



引文格式: 陈靖, 郭文波, 王宏宇, 等. 综合电磁法在凤太二里河铅锌矿深部的找矿效果分析[J]. 西北地质, 2024, 57(1): 196–206. DOI: 10.12401/j.nwg.2023177

Citation: CHEN Jing, GUO Wenbo, WANG Hongyu, et al. Analysis on Prospecting Effect of Integrated Electromagnetic Methods in Deep Prospecting of Fengtai Erlihe Lead–Zinc Deposit[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 196–206. DOI: 10.12401/j.nwg.2023177

综合电磁法在凤太二里河铅锌矿深部的找矿效果分析

陈靖^{1,2}, 郭文波^{2,*}, 王宏宇², 张建军³, 顾欣⁴, 王伟², 冯凡², 刘敏², 朱恩²

(1. 西北有色地质矿业集团有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 西安西北有色物化探总队有限公司, 陕西 西安 710068;
3. 陕西有色金属控股集团有限责任公司, 陕西 西安 710000; 4. 西安西北有色地质研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 二里河铅锌矿是凤太矿集区中具有代表性的重要铅锌矿床之一, 近些年找矿方向转向已知矿体深部及外围。根据二里河地区地质、地球物理特征, 结合多年在凤太地区的综合地球物理找矿工作, 分析了回线源瞬变电磁法、电性源短偏移距瞬变电磁法及广域电磁法在二里河地区的实际应用效果, 对 3 种方法的特点和适用性进行总结, 认为: 回线源瞬变电磁法、电性源短偏移距瞬变电磁法及广域电磁法在该地区深部找矿具有可行性; 回线源瞬变电磁法对于圈定矿体水平位置具有较好的效果, 电性源短偏移距瞬变电磁法对低阻异常较为敏感, 广域电磁法分辨率较高, 同时探测深度可达到 2 500 m。此外针对二里河矿区的找矿工作, 提出物探工作建议: 采用以广域电磁法和电性源短偏移距瞬变电磁法为首选的综合电磁探测方法, 同时应尽可能采用长剖面 and 面积性物探工作。

关键词: 电磁法; 回线源瞬变电磁法; 电性源短偏移距瞬变电磁法; 广域电磁法; 深部找矿

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)01-0196-11

Analysis on Prospecting Effect of Integrated Electromagnetic Methods in Deep Prospecting of Fengtai Erlihe Lead–Zinc Deposit

CHEN Jing^{1,2}, GUO Wenbo^{2,*}, WANG Hongyu², ZHANG Jianjun³, GU Xin⁴,
WANG Wei², FENG Fan², LIU Min², ZHU En²

(1. Northwest Nonferrous Geological Mining Group Limited Company, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Geophysical and Geochemical Exploration Corporation, Bureau of Geological Exploration for Nonferrous Metals in Northwest China, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Nonferrous Metals Holding Group Co., Ltd., Xi'an 710000, Shaanxi, China; 4. Xi'an Northwest Geological Institute for Nonferrous Metals Co., Ltd, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Erlihe lead-zinc deposit is one of the representative large-middle lead-zinc deposits in Fengtai ore-field. In recent years, the prospecting direction has shifted to the deep and periphery of the known ore body. According to the geological and geophysical characteristics of Erlihe area and combined with the comprehensive prospecting work in Fengtai area for many years, this paper analyzes the practical application effects of loop

收稿日期: 2023-02-14; 修回日期: 2023-11-06; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 国家重点研发计划项目“高分辨地球电磁特性综合测量系统”(2022YFF0706204), 西北有色地质矿业集团有限公司博士后项目“二里河矿区深部及外围综合物探找矿关键技术及应用研究”(XBDK202008)联合资助。

作者简介: 陈靖(1984–), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事地球物理方法理论及应用研究。E-mail: chenjing_0528@163.com。

* 通讯作者: 郭文波(1966–), 男, 正高级工程师, 主要从事电磁法理论方法及应用研究。E-mail: guowenbo2003@163.com。

source transient electromagnetic method (TEM), electrical source short-offset transient electromagnetic method(SOTEM) and wide field electromagnetic method in Erlihe area. It is concluded that TEM, SOTEM and wide field electromagnetic method are feasible in deep prospecting for this area; TEM has a good effect on delineating the horizontal position of the ore body. SOTEM is more sensitive to low resistivity anomaly, the resolution of wide field electromagnetic method is high, and the detection depth can reach 2 500 meters; According to the characteristics of Erlihe lead-zinc deposit, it is suggested to adopt the comprehensive electromagnetic detection method with wide field electromagnetic method and SOTEM as the first choice, and use long sections and area geophysical exploration as far as possible.

Keywords: electromagnetic method; loop source transient electromagnetic method; short-offset transient electromagnetic method; wide field electromagnetic method; deep prospecting

二里河铅锌矿床是陕西凤太矿集区北部典型的大型铅锌矿床之一,位于八方山-二里河矿床东段(王瑞廷等, 2012, 2023)。随着多年的勘查、开发,地表露头矿及已知延伸矿体的开采已日益减少,寻找深部及外围隐伏矿体是近些年找矿的主攻方向(田民等, 2004; 毛景文等, 2005; 李红中等, 2009; 祝新友等, 2011; 高卫宏等, 2016; 王义天等, 2018)。然而,深部及隐伏部位找矿是目前公认的难题(罗杰等, 2022; 李忠等, 2022),由于规模、埋深以及与围岩的物性差异、设备探测能力及人文干扰等,深部目标体通常引起的地球物理异常非常微弱并且具有不确定性(刘天放等, 1992; 滕吉文等, 2022; 张津瑞等, 2023),故针对本矿,开展已知矿区地下 800~1 000 m 第二找矿空间深部找矿,或已知区域外围隐伏矿体勘查(叶天竺, 2014)是当前二里河铅锌矿迫切需要解决的难题,并且这对整个凤太地区的找矿工作有重要意义。

近年来,二里河地区已经开展了丰富的物探工作,包括区域上的重磁勘探、大比例尺地面高精度磁测、自然电位法、激电中梯、可控源音频大地电磁测深、高频大地电磁测深等,对区域和矿区的地质构造特征、成矿规律和隐伏地质构造特征已有了许多成果。然而这些方法和成果对于解释深部地质构造和指导深部和外围隐伏矿体找矿还远远不够。因此需要通过多种物探手段提高对地下深部地质构造和地质体分布的深层次认识,加大大深度的物探探测技术应用,为二里河铅锌矿及凤太同类型矿床第二空间找矿突破提供有效、适用的物探方法手段。

1 地质特征

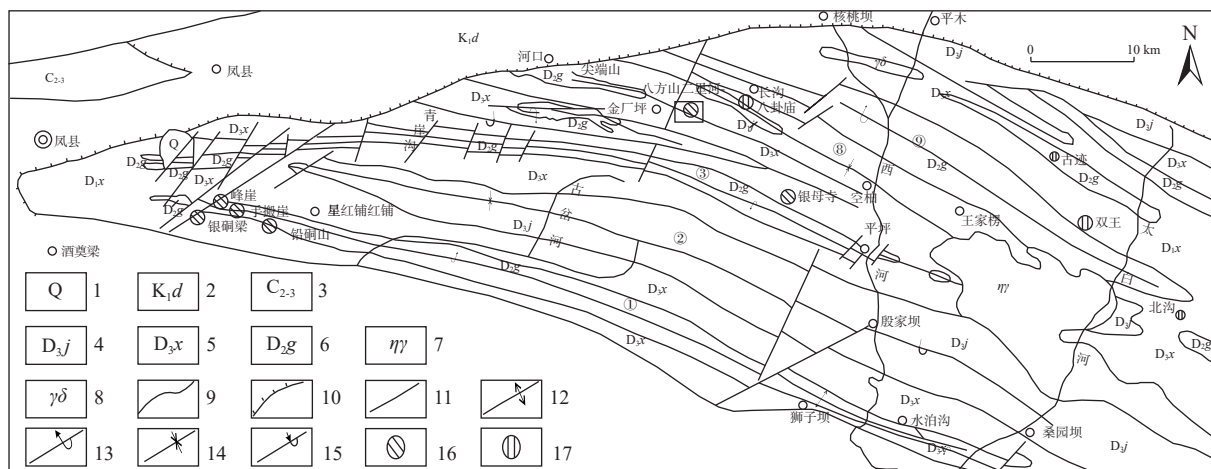
1.1 区域地质特征

研究区地处秦岭造山带凤太矿集区中北部(周小

康等, 2020)。该区广泛出露中泥盆统、上泥盆统,另有二叠系、三叠系及白垩系分别在区内南北部局地出现。泥盆系主要为一套浅变质碳酸盐岩-泥质碎屑岩建造(王义天等, 2018; 魏丽等, 2021)。从老到新依次为中泥盆统马槽沟组(D_2m)、古道岭组(D_2g)、上泥盆统星红铺组(D_3x)、九里坪组(D_3j)。铅锌矿体主要赋存于古道岭组灰岩与星红铺组千枚岩间的千-灰接触带,富厚矿体往往产于该层位中(图 1)。

构造分为褶皱和断裂两大类。区内褶皱包括一级褶皱构造古岔河-桑园坝复向斜,二级褶皱构造安河寺-两河口复背斜、丝毛岭-荒草沟复向斜及银母寺-大黑沟复背斜。背斜核部主要为灰岩(D_2g),两翼主要为千枚岩(D_3x)。断裂构造包括 NW-NWW 向和 NE 向两类,一般 NW-NWW 向断裂规模较大,多表现为逆冲断层。NE 向多发育张剪性断裂,常有岩脉充填。NW-NWW 向褶皱带与 NE 向断裂带的交汇部位控制着矿集区的分布,其复合部位控制着矿床或矿体的分布。

区内侵入岩体与岩脉发育,侵入岩体主要分布于东部太白县、凤县、留坝县交界处,包括花红树坪岩体与西坝岩体。花红树坪岩体呈较小的岩株以 NWW 向侵位于泥盆系,岩石类型为中细粒花岗闪长岩。西坝岩体呈 NWW 向展布于东南部,主要由花岗闪长岩、二长花岗岩和英云闪长岩组成。除侵入岩体外, NWW 向与 NE 向脉岩发育: NWW 向脉岩主要为花岗斑岩脉,分布于凤太铅锌-金矿集区中部; NE 向脉岩主要为闪长岩脉与闪长玢岩脉,在铅锌、金矿床部位集中分布。区内铅锌、金、铜等矿产资源富集,形成 4 处 NWW 向铅锌成矿带,已查明的铅锌矿床或矿点达 10 处以上(文耀辉, 2020)。侵入岩体与岩脉为本区铅锌、金成矿提供热动力条件(王瑞廷, 2023)。



- 1.第四系; 2.下白垩统东河群; 3.中上石炭统; 4.上泥盆统九里坪组; 5.中泥盆统星红铺组; 6.中泥盆统古道岭组;
7.印支期二长花岗岩; 8.印支期花岗闪长岩; 9.地质界线; 10.不整合; 11.断层; 12.背斜; 13.倒转背斜; 14.向斜;
15.倒转向斜; 16.大中型铅锌矿床; 17.金矿床

图1 凤太矿集区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Fengtai mining area

1.2 矿区地质特征

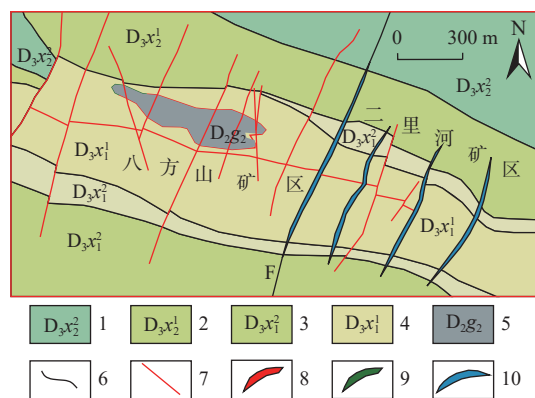
凤县二里河铅锌矿受八方山背斜控制,背斜两翼产状北侧较陡,局部向南倒转,属较紧闭背斜。已知矿床产于背斜鞍部及北翼地层由缓变陡部位或倒转翼。含矿岩石为 D_{2g} 灰岩与 D_{3x} 千枚岩间的接触带附近的硅质岩、硅化铁碳酸盐蚀变岩(王瑞廷等, 2007, 2013; 李永勤等, 2015; 代金龙, 2015; 张革利, 2018)(图2)。本区未见地表大块岩浆岩出露,仅在西南可见花岗斑岩脉带,由数条斑岩脉带组成。闪长玢岩脉均沿横断层分布。已查明矿体走向延伸 3 500 m, 目前最大埋深 950 m。

本区铅锌矿体受次级背斜构造控制,主成矿结构面为古道岭组生物碎屑灰岩与星红铺组千枚岩接触界面(硅钙面)。地层、围岩及构造等是主要的控矿要素。围岩蚀变以硅化为主,与矿化紧密相关,主要展布空间沿赋矿层位、构造薄弱部位及矿体分布。铅锌矿体主要分布在次级背斜构造鞍部及两翼,其次亦受层间滑动破碎带的控制影响。

2 地球物理特征

以往在本区开展过多次激电法、充电法、CSAMT 等工作,有较为丰富物性参数资料,所收集的岩矿石电性特征如表 1 所示。

可以看出,本区灰岩电阻率最高,其平均值为 10 k Ω ·m 以上;铁白云质千枚岩、含绿泥石铁白云质



- 1.上泥盆统星红铺组上段上层,碳质千枚岩、绢云母千枚岩夹薄层灰岩; 2.上泥盆统星红铺组上段下层,绿泥石绢云母千枚岩; 3.上泥盆统星红铺组下段上层,方解石绢云母千枚岩夹薄层灰岩; 4.上泥盆统星红铺组下段下层,铁白云质-炭质绢云母千枚岩; 5.中泥盆统古道岭组,中厚层结晶灰岩、生物灰岩; 6.地质界线; 7.断层; 8.铅锌矿体; 9.铜矿体;
10.闪长玢岩脉

图2 八方山-二里河铅锌矿床地质简图

Fig. 2 Geological diagram of Bafangshan-Erlihe lead-zinc deposit

千枚岩、绢云母千枚岩电阻率平均值为 431~647 Ω ·m, 属中低阻;含碳生物灰岩和铅锌矿石其平均值 90~1 922 Ω ·m, 属低阻。岩(矿)石电阻率差异明显,①高阻的灰岩。②中低阻千枚岩。③低阻的铅锌矿石和碳质灰岩。高阻的灰岩与中低阻千枚岩两者差异达 1~2 个数量级以上,铅锌矿石、碳质灰岩与千枚岩有 4~5 倍的差异,与灰岩有 2 个数量级以上的差异。岩

表 1 岩矿(石)电性参数统计表

Tab. 1 Statistical table of electrical parameters of rock and ore

岩(矿)石名称	电阻率($\Omega\cdot\text{m}$)			极化率(%)		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
绢云母千枚岩夹薄层灰岩	720	208	451	5.3	1.5	2.7
铁白云质千枚岩夹薄层灰岩	460	318	390	3.8	1.2	1.8
铁白云质千枚岩	536	215	431	3.4	0.8	1.6
含绿泥铁白云质千枚岩	910	153	507	1.9	1.0	1.3
绢云母千枚岩	1 322	318	647	2.7	1.2	1.6
含碳生物灰岩	7 854	508	1922	40.3	3.9	12.7
硅化灰岩	16 707	13 938	15 323	5.3	1.0	2.7
结晶灰岩	17 304	8 023	11 323	1.7	0.3	1.1
铅锌矿体	212	13	90	52.9	8.0	26.1

注: 资料来源王瑞廷等(2012)。

(矿)石极化率主要分为两大类,一类为低极化率的千枚岩及灰岩,其极化率值在 1%~5% 变化,平均值为 1.1%~2.7%;另一类为高极化率的碳质岩石和铅锌矿石,其极化率在 3.9%~52.9% 变化,平均值为 12.7%~26.1%。岩石极化率差异明显,铅锌矿石和碳质岩石与其他岩性的极化率差异在 1 个数量级以上。生物灰岩中由于有碳质残留,使灰岩的电阻率显著下降,极化率显著升高,碳质对硫化物的吸附作用明显。含碳千枚岩同样如此。

本区泥盆系古道岭组、星红铺组之间的千-灰接触带是铅锌矿找矿的地层标志。成矿有利构造为次级背斜鞍部虚脱部位、北翼地层由缓变陡部位或倒转翼,富且厚的铅锌矿体常赋存在背斜倾伏部位。硅化灰岩给元素富集提供了有利条件,是最直接的找矿目标。物探综合异常能够在寻找深部盲矿及隐伏矿方面发挥巨大作用,是重要的找矿间接标志(张耀斌等, 2016; 陈明寿等, 2017; 王瑞廷等, 2021; 李凤廷等, 2023; 滕菲等, 2023)。综上所述,区内铅锌矿富集区域可表现出低电阻、高极化特征,硅化灰岩为高电阻、低极化率特征。千枚岩-灰岩界面表现出明显的高低阻异常分界。背斜鞍部虚脱部位富矿体常表现为高阻隆起中间含有局部低阻异常。此外,背斜两翼高阻异常扭曲错动部位也可能是有利的找矿区域。以上为开展二里河深部找矿提供了物探依据。

3 综合电磁探测技术应用方法及效果

3.1 综合电磁探测技术概述

根据二里河铅锌矿地质及地球物理特征,先后在

研究区开展回线源瞬变电磁法、电性源短偏移距瞬变电磁法和广域电磁法物探工作,开展综合电磁法应用效果研究。

回线源瞬变电磁工作观测纯二次场观测,擅长在高阻围岩中寻找低阻地质体,且无地形影响。通过已知剖面试验,针对寻找背斜鞍部矿体设计了大小为 50 m×50 m、发射线框为 3 匝、接收线框为 5 匝,并经过阻抗匹配修正模型的 TEM 重叠回线装置,针对寻找背斜两翼矿体,基于其具有沿纵深和水平方向延展性大的特点,设计了大小为 100 m×100 m、点距为 25 m,线距为 100~200 m 的单匝重叠回线装置。

电性源短偏移距瞬变电磁(SOTEM)将测区偏移距缩短为 $r=0.5\sim 2H$ 处观测,发射端提供一种矩形阶跃式电流,接收端布设在在发射源两侧,一次布源可以实现大范围观测,特别在山区施工,接地导线源的布置较为方便(薛国强等, 2013, 2020; 陈卫营等, 2015, 2017; 王备战等, 2020)。SOTEM 继承了 TEM 的优点,同时由于采用小偏移距,能显著提高观测信号的信噪比,并减小体积效应,因此可以大幅度降低数据处理难度,提高结果的可靠性和准确度,尤其适合在山区开展深部找矿工作。本次工作点距 20 m,布设了 7 条剖面,剖面总长为 8.78 km。工作参数包括:发射源长度,发射电流大小、发射基频、观测时长、电极距 MN,线圈有效接收面积等,根据测区实际工作环境确定。接收参数的设置根据测区噪声环境,选择不同的叠加次数,在干扰较为严重的地区,叠加次数增多,单点的观测时间增长。数据处理阶段所做的工作包括滤波、去噪、畸点去除、地形校正、场源校正等。

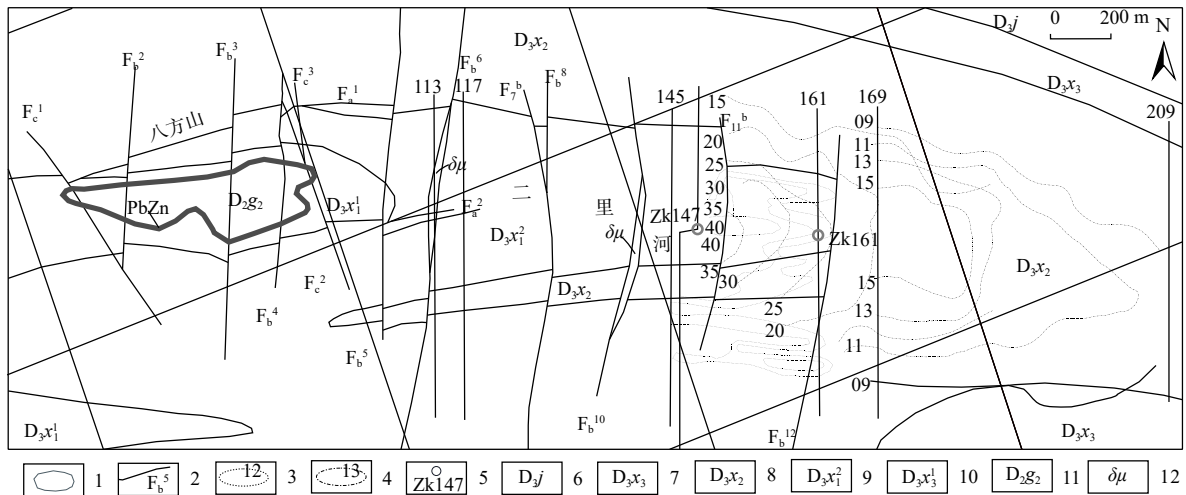
广域电磁法同可控源音频大地电磁法一样,具有场源可控的特点(底青云等, 2008; 耿涛等, 2023)。和大地电磁法相比, 它的场源更稳定可控, 信号更强。通过提取全域视电阻率计算公式, 能够在“非远区”开展测量工作, 从而极大地拓展了人工源法的观测范围, 成倍地增加了探测深度。针对 CSAMT 变频发送的缺点, 其发射信号具有多个频率成分且振幅接近。采用伪随机信号电流(何继善, 2010, 2020), 可有效提高工作效率, 改善观测精度。本次工作在二里河铅锌矿床东部某线进行, 试验测线长为 3.6 km, 方位 20°, 点距 40 m。设计最小收发距在 10.5 km 以上, 大于 7 倍以上有效探测深度, 以达到最大探测深度(1.5 km)的要求。内业采用 GME_3DI(V4.2)软件进行数据处

理解释。

3.2 应用效果

3.2.1 回线源瞬变电磁法

2000 年前后二里河铅锌矿在背斜南侧开展了回线源瞬变电磁剖面探测(图 3), 共获得 2 处瞬变电磁异常。一处位于二里河背斜鞍部, 异常沿背斜延伸方向分布。该异常由下方二里河主矿体引起, 与已知地质情况相吻合。另一处异常位于二里河背斜南翼次级褶皱上方, 与前一处异常特征具有相似性, 推测由二里河背斜南侧的次级褶皱鞍部盲矿体引起。TEM 方法在本区的找矿效果中具有可靠性(陈卫营等, 2015; 王备战等, 2020), 可探测深度可达 500~700 m, 并准确圈出了矿体的水平投影界限。



1.铅锌矿体; 2.断层及编号; 3.TEM 异常; 4.充电异常; 5.钻孔; 6.D_{3j} 上泥盆统九里坪组砂岩; 7.D_{3x3} 上泥盆统星红铺组砂质千枚岩; 8.D_{3x2} 上泥盆统星红铺组绿泥石千枚岩; 9.D_{3x1}² 上泥盆统星红铺组铁白云千枚岩; 10.D_{3x1}¹ 上泥盆统星红铺组碳质千枚岩; 11.D_{2g2} 上泥盆统古道岭组灰岩; 12.δμ 闪长玢岩

图3 二里河铅锌矿床及东延 TEM 异常等值线图(据田民等, 2004 修改)

Fig. 3 TEM anomaly contour map of Erlihe lead-zinc deposit and east extension

3.2.2 电性源短偏移距瞬变电磁法

2016 年在八方山-二里河南侧实施了 7 条 SOTEM 剖面, 该方法利用小偏移距实现大深度探测(王备战等, 2020)。7 条剖面中均存在两处低阻异常且连续性较好, 推测存在隐伏背斜和铅锌矿体(图 4)。从图 5 中可以看到, 在点号 262~278, 视电阻率表现为中间低两端高的特点, 推断此处异常为铅锌矿体的瞬变电磁响应, 与已知地质成矿规律和地质情况吻合, 埋深在 500 m 左右。另一处异常具有相似的电性特征, 推测为主背斜旁侧的次级隐伏背斜。电性源短偏移距瞬变电磁法圈定的低阻异常, 与已知铅锌矿对应关系较好, 反映本区铅锌矿体为低阻特征, 证明该方法

在本区深部找矿具有有效性, 同时, 相比 TEM 方法, SOTEM 的有效探测深度提高到 1 000 m。

3.2.3 广域电磁法

2020 年在二里河东延某线进行广域电磁法方法试验, 从剖面结果图上看(图 6), 整个剖面可以分成两大电性层: 剖面中上部呈现出中低阻的特征, 局部夹有高阻, 主要是中低阻千枚岩的反映, 局部高阻可能为石英脉、闪长玢岩脉等的反映; 剖面中下部呈现出中高阻的特征, 推测由生物结晶灰岩引起。电阻率等值线形态较为陡立, 反映了剖面上对应地层的产状较陡; 剖面中下部等值线波浪起伏较大, 反映出褶皱较为发育。结合相关地质资料, 在剖面 1 200~1 300 m

标高段, 点号 147~155 附近, 有一处相对高阻隆起异常, 认定为背斜核部结晶灰岩的反映, 界面上部及两

翼电性表现相对较低, 且两翼电阻率等值线明显向下凹陷, 使得褶皱核部及两翼形成了一个较大的低阻凹

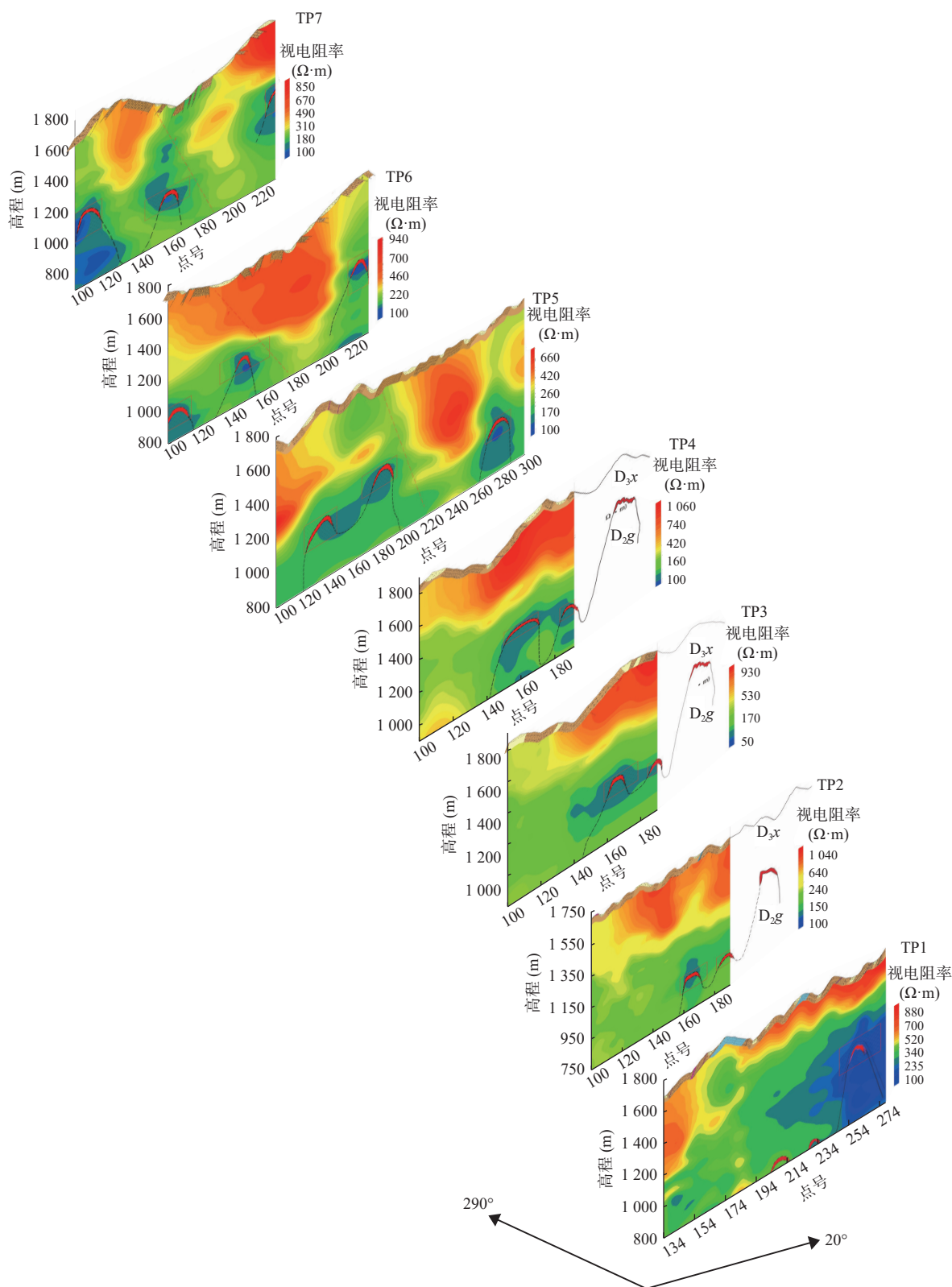


图4 TP1-TP7 线物探地质综合推断图

Fig. 4 Geophysical and geological comprehensive inference map of TP1-TP7 line

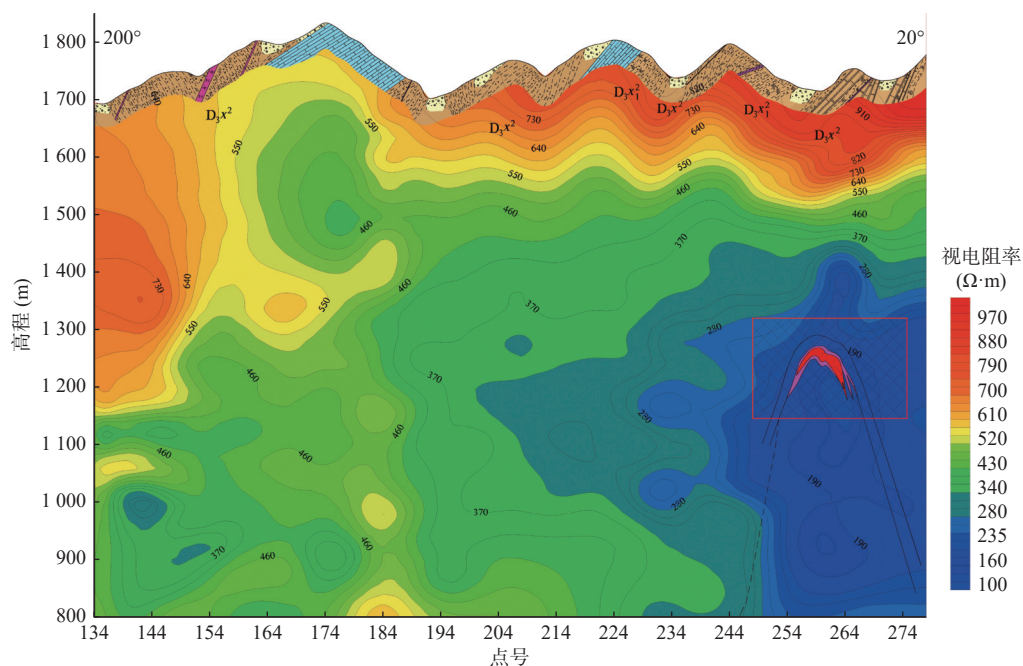


图5 TP1 线物探地质综合剖面图

Fig. 5 Geophysical and geological profile on TP1 line

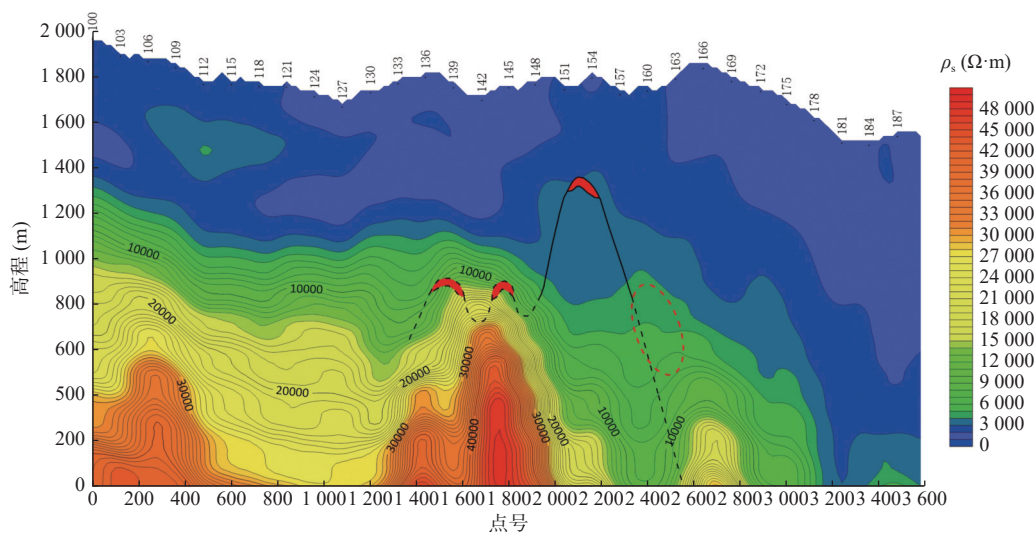


图6 广域电磁法物探地质综合剖面图

Fig. 6 Geophysical and geological profile of wide area electromagnetic method

陷区,结合该测区成矿机理,推测该处为背斜核部虚脱部位,是较好的含矿空间。此推测和电性源短偏移距瞬变电磁法 TP1 剖面情况吻合,并与地质情况做了对应,验证了方法的有效性。同时,在标高 900~1 000 m,点号 140~146 处,有一深部高阻隆起异常,且顶部等值线密集,推测为一隐伏次级背斜,这也和 SOTEM 剖面上两处低阻异常体对应较好,此推测也和电性源短偏移距瞬变电磁法 TP1 剖面情况吻合;在标高 600~800 m,点号 158~162 处,有一处明显的高

阻隆起异常,异常顶部及两翼等值线明显凹陷,电阻率异常呈局部隆起特征、电阻率等值线膨大,和点号 147~155 处的情况相似,推测有赋矿的可能;在标高 200~300 m,点号 165~167 处,还有一处清晰明显的深部高阻隆起异常,推测为控矿背斜北翼深部稳定延伸引起的电性异常,值得进一步研究。本次使用广域电磁法,在保证探测精度的前提下,大大拓展了地下探测的深度,可以达到地表下 2 500 m。

通过后期地质工程(图 7),标高 1 200~1 300 m

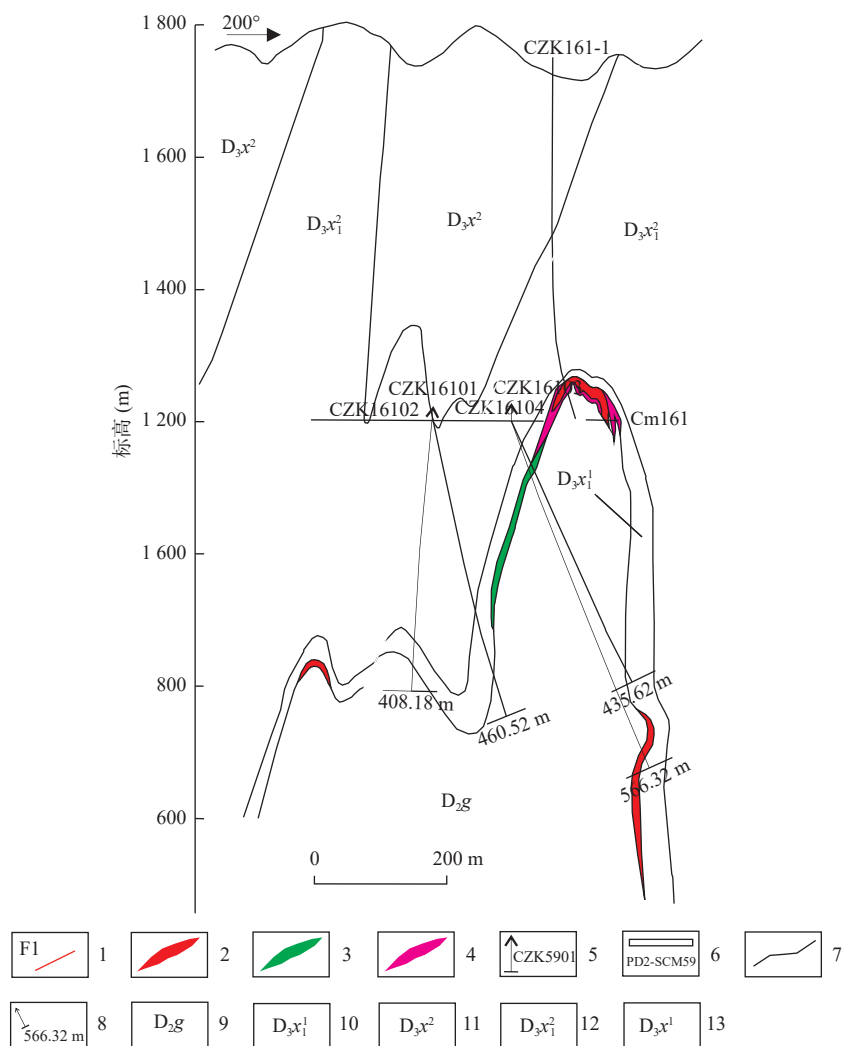


图7 二里河矿床剖面图

Fig. 7 Profiles of Erlihe Deposit

处背斜顶部的见矿部位验证了广域电磁法异常推断。在标高 800~900 m, 点号 135~146 处打钻也见到矿体赋存, 对应 SOTEM 系列剖面上反映矿体的低阻异常, 在广域电磁法综合剖面图上也有反映背斜灰岩的高阻异常与之对应。后续实施坑内钻, 在标高 600~800 m 处发现背斜延伸界面的局部扭转部位见矿, 对应广域电磁法在 158~162 处产生的明显高阻隆起异常。3 处见矿部位见矿厚度介于 0.68~15.96 m, 平均厚度为 10.39 m, Pb 品位为 0.07%~2.65%, 平均为 1.58%, Zn 品位为 2.21%~20.52%, 平均为 6.27%。

3.3 讨论

通过在二里河矿区开展综合电磁法探测,研究各

方法在该地区找矿的效果,分析认为:在二里河铅锌矿各探测阶段,回线源瞬变电磁法对圈定矿体水平位置具有较好的效果,在早期圈定了中浅部的重点异常,为后续的勘探奠定了基础。电性源短偏移距瞬变电磁法对低阻异常具有更高的敏感度,且和回线源瞬变电磁法相比,具有更高的探测深度和探测精度。首次在该区域应用广域电磁法,认为该方法对于反映深部高阻-低阻异常分界及背斜隆起形态有一定效果,探测深度可达到 2 500 m。

凤太地区的铅锌矿大多具有相似的成矿类型及控矿因素。多年来在对该地区开展瞬变电磁法、广域电磁法找矿,取得了较好的效果。如在杨家湾开展瞬

变电磁法测量,在埋深 700 m 处发现一低阻异常,经地质验证,该异常与二里河千-灰接触带出露位置相对应。在银母寺开展广域电磁法测量,物探异常经钻孔验证,发现一处 400 m 厚的无矿带及一处位于 750~1 400 m 埋深处的有利地段(祝新友, 2011; 王瑞廷, 2012)。各矿山的地质地球物理条件不尽相同,但总体结果仍反映出方法的有效性。

综上所述,回线源瞬变电磁法、电性源短偏移距瞬变电磁法及广域电磁法在凤太铅锌矿深部找矿具有可行性,并建议工作方式以广域电磁法和电性源短偏移距瞬变电磁法为首选,开展综合物探找矿实践。

4 结论

(1) 通过在凤太矿集区二里河铅锌矿开展回线源瞬变电磁法、SOTEM 法及广域电磁法,分析总结各方法的成效:瞬变电磁法通过面积性工作发现两处异常体,结合地质情况,一处为已知矿体,一处为隐伏含矿次级背斜;SOTEM 通过 7 条剖面,发现了连续性的两处异常,推测为主背斜旁侧的次级隐伏背斜,并在 TP1 剖面上圈定了一处低阻异常,证实与已知矿吻合;广域电磁法试验剖面上显示的几处异常和 SOTEM 方法 TP1 剖面的已知矿体及 TP1~TP7 推断的隐伏背斜和铅锌矿体对应良好,对于反映深部高阻-低阻异常分界及背斜隆起形态有一定效果。同时在其北侧深部又有新的发现,待进一步证实。以上成果表明电磁法在本区深部找矿中具有可行性和有效性。

(2) 根据各方法的特点分析总结得出,TEM 方法在本区找矿探测深度可达 500~700 m,能准确圈出了矿体的水平投影界限;SOTEM 对低阻异常的探测较好,探测深度可达 1 000 m。广域电磁法在保障了探测精度的前提下,可将探测深度拓展到 2 500 m 以下。

(3) 针对二里河铅锌矿复杂的成矿背景以及多年勘探经验,总结认为开展单一方法的勘探工作效果不佳,在当前深部找矿 1 000 m 以深的要求下,开展以广域电磁法和电性源短偏移距瞬变电磁法为首选的可实现探测深度大、抗干扰能力强、分辨率高的综合电磁探测方法,同时建议采用长剖面 and 面积性物探工作,实现复杂地形地貌和地质成矿条件下高分辨率探测。

参考文献(References):

陈明寿,刁卫红,王建涛.陕西凤太矿铅锌矿集区矿床成因及找

矿方向探讨[J].甘肃冶金, 2017, 39(1): 72-77.

CHEN Mingshou, DIAO Weihong, WANG Jiantao. Orogenesis and Prospecting Direction in the Feng-Tai Pb-Zn Deposit Cluster Area in Shanxi[J]. Gansu Metallurgy, 2017, 39(1): 72-77.

陈卫营,李海,薛国强,等.基于垂直磁场的 SOTEM 数据一维 OCCAM 反演及其应用于三维模型的效果[J].地球物理学报, 2017, 60(9): 3667-3676.

CHEN Weiying, LI Hai, XUE Guoqiang, et al. One-dimensional OCCAM inversion of SOTEM data based on vertical magnetic field and its application to three-dimensional model[J]. Journal of Geophysics, 2017, 60(9): 3667-3676.

陈卫营,薛国强,崔江伟.电性源瞬变电磁发射源形变对观测结果影响分析[J].地球物理学进展, 2015, 30(1): 126-132.

CHEN Weiying, XUE Guoqiang, CUI Jiangwei. Analysis on the influence from the shape of electric source TEM transmitter[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 126-132.

代金龙.秦岭凤太矿田铅锌矿成矿特征分析[J].地下水, 2015, 37(3): 209-211.

DAI Jinlong. Analysis on metallogenic characteristics of lead-zinc deposit in Fengtai ore field, Qinling[J]. Ground Water, 2015, 37(3): 209-211.

底青云,王若.可控源音频大地电磁数据正反演及方法应用[M].北京:科学出版社, 2008: 1-192.

DI Qingyun, WANG Ruo. Forward and inverse modeling of controllable source audio magnetotelluric data and its application[M]. Beijing: Science Press, 2008: 1-192.

高卫宏,王瑞廷,李青峰,等.西秦岭凤太矿集区西部铅锌成矿特征及找矿方向[J].矿产与地质, 2016, 30(2): 227-233.

GAO Weihong, WANG Ruiting, LI Qingfeng, et al. Metallogenic characteristic and prospecting direction of Pb-Zn deposits in the western part of Fengtai ore-concentrated area in West Qinling[J]. Mineral Resources and Geology, 2016, 30(2): 227-233.

耿涛,郭培虹,冯治汉,等.北秦岭华阳川地区复杂地形条件下隐伏硬岩型铀矿的地球物理勘查方法[J].西北地质, 2023, 56(2): 225-244.

GENG Tao, GUO Peihong, FENG Zhihan, et al. Geophysical Exploration Method of Concealed Hard Rock Type Uranium Deposit with Complex Topographic Conditions in Huayangchuan Area, North Qinling Mountains[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 225-244.

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, 2010: 1-225.

HE Jishan. Wide-area electromagnetic method and pseudo-random signal electrical method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 1-225.

何继善.广域电磁法理论及应用研究的新进展[J].物探与化探, 2020, 44(5): 985-990.

- HE Jishan. New research progress in theory and application of wide field electromagnetic method[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2020, 44(5): 985–990.
- 胡乔青, 王义天, 王瑞廷, 等. 西秦岭凤太矿集区八方山-二里河铅锌(铜)矿床成矿地质特征与矿床成因探讨[J]. *地质与勘探*, 2013, 49(1): 99–112.
- HU Qiaoping, WANG Yitian, WANG Ruiting, et al. Geological Characteristic and Genesis of the Bafangshan-Erlihe Pb-Zn(-Cu) Deposit in the Fengxian-Taibai Ore Concentration Area, West Qinling[J]. *Geology and Exploration*, 2013, 49(1): 99–112.
- 李凤廷, 苗虎林, 付佳, 等. 那陵郭勒河下游重磁异常与铁多金属矿找矿预测[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 155–165.
- LI Fengting, MIAO Hulin, FU Jia, et al. Gravity and Magnetic Anomalies and Prospecting Prediction of Iron Polymetallic Deposits in the Downstream of Nalingguole River[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 155–165.
- 李红中, 杨志军, 周永章, 等. 秦岭造山带西段八方山-二里河 Pb-Zn 矿区硅质岩的微组构分析及其意义[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2009, 34(2): 12–17.
- LI Hongzhong, YANG Zhijun, ZHOU Yongzhang, et al. Microfabric Characteristics of Cherts of Bafangshan-Erlihe Pb-Zn Ore Field in the Western Qinling Orogen[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(2): 12–17.
- 李永勤, 王瑞廷, 丁坤, 等. 陕西凤县八卦庙金矿脆韧性剪切带控矿特征及成矿模式探讨[J]. *西北地质*, 2015, 48(1): 101–108.
- LI Yongqin, WANG Ruiting, DING Kun, et al. Ore-controlling Characteristic and Metallogenic Model of Brittle Ductile Shear Zones of Baguamiao Gold Deposit in Fengxian County, Shaanxi[J]. *Northwestern Geology*, 2015, 48(1): 101–108.
- 李忠, 代达龙, 张小兵, 等. 个旧矿集区东区重力场特征及地质-地球物理找矿模型[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(6): 751–761.
- LI Zhong, DAI Dalong, ZHANG Xiaobing, et al. Characteristics of gravity field and establishment of geological and geophysical prospecting model in east Gejiu ore concentration area[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2022, 49(6): 751–761.
- 刘天放, 李志聘. 矿井地球物理勘探[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992: 1–36.
- LIU Tianfang, LI Zhiran. *Mine geophysical exploration*[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1992: 1–36.
- 罗杰, 周仲礼, 邹天一, 等. 基于 PSO-CNN 的深部找矿预测模型构建[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(6): 697–708.
- LUO Jie, ZHOU Zhongli, ZOU Tianyi, et al. Construction of deep prospecting prediction model based on PSO-CNN [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2022, 49(6): 697–708.
- 毛景文, 李晓峰, 李厚民, 等. 中国造山带内生金属矿床类型、特点和成矿过程探讨[J]. *地质学报*, 2005, 79(3): 342–372.
- MAO Jingwen, LI Xiaofeng, LI Houmin, et al. Types and Characteristics of Endogenetic Metallic Deposits in Orogenic Belts in China and Their Metallogenic Processes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(3): 342–372.
- 滕吉文, 薛国强, 宋明春. 第二深度空间矿产资源探查理念与电磁法找矿实践[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(10): 3975–3985.
- TENG Jiwen, XUE Guoqiang, SONG Mingchun. Theory on exploring mineral resources in the second deep space and practices with electromagnetic method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(10): 3975–3985.
- 滕菲, 任军平, 张国立, 等. 莫桑比克上利戈尼亚地区航磁、航放异常特征及钽-铌矿找矿方向[J]. *西北地质*, 2023, 56(5): 49–60.
- TENG Fei, REN Junping, ZHANG Guoli, et al. Aeromagnetic and Aeroradiometric Characteristics in Alto Ligonha Area, Mozambique and Prospecting Direction of Ta-Nb deposits[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(5): 49–60.
- 田民民, 袁旭东, 张永让, 等. 凤县二里河铅锌矿床后续地质找矿探讨[J]. *矿产与地质*, 2004, 18(2): 134–138.
- TIAN Minmin, YUAN Xudong, ZHANG Yongrang, et al. Discussion of Geological Prospecting in Erlihe Pb-Zn Deposit, Fengxian[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2004, 18(2): 134–138.
- 王备战, 王瑞廷, 王宏宇, 等. 陕西凤太矿集区深部铅锌矿产资源潜力及地球物理找矿方向[J]. *地球科学与环境学报*, 2021, 43(3): 801–818.
- WANG Beizhan, WANG Ruiting, WANG Hongyu, et al. Potential and Geophysical Prospecting Direction of Pb-Zn Mineral Resources in the Deep Area of Fengtai Ore-gathering Area, Shaanxi, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(3): 801–818.
- 王瑞廷, 王涛, 高章鉴, 等. 凤-太多金属矿集区主要金属矿床成矿系列与找矿方向[J]. *西北地质*, 2007, 40(2): 77–84.
- WANG Ruiting, WANG Tao, GAO Zhangjian, et al. The Main Metal Deposits Metallogenic Series and Exploration Direction in Feng-Tai Ore Cluster Region, Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 2007, 40(2): 77–84.
- 王瑞廷, 王东生, 代军治, 等. 秦岭造山带陕西段-主要矿集区铅锌铜金矿综合勘查技术研究[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 1–262.
- WANG Ruiting, WANG Dongsheng, DAI Junzhi, et al. Study on comprehensive exploration technology of lead, zinc, copper and gold deposits in Shaanxi section of Qinling orogenic belt and main ore concentration areas[M]. Beijing: Geological Publish-

- ing House, 2012: 1–262.
- 王瑞廷, 张革利, 李青峰, 等. 秦岭凤太铅锌-金矿集区成矿规律与找矿预测[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(3): 528–548.
- WANG Ruiting, ZHANG Geli, LI Qingfeng, et al. Metallogenic Regularity and Prospecting Prediction of Fengtai Pb-Zn-Au Ore Concentration Area in Qinling, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(3): 528–548.
- 王瑞廷, 秦西社, 李青峰, 等. 西秦岭凤太铅锌矿集区成矿特征、找矿预测及勘查方法技术组合[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 85–97.
- WANG Ruiting, QIN Xishe, LI Qingfeng, et al. Metallogenic Characteristics, Prospecting Prediction and Exploration Methods Combination of Fengtai Pb-Zn Orefield, West Qinling[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(5): 85–97.
- 王义天, 刘协鲁, 胡乔青, 等. 陕西凤太矿集区柴蚂金矿床脉状闪锌矿 Rb-Sr 同位素测年及意义[J]. 西北地质, 2018, 51(03): 121–132.
- WANG Yitian, LIU Xielu, HU Qiaoping, et al. Rb-Sr isotopic Dating of Vein-like Sphalerites from the Chaima Au Deposit in Fengxian-Taibai Ore-concentration Area, Shaanxi Province and Its Geological Significance[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(03): 121–132.
- 魏丽, 杨文博, 马尚伟, 等. 秦岭凤太矿集区铅锌金矿区域成矿规律研究[J]. 矿产与地质, 2021, 35(1): 1–8.
- WEI Li, YANG Wenbo, MA Shangwei, et al. Research of regional metallogenic regularity of lead-zinc-gold deposits in Fengtai ore concentration area, Qinling[J]. Mineral Resources and Geology, 2021, 35(1): 1–8.
- 文耀辉. 西秦岭凤太矿集区银洞山铅锌矿床成矿地质特征及成因探讨[J]. 中国金属通报, 2020, (8): 49–51.
- WEN Yaohui. Geological characteristics and genesis of the Yindongshan lead-zinc deposit in the Fengtai ore concentration area of the West Qinling Mountains[J]. China Metal Bulletin, 2020, (8): 49–51.
- 薛国强, 陈卫营, 周楠楠, 等. 接地源瞬变电磁短偏移深部探测技术[J]. 地球物理学报, 2013, 56(1): 255–261.
- XUE Guoqiang, CHEN Weiying, ZHOU Nannan, et al. Deep exploration technology of transient electromagnetic short migration of grounding source[J]. Journal of Geophysics, 2013, 56(1): 255–261.
- 薛国强, 陈卫营, 武欣, 等. 电性源短偏移距瞬变电磁研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(2): 215–226.
- XUE Guoqiang, CHEN Weiying, WU Xin, et al. Review on research of short-offset transient electromagnetic method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(2): 215–226.
- 叶天竺, 吕志成, 庞振山, 等. 勘查区找矿预测理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2014: 70–102.
- YE Tianzhu, LV Zhicheng, PENG Zhenshan, et al. Theory and method of prospecting prediction in exploration area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014: 70–102.
- 张革利, 王瑞廷, 田涛, 等. 陕西凤太矿集区东塘子铅锌矿床地质-地球化学特征与成因[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(5): 520–534.
- ZHANG Geli, WANG Ruiting, TIAN Tao, et al. Geological-geochemical Characteristics and Genesis of Dongtangzi Pb-Zn Deposit in Fengxian-Taibai Ore Concentration Area of Shaanxi, China[J]. Journal of Earth Science and Environment, 2018, 40(5): 520–534.
- 张津瑞, 陈华, 任军平, 等. 矿产资源潜力评价方法对比及其发展趋势探讨[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 292–305.
- ZHANG Jinrui, CHEN Hua, REN Junping, et al. Mineral Resource Assessment Methods Comparison and Its Development Trend Discussion[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 292–305.
- 张耀斌, 姚善杰, 王双彦, 等. 从凤太矿田找矿历史谈找矿方向[J]. 甘肃冶金, 2016, 38(1): 103–105.
- ZHANG Yaobin, YAO Shanjie, WANG Shuangyan, et al. From the Fengtai Ore Prospecting Direction of History[J]. Gansu Metallurgy, 2016, 38(1): 103–105.
- 周小康, 李维成, 董王仓, 等. 陕西省铅锌矿资源特征及时空分布规律概论[J]. 西北地质, 2020, 53(3): 127–139.
- ZHOU Xiaokang, LI Weicheng, DONG Wangcang, et al. A preliminary Study of the Characteristics of Lead-Zinc Deposits in Shaanxi Province and Their Distribution Laws[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(3): 127–139.
- 祝新友, 王瑞廷, 汪东波. 西秦岭铅锌金铜银矿床成矿模式研究及找矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 1–212.
- ZHU Xinyou, WANG Ruiting, WANG Dongbo. Study on Metallogenic Model and Prospecting Prediction of Lead-Zinc Gold-Copper-Silver Deposit in West Qinling[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 1–212.