

利用 FY-4A 气象卫星观测海洋内波

马志多^{1,2,3}, 孟俊敏^{2,3}, 孙丽娜^{2,3}, 刘永信¹

(1. 内蒙古大学 电子信息工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010000; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 自然资源部海洋遥测技术创新中心, 山东 青岛 266061)

摘要: 随着遥感技术的迅猛发展, 可用于观测海洋内波的数据源越来越丰富。本文基于静止轨道气象卫星连续观测的优势, 开展了 FY-4A 气象卫星海洋内波观测研究。首先计算得到了 FY-4A 遥感影像耀斑区位置, 并基于遥感影像对结果进行了验证; 然后, 以此为依据选择了适用于内波观测的 FY-4A 数据, 对比了 FY-4A 与 MODIS 遥感影像成像的差异, 表明了在一定条件下 FY-4A 遥感影像可观测到海洋内波; 最后本文利用 FY-4A 遥感影像计算了内波的传播速度。本研究表明随着传感器空间分辨率的提高, 静止轨道气象卫星在海洋内波观测方面越来越体现出其优势, 为海洋内波的研究提供跟踪观测数据。

关键词: 海洋内波; FY-4A; 耀斑区

中图分类号: P731.24; P715.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2021)02-0032-08

DOI: 10.11759/hyxx20200221002

内波是一种常见的海洋现象, 在全球海洋中广泛分布^[1-3], 内波能够长时间、远距离传播, 对内波的研究一直是海洋科学的热点^[4]。卫星遥感是海洋内波的重要观测手段, 遥感手段能够实现对全球海洋的大范围观测, 相较于实测手段, 遥感观测能够直观成像, 成本较低, 可获取的数据量更多, 目前星载雷达和光学传感器都能够实现海洋内波的观测^[5]。利用多源遥感图像既可以研究内波的时空分布特征^[6-8], 也可以进行内波参数反演^[9-10]。海洋内波是一种动态过程, 具有一定的区域传播特性, 连续观测的遥感数据对内波研究更有价值。常见的用于研究内波的遥感数据大都是极轨卫星数据, 时间分辨率较低。Lindsey 等^[11]利用地球静止卫星 AHF 对内波进行了跟踪观测, 计算了卫星对地成像位置, 本文则利用 FY-4A 气象卫星观测海洋内波, 并分析其观测结果。

风云四号(FY-4A)是我国新一代静止轨道气象卫星, 装载多种观测仪器^[12]。多通道扫描成像辐射计(AGRI)是风云四号静止气象卫星的主要载荷之一, 主要通过精密的双扫描镜机构实现精确和灵活的二维指向和分钟级的区域快速扫描, 具有较高的时间分辨率。AGRI 共有 14 个通道, 可实现全盘扫描和区域扫描, FY-4A 在以 104.7°E 经度为中心的位置上获取遥感影像。其中, 区域扫描模式可获取中国区域最高分辨率 500 m 的图像, 每幅图像间隔时间 7~30 min。

对于内波尺度较大的海域, 如南海^[13]、苏禄海^[14]及安达曼海^[15], FY-4A 图像有能力探测到该区域的内波。通过收集并分析苏禄海和安达曼海 FY-4A 遥感数据发现, 图像耀斑区的内波清晰可见。

因此, 本文基于 FY-4A 影像, 通过卫星参数以及太阳高度角计算影像中耀斑区的位置, 并与实际探测的卫星遥感影像进行了比对; 同时还与 250 m 空间分辨率的 MODIS 遥感影像进行了对比^[16], 验证了 FY-4A 探测内波的可靠性。本文利用 FY-4A 的高时空分辨率连续观测内波的优势, 计算了安达曼海和苏禄海内波的传播速度, 并进行了分析。

1 方法

1.1 计算耀斑区中心位置

光学遥感影像中, 内波主要发生在耀斑区附近。对遥感影像耀斑区位置的研究首先以地球中心为原

收稿日期: 2020-02-21; 修回日期: 2020-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(61471136); 全球变化与海气相互作用专项(GASI-02-SCS-YGST₂-04)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 61471136. Global Change and Air-sea Interaction of Ministry of Natural Resources, No. GASI-02-SCS-YGST₂-04]

作者简介: 马志多(1994-), 女(汉族), 辽宁阜新人, 硕士研究生, 主要从事海洋内波方面研究, 电话: 14741477740, E-mail: 1553323430@qq.com; 孟俊敏(1973-), 通信作者, 男, 内蒙古呼和浩特人, 研究员, 博士, 博士研究生导师, 主要从事海洋微波遥感方面研究, 电话: 0532-88967394, E-mail: mengjm@fio.org.cn

点, 建立三维坐标系如图 1 所示, 该坐标系以原点指向(0°N, 0°E)的直线作为 x 轴, 以原点指向(0°N, 90°E)的直线作为 y 轴, 以原点指向北极的直线作为 z 轴, 以该坐标系描述卫星以及太阳位置。其中根据卫星所在位置以及太阳运行位置来确定太阳耀斑区中心点 S 所在坐标, 其位置关系如图 2 所示, 其中 S 点满足以下条件:

- 1) S 点位于地球椭球面上;
- 2) 光线入射角与反射角相等, 即 $\theta = \varphi$;
- 3) 入射光线、反射光线和法线在同一平面上,

即 $\theta + \varphi = \alpha$ 。

即

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \\ \theta = \varphi \\ \cos \alpha = 2 \cos^2 \theta - 1 \end{cases} \quad (1)$$

根据上述 3 个条件求解 S 点坐标, 其中法线方向可由 S 点坐标表示, 太阳位置 A 可由地球公转以及自转规律求得, 卫星位置 B 可由卫星参数求得, 得到下列方程组:

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \\ \frac{((x_1, y_1, z_1) - (x, y, z)) \cdot ((x_3, y_3, z_3) - (x, y, z))}{\|((x_1, y_1, z_1) - (x, y, z))\| \|((x_3, y_3, z_3) - (x, y, z))\|} = \frac{((x_2, y_2, z_2) - (x, y, z)) \cdot ((x_3, y_3, z_3) - (x, y, z))}{\|((x_2, y_2, z_2) - (x, y, z))\| \|((x_3, y_3, z_3) - (x, y, z))\|} \\ \frac{((x_1, y_1, z_1) - (x, y, z)) \cdot ((x_2, y_2, z_2) - (x, y, z))}{\|((x_1, y_1, z_1) - (x, y, z))\| \|((x_2, y_2, z_2) - (x, y, z))\|} = 2 \times \left(\frac{((x_1, y_1, z_1) - (x, y, z)) \cdot ((x_3, y_3, z_3) - (x, y, z))}{\|((x_1, y_1, z_1) - (x, y, z))\| \|((x_3, y_3, z_3) - (x, y, z))\|} \right)^2 - 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中 a, b 为地球长半轴长度, c 为地球短半轴长度, 解出 x, y, z 的值为 S 在该三维直角坐标系中的位置, 将其换算为角度即可得到 S 点的经纬度坐标。

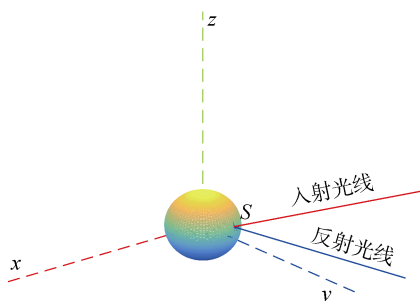


图 1 坐标系构建

Fig. 1 Coordinate system construction diagram

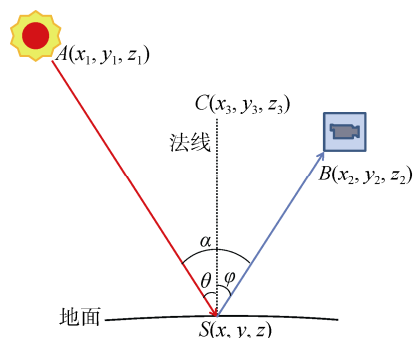


图 2 耀斑区中心点位置与角度关系

Fig. 2 Relationship between position and angle at the center point of the flare area

1.2 传播速度计算方法

FY-4A 静止轨道卫星获取的内波影像时间间隔较小, 从中针对一个内波选取所有拍摄到该内波的遥感影像, 文中称其为一组影像, 按照时间先后顺序排列后观察可对内波的形态变化以及传播速度进行研究。

传播速度为研究内波的一个重要参数, 本文根据 FY-4A 遥感影像对其进行计算, 图 3 所示为内波传播速度计算原理图, 图中 L_1 为前一时间遥感影像的内波波峰线, L_2 为后一时间遥感影像的内波波峰线, 选取 L_1 上一点 P , 过 P 分别作 L_1 在此处的切线以及该切线的垂线, 垂线与 L_2 的交点为点 Q , 点 P 和点 Q 间的距离为 l , 两景影像的时间间隔为 t , 则内波的传播速度 $v = l/t$ 。

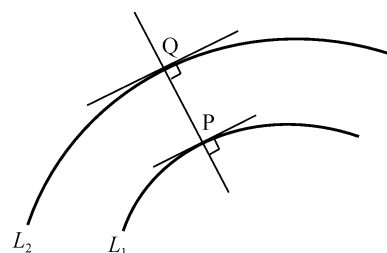


图 3 内波传播速度计算原理

Fig. 3 Principle diagram of internal-wave propagation speed calculation

本文下述内容针对上述耀斑区中心点计算、与 MODIS 影像对比以及内波传播速度计算 3 个研究内容的结果进行展示与讨论, 主要分析区域为内波较为多发的苏禄海^[17]与安达曼海^[18]。

2 结果分析

2.1 耀斑区中心点计算

本文选取 2019 年 5 月 1 日这一天进行耀斑区中心点位置计算, 计算结果如图 4a 所示, 为 2019 年 5 月 1 日(世界标准时间, UTC)整点时分的照射及反射光线空间示意图。图中红色直线表示太阳入射光线, 蓝

色直线表示反射光线, 汇聚的一点为卫星位置。

由上图中展示的一天内卫星成像情况, 不难发现耀斑区中心点位置与太阳和地球的相对位置具有重要关系。为验证本文中的理论计算结果, 选取了一组 FY-4A 遥感影像进行分析, 影像的获取时间为 2019 年 5 月 20 日, 根据该时间计算出每幅影像太阳耀斑区中心点位置, 该坐标点用红色圆点标识, 其中第 2 幅影像像太阳耀斑区中心点经纬度坐标大约为: (9.28°N, 100.51°E), 图 5 中放大区域为第 2 幅影像的太阳耀斑区位置, 所示计算结果与影像所呈现的信息相符。

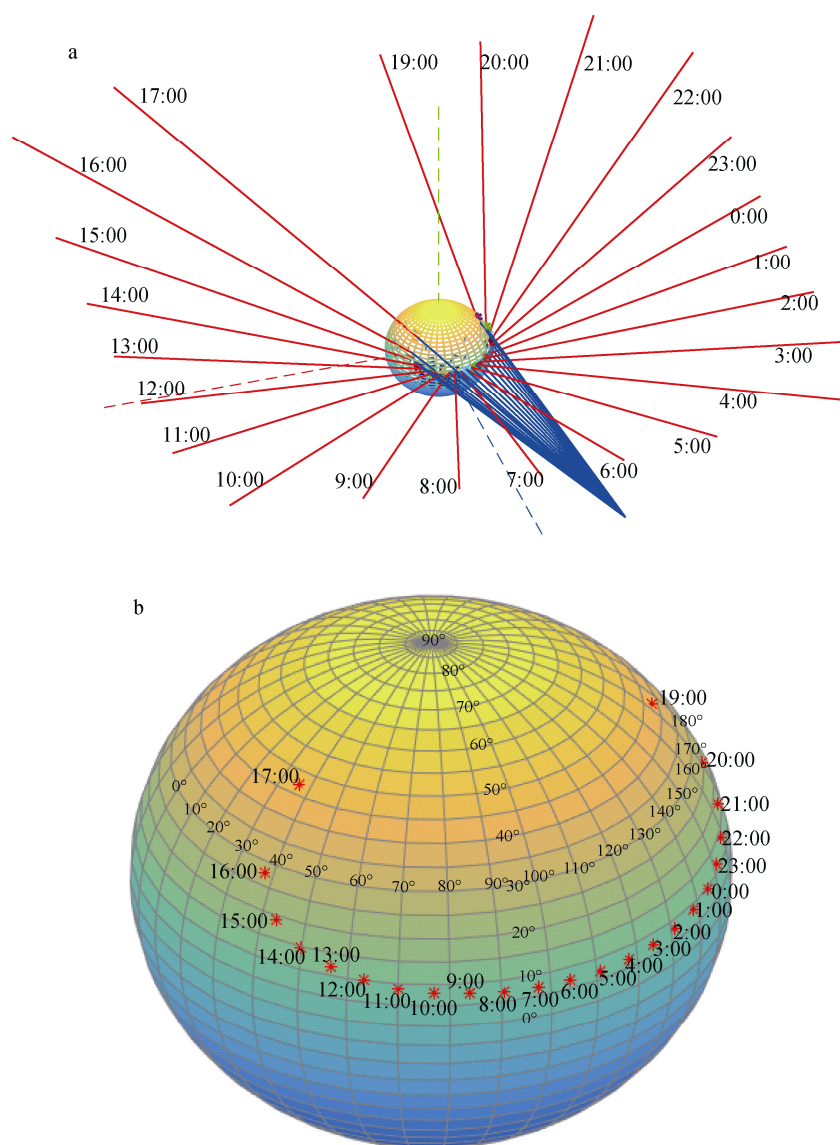


图 4 太阳耀斑区计算结果

Fig. 4 Schematic of calculation results of solar flare area

注: a: 2019 年 5 月 1 日(UTC)整点时分的照射及反射光线空间示意图; b: 图 a 中太阳耀斑区中心点位置示意图

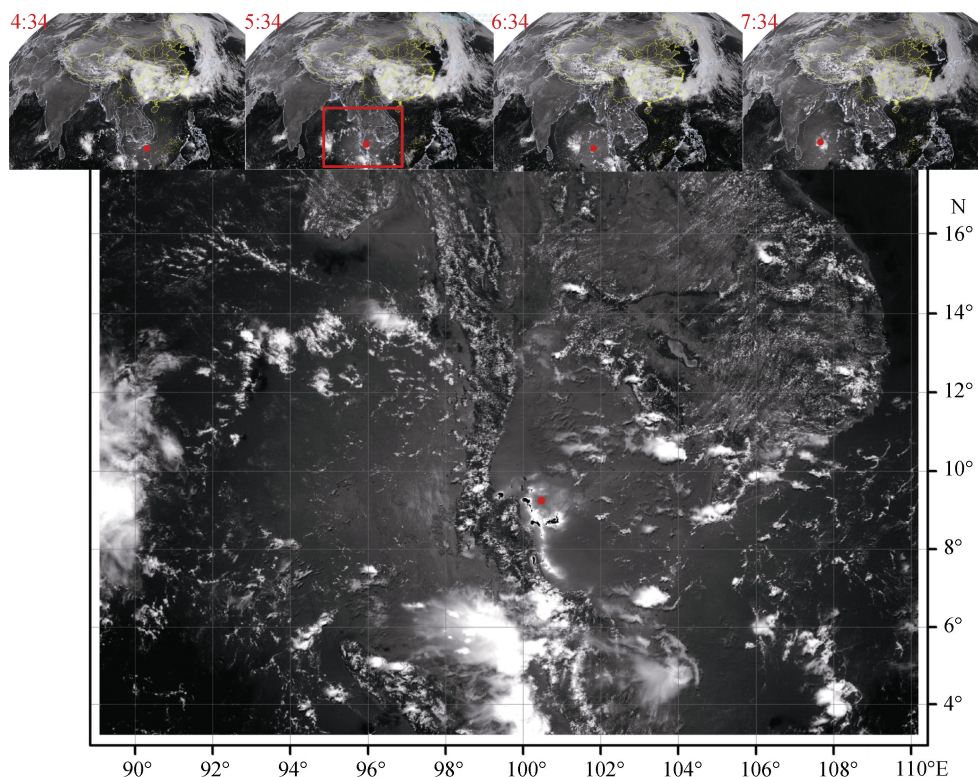


图 5 2019 年 5 月 20 日 05:34(UTC)耀斑区
Fig. 5 Flare area at 5:34 (UTC) on May 20, 2019

2.2 FY-4A 与 MODIS 遥感影像对比

为研究 FY-4A 对内波观测的可靠性, 本文将 FY-4A 与 MODIS 遥感影像的内波成像进行了对比分析, 选取了同一天(2019年5月20日)的遥感影像, 如图 6 所示, MODIS 影像的绿色部分为陆地。

图 6 所示每对中两幅遥感影像的时间存在差异, 但对于内波来讲, 在该时间差情况下的两幅影像依然具有较大的参考意义。图中以灰度图显示的为 FY-4A 影像, 以彩色图显示的为 MODIS 影像, 图中红色曲线描述了两图中能够匹配上的内波波峰线形态, 其中图 6c、d 中相同大小写字母对表示相匹配的内波, 其余为未匹配内波。图 6a、b 为苏禄海遥感影像, 图 6c、d 为安达曼海遥感影像, 观察两幅苏禄海影像可发现图中共有 3 个内孤立波, 在位置上能够全部匹配, 由于时间存在差异, 云对影像的覆盖情况存在也差异, 但从局部观测到的内波形态来看相似度极高; 观察安达曼海两幅影像, 发现两图中存在两对能够明显匹配的内波: A 和 a、B 和 b, 在 FY-4A 影像中可以观测到另外两个较为清晰的内波波包 C 和 D, 但在 MODIS 影像中这两个内波波包较为模糊, 图 6d 中的西侧两个内波波包 C 和 D 其中一

个被云层覆盖, 另外一个内波波包在遥感影像中还未生成清晰的内波条纹, 不易被分辨, 分析产生该现象的原因可能由于两幅影像时间上存在差异, 进而导致影像获取时的云层覆盖情况有所不同, 另外两个卫星拍摄角度不同也会导致获取影像的差异, 除此之外图 6d 拍摄时内波 C 可能处于刚生成阶段, 内波条纹较为模糊, 而一段时间之后的图 c 中内波条纹则较为清晰。

上述内容简单对比了 MODIS 与 FY-4A 遥感影像对内波的成像情况, 证实了 FY-4A 观测内波的可靠性。

2.3 内波传播速度

静止轨道 FY-4A 可以在短时间内连续获取内波观测的遥感影像, 基于此可以计算内波的传播速度。本文选用 2019 年 5 月 20 日的影像进行计算, 从中截取出苏禄海以及安达曼海的目标区域, 分别如图 7 和图 8 所示, 从图中可看出两组影像中每组内波成像位置无明显差异, 选取条带较为清晰的位置做剖面, 根据剖面上的雷达后向散射值计算两幅影像时间间隔内内波的传播速度如表 1 和表 2 所示, 表中所示传播速度差异较大, 分析其原因可能是遥感影像的分辨率不足导致的, 根据两幅影像计算内波传播

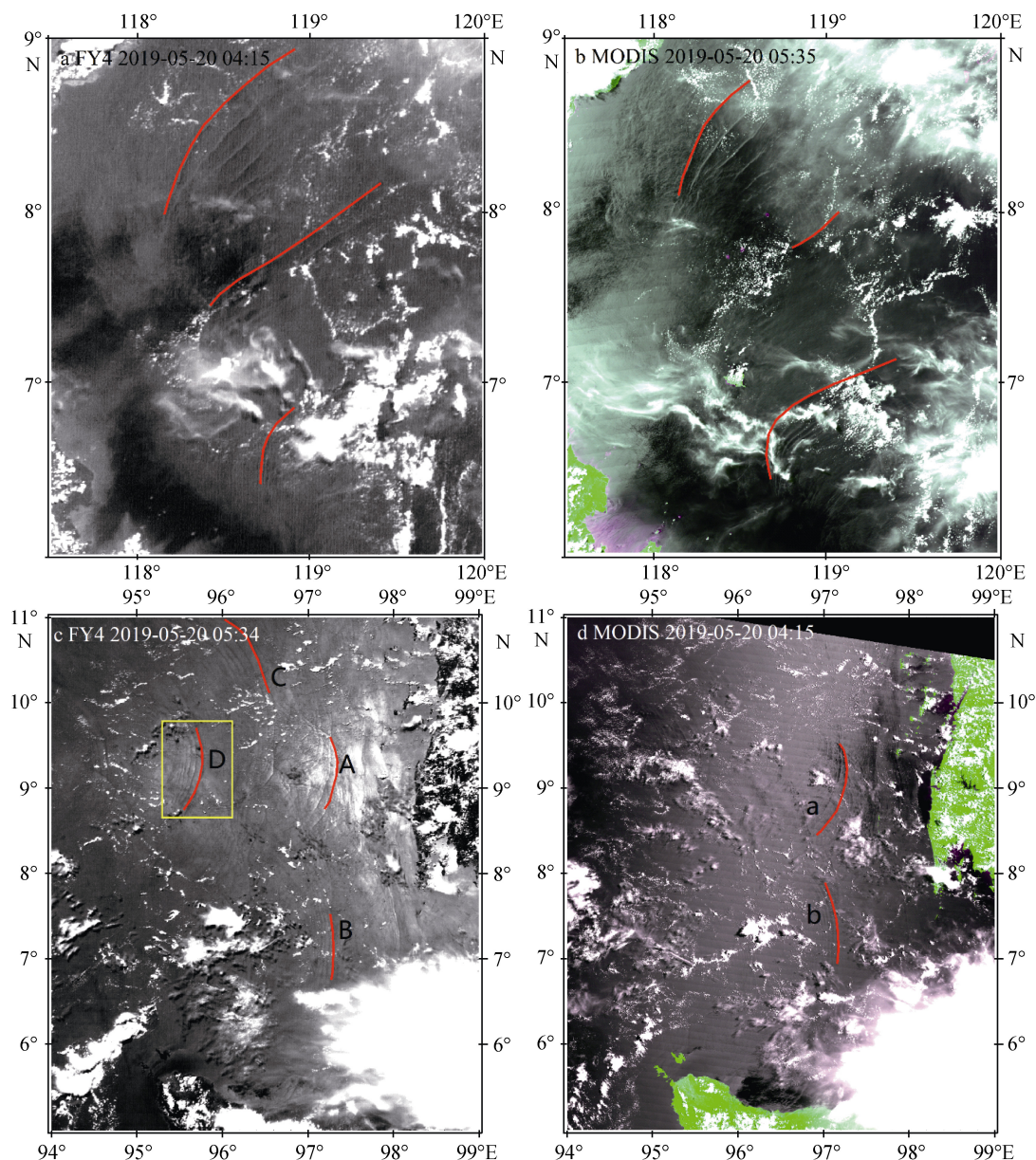


图 6 FY-4A 与 MODIS 遥感影像对比图

Fig. 6 Comparison of remote-sensing images between FY-4A and MODIS

表 1 苏禄海内波传播速度计算结果

Tab. 1 Calculation results of internal-wave propagation velocity in the Sulu Sea

时间(hhmmss)	速度/(m/s)
041500—042334	1.82±0.97
042334—043000	2.17±1.29
043000—043834	0.84±0.97
043834—044500	1.42±1.29

距离的过程中产生的误差较大, 可能达到 1~2 个像素的误差, 该误差会对较短时间内的传播速度造成较大误差。

表 1 所示为根据不同时间 FY-4A 影像计算的内波的传播速度, 该内波与图 6a 中黄色方框所示为同一内波, 图 7 所示为表 1 中时间顺序上的第一幅和最后一幅影像, 根据图中两幅影像计算该时间段的平均速度为 1.53 m/s。

表 2 所示也为根据不同时间 FY-4A 影像计算的内波的传播速度, 该内波与图 6c 中黄色方框所示为同一内波, 图 8 所示为表 2 中时间顺序上的第一幅和最后一幅影像, 根据图中两幅影像计算该时间段的平均速度为 2.24 m/s。

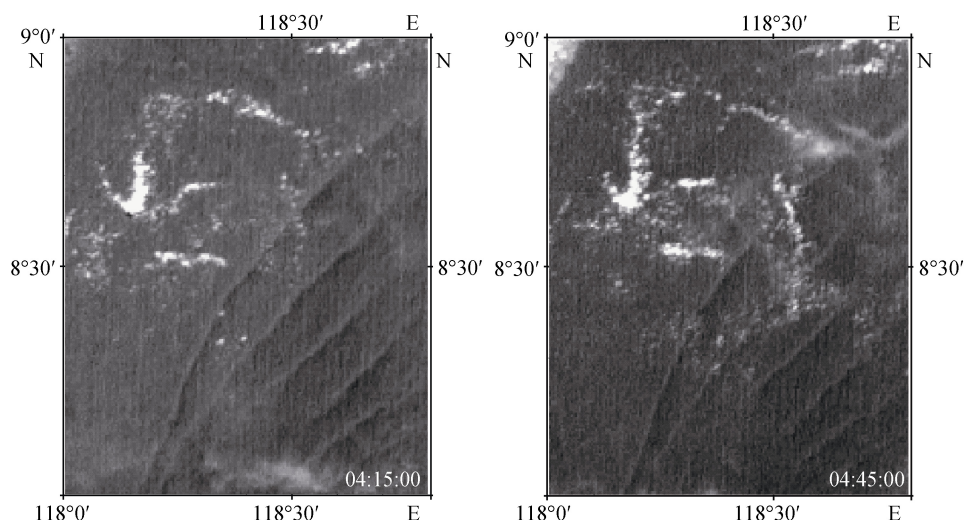


图 7 苏禄海内波局部影像

Fig. 7 Calculation data of internal-wave propagation velocity in the Sulu Sea

表 2 安达曼海内波传播速度计算结果

Tab. 2 Calculation results of internal-wave propagation velocity in the Andaman Sea

时间(hhmmss)	速度/(m/s)
063417–063834	1.25±1.94
063834–064500	2.91±1.29
064500–064917	2.23±1.94

3 结论

本文利用 2019 年的 FY-4A 遥感影像开展了海洋内波观测研究。通过对大量遥感图像分析发现，在 FY-4A 遥感影像的耀斑区内波成像清晰可见，而且可以定量的分析内波的传播特征，揭示了静止轨道气象卫星的中分辨率连续观测能力对于研究特定区域海洋内波的传播特性具有重要价值。本文得到以下结论：

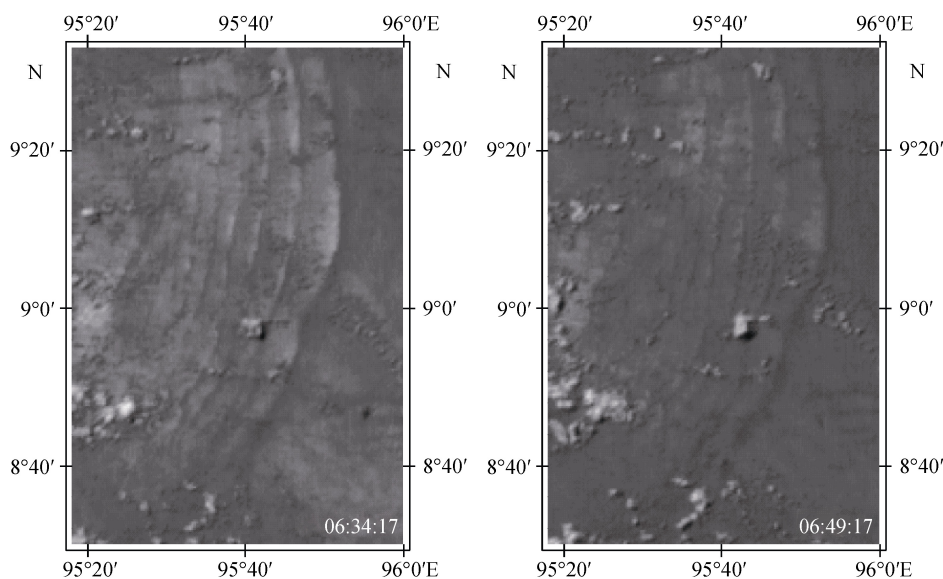


图 8 安达曼海内波局部影像

Fig. 8 Calculation data of internal-wave propagation velocity in the Andaman Sea

(1) 根据时间以及卫星位置在理论上计算了 FY-4A 遥感影像中耀斑区中心的位置，并将计算结

果与遥感影像进行了对比，发现 FY-4A 遥感影像可以连续大范围观测苏禄海和安达曼海的内波。

(2) 利用 FY-4A 可以连续观测内波的优势, 计算了苏禄海和安达曼海的内波传播速度, 分析发现, 内波在短时间内的传播速度有一定差异, 原因主要是由于 FY-4A 遥感影像分辨率较低、获取图像时间间隔较短所导致。

(3) 通过不同时刻不同区域的 FY-4A 遥感影像对比发现, 内波的可视性不同, 这有待进一步分析。

综上, 随着遥感器空间分辨率的提高, 基于静止气象卫星大范围、持续性观测的优势, 可以实现内波全生命周期的连续观测, 对于海洋学研究意义重大。

参考文献:

- [1] Huang X, Chen Z, Wei Z, et al. An extreme internal solitary wave event observed in the northern South China Sea[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30041.
- [2] Alford M H, Peacock T, Mackinnon J A, et al. Corrigendum: The formation and fate of internal waves in the South China Sea [J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 65-69.
- [3] 孙丽娜, 张杰, 孟俊敏. 2010—2015 年南海和苏禄海内孤立波时空分布特征分析[J]. *海洋科学进展*, 2019, 37(3): 398-408.
Sun Lina, Zhang Jie, Meng Junmin. Analysis of spatio-temporal distribution of internal solitary waves in the South China Sea and Sulu Sea (2010-2015)[J]. *Advances in Marine Science*, 2019, 37(3): 398-408.
- [4] 杜涛, 吴巍, 方欣华. 海洋内波的产生与分布[J]. *海洋科学*, 2001, 25(4): 25-28.
Du Tao, Wu Wei, Fang Xinhua. The generation and distribution of ocean internal waves[J]. *Marine Sciences*, 2001, 25(4): 25-28.
- [5] 吕海滨, 何宜军, 申辉. 基于 X 波段雷达获取东沙群岛附近内波的传播速度[J]. *海洋科学*, 2012, 36(11): 98-102.
Lv Haibin, He Yijun, Shen Hui. Velocity of the internal waves around the Dongsha Islands calculated based on X-band radar[J]. *Marine Sciences*, 2012, 36(11): 98-102.
- [6] Jackson C. Internal wave detection using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C11): 60-64.
- [7] Meng J, Zhang J. Synergy Envisat ASAR, ERS-2 SAR, Radarsat SAR, Landsat TM and MODIS Images to Research Propagation Features of Internal Solitary Waves in Northern of South China Sea[J]. *Agu Fall Meeting Abstracts*, 2006, 613: 37.
- [8] Wang J, Huang W, Yang J, et al. Study of the propagation direction of the internal waves in the South China Sea using satellite images[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(5): 42-50.
- [9] Li X, 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.
- [10] 杨劲松, 周长宝, 黄韦良, 等. 合成孔径雷达图像内波参数提取方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2000, 15(1): 6-9.
Yang Jinsong, Zhou Changbao, Huang Weigen, et al. Study on extracting internal wave parameter of SAR images[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2000, 15(1): 6-9.
- [11] Lindsey D T, Namb S H, Millerc S D. Tracking oceanic nonlinear internal waves in the Indonesian seas from geostationary orbit[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 208: 202-209.
- [12] 冯绚, 李利兵, 陈博洋, 等. 风云四号 A 星干涉式大气垂直探测仪在轨定标及性能评价[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(5): 648-654.
Feng Xuan, Li Libing, Chen Boyang, et al. Post-launch calibration and validation of the Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) on FY-4A[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2019, 38(5): 648-654.
- [13] 张洪运, 庄丽华, 阎军, 等. 南海北部东沙群岛西部海域的海底沙波与内波的研究进展[J]. *海洋科学*, 2017, 41(10): 149-157.
Zhang Hong-yun, Zhuang Li-hua, YAN Jun, et al. Progress of sand waves and internal waves research in sea area west of the Dongsha Islands in the northern South China Sea[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(10): 149-157.
- [14] 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.
- [15] 孙丽娜, 张杰, 孟俊敏. 基于光学遥感 MODIS 的安达曼海内波时空分布与传播特性研究[J]. *海洋学报(中文版)*, 2018, 38(7): 121-128.
Sun Lina, zhang Jie, Meng Junmin. A study of the spatial-temporal distribution and propagation characteristics of internal waves in the Andaman Sea using MODIS[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(7): 121-128.
- [16] Jackson C. Internal wave detection using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112: C11012.
- [17] Tessler Z D, Gordon A L, Jackson C R. Early stage soliton observations in the Sulu Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2012, 42(8):1327-1336.
- [18] Sun L, Zhang J, Meng J. A study of the spatial-temporal distribution and propagation characteristics of internal waves in the Andaman Sea using MODIS[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(7): 121-128.

Observation of internal waves in the ocean using FY-4A meteorological satellite

MA Zhi-duo^{1, 2, 3}, MENG Jun-min^{2, 3}, SUN Li-na^{2, 3}, LIU Yong-xin¹

(1. Inner Mongolia University, college of Electronical and Information Engineering, Hohhot 010000, China; 2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China; 3. Ocean Telemetry Technology Innovation Center, MNR, Qingdao 266061, China)

Received: Feb. 21, 2020

Key words: ocean internal wave; FY-4A; sunglint

Abstract: With the rapid development of remote sensing technology, the number of data sources that can be used to observe ocean internal waves is increasing. Based on the continuous advantages of geostationary orbiting meteorological satellites, this study investigates the FengYun-4A (FY-4A) meteorological satellite ocean internal-wave observation. First, the position of the flares in the FY-4A remote-sensing image was calculated, and the results were verified based on remote-sensing images. The FY-4A data suitable for internal-wave observations was compared, and the FY-4A and MODIS remote-sensing images were also compared. The results indicate that under certain conditions, FY-4A remote-sensing images could observe the ocean internal waves. Finally, FY-4A remote-sensing images were used to calculate the internal waves. This study shows that with the improvement of the spatial resolution of remote sensors, geostationary orbit meteorological satellites will increasingly demonstrate their advantages in ocean internal-wave observation, providing tracking observation data for the study of ocean internal waves.

(本文编辑: 丛培秀)