



引文格式: 李杰, 吴中骁, 赵佃春, 等. 基于平滑反演先验约束的瞬变电磁定源回线一维反演研究[J]. 西北地质, 2026, 59(4): 190–200. DOI: 10.12401/j.nwg.2026035

Citation: LI Jie, WU Zhongxiao, ZHAO Dianchun, et al. One-Dimensional Inversion of Source-Loop Transient Electromagnetics Based on Smoothed Inversion-Derived Prior Model[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(4): 190–200. DOI: 10.12401/j.nwg.2026035

基于平滑反演先验约束的瞬变电磁定源回线 一维反演研究

李杰¹, 吴中骁², 赵佃春¹, 马毓¹, 牛超^{3,*}, 霍超²

(1. 杭锦旗聚能能源有限公司油房壕煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 2. 陕西正通煤业有限责任公司, 陕西 咸阳 713600;
3. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 为取得瞬变电磁精细化反演结果, 提高其对地质问题的解译精度, 开展不同初始模型下的反演研究具有重要意义。研究选取了均匀半空间模型和平滑因子最小二乘法反演结果模型两种不同的初始模型, 以三层地电模型(H型、K型)的正演响应数据进行不同初始模型下的平滑因子最小二乘法与正则化-阻尼最小二乘法反演运算, 对比分析不同初始模型下的反演效果; 利用实测数据进行与正演拟合数据相同的反演计算, 选取单点不同衰减时二次场归一化电位、电阻率、反演结果模型及其对应误差进行对比分析, 结合地质资料对某一完整电阻率剖面进行反演效果分析, 并通过工程案例校验研究结论。结果表明: 以均匀半空间为初始模型进行的平滑因子最小二乘法反演与瞬变电磁数据的拟合效果较差; 同等条件下的正则化-阻尼最小二乘法虽能较为真实地反映地层特征, 但对深部地层信息的刻画不及初始模型为平滑因子最小二乘法反演结果模型; 以平滑因子最小二乘法反演结果作为初始模型的正则化-阻尼最小二乘法反演结果对地下地质条件的反映更加准确。研究结果揭示了不同初始模型的选择会对TEM数据反演效果产生显著影响。通过对比分析, 进一步证实了以平滑因子最小二乘法反演结果作为初始模型的正则化-阻尼最小二乘法反演在精确度和可靠性方面具有较大优势。研究成果为瞬变电磁法在复杂地电结构探测中的应用提供了重要参考和实践指导。

关键词: 瞬变电磁; 初始模型; 平滑因子最小二乘法; 正则化-阻尼最小二乘法; 反演

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)04-0190-11

One-Dimensional Inversion of Source-Loop Transient Electromagnetics Based on Smoothed Inversion-Derived Prior Model

LI Jie¹, WU Zhongxiao², ZHAO Dianchun¹, MA Yu¹, NIU Chao^{3,*}, HUO Chao²

(1. Youfanghao Coal Mine, Hangjinqi Juneng Energy Co., Ltd., Ordos 017000, Inner Mongolia, China; 2. Shaanxi Zhengtong Coal Industry

收稿日期: 2026-06-11; 修回日期: 2026-06-20; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41807190)资助。

作者简介: 李杰(1985-), 男, 高级工程师, 长期从事煤矿安全生产技术管理和灾害防治工作。E-mail: Ljtm1985@163.com。

* 通讯作者: 牛超(1985-), 男, 博士, 副教授, 从事矿井水文地质与灾害防治相关教学与科研。E-mail: niuchao@xust.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

Co., Ltd., Xianyang 713600, Shaanxi, China; 3. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: To achieve refined inversion outcomes of TEM and enhance the precision of geological problem interpretation, conducting research on inversions under different initial models holds substantial significance. This study selected two distinct initial models: the homogeneous half-space model and the model derived from the inversion result of the least-squares method with a smoothing factor. Initially, the forward-response data of a three-layer geoelectric model (H-type and K-type) were utilized to conduct inversion computations via the least-squares method with a smoothing factor and the regularization-damped least squares method under different initial models. The inversion performances under various initial models were then compared and analyzed. Subsequently, field - measured data were employed to perform inversion calculations identical to those of the forward - fitting data. The normalized potential of the secondary field at a single point with different decay times, resistivity, the result model, and their corresponding errors were selected for comparative analysis. Additionally, the inversion effect of a complete apparent-resistivity profile was analyzed in conjunction with geological data. Finally, the research findings were validated through engineering cases. The results show that: The inversion of the least - squares method with a smoothing factor is poorly fitted with transient electromagnetic data. Under equivalent conditions, although the regularization-damped least squares method can more realistically reflect the stratal characteristics, its depiction of deep - stratum information is less accurate compared to when the initial model is the inversion - result model of the least - squares method with a smoothing factor. The inversion result of the regularization-damped least-squares method, with the inversion result of the least-squares method with a smoothing factor serving as the initial model, provides a more precise reflection of the underground geological conditions. The choice of different initial models exerts a remarkable influence on the inversion effect of TEM data. Through comparative analysis, it is further verified that the inversion of the regularization-damped least-squares method, with the inversion result of the least-squares method with a smoothing factor as the initial model, enjoys significant advantages in terms of accuracy and reliability. This conclusion offers crucial references and practical guidance for the application of the TEM in detecting complex geoelectric structure.

Keywords: transient electromagnetics; initial model; smoothing factor least squares method; regularization-damped least square method; inversion

瞬变电磁法是建立在电磁感应基础上的时域人工源电磁勘探方法,具有探测深度大,穿透高阻和分辨低阻覆盖能力强,受体积效应小,无高阻屏蔽等诸多优点,已广泛应用于矿产勘查、水文地质调查、工程地质勘察、环境与灾害地质调查以及考古研究等众多领域(陈魁奎等, 2016; 牛峥等, 2017; 柳宁等, 2019; 解海军等, 2020; 燕帅等, 2023; 陈靖等, 2024; 李正明等, 2025; 赵宁等, 2025)。钟国对瞬变电磁的研究工作已有 50 余年,在理论研究、仪器研制、应用推广方面虽取得了长足进步,但多维瞬变电磁理论、数据处理方法难以在短时间内指导生产实践,当前的瞬变电磁反演解释方法仍以基于层状模型的一维反演、二维成像为主(王猛等, 2015; 张文波等, 2022; 张旭等, 2025)。在一维反演方面,基于“烟圈”理论的近似

反演方法与基于严格正演公式的最优反演方法是两个主要方法。前者虽具有反演速度快,无需初始模型的特点,但属于近似反演方法,其结果通常不能拟合实测数据;后者可将正演结果与观测数据达到最佳拟合,常用的有高斯法、梯度下降法、阻尼最小二乘法以及 OCCAM 法等(戚志鹏等, 2014; 唐荣江等, 2017; 陈辉等, 2020; 王少杰等, 2024)。昌彦君等(2010)研究了瞬变电磁一维反演初值问题,当初值选择合理时,利用常规线性反演方法可使反演曲线获得快速、稳定收敛和等值减小的效果。王园园等(2013)采用阻尼最小二乘法优化逼近正演结果的算法进行瞬变电磁反演的计算,得到不同电阻率初值的地层反演结果,证实该方法可行,误差较小。前人利用阻尼最小二乘法在围岩力学参数反演、位场欧拉反演、高密度电法

反演等方面进行了研究,均取得了较好的研究成果(刘强等, 2019; 杨聪等, 2020; 王哲成等, 2023)。另有学者对阻尼最小二乘法的研究与改进,进一步丰富和发展了其寻优内涵,更好地满足了工程计算所需(肖艳丽等, 2018),但阻尼最小二乘法反演对初始模型的选择和噪声较为敏感,不同的初始模型可能会产生不同的反演结果,噪声可能会导致反演结果出现波动和偏差,进而增加了反演的不确定性和复杂性。

考虑到阻尼最小二乘法反演存在的不足,智庆全等(2015)在目标函数中引入平滑约束,利用阻尼最小二乘法实现了带约束反演,有效抑制了反演过程中的噪声干扰,增强了解的稳定性与地质合理性。李刚等(2017)引入正则化思想对模型进行约束反演,且正则化因子通过计算每次迭代的数据目标函数和模型目标函数自适应得到,使反演能够稳定地进行;引入拟牛顿法来更新雅可比矩阵,大大缩短反演所需要的时间,通过典型的 3 层与多层理论模型的反演试算,证明了拟牛顿法自适应正则化反演算法拟合效果好,收敛速度快,适应性强,体现了良好的稳定性和可靠性。

在瞬变电磁一维反演中,初始模型的选择对反演结果的精度、收敛速度及稳定性具有重要影响。然而,当前关于初始模型的研究相对较少,多数研究仍依赖经验设定或利用简单的地质假设进行选取,导致反演过程中可能出现局部收敛、非唯一解或计算效率低等问题。本研究以阻尼最小二乘法反演为基础,通过构建不同类型的初始模型并结合实际观测数据,系统分析初始模型差异对反演结果的影响,深入探讨初始模型的优化,旨在提升阻尼最小二乘法在瞬变电磁数据反演中的精确性与可靠性,从而为实际勘探工程建立更精准的地球物理模型解释体系,最终获取更高置信度的地质勘查成果。通过对不同初始模型反演结果的研究,不仅能够提供多样化反演策略,还可为复杂地质条件下的瞬变电磁勘探提供有力支撑。

1 阻尼最小二乘法概念模型

阻尼最小二乘法最早由 Levenberg 提出, Marquardt 对其进行了完善, Fletcher 做了进一步改进,改进的阻尼最小二乘法已成为求解非线性最优问题最常用的算法之一(Madsen et al., 2004; Marquardt, 2006; Jose, 2007),其基本原理表达为公式(1)的目标函数,将其转化为求解线性方程组的问题,即公式(2)。

$$\Phi(b) = \sum_{i=1}^M f_i^2(b) \quad (1)$$

$$(A + \lambda I)\delta = g \quad (2)$$

式中: $b = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T$ 为待求解的参数向量; A 表示 $M \times N$ 阶矩阵; δ 表示每一次迭代的校正量,即 $\delta = b^{(k+1)} - b^k$; g 表示一种 N 维向量; λ 为阻尼因子; I 为单位矩阵; k 为迭代次数。

由上述公式可知,校正量 δ 与阻尼因子 λ 之间存在函数关系,即 $\delta = \delta(\lambda)$ 。为更直观地理解迭代量与阻尼因子之间的关系,可改写为公式(3)。

$$b^{(k+1)} = b^{(k)} + (A + \lambda I)^{-1}g \quad (3)$$

阻尼最小二乘法的优异特征可以概括为:当阻尼因子逐渐增大时,阻尼最小二乘法的迭代方向由高斯-牛顿法的方向渐渐转向最速下降方向,最速下降方向能够保证迭代的收敛性。当需要增大迭代速度时就减小阻尼因子,使之靠近高斯-牛顿法,增大迭代步长。换言之,如果方程 $(A + \lambda I)\delta = g$ 中的矩阵 A 是病态的或者非正定的而导致迭代无法有效收敛,只要增大阻尼因子,就可以改善上述矩阵的病态特征。因此,阻尼最小二乘法相较于最小二乘法、高斯-牛顿法、最速下降法等反演方法确实具有明显优势。在此基础上引入正则化约束,构成正则化-阻尼最小二乘法,通过正则化因子在数据拟合误差与模型平滑性之间进行权衡,进一步抑制反演过程中的病态问题,提高反演结果的稳定性与可靠性。

2 数值计算

为得到不同初始模型下的反演结果,使用层状介质模型的理论响应数据进行反演计算。为此,建立正演模型,计算得到模型数值解;将正演数据进行不同初始模型下的反演运算,对比分析反演效果。正演模型设置为简单的三层地电模型 H 型与 K 型,并与均匀半空间(电阻率 $100 \Omega \cdot m$)作对比。前者电阻率依次为 $100 \Omega \cdot m$ 、 $10 \Omega \cdot m$ 、 $100 \Omega \cdot m$,层厚为 $50 m$ 、 $50 m$ 、 $10000 m$;后者电阻率依次为 $10 \Omega \cdot m$ 、 $100 \Omega \cdot m$ 、 $10 \Omega \cdot m$,层厚同于 H 型。

考虑到定源回线可视为中心回线的一种特殊形式,正演计算参数以中心回线为基础进行设定:矩形发射线框边为 $420 m \times 540 m$,线圈匝数为 1 匝,发射电流为 $12 A$,接收线圈为 2 匝边长 $10 m$ 的方形线圈,关

断时间为 $156 \times 10^{-6} \text{s}$, 采集时窗为 $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{s}$, 指数等间隔为 0.1, 共计 41 个衰减时。通过正演计算, 得到了 H、K 型感应电动势与电阻率(图 1)。H 型地电模型二次场衰减曲线在早、晚期与均匀半空间地电模型一致, $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{s}$ 感应电动势明显增大, 为低阻层的响应(图 1a)。K 型地电模型二次场衰减曲线全期均高于均匀半空间地电模型, 曲线梯度变化不大, 表明中间高阻层响应不明显, 即正演数值模拟高阻(图 1b)。从视电阻率曲线上看, 两地电模型视电阻在晚期道均能反映深部地层信息, 而早期的响应难以反映浅部地层信息, 低阻层的响应优于高阻层的响应。

将以上正演数据进行不同初始模型下的反演计算, 共计 3 种模型。模型 1 为均匀半空间, 电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$, 反演方法为平滑因子最小二乘法反演; 模型 2 为均匀半空间, 电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$, 反演方法为正则

化-阻尼最小二乘法反演; 模型 3 为以模型 1 结果作为初始模型, 进行正则化-阻尼最小二乘法反演。反演参数设置为: 电性层数 20 层, 迭代次数 10 次, 深度递增因子 1.1(即每层厚度为上一层的 1.1 倍, 层厚随深度缓慢递增, 以兼顾浅层分辨率与深层探测能力), 均方误差限 10%。通过反演计算, 获得 H 型、K 型地电模型在 3 种不同模型下的电阻率反演效果(图 2)。

H 型、K 型地电模型下的两种初始模型反演结果均大致符合理论模型, 模型 1 对理论模型的刻画精细度不足, 拟合精度低于模型 2 和模型 3, 尤其是 K 型地电模型反演结果偏离理论模型较大; 模型 2 与 3 拟合精度差别较小, 只是在电性分层上前者拟合精度略低于后者(图 2)。由此可知, 以平滑因子最小二乘法反演后的结果作为初始模型进行正则化-阻尼最小二乘法反演, 其反演效果最优; 均匀半空间下的平滑因子

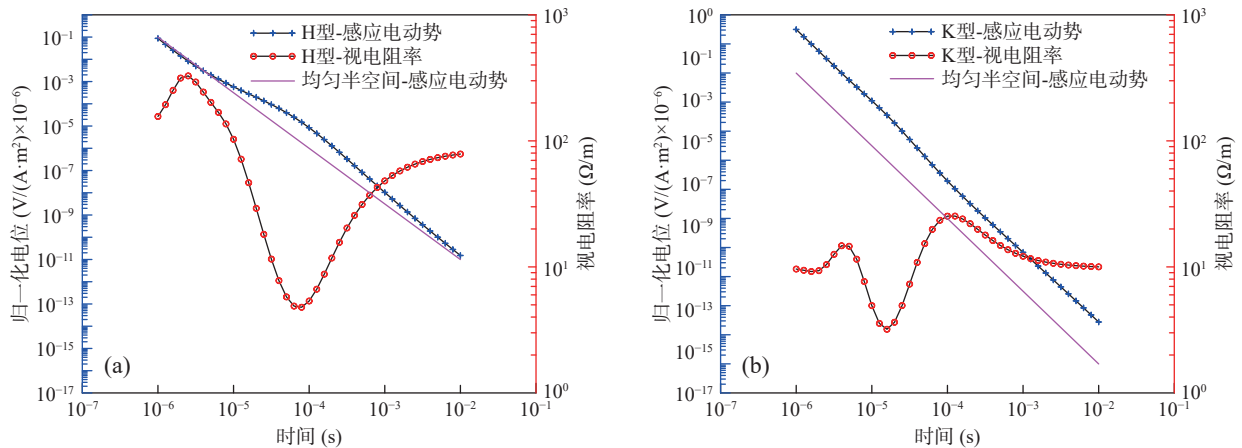


图1 H型(a)、K型(b)地电模型瞬变响应特征图

Fig. 1 Transient response characteristic diagrams of (a) H and (b) K geoelectric models

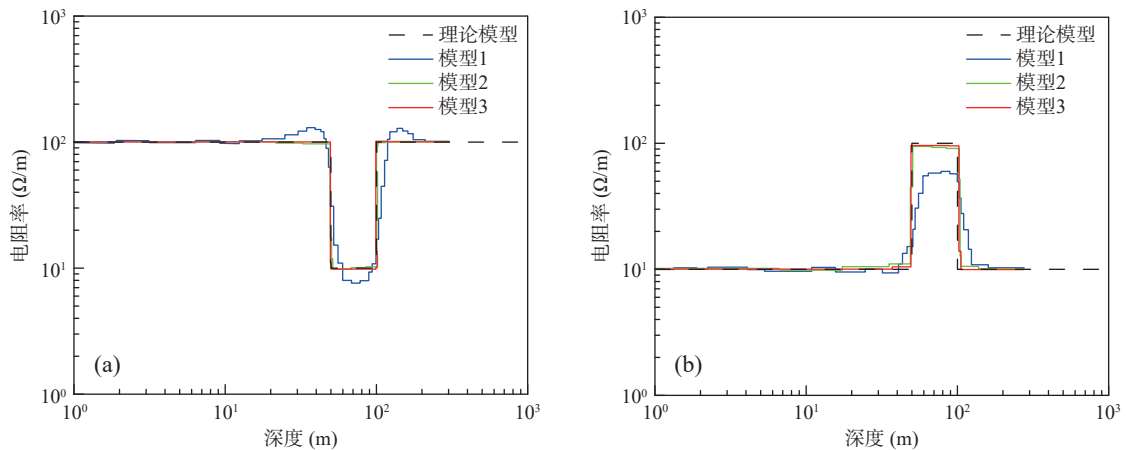


图2 H型(a)、K型(b)地电模型 10 次迭代反演图

Fig. 2 The 10 iterations results of (a) H and (b) K geoelectric models

最小二乘法反演精度最低。以上反演结果的对比分析是基于正演响应数据进行的,笔者将结合实测数据对不同初始模型下的反演效果进行对比分析。

3 实测数据反演

3.1 研究区背景

本次实测数据采集地位于榆林市横山区。研究区地处毛乌素沙漠东南缘与陕北黄土高原接壤地带,地貌形态以垄状、波状沙丘夹沙间洼地为主(图3)。地形总体较为平坦,海拔为+995~+1 063 m,最大高差

68 m。沙界沟为区内唯一水系,由西北向东南流入无定河。

研究区地质构造简单,处于鄂尔多斯盆地陕北斜坡中部,总体为 NWW 微倾的单斜构造(平均倾角小于 1°),无较大褶皱,仅局部发育宽缓波状起伏,无断层发育,无岩浆岩侵入。

研究区位于陕北侏罗纪煤田榆横矿区中东部,地表绝大部分被第四系上更新统风成沙及萨拉乌苏组砂土、亚砂土所覆盖。地层由老至新依次为三叠系上统瓦窑堡组(T_3w)、下侏罗统富县组(J_1f)、侏罗系中统延安组(J_2y)、第四系中更新统离石组(Q_2l)、全新统风

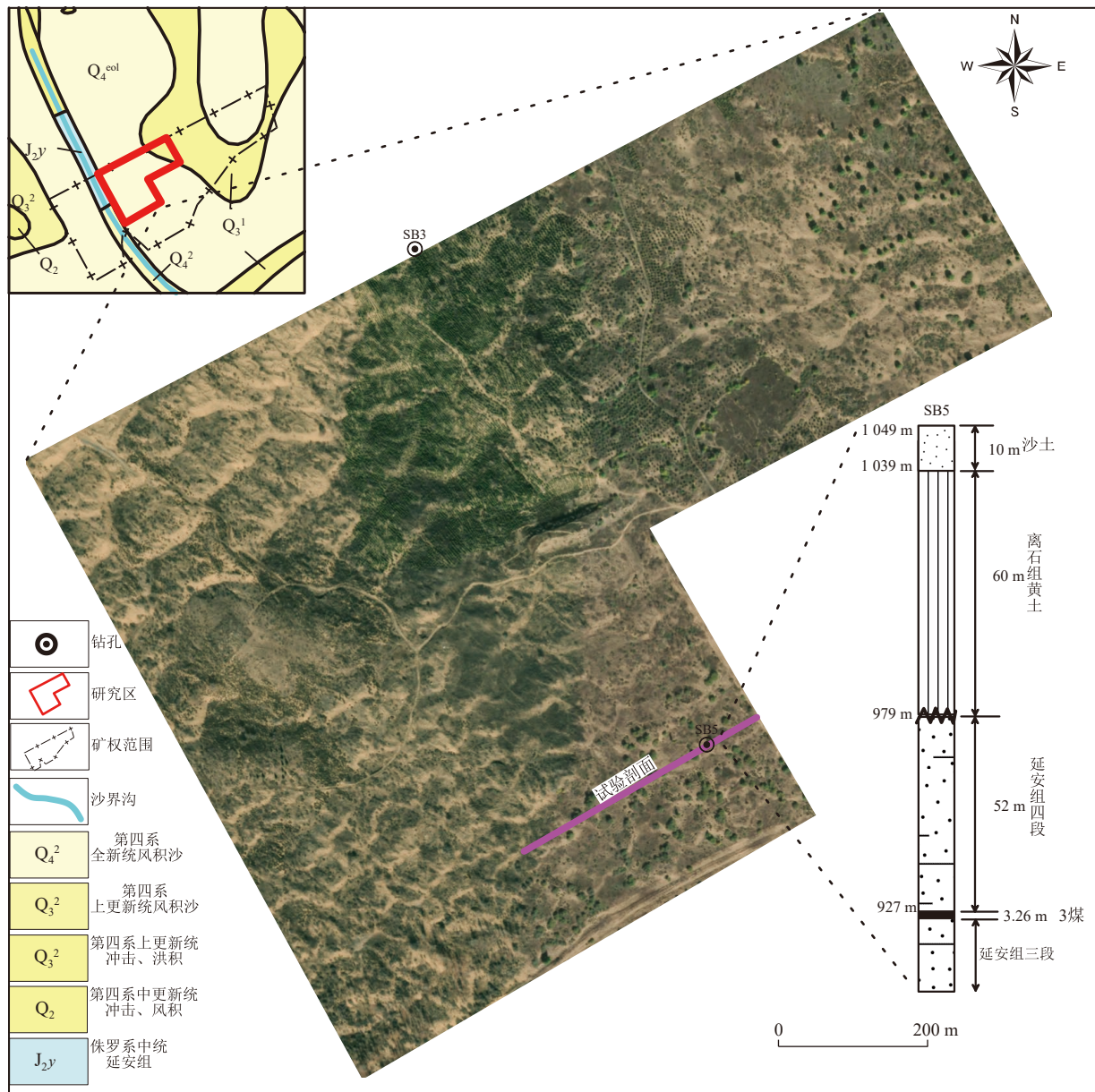


图3 研究区地形地貌与地质图(含钻孔柱状图)

Fig. 3 Topography and geological map of the study area (including borehole log)

积沙(Q_4^{col})。延安组为区内含煤地层,厚度约为230 m,共含煤9层,其中3号煤层为研究区唯一可采煤层,厚度为2.85~3.53 m,平均为2.89 m,处于延安组第三段顶部,埋深为90~190 m。

根据地下水的赋存条件及水力特征,研究区地下水划分为第四系松散岩类孔隙潜水和中生代碎屑岩类裂隙承压水两种类型,第四系全新统砂层孔隙潜水、第四系中更新统离石组黄土裂隙孔隙潜水、侏罗系中统碎屑岩类风化带裂隙潜水、侏罗系碎屑岩类裂隙承压水4个含水岩层(组)。矿井主要充水水源为以上4个含水层水。中生界互层状沉积的泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩为相对隔水层。研究区水文孔抽水试验结果:风化基岩含水层钻孔涌水量为12.44~37.24 m³/h,单位涌水量为0.0108~0.0427 L/s·m,渗透系数为0.110926~0.2669 m/d,含水层富水性弱。

风积沙、离石组黄土为松散沉积物,电阻率表现为高阻特征,延安组砂岩电阻率相对较高,当其富水时电阻率明显降低;新生界与中生界为不整合接触,接触带存在基岩风化裂隙带,当地下水汇集到基岩风化层中时,其电阻率表现为低阻特征;煤层相对顶底板围岩通常变现为高阻特征(图4)。研究区地层沉积稳定,横向上电性差异较小。

3.2 数据采集

实测数据由加拿大Protem57采集,发射频率25Hz,定源回线边长(发射线框)为420 m×540 m,点距为20 m,接收线圈面积为200 m²,发射电流为12 A,关断时间为156 μs,增益为4,时间门为30,积分时间为15 s。数据采集区域为发射线框面积的三分之一区域,

即180 m×140 m的方形区域(图5)。

3.3 初始模型及其参数设定

本研究设置3种反演模型。模型1和模型2以均匀半空间模型分别进行平滑因子最小二乘法(模型1)与正则化-阻尼最小二乘法反演(模型2),模型电阻率为100 Ωm,预设地层数为20。反演控制参数:迭代次数为10次,平滑因子为0.05,电阻率为0.1~10 000 Ω·m,均方误差限10%等。模型3则以平滑因子最小二乘法反演结果作为初始模型进行正则化-阻尼最小二乘法反演,其它反演参数不变。

3.4 单点反演分析

运用前述反演方法与初始条件进行反演,反演最优结果为最后一次迭代结果,选取单点不同衰减时二次场归一化电位(V/(A·m²)×10⁻⁶)、电阻率拟合曲线进行分析(图6),并对不同初始条件下的反演模型及其对应误差进行对比研究(图6)。拟合误差Rms的计算过程表达为公式(4)。

$$Rms = \sqrt{\int_{j=1}^M \frac{((d_j^{obs} - d_{0j})/d_j^{obs})^2}{M}} \quad (4)$$

式中: M 为观测数据的个数; d_j^{obs} 、 d_{0j} 为观测值与正演理论值,Ω·m。

以均匀半空间为初始条件的平滑因子最小二乘法反演后,其归一化电位在早、晚期道与实测值拟合较差,而同等条件下的模型2与模型3反演结果拟合较好(图6a)。模型1电阻率在早、晚期道与模型2、模型3差别较大,而后两者电阻率值几近重合(图6b),

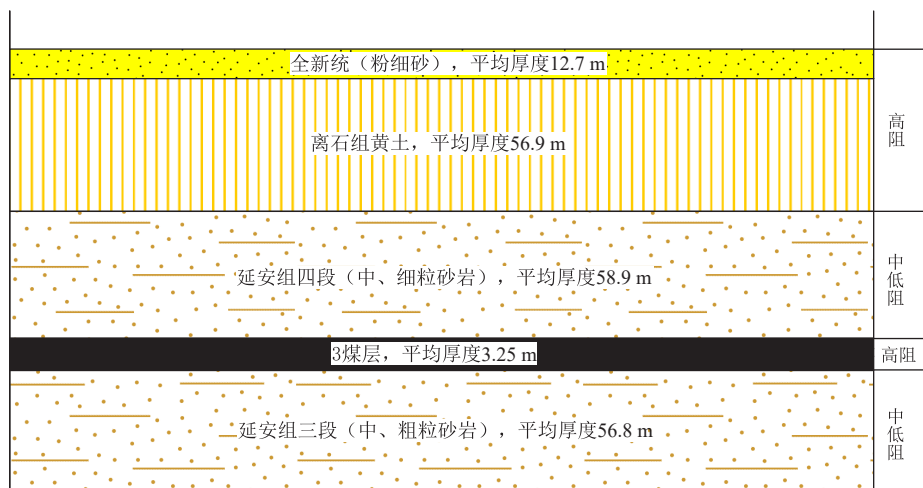


图4 研究区地电模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the geoelectric model in the study area

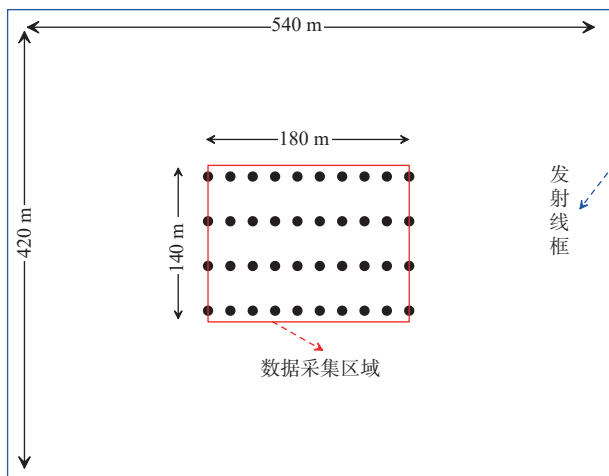


图5 定源回线数据采集示意图

Fig. 5 Data acquisition layout of fixed source loop

这表明模型 2 与模型 3 反演结果相差不大。从反演模型(图 7a)上看,模型 1 测深曲线总体表现为“H”型,电性分层界线不清,说明该方法对地层的分辨能力不足,而模型 2 与模型 3 均能有效响应地层特征,测深曲线总体呈“HK”型,但两者电性分层结果略有差异,即后者较前者分层减少,分层界面更加清晰。3 种模型的拟合差都在稳步减小(图 7b),说明迭代的稳定性较好,模型 2 前期迭代最快,模型 3 前期迭代较慢,模型 1 迭代 3 次后即趋于稳定,但拟合误差偏大,最后一次迭代达到 7.3%,表明该反演算法收敛快速但精度不足。模型 2、模型 3 在 5 次迭代后,其拟合误差一致,第 8 次迭代拟合差降到了 0.3%,拟合精度较高。综合分析得到,3 种模型反演结果优等级别:模型 3>模型 2>模型 1,这与数值计算分析结果相契合。

3.5 剖面反演分析

为使不同模型反演结果对比更加直观,以完整的一条反演电阻率等值线断面为基础并结合地层资料进行分析(图 8)。从反演电阻率断面图中可以看出,3 种模型在标高 980 m 以浅呈高阻特征,这是由一次场关断时间较长($156 \mu s$)而导致反演结果浅部(约 55 m)地层信息缺失,也致使 Q_2^I (离石组黄土)与下伏 J_2y4 (延安组四段风化基岩)的不整合接触面响应不明显。标高+930 m~+950 m 位置呈明显的低阻、中高阻特征,结合地质资料(钻孔 SB5),此两处位置分别对应风化基岩段和 3 煤层。模型 2 与模型 3 的反演结果均能有效反映 3 煤层(中高阻薄层)、风化基岩含水层(低阻薄层),而模型 1 无此响应特征。根据区域资料,标高+869~807 m 为延安组二段,电阻率呈中阻特征;标高+807~753 m 为延安组一段,标高+753~707 m 为二叠系富县组,这两组地层电阻率差异不大,均表现为低阻特征;标高+707 m 以深为三叠系瓦窑堡组,瓦窑堡组上部电阻率表现为明显的低阻特征。由此可知,在标高 900 m 以深,模型 3 电阻率断面的层性优于模型 2,其对深部煤系地层的刻画更清晰,更加符合沉积地层发育规律。

此外,瞬变电磁在相对富水地层中的频散效应会使信号的衰减速度和传播路径发生变化,导致探测到的异常区域范围和强度可能会与实际情况存在一定差异。电阻率断面中的风化基岩含水层因裂隙发育形成弥散型频散介质,表现为全域低阻;延安组二段至瓦窑堡组总体表现为低阻特征,且分层较浅部模糊,一定程度上表明频散效应的存在使地层电阻率趋同,

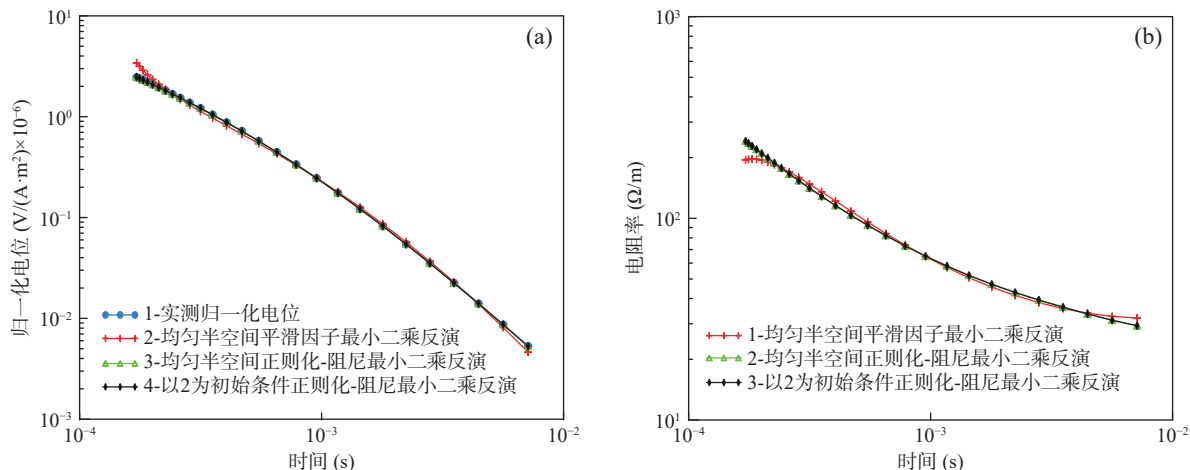


图6 不同初始条件 8 次迭代后归一化电位(a)与电阻率曲线图(b)

Fig. 6 The curves of (a) normalized potential and (b) resistivity after 8 iterations under different initial conditions

分辨率降低(图7)。

3.6 平面分析

由于3煤层回采后形成的导水裂隙带已全部发育至地表,3煤层顶板以上含水层均为矿井的直接充水含水层。工作面回采时易受到风化基岩含水层及延安组基岩含水层水的影响,其不均一的富水特性给煤矿工作面正常生产带来一定安全隐患,查明其不同含水层的富水分布及水力联系尤为重要。可以从区域上开展地面水害治理工作,为从井下探查疏放顶板水提供目标区域。为此,开展了1:5000地面磁性源瞬变电磁勘探工作。基于前述3种模型的对比分析结果,以平滑因子最小二乘法反演结果作为正则化

-阻尼最小二乘法的初始模型,在实测定源回线TEM数据反演中展现出无可比拟的优势。基于这一特性,将其应用于研究区地面瞬变电磁实测数据的处理与解释工作,提取了4个等深度(标高分别为1000 m、980 m、950 m、930 m)的电阻率电性特征图(图8),其对应的地层分别为第四系底部、风化基岩层顶部、风化基岩含水层以及风化基岩底部。

第四系底部整体表现为相对较高的电阻率,仅在局部区域出现小范围低阻区域(图9),表明第四系松散含水层的富水性较弱,地下水主要沿垂向渗透,难以大量滞留,大部分地下水已渗流至下伏的基岩风化壳中。随着标高的降低,电阻率低值区逐渐扩大,直

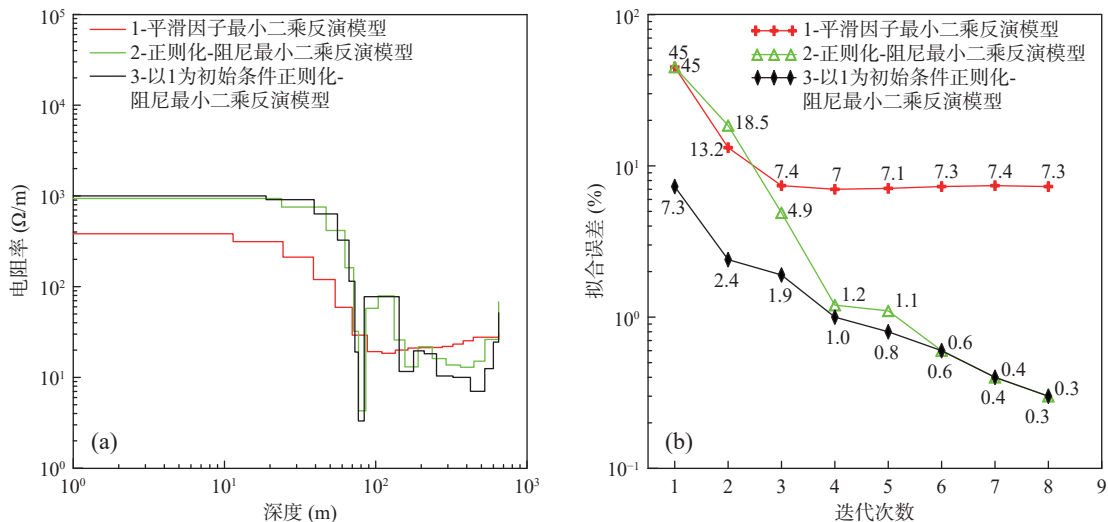


图7 不同初始条件8次迭代后反演模型(a)与拟合误差曲线图(b)

Fig. 7 The curves of (a) inversion model and (b) fitting error after 8 iterations under different initial conditions

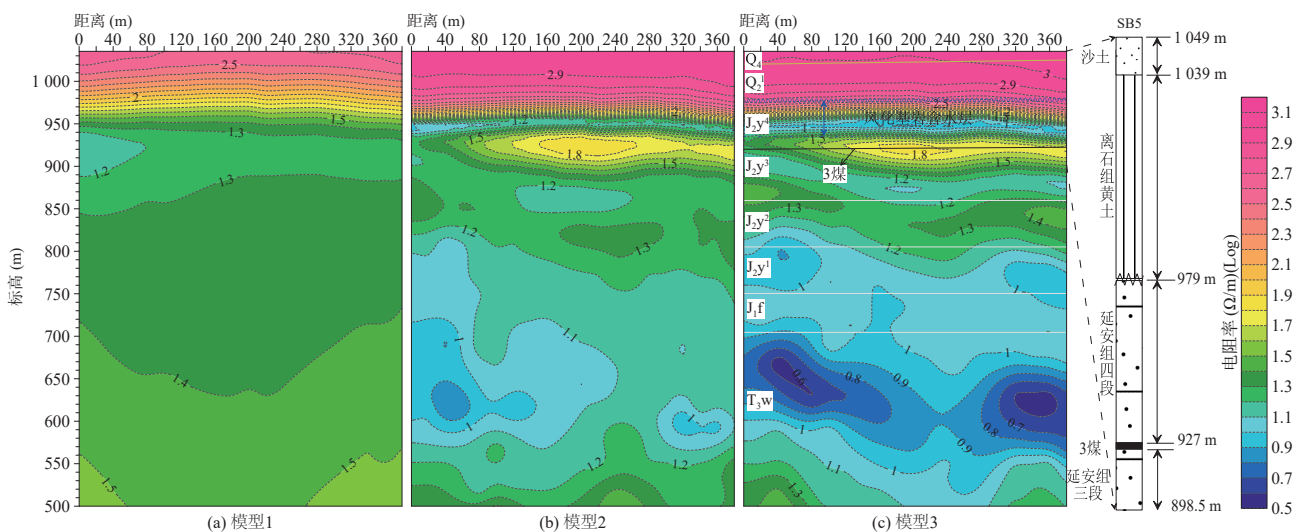


图8 不同初始条件下反演电阻率断面图

Fig. 8 Inverted resistivity cross-section under different initial conditions

至标高 950 m, 整个研究区内电阻率普遍较低, 表明风化基岩含水层分布广泛, 具备良好的储水空间和一定的富水性, 可能与基岩风化带的裂隙发育程度密切相关。当标高降低至风化基岩层底部, 电阻率开始逐步增大, 低阻范围逐渐缩小, 说明 3 煤层顶板砂岩层的富水性较弱, 属于相对隔水层或弱富水层。需要特别关注由上至下贯穿的局部低阻区域, 这些异常区可能

暗示风化基岩含水层与砂岩含水层、第四系孔隙潜水含水层之间存在水力联系, 在采动影响下可能形成渗流通道, 进而增加矿井水害风险。

后续沿 Line320 测线施工 YZK01、YZK02 验证钻孔, 钻探揭露的风化基岩、3 煤层层位与电阻率剖面解释结果一致性良好(图 10), 说明引入平滑反演先验约束的一维瞬变电磁反演可靠性高、应用成效显著。

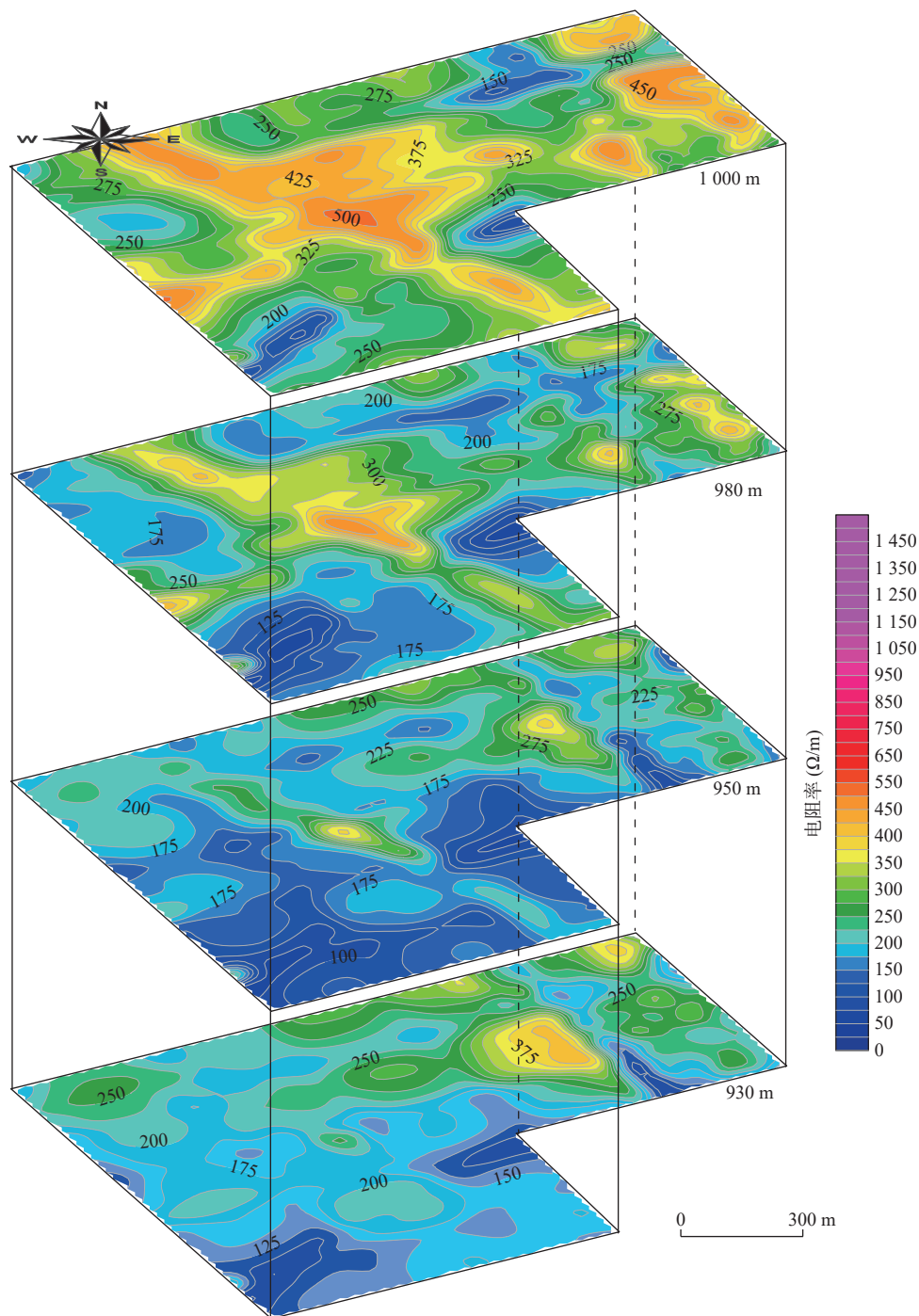


图9 等深度电阻率等值线切片图

Fig. 9 Contour map of equal depth resistivity

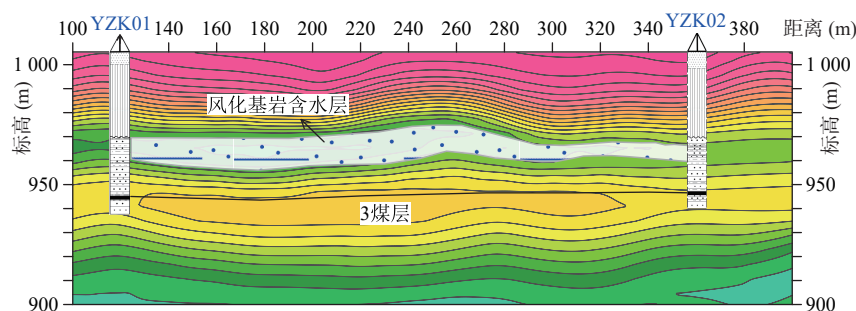


图10 Line320 电阻率等值线断面图(叠加验证钻孔)

Fig. 10 Cross-sectional map of Line 320 resistivity contours (with verification boreholes overlaid)

4 结论

(1)在其他参数相同的条件下,采用不同的初始模型进行3层地电模型(H型、K型)响应数据与实测定源回线TEM数据一维反演,得到不同的反演结果。

(2)以均匀半空间和平滑因子最小二乘法反演结果作为初始模型,研究了平滑因子最小二乘法、正则化-阻尼因子最小二乘法的反演效果。结果表明均匀半空间下的平滑因子最小二乘法反演不能对地层信息作出有效响应,而后两者可真实反映地层信息,尤以平滑因子最小二乘法反演结果作为初始条件的方法对层状地层的拟合更为突出,特别是对低阻薄层和深部地层的响应。

(3)由于煤系地层的成层性,以平滑因子最小二乘法反演结果作为初始条件的正则化-阻尼最小二乘法反演优势明显,8次迭代拟合差0.3%,拟合精度高。这为今后瞬变电磁一维反演初始模型的选择提供了实际参考。文中的正演模型与实例均以近水平层状地层为主,所提方法在倾斜地层或非层状地层条件下的适用性有待进一步验证,将作为后续研究方向加以探讨。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 昌彦君,肖明顺,武毅.瞬变电磁数据一维反演的初值选取研究[J].石油地球物理勘探,2010,45(2):295-298.
- CHANG Yanjun, XIAO Mingshun, WU Yi. The selection of initial value for one-dimensional inversion of transient electromagnet-

- ic data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(2): 295-298.
- 陈辉,杜兴忠,孙永清.高阻体模型瞬变电磁响应特征及其反演浅析[J].物探化探计算技术,2020,42(5):660-669.
- CHEN Hui, DU Xingzhong, SUN Yongqing. Transient electromagnetic response characteristics and inversion analysis of high resistance body model[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 42(5): 660-669.
- 陈靖,郭文波,王宏宇,等.综合电磁法在风太二里河铅锌矿深部的找矿效果分析[J].西北地质,2024,57(1):196-206.
- CHEN Jing, GUO Wenbo, WANG Hongyu, et al. Analysis on Prospecting Effect of Integrated Electromagnetic Methods in Deep Prospecting of Fengtai Erlihe Lead-Zinc Deposit[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 196-206.
- 陈魁奎,王心义.瞬变电磁法探测盲区深度减少和探测深度增加技术[J].河南理工大学学报(自然科学版),2016,35(6):796-801.
- CHEN Kuikui, WANG Xinyi. Techniques for reducing the depth of detection blind zones and increasing detection depth in transient electromagnetic method[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science Edition), 2016, 35(6): 796-801.
- 李刚,潘和平,王智,等.回线源瞬变电磁法一维反演算法[J].煤田地质与勘探,2017,45(5):161-166+172.
- LI Gang, PAN Heping, WANG Zhi, et al. One-dimensional inversion algorithm of loop source transient electromagnetic method[J]. Coal Geology and Exploration, 2017, 45(5): 161-166+172.
- 李正明,王备战,展卫露,等.青海省锡铁山铅锌矿床沉积盆地构造与找矿方向浅议[J].西北地质,2025,58(1):166-177.
- LI Zhengming, WANG Beizhan, ZHAN Weilu, et al. Discussion on Structure and Prospecting Direction of Xitianshan Lead-zinc Deposit Sedimentary Basin in Qinghai Province[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 166-177.
- 刘强,姚长利,郑元满.基于阻尼最小二乘法的位场欧拉反演方法[J].地球物理学报,2019,62(10):3710-3722.
- LIU Qiang, YAO Changli, ZHENG Yuanman. Euler deconvolution of potential field based on damped least square method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(10): 3710-3722.
- 柳宁,赵晓光,解海军,等.榆神府地区煤炭开采对地下水资源的影响[J].西安科技大学学报,2019,39(1):71-78.
- LIU Ning, ZHAO Xiaoguang, XIE Haijun, et al. Influence of coal

- mining on groundwater resources in Yushenfu Area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(1): 71-78.
- 牛峥, 胡少虎, 刘花婷, 等. 瞬变电磁法三维数据模拟及应用效果[J]. 西北地质, 2017, 50(4): 226-231.
- NIU Zheng, HU Shaohu, LIU Huating, et al. 3D data simulation of TEM method and its exploration application[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(4): 226-231.
- 戚志鹏, 智庆全, 李貅, 等. 大定源瞬变电磁三分量全域视电阻率定义与三分量联合反演[J]. 物探与化探, 2014, 38(4): 742-749.
- QI Zhipeng, ZHI Qingquan, LI Xiu, et al. The definition of the full-zone apparent resistivity and the constrained inversion of the three components of fixed source TEM[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(4): 742-749.
- 唐荣江, 王绪本, 甘露. 一种利用特征值性质的 MT 阻尼最小二乘反演[J]. 石油物探, 2017, 56(6): 898-904.
- TANG Rongjiang, WANG Xuben, GAN Lu. A MT damping least squares inversion using eigenvalue properties[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(6): 898-904.
- 王猛, 刘国辉, 王大勇, 等. 瞬变电磁测深资料的 ABC 算法反演研究[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 133-139.
- WANG Meng, LIU Guohui, WANG Dayong, et al. Inversion study of ABC algorithm for transient electromagnetic sounding data[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 133-139.
- 王少杰, 周磊, 谢兴兵, 等. 基于差分进化算法的瞬变电磁一维反演[J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(2): 343-351.
- WANG Shaojie, ZHOU Lei, XIE Xingbing, et al. Transient electromagnetic one-dimensional inversion based on differential evolution algorithm[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(2): 343-351.
- 王园园, 刘斌, 王晨. 基于阻尼最小二乘法的瞬变电磁反演算法研究[J]. 电子测试, 2013, (Z1): 1-3.
- WANG Yuanyuan, LIU Bin, WANG Chen. Research on transient electromagnetic inversion algorithm based on damped least square method[J]. Electronic Test, 2013, (Z1): 1-3.
- 王哲成, 秦祯秋, 刘笑娣, 等. 基于阻尼最小二乘法的盾构隧道围岩力学参数反演[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(3): 737-749.
- WANG Zhecheng, QIN Zhenqiu, LIU Xiaodi, et al. Research on back analysis of shield tunnel structure based on damped least square method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(3): 737-749.
- 肖艳丽, 李明星. 阻尼最小二乘算法研究综述[J]. 软件导刊, 2018, 17(8): 9-12.
- XIAO Yanli, LI Mingxing. A review of damped least squares algorithm research[J]. Software Guide, 2018, 17(8): 9-12.
- 解海军, 李静蕊, 董毅, 等. 小波基和阈值参数对瞬变电磁信号去噪效果影响[J]. 西安科技大学学报, 2020, 40(4): 682-690.
- XIE Haijun, LI Jingrui, DONG Yi, et al. Influence of wavelet base and threshold parameters on de-noising effect of transient electromagnetic signal[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(4): 682-690.
- 燕帅, 殷长春, 苏扬, 等. 基于卷积神经网络的瞬变电磁数据快速成像算法研究[J]. 地球物理学报, 2023, 66(10): 4290-4300.
- YAN Shuai, YIN Changchun, SU Yang, et al. Fast imaging of transient electromagnetic data based on convolutional neural network[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(10): 4290-4300.
- 杨聪, 毛立峰, 毛鑫鑫, 等. 半航空瞬变电磁自适应正则化-阻尼最小二乘算法研究[J]. 地质与勘探, 2020, 56(1): 137-146.
- YANG Cong, MAO Lifeng, MAO Xinxin, et al. Research on adaptive regularization-damped least squares algorithm for half-borne transient electromagnetic method[J]. Geology and Prospecting, 2020, 56(1): 137-146.
- 张文波, 张莹, 李建慧. 地面回线源瞬变电磁法一维反演系统及其应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1258-1266.
- ZHANG Wenbo, ZHANG Ying, LI Jianhui. One-dimensional inversion system of ground loop source transient electromagnetic method and its application[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1258-1266.
- 张旭, 徐得忠, 韩媛, 等. 多源地空瞬变电磁一维反演及其在三维模型数据解释中的应用分析[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 33-40.
- ZHANG Xu, XU Dezhong, HAN Yuan, et al. Multi-source SATEM 1D inversion and its application to the 3D model data[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 33-40.
- 赵宁, 张赵坝基, 姜黎明, 等. 各向异性介质井孔瞬变电磁视电阻率和视倾角计算[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2025, 44(2): 81-89.
- ZHAO Ning, ZHANG Zhaoaji, JIANG Liming, et al. Calculation of borehole transient electromagnetic apparent resistivity and dip in anisotropic medium[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2025, 44(2): 81-89.
- 智庆全, 武军杰, 邓晓红, 等. 地下瞬变电磁法一维反演[J]. 物探化探计算技术, 2015, 37(5): 566-570.
- ZHI Qingquan, WU Junjie, DENG Xiaohong, et al. One dimensional inversion of underground transient electromagnetic method[J]. Computing Techniques For Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 37(5): 566-570.
- Jose P. The solution of nonlinear inverse problems and the Levenberg-Marquardt method[J]. Geophysics, 2007, 72(4): 1-16.
- Madsen K, Nielsen N B, Tingleff O. Methods for nonlinear least squares problems[J]. Society for Industrial & Applied Mathematics, 2004, (1): 1409-1415.
- Marquardt W D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006, 11(2): 431-441.