doi: 10.11720/wtyht.2019.0261

朱自串,周丹,李德文,等.音频大地电磁测深法在老挝万象盆地钾镁盐矿产勘探中的运用效果[J].物探与化探,2019,43(6):1268-1276.ht-tp://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0261

Zhu Z C, Zhou D, Li D W, et al. The application of natural field audio magnetotellurics sounding to the exploration of the Vientiane basin potassium salt deposit in Laos [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6):1268–1276. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0261

音频大地电磁测深法在老挝万象盆地 钾镁盐矿产勘探中的运用效果

朱自串,周丹,李德文,余润龙

(北京达创高科科技有限公司,北京 102445)

摘要:老挝万象盆地位于呵叻盆地北缘,呵叻盆地钾盐矿是世界上最大的固体钾盐矿床之一,矿体以厚层状光卤 石为主,局部伴有薄层钾石盐矿体。在万象盆地东北部某矿区内完成了3条音频大地电磁测深(AMT)剖面,剖面 二维反演结果直观反映了塔贡组盐岩层起伏及构造分布情况,L2线西部、L3线中西部似球状高阻凸起,钻孔揭露 为盐岩层隆起区,盐岩层埋深变浅、厚度增大,隆起区两侧构造发育,AMT二维反演结果模型基本反映出盐隆起全 貌;L1线钻孔揭露的盐岩层顶板埋深与二维电性模型推断结果吻合度高。总之,通过与剖面附近钻孔及已有地质、 物探成果资料对比,说明 AMT 所得二维电性模型反映的盐岩层赋存状态、构造发育部位基本可靠,因此通过 AMT 反演结果反映的盐岩层、构造特征可为找矿靶区优选、钻孔选址、成矿研究提供依据,对今后呵叻盆地钾盐矿产勘 查物探方法选取也有积极的参考意义。

0 前言

钾盐矿作为植物所需氮、磷、钾三大元素之一钾 肥的主要原材料,关乎祖国农业发展大计,而钾盐矿 产是我国大宗急缺矿种之一,每年超过半数消耗量 需要从国外进口,价格受制于人,严重制约我国农业 生产^[1]。呵叻高原钾盐矿作为世界最大固体钾盐 矿床之一,与我国距离近、投资环境好,矿区所处的 老挝和泰国都是中国友好邻邦,相对于世界其它主 要钾盐矿区具有地缘、政治优势,目前已有十余家中 国企业在老挝、泰国进行钾盐矿产勘探、开发投资, 尤其在老挝的投资进展最快,目前已有开元、中农等 企业生产的钾盐开始供给国内市场^[2-3]。

万象盆地位于呵叻盆地北缘,钾盐矿石以光卤 石为主,厚度一般几十米至200米左右,目前钻孔揭 露的最大厚度为238m,少数钻孔见钾石盐矿层^[4], 但通常厚度较薄、层位不稳定、横向连续性差,多不 具备经济意义。光卤石矿体主要赋存于古近系塔贡 组下段(E₁tg¹)顶部附近,埋深几十到六、七百米不 等,地表均被第四系覆盖、地形起伏小、盆地内无基 岩出露,地表地质调查难于奏效^[4-5]。万象盆地总 体地质工作程度较低,仅2001年左右云南省地矿局 做过相对系统的1:10万地质调查、重力测量等工 作,其余均为各投资企业在所属矿区内开展的针对 性勘查,目前主要以1:5万高精度重力测量为主,并 以此作为勘探钻孔部署的主要依据。部分企业也开 展过少量二维地震勘探工作,但由于使用炸药震源, 当地民怨极大,协调困难,而且施工成本相对较高, 难于开展大面积工作。近几年的钻探结果表明,由 于靠近盆地边缘,地质构造、矿体赋存状态复杂程度 远超预期,单靠重力测量结果指导布孔依据不足、失

作者简介:朱自串(1985-),男,云南省腾冲市人,工程师,本科学历,2008 年毕业于中国地质大学(北京)地球物理专业,主要从事大地电磁法的勘探运用研究工作。

收稿日期: 2019-05-10; 修回日期: 2019-08-28

败钻孔(无钾盐矿层)较多。为此,受国内某投资公 司委托,我们对其所属区块及邻近矿区钻井、测井结 果进行分析研究,发现万象盆地钾盐矿储层----古 近系塔贡组不同岩性层之间电性差异明显,具备开 展电法勘探的地球物理前提:矿区内人文活动少、无 明显工业干扰、电磁环境优越,适合开展以天然电磁 场为场源的大地电磁测深工作。因此提议委托方在 矿区内布置了三条 AMT 测深剖面,目的在于通过 AMT 剖面成果了解探测区内盐岩层展布特征及可 能存在的地质构造,并结合钻孔结果分析大地电磁测 深在本区地质条件下对钾盐矿勘探的方法有效性。

地质与地球物理概况 1

1.1 地质概况

万象平原位于呵叻盆地西北三角形地带, 面积 5452 km²,据区域地质资料记载,盆地内地层自下而

上为中侏罗统班辛黑组(J,bx),白垩系普帕纳帕陶 山组 (K_1pp) 、班纳德组 (K_1bn) 、班塔拉组 (K_1bt) ,古 近系塔贡组(E₁tg)、班塔博组(E_{1.2}bt)及第四系 (0)^[4,6](图1)。本区钻井终孔地层多为塔贡组下 段石盐层,个别钻孔为班塔拉组(K,bt)顶部碎屑岩, 塔贡组上覆地层为第四系,厚度 4.34~112.29 m,缺 失班塔博组(E1,bt)。塔贡组为钾盐赋矿层位,矿石 类型以光卤石为主,局部赋存钾石盐矿。塔贡组可 分为三个沉积旋回(下段、中段和上段),每个旋回 由碎屑岩和膏盐岩组成,光卤石矿层主要赋存于塔 贡组下段(E₁tg¹)上部或顶部^[5-8]。钻孔资料显示 塔贡组下段盐岩层在盆地内稳定存在(但其顶部或 上部不一定存在光卤石矿层),盐岩层顶板埋深一 百多至五百多米不等,本次工作区埋深多在500~ 600 m,底板埋深则通常在 650~750 m 左右。部分区 域上段和中段盐岩层存在不同程度缺失,尤其在构 造复杂区段缺失更为严重,构造发育区还存在泥岩



1-中二叠统;2-中下、中侏罗统;3-下白垩统;4-塔贡组;5---班塔博组;6--白垩纪二长花岗斑岩;7--角度不整合界线;8-平行不整合 界线;9—整合界线;10—性质不明断层;11—平移断层;12—隐伏断层;13—背斜及编号;14—向斜及编号

1-middle Permian; 2-middle-lower Jurassic; 3-lower Cretaceous; 4-tagong formation; 5-bantabo formation; 6-Cretaceous monzonite graniteporphyry; 7-angular unconformity; 8-parallel unconformity; 9-conformity boundary; 10-fault of unknown property; 11-nucleation fault; 12concealed fault; 13-anticline and their numbers; 14-syncline and their numbers

Fig.1 Geologic structure of Vientiane basin

与石盐交融形成混积岩的现象。受近 EW 向的挤压 或张引活动影响,盆地内构造较发育,以 NNW 向纵 断层、褶皱及近 NS 向横断层为主,其中塔贡向斜为 控矿构造^[4],图 1 中③号向斜为塔贡向斜^[4,9]。本 次工作区完成的 1:5万重力测量结果(图 2)显示测 区附近可能存在多条 NNE、NE 向断层,具体见图 2 中红色虚线位置,推断断层附近等值线有明显的带 状负异常特征,等值线密集、横向梯度变化大。

1.2 地球物理概况

该区目标层段(塔贡组)包括三个沉积旋回,为 盐岩与碎屑岩互层,盐岩层有厚度大、纯度高、结晶 好等特点,碎屑岩以泥质、粉砂质成分为主,含少量 石膏、石盐等。表1为测区附近5个钻孔地层电阻 率统计表(钻孔编号为虚拟编号),每个层段幅值为 该地层段三侧向测井结果平均值。这几口井第四系 厚度在20m以内,电阻率幅值与下伏塔贡组上段泥 岩层相近,未做单独统计。从表中可以看出同一地 层电阻率在不同钻孔测井结果中有一定差异,但同 一钻孔内各地层的相对关系是一致的,塔贡组地层 电阻率由浅至深的变化特征为:低(E₁tg³⁻²)→高 (E_1tg^{3-1}) → $\mathfrak{K}(E_1tg^{2-2})$ → $\ddot{\mathsf{B}}(E_1tg^{2-1})$ → $\mathfrak{K}(E_1tg^{1-2})$ →次高(E_1tg^{1-1} 光卤石矿层)→高(E_1tg^{1-1} 石盐)。这 一物性差异说明本次在区内开展电磁法探测有充分 的地球物理基础。万象盆地盐岩层平均密度 1.8~ 1.9 t/m³.砂泥岩层平均密度 2.2~2.3 t/m³.盐岩层与 砂泥岩密度差异明显。盐岩层在本区有相对低密度 特征,已有钻孔表明低重力异常通常与盐岩层埋深 浅、厚度大有关,如图2中条带状负重力异常(蓝色 等值线)区中心部位盐岩层埋深仅百余米,厚度超 过600m;高重力异常则多与盐岩层埋深增大、厚度 变薄相对应,图2中南部正异常区钻孔揭露盐岩层 埋深超过 500 m,厚度仅 200 余米。

表1 钻孔电测井所得塔贡组各地层平均电阻率统计

	Table 1 The avera	age resistivity of	Tagong Tormatio	on stratum by ele	ctric logging	$(\mathbf{\Omega} \cdot \mathbf{m})$
地层名称	ZK1	ZK2	ZK3	ZK4	ZK5	平均值
上泥岩层(E ₁ tg ³⁻²)	10	11	8	12	17	11.6
上石盐层(E ₁ tg ³⁻¹)	491	273	137	26	489	283
中泥岩层(E ₁ tg ²⁻²)	8	17	9	25	10	13.8
中石盐层(E ₁ tg ²⁻¹)	563	299	192	99	497	330
下泥岩层(E ₁ tg ¹⁻²)	17	71	42	22	20	34
光卤石矿层(E ₁ tg ¹⁻¹)	174	152	143	178	392	208
下石盐层 $(E_1 tg^{1-1})$	511	344	224	199	460	348



1-gravity anomaly contour of negative value; 2-gravity anomaly contour of positive value; 3-contour of zero; 4-inference fault; 5-profile of AMT; 6-drilling of finished

图 2 AMT 测线位置及周缘重力异常平面等值线 Fig.2 Location of AMT line and gravity anomaly of nearby area

万方数据

2 数据反演

2.1 数据采集与处理

野外工作布置了 3 条 AMT 剖面——L1、L2 和 L3,共计测点 292 个(见图 2)。3 条剖面均为 EW 向展布,其中 L1 线穿过已有钻孔,点距 40 m,测线 长 1.16 km;L2 和 L3 剖面长度分别为 7.2、9.8 km,贯 穿整个矿权区,L1 与 L2 线距离 200 m,L2 与 L3 线 距离 500 m。如图 2 所示,L2 和 L3 线穿过 1:5 万 重力测量推断的 3 条 NNE 向断层(F1、F2、F3),剖 面点距 20、40、100、200 m 不等,F2 和 F3 断层之间 基本点距 40 m、钻孔附近加密至 20 m,F1、F2 断层之 间点距 100 m,L3 线东端出矿区部分点距为 200 m。 AMT 数据采集使用德国 Metronix 公司生产的 ADU-07e 综合大地电磁法仪,共投入两套设备,仪器编号 233、259。

为保证仪器工作的稳定性和一致性,在工作开 始前和结束后均进行了一致性试验,图 3、图 4 为开 工前两套设备一致性试验所得电道和磁道时间序列 叠加截图,从图中可以看出两台仪器电、磁场信号重 合性好,可以在同一工区内共同使用。

每个测点数据采集时间为 60 min,电极、磁棒按 磁南北、东西布设,原始时间序列剔除干扰段信号 (通过处理软件标记不让其参与后续计算)后经过 快速傅氏变换(FFT)、频谱分析等得到每个测点 xy、 yx方向视电阻率(ρ_s)和相位(φ)曲线。本次数据经 过处理后可用频段为 5~16000 Hz 左右,图 5 为部分 测点预处理所得视电阻率和相位曲线,从图中可以 看出区内除 1000~2000 Hz 附近信号质量较差、视 电阻率和相位跳跃较大外,其余频段所得曲线光滑、 数据质量高,1000~2000 Hz 信号质量下降可能与该 频带天然电磁场信号弱有关。

为了确保数据质量,测区内共完成质量检查点 20个,在剔除局部畸变频点后按规范给出的均方相 对误差计算公式得出工作区视电阻率误差为 ±3.5%,阻抗相位误差为±4.2%,满足规范中检查点 相对误差低于5%的要求。图6为L1线井旁测点原 测量与质检结果视电阻率、相位叠加曲线,从图中可 以看出两次测量所得曲线重合性非常好。



Fig.4 Four channels H field time series of two equipment







图 5 部分测点的视电阻率曲线和相位曲线 Fig.5 resistivity and phase curve of some site



图 6 L1 线井旁原测量与质检结果视电阻率和相位曲线对比 Fig.6 Two ADU's apparent resistivity and phase curve comparison in same site

2.2 数据反演

数据使用二维非线性共轭梯度法(NLCG)反 演,该方法由 Rodi 和 Mackie 在 2001 年提出,是一 种快速、稳定、收敛的二维反演计算方法,其主要优 点是反演时可以避免直接求解雅可比矩阵,大大节 省了计算量,而且与其他一些近似方法不同,不是用 一维雅可比矩阵去构建二维雅可比矩阵,是真二维 反演,具有较高的模型分辨率和反演稳定性,是目前 广泛运用的一种大地电磁反演方法。NLCG 反演目 标函数采用 Tikhonov 等人构建的函数^[10]:

$$\Psi(m) = \Psi_1(m) + \lambda \Psi_2(m) , \qquad (1)$$
$$\Psi_1 = [\mathbf{d} - F(m)]^{\mathrm{T}} \mathbf{V}^{-1} [\mathbf{d} - F(m)] = \mathbf{e}^{\mathrm{T}} \mathbf{V}^{-1} \mathbf{e}^{\mathrm{T}}, \qquad (2)$$

$$\Psi_2 = \lambda \boldsymbol{m}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{L}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{L} \boldsymbol{m}_{\mathrm{O}} \tag{3}$$

式(1)中: $\Psi(m)$ 为反演目标函数, $\Psi_1(m)$ 数据目标 函数项, $\Psi_2(m)$ 为模型数据函数项(模型约束函 数), λ 为正则化因子(或拉格朗日因子)。式(2) 中:d为需要反演的数据向量,m为模型参数向量,F是正演算子,e=d-F(m),是模型拟合差向量。式 (3)中:L为网格单元二阶差分算子,Lm由网格单 元中视电阻率值取对数后乘以拉普拉斯算子所得。 二维反演就是求取目标函数极小值问题^[11],即:

Ψ(m) = Ψ₁(m) + λΨ₂(m) → min 。 (4)
 在对剖面数据进行反演前,先对预处理所得视
 电阻率和相位曲线进行编辑和处理,包括畸变点剔除、阻抗张量分解、主轴旋转3个部分:①标记曲线
 中的跳跃频点,孤立的飞点会影响阻抗张量分解质量、降低反演拟合效果,因此需要将飞点进行剔除,
 不让其参与后续的计算和反演;②阻抗张量分解和

主轴计算,分别利用了 Bahr 分解、相位张量、GB 分 解、完全三参数优化等多种分解方法,结合测区地质 资料对比分析后最终选取了完全三参数优化分解结 果,统计主轴方位 L1 线为 4.8°, L2 线为 16.5°, L3 线 为 16.8°;③将每条剖面数据旋转至主轴方位,并重 新计算每个频点的视电阻率和相位值,此时数据才 是两组相互独立的极化模式,即 TE 和 TM 模式,计 算完成后需重复第一步对曲线中出现的飞点进行剔 除,有明显静位移影响的做静校正处理。

上述预处理过程完成后分别对每条剖面进行 TE、TM、TETM 模式一维和二维反演,二维反演初始 模型半空间电阻率为 100 Ω · m。对比不同极化模 式反演结果,结合区域、区内地质资料,最终 L1 线选 择了 TM 模式反演结果,拟合差 0.98,正则化因子 τ =20;L2 和 L3 线选择了 TETM 联合反演结果,正则 化因子分别为 20 和 10,拟合差分别为 1.39、1.29,三 条测线拟合效果较好。图 7 为三条测线最终二维反 演结果剖面,图中三条剖面的相对位置与实际相符; L2 和 L3 剖面中的红色线条为重力测量推断断层的 大致位置;L1 线中的红色竖线为钻孔位置及深度示 意,紫色箭头所指位置为钻孔揭露的塔贡组上段盐 岩层顶界面位置。

3 运用效果分析

从3条剖面二维反演结果(图7)可以看出,本 区1km以浅电性结构有明显的层状分布特征,多为 似水平层状结构,根据三个剖面电阻率变化特征,测 区地层在纵向上大致可分为三个电性特征层:①近



万方数据

图 7 L1、L2、L3 这一年仅演结未司面示息 Fig.7 2D inversion result of L1、L2 and L3

43 卷

地表至150m左右,电阻率幅值相对较高,横向连续 性差,为高、低阻体相间分布,电阻率幅值一般为十 几至几十欧姆·米:②中部低阻层,深度多在150~ 500 m 左右,电阻率幅值低于 10 Ω · m,该低阻层较 为稳定、横向连续性好:③深部高阻层,电阻率幅值 自 $10 \Omega \cdot m$ 左右随深度增加逐渐升高,除局部高阻 异常区外,电阻率纵向梯度较小,横向等值线多呈似 水平状,在剖面底部附近幅值一般在 50 Ω·m 左 右。根据前述本区各地层电阻率相对关系(表1)及 L1 线上的钻孔揭露结果,上述三个电性特征层中浅 部不均匀高阻层与钻遇的塔贡组上段(E₁tg³⁻²)泥质 粉砂岩、粉砂岩层对应,高阻异常应该是该套地层的 响应,含水性、泥质含量等差异可能是导致该高阻层 横向连续性差的主要因素:中部的低阻层(浅蓝-深 蓝色填充)则与塔贡组上段(E₁tg³⁻²)泥岩层埋深、厚 度相当:低阻层的底部(电阻率幅值高于 $10 \Omega \cdot m$, 图 7 中青色填充部分顶界面) 开始电阻率逐渐升高 则可能是穿过塔贡组上部泥岩层进入盐岩层的标 志,图7中L1 剖面标注的石盐层顶界面为钻孔揭露 结果,对应剖面中的电阻率为 10 $\Omega \cdot m$ 左右,据此 在推断本区盐岩层埋深时,将电阻率幅值为 10Ω . m 的等值线作为进入盐岩层的标志。在上述深部高 阻层顶界面(10Ω·m等值线)之下至剖面底部电 阻率幅值随深度增加逐渐抬升,未反映出塔贡组中、 下段(E₁tg²⁻²、E₁tg¹⁻²)碎屑岩层相对低阻的异常特 征,究其原因可能是这两个层段厚度较薄且每个层 段石盐含量相对较高所致($E_1 tg^{2-2}$ 厚 80 m,上部 75 m 为含盐泥岩;E₁tg¹⁻²厚12m,上部10m为含盐泥岩, 两个层段石盐含量均为20%左右),石盐占比增大 会导致地层电阻率抬升,使之与盐岩层电性差异减 小。

L2 线 1.6 km、L3 线 4 km 附近有两个明显的高 阻凸起,深部高阻层顶界面抬升至 100 m 左右,高阻 体位置与图 2 重力异常图中北东向条带状负异常基 本重合。根据前述地球物理特征,本区地层中盐岩 层密度较低,低重力异常通常是由埋深浅、厚度大的 盐岩层引起,在该负异常带北端附近施工了两个钻 孔,异常带中心附近盐岩层埋深仅百余米,至 635 m (未揭穿)均为高纯度石盐层,负异常带边部(距离 中心位置 1 km 左右)盐岩层埋深就增大至 500~550 m,是典型的盐隆起带。由此说明本区重力等值线 图中展现的低重力异常带也应该是盐隆起(低密度 体)的反应。AMT 二维反演结果在负异常带位置电 阻率有明显的凸起特征,呈似球状高阻异常,异常与 钻孔揭露**阳空凝**起核部埋深相近、宽度相当,盐岩层 又为相对高阻特征,说明该高阻异常是盐岩层隆起 的响应无疑,进一步说明 AMT 反演结果可以较为真 实地反应盐岩层赋存状态。高阻凸起两翼盐岩层埋 深变化快(等值线下降明显)也与隆起两翼陡倾的 特征符合。图 7 中高阻隆起两侧红色线条为重力测 量推断的断层位置,从 AMT 结果推断可能为盐丘两 翼斜坡,局部受盐隆起活动影响可能形成垮塌构造。

根据万象盆地钻探揭露结果,光卤石矿层通常 位于构造活动弱、盐层埋深变化小、产状缓的盐丘附 近,盐丘核部通常矿层厚度最大、埋深最浅[4](班农 刀矿区盐丘核部光卤石矿层厚约 238 m)。L2 剖面 中东部 4.6~6 km、L3 剖面中东部 6.2~8.2 km 附近 10Ω·m等值线之下等值线呈近水平状展布,其东 侧等值线缓慢抬升,说明该段盐岩层埋深、变化小, 构造活动弱,有利于矿层保存,应该是剖面范围内的 有利赋矿区段。L2线4.6km、L3线6.2km以西等 值线埋深变化大,盐岩层顶界面有较明显的波浪状, 还存在一个高阻凸起区,与上述区段埋深差 300 m 左右,重力测量结果也推断高阻凸起附近有构造存 在,说明该区段构造活动比较强烈,不利于成矿或矿 层受后期构造活动影响发生淋漓而流失。L1 线上 的钻孔位于上述构造活动剧烈区和平稳区边界附近 (图7),该孔在610m左右见十余米光卤石矿层(相 对较薄),自160m左右开始不断出现漏浆情况,取 芯结果显示垂向裂隙十分发育。从图7可以看出, L1 和 L2 剖面在钻孔附近埋深 400 m 以下电阻率等 值线有上凸的现象(图中红色椭圆标注位置),这一 特征说明该段盐岩层可能受其西部构造活动的影响 形成局部隆起,仍属于构造活动相对剧烈区,这一隆 起构造可能是导致钻进过程中漏孔严重、垂向裂隙 发育、岩心破碎的主要原因。

图 8 为 L3 线重力异常剖面与 AMT 反演结果对 比。从图中可以看出,剖面 4 km 左右低重力异常与 AMT 反演结果的高阻凸起是完全对应的,说明两种 方法对规模较大的构造均有明显反应。重力剖面自 5 km 左右向东曲线呈近水平状变化,而 AMT 反演 结果则显示盐隆起的边界可能在剖面 6 km 附近,只 是自 5 km 起盐岩层倾角变缓。从这一对比可以看 出,AMT 反演结果对局部构造变化、盐岩层界面埋 深变化的反应更为直观、细致,优于重力测量结果。

综上所述,通过 AMT 反演结果与附近钻孔、重 力测量结果对比认为,AMT 反演结果虽然无法对塔 贡组不同岩性段进行详细划分,但可以直观反映塔 贡组盐岩层顶界面埋深变化情况,从而根据盐岩层 展布特征识别构造位置和盐岩层起伏情况分析构造





活动强度,并以此为依据优选找矿靶区。也就是说, AMT 可作为本地区间接找矿的主要物探手段之一, 尤其适合在高精度重力测量的基础上开展精细测 量,缩小找矿范围,提高钻探成功率。

4 结语

 测区塔贡组中、下段碎屑岩层厚度偏薄、盐 岩占比大,导致电阻率与上下盐岩层差异变小,难于 通过 AMT 反演结果划分不同时段盐岩层及其间的 碎屑岩层(在厚度大、盐岩占比小的区域或许可 行),但可以直观反应塔贡组顶部盐岩层的埋深变 化,并以此推断可能存在的地质构造、盐系地层展布 特征等,达到间接找矿的目的。

2)根据已有钻孔资料,就本区而言,以10Ω・
 m等值线作为进入盐岩层标志的结论合理,与钻孔
 揭露情况吻合度较高。

3) 从 AMT 与高精度重力测量剖面对比结果可 以看出,通过 AMT 反演结果可以获取更多地质信 息,对分析矿体赋存位置、状态等有益,应该在面积 性重力测量结果圈定的找矿靶区内开展高精度 AMT 剖面测量,进一步认识地质特征,缩小找矿范 围,提高钻探成功率。

4) 抽取了不同点距数据进行反演试验,发现点 距为40m反应的盐岩层展布特征清晰,点距加密至 20m无明显改善,当点距大于100m时难于勾绘盐 岩层埋深局部变化(比如L1线钻孔处盐岩层的局 部隆起特征无显示),因此建议使用 AMT 对万象盆 进行地钾盐勘探时点距选择40m 左右,不宜超过 100m,作为成矿研究的控制性剖面点距不宜超过 200m。

5) AMT 二维反演模型推断的盐岩层电阻率幅 值在 10~石方数据 左右,明显低于表 1 所列盐岩层 电阻率,分析可能是受盐岩层上覆低阻泥岩层(电 阻率为10Ω・m左右)的影响所致。

6) AMT 探测深度大、设备轻便、操作简单、对 地表破坏小,相对于重力测量可以更直观的反应盐 岩层展布状态、构造信息等,对找矿工作帮助大,尤 其在构造相对复杂矿区更能体现其有效性,因此可 将本方法作为万象盆地优选勘探手段之一。

参考文献(References):

- [1] 郑绵平,齐文,张永生.中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步 分析[J].地质通报, 2006,25(11):1239-1246.
 Zheng M P,Qi W,Zhang Y S. Present situation of potash resources and direction of potash search in China [J]. Geological Bulletin of China, 2006,25(11):1239-1246.
- [2] 张西营,马海州,韩元红.泰国—老挝呵叻高原钾盐矿床研究现 状及展望[J].地球科学进展,2012,27(5):549-556.
 Zhang X Y, Ma H Z, Han Y H.Recent status and prospects on potash deposits on Thailand—Laos Khorat plateau [J]. Advances in Earth Science, 2012,27(5):549-556.
- [3] 李文光.开发泰国-老挝钾盐矿产资源[J].中国地质,1998(9): 47-48.

Li W G. Exploiting the potassium salt sesources in Thailand [J]. Geology of China, 1998(9):47-48.

- [4] 郭远生,吴军,朱延浙,等.老挝万象钾盐地质[M].昆明:云南 科技出版社, 2005.
 Guo Y S, Wu J, Zhu Y Z, et al. Potassium geology of Vientiane in Laos [M]. kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2005.
- [5] 王少华.老挝万象平原塔贡矿区钾石盐矿层特征及其勘探开发 意义[J].化工矿产地质, 2012,34(4):226-230.
 Wang S H. Tagong mining area halosylvite ore bed features and exploration and development significance of Vientiane plain in Laos
 [J]. Geology of Chemical Minerals, 2012,34(4):226-230.
- [6] 郭远生,徐世光,吴军,等.老挝万象平原钾盐资源[J].无机化 工信息,2004,3:5-9.
 Guo Y S, Xu S G, Wu J, et al. Potash resources of Vientiane plain in Laos [J]. Inorganic Chemical News,2004,3:5-9.
- [7] 冯明刚,吴军,韩润生,等.老挝万象地区含盐系地层[J].云南

地质,2005,24(4):407-413.

Fang M G, Wu J, Han R S, et al. The salt-Bearing strata in Vientiane plain [J]. Geology of Yunnan, 2005, 24(4):407-413.

[8] 周国兴.老挝万象平原钾盐矿床沉积特征地震解释[J].中国煤炭地质,2012,24(8):71-76.
 Zhou G X. Seismic Interpretation of Potash Deposit Sedimentary

Characteristics in Vientiane Plain, Laos [J].Coal Geology of China, 2012,24(8):71-76.

[9] 朱延浙.老挝万象平原钾盐矿床[J].地质与资源, 2008, 17
 (1):45-49.

Zhu Y Z. The Potash deposits in Vientiane plain, Laos [J]. Geology and Resources, 2008, 17(1):45 – 49.

[10] 薛帅.大地电磁各向异性介质正演与 NLCG 反演研究[D].长沙:中南大学,2013.

Xue S. Magnetotelluric forward in anisotropic medium and NLCG inversion research [D]. Changsha: Central South University, 2013.

[11] 陈小斌,赵国泽,汤吉,等.大地电磁自适应正则化反演算法
[J].地球物理学报,2005,48(4):937-946.
Chen X B,Zhao G Z,Tang J, et al. An adaptive regularized inversion algorithm for magnetotelluric data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005,48(4):937-946.

[12] 陈小斌,赵国泽,马宵.关于 MT 二维反演中数据旋转方向的选

择问题初探[J].石油地球物理勘探(非地震), 2008,43(1): 114-128.

Chen X B, Zhao G Z, Ma X. Preliminary discussion on selecting rotation direction in 2-D MT inversion [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008,43(1):114 – 128.

- [13] 朱培民,王家映.地球物理资料非线性反演方法讲座-六——共 轭梯度法[J].工程地球物理学报,2008,5(4):381-386.
 Zhu P M, Wang J Y. Lecture on non-linear inverse methods in geophysical data (6)—Conjugate Gradient Method [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008,5(4):381-386.
- [14] 陈向斌,吕庆田,张昆,等.大地电磁测深反演方法现状与评述
 [J].地球物理学进展,2011,26(5):1607-1619.
 Chen X B,Lv Q T,Zhang K, et al. Review of magnetotelluric data inversion methods [J]. Progress in Geophysics, 2011,26(5): 1607-1619.
- [15] 蔡军涛,陈小斌.大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(二)——反演数据极化模式选择[J].地球物理学报, 2010,53(11):2703-2714.

Cai J T, Chen X B. Refined techniques for data processing and two — dimensional inversion in magnetotelluric II : Which data polarization mode should be used in 2D inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(11):2703 – 2714.

The application of natural field audio magnetotellurics sounding to the exploration of the Vientiane basin potassium salt deposit in Laos

ZHU Zi-Chuan, ZHOU Dan, LI De-Wen, YU Run-Long

(Beijing Dachuang High Tech Science & Technology Co., Ltd., Beijing 102445, China)

Abstract: Located on the north margin of Nakhon-Khorat basin, the Vientiane Basin of Laos has one of the largest solid potash deposits in the world. The main orebody is closely related to thick-bedded Carnallite, and locally associated with thin-bedded potassium. The authors' company has completed 3 AMT profiles in a mining area in northeastern Vientiane Basin. The 2D inversion results reflect directly the fluctuation of salt beds in Tagong Formation and the distribution of structures. The spherical high-resistivity uplifts exist in the western part of Line L2 and the central and western part of Line L3. Drilling detected the spherical high-resistivity uplift as the salt bed with salt layer becoming shallower and its thickness becoming larger. The structures on both sides of the uplift area are well developed. AMT 2D inversion model basically reflects the salt layer uplift completely. The roof burial depth of salt rock exposed by L1 line boreholes is in good agreement with the result of two-dimensional electrical model inference. In a word, through the comparison between the AMT 2D inversion models and the data of boreholes near the profiles as well as the results of geological and geophysical prospecting, it is shown that the 2D electrical model obtained by AMT reflects the occurrence state of salt beds and the location of structural development. Therefore, the characteristics of salt beds and the structures reflected by AMT inversion models can provide the evidence for the optimization of prospecting target areas, selection of drilling sites and the metallogenic research. The results obtained by the authors provide a positive reference for the selection of geophysical methods for potash mineral exploration in the future.

Key words: natural field audio magnetotellurics; resistivity; Vientiane basin of Laos; Carnallite deposit; Tagong Formation of Paleogene