

短偏移距瞬变电磁法在崤山矿集区的应用实现重大找矿突破

金旺林^{1,2}, 王艳红², 李士祥², 胡丽芳²

(1. 河南省有色金属矿产探测工程技术研究中心, 郑州 540016;

2. 河南省有色金属地质矿产局第一地质大队, 郑州 540016)

摘要:小秦岭、熊耳山和崤山地区处于同一大地构造位置,具有极为相似的成矿地质条件和区域地质演化背景,其中小秦岭和熊耳山地区已取得较好的找矿效果,而崤山地区却一直未取得重大找矿突破。如何在崤山地区的深部与覆盖区实现找矿突破,是崤山地质研究的一个重要课题。由于崤山地区覆盖层较厚,采用常规的物探方法,找矿效果不理想。通过开展短偏移距瞬变电磁法试验研究,在崤山地区中深部发现了有利的低阻构造单元,再结合地质资料,实现了重大找矿突破。短偏移距瞬变电磁测深试验中,通过研究短偏移距装置参数及技术指标特点,并结合已知地质物化探资料,对观测数据进行处理与反演,借助已知钻孔资料进行层位标定,从而总结短偏移距瞬变电磁测深技术方法规律;然后根据已知剖面上的研究规律,结合地质资料分析,在未知区开展试验,总结出一套适合崤山薄脉型矿床的找矿新方法。该方法突破了传统物探方法的局限性,在推广应用到整个崤山地区的地质找矿之后,实现了区域找矿重大突破。

关键词:崤山矿集区;短偏移距瞬变电磁法;隐伏岩体;高阻异常;薄脉型矿床;构造反演;重大找矿突破

中图分类号:P62

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2022)02-0110-06

A major breakthrough in ore prospecting achieved by the application of Short Offset Transient Electromagnetic Method in Xiaoshan ore concentration area

JIN Wanglin^{1,2}, WANG Yanhong², LI Shixiang², HU Lifang²

(1. Henan Non-ferrous Metal Mineral Exploration Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 540016, China;

2. The First Geological Team of Henan Provincial Non-ferrous Metals Geological and Mineral Resources Bureau, Zhengzhou 540016, China)

Abstract: For the same geotectonics, metallogenic geological conditions and regional geological evolution background of Xiaolinling, Xiong'er Mountain and Xiaoshan are pretty similar, at the same time, the first two areas have achieved good prospecting results while the last one have no significant results. How to realize ore-prospecting breakthrough in the depth and overburden area of Xiaoshan is an important subject in geological research. Due to the thick overburden in Xiaoshan area, the conventional geophysical prospecting method is not ideal. Through the experimental study of the Short Offset Transient Electromagnetic Method (SOTEM), favorable low-resistivity structural units were found in the middle and deep parts of Xiaoshan area. Combined with the geological data, an important breakthrough in ore prospecting was achieved. Through the Short Offset Transient Electromagnetic Test on the typical profiles in the Xiaoshan ore concentration area to get the device parameters and technical specifications and characteristics, known geological and geochemical data, processed an inversed observer data, and horizon calibration under the help of drilling, the Short Offset Transient Electromagnetic Method have been summarized. Then,

收稿日期:2021-03-17

基金项目:河南省有色金属地质矿产局科技创新项目(YSDK2018-02)

作者简介:金旺林(1982—),男,工程师,硕士,地球探测与信息技术专业。

according to the research law of the known section, combined with the analysis of geological data, the experiment was carried out in the unknown area, and a set of new prospecting methods suitable for the thin vein type ore deposit in Xiaoshan were concluded. This method breaks through the limitation of the traditional geophysical prospecting method, and it has achieved a major breakthrough in regional prospecting after being applied to the whole Xiaoshan area.

Key words: Xiaoshan ore concentration area; SOTEM; concealed rock mass; abnormal high resistance; thin vein deposit; structural inversion; major breakthrough in ore prospecting

崤山、小秦岭和熊耳山地区是华北克拉通南缘3个紧密相邻的晚中生代变质核杂岩区,处于同一大地构造单元,具有极为相似的成矿地质条件与区域地质演化背景^[1]。然而,小秦岭和熊耳山地区均已取得很好的找矿成果,而崤山地区却一直未能取得大的找矿突破。截至目前,小秦岭地区共探明金600 t^[2];熊耳山地区探明金300 t,银6 400 t^[3];崤山地区仅探明金30 t,银4 000 t^[4]。以往在崤山地区开展的大量地质和物探科研工作,积累了丰富的地质资料。然而,相对于小秦岭和熊耳山地区,虽然崤山地区同样处于有利的地质成矿背景,但找矿成果不显著,主要原因是该区控矿因素复杂多变,且该区未开展过系统的成矿模型与深部找矿技术方法研究^[5]。因此,如何在崤山地区的深部与覆盖区实现找矿突破,是豫西地质研究与找矿勘探面临的一个重大课题。由于以往采用的物探技术方法在该区中深部成矿预测与勘查工作中成效甚微,亟需新的物探技术方法来提升中深部矿体预测与探测精度,推动中深部找矿突破。

短偏移距瞬变电磁测深(Short offset Transient Electromagnetic Method, SOTEM)是近年发展起来的一种新的瞬变电磁测深法^[6-7]。短偏移距瞬变电磁法最早出现于苏联,20世纪50年代末至60年代初主要采用大于4~6倍目的层埋深的收、发距装置,称为远区建场测深法;20世纪60年代末期出现近区建场测深法,该方法是采用小于目的层埋深的极距装置,相对于远区建场方法具有更大的探测深度和更详细的探测结果,故引起了广泛关注^[8]。我国此项研究工作的开展始于20世纪90年代后期。陈明生等对电偶源瞬变电磁法的原理、装置及数据处理进行了介绍和论述^[9-10];黄力军等对电偶源瞬变电磁测深的正演工作进行了研究,并编制了长偏移距瞬变电磁法的一维反演软件^[11-12];牛之琰介绍了远区和近区电测深曲线的特征,对探测能力和探测深度进行了分析,并对线源长度影响测量结果进行了分析研究,提出了对测量结果进行归一化处理及处理办法,并介绍了电偶源瞬变电磁测深在地热

井勘探上的应用^[10]。

1 短偏移距瞬变电磁法装置介绍

以接地电极做场源的瞬变电磁测深装置有AB-s装置和AB-MN装置,AB-s装置主要由接地电极AB做电源发射信号,由接收线圈接收二次感应磁信号,AB-MN也是由接地电极AB做电源发射信号,而接收端为M、N电极接收电信号。本研究采用AB-s装置(图1),装置参数设置如下:供电线源的长度 $AB=1\ 000\sim3\ 000\text{ m}$,偏离距 $TR=1\ 000\sim2\ 000\text{ m}$,供电电流一般为5 A以上。接收线圈等效面积在 100 m^2 以上^[13-14]。在应用时,装置垂直于构造或矿体走向放置,然后在平行于供电线源AB的两侧布置测量剖面进行观测(图1),点距取 $10\sim50\text{ m}$,线距取 $50\sim200\text{ m}$ 。

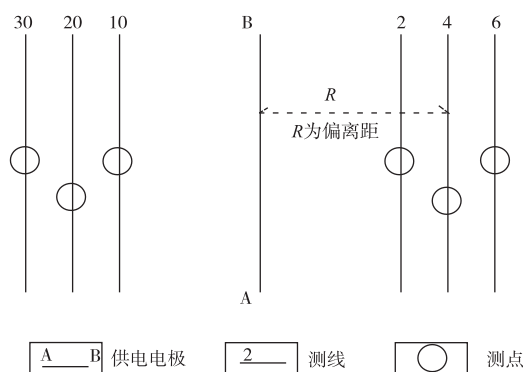


图1 短偏移距瞬变电磁法装置图

Fig. 1 Short offset transient electromagnetic apparatus

2 崤山矿集区地质及地球物理特征

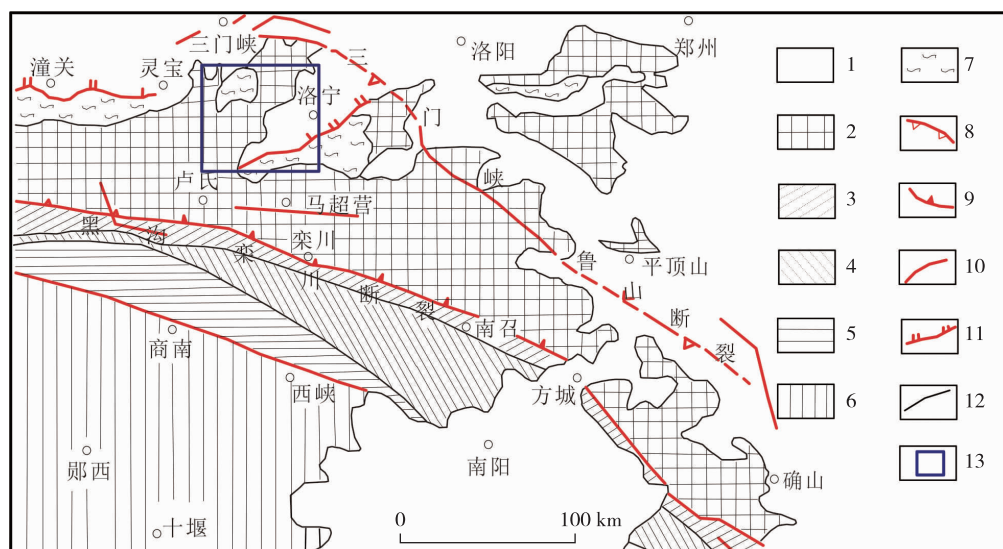
2.1 崤山矿集区地质特征

豫西地区的金银多金属矿床主要受断裂构造带控制,多形成薄而富的薄脉型银(金)—铅—锌多金属矿,该类型矿脉是熊耳山西段和崤山地区最为重要的金矿床工业类型,也是目前该地区深部找矿的主要目标^[2]。近年来,河南省有色金属地质矿产局和河南发恩德矿业公司在熊耳山西段下峪矿田合作开展的勘查工作取得了重大找矿突

破,就是来自对这一矿化类型的深部勘探和资源评价^[3]。截至2016年6月,熊耳山西段下峪矿田共获得银金属量5 828 t、铅金属量104万t、锌金属量35.6万t,使熊耳山地区一跃成为我国三大白银生产基地之一。与此同时,河南省有色金属地质矿产局在崤山地区的申家窑—葫芦峪、宽坪和寺家沟等区段取得的一些重要找矿进展,也同样来自于对薄脉型银(金)—铅—锌多金属矿的地质勘查^[4]。但是,崤山地区发现的金—多金属矿脉普遍富金且多为缓倾斜脉系,而熊耳山西段的矿脉大多富银铅且主要为陡倾斜脉系,二者之间

既有相同点又有区别点。

研究区大地构造位置处于华北地块南缘,主要由克拉通结晶基底和盖层组成,克拉通结晶基底为太古宇太华群中—深变质岩建造,克拉通盖层岩系为中元古界熊耳群火山岩建造、中元古界官道口群碎屑岩—碳酸盐岩沉积建造等。太古宇太华群具有多期次、深层次强烈变质变形的特点,盖层岩系以浅层次的脆韧性—脆性变形为主,区域性构造以近EW向为主,叠加NE向构造,发育多期推覆构造和伸展构造^[5]。岩浆活动主要集中于太古代、中元古代早期和中生代(图2)。



1—第四系;2—华北陆块盖层熊耳群、官道口群;3—宽坪群;4—二郎坪群;5—秦岭群;
6—南秦岭造山带;7—华北陆块基底太华岩群;8—山麓逆冲断层;9—栾川逆冲断层;
10—区域大断裂;11—拆离断层;12—地质界线;13—研究区范围

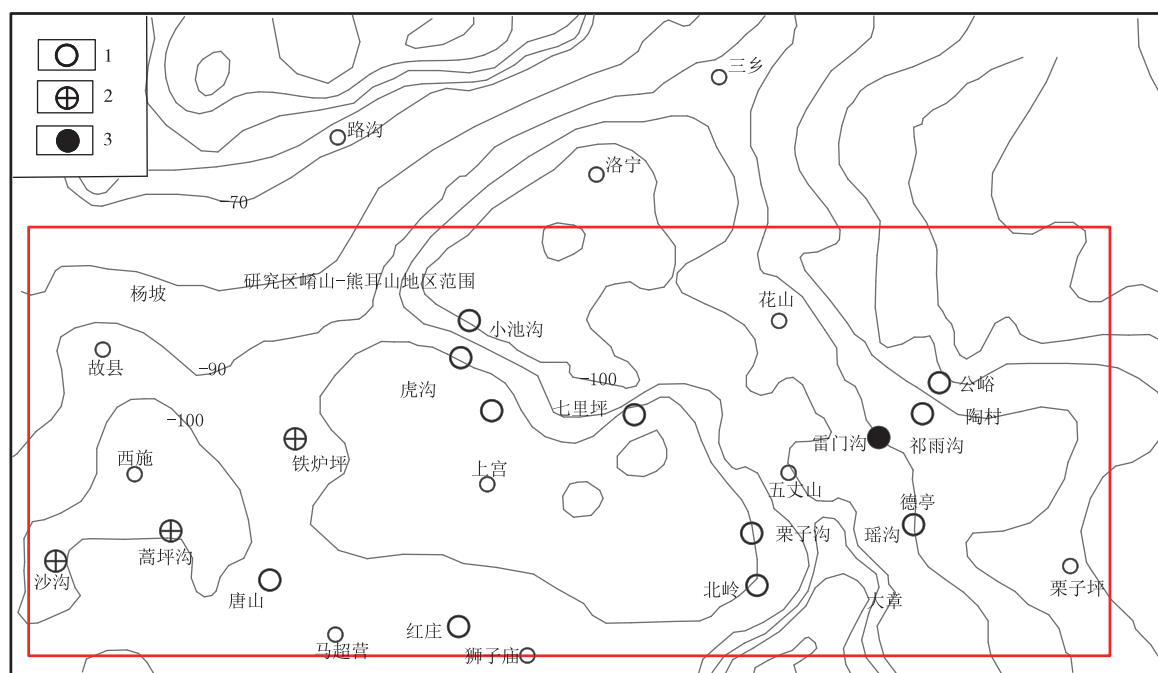
图2 崤山矿集区大地构造位置示意图

Fig. 2 Diagram of tectonic position of Xiaoshan ore concentration area

2.2 崤山矿集区地球物理特征

根据河南省地质矿产与开发局物探队(1991)研究资料显示,熊耳山、崤山矿集区内布格重力低异常主要由太华群、熊耳群内局部发育的低密度酸性岩体引起,或者是由于中—新生代的断陷盆地和断层等构造引起^[15]。从熊耳山、崤山地区1:20万布格重力异常图上可以看出,公峪—雷门沟一带和铁炉坪—康山一带存在明显的重力异常,梯度变化明显,在洛宁的三乡、雷门沟和栗子沟以南的花岗岩地区出现明显的NW向重力低异常带,并且重力低异常中心与盆地范围及岩体大致分布相吻合。另外,在熊耳群火山岩和太华群变质岩分布地区,重力资料显示为重力正异常^[16]。结合研究区内地质化探资

料分析,三乡、雷门沟和栗子沟以南的花岗岩地区的重力低异常是由洛宁中生代盆地及低密度花岗岩引起的,而花山雷门沟局部重力低异常均分布在同一重力异常带上,因此可以推测三乡、雷门沟和栗子沟3个岩体在深部可能是相连的,成为一巨大的花岗岩基。从布格重力异常图上可以看出,重力正异常中心多集中在熊耳群火山岩及太华群变质岩区域。而在岩基与熊耳群火山岩、太华群变质岩的接触部位出现明显的正负重力异常梯度带,从图中主要金银矿床点的分布位置也能看出,矿床(点)主要分布在正负重力异常梯度带上,或重力低异常舌状伸出部位的宽缓梯级带上,以及与大断裂有关的梯级带上(图3)。



1—金矿床点;2—银多金属矿床点;3—铅矿床点。注:图中等值线数值单位为 10^{-5} m/s^2

图 3 熊耳山—崤山地区重力布格异常图(据齐金忠等,2005 修改)

Fig. 3 Gravity bouguer anomaly map of Xiongershan-Xiaoshan area(modified after QI et al. ,2005)

前人曾在崤山地区开展了大量的电法工作^[17-18],并对电性参数进行了测试,统计数据略有差异,其中有代表性的岩性主要有辉绿岩、片岩、片麻岩、绢云母片岩、绿泥石片岩、白云质大理岩、石英大理岩和花岗岩等。由表 1 可知,矿石视电阻率低、

视极化率最高,花岗岩视电阻率最高、视极化率最低,围岩和矿化蚀变岩之间存在明显的视电阻率和视极化率差异,为开展短偏移距瞬变电磁法提供了很好的物性基础。

表 1 崤山金矿区标本电性参数

Table 1 Electrical parameters of samples in Xiaoshan gold mining area

矿石标本名称	块数/块	视极化率 $\eta_s/\%$		视电阻率 $\rho_s/(\Omega \cdot \text{m})$	
		变化范围	统计值	变化范围	统计值
辉绿岩	15	0.45~1.78	1.25	55~578	223.5
片岩、片麻岩	22	0.32~2.34	0.83	231~1 873	585.4
蚀变岩	17	0.48~3.45	1.88	326~1 083	432.3
绢云母片岩	20	0.65~1.42	0.87	176~341	247.7
绿泥石片岩	25	0.25~2.14	0.74	215~1 315	765.4
花岗岩	15	0.39~1.77	0.68	1 038~2 435	1 673.0
矿石	15	6.45~16.87	12.37	78~154	115.0

综上所述,崤山地区金银多金属矿表现为低阻高极化异常,与围岩存在明显的电性差异,因此可选用短偏移距瞬变电磁法进行试验研究,寻找最有利的含矿构造及赋存部位。

3 短偏移距瞬变电磁效果分析

3.1 已知剖面矿体试验情况

本次在寺家沟已知矿体上施工了 1 条 SOTEM 测线 L1,该测线剖面探测结果与崤山地区寺家沟—

宽平一带(图 3 栗子坪祁雨沟一带)金银多金属矿 E5 勘探线剖面图中的地质信息基本一致。其中,低阻异常区域(图 4)呈 20° 左右倾斜状分布,异常区域处在高阻与低阻区域的结合带,左右两侧的电阻率变化较大,且有圈闭出现,说明高阻与低阻两侧岩性不同,推测该低阻异常带为宽缓型构造矿脉,与已有剖面图中钻孔揭露的地层情况相吻合。推测剖面深部高阻区域为岩体位置,因此推断高阻与低阻结合带是成矿有利部位。

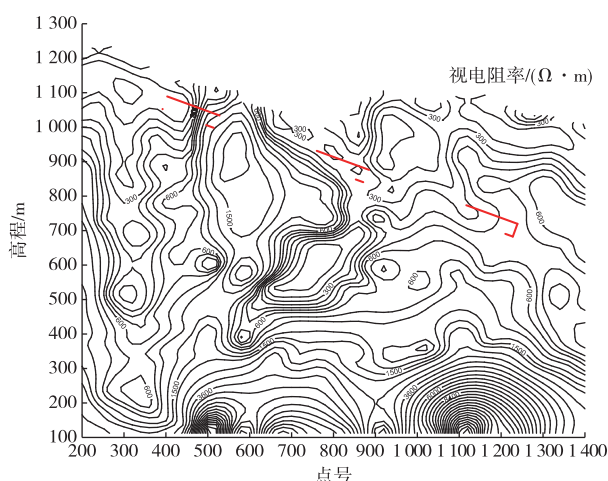


图4 L1测线视电阻率断面解释图

Fig. 4 Section interpretation and comparison of apparent resistivity of L1 line

3.2 未知矿体预测情况

L2测线布置在银化探异常区,L1电阻率总体呈左高右低的特征。结合地质资料,在图上画出了一条红色虚线的低阻异常带(图5),呈 35° 左右倾斜状分布。与化探异常区域相吻合(点号700~800和点号1000~1100处),即异常位置处在高阻与低阻区域的结合带,左右两侧的电率变化较大,且有圈闭出现,说明高阻与低阻两侧岩性不同,该低阻异常带推测为宽缓型构造矿脉,左侧0~300 m范围内,红色高阻区域推测为岩体发育位置,结合已知剖面及地质资料分析,红色虚线指示的高阻与低阻接触带位置为成矿有利部位。

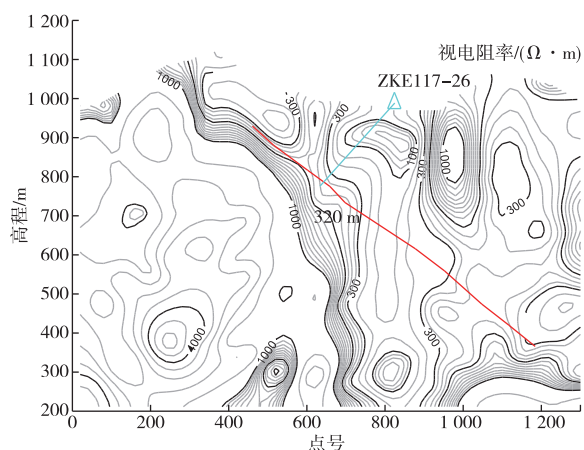


图5 L2测线异常推断解释与钻孔查证对比图

Fig. 5 Comparison diagram of anomaly inference interpretation and borehole verification of L2 line

为了验证红色虚线指示高阻与低阻结合部位是否为矿致异常,在该处设计了ZKE117-26钻孔对异

常进行查证,设计孔深320 m。通过钻探施工,在低阻异常体位置附近(ZKE117-26钻孔311 m处)发现了薄脉型银矿体,矿体真厚度0.59 m,银品位 487.5×10^{-6} ,铅品位 0.45×10^{-2} 。

4 综合研究及成矿预测

由于崱山地区控矿因素复杂多变,多年来该地区深部找矿一直未取得大的突破,传统物探技术在中深部成矿预测与勘查工作中成效甚微,亟需新的物探技术来提升中深部矿体预测与探测精度,从而实现中深部找矿突破。本课题采用的短偏移距法在崱山地区的应用研究有望在中深部发现有利的低阻成矿构造单元,再结合地质资料进行分析,可为深部找矿提供有利线索。根据以上短偏移距瞬变电磁测深在已知和未知剖面上的试验工作显示,成矿有利部位位于高阻与低阻接触带上,且与构造走向一致,图中高阻推测为岩体或基底岩系,岩体为矿体富集提供了物质来源,同时低阻破碎带也为矿化提供了运移通道。因此,成矿的物质来源和运移通道均已具备,推测该位置为成矿有利部位。下一步拟结合地质资料,在电阻率过渡部位开展激电测深工作,圈定找矿靶区,可获得有重要意义的成果。

5 结论

通过在崱山已知和未知矿脉剖面开展试验工作,利用短偏移距瞬变电磁法可以准确地确定中深部隐伏岩体,再结合收集的地质矿床成矿类型资料,进一步确定找矿有利靶区。

随着崱山矿集区内矿产资源开采力度的加大,一些矿山已经出现资源危机,寻找新的接替资源显得十分迫切和必要。因此,亟需加大地质勘查和研究工作的投入,加强探测方法的应用研究,从而寻找新的接替矿产资源。

综上所述,总结出该地区开展物探找矿的基本规律:

1)通过研究发现,短偏移距瞬变电磁法采集的是纯异常信号,没有静场效应和近场源效应,功率大、勘探深度大且工作效率高,可多台接收机同时工作,装置灵活,适应山区等恶劣地形。在复杂地形条件下,中深部找矿具有较好的探测效果。

2)当收发距较近时,短偏移距瞬变电磁法易受到激发极化场干扰,收发距较远时信号较弱,所以工作中需要选取合适的收发距,既要保证信噪比,又要保证信号受激发极化影响小。

3)本研究遵循了从已知到未知,从浅层到深层多次解释,再结合地质物探资料综合解释等手段,对以后类似工区开展薄脉型矿床勘查具有很好的指导价值。

4)通过工作区物探异常推断和地质资料综合解释,推测在崂山宽坪—寺家沟矿区中深部存在隐伏岩体,高阻岩体与上部构造破碎带中电阻梯度变化的平缓位置具有很好的找矿前景。

参 考 文 献

- [1] 王志光. 华北地块南缘地质构造演化与成矿[M]. 北京:冶金工业出版社,1996.
WANG Zhiguang. Tectonic evolution and mineralization of the south margin of the North China Block [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,1996.
- [2] 罗铭玖,黎世美,卢欣祥,等. 河南省主要矿产的成矿作用及矿床成矿系列[M]. 北京:地质出版社,2000.
LUO Mingjiu, LI Shimei, LU Xinxiang, et al. Metallogenesis and metallogenic series of main mineral deposits in Henan province[M]. Beijing: Geological Publishing House,2000.
- [3] 赵定生. 河南龙门店银矿地质特征及成矿规律研究[J]. 黄金科学技术,2012,19(6):19-21.
ZHAO Dingsheng. Research on the geological characteristics and mineralization regularity of Longmendian silver mine, Henan province [J]. Gold Science and Technology, 2012, 19(6):18-21.
- [4] 宋立强. 崂山矿集区金多金属矿床成矿模式与大比例尺成矿预测[D]. 武汉:中国地质大学,2015.
SONG Liqiang. The metallogenic model and large scale metallogenic prediction of the Au-polymetallic deposit in Xiaoshan ore collection area[D]. Wuhan: China University of Geosciences,2015.
- [5] 高帅,高喜,高领. 河南崂山地区金矿床的三位一体成矿浅析[J]. 地质与资源,2015(6):567-571.
GAO Shuai, GAO Xi, GAO Ling, et al. A triad analysis of ore deposits in Xiaoshan district Henan province[J]. Geology and Resources,2015(6):567-571.
- [6] 陈卫营. 短偏移距电性源瞬变电磁法研究[D]. 桂林:桂林理工大学,2012.
CHEN Weiying. Study on short offset transient electromagnetic method of electrical source[D]. Guilin: Guilin University of Technology,2012.
- [7] 白登海. 时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计算[J]. 地球物理学报,2003,46(5):697-704.
BAI Denghai. Numerical calculation of whole-course apparent resistivity in the central mode of transient electromagnetic method in time domain [J]. Journal of Geophysics, 2003, 46(5):697-704.
- [8] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 北京:地质出版社,1990.
PIAO Huarong. Principle of electromagnetic sounding [M]. Beijing: Geological Publishing House,1990.
- [9] 陈明生. 电偶源瞬变电磁测深研究[J]. 煤田地质与勘探,1999(4):27-30.
CHEN Mingsheng. Study on transient electromagnetic sounding of electric couple source [J]. Coal Geology and Exploration,1999(4):27-30.
- [10] 牛之琰. 源瞬变电磁法及应用[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1986.
NIU Zhilian. Source transient electromagnetic method and its application [M]. Changsha: Central South University of Technology Press,1986.
- [11] 黄力军. 电偶源瞬变电磁测深—维全区视电阻率解释方法研究[J]. 物探与化探,1995,19(5):391-397.
HUANG Lijun. Study on the interpretation method of one dimensional apparent resistivity of transient electromagnetic sounding with electric dipole source [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,1995,19(5):391-397.
- [12] 苏朱刘,胡文宝. AB-s 方式瞬变电磁测深资料处理方法研究[J]. 石油地球物理勘探,2002,37(3):262-266.
SU Zhuliu, HU Wenbao. Study on the processing method of AB-s transient electromagnetic sounding data [J]. Petroleum Geophysical Exploration,2002,37(3):262-266.
- [13] 陈卫营,薛国强,李梅芳,等. 电性源近场区瞬变电磁法响应特征[J]. 物探化探计算技术,2011,33(增刊1):122-126.
CHEN Weiying, XUE Guoqiang, LI Meifang, et al. Response characteristics of transient electromagnetic method in near field of electrical source [J]. Geophysical and Geochemical Calculation Techniques,2011,33(S1):122-126.
- [14] 王保峰. 可控源音频电磁法在皖南某矿区深部勘查中的应用[J]. 有色金属(矿山部分),2019,71(3):34-38.
WANG Baofeng. Application of CSAMT method for deep prospecting in a typical mine area in Southern Anhui [J]. Nonferrous Metals(Mining Section),2019,71(3):34-38.
- [15] JUPP D L B, VOZOFF K. Stable iterative methods for the inversion of geophysical data[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society,1975,42:957-976.
- [16] 张瑜麟,张林. 熊耳山西段银铅矿找矿地球物理标志研究[J]. 矿产与地质,2003,17(增刊1):272-274.
ZHANG Yulin, ZHANG Lin. Study on geophysical markers of silver lead ore prospecting in the Western Xiong'er Mountains [J]. Minerals and Geology,2003,17(S1):272-274.
- [17] 张鹏,张璐,姚夫义,等. 南秦岭杨木沟钼矿地质特征及矿床成因探析[J]. 有色金属(矿山部分),2021,73(5):106-112.
ZHANG Peng, ZHANG Lu, YAO Fuyi, et al. Geological characteristics and genesis of the Yangmugou molybdenum deposit in South Qinling [J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2021,73(5):106-112.
- [18] 杨守渠. 物探在小秦岭寻找隐伏金矿中的应用效果[J]. 物探与化探,2013(4):37-41.
YANG Shouqu. Application of geophysical prospecting for hidden gold deposits in Xiaolinling Mountains [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2013(4):37-41.

(编辑:周叶)