

doi: 10.12097/gbc.2023.03.013

陆域大地电磁基础网规划与展望

秦绪文¹, 戴意蕴¹, 张耀阳^{2,3,4*}, 肖都^{2,3,4}, 方慧^{2,3,4}, 裴发根^{2,3,4}, 何大双^{2,3,4}, 冯斌^{2,3,4}
QIN Xuwen¹, DAI Yiyun¹, ZHANG Yaoyang^{2,3,4*}, XIAO Du^{2,3,4}, FANG Hui^{2,3,4}, PEI Fagen^{2,3,4},
HE Dashuang^{2,3,4}, FENG Bin^{2,3,4}

1. 中国地质调查局, 北京 100037;
 2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000;
 3. 国家现代地质勘查技术研究中心, 河北 廊坊 065000;
 4. 自然资源部地球物理电磁法探测技术重点实验室, 河北 廊坊 065000
1. China Geological Survey, Beijing 100037, China;
2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China;
3. National Modern Geological Exploration Technology Research Center, Langfang 065000, Hebei, China;
4. The Electromagnetic Detection Technology Key Laboratory of the Ministry of Natural Resources, Langfang 065000, Hebei, China

摘要: 阵列式大地电磁测深是区域地球物理调查的重点发展方向之一, 对标国外先进水平和国家社会的基础性需求, 中国阵列式大地电磁测深工作程度依然较低, 缺乏整体规划, 开展全国性观测计划亟需提上日程。系统总结了当前区域地球物理学的发展趋势及国内外大地电磁网建设现状, 提出了合作共建陆域多层级大地电磁基础网和大数据中心的顶层设计和规划布局, 并对中国大地电磁基础网未来的重点发展方向进行了展望和思考。相关工作的顺利开展将为中国区域地球物理调查拓展一项新属性参数, 推动构建物性地球、结构地球和地球物理场四维模型, 进而变革区域地球物理研究范式和工作模式, 支撑中国深地探测走向世界前列。

关键词: 区域地球物理; 大地电磁测深; 深地探测; 基础网建设; 观测监测体系; 数据库

中图分类号: P31; P631.3⁺25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)04-0489-14

Qin X W, Dai Y Y, Zhang Y Y, Xiao D, Fang H, Pei F G, He D S, Feng B. Future plan and prospect for national magnetotelluric datum network. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(4): 489–502

Abstract: Array magnetotelluric sounding is one of the most promising techniques in regional geophysical investigation. In consideration of the advantages of foreign developed countries and the basic needs of society, the development of array magnetotelluric sounding in China lacks integral planning and is lagging behind. It is urgent to carry out a magnetotelluric observation plan at the national level. In this paper, we review the current development trend of regional geophysics and the construction status of magnetotelluric network in China and abroad. Furthermore, we put forward the top-level concept and construction plan of the national magnetotelluric datum network and the relevant big data bank, and point out the future development priorities. The implementation of this project will expand a new parameter of regional geophysical survey in our country, and promote constructing the 4D model of physical earth, structural earth and geophysical field, which are of great significance to transform the regional geophysical research paradigm and work mode, and help China's deep earth exploration to move forward all over the world.

收稿日期: 2023-03-07; 修订日期: 2023-04-07

资助项目: 中国地质调查局项目《重点地区区域地球物理调查和成果集成》(编号: DD20242909)、中国地质科学院基本科研业务费项目《天然地震接收函数与大地电磁数据联合反演研究》(编号: AS2022J04)、国家自然科学基金项目《华北中部造山带南段岩石圈上地幔速度间断面结构及性质研究》(批准号: 41904065)

作者简介: 秦绪文(1977-), 男, 博士, 研究员, 从事遥感地质研究和地质调查管理工作。E-mail: qinxuwen@163.com

* 通信作者: 张耀阳(1988-), 男, 博士, 高级工程师, 从事地震学、大地电磁学深地探测及研究工作。E-mail: zyy198888@163.com

Key words: regional geophysics; magnetotelluric sounding; deep exploration; network construction; observation and monitoring system; database

21 世纪,地球科学发展到“地球系统科学”的新阶段,其核心是地球整体性及各圈层相互作用过程和机理研究。围绕固体地球建立地球系统科学体系,必须充分利用地球物理探测技术,通过建立大尺度、多属性的地球物理基础网,获取静态和时变地球物理场信息,构建高精度壳、幔地球物理结构标准模型,进而融合信息科学、模拟预测等先进技术,开展系统化、定量化、多尺度综合研究,实现对地球内部物理属性、动力学过程、深浅耦合关系及各圈层相互作用的全面理解,得到对地球系统从浅表到深部相对全面、完整的认识。

作为区域地球物理调查的一种重要方法,大地电磁测深(Magnetotellurics,简称 MT)以地球自然存在的电磁场为场源,可以进行近地表到地幔转换带尺度的电性结构探测,在基础地质研究、油气田勘探、地热资源调查、金属矿勘查、地震监测、地下水资源勘查等多个领域得到了广泛的应用(金胜等, 2010; He et al., 2015; Liu et al., 2016; 杨文采等, 2020; Jiang et al., 2022a)。近年来,大地电磁测深三维正反演技术的实用化正推动大规模阵列式观测成为新的发展趋势(Siripunvaraporn et al., 2005; Kelbert et al., 2014),已相继在全国各地建立了不同网度的局部测网(魏文博等, 2010; 杨文采等, 2015, 2020)。开展一项全国性计划,统一技术标准,建立覆盖全国的大地电磁测深基础网,进行高精度大地电磁场观测,构建全国高精度壳、幔电性结构模型的时机已经成熟,将为中国的地球物理学基础研究揭开新篇章。

1 区域地球物理调查发展趋势

区域地球物理调查是通过对地球物理场以一定比例尺和精度进行系统性观测、处理和反演来获取地球内部结构的物理模型,包括地震波速度结构模型、电性结构模型、密度结构模型、位场结构模型、地热结构模型等(杨文采等, 2015; 胡祥云等, 2020),结合多学科(地质、矿产、地球物理、地球化学等)综合研究,作出定性、定量的科学论断,进行物性和构造填图,提供深部地球物理异常和其他地下浅部、深部待测目标物的信息。纵观全球区域地球物理调查的发展历程,总体呈现如下趋势。

1.1 区域地球物理调查工作面临转型升级的巨大挑战

地球系统科学是以全球性、统一性的整体观、系统观和多时空尺度,研究地球系统的整体行为,为人类认知地球和绿色可持续发展提供科学支撑(郭正堂等, 2004)。在此背景下,区域地球物理调查的工作方式和内容正在经历深刻变化,区域性、综合性、大尺度的调查成为新的发展趋势,调查参数走向系统化、多元化、实时化,探测深度和研究领域不断拓展,更加突出地球动力学、地球信息科学、地球管理科学及跨学科研究与创新,更加强调提供系统性地质解决方案和应用。

世界各国区域地球物理调查普遍面临转型升级的巨大挑战,纷纷探索发展新路径。探测重点逐步从中浅层走向中深层、超深层和浅部并重,从探测地球结构进入探讨地球深部过程与结构的耦合关系,从一次性探测转向动态观测和实时监测,研究领域由能源、矿产资源转变为兼顾资源与环境保护、灾害的资源与环境并重。同时,地球物理与区域地质、遥感地质、地球化学等的综合调查、协同部署和联合解释成为最显著特征。以美国地质调查局为例,其推动“整合科学”跨越传统科学界限和学科门类,将调查、监测、评估、预测、信息传递等科学调查全过程与内外部不同尺度的数据源整合,持续不断地提供表征地球系统的产品。区域地球物理学调查与综合研究作为其中的重要环节被提升到战略高度,部署了一系列大型的观测计划(郑人瑞等, 2019)。

1.2 深地探测成为各国优先部署的国家战略

地球深部物质运动和能量转换,是支撑地球系统和生命体系之根基,是人类生存发展所需资源之根本,也是重大自然灾害产生之根源。然而,“上天不易,入地更难”,人类对地球深部的了解依然非常肤浅,地球深部已成为地球科学的最后前沿,深地探测已经成为发达国家争先攻占的科技制高点。目前,世界主要发达国家都已经将深部探测工程作为事关国家未来发展的重大科学战略。

美国自 20 世纪 70—80 年代率先开展 COCORP 计划(Oliver, 1978; Oliver et al., 1983),引发了全球深部探测高潮,随后国际上又有国际岩石圈计划(ILP)

(Fuchs, 1990; 董树文等, 2010)、欧洲地球探测计划(EUROPROBE)(Cavazza et al., 2004)、德国大陆反射地震计划(DEKORP)(Group, 1990; Group, 1999)、英国反射地震计划(BIRPS)(Brewer et al., 1983; Klemperer et al., 1991)、俄罗斯深部探测计划(Carbonell et al., 1996; Knapp et al., 1996)、加拿大岩石圈探测计划(LITHOPROBE)(Clowes et al., 1999; Clowes, 2010)等相继开展。2001 年, 美国提出以“地球透镜”计划(EarthScope)为标志的第二轮地球探测计划(Council, 2002; Meltzer, 2003)。澳大利亚自 20 世纪 90 年代起, 先后开展了澳大利亚四维地球动力学计划(AGCRC)(Price et al., 2002)、澳大利亚玻璃地球计划(Glass-Earth)(Henderson et al., 2005; Wu et al., 2015)和澳大利亚地球探测计划(AuScope)(Lovell et al., 2013), 近年又启动了 UNCOVER、AusLAMP(Robertson, 2016; Thiel et al., 2020)等计划。自 20 世纪 80 年代起, 中国陆续参与了“喜马拉雅地质构造与地壳上地幔形成演化”中法合作项目、“青藏高原与喜马拉雅深部剖面探测”(INDEPTH)四国合作计划(Brown et al., 1996; Nelson et al., 1996; Haines et al., 2003)、“全球地学大断面”(GGT)计划(滕吉文, 1994; 吴功建, 1994; 高锐, 1996)等, 但是与国际水准相比存在近 20 年的研究差距。进入 21 世纪后, 中国加大了对深地探测和研究的投入, 主导了“华北克拉通破坏”重大计划(Chen et al., 2008; He et al., 2015)和“深部探测技术与实验专项(SinoProbe)”(魏文博等, 2010; Dong et al., 2013)等, 系统组织开展了以深地震反射、地震测深、天然地震台阵、大地电磁测深等方法为主的深部地球物理探测, 引起了国际关注, 实现了从“跟跑”到“并跑”的跨越。

1.3 观测、监测网络体系建设成为地球物理学发展的重要标志

地球物理是“透视和照明”地球内部的主体手段, 而地球内部时刻发生着物质迁移和能量交换, 是一个动态变化的系统。现有的地球物理调查多以针对静态结构的一次性调查为主, 要实现对地球认知从三维向四维的突破, 亟需将地球物理探测、观测与监测试验、信息科学、模拟预测技术等充分结合, 通过建立覆盖全国的综合性地球物理观测、监测网络体系, 获取静态和时变地球物理场信息, 得到对地球系统从浅表到深部相对全面、完整的认识。

自 20 世纪 60 年代开始, 世界各国对建设地球物理观测网投入不断加大, 这也成为一个国家地球物理学发展的重要标志。国际上最早开始系统性地震监测和测震台网建设的国家是美国和日本, 高密度的全国地震监测站网已经建成, 欧洲部分国家也联合建立了区域性测震站网。近年来流动阵列观测逐渐成为研究地下精细结构的有效手段, 美国的 USArray 地震和 MT 观测计划已进入尾声(李秋生等, 2010; Bedrosian et al., 2014; Yang et al., 2021)。此外, 全球已有 144 个地磁基准站加入了国际地磁台网(INTERMAGNET), 涵盖 56 个国家和地区; 国际大地测量和地球物理联合会(IUGG)组织实施了全球地球动力学计划, 在全球多个国家部署了 42 个超导重力观测站。2005 年以来, 地球观测领域最大和最权威的政府间国际组织——地球观测组织(GEO), 在发展全球综合地球观测系统(GEOSS)、提供广泛与开放的数据共享与获取、启动全球主要监测计划等方面已经取得了相当大的成就。中国地震局在中国观测、监测站网建设中走在前列, 经过 50 余年的积累, 已初步建成了覆盖全国的数字化测震站网(刘瑞丰等, 2008)、重力站网、地磁站网、地壳形变站网和覆盖重要活动构造带的地应力台网, 并部署了中国地震科学台阵探测(ChinArray)(宋丽莉等, 2012; 太龄雪等, 2015; Xiao et al., 2020)、“张衡一号”电磁监测卫星计划(刘大鹏等, 2022)和中国地震科学实验场(吴忠良等, 2021a, 2021b, 2021c; 陈学芬等, 2022)等一系列开创性的观测、研究计划, 使其在监测网络建设、震灾评价、应急救援、地震基础研究等领域取得诸多具有国际影响力的重大成果。

1.4 数据驱动研究范式变革成为新的前沿

当前, 利用数字技术革命重塑地质调查和地学研究已上升至战略发展高度。全球地球物理多要素探测、观测、监测网络体系正在逐步建立, 相应的数据积累呈指数上升, 超级计算机等硬件使得海量复杂数据的分析和挖掘成为可能, 云计算、人工智能等现代信息技术的交叉融合正推动着数字革命的发展进程。以数据驱动地球物理学研究范式变革, 从“大数据”中提取新认识、新模型等, 可以改变以往单纯观测到简单假说的研究模式, 推动深地动力学研究由假说驱动到大数据驱动的转变, 促进深地科学研究成果的革命性进步。

从科学数据“生产者”转向“开发者”是发展的必

经之路,美国、澳大利亚、英国等发达国家已将数字化和智能化地质调查作为未来重要的发展方向,正积极谋划新一轮发展战略。例如,美国“EarthScope”计划正在试图建设“数据到分析”的应用开发,通过资源和数据共享推动知识信息的深度挖掘,探索未来地学研究的新思路 (Council, 2002; Meltzer, 2003)。澳大利亚“GlassEarth”计划开发了以 FracSIS 程序为核心的三维可视化和模拟技术 (Henderson et al., 2005; Wu et al., 2015), “AuScope”计划提出了地学信息化科学环境 (e-GeoScience) (Lovell et al., 2013), 推动远程协同研究与信息深度挖掘。中国科学家近期提出“深时数字地球”国际大科学计划,旨在运用最前沿信息技术,整合地球时空大数据,构建地球科学全领域知识图谱,推动地球科学研究范式变革。

1.5 多渠道开展国际合作的步伐明显加快

近年来,受全球人口爆发式增长、工业化进程加快、资源能源供需失衡、国家安全形势不稳定等因素影响,自然资源领域面临一系列更趋复杂且具有全球影响性的挑战。地球系统科学的全球信息共享、跨国间合作及综合性解决方案对于应对这些挑战至关重要,从根本上推动了欧盟、非洲、东南亚、美洲等地区先后建立起区域性地学合作组织,同时也使得国际岩石圈计划、国际地球科学计划、“化学地球”等国际大科学计划的受关注度和影响力不断提升,多渠道开展国际合作的步伐明显加快。

以美国地质调查局(USGS)为例,其长期在全球布局,在 2021 年承担了 12 项国际地学计划,在国际地学组织有 9 人任职。通过与联合国、世界银行、地球观测组织(GEO)等国际组织合作和参与各种国际科研活动,建立了全球地质、地球物理、矿产资源、地下水、生物资源等网络信息平台 and 数据库。在非洲、亚洲、北美、南极、欧洲等区域,广泛开展了数据网络和地理空间基础设施建设,涉及水、矿产、能源、环境、生态、灾害等众多方面。中国地质调查局先后与六大洲 63 个国家的地质调查机构、科研院校签署了 229 份国际合作谅解备忘录与国际合作项目协议,更多聚焦于能源资源、地质环境、区域地质、海洋地质等领域,建立了联合国教科文组织国际岩溶研究中心、全球尺度地球化学国际研究中心、中国-上海合作组织地学合作研究中心、中国-东盟地学合作中心等合作平台,拓展了中国地质调查国际合

作网络。

综上所述,中国区域地球物理调查正逐步从对地球静态的结构探测向地球内部运动变化动态过程的实时观测和监测方向发展。立足国内,放眼国际,共建、共享多参数观测、监测网络体系,以数据驱动研究范式变革,实现不同时空尺度对地球系统模拟和预测将成为未来地球物理学发展的必然趋势。相比中国已经初具规模的数字化测震站网、重力站网、地磁站网、地壳形变站网、地应力台网等,中国地球物理电磁法观测、监测体系尚未开展顶层设计和部署,筹建全国大地电磁基础网也因此被提上日程。

2 大地电磁观测网建设现状

大地电磁测深经过近 30 年的飞速发展,已成为区域地球物理调查和深地探测的核心手段之一。大地电磁测深方法的优点在于对地球内部的良好导体具有很高的分辨能力,而地球内部的良好导体与深部流体、高导矿物、部分熔融体及力学软弱带等紧密相关 (Jones, 1992; 徐义贤, 1995; Simpson, 2001; Vanyan and Group, 2002), 其得到的电性结构模型能够用于推断地球内部的岩石、矿物组成和地质构造轮廓,还可以间接提供地球内部热结构及流变学强度等的信息,为研究地球内部物质状态、地壳运动过程及其动力学机制等科学问题服务 (魏文博等, 2010; Chave et al., 2012; Liu et al., 2016)。常规对地壳和上地幔大尺度电阻率变化的认识,主要来自于对特定大地构造单元所作的高空间密度 MT 剖面的解释 (Wei et al., 2001; Bai et al., 2010; Zhao et al., 2012)。近些年,先进的宽频带和长周期 MT 系统的推广使用、软硬件技术的进步和方法理论的完善,使得大规模的阵列观测成为可能。国内外多个大型地学研究计划中系统开展了阵列式大地电磁调查,组织部署了较大规模的阵列式大地电磁观测网,提供了成功应用的范例。

2.1 国外建设现状

2.1.1 美国 USArray 大地电磁阵列

2001 年,美国提出以“地球透镜”(EarthScope)计划为标志的第二轮地球探测计划,旨在获得北美大陆岩石圈和下地幔结构的三维图像,提升了人类对北美大陆结构、演化和动力学的理解,使得美国再次站到了全球深部探测的领军地位。“美国阵列”(USArray)是该计划的重要组成部分,它包含 3 种地震观测阵列和大地电磁阵列。其中,大地电磁阵列

由固定台站和移动台站组成。该计划区域性大地电磁观测部署的点距约为 75 km, 总计采集长周期大地电磁测点 1116 个, 覆盖了美国大陆的大部分地区(图 1)。USArray 大地电磁数据是随时间分区域采集的, 包括美国西北地区(2006—2011), 北美中陆大裂谷地区(2011—2013), 北美东部(2014—2017), 以及北部大平原地区(2017—2018)。随着数据采集, 基于不同区域数据的三维电性结构模型也相继被提出(Bedrosian et al., 2014; M. Meqbel et al., 2014; Yang et al., 2015, 2021)。

2.1.2 澳大利亚 AusLAMP 大地电磁阵列

2006 年, 澳大利亚大陆“AuScope”计划旨在建立国家级研究基础框架, 先后启动了“UNCOVER”“AusLAMP”等计划, 其中“AusLAMP”计划以 55 km×55 km 网度的大地电磁观测阵列覆盖整个澳洲大陆(图 2), 深化对澳大利亚大陆结构和演化的认知, 为研究岩石圈结构演化及资源分布提供基础地球物理信息。目前, 基于 2016—2019 年在澳大利亚北部收集的长周期大地电磁数据, 已初步建立了覆盖澳大利亚北领地南部和昆士兰州西北部地区的全新电导率模型, 可用于缩小在勘探不足地区寻找大型矿物系统的范围, 帮助行业和政府填补现有矿产和关键矿藏的知识空白, 为该地区岩石圈结构和矿产潜力提供了新的认识(Robertson et al., 2016; Kirkby et al.,

2020; Robertson et al., 2020; Thiel et al., 2020; Wang et al., 2020; Jiang et al., 2022b; Kay et al., 2022)。

2.2 国内建设现状

2009 年以来, 在财政部、科技部支持下, 国土资源部、教育部、中国科学院、中国地震局和国家自然科学基金委员会, 通过多部委联合, 组织实施了中国历史上在深部探测研究领域规模最大的地学计划——深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe)。SinoProbe 专项部署了全国“两网、两区、四带、多点”深部探测实验(Dong et al., 2013), 其中开展了全国大地电磁标准点 4°×4°观测、青藏高原和华北地区 1°×1°阵列测量, 共计完成了大地电磁测深点近 4000 个, 首次建立了全国大陆地球电磁物性标准网(魏文博等, 2010; 叶高峰等, 2010; 杨文采等, 2011), 使中国跨入深部探测大国行列。在该计划中, 亦布设了大量平均点距约 25 km 的宽频大地电磁测点, 兼顾了浅部信息, 能够对资源能源勘探提供基础电性数据。

中国地质调查局始终处于中国大地电磁研究的第一梯队, 近年来更是通过一系列项目的支撑, 组织开展了大量阵列式大地电磁测深调查, 奠定了该领域的领先地位。2008—2010 年, 在国土资源部行业科研专项支持下, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所(简称: 物化探所)通过大地电磁阵列

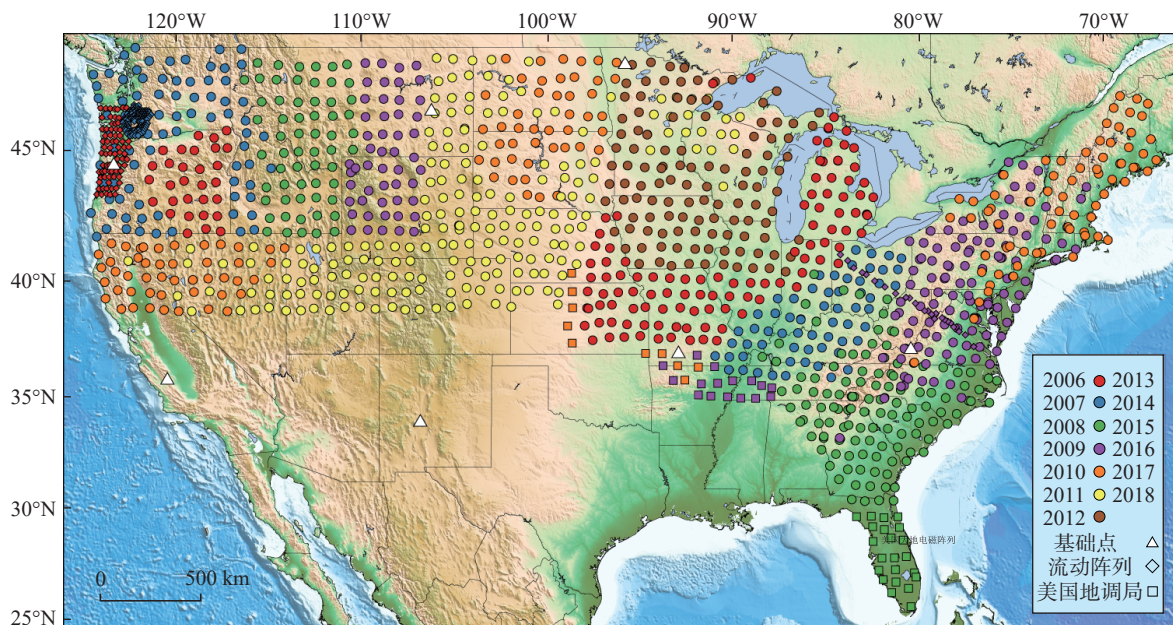


图 1 美国大地电磁阵列测量观测点分布图(修改自 <http://www.usarray.org>)

Fig. 1 Distribution of array MT stations in the United States

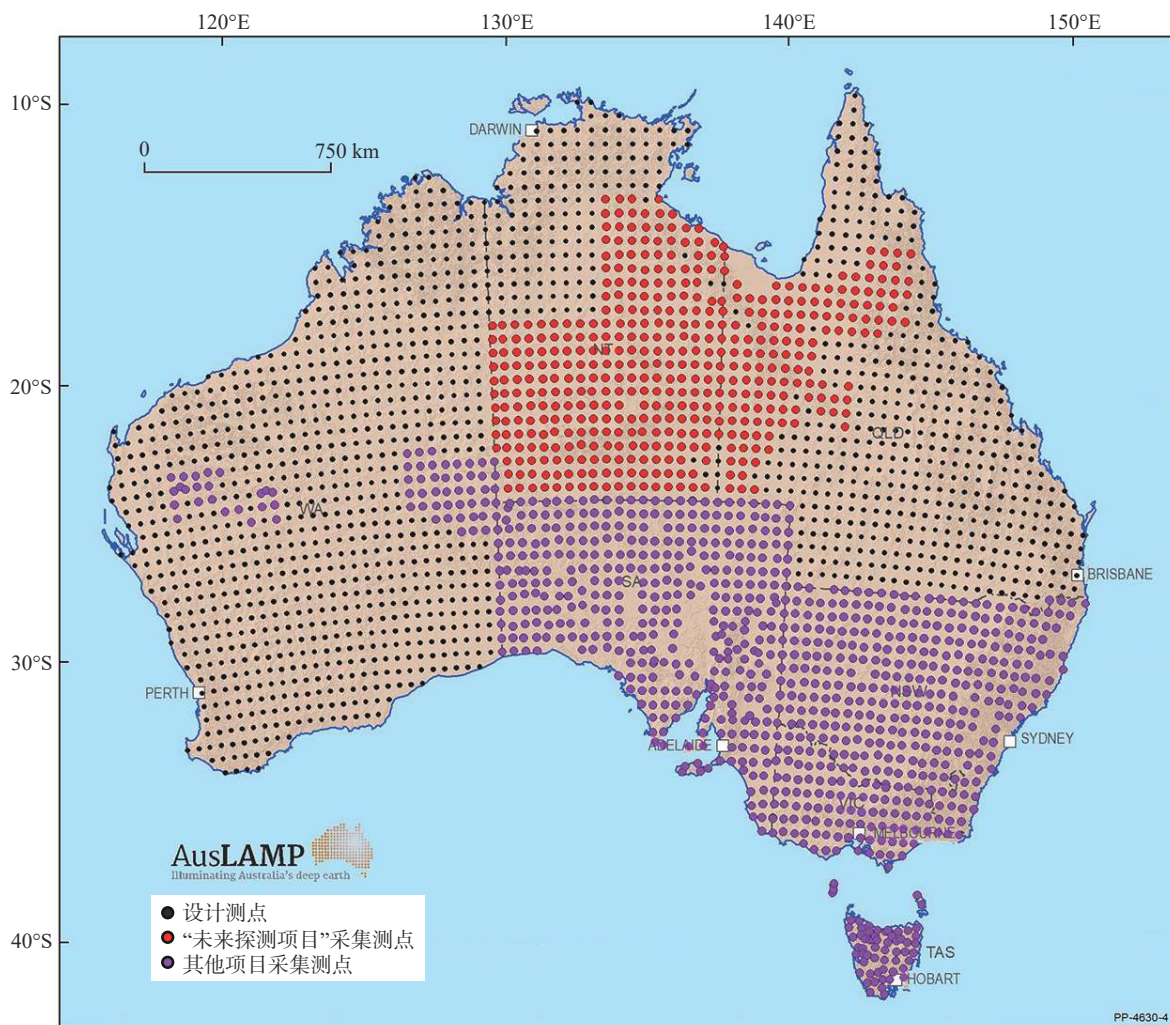


图2 澳大利亚大地电磁阵列观测点分布图(截至2022年9月,修改自 <https://www.ga.gov.au/about/projects/resources/auslamp>)

Fig. 2 Distribution of array MT stations in Australia

观测,首次获得了长江中下游岩石圈三维电性结构模型,编制了1:100万武汉幅综合地质、地球物理系列图件40余幅,预测了深部成矿有利区和找矿远景区。2016—2018中国地质科学院(简称:地科院)在《钦杭结合带及邻区深部地质调查》等地质调查项目的支持下,初步形成了覆盖华南大部 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网度的宽频大地电磁阵列网,为研究区域构格架提供了电性依据。2019年以来,由物化探所组织开展的1:100万大地电磁测深已在华东、松辽盆地、银额盆地、四川盆地南部等地区合计完成约 $100\times 10^4\text{ km}^2$ (图3)。此外,国内高校和科研院所也在塔里木盆地、松辽盆地、青藏高原周缘等重点地区布设了大量大地电磁测点(杨文采等,2015;李世文等,2020),极大地推动了阵列式大地电磁测深工作的发展。

随着全国范围内阵列式大地电磁测深工作程度的不断提高,中国学者已初步建立了松辽盆地(李世文等,2020)、青藏高原(Dong et al., 2020; 杨文采等, 2020)、华北中东部(Dong et al., 2014; Sedikou et al., 2018)、华南成矿带(Xu et al., 2019; 仇根根等, 2019; Yin et al., 2021)等重点区域的深部三维电性结构模型,在有效支撑重点区构造格架研究及资源能源普查等工作的同时,也为未来全国性大地电磁测深观测的布局 and 推进奠定了基础。

2.3 问题与不足

(1)阵列式大地电磁测深工作程度不均衡,缺少统一标准。以电性参数为主的区域地球物理调查工作刚刚起步,相对中国广阔的地域面积而言工作程度较低,有的在空间上布局不均匀,有的沿测线进行,而测线间距过大,不能有效控制全部国土,远不

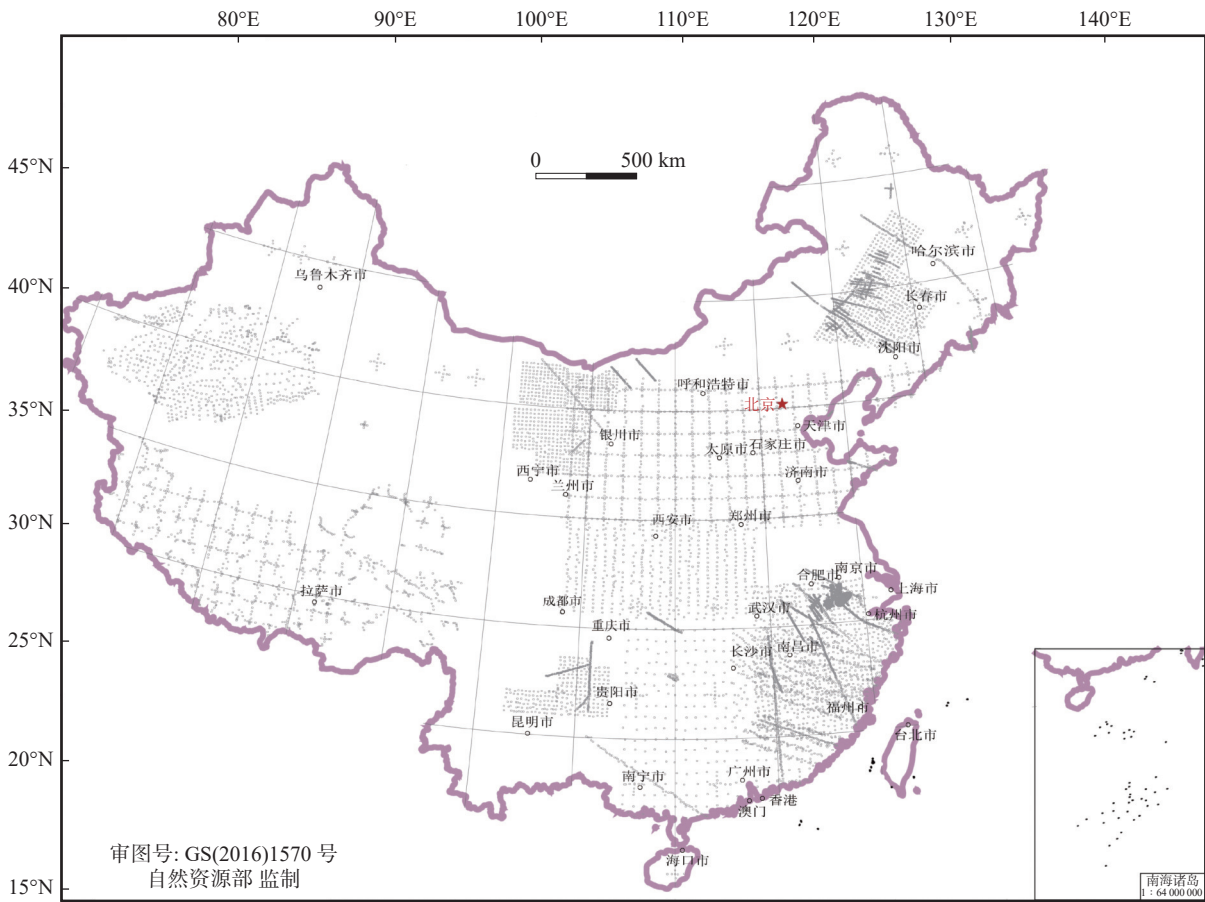


图 3 全国大地电磁测深工作程度图(截至 2022 年 3 月)

Fig. 3 The distribution of MT stations for deep earth exploration in China

足以形成三维数据体;已有数据调查比例尺不一,缺乏统一的规范和技术要求,数据质量参差不齐,缺少顶层设计,标准化地球物理数据采集、集成、处理、分析及应用模式尚未形成。

(2)大地电磁基础数据共享机制不健全、信息挖掘不充分。已有大地电磁数据资源仍分散在全国各个科研单位,“信息孤岛”问题仍较突出,不同机构间资源和硬件难以实现统一调度,共享机制不健全;受限于早期的技术水平和管理体制,数据资源整体的开发利用效率较低,存在一定的局限性,例如早期的反演解译以二维为主,受空间效应的影响多解性和不确定性问题相对突出。随着大地电磁数据处理和解释技术的不断发展,亟需加强对已有数据资源的二次开发和深度挖掘。

(3)大地电磁测深研究“立典性”不足,成果产出模式落后。现阶段中国区域性电性模型层出不穷,但模型间各自为战,尚未形成统一的考核、评价标准,无法横向对比,缺乏有广泛影响力的全国性标准

模型和综合性系列产品;数字化研究范式和在线化工作模式尚未建立,多学科、多方法、多参数综合解译不足,制约了成果形成、转化的时效性和实效性。

(4)大尺度大地电磁数据处理、反演技术亟需创新。迄今为止的多数大地电磁正、反演研究仍基于天然入射场的平面波假设及地球介质的平坦地表假设展开,很大程度上简化了数值计算的复杂性。在进行大尺度大地电磁数据处理和三维反演时,忽略地球曲率影响的传统直角坐标系会带来探测定位和反演解释误差问题,而地形效应引起的电流畸变对于感应电磁法的反演与解释有较大影响,故需攻关带地形的球域大地电磁三维正反演技术。

3 全国陆域大地电磁基础网发展规划

针对现阶段中国阵列式大地电磁测深发展滞后、工作模式无法有效支撑基础地质研究和地球系统科学创新的现状,中国地质调查局于 2022 年启动了全国陆域大地电磁基础网建设。通过中国地质调

查局和国内相关地球物理科研单位的沟通协作,以自建共建共享为基本原则,在“四统一”(统一技术、统一标准、统一组织、统一实施)框架下,加强顶层设计,优化布局、统筹部署,高质量建设陆域大地电磁基础网,提升中国陆域地球物理属性特征的认知水平,实现资源共享。包括以下几项核心任务。

3.1 建设全国陆域大地电磁基础网

3.1.1 数据收集

收集整理已有大地电磁资料,优选大地电磁基础网建网数据。在全国范围内需收集、再处理的数据资料主要包括:Sinoprobe 深地探测专项中全国 $4^{\circ}\times 4^{\circ}$ 和华北地区、青藏高原地区 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 阵列大地电磁数据,共涉及测点 2100 余个;1:100 万大地电磁数据,主要分布在松辽盆地、银额盆地、酒泉-武威地区、长江中下游地区、四川盆地南部及邻区等地区,共涉及测点约 3600 余个;塔里木盆地测点 700 余个,中央造山带测点约 440 余个,以及华南地区测点的 1500 余个(图 3),共累计覆盖中国陆域国土面积超过 $400\times 10^4\text{ km}^2$ 。

3.1.2 分级建网

以需求和目标为导向,综合考虑中国地质调查局下属各单位仪器装备、技术力量和区位优势等因素,拟采用“1+8”工作模式,由物化探所牵头,协同地科院、天津地质调查中心、沈阳地质调查中心、南京地质调查中心、武汉地质调查中心、成都地质调查中心、西安地质调查中心和地球物理调查中心,分层级、分区块、分年度持续推进,建设不同网度的陆域大地电磁基础网。具体参数见表 1。

第一层级为 $50\text{ km}\times 50\text{ km}$ 网度大地电磁基础网(图 4),共包括测点 3427 个,观测频率为 $320\sim$

$1/3000\text{ Hz}$,观测时间仅需不少于 36 h 即可,施工难度相对较小,成本较低,相应的最大探测深度可达 150 km,主要用于查明地壳至岩石圈范围内不同块体的电性变化特征,揭示壳内低阻层的分布规律、缝合带位置,为全面认识中国陆域盆山的地壳整体结构、探查研究电性特征与地热、成矿、成藏、致灾的关系、深化地球动力学与构造演化提供基础依据。该层级大地电磁基础网预计于 2026 年完成,共需优选测点约 1900 个,新建测点 1527 个。其中,物化探所主要负责松辽盆地周缘、鄂尔多斯盆地、青藏高原中南部、云贵高原西部等区域共 430 个测点的野外建设任务及全国数据、成果综合集成,地科院主要负责华南地区的基础网数据优选、补测和综合研究,六大区地调中心分别负责华北(105 个测点)、东北(60 个测点)、华东(68 个测点)、中南(92 个测点)、西南(147 个测点)、西北(280 个测点)区划内的基础网测点野外建设任务及数据、成果集成,地球物理调查中心主要负责新疆地区共 350 个测点的野外建设任务及数据、成果集成,具体安排见图 4。

第二层级为 $100\text{ km}\times 100\text{ km}$ 与 $200\text{ km}\times 100\text{ km}$ 大地电磁基础网(图 5),分别包括测点 725 个和 238 个,通过拓展观测频段,观测频率分别可达 $1/100\sim 1/20000\text{ Hz}$ 和 $1/100\sim 1/50000\text{ Hz}$,相应的观测时长分别不少于 7 d 和 30 d。大地电磁场长期观测对仪器的稳定性及施工标准都要求极高,电极、磁棒等布设和填埋都需要特殊处理,还需要定期巡查,故该层级施工难度远大于 $50\text{ km}\times 50\text{ km}$ 网度基础网,成本较高,但最大探测深度分别可达约 300 km 和 500 km,主要用于查明岩石圈-上地幔上部范围内的电性变化特征,揭示板块、大的块体的接触关系,为研究

表 1 基础网总体构想及参数

Table 1 Planning and parameters of the MT datum network

序号	网度/km	测点数	观测频率/Hz	最大探测深度/km	常规观测时长	施工难度	目标
第一层级	50×50	3927	320~1/3000	150	>36 h	易	查明地壳-岩石圈顶部空间尺度的电性变化特征,为揭示重要地质单元接触关系、壳内低阻层的分布规律、大缝合带位置及成藏、成矿、致灾背景研究等提供基础依据
	100×100	725	1/100~1/20000	300	>7 d	中等	查明岩石圈-上地幔空间尺度内地球深部电性变化特征,揭示块体接触关系、深部流变性、热状态等特征,为研究地球深浅交互作用、圈层耦合关系、深部动力学、地球演化等提供科学证据
第二层级	200×200	328	1/100~1/50000	500	>30 d	难	

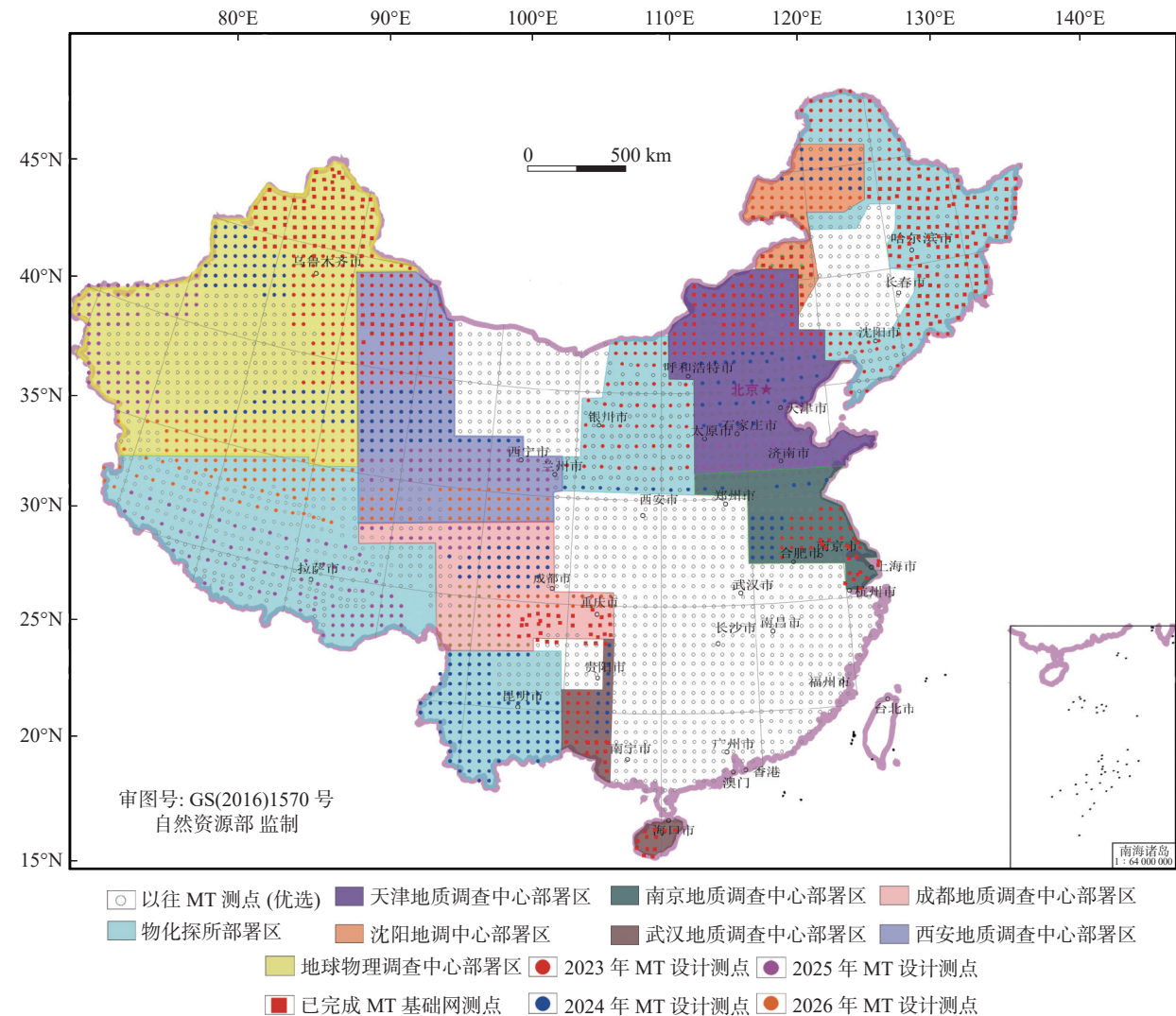


图 4 全国陆域 50 km×50 km 网度宽频大地电磁基础网部署图
Fig. 4 The deployment map of the 50 km×50 km MT datum network

深部热状态、深浅交互作用、圈层耦合关系、深部动力学、流变学、地球演化等提供科学证据。

3.1.3 电性建模

依托多层次大地电磁基础网数据,通过大地电磁三维反演技术和可视化仿真建模技术等,分区域构建全国地壳-岩石圈-上地幔多尺度三维电性结构模型。在此基础上,融合区域重、磁、电、震、地应力、钻孔、物性等数据资料,开展多属性、强约束综合地球物理建模,在地球系统科学理论指导下对电性模型持续优化,构建深部尽可能接近真实的三维电性-地质结构模型。揭示中国大陆深部物性基本特征和变化规律,提升对地球圈层结构、物质组成和交互作用的认知水平,为透视地球、开展全球地质对比、创新地球系统科学理论提供科学依据和基础数据。

3.1.4 野外建站

依托大陆科学钻探深孔地壳活动野外科学观测研究站,在江苏东海、四川汶川建设 2 个综合地球物理野外科学观测研究示范基地。拓展已有温度、形变、压力和地震波场等观测参数,开展井中和地面大地电磁场联合观测,打造形成电磁、绝对重力、地应力、地磁、地震、地温等综合地球物理观测监测站,获取高精度、高分辨率、稳定可靠的时变综合地球场观测数据。通过持续完善观测参数和标准,支撑大陆科钻深孔地壳活动野外科学观测研究站建设,亦将长期观测站作为选址,用于对数据采集设备进行统一检测,保证仪器可靠,作为远参考站辅助改善邻区测点质量,形成开放共享、合作交流、研发应用为一体的综合地球物理野外科学观测研究示范基地。

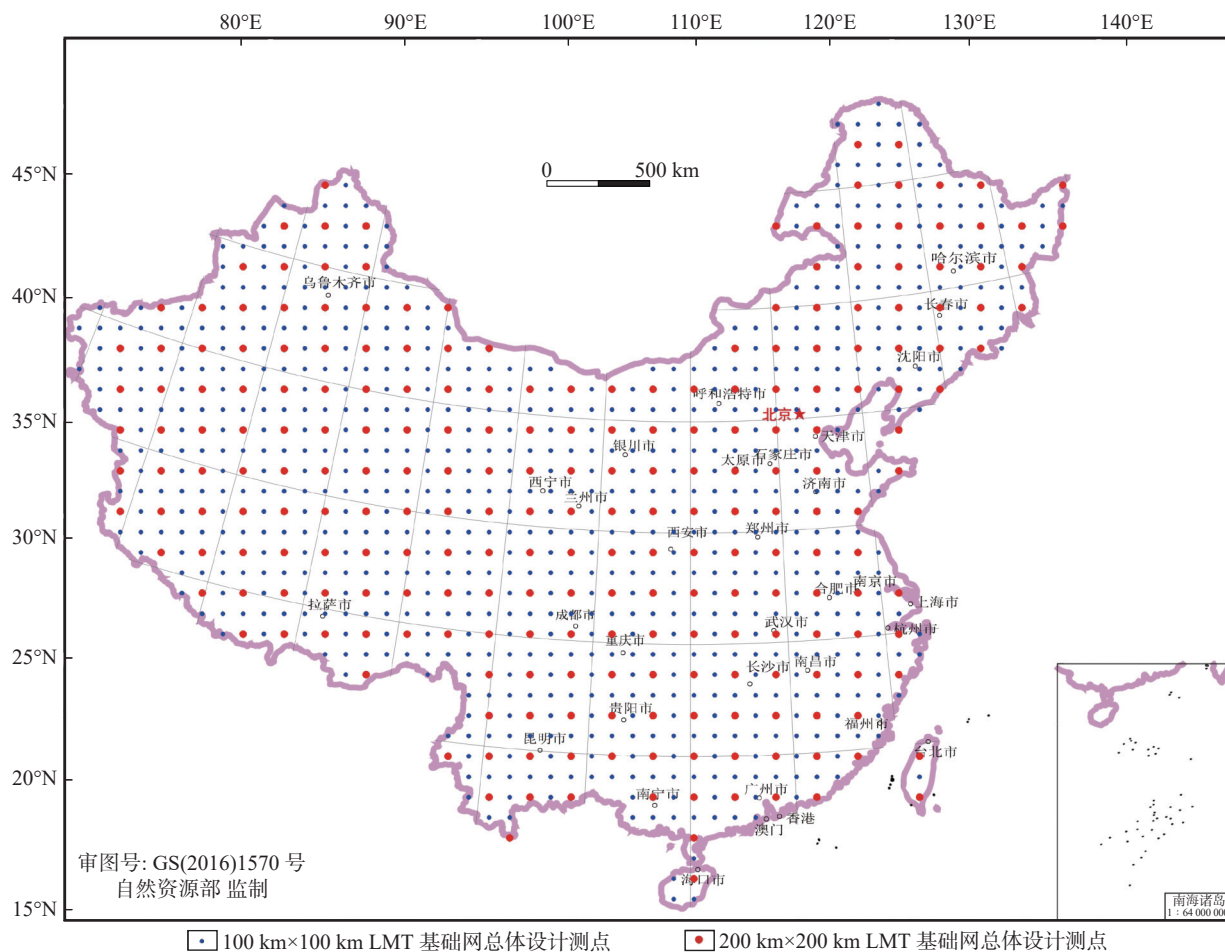


图5 全国陆域不同层级宽频大地电磁基础网部署图

Fig. 5 The deployment map of the high level MT datum network

3.2 搭建数据库体系和“云”服务平台

融合大数据、云计算、人工智能等先进技术,重点构建“1+6”陆域大地电磁数据库体系,建设大数据中心基础设施环境,整合硬件资源,根据统一的标准规范体系对平台服务、运维及业务接入进行规范化管理,汇聚、整理大地电磁测深数据(图6)。构建计算资源池、存储资源池和网络资源池,打造数据枢纽,多渠道汇聚大地电磁测深数据,建立大地电磁数据数据更新机制和交换、共享机制,推进数据库不断增储扩容,确保数据的现势性。进而,集成整合多级多源异构地球物理数据汇聚系统,形成物性、重力、磁力、电磁和地震等可动态扩展的陆域综合地球物理数据库,支撑中国地质调查局陆域地球物理研究中心建设。

研发大地电磁反演建模及专题化产品开发“云”服务平台,提供可靠、实时、高效的大地电磁测深数据挖掘、反演计算、模拟分析、智能检索和可视化展

示等功能。建成公益性地球物理调查工作的数据资源池、技术孵化器和专题化产品工厂,以数据驱动发现、提取和挖掘隐藏在地球物理数据背后的规律和知识,构建地球物理领域的知识图谱,形成知识数据库,建立地球物理专业数据资源与知识信息“一站式”应用服务平台。提升在线化服务水平,支撑“地质云”平台建设,分层次、分阶段向社会开放共享数据资源与知识成果,满足政府部门科学决策和社会公众对地球物理数据的需要。

3.3 创新技术方法与标准体系

充分发挥科技创新的引擎作用,攻关大地电磁测深关键核心技术:一是攻克中低频段低信噪比的磁响应关键技术,研发宽频带感应式磁传感器,打破国外同类型磁传感器的长期垄断;二是研发高稳定性电极和远程遥测数据采集技术,支持国产化仪器应用及推广,逐步提升国产化仪器的市场占有率;三是攻关带地形、球坐标系的三维大地电磁测深反演

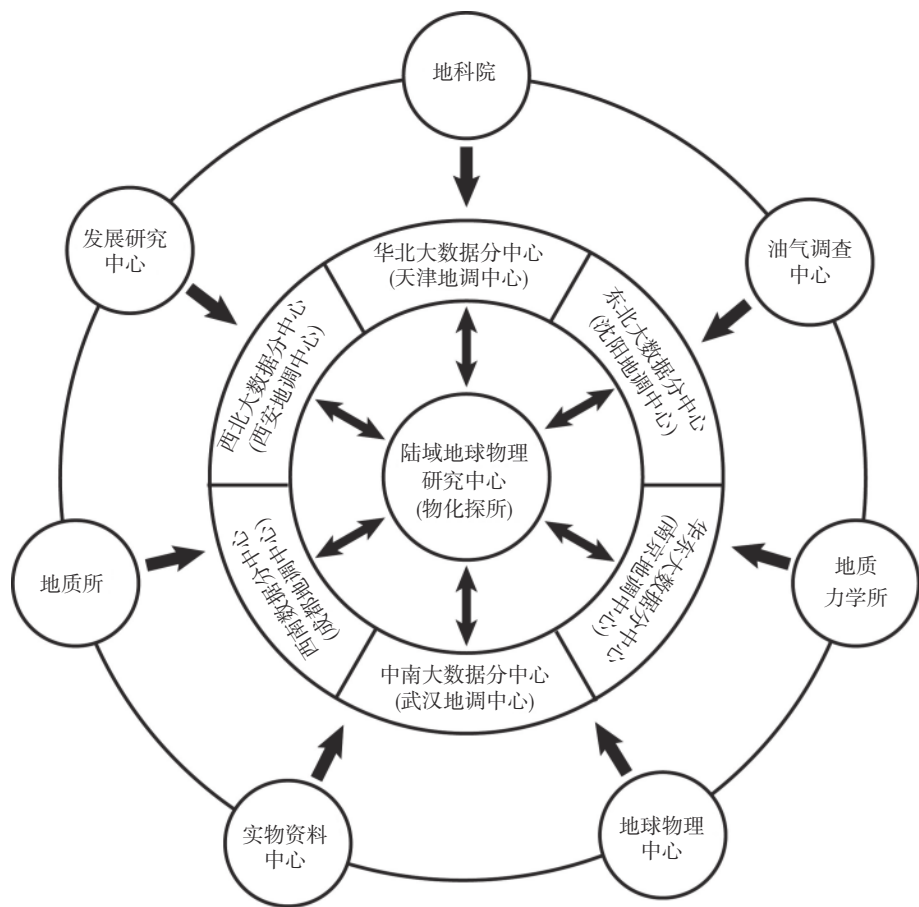


图 6 数据汇聚框架图

Fig. 6 Framework diagram for data aggregation

技术,研发地球物理多参数联合反演新方法,提升反演精度和地质建模水平;四是研究地球物理大数据信息挖掘新技术,形成一套地球物理领域知识图谱的自动化构建方法及系统与流程。在此基础上,进一步推动地球物理标准化研究,制定陆域大地电磁基础网和大地电磁数据库建设标准和技术要求,建立一套涵盖“数据采集-数据处理-数据反演-解释-成果表达”全流程的技术标准体系,推进区域地球物理调查技术发展。

4 展 望

4.1 共建综合地球物理观测、监测网络体系是大势所趋

以中国地质调查局为主体的陆域大地电磁基础网建设正在步入正轨,但其地球物理专业技术人员不足、观测监测站网建设能力落后的现状短期内依然无法改善。现有地震局地球物理观测、监测站网主要应用于防震减灾领域,难以支撑地球系统科学的

认知和资源能源、生态环境、地震灾害等多元化社会发展需求。未来亟需统筹联合中科院、地震局、测绘系统及高校等多方力量,整合已有电磁、重力、地磁、地震、地应力、GNSS 等观测台站和数据资源,构建物性参数更加齐全、空间布局更加合理、组织体系更加完善的综合地球物理观测、监测体系。

4.2 开展多方法联合反演是解决多解性问题的关键

随着区域地球物理工作的大规模开展,单一方法的局限性和地球物理反演的多解性愈发突出。而联合反演可以应用多种地球物理观测数据,通过地质体的某种先验岩石物性关系或结构性的耦合关系求得统一的地球物理模型,逼近对地质体的完整认识。开展综合研究是当今国内外地球物理学发展的必然趋势,而联合反演则是综合研究的定量解释工具。未来需要融合多元地球物理数据,开展多属性、强约束综合地球物理联合反演与建模,在地球系统科学理论指导下,构建更为可靠的地质-地球物理三维结构模型。

4.3 坚持海陆统筹是落实海洋强国战略的重要举措

海洋是人类的未来,国际上海洋强国纷纷加强海洋观测网络建设,以确保在新一轮海洋竞争中占据先机,例如美国海洋观测网(OOI)、日本海底观测密集网络(DONET)、欧洲海洋观测网(ESONET)、澳大利亚国际观测网络(IMOS)等。相比陆域,中国海域的区域地球物理工作严重滞后,海陆统筹是事关中国海洋发展战略的关键所在。未来需要将中国大地电磁基础网和天然地震观测网等向海域延伸,共建海陆一体化多属性、智能化综合地球物理观测站网,进而建成陆海地球物理大数据中心,助力海洋强国目标的实现。

4.4 国际合作是实现科技创新的有效途径

国际合作、资源共享、全球联动是大势所趋,中国的区域地球物理学发展无法独善其身。未来需要加强与其他国家和国际组织的合作,共建覆盖全球的综合地球物理观测、监测体系和全球地球物理大数据中心,通过实施“物理地球”等国际大科学计划,打造地球物理协同研究中心和创新高地,产出一批原始创新和具有国际影响力的重大成果,为全球提供地球物理知识服务产品。

5 结 论

(1)阵列式大地电磁测深是地球物理学的重点发展方向之一。对标国外先进水平和国家社会的基础性需求,中国阵列式区域大地电磁测深工作程度依然很低,已有数据挖掘程度不充分、共享机制不健全、成果应用不显著,难以支撑解决资源环境问题和地球系统科学创新需求,亟需开展区域大地电磁基础网建设。

(2)开展顶层设计,统筹规划布局,加强多方合作,建立覆盖中国大陆域的阵列式大地电磁测深基础网,推进陆域大地电磁测深大数据中心建设,可以为中国区域地球物理调查拓展一项新的属性参数,推动构建物性地球、结构地球和地球物理场四维模型,为揭示中国大地构造特点和壳、幔精细结构提供重要依据,为中国地球科学的进步和社会可持续发展作出重要贡献。

(3)陆域大地电磁基础网的启动仅仅是一个开端,要想立足深地探测世界前沿,综合地球物理观测、监测网络体系建设任重道远。未来还需持续

以科技创新和信息技术为引擎,加强地球物理多参数联合反演和综合解释,不断探索建立多方协同、全球合作的联动机制,实现综合地球物理观测、监测从国内向全球发展,从陆域向海域跨越。

致谢:“陆域大地电磁基础调查工程”项目组成员提供了测点坐标信息,并给予了大力支持,审稿专家对文章提出了宝贵的意见和建议,在此一并表示感谢。

参考文献

- Bai D H, Unsworth M J, Meju M A, et al. 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging[J]. *Nature Geoscience*, 3(5): 358–362.
- Bedrosian P A, Feucht D W. 2014. Structure and tectonics of the northwestern United States from EarthScope USArray magnetotelluric data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 402: 275–289.
- Brewer J A, Matthews D H, Warner M R, et al. 1996. BIRPS deep seismic reflection studies of the British Caledonides[J]. *Nature*, 1983,305(5931): 206–210.
- Brown L D, Zhao W J, Nelson K D, et al. 1996. Bright spots, structure, and magmatism in southern Tibet from INDEPTH seismic reflection profiling[J]. *Science*, 274(5293): 1688–1690.
- Carbonell R, Pérez-Estaún A, Gallart J, et al. 1996. Crustal root beneath the Urals: Wide-angle seismic evidence[J]. *Science*, 274(5285): 222–224.
- Cavazza W, Roure F, Spakman W, et al. 2004. The TRANSMED Atlas—The Mediterranean region from crust to mantle[M]. Springer Berlin Heidelberg.
- Chave A D, Jones A G. 2012. The Magnetotelluric Method – Theory and Practice[M]. London: Cambridge University Press.
- Chen L, Wang T, Zhao L, et al. 2008. Distinct lateral variation of lithospheric thickness in the Northeastern North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 267(1/2): 56–68.
- Clowes R, Cook F, Hajnal Z, et al. 1999. Canada's LITHOPROBE Project (Collaborative, multidisciplinary geoscience research leads to new understanding of continental evolution)[J]. *Episodes Journal of International Geoscience*, 22(1): 3–20.
- Clowes R M. 2010. Initiation, development, and benefits of Lithoprobe—shaping the direction of Earth science research in Canada and beyond[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 47(4): 291–314.
- Council N R. 2002. Review of earthscope integrated science[M]. National Academies Press.
- DEKORP-BASIN Research Group. 1999. Deep crustal structure of the Northeast German basin: New DEKORP-BASIN'96 deep-profiling results[J]. *Geology*, 27(1): 55–58.
- DEKORP Research Group. 1990. Results of deep-seismic reflection investigations in the Rhenish Massif[J]. *Tectonophysics*, 173(1/4): 507–515.
- Dong H, Wei W, Ye G, et al. 2014. Three-dimensional electrical

- structure of the crust and upper mantle in Ordos Block and adjacent area: Evidence of regional lithospheric modification[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 15(6): 2414–2425.
- Dong H, Wei W B, Jin S, et al. 2020. Shaping the Surface Deformation of Central and South Tibetan Plateau: Insights From Magnetotelluric Array Data[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 125(9): e2019JB019206.
- Dong S W, Li T D, Lv Q T, et al. 2013. Progress in deep lithospheric exploration of the continental China: A review of the SinoProbe[J]. *Tectonophysics*, 606: 1–13.
- Fuchs K. 1990. The international lithosphere program[J]. *Episodes Journal of International Geoscience*, 13(4): 239–246.
- Haines S S, Klemperer S L, Brown L, et al. 2003. INDEPTH III seismic data: From surface observations to deep crustal processes in Tibet[J]. *Tectonics*, 22(1).
- He Z X, Hu Z Z, Gao Y, et al. 2015. Field test of monitoring gas reservoir development using time-lapse continuous electromagnetic profile method[J]. *Geophysics*, 80(2): 127–134.
- Henderson S, Cryan G, Cahill J, et al. 2005. Glass Earth gold exploration: combining geoinformatics data intervention processes with ultra-detailed geophysical prospecting[C]//Proceedings of the 37th Annual Conference: 134–141.
- Jiang F, Chen X B, Unsworth M J, et al. 2022a. Mechanism for the uplift of Gongga Shan in the Southeastern Tibetan Plateau constrained by 3D magnetotelluric data[J]. *Geophysical Research Letters*, 49(9): e2021GL097394.
- Jiang W, Duan J, Doublier M, et al. 2022b. Application of multiscale magnetotelluric data to mineral exploration: an example from the east Tennant region, Northern Australia[J]. *Geophys. J. Int.*, 229(3): 1628–1645.
- Jones A G. 1992. Electrical conductivity of the continental lower crust[C]//Continental Lower Crust, Amsterdam, Elsevier: 81–143.
- Kay B, Heinson G, Brand K. 2022. Crustal magnetotelluric imaging of a Paleoproterozoic graphitic suture zone, Curnamona Province, Australia[J]. *Gondwana Research*, 106: 1–14.
- Kelbert A, Meqbel N, Egbert G D, et al. 2014. ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data[J]. *Computers & Geosciences*, 66: 40–53.
- Kirkby A L, Musgrave R J, Czarnota K, et al. 2020. Lithospheric architecture of a Phanerozoic orogen from magnetotellurics: AusLAMP in the Tasmanides, southeast Australia[J]. *Tectonophysics*, 793:228560.
- Klemperer S L, Hobbs R, Hobbs R W, 1991. The BIRPS Atlas: Deep seismic reflections profiles around the British Isles[M]. Cambridge University Press.
- Knapp J H, Steer D N, Brown L D, et al. 1996. Lithosphere-scale seismic image of the southern Urals from explosion-source reflection profiling[J]. *Science*, 274(5285): 226–228.
- Liu L J, Hasterok D. 2016. High-resolution lithosphere viscosity and dynamics revealed by magnetotelluric imaging[J]. *Science*, 353(6307): 1515–1519.
- Lovell J E J, McCallum J N, Reid P B, et al. 2013. The AuScope geodetic VLBI array[J]. *Journal of Geodesy*, 87: 527–538.
- Meqbel N M, Egbert G D, Wannamaker P E, et al. 2014. Deep electrical resistivity structure of the northwestern U. S. derived from 3-D inversion of USArray magnetotelluric data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 402: 290–304.
- Meltzer A. 2003. EarthScope: Opportunities and challenges for earth-science research and education[J]. *The Leading Edge*, 22(3): 268–271.
- Nelson K D, Zhao W J, Brown L D, et al. 1996. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of project INDEPTH results[J]. *Science*, 274(5293): 1684–1688.
- Oliver J. 1978. Exploration of the continental basement by seismic reflection profiling[J]. *Nature*, 275(5680): 485–488.
- Oliver J, Cook F, Brown L. 1983. COCORP and the continental crust[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 88(B4): 3329–3347.
- Price G P, Stoker P. 2002. Australian Geodynamics Cooperative Research Centre's integrated research program delivers a new minerals exploration strategy for industry[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 49(4): 595–600.
- Robertson K, Heinson G, Thiel S. 2016. Lithospheric reworking at the Proterozoic–Phanerozoic transition of Australia imaged using AusLAMP Magnetotelluric data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 452: 27–35.
- Robertson K, Thiel S, Meqbel N. 2020. Quality over quantity: on workflow and model space exploration of 3D inversion of MT data[J]. *Earth, Planets and Space*, 72(1): 2.
- Simpson F. 2001. Fluid trapping at the brittle–ductile transition re-examined[J]. *Geofluids*, 1(2): 123–136.
- Siripunvaraporn W, Egbert G, Lenbury Y, et al. 2005. Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 150(1/3): 3–14.
- Thiel S, Goleby B R, Pawley M J, et al. 2020. AusLAMP 3D MT imaging of an intracontinental deformation zone, Musgrave Province, Central Australia[J]. *Earth, Planets and Space*, 72(1): 1–21.
- Vanyan L L, Kuznetsov V A, Lyubetskaya T V, et al. 2002. Electrical Conductivity of the Crust beneath Central Lapland[J]. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 38(10): 798–815.
- Wang L J, Duan J M, Hitchman A P, et al. 2020. Modeling Geoelectric Fields Induced by Geomagnetic Disturbances in 3D Subsurface Geology, an Example From Southeastern Australia[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(9): e2020JB019843.
- Wei W B, Unsworth M, Jones A, et al. 2001. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies[J]. *Science*, 292(5517): 716–719.
- Wu C L, Liu G. 2015. Current situation, existent problems, trend and strategy of the construction of “Glass Earth”[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(7): 1280–1287.
- Xiao Z, Fuji N, Iidaka T, et al. 2020. Seismic structure beneath the Tibetan plateau from iterative finite-frequency tomography based on ChinArray: New insights into the Indo–Asian collision[J]. *Journal of*

- Geophysical Research:Solid Earth, 125(2): e2019JB018344.
- Xu S, Unsworth M J, Hu X Y, et al. 2019. Magnetotelluric Evidence for Asymmetric Simple Shear Extension and Lithospheric Thinning in South China[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 124(1): 104–124.
- Yang B, Egbert G D, Kelbert A, et al. 2015. Three-dimensional electrical resistivity of the north-central USA from EarthScope long period magnetotelluric data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 422: 87–93.
- Yang B, Egbert G D, Zhang H Q, et al. 2021. Electrical resistivity imaging of continental United States from three-dimensional inversion of EarthScope USArray magnetotelluric data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 576: 117244.
- Yin Y T, Jin S, Wei W B, et al. 2021. Lithosphere structure and its implications for the metallogenesis of the Nanling Range, South China: Constraints from 3-D magnetotelluric imaging[J]. *Ore Geology Reviews*, 131: 104064.
- Zhao G Z, Unsworth M J, Zhan Y, et al. 2012. Crustal structure and rheology of the Longmenshan and Wenchuan Mw 7.9 earthquake epicentral area from magnetotelluric data[J]. *Geology*, 40(12): 1139–1142.
- 陈学芬, 胡德军, 赵晶, 等. 2022. 中国地震科学实验场四川区野外实验观测现状及进展[J]. *大地测量与地球动力学*, 42(2): 193–198.
- 仇根根, 方慧, 吕琴音, 等. 2019. 武夷山北段及相邻区深部电性构造与成矿分析: 基于三维大地电磁探测结果[J]. *中国地质*, 46(4): 775–785.
- 董树文, 李廷栋, 高锐, 等. 2010. 地球深部探测国际发展与我国现状综述[J]. *地球学报*, 84(6): 743–770.
- 高锐. 1996. 中国大陆岩石圈演化研究建议——来自全球地学断面(GGT)的启示[J]. *中国地质*, (11): 23–25.
- 郭正堂, 吴海斌. 2004. 浅谈固体地球科学与地球系统科学[J]. *地球科学进展*, 19(5): 699–705.
- 胡祥云, 林武乐, 杨文采, 等. 2020. 克拉通岩石圈电性结构研究进展[J]. *中国科学:地球科学*, 50(11): 1533–1552.
- 金胜, 张乐天, 魏文博, 等. 2010. 中国大陆深探测的大地电磁测深研究[J]. *地质学报*, 84(6): 808–817.
- 李秋生, 陈凌, 王良书, 等. 2010. USArray 及其近期科学发现[J]. *地质学报*, 84(6): 847–853.
- 李世文, 翁爱华, 李建平, 等. 2020. 三维电性结构揭示的中国东北地区新生代火山深部起源[J]. *地球物理学报*, 50(4): 538–552.
- 刘大鹏, 孙晓英, 杨艳艳, 等. 2022. 张衡一号电磁卫星在轨情况及主要的科学成果[J]. *地球与行星物理评论*, 54(4): 455–465.
- 刘瑞丰, 高景春, 陈运泰, 等. 2008. 中国数字地震台网的建设与发展[J]. *地震学报*, 30(5): 533–539.
- 宋丽莉, 杨微, 葛洪魁, 等. 2012. 中国地震科学台阵流动观测现状及进展[J]. *国际地震动态*, (3): 533–539.
- Sedikou B O D, 谢成良, 魏文博, 等. 2018. 华北大地电磁测深阵列观测实验与岩石圈导电性快速成像模型[J]. *地球物理学报*, 61(6): 2508–2524.
- 太龄雪, 高原, 刘庚, 等. 2015. 利用中国地震科学台阵研究青藏高原东南缘地壳各向异性: 第一期观测资料的剪切波分裂特征[J]. *地球物理学报*, 58(11): 4079–4091.
- 滕吉文. 1994. 全球地球科学大断面与地球动力学 (I)[J]. *地球物理学进展*, 9(1): 40–58.
- 魏文博, 谢成良, 金胜, 等. 2010. 中国大陆岩石圈导电性结构研究--大陆电磁参数"标准网"实验 (SinoProbe-01)[J]. *地质学报*, 84(6): 788–800.
- 吴功建. 1994. 全球地学断面 (GGT)——以亚东-格尔木地学断面为例[J]. *地球物理学进展*, 9(4): 1–3.
- 吴忠良, 丁志峰, 张晓东, 等. 2021a. 中国地震科学实验场: 历史与未来[J]. *地球与行星物理评论*, 52(2): 234–238.
- 吴忠良, 李茜, 张晓东, 等. 2021b. 中国地震科学实验场: 起步与尝试[J]. *地球与行星物理评论*, 52(6): 675–678.
- 吴忠良, 王龙, 车时, 等. 2021c. 中国地震科学实验场: 认识与实践[J]. *地球与行星物理评论*, 52(3): 348–352.
- 徐义贤. 1995. 中下地壳高导层成因研究综述[J]. *地质科技情报*, 14(3): 15–22.
- 杨文采, 魏文博, 金胜, 等. 2011. 大陆电磁参数标准网实验研究——SinoProbe-01 项目介绍[J]. *地球学报*, 32(suppl): 24–33.
- 杨文采, 徐义贤, 张罗磊, 等. 2015. 塔里木地体大地电磁调查和岩石圈三维结构[J]. *地质学报*, 89(7): 1151–1161.
- 杨文采, 金胜, 张罗磊, 等. 2020. 青藏高原岩石圈三维电性结构[J]. *地球物理学报*, 63(3): 817–827.
- 叶高峰, 魏文博, 邓明, 等. 2010. 青藏及华北阵列式区域大地电磁场标准观测网建设方法与实验[J]. *地质学报*, 84(6): 801–807.
- 郑人瑞, 吴登定, 杨宗喜, 等. 2019. 全球地质调查发展新动向与新趋势——国外主要国家地质调查机构新一轮发展战略综述[J]. *地质通报*, 38(11): 1769–1776.