

背景流和混合层深度对内波表面信号的影响

吕海滨^{1,2}, 申 辉², 何宜军³

(1. 淮海工学院 测绘工程学院, 江苏 连云港 222005; 2. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 南京信息工程大学 海洋科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 主要利用 Lamb 模式进行了四个数值敏感实验, 研究了背景流、混合层深度对南海东北部内波表面信号强度的影响, 并用 MASCG 指标(表层流梯度绝对值的最大值)进行了量化。研究结果表明: 同向背景流能增强内波表面流梯度, 逆向背景流则反之。混合层深度对内波表面信号影响很大, 深的混合层能弱化内波表面信号强度。内波表面信号的量化依赖于海洋环境条件和内波动力参数, 本实验结论将加深对内波遥感观测的理解。

关键词: 内波; 表面信号; 混合层

中图分类号: P71

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2013)09-0020-04

内波在层化海洋中的陆架上被频繁地发现, 是一种很重要的海洋中尺度现象。吕宋海峡是南海东北部内波的一个重要的生成源地。很多学者对该海域内波进行了大量深入研究。Cai 等^[1]于2012年总结了过去10 a 南海内孤立波研究的成果, 归纳了多个源地和产生机制。一般在数值模式中, 当正压潮流流经层结显著的水下海脊时, 内孤立波就很容易发生。当潮流与背景流流向相反时, 会极大地削弱内波强度^[2]。背景流能改变内孤立波的相速度和波结构, 但是流的剪切对波的结构影响很小^[3]。黑潮入侵促进了内部混合, 增加了内孤立波包的产生^[4]。然而, 目前的研究并未涉及对内波表面信号的影响。本文的工作是利用四个数值实验来研究混合层深度、背景流对内波表面信号的影响。

1 数值模型介绍

Lamb^[5]于1994年利用 Lamb 模式进行敏感性实验, 研究了理想陆架地形、潮流、层化、沿岸流对内波生成时垂向结构的影响。该模式是完全非线性、非静力、刚盖近似, 动力方程组如下:

$$u_t + \mathbf{u} \cdot \nabla u - fv = -p_x + F_u[u] + B_u(x, z, t) \quad (1)$$

$$v_t + \mathbf{u} \cdot \nabla v + fu = F_u[v] \quad (2)$$

$$w_t + \mathbf{u} \cdot \nabla w = -p_z - \rho g + F_u[w] + B_w(x, z, t) \quad (3)$$

$$\rho_t + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho = F_\rho[\rho] \quad (4)$$

$$S_t^n + \mathbf{u} \cdot \nabla S^n = F_s[S^n] \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (6)$$

其中

20

$$\mathbf{u} = (u, w) \quad (7)$$

$$F_u[u] = \frac{\partial}{\partial z}(K_u u_z) + \frac{\partial}{\partial \xi}(Kh_u u_\xi) \quad (8)$$

$$F_\rho[\rho] = \frac{\partial}{\partial z}(K_\rho \rho_z) + \frac{\partial}{\partial \xi}(Kh_\rho \rho_\xi) \quad (9)$$

采用 Boussinesq 近似, u, v 是水平速度, w 是垂向速度。 ∇ 是矢量梯度算子, t 是时间。 ρ 是无量纲参考密度。 P 是压强。 K_u 是垂向涡粘系数, K_ρ 是垂向扩散系数, K 是水平扩散系数。 $S^n, n = 1, 2, \dots$ 是示踪粒子。 F_u, F_ρ, F_s 是涡动扩散项, B_u, B_w 是强迫项, g 是重力加速度, f 是科氏参数。

2 实验方案设计

Du 等^[4]于2008年利用2D 理想实验研究了潮流和黑潮入侵对内波垂向结构的影响, 其理想地形断面位置见图1中断面1。Warn-Varnas 等^[6]在2009年利用2.5D 的 Lamb 模式研究了吕宋海峡孤立波的生成, 其地形断面位置见图1中断面2。这两个理想地形都有两个水下海脊, 东部较高的代表巴坦岛或巴布岛附近的水下海脊, 西部较低的代表台湾吕宋海沟西部的海槛。因为潮波向西传播, 我们敏感性实验所用理想地形如图2所示, 理想海山代表 Baban

收稿日期: 2013-04-25; 修回日期: 2013-07-29

基金项目: 中国科学院海洋环流与波动重点实验室开放基金课题(KLOCW1205); 国家自然科学基金(41030855; 41025019); 淮海工学院引进人才基金(KQ12002)

作者简介: 吕海滨(1979-), 男, 山东烟台人, 讲师, 博士, 主要从事海洋内波遥感与海洋数值模拟研究, 电话: 13861427903, E-mail: kjsxhbb@126.com

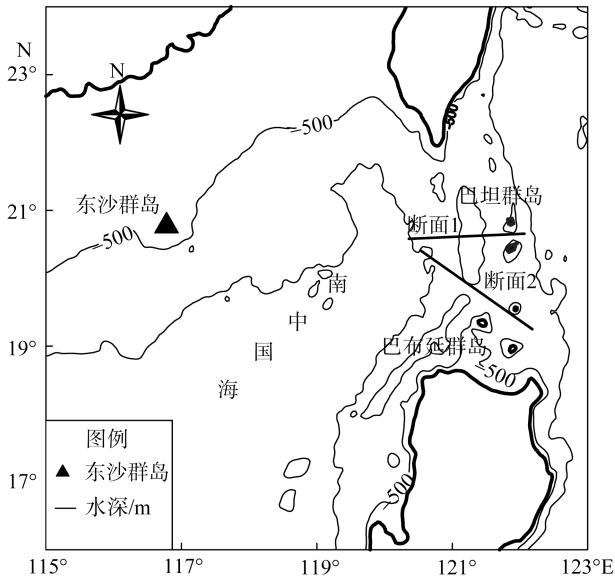


图1 南海东北部水下地形

Fig. 1 Topography of the northeastern South China Sea

岛屿间的水下海脊,位置如图1中断面1。理想高斯海脊处于海表下300 m,最大水深3 665 m。计算网格水平方向4 000个,垂向100层。本文关心非线性内波在传播过程中,混合层深度、背景流对内波表面信号的影响,粘性项和扩散项对其影响很小,所以没有考虑这两项。垂向采用 sigma 坐标,时间步长等于20 s,满足 CFL 条件。左边是开边界,流强迫 $U = U_{\text{geos}} + U_{\text{max}} \sin(\phi)$ 与杜涛等^[4]类似。最大 M_2 潮流 U_{max} 等于 0.0439 m/s ^[6],起始时刻向左最大。 ϕ 是 M_2 分潮相位, U_{geos} 是 x 方向背景地转流。假设背景密度场水平均匀层化,如图2所示,数据保存时间间隔为1 h, N^2 是背景浮力频率的平方,等于 $1.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-2}$ 。垂向科氏参数 $f = 5.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,对应 21°N 纬线。表1中列举了四个敏感实验,实验中提到的背景流,负值指西向背景流,此时与内波向西传播方向一致。

表1 四个实验方案中垂向科氏力、背景流、混合层深度设置
Tab. 1 Vertical Coriolis force (f), background current and pycnocline depth for five cases

实验	$F (\text{s}^{-1})$	$U_{\text{geos}} (\text{m/s})$	混合层深度(m)
E1	1	0	150
E2	1	1 ($U_{\text{geos}} = -0.1$)	150
E3	1	1 ($U_{\text{geos}} = -0.02$)	150
E4	1	1 ($U_{\text{geos}} = -0.1$)	80

3 结果与讨论

图3显示不同实验中表层流速的 x 分量时间变化,实验E1中,由于 M_2 分潮的影响,在海脊两侧分别出现内波表面信号。在实验E2中,在海脊左边出现不明显的内波表面信号,在海脊右边没有出现任

何信号。E3中背景流等于 0.02 m/s ,相当于实验E2的五分之一,内波表面信号比较清晰,同时海脊右边出现内波。在E4中,由于混合层变浅,海脊右侧出现明显内波信号,这与E2是显著不同的。总之,随着背景流减弱,潮流对流场的影响变大,当落潮发生时,内波容易向右跨越海脊传播。

Alpers^[7]于1985年提出了内波雷达影像理论,大尺度的内波条纹是由于表层粗糙度的变化,起因是内波引起的表层流变化,可以利用表层流梯度 $\partial u_x / \partial x$ 来定义表层粗糙度。因为表层流梯度绝对值的最大值(MASCG)能决定内波的表面信号能否被遥感设备观测到,所以我们用MASCG指标来定量化不同因素对内波表面信号的影响大小,如表2所示。对比E1和E2, MASCG分别为0.000 84和0.002 85,可以看出海脊西侧,同向背景流与内波传播方向一致时,能使得内波传播加速,内波表面信号增强;海脊东侧,逆向背景流则反之。对比E2和E3, MASCG 分别为0.002 85 和0.000 84,随着同向背景流减弱,内波的表面信号变弱。对比E2和E4,混合层深度由150 m变为80 m, MASCG 分别为0.002 85和0.003 87,非线性内波能够跨越水下海脊,在右边形成内波表面信号,说明混合层深度加深,内波表面信号强度减弱。

Zheng 等^[8]于2001年基于 KdV 方程给出了两层海洋界面内波发生时,上下层水体的速度解析解,这里仅列出上层水体的速度公式(10),要验证我们的

实验结论,只要确定 $\left| \frac{\partial u_1}{\partial x} \right|$ 和 h_1 的关系即可。

$$u_1(x, t) = \left(\frac{C\eta_0}{h_1} \right) \sec h^2 \left(\frac{x - Vt}{\Delta} \right) \quad (10)$$

$$\left| \frac{\partial u_1}{\partial x} \right| = \left| \frac{C\eta_0}{h_1} \right| \left| \frac{\partial \left[\sec h^2 \left(\frac{x - Vt}{\Delta} \right) \right]}{\partial x} \right| = \frac{C\eta_0}{h_1} \left| \frac{\partial \left[\sec h^2 \left(\frac{x - Vt}{\Delta} \right) \right]}{\partial x} \right| \quad (11)$$

根据上面公式(11)可知, h_1 减小, $\left| \frac{\partial u_1}{\partial x} \right|$ 必定增加。

也就是说,混合层加深,能够削弱内波表面信号强度。

表2 不同实验对应的表层流梯度绝对值的最大值

Tab. 2 maximum absolute value of surface current gradient in various model cases

实验	MASCG
E1	0.00084
E2	0.00285
E3	0.00084
E4	0.00387

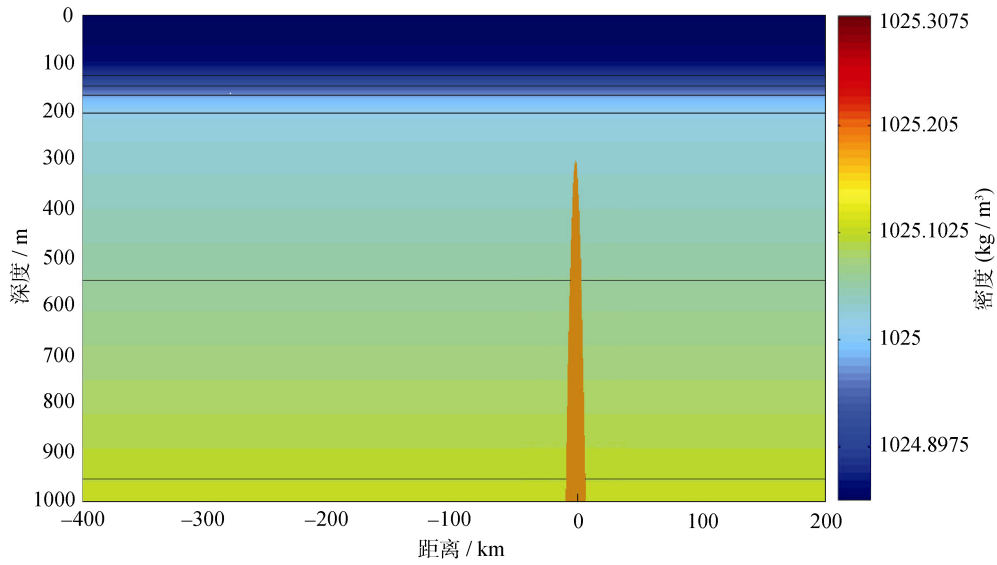


图 2 理想实验水下地形及层化

Fig. 2 Initial stratification and topography in the numerical experiments domain

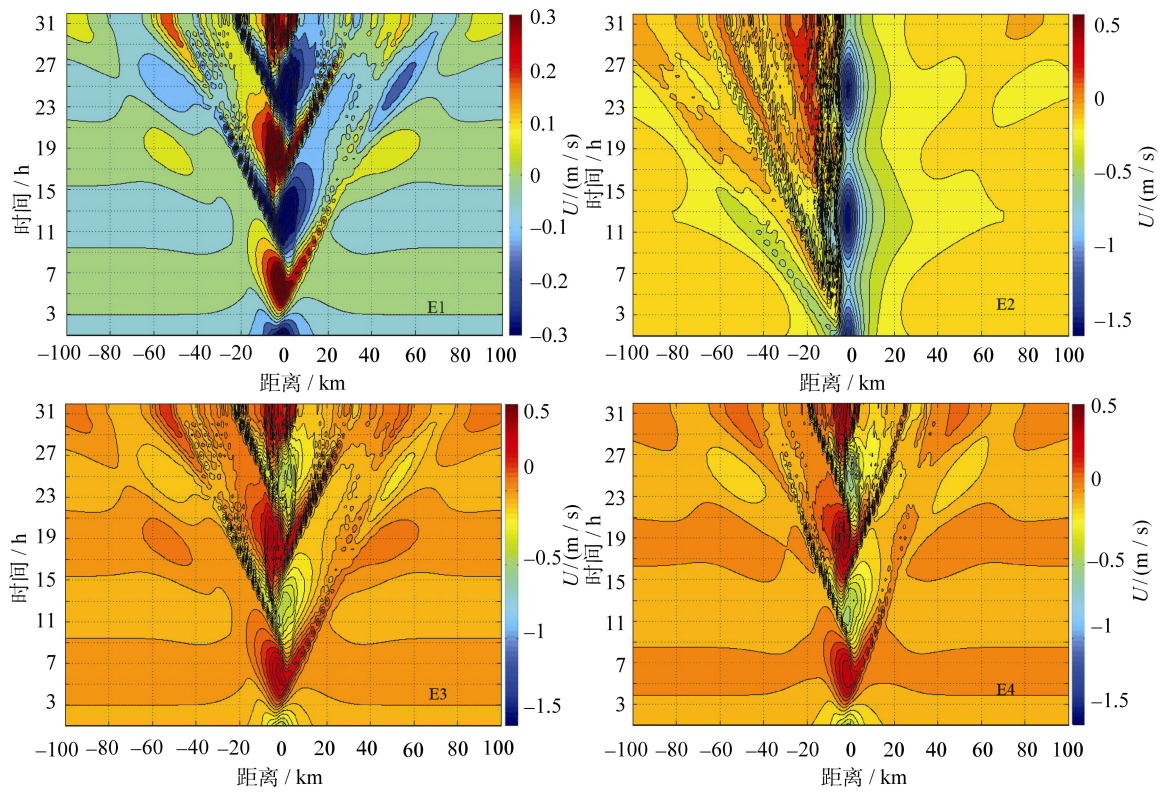


图 3 实验 E1~E4 中海表流速东西分量 U 的时空分布图

Fig. 3 Time series of U component of surface flow field under different flow conditions: Cases E1, E2, E3 and E4

4 结论

本文主要利用 Lamb 非静力模式, 进行了四个数值实验, 发现: 用 MASCg 指标量化了不同因素对

内波表面信号的影响。背景流对内波的表面水平流结构有很大影响。当与内波传播同向的背景流增大, 表面流梯度变大, 内波表面信号会增强; 混合层加深, 内波的表面信号强度减弱。

参考文献:

- [1] Cai Shuqun, Xie Jieshuo, He Jianling. An overview of internal solitary waves in the South China Sea[J]. *Surv Geophys*, 2012, 33: 927-943.
- [2] Cai Shuqun, Long Xiaomin, Gan Zijun. A numerical study of the generation and propagation of internal solitary waves in the Luzon Strait[J]. *Oceanologica Acta*, 2002, 25 (2): 51-60.
- [3] Cai Shuqun, Long Xiaomin, Dong Danpeng, et al. Background current affects the internal wave structure of the northern South China Sea[J]. *Pro Nat Sci*, 2008, 18: 585-589.
- [4] Du Tao, Tseng Y H, Yan X H. Impacts of tidal currents and Kuroshio intrusion on the generation of nonlinear internal waves in Luzon Strait [J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2008, 113(C8): 1-15.
- [5] Lamb K G. Numerical experiments of internal wave generation by strong tidal flow across a finite amplitude bank edge[J]. *J Geophys Res*, 1994, 99: 834-864.
- [6] Warn-Varnas A, Hawkins J, Lamb K G, et al. Solitary wave generation dynamics at Luzon Strait[J]. *Ocean Modell*, 2010, 31: 9-27.
- [7] Alpers W. Theory of radar imaging of internal waves[J]. *Nature*, 1985, 314: 245-247.
- [8] Zheng Quanan, Yuan Yeli, Klemas V. Theoretical expression for an ocean internal soliton synthetic aperture radar image and determination of the soliton characteristic half width[J]. *J Geophys Res*, 2001, 106 (C12): 31415-31423.

The effects of background current and pycnocline depth on surface signals of internal waves

LÜ Hai-bin^{1,2}, SHEN Hui², HE Yi-jun³

(1. School of Geodesy & Geomatics Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Received: Apr., 25, 2013

Key words: internal waves; surface signal; pycnocline

Abstract: The impacts of pycnocline depth and background current on surface signals of underwater internal waves in the northeastern South China Sea (SCS) were studied using four well-designed simulation experiments. The index named maximum absolute value of surface current gradient (MASCg) was used to describe the effect. Model results confirm that the synclastic background current strengthened the horizontal flow gradient of internal waves, while the opposing background current weakened the surface current gradient of internal waves. Pycnocline depth affected dramatically internal wave surface signal. A deeper pycnocline would reduce the internal waves' surface signal intensity. The quantity of surface signals from oceanic internal waves depends on marine environmental conditions and dynamical characteristics of internal waves. These results may help better understanding of internal waves from remote sensing measurements.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)