第58卷第1期 2025年(总239期)



引文格式:李正明,王备战,展卫露,等.青海省锡铁山铅锌矿床沉积盆地构造与找矿方向浅议[J].西北地质,2025, 58(1):166-177. DOI: 10.12401/j.nwg.2023173

Citation: LI Zhengming, WANG Beizhan, ZHAN Weilu, et al. Discussion on Structure and Prospecting Direction of Xitieshan Lead-zinc Deposit Sedimentary Basin in Qinghai Province[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 166–177. DOI: 10. 12401/j.nwg.2023173

青海省锡铁山铅锌矿床沉积盆地构造与找矿方向浅议

李正明1,王备战^{2,*},展卫露1,战嘉华1,郭文波²,王宏宇²,董星²,李增涛²

(1. 西部矿业股份有限公司,青海西宁 810000;2. 西安西北有色物化探总队有限公司,陕西西安 710068)

摘 要:锡铁山铅锌矿床位于柴达木盆地北缘,矿体主要产于奥陶系滩间山群O₃tn^{a2}正常沉积岩 段。对深部构造的探测和原始成矿环境的恢复一直是勘查研究工作的重点。矿山以往深部找矿 投入了瞬变电磁法(TEM)和可控源音频大地电磁测深法(CSAMT),对深部的结构、构造反映不 够清楚,找矿效果也不理想。2020年首次投入了高分辨广域电磁法(WEFM),取得了较好的勘查 效果。笔者结合已有的地质资料,对广域电磁法成果进行综合分析,初步认为锡铁山铅锌矿床 原始沉积盆地走向为EW向,属于南高北低的抬斜式盆地。受NE-SW向的斜向推覆作用,形成 目前盆地的构造形态;同时推测盆地内部存在两条主要的同生断裂。笔者依据同生断裂和已知 矿体的空间位置预测了找矿靶区,指出了锡铁山沉积盆地内铅锌矿的找矿方向。

关键词:锡铁山铅锌矿;原始沉积盆地;广域电磁法;斜向推覆;找矿方向 中图分类号:P618.42;P618.43 文献标志码:A 文章编号:1009-6248(2025)01-0166-12

Discussion on Structure and Prospecting Direction of Xitieshan Lead-zinc Deposit Sedimentary Basin in Qinghai Province

LI Zhengming¹, WANG Beizhan^{2, *}, ZHAN Weilu¹, ZHAN Jiahua¹, GUO Wenbo², WANG Hongyu², DONG Xing², LI Zengtao²

 Western Mining Co., Ltd., Xining 810000, Qinghai, China; 2. Xi'an Northwest Non-ferrous Geophysical and Chemical Exploration Group Co., Ltd, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: Xitieshan lead-zinc deposit is located in the northern margin of Qaidam Basin, and the ore body is mainly produced in the normal sedimentary rock section of $O_3 tn^{a-2}$ of the Ordovician Tanjianshan Group. The exploration of deep structures and the restoration of the original metallogenic environment have always been the focus of exploration and research work. In the past, transient electromagnetic method (TEM) and controlled source audio frequency magnetotelluric sounding (CSAMT) were used in deep prospecting of the mine, which did not reflect the deep structure and structure clearly enough, and the prospecting effect was not ideal. In 2020,

收稿日期: 2022-10-05; 修回日期: 2023-09-05; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目:西北有色地质矿业集团地质科技项目"复杂条件下深部矿产高分辨电磁探测关键技术研究与工程示范"(XBD-KKJ202101)。

作者简介:李正明(1987-),男,工程师,主要从事矿山地质工作。E-mail: 455084813@qq.com。

^{*} 通讯作者: 王备战(1970-), 男, 高级工程师, 主要从事矿产勘查工作。E-mail: 728567950@qq.com。

the high-resolution wide area electromagnetic method (WEFM) was put into use for the first time, and good exploration results were achieved. Based on the existing geological data and the comprehensive analysis of the results of the wide area electromagnetic method, this paper preliminarily believes that the original sedimentary basin of the Xitieshan lead-zinc deposit is oriented in the east-west direction and belongs to an uplifted basin with the south high and the north low. Due to the NE—SW oblique nappe, the current structural form of the basin was formed; At the same time, it is speculated that there are two main contemporaneous faults in the basin. Based on the syngenetic faults and the spatial location of known ore bodies, this paper predicts the prospecting target area and points out the prospecting direction of lead-zinc deposits in the Xitieshan sedimentary basin. **Keywords**: Xitieshan lead-zinc mine; primitive sedimentary basin; WFEM; oblique nappe action; prospecting direction

锡铁山铅锌矿床产于柴北缘加里东造山带中段 早古生代大型沉积盆地的次级盆地内(张德全等, 2005),锡铁山次级盆地内分布一套火山--沉积岩系 (祝新友等,2006)。铅锌矿体即赋存于奥陶系滩间山 群中,是中国最大的铅锌矿床之一。自20世纪50年 代被发现以来,前人作了大量研究工作,主流学者认 为矿床成因为海底喷流沉积型(邓达文等,2003;祝新 友等,2006;冯志兴等,2010;宋忠宝等,2012)。由于 受后期板块推覆作用的影响(孙华山等,2017),形成 了目前较为陡立的矿体产状特征。1999年,邓吉牛 (1999)提出了褶皱构造控矿(后期推覆作用的结果), 对于锡铁山矿床的地质勘查具有重大意义,使其找矿 增储效果明显。

一直以来,锡铁山盆地的原始沉积面貌以及构造 格架现状是地质人员研究和争论的重点之一,这关系 到矿山的找矿方向问题。邬介人等(1987)认为矿区 为单斜构造,不同时代的地层以断层接触。邓吉牛 (1999)认为矿区为中央背斜和两翼向斜的复式向斜 构造,剖面上呈"W型",又称"口袋状向斜"。在 研究广域电磁法成果的基础上,结合矿区地层、构造、 矿体等空间分布规律,尝试对锡铁山铅锌矿床成矿时 期的原始沉积盆地进行了恢复。通过分析已知矿体 的电阻率异常特征,推测了分布于原始沉积盆地内同 生断裂的位置,结合板块之间的推覆作用过程,推论 了整个矿区的构造格架,在此基础上探索锡铁山铅锌 矿的找矿方向。

1 锡铁山沉积盆地地质背景

1.1 地层

矿区地层从老到新出露依次为:早元古代旋回形

成的基底构造层——下元古界达肯大坂群(Pt₁dk);加 里东旋回形成的裂谷构造层——上奥陶统滩间山群 (O₃tn);华力西旋回形成的裂谷盖层构造层——上泥 盆统阿木尼克组(D₃a)和下石炭统城墙沟组(C₁c)以及 新近系干柴沟组(N₁g)、第四系(Q)覆盖层。

达肯大坂群(Pt₁dk)呈 NW-SE 向分布在锡铁山沟、 无名沟、中间沟和断层沟以北地区,与上覆上奥陶统 滩间山群(O₃tn)呈不整合接触,多为断层接触关系。 达肯大坂群(Pt₁dk)厚约为5000 m,为一套混合岩化的 白云母、二云母片岩、黑云斜长片麻岩夹斜长角闪岩 和大理岩系,变质较深,混合岩化程度强烈。

上奧陶统滩间山群(O₃tn)是一套经受了区域变质 的浅海相基性-酸性火山喷发熔岩、火山碎屑岩夹正 常碎屑岩及少量碳酸盐岩的绿色片岩系,其呈 NW-SE向狭长带状展布,在锡铁山沟-中间沟一带出 露最宽,达2.4 km。该套地层受造山作用影响,大多 已变质,变质程度较高,岩石劈理/片理化特征明显,说 明后期构造变形作用对锡铁山铅锌矿床的改造强烈。 按岩石组合特征、喷发旋回和沉积环境特点,上奥陶 统滩间山群(O₃tn)可划分为a、b、c、d等4个岩性组, a、d岩组又划分为2个和4个岩性段。其中,O₃tn^{*2}正 常沉积岩段是矿区主要含矿层位,O₃tn^b中基性火山碎 屑岩组是矿区次要含矿层位。

上泥盆统阿木尼克组(D₃a)在矿区南西部一带断 续分布,走向 SE,倾向 NE,倾角为 30°~50°,局部岩层 扭曲,与上覆地层呈不整合接触。岩性为暗紫红色复 成分砾岩(以绿色片岩和大理岩砾石为主)、紫红色复 成分细砾岩(主要为石英砾石)、含砾砂岩夹砂岩透 镜体。

下石炭统城墙沟组(C₁c)沿南西侧柴达木盆地北 缘断续分布,走向 SE,倾向 NE,倾角为 30°~50°,局部 岩层扭曲,与上覆地层呈断层接触。本组上部为黄褐 色、杂色粉-细砂岩夹砂鲕状灰岩、生物碎屑灰岩;下 部为紫红色、黄色长石石英砂岩、细砂岩、粉砂岩夹 含砾砂岩、砾岩。底部有一层黄褐色底砾岩。本组总 厚度为13~609 m。 新近系干柴沟组(N₁g)沿南侧柴达木盆地北缘断续分布。走向 SE,倾向 NE,倾角为 30°~50°,岩性为砖红色、黄褐色砂岩、含砾砂岩及砾岩。

第四系(Q)沿矿区沟谷地带分布。主要为残坡积物、含砾风积砂土(图1)。



1.第四系; 2.新近系干柴沟组; 3.石炭系城墙沟组第一岩性段; 4.石炭系城墙沟组第二岩性段; 5.泥盆系阿木尼克组;
6.滩间山群 d 组第四岩性段; 7.滩间山群 d 组第三岩性段; 8.滩间山群 d 组第二岩性段; 9.滩间山群 d 组第一岩性段;
10.滩间山群 c 组; 11.滩间山群 b 组; 12.滩间山群 a 组第二岩性段; 13.滩间山群 a 组第一岩性段; 14.达肯大坂群;
15.闪长岩; 16.斜长角山岩脉; 17.矿体; 18.大理岩; 19.不整合界线; 20.正断层; 21.逆断层; 22.产状(片理、片麻理); ATF.阿尔金断层; F1~F6.断层编号; a.构造位置图: b.矿区地质简图



Fig. 1 Geological sketch map of Xitieshan lead-zinc mining area

1.2 构造

锡铁山铅锌矿所处区域大地构造位置及早古生 代构造演化过程显示,原特提斯洋自早古生代早期开 始俯冲、消减、碰撞、闭合过程中,形成了以柴北缘超 高压变质带(UHPB)为代表的构造混杂产物(林成贵 等,2017;王佳兴等,2020),作为其中的一部分,滩间 山群这个地质体整体经历了加里东造山运动的强烈 构造运动,发生了角闪岩相-低绿片岩相区域埋深变 质作用,其后被未变质弱变形的泥盆系为代表的晚古 生代地层不整合覆盖(冯志兴等, 2010); 所谓的滩间 山群在地层系统里是一个复杂的群,在承认存在早古 生代喷流成矿体系的前提下,早古生代构造混杂过程 对矿山矿体的叠加改造以及后期构造运动进一步改 造应该是锡铁山矿床深部找矿的基准。也就是说,深 部找矿潜力研究需要回答早期喷流沉积成矿系统在 构造混杂过程中被改造情况、埋深变质的表现、以及 新生代走滑逆冲作用对成矿系统的剥蚀、抬升过程的 刻画。

1.2.1 褶皱构造

长期以来,有关锡铁山矿床的褶皱构造的争论一

直很热烈。过去在矿山地表容矿地层中曾识别出大量的"褶皱构造",并以此为基础还总结出锡铁山矿床"主褶皱构造"及其控矿规律。矿区滩间山群深部形态及延伸状况也是一个争议的话题,目前有3种观点,①地层呈 NW 走向,向 SW 倾斜的单斜层。 ②该地层构成向斜,核部是"紫色层"。③下部绿片 岩是向南东侧伏倒转背斜。

邓吉牛(1999)根据地层层序和展布形态的分析, 认为锡铁山矿区的褶皱关系为一核部背斜和两翼向 斜的复式向斜,北东侧为口袋状倒转向斜,南西翼为 倒转翼,锡铁山铅锌矿床产于倒转向斜南西翼。祝新 友等(2006)提出,可能是岩溶塌陷部分引起了地表褶 皱构造的假象。孙华山等(2017)认为矿区南侧 O₃tm^d 岩组内部发现存在一个向斜,该向斜以 O₃tm^{d-3} 岩段为 核部, O₃tm^{d-1}、O₃tm^{d-2}/O₃tm^{d-3} 之间断层接触,导致 南翼断失)和 O₃tm^{d-4} 为两翼。

1.2.2 断裂构造

矿区断裂构造非常发育,按照断裂的走向沿伸可 以将其分为两组:NW走向和NE走向。其中,NW走 向断裂为矿区内区域性断裂,沿伸远,规模大,断面波 状起伏,整体向北倾,以逆冲性质为主,从N至S编号 分别为F₁、F₂、F₃、F₄、F₅、F₆; NE 走向断裂延伸短,规 模较小,以左行平移断层为主,局部具正断性质。

(1)NW向断裂, 矿区最重要的控制性构造, 不同 区段走向略有变化, 南东段走向为 340°~350°, 往北 西延伸逐渐转为 320°~300°, 略呈弧形延伸, 与地层 走向总体有 20°左右的交角。断裂规模巨大, 具区域 性深大断裂特征。李厚有等(2014)认为在早期裂谷 演化阶段, 具同生断裂性质, 控制裂谷盆地的形成与 演化, 并对盆地的喷流沉积成矿等有重要的控制作用, 晚期(裂谷封闭阶段和陆内造山阶段)强烈挤压推覆, 产生韧性剪切、滑移, 并且在浅表发生脆性破坏。断 裂倾角总体较陡, 但据深部钻孔揭露资料, 向深部产 状有变缓的趋势。

(2)NE向断裂,走向约为40°~60°,呈锯齿状追踪延伸,断层以倾向南东为主,倾角陡直。断层性质多为张性,且大致呈等间距分布(从西往东沿沟分布,如黄羊沟、红柳沟、瀑布沟、锡铁山沟、无名沟、中间沟、断层沟、绿石岗沟、红石岗沟、全集河沟等)。野外地质路线对比观察发现,每个沟的平面展布形态都呈齿状弯曲(张性追踪)伸展。虽没有发现明显大的断裂破碎带,但每个山沟的东、西两侧山坡,仅间隔30~40 m或60~80 m,同一岩层的厚度、夹层等沿走向无法对比,但大的层位又没有明显错位或缺失。该组断裂将矿带分为数段,成矿后又对矿体产生破坏作用。

1.3 岩浆岩

区内岩浆活动微弱,无大规模的岩浆侵入活动, 仅在达肯大坂群局部见岩浆侵入迹象。

2 锡铁山铅锌矿体特征

2.1 矿体类型

锡铁山矿区含矿层地表由北东至南西划分为 I、 II、III、IV等4个矿带二大类型,3222m中段以下 I、 II矿体合并为一个矿带,空间位置相当于 II 矿带的位 置,即绝大部分矿体完全可归并为同一矿体,矿体之 间的分离甚至平行排列是由于后期构造错动所致,通 过构造恢复可连为一个矿体,III 矿带矿体在3222m 以下只有零星的矿体分布。2600m以下,在1勘探线 以东新发现的以片岩为赋矿围岩的矿体群,因其产出 形态、矿化特征等特点不同于其他矿体,故将其划分 为Ⅳ矿带。依据赋矿围岩的区别将矿体划分为大理 岩型矿体和片岩型矿体两大类。与祝新友等(2007) 提出的非层状铅锌矿体、层状铅锌矿体相对应。它们 与大理岩及网脉状的蚀变带共同构成喷流沉积 系统。

(1)大理岩型矿体,主要是Ⅱ矿带,包括部分Ⅰ矿 带,主要分布在矿区23线以西的大理岩发育地段(3002m 中段),或大理岩与上部片岩接触部位,矿体形态和产 状变化大,呈透镜状、束状、似层状、囊状,与围岩界 线清晰,向深部具有分枝现象,以块状、稠密浸染状矿 石为主,单个矿体规模中等偏小,Pb+Zn品位一般大 于10%,矿体连续性较好,是矿区的主要矿化类型。

(2)片岩型矿体,主要是Ⅳ、Ⅲ矿带,包括部分 I 矿带,主要分布在矿区1线以东大理岩变薄至尖灭而 片岩发育地段,主要产于片岩中及片岩与下部大理岩 接触带部位的片岩中,矿体形态比较规整,呈似层状-透镜状,沿走向和倾向形态及品位变化较小,矿化均 匀,以、透镜状条带状、层状、纹层状、浸染状矿石为 主,与围岩界线不清,少量矿化呈细脉浸染状沿裂隙 充填切穿围岩层理,Pb+Zn品位一般小于10%。

锡铁山铅锌矿床属于海底喷流沉积矿床,主要矿体赋存在大理岩与绿片岩接触部位及大理岩中,明显 受地层层位和岩性控制,矿体产出与围岩产状基本一 致。在 2018年储量核实范围内共圈出铅锌矿体 179个,有53个矿体分布于大理岩内及大理岩与片岩 接触带中;有126个矿体分布于片岩中。

根据矿山生产资料显示,矿化带呈 SE 向,长大于 2000 m,延深大于 1200 m,矿体倾角 10°~86°,呈似层 状、透镜状及脉状。经工程控制单个矿体水平长一般 为 14~878 m。

矿体产状与地层产状基本一致,走向 NW,倾向 SW 或 NE, Ⅱ号矿带矿体倾角为 22°~86°, Ⅲ号矿带 矿体倾角为 42°~76°, Ⅳ号矿带矿体倾角为 4°~40°。 矿体多呈雁行排列,自北西往南东侧伏。主要成矿期 后层间滑动和斜向断层较为发育,但对矿体破坏影响 不大。

2.2 矿体形态

(1)大理岩型矿体

大理岩型矿体主要分布于大理岩内及大理岩与 片岩接触带中。矿区大理岩型矿化带呈 NW-SE 向展 布,长约为 900 m,延深大于 1 200 m。矿体多呈似层 状、透镜状及脉状,局部出现波状扭曲。主矿体倾向 SW,局部倾向 NE,主矿体倾角较陡,倾角约为 42°~86°。在2942 m 中段以下经工程控制单个矿体 水平长一般为 14~878 m;矿体最小厚为 1 m,最大厚 为 42 m。矿体多呈雁行排列,自北西往南东侧伏,总 体侧伏角为 30°~45°,少数为 60°。

矿体与大理岩密切相关,大理岩往深部变薄,矿体随之尖灭;若大理岩向深部延伸变厚,矿体规模亦大。矿体厚大部位位于矿区 25~33 线间的厚层状大 理岩及条带状硅质岩最发育地段。

(2)片岩型矿体

片岩型矿体主要分布在 15 线以东, 是中间沟-断 层沟矿区的主要矿体类型。含矿围岩为碳质泥岩--细 砂岩夹较多硅质纹层, 围岩主要岩石类型有:碳质绿 泥片岩、含碳绿泥片岩、绿泥(石英)片岩、绢云石英 片岩、碳质纹层硅质岩、纹层硅质岩等。其中, 碳质 层较发育地段成矿相对较好。矿体产状与围岩产状 基本一致, 走向 NW, 倾向 SW, 倾角为 50°~82°。沿 走向矿体有明显的膨缩现象, 从 09 线到 031 线, 脉状 矿体厚度逐渐减薄, 到 031 线以东有逐渐尖灭趋势: 沿含矿层倾向方向变化大, 尖灭快。矿体以层状、似 层状为主, 次为透镜状、脉状; 矿石构造以条带状、浸 染状为主, 次为块状、角砾状。矿区共圈出 27 个铅锌 矿体、数个小铅锌矿体。

锡铁山片岩型矿体后期改造较弱,矿石的沉积型 结构保留完整。本区相对锡铁山沟-中间沟矿区,勘 探开发时间比较晚,研究程度相对较低。

2.3 矿石特征

(1)矿物组成

锡铁山铅锌矿床矿石中主要金属矿物为闪锌矿、 方铅矿、黄铁矿、磁黄铁矿,少量白铁矿、毒砂、黄铜 矿、黄锡矿、磁黄铁矿、磁铁矿、铬铁矿、银金矿、金 银矿、自然金、硫金银矿、黝锑银矿、银砷铜银矿、银 锌砷铜银矿、银黝铜矿、硫镉矿、锡石、铜蓝、辉铜矿 和金红石等。矿石中主要非金属矿物为石英、方解石、 钠长石、绿泥石和碳泥质,其次有绢云母、菱锰矿和 石膏等。

(2)矿石结构

半自形-他形粒状结构:金属矿物多呈半自形-他 形粒状,互相连生或镶嵌,分布广泛。矿物粒度由粗 至细粒均有。环带结构:隐晶质的胶状黄铁矿常具环 形,环的核心部分常包有石英及其他杂质,有的包有 黄铁矿晶体。交代结构:方铅矿交代闪锌矿及磁黄铁 矿,闪锌矿中见乳滴状黄铜矿。充填交代结构:碳酸盐充填胶结闪锌矿,包裹闪锌矿小晶体。压碎粒状结构:闪锌矿及黄铁矿呈压碎粒状。交织结构:方铅矿、闪锌矿和黄铁矿交代组成不规则的交代网脉,呈交织状。

(3)矿石构造

致密块状矿石:由方铅矿、闪锌矿、黄铁矿的粒 状集合体组成。条带构造:由不同金属矿物条带状组 成,或由片岩纹层与金属矿物组成相间条带,具沉积 特征。星散浸染状构造:由细粒黄铁矿、方铅矿、闪 锌矿呈星点浸染状分布于围岩中或片理、层理裂隙中。 斑状构造:大理岩中硫化物呈斑状分布。角砾状构造: 大理岩和片岩角砾被硫化物胶结。

3 锡铁山矿区深部同生断裂地球物理 证据

锡铁山铅锌矿床成因为海底喷流沉积型,同生断 裂的位置直接决定着成矿有利部位的圈定。孙华山 等(2017)及陈正乐等(2020)依据蚀变特征、砾石成分、 矿石结构构造特征,在锡铁山矿区识别出多个海底喷 流管道相,但是受观察资料所限,难以判定锡铁山矿 区内存在同生断裂以及原生喷流系统。

进入21世纪,锡铁山铅锌矿进入深部找矿阶段。 随着先进物探方法的引入,人们对锡铁山矿区深部结 构构造的认识逐渐加深,使得识别原生喷流系统成为 可能。这个阶段采用的主要为探测深度较大的电磁 法,包括瞬变电磁法(TEM)(张小路等,2010)和可控 源音频大地电磁测深法(CSAMT)(李艳等, 2017),由 于矿区干扰大、方法分辨率低,对深部的结构、构造 反映尚不够理想,找矿效果不佳。2020年,锡铁山矿 山为减少勘探投资风险,在类比其他勘探手段的前提 下,选择高分辨广域电磁法(WEFM)开展深部探测研 究,重点探索锡铁山矿区东部中间沟5线~015线范 围内滩间山群含矿层位深部空间的分布形态特征(测 线具体位置见图 2 中 5 线、03 线、015 线),为下一步 钻探工程布置提供依据。广域电磁法成果显示锡铁 山矿区深部可能存在成矿期同生断裂,结合分析矿区 地质背景,对矿区的原始成矿环境有了新的认识。

3.1 深部探测的地球物理前提

为了解锡铁山矿区深部的地层、构造等的分布特征,矿山以往开展过多种物探方法,并测定了丰富的



1.第四系; 2.新近系干柴沟组; 3.石炭系城墙沟组; 4.泥盆系阿木尼克组; 5.滩间山群d组第四岩性段; 6.滩间山群d组第三岩性段; 7.滩间山群d组第二岩性段; 8.滩间山群d组第一岩性段; 9.滩间山群c组; 10.滩间山群b组; 11.滩间山群a组第二岩性段; 12.滩间山群a组第一岩性段; 13.达肯大坂群; 14.大理岩; 15.地层界线; 16.断层; 17.铅锌矿体; 18.推测深部成矿通道在地表的投影

图2 推测深部成矿通道在地表的投影范围示意图

Fig. 2 Schematic diagram of projection range of inferred deep metallogenic channels on the surface

表1 岩矿石电性参数统计表

Tab. 1 Statistical table of electrical parameters of rocks and ores

岩(矿)石名称	块数	电阻率ρ(Ω·m)	
		变化范围	几何平均值
块状铅锌矿	34	0.1~11	0.2
碳质绿泥片岩	6	90~810	170
碳质二云片岩	27	$14{\sim}400$	55
钙质绿泥片岩	83	$800\!\sim\!3700$	1 800
绢云绿泥片岩	23	$530 \sim 7570$	2 290
含碳片麻岩	57	140~8860	1 400
片麻岩	55	$440 \sim 6000$	1 560
紫色砂砾岩	37	$26 \sim 2800$	1 160
角闪岩	95	$180 \sim 8100$	1 400
大理岩	56	$650 \sim 2500$	1 240

岩矿石电性资料,统计结果见表1。

从表1可知,电阻率值最高的为滩间山群中的钙 质绿泥片岩、绢云绿泥片岩,电阻率值大于1800Ω·m; 达肯大板群中的片麻岩和角闪岩等深变质岩系、滩间 山群中的大理岩、砂砾岩电阻率稍低,电阻率值位于 1000~1600Ω·m之间;不同岩石含有碳质后,电阻率 值均有所降低,阻值大小与含碳多少相关,范围几十 至上千Ω·m不等;块状铅锌矿电阻率最低,平均值小 于1Ω·m。矿区岩矿石电性差异较大,具备开展物探 电法工作的前提。

3.2 深部探测方法的选择

3.2.1 深部探测方法的选择

一般深部找矿可供选择的物探方法有:可控源音频大地电磁测深(CSAMT)、瞬变电磁法(TEM)、短偏移距瞬变电磁法(SOTEM)、音频大地电磁测深(AMT)、广域电磁法(WEFM)等。其中 CSAMT 探测

深度勉强可以达到,但磁分量衰减快,抗干扰能力较差;TEM 探测深度一般不超过1000 m,所测二次场易 受干扰;SOTEM 探测深度可以达到,但目前主要探测 磁场分量,抗干扰能力较差;AMT 探测深度大,采用 天然场源,抗干扰能力差;广域电磁法由于采用了伪 随机信号,探测深度大、抗干扰能力强、深部精度高。 鉴于锡铁山铅锌矿区探矿研究深度已达千米以上,区 内又存在较为严重的人文干扰,综合分析后选择广域 电磁法作为该区开展深部探测的首选方法。

3.2.2 广域电磁法原理

广域电磁法(WEFM)是相对于传统的可控源音 频大地电磁法(CSAMT)和地面电磁波法(MELOS)提 出来的(何继善, 2010),在深部地球物理找矿中取得 了较好的应用效果(王瑞廷等, 2023;陈靖等, 2024)。 CSAMT采用人工场源,克服了MT法场源的随机性 和信号微弱的缺点。但是它沿用在远区测量一对正 交电、磁分量,按远区近似公式计算视电阻率的做法, 又限制了它的适用范围。远区测量的信号微弱,背离 了采用人工源使信号强大的初衷;如果在近一些的地 方测量,确实能增大信号强度,可是远区近似公式又 难以成立(略去了不可略去的高次项,降低了精度), 出现了新的矛盾。

MELOS 方法突破了"远区"的限制,大大拓展 了频率域电磁法的观测范围。与 CSAMT 相比,它具 有一定的优势。但是它把非远区的测量结果"校正" 到远区去的作法,增加了野外和室内工作量的代价, 又回到了远区的老路。有点得不偿失。

广域电磁法继承了 CSAMT 使用人工场源克服场 源随机性的优点,也继承了 MELOS 方法非远区测量 的优势,既不沿用卡尼亚公式,也不把非远区校正到 远区,而是用适合于全域的公式计算视电阻率,大大 拓展了人工源电磁法的观测范围,提高了观测速度、 精度和野外效率。广域电磁法和伪随机信号电磁法 结合起来,形成了独具特色的一种新的电法勘探方法。

可控源音频大地电磁法(CSAMT)要求在远区测 量一对相互正交的电场、磁场分量,同样计算二者之 比(阻抗)来提取地下的视电阻率。以电偶源为例,

$$\mathcal{E}_{\varphi} = \frac{l\rho dL \sin\varphi}{2\pi r^3} [2 - e^{-ikr} (1 + ikr)] \tag{1}$$

$$H_{r} = -\frac{IdL}{4\pi r^{2}}\sin\varphi \left\{ 6I_{1}\left(\frac{ikr}{2}\right)K_{1}\left(\frac{ikr}{2}\right) + ikr\left(\frac{ikr}{2}\right)K_{0}\left(\frac{ikr}{2}\right) - I_{0}\left(\frac{ikr}{2}\right)K_{1}\left(\frac{ikr}{2}\right) \right\}$$
(2)

当观测点距离场源处于"远区"时,近似地有:

$$|E_{\varphi}| \approx \frac{I\rho dL\sin\varphi}{\pi r^3} \tag{3}$$

和

$$H_r \approx \frac{IdL\sin\varphi}{\pi r^3 \sqrt{\sigma\mu\omega}} e^{-i\frac{\pi}{4}}$$
(4)

仿照 MT 的做法取二者之比

$$|E_{\varphi}|/|H_r| = \sqrt{\omega\mu\rho} \tag{5}$$

提取卡尼亚视电阻率:

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \frac{|E_{\varphi}|^2}{|H_r|^2} \tag{6}$$

但是公式(6)是个近似公式,对于非"远区",则 不能利用(6)式计算视电阻率。

为在不满足"远区"条件的广大区域能够进行 电磁测深,何继善(2010)提出了广域电磁测深法。所 谓"广域",就是指突破"远区"的局限,在包括远 区,也包括非远区的广大地区进行测量,把电磁测深 的观测范围扩大到包括非远区的广大区域。其算法 是直接从(1)和(2)式出发,或者转换到直角坐标:

$$E_x = \frac{IdL}{2\pi\sigma r^3} [1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)]$$
(7)

(7)是均匀大地表面上水平电偶极源的 Ex 的严格的、精确的表达式。根据(7)式可以定义广域意义上的视电阻率:

$$\rho_a = K_{E-Ex} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{F_{E-E_x}(ikr)} \tag{8}$$

式中:

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

(8)式构成了 E-Ex 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分量(而不是彼 此正交的一组电、磁分量),计算广域视电阻率值,这 就是广域电磁法的基本原理。

在广域电磁法实际施工过程中,要求接收电极 MN与发射电极 AB 的夹角小于 3°,但受客观条件影 响,测线可能并非平直,尤其是在地形条件很差的情 况下,很难保证 MN 与 AB 平行,即观测到的电场并不 是 Ex 分量,而是含有其他方向电场的矢量值,命名其 为 E-E_{ma}。

3.3 同生断裂的物探异常反映

本次广域电磁深部探测在中间沟一带共布置了



1.滩间山群d段第一岩性组;2.滩间山群c段;3.滩间山群b段;4.滩间山群a段第二岩性段;5.滩间山群a
 段第一岩性段;6.达肯大坂群;7.变流纹岩;8.地质界线;9.断裂;10.铅锌矿体;11.黄铁矿;12.深部高阻界
 面;13.预测A级找矿有利部位;14.预测B级找矿有利部位;15.成矿通道(同生断裂)

图3 锡铁山铅锌矿区 015 线断面及推断成果图



5线、03线、015线3条测线,测线方位53°。依据场 源与测线的最小收发距约大于3δ(趋肤深度)原则,将 供电场源布设于矿区东南部的戈壁滩,最小收发距为 8.0 km,探测深度可达2000 m以上;供电电流75A以 上,保证了接收信号的可靠性。3条剖面均反映出深 部地层、构造的分布特征,验证钻孔在015线物探推 断的成矿有利部位见到了片岩型铅锌矿体(图3),地 层构造的分布特征与物探推断结果一致,说明本次广 域电磁测量成果较为可靠,为推断同生断裂提供了 依据。

图 3 为 015 线广域电阻率一维有源连续介质反演 结果,显示本次广域电磁法探测深度超过 2 000 m。电 阻率曲线特征显示电阻率异常从上至下大致分为 3 部分,上部 300 m 以浅近水平高阻层;中部 300 m 以深至 1 800 m 标高之间的相对低阻异常区;深部 1 800 m 标 高以下总体近水平、局部垂向分布的电阻率异常区。

上部近水平高阻层位于近地表 300 m 以浅, 电阻 率曲线具有水平展布特征, 电阻率值高达 500 Ω·m 以 上。由于矿区气候干旱少雨多风,蒸发量远大于降雨 量,近地表岩石电阻率远大于深部。矿区内大多数的 地层分界线位于电阻率梯级带上,大多数地层产状 北倾。

中部相对低阻异常区主要位于 300 m 以深至 1800m标高之间,电阻率异常呈现近垂向、高低阻相 间条带状分布。中部异常的分布形态与矿区地层产 状较为相符,从异常形态看,深部地层呈现明显的反 转特征,与钻孔所见一致。由区内地层电性特征可知, 达肯大板群深变质岩系比滩间山群的中等变质岩电 阻率低,因此推测剖面北部背景值较低的地层为达肯 大板群的分布范围,大致位于330点以北。该地层与 南侧的滩间山群地层以断层 F₁相接。图 3 南部滩间 山群中的两条黑色实线为a岩组第一、第二岩性段及 b岩组的地层分界线。锡铁山铅锌矿主要分布于a岩 组第二岩性段。其中,位于标高为 2 200~2 600 m 的 高阻异常主要为深部变流纹岩的反映。标高为 2282 m 以上的已知矿体位于高阻异常之间,即位于两 层变流纹岩的夹层中,呈现低阻特征。说明015线的 矿体类型属于片岩型。推测矿区向东至此处已无大 理岩型矿体。

深部1800m标高以下为高阻异常区,标高1800m 的电性界面可能反映了区内推覆作用影响的最深位 置,电性界面以下因未受推覆作用影响,岩石较为规 整,从而呈现高阻。高阻区内分布两个近乎垂直的V 型低阻异常。异常特征与03线深部相对应部位的异 常特征完全一致,综合推测为成矿通道,也就是锡铁 山铅锌成矿期的同生断裂位置之所在。理由如下:

陈正乐等(2020)在 03 线的钻孔 ZK104003-1 中见 到了喷流口的迹象,钻孔浅部矿体中存在被晚期切割 的泥岩条带,表明该处存在强烈的后期水动力环境。 而泥岩条带正好位于物探推断的成矿通道正上方;其 次,03 线深部(标高 1 900 m 以下)发现厚大的黄铁矿 体,该黄铁矿体刚好就位于物探推断的成矿通道附近, 两者相距约数十米之近。综合分析认为物探推断的 成矿通道就是锡铁山沉积成矿期的同生断裂。

依据成矿规律推测已知矿体末端至成矿通道为 成矿有利部位,见图 3 中的 A 级和 B 级找矿有利部位。 为了验证物探推断结果,矿山在 015 线深部圈出的 A 级找矿有利部位布设了 ZK110015-02、ZK110015-03 两个钻孔。结果在预测部位发现了新的片岩型铅锌 矿体,从而验证了广域电磁预测成果的可靠性。

4 锡铁山沉积盆地原始沉积面貌分析

邬介人等(1987)认为:"柴达木盆地北缘晚奥 陶世绿岩带火山岩与锡铁山块状硫化物矿床的形成 受大陆古裂谷作用的控制,是中朝-塔里木古板块 进一步解体的结果"。在裂谷带内与裂谷伴生有一 系列的同生断层,裂谷盆地的形成依赖于这些同生 断层的活动和发展,同生断层的特点是能长期持续 的活动,保证构造通道畅通,使深部矿液不断沿断裂 带迁移上升。

广域电磁在锡铁山矿区 5 线、03 线、015 线深部 的探测成果显示,3 条测线在深部均发现了成矿通道, 即同生断裂。锡铁山矿区深部的同生断层与锡铁山 原始沉积盆地一样,均受原始裂谷带构造控制(张代 斌,2004)。亦即裂谷带控制了原始沉积盆地的延展 形态。说明同生断裂的延伸方向与沉积盆地的走向 基本一致。因此,判断同生断裂的位置、原始沉积盆 地的走向、矿体的空间分布状态之间的关系,对预测 矿区内铅锌矿体的分布范围有至关重要的作用。

锡铁山沉积盆地的现状是:由锡铁山沟向东经无 名沟、中间沟到断层沟,铅锌矿体赋存的滩间山地层 由向南西倾的单斜层过渡到浅部反倾(北东倾)、深部 南西倾的状态(魏俊浩等,2021),显示了区域构造运 动的斜向推覆作用(图4)。将深部广域电磁推断的同 生断裂位置投影到地表看(图2),投影位置与F₄断裂 的北侧分支F₄-1断裂的走向基本一致。因此有理由 认为F₄-1断裂与深部的同生断裂存在较深层次的内 在联系。F₄-1断裂是在板块运动过程中沿同生断裂走 向,在其上部形成的断裂带,为继承性断裂。深部同 生断裂属于成矿期断裂,F₄-1断裂属于后期断裂。

根据继承性断裂 F₄-1 的走向以及地表矿体的出露范围,可以判断同生断裂走向大致呈近 EW 向,这 应该是原始裂谷带的走向,同时也是锡铁山沉积盆地 的原始伸展方向。该同生断裂大致位于沉积盆地的 中部,长度从锡铁山沟延伸至断层沟(属于推测),见 图 4 中的推断的 F11 断裂, F11 属于广域电磁推断的 同生断裂在地表的投影。张代斌(2004)认为,锡铁山 原始沉积盆地属于抬斜式盆地,在成矿阶段南西高北 东低,同生断层位于主矿区(锡铁山沟-无名沟)的南 西侧。这与笔者推断的同生断裂 F11 位于矿体南西 侧的认识是一致的。

图 4 中的 F22 断裂位于 F11 断裂南侧, 与 F11 呈



1.第四系; 2.新近系干柴沟组; 3.石炭系城墙沟组第一岩性段; 4.石炭系城墙沟组第二岩性段; 5.泥盆系阿木尼克组; 6.滩间山群 d 组第四岩性段; 7.滩间山群 d 组第三岩性段; 8.滩间山群 d 组第二岩性段; 9.滩间山群 d 组第一岩性段; 10.滩间山群 c 组; 11.滩间山群 b 组; 12.滩间山群 a 组第二岩性段; 13.滩间山群 a 组第一岩性段; 14.达肯大坂群; 15.闪长岩; 16. 斜长角山岩脉; 17.矿体; 18.大理岩; 19.不整合界线; 20.正断层; 21.逆断层; 22.产状(片理、片麻理); 23.同生断裂在地表投影; 24.物探预测找矿靶区; ATF.阿尔金断层; F1~F6.断层编号; a.构造位置图; b.矿区地质简图

图4 锡铁山铅锌矿区找矿靶区预测图

Fig. 4 Prospecting target area prediction of Xitieshan lead zinc mining area

平行展布。据矿区地质资料, F22 断裂以东的滩间山 群地层中未发现明显的矿化特征; 矿区地质图显示, F22 断裂与 F11 断裂之间的地层较外围地层剥蚀程度 深, 推测两断裂之间的地块深部存在易分离的层间破 碎带, 即可能存在原始喷流沉积层位。综合推测 F22 为分布于沉积盆地南部的同生断裂在地表形成的继 承性断裂。

5 找矿方向浅议

从广域电磁推测的同生断裂、矿区矿体的空间分 布特征、区内推覆作用以及原始沉积盆地的展布方向 等方面,对锡铁山矿区的找矿方向进行预测。综合研 究预测,锡铁山铅锌矿区可圈出两个找矿靶区(均为 隐伏矿体在地表的投影范围),其中A级找矿靶区一 个,B级找矿靶区一个。具体分析如下:

A级找矿靶区: 靶区位于锡铁山沟与断层沟之间, 以中间沟为界分为两部分。中间沟以西找矿靶区位于 地表出露矿体以南, 范围包括地表矿体与 F₄-1 断裂之 间的三角区域。该靶区赋存的矿体产状南西倾(和浅 部矿体与同生断裂的连线吻合), 深部矿体末端与同生 断裂之间部位有找矿潜力。赋矿地层属于单斜地层。

中间沟以东找矿靶区位于地表出露矿体以北,范 围包括地表矿体与同生断裂(图 4 中 F11)之间的三角 区域。因区域斜向推覆作用(NE-SW 向),中间沟与断 层沟之间的找矿靶区,浅部矿体产状北东倾,深部矿体则会反向,呈南西倾。赋矿地层呈倒转向斜。北部边界会超出同生断裂在地表的投影位置。矿区 2007年开展详查工作,在断层沟 085线深部钻孔 ZK085-11中见到厚为 7.62 m 的铅锌矿体,铅+锌平均品位为 17.98%,说明断层沟一带深部找矿潜力较大。

B级找矿靶区: 靶区位于图 4 中 F22 断裂以北的 深部。F22 断裂西端起于 F₄ 断裂, 东端止于断层沟, 地表继承断裂长大于 2.5 km。由 F11 断裂长度推测 F22 向东绝不限于断层沟。由于区域斜向推覆作用, 导致局限于 F₂、F₃、F₄ 断裂之间的滩间山群地块由窄 向宽产生挤出效应(由西向东逃逸),此时会沿断裂出 现走滑现象,同时由于同生断裂的存在,容易在地表 出现其继承性断裂 F22。F22 断裂深部对应同生断裂, 因挤出效应,其北侧地层会抬升。断裂北侧剥蚀出奥 陶系,其南侧出露泥盆系及石炭系。北侧地层早于南 侧地层,即为这种构造运动的结果和证据。

F22 断裂深部对应的同生断裂位于锡铁山成矿盆 地的南边部,与中部的同生断裂平行,沿裂谷带走向 伸展发育,其深度通常会浅于盆地中部的同生断裂。 如果同生断裂为成矿通道,则成矿流体会向盆地中部 运移。因此,推测F22 断裂对应的深部同生断裂北侧 为成矿有利部位,其在地表的投影部位见图4中B级 靶区。依据03线的广域电磁成果,锡铁山沉积盆地 南部的滩间山群地层在深部呈近水平状分布,据此推 测,如果 B 级靶区深部有矿,则矿体产状可能呈近水 平状。

6 结论

(1)通过分析深部广域电磁探测异常信息,充分利用矿区地质资料,进行符合地质规律的逻辑推理去预测找矿靶区,广域电阻率异常显示,锡铁山铅锌矿区03线以东,中间沟一带主要分布片岩型矿体,此处似乎已无大理岩型矿体。

(2)初步推测锡铁山矿区深部存在两条同生断裂。 其中,同生断裂 F11 位于原始沉积盆地中部;同生断 裂 F22 位于原始沉积盆地南部。两条断裂相互平行, 走向近 EW 向。地表出露其继承性断裂。

(3)锡铁山原始沉积盆地受裂谷带构造控制,走向近 EW 向。后经 NE-SW 向区域构造运动的斜向推 覆作用,才形成目前盆地的构造形态。同生断裂与盆 地走向一致,其中 F11 位于原始沉积盆地中部,喷流 成矿位于其北侧,经推覆作用后形成目前已知的锡铁 山铅锌矿矿床体系,投影到地面上则成为文中预测的 A 级靶区; F22 位于原始沉积盆地南部,由于盆地南高 北低,喷流成矿位于其北侧,该处深部滩间山群地层 近于水平,如果其中产出铅锌矿体,推测矿体产状近 水平展布,投影到地表即文中预测的 B 级靶区。

致谢:特别感谢审稿专家对本文提出的宝贵意 见,在此表示诚挚的谢意;野外工作中得到西部矿 业公司领导、员工的支持和关怀,在此一并感谢。

参考文献(References):

- 陈正乐. 锡铁山铅锌矿深部及外围成矿控制因素找矿靶区预测 研究[R]. 北京: 中国地质科学院地质力学研究所, 2020.
- 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.
- 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.
- 邓达文,孔华,奚小双,等.青海锡铁山热水沉积型铅锌矿床的 地球化学特征[J].,矿物岩石地球化学通报,2003,22(4): 310-313.
- DENG Dawen, KONG Hua, XI Xiaoshuang, et al. Geochemistry of the Hydrothermal Sedimentary Xitieshan Pb-Zn Deposit, Qing-

hai Proyince[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 22(4); 310–313.

- 邓吉牛.青海锡铁山矿区褶皱构造及其找矿预测[J].有色金属 矿产与勘查,1999,8(5):283-288.
- DENG Jiniu. Fold structure and prodiction for prospecting in the Xitieshan ore field, Qinghai[J]. Geological Exploration for Nonferrous Metals, 1999, 8(5): 283–288.
- 冯志兴,孙华山,吴冠斌,等.青海锡铁山铅锌矿床类型刍议[J].地质论评,2010,56(4):501-512.
- FENG Zhixing, SUN Huashan, WU Guanbin, et al. A Discussion on Type of the Xitieshan Pb-Zn Ore Deposit, Qinghai [J]. Geological Review, 2010, 56(4): 501–512.
- 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.
- HE Jishan. Wide field electromagnetic method and pseudo-random signal electrical method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- 李厚有, 王春龙. 青海省大柴旦镇中间沟—断层沟铅锌矿区勘 探地质报告[R]. 2014.
- 李艳,李春付,安玉伟,等.大功率电磁法在青海锡铁山矿区绿 石岗—红石岗矿段深部找矿上的应用[J].黄金地质,2017, 38(11):24-28.
- LI Yan, LI Chunfu, An Yuwei, et al. Application of high power electromagnetic method to deep ore-prospecting in Lvshigang-Hongshigang of Xitieshan Mining District, Qinghai[J]. Gold, 2017, 38(11): 24–28.
- 林成贵,许荣科,郑有业,等.柴北缘超高压变质带鱼卡榴辉岩型金红石矿地质特征及原岩性质探讨[J].西北地质,2017,50(2):142-155.
- LIN Chenggui, XU Rongke, ZHENG Youye, et al. Geological Characteristic and Protolith Nature of Yuqia Eclogite-type Rutile Deposit in Northern Qaidam UHP Metamorphic Belt[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(2): 142–155.
- 宋忠宝,张雨莲,张照伟,等.青海锡铁山铅锌矿的成因讨论[J]. 西北地质,2012,45(4):134-139.
- SONG Zhongbao, ZHANG Yulian, ZHANG Zhaowei, et al. The origin discussion of the Xitieshan Lead Zinc Deposit in Qinghai Province[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 134–139.
- 孙华山.青海锡铁山铅锌矿深部及外围找矿预测研究[R].2017.
- 王佳兴, 蔺梦, 刘泽宇, 等. 柴北缘超高压变质带变质蛇绿岩组 合及其地质意义[J]. 西北地质, 2020, 53(4): 1-10.
- WANG Jiaxing, LIN Meng, LIU Zeyu, et al. Petrological Study of the Meta-ophiolite from the North Qaidam UHP Metamorphic Belt and Its Geological Implications[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(4): 1–10.

- 王瑞廷,秦西社,李青锋,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.
- 魏俊浩,李鹏,李义邦,等.青海省锡铁山铅锌矿成矿元素物质 场结构及深部找矿潜力[J].地质科技通报,2021,40(2): 1-12.
- WEI Junhao, LI Peng, LI Yibang, et al. Material field structure of oreforming elements and deep prospecting potential of Xitieshan lead-zinc deposit, Qinghai Province[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(2): 1–12.
- 邬介人,任秉琛,张苺,等.青海锡铁山块状硫化物矿床的类型及地质特征[J].西安地质矿产研究所所刊,1987,(20): 1-88.
- WU Jieren, REN Bingchen, ZHANG Mei, et al. The genetic type and geological characteristics of the Xitieshan massive sulphide deposit, Qinghai[J]. Bulletin of Xi 'an Institute of Geology and Mineral Resoures, 1987, (20): 1–88.
- 魏俊浩.青海省大柴旦锡铁山铅锌矿区成矿地质条件对比综合 研究及靶区预测[R].武汉:中国地质大学.2015.
- 张德全,王富春,李大新,等.柴北缘地区的两类块状硫化物矿 床-I.锡铁山式 SEDEX 型铅锌矿床[J].矿床地质,2005, 24(5):471-480.

ZHANG Dequan, WANG Fuchun, LI Daxin, et al. Two types of

massive sulfide deposits on northern margin of Qaidam basin, Qinghai Province: I . Xitieshan style SEDEX lead-zinc deposits[J]. Mineral Deposits, 2005, 24(5): 471–480.

- 张代斌.青海锡铁山铅锌矿床成矿盆地特征及构造变形研究 [D].长沙:中南大学,2004.
- ZHANG Daibin. A Study on the Characteristics and Structural Deformation of the Metallogenic Basin of the Xitieshan Lead-Zinc Deposit in Qinghai Province [D]. Changsha: Central South University, 2004.
- 张小路, 王钟, 罗润林, 等. 大功率 TEM 法在锡铁山矿区深边部 找矿中的应用效果[J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30(2): 179-187.
- ZHANG Xiaolu, WANG Zhong, LUO Runlin, et al. High-Power TEM Application in Deep and Verge Prospecting at Xitieshan Mining Area[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2010, 30(2): 179–187.
- 祝新友,邓吉牛,王京彬,等.锡铁山矿床两类喷流沉积成因的 铅锌矿体研究[J].,矿床地质,2006,25(3):252-262.
- ZHU Xinyou, DENG Jiniu, WANG Jingbin, et al. Study of two types of ore bodies in Xitieshan lead-zinc SEDEX deposit, Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(3): 252–262.
- 祝新友,邓吉牛,王京彬,等.锡铁山喷流沉积矿床卤水与海水的相互作用[J].,地质评论,2007,53(1):53-64.
- ZHU Xinyou, DENG Jiniu, WANG Jingbin, et al. Study on Marble of the Xitieshan Lead-Zinc SEDEX Deposit, Qinghai Province:Interaction between Exhaled Brine and Seawater[J]. Geological Review, 2007, 53(1): 53–64.