

中国海洋学文集

OCEANOGRAPHY IN CHINA

3

浅海内波研究

赵俊生等

国家海洋局第一海洋研究所

国家自然科学基金资助项目

海洋出版社

中国海洋学文集

3

浅海内波研究

赵俊生等

国家海洋局第一海洋研究所

国家自然科学基金资助项目

海洋出版社

1992年·北京

内 容 简 介

本文集系国家自然科学基金资助之 04860224 项目的研究成果。成果包括测量和研究两方面内容。测量方面：提出了符合浅海特点的内波观测方法；设计并采用了适于在浅海获取整个垂直水柱中内波振幅及其波致流同步信息的测量系统；完成了黄海内波场实测数据资料的原始积累工作。研究方面：从浅海实测资料中提取内波信息的分析、处理方法；黄海内波场特征研究，并由此揭示出黄海全日内潮的特殊研究价值；对曾给出的两层海洋理论模式的实验验证及计算方法改进；从能量构成及分配关系，提出了揭示潮频内波对潮流垂直结构影响的研究方法；适用于跃层数值预报的内波理论模式研究；内波旋转特性的理论研究及应用等。

本文集可供科研、教学、有关的水下工程设计及国防部门应用和参考。

(京)新登字 087 号

编写委员会：主任 赵俊生 委员 耿世江

责任编辑 陈茂廷

中国海洋学文集 3

*

海洋出版社出版(北京复兴门外大街1号)

新华书店北京发行所发行 香河印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：6.875 字数：175千字

1992年10月第一版 1992年10月第一次印刷

印数：1—1000册

*

ISBN7-5027-2445-1/P·211 定价：10.00元

前 言

本文集为浅海内波研究论文专集,是 04860224 编号之国家自然科学基金资助项目的成果汇编。

海洋内波,即海洋内部的重力波,它们像海表面波浪一样常在,或许更甚,因为从未有人报道过海洋内部是平静的(W. Munk, 1981)。内波生成的条件是水域中因温、盐变化产生的密度层化和环境中的扰动。密度均匀水域中不会有内波,而如海浪、潮波等重力波于其中却可存在。相对内波而言,后者统称表面(重力)波。潮波有时也称为表面潮,因为潮频率内波常简称为内潮。内波的恢复力是重力与浮力之差,其量级在单位重力 g 的百分之几到千分之几左右。内波的典型尺度是若干千米和若干小时,其振幅明显地大,有成 10 米的量级。因此,内波是不难观测到的。内波的频率范围很宽,一般在浮性频率到局地惯性频率之间,低于惯性频率的内波往往与特殊环境有关。内波是充满活力的研究主题,关键是找出内波与其他海洋过程之间的联系。本文集研究的是我国浅近海中内波场的特征及其与所关心的主要海洋过程之间的联系。

内波是 Nansen 于 1902 年首先报道的,这归功于 Nansen 瓶及颠倒温度表的发明和使用。因为此前是无法检测到次表层水温或其密度的。然而,理论却比观测要早半个世纪。尽管如此,从实测发现内波起算,持续 40 多年对内波的研究并无突破性进展。1940 年温深仪(BT)的问世,使密集间隔重复测量成为可能。50 年代末期,由于热敏电阻测温器件的应用,使快速密集取样成为可能。始于 1959 年,等温度深度线变化的时间序列在美国海军电子实验室(NEL)海洋观测塔被获得。现在关于内波的时空尺度的观念主要是根据锚定、拖曳和垂直降落 3 种方式的快速密集采样的测量结果。内波常使海表面呈现出由交替的粗糙水带和光滑水带构成的现象(Ewing, 1950; Hughes, 1978)。这些现象从卫星上似乎是可见的。于是,卫星遥感又成了当今研究内波的一种手段。高频声纳亦是测量上层海洋中内波相关过程的有效工具。由此可见,内波确是一个充满活力的研究主题。关键是寻找内波与其他海洋过程的联系。更精细的尺度、直到分子尺度过程的发现,四五十年来不断地震惊着海洋学界。这些都是由于现代的探测仪器(BT、STD、CTD)以及那些沉降缓慢($\sim 0.1\text{cm/s}$)和使用小型快速响应($\sim 0.01\text{s}$)换能器的自由降落装置的功劳。四五十年前,内波处于一种既吸引人又遭人讨厌的境地。引人处在于它在解析学上的精美及其对于各种实验方法的可通达性。恼人处在于它干扰了当时所认定的物理海洋学主要任务,即,绘制平均密度场图。如今,内波的研究已同各种中、小尺度的物理过程联系了起来。Munk(1981)预期,20 年内,内波将会被认清是与热、盐和动量的垂直通量紧密关联的,以致在了解大洋平均质量场及运动方面提供一个核心的链环。

内波的研究,不但具有重要的理论价值,在国防和海洋开发方面,更具有应用价值。例如:美国长尾鲨号核潜艇在距麻省海岸 350 km 海域蒙难与内波有关;加拿大戴维斯海峡深水石油钻探平台曾遭内波破坏致使作业中断。

研究海洋内波的学者的注意力,大多集中在大洋水域。如今,陆架区内波也吸引了不少人进行研究。不过,研究大多集中在 100m 以深的陆架坡折处,如我国这样宽度的浅近海中,内波研究以往基本空白。我国关于内波的研究,开展较晚,主要是历史的原因,当然也不排斥它曾被

当作既引人而又讨厌的角色的观念的影响。

1980年春,中国科学院声学所汪德昭教授和国家海洋局第一海洋研究所束星北教授共同倡导,在我国近海开展海洋内波的观测和研究。自此,以海洋现场实测为基础的海洋内波研究,在我国正式起步;声学所以高频内波为对象,着重于高频内波对水下声场起伏影响的研究,第一海洋研究所则以海洋内波为对象,着重于中国浅海内波场(的特征)及其对海洋中其他动力因素影响的研究。

因缺乏历史观测资料,要对我国近海内波场行研究,必须从现场观测着手。作为对中国浅海内波场进行实测和研究迈出的第一步,我们花了近一年多的时间研制了一条由12个铂电阻探头构成并以单板机控制取样、记录的测温链,于1981年秋以其在黄海水域作了试验性测量;后又于1984年初研制成由16个热敏电阻探头构成并由微机控制取样、记录的测温链,用于海洋现场正式测量。从1981年起至1983年末束星北教授逝世,我们的工作是在他亲自指导下进行的。1984年后,工作继续前进。由于引进了Aanderaa测量系统,从1985年起,我们改用以12台Aanderaa海流计构成的测量系统辅以自制的热敏电阻测温链系统在海洋现场进行测量,以期在浅海中获取整个测量水柱中内波振幅场及其波致流场的同步信息。

我们选定黄海为实测海域,北黄海为重点研究水域。从1985年至1990年共进行了4航次内波专题考察,作了12个观测站的连续观测。特别于1990年秋,在我国近海首次实现了由3点浮标阵和1船舶站进行的连续7昼夜的内波同步观测。藉此,我们不但获取了不同水域内具有代表性测站的实测资料,而且取得了重点测站于不同年份、不同季节的重复观测记录;4点同步连续观测的资料更充实了我们的数据资料库,为我们的理论研究成果提供了佐证。归结起来,在执行基金项目期间(1987~1990年),完成的成果有两个方面。

在观测方面的成果:(1)提出了符合浅海特点的内波观测方法,设计并采用了适于在浅海获取整个垂直水柱中内波振幅及其波致流同步信息的测量系统;(2)完成了黄海内波场实测数据的原始积累工作。

研究成果包括:(1)1990年经3点同步连续观测验证,证明了以前给出的模式,即,针对浅海特点,在理论上,给出了藉单站测量资料计算潮频内波包络面传播方向和速度的两层海洋模式)的正确性。(2)总结出从浅海实测资料中提取内波信息的分析、处理方法。(3)提出了从能量构成及分配研究潮流垂直结构的方法。证明了在潮流垂直结构的形成中正压潮流与变差潮流的交叉作用是主导因素;而当内潮流在变差潮流中的能量占支配地位时,可以导致跃层以下潮流的逆转;由实测资料计算证实,老铁山水道邻近水域中全日潮流之所以在跃层以下呈现逆转,主要是全日内潮造成的。(4)研究证明,用三层海洋(上、下为均匀层,中间界以浮性频率 $N = \text{const.}$ 水层)的内波模式来估计黄海区内潮对跃层起伏的影响是适用的。其估计的相对误差不超过15%。(5)从理论上证明了自由内波的波致流在北半球一定是顺时针旋转的。其旋转椭圆的椭圆率在量值上等于惯性频率与波频率的比值,波沿其波致流椭圆长轴的确切方向传播。实测资料计算证实:北黄海实测水域和南黄海部分水域中半日内潮具有自由内波特征;黄海全日内潮具有内Kelvin波特征。(6)研究发现:黄海区内波场的能量主要集中在全日和半日内潮频段,即黄海内波场中内潮流居支配地位;老铁山水道邻近水域为大振幅内波区,全日内潮比半日内潮更强。基于黄海处于惯性区以北(即 $\sigma < f$, σ ——全日潮频率, f ——惯性频率),研究断定,该区全日内潮应属于受地形拦截的陷波类,这种波的生成机理问题国外几无涉及,从而确立了进一步深入研究的课题。

1986年,我们面临着内波研究是否持续下去的抉择。要持续,就必须进行实测,离开实测

是无法研究中国浅海问题的。因为,开展研究所必需的实测资料还很缺乏。为此,我们申请并得到了国家自然科学基金的资助。于执行基金项目期间,在经费严重缺乏和测量用船及观测仪器的调配使用存在重重困难的情况下,经主观努力,多方求助,在国家海洋局及本所各级业务部门的理解、支持和协助下,终于按预定目标于1987、1989和1990年实现了3次海洋现场内波专题测量。特别,在1990年秋,在我国首次实现了三点浮标阵及一船舶站连续7昼夜的内波同步观测,超额完成了基金项目的指标。在此,向一切支持我们工作的领导机构和个人表示诚挚的谢意和感激。

赵俊生

1991年12月

中国海洋学文集

第 3 集

目 录

前言	(1)
北黄海内波场特征	赵俊生 耿世江 孙洪亮 张自历 (1)
南黄海内波场特征	赵俊生 耿世江 孙洪亮 张自历 谭攻克 (14)
北黄海内潮对潮流垂直结构的影响	赵俊生 耿世江 孙洪亮 张自历 (26)
内波旋转特性的理论研究及其应用	赵俊生 耿世江 (41)
关于估计内波对跃层影响的适用理论模式的研究	赵俊生 耿世江 (58)
黄海内波场的观测和研究	赵俊生 耿世江 孙洪亮 张自历 谭攻克 (78)

OCEANOGRAPHY IN CHINA

(3)

CONTENTS

Foreword

Internal Wave Field Characteristics in the North Huanghai Sea	
..... <i>Zhao Junsheng, Geng Shijiang, Sun Hongliang and Zhang Zili</i>	(13)
Internal Wave Field Characteristics in the South Huanghai Sea	
..... <i>Zhao Junsheng, Geng Shijiang, Sun Hongliang, Zhang Zili and Tan Gongke</i>	(24)
The Effect of Internal Tides on the Vertical Structure of Tidal Current in the North Huanghai Sea.....	<i>Zhao Junsheng, Geng Shijiang, Sun Hongliang and Zhang Zili</i> (40)
Theoretical Study on the Rotary Characteristics of Internal Waves and Its Application	<i>Zhao Junsheng and Geng Shijiang</i> (56)
The Study of the Theoretical Model Suitable for Estimating the Effect of the Internal Waves on the Thermocline.....	<i>Zhao Junsheng and Geng Shijiang</i> (76)
The Observation and Study for the Internal Wave Field in the Huanghai Sea	
..... <i>Zhao Junsheng, Geng Shijiang, Sun Hongliang, Zhang Zili and Tan Gongke</i>	(100)

北黄海内波场特征*

赵俊生 耿世江 孙洪亮 张自历

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛)

摘 要

本文根据在北黄海 A 和 B 两个纬向断面, 利用由 16 通道热敏电阻测温链和 12 台 Aanderaa 海流计构成的垂直阵列所获取的温、盐、深和海流同步连续观测资料, 借助于谱分析和波包络面传播参数的计算, 概括出北黄海内波场的如下特征: (1) 内波的谱能量主要集中在潮频段。在全日潮直至 1/5 日分潮频段, 谱峰明显; 在全日和半日潮频段, 谱峰突出, 表明该区全日及半日潮频内波占主导; (2) 内波群包络面的传播速度, 在 A 断面观测区约 1~1.4 节, 在 B 断面观测水域约为 0.5 节。 (3) 内波群波峰线大致与等深线平行。 (4) 在全日直至 1/5 日分潮频段, 跃层两侧的内波波致流反向, 均顺时针旋转; 跃层两侧同频率波致流旋转椭圆的长轴方向及椭圆率均相同。 (5) A 断面区诸测站, 全日潮频内波流的能量约占同频率变化流能量的 60%~70%, 半日潮频内波流的能量约占同频率变化流的 40%~60%。 (6) A 断面区跃层以下水层中出现全日潮流逆转的现象, 究其原因主要是由内潮流造成的。

海洋内波是在稳定分层海洋内部产生的一种波动。北黄海是一个季节层化特征明显的陆架浅海, 具备产生内波的介质条件。为了揭示北黄海的内波场特征, 我们在 A 和 B 两个典型断面上, 进行了 6 个站次的温度、盐度、深度、流速和流向共 5 个参数的同步连续观测, 并通过实测资料的分析, 概括出了北黄海的内波场特征。

本文第一节叙述测站布设、仪器配置和资料处理; 第二节介绍内波的振幅谱及其波致流的旋转谱特征; 第三节介绍内波群包络面的传播特征; 第四节概述内波波致流的特征分析; 第五节为初步结论。

一、测站布设、仪器配置和资料处理

(一) 测站布设

在纬向 A 断面共布设了 L3(现场水深 60m)、L34(现场水深 63m) 和 L4(现场水深 60m)

* 国家自然科学基金资助项目。

三个测站。在B断面共布设了L5(现场水深45m)和L6(现场水深60m)两个测站。1985年夏,由“向阳红08”号船(1200t),在L3站连续观测24.7h(07-02 11:35~07-03 12:10),在L4站连续观测75h(06-29 06:55~07-02 09:50)。该二测站周围地形起伏,半日及全日潮流均较强盛,有较大振幅内波的生成条件。观测期间邻近当地大潮期,温跃层处成长阶段,风力大多4级以下。在L5站连续观测75h(06-25 19:10~06-28 22:05),在L6站连续观测50h(06-23 13:40~06-25 15:35)。该二测站半日潮流强,观测期间温跃层处成长阶段,多雾天。1989年秋,由“向阳红07”号船,又在L4站连续观测100h(09-10 13:55~09-14 17:50)。原计划在该站连续观测175h,因大风中止了观测。在L34站连续观测75h(09-18 08:30~09-21 11:25),观测是在大风后开始的。该二站的观测,分别值当地大潮期之前和之后。温跃层处下沉阶段,其上界约在20m左右。

(二)仪器配置

为了获取内波的起伏及其波致流的完整信息,采用12台Aanderaa海流计构成垂向测量阵,并辅以自制的16通道热敏电阻测温链作同步测量。Aanderaa海流计是按最大限度地获取从海面至海底整个水柱中内波振幅及其波致流的同步时间序列为准则配置的。一般最上和最下两台海流计分别置于离海面3~5m及距海底3~4m之水层中。从第一台海流计向下,根据跃层的厚度及其上界的深度,采取不等距方式配置其余10台,但在跃层及其上、下界附近,两台海流计的平均间距为2m。测量时12台Aanderaa海流计同步触发,取样间隔5min。16通道测温链所测海水温度用微机记录,取样间隔1min,探头总跨度20cm,主要置于温跃层中。观测仪器投放前,先以MBT作辅助测量,以确定跃层的大体位置。仪器配置示意图见图1。

(三)资料处理

对在上述各站由Aanderaa海流计和测温链获取的温度、盐度、压强、流速和流向同步观测记录进行了处理。各站水温梯度的时间序列,根据海水温度及其相应的水深时间序列通过Lagrange插值公式求得;等温度深度线时间序列,经线性插值获得。等密度深度线时间序列,由温、盐、深时间序列算得的密度时间序列及其对应的水深时间序列,借线性插值公式求得。下面所示的跃层上、下边界面,以及标示内波起伏的等温度深度线或等密度深度线,均系上述计算结果的直观图像。内波振幅谱图亦均由等温度深度线或等密度深度线时间序列经计算得出。

关于实测海流记录的处理,由各站12层实测海流同步记录解码后获12个时间相应、长度相等的实测流的时间序列。由同一时刻记录的12个流矢量,针对其各自的瞬时深度,利用梯形积分公式算得平均全流时间序列,再由诸实测流与平均全流时间序列之差,获得各层变差流的时间序列。再经Fourier变换,使得平均全流及各层变差流的单频分量。显然,平均全流的全日及半日潮频分量是正压性的潮

分量。它们比较精确地反映出天文潮的特征。据此,我们称其为全日和半日平均正压潮流分量,依此类推。就各层变差流的单频分量而言,其构成成分比较复杂,它既包含正压潮流因受海底摩擦影响导致应力分布不均匀产生的变

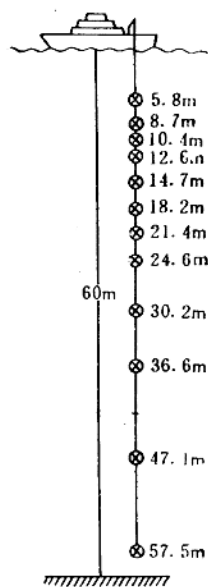


图1 Aanderaa海流计垂直
阵列示意图

化流,也包括层化海水中由各种扰动所引起的斜压性波的波致流。斜压潮,即潮频率内波,亦称内潮^[1,2]。由此可见,在层化浅海中潮频率的变差流,即通常所称的潮余流,实际上包括正压潮流受海底摩擦影响所致的余流(或变差流)和内潮所致的余流(或变差流)。由于正压潮流具表面波属性,亦称表面潮^[2]。因此,在浅海通常所谓的潮余流实际上由表面(或正压)潮流和内(或斜压)潮余流两部分组成。当研究表面潮余流时,应设法将内潮余流滤除;当研究潮频内波流时,应设法滤除表面潮余流。

我们现在所面临的问题就是要从以表面潮流为主的背景流场中检出内潮流来加以研究。如所周知,同频率的两种成分用一般的滤波器是无法分别滤除和检出的。对于这个问题我们是这样处理的:以跃层为界,分别对跃层以上及其以下水柱中实测的变差流取积分平均,以此二平均变差流表征跃层上、下两侧的内波波致流。按照我们测量时的试验设计,参与跃层以上水柱平均计算的有 8 或 9 个实测层的变差流,参与跃层以下水柱平均计算的有 4 或 3 个实测层的变差流。所获平均变差流的 Fourier 分量即表示跃层以上或其下确定频率的内波流。

依上述方法获取的平均变差流来表征跃层上侧或下侧的内波流有何依据呢?换言之,依上述方法处理是否能有效地滤除正压潮流成分呢?这可从理论和实际两方面予以回答。从理论上讲,内波流显著具有依跃层分布的特征。在典型的界面内波情况下,跃层界面两侧内波流应反相(即相位相差 180°)。在我们所测量的浅海区,以 $0.2^\circ\text{C}/\text{m}$ 梯度划分跃层的上、下界,其厚度最大不过 10m 左右。跃层可用理想的几何界面或浮性频率 $N=\text{const}$ 来近似。在此情况下,跃层上、下侧的内波流均应呈现反相的特征。而以上述方法处理所获跃层上、下侧平均变差流的相位衡量确具反相的特征。事实上,于以上所述各测站,在全日直至 $1/5$ 日分潮频段上,跃层上、下侧平均变差流分量的相位差均在 $180^\circ \pm 1^\circ$ 的范围内。更有趣的事实是,无论平均正压潮流是顺或逆时针旋转,其相应频率的平均变差流均顺时针旋转,且上、下层平均变差流的椭圆率近似相等。由此可见,跃层上、下侧的平均变差流确能表征对应侧的内波流。

二、内波振幅谱及其波致流旋转谱特征

(一)实测内波起伏

内波出现在因温、盐变化而层结的海域的次表层水中^[3]。其振幅以等密度深度线的起伏来衡量。由于直接测量海水密度的困难,通常用等温线或等盐线的起伏予以标志。在浅海中,测量内波主要靠测温^[4]。图 2~5 表示在 B 和 A 纬线上实测的等温度深度线的起伏状况。图中上方的粗线表示温跃层上边界($0.2^\circ\text{C}/\text{m}$),下方粗线表示 $0.1^\circ\text{C}/\text{m}$ (或 $0.05^\circ\text{C}/\text{m}$)的温度梯度线。图 2 和 3 表示夏初内波的起伏状况;图 4 和 5 为秋季内波的起伏状况。由图可直观地归纳出如下特征:

1. 潮频率的内波,在实测站明显地存在。在 L5 站,半日潮频内波显著;在 L4 和 L34 站,全日和半日潮频率内波均显著。
2. 内波振幅的最大值不是在跃层中出现,而是在跃层下边界($0.2^\circ\text{C}/\text{m}$ 等温度深度线)与其下 $0.1^\circ\text{C}/\text{m}$ 或 $0.05^\circ\text{C}/\text{m}$ 等温度梯度线之间出现。
3. A 断面区存在较大振幅的内波(图 3~5)。
4. 夏季跃层成长期的内波趋近海面;秋季内波随跃层而下沉。

于此顺便指出,通过等密度深度线与等温度深度线起伏特征的对比发现,二者几无差异,

故此,略去各站等密度深度线起伏图。

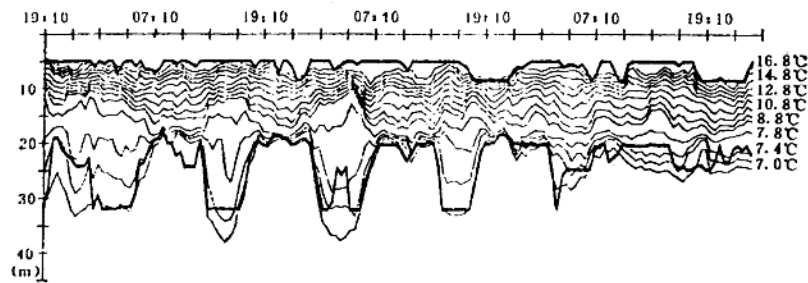


图2 L5站等温度深度线

图中上、下粗线分别为 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 和 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ (或 $0.05^{\circ}\text{C}/\text{m}$) 等梯度线,
水深:45m;观测日期:1985-06-25 19:10~1985-06-28 22:05

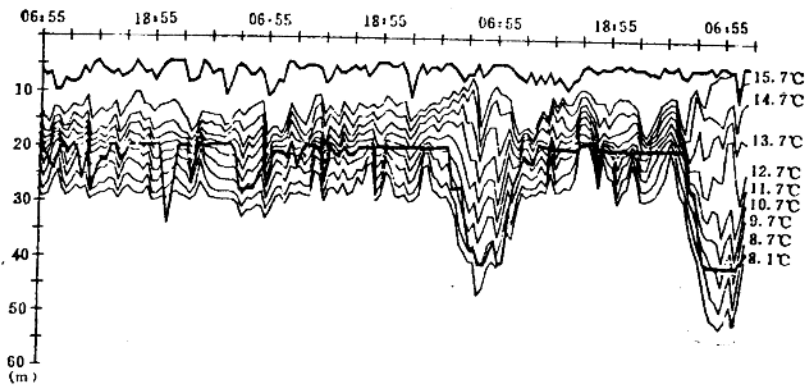


图3 L4站等温度深度线

图中粗线意义同前;水深:60m;观测日期:1985-06-29 06:55~1985-07-02 09:50

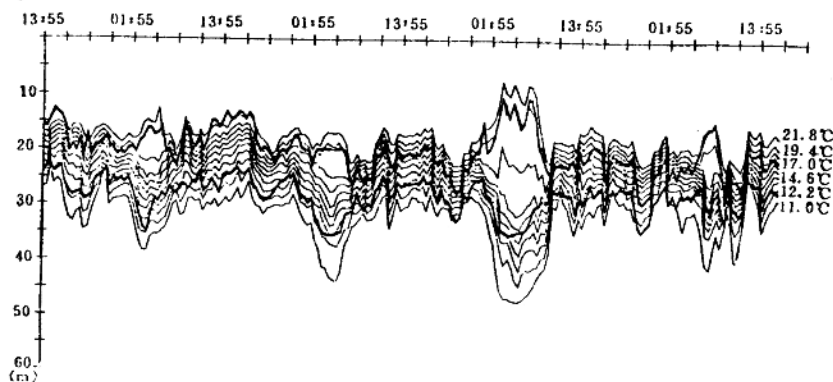


图4 L4站等温度深度线

图中粗线意义同前;观测日期:1989-09-10 13:55~1989-09-14 17:50

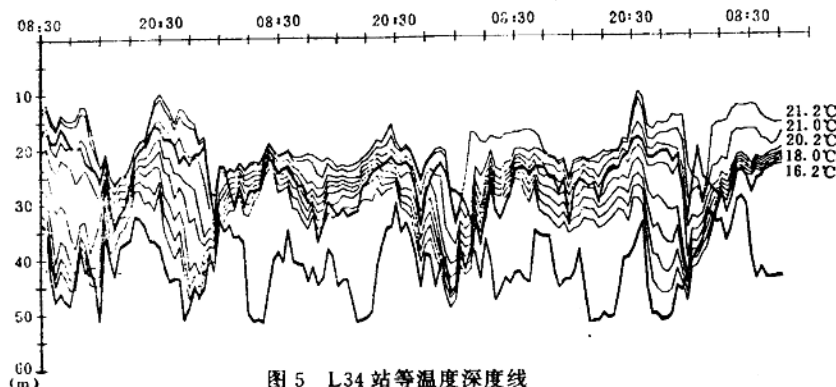


图 5 L34 站等温度深度线
图中粗线意义同前;水深:63m;观测日期:1989-09-18 08:30~1989-09-21 11:25

(二)内波振幅谱特征

内波振幅谱由等温度深度线时间序列计算获得。图 6(a)和(b)表示 B 断面上 L6 和 L5 站内波振幅谱。图 6(c)、(d)、(e)为 A 断面上 L4 和 L34 站不同季节内波振幅谱。

从图 6(a)和(b)看出,在全日至 1/4 日分潮频段有谱峰,半日潮频段谱峰突出。图 6(c)和(d)是在同一测站,由不同年份、不同季节的测量资料计算的结果。二者的共同特征是,在全日和半日潮频率,谱峰均异常突起;全日潮频段的谱能量一致地超过半日潮频段的。这种特征在不同年份、不同季节的重现性表明,在该海域存在着较大的全日和半日潮频率的内波,并且可以推断,它的存在主要是该海域表面潮波与其周围的固有地形特征所决定的。这与陆架区内潮是由表面潮与地形相互作用激发生成的论断^[5~8]相吻合。L34 站(见图 6(e))也是全日和半日潮频率内波显著。与 L4 站情况不同的是,于该站半日潮频段谱峰较全日潮频段的更突出。L3 站(谱图未列出)的谱特征与 L4 站的类似。

综北黄海两个典型断面 5 个测站 6 次单点观测的结果可以得出如下结论:

1. 在北黄海,内波场的能量集中在潮频段,全日和(或)半日潮频率的内波占主导。
2. 在北黄海,潮频率内波,即内潮波是由表面潮(即正压潮)与地形相互作用激发生成的。其证据有二:第一,在 B 断面上,两测站处均属半日潮为主海区,相应地半日潮频率内波占主导;在 A 断面上的 3 测站处均属混合潮区,与之相应地该处全日和半日潮频率内波均较强;第二,在 L4 站两次测量谱特征的重现性,除归结为正压潮周期性因素和地形不变因素促成外别无其他解释。

3. 对 A 断面区全日和半日潮频率内波生成机理进行研究具有理论和现实意义。因为该区的全日潮频率已低于惯性频率,既然事实证明这种频率的内波在该区是存在的,那么可以推想,其以 Kelvin 波形式存在的可能性极大。但是,对于这种低于惯性频率的内 Kelvin 波激发生理的研究尚未见有报道。

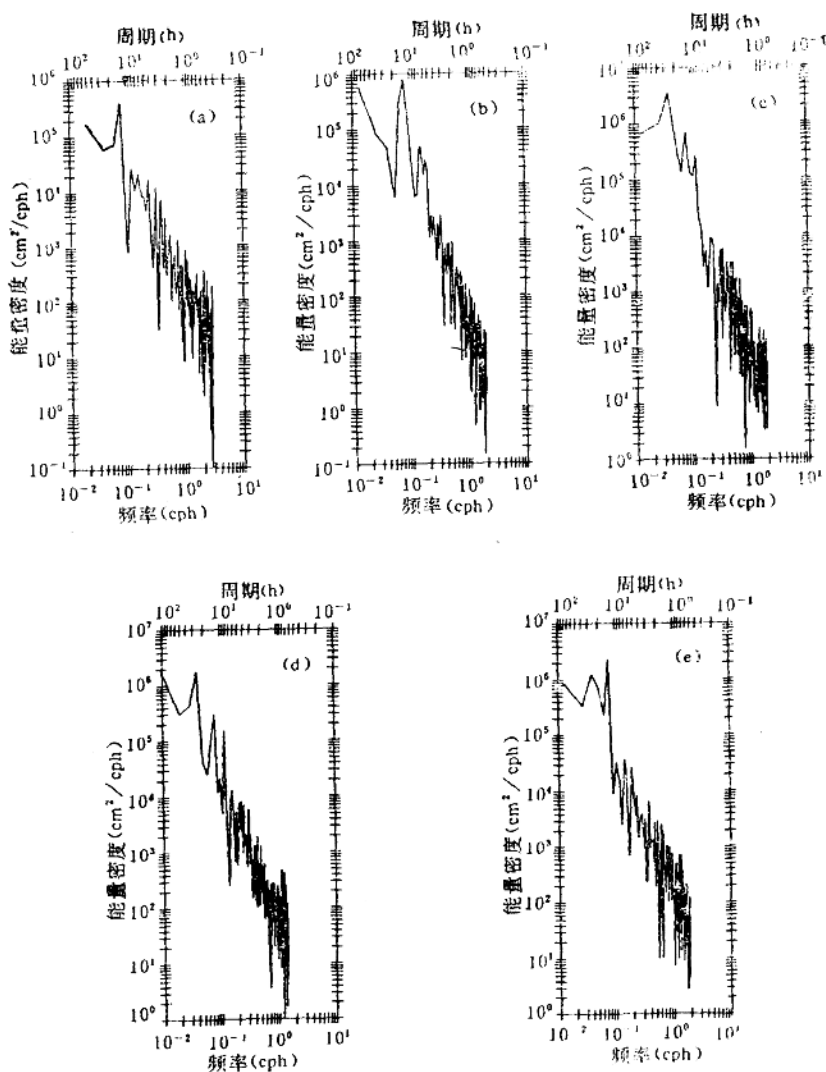


图6 内波振幅谱

(a)L6站,水深:60m;观测日期:1985-06-23 13:40~1985-06-26 15:35;

(b)L5站,观测日期同图2 (c)L4站,观测日期同图3

(d)L4站,观测日期同图4 (e)L34站,观测日期同图5

(三)内波波致流的旋转谱特征

内波波致流的旋转谱由跃层两侧平均变差流之差的时间序列计算获得。图7表示各测站内波波致流的旋转谱图。与图6相对照不难发现,同一测站的内波流的旋转谱谱峰特征与其振幅谱的完全一致。这对从振幅谱所得的结论起到印证的作用。另一方面,也进一步证明前述以跃层为界对实测变差流按水柱取积分平均滤除正压潮余流的方法,在浅海是行之有效的。除了

与振幅谱图的峰值一致性外,从图 7 还可以看出,所列各站全日和半日潮频率的内波都是顺时针旋转的。事实上,L6 和 L5 站的半日潮流都是逆时针旋转的,L3 和 L34 站的全日潮流也都是逆时针旋转的。这一特征表明,低频内波的波致流一般具有地转特征。关于自由内波,我们曾证明,其波致流在北半球一定是顺时针旋转的,在南半球一定是逆时针旋转的性质。即使是内 Kelvin 波,在相当广的范围内也具有此性质⁽⁹⁾。

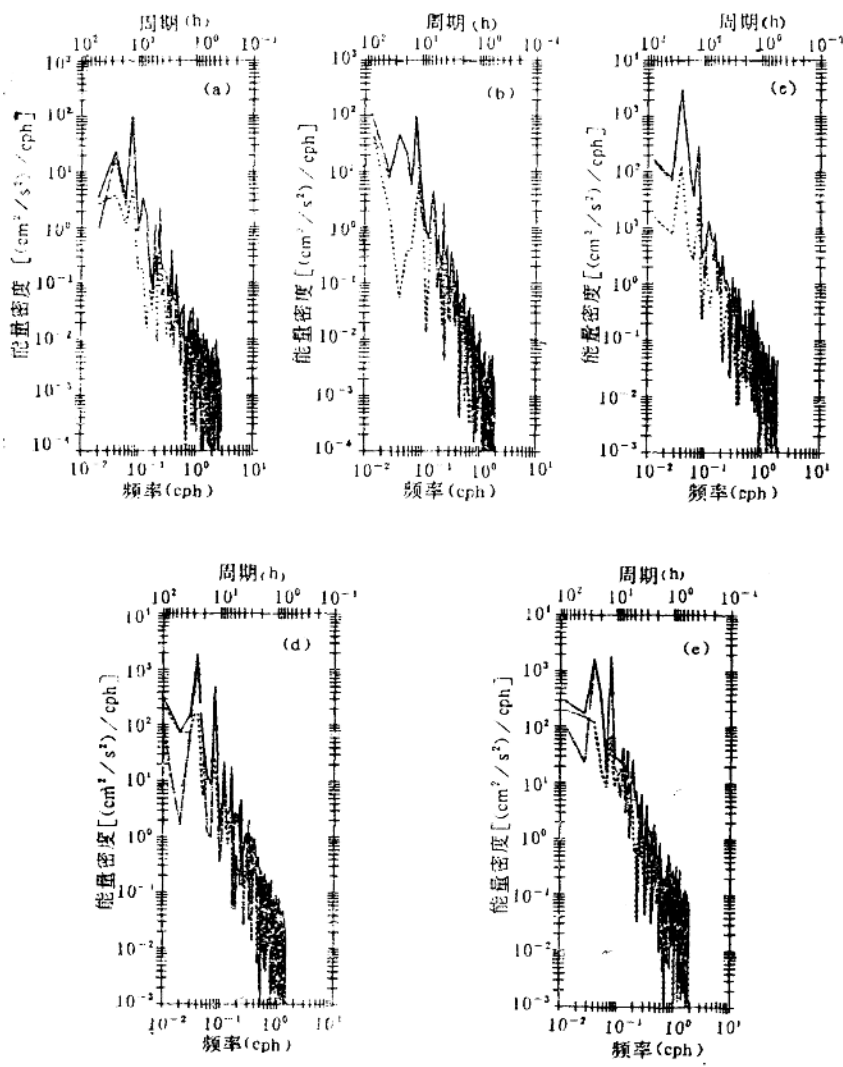


图 7 内波流旋转谱

图中实线表示总谱;点划线和点线分别表示顺、逆时针旋转能量谱。

(a)L6 站;(b)L5 站;(c)L4 站,观测日期同图 6(c);

(d)L4 站,观测日期同图 6(d);(e)L34 站

三、内波群包络面的传播特征

由前一节讨论的谱特征证实,所研究海域的内波场实际上是潮频率内波场或内潮波场。关于内潮波包络面的传播,作者曾得出如下的模式:

$$A\Delta\bar{u} + B\Delta\bar{v} = \bar{\xi}, \quad (1)$$

式中 $\Delta\bar{u}, \Delta\bar{v}$ 分别表示跃层下、上两侧平均变差流之差的东分量和北分量, $\bar{\xi}$ 为跃层邻近等温度(或等密度)深度线的平均起伏。为叙述方便,称 $(\Delta\bar{u}, \Delta\bar{v})$ 为平均剪切变差流,简称剪切变差流。借 $\bar{\xi}$ 和剪切变差流的实测时间序列作二元回归分析求得 A 和 B 。波群包络面的传播方向和速度由下式估算:

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{A}{B}, \quad C = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \cdot \frac{H_1 H_2}{H},$$

其中 H_2, H_1 和 H 分别为跃层以上水层厚度、跃层以下水层厚度及水深。为了检验二元相关的显著性,并以 F 函数作方差分析^[4]。严格来说,在利用 $\bar{\xi}$ 和剪切变差流的实测时间序列按模式(1)进行计算时,应从中滤除非潮周期的成分。因此,我们有必要在具体估算实测海区内潮波场传播参量之前,首先给出一个能滤除非潮频成分的计算模式来。

(一)模式计算方法的改进

令 $(\Delta\bar{u}_j, \Delta\bar{v}_j, \bar{\xi}_j)$ 表示三维样本空间中的样本点, j 为等时间间隔内取样的序号。考虑关于 A 和 B 的二次式

$$Q = \sum_{j=1}^N (A\Delta\bar{u}_j + B\Delta\bar{v}_j - \bar{\xi}_j)^2.$$

按最小二乘法, A 和 B 即由 $\frac{\partial Q}{\partial A} = 0$ 和 $\frac{\partial Q}{\partial B} = 0$ 联立方程求得。为滤除非潮汐频率的成分,将 $\Delta\bar{u}_j$ 、 $\Delta\bar{v}_j$ 及 $\bar{\xi}_j$ 以 Fourier 级数形式代入 Q 式

$$Q = \sum_{j=1}^N \left[A \sum_{k=1}^M (a_{1k} \cos \omega_{kj} + b_{1k} \sin \omega_{kj}) + B \sum_{k=1}^M (a_{2k} \cos \omega_{kj} + b_{2k} \sin \omega_{kj}) - \sum_{k=1}^M (P_k \cos \omega_{kj} + q_k \sin \omega_{kj}) \right]^2,$$

其中,

$$\omega_{kj} = \frac{2\pi(k-1)}{N} j, \quad M = \left[\frac{N}{2} \right].$$

设 $N = L \cdot T$, L 为正整数, T 表示全日潮的无量纲周期。在 Q 表达式中保留 $k = m \cdot L$ 项,略去其余的成分, $k = 1, 2, \dots, \left[\frac{N}{2} \right]$, $m = 1, 2, \dots, \frac{\left[\frac{N}{2} \right]}{L}$, 并以积分式近似代表关于 j 的求和式,于是得到

$$\bar{Q} = \int_0^1 \left[A \sum_{k=1}^{T/2} (A_{1k} \cos \omega_k t + B_{1k} \sin \omega_k t) + B \sum_{k=1}^{T/2} (A_{2k} \cos \omega_k t + B_{2k} \sin \omega_k t) - \sum_{k=1}^{T/2} (P_k \cos \omega_k t + Q_k \sin \omega_k t) \right]^2 dt,$$

其中, $\omega_k = \frac{2\pi}{T} \cdot k$ 经简单运算, 遂得:

$$\bar{Q} = \frac{1}{2} \{ A^2 \sum (A_{1k}^2 + B_{1k}^2) + B^2 (A_{2k}^2 + B_{2k}^2) + 2AB \sum (A_{1k} A_{2k} + B_{1k} B_{2k}) + \sum (P_k^2 + Q_k^2 - 2A \sum (A_{1k} P_k + B_{1k} Q_k) - 2B \sum (A_{2k} P_k + B_{2k} Q_k)) \}.$$

由 $\frac{\partial \bar{Q}}{\partial A} = 0$ 和 $\frac{\partial \bar{Q}}{\partial B} = 0$, 即得:

$$A = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad B = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad (2)$$

其中,

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} \sum (A_{1k}^2 + B_{1k}^2), & \sum (A_{1k} A_{2k} + B_{1k} B_{2k}) \\ \sum (A_{1k} A_{2k} + B_{1k} B_{2k}), & \sum (A_{2k}^2 + B_{2k}^2) \end{vmatrix}, \\ \Delta_1 &= \begin{vmatrix} \sum (A_{1k} P_k + B_{1k} Q_k), & \sum (A_{1k} A_{2k} + B_{1k} B_{2k}) \\ \sum (A_{2k} P_k + B_{2k} Q_k), & \sum (A_{2k}^2 + B_{2k}^2) \end{vmatrix}, \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} \sum (A_{1k}^2 + B_{1k}^2), & \sum (A_{1k} P_k + B_{1k} Q_k) \\ \sum (A_{1k} A_{2k} + B_{1k} B_{2k}), & \sum (A_{2k} P_k + B_{2k} Q_k) \end{vmatrix}. \\ \Rightarrow \quad \varphi &= \operatorname{tg}^{-1} \frac{A}{B}, \quad C = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \cdot \frac{H_1 H_2}{H}. \end{aligned} \quad (3)$$

式(2)和(3)即滤除非潮频成分后计算内潮波群包络面的传播方向和速度的计算式。

为了检验二元相关的显著性, 同样可以给出遵循 F 分布的统计量来。统计量

$$F = \frac{A \sum (A_{1k} P_k + B_{1k} Q_k) + B \sum (A_{2k} P_k + B_{2k} Q_k)}{\sum (P_k^2 + Q_k^2) - [A \sum (A_{1k} P_k + B_{1k} Q_k) + B \sum (A_{2k} P_k + B_{2k} Q_k)]} \cdot \frac{(T/2) - 3}{2}, \quad (4)$$

复相关系数

$$R = \sqrt{\frac{A \sum (A_{1k} P_k + B_{1k} Q_k) + B \sum (A_{2k} P_k + B_{2k} Q_k)}{\sum (P_k^2 + Q_k^2)}}. \quad (5)$$

(二)内波群包络面的传播特征

既然所研究海区的内波场以内潮波场为主, 那么我们就着重研究内潮波包络面的传播特征。估计波群包络面的方向和速度, 利用公式(2)和(3)。检验相关显著性用式(4), 式(5)作参考。

在计算中, 跃层的分界面从海底算起, 在 $0.05^\circ \text{C}/\text{m}$ (或 $0.1^\circ \text{C}/\text{m}$) 的等温度梯度线的平均深度与 $0.2^\circ \text{C}/\text{m}$ 等温度梯度线的平均深度之间的水层中选取。界面处的变差流由界面两侧相邻实测层的变差流插值获得。然后, 由所计算的平均剪切变差流及与该界面的深度相近的等温度深度线起伏的潮频 Fourier 分量, 按公式(2)和(3)计算, 并借式(4)作显著性检验。计算结果