

数据类型对三维广域电磁法勘探效果的影响

吴金涛

中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年3月4日; 录用日期: 2026年4月21日; 发布日期: 2026年4月29日

摘要

为探讨不同数据类型对三维广域电磁法反演成像效果的影响, 文章基于三维数值模拟与反演计算, 对电场与磁场不同分量的数据响应特征及其成像能力进行了系统分析。采用谱元法实现三维正演计算, 并结合有限内存拟牛顿算法(L-BFGS)构建三维反演框架。通过设计典型低阻异常模型, 对Ex复分量、振幅数据以及Hy、Hz复分量及其组合形式进行了对比反演研究。结果表明: Ex复分量反演在异常体形态恢复、边界刻画及电阻率定量估计方面明显优于单纯振幅反演; Hy分量对横向电性变化敏感性较弱, 单分量反演成像能力有限; Hz分量对三维结构具有一定响应优势, 但分辨率仍低于电场分量。多分量联合反演虽可增强数据约束, 但同时可能加剧模型多解性, 对正则化参数与结构约束依赖更高。研究结果为广域电磁法三维反演数据类型的合理选择提供了理论依据。

关键词

广域电磁法, 三维反演, 数据类型, 有限内存拟牛顿法

The Impact of Data Types on the Effectiveness of 3D WFEM

Jintao Wu

School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan

Received: March 4, 2026; accepted: April 21, 2026; published: April 29, 2026

Abstract

To investigate the impact of different data types on the imaging effects of 3D WFEM, this paper conducts a systematic analysis of the response characteristics and imaging capabilities of different components of electric and magnetic field data based on 3D numerical simulation and inversion calculations. The spectral element method is used to achieve 3D forward modeling, and combined

with the L-BFGS algorithm, a 3D inversion framework is constructed. By designing typical low-resistivity anomaly models, comparative inversion studies are conducted for the Ex complex component, amplitude data, as well as Hy and Hz complex components and their combinations. The results show that: inversion using the Ex complex component is significantly better than simple amplitude inversion in terms of recovering the anomaly shape, delineating boundaries, and quantitatively estimating resistivity; the Hy component has weak sensitivity to lateral electrical variations, and single-component inversion has limited imaging capability; the Hz component has certain advantages in responding to 3D structures, but its resolution is still lower than that of electric field components. Although multi-component joint inversion can enhance data constraints, it may also exacerbate model non-uniqueness, increasing dependence on regularization parameters and structural constraints. The results provide a theoretical basis for the rational selection of data types in 3D regional electromagnetic inversion.

Keywords

Wide Field Electromagnetic Method, 3D Inversion, Data Type, L-BFGS

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

广域电磁法是在可控源音频大地电磁法(CSAMT)基础上发展形成的人工源频率域电磁探测方法, 由于信号强、探测深度大和抗干扰能力较强等优点, 近年来在深部资源勘查广泛应用[1] [2]。

在三维反演领域, 频率域可控源电磁反演常采用基于梯度的迭代优化方法, 如有限内存拟牛顿法(L-BFGS)、非线性共轭梯度法(NLCG)以及高斯-牛顿法(GN)等。其中, L-BFGS 方法在大规模三维问题中具有存储需求低、收敛速度快等优势, 因而被广泛应用于电磁反演计算[3]-[14]。

尽管三维反演算法日趋成熟, 但反演数据类型的选择仍是影响成像质量的关键因素。不同电磁场分量对地下电性结构的敏感性存在明显差异, 振幅数据与复分量数据所包含的信息量也不相同。已有研究表明, 数据类型的差异会显著影响反演结果的分辨率与稳定性。然而, 对于广域电磁法三维反演中不同场分量及其组合形式对成像效果的系统对比研究仍相对不足[14]-[19]。

基于此, 本文构建了基于六面体网格的广域电磁法三维反演框架。首先简要介绍三维正演的基本理论与数值实现方法; 随后建立正则化目标函数, 并采用 L-BFGS 算法进行模型更新; 最后通过典型低阻异常模型, 对 Ex 振幅、Ex 复分量、Hy 与 Hz 复分量以及多分量联合反演效果进行系统对比分析, 揭示不同数据类型对成像分辨率与稳定性的影响机制, 为实际资料处理提供参考依据。

2. 三维正演

从微分形式的麦克斯韦方程组出发, 取时谐因子为 $e^{-i\omega t}$, 可得电性源广域电磁法满足的麦克斯韦方程组

$$\nabla \times E = i\omega\mu H, \quad (1)$$

$$\nabla \times H = (\sigma - i\omega\varepsilon)E + J_s, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho, \tag{4}$$

式中： D 、 E 为电位移矢量和电场强度； B 、 H 为磁感应强度和磁场强度； σ 为电导率； ω 为角频率； μ 为磁导率； ε 为介电常数； J_s 为外部激发的电性源。

人工源电磁法正演需考虑源的加载及源奇异性的影响，为了避免场源的奇异性，采用二次场算法，将总场分解成背景场和二次场，背景场由解析解计算得到，二次场满足的公式(1)、(2)的形式为

$$\nabla \times E^s = i\omega\mu H^s, \tag{5}$$

$$\nabla \times H^s = (\sigma - i\omega\varepsilon)E^s + J_s^p, \tag{6}$$

其中

$$J_s^p = (\sigma - \sigma_p)E^p, \tag{7}$$

式中： σ_p 为背景电导率； E^p 为一次电场。将(6)式代入(5)式，消去磁场可得二次电场满足的矢量赫姆霍兹方程：

$$\nabla \times \nabla \times E^s - k^2 E^s = i\omega\mu(\sigma - \sigma_p)E^p, \tag{8}$$

其中， $k^2 = i\omega\mu\sigma + \omega^2\mu\varepsilon$ ，为波数。

为保证电场的唯一性，需要考虑边界条件的加载，本文在正演时对计算区域进行扩边处理，当扩边区域足够大时可以近似认为二次电场已衰减为0，因此本文在外边界处选取 Dirichlet 边界条件如下

$$E^s \Big|_{\partial\Omega} = 0, \tag{9}$$

式(8)和(9)式共同构成广域电磁法边值问题。

3. 三维反演

3.1. 目标函数

基于反演中的正则化思想，构造如下目标函数

$$\phi(\mathbf{m}) = \phi_d(\mathbf{m}) + \lambda\phi_m(\mathbf{m}) \tag{10}$$

其中 \mathbf{m} 为模型参数向量， $\phi_d(\mathbf{m})$ 为数据拟合项， $\phi_m(\mathbf{m})$ 为模型约束项，也称为正则化项， λ 为正则化因子，用于平衡数据拟合与模型约束之间的权重。本文采用冷却法更新正则化因子。

数据拟合项的具体表达式为

$$\phi_d(\mathbf{m}) = \left\| \mathbf{W}_d (\mathbf{d}_{pre} - \mathbf{d}_{obs}) \right\|_2^2 \tag{11}$$

其中 \mathbf{d}_{pre} 为预测数据向量， \mathbf{d}_{obs} 为观测数据向量， \mathbf{W}_d 为数据协方差矩阵，是由数据误差的倒数组成的对角阵。

反演中采用均方根误差(RMS)定义数据拟合差，表达式为

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\phi_d(\mathbf{m})}{N_d}} \tag{12}$$

其中 N_d 为观测数据个数。理论上预测数据完全拟合于真实数据时，RMS 等于 1，因此 RMS 越接近于 1 时，拟合情况越好。

模型约束项的表达式为

$$\phi_m(\mathbf{m}) = \left\| \mathbf{W}_m (\mathbf{m} - \mathbf{m}_{ref}) \right\|_2^2 \quad (13)$$

其中 \mathbf{m} 为模型参数分量, \mathbf{W}_m 为模型约束矩阵, \mathbf{m}_{ref} 为参考模型。

3.2. L-BFGS 算法

对于 L-BFGS 算法, 在第 k 次迭代模型更新公式为

$$\mathbf{m}_{k+1} = \mathbf{m}_k + \alpha_k \mathbf{p}_k \quad (14)$$

其中 α_k 是步长, \mathbf{p}_k 为模型搜索方向, 其表达式为

$$\mathbf{p}_k = -\mathbf{H}_k^{-1} \mathbf{g}_k \quad (15)$$

其中 \mathbf{g}_k 为目标函数梯度向量, \mathbf{H}_k 为海森矩阵, 数学表达式分别为

$$\mathbf{g}_k = 2\text{Re} \left\{ \mathbf{J}_k^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d [\mathbf{f}(\mathbf{m}_k) - \mathbf{d}_{obs}]^* \right\} + 2\lambda \mathbf{W}_m^T \mathbf{W}_m (\mathbf{m}_k - \mathbf{m}_{ref}) \quad (16)$$

$$\mathbf{H}_k = 2\text{Re} \left\{ \mathbf{J}_k^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{J}_k \right\} + 2\lambda \mathbf{W}_m^T \mathbf{W}_m \quad (17)$$

式(17)所表示的海森矩阵显式计算和存储以及求逆都是非常困难的, L-BFGS 算法无需精确计算海森矩阵, 而是基于构建一个海森矩阵逆矩阵的近似矩阵 \mathbf{B}_k 来获得搜索方向, 于是模型的更新方式可以重写为

$$\mathbf{p}_k = -\mathbf{B}_k \mathbf{g}_k \quad (18)$$

为了最大程度减小内存消耗, 仅利用最近 m 次迭代的信息构建 \mathbf{B}_k , 其表达式为

$$\mathbf{B}_k = \left(\mathbf{v}_{k-1}^T \cdots \mathbf{v}_{k-m}^T \right) \mathbf{B}_k^0 \left(\mathbf{v}_{k-m} \cdots \mathbf{v}_{k-1} \right) + \left(\mathbf{v}_{k-1}^T \cdots \mathbf{v}_{k-m+1}^T \right) \rho_{k-m} \mathbf{s}_{k-m} \mathbf{s}_{k-m}^T \left(\mathbf{v}_{k-m+1} \cdots \mathbf{v}_{k-1} \right) + \cdots + \rho_{k-1} \mathbf{s}_{k-1} \mathbf{s}_{k-1}^T \quad (19)$$

其中

$$\rho_k = \frac{1}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k}, \mathbf{v}_k = \mathbf{I} - \rho_k \mathbf{y}_k \mathbf{s}_k^T$$

$$\mathbf{s}_k = \mathbf{m}_k - \mathbf{m}_{k-1}, \mathbf{y}_k = \mathbf{g}_k - \mathbf{g}_{k-1}$$

在 L-BFGS 算法的实践中, 通常不采用显式计算式(19)然后代入式(18)的方式得到搜索方向, 而是采用上述表达式推导得到的双循环递归算法直接快速计算得到搜索方向。可以看出其计算时间和内存消耗都是非常小的。

4. 模型算例

4.1. 单个低阻体

如图 1 所示的单个低阻体模型, 均匀半空间电导率为 0.01 S/m, 异常体电导率为 0.1 S/m, 其几何尺寸为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$, 顶部埋深为 400 m, 中心坐标位于 $(0, 0, 650) \text{ m}$ 。场源沿 x 轴方向布置, 中心坐标位于 $(0, -6000, 0) \text{ m}$, 长度为 100 m, 电流为 1 A, 在异常体正上方 $-1 \text{ km} < x, y < 1 \text{ km}$ 的地表处布置均匀测网, 相邻测点之间间隔 100 m, 共 441 个测点。利用正演计算该模型在 1 Hz~8192 Hz 之间对数间隔的 14 个频率的电场 E_x 分量数据, 并加入 3% 高斯噪声作为观测数据, 共获得 6174 个复数电场数据。反演区域为: $-1.2 \text{ km} < x, y < 1.2 \text{ km}, -1.2 \text{ km} < y < 1.2 \text{ km}, 0 \text{ km} < z < 1.2 \text{ km}$, 核心区域的网格均为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 。

反演初始模型为电导率为 0.01 S/m 的均匀半空间, 初始正则化因子为 10, 冷却因子设置为 10, 最小正则化因子 λ_{\min} 设置为 10~40。

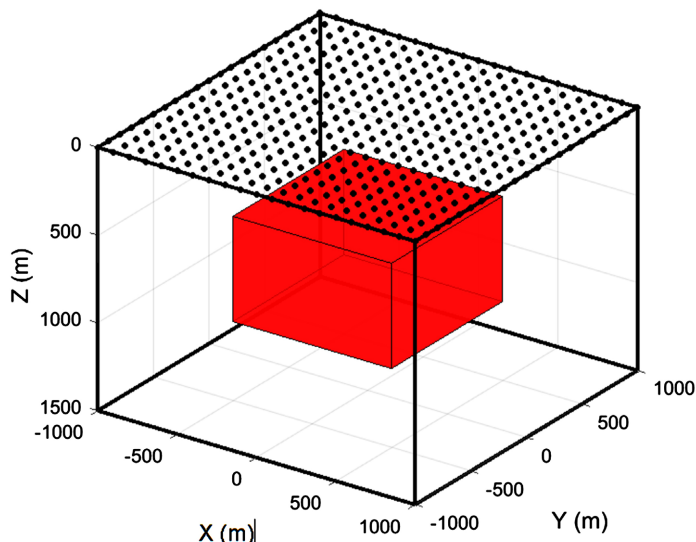


Figure 1. Low-resistivity cuboid model (Black dots on the ground surface are receivers)

图 1. 低阻体模型示意图(地表黑色的点代表测点)

4.1.1. Ex 复分量与振幅

图 2 展示了 Ex 复分量与振幅两种反演的数据拟合差曲线，反演中收敛阈值均设为 1.01，反演 Ex 复分量数据时，初始拟合差为 4.44，经过 61 次迭代后收敛，反演 Ex 振幅数据时，初始拟合差为 4.13，经过 46 次迭代后收敛，两种反演都较为稳定，收敛性也较为接近。

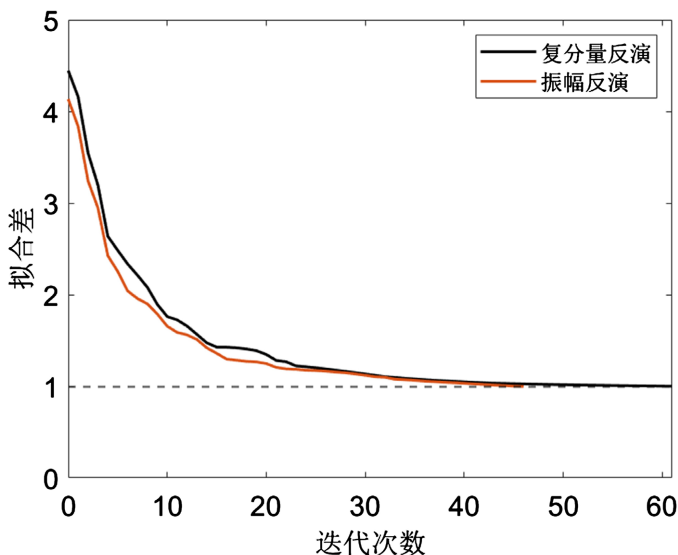
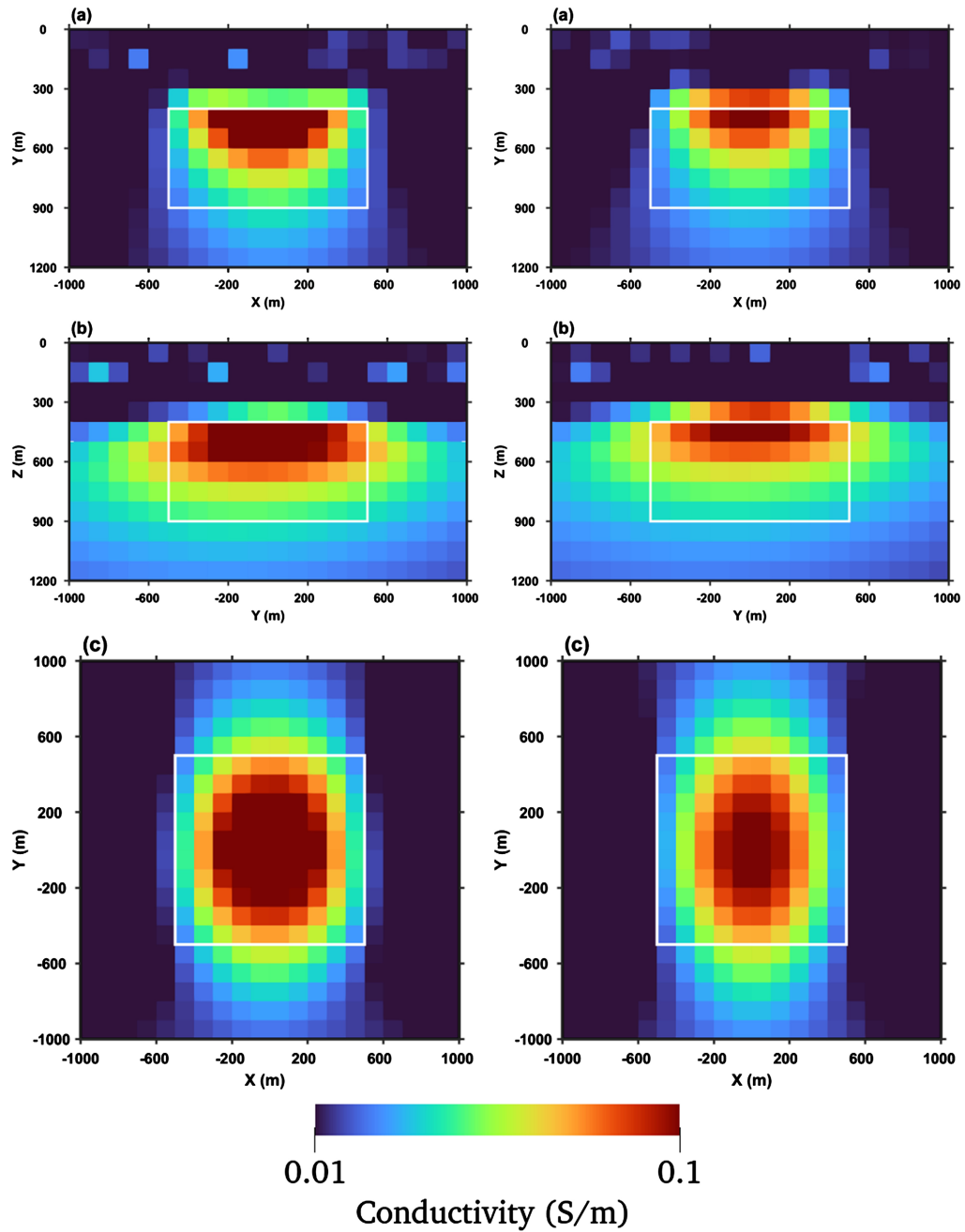


Figure 2. Inversion iterative convergence curve of Ex component for single low-resistivity cuboid

图 2. 单个低阻体 Ex 分量反演迭代收敛曲线

图 3 为阻体模型复分量反演(左列)与振幅(右列)反演结果剖面对比图。图中可以明显 Ex 分量两种反演均能恢复出异常体的位置与电导率，但复分量反演相比于振幅反演更为准确。两种异常体顶部与浅部恢复得较好，深部区域与底部界面稍差，反演获得的异常区域向地表略微偏移。



注：自上而下分别为 $y = 0 \text{ m}$, $x = 0 \text{ m}$, $z = 425 \text{ m}$ 。

Figure 3. Inversion result profiles of complex component inversion (left column) and amplitude inversion (right column) for low-resistivity cuboid model

图 3. 低阻体模型复分量反演(左列)与振幅(右列)反演结果剖面

4.1.2. H_y 复分量、 H_z 复分量、 $E_x + H_z$ 复分量

图 4 展示了 H_y 分量, H_z 分量和 $E_x + H_z$ 三种反演的数据拟合差曲线, H_y 初始 RMS 较小, 在 8 次迭代后完成拟合。 H_z 初始拟合差为 5.43, 经过 140 次, 拟合差降为 1.50。次迭代后收敛。反演 E_x 振幅数据时, 初始拟合差为 4.13, 经过 133 次迭代后收敛, 两种反演都较为稳定, 收敛性也较为接近。 $E_x + H_z$ 初始拟合差为 1.59。

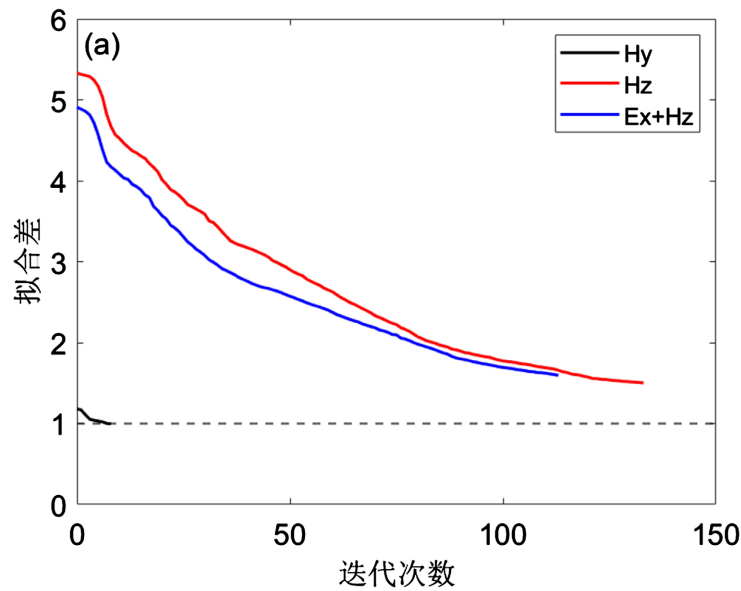


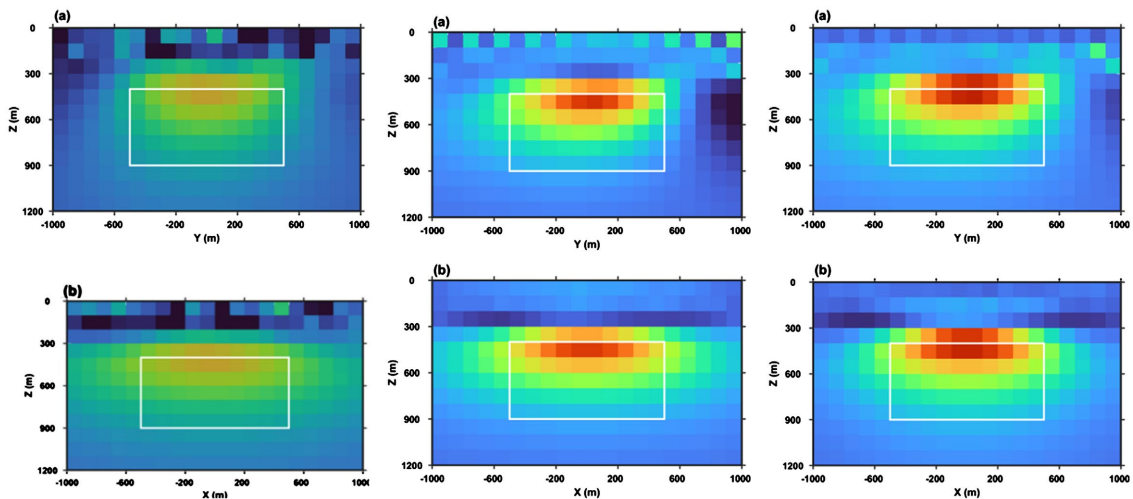
Figure 4. RMS values of inversion parameters versus iteration number
图 4. 反演参数随迭代次数的变化 RMS 值

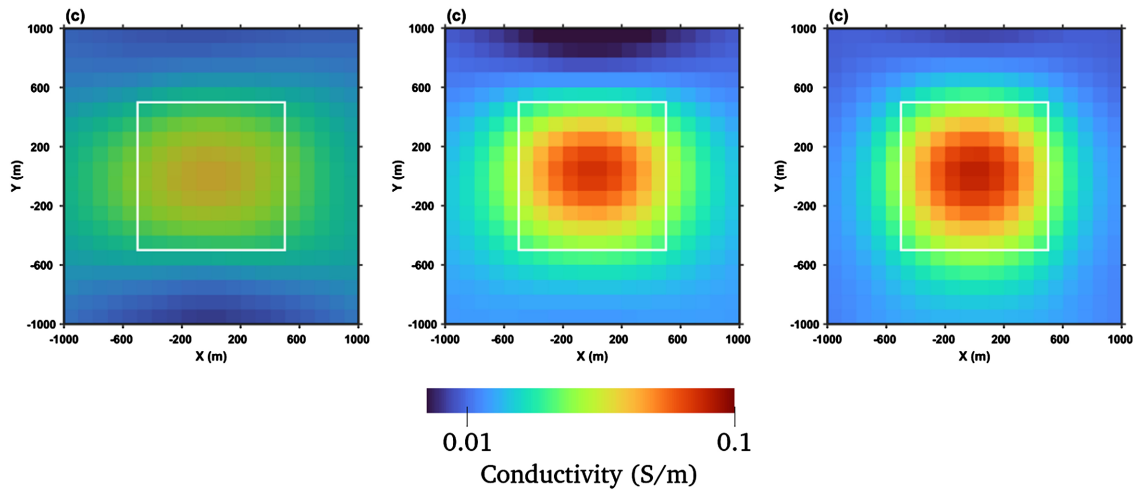
图 5 是低阻体模型 H_y 、 H_z 和 $Ex + Hz$ 反演结果剖面。反演得到的异常微弱，这是因为 H_y 振幅较小、噪声水平相对较高，其对低阻异常的反演能力较弱， H_y 单分量反演难以精确刻画三维低阻体的几何形态。 H_z 反演结果与 $Ex + Hz$ 二者联合反演能够一定程度反映低阻异常的整体形态，但仍存在成像细节不足的问题。

② 高阻 - 低阻组合体模型

如图 6 所示的高阻 - 低阻组合体模型，均匀半空间电导率为 0.01 S/m，高阻异常体电导率为 0.0005 S/m，低阻异常体电导率为 0.0005 S/m，两个异常体的几何尺寸均为 $0.5 \text{ km} \times 1 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ ，高阻异常体顶部埋深为 200 m，中心坐标位于 $(-550, 0, 450) \text{ m}$ ，低阻异常体顶部埋深为 300 m，中心坐标位于 $(-550, 0, 550) \text{ m}$ 。

场源沿 x 轴方向布置，中心坐标位于 $(0, -6000, 0) \text{ m}$ ，长度为 100 m，电流为 1 A，在异常体正上方 $-1 \text{ km} < x, y < 1 \text{ km}$ 的地表处布置均匀测网，相邻测点之间间隔 100 m，共 441 个测点。





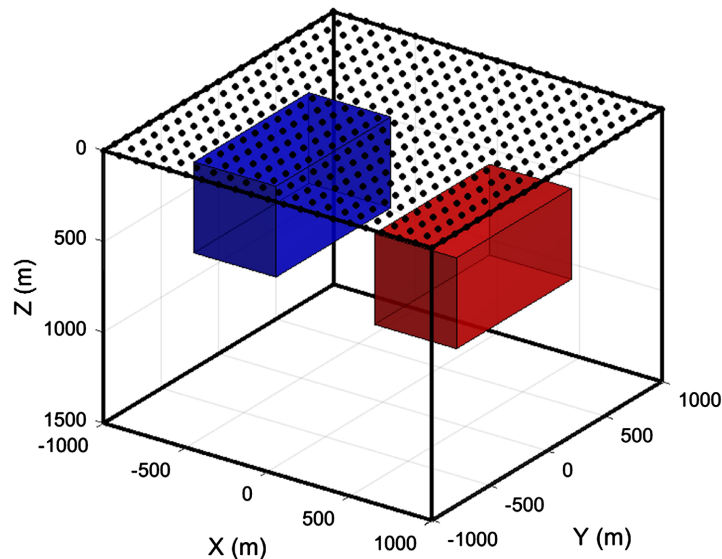
注：自上而下分别为 $y = 0 \text{ m}$, $x = 0 \text{ m}$, $z = 425 \text{ m}$ 。

Figure 5. Inversion result profiles of H_y (1st column), H_z (2nd column) and $E_x + H_z$ (3rd column) for low-resistivity cuboid model

图 5. 低阻体模型 H_y (第一列)、 H_z (第二列)和 $E_x + H_z$ (第三列)反演结果剖面

利用正演计算该模型在 1 Hz~8192 Hz 之间对数间隔的 14 个频率的电场 E_x 分量数据，并加入 3% 高斯噪声作为观测数据，共获得 6174 个复数电场数据。反演区域为： $-1.5 \text{ km} < x, y < 1.5 \text{ km}$, $-1.5 \text{ km} < y < 1.5 \text{ km}$, $0 \text{ km} < z < 1.5 \text{ km}$ ，核心区域的网格均为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 。

反演初始模型为电导率为 0.01 S/m 的均匀半空间，初始正则化因子为 10，冷却因子设置为 100，目标拟和差 RMS 设置为 1.01，最小正则化因子 λ_{\min} 设置为 10~40。



注：该模型包括一个高阻异常体和一个低阻异常体，蓝色为 0.0005 S/m，红色为 0.2 S/m，地表黑色的点代表测点。

Figure 6. Schematic diagram of two anomalous bodies model

图 6. 两个异常体模型示意图

图 7 展示了单 E_x 分量和 $E_x + H_z$ 联合两种反演的数据拟合差曲线。 E_x 反演初始拟合差，4.67，经过 48 次迭代后收敛。 $E_x + H_z$ 联合时，初始拟合差为 5.99，经过 140 次迭代后收敛，最终拟合差为 1.44。

由于数据量的原因，初始单 E_x 反演的拟合差小于 $E_x + H_z$ 反演，随着数据量的增加，模型空间的可解释性也相应扩展，反而可能引入更高的多解性，迭代次数也相应增加。

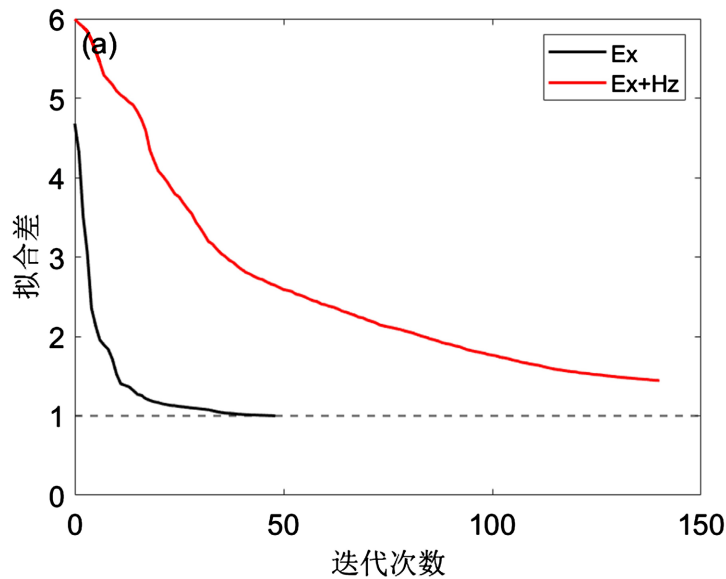
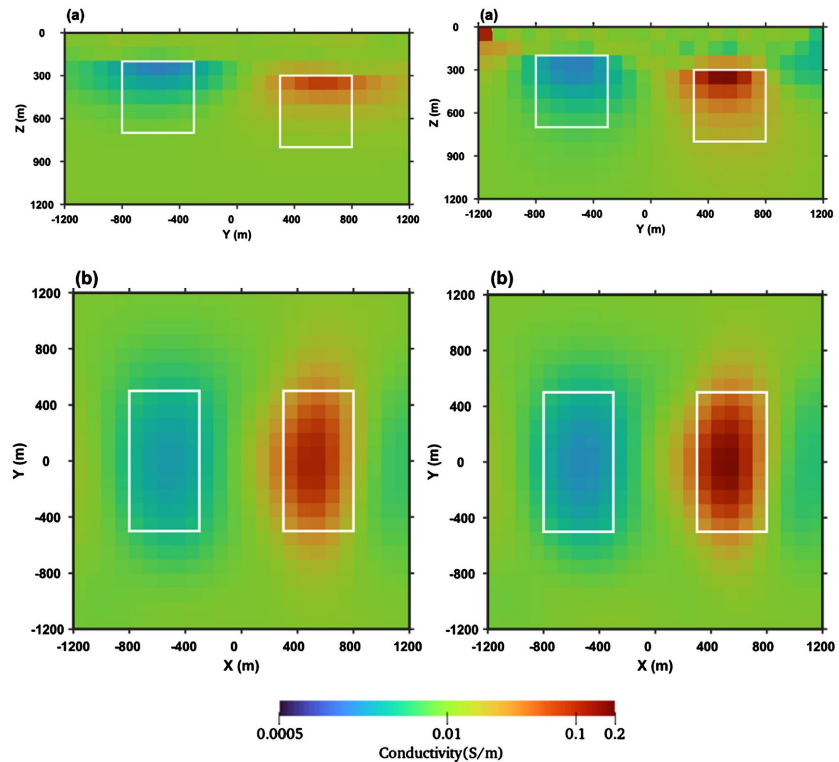


Figure 7. Variation of RMS values of inversion parameters with iteration number
图 7. 反演参数随迭代次数的变化 RMS 值



注：自上而下分别为 $y = 0 \text{ m}$, $x = 0 \text{ m}$, $z = 350 \text{ m}$ 。

Figure 8. Section profiles of E_x inversion results (left column) and $E_x + H_z$ inversion results (right column) for the high-resistivity & low-resistivity composite model
图 8. 高阻 - 低阻组合体模型 E_x (左列)和 $E_x + H_z$ (右列)结果剖面

图 8 是低阻体模型 E_x 和 $E_x + H_z$ 反演结果剖面。相比于 E_x 单分量的反演结果，将 $E_x + H_z$ 二者联合反演可以在单分量基础上提高成像质量。这是因为 E_x 与 H_z 分量具有明显互补性： E_x 对电阻率变化最敏感，而 H_z 对横向梯度和三维结构响应明显。

5. 结论与展望

论文针对广域电磁测深勘探方法，通过理论模型数值模拟，研究不同数据类型的勘探效果。三维反演借助 L-BFGS 方法实现得到以下结论：

- (1) E_x 分量反演中，复分量相对振幅数反演结果更为准确，能够较为准确地反映地下电性结构特征；
- (2) 磁场分量中， H_y 分量对横向电性变化的敏感性相对较弱，其单分量反演成像能力有限； H_z 分量对三维电性结构具有一定响应能力；
- (3) $E_x + H_z$ 分量联合反演对于 E_x 单分量反演能够显著提升成像稳定性，但随着输入数据量的增加，模型空间的可解释性也相应扩展，反而可能引入更高的多解性。

6. 展望

本文只展示了 E_x 、 H_y 、 H_z 和 $E_x + H_z$ 这 4 种数据的反演，后面可以尝试更多种数据联合反演。

联合反演中由于数据量的增加需依赖合理的初始模型、正则化参数以及结构约束，未来可以进一步在程序中实现。

参考文献

- [1] 何继善, 张大伟, 蒋奇云, 等. 广域电磁法技术进展与多领域应用综述[J/OL]. 中国有色金属学报, 2026, 36(2): 409-429. <https://link.cnki.net/urlid/43.1238.TG.20250928.1708.001>, 2026-03-12.
- [2] 王腾飞. 广域电磁法在深部金属矿勘查中的三维反演与资源预测[J]. 世界有色金属, 2026(3): 172-174.
- [3] 徐锦通, 汤井田. 基于谱元法的广域电磁法三维正演模拟[J]. 地球物理学报, 2022, 65(4): 1461-1471.
- [4] 谭歌, 原源, 苗成宏. 地空广域电磁法三维反演效果影响因素分析[J]. 资源环境与工程, 2026, 40(1): 100-106.
- [5] 何洪森, 何卫峰, 谭章坤, 等. 广域电磁法场源布置受地质条件的影响研究[J]. 四川地质学报, 2025, 45(S1): 97-100+105.
- [6] 朱云起, 李帝铨, 刘最亮, 等. 煤矿 CSAMT 数据的广域电磁法处理[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(4): 133-142.
- [7] 周印明, 王金海, 胡晓颖, 等. 基于矢量位和标量位的广域电磁法三维有限元数值模拟[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(1): 181-189+12.
- [8] 翁爱华, 李大俊, 李亚彬, 等. 数据类型对三维地面可控源电磁勘探效果的影响[J]. 地球物理学报, 2015, 58(2): 697-708.
- [9] 张林成, 周聪, 汤井田, 等. 双分量广域电磁法在深埋隧洞工程勘察中的应用[J]. 地质与勘探, 2022, 58(4): 857-864.
- [10] 戴世坤, 陈轻蕊, 凌嘉宣, 等. 空间-波数域三维大地电磁场积分方程数值模拟[J]. 地球物理学报, 2022, 65(6): 2294-2310.
- [11] 殷长春, 刘云鹤, 熊彬. 地球物理三维电磁反演方法研究动态[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(3): 432-435.
- [12] 胡英才. 矢量有限元三维张量 CSAMT 正演模拟研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [13] 李建慧, Colin G. Farquharson, 胡祥云, 等. 基于电场总场矢量有限元法的接地长导线源三维正演[J]. 地球物理学报, 2016, 59(4): 1521-1534.
- [14] 张继锋, 刘寄仁, 冯兵, 等. 三维陆地可控源电磁法有限元模型降阶快速正演[J]. 地球物理学报, 2020, 63(9): 3520-33.
- [15] 岳鹏. 可控源音频大地电磁二维约束反演研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [16] 彭荣华, 胡祥云, 李建慧, 等. 基于二次耦合势的广域电磁法有限体积三维正演计算[J]. 地球物理学报, 2018, 61(10): 4160-4170.

- [17] Viezzoli, A., Auken, E. and Munday, T. (2009) Spatially Constrained Inversion for Quasi 3D Modelling of Airborne Electromagnetic Data—An Application for Environmental Assessment in the Lower Murray Region of South Australia. *Exploration Geophysics*, **40**, 173-183. <https://doi.org/10.1071/eg08027>
- [18] Siemon, B., Auken, E. and Christiansen, A.V. (2009) Laterally Constrained Inversion of Helicopter-Borne Frequency-Domain Electromagnetic Data. *Journal of Applied Geophysics*, **67**, 259-268. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2007.11.003>
- [19] Christensen, N.B., Reid, J.E. and Halkjær, M. (2009) Fast, Laterally Smooth Inversion of Airborne Time-Domain Electromagnetic Data. *Near Surface Geophysics*, **7**, 599-612. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2009047>