

地球物理学、空间物理学和大地测量学与人类文明

符慧山¹, 赵亮², 李志伟³, 王一博², 李忠海⁴, 黄周传⁵, 程惠红^{6*}

1. 北京航空航天大学空间与地球科学学院, 北京 100191

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083

4. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

5. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023

6. 国家自然科学基金委员会地球科学部三处, 北京 100085

* 联系人, E-mail: chenghh@nsfc.gov.cn

1 地球物理学 空间物理学和大地测量学简介

地球物理学、空间物理学和大地测量学是研究地球和行星内部、表层以及其空间环境的学科, 是基于物理学及相关理论方法, 结合多维多尺度观测和实验手段, 探索地球、行星和行星际空间的结构、运行和演化规律, 揭示地球与空间环境、人类宜居环境的形成过程等的一门学科^[1], 该学科的发展简史如图1所示。

地球物理学侧重于通过探测和解析地球内部和表层的物理场, 认识地球的形成与演化, 为资源能源勘探、自然灾害防控及地球环境保护与治理等提供科学依据。长期以来, 该分支学科利用地震波场、重力场、电磁场等进行探测, 获得了地球和行星的物质组成、分布及内部结构等, 为矿产、石油、天然气等关键战略资源的勘探提供了技术支持; 同时, 地球物理学在地震、海啸、火山喷发等自然灾害的预测和预警中发挥了重要作用, 显著减少了人员伤亡和财产损失; 此外, 该学科通过对地球深部以及海洋、大气等表层系统的数理表征, 为人类理解长时间尺度气候变化的根源、预测地球系统未来变化趋势和应对环境挑战等提供了重要理论支撑。

空间物理学主要研究地球与太阳系空间环境及其相互作用, 揭示太阳风、磁暴、极光等现象的形成机制和演化规律, 并在此基础上开展空间天气预报, 精确预测和预防太阳活动对地球环境的影响。自20世纪50年代以来, 该分支学科逐渐揭示了太阳爆发、磁场重联、极光等现象的发生机理, 意识到了空间环境对地球及人类活动的影响, 特别是对卫星运行、通信系统、导航技术甚至电力网络的潜在威胁^[2]。该分支学科与航天工程密切相关, 为人类探索太阳系其他天体、设计深空探测任务提供了理论支持。随着火星、月球、



程惠红 博士, 副研究员。国家自然科学基金委员会地球科学部三处副处长兼地球物理学科项目主任。主要研究方向为计算地球动力学、地球物理学和空间物理学学科项目管理和资助战略研究。

小行星等天体探索的深入, 空间物理学在揭示这些天体的物理特性及其与太阳系环境的关系方面发挥着越来越重要的作用。

大地测量学聚焦在一定的时间和空间参考系中, 精确测量和描绘地球及其他行星的形状与重力场^[3], 并持续监测以了解其变化过程。该分支学科通过建立地球时间和空间框架, 为人类测定和描述宇宙万物提供时空基准, 并通过对地球以及其他行星的定量测量, 不断拓展人类对地球、行星和宇宙的认知边界^[4]。现代大地测量学借助空天遥感与导航等技术手段, 系统地服务国民经济、国防建设、科学研究、防灾减灾等领域, 同时支撑卫星导航、载人航天、深空探测等国家重大需求。

地球物理学、空间物理学和大地测量学的持续研究, 不仅让我们能够更深入地了解地球及行星的物理结构、物理特性和运行规律, 还能够在应对外部宇宙环境挑战等方面中取得重要进展。在人类文明发展的历史长河中, 地球物理学、空间物理学和大地测量学始终是推动人类科技进步和文明发展的重要力量。

引用格式: 符慧山, 赵亮, 李志伟, 等. 地球物理学、空间物理学和大地测量学与人类文明. 科学通报

Fu H, Zhao L, Li Z, et al. Geophysics, Space Physics, Geodesy, and their contributions to human civilization (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/CSB-2025-0623](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0623)

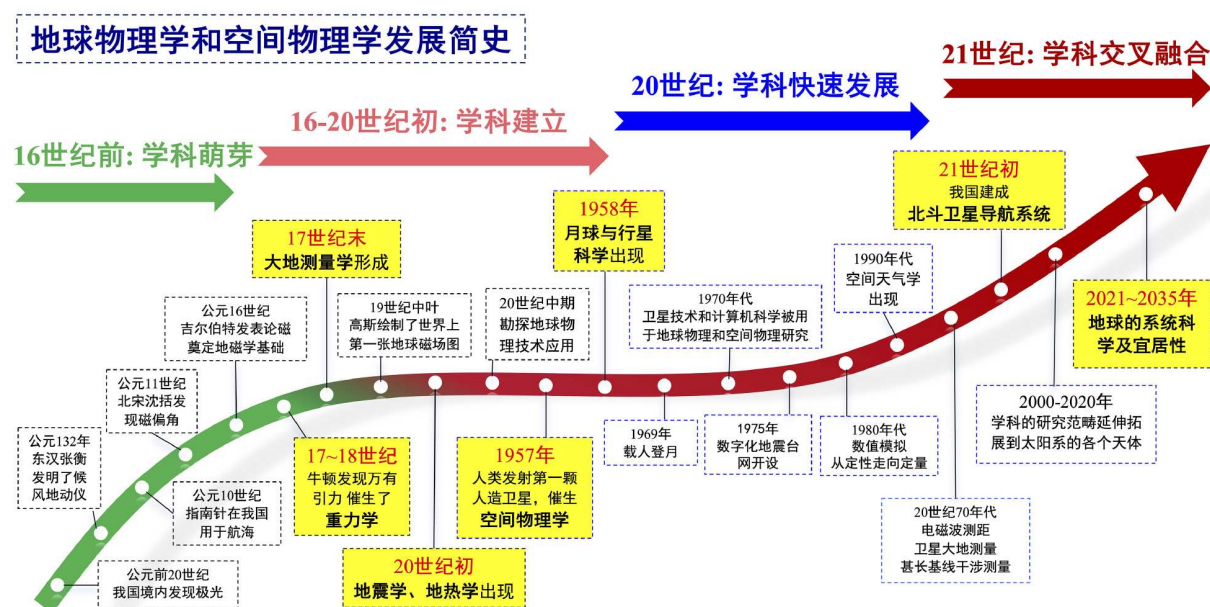


图1 地球物理学和空间物理学发展简史

Figure 1 A brief history of the development of Geophysics and Space Physics

2 地球物理学 空间物理学和大地测量学对人类文明的贡献

2.1 改变世界观

地球物理学、空间物理学和大地测量学通过揭示地球与宇宙的内在结构和运行规律, 重塑了人类对自然、生命以及自身属性的认知体系. 这一过程贯穿了数千年的科学发展历程, 历经了从“地心说”到“日心说”的变革、从基于地球认识地球到从宇宙的视角来认识地球的变革, 为人类文明注入了崭新的思想力量及变革性技术, 主要体现在以下方面.

首先, 揭示了神秘的磁场, 让我们认识到磁场是保护地球家园的无形屏障. 地球磁场是地球物理学、空间物理学和大地测量学的重要研究对象, 它不仅影响着地球的环境, 还深刻影响着人类文明的发展. 历史上, 人们最早通过司南和指南针认识到地磁场的存在, 随着科技的进步, 人类逐步揭示了地磁场的起源——地球内部的液态外核中, 对流运动产生“地球发电机”效应, 进而形成了地磁场^[5]. 空间物理的研究还发现, 太阳活动(如太阳风、日冕物质抛射等)会与地磁场相互作用, 形成磁暴、极光等现象, 并影响无线电通信、卫星运行, 甚至对地球上的电网和航空系统造成干扰. 相关研究进一步拓展到太阳磁场和行星际磁场, 使人类认识到地球并不是孤立存在的, 而是始终处于太阳系环境的影响之下. 这些发现不仅加深了人类对地球磁场的理解, 也让人们意识到宇宙环境对地球的深远影响, 提升了人类对宇宙环境下地球脆弱性的认知^[6].

其次, 推动了人类对地球圈层结构和板块构造的认识, 彻底颠覆了地球内部静止不变的传统观念. 一直以来, 认识圈层结构、板块构造与地球的动态演化都是科学探索的难题. 在古代, 人们普遍认为地球内部是空的, 或者充满神秘物质. 1909年, 莫霍洛维奇发现了地球内部地震波速度的突变, 提供了莫霍面及地球内部结构分层的直接证据, 揭开了地球圈层结构发现的序幕^[7]. 1913年, 德国地球物理学家古登堡利用地震学发现了地球存在液态的地核. 1936年, 丹麦地震学家莱曼发现在地核的中心存在一个固态的内核. 至此, 地球物理学家建立了完整的地壳-地幔-外核-内核的地球圈层结构. 1912年, 魏格纳提出“大陆漂移假说”, 并于1915年发表了著名的德文著作《海陆的起源》, 系统指出地球表层的大陆板块是在不断漂移和运动的. 到20世纪中叶, 海底大调查积累了丰富观测数据, 发现了以洋中脊对称分布的、正负相间的海底磁异常条带, 提出了海底扩张学说^[8], 为板块构造理论的建立提供了至关重要的证据. 之后, 人类对地球板块运动的认知得到了快速发展, 板块构造理论逐步确立^[9-13]. 板块构造理论解释了地球大陆如何运移、碰撞、裂解, 并形成山脉、裂谷等地貌. 这一理论表明地球并非静止不变的, 而是一个充满活力的动态系统, 彻底改变了人们对地球的认识. 地震学和火山学的发展加深了对地球内部活动的认识, 使人类对地球的了解从表层延伸至深层, 逐步理清了地球内部的运行模式和驱动机制.

最后, 精确“丈量”了地球的形状与变化, 对赖以生存的地球有了更清晰更深刻的认知. 过去, 人类对地球形状和大小

的认识依赖于视觉观察和经验判断。而随着现代大地测量学的发展,特别是全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)、卫星重力测量和卫星测高等技术的出现,人类能够“跳出地球”来开展高精度多尺度测量(包括动态测量地球形状、大小和重力场),并实时监测地球的变化(如海平面上升、冰川消融、地壳运动等)^[14]。这标志着人类认识地球的方式从“经验判识”转变为“精密量测”,使地球科学的研究更加定量化、精确化,为研究气候变化、资源勘探、地震预报等领域提供了强大的技术支撑^[15]。

此外,促使人类从宇宙的视角来重新认识地球家园。1957年,第一颗人造卫星“斯普特尼克一号”发射成功,标志着人类发展进入太空时代,可以从太空的视角来回看地球。1958年,范艾伦辐射带的发现,使人类认识到地球磁场是地球的“太空盾牌”,为后续深入研究空间环境、发展航天事业以及探索行星磁场与生命的关联奠定了坚实基础。20世纪60~70年代,阿波罗计划使人类首次成功踏足月球,迈出了探索深空的一大步,更通过珍贵的“蓝色弹珠”影像,为全人类带来了前所未有的视觉震撼。之后,月球探测、行星探测、太阳系边际探测等一系列探测任务,使人类对地球的认识发生了革命性的变化。尤其是对火星、金星等行星的探测,使我们认识到不同行星存在巨大的环境差异(例如火星曾经可能存在液态水^[16]、金星的极端温室效应使其成为炽热的“地狱”等)。这些发现不仅帮助我们理解了地球的独特性,还让我们从“差异化行星演化”的角度去思考地球的去、现在和未来,揭示不同行星的演化路径;“旅行者号”“新视野号”等太阳系边际探测任务,将人类的探索范围扩展至柯伊伯带、奥尔特云,甚至跨越太阳系边界进入星际空间,让我们在更宏观的尺度上审视地球的地位。

综上,地球物理学、空间物理学和大地测量学的发展使人类从“地心说”的局限视角逐步拓展到宇宙尺度的认知体系,同时也使人类从一个被动接受自然的“观察者”逐步转变为主动认知宇宙的“思考者”。人类通过深空探测,了解了地球在太阳系乃至整个宇宙空间的独特性;通过对地磁场及太阳活动的研究,意识到地球并非独立个体,而是时刻受到外界影响;通过板块构造和地震的研究,揭示了地球内部的动态演化过程;通过高精度卫星测量技术,改变了“丈量”地球的方式。学科的发展不仅持续塑造了人类的世界观、自然观和宇宙观,也为我们应对未来的挑战提供了宝贵的科学依据和启示。

2.2 推进人类工业文明

地球物理学、空间物理学和大地测量学的发展,深刻影响了能源资源、通信、交通等诸多领域,为工业革命、现代化建设和全球化进程提供了强大支持^[17]。学科对人类工业文明的促进作用重点体现在以下几个方面。

首先,犹如一个强劲的引擎,驱动资源能源深刻变革。在对资源能源高效安全开发的过程中,地球物理学发挥了关键作用。20世纪初,随着石油工业的崛起,地震勘探技术成为寻找地下油气资源的关键手段。1921年,约翰·克拉伦斯·卡斯特首次应用反射地震法定位地下油藏,标志着地震波被正式用于油气勘探。该技术基于人工激发的地震波传播特性,探测地下地质结构及介质物性^[18],大大提升了资源探测效率、降低了勘探成本与风险,极大地推动了全球石油工业发展^[19]。随后,地球物理技术进一步拓展至矿产资源勘探领域。例如,利用短暂电磁脉冲探测地下结构的“瞬变电磁法”提供了一种新的非侵入式探测方式,极大地提高了矿藏探测的效率和准确性^[20],进一步为工业化和现代制造业提供了基础原材料。同时,地球物理学助力了地热、地下水等可再生资源的开发,促进了能源结构的多样化,提高了人类社会的可持续发展能力。此外,学科还在能源开发的另一个重要领域——核能开发——中发挥了重要作用。20世纪中叶,核电站建设兴起,地震探测与地下水勘测被广泛应用于选址与工程安全评估,确保核设施在地质条件复杂的环境中长期安全运行。同时,地球物理学还被广泛应用于核废料存储的选址等。

其次,犹如一座精密运转的智慧灯塔,为人类定位与导航技术的革新指明了方向。指南针的诞生与应用,是人类最早利用地球物理特性服务于生产生活的智慧结晶,蕴含了“利用地球物理场实现定位导向”的核心思想。现代地球物理学以更加科学、系统的方式,开展地球磁场的产生机制和时空变化规律研究,从而推动指南针从传统磁针式工具,发展为高精度、智能化的电子磁罗盘与卫星导航系统,持续服务于人类社会的发展。现代大地测量学的飞跃式发展催生了GPS、格洛纳斯(GLONASS)、北斗、伽利略等全球卫星导航系统,并广泛应用于国民经济、国防安全和日常民生,如物流运输、自动驾驶、灾害监测等,成为人类科技进步的象征和现代社会不可缺少的基石。

最后,犹如一双洞察空间的“透视之眼”,为现代社会大规模基础设施建设筑牢根基。无论是高铁线路、城市地铁、机场建设,还是水利工程(如三峡大坝)、跨海大桥(如港珠澳大桥)等,这些大工程项目都需要精准的地质勘测和测绘,需要大地测量学和地球物理学提供高精度的地形测量、地壳形变监测、地质灾害评估等技术支持。例如,高铁线路的选址和轨道铺设需要精确测定地壳运动、地下岩层结构,避免因地层不稳导致工程事故。地球物理测量技术的发展,使得基础设施的建设从“经验规划”转向“科学论证”,显著提高了工程的安全性、耐久性与经济效益^[21]。

此外,覆盖全球的信息传输系统与学科的发展密切相关。20世纪初,空间物理学家发现地球高层大气中存在一个可以反射无线电波的电离层(E层和F层),从而促使无线电通信技术迅速发展。电离层理论的建立及其对无线电波传播路径的预测,使得洲际长距离通信成为现实,并使国际的信息流通

更加顺畅,全球经济和文化的互动变得更加频繁,真正意义上缩小了人类活动的地域隔阂,推动了“地球村”概念的形成^[22]。相关技术突破催生了无线电广播、短波通信,为现代通信革命奠定了基础。如今,卫星通信、移动电话和互联网技术的进步,依然离不开大地测量学的支持。例如,我国自主研发的北斗系统相比于美国航空航天局的GPS系统和欧洲航天局的伽利略系统,提供了短报文通信服务,被广泛应用于物流、农业、应急救援、智慧城市等多个领域,展现了中国在高技术领域的创新能力和国际影响力^[23-25]。

综上,地球物理学、空间物理学和大地测量学的发展推动了人类的工业文明进程,塑造了人类的文明轨迹。从古代的指南针到现代的全球卫星导航系统,从石油勘探到新能源开发,从城市基础设施建设到现代通信网络搭建,不仅塑造了现代社会的科技体系,也成为推动未来创新和可持续发展的重要动力。

2.3 保障和拓展人类安全生存空间

在保障人类安全和拓展生存空间方面,地球物理学、空间物理学和大地测量学同样发挥了关键作用。随着对地球内部和外部自然灾害的深入研究,科学家不仅加深了对地球及太空环境的认知,也开发了有效的方法技术来预测和应对自然灾害,并积极探索和拓展人类的生存空间。尤其体现在以下几个方面。

首先,在自然灾害的预警和防范中发挥了关键作用。地震、火山、台风、滑坡、泥石流等自然灾害的发生会直接威胁到人类的生命和财产安全。通过对地球内部和外部环境的持续监测,地球物理学、空间物理学和大地测量学为自然灾害防控提供了科学依据及相关技术手段。20世纪中叶,地震预警系统逐步投入使用,为人类监测地震灾害提供了技术支持。该系统利用电磁波传播速度远快于地震波传播速度的原理,通过快速确定地震的震中位置和震级,估算其波及范围,并通过通信网络在地震波到达前几秒至几十秒,向潜在受灾区域快速发布地震警报。这段“黄金时间”可为人员疏散和关键设施的应急反应赢得宝贵时机,大大减少人员伤亡与财产损失。我国川滇地区已建成世界上最密集的地震预警台网,在多次重大地震预警中取得了显著效果。在火山监测方面,地震活动、地壳变形及火山气体释放是预警系统的关键^[26]。现代地球物理和大地测量技术(如重力测量、GPS和InSAR形变监测等),通过对火山体周围地壳的重力变化和地表形变进行监测,可以获得火山内压力积聚的实时数据,帮助预测火山是否会爆发。1991年菲律宾皮纳图博火山和2010年冰岛厄尔布鲁火山爆发前,科学家就通过监测地震群、地壳形变和火山活动的微小变化,成功预测了火山的爆发,并及时发出了预警,提前组织大规模疏散,避免了大规模的人员伤亡。在泥石流和山体滑坡监测方面,全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)和InSAR等大地

测量技术同样发挥了关键作用。2021年,甘肃黑方台发生黄土滑坡,科学家通过GNSS监测站捕捉到了滑坡处于临滑状态,提前6 h进行了预警,及时撤离了200余人,避免了人员伤亡和财产损失^[27]。在应对气候变化和环境污染方面,空间物理学和大地测量学利用卫星遥感等技术为全球气温、冰川消融、森林变化等提供监测数据,帮助各国政府制定科学的环境保护政策,为可持续发展目标的实现提供了科学依据。

其次,在国防安全领域扮演了重要角色。地震学技术在全球核爆监测中发挥着核心作用。地下核试验会产生与天然地震类似但并不一致的地震波,其波形特征、震源深度和频谱分布具有明显区别。通过全球布设的地震监测网络,科研人员能够快速识别核爆事件并准确确定其发生位置、爆炸当量及震源类型。20世纪以来,多个国家建立了综合核爆监测系统,为核不扩散条约的实施提供了技术支撑。例如,1998年印度进行核试验后,国际监测组织便通过地震波迅速确认其核爆行为^[28]。我国在该领域也取得了显著成就,依托自主建设的地震监测系统,对境内外核爆行为进行了快速识别和追踪^[29],从而强化了我国的国家安全防线。

此外,空间物理学还积极助力人类拓展生存空间,使人类能够离开地球、踏足月球、遨游星辰,并成为“跨星际物种”。20世纪60年代,随着“阿波罗登月计划”的成功实施,人类首次踏足月球,标志着太空探索进入新阶段。太空中的磁暴、亚暴及强烈地磁扰动会对卫星、电力网络及通信系统造成灾难性影响。利用空间物理学的监测手段,人类可以对太阳风暴的到来做出提前预警,从而为卫星运行、航天任务以及宇航员安全提供坚实保障。例如,太阳与日球层观测卫星(SOHO)和日地关系观测卫星(STEREO)可以观测太阳爆发及其日地传播信息,深空气候卫星(DSCOVR)可以在太阳风到达地球前数小时提供预警,这为航天部门、电力部门和通信公司等提供了足够的时间来采取应对措施,从而减轻潜在的危害。通过这些监测与预警,空间物理学不仅在提升灾害应对能力方面发挥了重要作用,也为全球通讯、导航及能源基础设施的正常运行提供了强有力的支持,保障了人类在日益复杂的太空环境中的安全生存空间。同时,随着“国际空间站”和“中国空间站”的建成和国际合作的加强,人类在太空中逐步建立了长久的生存和科研基地^[30]。空间物理学在这一过程中提供了至关重要的支持(尤其是在揭示太空辐射、微重力对人体影响等方面提供了关键信息),为人类未来向地外天体迁徙及生存奠定了基础。

综上,地球物理学、空间物理学和大地测量学的发展不仅能够帮助我们应对自然灾害,也为人类的太空探索和地外生存提供了科学保障。随着科技的不断进步,地球物理学、空间物理学和大地测量学在保障地球安全、拓展人类生存空间等方面的作用将愈加重要。尤其是在地球环境日益严峻的今天,学科的发展为人类向外太空拓展生存空间提供了希望和动力。

3 面向未来的责任和担当

面向未来,地球物理学、空间物理学和大地测量学既肩负着为人类可持续发展保驾护航的神圣使命,也承载着服务国家重大需求的重要责任。从服务“双碳”目标、探究地球深部碳-氢-氧等挥发分元素的循环机制,到助力能源资源安全保障、揭示能源资源成藏规律;从响应防灾减灾需求、解析地震和地质灾害孕育机理,到支撑海洋强国建设、揭示深海构造演化奥秘;从为载人航天、卫星安全运行等提供空间天气预警服务,到围绕深空战略为火星探测、小行星采样、木星系统探测等任务提供科学支撑。通过构建高精度探测体系、深化地球系统动力学模型研究、培育前沿交叉学科方向,不断突破关键技术瓶颈、提升原始创新能力,以扎实的基础研究成果驱动学科高质量发展,为实现我国科技自立自强与民族复兴伟业贡献学科智慧与力量。未来的责任及担当主要体现在以下几个方面。

3.1 理念变革:对标国家需求,夯实基础研究

作为地球系统科学的核心组成部分,地球物理学、空间物理学和大地测量学需主动聚焦圈层耦合、地球和行星宜居性^[31],深入揭示地球多圈层之间及地球与空间环境之间的相互作用与反馈规律,推动学科体系的整体跃升。与此同时,学科将加强与地质学、地球化学等传统地学学科的交叉融合,从地质构造、地球演化与物质迁移等角度深化圈层动力过程的理解,构建更加完整的地球演化模型;同时也需主动融合信息科学、人工智能、量子计算等新兴技术,推动观测数据的集成处理、模式识别与预测模拟智能化,形成“地球物理+信息科学”的新型研究范式,推动“透明地球”“数字地球”和“深时地球”研究,为构建面向未来的地球系统科学理论体系提供坚实支撑。

3.2 能源勘探:开拓新能源的技术边界

面向未来的能源转型,地球物理学、空间物理学和大地测量学将持续在非常规能源、新能源勘探中发挥关键作用,助力我国实现高质量发展与保障国家能源安全的双重目标。随着传统化石能源逐渐接近开发极限,拓展能源的新路径已成为全球能源战略的核心议题。我们亟需加快推进页岩油气、天然气水合物等非常规油气资源的精准探测与高效安全开发。依托深地探测、人工智能、大数据融合等前沿技术,实现资源调查的智能化与精细化,进一步将推动非常规能源向更深层次、更复杂构造区的突破。同时,地热和氢能源作为绿色低碳、可持续利用的重要新能源,其开发潜力亟待释放^[32]。未来将通过构建高分辨率地球物理成像体系,结合多源探测技术,全面提升深层地热资源的识别与评估能力,服务我国清洁能源战略布局。与此同时,面向高技术产业链的国家核心需求,关键金属资源(如稀土、锂、钴、镍等)的深

地深海探测与可持续获取将成为资源保障的新高地。相关技术的突破将为新能源电池、先进制造与战略储备等提供坚实支撑。同时,学科将在非常规油气、可再生能源、战略资源保障等多个维度拓展边界,为实现“双碳”目标与国家能源安全提供强大支撑。此外,太空的能源潜力也值得重视,特别是以月球氦-3为代表的未来聚变能源,其清洁、安全、高效的特性有望引领下一代能源革命。空间物理学和地球物理学将在月球与小行星资源的远程探测、成分识别与可采性评估等方面持续发力,为我国未来空间能源的开发利用打下基础^[33]。

3.3 资源环境:城市地下空间开发和环境保护

随着智慧城市建设和城市地下空间开发利用加快现代化城市的建设,地球物理学和大地测量学在此过程中将承载更加重要的使命。此外,在极端气候事件频频出现、环境保护亟需加强的当下,地球物理学和大地测量学也将发挥愈加重要的作用。学科未来将围绕城市地下空间开发(如地铁线路规划和施工、线路管网铺设、排水系统设计、人防工程建设等),利用地球物理和大地测量学的先进技术(包括GNSS导航定位、InSAR地表形变分析、三维激光扫描、陀螺定向测量、重力测量等),在城市地下空间施工过程中获取更为精准的地表沉降数据和基坑位移数据,预防坍塌风险,并提供高精度基准,纠正地铁建设过程和隧道桥梁工程中的轨迹偏差,从而为智慧城市建设和民生工程提供支撑,促进社会和谐发展。同时,学科还将针对海平面上升、冰川消融、植被破坏、森林面积变化、土地沙化、土壤流失、耕地面积锐减等棘手的气候问题和环境问题,InSAR测量、激光雷达(LiDAR)测量等先进的大地测量学的技术和手段获取更为精准的监测数据,从而为政府出台治理方案和保护措施提供科学依据、为国家宏观决策提供数据支撑、为人类社会可持续发展保驾护航。

3.4 防灾减灾:应对全球风险的科技支撑

在全球灾害风险日益加剧的背景下,地球物理学、空间物理学和大地测量学需肩负起构建高水平防灾减灾科技体系的重要使命。学科将重点围绕空间灾害监测预警、地下空间安全保障与野外综合观测台网建设等核心领域,深化基础研究与技术创新,为我国重大工程和社会民生的安全运行提供坚实支撑。在空间灾害防御方面,学科需进一步聚焦空间天气变化的物理机制与演化规律,尤其是太阳活动、太阳风、磁暴等过程对地球电离层、中高层大气和地表的影响。通过构建高分辨率的空间探测体系和预报模型,实现对磁暴、亚暴、高能粒子事件的精确预测,切实保障卫星导航、通信系统、电网运行及载人航天活动的安全稳定,同时为深空探测与未来星际航行中的灾害防御提供理论与技术储备。在地下空间安全保障方面,学科将针对日益扩张的城市与工

程开发需求,依托卫星大地测量、地震波、电磁波等探测手段及其高精度地球物理成像技术^[34],进一步揭示中国大陆深部结构与浅部活动的精细特征与时空变化规律,为重大工程选址、地下交通系统建设以及深层资源开采提供安全评估与风险预警支持。在野外综合观测台网建设方面,学科将通过在关键地质构造区、重点城市群及边远区域布设高密度、高灵敏度的观测台站,实现对地震、地质灾害、地表形变、电磁扰动等多源信息的实时采集与智能集成分析。通过与空间探测数据协同融合,形成天地一体化的立体监测体系,全面提升灾害识别、预警与响应的智能化水平,为保障国家安全、经济发展与人民生命财产安全提供坚强的科技支撑。

3.5 深空探测:月球与行星探测的未来蓝图

深空探测作为国家“深空”战略的核心,是学科未来的重要发展方向^[35]。随着我国航天事业的飞速发展,空间站、月球与行星探测已成为推动科技进步和保障国家战略安全的重要支撑。中国空间站的建设将促进地球系统科学(例如海洋科学、大气科学、空间环境、地球磁场、地球重力场、微重力、圈层耦合)的全面快速发展。月球的探测不仅涉及月球资源评估,还将助力月球科研站建设。中国的嫦娥工程自2007年成功发射嫦娥一号以来,逐步实现了绕月探测、月面软着陆、样品返回的“三步走”战略,所取得的科学成果为未来月球资源的开发利用提供了科学数据支撑^[36],进而加快了人类从“地球村”到“地月村”迈进的步伐^[37]。例如,氦-3被认为是清洁核聚变能源的重要材料,而嫦娥五号带回的月壤样品则为评估月球表面的氦-3资源奠定了基础。在行星探测方面,学科未来将聚焦于类地行星、巨行星及其卫星的探测,尤其是这些星球的内部结构和空间环境的探测。2021年中国天问一号探测器成功实现了火星“绕、落、巡”三步任务,成为全球首个在一次任务中完成这三项目标的探测计划。天问一号的着陆器与“祝融号”火星车不仅对火星地貌、土壤成分进行了科学探测^[38],还深入分析了火星磁场及地下水的可能存在^[39,40],为未来火星移居计划提供了宝贵的理论依据。巨行星探测(包括木星、土星)将为太阳系起源和演化提供宝贵线索^[41],而这也正是我国规划中的任务。因此,未来学科将结合我国的深空探测任务以及相关国际任务(如美国航空航天局和欧洲航天局的任务),深入开展月球和行星科学的研究^[42]。

3.6 技术变革:变革性技术是学科持续发展的关键

随着信息化和人工智能等现代手段的迅速发展,地球物理学、空间物理学和大地测量学在未来将进行一系列技术变革。对于地球物理学,随着地震、重力、电磁等探测方法和技术的发展,未来有望实现地球和行星内部更高精度的成像,从而为地球和行星内部的运行机制提供更可靠的约束,进而更有效地促进能源资源勘探、灾害防治和环境保护。对于空间物理学,随着日地空间全链条监测网络的建成,未来

有望实现对空间天气的精准预报和预警,实现对灾害性天气的有效规避和对人类航天活动的高效防护。对于大地测量学,随着高精度导航定位、空天遥感和全球通信网络的建成,未来将为地震预警、城市规划以及资源管理等提供精确的数据支撑,为国家基础设施建设、生态环境保护、气候变化监测以及城市安全运维等社会民生工程提供有力保障。

4 总结

回顾历史,地球物理学、空间物理学和大地测量学作为人类认识自然的重要学科,不仅深刻改变了人类对世界的认知方式,还在推动工业文明进程与保障人类生存空间等方面发挥了不可替代的作用。在改变世界观层面,学科通过对地球内部结构、圈层演化以及地球动力过程的持续研究,帮助人类从“平地而居”的直观经验中跳脱出来,建立起系统性的地球观和空间观。地球不再只是表层可见的陆地与海洋,而是一个由多个圈层耦合组成的复杂动力系统,且与宇宙环境深度连通,这一全新认知格局重塑了人类理解自然的基础。在推进工业文明方面,地球物理学与大地测量学为能源与矿产资源的高效探测和可持续开发提供了坚实技术支撑。石油、天然气、煤炭等传统能源大规模开采的背后,正是学科发展做出的巨大贡献;高精度的大地测量和物探手段,也为交通、建筑、水利等基础设施建设提供了科学依据,推动了现代工业社会的兴起与壮大。在保障与拓展人类安全生存空间方面,地球物理学、空间物理学和大地测量学是全球灾害防控和未来空间拓展的关键支撑。对地震、火山、滑坡等地质灾害的监测预警技术日益成熟,大规模地震台网和野外监测系统不断完善,为人类赢得更多应对自然灾害的时间和空间;对太阳活动和磁暴的监测预报网络日趋完善,为人类航天活动和国民经济提供了有力保障。

展望未来,地球物理学、空间物理学和大地测量学将在推动人类文明进程中发挥更加关键的作用。在面对全球气候变化、能源危机与自然灾害频发等对人类的严峻挑战时,地球物理学将持续提供更为精准的自然灾害预测手段和资源勘探技术,助力人类科学应对环境变迁、减缓生态破坏,推进可持续发展。同时,地球物理学在绿色能源开发与利用方面也将成为推动能源转型的重要科技引擎,为实现低碳经济和绿色未来奠定基础。空间物理学则将进一步深化人类对太阳系乃至更深远宇宙空间环境的认识,尤其在应对太阳风暴、地磁暴等极端空间天气对通信、导航、航天器与地面基础设施的影响方面,将发挥不可替代的作用。随着深空探测的不断推进,空间物理学将为人类探索类地行星、开采空间资源、迈向星际文明提供坚实的科学支撑。大地测量学将通过更高精度的测量技术与全球导航定位体系的构建,为地球形变监测、海平面变化、板块运动等地球动态过程提供实时可靠的数据支持。在城市安全、工程建设、资源管理以及应对极端气候事件等领域,大地测量学也将发挥重要的基

础支撑作用。特别是在推动天地一体化观测体系、大数据集成与智能分析等方面,学科之间的协同将愈加紧密。通过加强基础研究、促进跨学科融合与技术创新,地球物理学、空

间物理学和大地测量学将在解决地球与行星科学的重大问题中持续发挥引领作用,为人类的文明发展不断注入强劲动力,助力科技进步与社会繁荣迈向新高度。

致谢 感谢国家自然科学基金战略研究类专项(42342062)资助。衷心感谢地球物理学和空间物理学学科资助体系梳理战略组及对本次学科体系梳理工作提出宝贵论证意见的专家们(按姓氏拼音排序):艾印双、鲍李峰、曹丹平、曹晋滨、陈晓非、陈耀、储日升、崔峻、邓成龙、葛亚松、郭宇航、韩鹏、胡俊、胡祥云、黄清华、姜卫平、李博峰、李晖、李建成、李建慧、刘立波、倪彬彬、倪四道、欧阳志海、潘永信、单新建、盛敏汉、孙付平、王赤、王彦飞、许才军、薛向辉、于晟、杨泽发、姚华建、姚宜斌、印兴耀、袁运斌、张爱兵、张磊、张伟、张小红、张效信、赵倩、周元泽、宗秋刚、邹贤才等。感谢国家自然科学基金委员会分管委领导兰玉杰副主任、地球科学部郭正堂主任、姚玉鹏常务副主任及地球科学部咨询委员会提供的支持和指导。

推荐阅读文献

- Cheng H, Sun C, Wang C. Optimization of the discipline layout of geophysics and space physics sciences in the National Natural Science Foundation of China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 176–186 [程惠红, 孙长青, 王聪. 国家自然科学基金地球物理学和空间物理学学科布局规划研究. 科学通报, 2021, 66: 176–186]
- Wang C. Prospects of global space science breakthroughs and China's contributions (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2022, 37: 1050–1065 [王赤. 空间科学突破的前瞻和中国的贡献. 中国科学院院刊, 2022, 37: 1050–1065]
- Li J C, Chen J Y, Ning J S, et al. The Theory of Approximation of the Earth's Gravity Field and the Determination of China's 2000 Quasi-Geoid (in Chinese). Wuhan: Wuhan University Press, 2003 [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. 武汉大学出版社, 2003]
- Yao Y B, Yang Y X, Sun H P, et al. Geodesy discipline: progress and perspective (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2020, 49: 1243–1251 [姚宜斌, 杨元喜, 孙和平, 等. 大地测量学科发展现状与趋势. 测绘学报, 2020, 49: 1243–1251]
- Ma S Z, Wei Q Y, Xu W Y. On the core-mantle interaction and geodynamo theory (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 1992, 7: 31–34 [马石庄, 魏青云, 徐文耀. 核幔相互作用与地球发电机理论. 地球科学进展, 1992, 7: 31–34]
- Zhu R, Liu Q, Pan Y. Link between the geomagnetic polarity reversal and global-geology events (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 1999, 44: 1843–1851 [朱日祥, 刘青松, 潘永信. 地磁极性倒转与全球性地质事件的相关性. 科学通报, 1999, 44: 1843–1851]
- Hirose K, Wood B, Vočadlo L. Light elements in the Earth's core. *Nat Rev Earth Environ*, 2021, 2: 645–658
- Müller R D, Sdrolias M, Gaina C, et al. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. *Geochem Geophys Geosyst*, 2008, 9: 2007GC001743
- Isacks B, Oliver J, Sykes L R. Seismology and the new global tectonics. *J Geophys Res*, 1968, 73: 5855–5899
- Le Pichon X. Sea-floor spreading and continental drift. *J Geophys Res*, 1968, 73: 3661–3697
- McKENZIE D P, Parker R L. The North Pacific: an example of tectonics on a sphere. *Nature*, 1967, 216: 1276–1280
- Morgan W J. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *J Geophys Res*, 1968, 73: 1959–1982
- Wilson J T. Static or mobile earth: the current scientific revolution. *Tectonophysics*, 1969, 7: 600–601
- Dang Y M, Jiang T, Yang Y X, et al. Research progress of geodesy in China (2019–2023) (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2023, 52: 1419–1436 [党亚民, 蒋涛, 杨元喜, 等. 中国大地测量研究进展(2019~2023). 测绘学报, 2023, 52: 1419–1436]
- Xu H Z, Jiang F Z, Zhang C J. Progress of dynamic geodesy in China (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2000, 15: 127–133 [许厚泽, 蒋福珍, 张赤军. 我国动力大地测量学的进展. 地球科学进展, 2000, 15: 127–133]
- Lin H, Lin Y, Wei Y, et al. Mineralogical evidence of water activity in the northern lowlands of Mars based on inflight-calibrated spectra from the Zhurong rover. *Sci China Earth Sci*, 2023, 66: 2463–2472 [林红磊, 林杨挺, 魏勇, 等. 祝融号在轨道标光谱揭示火星北部低地卤水活动的矿物学证据. 中国科学: 地球科学, 2023, 53: 2506–2515]
- Bai C L. Technological revolution and industrial transformation: trends and implications (in Chinese). *Sci Tech Rev*, 2021, 39: 11–14 [白春礼. 科技革命与产业变革: 趋势与启示. 科技导报, 2021, 39: 11–14]
- Li Z, Chen X. An effective method to extract overtones of surface wave from array seismic records of earthquake events. *JGR Solid Earth*, 2020, 125: e2019JB018511
- Bednar J B. A brief history of seismic migration. *Geophysics*, 2005, 70: 3MJ–20MJ

- 20 Xue G Q, Li X, Di Q Y. The progress of TEM in theory and application (in Chinese). *Prog Geophys*, 2007, 22: 1195–1200 [薛国强, 李貅, 底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展. *地球物理学进展*, 2007, 22: 1195–1200]
- 21 Di Q Y, Wang G J, An Z G, et al. Geophysical exploration of a long deep tunnel on the west route of South to North Water Diversion Project (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2006, 49: 1836–1842 [底青云, 王光杰, 安志国, 等. 南水北调西线千米深长隧洞围岩构造地球物理勘探. *地球物理学报*, 2006, 49: 1836–1842]
- 22 Fan Q L, Bai Q J, Wang H M, et al. The Nobel Prize as an indicator of space science's contribution to world science and technology power construction (in Chinese). *Sci Tech Rev*, 2018, 36: 8–12 [范全林, 白青江, 王海名, 等. 从诺贝尔奖看空间科学对科技强国的贡献. *科技导报*, 2018, 36: 8–12]
- 23 Cheng H H, Yao Y B, Zhao Q, et al. Exploring the disciplinary framework and development of geodesy through the lens of the National Natural Science Foundation of China (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2023, 52: 523–535 [程惠红, 姚宜斌, 赵倩, 等. 从国家自然科学基金项目资助探讨大地测量学的学科架构与发展. *测绘学报*, 2023, 52: 523–535]
- 24 Yang Y, Liu L, Li J, et al. Featured services and performance of BDS-3. *Sci Bull*, 2021, 66: 2135–2143
- 25 Cai H L, Meng Y N, Geng C J, et al. BDS-3 performance assessment: pNT, SBAS, PPP, SMC and SAR (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2021, 50: 427–435 [蔡洪亮, 孟轶男, 耿长江, 等. 北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估: 定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救. *测绘学报*, 2021, 50: 427–435]
- 26 Seropian G, Kennedy B M, Walter T R, et al. A review framework of how earthquakes trigger volcanic eruptions. *Nat Commun*, 2021, 12: 1004
- 27 Zhu W, Zhang Q, Zhu J J, et al. Real-time monitoring and early warning technology for huge landslides (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2022, 44: 1341–1350 [朱武, 张勤, 朱建军, 等. 特大滑坡实时监测预警与技术装备研发. *岩土工程学报*, 2022, 44: 1341–1350]
- 28 Barker B, Clark M, Davis P, et al. Monitoring nuclear tests. *Science*, 1998, 281: 1967–1968
- 29 Xie X B, Zhao L F. The seismic characterization of North Korea underground nuclear tests (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2018, 61: 889–904 [谢小碧, 赵连锋. 朝鲜地下核试验的地震学观测. *地球物理学报*, 2018, 61: 889–904]
- 30 Gu Y. The China Space Station: a new opportunity for space science. *Natl Sci Rev*, 2022, 9: nwab219
- 31 Pan Y X, Zhu R X. The progress of environmental magnetism (in Chinese). *Prog Geophys*, 1996, 11: 87–99 [潘永信, 朱日祥. 环境磁学研究现状和进展. *地球物理学进展*, 1996, 11: 87–99]
- 32 Olabi A G, Abdelkareem M A. Renewable energy and climate change. *Renew Sustain Energy Rev*, 2022, 158: 112111
- 33 Wu J, Sun L L, You L, et al. 2016–2030 Research report on space science strategic plan (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2015, 30: 707–720 [吴季, 孙丽琳, 尤亮, 等. 2016–2030年中国空间科学发展规划建议. *中国科学院院刊*, 2015, 30: 707–720]
- 34 Wang J, Wu G, Chen X. Frequency-bessel transform method for effective imaging of higher-mode Rayleigh dispersion curves from ambient seismic noise data. *JGR Solid Earth*, 2019, 124: 3708–3723
- 35 Wang C. China aims to become a space science powerhouse (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2024, 39: 1808–1812 [王赤. 中国要建成空间科学强国. *中国科学院院刊*, 2024, 39: 1808–1812]
- 36 Li C, Liu D, Liu B, et al. Chang'e-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials. *Nature*, 2019, 569: 378–382
- 37 Wang C, Song T, Shi P, et al. A Chinese path to modernization on Space Science & Technology (in Chinese). *Sci Tech Rev*, 2024, 42: 6–15 [王赤, 宋婷婷, 时蓬, 等. 关于中国空间科技现代化发展的初步思考. *科技导报*, 2024, 42: 6–15]
- 38 Li C, Zheng Y, Wang X, et al. Layered subsurface in Utopia Basin of Mars revealed by Zhurong rover radar. *Nature*, 2022, 610: 308–312
- 39 Liu J, Qin X, Ren X, et al. Martian dunes indicative of wind regime shift in line with end of ice age. *Nature*, 2023, 620: 303–309
- 40 Zhang R Q, Geng Y, Sun Z Z, et al. Technical innovations of the Tianwen-1 Mission (in Chinese). *Chin J Aeronaut*, 2022, 43: 626689 [张荣桥, 耿言, 孙泽洲, 等. 天问一号任务的技术创新. *航空学报*, 2022, 43: 626689]
- 41 Wei Y, Yao Z, Wan W. China's roadmap for planetary exploration. *Nat Astron*, 2018, 2: 346–348
- 42 Li C, Wang C, Wei Y, et al. China's present and future lunar exploration program. *Science*, 2019, 365: 238–239

Summary for “地球物理学、空间物理学和大地测量学与人类文明”

Geophysics, Space Physics, Geodesy, and their contributions to human civilization

Huishan Fu¹, Liang Zhao², Zhiwei Li³, Yibo Wang², Zhong-Hai Li⁴, Zhouchuan Huang⁵ & Huihong Cheng^{6*}

¹ School of Space and Earth Sciences, Beihang University, Beijing 100191, China

² Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

³ School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

⁴ College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

⁵ School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

⁶ Division III, Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China

* Corresponding author, E-mail: chenghh@nsfc.gov.cn

Geophysics, Space Physics, and Geodesy are a fundamental discipline of the Earth sciences and also an important branch of the natural sciences. Specifically, the geophysics aims to reveal the formation and evolution of the Earth system based on the detection and analyses of the physical fields on the Earth's surface and inside the Earth's interior, and finally provides a scientific basis for the resource exploration, energy utilization, natural disaster monitoring and prevention, and also the environment protection and treatment. The space physics mainly focuses on the terrestrial space environment and solar-system space environment and also the interaction between them, and aims to reveal the formation mechanisms and evolution features of a serious mysterious phenomena such as the solar eruption, solar wind, geomagnetic storm, magnetospheric substorm, and aurora, and finally on the basis of such observations and analyses forecasts the space weather accurately and alleviates the impact of solar eruption on the Earth's environment. The geodesy focuses on a specific reference frame of time and space, precisely measures the shape and gravity field of the Earth and other planets, and thereby establishes a model for them and continuously monitors their temporal evolution, and consequently aims to provide a spatiotemporal reference for human beings during the determination and description of the universe. Historically speaking, the geophysics, space physics, and geodesy have played a pivotal role during the development of human civilization and indisputably they have contributed significantly to the modern society. In general, such a discipline has not only greatly expanded our knowledge about the Earth, planets, solar system, and even the universe, but also has provided a robust scientific basis for boosting the socio-economic development. Targeting these issues and relying on a systematic review and careful investigation of the disciplinary branches, in this paper, we analyze the significant contributions of geophysics, space physics, and geodesy to the human civilization from three different angles and then discuss their responsibilities and commitments in the future development of the human civilization from six different aspects. First of all, we believe that this discipline (including geophysics, space physics, and geodesy) has unveiled the intrinsic structures and laws of the Earth and even the universe, which greatly helps us reshape the knowledge framework of nature, life, and human beings. Then, we are sure that this discipline has sped up the development of the industrial civilization, which greatly supports the industrial revolution, modernization construction, and the economic globalization. Finally, we feel confident that this discipline has provided scientific support and rational guidance for the disaster prevention and mitigation, space exploration, and the expansion of extraterrestrial habitation. In the future, the discipline will keep focusing on the frontier scientific problems, such as the deep-space exploration, deep-earth exploration, deep-sea development, and the Earth system sciences. Accompanied by the technological innovation and driven by information revolution, the discipline will persistently overcome technical challenges and theoretical boundaries. Particularly, in the future, this discipline will strengthen the fundamental research and thereby make essential breakthroughs in the conceptual advance, technological innovation, resource exploration, energy utilization, environment protection, disaster prevention and mitigation, and so on, to address the strategic problems and major concerns of our country. Ultimately, on the basis of the above endeavor, this discipline aims to greatly promote the sustainable development of the modern society and also play a more critical role in advancing the human civilization.

Geophysics, Space Physics, Geodesy, human civilization

doi: [10.1360/CSB-2025-0623](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0623)