

日本海海洋环境调查进展

张永垂¹, 汪浩笛¹, 陈诗尧¹, 王宁¹, 杨霄², 谭成伟³

(1. 国防科技大学气象海洋学院, 湖南 长沙 410073; 2. 南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044; 3. 31440 部队, 辽宁 沈阳 110027)

摘要: 重点回顾了俄罗斯、日本和韩国等周边国家早期开展的日本海海洋环境调查; 简要回顾了20世纪90年代在日本海开展的多国联合调查及相关的代表性研究成果; 介绍了在浮标、潜标、Argo等现场观测以及卫星遥感大面积观测能力不断提升的时代背景下, 日本海海洋调查研究取得的最新进展; 最后, 对我国如何在日本海开展海洋环境调查提出建议。

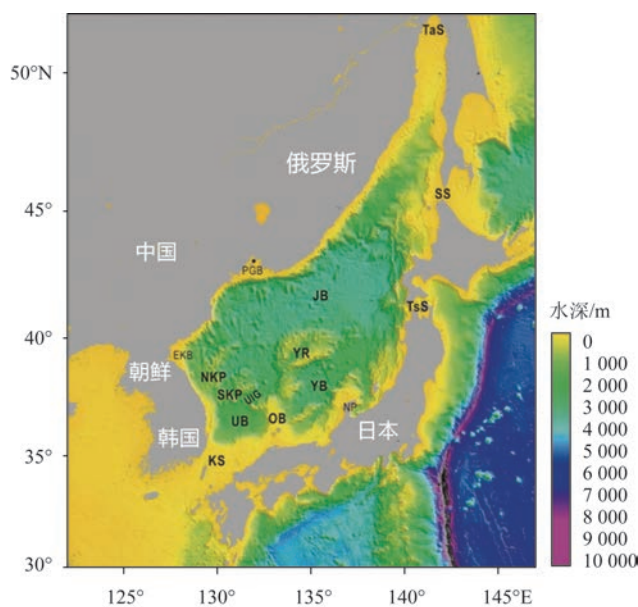
关键词: 日本海; 海洋调查; 现场观测; 卫星遥感

中图分类号: P71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)02-0092-10

1 引言

日本海(Japan Sea, 韩国称为“东海”)是西北太平洋最大的边缘海, 由亚洲大陆、库页岛和日本诸岛所包围(见图1), 西起128°E, 东至142°E, 南起35°N, 北至50°N, 总面积约为10⁶ km², 最大深度超过3 700 m。日本海是一个半封闭的海盆, 它通过4个浅而窄的海峡与外海相通(分别是朝鲜海峡、津轻海峡、宗谷海峡和鞆鞆海峡)。日本海海盆相对较小, 而纬度范围跨越了副热带和副极地, 表现出许多深海大洋的显著特征, 如季风、海盆尺度的环流、西边界洋流、副极地锋、中尺度涡旋和深层水, 因此也有“微型大洋”之称。日本海是全球变化的自然实验室, 可以促进对开阔大洋特征的了解, 如日本海中部地区的海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)以1.71 °C/100 a的速率变暖, 这个显著变暖趋势是全球平均值的3.2倍, 日本海内部也有一个类似于大西洋热盐环流的深水局部环流系统^[1]。

海洋调查是海洋科学研究的基础和前提^[2]。由于日本海周边国家历史、文化以及语言的差异, 早期的海洋环境调查多是由各个国家独立承担, 没有



审图号: GS(2021)8775号

图1 日本海地形

Fig.1 Topography of the Japan Sea

注: UB 郁陵海盆; YB 大和海盆; JB 日本海盆; KS 对马(朝鲜)海峡; TS 津轻海峡; SS 宗谷海峡; TaS 鞆鞆海峡; YR 大和隆起; NKP 北朝鲜高原; SKP 南朝鲜高原; OB 隐岐浅滩; UIG 郁陵缺口; PGB 彼得大帝湾; EKB 东朝鲜湾; NP 能登半岛。

收稿日期: 2021-02-03; 修回日期: 2021-05-11。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0604100)。

作者简介: 张永垂(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事海洋环流动力学和海洋中尺度涡研究。E-mail: zyc@nudt.edu.cn

邻国的参与,甚至会因为领土主权的严重对立而受到严重阻碍。直到20世纪90年代,日本海周边国家才开始广泛合作,陆续组织了多次具有国际影响力的联合海洋调查,进一步加深了对日本海海洋环境的理解和认识。随着浮标、潜标和Argo等现场观测以及卫星海洋遥感的大面积覆盖,日本海海洋环境观测研究进入了全新的时代。

本文对日本海海洋环境调查活动的发展历程进行了综述。第2、3和4节分别为单国、多国联合调查和立体全方位观测的情况,最后一节为展望。

2 单国调查阶段

直到18世纪末,由于周边国家都没有适合远航的船只,人们对日本海大尺度环流系统缺乏了解。这一时期,欧洲科学家们首先展开了日本海海洋调查。1787年,法国人拉佩鲁斯(J.F. La Perouse)率领的一支欧洲科学考察队对日本海进行了调查和测绘,完整绘制了第一张日本海沿海地区水文地图,其中包括海底地形和部分表层环流信息。之后,布劳顿(W.R. Broughton)带领的英国探险队和克鲁森斯登(I. F. Kruzenshtern)带领的俄罗斯探险队先后于1796年和1805年前往日本海开展海洋环境调查。

日本海周边的地缘政治变化对于海洋学研究活动有着重要影响。1860年签署的《北京条约》使得俄罗斯掌握了日本海西北海岸的管辖权,为此后在该海域开展海洋调查活动奠定了基础。半个世纪之后,日俄战争爆发,日本占领了萨哈林岛南部地区。1910年日本吞并朝鲜后,开始对日本海开展广泛的科学研究。随着二战和朝鲜战争的结束,韩国也逐渐加入日本海的调查研究活动中。

2.1 俄罗斯

1859年,俄国海军在日本海开展了首次系统的海洋水文调查,调查要素包括温度、密度和海流等。大约10 a后,基于上述调查结果,Shrenk^[3-4]撰写了日本海物理海洋学领域的前两部专著。这些专著首次提到了日本海海盆尺度的表层环流特征,并对主要支流进行了命名,分别为从东海穿过对马海峡输运暖水的对马暖流,以及从北部沿俄罗斯海岸输运冷水的黎曼寒流。后续研究又诞生出了一批关于

海洋热力结构、海冰状况和表层环流的文献,提供了有关日本海北部和西部海温、密度和海流分布的详细信息。该时期日本海的海洋水文科学研究主要由俄国科学家主导,但随后一系列战乱和动荡使得俄国中止了在日本海开展的一切科研活动。

俄罗斯(前苏联)的新一轮海洋调查由前苏联科学院派遣调查船分别在1949年、1951年和1955年实施,两艘调查船在不同季节分别进行了走航观测,获取了日本海物理性质分布、环流形态以及地形特征的第一手资料。除调查船外,俄罗斯(前苏联)也在日本海西北和北部沿岸区域布放锚系设备对潮汐和海流开展长期监测。但1959—1972年间俄罗斯(前苏联)在日本海开展的海洋环境调查较少。

随着调查船数量的不断增长,20世纪70年代,俄罗斯(前苏联)重返日本海开展了一系列大规模海洋水文调查。远东区域水文气象研究所(Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, FERHRI)在1974—1976年分别派遣Okean和Priliv两艘调查船开展了3个航次的海洋调查。随后,又在1984—1990年派遣Vyacheslav Frolov、Shokalsky和Valerian Uryvaev 3艘调查船开展了12个航次的调查。这些调查主要是观测和研究日本海环流特征和水团特征,但当时采用的温盐深仪(Conductivity-Temperature-Depth, CTD)存在取样精度不足的问题,盐度滴定法也存在一定的缺陷,这些因素制约了对深层水团的研究,因此俄罗斯(前苏联)科学家将研究重点放在了上层海水(500 m以浅)。这一时期的主要成果是积累了大量的实测资料,但是受调查仪器和方法的限制,俄罗斯(前苏联)在日本海的深层环流和水团研究方面没有取得突破。FERHRI^[5]全面总结了2000年之前日本海海洋物理、化学和气象方面的大量研究成果,对早期海洋数据集进行统计和分析,整理归纳了日本海基本的海洋环境信息并出版了第三部日本海海洋学专著。1991年俄罗斯国内发生的政治和经济剧变使其在日本海的调查活动大大减少,但也促进了俄罗斯与其他周边国家在海洋调查领域的广泛合作。

2.2 日本

进入20世纪后,日本在日本海的调查活动日渐增多,成为1922—1945年日本海海洋水文调查研究

的中坚力量。这一时期的海洋调查提供了日本海内部海盆的最新资料,由此发现了日本海底部的主要地形特征(大和隆起和深度超过3 500 m日本海盆)。1928—1930年的成果最为突出,神户海洋天文台派遣 Shumpu Maru 调查船在日本海西部首次进行了深度超过1 000 m的观测。

1932—1933年,日本科学家 Uda 首次使用两艘调查船和 50 艘渔船同步开展了包括深水区在内的海盆尺度水文观测,绘制了一张应用了近一个世纪的日本海环流分布示意图(见图 2)^[6]。Uda 还特别提到日本海深水具有极低温度、高氧含量和显著的均匀性特征,这些物理性质是由冬季频繁的对流活动形成的。



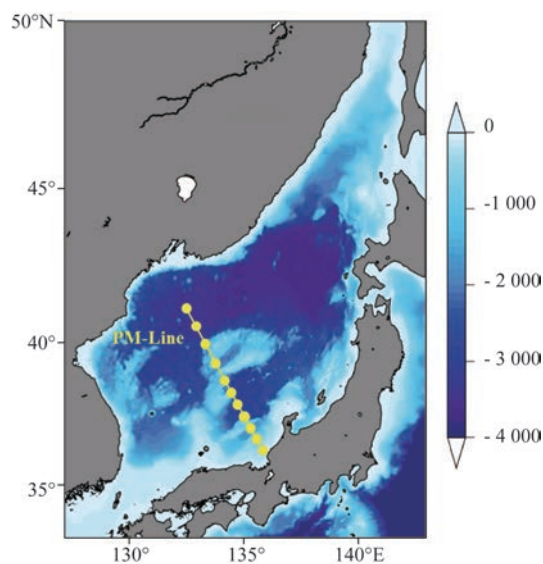
审图号:GS(2021)8775号

图2 第一张日本海环流示意图(1.浦之内湾,2.中之内海,3.青森湾)

Fig.2 First schematic diagram of circulation in the Japan Sea (1. Urunchi Bay, 2. Nakunchi Sea, 3. Aomori Bay)

第二次世界大战和朝鲜战争严重影响了周边国家的政治经济形势,日本海区域的相关研究也遭受波及。但日本政府和机构仍定期开展海洋环境调查。例如,日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)依然维持季节性的海洋观测来监测日本海的海洋气候变化,其中最著名的观测线是由 JMA 舞鹤海洋气象台(Maizuru Marine Observatory, MMO)维持的 PM 断面(见图 3)。自 1972 年以来, JMA 每个季节都会收集 PM 断面上的物理、化学和

生物要素信息,包括温度、盐度、溶解氧、营养物质、叶绿素和浮游动物等。此外,日本海岸警卫队也在持续监测日本海的海洋环境变化情况,重点关注潮汐、环流以及海洋污染物的扩散和分布等信息,并由日本海洋数据中心(Japan Oceanographic Data Center, JODC)负责定期收集并公开各类海洋环境数据信息(网址: <https://www.jodc.go.jp/jodcweb/>)。出于海洋生态系统研究和渔业资源管理需求,日本渔业研究机构和各县级渔业实验站也进行了大量观测工作。



审图号:GS(2021)8775号

图3 日本舞鹤海洋气象台的 PM 断面(底图为水深)

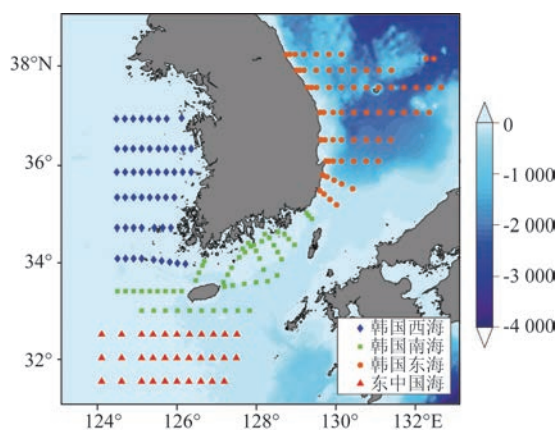
Fig.3 PM section of Japan Maizuru Marine Observatory (The base map is topography)

2.3 韩国

韩国的日本海海洋水文调查可以追溯到 1921 年成立的渔业研究与开发研究所(National Fisheries Research and Development Institute, NFRDI),后更名为韩国渔业科学研究所(National Institute of Fisheries Science, NIFS),此后一直维持连续海洋观测(NIFS Serial Oceanographic observation, NSO)。NSO 是一个定期监测日本海物理、化学和生物状态的综合性观测计划,目的是收集渔场信息和监视海洋环境状况。20 世纪 20 年代, NSO 维持 6 条观测断面,每年不定期开展 2~6 次海洋水文调查。1935 年,观测断面增加至 14 条,覆盖了韩

国周边全部海域,并延伸至海岸以外 100 n mile 的范围。

1948 年韩国独立和 1953 年朝鲜战争结束使得韩国在日本海的调查工作取得重大进展。1961 年,为了更好地了解朝鲜半岛周围复杂的海洋结构和特性变化,NFRDI 升级了 NSO 观测计划,将观测断面数量从原有的 14 条增加至 22 条,站位数量增加至 175 个。20 世纪 90 年代再次增加 3 条观测断面。截至目前,NSO 计划共维持 25 条观测断面和 207 个观测站,其中 8 条断面和 69 个测站位于日本海(见图 4)。通过长期观测,NSO 计划提供了日本海气候变化的大量重要信息。此外,NSO 计划还为海洋环境预报和海洋自然灾害预防提供支撑,为日本海及其附近海域的生态系统状况评估提供坚实基础。NSO 观测数据通过 NFRDI 维护的韩国海洋数据中心网站(网址:<http://kodc.nfrdi.re.kr>)发布。



审图号:GS(2021)8775号

图4 NSO计划近20 a(1995—2014年)的历史水文测线(底图为水深)

Fig.4 Historical hydrographic lines of the NSO program over the past 20 years (1995 to 2014. The base map is topography)

3 多国联合调查阶段

1982 年,联合国第三次海洋法会议做出关于专属经济区的决议,使得日本海海盆尺度的调查数量大大减少。日本海周边国家都由海盆尺度的开创性观测转向中小尺度的常规监测。日本、韩国和俄罗斯开始对固定断面进行周期性观测,其中绝大部分观测工作直到今天仍在继续开展,提供了长达 40~

50 a 时间跨度的宝贵资料。尽管其中相当一部分观测计划受到不同国家专属经济区的限制,但总体来说,观测资料在日韩周边海域还是保证了相当高的空间覆盖率。俄罗斯渔业研究机构也在日本海维持了 4 个断面的周期性观测。但在朝鲜专属经济区内尚无公开的观测资料。在大尺度观测方面,俄罗斯(前苏联)科学家在 20 世纪 60—70 年代维持的 4 个横跨日本海的长距离断面一直沿用至今。

20 世纪 90 年代初,日本海周边国家已经清楚地认识到,有必要对日本海海洋水文特性进行更系统的长期观测,研究各种海洋水文要素的长期变化趋势,揭示日本海环流和其他物理化学过程的发展机制。显然,实现这一目标离不开广泛的国际合作。冷战结束后出现了开放的国际政治局面,推动了在日本海首次开展多国联合调查活动。

日本海和东中国海研究计划(Japan and East China Seas Study, JECSS)是在日本海启动的第一个国际性的研究计划,主要涉及日韩两国科学家的合作研究,自 1981 年起每两年组织一次专题研讨会,为同领域学者提供了密切交流的平台。1993 年, JECSS 计划更名为 PAMS (Pacific-Asian Marginal Seas)/JECSS, 2009 年再次更名为 PAMS。PAMS 关注的海域已拓展至印度尼西亚海、南海、东海、黄海、日本海和鄂霍次克海等边缘海。

3.1 CREAMS 计划

在日本、韩国和俄罗斯等多国科学家的倡议下,新的大型国际合作交流计划——东亚边缘海环流研究(Circulation Research of East Asian Marginal Seas, CREAMS)计划成立。CREAMS 计划由九州大学(日本)、首尔国立大学(韩国)和 FERHRI(俄罗斯)等十余个组织机构的科学家团队牵头,为精确测量日本海主要盆地的盐度、温度和化学示踪剂提供了难得的机会。这也是自 Uda^[6]之后 60 多年来的首次联合调查计划^[7]。CREAMS 计划的外业调查部分始于 1993 年日本、韩国和俄罗斯海洋学家开展的联合海洋调查。1999 年该计划又开展了 7 个航次的海洋调查。

CREAMS 计划每年举办一次日本海海洋学专题研讨会(1994—2000 年),极大促进了日本海深层次多领域的国际学术交流和合作研究。CREAMS

计划(包括国际合作调查和专题研讨会)是针对日本海海洋学领域第一个真正意义上的国际性长期研究计划,在该计划框架下产生了诸多重要的学术成果。

继 CREAMS 计划之后,美国海军研究办公室(Office of Naval Research, ONR)在 1997—2001 年间发起了 ONR 国际合作计划(见图 5)。该计划包括 15 个研究项目,使用多种观测技术收集日本海海盆尺度的详细观测资料,包括高精度水文勘测、化学和生物采样、改进的锚系观测系统、浮标剖面观测和海洋遥感技术等。此外,ONR 计划还强调了在日本海引入先进的数值模式开展相关研究的必要性。

3.2 PICES 计划

北太平洋海洋科学组织(North Pacific Marine Science Organization, NPMO),也称为亚太版的国际理事会海洋探测(Pacific version of the International Council for the Exploration of the Sea, PICES),是一个政府间海洋科学组织,旨在促进和协调北太平洋的海洋科学研究活动。PICES 还致力于促进有关地区海洋科学研究信息和数据资料的收集和共享,关注的区域主要包括北太平洋的温带和亚北极地区

及其邻近海域,尤其是 30°N 以北的地区。

近年来,PICES 计划大力支持海洋物理、化学和生物的相互作用研究,并为 CREAMS / PICES 研讨会提供资助。研究内容涉及物理海洋过程及海洋环境影响的前沿问题,专题研讨会成果多以专刊的形式发表在国际学术期刊上。

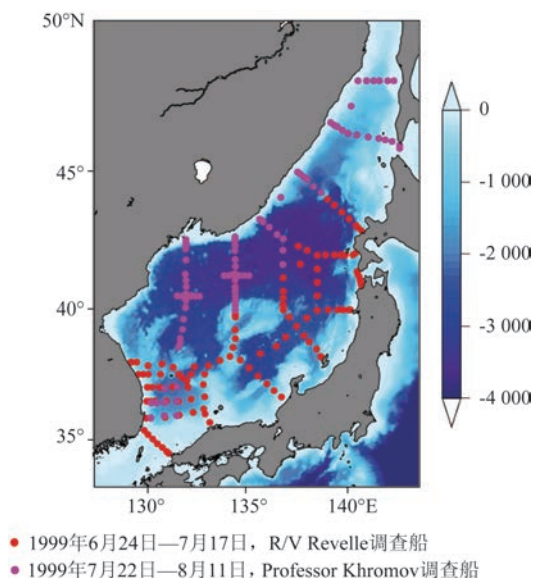
4 立体全方位观测阶段

19 世纪 70 年代至今是日本海海洋环境调查的现代化发展时期,主要特征是将新技术广泛应用于海洋学研究,包括高精度 CTD 剖面仪、海流计、化学示踪技术和海洋遥感技术。新技术的发展应用为海洋学的新发现提供了更多机遇。第一张卫星红外图像揭示了日本海的详细热力结构以及其他许多与中尺度动力学相关的特征^[8]。在此期间,日本科学家使用高精度尼尔·布朗 MK-III CTD 系统观测了温度和盐度的垂直精细剖面结构^[9]。该系统基于精细剖面结构成功识别了中层水和深层水,并估算了盐度随深度的垂直变化梯度,首次得出了日本海深层水团溶解氧含量降低的重要结论。此外,正是在首次开展的长期锚系流场观测结果的基础上,科学家提出了研究日本海深层环流及其时空变化的想法。

随着观测手段的多样化和观测仪器的精细化,日本海的海洋环境研究进入了一个新的阶段。卫星观测资料的积累使得人们对海洋表面精细结构有了更深入的了解。研究发现,大洋中广泛存在的中尺度涡在日本海同样活跃,如常年存在的郁陵暖涡和多克冷涡;Argo 浮标资料的不断更新使得人们对日本海中深层温盐结构和表层环流系统有了更深入的理解;数值计算能力的大幅度跃升为日本海涡分辨率的数值模拟提供了有效手段。

4.1 表面漂流浮标

卫星跟踪漂流浮标可作为拉格朗日浮标用于海洋表面流场的测量^[9]。如表面流场计划(Surface Velocity Program, SVP)^[10]所属的 Drifter 漂流浮标载有球形表面浮标和 15 m 标准深度的多孔水帆,由卫星确定 Drifter 浮标的实时位置,可以记录并接收浮标经纬度位置和 SST 信息。1988 年,伍兹霍尔海洋



审图号:GS(2021)8775 号

图 5 两艘调查船对日本海的调查(底图为水深)

Fig.5 Survey of the Japan Sea by two survey vessels (The base map is topography)

学研究所(Woods Hole Oceanographic Institution)在日本海部署了第一个卫星追踪漂流浮标^[11],随后,日本和韩国的研究机构定期投放了少量SVP漂流浮标。在ONR的赞助下,美国于1998—2001年期间每两个月在日本海东部和南部投放SVP漂流浮标和小型气象漂流浮标^[12]。截至目前,日本海部署的Drifter浮标数量达到853个(见图6)。浮标密度分布的主要特点是南多北少,年际变化为双峰值结构,分别在2000年和2007年达到峰值。

4.2 Argo

国际地转海洋学实时观测阵列计划(Array for real-time geostrophic oceanography, Argo)^[13]旨在建立全球海洋自由漂流剖面浮标观测网,以观测世界大洋上层海水的温盐分布情况(网址:<http://www.argo.net>)。该观测网致力于观测季节到年代际尺度上温度、盐度和环流的气候变化,并为卫星测量的校准提供必要信息,同时为数值模式初始化和约束提供数据支撑。截至2021年1月6日,处于工作状态的全球Argo浮标共有3 884个,如此空前的数据量对海洋状态的估计和SST预报能力的提升产生了巨大影响。

由于日本海具有许多与深海大洋相似的特征,

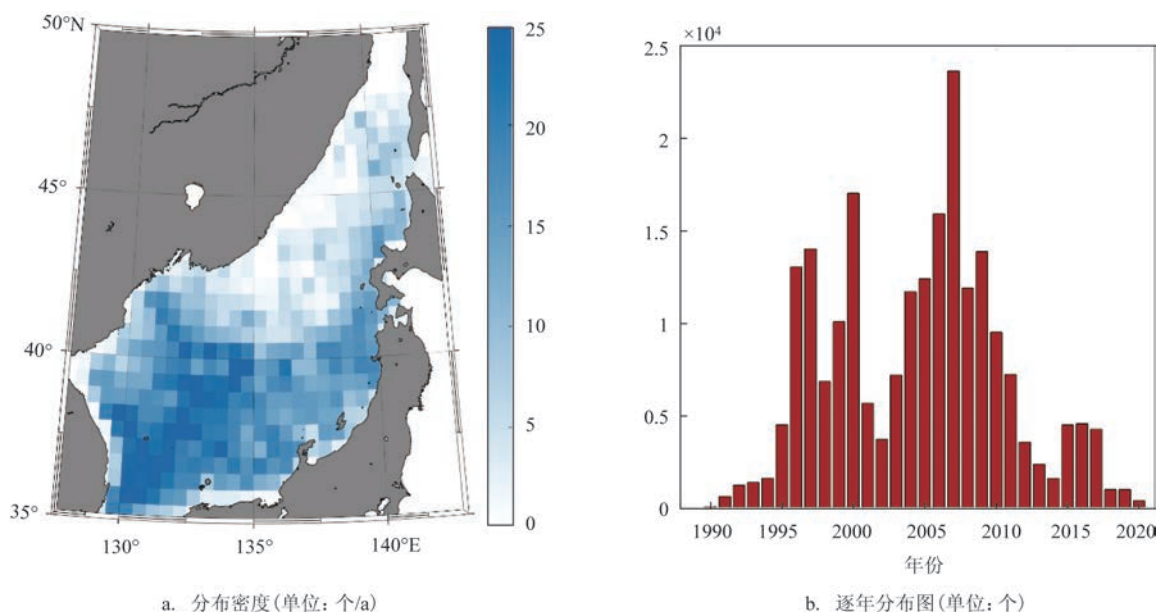
因此成为自动浮标研发和测试的理想场地。1999年,华盛顿大学在日本海北部800 m深的位置部署了载有CTD传感器的36个剖面观测浮标^[14]。这些名为“自动剖面探测器”的浮标也是目前Argo计划广泛使用的观测设备。

2000年启动的韩国Argo计划,计划每年在日本海、西北太平洋和南大洋部署10~30个Argo浮标。1998—2012年,韩国和华盛顿大学部署在日本海的浮标共捕获了14 000余个温盐剖面,相当于过去50 a韩国海洋机构在日本海获取的全部走航CTD剖面数量。目前,日本海是世界上Argo数据密集度最高的海域之一(尤其是郁陵海盆,在 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的网格内已获得15 000多个剖面,见图7)。

4.3 锚系潜标观测

时至今日,人们仍然难以对日本海深层环流进行定量描述,主要原因在于日本海水团大多具有同质性,对测量仪器的精度提出了很高要求。自20世纪80年代末以来,科学家已经在日本海开展了多次锚系浮标海流测量,揭示了深层环流的特征,更深入地了解了日本海的海洋动力学,发现日本海深层海水并非静止不动,而是始终处于活跃的运动状态^[15]。

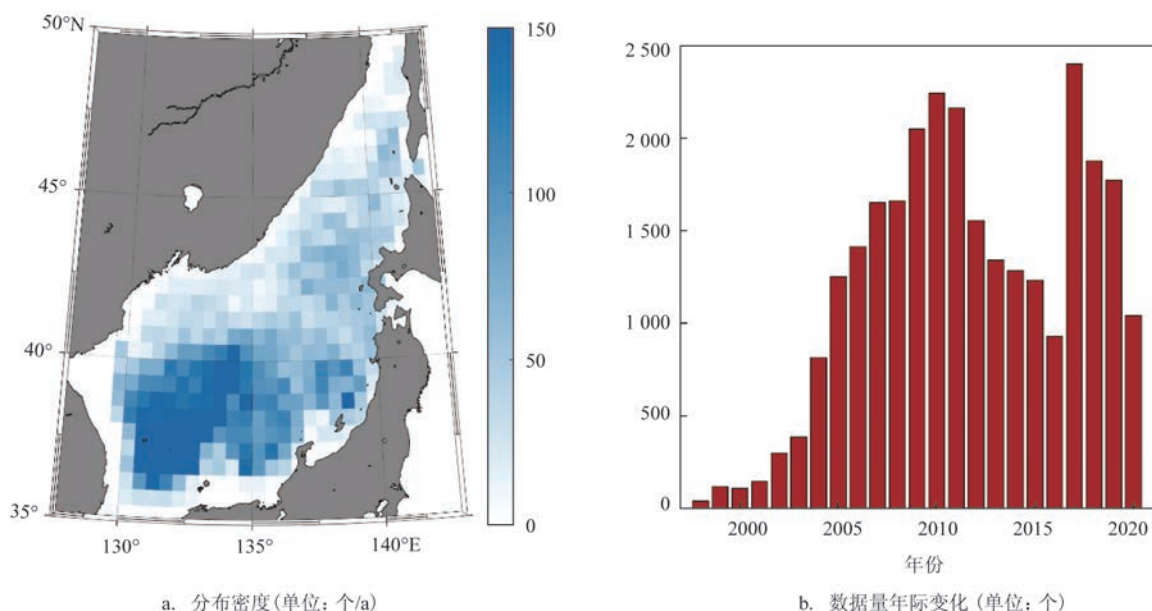
部署在日本海的锚系潜标可以分为两类:一类



审图号:GS(2021)8775号

图6 日本海SVP浮标资料分布密度和逐年分布图

Fig.6 Distribution density and annual average stations of SVP buoys in the Japan Sea



审图号:GS(2021)8775号

图7 日本海Argo浮标分布密度和数据量年际变化

Fig.7 Distribution density and annual average profiles of Argo floats in the Japan Sea

是布放在深层,由一根拉紧的锚系缆绳牵接,缆绳上挂有海流计和测量其他物理特征的传感器;另一类是安装在海底的声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)。锚系缆绳下系挂的设备又可以分为两类,分别为表面锚系设备和水下锚系设备。表面锚系设备用于测量生物地球化学参数以及浅密度跃层(~ 200 m以浅)以上的表面流场。更多地会采用水下锚系设备以获取密度跃层以下的深层环流信息^[16]。

位于中纬度的日本海就像一条在亚太沿岸交换物质和能量的“运河”,将来自赤道的热能输送到北极。对马海峡是“运河”的入口,但大量渔业活动和拖网作业严重阻碍了海峡的长期锚系测量,直到耐拖网底架(Trawl-Resistant Bottom Mounts, TRBM)的出现^[17]。1999年5月—2000年3月,对马海峡两侧共部署了12个海底ADCP^[17]。尽管在TRBM表面发现了拖网刮屑,但事实证明TRBM在保护免受拖网捕鱼作业影响方面非常有效。

1996年首次在郁陵海盆部署了长期的水下锚系海流观测设备——位于郁陵缺口(Ulleung Interplain Gap, UIG)位置的EC1,这是日本海盆与郁陵海盆之间深水交换的一个通道。EC1锚系设备自1996年以来一直在运行,是日本海观测时间最长

的深海海流监测站^[18]。它通常载有3个深度的海流计,布放的深度范围分别在300~500 m、1 300~1 500 m和1 900 m以下,有时会根据观测需要安装其他海流计(包括ADCP等)以测量全水深海流。2012年,EC1成为OceanSITES计划的观测站之一。

1999—2001年,在美国的日本海/东海计划框架下,日韩两国合作完成了前所未有的大量锚系观测。主要观测结果来源于16个海流计和23个配备压力计的倒回波测深仪,这些测深仪锚系在海床附近大于1 000 m深度处,揭示了郁陵海盆表层和深层的环流特征^[16]。

4.4 卫星海洋观测

海洋卫星以惊人的观测能力从太空轨道捕捉到了日本海多种海洋环境特征信息。自1978年载有高分辨率合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的海洋卫星(SeaSAT)发射以来,各种卫星遥感数据已用于日本海的海洋研究。海洋卫星发展至今已经能够观测多种海洋要素,例如,近极轨卫星和地球同步卫星搭载的红外传感器可以实时观测SST;高度计可以测量海表面高度和有效波高;散射仪可以测量近海面风场;微波传感器可以测量海水中的叶绿素a浓度;海洋水色传感器可

以测量水中悬浮颗粒的浓度;SAR能够观测到近海表风、海面溢油、波浪和内波等。当前,海洋卫星产品已广泛应用于多种研究。从Topex/Poseidon卫星的9a数据计算得到的日本海南部海平面上升速率 $6.6 \pm 0.4 \text{ mm/a}$,约为全球平均海平面上升速率 $3.1 \pm 0.4 \text{ mm/a}$ 的两倍^[19]。

卫星观测的主要优势来自对海洋表层要素场的同步、大范围和重复的观测。考虑到日本海现场观测的困难性和局限性,未来遥感卫星在数量上、功能上和质量上势必会不断完善,卫星遥感能力的增强将使同步高精度观测以及更广泛和深入地认识日本海各种海洋现象成为可能。

5 展望

海洋调查通过观察和测量获取海洋环境信息,是认识海洋的重要手段,在加快海洋强国建设中具有不可替代的重要支撑作用。但由于历史和现实的原因,日本海已完全被日本、韩国、朝鲜和俄罗斯的专属经济区分割完毕(日韩在独岛/竹岛及其专属经济区还存在争议),这给我国前出日本海并开展停船作业带来极大困难。鉴于此,我们建议在日本海的海洋调查采取走航、非接触、搭载和合作等方式进行。

5.1 走航调查

在朝鲜海峡、津轻海峡、宗谷海峡以及郁陵海盆等关键海域,采用走航作业方法,使用船载ADCP测量海流,投放XBT和XCTD等获取温盐数据,利用多波束测深系统测量海底地形地貌。投放大量Argo和Drifter等浮标获取长期温盐流数据。采用水下滑翔机集群组网方式,对郁陵暖涡、对马暖流主轴、多克冷涡和副极地锋等关键海洋系统进行针对性的加密观测。

5.2 非接触调查

传统的海洋调查通常以调查船、浮标和潜标等为平台,搭载各种仪器设备和传感器完成调查任务,但传统调查平台在日本海海域作业有很大的局限性。随着卫星观测技术的发展,其观测精度和分辨率得到较大提升。建议在日本海采用卫星的非

接触方式,开展大面积、准实时和高效率观测,实现全海域、全天时和全天候的海洋立体监测。

5.3 商船搭载调查

远东-北美西海岸贸易运输线是世界上最繁忙的航线之一。该路线一般为从我国的沿海各港出发,偏南的经大隅海峡出东海,偏北的经对马海峡穿日本海后,或经津轻海峡进入太平洋,或经宗谷海峡穿过鄂霍茨克海进入北太平洋。鉴于目前在渔船上搭建数据采集平台用以调查水质和渔业资源较为普遍且效果良好,可在日本海航线较为规律的商船和渔船上加装海洋调查仪器,在不影响原有船舶正常使用的前提下,通过自动化的方式采集海洋水文气象等要素。

5.4 合作调查

20世纪90年代,美国、日本、韩国和俄罗斯对日本海开展了系统的观测研究,积累了大量资料,获得了众多研究成果,而此前我国对日本海的调查研究基本空白。因此,可以通过共同开展调查、共享研究资料并借鉴国外经验更好地促进我国对日本海的深入研究。如1986—1992年,中国和日本开展了为期6a的中日黑潮联合调查研究,这是一个双方所需且互利共赢的多国合作调查典范。

本文仅对日本海调查活动进行了综述,相关学术成果不在本文范围之内。实际上,自本世纪以来,国际上出版了大量关于日本海的学术文章(尤其是以特刊或专刊的形式)以及专著^[20]。与国际上尤其是日本、韩国和美国对日本海广泛而深入的研究相比,我国对日本海海洋环境的研究严重匮乏。仅有的几篇学术文章只对日本海温度跃层、特征水和海峡输送等进行了研究^[21-24]。对于这个约100万平方公里的西北太平洋最大边缘海,我国参与日本海海洋环境的研究,在国际海洋学术研究中占有一席之地,具有重要的科学意义。

参考文献:

- [1] Senjyu T. Long-term changes in the abyssal Japan Sea (East Sea): a physical view[M]//Chen C T A, Guo X Y. Changing Asia-Pacific Marginal Seas. Singapore: Springer, 2020: 69-85.
- [2] 陈连增,雷波. 中国海洋科学技术发展70年[J]. 海洋学报(中文版), 2019, 41(10): 3-22.

- Chen L Z, Lei B. Marine science and technology development over the past 70 years in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica* (Chinese edition), 2019, 41(10): 3-22.
- [3] Shrenk L. Notes on physical geography of the northern Japan Sea[J]. *Memoires of Emperor Academy of Sciences*, 1870, 16(2), 1-254.
- [4] Shrenk L. On the currents of the Okhotsk, Japan and adjacent seas[J]. *Memoires of Emperor Academy of Sciences*, 1874, 23(2): 1-112.
- [5] FERHRI. The sea of Japan. Hydrometeorological conditions[R]. *Gidrometeoizdat*, St. Petersburg, 2003:1-398.
- [6] Uda M. The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June, 1932[J]. *Journal of the Imperial Fisheries Experiment Station*, 1934, 5: 57-190.
- [7] Kim K, Kim K R, Min D H, et al. Warming and structural changes in the East (Japan) Sea: a clue to future changes in global oceans? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(17): 3293-3296.
- [8] Huh O K, Shim T. Satellite observations of surface temperatures and flow patterns, Sea of Japan and East China Sea, late March 1979[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 22(3): 379-393.
- [9] Gamo T, Horibe Y. Abyssal circulation in the Japan Sea[J]. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1983, 39(5): 220-230.
- [10] Lumpkin R, Pazos M. Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: the instrument, its data, and some recent results[M]//Griffa A, Kirwan A D Jr, Mariano A J, et al. *Lagrangian Analysis and Prediction of Coastal and Ocean Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 39-67.
- [11] Beardsley R C, Limeburner R, Kim K, et al. Lagrangian flow observations in the East China, Yellow and Japan seas[J]. *La Mer*, 1992, 30(3): 297-314.
- [12] Lee D K, Niiler P. Surface circulation in the southwestern Japan/East Sea as observed from drifters and sea surface height[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2010, 57(10): 1222-1232.
- [13] Roemmich D H, Davis R E, Riser S C, et al. The argo project: global ocean observations for understanding and prediction of climate variability[R]. La Jolla: Scripps Institution of Oceanography, 2003.
- [14] Danchenkov M A, Riser S C. Observations of currents, temperature and salinity in the Japan Sea in 1999-2000 by PALACE floats. *Oceanography of the Japan Sea* [C]. *Proceedings of CREAMS' 2000 international symposium*, Far Eastern regional hydrometeorological research institute, 2000, 33-40.
- [15] Takematsu M, Nagano Z, Ostrovski A G, et al. Direct measurements of deep currents in the northern Japan Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 1999, 55(2): 207-216.
- [16] Chang K I, Teague W J, Lyu S J, et al. Circulation and currents in the southwestern East / Japan Sea: overview and review[J]. *Progress in Oceanography*, 2004, 61(2-4): 105-156.
- [17] Perkins H, de Strobel F, Gualdesi L. The barny sentinel trawl-resistant ADCP bottom mount: Design, testing, and application[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2000, 25(4): 430-436.
- [18] Noh S, Nam S. EC1, mooring time-series since 1996[J]. *SEAN-OE*, 2018. <https://doi.org/10.17882/58134>
- [19] Kang S K, Cherniawsky J Y, Foreman M G G, et al. Patterns of recent sea level rise in the East/Japan Sea from satellite altimetry and in situ data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(C7): C07002.
- [20] Chang K I, Zhang C I, Park C, et al. *Oceanography of the East Sea (Japan Sea)*[M]. Cham: Springer, 2016.
- [21] 董津生, 徐佳佳. 日本海主要海峡体积输运的季节变化特征[J]. *海洋湖沼通报*, 2011(1): 13-20.
- Dong J S, Xu J J. Seasonal variation of volume transport through straits around Japan Sea using variational algorithm[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2011(1): 13-20.
- [22] 刘金芳, 毛可修, 李颜, 等. 日本海温度跃层分布特征概况[J]. *海洋预报*, 2014, 31(2): 67-72.
- Liu J F, Mao K X, Li Y, et al. Characteristics of the thermocline in the Japan Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2014, 31(2): 67-72.
- [23] 郑沛楠, 刘俊, 杨玉震, 等. 日本海特征水研究进展[J]. *海洋预报*, 2011, 28(2): 63-67.
- Zheng P N, Liu J, Yang Y Z, et al. Advances in the study of characteristic water in the Japan Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2011, 28(2): 63-67.
- [24] 崔琰琳, 吴德星, 兰健. 日本海环流研究综述[J]. *海洋科学进展*, 2006, 24(4): 577-592.
- Cui Y L, Wu D X, Lan J. Review of study on circulation in the Japan Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2006, 24(4): 577-592.

Progress of marine environmental survey in the Japan Sea

ZHANG Yongchui¹, WANG Haodi¹, CHEN Shiyao¹, WANG Ning¹, YANG Xiao², TAN Chengwei³

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073 China; 2. Marine Science College, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 China; 3. PLA 31440 Troop, Shenyang 110027 China)

Abstract: This paper mainly reviews the early surveys of the marine environment in the Japan Sea carried out by neighboring countries, including Russia, Japan and South Korea, and briefly reviews the multi-country joint surveys conducted in the Japan Sea in the 1990s and related key research results. Moreover, the latest progress of the marine environment survey in the Japan Sea is introduced under the background of the new era of the continuous enhanced observation capabilities in in-situ observation, such as buoy, submerged buoy and Argo, and satellite remote sensing with large-scale coverage. Finally, we propose some suggestions on how China shall conduct marine surveys in the Japan Sea.

Key words: Japan Sea; marine survey; in-situ observation; satellite remote sensing