

陆架区海洋内波传播特性遥感方法分析

高国兴^{1),2)} 王振占²⁾ 陈 标¹⁾ 刘翠华¹⁾ 张本涛¹⁾

¹⁾(海军潜艇学院, 青岛 266071) ²⁾(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

摘 要 应用 ENVISAT-ASAR 数据对南海东北部的海洋内波进行研究,用遥感方法反演得到一组内波参数,分析了海底地形变化趋势对内波传播的影响,给出内波参数与地形变化之间的统计关系。通过分析得出内波的传播方向并不完全与海底地形变化一致。这对于前向内波理论本身和应用卫星遥感方法对内波参数获取研究具有重要意义。

关键词 合成孔径雷达 海洋内波 陆架坡 群速

中图法分类号: P237 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)05-790-06

Analysis of Propagating Characteristics of the Internal Waves on Continental Shelf with Remote Sensing Approach

GAO Guoxing^{1),2)}, WANG Zhenzhan²⁾, CHEN Biao¹⁾, LIU Cuihua¹⁾, ZHANG Bentao¹⁾

¹⁾(Navy Submarine Academy, Qingdao 266071)

²⁾(Center for Space Science and Applied Research Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract A study of internal waves occurring in the northeastern South China Sea with ENVISAT-ASAR data is presented. Using the remote sensing analyzing approach, a group of parameters of the internal waves is retrieved from synthesize aperture radar(SAR) image. The influence of the topographic variation on the propagation of internal waves is analyzed and the relation between the topographic variation and parameters of the internal waves is given. It is concluded that the direction of internal waves is incompletely consistent with the gradation of benthic topography and that the variation of topography on the shelf is one of the important factors of nonlinear effect on the propagation of internal waves. It is beneficial to research on internal waves' theory and retrieval modeling for internal waves' parameters using remote sensing data.

Keywords synthesize aperture radar, internal waves, continental shelf slope, group velocity

0 引 言

自 1978 年美国 SeaSat 卫星的重要载荷合成孔径雷达(SAR)发现海洋内波以来,通过星载或机载遥感器获取的遥感图像对海洋内波问题进行研究^[1-6],就一直是海洋遥感领域的研究热点。在内波的正(前)向问题研究中,内波成因和内波传播特性研究是一个重要方向^[7],其中,KdV理论在非线性内波研究中应用非常广泛,能够深刻揭示内波以孤立波形式传播的非线性特性。而对于内波反问题

的研究,就是通过遥感图像中内波的海面效应,获取内波传播参数。对于这样的海洋非线性问题,直接求解难度很大,不仅是由于内波的非线性,而且是因为内波的波函数是一个关于时空、海底地形(水深)、跃层(水平分层)、海面风场、潮流等变量相作用的复杂的多元函数;另一方面内波 SAR 成像过程也受雷达参数,如 SAR 系统的工作波长、入射角、雷达视向与内波传播方向的夹角、方位角及海面风速等诸多因素的影响^[1],具有很大的不确定性。尽管如此,内波的反向建模并不是不可能。一方面多传感器、多时相的遥感图像从不同的侧面揭示了海洋

收稿日期:2008-10-15;改回日期:2009-02-19

第一作者简介:高国兴(1972—),男,讲师。中国科学院空间科学与应用研究中心博士研究生。研究方向为微波遥感与应用研究,已发表论文 10 多篇。E-mail:gaoguoxing@sohu.com

内波的存在与探测的可行性,更为幸运的是人们找到了 KdV 方程的一组孤立波解^[8-10](椭圆余弦波解的一种),这就为内波反向建模问题的研究提供了一条较为方便的途径。

本文对内波的研究正是从 KdV 方程的一组孤立波解出发,根据 SAR 图像的内波海面特性得到内波的参数;另一方面,由于应用孤立波法进行内波参数反演有一定局限性,因此,本文分析了内波区海底地形变化对内波传播参数的影响,给出了内波参数与地形变化之间的统计关系,指出内波的传播方向并不完全与海底地形变化一致。这对于内波理论本身在和应用卫星遥感方法研究内波参数获取问题具有重要意义。

1 内波传播非线性理论与内波参数的反演方法

内波在传播过程,由于陆架坡斜度的剧烈变化等因素引起波传播的非线性作用增强,产生波的弥散效应,这一非线性过程可以用 KdV 理论描述,其表达式为

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (c_0 + \alpha \eta + \alpha_1 \eta^2) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \kappa \eta - \frac{\varepsilon}{2} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

式中, η 为内波的纵向位移, t 为时间,参数 $c_0, \alpha, \alpha_1, \beta, \kappa$ 和 ε 分别为线性项、一阶非线性项、二阶非线性项、弥散项、浅水项和耗散项系数。

如果不考虑二阶非线性项,浅水项和耗散项,KdV 方程可以简化为

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (c_0 + \alpha \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \gamma \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0 \quad (2)$$

其中,

$$\alpha = \frac{3c_0}{2} \frac{\int_{-h}^0 \left(\frac{d\phi}{dz}\right)^3 dz}{\int_{-h}^0 \left(\frac{d\phi}{dz}\right)^2 dz}, \quad \gamma = \frac{c_0}{2} \frac{\int_{-h}^0 \phi^2 dz}{\int_{-h}^0 \left(\frac{d\phi}{dz}\right)^2 dz} \quad (3)$$

函数 $\phi(z)$ 表示内波的垂向无量纲本征函数,在不考虑水平流、地球自转和 Boussinesq 近似条件下, $\phi(z)$ 满足垂向本征方程:

$$\frac{d^2 \phi}{dz^2} + \left[\frac{N^2(z)}{\omega^2} - 1 \right] k^2 \phi = 0 \quad (4)$$

边界采用钢盖近似,即 $\phi(-H) = \phi(0) = 0$, ω 为内波的角频率, k 为内波的波数, H 为海水深度, $N^2(z)$ 为 Brunt-Väisälä 频率。

KdV 方程存在一组非线性的孤立波解,由 Osborn 和 Burch^[8] 给出,形式为

$$\eta = \eta_0 \phi(z) \operatorname{sech}^2 \left(\frac{(x - x_c) - ct}{L} \right) + O(\varepsilon, \delta) \quad (5)$$

式中, x_c 是孤立波所处的位置, η_0 是孤立波的最大振幅, c 是相速, L 是孤立波的半宽度, $O(\varepsilon, \delta)$ 表示关于坐标尺度参数 ε 和流体分层强度参数 δ 的高阶小量。

对于 KdV 方程孤立波解在多个领域已经得到了很好的研究^[11],并得到了孤立波波形参数和非线性项之间的关系,并可以由此计算内波参数。考虑一个二层海洋模式,近似的内波群速、波长、相速、振幅和内波流速可以得出。

1) 内波群速

通过 SAR 图像实现对内波群速度测量,首先应确定在 SAR 图像数据中至少要含有两个相连接同源波列群或孤立波波包之间的间距离 D_g ,实际计算中对于海底地形变化比较复杂的海域,内波的波向变化多样,因此仅从 SAR 图像中严格确定波包之间的间距并不现实,也必然会存在一定的误差。另一方面,对于内波群速的计算需要已知内波的传播周期,通过对南海北部内潮特征的研究^[12],认为在低纬度,全日潮流占总流动的较大比重,内潮的周期主要为全日潮周期,因此,如果假定内波是由潮流引起(这一假定的合理性已为大量的研究^[4]证实),则内波波群的传播周期应为 $T_g = 2 \times 12.42$ 。内波群速可直接由 $V_g = D_g / T_g$ 得到。

2) 内波的波长

对于内波波长根据 Small 的研究^[10],可以由孤立波包在从 SAR 图像中呈现的明暗相间的条纹的间距 D 中给出,并满足关系

$$D = 1.32L \quad (6)$$

式中, L 为孤立波半振幅宽度,这是 SAR 内波图像和内波参数之间的重要关系。

3) 内波相速

由海洋内波二层模式理论分析,并假设上层厚度 h_1 就是密度跃层深度,下层厚度为 $h_2 = H - h_1$,其中 H 是水深。根据内波频散关系可得出相速 c_n 为

$$c_n = \left(\frac{g \Delta \rho}{k \rho [\coth(k \cdot h_1) + \coth(k \cdot h_2)]} \right)^{1/2} \quad (7)$$

式中, g 是重力加速度, ρ 是海水平均密度, $\Delta \rho$ 是上下两层海水的密度差, k 是波数,下标 n 代表内波的模态。

根据二层海洋系统假设,对应于最低模态内波相速可表示为

$$c_0 = \left[\frac{g\Delta\rho h_1 h_2}{\rho(h_1 + h_2)} \right]^{1/2} \quad (8)$$

4) 内波振幅和内波流速

根据 KdV 方程孤立波解中,特征参数之间的关系

系^[10] $L^2 = \frac{12\gamma}{\eta_0\alpha}$,以及二层系统中参数 γ 和 α 的表示

$\gamma = \frac{h_2 h_1}{6}, \alpha = \frac{3 h_2 - h_1}{2 h_2 h_1}$,可以得到内波振幅的表示式

$$\eta_0 = \frac{4 (h_1 h_2)^2}{L^2 (h_2 - h_1)} \quad (9)$$

由式(9)和孤立波解式(5)可以得到流速关系式为

$$u_n = -\eta_0 c_n \frac{d\phi_n}{dz} \operatorname{sech}^2\left(\frac{x - c_n t}{L}\right) \quad (10)$$

以上是从 KdV 理论出发与 SAR 内波图像相结合得到的内波参数的反演方法,因此,深入理解 KdV 方程对于内波问题的研究有重要意义。下面根据以上提供的方法对于特定的一组 SAR 图像对内波参数进行反演。重点分析地形变化对内波的影响。

2 内波参数反演及其传播特性分析

2.1 内波区水文特性分析

本文的内波研究区域位于南海北部,海南岛以东 100 km ~ 300 km 的海域,是海洋内波的多发区之一,应用三景 SAR 数据对该区域内波进行研究,如图 1 所示,在图中(1)~(2)处海底地势变化比较平

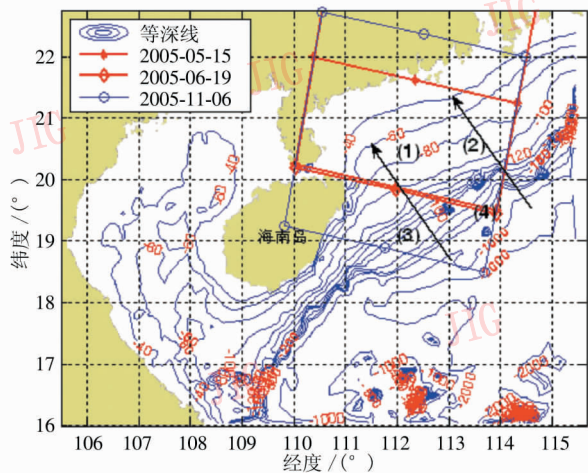


图 1 SAR 数据覆盖区与海洋深度示意图

Fig. 1 Sketch map of covering region of SAR data and isobath

缓,而在(3)~(4)处变陡,即存在明显的陆架深度剧烈变化的区域。在图 2 中画出了图 1 箭头线 1 (约 240 km)和箭头线 2 (约 250 km)所示位置的海底地形剖面图。另一方面,根据历史调查资料可知在 5 月份、6 月份及 11 月份该区的海洋上混合层深度分别约为 30 m,30 m 和 40 m,并且在该区域春、夏、秋季普遍存在着障碍层^[13];内波可能存在多个模态,且以多个模态叠加的形式存在,但是对内波最大振幅的影响主要是第一模态,其出现深度与混合层深度相一致。根据“有限深”和“浅水”理论^[14],在对内波问题的研究中,上混合层深度 h 是描述内波的特征尺度之一(内波振幅也是一个特征尺度),它与水深 H 之比(h/H)是以上理论采用的近似。而这一比值在海底地形变化剧烈区域有较显著变化。在图 1 中标出的(1)~(4)处的这个比值(以 30 m 混合层深度计算)分别约为:0.43,0.33,0.10 和 0.038。即在(1),(2)处为 1 阶小量,而(3),(4)处近似为 2 阶小量。

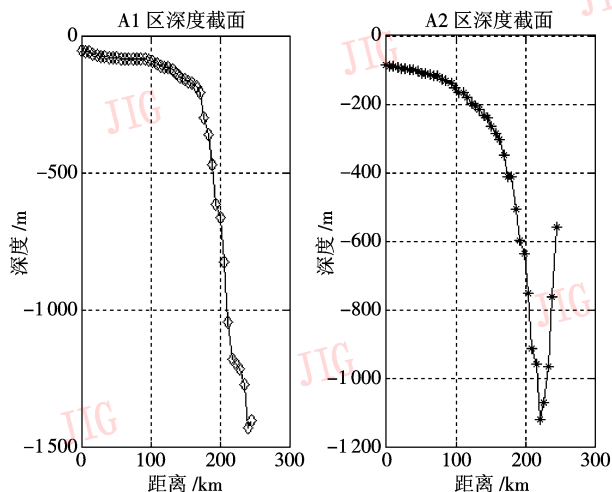


图 2 箭头线 1 和 2 所示区域陆架坡深度剖面图
Fig. 2 Section plane Fig of continental shelf depth of arrow 1 and 2 in Fig. 1

2.2 内波成因分析

对于该区域的内波的生成问题,一般认为潮流是内波生成的主要原因之一。首先,根据 Liu 对 ASIAEX 试验数据分析^[12]表明,黑潮的强流分支通过吕宋海峡进入南海海域是内波生成的一个重要原因。其二,在东沙群岛附近钻井平台记录的数据分析,也说明了黑潮的强流分支进入南海的情况。此外,历史资料分析表明,一般而言在 5,6 月份黑潮的强流分支比 11 月更有可能南下^[4]。

2.3 SAR 数据的内波参数反演与海底地形

对 ENVI-ASAR 的三景数据如图 3,4,5 所示,通过预处理后,内波在海面的效应更明显。根据 SAR 成像理论、海洋内波与表面波的波—波作用以及内波表面流与表面波相互作用理论可知,内波在 SAR 图像中强度变化与表面流速梯度成正比,但是其比率与 SAR 系统的工作波长、入射角、雷达视向与内波传播方向的夹角,方位角和海面风速等因素有关^[1]。内波在 SAR 图像中表示为有规律的亮暗相间条纹,并可以由此得出内波的波长参数 D ,并可以计算孤立波半振幅宽度。内波的传播方向可以直接从 SAR 图像中读出,图 3,4,5 中箭头方向即为内波传播方向。

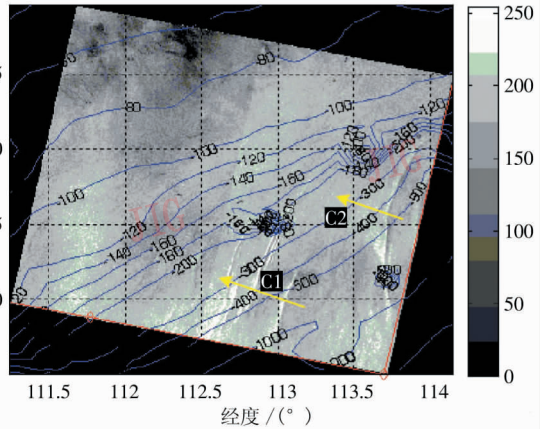


图 5 内波传播与海底地形(2005-11-06)
Fig.5 Propagation of internal waves and topography(2005-11-06)

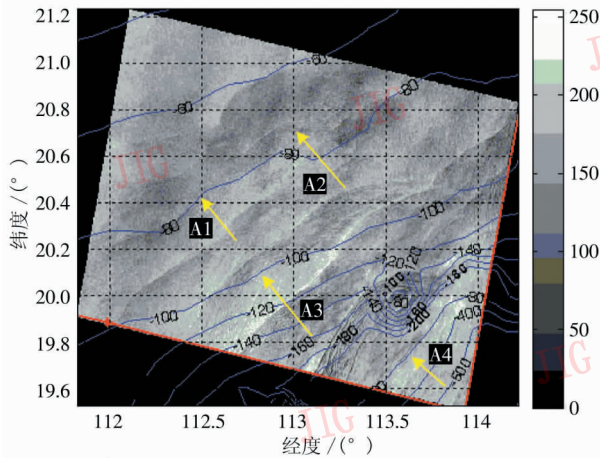


图 3 内波传播与海底地形(2005-05-15)
Fig.3 Propagation of internal waves and topography(2005-05-15)

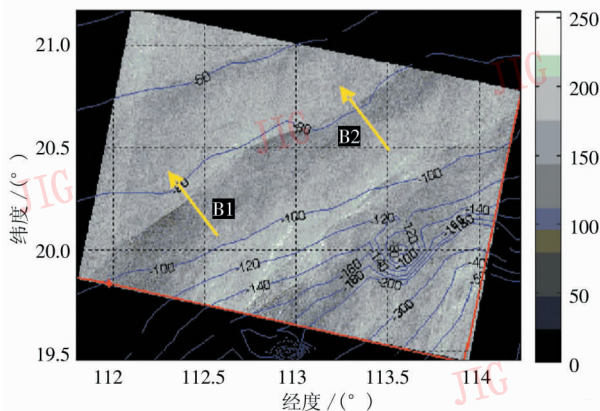


图 4 内波传播与海底地形(2005-06-19)
Fig.4 Propagation of internal waves and topography(2005-06-19)

的传播方向与海底地形有很强的相关性;2) 其传播方向并不是完全与海底地形的 200 ~ 300 m 等深线梯度方向一致,而是偏离深度梯度变化方向,部分内波(A4,C1,C2)与黑潮的强流分支进入南海的方向有一致性;3) 在内波向 100 m 深度以上传播时受到海底地形的调制。例如, A1, A2, B1, B2 在传播到 60 ~ 80 m 等深线附近,其方向基本与等深线梯度方向一致。另外图 3,4,5 中暗礁附近内波传播与等深线之间的关系也可以看出内波受到海底地形的调制效果。

为了进一步说明内波传播特征与海底地形及其与变化之间的关系,用第 1 节提供的内波参数反演方法对 ENVI-ASAR 2005-05-15 数据计算了内波的相速和群速及相应的 SAR 内波位置处沿内波传播方向的海底地形变化的斜率,计算图例如图 6 所示,

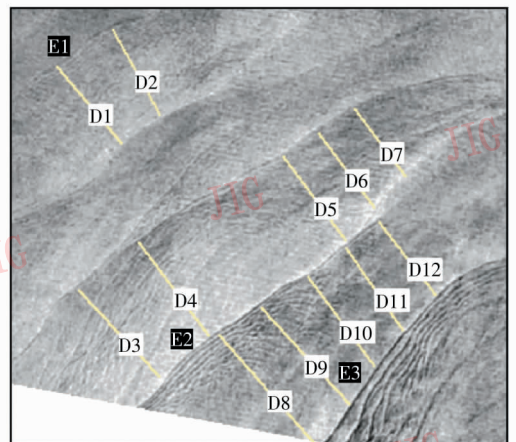


图 6 内波反演区域选择
Fig.6 Choosing retrieval region of internal waves' parameters

在图 3,4,5 中 SAR 图像上叠加等深线。能够明显看出内波的传播方向与海底地形的关系。1) 内波

D1 ~ D12 线用于测量波包间距, E1, E2, E3 为内波参数反演。计算结果如表 1, 表 2 所示。

表 1 内波群速反演结果

Tab. 1 Results of group velocity of internal waves

计算位置	深度最大/m	深度最小/m	内波群速/(m/s)	陆架坡度/(m/km)
D1	-80	-85	0.27	-0.17
D2	-78	-83	0.26	-0.22
D3	-103	-133	0.32	-0.96
D4	-96	-128	0.32	-1.13
D5	-91	-107	0.28	-0.58
D6	-85	-100	0.25	-0.62
D7	-83	-88	0.23	-0.24
D8	-139	-180	0.40	-1.04
D9	-125	-184	0.35	-1.84
D10	-125	-166	0.30	-1.44
D11	-124	-136	0.27	-0.50
D12	-119	-142	0.25	-0.96

表 2 内波的相速、波长与振幅反演结果

Tab. 2 Results of internal waves' parameters: phase velocity, wave length and amplitude

编号	经度/(°)	纬度/(°)	水深/m	方向	相速/(m/s)	波长/m	振幅/m
E1	112.7	20.2	84	325	0.18	1 105	1.3
E2	112.8	19.9	151	317	0.22	914	3.1
E3	113.2	19.8	210	307	0.21	1 103	5.7

由表 1 中的数据可以得到表示内波群速与内架坡度(斜率)的变化关系图 7。

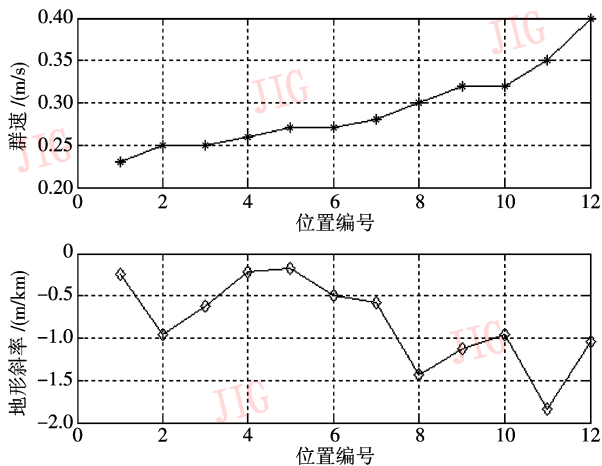


图 7 内波群速与内架坡度(斜率)的变化关系图

Fig. 7 Relation of internal waves' group velocity and variation of continental shelf slope

从图 7 可以看出内波群速在一个范围内随斜率增大而变小。而在传统分析中通过频散关系得到的内波群速,这一关系并未得到很好的体现。但是,应说明的是内波是一种重要的海洋波动现象,作为波动最大特点是其动态性,即随空间位置的变化而变化,海底地形是内波传播的重要边界条件,对内波的传播有一定的调制作用,这一边界是空间位置的函数,当研究的内波问题的特征尺度与水深相比不是小量时,这个变化在内波反演问题中就是一个不容忽视的重要因素。

3 结论

对于内波群速和与陆架区海水深度的变化特点进行了分析,给出了内波参数与地形变化之间的统计关系,指出内波的传播方向并不完全与海底地形变化一致。能够看出海底地形的变化对内波传播有不可忽视的影响作用,说明在内波反演算法中如果进一步考虑这种地形变化的调制作用就更能反映问题的本质。这对于内波理论本身在和应用卫星遥感方法研究内波参数获取问题具有重要意义。另外,关于海底地形的变化对内波振幅和流速的影响以及海底地形的变化与内波传播非线性效应等方面的分析将另文给出。

参考文献 (References)

- [1] Alpers W. Theory of radar imaging of internal waves[J]. Nature, 1985, 314(6008): 245-247.
- [2] Brandt P, Alpers W. The generation and propagation of internal wave forms in the Strait of Gibraltar studied by ERS-1 SAR imagery and a numerical model[C]//Proceedings of Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS'94). New York, NY, USA: IEEE Press, 1994: 2023-2025.
- [3] Hajji H, Bonicel D, Ramamonjariisoa A, et al. Internal waves topography and ocean fronts and eddies observed with ERS synthetic aperture radar [C]//Proceedings of Oceans' 98 Conference Proceedings. New York, NY, USA: IEEE Press, 1998: 898-903.
- [4] Fang Xinhua, Du Tao. Fundamentals of Oceanic Internal Waves and Internal Waves in the China Seas [M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2004. [方欣华, 杜涛, 海洋内波基础和中国海内波[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2004.]
- [5] Li Haiyan, He Yijun, Du Tao, et al. Nonlinear method of extracting thermocline depth and amplitude of internal wave from SAR imagery[J]. Marine Environmental Science, 2007, 26(6):

- 583-590. [李海艳, 何宜军, 杜涛, 等. 从内波 SAR 图像中提取跃层深度和内波振幅的非线性方法[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(6): 583-590.]
- [6] Li Qun, Sun Li, Xu Zhaoting. Modeling the wave-wave interaction between internal solitary waves[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(6): 868-872. [李群, 孙丽, 徐肇廷. 内孤立波波一波相互作用的数值模拟[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(6): 868-872.]
- [7] Alford M H, MacKinnon J A, Zhao Z, et al. Internal waves across the Pacific[J]. Geophysical Research Letter, 2007, 34(24): L24601.
- [8] Osborn A R, Burch T L. Internal solitons in the andaman sea[J]. Science, 1980, 208(4443): 451-460.
- [9] Silva J C B, Ermakov S A, Robinson I S, et al. Role of surfer films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf I short-period internal waves[J]. Journal Geophysical Resaerch, 1998, 103, (C4): 8009-8031.
- [10] Small J, Halllck Z, Pavey G, et al. Observation of large amplitude internal waves at the malin Shelf edge during SESAME 1995[J]. Continental Shelf Research, 1999, 19(11): 1389-1436.
- [11] Xu Zhaoting. Dynamics of Oceanic Internal Waves[M]. Beijing: Science Press, 1999. [徐肇廷. 海洋内波动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [12] Liu A K, Ramp S R, Zhao Y H, et al. A case study of internal solitary wave propagation during ASIAEX 2001[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(4): 1144-1156.
- [13] Guo Pu, Fang Wendong, Gan Zijun, et al. Characteristics of internal tidy on contintenal shelf in the northeastern south sea China[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 52(II): 15-22. [郭朴, 方文东, 甘子均, 等. 南海北部大陆坡区的内潮特征[J]. 科学通报, 2006, 51(II): 15-22.]
- [14] Grimshaw R. Internal Solitary Waves [M]//Philip L, Liu F. Advances in Coastal and Ocean Engineering. Singapore: World Scientific Publishing Company, 1997: 1-30.