顾观文,王顺吉,李桐林,等. 不同供电方向激励对多极距组合中梯装置三维激电探测效果的影响. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54(1):292-309. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220345.
Gu Guanwen, Wang Shunji, Li Tonglin, et al. Influence of Different Power Supply Direction Excitation on Three-Dimensional Induced Polarization Exploration Effect with Central Gradient Array of Multi-Group Power Supply Pole Distance Combination. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (1): 292-309. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220345.

不同供电方向激励对多极距组合中梯装置三维激电探测效果的影响

顾观文[1,2],王顺吉[1],李桐林[3],武 晔[1,2],许志河[1,2]
1.防灾科技学院地球科学学院,河北 三河 065201
2.河北省地震动力学重点实验室,河北 三河 065201
3.吉林大学地球探测科学与技术学院,长春 130026

摘要:本文基于直流点电源三维非结构有限元数值模拟技术和不完全高斯-牛顿三维反演方法,讨论近些年兴起的多极距组合中梯装置三维激电法不同供电方向激励对探测效果的影响,为中梯装置三维激电测量供电方向的合理选择提供依据。首先,设计了多个不同的三维地电模型,在横向供电(供电方向垂直于构造走向或目标体延伸方向)、纵向供电(供电方向平行于构造走向或目标体延伸方向)、横向和纵向双方向组合供电3种方式下,开展理论模型的三维正反演试算。然后,选取某矿区在这三种方式下获取的三维激电实测数据进行三维反演。最后,对理论模型合成数据和实测数据的三维反演结果及矿区已有地质资料进行综合对比分析。研究结果表明:横向供电、纵向供电、横向和纵向双方向组合供电三种方式激电数据的三维反演结果均能有效反映研究区的岩性分布和构造展布特征;但在揭示研究区的局部异常信息方面,横向和纵向双方向组合供电方式激电数据的三维反演结果展示的异常信息更为丰富、完整,而横向供电或纵向供电单方向供电方式激电数据的三维反演结果揭示的异常信息不完整,有可能漏掉部分有效异常信息。

关键词:激电法;中梯装置;三维;供电方向;反演
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220345 **中图分类号**:P631.3;P319 **文献标志码**:A

Influence of Different Power Supply Direction Excitation on Three-Dimensional Induced Polarization Exploration Effect with Central Gradient Array of Multi-Group Power Supply Pole Distance Combination

Gu Guanwen[1,2], Wang Shunji[1], Li Tonglin[3], Wu Ye[1,2], Xu Zhihe[1,2]

收稿日期:2022-12-16
作者简介:顾观文(1975—),男,教授,主要从事电磁勘探方法与理论、数值模拟及应用研究,E-mail: sun_ggw@163.com
基金项目:中央高校创新团队项目(ZY20215108);国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ050060);河北省高等学校科学技术研究项目(ZC2022056,ZC2021213);河北省硕士在读研究生创新能力培养项目(CXZZSS2023184)
Supported by the Central University Innovation Team Project (ZY20215108), the National Major Scientific Instruments and Equipment Development Special Project (2011YQ050060), the Science and Technology Research Project of Higher Education Institutions in Hebei Province (ZC2022056, ZC2021213) and the Innovative Ability Training Project for Postgraduate Students in Hebei Province (CXZZSS2023184)

1. *School of Earth Sciences, Institute of Disaster Prevention, Sanhe* 065201, *Hebei, China*
2. *Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe* 065201, *Hebei, China*
3. *College of GeoExploration Sciences and Technology, Jilin University, Changchun* 130026, *China*

Abstract: This study investigates the impact of different power supply direction excitation on the exploration effect of the three-dimensional (3D) induced polarization (IP) method, for a central gradient array of multi-group power supply pole distance combinations. We employ the 3D unstructured finite element numerical simulation for direct current point power supply and the incomplete Gauss-Newton 3D inversion. The goal is to provide a basis for the rational selection of power supply directions for 3D IP measurements. First, we design various 3D geoelectric models and conduct forward and inverse modeling for three power supply modes: transverse, longitudinal, and transverse/longitudinal bidirectional combinations. Then we perform 3D inversion on IP measured data obtained in a mining area under these three power supply modes. Finally, the 3D inversion results of theoretical model synthesis data and measured data and the existing geological data of the mining area are synthetically analyzed. We find that 3D inversion results for IP data under transverse, longitudinal, and transverse/longitudinal bidirectional combination power supply modes can effectively depict the lithological and structural distribution characteristics. In terms of revealing local anomaly information, the bidirectional combined power supply IP data yields the most abundant and complete information. By contrast, the inversion results of single-directional power supply IP data may lack some effective anomaly information, presenting incomplete anomaly details.

Key words: IP; central gradient array; 3D; power supply direction; inversion

0　引言

中间梯度装置激发极化法(中梯装置激电法)具有工作效率高、异常形态简单、易于解释等特点[1-4]，在金属矿勘查中应用广泛[5-11]。传统的中梯装置激电法受限于单一固定长度的供电极距，主要用于激电快速扫面工作，仅能获取地下某一深度的电性分布信息，无法反映随深度变化的地电信息。而传统的对称四极装置激电测深法由于需要在各个测点频繁地移动供电电极，工作效率较低。为了克服传统对称四极电测深装置工作效率低和高密度温纳装置获取的激电信息不足的困难，Aizebeokhai 等[12]开展了多极距组合中梯二维激电测量实验，该技术在一定程度上提高了工作效率，并获得了比高密度温纳装置更为丰富的激电信息，但受限于二维观测，无法获取地下全空间、多方位的电性信息。

近些年随着大功率、分布式三维激电采集技术和激电法三维正反演技术的发展，国内学者在传统中梯装置激电法的基础上，结合电阻率测深法的特点，发展形成了基于多极距组合中梯装置的三维激电测量技术[13-15]，该技术能快速高效地获取测区三维电阻率及极化率信息，具有空间分辨率高、探测深度大的优点。

目前，基于多极距组合中梯装置的三维激电测量在供电方向激励方面主要采用横向供电(供电方向垂直于构造走向或目标体延伸方向)、纵向供电(供电方向平行于构造走向或目标体延伸方向)、横向和纵向双方向组合供电三种方式。不同勘探区工作条件、地质构造走向及矿体延伸产状存在差异，如何选取经济有效的供电方向激励方式是开展激电测量工作设计阶段面临的一个重要问题。龚胜平等[16]在我国西北地区某多金属矿区开展了不同供电方向激电中梯的实验工作并进行了初步探讨。曹创华等[17]针对传统中梯装置，基于单个长方体异常模型开展了不同供电方向激励的电性响应特征研究。

为了进一步较为系统地研究不同供电方向激励对中梯装置三维激电勘探效果的影响，本文基于理论模型和实际资料，首先，设计不同类型的理论地电模型，在不同供电方向的激励下，采用三维非结构网格有限元方法[18-19]通过正演模拟获取理论模型合成数据，进而采用不完全高斯-牛顿法[20-21]反演模型合成数据获得电性结构。然后，在此基础上利用我国西北某矿区不同供电方向的多极距组合中梯装置三维实测激电资料，开展三维反演获取矿区地下

电性结构。最后,结合理论模型和实际资料的三维反演结果讨论不同供电方向激励对中梯装置三维激电探测效果的影响。

1 时间域激电三维正反演方法

1.1 电阻率/激电法三维非结构有限元正演

双电极供电时的直流电阻率法控制方程可以表示为

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla U) = -I\left[\delta(r-r_s^+)-\delta(r-r_s^-)\right] 。 \tag{1}$$

式中:σ 为介质电导率;U 为电势;I 为供电电流;δ 为狄拉克函数;r 为空间任意一点位置;r_s^+ 为供电正电极位置;r_s^- 为供电负电极位置。利用有限单元法,可将式(1)离散为如下形式的线性方程组:

$$\boldsymbol{KV}=\boldsymbol{P}。 \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{K}$ 为正演模型空间的系数矩阵,是一个与网格剖分及电导率分布有关的对称、稀疏矩阵;$\boldsymbol{V}$ 为网格剖分后的电位;$\boldsymbol{P}$ 为右端源项。采用对称连续超松弛预条件共轭梯度(SSOR-PCG)法求解线性方程组(式(2)),获得 $\boldsymbol{V}$,进而求取地面各观测点的视电阻率:

$$\rho_a = K(A,B,M,N)\cdot[V(A,M)-V(A,N)-V(B,M)+V(B,N)]。 \tag{3}$$

式中:A 和 B 为供电电极;M 和 N 为测量电极;$K(A,B,M,N)$ 为装置系数;$V(A,M)$、$V(A,N)$ 分别为 A 供电时 M、N 的电位;$V(B,M)$、$V(B,N)$ 分别为 B 供电时 M、N 的电位。

通过上述三维正演过程获得各观测点的纯一次电压后,利用等效电阻率法再进行一次正演获得各观测点的总电压(等效电压),进而计算各观测点的视极化率。

1.2 不完全高斯-牛顿法电阻率/激电法三维反演

根据正则化理论[22],定义三维电阻率法反演问题的目标函数[23]为

$$\varphi=\frac{1}{2}\varphi_d+\frac{\lambda}{2}\varphi_m=\frac{1}{2}\|\boldsymbol{D}(\boldsymbol{d}_{fwd}-\boldsymbol{d}_{obs})\|^2+\frac{\lambda}{2}\|\boldsymbol{W}(\boldsymbol{m}-\boldsymbol{m}_{ref})\|^2。 \tag{4}$$

式中:φ_d 和 φ_m 分别为数据拟合项和模型约束项;$\boldsymbol{D}$ 为数据加权矩阵[20,24],调节正则化因子 λ 的大小,改变数据拟合项和模型约束项在目标函数中所占的权重;$\boldsymbol{d}_{fwd}$ 为理论计算数据;$\boldsymbol{d}_{obs}$ 为观测数据;$\boldsymbol{m}$ 为模型向量,$\boldsymbol{m}=\ln\boldsymbol{\sigma}$;$\boldsymbol{m}_{ref}$ 为参考模型;$\boldsymbol{W}$ 为模型加权矩阵,一般取一阶正则化约束,用梯度算子保证模型的光滑度。

高斯-牛顿方法的法方程形式为

$$[\nabla^2\varphi_d(\boldsymbol{m})+\lambda\nabla^2\varphi_m(\boldsymbol{m})]\Delta\boldsymbol{m}=-[\nabla\varphi_d(\boldsymbol{m})+\lambda\nabla\varphi_m(\boldsymbol{m})]。 \tag{5}$$

式中,$\Delta\boldsymbol{m}$ 为惯性修正量。在直流电阻率不完全高斯-牛顿反演中,一般仅在若干有限位置上进行观测,令

$$\boldsymbol{d}=\boldsymbol{QV}=\boldsymbol{QA}^{-1}(\boldsymbol{\sigma})\boldsymbol{q}。 \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{Q}$ 为 $\boldsymbol{V}$ 到 $\boldsymbol{d}$ 的映射矩阵;$\boldsymbol{A}$ 为正演算子;$\boldsymbol{q}$ 为描述源分布的向量。

由式(4)(5)(6)可得法方程(式(5))的具体表达式为

$$(\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}+\lambda\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W})\Delta\boldsymbol{m}=-[\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{QA}^{-1}\boldsymbol{q}-\boldsymbol{d}_{obs})+\lambda\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}(\boldsymbol{m}-\boldsymbol{m}_{ref})]。 \tag{7}$$

式中,$\boldsymbol{J}$ 为雅可比矩阵。令

$$\boldsymbol{H}=(\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}+\lambda\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}),$$

$$\boldsymbol{g}=[\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{QA}^{-1}\boldsymbol{q}-\boldsymbol{d}_{obs})+\lambda\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}(\boldsymbol{m}-\boldsymbol{m}_{ref})],$$

则式(7)可简写为

$$\boldsymbol{H}\Delta\boldsymbol{m}=-\boldsymbol{g}。 \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{H}$ 为 Hessian 矩阵。从式(5)中看出,$\boldsymbol{g}$ 实际上为目标函数的梯度。反演过程中面临的主要问题是 $\boldsymbol{J}=\dfrac{\partial\boldsymbol{d}(\boldsymbol{m})}{\partial\boldsymbol{m}}$ 的相关计算。在电阻率三维反演中,反演参数和实测数据量均非常大,导致 $\boldsymbol{J}$ 的计算量和存储量巨大,一般避免直接计算和存储 $\boldsymbol{J}$。Haber 等[25]将 $\boldsymbol{J}$ 表示为

$$\boldsymbol{J}=-\boldsymbol{QA}^{-1}\boldsymbol{B}。 \tag{9}$$

式中,$\boldsymbol{B}=(\boldsymbol{A}(\boldsymbol{m})\boldsymbol{V})/\partial\boldsymbol{m}$,是与模型参数和网格剖分有关的矩阵。Dembo 等[26]指出,对方程组(8)只需借鉴不完全高斯-牛顿法,结合不精确的预条件共轭梯度(PCG)算法进行近似求解。在反演过程中,只需计算 $\boldsymbol{J}$ 与任一向量 $\boldsymbol{x}$ 的乘积及 $\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}$ 与任一向量 $\boldsymbol{y}$ 的乘积即可[21,24,27]。

引入上述方法之后,不完全高斯-牛顿法反演的简要流程如下。

1)给定初始模型,取为均匀半空间。

2)利用 PCG 算法求解式(8),获得 $\Delta\boldsymbol{m}$。

3)确定线性搜索步长 α 。α 初始值为 1。子迭代中，每次迭代使 α 减小[28]，直到满足目标函数优化：

$$\varphi(\boldsymbol{m}_{i+1}) = \varphi(\boldsymbol{m}_i + \Delta\boldsymbol{m}) \geqslant \varphi(\boldsymbol{m}_i) + c\alpha \nabla \varphi^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{m}_i)\Delta\boldsymbol{m}。 \tag{10}$$

式中，c 为常数，一般取 10^{-4}。若 α 极小依然无法满足条件(取 0.01 为 α 的最小值)，则跳出迭代，并判断是否需要结束反演。

4)更新模型：

$$\boldsymbol{m}_{i+1} = \boldsymbol{m}_i + \alpha\Delta\boldsymbol{m}。 \tag{11}$$

5)判断是否继续迭代。计算目标函数并估计数据残差，若满足精度要求，则反演结束并输出结果；若不满足，重复步骤 2)—4)进行迭代。

对于视极化率数据的反演，文献[29 - 30]给出了在电阻率反演基础上实现激电反演的方法。据 Seigel 等[31]的理论，视极化率响应可表示为

$$\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{a}} = -\boldsymbol{J}\boldsymbol{\eta}。 \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{a}}$ 为视极化率响应矢量；$\boldsymbol{\eta}$ 为本征极化率参数矢量。激电三维反演目标函数可写成

$$\varphi(\boldsymbol{\eta}) = \frac{1}{2}\left\|\boldsymbol{D}(\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{fwd}} - \boldsymbol{\eta}_{\mathrm{obs}})\right\|^2 + \frac{\lambda}{2}\left\|\boldsymbol{W}(\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}_{\mathrm{ref}})\right\|^2。 \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{fwd}}$ 为理论计算视极化率数据；$\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{obs}}$ 为观测视极化率数据；$\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{ref}}$ 为参考极化率模型。同理，利用前述不完全高斯-牛顿法求目标函数 $\varphi(\boldsymbol{\eta})$ 极小，实际上相当于求解线性方程组：

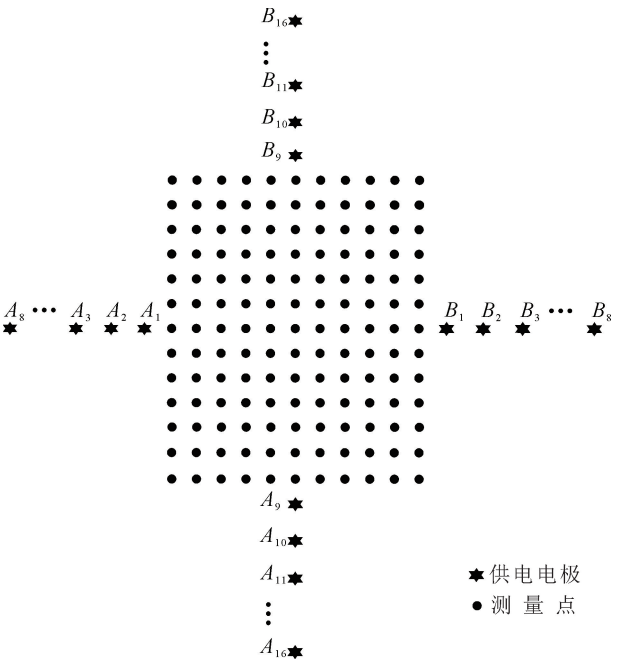
$$(\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J} + \lambda\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W})\Delta\boldsymbol{\eta} = -\left[\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{Q}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{q} - \boldsymbol{\eta}_{\mathrm{obs}}) + \lambda\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}(\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}_{\mathrm{ref}})\right]。 \tag{14}$$

由于在视电阻率反演过程中已求取 $\boldsymbol{J}$ ，因此，只需将已得到的 $\boldsymbol{J}$ 代入式(14)中，即可完成视极化率的反演。

2　理论模型计算和分析

模型计算包括在给定中梯装置下对不同理论地电模型的三维正反演计算。首先利用三维非结构网格有限元方法对单异常体、双异常体、三异常体模型进行三维正演，获得不同供电方向及不同极距激励下理论地电模型的响应电压数据；进而采用不完全高斯-牛顿法开展理论模型合成数据的三维反演，获得三维反演电阻率和极化率模型；在此基础上分析不同供电方向激励下反演结果对实际地电模型的重现情况。

模型计算涉及的三类地电模型均采用横向供电、纵向供电、横向和纵向双方向组合供电三种方式，每个供电方向包括 8 对供电电极，A、B 极距分别为 1 500、2 000、2 500、3 000、3 500、4 000、4 500 和 5 000 m，测量电极 M、N 的极距为 50 m，观测区的点距和线距均为 50 m，三维观测布置如图 1 所示。



A_1、A_2、A_3、…、A_8，B_1、B_2、B_3、…、B_8为横向供电电极；A_9、A_{10}、A_{11}、…、A_{16}，B_9、B_{10}、B_{11}、…、B_{16}为纵向供电电极。

图 1　多极距组合中梯装置三维激电法观测示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the 3D IP method with the central gradient array of multi-group power supply pole distance combination

2.1　单异常体模型

单异常体模型为位于均匀半空间中的 1 个低阻高极化棱柱体(图 2)，该棱柱体 x 、y 和 z 3 个方向的边长分别为 200、400 和 200 m，其顶界面和底界面距地表分别为 200 和 400 m，异常体的电阻率和极化率分别为 10 Ω · m 和 25%，围岩的电阻率和极化率分别为 100 Ω · m 和 1%。

分别采用横向供电、纵向供电、横向和纵向双方向组合供电三种方式，通过三维正演模拟获得单异常体模型在地表的电性响应数据，将算区中间的 21×21 个测点作为观测数据，反演输入数据为观测点的视电阻率和视极化率，λ =5。

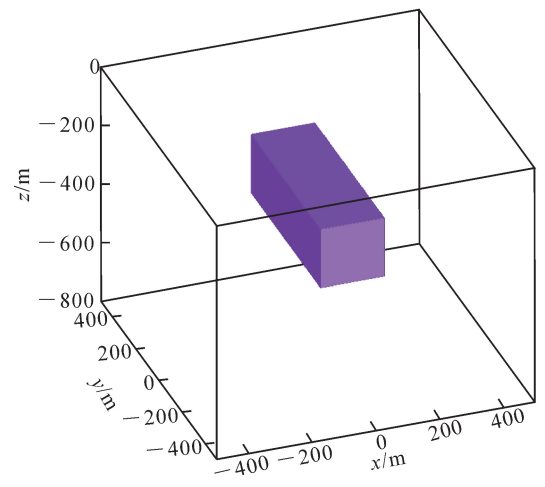


图 2 单低阻高极化体模型

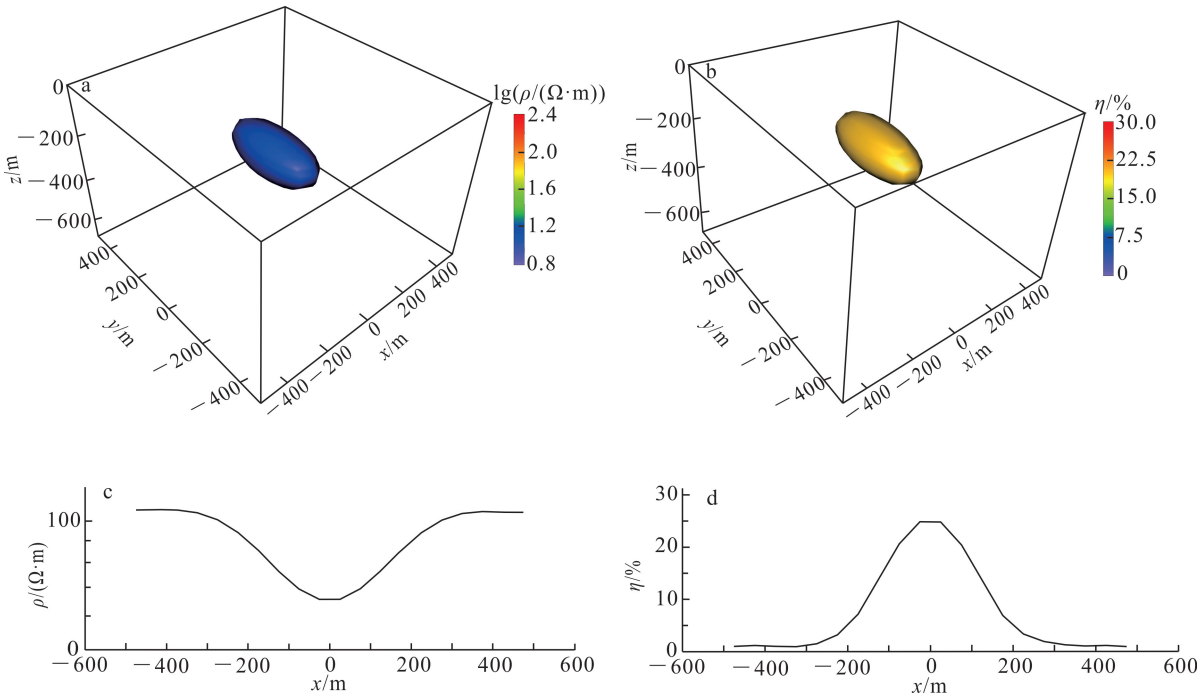
Fig.2 Single low resistance and high polarization body model

迭代反演 5 次，图 3、图 4、图 5 分别为横向供电、纵向供电、横向和纵向双方向组合供电方式激励的反演结果。从三种方式的三维反演电阻率和极化率模型(图 3a、b，图 4a、b 和图 5a、b)可以看出，三种方式的反演结果对低阻高极化体均有反映，但纵向供电方式反演的低阻高极化体在形态上近似于圆饼状(图 4a、b)，未能重现实际棱柱体模型(图 2)的延伸状态。同样，深度为 300 m、y=25 m 时的反演电阻率和极化率剖面曲线(图 4c、d)比实际模型异常更为宽泛，未能有效反映实际异常特征。横向供电、横向和纵向双方向组合供电两种方式的反演结果(图 3a、b 和图 5a、b)很好地反映了实际棱柱体(图 2)的空间位置分布、产状和规模。

2.2 双异常体模型

双异常体模型为位于均匀半空间中的 2 个低阻高极化棱柱体(图 6)，2 个棱柱体相距 200 m，规模均为 200 m×600 m×200 m，其顶界面和底界面距地表分别为 200 和 400 m，异常体的电阻率和极化率均分别为 10 Ω·m 和 25%，围岩的电阻率和极化率分别为 100 Ω·m 和 1%。

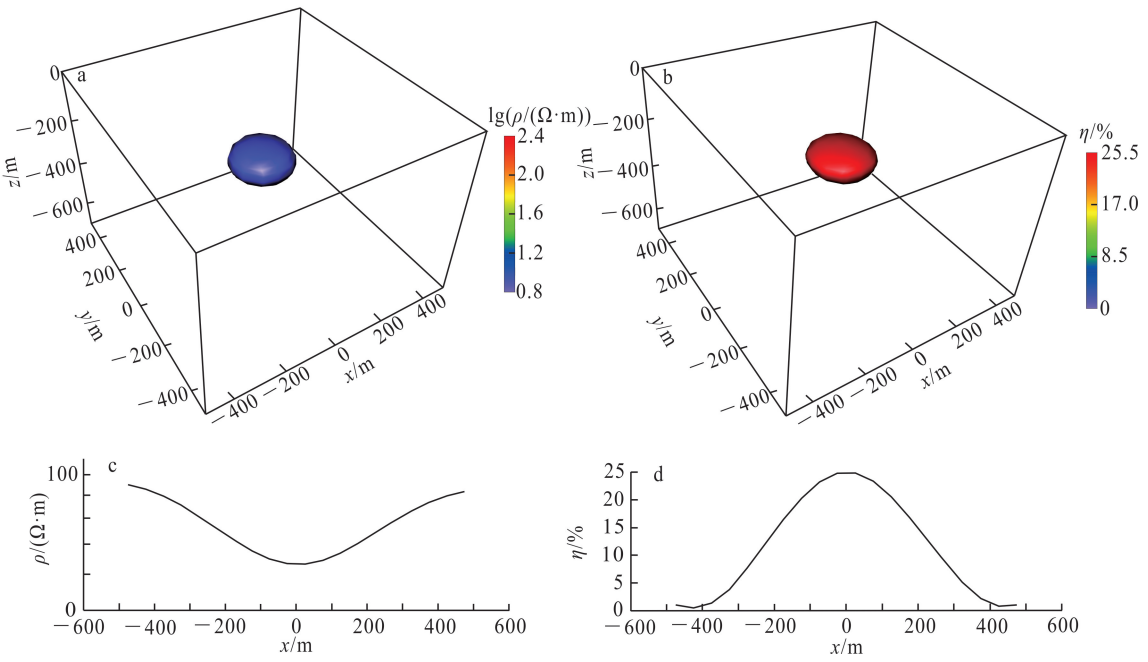
分别采用横向供电、纵向供电、横向和纵向双方向组合供电三种方式，通过三维正演模拟获得双异常体模型在地表的电性响应数据，将算区中间的 21×21 个测点作为观测数据，反演输入数据为观测点的视电阻率和视极化率，λ =2。



a 和 b 为三维反演电阻率和极化率模型；c 和 d 为反演电阻率和极化率结果在深度为 300 m、y=25 m 时的剖面曲线。

图 3 横向供电激励下单低阻高极化体模型反演结果

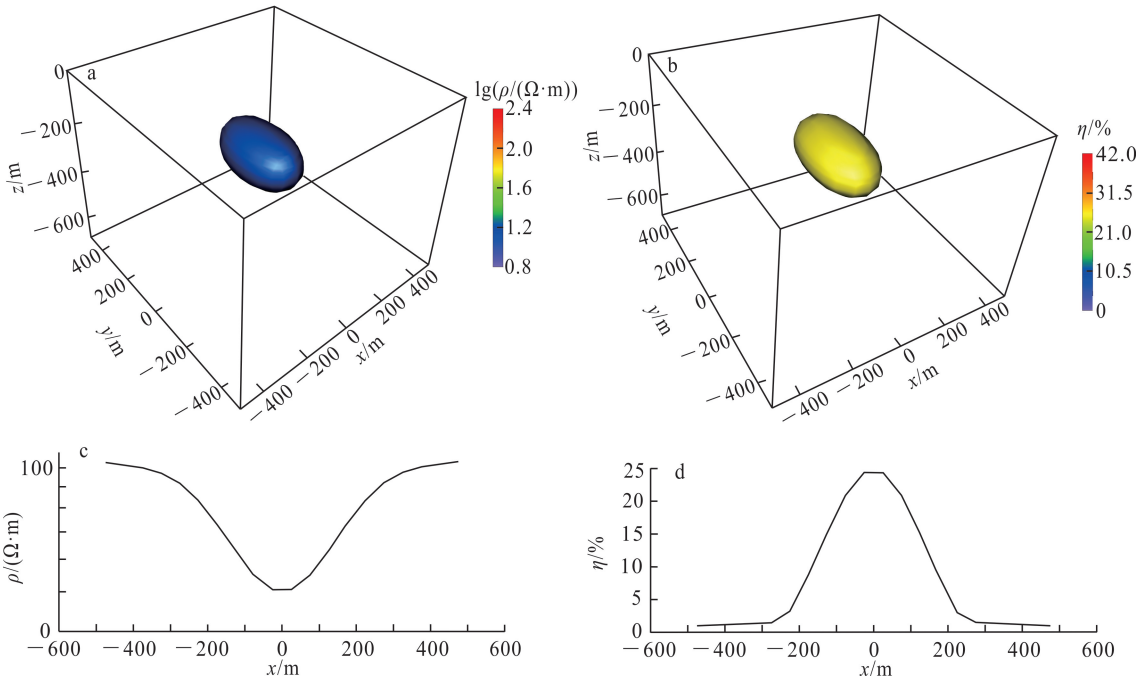
Fig.3 Inversion results of single low resistance and high polarization body model by transverse power supply excitation



a 和 b 为三维反演电阻率和极化率模型；c 和 d 为反演电阻率和极化率结果在深度为 300 m、$y=25$ m 时的剖面曲线。

图 4　纵向供电激励下单低阻高极化体模型反演结果

Fig.4　Inversion results of single low resistance and high polarization body model by longitudinal power supply excitation



a 和 b 为三维反演电阻率和极化率模型；c 和 d 为反演电阻率和极化率结果在深度为 300 m、$y=25$ m 时的剖面曲线。

图 5　横向和纵向双方向组合供电激励下单低阻高极化体模型反演结果

Fig.5　Inversion results of single low resistance and high polarization body model by transverse and longitudinal bidirectional combined power supply excitation

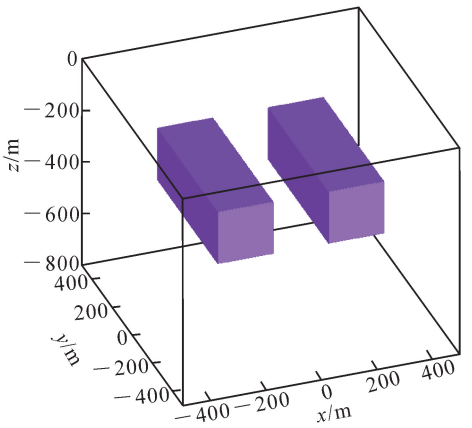


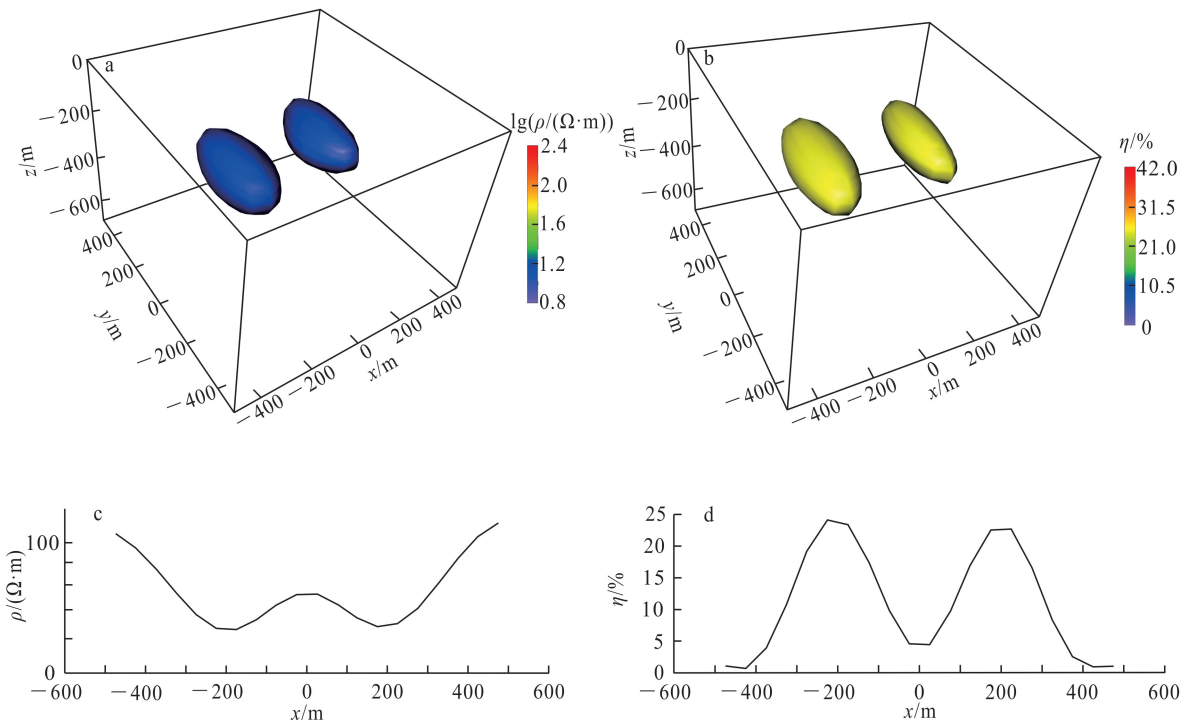
图 6 双低阻高极化体模型

Fig.6 Two low resistance and high polarization bodies model

迭代反演 8 次，图 7、图 8、图 9 分别为横向供电、纵向供电、横向和纵向双方向组合供电三种方式激励的反演结果。从横向供电、横向和纵向双方向组合供电两种方式的三维反演电阻率和极化率模型(图 7a、b 和图 9a、b)可以看出，2 个低阻高极化异常体在水平方向和深度方向的分布与理论模型的 2 个异常体空间位置(图 6)吻合；同样，在深度为 300 m、$y=25$ m 时的反演电阻率和极化率剖面曲线(图 7c、d 和图 9c、d)形态明显地反映了 2 个低阻高极化异常。而纵向供电方式的三维反演电阻率和极化率模型(图 8a、b)的形态为 1 个沿垂直于实际棱柱体模型延伸(图 6)方向展布的近似椭球体，未能将 2 个棱柱体分离开，且近似椭球异常体，与实际棱柱体模型(图 6)延伸方向不符；同样，在深度 300 m、$y=25$ m 时的反演电阻率和极化率剖面曲线(图 8c、d)形态为 1 个宽缓的异常，未能有效反映 2 个低阻高极化体的异常特征。

2.3 三异常体模型

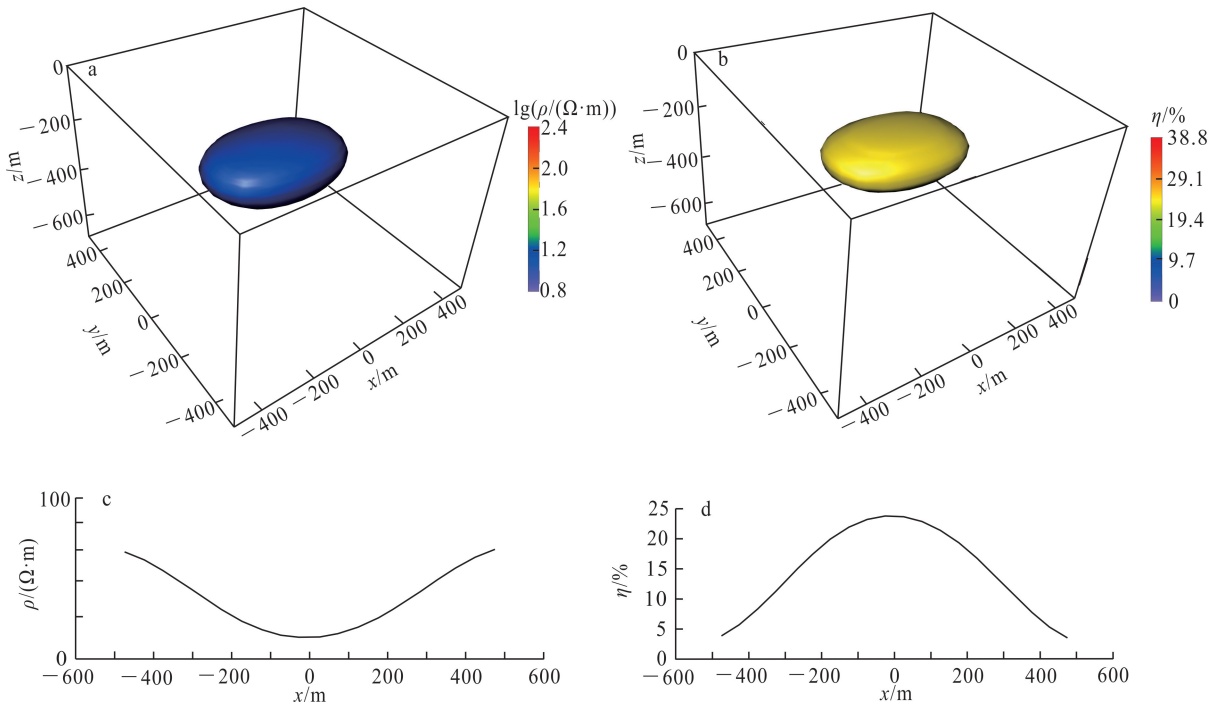
设计的地电模型为均匀半空间中包含 3 个低阻高极化棱柱体模型(图 10)，①号和②号两个棱柱体呈南北向展布，二者相距 200 m，规模均为 200 m×600 m×200 m；③号棱柱体呈东西向展布，规模为 600 m×200 m×200 m，相距①号和②号 2 个棱柱体 200 m；3 个棱柱体的顶界面和底界面埋深分别为 200 和 400 m，其电阻率和极化率均分别为 10 Ω·m 和 25%；围岩的电阻率和极化率分别为 100 Ω·m 和 1%。



a 和 b 为三维反演电阻率和极化率模型；c 和 d 为反演电阻率和极化率结果在深度为 300 m、$y=25$ m 时的剖面曲线。

图 7 横向供电激励下双低阻高极化体模型反演结果

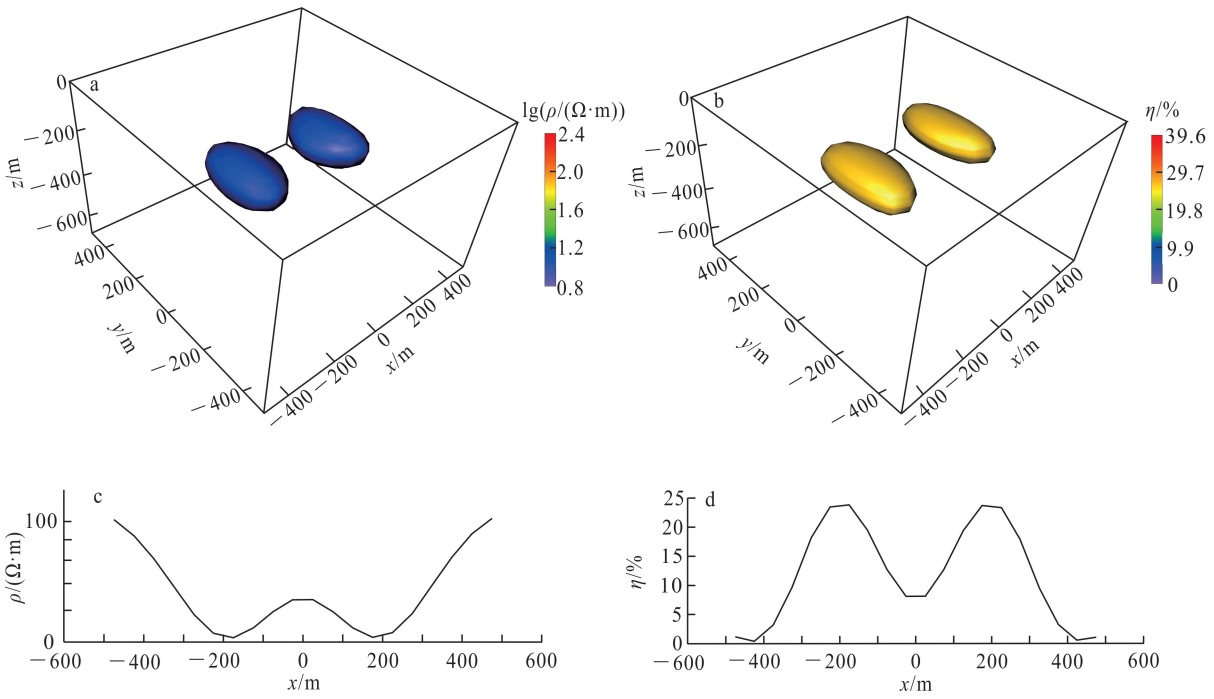
Fig.7 Inversion results of two low resistance and high polarization bodies model by transverse power supply excitation



a 和 b 为三维反演电阻率和极化率模型；c 和 d 为反演电阻率和极化率结果在深度为 300 m、$y=25$ m 时的剖面曲线。

图 8　纵向供电激励下双低阻高极化体模型反演结果

Fig.8　Inversion results of two low resistance and high polarization bodies model by longitudinal power supply excitation



a 和 b 为三维反演电阻率和极化率模型；c 和 d 为反演电阻率和极化率结果在深度为 300 m、$y=25$ m 时的剖面曲线。

图 9　横向和纵向双方向组合供电激励下双低阻高极化体模型反演结果

Fig.9　Inversion results of two low resistance and high polarization bodies model by transverse and longitudinal bidirectional combined power supply excitation

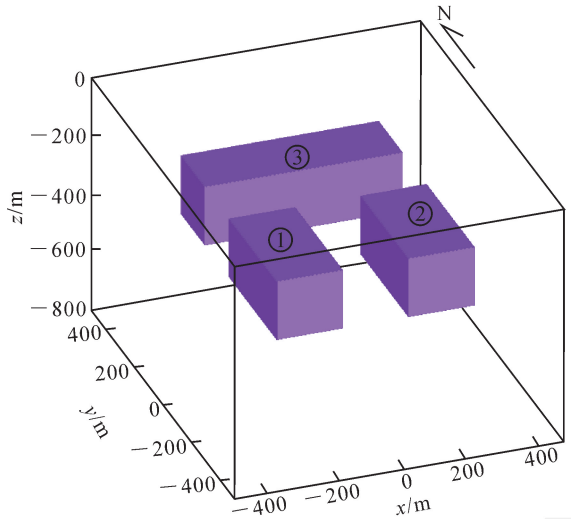
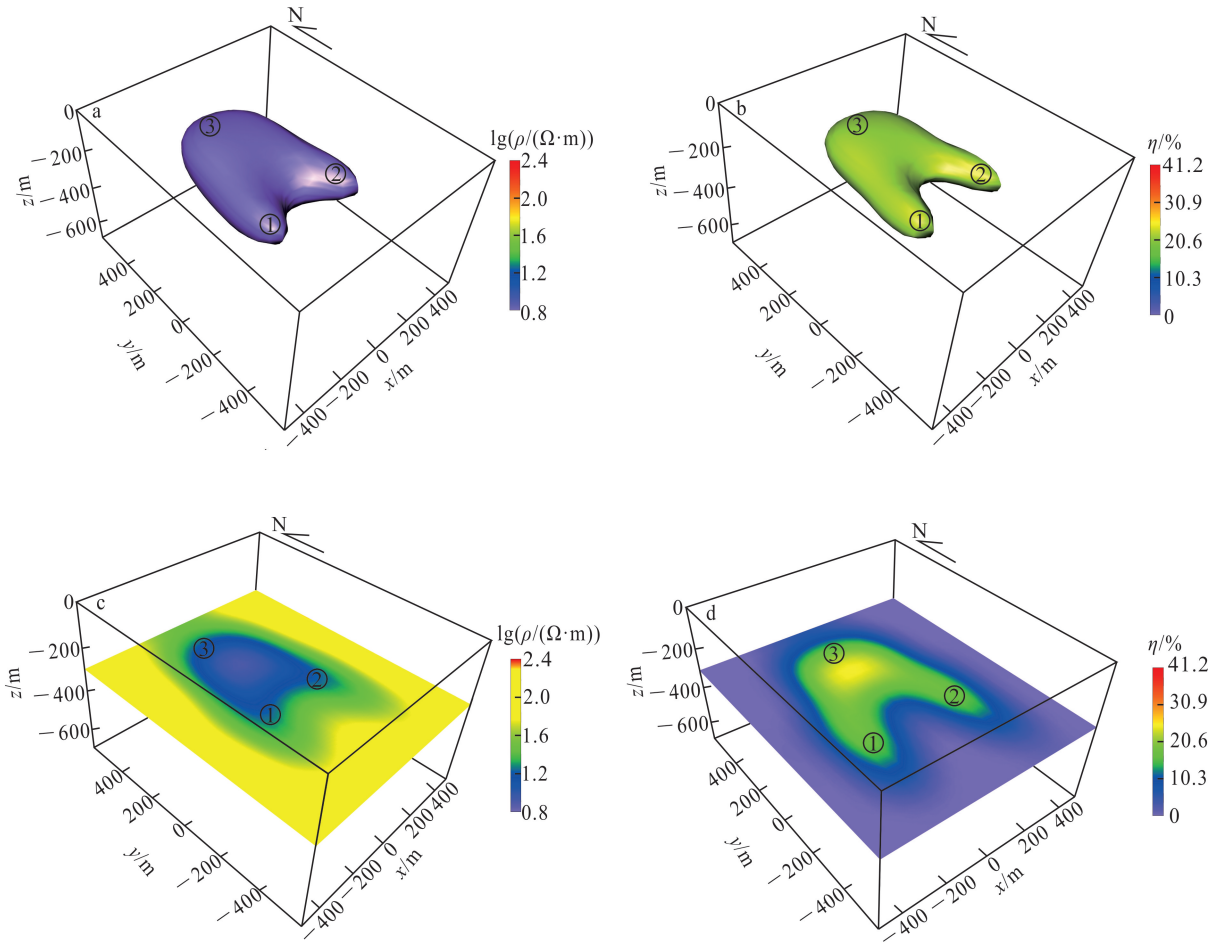


图 10 三低阻高极化体模型

Fig.10 Three low resistance and high polarization bodies model

分别采用横向供电、纵向供电、横向和纵向双方向组合供电三种方式，通过三维正演模拟获得三异常体模型在地表的电性响应数据，将算区中间 21×25 个测点作为观测数据，反演输入数据为观测点的视电阻率和视极化率，$\lambda=5$。

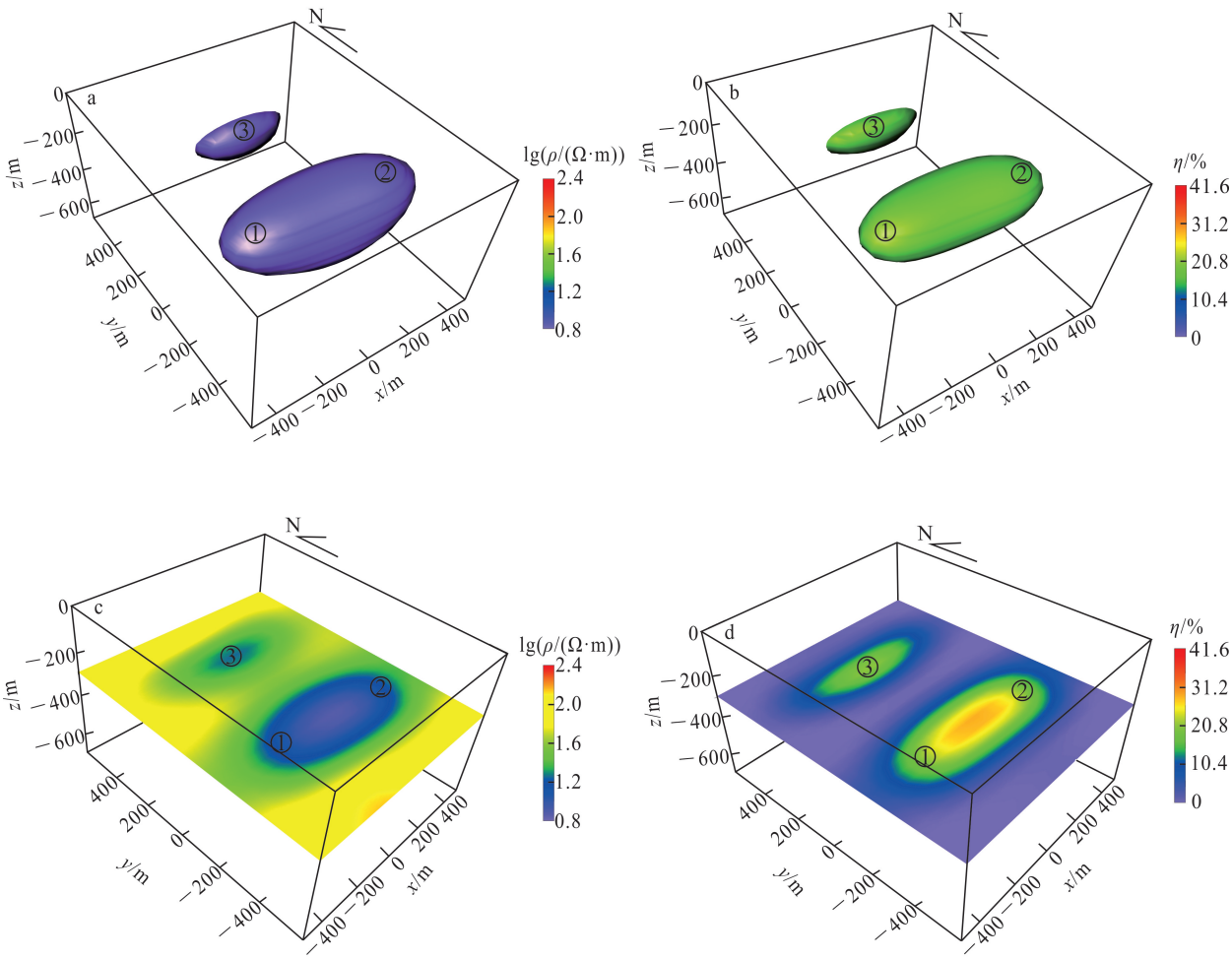
迭代反演 5 次，图 11、图 12、图 13 分别为横向供电、纵向供电、横向和纵向双方向组合供电三种方式激励的反演结果。从横向供电方式的三维反演电阻率和极化率结果(图 11)可以看出：①号和②号 2 个低阻高极化异常体在东西方向得到了很好的分离；但③号异常体与①号和②号异常体连接在一起，未能得到有效分离。从纵向供电方式的三维反演电阻率和极化率结果(图 12)看出：③号异常体与①号和②号异常体在南北方向得到了有效分离，与实际的③号棱柱体位置(图10)吻合；但①号和②号异常



a 和 b 为三维反演电阻率和极化率模型；c 和 d 为反演电阻率和极化率结果在深度为 300 m 时的切片图。

图 11 横向供电激励下三低阻高极化体模型反演结果

Fig.11 Inversion results of three low resistance and high polarization bodies model by transverse power supply excitation



a 和 b 为三维反演电阻率和极化率模型；c 和 d 为反演电阻率和极化率结果在深度为 300 m 时的切片图。

图 12　纵向供电激励下三低阻高极化体模型反演结果

Fig.12　Inversion results of three low resistance and high polarization bodies model by longitudinal power supply excitation

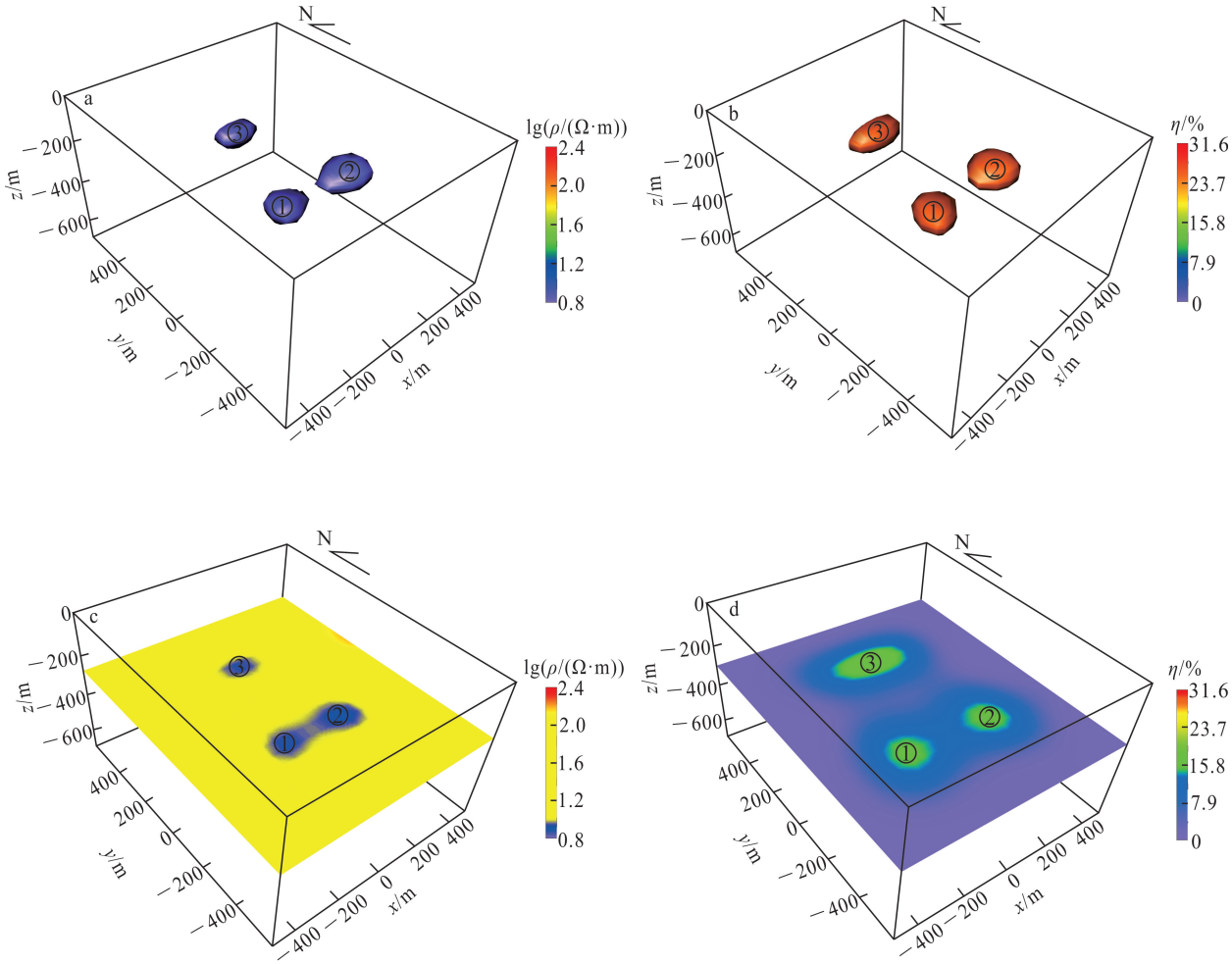
体在形态上表现为东西向展布的单个近似椭球体，与实际模型的①号和②号 2 个独立棱柱体的分布(图 10)明显不符。从横向和纵向双方向组合供电方式的三维反演电阻率和极化率结果(图 13)可以看出，①号、②号和③号 3 个低阻高极化异常体在空间上得到了很好的归位，与理论地电模型(图 10)吻合。

3　实测激电资料反演和分析

为了进一步研究在野外实际激电测量工作中不同供电方向对探测结果的影响，选取我国西北地区某多金属矿区作为研究区，对在该区横向供电、纵向供电、横向和纵向双方向组合供电三种方式采集的三维激电数据开展三维反演试算，并对反演获得的三维电阻率和极化率模型进行分析。

3.1　矿区资料

该矿区包括 3 个矿带，分别为位于矿区北部、东部和南部的一矿带、二矿带和三矿带，本次测区为一矿带。据矿区已有资料[32]及测区地质图(图 14)可知，测区南侧和北侧的岩性分别为三岩组三岩段大理岩、千枚岩和四岩组千枚岩。一矿带赋存于矿区南北两侧岩性接触带近东西错动的部位。三岩组二岩段千枚岩与三岩段大理岩夹千枚岩的过渡部位为二矿带所处位置。测区南端为三矿带，测点布置未完全覆盖该矿带。测区内存在一近南北走向的 F_3 断裂，与近东西向展布的南北岩性接触带相交。F_3 为后期的断裂带，是岩体的入侵通道。测区矿体的走向与产状主要受 F_3 影响。



a 和 b 为三维反演电阻率和极化率模型;c 和 d 为反演电阻率和极化率结果在深度为 300 m 时的切片图。

图 13 横向和纵向双方向组合供电激励下三低阻高极化体模型反演结果

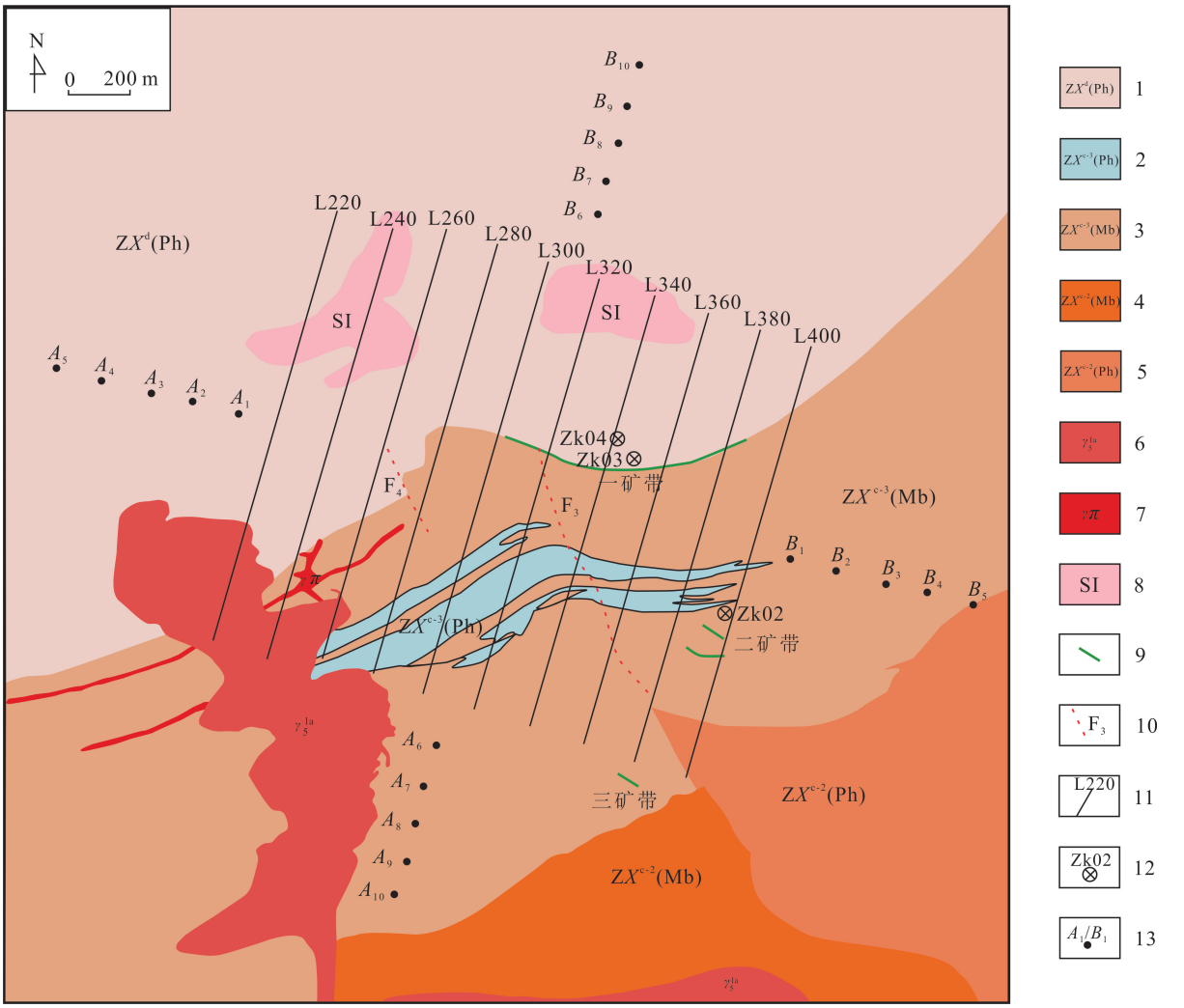
Fig.13 Inversion results of three low resistance and high polarization bodies model by transverse and longitudinal bidirectional combined power supply excitation

该矿区为铅锌银多金属矿区,硫化矿石金属矿物主要有黄铁矿、方铅矿和闪锌矿等。硫化矿石金属矿物具有低电阻率、高极化率的特点,可与其他类型的岩石相区分,具备物探找矿的地球物理前提。但测区北部含炭千枚岩具有低电阻率、高极化率的特征,容易成为找矿的干扰因素。

为了探明本区的主要构造展布特征和矿体赋存部位,采用本文所述的多极距组合中梯装置大功率激电法,布设了 10 条垂直于测区南北不同岩性接触带的激电测线,测线方位为北偏东 16°,编号为 L220—L400(图 14)。测线长度均为 1 400 m,线距和点距分别为 200 和 50 m。测区的测点呈规则网格状分布,共 290 个。分别采用横向供电(垂直于主构造方向)、纵向供电(平行于主构造方向)、横向和纵向双方向组合供电三种方式(图 14),每个供电方向包括 5 对供电电极,A、B 极距分别为 2 000、2 500、3 000、3 500、和 4 000 m,测量电极 M、N 极距为 50 m。

3.2 成像效果分析

为了对比横向供电、纵向供电、横向和纵向双方向组合供电三种方式对本区三维电性结构的成像效果,利用基于不完全高斯-牛顿法的三维激电反演程序[19]分别对这三种方式采集的视电阻率和视极化率数据进行三维反演,将计算区域沿 x、y 和 z 3 个方向进行网格剖分,网格数为:58×55×30,将测区 290 个测点的视电阻率和视极化率数据作为反演输入的数据。反演初始模型的电阻率取本测区的平均



1. 震旦系洗肠井群四岩组千枚岩；2. 震旦系洗肠井群三岩组三岩段千枚岩；3. 震旦系洗肠井群三岩组三岩段大理岩；4. 震旦系洗肠井群三岩组二岩段大理岩；5. 震旦系洗肠井群三岩组二岩段千枚岩；6. 印支期花岗岩；7. 花岗斑岩脉；8. 板岩；9. 矿带；10. 断裂及编号；11. 测线及编号；12. 钻孔及编号；13. 供电电极及编号。据文献[33]。

图 14　测区地质图与中梯装置三维激电布置

Fig.14　Geological map and layout of 3D IP survey with the central gradient array of the survey area

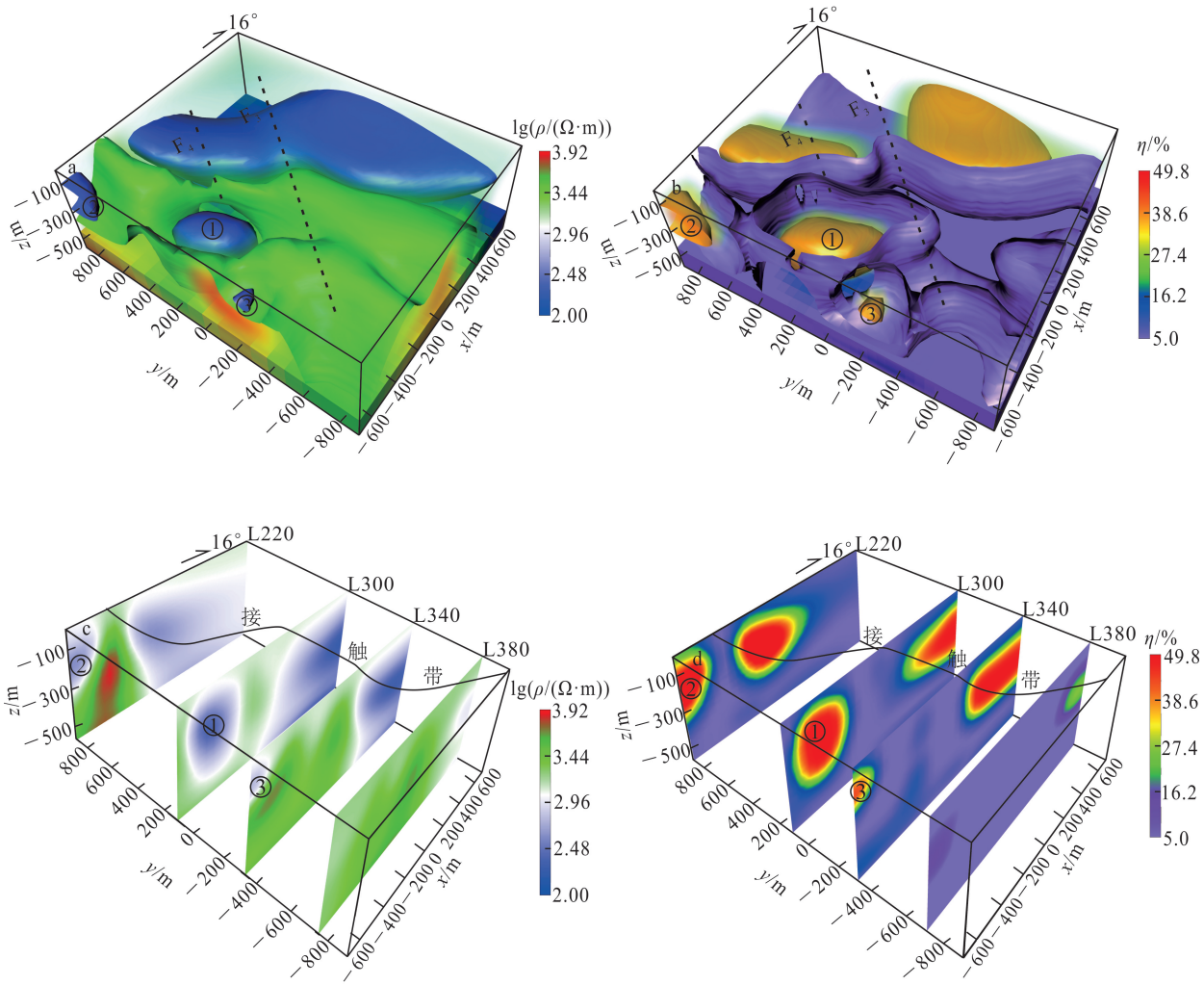
视电阻率415 Ω·m，正则化因子为 3，迭代反演 6 次。

3.2.1　横向供电方式

图 15a、b 为对横向供电方式采集的激电数据进行三维反演获得的测区三维电阻率和极化率模型，电性模型显示该区的北部和南部分别表现为低阻高极化和高阻低极化特征。结合测区地质资料（图 14）解译，测区北部的含炭千枚岩和南部的大理岩对应于电性模型中北侧的低阻高极化带和南侧的高阻低极化带。同时，千枚岩与大理岩接触带由南西向北东的延展特征在三维电性模型中得到了清晰的反映。测区电性结构南部高阻低极化体中部呈现朝北西方向扭侵的现象，这主要由近南北走向的断裂 F_3 和 F_4 对地层的错动破坏所致。三维电阻率模型（图 15a）和极化率模型（图 15b）显示了三处局部低阻高极化异常，分别位于紧邻 F_4 断层的西南向、测区西南角和测区南部邻近三矿带的边界位置（图 15a、b 中的①②③）；同样，典型测线（L220、L300、L340 和 L380）的反演电阻率和极化率断面（图 15c、d）明显反映了①②③处低阻高极化异常，并较好地展示了岩性接触带的延伸展布特征。

3.2.2　纵向供电方式

纵向供电方式激电数据的三维反演结果（图 16a、b）显示：测区电性结构的整体形态和特征与横



a 和 b 为三维反演电阻率和极化率模型;c 和 d 为典型测线的反演电阻率和极化率断面。

图 15 横向供电激励下测区三维反演结果

Fig.15 3D inversion results of the survey area by transverse power supply excitation

向供电方式反演结果(图 15a、b)较为相似,但大理岩与千枚岩接触带的展布特征与实际地质资料呈现的接触带展布延伸方向略有差异。在局部异常体展现方面,反演模型仅反映了测区东部邻近二矿带的一处低阻高极化异常(图 16a、b 中的④)。从典型测线(L220、L300、L340 和 L380)的反演电阻率和极化率断面(图 16c、d)也可看出,仅 L380 线的反演断面显示了④号异常,其他 3 条断面均未见局部异常反映。

3.2.3 横向和纵向双方向组合供电方式

对横向和纵向双方向组合供电方式的激电数据进行三维反演,得到的三维电性模型(图 17)显示:横向和纵向双方向组合供电方式获得的电性结构与横向供电、纵向供电单方向供电方式的反演电性模型整体形态相似,测区的岩性分布和主要构造展布特征在反演电性模型中均得到了很好的反映。测区南部高阻低极化体中部呈现朝北西方向的扭侵形态,反映了近南北走向断裂 F_3 和 F_4 对地层的错动破坏。横向和纵向双方向组合供电方式反演的三维电性模型(图 17)与横向供电、纵向供电单方向供电反演结果(图 15、图 16)相比,横向供电反演结果揭示的①号、②号、③号局部异常和纵向供电反演揭示的④号局部异常均在三维电性模型(图 17)中得到明显反映。

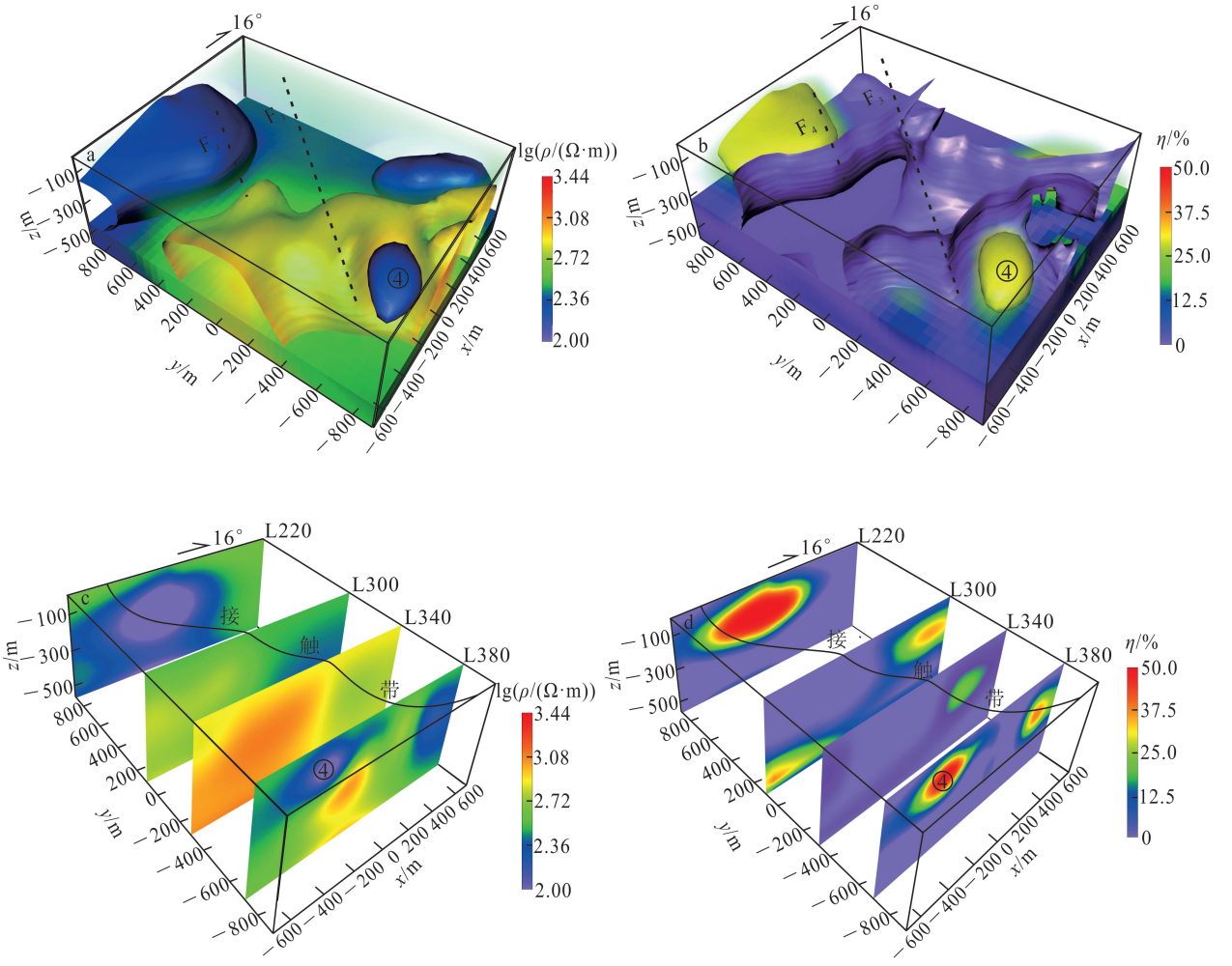
3.2.4 综合对比分析

在探测测区整体构造格架方面,本次研究工作三种供电方式获得的三维电性结构(图 15、图 16 和图 17)均反映了测区的主要地质构造走向及展布,

测区北侧含炭千枚岩与南侧大理岩的接触关系和展布及近南北走向的 F_3 和 F_4 断裂均得到明显反映，但在精细结构刻画方面，横向和纵向双方向组合供电方式反演结果（图 17）展示的效果明显优于另外两种单方向供电方式（图 15、图 16）。

在测区局部异常的揭示方面，前人对该区物探资料解译成果[15-16, 33]显示本区包括 3 处局部低阻高极化异常，与本次工作横向和纵向双方向组合供电获得的 3 处异常（图 17 中的①③④）相对应，分别位于紧邻 F_4 断层的西南向、测区南部邻近三矿带的边界位置和测区一矿带东部与二矿带相邻位置。本次工作的横向和纵向双方向组合供电反演结果不仅揭示了前人成果解译的 3 处局部异常（图 17 中的①③④），同时发现了一处新异常（图 17 中的②）；而横向供电反演获得的电性结构仅获得了 3 处局部异常（图 15 中①②和③），前人及本次横向和纵向双方向组合供电方式揭示的④号局部异常未见反映；纵向供电方式反演结果仅揭示一处局部异常（图 16 中④），①号、②号和③号局部异常未得到有效反映。

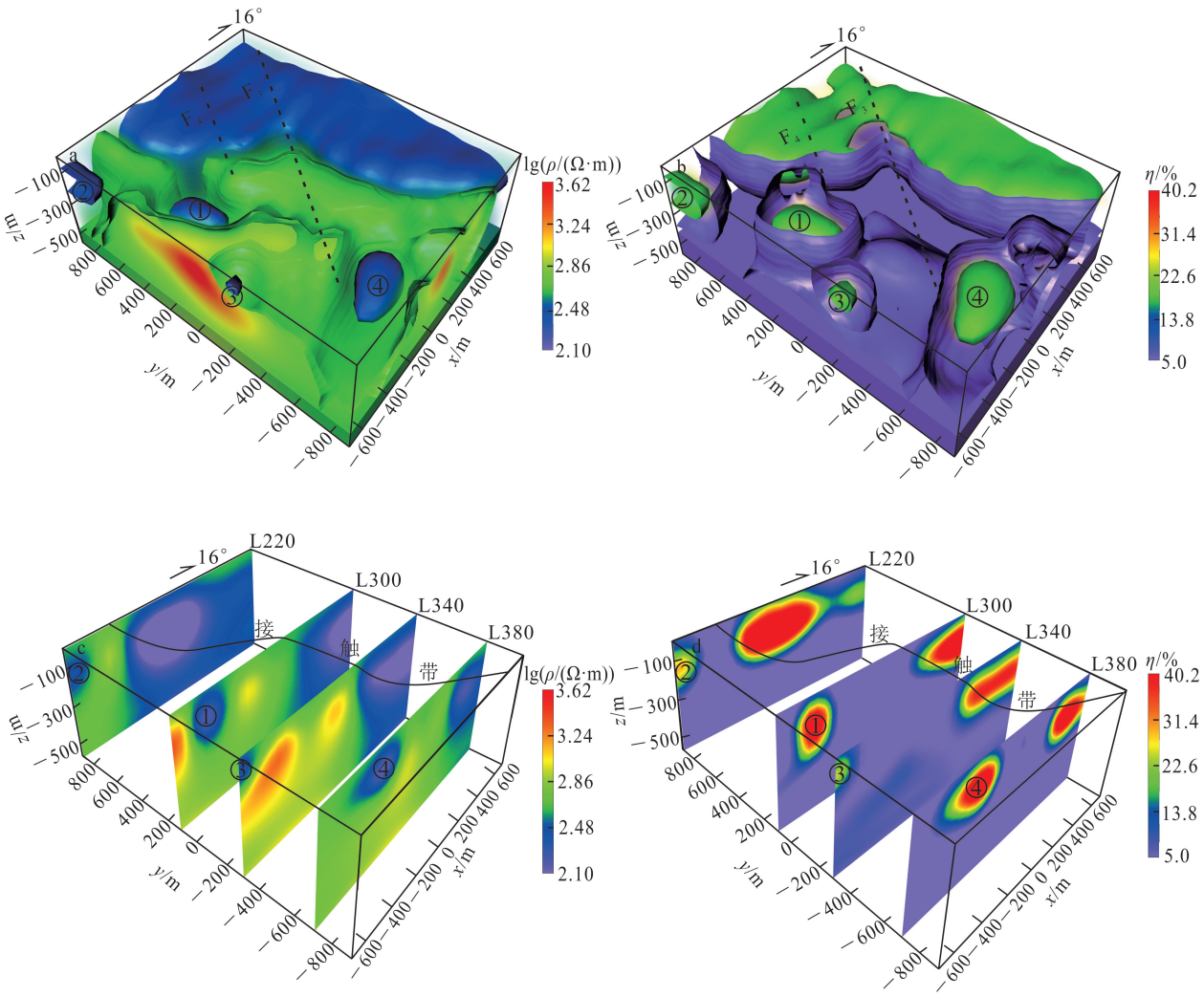
从以上三种供电方式对本测区探测结果的分析可以看出，横向和纵向双方向组合供电方式获得的三维电性结构无论在测区的构造格架精细刻画方面，还是局部低阻高极化异常的有效揭示方面，效果均优于另外两种供电方式（横向、纵向）。从横向供电、纵向供电两种单方向供电探测结果的分析可知，横向供电方式比纵向供电方式获取的电性结构信息更为丰富。



a 和 b 为三维反演电阻率和极化率模型；c 和 d 为典型测线的反演电阻率和极化率断面。

图 16　纵向供电激励下测区三维反演结果

Fig.16　3D inversion results of the survey area by longitudinal power supply excitation



a 和 b 为三维反演电阻率和极化率模型;c 和 d 为典型测线的反演电阻率和极化率断面。

图 17 横向和纵向双方向组合供电激励测区三维反演结果

Fig.17 3D inversion results of the survey area by transverse and longitudinal bidirectional combined power supply excitation

4 结论

通过对不同供电方向激励的理论模型合成数据和某多金属矿区实测激电资料三维反演结果的分析,得到如下结论:

1)理论模型合成数据反演结果表明:对于单个异常体,横向供电、纵向供电、横向和纵向双方向组合供电三种方式的探测效果均能反映异常体的形态和延伸方向,但纵向供电方式对异常体形态的刻画能力不如横向供电、横向和纵向双方向组合供电两种方式;对于多个异常体且延伸方向相同的探测目标,横向供电、横向和纵向双方向组合供电两种方式均能使异常体正确归位,且电性结构与异常体形态吻合;纵向供电方式未能将异常体正确归位,且电性结构与异常体形态有明显差异;对于多个异常体且延伸方向不同的复杂探测目标,横向供电、纵向供电两种方式观测数据反演的电性结构均未正确反映目标体的归位和形态,横向和纵向双方向组合供电方式观测数据反演的电性结构能正确刻画目标体的位置和形态。

2)矿区实测资料三维反演结果进一步表明:在探测整体构造格架方面,横向供电、纵向供电、横向和纵向双方向组合供电三种方式观测数据反演的电性结构均能反映测区的主构造展布,但横向和纵向双方向组合供电方式观测数据反演的电性结构对测区岩性分布和构造展布刻画得更为精细;在揭示局

部异常方面，横向和纵向双方向组合供电方式激电数据反演结果展示的局部异常信息更为丰富、完整，而横向供电或纵向供电单方向供电方式激电数据反演结果揭示的局部异常信息不完整，有可能会漏掉部分有效异常信息。

3）在野外实际开展中梯装置三维激电测量工作时，建议根据探测任务合理选择供电方式。在探测任务为查明研究区的整体岩性分布和主要构造的情况下，横向供电、纵向供电、横向和纵向双方向组合供电三种方式均可采用。如探测任务既要探明研究区的主要构造展布情况，又要揭示该研究区的局部异常信息，则横向和纵向双方向组合供电方式为最优选择。

参考文献（References）：

[1] Sumi F. TheInduced Polarization Method in Ore Investigation[J]. Geophysical Prospecting, 1961, 9(3): 459－477.

[2] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京：地质出版社，2005.
Li Jinming. Geoelectric Field and Electrical Exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.

[3] Arifin M H, Kayode J S, Izwan M K, et al. Data for the Potential Gold Mineralization Mapping with the Applications of Electrical Resistivity Imaging and Induced Polarization Geophysical Surveys[J]. Data in Brief, 2019(22):830－835.

[4] 刘海飞，柳建新，刘嵘，等. 激发极化法在有色金属矿产勘查中的研究进展[J].中国有色金属学报，2023，33(1)：203－222.
Liu Haifei, Liu Jianxin, Liu Rong, et al. Progress of Induced Polarization Method in Nonferrous Metal Mineral Exploration [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(1): 203－222.

[5] 李帝铨，王光杰，底青云，等. 大功率激发极化法在额尔古纳成矿带中段找矿中的应用[J].地球物理学进展，2007，22(5)：1621－1626.
Li Diquan, Wang Guangjie, Di Qingyun, et al. The Application of High-Power Induced Polarization in the Middle Section of Eerguna Metallogenic Belt [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(5): 1621－1626.

[6] 张晓东，方捷，张定源，等. 激发极化法在东溪金矿接替资源勘查中的应用[J]. 物探与化探，2017，41(3)：445－451.
Zhang Xiaodong, Fang Jie, Zhang Dingyuan, et al. The Application of the Induced Polarization Method to the Replacement Resources Exploration of the Dongxi Gold Deposit [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(3): 445－451.

[7] 马一行，颜廷杰，何鹏，等. 激发极化法在/覆盖区矿产勘查中的应用：以内蒙古昌图锡力锰银铅锌多金属矿勘查为例[J]. 物探与化探，2019，43(4)：709－717.
Ma Yixing, Yan Tingjie, He Peng, et al. Exploration in Coverage Area: A Case Study of the Changtuxili Mn－Ag－Pb－Zn Polymetallic Ore Deposit, Inner Mongolia [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(4): 709－717.

[8] 卢卯，黄凯，蒋海民，等. 激发极化法在黔西北洗线沟铅锌矿床找矿中的应用[J]. 矿物学报，2020，40(4)：502－509.
Lu Mao, Huang Kai, Jiang Haimin, et al. Application of the Induced Polarization Method in Mineral Prospecting of the Xixiangou Lead-Zinc Deposit in the Northwestern Guizhou, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2020, 40(4): 502－509.

[9] Adrian J, Tezkan B, Candansayar M E. Exploration of a Copper Ore Deposit in Elbistan/ Turkey Using 2D Inversion of the Time-Domain Induced Polarization Data by Using Unstructured Mesh [J]. Pure Appl Geophys, 2022, 179: 2255－2272.

[10] 文真蓁，陈超，郑毅，等. 自然电场法和 AMT 法在同德石墨矿勘查中的应用[J].世界地质，2022，41(3)：641－653.
Wen Zhenqin, Chen Chao, Zheng Yi, et al. Application of Natural Electric Field Method and AMT Method in Tongde Graphite Ore Exploration [J]. World Geology, 2022, 41(3): 641－653.

[11] 王大壮，李桐林，张镕哲，等. 基于结构约束的三维电阻率和重力法联合反演[J].世界地质，2022，41(3)：597－606.
Wang Dazhuang, Li Tonglin, Zhang Rongzhe, et al. Joint Inversion of 3D Resistivity and Gravity Method Based on Structural Constraint[J]. World Geology, 2022, 41(3): 597－606.

[12] Aizebeokhai A P, Oyeyemi K D. The Use of the Multiple-Gradient Array for Geoelectrical Resistivity and Induced Polarization Imaging [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 111: 364－376.

[13] 刘洋. 基于非结构网格的电阻率三维正反演及其应用研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2016.
Liu Yang. Study of 3D Resistivity Modeling and Inversion Using Unstructured Grids and Their Applications[D]. Hefei: University of Science and

Technology of China, 2016.

[14] Wang J L, Lin P R, Wang M, et al. Three-Dimensional Tomography Using High-Power Induced Polarization with the Similar Central Gradient Array [J]. Applied Geophysics, 2017, 14(2): 291-300.

[15] 张永哲, 成山林, 李跃东,等. 多源信息找矿预测技术研究及其应用:以吉林省砂金沟金矿床为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(6): 1855-1866.
Zhang Yongzhe, Cheng Shanlin, Li Yuedong, et al. Research and Application of Multi-Source Information for Ore Prospecting and Prediction: Taking Jilin Shajingou Gold Deposit as an Example[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(6): 1855-1866.

[16] 龚胜平,杨亚斌,张光之,等. 三维时间域激发极化法探测花牛山铅锌矿的试验研究[J].科学技术与工程, 2018, 18(18): 16-24.
Gong Shengping, Yang Yabin, Zhang Guangzhi, et al. Experimental Study on 3D Time-Domain Electromagnetic Exploration in Huaniushan Pd-Zn Deposit[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(18): 16-24.

[17] 曹创华,邓专,康方平,等. 激电中梯装置测量长方异常体的三维正演模拟及启示[J]. 物探化探计算技术, 2018, 40(4): 459-467.
Cao Chuanghua, Deng Zhuan, Kang Fangping, et al. Three-Dimensional Forward and Inspiration of Abnormal Cuboids Under Intermediate Gradient Way of IP Method [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 40(4): 459-467.

[18] Wang W, Wu X P, Spitzer K. Three-Dimensional DC Anisotropic Resistivity Modelling Using Finite Elementson Unstructured Grids[J]. Geophys J Int, 2013, 193(2): 734-746.

[19] 王新宇, 严良俊, 毛玉蓉, 等.起伏地形条件下长偏移距瞬变电磁三维正演[J].吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(3): 754-766.
Wang Xinyu, Yan Liangjun, Mao Yurong, et al. Three-Dimensional Forward Modeling of Long-Offset Transient Electromagnetic Method over Topography [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 754-766.

[20] Pidlisecky A, Haber E, Knight R. RESINVM3D: A 3D Resistivity Inversion Package [J]. Geophysics, 2007, 72(2): 1-10.

[21] 吴小平,刘洋,王威. 基于非结构网格的电阻率三维带地形反演[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2706-2717.
Wu Xiaoping, Liu Yang, Wang Wei. 3D Resistivity Inversion Incorporating Topography Based on Unstructured Meshes [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2706-2717.

[22] Tikhonov A N. On Determining Electric Characteristics of the Deep Layers of the Earth's Crust[J]. Doklady Akademii nauk SSSR, 1950, 73(2): 295-297.

[23] Tikhonov A N, Arsenin V Y. Solution of Ill-Posed Problem[M]. Washington: W H Winston and Sons, 1977.

[24] 李长伟,熊彬,王有学,等. 基于改进 Krylov 子空间算法的井中激电反演[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3862-3869.
Li Changwei, Xiong Bin, Wang Youxue, et al. Inversion of IP Logging Based on Improved Krylov Subspace Methods [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11): 3862-3869.

[25] Haber E, Ascher U M. On Optimization Techniques for Solving Nonlinear Inverse Problems[J]. Inverse Problems, 2000, 16(5): 1263-1280.

[26] Dembo R S, Steihaug E T. Inexact Newton Methods [J]. Siam Journal on Numerical Analysis, 1982, 19(2): 400-408.

[27] 吴小平,徐果明. 电阻率三维反演中偏导数矩阵的求取与分析[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(4): 363-372.
Wu Xiaoping, Xu Guoming. Derivation and Analysis of Partial Derivative Matrix in Resistivity 3-D Inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1999, 34(4): 363-372.

[28] Armijo L. Minimization of Functions Having Lipschitz Continuous First Partial Derivatives [J]. Pacific Journal of Mathematics, 1966, 16(1): 1-3.

[29] 阮百尧,村上裕,徐世浙. 激发极化数据的最小二乘二维反演方法[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 1999, 24(6): 619-624.
Ruan Baiyao, Murakami Y, Xu Shizhe. Least Souare 2-D Inversion Method for Induced Polarization Data [J]. Eaeth Science: Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(6): 619-624.

[30] 吴小平. 利用共轭梯度方法的激发极化三维快速反演[J].煤田地质与勘探,2004, 32(5) :62-64.
Wu Xiaoping. Rapid 3-D Inversion of Induced

Polarization Data Using Conjugate Gradient Method [J]. Coal Geology and Exploration,2004, 32(5): 62 - 64.

[31] Seigel, Harold O. Mathematical Formulationand Type Curves for Induced Polarization [J]. Geophysics, 1959, 24(3): 547 - 565.

[32] 杨建国,任有祥,王小红,等. 甘肃北山花牛山金银多金属矿田成矿规律与找矿预测[M]. 北京:地质出版社, 2011.
Yang Jianguo, Ren Youxiang, Wang Xiaohong, et al. Metallogenic Patterns and Mineralization Predictions for the Huaniushan Gold-Silver Polymetallic Field, Beishan, Gansu[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.

[33] 顾观文,李桐林. 基于矢量有限元的带地形大地电磁三维反演研究[J]. 地球物理学报, 2020, 63(6): 2449 - 2465.
Gu Guanwen, Li Tonglin. Three-Dimensional Magnetotelluric Inversion with Surface Topography Based on the Vector Finite Element Method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(6): 2449 - 2465.