

电法联合解释在覆盖区矿产勘查中的应用

戚志鹏, 李 貅, 钱建兵, 楚 岩, 张 旭

长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710054

摘要: 覆盖较厚的区域地球物理异常较弱, 尤其是危机矿山二次空间探矿的人文干扰较大, 从而使找矿难度增加。为了开展覆盖区隐伏矿产资源的勘查工作, 应用信号较强的人工源工作方式, 分别采用瞬变电磁法、可控源音频大地电磁法和激发极化法在同一矿区进行勘查。在理论上分析了这3种方法结合的优势, 使3种方法在深度电阻率断面上互相校正、互相补充。在甘肃某区进行金属矿勘查时, 采用3种方法组合进行联合解释, 取得了较好的探矿效果, 表明多电法综合进行覆盖区找矿是一种行之有效的途径。

关键词: 联合解释; 激发极化法; 瞬变电磁法; 可控源音频大地电磁法; 覆盖区; 成矿预测; 矿床; 地球物理。

中图分类号: P319

文章编号: 1000-2383(2012)06-1199-10

收稿日期: 2012-07-19

Application of Electrical Joint Interpretation Method in Mineral Exploration of Coverage Areas

QI Zhi-peng, LI Xiu, QIAN Jian-bing, CHU Yan, ZHANG Xu

School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: The geophysical anomalies are very weak in mineral prospecting of the areas with thick covering layer, especially in the second exploration of crisis mines where the cultural disturbances are strong, which makes it more difficult for ore prospecting. In order to carry out the explorations for hidden ore deposits in coverage areas, we adopt three methods with artificial source, namely, transient electromagnetic method (TEM), controlled source audio-frequency magnetotelluric (CSAMT) and induced polarization (IP) respectively, whose signals are strong enough for prospecting in the working areas. In addition, we have analyzed the advantages of the combination of these three methods in theory. It is found that the three methods can not only complement with one another in depth but also correct one another in interpretation. The electrical joint interpretation method has achieved a satisfying result in metal prospecting in Gansu Province, where these three methods complement and validate each other well. Therefore, the electrical joint interpretation method provides an effective way for mineral exploration in coverage areas.

Key words: joint interpretation method; induced polarization; transient electromagnetic method; controlled source audio-frequency magnetotelluric; coverage areas; ore prospecting; ore deposits; geophysical.

近年来,电法勘探技术有了飞跃性的发展,这些方法在矿产资源勘查中发挥了重要作用(刘洪涛等,2004)。但是在覆盖较厚、地表无矿体出露迹象或露头不好以及深部找矿时,由于方法的局限性和多解性,单一的方法很难达到理想的效果(丁绪荣等,1980;刘光鼎和郝天珧,1995)。为了弥补单一方法的不足,实现覆盖区及深部二次空间探矿,综合地球物

理方法得到了广泛的应用(崔天秀,1995;李景朝等,2002;葛双成等,2006;涂广红等,2008;崔敏利等,2010),更有学者提出了多参数联合反演方法(敬荣中等,2004;于鹏等,2006;陈洁等,2007)。刘洪涛等(2004)利用甚低频法、连续电导率成像(EH4)、可控源音频大地电磁(CSAMT)方法对赤峰柴胡栏子金矿进行了联合解释;陈伟军和刘洪涛(2009)利用综

合地球物理方法发现了内蒙赵家围子银铅锌多金属矿;薛融晖等(2011)利用激发极化法(IP)、可控源音频大地电磁(CSAMT)、磁法,对广东韶关某地找矿进行了综合地球物理解释;孙燕等(2011)利用综合地球物理方法在某多金属矿找矿中取得了较好的效果. 国外,地球物理勘探方面综合解释得到了成功应用,联合反演方法研究也取得了一定进展(Hering *et al.*, 1995; Abubakar and Van den Berg, 2000). 在矿产资源勘查方面地球物理方法的综合应用均取得了满意的效果(李景朝等, 2002; 周立国等, 2009; 田文法等, 2010),因此多种物探方法综合解释是地球物理探矿的发展趋势.

本文依托中国地质调查项目,进行覆盖区综合地球物理方法解释. 根据覆盖区矿产资源勘查的特点,选择探测深度大、抗干扰能力强、施工方便的地球物理方法. 电法勘探是矿产资源勘查的主要手段,在过去的实践中取得了很好的效果,鉴于此方法选择以电法勘探为主,为了满足抗干扰的要求,采用主动源方式. 通过比较,笔者选择激发极化法(IP)、可控源音频大地电磁(CSAMT)、瞬变电磁(TEM) 3种方法组合进行综合解释实现覆盖区矿产资源勘查,并通过甘肃某矿区深部二次空间探矿验证 3 种方法联合解释的有效性.

1 IP、CSAMT 和 TEM 的特点及联合解释原理

1.1 IP、CSAMT 和 TEM 的特点

激发极化法(IP)以地下岩矿石之间电化学性质

差别为基础,通过观测人工建立的直流或交流激电场的分布规律,提取极化率和视电阻率参数进行找矿的一个电法勘探分支(何继善, 1990b). 激发极化法是金属硫化矿床和石墨矿勘查的主要手段,特别是当电阻率与围岩相差不大时,较其他方法更为有效(李帝铨等, 2007; 余传涛等, 2008). 这是由于激发极化法不仅提取地下介质的电阻率参数,还提取极化率参数. 激发极化法的有效探测深度主要与发射电极距有关,范围为 $(1/3 \sim 1/2)AB/2$,其中 AB 为发射电极 A 、 B 之间的距离(何继善, 1990b; 汪玉琼, 2008).

CSAMT 即可控源音频大地电磁,基于电磁波传播理论和麦克斯韦方程组(何继善, 1990a). 由于大功率人工源的引入,该方法相对于大地电磁法(MT)在信噪比以及数据可靠性等方面有了更大的提高,因此该方法自 20 世纪 80 年代兴起以来在矿产、水文、煤田勘探等领域得到了广泛的应用(张慧等, 2008). CSAMT 的发射和接收是分离的,接收机一般在垂直发射方向的 $2 \sim 8$ km 之间的平面位置,测量区位于距发射机垂直距离 $4 \sim 8$ km 的扇形区域. 其主要提取参数为电阻率. 探测深度与发送频率有关,一般有效探测深度为 1 km 左右.

TEM 即瞬变电磁法,是利用接地电极或回线源通以脉冲电流,在地下建立起一次脉冲磁场,在一次场间隙期间,利用线圈观测地下产生的二次涡流场,根据观测信号来判断地下介质的电性变化情况(朴化荣, 1990; 牛之璉, 1993; 李貅, 2002). 主要提取参数为电阻率. 瞬变电磁法是在一次场断电后测量纯二次场,不存在一次场的干扰,对地下介质的电性

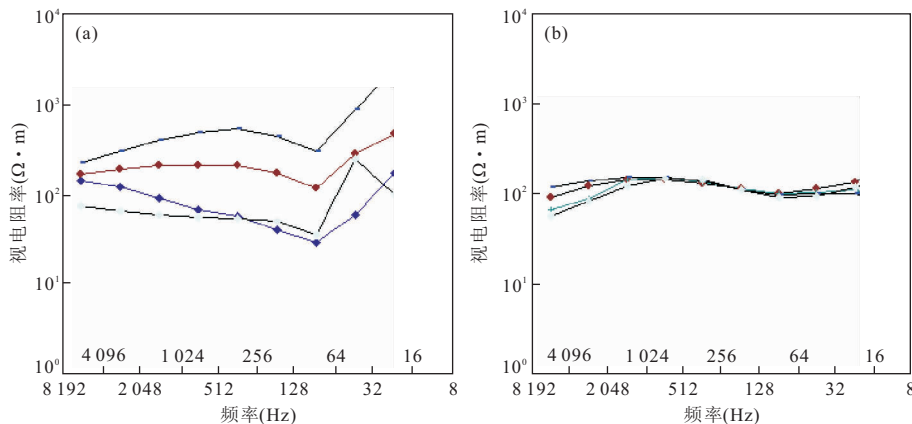


图 1 TEM 静校正前后 CSAMT 视电阻率曲线

Fig. 1 The results before and after statics correction based on TEM

a. 有静态效应影响的 CSAMT 视电阻率曲线; b. 做 TEM 静校正后 CSAMT 视电阻率曲线

差异分辨能力较强。

1.2 IP、CSAMT 和 TEM 联合解释原理

覆盖区矿产资源勘查要求探测深度大;由于覆盖层的存在,使得异常信号较弱,因此要求采用的方法具有较高的分辨率;在矿区进行二次空间探矿要求方法具有很强的抗噪性;覆盖区没有矿产出露,地下介质的地球物理差异不明显. 这些就是覆盖区矿产资源勘查面临的现实问题. 针对上述问题,笔者提出利用电法组合实现覆盖区矿产资源勘查的方法. 为了提高方法的抗噪能力并增强深部异常信号强度,采用主动源类方法. 覆盖区探测深度一般要求至少在 200 m 以上,因此直流电阻率法并不适合. 在没有露头的情况下充电法也不能起到良好的效果. 综合考虑只能采用 IP、CSAMT 以及 TEM 等方法.

然而 3 种方法的选择绝非偶然. 在深度上,IP 主要反映浅中部地质信息,TEM 主要反映中等深度的电性信息,CSAMT 则主要探测深部的电性分布. 这 3 种方法相结合可以提供分辨率较高的、由浅到深的、大范围电性分布. 其次,在方法应用方面瞬变电磁可以实现 CSAMT 的静校正,并且瞬变电磁的激发极化效应可以直接用来定性的分析矿产分布. 3 种方法物理基础不同,勘查深度不同. 相同深度范围相互验证,不同深度范围相互补充,从而提高覆盖区矿产勘探的准确率.

1.2.1 勘探深度互补 首先对瞬变电磁的探测深度进行分析,瞬变电磁法最早可分辨延迟时间所对应的探测深度为最小探测深度. 最小探测深度的近似计算如公式(1)所示(李貅和冯兵,2003):

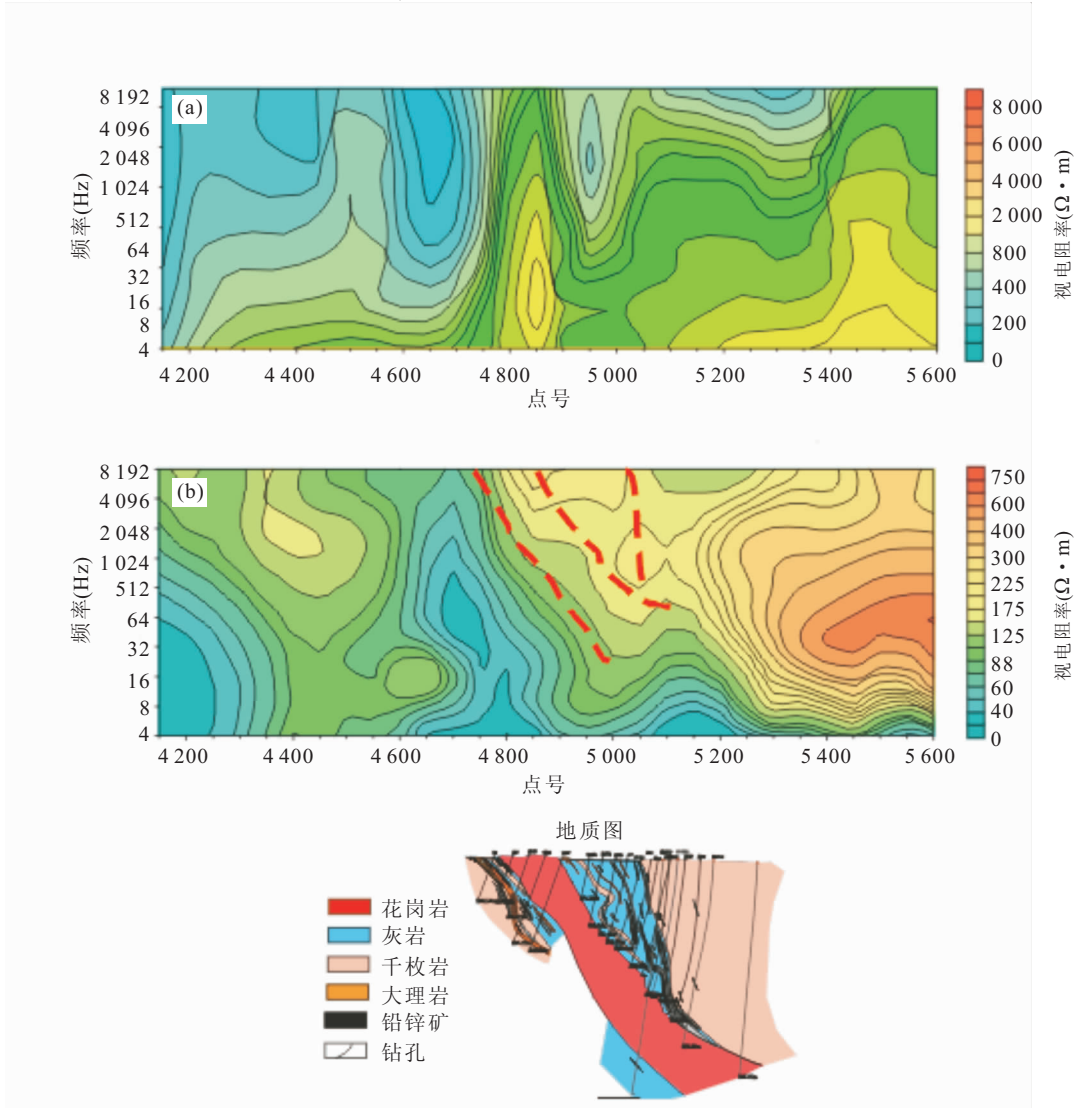


图 2 TEM 静校正效果

Fig. 2 The statics correction results based on TEM

a. 未做静校正 CSAMT 视电阻率断面图; b. 静校正后 CSAMT 视电阻率断面图

$$h_{\min} \sim \sqrt{t_{\min} \cdot \rho}, \quad (1)$$

式中： t_{\min} 为第一道时间，单位是 μs ； ρ 为表层电阻率，单位是 $\Omega \cdot \text{m}$ ； h_{\min} 为最小探测深度，单位是 m。

瞬变电磁的探测度与发送磁矩、覆盖层电阻率及最小可分辨电压有关。在中心回线装置情况下有效探测深度表达式为(李貅,2002)：

$$H = 0.55 \left(\frac{M\rho_1}{\eta} \right), \quad (2)$$

式中： M 为发送磁矩， ρ_1 为表层电阻率， η 为最小可分辨电压。

由公式(1)可知，瞬变电磁探测在浅部存在盲区，而激发极化法可以弥补瞬变电磁法浅部丢失的信息，而通过控制激发极化法的测量极距，可以弥补瞬变电磁法浅部丢失的信息，这样就得到了较完整

的剖面信息。

CSAMT 法勘探深度与发送频率有关，虽然趋肤深度在某种意义上来说与电磁波在介质中穿透的深度有关，但它并不代表实际的有效探测深度。探测深度是个比较模糊的概念，它大体上是指某种测深方法的体积平均探测深度。对穿透深度 D 较好的经验公式是(何继善,1990a)：

$$D = \frac{\delta}{\sqrt{2}} = 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \quad (3)$$

式中： δ 为趋肤深度， ρ 为大地电阻率， f 为信号频率。

穿透深度仅仅取决于 2 个参数：大地电阻率 ρ 和使用的信号频率 f 。随着电阻率的减小或频率增高，穿透深度变浅；反之，随着电阻率增大或频率降低，穿透深度加深。当大地电阻率结构一定时，改变

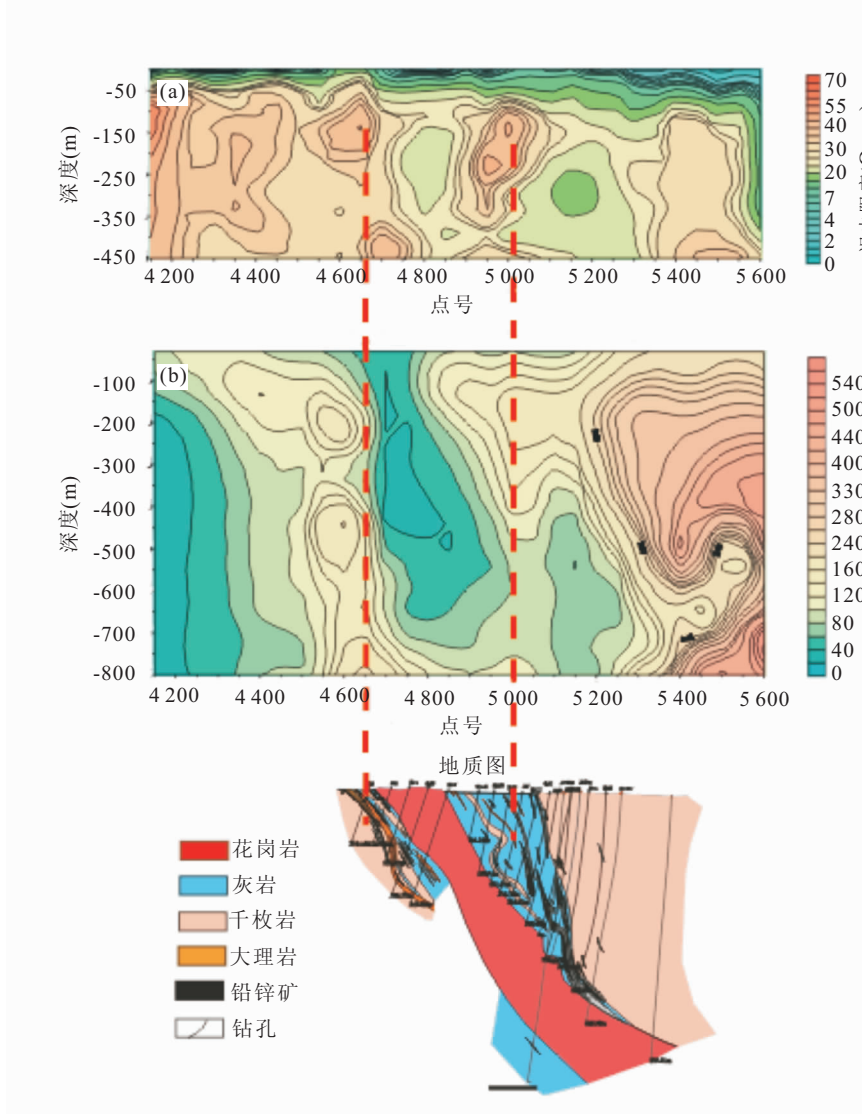


图 3 极化率与视电阻率综合解释成果

Fig. 3 The joint interpretation results with resistivity and polarizability

a. 极化率断面图；b. 瞬变电磁视电阻率断面图

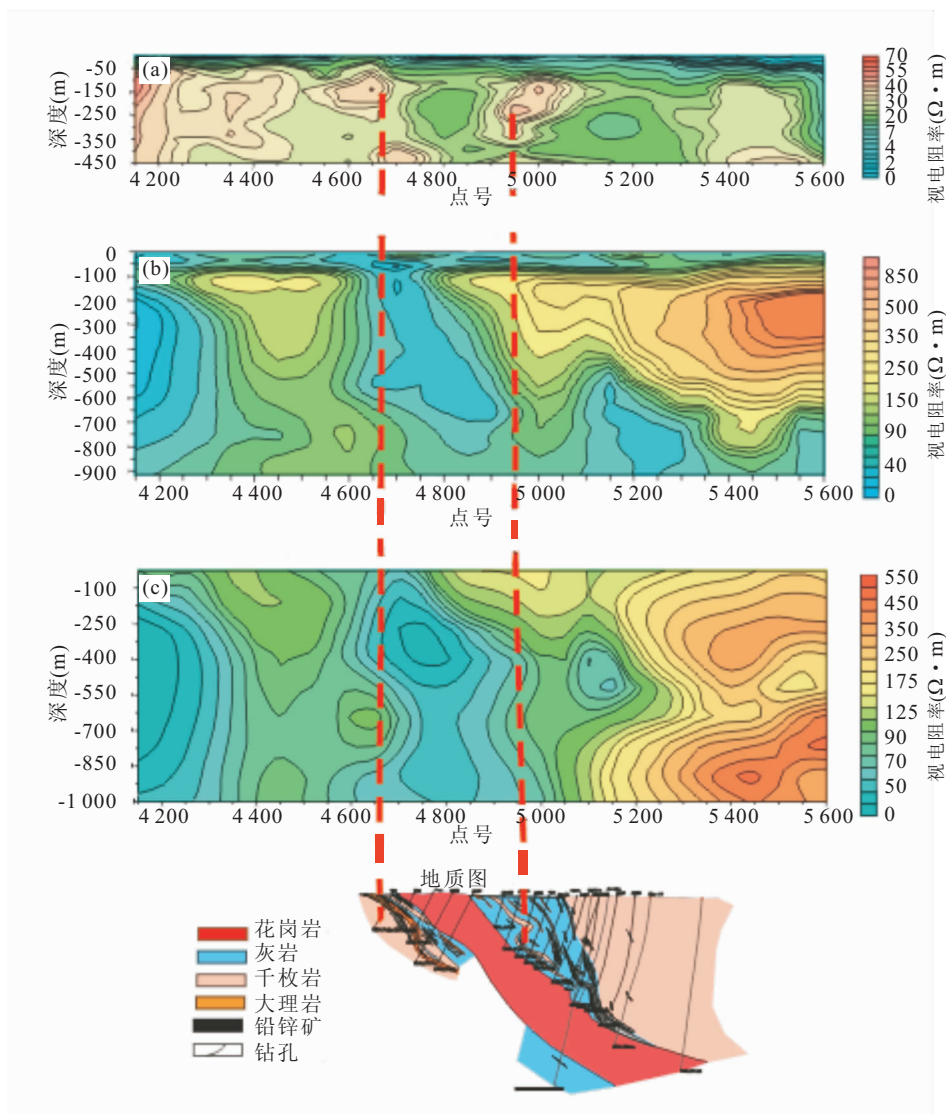


图 4 电法联合解释应用效果

Fig. 4 The results of the electrical method joint interpretation

a. 激电测深极化率断面图; b. 瞬变电磁测深视电阻率断面图; c. CSAMT 视电阻率断面图

信号频率,便可以得到连续的垂直测深,从而达到测深的目的. 一般情况下,CSAMT 法的最大探测深度为 2~3 km.

结合瞬变电磁法在 50~500 m 精细探测,加上激发极化法和可控源音频大地电磁法 3 种方法可以在较大空间范围准确把握矿体的分布.

1.2.2 利用 TEM 来消除 CSAMT 的静态影响 静态效应是由于地表电性不均匀体的存在引起的,在外电场作用下,不均匀体界面上形成积累电荷,从而导致电场观测值的偏移,而不影响磁场观测值. 在此认识基础上,可以利用非电场观测的电磁法,获取无静态效应的测深资料,对 CSAMT 进行静态校正. 瞬变电磁是建立在大地中的场源消失时产生的瞬变

磁场响应信号,观测数据不存在静态效应. Sternberg 等提出了一种用 TEM 来进行静态校正的技术(李貅,2002). 其基本原理是利用时间和频率之间存在的经验转换关系式:

$$t = (194 \sim 200) / f. \tag{4}$$

将 TEM 时间坐标的视电阻率曲线变换成频率坐标的视电阻率曲线,然后与 CSAMT 视电阻率实测曲线进行对比校正静态偏移.

结合野外数据验证此法的应用效果,如图 1a 所示 CSAMT 受静态影响的电阻率曲线,从图上可以看出相邻点之间的视电阻率曲线有明显的整体上下移动的特征,但是相邻点的曲线趋势相似. 图 1b 是经过联合反演的方法,利用 TEM 的数据校正后的

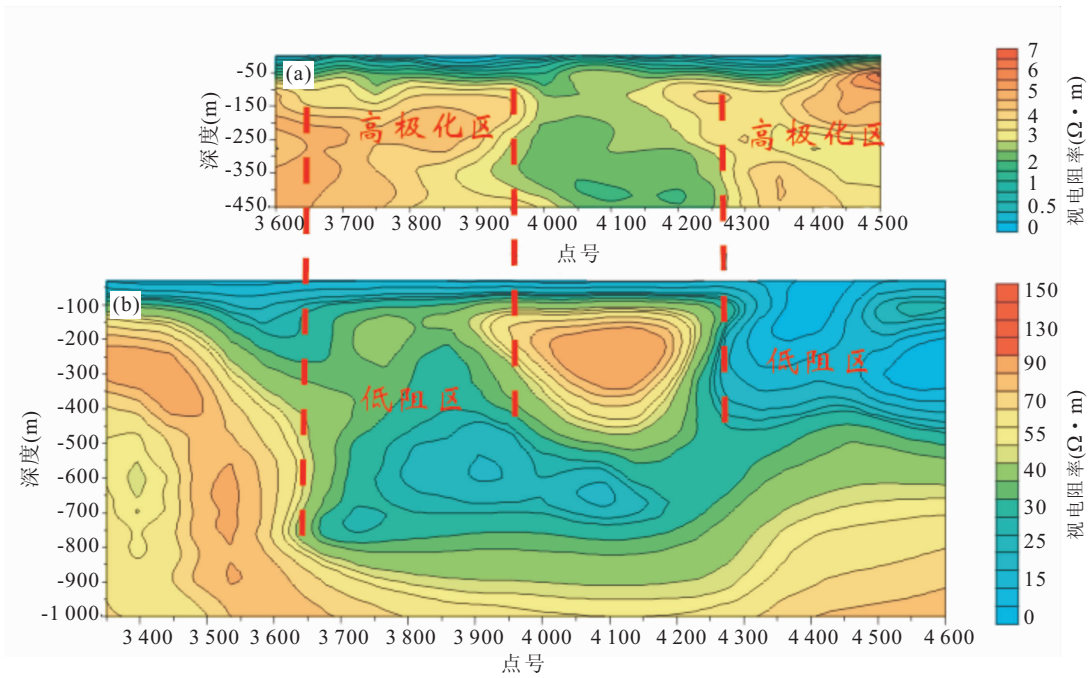


图 5 二矿区 152 线激电与瞬变电磁结果对比

Fig. 5 The comparison between IP and TEM results in the second mineral area

a. 152 线激电测深极化率断面图; b. 152 线瞬变电磁视电阻率断面图

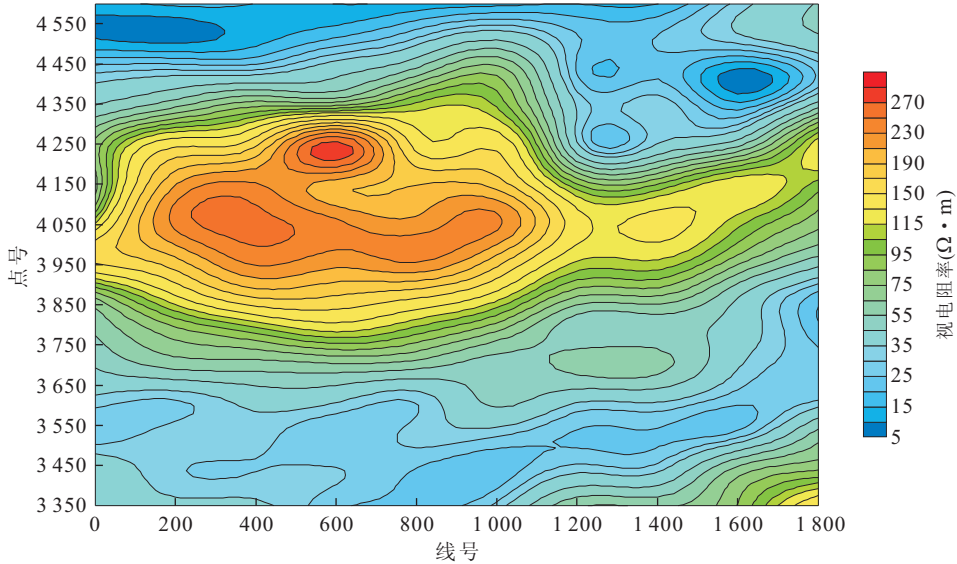


图 6 瞬变电磁二矿区第 10 道切平面($t=440.8 \mu s$)

Fig. 6 The ichnography of TEM results at 440.8 μs at the second area

视电阻率曲线,从图上可以看出,校正后的相邻曲线上下移动较小,减小了静态影响的作用。

给出整个测线校正前后 CSAMT 视电阻率断面图,并与已知地质图进行对比,如图 2 所示,由上到下依次为静校正前的 CSAMT 视电阻率断面图、静校正后的 CSAMT 视电阻率断面图及地质图。由图可知,经过校正后,CSAMT 视电阻率断面图与地

下岩石电性结果相吻合,表明用瞬变电磁数据对 CSAMT 进行校正能够得到较好的效果。

1.2.3 极化率与电阻率综合解释确定矿化异常
瞬变电磁法和 CSAMT 方法主要提取参数为视电阻率,对低阻体(如低阻岩层、断层破碎带等)反映较好,然而当矿化异常与围岩电阻率接近时不能很好地确定异常范围。激发极化法可以提取 2 种参数,即

极化率和视电阻率. 而且极化率参数是确定矿化异常的主要信息. 极化率断面图与电阻率断面图相互对比, 综合分析可以清楚地划分矿产范围与走向.

图3为利用极化率与视电阻率综合解释判断矿化带. 图中顶部为极化率断面, 中间为电阻率断面. 电阻率图可以清楚地反映地下介质的电性变化, 但是不能仅根据电阻率准确判定矿脉, 简单地认为高阻或低阻区域为矿脉. 同样, 单一的极化率断面也不能仅凭借高极化区或低极化区圈定为矿脉异常. 将2种参数相结合, 如图红色虚线处所示, 可以清楚地圈定矿脉异常主要存在于接触带, 并且结果与地质图相吻合.

2 电法联合解释应用效果分析

为了说明方法组合的有效性, 文中以甘肃某金属矿区实测数据为例进行分析. 首先以有矿体出露的已知剖面进行处理, 验证方法的准确性. 在矿区周边对没有出露的覆盖区进行探测, 通过钻孔验证方法的有效性.

2.1 工区概况

该矿区位于甘肃北山地区, 在大地构造位置上处于北山—阴山东西向复杂构造带西段, 属天山地槽褶皱系. 按照板块构造学说, 北山地区位于塔里木板块与哈萨克斯坦板块的聚合部位, 构造位置独特, 地质演化历史复杂, 构造—岩浆活动强烈, 具有较好的成矿地质条件. 从地质分析来看, 矿区存在着2个完全不同成矿系列的矿床类型: 一种类型为与热水沉积作用有关的铅锌金银矿床; 另一种为与印支期花岗岩有关的钨钼金银矿床, 成矿热液沿断裂迁移并成矿.

铅锌矿石和石英脉型金矿石具有高极化率、低电阻率的特征, 磁铁矿和片岩型金矿石极化率和电阻率值次之, 片岩、石英岩中基性火山岩等极化率低、电阻率值较高, 中性岩的极化率最低、电阻率最高. 上述表明, 本区具备电法找矿的地球物理前提, 应用电法可以直接圈定低阻高极化异常, 达到电法间接找矿目的.

2.2 物探工作布置

测线 $I-I'$ 贯穿整个矿区, 长度为7 km, 点距50 m, 点号编码从1 000、1 050到8 000, 共计141个点; 7 km全部做可控源音频大地电磁法, 1 650~2 350号点做激电测深, 4 150~5 600号点做激电测深、瞬变电磁法. 二矿区为面积型勘探, 设计了10条剖面, 线编号为120, 124~156, 测网为200 m ×

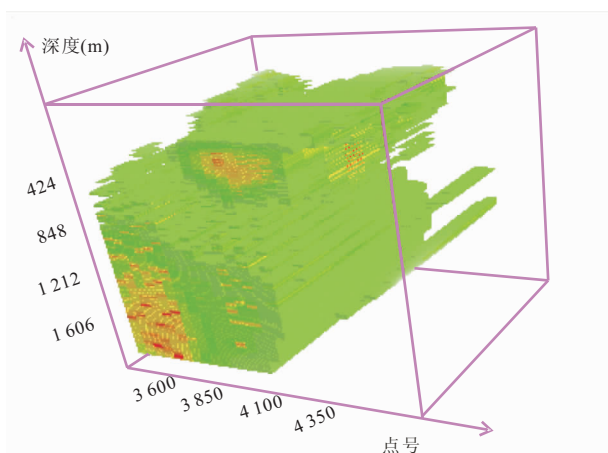


图7 显示大于 $75 \Omega \cdot \text{m}$ 电阻率立体图

Fig. 7 The 3D display of resistivity great than $75 \Omega \cdot \text{m}$

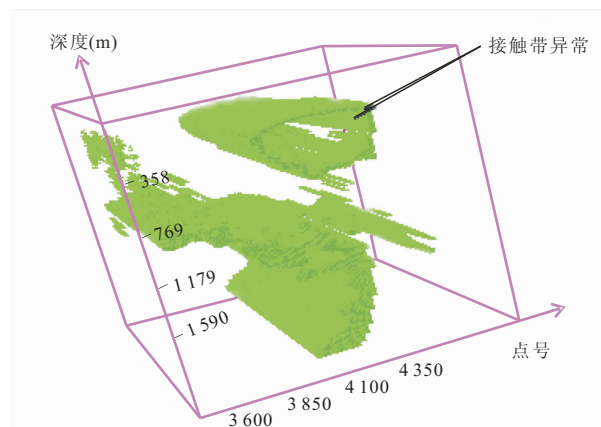


图8 显示 $80 \Omega \cdot \text{m}$ 电阻率立体图

Fig. 8 The 3D display of resistivity equal to $80 \Omega \cdot \text{m}$

50 m, 点编号为3 350, 3 400~4 600, 每条测线为26个点, 测网内共260个点. 其中瞬变电磁全做, 激电测深在140线、152线进行测量.

激发极化法选用DJF-10仪器设备, 采用对称四极法, 最大 $AB/2=1\ 500$ m. 可控源音频大地电磁法的观测方法, 点距为50 m, 测量电偶极距 $MN=50$ m, 供电偶极距 $AB=1\ 900$ m, 收发距 $r \geq 6$ km. 观测电场 E_x 分量和磁场 H_y 分量, 观测频率范围0.125~8 192 Hz. TEM采用200 m × 200 m中心回线装置, 中心探头接收, 探头接收等效面积为10 000 m², 发射电流大于8 A, 选用工作频率为8 Hz和16 Hz.

2.3 资料的处理结果分析

2.3.1 已知地质条件下联合解释方法验证 测线 $I-I'$ 全线进行了CSAMT测量, 并且在4 150~5 600号点做了激电测深和瞬变电磁. 因此, 给出测线 $I-I'$

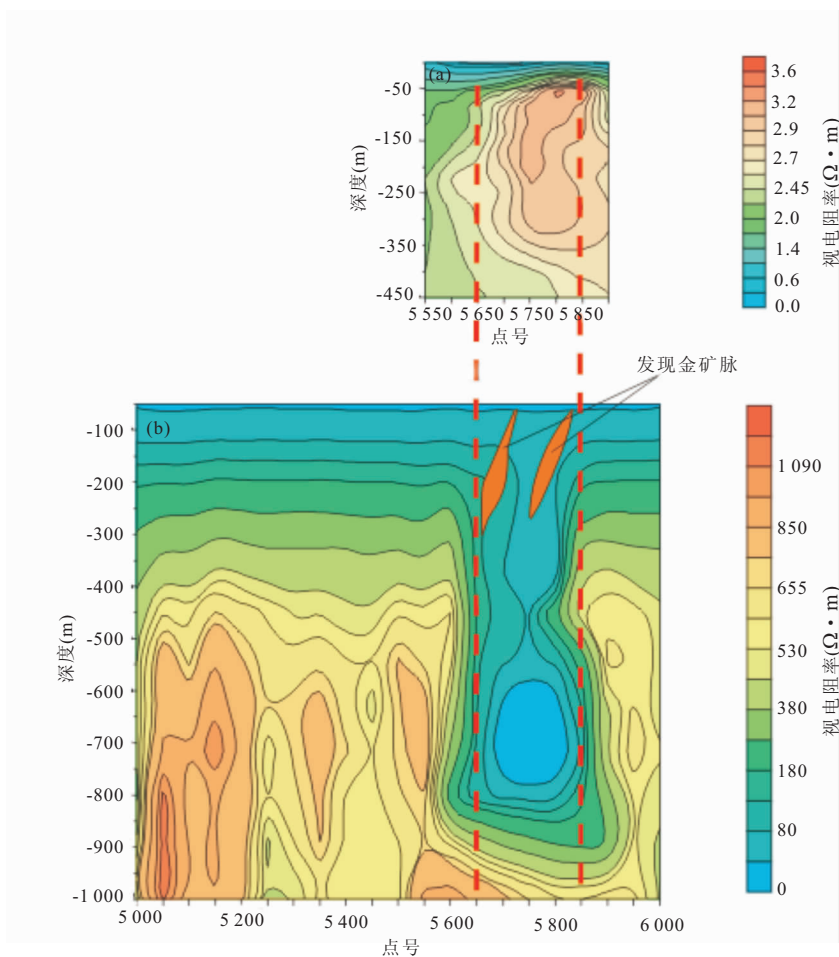


图 9 金矿区 232 线物探综合成果

Fig. 9 The Comprehensive results of the gold ore area

a. 232 线极化率断面图; b. 232 线瞬变电磁视电阻率断面图

点号 4 150~5 600 区间的 3 种方法的解释成果图, 如图 4 所示. 由上而下分别为激电测深极化率断面图、瞬变电磁视电阻率断面、CSAMT 电阻率断面和地质图. 瞬变电磁电阻率与 CSAMT 电阻率在深度上有一定的重合, 可以相互验证; CSAMT 电阻率深度较瞬变电磁深度大, 对其有一定的补充. 结合极化率断面图, 勾画出低阻高极化区域, 如图中虚线所示为矿化带. 结果与地质图吻合很好. 由此可知, 文中 3 种电法组合可以有效圈定矿化异常.

2.3.2 激电与瞬变电磁联合解释成果分析 二矿区为面积型工作, 其中瞬变电磁全做, 激电测深在 140 线、152 线, 而 140 线测线较短, 152 线较长, 可以与瞬变电磁法进行对比分析. 从图 5 二矿区 152 线激电与瞬变电磁结果对比图上可以看出: 用红线隔开的 3 650~4 050 号点之间, 激电测深显示为高极化区, 瞬变电磁测深显示为低阻区, 符合本区成矿特征, 推断为有利成矿区. 4 300~4 500 号点也是这

样的特征. 对于二矿区 10 条瞬变电磁的电阻率断面图, 进行第 10 道切平面, 结果如图 6.

三维空间显示如图 7 和图 8 所示, 在大于 $75 \Omega \cdot \text{m}$ 电阻率立体图中可以看出有 2 个东西向分布异常, 图 8 中只显示 $80 \Omega \cdot \text{m}$ 电阻率立体图, 可以清楚地看出接触带在空间上的位置与特征.

图 9 为 232 线激电与瞬变电磁综合物探成果图. 从图 9 分析, 激电测深表现为高极化特征, 而在瞬变电磁断面图上表现为有明显低阻带分布, 对应着金矿体的位置, 从图上可以很直观地看出边界位置. 综合分析可以推断点号 5 600~5 900 间为有利成矿位置.

3 结论

针对覆盖区矿产资源勘查存在的困难, 文中选择了 IP、TEM、CSAMT 这 3 种方法进行联合解释.

从理论上分析了 3 种电法类方法相结合的优势:(1)在地下电性断面分布中,3 种方法在不同深度电性结果判断上相互验证,相互补充;(2)瞬变电磁可以实现 CSAMT 静校正,提高 CSMAT 方法的准确性;(3)将地下介质电性断面与极化率断面综合解释,能够清楚地判断矿致异常,以及矿体走向。

利用文中所述方法对已知矿区进行探测,综合解释结果与地质结果一致,充分验证了 3 种方法结合的准确性。对矿区周边进行深部二次空间探矿,在无出露、地下地质情况未知的条件下,发现 2 处异常,并给出了接触带三维走向。

在理论上,IP、TEM、CSAMT 相互验证、相互补充。在实际应用中,运用 IP、TEM、CSAMT 进行覆盖区联合解释得到了较好的结果。这充分证明了文中方法适合覆盖区矿产资源勘查。

References

- Abubakar, A., Van den Berg, P. M., 2000. Joint in inversion of electrode and induction logging data. *Society of Exploration Geophysics*, 2166—2168.
- Chen, J., Wen, N., Chen, B. Y., 2007. Joint inversion of gravity-magnetic-electrical-seismic combination survey: progress and prospect. *Progress in Geophysics*, 22(5): 1427—1438 (in Chinese with English abstract).
- Chen, W. J., Liu, H. T., 2009. Integrated geophysical exploration for concealed ore beneath cover in the Zhaojiaweizi area, Inner Mongolia, northern China. *Progress in Geophysics*, 24(1): 293—302 (in Chinese with English abstract).
- Cui, M. L., Zhang, B. L., Liang, G. H., et al., 2010. The technical combination of comprehensive geophysical prospecting in the Molybdenum mines with losses-covered: a case study at the Shapoling molybdenum mine. *Progress in Geophysics*, 25(2): 602—611 (in Chinese with English abstract).
- Cui, T. X., 1995. Collective application of geological and geophysical methods to prospecting for potash resource. *Geology of Chemical Minerals*, 17(3): 198—206 (in Chinese).
- Ding X. R., Yu H. J., Deng Y. Q., 1980. The tutorial of metal geophysical. Geological Publishing House, Beijing, 273—274 (in Chinese).
- Ge, S. C., Jiang, Y., Yan, X. J., 2006. Application of comprehensive geophysical exploration technique to hidden trouble detection of dyke. *Progress in Geophysics*, 21(1): 263—272 (in Chinese with English abstract).
- He, J. S., 1990a. Control source audio-frequency magnetotelluric. Central South Industrial University Press, Changsha, 2—5 (in Chinese).
- He, J. S., 1990b. Induced polarization sounding principle. Central South Industrial University Press, Changsha (in Chinese).
- Hering, A., Misiek, R., Gyulai, A., et al., 1995. A joint inversion algorithm to process geoelectric and surface wave seismic data. Part I: basic ideas. *Geophysics Prospecting*, 43: 135—156.
- Jing, R. Z., Bao, G. S., Lin, J., et al., 2004. A geophysical integration inversion method based on data fusion. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(1): 143—150 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. Q., Wang, G. J., Di, Q. Y., et al., 2007. The application of high-power induced polarization in the middle section of eerguna metallogenic belt. *Progress in Geophysics*, 22(5): 1621—1626 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Z., Liu, S. H., Yan, G. S., 2002. The research method of large and super-large ore deposits for synthetical information metallogenic prediction. *Progress in Geophysics*, 17(4): 736—744 (in Chinese with English abstract).
- Li, X., 2002. Theory and application of transient electromagnetic sounding. Shaanxi Science and Technology Press, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Li, X., Feng, B., 2003. Essentials of applied geophysics. Shaanxi People's Education Press, Xi'an, 187—217 (in Chinese).
- Liu, G. D., Hao, T. Y., 1995. Searching of hidden mineral deposits by geophysical methods. *Acta Geophysica Sinica*, 38(6): 850—854 (in Chinese).
- Liu, H. T., Yan, X. Y., Yu, C. M., et al., 2004. A case study in finding concealed ores by using geophysical exploration methods in combination of VLF-EM, EH4 and CSAMT. *Progress in Geophysics*, 19(2): 276—285 (in Chinese with English abstract).
- Niu, Z. L., 1993. Time domain electromagnetic method theory. Central South Industrial University Press, Changsha, 15—20 (in Chinese).
- Piao, H. R., 1990. Electromagnetic sounding theory. Geological Publishing House, Beijing, 1—10 (in Chinese).
- Sun, Y., Liu, J. M., Zeng, Q. D., et al., 2011. Application of comprehensive geophysical methods in ore prospecting in one Au polymetallic mineralizing area. *Progress in Geophysics*, 25(6): 2096—2101 (in Chinese with English abstract).
- Tian, W. F., Hao, J. J., Yan, J. Y., et al., 2010. Application of synthetic geophysical methods to deep exploration of Hanxing-type iron deposit. *Progress in Geophysics*, 25(4): 1442—1452 (in Chinese with English abstract).
- Tu, G. H., Jiang, W. W., Zhu, D. Y., et al., 2008. Applying

- integrated geophysical methods to study distribution of Pre-Cenozoic residual basins of Yellow Sea. *Progress in Geophysics*, 23(2): 398—406 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. Q., 2008. Application of IP intermediate gradient and IP sounding to Xinmai lead-zinc ore. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 5(5): 551—553 (in Chinese with English abstract).
- Xue, R. H., Wang, G. J., Di, Q. Y., et al., 2011. The comprehensive application of several geophysical methods in mineral exploration in Guangdong. *Progress in Geophysics*, 26(4): 1364—1371 (in Chinese with English abstract).
- Yu, C. T., Liu, H. F., Gao, J. P., 2008. The experimental study on the Dual frequency induced polarization method detecting coal mine gob. *Progress in Geophysics*, 23(5): 1603—1609 (in Chinese with English abstract).
- Yu, P., Wang, J. L., Wu, J. S., et al., 2006. Research and analysis of geophysical joint inversion. *Progress in Exploration Geophysical*, 29(2): 87—93 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Xie, L. L., Wu, X. B., 2008. Application of audio magnetotellurics and high-power induced polarization for concealed ores in the eerguna metallogenic belt. *Geology and Prospecting*, 44(5): 76—80 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. G., Wang, Y. H., Zhang, D. L., et al., 2009. A study on application of integrated geophysical prospecting methods to the Rilonggou Sn-polymetallic metallogenic area. *Progress in Geophysics*, 24(6): 2255—2260 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈洁, 温宁, 陈邦彦, 2007. 重磁电震联合反演研究进展与展望. *地球物理学进展*, 22(5): 1427—1438.
- 陈伟军, 刘洪涛, 2009. 综合地球物理方法在隐伏矿床勘查中的应用——以内蒙赵家围子银铅锌多金属矿床为例. *地球物理学进展*, 24(1): 293—302.
- 崔敏利, 张宝林, 梁光河, 等, 2010. 黄土覆盖区钼矿综合地球物理找矿技术组合: 以沙坡岭钼矿为例. *地球物理学进展*, 25(2): 602—611.
- 崔天秀, 1995. 钾盐找矿工作中的综合地球物理—地质研究. *化工矿产地质*, 17(3): 198—206.
- 丁绪荣, 于汇津, 邓一谦, 1980. 金属物探简明教程. 北京: 地质出版社, 273—274.
- 葛双成, 江影, 颜学军, 2006. 综合物探技术在堤坝隐患探测中的应用. *地球物理学进展*, 21(1): 263—272.
- 何继善, 1990a. 可控源音频大地电磁法. 长沙: 中南工业大学出版社, 2—5.
- 何继善, 1990b. 激电测深法原理. 长沙: 中南工业大学出版社.
- 敬荣中, 鲍光淑, 林剑, 等, 2004. 一种基于数据融合的地球物理数据联合反演方法——以 VES 和 MT 为例. *地球物理学报*, 47(1): 143—150.
- 李帝铨, 王光杰, 底青云, 等, 2007. 大功率激发极化法在额尔古纳成矿带中段找矿中的应用. *地球物理学进展*, 22(5): 1621—1626.
- 李景朝, 刘少华, 严光生, 2002. 大型超大型金属矿床综合信息成矿预测方法研究. *地球物理学进展*, 17(4): 736—744.
- 刘洪涛, 杨秀瑛, 于昌明, 等, 2004. 用 VLF-EM、EH4 和 CSAMT 方法寻找隐伏矿——以赤峰柴胡栏子金矿床为例. *地球物理学进展*, 19(2): 276—285.
- 李貅, 冯兵, 2003. 应用地球物理基础教程. 西安: 陕西人民教育出版社, 187—217.
- 李貅, 2002. 瞬变电磁测深的理论与应用. 西安: 陕西科学技术出版社.
- 刘光鼎, 郝天珧, 1995. 应用地球物理方法寻找隐伏矿床. *地球物理学报*, 38(6): 850—854.
- 牛之琰, 1993. 时间域电磁法原理. 长沙: 中南工业大学出版社, 15—20.
- 朴化荣, 1990. 电磁测深法原理. 北京: 地质出版社, 1—10.
- 孙燕, 刘建明, 曾庆栋, 等, 2011. 综合地球物理方法在某金多金属矿区找矿中的应用. *地球物理学进展*, 25(6): 2096—2101.
- 田文法, 郝俊杰, 严加永, 等, 2010. 综合地球物理方法在邯邢式铁矿深部找矿中的应用. *地球物理学进展*, 25(4): 1442—1452.
- 涂广红, 江为为, 朱东英, 等, 2008. 综合地球物理方法对黄海地区前新生代残留盆地分布的研究. *地球物理学进展*, 23(2): 398—406.
- 汪玉琼, 2008. 激电中梯和激电测深在织金新麦铅锌矿区的综合应用. *工程地球物理学报*, 5(5): 551—553.
- 薛融晖, 王光杰, 底青云, 等, 2011. 广东韶关某地找矿的多种地球物理方法综合应用. *地球物理学进展*, 26(4): 1364—1371.
- 余传涛, 刘鸿福, 高建平, 2008. 双频激电法在探测煤矿采空区的尝试. *地球物理学进展*, 23(5): 1603—1609.
- 于鹏, 王家林, 吴健生, 等, 2006. 地球物理联合反演的研究现状和分析. *勘探地球物理进展*, 29(2): 87—93.
- 张慧, 谢玲琳, 吴湘滨, 2008. 大功率激发极化和音频大地电磁联合方法在额尔古纳成矿带寻找隐伏矿的应用研究. *地质与勘探*, 44(5): 76—80.
- 周立国, 王延浩, 张单乐, 等, 2009. 日龙沟锡—多金属成矿区综合物探找矿方法应用研究. *地球物理学进展*, 24(6): 2255—2260.