

文章编号: 1001-1749(2022)06-0698-10

“十一五”以来勘查地球物理发展回顾与展望

肖 都, 张 强, 杜炳锐, 袁桂琴, 刘建勋, 裴发根, 李建华,
贲 放, 欧 洋, 王 刚, 冯 斌, 朱 威, 孙 跃

(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所 国家现代地质勘查工程技术研究中心, 廊坊 065000)

摘 要: 随着现代先进的计算机技术、传感技术以及新材料、新工艺等科学技术的进步, 我国勘查地球物理工作得到了快速发展。近 15 年来, 物化探所在地球物理仪器装备研发、方法技术创新, 服务国家需求等方面取得了显著成果; 构建了“航空—地面—地下”地球物理立体勘查方法技术体系, 自主研发了固定翼时间域航空电磁测量系统、无人机航磁测量系统, 大功率多功能三维电磁测量系统、高精度磁传感器和高温超导磁强计, 创新了全区多源电磁测量方法。同时, 在固体矿产和油气资源勘查, 页岩气、陆域天然气水合物、干热岩及地热等清洁能源调查, 基础地质调查、工程环境调查监测等方面取得了一系列新进展, 建立了地球物理勘查技术标准体系和信息化平台。

关键词: 地球物理勘查技术; 自主研发; 现状; 展望

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2022.06.02

0 引言

中国的地球物理勘查工作, 包括新中国成立前后时期, 已有 80 多年发展史。期间, 世界各国地球物理发展呈现多种模式, 而我国走的是一条有中国特色的地球物理发展道路。其技术进步与发展历程大致分为 20 世纪 60 年代—70 年代的发展阶段、20 世纪 80 年代—90 年代的提高阶段和 21 世纪的创新阶段。在创新阶段, 地球物理仪器设备以自主创新、研发和优选引进并存, 仪器设备水平呈现数字化、智能化、多功能、多参数、人机可视化等特点, 通过引进消化吸收再创新, 我国地球物理仪器设备水平有了很大提高。随着国家科技投入力度加大, 地

质大调查深入开展, 地球物理勘查方法技术呈现全新面貌, 高精度、高分辨率采集系统不断成熟, 信息化、数字化水平大幅提升, 自动化、智能化发展迅速, 总体上地球物理勘查技术已接近或达到国际先进水平。

物化探所自 1957 年建所以来, 坚持以地球物理勘查方法技术研究、示范、应用和推广为立所之根本, 取得了以斜磁化理论及应用研究、激发极化法应用研究等为代表的一系列成果, 带动了全国地球物理勘查工作的发展。“十一五”至今, 物化探所在航空电磁法、地面电磁法、地震技术、地下物探等方面的研究成果呈现出勃勃生机, 航空—地面—地下立体勘查技术体系进一步完善, 应用领域进一步扩大, 在油气与矿产资源、水文地质与工程地质、环境地质

收稿日期: 2022-11-01

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(AS2020P01, AS2022P02)

第一作者: 肖都(1976—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事电磁法等地球物理方法与发展战略研究, E-mail: xdu@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 张强(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电磁勘探方法及地球物理综合应用研究, E-mail: zhangqiang@mail.cgs.gov.cn。

与灾害地质查、清洁能源等领域都取得了系列创新成果。笔者简要介绍了近 15 年来,物化探所在勘查地球物理核心技术与装备、方法技术体系创新应用、标准体系建设与信息化等方面取得的进展,展望了下一步发展趋势。

1 自主研发一批物探核心装备与技术

物化探所长期致力于研发物探关键装备和核心技术,打破西方国家的技术封锁,通过掌握“航空—地面—井中”自主核心技术来推动工作能力和水平的提升,更好地服务地质调查事业高质量发展。

1.1 固定翼时间域航空电磁测量系统

为满足国家在自然资源、生态环境地质调查等领域对快速、大深度、高分辨航空电磁勘查技术装备的需求,物化探所依托国家“863”计划项目,国家重点研发计划项目和地质调查项目,历时 15 年,研发了我国首套大深度实用化固定翼时间域航空电磁测量系统^[1]。实现了 $1.2 \times 10^6 \text{ Am}^2$ 峰值磁矩发射,为国外同类型 GEOTEM 系统的 1.7 倍,探测深度达到 650 m,噪声水平(由十二五期间 50 nT/s 改善至 2 nT/s)、续航时间(由十二五期间 3.5 h 提升至大于 5 h)等关键技术指标均满足实用化调查需求并达到国际先进水平,实现了我国大型航空电磁测量装备从 0 到 1 的突破^[2]。2021 年,系统在吉林白城—松原、内蒙古兴安盟等地区开展航空电磁测量,划分了松嫩平原山前地带 200 m 以浅含水层结构和 650 m 以浅中生代地层电性结构,解译了主要断裂空间展布,支撑了基础地质、水文地质调查工作,建立了一套实用化的固定翼时间域航空电磁测量技术体系。系统的成功研发并应用打破了西方发达国家的技术垄断,获得了 2021 年度中国地质调查局地质科技十大进展。

1.2 无人机航空磁/放综合测量系统

依托地质调查项目,物化探所突破了气动外形、电磁兼容、遥测遥控等关键技术,在国际上首次研制了中大型无人机航空磁/放综合勘查系统^[3]。实现了高精度超低空地形跟随飞行测量,提高了航空物探测量精度;攻克了超远程测控及夜航测量技术,提高了测量效率。航磁数据补偿后标准差 53 pT,改善比 11.3,动态噪声水平优于 60 pT,磁测总精度达到 1.65 nT,航空放射性稳定性优于 $\pm 1\%$,晶体分辨率优于 12%,峰位漂移小于 ± 1 道,系统单架次续航超过 7.5 h,200 测线 km,测线偏航小于 ± 10 m,实用化性能优越。该系统目前已完成了国内外油

气、矿产资源及滩涂区无人机航空物探调查任务总计约 26 万测线千米,取得了高质量的航空物探测量数据和很好的地质效果,获得了中国地质学会 2013 年度十大科技进展、中国地质科学院 2013 年度十大科技进展、中国地质调查局 2013 年度地质调查十大进展^[4]。

1.3 大深度多功能三维电磁测量系统

为打破国外垄断,在国家 863 重点、国家重大科学仪器设备开发专项、国家重点研发计划、地质调查等项目支持下,针对我国能源资源勘查对地球电磁特性大深度高分辨的探测需求,物化探所成功研发了具有自主知识产权的大功率多功能三维电磁测量系统,填补了国内空白,并实现了我国电磁勘探技术由二维测量向三维测量的跨越式发展。基于天然电磁场和人工电磁场的传播特点,创新提出了多种电法(AMT/MT、CSAMT、TDIP、SIP)的三维分布式探测方法;攻克电流精细采样的大功率发射、大动态范围的阵列分布式测量,以及高精度同步等关键技术,成功研发了大功率多功能的电磁法测量设备,最大发射功率达 160 kw,最大电流为 100 A;通过研究抗干扰数据采集、处理与带地形的电磁二、三维正反演解释方法,开发集成了实用化国产多功能三维电磁软件,当以 50 Hz 为主的环境电磁干扰超过测量有效信号 1 000 倍时,仍可获取可靠的电性信息^[5-7]。近年来在资源能源勘查、三维地质填图、深部结构探测等领域开展了广泛的应用示范,取得显著成效。相关研究成果获国土资源部科技进步二等奖和中国地质调查局科技进步二等奖。

1.4 全区多源电磁探测技术

为解决可控源电磁法固有的场源效应、静态位移影响,以及 CSAMT 因限于“远区”观测而深度受限等问题,研究了全区多源观测方法,以及静态位移改正、电磁场直接反演等数据处理与解释技术,创新形成了全区多源电磁探测方法(MSEM)。作为一种新型的人工源频率域电磁勘探方法,突破了传统可控源电磁测深法的场源效应畸变和静态位移影响等,增强了观测数据质量,提升了勘探深度和精度,使得可控源电磁法探测深度从传统方法的 1 500 m 提升到 5 000 m。研发方法技术获国家发明专利 3 项,支撑我国多金属矿产、地热、页岩气等能源资源勘探开发取得重要进展,如在河北省博野县建议的地热孔揭示地层与推断地层吻合良好,在 3 240 m ~ 4 007 m 见到温度为 135℃ 的地下热水,单井可供暖面积超过 $25 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

1.5 大透距地下电磁波层析成像系统

地下电磁波法是在钻孔或坑道中,利用介质对

电磁波传播造成的振幅衰减或时间延迟异常,来探测地下目标体的一种地下物探方法。物化探所从1959年就开始了地下电磁波法仪器与方法技术研究,使我国跻身开展地下电磁波层析成像技术研究与应用最早的国家之一。在国家“863”课题、国土资源公益性行业科研专项、地质调查等项目的资助下,物化探所攻关深井电磁波大功率发射、高灵敏度接收及耐高温高压技术,研发了集软硬件一体的大透距地下电磁波层析成像系统。该系统发射机输出功率由10 W提高到100 W,接收机灵敏度提升到0.1 V,耐温、耐压分别达到85℃、25 MPa,探测深度增加到2 000 m,实现了大功率发射和高灵敏度接收,在中高电阻率条件下跨孔透距达500 m,主要技术指标与应用水平均达到国际先进水平。在矿产勘查,尤其深部找矿、危机矿山隐伏矿探查中发挥了重要作用,还广泛应用于煤炭、油气资源开发、水文地质、工程地质、地质灾害防治等国家基础地质调查及重大工程领域。近十年已累计向25家生产单位及科研院所推广26台套,相关成果获得中国地质科学院2012年度十大科技进展奖、2019年度中国地质调查局地质科技一等奖。

1.6 高灵敏度磁传感器

我国高灵敏度磁场传感器匮乏,长期依赖国外进口,同时深部地质调查及深部能源、矿产资源勘查急需高灵敏度磁场传感器。2011年,在国家重大仪器专项和地质大调查项目的支持下,物化探所开展了高温超导三分量磁测技术研究和感应式磁场传感器研制,采用阻抗匹配、高频小信号放大、光电隔离、分格绕制、磁通反馈以及弱信号低噪声放大等关键技术,研制了高温超导三分量磁测系统和系列高灵敏度磁场传感器,实现了多分量、多频段、宽频带磁场信号测量,性能指标达到(近半数超过)国外同类产品水平,具有高灵敏度、低噪声、频带宽、防水性好和返修率低的特点,获得国土资源科学技术奖二等奖一项^[8-9]。该项技术在青海、甘肃、新疆等地区开展了大量工作,获得了高质量的原始数据^[10]。高灵敏度磁场传感器的成功研制和应用,实现了助推国内电磁探测装备进步、打破国外产品垄断的明显成效。

2 创新集成一批有效方法技术体系

当今世界正处于百年未有之大变局。围绕新时代地质工作面临的新形势、新任务、新需求,物化探所加大地球物理技术对地质调查工作的支撑力度,

优化完善传统应用领域,加快拓展新应用领域,初步构建了现代地球物理研发与应用体系。

2.1 矿产资源勘查领域

2.1.1 金属矿电磁勘探技术

我国矿区找矿的目标已指向“第二深度空间”,对当前的矿区物探方法深部找矿提出了更高的要求。物化探所在国家重点研发计划、重大仪器专项、基础地质调查等项目的资助下开展了地面大功率高温超导瞬变电磁、大功率地—井瞬变电磁、大功率综合电磁法测量等方法技术的研究和装备研制。利用高温超导瞬变电磁法直接测量磁场,大大提高观测时间和晚期信噪比将常规瞬变电磁的探测深度提高50%。地—井瞬变电磁方法采用地面发射井中接收的装置形式,传感器沿钻孔深入地下更接近于深部目标体,从而提高见矿率和找矿效果。大功率IP测量中,基于传统的时域激电观测模式,创新研究了基于全波形采样的时频激电多参数提取的数据处理方法,仅一次供电即可提取多种时、频域激电参数^[11];CSAMT中,创新研究了场源效应畸变和静态位移影响校正方法,频点优化、数字滤波、二/三维正反演等,可有效压制人文干扰和电性不均匀体造成的静态位移等;三维IP/CSAMT测量可多角度、多细节显示地下介质电性特征的分布情况,明确电性突变界面的延展状态,快速圈定成矿有利区^[12]。利用研发的高温超导瞬变电磁、地—井瞬变电磁和综合电磁法测量系统已经在新疆、内蒙、云南、青海、西藏、辽宁、吉林等地多个金属矿区开展应用示范,获得了良好的应用效果^[13-16]。

2.1.2 金属矿地震勘探技术

在金属矿资源勘查领域,创新形成了适合我国金属矿资源特点的深部精细探测地震方法技术体系。首次提出利用地震散射波寻找块状硫化物金属矿体的新理念,研发了散射波地震成像新技术和反演处理新思路,在山东、内蒙古以及新疆等地金属矿勘查中得到了成功应用。率先在国内开展了高分辨率反射地震与地震层析成像联合勘探技术研究,应用地面地震层析成像技术有效解决了复杂地质条件下高精度速度构造问题,研发的宽频去噪和矿体追踪地震处理解释技术,降低了金属矿地震勘探成果的多解性,有效勘探深度达到10 km。该项成果应用于新疆喀拉通克铜镍矿区,首次在矿区深部新发现了隐伏含矿岩体(671.45 m~1 176.25 m)并获钻探验证,对矿区寻找深部隐伏矿具有重要指导意义。在国内首次开展了金属矿三分量地震试验研究,突破了三分量金属矿地震数据采集、处理和解释的关

键技术难点,利用三分量成像技术对矿体进行了横向追踪,利用纵—横波速度比预测了岩体岩性,实现了我国深部金属矿地震勘探技术的又一突破。

2.1.3 地下及井中地球物理勘探技术

在深部矿产资源勘查中,深部矿体异常弱、地表干扰严重等问题影响了物探工作的效果,地下及井中地球物理探测技术作为物探勘查技术的重要组成部分,能够在钻孔中实现全方位测量,避开了浅部干扰,更接近地质体,具有较高的垂向分辨率,是服务深部矿产资源勘查,矿体精细定位的重要手段。物化探所是我国井中物探领域的先行者,并通过不断创新,逐步形成了地下及井中地球物理探测技术体系。近十几年来,物化探所研发的井中物探与测井技术,从单一方法应用,发展成为包括井中磁测、井中激电、地下电磁波、井中声波、地—井瞬变电磁和地球物理测井的综合物探技术体系,探测深度由 1 500 m 提升到 4 000 m,井中磁测精度由数百纳特提升至 30 nT,井中激电发射功率由 10 kW 提高到 50 kW,地下电磁波跨孔探测距离达数百米。融合信息化技术后,形成集软硬件为一体的地下及井中地球物理探测技术体系,探测精度和工作效率进一步提高^[17-19]。目前,物化探所自主研发的井中电磁波、井中声波、地—井瞬变电磁等新型地下物探设备,推广应用到全国 30 多个省(区、市),已成为我国高质量低成本开展科研与生产的利器;地球物理测井在安徽某矿集区钻孔 1 500 m~1 900 m 井段连续发现 21 处强放射性异常,异常段累计厚度达 93.02 m,取得了重要地质发现^[20]。相关成果获 2017 年度中国地质调查局地质科技一等奖、2018 年度国土资源科学技术奖一等奖。

2.2 能源资源调查领域

2.2.1 油气地球物理勘探技术

我国油气对外依存度逐年攀升,能源安全形势严峻,加大油气资源勘探开发和增储上产力度日益迫切。自 2008 年起,物化探所参加了中国地质调查局新一轮油气资源战略调查与评价工作,在油气地球物理勘探新技术、新方法和仪器研发等方面取得重要进展^[21-23]。针对制约火山岩下伏地层成像质量的六大因素,创新建立了“两高、一宽、一长”地震采集技术和高保真去噪、长排列各向异性处理等精细成像技术,总结提出了银额盆地石炭—二叠系“三套标志层+三个不整合面”的地质地球物理识别标志,显著提高了火山岩覆盖区油气地球物理调查技术的应用效果^[24]。针对复杂地表、复杂构造区油气页岩气勘探需求,集成创新了“双复杂”区地球物理

勘探技术,建立了“有线+节点”联合采集的宽线地震探测技术方法,首次应用于柴达木盆地东部取得良好实效;全区多源电磁测量技术在硬件和软件方面得到进一步升级和完善,在长江下游页岩气勘探中实现了大深度勘探,成功实现向能源调查领域应用转型。开展了页岩气水力压裂电磁监测技术和微地震监测技术试验,在川中和长江下游等地区页岩气压裂监测中取得了良好应用效果,为非常规能源开发提供了技术支撑。

2.2.2 陆域冻土区天然气水合物地球物理勘探技术

天然气水合物资源调查评价及开发技术是当今国际地学领域的热点和前沿。自 2009 年起,在国家 863 计划、行业专项、地质调查项目等支持下,物化探所历经 10 年进行永久冻土区天然气水合物地球物理调查评价关键技术攻关。开展了水合物物性特征物理实验和数值模拟研究,揭示了低孔低渗硬岩型水合物储层导热性、弹性、电性、密度等基础性质的变化规律、微观主控因素和响应机制;攻克了高速冻土层屏蔽效应、可控震源谐波干扰、低信噪比地震数据保真处理、水合物藏地震学识别等技术难题,建立了冻土区天然气水合物地震勘探技术^[25];攻克了音频大地电磁场噪声压制、“死频段”数据采集、冻土层反演、水合物藏电磁学识别等技术难题,建立了冻土区天然气水合物电磁勘探技术^[26-27];创新集成了大深度低频探地雷达系统,首次将低频探地雷达技术应用于冻土区天然气水合物勘探^[28]。建立了水合物藏综合地球物理识别标志和勘查模型,开发了冻土区天然气水合物储层识别与参数评价系统和天然气水合物成藏预测系统。提出的建议井位成功钻获天然气水合物实物样品,方法有效性得到检验。在羌塘盆地、南祁连盆地和东北漠河盆地等地区开展了调查应用,圈定了多处水合物成藏有利远景区,为我国陆域天然气水合物资源调查评价提供了重要的技术支撑和基础数据。“青藏高原永久冻土区天然气水合物地球物理勘探关键技术”获 2022 年中国地球物理科学技术进步奖二等奖。

2.2.3 地热(干热岩)资源调查与开发中的地球物理勘探技术

地热资源是一种绿色低碳的可再生资源,是未来改变我国能源结构的重要基础能源。近年来,物化探所依托地质调查和科技项目,致力于地热勘查技术体系的建设与深井测井仪器的研发,充分发挥综合物探技术优势,构建了基于地震、长周期/宽频大地电磁与地球物理测井等方法的地热勘查方法技术体系,在冀中拗陷区,特别是雄安新区的地热资源

调查评价、热源机制研究、靶区优选、井位建议等方面均取得了优质成果,高质量支撑了京津冀地区水热性地热资源与青海共和干热岩资源调查。研发集成了 300℃ 存储式井温测井仪、230℃ 直读式井温测井仪、200℃ 超声成像测井仪,创新形成了地热(干热岩)储层测井评价解释方法,建立了高温综合测井数据采集及地热储层测井评价技术体系。完成的共和盆地 6 口干热岩井成像测井和综合评价解释工作,精准获取三段压裂有利层位,有效支撑压裂方案设计,相关成果获 2020 年、2021 年度中国地质调查局地质调查十大进展。

2.3 基础地质调查领域

2.3.1 厚覆盖区地质填图中的地球物理勘探技术

京津冀地区是中国的“首都经济圈”,位于平原覆盖区。近年来城市国土空间规划利用的迫切需求对基础地质调查提出了更高的要求,传统基岩区地质填图的手段已不能满足覆盖区地质填图的需求,急需开展厚覆盖区地质填图方法技术研究。物化探所承担了地质调查项目“永定河冲积平原区域地质调查”试点工作,在永定河中下游平原区涿县幅等 6 个 1:50 000 图幅内开展了地质填图示范。针对平原区第四系“二元结构”地质特征,以及建筑密集、人文干扰强和施工难度大的问题,针对不同地球物理方法特点在工作方法、采集装置、野外采集参数、抗干扰数据处理和施工时间等方面做出了针对性的改进和调整。应用 1:50 000 区域重力调查、浅层反射地震、大地电磁、瞬变电磁、可控源音频大地电磁、高密度电法以及综合测井等物探工作,系统地解决了厚覆盖区填图中涉及的构造单元划分、主要断裂展布、第四系地层划分、基岩界面探测、活动断裂评价和应急水源地圈定等问题^[29-31]。形成的基础地质图件为京津冀地区经济建设和基础地质科学问题研究提供了新资料,总结评价了物探方法技术在填图问题解决中的作用和效果,形成了一套可供推广应用的厚覆盖区物化探填图方法技术组合,为我国基础地质调查提供了实用的勘查技术支撑。在 2021 年度全国区域地质调查优秀图幅展评中,“宫村幅”入选优秀图幅。

2.3.2 海岸带地质填图中的地球物理勘探技术

滩浅海区属海陆过渡地带,陆地和海洋地质调查工作均无法有效地在此类区域开展工作,造成滩浅海区地质调查工作不足,形成海陆地质调查统筹管理工作的缺失环节。2016 年开始至今,物化探所依托中国地质调查项目和基本科研业务费在滩浅海区进行了大量地球物理调查工作,研发了适用的勘

探技术,针对滩浅海独特的基础地质调查需求,对滩浅海区进行地质填图,取得了较显著的成果^[32-34]。研发了拖拽式浅层反射地震勘探系统和 τ - ρ 域反褶积处理技术,提高了勘探精度和工作效率。改造了音频大地电磁仪器装备,解决了海水腐蚀、水中稳定和实时定位、电磁场畸变等技术问题,研发了拖拽式音频大地电磁数据采集技术和校正处理技术,有效填补了陆海过度带的调查技术空白和基础地质调查空白,实现了陆海数据一体化采集和处理解释。集成研发了无人机水平横向梯度测量系统,提高了磁测数据的水平横向分辨能力,并首次在滩涂区取得了成功应用。综合梳理总结了地球物理基础地质调查的技术组合,针对调查的不同地质目标体,形成了高效、高精度的地球物理技术方法组合,进而形成了服务与基础地质调查的滩浅海区综合地球物理调查技术体系,为陆海统筹地质调查提供了海陆过渡地带的地质调查技术支撑。

2.3.3 区域地球物理调查技术

近年来,为了更好地发挥区域地球物理的基础性、先行性作用,物化探所依托地质调查工程、国土资源公益性行业科研专项等组织开展了 1:1 000 000 区域大地电磁测深,为我国区域地球物理调查增添了一项新的调查参数。编制形成了《1:1 000 000 区域大地电磁调查技术指南》,开展了大地电磁数据去噪、反演方法技术研究,形成了搭载国际主流反演程序的三维大地电磁测深反演处理平台,基本形成了一套涵盖“数据采集—数据处理—地质解译”的区域大地电磁测深方法技术体系,并为多个公益性、基础性调查项目提供了计算服务^[35-37]。组织完成了华南地区、松辽盆地、银额盆地及四川盆地南部等地区 1:1 000 000 区域大地电磁测量工作,覆盖陆域国土面积达 $110 \times 10^4 \text{ km}^2$,获得了这些地区岩石圈三维电性结构模型,在深部结构和成矿成藏背景等方面取得了一些重要发现和认识^[38-40]。积极推进区域重力调查由造山带向含油气盆地拓展,累计完成 1:250 000 区域重力调查 $143 \times 10^4 \text{ km}^2$,研发了重力三维快速约束反演算法^[41],初步建立了多地球物理方法综合识别隐伏断裂技术,在构建三维精细结构模型、深化盆山耦合关系研究等方面发挥了积极作用。

2.4 工程环境调查监测领域

2.4.1 城市地下空间调查与开发利用中的地球物理勘探技术

随着我国城市化进程的加速,城市建设开始由地表转向地下。开展地下空间资源调查,摸清地下

空间资源底数,既是国家战略的客观需求,也是服务民生的重要保障。依托地质调查项目与基本科研业务费,针对物探方法在城市地下空间调查中面临的诸多挑战,物化探所创新研发基于层剥离的 Laplace—Fourier 域多尺度全波形反演方法,有效克服实测数据缺少低频信息的问题;发展地震和大地电磁同步联合反演方法,同时提高地震反演精度与电阻率异常刻画精度;研发多电磁法数据联合反演技术,在保证浅部探测分辨率的基础上获得了深部电性信息;研发水上拖曳式瞬变电磁系统、解决了水上实时定位、连续采集技术难题^[42]。在雄安新区三维地质结构调查工作中,物化探所应用创新成果,充分发挥各方法特点,针对不同地质问题进行有机结合,开展钻孔—地震—重磁电逐级标定解释,实现点—线—面综合解译,精准推断地层结构及构造形态,获取地下万米地质结构,构建了新区“浅—中—深”不同尺度三维可视化地质结构模型,有力支撑城市水工环地质调查,为雄安新区规划建设、地下空间利用提供了可靠依据^[43-44]。

2.4.2 地质灾害调查中的地球物理勘探技术

我国是地质灾害最严重的国家之一,其中滑坡灾害危害尤为突出。滑坡体地球物理探测方面的研究还存在许多薄弱环节,特别是缺少快速可靠圈定滑坡体规模和探测滑坡体精细结构的技术方法。物化探所从 2020 年开始,陆续开展了南方地区典型滑坡地球物理调查研究、西南地区典型滑坡三维速度结构与灾害风险评价研究和国家自然科学基金面上项目“土质滑坡体浅地表结构主动源和被动源联合成像研究”,针对滑坡地质灾害探测的关键技术开展攻关。突破了空中宽频传感器绕制工艺、收发高精度同步等关键技术,解决了接收机降噪、传感器失稳等飞行平台改装难题,研发成功基于旋翼无人机的回线源地空瞬变电磁系统,并在重庆彭水、贵州六盘水、广西河池等地开展了应用试验,获得了良好应用效果,相关成果已申请 11 项国家发明和实用新型专利^[45]。

3 构建地球物理勘查技术标准体系

我国自上世纪 90 年代开始制定地球物理勘查技术标准,经过 30 多年几代人不懈地努力,使地球物理勘查技术标准从零散到成系列,逐步形成重磁测量技术标准、电法测量技术标准、地震测量技术标准、测井及井中地球物理勘查标准、地球物理综合方法应用标准等 5 个门类。不同层次、配套齐全、适应

空中—地面—地下立体探测的技术标准体系^[A],涵盖地球物理勘查技术标准 61 项,其中国家标准 5 项、行业标准 53 项、中国地质调查局标准 3 项。这些标准中,由物化探所牵头或参与制修订的标准共 25 项。近年来,物化探所在地球物理勘查技术标准制修订方面取得累累硕果,出台多项在业内有影响的行业标准^[B],研制了无人机航空磁测、天然场音频大地电磁法、可控源音频大地电磁法、钻孔电磁波法、地—井瞬变电磁法等一批新方法新技术标准;制修订了地球物理勘查术语、技术符号、图式图例及色标、岩矿石标本物性测量等学科通用标准;更新了大地电磁测深法、区域重力调查、电阻率剖面法、自然电场法、充电法等一批老标准,极大提升了标准适应性,为我国地球物理勘查技术方法体系不断完善和新方法新技术推广发挥了重要作用。

4 信息化建设取得进展

近年来,物化探所信息化建设实现快速发展,通过“地球物理地球化学数据集成与服务”、“地质大数据支撑平台建设”等地质调查项目和基本科研业务费的资助,在信息化基础设施、数据库建设、数据处理系统研发等方面取得了一系列突出进展。建成了地质云物化探所分节点,搭建了物化探数据共享服务系统,构建了多专业、多要素的物化探数据“一张图”,建立了重力、电磁法、地震探测、测井、岩石物性、区域地球化学、土地质量地球化学等地球科学核心数据库。累计共享发布物化探数据服务 300 余个、地质信息服务产品 1 400 余个,范围覆盖全国 90% 陆域面积,数据量达 100 GB,提供下载服务 6.6×10^4 余次,有力地支撑了资源能源勘查、区域地质调查、土地利用规划、特色土地资源开发和污染土地整治修复等工作。相关成果获中国地质调查局、中国地质科学院地质调查十大进展 2 项、地质科技十大进展 2 项、地理信息科技进步二等奖 1 项。

物化探数据处理新方法、新技术和软件开发工作成果斐然,在国家重大科学仪器设备开发专项、“863”课题、地质调查等项目资助下,自主研发形成了“电法工作站软件系统”“三维电磁测量数据处理与反演软件系统”“重、磁数据三维交互反演系统”“金属矿地下物探数据处理解释系统”等软件系统,覆盖了重、磁、电等数据预处理到反演成像等实用化功能,并应用到能源与矿产资源勘查、基础地质调查等领域,为地质解译提供了强有力支撑,向全国的地调、煤田、冶金、石油、核工业等部门的生产单位以及

有关院校、院所、地质仪器厂等单位推广 400 余套,在实际应用中取得了较好的效果。

5 发展趋势与展望

综上所述,在科技部、自然资源部、中国地质调查局持续支持下,依托国家科技和地质调查项目,物化探所在地球物理技术研发和仪器装备研制方面形成了一批重要成果,构建了具有自主知识产权的“航空—地面—地下”地球物理立体探测技术体系,取得了服务能源与矿产资源勘查、基础地质调查、工程与环境调查等领域的良好应用成效,形成了一批国内外有一定影响力的优势研究领域和方向,为推动我国地球物理学科建设和勘查地球物理事业发展起到了重要作用。面对国家和时代发展的需要,物化探所勘查地球物理事业发展将坚持守正创新,既要传承,又要创新。对照国内外勘查地球物理前沿进展与现实差距,未来在技术创新上要向深部探测和浅部精细精准探测并重发展,在探测方式上要从二维、三维探测向立体探测乃至时空探测发展,在工作范式上要加快地球物理大数据和智能化应用并向基于知识和机器的预测发展。

“十四五”期间,物化探所将围绕国家需求,坚持使命导向,聚焦支撑国家能源资源安全保障、服务生态文明建设和自然资源管理中心工作,攻克一批勘查地球物理探测关键核心技术装备;加快勘查地球物理技术与大数据、人工智能等新兴技术的融合发展,推进具备大数据管理、智能识别与分析能力的地球物理数值模拟预测技术研究;进一步加大国内、外开放合作,推动依托物化探所建设运行的国家现代地质勘查工程技术研究中心、自然资源部地球物理电磁法探测技术重点实验室、中国地质调查局陆域地球物理研究中心聚力发展,打通数据获取、基础研究、技术研发、成果转化的创新链条,探索构建产学研用高效协同的新机制,为我国勘查地球物理事业高质量发展做出新的贡献。

参考文献:

- [1] 李军峰, 黄放, 李洋, 等. 固定翼时间域航空电磁测量技术系统研制项目取得重要进展[J]. 中国科技成果, 2020, 21(21): 14—16.
- LI J F, BEN F, LI Y, et al. Important progress has been made in the development of fixed wing time domain airborne electromagnetic measurement technology system[J]. China Science and Technology Achievements, 2020, 21(21): 14—16. (In Chinese)

- [2] 黄放, 黄威, 吴珊, 等. 时间域航空电磁系统姿态变化影响研究[J]. 地球物理学报, 2018, 61(7): 3074—3085.
- BEN F, HUANG W, WU S, et al. Influence of attitude change for time domain airborne electromagnetic system[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(7): 3074—3085. (In Chinese)
- [3] 李军峰, 李文杰, 秦绪文, 等. 新型无人机航磁系统在多宝山矿区的应用试验[J]. 物探与化探, 2014, 38(4): 846—850.
- LI J F, LI W J, QIN X W, et al. Trial survey of a novel UAV—borne magnetic system in the Duobaoshan ore district[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(4): 846—850. (In Chinese)
- [4] 李飞, 丁志强, 崔志强, 等. CH—3 无人机航磁测量系统在我国新疆不同地形区的应用示范[J]. 地质与勘探, 2018, 54(4): 735—746.
- LI F, DING Z Q, CUI Z Q, et al. Application demonstration of the CH—3 UAV—Borne magnetic survey system in different terrain areas of Xinjiang[J]. Geology and Exploration, 2018, 54(4): 735—746. (In Chinese)
- [5] 林品荣, 郭鹏, 石福升, 等. 大深度多功能电磁探测技术研究[J]. 地球学报, 2010, 31(2): 149—154.
- LIN P R, GUO P, SHI F S et al. A study of the techniques for large—depth and multi—functional electromagnetic survey[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2010, 31(2): 149—154. (In Chinese)
- [6] 林品荣, 郑采君, 吴文鹏, 等. 大深度多功能电磁探测技术与系统集成[J]. 中国地质调查, 2016, 2(8): 60—66.
- LIN P R, ZHENG C J, WU W L, et al. Techniques and systems for large—depth and multi—function electromagnetic survey[J]. Geological Survey of China, 2016, 2(8): 60—66. (In Chinese)
- [7] 郑采君, 刘昕卓, 林品荣, 等. 分布式电磁法仪器系统设计与实现[J]. 地球物理学报, 2019, 62(10): 3772—3784.
- ZHENG C J, LIU X Z, LIN P R, et al. Design and realization of the distributed electromagnetic instrument system[J]. Chinese J. Geophys, 2019, 62(10): 3772—3784. (In Chinese)
- [8] 赵毅, 陈晓东, 王刚, 等. 频率域感应式磁传感器信号调理电路研究[J]. 物探化探计算技术, 2016, 38(2): 198—205.
- ZHAO Y, CHEN X D, WANG G, et al. Research for signal adjustment electric circuit of inductive magnetism transducer in the frequency domain[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 38(2): 198—205. (In Chinese)
- [9] 赵毅, 陈晓东, 王刚, 等. 频率域感应式磁传感器灵敏度研究[J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(1): 1—5.

- ZHAO Y, CHEN X D, WANG G, et al. Research on sensitivity of inductive magnetism transducer in the frequency domain[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2017, 14(1): 1—5. (In Chinese)
- [10] 陈晓东, 赵毅, 张杰, 等. 高温超导磁强计在瞬变电磁法中的应用研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 702—708.
- CHEN X D, ZHAO Y, ZHANG J, et al. The applications of HTc SQUID magnetometer to TEM[J]. Chinese J. Geophys., 2012, 55(2): 702—708. (In Chinese)
- [11] 李建华, 林品荣, 何畏, 等. 基于全波形采样的激电多信息提取方法研究与应用[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(1): 0132—0138.
- LI J H, LIN P R, HE W, et al. Study and application on induced polarization multi-parameter information extraction method based on the full waveform sampling technology[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(1): 0132—0138. (In Chinese)
- [12] 李建华, 林品荣, 张强, 等. 可控源电磁法中关键技术研究与应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(3): 713—724.
- LI J H, LIN P R, ZHANG Q, et al. Research and application of key technology of controlled source electromagnetic [J] Method, Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 713—724. (In Chinese)
- [13] 武军杰, 智庆全, 邓晓红, 等. 辽东白云金矿区深部地质结构的瞬变电磁法探测. 地球科学, 2020, 45(11): 4027—4037.
- WU J J, ZHI Q Q, DENG X H, et al. Exploration of deep geological structure of baiyun gold deposit in eastern liaoning Pprovince with TEM [J]. Earth Science, 2020, 45(11): 3885—3899. (In Chinese)
- [14] WU J J, CHEN X D, YANG Y, et al. Application of TEM based on HTS SQUID magnetometer in deep geological structure exploration in the baiyun gold deposit, NE China[J]. Journal of Earth Science, 2021, 32(1): 1—7.
- [15] WU J, ZHI Q, DENG X, et al. Deep gold exploration with SQUID TEM in the Qingchengzi orefield, eastern Liaoning, Northeast China[J]. Minerals . 2022, 12, 102.
- [16] 武军杰, 刘彬, 智庆全, 等. 井地瞬变电磁联合探测在2000m深部找矿中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(7): 70—78.
- WU J J, LIU B, ZHI Q Q, et al. Application of surface and borehole TEM joint exploration in 2 000 m deep mineral exploration[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(7): 70—78. (In Chinese)
- [17] 冯杰, 欧洋, 赵勇, 等. 三维井地磁测联合约束反演[J]. 地球物理学报. 2019, 62(10): 3686—3698.
- FENG J, OU Y, ZHAO Y, et al. 3D joint constrained inversion of borehole and ground magnetic data[J]. Chinese J. Geophys., 2019, 62(10): 3686—3698. (In Chinese)
- [18] 贾定宇, 王宇航, 王桂梅, 等. 一种新型井中激电装置在铜金矿上的应用[J]. 物探与化探. 2019, 43(6): 1205—1210.
- JIA D Y, WANG Y H, WANG G M, et al. The application of a new device of borehole induced polarization to the copper—gold deposit. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1205—1210. (In Chinese)
- [19] 欧洋, 高文利, 李洋, 等. 估计辐射参数的井间电磁波层析成像技术[J]. 地球物理学报. 2019, 62(10): 3843—3853.
- OU Y, GAO W L, LI Y, et al. Cross well electromagnetic imaging method with radiation parameter estimation[J]. Chinese J. Geophys. 2019, 62(10): 3843—3853. (In Chinese)
- [20] 高文利, 孔广胜, 潘和平, 等. 庐枞盆地科学钻探地球物理测井及深部铀异常的发现[J]. 地球物理学报. 2015, 58(12): 4522—4533.
- GAO W L, KONG G S, PAN H P, et al. Geophysical logging in scientific drilling borehole and find of deep Uranium anomaly in Luzong basin[J]. Chinese J. Geophys. 2015, 58(12): 4522—4533. (In Chinese)
- [21] 胡平, 方慧, 钟清著. 青藏高原油气资源战略调查与评价中的非地震方法技术[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- HU P, FANG H, ZHONG Q. Non seismic methods in strategic investigation and evaluation of oil and gas resources in the Qinghai Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012. (In Chinese)
- [22] 刘建勋, 张保卫, 王小江, 等. 羌塘盆地浅层地震探测方法技术[J]. 物探与化探, 2015, 39(4): 678—685.
- LIU J X, ZHANG B W, WANG X J, et al. The method for shallow seismic exploration in Qiangtang basin[J] Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(4): 678—685. (In Chinese)
- [23] 李晓昌, 钟清, 方慧, 等. 大地电磁测深数据处理技术与反演方法改进及其应用实例[J]. 物探化探计算技术, 2017, 39(3): 313—318.
- LI X C, ZHONG Q, FANG H, et al. The application examples and improvement for data processing technology and inversion methods of the magnetotelluric sounding[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 39(3): 313—318. (In Chinese)
- [24] 何梅兴, 张耀阳, 裴发根, 等. 银额盆地居延海坳陷石炭系—二叠系泥岩层电性特征[J]. 石油物探, 2022, 61(05): 929—939+950.

- HE M X, ZHANG Y Y, PEI F G, et al. Electrical characteristics of carboniferous — permian mudstone beds in Juyanhai Depression, Yingen—Ejin Basin. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(5): 929—939. (In Chinese)
- [25] 徐明才, 哈立洋, 王小江, 等. 哈拉湖地区天然气水合物地震探测技术试验[J]. *物探与化探*, 2016, 40(4): 667—674.
- XU M C, HA L Y, WANG X J, et al. Experiment on seismic exploration technique of natural gas hydrate in Halahu area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40(4): 667—674. (In Chinese)
- [26] 方慧, 裴发根, 何梅兴, 等. 音频大地电磁测深法探测冻土区天然气水合物有效性实验[J]. *物探与化探*, 2017, 41(6): 1068—1074.
- FANG H, PEI F G, HE M X, et al. Effectiveness of audio magnetotelluric sounding for detecting gas hydrate in permafrost regions [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(6): 1068—1074. (In Chinese)
- [27] 裴发根, 何梅兴, 仇根根, 等. 青藏高原冻土区 AMT 探测天然气水合物采集试验[J]. *物探与化探*, 2017, 41(6): 1113—1120.
- PEI F G, HE M X, QIU G G, et al. AMT acquisition experimental study of gas hydrate exploration in the permafrost region of the Tibetan Plateau [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(6): 1113—1120. (In Chinese)
- [28] 白大为, 杜炳锐, 张鹏辉. 基于希尔伯特—黄变换的低频探地雷达弱信号处理技术及其在天然气水合物勘探中的应用[J]. *物探与化探*, 2017, 41(06): 1060—1067.
- BAI D W, DU B R, ZHANG P H. Weak signal processing technology of low frequency GPR based on Hilbert—Huang transform and its application in permafrost area gas hydrate exploration [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(06): 1060—1067. (In Chinese)
- [29] 代鹏, 邓晓红, 王盛栋, 等. 河北平原区固安 G01 孔岩芯特征及第四纪地层划分[J]. *第四纪研究*, 2019, 39(2): 399—407.
- DAI P, DENG X H, WANG S D, et al. Core characteristics and stratigraphic classification of CO1 corehole in Gu'an, Hebei Plain [J]. *Quaternary Sciences*, 2019, 39(2): 399—407. (In Chinese)
- [30] 代鹏, 王盛栋, 邓晓红, 等. 地球物理方法在厚覆盖区第四纪地层划分中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(6): 2143—2151.
- DAI P, WANG S D, DENG X H, et al. The application of geophysical methods in the Quaternary stratigraphic division of thick covered area [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(6): 2143—2151. (In Chinese)
- [31] 代鹏, 邓晓红, 王盛栋, 等. 永定河冲积平原南部第四纪年代地层划分及沉积速率特征[J]. *地质通报*, 2022, 41(2—3): 253—261.
- DAI P, DENG X H, WANG S D, et al. Chronostratigraphic division and sedimentary rate characteristics in the south alluvial plain of Yongding River [J]. *Geological bulletin of China*, 2022, 41(2—3): 253—261. (In Chinese)
- [32] 张保卫, 张凯, 岳航羽, 等. 江苏滩涂区浅层地震探测方法技术应用[J]. *物探与化探*, 2018, 42(1): 144—153.
- ZHANG B W, ZHANG K, YUE H Y, et al. Application of shallow seismic exploration method in Tidal—flat region of Jiangsu Province. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(1): 144—153. (In Chinese)
- [33] 李飞, 董浩, 崔志强, 等. 滩涂区综合地球物理调查技术在耕茶河断裂空间展布中的应用[J]. *地质与勘探*, 2020, 56(3): 566—579.
- LI F, DONG H, CUI Z Q, et al. Application of integrated geophysical survey technology in the spatial distribution of Benchah fault in Rudong mudflat area, Jiangsu Province [J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(3): 566—579. (In Chinese)
- [34] 智庆全, 武军杰, 杨毅, 等. B_Z 参数瞬变电磁法的优势及在沿海滩涂区的验证试验[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(1): 379—385.
- ZHI Q Q, WU J J, YANG Y, et al. Superiority of B_Z—based transient electromagnetic method and verification test in coastal tidal regions [J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(1): 379—385. (In Chinese)
- [35] 仇根根, 张小博, 裴发根, 等. 大地电磁测深反演技术有效性对比试验[J]. *物探与化探*, 2015, 39(01): 118—124.
- QIU G G, ZHANG X B, PEI F G, et al. Effectiveness of magnetotelluric sounding inversion technique [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(01): 118—124. (In Chinese)
- [36] 王大勇, 朱威, 范翠松, 等. 矿集区大地电磁噪声处理方法及其应用[J]. *物探与化探*, 2015, 39(04): 823—829.
- WANG D Y, ZHU W, FAN C S, et al. Noise processing methods and application study of MT in the ore concentration area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(4): 823—829. (In Chinese)
- [37] 仇根根, 吕琴音, 彭炎, 等. 大地电磁三维模型二维反演计算数值模拟分析[J]. *物探与化探*, 2018, 42(04): 791—797.
- QIU G G, LV Q Y, PENG Y, et al. An analysis for MT 2D inversion to explain three—dimensional model [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(4): 791—797. (In Chinese)

- [38] 钟清,方慧,杨辟元,等. 上地幔高导层与内生金属矿产及油气藏的关系[J]. 地球物理学报, 2015, 58(06): 2160—2176.
ZHONG Q, FANG H, YANG B Y, et al. The relationship between high conductive layer in upper mantle and endogenous metallic ore and petroleum reservoir [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(06): 2160—2176. (In Chinese)
- [39] 仇根根,方慧,吕琴音,等. 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, 2019, 46(04): 775—785.
QIU G G, FANG H, LV Q Y, et al. Deep electrical structures and metallogenic analysis in the north section of Wuyishan Mountains and its adjacent areas: Based on three-dimensional magnetotelluric sounding results [J]. Geology in China, 46(4): 775—785. (In Chinese)
- [40] 方慧,钟清,郭友钊,等. 重要成矿区带地球物理深部探测与研究示范成果报告[R]. 廊坊:中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 2012.
FANG H, ZHONG Q, GUO Y Z, et al. Report on demonstration results of geophysical deep exploration and research in important metallogenic zones [R]. Langfang: Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, 2012. (In Chinese)
- [41] JING L, YAO C, YANG Y, et al. Optimization algorithm for rapid 3D gravity inversion [J]. Applied Geophysics, 2019, 16(4): 507—518.
- [42] 王兴春,智庆全,张杰,等. 瞬变电磁法在雄安新区地下水调查中的应用[J]. 地球科学, 2022, 20(04): 11: 27: 46, 网络首发.
WANG X C, ZHI Q Q, ZHANG J, et al. Application of transient electromagnetic method in the investigation of underground water in Xiongan New Area[J]. Earth Science, 2022, 20(04): 11: 27: 46. (In Chinese)
- [43] 岳航羽,王凯,张杰,等. 雄安新区及周边深反射地震高精度成像技术[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(04): 855—869.
YUE H Y, WANG K, ZHANG J, et al. High-precision imaging technology of deep reflection seismic in Xiongan New Area and its surroundings[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(04): 855—869. (In Chinese)
- [44] 王凯,张杰,白大为,等. 雄安新区地热地质模型探究:来自地球物理的证据[J]. 中国地质, 2021, 48(05): 1453—1468.
WANG K, ZHANG J, BAI D W, et al. Geothermal-geological model of Xiongan new area: Evidence from geophysics[J]. Geology in China, 2021, 48(5): 1453—1468. (In Chinese)
- [45] WU J J, ZHI Q Q, DENG X H, et al. Joint inversion with borehole and semi-airborne TEM data based on equivalent filament approximation [J]. Minerals, 2022, 12: 803.

Review and prospect of exploration geophysics development since the 11th five year plan

XIAO Du, ZHANG Qiang, DU Bingrui, YUAN Guiqin, LIU Jianxun, PEI Fagen, LI Jianhua,
BEN Fang, OU Yang, WANG Gang, FENG Bin, ZHU Wei, SUN Yue

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

Abstract: In the wake of modern advanced computer and sensor technique, and the progress of new materials and other technology, the geophysical exploration in China has developed rapidly. In the past 15 years, the institute of geophysical and geochemical exploration has made remarkable achievements in the development of geophysical instruments, innovation of geophysical technology, and service for national needs. We have built a comprehensive geophysical exploration system of "Air—Ground—Underground", including the independently developed fixed-wing airborne time domain electromagnetic system, aeromagnetic measurement system, high-power multi-function three-dimensional electromagnetic measurement system, high precision magnetic sensor and high temperature superconducting magnetometer, and the innovation of the multi-source electromagnetic measurement method. Moreover, series of new progress have been made in the exploration of solid mineral deposits, oil and gas resource, shale gas, terrestrial gas hydrate, hot dry rock and other clean energy. We also get outstanding achievements in the basic geological survey, engineering survey and environmental monitoring. After years of effort, we have successfully established the standard system of geophysical exploration technology and information platform.

Keywords: geophysical exploration technology; independent research and development; current situation; prospects