

# 海洋重要水文参数的卫星遥感反演研究综述

吴桂平<sup>1,2</sup>, 刘元波<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008)

**摘要:** 经过近 50 年的发展, 海洋卫星遥感日益成熟, 各种反演算法和数据集应运而生, 大大推动了海洋水文过程的研究。围绕与海洋水文相关的重要物理参数, 简要回顾了海面高度、海水深度、海表洋流及海水质量变化的卫星遥感反演基本原理、主要算法以及存在的难点和前沿性研究问题, 介绍了应用遥感反演算法制成的全球海洋水文参数主要数据集, 并结合目前存在的问题探讨了卫星遥感反演海洋水文参数的发展趋势及所面临的挑战。研究发现, 运用多卫星、多通道、多模式的联合反演方法可以显著地提升人们监测海洋水文参数时空动态变化的能力, 必将成为未来全球海洋水文遥感的主要研究方向之一。

**关键词:** 海洋水文参数; 反演算法; 光学遥感; 微波遥感; 多传感器联合反演; 全球数据集

**中图分类号:** TV122; G353.11      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2016)01-0139-13

海洋是人类最大的资源宝库, 蕴藏极为丰富的生物、化学、矿产资源和能源, 是人类扩大生存空间、推动经济发展的重要领域<sup>[1]</sup>。相对于陆地而言, 占地球表面积 71% 的海洋拥有全球 97% 的水量, 是自然界水循环的重要组成部分, 并对地球上的水文生态环境产生着极其重要的影响<sup>[2]</sup>。在诸多海洋水文物理参数中, 海面高度、海水深度、海表流速及海水质量变化与全球水循环关系最为密切, 准确把握海洋中这 4 种水文参数的变化, 不仅有利于海洋资源发掘、海洋权益维护及沿海地区的综合开发和管理, 而且对于全面理解海-陆相互作用过程以及地球水循环等意义重大, 已成为全世界高度关注的问题<sup>[3-4]</sup>。

长期以来, 人们对于上述海洋水文参数的获取, 主要是通过船只“稀疏”走航或站点定位测量等方式来实现的<sup>[5]</sup>。然而, 传统调查方式所获得的水文资料往往具有非连续性和非同步性, 无论在测量规模、范围、频次上均十分有限, 因而对于全面认识复杂的海洋水文变化特征有一定的困难。自 20 世纪 60 年代初 TIROS-1 气象卫星取得了若干海洋信息后, 随即兴起了从太空研究海洋的热潮<sup>[6]</sup>, 人类能在瞬间看到几百公里的洋面上水体信息, 并能充分而快速地分析海洋水位、深度、海水质量等水文要素的变化。经过近 50 年的发展, 基于卫星手段的海洋水文参数反演研究已日趋成熟, 各种反演算法和数据集应运而生, 在海洋资源、环境和减灾等方面发挥了不可替代的作用<sup>[7-8]</sup>。本文将主要针对海面高度、海水深度、海表流速及海水质量变化 4 种重要海洋水文参数, 简要回顾各自的卫星遥感反演原理与方法及其研究进展, 在此基础上对多种反演算法所生成的全球数据集进行介绍, 展望海洋水文参数卫星反演研究的发展前景。

## 1 海洋水文参数的遥感反演

### 1.1 海面高度

海面高度是指海水的自由水面距离固定基准面的高度, 是最基本的海洋水文参数之一<sup>[6]</sup>。目前, 基于遥感手段的海面高度获取, 主要是利用卫星测高的手段来实现的。其原理是利用雷达高度计, 通过测定发射

收稿日期: 2015-07-14; 网络出版时间: 2016-01-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20160122.2248.018.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41430855; 41401506)

作者简介: 吴桂平(1980—), 男, 江苏泰州人, 博士, 主要从事水文遥感研究。E-mail: gpwu@niglas.ac.cn

通信作者: 刘元波, E-mail: ybliu@niglas.ac.cn

脉冲与接收脉冲之间的时间延迟, 获得海面相对于某个参考椭球面的点位高程值<sup>[8]</sup>。自 1973 年 NASA 发射 SKYLAB 卫星, 首次进行海洋卫星测高实验开始, 国际上先后发射了多颗、多代测高卫星, 如 ERS-1/2、TOPEX/Poseidon(T/P)、GFO、ENVISAT、JASON-1/2、CRYOSAT-2、HY-2 以及 SARAL 等, 并在局部潮位变化、大中尺度的海平面变化等方面均发挥了重要作用<sup>[9-10]</sup>。

由于测高卫星在运行过程中受到卫星轨道、对流层延迟、电离层延迟及海况多种客观因素的影响, 其观测值不可避免地存在误差, 必须对其进行各项改正<sup>[8]</sup>。早期的卫星测高技术很难辨别出高度计观测误差和地球物理信号, 通常只能获得海面高的半定量观测<sup>[9]</sup>。随着卫星测高技术的发展和算法的改进, 目前已可以实现对海面高度进行定量化观测, 并且在开阔海域的测高精度也由最初的米级提高到现在的厘米级<sup>[11]</sup>(图 1)。然而, 在近海由于受到沿海地形、岛屿、潮汐等影响, 造成雷达测高脉冲的反射波形不规则, 无法准确求得卫星至海面之间的距离<sup>[12]</sup>。针对这一情况, 国内外学者相继提出了多种波形重定方法, 如 OCOG 算法<sup>[13]</sup>、Threshold 算法<sup>[14]</sup>、参数模型算法<sup>[15]</sup>等, 用于改善卫星高度计地球物理数据记录中瞬时海面高的精度。波形重定是高精度卫星测高技术中的难点, 也是目前的前沿研究问题<sup>[9]</sup>。

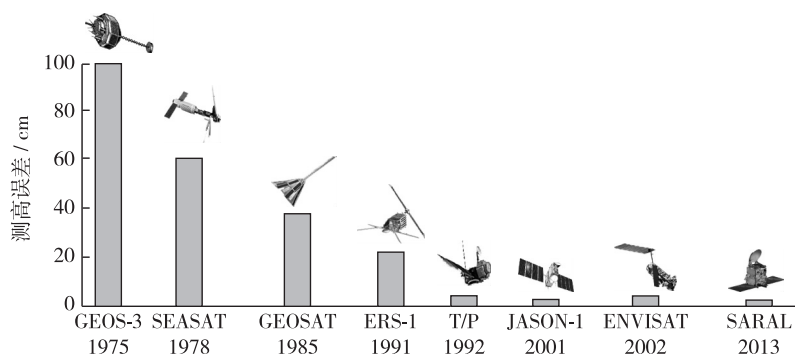


图 1 卫星高度计发展历程及其测高精度变化

Fig. 1 Development history of satellite altimeters and their measurement precision

传统的单一雷达高度计是一种采用主动方式工作的微波传感器, 仅限于特定时间段内、星下点附近很窄的区域观测, 观测刈幅仅为 3 km 左右, 在中尺度海洋高度观测的时空连续性和准确性上受到了一定的限制<sup>[3]</sup>。近 20 年来, 结合多种传感器联合观测海面高度的技术方法逐渐得到了论证并实施。主要表现为以下两个方面:

首先, 最具代表性的就是宽刈幅海洋高度计(Wide Swath Ocean Altimeter, WSOA)的开发和研制, 即将脉冲雷达高度计与干涉高度计联合使用的一种新技术<sup>[16-17]</sup>。该技术结合了传统高度计测高和干涉合成孔径雷达(InSAR)技术于一体, 测量精度不但可以控制在 3 cm 之内, 而且还能获取 15 km×15 km 空间像元尺度上的高度值, 在获取海面高程信息方面显示出了巨大潜力<sup>[18]</sup>。WSOA 的研制在 20 世纪 90 年代最早得到了 NASA 的 Instrument Incubator Program(IIP)立项资助。随后, 美国喷气动力实验室开展了 10 多年的宽刈幅微波测高技术研究工作<sup>[19]</sup>, 并且原本准备作为 JASON-2 卫星的试验载荷, 但是由于故障原因没有携带。同时, 中国科学院空间科学应用研究中心在国家有关计划的支持下, 也开展了宽刈幅三维成像高度计(China Imaging Altimeter, CIALT)的研制和试验工作<sup>[20]</sup>。CIALT 在概念上与 WSOA 非常相似, 即融合了合成孔径技术、干涉技术和偏离天底点观测技术, 能够提供每个像元点高精度的实时动态三维信息<sup>[20]</sup>。

其次, 除了通过研制具备宽刈幅观测能力的新一代高度计之外, 多种卫星测高数据的融合, 也可以有效改善目前单一高度计观测时空分辨率不足的问题<sup>[16]</sup>。于振涛<sup>[21]</sup>使用 T/P 和 JASON-1 两种高度计数据, 采用相关插值算法对两者进行了融合, 最终生成了一套时空连续的网格化海面高度产品; 金涛勇等<sup>[22]</sup>联合 GEOSAT、ERS-1/2、ENVISAT、T/P 和 JASON-1 数据构建了全球平均海面高模型; 孙文等<sup>[23]</sup>联合 T/P、JASON-1 和 JASON-2 三代卫星测高数据, 有效延长了中国近海及邻域海平面变化序列的时间跨度。由此可见, 通过多星测高数据的综合运用和交叉, 可以充分发挥各自的优势, 促进和加深全球海面高度的实时、高

效监测。表 1 归纳总结了有关海面高度的主要卫星测高方法及其基本特征。

表 1 卫星监测海面高度的主要方法及其基本特征

Table 1 Main satellite methods of measuring sea surface height and their characteristics

主要方法	优点	缺点	应用领域	提取精度
单一高度计观测	数据易获取操作简单	时空连续性受限	小尺度海面高度观测	厘米级至米级不等
宽刈幅海洋高度计观测	可以获取像元尺度上的高度信息	技术设计代价高	海面信息三维动态观测	厘米级
多种高度计数据融合	可获取时空连续的海面高度信息	—	海面高度长时序变化分析	厘米级

1.2 海水深度

海水深度是海洋水体的重要水文参数, 是海面高度及海底地形的同步反映。根据使用的遥感波段及其探测原理的不同, 卫星遥感反演海水深度的研究, 大致可分为遥感浅海测深和遥感深海测深两大类。其中, 遥感浅海测深又分为多光谱测深、高光谱测深以及合成孔径雷达测深等技术<sup>[24]</sup>, 而遥感深海测深则主要为雷达高度计技术。各种测深方法及其基本特征如表 2 所示。

(1) 遥感浅海测深 浅海光学遥感反演水深的算法最早提出, 该算法主要通过辐射传输过程来建立光谱反射率与水深之间的定量关系实现<sup>[25]</sup>。根据建模方式的不同, 又可分为理论解译模型、半经验半理论模型和统计相关模型等<sup>[26]</sup>。理论解译模型是以水体的光学理论为基础, 分析光在浅海水域的辐射传输过程, 并据此建立辐射亮度与水深的解析表达式, 进而解算出水深<sup>[27]</sup>。半经验半理论模型是简化海洋辐射传输理论得到的水深、离水反射率、衰减系数及海底反射率之间的解析模式<sup>[24]</sup>。随着研究的不断深入, 目前已逐渐形成了诸如单波段模型、双波段比值模型和多波段模型等多种解算方法<sup>[28-29]</sup>, 并且也得到了较广泛的应用; 统计相关模型则是利用浅水水域多光谱数据与实测水深值之间的相关性而建立起来的水深遥感反演模型<sup>[30]</sup>。该方法简便易行, 但是未考虑水体内部的环境影响, 建立的统计相关模型具有一定的区域局限性<sup>[31]</sup>。20 世纪 90 年代后期开始, 利用高光谱数据进行浅海水深反演的算法取得了突破性进展, 产生了基于半分析模型的非线性优化算法<sup>[32]</sup>、主成分分析法<sup>[33]</sup>以及基于物理原理的 HOPO 算法<sup>[34]</sup>等等。高光谱传感器的出现, 有利于识别反射信号微弱的水体信息, 在一定程度上提高了浅海水深的反演精度, 具有巨大的发展前景<sup>[24]</sup>。

浅海雷达遥感测深主要是基于雷达后向散射强度变化(形成明暗相间的条纹)与水深的定量关系原理来实现<sup>[35]</sup>。实践证明, 浅海(不超过 50 m)SAR 图像上的明暗条纹特征与海底地形、地貌直接相关, 且雷达波长越长, 水下地形和水深在 SAR 图像上所反映的特征效果越好<sup>[36]</sup>。利用 SAR 进行浅海水深探测的研究最早可以追溯到 1978 年, 第一颗海洋卫星 Seasat 首次展示了浅海雷达测深的巨大潜力<sup>[37]</sup>。1984 年, 德国科学家 Alpers 和 Hennings<sup>[35]</sup>提出了雷达浅海测深的理论模型, 开创了星载 SAR 浅海测深定量化研究的里程碑。随后, 国内外科研人员相继对雷达浅海测深的相关技术方法进行了更加深入的研究<sup>[38]</sup>。目前较具规模和影响的 SAR 浅海测深技术是荷兰科学家采用迭代方式建立的“水深估测系统”, 利用该技术获取的北海试验区反演水深值误差仅为 30 cm<sup>[39]</sup>。近年来, 随着传感器硬件条件的发展, SAR 浅海测深逐渐由传统的单波段、单极化研究向着多波段、多极化研究不断深入<sup>[40]</sup>, 从而可获取更为丰富的浅海水下地形信息。多波段多极化 SAR 必将成为未来浅海雷达遥感测深的重要手段之一。

(2) 遥感深海测深 遥感深海测深的研究起源于 19 世纪 70 年代, Siemens<sup>[41]</sup>最早提出了通过海面重力测量方法推求海洋深度的设想。直到 20 世纪 80 年代卫星测高技术出现后, Dixon<sup>[42]</sup>才将这一设想付诸实施。其测深原理是首先利用卫星高度计数据推算海洋的大地水准面, 在此基础上根据海洋重力异常及其大地水准面在一定波长范围内与海洋水深的相关关系, 结合水层深度、地壳厚度等, 建立水深的反演模型, 推算出相应的水深值。目前, 国际上利用卫星测高数据反演海水深度的常用方法主要有解析算法和统计算法两大类<sup>[43]</sup>。其中, 解析算法主要是基于 Parker<sup>[44]</sup>的异常扰动位计算公式和 Watts<sup>[45]</sup>的 3 个板块模型, 利用卫星高度计数据所推求的海洋重力异常, 并参考海底地形模型反演出海洋深度。通过解析方法建立的反演模型, 物理意义比较明确, 但是准确获取模型中的关键参数比较困难<sup>[43]</sup>。统计算法则主要是基于随机过程中的最



小二乘配置理论，通过统计迭代计算的方法来获取反演的水深模型，具有一定的可靠性和实用性<sup>[46]</sup>。

近年来，随着卫星测高技术的发展，国内外众多学者利用卫星高度计资料，对上述两种方法在海洋深度探测方面的适用性进行了大量研究。研究发现，目前利用卫星测高数据反演的深海水深值基本上都能保持在 10% 的相对误差以内<sup>[43]</sup>。然而，由于卫星高度计数据的空间分辨率较粗(6~9 km)，并且卫星测高在浅水区域或岛屿附近受周围地形地物的影响较大，使得其反演浅水区域的水深精度明显下降。Lee 等<sup>[47]</sup>利用基于卫星测高技术获得的 ETOPO2 数据，对巴哈马浅滩区域的海水深度反演和估算进行了试验研究，发现基于卫星测高技术反演的海洋深度，一般只有在深水海区才有望获得较满意的结果。但是作为传统的船只定点测量水深手段的一种有益补充，基于卫星测高技术的水深探测在未来海洋科学研究中仍然具有相当广阔的应用前景。

表 2 卫星遥感反演海水深度的主要方法及其基本特征  
Table 2 Main satellite methods of retrieving sea depth and their characteristics

目标	监测手段	主要方法	主要原理	优点	缺点
浅海测深	多光谱遥感	理论解释模型 半经验半理论模型 统计相关模型	基于光谱反射率与水深之间的解析关系	方法简单 便于实现	精度不高 适用性差
	高光谱遥感	主成分分析法 非线性优化算法 HOPO 算法	基于海洋辐射传递理论	可识别反射信号微弱的水体信息,精度较高	受限于晴空条件 适合于大范围监测海岸带
	雷达遥感	单波段单极化法 多波段多极化法	基于雷达后向散射强度变化与水深的定量关系	具有全天候及一定水体浑浊度下的可测性优点	要求有一定的风速、海面粗糙度及水深范围条件
深海测深	卫星高度计	解析算法 统计算法	基于海洋重力异常与海水深度的相关关系	可监测深水海区的海洋深度	反演浅海区域的精度明显下降

1.3 海表洋流

海表洋流是地球系统中水循环的重要组成部分，认识和掌握海水的流动速度和方向规律对于理解气候模式、海洋热量传递及全球水循环等意义重大<sup>[48]</sup>。迄今为止，基于遥感手段获取海表流场的方法大体上可分为可见光/红外遥感、合成孔径雷达遥感以及卫星测高遥感 3 种，如表 3 所示。

(1) 可见光/红外遥感方法 利用可见光/红外波段遥感影像提取海表流场的思路，主要是根据遥感所观测的示踪物(温度、叶绿素、悬浮泥沙、盐度等)及其在一段时间段内的移动特征，基于特征跟踪或模式识别方法来实现海流的获取<sup>[49-50]</sup>。基于该思路的海表洋流反演方法主要有最大相关系数法(Maximum Correlation Coefficient, MCC)和相关松弛法两种。其中，MCC 法是基于连续时刻水体光学/红外特征，结合模板匹配技术，利用相关系数来跟踪海表示踪物结构变化的一种方法<sup>[49]</sup>。相关松弛法是对 MCC 法的一种改进方法，该方法在决定某位置上的位移矢量时，除了考虑相关系数值以外，还考虑了周围矢量的一致性程度<sup>[50]</sup>。近年来，基于可见光/红外波段遥感影像的海表洋流获取精度逐渐提高，并且在实际应用中发挥了重要作用。Tokmakian 等<sup>[51]</sup>选取加利福尼亚附近海域，利用 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)测量数据与 MCC 法得到的结果进行比较，均方差为 0.14~0.25 m/s；Bowen 等<sup>[52]</sup>选取了澳大利亚东部海域 7 年的 AVHRR 数据，用 MCC 法估算海表面流的精度达到了 0.08~0.2 m/s。然而，可见光/红外遥感方法是一种间接海流获取方法，同时需要连续时间且空间分辨率高的卫星影像作支撑，一定程度上限制了该方法的广泛应用<sup>[48]</sup>。

(2) 合成孔径雷达(SAR)遥感方法 SAR 提取海表流场的原理，主要是利用雷达所提供的反映动力学特征的海面粗糙度信息及复介电常数，推断出海洋表面流场的大小和方向<sup>[53]</sup>。与可见光/红外遥感相比，SAR 具有全天候、全天时获取数据的优势，因而自 20 世纪 80 年代之后，基于 SAR 反演海表流场的方法研究方面逐渐得到了国内外学者的广泛重视<sup>[54]</sup>。其中，应用较为广泛的主要有基于单天线的多普勒频移计算法<sup>[53]</sup>和基于双天线的顺轨干涉 SAR 测量法(ATI 技术)<sup>[55]</sup>两类。多普勒频移计算法是利用 SAR 原始数据，通过由海面后向散射多普勒质心与参考多普勒质心所确定的多普勒频移来求解海表流场的一种方法<sup>[54]</sup>。研究表明，利用该方法反演海表流场时具有一定的可靠性和鲁棒性，但是在实际应用过程中该方法受制于一些非线性问题及风场等环境因素的影响。目前，该方法反演的流速误差基本上能够控制在±10 cm/s 之内，流

向误差小于 $\pm 20^\circ$ <sup>[56]</sup>。基于双天线的 ATI 技术是由美国学者 Goldstein 和 Zebker<sup>[55]</sup>首次提出。其基本原理是, 通过两个顺轨天线接收的 SAR 复图像的相位差正比于后向散射信号的多普勒频移关系, 反演出视向海表流场分量<sup>[57]</sup>。目前, 国际上普遍认为 ATI 技术是 SAR 遥感反演海表流场的最好途径, 同时获得了较广泛的应用。Romeiser<sup>[58]</sup>利用 SRTM 数据探讨了星载干涉 SAR 进行海表流场反演的可行性; 于祥祯等<sup>[59]</sup>建立了顺轨干涉 SAR 海表流场迭代反演算法, 并成功应用到了美国 Key Largo 海域流场反演过程中, 取得了较好的结果。此外, 2007 年德国发射的 TerraSAR-X 卫星, 其中就包括了 ATI 技术测量海表流场的使命。然而, 无论是单天线法还是双天线法, 目前直接从 SAR 获得海表流仍然存在着覆盖范围小、重复观测周期长等需要解决的问题<sup>[55]</sup>。

(3) 卫星测高遥感方法 基于卫星测高的海表流场反演, 主要是根据地球流体力学原理和运动学定律, 通过融合卫星散射计数据推算的 Ekman 流以及卫星高度计数据估算的地转流, 最终获得海表流场的一种方法<sup>[60]</sup>。邱云和胡建宇<sup>[61]</sup>利用 1993—2011 年的 T/P 卫星高度计数据, 研究了热带大西洋表层环流的季节性变化, 并用 Argos 海面漂流浮标的观测结果进行了验证, 取得了较好的反演精度; 安玉柱等<sup>[62]</sup>利用 2000—2008 年的卫星高度计资料和 QuickSCAT 卫星风场资料, 反演了全球海表的地转流和 Ekman 流, 将两者合成后生成了逐周的全球表层流产品。研究表明, 该方法反演估算的海表流场数据客观合理, 是探测和获取大尺度海流信息的一条有效途径。然而, 由于卫星高度计的时间和空间分辨率有限, 同时该方法很大程度上受大地水准面精度的限制, 通常仅适用于研究大范围的海洋变化, 无法用于小区域(如大陆架浅海区)的海表面流的反演<sup>[60]</sup>。

此外, 鉴于不同海流遥感反演方法具有其特定的适用性, 通过有效结合不同的遥感数据能够充分发挥三者的优势<sup>[63]</sup>。近年来, 多传感器联合反演海流的研究逐渐得到了众多研究者的重视。Wilkin 等<sup>[63]</sup>利用 1993—1998 年间的 AVHRR、TOPEX/Poseidon 以及 ERS 卫星数据, 联合最大相关系数法和卫星高度计法对澳大利亚东部海域的海表流场进行了反演制图研究, 同时根据研究区域 1995 年 7 月—1997 年 4 月间的 17 个浮标监测结果进行比较, 表明多种卫星传感器联合的海表流场反演结果具有更高的一致性。

表 3 卫星监测海表洋流的主要方法及其基本特征

Table 3 Main satellite methods of measuring sea surface current and their characteristics

监测手段	主要方法	优点	缺点
可见光/红外遥感	最大相关系数法、相关松弛法	原理简单	数据要求高、适用性差
SAR 遥感	多普勒频移算法、顺轨干涉 SAR 测量法	可以全天候、全天时获取数据	覆盖范围小、重复观测周期长
卫星高度计	地转流估算	便于探测大尺度海流信息	时空分辨率较低、不适于小区域海流监测
多种传感器	多传感器联合反演	可获取时空连续的海表洋流信息	—

#### 1.4 海水质量变化

海水质量变化是全球和区域气候变化的重要标志性指标之一。传统的海水质量变化确定方法主要有海底压力测量法和海洋学模型法两种<sup>[64]</sup>。然而对于大尺度海洋水体而言, 上述两种方法并不能反映真实的海水总质量变化, 且实测的海底压力数据受环境限制而分布极其有限<sup>[65]</sup>。近几十年来, 随着一系列测高卫星和地球重力卫星的发射成功, 为人们提供了精确且详细的全球重力场和大地水准面模型, 开创了海水质量变化监测研究的革命性进步。

(1) 卫星测高反演方法 通常引起全球海平面变化的因素主要有两个方面<sup>[66]</sup>: ① 比容海平面变化, 由于海水温度、盐度变化引起海水体积变化导致; ② 质量项海平面变化, 由于海洋与大气、陆地之间进行各种质量交换导致。其中, 比容海平面变化项可以利用温度、盐度数据计算得到<sup>[67]</sup>。由此, 利用卫星高度计观测的平均海平面变化, 扣除掉模式计算的比容海平面变化, 则可以估算得到海水质量变化的等效水柱高<sup>[66]</sup>。

(2) 重力卫星反演方法 由于地球重力场随时间的变化, 主要由于地球表面质量的变化和重新分布引起, 在海洋上则表现为海水质量的增减或迁移<sup>[68]</sup>。基于这一原理, 则可以根据重力卫星(如 CHAMP、

GRACE、GOCE)所监测的地球重力场系数变化量来推求用等效水柱高表示的海水质量变化<sup>[69]</sup>。

近 10 年来,在利用测高卫星和重力卫星反演海水质量变化研究方面均逐渐得到发展。Jin 等<sup>[68]</sup>结合卫星测高和海洋盐度、温度等数据,反演得到了 2003—2006 年全球海水质量的变化。同时利用 GRACE 月时变重力场球谐系数,反演计算了全球海洋等效水柱高的变化。研究表明,GRACE 时变重力场反演的全球海水质量长期性变化为 $-0.2 \pm 0.2$  mm/a,周年变化幅度为 $7.4 \pm 0.4$  mm;卫星测高数据计算的全球平均海平面长期性变化为 $2.1 \pm 0.2$  mm/a,周年变化幅度为 $2.5 \pm 0.4$  mm。反演的两种海水质量变化的年际变化特征一致性较好;冯伟等<sup>[66]</sup>利用 GRACE 卫星重力和海洋实测与模式资料,探讨了海水质量变化对中国南海海平面变化的影响。研究表明,利用 ECCO 模式得到的海水质量变化与 GRACE 卫星观测结果在空间分布上有很好的-致性。此外,Feng 等<sup>[65]</sup>利用 GRACE 卫星重力数据成功获得红海地区的季节性海水质量变化信号,并发现海水质量变化是该地区的平均海平面变化的主因。

由于冰后回弹的影像,当前利用 GRACE 估算海水质量变化依然存在着较大的不确定性,这种误差可以达到 $0.5$  mm/a<sup>[70]</sup>,如果联合卫星测高手段,GRACE 将能较好地反映空间大尺度比热容海平面的变化<sup>[66]</sup>。近几年来,将测高卫星和重力卫星联合进行海水质量变化的研究逐步开展。常金龙等<sup>[71]</sup>联合卫星测高和 GRACE 数据研究了 2003—2005 年间全球比容海平面变化的分布情况;Lombard 等<sup>[72]</sup>联合 GRACE 和 JASON-1 数据计算了 2003—2006 年间比容海平面季节性变化;Cazenave 等<sup>[4]</sup>利用 GRACE、卫星测高和 Argo 浮标数据计算了海平面变化,结果显示海水质量变化对总体海平面的贡献约为 80%,比容海平面长期变化趋势约为 $0.3$  mm/a。大量研究表明,联合重力卫星及雷达高度计数据反演海水质量变化将是未来发展的趋势<sup>[72]</sup>。

## 2 全球数据集

随着众多海洋卫星的发射成功以及遥感反演算法的逐步发展,目前各种各样的区域性和全球性海洋水文参数数据集应运而生,并在全球海洋环境监测、海洋环流动力学研究等多个方面得到了较为广泛的应用。

### 2.1 海面高度产品

(1) Ssalto/Duacs 高度计产品 Ssalto/Duacs 是由法国 AVISO 发布的一种延时的多任务融合高度计数据产品<sup>[73]</sup>。该产品是利用 T/P、JASON-1、JASON-2 的卫星测高数据,再结合 ERS-1/2、ENVISAT 和 GEOSAT 等数据融合得到,具有较高的时空分辨率,其覆盖区域从 $82^{\circ}\text{S}$ 到 $82^{\circ}\text{N}$ ,空间分辨率有 $(1/3)^{\circ} \times (1/3)^{\circ}$ 和 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 两种墨卡托投影网格,时间跨度从 1992 年至今,时间间隔为 7 d。AVISO 的 Ssalto/Duacs 数据产品类别丰富,包括海表面高度数据(MADT)、海表面高度异常(MSLA)以及地形高度等等。其中,MADT 是由海面高度距平转化为海面动力距平后与平均海面动力地形(MDT)叠加而成<sup>[71]</sup>。海面高度异常数据融合了多颗卫星高度计(T/P, JASON-1 和 ERS 系列)的数据产品,该数据已经过了潮汐、电磁偏向等多种校正。目前,该数据产品可以通过 <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/data-access.html> 获取。

(2) CCAR/SSH 海面高度产品 CCAR/SSH 是由美国科罗拉多天文动力学研究中心,融合多种卫星测高资料反演生成的近实时海面高度数据产品<sup>[74]</sup>。目前,CCAR 研究中心可以提供每天实时的 SSH 产品以及具有 60 d 延长期的历史海面高产品。其中,实时 SSH 产品主要是基于 JASON-1 和 OSTM/JASON-2 高度计的 OGDR 数据,联合 Envisat 高度计的 Fast-delivery Geophysical Data Records(FGDR)数据生成,该产品的时间跨度从 2009 年 12 月 14 日至今;历史 SSH 产品则是基于荷兰 Delft 研究所地球空间研究中心的雷达高度计数据库系统(RADS)的数据反演生成,其时间跨度是从 1986 年 12 月 26 日至今。无论是实时产品还是历史产品,其空间分辨率均为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的格网数据。

(3) HY-2 海面高度产品 海洋二号卫星(HY-2)是中国第一颗海洋动力环境卫星,该卫星集主、被动微波遥感器于一体,具有高精度测轨、定轨能力与全天候、全天时、全球探测能力,可以获得包括海面高度在内的多种海洋动力环境参数<sup>[75]</sup>。HY-2 卫星是世界上唯一能够进行高纬度海面温度和海面高度观测的微波遥



感卫星,在填补海面高度数据的空白方面起到了重要作用,与其他海洋微波遥感卫星观测数据的融合产品将显著提高海面高度的时空采样率和准确率<sup>[75]</sup>。2012年3月30日由中国国家海洋局举行了海洋二号卫星数据产品发布会,向社会发布了海洋二号卫星数据产品。目前,用户可从国家卫星中心网站(<http://www.nsoas.gov.cn>)申请获取该数据产品。

在海面高度产品应用方面,随着卫星测高技术的发展,利用卫星海面高度产品进行海洋水位、环流、涡旋和潮汐等的监测得到了越来越广泛的应用。早在1995年,Teague等<sup>[7]</sup>就将PIES观测数据得到的海面高度异常与T/P高度计数据得到的海面异常进行了比较研究,结果显示两者一致性较好;Yuan等<sup>[76]</sup>采用美国航天动力学科罗拉多中心提供的海面高度数据产品,对中国南海东北部锚定测流站附近的海表面高度分布状况进行了分析,同时基于分析结果对利用ADCP测流资料所获得的研究区域浅水层/深层海流观测值进行了定性分析和评估;此外,葛磊<sup>[77]</sup>利用AVISO提供的T/P和ERS-2沿轨海面高度异常数据,对PIES SLA测得的海面高度异常进行了比较。研究发现,在日本海地区,PIES SLA和卫星高度计SLA相关系数很好,具有较高的一致性。

## 2.2 海洋深度产品

(1) ETOPO数据集 ETOPO数据是当今海洋模式中最常用的水深数据。该数据集是NOAA收集各方面资料,经过处理得到的网格化地形数据,包含了一些网格化的全球地形数据和不同尺度的水深数据、数字化的陆地岸界数据等。2001年NOAA又推出了ETOPO2,并且在2006年6月又公布了ETOPO2v2,ETOPO2和ETOPO2v2是在ETOPO5的基础上发展起来的,包含了纬度 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ,经度 $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 范围内分辨率为 $2'$ 的地形数据,对于美国附近海域的分辨率已经提高到 $3''$ 。最新ETOPO数据是ETOPO1,ETOPO1分辨率为 $1'$ 的全球地形模型,包含了大陆的地势起伏和海洋中的水深数据,是在众多全球和区域数据集的基础上建立起来的,如美国海岸地形模型、日本海洋地质数据中心的日本周围海底的测深网格数据、国际北冰洋水深图、加利福尼亚湾的声学多波束水深调查图以及冰面的数据和岩基数据等(<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>)。

(2) GEBCO数据集 GEBCO数据的全称是General Bathymetric Chart of the Oceans(全球海洋通用水深数据),是由国际海道测量组织(IHO)和政府间海洋学委员会(IOC)联合发布的最全面的世界大洋海底地形数据,也是当今海洋模式中最常用的海洋水深数据之一(<http://www.gebco.net>)。目前,IHO-IOC提供的相关数据包括:30"GEBCO\_08 Grid和1'GEBCO Grid数据以及相关辅助数据,格网数据采用NetCdf格式。其中,30"分辨率的GEBCO\_08数据的海洋部分主要是基于船舶测深资料以及卫星重力数据联合插值的综合成果<sup>[78]</sup>,陆地部分地形则基本上是根据SRTM30数字高程模型生成。30"GEBCO\_08 Grid和1'GEBCO Grid数据均可以通过英国海图数据中心(British Oceanographic Data Center)下载并获取([http://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/))。

在海洋深度产品应用方面,国内外研究人员纷纷利用GEBCO、ETOPO等海洋水深数据集在海底地形高精度模拟、地形复杂度分析、海底地貌识别等方面开展了卓有成效的研究。Harris等<sup>[79]</sup>基于ETOPO1海深数据,在全球大洋中共识别出了5 849条海底峡谷,论证了全球主动与被动陆缘海底峡谷在地貌特征差异上的统计学意义;滕飞等<sup>[80]</sup>采用ETOPO1、ETOPO5以及海图读取的水深数据,对印度尼西亚近海的水深进行了优化模拟。同时,结合104个T/P卫星高度计交叉点调和常数及国际水文组织的79个验潮站调和常数,对模拟结果进行了比较和评价;此外,聂琳娟等<sup>[81]</sup>基于分析得到的海水质量亏损引起的重力异常与海深之间的线性关系,利用NOAA提供的ETOPO2海深数据,结合EGM96重力场模型,采用解析法反演得到了南海海底地形,反演结果与LDEO船测海深数据一致性较好,均方根误差小于175 m。

## 2.3 海表洋流产品

(1) OSCAR产品 OSCAR(Ocean Surface Current Analyses-Real time)是一种实时海洋表层流数据产品<sup>[82]</sup>。该数据产品主要由卫星高度计数据、QuickSCAT风场资料以及温度场数据联合反演得到的海表流场,包括地转流和Ekman流成分,其数据质量已通过在现场观测资料对比进行了验证。OSCAR格网数据的空间

分辨率包括  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  (1992 年至今) 和  $(1/3)^{\circ} \times (1/3)^{\circ}$  (2009 年至今) 两种, 分别适用于大尺度和中小尺度洋流, 时间分辨率为 5 d。目前, OSCAR 数据可以通过 NASA 物理海洋数据中心以及 NOAA 两种途径免费获取。

(2) GEKCO 产品 GEKCO (Geostrophic and EKman Current Observatory) 是由法国 CTOH 研究中心提供的全球  $(1/4)^{\circ}$  空间分辨率的海表流数据。GEKCO 海流产品可提供 NetCDF 格式的每日一个数据文档, 每个文档包括输入数据 (绝对动态海面地形和海洋表面风应力场等) 以及输出数据 (海表流场) 共 11 个文件。其中, 海表流场不仅包含表层地转流, 而且包括风应力驱动的 EKman 流。地转流场主要是根据卫星高度计数据联合反演生成的, EKman 流场则是利用 Quikscat 散射计资料结合海表气象数据计算而得。目前, 该数据产品可以通过 [http://www.legos.obs-mip.fr/sudre/gekco\\_form](http://www.legos.obs-mip.fr/sudre/gekco_form) 免费获取。

(3) SCUD 产品 SCUD (Surface Currents from Diagnostic model) 是由亚太数据研究中心/国际太平洋研究中心提供海表流场产品 (<http://www.apdrc.soest.hawaii.edu/>)。SCUD 海表流场产品由 4 种不同的数据融合计算处理得到, 这 4 种数据分别为法国 AVISO 中心的海面高度距平数据、平均动力地形数据、QuickSCAT 风场数据和 NOAA 大西洋大气与海洋实验室提供的表面漂流浮标轨迹数据。产品通过建立海表流速与局地水平压强梯度和局地风场有关的线性模型, 并通过求解该模型与浮标速度的最小代价函数得到未知参数的值, 进而代入模型解得流速。SCUD 提供了全球逐日的流场数据, 空间分辨率为  $(1/4)^{\circ} \times (1/4)^{\circ}$  [83]。

基于上述海表洋流产品, 国际上开展海洋水文现象和过程的例子较多。Sudre 和 Morrow [84] 将 CTOH 的 GEKCO 全球  $(1/4)^{\circ}$  空间分辨率的卫星反演海流产品与其他类型的海流观测数据进行了比较, 并且结合拉格朗日漂流浮标和航测 ADCP 进行了全球的有效性检验; 赵君 [85] 利用现有 OSCAR 流场数据、Quikscat 观测资料以及 ECMWF 风场数据, 对热带西太平洋的表层环流特征从不同时空尺度进行了分析和探讨; 宣莉莉等 [86] 利用近 20 年的卫星遥感海面绝对动力高度 ADT 数据、OSCAR 表层流数据以及 Argos 表面漂流浮标数据, 研究了热带东印度洋表层环流的季节变化特征。研究表明, Argos 和 OSCAR 流速资料均是表层环流研究的重要数据集, 但由于 OSCAR 表层海流流速只包含了地转流及 Ekman 流成分, 因而在低纬度非地转海流成分显著的海域, 流速偏小, 而 Argos 资料空间分布不均, 在近岸区域资料不足, 因此表层环流特征的分析很有必要将两者结合起来考虑 [86]。

### 3 结论与展望

卫星遥感技术具有覆盖范围大、快速、准确的宏观监测能力, 是未来全球海洋水体的动态监测与评价研究的重要手段。近 40 多年来, 多种海洋资源卫星、测高卫星及重力卫星不断发射成功, 为海洋水文参数的遥感反演提供了越来越多的数据源。然而, 目前卫星遥感在观测海面高度、海洋深度、洋流及海水质量变化等方面仍然存在着一系列的局限性。主要表现为: 可见光/红外传感器无法实现深海水深及高时间分辨率海流信息的准确观测; 高频 Ku 波段的微波传感器在强降雨带无法准确获取海面信息; 单一雷达高度计的时空采样频率过低, 无法实现星下点以外海面高度信息的获取等等。针对这一系列问题, 发展包括可见光、红外到微波波段的综合型海洋水文综合型传感器集成, 尤其是努力提高微波遥感器的观测性能, 将是全球下一代海洋水文遥感卫星的主要发展趋势。计划于 2020 年发射的地表水体海洋地形 (Surface Water Ocean Topography, SWOT) 卫星, 将搭载宽刈幅雷达干涉高度计, 其工作在 Ka 波段, 测量海洋高度的数据单元为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ , 未来对  $10 \text{ km}$  尺度海洋水文过程的观测将成为可能。同时, 中国预计在 2016 年发射的“天宫二号”空间实验室上也将同时携带宽波段成像仪、三维成像高度计等传感器, 有望实现对海洋水文信息动态监测的革命性进步。

除了目前在轨运行的 10 多颗海洋卫星以外, 在未来几年, 还将陆续有多个卫星传感器同时对海洋进行探测, 但这些传感器往往为了特定的目的专门设计, 性能技术指标都有差异, 同时任何特定的水文参数反演算法和数据集都有其自身的优缺点。因此, 如何运用多卫星 (海洋资源卫星、测高卫星、重力卫星)、多通道 (可见光/红外和微波)、多模式 (主动和被动) 的联合手段来提高遥感反演能力从而得到更为准确的海洋水



文信号估算,仍然是卫星遥感反演海洋水文参数未来重点研究的方向之一。另外,值得指出的是,各种海洋水文变量的动态监测,除了利用星载卫星遥感观测手段以外,还需要配以传统的地面观测手段建立海上辐射校正与真实性检验场,最终形成以卫星为主体的立体海洋水文参数定量观测体系。

### 参考文献:

- [1] 李颖虹,王凡,任小波.海洋观测能力建设的现状、趋势与对策思考[J].地球科学进展,2010,25(7):715-722. (LI Y H, WANG F, REN X B. Development trend and strategy of ocean observing capability[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(7): 715-722. (in Chinese))
- [2] CHAMBERS D P, WAHR J, NEREM R S. Preliminary observations of global ocean mass variations with GRACE [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31:1-4.
- [3] RODRIGUEZ E, POLLARD B. Centimetric sea surface height accuracy using the Wide-Swath Ocean Altimeter [J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, 5: 3011-3013.
- [4] CAZENAVE A, DOMINH K, GUINEHUT S, et al. Sea level budget over 2003—2008: a reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo [J]. Global and Planetary Change, 2009, 65: 83-88.
- [5] 待茂崇,高郭平,鲍献文.海洋调查方法导论[M].青岛:中国海洋大学出版社,2008. (DAI M C, GAO G P, BAO X W. Introduction to marine survey method[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2008. (in Chinese))
- [6] 赵建虎.现代海洋测绘[M].武汉:武汉大学出版社,2007. (ZHAO J H. Modern marine surveying and charting[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007. (in Chinese))
- [7] TEAGUE W J, HALLOCK Z R, JACOBS G A, et al. Kuroshio sea surface height fluctuations observed simultaneously with inverted echo sounders and TOPEX/Poseidon [J]. Journal Geophysical Research, 1995, 100(C12): 24987-24994.
- [8] FU L L, CAZENAVE A. Satellite altimetry and earth sciences: a handbook of techniques and applications [M]. San Diego: Academic Press, 2001.
- [9] 郭金运,常晓涛,孙佳龙,等.卫星雷达测高波形重定及应用[M].北京:测绘出版社,2013. (GUO J Y, CHANG X T, SUN J L, et al. Waveform retracking of satellite radar altimeter and applications[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2013. (in Chinese))
- [10] HO C R, ZHENG Q, SOONG Y S, et al. Seasonal variability of sea surface height in the South China Sea observed with TOPEX/Poseidon altimeter data [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(C6): 13891-13990.
- [11] CALMANT S, SEYLER F, CRETAUX J F. Monitoring continental surface waters by satellite altimetry [J]. Surveys in Geophysics, 2008, 29: 247-269.
- [12] DENG X, FEATHERSTONE W E, HWANG C, et al. Estimation of contamination of ERS-2 and POSEIDON satellite radar altimetry close to the coasts of Australia [J]. Marine Geodesy, 2002, 25(4): 249-271.
- [13] WINGHAM D J, RAPLEY C G, GRIFFITHS H. New techniques in satellite altimeter tracking systems [C]//Proceedings of IGARSS'86 Symposium. Zurich: ESASP-254, 1986.
- [14] DAVIS C H. A robust threshold retracking algorithm for measuring ice-sheet surface elevation change from satellite radar altimeters [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(4): 974-979.
- [15] CHALLENGOR P G, SROKOSZ M A. The extraction of geophysical parameters from radar altimeter return from a nonlinear ocean surface, in Mathematics in Remote Sensing[M]. Oxford: Oxford University Press, 1989: 257-268.
- [16] 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 X W, SONG Q T. Satellite microwave measurements of the global oceans and future missions[J]. Science & Technology, 2010, 28(3): 105-111. (in Chinese))
- [17] ERNESTO R, BRIAN D P. The measurement capabilities of wide-swath ocean altimeters [C]//Washington D C: The High-resolution Ocean Topography Science Working Group (HOTSWG) Meeting, 2001.
- [18] ENJOLRAS V P, VINCENT J C, SOUYRIS E, et al. Performances study of interferometric radar altimeters: from the instrument to the global mission definition [J]. Sensors, 2006, 6: 164-192.
- [19] FU L L, RODRIGUEZ E. High-resolution measurement of ocean surface topography by radar interferometry for oceanographic and geophysical applications [J]. The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics, 2004, 19: 209-224.

- [20] 张荣, 杨劲松, 黄韦良, 等. 三维成像雷达高度计的工作机理及其可能的海洋学应用[J]. 海洋学研究, 2009, 27(3): 99-102. (ZHANG R, YANG J S, HUANG W G, et al. Imaging mechanism and possible oceanographic applications of China imaging altimeter[J]. Journal of Marine Sciences, 2009, 27(3): 99-102. (in Chinese))
- [21] 于振涛. Jason-1 和 Topex/Poseidon 卫星高度计数据在中国海和西北太平洋的校正、印证及数据融合[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006. (YU Z T. The cross-calibration, validation and merging of Janson-1 and Topex/Poseidon data in the China seas and northwest pacific ocean [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006. (in Chinese))
- [22] 金涛勇, 李建成, 姜卫平, 等. 基于多源卫星测高数据的新一代全球平均海面高模型[J]. 测绘学报, 2011, 40(6): 723-729. (JIN T Y, LI J C, JIANG W P, et al. The new generation of global mean sea surface height model based on multi-altimetric data [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(6): 723-729. (in Chinese))
- [23] 孙文, 王庆宾, 朱志大. 联合多代卫星测高数据构建中国近海及邻域海平面异常序列[J]. 测绘学报, 2013, 42(4): 493-500. (SUN W, WANG Q B, ZHU Z D. Sea level anomaly series in China Sea and its vicinity based on multi-generation satellite altimetric data [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(4): 493-500. (in Chinese))
- [24] 刘振, 胡连波, 贺明霞. 卫星高光谱数据反演南沙岛礁区海域海水深和光学参数[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(5): 101-108. (LIU Z, HU L B, HE M X. Retrieval of shallow water depth and optical parameters around islands and reefs in the south china sea by EO-1/Hypeion data [J]. Periodical of Ocean University of China, 2014, 44(5): 101-108. (in Chinese))
- [25] POLCYN F C, BROWN W L, SATTINGER I J. The measurement of water depth by remote sensing techniques [R]. Michigan: The University of Michigan, 1970.
- [26] SANDIDGE J C, HOLYER R J. Coastal bathymetry from hyper-spectral observations of water radiance [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65: 341-352.
- [27] LYZENGA D R. Shallow-water reflectance modeling with applications to remote sensing of ocean floor, proceedings of the 13th international symposium [J]. Remote Sensing of Environment, 1979, 4(1): 583-602.
- [28] 徐升, 张鹰, 王艳姣, 等. 多光谱遥感在长江口水深探测中的应用[J]. 海洋学研究, 2006, 24(1): 83-90. (XU S, ZHANG Y, WANG Y J, et al. Application of multi-spectral imagery to water depth extraction in the Changjiang River estuary[J]. Journal of Marine Sciences, 2006, 24(1): 83-90. (in Chinese))
- [29] PAREDES J M, SPERO R E. Water depth mapping from passive remote sensing data under a generalized ratio assumption [J]. Applied Optics, 1983, 22(8): 1134-1135.
- [30] SANDIDGE J C, HOLYER R J. Coastal bathymetry from hyper-spectral observations of water radiance [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65: 341-352.
- [31] TRIPATHI N K, RAO A M. Bathymetric mapping in Kakinada Bay, India, using IRS-1D LISS-III data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(6): 1013-1025.
- [32] HE M X, HU L B, WANG Y F, et al. Depth and optical properties of water column retrieved from MERIS data around the Dongsha Atoll [C]. Beijing: ESA SP-655, 2008.
- [33] LIU Z S, ZHOU Y. Direct inversion of shallow-water bathymetry from EO-1 hyperspectral remote sensing data [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(6): 5-8.
- [34] LEE Z P, CARDER K L, MOBLEY C D, et al. Hyperspectral remote sensing for shallow waters; 2: deriving bottom depths and water properties by optimization [J]. Applied Optics, 1999, 38(18): 3831-3843.
- [35] ALPERS W, HENNINGS I. A theory of the imaging mechanism of underwater bottom topography by real and synthetic aperture radar [J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89: 10529-10546.
- [36] 傅斌, 黄韦良, 周长宝, 等. 星载 SAR 浅海水下地形和水深测量遥感模拟仿真[J]. 海洋学报, 2001, 23(1): 35-41. (FU B, HUANG W G, ZHOU C B, et al. Simulation study of sea bottom topography mapping by spaceborne SAR[J]. Acta Ocean Sinica, 2001, 23(1): 35-41. (in Chinese))
- [37] VOGELZANG J, WENSINK G J, CALKOEN C J, et al. Mapping submarine sand waves with multiband imaging radar-experimental results and model comparison [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(C1): 1183-1192.
- [38] VOGELZANG J, WENSINK G J, DE LOOR G P, et al. Sea bottom topography with polarimetric P-, L- and C-Band SAR [C]//International IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway: IEEE Press, 1990: 2467-2470.
- [39] HUANG W G, FU B, ZHOU C B, et al. Simulation study on optimal currents and winds for spaceborne SAR mapping of underwa-

- ter bottom topography [J]. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(11): 859-866.
- [41] SIEMENS C W. On determining the depth of the sea without the use of a sounding line [J]. *Philos Trans R Soc London*, 1876, 166: 671-692.
- [42] DIXON T H. Bathymetric prediction from Seasat Altimeter data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88: 1563-1571.
- [43] 黄漠涛, 翟国君, 欧阳永忠, 等. 利用卫星测高资料反演海底地形研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2002, 27(2): 133-137. (HUANG M T, ZHAI G J, OUYANG Y Z, et al. The recovery of bathymetry from altimeter data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(2): 133-137. (in Chinese))
- [44] PARKER R L. The rapid calculation of potential anomalies [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1972, 31: 447-455.
- [45] WATTS A B. An analysis of isostasy in the world's ocean 1: Hawaiian-Emperor Seamount Chain [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83(B12): 5989-6004.
- [46] TSCHERNING C C, KNUDSEN P, FORSBERG R. First experiments with improvement of depth information using gravity anomalies in the Mediterranean Sea [C]. *Thessaloniki: Department of Geodesy and Surveying University of Thessaloniki*, 1994: 133-148.
- [47] LEE Z P, HU C M, CASEY B, et al. Global shallow-water bathymetry from satellite ocean color data. *Eos* [J]. *Transactions American Geophysical Union*, 2011, 91(46): 429-430.
- [48] 郭洪涛. 利用卫星资料反演表面海流的研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2012. (GUO H T. Remote sensing inversion of ocean surface currents[D]. *Nanjing: Nanjing Normal University*, 2012. (in Chinese))
- [49] EMERY W J, THOMAS A C, COLLINS M J, et al. An objective procedure to compute advection from sequential infrared satellite images [J]. *Journal Geophysical Research*, 1986, 91: 12865-12879.
- [50] 毛志华, 潘德炉, 潘玉球. 利用卫星遥感 SST 估算海表流场 [J]. *海洋通报*, 1996, 15(1): 84-90. (MAO Z H, PAN D L, PAN Y Q. Methods of obtaining sea surface velocities field from SST images [J]. *Marine Science Bulletin*, 1996, 15(1): 84-90. (in Chinese))
- [51] TOKMAKIAN R T, STRUB P T, MCCLEAN-PADMAN J. Evaluation of the maximum cross-correlation method of estimating sea surface velocities from sequential satellite images [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1990, 7: 852-865.
- [52] BOWEN M, EMERY W, WILKIN J, et al. Extracting multiyear surface currents from sequential thermal imagery using the Maximum Cross-correlation Technique [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 131: 1665-1676.
- [53] CHAPRON B, COLLARD F, ARDHUM F. Direct measurements of ocean surface velocity from space: interpretation and validation [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C7): 76-92.
- [54] YOUNG I R, ROSENTHAL W. A three-dimension analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90: 1049-1059.
- [55] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A. Interferometric radar measurement of ocean surface currents [J]. *Nature*, 1987, 328: 707-709.
- [56] 薛文虎, 韩树宗, 朱三文, 等. 利用合成孔径技术提取表层海流的新算法[J]. *现代雷达*, 2007, 29(8): 116-120. (XUE W H, HAN S Z, ZHU S W, et al. A novel algorithm on extracting sea surface current by synthetic aperture technique[J]. *Modern Radar*, 2007, 29(8): 116-120. (in Chinese))
- [57] ROMEISER R, THOMPSON D R. Numerical study on the along-track interferometric radar imaging mechanism of oceanic surface currents [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(12): 446-458.
- [58] ROMEISER V R. Current measurements by airborne along-track InSAR: measuring technique and experimental results [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(3): 552-569.
- [59] 于祥祯, 种劲松, 洪文. 顺轨干涉 SAR 海洋表面流场迭代反演算法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(11): 2660-2665. (YU X Z, CHONG J S, HONG W. An iterative method for ocean surface current retrieval by along-track interferometric SAR [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(11): 2660-2665. (in Chinese))
- [60] LI J X, ZHANG R, JIN B G. Eddy characteristics in the northern South China Sea as inferred from Lagrangian drifter data [J]. *Ocean Science*, 2011, 7: 661-669.
- [61] 邱云, 胡建宇. 利用卫星度计资料分析热带大西洋表层环流的季节性变化[J]. *海洋通报*, 2005, 24(4): 8-16. (QIU Y, HU J Y. Seasonal variation of surface currents in the tropical atlantic derived from altimeter data [J]. *Marine Science Bulletin*,



- 2005, 24(4): 8-16. (in Chinese))
- [62] 安玉柱, 张韧, 王辉赞, 等. 基于卫星遥感数据的全球表层流场反演重构[J]. 海洋通报, 2012, 31(1): 1-8. (AN Y Z, ZHANG R, WANG H Z, et al. Ocean surface current retrieval based on satellite remote sensing data [J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31(1): 1-8. (in Chinese))
- [63] WILKIN J L, BOWEN M M, EMERY W J. Mapping mesoscale currents by optimal interpolation of satellite radiometer and altimeter data [J]. Ocean Dynamics, 2002, 52: 95-103.
- [64] BINDOFF N, WILLEBRAND J, ARTALE V, et al. Observations: oceanic climate change and sea level [R]//IPCC Fourth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [65] FENG W, LEMOINE J M, ZHONG M, et al. Mass-induced sea level variations in the Red Sea from GRACE, steric-corrected altimetry, in situ bottom pressure records, and hydrographic observations [J]. Journal of Geodynamics, 2014, 78:1-7.
- [66] 冯伟, 钟敏, 许厚泽. 联合卫星重力、卫星测高和海洋资料研究中国南海海平面变化[J]. 中国科学(地球科学), 2012, 42(3): 313-319. (FENG W, ZHONG M, XU H Z. Sea level variations in the South China Sea inferred from satellite gravity, altimetry, and oceanographic data [J]. Science China (Earth Science), 2012, 42(3): 313-319. (in Chinese))
- [67] ISHII M, KIMOTO M, SAKAMOTO K, et al. Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses [J]. Journal of Oceanography, 2006, 62: 155-170.
- [68] JIN T Y, LI J C, WANG Z T, et al. Global ocean mass variations in recent four years and its spatial and temporal characteristics [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(1): 26-34.
- [69] WAHR J, MOLENARR M, BRYAN F. Time variability of the Earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B12): 30205-30230.
- [70] QUINN K J, PONTE R M. Uncertainty in ocean mass trends from GRACE [J]. Geophysical Journal International, 2010, 181(2): 762-768.
- [71] 常金龙, 钟敏, 段建宾, 等. 联合卫星重力和卫星测高资料研究热容海平面季节性变化[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(5): 44-48. (CHANG J L, ZHONG M, DUAN J B, et al. On seasonal steric sea level variations by combining GRACE with satellite altimetry data [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(5): 44-48. (in Chinese))
- [72] LOMBARD A, GARCIA D, RAMILLIEN G, et al. Estimation of steric sea level variations from combined GRACE and Jason-1 data [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 254(1/2): 194-202.
- [73] AVISO. SSALTO/DUACS User Handbook: (M) SLA and (M) ADT near-real time and delayed time products [R]. Toulouse: Centre National d'Etudes Spatiales, 2008.
- [74] ROBERT R L, GEORGE H B, BENJAMIN R E. Operational altimeter data processing for mesoscale monitoring [J]. Marine Geodesy, 2002, 25: (1/2): 3-18.
- [75] 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): 7-11. (JIANG X W, LIN M S, SONG Q T. Active and passive microwave remote sensing technology of the HY-2A ocean satellite mission [J]. Engineering Sciences, 2013, 15(7): 7-11.
- [76] YUAN Y C, ZHAO J P, WANG H Q, et al. Current measurements and spectral analyses in the upper 450 m and deep layers of the northeastern South China Sea [J]. Science in China (Series D), 2002, 45(11): 1008-1026.
- [77] 葛磊. 压力传感逆式回声仪数据反演及与卫星高度资料比较研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2013. (GE L. Comparisons of sea surface height anomaly derived by pressure-sensor-equipped inverted echo sounders and satellite altimetry [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese))
- [78] BECKER J J, SANDWELL D T, SMITH W H F, et al. Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30-Plus [J]. Marine Geodesy, 2009, 32(4): 355-371.
- [79] HARRIS P T, ASHLEY G M, COLLINS M B, et al. Topographic features of the Bristol Channel sea-bed: a comparison of SEASAT and side-scan sonar images [J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(1): 119-136.
- [80] 滕飞, 方国洪, 王新怡, 等. 印度尼西亚近海潮汐潮流的数值模拟[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(2): 166-179. (TENG F, FANG G H, WANG X Y, et al. Numerical simulation of principal tidal constituents in the Indonesian adjacent seas [J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(2): 166-179. (in Chinese))
- [81] 聂琳娟, 吴云孙, 金涛勇, 等. 基于海水质量亏损引起的重力异常反演南海海底地形[J]. 大地测量与地球动力学, 2012,

- 32(1): 43-46. (NIE L J, WU Y S, JIN T Y, et al. Inversion of submarine topography of South China Sea by using gravity anomaly caused by mass deficiency [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(1): 43-46. (in Chinese))
- [82] BONJEAN F, LAGERLOEF G S E. Diagnostic model and analysis of the surface currents in the Tropical Pacific Ocean [J]. Journal of Physical Oceanography, 2002, 32: 2938-2954.
- [83] MAXIMENKO N, HAFNER J. SCUD: surface currents from diagnostic model [J]. International Pacific Research Center Technical Note, 2010, 5: 17.
- [84] SUDRE J, MORROW R A. Global surface currents: a high-resolution product for investigating ocean dynamics [J]. Ocean Dynamics, 2008, 58(2): 101-118.
- [85] 赵君. 热带西太平洋表层环流多时间尺度时空变化特征与机制研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2013. (ZHAO J. Multi-scale variations of the surface circulation in the west tropical pacific: spatial-temporal features and driving mechanisms [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, 2013.
- [86] 宣莉莉, 邱云, 许金电, 等. 热带东印度洋表层环流季节变化特征研究[J]. 热带海洋学报, 2014, 33(1): 26-35. (XUAN L L, QIU Y, XU J D, et al. Seasonal variations of surface-layer circulation in the eastern tropical Indian Ocean [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2014, 33(1): 26-35. (in Chinese))

## Satellite retrieval of important ocean hydrological parameters: an overview\*

WU Guiping<sup>1,2</sup>, LIU Yuanbo<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The ocean, which covers 71 percent of the Earth's surface, is a fundamental component of the global water cycle. Accurately monitoring the spatial and temporal dynamics of ocean hydro-physical parameters is important for comprehensive understanding of the global water cycle and the effective management of ocean water resources. Ocean remote sensing is a new and advanced space-based technique for estimating spatio-temporally distributed hydro-physical parameters. With five-decades of aerospace satellite sensors development, remote sensing approaches to retrieving ocean hydro-physical parameters appear mature. This paper briefly describes the principles of and retrieval algorithms for the main ocean hydro-physical parameters of Sea Surface Height (SSH), Sea Depth (SD), Sea Surface Current (SSC) and Water Volume Variation (WVV) using optical, passive-microwave and active-microwave remote sensing or combinations thereof. For each ocean hydro-physical parameter, the deficiencies of a single satellite sensor algorithm can be alleviated with the combined use of multi-sensors. Additionally, with the improvement of retrieval techniques, several regional and global hydro-physical parameter datasets have been generated. Hence, this paper also briefly describes the main datasets and their applications. Furthermore, to improve the retrieval accuracy of each hydro-physical parameter, the combination of observations from different sensors is a promising approach. As a result of international efforts, several new satellites are also scheduled to be launched into space, for example, the joint CNES-NASA satellite project SWOT (launch date in 2020) and China's second space lab, Tiangong-2 (launch date in 2016). These satellites will greatly improve our ability to monitor the spatial and temporal dynamics of ocean hydro-physical parameters.

**Key words:** ocean hydrological parameters; retrieval algorithm; optical remote sensing; microwave remote sensing; multi-sensor based retrieval; global dataset

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41430855; No. 41401506).