

蒋兴伟, 何贤强, 林明森, 等. 中国海洋卫星遥感应用进展[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 113–124. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.10.007
Jiang Xingwei, He Xianqiang, Lin Mingsen, et al. Progresses on ocean satellite remote sensing application in China[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(10): 113–124. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.10.007

中国海洋卫星遥感应用进展

蒋兴伟^{1,2}, 何贤强^{3,4}, 林明森^{1,2}, 龚芳^{3,4}, 叶小敏^{1,2}, 潘德炉^{3,4}

(1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 自然资源部空间海洋遥感与应用研究重点实验室, 北京 100081; 3. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 4. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 我国海洋遥感应用自 20 世纪 70 年代起步以来, 取得了长足发展, 构建了覆盖海洋水色、海洋动力和海洋监视监测的三大系列海洋卫星, 并初步形成了具有优势互补的卫星海洋遥感业务化应用体系。本文回顾了我国海洋卫星遥感应用取得的重要进展, 重点介绍了卫星遥感在海洋环境与资源监测、海洋灾害监测、海洋权益维护、海洋环境预报与安全保障等方面所构建的典型应用示范系统, 以及开展的典型业务化监测应用。最后, 文章对我国海洋卫星遥感应用下一步发展进行了展望分析。

关键词: 海洋卫星; 遥感应用; 业务化监测; 应用示范系统

中图分类号: P715.6; V474.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)10-0113-12

1 引言

海洋卫星遥感具有全天时、全天候、大范围、长时序观测的独特优势, 广泛应用于海洋生态与资源监测调查、海洋灾害监测、海洋权益维护、海洋环境预报与安全保障等领域。新中国成立 70 年来, 我国十分重视海洋卫星遥感应用技术的发展, 构建并发射了海洋水色、海洋动力环境和监视监测系列海洋卫星, 初步形成了具有优势互补的卫星海洋遥感业务化应用体系, 基本实现了海洋卫星遥感的业务化应用, 取得了显著的经济和社会效益。

我国海洋遥感应用先后经历了 20 世纪 70 年代的起步和探索阶段, 80 年代的试验和初步应用阶段, 以及 90 年代以来的业务化应用阶段。1973 年我国开始接收美国 NOAA 气象卫星资料^[1], 70 年代末至 80 年代期间, 我国利用气象卫星和陆地卫星数据开展了海洋气象分析、海冰、海水污染、海表温度、中尺度涡旋、大尺度海洋动力学和河口近岸悬浮泥沙

观测等应用研究^[2-10], 并在渤海湾、杭州湾等海域使用航空遥感开展了溢油^[11]、地物分类^[12]、滩涂资源^[13]和海表温度^[14]等遥感应用研究。20 世纪 80 年代末至 90 年代初, 陈干城^[15]、黄润红和王其茂^[16]开展了卫星遥感数据的渔场速报应用研究; 黄润恒等^[17]开展了渤海海冰卫星遥感监测业务系统研制; 郑全安等^[18-19]利用 Landsat 卫星对胶州湾进行海湾面积、岸线和动力参数的监测应用。1997 年 9 月, 自然资源部第二海洋研究所(原国家海洋局第二海洋研究所)卫星地面站实现了美国 SeaWiFS 海洋水色卫星资料的实时接收、处理和分发, 为我国海洋遥感业务化应用提供了准实时、高质量的水色卫星资料^[20]。此外, 刘建强等^[21]利用加拿大 RADARSAT-1 卫星资料开展了渤海海冰监测应用研究; 林明森等^[22]开展了利用全球导航卫星反射信号(GNSS-R)开展海面风场信息提取的应用研究; 蒋兴伟等^[23-24]利用意大利 COSMO-SkyMed 卫星合成孔径雷达(SAR)图像开展浒苔信息快速提取应用研究, 并依托国家卫星海洋应用中心构

收稿日期: 2019-07-29; 修订日期: 2019-08-26。

基金项目: 国家自然科学基金——面向 2035 的天基海洋观测的前沿科技工程发展战略研究(L1824032); 国家重点研发计划(2016YFC1401000)。

作者简介: 蒋兴伟(1959—), 男, 山东省莒南县人, 博士, 研究员, 中国工程院院士, 主要从事海洋卫星工程技术及应用研究。E-mail: xwjiang@mail.nsoas.org.cn

建了浒苔(绿潮)灾害卫星遥感应急监视监测系统;邹亚荣等^[25]开展了海上溢油监测应用研究,目前国家卫星海洋中心、自然资源部北海局(原国家海洋局北海分局)等相关单位均已实现海上溢油的业务化监测应用。另外,SAR 高分辨率遥感图像已被广泛应用于海浪、海流、海冰、风场、海水污染及海岸变迁等监测^[26-29]。

我国从 20 世纪 80 年代开始进行自主海洋卫星的论证工作,构建了海洋水色环境卫星(海洋一号, HY-1)、海洋动力环境卫星(海洋二号, HY-2)、海洋监视监测卫星(海洋三号, HY-3)3 个系列卫星的发展规划。2002 年至 2011 年间,我国分别发射了 HY-1A、HY-1B 和 HY-2A 3 颗试验卫星,并建成了相应的海洋卫星地面应用系统,分别开展了 HY-1 和 HY-2 卫星的海温监测、近海水质监测、海岸带动态监测、大洋渔场业务化应用、海平面上升辅助决策、海洋风暴潮监测、海冰监测预报、海洋重力场应用、海-气相互作用应用等领域的示范应用^[30-43]。2016 年 8 月我国发射了搭载 C 波段 SAR 的 GF-3 卫星,其高分辨率 SAR 数据已广泛应用于海上目标、内波、绿潮、溢油、洪灾、台风灾害等海洋应用领域^[44-46]。此外,我国于 2002 年 3 月和 12 月发射的“神州三号”“神舟四号”飞船上分别搭载了中分辨率水色成像光谱仪 CMODIS^[47] 和多模态微波遥感器^[48-49]。2016 年发射的“天宫二号”空间站上搭载了中分辨率宽波段水色成像仪和三维成像微波高度计,对新型海洋卫星遥感载荷进行研制和试验。2018 年 9 月和 10 月分别发射了我国第一批业务化海洋卫星 HY-1C 和 HY-2B,研制了业务化运行的地面应用系统。2018 年 10 月发射了国际合作科研试验卫星——中法海洋卫星(CFOSAT),搭载了微波散射计和波谱仪两个微波遥感载荷。后续,我国还将发射 HY-1D 及 HY-2C 卫星,与 HY-1C、HY-2B 形成星座进行业务化海洋观测。根据《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015-2025 年)》,我国还将继续发射新一代海洋水色卫星、新一代海洋动力环境卫星、盐度卫星、1 m 分辨率 C-SAR 卫星、高时间分辨率静止轨道海洋卫星等,使 3 个系列卫星达到业务化、长寿命、不间断稳定运行,提高海洋环境预报和海洋灾害预警的准确性和时效性,为海洋环境与资源监测、海洋权益维护、防灾减灾、国民经济建设和国防建设提供服务^[50]。

我国在自主海洋卫星工程建设和近 40 年卫星海洋遥感应用研究成果的基础上,在海洋环境与资源、海洋灾害、海洋权益、海洋预报与安全保障等方面开展了典型遥感应用示范系统构建和业务化遥感监测

应用,取得了丰硕成果。

2 海洋环境与资源遥感监测应用

在海洋水色水温环境遥感监测应用方面,我国在“十二五”期间自主研制出了海洋水色水温卫星遥感应用系统,实时接收我国 HY-1 系列卫星、FY-1 系列卫星及国外 NOAA 系列卫星、EOS/MODIS 系列卫星的水色水温遥感资料,自动进行卫星数据预处理、几何校正、地理定位、大气校正,以及海洋、大气、陆地环境信息的提取,生成 16 种海洋环境信息遥感专题产品。该系统已在国内 10 余家单位安装和业务化运行应用。同时,在海洋公益性行业科研专项等的支持下,针对我国沿海水质环境恶化、灾害(富营养化、赤潮和污染等)频发、水体服务功能下降和持续利用能力降低,而常规现场监测方法又无法满足大面积沿海水质环境实时动态监测、评价和服务决策需求的现状,以我国海洋水色卫星 HY-1B 资料为主,综合多种海洋水色水温卫星资料和 GIS 技术,构建了一套业务化运行的“长三角”沿海水质遥感实时监测和速报系统,实时向相关省市政府和海洋生产部门提供沿海水质状况(图 1)及信息应用服务^[51]。

针对近海复杂水体海-气二氧化碳通量遥感估算问题,通过海洋遥感、海洋化学、海洋模式、海洋地理信息系统等多学科交叉,建成了一套集现场观测、遥感监测和信息服务为一体的中国近海海-气二氧化碳通量遥感监测评估系统(www.satco2.com),为我国发展长时间稳定运行的海洋碳立体监测系统提供了

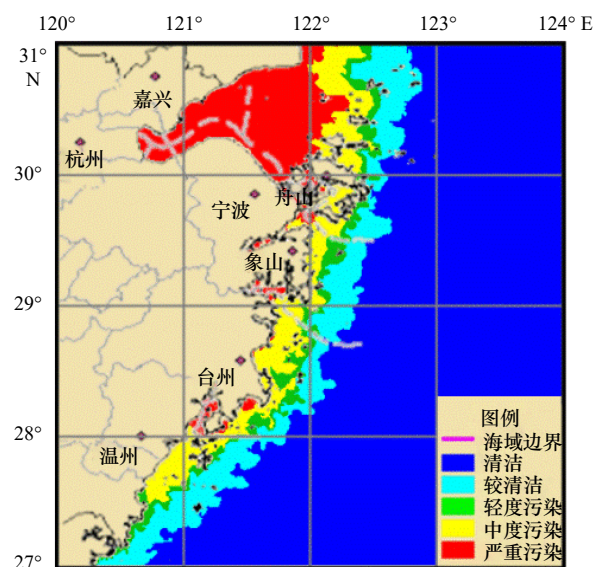


图 1 2009 年 7 月浙江海域水质遥感分类

Fig. 1 Water quality classification by remote sensing in Zhejiang coastal water in July, 2009

科学和技术支撑。该系统根据不同用户等级,分为专业版和公众版两种。专业版系统服务于业务中心的碳通量监测和评估工作,实现了走航、浮标、岸基站等现场观测数据和遥感监测数据的一体化管理和可视化分析,以及现场和遥感数据的自动匹配、相互评估、产品精度评价、长时序变化分析、碳通量评估及专题图制作等业务化功能。公众版系统通过互联网发布基础的海洋环境遥感信息,可便捷地进行查询、浏览和统计分析。根据业务化服务链条和不同用户需求,该系统已部署到自然资源部东海局(原国家海洋局东海分局)东海环境监测中心、国家海洋环境监测中心等进行了应用示范。

HY-2系列卫星上的微波散射计、微波辐射计和雷达高度计,以及CFOSAT卫星微波散射计和波谱仪等载荷,每天对全球海洋进行观测并提供业务化产品(图2),其中HY-2系列卫星单星单天可覆盖全球90%以上的海洋。HY-2系列卫星提供的海面风场、有效波高等遥感专题产品已应用于海洋风能、波浪能等自然资源调查。

以自主HY-1系列、HY-2系列海洋卫星资料为主要数据源,结合国外海洋卫星,我国自主研发了“卫星遥感大洋渔场环境信息的数据共享及快速分发平台”。渔场环境海洋卫星监测与分析结果分布图示例见图3。结合海洋渔业渔情预报系统,实现了对太平

洋金枪鱼、北太平洋柔鱼、东南太平洋茎柔鱼、西南大西洋鱿鱼、中大西洋金枪鱼等七大海域、3种捕捞对象的每周1次的渔情分析与预报。该系统实现了业务化运行应用,可向渔业企业提供渔情预报、海况分析等大洋渔场渔情速报服务,为我国远洋渔船的生产起到了重要的指导作用,取得了显著的经济效益。

GF-3卫星SAR高分辨率数据则广泛用于监测我国管辖海域海岛新生沙洲、海岸变迁、海岸带典型地物分类,以及海域使用类型、位置分布、用海面积监视等,为全面、及时掌握海岸带与海域使用现状提供重要的客观依据。图4展示了GF-3卫星SAR图像的黄河口湿地分类结果。

3 海洋灾害监测

我国近海海域是赤潮高发区域,尤其是在浙闽沿岸。近年来,综合利用我国HY-1系列卫星及国外EOS/MODIS、SNPP/VIIRS和GOCI等多颗海洋水色卫星资料,构建了赤潮卫星监测业务化系统,实现了我国近海复杂水体条件下的赤潮自动化卫星遥感识别^[52]。该系统监测结果准确度高、产品制作时效性强,可满足业务化监测需求,已在东海开展了多年的赤潮遥感卫星监测(图5),相关结果以多种形式报送给国家遥感中心、自然资源部东海局东海监测中心、温州海洋监测中心站等有关单位及沿海相关省市,为

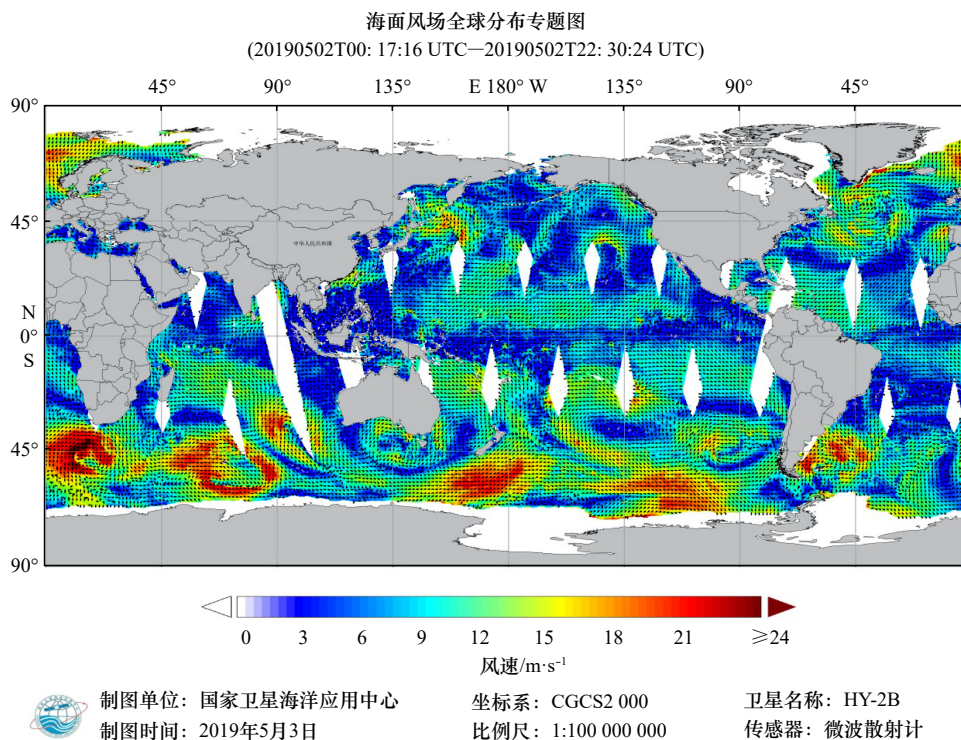


图2 HY-2B卫星微波散射计全球海面风场遥感产品(2019年5月2日)

Fig. 2 Global sea surface wind field product by HY-2B microwave scatterometer on May 2, 2019

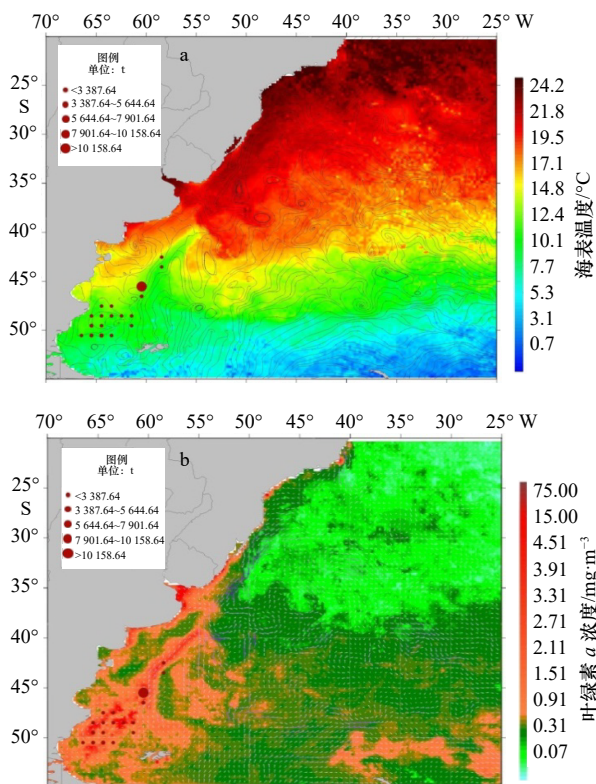


图3 西南大西洋鱿鱼渔场环境卫星监测与分析图
(2011年1月21日)

Fig. 3 Squid fishing ground environment monitoring by ocean satellites in the Southwest Atlantic on January 21, 2011

a. 海表温度、海流流线与渔场位置关系; b. 叶绿素 a 浓度、海流与渔场位置关系

a. Relationship between sea surface temperature, current streamline and fishing ground location; b. relationship between chlorophyll a concentration, ocean current and fishing ground location

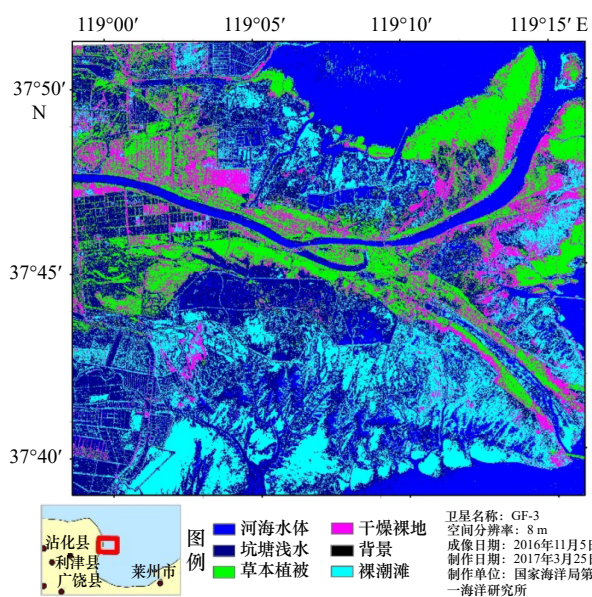


图4 GF-3 卫星 SAR 图像的黄河口湿地分类

Fig. 4 Classification of wetland in the Yellow River Estuary by GF-3 satellite SAR image

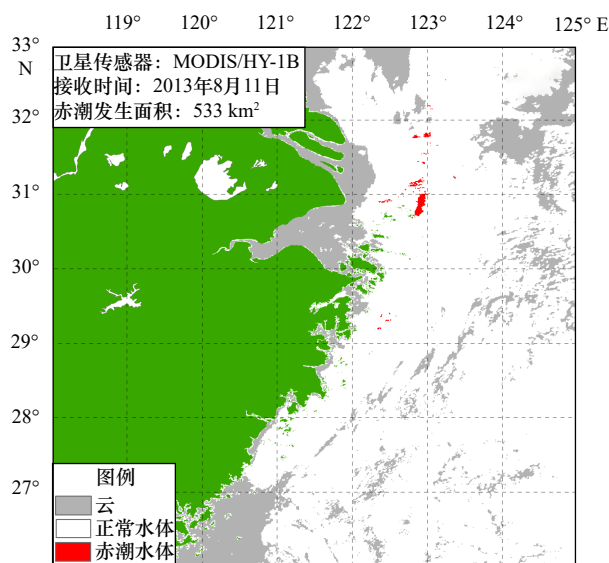


图5 东海赤潮卫星遥感监测结果(2013年8月11日)

Fig. 5 Red tide monitoring by satellite remote sensing in the East China Sea on August 11, 2013

赤潮灾害的监测和防灾减灾提供了信息服务。

我国海洋微波遥感广泛应用于海上溢油、海冰、热带风暴(台风)、绿潮等监测。海上溢油灾害监测主要是利用欧空局 ENVISAT 卫星、加拿大 RADARSAT-1/2 卫星、意大利 COSMO-SkyMed 卫星以及中国 GF-3 卫星等 SAR 数据,结合海上溢油漂移路径预报系统及溢油辅助信息数据库,对渤海、东海和南海重点海区进行了全天候近实时监测,向海洋环境监测等相关单位提供及时可靠的溢油卫星遥感监测结果^[53]。图6为2018年1月28日“桑吉”油轮东海海上溢油的GF-3卫星SAR监测结果。

当我国渤海、黄海海域进入结冰期,海冰灾害对渤海和黄海北部区域会造成严重的影响。利用雷达卫星影像资料,并结合光学卫星数据,我国对渤海和黄海北部海冰冰情进行业务化遥感监测,制作海冰冰情实时监测通报,通过传真、电子邮件和网站的方式向自然资源部主管部门、国家海洋环境预报中心、自然资源部北海局和环渤海三省一市等部门和单位实时发布^[54]。图7所示为我国渤海冬季海冰SAR业务化遥感监测结果示例。

针对2008年北京奥运会青岛帆船比赛场地暴发大规模绿潮灾害的问题,国家卫星海洋应用中心牵头构建了浒苔(绿潮)灾害卫星遥感应急监视监测系统,综合利用光学及微波遥感卫星对黄海、东海进行了为期3个月的监视监测,发布绿潮遥感监测信息,为奥运会帆船比赛海域浒苔自然灾害前线指挥部应急响应、决策指挥提供了有力、有序、有效的技术支持^[24]。

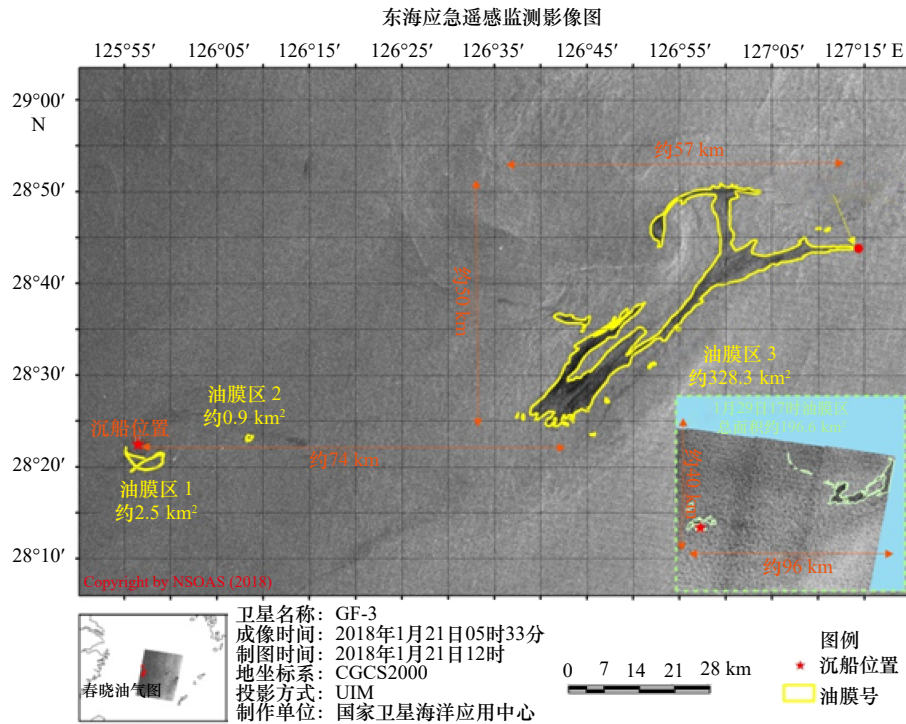


图6 GF-3卫星“桑吉”油轮东海海上溢油监测(2018年1月28日)

Fig. 6 Oil spill monitoring of SANCHI oil tanker by GF-3 satellite in the East China Sea on January 28, 2018

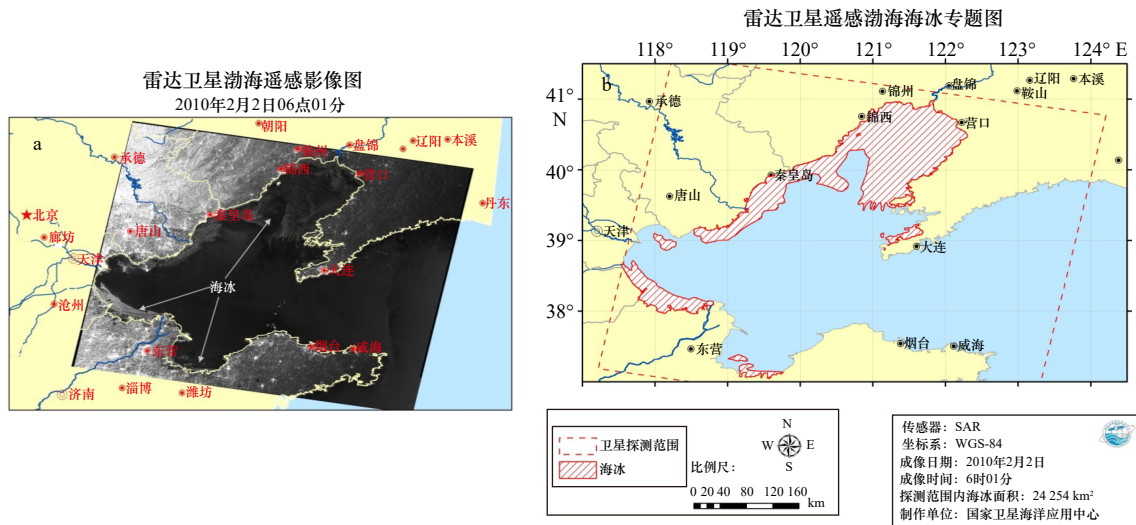


图7 渤海冬季海冰 SAR 遥感监测结果

Fig. 7 SAR remote sensing monitoring of sea ice in the Bohai Sea in winter

a. SAR 图像; b. 海冰识别结果

a. SAR image; b. sea ice detection results

在此基础上,利用 GF-3、RADARSAT-1/2、EN-VISAT 等卫星微波遥感数据,结合我国 HY-1 卫星、北京一号卫星等光学遥感数据及其他相关资料,实现了我国近海绿潮灾害的业务化监测。监测通报向自然资源部有关单位及沿海相关省市发布,为绿潮灾害的监测和防灾减灾提供信息服务。图 8 所示为绿潮 SAR 遥感监测结果示例。

针对我国沿海台风灾害频发且对沿海人民生命财产与经济发展造成严重影响的问题,我国充分利用卫星遥感的大面积、全天时、全天候的观测优势,对台风灾害进行了业务化监测。我国 HY-2 系列卫星及 CFOSAT 卫星上搭载的微波散射计能够获取全球海面风场,可监测台风的移动路径,并识别台风中心^[55-56]。我国 HY-2 系列卫星海面风场、有效波高和

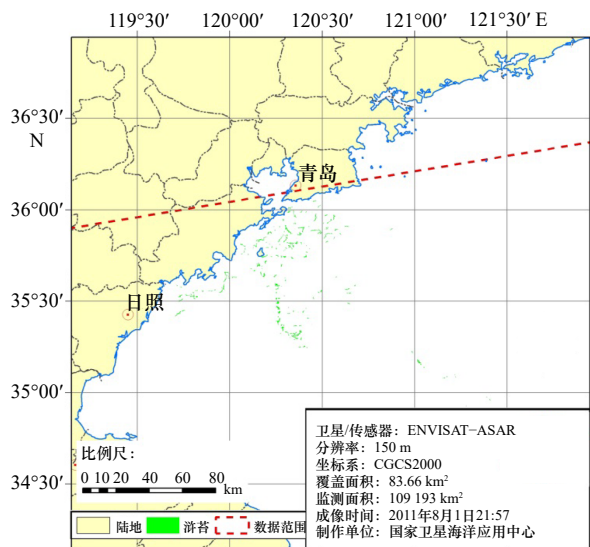


图 8 绿潮 SAR 遥感监测结果(2011 年 8 月 1 日)

Fig. 8 SAR remote sensing monitoring of green tide on August 1, 2011

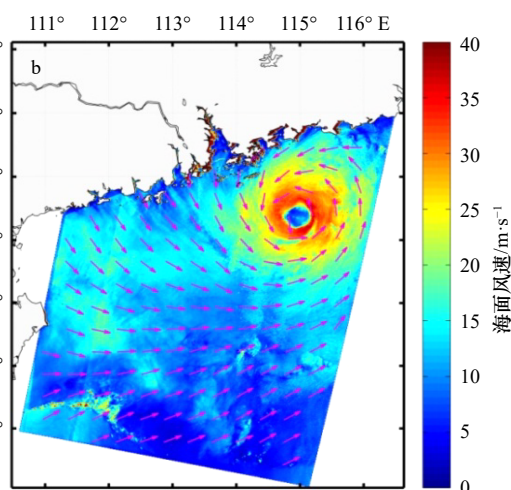
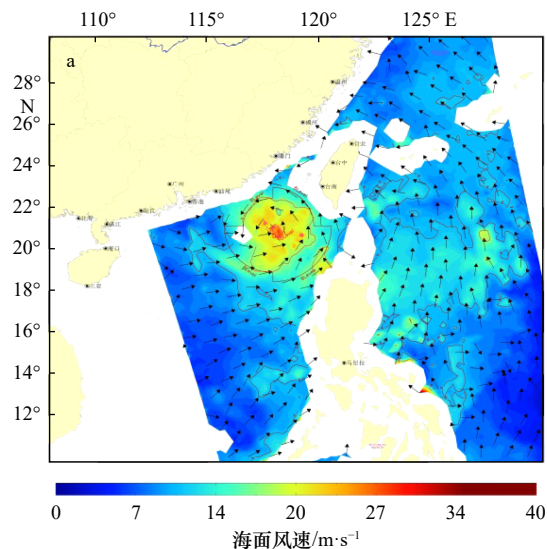
海面高度等资料数据,也已进入我国风暴潮、海啸预警等海洋灾害监测的业务应用系统,并发挥了重要作用。此外,基于 GF-3 卫星 SAR 的高分辨率优势,对台风的高分辨率海面风场结构进行了卫星监测^[46, 57]。目前,我国利用海洋卫星已实现了对进入我国海域台风的业务化监测,并及时发布台风海面风场产品。图 9 所示为基于 HY-2 卫星微波散射计和 GF-3 卫星 SAR 的台风海面风场监测结果示例。

除国家卫星海洋卫星应用中心、自然资源部第二海洋研究所等单位建有卫星海洋灾害监测业务化应用系统外,我国沿海省市也建有各自海区的海洋灾害和海洋环境立体监测应用系统,用于海洋灾害的监测防治^[58-59]。

4 海洋权益维护

利用 SAR 高分辨率观测的特点,我国已实现了利用 GF-3 卫星 SAR 数据对海岛、海上油气平台、舰船的分布情况进行监视监测,获取非法建设、油气平台,以及非法海洋捕捞船只的分布,为海上维权执法、维护海洋权益提供监视基础数据的能力。图 10 所示为 GF-3 卫星 SAR 获得的南海油气平台监测专题产品。

此外,我国业务化海洋卫星 HY-1C 和 HY-2B 上新增了船舶自动识别系统(AIS)设备,具备全球 AIS 信号侦听能力。利用 AIS 结合 GF-3 卫星 SAR 的观测,目前已初步实现基于自主海洋卫星 AIS 和 SAR 数据联合应用的船舶监测,可一定程度上消除 SAR 海上目标检测结果中的不确定性,为执法监察提供更有针对性的辅助决策信息支持。



数据源: GF-3/SAR 观测时间: 2017年8月23日 06:24 (北京时间) 制作单位: 国家卫星海洋应用中心

图 9 HY-2A 卫星微波散射计(a)和 GF-3 卫星 SAR(b)对台风“天鸽”的海面风场业务化监测结果 (2017 年 8 月 23 日)

Fig. 9 Operational sea surface wind field monitoring of typhoon Hato by HY-2A microwave scatterometer (a) and GF-3 SAR (b) on August 23, 2017

5 海洋环境预报与安全保障

HY-1 系列卫星水色水温仪(COCTS)和 HY-2 系列卫星的微波辐射计均可提供全球的海表温度产品, HY-2 系列卫星微波散射计和雷达高度计提供的海面风场和有效波高数据,均作为重要的基础观测数据,已应用于我国海洋环境预报。其中 HY-2A 卫星扫描辐射计获取的西北太平洋海面温度数据自 2011 年 11 月 26 日已正式纳入国家海洋环境预报中心对外发布的海洋环境信息海洋环境预报系统中,并通过 CCTV13 频道每周对外发布(图 11),服务于社会公众

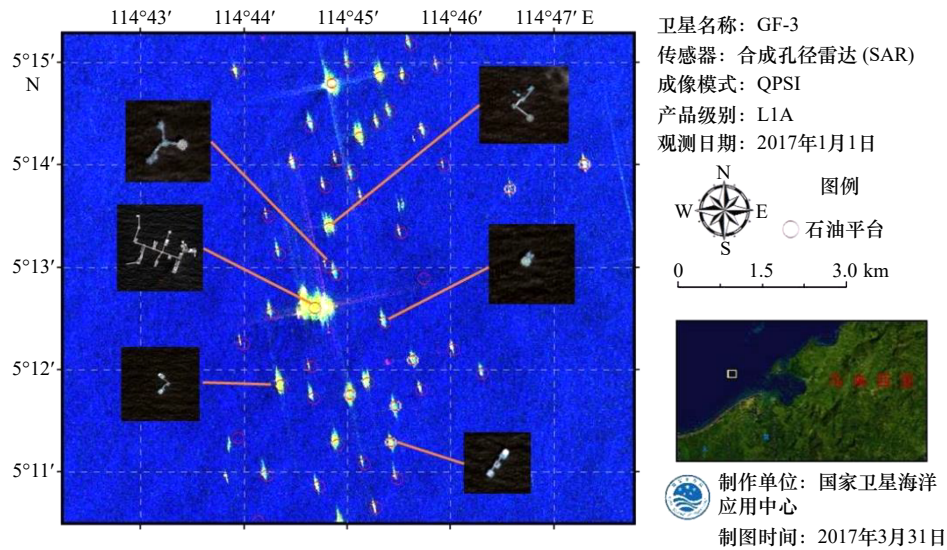


图 10 GF-3 卫星 SAR 监测获得的南海典型区域油气平台

Fig. 10 Offshore oil and gas platform detection results in a specific region in the South China Sea by GF-3 satellite SAR image

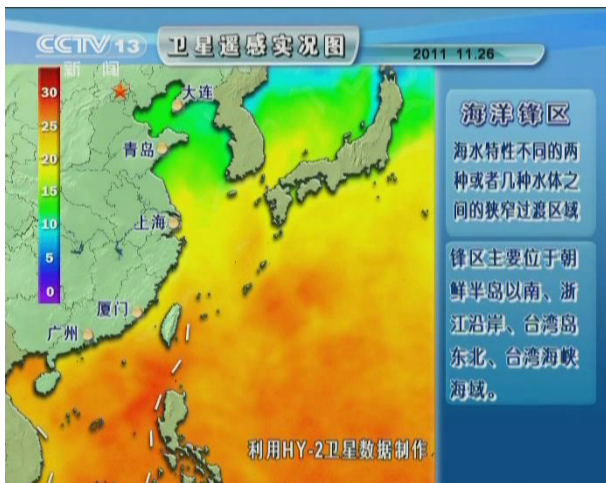


图 11 HY-2A 卫星扫描微波辐射计海表温度电视产品

Fig. 11 TV product of sea surface temperature by HY-2A satellite scanning microwave radiometer

和相关海洋产业部门。

此外, HY-2 系列卫星上搭载的微波散射计和微波辐射计为全球观测, 在极地航行保障、极地海冰变化等方面具有极大观测覆盖优势。GF-3 卫星 SAR 数据对极地科考船和航运舰船的航线冰情监测及其态势分析, 具有全天时、全天候和高分辨率的优势。联合陆基海洋卫星地面站及“雪龙”号船载移动海洋卫星接收处理与应用系统, 我国海洋卫星多微波遥感载荷的对地观测, 已基本实现了极地航行海洋环境的遥感应用保障, 可提供极地海洋海面风场、有效波高、海表温度、海冰边缘分布及其密集度等业务化海洋卫星遥感基础观测和应用产品^[60]。图 12 所示为两极海区的 HY-2B 卫星海面风场业务化监测产品。

除海洋环境与资源监测、海洋灾害监测、海洋权益维护、海洋环境预报与安全保障等业务化应用外, 我国卫星海洋遥感数据还广泛应用于海平面上升、全球气候变化、海-气相互作用、大气环境、海洋动力过程和现象(内波和锋面)等领域, 业务化应用能力稳步提高, 应用领域等得到逐步拓展。

6 展望

在充分继承已有 HY-1A/B/C、HY-2A/B、GF-3 和 CFOSAT 卫星工程建设经验和应用成果的基础上, 我国还将发展多种光学和微波遥感技术, 建设新一代海洋水色卫星和海洋动力环境卫星, 发展海洋监视监测卫星, 进一步提高观测时空分辨率、观测精度和应用能力。

根据我国海洋卫星发展规划, 近期将再发射 HY-1D 和 HY-2C 卫星, 与目前在轨的 HY-1C 和 HY-2B 一起构成我国自主的全球海洋卫星观测网。在“十四五”期间, 我国还将继续研制和发射新一代海洋水色卫星、新一代海洋动力环境卫星、盐度卫星、1 m 分辨率 C-SAR 卫星、高时间分辨率静止轨道海洋卫星等。我国的新一代海洋水色卫星将进一步优化波段设置、增加可编程高光谱传感器, 提高水体观测光谱分辨率和信噪比、丰富观测要素, 以及提高海岛海岸带观测的时空分辨率。同时, 将发展小时级高时间分辨率的静止卫星海洋水色观测技术, 以及具有探测海洋次表层信息的激光雷达遥感技术。在海洋动力环境要素观测方面, 将增加海面高度和海浪谱的宽刈幅观测, 同时发展全极化微波散射计和海洋盐度计, 构

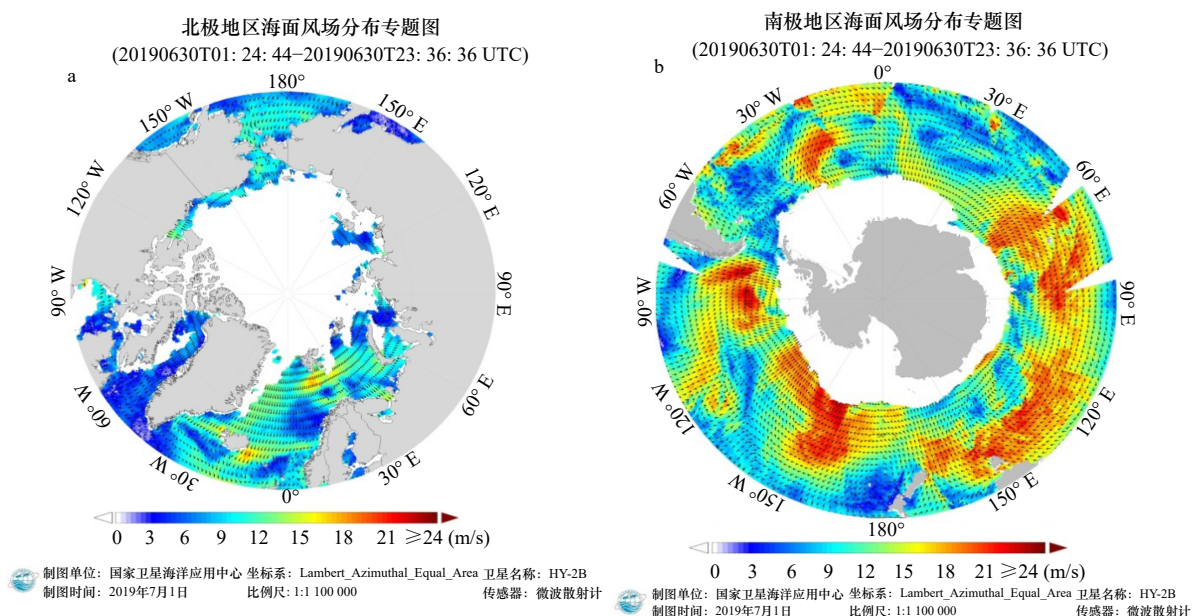


Fig. 12 Sea surface wind distribution of polar ocean by HY-2B satellite on January 30, 2019

成对海洋温、盐、流、浪、海面风等动力环境多要素的精细观测。在海洋监视监测方面,除发射高分辨率 SAR 业务化极轨卫星外,还将发展静止卫星 SAR 观测技术。未来,我国将构建更加完善、成熟的优势互补的海洋卫星综合观测体系,充实全球海洋立体观测网。

以我国海洋卫星观测体系为基础,我国海洋卫星应用将以天地协调、布局合理、功能完善、产品丰富、信息共享、服务高效为目标,监测范围覆盖全球海洋,满足我国在海洋资源调查与开发、海洋环境保护、海洋防灾减灾、海洋权益维护、海域使用管理、海岛海岸带调查和极地大洋考察等方面的重大需求,

同时兼顾气象、农业、环保、减灾、测绘、交通、水利、统计等行业应用需求。通过不断拓展我国自主海洋卫星数据的应用潜力,提升自主海洋卫星数据的应用广度、深度,显著提高海洋环境预报和海洋灾害预警的准确性和时效性,有效实施海洋环境与资源监测,为维护海洋权益、防灾减灾、国民经济和国防建设提供服务。同时,不断完善产品多样化、数据标准化、应用定量化、运行业务化的海洋卫星综合观测体系,满足海洋监视监测现代化、科学化、信息化、全球化的新要求,为实施海洋开发战略与发展海洋产业提供强有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 郑全安, 吴克勤. 我国的海洋遥感十年发展回顾(1979–1989)[J]. 海洋通报, 1990, 9(3): 90–96.
Zheng Quanan, Wu Keqin. Review of the ten-year development of ocean remote sensing in China (1979–1989)[J]. Marine Science Bulletin, 1990, 9(3): 90–96.
- [2] 郑全安. 遥感在海洋中尺度涡旋研究中的应用及卫星照片实例解译[J]. 海洋学报, 1979, 1(2): 342–357.
Zheng Quanan. Application of remote sensing in ocean mesoscale vortex research and case interpretation of satellite images[J]. Haiyang Xuebao, 1979, 1(2): 342–357.
- [3] 郑全安. 由GMS-1和NOAA-5卫星红外照片得出的黄、东海冬季海面温度模式[J]. 海洋学报, 1981, 3(4): 523–534.
Zheng Quanan. The winter surface temperature pattern of the Huanghai Sea and the East China Sea derived from the GMS-1 and NOAA-5 satellite images[J]. Haiyang Xuebao, 1981, 3(4): 523–534.
- [4] 恽才兴, 蔡孟裔, 王宝全. 利用卫星象片分析长江入海悬浮泥沙扩散问题[J]. 海洋与湖沼, 1981, 12(5): 391–401.
Yun Caixing, Cai Mengyi, Wang Baoquan. An analysis of the diffusion of suspended sediment discharged from the Changjiang River based on the satellite images[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1981, 12(5): 391–401.
- [5] 郑全安. 红外遥感在大尺度海洋动力学中的应用[J]. 黄渤海海洋, 1983, 1(2): 91–99.
Zheng Quanan. Application of infra-red remote sensing to large-scale ocean dynamics[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1983, 1(2): 91–99.
- [6] 陈俊昌. 南海北部冬季海面温度实时分布特征的若干解译[J]. 海洋学报, 1983, 5(3): 391–395.

- Chen Junchang. Some interpretations of real-time distribution characteristics of sea surface temperature in northern South China Sea during winter[J]. *Haiyang Xuebao*, 1983, 5(3): 391-395.
- [7] 申宪忠, 仲德林, 张凤岐. 利用陆地卫星象片对江苏潮流沙脊群的分析研究[J]. *黄渤海海洋*, 1983, 1(1): 78-83.
Shen Xianzhong, Zhong Delin, Zhang Fengqi. Analysis of the tidal sand ridge group of Jiangsu using Landsat photo images[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1983, 1(1): 78-83.
- [8] 许殿元, 黄宝艇. 渤海湾海河口海域遥感图像KL变换及其对海水污染的解译[J]. *海洋学报*, 1984, 6(4): 479-484.
Xu Dianyuan, Huang Baoting. KL transform of remote sensing images in Haihe Estuary of Bohai Bay and its interpretation of seawater pollution[J]. *Haiyang Xuebao*, 1984, 6(4): 479-484.
- [9] 熊仕林, 迟运祥, 高峻岭. 多光谱扫描仪遥感海冰图象研究[J]. *海洋技术*, 1987, 6(4): 1-10.
Xiong Shilin, Chi Yunxiang, Gao Junling. Research on sea-ice remote sensing by multispectral scanner system[J]. *Ocean Technology*, 1987, 6(4): 1-10.
- [10] 李铁芳, 李成治. 渤海海峡南部海域水深、底质、浅滩及礁石遥感信息的提取与应用[J]. *海洋与湖沼*, 1988, 19(6): 547-552.
Li Tiefang, Li Chengzhi. Obtaining and applying the remote sensing data of water depth, bottom sediment, shallow beach and reef in the southern Bohai Strait[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1988, 19(6): 547-552.
- [11] 郑全安, 孙元福, 师元勋, 等. 海面溢油航空遥感监测方法研究——波谱特性及实验结果分析[J]. *海洋学报*, 1984, 6(4): 531-541.
Zheng Quanan, Sun Yuanfu, Shi Yuanxun, et al. Study on airborne remote sensing monitoring method for oil spill on sea surface: Spectral characteristics and analysis of experimental results[J]. *Haiyang Xuebao*, 1984, 6(4): 531-541.
- [12] 潘德炉, 施纪青. 海岸带遥感计算机地物分类原理及结果评价[J]. *海洋学报*, 1984, 6(4): 520-530.
Pan Delu, Shi Jiqing. Principle and result evaluation of coastal zone terrain classification by remote sensing and computer[J]. *Haiyang Xuebao*, 1984, 6(4): 520-530.
- [13] 李伯衡. 海岸滩涂资源低潮位航空遥感实验[J]. *遥感信息*, 1986, 1(4): 7-9.
Li Boheng. Aerial remote sensing experiments on coastal beach resources in low tidal level[J]. *Remote Sensing Information*, 1986, 1(4): 7-9.
- [14] 陈清莲, 杨庆保, 任洪启. 航空测量海面温度的数据分析[J]. *海洋技术学报*, 1987, 6(4): 25-31.
Chen Qinglian, Yang Qingbao, Ren Hongqi. Data analysis of the airborne measured seasurface temperature[J]. *Ocean Technology*, 1987, 6(4): 25-31.
- [15] 陈干城. 应用NOAA卫星资料速报渔海况[J]. *遥感信息*, 1988, 3(3): 5-6, 21.
Chen Gancheng. Rapid reporting of fishing sea state by NOAA satellite data[J]. *Remote Sensing Information*, 1988, 3(3): 5-6, 21.
- [16] 黄润恒, 王其茂. 卫星遥感在东海渔场速报中的应用[J]. *海洋预报*, 1990, 7(4): 63-68.
Huang Runheng, Wang Qimao. Application of satellite remote sensing in fast report of east china sea fishing ground[J]. *Marine Forecasts*, 1990, 7(4): 63-68.
- [17] 黄润恒, 王强, 金振刚. 渤海海冰卫星遥感监测业务系统[J]. *海洋预报*, 1991, 8(3): 57-63.
Huang Runheng, Wang Qiang, Jin Zhengang. Satellite remote sensing operational system for monitoring of Bohai Sea ice[J]. *Marine Forecasts*, 1991, 8(3): 57-63.
- [18] 郑全安, 吴隆业, 张欣梅, 等. 胶州湾遥感研究 I. 总水域面积和总岸线长度量算[J]. *海洋与湖沼*, 1991, 22(3): 193-199.
Zheng Quanan, Wu Longye, Zhang Xinmei, et al. A remote sensing study of Jiaozhou Bay I. Measurement of total area and coastal line[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1991, 22(3): 193-199.
- [19] 郑全安, 吴隆业, 戴懋瑛, 等. 胶州湾遥感研究 II. 动力参数计算[J]. *海洋与湖沼*, 1992, 23(1): 1-6.
Zheng Quanan, Wu Longye, Dai Maoying, et al. A remote sensing study of Jiaozhou Bay II. Calculation of dynamical parameters[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1992, 23(1): 1-6.
- [20] 潘德炉. 海洋二所地面站成功地接收和处理SeaWiFS资料并且开展资料免费分发业务[J]. *遥感信息*, 1998, 7(2): 44.
Pan Delu. SeaWiFS data have been successfully received and processed by the second institute of oceanography and distributed for free[J]. *Remote Sensing Information*, 1998, 7(2): 44.
- [21] 刘建强, 吴奎桥, 黄润恒. Radarsat卫星渤海海冰监测研究[J]. *海洋预报*, 1999, 16(3): 62-70.
Liu Jianqiang, Wu Kuiqiao, Huang Runheng. The monitoring of sea ice in the Bohai Sea with Radarsat SAR[J]. *Marine Forecasts*, 1999, 16(3): 62-70.
- [22] 林明森, 王其茂, 彭海龙. GPS反射信号的海洋应用[J]. *海洋湖沼通报*, 2004(4): 32-40.
Lin Mingsen, Wang Qimao, Peng Hailong. On the application of GPS reflected signals to ocean sciences[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2004(4): 32-40.
- [23] 蒋兴伟, 邹亚荣, 王华, 等. 基于SAR快速提取浒苔信息应用研究[J]. *海洋学报*, 2009, 31(2): 63-68.
Jiang Xingwei, Zou Yarong, Wang Hua, et al. Application study on quick extraction of *Enteromorpha prolifera* information using SAR data[J]. *Haiyang Xuebao*, 2009, 31(2): 63-68.
- [24] 蒋兴伟, 刘建强, 邹斌, 等. 浒苔灾害卫星遥感应急监视监测系统及其应用[J]. *海洋学报*, 2009, 31(1): 52-64.
Jiang Xingwei, Liu Jianqiang, Zou Bin, et al. The satellite remote sensing system used in emergency response monitoring for *Enteromorpha prolifera* disaster and its application[J]. *Haiyang Xuebao*, 2009, 31(1): 52-64.

- [25] 邹亚荣, 王华, 朱海天, 等. 海上溢油SAR图像分割算法研究[J]. *海洋环境科学*, 2009, 28(3): 313–315.
Zou Yarong, Wang Hua, Zhu Haitian, et al. Study on segmentation of SAR image for oil spilled at sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2009, 28(3): 313–315.
- [26] 杨劲松. 合成孔径雷达海面风场、海浪和内波遥感技术[M]. 北京: 海洋出版社, 2005.
Yang Jinsong. Remote Sensing Technology of Sea Surface Wind Field, Sea Wave and Internal Wave by Synthetic Aperture Radar[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005.
- [27] 邵芸, 张凤丽, 田维, 等. 海洋环境微波遥感应用研究进展[J]. *遥感学报*, 2009, 13(S1): 154–159.
Shao Yun, Zhang Fengli, Tian Wei, et al. Progresses on application of microwave remote sensing in ocean environment[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(S1): 154–159.
- [28] 朱敏慧. SAR的海洋遥感探测技术综述[J]. *现代雷达*, 2010, 32(2): 1–6.
Zhu Minhui. Review of SAR oceanic remote sensing technology[J]. *Modern Radar*, 2010, 32(2): 1–6.
- [29] 袁新哲, 林明森, 刘建强, 等. 高分三号卫星在海洋领域的应用[J]. *卫星应用*, 2018(6): 17–21.
Yuan Xinzhe, Lin Mingsen, Liu Jianqiang, et al. Application of GF-3 satellite in ocean[J]. *Satellite Application*, 2018(6): 17–21.
- [30] 郑全安, 张朝贤. 全球尺度海洋学研究对卫星遥感数据的需求[J]. *黄渤海海洋*, 1989, 7(2): 53–58.
Zheng Quanan, Zhang Chaoxian. Requirements of global scale oceanographic study for satellite remote sensing data[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1989, 7(2): 53–58.
- [31] 黄韦良, 沈毅楚. 我国海洋遥感的现状与需求[J]. *遥感技术与应用*, 1994, 9(2): 50–53.
Huang Weigen, Shen Yichu. Situations and requirements of ocean remote sensing in China[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1994, 9(2): 50–53.
- [32] 刘宝银. 我国海洋遥感应用的进展[J]. *地球信息科学学报*, 2000, 2(4): 67–70.
Liu Baoyin. Advancement of Chinese marine remote sensing[J]. *GEO-Information Science*, 2000, 2(4): 67–70.
- [33] 张杰, 黄卫民, 纪永刚, 等. 中国海洋微波遥感研究进展[J]. *海洋科学进展*, 2004, 22(S1): 157–165.
Zhang Jie, Huang Weimin, Ji Yonggang, et al. Advances in marine microwave remote sensing research in China[J]. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(S1): 157–165.
- [34] 蒋兴伟, 宋清涛. 海洋卫星微波遥感技术发展现状与展望[J]. *科技导报*, 2010, 28(3): 105–111.
Jiang Xingwei, Song Qingtao. Satellite microwave measurements of the global oceans and future missions[J]. *Science & Technology Review*, 2010, 28(3): 105–111.
- [35] Jiang Xingwei, Lin Mingsen, Liu Jianqiang, et al. The HY-2 satellite and its preliminary assessment[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2012, 5(3): 266–281.
- [36] 蒋兴伟, 林明森, 宋清涛. 海洋二号卫星主被动微波遥感探测技术研究[J]. *中国工程科学*, 2013, 15(7): 4–11.
Jiang Xingwei, Lin Mingsen, Song Qingtao. Active and passive microwave remote sensing technology of the HY-2A ocean satellite mission[J]. *Engineering Sciences*, 2013, 15(7): 4–11.
- [37] 蒋兴伟, 林明森, 张有广. HY-2卫星地面应用系统综述[J]. *中国工程科学*, 2014, 16(6): 4–12.
Jiang Xingwei, Lin Mingsen, Zhang Youguang. An overview of HY-2 satellite ground application system[J]. *Engineering Sciences*, 2014, 16(6): 4–12.
- [38] Jiang Xingwei, Lin Mingsen. Ocean observation from Haiyang satellites: 2012–2014[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, 34(5): 710–720.
- [39] 林明森, 张有广, 袁欣哲. 海洋遥感卫星发展历程与趋势展望[J]. *海洋学报*, 2015, 37(1): 1–10.
Lin Mingsen, Zhang Youguang, Yuan Xinzhe. The development course and trend of ocean remote sensing satellite[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(1): 1–10.
- [40] 蒋兴伟, 林明森, 张有广. 中国海洋卫星及应用进展[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1185–1198.
Jiang Xingwei, Lin Mingsen, Zhang Youguang. Progress and prospect of Chinese ocean satellites[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1185–1198.
- [41] 蒋兴伟, 林明森, 邹亚荣. 我国海洋卫星发展与应用[J]. *卫星应用*, 2016(6): 17–23.
Jiang Xingwei, Lin Mingsen, Zou Yarong. Development and application of Chinese ocean satellites[J]. *Satellite Application*, 2016(6): 17–23.
- [42] 林明森, 张有广. 我国海洋动力环境卫星应用现状及发展展望[J]. *卫星应用*, 2018(5): 19–23.
Lin Mingsen, Zhang Youguang. Application and development of Chinese ocean dynamic environment satellites[J]. *Satellite Application*, 2018(5): 19–23.
- [43] 蒋兴伟, 林明森, 张有广, 等. 海洋遥感卫星及应用发展历程与趋势展望[J]. *卫星应用*, 2018(5): 10–18.
Jiang Xingwei, Lin Mingsen, Zhang Youguang, et al. Progress and trend of ocean remote sensing satellites and their applications[J]. *Satellite Application*, 2018(5): 10–18.
- [44] 张庆君. 高分三号卫星总体设计与关键技术[J]. *测绘学报*, 2017, 46(3): 269–277.
Zhang Qingjun. System design and key technologies of the GF-3 satellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(3): 269–277.

- [45] Zhang Qingjun, Liu Yadong. Overview of Chinese first C-band multi-polarization SAR satellite GF-3[J]. *Aerospace China*, 2017(3): 22–31.
- [46] Lin Mingsen, Ye Xiaomin, Yuan Xinzhe. The first quantitative joint observation of typhoon by Chinese GF-3 SAR and HY-2A microwave scatterometer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(11): 1–3.
- [47] Pan Delu, He Xianqiang, Mao Tianming. Preliminary study on the orbit cross-calibration of CMODIS by SeaWiFS[J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(10): 745–749.
- [48] 蒋兴伟, 林明森. 微波多模态遥感器的性能评价[J]. *遥感技术与应用*, 2005, 20(1): 18–23.
Jiang Xingwei, Lin Mingsen. An achievements and limitations evaluation on M3RS measurement system[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(1): 18–23.
- [49] 张德海, 姜景山, 郑震藩, 等. 神舟4号主载荷——多模态微波传感器[J]. *遥感技术与应用*, 2005, 20(1): 74–80.
Zhang Dehai, Jiang Jingshan, Zheng Zhenfan, et al. SZ-4 main payload-multi-mode microwave remote sensor[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(1): 74–80.
- [50] 蒋兴伟, 林明森, 刘建强. 我国卫星海洋空间探测[J]. *中国工程科学*, 2008, 10(6): 56–62.
Jiang Xingwei, Lin Mingsen, Liu Jianqiang. Satellite ocean exploration of space in China[J]. *Engineering Sciences*, 2008, 10(6): 56–62.
- [51] 潘德炉, 白雁. 我国海洋水色遥感应用工程技术的新进展[J]. *中国工程科学*, 2008, 10(9): 14–24, 46.
Pan Delu, Bai Yan. Advances on the application of ocean color remote sensing engineering in China[J]. *Engineering Sciences*, 2008, 10(9): 14–24, 46.
- [52] Tao Bangyi, Pan Delu, Mao Zhihua, et al. Optical detection of prorocentrum donghaiense blooms based on multispectral reflectance[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(10): 48–56.
- [53] 邹斌, 林明森, 石立坚, 等. 遥感技术在海洋灾害监测中的应用[J]. *城市与减灾*, 2018(6): 65–69.
Zou Bin, Lin Mingsen, Shi Lijian, et al. Application of remote sensing technology in ocean disasters monitoring[J]. *City and Disaster Reduction*, 2018(6): 65–69.
- [54] 朱海天, 曾韬, 梁超, 等. 卫星遥感海冰监测系统在渤海海冰监测中的应用[J]. *海洋预报*, 2011, 28(6): 55–59.
Zhu Haitian, Zeng Tao, Liang Chao, et al. Satellite remote sensing of sea ice monitoring system in the Bohai Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2011, 28(6): 55–59.
- [55] 林明森, 张毅, 宋清涛, 等. HY-2卫星微波散射计在西北太平洋台风监测中的应用研究[J]. *中国工程科学*, 2014, 16(6): 46–53.
Lin Mingsen, Zhang Yi, Song Qingtao, et al. Application study of the HY-2 scatterometer on monitoring typhoon events in the northwest Pacific Ocean[J]. *Engineering Sciences*, 2014, 16(6): 46–53.
- [56] 兰友国, 郎姝燕, 林明森, 等. 海洋二号卫星A星微波散射计在台风遥感监测中的应用[J]. *卫星应用*, 2018(5): 40–42.
Lan Youguo, Lang Shuyan, Lin Mingsen, et al. Application of microwave scatterometer onboard HY-2A satellite in typhoon remote sensing monitoring[J]. *Satellite Application*, 2018(5): 40–42.
- [57] Ye Xiaomin, Lin Mingsen, Zheng Quanan, et al. A typhoon wind-field retrieval method for the dual-polarization SAR imagery[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019: 1–5.
- [58] 张文宗, 王云秀, 魏立涛, 等. 河北省海洋灾害遥感动态监测系统简介[J]. *自然灾害学报*, 2007, 16(3): 76–80.
Zhang Wenzong, Wang Yunxiu, Wei Litao, et al. Brief introduction of remote sensing dynamic monitoring system for ocean disaster in Hebei Province[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2007, 16(3): 76–80.
- [59] 赵小锋, 池天河, 张新, 等. 福建海洋环境立体监测信息服务系统的设计与实施[J]. *台湾海峡*, 2007, 26(4): 484–491.
Zhao Xiaofeng, Chi Tianhe, Zhang Xin, et al. Design and implementation of Fujian ocean observing information service system[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2007, 26(4): 484–491.
- [60] 刘建强, 吴奎桥, 孙从容, 等. “雪龙号”船载海洋卫星接收处理系统及应用[J]. *卫星应用*, 2016(4): 48–52.
Liu Jianqiang, Wu Kuiqiao, Sun Congrong, et al. Shipborne receiving and processing system of ocean satellites onboard Xuelong ship and its Application[J]. *Satellite Application*, 2016(4): 48–52.

Progresses on ocean satellite remote sensing application in China

Jiang Xingwei^{1,2}, He Xianqiang^{3,4}, Lin Mingsen^{1,2}, Gong Fang^{3,4}, Ye Xiaomin^{1,2}, Pan Delu^{3,4}

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 4. State Key Laboratory of Satellite Environment Dynamics, Hangzhou 310012, China)

Abstract: China has made significant achievements on the applications of satellite ocean remote sensing since

1970s. Three series of Chinese ocean satellites including the ocean color satellites, marine dynamic environment satellites and ocean surveillance satellites have already been constructed, and a preliminary complementary operational application system of satellite ocean remote sensing has been found. In this paper, we review the important progresses of the application of ocean satellite remote sensing in China, focusing on the typical satellite remote sensing application demonstration systems in marine environment and resources monitoring, marine disasters monitoring, marine rights and interests maintaining, marine environment forecasting and safety assurance, as well as typical operational marine satellite monitoring applications. Finally, we give a prospect of the future development of ocean satellite remote sensing applications in China.

Key words: ocean satellite; remote sensing application; operational monitoring; application demonstration system