

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2021.3.16

西北太平洋黑潮延伸体观测回顾和展望

陈朝晖^{1,2}, 林霄沛^{1,2}, 马昕^{1,2}, 管延锋¹, 周春^{1,2}, 张岳奇¹, 马克¹

1. 中国海洋大学 深海圈层与地球系统前沿科学中心/物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266237

CHEN Zhaohui^{1,2}, LIN Xiaopei^{1,2}, MA Xin^{1,2}, GUAN Yanfeng¹, ZHOU Chun^{1,2},
ZHANG Yueqi¹, MA Ke¹

1. Frontier Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System (FDOMES)/MOE Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
2. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

CHEN Zhaohui, LIN Xiaopei, MA Xin, et al. Observational studies in the Kuroshio Extension region, Northwest Pacific—a review and outlook. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(5): 013-022

Abstract: The Kuroshio Extension (KE) in the Northwest Pacific is one of the regions that are dynamically most complex, most sensitive to climate change and have the most productive fishing ground in the global ocean. However, it is also a region with the least long-term continuous observation, which can hinder our understanding of the physical, ecological and biogeochemical processes in the region. This paper reviews the recent progress and accomplishments in the international KE observations as well as the ongoing efforts by Chinese scientists—including in 2020 the successful construction of the Kuroshio Extension Mooring System (KEMS), the first real-time data-transmission mooring array in the Northwest Pacific. During the construction of the KEMS, it was found that subduction by eddy lateral advection accounted for more than 50% of the total subduction rate for mode waters. The mesoscale eddies could trap and transport such mode waters southwestward to the western boundary of the subtropical gyre within one and a half year. By simultaneous temperature/salinity measurements and velocity measurement from the mooring arrays, the dynamic features of subthermocline eddies (STEs) in the KE region were examined in detail. For the first time in situ evidence of three types of STEs were obtained in this region, which provided a solid observational basis for further investigation of the detailed generation and erosion mechanisms of the KTES as well as the global subsurface mass/heat transport processes. The paper proposes that future observational systems should include integrated open-ocean observational platforms for multisphere, multidisciplinary studies, which can provide important observational support for the understanding of multiscale physical biological coupling, deep-ocean energy cascade and its climate effects, and deep-ocean carbon cycle.

Keywords: Northwest Pacific; Kuroshio Extension; observation system; multi-sphere; multi-disciplinary

摘要:西北太平洋黑潮延伸体是全球海洋动力过程最复杂、对全球气候变化最敏感和全球海洋渔业产量最大的区域之一,然而,目前对该海区物理、生态及生化地循环等过程的认识仍受限于长期连续海洋观测资料的缺乏。本文回顾了国际上针对黑潮延伸体海区的相关观测情况和取得的主要进展,介绍了近年来我国在

收稿日期:2021-03-10;修回日期:2021-03-29

基金项目:科学技术部国家重点研发计划项目(2016YFC1402606);国家自然科学基金项目(42076009);中央高校基本科研业务费专项(202172001);山东省泰山学者建设工程专项(tsqn201812022)

作者简介:陈朝晖(1984—),男,教授,博士生导师,主要从事海洋多尺度过程观测与机理的研究工作。E-mail: chenzhaohui@ouc.edu.cn

该区域观测系统的构建工作及取得的初步成果,包括构建了全球首个西北太平洋黑潮延伸体定点观测系统;发现黑潮延伸体海区海洋涡旋的平流效应对该海区模态水的总潜沉率贡献超过一半,所携带当地的模态水只需要一年半的时间就可到达海盆的西边界;基于潜标首次展示了黑潮延伸体区域3种不同类型次温跃层涡旋流速的直接观测结果,为开展其生成消亡机制及其全球次表层物质能量输运提供了重要的现场观测基础。最后,本文展望了今后观测系统的发展方向,即在跨圈层和多学科交叉方面发展成为我国在西北太平洋重要的深远海综合观测网络。这将为揭示多尺度物理-生物过程耦合、深海能量串级及其气候效应与深海碳循环等领域实现突破提供重要的观测支撑。

关键词:西北太平洋;黑潮延伸体;观测系统;多圈层;多学科

中图分类号:P714;P721 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2022)05-0013-0010

0 引言

海洋是生命的摇篮,是支撑宜居地球的关键空间,是地球系统科学发展的重要引擎。海洋是全球气候系统的调节器,对地球系统的热量循环、水循环和物质循环等有重要的调控作用,深入认识海洋动力过程及其所引起的能量物质循环是理解和应对极端天气和气候变化的关键。海洋也孕育了地球上最大的生态系统,具有巨大的服务功能和价值,认识蓝色生命系统过程与规律、合理开发和保护蓝色生物资源是支撑人类社会可持续发展的重大战略需求。

海洋作为地球系统的“血液”,是联系地球系统各圈层的纽带,开展以海洋为核心的跨圈层耦合研究,是催生地球科学重大发现、创建和发展地球系统

科学理论的必由之路。西北太平洋的黑潮延伸体(Kuroshio Extension)海区由于其特殊的地理格局、活跃的海洋动力过程、丰富的陆源物质输入、强烈的海-气界面物质能量交换、丰富的生物地球化学物质循环以及极高的海洋渔业产量,而成为跨圈层物质能量循环及其生态气候效应研究的最佳的深远海试验区(图1)。

从海洋动力学角度看,黑潮延伸体是全球海洋动力过程最为复杂的区域之一。海洋多尺度动力过程及其相互作用是维持海洋能量平衡的核心环节,能量从大尺度向小尺度的串级对于维持海洋能量收支平衡、决定海洋系统的运动形态具有至关重要的作用^[1-2]。黑潮及其延伸体在非常狭窄的区域内从低纬度向中高纬度输送大量的热量,这使得该海域存在非常显著的海气温差,强烈的海气相互作用伴

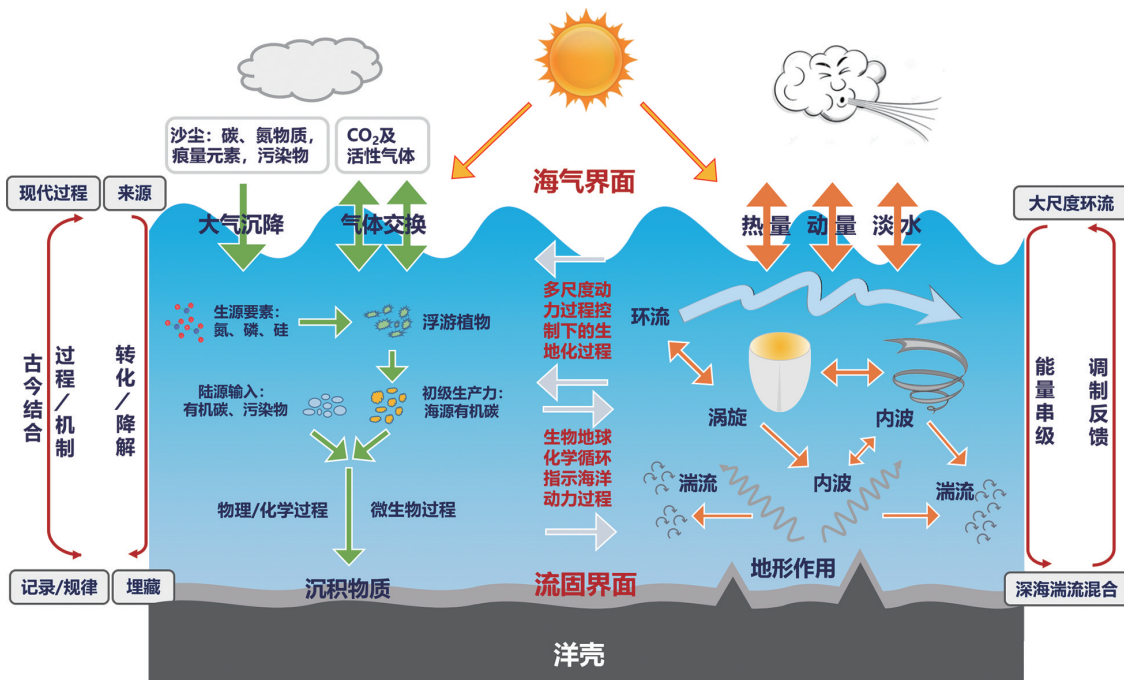


图1 海洋物质能量循环示意图
Fig. 1 Diagram of ocean material and energy cycle

随着高度活跃的海洋动力过程使得该地区海洋与大气运动具有显著的多尺度特征^[3]。黑潮延伸体是海洋多尺度动力过程的“舞台”，涵盖着丰富的大尺度环流、中尺度/亚中尺度涡旋、锋面、内波、海浪以及小尺度湍流等过程(图 2^[4])，向最小尺度的串级过程涉及能量在上述不同运动形式间的转换，该过程也受到海气界面和流固界面的显著影响。因此，在黑潮延伸体海区开展多尺度、跨圈层海洋动力过程研究对于理解海洋能量串级机理、认知海洋演变规律具有重要意义。

从物质交换角度看，黑潮延伸体是海-气物质交换的热点海区，在全球气候变化中具有重要作用。海洋是大气 CO₂ 重要储库，同时也是其他活性气体(二甲基硫、甲烷和一氧化碳等)的重要释放源^[5]，海

洋向大气排放的二甲基硫占全球天然硫排放总量的 70% 以上^[6-7]。黑潮延伸体是全球“碳汇”的关键海区，因而成为研究海-气界面气体交换的重要的实验区^[8]。除了海-气界面的气体交换，大气沉降对海洋生物地球化学过程及环境效应具有重要影响。例如，来自东亚大陆的沙尘入海可以显著提升表层及次表层海洋初级生产力，进而增强海洋碳泵，人为添加大气物质(如 Fe、沙尘等)的海洋“施肥”，是未来降低大气 CO₂ 浓度、缓解气候变化的潜在工程手段。另外，大气沉降也是生源要素、痕量元素、污染物(包括汞、黑碳、POP、微塑料等)向海洋输入的主要途径之一^[9-10]，但目前对其循环控制过程及长期风险的认识严重不足。因此，在黑潮延伸体海区开展海-气界面物质交换的时空格局及调控机制研

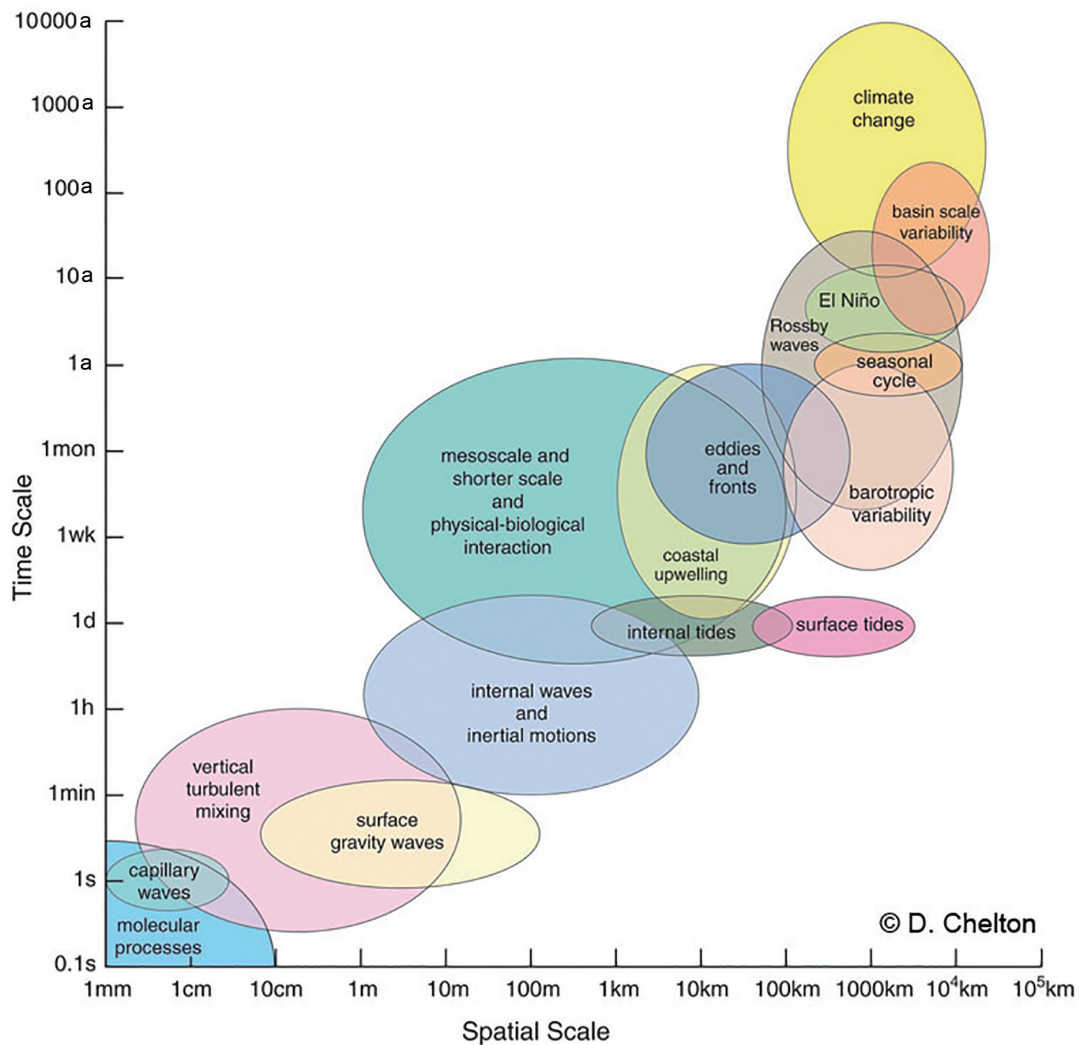


图 2 海洋多尺度过程示意图
(据文献[4])

Fig. 2 Diagram of ocean multi-scale processes. Adapted from [4].

究, 对于理解该海区生物地球化学过程和环境效应具有重要意义。

从渔业资源角度看, 黑潮延伸体是全球渔业资源最为丰富的区域之一。向北的黑潮在非常狭窄的区域内从低纬度向中高纬度输送大量的热量, 向南的亲潮将低温低盐海水从高纬度向低纬度输送, 导致黑潮延伸体海区存在显著的海洋温度梯度, 形成两个明显的锋面带——北太平洋副热带锋和亚北极锋^[11]。北太平洋副热带锋和亚北极锋之间(30°~45°N)存在绵延长 9 000 km、宽 1 000 km 的北太平洋过渡带(North Pacific Transition Zone), 南部副热带环流区和北部亚极地海区的水体在这里混合, 汇聚了丰富的营养物质, 形成了具有较高叶绿素浓度和初级生产力的区域^[12]。适宜的水温和较高的初级生产力为鱼类提供了良好的生存环境和充足的食物来源, 使得西北太平洋成为海洋经济渔业种类重要的栖息地。联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations)的数据显示, 西北太平洋是世界远洋渔业捕捞量最高的海区, 贡献了全球约四分之一的渔业总产量^[13]。特别是在黑潮延伸体和北侧的亲潮延伸体区域, 作为全球海洋生物资源尤其是金枪鱼、秋刀鱼等重要中上层远洋渔业资源最丰富的海区, 这里有传统的世界四大渔场之一的“北海道渔场”。在我国近海自然渔业资源衰退的背景下, 该区域作为我国发展远洋渔业的关键区域, 秋刀鱼、鲑鱼、柔鱼等均已成为我国重点开发的远洋经济鱼种。

从现场观测角度看, 黑潮延伸体是全球系统性海洋观测相对缺乏的海区之一。长期观测方面, 海洋动力和生态要素观测主要依靠传统的锚系浮标和潜标。然而, 目前几乎所有的锚系观测(如 TAO/TRITON 阵列、RAMA 计划和 PIRATA 计划)集中在热带海区^[14-16], 全球中高纬度海域特别是海气相互作用和海洋动力过程最为丰富的黑潮延伸体海区仍然是长期连续观测的“荒漠区”。精细观测方面, 当前的观测水平尚无法分辨发生在中纬度西边界流区的中小尺度, 特别是亚中尺度海洋动力过程。虽然近年来 KESS(Kuroshio Extension System Study)和 HOTSPOT(HOT SPOT in climate system)等项目的开展使得高分辨率的观测成为可能, 针对海洋中尺度涡旋、锋面、大气边界层等高分辨率的资料有了一定的累积, 但仍缺乏系统性的多学科观测来实现上述中小尺度海洋过程的精细化描述,

这也限制了我们对中小尺度海洋过程及其对生态要素影响的深入认知。

本文将回顾国际上针对黑潮延伸体海区的相关观测情况以及取得的主要进展, 介绍近年来我国在该区域开展的现场观测工作以及浮、潜标观测系统的构建情况, 并展望未来该区域前沿科学问题牵引下的海洋观测发展方向。

1 黑潮延伸体的主要观测研究计划

1.1 KESS

KESS 计划(2003—2008 年)是由美国国家自然科学基金委资助, 罗德岛大学、夏威夷大学和伍兹霍尔海洋研究所共同参与的一项针对黑潮延伸体的大型观测研究项目。KESS 的目标是确定和量化控制黑潮延伸体和再循环流涡之间的变化和相互作用的动力学与热力学过程, 包括了解正压与斜压环流的耦合以及变化过程, 确定和量化锋面之间的物质能量交换过程, 以及决定再循环流涡强度与结构(流涡的位置、拉伸变化、层化以及生成的副热带模态水)的主导因素^[17]。

KESS 计划的主要观测区域为黑潮延伸体第一个准静止大弯曲的波峰处, 在该区域布放了 46 套倒置回声测深仪(Inverted Echo Sounders equipped with bottom Pressure gauges and Current meters, CPIESs)所构成的观测阵列(图 3)^[18], 这是迄今国际上规模最大的海洋 CPIES 观测阵列, 其覆盖面积约 50 km², 能够同时观测上层流弯曲形成、涡旋的运动与形变速度和深层环流的变化。此外, 该计划沿 T/P-Jason 1 卫星轨道布放了 7 套深海潜标系统, 上面搭载了单点海流计、剖面测量仪以及多普勒声学海流剖面仪。该观测阵列持续工作了两年, 于 2006 年 5 月结束观测任务。到目前为止, 观测数据在研究上层中尺度过程动力学^[19-21]、地形对上层环流的作用^[22-23]等方面提供了重要的现场观测支撑。

计划执行期间, 在黑潮延伸体区域集中投放了 48 台 Argo 浮标开展海洋的剖面观测。这对研究黑潮再循环流涡的动力学和热力学变化, 例如热通量、温度平流以及潜沉有了更为充分的现场观测支撑。利用上述观测数据, 科学家们确认了北侧再循环流涡的存在^[24], 结合卫星高度计数据分析了黑潮延伸体主轴、再循环流涡与中尺度涡在多年尺度上的变化关系^[25]。

Administration)在黑潮延伸体主轴的南侧(32.3°N, 144.6°E)布放了一套锚系海气界面浮标(图4a和4b)。针对黑潮延伸体区域的恶劣海况,对KEO浮标进行了适应性改造,搭载了若干海洋与气象传感器,可实现海气热量、水汽与动量通量、二氧化碳吸收量、上层海洋温度、盐度和海流观测。从2007年2月至2013年6月,日本海洋科学技术中心(Japan Agency for Marine-earth Science and Technology, JAMSTEC)在黑潮延伸体主轴偏北位置(38.0°N, 146.4°E)维持了一套锚系浮标(JAMSTEC KEO, JKEO;图4c),并沿用了类似KEO浮标的工程结构与传感器设计^[27]。

KEO与JKEO浮标提供了高质量的黑潮延伸体区域海气观测资料,其数据时间长,分辨率高,为研究黑潮延伸体区域海气相互作用提供了宝贵的实测资料,产生了一系列学术研究成果,被广泛应用于数值天气预报、数据再分析、卫星数据定标等领域。浮标资料显示了黑潮延伸体海区巨大的热量损失,并捕捉到了黑潮延伸体主轴南北两侧海气相互作用精细差异结构^[28]。KEO观测的海气通量的高频变化表明了天气模式与海气通量异常事件的关系^[29],其季节与年际变化显示了夏季海气通量与上层海洋状态对冬季海洋混合层的直接影响^[30]。超强台风过境时,KEO浮标资料显示海气通量异常增大,上层海洋混合增强,完善了人类对台风过程海气相互作用的理解^[31]。KEO数据在海洋生化方面也得

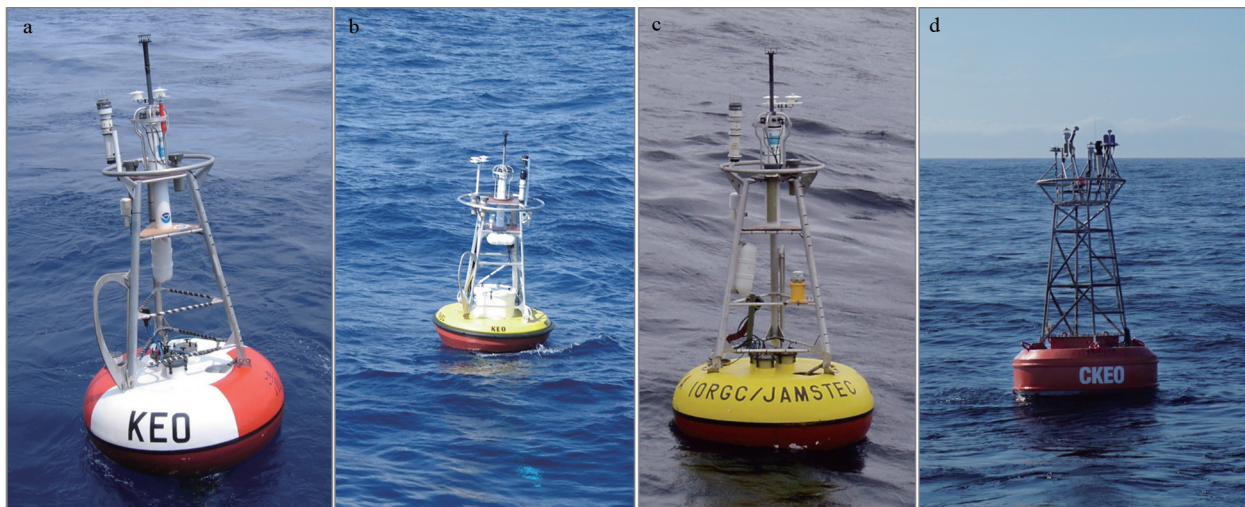
到应用,被用以评估海洋混合层碳循环的驱动因素^[32]。

从上述介绍可知,虽然近年来国际上针对黑潮延伸体海区实施了若干短期的观测计划,这些项目的开展使得高分辨率的观测成为可能。但2014年后美、日两国在该区域没有后继的系统观测计划,已经存在十多年的观测数据序列,尤其是可以分辨海洋中小尺度涡旋、锋面、大气边界层对流及风暴轴活动的高分辨率资料面临中断的危险,将无法支撑我们对海洋动力和生态环境的持续认知。受复杂海洋环境和恶劣天气条件影响,2014年以后,此海域仅有美国一套大型浮标观测系统KEO在维持工作。当前,我国在该区域的研究已经逐渐进入国际前沿,且具备相应的观测能力和研究水平,我们有责任在区域海洋观测研究中起更重要的作用,这也是我国在该领域争取国际领先地位的良机。

2 我国在黑潮延伸体的观测和研究进展概述

2.1 黑潮延伸体定点观测系统

从2014年起,围绕“透明海洋”计划在西北太平洋黑潮延伸体观测网的战略布局^[33],通过每年一度的航次逐步构建和完善黑潮延伸体潜、浮标定点观测系统,在黑潮延伸体主轴以及主轴的南北两侧布放并维持共4套6000m级深海潜标系统,为我们



a, b—两型KEO浮标; c—JKEO浮标; d—CKEO浮标。

图4 黑潮延伸体海区的锚系浮标

Fig. 4 Moored buoys in Kuroshio Extension region

研究黑潮延伸体变异, 中尺度涡旋过境时的海洋过程以及冬季大风天气对上层海洋的能量输入与下传等科学问题提供了宝贵的科学数据。此外, 顺利完成了我国在中纬度黑潮延伸体海域首套深海大型观测浮标(CKEO 系列浮标; 图 4d) 的布放和回收工作, 使我国成为除美国、日本之外第三个在黑潮延伸体海域拥有大型观测浮标的国家。除了建立以浮、潜标为核心的定点观测阵列, 我们在该海域陆续进行了一系列新型移动观测平台(如 4 000 m 级深海自持式剖面浮标、漂流式海气界面浮标、波浪滑翔器、声学水下滑翔机等) 的测试和深远海科学应用, 加速了我国自主研发的新型海洋移动观测平台从实验室推向深海大洋的过程。

2020 年, 随着黑潮延伸体综合科考航次的结束, 历经了 5 年 6 个科考航次及近 200 天的海上作业, 全球首个西北太平洋黑潮延伸体定点观测系统(Kuroshio Extension Mooring System, KEMS) 一期构建完成。2021 年, KEMS 二期启动建设, 基于 CKEO 系列浮标实现了包括二氧化碳、地球磁场、环境噪声和温度剖面等要素的综合观测, 在黑潮延伸体布放了我国在该海区首套远洋渔业与渔场环境监测潜标, 初步形成了该海区长期、综合的观测能力(图 5)。

2.2 代表性成果

在观测系统构建完善过程中, 我们对该区域多尺度海洋过程特别是过去无法精细化观测的模态水和次温跃层涡旋有了新的认识。

2.2.1 模态水观测研究

黑潮延伸体区域由于海洋大量失热而形成的深

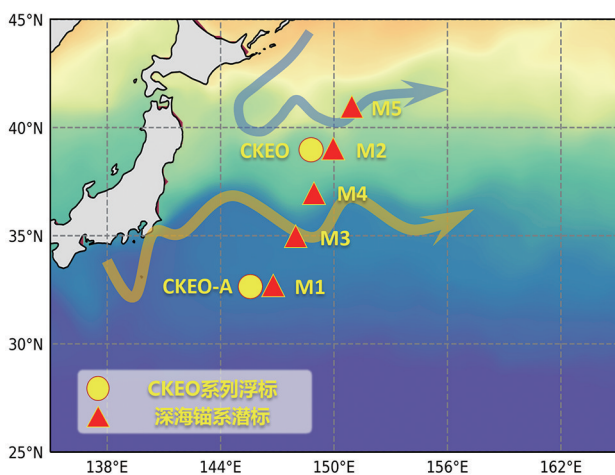


图 5 黑潮延伸体定点观测系统示意图

Fig. 5 Diagram of Kuroshio Extension Mooring System

混合层是模态水的“原产地”。模态水进入温跃层后仍保留其低位涡的特性, 垂向厚度大, 热含量也大, 对海洋环流及气候变化都具有重要的影响。模态水在黑潮延伸体海域随副热带经向翻转流潜沉, 后随副热带环流向西南迁移, 在背景流的输送下可到达台湾以东, 影响局地的水体特性及气候变化。

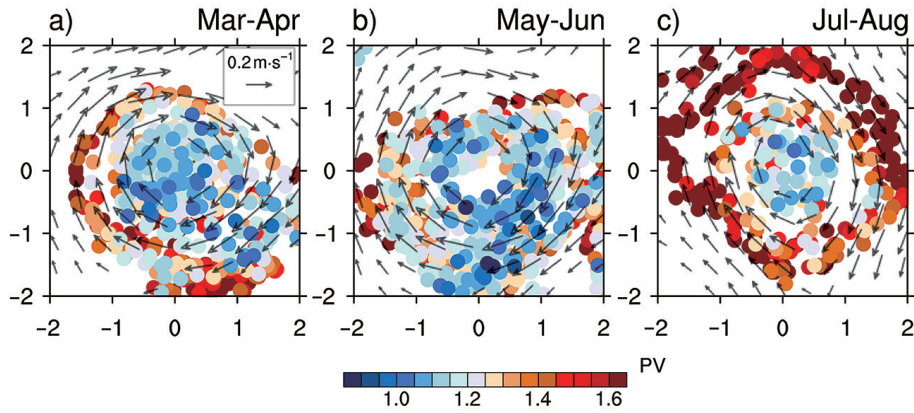
海洋涡旋对模态水的潜沉和输运主要依靠涡旋外围的平流效应以及涡旋核心的携带输运这两个机制。基于 17 台带有溶解氧探头的 Argo 浮标, 研究发现海洋涡旋的平流效应对模态水总潜沉率的贡献占到了一半以上, 且将模态水快速向南输运, 其速度是平均流的 10 倍以上(图 6^[34])。在黑潮延伸体南侧形成的海洋涡旋, 形成后携带当地的模态水只需要一年半的时间就可到达海盆的西边界。另外, 研究发现, 在反气旋涡内的模态水受涡旋非线性影响与外界水体交换很弱, 其原有性质保存更加“完好”^[34-36]。

此外, 原国家海洋局还在西太平洋海区开展了放射性监测工作, 获得了福岛核事故以来西北太平洋海洋生态环境综合要素的分布及变化情况。特别是发现了模态水可以在短短一年多的时间内将福岛放射性物质输运至台湾东南海域^[37], 侧面证实了中尺度涡与模态水的相互作用可能是¹³⁴Cs 和¹³⁷Cs 快速进入更深层水体的主要原因。上述实测结果与王辉等^[38]的数值模拟和胡海波^[39]所估算的关于模态水运移至台湾东南海域需要 12 年的结论不同, 与 Oka 等^[40]关于跨锋流产生的反气旋涡半年内可将模态水从源地输运迁移到 27.5°N 的结论相符, 进一步体现出该海区模态水在物质输运中扮演的重要角色。

2.2.2 次温跃层涡旋观测研究

次温跃层涡旋(Subthermocline Eddy, STE) 是一种核心位于海洋次表层的涡旋。与中尺度涡旋相比, STE 通常位于主温跃层之下, 在海表面没有明显的信号, 因此难以通过卫星高度计进行识别和探测。通常来讲, STE 多以反气旋(北半球顺时针)的形式存在, 其垂直尺度和水平尺度相对较小(百米和十千米量级), 因此该类涡旋又被命名为亚中尺度相干涡旋(Submesoscale Coherent Vortices)^[41]。STE 多以透镜式结构为主, 其核心包裹着性质(温度、盐度和溶解氧等)相对均一的水体, 因此这种涡旋核心层结较弱、位势涡度较低, 与周围环境的水体有较大的差异, 形成其独特的动力学和热力学特征。

受限于现场观测条件和手段, 黑潮延伸体海区



坐标零点代表反气旋的核心, 定义涡旋核心边界为相对涡度为 0 的闭合等值线, 将涡旋的边界标准化为 $[-1, 1]$, 代表标准化的涡旋半径。箭头表示地转流 (m/s)。不同颜色的点表示每个 Argo 观测站在模态水核心密度面 ($25.3 \sigma_\theta$) 上的位势涡度 (单位 $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

图 6 基于 Argo 浮标观测的模态水核心密度面上的位势涡度季节变化特征 (据文献[34])

Fig. 6 Seasonal variation characteristics of potential vorticity (PV) on core layer of model water based on Argo floats. Adapted from [34].

STE 的相关研究特别是观测研究发展较慢。苏联于 1987 年开展了针对黑潮延伸体主轴北侧区域的数十套潜标和多断面的船载观测, 并通过其中一套潜标上的单点海流计捕捉到了海洋内部异常流速现象^[42]。随后的近 20 年, 由于观测技术没有实质性提升, 有关 STE 的进一步研究停滞不前。直到最近, 得益于高分辨的海洋调查以及 Argo 浮标的快速发展, STE 的现场观测研究迎来了新的机遇。日本科学家通过船载观测, 在黑潮延伸体主轴的南侧发现了一个携带低温、低盐和高溶解氧的 STE, 其水体和北太平洋中层模态水的性质相似^[40]。利用上文提到的 17 套 Argo 浮标, 我们首次捕捉到了另一种携带高温、高盐属性的 STE, 表明该区域 STE 的多样性特征^[43]。随后利用长达 14 年的 Argo 浮标数据, Li 等^[44]对其中低温、低盐的 STE 进行了详细的统计分析, 并推测其可能来源地为亚极地锋面区。基于 KESS 计划的潜标和黑潮延伸体定点观测系统的潜标, 对 STE 的温盐性质和流场结构进行了深度剖析, 首次展示了黑潮延伸体区域 3 种不同类型 STE 流速的直接观测结果, 为描述海洋次中尺度运动的动力学特征提供了新的角度 (图 7^[45]), 为今后开展 STE 的生成消亡机制及其全球次表层物质能量输运提供了重要的现场观测基础。

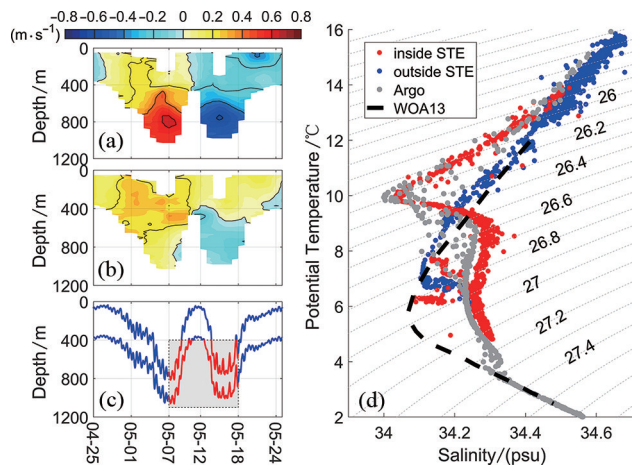


图 7 黑潮延伸体定点观测系统 M1 潜标观测的双核 STE (据文献[45])

Fig. 7 Dual-core STE captured by M1 of KEMS. Adapted from [45].

3 未来展望

当前, 海洋科学的发展已逐渐形成了多学科交叉融合的态势, 目前通过传统的观测手段以及海洋数值模式, 我们对该海区的海洋多尺度动力过程有了较为详细的认知, 然而, 在区域甚至全球的物质能量循环及其生态和气候效应方面仍存在一系列前沿的科学问题, 有待我们进一步开展以观测为基础的多学科交叉研究, 包括:

(1) 黑潮延伸体多尺度海洋动力过程及其在能量串级、热量输运、海气相互作用、多尺度物理-生物过程耦合与海洋碳循环中的作用;

(2) 黑潮延伸体海区大气沉降和海-气界面物质交换的时空格局及调控机制;

(3) 黑潮延伸体海洋生源要素、痕量元素和放射性同位素的生物地球化学过程和环境效应;

(4) 黑潮延伸体海区微生物驱动的地球化学循环过程、机制及其变化规律;

(5) 黑潮延伸体海区渔业资源可持续利用的生态环境基础。

黑潮延伸体海区海洋动力过程丰富、生态系统复杂、生物过程活跃,也是距离我国最近的深远海区域,现有的定点观测系统均位于公海,是解决上述重大科学问题的最佳综合试验区。下一步需要在此区域建立从海气界面、水体到海底,从大气圈、水圈、生物圈到岩石圈的跨圈层定点观测系统,实现关键水文、化学、生态渔业要素的实时化传输,打造我国在西北太平洋长期、连续的综合观测站,形成我国在西北太平洋多学科常态化观测体系。以此为契机,积极推动国际第二次黑潮联合调查计划,奠定我国在该区域海洋综合观测的国际领先地位。

感谢中国海洋大学“东方红 2”船、“东方红 3”船的全体船员在黑潮延伸体定点观测系统构建做出的卓越贡献。感谢各位审稿人和编辑对本文提出的修改意见。感谢太平洋海洋环境实验室网站(www.pmel.noaa.gov)提供浮标照片。

参考文献

- [1] WUNSCH C, FERRARI R. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2004, 36: 281-314.
- [2] FERRARI R, WUNSCH C. Ocean circulation kinetic energy: reservoirs, sources, and sinks[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2009, 41: 253-282.
- [3] KWON Y O, ALEXANDER M A, BOND N A, et al. Role of the Gulf Stream and Kuroshio-Oyashio systems in large-scale atmosphere-ocean interaction: a review[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(12): 3249-3281.
- [4] DICKEY T. The role of new technology in advancing ocean biogeochemical research[J]. *Oceanography*, 2001, 14(4): 108-120.
- [5] CARPENTER L J, ARCHER S D, BEALE R. Ocean-atmosphere trace gas exchange[J]. *Chemical Society Reviews*, 2012, 41(19): 6473-6506.
- [6] LANA A, BELL T G, SIMÓ R, et al. An updated climatology of surface dimethylsulfide concentrations and emission fluxes in the global ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(1): GB1004.
- [7] SIMÓ R. The role of marine microbiota in short-term climate regulation[M]//DUARTE C M. The role of marine biota in the functioning of the biosphere. Bilbao: Fundación BBVA, 2011: 107-130.
- [8] TAKAHASHI T, SUTHERLAND S C, WANNINKHOF R, et al. Climatological mean and decadal change in surface ocean $p\text{CO}_2$, and net sea-air CO_2 flux over the global oceans [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2009, 56(8/9/10): 554-577.
- [9] MARTIN J H, COALE K H, JOHNSON K S, et al. Testing the iron hypothesis in ecosystems of the equatorial Pacific Ocean[J]. *Nature*, 1994, 371(6493): 123-129.
- [10] KIM T W, LEE K, NAJJAR R G, et al. Increasing N abundance in the northwestern Pacific Ocean due to atmospheric nitrogen deposition [J]. *Science*, 2011, 334 (6055): 505-509.
- [11] QIU B. Kuroshio and Oyashio Currents[M]//COCHRAN J K, BOKUNIEWICZ H, YAGER P. Encyclopedia of ocean sciences. Oxford: Academic Press, 2019: 384-394.
- [12] POLOVINA J J, HOWELL E, KOBAYASHI D R, et al. The transition zone chlorophyll front, a dynamic global feature defining migration and forage habitat for marine resources[J]. *Progress in Oceanography*, 2001, 49(1/2/3/4): 469-483.
- [13] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAO Yearbook. Fishery and aquaculture statistics 2018[M]. Rome: FAO, 2020.
- [14] MCPHADEN M J. The tropical atmosphere ocean array is completed[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1995, 76(5): 739-744.
- [15] SERVAIN J, BUSALACCHI A J, MCPHADEN M J, et al. A pilot research moored array in the tropical Atlantic (PIRATA)[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(10): 2019-2031.
- [16] MCPHADEN M J, MEYERS G, ANDO K, et al. RAMA: the research moored array for African-Asian-Australian monsoon analysis and prediction[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(4): 459-480.
- [17] 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.
- [18] DONOHUE K, WATTS D R, TRACEY K, et al. Mapping circulation in the Kuroshio Extension with an array of Current and Pressure recording Inverted Echo Sounders[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27 (3): 507-527.
- [19] HOWE P J, DONOHUE K A, WATTS D R. Stream-coor-

- dinate structure and variability of the Kuroshio Extension [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(7): 1093-1116.
- [20] 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.
- [21] JAYNE S R, HOGG N G, WATERMAN S N, et al. The Kuroshio Extension and its recirculation gyres[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(12): 2088-2099.
- [22] 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.
- [23] GREENE A D, SUTYRIN G G, WATTS D R. Deep cyclogenesis by synoptic eddies interacting with a seamount[J]. *Journal of Marine Research*, 2009, 67(3): 305-322.
- [24] QIU B, CHEN S M, HACKER P, et al. The Kuroshio Extension northern recirculation gyre: profiling float measurements and forcing mechanism[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2008, 38(8): 1764-1779.
- [25] QIU B, CHEN S M. Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre, and mesoscale eddies on decadal time scales[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2005, 35(11): 2090-2103.
- [26] NAKAMURA H, ISOBE A, MINOBE S, et al. "Hot Spots" in the climate system: new developments in the extratropical ocean-atmosphere interaction research; a short review and an introduction[J]. *Journal of Oceanography*, 2015, 71(5): 463-467.
- [27] CRONIN M F, MEINIG C, SABINE C L, et al. Surface mooring network in the Kuroshio Extension[J]. *IEEE Systems Journal*, 2008, 2(3): 424-430.
- [28] KONDA M, ICHIKAWA H, TOMITA H, et al. Surface heat flux variations across the Kuroshio Extension as observed by surface flux buoys[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(19): 5206-5221.
- [29] BOND N A, CRONIN M F. Regional weather patterns during anomalous air-sea fluxes at the Kuroshio Extension Observatory (KEO) [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(8): 1680-1697.
- [30] TOMITA H, KAKO S, CRONIN M F, et al. Preconditioning of the wintertime mixed layer at the Kuroshio Extension Observatory[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C12): C12053.
- [31] BOND N A, CRONIN M F, SABINE C, et al. Upper Ocean response to Typhoon Choi-Wan as measured by the Kuroshio Extension Observatory mooring [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C2): C02031.
- [32] FASSBENDER A J, SABINE C L, CRONIN M F, et al. Mixed-layer carbon cycling at the Kuroshio Extension Observatory[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, 31(2): 272-288.
- [33] 吴立新, 陈朝晖, 林霄沛, 等. "透明海洋"立体观测网构建 [J]. *科学通报*, 2020, 65(25): 2654-2661.
- [34] XU L, LI P, XIE S P, et al. Observing mesoscale eddy effects on mode-water subduction and transport in the North Pacific[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10505.
- [35] XU L X, XIE S P, MCCLEAN J L, et al. Mesoscale eddy effects on the subduction of North Pacific mode waters[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(8): 4867-4886.
- [36] XU L X, XIE S P, JING Z, et al. Observing subsurface changes of two anticyclonic eddies passing over the Izu-Ogasawara Ridge[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(4): 1857-1865.
- [37] MEN W, HE J, WANG F, et al. Radioactive status of seawater in the northwest Pacific more than one year after the Fukushima nuclear accident [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 7757.
- [38] 王辉, 王兆毅, 朱学明, 等. 日本福岛放射性污染物在北太平洋海水中的运输模拟与预测 [J]. *科学通报*, 2012, 57(22): 2111-2118.
- [39] 胡海波. 北太平洋低位势涡度水的潜沉和向台湾以东的运输 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [40] OKA E, TOYAMA K, SUGA T. Subduction of North Pacific central mode water associated with subsurface mesoscale eddy [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(8): L08607.
- [41] MCWILLIAMS J C. Submesoscale, coherent vortices in the ocean [J]. *Reviews of Geophysics*, 1985, 23(2): 165.
- [42] MAXIMENKO N, YAMAGATA T. Submesoscale anomalies in the north Pacific subarctic front [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C9): 18459.
- [43] ZHANG Z W, LI P L, XU L X, et al. Subthermocline eddies observed by rapid-sampling Argo floats in the subtropical northwestern Pacific Ocean in Spring 2014 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(15): 6438-6445.
- [44] LI C, ZHANG Z W, ZHAO W, et al. A statistical study on the subthermocline submesoscale eddies in the northwestern Pacific Ocean based on Argo data [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(5): 3586-3598.
- [45] ZHU R C, CHEN Z H, ZHANG Z W, et al. Subthermocline eddies in the Kuroshio Extension region observed by mooring arrays [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2021, 51(2): 439-455.