

# 具有内波特性的渤海南部次重力波

范植松<sup>1</sup>, 高郭平<sup>1</sup>, 尹训强<sup>1</sup>, 范 宇<sup>1</sup>, 吴 玮<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266003)

关键词: 次重力波; 边缘波; 内波; 水平流速铅直剪切; 内部混合

中图分类号: P731.24

文献标识码: A

文章编号: 0253- 4193 (2003)05- 0136- 05

## 1 引言

次重力波(infragravity waves)是频率范围介于局地平均 Brunt- Väisälä 频率和 0.05 Hz (涌浪频率)之间的一种海洋波动,其能量在深水大洋中一般甚低,但在浅海中却很强. 该波动的研究对于浅海海洋内部混合、近岸海洋工程、海洋生态学、海洋沉积学及军事海洋学均有重要的意义. Munk<sup>[1]</sup>很早就开始研究这类波动,然而主要由于观测技术的限制,对于该类波动的动力学机制的研究进展迟缓. Herbers 等<sup>[2,3]</sup>综合他们自己及他人的研究结果得到如下结论:观测的次重力波能量可分为两部分,即强迫波模式和自由波模式. 前者对应于表面重力波的非线性波-波相互作用理论,后者对应于边缘波模式,通常后者的能量构成总观测能量的主要部分.

在我国近海的某些区域,例如渤海南部和黄海西部,海洋环境有两个显著的特征:(1)海岸的坡度很小,约为  $O(10^{-3})$ ,而国外多数海岸的坡度为  $O(10^{-1}) \sim O(10^{-2})$ ;(2)近岸海区海水层结明显,尤其在夏秋季,而国外多数近岸海区海水层结不明显. 因此,我国近海的次重力波呈现独特的性质,即呈现内波的某些特征,不仅仅表现为海面的起伏. Wright 等<sup>[4]</sup>在黄河口曾发现周期约为 5 min 的次重力波,他们称之为短周期内波. 该波动对海底失稳及泥沙异重流的形成有重要的作用. 最近我们依据在渤海南部的流场观测资料发现周期约为 6 min 的次重力波,并且它们既具有边缘波性质又具有内波的某些特征.

## 2 海洋观测

在渤海南部( $37^{\circ}55' N$ ,  $120^{\circ}55' E$ )水深约 16.5 m 处,我们使用 ADCP(500 KH)和 CTD 对流场进行了 3 d 观测(2000 年 8 月 17 日 17:20 至 19 日 18:06). ADCP 被置于水面下约 0.5 m

收稿日期: 2001- 12- 15; 修订日期: 2002- 10- 10.

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2002A A633120).

作者简介: 范植松(1946—),男,山东省青岛市人,教授,主要从事海洋内波研究.

处, 它测得 7 层可靠的水平流速, 其名义深度为 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 m. 该流速应理解为以名义深度为中心在 2 m 深度范围内的流速平均值. 流速的采样时间间隔为 2 min, 在 18 日 5: 42~ 5: 50 之间以及在 18: 26~ 18: 40 之间, 观测资料有间断. 在观测期间海面是风平浪静的. 观测海区的潮汐属正规半日潮. 图 1 所示为第 3 层的观测流速, 它清楚地显示在半日潮频率振荡基础上叠加着周期约为 6 min 的高频振荡. 在该图中靠近资料序号 400.0 的竖直线是因 ADCP 的故障所致.

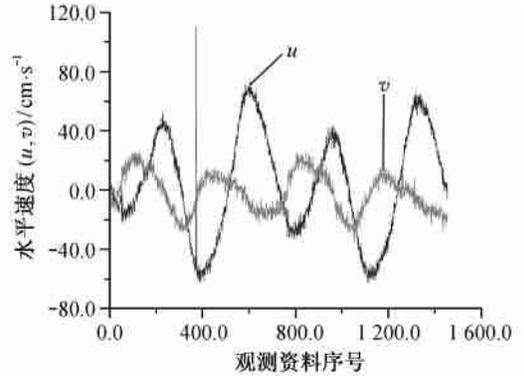


图 1 在第 3 层(深度 7 m)观测的水平速度( $u, v$ )的时间变化

### 3 资料分析

#### 3.1 资料预处理

观测的水平流速资料( $u$  分量向东为正,  $v$  分量向北为正, 见图 1)中包含了余流、潮流、次重力波流流和小尺度湍流. 首先我们使用一个平太阴日(24 h 50 min)内的流速连续观测资料求出余流( $u, v$ ), 即这些观测资料的算术平均值, 然后利用潮流滤波器( $a_5/5$ )<sup>3</sup>求得潮流( $U, V$ )的值<sup>[5]</sup>. 将实测资料减去( $u, v$ )和( $U, V$ )后得到流速( $u', v'$ ), 主要包含周期小于 10 min 的海洋内部运动.

#### 3.2 功率谱分析

我们对流速  $q = \sqrt{u'^2 + v'^2}$  进行功率谱分析, 使用的资料为 18 日 18: 40 至 19 日 18: 06 的观测结果. 在功率谱的估计中, 采样时间间隔  $t = 120$  s, Nyquist 频率  $f_N = 1/(2t) = 0.00417$  Hz, 乘积和的个数  $m$  取为  $0.5N$ , 这里  $N$  为样本容量. 在谱估计量的平滑中采用了 Hamming 窗. 图 2 所示为第 1 和第 7 层水平流速的功率谱. 在第 1~5 层, 次重力波的峰频率均为 0.00291 Hz, 对应的周期为 5.73 min. 在第 2~5 层水平流速功率谱的图形与第 1 层的图形是类似的. 在第 6 和第 7 层, 次重力波的峰频率明显地向低频漂移, 对应的周期约为 10 min.

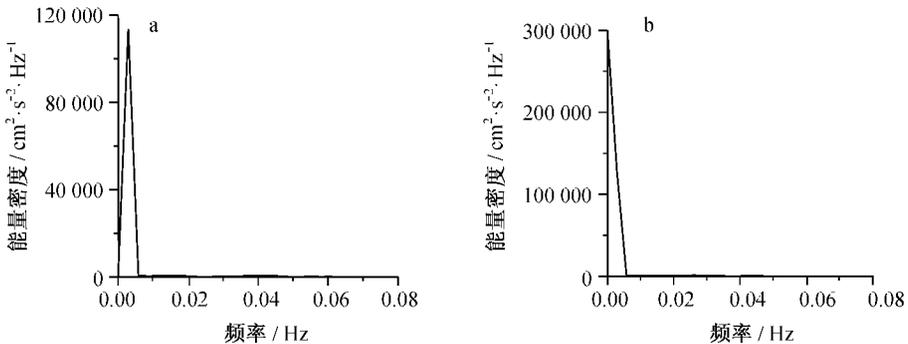


图 2 在第 1 层(a)和第 7 层(b)的水平速度  $q = \sqrt{u'^2 + v'^2}$  的功率谱

Brunt-Väisälä 频率 /  $10^{-3}$  Hz

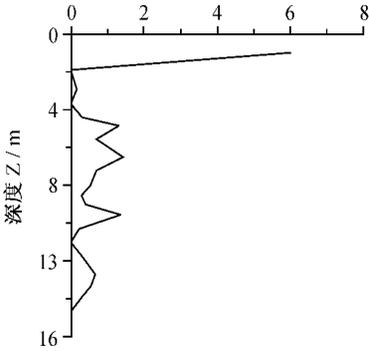


图 3 观测期间在该海区(  $37^{\circ} 55' N$ ,  $120^{\circ} 25' E$ ) 的 Brunt-  $V^{3/4}$  频率铅直分布

在第 6 层水平流速功率谱的图形与第 7 层的图形是类似的. 这种频率漂移的动力学原因尚不清楚, 可能与该次重力波的生成机制有关. 功率谱的峰值在第 1~ 5 层随深度增加而逐渐降低, 然而在第 6 和第 7 层随着峰频率的漂移该峰值变得很大. 此外, 将上述结果与图 3 所示的 Brunt-  $V^{3/4}$  频率的铅直分布相比较可见, 次重力波的峰频率在第 1~ 5 层明显地高于局地 Brunt-  $V^{3/4}$  频率. 因此我们发现的这种波动应属于次重力波范畴, 而不是一般的内重力波.

### 3.3 相干谱分析

对于相邻两层水平流速  $q_1$  和  $q_2$  之间的铅直相干谱分析, 我们使用的资料与在功率谱分析中所用的资料相同. 除  $m$  取为  $N/3$  之外, 其他参量及平滑窗均与功率谱分析中相同. 图 4 为第 1 层和第 2 层之间及第 6 层和第 7 层之间的相干谱.

其他各相邻层之间的相干谱的图形与图 4 所示是类似的. 这些图表明在该次重力波频段水平流速的铅直相干值是很高的. 该事实意味着次重力波的传播具有明显的方向性, 并且具有边缘波的性质. 这些观测结果与一般的表面重力波和高频内重力波的观测结果是显著不同的, 表面重力波的流体微团运动主要限于上层海水. 对于一般的风浪, 在大约 4 m 以下深度流体微团运动速度已经很小, 所以风浪产生的水平速度的铅直相干在深层水中很低. 高频内波不稳定性比较强, 因此高频内波的水平速度铅直相干也很低. 图 5 是与图 4 相对应的位相谱. 它们表明在次重力波频段相邻两层水平流速的变化方向激烈改变, 这与下面对水平流速铅直剪切的时间变化的分析结果是一致的, 但是仅有第 2 层和第 3 层之间的位相谱显示难以理解的不同的性质(该位相谱的图在本文中没给出).

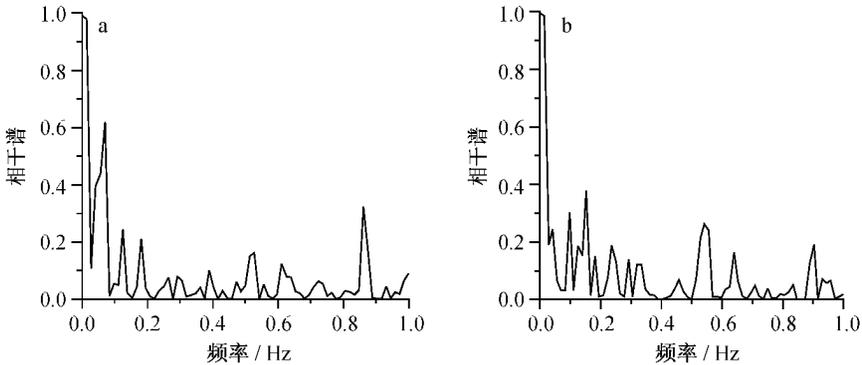


图 4 在第 1 层和第 2 层之间(a) 及第 6 层和第 7 层之间(b) 水平速度的铅直相干谱

### 3.4 剪切的时间变化

为了分析铅直剪切  $\frac{\partial u'}{\partial z}$  和  $\frac{\partial v'}{\partial z}$  的时间变化, 我们粗略地选用了以下 4 个时间段的观测资料: 涨潮时段( 17 日 18: 42~ 22: 42)、高潮时段( 17 日 22: 54 至 18 日 00: 54)、落潮时段

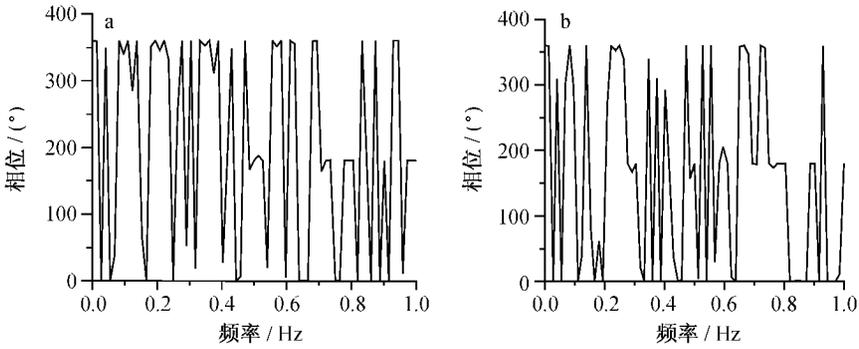
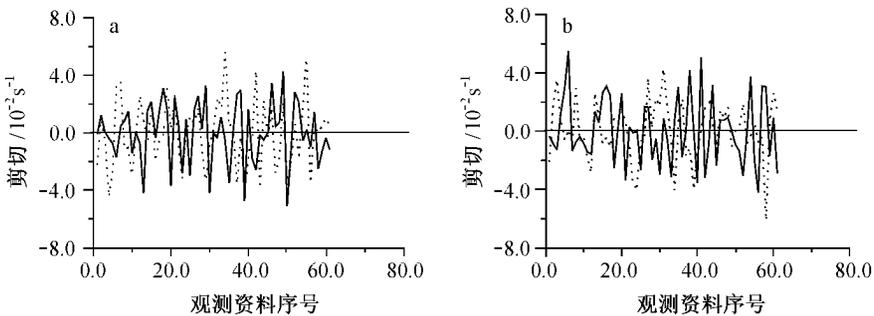


图5 与图4中相干谱相对应的位相谱

(18日00:54~04:54), 低潮时段(19日05:38~07:38). 虽然在这4个时段潮流剪切  $\frac{\partial U}{\partial Z}$  和  $\frac{\partial V}{\partial Z}$  的时间变化特性相差甚大, 但是剪切  $\frac{\partial u'}{\partial z}$  和  $\frac{\partial v'}{\partial z}$  的时间变化特性在这4个时段相差甚微, 所以我们仅给出在低潮时段第1层和第2层之间及第6层和第7层之间的剪切分析结果, 如图6所示. 这些图清晰地显示  $\frac{\partial u'}{\partial z}$  和  $\frac{\partial v'}{\partial z}$  随着时间正负交替变化, 其变化周期约为次重力波周期, 而这是内波的重要特征之一. 关于内波的这个重要特征既可给出解析证明, 也可依据内波传播的直观图像予以理解<sup>[6]</sup>, 然而迄今为止对次重力波和边缘波的理论模式、数值模式和谱模式的研究均取全流近似, 即, 不考虑流场的铅直结构<sup>[2,3,7,9]</sup>. 因此, 现有的次重力波模式不能合理地解释我们在渤海南部观测到的次重力波现象. 尽管没有与本资料同步的海面起伏及内部等势密度面铅直位移的观测资料, 但根据观测期间的海面状况, 考虑到 Wright 等的观测结果, 我们推测渤海南部的次重力波具有内波的某些特性.

图6 在第1层和第2层之间(a)及第6层和第7层之间(b)铅直剪切  $\frac{\partial u'}{\partial z}$  (实线)

和  $\frac{\partial v'}{\partial z}$  (点线) 在低潮时段的时间变化

## 4 结论与讨论

依据以上分析, 我们得到结论如下:

(1) 在渤海南部存在很强的周期约为6 min的次重力波. 以往若干作者将我国近海海流

分为余流、潮流和湍流三部分并将周期约小于 10 min 的海洋内部运动归入湍流<sup>[5,8]</sup>, 这种做法是不正确的;

(2) 该海区的次重力波基本上是自由波模式, 即具有边缘波的性质;

(3) 该海区的次重力波具有内波的某些特性, 这可能与该海区独特的海洋环境有关; 至今尚未见到国外有这方面的研究和报道<sup>[9]</sup>.

我们推测, 剪切层结潮流在近海由于海底地形坡度的作用而导致的不稳定过程(主要为剪切不稳定)可能是该海区次重力波的主要生成机制. 在所谓“潮混合”过程中, 次重力波可能扮演重要角色. 进一步的观测研究, 尤其是多参量的阵列方式的次重力波场观测研究, 是迫切需要的.

## 参考文献:

- [1] MUNK W H. Surf beats[J]. *Eos Trans Amer Geophys Union*, 1949, 30: 849—854.
- [2] HERBERS T H C, ELGAR S, GUZA R T. Infragravity-frequency (0.005–0.05 Hz) motions on the shelf. Part iv. Forced waves[J]. *J Phys Oceanogr*, 1994, 24: 917—927.
- [3] HERBERST H C, ELGAR S, GUZA R T, et al. Infragravity-frequency (0.005–0.05 Hz) motions on the shelf. Part ⑤. Free waves[J]. *J Phys Oceanogr*, 1995, 25: 1 063—1 079.
- [4] WRIGHT L D, YANG Z-S, RORNHOLD B D, et al. Short period internal waves over the Huanghe (Yellow River) Delta front[J]. *Geo-Marine Letters*, 1986, 6: 115—120.
- [5] 侍茂崇, 高郭平, 鲍献文. 海洋调查方法[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 2000. 343.
- [6] 范植松. 海洋内部混合研究基础[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [7] 叶安乐, 李凤岐. 物理海洋学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992. 684.
- [8] 赵亮, 魏皓. 渤海垂直湍流混合强度季节变化的数值模拟[J]. *青岛海洋大学学报*, 2001. 31(3): 313—318.
- [9] Van DONGEREN A R, SVENDSEN I A. Nonlinear and 3D effects in leaky infragravity waves[J]. *Coastal Engineering*, 2000, 41(4): 467—496.

## Infragravity waves with internal wave characteristics in the south of the Bohai Sea

FAN Zhi-song<sup>1</sup>, GAO Guo-ping<sup>1</sup>, YIN Xun-qiang<sup>1</sup>, FAN Yu<sup>1</sup>, WU Wei<sup>1</sup>

(1. *Marine Environment College, Ocean University of China, Shandong, Qingdao 266003, China*)

**Key words:** infragravity waves; edge waves; internal waves; vertical shear of horizontal velocity; internal mixing