

基于 MODIS 遥感影像的直布罗陀海峡内波传播特性研究

史璐, 王晶, 梅源

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 选用 2014—2016 年直布罗陀海峡地区中分辨率成像光谱仪(MODIS)观测图像作为数据源, 获得了内波时空分布特征。光学遥感图像观测到内波在 Camarinal 海底山脊东侧生成, 集中分布在地中海西部, 呈弧形向东传播; 内波的时间分布表现为随季度呈周期性变化, 每年的第二、三季度为内波活跃期。为了进一步研究直布罗陀海峡内波的生成与传播特性, 使用麻省理工学院通用环流模型(MITgcm), 通过海面高程变化、等温线变化分析半日潮与海底山脊的相互作用, 在海峡口附近生成弧形向东内波, 随着水深增大, 频散效应增强, 振幅减小。在传播过程中, 内波分裂成波包, 波峰线之间的宽度和弧形半径增大, 波包中内波的数目增多。模拟计算结果与光学遥感观测结果一致。

关键词 遥感; 内波; 中分辨率成像光谱仪; 直布罗陀海峡

中图分类号 P731.24; P236

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.012802

Propagation Characteristics of Internal Waves in the Strait of Gibraltar Based on MODIS Remote Sensing Images

Shi Lu, Wang Jing, Mei Yuan

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

Abstract The moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) images from 2014 to 2016 are collected in the Strait of Gibraltar (SOG). The temporal and spatial characteristics of internal waves are analyzed statistically based on MODIS images. The optical remote sensing images show that internal waves generate at the east of Camarinal sill, and concentrate at the western Mediterranean. The eastward propagation internal waves have arc-like shape. The temporal distribution of internal waves shows that the majority of internal waves are observed in the second and third quarters. The generation and propagation characteristics of internal waves in the SOG are further studied by Massachusetts Institute of Technology general circulation model (MITgcm). Through the change of surface elevations and isotherms, the interaction between barotropic tide and the sill of the SOG is analyzed. The arc-like eastward internal waves are generated nearby the jaw. The amplitude decreases with the increase of water depth and the strengthening of dispersion effect. The east propagating internal waves disintegrate into a train of rank-ordered internal waves packets in the process of propagation. In addition, the width between the crest lines and the radius of the arc-like crest line increase. The number of inertial wave in the wave packet increases. The simulation results are consistent with the results observed by optical remote sensors.

Key words remote sensing; internal wave; moderate-resolution imaging spectroradiometer; the Strait of Gibraltar

OCIS codes 280.4788; 010.0280; 100.2000

收稿日期: 2017-07-14; **收到修改稿日期:** 2017-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(61171161)

作者简介: 史璐(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋内波方面的研究。E-mail: monica_shilu@163.com

导师简介: 王晶(1962—), 女, 博士, 教授, 主要从事光纤光学和海洋内波方面的研究。

E-mail: wjing@ouc.edu.cn(通信联系人)

1 引言

内波的生成、传播都发生在水下,随机性很大,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,很难得到足够的全面的有效数据。目前,光学遥感数据源丰富,其中,中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感影像覆盖范围广,空间分辨率高,公开免费,不仅应用于海洋内波研究,还应用于海水光信道、中国近海气溶胶特性研究等方面^[1-3]。Bai等^[4]利用MODIS图像分析了台湾南部海域内波空间特征,并进一步分析了其激发源地。Jackson^[5]利用MODIS真彩色图片研究了全球内波的分布情况,利用2002年8月—2004年5月共21个月的3581幅内波MODIS图像,给出了全球7大地区的内波特征。现在,MODIS在内波探测方面的贡献已经达到、甚至在某些方面超过了合成孔径雷达(SAR)。

直布罗陀海峡是内波的高发区,已有学者针对该海域的内波生成、传播及消亡进行研究^[6-10]。La Violette等^[11]通过航天飞机照片发现直布罗陀海峡西部是有内波的;Richez^[12]利用SAR捕获到内波。科学家针对内波的生成机制和传播特性进行了大量研究。La Violette等^[13]根据实测数据指出直布罗陀海峡水体中产生的强烈震荡是由潮汐速度增加引起的。Wesson等^[14]由实测数据得到半日潮经过直布罗陀海峡的Camarinal山脊后,转变成内波。Pierini^[15]基于Benjamin-Ono(B-O)方程的弱非静水两层数值模型模拟海峡二维非线性内波,在

Spartel山脊和Camarinal山脊的西边强烈凹陷,生成向东传播的内波列。由于计算机条件的限制,目前大部分对内波的数值模拟均为二维实验,而内波的传播具有明显的三维特征,美国麻省理工学院利用不可压缩流体Navier-Stokes方程建立的麻省理工学院通用环流模型(MITgcm)软件系统可以模拟三维条件下的内波。Vlasenko等^[16]采用MITgcm,首次运用数值计算对南海北部的内波现象进行三维模拟,重点研究了内波的模式结构。Li等^[17]利用MITgcm模拟了南海西北部的内波,研究发现此处内波多数是由海潮与海底山脊相作用而形成。Guo等^[18]数值模拟了南海强内波后尾随的骑行在第二模态上的短内波。Pradha等^[19]首次用MITgcm对孟加拉湾西部地区的内波进行模拟,并将模型模拟值与真实有效观测数据进行了对比。da Silva等^[20]利用SAR图像和MITgcm非线性和非静力模拟研究了印度洋Mascarene Plateau内波的生成机制,利用SAR与MITgcm模型的结合可以研究不同发源地、不同类型的非线性波列。

2 光学遥感内波图像

2.1 MODIS 图像处理

直布罗陀海峡位于欧非大陆之间,是连接大西洋与地中海的唯一海上通道。Camarinal山脊为海底最高山,强烈的潮流与地形相互作用被认为是大振幅内波产生的主要发源地。利用Surfer软件绘制了直布罗陀海峡的水深地形图,如图1所示。

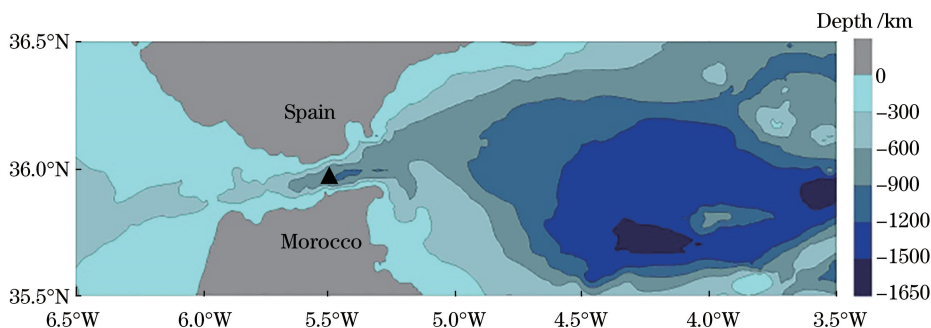


图1 直布罗陀海峡海底地形图。三角形表示海底Camarinal山脊位置

Fig. 1 Bathymetry of the Strait of Gibraltar. The triangle represents the position of Camarinal sill

所研究的直布罗陀海峡海区经纬度范围为北纬 $35^{\circ}\sim 37^{\circ}$ 和西经 $2^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 。鉴于内波波长可能有几十米到上千米的跨度,因此选用的是空间分辨率为250 m的MODIS图像,以求能提取绝大多数内波。选择2014—2016年的图像,采用ENVI软件对MODIS图像进行预处理^[21],将1波段($620\sim 670\ \mu\text{m}$)、2波段

($841\sim 876\ \mu\text{m}$)、1波段($620\sim 670\ \mu\text{m}$)合成伪彩色影像,影像呈现出绿地黑(偏蓝)海,便于观测内波。实验过程中不计入由于内波振幅小以及天气条件造成无法分辨的海洋内波,例如下雨影响了含有海洋内波的遥感影像的分辨,台风造成较大的风浪无法识别海洋内波,最后共筛选出61幅具有清晰内波轨迹的图

像。图 2 是 2016 年从直布罗陀海峡经过的 MODIS 遥感影像,从图 2 可以清楚地看到海峡附近的内波。

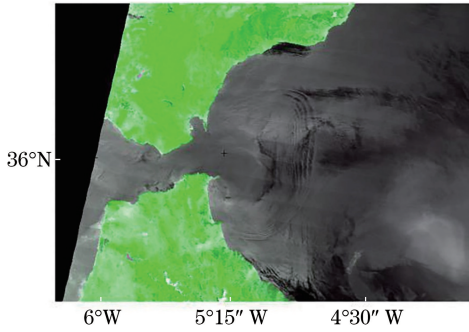


图 2 2016 年 MODIS 遥感影像观测到的直布罗陀海峡内波

Fig. 2 Internal waves of MODIS image in the Strait of Gibraltar in 2016

2.2 直布罗陀海峡内波空间分布特征

用 2014—2016 年 MODIS 图像统计勾勒出直布罗陀海峡内波波峰线位置(图 3),为区别每一景中的内波,波峰线用不同颜色来表示。

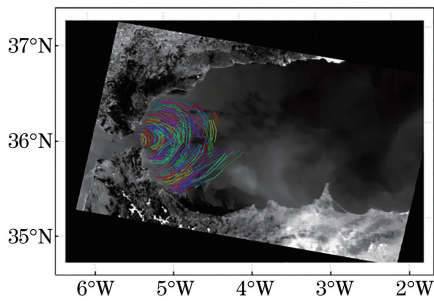


图 3 直布罗陀海峡内波空间分布图(2014—2016 年)

Fig. 3 Spatial distribution of internal waves in the Strait of Gibraltar (2014—2016)

从图 3 的空间分布上看,直布罗陀海峡东侧、地中海西侧是内波最频繁的地区,具体经纬度范围为 $4.5^{\circ}\text{W}\sim 5.2^{\circ}\text{W}$, $35.5^{\circ}\text{N}\sim 36.5^{\circ}\text{N}$ 。内波出现在直布罗陀海峡以西,在海峡口 (5.2°W 左右) 波峰线呈半圆弧形向东传播,内波分裂成波包,每组波包中有 3~10 条内波波峰线,波前的波峰线最长,依次递减,随着水深增加,其振幅减小,波包中相邻内波间的距离越来越大,波峰线的宽度和弧形半径越来越大(图 4),这可能与传播过程中频散效应增强导致振幅减小、半峰全宽增大有关,在 4°W 以东基本无内波出现。

图 4(a)观测到的内波包在 5.2°W 附近,而 5.2°W 是内波开始出现的位置,从图 4(a)可以看出:内波包中有 3 条清晰的圆弧形内波波峰线,波峰线宽度窄且距离近;图 4(b)观测的位置在 4.7°W 附近,波包中有 5 条清晰的弧形内波波峰线,波峰线的宽度较图 4(a)

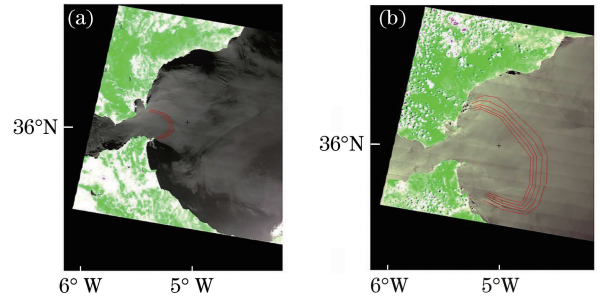


图 4 2014 年 MODIS 图像观测到直布罗陀海峡不同位置的内波包

Fig. 4 Internal wave packets in different locations in the Strait of Gibraltar in 2014

明显变宽,相邻波峰线的距离增大,这与内波传播过程中水深增大、频散效应增强有关。

从波峰线的推移方向上可以明显地看出,直布罗陀海峡的内波发源于 Camarinal 山脊 ($36^{\circ}\text{N}, 5.5^{\circ}\text{W}$)。

2.3 直布罗陀海峡内波时间分布特征

从 MODIS 图像中分析内波在每个月份中出现的天数,分析结果见图 5。

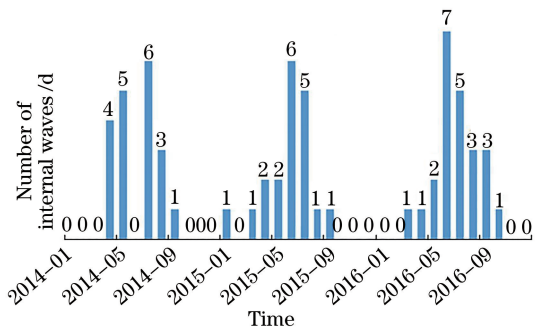


图 5 2014—2016 年内波时间分布统计图

Fig. 5 Temporal distribution of internal waves (2014—2016)

从图 5 可以看到内波的产生随季度呈周期性变化。1 月份时就有内波出现,至 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开始衰减;11 月和 12 月内波发生的频率很低。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。

根据 MODIS 图像中内波发生天数与总天数之比,计算出各季度内波发生频率,如图 6 所示。

由图 6 可以发现,内波出现的时间特性是存在的。每年二(4—6 月)、三(7—9 月)季度达到最大值,一(1—3 月)、四(10—12 月)季度内波的出现很少。由此可见,在二、三季度,海上航行更容易受到内波的影响。

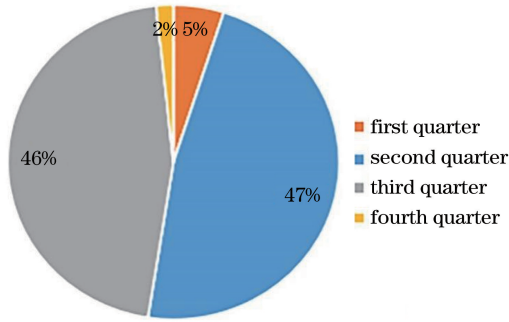


图6 内波发生频率分布

Fig. 6 Frequency distribution of internal waves

3 内波传播特性

3.1 建立 MITgcm

将 Navier-Stokes 流体动力学方程驱动的 MITgcm 应用于海洋,模拟海洋内波。任何时候,流体状态都由速度矢量 \mathbf{v} , 温度 θ 和盐度 S , 重力势能 ϕ 和密度 ρ 等量的分布来描述。其中密度 ρ 是依赖于 θ, S 的函数。

3.1.1 控制方程

将通用的垂直坐标 r 应用于方程中,模式的控制方程可表示如下:水平动量方程为

$$\frac{d\mathbf{v}_h}{dt} + (2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v})_h + \nabla_h \phi = \Gamma_{v_h}, \quad (1)$$

垂向动量方程为

$$\frac{dr}{dt} + \mathbf{k} \cdot (2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}) + \frac{\partial \phi}{\partial r} + b = \Gamma_r, \quad (2)$$

连续方程为

$$\nabla_h \cdot \mathbf{v}_h + \frac{\partial r}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

状态方程为

$$b = b(\theta, S, r), \quad (4)$$

位温方程为

$$\frac{d\theta}{dt} = Q_\theta, \quad (5)$$

盐度或湿度方程为

$$\frac{dS}{dt} = Q_s, \quad (6)$$

式中 r 是垂向坐标, $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla$ 是全微分, $\nabla =$

$\nabla_h + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial r}$ 为梯度算子, ∇_h 为水平梯度算子, $\mathbf{k} \frac{\partial}{\partial r}$ 为垂向梯度算子, \mathbf{k} 为垂向单位矢量, t 为时间, \mathbf{v} 为速度矢量, ϕ 为压强或重力势能, $\boldsymbol{\Omega}$ 为自转角速度, b 为浮力, θ 为位温, S 对大气来说是比湿度,对海洋

来说是盐度, Γ_{v_h} 、 Q_θ 、 Q_s 分别指的是速度、位温和盐度的强迫和耗散项。

3.1.2 研究区域设置

采用三维非静力 MITgcm 对 $3.5^\circ\text{W} \sim 6.5^\circ\text{W}$, $35.5^\circ\text{W} \sim 36.5^\circ\text{N}$ 的海域内波生成与传播过程进行模拟,海域面积为 $269 \text{ km} \times 111 \text{ km}$ 。 x 方向(东西方向)空间分辨率设为 224 m ,网格数为 1200 个,这足够观察到详细的内波结构。 y 方向(南北方向)空间分辨率为 1850 m ,网格数为 60 个。 z 方向(垂直方向)共分为 25 层,垂直网格分辨率在表面附近为 10 m ,模拟水深为 1395 m ,从上至下分层水深逐渐增大。为了避免正压波和斜压波的反射,在东西方向设置开边界添加海绵层区域。Tiemann 等^[22] 提出在直布罗陀海峡的海水中,上层是向东流动的大西洋的高温水,下层是向西流动的低温水,上层较薄,约 100 m ,分层结构明显且稳定。该区域的初始的温度 $T(z)$ 和盐度 $S(z)$ 的分布均来源于 World Ocean Atlas (2009) 的年平均数据。

在模型中,使用 Vlasenko 等^[16] 的方法,采用周期性的正压潮流驱动,在动量方程中增加额外项来驱动 MITgcm,即在纬度方向和经度方向增加外部驱动力:

$$F_x = \frac{UH_0}{H(x, y) \sigma \cos(\sigma t)}, \quad (7)$$

$$F_y = \frac{UH_0}{H(x, y) f \sin(\sigma t)}, \quad (8)$$

式中 H_0 是水深,在 H_0 处正压潮速度为 U ,潮汐频率为 σ ; $H(x, y)$ 是局地水深; f 是科氏参数。本次模拟区域的纬度大约在 36°N ,因此科氏参数取为 $f = 2\boldsymbol{\Omega} \sin \theta \approx 8.6 \times 10^{-5}$ 。按经验值选取黏性系数和扩散系数以满足 MITgcm 用户手册中要求的数值稳定性判据。时间步长设为 5 s ,以便很好地满足 Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) 条件,保证模式的稳定性和收敛性。选取半日潮 M_2 进行模式的驱动,潮汐周期 $T = 12.4 \text{ h}$ 。模式所用的初始正压潮为正弦波,以速度的形式给出,则其波形为 $U = U_0 \sin(2\pi t/T)$, U_0 为最大水平速度,选取 $U_0 = 0.3 \text{ m/s}$ 。模式驱动 5 个潮流周期。

3.2 内波生成与传播的海面高程变化

内波是发生在海水内部的波动,但是这种波动会影响海表面的起伏,对其起到调制作用。如果一开始海表面没有波动,则在潮流驱动下可以通过海表面的起伏来判断海洋内波的特征。将数值模拟结果中的海面高程(Eta)数据以灰度图的形式绘制,得

到内波生成传播过程的海面高程图如图 7 所示,其中黑框红线表示 19.84 h 生成的内波的位置,红框蓝线表示 29.76 h 生成的下一组内波的位置。由图 3 MODIS 遥感影像统计内波空间分布规律得出该区域内波集中出现在 $4.5^{\circ}\text{W}\sim 5.2^{\circ}\text{W}$, $35.5^{\circ}\text{N}\sim 36.5^{\circ}\text{N}$ 范围内,选取 $3.5^{\circ}\text{W}\sim 6.5^{\circ}\text{W}$, $35.5^{\circ}\text{N}\sim 36.5^{\circ}\text{N}$ 的区域进行模拟,更好地分析内波生成与传播的规律。初始时

刻 $t=0$ h,海表面没有起伏,此刻的海表面位置为平衡位置,位移设为 0。之后,若海表面有正向(东)位移,则颜色加深,若海表面有负向(西)位移,则颜色变浅。即在正向位移时,偏离平衡位置的位移越大,颜色越深,而在负向位移时则越浅。图 7 表示在 2.8 个周期(34.72 h)内海表面起伏图,时间间隔为 0.4 个周期,即 4.96 h。

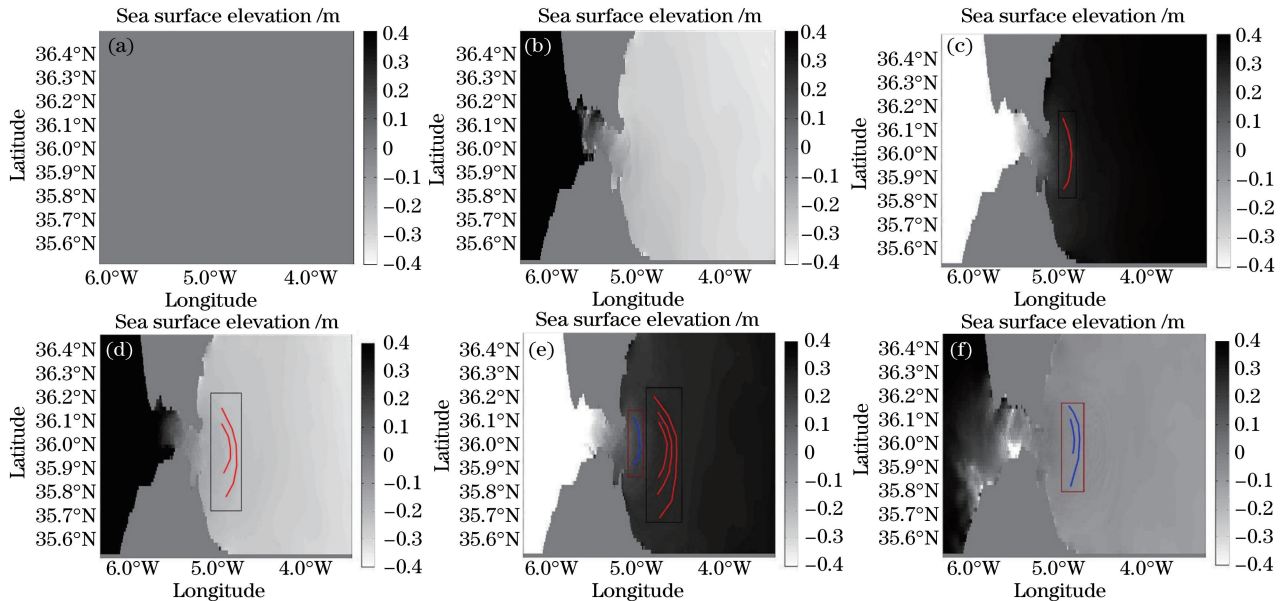


图 7 内波生成传播过程的海面高程图。

(a) $t=0$ h; (b) $t=14.88$ h; (c) $t=19.84$ h; (d) $t=24.8$ h; (e) $t=29.76$ h; (f) $t=34.72$ h

Fig. 7 Sea surface elevation for generation and propagation of internal waves.

(a) $t=0$ h; (b) $t=14.88$ h; (c) $t=19.84$ h; (d) $t=24.8$ h; (e) $t=29.76$ h; (f) $t=34.72$ h

由图 7 可以看出,一开始海表面没有起伏,随后海表面出现轻微的变化,直到 $t=19.84$ h[图 7(c)]时,大约在 5°W 的位置,出现了灰度一致且异于两侧的弧形,说明该处存在内波,这一线条可以代表内波的波峰线,之前的海面高程变化无内波出现[图 7(b)]。之后,波峰线向东运动,宽度增加,弧形半径增大,内波列中内波数目增多,距离增大,与图 3 空间分布统计规律一致。在 $t=29.76$ h 时,内波列传播至大约 4.6°W 的位置,且在大约 5°W [图 7(e)中红框]位置新的单根内波生成。在 $t=34.72$ h 时,图 7(f)黑框中未发现内波列,内波列基本消失,红框中内波分裂成波包,波前传播至 4.5°W 附近,波峰线宽度增大。内波集中分布在 $4.5^{\circ}\text{W}\sim 5.2^{\circ}\text{W}$, $35.5^{\circ}\text{N}\sim 36.5^{\circ}\text{N}$ 的海域,与图 3 中基于 MODIS 遥感影像直布罗陀海峡附近海洋内波的空间分布相一致。

3.3 内波生成与传播的等温线变化

由海面高程变化得知,内波在一个周期内产生

消亡,因此选取模拟区域在 36°N 处一个潮周期内的等温线截面,根据截面上不同时刻等温线的波动情况来观测内波的生成和传播过程(图 8)。由于密度跃层大约在 100 m 左右,图 8 仅描绘水深 1000 m 以内的温度变化情况,图中黑色细实线表示跃层 100 m 处 17°C 等温线变化,黑框内为内波出现区域。

由等温线变化得知半日潮经过 Camarinal 山脊(5.5°W)激烈分裂,在 $t=17.36$ h[图 8(a)]时,内波在 5.24°W 附近形成,之后较为稳定地继续向东传播,如图 8 黑色矩形框圈起的部分所示,这与图 3 中基于 MODIS 遥感影像直布罗陀海峡附近海洋内波的空间分布图在 5.2°W 附近开始发现半圆弧形内波的分析一致,而 Wesson 等^[14]由实测数据证实直布罗陀海峡内波是由半日潮经过 Camarinal 山脊生成。当内波传播至 $t=19.84$ h [图 8(b)],由于非线性增强,波形变陡,振幅增大,内波分裂成波包,当传播至 24.8 h[图 8(d)]时,一

个波包内包含 3 个内波。在传播过程中,随着水深变深,频散效应增强,导致振幅减小,半峰全宽变大,这很好地解释了光学遥感图像统计得到的

空间分布中水深越深、波包中波峰线之间距离越远的原因。当内波传播至 29.76 h[图 8(f)]时,振幅很小,内波趋于消散。

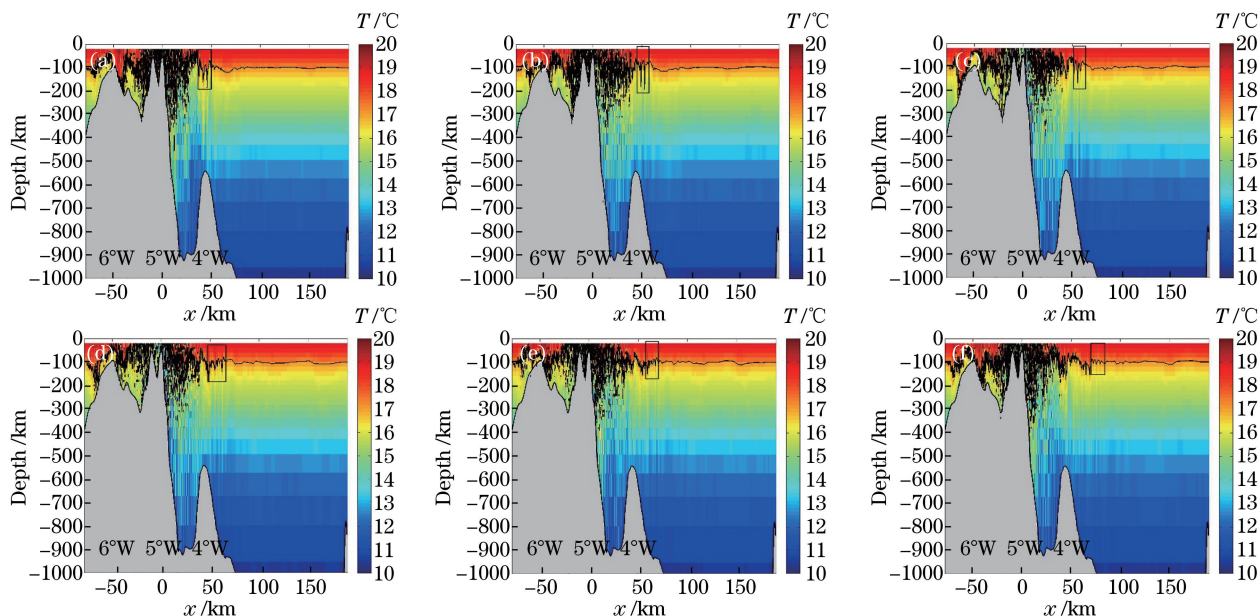


图 8 内波生成传播过程的截面等温线图。

(a) $t=17.36$ h; (b) $t=19.84$ h; (c) $t=22.32$ h; (d) $t=24.80$ h; (e) $t=27.28$ h; (f) $t=29.76$ h

Fig. 8 Cross-section of isotherm for generation and propagation of internal waves.

(a) $t=17.36$ h; (b) $t=19.84$ h; (c) $t=22.32$ h; (d) $t=24.80$ h; (e) $t=27.28$ h; (f) $t=29.76$ h

4 结 论

根据 2014—2016 年的 MODIS 数据,对直布罗陀海峡内波的空间分布与时间规律进行了统计分析。由空间分布可以看出,靠近直布罗陀海峡的海域($35.5^{\circ}\text{N}\sim 36.5^{\circ}\text{N}$, $4.5^{\circ}\text{W}\sim 5.2^{\circ}\text{W}$)是内波的高发区。内波自直布罗陀海峡发源,呈弧形向东传播,弧形波峰线的圆心汇聚在 Camarinal 山脊(5.5°W , 36°N),由此推测直布罗陀海峡的内波是半日潮经过 Camarinal 山脊反射处形成的。波峰线的宽度和弧形半径越来越大,波包中内波间的距离也越来越大。从时间分布上来看,内波集中出现在第二、三季度(4—9 月),第一、四季度出现较少。

随后建立了 MITgcm 下的内波模型,从海面高程、等温线两个方面展现了内波的生成和传播过程。半日潮在经过直布罗陀海峡与海底 Camarinal 山脊(5.5°W , 36°N)相互作用生成内波,弧形内波向东传播,振幅越来越小,波峰线宽度和半径越来越大,内波分裂成波包,波包中内波间的距离增大,与实际海域 MODIS 影像基本吻合。

参 考 文 献

[1] Fan J, Guo B F, He H C. Retrieval of aerosol optical

thickness with MODIS data over Hangzhou[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0101001.

范娇, 郭宝峰, 何宏昌. 基于 MODIS 数据的杭州地区气溶胶光学厚度反演[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0101001.

[2] Tang X, Yi W N, Du L L, *et al.* Adjacency effect correction study of GF-1 satellite multi-spectral remote sensing images[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0228003.

汤兴, 易维宁, 杜丽丽, 等. 高分一号卫星多光谱遥感图像邻近效应校正研究[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0228003.

[3] Ao J, Liu J Q, Ma C B. Inversion of seawater optical communication channel characteristics based on remote sensing data [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 120102.

敖珺, 刘静秋, 马春波. 利用遥感数据反演海水光信道特性[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 120102.

[4] Bai X, Liu Z, Li X, *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.

- [5] Jackson C. Internal wave detection using the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(C11): C11012.
- [6] Bryden H L, Candela J, Kinder T H. Exchange through the Strait of Gibraltar [J]. *Progress in Oceanography*, 1994, 33(3): 201-248.
- [7] Ziegenbein J. Short internal waves in the Strait of Gibraltar [J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1969, 16(5): 479-482.
- [8] Watson G, Robinson I S. A study of internal wave propagation in the Strait of Gibraltar using shore-based marine radar images [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1990, 20(3): 374-395.
- [9] Nihoul J C J. *Oceanography of semi-enclosed seas: Medapex: an international field experiment in the Western Mediterranean* [J]. Elsevier Oceanography, 1982, 34: 1-12.
- [10] Brandt P, Alpers W, Backhaus J O. Study of the generation and propagation of internal waves in the Strait of Gibraltar using a numerical model and synthetic aperture radar images of the European ERS 1 satellite [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(C6): 14237-14252.
- [11] La Violette P E, Arnone R A. A tide-generated internal waveform in the western approaches to the Strait of Gibraltar [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1988, 93 (C12): 15653-15667.
- [12] Richez C. Airborne synthetic aperture radar tracking of internal waves in the Strait of Gibraltar [J]. *Progress in Oceanography*, 1994, 33(2): 93-159.
- [13] La Violette P E, Lacombe H. Tidal-induced pulses in the flow through the Strait of Gibraltar [J]. 1988, 9: 13-27.
- [14] Wesson J C, Gregg M C. Mixing at Camarinal sill in the Strait of Gibraltar [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C5): 9847-9878.
- [15] Pierini S. A model for the Alboran Sea internal solitary waves [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1989, 19(6): 755-772.
- [16] Vlasenko V, Stashchuk N, Guo C, *et al.* Multimodal structure of baroclinic tides in the South China Sea [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2010, 17(5): 529-543.
- [17] Li D, Chen X, Liu A. On the generation and evolution of internal solitary waves in the northwestern South China Sea [J]. *Ocean Modelling*, 2011, 40(2): 105-119.
- [18] Guo C, Vlasenko V, Alpers W, *et al.* Evidence of short internal waves trailing strong internal solitary waves in the northern South China Sea from synthetic aperture radar observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 542-550.
- [19] Pradhan H K, Rao A D, Joshi M. Neap-spring variability of internal waves over the shelf-slope along western Bay of Bengal associated with local stratification [J]. *Natural Hazards*, 2016, 80 (2): 1369-1380.
- [20] da Silva J C B, Buijsman M C, Magalhaes J M. Internal waves on the upstream side of a large sill of the Mascarene Ridge: a comprehensive view of their generation mechanisms and evolution [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, 99: 87-104.
- [21] Zhang J H, Jing Y G. 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.
- [22] Tiemann C O, Worcester P F, Cornuelle B D. Acoustic scattering by internal solitary waves in the Strait of Gibraltar [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2001, 109(1): 143-154.