

黄松松, 王晶, 梅源, 等. 基于光学遥感的安达曼海内孤立波传播速度特性研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(7): 15–21, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.07.002

Huang Songsong, Wang Jing, Mei Yuan, et al. The velocity characteristics of internal solitary waves in the Andaman Sea by optical remote sensing[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(7): 15–21, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.07.002

基于光学遥感的安达曼海内孤立波传播速度特性研究

黄松松¹, 王晶^{1*}, 梅源¹, 张紫越¹

(1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院 物理系, 山东 青岛 266100)

摘要: 安达曼海内孤立波非常活跃且错综复杂, 传播速度是内孤立波的重要特征参量, 本文采用光学遥感手段建立了内孤立波传播速度的计算方法。收集并处理大量 Terra/Aqua-MODIS 遥感图像, 利用两景图像追踪同一内孤立波与同一激发源产生的内孤立波波群两种方法定量研究安达曼海内孤立波传播速度。研究结果表明: 安达曼海内孤立波传播速度在 0.5~2.7 m/s 之间, 内孤立波传播方向主要受海底地形的影响, 传播速度大小在传播过程中随水深变浅而呈减小的趋势, 在深水区传播速度大小还呈现出季节性差异。

关键词: 内孤立波; 光学遥感; 安达曼海; 半日潮

中图分类号: P731.24; P236

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)07-0015-07

1 引言

安达曼海有着稳定的层结以及特殊的海底地形结构, 被观测到内孤立波频发。Mauray^[1]曾记录过船员在经过安达曼海南部时经常看到海表面浪带起伏。Perry 和 Schimke^[2]进行海上实测, 证实这些浪带与内孤立波有关。随后, Osborne 和 Burch^[3]在安达曼海南部进行观测, 测量到一个传播速度为 2.2 m/s 的内孤立波, 并用 KdV 方程对内孤立波进行描述。Hyder 等^[4]利用安达曼海北部实测数据结合 KdV 方程计算了内孤立波的传播速度为 2.2 m/s, 这说明安达曼海的某些区域内孤立波传播速度还是较大的。谢志宏^[5]总结确定 Alpers 等^[6]提出的安达曼海 4 个生成源地的具体位置, 又提出了另外 4 个可能的生成源地。Vlasenko 和 Alpers^[7]对比模拟和 SAR 观测结果证明安达曼海南部出现的次级内孤立波是由大振幅内孤立波与浅滩相互作用产生。Silva 和 Magalhaes^[8]结合现场实测数据和 SAR 数据研究十度海峡第二模

态内孤立波的生成机制, 认为其与第四模态界面内潮有关。由此可见安达曼海频发的内孤立波由多个生成源地产生。

学者们通过现场实测、遥感和数值模拟手段对安达曼海内孤立波的生成和传播机制开展过研究, 但尚未对该海域内孤立波传播速度分布特点开展详细研究。由于内孤立波的发生具有随机性, 要获得内孤立波的传播速度通常需要大范围、长时间的连续观测。以往的现场实测只能实现小范围的定点或布阵测量, 难以获得全面的有效信息。光学遥感数据丰富、覆盖范围广, 已成为内孤立波参数反演和传播演变过程研究的重要手段。本文利用 3 年光学遥感图像建立安达曼海内孤立波传播速度的计算方法, 研究了该海域内孤立波传播速度分布特征, 为掌握安达曼海内孤立波特性提供科学依据。

2 安达曼海水文特征

安达曼海是印度洋东北部的一个半封闭式边缘

收稿日期: 2018-07-26; 修订日期: 2019-01-04。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1405602); 国家自然科学基金项目(61871353)。

作者简介: 黄松松(1993—), 女, 山东省青岛市人, 主要研究方向为光学遥感。E-mail: Huangsongsonghss@163.com

* 通信作者: 王晶(1962—), 女, 教授, 主要研究方向为海洋内孤立波的探测。E-mail: wjing@ouc.edu.cn

海,北至缅甸,东至马来半岛,南至苏门答腊岛,西为安达曼群岛和尼克巴群岛,东南通马六甲海峡,面积约 $6 \times 10^5 \text{ km}^2$,平均水深 $1\,100 \text{ m}$ ^[9],水深分布具体见图 1。

安达曼海在气候上属于热带气候,2–4 月为热季,5–10 月为雨季,11 月至翌年 1 月为冬季^[10]。研究区域内多点平均温度、盐度及密度数据选自 World Ocean Atlas(2013)多年月平均数据,其不同季节垂向分布如图 2 所示。

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

$$N(z) = \left[-\frac{g}{\bar{\rho}} \frac{d\rho(z)}{dz} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中, g 为重力加速度; $\bar{\rho}$ 为密度常量; $\frac{d\rho(z)}{dz}$ 为密度的垂向变化:

对于稳定层化的两层流体,在密度跃层处会出现一个浮频率最大值。由图 2 可以看出不同季节海洋层化结构不同,热季和冬季差别不大,密度跃层分别位于 50 m 和 59 m 深度附近,雨季跃层最深,位于 85 m 深度附近。

3 内孤立波传播速度的观测方法

由于 MODIS 图像具有时间分辨率高、空间覆盖范围广的优势,因此既可以利用上、下午星追踪同一内孤立波的传播轨迹,计算内孤波的传播速度,也可

以在同一景图像中找到同一激发源产生的多组内孤立波列,利用潮周期计算内孤立波在远距离传播过程中的平均传播速度^[11–13]。通过搜集 2015–2017 年 MODIS 图像,获得安达曼海内孤立波的空间分布如图 3 所示。遥感图像中观测到的内孤立波多分布于水深小于 $2\,000 \text{ m}$ 的海区,即苏门答腊岛以北,马来半岛以西,安达曼群岛东北部,尼克巴群岛附近。由图 3 还可以看出,安达曼海内孤立波的传播方向不一致,大部分海域内孤立波向东或东北方向传播,但在北部有向东西两个方向传播的内孤立波,下面将对安达曼海内孤立波的传播速度展开深入研究。

3.1 两景图像追踪法

Terra 和 Aqua 两颗卫星过境安达曼海的时间间隔为 Δt ,在同一天内对同一列内孤立波能够进行 2 次观测。在两景图像中寻找同一天内孤立波形相似、相距约为 21 km 的两组内孤立波列即为同一内孤立波,利用 ArcGIS 软件提取和融合两次观测到的内孤立波的波峰线,在两条波峰线之间做多组垂直线段,端点为两亮条纹中心,线段长度即为内孤波的运动位移 ΔX_1 (图 4),利用下式求出内孤立波传播的平均传播速度:

$$V_1 = \frac{\Delta X_1}{\Delta t}. \quad (2)$$

3.2 潮周期法

安达曼海内孤立波是由印度洋的半日潮自西通过海底山激发生成^[3–4, 14],因此还可以依据半日潮周

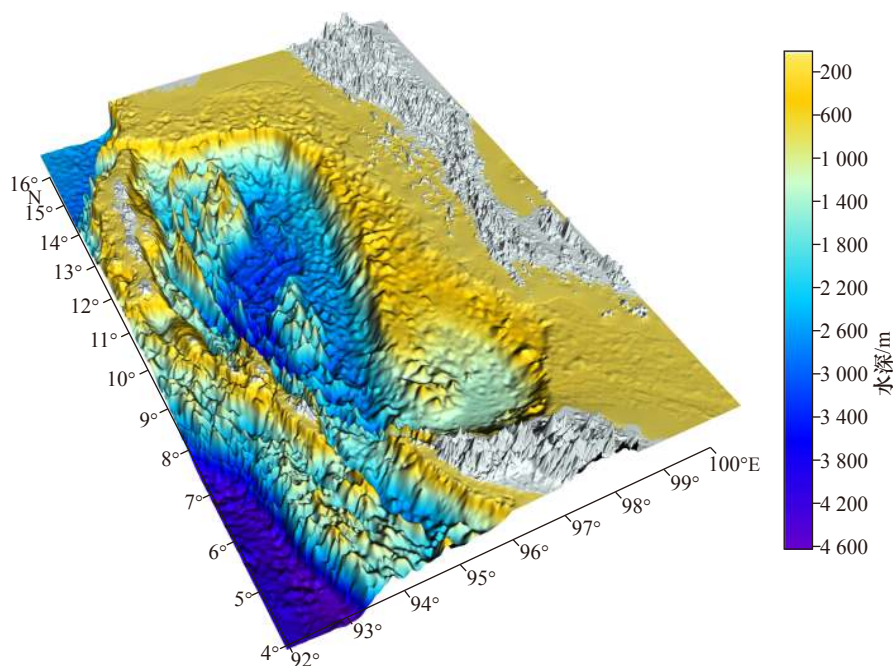


图 1 安达曼海三维水深分布

Fig. 1 Three-dimensional topography of the Andaman Sea

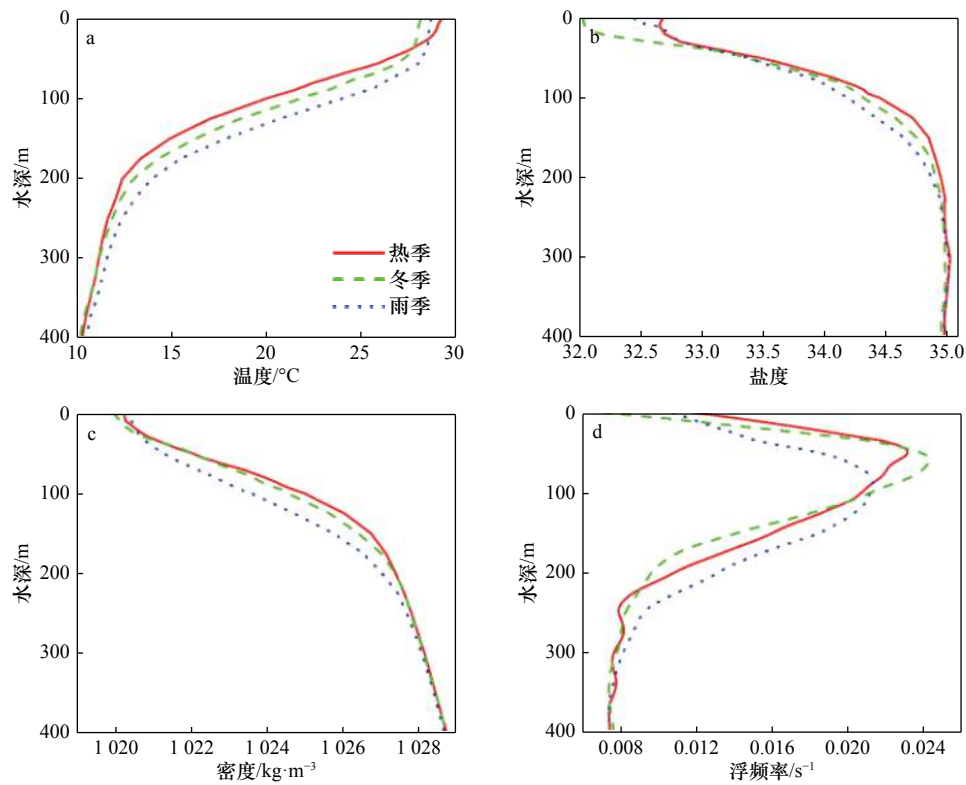


图2 安达曼海不同季节平均垂向温度(a)、盐度(b)、密度(c)及浮频率(d)曲线

Fig. 2 Averaged temperature (a), salinity (b), density (c) and buoyancy frequency (d) vertical profiles in different seasons in the Andaman Sea

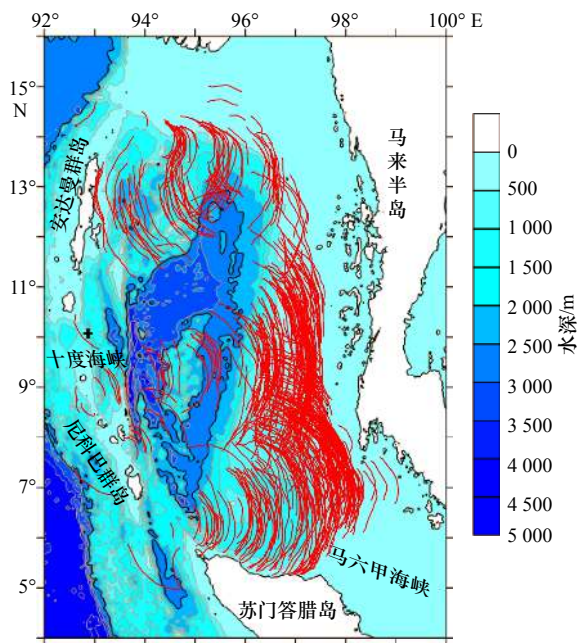


图3 2015—2017年MODIS图像统计获得的安达曼海内孤立波的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of internal solitary waves obtained by MODIS images from 2015 to 2017 in the Andaman Sea

期($T = 12.42\text{ h}$)计算内孤立波的平均传播速度。图5为Terra卫星拍摄到由两个激发源产生的6组内孤立

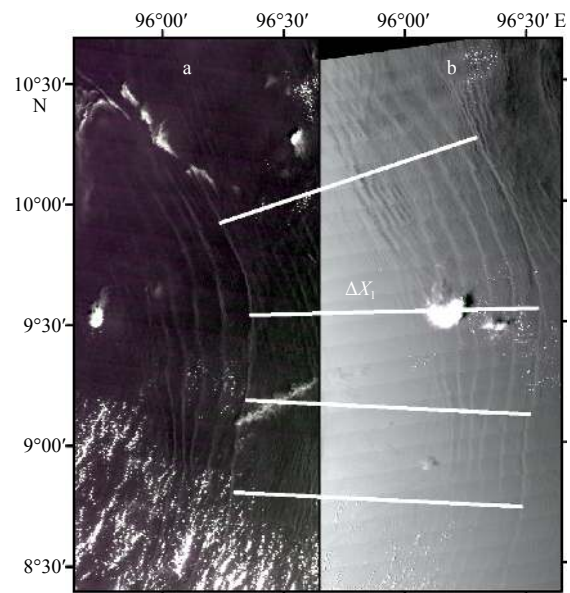


图4 追踪法计算内孤立波传播速度示意图

Fig. 4 Schematic diagram for calculating the propagation velocity of internal solitary waves by tracing method

a为2017年3月13日04:00 UTC的MODIS图像, b为2017年3月13日07:00 UTC的MODIS图像

MODIS images acquired at 04:00 UTC (a) and 07:00 UTC (b) on March

13, 2017

波波群, A1–A3、B1–B3 分别由两个不同激发源产生。在 MODIS 图像中寻找同一激发源产生的两组或多组内孤立波波列, 假设波列之间具有与之相同的半日潮周期, 连接相邻波列波峰线的中心, 利用下式计算内孤立波传播的平均传播速度:

$$V_2 = \frac{\Delta X_2}{T}. \quad (3)$$

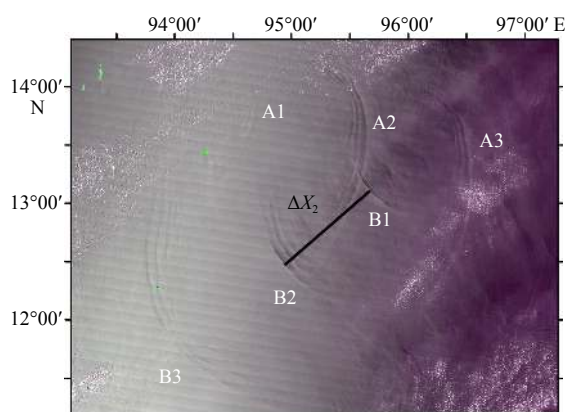


图 5 潮周期法计算内孤立波传播速度示意图

Fig. 5 Schematic diagram for calculating the propagation velocity of internal solitary waves by tidal period method

图为 2018 年 3 月 3 日 04:30UTC 的 MODIS 图像

The MODIS image acquired at 04:30 UTC on March 3, 2018

4 观测结果与分析

本文筛选 2015–2017 年 MODIS 遥感图像, 采用两种方法观测内孤立波的传播速度, 图像追踪法找到上、下午星各 45 景光学遥感图像, 共提取 79 对内孤立波列, 潮周期计算法选取 19 景图像, 共提取 40 列内孤立波。

4.1 图像追踪观测结果

利用两景图像追踪法将计算的传播速度矢量融合得到内孤立波传播速度矢量分布, 如图 6 所示。图 6 中图像追踪法的传播速度矢量取自图 4 所示同一内孤立波对应点的位移, 由于 Terra 和 Aqua 卫星过境安达曼海的时间分别为地方时 10:30 am 前后和 1:30 pm 前后, 两星时间间隔大约为 3 h, 因此定性地采用矢量长度表示传播速度的大小, 矢量方向表示传播速度的方向。依据传播速度分布规律将安达曼海划分为 5 个区域进行讨论, 通过统计分析总结出该海域内孤立波传播速度的空间分布具有以下特征:

(1) 南部 I 区水深在 800~2 000 m 之间, 内孤立波的传播速度约为 2.0~2.6 m/s。

(2) 东南部 II 区及东部 III 区为广阔的大陆架, 水

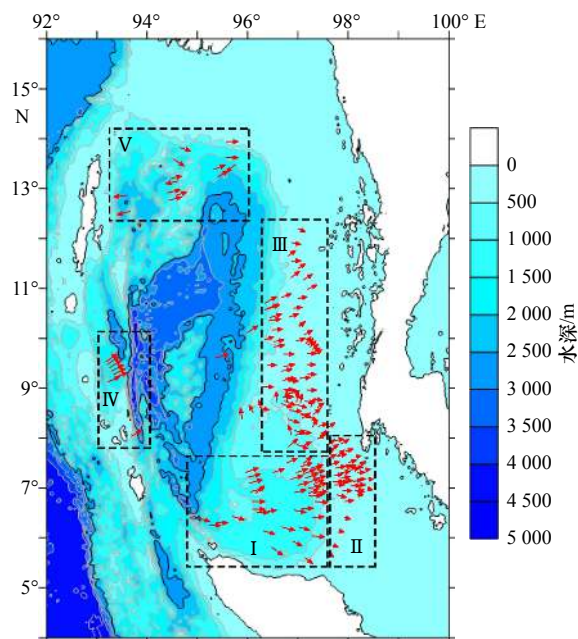


图 6 图像追踪法获得内孤立波传播速度矢量图

Fig. 6 Velocity vector of internal solitary waves acquired by image tracing method

深在 100~800 m, 内孤立波传播至此开始破碎和耗散, 传播速度由 2.0 m/s 急剧下降到 0.5 m/s。

(3) 中西部 IV 区为深水区, 只在总水深 1 800~2 500 m 处追踪到内孤立波, 内孤立波向东北方向传播, 观测到该海域最大传播速度为 2.5~2.7 m/s。

(4) 北部 V 区水深为 1 400~2 000 m, 具有 2 个内孤立波生成源地, 内孤立波分别向西南和东南方向传播, 传播速度在 2.2~2.5 m/s 之间。

(5) 安达曼海内孤立波整体上多向东或东北方向传播, 在北部有向西南和东南两个方向传播的内孤立波。通过融合地形数据发现安达曼海内孤立波大致沿垂直于等深线的方向传播, 说明地形对内孤立波的传播演变过程起重要作用。

4.2 潮周期观测结果

通过光学遥感长期观测发现安达曼海内孤立波是由半日潮与海山相互作用产生, 前后两个内孤立波群相隔一个半日潮周期, 利用潮周期可以计算内孤立波在远距离传播过程中的平均传播速度, 这对于安达曼海域内孤立波可预报性研究以及为开展海洋工程应急措施都有重大意义。采用半日潮周期方法计算内孤立波传播的平均传播速度结果如图 7 所示, 图 7 中潮周期法的传播速度矢量大小取自图 5 所示同一激发源产生的相邻内孤立波列头波之间的距离, 矢量箭头指向内孤立波的传播方向, 由于相邻内孤立波之间相差一个潮周期, 因此定性地采用较长的矢量长度

表示长距离的平均传播速度大小。通过潮周期法得到的该海域孤立波传播速度的空间分布具有以下特征:(1)在 97°E 以东为广阔的大陆架,水深多小于 500 m,内孤立波传播速度为 1.27~2.00 m/s;(2)在 97°E 以西的水深较深,内孤立波传播速度为 1.84~2.72 m/s;(3)安达曼海是盆地地形,西部具有广阔的大陆架,沿内孤立波传播方向,水深逐渐变浅,传播速度也逐渐变小。安达曼海地形复杂,内孤立波传播速度随地形变化比较明显。

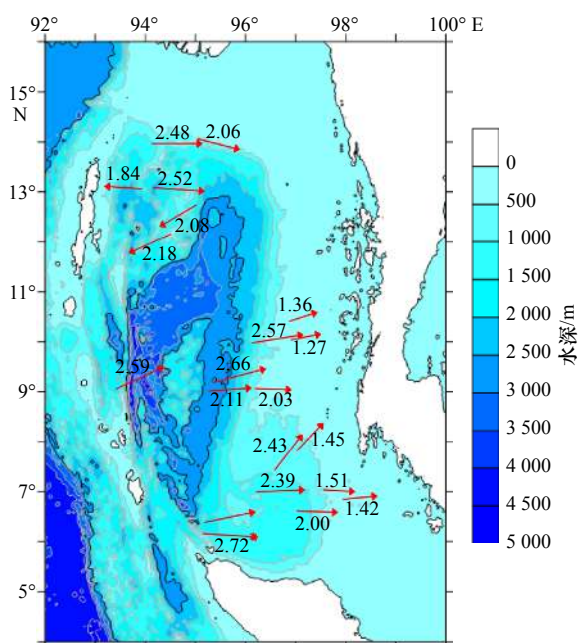


图7 利用半日潮周期计算的内孤立波平均传播速度矢量

Fig. 7 Velocity vector of internal solitary waves acquired by tide method

总之,比较上述两种观测内波传播速度的方法,图像追踪法计算同一个内孤立的时间间隔约为 3 h,潮周期法计算前后两个内孤立波的时间间隔为 12.42 h。可见潮周期法得到内孤立波在长距离传播过程中的平均传播速度,而图像追踪法的时间间隔短,计算的传播速度比潮周期法更为细致,更适合描述传播速度的大小随水深的变化,因此下一节采用两景图像追踪法来讨论影响传播速度的因素。

4.3 影响内孤立波传播速度的因素

沿传播速度矢量方向提取 ETOPO 平均水深数据,结合两景图像追踪法计算的传播速度矢量,获得传播速度随水深变化的散点分布,如图 8 所示。

由图 8 可见,内孤立波的传播速度除了受地形影响外,还呈现出一定的季节性差异,特征如下:

(1)在浅水区水深小于 600 m 时,传播速度随水

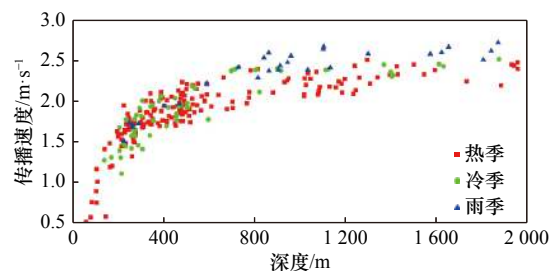


图8 传播速度随水深变化的散点分布

Fig. 8 Distribution of propagation velocity and water depth

深增加呈现出显著增大的趋势;当水深大于 600 m 以后,传播速度仍随水深增加,但变化较缓慢。

(2)内孤立波的传播速度在浅水区和深水区呈现出不同的季节性差异。水深小于 600 m 时,同一水深位置处 3 个季节内孤立波传播速度差别并不明显;水深大于 600 m 以后季节性差异较为明显,同一水深位置处,雨季传播速度最大、冬季次之、热季最小,雨季和热季传播速度平均差约 0.5 m/s。

传播速度的季节差异主要与海洋层化结构有关。不同季节海水温度、盐度不同,进而影响密度跃层的位置,这必然影响在密度跃层传播的内孤立波。由图 2 的浮频率分布可知密度跃层在雨季最深、冬季次之、夏季最浅。水深大于 600 m 以后,传播速度的季节性差异与上层厚度呈正比关系,说明深水区上层厚度越深,内孤立波传播速度越快。对于水深小于 600 m 的海域,传播速度与上层厚度的相关性不明显。

5 结论

本文收集并处理安达曼海 2015–2017 年光学遥感图像,共筛选 109 景图像建立两景图像追踪法和潮周期法获得安达曼海的内孤立波传播速度,以 3 年数据分析了内孤立波传播速度的空间及时间分布,并对其影响因素进行了定量研究。

安达曼海内孤立波多向东或东北并沿垂直于等深线的方向传播,在北部存在向东南和西南两个方向传播的内孤立波。内孤立波的传播速度分布为:水深 100~800 m 东南和东部地区,传播速度为 0.5~2.0 m/s;水深 800~2 000 m 的南部地区,传播速度为 2.0~2.6 m/s;水深 1 400~2 000 m 的北部地区,传播速度为 2.2~2.5 m/s;水深 1 800~2 500 m 的中西部地区,传播速度为 2.5~2.7 m/s。与安达曼海纬度相近的南海,多年来学者们进行过许多现场实测: Cai 等^[15]于水深 472 m 处测得一个传播速度为 1.36 m/s 内孤立波;吕海滨等^[16]在水深 697 m 处测得平均传播速度为 2.79 m/s 的内孤立波; Li 等^[17]设置 3 个系泊,平均

水深 1 523 m, 测得平均传播速度为 2.95 m/s 的内孤立波。由现场实测数据可知, 南海海域内孤立波的传播速度与水深也是正相关的。本文得到的安达曼海内孤立波传播速度与水深关系与南海实测是一致的, 进而说明遥感图像观测方法计算内孤立波传播速度是有效的。

内孤立波的传播速度在浅水区和深水区呈现出不同的变化趋势。浅水区内孤立波的传播速度受地形影响很大, 随水深的增加而显著增大, 海洋层化结构引起的传播速度季节性差异不明显; 但在深水区地形对内孤立波的传播速度的影响减弱, 不同层化结构导致的传播速度差异变得明显。

参考文献:

- [1] Maury M F. The Physical Geography of the Sea and its Meteorology[M]. New York: Harper, 1861: 404–405.
- [2] Perry B R, Schimke G R. Large-amplitude internal waves observed off the northwest coast of Sumatra[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70(10): 2319–2324.
- [3] Osborne A R, Burch T L. Internal solitons in the Andaman Sea[J]. *Science*, 1980, 208(4443): 451–460.
- [4] Hyder P, Jeans D R G, Cauquil E, et al. Observations and predictability of internal solitons in the northern Andaman Sea[J]. *Applied Ocean Research*, 2005, 27(1): 1–11.
- [5] 谢志宏. 利用SAR及MODIS卫星影像研究安达曼海非线性内波之发源及演变[D]. 基隆: 台湾海洋大学, 2004: 26–39.
Xie Zhihong. A study of generation and evolution of nonlinear internal waves in the Andaman Sea by using SAR and MODIS images[D]. Keelung: National Taiwan Ocean University, 2004: 26–39.
- [6] Alpers W, Heng Wangchen, Hock L. Observation of internal waves in the Andaman Sea by ERS SAR[C]//IGARSS'97. 1997 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Remote Sensing-A Scientific Vision for Sustainable Development. Singapore: IEEE, 1997.
- [7] Vlasenko V, Alpers W. Generation of secondary internal waves by the interaction of an internal solitary wave with an underwater bank[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2005, 110(C2): 1105–1107.
- [8] Silva J C B D, Magalhaes J M. Internal solitons in the Andaman Sea: a new look at an old problem[C]//Proceedings Volume 9999, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. Edinburgh, United Kingdom: SPIE Remote Sensing, 2016: 999907.
- [9] Li Yineng, Peng Shiqiu, Zeng Xuezhi. Observations and simulations of the circulation and mixing around the Andaman-Nicobar submarine ridge[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2012, 5(4): 319–323.
- [10] Zhou Liying, Yang Jingsong, Wang Juan, et al. Spatio-temporal distribution of internal waves in the Andaman Sea based on satellite remote sensing[C]//Proceedings of the 9th International Congress on Image and Signal Processing, Biomedical Engineering and Informatics. Datong, China: IEEE, 2017: 624–628.
- [11] Porter D L, Thompson D R. Continental shelf parameters inferred from SAR internal wave observations[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999, 16(4): 475–487.
- [12] Li Xiaofeng, Clemente-Colón P, Friedman K S. Estimating oceanic mixed-layer depth from internal wave evolution observed from radarsat-1 SAR[J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2000, 21(1): 130–135.
- [13] Hong D B, Yang Chansu, Ouchi K. Estimation of internal wave velocity in the shallow South China Sea using single and multiple satellite images[J]. *Remote Sensing Letters*, 2015, 6(6): 448–457.
- [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] Cai Shuqun, Gan Zijun, Long Xiaomin. Some characteristics and evolution of the internal soliton in the northern South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(1): 21–27.
- [16] 吕海滨, 何宜军, 申辉. 基于Radon变换获取东沙群岛附近三个内孤立波的传播速度[J]. *海洋通报*, 2013, 32(3): 251–255.
Lv Haibin, He Yijun, Shen Hui. Calculation of the velocities of three internal solitary waves around Dongsha Islands based on Radon transform[J]. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(3): 251–255.
- [17] Li Youkai, Wang Caixia, Liang Chujin, et al. A simple early warning method for large internal solitary waves in the northern South China Sea[J]. *Applied Ocean Research*, 2016, 61: 167–174.

The velocity characteristics of internal solitary waves in the Andaman Sea by optical remote sensing

Huang Songsong¹, Wang Jing¹, Mei Yuan¹, Zhang Ziyue¹

(1. Department of Physics, School of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Internal solitary waves (ISWs) are widely distributed and have a large scale in the Andaman Sea. The velocity of ISWs is an important dynamic parameter. In this paper, approaches are proposed and demonstrated for calculating the propagation velocity of ISWs by optical remote sensing. The optical remote sensing data of MODIS in the Andaman Sea are collected and two methods are adopted to acquire velocity. One is to track the same ISWs based on two remote sensing satellites. The other is to find two or more packets of ISWs from the same generation in a single image. The overview of velocity distribution in the whole Andaman Sea is obtained by combining two methods. The results show that the propagation velocity of the Andaman Sea internal solitary wave ranges from 0.5 m/s to 2.7 m/s. The direction of the velocity is mainly influenced by the bottom topography, and the velocity decreases with the depth of water. In addition, different seasons correspond to different velocities in the deep water areas.

Key words: internal solitary wave; optical remote sensing; Andaman Sea; semidiurnal tide