

引用格式: NING Jing, WANG Jing, ZHANG Meng, *et al.* Amplitude Inversion Model and Application of Internal Solitary Waves of the Northern South China Sea Based on Optical Remote-sensing Images[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 1228003

宁静, 王晶, 张猛, 等. 基于光学遥感图像的南海北部内孤立波振幅反演模型与应用[J]. 光子学报, 2019, **48**(12): 1228003

# 基于光学遥感图像的南海北部内孤立波振幅反演模型与应用

宁静, 王晶, 张猛, 崔海吉, 陆可潇

(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:** 收集 2015 年 1 月至 2018 年 12 月共计 4 年的 MODIS 光学遥感图像, 利用神经网络算法建立适用于南海北部深海与浅海的内孤立波振幅反演模型. 模型的计算结果与现有的南海实测数据对比, 无论对于浅海(文昌海域)还是深海(东沙岛附近海域和深海盆地), 反演精度都高于 15%. 利用模型得到了南海北部内孤立波的振幅分布, 发现振幅分布与水深呈正相关, 相关系数为 0.81. 计算了南海北部文昌海域、东沙岛附近海域以及深海盆地的内孤立波振幅分布, 发现同一条内孤立波, 振幅不同. 南海北部文昌海域、东沙岛附近海域以及深海盆地的单条内孤立波振幅与水深呈正相关, 相关系数分别为 0.79, 0.91, 0.81. 本文为南海北部海域深海与浅海的内孤立波振幅反演提供借鉴.

**关键词:** 内孤立波; 光学遥感; 振幅反演; 神经网络算法; 南海

中图分类号: P731.24, P23

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1228003

## Amplitude Inversion Model and Application of Internal Solitary Waves of the Northern South China Sea Based on Optical Remote-sensing Images

NING Jing, WANG Jing, ZHANG Meng, CUI Hai-ji, LU Ke-xiao

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

**Abstract:** The internal solitary waves are studied by analysis of optical remote sensing images in the whole sea area of the Northern South China Sea. This paper mainly collects MODIS optical remote-sensing images from Jan.2015 to Dec.2018, and the amplitude inversion model of internal solitary waves applicable to deep sea and shallow sea in the Northern South China Sea are established by using neural network. The calculation results of the model are compared with the situ data in the Northern South China Sea, and the accuracy is higher than 15% for both shallow sea and deep sea. Using the inversion model, the amplitude distribution of internal solitary waves in the Northern South China Sea is obtained. It is found that the amplitude distribution is positively correlated with water depth, with a correlation coefficient of 0.81. The amplitude distribution of internal solitary waves in Wenchang sea area, Dongsha atoll area and deep sea basin was calculated. It is found that the amplitude of single internal solitary waves is different. The amplitude of internal solitary waves in Wenchang sea area, Dongsha atoll area and deep sea basin is positively correlated with the water depth, with correlation coefficients of 0.79, 0.91 and 0.81 respectively. This study provides a new method for inversion of internal solitary waves amplitude in both deep and shallow areas of Northern South China Sea.

**Key words:** Internal solitary waves; Optical remote sensing; Amplitude inversion; Neural network algorithm; Northern South China Sea

**OCIS Codes:** 280.4788; 280.4991; 010.4450; 100.2960; 240.6690

基金项目: 国家重点研究发展计划(No.2017YFC1405602), 国家自然科学基金(No.61871353)

第一作者: 宁静(1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋遥感相关技术. Email: ningjing8458@qq.com

导师(通讯作者): 王晶(1962-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为海洋内波探测. Email: wjing@ouc.edu.cn

收稿日期: 2019-07-04; 录用日期: 2019-09-03

## 0 引言

南海是内孤立波(Internal Solitary Waves, ISW)多发的海区之一,包括了内孤立波的生成、传播、分裂直至消亡的全过程,因此南海成为内孤立波研究热点海域<sup>[1-7]</sup>.内孤立波振幅大小是衡量其能量的主要参量之一,也是估计其对海洋工程的破坏力和海洋混合贡献多少的重要参量,因此对内孤立波振幅的研究具有重要的科学意义和应用价值.

光学遥感图像有着时间分辨率高、覆盖范围广和数据免费获取等优点,特别是搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS),每天可获取 2 景图像,已经成为研究海洋内孤立波的重要数据之一.SHAND J A<sup>[8]</sup>在 1953 年利用光学遥感观测到了内孤立波引起的海面明暗条带现象,拉开了光学遥感探测内孤立波研究的序幕.目前,利用光学遥感图像研究内孤立波时空分布的工作较多<sup>[9-12]</sup>,例如 JACKSON C<sup>[13]</sup>等收集了 2002 年到 2004 年大量的 MODIS 图像,并绘制出了全球内孤立波的分布图并给出了全球内孤立波的分布特征.另外,由于光学遥感图像受云雾影响较大,利用传感器的强度反演内孤立波振幅非常困难.因此目前通过光学遥感图像反演内孤立波振幅的研究大多借鉴合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)反演模型.内孤立波从吕宋海峡附近生成,经深海盆地到陆架陆坡传播,水深从两三千米到几十米,内孤立波在长距离水深变化非常大的路径传播过程中,振幅变化也很大.从现场实测发现南海内孤立波振幅最小只有几米,最大能达到 240 m<sup>[14]</sup>.如何建立统一模型反演南海内孤立波振幅是至关重要的.目前已建立了 SAR 图像与 Korteweg de-Vries(KdV)方程结合的浅海振幅反演模型<sup>[15]</sup>,例如黄晓冬等<sup>[16-17]</sup>采用了 Peak-to-Peak 方法计算了内孤立波的半波宽度,并利用 KdV 得到了内孤立波的振幅、传播速度和波型等特征参数;ZHANG 等建立了 SAR 图像与非线性薛定谔方程(Nonlinear Schrodinger Equation, NLS)结合的深海振幅反演模型<sup>[18]</sup>,未见适用于南海北部海域深海与浅海的光学遥感图像反演内孤立波振幅模型.

本文收集多年光学遥感图像,从内孤立波光学遥感图像条纹的纹理特征参量入手,增加遥感图像的信息量,并结合水深和层结参量,利用神经网络算法建立内孤立波振幅反演模型,期望应用于南海北部深海与浅海的内孤立波振幅反演.旨在为南海北部海域深海与浅海的内孤立波振幅反演提供借鉴.

## 1 数据收集与处理

本文主要利用MODIS来进行内孤立波图像的收集.MODIS是搭载在美国地球观测系统系列卫星中的

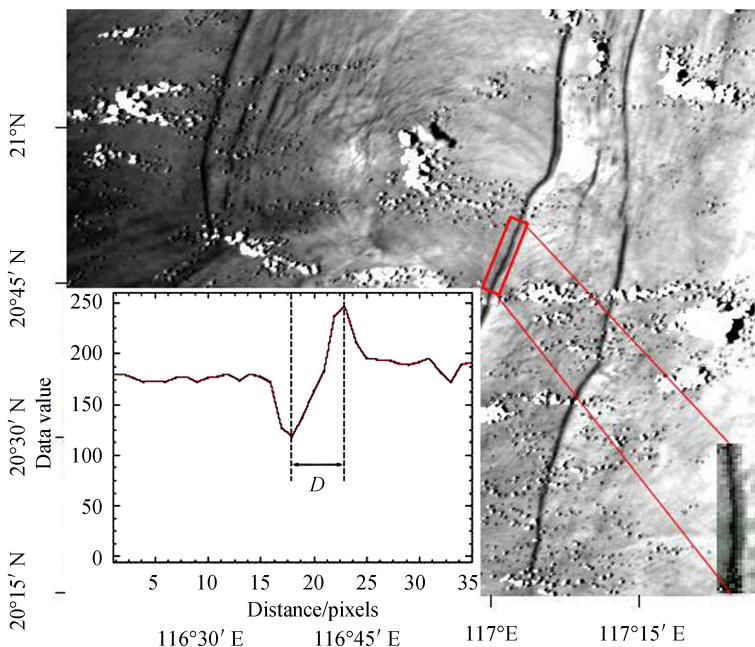


图 1 MODIS 光学遥感图像中的内孤立波以及提取到的单根内孤立波和亮暗间距

Fig.1 The ISWs on MODIS optical remote sensing images. The insert map is the grey image of a single ISWs and the spatial profile of the leading wave which indicated by the red box

Terra 和 Aqua 卫星上的重要传感器.本文使用空间分辨率为 250 m, 刈幅宽度 2 330 km 的 MODIS 数据,由美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)网站下载,共获得了南海北部海域(18°N-22°N, 111°E-122°E) 2015 年 1 月到 2018 年 12 月 4 年共计 2 922 景 MODIS 图像.通过遥感图像处理系统(The Environment for Visualizing Images, ENVI)对所获得的卫星图像进行处理,并筛选出 328 景清晰的具有内孤立波条纹的图像(如图 1).用 ETOP1 下载南海的水深数据,获取当地总水深  $h$ , 并利用温盐数据以及海水状态方程计算密度跃层的中间值即上层水深  $h_1$ , 地形图如图 2 所示.

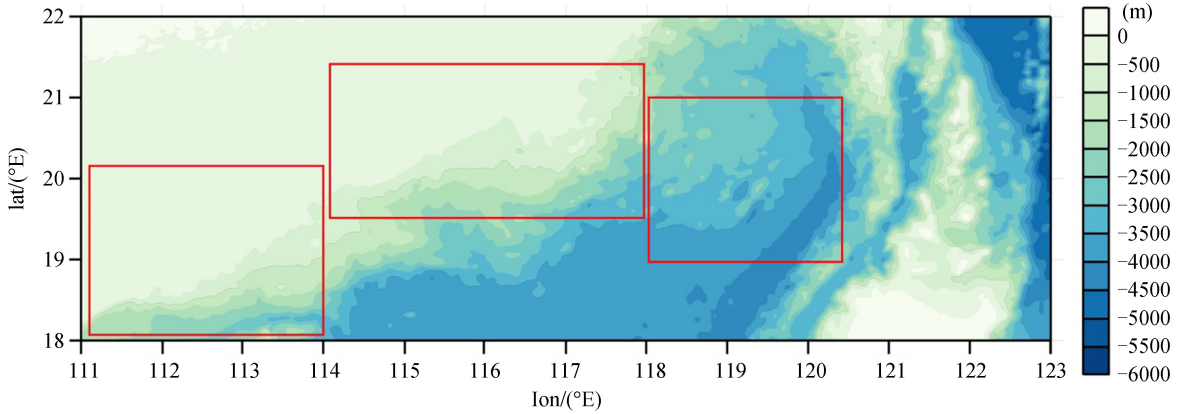


图 2 南海北部水深分布及研究区域

Fig.2 Two-dimensional topography of South China Sea

将筛选出来的 328 景内孤立波图像进行几何校正处理,截取部分单条孤立波,包括南海近海文昌海域(1 206 条单根内孤立波图像),南海东沙岛附近陆架陆坡海域(856 条单根内孤立波图像),深海盆地(198 条单根内孤立波图像),一共 2 260 条单根内孤立波.在处理内孤立波图像的同时获取内孤立波在遥感图像上的最亮点与最暗点之间的距离  $D$ (亮暗间距),图 1 为截取到的单根内孤立波图像以及该处的亮暗间距,通过计算得出该内孤立波列头波的亮暗间距为 1 324.7m.内孤立波在遥感图像上主要表现为亮暗条纹,而条纹的变化会引起图像上灰度与梯度的变化,因此利用灰度-梯度共生矩阵,提取单根内孤立波的小梯度优势、大梯度优势、灰度分布不均匀性、梯度分布不均匀性、能量、灰度均值、梯度均值、灰度标准差、梯度标准差、相关性、灰度熵、梯度熵、混合熵、差分矩以及逆差分矩这十五种纹理特征参量,如表 1 所示.

表 1 基于 MODIS 图像的内孤立波条纹特征参数

Table 1 The characteristic parameter based on MODIS images of ISWs

Characteristic parameter	ISW1	ISW2	ISW3	...	ISW2260
Small gradient strength	0.46	0.55	0.49		0.47
Large gradient strength	440.45	378.87	406.81		410.60
Grey uneven representation	33.37	34.97	19.41		10.75
Gradient uneven representation	64.07	81.06	51.16		77.71
Energy	0.06	0.15	0.06		0.02
Grey mean	87.87	223.71	152.02		118.75
Gradientmean	15.24	12.82	14.13		14.29
Grey mean square	28.30	31.12	27.52		55.41
Gradient mean square	14.43	14.65	14.39	...	14.37
Relevance	-54.67	-252.92	-173.96		-28.10
Grey entropy	0.92	0.91	1.02		1.42
Gradient entropy	0.60	0.49	0.59		0.60
Mixing entropy	1.35	1.18	1.36		1.76
Inertia	6 394.07	46 164.50	20 324.87		14 243.93
Inverse gap	0.000 33	0.001 1	0.008 2		0.000 24
Peak-to-peak distance/m	787.77	786.83	722.12		793.28

## 2 反演内孤立波振幅的 BP 神经网络模型

BP 神经网络是一种误差反向传播的多层前馈网络, BP 神经网络能存储和学习大量的输入与输出模式之间的映射关系, 而不需要事先揭示出用来描述这种映射关系的数学方程. BP 神经网络主要由输入层, 输出层, 隐含层组成. 本文主要将第一节中提到的十五种纹理特征参量以及亮暗间距  $D$ 、水深  $h$ 、上层水深  $h_1$  这十八种参量作为 BP 神经网络反演振幅模型的输入, 将内孤立波振幅作为输出. 对于模型所需的样本库, 将前面所提取到的 2 260 个样本作为训练集, 利用有实测内孤立波振幅值的 9 个样本作为测试集, 训练集主要训练模型, 然后用测试集来评估测试误差.

BP 神经网络的训练需要内孤立波振幅的真值, 但内孤立波实测数据获取非常困难, 数据量较少. 内孤立波在传播过程中会在波前和波后引起海面的辐聚和辐散效应, 从而导致海面粗糙度发生变化. 海面粗糙度的变化是由海水的水文参数和内孤立波的参数决定的, 与探测内孤立波所用的传感器无关, 因此光学图像上测量的最亮和最暗点与 SAR 图像一样, 因此可以借用 SAR 图像建立的 NLS 反演模型关系<sup>[18]</sup>进行内孤立波参数的反演, 作为模型训练的真值. 由此可以得到构建内孤立波样本库所需的输入参数和输出参数, 可以完成基于 MODIS 遥感图像的内孤立波样本库构建.

BP 神经网络拓扑结构如图 3. 在 BP 神经网络模型的建立过程中, 一般从网络的层数、每层中神经元的个数、学习速率以及迭代次数等方面来调整参数, 以获得最优结果. 模型参数的设置如表 2 所示, 模型 1 选取的隐含层个数为 1, 隐含层的节点数为 29, 学习速率为 0.7, 迭代次数为 500. 模型 2 选取的隐含层个数为 2, 第一层隐含层节点数为 36, 第二层隐含层节点数为 15, 学习速率为 0.7, 迭代次数为 550. 模型 3 选取的隐含层个数为 3, 每个隐含层节点数分别为 34, 15, 4, 学习速率为 0.4, 迭代次数为 550. 模型 4 选取的隐含层个数为 4, 每个隐含层节点数分别为 34, 16, 4, 2, 学习速率为 0.4, 迭代次数为 600.

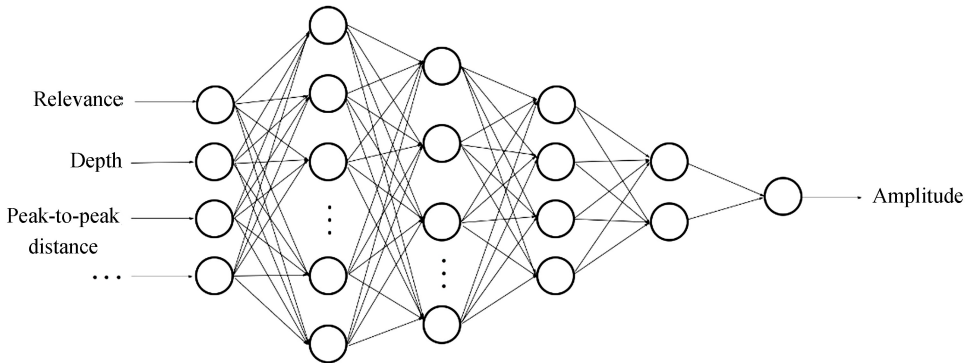


图 3 BP 神经网络拓扑结构

Fig.3 The topological structure of the BP neural network

表 2 BP 神经网络模型的参数设置

Table 2 Parameter setting of BP neural network model

BP neural network	Number of hidden layers	Number of neurons of hidden layers	Learning rate	Number of iterations
Model 1	1	29	0.7	500
Model 2	2	36, 15	0.7	550
Model 3	3	34, 15, 4	0.4	550
Model 4	4	34, 16, 4, 2	0.4	600

为了检验模型的精度, 将模型反演的内孤立波振幅与现场实测数据进行对比. 由于内孤立波现场测量与卫星遥感图像相匹配的数据稀缺, 目前只有少量文昌海域与东沙岛附近海域与光学遥感图像匹配的现场实测数据. 文昌海域实测位置的观测时间从 2005 年 4 月 16 日至 2005 年 7 月 20 日, 实测站点的位置约在  $19^{\circ}50'N$ ,  $112^{\circ}E$ , 主要采用声学多普勒流速剖面仪 (Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP) 和温度链进行观测. 温度链包括 24 个温度传感器和 5 个温盐传感器, 分布在 4 m~75 m 水深处. 温度传感器的采样频率是 1 min, 精度  $0.01^{\circ}$ , ADCP 的流速测量频率为 10 min. 在此时间段内, 共找到 8 景与实测点位置在时间与空间上相互对应的 MODIS 图像. 东沙岛实测位置的观测时间为 2013 年 7 月 2 日, 实测站点的位置约在



21°28'N,117°1'E,共找到 1 景与实测点位置在时间与空间上相对应的 MODIS 图像.所找到的 MODIS 图像信息如表 3 所示.

表 3 四种模型与文昌海域和东沙岛附近海域实测值对比  
Table 3 Calculated and observed amplitudes of the ISWs

MODIS image	Observation /m	Calculated result				
		Model 1/m	Model 2/m	Model 3/m	Model 4/m	NLS model/m
MOD02QKM. A2005109.0320.005.2010151175606	16.4	19.1	19.9	18.3	18.8	19.4
MOD02QKM. A2005118.0315.005.2010151231239	20.7	21.7	20.3	20.2	20.1	20.3
MOD02QKM. A2005132.0325.005.2010152153956	22.9	20.2	25.7	23.1	20.8	23.8
MOD02QKM. A2005136.0300.005.2010160003722	27.9	23.2	26.2	28.6	26.5	27.3
MOD02QKM. A2005180.0325.005.2010154061045	16.2	16.8	15.8	17.3	16.0	15.8
MOD02QKM. A2005134.0315.005.2010152164511	17.1	19.9	18.9	18.3	18.1	19.3
MYD02QKM. A2005140.0540.005.2009230130725	23.8	28.9	25.7	30.3	24.9	21.8
MYD02QKM. A2005179.0545.005.2009232072407	15.6	17.3	17.5	16.8	16.6	17.0
MOD02QKM. A2013183.0255.061.2017299083504	42.0	35.9	31.2	39.4	38.4	47.1
Average error/%		13.0%	11.2%	8.1%	6.5%	7.9%

图 4 为 2005 年 5 月 14 日在文昌海域观测到内孤立波的 MODIS 图像,图中三角标记为实测站点,红线为选取的内孤立波参数提取位置,红线选取的内孤立波头波处水深 101 m,上层水深 25 m,亮暗间距 556.5 m,图 5 为 2005 年 5 月 14 日的实测时间序列,黑线为 24°等温线起伏,红线椭圆对应于内孤立波头波实测振幅为 17.1 m.利用模型 1、模型 2、模型 3 和模型 4 反演该内孤立波振幅,其结果分别为 19.9 m、18.9 m、18.3 m、18.1 m,误差分别为 16.4%、10.5%、7.0%、5.8%.由于内孤立波在传播过程中海水深度变化很小,MODIS 图像中的内孤立波都在实测点附近,该海区内孤立波在传播过程中内孤立波的振幅变化应该不大.因此,MODIS 图像上的内孤立波与实测点处的内孤立波具有可比性.

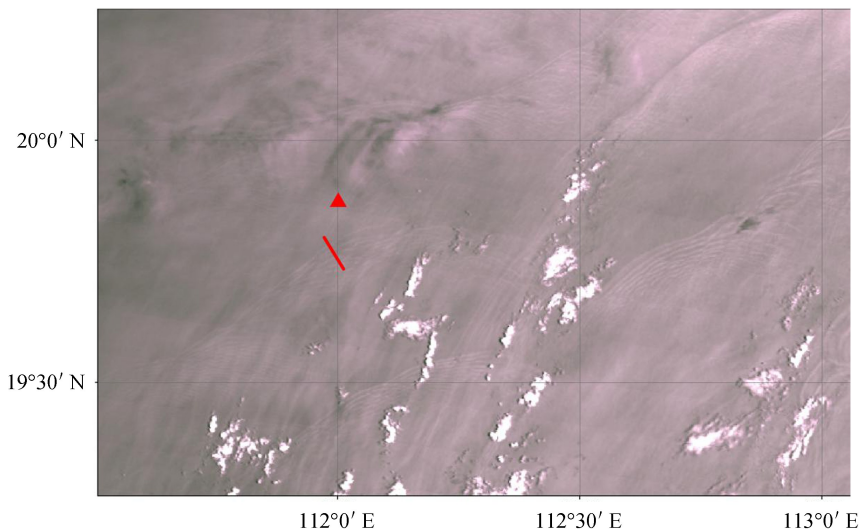


图 4 2005 年 5 月 14 日 11:15(UTC+8)的文昌海域 MODIS 内孤立波图像  
Fig.4 ISWs observed in the MODIS image at 11:15 (UTC+8), Wenchang area, on May 14, 2005

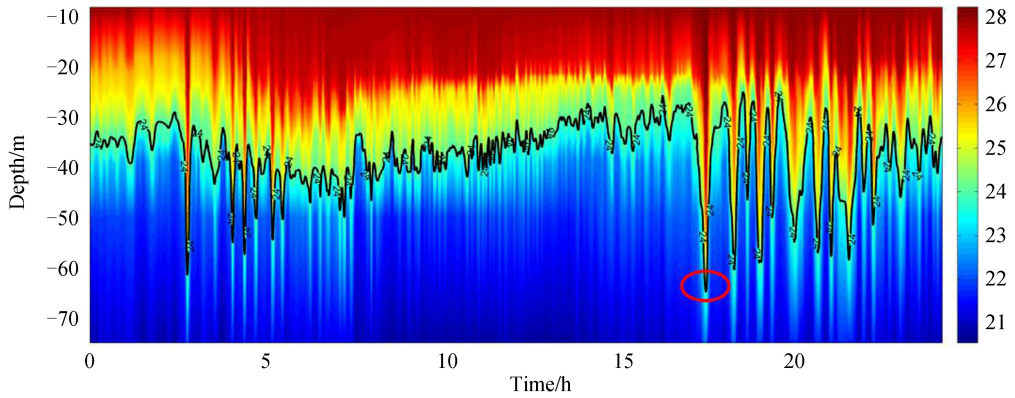


图5 2005年5月14日文昌实测位置的等温线剖面图

Fig.5 Isotherm profile of the measured position in Wenchang on May 14, 2005

利用同样的方法,将建立的4个振幅反演模型应用于9景匹配的遥感图像,与文昌海域与东沙岛附近海域实测值作对比,计算结果见表3.

模型1、模型2、模型3和模型4反演得到的内孤立波振幅与实测对比的平均误差分别为13.0%、11.2%、8.1%、6.5%,随着模型隐含层个数的增加,并不断地调整隐含层节点数,学习速率,迭代次数等,误差逐渐减小.当隐含层个数增加到4层时,模型精度最高.而当选取更多的层数时,模型精度并没有提高,反而增加了网络的复杂程度.可以选用模型4作为南海北部深海与浅海的内孤立波振幅反演模型.因此用BP神经网络反演南海北部深海与浅海的内孤立波振幅是可行的,无论对于浅海(文昌海域)还是深海(东沙岛附近海域和深海盆地),反演精度都高于15%,为内孤立波振幅的反演提供了新方法.

### 3 南海内孤立波振幅特征分析

#### 3.1 南海内孤立波振幅分布特征

通过对文昌海域、东沙岛附近海域、深海盆地的内孤立波进行特征参量的提取,得到南海海域的内孤立波振幅分布.由图6可知南海北部海域都有内孤立波发生,位置不同,内孤立波振幅大小也不同.文昌海域水深较浅,水深大多小于400 m,而内孤立波振幅大小位于0~50 m之间;东沙岛附近海域水深大约为300~1 000 m,内孤立波振幅大小大多位于30~100 m之间;深海盆地海域内孤立波振幅普遍较大,多位于水深超过2 000 m的位置,内孤立波振幅也大多都超过100 m,最大可达到200 m.由此可见,南海北部地区的内孤立波振幅随着水深的增加呈增大的趋势.

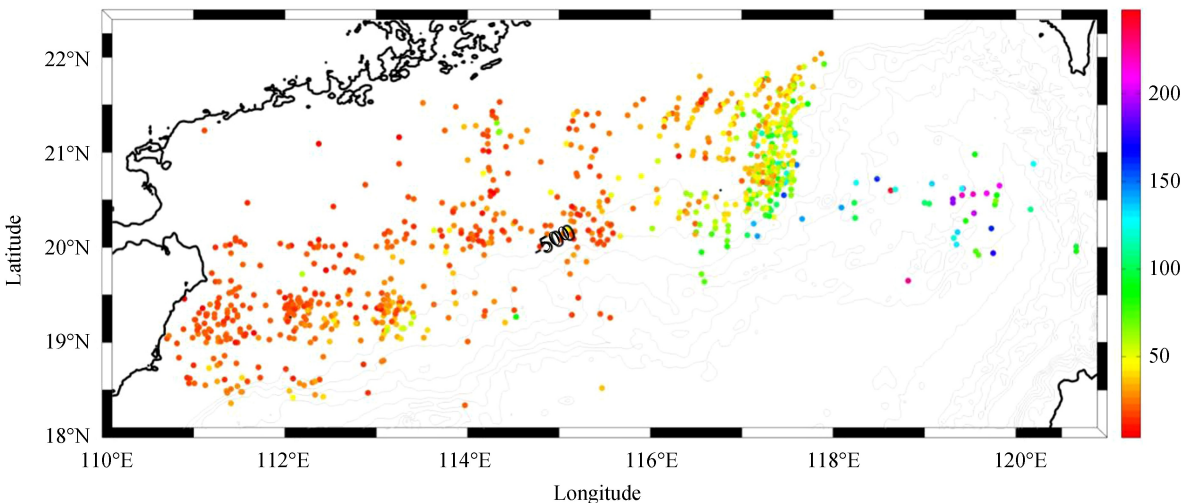


图6 南海北部海域内孤立波振幅分布

Fig.6 Amplitude distribution of ISWs in the South China Sea

为了进一步验证内孤立波振幅与水深的关系,用Origin软件绘出内孤立波振幅与水深的散点分布图,

对散点图进行线性拟合,绘制出拟合曲线.内孤立波振幅与水深的关系如图 7 所示,其拟合函数为  $y=0.05x+18.19$ ,相关系数为 0.81.可以得到南海北部海域的内孤立波振幅与水深呈正相关,振幅随着水深增大呈逐步增大的趋势.同一水深对应的振幅大小存在差异,可能与海水的层化深度以及内孤立波能量有关.

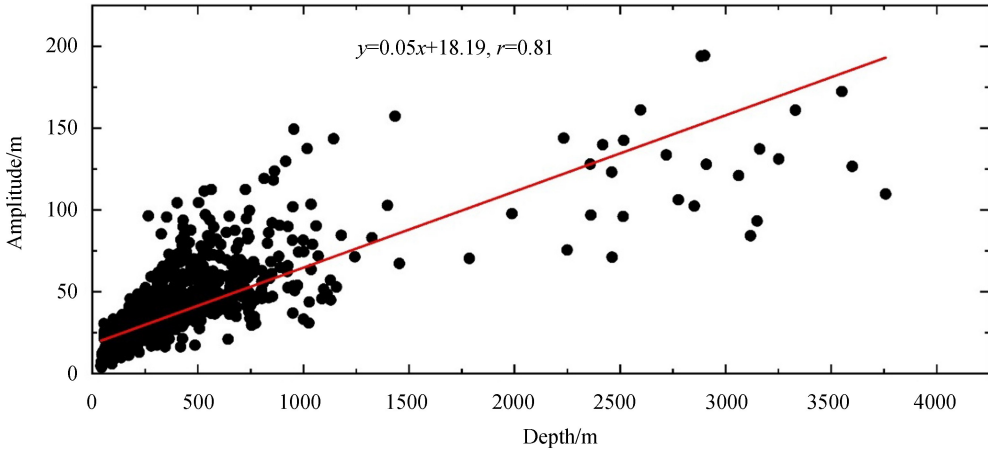
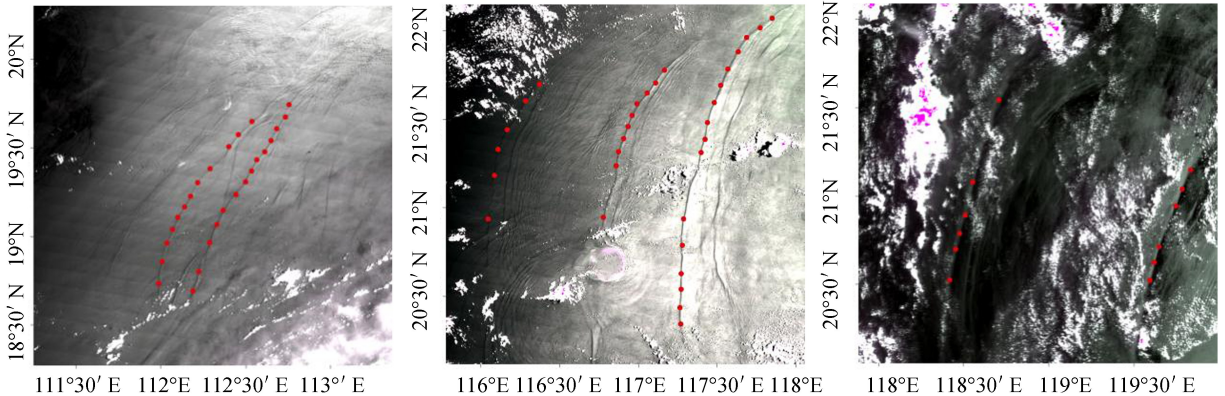


图 7 南海北部内孤立波振幅与水深关系

Fig.7 Relationship between the depth of water and amplitudes of ISWs in the South China Sea

### 3.2 单条内孤立波振幅分布特征

由于内孤立波波峰线较长,同一条内孤立波上各点水深不同,因而内孤立波的振幅会产生差异.图 8(a),图 8(b),图 8(c)分别为文昌海域 2017 年 5 月 31 日、东沙岛 2018 年 6 月 30 日、深海盆地 2017 年 9 月 9 日的 MODIS 内孤立波图像,对图中内孤立波条纹分别进行参数的提取,提取位置为每个红点位置.结合当地水深,依据上述模型对单条内孤立波上多点的振幅进行了计算,内孤立波的振幅分布如图 9 所示.



(a) ISW image in MODIS on May 31, 2017 (b) ISW image in MODIS on June 30, 2018 (c) ISW image in MODIS on September 9, 2017

图 8 MODIS 内孤立波图像,红点为内孤立波提取位置

Fig.8 The ISWs on MODIS optical remote sensing images. The red dot is the extracted positions of ISWs

由图 9 可以清楚地看到每条内孤立波上的振幅分布.所提取的文昌海域的内孤立波相对其他两个海域的内孤立波,振幅较小;在 200 m 等深线附近,由北向南,水深逐渐变深,两条内孤立波的振幅也呈增大的趋势.东沙岛附近的内孤立波基本位于 200 m 等深线以内,该海域内的每条内孤立波上的振幅变化趋势较为明显,可能是由于该地区海底地形变化较大,水深变化较为剧烈.深海盆地水深较深,提取内孤立波的位置水深都大于 2 000 m,最深可达 3 400 m,该地区内孤立波振幅基本都大于 100 m,同一条内孤立波的振幅变化随着水深增加而逐渐增大.由于文昌海域,东沙岛附近海域,深海盆地的水深、分层有很大的差别,因此分别做出了三个区域的内孤立波的振幅与水深的散点分布图,绘制出拟合曲线,如图 10 所示.图 10(a)为文昌海域内孤立波振幅与水深的关系,其拟合函数为  $y=0.14x+13.00$ ,相关系数为 0.79,图 10(b)为东沙岛附近海域的内孤立波振幅与水深的关系,其拟合函数为  $y=0.06x+26.18$ ,相关系数为 0.91,图 10(c)为深海盆地的内孤立波振幅与水深关系,其拟合函数为  $y=0.07x-43.13$ ,相关系数为 0.81.可以看出,三个区域随着水深增加,内孤立波振幅都有明显增大的趋势,振幅与水深的关系呈正相关.



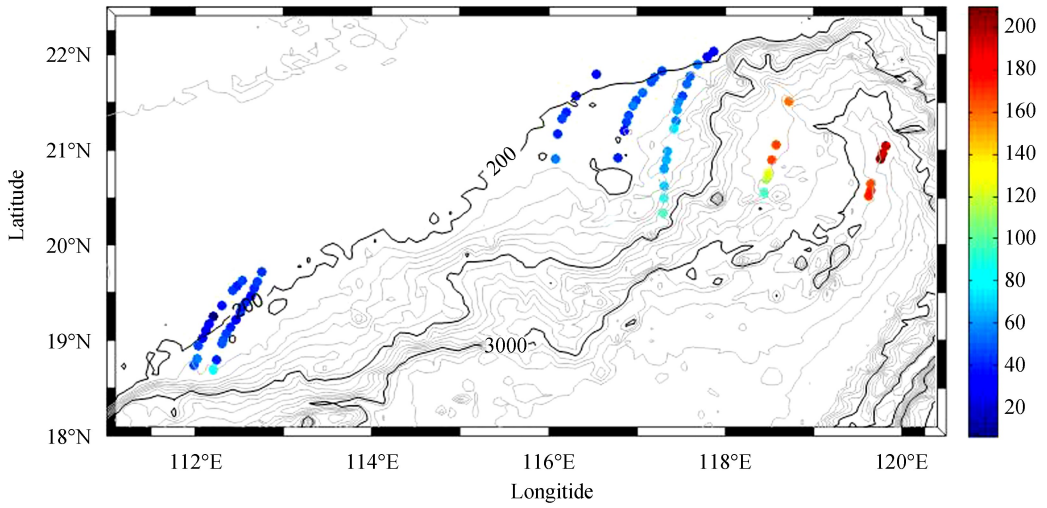
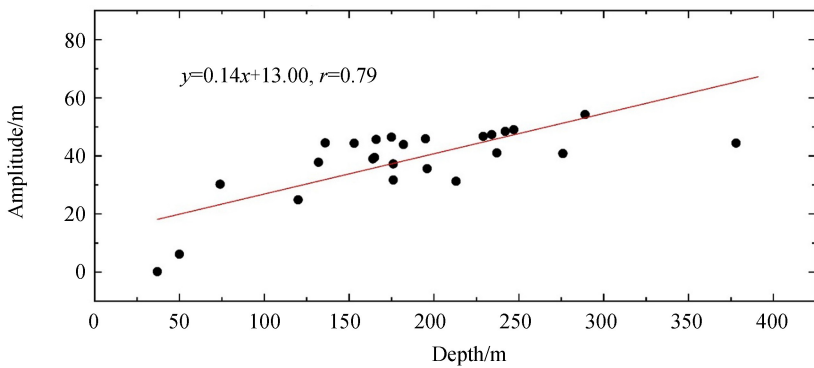
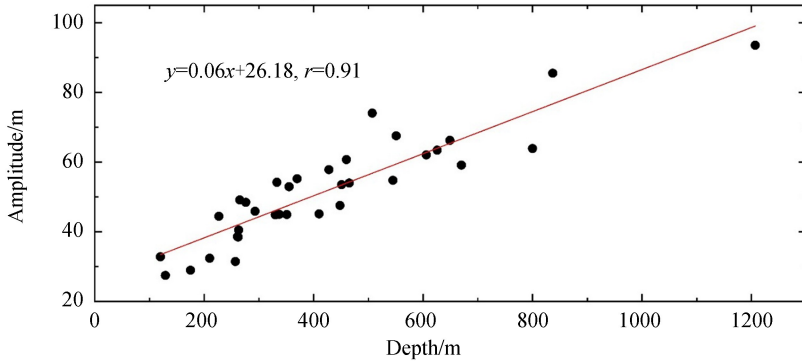


图9 单条内孤立波的振幅分布

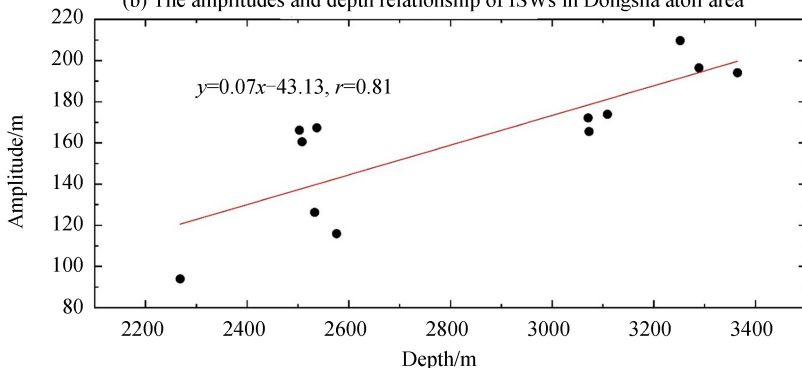
Fig.9 The amplitudes distribution of ISWs, and the colored dots indicate the amplitude position



(a) The amplitudes and depth relationship of ISWs in Wenchang area



(b) The amplitudes and depth relationship of ISWs in Dongsha atoll area



(c) The amplitudes and depth relationship of ISWs in deep-sea basin area

图10 内孤立波振幅与水深关系

Fig.10 Relationship between the depth of water and amplitudes of ISWs



## 4 结论

采用 MODIS 光学遥感数据,获得了南海北部(18°N-22°N,111°E-122°E) 2015 年 1 月到 2018 年 12 月共 328 景内孤立波图像,通过筛选、处理和计算获得 2 260 条单条内孤立波图像的特征参量数据集,利用 BP 神经网络算法,建立 4 种适用于南海北部深海与浅海的内孤立波振幅反演模型.将模型反演得到的内孤立波振幅与实测振幅进行对比检验,所设计模型的精度满足内孤立波测量要求,为内孤立波振幅的反演提供了新的方法.利用最优模型对南海文昌、东沙岛附近以及深海盆地内孤立波光学遥感图像进行计算,得到了南海从浅海到深海的内孤立波振幅分布,振幅分布与水深呈正相关,水深增加,振幅增大.同一水深对应的振幅大小存在差异,可能与海水的层化深度以及内波能量有关.南海北部海域同一条内孤立波波峰线上各点的振幅不相同,同一条内孤立波,振幅分布随着水深增加,振幅相应增大.为掌握南海北部内孤立波振幅特征提供了参考.

### 参考文献

- [1] ALFORD M H, PEACOCK T, MACKINNON J A, *et al.* The formation and fate of internal waves in the South China Sea[J]. *Nature*, 2015, **521**: 7550.
- [2] ZHANG Xiao-jiang, HUANG Xiao-dong, ZHANG Zhi-wei, *et al.* Polarity variations of internal solitary waves over the continental shelf of the Northern South China Sea: impacts of seasonal stratification, mesoscale eddies, and internal tides [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2018, **48**(6): 1349-1365.
- [3] LI X, JACKSON C R, PICHEL W G. Internal solitary wave refraction at Dongsha Atoll, South China Sea [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(12): 3128-3132
- [4] ALFORD M H, LIEN R C, SIMMONS H, *et al.* Speed and evolution of nonlinear internal waves transiting the South China Sea [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, **40**(6): 1338-1355.
- [5] CAI Shu-qun, XIE Jie-shuo. A propagation model for the internal solitary waves in the northern South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2010, **115**(12): C12074.
- [6] HSU M K, LIU A K, LIU C. A study of internal waves in the China Seas and Yellow Sea using SAR [J]. *Continental Shelf Research*, 2000, **20**(4): 389-410.
- [7] MENG Jun-min, ZHANG Jie. SAR imagery in studying internal waves in the Northern of South China Sea [C]. SPIE, 2003, 4892.
- [8] SHAND J A. Internal waves in Georgia Strait [J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1953, **34**(6): 849-856.
- [9] BAI Xiao-lin, LIU Zhi-yu, LI Xiao-feng, *et al.* Generation sites of internal solitary waves in the southern Taiwan Strait revealed by MODIS true-colour image observations [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, **35**(11-12): 4086-4098.
- [10] SUN Li-na, ZHANG Jie, MENG Jun-min. Analysis of characteristics of spatial and temporal distributions of large amplitude internal waves in the South China Sea using MODIS [J]. *Advances in Intelligent Systems Research*, 2014, **102**: 801-805.
- [11] WANG Juan, HUANG Wei-gen, YANG Jing-song, *et al.* The distribution, sources, and propagation of internal waves in South China Sea based on satellite remote sensing [C]. SPIE, 2011, **8006**(1): 85.
- [12] GAN Xi-lin, HUANG Wei-gen, YANG Jing-song, *et al.* The study of spatial and temporal distribution characteristics of internal waves in the South China Sea from multi-satellite data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, **22**(2): 242-245.
- [13] JACKSON C. Internal wave detection using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, **112**(C11): C11012.
- [14] HUANG Xiao-dong, ZHAO Wei. An extreme internal solitary wave event observed in the northern South China Sea [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 30041
- [15] ZHENG Quan-an, YUAN Ye-li, KLEMAS V, *et al.* Theoretical expression for an ocean internal soliton synthetic aperture radar image and determination of the soliton characteristic half width [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, **106**(C12): 31415-31424.
- [16] HUANG Xiao-dong, ZHAO Wei. Information of internal solitary wave extracted from MODIS image: a case in the deep water of northern south china sea [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, **22**(7): 19-23.  
黄晓冬, 赵玮. 基于 MODIS 图像的内孤立波信息反演——以南海北部深水区为例 [J]. *中国海洋大学学报自然科学版*, 2014, **44**(7): 19-23.
- [17] HUANG Xiao-dong, CHEN Zhao-hui, ZHAO Wei, *et al.* An extreme internal solitary wave event observed in the northern South China Sea [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 30041.
- [18] ZHANG Xu-dong, WANG Jing, SUN Li-na, *et al.* Study on the amplitude inversion of internal waves at Wenchang area of the South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, **35**(7): 14-19.