

doi: 10.11720/wtyht.2020.0193

梁维天,李勇,王东波,等.辽东南金属矿勘查中广域电磁法应用效果[J].物探与化探,2020,44(5):1078-1084.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0193

Liang W T, Li Y, Wang D B, et al. The application effect of WFEM in the exploration of metal deposits in the southeast of Liaoning Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1078-1084. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0193

辽东南金属矿勘查中广域电磁法应用效果

梁维天^{1,2}, 李勇¹, 王东波^{1,2}, 李浩¹, 袁圣¹, 冯家新¹, 孙文¹

(1. 辽宁省第五地质大队有限责任公司, 辽宁 营口 115100; 2. 辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 在辽东南部多个金属矿区运用广域电磁法进行测量研究, 可对辽东南深部地层接触面以及构造发育等特征形成更清晰认识, 通过对辽东古裂谷以及变质核杂岩的形成时间、岩石圈层隆升过程、动力学机制的深入了解, 应用广域电磁法为该地区成矿、控矿作用和成矿机理等提供较准确的地球物理依据, 对辽东南金属矿成矿模型建立以及深部矿产资源勘查具有重要意义。

关键词: 广域电磁法; 辽东裂谷; 变质核杂岩; 找矿模型

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)05-1078-07

0 引言

近几年来自然资源部非常重视华北克拉通辽东重要成矿区带金多金属矿的深部预测及勘查, 为突破辽东重点矿集区深部找矿技术瓶颈, 组织勘查单位选择成矿有利区域建立多个深部资源评价勘查项目来进行勘查工作, 从地、物、化等方面综合进行勘查研究, 构建一套有效的深部资源勘查技术方法体系。辽东和胶东隔海相望, 地质背景类似, 胶东矿床的勘查程度和矿产的开采率较高, 而辽东勘查深度仅 1 000 m 左右, 辽东深部矿产资源潜力如何, 深部是否发育类似胶东的巨型矿床, 如何探测和定位深部矿体, 是目前需解决的问题。随着研究手段的不断进步, 越来越多的高科技手段运用到该勘查当中。广域电磁仪是何继善院士团队研制开发的一款新型电磁仪, 是我国自主研发的、新的频率域电磁勘探方法, 该方法从投入实际生产以来, 应用到了地球物理勘查的各个领域, 效果良好。本次工作的目的就是把广域电磁法应用到辽东南地区金属矿勘查中, 用该方法的勘查成果与地质工程等其他勘查手段做对比, 为辽东南地区多金属矿成矿理论研究及成矿模型建立等提供更深、更准确的地球物理资料^[1-3]。

1 辽东南地质及地球物理概况

1.1 辽东南地质特征

辽东南地层区划属华北地层区、辽东地层分区、南西部为大连—复州地层小区、东北部为营口—丹东地层小区。研究区地层出露较齐全, 包括太古宇变质表壳岩组合, 古元古界辽河群层状变质岩系, 中元古界榆树砬子岩组, 新元古界青白口系、南华系、震旦系, 古生界寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系, 中生界侏罗系、白垩系及新生界第四系(图 1)。

根据《辽宁省区域地质志》, 区域岩浆岩是新金—宽甸、盖县—皮口、柳家岭—庄河构造岩浆带的组成部分。区内岩浆侵入活动强烈, 不同程度地发育太古宙—中生代侵入岩, 其中以新太古代、古元古代、中生代三叠纪和侏罗纪、白垩纪岩浆侵入活动最强烈, 表现出岩浆活动具多时代、多期次、岩石类型复杂多样的特点。

研究区经历了自太古宙至新生代的构造演化史, 在综合区内各种地质作用基础上, 将区内构造演化分为四个阶段: 即克拉通基底形成阶段、克拉通盖层发展阶段、板内造山阶段和新构造运动发展阶段^[4-5]。

收稿日期: 2020-04-22; 修回日期: 2020-07-15

基金项目: 辽宁省财政资金项目(LNZC2019-0078-14)

作者简介: 梁维天(1984-), 男, 2008年毕业于中国地质大学(北京), 物探高级工程师, 长期从事地球物理勘查及研究工作。Email: 15009869686@163.com

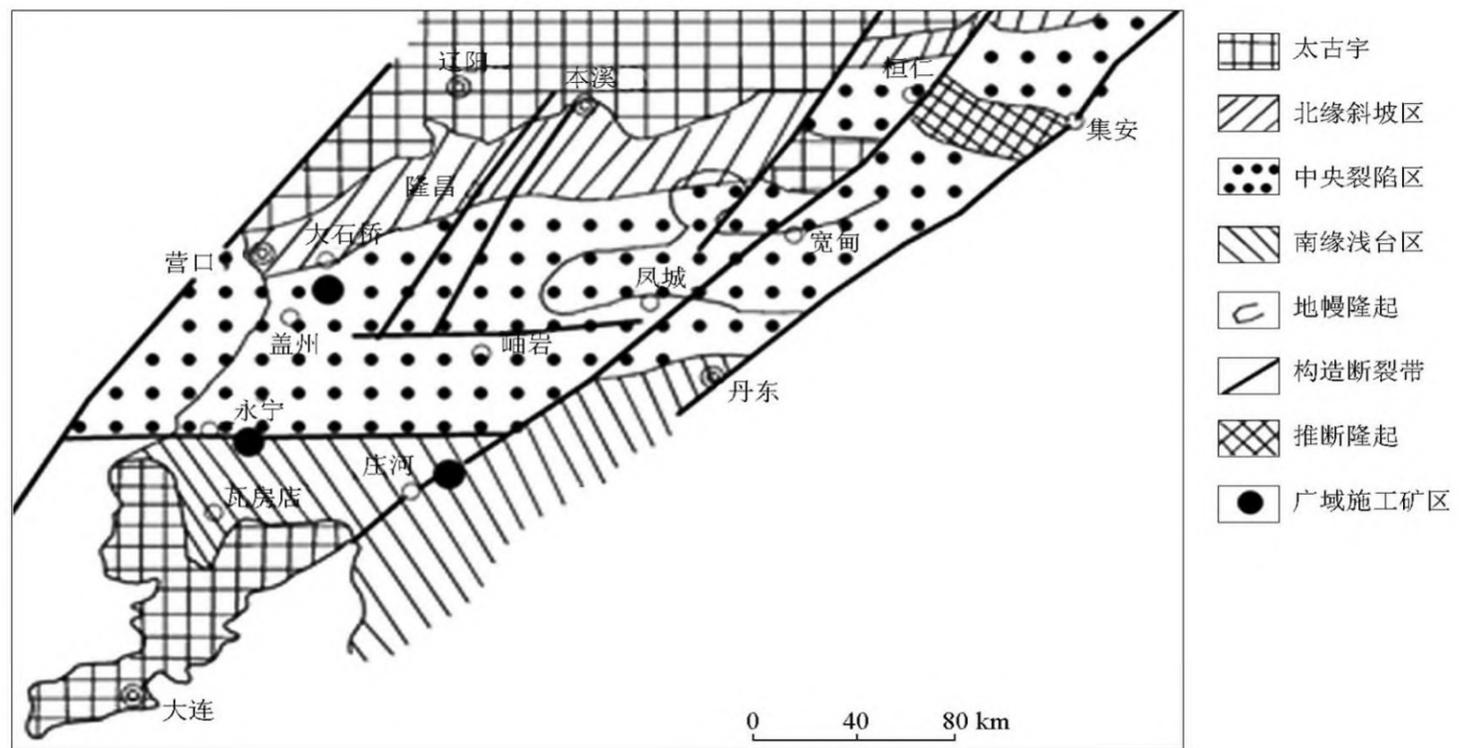


图1 辽东南地质矿产简图

Fig.1 Geological and mineral resources map of southeast Liaoning

1.2 勘查研究现状

辽吉古元古代裂谷是我国一条重要的成矿带,由于它在辽东发育较完整,可称辽东裂谷。该裂谷西起渤海湾自营口向东经岫岩、凤城、桓仁出辽宁。辽东裂谷是辽宁省乃至全国重要的金属矿化区地之一。通过对猫岭、白云、五龙等矿床研究发现,辽东裂谷金矿床主要产于古元古界大石桥组和盖县组的碎屑—碳酸盐岩建造中,显示出古元古代含金建造对金矿化的控制作用。

辽东古元古界超镁铁质—镁铁质火山岩的发现,为辽东古元古界地层层序划分与对比,以及大地构造环境恢复提供了新的依据。地层和岩石组合序列研究表明,辽东古元古界由大陆裂谷向陆缘裂谷演化过程中,经历了初萌—发育—隆起的发育阶段,与这一演化相对应,岩石圈壳层发生了拱陷—拉张—减薄—叠置增厚等岩石圈结构等方面的变化。以地幔岩浆活动为特点的开放体系是制约辽东古元古界非金属、有色金属和黑色金属矿床形成的初始原因^[6]。

另外在辽东南共识别出四个变质核杂岩和一个拆离断层系,分别为金州变质核杂岩、万福变质核杂岩、新房变质核杂岩、栗子房变质核杂岩和大营子拆离断层系,它们具有运动学统一性、几何学上的不对称性、构造—岩浆共同活动性和形成时间的差异性。大量年代学分析数据表明,该区变质核杂岩可以划分为两个伸展构造期:一是晚三叠世—早侏罗世构造期,形成金州变质核杂岩和新房变质核杂岩;二是

早白垩世构造期,形成万福变质核杂岩、栗子房变质核杂岩和大营子拆离断层系。宏微观运动学特征表明,金州、新房变质核杂岩总体为上盘相对下盘向西剪切滑移,万福、栗子房变质核杂岩总体向东剪切滑移,大营子拆离断层系为由东向西伸展。根据研究区内构造方面研究,构造热液裂隙充填交代型矿床是辽南地区金多金属矿床的主要类型,变质核杂岩中的拆离断层带往往是一条金属成矿带,拆离断层赋矿具有特定的有利的成矿条件,如:①两种流体(浅层大气水流和深层岩浆流体)发生交汇;②具两种物理化学环境(上盘氧化环境和下盘还原环境)并在拆离断层带构成有利于矿质沉淀的氧化—还原界面;③大量断层和强烈破碎带为含矿溶液的运移、渗滤和成矿物质的沉淀、聚集提供了通道和空间;④变质核杂岩往往是多期岩浆活动的中心,岩浆热液活动、伸展隆起和构造剥蚀形成了高地热梯度和高热流环境,为成矿元素的活化、淬取、迁移、富集提供了良好条件。变质核杂岩及其拆离断层控制着成矿的物理化学条件^[7-9]。

通过对辽宁东南部地层构造的发育过程、形成模式及形成机制综合分析,对各个金矿矿床的分析研究,对该地区金属矿产的成矿机理有了一定的了解,针对地层接触面和断裂构造的勘查研究对于辽东裂谷和变质核杂岩的研究至关重要。

1.3 地球物理特征

对辽东南地区的地球物理资料(包括重、磁、电等)以及地质工程施工资料进行收集分析,分析该

地区各地层地球物理性质之间的区别,以及各类活动构造面之间是否存在物性差异,是否可以应用电磁性差异达到区分地层界线及构造面的目的。

辽宁省辽东半岛地区布格重力异常值最高、中部次之、西北最低。除去岩体、盆地等引起的局部异常影响外,布格重力异常的高、低起伏形态,主要反映太古宙代结晶基底的起伏形态。异常走向以 NE 向为主,反映了全省主体地质构造的走向。

辽宁省航磁 ΔT 异常场,是以鞍山磁异常最高,中心幅值达到 5 034.11 nT。研究区的北部为大片的航磁 ΔT 负异常区域,主要由基底凹下、凹陷区内发

育的弱磁性的细河群地层引起。向南为航磁 ΔT 异常的正负异常组合的区域,将这些正负磁异常的线性排列或正负异常过渡带或磁异常陡变梯度带的延伸趋势连接起来,就可以表明此地控制不同磁性地质体的各类断裂构造^[10]。

收集了辽东南地区各个矿区以往的激电中梯扫面资料、激电测深资料以及浅部的槽探及钻探取样化验资料,数据分析结果表明大多低阻高幅频率异常与金属矿化有关。对多个矿区岩矿石物性参数进行统计(图 2),标本来自于勘查钻孔岩心及地表采样。

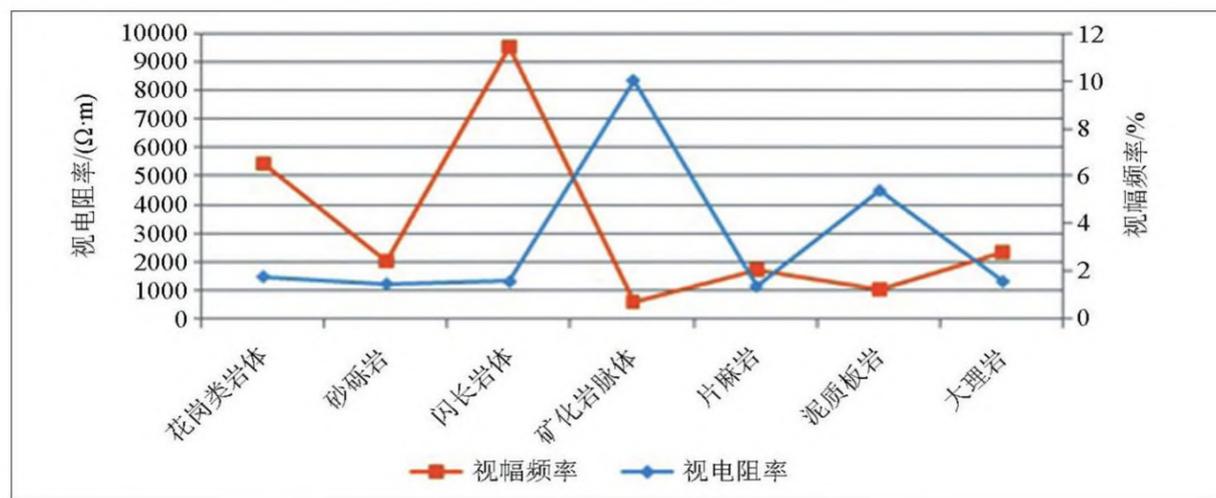


图 2 辽东南地区主要岩矿石物性统计结果

Fig.2 Statistical result of physical properties of main rocks and ores in Southeast Liaoning

从收集的重、磁、电等资料可以看出该矿区各岩性组之间存在物性差异,尤其电阻率差异较大,应用广域电磁法可以达到辨识目的。

2 广域电磁法基本原理

广域电磁法是一种人工源频率域电磁勘探方法,通过发送与接收不同频率的信号来探测不同深度的地电信息。广域电磁法把提取视电阻率的观测范围拓展到更大的区域,此时卡尼亚公式不再适用,必须采用非远区的精确公式。精确公式比卡尼亚公式复杂,含有超越函数甚至特殊函数,用一般的代数方法无法解出其中未知的视电阻率,而是采用计算机迭代的方法提取视电阻率。于是何继善院士提出广域电磁测深法,其算法严格从电磁波方程出发,求得基本解,经过复杂推导得出电场强度表达式:

$$E_x = \frac{IdL}{2\pi\sigma r^3} [1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)] \quad (1)$$

式(1)是均匀大地表面上水平电偶极源的 E_x 的严格的、精确的表达式。根据式(1)可定义广域意义上的视电阻率:

$$\rho_a = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{F_{E-E_x}(ikr)}, \quad (2)$$

其中,

$$K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dL \cdot MN},$$

$$\Delta V_{MN} = E_x \cdot MN,$$

式(2)为广域电阻率的计算基础。在包括远区也包括部分非远区在内的广大区域进行测量,观测人工源电磁场的一个电场分量,从而获得目标体视电阻率^[11-14]。

3 广域电磁法应用效果

按照广域电磁法施工规范在辽东南大东沟金矿区、河洼多金属矿区、新房多金属矿区分别布设广域电磁法剖面进行测量,并对采集的数据进行处理,经过反演分析与已有的地质、钻探工程资料进行对比分析。

3.1 大东沟金矿区

根据矿区特性和地表特征,确定测量电极距 MN 为 30 m,收发距 11 km,供电距 AB 为 1 km,供电

电流 100 A,频率范围 0.016~8 192 Hz。该区域地质构造比较复杂,同时岩浆岩也比较发育,0 线和 1 线两条反演剖面都显示该区域褶皱构造发育,同时深部存在断裂,实测频率电阻率曲线在低频出现了低阻,说明深部确实存在低阻体,低阻区域反映了断裂或矿化体或有利成矿区域的存在(图 3)。两条剖面都存在高阻团块状,这些高阻团块状一般呈椭圆状,

有的直立,应该由岩浆岩引起,也说明该区域岩浆岩比较发育,其附近的大面积低阻区域为成矿的有利区域。通过广域电磁法可以发现控矿的断裂、构造和成矿的背景,与现有的地质钻探等资料进行比对后发现,已经掌握的浅部地质资料与广域电磁法推断的地层界线及断裂褶皱等构造吻合度较高,可以进行深部异常推断,达到间接找矿目的。

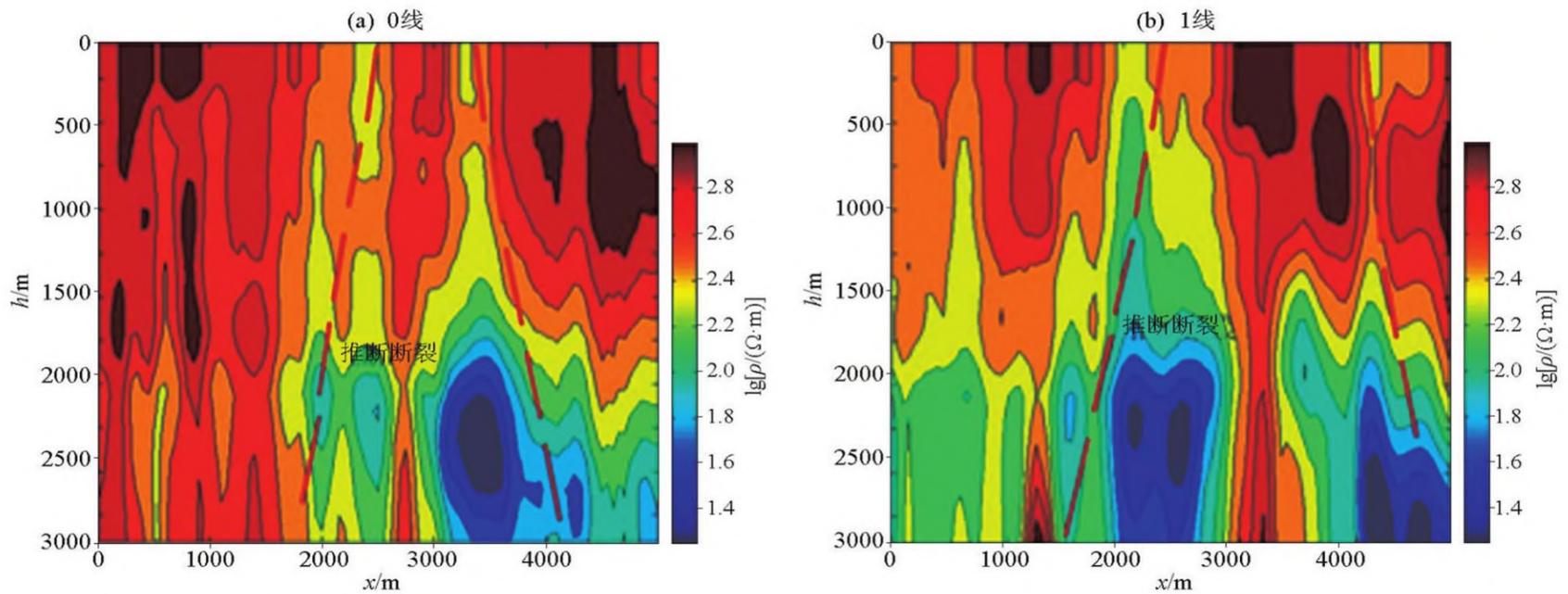


图 3 大东沟广域电磁法推断图
Fig.3 Inference graph of Dadonggou WFEM

3.2 河洼多金属矿区

根据矿区特性和地表特征,确定测量电极距 MN 为 50 m,收发距 12 km,供电 AB 距为 1 km,供电电流 50 A,频率范围 0.016~8 192 Hz。2 线和 3 线两条电阻率剖面图自上而下电性变化规律大致为低阻—高阻—中低阻—高阻 4 个电性层(图 4、5)。浅

部为低阻层,电阻率范围 800~2 000 Ω·m,该层厚度大致在 400~500 m。局部成层性较差,剖面中部有团块状的高阻体发育。在 400~2 200 m 为电阻率 2 500~16 000 Ω·m 的高阻层,该层的埋深起伏较大,范围成层性较差,根据数据的梯度变化及突变特性,推测其可能存在断层。位于该高阻层下部的低

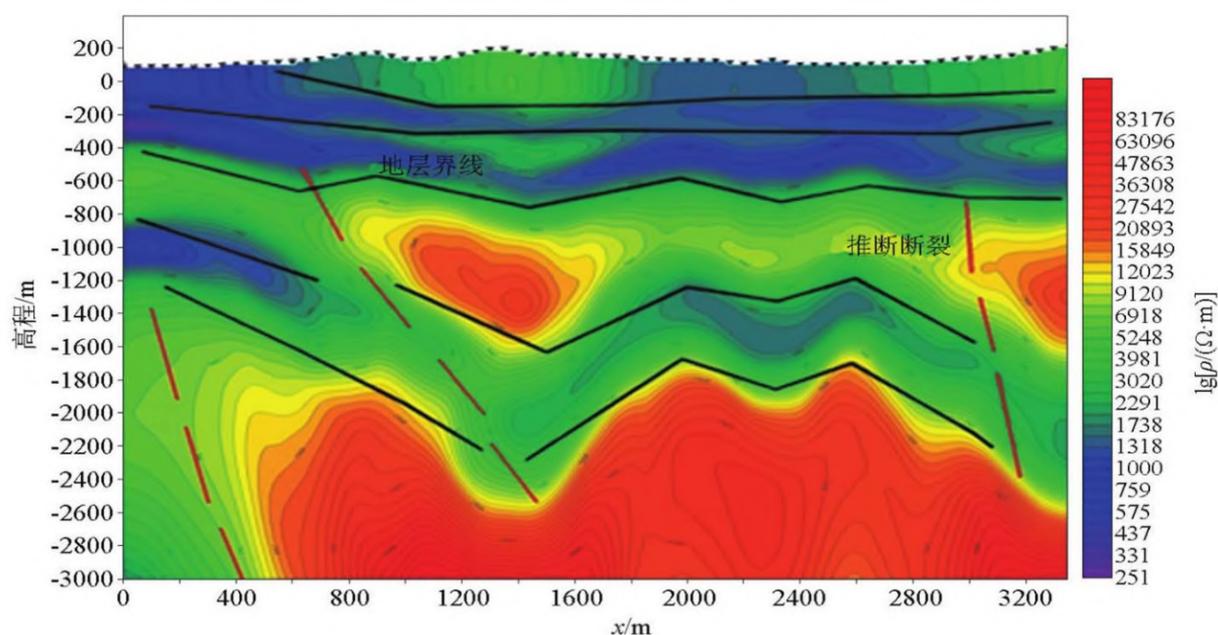


图 4 河洼 2 线广域电磁法推断图
Fig.4 Inference graph of WFEM for Hewa line 2

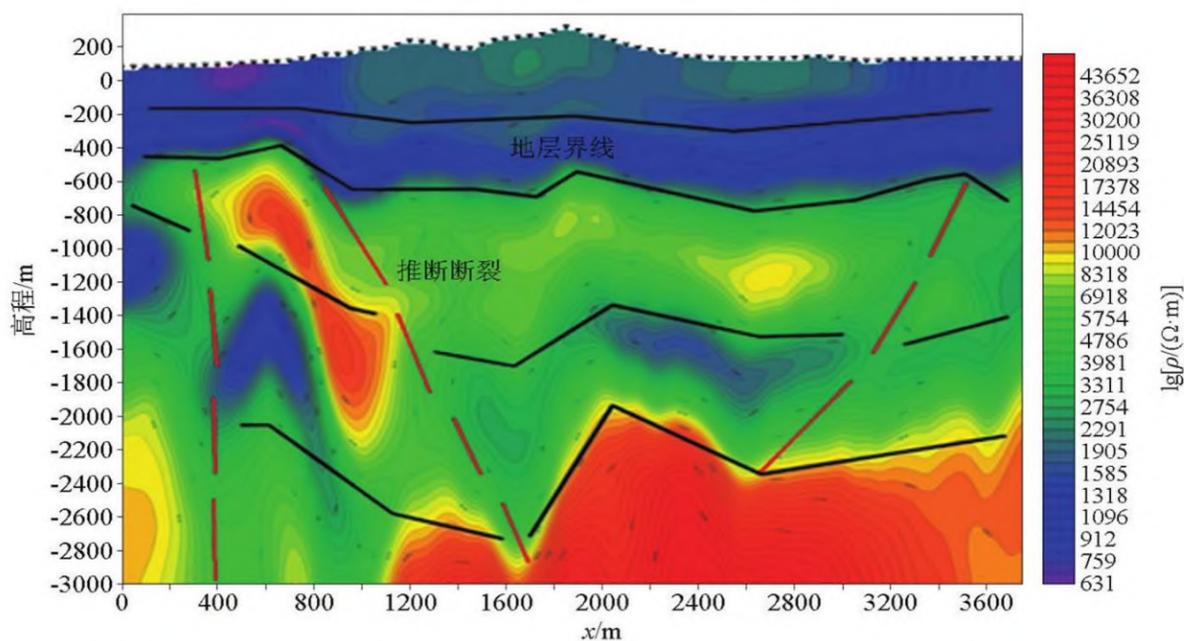


图5 河洼3线广域电磁法推断图

Fig.5 Inference graph of WFEM for Hewa line 3

阻层未被高阻屏蔽,电阻率大部分为 1 000~2 000 $\Omega \cdot m$,在测点距离 700~800 m 的位置埋深最深,大约在 3 000 m,该层有较大的研究价值。底部为高阻层,电阻率在 6000 $\Omega \cdot m$ 以上,埋深大于 1 400 m。总体来看,2 线和 3 线电性规律略有差异,但总体类似。在剖面上电阻率变化复杂,同一电性层的埋深差异较大时,预示该区域地质活动活跃,断裂发育,为成矿提供了条件^[15]。

在 3 线 1 750 号测点的位置施工孔深为 815 m

的勘查钻孔,在钻深 700 多米时,钻进某一岩体,在广域剖面大约为第一电性层和第二电性层的接触面起始,所以广域测深结果和钻井资料非常吻合。

3.3 新房多金属矿区

根据矿区特性和地表特征,确定测量电极距 MN 为 50 m,收发距 10 km,供电 AB 距为 1 km,供电电流 100 A,频率范围 0.016~8 192 Hz。5 线与 4 线平行,且 5 线位于 4 线东部。在广域剖面的附近施工有多个勘查钻孔,其岩心资料见表 1。

表 1 新房地区钻孔资料

Table 1 Drilling data in Xinfang area

钻孔编号	孔深/m	新元古界盖层厚度及岩性	含矿性
ZK102-3	1018.57	约 430 m,泥质板岩、砂质板岩、闪长岩脉	390 m 见含 Ag 砂质板岩,590~610 m、770 m 见含 Au 斜长角闪片麻岩
ZK112-16	970	约 630 m,泥质板岩、变质砂岩、大理岩	710、830、910 m 见含 Au 斜长角闪片麻岩,600~660 m 见含 Ag 变质砂岩

把两条广域剖面的数据经过处理后,反演成图(图 6、7),结合区域断裂特点,在剖面上电性参数变化部位进行断裂推断,对勘探区域断裂构造、地层界限起伏等形成初步认识。推断两条剖面中间部位存在较大断裂构造,岩性存在一定差距,但总体吻合。结合对该工区金矿成矿类型的认识,推断新房金矿床青白口系地层与下伏太古宇地层间的接触部位由西向东逐渐变浅直至出露地表。东部地区发育韧性剪切构造,这些地质构造都是金矿成矿物质富集的先决条件,且都具有一定规模。5 线数据由于受地表地形及水域的影响,局部波动较大,但总体不影响解释。

新房矿区广域电磁法剖面施工的基础上推断的岩层界面和断裂位置与附近已知的钻孔 ZK102、

ZK112 岩性变化层位以及断裂资料基本吻合,该方法数据能较真实反映地质体的电性特征。

3.4 成果验证

对辽东南地区地质资料充分收集研究,在各界专家学者共同研究下,对该地区地层特征,以及成矿机理有了一定认识,在现有的物化钻探资料的前提下,对浅部的地层界线以及矿床都有了较高的认知。在此基础上应用广域电磁法在该地区多个矿区进行剖面测量,浅部的广域电磁法推断成果与已知地质资料高度吻合,广域电磁法的数据反演成果对于存在物性差异的各个界面划分十分明显,与钻孔岩性变化吻合度也较高。可以推断在深部通过广域电磁法推断的地质构造体可信度较准确,对地层的辨识程度较高,对成矿有利层位的划分比较准确。

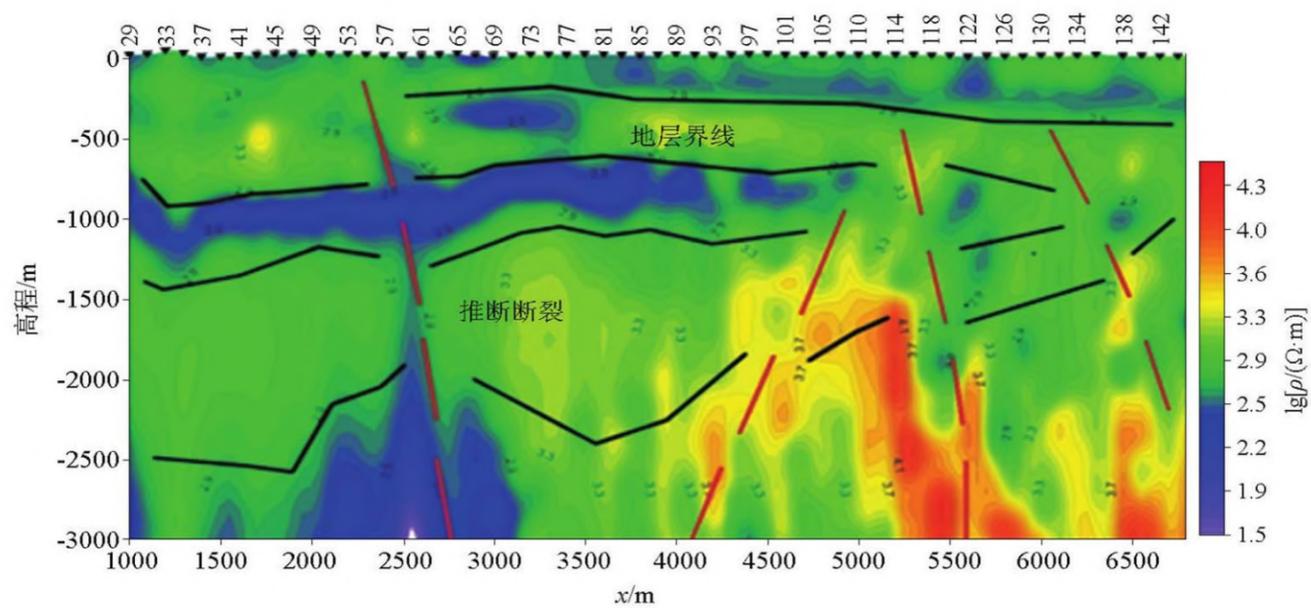


图6 新房4线广域电磁法反演电阻率断面

Fig.6 Inversion resistivity section of WFEM for Xinfang line 4

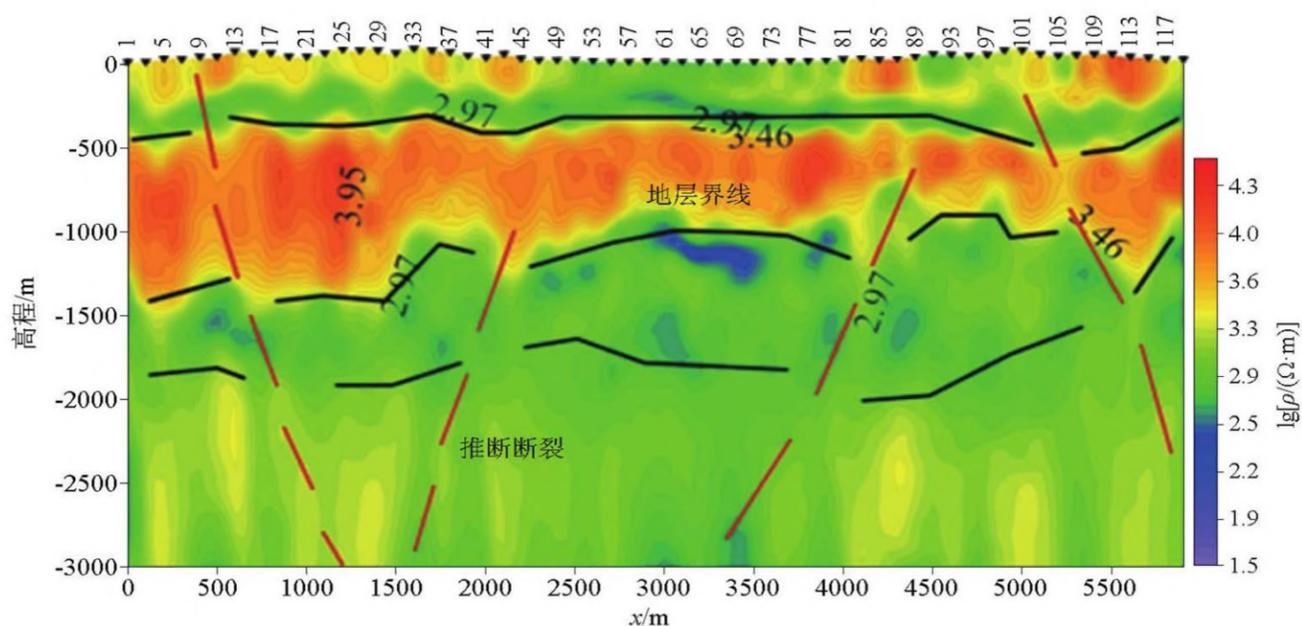


图7 新房5线广域电磁法推断图

Fig.7 Inversion resistivity section of WFEM for Xinfang line 5

4 结论

1) 三个矿区的广域电磁法勘探深度均达到3 km,对地层分层及构造断裂的辨识度较高,当供电电流超过50 A,12 km左右收发距时,采集端均能接收到较强地电信号,能够为地质勘查提供较为准确的地球物理依据。广域电磁法是辽东南地区深部金属矿勘查一种比较有效的方法。

2) 构造热液裂隙充填交代型矿床是辽东南地区金多金属矿床的主要类型。变质核杂岩中的上下盘接触面为成矿提供了前提条件,拆离断层往往是一条金属成矿带,此种构造在辽东南多地发育,可利用广域电磁法进一步确定该接触面延伸情况以及其附近形成的断裂构造,从而达到找矿目的。

参考文献 (References):

- [1] 陈荣度.辽东裂谷的地质构造演化[J].中国区域地质,1990(4):306-315,333.
Chen R D.Tectonic evolution of Liaodong rift[J].Regional Geology of China,1990(4):306-315,333.
- [2] 张秋生,等.辽东半岛早期地壳与矿床[M].北京:地质出版社,1988.
Zhang Q S, et al.Early crust and deposits in Liaodong Peninsula [M].Beijing:Geological Housing Press,1988.
- [3] 毛永涛.辽东裂谷金矿地质特征及找矿标志[J].西部探矿工程,2017(9):161-164.
Mao Y T.Geological characteristics and prospecting criteria of gold deposits in Liaodong rift[J].West-China Exploration Engineering, 2017(9):161-164.
- [4] 王文清,曲亚军.辽东古元古宙金矿地质特征及成矿模式[J].辽宁地质,2000,17(3):161-172.

- Wang W Q, Qu Y J. Geological characteristics and metallogenic model of Paleoproterozoic gold deposits in Eastern Liaoning Province[J]. Liaoning Geology, 2000, 17(3): 161-172.
- [5] 纪沫, 胡玲, 刘俊来, 等. 辽南变质核杂岩主拆离断层的波瓦状构造 (corrugation) 及其成因 [J]. 地质科学, 2008, 43(1): 12-22.
- Ji M, Hu L, Liu J L, et al. Corrugation of main detachment faults of metamorphic core complex in Southern Liaoning and its genesis [J]. Geological Science, 2008, 43(1): 12-22.
- [6] 刘永达, 邴志波, 董景超, 等. 辽东古元古界构造环境及岩石圈结构 [J]. 国土资源, 1992(3): 193-240.
- Liu Y D, Bing Z B, Dong J C, et al. Early Proterozoic tectonic environment and lithospheric structure in Eastern Liaoning [J]. Land and Resources, 1992(3): 193-240.
- [7] 陈柏林, 董法先, 李中坚. 韧性剪切带型金矿成矿模式 [J]. 地质评论, 1999, 45(2): 186-192.
- Chen B L, Dong F X, Li Z J. Metallogenic model of gold deposits of ductile shear zone type [J]. Geological Review, 1999, 45(2): 186-192.
- [8] 刘俊来, 纪沫, 申亮, 等. 辽东半岛早白垩世伸展构造组合、形成时代及区域构造内涵 [J]. 地球科学, 2011, 41(5): 618-637.
- Liu J L, Ji M, Shen L, et al. Early Cretaceous extensional tectonic assemblage, formation age and regional tectonic connotation in Liaodong Peninsula [J]. Earth Science, 2011, 41(5): 618-637.
- [9] 杨中柱, 孟庆成, 江江. 辽南变质核杂岩构造 [J]. 辽宁地质, 1996(4): 241-250.
- Yang Z Z, Meng Q C, Jiang J. Metamorphic core complex structure in southern Liaoning [J]. Liaoning Geology, 1996(4): 241-250.
- [10] 李强, 张捷, 廖勇, 等. 辽东裂谷的基本特征及含矿建造划分 [J]. 有色矿冶, 2007, 23(4): 9-11.
- Li Q, Zhang J, Liao Y, et al. Basic characteristics and ore bearing formation division of Liaodong rift [J]. Nonferrous Mining and Metallurgy, 2007, 23(4): 9-11.
- [11] 何继善. 广域电磁测深法研究 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(3): 1065-1072.
- He J S. Wide field electromagnetic sounding methods [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(3): 1065-1072.
- [12] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- He J S. Wide field electromagnetic method and pseudo-random signal electrical method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [13] 朱裕振, 许聪悦. 广域电磁法深部找矿实验效果 [J]. 物探与化探, 2011, 35(6): 743-746.
- Zhu Y Z, Xu C Y. Experimental results of deep prospecting by wide field electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(6): 743-746.
- [14] 李帝铨, 谢维, 程党性. $E-E_x$ 广域电磁法三维数值模拟 [J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2459-2470.
- Li D Q, Xie W, Cheng D X. Three dimensional modeling for $E-E_x$ wide field electromagnetic methods [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2459-2470.
- [15] 邓锋华, 杨洋, 李帝铨. 广域电磁法在隐伏金矿中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(3): 357-362.
- Deng F H, Yang Y, Li D Q. The application of wide-field electromagnetic method to hidden gold deposit [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(3): 357-362.

The application effect of WFEM in the exploration of metal deposits in the southeast of Liaoning Province

LIANG Wei-Tian^{1,2}, LI Yong¹, WANG Dong-Bo^{1,2}, LI Hao¹, YUAN Sheng¹, FENG Jia-Xin¹, SUN Wen¹
(1. Liaoning Fifth Geological Brigade Co., Ltd., Yingkou 115100, China; 2. Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: By using the wide field electromagnetic method to measure and study many metal mines in the southeast of Liaoning Province, researchers can have a fairly clear understanding of the formation of deep strata contact surface and structural development in the southeast of Liaoning Province. Through the deep understanding of the formation time of the ancient rift and metamorphic core complex, the process of rock circle uplifting and dynamic mechanism in the east of Liaoning Province, the authors applied wide field electromagnetic method and provided more accurate geophysical basis for mineralization, ore control and metallogenic mechanism in this area, which is of great significance to the establishment of metallogenic model of metal deposits in southeast Liaoning Province and the exploration of deep mineral resources.

Key words: wide field electromagnetic method; Liaodong rift; metamorphic core complex; prospecting model

(本文编辑: 叶佩)