

近海陆架区内潮观测研究进展

郭朴, 方文东, 于红兵

(中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室 广东 广州 510301)

摘要:内潮是近海陆架区内最常见的海洋内波,一般是由正压潮经过特殊地形或海况激发产生,内潮由此具有天文潮周期且出现频率相对稳定。频繁出现的内潮对人类海上活动的影响有弊也有利,它可引发强烈的海水混合或产生上升流,使深层营养盐提升从而形成丰富的渔场,而大振幅内潮或由其演变出的强孤立内波会干扰海洋工程作业,对建成的石油钻井平台和海底油气管道构成严重的威胁,内潮导致的水体扰动还会对海上舰船的行驶产生不利影响。所以对近海陆架区内潮的观测研究一直为人们所重视。对内潮的一些相关特点做了简要介绍,主要论述了国际上近海陆架区内潮观测研究的进展情况以及近几年来观测方法的最新发展趋势,并着重分析了南海北部海区内潮研究现状,讨论了目前南海内潮观测研究中存在的一些问题,进而提出今后开展进一步观测研究的思路。

关键词:内潮;陆架区;内波;南海北部;观测研究

中图分类号: P73 **文献标识码:** A

内潮是一种具有天文潮周期的海洋内波^[1]。1970年 Petterson 发现卡特加特(Kattegat)海峡的水体内部运动有相当一部分具有潮周期^[2]。此后的几十年,内潮现象在世界各地不断被发现和观测。今天人们已经认识到它是全球潮能量耗散的重要过程^[3],也是影响海水混合过程的重要因素^[4-7]。

密度层结的天文潮流流经剧烈变化的海底地形时受地形的强迫作用就会激发出内潮,所以大陆架坡折区是生成内潮的主要区域^[8],其传播方向决定于地形因素和海水层化状况。强烈的内潮可以造成海水等温线数十米的升降,并携带能量以波束的形式向深海及浅海区传播,经过反射、散射或演变为孤立内波,在能量耗散的过程中对海洋内部混合产生重要影响^[9-11]。

掌握内潮现象活动情况对海洋科技和海洋工程发展十分重要。多发的内潮现象会对海洋工程及设施产生严重威胁,经常有干扰工程作业施工、破坏油

气管道的事件发生。如在安德曼海,一个石油钻井机曾被经过的潮生孤立内波扭转了 90° 并被推移超过 30 m ^[12]。不过内潮现象也不是只会造成危害,大振幅的潮生内波在传播到浅海区后将产生海水混合或者形成上升流区,提升底层高营养盐到表层^[13],提高表层海水的初级生产力,改变局部海洋的生态环境,上升流显著的地方可形成产量丰富的渔场。所以内潮的研究在许多领域都有重要的价值,特别是人类在近海陆架区的许多活动都要重视内潮的影响。

理论分析表明,所有分潮周期的内潮都会存在,但强度各有不同。在实际观测中也发现,半日和全日周期的内潮分量在总能量中占主导地位^[14],主要是 M_2 、 S_2 、 O_1 、 M_1 及 K_1 分内潮。不同的海区由于自身特点所产生内潮的能量分布也不尽相同,但能谱中的峰值点绝大部分都是 M_2 或 K_1 ,其他周期的能量分量相对都要小很多^[2]。

本文将综述近海陆架区内潮的观测研究进展,

* 收稿日期: 2006-01-05, 修回日期: 2006-05-11。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“南海西部夏季的一支离岸海流”(编号: 40376002); 广东省自然科学基金项目“南海西部环流年际变异”(编号: 05003688); 中国科学院与中海油联合项目“海洋采油平台海洋环境监测研究”资助。

作者简介: 郭朴(1980-) 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事南海内潮分析研究。E-mail: guopu@scsio.ac.cn

并简述南海区的内潮研究现状。文章报道的具体研究内容见各章节的阐述。

1 内潮的观测方法进展

1.1 理论基础

内潮产生的机制目前来说还不是十分明确^[15], 不过大量的观测发现, 内潮通常会产生于倾斜的海底地形, 如海山、海岭、海沟及陆架边缘区^[16, 27]。在密度层结的海水中, 正压潮经过这些剧烈变化的地形时就会产生斜压内潮, 部分正压能量转化为斜压能量并以波束或射线的形式沿着某些特征轨道传播。内潮流和能量主要是斜压流与能量, 所以在研究时常用潮流的斜压部分来表征内潮^[18], 内潮波的传播轨道与水平面所成的斜率则表示为:

$$= \frac{(\sigma^2 - f^2)^{1/2}}{N^2 - \sigma^2}$$

式中, σ 为内波频率, N 为局地 Brunt-Väisälä 频率, f 为惯性频率。所以在地形斜率等于或大于 σ (即更陡峭) 时才会有内潮产生。

研究表明还有一种机制也可以产生内潮, 即当正压潮经过涡旋场时也会激发出内潮^[15]。不过此现象的研究和观测较少, 从现有的资料和记录来看, 绝大部分被观测到的内潮现象都是由前一种机制所引起的。

根据海水层结条件下的频散关系, 对于某一确定频率的波, 其对应的波数不是唯一的, 而是构成一个离散的序列, 即形成模态结构。内潮的高模态成分能量较小, 在其产生处马上就耗散掉造成局地海水混合, 而低模态波将携带大部分能量传播至很远, 达到几百甚至数千公里^[19, 20]。波束经过海面反射、海底反射及散射, 会逐渐演变成一系列高频内波、孤立内波及高模态波, 从而造成能量的衰减与海水的混合^[4, 19, 21]。

大陆架坡折处地形变化剧烈, 是生成内潮的主要区域^[14, 28], 人们对内潮的观测也主要集中在此区域。所产生的波束按特征轨道一些进入大洋, 一些向上进入大陆架, 对浅海海水垂直结构产生重要影响。

1.2 现场观测

对内潮的观测主要从水体温度和海流两个方面进行, 以斜压潮流表征的内潮会造成海水等温线的显著升降, 所以通过对各水层等温线和海流斜压分量的量值变化可以考察内潮的相关特质。早期常用的观测方法是利用 Nansen 瓶测量海面以下水体的温度和盐度变化^[2]。深度温度仪出现之后, 大面观

测站大量建立, 不过其观测深度一般只能达到海面以下数百米^[22]。20 世纪 70 年代初, 定点测量仪器得到普及, 海流计、热敏电阻温度计等得以用于内潮的观测^[2]。80 年代初出现了精度和稳定性都更好的测量仪器, 如 CTD 和 XBT, 以及其他类型的仪器, 如 Aanderaa 海流计等产品, 大大提高了观测精度和准确度^[23]。近几年常用的仪器一般是温度链、海流计、CTD 与 ADCP 等。

内潮的针对性观测多采用定点测量, 内潮波产生后会向深海和陆架方向传播, 在其传播路径上布点观测是最直接和有效的方法。在已知有内潮现象存在的海区, 观测点通常取在靠近内潮可能产生地点的附近, 因为“新生”的内潮波能量较大且对水体作用明显, 有利于观测研究, 另外对此处的多点观测有助于确定内潮波的产生地点。观测站的位置确定通常要从两个方面考虑, 即沿陆架坡折线方向和垂直于陆架坡折线方向, 在每个方向上布一列或几列站点, 利用各点测得的流场和温度场变化来考察内潮通过时的传播状态, 如波长、振幅、波速及能量等情况。另外, 选点还要考虑观测海区的地形、海况以及观测的预期目标, 实际测量时的布点密度还会受到试验条件等因素的影响。每一站点处用测温 and 测流仪器获取该定点以下各水层温度及海流数据。仪器设置视情况而定, 以 ADCP 和温度链为例, 若水深在数百米内则深度间隔通常设定在 1 ~10 m, 温度链测量间隔取 5 ~10 m, 时间间隔 ADCP 为 1 ~30 min, 温度链为 1 ~30 min, 观测点海水深度过浅或过深则相应调整采样间隔。

观测要选择在风力较小、海水层化情况较好的时间进行。风力太大会影响海水内部结构稳定性, 也会使水体扰动从而影响观测准确度^[24]; 而随季节变化的海水层化情况也会直接影响所生成内潮的强度, 强内潮更利于观测和数据处理^[25]。另外, 观测时间长度至少要 7 天左右, 即包括一次大潮—小潮变化^[10] 或者取一个月^[4], 长期观测可达半年以上^[26]。

在内潮现象显著的海区, 其现场观测试验也较多, 如新西兰陆架边缘^[13]、加利福尼亚陆架区^[25]、澳大利亚西北陆架区以及夏威夷群岛附近^[17, 27] 等地。这些地区内潮活动频繁, 海流场受内潮影响较大, 所以对这些海域内潮现象的研究有重要的意义。

实测方面较有代表性的如澳大利亚海洋学家 Holloway 对澳大利亚西北陆架区内潮现象的一系列研究。1995 年, Holloway 等^[28] 对澳大利亚西北陆架

海区内潮现象进行了一次为期 2 个月的观测,此次观测的方法有重要的参考价值。试验从 65 m 深的陆架到 750 m 的陆坡区,沿西北—东南的直线方向,共布设了 13 个点的纵向 CTD 观测阵列,先利用船载 CTD 和 ADCP 顺次在各点做 13 个小时即半日潮周期的短时测量,同时又在其中 4 个定点做了超过一个月的长时间定点观测。试验使用的仪器包括 CTD、海流计、ADCP、温度链、潮位计。观测时间为 1995 年 1~3 月,此时间段正是该海域内潮的活跃期。

该试验需注意的有 2 个方面:一是测量点位置和观测时间的确定,再就是观测采用了短时和长期两种测量手段。澳大利亚西北陆架区是内潮现象显著的海区,此前 Holloway 已经做了长时间的研究工作,分别从现场观测和数值模拟的角度考察了该海区内潮的特性^[23,29-32]。此次观测的主要目的就是进一步掌握该海区内潮的特性,以及它在能量传输等方面的影响,所以在以往研究成果的基础之上确定了观测时间和观测点布局。观测另一个突出的特点是结合了两种观测数据,分别为 13 小时船载 CTD 和 ADCP 数据和一个月的定点测量数据,在资料分析时分别进行处理并将结果对照比较。短期观测空间密度大,长期观测时间跨度长,这种处理使观测更为全面,且两种数据相互印证补充也增强了观测结果的可信度。

Holloway 对取得的数据进行了处理,计算得到观测海区 3 个主要内潮成分 M_2 、 S_2 、 K_1 在各观测点的椭圆参量、振幅、传播方向和能量情况。Holloway 的工作在该海区内潮现象的进一步深入研究积累了资料,也为相关领域和学科的研究提供了重要的参考。

1.3 卫星观测

目前由于测量仪器的发展,内潮的现场观测已经可以达到较高的精度和准确度,能够较好的描述观测对象的主要性质特征,并进一步定量分析其对海水内部结构及能量输运过程的影响。但是海上现场观测仍有许多局限性,如受气候影响较大,观测费用昂贵等,而且它只能进行短期局部海域的观测和研究,对大范围和长时间内的变化敏感度低,无法描述广阔海域内潮现象的整体性规律。作为现场观测的补充,分析卫星遥感资料是研究内潮新的辅助方法,它可在一定程度上弥补现场观测的上述不足,特别是在估算全球性等大尺度范围内内潮能量分配方面,卫星遥感有其突出的优势^[3,33,34]。卫星遥感是

通过探测内潮对海洋某些方面的影响来发现和研究内潮的,目前主要是通过以下几个途径:

首先,内潮会引起海面高度的波状起伏,洋面这种高度变化可以被卫星探测到。从高度计得到的海面高度变化可以用来估计内潮振幅幅度、相位大小,甚至可以通过相位和波振面的变化来确定内潮的产生源地^[1]。水下内部振动与其引起海表面振动幅度之比约为 10^3 ,即 10 m 振幅的内潮波能引起相应海面高度几厘米的变化,当内潮能量较高时,它所引起的海面高度变化是可以被某些卫星高度计探测到的。1992 年发射升空的卫星 Topex/Poseidon 携带的高度计,其方均根精度 4~5 cm,当内潮现象显著且稳定时,可以通过多次重复测量以排除干扰信号。目前利用高度计观测除了受测量精度限制以外,卫星的运行轨迹相距较远,也对精确揭示内潮的空间特征有一定影响,因此卫星高度计研究内潮尚有其局限性。已有的研究主要是针对深海内潮的研究,在深海区,潮汐信号弱,内潮突出出来被观测到,而能量方面的估算在研究中占较大比重。

利用高度计观测还有一点需要注意,即卫星在同一地区的采样频率过低,Topex/Poseidon 的重复观测周期是 9.9 天,即每隔 9.9 天才能对同一地区进行重复观测。根据计算,分离出 M_2 内潮波至少需要 3 年时间的观测,而分离出 K_1 内潮波则至少需要 9 年。好在 Topex/Poseidon 卫星自 1992 年发射至今已经有十几年,足以利用其高度计的数据分析几个主要频率的内潮波,如 M_2 、 K_1 ,而其他如 S_2 、 O_2 等虽然观测时间已经足够长,但由于振幅较小以高度计的现有分辨率还不能对它们进行很好的分析。

人们已经利用 Topex/Poseidon 的高度计资料研究了几个海区的内潮现象及其能量输运情况,如夏威夷海岭附近海域^[1,35]、北太平洋中部^[36]、太平洋西北边缘区^[33],以及产生于北太平洋阿留申群岛海域的内潮^[37]。2001 年发射升空的 Jason 卫星将是 Topex/Poseidon 的替代品,它携带的高度计所获取的资料应该能使我们对内潮的观测更为精确。

另一种可利用的遥感数据是雷达遥感图像,用卫星或航天飞机携带的合成孔径雷达(SAR)探测并分析水下内波。SAR 是高分辨率相干成像雷达,主动发射微波信号并接收反射信号,对于海上观测,雷达成像主要取决于目标的表面粗糙度。内波会影响海表面流场,从而调制风场下的海面短波,由此而改变的海面粗糙度会反映到雷达图像中,我们也能从 SAR 图像提取内波参数^[38,39]。但目前 SAR 图像

观测到的内波大多是大振幅孤立内波^[40-42]。这些孤立内波经常由内潮演变而成,虽然从它们的性质的确可以得到内潮传播方向等方面的信息,但要了解内潮产生和传播的过程,特别是得到内潮各分量的特征,SAR就无能为力了。所以SAR图像对于分析内潮有一定的局限性,不过它可以快速在大尺度范围内探测内波的踪迹,进而推测与之相关内潮的信息,有其观测的及时性和全局性,是局部现场观测很好的参考和补充。

还有一种值得一提的观测方法是利用水色遥感图像证实内潮的存在。Da Silva等^[43]首先提出这种方法并论证了它的可行性。夏季海洋中,表层叶绿素浓度会降低而导致在次表层处浓度出现最大值,其深度通常接近温跃层。此时当有内潮通过时,内潮波峰就会提升海水水体,升高叶绿素浓度最大值所在的水层,反映到水色图像上就是图像的深色区域,于是遥感水色图像就可以反映出内潮的运动情况。他们还利用多孔径雷达探测到了观测区域孤立内波的存在,因为孤立内波通常是由内潮的非线性作用产生的,这样,通过对此类水色遥感图像的分析也可以找到内潮存在的证据。

综上所述,虽然从遥感图像得到的内潮信息比海上直接测量相对要少,但在数据质量较高的情况下,通过数据分析也可以得到所观测内潮的波长、频率、产生地点、传播速度及路径,并计算特定波段的能量输运情况。更重要的是,在确定内潮产生、传播及破碎过程方面,以及在观测及时性和全局性等方面,遥感观测都要比直接观测有更好的效果,更直观也更清晰,是海上观测的极好补充。

2 内潮观测数据分析方法

内潮现场观测数据通常是海流以及温度时间序列,可以利用多种常用的海洋数据处理方法对资料进行分析^[44]。首先要选取有效数据,筛选掉无效数据,如仪器故障等原因引起的缺测、失真等。可以利用不同的方法对数据进行处理,如通过带通滤波器滤波^[14],或利用调和分析得到有效的斜压潮成分,并得出各深度层的斜压潮流椭圆要素^[45]。调和分析可利用计算机程序实现,如目前常用的T₂Tide^[46]。也可以利用功率谱分析识别各周期的振动,得到内潮波的主要分波成分^[10]。另外,利用流速与温度的变化还可得到内潮携带能量的情况^[17]。

遥感高度计数据的处理也是通过对观测海域海面高度变化的时间序列进行滤波和调和分析,分离

出内潮波主要成分加以分析,得到振幅、波长和能量等相关信息^[37,47]。

3 南海北部海区内潮观测研究现状

南海北部陆架是易产生内潮的海区。吕宋海峡连接南海北部与西太平洋,横跨海峡的巨大海岭海区也极有可能生成内潮。另外,南海北部的陆坡和陆架海域受黑潮入侵和季风的影响,流态格局多变,众多的涡旋也可能激发内潮。而且数值模拟及观测也证实南海北部有明显的周日及半日潮^[48]。由此可知,南海北部区的内潮现象应十分显著,而现场观测对南海孤立内波的研究也的确证明了这一点。大量资料显示,南海是孤立内波活动频繁的地区,而根据分析在这一地区孤立内波多是由于内潮的非线性相互作用而演变产生的^[49]。有研究表明吕宋海峡是内潮的多发海区,生成的内潮向西传播至北部陆架,并逐渐演变成一系列的孤立波,而在陆架区也会有内潮产生^[34]。

国内外对南海区内潮的研究起步较晚,研究项目也相对较少,其原因主要是现场观测资料积累不够丰富。在缺少相关现场资料的情况下,最早是利用数值模拟来研究南海北部内潮^[50],通过非线性数学模型计算,对南海东北部内潮主要成分及分布做相关预测。首次利用实测数据研究南海内潮现象是对南海北部一观测点的资料分析^[51],利用调和分析、功率谱分析等方法对该点温盐、海流及潮位资料进行处理。研究结果证实该海区有内潮存在并给出了其主要成分及传播方向。此后一段时间的研究由于资料积累缺乏而进展缓慢,对南海内潮现象的研究无法做到详尽和准确^[52],而要进一步深入研究南海内潮现象的特性则需要更详尽或更有针对性的观测数据。

随着国家对海洋科学发展的关注程度不断提高,海上试验及观测日益受到重视,对南海区海洋观测的力度可望逐渐增强。近十多年来,大型海上综合科学调查逐渐涉足南海大部分地区,如南海东北部调查、南沙群岛及邻近海域综合考察、南海季风试验、亚洲海洋国际声学试验等。这些海上科学考察为南海海洋研究积累了许多观测资料,也使我们希望有条件对南海区内潮相关现象进行更深入的研究。

1998年进行的南海季风试验(SCSM EX)是一大型的国际合作试验,许多国家与地区参与了SCS-MEX外场观测试验和以后的研究活动,它也是第一个由中国科学家主持的较大规模的大气和海洋联合

科学试验计划。试验旨在更好地了解南海季风的爆发、维持与变化的物理过程,以改进东亚和东南亚地区的季风预报。1998年的5~8月间进行的外场观测试验是SCSM EX计划的核心部分,通过对大尺度观测区(70~150°E, 10°S~40°N)和加强观测区(IOPs)(95~130°E, 10°S~30°N)的观测,获得了南海大量气象与海洋资料。特别是5月5~25日与6月4~23日的两次加强和加密观测(IOPs),利用最先进的海洋观测平台和仪器,获取了大量南海大气、海洋和海水相互作用等观测资料。这些海洋资料对

于进行南海内潮的研究有重要的价值。图1是由南海季风试验期间的CTD温度资料绘出的20天等温线深度结构变化,从图像中可以清晰的看到有周日性内潮波的存在,特别是在300 m以下深度这种水体的日周期性振荡更为明显,而400 m深度以下甚至可以看出受大小潮影响的振幅大小的变化。要进一步考察南海北部地区的内潮现象,我们可以利用SCSM EX所得到的数据考察试验区域流场及温度场状况^[53~55]进而研究该海区内潮相关情况。

更新的资料来源于2001年的“亚洲海洋国际声

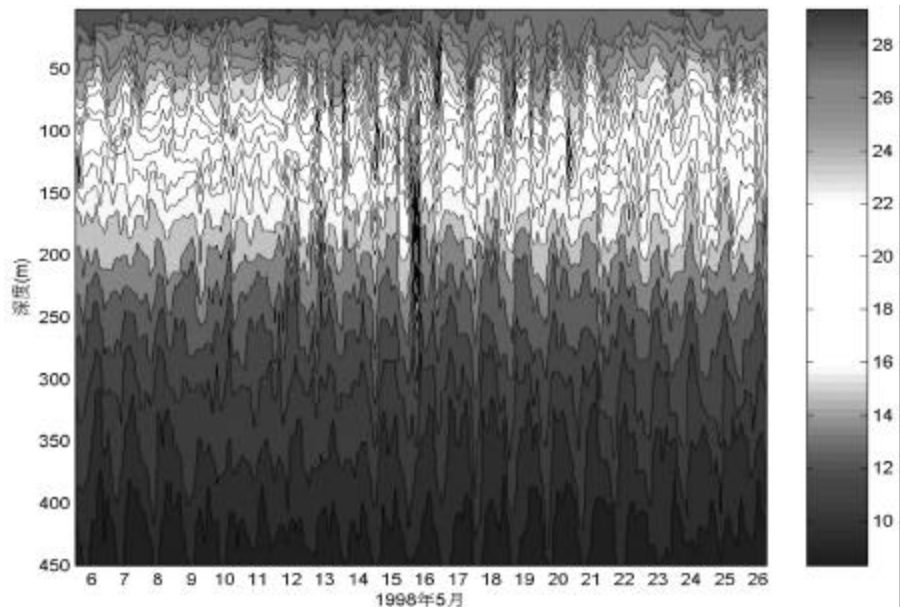


图1 南海季风实验期间CTD观测的20天等温线深度时间序列(1998年5月5~26日)^[55]

Fig.1 A 20-day time series of isotherm depths from CTD temperature data from May 5 to May 26, 1998, showing that large-amplitude internal waves occurred during the mid-May^[55]

学试验”(The Asian Seas International Acoustics Experiment, ASIAEX)。试验分两部分,分别在中国东海和南海进行观测,由多个国家和地区包括美国、中国、新加坡、韩国及台湾合作完成,研究涉及了物理海洋学、地球物理学和环境声学等多个学科领域。其中在南海区的观测为了解此海域正压潮及内潮的活动规律提供了丰富的资料^[45,56]。试验在南海北部陆架区进行定点观测(117~117.7°E, 21.5~22.2°N),获取了从4月21日到5月21日的连续海流及温盐数据,这些数据足以对该海区内潮现象进行深入研究。Duda等^[45]根据获取的资料,对南海北部大陆坡的内潮和孤立内波的特征进行了分析。

数据显示在观测海域存在明显的周日性内潮及相对较弱的半日内潮,且内潮在传播途中可逐渐破碎并演变出很多非线性高频内波。由于海水层化状况多变以及水平对流和多普勒效应的影响,使内潮2个主要周日分量 K_1 、 O_1 的相对振幅和相位都不稳定,能量分布也不易计算。但从获得的数据可以估算出周日内潮波的水平及垂直波长分别约为110 km和400 m,水平相速约1.2 m/s。Duda等^[45]还对内潮产生的地点做了估计,认为所观测到的周日内潮应产生于观测海域某处,他们利用布置的压力计描绘了此区域的海底地形,发现地形坡度符合周日潮波生成条件且小于产生半日内潮需要的坡度值,

这与内潮观测的结果相符合,而对于检测到的半日内潮,则猜测可能是产生于吕宋海峡,并向西传播直至观测海区。另外,文章对非线性内波的许多性质及其与内潮的关系有详细论述,这是目前为止已知的最为详尽的南海区内潮观测研究工作,为今后的继续研究积累了宝贵的经验和资料。

4 南海北部海区内潮研究存在的问题及解决方法探讨

基于上述理由,南海北部海区内潮现象正逐渐引起人们的重视,特别是由其产生的孤立内波更引发人们的兴趣。但目前为止数据大多来自于单站或短期观测,观测点的分布区也较稀疏并缺乏针对性,南海北部海域和陆架面积都十分广阔,较少的站点观测数据难以揭示内潮的运动规律。由于缺少多观测站、长时间现场观测资料的支持,致使对内潮的数值模拟和深入分析难以深入进行。故目前对南海北部陆架区内潮的研究仍然比较欠缺,尚不能详细掌握该海区内潮特征及活动规律。如已有的相关研究大多只局限于局部海域的观测分析,就南海内潮波的总体特征、产生源地、传播及消减过程尚没有一致的定论。因此,要深入掌握南海北部内潮的变化规律,需要更长时间的多点现场观测资料支持作为基础。

对南海海域内孤立内波的研究可以辅助我们研究内潮。多数孤立内波产生于由内潮波间的非线性相互作用,由孤立内波的活动规律也可以推测内潮的相关性质^[57]。过去对南海孤立内波的研究也相对较少,近几年来有逐渐增多的趋势,这对考察南海内潮的发生地和演变过程有一定作用。

总体来说,由于缺少现场观测资料的支持,致使对内潮的数值模拟和深入分析都难以深入进行,目前对南海北部陆架区内潮的研究仍然十分欠缺。这对中国海洋科技和海洋工程的发展,特别是对军事海洋环境研究是亟待解决的问题。

由上所述可见,对于南海内潮的研究,首先必须有丰富的海流、温度等实测资料作为基础,才能对局部海域内潮现象作充分分析,得到其特征参量和运动规律;其次,为研究内潮产生的动力学机制和明确其发生源地,则必须结合当地的海底地形、海域流场等状况来进行研究。海上观测是海洋科学研究的基础,对内潮的深入研究离不开海洋调查和长期观测数据的积累,加强观测力度应该是解决目前存在问题的必要途径。另外,通过国际合作也可以促进我

们的观测工作。南海水域面积广阔,海洋环境复杂,海底地形变化剧烈,单凭一个国家的科研投入有时很难使观测做到全面和深入,而通过国际合作则可以较好地解决这一问题。此外,对卫星遥感资料的利用也应该引起足够的重视,遥感资料分析使全局了解南海区内潮状况成为可能,也能为局部海域观测研究提供参考和印证,是行之有效的研究方法。

参考文献(References) :

- [1] Ray R D, Mitchum G T. Surface manifestation of internal tides generated near Hawaii [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(16): 2101-2104.
- [2] Wunsch C. Internal tides in the ocean [J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1975, 13(1): 167-182.
- [3] Egbert G D, Ray R D. Estimates of M₂ tidal energy dissipation from Topex/Poseidon altimeter data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C10): 22475-22502.
- [4] Althaus A M, Kunze E, Sanford T B. Internal tide radiation from Mendocino Escarpment [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, 33(7): 1510-1527.
- [5] Alford M H. Redistribution of energy available for ocean mixing by long-range propagation of internal waves [J]. *Nature*, 2003, 423(6936): 159-162.
- [6] St Laurent L, Garrett C. The role of internal tides in mixing the deep ocean [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(10): 2882-2899.
- [7] Nash J D, Kunze E, Toole J M, et al. Internal tide reflection and turbulent mixing on the continental slope [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34(5): 1117-1134.
- [8] Fan Zhisong. *Research Fundamentals of Ocean Interior Mixing* [M]. Beijing: Ocean Press, 2002. [范植松. 海洋内部混合研究基础 [M]. 北京: 海洋出版社, 2002.]
- [9] Lien R C, Gregg M C. Observations of turbulence in a tidal beam and across a coastal ridge [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C3): 4575-4592.
- [10] Rippeth T P, Inall M E. Observations of the internal tide and associated mixing across the Malin Shelf [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C4): 3028-3028.
- [11] St Laurent L C, Simmons H L, Jayne S R. Estimating tidally driven mixing in the deep ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(23): 2106-2106.
- [12] Osborne A R, Burch T L. Internal solitons in the Andaman Sea [J]. *Science*, 1980, 208(4443): 451-460.
- [13] Sharples J, Moore C M, Abraham E R. Internal tide dissipation, mixing, and vertical nitrate flux at the shelf edge of NE New Zealand [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C7): 14069-14081.
- [14] Filonov A E, Lawin M F. Internal tides in the Northern Gulf of California [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C5): 3151-3151.

- [15] Krauss W. Internal tides resulting from the passage of surface tides through an eddy field[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C8): 323-18331.
- [16] Kurapov A L, Egbert G D, Allen J S, et al. The M-2 internal tide off Oregon: Inferences from data assimilation[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, 33(8): 1733-1757.
- [17] Eich M L, Merrifield M A, Alford M H. Structure and variability of semidiurnal internal tides in Manala bay, Hawaii[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(C5): 5010-5010.
- [18] Huthnance J M. Internal tides and waves near the continental shelf edge[J]. *Geophysical Astrophysical Fluid Dynamics*, 1989, 48: 91-106.
- [19] Johnston T M S, Merrifield M A. Internal tide scattering at seamounts, ridges, and islands[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C6): 3180-3180.
- [20] Johnston T M S, Merrifield M A, Holloway P E. Internal tide scattering at the Line Islands ridge[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C11): 3365-3365.
- [21] Legg S. Internal tides generated on a corrugated slope. part I: Cross-slope barotropic forcing[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34(1): 156-173.
- [22] Joseph L, Reid J R. Observations of internal tides in October 1950[J]. *Transactions of the American Geophysical Union*, 1956, 37(3): 278-286.
- [23] Holloway P E. Internal tides on the Australian North-West Shelf: A preliminary investigation[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1983, 13(8): 1357-1370.
- [24] de Young B, Pond S. The internal tide and resonance in Indian Arm, British Columbia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(C5): 191-5207.
- [25] Lerczak J A, Winant C D, Hendershott M C. Observations of the semidiurnal internal tide on the southern California slope and shelf[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C3): 3068-3068.
- [26] Morozov E G, Trulsen K, Velarde M G, et al. Internal tides in the strait of Gibraltar[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(11): 3193-3206.
- [27] Holloway P E, Merrifield M A. On the spring-neap variability and age of the internal tide at the Hawaiian ridge[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C4): 3126-3126.
- [28] Holloway P E, Chatwin P G, Craig P. Internal tide observations from the Australian North West Shelf in summer 1995[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2001, 31(5): 182-199.
- [29] Holloway P E. On the semidiurnal internal tide at a shelf break region on the Australian north west shelf[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1984, 14(11): 1787-1799.
- [30] Holloway P E. A comparison of semidiurnal internal tides from different bathymetric locations on the Australian North West Shelf[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1985, 15(3): 240-251.
- [31] Holloway P E, Pelinovsky E, Talipova T, et al. A nonlinear model of internal tide transformation on the Australian North West Shelf[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1997, 27(6): 871-896.
- [32] Holloway P E. A regional model of the semidiurnal internal tide on the Australian North West Shelf[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C9): 19625-19638.
- [33] Tian J W, Zhou L, Zhang X Q, et al. Estimates of M-2 internal tide energy fluxes along the margin of Northwestern Pacific using TOPEX/POSEIDON altimeter data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(17): 1889-1889.
- [34] Zhao Z X, Klemas V, Zheng Q, et al. Remote sensing evidence for baroclinic tide origin of internal solitary waves in the north-eastern South China Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(6): 302-6302.
- [35] Dushaw B D. Mapping low-mode internal tides near Hawaii using TOPEX/Poseidon altimeter data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(8): 1250-1250.
- [36] Ray R D, Cartwright D E. Estimates of internal tide energy fluxes from Topex/Poseidon altimetry: Central North Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(7): 1259-1262.
- [37] Cummins P F, Cherniawsky J Y, Foreman M G G. North Pacific internal tides from the Aleutian ridge: Altimeter observations and modeling[J]. *Journal of Marine Research*, 2001, 59(2): 167-191.
- [38] Yang Jinsong, Huang Weigen, Zhou Chenhu, et al. The feasibility of applying sar imagery to the estimation of wave depth and amplitude[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2003, (1): 29-42. [杨劲松, 黄韦良, 周成虎, 等. 利用 SAR 图像计算内波深度和振幅的可行性研究[J]. *国土资源遥感*, 2003, (1): 29-42.]
- [39] Mitnik L, Alpers W, Chen K S, et al. Manifestation of internal solitary waves on ERS SAR and SPOC images: Similarities and differences[J]. *IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2000, I-VI: 857-1859.
- [40] Vlasenko V, Alpers W. Generation of secondary internal waves by the interaction of an internal solitary wave with an underwater bank[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(C2): 2019-2019.
- [41] Dong Q, Guo H D, Han C M. The internal wave extraction from composing sea surface using SAR image[J]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2003, I-VII, PROCEEDINGS: 674-2676.
- [42] Azevedo A, da Silva J C B, New A L. Possible generation sites of internal solitary waves observed by ERS SAR in the central region of the bay of Biscay[J]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and 24th Canadian Symposium on Remote Sensing*, 2002, I-VI, PROCEEDINGS: 600-1602.
- [43] da Silva J C B, New A L, Szokos M A, et al. On the observability of internal tidal waves in remotely-sensed ocean colour data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(12): 1569-1569.
- [44] Chen Shangji, Ma Jirui. *Technique of Processing Ocean Data and Application*[M]. Beijing: Ocean Press, 2002. [陈上及, 马继瑞. *海洋数据处理分析方法及其应用*[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.]

- [45] Duda T F , Lynch J F , Irish J D , et al. Internaltide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern South China Sea [J] . IEEE Journal of Oceanic Engineering Special Issue on Asian Marginal Seas 2004 , 29(4) : 1105-1130 .
- [46] Pawlowicz R , Beardsley R , Lentz S . Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE [J] . Computers Geosciences 2002 , 28 : 929-937 .
- [47] Ray R D , Mitchum G T . Surface manifestation of internal tides in the deep ocean : Observations from altimetry and island gauges [J] . Progress in Oceanography 1997 , 40 : 135-162 .
- [48] Fang G H , Kwok Y K , Yu K J , et al . Numerical simulation of principal tidal constituents in the South China Sea , Gulf of Tonkin and Gulf of Thailand [J] . Continental Shelf Research , 1999 , 19(7) : 845-869 .
- [49] Cai Shuqun , Gan Zijun . Progress in the study of the internal soliton in the northern south China sea [J] . Advances in Earth Science 2001 , 16(2) : 215-219 . [蔡树群 , 甘子钧 . 南海北部孤立子内波的研究进展 [J] . 地球科学进展 , 2001 , 16(2) : 215-219 .]
- [50] Yuan Shuyao , Xu Xizhen , Deng Juzi , et al . A numerical study on internal tides in the northeast of South China Sea [J] . Tropic Oceanology 1995 , 14(4) : 16-23 . [袁叔尧 , 徐锡祯 , 邓九仔 , 等 . 南海东北部内潮数值研究 [J] . 热带海洋 , 1995 , 14(4) : 16-23 .]
- [51] Qiu Zhang , Xu Xizhen , Long Xiaomin . A preliminary analysis on internal tide characteristics at an observation point in northern south China sea [J] . Tropic Oceanology 1996 , 15(4) : 63-67 . [邱章 , 徐锡祯 , 龙小敏 . 南海北部一观测点内潮特征的初步分析 [J] . 热带海洋 , 1996 , 15(4) : 63-67 .]
- [52] Zhang Aijun , Jang Minghun . An analysis on tidal current temperature and salinity at a mooring station in southwest waters to dengsha islands [J] . Tropic Oceanology 1999 , 18(1) : 23-30 . [张爱军 , 江明顺 . 东沙群岛西南海域单站潮流及温盐特征分析 [J] . 热带海洋 , 1999 , 18(1) : 23-30 .]
- [53] Qiu Zhang , Fang Wendong . Vertical variation of spring sea current in northern south China sea [J] . Tropic Oceanology 1999 , 18(4) : 32-39 . [邱章 , 方文东 . 南海北部春季海流的垂向变化 [J] . 热带海洋 , 1999 , 18(4) : 32-39 .]
- [54] Qiu Zhang , Fang Wendong . Vertical structure of baroclinic current over northern south China Sea continental slope [J] . Journal of Oceanography in Taiwan Strait , 2000 , 19(4) : 405-411 . [邱章 , 方文东 . 南海北部大陆架区斜压海流的垂向结构 [J] . 台湾海峡 , 2000 , 19(4) : 405-411 .]
- [55] Fang Wendong , Shi Ping , Long Xiaomin , et al . Internal solitons in the northern south China sea from insitu observations [J] . Chinese Science Bulletin , 2005 , 50(13) : 400-404 . [方文东 , 施平 , 龙小敏 , 等 . 南海北部孤立内波的现场观测 [J] . 科学通报 , 2005 , 50(13) : 400-404 .]
- [56] Beardsley R C , Duda T F , Lynch J F , et al . The barotropic tide in the northeast south China sea [J] . IEEE Journal of Oceanic Engineering Special Issue on Asian Marginal Seas 2004 , 29(4) : 1075-1086 .
- [57] Lien R C , Tang T Y , Chang M H , et al . Energy of nonlinear internal waves in the south China sea [J] . Geophysical Research Letters 2005 , 32(5) : 5615-5615 .

Progress in the Observational Studies of Internal Tide over Continental Shelf

GUO Pu , FANG Wen-dong , YU Hong-bing

(IED , South China Sea Institute of Oceanology , The Chinese Academy of Sciences , Guangzhou 510301 , China)

Abstract : Internal tide is a kind of internal wave found frequently on the continental shelf. It is often generated by the barotropic tide crossing special topography in special ocean state. Therefore, the internal tide has the tidal period. Frequent internal tide can be of advantage or disadvantage to the human activity in the ocean. For instance, it can drive strong mixing or even generate upwelling bringing nutrition up from deep water so that a fishing region can come into being. On the other hand, internal tide with large amplitude and generating solitary waves will disturb the work of oceanic engineering and be dangerous to marine oil platform and submarine oil pipe. The turbulence driven by internal tide can also affect the ship or submarine, and reduce the precision of torpedo. So, the observation on the internal tide near the continental shelf has been emphasized for long. This paper will make a brief introduction about some characteristics of internal tide, and discuss the evolution of the observation in recent years. As a stress, the present situation of study of internal tide in the northern south China sea will be described, questions of observation on the internal tide in the South China Sea discussed some opinions about developing the study and observation on the internal tide put forward.

Key words : Internal tide ; Observation ; Continental shelf ; Internal wave ; Northern south China sea.