doi: 10.11720/wtyht.2026.0065
杨海明, 唐塑, 魏永山, 等. 改进型野马优化算法在 Cole-Cole 模型参数反演中的应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(4): 698-706. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0065
Yang H M, Tang S, Wei Y S, et al. Application of a modified wild horse optimizer in the inversion of Cole-Cole model parameters[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(4): 698-706. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0065

改进型野马优化算法在 Cole-Cole 模型参数反演中的应用

杨海明[1], 唐塑[1,2], 魏永山[1], 关力伟[1,2], 潘展超[1,2]
(1. 中国地质调查局 乌鲁木齐自然资源综合调查中心, 新疆 乌鲁木齐 830057; 2. 中亚造山带成矿预测与找矿示范创新基地, 新疆 乌鲁木齐 830057)

摘 要: 在时间域激电的 Cole-Cole 模型参数反演中, 引入具有进化能力更强、搜索速度更快、寻优能力更强的改进型野马优化算法(modified wild horse optimizer, MWHO), 利用已知模型验证算法效果并开展参数对比研究。当时间窗口数量取 8 组及以上、时间延时取 100~250 ms 时, 能够成功反演得到最高精度达 0.03% 的 Cole-Cole 模型参数, 而且该算法计算速度快、结果稳定性好。然后采用实测数据进一步验证, 反演得到的频率相关系数 c、充电率 m 和时间常数 τ 具有较好的一致性, 实测反演结果显示出的低频率相关系数、高充电率、高时间常数异常特征, 推测为矿化程度较高、金属矿物含量较多、矿化颗粒不均匀且导电矿物连通程度较好的金属硫化物矿(化)体。钻孔结果显示在孔深 45.08~45.88 m 处为黄铁矿化粉砂岩, 黄铁矿呈浸染状和细脉状沿裂隙连续分布特征且见金矿化, 金品位达到工业品位, 反演推测的结果与实际钻探的结果基本吻合。由此可见, MWHO 算法可以有效应用于反演 Cole-Cole 模型参数, 而且能够区分出弱激电异常, 能明显提升地质体分辨率, 有效强化矿致异常, 对于寻找金属硫化物异常效果较好, 值得研究并推广应用。

关键词: 改进型野马优化算法; Cole-Cole 模型参数; 激电异常; 反演
中图分类号: P31; P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)04-0698-09

0 引言

时间域激发极化法是通过观测人工场源引起的大地视时变电阻率特征, 根据岩(矿)石时谱参数, 解译电性异常体的一种地球物理勘探方法[1]。该方法可以反映地下地质结构的电阻率、极化率等参数信息, 但在面对复杂介质时, 常常显示出电性差异不明显、难以区分电性异常特征等问题。随着激发极化法的不断发展, 研究者发现频谱激电特征参数(充电率、时间常数、频率相关系数等)能够区分复杂介质的电性差异, 通过采用多参数联合解释电性差异的方法具备一定的研究前景[2]。Pelton 等[3] 通过对大量岩(矿)石标本和露头的测量, 证明 Cole-Cole 模型可以描述激电效应, 而且不同岩(矿)石的 Cole-Cole 模型频谱参数具有不同的物理意义, Grisseman 等[4] 研究发现充电率 m 能够反映可极化物质的含量, 时间常数 τ 与可极化颗粒和孔隙大小有密切关系, 频率相关系数 c 则表征极化体颗粒均匀性。因此, 可以利用 Cole-Cole 模型参数充分挖掘时间域激电数据的使用效率来区分共生、伴生矿, 进一步提升时间域激电数据综合解释的分辨率。

早期, 罗延钟等[5-6] 通过阻尼最小二乘法反演得到 Cole-Cole 模型参数, 开启了由时间域激电数据反演 Cole-Cole 模型参数找矿的大门。罗润林等[7] 采用最小二乘法从时域激电数据中得出频谱参数信

收稿日期: 2026-03-11; **修回日期:** 2026-05-19
基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20240203205、DD20230380)
第一作者: 杨海明(1991-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事电法勘探正反演研究工作。 Email: yanghaiming009@163.com
通讯作者: 唐塑(1990-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事浅地表地球物理勘探及反演研究工作。Email: 14763662@qq.com

息, 在实践中取得不错效果。彭伟等[8] 利用阻尼最小二乘法实现时间响应与 Cole-Cole 模型的拟合, 实现对激电异常的正确推断解释, 推广了时间域激电法在深部找矿的应用。但是 Cole-Cole 模型是一种强非线性模型, 最小二乘法等传统反演方法的线性化过程依赖初始模型, 若初始模型远离真实值, 容易导致收敛到初始模型附近的局部极值, 进而无法遍历整个参数空间寻找全局最优解。

而智能优化算法则是基于自然演化、群体智能等原理的启发式算法, 通过模拟生物进化、粒子运动等过程, 在参数空间中全局搜索最优解, 无需再对模型线性化, 能够直接处理非线性的反演问题, 具有较好的实际效果。如粒子群算法(particle swarm optimizer, PSO)、蝴蝶优化算法(butterfly optimization algorithm, BOA)、麻雀优化算法(sparrow algorithm, SA)、鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)等新的群智能优化算法[9-12]。该类算法结构简单, 运行速度快, 所需参数少, 具有在较短时间内解决繁杂和多维问题的能力, 被广泛应用于复杂科学研究和工程应用在空间中搜索最优解的难题。同时针对智能优化算法存在种群多样性低、收敛速度和反演稳定性得不到保证等问题, 众多学者也进行了不同程度的改良与优化[13-14]。

改进型野马优化算法(modified wild horse optimizer ,MWHO)是基于野马优化算法(wild horse optimizer ,WHO)的计算框架以及借鉴粒子群算法的局部搜索计算过程进行的改进优化, 具备收敛速度快、计算精度高的特点[15-16]。该算法通过模拟野马群体间的放牧和杂交行为来完成群体间各个粒子的信息交换, 并不断重复整个种群游牧行为模拟, 直到该种群找到最适合的栖息地, 并将该地点作为全局最优解。相较于其他启发式算法, 其具有更强的搜索能力和更好的稳定性, 在地球物理反演计算以及解决其他工程问题中均得到了较好的实际应用效果, 是目前受到广泛关注和应用的启发式智能算法之一[17-18]。本文将 MWHO 应用于 Cole-Cole 模型参数反演, 首先使用理论模型验证其计算精度和反演效果, 而后应用实例反演高精度 Cole-Cole 模型参数, 分析解译电性异常信息。

1　Cole-Cole 模型

当通过岩(矿)石的供电电流密度不大时, 岩(矿)石的激电效应具有线性规律, 并且在时间范围内可以用不变的参数来描述, 是一个线性不变系统。对于矿化岩石来说, 可以把它的一个基本结构单元简化成图 1a 所示结构, 其中包括被金属硫化物阻塞的溶液孔隙通道和未被阻塞的溶液孔隙通道; 此基本结构单元可以用图 1b 所示的等效电路来模拟, 电阻 R1 模拟未被阻塞的溶液孔隙通道中的溶液电阻, 电阻 R2 模拟被阻塞的溶液孔隙通道中的溶液的电阻与金属颗粒的电阻的和, 复阻抗 $(j\omega X)^{-c}$ 模拟金属—离子溶液界面阻抗[3]。

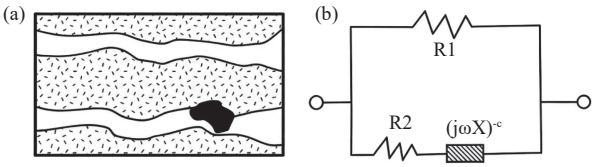


图 1　矿化岩石的一个基本结构单元示意(a)及其等效电路(b)[8]

Fig. 1　Schematic of a basic structural unit of mineralized rock (a) and its equivalent circuit (b)[8]

该等效电路复电阻率在频率域的 Cole-Cole 模型数学表达式为:

$$\rho(\omega)=\rho_0\left[1-m\left(1-\frac{1}{1+(j\omega\tau)^c}\right)\right], \qquad (1)$$

上式经 Fourier 逆变换后, 得到时间域响应:

$$V(t)=mR_0I_0\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n(t/\tau)^{nc}}{\Gamma(nc+1)}, \qquad (2)$$

式中: ρ_0是零频率时的电阻率; ω是角频率; $V(t)$ 是二次场电位差; t 是响应时间; I_0是一次场电流; R_0是零频电阻; Γ是伽马函数; m 是充电率; τ 是时间常数; c 是频率相关系数; n 是实测衰减曲线上取样点总数。

地质体激电效应的时间特性和频率特性在数学理论上可以互相换算, 其物理意义上是等效的, 仅存在观测技术上的差别。正是 Cole-Cole 模型搭建了时频激电转换的桥梁, 为本文基于时间域激电数据, 采用智能算法反演频谱参数奠定了基础。

2　改进型野马优化算法

MWHO 算法主要包含以下 5 个核心步骤。

2.1　种群初始化

随机生成野马总数量为N, 设置种马(首领)占总群的百分比为PS, 则种马数量$G=PS\times N$, 将剩余成员根据种马的数量在马群中平均分组。算法初期随机选择各自马群首领, 后期根据各群体成员的适应度选择替换首领。

2.2　种群放牧行为

在放牧行为中, 算法认定各马群首领为放牧区

域中心, 马群内成员在首领周围放牧。放牧行为用

$$\overline{\boldsymbol{X}}_{G,i}^{j} = 2Z\cos(2\pi RZ)\times(\boldsymbol{Stallion}_{G,i} - \boldsymbol{X}_{G,i}^{j}) + \boldsymbol{Stallion}_{G,i} \quad (3)$$

来模拟, 使群内成员在不同半径移动和搜索。式中: $\boldsymbol{X}_{G,i}^{j}$是马群i中成员j的当前位置; $\overline{\boldsymbol{X}}_{G,i}^{j}$是成员$j$放牧后的位置; $\boldsymbol{Stallion}_{G,i}$是马群$i$中首领的位置; R是一个范围在 [−2,2] 的随机数, 可使马在不同角度放牧; Z是一个自适应值。

2.3 种群杂交行为

种群内的小马驹会在成熟时离开当前群体, 和其他群体中的马驹进行杂交, 产生新的个体。杂交个体位置信息更新方式用式(4)模拟:

$$\boldsymbol{X}_{G,k}^{p} = Mean(\boldsymbol{X}_{G,i}^{q}, \boldsymbol{X}_{G,J}^{z}),\ i \neq j \neq k,\ p = q = end \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{X}_{G,k}^{p}$为马群k中杂交产生新的小马驹p的位置; $\boldsymbol{X}_{G,i}^{q}$为马群i中父代个体q的位置; $\boldsymbol{X}_{G,j}^{z}$马群j中母代个体z的位置。算法中小马驹的离开和杂交行为, 用均值型交叉算子$Mean$模拟。

2.4 种群找水行为

种马领导团队寻找水源、逐渐靠近水源并争夺水源, 具体是指让小马驹在种马和现有水源地之间进行搜寻, 旨在寻找最佳水源地。寻找水源的方式用式(5)和式(6)模拟。

$$\overline{\boldsymbol{S}}_{G,i}^{j} = w\boldsymbol{S}_{G,i}^{j} + c_1 r_1\left(\boldsymbol{Stallion}_{G,i} - \boldsymbol{X}_{G,i}^{j}\right) + c_2 r_2\left(\boldsymbol{WH} - \boldsymbol{X}_{G,i}^{j}\right), \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{S}_{G,i}^{j}$是马群i中成员j的当前移动距离; $\overline{\boldsymbol{S}}_{G,i}^{j}$是成员$j$下一步的移动距离; $\boldsymbol{Stallion}_{G,i}$是马群$i$中首领的位置; $\boldsymbol{X}_{G,i}^{j}$是成员j的当前位置; $\boldsymbol{WH}$是水源位置; c_1、c_2分别表示认知尺度因子和社会尺度因子; r_1、r_2分别是在 [0,1] 内的随机数; w为惯性权重。

$$\overline{\boldsymbol{X}}_{G,i}^{j} = \overline{\boldsymbol{S}}_{G,i}^{j} + \boldsymbol{X}_{G,i}^{j}, \quad (6)$$

式中: $\overline{\boldsymbol{X}}_{G,i}^{j}$是马群$i$中成员$j$移动后的位置; $\overline{\boldsymbol{S}}_{G,i}^{j}$是成员$j$下一步的移动距离; $\boldsymbol{X}_{G,i}^{j}$是成员j的当前位置。

2.5 种群竞争行为

算法初期随机选择种马, 确保随机性质, 如果后期该马群中某个成员的适应度优于种马, 则马群首领和相应成员的位置将根据式(7)进行交换:

$$\boldsymbol{Stallion}_{G,i} = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{X}_{G,i} & if & F(\boldsymbol{X}_{G,i}) < F(\boldsymbol{Stallion}_{G,i}) \\ \boldsymbol{Stallion}_{G,i} & if & F(\boldsymbol{X}_{G,i}) > F(\boldsymbol{Stallion}_{G,i}) \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

式中: $\boldsymbol{Stallion}_{G,i}$是马群首领的当前位置; $\boldsymbol{X}_{G,i}$是马群成员的当前位置; $F(\cdot)$为计算适应度的算子。

3 理论模型验证

3.1 目标函数构建

基于前人研究成果, 结合 Guptasarma[19] 提出的数字滤波算法, 可以得到视极化率衰减曲线的正演模型:

$$\begin{cases} \eta(t) = \sum_{i=1}^{21} \Phi_i m[x_i(t+T_P) - x_i(t)] \\ x_i = \dfrac{1+(\omega_i\tau)^c\cos\pi c/2}{1+(\omega_i\tau)^{2c}+2(\omega_i\tau)^c\cos\pi c/2} \\ \omega_i = \dfrac{10^{a_i}}{t} \end{cases}, \quad (8)$$

式中: t是响应时间; T_P是窗口时间; a_i是滤波系数对应的横坐标; Φ_i是与a_i对应的滤波系数; x_i是传递函数; ω_i是角频率。

Cole-Cole 模型参数反演的目标函数可构建成实测视极化率与式(8)正演计算得到视极化率的均方差, 定义如下:

$$\Phi = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}(\eta_{\mathrm{obs},i} - \eta_{\mathrm{cal},i})^2/N}, \quad (9)$$

式中: N为观测数据的个数; $\eta_{\mathrm{obs},i}$表示视极化率的观测值; $\eta_{\mathrm{cal},i}$表示通过正演模型(式 8)计算得到的极化率值。

3.2 已知模型验证

根据罗延钟等[20] 给出的检验模型, 取频率相关系数 c=0.5、充电率 m=0.6、时间常数 τ=1, 利用上述给定的极化率正演模型, 分两种方式验证 MWHO 算法反演 Cole-Cole 模型参数效果。

第一种方式为固定延时 100 ms, 采样时间窗口从 4 组依次增加至 9 组, 探究在不同时间窗口数量下 Cole-Cole 模型参数反演结果的精度。图 2 为不同时间窗口数量的激电谱理论曲线与拟合曲线, 可以发现, 时间域激电谱的观测值和计算值整体拟合效果较好。随着时间窗口的增加, 拟合效果逐渐优化, 但是时间窗口增至 9 组时, 拟合效果变化不明显。说明时间窗口的数量为 8 组以上时, 对于激电谱的形态拟合差异影响较小。

表 1 为不同时间窗口数量的验证模型反演结果及精度, 可以看出, 随着时间窗口的增加, 反演得到的 3 个参数精度都有所提高。当时间窗口数量为 4~7 组时, 反演参数精度范围是 1.01%～20.13%, 精度一般。窗口数量达到 8 组及以上, 精度范围明显提升, 精度为 0.03%～0.48%, 重复多次反演后, 精度范围均小于 0.5%, 且反演结果具有较好的稳定性。

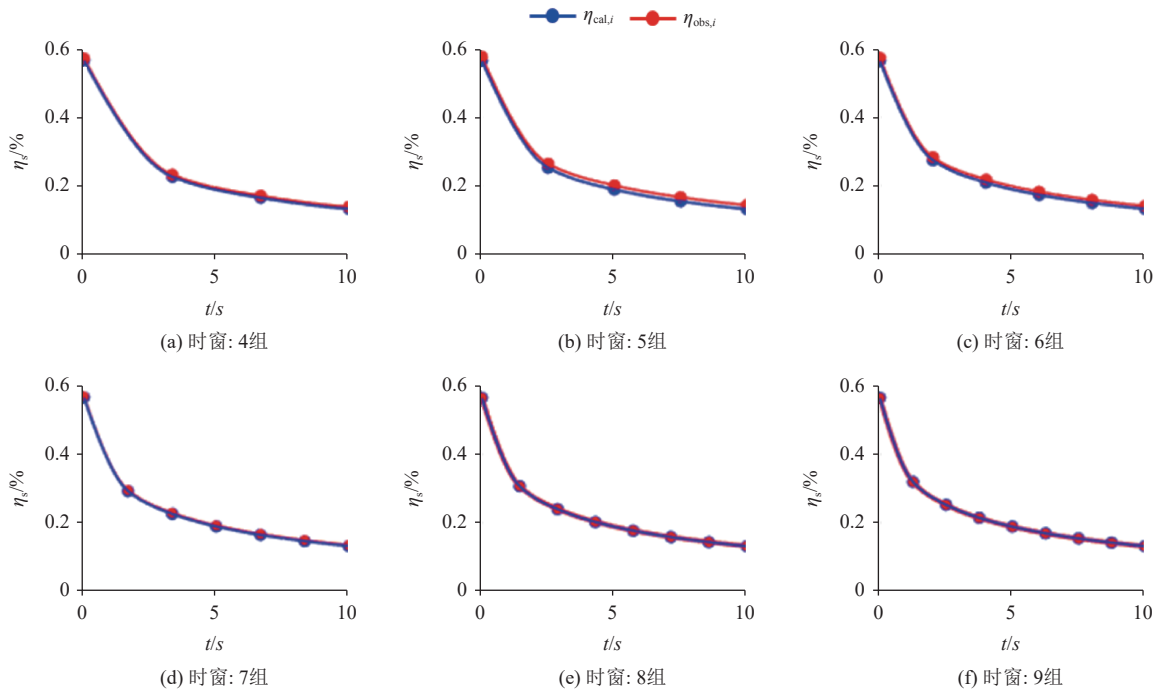


图 2　不同时间窗口数量的激电谱理论曲线与拟合曲线

Fig. 2　Theoretical curves and fitted curves of induced polarization spectra with different numbers of time windows

表 1　不同时间窗口数量的验证模型反演结果及精度

Table 1　Inversion results and accuracy of validation models with different numbers of time windows

时间窗口数量	模型理论值			拟合值			精度/%		
	c	m	τ	c	m	τ	c	m	τ
4组	0.5	0.6	1	0.472 2	0.656 1	1.021 1	5.56	9.35	2.11
5组	0.5	0.6	1	0.443 4	0.720 8	1.018 5	11.32	20.13	1.85
6组	0.5	0.6	1	0.465 5	0.670 6	1.026 4	6.90	11.77	2.64
7组	0.5	0.6	1	0.489 3	0.621 3	1.010 1	2.14	3.55	1.01
8组	0.5	0.6	1	0.498 5	0.602 9	1.002 5	0.30	0.48	0.25
9组	0.5	0.6	1	0.501 3	0.597 4	0.999 7	0.26	0.43	0.03

第二种方式是固定时间窗口数量为 8 个, 时间延时分别取 10、50、80、100、150、180、250、350、500、700 ms, 共 10 组, 探究在不同时间延时后 Cole-Cole 模型参数反演结果的精度。图 3 为不同延时的激电谱理论曲线与拟合曲线, 图 3a～i 依次为延时取 10、50、80、150、180、250、350、500 和 700 ms 的拟合情况, 可以看出 10～50 ms 拟合形态效果较差, 80~250 ms 拟合形态效果较好, 350～700 ms 拟合形态效果较差。

表 2 为不同延时的验证模型反演结果及精度, 同样可以看出, 时间延时从 10 ms 一直增大到 700 ms, 反演参数的精度呈现先逐渐提高, 然后在一段时间内保持稳定, 最后逐渐下降的特征。当延时为 10～80 ms 时, 反演参数精度范围变化大, 在 3.33%～35.86% 内波动, 精度一般; 延时为 100～250 ms 时, 精度范围变化小, 为 0.08%～0.85%, 精度最高; 延时为 350～700 ms 时, 精度范围变化较大, 为 3.61%～31.65%, 精度随着延时增大又逐渐降低; 说明时间延时对于激电谱的拟合差异影响较大, 在野外实际工作测量中, 需要对时间延时进行多次调试, 选取最合适的延时范围, 才能得到高精度的拟合效果。

综上采用两种方式对已知理论模型检验, 初步认为, 使用 MWHO 算法反演时间域激电数据的频谱参数效果较好, 同时当选择 8 组及以上的时间窗口, 激电测量过程中时间延时设置在 80～250 ms 之间, 可反演得到高精度的 Cole-Cole 模型参数。

4　实例应用

实测数据采集于新疆青河县某金矿, 该矿区位于卡拉麦里深大断裂与其北部的次一级构造清

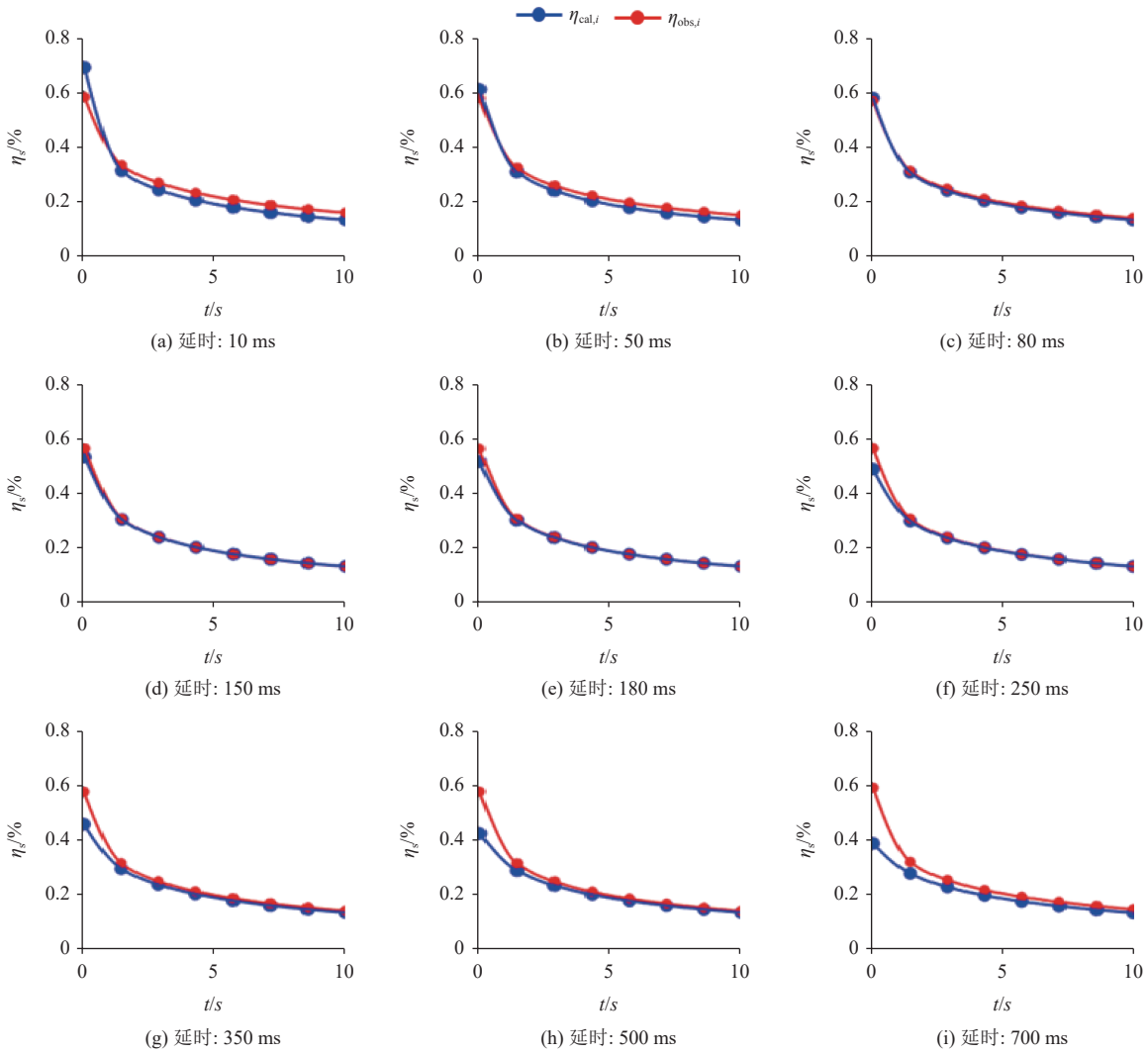


图 3 不同延时的激电谱理论曲线与拟合曲线

Fig. 3 Theoretical curves and fitting curves of induced polarization spectra with different delays

表 2 不同延时的验证模型反演结果及精度

Table 2 Inversion results and accuracy of verification models with different delays

延时/ms	模型理论值			拟合值			精度/%		
	c	*m*	*τ*	*c*	*m*	*τ*	*c*	*m*	*τ*
10	0.5	0.6	1	0.419 0	0.766 3	1.358 6	16.20	27.72	35.86
50	0.5	0.6	1	0.435 0	0.736 7	1.130 9	13.00	22.78	13.09
80	0.5	0.6	1	0.473 7	0.652 6	1.033 3	5.26	8.77	3.33
100	0.5	0.6	1	0.498 5	0.602 9	1.002 5	0.30	0.48	0.25
150	0.5	0.6	1	0.502 0	0.596 1	0.999 1	0.40	0.65	0.09
180	0.5	0.6	1	0.502 5	0.594 9	1.004 8	0.50	0.85	0.48
250	0.5	0.6	1	0.501 0	0.598 1	0.999 2	0.20	0.32	0.08
350	0.5	0.6	1	0.467 3	0.671 9	0.963 9	6.54	11.98	3.61
500	0.5	0.6	1	0.470 7	0.665 8	0.950 6	5.86	10.97	4.94
700	0.5	0.6	1	0.424 9	0.789 9	0.809 3	15.02	31.65	19.07

水—苏吉泉大断裂之间。由于受构造挤压，岩石具强片理化，区内卡拉麦里断裂及次级脆—韧性断裂与金的关系十分密切，已发现的金矿(化)点、金矿化构造破碎带多与主断裂相关的次级脆—韧性断裂相关，是成矿物质来源运移的通道，NW—近 EW 向次级断裂为主要的导矿、控矿和容矿构造。本次数据采集工作是在地表矿化蚀变程度较高的区域开展激电测深工作，图 4a、b 为其中一条测线的视极化率、视电阻率变化特征。视极化率主要变化范围为 1.36%~3.85%，异常特征不明显，仅地表存在个别极

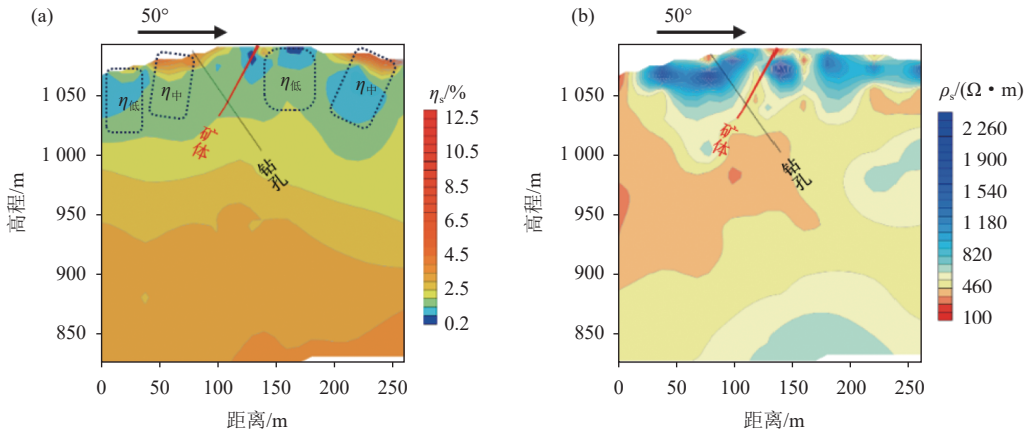


图 4　激电测深视极化率 (a)、视电阻率 (b) 等值线断面

Fig. 4　Cross section of apparent polarization rate(a) and apparent resistivity(b) contour lines in induced polarization depth measurement

大值达到 10% 左右。从纵向来看，高程从 820 m 上升至 1 090 m，视极化率在不同高程处呈现近似水平层状且逐渐减小的趋势，整体数值偏低，均值约为 2.04%。在高程 800~1 000 m 区间，当水平距离从 0 m 增加至 250 m，横向分析显示视极化率无明显变化趋势；而在高程 1 000~1 090 m 区间，当水平距离从 0 m 增加至 250 m，横向分析显示视极化率呈现“低极化—中极化—低极化—中极化”的特征（图 4a 中虚线框所示），也无法区分出明显的高极化异常体。视电阻率沿测线方向，在高程 1 000~1 090 m 区间，可见条带串珠状连续的高阻体，中部显示明显南倾低阻异常体。但是在高程 820~1 000 m 区间，整体呈现低阻特征，导致上述浅部低阻异常向深部延伸情况不明晰。综合以上视极化率、视电阻率变化特征，未能有效圈定伴有高极化、低阻特征的异常地质体。

由于图 4 中视极化率和视电阻率不能区分出地下弱激电异常，但该条测线地表矿化蚀变带比较明显，结合地质资料推测存在已知矿体（图中红色粗线段代表矿体位置），经钻探验证后在钻孔 45.08 m 处出现黄铁矿化粉砂岩，黄铁矿呈浸染状和细脉状沿裂隙连续分布且见矿，金的品位达到工业品位以上，（图中黑色线段代表钻孔位置）。因此本文基于 8 个时间窗口、设定时间延时为 100 ms，采用 MWHO 算法进一步反演该条激电测深剖面的 Cole-Cole 模型参数，以此提高地下电性异常体的分辨率，分别得到频率相关系数 c、充电率 m 和时间常数 τ 等值线断面图 5a~c，其中 c、m 和 τ 三个参数的背景值分别为 0.82、18% 和 31 s。从图 5 中依据频谱参数异常重新细分激电异常区域，能够划分 C1~C6 的 c 值异常、M1~M6 的 m 值异常、τ1~τ6 的 τ 值异常，可以看出 c 值、m 值、τ 值具有较好的一致性，结合图 4 和图 5 总结得到表 3 所示的各个异常区的激电参数特征情况。

由于 m 值随导电矿物含量的增大而增大，且 m 和 η_s 两个参数都描述岩（矿）石在供电断电后产生激发极化效应的强弱，本质是同一个物理效应的两

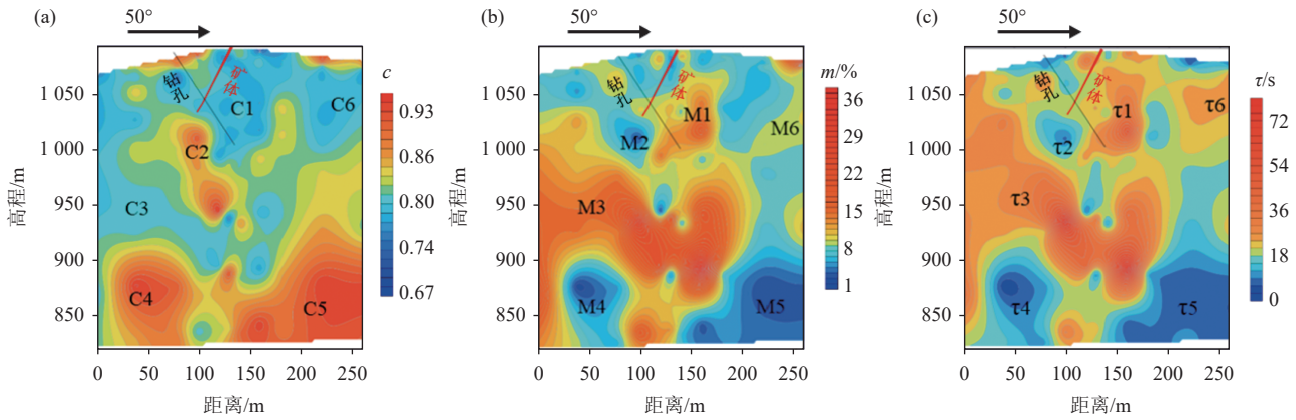


图 5　Cole-Cole 模型参数：频率相关系数 (a)、充电率 (b) 和时间常数 (c) 等值线断面

Fig. 5　Cole-Cole model parameters: contour sections of frequency correlation coefficient (a), charging rate (b) and time constant (c)

表 3 异常区激电参数特征

Table 3 Characteristics of induced polarization parameters in abnormal areas

异常区特征	c	m	τ	η_s	ρ_s
C1、M1、τ1	低;≈0.76	高;≈21%	高;≈47	低	中
C2、M2、τ2	高;≈0.87	低;≈9%	低;≈18	中低	低
C3、M3、τ3	低;≈0.75	高;≈23%	高;≈61	中高	低
C4、M4、τ4	高;≈0.91	低;≈5%	低;≈12	高	中低
C5、M5、τ5	高;≈0.92	低;≈4%	低;≈11	高	中高
C6、M6、τ6	低;≈0.72	中;≈15%	中;≈29	低	中

种表达方式,在相同装置、相同延时条件下,理论上数值近似呈正相关,但在实际野外测量中,受限于矿物颗粒细小、连通性差时,电荷传输受阻,激电谱衰减变慢,极化率和充电率变化不同步,导致二者不成正相关;τ 值的大小主要受导电矿物颗粒大小和导电矿物连通程度控制,颗粒越大,连通程度越好,则 τ 值越大;c 值受导电矿物颗粒的含量和颗粒均匀性影响,导电矿物含量越高,c 值越小,矿化程度较高的岩石内部矿化颗粒往往不均匀,c 值较小,零星或稀疏浸染矿化的背景地段岩石一般颗粒较均匀,c 值较大。至于矿化或石墨化程度很高、导电矿物连通极好的网脉状或致密状矿 (化) 体,已接近于面极化体,其 c 值都在 0.5 以上[6]。根据图 5 分析 Cole-Cole 模型参数特征,C1、M1、τ1 为同一异常,推测是矿化程度较高、金属矿物含量较多、矿化颗粒不均匀且导电矿物连通程度较好的金属硫化物矿化体。经钻孔验证后,钻孔与矿脉交汇处,石英脉体发育,岩心整体矿化蚀变强烈,在 45.08~45.88 m 间为灰白色—紫红色黄铁矿化绢云母化粉砂岩,岩石塑性变形较强,岩心内灰白色石英细脉宽 2 cm 左右,岩心整体矿化强烈,主要为黄铁矿化,呈条带状,沿劈理面分布,半自形—它形粒状、团斑状,以银白色为主,少数为淡金黄色,1~2 mm,大多为 2~3 mm,黄铁矿含量占 10% 左右,石英脉内局部可见 1 mm 左右星点状黄铁矿,多沿脉体边部小裂隙分布,脉体内灰绿色围岩中的黄铁矿相对较多,在该段异常体内见矿,金品位达工业品位以上。C3、M3、τ3 和 C6、M6、τ6 的异常特征对应效果较好,且与 C1、M1、τ1 具有相似特征,预测可能是矿化程度较高、金属矿物含量较多、矿化颗粒不均匀且导电矿物连通程度较好的金属硫化物矿化体或是呈零星、稀疏浸染状金属硫化物矿化体,同样具有见金矿化的潜力。C2、M2、τ2 为同一异常,推测该地层导电矿物连通程度较差,可能是含星点状黄铁矿的凝灰质砂岩。C4、M4、τ4 和 C5、M5、τ5 可能为同一异常,推测该地层矿物连通程度较差,呈零星、稀疏浸染状金属硫化物矿化体或者是具有高阻高极化特征硅化较强的金属硫化物地质体。

综上所述,地表沿测线方向矿化蚀变强烈,石英脉矿体延伸几十米,然而视极化率无明显异常特征,不能够区分出地下异常体形态,仅凭视电阻率解释激电信息依据单薄,反演高精度的 Cole-Cole 模型参数则能够对弱激电异常进一步刻画,根据 c、m 和 τ 值的相对大小推测地下异常体更精细的分类,且根据已知见矿部位的电性特征初步推测深部仍有见矿可能,这为后续利用 Cole-Cole 模型参数寻找金属矿增添了进一步研究的意义。

5 结论

基于时间域全波形采样方式,将 MWHO 算法引入到 Cole-Cole 模型参数反演中,通过前人的模型检验和在实测数据的应用,取得以下几点新认识:

1)MWHO 算法反演频谱参数具有计算时间快,反演结果稳定性好,不易陷入局部解困扰等优点。经过已知模型验证,当时间窗口数量取 8 组及以上、时间延时取 100~250 ms 时,能够反演得到最高精度达 0.03% 的高精度 Cole-Cole 模型参数,类似 MWHO 等群智能全局优化算法在深度处理激电数据反演时值得研究推广。

2)将理论计算的时域激电谱与实际观测时域激电谱拟合后发现,时间窗口数量对拟合效果影响较小,时间窗口选择 4~9 组时,激电谱拟合形态都比较一致。时间延时对拟合效果响应明显,当延时为 10~50 ms、350~700 ms 两个时间段时,拟合效果一般,在 80~250 ms 之间拟合效果好,这为今后野外激电测量中设定时间延时提供了较明确的参考范围,断电后测量的延时设定不宜过早或过晚。

3)与传统的反演方法对比,本文将群智能全局优化算法引入到基于野外实际测量的时间域激电数据反演 Cole-Cole 模型参数中,能够明显提高激电异常分辨率,区分出常规视极化率和视电阻率无法识别的弱激电异常,重新刻画地下异常体的空间形态

及延伸展布情况, 与已知的地质资料及钻孔勘查相互验证, 对地下矿体见矿情况能够给出合理的解释以及对深部找矿前景做出预测, 是一次有益的尝试与探索。

参考文献(References):

[1] 刘崧. 谱激电法 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998.
Liu S. Spectral induced polarization method [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1998.

[2] 何继善. 双频激电法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
He J S. Dual-frequency induced polarization method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.

[3] Pelton W H , Ward S H , Hallof P G, et al. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency ip[J]. Geophysics, 1978, 43(3): 588.

[4] Grissemann C, D Rammlmair, C Siegwart, et al. Spectral induced polarization linked to image analyses: A new approach [G]. Balkema: Rammlmair D, Mederer J, Oberthür T, et al. , eds. , Applied Mineralogy, 2000: 561−564.

[5] 罗延钟, 方胜. 视复电阻率频谱的一种近似反演方法 [J]. 地球科学, 1986, 11(1): 93−102.
Luo Y Z, Fang S. An approximater inversion of the apparent complex resistivity spectrum[J]. Earth Science Journal, 1986, 11(1): 93−102.

[6] 罗延钟, 吴之训. 谱激电法中频率相关系数的应用 [J]. 地球物理学报, 1992, 35(4): 490−500.
Luo Y Z, Wu Z X. The application of frequency dependent factor in spectral induced polarization method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1992, 35(4): 490−500.

[7] 罗润林, 李亚南. 基于时域激电数据的 Cole-Cole 模型频谱参数反演 [C]//桂林: 第九届中国国际地球电磁学术讨论会, 2009: 285−288.
Luo R L, Li Y N. Spectrum parameters of Cole-Cole model inversion based on time-domain IP data[C]//Guilin: The 9th China International Symposium on Electromagnetics of the Earth, 2009: 285−288.

[8] 彭伟, 梁义强, 张淳, 等. Cole-Cole 模型参数在时间域激电找矿中的应用 [J]. 物探与化探, 2018, 42(3): 513−517.
Peng W, Liang Y Q, Zhang C, et al. The application of Cole-Cole model parameters to the time domain induced polarization prospecting[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(3): 513−517.

[9] 彭刘亚, 冯伟栋, 解惠婷, 等. 基于改进蝴蝶优化算法的瑞利波频散曲线反演方法 [J]. 物探与化探, 2024, 48(3): 705−720.
Peng L Y, Feng W D, Xie H T, et al. An improved butterfly optimization algorithm in the inversion of Rayleigh wave dispersion curve[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(3): 705−720.

[10] 李勤, 杨晓迎, 姜星宇, 等. 基于改进粒子群算法的 VTI 介质裂隙预测 [J]. 物探与化探, 2024, 48(4): 1054−1064.
Li Q, Yang X Y, Jiang X Y, et al. Prediction of fractures in VTI media based on the improved particle swarm optimization algorithm[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(4): 1054−1064.

[11] Rahman I , Mohamad-Saleh J , Sulaiman N. Reactive Power Optimization Using New Enhanced Whale Optimization Algorithm [J]. International Journal of Applied Metaheuristic Computing (IJAMC), 2022, 13(13): 1−12.

[12] 曹绍贺, 黄中群, 袁春艳, 等. 基于麻雀搜索算法的致密砂岩储层参数非线性反演方法 [J]. 物探与化探, 2025, 49(5): 1141−1154.
Cao S H, Huang Z Q, Yuan C Y, et al. Nonlinear inversion of tight sandstone reservoir parameters using the sparrow search algorithm [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(5): 1141−1154.

[13] 张倩, 王玲, 江沸菠. 电阻率层析成像的二维改进粒子群优化算法反演 [J]. 物探与化探, 2015, 39(5): 1047−1052.
Zhang Q, Wang L, Jiang F B. 2-D Improved particle swarm optimization algorithm for electrical resistance tomography inversion[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(5): 1047−1052.

[14] 孙旭, 计子琦, 杨庆义, 等. 基于改进麻雀搜索算法的瑞利波频散曲线反演 [J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1267−1275.
Sun X, Ji Z Q, Yang Q Y, et al. Inversion of Rayleigh wave dispersion curves based on the improved sparrow search algorithm[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1267−1275.

[15] Naruei I, Keynia F. Wild horse optimizer: A new meta-heuristic algorithm for solving engineering optimization problems[J]. Engineering with Computers, 2022, 38(S4): 3025−3056.

[16] 唐塑, 武银婷. 改进野马优化算法在基阶瑞雷面波频散曲线反演中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2024, 39(4): 1698−1710.
Tang S, Wu Y T. Application of modified wild horse optimizer for inversion of base-mode Rayleigh wave dispersion curve[J]. Progress in Geophysics, 2024, 39(4): 1698−1710.

[17] 綦志刚, 张昊, 李冰, 等. 基于改进型野马优化算法的船舶参数辨识方法 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(1): 85−95.
Qi Z G, Zhang H, Li B, et al. Ship parameter identification method based on improved wild horse optimizer[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(1): 85−95.

[18] Jia T , Wu Y T , Tang S. Research on the inversion of passive-source Rayleigh wave dispersion curves based on the MWHO algorithm[J]. Acta Geophysica, 2025, 73(5): 4101−4112.

[19] Guptasarma D. Computation of the time-domain response of a polarizable ground[J]. Geophysics, 1982, 47(11): 534−541.

[20] 罗延钟, 张桂青. 频率域激电法原理 [M]. 北京: 地质出版社, 1988.
Luo Y Z, Zhang G Q. Principle of frequency-domain induced polarization method M]. Beijing: Geology Press, 1988.

Application of a modified wild horse optimizer in the inversion of Cole-Cole model parameters

YANG Hai-Ming [1], TANG Su [1, 2], WEI Yong-Shan [1], GUAN Li-Wei [1, 2], PAN Zhan-Chao [1, 2]

(1. *Urumqi Natural Resources Comprehensive Survey Center*,*China Geological Survey*, *Urumqi* 830057, *China*; 2. *Innovation Base for Metallogenic Prediction and Prospecting Demonstration in the Central Asia Orogenic Belt*, *Urumqi* 830057, *China*)

Abstract: In this study, a modified wild horse optimizer (MWHO) algorithm characterized by a strong evolutionary capability, a faster search speed, and an enhanced optimization ability was introduced into the inversion of Cole-Cole model parameters using the time-domain induced polarization method. The performance of the MWHO algorithm was verified using known models, followed by a comparative study on the derived model parameters. In the case where the time window number and time delay were set at 8 or above and 100~250 ms, respectively, Cole-Cole model parameters with a maximum error of 0.03% were achieved through inversion using the MWHO algorithm. Furthermore, this algorithm exhibited a rapid computation speed and high result stability. Further verification using measured data indicates high consistency among the inverted values of frequency correlation coefficient (c), chargeability (m), and time constant (τ). The inversion results of measured data exhibited low-amplitude frequency correlation coefficient anomalies, high-amplitude chargeability anomalies, and high-amplitude time constant anomalies. These characteristics suggest the presence of metal sulfide ore (mineralized) bodies with a high mineralization degree, high metallic mineral contents, uneven mineralized particles, and high interconnectivity of conductive minerals. Drilling results reveal that siltstones with pyrite alteration occur at depths ranging from 45.08 m to 45.88 m. Disseminated and veinlet pyrite are continuously distributed along fractures. Furthermore, gold mineralization is visible, with gold grade reaching the industrial grade. The inversion results are roughly consistent with the drilling results. Therefore, the MWHO algorithm can be effectively applied to the inversion of Cole-Cole model parameters. Furthermore, this algorithm can distinguish weak induced polarization anomalies, thereby significantly enhancing the resolution of geobodies and highlighting ore-related anomalies. The proposed MWHO algorithm delivers high performance in identifying metal sulfide anomalies, warranting further research and widespread application.

Key words: modified wild horse optimizer(MWHO); Cole-Cole model parameters; induced polarization anomaly; inversion

(本文编辑: 叶佩)