

# 基于遥感与现场观测数据的南海北部 内波传播速度\*

孙丽娜 张 杰 孟俊敏<sup>①</sup>

(国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

**摘要** 南海北部是全球海洋中内波最为活跃、生成和演变机制较为复杂的海域,本文利用多源卫星遥感数据(MODIS、GF-1、ENVISAT ASAR、RADARSAT-2)和现场观测数据开展了南海北部内波传播速度的研究。通过匹配捕获同一条内波的相邻两幅遥感图像,由内波的空间位移和时间间隔反演传播速度,并以  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  网格给出了南海北部内波传播速度的分布图。研究结果表明,内波传播速度受背景流场、水体层结和底地形变化等多因素影响,特别是水深。在南海北部由东至西、由南至北方向,内波传播速度逐渐递减。深海区内波传播速度最大,可达 3m/s 以上;内波在向西大陆架传播过程中,随着水深变浅速度逐渐减慢,传播速度为 1—2m/s;大陆架浅海的内波传播速度较小,仅为零点几米每秒。同时,利用 KdV 方程反演了内波传播速度理论值,对遥感数据提取的内波传播速度进行了精度验证,结果较为一致。

**关键词** 海洋内波; 遥感; 传播速度; 南海北部

**中图分类号** P731.24 **doi:** 10.11693/hyhz20171000259

海洋内波是发生在海水密度稳定分层的海洋内部的一种波动,它可以实现数百公里的长距离传播而保持不变,伴随着巨大的质量和动量输运,在海洋中起着重要的动力学作用(Thorpe *et al.*, 1975; Munk *et al.*, 1998; Müller *et al.*, 2000)。内波传播带来极大的垂向流速和可观的垂向剪切,可引发海水湍流和混合,对海洋能量和生态环境具有重要作用。

传统的内波现场观测受地域限制,只能获取有限点的资料,无法获得全局的信息。同时,海上作业受天气影响较大,仪器的布放、监测和回收都比较困难;且费用昂贵,难以大范围进行观测,无法全面追踪内波的传播和演变过程。随着遥感技术的迅猛发展,卫星遥感具有大范围、高时空分辨率、全天候等特点,已成为内波监测的重要手段。早期美国的 Landsat、Seasat、EOS 系列卫星,欧洲的 ERS-1/2、ENVISAT,加拿大的 Radarsat-1/2 和我国的 HJ-1A/B、FY-3A/B 等卫星;近期日本的

ALOS-2, 欧空局的 Sentinel-1A/B 和我国 GF 系列等卫星可见光和 SAR 传感器获得了大量的内波遥感图像,为大规模的内波研究积累了丰富的遥感资料。现场观测和卫星遥感观测都表明海洋中内波十分活跃,且分布于全球多个海域(Osborne *et al.*, 1980; Apel *et al.*, 1985; Holloway, 1987; Jackson, 2007),南海北部是全球内波最为活跃的海域之一,是内波研究的热点区域(Liu *et al.*, 1998; Hsuet *et al.*, 2000a, 2000b; Yang *et al.*, 2010; Alford *et al.*, 2015)。现场观测显示南海北部内波水平流速超过 2m/s(Zhao *et al.*, 2012),最大振幅可达 240m(Huang *et al.*, 2016)。内波在传播过程中受海底地形和潮流等多种因素的影响,具有很强的地域特点,如黄海内孤立波传播速度相对于南海内波的传播速度要小得多,为 0.8m/s 至 1.1m/s(Warn-Varnas *et al.*, 2002);同时研究发现,海洋中尺度涡会使内波的波峰线产生畸变(Xie *et al.*, 2016),进而改变内波的传播速度。Alford 等(2010)使用 10 套潜标分析了南海内孤立波的传

\* 国家自然科学基金项目, 61471136 号; “全球变化与海气相互作用”专项项目, GASI-02-SCS-YGST2-04 号, GASI-02-IND-YGST2-04 号。孙丽娜, 助理工程师, E-mail: sunln@fio.org.cn

通讯作者: 孟俊敏, 研究员, E-mail: mengjm@fio.org.cn

收稿日期: 2017-10-12, 收修改稿日期: 2017-11-21

播速度, 他们的结果表明在深水区, A 波和 B 波的传播速度均比线性相速度大, 而由于较大的振幅, A 波的传播的速度比 B 波大 5%—10%; 在陆架区, 由于背景内潮的调制, B 波的传播速度比 A 波大 8%—12%。对于潮汐和地形相互作用产生的内波, 根据遥感图像中两个或多个波包距离和潮周期可得内波传播速度(Zhao *et al*, 2004)。Cai 等(2008, 2014)分别利用温盐月平均数据结合理论分析得出, 南海深水区内波的传播速度要大于浅水区内波传播速度。通过同一地点相邻两幅遥感图像捕获同一条内波, 可由空间位移和时间间隔计算出内孤立波的传播速度(Liu *et al*, 2014; Hong *et al*, 2015), 研究表明后者计算的内波传播速度要比前者精确的多(Jackson *et al*, 2013; Hong *et al*, 2015)。研究内波传播速度的学者很多, 但由于遥感图像的匹配不易, 很难给出大范围内波的速度分布情况。

本文在长期进行内波遥感探测和研究的基础上, 积累了大量的光学和 SAR 内波遥感数据, 以及南海北部的内波现场观测数据。基于 2010—2015 年的 MODIS 和 ENVISAT ASAR 遥感数据, 提取了内波位置信息, 绘制了南海北部内波空间分布图; 通过查找匹配南海北部 13 对同一地点、时间间隔临近的两幅内波遥感图像, 同时辅以现场观测数据, 开展南海北部内波传播速度研究。以  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  网格绘制了内波传播速度分布图; 并利用 KdV 方程反演了内波的传播速度, 与遥感图像获得的内波速度进行了对比分析。

## 1 南海北部内波空间分布

本文的研究区域为南海北部海域, 范围为

$105^{\circ}—122^{\circ}E$ ,  $16^{\circ}—24^{\circ}N$ 。南海北部海域半封闭性较强, 通过台湾海峡和巴士海峡与西太平洋相通。海底地形崎岖, 动力过程复杂, 是内潮和内孤立波的频发海域, 也是全球内波最为活跃的海域之一。南海北部被世界公认为是研究海洋内波的“天然实验场”(杜涛, 2000), 多位海洋工作者采用了温盐深仪(Conductivity, Temperature, Depth, CTD)、声学多普勒剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)、海流计、温度链等多种仪器组合以锚定、船载及石油平台挂载等多种方式对该海域内波进行了现场观测。2001 年, 在中国东海和南海, 中国和美国等国家和地区的海洋工作者联合举行了亚洲海国际声学实验(Asian Seas International Acoustics Experiment, ASIAEX)对南海北部海域的内潮和非线性内波进行了大面的观测(Liu *et al*, 2004; Duda *et al*, 2005)。国家“863 计划”重大项目课题“南海深水区内波观测技术与试验系统开发”通过在南海北部深水区 and 吕宋海峡内构建内波潜标观测网, 实现了对南海内孤立波的长期连续观测(黄晓冬等, 2013)。同时, 遥感手段也被广泛应用于该海域的内波研究, 海洋内波在光学和 SAR 遥感图像中均表现为明暗相间的条带; 沿传播方向大多以波包的形式传播, 每个波包含有几个或多个孤立子; 前导波一般最大, 后面的内孤立子依次减小。基于上述内波判别标准, 结合长期的内波遥感调查经验, 本文利用 2010—2015 年的 MODIS 和 ENVISAT ASAR 遥感数据, 提取的内波位置信息, 获得的内波空间分布图如图 1 所示。

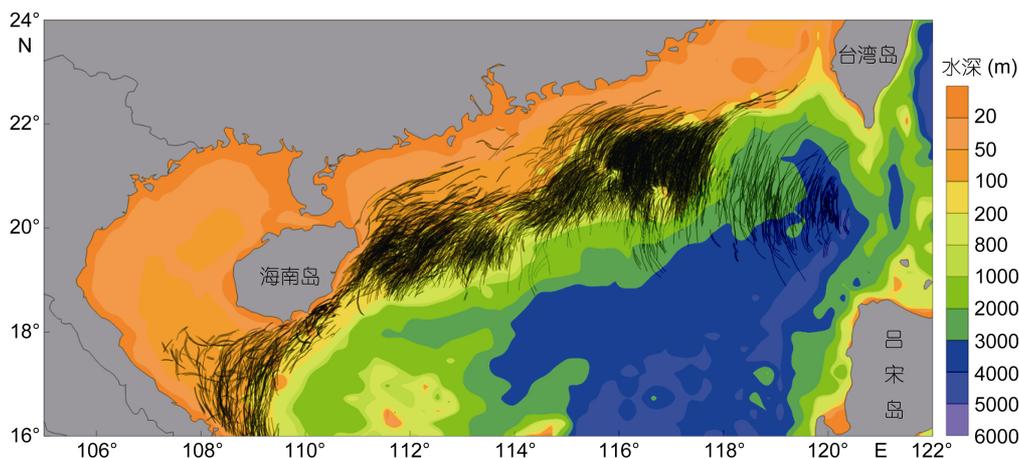


图 1 南海北部内波分布图(黑色曲线为提取的内波波峰线)

Fig.1 The distribution of internal waves in the northern South China Sea(the black lines are the crests of internal waves)

空间分布统计结果表明,南海北部的内波主要分布在吕宋海峡以西,东沙群岛、海南岛以东及以南的大陆架浅海区,其中东沙群岛附近海域的内波最频繁。已有研究结果表明(Alford *et al*, 2015),南海东北部内波主要是内潮与吕宋海峡的恒春、兰屿两个山脊相互作用产生,在向西传播过程中得到非线性深化;到达东沙群岛时,由于浅滩效应和耗散而衰减,在东沙环礁处带有折射现象产生;之后随着水体的变浅内波发生极性转变,由下凹型转变为上凸型,最终消亡于大陆架浅海,这个过程大概历时 3 天左右(Simmons *et al*, 2011)。根据传播距离可以估算,内波在生命过程中的平均传播速度大约为 0.5m/s 左右。内波的生命过程大体包括产生、演变、衰减和消亡四个阶段,与此同时,受海底地形和潮流等外在因素的影响,不同时刻、不同地点的内波传播速度具有很大差异。本文将利用遥感图像和现场观测数据来分析南海北部内波的传播速度。

## 2 数据集构建

本文采用的数据包括 MODIS、GF-1、ENVISAT ASAR、RADARSAT-2 等遥感图像和现场观测数据。MODIS 采用的是分辨率为 250m 的太阳反射波段数据,共有两个波段 band1(0.620—0.670 $\mu\text{m}$ )、band2(0.841—0.876 $\mu\text{m}$ ),刈幅宽度 2330km。TERRA 与 AQUA 上的 MODIS 数据在时间更新频率上相配合,可以得到每天最少 2 次更新数据,MODIS 具有时间分

辨率高、空间覆盖范围广、数据可免费获取等优点,已成为研究海洋内波的重要数据源。GF-1 数据采用 16m 分辨率的多光谱相机(WFV),卫星共装载 4 台(WFV1、WFV2、WFV3 和 WFV4)多光谱相机,可以获取 4 个波段(0.45—0.52 $\mu\text{m}$ 、0.52—0.59 $\mu\text{m}$ 、0.63—0.69 $\mu\text{m}$ 、0.77—0.89 $\mu\text{m}$ )的多光谱彩色图像,刈幅宽度可达 800km。ENVISAT ASAR 采用 150m 空间分辨率的 VV/HH 极化方式的 WSM 模式数据,刈幅宽度约 400km。SAR 具有全天时、全天候以及能够穿透云雾等优势,可以弥补光学遥感成像的不足。RADARSAT-2 是一颗搭载 C 波段传感器的高分辨率商用雷达卫星,本文所用的 RADARSAT-2 是 6.25m $\times$ 6.25m 分辨率的 SAR 地理参考精细分辨率产品(SGF),刈幅宽度 50m $\times$ 50m,HH 极化方式的精细模式数据。

本文根据上述多源遥感数据,匹配获取内波传播速度数据集。但获取捕获同一条内波、时间间隔较短的两幅遥感影像并非易事,它受遥感图像分辨率、卫星定位、数据获取等条件的制约。与此同时,计算内波传播速度所采用的两幅图像时间间隔不易太近,因为遥感图像的空间分辨率较低,时间间隔太短,误差就会较大。同样,两幅图像的时间间隔又不易过长,内波的传播受风、背景潮流、地形等条件的影响,长时间传播过程中会发生较大的形态变化,获取的内波传播速度误差较大。所用遥感数据如表 1 所示。

表 1 Terra/Aqua-MODIS、GF-1、ENVISAT ASAR、RADARSAT-2 数据信息  
Tab.1 The image pairs of Terra/Aqua-MODIS, GF-1, ENVISAT ASAR, and RADARSAT-2

序号	卫星数据	成像时间(UTC)	时间间隔
1	ENVISAT-ASAR	5/12/2011 02:19:39	25.35min
	Terra-MODIS	5/12/2011 02:45	
2	ENVISAT-ASAR	5/31/2011 02:22:58	52.03min
	Terra-MODIS	5/31/2011.03:15	
3	ENVISAT-ASAR	6/8/2011 02:29:59	3h
	Aqua-MODIS	6/8/2011 05:30	
4	ENVISAT-ASAR	8/7/2011 02:30:47	3.4h
	Aqua-MODIS	8/7/2011 05:55	
5	ENVISAT-ASAR	8/18/2011 02:27:36	3.2h
	Aqua-MODIS	8/18/2011 05:40	
6	ENVISAT-ASAR	8/23/2011 02:41:53	3.22h
	Aqua-MODIS	8/23/2011 05:55	
7	GF1_WFV3	8/3/2014 11:27:15	2.13h
	Aqua-MODIS	8/3/2014 05:35	

续表

序号	卫星数据	成像时间(UTC)	时间间隔
8	GF1_WFV4	8/15/2014 11:20:27	30.45min
	Terra-MODIS	8/15/2014 02:50	
9	GF1_WFV2	8/31/2014 11:11:34	21.57min
	Terra-MODIS	8/31/2014 02:50	
10	GF1_WFV3	4/18/2014 11:27:40	1.87h
	Aqua-MODIS	4/18/2014 05:20	
11	RADARSAT-2	7/2/2013 10:11:57	7.28h
	Terra-MODIS	7/2/2013 02:55	
12	RADARSAT-2	8/19/2013 10:11:55	7.28h
	Terra-MODIS	8/19/2013 02:55	
13	RADARSAT-2	8/26/2013 10:07:44	7.13h
	Terra-MODIS	8/26/2013 03:00	

### 3 研究方法

利用遥感手段研究内波传播速度主要有两种方法:一种是基于内波在不同卫星图像上的位置和时间间隔来计算,称为MTI(multi-temporal images)方法;另一种是基于单一图像的多个波包之间的距离,利用半日潮周期来计算,称为TPI(tidal period images)方法。这两种方法都可以用来计算内波的传播速度,但TPI方法主要适用于潮成内波,精度略低,主要是由于长时间的潮汐周期内,内波在长距离传播过程中受地形和流场等外界环境的影响会发生较大变化。MTI方法精度相对较高,但获取匹配数据不易。本文主要利用MTI方法,通过搜集时间间隔接近的相邻两幅遥感图像,利用同一条内波在不同遥感图像中的地理位移和时间间隔来获取内波传播速度。同时利用现场观测数据,与遥感数据进行匹配来获取内波传播速度。

以下是相邻的两幅MODIS和GF-1遥感图像,图2a为南海北部2014年8月15日03:11:34(UTC)的GF-1图像,图2b为2014年8月15日02:50(UTC)的Terra-MODIS图像,两景遥感图像的获取时间间隔为30.45min。分别提取两幅图像中的同一条内波波峰线进行叠加,如图2c所示。其中,红色线为GF-1图像中的内波波峰线,蓝色线为MODIS图像中的内波波峰线,黑色线段代表两幅遥感图像中内波波峰线间的位置间隔,该距离在ArcGIS软件中提取,长度可直接测量获得。通过两幅图像中的内波位置和时间间隔,可计算得到内波传播速度。

同时,利用遥感图像和现场数据探测到的同一条内波,亦可获取内波传播速度,如图3所示。RADARSAT-2遥感图像的获取时间为2013年5月13日21:55:01 UTC,匹配的现场观测数据获取的同一条内波时间为2013年5月13日23:30 UTC,时间间隔1.6h。遥感图像中黄色点表示实测站位(117.87°E, 21.11°N),距离该站位的西偏北方向12.53km处为遥感探测到的内波,内波由东向西传播,即遥感探测到内波1.6h小时后现场观测到了内波。利用遥感观测到的内波与潜标探测到的内波之间的距离和时间差,计算得该处内波传播速度为2.17m/s。

## 4 结果与讨论

### 4.1 内波传播速度

利用匹配的Terra/Aqua-MODIS、GF-1、ENVISAT ASAR and RADARSAT-2的遥感数据,经过数据预处理,提取出了内波波峰线所在的位置,具体分布图如图4所示。图中不同颜色的曲线代表不同时间的内波波峰线,红色圆点表示内波实测站点位置。由于遥感数据分布的不均匀性,在东沙岛附近海域匹配的遥感数据较多,而110°—115°E的大陆架范围以及吕宋海峡附近海域匹配的遥感图像较少。时间间隔上,获取数据最短的为2011年5月12日的ENVISAT-ASAR和Terra-MODIS数据,时间间隔仅为25.35min,图像位于东沙群岛附近海域。时间间隔最长的为RADARSAT-2和Terra-MODIS数据,时间间隔7.28h,图像中内波位于吕宋海峡附近海域。由于该海域遥感图像探测到的内波较少,仅匹配到了一组数据;但该

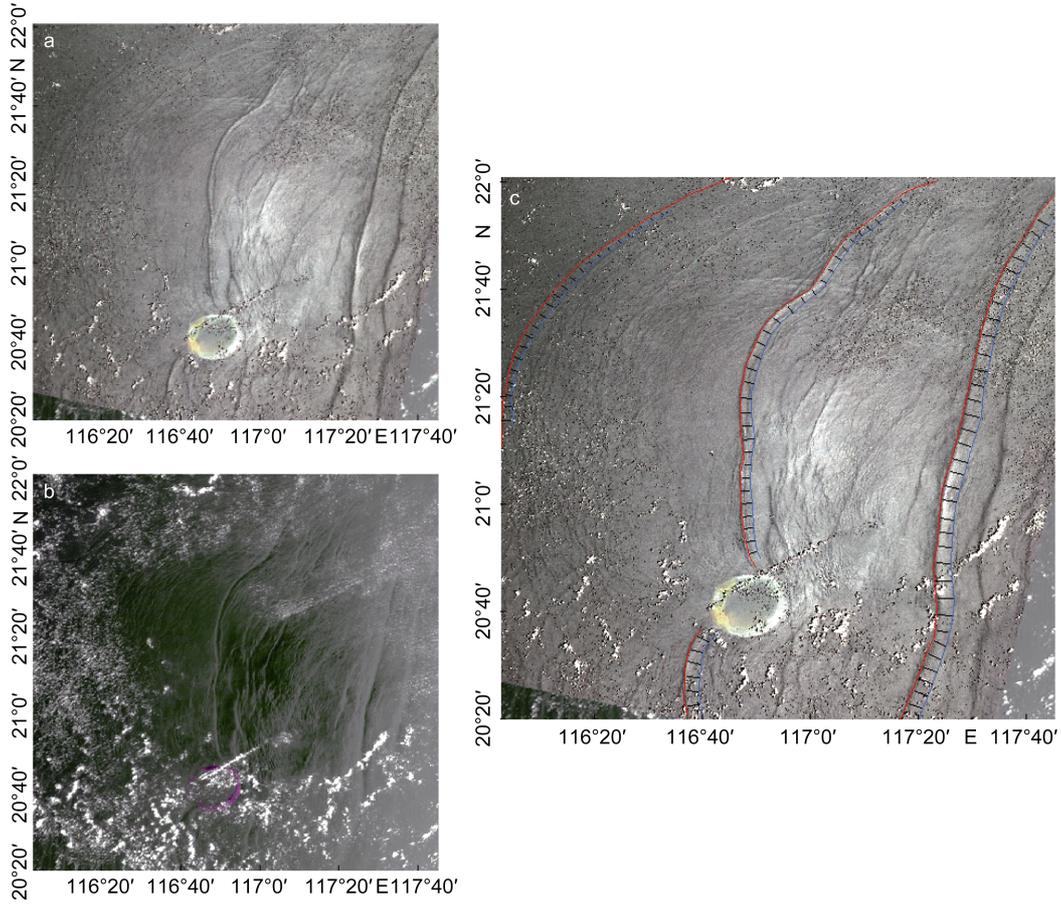


图 2 卫星遥感图像提取内波传播速度示意图

Fig.2 Using satellite remote sensing images to extract internal wave propagation velocity

a: The GF-1 image acquired at 03:11:34 UTC 15 August 2014; b: The Terra-MODIS image acquired at 02:50 UTC 15 August 2014; c: The stacking diagram of internal wave crests of GF-1 and MODIS images

注: a: 2014 年 8 月 15 日 03:11:34 UTC 的 GF-1 遥感图像; b: 2014 年 8 月 15 日 02:50 UTC 的 Terra-MODIS 遥感图像; c: GF-1 和 MODIS 图像中的内波波峰线的叠加图

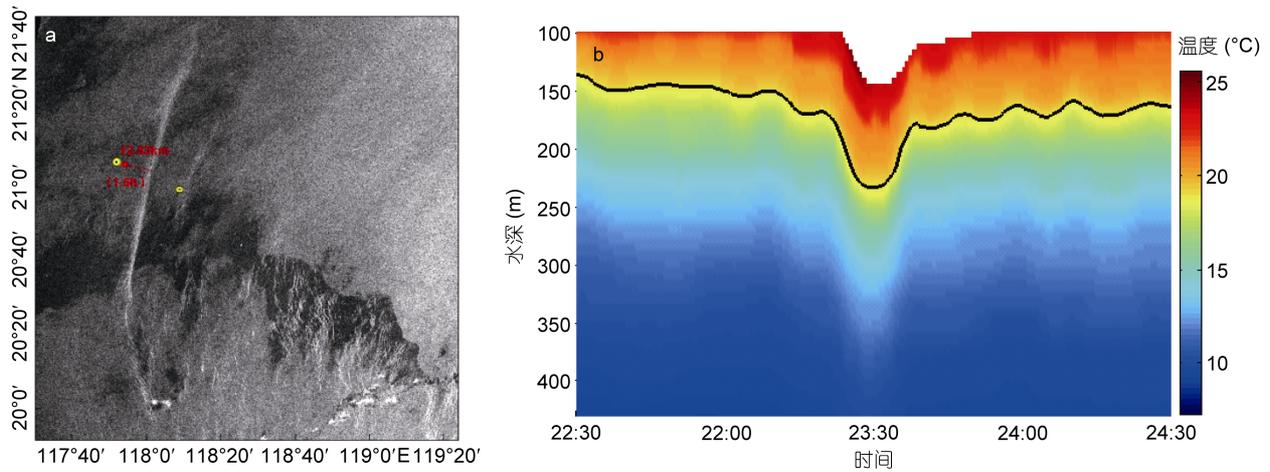


图 3 南海北部 RADARSAT-2 遥感图像(2013 年 5 月 13 日 21:55:01 UTC)(a)和现场观测的温度剖面图(单位: °C)(2013 年 5 月 13 日 23:30 UTC)(b)

Fig.3 The RADARSAT-2 image of the northern South China Sea acquired on 13 May 2013 at 21:55:01 UTC (a); and the temperature profile of field observations on 13 May 2013 at 23:30 UTC (b)

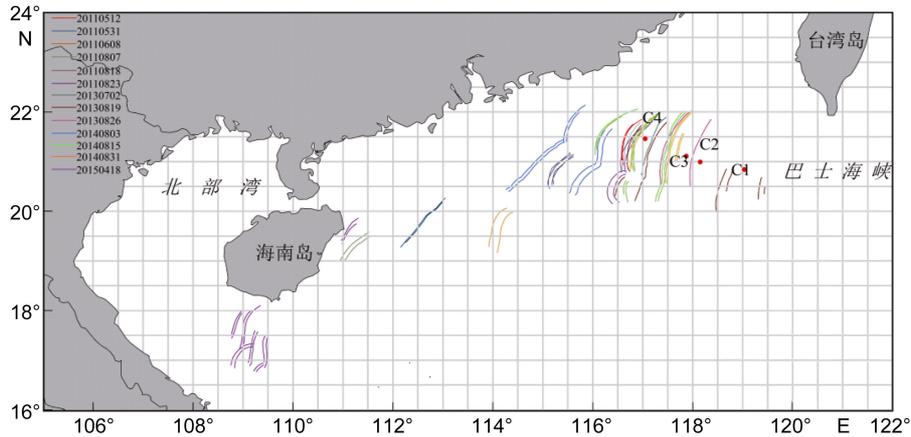


图4 南海北部匹配遥感数据提取的内波信息分布

Fig.4 The distribution map of internal waves with matching remote sensing data extraction in the northern South China Sea

海域水深较深可达两千米以上,内波传播受地形变化影响较小,故可用于获取该海域的内波传播速度。文中所用的遥感数据获取时间上覆盖了南海内波频发期(4月—8月),空间上覆盖了南海北部各个特征典型的区域(如吕宋海峡附近海域、东沙群岛附近海域、大陆架附近海域、海南岛附近的近岸海域)。内波观测潜标(C1—C4)位置如图4所示,它们分别位于300—2800m不同水深范围内,携带的设备为ADCP和(或)温度链,其中温盐链包含了温度传感器、盐度

传感器和压力传感器。

由匹配遥感数据提取的内波信息分布图可以看出,获取的匹配数据在东沙群岛附近海域内波分布较为密集,近岸海域和深海匹配相关遥感图像较少,119°E附近海域和海南岛附近海域仅找到了一组匹配数据。利用获取的内波空间位移和时间差,计算了不同区域的内波传播速度。同时将研究区域划分为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的单元格,计算了每个单元格的内波平均传播速度,给出了内波传播速度具体空间分布情况,如图5所示。

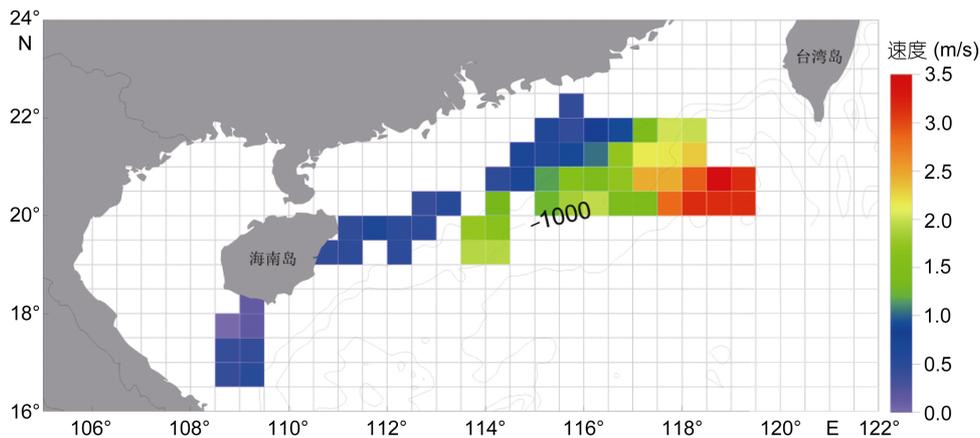


图5 南海北部内波传播速度分布

Fig.5 The distribution of propagation velocity of internal waves in the northern South China Sea

从遥感图像反演的内波传播速度分布图可知,内波的传播速度变化与等深线变化趋势较为一致,北部水深较浅海域的内波传播速度要小于南部水深较深的海域。内波的传播速度由东至西、由南至北方向明显递减,这表明,水深的变化导致内波传播速度的变化。深海区内波传播速度可达3m/s以上;内波

向西传播至东沙群岛附近海域时,速度减为2m/s左右;在向陆架坡继续传播过程中,速度逐渐减慢,传播速度为1m/s左右;传至大陆架浅海的内波传播速度仅为零点几米每秒。在1000m等深线附近海域,内波的传播速度大约为2m/s左右;南海岛附近海域的内波传播速度较小,主要是因为该海域水深较浅,由

此可以看出, 水深对内波传播具有重要的影响。

内波在传播过程中受背景流场、水体层结和底地形等多因素影响。在南海东北部深海盆地, 较强的中尺度涡旋(反气旋涡)对内波波峰线的影响要大于水体层结和底地形的影响(Xie *et al.*, 2016)。南海北部的内波主要是自东向西方向传播, 现场观测数据表明, 西向背景流会导致内波传播速度有所增加, 东向背景流会导致内波传播速度明显减小; 该海域的水体层结存在明显的季节变化, 即夏强冬弱, 内波在夏季的传播速度要大于冬季的传播速度(黄晓冬, 2013)。

利用遥感图像提取的内波传播速度, 结合当地水深数据, 以下给出了内波传播速度与水深的拟合关系, 如图 6 所示。图中蓝色曲线为内波传播速度与水深的拟合曲线, 关系式为:

$$v = -2.34 + 0.65 \text{Log}h. \quad (1)$$

其中,  $v$  表示内波传播速度,  $h$  代表水深。

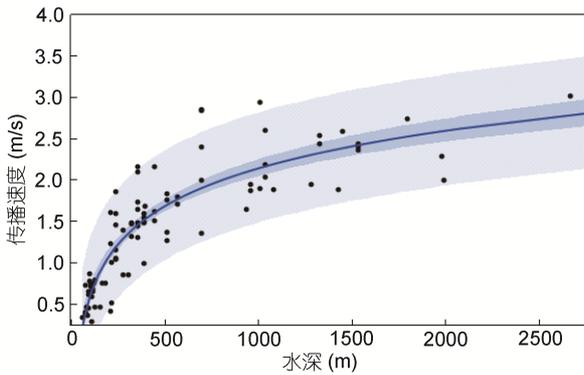


图 6 南海北部内波传播速度与水深关系拟合曲线

Fig.6 The fitting curve of propagation velocity and depth of internal waves in the northern South China Sea

#### 4.2 内波传播速度理论计算

KdV 方程不仅可以描述内波的传播特性, 还可以反演内波速度。下式为目前应用较广泛的 KdV 方程形式, 它是将浅水方程推广到缓慢变化地形所得到的, 其表达式为:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial n}{\partial x}(C_0 + \alpha\eta + \alpha_1\eta^2) + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \gamma\eta - \frac{1}{2}\varepsilon \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = 0. \quad (2)$$

其中,  $t$  为时间,  $\eta$  为内波波动振幅,  $C_0$  为线性内波波速, 也是线性项,  $\alpha$ 、 $\alpha_1$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  和  $\varepsilon$  分别为一阶非线性项系数、二阶非线性项系数、频散系数、浅水效应系数和耗散项系数。若不考虑海水的黏性作用和海底摩擦效应, 浅水项和耗散项可以忽略, 可以得到一般意义上的 KdV 方程。

$$\frac{\partial n}{\partial t} + (C_0 + \alpha\eta) + \frac{\partial n}{\partial t} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0. \quad (3)$$

上述 KdV 方程解的形式如下:

$$\eta(x, t) = \bar{\eta}_0 \sec^2 \left[ \frac{x - C_p t}{l} \right]. \quad (4)$$

其中,  $\eta_0$  为内孤立波振幅,  $C_p$  为内波相速度,  $l$  为内波半波长。在两层海水分层近似下, 相速度  $C_p$  和内波半波长  $l$  分别为:

$$C_p = C_0 \left[ 1 + \frac{\eta_0(h_2 - h_1)}{2h_1 h_2} \right], \quad (5)$$

$$l = \frac{h_1 h_2}{\sqrt{3\eta_0 |h_2 - h_1|}}, \quad (6)$$

$$C_0 = \left[ \frac{g\Delta\rho h_1 h_2}{\rho(h_1 + h_2)} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

其中,  $C_0$  为线性波波速,  $h_1$ 、 $h_2$  分别为上下层海水厚度,  $\Delta\rho$  为两层流体分密度差值(上下层密度分别为  $\rho_1$  和  $\rho_2$ ),  $\rho$  为海水的平均密度。由此可以通过计算得到内波相速度理论值。将基于遥感图像计算得到的内波传播速度和利用 KdV 方程计算得到的内波速度, 在一定水深范围内取平均值, 得的内波传播速度如下表所示。

表 2 内波传播速度遥感计算值和理论值对比结果  
Tab.2 Comparison of propagation velocity of ISWs from satellite images and theoretical values

水深范围 (m)	遥感均值 (m/s)	理论均值 (m/s)	相对误差 (%)
50—80	0.474	0.515	8.77
80—120	0.660	0.604	8.49
120—180	0.656	0.664	1.22
200—240	1.188	1.141	3.97
260—320	1.220	1.148	5.90
340—390	1.425	1.336	6.23
430—510	1.570	1.433	8.70
560—1000	1.800	1.678	6.78
1000—1500	2.182	2.049	6.10
1500—2000	2.387	2.216	7.18
2000 以上 (2663m)	3.025	2.809	7.14

基于遥感数据提取的内波传播速度结果显示, 在南海北部水深 50—80m、80—120m、120—180m、200—240m、260—320m、340—390m、430—510m、560—1000m、1000—1500m、1500—2000m、2000m 以上区域, 遥感图像提取出的平均传播速度分别为

0.474、0.660、0.656、1.188、1.220、1.425、1.570、1.800、2.182、2.387 和 3.025m/s。通过与 KdV 方程求解得到的内波传播速度理论值进行比较,二者较为吻合。下图为遥感图像反演的内波传播速度和 KdV 计算的内波传播速度理论值对比图。

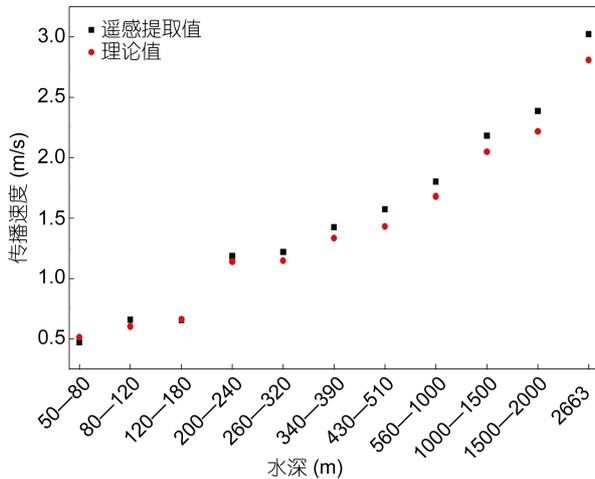


图7 遥感提取的内波传播速度与 KdV 方程反演的理论值对比示意图

Fig.7 Comparison in propagation velocity of ISWs from satellite images and theoretical values based on the KdV equation

可以发现,遥感图像提取的内波传播速度与理论速度值十分接近,其反演精度较高。内波传播速度的变化与水深密切相关,在遥感反演的水深最深 2663m 处,内波的传播速度达到了 3.025m/s,水深最浅 55m 处的内波传播速度为 0.474m/s,水深最深处的内波传播速度要远远大于水深最浅处的内波传播速度。在 200m 以下浅海区域,内波的速度变化不大,在 0.4—0.7m/s 范围内。随着水深的增加,内波的传播速度逐渐增大,表明水深变浅导致内波的传播速度减缓。

## 5 结论

南海北部是国际上公认的海洋内波热点发生区域之一,是内波研究的天然实验场。传播速度作为描述内波传播的一个重要参数,具有重要的研究意义。本文利用多源遥感卫星数据(MODIS、GF-1、ENVISAT ASAR、RADARSAT-2)结合现场观测数据开展了南海北部内波传播速度的研究,共匹配遥感数据对 13 个,所用遥感数据时间间隔最短的为 25.35min,覆盖区域为东沙岛附近海域,该海域匹配的遥感图像较多;研究区域最靠近吕宋海峡附近海域的两景图像时间间隔较长为 7.28h,由于该海域水

深较深,内波传播速度受海底地形影响较小,故可用来反演内波传播速度。遥感数据获取时间上覆盖了南海北部内波频发期(4月、5月、6月、7月、8月),空间上覆盖了南海北部各个特征典型的区域(如吕宋海峡附近海域、东沙群岛附近海域、大陆架附近海域、海南岛附近的近岸海域),非常有利于研究南海北部的内波传播速度。利用同一条内波在不同卫星图像上的位置和时间间隔获取其传播速度,以  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  网格绘制了南海北部内波传播速度的分布图,给出了南海北部内波传播速度的具体分布情况,同时给出了内波传播速度与深水的简单拟合关系。

南海北部内波传播速度受背景流场、层结和底地形变化等因素的影响,其中水深对内波传播速度具有重要的影响。北部较浅的海域内波的传播速度要小于南部较深的海域,内波速度从东至西方向上更是呈明显的递减趋势;整体上在南海北部由东至西、由南至北方向,内波传播速度逐渐递减。深海区内波传播速度较大,可达 3m/s 左右;内波在向陆架坡传播过程中速度逐渐减慢,传播速度为 1—2m/s;大陆架浅海的内波传播速度较小,仅为零点几米每秒。利用遥感提取的内波传播速度与 KdV 方程求解得到的内波传播速度理论值进行了比较,二者较为吻合,从理论上解释了南海北部海洋水深变化对海洋内波传播速度的影响。

致谢 感谢 NASA 网站提供的 MODIS 数据,感谢中欧“龙计划”合作项目提供的 ENVISAT ASAR 数据

## 参 考 文 献

- 杜 涛, 2000. 浅强跃层大振幅内波研究. 地学前缘, 7(S2): 179—188
- 黄晓冬, 2013. 南海内孤立波的空间分布与时间变化特征研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 20—23
- Alford M H, Lien R C, Simmons H *et al*, 2010. Speed and evolution of nonlinear internal waves transiting the South China Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 40(6): 1338—1355
- Alford M H, Peacock T, MacKinnon J A *et al*, 2015. Corrigendum: The formation and fate of internal waves in the South China Sea. *Nature*, 528(7580): 152
- Apel J R, Holbrook J R, Liu A K *et al*, 1985. The Sulu Sea internal soliton experiment. *Journal of Physical Oceanography*, 15(12): 1625—1651
- Cai S Q, Long X M, Wu R H *et al*, 2008. Geographical and monthly variability of the first baroclinic Rossby radius of deformation in the South China Sea. *Journal of Marine Systems*, 74(1—2): 711—720
- Cai S Q, Xie J S, Xu J X *et al*, 2014. Monthly variation of some

- parameters about internal solitary waves in the South China sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 84: 73—85
- Duda T F, Lynch J F, Irish J D *et al*, 2004. Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern South China Sea. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(4): 1105—1130
- Holloway P E, 1987. Internal hydraulic jumps and solitons at a shelf break region on the Australian North West shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 92(C5): 5405—5416
- Hong D B, Yang C S, Ouchi K, 2015. Estimation of internal wave velocity in the shallow South China Sea using single and multiple satellite images. *Remote Sensing Letters*, 6(6): 448—457
- Hsu M K, Liu A K, 2000a. Nonlinear internal waves in the South China Sea. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26(2): 72—81
- Hsu M K, Liu A K, Liu C, 2000b. A study of internal waves in the China Seas and Yellow Sea using SAR. *Continental Shelf Research*, 20(4—5): 389—410
- Huang X D, Chen Z H, Zhao W *et al*, 2016. An extreme internal solitary wave event observed in the northern South China Sea. *Scientific Reports*, 6: 30041
- Jackson C, 2007. Internal wave detection using the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C11): C11012
- Jackson C R, Da Silva J C B, Jeans G *et al*, 2013. Nonlinear internal waves in synthetic aperture radar imagery. *Oceanography*, 26(2): 68—79
- Liu A K, Chang Y S, Hsu M K *et al*, 1998. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C4): 7995—8008
- Liu A K, Ramp S R, Zhao Y H *et al*, 2004. A case study of internal solitary wave propagation during ASIAEX 2001. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(4): 1144—1156
- Liu B Q, Yang H, Zhao Z X *et al*, 2014. Internal solitary wave propagation observed by tandem satellites. *Geophysical Research Letters*, 41(6): 2077—2085
- Müller P, Briscoe M, 2000. Diapycnal mixing and internal waves. *Oceanography*, 13(2): 98—103
- Munk W, Wunsch C, 1998. Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 45(12): 1977—2010
- Osborne A R, Burch T L, 1980. Internal solitons in the Andaman Sea. *Science*, 208(4443): 451—460
- Thorpe S A, 1975. The excitation, dissipation, and interaction of internal waves in the deep ocean. *Journal of Geophysical Research*, 80(3): 328—338
- Simmons H, Chang M H, Chang Y T *et al*, 2011. Modeling and Prediction of Internal Waves in the South China Sea. *Oceanography*, 24(4): 88—99
- Warn-Varnas A, Chin-Bing S, King D *et al*, 2002. Yellow sea internal solitary wave variability. In: Pace N G, Jensen F B eds. *Impact of Littoral Environmental Variability of Acoustic Predictions and Sonar Performance*. Dordrecht: Springer, 409—416
- Xie J S, He Y H, Lü H B *et al*, 2016. Distortion and broadening of internal solitary wavefront in the northeastern South China Sea deep basin. *Geophysical Research Letters*, 43(14): 7617—7624
- Yang Y J, Fang Y C, Tang T Y *et al*, 2010. Convex and concave types of second baroclinic mode internal solitary waves. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 17(6): 605—614
- Zhao W, Huang X D, Tian J W, 2012. A New Method to Estimate Phase Speed and Vertical Velocity of Internal Solitary Waves in the South China Sea. *Journal of Oceanography*, 68(5): 761—769
- Zhao Z X, Klemas V, Zheng Q A *et al*, 2004. Estimating parameters of a two-layer stratified ocean from polarity conversion of internal solitary waves observed in satellite SAR images. *Remote Sensing of Environment*, 92(2): 276—287

## ON PROPAGATION VELOCITY OF INTERNAL SOLITARY WAVES IN THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA WITH REMOTE SENSING AND IN-SITU OBSERVATIONS DATA

SUN Li-Na, ZHANG Jie, MENG Jun-Min

*(First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)*

**Abstract** The northern South China Sea (NSCS) is a hot spot of the internal waves. Internal waves in the NSCS are very complex because of complicated generation and evolution mechanism. We studied the propagation velocity of the internal solitary wave (ISW) in the NSCS with multi-sourced remote sensing satellite data (MODIS, GF-1, ENVISAT ASAR, and RADARSAT-2) and in-situ observation data. The propagation velocity was derived using horizontal displacement of ISW patterns and the time difference between satellite image pairs. The distribution of propagation velocity was presented in  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  grid in the NSCS. The results show that the propagation velocity is affected mainly by water depth, as well as the water temperature, stratification, and the bottom terrain. The propagation velocity decreases gradually westwards and northward in NSCS from  $>3\text{m/s}$  in the deep sea to  $<1\text{m/s}$  in the shallow continental shelf. Meanwhile, the propagation velocity obtained from satellite images is in good agreement with the theoretical calculations using the KdV equation.

**Key words** internal solitary waves; propagation velocity; remote sensing; northern South China Sea