

## CSAMT 逐级反演技术的讨论及应用

曹创华<sup>1,2,3</sup>, 柳建新<sup>1,2,3</sup>, 童孝忠<sup>1,2,3</sup>, 谢维<sup>1,3</sup>, 佟铁钢<sup>1,2,3</sup>, 高大维<sup>1,2,3</sup>

- (1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
2. 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室, 长沙 410083;
3. 中南大学 地质调查研究院, 长沙 410083)

**摘要:** 对深部探测地球物理找矿领域中最常用的 CSAMT 法的反演技术进行探索。首先利用一维 Bostick 反演方法进行野外实测数据的反演; 由于 Bostick 反演结果较为准确地确定了探测深度, 然后将一维反演断面信息作为二维反演的初始模型断面, 利用 Occam 反演方法进行正则化反演; 再进行地质解释, 间接地提高了地电断面初始模型的正确度; 最后结合东昆仑地区某 Cu、Pb、Zn 多金属矿 CSAMT 实际勘察结果, 分析总结这种数据处理方法的认知。结果表明, 逐级反演技术提高了勘察效果, 为今后勘察提供了有益的经验。

**关键词:** 可控源音频大地电磁测深; 逐级反演; 精度; 东昆仑  
**中图分类号:** P631.3 **文献标志码:** A

## Discussion and application of CSAMT method with progressively inversion technology

CAO Chuang-hua<sup>1,2,3</sup>, LIU Jian-xin<sup>1,2,3</sup>, TONG Xiao-zhong<sup>1,2,3</sup>, XIE Wei<sup>1,3</sup>, TONG Tie-gang<sup>1,2,3</sup>, GAO Da-wei<sup>1,2,3</sup>

- (1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Key Laboratory of Non-ferrous Resources and Geological Detection, Ministry of Hunan Province, Changsha 410083, China;
3. Research Institute of Geological Survey, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The inversion technique of CSAMT method which is widely used in the field of geophysical prospecting was investigated. Firstly, one-dimensional Bostick inversion method was used in the inversion of data measured in the field; secondly, the cross-section of one-dimensional inversion was taken as an initial cross-section model of the two-dimensional inversion since the probing depth determined by Bostick inversion is relatively accurate, and we Occam inversion method was used for positive inversion; thirdly, geological interpretation was concluded, which improves the accuracy of the initial geoelectric section model indirectly; at last, this data processing method was analyzed and a conclusion was drawn while integrating the CSAMT survey results of eastern Kunlun Cu, Pb and Zn polymetallic ore. The results show that step by step inversion technique contributes directly to the survey result, which provides useful experience for future investigation.

**Key words:** controlled source audio frequency magnetotelluric sounding; progressively inversion; accuracy; east Kunlun

随着经济建设日益发展, 社会对地质工作的要求越来越高, 对探测深部隐伏矿床技术的技术革新也提出了新要求, 特别是生产矿山探测向深部进行探索。

国土资源部发布关于促进深部找矿工作指导意见指出: 未来一段时间甚至长期内, 500~2 000 m 的找矿第二空间将作为重点勘探对象<sup>[1-2]</sup>。众所周知, 在深部

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41174103, 41374119); 国家科技支撑计划项目(2011BAB04B08); 教育部博士点基金资助项目(20110162130008); 中国地质调查局科研项目(资[2011]03-01-64); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金博士生自由探索项目(2013zzts054); 国家科技基础性专项(2013FY110800)

**收稿日期:** 2013-05-16; **修订日期:** 2013-06-30

**通信作者:** 柳建新, 教授, 博士; 电话: 13807486248; E-mail: ljx6666@126.com

找矿当中地球物理勘探方法是不可或缺的有效手段,但技术的革新与发展探索将在长期内成为科研及生产单位广大工作者面临的课题之一。特别是有色金属矿床,CSAMT、TEM和MT方法都在实际应用中取得了较好的效果<sup>[3-8]</sup>。虽然这些方法在经济建设中发挥了不可或缺的作用,但具体的反演技术还有待发展,具体细节还有待讨论,本文作者从CSAMT反演入手,讨论逐级反演技术及其应用效果。

目前,在有色金属实际勘探中,二维地电剖面的测量最为常用,常常采用赤道偶极装置测量方式。自从20世纪70年代以来,通过几十年的发展不论是从正演模型的响应分析,还是反演技术及结果的讨论,都取得了很大的进步。YUJI<sup>[9]</sup>,底青云等<sup>[10]</sup>和雷达<sup>[11]</sup>分别实现了电偶源的2.5维测深的正演响应。对于反演,大多数专家学者还仍停留在一维反演阶段,美国著名地球物理勘探公司的WANNAMAKER<sup>[12]</sup>实现了二维圆滑模型反演系统实验;底青云等<sup>[10]</sup>实现了基于有限单元法的CSAMT数值反演,雷达<sup>[11]</sup>实现了二维Occam反演并进行了实例例证,效果较好。

虽然反演方法得到了实际生产效果的检验,但在建立正演初始模型时还有很多问题需要仔细分析,初始模型建立的适当与否和反演技术的选择是否恰当,往往是反演结果多解性的决定性因素。最近中国地质调查局组织了国内6家单位的勘探人员对冬瓜山矿区的电磁剖面进行了反演,数据处理结果和解释均存在差异<sup>[13]</sup>,产生这一结果的诸多原因之一就是正演模型响应计算过程及反演技术不尽相同,也可能是不同仪器采集的原始数据遭到严重的人文污染所致。可控源反演中有诸多反演初始模型,一般情况下,对于远区的数据都借用MT资料处理方式,忽略电磁场源的影响来进行反演。针对可控源反演问题,很多专家学者都进行了大量研究工作,例如:国外WANNAMAKER<sup>[12]</sup>提出了CSAMT一维和MT二维联合反演解释的方法等;国内周俊杰等<sup>[14]</sup>利用CSAMT法在波区与MT理论相似的原理,提出用Bostick半定量结果作为CSAMT一维反演的初始模型,采用传统最小二乘算法,结合多种常识性物性变化特点,提高了反演精度。WANNAMAKER<sup>[12]</sup>提出的方法是基于野外数据直接进行反演,电偶源对反演结果的影响考虑还不够全面,加之校正和参数设置过程人为因素较大,且可控源音频大地电磁测深法本身的局限性,结果也就出现了多样性,解译也随之产生了不同差异,周俊杰等<sup>[12]</sup>提出的方法没有进行基于一维Bostick反演结果作为初始模型进行二维反演尝试。基于此,本文作者利用一维Bostick单点反演深度对应的电阻率

作为初始模型,然后再利用Occam正则化技术进行最优化反演,最后结合实例进行分析,讨论这种方法的有效性,对可控源数据的反演进行一些有益的探索。

## 1 技术原理

假设某个实测得到的 $j$ 个数据用一个 $j$ 维向量 $\mathbf{d}=[d_1, d_2, \dots, d_j]^T$ ,所有数据 $\mathbf{d}$ 构成的集合在数学中称为数据空间。对于模型参数可用 $\mathbf{m}$ 表示,若认为 $\mathbf{m}$ 是离散的,则可以将其定义为一个 $m$ 维向量 $\mathbf{m}=[m_1, m_2, \dots, m_m]^T$ ,构成的集合在数学中称为模型空间。在一般情况下,数据空间 $\mathbf{d}$ 和模型空间 $\mathbf{m}$ 之间可以用 $\mathbf{d}=\mathbf{F}(\mathbf{m})$ 表示,其中 $\mathbf{F}$ 为满足两者关系的某种函数,这叫正演响应;若从 $\mathbf{d}$ 数据空间映射到 $\mathbf{m}$ 空间,即 $\mathbf{m}=\mathbf{F}^{-1}(\mathbf{d})$ ,常称之为地球物理反演<sup>[15]</sup>。

本次CSAMT实际数据处理的核心思想如下:首先通过设置初始模型( $\mathbf{m}$ 模型,此处特指电阻率模型地质断面,参数有地层电阻率、深度等),通过正演算子 $\mathbf{F}$ 求得响应数据空间 $\mathbf{d}$ (视电阻率等参数空间);其次将实测数据 $\mathbf{d}'$ 与响应数据 $\mathbf{d}$ 进行拟合,利用最优化等方法通过不断设置和优化初始模型,迭代直至 $\mathbf{d}'$ 和 $\mathbf{d}$ 的拟合差达到预先的误差范围之内。在CSAMT反演计算中,利用Bostick反演方法,较为精确、直观地给出地下电阻率随深度的变化规律,此时认为其一维Bostick的深度和电阻率为 $\mathbf{m}$ 模型空间,形成二维反演的初始拟断面,通过2.5维CSAMT电磁响应进行正演计算,得出TM模式卡尼亚视电阻率和频率参数 $\mathbf{d}$ 数据空间,最后与实测 $\mathbf{d}'$ 空间进行拟合。

### 1.1 2.5维CSAMT电磁响应

实际应用中,在布设电偶源时,其发射源往往为三维,而接收系统为二维,这种频率域电磁测深方式被称为2.5维可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)<sup>[9]</sup>。当电磁波在源的远区(即探测区域)进行测量时,如果定义异常体走向为 $x$ 方向, $y$ 为垂直走向的方向, $z$ 为垂直地面正方向向上。其在笛卡尔坐标系中的装置如图1所示。坐标系中单位均为m,其中,位置 $A$ 和 $B$ 为线电流源接地点, $O$ 为坐标原点,测线距源的位置为8000m;不失一般性,选择断面响应的计算剖面地表起始点分别为点1和2,计算剖面为2000m×1500m的矩形,点1的坐标为(8000, 2000, 0),点2的坐标为(8000, 4000, 0),异常体为500m×500m的矩形,其中心点坐标为(8000, 3000, -750)。

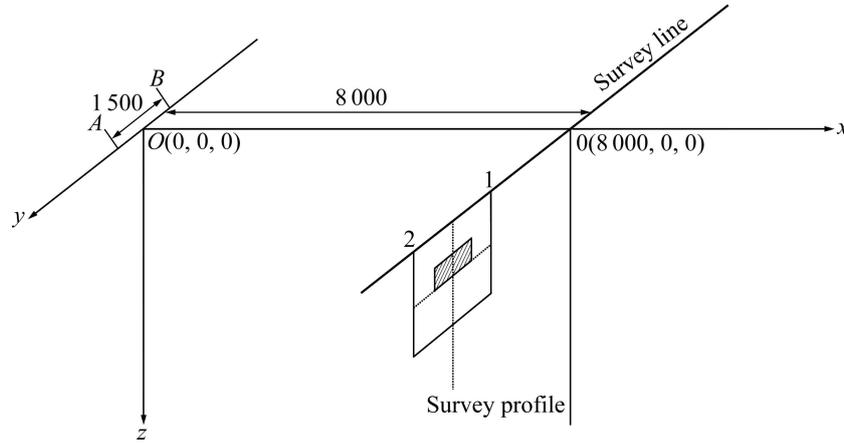


图 1 2.5 维 CSAMT 正演响应模型示意图

Fig. 1 Coordinate system for 2.5-D CSAMT response model (Unit: m)

因为在电磁场勘探中，岩石的位移电流响应对总电流的贡献很小，在此忽略不计，简化后的 Maxwell 方程组可表示如下<sup>[15-17]</sup>：

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0(\sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_s) \tag{2}$$

式中： $\mathbf{E}$  为电场强度； $\mathbf{B}$  为磁感应强度； $\mathbf{J}_s$  表示电偶源； $\nabla$  为哈密顿算子； $\mu_0$  为真空中的磁导率； $\sigma$  为电导率。通过对上两式的傅立叶变换，在傅氏域中有下列方程组成立<sup>[9]</sup>：

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mathbf{y}}{k_e^2} \frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mathbf{y}}{k_e^2} \frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial z} \right) - \mathbf{y} \mathbf{E}_y + \\ & ik_y \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{k_e^2} \right) \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{k_e^2} \right) \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial x} \right] = \mathbf{J}_{xy} \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mathbf{z}}{k_e^2} \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mathbf{z}}{k_e^2} \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial z} \right) - \mathbf{z} \mathbf{H}_y + \\ & ik_y \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{k_e^2} \right) \frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{k_e^2} \right) \frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial z} \right] = 0 \\ & \mathbf{E}_x = \frac{1}{k_e^2} \left( -ik_y \frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial x} - \mathbf{z} \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial z} \right) \\ & \mathbf{E}_z = \frac{1}{k_e^2} \left( -ik_y \frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial z} - \mathbf{z} \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial x} \right) \\ & \mathbf{H}_x = \frac{1}{k_e^2} \left( -ik_y \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial x} - \mathbf{y} \frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial z} \right) \\ & \mathbf{H}_z = \frac{1}{k_e^2} \left( -ik_y \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial z} - \mathbf{y} \frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial x} \right) \end{aligned} \right. \tag{3}$$

式中： $\mathbf{E}_x$ 、 $\mathbf{E}_y$ 、 $\mathbf{E}_z$ 、 $\mathbf{H}_x$ 、 $\mathbf{H}_y$  和  $\mathbf{H}_z$  分别表示电场和磁场在三维空间  $x$ 、 $y$  和  $z$  各方向的矢量； $\mathbf{y}$  和  $\mathbf{z}$  表示沿

所测剖面两个方向的单位矢量； $\mathbf{J}_{xy}$  表示  $x$  轴和  $y$  轴所组成平面的电流源； $k_y$  和  $k_e^2 (= k_y^2 - (-z\mathbf{y})^2)$  均表示介质的波数。利用有限单元或者有限差分法对上述方程求解，可求得上述 6 个电场和磁场分量的值，最后通过傅氏逆变换即可求得真实的场值，然后利用相互正交的电场分量和磁场分量就可计算得到卡尼亚视电阻率<sup>[15-16]</sup>。

### 1.2 一维 Bostick 反演

一维 Bostick 反演是以低频区视电阻率曲线尾支渐近线为基础，在层状地层中，假如岩石基底的电阻率为零和无穷大，即在这种情况下满足<sup>[16]</sup>：

$$\left\{ \begin{aligned} & \rho_a = \frac{1}{\omega \mu S^2}, \rho_2 = \infty \\ & \rho_a = \omega \mu H^2, \rho_2 = 0 \end{aligned} \right. \tag{4}$$

式中： $S$  代表地层顶层的纵向电导； $H$  为其厚度； $\omega$  为角频率； $\mu$  为介质中的磁导率；构成的解  $\rho_a$  即为仅与断面中某一深度  $H$  以上的平均电阻率。

地层电性往往随深度呈连续变化，这样纵向电导也可认为是连续变化的，通过连续函数进行推导可以得到视电阻率值及对应深度值。这里仅给出最终公式<sup>[15]</sup>：

$$\left\{ \begin{aligned} & \rho = \rho_{\text{obs}}(\omega) \frac{1 - \frac{d \lg \rho_{\text{obs}}}{d \lg \omega}}{1 + \frac{d \lg \rho_{\text{obs}}}{d \lg \omega}} \\ & H = \sqrt{\frac{\rho_{\text{obs}}}{\omega \mu}} \end{aligned} \right. \tag{5}$$

通过实测的不同频率所对应的视电阻率  $\rho_{\text{obs}}$  和  $\omega$ ，求得  $H$  和对应的二维初始电阻率值。

### 1.3 二维 Occam 反演

$m$  模型空间包含有电阻率和异常体边界等假设信息, 反演时为了有效地抑制反演迭代过程中产生的冗余构造, 并提高解的稳定性, Groot-Hedin 等提出了 Occam 算法<sup>[15]</sup>, 并假定如下反演总体目标函数:

$$U = \|\partial_y m\|^2 + \|\partial_z m\|^2 + \mu^{-1} \{\|Wd - WF(m)\|^2 - X_*^2\} \tag{6}$$

结合图 1 所示异常体空间展布状态,  $\|\partial_y m\|^2$  所表示的是实测剖面垂直构造方向的粗糙度矩阵;  $\|\partial_z m\|^2$  表示的是指向基底方向的粗糙度矩阵;  $\mu^{-1}$  为正则化因子;  $F(m)$  为模型的正演响应,  $W = \text{diag}[1/\sigma_1, 1/\sigma_2, \dots, 1/\sigma_M]$  为加权对角矩阵;  $\sigma_j$  是已知观测的视电阻率和相位等信息  $d_j(j=1, 2, \dots, M)$  的方差;  $M$  是观测数据的个数, 在假设噪声不相关条件下时,  $X_*^2 = X^2 = M$ 。

对  $U$  求  $m$  中每个离散的  $m_i$  的偏导数, 就可求得模型的一般最优解, 就是满足目前条件下的地电模型反演结果。

## 2 数值试验

### 2.1 模型试算

采用图 1 所示的坐标系统及模型参数, 异常体的电阻率设置为 2 000  $\Omega\cdot\text{m}$ , 背景场的电阻率为 100  $\Omega\cdot\text{m}$ , 设置此模型的目的是实际数据采集中, 地表往往为第四系覆盖层, 呈低电阻率的物理性质, 另一方

面是为了检验静态效应对此类情况下反演效果到底影响有多大; 发射源为电流线源, 长度  $L_{AB}=1\ 500\ \text{m}$ , 测量采用赤道偶极装置进行标量(TM) 方式观测, 因为电磁法勘探当中 TM 测量方式比 TE 方式反应灵敏<sup>[16]</sup>; 收发距设计为垂直测线距离  $r=8\ 000\ \text{m}$ , 相应的趋附深度设计 1 500 m 的探测深度; 远满足  $r>4\delta=6\ 000\ \text{m}$  的要求。满足探测目标体的最低频率按照下式进行计算<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} f_L = 4.0 \frac{\rho_a}{r_{\max}^2} \\ f_L = \pi \left( \frac{356}{H} \right)^2 \end{cases} \tag{7}$$

式中:  $f_L$  表示所需最低频率;  $\rho_a$  表示平均电阻率;  $r_{\max}$  表示最大收发距;  $H$  为探测深度。取  $\rho=500\ \Omega\cdot\text{m}$ , 可以算得最低频率约为 0.2 Hz, 即可满足上方程组的一个, 选用 1 Hz 作为最低采集频率进行试算。为了检测实际野外数据处理中频率采样组合的有效性, 本次选择的发射频率分别为 1、1.41、2、2.82、4、5.6、8、11.2、16、22.4、32、45、64、90、128、180、256、360、512、721、1 024、1 441、2 048、2 882、4 096、5 765 和 8 192 Hz, 共计 27 个频点。

图 2 所示为通过每个测点一维 Bostick 反演结果断面图。横坐标为测量点, 纵坐标为利用式(5)计算的深度, 测量点和深度对应的反演电阻率值亦为式(5)计算而得。

经过 Bostick 反演, 已经可以判别出异常体的范围, 高阻异常的中心也得到了较好的反映, 但在矩形

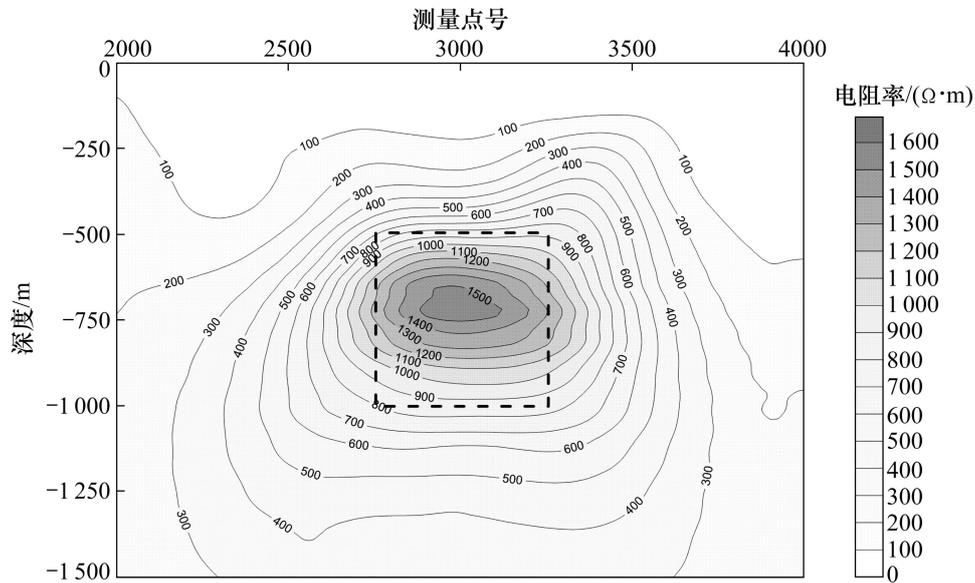


图 2 二维模型 Bostick 反演断面图

Fig. 2 Bostick inversion cross section result using 2D model

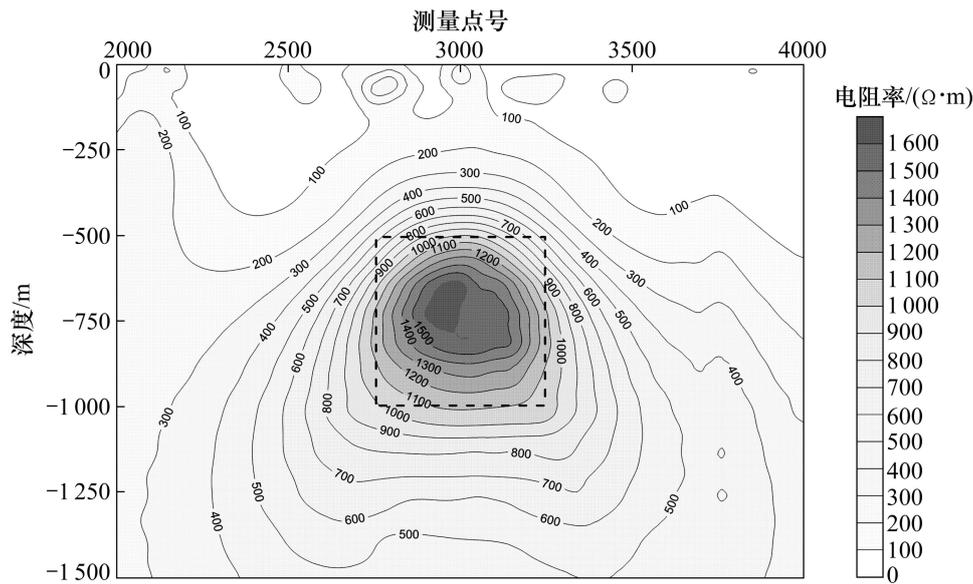


图3 Bostick反演结果为初始模型的二维反演断面图

Fig. 3 2D inversion result using the forward of Bostick inversion profile

初始模型内,反演后的电阻率普遍比初始模型大,都在 $1\ 000\sim 2\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 范围内,形态有部分朝向地面散布的趋势,初步判定为高阻异常体顶部的静态效应引起。地面以下断面顶部电阻率出现极小值,是正演模型响应和反演函数拟合过程中产生的,部分值小于 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ ,底部的电阻率值都大于 $400\ \Omega\cdot\text{m}$ ,作者认为是中部高阻体影响的结果。

图3所示为经过一维Bostick反演结果断面图作为正演初始模型进行二维Occam反演的最终结果。由图3可以看出,反演效果得到了极大改善,异常中心对应于测点3000的位置,异常中心与模型吻合较好,在虚线框内的反演电阻率均在 $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 以上,最大值已接近 $2\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 。虚框外的电阻率均在 $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 以下,整体电阻率下降,等值线在虚框附近密集分布,具有明显的边界; $2\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 的等值线也愈靠近异常中心,反演效果较好。从整体形态看,对于围岩为低阻的物性来说,压制了低阻对高阻异常体的影响,异常形态已出现聚集。

## 2.2 精度分析

将3000号测点的一维Bostick反演结果、以视电阻率断面为初始模型的直接二维反演结果、以一维Bostick反演结果作为二维Occam反演初始断面进行反演的结果进行对比,结果如图4所示。图4中,横坐标为电阻率值,纵坐标为深度,3000号测点对应的地层分布情况为 $0\sim 500\ \text{m}$ 电阻率为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ , $-500\sim -1\ 000\ \text{m}$ 电阻率为 $2\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ , $-1\ 000\ \text{m}$ 以下电

阻率为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 。由数值计算可以得出:一维Bostick反演结果的电阻率峰值为 $1\ 697\ \Omega\cdot\text{m}$ ,而经过逐级反演后电阻率的峰值接近 $1\ 980\ \Omega\cdot\text{m}$ ,从幅值上可以看出,以异常体值为标准,精度相对前者提高了28.3%;在电阻率变化的地层界面处,逐级反演更接近实际情况,最小值也最接近 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

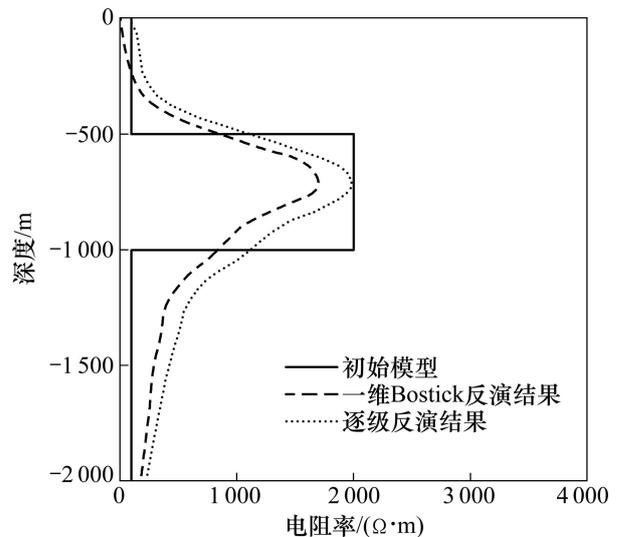


图4 3000号测点反演结果对比

Fig. 4 Comparison of inversion results of station 3000

## 3 应用实例

实例选取祁曼塔格—东昆仑成矿带某铅锌多金属

矿的 CSAMT 测量结果。

### 3.1 工作方法

20 世纪 90 年代前, 可控源野外实测时都是通过单点进行测量, 之后伯克利的博士研究生 Carlos Torres-Verdin 对电磁列阵剖面法(EMAP)进行了深入分析, 20 世纪末汤井田等将此技术引入国内<sup>[17]</sup>。但目前在实际资料处理中还是以一维的 Bostick 反演为主, 单点进行反演后再成图为拟二维反演断面结果进行分析和地质解译, 反演的纽带目前以视电阻率为主要参数, 相位等为辅助参数进行解译。本研究的实例将根据前面所讨论的逐级反演技术, 参考已有地球物理、地球化学资料, 利用综合物探方法的思想<sup>[18-20]</sup>对此矿区进行剖析, 结合东昆仑成矿规律研究成果<sup>[21-23]</sup>, 对此矿区进行成矿分析。

工作方法步骤如下: 首先对矿区的已有地质、物化探资料进行搜集并研究分析, 然后根据地质工作的目的进行测网布设, 最后进行数据采集、处理和解释。地质资料的搜集包括区域地质、矿产、地层和勘察研究区的矿点分布等; 物探资料的搜集包括区域重力资料、航磁测量资料及已有矿山普查物探资料等; 化探资料的搜集包括区域元素原生晕、次生晕及人文污染、元素是否迁移情况分析等; 测网的布设要满足相关行业规范及技术参数标准、垂直构造主要构造方向等; 在进行数据处理及地质解释时, 要结合已有资料综合分析, 选取不同的静态校正方法进行对比, 选取适合本区的校正方法, 剔除飞点不能盲目, 遇到差异较大的飞点要实地进行科学考察分析, 反演时对比不同最优化方法选取较为适合本地区的反演方法, 勾画断层、岩性接触带的分界线和矿化异常可能位置时要结合可见地质情况去综合分析等。整体的工作方法步骤见图 5。

### 3.2 矿区概述

#### 3.2.1 地形条件

工作区位于青藏高原北部的阿尔茨托山一带, 山系近东西向, 山坡南陡北缓, 属高原干旱地带, 山地海拔多在 3 700 m 以上, 最高达 4 550 m; 山地间为戈壁滩, 海拔 3 500~3 800 m, 测区相对高差 150~300 m, 植被不发育。

#### 3.2.2 地层特征

工作区出露的地层主要为上奥陶统滩涧山群(O<sub>3</sub>tn)一套浅变质的火山岩、碳酸盐岩、碎屑岩组合, 根据岩性组合, 由(南至北)下至上分 3 个岩组, 各岩组之间为过渡接触(图 6)。O<sub>3</sub>tn<sup>1</sup>: 火山岩组, 为中酸

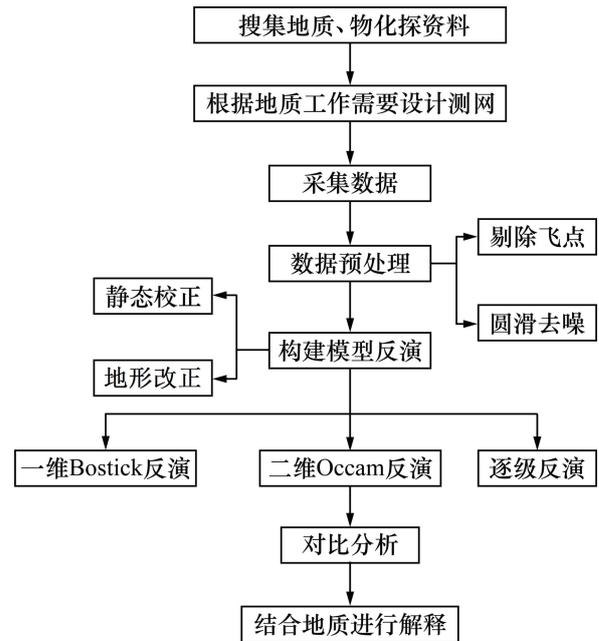


图 5 工作方法步骤流程图

Fig. 5 Flowchart of working method steps

性夹中基性火山岩组合, 岩性为安山岩夹少量的斜长角闪片岩、绿泥石英片岩。O<sub>3</sub>tn<sup>2</sup>: 片岩岩组, 岩性为绢云白云石英片岩、绿泥绢云石英片岩夹透镜状或薄层状大理岩, 底部为安山岩夹少量的斜长角闪片岩、绿泥石英片岩, 本层中上部为含铜铅锌矿化的热水沉积岩系含矿层, 岩性为间夹着硅质岩、绿泥绢云石英片岩、大理岩与含硅质条带大理岩。含矿层长度为 3.0 km, 厚度为 50~100 m。O<sub>3</sub>tn<sup>3</sup>: 砂岩岩组, 下部为石英砂岩、硅质岩、长石石英砂岩、中部变为安山岩、英安斑岩; 岩性上部为石英砂岩加少量的绢云石英片岩; 底部常出现含铜热水沉积的硅质岩夹层、透镜体或条带。

#### 3.2.3 构造

本区位于阿尔茨托山复式倒转向斜南翼(正常翼), 褶皱构造较为简单。

地层总体走向 90°~120°, 倾向北或北东, 局部西北倾, 倾角 40°~85°。断裂构造较发育, 按其走向可分为 4 类, 即东西向、北西向、北东向和近南北向断裂, 其中, 以东西向和北西向断裂形成较早, 北东向和近南北向断裂形成较晚, 多切割前者。

#### 3.2.4 已有地球物理信息

针对本区缺乏矿区地球物理信息的情况, 柳建新等<sup>[18]</sup>对矿区内典型的岩矿石进行标本测试, 方法为强迫电流法, 选择的装置为对称四极, 使用的仪器为双频激电仪, 所测的参数为视标本测试结果如表 1 所列。

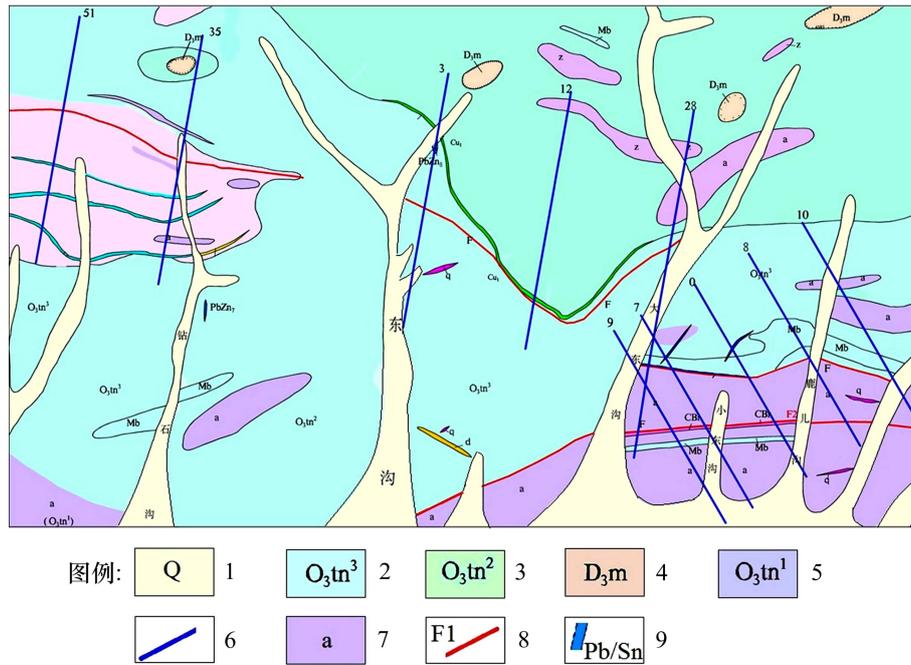


图 6 地质及工作布置简图：1—第四系；2—上奥陶统滩涧山群砂岩岩组；3—上奥陶统滩涧山群片岩岩组；4—安山岩；5—上奥陶统滩涧山群火山岩组；6—CSAMT 测线；7—英安岩；8—断层；9—矿化带

Fig. 6 Geological and work layout diagram: 1—Quaternary; 2—Sandstone of Ordovician; 3—Schist of Ordovician; 4—Andesite; 5—Volcanic rock of Ordovician; 6—CSAMT survey line; 7—Dacite; 8—Fault; 9—Mineralization zone

表 1 岩矿石标本物性测量结果

Table 1 Measurement results of physical properties of rock and ore specimens

岩性	块数	变化范围		几何平均值	
		$F_s/\%$	$\rho_s/(\Omega\cdot m)$	$F_s/\%$	$\rho_s/(\Omega\cdot m)$
$O_3tn^1$	8	0.47–1.83	886.72–4 765.33	1.13	2 764.51
$O_3tn^2$	8	0.99–1.47	998.86–6 954.21	1.22	3 826.55
$O_3tn^3$	8	0.81–1.72	1 002.33–7 834.25	1.45	4 457.43
第四系	3	0.11–1.34	1.33–321.31	0.78	227.65
安山岩	5	0.34–1.28	432.77–3 221.52	0.86	1 888.32
铅锌矿化岩石	7	1.27–4.01	33.31–898.77	2.65	456.77
铜矿化岩石	9	1.53–3.32	12.31–986.34	2.88	431.29

注： $F_s$  为视幅频率； $\rho_s$  为视电阻率。

在此矿区，从标本测试结果来看，含矿(化)岩石幅频率特征幅值最大，视电阻率具有中等视电阻率特征；铅锌矿化程度的大小由含  $CuFeS_2$ 、 $ZnS$  和  $PbS$  成分高低而定，体现在激发极化参数幅频率值的大小上，由于此区域处于西北干旱区域，相对地表第四系而言，标本的电阻率测试结果往往呈中等电阻率特征，但亦有物性差异<sup>[18]</sup>。

此铜铅锌矿区刻划分为西部和东部两个异常分布区，分带非常明显(图 7)：

西部矿区 7~63 线激电异常带，异常走向长度约

为 1 500 m，宽度为 800 m，中心部位近等轴状， $F_s$  最大达 3.6%，西部地表存在铅锌矿化蚀变带。南部  $Zn$ 、 $Pb$  矿化带为异常中心高值区域，地表槽探见有铅锌矿化体，该处是寻找铅锌矿的有利地段。东部矿区激电异常带异常走向长度为 1 000 m，宽度为 100~200 m， $F_s$  最大达 2.3%，标本测试结果分析为浸染状矿体引起，地表槽探  $Cu$  矿化。

### 3.2.5 已有地球化学信息

表 2 所列的化探数据采集利用原生晕进行测量，其中， $O_3tn^1$  火山岩组为本区的基地岩性，地表研究区

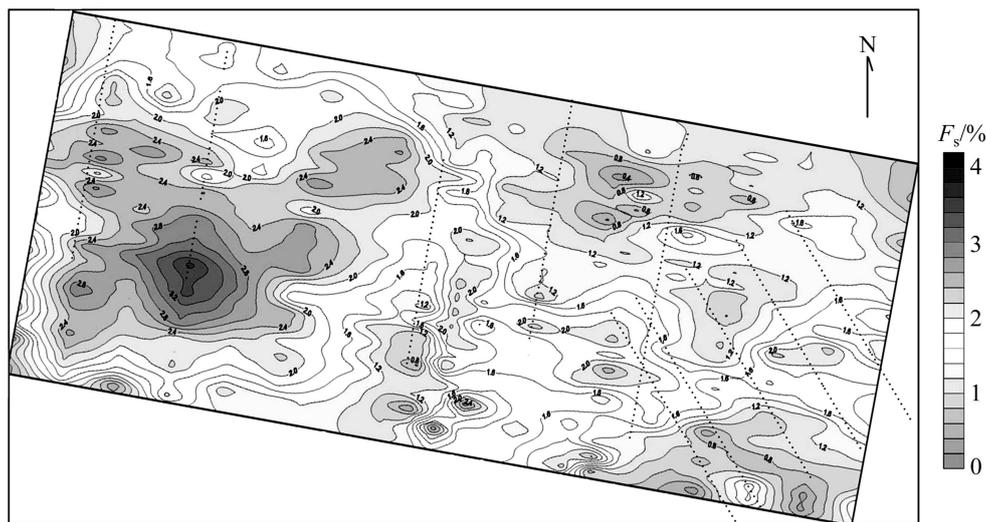


图 7 双频激电中间梯度法扫面测量结果等值线图(图中黑色点为 CSAMT 测量点)

Fig. 7 Sweep surface measurement result contour map of intermediate gradient method using dual-frequency induced polarization

表 2 不同岩系地球化学元素测量结果

Table 2 Measurement results of geochemical elements with different rock series

地层	岩性	$w/10^{-6}$								
		Cu	Pb	Zn	Au	Ag	As	Sb	Bi	Co
$O_3tn^3$	热水沉积岩系	574	18	48	3.3	985	11	0.6	1.2	18
$O_3tn^2$	其他岩类	30	25	68	2.9	157	9	0.8	0.6	15
$O_3tn^2$	其他岩类	18	33	83	1.3	144	5	0.6	0.4	18

域不存在, 故在表 2 中没有列出。

从表 2 可以看出, 本区 Cu、Pb、Zn 和 Ag 在上奥陶统滩涧山群地层较上泥盆统托牛山组有较高的背景值, 特别 Cu、Zn 和 Pb 在热水沉积岩中富集程度高, Au 和 Ag 在上奥陶统滩涧山群  $O_3tn^2$  岩组热水沉积岩地段有一定程度的富集。

### 3.3 效果分析

#### 3.3.1 剖面逐级反演实际剖面分析

以本区的 0 号测线为实验剖面进行分析。图 8(a) 所示为初始模型以采集视电阻率和卡尼亚深度作为初始模型直接进行二维反演得到的结果; 图 8(b) 所示为一维最小二乘反演结果作为二维共轭梯度反演的结果; 图 8(c) 所示为以一维 Bostick 反演结果作为二维反演初始模型进行 Occam 反演得到的结果; 图 8(d) 所示为结合地质进行的物探资料解译剖面。

从上述结果可以看出, 任何一种反演方法都不能完全进行地质解译, 但经过逐级反演能够较好地分辨

出断层、不同岩层接触带, 再结合图 7 对应激发极化法的视幅频率信息可找出异常, 最后结合地质填图、地球化学原生晕信息就可确认是否为矿致有用异常<sup>[18-19]</sup>。

#### 3.3.2 三维切片结果解译

为了全面分析全区域的地层和岩体空间展布状态, 将本次实测的 10 条 CSAMT 数据进行逐级反演, 绘制成三维空间切片图, 如图 9 所示。

参考表 1 所测参数范围, 综合利用地质和地球化学信息, 推测本区的空间立体构造如图 10 所示。

图 10 中, 推测该区内主要存在两个大断裂, 分别为正断层 F 和逆断层 F1, 矿脉受这两个断裂带的张性力控制, 张力造成底层内部或者岩性接触带附近出现容矿空间, 深部热液在地质运动(包括物理的、化学的等)作用下矿物质粒子经过若干年逐步积累达到工业标准可开采的含量范围, 形成了工业矿床。矿区西部主要成矿岩体为安山岩体, 东部为奥陶统滩涧山群的混合岩体。

#### 3.3.3 成矿远景评价与分析

分布于上奥陶统滩涧山群的热水沉积岩、火山碎屑沉积岩和碳酸盐岩组合为特征的岩石组合表明滩涧山群是柴北缘 Cu、Pb 和 Zn 多金属的重要赋矿层位。物探激电异常分带性明显, 与地质填图平面特征吻合好, 异常中已有铜铅锌矿(化)点发现, 为进一步工作提供了基础。

本区受 F 断层和 F1 断层控制成矿, 是明显的张性断裂构造, 推测 F 贯穿于整个矿区。矿(化)体分布于该区域内主要断层的次级断裂及其构造中, 与地表

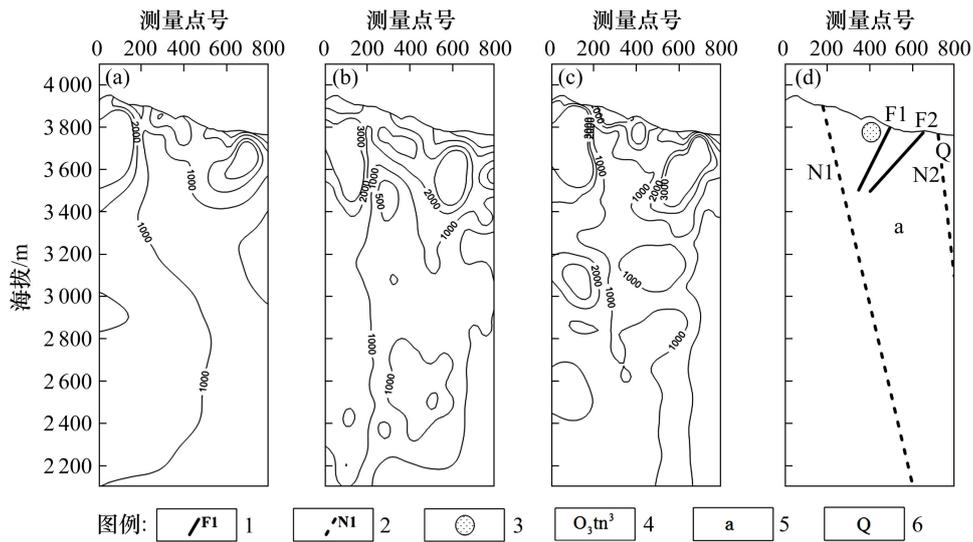


图 8 0号测线 CSAMT 方法数据反演及解释图：1—断裂；2—岩性接触带；3—矿化体；4—奥陶系砂岩；5—英安岩；6—第四系

Fig. 8 Inversion and interpretation results with CSAMT method of No. 0 line: 1—Fault; 2—Lithologic contact; 3—Mineralization body; 4—Sandstone of Ordovician; 5—Dacite; 6—Quaternary

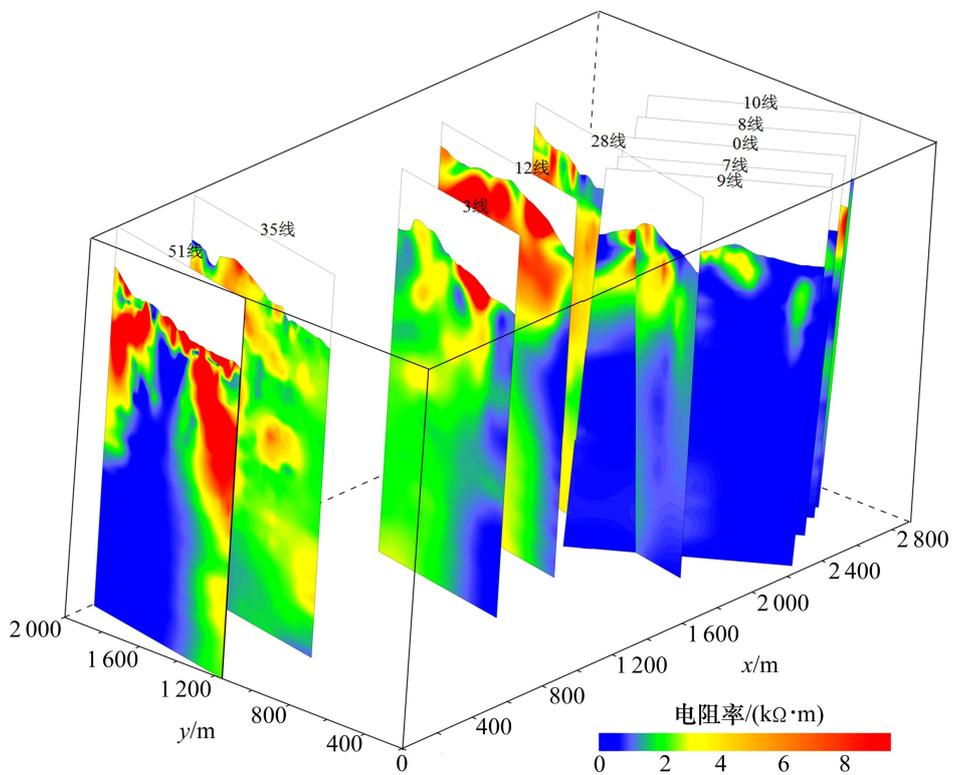


图 9 CSAMT 数据逐级反演结果三维切片图

Fig. 9 3D slice map of CSAMT progressively inversion results

激电扫面异常吻合的地方成矿可能性较大，具有良好的前景。矿区的矿种可能性是西部以铅锌矿为主，东部以铜矿为主。

### 3.3.4 钻探结果验证

在 0 号线布置了钻孔 ZK001 用以查证物探异常是

否具有成矿意义，钻孔深度 508.12 m，钻孔斜度为 80.75°，在深度 98.87 m 时打到 Cu1 矿带，根据地表露头，大致确定了此矿化带的走向为 44.5°，走向和矿区主要断裂带及构造带呈大致平行状态；F1 断裂在深度 421.5 m 和钻孔相遇，推测此断裂较倾，达 62°；均

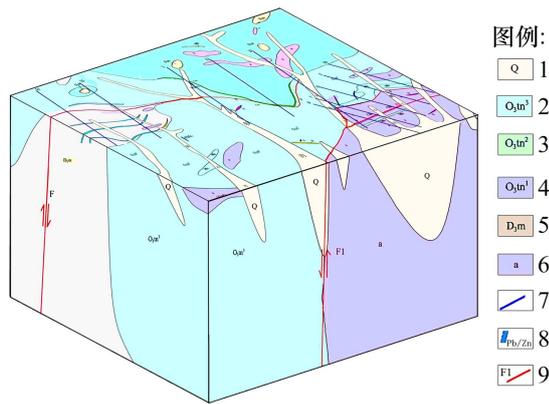


图 10 三维地质解释图: 1—第四系; 2—上奥陶统滩洞山群砂岩岩组; 3—上奥陶统滩洞山群片岩岩组; 4—上奥陶统滩洞山群火山岩组; 5—安山岩; 6—英安岩; 7—CSAMT 测线; 8—推测矿(化)体; 9—断层

Fig. 10 3D geological interpretation map: 1—Quaternary; 2—Sandstone of Ordovician; 3—Schist of Ordovician; 4—Volcanic rock of Ordovician; 5—Andesite; 6—Dacite; 7—CSAMT survey line; 8—Mineralization zone; 9—Fault

与物探成果预测相一致。

## 4 结论

1) 通过数值试验和实际探测应用, 验证了可控源数据逐级反演的可行性及正确性。

2) 数值计算结果表明, 通过逐级反演, 数据反演精度和地电断面的形态更趋近于设置模型。

3) 一维 Bostick 反演结果作为二维反演初始模型进行 Occam 反演在实例中效果最好, 这种方法对地层地表低阻体的静态效应引起的等值线异常具有压制作用。

4) 进一步证实了在复杂地质条件下的电磁法频率域测深的分辨率有待改进问题, 得出了“电磁找构造, 激电找异常”的金属矿地球物理勘探的一般性结论。

5) 实例分析中, 科学地将地质、物化探已有信息运用到地质解译过程, 为地球科学寻找金属矿床积累了有益经验。

### 致谢

在论文的写作过程中, 得到了冯万杰博士在计算 2.5 维 CSAMT 正演响应模型时的指导, 在地质解译过程中青海省国土资源厅地调项目评审专家张允胜教授

级高级工程师提供了极大帮助, 在此深表感谢!

## REFERENCES

- [1] 中华人民共和国国土资源部. 国土资源部找矿突破战略行动纲要 (2011-2020) 的通知 [EB/OL]. [2012-06-22]. [http://www.gov.cn/zwgk/content\\_2166982.htm](http://www.gov.cn/zwgk/content_2166982.htm). Ministry of land resources of the people's republic of China. The strategy platform for prospecting breakthrough action from MLR of china (2011-2020) [EB/OL]. [2012-06-22]. [http://www.gov.cn/zwgk/content\\_2166982.htm](http://www.gov.cn/zwgk/content_2166982.htm).
- [2] 中华人民共和国国土资源部. 关于促进深部找矿工作指导意见 [EB/OL]. [2008-01-08]. [http://www.gov.cn/gzdt/08/content\\_852781.htm](http://www.gov.cn/gzdt/08/content_852781.htm). Ministry of Land Resources of the People's Republic of China. The guidance of deep exploration work on the promotion [EB/OL]. [2008-01-08]. [http://www.gov.cn/gzdt/08/content\\_852781.htm](http://www.gov.cn/gzdt/08/content_852781.htm).
- [3] 何继善. 可控源音频大地电磁法 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 1998: 1-201. HE Ji-shan. Controlled source audio magnetotelluric method [M]. Changsha: Central South University Press, 1998: 1-201.
- [4] 于昌明. CSAMT 法在寻找隐伏金矿中的应用 [J]. 地球物理学报, 1998, 41(1): 133-138. YU Chang-ming. Application of CSAMT method to looking for hidden gold mine [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1998, 41(1): 133-138.
- [5] CECILE S, MICHEL R, JEAN L J, PATRICK B. Hydrothermal system mapped by CSAMT on Karthala volcano, Grande Comore Island, Indian Ocean [J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 48: 143-152.
- [6] 程辉, 李帝铨, 底青云, 付长民, 王若. 基于 CSAMT 法的地基基础评价 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(4): 1561-1567. CHENG Hui, LI Di-quan, DI Qing-yun, FU Chang-min, WANG Ruo. Foundation evaluation based on CSAMT method [J]. Central South University: Science and Technology, 2010, 41(4): 1561-1567.
- [7] BOEMER D E, WRIGHT J A, THURLOW J G, REED L E. Tensor CSAMT studies at the Buchans mine in central Newfoundland [J]. Geophysics, 1993, 58(1): 12-19.
- [8] CHEN W J, LIU H T, LIU J M. Integrated geophysical exploration for the Longtoushan Ag-Pb-Zn deposit in the southeast of the Daxinganling Mountains, Inner Mongolia, northern China [J]. Exploration Geophysics, 2010, 41(4): 279-288.
- [9] YUJI M. 2D electromagnetic modeling by finite-element method with a dipole source and topography [J]. Geophysics, 2000, 65(2): 465-475.
- [10] 底青云, MARTYN U, 王妙月. 2.5 维有限元法数值反演 [J].

- 石油地球物理勘探, 2006, 41(1): 100-106.
- DI Qing-yun, MARTYN U, WANG Miao-yue. 2.5D finite-element CSAMT numerical inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(1): 100-106.
- [11] 雷 达. 起伏地形下 CSAMT 二维正反演研究及应用[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 982-993.
- LEI Da. Studies and application of 2D CSAMT modeling and inversion with a dipole source and topography[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(4): 982-993.
- [12] WANNAMAKER P E. Tensor CSAMT survey over the Ulphur springs thermal Valles Caldera, New Mexico, USA. Part II: Implications for CSAMT technology[J]. Geophysics, 1997, 62(2): 466-476.
- [13] 邓晓宏, 武军杰, 王兴春. 危机矿山电(磁)方法有效性对比 [R]. 廊坊: 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 2012: 1-211.
- DENG Xiao-hong, WU Jun-jie, WANG Xing-chun. The comparative of crisis mines electric (magnetic) methods' efficacy[R]. Langfang: Institute of Geophysical and Geochemical Exploration of Geological Sciences of Chinese Academy, 2012: 1-211.
- [14] 周俊杰, 强健科, 汤井田, 王海青. 具有干预机制的 CSAMT 数据一维最优化反演[J]. 地震地质, 2010, 32(3): 453-464.
- ZHOU Jun-jie, QIANG Jian-ke, TANG Jing-tian, WANG Hai-qing. 1D optimization inversion of CSAMT data with intervention mechanism[J]. Seismology and Geology, 2010, 32(3): 453-464.
- [15] GROOT-HEDIN D C, CONSTABLE S C. Occam's inversion to generate smooth two dimensional models from magnetotelluric data[J]. Geophysics, 1990, 55(12): 1613-1624.
- [16] 柳建新, 童孝忠, 郭荣文, 李爱勇, 杨 生. 大地电磁测深法勘探—资料处理、反演与解释[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 58-98.
- LIU Jian-xin, TONG Xiao-zhong, GUO Rong-wen, LI Ai-yong, YANG Sheng. The magnetotelluric sounding prospecting-data processing, inversion and interpretation[M]. Beijing: Science Press, 2012: 58-98.
- [17] 汤井田, 何继善. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005: 1-336.
- TANG Jin-tian, HE Ji-shan. Methods and applications of CSAMT[M]. Changsha: Central South University Press, 2005: 1-336.
- [18] 柳建新, 曹创华, 童孝忠, 郭荣文, 谭辉跃, 曹志雄. 综合物探方法在青藏高原某钼多金属矿的勘查效果[J]. 地质与勘探, 2012, 48(6): 1188-1198.
- LIU Jian-xin, CAO Chuang-hua, TONG Xiao-zhong, GUO Rong-wen, TAN Hui-yue, CAO Zhi-xiong. Application of integrated geophysical methods to a molybdenum polymetallic deposit in the Tibetan Plateau[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(6): 1188-1198.
- [19] WILLAM K M, ANIMESH M, SHAMA S P, SAIBAL G, SURAJIT M. Integrated geological and geophysical studies for delineation of chromite deposits: A case study from Tangarparha, Orissa, India[J]. Geophysics, 2011, 76(5): B173-B185.
- [20] 王大勇, 李桐林, 高 远, 方含珍, 赵广茂. CSAMT 法和 TEM 法在铜陵龙虎山地区隐伏矿勘探中的应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(6): 1134-1140.
- WANG Da-yong, LI Tong-lin, GAO Yuan, FANG Han-zhen, ZHAO Guang-mao. The application of CSAMT and TEM to exploration buried deposits in Longhu mountain area at Tongling, Anhui Province[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39(6): 1134-1140.
- [21] 潘 彤, 罗才让, 伊有昌, 钱 明. 青海省金属矿产成矿规律及成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 136-142.
- PAN Tong, LUO Cai-rang, YI You-chang, QIAN Ming. Qinghai metal ore mining law and metallogenic prognosis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 136-142.
- [22] 青海省地质矿产局. 青海省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 41-62.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province. Regional geology of Qinghai Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 41-62.
- [23] 陈树云, 伊有昌, 吴小霞, 范丽琨, 周晓中, 赵 萍. 青海东昆仑东段区域成矿地质特征及金属矿产找矿方向研究[J]. 黄金科学技术, 2007, 15(4): 9-17.
- CHEN Shu-yun, YI You-chang, WU Xiao-xia, FAN Li-kun, ZHOU Xiao-zhong, ZHAO Ping. The mineralization geological feature and the metal minerals prospecting research direction in east section of east Kunlun mountains of Qinghai region[J]. Gold Science and Technology, 2007, 15(4): 9-17.

(编辑 陈卫萍)