

利用光学遥感探测南中国海内波

张旭东¹ 王晶¹ 魏子章¹ 孙丽娜² 孟俊敏^{2,*}

¹中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100

²国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061

摘要 由于内波生成、传播都发生在水下,常规手段如现场观测成本过高,且易受到环境的制约,很难得到足够的有效数据。中分辨率成像光谱仪(MODIS)以其图像覆盖范围大、时间分辨率高、数据公开免费等优势而成为内波研究的重要数据源,可以实现大范围的观测。选用2010年6月至2012年6月共两年的南中国海地区(0°N~23°N,102°E~121°E) MODIS观测图像作为数据源,使用ENVI软件对MODIS图像进行筛选与处理,对该海区的内波特征进行了统计分析,最终整合获得了最新的内波时空分布特征。结果表明:南中国南海西北部,尤其是东沙环礁附近海区是内波发生频率最高的海区,发源于吕宋海峡。在115°E附近的海南岛东部海区,内波波峰线与东沙群岛海区的内波波峰线有较明显的断开特征,可能内波在本地发源。时间分布表现为内波在夏季出现最多,春、秋季节次之,且春季内波出现略多于秋季,冬季最少。

关键词 海洋光学;内波;中分辨率成像光谱仪;南中国海

中图分类号 P731.24, P236 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.042801

Detection of Internal Solitary Wave in the South China Sea Using Optical Remote Sensing

Zhang Xudong¹ Wang Jing¹ Wei Zizhang¹ Sun Lina² Meng Junmin²

¹College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

²First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266061, China

Abstract The generation and propagation of internal wave occurs beneath the sea water, conventional methods such as field observations are restrained by weather conditions as well as other factors, it is difficult for researchers to get enough valid data. Moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) become the important research data sources of internal wave because of its large coverage, high temporal resolution, freedom data download, etc. A wide range observation of internal wave is possible with it. Based on data from MODIS, study on internal wave is conducted from June 2010 to June 2012 in South China Sea (0°N~23°N,102°E~121°E). A statistical analysis of temporal and spatial characteristics of internal waves is given. The results show that internal wave generates with a high frequency in the northwestern South China Sea, especially around Dongsha Atoll area which originates from Luzon Strait. In areas around 115°E east to Hainan Island, crest of waves have an obvious distinct characteristics from the waves of Dongsha Atoll, it is possible that there are local generation of internal wave. The temporal distribution of internal wave shows that most of internal waves are observed in summer and observation comes to the least in winter.

Key words oceanic optics; internal wave; moderate-resolution imaging spectroradiometer; South China Sea

OICS codes 280.4788; 280.5600; 100.2000

1 引言

海洋内波是海洋中的重要动力过程,它可以实现数百公里的长距离传播,从而产生巨大的质量与动量运输。大振幅内波所引起的强大剪切力会对海上石油工程等造成巨大影响,在印尼苏门答腊岛附近的安德

收稿日期: 2014-07-01; 收到修改稿日期: 2014-08-15; 网络出版日期: 2015-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(61171161)

作者简介: 张旭东(1990—),男,硕士研究生,主要从事光学遥感方面的研究。E-mail: ouc_cook@163.com

导师简介: 王晶(1962—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: wjing@ouc.edu.cn

*通信联系人。E-mail: mengjm@fio.org.cn

曼海域进行的一项内波观测研究显示^[1],大振幅内波经过的海域石油钻井平台被推移了 30.48 m,并旋转了 90°。内波引起的等温面和等密度面的起伏会影响海洋中声信号的传播速度与方向,即改变了声道,从而降低了声纳的功能,增加了水下通讯和目标探测的困难。因此,加强海洋内波的研究对于海洋资源、海洋工程以及海洋军事安全有着重要的意义。

由于内波生成、传播都发生在水下,随机性也很大,分布又是在大、中尺度的海区,以现场观测为代表的常规观测手段成本过高,又容易受到环境条件的制约,很难得到足够的有效数据。因而,遥感便成为目前唯一的大范围内波观测手段。光学遥感图像虽然有时会被云层遮盖,但以中分辨率成像光谱仪(MODIS)为代表的中分辨率光学遥感器,其图像覆盖范围大、时间分辨率高、数据公开免费等优势成为研究海洋内波的重要数据来源。

南中国海是内波多发区,针对该海域的内波生成、传播及消亡已引起学者的高度关注^[2-4]。Fett等^[5]最早从卫星图像中发现南中国海东沙群岛附近存在着内波;Bole等^[6]自航天飞机上的照片也捕获了很多内波现象,研究了南中国海北部内波的分布,结合实测海流和潮汐资料研究了南中国海内波的激发源、激发机理和传播路径。Weidemann等^[7]还利用紧凑型航空成像光谱仪(CASI)观测到了近岸的内波波包。谢志宏^[8]利用大量的合成孔径雷达(SAR)和MODIS影像分析了安达曼海内波的激发源地和传播特征。Jackson等^[9]又利用MODIS真彩色图片研究了全球内波的分布情况,利用2002.8~2004.5共21个月3581幅内波MODIS图像,给出了全球七大地区的内波特征。2002年5月,NASA发射了新的多功能地球观测卫星—Aqua,这是继1999年12月,第一颗搭载MODIS的Terra卫星后,第二颗同为EOS系列的卫星。MODIS的应用不仅在海洋内波方面,还有海岸带图像校正、海面粗糙模型和中国近海的气溶胶特性研究等^[10-14]方面。

本文利用Terra卫星和Aqua卫星的MODIS图像,分析了2010.6~2012.6中国南中国海内波时间和空间分布特征,旨在为南中国海内波研究提供可靠的依据。

2 内波时空特征分析

海洋内波是发生在密度稳定层化的海水内部的一种波动,它具有很强的随机性,其波长和波峰线分布在很宽的范围内,内波振幅大小不一,从几十米到上百米不等。现场观测和卫星遥感观测均表明海洋中的内孤立波活动十分活跃,普遍存在于世界各大洋。南中国海是全球海洋中内孤立波最强、最为活跃、生成和演变机制最为复杂的海域之一,因此,通过MODIS遥感图像来分析南中国海内波的时空分布特征,旨在为内波的预报提供数据支撑。

2.1 MODIS 图像处理

LAADS是NASA的戈达德航天中心用来存放数据的一个网站接口,存放的数据有MODIS一级数据、大气和陆地数据、可见红外辐射一级产品和陆地产品。从LAADS可以免费下载需要的空间分辨率为250 m (Band 1 and Band 2)的L1B级MODIS数据。

研究的南中国海海区经纬度为北纬0°N~23°N和东经102°E~121°E的区域。鉴于内波波长可能由几十米到上千米的跨度,选用空间分辨率为250 m的MODIS图像,可以提取绝大多数内波。MODIS图像大部分来自Terra卫星,Terra在地方时上午过境,Aqua将在地方时下午过境。Terra与Aqua上的MODIS数据在时间更新频率上相配合,加上晚间过境数据,对于接收MODIS数据来说,可以得到每天最少2次白天更新数据。时间选择从2010年6月1日至2012年5月31日,共两年的图像,选择其中无云或少云的图像337幅,采用ENVI软件对MODIS图像进行处理^[15],筛选出具有清晰内波轨迹的图像225幅。例如,图1是2012年从南中国海经过的MODIS图片,可以清楚地看到东沙岛附近的内波。东沙岛对内波传播产生影响,造成内波的分裂也直观可见。

2.2 南中国海海区内波的空间分布

用2年MODIS图像统计勾勒出南中国海内波波峰线位置,如图2所示,这是南中国海内波的空间分布。

从空间分布上看,南中国海北部、具体是吕宋海峡以西直到东经114°E的陆架陆坡海区是内波发生最频繁的地区。北部湾出口、南沙群岛尤其是Natuna岛东部也有较多的内波痕迹。菲律宾以南的苏禄海虽然不属于南中国海海区,但有时也能观察到内波出现。此外,在大约(21°N,116°E)的位置,内波分布有明显的

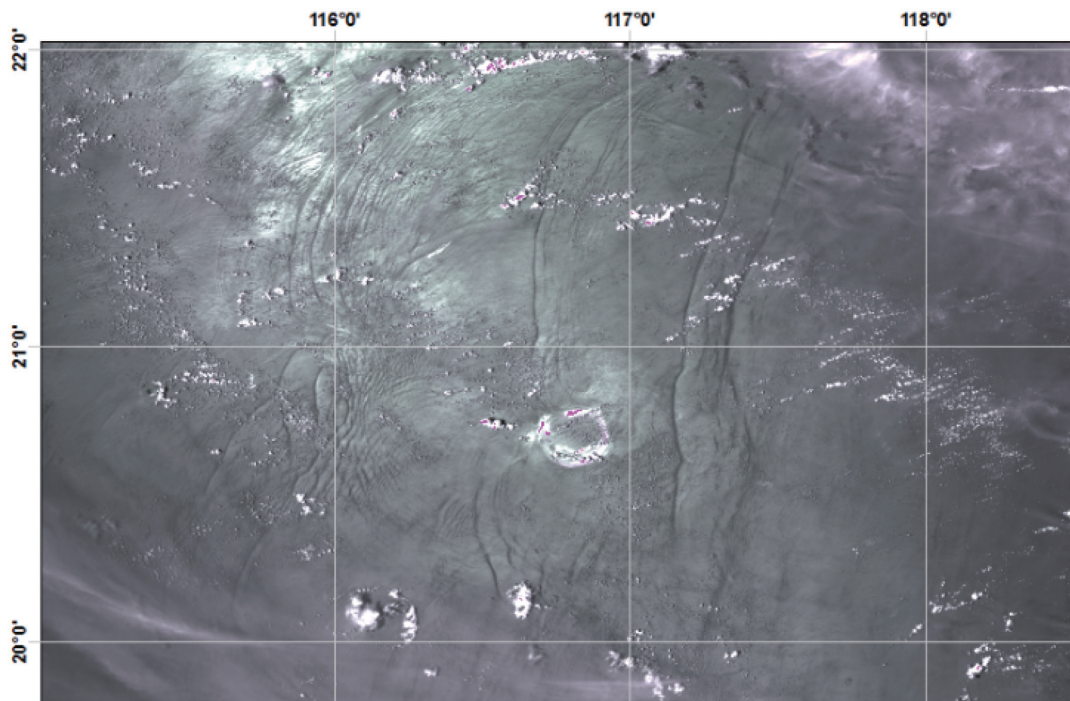


图1 2012年MODIS图像观测南中国海东沙岛内波

Fig.1 MODIS image of internal waves in South China Sea in 2012

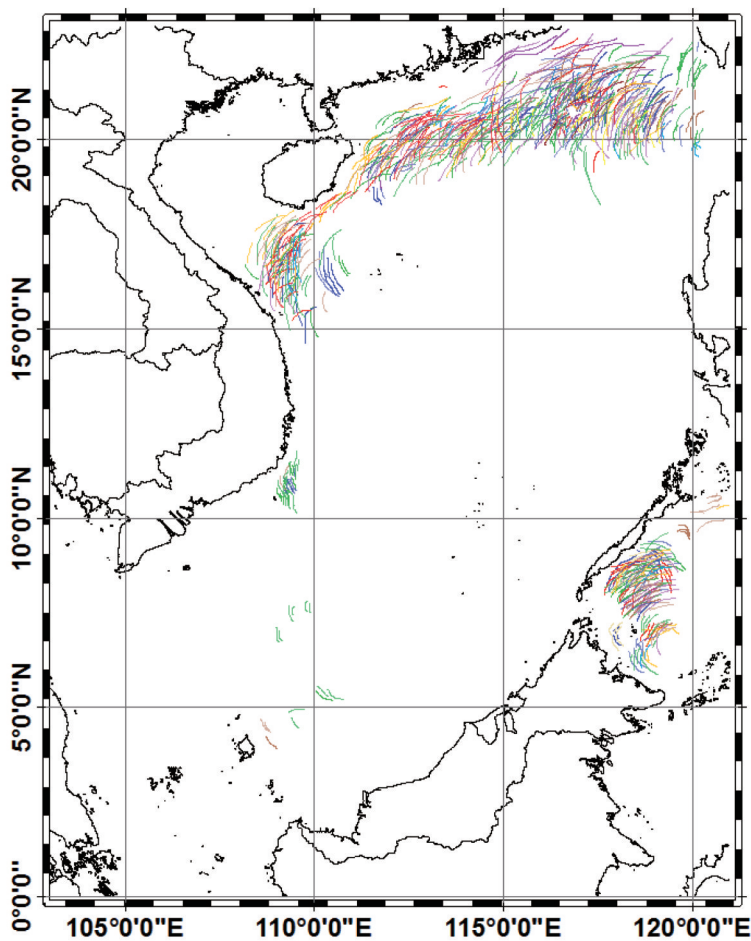


图2 2010.6~2012.6南中国海内波空间分布

Fig.2 Spatial distribution of internal waves in South China Sea during 2010.6~2012.6

空缺,而且自东而来的内波至此多被割裂,波峰线变短。这一点即是由于东沙岛导致内波的分裂。

从波峰线的推移方向上可以看出,南中国海东北部的内波有较明显的从吕宋海峡发源的趋势,这一点与他人的结果一致,说明这两年内波发生与往年基本相同。至于北部湾口所在的南中国海西北部,内波的排列与东沙海域略有不同,因此猜测这里可能存在另一个内波源。115°E附近的海南岛东部海区,内波波峰线与东沙群岛海区的内波波峰线有较明显的断开特征。类似的,苏禄海西部的内波也有自南发源的趋势。

2.3 南中国海海区内波的时间分布

从MODIS图像中分析内波在每个月份中出现的天数,如图3所示。因为MODIS为光学遥感,受天气影响较大,所以当天空多云时,图像会被大部分的云所遮盖,无法有效地观测内波。

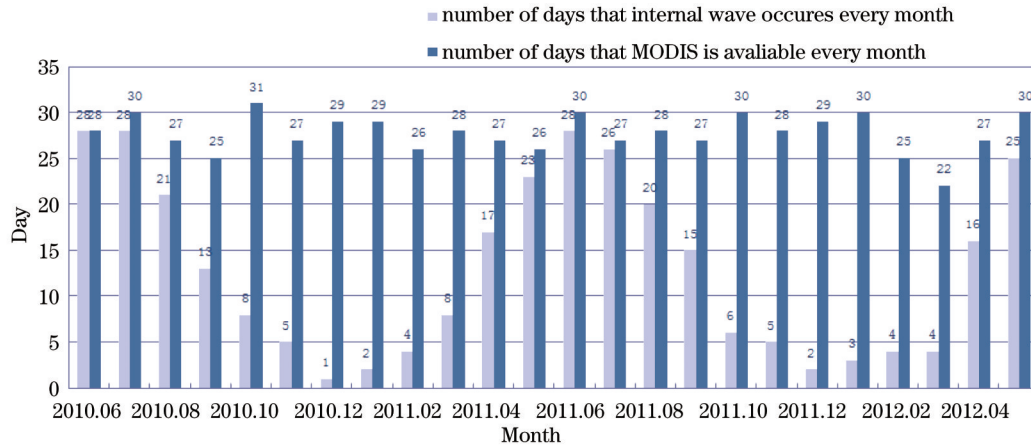


图3 2010~2012年内波时间分布统计图

Fig.3 Temporal distribution of internal waves during 2010~2012

从图3可以看出内波的产生随季节呈周期性变化。每年夏季达到最大值,基本每天都会观测到内波的产生,冬季内波的出现甚少,很少观测到内波的传播。内波的产生受多种因素的影响,海洋的分层是影响内波生成的重要因素,根据WOA2009的温盐数据南中国海北部海域表现出空间的一致性,但有着明显的季节性变化。在夏季由于阳光照射,海水分层变强,更易于内波的产生;冬季混合层加深变厚,分层变弱,不利于内波生成。Ramp等^[10]同样认为冬天没有内波的产生是由于冬天的混合层变深,他们也推测偶尔出现的内波可能与分层有关,比如受中尺度涡的影响。除了季节性变化引起的内波发生频率,黑潮入侵会使背景流发生变化,因此也在内波的产生过程中扮演了重要的角色。

根据MODIS图像中内波发生天数与总天数之比,计算出各月内波发生频率,如图4所示。

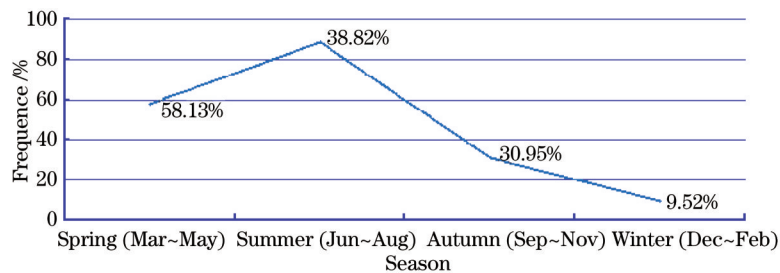


图4 内波的发生频率分布

Fig.4 Frequency distribution of internal wave

由图4可以发现,内波出现的时间特性是存在的。2月时就有内波出现,3月~4月内波逐渐增多,5~7月内波发生最为频繁;从8月开始内波的出现数量依次衰减;12月和次年1月内波发生的频率很低。由此可见,在夏秋季节,海上作业平台更容易受到内波带来的影响。

3 结论

利用2010.6~2012.6的MODIS数据,对南中国海内波的空间分布与发生频率进行了统计分析。基于大量的MODIS图像整合,得到了南中国海内波传播的时间、空间分布。

由时间、空间分布可以看出,内波的时间特性仍然是夏季(6~8月)出现最多,春、秋季节居次,且春季内波出现略多于秋季,冬季最少。并且,统计发现,南中国海北部(即吕宋海峡水道以西和南中国海北部114°E以东的陆架陆坡区域),尤其是东沙环礁附近海区,是内波发生频率最高的地区。MODIS图像显示,内波自吕宋海峡发源后,传播至东沙群岛附近分裂和反射,使得这一带成为内波出现最频繁、最复杂的海区。而在115°E附近的海南岛东部海区,内波波峰线与东沙群岛海区的内波波峰线有较明显的断开特征,由此可以推测内波可能在本地产生,因为该海域海底地形中存在海山,由于潮地相互作用,产生了内波,类似于吕宋海峡产生内波的过程。

总之,由MODIS图像数据源得到内波在南中国海的时空分布,可以清楚看到内波传播的路径以及产生时间,为决策部门预报内波提供科学依据。

参考文献

- 1 Osborne A R, Burch T L. Internal solitons in Adaman Sea [J]. *Science*, 1980, 208(4443): 451-460.
- 2 Huang X D, Tian J W, Zhao W. The behaviors of internal solitary waves near the continental shelf of south China sea inferred from satellite images [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 588-589: 2131-2135.
- 3 Vasili Vlasenko, Chuncheng Guo, Nataliya Stashchuk. On the mechanism of A-type and B-type internal solitary wave generation in the northern South China Sea [J]. *Deep-Sea Research I*, 2012, 69: 100-112.
- 4 Buijsman M C, Kanarska Y, McWilliams J C. On the generation and evolution of nonlinear internal waves in the South China Sea [J]. *J Geophys Res*, 2010, 115: C02012.
- 5 Fett R W, Rabe K. Satellite observation of internal wave refraction in the South China Sea [J]. *Geophys Res Lett*, 1977, 4 (5): 189-191.
- 6 Bole J B, Ebbesmeyer C C, Romea R D. Soliton currents in the South China Sea: measurements and theoretical modeling [C]. *Proceeding in the 26th Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, 1994. 367-376.
- 7 Weidemann A D, Johnson D J, *et al.* Remote imaging of internal solitons in the coastal ocean [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2): 260-267.
- 8 Xie Zhihong. Study on Generation and Evolution of Internal Wave in Andamansea Based on SAR and MODIS Images [D]. *Keelung: National Taiwan Ocean University*, 2004.
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.
- 9 Jackson C. Internal wave detection using the Moderate Resolution Imaging Spectro-Radiometer(MODIS) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: C11012.
- 10 Peng Lina, Yi Weining, Ma Jinji, *et al.* Atmospheric correction of quickBird-2 imagery for turbid water coastal areas using MODIS data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 817-821.
彭妮娜, 易维宁, 麻金继, 等. 利用MODIS数据进行QuickBird-2卫星海岸带图像大气校正研究 [J]. *光学学报*, 2008, 28 (5): 817-821.
- 11 Ma Jinji, Qiao Yanli, Yang Shizhi, *et al.* Using MODIS image to retrieve aerosol optical characteristic over coast of China [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2039-2045.
麻金继, 乔延利, 杨世植, 等. 利用MODIS图像反演中国近海海域的气溶胶光学特性 [J]. *光学学报*, 2009, 29(8): 2039-2045.
- 12 He Xianqiang, Pan Delu, Bai Yan, *et al.* Rough sea-surface model for vector radiative transfer of coupled ocean-atmosphere system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 618-624.
何贤强, 潘德炉, 白雁, 等. 海洋-大气耦合矢量辐射传输粗糙海面模型 [J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 618-624.
- 13 Wang Jiacheng, Qiao Yanli, Yang Shizhi, *et al.* Study on the relation of ocean atmospheric aerosol optical model parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1101005.
王家成, 乔延礼, 杨世植, 等. 海洋大气气溶胶光学模型参数的相关性研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1101005.
- 14 Li Dong, Chen Wenzhong. Comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data with in-situ sky radiometer observations over East China Sea [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2828-2836.
李栋, 陈文忠. MODIS遥感中国东部海域气溶胶光学厚度与现场测量数据的对比分析 [J]. *光学学报*, 2010, 30 (10): 2828-2836.
- 15 Zhang Jinghong, Jing Yigang. Remote sensing image processing system ENVI and application on MODIS [J]. *Journal of Shaanxi Meteorology*, 2004, (1): 27-29.
张京红, 景毅刚. 遥感图像处理系统ENVI及其在MODIS数据处理中的应用 [J]. *陕西气象*, 2004, (1): 27-29.
- 16 Ramp S R, Yang Y J, Bahr F L. Characterizing the nonlinear internal wave climate in the northeastern South China Sea [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2010, 17(5): 481-498.

栏目编辑: 韩峰