

逆式回声测量仪在全球海洋中应用及前景展望

任强^{1,2,3,4}, 于非^{1,2,3,4}, 南峰^{1,2,3,4}, 王建丰^{1,2,3,4},
孙凡^{1,2,3}, 陈子飞^{1,2,3}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071)

摘要: 系统总结了逆式回声测量仪(IES)的发展历史, 重点介绍了其目前在世界范围内的应用情况, 并阐述了 CPIES(集成流速和压力传感器的 IES)在我国吕宋海峡周边布放的意义及对未来应用的展望。结果表明采取不同的排列方式布放的 IES 阵列所获取的数据通过结合地转经验模态 GEM (gravest empirical mode)以及最优插值方法能够获得观测海区的温度、盐度和流场的三维空间分布特征。基于 CPIES 的应用, 可深入地研究多尺度的海洋动力过程, 如内波、内潮和中尺度涡等, 对后续大洋环流理论发展、中尺度涡产生和消亡机理、海洋中不同尺度能量串级等具有重要意义。

关键词: 逆式回声测量仪 (IES); 大洋; 海洋动力; 中尺度过程

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)07-0171-08

DOI: 10.11759/hyxx20200119004

逆式回声测量仪(inverted echo sounder, 简称 IES)是由美国罗德岛大学研制的一种坐底式海洋观测仪器, 其主要测量声波从海底到海表的传播时间, 同时搭载压力和流速传感器后称为 CPIES (current-pressure inverted echo sounder), 能同步测量海底的压力和流速流向。

1 IES 的发展历史及组成

早在 1969 年, Rossby 就提出了利用海表到海底的声速传播时间来监测主温跃层深度的变化的构想, 并随后发明了逆式回声仪^[1]。在随后的 1973 年, Rossby 和 Watts 利用多台 IES 在大洋动力学试验中(MODE1)成功观测到了温跃层的变化, 这是首次 IES 的实际应用观测, 受限于当时的技术条件, 观测时间较短仅为 2 个月左右同时数据容量也非常小^[2]。20 世纪 70 年代中后期, IES 改用耐压的玻璃球结构同时集成了高精度压力传感器, 极大地提高了 IES 的测量精度和工作水深^[3-4]。20 世纪 80—90 年代, IES 的硬件主要在存储能力、遥测能力以及工作时长等方面有了很大的改进, 使得 IES 在更加复杂的海区稳定工作 2~5 a。其后, IES 的性能不断加以完善, 并且根据需要开发出了许多不同功能以应对不同的观测需求。同时能搭载压力传感器(pressure)和海流计(current)的 CPIES, 在罗德岛大学的开发下不断得到

完善。进入 20 世纪, IES 通过技术积累, 主要在数据应用范围等方面开展了研究, 如 Watts 和 Sun 等^[5]结合历史水文数据创建了根据传播时间来反演全水层的温度、盐度和比容异常等参数的地转经验模态(gravest empirical mode, GEM)方法, 该方法是通过建立一个斜压流函数, 将大量的历史水文数据投影到此二维空间上, 从而得到一个垂向的水文结构场, 它的优点是能够将所有观测到的历史数据进行整体的质控及诊断分析, 减少中尺度涡和海流等引起的非线性误差。通过多个 CPIES 组成的观测阵列, 基于 GEM 方法可以得到绝对流速垂直剖面, 随后诸多研究完善了 GEM 方法, 并且在各个海区实现了成功应用^[6-9]。后来 Xu 等^[10]开发了一套用于处理 CPIES 数据中压力漂移、跳、深度校正以及定标的新技术, 极大的提高了 IES 的实际应用性能和范围。

收稿日期: 2020-01-19; 修回日期: 2020-03-19

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1403401, 2016YFC1400505); 全球变化与海气相互作用专项(GASI-02-PAC-ST-Wwin); 国家自然科学基金创新群体项目(41421005)

[Foundation: National Key Research and Development Plan, No.2017YFC1403401, No.2016YFC1400505; the Global Climate Changes and Air-Sea Interaction Program, No. GASI-02-PAC-ST-Wwin; NSFC Innovative Group Grant, No.41421005]

作者简介: 任强(1989-), 男, 湖南益阳人, 工程师, 博士研究生, 主要从事海洋观测技术与海洋中尺度动力过程的研究, 电话: 0532-8289892, E-mail: rqiocas1989@163.com; 于非, 通信作者, 研究员, 主要从事海洋中小尺度动力过程的研究, 电话: 0532-8289887, E-mail: yuf@qdio.ac.cn

CPIES 主要组成如图 1 所示, 其中由上至下主要包括打捞浮球、玻璃浮球、海流计、50 m 通讯电缆、PIES 倒置式回声仪以及重块底座等。其中 PIES 倒置式回声仪本体上配备有压力传感器、温度传感器和声学换能器等传感器, 同时可设置不同的工作间隔。

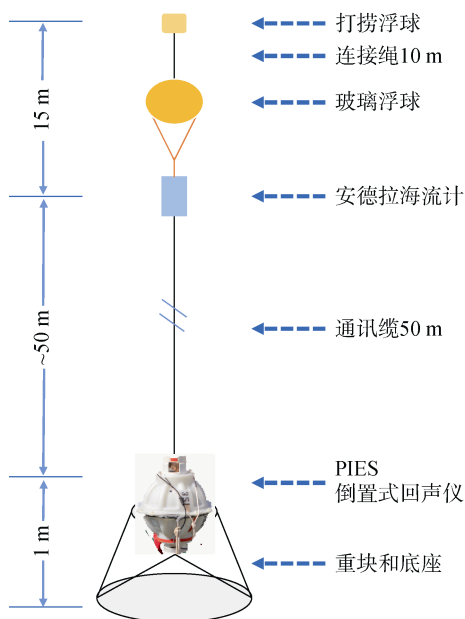


图 1 CPIES 组成结构示意图

Fig. 1 A schematic diagram of structure and composite of CPIES

2 IES 应用功能介绍

Pressure inverted echo sounder (PIES) 获取的数据同时借助于反演算法, 根据其不同的排列方式最终可以得到的参数信息如下表所示(表 1)。两个及以上的 CPIES 组合可以反演出绝对流速剖面, 二维布放阵列可以实现观测海区全水层的 4D 速度和温盐密结构的反演。一方面, 在较为早的研究时期, IES 主要被用来监测主温跃层的深度的变化, 同时根据其传播时间、动力高度和总热容量之间的线性关系可用于上述参数的计算。另一方面搭载了压力和海流计的 CPIES 能够反演海洋垂直动力参数^[11-14], 如全水深的温度、盐度、比容异常剖面以及流速剖面, 但这类参数需要借助于 2001 年 Watts 和 Sun 提出的 GEM 方法进行反演计算。而 GEM 阵列是将历史水文资料投影到二维空间上的数据库, 其主要依赖于观测海区历史数据 CTD 剖面。GEM 的成功应用, 可以说极大地提高 PIES 的观测能力。再者, 多个 IES(PIES/CPIES)组成的阵列结合最优插值 OI (op-

timal interpolation)方法^[15]可以对观测海区的物理参数的三维空间分布进行反演, 可对海洋中尺度现象过程进行研究。另外多个设备组成的阵列可观测底层的温度场、流场等, 目前在黑潮延伸体区域和德雷克海峡等多个海底区域布放的大型阵列已经获得了长时间的海底实测数据, 并对相关区域的底部环流特征、水团交换及其与上层海洋关系等进行了一系列重要的研究^[16-17], 一定程度上弥补了长期以来由于大洋底层连续观测数据的不足而造成的近底层环流结构及其变化等的研究。同时还有诸多的学者利用改造后的 IES 捕捉高频的信号进行内波和内潮的观测研究^[18-19]。

表 1 不同排列组合下的 PIES 观测功能

Tab. 1 PIES observation function under different permutations and combinations

阵列数量	可观测指标
单个 PIES	温盐剖面时间序列 SSH 的质量负载部分
两个 PIES/CPIES(1 维阵列)	绝对流速剖面时间序列 温盐和流速断面, 输运通量
三个及以上 PIES/CPIES (2 维阵列)	矢量流速剖面时间序列 4D 速度和温盐密结构

自 1973 年 IES 第一次被应用于海洋现场观测以来, 其技术能力经过近半个世纪的发展取得了极大的提升, 同时观测能力已经被各国研究机构所认定并逐步形成了一种较为新型的观测手段作为传统海洋调查观测的补充。目前 CPIES 在全世界的应用范围非常广, 基本上涵盖了世界各大海区(图 2), 图中可以看出应用区域主要位于黑潮及其黑潮延伸体、日本海、北大西洋暖流区、南极绕极流等区域。进入 21 世纪, 海洋学的研究已经进入新的发展阶段, 各个国家都日益加大对海洋科技的投入。长期连续数据的获取仍然是目前海洋研究的重要方式之一, 相对于其它锚系潜标、浮标等海洋观测设备来说, IES 能够满足长期连续观测的需求的同时能兼顾安全性、操作方便和成本较低等特点。

3 PIES 的应用简介

3.1 PIES 在世界大洋中的应用

目前 PIES/CPIES 已应用在全球海洋多个区域, 并取得了一系列成果。下面重点介绍目前世界上已经成功布放的规模较大的科学观测项目。

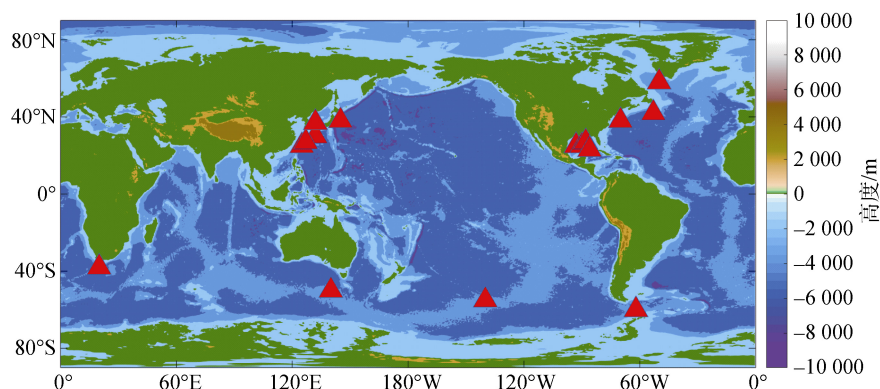


图2 C-PIES 在全球海洋中的应用分布图

Fig. 2 Map of C-PIES application distribution in the global ocean

3.1.1 KESS 计划

黑潮延伸体系研究(Kuroshio extension system study, 简称 KESS)的总体目标定量定性的分析黑潮延伸体和黑潮回转环流之间的变化和相互作用的动力学和热力学过程。2004 年到 2006 年, 美国 3 所单位(罗得岛大学、伍兹霍尔海洋研究所和夏威夷大学)的研究人员在日本以东布放了近底部压力、流速传感器的 C-PIES 阵列(见图 3)。其是目前世界上最大的单体 C-PIES 阵列, 共包括 46 座 C-PIES, 8 座锚系潜标。该阵列的成功实施, 通过 4D 分辨率的时变密度和速度场, 计算分析了该区域的热量、盐度、动量和位势涡度的跨锋面交换, 极大地促进了黑潮延伸体区域的动力学特征及黑潮结构变异的研究^[20-25]。

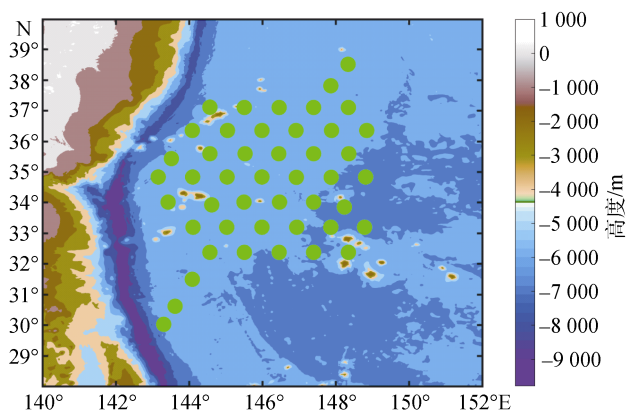


图3 KESS 项目站位分布图

Fig. 3 Map of KESS project station distribution

3.1.2 Drake Passage 项目

Drake Passage C-PIES 项目(以下简称 cDrake)的目标是了解南极绕极流(ACC)在德雷克海峡的输运

通量和变化的动力过程。该计划由美国 Scripps 研究所和罗德岛大学共同开展共历时 4 a(2007—2011 年), 于 2007 年在德雷克海峡部署了 41 座 C-PIES 并在 2011 年回收(图 4), 期间每年通过声波遥测技术收集数据, 使仪器在项目结束前不受干扰极大的节省了各类成本, 并有效地保证了数据的连续性。该项目用一条断面跨越德雷克海峡来研究南极绕极流运输的水平 and 垂直结构时间变化过程, 同时利用局部动力学阵列描述中尺度涡旋场, 并为观测阵列和数值模拟的评估提供指导作用^[26-27]。

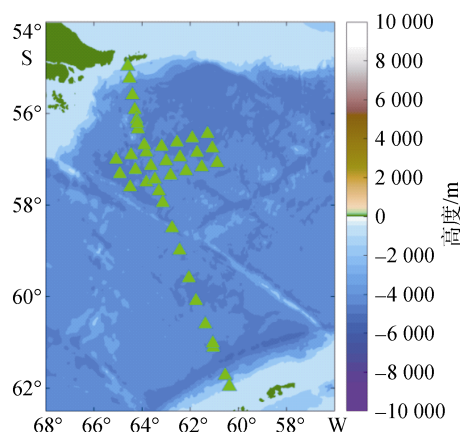


图4 Drake Passage 项目站位分布图

Fig. 4 Map of Drake Passage project station distribution

3.1.3 JES(Japan/East Sea)项目

该计划由韩国海洋与发展研究机构(Korean Ocean Research and Development Institute(KORDI))和日本的应用力学研究所(Research Institute for Applied Mechanics(RIAM))共同合作下组织开展。从 1999 年 6 月到 2001 年 7 月, 在日本海的西南端布放以 5×5 的阵列排列的 25 个 C-PIES, 每个站位之间的

间距为 55~60 km(图 5), 该阵列回收了 23 个 PIES 和 12 个单点海流计 RCMs。该项目旨在了解日本海西南地区的中尺度环流、观测对马暖流分支的输运时间变化特征以及对近海环流和东朝鲜暖流的上层环流和路径变化进行观测, 进一步了解该区域内上层、深层海流与涡旋之间相互作用的物理过程^[28-31]。

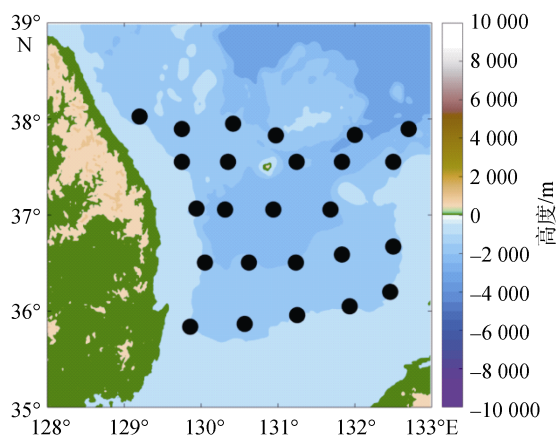


图 5 JES 项目站位分布图
Fig. 5 Map of JES project station distribution

3.1.4 GOM(Gulf of Mexico)项目

GOM 项目是由美国罗德岛大学为主导的观测计划, 观测区域集中在墨西哥湾, 也是目前世界上 IES 布放数量最多的区域, 时间跨度从 2001—2009 年。但是 GOM 阵列并不是单次完成的布放, 其历经 9 年共由 5 次观测布放。早在 2001 年, 针对 DeSoto 峡谷涡旋入侵墨西哥湾的研究布放了 3 套 CPIES, 其后分别在 2003—2004 年, 2004—2005 年, 2004—2006 年完成了针对墨西哥湾的中部、西部和东部的观测阵列 PIES 布放, 最后在 2009—2011 年布放了间隔为 53 km 左右的 25 座 CPIES, 其目的是为了研究墨西哥湾流套环流的动力特征^[32-34]。

除了上述几个大型的计划以外, 还有其他大小规模不一的 CPIES 观测等。

3.1.5 PIES 在我国的应用

PIES 在我国的观测应用较晚。直到 2012 年, 自然资源部第二海洋研究所(SIOMNR)引进了 5 台 PIES 并在南海西沙附近实现了成功布放和回收, 并获取了接近 22 个月的数据, 结合建立的 GEM 反演了南海海域观测时间内的温度、盐度和流速的时空分布和变化特征, 捕捉到了中尺度涡的横切面结构^[35], 同时观测到了南海北部近 7 天的海底压力对大气表面压力和风的响应^[36]。借助于 CPIES, Zhao

等首次发现了南海海底压强的近 5 天振荡特征^[37]。这也是 PIES 在我国的应用布放并取得的一系列的研究成果之一。

2018 年 6 月, 在自然资源部“全球变化与海气相互作用专项”项目下, 中国科学院海洋研究所(IOCAS)和 SIOMNR 开展合作在吕宋海峡周边布放了 40 套 CPIES 和 3 套锚系潜标阵列(图 6)。这是我国首次超大规模的 CPIES 观测应用, 在世界上也是单体规模第三大的阵列, 并且于 2019 年 8 月成功回收了 39 套 CPIES。

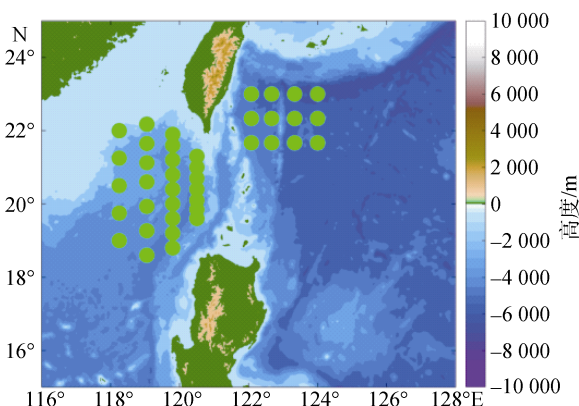


图 6 吕宋海峡附近 CPIES 项目站位分布图
Fig. 6 Map of CPIES project station distribution near the Luzon Strait

吕宋海峡是太平洋西边界地区的重要豁口, 也是南海和太平洋物质及能量交换的最主要通道。黑潮作为最强劲的西边界流之一, 对西边界地区的海洋环流和气候等具有重大影响。吕宋海峡黑潮两侧都是中尺度涡高发区, 西传中尺度涡对黑潮流量和流轴都有重要的调制作用。因而对该类问题的研究需要进一步确定中尺度涡的结构特征及其演变过程等, 而目前对于中尺度涡的研究其主要是基于平均态的温盐场, 因而很少有覆盖到涡旋内部的观测阵列所获取的数据进行的研究。图 7 所示的 CPIES 初步反演的气旋涡某个时刻温盐异常的三维结构图, 基于此我们在吕宋海峡附近获取了长达一年的数据, 加之该区域是中尺度涡高发地区, 因而我们可以持续的对中尺度涡进行跟踪反演, 进而研究中尺度涡旋的演变过程。因此 CPIES 在我国的应用可对吕宋海峡水交换变化特征、中尺度涡三维结构以及黑潮-中尺度涡相互作用过程等科学问题展开深入的分析, 为我国在该海域的研究提供新手段新思路的同时进一步提高海洋科学的研究水平。

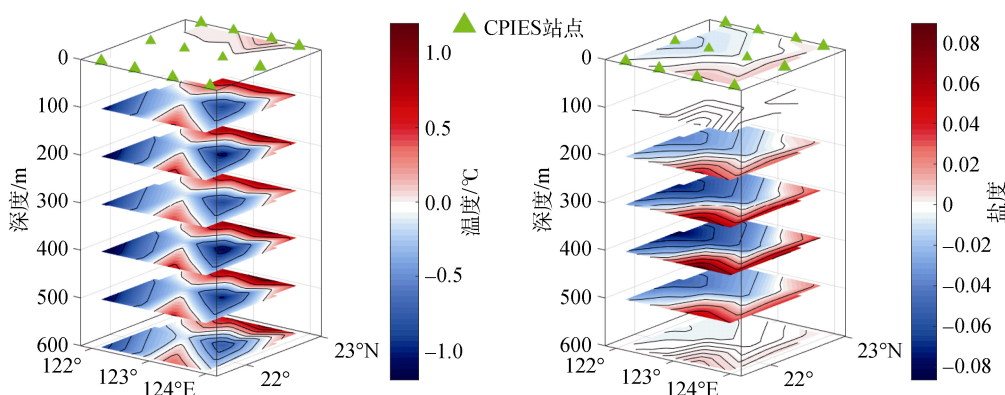


图7 台湾以东中尺度涡的温度和盐度异常三维结构分布

Fig. 7 Three-dimensional structure distribution of temperature and salinity anomaly of mesoscale eddies east of Taiwan. The green triangle is the CPIES site

4 CPIES 的应用前景及展望

IES的发展及应用已经约半个世纪, 到目前为止 IES 的观测能力已经有了极大的提升, 可搭载压力传感器(PIES)和流速仪(CPIES)对基本的物理海洋背景参数进行多维度的观测。结合 GEM 方法, 可反演得到四维空间尺度的温度、盐度和流速场。CPIES 的应用可对如下科学问题的研究提供一些新的思路方式: (1)中尺度涡三维结构。中尺度涡作为海洋物质和能量运输的载体普遍存在于世界海洋中, 其动能要比大部分海域的平均动能大一个量级, 对大洋环流、海洋能量平衡、水团分布、热盐和营业物质运输等具有重大作用^[38-40]。近年来由于卫星产品、水下剖面浮标(Argo)、锚系潜标阵列以及航次调查提供的数据和模式产品的应用, 对于中尺度涡的平均态三维结构已经取得了很大的认识^[41-43], 但是目前对于中尺度涡的三维结

特征仍需要进一步的研究。图 8 所示的为 CPIES 阵列与锚系潜标结合观测表层和次表层中尺度涡示意图, 基于 CPIES 阵列的布放, 将能捕捉到中尺度涡过程并基于数据反演描述其结构, 为研究中尺度涡提供一种新的手段方式。(2)涡流相互作用过程: 中尺度涡在世界大洋广泛存在且与大洋环流紧密相连, 而涡流相互作用过程复杂, 动力机制尚不明确, 是国际前沿问题, 也是国内外学者比较关注的方向。

逆式回声记录仪目前已经在世界多个海区实现了大规模的成功应用, 相对于同等规模的锚系潜标阵列, 其具有明显的布放回收方便、性价比高和安全性强等优点。基于 CPIES 的应用, 可解析出中尺度过程等海洋动力参数过程, 进一步认识中尺度涡产生机制, 并能对小尺度现象如内波和内潮等进行观测。对后续大洋环流理论发展、中尺度涡产生和消亡机理、海洋中不同尺度能量串级等具有重要意义。

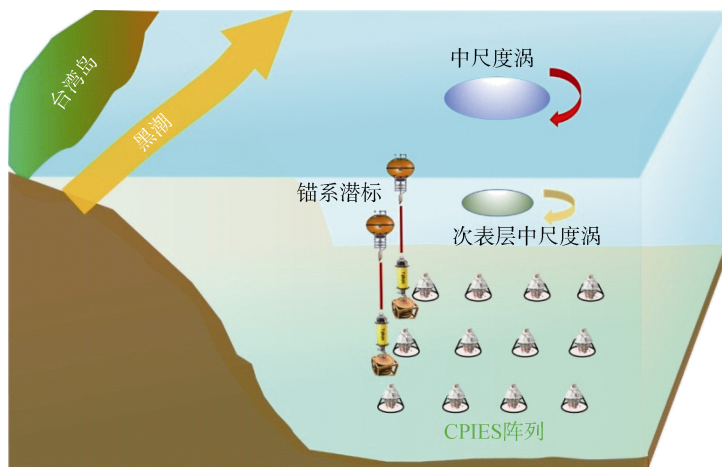


图8 台湾以东 CPIES 观测示意图

Fig. 8 Schematic of CPIES observations east of Taiwan

参考文献:

- [1] Rossby T. On monitoring depth variations of the main thermocline acoustically[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, 74(23): 5542-5546.
- [2] Watts D R, Rossby H T. Measuring dynamic heights with inverted echo sounders: results from MODE[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1977, 7(3): 345-358.
- [3] Watts D R, Johns W E. Gulf stream meanders observations on propagation and growth[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982: 9467-9476.
- [4] Watts D R, Sun C, Rintoul S R. A two-dimensional gravest empirical mode determined from hydrographic observations in the subantarctic front[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2001, 31(8): 2186-2209.
- [5] Sun C, Watts D R. A circumpolar gravest empirical mode for the Southern Ocean hydrography[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, 106: 2833-2855.
- [6] Meinen C S, Watts D R. Vertical structure and transport on a transect across the North Atlantic Current near 42°N: Time series and mean[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2000, 105(C9): 21869-21891.
- [7] Meinen C S, Luther D S, Baringer M O. Structure, transport and potential vorticity of the Gulf Stream at 68°W: Revisiting older data sets with new techniques[J]. *Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(1): 41-60.
- [8] Donohue K, Watts D R, Tracey K, et al. Program studies the Kuroshio Extension[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2008, 89(17): 161-162
- [9] Mitchell D A, Watts D R, Wimbush M, et al. Upper circulation patterns in the Ulleung Basin[J]. *Deep Sea Research Part II*, 2005, 52(11/13): 1617-1638.
- [10] Xu Y, Watts D R, Wimbush M. Coupled patterns between fields of dynamic height and bottom pressure in the Japan/East Sea[J]. *Ocean Science Journal*, 2009, 44(1): 35-42.
- [11] Tracey K L, Watts D R. On Gulf-stream meander characteristics near Cape-hatteras[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(C6): 7587-7602.
- [12] Watts D R, Johns W E. Gulf stream meanders: Observations on propagation and growth[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87(C12): 9467-9476.
- [13] Hallock Z R. Regional characteristics for interpreting inverted echo sounder(IES) observations[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1987, 4(2): 298-304.
- [14] Chriswell S M. Using an array of inverted echo sounders to measure dynamic height and geostrophic current in the North Pacific subtropical gyre[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, 11(5): 1420-1424.
- [15] Bretherton F P, Davis R E, Fandry C B, et al. A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73[J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1976, 23(7): 559-582.
- [16] Bishop S P, Watts D R, Park J H, et al. Evidence of bottom-trapped currents in the Kuroshio Extension region[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2012, 42(2): 321-328.
- [17] Donohue K A, Tracey K L, Watts D R, et al. Mean antarctic circumpolar current transport measured in Drake Passage[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(22): 11760-11767.
- [18] Farmer D, Li Q, Park J H. Internal wave observations in the South China Sea: The role of rotation and non-linearity[J]. *Atmosphere-Ocean*, 2009, 47(4): 267-280.
- [19] Li Q, Farmer D M. The generation and evolution of nonlinear internal waves in the deep basin of the South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2011, 41(7): 1345-1363.
- [20] Qiu B, Hacker P, Chen S, et al. Observations of the subtropical mode water evolution from the Kuroshio Extension System study[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2006, 36: 457-473.
- [21] Howe P J, Donohue K A, Watts D R. Stream-coordinate structure and variability of the Kuroshio Extension[J]. *Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(7): 1093-1116.
- [22] Donohue K A, Watts D R, Tracey K L, et al. Mapping circulation in the Kuroshio Extension with an array of current and pressure recording inverted echo sounders[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2010, 27(3): 507-527.
- [23] Tracey K L, Watts D R, Donohue K A, et al. Propagation of Kuroshio Extension meanders between 143° and 149°E[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2012, 42(4): 581-601.
- [24] Bishop S P, Watts D R. Rapid eddy-induced modification of subtropical mode water during the Kuroshio Extension System Study[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2014, 44: 1941-1953.
- [25] Bishop S P, Bryan F O. A comparison of mesoscale eddy heat fluxes from observations and a high-resolution ocean model simulation of the Kuroshio Extension[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2013, 43(12): 2563-2570.
- [26] Chereskin T, Donohue K, Watts R. cDrake: Dynamics and transport of the Antarctic Circumpolar Current in Drake Passage[J]. *Oceanography*, 2012, 25(3): 134-135.
- [27] Chereskin T K, Donohue K A, Watts D R, et al. Strong bottom currents and cyclogenesis in Drake Passage[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(23): 4-9.
- [28] Park J H, Watts D R, Tracey K L, et al. A multi-index GEM technique and its application to the southwestern

- Japan/East Sea[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22(8): 1282-1293.
- [29] Park J H, Watts D R. Internal tides in the southwestern Japan/East Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2006, 36(1): 22-34.
- [30] Watts, D R, Wimbush K L, Tracey W J, et al. Currents, eddies, and a “fish story” in the southwestern Japan/East Sea[J]. *Oceanography*, 2006, 19: 64-75.
- [31] Xu Y, Watts D R, Wimbush M, et al. Fundamental-mode basin oscillations in the Japan/East Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(4): L04605.
- [32] Donohue K, Hamilton P, Leben R, et al. Survey of deep-water currents in the northwestern Gulf of Mexico. Volume I: Executive summary[R]. New Orleans: Department of the Interior Minerals Management Service of United States, 2008.
- [33] Donohue K, Hamilton P, Leben R, et al. Survey of deep-water currents in the northwestern Gulf of Mexico. Volume II: Technical report[R]. New Orleans: Department of the Interior Minerals Management Service of United States, 2008.
- [34] Watts D R, Qian X S, Tracey K L. Mapping abyssal current and pressure fields under the meandering Gulf Stream[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, 18(6): 1052-1067.
- [35] Zhu X, Zhao R, Guo X, et al. A long-term volume transport time series estimated by combining in situ observation and satellite altimeter data in the northern South China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 2015, 71(6): 663-673.
- [36] Zhang K, Zhu X H, Zhao R. Near 7-day response of ocean bottom pressure to atmospheric surface pressure and winds in the northern South China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2017, 132: 6-15.
- [37] Zhao R, Zhu X, Park J, et al. Near 5-Day nonisostatic response to atmospheric surface pressure and Coastal-Trapped waves observed in the Northern South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(9): 2291-2303.
- [38] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies[J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(2): 167-216.
- [39] Dong C, McWilliams J C, Liu Y, et al. Global heat and salt transports by eddy movement[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3249.
- [40] Yang G, Wang F, Li Y, et al. Mesoscale eddies in the northwestern subtropical Pacific Ocean: Statistical characteristics and three-dimensional structures[J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2013, 118(4): 1906-1925.
- [41] Zhang Z, Tian J, Qiu B, et al. Observed 3D structure, generation, and dissipation of oceanic mesoscale eddies in the South China Sea[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 24349.
- [42] Zhang Z, Wang W, Qiu B. Oceanic mass transport by mesoscale eddies[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 322-324.
- [43] Zhang Z, Zhang Y, Wang W, et al. Universal structure of mesoscale eddies in the ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(14): 3677-3681.

Application and prospect of inverted echo sounder in global ocean

REN Qiang^{1, 2, 3, 4}, YU Fei^{1, 2, 3, 4}, NAN Feng^{1, 2, 3, 4}, WANG Jian-feng^{1, 2, 3, 4},
SUN Fan^{1, 2, 3}, CHEN Zi-fei^{1, 2, 3}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Fluctuation, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Center for Ocean Sciences, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Jan. 19, 2020

Key words: inverted echo sounder (IES); ocean; ocean dynamic; mesoscale processes

Abstract: The development history of inverted echo sounder (IES) is summarized systematically, and its current application in the world is introduced. The significance of the CPIES (IES integrated with pressure and current sensors) array deployed near the Luzon Strait in China and the prospect of its future application are expounded. The results show that the data obtained from the IES arrays, combined with the gravest empirical mode (GEM) and the optimal interpolation method, can obtain the three-dimensional spatial distribution characteristics of temperature, salinity and flow filed in the observed sea area. Based on the application of CPIES, multi-scale ocean dynamic processes, such as internal waves, internal tides and mesoscale eddies, can be further studied in future. More than that, its great significant to study the development of ocean circulation theory, the generation and extinction mechanism of mesoscale eddies, and energy transform at different scales in the ocean.

(本文编辑: 刘珊珊)