科学通报 2020 年 第 65 卷 第 25 期：2654 ~ 2661
观 点
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

“透明海洋”立体观测网构建

吴立新[1,2*], 陈朝晖[1,2], 林霄沛[1,2], 刘永正[1,2]

1. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室/海洋高等研究院/深海圈层与地球系统前沿科学中心, 青岛 266100;
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 青岛 266237
* 联系人, E-mail: lxwu@ouc.edu.cn

1 全球海洋观测网络构建状况浅析

海洋是人类生存发展的重要物质基础, 是高质量发展的战略要地. 随着陆地资源减少甚至枯竭, 海洋已经成为拓展人类生存与发展空间的主要领域, 世界各国都把维护国家海洋权益、发展海洋经济、保护海洋环境、开发海洋资源列为重大发展战略. 海洋观测是认识海洋的基本手段, 是海洋经济开发、环境保护和权益维护的基础. 实施“透明海洋”战略, 加强海洋观测技术装备研发, 建设海洋综合立体观测体系, 已经成为我国海洋科技创新的一个重要方向[1].

所谓“透明海洋”, 是指集成和发展现代海洋观测与探测技术, 面向全球大洋和特定海区, 以移动平台为核心, 依托人工智能和大数据技术, 实时或准实时获取多圈层、全海深、高时空分辨率的海洋综合环境与目标信息, 并在此基础上, 预测未来特定时间内海洋环境变化, 实现海洋的状态透明、过程透明、变化透明、目标透明, 为国家海上活动安全、海洋经济发展和权益维护等提供全面精准的海洋信息技术支撑与服务.

实现“透明海洋”, 首先要实现海洋的状态透明, 即具备全球范围、全水深、多时空分辨率的海洋信息实时获取能力. “经略海洋”集中体现在对海洋环境的感知、认知及预测能力、海洋资源的开发能力、海洋权益的维护能力、海洋生态环境的保护能力上, 而感知海洋是后几种能力建设的基础. 实施“透明海洋”计划, 构建新一代全球海洋高时空分辨率立体观测网, 将极大提升我国“经略海洋”的能力.

随着“一带一路”倡议开始在世界政经版图上快速铺展, 其所面临的海洋权益和安全保障问题也不容忽视. 实施“透明海洋”计划, 构建全球海洋高时空分辨率实时观测网, 提升全球海洋尤其是“两洋一海”(西太平洋-南海-印度洋)和极区海洋环境信息获取能力, 在此基础上形成我国核心战略海域的环境安全保障能力, 可为国家实施“一带一路”倡议保驾护航, 同时也造福海上丝路沿线国家的减灾防灾和海洋生态保护等.

针对我国海洋装备核心技术受制于人等问题, 围绕海洋科技发展前沿技术, 依托全球海洋立体观测网构建, 努力打造海洋高端装备研发高地, 实现系列新型海洋观测装备的产品化, 加速高端海洋装备制造业发展, 辐射带动周边产业链建设, 是实现海洋科技创新从“跟跑”向“并跑”甚至“领跑”转变的实质性举措.



吴立新 教授, 中国科学院院士、美国地球物理学会会士、发展中国家科学院院士. 长期致力于大洋环流与气候研究, 在多尺度海洋动力过程及海气相互作用领域取得了系统性创新成果.

当前, 随着卫星遥感、大型潜/浮标、海洋次表层剖面浮标、无人移动潜器等海洋技术和装备的发展, 发达国家尤其是美国和欧盟, 已经基本形成了对全球上层海洋大尺度(百千米级)信息实时获取能力. 20 世纪末联合国政府间海洋学委员会(Intergovernmental Oceanographic Commission, IOC)、世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)、联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)等联合发起了全球海洋观测系统(Global Ocean Observing System, GOOS)计划[2], 初步形成了由海洋卫星、浮标和沿海台站组成的全球业务化海洋观测系统, 这也是目前全球最大、综合性最强的海洋观测系统, 并围绕深海研究启动了若干观测实验和国际研究计划.

在深海动力环境观测方面, 20 世纪 80 年代末开始实施的全球热带大洋锚系浮标观测阵(global tropical moored buoy array, GTMBA)[3~5], 围绕太平洋、大西洋、印度洋热带海气相互作用研究构建了跨洋盆的热带海区长期连续观测阵, 特别是热带海洋全球大气(tropical ocean global atmosphere, TOGA)计划[6]为人类监测和预测厄尔尼诺事件奠定了重要的观测基础. 20 世纪 90 年代的世界大洋环流实验(world ocean circulation experiment, WOCE)[7,8], 围绕全球深海大洋开展了大量高分辨率断面观测、化学痕量综合观测、卫星观测、潜标长期连续观测、表层和次表层漂

© 2020《中国科学》杂志社

流浮标观测. 1998 年开始实施的地转海洋学实时观测阵(array for real-time geostrophic oceanography, Argo)[9], 基于 Argo 浮标实现了全球上层海洋的水文要素准实时观测, 目前已经建成一个由 4000 枚 Argo 剖面浮标组成的覆盖水域更深厚、涉及领域更宽广、观测时域更长远的真正意义上的全球 Argo 实时海洋观测网.

在深海生态系统和地质观测方面, 20 世纪中叶发起的国际大洋钻探计划及其后的国际大洋发现计划(International Ocean Drilling Program, IODP)[10]、20 世纪 90 年代发起至今的国际大洋中脊计划(International Cooperation in Ridge-Crest Studies, InterRidge)[11]和 21 世纪初发起了海洋生物地球化学和海洋生态系统研究计划(Integrated Marine Biosphere Research Project, IMBER)[12], 以大洋钻探、深部取样、海底生态系统连续监测等为主要手段, 研究地球起源、地质演化和多圈层相互作用. 近年来美国实施的海洋观测先导计划(Ocean Observatories Initiative, OOI)[13], 基于实时潜/浮标, 自主式水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)和水下滑翔机(underwater glider)等多平台观测装备实现其重点监测海域的立体组网观测. 在极区动力环境观测方面, 2009~2014 年美英联合实施了南大洋混合试验 (the diapycnal and isopycnal mixing experiment, DIMES)[14], 基于潜标、断面观测、漂流浮标和示踪物追踪等手段, 对南大洋混合过程及其对大洋翻转环流的调控进行了组网观测.

通过上述观测计划的实施, 极大地提高了全球海洋观测水平, 促进了海洋观测仪器及其传感器的研发水平, 提高了数据传输手段的多样性和时效性. 在这些大型全球和区域观测计划的支撑下, 海洋科学领域开展了一系列研究计划, 包括国际气候变化与可预测性研究计划(Climate Variability and Predictability, CLIVAR)[15]、全球海洋通量联合研究计划(Joint Global Ocean Flux Study, JGOFS)[16]、上层海洋-低层大气研究计划(Surface Ocean-Lower Atmosphere Study, SOLAS)[17]、全球有害藻华生态学与海洋学研究计划(Marine Geological & Biological Habitat Mapping, GEOHAB)[18]等. 这些研究计划极大地推动了海洋科学发展成为一门独立学科, 促进了海洋科学与其他学科的相互交叉.

我国也在积极拓展全球海洋观测能力, 依托国家高技术研究发展计划("863 计划")等发展了温盐深剖面仪(conductivity temperature depth, CTD)和声学多普勒流速剖面仪(acoustic Doppler current profiler, ADCP)等数十种传感器、观测装备和各种固定、移动、空投、拖曳等观测平台, 发射了 HY 系列自主业务化海洋卫星, 并通过国家重点基础研究发展计划("973 计划")、重点研发计划和一批专项, 在我国近海、南海、西太平洋、东印度洋、南北极等关键海区和通道, 建设了岸站、常规断面、水体及海底的区域观测网.

然而, 我国在南海和西太平洋等核心海区初步构建的海洋观测网主要以潜标阵列为主, 对研究大尺度环流具有一定的帮助, 但对于中小尺度过程的观测仍远远不够, 且数据无法实时传输. 此外, 核心设备依赖于进口, 自主知识产权率较低. 涵盖海面、水体和海底的立体化海洋观测网建设尚在探索阶段, 且以传统的观测手段与技术为主, 多数设备不具有"智能"性. 空间布局上以区域内的点、线为主, 存在数据孤岛, 2000 m 以下的深海观测几乎是空白, 缺乏全水深、一体化、实时、高时空分辨的观测能力. 目前, 我国自主获取的全球海洋环境信息数据总量不到美国、日本等国的 2%, 即使是东海和南海数据, 也只有美国、日本等国的 5%. 在大数据及人工智能信息化的新时代, 上述对海洋信息感知能力的缺乏, 导致对诸多海洋重大科学问题的认识较肤浅, 难以取得重大原创性成果.

总体来讲, 当前我国的海洋观测网虽有一定规模, 但存在着区域碎片化、信息单一化、时空分辨低质化、数据传输延滞化等制约, 尚未形成对全球及核心海区海洋环境信息的实时、立体、高分辨率、多要素的整体同步获取能力, 与国际海洋强国仍有较大差距. 特别是最近几次革命性的海洋观测技术计划, 我国贡献明显不足, 这与我们对经略海洋的需求和国际大国的地位极不相称, 也使我国在国际上牵头组织并发起海洋科学计划方面失去主动权.

2 海洋科学重大前沿问题牵引下的海洋观测

海洋占地球表面的 71%, 其平均水深超过 3800 m. 海洋巨大的热容量和碳储存量是地球气候系统的调节器, 对地球系统的生物地球化学循环和水循环有重要的调控作用. 对气候系统各尺度变化的预测能力与水平在很大程度上依赖于对全球海洋多学科、长期连续、实时或准实时的综合立体观测, 但是目前的观测能力无法满足当前重大的海洋科学前沿的需求.

(1) 海气多尺度相互作用及气候效应. 海气系统的相互作用是海洋与大气之间物质与能量交换的桥梁, 过去传统认为海气相互作用主要在大尺度[19~23], 然而近年来的观测发现中小尺度(十千米到千米级)的海气相互作用, 对大尺度大气环流和气候变化具有重要影响, 缺乏上述物理过程也是目前地球系统模式模拟误差的重要来源[24~26]. 现有卫星遥感只能通过对海面要素的观测间接反演海气通量, 对调控海气交换的海洋混合层没有观测能力; 大型锚系浮标在全球海洋的数量稀少且分布不均, 岸基观测站、地波雷达等受限于近海区域, 船基观测成本高且覆盖范围有限. 上述手段均无法满足大范围、高时空分辨率、高精度的观测要求, 因此, 需要研发低成本、智能化的移动式平台, 可以大批量在海面布放, 同时结合传统大型锚定浮标以及新一代高分辨率卫星观测, 尤其是可以穿透海面的卫星遥感技术, 实现对全球海气界面的观测"透明".

(2) 海洋多尺度动力过程变异的机理及预测. 海洋运动具有多尺度的特征, 不同尺度的动力过程之间发生复杂的能量串级, 决定了海洋的能量与物质输送, 同时影响着海洋动力环境[27,28]. 目前虽然对单一动力过程已经有一定的认识, 但由于缺乏观测, 对于不同运动尺度之间的相互作用过程及机理认识非常有限[29~32], 制约着海洋环境与气候的预测能力及保障能力. 海洋多尺度运动对观测技术提出了巨大的挑战, 不仅需要在垂向实现高分辨率的长期持续观测, 并能对中小尺度运动过程开展智能自适应加密观测, 如海洋涡旋、锋面、台风诱导的海洋过程等[33]. 潜标和水下滑翔机等观测手段只适用于点、面采样观测, Argo 浮标虽然面向全球大洋, 但缺乏机动性难以对中小尺度过程进行三维高分辨智能观测[34~37]. 因此, 需要新型观测手段, 既具有垂向高分辨的长期观测能力, 又具备区域精细观测能力, 甚至能够在极端条件下(如极端天气、台风和战场环境等)实现快速、集中的应急机动部署, 以满足我们对海洋多尺度过程的长期、连续观测需求.

(3) 深海大洋热与碳吸收的关键过程与机制. 深海大洋的长期观测目前几乎是空白, 对深海的变化了解甚少. 20 世纪 90 年代末以来尽管全球 CO_2 含量持续增加, 但全球地表平均温度出现增温停滞现象(global warming hiatus). 最近研究指出, 这种增温停滞现象与深海大洋热量吸收密切相关[38,39]. 这些热量在深海如何进行再分配? 对深海动力和生物地球化学环境造成什么影响? 深海对热和碳的吸收能力是否会达到饱和? 回答这些重大问题都需要我们有能力对深海尤其是 2000 m 以下的海洋有更加清晰的认识. 但是目前 Argo 阵列只具有对浅于 2000 m 的海洋进行观测的能力[40], 因此我们需要具备长期、连续和高精度观测能力的仪器装备对全球 2000 m 以下深海大洋进行系统性观测, 以更好地认识和评估深海热和碳的吸收能力.

(4) 深海物理与地球化学环境变化对资源和气候的影响. 海洋是一个物理、生物地球化学和地质过程相互交织的系统, 但受研究手段的局限, 对大洋深海生物地球化学环境及生物资源的研究相对匮乏. 第二届全球海洋观测大会明确提出未来海洋观测必须向多学科综合同步观测的方向发展, 以解决人类活动和气候变化双重胁迫下海洋所面临的压力[41]. 因此, 基于海洋科学的多学科交叉特性, 对观测手段和平台综合性提出很高的要求, 需要发展基于水下机动载体、低功耗、高精度、低漂移多传感器为特征的新型海洋观测集成技术, 以满足我们对全球深海大洋的长期综合观测的现实需求.

(5) 探索洋底过程、观测深海资源-能源-灾害分布规律和异常. 目前对海底成藏、成矿的认识还极其低下, 海底通过何种方式和何种机制影响海洋水体也停留在表面认识上, 需要尽快实施多技术综合海底观探测, 发展快速海底物质调查、移动与原位相结合的探测技术、海底地球物理场长时间观探测与实时监测追踪关键技术等核心技术体系研究, 推动海底科学的发展[42,43]. 我国海底天然气水合物即将工业化开采, 对海底稳定性监测、海底环境保护迫在眉睫; 海底洋中脊金属矿产开采区块确定也迫切需要从科学上精选成矿富集区带, 以满足《联合国海洋法公约》规定的勘探权区块要求, 因此发展海底科学观探测技术是非常必要、非常紧迫的.

综上, 多尺度、多学科交叉下的海洋物质能量循环和深海大洋动力过程及气候资源效应是目前全球海洋研究的重大科学问题, 因此构建“透明海洋”立体观测网络, 支撑上述科学问题的解决, 是推动科技创新的重要举措, 将极大提升我国在全球海洋科技的地位.

3 构建“透明海洋”立体观测网络的举措

“透明海洋”立体观测网将聚焦海洋与气候变化、健康海洋、海洋生命过程、跨圈层流固耦合、快速变化的极地系统等重大前沿海洋科学问题, 通过海洋观探测技术研发和平台整合, 建设面向深远海科学前沿的精细化、多要素空中-水面-水下-海底的立体观测网, 提升全球海洋尤其是“两洋一海”的海洋环境信息综合、实时、高分辨率的获取和信息服务能力, 为推动海洋跨尺度和跨圈层多学科交叉的原始创新、构建新一代海洋模拟和预测系统、组织并发起我国主导的国际海洋科学计划提供重要基础.

基于我国当前在深远海立体观测系统初期建设的基础, 以相对成熟的潜标、浮标等固定观测平台为骨架, 以科考船队联合开展断面观测为补充, 以新型海洋观测技术手段和新型卫星等为突破口, 通过整合现有资源和成果, 研发一批具有自主知识产权的核心技术及装备, 布局建设海洋三维高分卫星遥感(天空)、海气界面观测系统(水面)、深海观探测系统(水下)和海底观探测系统(海底)4 个立体层次的观测网络, 建立海洋观测数据智能分析处理中枢系统.

概括来讲, “透明海洋”立体观测网的建设内容要分为三方面: 观探测技术研发、立体观测网络构建、智能分析处理中枢系统.

3.1 观探测技术研发

发展海洋观测新概念、新原理和新方法, 自主研发小型化、智能化、高精度的动力环境、生物地球化学要素、生物基因、声场、电磁和重力等方面的新型多学科传感器, 打破美国和欧洲相关国家等海洋强国在传统海洋传感器方面的垄断地位; 开展新概念、新体制海洋卫星遥感技术研发, 构建深远海遥感标定实验场, 实现卫星海洋遥感从中尺度到亚中尺度再到小尺度、从二维海面到三维上层海洋、从海洋标量场到向量场的遥感观测.

围绕全海深观测能力建设, 突破耐压、功耗、导航、平台稳定性、传感器搭载能力等多方面限制, 研发新一代多参数跨学科自主式水下航行器、遥控无人潜水器、水下

滑翔机及新体制移动基观测设备；突破大流量、全天候、全海深、安全可靠实时传输，水下实时通讯，传感器协同观测，能源补给等多方面关键技术，研发谱系化实时浮、潜标及新概念固定基观测设备.

研发界面过程直接观测设备，形成海气和水固界面长期连续观测能力；发展船载高精度地磁仪和重力仪，拖曳式高精度三分量地磁仪和万米级海底地震仪等地球物理勘探仪器；形成对多圈层现场观测和地球物理探测联合观测能力，加速界面互作过程与跨圈层气流固耦合机制研究步伐.

发展深海生命过程(微生物等)DNA、RNA、代谢和酶催化等生理学原位观测技术，研发超高分辨率微生物结构显微成像等形态学原位观测技术，实现深海极端环境下生命生理学与形态学同步原位观测，研制深海生命过程研究微型实验站，形成深海原位观测与室内分析测试互补一体化检测能力.

3.2 立体观测网构建

“透明海洋”立体观测网分为 4 个层次的网络，包括：天基观测网、全球海气界面观测网、深远海水体观测网和深远海海底观测网(图 1).

(1) 天基观测网(“海洋星簇”计划). 针对亚中尺度海洋现象、海洋近温跃层垂直剖面信息缺乏、极地大洋探测等需求，开展新机制卫星遥感载荷关键技术研究，实现中尺度到亚中尺度、二维到三维、微波与光学独立观测到联合同步的观测. 同海洋水色卫星、海洋动力卫星组网观测，建立全天候、全谱段、多参数的海洋综合信息探测能力.

“海洋星簇”计划将在国际上首次实现同步搭载干涉成像高度计和海洋激光雷达的卫星观测新体制，填补海洋卫星遥感从中尺度识别(约10~100 km)到亚中尺度分辨(1~10 km)的观测空白；另外，该计划将首次实现从海表二维遥感观测到水体垂直剖面探测的重大突破.

(2) 全球海气界面观测网(“海气交互”计划). 发展海面智能移动和定点锚系平台互连观测与探测技术，构建一体化的海气交互观测技术系统，实现对海-气界面物质能量交换的实时观测和水下移动观测平台的通讯中继. 综合利用大型锚系海气观测浮标、漂流式海气界面浮标和波浪滑翔器等固定和移动观测平台，构建多手段、多源、协同组网、高时空辨率网格化观测、数据实时通讯等功能于一体的海气界面观测网.

“海气交互”计划将完成新一代无人智能移动式海气界面观测设备研发与全球应用，结合大型锚定浮标构建高时空分辨率全球海气交互观测网. 特别地，在完善海气交互组网观测技术的基础上，引领新一轮国际海气通量观测计划，在我国海上利益攸关区(南海和西太平洋第二“岛链”以内)建立海气交互智能观测示范网络，为今后的业务运行提供技术支撑.

(3) 深远海水体观测网(“深海星空”计划). 实现深海多参数 Argo 浮标、多参数水下滑翔机、长航程 AUV 等深海观探测装备自主研发以及实时通信潜标等固定平台的国产化，系统融合长期定点实时观测平台和移动观测平台，建设涵盖全球深海大洋特别是“两洋一海”区域的先进可靠、互联共享的一体化综合观测网络.

“深海星空”计划通过研发新一代移动式深海观测设备，拓展深海设备水下连续自主工作的时间、深度和航程，结合大型实时潜标构建高时空分辨率全球深海观测网. 进

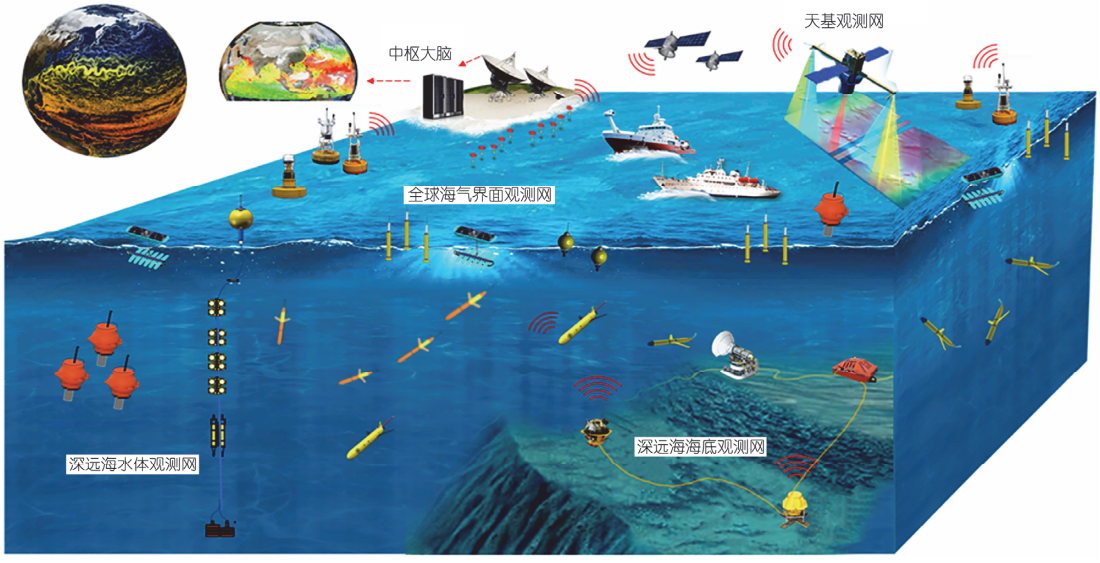


图 1 “透明海洋”立体观测网概念图

Figure 1 The draft of observation network of “Transparent Ocean”

一步, 水下固定和移动节点实现智能优化配置、互联和双向实时通信, 提高移动节点定位导航精度, 拓展固定节点通信中继、移动节点接驳等功能. 在深海观测技术发展的基础上, 以深海多尺度物质能量循环及其资源环境效应重大科学问题和国家水下环境安全保障需求为牵引, 构建先进、可靠、互联、共享的水下一体化深海多学科观测网络. 最终融合“海洋星簇”计划和“海气交互”计划, 实现对全球百千米级、“两洋一海”十千米级、关键通道百米级海洋环境信息实时获取.

(4) 深远海海底观测网(“海底透视”计划). 发展对海底环境及海底物质成分识别、海底背景和异常地球物理场探测等重大前沿技术体系, 形成海底观测探测技术能力, 发展海底自主高精度定位、新一代接驳技术和数据传输技术, 建设以勘测海底过程、重塑海底环境、探测深海目标为目的海底观测技术示范系统.

“海底透视”计划包括五大重点任务, 分别为高精度多尺度多要素地球物理探测系统、海底地质灾害监测预警系统、海底边界层综合探测系统、深海钻探系统和海底矿产资源勘探与评价系统. 上述任务通过建立重/磁/电/震/声的背景和异常地球物理场探测重大前沿技术体系, 揭示水体和海底边界层结构和物质组成, 为环境和目标的立体监测体系提供海底基平台和技术系统, 提升我国海底长时间、全海深、高分辨、多物理场覆盖的海底综合信息探测系统技术能力.

3.3 观测数据智能分析处理中枢系统

研发机器智能、边缘计算和大数据分析等前沿技术, 建立具有自主智能、自动发现、自演进的深蓝大脑, 形成面向超大规模、超高维度、超复杂海洋大数据的可高速处理的自主智能与协同控制体系. 构建基于深蓝大脑的深远海立体观测网络中枢系统, 实现空间精细、时空连续、分量完备的海洋大数据的智能感知与多网立体协同观测体系.

该系统以机器智能为核心的“海洋物联网”为中枢神经(“深蓝大脑”计划), 实现海洋物联网和观测设备智能管控, 海洋大数据智能分析与同化. 在此基础上, 建设全球十千米级、区域千米到百米级数值预报能力的超高精度自驱动、自发现和自演进海洋智能模拟器, 解决重大科学任务驱动下空天地海一体化海洋物联网的实时协同和智能计算. 进一步, 通过建设以机器智能为核心的“海洋物联网”中枢系统, 自主智能发现并监测海洋现象和海洋过程, 实现任务驱动的海洋观测物联网智能管控及观测设备协同调度.

目前, “透明海洋”立体观测网建设初见成效, 特别是深海实时观测能力实现跨越式发展. 围绕全球及核心海区海洋环境信息感知能力提升, 聚焦“两洋一海”, 突破了潜标数据实时可靠传输、万米深渊综合观测、多尺度动力环境同步观测、极地海区气-冰-海边界层长期实时监测等系列技术难题, 自主研发了深海潜/浮标、冰基拖曳式海洋剖面浮标及系列深海移动观测装备, 建成并推动全球最大的区域海洋定点观测网——“两洋一海”观测网进入实时化时代, 大幅提升了高分辨率海-气耦合预测能力与水平.

经过近 10 年建设, 我国构建了世界上最大规模的区域海洋潜标观测网——南海潜标观测网, 国际上首次实现蕴含丰富多尺度动力过程的南海深海盆全覆盖及完整监测观测; 西太平洋科学观测网建设持续推进, 实现大洋上层和中深层的全覆盖, 并建立了实时观测数据的自动分析和应用平台, 深海连续和实时观测能力稳步提升. 迄今, 在“两洋一海”关键海域已布放回收超过 500 套深海浮、潜标观测系统, 目前有 108 套深海潜、浮标在位稳定运行, 其中深海潜标 100 套(含 25 套深海实时潜标)、大型观测浮标 8 套.

在海洋观测探测前沿技术与装备方面, 自主研发的“海燕-X”水下滑翔机工作深度达到 10619 m, 万米深海研究迈入无人持续断面观测新时代; “海燕-L”长航程水下滑翔机无故障运行超过 300 d, 航程超过了 4000 km, 刷新国产水下滑翔机连续工作时间最长、续航里程最远纪录; 深海 4000 m 自持式浮标填补了国内空白; 新一代“观澜号”海洋科学卫星研制稳步推进; 自主研制的新一代深海气候观测浮标系统实现准业务化应用. 上述海洋观测探测技术的迅速发展为下一步全面构建“透明海洋”立体观测网提供了重要的技术示范支撑.

4 结语

围绕海洋科学认知、气候变化、资源开发与权益维护等国家重大科学与应用需求, 通过布局亚中尺度和次表层主动遥感新体制卫星遥感、海气界面智能定点与移动组网观测、水下无人智能移动平台及组网观测和海底观探测 4 个立体层次的观测探测网络, 建设面向全球的“透明海洋”立体观测网络. 实现“透明海洋”的状态透明, 使海洋环境的观测感知能力从百千米的大尺度提升到千米级的亚中尺度, 观探测参数从物理海洋为主拓展到多学科主要参数, 提升我国在海洋环境变化、海洋环境保障和海洋权益维护等方面的科技能力和水平, 支撑海洋强国建设. 进一步, 我们能够在国际上引领以多尺度多学科海洋物质能量循环和深海大洋动力过程及其气候资源效应等若干个重大科学问题的研究, 真正体现海洋强国地位.

致谢 感谢国家自然科学基金委员会海洋科学发展战略研究: 2021~2035(L1924024)、海洋数据科学发展战略研究(L1824025)和西太平洋地球系统多圈层相互作用学术活动和战略研究(91858000)资助.

推荐阅读文献

1 Li D H, Wu L X, Chen Z H. Strategic direction and construction path of Transparent Oceans (in Chinese). J Shandong Univ (Philos Soc Sci), 2019, 2: 130–136 [李大海, 吴立新, 陈朝晖. “透明海洋”的战略方向与建设路径. 山东大学学报(哲学社会科学版), 2019, 2: 130–136]
2 Malone T C. The coastal module of the Global Ocean Observing System (GOOS): An assessment of current capabilities to detect change. Mar Policy, 2003, 27: 295–302
3 Mcphaden M J. The tropical atmosphere ocean array is completed. Bull Am Meteorol Soc, 1995, 76: 739–744
4 Bourlès B, Lumpkin R, Mcphaden M J, et al. The PIRATA program: History, accomplishments, and future directions. Bull Am Meteorol Soc, 2008, 89: 1111–1126
5 Mcphaden M J, Meyers G, Ando K, et al. RAMA: The research moored array for African-Asian-Australian monsoon analysis and prediction. Bull Am Meteorol Soc, 2009, 90: 459–480
6 David L T A. The tropical ocean global atmosphere programme. Contemp Phys, 1995, 36: 245–265
7 Chapman P. The World Ocean Circulation Experiment (WOCE). Mar Technol Soc J, 1998, 32: 23–36
8 Lutjeharms J R E, Gründlingh M L. The World Ocean Circulation Experiment (WOCE). NOAA, 2013, 73: 34–35
9 Roemmich D, Gould J. The future of *in situ* climate observations for the global ocean. CLIVAR Exchanges, 2003, 8: 1–46
10 Bickle M, Arculus R, Barrett P, et al. Illuminating Earth’s Past, Present and Future. The Science Plan for the International Ocean Discovery Program 2013–2023. IODP Integrated Ocean Drilling Program, 2011
11 German C R, Lin J, Parson L M. Mid-ocean Ridges: Hydrothermal Interactions between the Lithosphere and Oceans. Washington DC: American Geophysical Union, 2004
12 Hofmann E, Bundy A, Drinkwater K, et al. IMBER—Research for marine sustainability: Synthesis and the way forward. Anthropocene, 2015, 12: 42–53
13 Isern A R, Clark H L. The ocean observatories initiative: A continued presence for interactive ocean research. Mar Technol Soc J, 2003, 37: 26–41
14 Gille S T, Ledwell J, Naveira-Garabato A, et al. The diapycnal and isopycnal mixing experiment: A first assessment. CLIVAR Exchanges, 2012, 17: 46–48
15 Karl T R, Nicholls N, Ghazi A. Clivar/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary. Clim Change, 1999, 42: 3–7
16 Garrison D L. Microbial food web structure in the Arabian Sea: A US JGOFS study. Deep Sea Res Part 2 Top Stud Oceanogr, 2000, 47: 7–8
17 Schultz C. Surface ocean-lower atmosphere processes. Eos, 2011, 92: 57
18 Kudela R, Pitcher G, Probyn T, et al. Harmful algal blooms in coastal upwelling systems. Oceanography, 2005, 18: 184–197
19 Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. Mon Weather Rev, 1969, 97: 163–172
20 Schopf P S, Suarez M J. Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model. J Atmos Sci, 1988, 45: 549–566
21 Zebiak S E, Cane M A. A model El Niño-southern oscillation. Mon Weather Rev, 1987, 115: 2262–2278
22 Neelin D J. The slow sea surface temperature mode and the fast-wave limit: Analytic theory for tropical interannual oscillations and experiments in a hybrid coupled model. J Atmos Sci, 1991, 48: 584–606
23 Jin F F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model. J Atmos Sci, 1997, 54: 811–829
24 Cronin M, Meinig C, Sabine C, et al. Surface mooring network in the Kuroshio extension. IEEE Syst J, 2008, 2: 424–430
25 Wang C Z, Zhang L P, Lee S K, et al. A global perspective on CMIP5 climate model biases. Nat Clim Chang, 2014, 4: 201–205
26 Yu L S. Global air-sea fluxes of heat, fresh water, and momentum: Energy budget closure and unanswered questions. Ann Rev Mar Sci, 2019, 11: 227–248
27 Ferrari R, Wunsch C. Ocean circulation kinetic energy: Reservoirs, sources, and sinks. Annu Rev Fluid Mech, 2009, 41: 253–282
28 Wunsch C, Ferrari R. Vertical mixing, energy and the general circulation of the oceans. Annu Rev Fluid Mech, 2004, 36: 281–412
29 Fjortoft R. On the changes in the spectral distribution of kinetic energy for two dimensional nondivergent flow. Tellus, 1953, 5: 225–230
30 Scott R B, Wang F M. Direct evidence of an oceanic inverse kinetic energy cascade from satellite altimetry. J Phys Oceanogr, 2005, 35: 1650–1666
31 Barkan R, Winters K B, Llewellyn S S G. Energy cascades and loss of balance in a reentrant channel forced by wind stress and buoyancy fluxes. J Phys Oceanogr, 2015, 45: 272–293
32 Schlösser F, Eden C. Diagnosing the energy cascade in a model of the North Atlantic. Geophys Res Lett, 2007, 34: 170–206

33 Schmidt K M, Swart S, Reason C, et al. Evaluation of satellite and reanalysis wind products with *in situ* wave glider wind observations in the Southern Ocean. J Atmos Ocean Technol, 2017, 34: 2551–2568
34 Freeland H J, Roemmich D, Garzoli S, et al. Argo—A decade of progress. Paper presented at OceanObs' 09: Sustained Ocean Observations and Information for Society (Vol. 2), Venice, Italy, 2009. 2010
35 Eriksen C C, Osse T J, Light R D, et al. Sea glider: A long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research. IEEE J Oceanic Eng, 2001, 26: 424–436
36 Bian X, Qin Z, Yan Z. Design and evaluation of a hierarchical control architecture for an autonomous underwater vehicle. J Mar Sci Appl, 2008, 7: 53–58
37 Yuh J. Design and control of autonomous underwater robots: A survey. Auton Robot, 2000, 8: 7–24
38 Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. Nature, 2013, 501: 403–407
39 Chen X Y, Tung K K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. Science, 2014, 345: 897–903
40 Roemmich D, Roemmich D, Boebel O, et al. Argo: The global array of profiling floats. In: Koblin-sky C J, Smith N R, eds. Observing the Oceans in the 21st Century. Melbourne: Bureau of Meteorology, 2001. 248–258
41 Claustre H, Antoine D, Boehme L, et al. Guidelines towards an integrated ocean observation system for ecosystems and biogeochemical cycles. In: Hall J, Harrison D E, Stammer D, eds. Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society. Venice: ESA Publication WPP-306, 2010
42 Li S Z, Jin C, Dai L M, et al. Marine Geodynamics—Advances and perspectives of international oceanfloor-related observatory network and exploration technique system (in Chinese). Mar Geol Quat Geol, 2009, 29: 131–143 [李三忠, 金宠, 戴黎明, 等. 洋底动力学——国际海底相关观测网络与探测系统的进展与展望. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29: 131–143]
43 He Q, Wang P. Current situation and prospect of deep sea energy development (in Chinese). Ocean Develop Manag, 2017, 34: 66–71 [何琦, 汪鹏. 深海能源开发现状和前景研究. 海洋开发与管理, 2017, 34: 66–71]

Summary for "'透明海洋'立体观测网构建"

Building the integrated observational network of "Transparent Ocean"

Lixin Wu[1,2*], Zhaohui Chen[1,2], Xiaopei Lin[1,2] & Yongzheng Liu[1,2]

[1] *Key Laboratory of Physical Oceanography of Ministry of Education/Institute for Advanced Ocean Science/Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*
[2] *Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China*
* Corresponding author, E-mail: lxwu@ouc.edu.cn

We live in an exciting era for ocean science, particularly when compared to three decades ago when the ocean was vastly underexplored. Progress can only be made through discovery, observation, understanding of the ocean from the surface to the deep sea, from global to local processes, and from physics, biogeochemistry to ecology.

Ocean observation is the basis of oceanic scientific research and is a key to global competition in marine science and technology. Breakthroughs depend on innovation in marine observation and exploration technology. Based on the current frontier issues of ocean science, we report ways to build a three-dimensional observation network of "Transparent Ocean". The network will effectively promote China's construction of an international collaborative innovation network for marine science.

The three-dimensional observation network "Transparent Ocean" focuses on building an intelligent mobile platform and integrates satellites, fixed platforms, vessel network, and submarine observation systems to make the oceans truly transparent.

This network includes four sub-programs.

(1) An Ocean Star Cluster Program, which resolves ocean variability at sub-meso and sub-week scales with a centimeter-level accuracy, to partially reveal the marine life system and ecosystem with a 10-m vertical interval in the euphotic layer, moving a significant step forward towards a "Transparent Ocean" down to the vicinity of thermocline both dynamically and bio-optically.

(2) An Air-Sea Interface Program, which aims to build an observational network that integrates fixed and mobile platforms to achieve a three-dimensional view of key elements/variables of the air-sea interface.

(3) A Starry Deep Sea Program, which builds a deep sea observation system with deep Argo, deep gliders, deep-sea autonomous underwater vehicles (AUVs), intelligent buoys, and other facilities. The system will provide support for information procurement through deep sea navigation and positioning technology.

4) An Undersea Perspective Program, which integrates seabed observation network, communication, navigation and positioning, with intelligent charging technologies to build an intelligent exploration network from water to the seabed.

In addition, there is a Deep Blue Brain Project, which will build a marine internet of things with the goal to enhance the ability of intelligent services from data to customers.

To date, breakthroughs have been made in research and development of cutting-edge marine technologies, providing new means for ocean observation and exploration. With respect to the ocean observation network, China has built a pilot mooring network with over one hundred sub-surface moorings and almost ten surface buoys in the western Pacific, South China Sea and the Indian Ocean over the past decade. In the next decade, it is essential to integrate observations, process studies and prediction/projection, so as to meet multiple demands of end users.

Transparent Ocean, three-dimensional observation network, marine observation and exploration technology, transparent state

doi: 10.1360/TB-2020-0558