

国际海底地震观测 最新进展分析

文 / 朱林 连尉平



美国海洋观测网（OOI）示意图

美国海底观测起步较早，在 2006 年就已开始启动美国海洋观测计划（OOI），OOI 是一个大型海洋观测系统，作为主要研究设备和设施建设项目，由美国国家科学基金会（NSF）赞助、监督建造和部署。加拿大海底观测网（ONC）是由东北太平洋的 NEPTUNE Canada 观测网和 VENUS 海底实验站于 2013 年合并组建而成，主要收集太平洋、北冰洋和大西洋的物理、化学、生物和地质方面的数据。在海啸和地震多发的日本，2016 年建成了 DONET 海底电缆实时观测网络，用于精确的地震和海啸监测。此外，2017

年，日本建成海底地震海啸观测网 S-net，其布设在从日本海沟到千岛海沟海域的东日本太平洋海域，可实现实时连续 24 小时监测，从而获取观测数据。2009 年，同济大学联合多家单位在上海附近海域进行了海洋观测组网技术的实验，并且建立了东海海洋观测小衢山试验站，这是中国第一个海洋综合观测实验与示范系统；2016 年，中科院声学所牵头建成南海深海海底观测实验系统，用于海洋观测等科学实验。

美、加海底观测网

美国海洋观测计划（OOI）是美国国家基金委管理下的海洋大型科学观测计划，是一个交互式的、全球分布的综合性观测网，以对发生在全球海洋中复杂的、具有内在联系的、物理学的、化学的、生物学的和地质学过程开展新一代研究。

OOI 是一个大型海洋观测系统，实现了从陆地延伸到深海，从海底到海面的立体观测系统。自 2016 年施工完成以来，OOI 一直处于运营状态，每年的资金水平约为 5500 万美元。2018 年，NSF 宣布授予学术和海洋研究联合组织一项为期五年、价值 2.2 亿美元的合同，以运营和维护海洋观测计划。该联合组织由伍兹霍尔海洋研究所（WHOI）领导，由美国国家科学基金会和 OOI 设施委员会提供指导，涵盖华盛顿大学（UW）、俄勒冈州立大学（OSU）等大学。每个机构将继续运营和维护其目前负责的 OOI 部分。OOI 的特点是海底建网，但不是单纯只作为海底的地质观测，或者只是建设固定式的观测平台，相反，OOI 大量的设施

是对水层从海面到海底进行观测，充分利用传感器、计算速度、通信带宽、互联网资源、高清晰成像、机器人技术等领域的最新发展成果，建立一个传感器分布全球的近实时观测网络。OOI 共分 3 级，即海岸观测系统、区域观测系统和全球观测系统。

加拿大海底观测网（ONC）是由东北太平洋的 NEPTUNE Canada 观测网和 VENUS 海底实验站于 2013 年合并组建而成，由维多利亚大学负责运营和管理，ONC 主要利用海底光电缆构建的具备观测和数据采集、能源供给和数据传输、交互式远程控制、数据管理和分析等功能的软硬件集成系统，实现对不同深度的海底、地壳板块运动、生态环境变化等进行连续观测，位于维多利亚大学的运行管理中心汇集了 ONC 系统的观测数据，面向全世界用户免费开放，可提供每天 24 小时的实时数据传输服务，包括数字、图形、图像、视频在内的各类测量数据以及数据处理工具。其不仅为加拿大和世界各地的科研人员提供创新型研究平台，同时在诸如海洋和气候变化、地震和海啸、海洋污染、港口安全和海上运输、资源开发、国家主权与



加拿大海底观测网（ONC）示意图

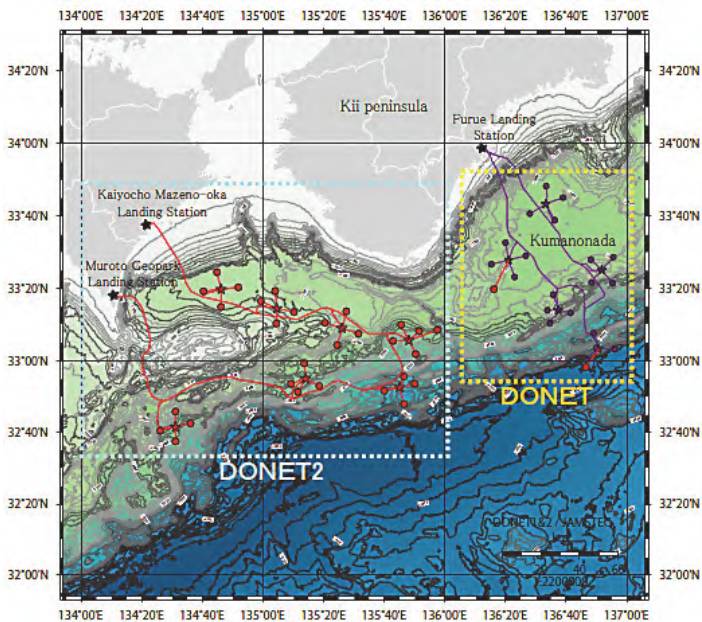
安全、海洋技术创新等方面发挥了重要作用。

日本海底观测网

日本 DONET, 于 2006 年启动, 2016 年建成, 随后并入日本陆地和海底波形监测网 (MOWLAS)。DONET 是一个海底电缆实时观测网络, 用于精确的地震和海啸监测。DONET 观测系统覆盖了日本广大的海域, 实现了对日本东部海域地震的高精度监测, DONET 还与大洋钻探计划相结合, 以有线方式连接部分钻探海底钻孔观测点, 为板块俯冲带地震机制研究提供了科学设施。

日本 S-net, 于 2011 年启动, 2017 年建成, S-net 观测网沿着日本海沟布设, 观测缆线总长度达 5700 千米, 覆盖面积从海岸到海沟约 250000 平方千米。其布设在从日本海沟到千岛海沟海域的东日本太平洋海域, 可实现连续 24 小时监测从而获取观测数据。S-net 观测网分为六个独立的子系统, 各子系统的观测数据通过海底电缆连续 24 小时双向传输到观测站, 这些观测数据被发送给防灾科研机构, 作为地震和海啸监测、紧急地震速报以及海域的地壳结构和地震像解析的基础数据。基于对 S-net 观测网数据的长期研究分析, 揭示了日本南部海槽板块构造的次级结构及其运动规律, 暗示了孕震机制的新线索, 推动了区域精细结构和地震机制的科学研究。

日本 N-net, 是日本文部科学省支持下正在建设的新系统, 正好填补日本东太平洋海域 S-net 和 DONET 之间的海上观测空白。N-net 采用基于 S-net 的内联系统, 以相对较低的成本快速覆盖广阔的区域, 采用 DONET 的节点系统, 以实现可扩展性和灵活性。



上图 | 日本S-net海底地震海啸观测网示意图
下图 | 日本DONET海底观测网示意图

美、加、日海底观测网对比

总体上，全球海底观测网建设有实践应用和基础研究两方面目标。根据建设目的侧重点不同，现有海底观测网可以分成两类：一类是美国、加拿大海底观测网，侧重基础研究，以海洋综合观测为目标，是多学科为一体的观测平台；一类是日本的海底观测网，侧重实践应用，以地震预警和海啸预警为核心目标。美加日海底观测网特点如下表所示：

日本 DONET、S-net 扩展了地震台网覆盖，有效提升区域地震监测能力，大大提升日本地震预警和海啸预警时间。2017 年，S-net 预警集成用于实时控制 JR 东部运营的新干线列车，2019 年，DONET 预警集成用于实时控制 JR 中央和 JR 西部运营的新干线列车。DONET 观测研究还揭示了南海海槽板块构造的次级结构及其运动规律，发现了板块边界断层的持续缓慢滑动等现象。美国 OOI 深入观测包括板块构造过程、海洋动力、海啸在内的各种关键性海

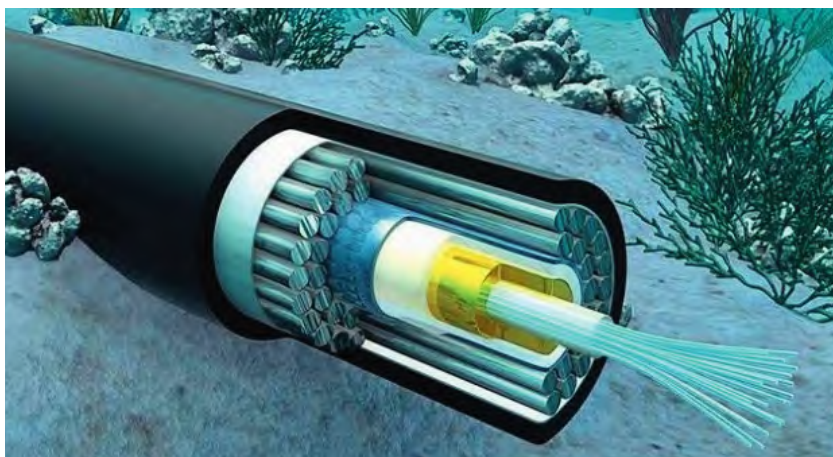
洋过程，观测结果用于研究地球动力学、地球内部构造等科学问题，目前已经产生 2500 多种科学数据产品，10 万多种科学与工程数据产品，并对公众及科研人员免费开放。

国内海底观测建设情况

2009 年，由同济大学牵头，建成东海海底观测小衢山实验站,这是中国第一套海底观测实验系统,包括一条 1.1 千米主干光电缆，一个海底接驳盒和 CTD、ADCP 和浊度仪等 3 种海底设备，水深 10 米，电力由水文观测平台太阳能板提供。2013 年，中科院南海所、声学所、沈阳自动化所联合研制的南海海底观测实验示范网建成，包含岸基站、2 千米海底光电缆、一个直流 10 千伏水下节点、3 套观测设备和声学网关组成的 4 个观测节点，水下节点接驳盒布放水深 20 米。

表 1 美国、加拿大、日本海底观测网特点

国家	海底观测网特点
美加	1. 系统完善，有近海尺度的 MARS 等、区域尺度的 OOI-RSN。 2. 布局具有全球性，兼有短期和长期观测网。 3. 科研驱动，各个网络研究重点不同，如生态系统网络（LEO-15），地震和火山观测网（H2O、NeMO 和 HUGO）。 4. 采用恒压馈电模式，供电和通信能力强大，预留了扩充端口，可灵活扩展各类海底仪器。 5. 不同平台相互连接完善，如浮标、锚系与有缆海底观测网的连接。 6. 使用遥控、自主水下操作机器人和水下滑翔机等高新技术设备，水下主次接驳盒技术成熟。 7. 观测数据全球公开。 8. Alcatel-Lucent、OceanWorks 等提供技术支撑。
日本	1. 起步最早，从同轴电缆发展到光电缆。 2. 各个网络基本以监测地震和海啸为主要目的。 3. 观测网规划比较长远，组网技术成熟。 4. 采用恒流馈电模式，供电和通信能力相对弱，抗灾能力强。 5. 主要支持地震仪和压力计，扩展能力有限。 6. 由日本电气股份有限公司（NEC）做技术支撑。



海底光缆

中国南海深海海底观测实验系统于2012年开始建设, 2016年建成, 由浙江大学、中天科技、同济大学等共计12家单位参与。南海深海海底观测网试验系统以海南为岸基站, 通过150千米海底光电复合缆连接的多套海洋化学、地球物理和海底动力观测平台布放在水深1800米处。

中国东海海底观测网络以小衢山海底观测网和摘箬山海底观测网为代表。东海海底观测小衢山试验站是由汪品先院士率领的团队建立, 是中国第一个海底综合观测深网系统, 光电复合缆长达1.1千米, 并配备了浊度计、地震计、水下视频设备等仪器。2017年, 海底科学观测网立项建议书获发改委批复, 为国家重大科技基础设施项目, 建设周期为5年, 总投资逾21亿元, 同济大学牵头统筹协调, 同济大学和中科院声学所共同作为项目法人单位。主要建设内容包括: 东海海底观测子网、南海海底观测子网、监测与数据中心及配套工程。

海底观测新技术和新方向

智能海底电缆 (SMART Cable)。2012年国际电信联盟、世界气象组织和联合国教科文组织政府间海委会成立联合工作队, 以促进智能海底电缆发展。联合工作队已被批准为联合国海洋十年的一个项目, 正在与海洋观测框架合作开发智能电缆。

光纤分布式传感技术 (DAS)。该技术通过瑞利反向

散射干涉测量、双向传输光学干涉测量和绝对时间测量的组合等方法测量光纤中的应变, 从而可以探测长距离光缆沿线的声音振动。2021年, 最新的研究将承载电信流量的光信号的偏振状态变化与光纤上的局部应力相关联, 用于检测北美和南美西海岸的地震事件, 该方法不需要专门的设备、激光源或专用光纤, 就可将普通的海底光缆通信系统升级为监测地震和海啸的网络。

总结

1. 全球海底观测发展出日本和美国两种不同模式。日本侧重实践应用, 以地震预测预警和海啸预警为核心目标。“3·11”地震和海啸的重大教训之一就是海域测站不足导致预警震级低估。日本亡羊补牢, 当年就启动了S-net建设, 目前还在建设N-net, 海底地震观测网规模全球遥遥领先。美国、加拿大等国家侧重基础研究, 以综合观测为主。海底观测网往往是多学科一体的观测平台, 以全球视角研究洋中脊、地球动力学、气候洋流生物化学循环等科学问题。两种模式的技术路线已有较大差别。

2. 海底观测网技术已经比较成熟, 建设运维成本趋于可控。美国、日本已建设几十个海底观测网, 从小型近岸系统发展到有中继的大型广域系统, 供电、通信、接驳、操作机器人、OBS技术均已成熟, 并发展出融合观测和通信功能的智能海底电缆技术。我国也已基本掌握海底观测技术链。各国通过开放合作, 引入多方机构和项目的技术和经费投入, 合作研发共用技术装备等, 分摊投入压力。随着技术成熟和建设规模扩大, 目前看, 美、日等国海底观测网的建设运维成本已经趋于可控。

3. 进一步加强国际合作, 合作开展海洋地震观测。联合国大会将2021-2030年定为“海洋科学促进可持续发展十年”(简称“海洋十年”), 制定了实施计划, 目前计划进展迅速。我们应抓住时机, 推进海洋地震观测技术体系和能力构建, 重点开展OBS设计、封装和敷设研发, 在合适场地推进近岸小型海底地震观测系统建设等。