引文格式:罗志才.物理大地测量学进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(11):2252-2262.DOI:10.13203/j.whugis20260398

Citation:LUO Zhicai.Progress and Perspective of Physical Geodesy[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(11):2252-2262.DOI:10.13203/j.whugis20260398

物理大地测量学进展

罗志才[1,2]

1 华中科技大学国家精密重力测量科学中心,湖北 武汉,430074

2 华中科技大学物理学院,地球物理研究所,湖北 武汉,430074

摘 要:物理大地测量学的主要任务是用物理方法研究和测定地球形状、地球重力场及各自随时间的变化,揭示地球系统的物质迁移规律及其地球动力学机制。简要介绍物理大地测量学的发展历程,重点梳理了地球重力场探测技术和地球重力场逼近理论的主要进展。面向地球科学前沿研究及大地测量基准、资源勘探和灾害监测等领域的战略需求,指出了物理大地测量学面临的挑战及未来10年的重点发展方向,以期为推动物理大地测量学发展及其与地球物理学、水文学、海洋学和空间科学等众多学科的交叉融合提供参考。

关键词:物理大地测量学;地球重力场;地球形状;重力场探测技术;地球重力场逼近理论

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-09-15

DOI:10.13203/j.whugis20260398 **文章编号**:1671-8860(2026)11-2252-11

Progress and Perspective of Physical Geodesy

LUO Zhicai[1,2]

1 National Gravitation Laboratory, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2 Institute of Geophysics, School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: The primary task of physical geodesy is to study and determine the Earth's figure, its gravity field, and their temporal variations using physical methods, thereby revealing the laws of mass transportation within the Earth system and its geodynamic mechanisms. This paper briefly introduces the development history of physical geodesy, focusing on the major advances in gravity field detection technology and the approximation theories of Earth's gravity field. In response to the strategic needs in frontier geoscience research, geodetic datums, resource exploration, and disaster monitoring, the challenges and key development directions of physical geodesy for the next decade are suggested. The aim is to provide references for promoting the development of physical geodesy and its interdisciplinary integration with geophysics, hydrology, oceanography, space science, and other related fields.

Key words: physical geodesy; Earth's gravity field; Earth's figure; gravity field detection technology; approximation theory of Earth's gravity field

1 学科发展历程

物理大地测量学是大地测量学的主要分支之一,是用物理方法研究和测定地球形状、地球重力场及各自随时间变化的学科,主要内容包括重力测量技术、重力位理论、全球和区域地球形状及其外部重力场的基础理论等[1]。其学科名称可追溯到1933年霍普夫的德语著作*Physikalische Geodäsie*[2],1953年维宁·曼尼兹及1967年海斯卡涅和莫里兹均沿用了"Physical Geodesy"这一学科名称[3-4],历史上也曾使用过地球及其重力场、重力测量与地球形状学、地球形状及外部重力场、地球重力学、理论大地测量学等名称[5-9]。物理大地测量学经历了从经典物理大地测量学

基金项目:国家自然科学基金(41931074,42061134007)。

作者简介:罗志才,博士,教授,主要研究方向为地球重力场理论、技术及应用。zcluo@hust.edu.cn

到现代物理大地测量学的发展过程,其学科内涵及应用领域不断拓展。

人类对地球形状的认识经历了非常缓慢的发展历程。18世纪中叶以前,人们单纯采用几何大地测量方法测定地球形状。利用重力研究地球形状始于1687年牛顿在《自然哲学的数学原理》中提出的某点重力与其纬度有关,并推测地球是赤道膨胀且两极扁平的椭球体;直到1743年,克莱洛在其著作《地球形状理论》中建立了地球几何扁率与重力扁率之间的数学关系,即克莱洛定理,才奠定了用物理方法(重力资料)研究地球形状的理论基础;1785年勒让德在《论椭球体引力》中引入“位函数”的概念,建立了重力位理论的基础及地球形状与重力场研究之间的联系。19世纪初,拉普拉斯、高斯和贝塞尔等都认识到椭球面不足以代表地球表面。1849年,斯托克斯提出斯托克斯理论及大地水准面概念,进一步发展了克莱洛定理;1873年,利斯廷提出用大地水准面代表地球形状,由此可将斯托克斯理论用于研究大地水准面形状,但实际应用中需要考虑大地水准面外部的地形质量问题,即重力归算问题。1945年,莫洛坚斯基提出了似大地水准面概念及利用地面重力观测资料来确定地球形状的理论,从而在理论上回避了斯托克斯理论中长期无法解决的重力归算问题。克莱洛定理、重力位理论、斯托克斯理论和莫洛坚斯基理论构成了经典物理大地测量学的核心内容。20世纪中叶以前,经典物理大地测量学的理论超前于重力场探测技术的发展,侧重于研究区域地球形状及其外部重力场,地球重力场对大地测量相对定位起辅助性作用,主要应用于区域参考椭球定位定向、地面观测数据(距离、方向等)归算到参考椭球面上以及精密水准测量的重力场改正等[2-9]。

1957年,第一颗人造地球卫星Sputnik发射成功,经典物理大地测量学过渡到现代物理大地测量学,其标志是开创了卫星重力探测时代,结束了重力场探测技术落后于理论的局面。20世纪中期,特别是进入21世纪以来,绝对和相对重力测量、海空重力测量、卫星测高和新一代卫星重力测量等重力场探测技术取得了重要进展,这突破了人们过去获取地球重力场信息的局限性,使得现代物理大地测量的研究领域从局部或区域扩展到全球,从地球外部拓展到地球内部甚至整个地球系统,从测定静态地球重力场发展到测定时变重力场,从而丰富了物理大地测量学的内涵。地球重力场探测技术与全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)、卫星激光测距、甚长基线干涉测量和合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)等空间大地测量技术的交叉并进,共同支撑了现代大地测量学的发展,进一步拓展了物理大地测量学的应用领域,凸显了物理大地测量学在现代大地测量中的关键性作用,为现代大地测量基准(地球参考框架、高程基准和重力基准等)建立、卫星大地测量定位、对地观测卫星的精密定轨、地球内部结构精化及动力学研究等领域提供了高精度、高分辨率的地球重力场信息,提升了物理大地测量学服务于资源勘探、环境变化、灾害监测等领域的能力,促进了物理大地测量学与空间大地测量学、地震学、地球动力学、水文学和海洋学等众多学科的交叉融合发展[10-12]。

探测和研究地球重力场精细结构既是物理大地测量学的长期科学任务,也是地球科学的基础性领域。面向深地、深海和深空“三深探测”的战略需求,测绘科学与技术的转型升级、海洋大地测量基准与导航、区域与全球高程基准统一和地球科学前沿研究等领域,均迫切需要更加精细的地球重力场信息支持[13-17]。物理大地测量学面临新的机遇与挑战,本文重点梳理了重力场探测技术和地球重力场逼近理论与方法的主要进展,以期为物理大地测量学的可持续发展及地球重力场的探测、研究和应用提供参考。

2　重力场探测技术进展

人类认识地球重力场的水平,首先取决于在全球范围内测定重力和探测重力场信息的技术发展水平。从1590年伽利略利用自由落体原理首次测定重力加速度为9.8 m/s^{2}算起,重力场探测技术经历了400多年漫长而又缓慢的发展历程,直到20世纪中期才取得了突破性进展,至今已形成陆地、海洋、航空和卫星重力测量技术体系,这不仅大大拓宽了探测重力场信息的“视角”,掌握了多维度测定重力场多种特征参量的科技手段,而且显著提高了探测重力场信息的时空分辨率和准确度。

在陆地重力测量技术方面,沿用和发展了200多年的毫伽级摆仪绝对和相对重力测量到20世纪中后期被淘汰,由于精密测时和激光干涉测长技术的迅速发展,被冷落了300年、根据自由落体原理测定绝对重力的技术重新登上了舞台,以

美国microg公司生产的FG-5系列产品,其准确度达到2 μGal,主要应用于建立高精度重力基准;20世纪30年代开始出现静力法(弹簧)相对重力测量仪,在精密电子机械技术的支持下,以CG-5/6和gPhone为代表的微伽级便携式重力仪已被广泛应用于大范围相对重力测量,其缺点是长时间测量存在漂移,需要定期用绝对重力仪或标准引力场对其进行校准;20世纪60年代末,利用超导技术产生的高稳定度恒定电流和磁场试制成功超导(相对)重力仪,目前美国GWR公司生产的OSG和iGrav超导重力仪的准确度已优于0.1 μGal,主要用于监测重力场的时变量;垂线偏差的普遍测定只是到20世纪建立了精密天文大地网后才得以实现,用于计算区域大地水准面或高程异常。21世纪以来,原子干涉绝对重力测量技术取得了突破性进展,法国MuQuans和iXblue公司、华中科技大学、中国科学院精密测量科学与技术创新研究院、浙江工业大学、中国计量科学研究院和中国科学技术大学等单位均成功研制了原子干涉绝对重力仪,其中华中科技大学研制的原子干涉绝对重力仪达到国际最好水平,其准确度与FG-5相当[18],这类仪器在灵敏度、稳定度、测量效率、连续工作能力和小型化等方面仍有较大发展潜力。此外,中国自主研制的微机电系统重力仪和超导重力仪也取得了重要进展[19-20],其性能已接近国际同类仪器的最好水平,近期将投入工程化应用;基于广义相对论,结合高精度光钟和时频比对技术发展起来的时频重力位测量方法从理论研究逐步走向实践[21-23]。需要特别指出的是,随着中国先后建成地壳运动监测网络和中国大陆构造环境监测网络,重力测量技术的快速发展促进中国建立了高空间覆盖率高精度的重力观测网络和新一代国家重力基准网,获取了中国大陆高精度重力场变化,在地震中长期预测预报和构造形变动力学研究等领域发挥了重要效益[24-27];同时,华中科技大学牵头建成了“精密重力测量研究设施”(国家“十二五”重大科技基础设施),该设施具备了全球毫伽级和基准微伽级重力数据获取、评估及应用能力,未来将在中国重力测量技术装备研发、资源勘探、基础测绘、深空探测和地球物理前沿研究等领域发挥重要作用[28]。

区别于陆地重力测量的静态观测,海洋重力测量属于动态观测,重力传感器和稳定平台决定了海洋重力测量系统的技术水平。海洋重力测量始于1903年Heker使用气压式海洋重力仪开展了海上重力测量工作[29]。自1923年维宁·曼尼兹在潜水艇上使用摆仪进行海洋重力测量以来,海洋重力仪的发展经历了摆仪、摆杆型海洋重力仪及轴对称型海洋重力仪3个阶段。摆仪由于其操作复杂、计算烦琐、测量时间长和精度较低等原因,到20世纪50年代逐渐被摆杆型重力仪取代;摆杆型海洋重力仪包括德国Graf-Askania公司生产的GSS系列重力仪(如GSS-2,后改称KSS-5)和美国LaCoste& Romberg公司生产的LCR系列重力仪,这类重力仪抗外界干扰能力较强,可在中等海况下工作,但交叉耦合效应(CC效应)的影响是其固有缺陷;直到20世纪80年代,轴对称型海洋重力仪日趋成熟,该类型仪器不受水平加速度的影响,基本消除了CC效应误差,可在较恶劣的海况下工作,其典型代表为德国Bodenseewerk公司生产的KSS-30/31、美国Bell航空公司生产的BGM-3型海洋重力仪及2001年Lacoste & Romberg公司推出的航空-海洋重力仪Ⅱ等,内符合精度优于1 mGal。在这一时期,振弦型重力仪也得到快速发展,代表性产品包括日本东京大学研制的TSSG海面船载重力仪和美国麻省理工学院研制的MIT型海洋重力仪。中国海洋重力仪的研制始于20世纪60年代初期,原中国科学院测量与地球物理研究所、北京地质仪器厂、国家地震局地震研究所等先后开展了海洋重力仪的自主研制工作,代表性仪器包括HSZ-2型海洋重力仪和CHZ型轴对称型海洋重力仪、ZY-1型振弦式海洋重力仪、ZYZY和DZY-2摆杆型重力仪,但由于种种原因,中国研制的海洋重力仪基本均未能进入实用化和商品化阶段,特别是20世纪90年代以后,国内相关研究基本停止,中国广泛使用的海洋重力仪长期依赖进口产品;2011年,在国家重大仪器开发专项“海洋/航空重力仪研发”项目支持下,原中国科学院测量与地球物理研究所重启了CHZ型海洋重力仪的升级改造工作,成功研制了CHZ-Ⅱ型海洋重力仪,其综合测量精度优于1 mGal,可替代当前进口的海洋重力仪[30]。

国外航空重力测量始于20世纪60年代,由于受测定载体速度和加速度的精度制约,直到90年代以来,GNSS、高稳定度平台和INS的发展及应用,才推动航空重力测量技术取得了突破性进展。这一进展主要体现在[31-36]:(1)传统海洋重力仪已改进为海/空重力仪,其精度和性能得到显

著改善,如LCR系列海/航空重力仪、BGM系列海/空重力仪、KSS系列海/空重力仪等已被广泛应用于航空重力标量测量系统;(2)研制了高精度航空惯性基准重力仪,如AirGrav航空重力仪和GT航空重力仪等,其精度优于1 mGal,空间分辨率可优于1 km;(3)发展了多种适用于海空重力测量的稳定平台技术,包括双轴阻尼陀螺平台、双轴惯导加捷联方位平台、三轴惯导平台和捷联惯导平台,其中前三类属于物理平台或机械平台,最后一类属于数学平台或解析平台;(4)利用航空重力标量测量技术获取了大量的局部重力场信息,填补了极地、海岸带、岛礁等特殊地区的数据空白,测量精度2~5 mGal、空间分辨率5~10 km;(5)捷联惯导航空重力测量和航空重力梯度测量技术进入实用化阶段,其中前者的代表性产品包括加拿大Calgary大学的捷联惯导标量重力测量和德国捷联式航空重力测量系统,这类系统可进行重力标量和矢量测量,后者的代表性产品是美国洛克希德·马丁旋转加速度型重力梯度仪,包括全张量重力梯度仪FTG和部分张量重力梯度仪FALCON,其精度5~10 E、空间分辨率0.5~1 km,这些系统对中国严格出口禁运。中国自主航空重力测量技术的研究虽然起步较晚,但进入21世纪以来也取得了较大进展,主要包括[37-43]:西安测绘研究所于2002年成功研制中国首台航空重力测量系统,该系统在中国特殊区域的加密重力测量中发挥了重要作用;构建了较完整的海空重力测量理论、数据处理方法及应用技术体系;相关机构成功研制了SAG-WZ系列捷联式航空重力仪、GDP型海空重力仪(后升级为ZL11型)及SAG系列海空重力仪等,其精度与国际同类产品相当;突破了部分张量海空重力梯度仪关键技术并研制了工程样机。总体而言,中国航空重力测量技术的自主研发及商品化能力、精密性及实用性仍需大幅提升。

卫星重力测量是以卫星为载体并利用卫星本身为重力传感器或卫星所携带的重力传感器(如雷达测高仪和激光测高仪、加速度仪、精密测距系统和重力梯度仪等)测定全球重力场的方法和技术。该技术的研究始于20世纪60年代末,GNSS技术出现以前,根据卫星轨道摄动理论,美欧等发达国家利用地面跟踪观测卫星轨道摄动确定了一系列低阶静态重力位模型,如JGM-3(70阶,280 km波长)等,但其精度和空间分辨率已接近极限。20世纪70年代开始出现卫星雷达测高,国际上先后实施了多代卫星测高任务,从早期的Geos-3、Seasat发展到T/P、Jason-1、ERS、Envisat等,测高精度提升至厘米级,数据分辨率达10 km水平,联合多代卫星测高数据相继发布了高分辨率全球海面高模型、海洋重力场模型和海面地形模型,如SIO和DTU系列模型等,这些模型及其衍生产品在海洋与极地环境监测、海平面变化、海底构造与海洋动力学研究等领域发挥了重要作用,促进了物理大地测量学与海洋学、冰川学、海洋导航等学科的交叉融合发展[44-46];2022年12月,美国和法国联合发射了宽刈幅星载雷达干涉测高卫星(surface water and ocean topography,SWOT),标志着卫星测高技术由过去沿轨一维观测发展到跨轨二维观测,已有研究表明,仅用一年SWOT卫星数据就能以8 km分辨率探测海底复杂构造[47],显著提升岛礁区域似大地水准面和平均海面地形的精度[48],SWOT卫星数据处理及应用是当前卫星测高领域的热点和前沿研究方向。21世纪以来,星载高精度加速度和重力梯度测量、精密星间测距、卫星精密定轨等关键技术的突破性进展,催生了新一代卫星重力探测技术,实现了高精度高低卫卫跟踪、低低卫卫跟踪和重力梯度测量,大幅度提升了全球重力场信息的获取能力,开创了卫星重力探测新时代。美欧先后成功实施了挑战性小卫星有效载荷、重力恢复与气候实验(gravity recovery and climate experiment,GRACE)、重力场与稳态洋流探测器和GRACE-FO(GRACE follow-on)卫星重力探测任务[49-51],国内外相关研究机构利用纯卫星观测数据发布了全球静态和时变重力场模型系列(ICGEM,https://icgem.gfz.de),相较于传统地面跟踪观测卫星轨道摄动确定的低阶静态重力场模型,其精度提升了约两个量级,空间分辨率提高了约4倍,更重要的是首次实现了时间分辨率为1个月、空间分辨率达300~400 km的全球重力场连续监测,新一代卫星重力探测技术近20多年来在大地测量、地震、水文、冰川等领域取得了重要的学术成果[52-55]。中国对新一代卫星重力探测技术的自主研发始于21世纪初,历经几代人的联合攻关,也取得了较重要的进展,包括:2019年12月发射了“天琴一号”技术验证卫星,实现了高低卫卫跟踪模式对地球重力场的自主观测[56];2021年12月成功发射了中国重力场增强与质量变化探测卫星(Chinese gravimetry augment and mass change exploring mission, Chi-

GAM),其观测模式与GRACE相同,全球重力场的精度、时空分辨率及应用能力与GRACE和GRACE-FO相当,标志着中国全面实现了卫卫跟踪模式自主测定全球重力场[57-58];与此同时,2023年发射了中国双星跟飞海洋测高卫星(Chinese ocean altimetry dual-satellites tandem,COAST),该卫星具备以约2 km格网分辨率反演全球海洋重力场,未来可联合ChiGAM和COAST观测数据构建自主全球超高阶次重力场模型[59]。近年来,国际上提出了一系列下一代卫星重力测量计划[60],中国"天琴二号"倾斜轨道卫星预计于2027年发射,未来将实现全球重力场的多星组网观测,显著提升地球重力场的准确度、时空分辨率及应用能力,推动卫星重力测量既支撑前沿科学研究,又服务于行业和工程应用及社会需求。

3 地球重力场逼近理论与方法

所谓地球重力场逼近,是指利用描述和确定地球重力场的一类基本参数集合,即地球重力场模型来近似表达真实地球重力场,目前常采用扰动位球谐或椭球谐展开系数集合(函数模型)、重力场参数(大地水准面高、重力异常、垂线偏差、扰动重力等)集合(数值模型)和图像等形式来描述地球重力场。大地测量边值问题理论始终是地球重力场逼近的基石,位理论三类外部边值问题是研究地球形状及其外部重力场的基础,即Dirichlet(第一类)、Neumann(第二类)和Robin(第三类)边值问题。斯托克斯理论是研究大地水准面形状问题(Stokes问题),莫洛坚斯基理论则是研究地球自然表面形状问题(Molodensky问题),比亚哈马(Bjerhammar)边值理论则是通过构造虚拟质量分布去逼近地球外部真实重力场,将Molodensky问题转换为虚拟球面边值问题。经典物理大地测量学时期,因只能获取重力异常数据而聚焦于Stokes问题和Molodensky问题的研究(属于第三边值问题,也称为混合边值问题),问题的实质归结为如何处理采集重力数据的实际边界面以及确定大地水准面在理论和实际上是否能真正绕过地壳密度假设,该问题所涉及的种种理论上和数学求解上的问题、局限性和复杂性以及实践成果详见文献[4-9,11,61-62]。在此需要指出的是,如果严密考虑地形质量的影响,斯托克斯理论、莫洛坚斯基理论和比亚哈马理论就确定地球形状及其外部重力场而言都是等价的;目前普遍采用的埋藏质点法、虚拟单层密度表示法、各类径向基函数法、Mascon方法等都是比亚哈马理论的拓展,也属于后续提到的重力学反问题的范畴。20世纪90年代以来,随着GNSS和航空重力测量技术的快速发展,科研人员获取了大量的扰动重力数据,推动了扰动重力边值问题(属于第二边值问题)的理论研究及实践,并提出了航空重力标量/矢量/梯度边值问题及其多分辨配置解法[33],形成了以地心参考椭球面为边界面的第二大地边值问题理论与方法体系[63]。

物理大地测量学的理论与实践表明,只有尽可能多地联合利用各类具有不同频谱特性的重力场观测数据,才能达到精细逼近真实地球重力场的目的。重力场探测技术所获取的各类信息为精化地球重力场提供了保障。地球重力场的联合求解,究其本质,若按数据离散分布的观点,则属于扰动位的配置问题[61];若按数据连续覆盖的观点,则归结为求解关于扰动位的超定边值问题[64],属于不适定问题,这是与经典适定大地测量边值问题理论的重要区别。超定边值问题的典型解法可概括为基于Lebesgue积分和Wiener测度的最小二乘解[64-65]、基于拟微分算子理论的解算方法[66]、基于单位球面上Sobolev空间H_p范数的准解[67-68],以及卫星重力梯度边值问题和重力-重力梯度边值问题的准解[69]。需要指出的是,现有超定边值问题的各种解法均未考虑地球形状及重力场随时间的变化,如果以厘米级甚至毫米级精度逼近真实重力场,必须在解析法框架中进一步发展超定边值问题理论,在统计法框架中发展"非经典配置法",或者寻求兼顾解析法与统计法的新方法。当前,超定边值问题的研究具有重大科学和现实意义,将为精细融合不同频谱特性的重力场观测数据确定全波段地球重力场提供理论基础和高效、稳定、可靠的数值逼近方法。

地球重力场探测技术的突破性进展及人工智能的快速发展,推动了物理大地测量学与地球物理学、水文学、冰川学等学科的交叉渗透和相互融合,也促进了重力学反问题和重力反演问题的研究与发展[70-71]。21世纪以来,这一领域的典型进展包括:(1)发展了固体地球潮汐理论和方法,联合超导重力观测数据和重力台站连续观测数据,构建了高精度重力潮汐基准模型[72];(2)提出了地球内部微弱信号检测方法(如OSE+AR-z组合方法等),利用高精度超导重力观测数据精

密提取了地球自由振荡、地球自由核章动和地球简正模等微弱信号,发现了新的地球动力学现象及动力学机制[73-75];(3)发展了地震位错理论,为利用重力场数据研究震源机制和地球内部结构等提供了理论基础,推动了物理大地测量学与地震学的深度融合[76-78];(4)发展了壳幔密度和海底地形反演方法,如多尺度重力反演方法、迭代非线性反演方法和模拟退火法等,利用重力场信息获取了更加精细的青藏高原壳幔密度结构和莫霍面地形、全球高分辨率海底地形模型和区域海底构造等[79-83];(5)利用卫星时变重力场、连续GNSS观测和水文气象等多源数据,深化了对水循环和生态恢复等演化过程的科学认知,揭示了融水在格陵兰冰盖内部和底部的演化过程[84-86];(6)开展了人工智能方法在物理大地测量学中的应用研究,展示了物理信息神经网络、机器学习和深度学习等方法在大地水准面建模、重力异常预测、重力反演、卫星轨道衰减预测、陆地水储量变化的时空降尺度及趋势预测等方面具有良好的应用前景[87-90]。

4　未来发展思考

21世纪以来,物理大地测量学的理论、方法和技术取得了突破性进展,虽然极大地提升了物理大地测量学服务于地球科学前沿研究及资源勘探、环境变化和灾害监测等领域的能力,但现有地球重力场模型的准确度和时空分辨率尚难以满足大地测量时空基准、陆地水文、冰冻圈和固体地球等领域的科学需求和社会需求[91]。当前,物理大地测量学面临的主要挑战包括:超定边值问题的严密性与实用性问题,重力场探测技术的精密性及实用化和智能化问题,多源重力场信息的时空分辨率限制、时空基准统一与精细融合难题,重力场信号的分离或解耦及向下延拓问题,厘米级精度区域与全球高程基准的统一和动态更新难题,以及高精度重力基准的动态维持与更新问题等。

持续提升地球重力场的准确度和时空分辨率,是物理大地测量学长期努力的科学目标,唯有从地球重力场探测技术和地球重力场逼近理论两方面协同推进,才能持续推进物理大地测量学的发展,逐步实现这一科学目标。为此,物理大地测量学未来10年的重点发展领域和方向如下:

1)创新地球重力场逼近理论与方法。面对地壳构造的复杂性、地形表面的粗糙性及地球重力场的动态性和多尺度特性,需要构建更具普适性、更加严密的多尺度重力场建模理论与方法,重点研究超定动态和随机边值问题的实用解法,在统计法框架中发展更严密的函数模型、误差解耦模型及实用算法,突破现有解析理论和统计方法的局限性;发展多尺度重力场模型表示方法,兼顾科学研究与跨专业和行业应用需求,考虑空间维度和时间维度,深化物理模型结合数据驱动和人工智能的建模方法研究,解决星、空、地多源异质重力场信息的精细融合难题,并利用地球重力场的函数模型(球谐模型或椭球谐模型)、数字模型、特征模型,研发适用于各种应用场景的重力场产品;突破卫星重力测量在轨智能标定与数据处理技术、发展近实时的时变重力场建模方法,开展多星组网的重力场建模方法及应用研究,解决卫星重力观测数据的精密性和应用时效性问题。

2)突破精密重力测量关键技术。发展集成化、实用化、智能化的星、空、地重力测量技术,协同推进硬件技术和数据处理理论方法的发展,实现精密重力测量技术与装备的自主可控,提升高精度和高时空分辨率重力场信息的获取能力。在时频重力位测量方面,重点解决光钟和星地时间频率比对等技术的精密性和稳定性问题,研发时频重力位测量装备;在海空重力测量方面,突破部分张量/全张量海空重力梯度测量关键技术,研发相应的技术装备,解决其精密性和环境适应性难题;在陆地重力测量方面,发展亚微伽级基准型量子重力/重力梯度测量技术和微伽级流动型量子重力/重力梯度测量技术;突破月面和火星重力测量关键技术和装备,发展适用于月球、火星和不规则小天体的重力场建模和重力反演方法,支撑深空探测的发展。

3)提升地球重力场的科学与工程应用能力。发展重力向下延拓、地壳密度和海底地形精细反演方法,重点解决向下延拓的稳定性、多尺度信号分离与噪声耦合问题;研究多地球物理场分析方法和技术,推进重力与北斗/GNSS、InSAR、地震和人工智能等多学科领域的交叉融合创新;研究厘米级甚至毫米级高程传递与基准统一方法、重力和高程基准的动态维持与更新方法,解决复杂困难地区的厘米级高程传递与大地水准面精化问题;融合多源数据构建更加精细的海底地形模型和海洋重力/全张量重力梯度场基准图,发

展多物理场辅助导航方法和技术,支撑深海探测和水下潜器无源导航的发展。

参 考 文 献

[1] 孙鸿烈. 地学大辞典[M]. 北京:科学出版社, 2017.
SUN Honglie. Dictionary of Geoscience[M]. Beijing: Science Press, 2017.

[2] HOPFNER F. Physikalische Geodäsie [M]. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1933.

[3] VENING MEINESZ F A. Physical Geodesy[C]// Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, Series B, 1953, 56(1).

[4] HEISKANEN W A, MORITZ H. Physical Geodesy[M]. London, UK: W. H. Freeman and Co., 1967.

[5] HEISKANEN W A, VENING MEINESZ F A. The Earth and Its Gravity Field[M]. New York: McGraw-Hill, 1958.

[6] 方俊. 重力测量与地球形状学:上册[M]. 北京:科学出版社, 1965.
FANG Jun. Gravimetry and Geomorphology of the Earth: Volume I [M]. Beijing: Science Press, 1965.

[7] 管泽霖,宁津生. 地球形状及外部重力场[M]. 北京:测绘出版社, 1981.
GUAN Zelin, NING Jinsheng. Earth Shape and External Gravity Field[M]. Beijing: Sino Maps Press, 1981.

[8] TORGE W. Gravimetry[M]. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1989.

[9] MORITZ H. The Figure of the Earth — Theoretical Geodesy and the Earth's Interior[M]. Karlsruhe: Wichmann, 1990.

[10] 陈俊勇. 现代大地测量学的进展[J]. 测绘科学, 2003, 28(2): 1-5.
CHEN Junyong. On the Development of Modern Geodesy[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2003, 28(2): 1-5.

[11] 李建成, 陈俊勇, 宁津生, 等. 地球重力场逼近理论与中国2000似大地水准面的确定[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2003.
LI Jiancheng, CHEN Junyong, NING Jinsheng, et al. Approximation Theory of Earth Gravity Field and Determination of China 2000 Quasi-Geoid[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.

[12] 许厚泽, 陆洋, 钟敏, 等. 卫星重力测量及其在地球物理环境变化监测中的应用[J]. 中国科学:地球科学, 42(6): 843-853.
XU Houze, LU Yang, ZHONG Min, et al. Satellite Gravity and Its Application to Monitoring Geophysical Environmental Change [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 42(6): 843-853.

[13] 宁津生. 测绘科学与技术转型升级发展战略研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(1): 1-9.
NING Jinsheng. Research on the Development Strategy of Surveying and Mapping Science and Technology Transformation and Upgrading [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(1): 1-9.

[14] 杨元喜, 徐天河, 薛树强. 我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(1): 1-8.
YANG Yuanxi, XU Tianhe, XUE Shuqiang. Progresses and Prospects in Developing Marine Geodetic Datum and Marine Navigation of China [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(1): 1-8.

[15] 李建成, 褚永海, 徐新禹. 区域与全球高程基准差异的确定[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1262-1273.
LI Jiancheng, CHU Yonghai, XU Xinyu. Determination of Vertical Datum Offset Between the Regional and the Global Height Datum[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1262-1273.

[16] 孙和平. 对我国重力学未来发展的几点思考[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(5): 881-890.
SUN Heping. Some Reflections on Developing Trend of Gravimetry in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(5): 881-890.

[17] 姚宜斌, 杨元喜, 孙和平, 等. 大地测量学科发展现状与趋势[J]. 测绘学报, 2020, 49(10): 1243-1251.
YAO Yibin, YANG Yuanxi, SUN Heping, et al. Geodesy Discipline: Progress and Perspective[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(10): 1243-1251.

[18] WU S Q, FENG J Y, LI C J, et al. The Results of 10th International Comparison of Absolute Gravimeters (ICAG-2017)[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(6): 63.

[19] LIU H F, LUO Z C, HU Z K, et al. A Review of High-Performance MEMS Sensors for Resource Exploration and Geophysical Applications[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(6): 2631-2648.

[20] 张宁, 陈高俊, 刘路, 等. 超导重力仪研制与固体潮观测[J]. 地球物理学报, 2024, 67(12): 4493-4502.

ZHANG Ning, CHEN Gaojun, LIU Lu, et al. Development of Superconducting Gravimeter and Observation of Solid Earth Tide[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, 67(12): 4493-4502.

[21] WILL C M. Gravitational Red-Shift Measurements as Tests of Nonmetric Theories of Gravity[J]. *Physical Review D*, 1974, 10: 2330-2337.

[22] WANG L, SHEN W B, et al. Experiment of Geopotential Measurement Using GNSS Single-Clock Transportation Method[J]. *Geophysical Journal International*, 2025: ggaf223.

[23] RUBY A, SHEN W B, SHAKER A, et al. Sensitivity Analysis of Gravitational Redshift Tests Using Laser Time Transfer on the Jason-2 Mission[J]. *The European Physical Journal C*, 2026, 86(6): 682.

[24] 孙和平, 孙文科, 申文斌, 等. 地球重力场及其地学应用研究进展: 2020中国地球科学联合学术年会专题综述[J]. 地球科学进展, 2021, 36(5): 445-460.
SUN Heping, SUN Wenke, SHEN Wenbin, et al. Research Progress of Earth's Gravity Field and Its Application in Geosciences—A Summary of Annual Meeting of Chinese Geoscience Union in 2020[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(5): 445-460.

[25] 祝意青, 张勇, 张国庆, 等. 21世纪以来青藏高原大震前重力变化[J]. 科学通报, 2020, 65(7): 622-632.
ZHU Yiqing, ZHANG Yong, ZHANG Guoqing, et al. Gravity Variations Preceding the Large Earthquakes in the Qinghai-Tibet Plateau from 21st Century[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(7): 622-632.

[26] 付广裕. 中国地震重力研究现状及其面临的挑战[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(6): 858-869.
FU Guangyu. Status and Challenges of Chinese Gravity Observation for Seismic Events[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(6): 858-869.

[27] 胡敏章, 李辉, 刘子维, 等. 川滇地区2010—2013年重力变化及重力网的地震监测能力[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(4): 616-620.
HU Minzhang, LI Hui, LIU Ziwei, et al. The Gravity Change over Sichuan-Yunnan Region in 2010—2013 and the Earthquake Monitoring Ability of the Gravimetric Network[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(4): 616-620.

[28] ZHOU Z B, LIU Y L, ZHOU H, et al. Precision Gravity Measurement Facility[J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2025, 12(4): 1254-1258.

[29] DEHLINGER P. Marine Gravity[M]. Amsterdam; New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978.

[30] 柳林涛, 何建刚, 许江宁, 等. CHZ-Ⅱ海洋重力仪研制与实践[J]. 测绘学报, 2024, 53(4): 620-628.
LIU Lintao, HE Jiangang, XU Jiangning, et al. Development and Practice of CHZ-Ⅱ Marine Gravimeter[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(4): 620-628.

[31] LACOSTE L, FORD J, BOWLES R, et al. Gravity Measurements in an Airplane Using State-of-the-Art Navigation and Altimetry[J]. *Geophysics*, 1982, 47(5): 832-838.

[32] FORSBERG R, KENYON S. Downward Continuation of Airborne Gravity Data[C]//The IAG Symposium G4 on Airborne Gravity Field Determination, XXI General Assembly of IUGG, University of Colorado, Boulder, USA, 1995.

[33] SCHWARZ K P, LI Z F. An Introduction to Airborne Gravimetry and Its Boundary Value Problems[M]//Geodetic Boundary Value Problems in View of the One Centimeter Geoid. Berlin/Heidelberg: Springer, 2005: 312-358.

[34] DRANSFIELD M, CHRISTENSEN A, ROSE M, et al. Falcon Test Results from the Bathurst Mining Camp[J]. *Exploration Geophysics*, 2001, 32(3/4): 243-246.

[35] DIFRANCESCO D. Gravity Gradiometry Developments at Lockheed Martin[C]//EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, 2003.

[36] 孙中苗, 翟振和, 李迎春. 航空重力仪发展现状和趋势[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 1-8.
SUN Zhongmiao, ZHAI Zhenhe, LI Yingchun. Status and Development of Airborne Gravimeter[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(1): 1-8.

[37] 宁津生. 基于SINS/GNSS的航空矢量重力测量数据处理方法研究[J]. 中国工程科学, 2014, 16(3): 4-13.
NING Jinsheng. Research on the Data Processing Methods of Airborne Vector Gravimetry Using SINS/GNSS[J]. *Engineering Science*, 2014, 16(3): 4-13.

[38] 熊盛青. 航空地球物理勘查科技创新与应用[J]. 地质力学学报, 2020, 26(5): 791-818.
XIONG Shengqing. Innovation and Application of Airborne Geophysical Exploration Technology[J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(5): 791-818.

[39] 蔡劭琨, 张开东, 吴美平, 等. 基于SINS/DGPS

的捷联式航空重力矢量测量[J]. 海洋测绘, 2015, 35(3): 24-28.
CAI Shaokun, ZHANG Kaidong, WU Meiping, et al. Airborne Vector Gravimetry Based on SINS/DGPS[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2015, 35(3): 24-28.

[40] 孙中苗, 刘晓刚, 吴富梅, 等. 航空重力测量理论及应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2021.
SUN Zhongmiao, LIU Xiaogang, WU Fumei, et al. Airborne Gravimetry Theory and Its Application [M]. Beijing: Sino Maps Press, 2021.

[41] 黄谟涛, 邓凯亮, 欧阳永忠, 等. 海空重力测量理论方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
HUANG Motao, DENG Kailiang, OUYANG Yongzhong, et al. Theoretical Method and Application of Sea-Air Gravity Measurement[M]. Beijing: Science Press, 2024.

[42] YU M B, CAI T J. Generation of a Multifrequency Gravitational-Gradient Excitation and Extraction of the Gravitational Gradient with a Rotating Accelerometer Gravity Gradiometer[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(10): 104501.

[43] YU X B, JIANG T, YU L, et al. Error Analysis of Calibration for Horizontal Tensor Rotating Accelerometer Gravity Gradiometer[J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(5): 055121.

[44] 李建成, 金涛勇. 卫星测高技术及应用若干进展[J]. 测绘地理信息, 2013, 38(4): 1-8.
LI Jiancheng, JIN Taoyong. On the Main Progress of Satellite Altimetry and Its Applications[J]. *Journal of Geomatics*, 2013, 38(4): 1-8.

[45] SANDWELL D T, MÜLLER R D, SMITH W H F, et al. New Global Marine Gravity Model from CryoSat-2 and Jason-1 Reveals Buried Tectonic Structure[J]. *Science*, 2014, 346(6205): 65-67.

[46] SANDWELL D T, HARPER H, TOZER B, et al. Gravity Field Recovery from Geodetic Altimeter Missions[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(2): 1059-1072.

[47] YU Y, SANDWELL D T, DIBARBOURE G. Abyssal Marine Tectonics from the SWOT Mission [J]. *Science*, 2024, 386(6727): 1251-1256.

[48] WU Y H, ANDERSEN O B, ABULAITIJIANG A, et al. Marine Quasi-Geoid Enhancement from SWOT Wide-Swath Data and Its Mapping of Mean Dynamic Topography Over Island Areas[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, 63: 4209920.

[49] REIGBER C, JOCHMANN H, WÜNSCH J, et al. Earth Gravity Field and Seasonal Variability from CHAMP [M]//Earth Observation with CHAMP. Berlin: Springer, 2005: 25-30.

[50] TAPLEY B D, BETTADPUR S, RIES J C, et al. GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System[J]. *Science*, 2004, 305(5683): 503-505.

[51] PAIL R, GOIGINGER H, SCHUH W D, et al. Combined Satellite Gravity Field Model GOCO01S Derived from GOCE and GRACE[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(20): L20314.

[52] 宁津生, 王正涛, 超能芳. 国际新一代卫星重力探测计划研究现状与进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(1): 1-8.
NING Jinsheng, WANG Zhengtao, CHAO Nengfang. Research Status and Progress in International Next-Generation Satellite Gravity Measurement Missions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 1-8.

[53] WANG H S, JIA L L, STEFFEN H, et al. Increased Water Storage in North America and Scandinavia from GRACE Gravity Data[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(1): 38-42.

[54] RODELL M, FAMIGLIETTI J S, WIESE D N, et al. Emerging Trends in Global Freshwater Availability[J]. *Nature*, 2018, 557(7707): 651-659.

[55] 罗志才, 钟波, 周浩, 等. 利用卫星重力测量确定地球重力场模型的进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1713-1727.
LUO Zhicai, ZHONG Bo, ZHOU Hao, et al. Progress in Determining the Earth's Gravity Field Model by Satellite Gravimetry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1713-1727.

[56] LUO J, BAI Y Z, CAI L, et al. The First Round Result from the TianQin-1 Satellite[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, 37(18): 185013.

[57] 肖云, 杨元喜, 潘宗鹏, 等. 中国卫星跟踪卫星重力测量系统性能与应用[J]. 科学通报, 2023, 68(20): 2655-2664.
XIAO Yun, YANG Yuanxi, PAN Zongpeng, et al. Performance and Application of the Chinese Satellite-to-Satellite Tracking Gravimetry System [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(20): 2655-2664.

[58] 孙和平, 肖云, 王长青. 中国卫星重力测量技术进展与科学应用[J]. 地球物理学报, 2026, 69(8): 3299-3313.
SUN Heping, XIAO Yun, WANG Changqing. Progress on the Chinese Satellite Gravimetry Techniques and Major Science Applications[J]. *Chinese*

Journal of Geophysics, 2026, 69(8): 3299-3313.

[59] 孙中苗, 刘乾坤, 黄令勇, 等. 中国重力卫星与测高卫星性能互比及联合建模思考[J]. 地球物理学报, 2026, 69(8): 3501-3509.
SUN Zhongmiao, LIU Qiankun, HUANG Lingyong, et al. Performance Intercomparison and Joint Modeling Considerations for Chinese Gravity and Altimetry Satellites[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2026, 69(8): 3501-3509.

[60] 冉将军, 闫政文, 吴云龙, 等. 下一代重力卫星任务研究概述与未来展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(6): 841-857.
RAN Jiangjun, YAN Zhengwen, WU Yunlong, et al. Research Status and Future Perspectives in Next Generation Gravity Mission[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(6): 841-857.

[61] MORITZ H. Advanced Physical Geodesy[M]. Karlsruhe; Tunbridge Wells: Herbert Wichmann Verlag AND Abacus Press, 1980.

[62] 章传银. 物理大地测量学[M]. 北京: 科学出版社, 2026.
ZHANG Chuanyin. Physical Geodesy[M]. Beijing: Science Press, 2026.

[63] 魏子卿. 第二大地边值问题[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
WEI Ziqing. Second Geodetic Boundary Value Problem[M]. Beijing: Science Press, 2021.

[64] SACERDOTE F, SANSÒ F. Overdetermined Boundary Value Problems in Physical Geodesy[J]. *Manuscripta Geodaetica*, 1985, 10(3): 195-207.

[65] RUMMEL R, TEUNISSEN P, VAN GELDEREN M. Uniquely and Overdetermined Geodetic Boundary Value Problems by Least Squares[J]. *Bulletin Géodésique*, 1989, 63(1): 1-33.

[66] KELLER W. On the Treatment of an Overdetermined Boundary Value Problem by Pseudodifferential Operators[C]//The II Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy, Pisa, Repubblica Italiana, 1989.

[67] 朱灼文, 于锦海. 超定大地边值问题的准解[J]. 中国科学(*B*辑), 1992,22(1): 103-112.
ZHU Zhuowen, YU Jinhai. Quasi-Solution of Overdetermined Geodetic Boundary Value Problem[J]. *Science in China* (*Series B*),1992,22(1): 103-112.

[68] 于锦海. 物理大地测量边值问题的理论[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所,1992.
YU Jinhai. Theory of Boundary Value Problem in Physical Geodesy[D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1992.

[69] 罗志才, 钟波, 宁津生, 等. 卫星重力梯度测量确定地球重力场的理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2015.
LUO Zhicai, ZHONG Bo, NING Jinsheng, et al. Theory and Method for Determining the Earth's Gravity Field from Satellite Gravity Gradiometry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2015.

[70] BARZAGHI R, SANSÒ F. Remarks on the Inverse Gravimetric Problem[J]. *Geophysical Journal International*, 1988, 92(3): 505-511.

[71] 李斐. 重力学反问题中零外部位密度的研究[J]. 地球物理学报, 1996, 39(4): 512-521.
LI Fei. A Research on Density of Null External Potential[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1996, 39(4): 512-521.

[72] 许厚泽. 固体地球潮汐[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2010.
XU Houze. Tide of Solid Earth[M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 2010.

[73] 孙和平, 徐建桥, 崔小明. 重力场的地球动力学与内部结构应用研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1290-1299.
SUN Heping, XU Jianqiao, CUI Xiaoming. Research Progress of the Gravity Field Application in Earth's Geodynamics and Interior Structure[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1290-1299.

[74] DING H, CHAO B F. Solid Pole Tide in Global GPS and Superconducting Gravimeter Observations: Signal Retrieval and Inference for Mantle Anelasticity[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 459: 244-251.

[75] DING H, CHAO B F. The Slichter Mode of the Earth: Revisit with Optimal Stacking and Autoregressive Methods on Full Superconducting Gravimeter Data Set[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(10): 7261-7272.

[76] OKUBO S. Potential and Gravity Changes Raised by Point Dislocations[J]. *Geophysical Journal International*, 1991, 105(3): 573-586.

[77] 孙文科. 地震位错理论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
SUN Wenke. Seismic Dislocation Theory[M]. Beijing: Science Press, 2012.

[78] ZHU Y, ZHAN F B, ZHOU J, et al. Gravity Measurements and Their Variations Before the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100(5B): 2815-2824.

[79] WAN J K, XU C, LUO Z C, et al. An Approach

to Moho Topography Recovery Using the On-Orbit GOCE Gravity Gradients and Its Applications in Tibet[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1567.

[80] XU C, LUO Z C, SUN R, et al. Multilayer Densities Using a Wavelet-Based Gravity Method and Their Tectonic Implications Beneath the Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 213(3): 2085-2095.

[81] XU C, LI J B, JIAN G Y, et al. An Adaptive Nonlinear Iterative Method for Predicting Seafloor Topography from Altimetry-Derived Gravity Data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2023, 128(1): e2022JB025692.

[82] 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.

[83] YANG J J, LUO Z C, TU L C. Ocean Access to Zachariæ Isstrøm Glacier, Northeast Greenland, Revealed by OMG Airborne Gravity[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(11): e2020JB020281.

[84] RODELL M, REAGER J T. Water Cycle Science Enabled by the GRACE and GRACE-FO Satellite Missions[J]. *Nature Water*, 2023, 1(1): 47-59.

[85] RAN J J, DITMAR P, VAN DEN BROEKE M R, et al. Vertical Bedrock Shifts Reveal Summer Water Storage in Greenland Ice Sheet[J]. *Nature*, 2024, 635(8037): 108-113.

[86] ZHOU H, SUN Y L, CHEN J L, et al. Ecological Restoration Reverses Terrestrial Water Storage Losses in the Mu Us Sandyland in China[J]. *Communications Earth & Environment*, 2026, 7: 80.

[87] JIANG T, TU Z J, LI J C. Physics-Informed Neural Networks for Geoid Modeling[J]. *Journal of Geodesy*, 2026, 100(1): 4.

[88] ZHANAKULOVA K, ADEBIYET B, ORYNBASSAROVA E, et al. Application of Machine Learning Methods for Gravity Anomaly Prediction[J]. *Geosciences*, 2025, 15(5): 175.

[89] MESSINA C, BIANCO L, ABBAS M A, et al. Gravity Modeling in Sedimentary Basins with a Mixed Machine Learning-Inversion Method[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, 63: 1-10.

[90] ZHOU H, YANG J P, LI Y Z, et al. Orbital Decay Prediction in Low Earth Orbit: Integrating Along-Track Density Observations with Machine Learning[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2026, 131(3): e2025JA034593.

[91] PAIL R, BINGHAM R, BRAITENBERG C, et al. Science and User Needs for Observing Global Mass Transport to Understand Global Change and to Benefit Society[J]. *Surveys in Geophysics*, 2015, 36(6): 743-772.