

均匀流过地形生成内波的实验探究^{*}

苏 梦,王彩霞*,陈 旭

(中国海洋大学 物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘 要:本文使用循环水槽生成恒定均匀的流体过地形产生内波,并借助染色技术、PIV 技术和高速图像记录系统来开展相关实验。实验设置了 6 组不同的障碍比 B (障碍物高度与下层水深之比),对均匀流过地形生成内波的演化特征进行了探究。通过定性分析和定量测量表明:当 $0.6 < B < 0.8$ 时,内波的波形比较稳定且不易破碎;当 $B < 0.6$ 时,潮流受障碍物的影响较小;当 $B > 0.8$ 时,波形较陡且容易破碎与混合。并且随着障碍比的增加,内波的振幅和能量逐渐增加,波长和生成位置与障碍物间的距离 S 逐渐减小,并且内波的非线性效应逐渐增强。PIV 实验表明当流体经过地形生成内波的过程中,在地形背面会有顺时针涡旋的产生。

关键词:循环水槽;内波;障碍比;分层染色技术;PIV

中图分类号:P731.24 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6482(2017)05-001-08

DOI:10.13984/j.cnki.cn37-1141.2017.05.001

引 言

内波是发生在密度稳定层化海水内部的一种波动,其最大振幅出现在海洋内部,与海水的表面潮流运动有着非常密切的关系,是一种常见的海洋动力学现象^[1]。潮流遭遇海脊、大陆架边缘等突变海底地形是海洋内波产生的重要因素之一^[2]。在海洋内波的多发区,海底地形是影响内波生成、传播和演化的重要因素^[3]。地形的相对高度、密度分层以及潮流速度与内波的形成、传播以及耗散有着非常密切的关系,而且在内波的形成过程中通常伴随着强烈的水体垂向加速及混合作用,将下层的沉积物、营养盐以及一些生物化学元素带至上层,对海洋环境和生态产生重要的影响。同时内波振幅出现在海洋内部,在运动以及破碎的过程中还会对海洋工程和一些海上军事活动产生不可忽视的影响。因此,海洋内波的研究具有重要的理论和应用价值。由于实际海洋中地形条件不同、跃层结构复杂以及内波随机性等因素,目前对海洋内波的认识仍然十分有限。定量分析地形结构与内波特征参数之间的关系,有利于我们更进一步的深入了解和研究海洋内波^[4]。

潮流通过驱动分层水和地形作用形成内波,这一过程在深海混合和大尺度大洋环流中具有非常重要的作用。在过去的几十年中,在海底地形附近形成内波的过程被频繁发现,例如大陆斜坡、海底山、大洋中脊等。潮流经过单个的海底地形如海脊时,会在背风面形成下凹的密度界面,有时会引起下降流,这时内波会变得不稳定进而在背风处形成一个内部水跃,引起小尺度的不稳定。自从 1980 年以来,关于内波的生成与传播进行了许多理论与实验研究。高国兴^[3]等基于非静压海洋动力学模型,对正压潮驱动下的内波生成和传播进行了数值模拟研究。Cummins et al^[5]的观测和数值模拟结果表明,潮流是海脊顶部波状水跃的形成原因。Hibiya^[6]通过数值模型重现了潮流经过大陆架生成内波的过程,发现潮流在内波的生成过程中起着至关重要的作用。Farmer 和 Armi^[7]通过对加拿大奈特湾内波的观测,认为沿海水域内波的发生通常是潮流迫使的结果。Odell 和 Kovasznay^[8]在一环形封闭水槽中用摩擦泵生成层化流体剪切流,并用这套设备进行了山后波实验。Maxworthy(1979)^[9]在实验水槽中拖动地形做周期性的往复运动,相当于潮流流过海脊地形,形成山后波并且得到了内孤立波的两种生成机制。Wessels 和 Hut-

* 基金项目:国家自然科学基金(41440038,41576021)

第一作者简介:苏梦,女(1990-),硕士研究生,研究方向为内波实验,E-mail:sumengsl@163.com

* 通讯作者:王彩霞,女(1971-),副教授,E-mail:cxwang@ouc.edu.cn,研究方向为海洋内波与混合

收稿日期:2016-04-14

ter^[10] 通过研究一维内波实验,认为内波的产生、反射、传播与耗散和障碍比 B 、障碍物的形状以及弗罗德数有关。Sveen et al^[11] 在下凹型内波实验中,发现波速、入射波振幅、上下水层厚度比及障碍物高度之间的相互关系,对内波经过障碍物的变化有重大的影响。Lim et al^[12] 通过实验研究了 2 层分层流体中潮流经过大陆架斜坡地形激发产生内波的过程。

虽然前人做了大量工作,但是实验室中对均匀流体过地形生成内波的定量测量相对较少,因此对恒定均匀流过地形生成内波的定性分析与定量测量是十分必要的。并且循环水槽是模拟海洋中潮流运动来生成内波,研究内波各种特性的水槽。本文亦是国内首次使用这种水槽来进行内波的生成实验,并且利用高速图像记录系统进行观测和分析,研究内波的生成以及地形结构与内波特征参数之间的关系,掌握内波特性。本实验结果,亦可作为研究潮流在海洋中经过障碍物形成内波时受海底地形影响的参考,为内波理论研究、数值模拟及内波观测与实验提供依据。

1 实验装置

实验在中国海洋大学物理海洋与海洋科学实验室进行,实验水槽是循环水槽,为有机玻璃构造。此水槽能形成流速均一稳定的流体,当流体经过障碍物(长方形立板)时可以产生内波,并且不需要安装造波、消波装置,更加符合实际海洋的特征,极大地改善了传统矩形实验水槽的缺陷。图 1 为实验水槽的俯视图,马达通过滑轮、皮带带动摩擦泵盘转动让流体自身产生流动,形成流速均匀的流体。水槽尺寸为 $140\text{cm} \times 80\text{cm} \times 20\text{cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),观测段尺寸为 $40\text{cm} \times 14\text{cm} \times 20\text{cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。本文实验采用染色技术和 PIV 技术来初步探究均匀流在经过海底地形时内波的形成情况以及障碍物与内波特征参数之间的关系。

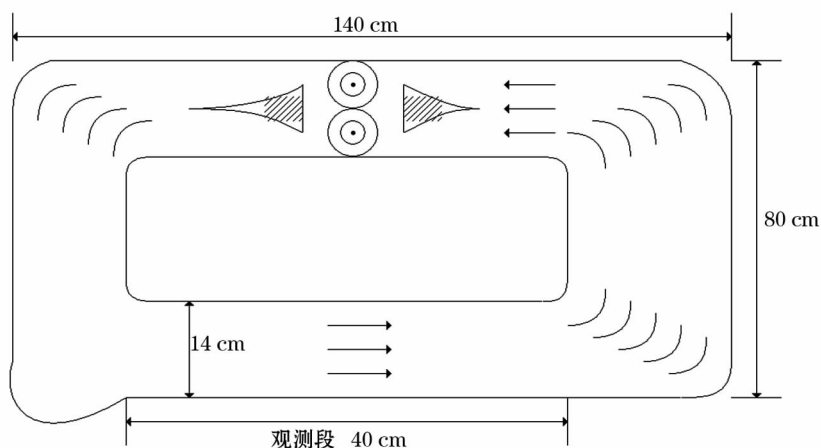


图 1 循环水槽俯视图示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the circulating water tank

2 染色实验

本实验采用两层模式,上层为淡水,水深 h_1 为 2 cm,下层为盐水,水深 h_2 为 10 cm;图 2 为实验获得的具有典型海洋跃层特征的密度和浮力频率剖面,图中密度分布为 $\rho(z)$,浮力频率分布为 $\sqrt{(g/\rho_1)(\partial\rho/\partial z)}$,在 $z=-2\text{cm}$ 时浮力频率最大。设障碍物高度为 D ,障碍比 B 则为 D/h_2 。实验设置 6 组不同的障碍比,即 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9,探究在不同障碍比下内波的生成特性及其特征参数之间的关系。为保证本次实验只有 1 个变量因子(障碍比 B),所做各组实验均采用相同的层结状况,即相同的上下层深度和密度,相同的背景流速和障碍物位置,实验用流速仪测得的流速为 $2.6 \pm 0.1\text{cm/s}$ 。CCD 每秒拍摄 20 张,然后用数据分析软件进行数据处理,图 3 为实验布局示意图,值得注意的是染色实

验不需要激光器,PIV 实验需要在水槽上方架设激光器。

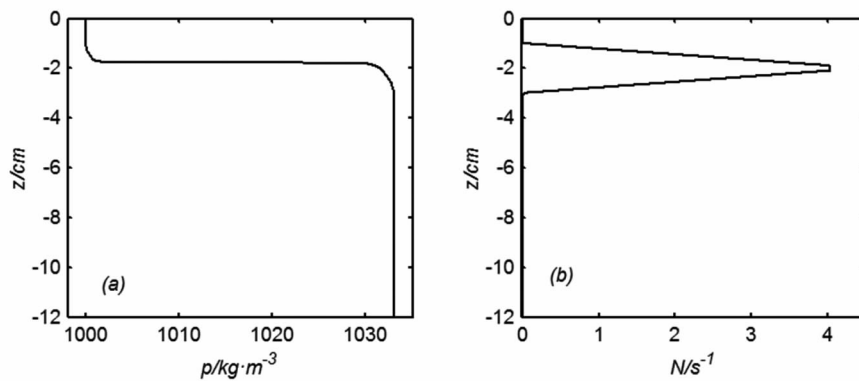


图 2 分层流体密度剖面(a)及浮频率剖面(b)

Fig. 2 Stratified fluid density profile (a) and buoyancy frequency profile (b)

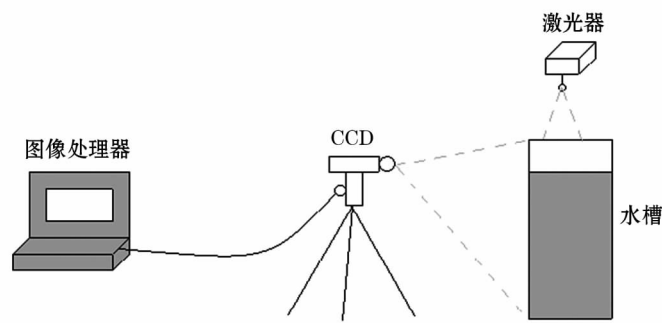


图 3 实验布局示意图

Fig. 3 Experimental layout sketch map

2.1 内波特征参数

从内波振幅的时间序列中可以得到内波的特征参数,如最大振幅 A 、波速 c 、内波的总能量 E (式(1))以及特征波长 L_w , (Michallet 和 Ivey^[13])。能量可以通过界面位移 $\eta(t)$ 在 t_0-t_1 的积分得到,其中 t_0-t_1 是界面位移开始变化的 1 个时间周期, $\Delta\rho$ 为 2 层流体的密度差。内波各特征参数(见表 1),其中 S 为内波形成位置与障碍物的距离。振幅 A 为偏离分层界面的垂向最大位移,特征波长 L_w 为界面位移所在竖直方向上,振幅一半高度处的宽度,(见图 3)。在图 7 中,当 $B=0.7$ 时,我们定义 $t_0=6\text{s}$, $t_1=18\text{s}$,第一个波峰处偏离的最大位移为 A 。

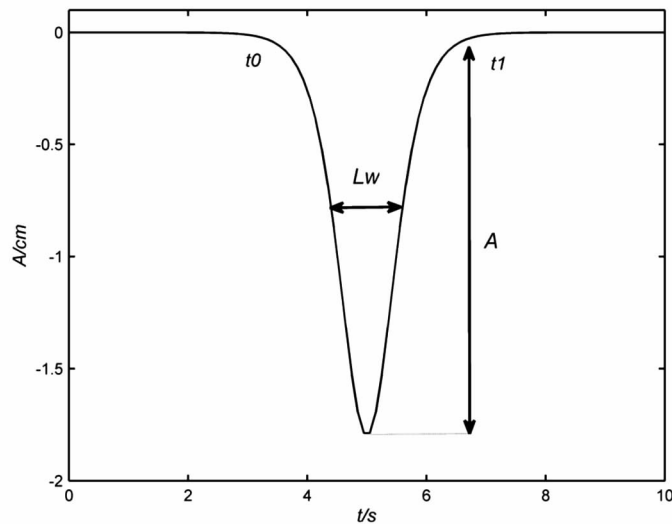
$$E = cg\Delta\rho\int_{t_0}^{t_1}\eta^2(t)dt \quad (1)$$

$$L_w \cong \frac{c}{a}\int_{t_0}^{t_1}\eta(t)dt \quad (2)$$

表 1 内波特征参数

Table 1 Internal wave characteristic parameters

障碍比 B	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
振幅 (cm)	0.60	0.65	0.77	0.86	0.92	1.27
波长 L_w (cm)	21.1	20.3	18.6	17.6	17.2	14.5
能量(J/m)	0.0016	0.0018	0.0024	0.0028	0.0030	0.0050
距离 S (cm)	19	17	15	7	6	5

图4 定义波宽 L_w 和振幅 A 示意图Fig. 4 Skeptch map of definting L_w wave width and Aamplitude

由表1可以看出,在流体经过障碍物产生内波的过程中,内波的振幅和能量随着障碍比的增加而增大,特征波长和 S 随着障碍比的增加逐渐减小。由图5(a)可以看出振幅 A 呈现类似线性增加的趋势,且在障碍比为0.9时发生跃变。说明随着障碍比的增加,内波振幅变大波形变陡,非线性效应增强。由图5(b)可见内波形成位置距离障碍物的位置随着障碍比的增加而减小,当 $B \geq 0.7$ 时陡然变小。障碍比越大内波离障碍物越近,猜测这也是内波在较高障碍比下极易发生破碎的1个可能原因。

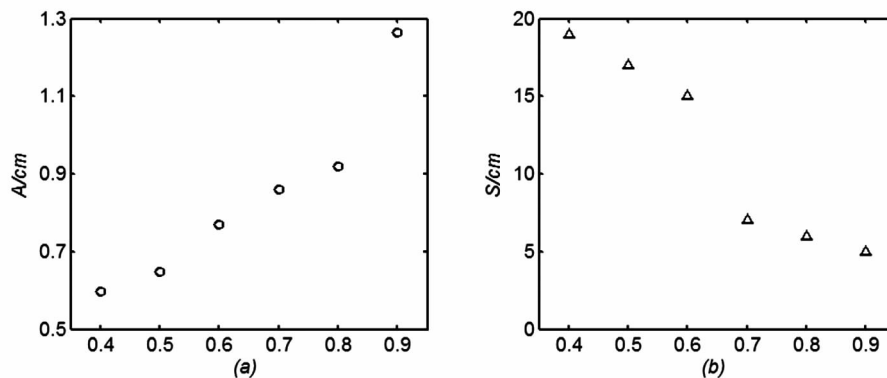


图5 特征参数与障碍比之间的关系

Fig. 5 The relationship between the characteristic parameters and B

2.2 内波振幅时间序列

通过观测和分析,可以得到各个障碍比下内波振幅的时间序列及内波随时间的演变。图6(a—f)为 $B=0.7$ 时内波从生成到界面混合的过程(水流方向从左至右),流体经过障碍物时会产生比较明显肉眼可见的内波,且波形稳定光滑不易破碎,随着时间的推移,由于频散效应的耗散和染色分子的扩散界面逐渐发生混合(f);当障碍比很小如0.4时,流体几乎不受障碍物的影响,几乎不能形成内波;当 $B=0.6$ 时,内波开始初步肉眼可见但不是非常明显,波形比较平缓,波宽较宽,频散效应较强;当 $B=0.8$ 时,会出现轻微的破碎现象,振幅变大且波型变得陡峭;但当 $B=0.9$ 时流体经过地形能较快形成内波,波形变得更陡,极易发生破碎与混合,这时非线性效应比较明显。本次实验结果与 Wessels 和 Hutter^[10] 的实验结果相类似。

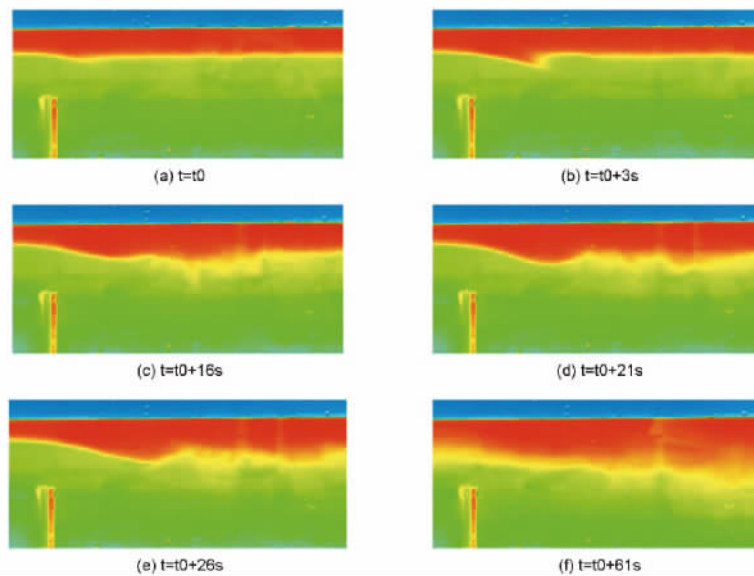
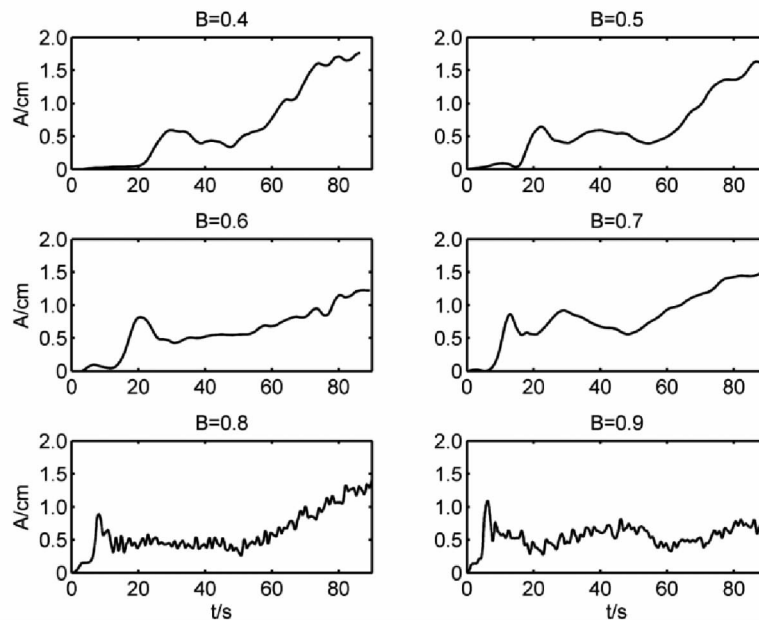
图 6 $B=0.7$ 时内波随时间的演变Fig. 6 The evolution of the internal wave with time when $B=0.7$ 

图 7 不同障碍比下波面位移随时间的变化

Fig. 7 The wave surface displacement with time under different B

图 7 为不同障碍比下滤波后的振幅随时间的变化,由图可见:随着 B 的增大,振幅增大,波宽变窄,破碎加快,非线性效应增强,验证了非线性效应越强,波形越陡的理论,振幅达到最大时所需的时间减少,与表 1 算出的内波特征参数的变化相符合。值得注意的是随着时间增加,如 40s 以后,所有障碍比下的内波振幅都随着时间一直变大,是因为循环水槽中的流体已经循环了多个周期,由于摩擦泵盘的搅动使流体界面发生了混合,上层的染色分子扩散到下层所致。

2.3 实验波形与理论波形的比较

本文实验在 2 层流体中进行,因此将实验结果和两层流体内波方程的理论解进行对比。(3)和(4)分别为 $KdV^{[14]}$ 和 $mKdV^{[15]}$ 的理论解, η_0 为最大垂向位移, L 半波宽。

$$\eta(x, t) = -\eta_0 \operatorname{sech}^2\left(\frac{x - ct}{L}\right) \quad (3)$$

其中, $c_0 = \sqrt{g\Delta\rho h_1 h_2 / \rho_2 (h_1 + h_2)}$, $L = \sqrt{-12\gamma / \eta_0 \alpha}$, $c = c_0 - \frac{1}{3}\alpha\eta_0$, $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, $\alpha = 3c_0(h_1 - h_2) / 2h_1 h_2$, $\gamma = c_0 h_1 h_2 / 6$

$$\eta(x, t) = -\eta_0 \frac{\operatorname{sech}^2[\kappa(x - c_m t)]}{1 - \mu \tanh^2[\kappa(x - c_m t)]} \quad (4)$$

其中, $\kappa = \sqrt{3H\eta_0(2\bar{h} - \eta_0) / 4H_c(H - H_c)(H - H_c)^3 + H_c^3}$, $H_c/H - H_c = \sqrt{\rho_2 / \rho_1}$, $C_{om} = \sqrt{g(\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 / H_c + \rho_1 / (H - H_c))}$, $C_m = C_{om}[1 + (\bar{h} - \eta_0)^2 / 2H_c(H_c - H)]$, $\mu = \eta_0 / 2\bar{h} - \eta_0$, $\bar{h} = h_2 - H_c$

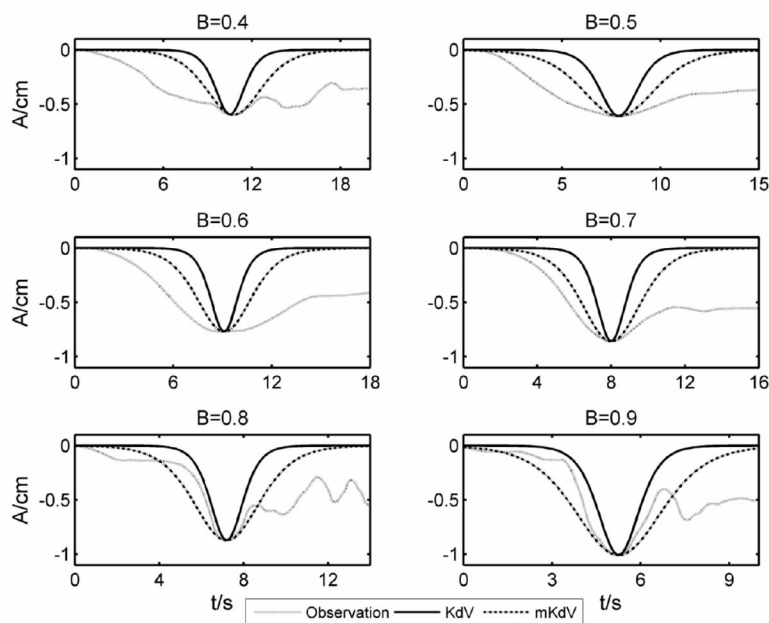


图8 实验波形与理论波形的比较

Fig. 8 Comparison between experimental and theoretical waveforms

图8为实验波形和理论波形的比较,其中实线为KdV理论波形,点虚线为mKdV理论波形,点线为实测波形。KdV方程主要用来描述浅水中有限小振幅、弱频散型内波;根据振幅的大小将内波分为小振幅波和大振幅波,大振幅内波的波形比较符合mKdV理论。由图可以看出当障碍比小于0.7时,实验所得结果与2种理论都不是很符合,内波波形较宽,非线性很弱几乎接近线性波,有点类似海脊顶部的波状水跃;当障碍比为0.7时,实验结果比较接近mKdV理论,内波已经开始表现出非线性的特点。当障碍比大于等于0.8时,实验波形介于2种理论之间,并呈现出内孤立波的特性。说明随着障碍比的增加,内波的非线性效应逐渐增强,与2.2所得结论一致。

3 PIV 实验

本文中PIV技术用来分析内波形成过程中内部的变化情况,整个系统包括光源激光器、示踪粒子、水槽和图像采集与分析设备,(见图3)。本实验依旧采用两层模式,上层为淡水,水深1.5cm,密度1.0g/cm³;下层为盐水,水深8.5cm,密度1.033±0.001g/cm³,因此可以得出内波的相速度为 $c=6.37\text{cm/s}$ 。根据背景流速和内波速度可以把潮流过地形生成内波的过程分为亚临界($Fr < 1$),临界($Fr = 1$),超临界($Fr > 1$)3种情况^[16]。本组实验中流速仪测出的背景流速值为 $U=2.054\text{cm/s}$,根据弗罗德数的计算公式 $Fr=U/c$ 可以算出 $Fr=0.322 < 1$,因此可以判断本组实验为亚临界情况。但是值得注意的是,由于实验室条件所限,多组实验所测得的背景流速值均小于内波速度,因此本部分全部实验均处于亚临界的

情况, Lim et al^[12] 在实验室模拟潮流过陆架地形的过程中所有的 Fr 也都小于 1。以目前国内外实验室的条件还未发现能实现其他两种临界情况的发表的实验工作。

本文以 $Fr=0.322$ 为例分析这一过程的流场情况。图 9 为流场的时间变化序列(水流方向从左至右),由图可以看出,当流体经过地形形成内波的过程中,会引起下降流,并伴随有顺时针涡旋的产生,在背风处形成一个内部水跃,引起小尺度的不稳定。随着时间的推移,涡旋不断向前运动并且涡旋半径不断增大变形,最终涡旋不再闭合,一部分汇入下降流中。这与 Cummins et al^[5] 的观测和数值模拟结果相似,说明潮流是海脊顶部波状水跃及其涡旋的形成原因。

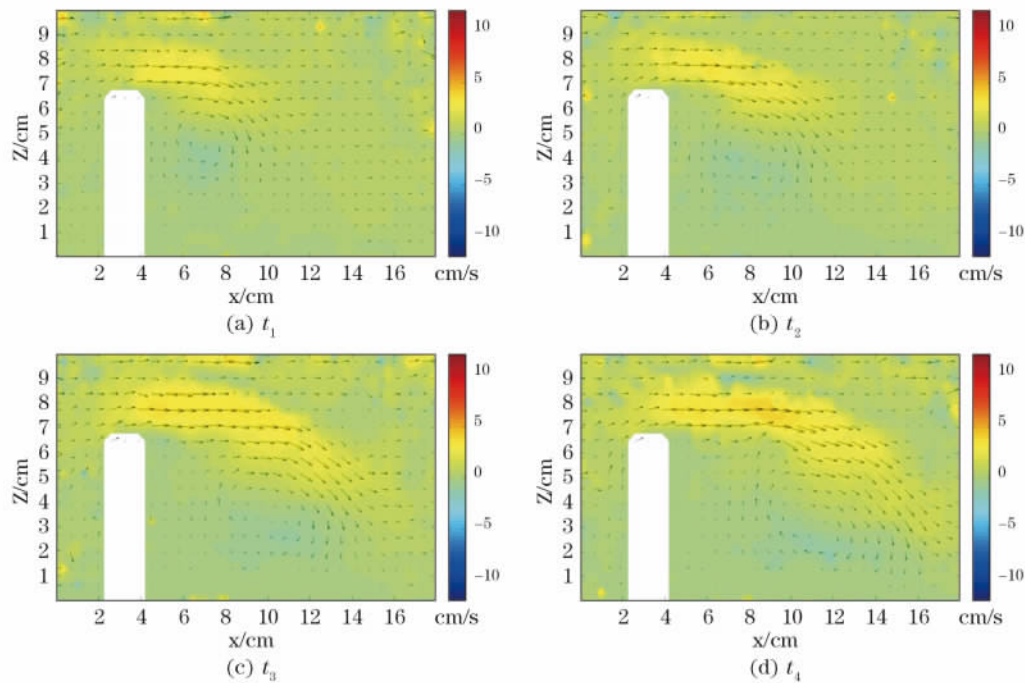


图 9 流场时间变化序列(a—d)

Fig. 9 The flow field time variation sequence (a—d)

4 结论

本文通过使用循环水槽生成恒定均匀的流体过地形产生内波,并借助染色技术、PIV 技术和高速图像记录系统,可以初步得出一些定量结论和定性分析:当 $0.6 < B < 0.8$ 时,波形比较稳定且不易破碎;当 $B < 0.6$ 时,潮流几乎不受障碍物的影响;当 $B > 0.8$ 时,波形比较容易破碎与混合。并且随着障碍比的增加,内波的振幅和能量逐渐增大;波长和内波与障碍物之间的距离 S 逐渐减小;振幅增大,波宽变窄,破碎加快,非线性效应增强。当 $B \geq 0.7$ 时,实验波形与理论波形符合较好,内波的非线性效应逐渐明显。当流体经过地形生成内波的过程中,会有顺时针涡旋的产生,引起小尺度的不稳定;随着时间的推移,涡旋不断向前运动并且涡旋半径不断增大变形,最终不再闭合。这些结果可以为今后的实验提供一定依据,但是由于条件所限所做实验均处于亚临界情况,并不能探究其他两种临界情况下的现象。在接下来的工作中,可以进一步探究实验地形的坡度和形状对潮流过地形生成内波的影响。

参考文献

- [1] 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,2005.
- [2] 蔡树群,何建玲,等. 近 10 年来南海孤立内波的研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7):703-710. DOI:doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2011.07.0703.
- [3] 高国兴,刘翠华,等. 单一海脊地形对海洋内波生成与传播影响的分析[J]. 热带海洋学报, 2015, 第 3 期(03):23-29.

- [4] 杜辉, 魏岗, 等. 缓坡地形上孤立波的破碎及能量分析[J]. 海洋科学, 2014, 10 期. DOI:doi:10.11759/hyxx20130124002.
- [5] Cummins P F, Vagle S, Armi L, et al. Stratified flow over topography: upstream influence and generation of nonlinear internal waves[J]. Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2003, 459(2034):1467-1487.
- [6] Hibiya T. Internal wave generation by tidal flow over a continental shelf slope[J]. Journal of oceanography, 2004, 60(3): 637-643.
- [7] Farmer D M, Armi L. Stratified Flow Over Topography and the Generation of Internal Solitary Waves[J]. DISTRIBUTION STATEMENT, 1999: 83.
- [8] Odell G M, Kovasznay L S G. A new type of water channel with density stratification[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 50.
- [9] Maxworthy T. A note on the Internal Solitary Waves Produced by Tidal Flow over a Three-Dimensional Ridge[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1979, 84(C1):338-346.
- [10] Wessels F, Hutter K. Interaction of Internal Waves with a Topographic Sill in a Two-Layered Fluid[J]. Journal of Physical Oceanography, 1996, 26(1):5-20.
- [11] Sveen J L, Guo Y, Davies P A, et al. On the breaking of internal solitary waves at a ridge[J]. Fluid Mech. 2002, 469(25) :161-188
- [12] Lim K, Ivey G N, Nokes R I. The generation of internal waves by tidal flow over continental shelf/slope topography[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2008, 8(5-6):511-526.
- [13] Michallet H, Ivey G N. Experiments on mixing due to internal solitary waves breaking on uniform slopes[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1999, 104(C6):13467 13477.
- [14] Djordjevic V D, Redekopp L G, Djordjevic V D. The Fission and Disintegration of Internal Solitary Waves Moving over Two-Dimensional Topography[J]. Journal of Physical Oceanography, 1978, 8:1016-1024.
- [15] Michallet H, BARTH, Lemy E. Experimental study of interfacial solitary waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 366:159-177.
- [16] Cummins P F, Armi L, Vagle S. Upstream Internal Hydraulic Jumps[J]. Journal of Physical Oceanography, 2006, 36(5):753-769.

Experimental Investigations on the Internal Waves Generated by Uniform Flow over Topography

SU Meng, WANG Caixia*, and CHEN Xu

(Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The internal waves generated by uniform flow over topography were investigated by using circulating water tank. The related experiments were carry out with the help of dyeing technology, particle tracer technique and high-speed image recording system. Six kinds of different barrier ratio B (the ratio of the barrier height to the lower layer water depth) were set up, to explore the evolution characteristics when uniform flow over the topography. The qualitative analysis and quantitative measurement suggested that when $0.6 < B < 0.8$, the waveform is stable and not easy to break; when $B < 0.6$, the obstacle has little effect on the current; when $B > 0.8$, the waveform is steep and easy to break and mix. And with the increase in B , the amplitude and energy of the internal waves increase gradually, wavelength and the distance S decrease, and then nonlinear effect is gradually strengthened. PIV experiments show that in the generating process of the internal waves when the fluid passes through the obstacles, clockwise vortex on the lee side of the obstacle can be generated.

Key words: circulating water tank; internal waves; the blocking degree; stratified dyeing technique; PIV