



武汉大学学报(信息科学版)  
*Geomatics and Information Science of Wuhan University*  
ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 全球海底地形精细建模进展与发展趋势  
作者: 李倩倩, 鲍李峰, 吴自银, 武凛, 孙和平  
DOI: 10.13203/j.whugis20220412  
收稿日期: 2022-07-06  
网络首发日期: 2022-08-12  
引用格式: 李倩倩, 鲍李峰, 吴自银, 武凛, 孙和平. 全球海底地形精细建模进展与发展趋势[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220412>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字符、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20220412

引用格式：

李倩倩, 鲍李峰, 吴自银, 等. 全球海底地形精细建模进展与发展趋势[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220412 (LI Qianqian, BAO Lifeng, WU Ziyin, et al. Progress and Development Trend of Global Refined Seafloor Topography Modeling[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220412)

## 全球海底地形精细建模进展与发展趋势

李倩倩<sup>1</sup>, 鲍李峰<sup>1,2</sup>, 吴自银<sup>3</sup>, 武凛<sup>1</sup>, 孙和平<sup>1,2,\*</sup>

1 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 大地测量与地球动力学国家重点实验室 武汉 430077

2 中国科学院大学 北京 100049

3 自然资源部第二海洋研究所 自然资源部海底科学重点实验室 杭州 310012

**摘要：**精细的海底地形模型在海底板块构造运动、水下载体航行保障、海洋资源勘探等方面具有重要作用。本文回顾了国内外海底地形探测技术和模型构建的发展, 讨论了当前全球海底地形精细建模的研究现状和面临的主要挑战, 总结了今后全球海底地形精细建模的发展趋势, 认为基于卫星测高技术的海洋重力场反演仍是未来全球海底地形精细建模的主要技术手段, 并且新体制测高卫星如双星跟飞测高和 SWOT(Surface Water Ocean Topography)二维海面高测量任务将为进一步提升海洋重力场以及海底地形模型精度提供数据源, 结合地形复杂度优化海底地形反演理论方法有望带来理论创新, 探索人工智能技术用于海底地形精细建模值得关注。

**关键词：**海底地形; 卫星测高; 重力场反演; 多波束测深; 双星跟飞测高; 全球水深模型

中图分类号: P223

文献标识码: A

海洋覆盖地球表面积的 71%, 贮藏着丰富的自然资源, 是人类生存发展不可或缺的基地。海底地形反映了海床的起伏变化, 是从事海洋调查研究的基本参量, 为开展海洋学、海洋地质学、海洋地球物理学和海洋生物学研究提供了重要基础资料。精细的海底地形模型有助于了解地球外部形态、海底构造运动和海底演化, 可用于舰艇航行路线规划及潜艇匹配导航, 以及深海资源开发、海域工程建设、海洋环境监测等, 在海洋科学研究、海洋军事保障、国民经济建设和海洋权益维护中具有重要应用价值。目前, 海底地形探测技术主要包括船基声呐技术、激光测深雷达、

卫星测高重力数据反演和遥感影像反演<sup>[1]</sup>。随着声呐技术、航天技术等的迅猛发展, 海底地形探测正经历着一场大的变革, 其中船基探测技术经历了从人工到自动、单波束到多波束、单一船基测量到立体测量<sup>[1-3]</sup>, 实现了从点、线到面, 最终到立体测量的跨越, 并结合卫星测高等反演技术, 呈现出多源、融合、立体的测量态势, 以及信息的高精度、高分辨率、全球快速获取。本文将从海底地形探测技术和模型构建的发展、全球海底地形精细建模面临的挑战和海底地形精细建模的发展趋势等方面展开论述。

---

收稿日期：2022-07-06

项目资助：国家自然科学基金（42192535, 42192533, 42174102, 41931076）；中国科学院基础前沿科学计划项目（ZDBS-LY-DQC028）。

第一作者：李倩倩, 博士, 主要从事卫星测高反演海洋重力场和海底地形等方面的研究。E-mail: 15072418205@asch.whigg.ac.cn

通讯作者：孙和平, 博士, 研究员。E-mail: heping@whigg.ac.cn

# 1 海底地形探测技术研究进展

## 1.1 船基声呐探测技术

海底地形测量是一项基础性的海洋测绘工作，目的在于获得海底地形点的三维坐标，包括测量位置、水深、水位、声速、姿态和方位等信息，其核心是水深测量。船载探测是海底地形地貌探测最直接的方式，水深测量是船载地形地貌探测最核心的工作，早期从测深杆、锤、绳等原始的方式，发展到目前的声光电等多种探测手段。因为光波、电磁波在水中衰减很快，而声波在水中能远距离地传播，当前，船载声学探测仍是海底地形地貌探测的主要方式之一。

(1) 单波束测深技术。单波束回声测深技术，是通过检测声波往返于换能器到海底的双程传播时间，再结合声速计算水深，反映海底地形的起伏变化。单波束测深技术实现了水深测量从人工到自动的变革，促进了海底地形地貌学研究的飞跃，基于大量测深数据编绘的大西洋、太平洋和印度洋图集，揭示了绵延数万公里的大洋中脊和转换断层等巨大地貌单元，为板块构造学说的诞生与发展奠定了重要基础。单波束测深技术发展历史悠久，早在 1913 年，美国科学家 R.A. Fessenden 发明了回声测深仪，其探测距离可达 3.7 km；1918 年，法国物理学家 P. Langevin 利用压电效应原理发明了夹心式发射换能器，实现了对水下远距离目标的探测，开创了近代水声学并发明了声呐。1920 年代，德国 Meteor 号采用单波束回声探测仪来探测海底地形地貌，取得 7 万多个水深数据，揭示了大西洋的中央海岭。传统的单波束测深仪有两个主要缺点：其一，仅采样测线上的点，对海底信息的反映比较粗糙；其二，波束宽度较大，在复杂地形测量时深度误差较大。目前单波束测深技术已经完全实现国产化，包括无锡海鹰和中海达等公司的产品在海洋调查中得到广泛应用<sup>[2]</sup>。

(2) 多波束测深技术。进入 20 世纪 60 年代，多波束测深系统兴起，并随着数字化计算机技术的飞速发展，逐渐出现了高精度、高效率、自动化、数字化的现代多波束测深系统，测深模式实现了从点到线、从线到面的飞跃，测量误差通常小于平均水深的 0.5%<sup>[4-5]</sup>。1962 年，美国国家海

洋调查局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 在 Surveyor 号上进行了新问世的窄波束回声测深仪海上实验。1976 年，数字化计算机处理及控制硬件应用于多波束系统，从而产生了第一台多波束扫描测深系统，简称 SeaBeam，该系统有 16 个波束，横向测量幅度约为水深的 0.8 倍，当水深在 200 m 左右的大陆架边缘时，海底的实际扫海扇面宽度约为 150 m，当水深为 5000 m 左右时，海底实际覆盖宽度约为 4000 m。多波束测深系统的出现，属于一场革命性的变革，深刻地改变了海洋调查方式及最终的成果质量，多波束测深属于“面”状测量，它能一次给出与航迹线相垂直的平面内成百上千个测深点的水深值，所以它能准确、高效地测量出沿航迹线一定宽度(3~12 倍水深)内水下目标的大小、形状和高低变化<sup>[3]</sup>。目前，浅水多波束技术已经完全实现国产化，如：北京海卓公司、无锡海鹰、哈尔滨工程大学、中国科学院声学研究所、浙江大学等的产品已经推向市场，国产深水多波束系统也已研制成功<sup>[2]</sup>。

自 1970 年代以来，中国持续利用声呐技术对南海、渤海、东海等海域的海底地形和地质展开调查，取得了大量水深资料。1994 年中国引入多波束测深系统，并启动了多个重大基础勘测项目。2012 年“中国近海海洋综合调查及评价专项”的主要工作之一就是测量近海海底地形地貌。该工作采用单波束、多波束、测扫声呐结合的方式获得了大量准确可靠的水深数据，完成了  $77 \times 10^4 \text{ km}$  水深地形测线，调查面积达  $34.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。2018 年，装载有多波束系统 SeaBeam 的新一代科考船“向阳红 01”完成环球综合考察，首次对南极海底进行了高精度、大范围、全覆盖扫描测量，取得前所未有的成果<sup>[6-7]</sup>。

(3) 其他主要地形地貌探测技术。随着相关技术进步，历经半个多世纪的发展，船基测深技术不断完善，主要的海底地形地貌探测技术还包括：侧扫声呐技术、相干型测深侧扫声呐技术、高分辨率双频识别声呐技术、水下三维扫描声呐技术、合成孔径声呐技术、移动三维激光扫描系统等<sup>[2]</sup>，此外，机载激光雷达测深技术、无人船海底地形测量技术、基于潜航器或深拖系统的测深技术以及深海科学观测光缆系统相继出现，且

研究和应用日益成熟。目前海底地形已形成了立体测量体系和信息的高精度、高分辨率、高效获取态势<sup>[3]</sup>。

## 1.2 机载激光雷达测深技术

机载激光雷达(Airborne Lidar Bathymetry, ALB)技术是一种采用扫描脉冲激光测量水深/水下地形的主动式航空遥感技术<sup>[8]</sup>。其依靠安装在飞机上的 ALB 系统，以一定的入射角和扫描方式向水面发射蓝绿激光脉冲，精确探测水面反射回波和水底反射回波的时间，结合激光传播速度、水的折射率、飞机的位置和姿态、激光束指向信息等，计算水底三维位置坐标及水深。依赖于激光穿透海水的能力，机载激光雷达技术一般用于测量几十米水深范围的海域海底地形。该技术是一种主动式、大面积覆盖、低成本的海底地形测绘手段，具有测量效率高、响应速度快、作业区域广、测量精度高、点云密度大等特点，是高效获取高精度近岸海底地形的重要手段，尤其对“人下不去、船上不来”泥质海岸带的海陆地形一体化测量更具优势<sup>[9]</sup>。机载激光海底地形测绘并不能取代传统的声学及多光谱成像方法，在深海区域仍以声呐技术作为普查方法使用，但在近海大陆架，机载激光无疑是最有效的测深手段，而正是这一地区集中了人们开发海洋的大部分活动，因此，机载激光雷达技术具有广阔的应用前景。

自 20 世纪 60 年代起，美国、加拿大、澳大利亚等发达国家就长期开展机载激光雷达水深测量技术的研究，研制出多种成熟的机载激光雷达测深系统。1968 年，美国的锡拉丘兹大学成功研制出世界上第一个用激光进行水下探测的装置，并通过基础理论研究验证了激光测深的可行性<sup>[10]</sup>。1971 年，美国海军研制的激光测深系统 PLADS(Pulsed Light Airborne Depth Sounder)实验成功。1970 年代末，瑞典国防研究院成功研制了机载的 FLASH 激光水深探测系统，并于 1980 年代末进行了首次探测试验，测深能力为 35 m<sup>[9]</sup>。1990 年代，加拿大的 Optech 公司研制了海底地貌测绘系统 SHOALS 200(Scanned Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey)，此后，Optech 公司相继推出一系列产品，包括 SHOALS3000T、CZMIL、Aquarius 和 Titan 等，其中

SHOALS3000T 在许多国家得到广泛长期应用，其最大探测深度 50 m 左右，垂直精度达 0.25 m，水平精度达 2.5 m<sup>[9]</sup>。此外，荷兰 Fugro 公司生产的 LADS 系列、德国 Leica 公司的 HawkEye 和 Chiroptera 以及美国 NASA 生产的 EAARL 系统等在国外浅水地形测量中都获得了广泛的应用<sup>[11-16]</sup>。

中国自 20 世纪 80 年代末开始机载激光雷达测深系统的研究工作，40 多年以来，取得了一定的研究成果，其中主要以华中科技大学、中国海洋大学、中国科学院上海光学精密机械研究所多个单位为代表，开展了长期的相关技术研究和系统研制，形成了多套原理样机或产品样机。2002 年，中国科学院上海光学精密机械研究所开展机载激光测深技术研发，开发了一套机载双频激光雷达(Laser Airborne Depth Measurement, LADM-I)，之后中国科学院上海光学精密机械研究所不断对系统进行优化，并于 2017 年成功研制了新型激光雷达 Mapper5000，该系统大大提升了浅水探测的能力<sup>[17]</sup>。

## 1.3 卫星测高重力数据反演技术

以船基声呐为代表的传统海底地形测量效率低、成本高、测量时间较长，短时间内无法满足全球范围海域全覆盖的海底地形测量需求。而卫星测高技术，凭借其全天时、全天候、全覆盖、快速获取信息的优势，为全球海域海底地形测量提供了新的技术手段。重力异常与海底地形在一定波段内存在较强相关性，基于这一理论，根据测高技术获取的全球海洋重力异常或重力梯度异常，即可反演全球尺度的海底地形，为地球系统科学研究提供数据支撑。

利用海洋重力异常反演海底地形的理论基础可追溯至 1972 年，Parker<sup>[18]</sup>详细推导了引力位在频率域的表达式，提出了由于物质界面起伏引起重力异常变化的频率域模型，为海底地形反演的发展奠定了基础。Watts<sup>[19]</sup>采用交叉谱技术分析了夏威夷皇帝海山链重力异常和海深剖面的关系，研究了考虑地壳均衡的重力异常导纳函数。Dixon 等<sup>[20]</sup>证实了重力异常与海底地形在一定的波段存在较高相关性，利用 Seasat 卫星测高获得的大地水准面高反演了夏威夷北部 Musician 海山海底地形，表明了大地水准面与海底地形在 50-300 km 相关性较强。Smith 和 Sandwell<sup>[21]</sup>利用海

洋重力异常和海底地形在 15-160 km 高度相关的特点，采用移去-恢复技术计算了南大洋海底地形模型。基于以上理论，许多学者开展了利用海洋重力异常反演海底地形的方法研究，到目前为止，由海洋重力异常反演海底地形的常用方法主要有导纳函数法、最小二乘配置法、Smith 和 Sandwell (S&S) 法和重力地质法 (Gravity-Geologic Method, GGM) 等。

导纳函数法主要基于 Parker 的异常扰动位计算公式和 Watts 的 3 个板块模型，经过傅里叶变换、极坐标积分变换、泰勒级数等一系列推导得到频率域内海底地形起伏计算海面重力异常的级数展开式，然后利用弹性板挠曲理论以及均衡模型最终建立了反演海底地形的导纳函数模型。20 世纪末，国内外学者利用导纳函数法进行了大量海底地形反演计算，Dixon 等人<sup>[20]</sup>、Smith 和 Sandwell<sup>[21]</sup> 等根据岩石圈挠曲补偿模型和理论，分析了若干海域海洋重力异常与海底地形的响应函数，认为在不同波长范围内，补偿模式不同。王勇<sup>[22]</sup> 等对重力异常与海深的相关性以及重力—地形转换函数进行了研究，并利用测高重力场反演了中国海及邻近海域高分辨率的海底地形。罗佳等<sup>[23]</sup> 利用导纳函数法反演了中国南海的海底地形，经与 ETOPO5 水深模型对比，分辨率大大提高。范雕<sup>[24]</sup> 联合重力异常和重力梯度异常数据，采用导纳函数法反演了西南太平洋海域海底地形模型。导纳函数法严格考虑了海底地形的地球物理环境，算法理论较严密，结算过程相对复杂。

最小二乘配置法主要基于随机过程中的最小二乘配置理论。1994 年，Tscherning 等首次采用最小二乘配置法，利用重力数据反演了地中海某海域的海底地形<sup>[25]</sup>。Calmant 通过结合最小二乘法，提出了地形反演的空域法，并利用迭代法获取了最终反演海深值<sup>[26]</sup>。Calmant 等采用空域法与最小二乘法，并融合船测海深数据、卫星测高数据和船测重力等构建了全球海底地形模型，并得到了其误差估计<sup>[27]</sup>。Arabelos 和 Hwang 也采用类似的方法，反演了地中海和中国南海的海底地形<sup>[28-29]</sup>。利用最小二乘配置法反演海底地形需已知海深与重力数据之间的自协方差函数和互协方差函数作为先验信息，而协方差函数的计算较困难，因此，该方法较少使用。

Smith 和 Sandwell (S&S 法) 是在导纳函数法

的基础上发展而来的，其基于大量重力与海深数据的统计特征发现，重力异常经滤波并向下延拓后与海底地形存在良好线性关系，并建立了数学函数关系，获取重力数据与海底地形的比例系数，进而计算出特定波段内海底地形结果<sup>[21]</sup>。Smith 和 Sandwell 等<sup>[30]</sup> 基于该方法，考虑了初步模型与船测数据的差异，构建了全球 2'×2' 的海底地形模型；Sandwell 等<sup>[31]</sup> 利用测高卫星 Cryosat-2 和 Jason-1 所反演得到的海洋重力数据，构建了全球 1'×1' 海底地形模型并研究了海底的板块构造，结果表明利用新的卫星测高数据可显著提高海底地形反演精度。眭晓红等<sup>[32]</sup> 基于 S&S 方法，利用重力异常在北太平洋部分区域开展了海底地形反演试验，并讨论了非线性二次项和三次项对结果的影响。胡敏章等<sup>[33]</sup> 利用多源卫星测高资料计算的新版全球重力异常，联合船测水深资料，构建了全球 1'×1' 海底地形模型 BAT\_WHU2020，并对模型精度进行了分析评价。S&S 法考虑海底地形地球物理环境的同时，方法简单，具有较强可操作性，使用比较广泛。

1972 年，重力地质法被提出应用于陆地基岩厚度探测，但由于陆地上密度差随深度的变化具有较大差异，限定了其在陆地上的反演应用。海底洋壳和海水之间密度差异变化较小，这使得重力地质法十分适用于利用卫星测高重力异常反演海底地形的研究。Kim 等<sup>[34]</sup> 采用重力地质法在南极洲德克雷海峡进行了海深反演试验，最终精度达到 29 m。Hsiao 等<sup>[35]</sup> 通过向下延拓方法推测岩石圈和海水之间的密度差异常数，依据重力地质法在格陵兰岛南部海域和南阿拉斯加两个海域进行了海深反演试验，结果标准差分别为 35.8 m 和 50.4 m。Hsiao 等<sup>[36]</sup> 利用 Geosat/GM、ERS-1/GM、Jason-1/GM 和 Cryosat-2 等测高卫星恢复了南中国海分辨率为 1'×1' 的重力场模型，并采用重力地质法反演了南中国海海底地形，其检核精度接近 100 m。胡敏章等<sup>[37-38]</sup> 利用重力地质法反演了皇帝海山的海底地形，提出了以船测水深为约束获取密度差参数的方法，并进一步提出顾及局部地形改正，以提高海底地形反演精度。欧阳明达等<sup>[39]</sup> 采用重力地质法反演了中国南海 1'×1' 海底地形，与检核水深相比，其水深反演精度优于 100 m。李倩倩等<sup>[40]</sup> 采用重力地质法，基于测高海洋重力异常反演了中国南海 1'×1' 海底地形，与

船测水深对比，模型精度达到了 70.32 m。相对于其他方法，重力地质法原理简单，易于计算，该方法的实施关键在于密度差常数的确定，且其反演精度依赖于船测数据作为控制点的密度与分布。

除上述四种主要方法外，Wang<sup>[41]</sup>根据 Wessel 等提出的垂直重力梯度异常能够放大短波信号，抑制长波信号的理论，推导了采用垂直重力梯度异常反演海底地形的方法。胡敏章等<sup>[42]</sup>，首次利用重力垂直梯度异常和船测水深数据构建了全球海底地形模型。Jena 等<sup>[43]</sup>采用人工神经网络方法反演了阿拉伯海的水深，精度在 94% 的区域优于 150 m，在 2% 的区域优于 50 m。Yang 等<sup>[44]</sup>引入模拟退火法，利用重力梯度数据反演水深，提高了西太平洋崎岖海底地形的精度。在全球海洋重力异常及海底地形研究具重要影响力的 Sandwell 等<sup>[45]</sup>正在利用机器学习的方法融合多源海深数据以提高全球海深模型的精度。

## 1.4 遥感影像反演技术

星载遥感影像反演技术是借助电磁波在水中传播和反射后的光谱变化，结合实测水深，构建反演模型，实现大面积水深反演，再结合遥感成像时刻水位反算得到海底地形。由于遥感影像覆盖面积大、可全天时全天候获取、重复周期段、时效性强，星载遥感影像反演技术成为测量水深的一种重要手段，是海洋探测技术体系中重要的组成部分，其随着卫星技术、电子技术、光电技术、微波技术等高新技术的发展而迅速发展。

1972 年以来，国内外相继发射了多颗携有空间探测器的卫星，其中以 Landsat、IKONOS、MOS-1、Pleiades 和 SPOT 最引人注目，自此科研人员开启了卫星遥感海洋测绘应用研究。早在 1960 年代末，美国密执安环境研究所首先从事应用遥感信息进行水深反演，之后随着卫星遥感技术的发展，遥感影像水深反演技术从定性研究逐步发展为定量研究。1978 年，Lygenga 提出了利用主成分分析法提取水深和水体地质信息的方法，该方法弥补了波段比值算法的不足，提高了计算精度<sup>[46]</sup>。1984 年，美国国防部制图局经多年的研究认为：卫星遥感资料是浅海海底地形和水下碍航物信息的重要来源。此后，Stove 基于研究区域的先验知识，建立了水深反射率参数与实

际水深的相关性及两者间的回归方程<sup>[47]</sup>。1998 年，Sandige 提出了 BP 人工神经网络模型，确定了遥感反射率与实际水深之间的相关关系<sup>[48]</sup>；王国兴等利用 SPOT 卫星多波段图像资料获取安徽武昌湖的水下地形图，并与实测水下地形图进行对比，吻合良好<sup>[49]</sup>。2007 年，田庆久等结合多光谱遥感信息传输方程推导出水深对数反演模型，采用 TM 遥感影像对江苏近海进行水深反演，得出 0-15 m 水深，模型预测水深与实测水深之间拟合较好<sup>[50]</sup>。2021 年，纪茜等通过实验证明了国产卫星高分系列能代替国外卫星 WorldView-2 来进行遥感水深反演<sup>[51]</sup>。

## 2 全球海底地形模型构建研究进展

随着声学、激光雷达、航空航天等技术的蓬勃发展，海底地形探测技术不断革新，包括已有技术的改进以及新技术的涌现，其中以多波束测深为代表的船基声呐技术以及基于卫星测高的重力数据反演技术是获取全球精细海底地形信息的主要技术手段。到目前为止，利用多波束测深技术已测得全球海域约 20% 高精度海底地形信息，其余 80% 海底地形数据基本来源于卫星测高技术<sup>[52]</sup>。随着卫星测高数据的不断丰富及重力数据反演海底地形技术的不断改进，由卫星测高技术获取的海底地形数据精度和分辨率也在不断提高。基于上述技术，全球精细海底地形模型的研究发展到了一个新的高度，国内外机构构建了多种全球海底地形精细模型，主要包括 ETOPO 系列、DTU 系列、S&S 系列、SRTM 系列、GEBCO 系列等，下面将详细展开介绍。

### 2.1 ETOPO 系列

1974 年，根据海洋盆地等深线图，NOVOCEANO 采用计算机插值技术生成了当时覆盖范围最广的海洋海底地形格网模型 DBDB-5，其空间网格分辨率为 5'，该水深模型为之后海底地形模型发展提供了丰富的数据来源。1988 年，美国地球物理数据中心(National Geophysical Data Center, NGDC)发布了网格分辨率为 5'×5' 的全球地形模型 ETOPO5。ETOPO5 中海洋区域的深度信息主要来源于 DBDB-5，陆地区域地形数据主要来源于 FNOC 提供的空间分辨率为 10' 的地形数

据。1993年,Smith通过交叉验证评估了全球数字水深模型ETOPO5的精度,结果表明:该模型存在明显“梯田现象”,含有较大的误差。该研究表明仅利用船测水深数据进行插值得到高分辨率海底地形,其精度不够可靠,原因是早期的船测水深数据存在较大误差,且船测数据十分有限。

2001年,NGDC发布了空间网格分辨率为 $2' \times 2'$ 的全球地形模型ETOPO2,该模型后续于2006年进行了修正和更新,更新后的版本为ETOPO2v2。新版本模型经纬度覆盖全球,空间分辨率为 $2' \times 2'$ ,垂直精度为1 m,其水平基准为WGS-84,垂直基准为平均海平面。数据源使用了Smith和Sandwell 1997年发布的8.2版本卫星测高海洋测深数据集<sup>[30]</sup>、GLOBE(Global Land One kilometer Base Elevation) 30"分辨率的陆地地形数据、IBCAO(International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean)1.0版本的高纬度(高于64° N)水深数据、CRM(Coastal Relief Model)美国海岸线至中远海水深资料、以及GLBD(Great Lakes Bathymetric Data)美国五大湖水深采样数据集等。

2009年,NGDC又发布了ETOPO2v2的改进版本ETOPO1<sup>[53]</sup>,以1'分辨率覆盖全球,旨在为海啸预测、洋流建模以及地球可视化做出贡献。其分为“Ice Surface”和“Bedrock”两个版本,这两个版本在南极洲和格陵兰岛之外的所有地区相同。“Ice Surface”涵盖南极和格陵兰冰盖表面,

“Bedrock”涵盖了冰盖下方的基岩。ETOPO1海底地形模型基于大量相关模型和区域实测数据,融合了全球的陆地地形和海洋深度数据。其中,海洋部分绝大部分海深数据来源于美国SIO发布的海底地形模型,陆地地形数据主要来自于GTOPO30。相较于ETOPO2v2和ETOPO5全球地形模型,ETOPO1全球地形模型精度显著提高。目前,ETOPO2v2和ETOPO5模型基本不再使用。

## 2.2 S&S系列

美国SIO(Scripps Institution of Oceanography)Sandwell教授团队长期以来一直致力于海洋重力场与海底地形精细建模的研究,自20世纪90年代起便不断更新发布全球海洋重力异常和海底地形模型。1994年,Smith和Sandwell在前人利用重力数据反演海底地形的研究基础上,发展了利用卫星测高重力异常数据反演海底地形方法,并

基于卫星测高数据、船测水深数据以及GTOPO30数据计算了全球 $2' \times 2'$ 分辨率的地形产品topo\_5.2<sup>[21]</sup>。之后增加了40%的船测水深数据、海岸线数据、等高线数据构建了topo\_7.2,并于2000年发布。2007年,基于全球海域重力场模型反演的SS V16.1,发布了topo\_9.1,相较于之前版本,新版本有了重大改变,其分辨率提高到 $1' \times 1'$ 。之后,随着测高数据不断积累和数据处理技术不断优化改进,Sandwell团队融合多源、高质量的船测水深数据,包括多波束水深数据,发布了多期全球海底地形模型,精度和分辨率不断提高,覆盖范围也不断扩大。其中,topo\_14.1添加了美国所有的多波束数据。topo\_16.1基于SS V22海洋重力场模型,该模型采用了所有的Cryosat-2、Jason-1和Envisat测高卫星数据,精度是之前重力模型的两倍,此外,topo\_16.1模型剔除了一些存在误差的测深数据,并增加了446条多波束数据,因此,该模型在精度上有较大改进。直至2020年,基于SS V29.1重力场模型,进一步优化向下延拓滤波器参数,发布了topo\_20.1。2021年,发布了该系列的最新版本topo\_23.1,是截至当前公认的精度最高的全球海底地形模型之一。2022年,Sandwell等结合基础测绘信息和地质统计资料,建立了深海丘陵的随机模型和微小海山的高斯模型,并以此构建了高分辨率的全球合成海底地形模型SYNBATH<sup>[52]</sup>。

## 2.3 DTU系列

与S&S系列模型类似,丹麦科技大学空间实验室(DTU SPACE)基于其发布的卫星测高海洋重力场产品,计算了DNSC-DTU系列水深模型。2008年,发布了空间分辨率为 $1' \times 1'$ 的全球海底地形模型DNSC08BAT<sup>[54]</sup>在重力信号与水深信号相关性强的20-120 km波段使用DNSC08的重力数据来反演水深,在其他频带使用GEBCO-1的数据,改善了GEBCO-1浅海周围的精度。2010年,发布的DTU10BAT<sup>[55]</sup>采用了改进的测高卫星数据,主要改进有:重新跟踪了ERS-1和ENVISAT测高数据来提高测距精度,并使用了地球物理校正模型,如海潮模型等。2018年,发布了DTU18BAT,其采用了3年的Sentinel-3A和7年的Cryosat-2 LRM数据,并使用了FES2014作为海潮模型改正。

## 2.4 SRTM 系列

2009年, SIO等联合发布了网格分辨率为30"的全球地形模型 SRTM30+<sup>[56-57]</sup>, 其中陆地地形数据来自 SRTM30, 海洋区域水深数据来自 Smith 和 Sandwell 发布的海底地形模型, 在洋脊和美国沿海地区使用了来自 NGDC 的多波束数据, 北极测深数据来自 IBCAO。2014年, SIO 基于 SRTM30+开发了 SRTM15+V1.0<sup>[58]</sup>, 其空间网格分辨率为 15", 能更好地揭示深海丘陵等地貌。SRTM15+V1.0 的陆地数据基于 SRTM 和 ASTER 的最佳可用数据, 格陵兰岛和南极洲的冰盖高程数据基于 Cryosat-2 和 IceSat 卫星数据, 海洋水深数据主要基于 V24.1 海洋重力异常反演, 北极的水深数据基于 IBCAO 网格。2019年, SRTM15+V2.0 发布, 其海洋地形数据使用了新的测高重力场模型 SSV27 反演, 该模型采用了 Cryosat-2、SARAL/Altika 和 Jason-2 的重跟踪数据, 使重力异常恢复的最小波长提高了 1.4 km, 重力数据预测深度精度也提高了 1.24%<sup>[59]</sup>。之后, 根据新的海洋重力异常和更多的船测水深数据, SIO 又陆续发布了 SRTM15+V2.1、SRTM15+V2.2, 目前, 该系列水深模型的最新版本为 SRTM15+V2.3。

## 2.5 GEBCO 系列

GEBCO(GEneral Bathymetric Chart of the Oceans)是联合国教科文组织下属的大洋水深制图项目。2008年, 年发布包含 SRTM30+模型和卫星测高水深模型 V11.1 的 GEBCO\_2008 模型, 格网分辨率为 30"。2014年, GEBCO\_2014<sup>[60-61]</sup>发布, 其空间分辨率为 30", 其中北极的陆地数据源自 IBCAOv3 数据, 南极陆地数据取自 IBCSO(International Bathymetric Chart of the Southern Ocean), 除极地外的陆地区域来自 SRTM30, 海洋数据基于多波束数据格网化和卫星测高重力反演, 据统计, 仅有约 18% 的格网数据基于多波束和单波束水深实测数据。2019年, 日本基金会(Nippon Foundation)与 GEBCO 的合作项目“Seabed 2030”<sup>[62]</sup>开发了第一个地形模型产品 GEBCO\_2019, 其空间分辨率为 15"。产品使用 SRTM15+V1.0 为先验模型, 在此基础上新增

加了四个 Seabed 2030 区域中心开发的多波束水深数据集。2020年, 以 SRTM15+V2.0 为基础, 开发了 GEBCO\_2020。最新发布的版本为 GEBCO\_2021, 空间分辨率仍为 15", 提供了格陵兰岛和南极洲的冰下地形信息。

## 2.6 国内全球海底地形模型

自 20 世纪 90 年代以来, 中国科学院、武汉大学等有关研究院所持续开展了卫星测高技术在海洋潮汐、重力场建模, 以及海底地形等方面的应用研究。在全球海底地形建模方面, 武汉大学李建成院士团队于 2014 年发布了首款联合卫星测高重力垂直梯度异常和船测水深构建的 1' × 1' 全球海底地形模型 BAT\_VGG2014<sup>[42]</sup>。2020 年, 利用自制的全球重力异常模型 Grav-Alti\_WHU<sup>[63]</sup>, 联合船测水深资料, 发布了新版全球海底地形模型 BAT\_WHU2020<sup>[33]</sup>。2021 年, 联合 SIO 卫星测高垂直梯度异常 (curv\_30.1.nc) 和来自美国国家环境信息中心 (NCEI)、日本海洋开发机构 (JAMSTEC)、澳大利亚地球科学机构 (GA) 的多波束、单波束等船测水深资料, 构建了 1' × 1' 全球海底地形模型 BAT\_VGG2021<sup>[64]</sup>, 与船测检核数据之差的标准差在 40~80m, 与 SIO topo\_20.1.nc 精度相当, 较 BAT\_VGG2014 版精度显著提升, 在中国海及邻区的局部区域空间分辨率达 15" × 15"<sup>[65]</sup>。

## 3 全球海底地形精细建模存在的问题

多种海底地形探测技术各有长短, 相辅相成, 共同促进全球海底地形精细建模的蓬勃发展。其中, 以多波束测深为代表的船载地形地貌探测技术精度较高, 可达米级, 应用广泛, 但缺点是效率低下、探测成本高昂, 目前全球约有 20% 的海域实现了全覆盖的多波束探测, 如以现代船测技术实现全球深海海域的地形精密探测则需要 200 船行年 (Ship-Year) 以上的时间。机载激光雷达技术测量精度高, 可达米级, 覆盖范围广, 是一种高效的海底地形测绘手段, 但受限于激光脉冲对海水的穿透能力, 该技术主要用于浅水区域 (几十米) 的海底测绘。且中国在机载激光雷达测深系统研制方面还处于试验阶段, 未形成成熟的商品化产品, 尚不能满足大规模测深应用的实际

需求。利用空天信息可以有效弥补上述探测技术的局限。目前,重力卫星和测高卫星提供的重力数据已覆盖全球,利用海洋重力数据反演具有获取全球海域水深的优势,依据该技术构建的全球海底地形模型网格分辨率达到 $1' \times 1'$ ,但重力数据仅对波段在20~200 km的水下地形起伏变化敏感,对小于2 km的剧烈地形变化几乎无法分辨。同时反演需要一定的先验信息。因此基于重力数据的水深反演在有船测深数据约束,或海底地形平坦的开阔海域使用效果更好。在大部分海域精度相对较低,约为百米级。利用卫星遥感反演地形可以在全球大规模采集数据,获取测量船难以到达的浅海区域,但目前只局限在50 m以浅的海域,且遥感影像受雷达和光谱仪参数以及海洋环境影响较大,普适性差,匹配船测水深和水文条件给与验证可以提升地形的反演精度,但总体而言目前仍处于科学探索阶段。

综上所述,利用海洋重力数据反演海底地形技术是目前快速获取全球范围海底地形的主要技术手段,且随着测高卫星技术的发展和测高海洋重力数据的积累,海洋重力数据反演技术在全球海底地形精细建模中发挥了重大作用,以该技术为支撑,构建了一系列精细的全球地形模型,加深了人类对海洋深处的认知。但需要指出的是,这一系列的成果在空间分辨率和精度水平上的局限性,还远远不能满足相关学科对海底地形精细结构认知的需求。例如,潜器水下航行需要精细的海底地形分布图保障安全,目前的海底地形模型空间分辨率和精度无法满足水下航行规划的需求。深海丘陵的走向、斜率对于了解海底形成的地质过程甚至地球演化过程有着重要作用,但目前的海底地形模型空间分辨率较低,无法探测深海丘陵等小尺度海底特征。尽管目前已有的海底地形模型网格空间分辨率达到 $1' \times 1'$ 甚至更高,但由于滤波以及向上延拓作用,基于测高海洋重力场反演的海底地形实际分辨率仅为12 km左右,这与Seabed 2030项目的目标分辨率相差10倍<sup>[52,59]</sup>。实现这一目标取决于全球范围内测定海洋重力以及利用重力数据反演海底地形信息的理论技术发展水平。

当前,卫星测高重力数据反演技术的局限性主要体现在卫星测高海洋重力数据作为源数据的实际分辨率和精度较低,以及海底地形反演中的

相关性、滤波平滑处理等阻碍了海底地形模型的实际分辨率及精度的提升,如何切实提升卫星测高海洋重力数据的分辨率及精度、优化海底地形反演理论方法,从而提高海底地形模型的分辨率及精度,将是今后全球海底地形精细建模的工作重点,并有望在新体制测高卫星加入、考虑地形复杂度下优化海底地形反演理论、利用人工智能技术反演海底地形等研究中得到改进。

## 4 全球海底地形精细建模发展趋势

测高卫星重力数据反演海底地形是当前全球地形模型产品的主要贡献者,船测水深数据所占的比例很低。现有产品分辨率号称为 $15''$ ,但分辨率真正达到 $15''$ 的部分仅占约20%。尽管海洋重力数据反演高分辨率海底地形模型的能力有限,但在未来一段时间内,利用测高卫星重力数据反演海底地形仍将是全球海底地形精细建模的主要方式,直至利用声呐技术完成全球海域测量。船基声呐技术、机载激光测深雷达技术以及遥感影像反演技术作为全球海底地形信息获取的重要辅助手段,也将在各技术领域进一步发展,总体上全球海底地形探测仍呈现出立体、多源测量态势,向高精度、高分辨率、高效率、自动化、智能化、集群化方向发展。具体表现如下:

### 4.1 卫星测高重力数据反演技术

#### 4.1.1 新体制测高卫星为海底地形反演提供新的数据源

在传统的单颗卫星采用回归任务轨道或大地测量轨道的技术体制下,由于卫星径向轨道误差、电离层延迟和海况偏差等误差项的影响,海面高测量精度无法进一步有效提高,现有海洋重力场模型构建精度几乎达到了现有技术体制下的瓶颈。并且,由于卫星轨迹多呈南北走向,沿轨大地水准面梯度对南北向垂线偏差更加敏感,所计算的垂线偏差南北分量精度高于东西分量精度,限制了海洋重力场反演的精度,由此反演的海洋重力场二维短波分辨能力不均匀,在除与卫星轨迹平行的其他方向的短波较差。海底地形模型,尤其

是中短波波段信号，由海洋重力异常根据特定数学关系反演而来，因此，传统模式测高卫星同样限制了现有海底地形模型的精度。

为解决上述问题，国内外学者研究了多种新体制测高卫星，旨在高分辨率、快速覆盖获取二维海面高。比如，美国正在研制的SWOT(Surface Water Ocean Topography)卫星系统，即为利用双刈幅合成孔径雷达干涉仪，测量120 km宽的海面高条带，重复周期为21天，可同时提供高时空分辨率、高精度的二维海面高数据。中国学者根据实际需求提出了双星跟飞测高全球海域重力场测量模式，旨在于相对较短的时间内获取全球海域1'分辨率、精度为2~3 mGal的海洋重力异常<sup>[66]</sup>。两颗卫星位于同一轨道面，前后相距30 km(约4 s)同时对海面进行观测。回归周期设为172天，考虑地球自转因素，两颗星的瞬时地面轨迹间距为1'，单颗星轨迹间距为2'，顾及小周期间的转移时间，以及升轨、降轨等因素，理论上双星跟飞测量大约2.3年后可完成1'轨道间距全球覆盖<sup>[67]</sup>，获取高精度的二维海面高/海面高差数据。此外，还有学者提出测高卫星组网计划，旨在获取高时空分辨率的高精度测高产品。

这些新型测高卫星计划，均可实现沿轨道和跨轨道的2维海面高(差)测量，通过差分获取多方位大地水准面梯度，降低地球物理项的改正需求，同时解算海洋垂线偏差南北和东西分量，并使东西分量与南北分量精度相当，从而极大提高海洋重力场的空间分辨率和精度，特别是提高浅大陆边缘的空间分辨率，进而提升海底地形的分辨率和反演精度。

## 4.1.2 丰富的先验信息优化海底地形

### 反演理论方法

海底地形与海洋重力异常/垂直重力梯度异常在一定波段内具有较强的相关性，这是测高重力场反演海底地形的理论基础。受海洋岩石圈挠曲均衡机制影响，一方面海底地形产生的重力异常随水深的增大而衰减，即存在水深“延拓衰减效应”；另一方面洋壳均衡效应削弱了海底地形的中长波信号，即存在洋壳“均衡抵偿效应”。因此，在短波和中长波部分，海底地形与海面重

力/垂直梯度异常的相干性因水深“延拓衰减效应”和洋壳“均衡抵偿效应”的影响而迅速减弱<sup>[21,24]</sup>。上述两种效应均与海底地形分布等先验信息密切相关。先验信息的丰富程度直接影响着测高海洋重力异常反演海底地形的理论方法，如反演波段、均衡模型的选取、有效弹性厚度等参数的确定等。

随着海底地形探测技术的发展，全球海域关于海底地形的先验信息越来越丰富、精确，基于岩石圈挠曲均衡理论建立的海洋重力场与海底地形的响应关系有望进一步改进优化。如考虑地形复杂度对响应关系的影响，在不同地形复杂度下，研究有效弹性厚度、高次项、密度差、反演波段等对海底地形反演精度的影响，在极区，考虑海冰对海底地形反演方法的影响等，建立多尺度下海洋重力数据与海底地形的响应关系，从而提高测高卫星海洋重力数据反演海底地形的分辨率和精度。

## 4.1.3 人工智能技术用于海底地形反

### 演值得关注

大数据时代催生了人工智能技术，人工智能科学领域的大量的海量数据处理算法及工具使其在地震学、地球物理学、地球化学等地学领域得到广泛应用并取得较好成果。国内外学者已尝试将人工智能技术用于测高海洋重力数据反演海底地形以及联合多源水深数据构建全球水深模型，并取得初步成功。人工智能概念相当广泛，功能强大，目前还不完全清楚其在海底地形模型构建领域将带来何种突破，但丰富的空间数据和集成数据必将收益于人工智能领域开发的数据操作、处理、解释等工具，从而大幅提高其应用价值。因此，人工智能技术用于海底地形反演值得国内外学者关注和探索。

## 4.2 其他海底地形探测技术

### 4.2.1 多波束测深系统

超宽覆盖、高精度、高分辨率是多波束测深系统未来的发展方向。覆盖宽度和测量精度是影

响多波束测深的两个重要指标。换能器扇面开角影响覆盖宽度,为提高覆盖宽度,国内外学者和厂家正致力于换能器基阵形式研发,采用U型、V型阵列分布替代传统的Mill's交叉阵,尤其是V型阵,利用两套均能独立收发基阵构成V型安装,使每套基阵水平夹角合理设置后发射波束主轴偏离基阵正下方,增强边缘波束方向的能量,利于接收边缘波束海底回波信号<sup>[3]</sup>。

分辨率是衡量多波束测深水平的另一个重要指标,决定了水下微小目标及复杂地形的精细探测能力。除采用双基阵提高数据分辨率外,近年来,相干研究从机理上解决了多波束测深分辨率受波束数限制的问题。因具有算法简单、波束数显著增加、不增加硬件成本等优点,相干声呐技术受到越来越多的科研单位及生产厂商重视。

## 4.2.2 机载激光雷达测深

相较其他测量方法,机载激光雷达测深系统(ALB)对于解决近岸浅水、潮间带等地形测量更具优势,但近岸海水浑浊,导致激光脉冲能量急剧衰减,穿透性能下降,并在回波信号中产生大量噪声,使得测深能力不足、测深精度降低。因此未来ALB系统将朝着性能改良和单光子激光、小型化等方向发展。前者将进一步提高测深性能和精度,后者将在精度要求不高的情况下提高穿透力和降低设备成本,使设备小型轻量化,增强测量灵活性。利用紧凑、坚固耐用、小型化的结构设计,可适用于多种飞行平台与无人机,可集成光学相机、红外测距仪等,实现水域和陆地地形一体化测量。单光子激光,尤其是绿激光,具有高重频、窄脉宽、高光束质量和稳定性,可实现超远距离观测,有望在激光测深领域取得较好应用,有效提高水域测量的效率和观测深度。浑浊度是影响穿透力和测深精度的主要因素,进一步研究海洋水文要素与激光测深精度的量化关系模型,对于修正ALB测深结果,提高测深精度将非常有益,也是未来ALB一个重要研究方向<sup>[3]</sup>。

## 4.2.3 潜基测量系统

深海调查活动将推动潜基测量应用日趋广泛。为提高海底地形信息获取的分辨率和精度,满足海洋科学的研究和工程应用需要,以

AUV(Autonomous Underwater Vehicle)、ROV(Remotely Operated Vehicle)、深拖系统为平台,携载多波束测深系统、压力传感器、USBL等设备的潜基海底地形地貌测量系统已经面世,并在中国一些重点勘测水域和工程中得到了应用,并受到海事、水下考古、海洋调查等部门的高度重视<sup>[68]</sup>。潜基海底地形地貌测量系统借助USBL、罗经、姿态传感器和压力传感器为平台提供绝对平面和垂直坐标,利用多波束获取海底地形,并将信息通过电缆传输到船载存储和处理单元,综合计算获得海底地形。潜基测量技术适用于深海地形测量。随着中国深海调查活动的深入,其应用必将越来越广泛。

## 5 结语

在地球系统科学的研究和海洋资源勘探对全球精细海底地形模型日益增长的需求牵引下,经过50多年发展,全球海底地形模型分辨率和精度得到显著提高,新型海底地形探测技术和卫星测高技术的发展已经使全球海底地形模型的分辨率和精度达到了空前的水平,局部空间分辨率达到15",精度达到30 m。国际上全球精细海底地形模型的构建蓬勃发展,多个机构相继发布了全球地形模型系列产品。国内相关机构也进行了全球海底地形模型构建研究,但其产品的覆盖范围和分辨率略低于国际同类产品,并且,当前发布的全球海底地形模型较少使用中国自主测高卫星数据,中国在卫星测高技术发展、新型水深探测系统研制和全球海底地形精细建模方面与世界先进水平仍存在差距,因此,中国应不断提升多波束测深系统、机载激光雷达测深系统等水深探测系统的硬件研制技术水平,加强卫星测高重力数据反演海底地形的理论与技术方法研究,充分利用自主测高卫星海洋二号数据,提高构建全球海底地形精细模型的能力,满足地球系统科学的迫切需求,为中国海洋强国发展战略保驾护航。

## 参考文献

- [1] Li Jiabiao. *Principle, technology and method of multi-beam survey*[M]. Beijing: Ocean Press, 1999 (李家彪. 多波束勘测原理技术与方法[M]. 北京: 海洋出版社, 1999)

- [2] Ziyin Wu, Fanlin Yang, Xiaowen Luo, Shoujun L, Mingkuan Xiong. High-resolution submarine topography—Theory and technology for surveying and post-processing[M]. BeiJing: Science Press, 2017. (吴自银 等著.高分辨率海底地形地貌——探测处理理论与技术[M].北京: 科学出版社, 2017.)
- [3] ZHAO Jianhu, OUYANG Yongzhong, WANG Aixue. Status and Development Tendency for Seafloor Terrain Measurement Technology[J]. *Acta Geodaetica et Cartographiae Sinicae*, 2017, 46(10):1786—1794. (赵建虎, 欧阳永忠, 王爱学. 海底地形测量技术现状及发展趋势. *测绘学报*, 2017,(10): 1786-1794.)
- [4] de Moustier C. Field evaluation of sounding accuracy in deep water multibeam swath bathymetry[C]//MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings. Honolulu, HI, USA.: 1761-1765vol.3
- [5] Marks K M, Smith W H F. An Uncertainty Model for Deep Ocean Single Beam and Multibeam Echo Sounder Data[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2008, 29(4): 239-250
- [6] Hao Ruijie, Wan Xiaoyun, Sui Xiaohong, et al. Research Status and Analysis of Seafloor Topography Survey and Model Development[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2022, 53(2): 172-186 (郝瑞杰, 万晓云, 畏晓虹, 等. 海底地形探测和模型研制现状及精度分析[J]. 地球与行星物理论评, 2022, 53(2): 172-186)
- [7] LI Z Y, DOU H L, ZHANG H Q. SeaBeam full-depth multi-beam echo-sounder system and its application[J].*Coastal Engineering*, 2021, 40(1):59-67.(李治远,豆虎林,张海泉.SeaBeam 全海深多波束测深系统及应用[J].*海岸工程*,2021,40(1):59-67)
- [8] Guenther G C. Airborne Lidar Bathymetry [M]//David F Maune. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual. 2nd ed. Maryland: The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2007: 253-320
- [9] Jin Dingjian, Wu Fang, Yu Kun, et al. Large-Scale Application Test and Evaluation of an Airborne Lidar Bathymetry System—A Case Study in China's Coastal Zone[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 9-23 (金鼎坚, 吴芳, 于坤, 等. 机载激光雷达测深系统大规模应用测试与评估: 以中国海岸带为例[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(S2): 9-23)
- [10] Hickman G D, Hogg J E. Application of an Airborne Pulsed Laser for near Shore Bathymetric Measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1969, 1(1): 47-58
- [11] Parker H, Sinclair M. The successful application of Airborne LiDAR Bathymetry surveys using latest technology[C]//2012 Oceans - Yeosu. Yeosu, Korea (South): 1-4
- [12] Pastol Y. Use of Airborne LIDAR Bathymetry for Coastal Hydrographic Surveying: The French Experience[J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 62: 6-18
- [13] Feygels V, Ramnath V, Smith B, et al. Meeting the international hydrographic organization requirements for bottom feature detection using the Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar (CZMIL)[C]//OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. Monterey, CA, USA.: 1-6
- [14] Wozencraft J, Millar D. Airborne Lidar and Integrated Technologies for Coastal Mapping and Nautical Charting[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2005, 39(3): 27-35
- [15] Wright C W, Kranenburg C, Battista T A, et al. Depth Calibration and Validation of the Experimental Advanced Airborne Research Lidar, EAARL-B[J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 76: 4-17
- [16] Kotilainen A T, Kaskela A M. Comparison of Airborne LiDAR and Shipboard Acoustic Data in Complex Shallow Water Environments: Filling in the White Ribbon Zone[J]. *Marine Geology*, 2017, 385: 250-259
- [17] He Yan, Hu Shanjiang, Chen Weibiao, et al. Research Progress of Domestic Airborne Dual-Frequency LiDAR Detection Technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 7-17 (贺岩, 胡善江, 陈卫标, 等. 国产机载双频激光雷达探测技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 7-17)
- [18] Parker R L. The Rapid Calculation of Potential Anomalies[J]. *Geophysical Journal International*, 1973, 31(4): 447-455
- [19] Watts A B. An Analysis of Isostasy in the World's Oceans 1. Hawaiian-Emperor Seamount Chain[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1978, 83(B12):

- 5989-6004  
 1998: 105-112
- [20] Dixon T H, Parke M E. Bathymetry Estimates in the Southern Oceans from Seasat Altimetry[J]. *Nature*, 1983, 304(5925): 406-411
- [21] Smith W H F, Sandwell D T. Bathymetric Prediction from Dense Satellite Altimetry and Sparse Shipboard Bathymetry[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99(B11): 21803-21824
- [22] Wang Yong, Xu Houze, Zhan Jingang. High-Resolution Submarine Topography of China Sea and Its Adjacent Waters[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(11): 956-960 (王勇, 许厚泽, 詹金刚. 中国海及其邻近海域高分辨率海底地形[J]. 科学通报, 2001, 46(11): 956-960)
- [23] Luo Jia, Li Jiancheng, Jiang Weiping. Bathymetry Prediction of South China Sea from Satellite Data[J]. *Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(3): 256-260 (罗佳, 李建成, 姜卫平. 利用卫星资料研究中国南海海底地形[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(3): 256-260)
- [24] Fan Diao. *Research on the Theory and Method of Bathymetry Prediction Using Satellite Altimetry Gravity Data*[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2018 (范雕. 卫星测高重力数据反演海底地形的理论和方法研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2018)
- [25] Tscherning C C. First experiment with improvement of depth information using gravity anomalies in the Mediterranean Sea[M]. In: Arabelos & Tziavos. GEOMED report no.4, 1994, 133-148
- [26] Calmant S. Seamount Topography by Least-Squares Inversion of Altimetric Geoid Heights and Shipborne Profiles of Bathymetry and/or Gravity Anomalies[J]. *Geophysical Journal International*, 1994, 119(2): 428-452
- [27] Calmant S, Berge-Nguyen M, Cazenave A. Global Seafloor Topography from a Least-Squares Inversion of Altimetry-Based High-Resolution Mean Sea Surface and Shipboard Soundings[J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 151(3): 795-808
- [28] Arabelos D. On the Possibility to Estimate Ocean Bottom Topography from Marine Gravity and Satellite Altimeter Data Using Collocation[M]//Geodesy on the Move. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999: 105-112
- [29] Hwang C. A Bathymetric Model for the South China Sea from Satellite Altimetry and Depth Data[J]. *Marine Geodesy*, 1999, 22(1): 37-51
- [30] Smith W H F, Sandwell D T. Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings[J]. *Science*, 1997, 277(5334): 1956-1962
- [31] Sandwell D T, Müller R D, Smith W H F, et al. Marine Geophysics. New Global Marine Gravity Model from CryoSat-2 and Jason-1 Reveals Buried Tectonic Structure[J]. *Science*, 2014, 346(6205): 65-67
- [32] Sui Xiaohong, Zhang Running, Wan Xiaoyun, et al. Bathymetry Prediction and Analysis Based on Satellite Altimetry Data[J]. *Spacecraft Engineering*, 2017, 26(3): 130-136 (眭晓虹, 张润宁, 万晓云, 等. 基于卫星测高数据的海底地形反演及分析[J]. 航天器工程, 2017, 26(3): 130-136)
- [33] HU Minzhang, ZHANG Shengjun, JIN Taoyong, et al. A new generation of global bathymetry model BAT\_WHU2020[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(8):939-954. (胡敏章, 张胜军, 金涛勇, 等. 新一代全球海底地形模型 BAT\_WHU2020. 测绘学报, 2020, 49(8): 939-951.)
- [34] Kim S S, Wessel P. New Global Seamount Census from Altimetry-Derived Gravity Data[J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 186(2): 615-631
- [35] Hsiao Y S, Kim J W, Kim K B, et al. Bathymetry Estimation Using the Gravity-Geologic Method: An Investigation of Density Contrast Predicted by the Downward Continuation Method[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2011, 22(3): 347
- [36] Hsiao Y S, Hwang C, Cheng Y S, et al. High-Resolution Depth and Coastline over Major Atolls of South China Sea from Satellite Altimetry and Imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 176: 69-83
- [37] Hu Minzhang, Li Jiancheng, Jin Taoyong. Bathymetry Inversion with Gravity-Geologic Method in Emperor Seamount[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(5): 610-612 (胡敏章, 李建成, 金涛勇. 应用重力地质方法反演皇帝海山的海底地形[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(5): 610-612)
- [38] Hu Minzhang, Li Jiancheng, Jin Taoyong. Bathymetry

- Prediction from GGM Method with Terrain Reductions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(1): 60-63 (胡敏章, 李建成, 金涛勇. 顾及局部地形改正的GGM海底地形反演[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(1): 60-63)
- [39] Ouyang Mingda, Sun Zhongmiao, Zhai Zhenhe, et al. The Calculation of Vertical Gravity Gradient Anomalies and Its Application in Bathymetry Inversion[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(9): 766-769 (欧阳明达, 孙中苗, 翟振和, 等. 海洋垂直重力梯度异常的计算及其在地形反演中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(9): 766-769)
- [40] Li Qianqian, Bao Lifeng. Predicting Submarine Topography of the South China Sea from Altimetry Gravity Field with High Precision[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2016, 36(2): 1-5 (李倩倩, 鲍李峰. 高精度测高重力场反演南海海底地形[J]. 海洋测绘, 2016, 36(2): 1-5)
- [41] Wang Y M. Predicting Bathymetry from the Earth's Gravity Gradient Anomalies[J]. *Marine Geodesy*, 2000, 23(4): 251-258
- [42] Hu Minzhang, Li Jiancheng, Xing Lelin. Global Bathymetry Model Predicted from Vertical Gravity Gradient Anomalies[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(6): 558-565 (胡敏章, 李建成, 邢乐林. 由垂直重力梯度异常反演全球海底地形模型[J]. 测绘学报, 2014, 43(6): 558-565)
- [43] Jena B, Kurian P J, Swain D, et al. Prediction of Bathymetry from Satellite Altimeter Based Gravity in the Arabian Sea: Mapping of Two Unnamed Deep Seamounts[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 16: 1-4
- [44] Yang J J, Jekeli C, Liu L T. Seafloor Topography Estimation from Gravity Gradients Using Simulated Annealing[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(8): 6958-6975
- [45] Sandwell D T, , 2020, <https://app.dimensions.ai/details/grant/grant.9055569>
- [46] Lyzenga D R. Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(3): 379-383
- [47] Stove G C. Use of high resolution satellite imagery in optical and infrared wavebands as an aid to hydrographic and coastal engineering[C]//*Proceedings Conference on Electronics in Soil and Gas*. Landon, 1985, 509-530
- [48] Sandidge J C, Holyer R J. Coastal Bathymetry from Hyperspectral Observations of Water Radiance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(3): 341-352
- [49] Wang Guoxing, Li Shihong. Application of SPOT Satellite Data to the Study of Water Depth Information[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 1998(6):77-81 (王国兴, 李士鸿. SPOT卫星资料在水深信息中的应用研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1998(6):77-81)
- [50] Tian Qingjiu, Wang Jingjing, Du Xindong. Study on Water Depth Extraction from Remote Sensing Imagery in Jiangsu Coastal Zone[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(3): 373-379 (田庆久, 王晶晶, 杜心栋. 江苏近海岸水深遥感研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(3): 373-379)
- [51] Ji (Qian|Xi). *Research on Water Depth Inversion Method of Multispectral Remote Sensing Image*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021 (纪茜. 基于遥感影像的水深反演方法研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021)
- [52] Sandwell D T, Goff J A, Gevorgian J, et al. Improved Bathymetric Prediction Using Geological Information: SYNBATH[J]. *Earth and Space Science*, 2022, 9(2): e2021EA002069
- [53] Amante C. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis[J]. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>, 2009.
- [54] Andersen O, Knudsen P. The DTSC08BAT Bathymetry Developed from Satellite Altimetry[C]. Vienna, Austria: EGU Meeting, 2008
- [55] Andersen O. The DTU10 Global Gravity Field and Mean Sea Surface-Improvements in the Arctic[C]//*2nd IGFS Meeting*, 2010
- [56] Becker J J, Sandwell D T. SRTM30\_PLUS: Data fusion of SRTM land topography with measured and estimated seafloor topography [BD/OL]. Scripps Inst. Oceanography, Univ. California San Diego, 2004, 9500
- [57] 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
- [58] Olson C J, Becker J J, Sandwell D T. 2014. A new global bathymetry map at 15 arcsecond resolution for resolving seafloor fabric: SRTM15\_PLUS[C]//AGU Fall Meeting Abstracts, 2014: OS34A-03.
- [59] Tozer B, Sandwell D T, Smith W H F, et al. Global Bathymetry and Topography at 15 Arc Sec: SRTM15+[J]. *Earth and Space Science*, 2019, 6(10): 1847-1864
- [60] Jakobsson M. Global Bathymetric Data Sets-General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)[J]. *Bollettino Di Geofisica*, 2016
- [61] Weatherall P, Marks K M, Jakobsson M, et al. A New Digital Bathymetric Model of the World's Oceans[J]. *Earth and Space Science*, 2015, 2(8): 331-345
- [62] Mayer L, Jakobsson M, Allen G, et al. The Nippon Foundation—GEBCO Seabed 2030 Project: The Quest to See the World's Oceans Completely Mapped by 2030[J]. *Geosciences*, 2018, 8(2): 63
- [63] Zhang Shengjun. Research on Determination of Marine Gravity Anomalies from Multi-Satellite Altimeter Data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(8): 1071 (张胜军. 利用多源卫星测高资料确定海洋重力异常的研究[J]. 测绘学报, 2017, 46(8): 1071)
- [64] Hu M Z, Li L, Jin T Y, et al. A New 1' × 1' Global Seafloor Topography Model Predicted from Satellite Altimetric Vertical Gravity Gradient Anomaly and Ship Soundings BAT\_VGG2021[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(17): 3515
- [65] Hu M Z, Jin T Y, Jiang W P, et al. Bathymetry Model in the Northwestern Pacific Ocean Predicted from Satellite Altimetric Vertical Gravity Gradient Anomalies and Ship-Board Depths[J]. *Marine Geodesy*, 2022, 45(1): 24-46
- [66] Bao Lifeng, Xu Houze. Twin-Satellites Altimetry Mode and Its Orbit Design[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(7): 661-667 (鲍李峰, 许厚泽. 双星伴飞卫星测高模式及其轨道设计[J]. 测绘学报, 2014, 43(7): 661-667)
- [67] Sun Zhongmiao, Guan Bin, Zhai Zhenhe, et al. Research Progress of Ocean Satellite Altimetry and Its Recovery of Global Marine Gravity Field and Seafloor Topography Model[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 923-934 (孙中苗, 管斌, 翟振和, 等. 海洋卫星测高及其反演全球海洋重力场和海底地形模型研究进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 923-934)
- [68] Ma Xiaochuan, Luan Zhendong, Zhang Xin, et al. Near-Bottom Topography Measurement Using ROV and Its Application in a Deep-Sea Hydrothermal Field in the Manus Basin[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(3): 76-84 (马小川, 栾振东, 张鑫, 等. 基于 ROV 的近海底地形测量及其在马努斯盆地热液区的应用[J]. 海洋学报, 2017, 39(3): 76-84)

## Progress and Development Trend of Global Refined Seafloor Topography

### Modeling

LI Qianqian<sup>1</sup>, BAO Lifeng<sup>1, 2</sup>, WU Ziyin<sup>3</sup>, WU Lin<sup>1</sup>, SUN Heping<sup>1, 2, \*</sup>

1 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

**Abstract:** The refined seafloor topography models play an important role in fields of submarine plate tectonic

movement, underwater carrier navigation support and marine resource exploration and so on. In this paper, the development of seafloor topography detection technology and model construction is reviewed, and discusses the current research status and main challenges of the global refined seafloor topography modeling. Also, the developing trends of global seafloor topography modeling is summarized, considering that the technology of recovering seafloor topography from altimeter-derived marine gravity anomalies is still the main means to construct global seafloor topography models. New altimeter satellites such as dual satellite tandem altimeter and SWOT (Surface Water Ocean Topography) will provide data sources for further improving the accuracy of marine gravity field and seafloor topography models. Optimization of seafloor topographic inversion theory based on topographic complexity is expected to bring theoretical innovation. It is worth paying attention to explore the application of artificial intelligence technology in global seafloor topography modeling.

**Keywords:** seafloor topography; satellite altimetry; gravity field inversion; multi-beam sounding; two-satellite tandem altimetry; global bathymetric model

**First author:** LI Qianqian, PhD, specializes in marine gravity and seafloor topography inversion from satellite altimetry. E-mail:15072418205@asch.whigg.ac.cn

**Corresponding author:** SUN Heping, PhD, professor. E-mail: heping@whigg.ac.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (42192535, 42192533, 42174102, 41931076); the Basic Frontier Science Research Program of Chinese Academy of Sciences (ZDBS-LY-DQC028)

网络首发:

标题: 全球海底地形精细建模进展与发展趋势

作者: 李倩倩, 鲍李峰, 吴自银, 武凛, 孙和平

DOI: 10.13203/j.whugis20220412

收稿日期: 2022-07-06

引用格式:

李倩倩, 鲍李峰, 吴自银, 等. 全球海底地形精细建模进展与发展趋势[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220412 (LI Qianqian, BAO Lifeng, WU Ziyin, et al. Progress and Development Trend of Global Refined Seafloor Topography Modeling[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220412)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

应用重力地质方法反演皇帝海山的海底地形

胡敏章, 李建成, 金涛勇

武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(5): 610-612

<http://ch.whu.edu.cn/article/id/214>