

苏禄海卫星海洋内孤立波预测技术研究

王业桂^{1,2}, 范开国^{1,2*}, 方芳¹, 施英妮¹, 徐东洋¹, 胡旭辉¹

(1. 中国人民解放军 32021 部队, 湖北 武汉 430077; 智能空间信息国家级重点实验室, 北京 100094)

摘 要: 海洋内波由于生成机制复杂、观测数据匮乏, 导致海洋内孤立波预测一直是海洋领域中亟待解决的瓶颈问题。针对这一问题, 提出一种基于卫星海洋内波遥感观测数据驱动, 结合海洋内波生成与传播物理机制的预测技术方法, 并在苏禄海开展卫星海洋内孤立波预测研究。预测结果不仅再现了苏禄海内孤立波的“手牵手”现象, 较好地实现内波从源区至消亡区的全路径传播预测, 而且模拟波峰线形态与观测前导波峰线吻合较好, 二者的平均绝对时间误差小于 0.92 h。

关键词: 内孤立波; 卫星遥感; 苏禄海; 预测

中图分类号: P731.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2026)03-0001-06

0 引言

海洋内孤立波 (Internal Solitary Waves, ISWs) 是指等密度面垂向位移在密度跃层具有最大值的一种非线性波动, 其时间尺度为 5~30 min, 水平长度尺度为 300~3 000 m, 振幅介于 5~250 m。研究表明, 大振幅内孤立波对海洋内部的物质输运、声传播和平台作业等方面具有极其重要的影响。

海洋内孤立波的产生通常包括两个过程: 天文潮流与陡变地形的相互作用产生近线性的长内波; 长内波在非线性、非静压和地球旋转的共同作用下演变为内孤立波。卫星遥感观测显示, 内孤立波在全球海洋内波高发海域均有分布, 其中苏禄海作为存在大振幅内孤立波的典型海区, 是国内外学者开展内孤立波研究的热点区域。

目前, 基于卫星遥感和现场观测揭示的苏禄海内孤立波源区有 3 个: 珍珠滩 (Pearl Bank, PB) 东侧的海槛^[1]、珍珠滩西侧的海槛^[2], 以及潘古塔兰岛 (Pangutaran Island, PI) 和北乌比安岛 (North Ubian Island, NUI) 之间的潘古塔兰水道 (Pangutaran Passage, PP)^[3]。其中, 源于珍珠滩两侧的内孤立波

经“手牵手”合并为更大规模的内孤立波向西北传播, 在 8°N 附近发展至最大强度, 约 2.5 天后到达帕拉弯岛近岸破碎消亡^[4]。此外, 苏禄海内孤立波表现为波包结构, 每个波包包含 3~7 个孤立子, 其前导波的最大振幅约为 90 m, 不同波包的间隔约为半日潮周期, 多在大潮期发生^[1]。

考虑到苏禄海内孤立波对区域水文环境的重要影响, 近年来国内外学者们开展了苏禄海内孤立波的传播预测研究。最早, Zhang 等^[5]使用全连接神经网络建立了基于初始波峰线的内孤立波传播预测技术方法, 并利用极轨卫星 Terra/Aqua 提供的间隔半日潮周期的内波观测数据计算波速。Huang 等^[6]使用循环神经网络建立了基于初始波峰线的内孤立波传播预测方法, 并利用地球静止轨道卫星 (多用途卫星-2A/风云四号 A 星, GK-2A/FY-4A) 提供的间隔 10 min 的内波观测数据计算了波速。但上述两种方法均依赖于卫星遥感实时获取的初始波峰线数据, 在缺乏该数据的情况下, 难以实现从内孤立波源区处开始的传播预测, 没有从根本上解决海洋内孤立波预测的难题。针对上述问题, 本文提出了一种基于卫星海洋内波遥感观测数据, 结合

收稿日期: 2025-12-20。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB3907700)。

作者简介: 王业桂 (1963-), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事气象海洋观测与保障研究。E-mail: wangyg0110@163.com

*通信作者: 范开国 (1981-), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事海洋信息探测与保障研究。E-mail: vanfkg@sina.com

内波生成与传播物理机制的内孤立波预测新技术,在苏禄海开展卫星海洋内孤立波预测案例研究。研究结果再现了苏禄海内孤立波的“手牵手”现象,较好地实现内波从源区至消亡区的全路径传播预测,模拟的波峰线形态与观测内孤立波前导波波峰线吻合较好,二者的平均绝对时间误差小于0.92 h。

1 数据和技术方法

1.1 遥感数据

本文收集了2015年全年的101景Terra/Aqua卫星中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)海洋内波遥感数据,其中MODIS卫星遥感数据的空间分辨率为250 m。利用ArcGIS软件提取MODIS卫星遥感数据中内孤立波暗条带中间像元的位置作为前导波波峰线空间位置,进而得到苏禄海内孤立波的空间分布情况(图1中蓝色曲线所示)。

1.2 技术方法

1.2.1 内孤立波产生源区确定技术

基于线性理论推导的内潮产生力常用来指示内孤立波的源区,其表达式为^[7-8]:

$$F = -\frac{zN^2}{h^2} \left[\left(\int Q_x dt \right) \frac{\partial h}{\partial x} + \left(\int Q_y dt \right) \frac{\partial h}{\partial y} \right] \quad (1)$$

式中: z 是垂向坐标,向上为正; N 是浮力频率; h 是总水深; Q_x 和 Q_y 分别是东西向和南北向的潮流体积通量。在计算式(1)时,水深数据利用美国斯克利普斯海洋研究所提供的SRTM15+^[9];海水温盐数据取自美国国家环境信息中心提供的World Ocean Atlas 2013^[10],代入海水热力学方程2010(Thermodynamic Equation of Seawater-2010, TEOS-2010)可求得浮力频率;潮流数据利用美国俄勒冈大学提供的全球潮汐模型TPXO反演模型^[11]。

1.2.2 内孤立波传播路径计算方法

基于Jackson^[12]的工作,使用程函方程模拟计算内孤立波的传播预测,其表达式为:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 = \frac{1}{C(x,y)^2} \quad (2)$$

式中: T 是内波从源点 (x_0, y_0) 传播到点 (x, y) 的时间;

C 是波速。在计算式(2)时,采用Korteweg-de Vries(KdV)理论估算波速,公式为:

$$C = c_0 + \frac{\alpha A}{3} \quad (3)$$

式中: c_0 是线性波速; α 是非线性系数; A 是振幅。针对苏禄海海域的内孤立波,依据前人研究结果,为简化处理,当水深 $\geq 1\,000$ m时, $A = -100$ m;当水深 $< 1\,000$ m时, $A = -20$ m^[13]。在求解式(2)时,首先建立目标海区的空间网格,其次确定空间网格点的波速,最后利用快速行进法求解,可得到内波从源点到达各网格点的时间 $T(x, y)$ 。

2 研究案例

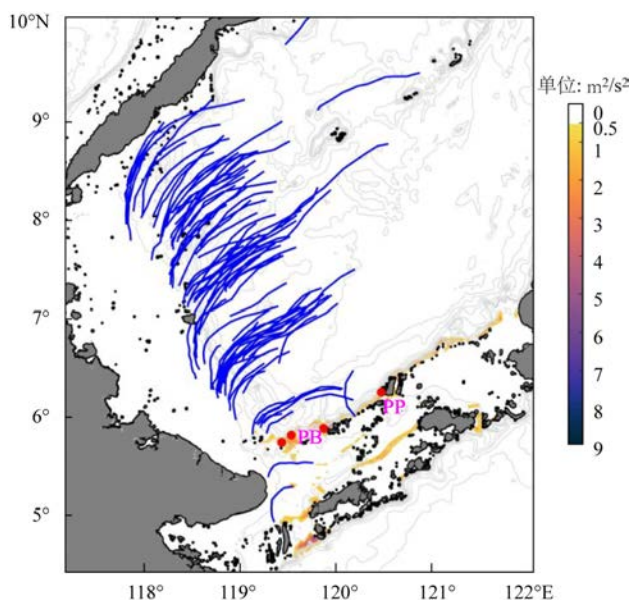
2.1 苏禄海内孤立波产生源点

由式(1)可知,内潮产生力大小与潮流和海水层化密切相关。本文以苏禄海4月的海水层化数据和 M_2 分潮数据为代表,计算了苏禄海的内潮产生力(见图1)。从图1中可以看到,内潮产生力在珍珠滩(PB)两侧和潘古塔兰水道(PP)呈现高值分布,结合内孤立波的空间分布(见图1中蓝线曲线),可以确定苏禄海内孤立波主要源于这两处区域,且源于珍珠滩的内波占据主导地位。为进一步确定内孤立波的传播路径,在珍珠滩和潘古塔兰水道处选取内潮产生力最大值所在的点位,作为苏禄海内孤立波的源点(见图1中红色圆点),其中珍珠滩处有3个源点^[2],潘古塔兰水道处有1个源点。

2.2 苏禄海内孤立波空间传播路径

将图1中利用内潮产生力确定的4个内孤立波产生源点代入式(2),利用4月的海水层化数据计算线性波速度,从而可得到内孤立波空间传播预测路径(见图2)。其中,黑色线为模拟的内孤立波波峰线,第一条波峰线对应时间 $T = 5$ h,相邻波峰线间隔4 h;蓝线为2015年4月MODIS卫星观测到的内孤立波前导波波峰线。对比可以看出,模拟的内孤立波波峰线与卫星遥感观测到的内孤立波前导波波峰线基本吻合,同时再现了源区处的“手牵手”现象和内波传播过程中遇浅水区的地形折射现象。

为进一步验证卫星海洋内孤立波预测方法的有效性,本文选取2015年4月两景、2016—2019年



注:蓝线为卫星遥感数据提取的内孤立波前导波位置,红色圆点代表内潮产生力最大值,PB指珍珠滩,PP指潘古塔兰水道

图1 苏禄海内孤立波空间分布和4月 M_2 分潮的内潮产生力空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of internal solitary waves and internal M_2 tide generation forces in the Sulu Sea in April

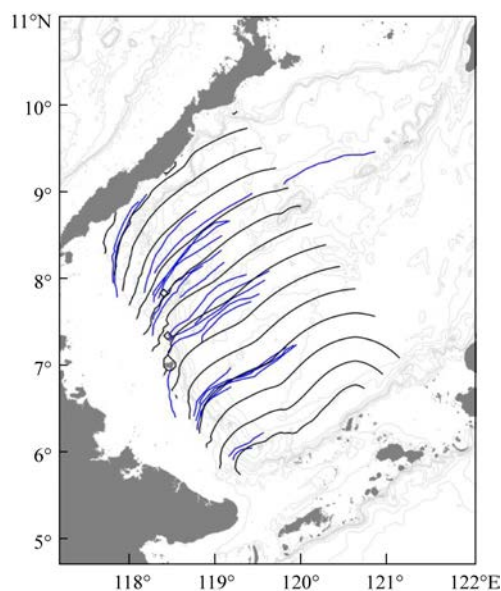
4月的五景卫星遥感数据,与同步时间段的内孤立波预测结果进行对比分析。

①对比分析案例一

图3a为2015年4月5日02:49(世界时,下同)的Terra/MODIS卫星遥感影像,从遥感数据中可清晰看到5组间隔半日潮周期的内孤立波波包,分别记为P1、P2、P3、P4和P5。其中,P1发源于PB西侧海槛,与发源于PP的内波合并为P2;P2逐步发展为P3,且发源于PB和PP的两支内波不断融合,形成具有光滑波峰线的P4;P4继续向西北传播,并逐渐耗散为P5。对应这5组内孤立波波包,通过内孤立波空间传播路径模拟得到的到达时间分别为5.5 h、16.5 h、28.0 h、40.0 h和53.5 h(见图3b),时间间隔依次为11.0 h、11.5 h、12.0 h和13.5 h。取 M_2 分潮的周期12.4 h作为P1、P2、P3、P4和P5波包的时间间隔真值,与内孤立波空间传播路径模拟结果比对,平均绝对时间误差为0.4 h。

②对比分析案例二

图4a为2015年4月21日02:49的Terra/MODIS



注:黑线是模拟的内孤立波波峰线,蓝线是2015年4月卫星遥感观测到的内孤立波前导波峰线

图2 苏禄海4月内孤立波空间传播路径图

Fig.2 The spatial propagation of internal solitary waves in the Sulu Sea in April

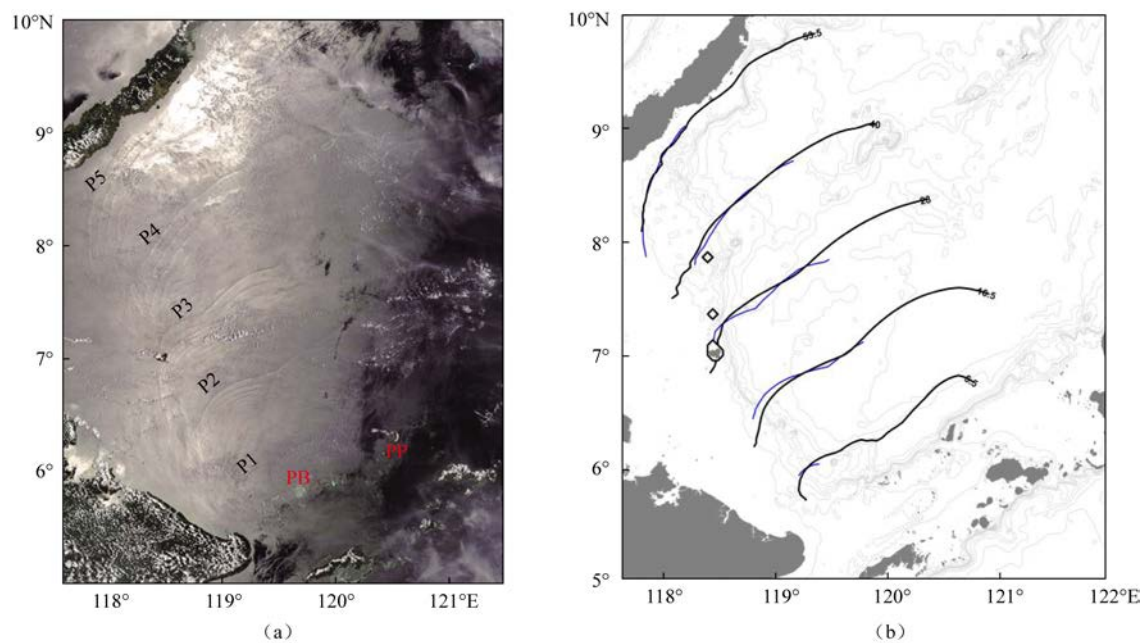
卫星遥感数据,从遥感数据中可见3组间隔半日潮周期的内波包,分别记为P1、P2和P3。对应这3组内波,通过内孤立波空间传播路径模拟得到的到达时间分别为17 h、30 h和42 h(见图4b),时间间隔为13 h和12 h。取 M_2 分潮的周期12.4 h作为P1、P2和P3波包的时间间隔真值,与内孤立波空间传播路径模拟结果比对,平均绝对时间误差为0.1 h。

③其他对比分析案例

利用2016—2019年4月的五景MODIS数据,通过对比卫星观测内波到达时间与预测内波到达时间的方式,进一步验证本文提出的预测技术性能。表1中的真实到达时间为卫星成像时间减去内波在源点的激发时间,动力预测时间为通过函数方程模拟的内波从源点到卫星观测波峰线的时间。这五景卫星数据对应的内波前导波位置见图5,从图中可以看出,预测位置分别覆盖了内波在苏禄海的生成区、成长区和衰减区。

3 结论

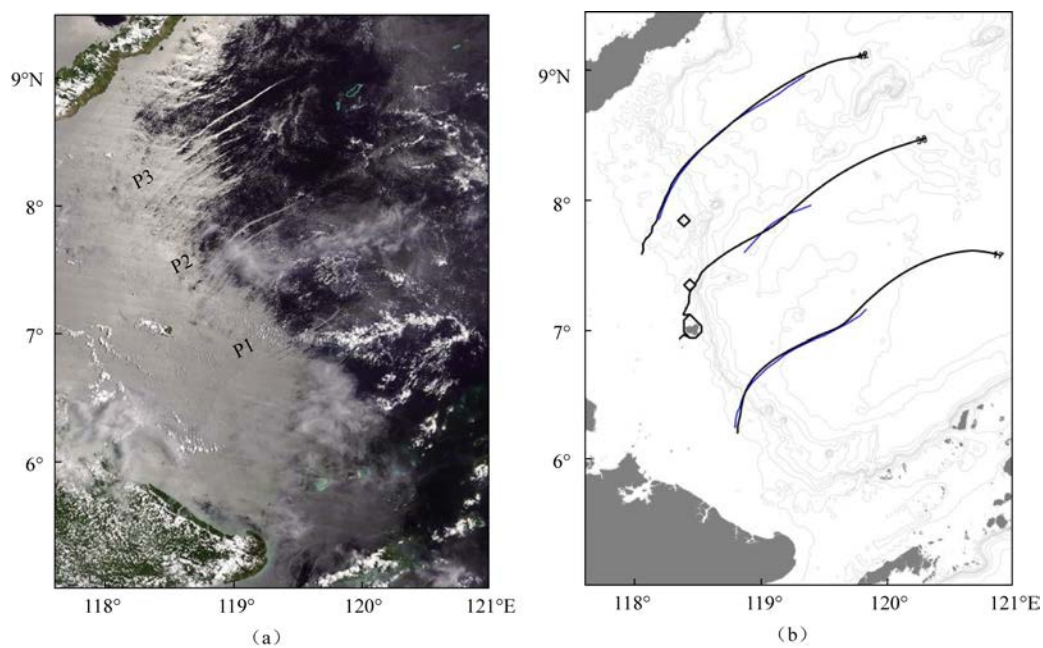
本文基于卫星海洋内波遥感观测数据,结合内



注:蓝线和黑线分别为MODIS观测的内孤立波前导波波峰线和模拟的内孤立波波峰线

图3 Terra/MODIS卫星遥感数据(a)和苏禄海内孤立波卫星遥感观测与内孤立波传播预测结果对比(b)

Fig.3 Remote sensing data from the Terra/MODIS satellite (a) and comparison between the satellite remote sensing images and the predicted propagation of internal solitary waves in the Sulu Sea (b)



注:蓝线和黑线分别为MODIS观测的内孤立波前导波波峰线和模拟的内孤立波波峰线

图4 Terra/MODIS卫星遥感数据(a)和苏禄海内孤立波卫星遥感观测与内孤立波传播预测结果对比(b)

Fig.4 Remote sensing data from the Terra/MODIS satellite (a) and comparison between the satellite remote sensing images and the predicted propagation of internal solitary waves in the Sulu Sea (b)

表 1 内孤立波预测对比验证案例

Tab.1 The comparison case between predicted and observed internal waves

序号	成像时间	真实到达时间/h	动力预测时间/h	绝对时间误差/h
1	2016年4月7日 02:49	5.32	5.50	0.18
2	2017年4月10日 02:49	18.32	17.50	0.82
3	2017年4月10日 02:49	30.82	30.00	0.82
4	2018年4月17日 05:26	44.43	47.00	2.57
5	2019年4月20日 05:25	19.92	21.50	1.58

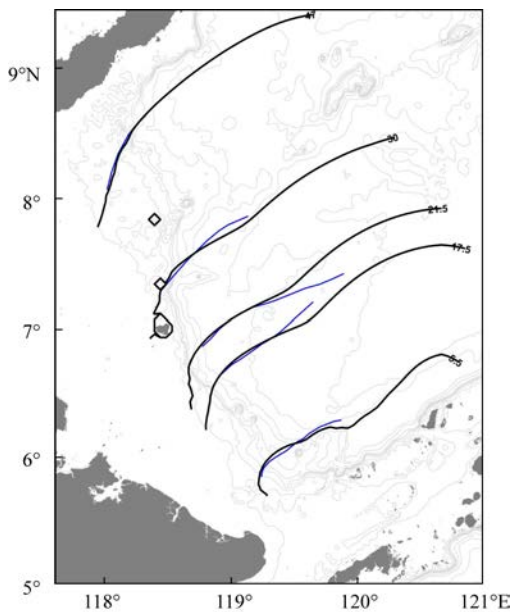


图5 不同年份的4月内孤立波预测对比图

Fig.5 Comparison of predicted and observed internal waves in April in different years

波生成与传播物理机制,提出了内孤立波产生源区确定与传播计算相结合的内孤立波预测新技术。该预测技术不仅较好地实现内波从源区至消亡区的全路径传播预测,再现了苏禄海内孤立波“手牵手”现象和地形作用下的内波折射现象,具备海洋内孤立波源区识别与复杂地形下内孤立波传播预测能力;而且模拟波峰线形态与观测前导波波峰线吻合较好,二者平均绝对时间误差小于0.92 h,具备较高的预测准确性。但在7.5°N附近,模拟的内孤立波波峰线与MODIS观测的内孤立波前导波波峰线仍存在一定偏差,这极有可能与KdV理论中波速参数简化设置有关。未来可结合多源卫星遥感观测或地球静止轨道卫星遥感观测,通过优化内孤立

波波速计算精度,进一步提升卫星海洋内孤立波预测技术精度。

综上所述,本文提出的基于卫星遥感数据和物理机制双驱动的内孤立波预测技术方法,具备可行性与有效性。该方法不仅避免了传统数值模型对复杂初始场和高计算资源的依赖,还克服了基于机器学习的海洋内孤立波预测技术对实时卫星内波遥感初始观测数据的依赖,有效提高了内孤立波预测的自主可控性与业务实用性,为解决海洋内孤立波预测难题提供了科学的技术方法借鉴。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] ZENG K, ALPERS W. Generation of internal solitary waves in the Sulu Sea and their refraction by bottom topography studied by ERS SAR imagery and a numerical model[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(7-8): 1277-1281.
- [3] JACKSON C R, ARVELYNA Y, ASANUMA I. High-frequency nonlinear internal waves around the Philippines[J]. Oceanography, 2011, 24(1): 90-99.
- [4] 许明光,刘安国,李周衡. 利用SAR影像研究苏禄海的内波[J]. 航测及遥测学刊,2003,8(3):1-14.
XU M G, LIU A G, LI Z H. Study of internal waves in the Sulu Sea using SAR images[J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, 8(3): 1-14.
- [5] ZHANG X D, LI X F. Combination of satellite observations and machine learning method for internal wave forecast in the Sulu and Celebes Seas[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(4): 2822-2832.
- [6] HUANG L Y, YANG J S, REN L, et al. Real and long-time predicting the trajectories of internal solitary waves: Case studies in the Sulu Sea[J]. Ocean Engineering, 2025, 325: 120765.
- [7] BAINES P G. On internal tide generation models[J]. Deep Sea

- Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1982, 29(3): 307-338.
- [8] AZEVEDO A, DA SILVA J C B, NEW A L. On the generation and propagation of internal solitary waves in the southern Bay of Biscay [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2006, 53(6): 927-941.
- [9] SMITH W H F, SANDWELL D T. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings[J]. Science, 1997, 277(5334): 1956-1962.
- [10] LOCARNINI R A, MISHONOV A V, ANTONOV J I, et al. World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature[M]//Levitus S, Technical A M. NOAA Atlas NESDIS 73. Silver Spring: NOAA, 2013: 40.
- [11] 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.
- [12] JACKSON C R. An empirical model for estimating the geographic location of nonlinear internal solitary waves[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(10): 2243-2255.
- [13] LIU B Q, D' SA E J. Oceanic internal waves in the Sulu - Celebes Sea under sunglint and moonlight[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(8): 6119-6129.

Research on prediction technique of internal solitary waves using remote sensing in the Sulu Sea

WANG Yegui^{1,2}, FAN Kaiguo^{1,2*}, FANG Fang¹, SHI Yingni¹, XU Dongyang¹, HU Xuhui¹

(1. Army 32021, PLA, Wuhan 430077, China; 2. National Key Laboratory of Intelligent Spatial Information, Beijing 100094, China)

Abstract: Due to the complexity of the generation mechanism and the scarcity of observational data, the prediction of oceanic internal solitary waves remains a critical question in marine science. In this paper, we proposes a prediction technique of internal solitary waves using remote sensing, integrated with the physical mechanisms of their generation and propagation. The case study result not only successfully reproduced the characteristic "hand-in-hand" phenomenon of internal solitary waves in the Sulu Sea, but also achieved full-path propagation prediction from the source region to the dissipation area. Furthermore, the simulated wave crests showed good agreement with the observed ones, with an average temporal error of less than 0.92 hours.

Key words: internal solitary waves; remote sensing; the Sulu Sea, prediction