



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. 地球物理学进展, 41(1): 0156-0173, doi:10.6038/pg2026JJ0018.

SONG HaoBo, JIANG ZhiHai, GUO Qiang, et al. 2026. Research progress and prospects of joint electromagnetic and seismic inversion methods. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(1): 0156-0173, doi:10.6038/pg2026JJ0018.

# 电磁与地震联合反演方法研究进展与展望

## Research progress and prospects of joint electromagnetic and seismic inversion methods

宋昊博, 姜志海\*, 郭强, 胡双贵

SONG HaoBo, JIANG ZhiHai\*, GUO Qiang, HU ShuangGui

中国矿业大学资源与地球科学学院, 徐州 221116

School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

**摘要** 地球物理勘探通过定量处理观测场源数据进行地下目标探测, 在能源勘探、环境监测、工程勘查领域具有广泛应用。然而, 采用单一数据的地球物理勘探方法在反演过程中存在多解性和分辨率低的问题。因此, 综合多种地球物理观测数据进行联合反演, 相较于单一反演, 具有更为显著的优势。电磁勘探和地震勘探是两种基于不同物理机制的地球物理勘探方法, 两种方法在空间分辨率及对目标体的敏感度上各有差异, 二者结合能够显著提高反演结果的可靠性。电磁与地震联合反演作为电磁与地震数据定量解释的重要技术手段, 能够有效降低单一数据反演的多解性, 提高地层参数的预测精度。本文首先概述了电磁与地震联合反演的分类及其发展历程, 然后阐述了联合反演方法的原理及应用实例, 最后探讨了联合反演的发展机遇, 并展望了其未来研究方向。

**关键词** 联合反演; 电磁勘探; 地震勘探; 深度学习; 岩石物理

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026JJ0018

CSTR:32085.14.pg2026JJ0018

**Abstract** Geophysical exploration has a wide range of applications in the fields of energy exploration, environmental monitoring and engineering survey by quantitatively processing the observed field source data for subsurface target detection. However, the geophysical exploration method using a single data has the problems of multiple solutions and low resolution in the inversion process. Therefore, joint inversion by synthesizing multiple geophysical observation data has more significant advantages than single inversion. Electromagnetic exploration and seismic exploration are two kinds of geophysical exploration methods based on different physical mechanisms, which typically differ in spatial resolution and sensitivity to the target. Therefore, the combination of the two can significantly improve the reliability of the inversion results. As an important means for quantitatively interpreting electromagnetic and seismic data, joint electromagnetic and seismic inversion can effectively reduce the multiple solutions of single data inversion and improve the prediction accuracy of formation parameters. This paper firstly summarizes the classification of electromagnetic and seismic joint inversion and its development history, then describes the principle and application examples of joint inversion method, and finally discusses its development opportunities and looks forward to the future research direction.

**Keywords** Joint inversion; Electromagnetic exploration; Seismic exploration; Deep learning; Rock physics

收稿日期 2025-04-25; 修回日期 2025-11-01.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家自然科学基金(42574200, 41974141)和国家重点研发计划课题(2023YFC3008901)联合资助.

第一作者简介 宋昊博, 男, 博士研究生, 主要研究方向为电磁探测理论与技术. E-mail: tb25010027a41@cumt.edu.cn

\* 通讯作者 姜志海, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁探测理论与技术的研究及教学工作. E-mail: jzh3885434@126.com

0 引言

地球物理勘探方法的理论基础源于物理学原理,将这些物理原理应用于地质学研究,能够利用观测到的地球物理场推断地下介质中如速度、密度、电阻率等物性参数的变化规律,从而对地质问题进行深入的分析与解释,并揭示深部地质现象的相关信息(彭国民和刘展,2020).地震勘探和电磁勘探是两种基于不同物理机制的地球物理勘探方法,二者所依赖的物理属性各异:地震勘探主要依赖地震波速度和地层密度,而电磁勘探则基于地下介质的电阻率与介电常数.

地震勘探是通过研究弹性波在地下介质的传播过程,实现地下结构探测的一种地球物理勘探方法.该技术可细分为人工源地震勘探与天然源地震勘探两大类,且根据所使用的地震波类型,进一步划分为反射波法、折射波法和透射波法.地震勘探的优势在于其能够实现大深度探测和高分辨率成像,可以直观地揭示地下的复杂地质结构,并精确地识别沉积地层及其倾角.这些特性使得地震勘探成为地质构造研究中不可或缺的工具,尤其是在油气及矿产资源预测方面发挥着关键作用.

电磁勘探则利用岩石和矿石的电学性质(如电阻率、极化率、电导率、磁导率、介电常数等)的差异,通过观测人工或天然电磁场的变化来推断地下的结构和矿产分布.具体而言,电磁勘探通过向地下激发电磁波并分析地下介质对这些的电磁响应,来推测地下的电性特征,从而为矿产资源的勘查或地质目标的定位提供依据(柳建新等,2023).电磁勘探方法包括频率域电磁法(如大地电磁法、可控音频大地电磁法等)、时间域电磁法(如瞬变电磁法)、直流电法勘探(如电剖面法、电测深法、充电法、激发极化法和自然电场法等),从源的类型上又可以分为人工场源和天然场源.电磁勘探和地震勘探是应用最多的两种方法,在空间分辨率及对目标体的敏感度上各有差异.电磁勘探基于大地电性差异,具有较大的探测深度和对低阻体敏感的特性;而地震勘探以岩石弹性差异为基础,具有分辨率较高以及对地质构造较为敏感的优势.为提高探测成果可靠性,在能源资源勘探开发中,大多采用电磁与地震勘探相结合的综合探测方案,这为电磁与地震联合反演研究提供了广阔应用空间.

联合反演是地球物理学中一项重要的定量解释工具(杨辉等,2002a,b).所谓联合反演(Joint

Inversion),是指在地球物理反演过程中,结合多种地球物理观测数据,通过反演地下地质体的岩石物性和几何参数来建立统一的地质模型(图1).从理论上讲,联合反演相较于单一地球物理数据的反演,具有显著的优势. Alekseev (1991)在其研究中定量描述了联合反演问题的解及其一般特征,指出通过将各个单独的反演问题结合为一个联合反演问题,可以有效降低各反演问题之间在描述参数几何形态时的自由度,从而在本质上提高地球物理反演的精度.

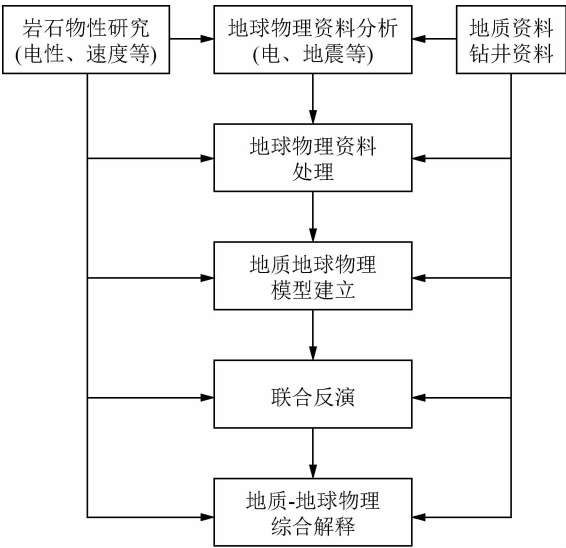


图1 地质-地球物理综合解释研究思路(杨辉等,2002a,b)

Fig.1 Integrated geological-geophysical interpretation research workflow (Yang et al., 2002a,b)

联合反演通过结合不同物理数据源,增加有效信息量,从而提升反演精度、减少解的多解性,并实现更准确的地下地质目标体的探测方法.该方法在地质勘探、资源调查、环境监测等领域具有广泛应用,尤其是在复杂地质条件下,联合反演能够有效整合来自电法、电磁法、地震、重力、磁力等不同地球物理方法的数据,从而获取更为精确的地下结构信息.

联合反演的概念最早出现在20世纪70年代,最初的研究主要集中在相同物性观测数据之间的联合反演.随着计算机技术的发展,联合反演逐渐从一维扩展到二维、三维,并逐步发展成非线性联合反演.最早的联合反演工作之一是由Vozoff和Jupp(1977)提出的,他们采用迭代二阶Marquardt阻尼最小二乘法对一维直流电法(DC)与大地电磁法(MT)进行联合反演.该方法显著提高了反演结果的

分辨率,并有效降低了单一数据源反演中可能出现的多解性问题.进入80年代,联合反演技术发展迅速,逐步应用到二维、三维反演问题.例如,Raiche等(1985)对瞬变电磁法(TEM)和DC数据的联合反演进行了研究,通过对比联合反演与单一反演结果,证明了联合反演能够提供更加精确的地质模型.Sasaki(1989)研究了二维MT与偶极-偶极法数据的联合反演,提出了约束圆滑的最小二乘法与Gram-Schmidt方法的结合,通过优化反演算法来提高解的稳定性,并进一步验证了联合反演在多解性问题上的优势.与此同时,国内学者如杨文采(1997)利用阻尼最小二乘法,实现了均方根速度与反射波走时的联合反演,胡建德(1989)研究了TEM和DC资料的联合反演,进一步改善了反演结果的稳定性和可靠性.

从90年代开始至今,基于相同物性的联合反演仍然是主要的研究方向,Meju(1996)对一维TEM和受浅部三维效应影响而畸变的MT数据进行联合反演,提供了一种增强地下结构成像分辨率和储层描述精度的方法.Sharma和Kaikkonen(1999)采用了最优化算法与非常快速模拟退火算法(VFSA)的联合反演策略,针对一维电磁(EM)和DC数据中存在的等效性抑制问题进行了深入评价,尤其是等效性问题引起的数据畸变.Yang等(1999)用DC及TEM数据进行联合反演来确定淡水和盐水界面的分布.Vasco等(1996)和杨振武等(1998)研究了地震波走时和振幅联合反演等.敬荣中等(2004)提出了一种基于数据融合的地球物理联合反演方法,整合垂直电测深(VES)和MT数据,采用语义模糊化和神经网络技术,有效融合不同尺度特征数据,并通过实验验证了其有效性.黄国娇和白超英(2010)结合共轭梯度法求解带约束的阻尼最小二乘最优化反演问题,利用多震相走时资料进行联合反演.李曼等(2020)进行二维直流电阻率与音频大地电磁自适应渐进正则化联合反演研究.张谿哲等(2021)在重力和重力梯度数据的联合反演中,采用了改进的共轭梯度算法和LO范数正则化项,可以快速地获得地下密度分布模型,展现出较强的稳定性和适用性.刘明宏等(2022)基于构建统一的目标函数和数据权重调整策略,将地面瞬变电磁和半航空瞬变电磁进行联合反演,能够有效地抑制反演过程中的多解性问题,并显著提高了反演结果的分辨率.黄翔等(2022)利用背景噪声互相关和地震面波层析成像技术,获取了华北克拉通中部造山带的瑞雷面波频

散数据,并采用蒙特卡罗非线性方法进行联合反演,获得了高分辨率的S波速度结构.易柯等(2022)和张志勇等(2023)都基于模糊C均值(FCM)聚类算法,分别对二维射频大地电磁(RMT)数据中电阻率与介电常数和二维直流电阻率(DCR)与射频大地电磁数据进行联合反演.胡祖志等(2023)基于奥克姆反演算法,提出了一种拟合差加权的时频电磁(TFEM)与大地电磁数据联合反演方法,提高了对浅部电性异常体的分辨率以及深部电性层的探测精度.罗鸣等(2024)提出了一种基于乘积目标函数的层状垂直各向异性(VTI)介质海洋可控源电磁(CSEM)和MT数据联合反演方法,并成功应用于南黄海实测资料反演,能够较为准确地重构海底地层的电性分布,并提高了对海底地层各向异性电阻率的分辨能力等.此时,联合反演技术不仅限于电法和电磁法的数据组合,其他地球物理勘探数据如地震、重力、磁力数据等也开始被引入联合反演过程中.

随着研究的深入,越来越多的学者开始探索基于不同物性观测数据之间的联合反演方法,尤其是地震与电磁、地震与重力等不同物性之间的联合反演.其中重力与地震的联合反演是最早的基于不同物性参数的联合反演研究之一.例如,Savino等(1980)通过联合反演地震P波走时数据与重力资料,研究了地壳和上地幔的密度与速度结构.该研究揭示了速度与密度之间的内在联系,并通过反演结果准确描述了地下的速度-密度界面.Golizdra(1980)对该模型的参数化进行了进一步细化,提出了三种不同类型的速度-密度匹配关系,并对其进行了系统的实验分析.国内研究者也在这一领域取得了显著进展,王一新和廉西京(1983)结合地震构造图与层速度资料,建立了重力模型,并通过重力与地震数据的联合反演,检验了地下岩性变化.范兴才和王家林(1995)叙述了二维重力和地震资料联合反演解的非唯一性和约束条件的使用.于鹏等(2007, 2008)提出了一种基于改进全局优化的VFSA,实现了重力与地震资料的约束同步联合反演,并优化了反演解的准确性和计算效率.吴珍汉等(2021)采用了先进的Model Vision软件,并通过人机交互的方式,拟合布格重力异常,通过重力与地震联合反演的技术手段,成功揭示了深部油储的关键参数,为预测北羌塘凹陷的深部油藏提供了科学依据.李鑫月等(2024)运用了加权广义最小二乘法,将近震体波走时与重力数据资料进行联合迭代反演,不仅提高了数据处理的效率,还增强了对地壳结构成像的分辨

率,最终获得了华北地区地壳上地幔顶部的P波速度结构。

在电法与地震的联合反演方面, Dobróka 等(1991)采用加权最小二乘法对地震 VSP (Vertical Seismic Profile) 走时数据和电法数据进行了联合反演,取得了较好的效果。杨辉等(2002a, b)采用 VFSA 算法实现了 MT 与地震数据的联合反演,同时也对该方法的误差“单判断”检验准则改为“双判断”检验误差,并避免了 Metropolis 接受准则的判断误差。陈东敬和于鹏(2005)也将该方法在西亚进行了综合应用,证明了该方法能够有效提高反演精度并减少解的多解性。Lan 等(2018)基于体积分方程法,在有效的层状介质背景下使电磁波和地震波进行二维的联合全波形反演。杨博等(2021)提出一种结合聚类分析和多元地质统计学的电-震联合建模约束反演方法,通过交叉变差函数和引导 FCM 算法实现多重约束反演,有效降低了多解性,提高了目标地质体的识别能力。甘露等(2022)提出了一种基于拟牛顿法的大地电磁与接收函数联合反演方法,通过新的联合约束算子提高了电阻率和速度模型间的耦合度,增强了数据拟合,提升了大地电磁纵向分辨率,降低了反演的非唯一性。刘佳成等(2023)引入 FCM 聚类约束,对直流电阻率法与地震走时成像法进行联合反演,提高了分辨能力,并通过监督学习改善了成像模型分辨率,增强了反演质量。索孝东等(2023)将电磁井震联合约束反演应用于临河凹陷,快速锁定了其有利的目标靶区,提高了深层勘探分辨率及油气储层预测精度,发挥了关键的先导性作用。孔繁祥等(2024)通过交叉梯度函数实现了海洋可控源电磁法(MCSEM)与地震全波形的二维联合反演,显著提升了异常体形态刻画和物性数值恢复,增强了 MCSEM 反演的可靠性,对海底油气储层识别具有重要意义。

在重力和磁法数据的联合反演中, Bosch 和 McGaughey(2001), Bosch(2002)在岩性约束的指导下,对重力与磁力数据进行联合反演,通过地面地质调查和钻孔资料综合构建了岩性模型,该模型能够同时表征岩性、密度和磁化率。孔瑞金等(2023)采用高斯-牛顿法和 Gramian 约束的重磁三维联合反演,不仅减少了其内存,还提升了运行速度,甚至其精确度比单一反演结果更优。Meng 等(2022)提出了一种基于二阶泰勒公式的三维交叉梯度联合反演方法,用于处理重力和磁力数据,特别是在非结构化网格上的应用,这种方法通过计算交叉梯度项,能够有

效地描述复杂地形中不规则地质体的详细信息,并在内蒙古大兴安岭南部的黄岗—甘珠尔庙成矿带的实际应用中,展示了其在矿物分布估计和成矿模型建立方面的潜力。Fang 等(2022)进一步提出了一种高效的交叉梯度联合反演算法,采用序贯策略,并结合随机奇异值分解(RSVD)算法,以提高重力和磁力数据联合反演的计算效率,通过合成数据和中国新疆某金属矿区的实际数据测试,该算法在效率和准确性方面均显示出显著优势。徐凯军等(2024)提出了一种基于交叉梯度函数的井中重磁多参数信息联合反演方法,通过耦合密度和磁化率,显著提高了纵向分辨率,从而有效识别深部矿体的存在。李丽丽等(2024)在处理起伏观测面的重磁数据时,发展了一种结合分块托普利兹(BTTB)矩阵和快速傅里叶变换(FFT)的快速联合反演方法,且实际应用于中国吉林省通化盆地三棵榆树凹陷地区,成功圈定了火成岩的发育范围。

在重力和电磁数据的联合反演中, Rasmussen 和 Hohmann(1991)用 TEM 和重力数据联合反演确定盆地的深度,并取得了一定的成果。胡祖志等(2020)基于人工鱼群算法,通过非线性约束对电磁与重力数据进行联合反演,提高了勘探的分辨率。曾志文等(2020, 2021)对大地电磁测深和重力进行联合反演时,通过双种群设置方案改进了差分进化算法,并引入了宽范围物性约束技术,以促进不同岩石物性参数在一定范围内的耦合,该算法提高了寻优能力和收敛速度,降低了对精确先验信息的依赖,增强了联合反演的适用性和灵活性。何浩源等(2022)基于平滑聚焦正则化方法,并结合了交叉梯度结构约束,实现了对三维重力、重力梯度和大地电磁数据的联合反演,有效地提高了密度模型的分辨率。陈卓等(2023)采用数据空间 Occam 反演和基于对数障碍法的正则化反演,通过引入梯度累加约束项,实现了电阻率法和重力勘探数据的联合反演,增强了反演模型的稳定性和可靠性,提高了异常体物性值恢复和形态刻画的精度。

随着人工智能(AI)技术的迅猛发展,深度学习(DL)在联合反演中的应用逐渐成为研究的热点,这也进一步推动了联合反演的研究,特别是在非线性反演问题上的应用。深度学习的优势在于其能够通过大规模数据训练获得复杂数据间的非线性映射关系,从而有效解决传统反演方法在处理复杂地质条件时可能遇到的多解性和精度问题。近年来,深度学习尤其是卷积神经网络(CNN)、长短期记忆网络

(LSTM)以及自注意力机制(Attention Mechanism)等技术在地球物理反演中取得了显著的进展,尤其是可以通过网络模型对不同地球物理观测数据进行预测.例如,李飞等(2020)提出了一种基于CNN与LSTM的联合反演方法,成功应用于矿井TEM与地震数据的联合反演,有效提高了对深部目标体的探测精度.闫政文等(2020)结合交叉梯度函数提出了一种重磁电三维联合反演算法,使用深度学习网络优化反演过程,减少了传统方法的计算复杂度并提升了解的准确性.张志厚等(2021)提出了一种结合深度学习的重力异常与重力梯度异常联合反演方法,该方法通过快速正演算法生成样本数据集,并设计了端到端的深度学习网络结构GraInvNet进行训练和反演预测,该方法能有效提高反演的聚焦性和准确性,尤其在处理复杂模型和噪声数据时显示出显著优势.魏楠雨等(2021)探讨了深度学习在重、磁、大地电磁数据联合反演中的应用,通过构建3D模型和正演数据,利用SDNN和U-Net网络结构进行训练,能够有效恢复矿体的几何形状,且对数据不平衡问题具有较好的鲁棒性.王亮等(2024)开发了一种基于深度学习的音频大地电磁法(AMT)和TEM联合反演方法JoATInvNet,该方法通过生成统一的电阻率模型和正演数据构建训练集,并利用ResNet和U-Net构建网络模型,该方法能有效地融合AMT和TEM数据信息,提高反演的准确性和抗噪声能力.

随着计算能力的提升、深度学习技术的不断优化,以及多源数据融合技术的成熟,联合反演在地质勘探领域的应用前景会十分广阔,不仅可以提升其精确性,还可以降低其多解性,为地球物理勘探研究开辟了新的发展方向.

## 1 震电联合反演技术

联合反演的广泛应用得益于多源物理数据约束反演方法的发展.根据反演过程和方法的不同,联合反演一般可分为四类:剥离法反演、顺序反演、伸展法反演和同步反演(王家林和吴健生,1995;刘彦等,2012).这些反演方法本质上依赖于不同地球物理数据的结合,但它们并未充分利用不同物性参数之间的内在联系.因此,联合反演的关键在于如何通过有效地融合多物理数据来降低解的多解性、优化反演精度,而非仅仅将不同反演结果进行加权组合.

联合反演根据物性数据的不同,又可分为基于相同物性观测数据和基于不同物性观测数据之间的

联合反演(刘彦等,2012;敬荣中等,2003).前者利用相同物性差异的数据进行反演,后者结合不同物性的数据(如地震、重力、电磁等)进行反演,从而提高地质模型的精度.基于相同物性的联合反演方法在地球物理勘探中得到广泛应用,而基于不同物性的联合反演则逐渐成为研究的新方向.

在电磁与地震联合反演中,关键问题是如何给出不同物性参数之间的耦合关系.物性参数之间的耦合关系对联合反演的精度和稳定性起着决定性作用.在震电联合反演中,物性参数耦合方式包括岩石物理模型(Sun and Li,2015;Pang *et al.*,2021)、地质结构相似性方法(Moorkamp,2017;Penta de Peppo *et al.*,2024)、信息变化方法(Variation of Information, VI)(Lösing *et al.*,2023;Lowe *et al.*,2024)、深度学习(Alyousuf *et al.*,2024;Ma *et al.*,2025)等.其中信息变化方法是基于信息论中的互信息(Mutual Information, MI)概念,用于衡量两个变量之间共享的信息量;在联合反演中,它可以帮助确定不同物性数据所反映的物理参数之间的相关性,并通过引入VI作为目标函数的一部分,能够更有效地约束模型参数,减少解空间,从而得到更精确、更符合地质规律的模型.在本部分将主要介绍在联合反演中常见的岩石物理模型、地质结构相似性模型及深度学习三种主要耦合方法.

### 1.1 岩石物理驱动的联合反演

岩石物理模型可以建立地层物性参数至电性及弹性响应的定量关系,在电磁与地震联合反演中起着至关重要的作用.根据联合反演的目标,岩石物理关系通常可以分为两类:一类是建立不同地球物理参数之间的联系,另一类则是将待反演参数与已知的地球物理参数(如电阻率、波速等)进行关联.这些关系不仅有助于分析不同物理场之间的相互作用,还可以在反演过程中约束目标参数,提高解的稳定性和精度.代表性电磁岩石物理模型包括Archie公式(Archie,1942);地震岩石物理模型包括Gassmann方程(Gassmann,1951)、Faust关系式(Faust,1953)等.

Archie公式是由美国地质学家G. E. Archie于1942年提出的理论模型,用于描述岩石孔隙介质中电阻率与孔隙度、含水饱和度的定量关系(Archie,1942).该公式广泛应用于石油勘探领域,特别是电磁测井数据的解释和储层评价(图2).

Archie公式(罗娜,2007;孙建国,2007;张洁等,2018)有两种常见的形式,分别对应完全水饱和和

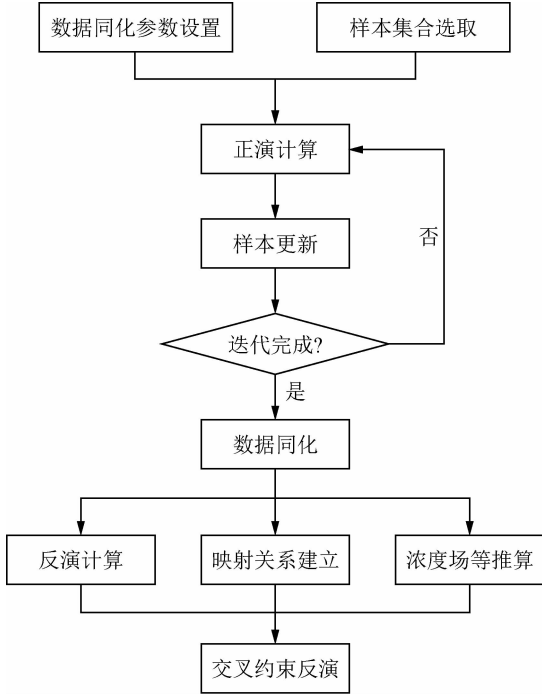


图2 基于 Archie 公式的多地球物理方法联合反演

Fig.2 Joint inversion of multiple geophysical methods based on Archie's formulation

层和部分水饱和地层. 完全水饱和和地层公式可表示为:

$$F = \frac{R_0}{R_\omega} = a \cdot \phi^{-m}, \quad (1)$$

其中:  $F$  指地层因子, 反映岩石骨架和孔隙结构对导电的影响;  $R_0$  指完全水饱和和地层的电阻率, 单位为  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $R_\omega$  指地层水的电阻率, 单位为  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $\phi$  指孔隙度, 反演岩石中孔隙体积与总岩石体积的比值;  $a$  指岩性系数, 通常取值为 1, 但在不同岩性条件下会调整;  $m$  指胶结指数, 描述孔隙的连接程度, 通常在 1.8 ~ 2.2 范围内.

部分水饱和地层公式可表示为:

$$R_t = a \cdot R_\omega \cdot \phi^{-m} \cdot S_\omega^{-n}, \quad (2)$$

其中:  $R_t$  指部分水饱和和地层的电阻率, 单位为  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $S_\omega$  指含水饱和度, 即孔隙中水体积与总孔隙体积的比值;  $n$  指饱和度指数, 描述水饱和对导电性的影响, 通常取值在 1.8 ~ 2.0 范围内.

在电磁与地震的联合反演中, Archie 公式通过描述电阻率、孔隙度和含水饱和度的关系, 桥接了两种物理场的数据, 其具体实施步骤是: 利用电磁数据反演得到地层电阻率  $R_t$ , 利用地震数据反演得到地层的波速 ( $V_p$ ,  $V_s$ ) 和密度, 再利用 Archie 公式, 通

过电阻率预测孔隙度和含水饱和度, 由 (2) 式转化成 (3) 式来进行计算:

$$\phi = \left( \frac{a \cdot R_\omega}{R_t \cdot S_\omega^n} \right)^{1/m}, \quad (3)$$

其中含水饱和度  $S_\omega$  可以通过该区域经验或流体模型估算出来. 得到孔隙度和含水饱和度后, 可以通过 Gassmann 方程或经验公式, 将其转换成地震波速和密度:

$$V_p = \sqrt{\frac{K_{\text{sat}} + \frac{4}{3}\mu}{\rho_b}}, \quad (4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_b}}, \quad (5)$$

其中:  $K_{\text{sat}}$  指饱和岩石的体积模量;  $\mu$  指剪切模量;  $\rho_b$  指岩石密度, 由孔隙度和流体饱和度决定. 接下来对模型进行更新, 使用 Archie 公式作为约束条件, 更新反演模型; 根据更新的地震波速和密度校正电学参数, 反之亦然; 通过迭代实现电磁和地震数据的一致性.

Archie 公式适用于非破裂的砂岩和碳酸盐岩储层, 前提是地层为均匀的多孔介质且其导电性主要由流体的导电性决定 (忽略矿物的导电性). 然而, 该公式也存在一些局限性, 如在复杂岩性 (例如泥岩) 中, 黏土矿物的导电性不能忽视; 在孔隙度较低或含水饱和度较低的地层中, 公式的准确性会降低; 而高矿化度或非常低矿化度的水也可能导致计算误差. Archie 公式被广泛应用于计算含水饱和度和孔隙度等参数. 在地球物理勘探领域, 准确估计储层的含水饱和度和孔隙度对于评估油气藏的潜力至关重要. 例如, Revil 和 Florsch (2010) 在其研究中采用了一种创新的方法, 通过电磁数据处理来反演含水饱和度和, 利用阿尔齐公式将岩石的电导率与孔隙度和含水饱和度联系起来, 从而能够从电磁数据中提取出有关储层流体含量的重要信息等; Pang 等 (2021) 将 Archie 公式应用于建立致密油藏储层的电阻率模型, 以表征岩石的电学和弹性特性, 并且结合实际的储层特性, 提出了一个改进的双孔隙-黏土并联网络岩石物理模型 (DPCL 模型), 解决了传统 Archie 公式在复杂储层电性表征中的局限性.

传统的 Archie 公式是经典的电阻率表征方法, 假设岩石中不含黏土或其他导电矿物, 岩石的电阻率完全由孔隙流体的导电性决定, 可以用于通过电阻率来推算孔隙度、水饱和度等储层参数. 但是也在实际复杂储层中存在着一一定的局限性, 例如: 岩石中

含有黏土矿物(如伊利石),它们具有较强的导电性,会显著降低总电阻率;岩石孔隙结构复杂,包括微裂隙和基质孔隙,其导电性对总电阻率的贡献不同;水和油共存时,水的分布对电阻率影响显著,而 Archie 公式未考虑微裂隙中水的分布特性. 针对上述局限性, Pang 等 (2021) 将 Archie 公式扩展到 DPCL 模型,以更精确地描述储层的电性特征. 假设岩石由三个并联的导电单元组成:基质孔隙(框架)、微裂隙和黏土. 每个单元的导电性通过其电阻率单独计算,总电阻率通过并联公式计算为:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1 - \phi_c - V_{sh}}{R_0} + \frac{\phi_c}{R_c} + \frac{V_{sh}}{R_{sh}}, \quad (6)$$

其中,  $R_t$  指总电阻率;  $R_0$  指岩石骨架孔隙的电阻率;  $\phi_c$  指微裂隙孔隙度;  $R_c$  指微裂隙孔隙的电阻率(等于水饱和时的水电阻率  $R_\omega$ );  $V_{sh}$  指黏土体积;  $R_{sh}$  指黏土的电阻率.

此外, DPCL 模型也对微裂隙和黏土进行公式修正,使微裂隙提供额外的导电路径,其电阻率计算使用了改进的 Archie 公式:

$$R_c = bS_\omega^{-n} R_\omega, \quad (7)$$

并通过其占比引入并联模型中.

而黏土矿物因其导电性显著降低了总电阻率,则通过增加并联项  $V_{sh}/R_{sh}$ , 直接表征黏土的贡献,弥补传统的 Archie 公式的不足. 图 3 展示了基于改进 Archie 公式和弹性模型所构建的岩石物理量板,将电阻率、声波阻抗和泊松比联系起来,量板的预测结果与测井数据的匹配性较高,证实了模型的可靠性. 通过引入黏土和微裂隙的修正, Archie 公式被成

功应用于复杂储层的电性表征,提高了复杂储层的电性和弹性特征的表征能力.

1.2 基于结构相似性的联合反演

除了岩石物理驱动以外,物性结构相似性也在地球物理联合反演中扮演着至关重要的角色,其核心假设在于地下不同物性参数的空间分布具有一致性,并且岩石的结构特征或边界能够通过多种地球物理勘探技术得以识别. 基于结构相似性的方法首先确立一个量化结构相似性的指标,并通过最小化不同模型间结构差异的方式,增强模型间的结构一致性. Gallardo 和 Meju (2003, 2004, 2007) 于 2003 年首次提出了交叉梯度函数的概念,此方法无需预先明确联合反演参数间的显式解析关系式,也无需对模型做各类假设,是一种灵活有效的结构相似性方法. 在近年来的研究中,交叉梯度被作为主要的物性结构约束,其联合反演的流程(图 4)通常包括以下三个基本步骤(何委微等, 2009): (1) 模型参数化; (2) 目标函数构建; (3) 反演算法选择.

联合反演的目标是最小化电磁法和地震法的拟合误差,同时确保两者物理属性的一致性. 目标函数  $F(m)$  包括两部分:数据拟合误差和交叉梯度正则化项. 以电磁和地震的联合反演为例,交叉梯度联合反演(彭国民和刘展, 2020; 王俊等, 2013; 石战结等, 2020; 张镕哲等, 2019)的目标函数通常表示为:

$$F(m_{EM}, m_s) = \alpha \|d_{EM} - G_{EM}(m_{EM})\|^2 + \beta \|d_s - G_s(m_s)\|^2 + \gamma \int_\Omega \|\nabla m_{EM} \times \nabla m_s\| d\Omega, \quad (8)$$

其中:  $d_{EM}$  和  $d_s$  分别是电磁和地震的观测数据;

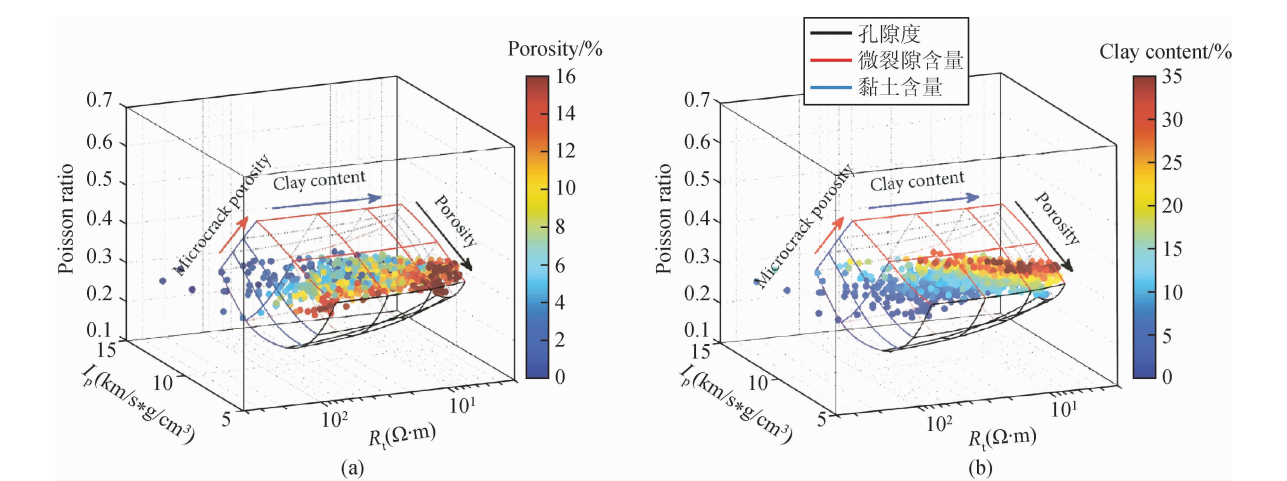


图 3 三维弹电岩石物理量板与解释数据(修改自 Pang et al., 2021)

(a) 孔隙度; (b) 黏土含量.

Fig. 3 Three-dimensional elasto-electric petrophysical plates with well interpreted data (After Pang et al., 2021)

(a) Porosity; (b) Clay content.

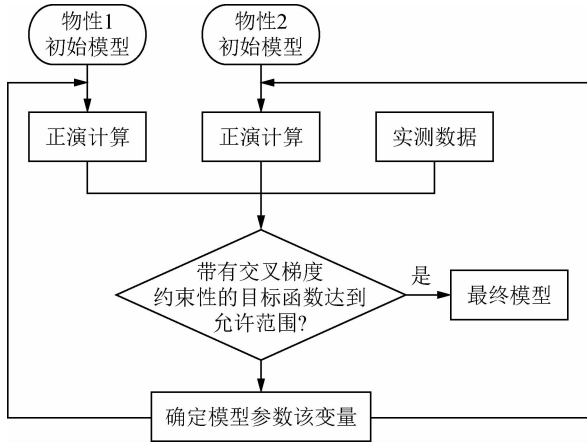


图4 交叉梯度联合反演的常规流程(石战结等,2020)

Fig. 4 General procedure for cross-gradient joint inversion (Shi et al., 2020)

$G_{EM}(m_{EM})$  和  $G_S(m_S)$  分别是电磁和地震的前向传播算子,描述模型到数据的映射; $\nabla m_{EM}$  和  $\nabla m_S$  分别是电磁和地震模型的梯度; $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  是权重因子,控制各部分对目标函数的贡献; $\|d_{EM} - G_{EM}(m_{EM})\|^2$  描述电磁数据拟合误差,确保反演的电磁模型能够较好地解释电磁观测数据; $\|d_S - G_S(m_S)\|^2$  描述地震数据拟合误差,确保反演的地震模型能够较好地解释地震观测数据; $\int_{\Omega} \|\nabla m_{EM} \times \nabla m_S\| d\Omega$  描述电磁模型和地震模型的交叉梯度约束,其物理意义是最小化两者梯度的夹角正交性,即希望模型变化的方向在相同区域保持一致; $\nabla m_{EM} \times \nabla m_S$  梯度的叉积反映两者变化方向的正交性.如果两者一致,则叉积接近零.式(8)中电磁和地震的梯度公式可表示为:

$$\nabla m_{EM} = \frac{\partial m_{EM}}{\partial x} i + \frac{\partial m_{EM}}{\partial y} j + \frac{\partial m_{EM}}{\partial z} k, \quad (9)$$

$$\nabla m_S = \frac{\partial m_S}{\partial x} i + \frac{\partial m_S}{\partial y} j + \frac{\partial m_S}{\partial z} k. \quad (10)$$

在联合反演目标函数的优化过程中,首先需要初始化模型,然后计算目标函数对模型参数的梯度:

$$\frac{\partial F}{\partial m_{EM}} = 2\alpha J_{EM}^T (d_{EM} - G_{EM}(m_{EM})) + \gamma \nabla \cdot \left( \frac{\nabla m_S \times \nabla m_{EM}}{\|\nabla m_{EM} \times \nabla m_S\|} \times \nabla m_S \right), \quad (11)$$

$$\frac{\partial F}{\partial m_S} = 2\beta J_S^T (d_S - G_S(m_S)) + \gamma \nabla \cdot \left( \frac{\nabla m_{EM} \times \nabla m_S}{\|\nabla m_{EM} \times \nabla m_S\|} \times \nabla m_{EM} \right), \quad (12)$$

其中: $J_{EM}$  和  $J_S$  指电磁和地震正演模型的雅可比矩阵.根据得到的梯度更新模型的参数,例如可以使用

梯度下降法:

$$m_{EM}^{k+1} = m_{EM}^k - \eta \frac{\partial F}{\partial m_{EM}}, \quad (13)$$

$$m_S^{k+1} = m_S^k - \eta \frac{\partial F}{\partial m_S}, \quad (14)$$

其中: $\eta$  是步长参数.当目标函数  $F$  或模型更新量小于某个阈值时,停止迭代,可得到最终反演的结果.

交叉梯度函数是实现联合反演的重要途径.例如,张镭哲等(2019)实现了多种地球物理方法的多交叉梯度约束二维联合反演算法,并通过设计实验验证了联合反演结果相较于单一反演更加精准.彭森等(2013)提出一种三维联合反演算法,通过交叉梯度耦合约束,解决了大地电磁和地震走时资料单一反演一致性差的问题,并克服了基于物性参数耦合的局限性.该算法实现了电阻率和速度模型的共同反演,提高了结果的准确性和可靠性.傅磊和刘四新(2016)提出了一种结合初至纵波与瑞雷面波的交叉梯度联合反演策略,在反演目标函数中加入 P 波速度和 S 波速度的交叉梯度作为正则化约束项,使得两者在反演过程中相互制约与约束,从而实现了地震初至 P 波与瑞雷面波的联合反演.吴萍萍等(2020)采用有限内存拟牛顿(L-BFGS)算法,分别对电阻率法和背景噪声法进行了三维反演,独立构建了各自的地底模型.随后,引入交叉梯度函数,实现了电阻率与速度模型的结构耦合,并通过交替迭代的方式完成了电阻率法与背景噪声法的三维联合反演.

Penta de Peppo 等(2024)提出了一种新的交叉梯度算法,用于在非平坦地形的情况下,联合反演电阻率层析成像(ERT)和地震折射层析成像(SRT)数据,同时进行结构化网格,避免对物理长度尺度的假设,以适合在不规则网格上进行反演.通过新的标准化交叉梯度(SCG)指数和模糊 C 均值(FCM)分析评估结果质量. SCG 通过比较独立反演和联合反演后的交叉梯度值来评估结构相似性的变化. FCM 分析通过成员函数评估重建的准确性,提供了主要单元的位置和形状的定量重建,有助于检测现场层序变化(图5).

图6、图7展示了该方法的可靠性,通过比较独立反演和联合反演结果,尤其在电阻率模型和低敏感区域或在电阻率和速度急剧变化的区域,联合反演能显著提高模型重建的准确性.如图8、图9展示了实测数据的应用结果,进一步证实了联合反演在低敏感深部区域、不同层之间的界面附近以及地球

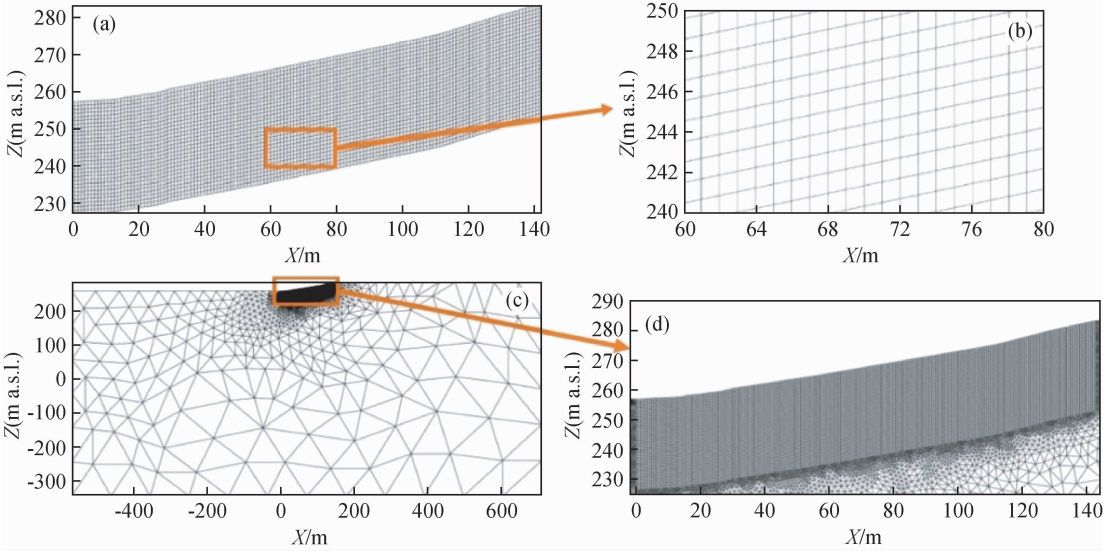


图5 FlexiMesh生成的用于反演的结构化网格(修改自 Penta de Peppo *et al.*,2024)  
(a)用于反演的网格;(b)网元细节;(c)用于 ERT 正演的细化网格;(d)参数区域 ERT 正演网格细节.  
Fig.5 Structured mesh generated by FlexiMesh for inversion (After Penta de Peppo *et al.*, 2024)  
(a) Mesh used for inversion; (b) Mesh element details; (c) Refined mesh used for ERT orthorectification;  
(d) Details of ERT orthorectified mesh for parameter regions.

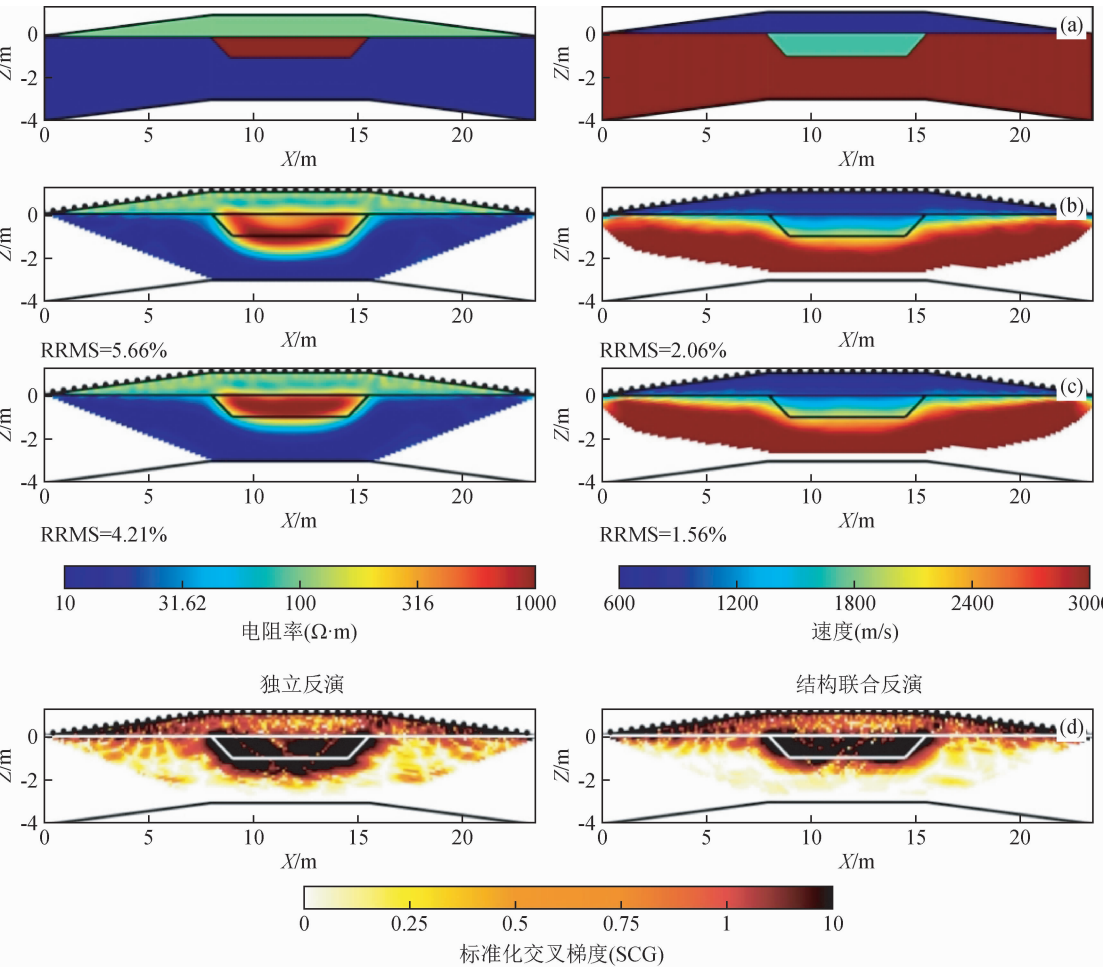


图6 合成示例中的真实模型、反演结果以及交叉梯度值(修改自 Penta de Peppo *et al.*,2024)  
(a)真实模型;(b)独立反演;(c)交叉梯度联合反演;(d)标准化交叉梯度值.

Fig.6 Real model, inversion results, and cross-gradient values in the synthesized example(After Penta de Peppo *et al.*, 2024)  
(a) Real model; (b) Independent inversion; (c) Cross-gradient joint inversion; (d) Standardized cross-gradient.

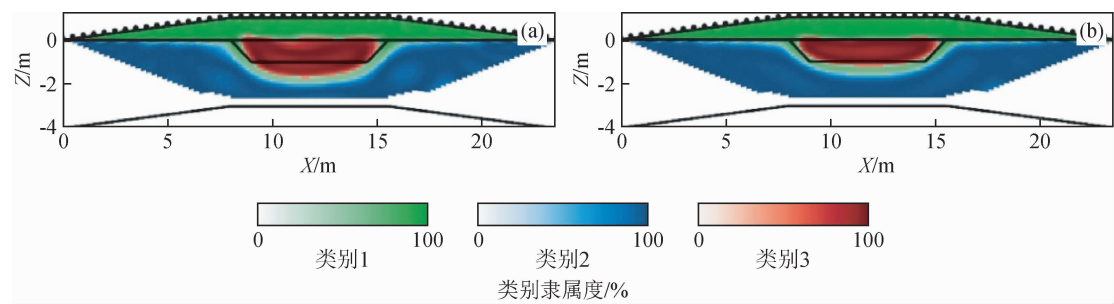


图7 合成示例中反演的聚类分析结果(修改自 Penta de Peppo *et al.*,2024)

(a) 独立反演;(b) 结构联合反演.

Fig. 7 Cluster analysis results of inversions in the synthesis example (After Penta de Peppo *et al.*, 2024)

(a) Independent inversion; (b) Structural joint inversion.

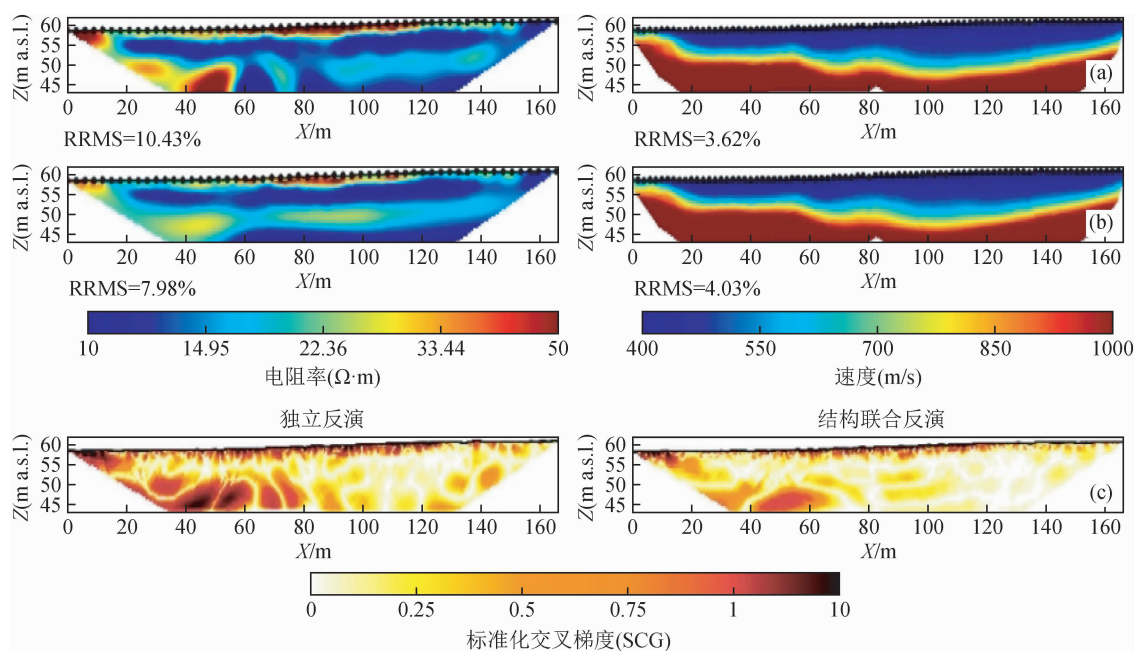


图8 实地案例中反演结果及交叉梯度值(修改自 Penta de Peppo *et al.*,2024)

(a) 独立反演;(b) 交叉梯度联合反演;(c) 标准化交叉梯度值.

Fig. 8 Inversion results and cross-gradient values in the field cases (After Penta de Peppo *et al.*, 2024)

(a) Independent inversion; (b) Cross-gradient joint inversion; (c) Standardized cross-gradient.

物理属性急剧变化区域的优势. 总体而言,该方法在提高 ERT 和 SRT 数据联合反演的准确性方面具有显著效果,特别适用于复杂地质环境,反演结果不仅提高了模型的分辨率,还增强了对地质单元的识别和解释精度.

1.3 基于深度学习的联合反演

当前,机器学习领域取得了巨大的突破,这为联合反演技术的进一步发展提供了巨大的推动力. 传统的电磁和地震联合反演方法,通常依赖于模型驱动的反演目标函数,并通过交叉梯度和物理模型约

束来优化反演结果. 这种方法虽然在一定程度上可以实现地下介质参数的定量预测,但在处理复杂地质环境和大规模数据时存在一定的局限性.

深度学习作为一种实现机器学习的重要技术手段,尤其擅长处理复杂非线性反演问题,并能够从海量数据中自动学习出潜在的规律. 在电磁与地震联合反演中,深度学习不仅可以自动构建目标函数,简化参数选择和优化过程,还能在非常复杂的地质体形态恢复中发挥重要作用. 例如,神经网络能够有效地捕捉电阻率与速度之间的非线性关系,从而提高

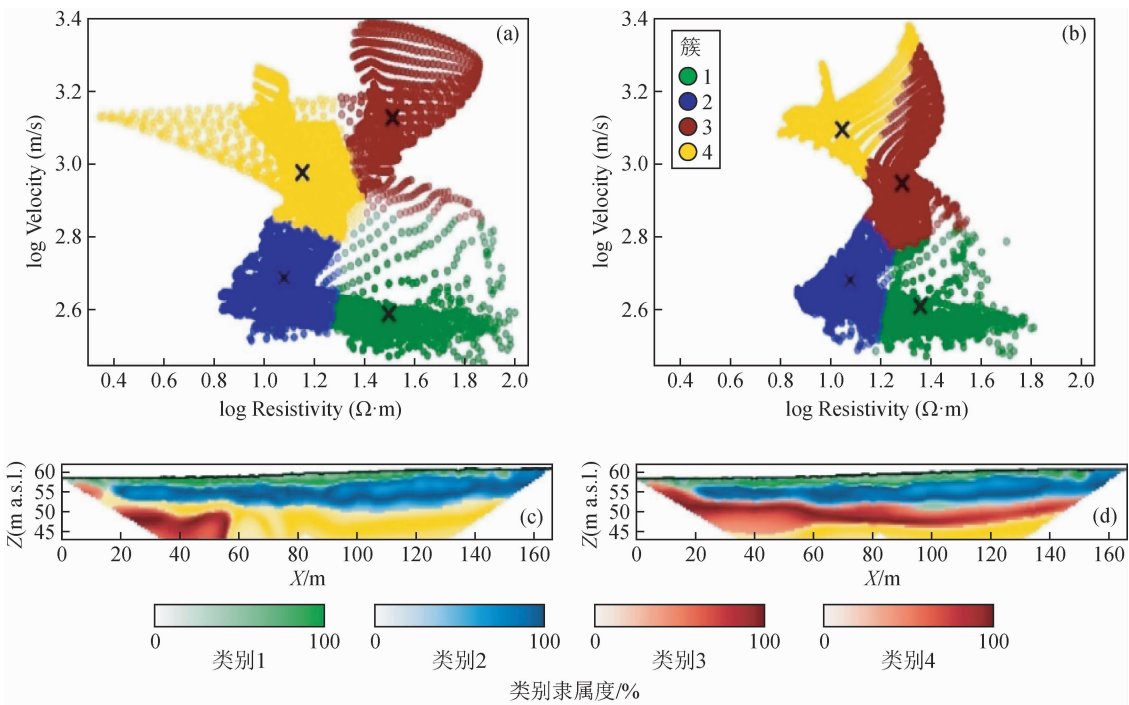


图 9 实地案例中反演聚类分析结果 (修改自 Penta de Peppo *et al.*, 2024)

(a) 独立反演聚类结果散点图; (b) 结构联合反演聚类结果散点图; (c) 独立反演聚类分析; (d) 结构联合反演聚类分析.

Fig. 9 Results of inverse cluster analysis in field cases (After Penta de Peppo *et al.*, 2024)

(a) Scatter plots of clustering results from independent inversion; (b) Scatter plots of clustering results from structural joint inversion; (c) Cluster analysis from independent inversion; (d) Cluster analysis from structural joint inversion.

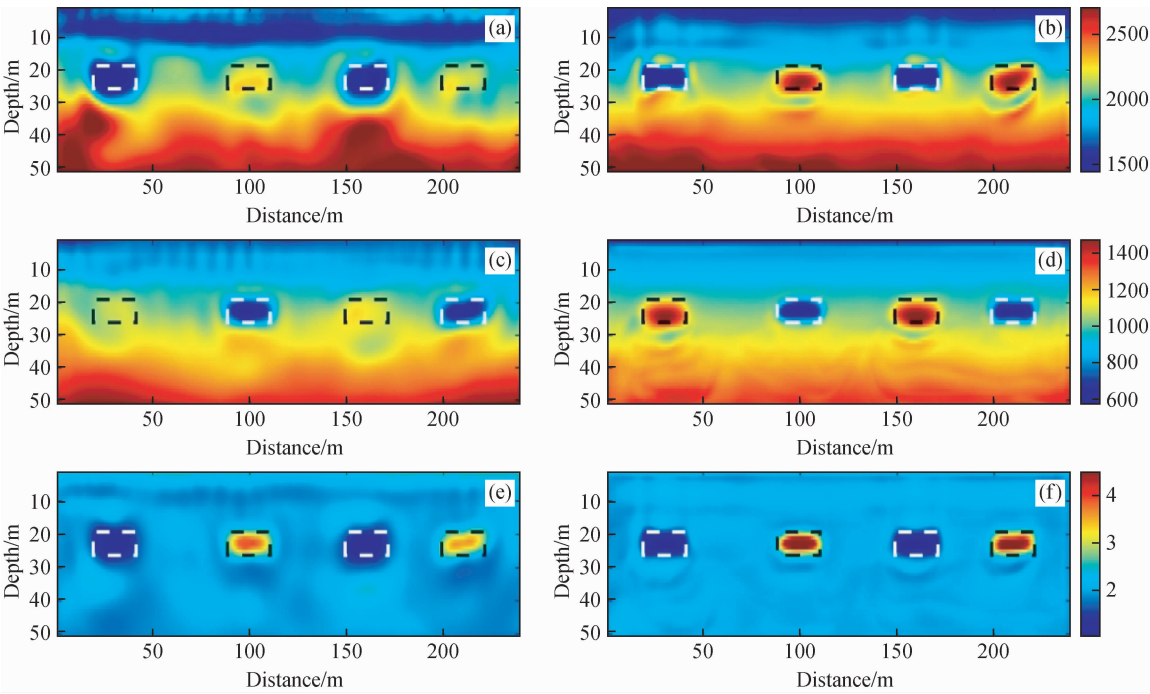


图 10 传统的 EFWI 与提出的 ENFWI 反演模型对比 (修改自 Zhang *et al.*, 2024)

(a) EFWI 的 P 波速度层析成像; (b) ENFWI 的 P 波速度层析成像; (c) EFWI 的 S 波速度层析成像; (d) ENFWI 的 S 波速度层析成像; (e) EFWI 的  $V_p/V_s$  模型成像; (f) ENFWI 的  $V_p/V_s$  模型成像.

Fig. 10 Comparison between the traditional EFWI and the proposed ENFWI inversion models (After Zhang *et al.*, 2024)

(a) P-wave velocity tomography of EFWI; (b) P-wave velocity tomography of ENFWI; (c) S-wave velocity tomography of EFWI; (d) S-wave velocity tomography of ENFWI; (e)  $V_p/V_s$  ratio of EFWI; (f)  $V_p/V_s$  ratio of ENFWI.

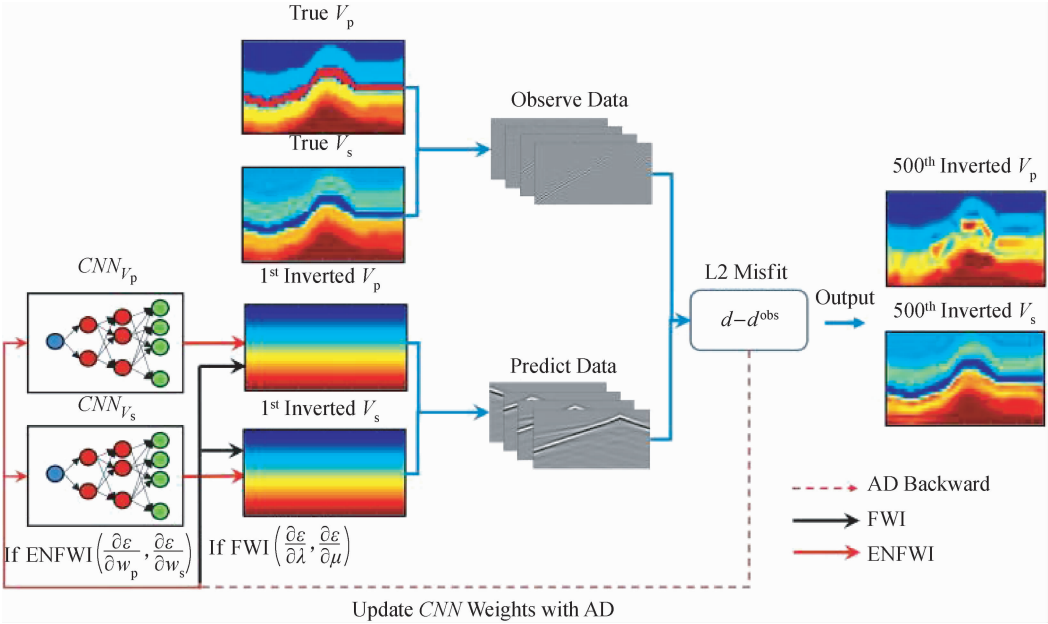


图 11 提出的 ENFWI 工作流程 (Zhang *et al.*,2024)

Fig. 11 The proposed ENFWI workflow (Zhang *et al.*, 2024)

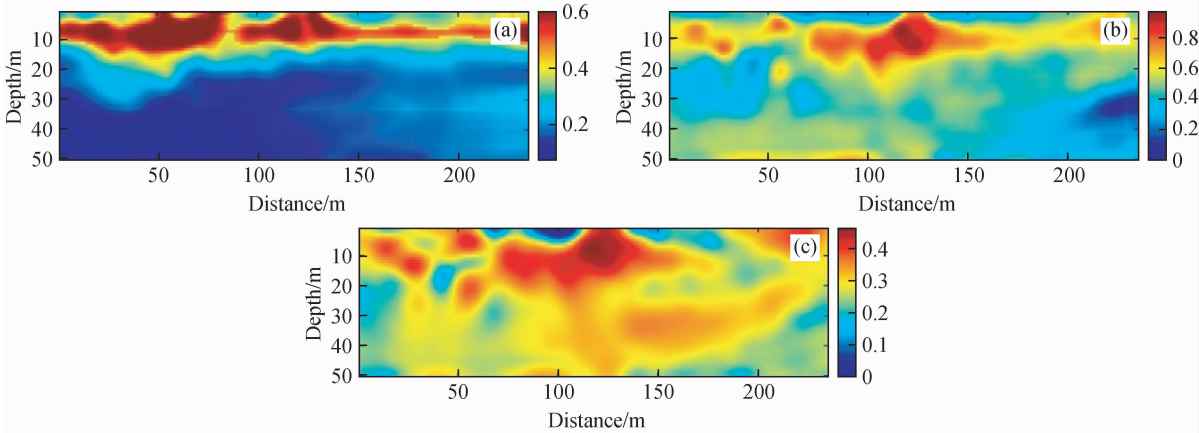


图 12 使用 ENFWI 反演的模型及其泊松比 (修改自 Zhang *et al.*,2024)

(a) 孔隙度模型; (b) 含水饱和度模型; (c) 泊松比.

Fig. 12 Models and their Poisson ratios using ENFWI inversion (After Zhang *et al.*, 2024)

(a) Porosity models; (b) Water saturation models; (c) Poisson's ratio.

了反演结果的精确度. 特别是在复杂的地下异常体成像中, 基于深度学习的联合反演方法能够显著提高异常体的形态恢复精度, 甚至能够突破传统方法的局限, 识别出更加细致的地下结构.

此外, 深度学习具有处理大规模数据的优势, 尤其是在并行处理、数据预测和模式识别方面. 传统反演方法在处理大量观测数据时, 往往会面临计算效率低、处理时间长等问题, 而深度学习技术能够通过高效的算法加速这一过程, 为深地和深海的勘探提

供更为高效的技术支持.

深度学习已成为提高联合反演精度和效率的关键技术之一. 例如, Hu 等 (2023, 2024) 聚焦于深度学习增强的多物理场联合反演技术, 提出了 DLE 框架及其扩展方法, 通过结合深度神经网络和传统反演流程, 利用结构相似性和深度感知损失等策略, 实现了对不同物理模型的联合重建, 提高了反演结果的准确性和效率, 并在合成数据和实际地质案例中验证了该方法的有效性. Zhang 等 (2024) 的研究中

提出了一种创新的集成方法,该方法结合了弹性神经网络全波形反演(ENFWI)与岩石物理反演框架,以提高对含水层饱和度和孔隙度的预测精度. 这种方法的核心在于利用卷积神经网络(CNN)处理复杂的地震数据,并结合传统的物理反演技术. ENFWI方法通过两个独立的CNN架构来生成 $V_p$ (纵波速度)和 $V_s$ (横波速度)的梯度,这种方法有效地抑制了弹性波反演中常见的串扰噪声,并提高了低信噪比条件下的鲁棒性. 如图10所示,ENFWI在处理合成模型数据时,相较于传统的全波形反演(EFWI)方法,能够更准确地识别局部的高速和低速异常区域,尤其是在低信噪比条件下,ENFWI的反演结果更为可靠.

图11展示了如何通过两个独立的CNN架构生成反演的 $V_p$ 和 $V_s$ 模型,并利用自动微分(AD)算法计算模型梯度,代替了传统的伴随状态方法. 这种计算流程不仅提高了计算效率,而且通过迭代更新CNN权重,最终输出了更为精确的反演结果.

在实际应用中,ENFWI方法不仅能够提高反演的速度和精度,还能够揭示更详细的地质结构特征. 如图12所示,该方法在沙特阿拉伯Wadi Qudaid地区的实地数据测试中,成功识别了含水层和地下结构的分布,为地下水补给路径的分析提供了重要信息.

## 2 震电联合反演的挑战

### 2.1 数据差异性:信噪比、分辨率

首先,电磁数据和地震数据的信噪比存在差异. 电磁数据通常受到电磁干扰和噪声的影响较大,而地震数据则可能受到地表运动、背景噪声等因素的影响. 这些差异导致了电磁和地震数据在反演中具有不同的精度和可靠性. 在联合反演过程中,如果两种数据的质量差异较大,可能会影响反演结果的准确性. 因此,如何处理这种差异性,保持反演结果的精度和可靠性,是当前联合反演面临的重要问题.

其次,电磁数据和地震数据的分辨率也存在显著差异. 电磁反演一般能够提供较为粗略的地下层位信息,而地震数据则能够提供更为精确的地层速度分布. 然而,由于两者的分辨率不同,如何有效融合这两种数据,确保两种数据能够互补并提供更为精确的地下结构,是当前研究的重点. 在大数据处理中,数据的多样性和复杂性进一步增加了融合的难度. 不同分辨率的数据在融合时需要进行精细的匹配和协调,以避免信息丢失或失真.

### 2.2 物性参数的耦合与物理模型构建

其次,电磁反演和地震反演分别依赖不同的物性参数. 电磁反演通常依赖于地下介质的电导率(或电阻率)来推测地下结构,而地震反演则依赖于地下介质的波速(如P波速度和S波速度)来推断地下构造. 由于电阻率和速度之间没有直接的物理关系,如何在联合反演中建立这两者之间的联系,以约束联合反演问题,始终是一个技术难题. 在实际应用中,为了确定物性参数之间的耦合关系,需要进行大量的计算和模拟. 然而,随着数据规模的增大和模型复杂度的提高,计算过程中面临着计算资源不足和计算效率低下的问题. 传统计算方法难以在合理时间内完成复杂的耦合关系分析和模型构建,如何采用并行运算、云计算等先进技术,提高模拟效率,突破计算瓶颈,是未来研究的关键.

目前,解决这一难题的一种方法是通过交叉梯度约束和物理模型的耦合,在目标函数中引入相应的正则化项,试图通过约束两种物性参数之间的关系来优化反演结果. 然而,由于电阻率和速度在不同地质条件下的变化方式不同,如何为这两种物性参数构建合适的耦合关系,并合理设置交叉梯度项和物理模型约束项的权重因子,仍然是电磁与地震联合反演的难点之一.

### 2.3 数据融合与多源信息的整合

最后,电磁和地震联合反演还需要面对多源信息的融合问题. 在实际的勘探过程中,除了电磁和地震数据外,往往还会涉及其他地球物理勘探手段(如重力、磁力、地面微震等)以及遥感数据、地质勘查数据等. 如何有效地将这些不同来源的数据进行融合,并提取出有用的地下信息,成为联合反演技术中的另一个关键问题. 多源数据融合不仅要求不同数据类型之间能够互补,还需要通过有效的算法设计确保数据之间的协调性和一致性. 如何利用大数据分析技术挖掘数据间的潜在关联,提升融合效果,也是未来需要重点关注的方向.

## 3 震电联合反演的展望

国家提出了以深地、深海、深空为主攻方向的战略目标,旨在通过科技创新推动国土资源勘查领域的重大突破,构建面向地球深部、深海空间及深空对地观测的战略科技新格局. 随着资源勘查的深度和广度不断扩大,传统的勘探技术面临着局限性,尤其是在深地和深海的勘探过程中,电磁与地震联合反演方法作为一种多物理场融合的地球物理勘探技

术,展现出了巨大的潜力.震电联合反演不仅能够提高地下结构成像的准确性,而且能够为复杂地下环境中的资源探测和灾害监测提供更为精确的地层信息.

随着深度学习技术的不断发展和电磁、地震勘探技术的持续进步,震电联合反演必将在未来的深地、深海和深空勘探中发挥更加重要的作用.未来的联合反演方法将逐步摆脱对传统物理建模和经验公式的依赖,转而发挥数据驱动方法的优势,特别是基于人工智能的深度学习模型.这种转变将显著提升勘探的效率和准确性,尤其在复杂地质环境中,能够实现地下结构的更精确成像.

同时,随着计算能力的持续增强和大数据处理技术的进步,震电联合反演的规模和精度也将得到进一步提升.未来的勘探工作不仅将更加依赖于电磁与地震数据的联合反演,还将逐步引入更多的地球物理勘探数据,通过多模态、多源信息的融合,实现对地下资源和结构的全面认识.

总之,电磁与地震联合反演虽然面临诸多挑战,但也迎来了新的发展机遇.随着深度学习和人工智能技术的引入,震电联合反演技术将在深地、深海、深空等复杂环境中的应用前景广阔,为资源勘探、环境监测、灾害预警等领域提供更加完善的技术支持,推动国土资源领域的科技创新和突破.

## 4 结 论

本文综述了基于电磁与地震联合反演的地球物理勘探方法的研究进展,并对其未来的发展方向进行了展望.电磁勘探和地震勘探作为两种基于不同物理机制的地球物理勘探方法,各自在地下目标探测中存在一定的局限性.然而,通过联合反演地震与电磁数据,可以有效降低单一数据反演的多解性,提高地层参数的预测精度,从而显著提升反演结果的可靠性.

本文首先概述了电磁与地震联合反演的分类及发展历程,其次介绍了联合反演的原理及应用实例.研究表明,联合反演技术能够整合电磁、地震、重磁等不同地球物理方法的数据,以获取更为精确的地下结构信息;联合反演的关键在于如何有效地融合多物理数据来降低解的多解性、优化反演精度.此外,本文还探讨了岩石物理模型和结构相似性方法,以及深度学习技术在联合反演中的应用,这些方法为解决传统反演方法可能面临的多解性和精度问题提供了新的途径.

尽管电磁与地震联合反演技术取得了一定的进展,但仍面临数据差异性、物性参数耦合与物理模型构建、数据融合与多源信息整合等挑战.未来的研究需将更加依赖于数据驱动的方法,尤其是基于人工智能的深度学习模型,以进一步提高勘探效率和准确性.随着计算能力的不断提升和大数据处理技术的进步,预计电磁与地震联合反演的规模和精度有望进一步扩展,为深地、深海、深空等复杂环境的资源勘探、环境监测、灾害预警等领域提供数据及技术支持,推动国土资源领域的科技创新和突破.

**致 谢** 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

## References

- Alekseev A S. 1991. Quantitative description and general properties of joint inversion solution (comprehensive geophysics). Lin A H Trans. // Abstracts of the 61st Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysicists (in Chinese). Houston, 595-596.
- Alyousuf T, Li Y G, Krahenbuhl R, *et al.* 2024. Three-axis borehole gravity monitoring for CO<sub>2</sub> storage using machine learning coupled to fluid flow simulator. *Geophysical Prospecting*, 72(2): 767-790, doi: 10.1111/1365-2478.13413.
- Archie G E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(1): 54-62.
- Bosch M, McGaughey J. 2001. Joint inversion of gravity and magnetic data under lithologic constraints. *The Leading Edge*, 20(8): 877-881.
- Bosch M. 2002. Lithology-constrained joint inversion of gravity and magnetic data. *Progress in Exploration Geophysics*, 25(2): 74-78.
- Chen D J, Yu P. 2005. The application of joint inversion of magnetotelluric and seismic data in Western Asia. *Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese)*, 44(3): 251-256, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2005.03.014.
- Chen Z, Tan H D, Peng M. 2023. Two-dimensional joint inversion of data of resistivity method and gravity exploration based on summative gradient constraint of physical properties parameters. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 38(1): 171-184, doi: 10.6038/pg2023GG0462.
- Dobróka M, Gyulai Á, Ormos T, *et al.* 1991. Joint inversion of seismic and geoelectric data recorded in an underground coal mine. *Geophysical Prospecting*, 39(5): 643-665.
- Fan X C, Wang J L. 1995. Typical geological and geophysical models and comprehensive interpretation of the Xingshan area, northern Songliao Basin. // Wang J L, Wu J S. *Comprehensive Geophysical Study of Typical Chinese Hydrocarbon Basins (in Chinese)*. Beijing: Petroleum Industry Press, 112-124.
- Fang Y, Wang J, Meng X H, *et al.* 2022. An efficient cross-gradient joint inversion algorithm for gravity and magnetic data using a sequential strategy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4510116, doi: 10.1109/TGRS.2022.3182690.
- Faust L Y. 1953. A velocity function including lithologic variation. *Geophysics*, 18(2): 271-288.
- Fu L, Liu S X. 2016. Joint inversion of first arrival P waves and Rayleigh waves based on cross-gradient constraint. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 59(12): 4464-4472, doi: 10.6038/cjg20161209.
- Gallardo L A, Meju M A. 2003. Characterization of heterogeneous near-

- surface materials by joint 2D inversion of dc resistivity and seismic data. *Geophysical Research Letters*, 30(13): 1658, doi: 10.1029/2003GL017370.
- Gallardo L A, Meju M A. 2004. Joint two-dimensional DC resistivity and seismic travel time inversion with cross-gradients constraints. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B3): B03311, doi: 10.1029/2003JB002716.
- Gallardo L A, Meju M A. 2007. Joint two-dimensional cross-gradient imaging of magnetotelluric and seismic traveltimes data for structural and lithological classification. *Geophysical Journal International*, 169(3): 1261-1272, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03366.x.
- Gan L, Wu Q J, Huang Q H, *et al.* 2022. Structure constrained joint inversion of magnetotelluric data and receiver function. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 65(11): 4460-4470, doi: 10.6038/cjg2022Q0319.
- Gassmann F. 1951. Über die elastizität poröser medien. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 96: 1-23.
- Golizdra G Y. 1980. Statement of the problem of comprehensive interpretation of gravity fields and seismic observations. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 16: 535-539.
- He H Y, Li T L, Zhang R Z, *et al.* 2022. Three-dimensional cross-gradient joint inversion of gravity, gravity gradient and magnetotelluric data based on smooth-focusing regularization method. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 65(5): 1822-1838, doi: 10.6038/cjg2022P0171.
- He W H, Wang J L, Yu P. 2009. Overview of the status and prospect of geophysical joint inversion. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 24(2): 530-540, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.022.
- Hu J D. 1989. Combinative inversions of transient electromagnetic sounding data and direct-current sounding data. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 24(5): 549-558, 618.
- Hu Y Y, Wei X L, Wu X Q, *et al.* 2023. A deep learning-enhanced framework for multiphysics joint inversion. *Geophysics*, 88(1): K13-K26, doi: 10.1190/geo2021-0589.1.
- Hu Y Y, Wu X Q, Sun J J, *et al.* 2024. Deep learning framework for multi-physics joint inversion and its application in the Decorah area. //IGARSS 2024-2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Athens, Greece: IEEE, 6933-6937, doi: 10.1109/IGARSS53475.2024.10640431.
- Hu Z Z, Shi Y L, Liu Y X, *et al.* 2020. Nonlinear constrained joint inversion of MT and gravity data. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 55(1): 226-232, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2020.01.026.
- Hu Z Z, Liu X J, Wang Z G, *et al.* 2023. Joint inversion of time-frequency electromagnetic and magnetotelluric data. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 58(3): 720-727, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2023.03.025.
- Huang G J, Bai C Y. 2010. Simultaneous inversion with multiple traveltimes within 2-D complex layered media. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 53(12): 2972-2981, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.12.021.
- Huang X, Ding Z F, Ning J Y, *et al.* 2022. Joint inversion of the lithospheric structure of the central North China Craton from ambient noise and seismic surface wave. *Acta Seismologica Sinica (in Chinese)*, 44(4): 539-554, doi: 10.11939/jass.20210042.
- Jing R Z, Bao G S, Chen S J. 2003. A review of the researches for geophysical combinative inversion. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 18(3): 535-540, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2003.03.033.
- Jing R Z, Bao G S, Lin J, *et al.* 2004. A geophysical integration inversion method based on data fusion. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 47(1): 143-150.
- Kong F X, Tan H D, Liu J X. 2024. Two-dimensional joint inversion based on the marine controlled-source electromagnetic method and seismic full-waveform. *Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese)*, 48(1): 67-76, doi: 10.11720/wtyht.2024.2583.
- Kong R J, Hu X Y, Cai H Z. 2023. Three-dimensional joint inversion of gravity and magnetic data using Gramian constraints and Gauss-Newton method. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 66(8): 3493-3513, doi: 10.6038/cjg2022Q0394.
- Lan T, Liu H, Liu N, *et al.* 2018. Joint inversion of electromagnetic and seismic data based on structural constraints using variational born iteration method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(1): 436-445, doi: 10.1109/TGRS.2017.2749240.
- Li F, Cheng J L, Yang S T, *et al.* 2020. Experimental study on joint inversion of water conducted karstic collapse column based on mine TEM and seismic exploration. *Journal of China Coal Society (in Chinese)*, 45(7): 2472-2481.
- Li L L, Zhou J Y, Ma G Q, *et al.* 2024. Study of fast joint physical inversion methods of gravity and magnetic data with undulating observation surface constraints. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 39(4): 1447-1456, doi: 10.6038/pg2024HH0390.
- Li M, Yu P, Zhang Z Y, *et al.* 2020. Study of 2-D joint inversion of direct current resistivity and audio magnetotelluric data using adaptive progressive mesh refinement strategy. *Journal of Tongji University (Natural Science) (in Chinese)*, 48(1): 114-122, doi: 10.11908/j.issn.0253-374x.19112.
- Li X Y, Shi L, Li Y H. 2024. Crust and uppermost mantle P-wave velocity structure of the North China: Constraints from joint inversion of local earthquake body-wave traveltimes and gravity anomalies. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 67(4): 1439-1453, doi: 10.6038/cjg2023R0061.
- Liu J C, Zhang Z Y, Zhou F, *et al.* 2023. Two-dimensional joint inversion of DC resistivity method and seismic traveltime tomography method based on the FCM cluster constraint. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 66(7): 3048-3059, doi: 10.6038/cjg2022Q0307.
- Liu J X, Liu R, Guo R W, *et al.* 2023. Research progress of electromagnetic method in nonferrous metal mineral exploration. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals (in Chinese)*, 33(1): 261-284, doi: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-43043.
- Liu M H, Cai H Z, Yang H, *et al.* 2022. Three-dimensional joint inversion of ground and semi-airborne transient electromagnetic method. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 65(10): 3997-4011, doi: 10.6038/cjg2022P0897.
- Liu Y, Lü Q T, Meng G X, *et al.* 2012. Joint electromagnetic and seismic inversion survey: status and prospect. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 27(6): 2444-2451, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.06.019.
- Lösing M, Moorkamp M, Ebbing J. 2023. Joint inversion based on variation of information—A crustal model of Wilkes land, east Antarctica. *Geophysical Journal International*, 232(1): 162-175, doi: 10.1093/gji/ggac334.
- Lowe M, Jordan T, Moorkamp M, *et al.* 2024. The 3D crustal structure of the Wilkes Subglacial Basin, East Antarctica, using variation of information joint inversion of gravity and magnetic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129(10): e2023JB027794, doi: 10.1029/2023JB027794.
- Luo M, Pei J X, Duan S M, *et al.* 2024. Study on deep structure of the residual basin of the Yellow Sea using VTI medium Marine CSEM and MT data inversion method. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 67(5): 1853-1865, doi: 10.6038/cjg2023Q0687.
- Luo N. 2007. Numerical analysis of Archie formulae and its meanings. *Acta Petrolei Sinica (in Chinese)*, 28(1): 111-114, doi: 10.3321/j.issn:0253-2697.2007.01.022.
- Ma J X, Deng Y F, Li X, *et al.* 2025. Recent advances in machine learning-enhanced joint inversion of seismic and electromagnetic data. *Surveys in Geophysics*, 46(1): 197-225, doi: 10.1007/s10712-024-09867-3.
- Meju M A. 1996. Joint inversion of TEM and distorted MT soundings: Some effective practical considerations. *Geophysics*, 61(1): 56-65.
- Meng Q F, Ma G Q, Li L L, *et al.* 2022. 3-D cross-gradient joint inversion method for gravity and magnetic data with unstructured grids based on second-order Taylor formula: Its application to the southern greater Khingan Range. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 5914816, doi: 10.1109/TGRS.2022.

- 3172337.
- Moorkamp M. 2017. Integrating electromagnetic data with other geophysical observations for enhanced imaging of the earth: a tutorial and review. *Surveys in Geophysics*, 38(5): 935-962, doi: 10.1007/s10712-017-9413-7.
- Pang M Q, Ba J, Carcione J M, *et al.* 2021. Elastic-electrical rock-physics template for the characterization of tight-oil reservoir rocks. *Lithosphere*, 2021(S3): 3341849, doi: 10.2113/2021/3341849.
- Peng G M, Liu Z. 2020. An overview of joint electromagnetic-seismic inversion and its future development. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 55(2): 465-474, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2020.02.025.
- Peng M, Tan H D, Jiang M, *et al.* 2013. Three-dimensional joint inversion of magnetotelluric and seismic travel time data with cross-gradient constraints. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 56(8): 2728-2738, doi: 10.6038/cjg20130821.
- Penta de Peppo G, Cercato M, De Donno G. 2024. Cross-gradient joint inversion and clustering of ERT and SRT data on structured meshes incorporating topography. *Geophysical Journal International*, 239(2): 1155-1169, doi: 10.1093/gji/ggae326.
- Raiche A P, Jupp D L B, Rutter H, *et al.* 1985. The joint use of coincident loop transient electromagnetic and Schlumberger sound to resolve layered structures. *Geophysics*, 50(10): 1618-1627.
- Rasmussen H J, Hohmann G W. 1991. Cooperative inversion of transient electromagnetic and gravity data for depth determination in a basin. //SEG Technical Program Expanded Abstracts 1991. Houston, Texas: Society of Exploration Geophysicists, 614-617.
- Revil A, Florsch N. 2010. Determination of permeability from spectral induced polarization in granular media. *Geophysical Journal International*, 181(3): 1480-1498, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04573.x.
- Sasaki Y. 1989. Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data. *Geophysics*, 54(2): 254-262.
- Savino J M, Rodi W L, Masso J F. 1980. Simultaneous inversion of multiple geophysical data sets for earth structure. //50th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expi. Geophys. Expanded Abstracts, 438-439.
- Sharma S P, Kaikkonen P. 1999. Appraisal of equivalence and suppression problems in 1D EM and DC measurements using global optimization and joint inversion. *Geophysical Prospecting*, 47(2): 219-249.
- Shi Z J, Yu T X, Han W G, *et al.* 2020. Joint inversion technology of seismic and ERT data and its application in the detection of mine goaf. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 35(1): 345-350, doi: 10.6038/pg2020CC0494.
- Sun J G. 2007. Archie's formula: historical background and earlier debates. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 22(2): 472-486, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.02.020.
- Sun J J, Li Y G. 2015. Multidomain petrophysically constrained inversion and geology differentiation using guided fuzzy c-means clustering. *Geophysics*, 80(4): 1D1-ID18, doi: 10.1190/GEO2014-0049.1.
- Suo X D, Zhang R F, Shi D Y, *et al.* 2023. Application of comprehensive geophysical prospecting technology in deep oil and gas exploration in Hetao Basin: Taking Linhe depression as an example. *Earth Science (in Chinese)*, 48(2): 749-763, doi: 10.3799/dqkx.2022.465.
- Vasco D W, Peterson J E Jr, Majer E L. 1996. A simultaneous inversion of seismic traveltimes and amplitudes for velocity and attenuation. *Geophysics*, 61(6): 1738-1757.
- Vozoff K, Jupp D L B. 1977. Effective search for a buried layer: An approach to experimental design in geophysics. *Exploration Geophysics*, 8(1): 6-15.
- Wang J, Meng X H, Chen Z X, *et al.* 2013. The theory of cross-gradient and its application in geophysical joint inversion. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 28(4): 2094-2103, doi: 10.6038/pg20130454.
- Wang J L, Wu J S. 1995. *Integrated Geophysical Researches on Typical Petroliferous Basins in China (in Chinese)*. Shanghai: Tongji University Press.
- Wang L, Liu W, Xi Z Z, *et al.* 2024. Deep learning audio-magnetotelluric and transient electromagnetic joint inversion. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 67(11): 4372-4384, doi: 10.6038/cjg2023R0582.
- Wang Y X, Lian X J. 1983. Approach of gravitational and seismic integrated interpretation in oil exploration. *Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese)*, 22(3): 34-41.
- Wei N Y, Yang D K, Li Y C, *et al.* 2021. Deep learning gravity, magnetic and magnetotelluric three-dimensional joint inversion. //2021 China United Academic Annual Meeting of Earth Sciences (in Chinese). 31-34, doi: 10.26914/c.cnkihy.2021.072299.
- Wu P P, Tan H D, Tao T, *et al.* 2020. Three-dimensional joint inversion of the resistivity method and ambient noise method with cross-gradient constraints. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 63(10): 3912-3930, doi: 10.6038/cjg202000066.
- Wu Z H, Song Y, Zhao Z. 2021. Seismic-gravity inverse modeling and deep oil-reservoir prediction of northern Qiangtang depression. *Acta Geoscientica Sinica (in Chinese)*, 42(1): 1-8, doi: 10.3975/cagsb.2020.093001.
- Xu K J, Ji C H, Pang Z H. 2024. Cross-gradient joint inversion of 3D borehole gravity and magnetic data for deep mineral resources exploration. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science) (in Chinese)*, 48(3): 65-74, doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2024.03.007.
- Yan Z W, Tan H D, Peng M, *et al.* 2020. Three-dimensional joint inversion of gravity, magnetic and magnetotelluric data based on cross-gradient theory. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 63(2): 736-752, doi: 10.6038/cjg2020M0355.
- Yang B, Zhang X G, Liu Z, *et al.* 2021. Technique and application of joint magnetotelluric and seismic modeling and constrained inversion based on clustering and multivariate geostatistics. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 56(3): 670-677, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2021.03.025.
- Yang C H, Tong L T, Huang C F. 1999. Combined application of DC and TEM to sea-water intrusion mapping. *Geophysics*, 64(2): 417-425.
- Yang H, Dai S K, Song H B, *et al.* 2002a. Overview of joint inversion of integrated geophysics. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 17(2): 262-271, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2002.02.011.
- Yang H, Wang J L, Wu J S, *et al.* 2002b. Constrained joint inversion of magnetotelluric and seismic data using simulated annealing algorithm. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 45(5): 723-734, doi: 10.3321/j.issn.0001-5733.2002.05.015.
- Yang W C. 1997. *Geophysical Inversion Theory and Method (in Chinese)*. Beijing: Geological Publishing House.
- Yang Z W, Wang J Y, Zhang S Y, *et al.* 1998. Research on joint inversion of 1-D magnetotelluric and seismic data. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 33(1): 78-88.
- Yi K, Zhang Z Y, Li M, *et al.* 2022. Joint inversion of resistivity and permittivity for two dimensional RMT data based on FCM clustering. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 65(6): 2340-2350, doi: 10.6038/cjg2022P0072.
- Yu P, Wang J L, Wu J S, *et al.* 2007. Comparative analysis of inversion methods of retrieving atmospheric profiles with GPS occultation measurements. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 50(2): 529-538, doi: 10.3321/j.issn.0001-5733.2007.02.026.
- Yu P, Dai M G, Wang J L, *et al.* 2008. Joint inversion of gravity and seismic data based on common gridded model with random density and velocity distributions. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 51(3): 845-852, doi: 10.3321/j.issn.0001-5733.2008.03.025.
- Zeng Z W, Chen X, Yang H Y, *et al.* 2020. Joint inversion of magnetotelluric and gravity based on improved differential evolution algorithm and wide-range petrophysical constraints. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 63(12): 4565-4577, doi: 10.6038/cjg202000020.
- Zeng Z W, Chen X, Guo D, *et al.* 2021. Dual-population artificial bee colony algorithm and its application in joint inversion of

magnetotelluric and gravity data. *Oil Geophysical Prospecting* ( in Chinese ), 56(6): 1400-1408, 1447, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2021.06.022.

Zhang C, Li J, Cao H Q. 2024. Integrating elastic neural network seismic waveform with petrophysical inversion framework for critical zone properties estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4510713, doi: 10.1109/TGRS.2024.3451116.

Zhang J, Luo J, Xia Y, *et al.* 2018. Limitation analysis and modification of the Archie equation. *Chinese Journal of Geophysics* ( in Chinese ), 61(1): 311-322, doi: 10.6038/cjg2018J0719.

Zhang R Z, Li T L, Deng H, *et al.* 2019. 2D joint inversion of MT, gravity, magnetic and seismic first-arrival wave traveltime with cross-gradient constraints. *Chinese Journal of Geophysics* ( in Chinese ), 62(6): 2139-2149, doi: 10.6038/cjg2019L0713.

Zhang R Z, Li T L, Liu C, *et al.* 2021. Three-dimensional joint inversion of gravity and gravity gradient data based on data space and sparse constraints. *Chinese Journal of Geophysics* ( in Chinese ), 64(3): 1074-1089, doi: 10.6038/cjg202100104.

Zhang Z H, Liao X L, Cao Y Y, *et al.* 2021. Joint gravity and gravity gradient inversion based on deep learning. *Chinese Journal of Geophysics* ( in Chinese ), 64(4): 1435-1452, doi: 10.6038/cjg202100151.

Zhang Z Y, Yi K, XIE S P, *et al.* 2023. Joint inversion of two-dimensional direct current resistivity and radio-magnetotelluric data based on fuzzy C-Means clustering model constraint. *Journal of Tongji University (Natural Science)* ( in Chinese ), 51(1): 135-144, doi: 10.11908/j.issn.0253-374x.21417.

合反演. 石油地球物理勘探, 55(1): 226-232, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2020.01.026.

胡祖志, 刘雪军, 王志刚, 等. 2023. 时频电磁与大地电磁数据联合反演. 石油地球物理勘探, 58(3): 720-727, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2023.03.025.

黄国娇, 白超英. 2010. 二维复杂层状介质中地震多波走时联合反演成像. 地球物理学报, 53(12): 2972-2981, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.12.021.

黄翔, 丁志峰, 宁杰远, 等. 2022. 基于背景噪声和地震面波联合反演华北克拉通中部岩石圈结构. 地震学报, 44(4): 539-554, doi: 10.11939/jass.20210042.

敬荣中, 鲍光淑, 陈绍裘. 2003. 地球物理联合反演研究综述. 地球物理学进展, 18(3): 535-540, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2003.03.033.

敬荣中, 鲍光淑, 林剑, 等. 2004. 一种基于数据融合的地球物理数据联合反演方法——以 VES 和 MT 为例. 地球物理学报, 47(1): 143-150.

孔繁祥, 谭捍东, 刘建勋. 2024. 海洋可控源电磁法与地震全波形二维联合反演研究. 物探与化探, 48(1): 67-76, doi: 10.11720/wtyht.2024.2583.

孔瑞金, 胡祥云, 蔡红柱. 2023. 基于 Gramian 约束与高斯-牛顿算法的重磁三维联合反演. 地球物理学报, 66(8): 3493-3513, doi: 10.6038/cjg2022Q0394.

李飞, 程久龙, 杨思通, 等. 2020. 矿井 TEM 与地震联合反演导水陷落柱的试验研究. 煤炭学报, 45(7): 2472-2481.

李丽丽, 周建业, 马国庆, 等. 2024. 起伏观测面约束的重磁数据快速联合物性反演方法研究. 地球物理学进展, 39(4): 1447-1456, doi: 10.6038/pg2024HH0390.

李曼, 于鹏, 张志勇, 等. 2020. 二维直流电阻率与音频大地电磁自适应渐进联合反演. 同济大学学报(自然科学版), 48(1): 114-122, doi: 10.11908/j.issn.0253-374x.19112.

李鑫月, 石磊, 李永华. 2024. 近震体波走时与重力联合反演华北地区地壳上地幔顶部 P 波速度结构. 地球物理学报, 67(4): 1439-1453, doi: 10.6038/cjg2023R0061.

刘佳成, 张志勇, 周峰, 等. 2023. 基于 FCM 聚类约束的直流电阻率法与地震走时成像法二维联合反演. 地球物理学报, 66(7): 3048-3059, doi: 10.6038/cjg2022Q0307.

柳建新, 刘嵘, 郭荣文, 等. 2023. 电磁法在有色金属矿产勘查中的研究进展. 中国有色金属学报, 33(1): 261-284, doi: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-43043.

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. 地球物理学报, 65(10): 3997-4011, doi: 10.6038/cjg2022P0897.

刘彦, 吕庆田, 孟贵祥, 等. 2012. 大地电磁与地震联合反演研究现状与展望. 地球物理学进展, 27(6): 2444-2451, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.06.019.

罗鸣, 裴建新, 段双敏, 等. 2024. 基于 VTI 介质海洋 CSEM 和 MT 数据联合反演的黄淮海相残留盆地深部结构研究. 地球物理学报, 67(5): 1853-1865, doi: 10.6038/cjg2023Q0687.

罗娜. 2007. 阿尔奇公式数值分析及其意义. 石油学报, 28(1): 111-114, doi: 10.3321/j.issn:0253-2697.2007.01.022.

彭国民, 刘展. 2020. 电磁和地震联合反演研究现状及发展趋势. 石

Alekseev A S. 1991. 联合反演问题解的定量描述及其一般特性(综合地球物理). 林安华译. //美国勘探地球物理学家学会第 61 届年会论文集. 休斯顿, 595-596.

陈东敬, 于鹏. 2005. 大地电磁与地震联合反演技术在西亚某区的综合应用. 石油物探, 44(3): 251-256, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2005.03.014.

陈卓, 谭捍东, 彭森. 2023. 基于物性参数梯度累加约束的电阻率法和重力勘探数据二维联合反演. 地球物理学进展, 38(1): 171-184, doi: 10.6038/pg2023GG0462.

范兴才, 王家林. 1995. 松辽盆地北部杏山地区典型的地质地球物理模型及综合解释. //王家林, 吴健生. 中国典型含油气盆地综合地球物理研究. 北京: 石油工业出版社, 112-124.

傅磊, 刘四新. 2016. 基于交叉梯度约束的地震初至纵波与瑞雷面波联合反演. 地球物理学报, 59(12): 4464-4472, doi: 10.6038/cjg20161209.

甘露, 吴庆举, 黄清华, 等. 2022. 大地电磁与接收函数结构约束联合反演. 地球物理学报, 65(11): 4460-4470, doi: 10.6038/cjg2022Q0319.

何浩源, 李桐林, 张谡哲, 等. 2022. 三维重力、重力梯度和大地电磁数据的平滑聚焦结构约束联合反演. 地球物理学报, 65(5): 1822-1838, doi: 10.6038/cjg2022P0171.

何委徽, 王家林, 于鹏. 2009. 地球物理联合反演研究的现状与趋势分析. 地球物理学进展, 24(2): 530-540, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.022.

胡建德. 1989. 瞬变电磁测深和直流电测深资料的联合反演. 石油地球物理勘探, 24(5): 549-558, 618.

胡祖志, 石艳玲, 刘云祥, 等. 2020. 电磁与重力数据非线性约束联

油地球物理勘探, 55(2): 465-474, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2020.02.025.

彭森, 谭捍东, 姜枚, 等. 2013. 基于交叉梯度耦合的大地电磁与地震走时资料三维联合反演. 地球物理学报, 56(8): 2728-2738, doi: 10.6038/cjg20130821.

石战结, 余天祥, 韩文功, 等. 2020. 采空区地震与电法探测数据的联合反演研究及应用. 地球物理学进展, 35(1): 345-350, doi: 10.6038/pg2020CC0494.

孙建国. 2007. 阿尔奇(Archie)公式: 提出背景与早期争论. 地球物理学进展, 22(2): 472-486, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.02.020.

索孝东, 张锐锋, 石东阳, 等. 2023. 综合物探技术在河套盆地深层油气勘探中的先导性应用: 以临河凹陷为例. 地球科学, 48(2): 749-763, doi: 10.3799/dqkx.2022.465.

王俊, 孟小红, 陈召曦, 等. 2013. 交叉梯度理论及其在地球物理联合反演中的应用. 地球物理学进展, 28(4): 2094-2103, doi: 10.6038/pg20130454.

王家林, 吴健生. 1995. 中国典型含油气盆地综合地球物理研究. 上海: 同济大学出版社.

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. 地球物理学报, 67(11): 4372-4384, doi: 10.6038/cjg2023R0582.

王一新, 廉西京. 1983. 重力与地震联合解释在石油勘探中的应用. 石油物探, 22(3): 34-41.

魏楠雨, 杨迪琨, 李寅初, 等. 2021. 深度学习重、磁、大地电磁三维联合反演. //2021年中国地球科学联合学术年会论文集(十一)——专题三十一 深部矿产资源探测技术与应用、专题三十二 航空地球物理勘查技术与应用、专题三十三 煤炭资源与矿山地球物理. 31-34, doi: 10.26914/c.cnkihy.2021.072299.

吴萍萍, 谭捍东, 陶涛, 等. 2020. 基于交叉梯度约束的电阻率法和背景噪声法三维联合反演研究. 地球物理学报, 63(10): 3912-3930, doi: 10.6038/cjg202000066.

吴珍汉, 宋洋, 赵珍. 2021. 北羌塘凹陷重力地震联合反演预测深部油藏. 地球学报, 42(1): 1-8, doi: 10.3975/cagsb.2020.093001.

徐凯军, 季春晖, 庞朝辉. 2024. 面向深部矿产资源勘探的井中重磁三维交叉梯度联合反演. 中国石油大学学报(自然科学版), 48(3): 65-74, doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2024.03.007.

闫政文, 谭捍东, 彭森, 等. 2020. 基于交叉梯度约束的重力、磁法和大地电磁三维联合反演. 地球物理学报, 63(2): 736-752, doi: 10.6038/cjg2020M0355.

杨博, 张祥国, 刘展, 等. 2021. 基于聚类和多元地质统计学的地震联合建模约束反演技术及应用. 石油地球物理勘探, 56(3): 670-677, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2021.03.025.

杨辉, 戴世坤, 宋海斌, 等. 2002a. 综合地球物理联合反演综述. 地球物理学进展, 17(2): 262-271, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2002.02.011.

杨辉, 王家林, 吴健生, 等. 2002b. 大地电磁与地震资料仿真退火约束联合反演. 地球物理学报, 45(5): 723-734, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2002.05.015.

杨文采. 1997. 地球物理反演的理论与方法. 北京: 地质出版社.

杨振武, 王家映, 张胜业, 等. 1998. 一维大地电磁和地震数据联合反演方法研究. 石油地球物理勘探, 33(1): 78-88.

易柯, 张志勇, 李曼, 等. 2022. 基于FCM聚类算法的二维RMT电阻率与介电常数联合反演. 地球物理学报, 65(6): 2340-2350, doi: 10.6038/cjg2022P0072.

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. 地球物理学报, 50(2): 529-538, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2007.02.026.

于鹏, 戴明刚, 王家林, 等. 2008. 密度和速度随机分布共网格模型的重力与地震联合反演. 地球物理学报, 51(3): 845-852, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2008.03.025.

曾志文, 陈晓, 杨海燕, 等. 2020. 基于改进差分进化算法的大地电磁测深和重力宽范围物性约束联合反演. 地球物理学报, 63(12): 4565-4577, doi: 10.6038/cjg202000020.

曾志文, 陈晓, 郭冬, 等. 2021. 双种群人工蜂群算法及其在MT和重力联合反演中的应用. 石油地球物理勘探, 56(6): 1400-1408, 1447, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2021.06.022.

张洁, 罗健, 夏瑜, 等. 2018. 阿尔奇公式的适用性分析及其拓展. 地球物理学报, 61(1): 311-322, doi: 10.6038/cjg2018J0719.

张镨哲, 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. 地球物理学报, 62(6): 2139-2149, doi: 10.6038/cjg2019L0713.

张镨哲, 李桐林, 刘财, 等. 2021. 基于数据空间和稀疏约束的三维重力和重力梯度数据联合反演. 地球物理学报, 64(3): 1074-1089, doi: 10.6038/cjg2021O0104.

张志厚, 廖晓龙, 曹云勇, 等. 2021. 基于深度学习的重力异常与重力梯度异常联合反演. 地球物理学报, 64(4): 1435-1452, doi: 10.6038/cjg2021O0151.

张志勇, 易柯, 谢尚平, 等. 2023. 基于模糊C均值聚类 的二维直流电阻率与射频大地电磁联合反演. 同济大学学报(自然科学版), 51(1): 135-144, doi: 10.11908/j.issn.0253-374x.21417.