

感知海洋的脉动

——海洋动力环境卫星

□ 文图 / 林明森

海洋是构建人类命运共同体过程中的重要平台和枢纽，系统认识和了解海洋是人类生存和可持续发展的基础。始于 20 世纪 70 年代的卫星观测技术，为人们快速和大面积获取全球海洋环境信息提供了有效技术手段，之后的几十年间，依托航天强国战略，不断发展各类海洋观测卫星，为系统研究和认知海洋提供了大量宝贵的卫星遥感数据。我国有专门的海洋卫星计划，按海洋水色（HY-1）、海洋动力环境（HY-2）和海洋监视监测（HY-3）三个卫星系列发展，已初步建立起完整的海洋卫星观测体系。其中，海洋水色卫星主要用于获取与海洋生态环境相关的叶绿素浓度、悬浮泥沙等要素信息；海洋动力环境卫星主要用于获取与海洋防灾减灾、资源开发和海上安全等相关的海浪、风场、海流、海温和盐度相关的要素信息；海洋监视监测卫星主要用于全天候获取高精度海洋目标和海浪谱、内波等要素信息。三个系列海洋卫星获取的各类海洋环境信息共同为我国的海洋经济和生态文明建设提供着数据支撑服务。

作者简介 林明森，二级研究员，博士生导师。国家卫星海洋应用中心主任，HY-1/HY-2系列卫星地面应用系统副总设计师。中国海洋学会副理事长、秘书长，国际光学工程学会（SPIE）中国专家组成员，国际对地观测委员会（CEOS）海洋地形专家组成员，地球观测组织（GEO）专家组成员。长期从事海洋遥感与应用研究，发表论文150余篇，获国家科技进步奖二等奖1项，荣立一等功1次，省部级科技进步奖特等奖1项、一等奖8项、二等奖7项、三等奖1项、青年科技奖2项。



海洋动力环境卫星，顾名思义就是观测海洋动力现象和动力过程的卫星。海洋中的水体处于不停地运动之中，有千公里尺度的大洋环流，有百公里中尺度的涡旋，还有几十公里和几公里甚至更小尺度的海风、海浪和海流等海洋动力现象，系统掌握这些海洋动力过程规律，是有效认知海洋的前提条件。海洋动力环境卫星具备全球海洋大面积动力环境信息连续获取能力，是认识海洋和感知海洋的高新技术手段之一。我国发展的海洋动力环境系列卫星（HY-2）集多种传感器于一体，具有高精度、全天候、全天时、全球探测的能力。卫星通过配置雷达高度计、微波散射计和微波辐射计这些遥感载荷来实现“看浪”“测高”“听风”和“探温”这些功能，获取海风、海浪、海面高度、海面温度等多要素海洋动力环境信息，为我国海洋防灾减灾、海洋资源开发、海洋科学研究以及国防建设等领域提供数据服务。

“看浪”——海浪观测和应用

海浪是在风力直接作用下产生的波动现象，主要包括风浪和涌浪，一般波高为几厘米至20米，极端情况下可达30米以上。海浪对航海、造船、海岸工程和海上军事活动有较大影响，精确海浪观测对保障人类生命及财产安全意义重大。海浪观测数据也是开展海浪预报及预报技术研究、提高海浪预报精度的基本点和出发点。海浪是海面起伏形状的传播，由有效波高、周期和波长等要素组成。雷达高度计是获取有效波高信息最有效且精度最高的传感器之一。雷达高度计观测有效波高的基本原理是向海面垂直发射脉冲，通过接收返回脉冲信号进行信息获取。在返回的脉冲信号波形中，波形的斜率与有效波高具有相关性，即波形斜率小对应大波高，波形斜率大对应小波高，以此特性可快速确定波高的数值。当然，更精确的波高信息需要靠专用的波形跟踪算法反演得到。

利用卫星观测技术来获取有效波高信息始于1978年美国的海洋卫星，当时的波高精度仅有几十厘米，卫星以技术验证和应用试验为主。我国的HY-2A卫星雷达高度计于2011年实现全球有效波高的观测。2018年和2020年发射的HY-2B和HY-2C卫星实现了有效波高的高精度业务化观测，达到世界先进水平。

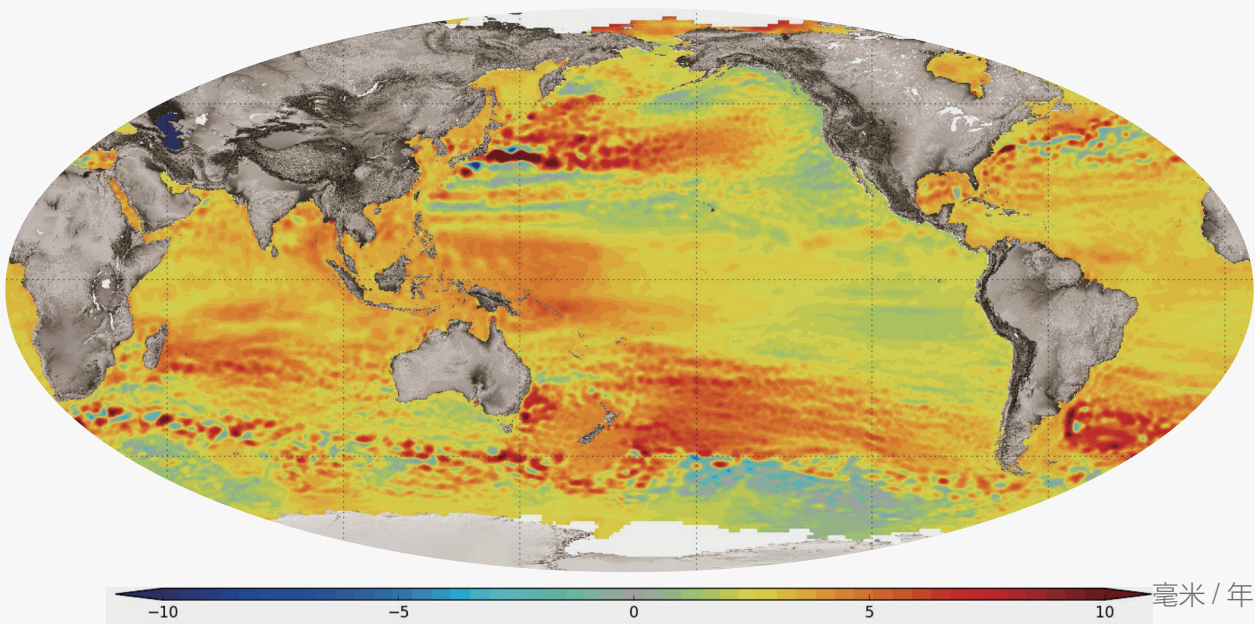
在海洋防灾减灾中尤其关注灾害性海浪的观测。灾害性海浪是指波高大于4米的海浪。其威力能够掀翻船只，破坏海上工程，给海上航行安全、海上工程作业、海上军事行动和渔业捕捞造成危害。利用HY-2卫星雷达高度计能够及时获取全球海洋波高大于4米海浪的数据，为数值预报模式中灾害性海浪的预警预报提供可靠的初始场信息，显著提升海浪的准确预报和预警能力，预报误差能减小10%左右，可有效避免恶劣海况带来的安全问题。

在海洋绿色能源开发中，波浪能作为可再生能源正成为各海洋国家着力开发的能源，利用卫星的大面积、高精度海浪观测对波浪能资源普查、开发条件评估和工程实施等环节提供信息保障，都是其他观测手段无法比拟的。

“测高”——海面高度观测和应用

雷达高度计获取的海面高度数据是研究海洋动力现象的重要信息源。海面高度是海面到参考椭球的距离（参考椭球是代表地球形状和大小的旋转椭球，是大地测量计算的基准面），量值一般在-110米至110米之间。雷达高度计观测海面高度的基本原理是根据发射和接收脉冲的时间间隔确定卫星到海面的距离，再结合卫星轨道信息和脉冲传播过程中的误差源修正信息，则可精确确定海面高度。

利用卫星雷达高度计获取海面高度信息的技术在1978年美国发射的海洋卫星上初次使用。当时受卫星定轨和卫星平台等技术限制，海面高度观测精度并不高。1992年，美国和法国联合研制的卫星雷达高度计在轨运行，实现了海面高度的高精度观测，之后便进入海面高度的业务化观测阶段。我国HY-2A卫星雷达高度计于2011年首次实现全球海面高度的观测，2018年和2020年发射的HY-2B和HY-2C卫星实现了海面高度高精度联合观测，精度优于5厘米。HY-2系列卫星海面高度数据的质量也得到了国外科研机构的充分认可，法国航天局科学家经过多次评估，认为HY-2系列卫星获取的海面

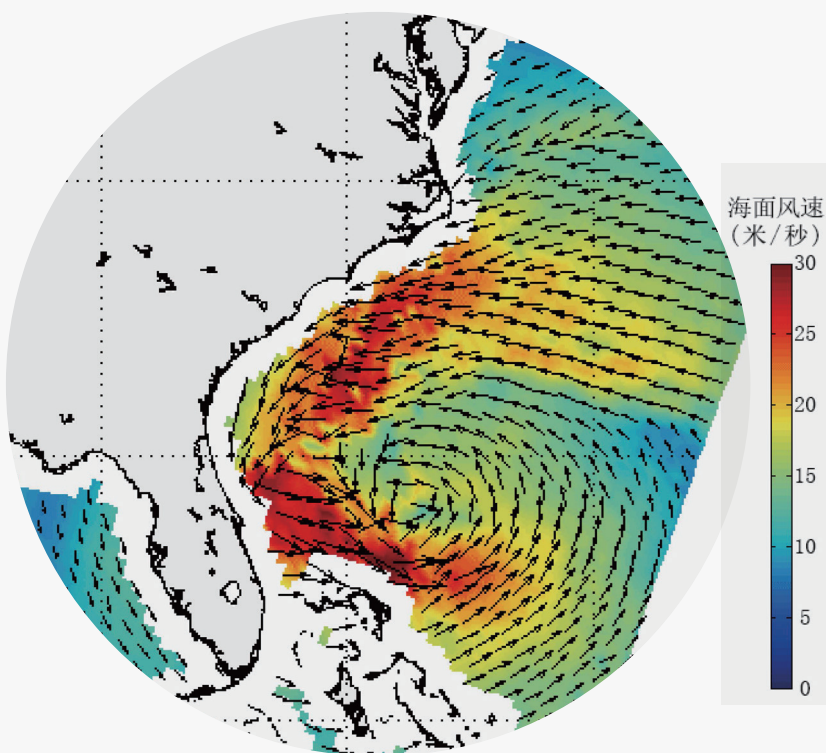


> 卫星观测的全球海平面变化示意图

高度数据精度高,具有与欧美国国家卫星同等的精度水平。自2011年10月开始, HY-2系列卫星数据便纳入到法国航天局所属的业务化数据处理系统中,为全球用户提供数据服务,有力提升了我国海洋卫星的国际地位。

海面高度信息主要用于监测全球海平面的变化。在全球变暖大背景下,全球海平面呈持续上升趋势,已成为当今国际社会普遍关注的全球热点问题,给人类社会生存和发展带来严峻挑战。传统方法是通过沿海布设验潮仪的长期观测数据来监测和预测海平面变化,随着卫星雷达高度计技术的发展,它在全球海平面变化监测中显示出更高的精确度与安全性。通过卫星获取的海面高度长时间序列观测数据,确定的全球海平面平均变化速率为3.3毫米/年,而在有的区域最高已超过10毫米/年。

随着我国城市化进程加快,沿海地区面临的海平面上升风险进一步加大。2019年“中国海平面公报”显示,1980—2019年中国沿海海平面上升速率为3.4毫米/年,已经高于全球海平面的变化速率。因此,加强我国近海海平面变化的监测也具有紧迫的现实需求。HY-2系列卫星自2011年至今,已形成海平面变化连续监测能力,实现了HY-2A, HY-2B和HY-2C卫星的接续观测,为我国近海和全球海平面的监测贡献了高质量观测数据,并有效服务于全球变化的研究中。



> 卫星观测的美国飓风“桑迪”示意图

“听风”——海面风场观测和应用

海面风场(风速和风向)是重要的海洋动力环境信息,它是引起海浪、大洋环流等海洋环境过程的主要驱动力之一。海风通过驱动海流,促进大气和海洋之间气体、热量、水分、能量和动力的交换,并通过这些过程影响区域和全球气候。长期、连续、稳定地获取海面风场资料能够显著提高海洋环境预报的精度,是有效应对台风、风暴潮等海洋灾害的必备信息。

海洋卫星上搭载的微波散射计是专门用于观测海面风场的遥感器,能够准确观测2米/秒~30米/秒的风速。微波散射计观测的基本原理是测量海面后向散射信息,再利用复杂的数学模型反演得到海面风场。国际上,卫星微波散射计观测始于20世纪70年代,其中最具有代表性的是美国的“海风”卫星散射计和欧洲气象卫星上搭载的散射计,这些卫星散射计为气象预报、气候预测和科学研究提供了大量高质量全球海面风场数据。我国2011年发射的HY-2A卫星上搭载的微波散射计与美国“海风”卫星散射计具备相同的观测方式,随后的HY-2B和HY-2C卫星也采用了相近的仪器设计和观测方式,实现双星组网业务化运行,观测精度达到国际同等技术水平。欧洲气象卫星组织向全球用户提供的数值预报产品被认为是质量最高的海洋大气数

据产品，其中模式运行所需的初始信息就有 HY-2 系列卫星海面风场数据的贡献。

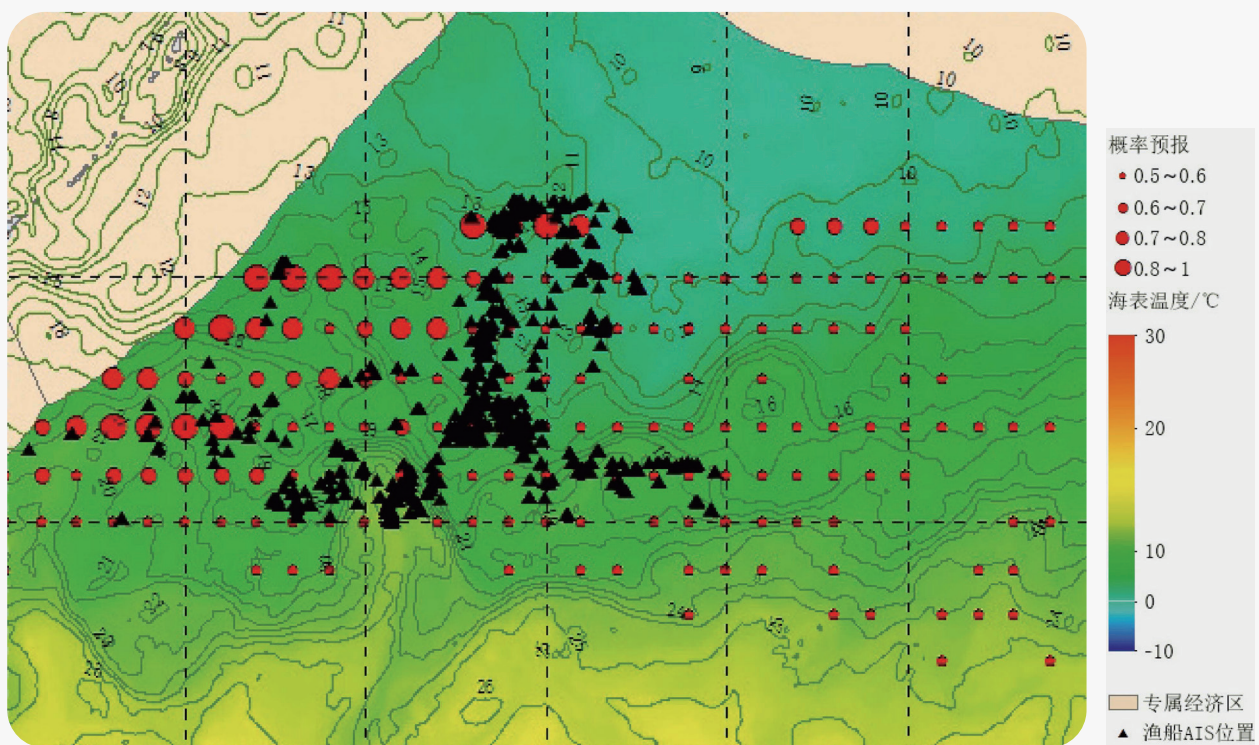
我国近海海洋灾害频发，尤以台风和风暴潮造成的人员和经济损失最为巨大。台风是发生在西北太平洋和我国南海的热带气旋，台风移向海岸时便会引起风暴潮，有时会冲毁沿岸城镇和设施。我国自 HY-2 系列卫星发射以来，近海平均每年 20 余次的台风均实现精准捕捉，无一漏网。微波散射计获取的海面风场数据为我国海洋环境数值预报模式提供着高时效初始信息，有效减少了台风预报的路径误差和强度误差。在境外的海洋灾害监测中，HY-2 卫星也具备观测优势。2012 年 10 月，肆虐美国的飓风“桑迪”造成 113 人死亡，经济损失巨大。HY-2A 卫星散射计成功观测到飓风“桑迪”登陆前的海面风场，登陆前最大风力超过 12 级。这也是当时全球唯一获取到飓风期间风场信息的卫星。2020 年 11 月，HY-2A 卫星微波散射计退役，但后继的 HY-2B 和 HY-2C 卫星已

经具备稳定观测能力，在我国近海防灾减灾和全球灾害监测中持续发挥着重要保障作用。

“探温”——海面温度观测和应用

海面温度是重要的海洋水文要素，它是表征海水冷暖程度的物理量。利用卫星观测的海表面温度信息有助于了解区域和全球气候变化；可用于大洋渔业中提高渔获量和节省燃油；还可为海洋温盐流数值预报模式提供初始信息，提高预报精度。

微波辐射计是具备海面温度探测能力的遥感载荷。最早的星载微波辐射计技术始于美国，最具代表性的微波辐射计是美国的卫星微波成像仪和日本的微波扫描辐射计。这些微波辐射计都属于被动微波遥感器，观测基本原理是通过测量海面辐射强度，经过一系列数据处理后得到海面温度信息。我国的海洋卫星中 HY-2A 和 HY-2B 卫星上搭载了微波辐射计，技术指标与美国和日本十分接近，获取的海面温度信息也接近国外卫星

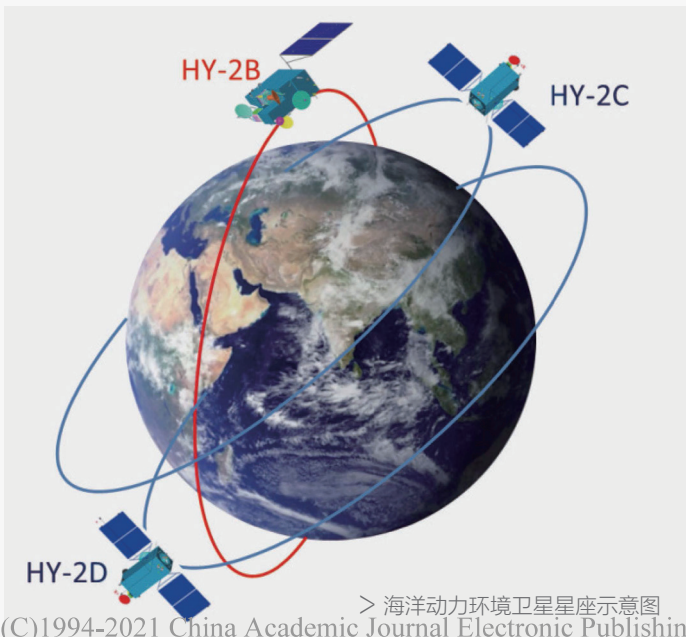


> 西北太平洋柔鱼渔情预报图



的精度。

在大洋渔业应用中,利用 HY-2 系列卫星观测的海面温度结合渔场环境特征,能够分析和预测渔场分布和变化情况。通常制作出某海域海面温度等温线图,通过等温线可以识别海域内海水温度的分布情况。利用等温线的走向、疏密程度等信息,也可以反演海洋温度梯度,进而分析海洋锋面、涡旋位置等信息。温度梯度越大反映该海域的温度变化越剧烈,会形成天然的“温度屏障”,鱼群往往在屏障前停留,形成渔场。在实际大洋渔业生产中,通常采用栖息地指数模型来预报渔场的可能区域,预报结果在 01 之间,预报结果越大,表明该区域存在渔场的可能性就越大。为便于渔民对渔情信息进行判断,科研人员基于卫星和现场观测数据制作出渔场环境和渔情预报图,渔民利用这些信息将缩小找鱼范围,节省寻鱼时间和燃料费用。目前,以 HY-2 卫星资料为主的全球三大洋海域业务化渔情分析与预报系统已稳定运行,通过远洋渔业协会向渔业企业发布渔情预报信息,为我国远洋渔业科学生产提供可靠渔情信息服务。据统计, HY-2 卫星数据及可视化系统在鱿鱼船上进行推广应用后燃油可节约 5%,渔获量提高 2%~3%,取得了很好的经济效益。



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

“三星合璧” ——海洋动力环境卫星后续发展

海洋卫星以其大面积快速获取全球海洋环境信息的能力,在海洋环境信息的服务保障中发挥出不可或缺的作用。为满足海洋防灾减灾、海上航行安全保障、资源开发和全球变化研究等需求,卫星还需提升获取信息的时空分辨率,而采用多星组网是提高时效性最可行和最有效的方法。为此,我国自 2011 年开始论证多星组网观测技术,从卫星平台设计、有效载荷配置、载荷指标设置、地面数据处理技术和数据应用等方面开展综合论证,最终确定了我国海洋动力环境卫星组网建设的方案。方案采用三颗 HY-2 系列卫星组成星座:搭载雷达高度计实现海面高度、有效波高,以及海流和中尺度涡流等信息的获取,并同步配置校正辐射计为雷达高度计提供大气湿对流层路径延迟校正信息;搭载微波散射计实现全球海面风场的观测;搭载微波辐射计实现全球海面温度和大气水汽含量等大气环境信息的观测。通过这些载荷的联合观测来获取多种海洋动力环境信息。

我国的海洋动力环境卫星星座建设分为两期,第一期由 HY-2B、HY-2C 和 HY-2D 三星组成,现已实现 HY-2B 和 HY-2C 双星在轨运行, HY-2A 卫星在 2020 年 11 月达到设计寿命,不再业务化运行。预计 2021 年 5 月完成 HY-2D 卫星的发射后,海洋动力环境卫星星座第一期建设将圆满完成,并将具备如下 3 项观测优势:

卫星观测能力和观测时效大幅提高。集成现有海洋卫星观测效能,成为集主、被动微波遥感器于一体,高精度测轨、定轨能力与全天候、全天时、全球海洋高效探测能力的海洋动力环境综合观测系统,具备同步获取海面风场、浪高、海面高度、海面温度等多种高时效海洋动力环境参数信息的能力,目前国外在轨的卫星都不能同步获取这些海洋动力环境参数。海面风场数据获取时效由单星的 24 小时提高到 6 小时,覆盖全球 90% 以上的海域。



> 天线展开试验

大洋和极地观测兼顾。作为全球首个专用于海洋动力环境信息获取的星座，既聚焦大洋观测，又兼顾极地观测。采用太阳同步轨道具备极区海洋环境观测能力，采用非太阳同步轨道可有效分离各潮汐分量，解决潮汐混频问题。采用顺行加逆行轨道，有利于在轨交叉定标和真实性检验，摆脱长期依赖外星定标和检验的局面，成为完全自主可控的卫星星座。

卫星数据产品种类更加丰富。通过卫星组网获取的高时空分辨率信息，使区域高分辨海洋动力环境数据产品的制作具备条件，可增加更高空间分辨率和时效性的专题信息产品，使卫星数据在我国近海的应用效能得到更大发挥。

人论证阶段，将重点加强星地一体化的设计，继续提升卫星观测的时空分辨率，持续为我国海洋防灾减灾、预警预报提供高频次实测数据，为海洋资源开发、海洋科研、国防建设等提供更加有力的数据支撑服务。

当前，人类进入全面认识、开发和利用海洋的时代，人类与海洋的和谐相处离不开对海洋的系统了解和认知。海洋卫星作为高效获取全球海洋信息的国之重器，必将在海洋强国建设中发挥出重要作用。☐

作者单位 / 国家卫星海洋应用中心

目前，海洋动力环境卫星星座第二期建设已进

(本文编辑：王依卓)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>