

DOI: 10.12401/j.nwg.2023098

## 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

王瑞廷<sup>1,2,3</sup>, 秦西社<sup>1</sup>, 李青锋<sup>1,2,\*</sup>, 成欢<sup>1,2</sup>, 任朝辉<sup>4</sup>, 冀月飞<sup>1,2</sup>

(1. 西北有色地质矿业集团有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省矿产资源综合利用工程技术研究中心, 陕西 西安 710054;  
3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 4. 宝鸡西北有色七一七总队有限公司, 陕西 宝鸡 721015)

**摘要:** 基于西秦岭凤太矿集区铅锌矿床矿体的产出受背斜构造、地层、特定岩性层位控制, 主要铅锌矿床随控矿背斜构造的倾伏, 铅锌矿成矿特征从出露到完全隐伏的认识, 依据区内铅锌矿床成矿模式和找矿标志研究, 把铅锌找矿有利地段分为已知矿体的延深部位、已知矿体深部(或周边)的未知矿体、暂无已知矿床的新区共 3 类。通过工作, 预测提出八方山-二里河铅锌矿床深部、白杨沟-洞沟铅锌矿带、银洞梁-手搬崖铅锌矿床深部和铅硐山-东塘子铅锌矿床深部等 4 个找矿靶区, 找矿靶位的预测聚焦于 4 个找矿靶区内已知铅锌矿床走向延伸与倾向延深部位、矿床两翼深部对赋矿有利的褶曲部位。近年来的找矿实践证明, 地质综合研究、构造叠加晕找矿法、以广域电磁法为主的大探测深度物探方法以及深部探矿工程验证是该矿集区深部铅锌找矿的有效勘查方法技术组合。

**关键词:** 凤太铅锌矿集区; 成矿特征; 找矿靶区; 勘查方法技术组合; 西秦岭

中图分类号: P618.42; P618.43 文献标志码: A 文章编号: 1009-6248(2023)05-0085-13

### Metallogenic Characteristics, Prospecting Prediction and Exploration Methods Combination of Fengtai Pb-Zn Orefield, West Qinling

WANG Ruiting<sup>1,2,3</sup>, QIN Xishe<sup>1</sup>, LI Qingfeng<sup>1,2,\*</sup>, CHENG Huan<sup>1,2</sup>, REN Zhaohui<sup>4</sup>, JI Yuefei<sup>1,2</sup>

(1. Northwest Nonferrous Geological and Mining Group Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Engineering Technology Research Center of Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Baoji No.717 Corps Limited of Northwest Nonferrous Geological and Mining Group. Baoji 721015, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the understanding that the occurrence of Pb-Zn ore bodies in Fengtai orefield of west Qinling is dominated by anticline structure, strata and specific lithologic horizon, and that the main Pb-Zn deposit exhibit a certain inclination with the ore-controlling anticline, the metallogenic characteristics of Pb-Zn deposits are from outcrop to completely concealed, based on the study on metallogenic model and prospecting criteria of Pb-Zn deposits in the region, the favorable areas for Pb-Zn ore prospecting can be divided into three

收稿日期: 2022-01-04; 修回日期: 2022-05-07; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 中国地质调查局项目“陕西省凤太矿集区找矿预测”(DD2016005213), “秦岭成矿带安康-凤太地区地质矿产调查”(DD20160014)联合资助。

作者简介: 王瑞廷(1969-), 男, 博士生导师, 正高级工程师, 主要从事地质矿产勘查和研究工作。E-mail: wrtyf@163.com。

\* 通讯作者: 李青锋(1979-), 男, 正高级工程师, 主要从事地质矿产勘查工作。E-mail: 150137390@qq.com。

types: the extension part of the known orebodies, the unknown orebodies in the deep part (or its periphery) of the known orebodies, and the new area without the known ore deposit. Through the work, four prospecting target areas are predicted: in the deep part of the Bafangshan-Erlihe Pb-Zn deposit, the Baiyanggou-Donggou Pb-Zn belt, the deep part of the Yindongliang-Shoubanya Pb-Zn deposit and the deep part of the Qiandongshan-Dongtangzi Pb-Zn deposit. The prediction of prospecting target is focused on the stretch and dip of known Pb-Zn deposits in the four prospecting target areas, and the fold of two deep flanks of the deposits. The practice of prospecting in recent years has proved that, comprehensive geological research, structural superimposed halo prospecting, wide-area electromagnetic prospecting and verification of deep prospecting engineering are the effective exploration methods and techniques combination for deep Pb-Zn deposits in this ore-concentrated area.

**Keywords:** Fengtai Pb-Zn ore concentration area; metallogenic characteristics; prospecting target; exploration methods and techniques combination; west Qinling

西秦岭凤太铅锌矿集区是中国 20 世纪 80 年代后发现的重要铅锌金矿集区,大地构造位置位于秦岭造山带西秦岭东段的南秦岭地块商丹缝合带南侧,地处秦岭多金属-贵金属成矿带中部,是中国著名的铅锌金矿床集中区之一,也是陕西省最大的铅锌金矿产资源基地(杨合群等, 2022; 姜寒冰等, 2023)。

凤太铅锌矿集区地质找矿工作大致可以分为 4 个阶段: ①1978 年以前,在以“热液成矿理论为基础的一次成矿论和花岗岩类岩浆活动有关的单一矿源说”指导下寻找铁矿。②1978~1993 年,在以“层控-改造型矿床”“热水喷流沉积成因”理论为基础建立起的“秦岭泥盆系铅锌多金属成矿带理念”指导下,开展铅锌找矿并获得突破性进展。③1989~2015 年,随着八卦庙金矿勘查取得突破性进展,在区内掀起了一轮找金热潮,发现了以八卦庙超大型金矿床为代表的构造蚀变岩型金矿床(王瑞廷, 2005; 李永勤等, 2015a, 2015b; 高卫宏等, 2016a)。④自 21 世纪初,以“就矿找矿”“顺藤摸瓜”的思路开展深部找矿工作(王瑞廷等, 2007, 2011, 2021)。至 20 世纪末,凤太铅锌矿集区累计查明铅锌资源量为  $500 \times 10^4$  t,金资源量约为 125 t,勘查深度主要集中在 500 m 以浅,采用的工作手段主要有地质剖面测量、物探、化探、槽探、坑探和钻探(田国民等, 2004; 王瑞廷等, 2012)。开展深部找矿工作以来,累计查明铅锌资源量约为  $150 \times 10^4$  t,金资源量约为 20 t,勘查深度达到 1 200 m,采用的工作手段主要有综合研究、物探、坑探和钻探(王瑞廷等, 2012, 2021; 王备战等, 2020)。

笔者在总结凤太铅锌矿集区成矿地质特征和找矿靶区预测的基础上,结合近年来在凤太矿集区的找

矿实践经验,针对“攻深找盲”,提出深部找矿的有效综合勘查方法技术组合,对解决区内大中型铅锌矿山资源危机和探矿增储问题,延长矿山服务年限,具有重要的指导意义。

## 1 地质背景

凤太铅锌矿集区处于南秦岭晚古生代裂陷带(秦岭造山带内秦岭微板块南部),该裂陷带北以赵家庄-湘子河-督都门断裂为界、南以酒奠梁-江口断裂为界(王瑞廷, 2005; 王瑞廷等, 2007, 2012, 2021; 祝新友等, 2011; 王义天等, 2018, 2021; 周小康等, 2020),地层主要为泥盆系。由于南北向对冲推覆构造造山作用(张国伟等, 1997; 王瑞廷等, 2012),区内构造线总体呈 NWW 向,整体上是褶皱、断裂组成的似菱形构造块体。褶皱主体为由一系列次级背斜及向斜构造组成的 NWW 向古岔河-桑园坝复向斜,铅锌矿床的赋存及矿带的展布受次级背斜控制(图 1)。

凤太铅锌矿集区出露地层大部分为泥盆系细碎屑岩-碳酸盐岩。其中,中泥盆统大枫沟组( $D_2 d$ )岩性主要为紫红色-灰色变含钙质长石石英杂砂岩、长石石英杂砂岩夹含砾细-粉砂岩、长石石英杂砂岩夹含钙石英粉砂岩、泥质粉砂岩、深灰色含长石石英质板岩夹(碳质)粉砂质千枚岩、薄层砂质灰岩;中泥盆统古道岭组( $D_2 g$ )岩性主要为深灰色中厚层-块状结晶灰岩、生物灰岩、深灰色含碳中薄层状重结晶生物碎屑灰岩;上泥盆统星红铺组( $D_3 x$ )岩性主要为碳质千枚岩、钙质千枚岩、斑点状铁白云质粉砂质千枚岩、绿泥石千枚岩、粉砂质千枚岩夹粉砂岩、薄层灰

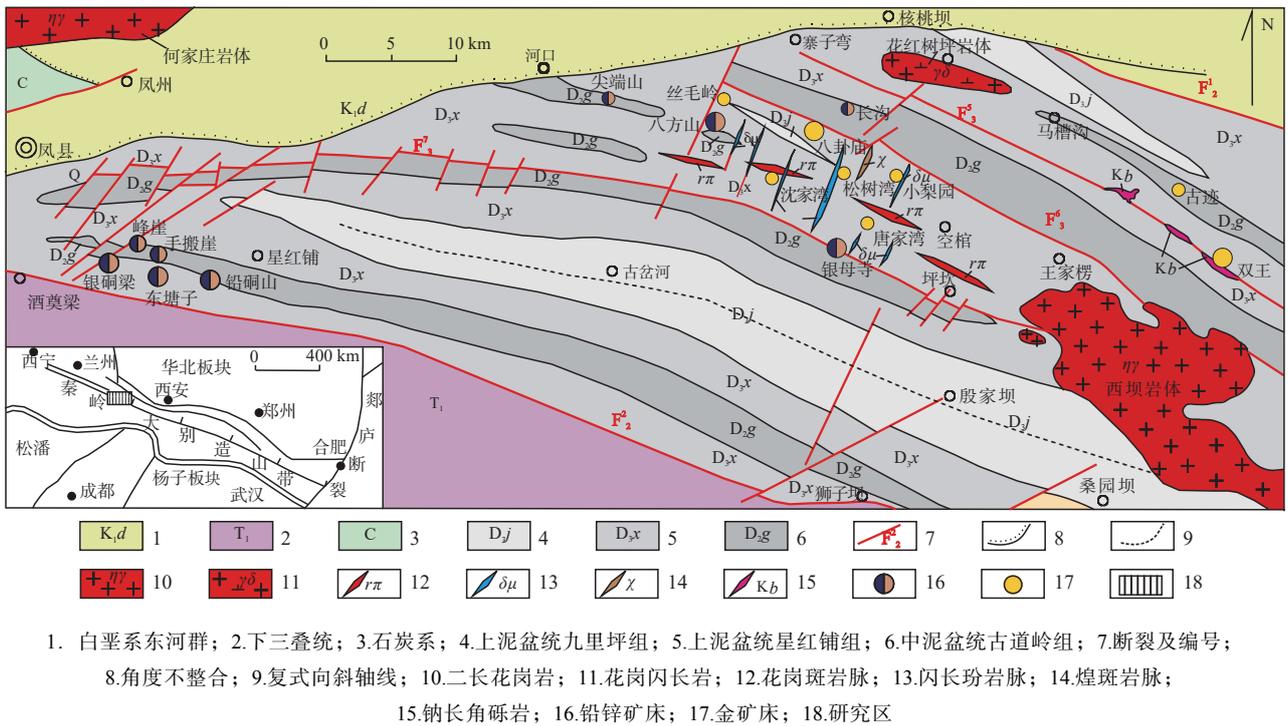


图 1 凤太铅锌矿集区西部矿产地质简图

Fig. 1 Geological map of mineral resources in western Fengtai Pb-Zn orefield

岩; 上泥盆统九里坪组( $D_{3j}$ )岩性主要为灰白色中厚层-厚层状变长石石英砂岩、中厚层-中薄层状变细砂岩、含钙粉砂质绢云母板岩、深灰色粉砂质板岩等。局部零星出露有秦岭岩群郭家庄岩组( $Pt_1g$ )副变质岩、丹凤岩群( $Pt_3OD$ )火山岩、晚泥盆统桐峪寺组( $D_3t$ )、早石炭统夹山沟组( $C_{1j}$ )和袁家沟组( $C_{1y}$ )、早中侏罗统龙家沟组( $J_{2l}$ )、早白垩统东河群( $K_1D$ )。以大致呈 SN 向流经平木镇-江西营的西河为界, 西部中、下泥盆统地层较东部明显含砂质成分高, 表明沉积环境的差异。次级背斜鞍部及两翼中泥盆统古道岭组灰岩与上泥盆统星红铺千枚岩的过渡层含碳部位是矿集区铅锌矿床的主要赋矿层位(王瑞廷, 2005; 王瑞廷等, 2007, 2012, 2021; 胡乔青等, 2013; 张革利等, 2020)。

区内岩浆岩较为发育, 受区域性断裂构造控制呈 NW、NE 向展布, 以中酸性岩类为主。规模较大的有印支期的西坝岩体(219 Ma)(张帆, 2010)、花红树坪岩体(225 Ma)(胡乔青, 2015), 岩性多为中-细粒花岗闪长岩、二长花岗岩、石英闪长岩、英云闪长岩, 主要分布于西河东部, 其中西坝岩体为区内铅锌金的富集成矿提供热动力和部分物质来源(贾润幸等, 1999; 冯建忠等, 2004; 王瑞廷, 2005); 西河以西, 主要是以小规模、不连续的岩脉沿断裂充填, 充填于 NWW 向断

裂的岩脉主要为酸性花岗斑岩, 充填于 NE 向断裂的岩脉主要以闪长玢岩、煌斑岩为主。空间位置上, 凤太铅锌矿床相对集中分布于西河以西, 在铅锌矿体及其上、下盘围岩中零星发现有岩脉赋存, 岩脉与其围岩的接触面多呈平整线状, 局部可见岩脉切穿灰岩与千枚岩接触带, 表现出破矿或铅锌成矿期后侵入的特征。尚未发现这些岩脉与铅锌矿床的形成有直接关系的证据。

## 2 铅锌成矿作用特征

### 2.1 矿床特征

凤太铅锌矿集区铅锌矿体赋存于泥盆纪古道岭组与星红铺组接触带, 受背斜构造与岩性接触面控制, 赋矿岩性主要为硅化灰岩、硅化白云岩、生物碎屑灰岩、含碳生物碎屑灰岩、石英脉及少量含碳钙质千枚岩和硅化千枚岩。地表有露头时, 矿体形态呈“八字型”, 地表未见露头时形态则呈鞍状或“抛物线型”, 规模相对较小的铅锌矿体呈似层状、透镜状赋存于灰岩与千枚岩接触带, 矿体多与围岩整合产出。凤太铅锌矿集区铅锌矿床展布的典型特征为相对集中且成带分布, 以矿集区中部古盆河-桑园坝复向斜核部为界, 分为南、北 2 个铅锌矿床集中分布区。北部铅锌

矿床集中分布区位于八方山-银母寺一带,包括长沟-洞沟-柳树沟-水晶沟铅锌矿带、尖端山-八方山-二里河铅锌矿带、银母寺-大黑沟铅锌矿带等3个主要铅锌矿带,代表性矿床为八方山-二里河大型铅锌矿床。矿体赋存于八方山背斜鞍部及两翼的古道岭组灰岩与星红铺组千枚岩接触带(硅钙面)及其附近(图2),鞍部矿体富厚,北倒转翼矿化强,矿体在地表出露部位呈长轴 NWW 向的椭圆形,随背斜构造向东侧伏成为隐伏矿体(图3)。南部铅锌矿床集中分布区位于铅硐山-水柏沟一带,代表性矿床为铅硐山-东塘子大型铅锌矿床。矿体赋存于向西倾伏的“M”型铅硐山复式背斜南北两分枝背斜鞍部及两翼硅钙面附近,随背斜构造向西侧伏,矿体在铅硐山矿段地表有出露,向西在东塘子矿段完全隐伏。

铅锌矿石结构主要为半自形-他形晶结构、交代结构、碎裂结构、重结晶结构;构造主要为块状-团块状构造、条带状-似条带状构造、浸染状构造,次为脉状、网脉状构造。围岩蚀变主要有硅化、铁白云石化、

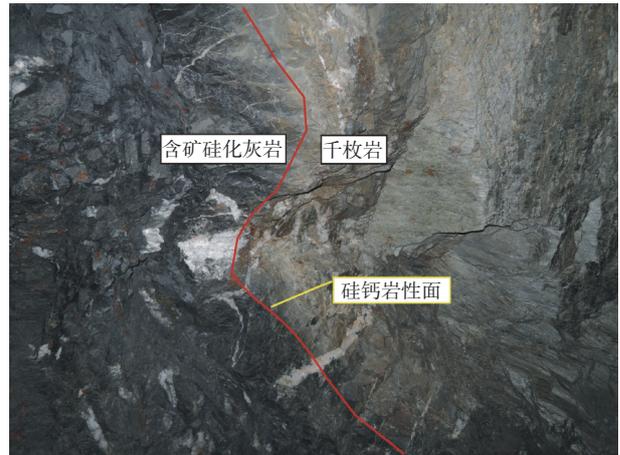
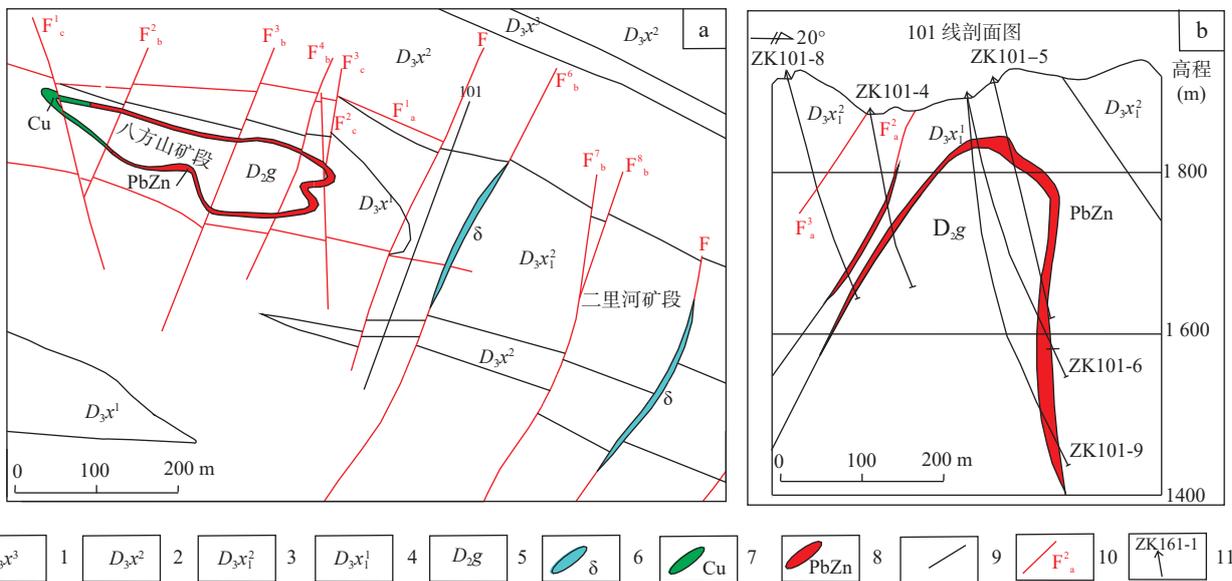


图2 凤太铅锌矿集区铅锌矿体主成矿结构面图  
Fig. 2 Main metallogenetic structural plane of Pb-Zn deposit in Fengxian-Taibai Pb-Zn ore concentration area

碳酸盐化、黄铁矿化等。蚀变作用表现出矿化带内部蚀变强、远离矿脉蚀变则迅速减弱,背斜转折端部位蚀变较强、向两翼延伸则减弱的特征,反映了热液活动的剧烈性和多期性。



1.星红铺组第三岩性段; 2.星红铺组第二岩性段; 3.星红铺组第一岩性段第二层; 4.星红铺组第一岩性段第一层;  
5.古道岭组; 6.闪长岩脉; 7.铜矿体; 8.铅锌矿体; 9.勘探线剖面; 10.断层及编号; 11.钻孔及编号

图3 八方山-二里河铅锌矿床地质略图(a)与典型剖面图(b)(据王瑞廷等, 2021)

Fig. 3 (a) Geological sketch map and (b) typical section map of the Bafangshan-Erlihe Pb-Zn deposit

### 2.2 矿床成因

对凤太矿集区铅锌矿床的成因认识随着找矿阶段的不同逐渐得到深化,先后提出层控型(杨锦源等, 1985; 祁思敬等, 1993)、动力热液型(宫同伦等, 1990)、热水喷流沉积型(张复新等, 1988; 王集磊等, 1996; 方

维萱, 1998)、热水喷流沉积改造型(王瑞廷等, 2007; 李红中等, 2009; 祝新友等, 2011; 任鹏等, 2013, 2014; 张阳等, 2015)、后生热液型(王义天等, 2009; 张帆, 2010; 胡乔青等, 2012a, 2013, 2015)等不同成因观点。近年来,部分学者(王瑞廷等, 2012; 张革利等, 2019,

2020; Hu et al., 2020)通过从矿床地质特征、同位素示踪等方面对分属不同矿带的八方山-二里河、铅硐山-东塘子铅锌矿床的研究,认为铅锌矿床成矿与南秦岭印支期大规模多阶段构造-岩浆-流体活动相关,是秦岭造山带晚三叠世后碰撞阶段区域大规模构造变形变质-岩浆-流体活动综合作用的产物,属于古道岭组灰岩与星红铺组千枚岩接触面(硅钙面)控制的层控岩浆热液型铅锌矿床。目前,笔者在凤太矿集区铅锌矿床层控岩浆热液型成因理论的指导下,部署了相关找矿工作并取得了较好的找矿成果。现勘查深度已达1200 m,但因受限于投入力度不够、勘查风险大、施工能力不足、认识多维性等因素,在铅锌矿床深部仍未发现支持层控岩浆热液型成因的成矿地质体。

### 2.3 成矿规律

学者们以往对凤太矿集区主要铅锌矿床从地质特征、控矿因素、成矿规律等方面进行了不少研究(祁思敬等, 1993; 王相等, 1996; 王集磊等, 1996; 王瑞廷等, 2007, 2012, 2021; 王义天等, 2018, 2020)。从整体上看,凤太矿集区主要铅锌矿床成矿特征基本一致,如赋矿地层和围岩岩性一致、矿体赋存产出特征相似、均产于背斜鞍部及两翼,矿石矿物均以富闪锌矿贫方铅矿为特征,矿石结构构造相似,围岩蚀变特征相似,以硅化和铁白云石化为主(王瑞廷等, 2007; 胡乔青等, 2012b; 张革利等, 2019)。从铅锌矿体的空间产出特征和成因规律上看,其具有“地层+层位+构造”的“三位一体”的成矿规律(高卫宏等, 2016a)。笔者研究认为,地层和流体提供成矿物质并迁移,结构面和构造控制矿体就位空间。

#### (1) 铅锌矿体的赋存受地层控制

区内发现的大、中型铅锌矿床矿体主要赋存于中泥盆统古道岭组灰岩与上泥盆统星红铺组千枚岩接触带靠近灰岩一侧,且其局部赋存状态与接触带形态密切相关,如八方山-二里河、铅硐山-东塘子、银洞梁等大型铅锌矿床和手搬崖、峰崖等中型铅锌矿床等均赋存于灰岩与千枚岩接触带偏灰岩一侧,八方山-二里河大型铅锌矿床矿体在地表部位的形态随灰岩与千枚岩接触带的形态而呈NWW向椭圆形,在剖面上呈“八字型”或“抛物线型”。个别小型铅锌矿床发现于古道岭组断裂构造中,如东沟、水晶沟小型铅锌矿床。在星红铺组断裂构造中也发现有铅锌矿点,如铁炉湾、剪子沟等铅锌矿点。

(2) 深部流体迁移成矿物质并在有利部位卸载而形成矿体

虽然区内铅锌矿床的宏观赋存特征上未见到铅锌矿床的形成与岩脉有直接关系的地质现象,但区内铅锌成矿作用特征与区域上普遍发育的印支期岩浆岩作用相相合。铅锌矿体上下盘围岩蚀变以及铅锌矿石的结构、构造特征均暗示成矿过程中有热液流体参与。区内八方山-二里河、铅硐山-东塘子大型铅锌矿床的成矿流体盐度和温度、H-O同位素、S同位素、Pb同位素等研究表明,铅锌矿床成矿流体和成矿物质的来源、迁移与岩浆活动密切相关(王瑞廷, 2005; 王瑞廷等, 2011, 2012; 胡乔青等, 2012a, 2012b, 2013; 任鹏等, 2014; 胡乔青, 2015; Hu et al., 2020; 张革利等, 2020; 王义天等, 2021); 区域上的岩浆岩岩石学研究表明,晚三叠世中酸性岩浆活动为区内铅锌成矿提供热源、成矿流体和成矿物质(宫同伦等, 1990; 王瑞廷, 2005; 张帆, 2010; 王瑞廷等, 2012; 任鹏等, 2013; 王义天等, 2021)。深部流体既是成矿物质的提供者,又是成矿物质迁移的热动力源,在迁移过程中于有利的容矿时空条件下,成矿物质卸载并形成矿体。

#### (3) 铅锌矿体的赋存受结构面控制

结构面为岩性界面(硅钙面)。铅锌矿体赋存于古道岭组灰岩与星红铺组千枚岩接触部位,这2种岩性界面是区内铅锌主成矿结构面。由于古道岭组与星红铺组接触部位两种岩性的能干性不同,导致构造物理化学条件存在差异(张长青等, 2012),在界面处控矿背斜往往造成构造虚脱部位,形成了铅锌矿体赋存的可利构造空间,成矿流体向上运移过程中在此处沉淀成矿。由于成矿作用过程中伴随层滑剪切运动与热变质致使岩石中碳质析出,在矿体上盘往往发育含碳岩层,形成铅锌矿标志性赋矿岩层。在铅锌矿体所赋存的古道岭组与星红铺组接触部位及偏灰岩一侧常见碳质含量相对较高。

(4) 铅锌矿床的分布与矿体赋存受控于断裂与背斜构造

区内NWW向断裂和褶皱构成了区内的构造格架。凤太铅锌矿集区铅锌矿床主要分布于赵家庄-湘子河-督都门断裂南侧的NWW向断裂带旁侧,且多见于NE与NW向断裂叠加交汇部位。而在古道岭组灰岩或星红铺组千枚岩内部发现的铅锌矿体则是断裂控矿的另一种表现形式。

铅锌矿床的展布与矿体赋存受背斜构造控制是

凤太铅锌矿集区最为明显、最为宏观的成矿规律。区内发现的铅锌矿床均普遍受 NWW 向次级背斜控制。自北向南依次分布的 6 个 II 级次级背斜(长沟-洞沟、尖端山-八方山-二里河、三角崖-甘沟、银母寺-大黑沟、麻沟-铁炉湾、铅硐山-水柏沟)构成了 6 个铅锌成矿带。各成矿带中的 III、IV 级次级紧闭背斜直接控制着不同展布形态的铅锌矿体的规模, 铅锌矿体呈现出鞍部厚度最大、品位最富, 倒转翼矿化强度与规模均大于正常翼的特征。其中, 铅硐山-水柏沟复式背斜(II 级)中的银硐梁-手搬崖背斜(III 级)控制了银硐梁铅锌矿床、手搬崖铅锌矿床、黑崖铅锌矿床, 铅硐山背斜(III 级)控制的铅硐山-东塘子铅锌矿床构成了区内规模最大、探明资源量最多的成矿带。次级背斜的核部与两翼岩性界面在成矿作用过程中容易发生层滑剪切运动, 形成构造虚脱部位, 该部位也是物理化学条件转换界面(部位), 是深部含铅锌热液沉淀的有利场所。此外, 在背斜翼部 2 组岩性接触带产状变化部位也是成矿有利部位。铅锌成矿受 2 组地层接触带部位的层间构造控制, 宏观上表现为背斜构造控制着铅锌矿床的分布。

### 2.4 成矿模式

凤太矿集区所在的秦岭造山带在印支—燕山期

发生对冲推覆褶皱造山作用(张国伟等, 1997; 王瑞廷等, 2012), 使得区内形成一系列 NWW、NE 向脆韧性剪切带、断裂和节理及以紧闭背斜为次级构造的一系列 NWW 向复式褶皱为组合的复杂构造变形系统, 并伴随有强烈的中酸性岩浆活动(Chen et al., 2020)。大规模的中酸性岩浆活动不仅提供了热源, 在迁移过程中活化了岩石中的 Pb、Zn 等成矿元素, 也提供了部分成矿流体和成矿元素。成矿流体在沿着从基底一直延伸至泥盆系的 NWW 向断裂构造向上运移过程中, 不断与加热下渗的大气降水和有机水发生混合作用, 上升至因岩石能干性不同而在背斜鞍部及翼部的古道岭组灰岩与星红铺组千枚岩接触界面形成的减压虚脱扩容部位, 在有利的温度、压力、酸碱度、氧化还原电位等物理化学条件下, 发生交代、沉淀、充填作用最终形成铅锌矿体(图 4)。矿集区赋存于不同地理位置、不同减压虚脱扩容部位的铅锌矿化体是同一期成矿作用在不同位置构造中的产物(王瑞廷等, 2012, 2021; 王义天等, 2020)。

## 3 铅锌矿找矿方向与靶区预测

### 3.1 找矿方向

综合矿集区地质构造、铅锌矿床特征、成矿规律、

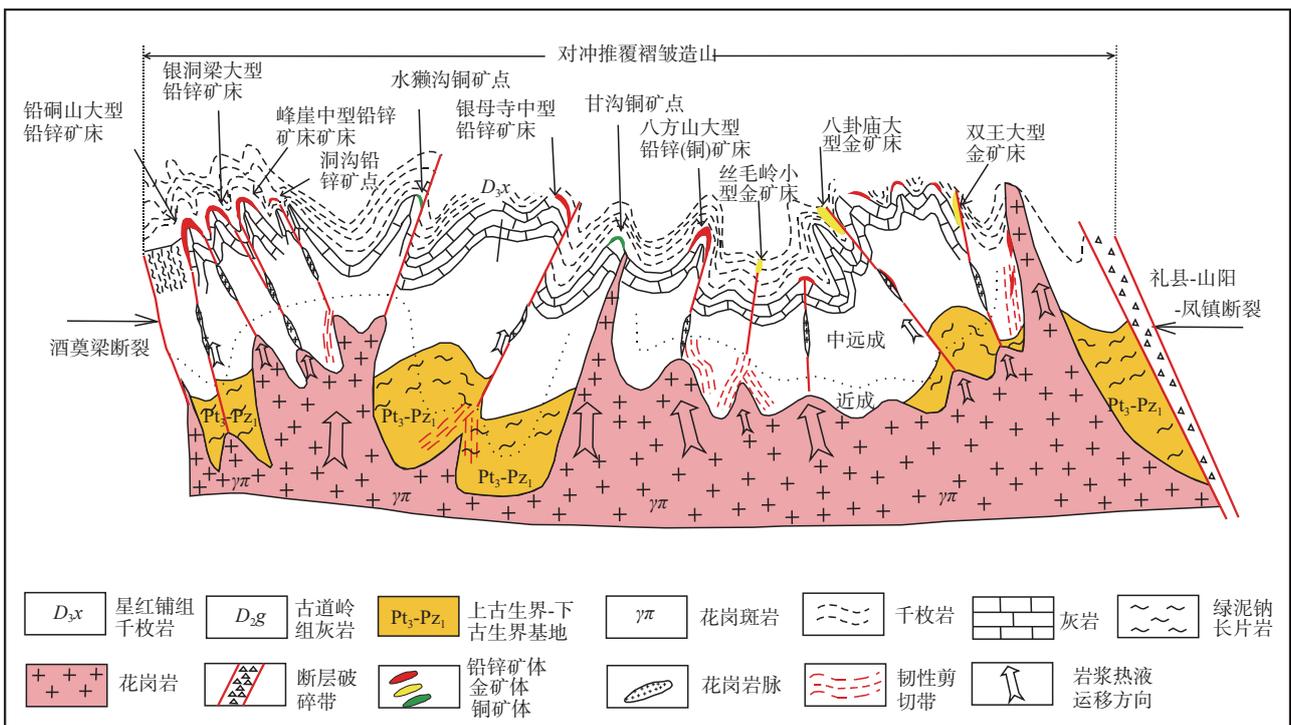


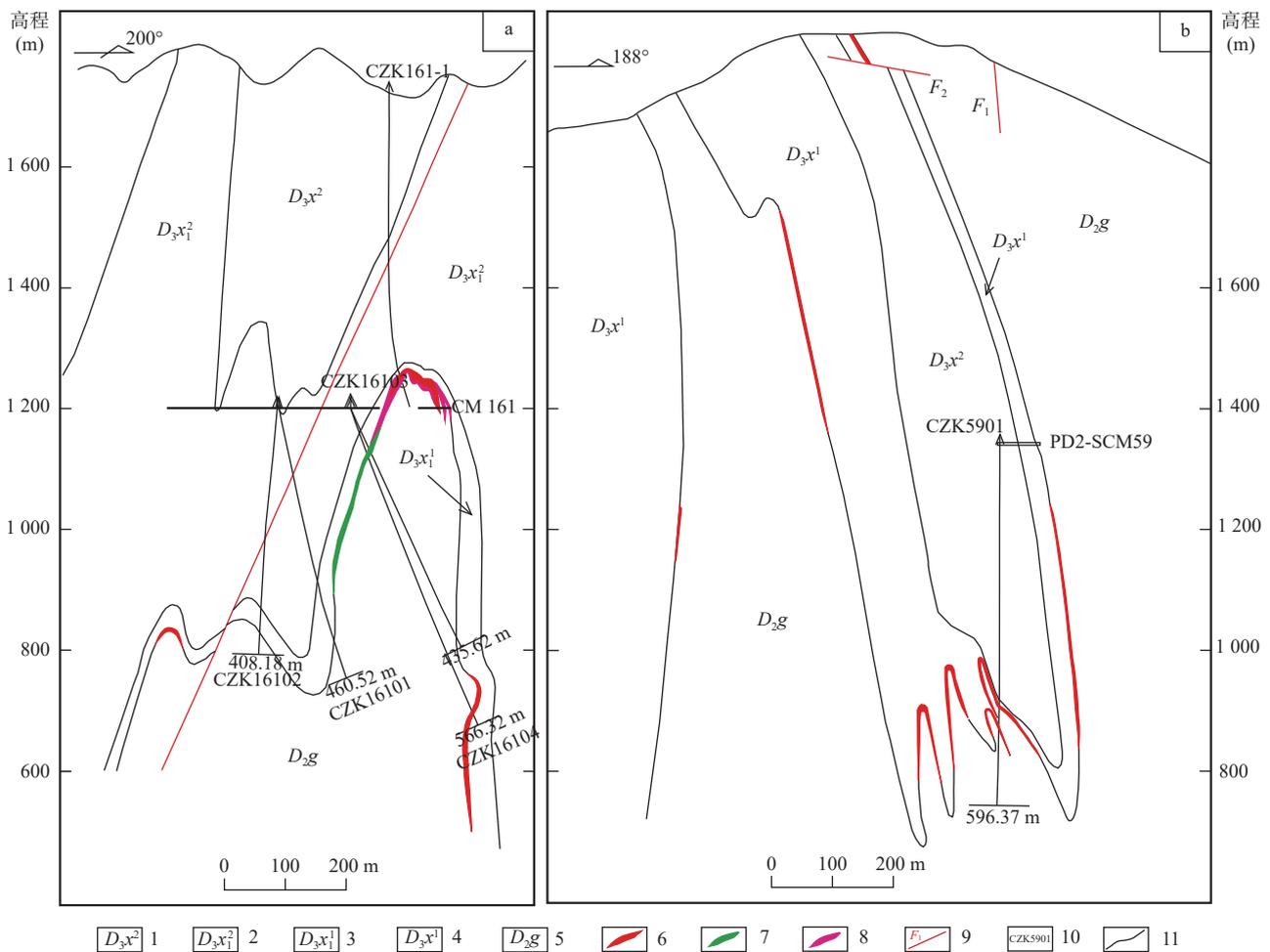
图 4 凤太铅锌-金矿集区区域铅锌金成矿模式图(据王瑞廷等, 2021)

Fig. 4 Regional metallogenic model of Fengtai Pb-Zn-Au ore concentration area

成矿条件、成矿模式、控矿因素等,分析认为已知铅锌矿床走向延伸与倾向延深部位(就矿找矿有利空间)、已知矿床两翼深部对赋矿有利的褶曲部位(500 m 以深的产状变化部位是第二有利找矿空间)、已证明含矿但勘查程度低的控矿背斜倾伏部位、受同一背斜控制的 2 个铅锌矿床之间的构造凹陷部位、千枚岩覆盖区可能存在的与已知控矿背斜平行的次级“隐伏”背斜(背斜核部古道岭组灰岩未出露)部位、北部白垩纪东河群与南部三叠纪地层下伏有利部位等是区内铅锌找矿有利地段(李发林等, 2004; 高卫宏等, 2016b; 王备战等, 2020; 王瑞廷等, 2021)。概括性地讲,依据成矿模式和找矿标志研究,找矿有利地段可划分为寻找已知矿体的延深部分、已知矿体深部(或周边)的未知矿体部位、无已知矿床的新区等

3 类。

21 世纪以前,在八方山铅锌矿床东延发现探明二里河铅锌矿床,铅硐山铅锌矿床西延发现探明东塘子铅锌矿床,银母寺铅锌矿床向东继续勘查使得矿体长度倍增。近年来,笔者在东塘子铅锌矿床西延新获埋深 1 000 m 的铅锌矿体,在二里河铅锌矿床所处的尖端山-八方山-二里河背斜东延深部发现埋深 1 000 m 的第二层铅锌矿体(图 5a),在银硐梁背斜北翼发现埋深约 1 200 m 的多条鞍部含矿的次级背斜(图 5b)。这些重大找矿发现,表明矿集区内主要找矿方向是已知铅锌矿床走向延伸与倾向延深部位、矿床两翼深部对赋矿有利的褶曲部位。随着新一轮找矿突破战略行动的启动和找矿认识的不断深入,科学预测、大胆验证,有望在这些找矿有利地段取得新的找矿突破。



1.星红铺组第二岩性段含绿泥石绢云母千枚岩; 2.星红铺组第一岩性段第二层铁白云质千枚岩,局部夹钙、砂质扁豆状千枚岩; 3.星红铺组第一岩性段第一层含碳钙质千枚岩夹薄层灰岩; 4.星红铺组第一岩性段(未分)铁白云质千枚岩、钙质千枚岩、含碳薄层灰岩; 5.古道岭组含碳生物微晶灰岩; 6.铅锌矿体; 7.铜矿体; 8.铅锌矿化蚀变体; 9.断层; 10.钻孔; 11.地质界线

图 5 二里河铅锌矿床 161 线(a)与银洞梁铅锌矿床 59 线地质剖面图(b)

Fig. 5 (a) Geological profiles of line 161 of Erlihe Pb-Zn deposit and (b) line 59 of Yindongliang Pb-Zn deposit

### 3.2 靶区预测

通过深入的对比研究,按照成矿地质条件优越、控矿要素匹配、地球物理-地球化学特征相似等综合信息集成分析原则,紧密结合找矿勘查工作,预测铅锌找矿靶区主要为八方山-二里河铅锌矿床深部、白杨沟-洞沟、银洞梁-手搬崖铅锌矿床深部、铅硐山-东塘子铅锌矿床深部等4处。

八方山-二里河铅锌矿床深部找矿靶区位于北部铅锌矿床集中分布区最大的八方山-二里河铅锌矿床深部,探采实践证明已知矿体随八方山控矿背斜向东倾伏而倾伏,呈隐伏状稳定向东延伸,其已知矿体的延深部分为找矿有利地段。该找矿有利地段总体处于高磁异常向低磁异常过渡部位,发育有1:5万水系沉积物综合异常与1:2.5万沟系次生晕异常,元素组合以Pb、Zn、Hg、Cd为主。

白杨沟-洞沟铅锌找矿靶区地处长沟-洞沟铅锌矿带中西段,推测在已知矿体周边存在未知矿体,找矿潜力较大,以古道岭组灰岩为核部的次级背斜发育,NW、NE向断裂发育,北侧为花红树坪花岗闪长岩体。该靶区位于北秦岭重力低向南重力逐渐增高的过渡部位,1:5万磁法测量圈出NWW向展布的磁异常带,推测为热接触蚀变形成的磁性物质引起,指示深部岩浆活动强烈。1:5万水系沉积物测量、1:2.5万沟系次生晕测量均在此靶区内圈出规模较大的Au、Ag、As、Sb、Cu、Pb、Zn、Hg等元素组合异常。

银洞梁-手搬崖铅锌矿床深部找矿靶区次级褶皱发育,具有良好的隐伏铅锌矿体赋矿条件,矿山生产过程中已在深部发现隐伏铅锌矿体集中发育部位,该部位也是已知矿体的延深部分。重力与磁法测量推断银洞梁-手搬崖铅锌矿床西侧存在隐伏NE向断裂构造,电法测量推断深部存在隐伏高阻异常。该找矿靶区的地球化学特征与八方山-二里河铅锌矿床深部找矿靶区相同。

铅硐山-东塘子铅锌矿床深部找矿靶区位于南部铅锌矿床集中分布区内规模最大的铅硐山-东塘子铅锌矿床深部,矿体向西随控矿背斜倾伏而倾伏并且延伸稳定,属已知矿体的延深部分。重力与磁法测量推断铅硐山-东塘子铅锌矿床西侧存在隐伏NE向断裂构造,靶区处于高磁向低磁异常过渡部位。该靶区地球化学特征与八方山-二里河铅锌矿床深部找矿靶区相同。

近十余年来,凤太矿集区在已知铅锌矿床走向延

伸与倾向延深部位、矿床两翼深部褶曲部位取得的铅锌找矿成果表明,对隐伏控矿构造与隐伏矿体的预测是找矿靶位预测的重点。上述4处找矿靶区均分布有隐伏控矿构造,为隐伏矿体的赋存提供了空间条件,是找矿靶位预测的首选目标区。

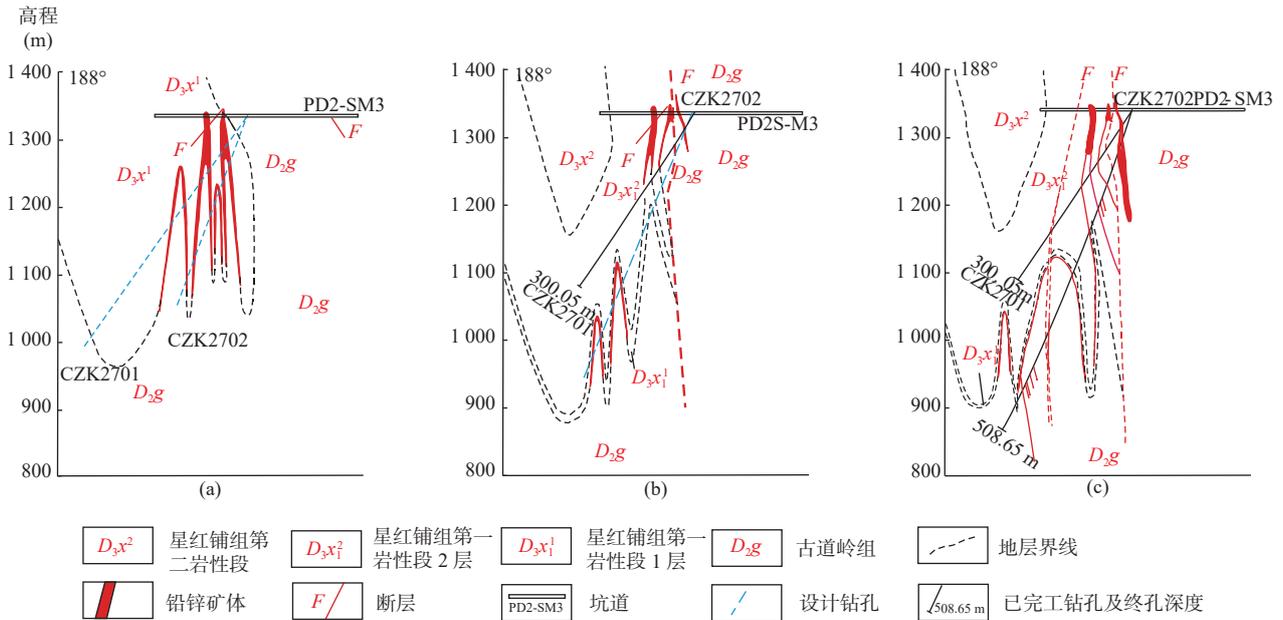
## 4 铅锌矿床勘查方法技术组合

国内有关矿山深部找矿大多采用的是地质、物探、化探、钻探验证综合找矿方法(王瑞廷,2005;廖震文,2006;石教波等,2006;王瑞廷等,2012;侯林等,2015)。凤太矿集区铅锌矿主要找矿靶区多位于已知矿体的走向侧伏及倾向延深深部(埋深已达1200m),加之受《陕西省秦岭生态环境保护条例》制约,面对传统的重砂测量、遥感地质调查、地表山地工程等勘查技术方法已难以凑效的窘境,迫切需要探索对深部找矿切实有效的新方法技术。近十余年来,笔者在凤太矿集区的铅锌找矿实践证明,地质综合研究、地球化学方法、地球物理方法、深部探矿工程是有效的勘查技术方法体系,组合采用各不同方法,扬长避短,可以有效提高深部找矿成功率。

地质综合研究方法是贯穿于地质工作全过程的对各种资料不断地进行多次分析研究、集成挖掘的智力密集型工作。①通过循环渐进研究矿区已有地、物、化、遥资料,特别是综合研究深部坑道和钻孔不断获得的岩性、构造、矿化蚀变、岩浆岩等成矿地质条件信息,产状、规模、形态、空间分布特征等矿体特征信息,矿物、化学成分、交代作用、物理性质、原生晕、成矿深度等内生分带指示信息,将其与已详细查明的矿区、矿体进行系统类比,提出矿区深部或边部的找矿验证方案。②据验证工程获取的新信息再不断的综合深入分析研究,提出并完善新的具体验证方案。③构造地质填图是地质综合研究的基础工作,通过研究矿田(矿集区)尺度的成岩成矿有关构造背景,以总结矿区控矿构造格架三维分布特征及空间分布规律,为预测深部及外围找矿有利靶区(位)提供地质依据。近年来,在地处银洞梁-手搬崖铅锌矿床深部找矿靶区的槽头沟地段深部找矿过程中,以已施工坑探工程和钻探工程所见构造、矿化蚀变、岩性及其产状为基础开展综合研究,采用构造地质填图法确定纵向大理深构造变化规律,在控矿背斜翼部推测存在4个次级含矿褶皱并设计了钻探验证方案(图6a)。

首孔验证见到了 2 个次级褶皱且在灰岩与千枚岩中均见到工业铅锌矿体, 但灰岩中的铅锌矿体规模不大, 与以往认为的铅锌矿体主要赋存于千枚岩与灰岩接触界面且偏向于灰岩一侧的认识不太一致。综合研究认为, 控矿背斜翼部深部千枚岩与灰岩接触界面存在另外 2 个次级褶皱并再次提出验证方案(图 6b)。

第二个钻孔验证后认为见到了推测的 1 个深部次级褶皱, 在灰岩与千枚岩中均再次见到了工业铅锌矿体, 且灰岩中矿体规模、厚度、品位均优于千枚岩中的铅锌矿体, 控矿构造更为复杂(图 6c)。这一找矿实例取得的找矿突破是地质综合研究法应用效果的典型体现。



a. 首孔设计图; b. 首孔验证后第二个验证孔设计图; c. 施工两个验证孔后见矿示意图

图 6 银洞梁-手搬崖铅锌矿床 27 线剖面(不同工作阶段)

Fig. 6 Profiles 27 of Yindongliang-Shoubanya Pb-Zn deposit

地球化学方法在发现地表、浅部矿产方面发挥了重要作用, 现在仍然是找矿工作中不可或缺的技术方法, 但是凤太矿集区各找矿靶区埋深已达 1 200 m, 传统的土壤地球化学测量、水系沉积物地球化学测量、地质-岩石地球化学测量已难以起到良好的指示效果。构造叠加晕找矿法的主要奠基者在对 90 多个矿山(涉及金、银、铜、铅、锌、铋等)的研究基础上建立的深部盲矿预测方法, 90% 以上靶位经工程验证取得了显著找矿效果(李惠等, 2021)。其中, 根据凤太矿集区双王金矿建立的矿床构造叠加晕预测模式对深部进行找矿预测, 提出了深部 3 个盲矿靶位, 经坑探和钻孔验证后获得金金属量为 14 t(李惠等, 2010)。受此启示, 笔者在凤太矿集区二里河铅锌矿床深部、东塘子铅锌矿床深部开展了构造叠加晕寻找深部盲矿体的初步尝试工作, 圈定的成矿元素垂直分带不具有典型的前缘晕-近矿晕-尾矿晕组合特征。分析认为, 这是铅锌矿多期成矿热液叠加成矿作用的结果, 预示

着深部存在找矿空间。二里河矿区近年新发现“第二找矿空间”的找矿成果印证了这一认识。据此, 预测提出在东塘子铅锌矿区存在“第二找矿空间”, 目前探索验证工作正在部署实施中。

常规的地球物理方法(瞬变电磁法、可控源音频大地电磁测深、频谱激电测深、激电中梯等)在发现浅部矿体方面, 能较有效地区分矿致异常与非矿致异常(刘建利等, 2010), 但存在抗干扰能力差、数据质量易受扰动、探测深度浅等缺陷, 笔者认为在深部找矿工作中要根据具体的地质环境, 采用不同的方法组合和有针对性的装置参数, 才能扬长避短, 取得较好的找矿效果。近年研发的广域电磁法具有抗干扰能力强、分辨率高、探测深度大、数据采集效率高的特点(何继善, 2010), 被誉为“绿色、高效、低成本”的勘查技术。笔者把广域电磁法首先引入到银母寺铅锌矿深部找矿工作中(王备战等, 2020), 圈定找矿靶位, 经钻探验证见到了矿化体, 找矿效果较好。随后, 在

二里河铅锌矿区也开展了3条广域电磁法剖面测量,根据其圈定的异常在相邻剖面布设坑内钻验证工程,见到埋深近1400 m的铅锌矿体。此外,短偏移距瞬变电磁法在二里河矿区圈定的低阻异常体与地质推测的隐伏铅锌矿体对应关系也较好(王备战等,2020),为深部找矿工程布设提供了地球物理依据。

深部地质探矿工程包括钻探和坑探。钻探具有成本低、施工便捷、速度快、深度大、机动灵活、适应性强的优势,是对深部找矿靶位验证的首选手段。坑内钻探在生产矿山深部寻找盲矿体可减少探矿风险、缩短探矿周期、节省探矿投入、提高探矿效果、降低或避免井下采掘工程安全环境风险的优势尤为突出,作为一种经济高效的探矿手段,在矿山探矿应用中普及程度越来越高。但钻探岩心直径有限不利于地质观察研究,弯曲度测量数据精度误差偏大时,往往会将综合研究带入误区。钻探与坑探工程之间具有很强的互补性。在成熟矿区,考虑到对复杂矿体的控制精度需要以及后期采矿工程可对探矿坑道的利用,坑探不失为深部靶位验证的优选手段。近年,在二里河铅锌矿床、东塘子铅锌矿床深部找矿工作中将坑内钻探与坑探两种工程手段取长补短综合运用,在取得较好的找矿效果的同时亦降低了探矿成本。

## 5 结论

(1)凤太矿集区铅锌矿床在赋矿层位、围岩岩性、矿体赋存特征、矿石矿物结构构造、围岩蚀变、控矿因素等地质特征方面相似度高、可类比性强。矿床成因认识先后有层控型、热水喷流沉积型、热水喷流沉积改造型、后生热液型等不同观点。通过本轮研究工作,认为凤太矿集区印支期—燕山期的岩浆—流体活动为铅锌成矿提供了能量和部分成矿物质,在同期的对冲推覆褶皱造山动力作用下,成矿流体上升至因岩石能干性不同而形成的减压虚脱扩容部位沉淀富集最终形成铅锌矿体,铅锌矿床成因类型为层控岩浆热液型。

(2)矿集区找矿有利地段可分为寻找已知矿体的延深部分、已知矿体深部(或周边)的未知矿体部位、无已知矿床的新区等3类,主要找矿方向是已知铅锌矿床走向延伸与倾向延深部位、矿床两翼深部对赋矿有利的褶曲部位。

(3)依据综合信息找矿预测,提出凤太矿集区铅

锌找矿靶区主要有八方山—二里河铅锌矿床深部、白杨沟—洞沟成矿带、银洞梁—手搬崖铅锌矿床深部、铅硐山—东塘子铅锌矿床深部等4处,是预测具体找矿靶位的首选区,找矿靶位的预测重点在于对隐伏控矿构造与隐伏矿体的研究判断。

(4)凤太矿集区近年的找矿实践证明,地质综合研究、构造叠加晕找矿法、以广域电磁法为主的大探测深度物探方法以及深部探矿工程验证是有效的勘查技术方法组合。

## 参考文献(References):

- 方维萱. 秦岭造山带大型-超大型金属矿床形成大陆动力学条件分析[J]. 西北地质, 1998, 19(3): 11-17.
- FANG Weixuan. The Analysis for the Condition of Continent Kinetics of Large and Super Large Metal Deposits in Qinling Orogenic Zone[J]. Northwestern Geology, 1998, 19(3): 11-17.
- 冯建忠, 汪东波, 王学明, 等. 西秦岭三个典型金矿床稳定同位素地球化学特征[J]. 中国地质, 2004, 31(1): 78-84.
- FENG Jianzhong, WANG Dongbo, WANG Xueming, et al. Stable Isotope Geochemistry of Three Typical Gold Deposits in the West Qinling[J]. Geology in China, 2004, 31(1): 78-84.
- 高卫宏, 王瑞廷, 李青锋, 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, 2016a, 30(2): 227-233.
- GAO Weihong, WANG Ruiting, LI Qingfeng, et al. Metallogenic Characteristics and Prospecting Direction of Pb-Zn Deposits in the Western Part of Fengtai Ore-concentrated Area in West Qinling[J]. Mineral Resources and Geology, 2016a, 30(2): 227-233.
- 高卫宏, 李降印, 陈明寿, 等. 秦岭凤太矿田矿产分布规律及找矿建议[J]. 甘肃冶金, 2016b, 38(1): 73-77.
- GAO Weihong, LI Jiangyin, CHEN Mingshou, et al. Mineral Distribution of Fengtai Ore Field and Prospecting Suggestion[J]. Gansu Metallurgy, 2016b, 38(1): 73-77.
- 宫同伦, 杨兴科. 凤县铅硐山铅锌矿床动力热液成因标志与找矿方向[J]. 地质与勘探, 1990, (10): 7-13.
- GONG Tonglun, YANG Xingke. Dynamic Hydrothermal Origin and Prospecting Guides of the Qiondongshan Pb-Zn Deposit, Fengxian, Shaanxi[J]. Geology and Prospecting, 1990, (10): 7-13.
- 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 Field Electromagnetic Sounding Methods and Pseudo-random Signal Coding Electrical Method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010, 1-225.
- 侯林, 彭惠娟, 张锦让, 等. 金矿床二次找矿的控矿因素研究与

- 物探找矿方法试验——以贵州普安泥堡金矿床为例[J]. *矿床地质*, 2015, 34(5): 895–912.
- HOU Lin, PENG Huijuan, ZHANG Jinrang, et al. Ore Control Factors and Geophysical Method Tests in Second Round Prospecting for Gold Deposits: A Case Study of Nibao Gold Deposit in Pu'an County, Guizhou Province[J]. *Mineral Deposits*, 2015, 34(5): 895–912.
- 胡乔青, 王义天, 王瑞廷, 等. 陕西省凤太矿集区二里河铅锌矿床的成矿时代: 来自闪锌矿 Rb-Sr 同位素年龄的证据[J]. *岩石学报*, 2012a, 28(1): 258–266.
- HU Qiaoping, WANG Yitian, Wang Ruiting, et al. Ore-forming Time of the Erlihe Pb-Zn Deposit in the Fengxian-Taibai Ore Concentration Area, Shaanxi Province: Evidence from the Rb-Sr Isotopic Dating of Sphalerites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012a, 28(1): 258–266.
- 胡乔青, 王义天, 王瑞廷, 等. 西秦岭凤太矿集区二里河铅锌矿床成矿流体特征[J]. *矿床地质*, 2012b, 31(S1): 659–660.
- HU Qiaoping, WANG Yitian, WANG Ruiting, et al. Characteristics of Ore-forming Fluid in the Erlihe Pb-Zn Deposit, Fengtai Mineral Cluster Region of Qinling Mountains[J]. *Mineral Deposits*, 2012b, 31(S1): 659–660.
- 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 Characteristics and Genesis of the Bafangshan-Erlihe Pb-Zn(-Cu) Deposit in the Fengxian-Taibai Ore Concentration Area, West Qinling[J]. *Geology and Prospecting*, 2013, 49(1): 99–112.
- 胡乔青. 西秦岭凤太矿集区铅锌多金属矿床成矿作用特征、机制与成矿规律[D]. 北京: 中国地质科学院, 2015: 1–150.
- HU Qiaoping. The Mineralization Features, Mechanism and Metallogenic Regularity of the Fengtai Pb-Zn Polymetallic Ore Cluster in West Qinling, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2015: 1–150.
- 贾润幸, 韩述山, 隗合明. 秦岭凤太矿田金矿成矿特征及其成因分析[J]. *西安工程学院学报*, 1999, 21(4): 67–75.
- JIA Runxing, HAN Shushan, WEI Heming. Main Metallogenic Characteristics and Genetic Analysis of Gold Deposit in Feng-tai Ore Field Qinling[J]. *Journal of Xi'an Engineering University*, 1999, 21(4): 67–75.
- 姜寒冰, 杨合群, 赵国斌, 等. 西秦岭成矿带区域成矿规律概论[J]. *西北地质*, 2023: 56(2): 187–202.
- JIANG Hanbing, YANG Hequn, ZHAO Guobin, et al. Discussion on the Metallogenic Regularity in West Qinling Metallogenic Belt, China[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 187–202.
- 李发林, 王瑞廷, 陈二虎, 等. 凤-太矿田大型铅锌矿床勘查靶区及其找矿思路[J]. *西北地质*, 2004, 37(3): 56–60.
- LI Falin, WANG Ruiting, CHEN Erhu, et al. Exploration Target Area for Large-scale Lead and Zinc Deposit and its Prospecting Thoughts in Fengxian-Taibai Ore Field, Shaanxi[J]. *Northwestern Geology*, 2004, 37(3): 56–60.
- 李红中, 周永章, 杨志军, 等. 秦岭造山带西段八方山-二里河地区硅质岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2009, 25(11): 3094–3102.
- LI Hongzhong, ZHOU Yongzhang, YANG Zhijun, et al. Geochemical Characteristics and their Geological Implications of Cherts from Bafangshan-Erlihe Area in Western Qinling Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(11): 3094–3102.
- 李惠, 禹斌, 魏江, 等. 勘查(新)区构造叠加晕研究方法及其预测参照实用理想模型[J]. *地质与勘探*, 2021, 57(2): 351–359.
- LI Hui, YU Bin, WEI Jiang, et al. Research on Prediction of Hidden Ore Bodies at Depth in Exploration (New) Areas Using Structural Superimposed Halos and A Reference Practical Ideal Model[J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(2): 351–359.
- 李惠, 张国义, 禹斌, 等. 构造叠加晕找盲矿法及其在矿山深部找矿效果[J]. *地学前缘*, 2010, 17(1): 287–293.
- LI Hui, ZHANG Guoyi, YU Bin, et al. Structural Superimposed Halos Method for Prospecting Blind Ore-body in the Deep of Ore districts[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(1): 287–293.
- 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*, 2015a, 48(1): 101–108.
- LI Yongqin, WANG Ruiting, Ding Kun, et al. Ore-controlling Characteristics and Metallogenic Model of Brittle Ductile Shear Zones of Baguamiao Gold Deposit in Fengxian County, Shaanxi[J]. *Northwestern Geology*, 2015a, 48(1): 101–108.
- 李永勤, 王瑞廷, 孟德明, 等. 陕西凤县太山庙铜矿地质特征及找矿方向[J]. *西北地质*, 2015b, 48(2): 169–175.
- LI Yongqin, WANG Ruiting, Meng Deming, et al. Geological Characteristics and Prospecting Direction of Taishanmiao Copper Deposits in Fengxian County, Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 2015b, 48(2): 169–175.
- 廖震文. 地物化综合找矿方法的一次成功尝试——贵州银厂坡银铅锌矿床深部矿体综合找矿预测及验证[J]. *地质与勘探*, 2006, 42(1): 59–63.
- LIAO Zhenwen. A Successful Exploration Attempt by Synthetic Geological-Geophysical-Geochemical Method[J]. *Geology and Prospecting*, 2006, 42(1): 59–63.
- 刘建利, 徐新学, 郭虎生, 等. CSAMT 和 SIP 法在凤县老厂铅锌矿区的应用效果[J]. *西北地质*, 2010, 43(2): 58–64.
- LIU Jianli, XU Xinxue, GUO Husheng, et al. Application of CSAMT and SIP Methods in Laochang Lead-zinc Ore Mining Area of Fengxian-County[J]. *Northwestern Geology*, 2010, 43(2): 58–64.

- 祁思敬, 李英. 秦岭泥盆系铅锌成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1993, 1-239.
- QI Sijing, LI Ying. Lead-Zinc Metallogenic Belt of Devonian System in Qinling Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993, 1-239.
- 任鹏, 梁婷, 牛亮, 等. 陕西秦岭铅锌矿床的地质特征及成矿动力学过程[J]. *地球科学与环境学报*, 2013, 35(1): 34-47.
- REN Peng, LIANG Ting, NIU Liang, et al. Geological Characteristic and Geodynamic Process from Pb-Zn Deposit in Qinling of Shaanxi[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2013, 35(1): 34-47.
- 任鹏, 梁婷, 刘扩龙, 等. 秦岭凤太矿集区喷流沉积型铅锌矿床S、Pb同位素地球化学特征[J]. *西北地质*, 2014, 47(1): 137-149.
- REN Peng, LIANG Ting, LIU Kuolong, et al. Geochemistry of Sulfur and Lead Isotopic Compositions of Sedex Lead-zinc Deposits in Fengtai Mineral Cluster Region of Qinling Mountains[J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(1): 137-149.
- 石教波, 谢玉玲, 徐九华, 等. 综合找矿方法在大冶铁矿深部勘查中的应用[J]. *矿床地质*, 2006, 25(S1): 443-446.
- SHI Jiaobo, XIE Yuling, XU Jiuhua, et al. The Application of the Integrated Ore Prognosis Method to Deep Prospecting of the Daye Iron mine[J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(S1): 443-446.
- 田民, 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*, 2020, 42(6): 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*, 2020, 42(6): 801-818.
- 王集磊, 何伯墀, 李建中. 中国秦岭型铅锌矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1996, 1-264.
- WANG Jilei, HE Bochi, LI Jianzhong. Qinling Type Lead and Zinc Mineral Deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996, 1-264.
- 王瑞廷. 秦岭造山带陕西段主要矿集区典型金属矿床成矿模式和找矿预测研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2005, 1-158.
- WANG Ruiting. Study on Metallogenic Model for Typic Metal Ore Deposits and Exploration Predicting of Qinling Orogenic Belt in Shannxi Province, China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2005, 1-158.
- 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, 李芳林, 陈二虎, 等. 陕西凤县八方山-二里河大型铅锌矿床地球化学特征及找矿预测[J]. *岩石学报*, 2011, 27(3): 779-793.
- WANG Ruiting, LI Fanglin, CHEN Erhu, et al. Geochemical Characteristics and Prospecting Prediction of the Bafangshan-Erlihe Large Lead-Zinc Ore Deposit, Feng County, Shaanxi Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(3): 779-793.
- 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银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 Synthetical Exploration Technology for Pb-Zn-Ag-Cu-Au Deposits in Major Mineralization Concentrated Region of Shannxi Area in Qinling Orogenic belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012, 1-276.
- 王瑞廷, 张革利, 李青锋, 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 Mountains[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(3): 528-548.
- 王相, 唐荣扬, 李实, 等. 秦岭造山与金属成矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996, 1-326.
- WANG Xiang, TANG Rongyang, LI Shi, et al. Qinling Orogeny and Metallogenesis[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996, 1-326.
- 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(3): 121-132.
- WANG Yitian, LIU Xielu, HU Qiaoqing, 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(3): 121-132.
- 王义天, 胡乔青, 王瑞廷, 等. 陕西凤太矿集区铅锌矿床的成矿模型及其找矿意义[J]. *矿床地质*, 2020, 39(4): 587-606.
- WANG Yitian, HU Qiaoqing, WANG Ruiting, et al. A New Metallogenic Model and its Significance in Search for Zn-Pb Deposits in Fengtai (Fengxian-Taibai) Polymetallic Ore Concentration Area, Shannxi Province[J]. *Mineral Deposits*, 2020, 39(4): 587-606.
- 王义天, 王瑞廷, 代军治, 等. 西秦岭凤太矿集区走滑双重构造

- 及其控矿意义[J]. *矿物学报*, 2009, 29(S1): 188–189.
- WANG Yitian, WANG Ruiting, DAI Junzhi, et al. The Strike-slip double structure and its Significance of Mineralization in Fengxian- Taibai Ore Cluster, Westem Qinling[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, 29(S1): 188–189.
- 王义天, 毛景文, 胡乔青, 等. 西秦岭西成和凤太矿集区三叠纪多金属成矿作用特征、规律及找矿方向[J]. *地球科学与环境学报*, 2021, 43(3): 409–435.
- WANG Yitian, MAO Jingwen, HU Qiaoqing, et al. Characteristics and Metallogeny of Triassic Polymetallic Mineralization in Xicheng and Fengtai Ore Cluster Zones, West Qinling, China and Their Implications for Prospecting Targets[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(3): 409–435.
- 杨锦源, 张四喜. 秦岭凤太矿田层控铅锌矿床的岩相古地理环境[J]. *沉积学报*, 1985, 3(1): 54–62.
- YANG Jinyuan, ZHANG Sixi. Tithofacies and Paleogeography Environment of Strata-bound Pb Zn Ore Deposits in Fengxian-Taibai Counties, Shaanxi Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 3(1): 54–62.
- 杨合群, 赵国斌, 姜寒冰, 等. 西秦岭成矿带矿床成矿系列概论[J]. *西北地质*, 2022, 55(1): 114–128.
- YANG Hequn, ZHAO Guobin, JIANG Hanbing, et al. Discussion on the Metallogenic Series of Mineral Deposits in the Metallogenic Belt of West Qinling, China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(1): 114–128.
- 张长青, 叶天竺, 吴越, 等. Si/Ca 界面对铅锌矿床定位的控制作用及其找矿意义[J]. *矿床地质*, 2012, 31(3): 405–416.
- ZHANG Changqing, YE Tianzhu, WU Yue, et al. Discussion on Controlling Role of Si-Ca Boundary in Locating Pb-Zn Deposits and its Prospecting Significance[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(3): 405–416.
- 张帆. 秦岭凤太地区印支期岩浆作用与成矿作用-地质年代学和地球化学的证据[D]. 北京: 北京大学, 2010: 1–83.
- ZHANG Fan. Magmatism and Mineralization of the Indosinian Period in the Fengtai Area, Qinling Mountains: Evidence of Geological Chronology and Geochemistry[D]. Beijing: Peking University, 2010:1–83.
- 张复新, 王俊发. 陕西凤太铅-锌矿田海底火山喷流沉积成因探讨[J]. *地质论评*, 1988, 34(2): 157–167.
- ZHANG Fuxin, WANG Junfa. the Submarine Volcanic-exhalative-sedimentary Origin of Lead-zinc Deposits in the Feng-tai Ore Field, Shaanxi[J]. *Geological Review*, 1988, 34(2): 157–167.
- 张革利, 田涛, 王瑞廷, 等. 凤太矿集区东塘子铅锌矿床 S、Pb 同位素组成对成矿物质来源的示踪[J]. *中国地质*, 2020, 47(2): 472–484.
- ZHANG Geli, TIAN Tao, WANG Ruiting, et al. S, Pb Isotopic Composition of the Dongtangzi Pb-Zn Deposit in the Fengtai Ore Concentration Area of Shaanxi Province for Tracing Sources of Ore-forming Materials[J]. *Geology in China*, 2020, 47(2): 472–484.
- 张革利, 王雷, 田涛, 等. 陕西省凤太矿集区找矿预测子项目成果报告[R]. 宝鸡: 西北有色七一七总队有限公司, 2019.
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平. 秦岭造山带基本组成与结构及其构造演化[J]. *陕西地质*, 1997, 15(2): 1–14.
- ZHANG Guowei, DONG Yunpeng, YAO Anping. The Crustal Compositions, Structures and Tectonic Evolution of the Qinling Orogenic Belt[J]. *Geology of Shaanxi*, 1997, 15(2): 1–14.
- 张阳, 段立志, 龚先洁. 陕西凤太铅锌-金多金属矿田热水沉积遗迹-改造成矿作用机理研究[J]. *西北地质*, 2015, 48(4): 20–29.
- ZHANG Yang, DUAN Lizhi, GONG Xianjie. The Research on Hydrothermal Sedimentation Relics and Reformation Metallogenic Mechanism of the Fengtai Pb-Zn-Au Polymetallic Ore Field in Shaanxi[J]. *Northwestern Geology*, 2015, 48(4): 20–29.
- 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, 等. 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, et al. Lead, Zinc, Gold, Copper and Silver Deposits Metallogenic Model Research, and Prospecting Prediction in West Qinling Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011, 1–212.
- Chen Shaocong, Wang Yitian, Yu Jinjie, et al. Petrogenesis of Triassic Granitoids in the Fengxian-Taibai Ore Cluster, Western Qinling Orogen, Central China: Implications for Tectonic Evolution and Polymetallic Mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 123: 103577.
- Hu Qiaoqing, Wang Yitian, Mao Jingwen, et al. Genesis of the Ba-fangshan-Erlihe Zn-Pb-Cu Deposit in the Fengxian-Taibai Ore Cluster, West Qinling, China: Evidence from Ore Geology and Ore-forming Fluids[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020: 126.