



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：大型油气工程建设地球物理勘探技术应用与展望

作者：荆少东，马学东，闫月锋，孙怀凤

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026054

投稿时间：2026-05-12

录用时间：2026-09-04

预出版时间：2026-09-11

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

大型油气工程建设中地球物理勘探技术应用现状与展望

荆少东¹, 马学东², 闫月锋², 孙怀凤³

JING Shaodong¹, MA Xuedong², YAN Yuefeng², SUN Huaifeng³

1. 中国石油化工集团有限公司, 北京 100029
2. 中石化石油工程设计有限公司, 山东东营, 257026
3. 山东大学土建与水利学院, 山东济南, 250100

1. Sinopec Group, Beijing, 100029, China
2. Sinopec Petroleum Engineering Corporation, Dongying, 257026, Shandong, China
3. School of Civil Engineering and Water Resources, Shandong University, Jinan, 250100, Shandong, China

Application and Prospect of Geophysical Exploration Technologies in Large-Scale Oil and Gas Engineering Construction

Abstract: [Objective] The construction of large-scale oil and gas engineering projects serves as a strategic cornerstone for ensuring national energy security. Various types of projects, including long-distance pipelines, refining and chemical engineering, and underground storage facilities, are being advanced synergistically, playing an irreplaceable supporting role in the national economy and people's livelihoods. Integrated site investigation, running through from site selection and design to construction and operation. Its core tasks are accurately identifying geological hazards along long-distance pipelines, foundation conditions of refining and chemical plant sites, rock mass integrity and stability in underground spaces. However, poor adaptability to complex terrains, limited detection range, disturbance and damage to the site, high costs and long time remain the shortcomings of current drilling technologies. **[Methods]** Engineering geophysical, leveraging the unique advantages of non-destructive, rapid, and capable of 3D exploration, have become the answer of the aforementioned challenges. Methods such as Controlled Source Audio-frequency Magnetotellurics (CSAMT), Electrical Resistivity Tomography (ERT), shallow seismic exploration, Ground Penetrating Radar (GPR), and microtremor surveys have been widely applied in oil and gas projects. **[Results]** Appropriate combinations of geophysical methods have demonstrated significant effectiveness in pipeline investigation, foundation exploration in karst-developed areas, and underground storage facility investigation. **[Conclusion]** With the maturation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology, semi-airborne and fully airborne geophysics will effectively address personnel safety and exploration efficiency issues in complex terrains. Artificial Intelligence (AI)-driven geophysical data processing and inversion techniques are expected to achieve computational acceleration by tens of thousands of times. Airborne-ground-borehole joint inversion will enable 3D high-precision imaging. The development of Distributed Acoustic Sensing (DAS) technology provides a new method for real-time dynamic monitoring of geological. **[Significance]** Engineering geophysical is advancing towards intelligence, multi-dimensionality, and real-time capability, which will provide more robust technical support for the construction of large-scale oil and gas engineering

基金项目: 国家自然科学基金地质联合基金项目 (U2444213)

This research was financially supported by the National Natural Science Foundation of China – Geological Joint Fund (Grant No. U2444213).

第一作者: 荆少东 (1972—), 男, 博士, 教授级工程师, 从事油气工程勘察与设计。E-mail: jingsd@sinopec.com

通讯作者: 闫月锋 (1992—), 男, 博士, 中级工程师, 从事油气工程地球物理勘察。E-mail: yfyan0516@gmail.com

projects.

Keywords: Oil and Gas Engineering, Engineering Geophysics, Long-distance Pipeline, Refining and Chemical Engineering, Underground Storage Facility; Geophysical Prospecting

摘要: 大型油气工程是国家能源安全的重要保障。长输管道、炼化工程与地下储库等各类油气工程项目协同配合，在国计民生中发挥着不可替代的作用。综合勘察贯穿于工程选址、设计、施工与运维的全过程，需要准确查明长输管道沿线的地质隐患、炼化厂区的地基条件、地下空间的岩体完整性和稳定性等。但传统钻探等技术存在复杂地形适应性差、探测范围有限、扰动场地、成本高、周期长等短板。工程物探技术因其无损、快速、可实现三维精细探测的特点，可以有效解决上述难题，成为勘探工作的重要环节。现阶段，可控源音频大地电磁法（CSAMT）、高密度电法、浅层地震勘探、地质雷达及微动探测等工程物探方法已在油气工程建设中得到广泛应用，在管道沿线勘察、岩溶发育区地基探测、地下储库勘察等方面取得了良好效果。随着无人机技术发展，航空物探将有效解决复杂地形探测区域的人员安全与探测效率问题；人工智能可以有效提高物探数据处理与反演的效率与精度；通过空-地-井联合反演，可以使不同物探方法取长补短，实现三维高精度成像；分布式光纤技术的发展则为地质体的实时动态监测提供了全新路径。工程物探技术在智能化、多维化、实时化等方面不断进步，将为大型油气工程建设提供更加坚实的技术支撑。

关键词: 油气工程；工程物探；长输管道；炼化工程；地下储库；地球物理勘探

中图分类号: P631.4; P313

文献标识码: A

文章编号: 1006-6616 (2026) 05-0000-00

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026054

0 引言

大型油气工程涵盖油气田地面工程、海洋油气工程及非常规与新能源工程（马永生等，2016；李自荣等，2025；王香增等，2025）。其中，长输管道、炼化工程与地下储库这三类工程，分别承担着油气资源长距离输送、深度加工转化以及战略储备调节任务，是保障能源安全的重要支撑（肖立业等，2022；Schell et al., 2023；Patanwar et al., 2024；张禹等，2024；程可心等，2025）。

在油气工程建设中，对于地质条件的准确判断是保障工程安全的关键。综合勘察融合地质测绘、钻探、原位测试、水文地质试验等手段，在工程选址、设计、施工与运维中发挥关键作用（底青云等，2005；谭远发，2012；文龙等，2025；林煜等，2026）。钻探能直接获取岩土样本、准确揭露地质情况，但钻探范围有限、连续性差、成本高且扰动场地，在地形复杂区域可能难以实施。工程物探作为勘察过程的重要环节，具有探测范围广、空间连续性强、对地层无扰动、成本相对较低等优点，能够获取地下地质体的空间展布，与钻探结合可更准确查明工程地质条件（董树文等，2012；袁亮和张平松，2019；石智军等，2020；汪海阁等，2021）。

针对不同探测深度与工程需求，需采用多种物探技术。在进行浅层探测时，高密度电法查明断层破碎带与地下水分布（底青云等，2001；董浩斌和王传雷，2003；郑冰和李柳德，2015；张平松等，2020；夏时斌等，2024）、浅层地震勘探刻画覆盖层厚度与基岩埋深、地质雷达适用于浅层精细探测与管线定位；在进行中深层探测时，跨孔 CT 实现钻孔间岩溶裂隙的高精度成像（Goes and Meekes, 2004；刘征宇等，2015；李术才等，2015；张巍等，2024），CSAMT 可有效探测深部地质构造、隐伏岩体及深大断裂，为深埋隧道、大型河流穿越及地下储库选址提供关键依据（柳建新等，2019；Liu et al., 2020；史玲玲等，2025；孙东生等，2025）。特殊场景下，声呐测腔是盐穴储气库腔体内部形态测量的有效方法，微动探测在冻土区以及城市复杂环境等区域具有独特优势（郭凯等，2015；齐得山等，2017）。工程物探在管道勘察、岩溶发育区地基探测、地下储库勘察等方面已取得显著成效，为大型油气工程建设提供了重要的地质数据。

现阶段，大部分工程物探技术已较为成熟，但各种物探方法均有局限性与适用范围，在应对复杂工程地质条件时仍存在不足。在复杂地形区与危险区域（如高山峡谷、密林沼泽等），传统地面物探实施困难。在探测目标位置较深时，探测分辨率降低，难以满足精细探测需求。电磁法在工业与城市强干扰环境下信号采集质量难以保障。此外，勘探效率与三维成像之间的矛盾、施工期与运维期实时监测手段不足，仍是待解决的问题。

文章系统梳理长输管道、炼化工程、地下储库等对工程物探的技术需求与应用现状，总结各方法的优缺点，并结合无人机技术、人工智能、空-地-井联合反演、分布式光纤传感等前沿发展方向，探讨工程物探技术在大型油气工程建设中的发展趋势，以期为该领域的理论研究与工程实践提供参考。

1 大型油气工程建设发展与综合勘察

中国大型油气工程建设历经七十余年的发展，实现了从无到有、由弱变强的历史性跨越。1959 年大庆油田的发现，开始了中国石油工业的跨越式发展，现已逐步建立起从勘探开发到储运加工的完整工程建设体系，为后续发展奠定了坚实基础（图 1）。



图 1 油气工程建设发展历程

Fig 1. Historical development stages of oil and gas engineering construction in China

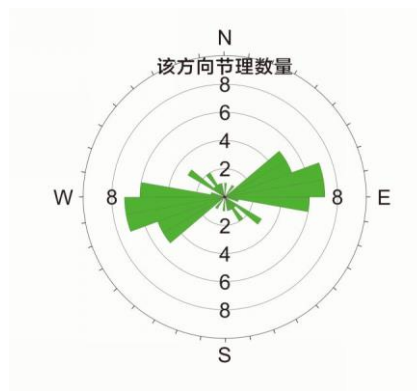
现阶段，中国油气工程已发展为涵盖上中下游的综合工程体系。按照资源类型与工程功能，大型油气工程可分为传统油气工程与新能源工程两大类。传统油气工程主要包括油气田地面工程（集输、处理、注水等设施）和海洋油气工程（海上平台、海底管道等）；新能源工程主要包括非常规油气工程（页岩气、煤层气等）和新能源融合工程（CCUS、风光发电、地下储氢等）。其中，长输管道、炼化工程与地下储库三大类工程分别承担着油气资源的长距离输送、深度加工转化与战略储备调节功能，是保障能源安全的关键工程。

1.1 长输管道工程

长输管道工程呈线性展布，管道沿线地形地貌与地质情况复杂多变，其综合勘察工作需分阶段、有针对性地开展。勘察目的为查明管道沿线的岩土工程条件、不良地质作用以及水文地质特征（图 2），为管道线路选择、敷设方式确定、穿跨越工程设计及施工安全评估提供地质依据（王小强等，2018；刘来等，2025，王成虎和李尉，2025；Wang et al., 2026）。



(a) 钻探作业



(b) 节理方向分布玫瑰花图

图 2 长输管道勘察作业图

Fig. 2. Long-distance pipeline survey

(a) drilling operation; (b) rose diagram showing the distribution of joint orientations

1.2 炼化工程

炼化工程属于点状工程，建（构）筑物荷载大、对地基变形要求严格，且常涉及复杂地质条件如厚层软土、不均匀地基、基岩面起伏大等，对勘察精度和深度要求较高（宋昌才等，2019）。炼化工程主要勘察目的为查明场区岩土层的类型、分布及工程特性（图 3），评价地基稳定性与承载力，查明不良地质作用及不利埋藏物的分布情况，为基础设计和地基处理提供岩土参数（吴青，2018；王德亮等，2021；辛靖和王连英，2021；Hu et al., 2025）。

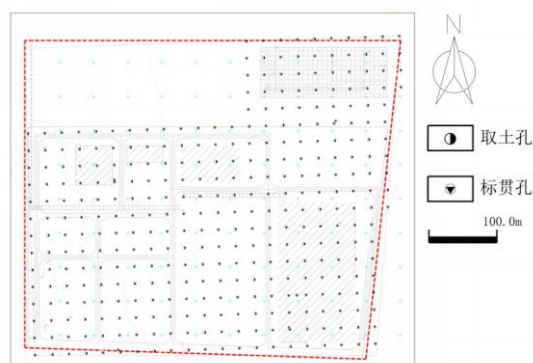


图 3 某炼化工程钻孔布置图

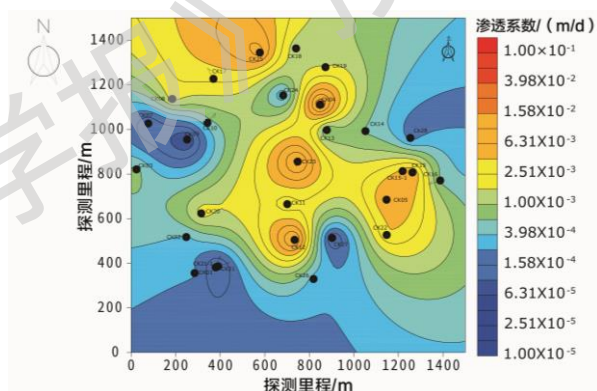
Fig. 3. Borehole layout at a refining and petrochemical engineering project site

1.3 地下工程

油气地下工程主要包括地下储气库（枯竭油气藏型、盐穴型）、地下水封洞库（战略石油储备）以及新兴的压缩空气储能电站等（丁国生等，2015；姜文等，2025；喻鹏飞等，2025；崔梓贤等，2026）。勘察重点在于查明深部岩体的密封性、完整性、稳定性及水封条件的可靠性（张志宏等，2012；刘伟等，2013；袁光杰等，2017；Tarkowski，2019）。



(a) 勘察作业



(b) 地下岩石渗透系数分布云图

图 4 地下工程勘察

Fig. 4. Underground engineering investigation

(a) survey operation; (b) contour map showing the distribution of hydraulic conductivity of subsurface rock masses

在进行岩体质量评价时，需查明岩体完整性、风化程度及软弱夹层分布，并进行围岩分类（图 4）。在结构面特征查明方面，需查明断层的产状，以及节理、裂隙的发育特征、张开度、充填物及连通性，评价其对洞室稳定性和密封性的影响。主要采用钻孔电视成像进行结构面精细描述，结合地表工程地质测绘与调查，必要时采用跨孔弹性波 CT 探测孔间结构面连通性（Bing and Greenhalgh，2000；彭勃等，2025；杨镇等，2025）。在盖层密封性评价方面，储气库需评价盖层的岩性、厚度、连续性及封闭能力。主要采用钻探取芯进行岩矿分析与突破压力试验，结合三维地震勘探查明盖层构造形态及断层发育特征，必要时采用微地震监测技术评价盖层密封性。

1.4 综合勘察技术发展需求

与钻探的点式信息不同，物探方法能够获取连续剖面或三维体积的地球物理场信息，通过对电阻率、波速、介电常数等物性参数的反演与解释，实现对地下地质体的空间成像。工程物探提升了勘探效率、降低了成本，以无损方式保护场地环境，并为钻探提供点位支持，成为大型油气工程建设的重要勘察环节。

2 油气工程建设工程物探技术应用

工程物探技术是利用地球物理场（如电磁场、弹性波场、重力场等）差异来探测地下地质体结构、物性参数与地质异常的勘察技术。根据所采集的地球物理场数据类型不同，可划分为电法类（高密度电法、CSAMT等：刘盛东等，2001；刘晓东等，2002；郑智杰，2017；姜国庆等，2022；Su et al., 2022；覃剑文等，2023；杨亮等，2024）、地震类（浅层地震反射波法、瞬态瑞雷面波法、微动探测等：黎灵，2013；付天光，2014；罗霄等，2020；徐磊等，2020；李鹏等，2021；杨继华等，2023；Chen et al., 2026）、重力类（管志宁等，2002；于鹏等，2007；付金华等，2013；朱卫平等，2017）、磁法类（田文法等，2010；柳建新等，2016；吕庆田等，2019；张铭哲等，2019；刘双等，2023）及放射性类（罗齐彬等，2022；谢登科等，2025）等。各方法均有优势与局限，需根据项目类型、目标、地形及精度要求合理选择组合（表 1）。文章将根据不同项目的探测目标与物探手段，阐述多种类型工程物探技术在油气工程建设中的应用。

表 1 大型油气工程常用工程物探方法对比

Table. 1 Comparison of common engineering geophysical methods applied in large-scale oil and gas engineering construction									
方法类别	方法名称	适用条件	探测深度范围	分辨率（纵向）	地形适应性	抗干扰能力	优势	局限	应用场景
电法类	高密度电法	电阻率差异明显区	20~100 m	0.5~2 m	受地形起伏影响大	易受接地电阻、工业杂散电流干扰	探测效率高、成像直观	地形影响大、探测深度有限	岩溶普查、断层定位
电法类	可控源音频大地电磁法	深部构造探测	100~1000 m	纵向几米~几十米	较好，可适应一定地形起伏	较好，人工源可控，压制工频干扰	探测深度大、抗干扰强	横向分辨率较低	深埋隧道、断裂构造
电法类	跨孔电磁波 CT	孔间精细探测	由钻孔深度控制	纵向 0.5~1m	不依赖地表地形（需钻孔）	中等，依赖孔内耦合条件	分辨率高、可定量解释	成本高、需要钻孔	溶洞探测
地震类	地震反射法	层状地层、基岩面探测	30~500 m（浅层），深部可达 2000m 以上	受地震波波长影响	较差，需较平坦或可施工场地	中等，受振动噪声影响大	探测深度大	施工复杂、成本高	覆盖层厚度、基岩起伏
地震类	面波法	横波速度结构探测	一般 5~50 m	纵向 0.5~3m	较差	较强，单点激发抗环境振动较好	抗干扰强	探测深度与排列长度相关	隧道洞口覆盖层探测
地震类	跨孔弹性波 CT	孔间速度成像	由钻孔深度控制	纵向 0.3~1 m	不依赖地表地形（需钻孔）	中等，受孔内换能器耦合影响	分辨率高、信息丰富	需要钻孔、成本高	岩体质量评价
电磁类	航空电磁法	大区域、复杂地形区	一般 50~500 m	纵向几米~十几米	极好，无地面通行限制	较差，易受到周围环境电磁干扰	快速、无人员风险	浅层分辨率有限、成本高	管道选线区域性勘察
电磁类	地质雷达	浅层精细探测	一般 0.5~50 m	较高，由天线频率控制	较好，需天线与地面耦合	弱，易受金属物体、无线电射频干扰	分辨率极高、无损	探测深度小（<50m）	地下管线探测、浅部结构
声学类	声呐测腔	腔体形态测量	由井深及腔体尺寸控制	角度分辨率约 0.5°~1°，距离精度约 0.1~0.3 m	仅用于井孔/腔体内	较强，但需液体介质耦合	适用于腔体成像方法	需要腔体内介质耦合	盐穴储气库形态检测

2.1 隧道勘察应用

在油气长输管道隧道勘察中，工程物探方法贯穿于从宏观选址到施工验证的全过程。针对洞身深层地质探测，CSAMT 可有效识别深大断裂及隐伏岩体。对于隧道洞口及浅埋段，高密度电法能够快速圈定覆盖层厚度变化及基岩起伏形态。而在隧道施工期间，需采用探地雷达、地震波反射法等开展超前地质预报，精准预测掌子面前方的断层、破碎带及富水区，为隧道安全掘进提供关键地质依据。复杂地形隧道地质风险探测已逐步突破传统单一地面测线识别的局限，开始向复杂地形适应性电磁探测、三维异常定位及风险分区评价相结合的综合化方向发展（Cheng et al., 2024）。

在隧道工程物探方法体系中，CSAMT 由于探测深度较大，探测精度较高，对保障地质安全具有最为关键的作用。然而，传统 CSAMT 的应用止步于物性异常识别，难以直接转化为工程所需的围岩等级参数。文章对于完成的中石化新疆煤制天然气外输管道工程（新气管道）中多条隧道的 CSAMT 成果进行分析，提出了根据

CSAMT 直接进行围岩等级判定与深大隧道破碎带判定方法。

2.1.1 CSAMT 围岩等级判定

通过勘察规范中围岩等级判定的影响因素与电阻率影响因素对比可知，岩体结构程度、地下水等同时决定围岩等级与电阻率（张志宏等，2012；张濡亮，2022；朱飞飞，2025）。当一处隧道位置确定后，隧址处的地下水矿化度、岩体内矿物成分、隧址区温度影响等都是基本恒定的。因此，CSAMT 成果与隧道定量的围岩分级之间，存在必然的关联性。以新气管道工程福建省某隧道工程为例，图 5 为电阻率与围岩等级关系图，可知当隧道存在一定背景电阻率值的情况下，隧道的围岩等级与电阻率趋势具有较高相关性，且电阻率对于隧道围岩等级变化较为敏感。

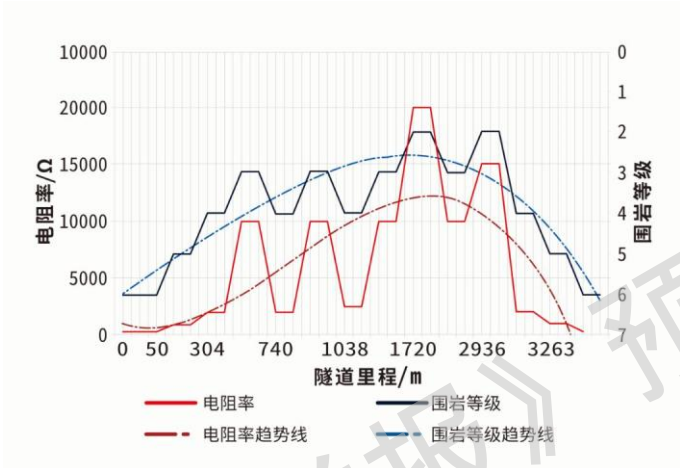
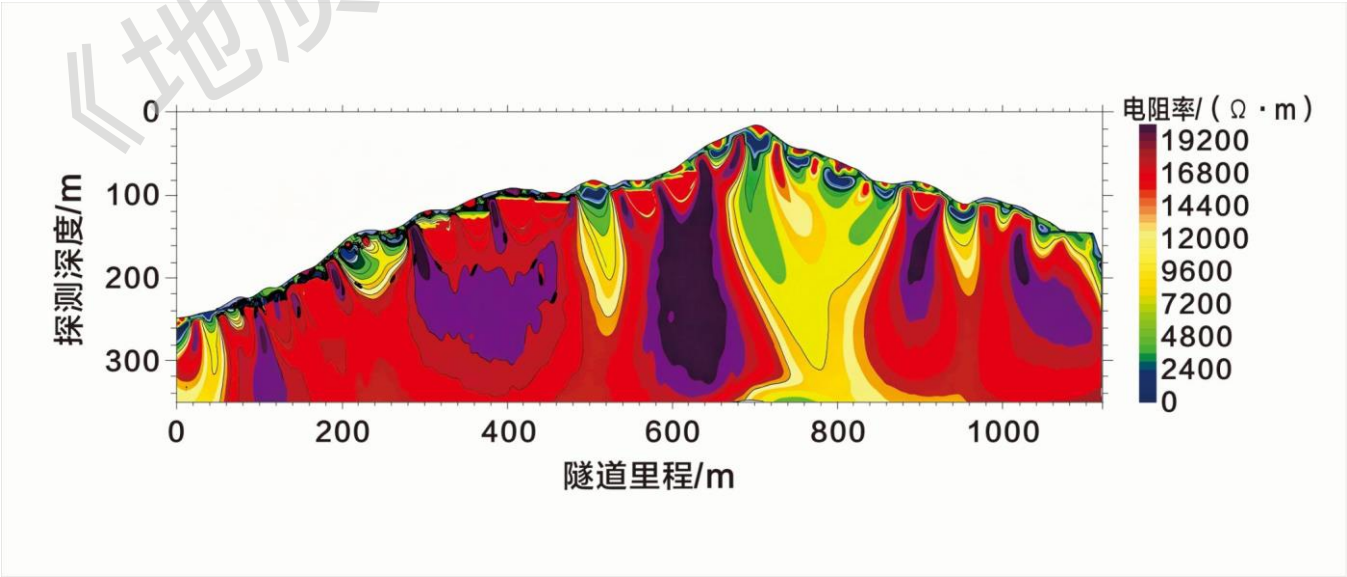


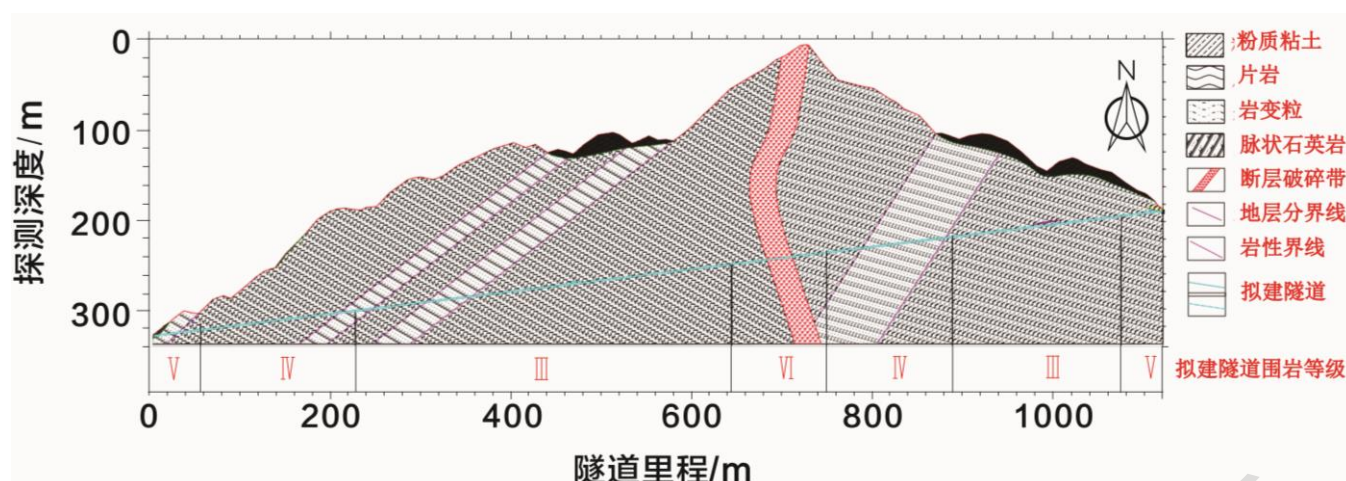
图 5 新气工程福建省某隧道电阻率与围岩等级关系图

Fig. 5. Relationship between electrical resistivity and surrounding rock mass classification for a tunnel of the New Gas Project in Fujian Province

根据 CSAMT 探测结果推断隧道围岩等级，主要根据电阻率断面图中的电阻率值大小、电阻率值变化大小（梯度）和低阻异常形态等特征，结合地质及钻探资料，可以宏观地对隧道围岩级别进行划分。对新气管道工程福建省某隧道进行 CSAMT 数据采集与处理，获取视电阻率反演结果并进行隧道围岩等级划分结果如图 6。



(a) CSAMT 成果图



(b) 围岩等级划分示意图

图 6 新气工程某隧道 CSAMT 探测结果

Fig. 6. CSAMT survey results for a tunnel section of the New Gas Project

(a) CSAMT survey results; (b) surrounding rock classification

根据围岩划分结果可知，随着深度增加，围岩等级逐步减小，表明围岩随深度由破碎-较破碎-较完整-完整的变化过程。对应电阻率随深度变化规律为高-低-高变化。通过钻孔与实际施工开挖所得地质情况对比可知，围岩等级划分合理。

2.1.2 CSAMT 深大隧道破碎带判定

深大隧道破碎带 CSAMT 法判译技术核心，在于分析隧道轴线穿越区域卡尼亚视电阻率变化情况，并绘制电阻率与相邻电阻率比值的曲线，对电阻率比曲线及其趋势线进行分析，判定是否存在破碎带及破碎带的规模等。

以 2.1.1 节新气工程某隧道为例，该隧道 CSAMT 成果中，较为明显的是在穿越高程最高点，深部及地表形成一个贯通的连续低阻异常区。此次探测设置了 5 条平行测线，通过探测结果（图 7）可知，该低阻区在空间范围内发育，每条测线均存在低阻异常区。结合工程区域地质资料，该隧道穿越区可能存在断层发育区，通过对隧道轴线的电阻率结果进行分析（图 8），可以判定通过隧址区内断层发育位置。

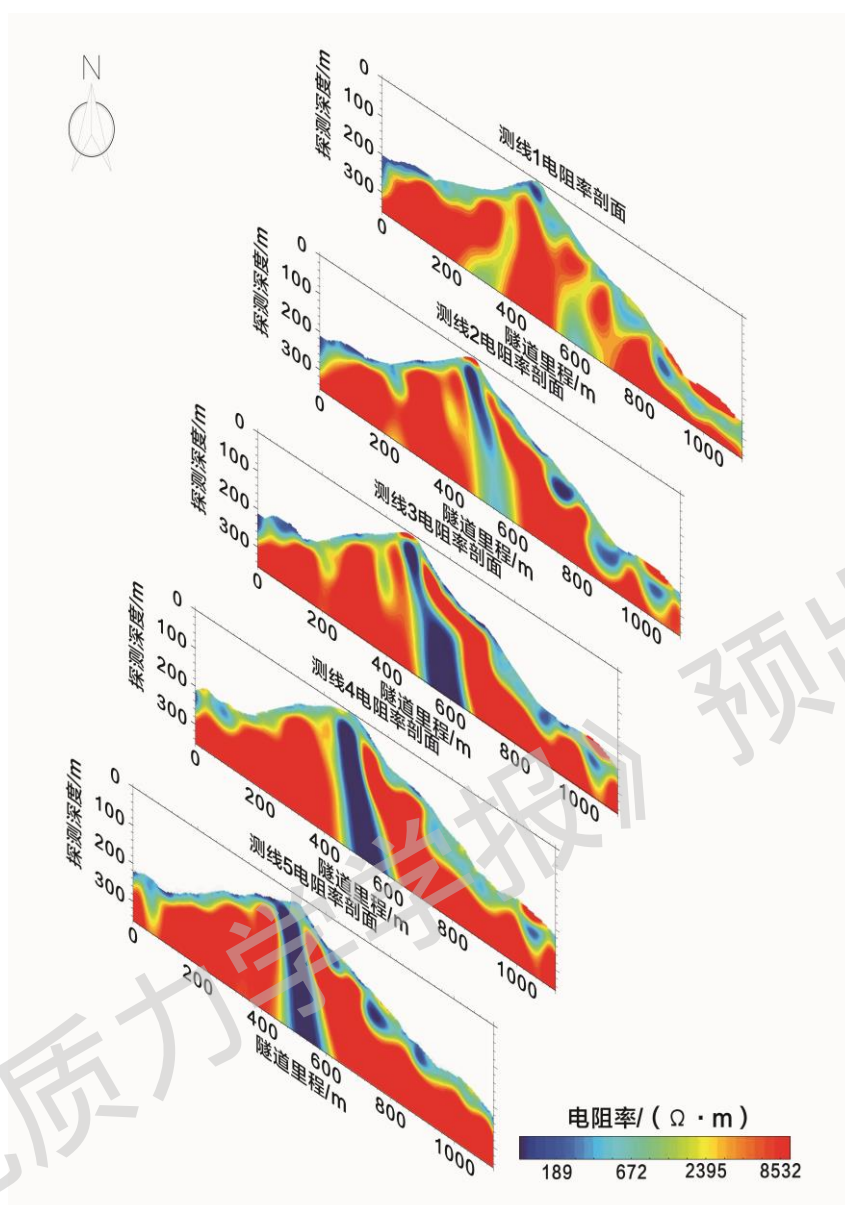


图 7 平行测线 CSAMT 成果切片图

Fig. 7. Slice map of CSAMT survey results along parallel measurement lines

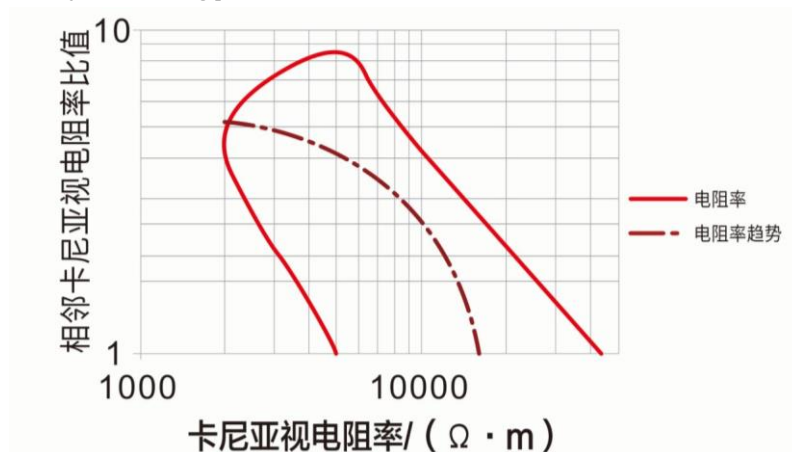


图 8 隧道轴线 CSAMT 判译破碎带曲线图

Fig. 8. Curve map of fracture zones interpreted from CSAMT data along the tunnel axis

通过 CSAMT 进行围岩等级与深大隧道破碎带判定，填补了钻探工作以外地段的地质“空白”，形成的二维隧道反演断面可以对隧道的洞身的围岩等级、地下水发育特征及断层、破碎带、断裂带做出客观的评价和分析，为隧道的设计、施工提供了科学的依据。

2.2 线路勘察应用

在传统油气长输管道线路勘察中，由于管道线路埋深往往较小，常采用高密度电法快速普查浅部地质结构及隐伏不良地质体，浅层地震反射波法可以获取覆盖层厚度及基岩面起伏形态，地质雷达可以实现精细探测浅表管线及空洞。现阶段线路勘察更重视将无人机地球物理遥感、航空电磁探测与多源数据融合技术应用于复杂地形区和大范围线性工程走廊的快速普查，以提升地质异常识别效率和区域风险判识能力（Dadrass Javan et al., 2025）。

对于复杂地质问题，需要进行深部构造探测。某 LNG 接收站配套外输管道工程通过矿井区域，对管道建设和安全运营有重大影响，需开展采空区专项勘察。由于探测目标埋深较大，勘察过程中采用了二维地震（图 9）、微动探测（图 10）、重力勘探（图 11）等方法，对采空区进行了有效判定，对于地层划分、断裂带的解释均有着明显的效果。

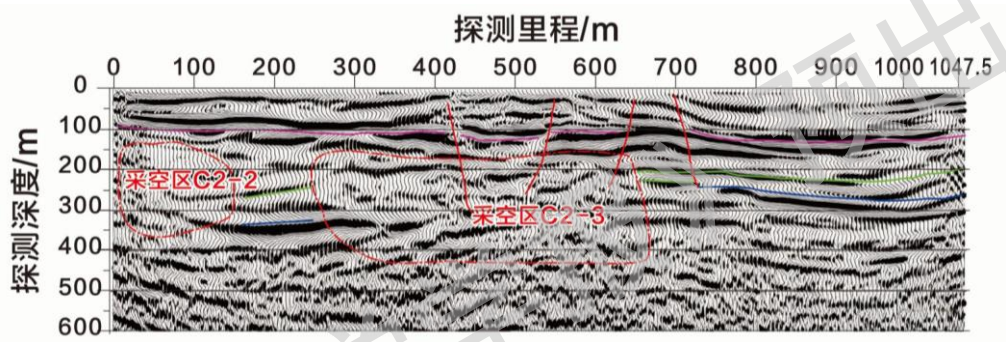


图 9 二维地震勘探探测结果与采空区判定
Fig. 9. 2D seismic survey results and interpretation of goaf areas

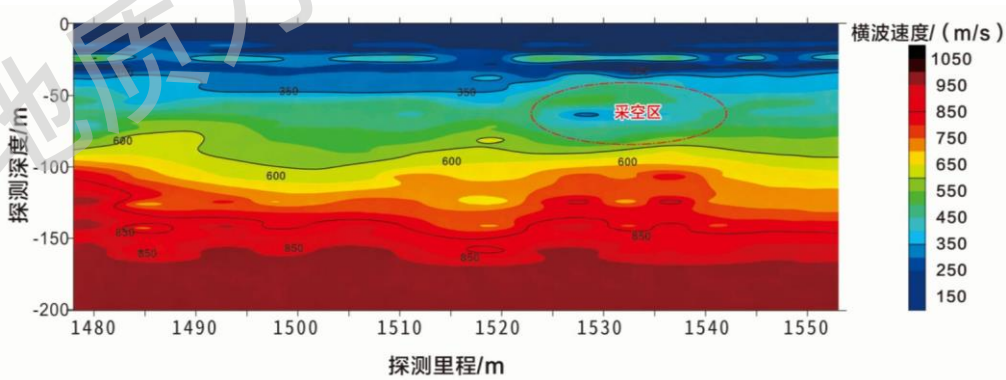


图 10 微动探测结果与采空区判定
Fig. 10. Microtremor survey results and interpretation of goaf areas

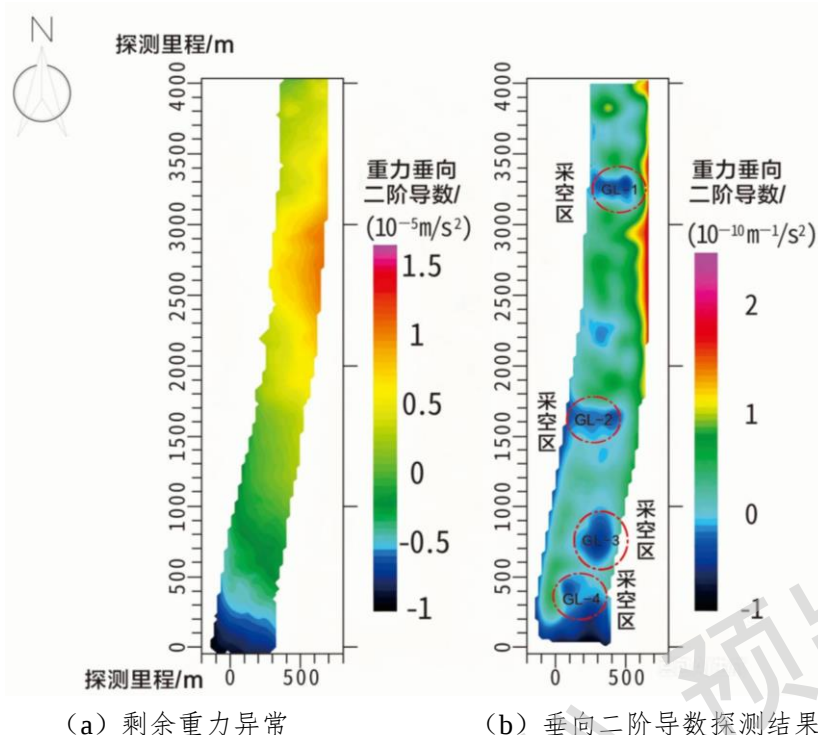


图 11 重力勘探结果

Fig. 11. Gravity survey results

(a) Residual gravity anomaly; (b) vertical second derivative, with interpretation of goaf areas

2.3 地灾勘察应用

在油气长输管道地质灾害勘察中，针对滑坡勘察，高密度电法和浅层地震反射波法可有效探测滑体厚度、滑面形态及地下水分布；对于崩塌体，地质雷达可快速查明崩塌堆积体的厚度及基岩面起伏；在采空区和岩溶塌陷区，高密度电法与跨孔地震 CT 相结合能精细圈定空洞及塌陷范围（王桦和纪洪广，2010；尚耀军等，2013；柴伦炜等，2021；彭勃等，2025）；针对活动断裂，浅层地震反射波法和可控源音频大地电磁法可查明断裂的产状、性质及上断点埋深。现阶段，复杂地形区地质风险识别正逐步向“遥感判识-航空/地面物探-钻探验证-动态监测”一体化方向发展，并通过无人机物探、三维电磁成像和多源数据综合解释，提高滑坡、岩溶、断裂等灾害体的空间识别精度与风险判识能力（Wang et al., 2018；Hussain et al., 2022；Xu et al., 2023）。

根据新气工程广西段某岩溶发育区高密度电法探测结果（图 12），可以清晰划分上覆地层与基岩，并识别可能存在的岩溶区域。在桩 LL196 段剖面下部灰岩区存在低阻条带区，推测该区域岩体溶蚀作用较强，溶蚀裂隙多有发育，存在溶洞、溶洞等不良地质情况可能性较大。地灾勘察中常采用多方法综合探测、点线面相结合的技术思路，通过物探成果与地质调绘、钻探相互验证，实现对地质灾害体的三维精细刻画。

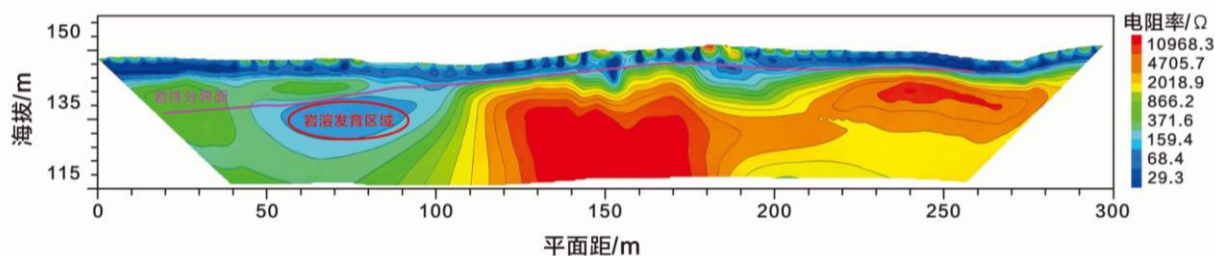


图 12 高密度电法岩溶探测结果

Fig.12. Detection results of karst using electrical resistivity tomography

2.4 炼化工程应用

在油气长输管道炼化项目勘察中，针对覆盖型岩溶发育区，常采用高密度电法进行快速普查，圈定岩溶异常范围。对于重点异常区，则进一步运用跨孔电磁波 CT 或弹性波 CT 进行精细探测，定量刻画溶洞的形态、规模及空间展布。同时，地质雷达可用于浅层地下管线及浅部结构探测，而浅层地震法则有助于查明基岩起伏及覆盖层厚度（蒋辉等，2024；张皓月，2026）。在中国石化天津液化天然气 LNG 项目三期工程中，需要对某工程区段进行近地表结构探测，采用探地雷达方式（图 13），可以有效对地下管道及其他埋藏物进行识别。国外大型工业场地及城市地下空间勘察更加重视非侵入式精细探测与地下设施信息的数字化管理，其中探地雷达已被用于地下管线和埋藏设施的自动化识别、定位与三维可视化（Lai et al., 2018；Safaan et al., 2025）。

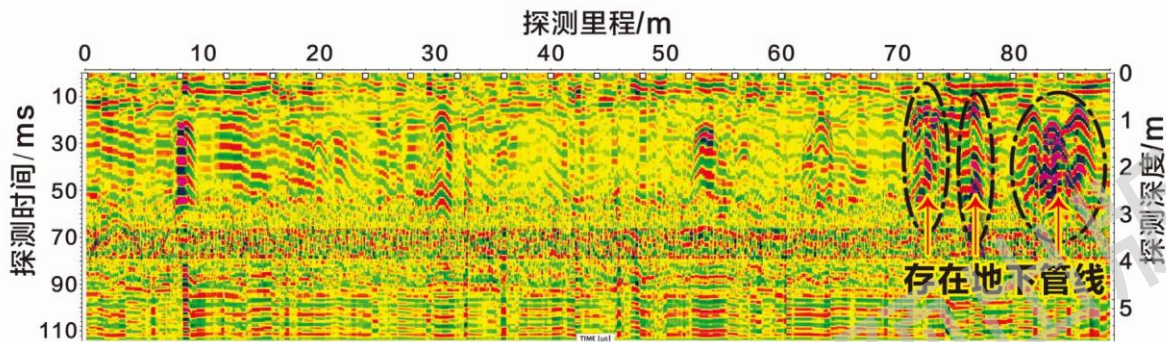


图 13 某炼化工程探地雷达探测结果

Fig. 13. GPR survey results for a refining and petrochemical engineering project

2.5 地下工程应用

在油气地下工程勘察中，由于场地比较集中且对于探测精度要求较高，工程物探方法需遵循多方法协同的总体思路。首先通过科学设计测网，布设可控源音频大地电磁法或地震反射波法进行大范围深层探测，实现对整个地下工程场区地质结构与断裂构造的整体控制（图 14）；针对可控源音频大地电磁法圈定的电阻率异常区域，采用高密度电法进行加密探测与复核，并结合浅层地震勘探等手段，实现对异常体的形态、规模及边界精细刻画，完成由面及体的整体探测；最后，在关键异常部位布设钻孔，实现深部岩体完整性、密封性及水封条件的高精度三维定量评价。在地下储库和地下储氢等国际前沿领域，国外研究已从单纯的储库勘察逐步拓展到盖层完整性、地质力学稳定性、注采循环响应和长期安全监测的综合评价（Miocic et al., 2022；Ramesh Kumar et al., 2023；Priolo et al., 2024；Qian et al., 2025）。

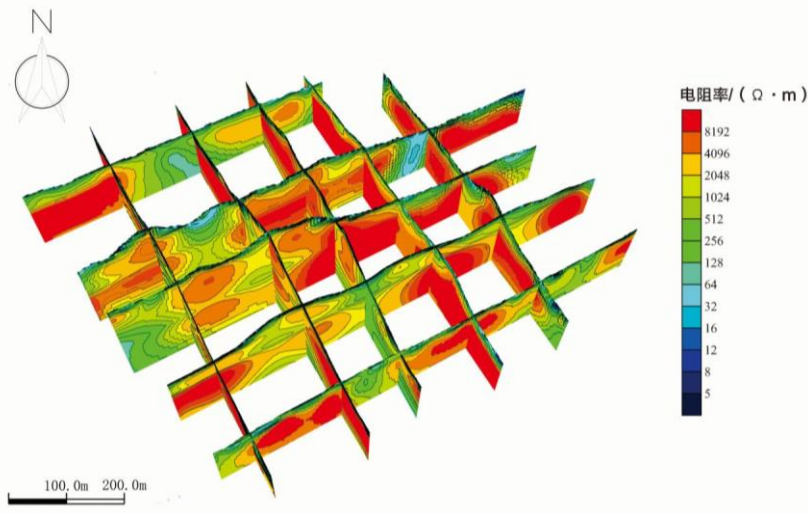


图 14 某地下工程可控源音频大地电磁法探测三维展示图

Fig. 14. Three-dimensional visualization of CSAMT survey results for an underground engineering project

2.6 工程物探技术面临的难点与需求

尽管物探技术在油气工程中已广泛应用，但面对日益复杂的工程条件和不断提高的技术要求，仍面临以下主要难点：

（1）复杂地形适应能力有待提升。油气工程常穿越高山峡谷、深切沟谷、河流漫滩及沼泽等复杂地形区域，传统地面物探方法施工困难、施工效率低、安全风险高。

（2）勘探效率与三维成像能力不足。传统二维剖面式探测难以满足工程对三维地质模型的迫切需求，而三维勘探成本高、数据量大，需要发展高效三维采集技术与自动化处理解释流程。

（3）深层探测精度不足。随着地下储库向更深层发展，对深层目标的分辨能力成为制约勘察质量的关键因素，需要发展深井观测、多尺度联合反演等技术。

（4）实时动态监测手段匮乏。在已建成运营的油气工程项目中，现有监测手段覆盖范围、定位精度及成本效益方面尚存不足。

3 油气工程建设地球物理勘探技术展望

大型油气工程建设场景下，复杂地形区勘探可达性不足、强噪声下处理效率偏低、深层目标刻画能力有限、实时监测缺失，仍是制约物探发展的关键问题。面向上述瓶颈，未来技术发展主要体现在四个方面：依托无人机平台提升复杂区勘探可实施性与安全性；借助人工智能提高复杂数据下的处理与反演效率；构建空-地-井联合观测体系发展三维联合反演；结合分布式光纤与被动源探测实现实时监测。因此，数据获取能力提升、反演智能化、解释一体化与实时监测，构成物探技术发展的主要方向。

3.1 无人机电磁勘探技术

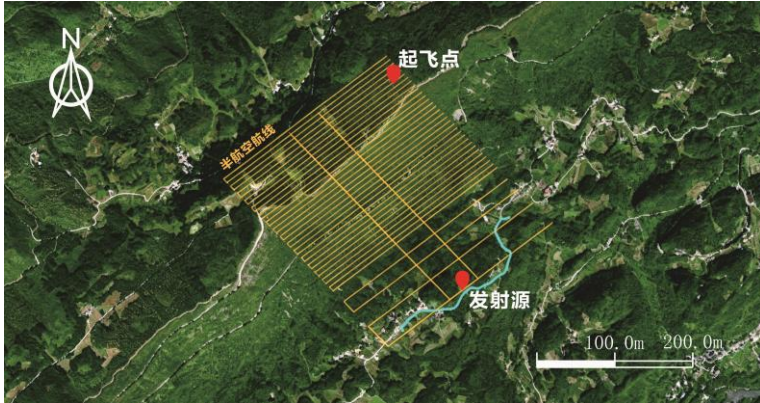
大型油气工程建设往往分布于山地、丘陵沟壑及森林覆盖区等复杂地形区域。受地形起伏大、交通条件差和作业环境复杂等因素影响，传统地面物探在此类地区普遍面临测线布设困难、设备运输受限、现场作业风险高和勘探效率低等问题，严重制约了工程勘察工作的开展。

随着无人机平台、导航定位与飞行控制技术的发展，物探观测平台由地面向空中拓展，为复杂地形区勘探提供了新的技术路径（彭国民和刘展，2020；Almpanis et al., 2025；Shi et al., 2025；Xie et al., 2025）。相较于传统地面物探方法，无人机平台较少依赖地面通行条件，可快速覆盖测区，降低人员进入高风险区的频率，具有机动性、高效性与安全性优势。在此基础上，国内以无人机搭载接收系统或发射接收一体化的无人机半航空瞬变电磁和无人机全航空瞬变电磁等新型装置形式应运而生，进一步拓宽了瞬变电磁法的应用场景（林君等，2021；Sun et al., 2023；Mörbe et al., 2026）。从国外研究进展看，无人机地球物理遥感已不再局限于单一航磁或航空电磁测量，而是向多传感器集成、自动航线规划、复杂地形自适应采集和快速反演解释方向发展（Dadrass et al., 2025；Zhong et al., 2026）。

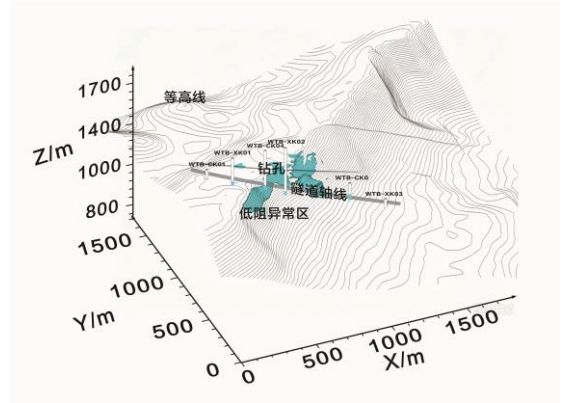
无人机半航空瞬变电磁法采用“地面发射空中接收”的装置形式，通过地面发射源激发地下瞬变电磁场，由无人机搭载接收系统对地下感应二次场进行连续观测。无人机全航空瞬变电磁法采用“空中发射空中接收”的装置形式，此方法无需地面布设发射装置，从根本上降低了对地面发射布设条件的依赖（马洪翔等，2024）。该方法兼具半航空瞬变电磁灵活机动、探测范围广等优点，可显著提高复杂地形区作业可实施性和快速部署能力，更有利于解决极复杂地形条件下的勘察难题。然而，受限于无人机平台载荷与供电能力，难以搭载大功率的发射设备，其探测深度和深部目标识别能力常弱于半航空，同时由于空中发射空中接收的装置形式，无人机飞行姿态稳定性以及发射接收耦合噪声对数据质量影响更明显，对后期全航空数据处理的要求更高，难度更大。

以川气东送二线工程某隧道为试验区，针对隐伏溶洞及相关岩溶异常体开展探测试验。该区地形起伏大、地表条件复杂，是复杂山地长输管道隧道工程的典型代表。为实现多测线快速部署并获取三维电阻率分布特征，采用无人机半航空瞬变电磁测量技术（图 15a），使探测所需时间由 15 天缩短为 3 天。结果表明，在隧道出口段显示明显低阻覆盖层，地下 50~200m 范围内存在相对富水的低阻层（图 15b）。验证了该方法适应复杂地形，

能有效识别隐伏不良地质体，具有工程应用潜力。



(a) 测线布置



(b) 异常区域三维定位

图 15 半航空瞬变电磁探测

Fig. 15. Semi-airborne transient electromagnetic (SATEM) survey

(a) arrangement of survey lines; (b) 3D positioning of anomalous areas

半航空模式在探测深度与复杂环境适应性之间实现了较好平衡，全航空模式则在极复杂区域的快速部署与安全保障方面更具潜力。随着无人机技术不断升级，复杂场景下海量、多维度物探数据的高效处理与快速解释将成为下一阶段需要突破的问题，这也为人工智能辅助反演与智能解释技术发展提出了现实需求。

3.2 人工智能深度学习数据处理与反演

随着工程物探目标不断向复杂地质条件、深部结构识别与快速精细评价方向发展，地球物理数据呈现出规模大、多通道、多类型和高非线性的特征，传统依赖人工经验和迭代优化的处理解释模式正面临效率与精度的双重挑战。在此背景下，人工智能成为推动物探处理、反演与解释模式变革的重要手段（廖绮等，2024）。从国外人工智能物探研究进展来看，相关研究正由单纯依赖数据驱动模型，逐步转向融合物理约束、可解释机制、跨区域泛化能力和不确定性量化的智能反演方法，以增强复杂地质条件下反演结果的稳定性、物理一致性和工程解释可靠性（Schuster et al., 2024; Wu et al., 2024）。

人工智能在工程物探中的应用已逐步覆盖数据处理、异常识别、参数反演和综合解释等多个环节。在数据处理方面，人工智能方法可用于去噪、特征提取和数据重建；在异常识别与结果解释方面，机器学习和深度学习能够从复杂观测数据中自动提取异常特征，实现目标识别与类型判别；在反演成像方面，人工智能通过学习观测响应与地下物性参数之间的非线性映射关系，为快速反演和智能成像提供了新的技术路径。

在上述应用中，反演效率提升是人工智能优势最为突出的方向之一。传统反演方法通常依赖反复正演计算与迭代优化，在复杂模型和大规模数据条件下存在计算量大、耗时长以及对初始模型依赖较强等问题。相比之下，深度学习方法能够通过训练建立观测数据与地下参数之间的映射关系，在完成训练后实现由数据到模型参数的快速预测，从而显著减少传统反演中的迭代求解成本（Raiche, 1991; Calderón-Macias et al., 2000）。航空物探快速反演是人工智能典型应用场景之一。航空瞬变电磁探测具有覆盖范围广、数据量大和解释时效要求高等特点，传统方法在此类数据处理中往往难以兼顾效率与精度，而深度学习方法能够实现响应数据到地下电性参数的快速映射，并兼顾较高的反演精度（殷长春等，2018）。因此，在当前算力条件持续提升的背景下，将人工智能方法引入航空瞬变电磁三维反演，对提高反演效率、支撑复杂区域快速解释具有重要意义。

选取美国地质调查局（USGS）公开的 2019 年 San Juan–Silverton Caldera 地区调查数据进行测试。该区热液蚀变作用强烈，浅部 50~150m 范围内发育与地下水活动相关的导电构造。基于 4 条间距约 100m 的测线公开一维反演结果，构建研究区三维电阻率模型。结果显示，研究区浅部整体为低阻、深部电阻率逐渐增大，这与区域地质认识基本一致。不同测线对比结果表明，采用 ATEM3D-Net 能够较好恢复主要异常体位置、形态及电阻率分布，虽对局部小尺度异常识别仍有限，但总体上具有较好的鲁棒性和实际应用潜力（图 16）。

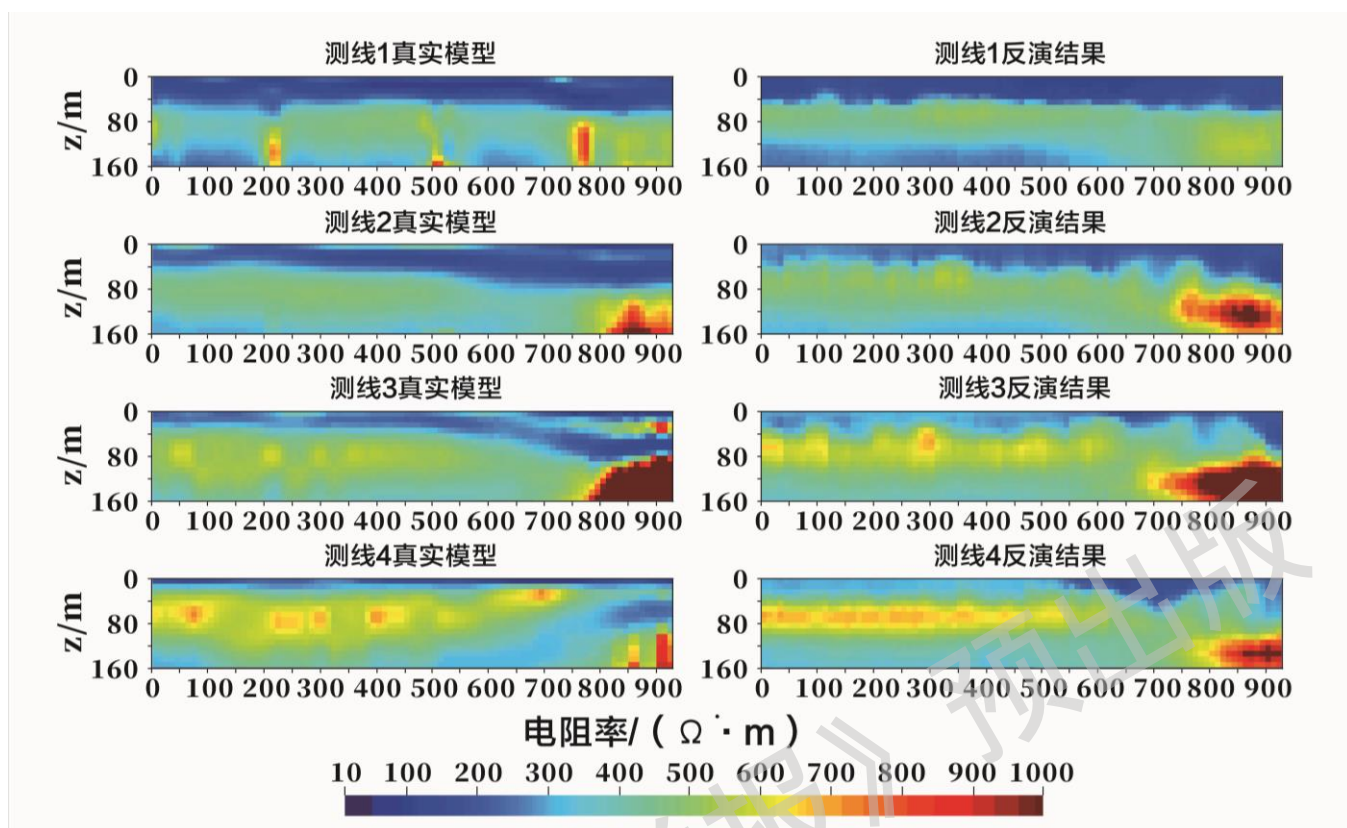


图 16 不同测线的反演结果与真实模型的对比分析(数据来源 Zhang et al., 2025b)

Fig. 16. Comparison of inversion results and true models for different survey lines (after Zhang et al., 2025b)

深度学习方法在航空瞬变电磁反演中已显示提高效率与保持精度的潜力，但面对地球物理问题的强非线性和多解性，现有方法仍存在泛化能力不足、物理约束不强以及局部异常刻画能力有限等问题。未来研究应进一步加强地球物理机理约束与深度学习模型的结合，提升复杂地质条件下三维反演的稳定性、可靠性和解释性，并为后续多平台、多源数据联合反演提供高效处理基础。

3.3 空-地-井联合反演与三维深层精细探测

随着资源勘探、油气开发及工程探测目标不断向深部、隐伏和精细化方向发展，单一物探手段获取的数据已难以同时满足大范围覆盖、高分辨率及确保参数稳定性反演等综合需求 (Colombo and Rovetta, 2018; 彭国民和刘展, 2020; 刘明宏等, 2022)。在复杂构造区和深层目标体探测中，不同观测平台在探测尺度、空间位置和异常响应特征等方面存在显著差异，多平台联合探测已成为联合反演进一步发展的重要方向。

空-地-井联合反演的核心在于综合利用航空、地面和井中观测资料的互补优势，构建多尺度、多空间层次的数据约束体系 (程铭等, 2025; Zhang et al., 2025a; 徐凯军等, 2026)。航空观测覆盖范围广、效率高，并对深部和区域性异常响应较为敏感，能够提供大尺度背景信息 (林君等, 2021; Sun et al., 2023; Shi et al., 2025; Xie et al., 2025)；地面观测具有较高的局部分辨能力，有利于刻画浅层中部结构细节 (齐彦福等, 2021; 杜冬冬等, 2025)；井中观测由于接近目标体，通常具有更强的垂向约束能力和更高的原位真实性 (岳建和姜志海, 2006; 孙怀凤等, 2022; 徐凯军等, 2026)。三类手段相互补充，使联合反演兼顾区域背景、局部细节与近目标约束 (图 17)。从国外多平台联合探测研究看，航空、地面和井中观测资料的联合解释正由经验性对比向多参数耦合约束、交叉梯度约束和不确定性分析方向发展，强调利用不同观测尺度之间的互补性降低反演多解性 (Li et al., 2026)。

空-地-井联合反演通常涉及大规模三维网格剖分、多源异构数据匹配以及高维参数优化，其计算规模和求解难度显著高于传统单一平台或二维反演方法。尤其在深部探测中，为兼顾探测范围与成像精度，反演模型往往需要更大的空间尺度和更精细的离散单元，这进一步增加了正反演计算量和存储需求 (王亮等, 2024; 宋昊

博等，2026）。近年来，随着高性能计算、并行计算、快速正反演算法、智能优化方法以及人工智能辅助反演技术的发展，多源异构数据的大规模三维联合反演逐渐具备实现条件。算力提升为复杂模型求解提供了计算基础，算法进步则提高了反演效率、稳定性和收敛能力，二者共同推动空-地-井联合反演由以往以二维或局部约束为主的研究模式，逐步发展为面向复杂深部目标的三维精细成像方法（敬荣中等，2003；韦老闹等，2025）。

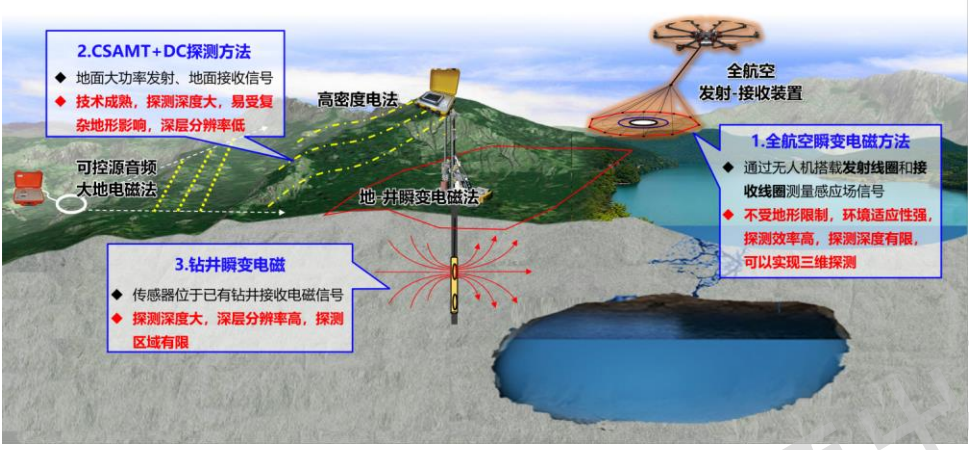


图 17 空-地-井联合探测体系方案示意图

Fig.17. Schematic diagram of the air-ground-well joint detection system

尽管空-地-井联合反演在三维深层精细探测中展现出良好应用前景，但其工程化应用仍面临若干瓶颈。首先，不同平台数据在采样尺度、噪声特征、分辨率及坐标体系上的差异较大，资料匹配和统一建模难度高。其次，联合反演目标函数设计、参数耦合方式及权重分配仍缺乏统一标准，不同数据之间可能出现“强约束压制弱信息”的问题。再次，三维联合反演计算量大，对高性能计算与高质量先验模型依赖较强。现有研究表明，未来发展可重点关注基于多物理场耦合约束的三维联合反演、地质先验驱动的结构约束反演，以及融合人工智能的快速正反演与智能解释方法，以实现深层目标的高分辨率、低多解性成像。

3.4 地质实时监测技术

随着大量油气工程建设完成并投入运营，地质安全实时监测的需求日益迫切。长输管道沿线穿越活动断裂、采空区、滑坡及冻土区，实时监测可及时发现变形与应力异常；炼化工程中地基沉降或岩溶塌陷直接威胁安全，需及时发现变形前兆；地下储库需持续监控盖层密封性与断层稳定性。因此，建立地质安全实时监测体系，已成为保障油气工程长期稳定运行的关键任务。

地质安全实时监测存在特殊的技术要求，必须采用无损化、实时化、可连续采集的物探技术。由于工程建成后无法布设固定的主动地震震源或电磁发射源，且炼化厂区、管道站场及地下库区周边存在强烈的工业电磁干扰，传统有源电法与主动源地震方法均难以有效实施。在此背景下，被动源地震监测已成为可行的技术路径。该方法无需人工激发信号，仅通过布设高灵敏度地震仪或检波器阵列，接收自然界及人类活动产生的被动地震信号，从中提取面波频散信息或进行微震定位，实现对地质体状态的实时监测，可以为已建油气工程的地质安全评估提供关键技术支撑。

随着光纤光栅技术的发展，分布式声传感系统（DAS）在被动源数据采集中开始大规模应用（林融冰等，2020），该采集方式更加高效，且可以实现实时数据传输与分析，且成本较低，布设方便，成为地质安全监测的新选择。DAS 技术的第一次应用为 Martin et al.（2016）在阿拉斯加州通过分布式光纤传感器进行了车辆源地震记录成分分析。Yuan et al.（2020）记录了低频的天然地震数据与车辆震源产生的高频数据，改善了频散成像的结果。Czarny and Zhu（2022）提出了基于城市移动源地震记录的 DAS 数据处理流程。国外 DAS 研究已在地球物理勘探、城市近地表成像和油气管道泄漏监测等方向形成较系统的应用体系，相关研究围绕单模/多模光纤适用性、管道泄漏检测和复杂环境监测等方面开展了深入探索，表明该技术正由单一数据采集手段逐步向工程风险识别和运行状态诊断工具转变（Rafi et al., 2024; Benabid et al., 2025）。DAS 技术在国内也取得了较多发展，主要应用方向为车辆震源等城市被动源信号的近地表勘探（Cao et al., 2022; Mi et al., 2022），图 18 为某隧道

上覆地层被动源监测探测结果，通过被动源数据采集、频散曲线提取与近地表速度结构反演，可以实现近地表地质实时监测。

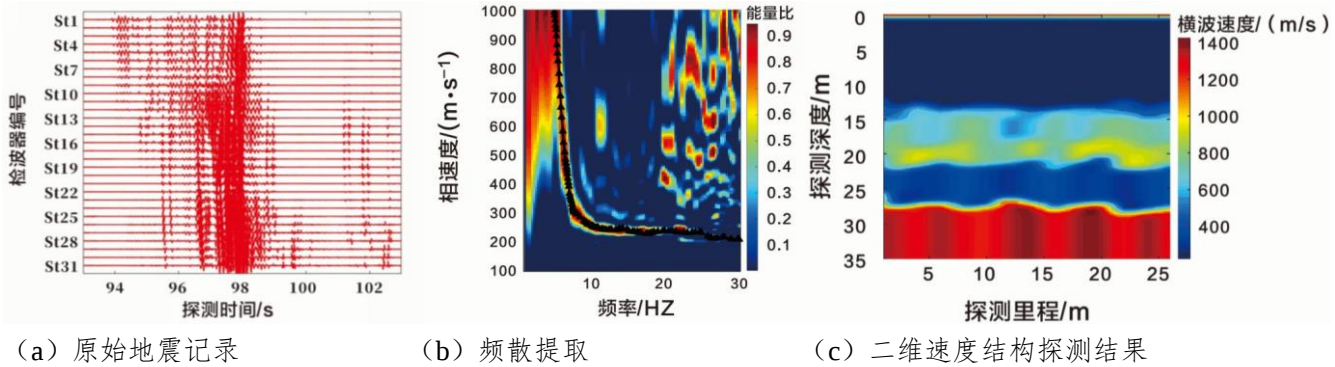


图 18 被动源监测探测成果 (Wang et al, 2024)

Fig. 18. Detection results from passive source monitoring (after Wang et al., 2024)

(a) raw seismic data, (b) dispersion curve extraction, (c) 2D velocity structure inversion results

分布式光纤声波传感技术凭借其成本低、布设便捷、空间采样率高等优势，已在城市近地表结构探测与地下空间成像方面开展了大量成功实践，可以满足地质安全监测的工程需求。尤其在油气工程领域，已部署了以光纤为载体的各类检测设备，如管道泄漏监测、应变与温度传感系统等，这些设施为 DAS 技术的推广应用提供了便利条件，通过“一纤多用”即可实现数据实时采集。因此，DAS 技术正成为实现油气工程地质安全监测极具潜力的新路径。

4 结束语

在大型油气工程勘察过程中，长输管道需查明沿线不良地质体分布，炼化工程需精准评价地基条件，地下储库则需查明深部岩体完整性、密封性及水封条件。由于大型油气工程对地质勘察的精度、深度和效率要求在持续提升，传统钻探等勘察手段在复杂地形适应性、空间连续性和成本工期等方面已难以全面满足工程需求。

工程物探技术凭借无损化、效率高、可三维成像的优势，已成为油气工程勘察中的重要环节。通过多物探方法合理组合，可以为大型油气工程建设提供合理的地质参数。尽管工程物探技术在油气工程建设中已取得广泛应用，但面对日益复杂的工程条件和不断提高的技术要求，仍面临诸多困难，主要表现为：传统地面物探方法施工困难、效率偏低且安全风险较高，复杂地形适应能力有待提升；三维勘探成本高、数据量大，需要发展高效采集技术与自动化处理流程；深层探测精度不足制约了地下工程的勘察质量；已建运营工程缺乏实时动态监测手段等。

通过传统物探技术与现代科技的结合可以实现工程物探技术的有效提升。无人机电磁勘探技术可有效提升复杂地形区的作业安全性与探测效率；人工智能深度学习方法有望大幅提高数据处理与反演的计算效率；空-地-井联合高效反演技术为深层目标的三维高精度成像提供了技术路径；分布式光纤声波传感 (DAS) 技术凭借低成本、易布设及可实时传输等优势，为已建油气工程的地质安全监测开辟了新途径。可以预见，工程物探技术正朝着智能化、多维化、实时化的方向加速演进。

综上，工程物探技术在大型油气工程建设中发挥着日益重要的作用。从勘察阶段的精准探测到运维阶段的实时监测，物探技术的进步将为保障国家能源安全与工程长期稳定运行提供更加坚实的技术支撑。

作者贡献声明：荆少东、闫月锋负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；马学东、孙怀凤、闫月锋参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图；马学东、闫月锋参与数据分析和研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: JING Shaodong and YAN Yuefeng conceived the study, performed data analysis, designed the

research methodology, and drafted the manuscript; MA Xuedong, SUN Huaifeng and YAN Yuefeng participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; MA Xuedong and YAN Yuefeng were involved in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。 Conflict of Interests : All authors declare no conflict of interests.

Reference

- ALMPANIS A, MCLACHLAN P, GROMBACHER D, et al., 2025. Synthetic evaluation of two semi-airborne transient electromagnetic (TEM) systems utilizing inductive and galvanic sources in hydrogeological settings[J]. *Geophysical Journal International*, 244(2): ggaf467.
- BENABID M K, BAUMGARTNER P, JIN G, et al., 2025. Leakage detection using distributed acoustic sensing in gas pipelines[J]. *Sensors*, 25(16): 4937.
- BING Z, GREENHALGH S A, 2000. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations[J]. *Geophysical Prospecting*, 48(5): 887-912.
- CALDERÓN-MACÍAS C, SEN M K, STOFFA P L, 2000. Artificial neural networks for parameter estimation in geophysics[J]. *Geophysical Prospecting*, 48(1): 21-47.
- CAO W P, HUANG X R, HU Y Z, et al., 2022. Improving seismic interferometry for traffic noise by wavefield decomposition and deconvolution[C]//Second international meeting for applied geoscience & energy. Houston, Texas: Society of Exploration Geophysicists and the American Association of Petroleum Geologists: 2076-2080.
- CHAI L W, TANG G Y, WANG G Q, et al., 2021. Application of ultra-high density cross-hole resistivity imaging in the detection of bored pile depth[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 18(2): 252-256. (in Chinese with English abstract)
- CHEN L, GONG Z F, CHEN L, et al., 2026. Tunnel geological forward-prospecting based on an optimized beamforming seismic method[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 247: 106135.
- CHENG K X, YANG Y F, LI S B, et al., 2025. Data-driven: challenges in pipeline risk assessment for oil and gas[J]. *Pipeline Protection*, 2(1): 88-96. (in Chinese with English abstract)
- CHENG M, YANG D K, LUO Q, et al., 2025. Interpretation and application of three-dimensional fast forward and inversion for transient electromagnetic data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 68(1): 342-354. (in Chinese with English abstract)
- CHENG W S, SUN N Q, QI Z P, et al., 2024. The application of GATEM in tunnel geologic risk survey based on complex terrain[J]. *Geophysics*, 89(6): B453-B465.
- COLOMBO D, ROVETTA D, 2018. Coupling strategies in multiparameter geophysical joint inversion[J]. *Geophysical Journal International*, 215(2): 1171-1184.
- CUI Z X, YANG J H, ZHANG Y, et al., 2026. Injection and production mechanisms and operation strategies of CO₂ serving as cushion gas of underground gas storage[J]. *Natural Gas Industry*, 46(2): 178-190. (in Chinese with English abstract)
- CZARNY R, ZHU T Y, 2022. Estimating Rayleigh surface wave from ambient noise recorded by distributed acoustic sensing (DAS) dark fiber array in the city[C]//Second international meeting for applied geoscience & energy. Houston, Texas: Society of Exploration Geophysicists and the American Association of Petroleum Geologists: 2133-2137.
- DADRASS JAVAN F, SAMADZADEGAN F, TOOSI A, et al., 2025. Unmanned aerial geophysical remote sensing: a systematic review[J]. *Remote Sensing*, 17(1): 110.
- DI Q Y, SHI K F, WANG M Y, et al., 2001. Water resources exploration with CSAMT and high density electric resistivity method[J]. *Progress in Geophysics*, 16(3): 53-57. (in Chinese with English abstract)
- DI Q Y, WU F Q, WANG G J, et al., 2005. Geophysical exploration over long deep tunnel for west route of south-to-north water transfer project[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(20): 3631-3638. (in Chinese with English abstract)
- DING G S, LI C, WANG J M, et al., 2015. The status quo and technical development direction of underground gas storages in China[J]. *Natural Gas Industry*, 35(11): 107-112. (in Chinese with English abstract)
- DONG H B, WANG C L, 2003. Development and application of 2d resistivity imaging surveys[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(1): 171-176. (in Chinese with English abstract)

- DONG S W, LI T D, CHEN X H, et al., 2012. Progress of deep exploration in mainland China: a review[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(12): 3884-3901. (in Chinese with English abstract)
- DU D D, SHI T, MA M, et al., 2025. Ground TEM survey for detecting old goaf water in Anshan Coal Mine[J]. China Mining Magazine, 34(S2): 427-431. (in Chinese with English abstract)
- FU J H, DENG X Q, CHU M J, et al., 2013. Features of deepwater lithofacies, Yanchang formation in ordos basin and its petroleum significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 31(5): 928-938. (in Chinese with English abstract)
- FU T G, 2014. Study on technology of comprehensive geophysical method exploration of mine goaf and water accumulated area[J]. Coal Science and Technology, 42(8): 90-94. (in Chinese with English abstract)
- GOES B J M, MEEKES J A C, 2004. An effective electrode configuration for the detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography[J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 9(3): 127-141.
- GUAN Z N, HAO T Y, YAO C L, 2002. Prospect of gravity and magnetic exploration in the 21st century[J]. Progress in Geophysics, 17(2): 237-244. (in Chinese with English abstract)
- GUO K, LI J J, ZHENG X B, 2015. Interlayer treatment process in cavity building for salt cavern gas storage-A case study of Jintan Gas Storage of West-to-East Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 34(2): 162-166. (in Chinese with English abstract)
- HU L L, HE S, ZHANG L, et al., 2025. Based on the design structure matrix optimization of EPC project schedule for petroleum refining engineering[J]. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 61(5): 1204-1211.
- HUSSAIN Y, SCHLÖGEL R, INNOCENTI A, et al., 2022. Review on the geophysical and UAV-based methods applied to landslides[J]. Remote Sensing, 14(18):4564.
- JIANG G Q, SHANG T X, HUANG J J, et al., 2022. Study on the development law of covered karst based on the comprehensive geophysical methods: taking Xuzhou area as an example[J]. Progress in Geophysics, 37(6): 2571-2579. (in Chinese with English abstract)
- JIANG H, ZHAO X P, ZHAO Y G, 2024. Dual channel radar resistivity tomography and its application[J]. Progress in Geophysics, 39(3): 1285-1292. (in Chinese with English abstract)
- JIANG W, HUANG L Q, ZHANG S H, et al., 2025. Advances in research on geological evaluation of compressed air energy storage in under-ground gas storage facilities[J]. Coal Geology & Exploration, 53(8): 62-75. (in Chinese with English abstract)
- JING R Z, BAO G S, CHEN S Q, 2003. A review of the researches for geophysical combinative inversion[J]. Progress in Geophysics, 18(3): 535-540. (in Chinese with English abstract)
- LAI W W L, DÉROBERT X, ANNAN P, 2018. A review of ground penetrating radar application in civil engineering: A 30-year journey from locating and testing to imaging and diagnosis[J]. NDT & E International, 96:58-78.
- LI L, 2013. The application on shallow seismic methods detection in unknown mine goaf[J]. China Mining Magazine, 22(3): 113-116. (in Chinese with English abstract)
- LI P, LUO Y Q, TIAN Y, et al., 2021. Research progress of geophysical exploration technology for deep geological resources[J]. Progress in Geophysics, 36(5): 2011-2033. (in Chinese with English abstract)
- LI S C, LIU Z Y, LIU B, et al., 2015. Boulder detection method for metro shield zones based on cross-hole resistivity tomography and its physical model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 37(3): 446-457. (in Chinese with English abstract)
- LI X Y, ZHAO Q, HU S S, et al., 2026. Introducing complex geometries to Yee cells in FDTD for transient electromagnetic forward modeling[J]. Geophysics, 91(2): F1-F12.
- LI Z R, CHU F, ZHOU Z Y, 2025. Progress and reflection on key equipment for oil and gas engineering of CNPC During the “14th Five-Year Plan” Period[J]. Petroleum Drilling Techniques, 53(6): 48-55. (in Chinese with English abstract)
- LIAO Q, LIU C Y, DU J, et al., 2024. Application and prospect of artificial intelligence in empowering the operation and management of oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 43(6): 601-613. (in Chinese with English abstract)
- LIN J, XUE G Q, LI X, 2021. Technological innovation of semi-airborne electromagnetic detection method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(9): 2995-3004. (in Chinese with English abstract)
- LIN R B, ZENG X F, SONG Z H, et al., 2020. Distributed acoustic sensing for imaging shallow structure II: Ambient noise tomography[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(4): 1622-1629. (in Chinese with English abstract)

- LIN Y, ZHONG H C, CHEN P, et al., 2026. Advances and trends in seismic interpretation techniques for large fan-delta conglomerate reservoirs: a case study of oil and gas exploration in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 61(1): 222-238. (in Chinese with English abstract)
- LIU G F, MENG X H, TAN H D, et al., 2020. Case study: Joint seismic reflection and CSAMT data interpretation for mineral explorations in Fujian, China[J]. *Acta Geophysica*, 68(5): 1373-1385.
- LIU J X, SUN H L, CHEN B, et al., 2016. Review of the gravity and magnetic methods in the exploration of metal deposits[J]. *Progress in Geophysics*, 31(2): 713-722. (in Chinese with English abstract)
- LIU J X, ZHAO R, GUO Z W, 2019. Research progress of electromagnetic methods in the exploration of metal deposits[J]. *Progress in Geophysics*, 34(1): 151-160. (in Chinese with English abstract)
- LIU L, ZHANG S B, QU Z C, 2025. Discussion on the pricing strategy for long-distance oil and gas pipeline projects in the Qinghai-Xizang Plateau region[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 44(12): 1430-1439. (in Chinese with English abstract)
- LIU M H, CAL H Z, YANG H, et al., 2022. Three-dimensional joint inversion of ground and semi-airborne transient electromagnetic method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(10): 3997-4011. (in Chinese with English abstract)
- LIU S, HU X Y, GUO N, et al., 2023. Overview on UAV aeromagnetic survey technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 48(6): 823-840. (in Chinese with English abstract)
- LIU S D, WU R X, ZHANG P S, et al., 2001. High density electric resistance method applied to monitor and measure overburden failure above seam[J]. *Coal Science and Technology*, 29(4): 18-19, 22. (in Chinese with English abstract)
- LIU W, LI Y P, HUO Y S, et al., 2013. Analysis of deformation and fracture characteristics of wall rock interface of underground storage caverns in salt rock formation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 34(6): 1621-1628. (in Chinese with English abstract)
- LIU X D, ZHANG H S, HUANG X C, et al., 2002. The application of high density electrical method to karst geological survey in Yichun City[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 13(1): 72-75. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z Y, LI S C, LIU B, et al., 2015. Boulder detection method based on 3D resistivity cross-hole tomography in metro shield zones and its physical model experimental study[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(12): 2519-2530. (in Chinese with English abstract)
- LUO Q B, YANG Y X, WU X M, et al., 2022. Application of comprehensive radioactive prospecting method on uranium prospecting in Lujing based on Kriging interpolation[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 45(2): 154-161. (in Chinese with English abstract)
- LUO X, XU Z H, LI Z S, et al., 2020. Application of multi-parameter comprehensive geophysical prospecting method in exploration of goaf in coal mines[J]. *Coal Engineering*, 52(2): 32-37. (in Chinese with English abstract)
- LU LV Q T, ZHANG X P, TANG J T, et al., 2019. Review on advancement in technology and equipment of geophysical exploration for metallic deposits in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(10): 3629-3664. (in Chinese with English abstract)
- MA H X, LIU L H, YAN S C, et al., 2024. Unmanned aerial vehicle time domain electromagnetic detection combination pulse launch technology[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 55(10): 3756-3767. (in Chinese with English abstract)
- MA Y S, CAI X Y, ZHAO P R, 2016. The support of petroleum engineering technologies in trends in oil and gas exploration and development-case study on oil and gas exploration in Sinopec[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 44(2): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- MARTIN E, LINDSEY N, DOU S, et al., 2016. Interferometry of a roadside DAS array in Fairbanks, AK[C]//SEG technical program expanded abstracts 2016. Dallas, Texas: Society of Exploration Geophysicists: 2725-2729.
- MI B B, XIA J H, TIAN G, et al., 2022. Near-surface imaging from traffic-induced surface waves with dense linear arrays: An application in the urban area of Hangzhou, China[J]. *Geophysics*, 87(2): B145-B158.
- MIOCIC J M, HEINEMANN N, EDLMANN K, et al., 2022. Underground hydrogen storage: a review[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 528(1): 73-86.
- MÖRBE W, YOGESHWAR P, HOFFMANN E, et al., 2026. Investigation of a graphite deposit with drone-based semi-airborne electromagnetics[J]. *Geophysics*, 91(3): B53-B61.
- PATANWAR Y K, KIM H M, DEB D, et al., 2024. Underground storage of hydrogen in lined rock caverns: An overview of key components and hydrogen embrittlement challenges[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50: 116-133.
- PENG B, QIANG S Y, SHI X Q, 2025. Optimizing 4D hydrogeological process monitoring using cross-hole electrical resistivity tomography(CHERT) via Bayesian

- experimental design[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 44(5): 293-301. (in Chinese with English abstract)
- PENG G M, LIU Z, 2020. An overview of joint electromagnetic-seismic inversion and its future development[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 55(2): 465-474. (in Chinese with English abstract)
- PRIOLO E, ZINNO I, GUIDARELLI M, et al., 2024. The birth of an underground gas storage in a depleted gas reservoir—Results from integrated seismic and ground deformation monitoring[J]. *Earth and Space Science*, 11(11): e2023EA003275.
- QI D S, BA J H, LIU C, et al., 2017. A dynamic monitoring and analysis method for the solution mining process of salt-cavern gas storage[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 36(9): 1078-1082. (in Chinese with English abstract)
- QI Y F, ZHI Q Q, LI X, et al., 2021. Three-dimensional ground TEM inversion over a topographic earth considering ramp time[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(7): 2566-2577. (in Chinese with English abstract)
- QIAN X J, YOU S H, WANG R Z, et al., 2025. Underground hydrogen storage in salt cavern: a review of advantages, challenges, and prospects[J]. *Sustainability*, 17(13): 5900.
- QIN J W, JIANG X T, XIE G C, et al., 2023. Karst exploration in urban complex environments based on electrical resistivity tomography: a case study of Beihuan New Village in Guigang City[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 47(2): 530-539. (in Chinese with English abstract)
- RAFI M, MOHD NOH K A, ABDUL LATIFF A H, et al., 2024. Application of distributed acoustic sensing in geophysics exploration: comparative review of single-mode and multi-mode fiber optic cables[J]. *Applied Sciences*, 14(13): 5560.
- RAICHE A, 1991. A pattern recognition approach to geophysical inversion using neural nets[J]. *Geophysical Journal International*, 105(3): 629-648.
- RAMESH KUMAR K, HONORIO H, CHANDRA D, et al., 2023. Comprehensive review of geomechanics of underground hydrogen storage in depleted reservoirs and salt caverns[J]. *Journal of Energy Storage*, 73: 108912.
- SCHELL C A, LEVER E, GROTH K M, 2023. Strain-based design and assessment for pipeline integrity management: a review of applications and gaps[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 204: 104973.
- SCHUSTER G T, CHEN Y Q, FENG S H, 2024. Review of physics-informed machine-learning inversion of geophysical data[J]. *Geophysics*, 89(6): T337-T356.
- SHANG Y J, HE Y J, HUANG Z L, 2013. The application of cross-hole super-high density resistivity method CT to karst carve exploration[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 10(4): 545-550. (in Chinese with English abstract)
- SHI J J, WU X, WANG Y B, 2025. Study on the detection capability of semi-airborne transient electromagnetic three-component technology for tabular anomalies[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 22(5): 1276-1289.
- SHI L L, REN J J, XING H W, et al., 2025. Application of CSAMT in geothermal resource exploration in western Horqin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 60(S1): 83-86. (in Chinese with English abstract)
- SHI Z J, YAO K, YAO N P, et al., 2020. 40 years of development and prospect on underground coal mine tunnel drilling technology and equipment in China[J]. *Coal Science and Technology*, 48(4): 1-34. (in Chinese with English abstract)
- SONG C C, DENG Z H, NIU C F, 2019. Advances in production of chemicals such as light oilfins from heavy oil[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 38(S1): 86-94. (in Chinese with English abstract)
- SONG H B, JIANG Z H, GUO Q, et al., 2026. Research progress and prospects of joint electromagnetic and seismic inversion methods[J]. *Progress in Geophysics*, 41(1): 156-173. (in Chinese with English abstract)
- SU B Y, LIU S D, DENG L, et al., 2022. Monitoring direct current resistivity during coal mining process for underground water detection: an experimental case study[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 5915308.
- SUN D S, LI A W, YANG Y H, et al., 2025. Research progress and prospects of deep stress measurement technology[J]. *Journal of Geomechanics*, 31(6): 1111-1126. (in Chinese with English abstract)
- SUN H F, ZHANG Y Y, ZHAO Y C, et al., 2022. Present study situation review of borehole transient electromagnetic method[J]. *Coal Geology & Exploration*, 50(7): 85-97. (in Chinese with English abstract)
- SUN H F, ZHANG N Y, LI D R, et al., 2023. The first semi-airborne transient electromagnetic survey for tunnel investigation in very complex terrain areas[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 132: 104893.
- TAN Y F, 2012. Applicable research on comprehensive survey technology of engineering geology for large deeply - buried tunnel[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 29(4): 24-31. (in Chinese with English abstract)

- TARKOWSKI R, 2019. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105: 86-94.
- TIAN W F, HAO J J, YAN J Y, et al., 2010. Application of synthetic geophysical methods to deep exploration of Hanxing-type iron deposit[J]. *Progress in Geophysics*, 25(4): 1442-1452. (in Chinese with English abstract)
- WANG C H, LI W, 2025. Major advances and prospects in in-situ stress measurement and estimation methods over the past 10 years (2014-2025)[J]. *Journal of Geomechanics*, 31(6): 1188-1209. (in Chinese with English abstract)
- WANG D L, ZHOU Z M, LIN M L, et al., 2021. Status and thinking of development constraints of refining to chemical transformation in China[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 40(10): 5854-5860. (in Chinese with English abstract)
- WANG H G, HUANG H C, BI W X, et al., 2021. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: progress and prospect[J]. *Natural Gas Industry*, 41(8): 163-177. (in Chinese with English abstract)
- WANG H, JI H G, 2010. Study on CT prospecting technology by the pole-pole cross-hole direct-current resistivity method[J]. *Progress in Geophysics*, 25(5): 1833-1840. (in Chinese with English abstract)
- WANG J, Sun C, Lin T, et al., 2024. Influence of strong directional sources in ambient seismic imaging using traffic-induced noise[J]. *Geophysics*, 89(4):15.
- WANG L, LIU W, XI Z Z, et al., 2024. Deep learning audio-magnetotelluric and transient electromagnetic joint inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 67(11): 4372-4384. (in Chinese with English abstract)
- WANG X Q, WANG B Q, WANG B, et al., 2018. The current situation and development trend of China's long distance natural gas pipeline[J]. *Petroleum Planning & Engineering*, 29(5): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- WANG X Z, WU J Q, WANG B, et al., 2025. New advances and future development directions in oil and gas engineering technologies of Yanchang Petroleum during "14th Five-Year Plan" period[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 53(6): 37-47. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y H, LI Y Q, JIAO Y, et al., 2026. Spatiotemporal seismic performance-informed evolution of corroded long-distance natural gas pipelines[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 272: 112563.
- WANG Z, CAI X, YAN J, et al., 2018. Using the integrated geophysical methods detecting active faults: A case study in Beijing, China[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 156:82-91.
- WEI L N, LI Y J, YIN C C, et al., 2025. Status and prospects of joint inversion of geophysical electromagnetic data[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 56(6): 620-640. (in Chinese with English abstract)
- WEN L, YANG Y, LUO B, et al., 2025. Oil and gas exploration in the Sichuan Basin since the 13th Five-Year Plan: significant advances and implications[J]. *Natural Gas Industry*, 45(12): 66-83. (in Chinese with English abstract)
- WU Q, 2018. Digital transformation of oil & chemicals under the contemporary situation: from digital to intelligent[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 37(6): 2140-2146. (in Chinese with English abstract)
- WU S H, Huang Q H, ZHAO L, 2024. Physics-guided deep learning-based inversion for airborne electromagnetic data[J]. *Geophysical Journal International*, 238(3): 1774-1789.
- XIA S B, LIAO G Z, DENG G S, et al., 2024. Application of high-density electrical resistivity tomography and audio magnetotellurics for groundwater exploration in the karst area in southwestern China[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 48(3): 651-659. (in Chinese with English abstract)
- XIAO L Y, ZHANG J Y, NIE Z P, et al., 2022. Underground energy storage engineering[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 41(2): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- XIE B, ZHANG Y Y, WU X Y, et al., 2025. Research on the response of different flight modes under concave and convex terrain by semi-airborne transient electromagnetic method (SATEM)[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 233: 105576.
- XIE D K, LI W D, FU Y G, et al., 2025. Application of the combined detection of geophysical prospecting and shallow drilling geochemical prospecting in the concealed magmatic copper-nickel deposits in the shallow-covered area of the Dahuangshan in the Eastern Tianshan Metallogenic Belt[J]. *Xinjiang Geology*, 43(2): 369-377. (in Chinese with English abstract)
- XIN J, WANG L Y, 2021. Impacts of "Dual Carbon" vision on refining and chemical industry and prospects for its paths[J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 37(6): 1504-1510. (in Chinese with English abstract)
- XU K J, JIN H R, CAO D P, et al., 2026. Joint inversion of borehole-surface direct-current resistivity data[J]. *Coal Geology & Exploration*, 54(4): 227-237. (in Chinese with English abstract)

- XU L, ZHANG J Q, CHEN S S, et al., 2020. Application research of the minimal offset seismic method for fault detection in tunnel[J]. Progress in Geophysics, 35(5): 2009-2015. (in Chinese with English abstract)
- XU Q., ZHAO B., DAI K., et al., 2023. Remote sensing for landslide investigations: A progress report from China[J]. Engineering Geology, 321:107156.
- YANG J H, YANG F W, FANG J N, et al., 2023. Comprehensive advanced geological prediction method based on multi-source information for double shield TBM construction tunnel and its application[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 31(6): 1571-1589. (in Chinese with English abstract)
- YANG L, ZHOU C, WANG K, et al., 2024. Research on application of resistivity method with borehole in detection of urban obstacle interval[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 20(4): 1357-1366. (in Chinese with English abstract)
- YANG Z, ZHONG N, ZHANG X B, et al., 2025. Avoidance distance and influence range of active faults: a case study of Litang fault[J]. Journal of Geomechanics, 31(1): 124-138. (in Chinese with English abstract)
- YIN C C, ZHU J, QIU C K, et al., 2018. Spatially constrained inversion for airborne EM data using quasi-3D models[J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(6): 2537-2547. (in Chinese with English abstract)
- YU P, WANG J L, WU J S, et al., 2007. Comparative analysis of inversion methods of retrieving atmospheric profiles with GPS occultation measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 50(2): 529-538. (in Chinese with English abstract)
- YU P F, HOU L, WANG X T, et al., 2025. Optimization of gas injection scheme for underground gas storage considering dynamic changes in reservoir pressure[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 44(4): 440-451. (in Chinese with English abstract)
- YUAN G J, XIA Y, JIN G T, et al., 2017. Present state of underground storage and development trends in engineering technologies at home and abroad[J]. Petroleum Drilling Techniques, 45(4): 8-14. (in Chinese with English abstract)
- YUAN L, ZHANG P S, 2019. Development status and prospect of geological guarantee technology for precise coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 44(8): 2277-2284. (in Chinese with English abstract)
- YUAN S Y, LELLOUCH A, CLAPP R G, et al., 2020. Near-surface characterization using a roadside distributed acoustic sensing array[J]. The Leading Edge, 39(9): 646-653.
- YUE J H, JIANG Z H, 2006. Technique and application of transient electromagnetic method in mine[J]. Energy Technology and Management(5): 72-75. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H Y, JIANG Q O, ZHANG X J, et al., 2025. The genesis and age of karst caves in Xinglong National Geopark, Hebei Province[J]. Journal of Geomechanics, 31(2): 278-286. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG N Y, SUN H F, LIU Y C, et al., 2025a. SATEM: a new drone-based semi-airborne transient electromagnetic receiver system[J]. Journal of Applied Geophysics, 241: 105848.
- ZHANG P S, XU S A, GUO L Q, et al., 2020. Prospect and progress of deformation and failure monitoring technology of surrounding rock in stope[J]. Coal Science and Technology, 48(3): 14-48. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG R L, 2022. Discussion on the relationship of AMT detection effect to the buried depth of abnormal body under different resistivity background[J]. Uranium Geology, 38(5): 962-969. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG R Z, LI T L, DENG H, et al., 2019. 2D joint inversion of MT, gravity, magnetic and seismic first-arrival wave traveltimes with cross-gradient constraints[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(6): 2139-2149. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG S W, LIU R, FENG H, et al., 2025b. 3D inversion of airborne transient electromagnetic data using deep learning[J]. Journal of Applied Geophysics, 239: 105737.
- ZHANG W, ZHOU Y K, LIU L Y, et al., 2024. Application of the cross-borehole resistivity method in the monitoring of leakage for urban water supply pipelines[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 48(3): 884-890. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y, CAO Y, YAN J, 2024. Research and application of energy saving and consumption reduction technology in oil and gas storage and long distance transportation pipeline[J]. Petrochemical Industry Technology, 31(7): 104-106. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z H, WANG L J, LI K F, et al., 2012. Development trend of oil & gas storage and transportation technology in China[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 31(1): 1-6, 68. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO Y C, LUO Y, LI L X, et al., 2022. In-situ stress simulation and integrity evaluation of underground gas storage: A case study of the Xiangguosi underground gas storage, Sichuan, SW China[J]. Journal of Geomechanics, 28(4): 523-536. (in Chinese with English abstract)

- ZHENG B, LI L D, 2015. The exploring effect comparison of different settings in resistivity tomography[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 12(1): 33-39.
(in Chinese with English abstract)
- ZHENG Z J, 2017. Experimental study on influence of terrain fluctuation to high density resistivity method for detecting underground karst pipes[J]. Journal of Engineering Geology, 25(1): 230-236. (in Chinese with English abstract)
- ZHONG W Y, YANG J, GUAN S, et al., 2026. Semi-airborne transient electromagnetic 3-D forward modelling using equivalent parameters on regular grids[J]. Geophysical Journal International, 246(1): ggag178.
- ZHU F F, 2025. Research and application of geophysical prospecting technology for surrounding rock classification in deeply buried tunnels[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 22(5): 378-384. (in Chinese with English abstract)
- ZHU W P, LIU S H, ZHU H W, et al., 2017. Study on the exploration depth of geophysical methods commonly used[J]. Progress in Geophysics, 32(6): 2608-2618. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 柴伦炜, 汤国毅, 王国群, 等, 2021. 超高密度跨孔电阻率法成像在灌注桩埋深探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 18 (2): 252-256.
- 程可心, 杨玉峰, 李守宝, 等, 2025. 数据驱动背景下的油气管道风险评价挑战[J]. 管道保护, 2 (1): 88-96.
- 程铭, 杨迪琨, 罗强, 等, 2025. 基于三维快速正反演的瞬变电磁数据解释技术及其应用方法[J]. 地球物理学报, 68 (1): 342-354.
- 崔梓贤, 杨金辉, 章妍, 等, 2026. 二氧化碳作为地下储气库垫底气的注采机理及运行策略[J]. 天然气工业, 46 (2): 178-190.
- 底青云, 石昆法, 王妙月, 等, 2001. CSAMT法和高密度电法探测地下水资源[J]. 地球物理学进展, 16 (3): 53-57.
- 底青云, 伍法权, 王光杰, 等, 2005. 地球物理综合勘探技术在南水北调西线工程深埋长隧洞勘察中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 24 (20): 3631-3638.
- 丁国生, 李春, 王皆明, 等, 2015. 中国地下储气库现状及技术发展方向[J]. 天然气工业, 35 (11): 107-112.
- 董浩斌, 王传雷, 2003. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘, 10 (1): 171-176.
- 董树文, 李廷栋, 陈宣华, 等, 2012. 我国深部探测技术与实验研究进展综述[J]. 地球物理学报, 55 (12): 3884-3901.
- 杜冬冬, 石腾, 马明, 等, 2025. 地面瞬变电磁勘探在安山煤矿老窑采空积水探测应用[J]. 中国矿业, 34 (S2): 427-431.
- 付金华, 邓秀芹, 楚美娟, 等, 2013. 鄂尔多斯盆地延长组深水岩相发育特征及其石油地质意义[J]. 沉积学报, 31 (5): 928-938.
- 付天光, 2014. 综合物探方法探测煤矿采空区及积水区技术研究[J]. 煤炭科学技术, 42 (8): 90-94.
- 管志宁, 郝天珧, 姚长利, 2002. 21 世纪重力与磁法勘探的展望[J]. 地球物理学进展, 17 (2): 237-244.
- 郭凯, 李建君, 郑贤斌, 2015. 盐穴储气库造腔过程夹层处理工艺: 以西气东输金坛储气库为例[J]. 油气储运, 34 (2): 162-166.
- 姜国庆, 尚通晓, 黄敬军, 等, 2022. 基于综合地球物理方法的覆盖型岩溶发育规律研究: 以徐州地区为例[J]. 地球物理学进展, 37 (6): 2571-2579.
- 蒋辉, 赵晓鹏, 赵永贵, 2024. 基于双通道雷达的跨孔电阻率CT方法与应用[J]. 地球物理学进展, 39 (3): 1285-1292.
- 姜文, 黄乐清, 张松航, 等, 2025. 压缩空气储能地下储气库地质评价研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 53 (8): 62-75.
- 敬荣中, 鲍光淑, 陈绍裘, 2003. 地球物理联合反演研究综述[J]. 地球物理学进展, 18 (3): 535-540.
- 黎灵, 2013. 浅层地震法在矿井不明老空区探测中的应用[J]. 中国矿业, 22 (3): 113-116.
- 李鹏, 罗玉钦, 田有, 等, 2021. 深部地质资源地球物理探测技术研究发展[J]. 地球物理学进展, 36 (5): 2011-2033.
- 李术才, 刘征宇, 刘斌, 等, 2015. 基于跨孔电阻率CT的地铁盾构区间孤石探测方法及物理模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 37 (3): 446-457.
- 李自荣, 楚飞, 周芷仪, 2025. 中国石油“十四五”油气工程关键装备进展与发展思考[J]. 石油钻探技术, 53 (6): 48-55.
- 廖绮, 刘春颖, 杜渐, 等, 2024. 人工智能赋能油气管道运行管理的应用及展望[J]. 油气储运, 43 (6): 601-613.
- 林君, 薛国强, 李貅, 2021. 半航空电磁探测方法技术创新思考[J]. 地球物理学报, 64 (9): 2995-3004.
- 林融冰, 曾祥方, 宋政宏, 等, 2020. 分布式光纤声波传感系统在近地表成像中的应用II: 背景噪声成像[J]. 地球物理学报, 63 (4): 1622-1629.
- 林煜, 钟厚财, 陈鹏, 等, 2026. 大型扇三角洲砾岩油藏地震解释技术进展及发展趋势: 以准噶尔盆地玛湖凹陷油气勘探实践为例[J]. 石油地球物理勘探, 61 (1): 222-238.
- 柳建新, 孙欢乐, 陈波, 等, 2016. 重磁方法在国内外金属矿中的研究进展[J]. 地球物理学进展, 31 (2): 713-722.
- 柳建新, 赵然, 郭振威, 2019. 电磁法在金属矿勘查中的研究进展[J]. 地球物理学进展, 34 (1): 151-160.

刘来, 张世彬, 曲智超, 2025. 青藏高原地区油气长输管道项目组价策略探讨[J]. 油气储运, 44 (12): 1430-1439.

刘明宏, 蔡红柱, 杨浩, 等, 2022. 地面与半航空瞬变电磁法三维联合反演[J]. 地球物理学报, 65 (10): 3997-4011.

刘盛东, 吴荣新, 张平松, 等, 2001. 高密度电阻率法观测煤层上覆岩层破坏[J]. 煤炭科学技术, 29 (4): 18-19, 22.

刘双, 胡祥云, 郭宁, 等, 2023. 无人机航磁测量技术综述[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 48 (6): 823-840.

刘伟, 李银平, 霍永胜, 等, 2013. 盐岩地下储库围岩界面变形与破坏特性分析[J]. 岩土力学, 34 (6): 1621-1628.

刘晓东, 张虎生, 黄笑春, 等, 2002. 高密度电法在宜春市岩溶地质调查中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 13 (1): 72-75.

刘征宇, 李术才, 刘斌, 等, 2015. 用于地铁盾构区间孤石探测的三维电阻率跨孔CT方法研究及物理模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 34 (12): 2519-2530.

罗齐彬, 杨亚新, 吴信民, 等, 2022. 基于Kriging插值的综合放射性勘探方法在鹿井铀矿找矿中的应用[J]. 东华理工大学学报 (自然科学版), 45 (2): 154-161.

罗霄, 许智海, 李正胜, 等, 2020. 多参数综合物探方法在煤矿采空区勘探中的应用研究[J]. 煤炭工程, 52 (2): 32-37.

吕庆田, 张晓培, 汤井田, 等, 2019. 金属矿地球物理勘探技术与设备: 回顾与进展[J]. 地球物理学报, 62 (10): 3629-3664.

马洪翔, 刘丽华, 晏使楚, 等, 2024. 无人机全航空时间域电磁探测组合脉冲发射技术[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 55 (10): 3756-3767.

马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 2016. 石油工程技术对油气勘探的支撑与未来攻关方向思考: 以中国石化油气勘探为例[J]. 石油钻探技术, 44 (2): 1-9.

彭勃, 强思远, 施小清, 2025. 基于贝叶斯实验设计优化跨孔高密度电阻率法监测四维水文地质过程[J]. 地质科技通报, 44 (5): 293-301.

彭国民, 刘展, 2020. 电磁和地震联合反演研究现状及发展趋势[J]. 石油地球物理勘探, 55 (2): 465-474.

齐得山, 巴金红, 刘春, 等, 2017. 盐穴储气库造腔过程动态监控数据分析方法[J]. 油气储运, 36 (9): 1078-1082.

齐彦福, 智庆全, 李貅, 等, 2021. 考虑关断时间的地面瞬变电磁三维带地形反演[J]. 地球物理学报, 64 (7): 2566-2577.

覃剑文, 姜晓腾, 谢贵城, 等, 2023. 基于高密度电法的城市复杂环境岩溶探查研究: 以贵港市北环新村为例[J]. 物探与化探, 47 (2): 530-539.

尚耀军, 何耀京, 黄子龙, 2013. 跨孔超高密度电法CT在岩溶勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 10 (4): 545-550.

史玲玲, 任晶晶, 邢焕伟, 等, 2025. CSAMT在科尔沁西部地热资源勘查中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 60 (S1): 83-86.

石智军, 姚克, 姚宁平, 等, 2020. 我国煤矿井下坑道钻探技术装备40年发展与展望[J]. 煤炭科学技术, 48 (4): 1-34.

宋昌才, 邓中活, 牛传峰, 2019. 重油生产低碳烯烃等化工品技术研究进展[J]. 化工进展, 38 (S1): 86-94.

宋昊博, 姜志海, 郭强, 等, 2026. 电磁与地震联合反演方法研究进展与展望[J]. 地球物理学进展, 41 (1): 156-173.

孙东生, 李阿伟, 杨跃辉, 等, 2025. 深部应力测量技术研发进展与展望[J]. 地质力学学报, 31 (6): 1111-1126.

孙怀凤, 张莹莹, 赵友超, 等, 2022. 钻孔瞬变电磁法研究现状综述[J]. 煤田地质与勘探, 50 (7): 85-97.

谭远发, 2012. 长大深埋隧道工程地质综合勘察技术应用研究[J]. 铁道工程学报, 29 (4): 24-31.

田文法, 郝俊杰, 严加永, 等, 2010. 综合地球物理方法在邯邢式铁矿深部找矿中的应用[J]. 地球物理学进展, 25 (4): 1442-1452.

王成虎, 李尉, 2025. 近10年(2014—2025年)地应力测试与估算方法的主要进展及展望[J]. 地质力学学报, 31 (6): 1188-1209.

王德亮, 周志茂, 林梦蕾, 等, 2021. 中国炼油转型化工现状及发展约束因素的思考[J]. 化工进展, 40 (10): 5854-5860.

汪海阁, 黄洪春, 毕文欣, 等, 2021. 深井超深井油气钻井技术进展与展望[J]. 天然气工业, 41 (8): 163-177.

王桦, 纪洪广, 2010. 跨孔直流电阻率法CT勘探技术研究[J]. 地球物理学进展, 25 (5): 1833-1840.

王亮, 刘威, 席振铎, 等, 2024. 音频大地电磁与瞬变电磁深度学习联合反演[J]. 地球物理学报, 67 (11): 4372-4384.

王香增, 吴金桥, 王波, 等, 2025. 延长石油“十四五”油气工程技术新进展及未来发展方向[J]. 石油钻探技术, 53 (6): 37-47.

王小强, 王保群, 王博, 等, 2018. 我国长输天然气管道现状及发展趋势[J]. 石油规划设计, 29 (5): 1-6.

韦老闹, 李永吉, 殷长春, 等, 2025. 地球物理电磁联合反演研究进展与展望[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 56 (6): 620-640.

文龙, 杨雨, 罗冰, 等, 2025. 四川盆地“十三五”规划以来油气勘探重大新进展与启示[J]. 天然气工业, 45 (12): 66-83.

吴青, 2018. 新常态下的炼化企业数字化转型: 从数字炼化走向智慧炼化[J]. 化工进展, 37 (6): 2140-2146.

夏时斌, 廖国忠, 邓国仕, 等, 2024. 高密度电法和音频大地电磁测深法在西南岩溶地区地下水勘探中的应用[J]. 物探与化探, 48 (3): 651-659.

肖立业, 张京业, 聂子攀, 等, 2022. 地下储能工程[J]. 电工电能新技术, 41 (2): 1-9.

谢登科, 李卫东, 付燕刚, 等, 2025. 物探和浅钻化探联合探测在东天山黄山一带浅覆盖区隐伏岩浆型铜镍矿中的应用[J]. 新疆地质, 43 (2): 369-377.

辛靖, 王连英, 2021. “双碳”愿景对炼化产业的影响及其路径展望[J]. 石油学报 (石油加工), 37 (6): 1504-1510.

徐凯军, 靳贺然, 曹丹平, 等, 2026. 井-地直流电阻率数据联合反演[J]. 煤田地质与勘探, 54 (4): 227-237.

徐磊, 张建清, 陈爽爽, 等, 2020. 洞内极小偏移距地震法在断层探测中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 35 (5): 2009-2015.

杨继华, 杨风威, 房敬年, 等, 2023. 基于多源信息的双护盾TBM施工隧洞综合超前地质预报方法及应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 31 (6): 1571-1589.

- 杨亮, 周聪, 王轲, 等, 2024. 带井电法在城市障碍区间探测中的应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 20 (4): 1357-1366.
- 杨镇, 钟宁, 张献兵, 等, 2025. 活动断层的避让距离与影响范围: 以理塘断裂为例[J]. 地质力学学报, 31 (1): 124-138.
- 殷长春, 朱姣, 邱长凯, 等, 2018. 航空电磁拟三维模型空间约束反演[J]. 地球物理学报, 61 (6): 2537-2547.
- 于鹏, 王家林, 吴健生, 等, 2007. 重力与地震资料的模拟退火约束联合反演[J]. 地球物理学报, 50 (2): 529-538.
- 喻鹏飞, 侯磊, 王雪婷, 等, 2025. 考虑地层压力动态变化的地下储气库注气方案优化[J]. 油气储运, 44 (4): 440-451.
- 袁光杰, 夏焱, 金根泰, 等, 2017. 国内外地下储库现状及工程技术发展趋势[J]. 石油钻探技术, 45 (4): 8-14.
- 袁亮, 张平松, 2019. 煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望[J]. 煤炭学报, 44 (8): 2277-2284.
- 岳建华, 姜志海, 2006. 矿井瞬变电磁探测技术及应用[J]. 能源技术与管理 (5): 72-75.
- 张皓月, 姜群鸥, 张绪教, 等, 2025. 河北兴隆国家地质公园溶洞的成因及时代探讨[J]. 地质力学学报, 31 (2): 278-286.
- 张平松, 许时昂, 郭立全, 等, 2020. 采场围岩变形与破坏监测技术研究进展及展望[J]. 煤炭科学技术, 48 (3): 14-48.
- 张镭哲, 李桐林, 邓海, 等, 2019. 大地电磁、重力、磁法和地震初至波走时的交叉梯度二维联合反演研究[J]. 地球物理学报, 62 (6): 2139-2149.
- 张濡亮, 2022. 不同围岩电阻率背景下音频大地电磁探测效果与深度的关系讨论[J]. 铀矿地质, 38 (5): 962-969.
- 张巍, 周瑜琨, 刘立岩, 等, 2024. 跨孔电阻率法在城市输水管道渗漏监测中的应用[J]. 物探与化探, 48 (3): 884-890.
- 张禹, 曹宇, 闫瑾, 2024. 油气储运长输管道中的节能降耗技术研究与应用[J]. 石化技术, 31 (7): 104-106.
- 张志宏, 王丽娟, 李可夫, 等, 2012. 我国油气储运技术发展趋势分析[J]. 石油科技论坛, 31 (1): 1-6, 68.
- 郑冰, 李柳德, 2015. 高密度电法不同装置的探测效果对比[J]. 工程地球物理学报, 12 (1): 33-39.
- 郑智杰, 2017. 地形起伏对高密度电法探测地下岩溶管道的影响试验研究[J]. 工程地质学报, 25 (1): 230-236.
- 朱飞飞, 2025. 物探技术在深埋隧道围岩分级中的研究与应用[J]. 工程地球物理学报, 22 (5): 378-384.
- 朱卫平, 刘诗华, 朱宏伟, 等, 2017. 常用地球物理方法勘探深度研究[J]. 地球物理学进展, 32 (6): 2608-2618.