

梁建军, 贾童, 蔡夕方, 等. 巴厘岛海域海洋内波的卫星遥感观测与数值模拟分析——4·21 印尼潜艇失事事件原因初探[J]. 海洋学报, 2021, 43(x): 1–3, doi:10.12284/hyxb2021-0000-00

Liang, Jianjun, Jia Tong, Cai Xifang, et al. Remote sensing observation and numerical simulation of oceanic internal waves around the Bali Island: A preliminary study on the possible causes of an Indonesian submarine wreck[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(x): 1–3, doi:10.12284/hyxb2021-0000-00

# 巴厘岛海域海洋内波的卫星遥感观测与数值模拟分析

## ——4·21 印尼潜艇失事事件原因初探

梁建军<sup>1</sup>, 贾童<sup>1,2</sup>, 蔡夕方<sup>3</sup>, 李晓明<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 数字地球重点实验室, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 解放军 91001 部队, 北京 100166)

**摘要:** 基于巴厘岛北部海域海洋内波卫星遥感观测与数值模拟结果, 本文对 4·21 印尼潜艇失踪事件原因进行了初步分析。结果表明, 在印尼潜艇失事海域和时间, 源于龙目海峡的海洋内波向北传播并广泛分布于巴厘岛北部海域, 振幅可达 50 m。潜艇很可能遭遇了大振幅海洋内波发生“掉深”而导致失事。

**关键词:** 巴厘岛海域; 海洋内波;

中图分类号: 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2021)x-0001-03

## 1 引言

2021 年 4 月 20 日 20:30 UTC 时间(当地时间 4 月 21 日 3:30), 印度尼西亚海军“南伽拉”402 号潜艇在巴厘岛北部约 60 海里的海域突然失联(简称为“4·21 印尼潜艇失事事件”)。4 月 24 日, 印尼确认“南伽拉”402 号潜艇掉入了 838 m 深的海底, 瓦解为 3 段, 艇上 53 人全部遇难。

位于巴厘岛和龙目岛之间的龙目海峡是国际公认的大振幅海洋内波发生区之一<sup>[1]</sup>。大振幅海洋内波会引起海水等密度面数十上百米的垂向起伏和强烈的水平剪切流, 若潜艇驶入这种强内波区域, 由于潜艇所受浮力突然减小, 加之内波流的作用, 潜艇在巨大外力作用下极易失去控制而掉入最大安全下潜深度以下, 巨大的海水压力会把潜艇压扁甚至瓦解。

本文利用卫星遥感观测和数值模拟<sup>[2-4]</sup>给出了

4·21 印尼潜艇失事事件期间巴厘岛北部海域海洋内波的产生和传播过程。初步分析表明, 该潜艇很大可能遭遇源于龙目海峡的约 50 m 的大振幅海洋内波, 从而导致其掉入深海并发生破裂。

## 2 巴厘岛海域海洋内波遥感观测

卫星遥感是海洋内波遥感研究的重要手段。海洋内波在卫星遥感图像上一般表现为明暗相间的条纹, 可以基于此特征来识别海洋内波。图 1a 和图 1b 给出了在巴厘岛海域获取的两景 MODIS 影像, 成像时间分别为 2021 年 4 月 19 日 03:00 UTC 和 2021 年 4 月 21 日 02:50 UTC。

从图 1a 可以看到, 在巴厘岛北部海域有两组明显的沿东南-西北方向传播的内波包(白色箭头所示), 两组内波包有 8-20 个子波, 波峰线长度在 100~130 km 之间。从图 1b 可以看到, 在龙目海峡也

收稿日期: 2021-05-10。

基金项目: 国家自然科学基金(42006193, 41876201); 国家杰出青年科学基金(42025605)。

作者简介: 梁建军(1986—), 男, 山东省泰安市人, 助理研究员, 主要研究方向为海洋内波。E-mail: liangjj@radi.ac.cn

\* 通信作者: 李晓明(1979—), 男, 研究员/博导, 主要研究方向为卫星海洋遥感。E-mail: lixiaoming@aircas.ac.cn

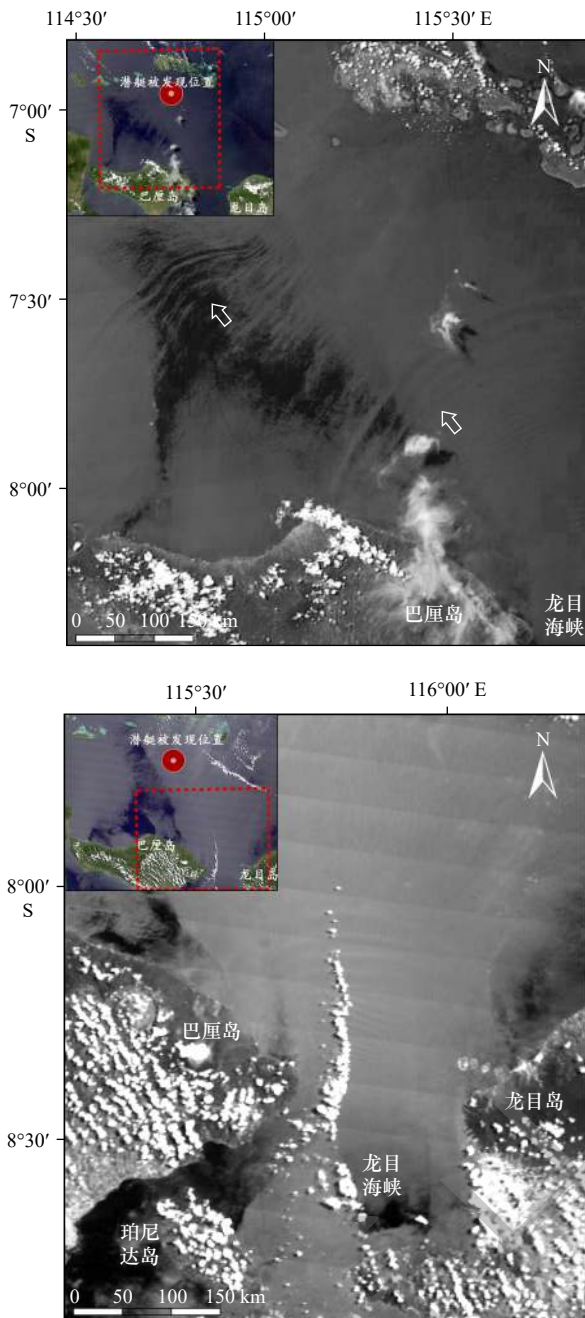


图1 巴厘岛海域获取的两景 MODIS 遥感影像, 成像时间为 2021 年 4 月 19 日 03:00 UTC(上)和 4 月 21 日 02:50 UTC(下)。图中白色箭头指示观测到的内波波包。

Fig. 1 Two MODIS images acquired around the Bali Island at 03:00 UTC on April 19, 2021 (top) and at 02:50 UTC on April 21, 2021 (bottom), respectively. The white arrows mark the observed internal waves in the images

有一组自东南向西北传播的内波包(白色箭头所示), 波包有 12 个子波, 波峰线长度约 50 km。利用 21 日 02:50 UTC 的 MODIS 数据和 02:19 UTC 的 Sentinel-3 数据(未展示)反演得到的内波先导波振幅约为 52 m<sup>[5]</sup>。

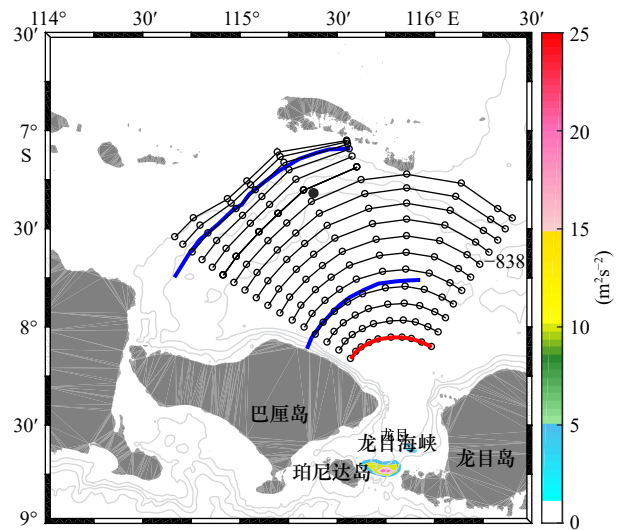


图2 利用射线追踪法模拟的 4 月 21 日 02:50–18:50 UTC 时间段内龙目海峡海洋内波的传播过程。背景彩色为  $M_2$  内潮体积产生力, 蓝色实线为在 4 月 19 日 03:00 UTC MODIS 影像(图 1 上图)上观测到的内波条纹, 红色实线为在 4 月 21 日 02:50 UTC MODIS 影像(图 1 下图)上观测到的内波先导波, 黑色实线为模拟的间隔 1 小时的内波波峰线位置, 黑色实心点标注的是潜艇被发现的位置。

Fig. 2 Propagation of the internal waves from the LOMBOK strait simulated by the ray tracing method. The background color indicates the distribution of the maximum depth-integrated body force for the  $M_2$  constituent. The blue and red lines represent the leading wave front observed from the MODIS image acquired on April 19, 2021 and April 21, respectively. The black lines represent the simulated wave fronts in one-hour time step. The black solid dot marks the location where the sunken submarine was discovered

### 3 巴厘岛海域海洋内波数值模拟

强潮流驱动层化海水流经珀尼达岛和龙目岛之间的浅海槛地形(图 2), 从而引发大振幅海洋内波<sup>[6]</sup>, 并向北传播进入巴厘海。4 月 18 至 20 日, 海槛处的潮流类型为半日型<sup>[7]</sup>。虽然潮流临近小潮期, 但这三日南北向最大潮流流速分别可达 1.24、1.08 和 0.89 m/s, 强潮流足以激发大振幅海洋内波。进而通过计算表征  $M_2$  半日潮流和地形相互作用强度的内潮产生体积力(图 2 中彩色), 确定了龙目海峡的海槛处存在强烈的内波生成过程。 $M_2$  分潮主导 4 月 18 至 20 日的潮流, 因此每间隔一个  $M_2$  潮周期(约 12.42 h)激发一组内波, 所以在 19 日、21 日 MODIS 图像上均观测到内波。

本文基于 21 日 MODIS 图像内波先导波信息(红线所示), 利用射线追踪方法<sup>[2]</sup> 计算了该先导波在 16 h 内(02:50–18:50 UTC)的传播过程(图 2 黑色实线)。

模拟结果表明龙目海峡所产生的海洋内波可穿越整个巴厘岛北部海域,亦覆盖潜艇失事位置。此外,模拟结果也再现了4月19日MODIS观测的内波条纹(图2蓝色曲线),比较准确地揭示了该海域内波传播过程。龙目海峡处激发的海洋内波波包通常包含多个子波,先导波之后每个子波均大致重复黑色实线的传播过程,它们连续继先导波若干小时之后与潜艇相遇。因此,根据21日该海域内波观测结果和传播模拟,我们推定4月20日第2个半日潮周期内,龙目海峡北端所产生的大振幅内波向西北传播十余小时之后可到达潜艇被发现位置(图2黑色实心点)。故此,基于上述分析,我们大胆推断印尼潜艇很有可能遭遇海洋内波而发生掉深,最终失事。

## 4 讨论

本文综合利用卫星遥感观测和数值模拟分析,对

4·21 印尼潜艇失踪事件原因进行了初步探讨分析。结果表明,该潜艇失事的主要原因可能是遭遇源于龙目海峡产生的大振幅海洋内波发生“掉深”而导致。目前,该事件仍在调查中,本研究对潜艇失事提供了一种可能性的科学分析,具体失事原因有待进一步关注。

自二战以来,已发生过多次潜艇失事事件,其原因大都指向了海洋内波。例如,1963年美国“长尾鲨”潜艇失事事件、1968年以色列“达喀尔”潜艇失事事件和今年的4·21印尼潜艇失事事件等。但根据公开报道,目前遭遇大振幅海洋内波但能自救成功的唯有中国海军的372号潜艇(人民网:《敢打必胜的深海铁拳》)。因此,综合利用卫星遥感数据、现场观测和数值模拟开展海洋内波生消和传播过程研究,进而开展类似事件原因的分析将是未来研究的重点和焦点。

### 参考文献:

- [1] 范开国,陈鹏,顾艳镇,等.星载合成孔径雷达海洋遥感与图像解译[M].北京:海洋出版社,2017.  
Fan Kaiguo, Chen Peng, Gu Yanzhen, et al. SAR ocean remote sensing and image interpretation[M]. Beijing: Oceanic Press, 2017.
- [2] Jia Tong, Liang Jianjun, Li Xiaoming, 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.
- [3] Liang Jianjun, Li Xiaoming. Generation of second-mode internal solitary waves during winter in the northern South China Sea[J]. *Ocean Dynamics*, 2019, 69(3): 313–321.
- [4] Liang Jianjun, Li Xiaoming, Sha Jin, et al. The lifecycle of nonlinear internal waves in the northwestern South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2019, 49(8): 2133–2145.
- [5] Jia Tong, Liang Jianjun, Li Xiaoming, et al. Retrieval of Internal Solitary Wave Amplitude in Shallow Water by Tandem Spaceborne SAR[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(14): 1706.
- [6] Susanto R D, Mitnik L, Zheng Quanan. Ocean internal waves observed in the Lombok Strait[J]. *Oceanography*, 2005, 18(4): 80–87.
- [7] Egbert G D, Erofeeva S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(2): 183–204.

## Remote sensing observation and numerical simulation of oceanic internal waves around the Bali Island: A preliminary study on the possible causes of an Indonesian submarine wreck

Liang, Jianjun<sup>1</sup>, Jia Tong<sup>1,2</sup>, Cai Xifang<sup>3</sup>, Li Xiaoming<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Number 18, The 91001 Unit of PLA, Beijing 100166, China)

**Abstract:** The possibility of the Indonesian submarine wreck on 20 April 2021 was analyzed based on satellite remote sensing observation and numerical simulation. The results indicate that large-amplitude oceanic internal waves, estimated to be approximately 50 m using satellite images, originate from the Lombok Strait. They are widely distributed to the north of the Bali Island and are suggested to cause an abrupt sinking of the Indonesian submarine.

**Key words:** north of Bali Island; oceanic internal wave; submarine wreck