

共享航次驱动海洋科学重大突破

张亮¹, 冷疏影^{2*}, 孙卫东^{3,4}, 荆钊^{4,5}, 吴立新^{4,5*}

1. 国家自然科学基金委员会地球科学部, 北京 100085

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

4. 崂山实验室, 青岛 266237

5. 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, 青岛 266100

* 联系人, E-mail: lengsy@mail.iggcas.ac.cn; lxwu@qnlm.ac.cn

海洋科学是研究海洋中的自然现象、基本性质及其变化规律的自然科学, 是一门以观测为基础、极具实践性的学科。纵观海洋科学的发展史, 海洋科学重大原创性成果的产生高度依赖于有计划、有组织地实施海上现场观测、积累调查资料、发现新的证据^[1,2]。国家自然科学基金委员会(简称“自然科学基金委”)于2009年启动了“国家自然科学基金共享航次计划”(简称“共享航次计划”), 用于资助海洋科学考察船和潜水器, 为必需进行海洋科学考察的国家自然科学基金资助项目提供稳定、可靠的调查设施保障, 获取现场观测资料, 以确保考察任务的完成。历经十余年, 共享航次计划实施了覆盖我国近海以及西太平洋和东印度洋部分海域的普惠型综合科学考察, 在一定程度上优化利用了科考船资源、推动了海洋数据资料的积累和共享^[3,4]。

然而, 传统普惠型航次存在观测目标分散、数据获取效率低、科学问题不聚焦等缺陷和不足, 难以获得多学科、多要素的综合观测数据和调查样品, 严重制约着海洋科学重大前沿问题的突破。为此, 共享航次计划指导专家组加强顶层设计和战略部署, 聚焦重大科学技术问题研究, 创新性地实施了“科学问题引导型”共享航次模式, 通过组织开展考察需求和实施方案的论证, 目前已立项35个重大科学考察项目。其中, 基于自然科学基金委深海大洋领域的首个重大研究计划——“西太平洋地球系统多圈层相互作用”重大研究计划(简称“西太计划”), 共享航次计划组织开展了四个重大科学考察项目, 历时五年对西太平洋跨圈层流固相互作用的关键海域开展了系统性观测, 成功获取了海量高分辨率的第一手观测数据和珍贵样品, 为解决西太计划“跨圈层动力过程与物质能量循环”这一重大科学问题提供了强有力的数据来源和支撑, 充分展现了新型共享航次模式在推动海洋科学创新突破方面的示范作用。



冷疏影 中国科学院地质与地球物理研究所研究员。主要从事海洋科学与极地科学、地理科学的学科发展战略研究及地球科学重大科研项目管理工作。



吴立新 中国科学院院士, 美国地球物理学会会士、美国气象学会会士, 崂山实验室主任。长期致力于透明海洋技术体系建设和海洋地球系统科学基础研究。领导发起了“透明海洋”研究计划, 推动“神威·海洋之光”超算系统、“两洋一海”立体观测系统等多项重大工程的实施。担任国家自然科学基金委“西太平洋地球系统多圈层相互作用”重大研究计划专家组组长。

本文以西太计划重大科学考察航次为例, 系统总结了“科学问题引导型”共享航次的组织实施过程与创新实践, 重点阐述了其在解决跨圈层流固相互作用等关键科学问题方面取得的重要进展, 进一步明确了共享航次对我国海洋科学重大前沿突破所发挥的重要推动作用。

引用格式: 张亮, 冷疏影, 孙卫东, 等. 共享航次驱动海洋科学重大突破. 科学通报

Zhang L, Leng S, Sun W, et al. Major marine science breakthroughs enabled by the NSFC Shiptime Sharing Project (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: 10.1360/CSB-2025-0416

1 重大科学考察航次目标凝练和设计

西太平洋板块俯冲与地球深部流固相互作用是西太计划拟解决的关键科学问题之一,近半数资助项目均布局在这一研究方向。然而,已有西太平洋马里亚纳海沟、穆绍海沟等典型俯冲海区的研究数据相对缺乏,资助项目迫切需要这些重点俯冲带区的第一手海洋地质和地球物理调查资料。2019年9月,在西太计划管理工作组建议下,共享航次计划指导专家组联合西太计划指导专家组,共同谋划组织了共享航次计划的首个重大科学问题引导型航次——“西太平洋多圈层相互作用板块俯冲起始机制科学考察实验研究”(航次编号: NORC2020-581)(图1)。

管理工作组事先针对有搭载需求的西太计划相关资助项目进行了问卷征集,汇总项目聚焦的科学问题和考察需求后,由共享航次计划指导专家组召集拟采用科考船负责人以及与NORC2020-581科学主题相关的20余位西太计划重点项目负责人,组织召开了航次科学问题凝练设计研讨会。面对有限船时与搭载项目需求间的供需矛盾问题,航次明确遵循重大研究计划“有限目标”的基本原则,紧密围绕“西太平洋板块俯冲起始机制”这一科学问题遴选搭载项目,同时建议通过分航段实施来满足不同调查需求,从而实现科学问题引导型航次的预期目标。航次针对俯冲起始的动力学机制、俯冲起始发生的构造边界和驱动模式、俯冲起始阶段的岩浆记录成因等进一步凝练了科学问题和目标,共享航次计划审议后发布了项目指南。航次获资助后即自行组织多次协调会议,统筹协调搭载项目的考察需求,制定和细化航次实施方案,最终顺利通过专家论证。

2020年,围绕西太平洋复杂地形与流体间的相互作用对能量串级和物质运输的影响这一关键科学问题,共享航次计

划组织实施了西太计划第二个重大科学考察航次——“西太平洋复杂地形对能量串级和物质运输的影响及作用机理重大科学考察实验研究”(航次编号: NORC2021-582)。航次聚焦西太计划核心目标区,通过在流固相互作用的关键海域开展物理海洋、海洋地质与地球物理、生物地球化学、海气交换等现场观测,获取全水深、多要素的精细化调查数据,以期揭示西太平洋能量串级和物质运输的基本时空特征,阐明复杂地形与流体间的相互作用对能量串级和物质运输的影响及调控机理。

2022年起,西太计划步入集成研究阶段,通过梳理国内外已有研究现状和数据采集情况,综合重大研究计划已取得的研究进展,并充分挖掘和集成已执行完毕的NORC2020-581和NORC2021-582航次观测资料,明确不足,查漏补缺。发现要解决俯冲起始机制这一重大科学问题,亟需对俯冲带的岩石样品进行精准地系统采集,从而准确刻画俯冲起始的精细过程,而常规的抓斗和拖网手段均无法实现。“深潜”技术无疑在解决俯冲起始机制方面有着不可替代的优势,为此凝练设计了以“深潜”为核心任务的“载人深潜-板块俯冲起始机制重大科学考察实验研究”(航次编号: NORC2023-583)项目,以期在充实和支撑西太计划集成项目研究、与国际深部钻探科学考察相接轨、深化地球深部探测理论与技术等方面发挥举足轻重的作用。

2023年,针对海洋涡旋在西太平洋跨圈层物质能量交换过程中发挥的显著作用和影响这一前沿研究方向,鉴于当前海洋涡旋观测领域存在样本代表性不足、时空分辨率不够和过程刻画不完整等问题,严重制约了对涡旋相关前沿科学问题的探究。为此设立了“海洋涡旋多尺度过程及其生态气候效应重大科学考察实验研究”(航次编号: NORC2024-584)



图1 重大科学考察航次对应西太计划科学问题示意图

Figure 1 Schematic diagram of major scientific expeditions corresponding to scientific issues of the Major Research Plan on West-Pacific Earth System Multispheric Interactions (WESPMI)

项目. 通过对代表性涡旋开展高分辨率、多学科精细化观测, 旨在系统性的增强海洋中尺度涡旋综合观测能力, 深化对涡旋背景下海洋吸热和储碳能力的理解, 提高海洋和气候系统的模拟预报水平.

2 重大科学考察航次组织和实施

共享航次计划实施方案^[5]和调查资料管理与共享服务办法^[6]明确规定了科学考察项目自申请立项、实施管理、资料汇交以及共享使用的各项细则. 根据细则, 同时为充分保障西太计划重大科学考察航次的科学目标实现和整体科考水平, 航次首席科学家由重大研究计划指导专家组成员或集成/重点项目负责人担任, 并对航次总体设计、搭载召集以及科学目标和预期成果的实现负主要责任. 首席科学家指定能够准确把握航次科学目标的西太计划重点项目负责人担任航段负责人并执行出海考察任务, 同时还须指定资料汇交负责人及航次报告助理, 共同协助首席科学家完成航次考察任务及航次资料汇交、航次报告编写等工作. 针对海上调查存在涉及国际敏感区域、外事申报可能不通过的问题, 要求选择既可达成科学目标亦无申报风险的方案作为航次实施首选方案, 同时提前做好备选方案, 方能通过实施方案专家论证.

航次组织实施过程中, 充分调动各方优势力量, 召集具有丰富海上科考经验的科研技术人员执行科考任务. 针对调查任务中关键搭载装备短缺的问题, 共享航次计划在2021年设立了“共享航次计划海洋调查装备共享战略研究”项目^[4], 在指导专家组的统筹协调下, 本着“有限目标、协同共享”原则, 集中优势资源突破重要数据采集装备的技术瓶颈, 通过定制改装、系统联调和航前测试等标准化流程, 确保所有搭载装备在航次启航前完成部署. 例如, NORC2020-581航次统筹使用了中国科学院海洋研究所、南海海洋研究所、自然资源部第二海洋研究所的多道地震探测系统; NORC2021-582航次共享使用了中国科学院海洋研究所的“发现”号4500 m级ROV(remote operated vehicle)系统, 实现了中国科学院“发现”号ROV首次离开“科学”号母船搭载中国海洋大学“东方红3”深远海综合科考船进行深海原位探测; NORC2023-583航次共享使用了中国科学院深海科学与工程研究所的“奋斗者”号全海深载人潜水器开展载人下潜任务; NORC2024-584航次统筹使用了天津大学的“海燕”1500 m级水下滑翔机、中国海洋大学的“黑珍珠”波浪滑翔器、南方科技大学的“海上烈鸟”无人机等装备共计48台套, 顺利保障了航次实施.

重大科学考察航次调查资料严格按照细则中的要求和时限进行汇交、质控、审查、验收和共享, 同时确定合理的资料保护期, 建立符合重大研究计划特色的分级分类共享机制, 提高对解决重大研究计划核心科学问题的服务能力. 研究成果发表时须对科学考察项目进行标注和致谢.

经过4年多的努力, 西太计划成功实施了NORC2020-

581、NORC2021-582、NORC2023-583和NORC2024-584四个重大科学考察航次(图2和表1), 先后搭载了50多个来自西太计划及重大科学问题相关的国家自然科学基金重点项目和集成项目, 来自中国科学院海洋研究所、中国科学院南海海洋研究所、中国科学院地质与地球物理研究所、自然资源部第一海洋研究所、浙江大学、厦门大学、北京大学、南方科技大学、中国海洋大学、崂山实验室等20多家涉海科研院所和高校的250余人次参与了航次现场调查, 在南海-吕宋海峡、冲绳海槽、黑潮延伸体、九州帕劳海脊、马里亚纳海沟和穆绍海沟等西太平洋重要目标海区获得多学科、多要素、精细化综合观测数据和调查样品, 有力支撑了西太计划各项研究工作的顺利开展.

3 共享航次取得的整体进展及其对西太计划科学目标实现的关键推动作用

截至目前, 通过四个重大科学考察航次的执行, 历时389天, 总航程近5.3万海里, 西太计划圆满完成了在西太平洋南海-吕宋海峡、黑潮延伸体、马里亚纳海沟和穆绍海沟等重点海区的物理海洋、海洋化学、海洋地质、地球物理以及大气科学等多学科海上综合调查作业. 针对西太平洋复杂地形调控下的海洋多尺度相互作用和能量串级、西太平洋板块俯冲的起始机制、板块俯冲体系下流固相互作用对深部及深海碳循环的影响、流固界面跨圈层物质与能量交换过程及对岩石圈演化的影响等科学问题, 航次开展了潜标组网、船载温盐深(conductivity, temperature, depth, CTD)/多普勒流速(lowered acoustic Doppler current profiler, ADCP)断面、湍流剖面仪(vertical microstructure profiler, VMP)、漂流浮标、多道反射地震、海底地震(ocean bottom seismometer, OBS)、海底电磁(ocean bottom electromagnetic meter, OBEM)、海底热流、生地化采水、岩石采样、柱状采样、ROV下潜和载人深潜等多学科交叉、多平台协作的综合观测, 共获取数据类型30余种, 数据量逾40 TB. 基于航次观测数据以及西太计划支持的各类项目收集的多元观测数据, 初步构建了包括温度、盐度、流速、湍动能耗散率、溶解氧、硝酸盐、溶解有机碳、溶解无机碳、二氧化碳分压、地震信号、沉积物浓度等要素在内的西太平洋多学科交叉综合数据集, 为西太计划开展海洋跨尺度、跨圈层的多学科交叉研究奠定了坚实的数据基础.

截至目前, 航次发表研究论文31篇, 在板块俯冲起始机制研究方面, 初步刻画了俯冲带内精细结构和俯冲起始发生的构造边界及岩浆记录, 为揭示西太平洋俯冲系统的板块俯冲起始机制与俯冲带水-碳循环过程提供了重要数据来源和科学支撑^[7-13]; 在复杂地形下的多尺度相互作用与能量串级研究方面, 基于现场观测定量评估了海洋多尺度动力过程对垂向物质能量输运的重要贡献^[14-21], 定量分析了冷泉和热液极端环境下流固界面的物质交换通量^[22-32], 为揭示西太平洋

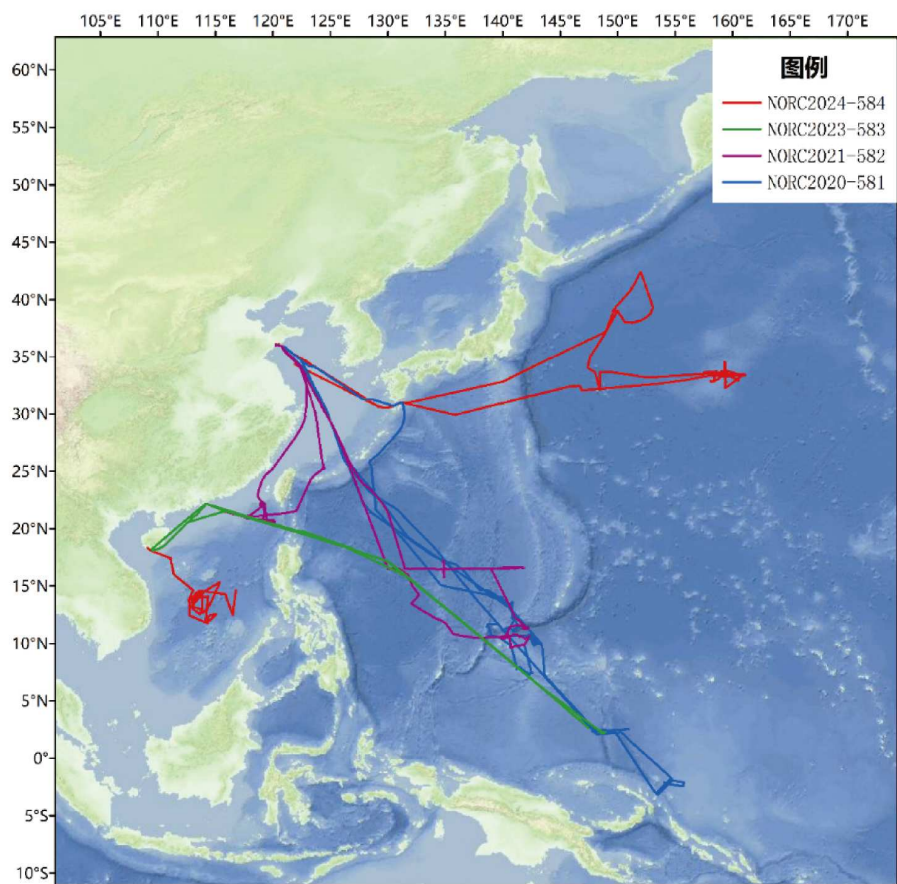


图 2 西太计划重大科学考察航次航迹示意图
Figure 2 Schematic diagram of the cruise track for WESPMI major scientific expeditions

表 1 西太计划重大科学考察航次简表
Table 1 List of the WESPMI major scientific expeditions

项目名称/航次编号	项目负责人/ 依托单位	首席 科学家	科考船/ 深潜器	分航段执行情况			
				航段/负责人	出航时间	航期(天)/ 航程(海里)	调查海域
共享航次计划2019年度西太平洋多圈层相互作用板块俯冲起始机制科学考察实验研究/ NORC2020-581	王凡/中国科学院 海洋研究所	吴立新	科学	第一航段/张国良	2020.11.23~ 2021.01.12	51/6050	马里亚纳海沟、 西菲律宾海盆
				第二航段/董冬冬	2021.01.20~03.08	48/8400	穆绍海沟、美拉 尼西亚海沟
共享航次计划2020年度西太平洋复杂地形对能量串级和物质运输的影响及作用机理重大科学考察实验研究/NORC2021-582	王毅/中国海洋 大学	刘怀山	东方红3/ “发现”号	第一航段/经志友	2021.09.17~10.30	44/5410	马里亚纳海沟、 九州帕劳海脊
				第二航段/张鑫	2022.05.03~06.10	39/4240	南海-吕宋海 峡、冲绳海槽
共享航次计划2022年度载人深潜—板块俯冲起始机制重大科学考察实验研究/NORC2023-583	唐古拉山/中国 科学院深海科学与 工程研究所	孙卫东	探索一号/ “奋斗者”号	孙卫东、张鑫	2024.09.17~11.14	59/7850	穆绍海沟
共享航次计划2023年度海洋涡旋多尺度过程及其生态气候效应重大科学考察实验研究/ NORC2024-584	吴能友/青岛 海洋科技中心	魏泽勋	向阳红01	第一航段/徐腾飞	2024.06.01~07.05	35/4500	南海西部
			东方红3	第二航段/荆钊	2024.08.25-10.11	48/7500	黑潮延伸体区
			嘉庚	第三航段/曹知勉	2024.11.01~12.06	36/5140	西北太平洋 副热带逆流区
			实验6	第四航段/经志友	2025.03.21~04.18	29/3580	南海东北部

复杂地形对能量串级的影响机制及跨圈层物质交换过程提供了有力的观测数据和样品支撑。

航次诸多数据和样品仍在处理分析中。下面按照关键科学问题介绍四个重大科学考察航次取得的最新进展和成果。

3.1 西太平洋板块俯冲起始机制研究进展和成果

揭示板块俯冲起始机制是西太计划总体科学目标之一,同时也是板块构造理论提出50多年来仍悬而未决的关键科学问题之一。NORC2020-581航次和NORC2023-583航次针对西太平洋处于不同俯冲阶段的俯冲带,如马里亚纳海沟、雅浦海沟、穆绍海沟、美拉尼西亚海沟,开展了俯冲带精细地形地貌、深部结构和基底物质组成等观测和调查。对于初始阶段的俯冲带,通过将多道地震探测、主动源OBS观测与俯冲带基岩采样相结合开展了联合研究;对于成熟的俯冲带,将OBS观测与OBEM和多道地震探测结合起来进行综合研究,为阐明俯冲起始成因机制提供了珍贵的现场观测数据和样品。

通过系统的地球物理解释和岩石样品分析,研究发现穆绍海沟缺少岛弧有关的火山岩和地球化学特征,但已具有俯冲板块变质和脱流体现象,指示穆绍海沟尚未真正开始俯冲起始;穆绍海沟和穆绍海脊之间的狭长地带受到了强烈的挤压变形与抬升作用,通过地震地层学与附近大洋钻探结果估算出穆绍海沟形成的年龄范围为9~10至约16.8 Ma^[7,8](图3(a))。通过对雅浦岛弧北端基性变质岩、蛇纹岩的矿物和地球化学分析,揭示了作为上盘的帕里西维拉海盆岩石圈向俯冲带转换的现象^[9,10]。

鉴于常规的抓斗和拖网手段无法实现对俯冲带岩石的精准系统采样,基于前期NORC2020-581航次在穆绍海沟考

察取得的初步认识,NORC2023-583航次围绕穆绍海沟俯冲起始机制,搭载“奋斗者”号载人深潜器开展了29次载人深潜调查作业,完成3条横切沟弧的地质剖面观测和取样,获取的岩石样品主要包括玄武岩、蛇纹岩、蛇纹岩化橄榄岩和辉长岩,发现的一些断层角砾岩指示了俯冲起始过程中有强烈的挤压作用。航次首次在穆绍海沟发现板块破裂遗迹和超大型热液群,利用深潜资料在6000 m水深初步勾勒出穆绍海沟研究区的地质简图,为深入揭示穆绍海沟俯冲起始的破裂过程奠定了重要基础。此外,在距离海沟约80 km的俯冲板块之上发现一系列巨型“麻坑”群,被命名为“昆仑”热液筒群,其喷发的热液流体中富含溶解态氢气,为寻找潜在的海底氢能开发区域提供了理想的天然试验场;原位拉曼光谱数据表明,其喷发的碱性热液流体在碳酸盐补偿深度之下形成了巨厚的碳酸盐岩,为研究俯冲带碳循环提供了新线索^[11~13](图3(b)和(c))。后续项目组将对本航次获取的样品和数据开展全面的岩石学、矿物学、地球化学和年代学研究,以期揭示西太平洋俯冲系统的板块俯冲起始机制、初始俯冲阶段岩浆成因和物质循环过程提供关键证据。

3.2 西太平洋复杂地形对能量串级和物质运输的影响及作用机理研究进展和成果

NORC2021-582航次聚焦复杂地形对西太平洋能量串级和物质运输的影响及作用机理这一重大前沿科学问题,通过在流固相互作用的关键海域开展物理海洋、海洋地质与地球物理、海洋生物地球化学、海气交换等现场观测,并结合数值模拟和理论分析,揭示西太平洋能量串级和物质运输的基本时空特征,阐明复杂地形与流体间的相互作用对能量串级和物质运输的影响及调控机理。

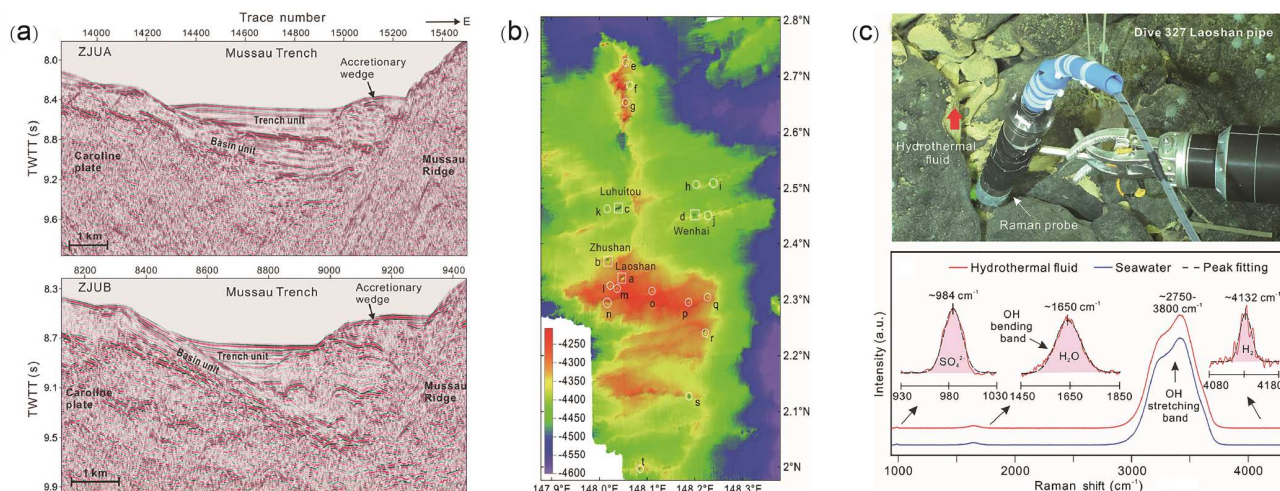


图3 NORC2020-581航次和NORC2023-583航次部分研究成果图。(a) 穆绍海沟高分辨率多道地震剖面^[8]。(b) 穆绍海沟大型热液筒群分布图。(c) 热液流体原位探测数据^[13]

Figure 3 Partial research results figures from NORC2020-581 and NORC2023-583. (a) High-resolution multi-channel seismic profile of the Mussau Trench^[8]. (b) Large-scale hydrothermal pipes in the Mussau Trench. (c) *In-situ* detection data of hydrothermal fluids^[13]

聚焦典型沟弧盆复杂地形体系下海洋多尺度动力过程的形成与演变规律、多尺度相互作用的关键驱动机制,航次属国际上首次在九州帕劳海脊深海复杂地形周边构建了高分辨率、多学科潜标观测阵列,获取了全水深、多要素的精细化断面观测数据,阐明了复杂地形“湍致上涌”在西太平洋翻转环流中的重要作用,系统探究了西太平洋和南海上层及深海复杂地形处的亚中尺度过程的动力学特征、时空变化和能量串级机制^[14,15](图4(a)).围绕“两点一线”(南海冷泉和冲绳海槽热液2个极端环境点、1条跨越深海到陆架的断面),航次完成深海ROV探测14个潜次,多道地震探测960 km.基于船载多波束、浅地层剖面、多道地震和科研鱼探仪数据,精细刻画了冷泉和热液区的高精度地形地貌和浅部地层结构^[16];采用CTD/LADCP、VMP等调查手段,获取了冷泉和热液喷口流体影响下的水体温盐要素剖面,探索了复杂地形、流体等多要素调制下湍流混合的时空演变机制;使用“发现”号ROV进行了喷口流体、还原性沉积物和底层水的原位拉曼探测和精准采样,同时获得了大量沉积物样品^[22-26];利用原位激光拉曼光谱探针等具有完全自主知识产权的设备,获得了天然气水合物、冷泉/热液喷口流体等特殊环境的长期原位监测数据^[27-32](图4(b));基于高分辨率多道地震探测系统,成功追踪了南海内波的浅化过程,获得了内波和中小尺度涡旋的高清晰度图像,为揭示南海北部复杂地形对内波和涡旋的影响机制提供了近海底水体结构特征和重要参数.本航次的成功实施为定量分析冷泉和热液极端环境下水体-沉积物间的物质交换通量、揭示西太平洋复杂地形对能量串级的影响机制等重大科学问题提供了有力的观测数据和样品支撑.

3.3 海洋涡旋多尺度过程及其生态气候效应研究进展和成果

NORC2024-584航次围绕海洋涡旋多尺度过程及其生态气候效应重大前沿科学问题,针对南海西部、南海东北部、西北太平洋副热带逆流和黑潮延伸体海域典型中尺度涡旋,分航段开展高分辨率的多学科综合观测研究,通过刻画特定生命阶段涡旋的动力和生物地球化学要素精细结构:(1)揭示涡旋引起的垂向物质和热量运输特征,(2)阐明涡旋多尺度相互作用对能量串级的贡献,(3)明确涡旋在海洋固碳储碳中的作用.

航次执行过程中,基于卫星遥感和数值预报锁定了目标涡旋,并根据船载ADCP的快速走航和表层漂流浮标等现场观测,对涡旋形态和位置进行订正和观测方案动态调整,综合运用水下滑翔机、波浪滑翔器、潜标、漂流浮标、生物地球化学浮标(biogeochemical Argo, BGC-Argo)、XUANWU(6000 m级深海自持式剖面浮标)等无人平台(图5),结合船载大面站和走航方式,开展了涡旋精细化结构的多学科综合组网观测,并在涡旋边缘开展了多参数走航拖曳观测,获取了涡旋内区(边缘)水平间隔不超过15(3)海里的高精度观测数据.观测内容涵盖了水文、生物、化学和光学等要素和样品.此外,航次首次使用无人机进行了混合层剖面观测和采水作业,展示了无人机未来集群作业的广阔前景;利用数据同化与最优路径求解等技术,实时调整观测策略,极大提高了水下滑翔机对涡旋三维结构的重构效率;开展了涡旋边缘的声学通信实验,取得了高信噪比的声学观测数据;开展了新一代高度计卫星(surface water and ocean topography, SWOT)的星海协同观测;全程开展了表层海水、海气通量、温室气体

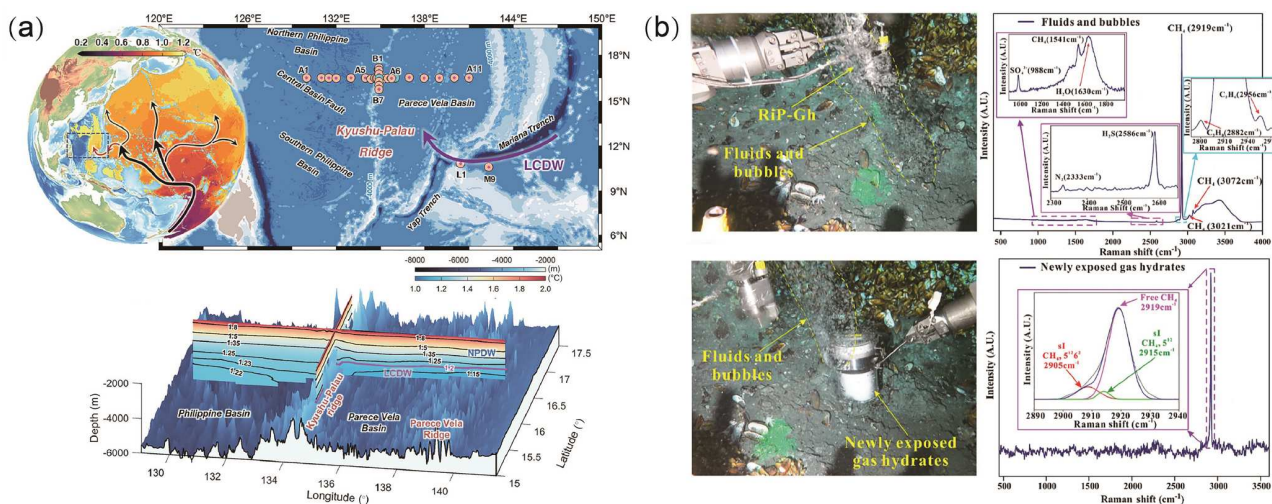


图4 NORC2021-582航次部分研究成果。(a)潜标观测站及跨九州帕劳海脊深层水位温空间分布^[15]。(b)南海冷泉喷口原位监测流体和气泡^[31]

Figure 4 Partial research results figures from NORC2021-582. (a) Mooring observation stations and spatial distribution of deep-water temperature across the Kyushu-Palau Ridge^[15]. (b) *In-situ* monitoring of fluids and bubbles at cold seep vents in the South China Sea^[31]

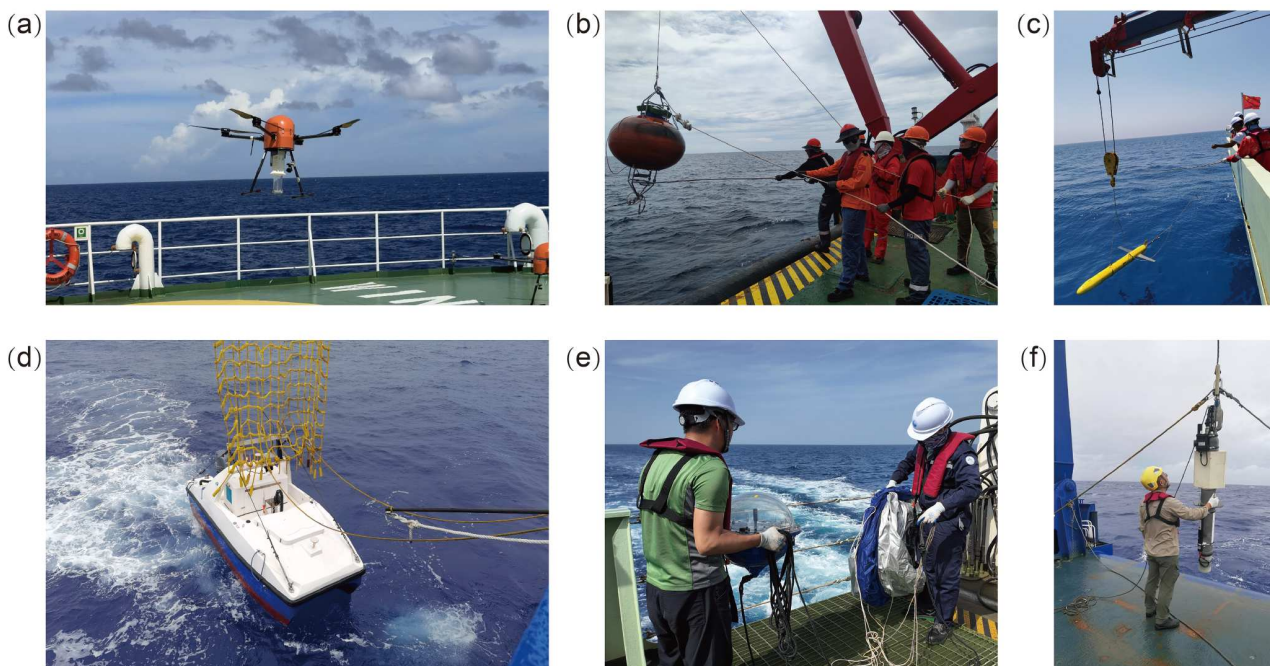


图5 无人观测平台。(a) 无人机。(b) 潜标。(c) 水下滑翔机。(d) 无人船。(e) 漂流浮标。(f) BGC-Argo

Figure 5 Unmanned observation platforms. (a) Unmanned aerial vehicle. (b) Mooring. (c) Underwater glider. (d) Unmanned surface vehicle. (e) Drift buoy. (f) BGC-Argo

含量等走航测量。初步分析发现，获取的观测数据较好的捕捉到涡旋边缘的温盐锋面和混合三维结构^[17-20]，冷(暖)涡和涡旋边缘温盐结构、生物光学特性和声散射层等的日变化规律^[21]，为进一步开展涡旋多尺度过程及其生态气候效应奠定了基础。

NORC2024-584航次初步形成卫星-现场观测-数值模拟相结合的目标涡旋动态研判、船基-岸基联动的观测站位动态调整和多平台协调组网的涡旋观测方案设计，在国际上首次实现了南海西部、黑潮延伸体及西北太平洋副热带逆流区典型涡旋的精细化组网观测，打造了具有国际影响力的涡旋观测范例，有效推动涡旋观测装备共享和数据质控；获取了能够解析涡旋中尺度和亚中尺度过程的高精度数据和样品，为准确刻画涡旋结构和能量串级过程、量化估算涡旋垂向物质热量输运、科学评估涡旋的生态气候效应、提升涡旋模拟预报水平等研究提供了坚实的观测数据支撑，从而实现西太平洋跨圈层物质能量循环过程的认识从定性分析到定量解析，助力西太计划整体科学目标的实现。

4 启示与展望

当前国际海洋调查发展呈现三大显著特征：学科交叉日益深化、观测技术快速迭代、数据共享需求迫切。这一态势深刻表明，构建现代化海洋调查体系已成为提升我国海洋科学研究水平和原始创新能力的关键路径。国家自然科学基金

委共享航次计划作为海洋科考的重要组织模式，不仅显著提高了海洋科考船时和高端调查装备的利用效率，更加带动了调查资料的积累与共享，培育了具备跨学科视野和实战能力的海洋科考人才队伍。近年来，随着海洋科学领域重大前沿问题的不断涌现，共享航次计划在保持传统普惠型航次优势的基础上，创新发展了以重大科学问题为导向、瞄准国际科学前沿和国家重大需求的新型共享航次模式。这一创新实践不仅延续了共享航次在资源整合、成本优化方面的固有优势，更通过聚焦关键科学目标，实现了从“普惠共享”到“精准突破”的战略升级。重大科学考察航次基于指导专家组的顶层设计和组织协调，通过整合多学科优势研究力量，采用“空-天-海-底”立体协同观测方案，针对西太平洋等关键海区的跨圈层相互作用等前沿科学问题，开展了高分辨率、多学科、全要素综合观测，为揭示海洋系统多圈层耦合机制提供了前所未有的高质量数据支撑和样品保障。这种以科学问题驱动、多团队协作的新型共享航次模式，正在成为推动海洋科学原始创新的重要引擎。

未来应进一步推动构建以重大科学问题为导向、大科学计划为载体、领域顶尖科学家主导的合作共享航次，兼顾国家在海洋安全、气候环境和战略资源等方面的需求，确立优先研究的科学问题，加强顶层设计，不断探索和完善更加高效的共享航次科考新范式，推动我国海洋领域实现重大原始创新突破。同时，注重加强共享航次获取数据的质量控制，

研制并推出高质量的综合数据产品, 构建集数据查询检索、可视化展示、在线使用和下载等多功能于一体的共享服务平台, 为用户提供更为广泛、便捷、高效的开放共享资料,

提高对解决重大前沿科学问题的信息服务能力, 服务科学共同体, 有力提升自然科学基金委共享航次计划的国际影响力和竞争力。

推荐阅读文献

- 1 Wu L X, Jing Z, Chen X Y, et al. Marine science in China: current status and future outlooks (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2022, 29: 1–12 [吴立新, 荆钊, 陈显尧, 等. 我国海洋科学发展现状与未来展望. *地学前缘*, 2022, 29: 1–12]
- 2 Leng S Y, Su T Y, Zhang L. Practice and reflections on open sharing of marine scientific data (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 2239–2249 [冷疏影, 苏天赞, 张亮. 海洋科学数据开放共享实践与思考. *科学通报*, 2023, 68: 2239–2249]
- 3 Leng S Y, Zhang L. Deepening implementation of “Shiptime Sharing Project”, promote original innovation of marine science and technology (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2020, 35: 1490–1498 [冷疏影, 张亮. 深化“共享航次计划”推动我国海洋科技原始创新. *中国科学院院刊*, 2020, 35: 1490–1498]
- 4 Leng S Y, Wang F, Liu B H, et al. Actively promote the sharing of marine survey equipment to serve the original innovation of marine science and technology in China (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found Chin*, 2023, 37: 267–275 [冷疏影, 王凡, 刘保华, 等. 顺应海洋科技发展需求加快推动海洋调查装备共享. *中国科学基金*, 2023, 37: 267–275]
- 5 National Natural Science Foundation of China. Implementation Plan for the National Natural Science Foundation of China Shiptime Sharing Project (Trial) (in Chinese). 2024, <https://www.nsfcode.cn/doc-download.jsp> [国家自然科学基金. 国家自然科学基金共享航次计划实施方案(试行). 2024, <https://www.nsfcode.cn/doc-download.jsp>]
- 6 National Natural Science Foundation of China. Measures for the Management and Sharing Service of Survey Data of the National Natural Science Foundation of China Shiptime Sharing Project (Trial) (in Chinese). 2024, <https://www.nsfcode.cn/doc-download.jsp> [国家自然科学基金. 国家自然科学基金共享航次计划调查资料管理与共享服务办法(试行). 2024, <https://www.nsfcode.cn/doc-download.jsp>]
- 7 Zhang G, Yao J, Xu F, et al. Origin of the Mussau Trench in the Western Pacific: geochemical and mineralogical constraints from basalts and serpentinized peridotites. *Chem Geol*, 2023, 642: 121798
- 8 Li C F, Deng Y, Wu T, et al. Propagating subduction initiation of the Caroline Plate at the Mussau Trench. *Sci China Earth Sci*, 2025, 68: 253–269
- 9 Yao J, Zhang G, Zhang J, et al. Petrological and geochemical constraints of mantle peridotites on the magma-starved Yap Arc formed by ultra-slow subduction. *Contrib Miner Petrol*, 2023, 178: 74
- 10 He E, Qiu X, Li Y, et al. Strong serpentinization and hydration in the subducting plate of the southern mariana trench: insights from V_p/V_s ratios. *Geophys Res Lett*, 2025, 52: e2024GL113792
- 11 Sun W, Zhang T. The Caroline Plate and plate subduction along the Mussau Trench. *Sci China Earth Sci*, 2025, 68: 639–642
- 12 Sun W D, Zhang X, Li C Y, et al. Report on the “Shiptime Sharing Project 2023 Annual Manned Deep Dive - Major Scientific Research Experiment on the Initiation Mechanism of Plate Subduction” (NORC2023-583) (in Chinese). 2025 [孙卫东, 张鑫, 李聪颖, 等. 共享航次计划2023年度载人深潜-板块俯冲起始机制重大科学考察实验研究航次报告(NORC2023-583). 2025]
- 13 Li L, Zhang H, Xi S, et al. Large hydrogen hydrothermal pipe swarm identified in the deep ocean. *Sci Bull*, 2025, doi: 10.1016/j.scib.2025.04.006
- 14 You J, Xu Z, Zhang P, et al. Mixing in the Philippine Sea: geography variability and parameterization. *Deep Sea Res Part II-Topical Studies Oceanography*, 2022, 202: 105143
- 15 Xiao X, Zhou C, Yang Q, et al. Diapycnal upwelling over the Kyushu-Palau ridge in the north Pacific Ocean. *Geophys Res Lett*, 2023, 50: e2023GL104369
- 16 Che H H, Xing L, Lin Y Z. Decoding and geophysical applications based on scientific fish finder data (in Chinese). *Mar Sci*, 2023, 47: 121–131 [车昊函, 邢磊, 蔺玉璽. 科研鱼探仪数据的解编及地球物理应用. *海洋科学*, 2023, 47: 121–131]
- 17 Cao H, Jing Z, Fox-Kemper B. Scale-dependent vertical heat transport inferred from quasi-synoptic submesoscale-resolving observations. *Geophys Res Lett*, 2024, 51: e2024GL110190
- 18 Zheng R, Jing Z. Diurnal variability of mixed layer overturning instabilities from glider array observations in the south China Sea. *Geophys Res Lett*, 2024, 51: e2023GL107694
- 19 Liu Y, Jing Z. Intrathermocline eddy with lens-shaped low potential vorticity and diabatic forcing mechanism in the south China Sea. *J Phys Oceanography*, 2024, 54: 929–948
- 20 Cao H, Freilich M, Song X, et al. Isopycnal submesoscale stirring crucially sustaining subsurface chlorophyll maximum in ocean cyclonic eddies. *Geophys Res Lett*, 2024, 51: e2023GL105793
- 21 Liu J, Yan T, Jing Z Y. Observations of Near-Inertial Waves generated by three successive typhoons in the northwestern South China Sea (in Chinese). *J Trop Oceanogr*, 2025, 44: 66–81 [刘杰, 闫桐, 经志友. 南海西北部连续台风激发的近惯性内波观测研究. *热带海洋学报*, 2025, 44:

- 66–81]
- 22 Yuan L, Cai P, Jiang X, et al. Precise measurement of $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ disequilibria in deep-sea sediments by high-sensitivity ICP-MS. [Chem Geol](#), 2023, 620: 121351
 - 23 Cheng Y, Cai P, Chen H, et al. Nitrate and silicate fluxes at the sediment–water interface of the deep North Pacific Ocean illuminated by $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ disequilibria. [Geochim Cosmochim Acta](#), 2024, 383: 81–91
 - 24 Shen H, Wan X S, Zou W, et al. Physical optima for nitrogen fixation in cyclonic eddies in the Subtropical Northwestern Pacific. [Prog Oceanogr](#), 2024, 226: 103298
 - 25 Hu B, Wang Q, Liu J, et al. Environmental heterogeneity of cold seep by biological trait analysis of marine nematodes at Site F cold seep in South China Sea. [Mar Pollution Bull](#), 2024, 198: 115932
 - 26 Ni S, Xu M N, Du M, et al. Top-down control of ammonia oxidizers by grazing in the north Pacific. [Geophys Res Lett](#), 2024, 51: e2024GL108484
 - 27 Du Z, Xi S, Luan Z, et al. Development and deployment of lander-based multi-channel Raman spectroscopy for *in-situ* long-term experiments in extreme deep-sea environment. [Deep Sea Res Part I-Oceanographic Res Papers](#), 2022, 190: 103890
 - 28 Du Z, Zhang X, Lian C, et al. The development and applications of a controllable lander for *in-situ*, long-term observation of deep sea chemosynthetic communities. [Deep Sea Res Part I-Oceanographic Res Papers](#), 2023, 193: 103960
 - 29 Zhang X, Luan Z, Du Z, et al. Gas hydrates in shallow sediments as capacitors for cold seep ecosystems: insights from *in-situ* experiments. [Earth Planet Sci Lett](#), 2023, 624: 118469
 - 30 Ma L, Luan Z, Du Z, et al. The direct observation and interpretation of gas hydrate decomposition with ocean depth. [Geochem Persp Lett](#), 2023, 27: 9–14
 - 31 Ma L, Luan Z, Du Z, et al. Natural structural transition of gas hydrates from sI to sII in the deep seafloor. [Geophys Res Lett](#), 2024, 51: e2023GL106839
 - 32 Li L, Luan Z, Du Z, et al. *In situ* Raman observations reveal that the gas fluxes of diffuse flow in hydrothermal systems are greatly underestimated. [Geology](#), 2023, 51: 372–376

Summary for “共享航次驱动海洋科学重大突破”

Major marine science breakthroughs enabled by the NSFC Shiptime Sharing Project

Liang Zhang¹, Shuying Leng^{2*}, Weidong Sun^{3,4}, Zhao Jing^{4,5} & Lixin Wu^{4,5*}

¹ Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China

² Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

³ Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

⁴ Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China

⁵ Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System and Key Laboratory of Physical Oceanography, MOE, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

* Corresponding authors, E-mail: lengsy@mail.iggcas.ac.cn; lxwu@qnlm.ac

Marine science is fundamentally an observation-based and highly practice-oriented discipline. The generation of groundbreaking original achievements in marine science critically depends on the systematic implementation of organized field observations, the accumulation of survey data, and the discovery of novel evidence. Three defining trends characterize the current development of international marine surveys: deepening interdisciplinary integration, the rapid evolution of observation technologies, and an increasingly urgent demand for data sharing. This research landscape indicates that building a modern marine survey system is a critical pathway to improve both the level of marine scientific research and the capacity for original innovation in China. Since its inception in 2009, the Shiptime Sharing Project, initiated by the National Natural Science Foundation of China (NSFC), has conducted inclusive and comprehensive scientific expeditions across China's coastal waters and parts of the West-Pacific and eastern Indian Ocean. These surveys have not only significantly increased the utilization rates of research vessel time and advanced survey equipment but also facilitated the accumulation and sharing of marine survey data. Furthermore, the programme has cultivated a cohort of marine scientists equipped with interdisciplinary perspectives and practical field capabilities. However, traditional open research cruises, which suffer from inherent limitations such as disparate observational objectives, low data collection efficiency, and ill-defined scientific questions, struggle to obtain comprehensive multidisciplinary, multiparameter observational data and samples. These difficulties hinder breakthroughs related to key frontier questions in marine science. In response, in addition to maintaining the advantages of traditional inclusive cruises, the Shiptime Sharing Project involves a novel “science-question-driven” cruise model with a strategic focus on international scientific frontiers and critical national imperatives. This innovative approach retains the advantages of the traditional open research cruise in terms of resource integration and cost optimization and achieves a strategic upgrade from “inclusive sharing” to “targeted breakthroughs” by focusing on key scientific objectives.

Based on demonstrations of investigation requirements and implementation plans, 35 major scientific investigation projects have been approved. Among them, the Guidance Expert Group of the Shiptime Sharing Project has strengthened top-level design and strategic deployment to meticulously refine and successfully organize and implement four major scientific investigations that focus on the main scientific issue of the Major Research Plan on West-Pacific Earth System Multispheric Interactions (WESPMI). During the organization and implementation process, high-quality resources from domestic stakeholders were effectively coordinated. This effort achieved a breakthrough in the integration of high-end survey equipment resources across institutions and enabled multiplatform collaborative three-dimensional “space-air-ocean-seabed” observations. Comprehensive multidisciplinary observation data and an important collection of valuable samples were acquired in the key target sea areas of the West-Pacific. These datasets and samples cover disciplines such as physical oceanography, marine geology, geophysics, biogeochemistry, and atmospheric sciences and span the full water depth at high resolution. An initial integrated multidisciplinary dataset for the region has also been constructed. On the basis of cruise data, significant progress has been made in understanding the initiation of plate subduction as well as multiscale interactions and energy cascades under complex topography, which has supported the publication of 31 research papers.

This article systematically summarizes the organization and implementation process as well as the innovative practices of the four major scientific cruises. It highlights significant advances in addressing key scientific issues such as cross-sphere fluid-solid interactions and clarifies the crucial role of the Shiptime Sharing Project in enabling breakthroughs in frontier challenges within China's marine science domain.

NSFC Shiptime Sharing Project, West-Pacific, multispheric interactions, science-question-driven, innovative practices

doi: [10.1360/CSB-2025-0416](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0416)