置在水槽侧方以提取内孤立波波要素等信息,两台CCD采样频率相同为50 Hz,单张图像大小为1 080×1 920。隔板作为扰动源用来产生第一模态内孤立波,右侧消波板用来代替地形。

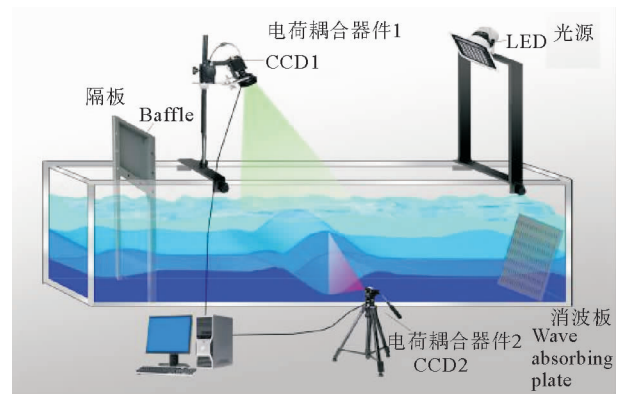


图7 光学遥感探测内孤立波的实验系统示意图

Fig.7 Schematic diagram of the experimental system for detecting internal solitary waves by optical remote sensing

实验前,首先在水槽内调制好密度为1.08 g/cm³的盐水作为下层水体,再利用蠕动泵铺设上层纯水,自然扩散形成三层水体结构。在水槽左端选择长0.4 m的区域作为造波区,在造波区插板后向上层以较慢速度注入密度为1.01 g/cm³的水,通过重力塌陷法得到向右传播的第一模态内孤立波,第一模态内孤立波传播至水槽右侧与消波板相互作用,在返回水槽左侧时产生了第二模态内孤立波。第一模态内孤立波在前,第二模态内孤立波尾随其后同向传播。为保证实验结果可用于真实海洋条件,实验中水深等参数设置均满足相似性原理。

具体设计参数如表1中所示。

实验结果如图8(b)~(c)所示,第一模态内孤立波在遥感图像中为亮暗条纹,而尾波中的第二模态内孤立波为暗亮条纹。在遥感图像中同一水深分层下,第一模态内孤立波与第二模态内孤立波呈现亮暗相反的条纹。实验结果进一步证明了遥感图像条纹亮暗特征判别方法。实验中第二模态内孤立波是在第一模态与

消波板相互撞击后产生,验证了典型遥感图像中第二模态是由第一模态与地形相互作用而产生的猜想。第二模态内孤立波尺度较第一模态相比较小且紧跟在第一模态之后,与遥感图像观测到的相一致。进一步验证第二模态是由第一模态内孤立波与地形相互作用产生的可能性。此结果与 Wang 等^[17]的数值计算结果吻合。

表 1 第二模态内孤立波实验参数

Table 1 Experimental parameters for the second mode internal solitary waves

组数 Number	分层比例 Stratification ratio	密度比例 Density ratio	塌陷 高度/cm Collapse height
1	10 : 34	1.01 : 1.08	20
2	10 : 34	1.01 : 1.08	25

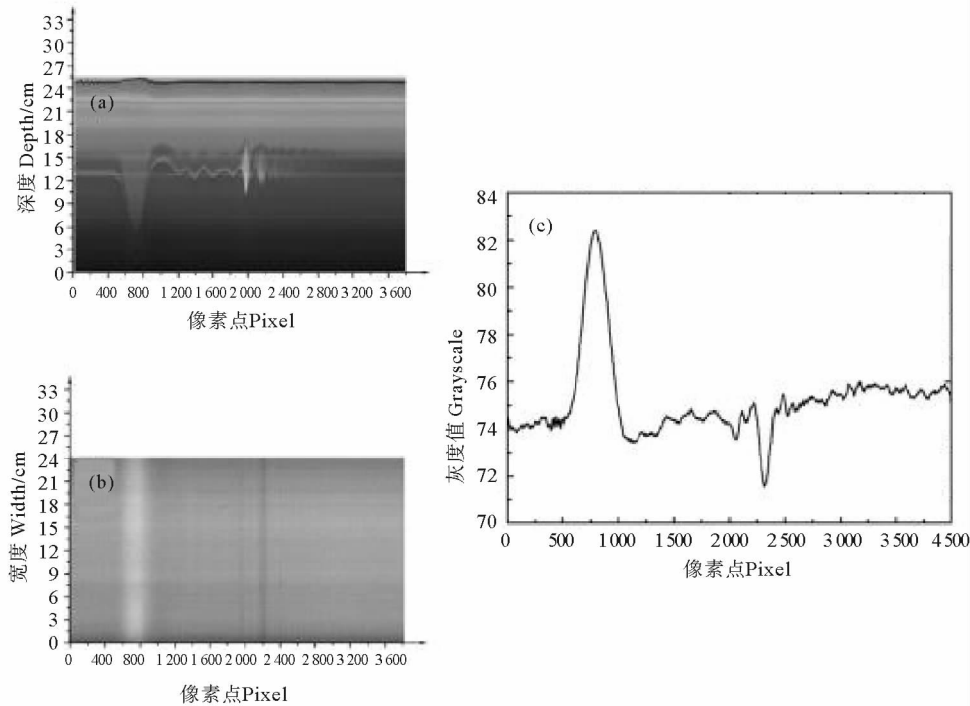


图 8 实验室光学遥感探测内孤立波的时间序列分布及表面灰度剖面图

Fig. 8 Time series distributions and surface grayscale profile of remote sensing image of internal solitary waves detected by optical remote sensing in laboratory

4 结语

本文采用高分辨率的高分一号遥感图像,对 2014—2020 年东沙岛海域(19°N—22°N, 116°E—118°E)的第二模态内孤立波的传播和生成进行了研究。通过对 WOA13 数据的分析得到了东沙岛及附近水域密度跃层深度随季节的变化空间分布图,图中明显看出春夏两季节密度跃层较浅,秋冬季密度跃层较深。

通过对 1478 景高分一号光学遥感图像处理,筛选出有第二模态内孤立波特征的遥感图像共 54 景。利用 7 年高分一号光学遥感图像统计分析,在夏季观测到第二模态内孤立波较多,且位于东沙岛西北部附近,向西北方向传播,大多数第二模态内孤立波跟随在第一模态内孤立波之后,波峰线长度约为第一模态的 10%~30%,第二模态内孤立波空间长度较小。

在遥感图像上,同一水深分层区域第二模态内孤立波较第一模态内孤立波有相反的条纹亮暗次序。本文利用重力塌陷法进行了第二模态内孤立波的光学遥

感仿真探测,实验结果表明第一模态内孤立波和第二模态内孤立波在同一水深分层下亮暗条纹次序相反,这验证了遥感上的判别方法。在实验中第一模态内孤立波撞击消波板在返回的过程中产生了第二模态内孤立波,第二模态内孤立波紧跟随第一模态内孤立波之后,与遥感观测相吻合,验证了第二模态内孤立波是由第一模态内孤立波与变化地形作用产生的可能性。

参考文献:

- [1] Navarro G, Vicent J, Caballero I, et al. Improving the analysis of biogeochemical patterns associated with internal waves in the strait of Gibraltar using remote sensing images[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 204: 1-13.
- [2] Jorge M, da Silva José. Internal solitary waves in the Andaman Sea: New insights from SAR Imagery[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(6): 861-877.
- [3] Jackson C. Internal wave detection using the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS)[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2007, 112(C11): 60-64.
- [4] Jia T, Liang J J, Li X M, et al. SAR observation and numerical

- simulation of internal solitary wave refraction and reconnection behind the Dongsha Atoll [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(1): 74-89.
- [5] Zhao Z, Klemas V, Zheng Q, 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(6): 1-4.
- [6] Xu J, Chen Z, Xie J, et al. On generation and evolution of seaward propagating internal solitary waves in the northwestern South China Sea[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2016, 32: 122-136.
- [7] He F, Zhang H S, Huang C, et al. Numerical investigation of the solitary wave breaking over a slope by using the finite particle method[J]. *Coastal Engineering*, 2019, 156: 103617.
- [8] 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.
- [9] Liu A K, Ramp S R, Zhao Y, et al. A case study of internal solitary wave propagation during ASIAEX 2001[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(4): 1144-1156.
- [10] Xu J C, He Y H, Chen Z W, et al. Observations of different effects of an anti-cyclonic eddy on internal solitary waves in the South China Sea [J]. *Progress in Oceanography*, 2020, 188: 102422.
- [11] Bai X, Li X, Lamb K G, et al. Internal solitary wave reflection near Dongsha Atoll, the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(10): 7978-7991.
- [12] Yang Y J, Tang T Y, Chang M H, et al. Solitons northeast of Tung-Sha Island during the ASIAEX pilot studies[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(4): 1182-1199.
- [13] 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(C10): 637-644.
- [14] 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(59): 18-27.
- [15] Qian H B, Huang X D, Tian J W, et al. Shoaling of the internal solitary waves over the continental shelf of the northern South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(9): 35-42.
- [16] Xie J H, He Y H, Cai S Q. Bumpy topographic effects on the transbasin evolution of large-amplitude internal solitary wave in the northern South China Sea[J]. *J Geophys Res Oceans*, 2019, 124(7): 4677-4695.
- [17] Wang S Y, Meng J, Li Q, et al. Evolution of internal solitary waves on the slope-shelf topography in the northern South China Sea[J]. *Ocean Dynamics*, 2020, 70: 729-743.
- [18] Brandt A, Shipley K R. Laboratory experiments on mass transport by large amplitude mode-2 internal solitary waves[J]. *Physics of Fluids*, 2014, 26(4): 046601.
- [19] Carr M, Davies P A, Hoebbers R P. Experiments on the structure and stability of mode-2 internal solitary-like waves propagating on an offset pycnocline[J]. *Physics of Fluids*, 2015, 27(4): 046602.
- [20] 方欣华. 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 Ocean* [M]. Qingdao: Ocean University of China Press, 2005.

Study on the Characteristics of the Second Mode Internal Solitary Wave in the North of Dongsha Island of the South China Sea

Cui Haiji, Li Zhixin, Zhang Meng, Hang Songsong, Liang Keda, Wang Jing
(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The Gaofen-1 satellite is an optical remote sensing satellite independently launched by China with spatial resolutions of 2, 8 and 16 m. Thus, it can provide strong data support for the study of the smaller second mode internal solitary waves. The characteristics of the second mode internal solitary wave in the South China Sea are studied based on the optical remote sensing images of Gaofen-1 from 2014 to 2020 in this paper. The research results show that in the sea area with invariable seawater stratification, the bright and dark orders of the second mode internal solitary waves of optical remote sensing images are opposite to those of the first mode internal solitary waves. The crest line of the second mode internal solitary waves is much shorter than that of the first mode internal solitary waves. The second mode internal solitary waves in the northern part of Dongsha Island in the South China Sea is the most likely to be observed in summer. Most of the second mode internal solitary waves occur after the first mode internal solitary waves, so it can be inferred that the second mode internal solitary waves are generated from the interaction of the first mode internal solitary waves and the raised parts of the ground. These results provide a good foundation for the further study of characteristics of the global second mode solitary waves.

Key words: Gaofen-1 satellite; optical remote sensing image; second mode internal solitary wave; north of Dongsha Island

责任编辑 庞 旻