



豫西蒲阵沟铅锌银多金属矿地质、地球物理特征及成因探讨

吴 煜^{1,2,3}, 李新萍^{1,2,3}, 豆贯铭^{1,2,3}, 岳 涛^{1,2,3}, 王建统^{1,2,3}, 宋佳伟^{1,2,3}

1. 河南省第一地质矿产调查院有限公司, 河南 洛阳 471000;
2. 河南省金银多金属成矿系列与深部预测重点实验室, 河南 洛阳 471000;
3. 自然资源部贵金属分析与勘查技术重点实验室, 河南 洛阳 471000

摘 要: 蒲阵沟铅锌银多金属矿床是东秦岭成矿带卢氏多金属矿集区的重要组成部分,也是近年来在豫西蒲阵沟岩体新发现的铅锌银多金属矿床。矿床赋存在官道口群内,矿体严格受高山河组石英砂岩和龙家园组白云岩之间的层间断裂带控制,已圈出铅锌银多金属矿体 2 个,伴生稀散元素锑金属量达到大型规模,铅锌矿资源量有望达到中型规模。根据矿床地质、地球物理、地球化学特征,结合矿石的矿物共生组合、同位素组成以及年龄特征,初步认为蒲阵沟铅锌银多金属矿床形成于晚侏罗世—早白垩世,成矿物质具有壳幔混合成因,矿床的形成与燕山期花岗岩关系密切,为岩浆期后热液型脉状铅锌银多金属矿床。

关键词: 矿床地质;地球物理;矿床成因;铅锌银矿;稀散金属;热液脉型;河南省

Geology, geophysics and genesis of the Puzhengou lead-zinc-silver polymetallic deposit in western Henan Province

WU Yu^{1,2,3}, LI Xin-ping^{1,2,3}, DOU Guan-ming^{1,2,3}, YUE Tao^{1,2,3}, WANG Jian-tong^{1,2,3}, SONG Jia-wei^{1,2,3}

1. Henan No. 1 Geology and Mineral Survey Institute Co., Ltd., Luoyang 471000, Henan Province, China;
2. Henan Key Laboratory of Au-Ag-Polymetallic Deposit Series and Deep-seated Metallogenic Prognosis, Luoyang 471000, Henan Province, China;
3. Key Laboratory of Precious Metals Analysis and Exploration Technology, MNR, Luoyang 471000, Henan Province, China

Abstract: The Puzhengou lead-zinc-silver polymetallic deposit, a newly discovered deposit within the Puzhengou pluton in western Henan Province, is a significant component of the Lushi polymetallic ore-concentrated area in the eastern Qinling metallogenic belt. The orebodies are hosted in the strata of Guandaokou Group, strictly controlled by the interlayer fracture zone between the quartz sandstone of Gaoshanhe Formation and dolomite of Longjiayuan Formation. Two Pb-Zn-Ag polymetallic orebodies have been delineated, with the metal reserves of indium, the associated scarce element, reaching large scale, while the resources of lead-zinc are expected to attain a medium scale. Based on the

收稿日期: 2024-06-17; 修回日期: 2024-07-22. 编辑: 李兰英.

基金项目: 河南省财政 2019 年度地质勘查项目“河南省灵宝市麻林河银矿预查”(豫自然资发[2019]22 号-2); 河南省财政 2021 年度地质勘查项目“河南省灵宝市麻林河银铅锌矿普查”(豫自然资发[2021]7 号-3).

作者简介: 吴煜 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地质矿产勘查和研究工作, 通信地址 河南省洛阳市洛龙区开元大道地矿大厦, E-mail//77301329@qq.com

通信作者: 李新萍 (1986—), 女, 硕士, 工程师, 从事遥感地质勘查及研究工作, 通信地址 河南省洛阳市洛龙区开元大道地矿大厦, E-mail//124573995@qq.com

引用格式: 吴煜, 李新萍, 豆贯铭, 岳涛, 王建统, 宋佳伟. 豫西蒲阵沟铅锌银多金属矿地质、地球物理特征及成因探讨[J]. 地质与资源, 2025, 34(4): 420-431.

Wu Y, Li X P, Dou G M, Yue T, Wang J T, Song J W. Geology, geophysics and genesis of the Puzhengou lead-zinc-silver polymetallic deposit in western Henan Province [J]. Geology and Resources, 2025, 34(4): 420-431.

geological, geophysical and geochemical characteristics, combined with the mineral paragenesis, isotopic composition, and age data, it is preliminarily considered that the Puzhengou Pb-Zn-Ag polymetallic deposit was formed during Late Jurassic-Early Cretaceous, with the ore-forming materials of mantle-crust mixing source. The deposit is genetically related to Yanshanian granite porphyry, belonging to post-magmatic hydrothermal vein type.

Key words: deposit geology; geophysics; deposit genesis; Pb-Zn-Ag deposit; scarce metal; hydrothermal vein type; Henan Province

0 引言

河南崤山南部卢氏多金属矿集区位于华北陆块南缘,属于东秦岭成矿带的一部分。区内成矿地质条件良好,岩浆活动频繁,尤其是燕山期中酸性岩浆活动最为强烈,形成了后瑶峪、柳关、八宝山、银家沟、秦池、圪老湾、夜长坪及蒲阵沟等小斑岩体。这些岩体严格受构造控制,空间展布具有明显的方向性、等距性及分带性规律^[1-2]。区域上围绕此类小斑岩侵入体已发现多处中小型铅锌、铁、铜、钼多金属斑岩-夕卡岩型矿床,以银家沟、八宝山、夜长坪及曲里多金属矿床为代表,找矿效果良好,研究程度较高^[3-17]。但是与之邻近的蒲阵沟银铅锌多金属矿区由于找矿成果较差,一直未引起重视,前人对矿床的控矿因素、成矿规律等方面的认识严重不足,对矿床成因有着夕卡岩型^[13]、热液脉型^①的分歧,矿床的研究程度整体较低,找矿工作一直未取得有效突破。

近些年,通过2019—2021年2个河南省财政地质勘查项目的实施,在蒲阵沟岩体外围新发现铅锌银多金属含矿构造蚀变带2条,在其深部控制到了厚度较大的铅锌银多金属矿体,并伴生钼、铀等稀散元素,取得了较好的找矿效果,实现了在蒲阵沟岩体地质找矿的重大突破。截至目前,初步估算铅锌资源量 8.3×10^4 t,银资源量105 t,钼金属量达到大型规模,铅锌资源量有望达到中型以上规模。本文在阐述蒲阵沟矿床地质、地球物理特征的基础上,探讨其矿床成因,以期对矿区后续探矿工作以及区域上同类型铅锌银多金属矿的地质找矿及科学研究提供参考。

1 区域地质背景

豫西蒲阵沟铅锌银多金属矿区位于灵宝市朱阳镇南部,区域大地构造单元属华北陆块南缘华熊地体西南卢氏-栾川拗陷西北。区域西北侧紧邻秦岭造山带,

受秦岭造山带的影响强烈,同时也受新华夏构造系的明显影响。华熊地体呈典型的盆岭地貌特征,成矿地质背景良好。

区域上出露的地层主要是太古宇太华群花岗质片麻岩,中元古界熊耳群安山岩、官道口群碳酸盐岩,新元古界陶湾群大理岩及第四系沉积物。区内构造主要由一系列近东西向的复式褶皱、逆冲断裂带与北东向断裂带复合形态组成。其中以近东西向和北东向断裂为主,控制了豫西灵宝-卢氏地区众多燕山期的岩浆岩及斑岩-夕卡岩型矿床(图1)。

区域内岩浆活动频繁,尤其以燕山期中酸性小斑岩体活动最为强烈,形成了蒲阵沟、银家沟、后瑶峪、柳关、八宝山、圪老湾、秦池及夜长坪等岩体。区域上围绕燕山期小侵入岩体已发现中小型铁-铜、钼、铅锌多金属斑岩-夕卡岩型矿床数处,以银家沟、夜长坪、八宝山及曲里铁-铜-钼多金属矿床为代表。

2 矿区地质特征

矿区位于蒲阵沟岩体西北部边缘,区内出露地层较简单,主要为中元古界官道口群碎屑岩和碳酸盐岩及新生界第四系地层。区内岩浆活动较强,断裂构造发育,主要形成了以铅锌银为主的矿产资源(图2)。

2.1 地层

矿区出露地层由老到新主要有:中元古界高山河组三段(Pt_2g^3)、中元古界官道口群龙家园组(Pt_2lj)、新生界全新统(Qh)。

(1)高山河组三段(Pt_2g^3):主要分布在矿区西北部石坡沟一带,呈北东向长条状,与上覆地层龙家园组一段呈平行不整合接触,倾向北北东,倾角 $19^\circ \sim 45^\circ$,主要为中细粒石英砂岩、细粒长石石英砂岩,局部夹泥岩、泥质粉砂岩及海绿石砂岩、泥页岩,砂岩中交错层理及波痕等沉积构造发育。

①灵宝市矿山技术服务中心. 河南省灵宝市朱阳镇蒲阵沟矿区铅锌矿详查报告. 2007.

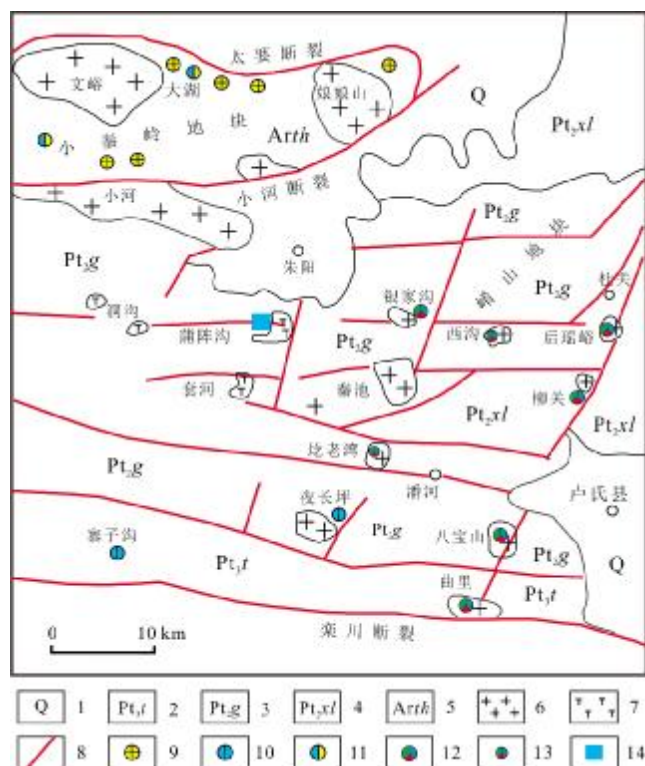


图1 东秦岭-崤山南部地区区域地质简图

Fig. 1 Regional geological map of eastern Qinling

Mountains-southern Xiaoshan Mountains

1—第四系沉积物 (Quaternary sediment); 2—新元古界陶湾群 (Neoproterozoic Taowan gr.); 3—中元古界官道口群 (Neoproterozoic Guandaokou gr.); 4—中元古界熊耳群 (Neoproterozoic Xiong'er gr.); 5—太古宇太华群 (Archean Taihua gr.); 6—中生代花岗岩基 (Mesozoic granitic batholith); 7—中生代闪长岩 (Mesozoic diorite); 8—断裂 (fault); 9—金矿床 (Au deposit); 10—钼矿床 (Mo deposit); 11—金钼矿床 (Au-Mo deposit); 12—多金属矿床 (polymetallic deposit); 13—多金属矿点 (polymetallic ore occurrence); 14—蒲阵沟铅锌银矿 (Puzhengou Pb-Zn-Ag deposit)

(2)龙家园组(Pt_2l):大面积出露于矿区内,倾向北北东,倾角 $20\sim 51^\circ$,自下向上可分为两段,两段之间为假整合接触,有明显的沉积间断。

龙家园组一段(Pt_2l^1):大面积分布于矿区内。该岩性段底部为砂质白云岩或含砂白云岩,其下部在区域上不连续地出露一层肉红色含铁质白云岩,中上部为厚层状燧石(或硅质)条纹(带)状细晶白云岩和中厚层细晶白云岩,偶夹含假鲕粒细晶白云岩,见有多层砂砾屑白云岩及风暴岩夹层,局部见有内层滑动褶曲及对称的浅水波痕。

龙家园组二段(Pt_2l^2):零星分布在矿区东北角窄

沟一带,岩性主要为中厚层纹层状细晶白云岩和中厚层细晶白云岩,以青灰色和纹层状构造并富含假裸枝叠层石为显著标志。

(3)全新统(Qh):主要分布于矿区西北角如意沟口一带,为河流冲积物,成分主要为河漫滩冲积亚黏土、亚沙土及卵石。

2.2 岩浆岩

矿区东南部发育燕山期蒲阵沟岩体,岩性主要为石英闪长岩,该岩体受近东西向和北东向断裂控制,以蒲阵沟村为中心形成不规则状三角形,出露面积约 3 km^2 ,南北长 2 km 、东西宽 1.5 km 。其中心有花岗斑岩及北东向花岗斑岩脉侵入,时代为中生代燕山期,反映了岩浆活动的多期性。

矿区内中酸性的脉岩较发育,闪长岩脉分布在矿区中部F2断裂附近,出露长度约 265 m ,宽度 $0.5\sim 2\text{ m}$,走向北西向。花岗斑岩脉地表未见出露,施工钻孔中均有揭露,厚度 $1\sim 3\text{ m}$,多沿白云岩及石英砂岩层间侵入,倾角较缓。

2.3 构造

矿区褶皱构造不发育,断裂构造较发育,共发现规模不等的断裂4条,按其展布方向分为北东向、北西向、近东西向3组。其中北东向断裂F1为矿区主要含铅锌银矿断裂,主要含矿断裂特征如下。

F1断裂:构造蚀变带分布在矿区东南部蒲阵沟村西一带,是高山河组三段石英砂岩和龙家园组一段白云岩之间的层间蚀变构造带,规模巨大。断裂构造带走向北东,倾向北西,长度约 2 km ,宽度 $1.0\sim 3.2\text{ m}$,倾角 $20\sim 53^\circ$,沿走向和倾向均呈舒缓波状延伸。构造带内岩性主要为蚀变岩、硅化碎裂岩,局部为构造角砾岩。蚀变主要为碳酸盐化、绢云母化等。主要金属矿化为方铅矿化、闪锌矿化,次为褐铁矿化等。该断裂构造控制了矿区内主要铅锌银多金属矿体F1-I。顶板围岩主要为龙家园组一段白云岩,底板围岩主要为高山河组三段石英砂岩。

F2断裂:该断裂构造蚀变带分布在矿区石坡沟南一带,地表断续出露长度 0.8 km ,宽度 $1.8\sim 2.4\text{ m}$,产状 $216\sim 221^\circ \angle 67\sim 81^\circ$ 。构造带内岩性主要为碎裂岩。蚀变主要为碳酸盐化、硅化以及高岭土化等。主要金属矿化为方铅矿化、褐铁矿化、赤铁矿化。该断裂构造控制了矿区铅锌矿体F2-I,围岩为龙家园组一段

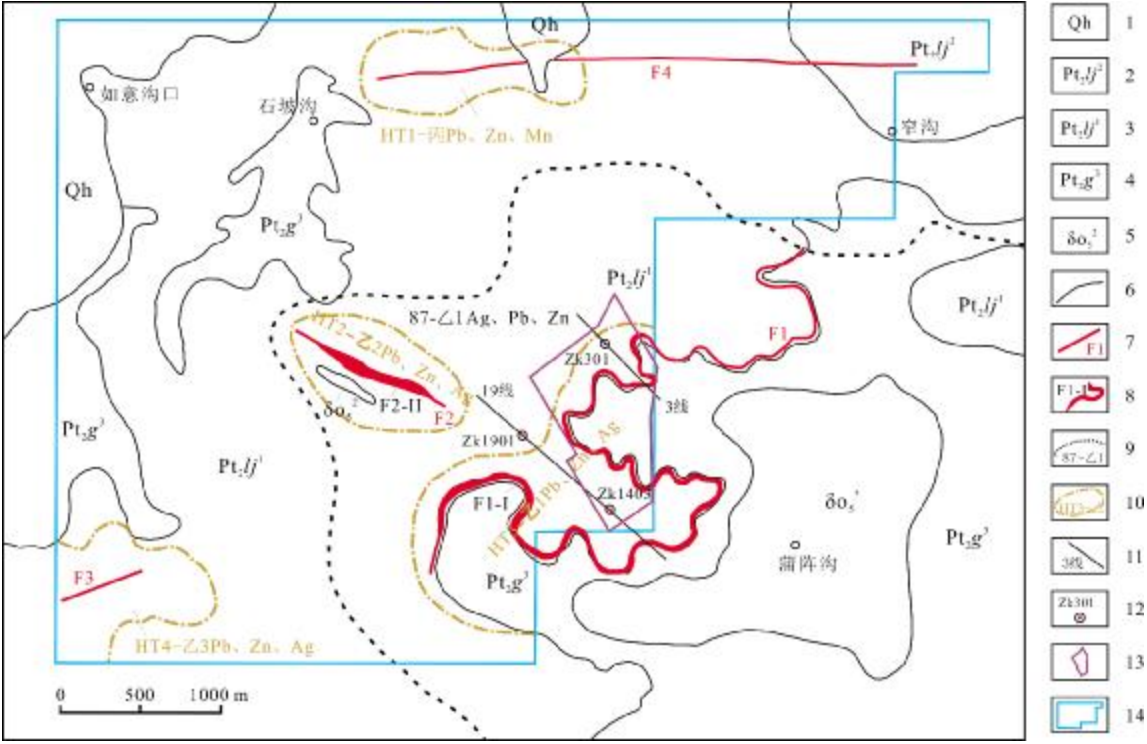


图 2 蒲阵沟多金属矿区地质简图及化探异常分布图

Fig. 2 Geological map of Puzhengou polymetallic orefield with distribution of geochemical anomalies

1—第四系 (Quaternary); 2—官道口群龙家园组二段 (2nd mem. of Longjiayuan fm., Guandaokou gr.); 3—官道口群龙家园组一段 (1st mem. of Longjiayuan fm., Guandaokou gr.); 4—官道口群高山河组三段 (3rd mem. of Gaoshanhe fm., Guandaokou gr.); 5—燕山期石英闪长岩 (Yanshanian quartz diorite); 6—地质界线 (geological boundary); 7—断层 (fault); 8—铅锌银矿体 (Pb-Zn-Ag ore body); 9—1:5 万水系沉积物异常 (1:50 000 stream sediment anomaly); 10—1:1 万土壤地球化学综合异常 (1:10 000 integrated soil geochemical anomaly survey); 11—地质剖面 (geological section); 12—施工钻孔位置 (borehole); 13—激电中梯测量范围 (IP intermediate gradient survey area); 14—矿区范围 (orefield)

白云岩。

2.4 变质岩

矿区的变质作用类型主要是动力变质作用，主要发生在区内断裂蚀变带内及其两侧，表现为断裂蚀变带内及两侧岩石的破碎、变形及重结晶。动力变质作用形成的变质岩主要有碎裂岩、构造角砾岩。构造角砾岩一般厚度较小，常夹在碎裂岩中断续出现。

2.5 围岩蚀变

矿体围岩蚀变与断裂构造关系密切，常沿断裂构造呈条带分布，由矿体中心向两侧依次为硅化、黄铁绢英岩化、绢云母化、碳酸盐化等。野外观察发现，与铅锌矿化较为密切的围岩蚀变主要是黄铁矿化和硅化。围岩蚀变的宽度 0.5~1.5 m，最大可达 3 m，一般靠近矿脉蚀变强，远离矿脉则逐渐减弱。

3 地球物理特征

3.1 激电中梯剖面异常

在前期土壤地球化学测量 HT3-乙 1 异常区域，按照网度 100 m×20 m 实施了 1:2000 激电中梯剖面测量 (图 2)，供电电极距 AB=1 600 m，测量极距 MN=40 m，测线方向 320°，整体上垂直于含矿断裂构造 F1 的走向。蒲阵沟多金属矿区岩石极化率的背景值为 0.48%~1.72%，电阻率背景值介于 3 082~4 357 Ωm。激电中梯测量结果显示：由视电阻率小于 3 000 Ωm 圈定的低阻异常 (图 3a) 以及视极化率 2.05% 作为异常下限圈定的相对高极化异常 (图 3b)，基本上位于激电测区的中部，呈环带状分布，与含矿断裂构造 F1 以及土壤地球化学铅锌银异常展布方向相同，尤其视极化率参数异常具有明显的异常中心，异常规模较大，其形态及分布

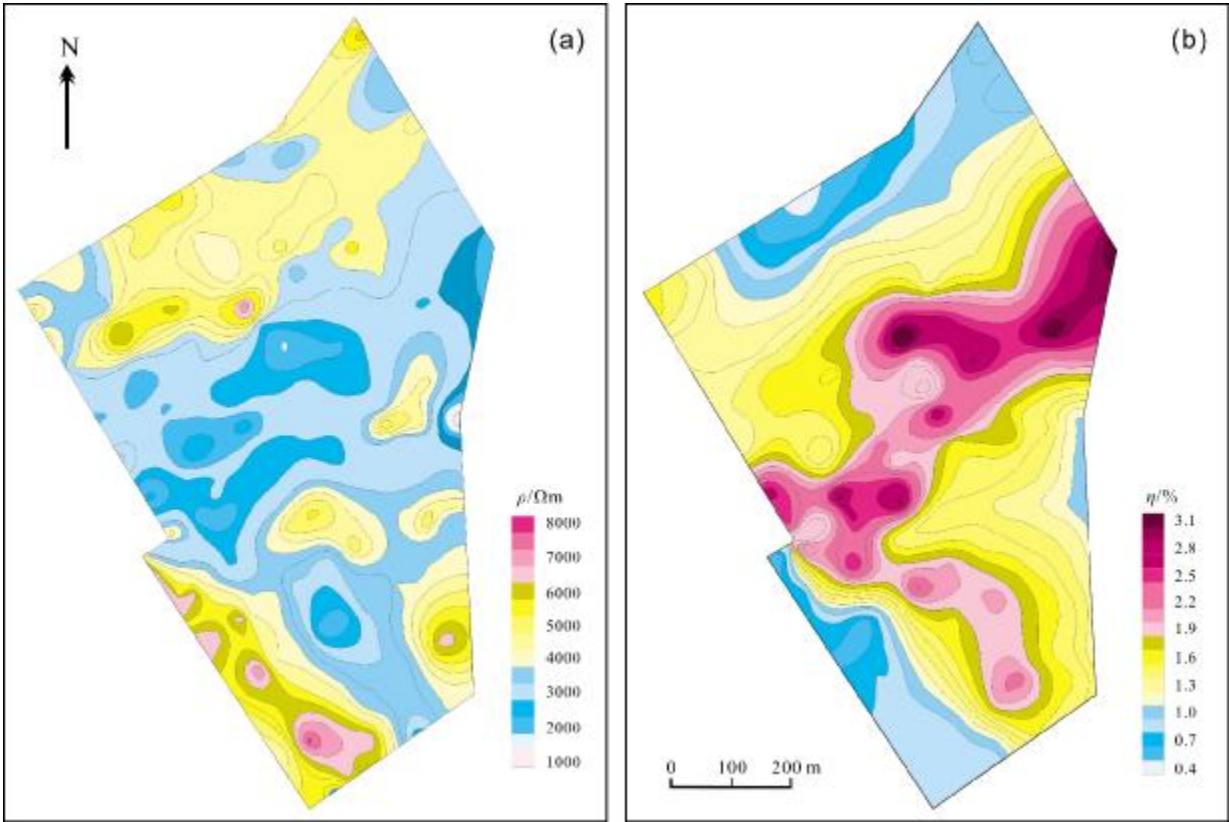


图 3 蒲阵沟矿区激电异常图

Fig. 3 Map of IP anomaly in Puzhengou orefield

a—激电中梯视电阻率平面图(plan view of apparent resistivity of IP intermediate gradient survey); b—激电中梯视极化率平面图(plan view of apparent polarizability of IP intermediate gradient survey)

位置与 F1 含矿断裂构造(图 2)十分吻合,激电异常反映了深部构造蚀变及矿化范围、位置等特征. 激电中梯测量结果表明: 构造蚀变带和铅锌多金属矿体具有低阻、高极化特性.

3.2 激电测深异常

在激电中梯高极化异常区布置大功率时间域激电测深剖面, 3 线激电测深剖面测量结果如图 4 所示. 视电阻率断面图(图 4a)中以 900 Ωm 等值线圈定, 明显存在着 2 个低阻电性体, 电性体中心分别位于水平距离 $x=200\text{ m}$, 高程 $h=880\text{ m}$ 处以及水平距离 $x=400\text{ m}$, 高程 $h=1\ 080\text{ m}$ 处. 该低阻电性体规模较大, 形态规整, 呈带状由浅部向深部中等倾斜连续延伸. 与此对应的视极化率断面图(图 4b)中由极化率为 2% 等值线圈定, 表现为串珠状排列的极化率明显高于周围的高极化异常体, 其异常分布位置、形态、规模与图 4a 内的低阻电性体基本相同. 结合矿区岩石物性特征、矿床特征, 推断该深部激电异常为矿致异常, 由隐伏的铅锌多

金属矿(化)体引起, 具有较大的找矿意义. 其带状连续延伸特征反映了 F1 构造蚀变带和铅锌矿(化)体在深部的延伸趋势, 低阻、高极化异常体向 320° 方向中等倾斜的状态, 大致反映了 F1 构造蚀变带和铅锌矿(化)体的产状, 与野外地质调查测量产状基本一致.

4 矿床地质特征

4.1 矿体特征

经过普查工作, 共发现含铅锌银多金属矿断裂构造 2 条(F1、F2), 依据现行工业指标, 初步圈定工业矿体 2 条, 分别为 F1-I、F2-I, 初步圈定铅锌矿资源量 $8.3\times 10^4\text{ t}$, 银资源量 105 t.

(1) F1-I 矿体

矿体走向长约 1.2 km, 倾斜延深长度约 865 m, 一般呈单脉产出(图 4c), 矿体总体走向北东, 倾向北西, 倾角 $20^\circ\sim 53^\circ$, 矿体厚度 1.0~3.0 m, 平均厚度 1.56 m, 厚度变化系数 35%, 属厚度变化稳定型. 该矿体中铅品位 $0.31\%\sim 4.42\%$, 平均 1.51%, 品位变化系数 72%, 属

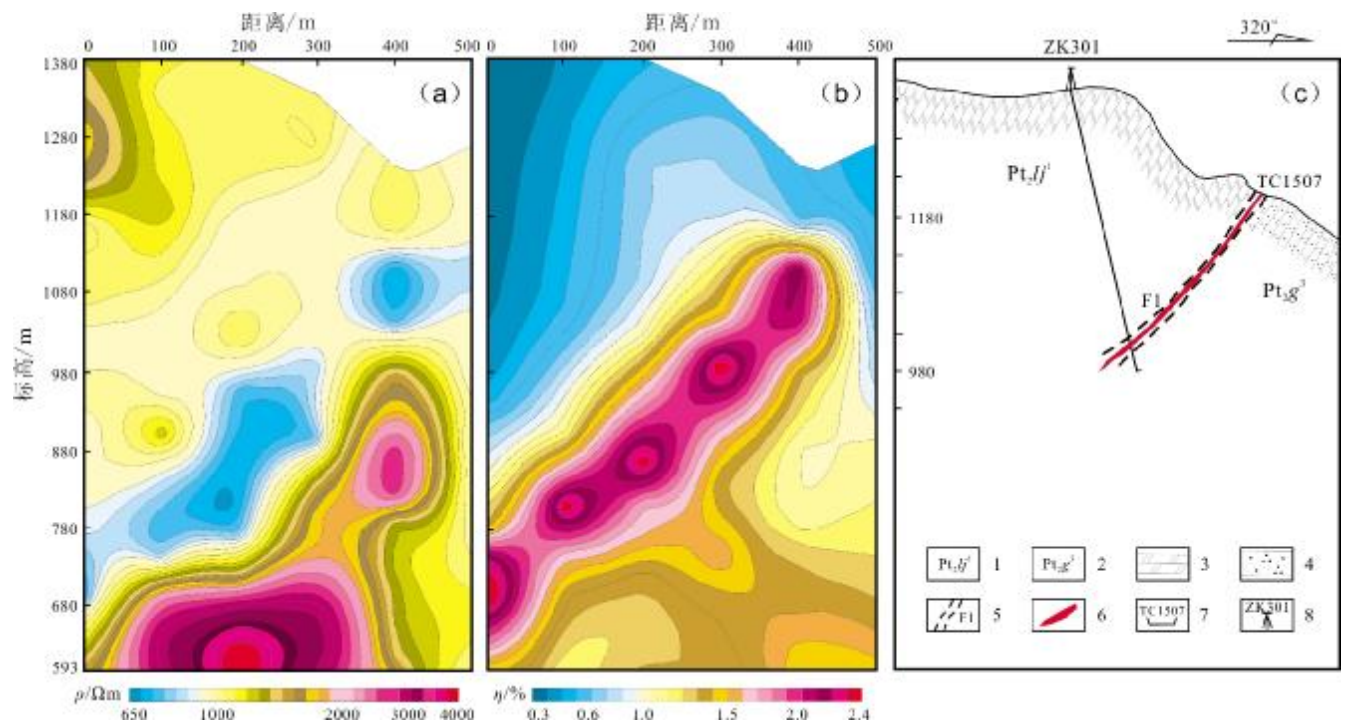


图 4 蒲阵沟矿区 3 线地质-物探综合剖面图

Fig. 4 Integrated geological-geophysical profiles along No. 3 exploratory line in Puzhengou orefield

a—激电测深视电阻率断面图 (profile of apparent resistivity of IP sounding); b—激电测深视极化率断面图 (profile of apparent polarizability of IP sounding); c—3 线钻孔地质剖面图 (geological profile across borehole); 1—龙家园组一段 (1st mem. of Longjiayuan fm.); 2—高山河组三段 (3rd mem. of Gaoshanhe fm.); 3—白云岩 (dolomite); 4—石英砂岩 (quartz sandstone); 5—断裂蚀变带 (fault alteration zone); 6—铅锌银矿体 (Pb-Zn-Ag ore body); 7—探槽及编号 (exploratory trench and number); 8—钻孔及编号 (borehole and number)

有用组分分布均匀型; 锌品位 0.06%~1.70%, 平均 1.04%, 品位变化系数 36%, 属有用组分分布均匀型; 银品位 1.33×10^{-6} ~ 33.93×10^{-6} , 平均品位 9.49×10^{-6} , 品位变化系数 86%, 属有用组分分布均匀型。

(2) F2- I 矿体

F2- I 矿体走向北东, 长约 600 m, 倾向南西, 倾向延深约 225 m, 倾角 75°。矿体平均厚度 1.03 m, 厚度变化系数 12%, 属厚度变化稳定型。铅平均品位 0.68%, 铅品位变化系数 72%; 锌平均品位 0.40%, 锌品位变化系数 102%; 银平均品位 12.8×10^{-6} , 银品位变化系数 88%。矿体属有用组分分布较均匀—均匀型。

4.2 矿石质量

(1) 矿石结构、构造

铅锌矿矿石结构主要有中细粒他形晶结构、碎裂结构以及残余结构等。矿石构造主要是条带状构造、团块状构造 (见图 5a、b), 其次是浸染状构造、细脉状构造。

(2) 矿石矿物成分组成

依据岩矿鉴定资料, F1- I、F2- I 矿体的矿石矿物主要是方铅矿、闪锌矿、黄铁矿, 其次是黄铜矿、磁黄铁矿, 约占矿物总量的 5%~10% (图 5c、d)。脉石矿物主要是石英和白云石, 其次是绢云母、方解石、绿帘石、褐帘石等, 微量矿物有锆石、磷灰石、榍石等, 一般占矿物总含量的 80% 以上。

(3) 矿石类型

根据矿石物相分析结果, 硫化物中铅金属含量介于 91%~95%, 矿区铅锌矿石以硫化物矿为主, 地表探槽中见到少量的氧化矿石。蒲阵沟矿区矿石的工业类型主要是硫化矿石。

5 讨论

5.1 成矿时代及地球动力学背景

根据前人 K-Ar 法同位素年龄测定, 蒲阵沟石英闪长岩年龄值为 159.9 Ma, 而后期侵入的花岗斑岩

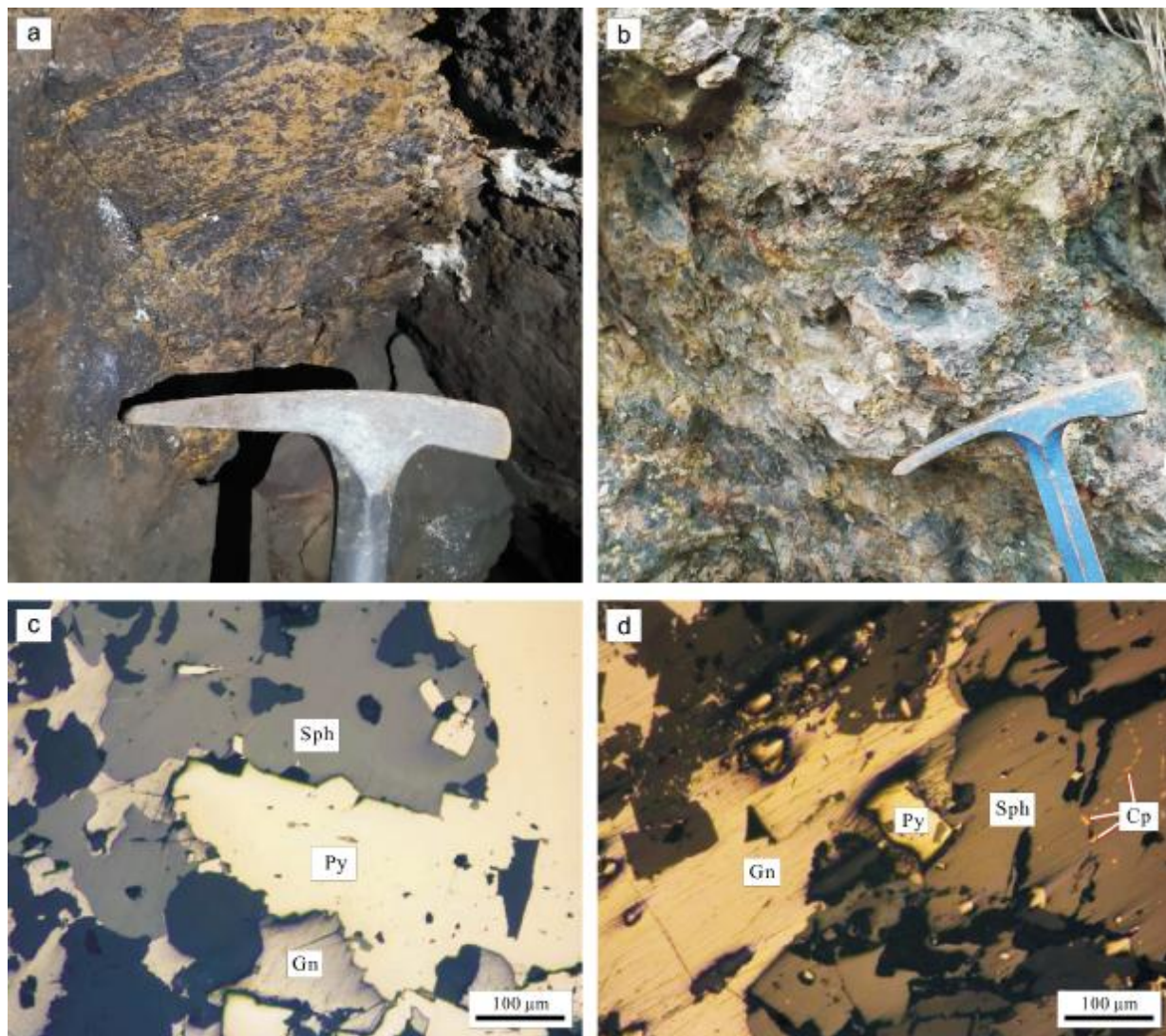


图5 蒲阵沟铅锌银多金属矿床矿石特征

Fig. 5 Ore characteristics of Puzhengou Pb-Zn-Ag polymetallic deposit

a—条带状构造(banded structure); b—团块状构造(massive structure); c, d—矿石显微照片(micrographs of ores); Py—黄铁矿(pyrite); Sph—闪锌矿(sphalerite); Gn—方铅矿(galena); Cp—黄铜矿(chalcopyrite)

年龄值为 142.3 Ma ^①。胡浩等^[1]利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年法,获得蒲阵沟石英闪长岩体的 U-Pb 同位素年龄为 $149 \pm 1 \text{ Ma}$,形成时代为晚侏罗世,后期侵入的花岗斑岩形成时代为早白垩世。除此之外,其利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法对夜长坪、后瑶峪、柳关、圪老湾等中酸性侵入岩进行精确的锆石 U-Pb 定年,结果表明:这些岩体的侵位时代均介于 $158 \sim 131 \text{ Ma}$ 之间,是华北克拉通南缘晚侏罗世—早白垩世期间大规模岩浆活动的产物,其中闪长岩类岩石的侵位时间很短,主要集中在晚侏罗世末期($150 \sim 149 \text{ Ma}$),而花

岗斑岩侵位则断续持续了近 30 Ma ($158 \sim 131 \text{ Ma}$),认为包括蒲阵沟岩体在内,与之对应的夕卡岩型、斑岩型矿床的形成时代均限定在晚侏罗世—早白垩世之间。

前人对卢氏多金属矿集区的成岩成矿年龄获得了大量的数据:李铁刚等^[10]获得银家沟斑岩体的侵位年龄为 $142.0 \sim 147.8 \text{ Ma}$,银家沟硫铁铅锌多金属矿的成矿年龄为 143 Ma ^[11];胡浩等^[1]获得夜长坪花岗斑岩体的年龄为 $158 \pm 1 \text{ Ma}$,而夜长坪钼钨多金属矿成矿年龄介于 $144 \sim 147 \text{ Ma}$ ^[9,12];张哲铭等^[2]获得楼房银铜矿黄铜矿的 Rb-Sr 等时线年龄为 $127.8 \pm 3.1 \text{ Ma}$,柳关铅

①灵宝市矿山技术服务中心,河南省灵宝市朱阳镇蒲阵沟矿区铅锌矿详查报告,2007。

锌矿黄铁矿 Rb-Sr 等时线的年龄为 124.8 ± 1.61 Ma; 楼房银铜矿临近的蒿坪沟黑云母花岗岩的岩体侵位年龄为 130.5 ± 1.1 Ma^[18], 柳关岩体的年龄为 132 ± 1 Ma^[1]. 以上数据均说明本区成矿与同一时期花岗质岩浆的侵入活动密切相关, 且成矿、成岩年龄十分接近 (≤ 15 Ma), 结合蒲阵沟矿区花岗斑岩、石英闪长岩的侵位年龄及接触关系, 初步认为将蒲阵沟铅锌银多金属矿床的形成时代限定在晚侏罗世—早白垩世是较为可靠的. 另外, 从更大的范围看, 卢氏矿集区东北部的蒿坪沟银多金属矿的成矿年龄为 134.9 ± 0.8 Ma^[19]、铁炉坪银铅矿床的年龄为 134.6 ± 1.2 Ma^[20]、沙沟银铅矿床报道的年龄为 140.0 ± 1.0 Ma^[21], 整个卢氏矿集区多金属矿床的成岩、成矿时代均形成于中生代晚侏罗世—早白垩世之间, 该时期也是东秦岭地区最重要的大规模成矿期^[18]. 毛景文等^[6, 22]提出的东秦岭地区钼多金属矿化在中生代表现为 3 个主成矿期, 即 233~221 Ma、148~138 Ma 和 131~112 Ma, 后两期大规模的钼及铅锌银多金属矿化均与晚侏罗世—早白垩世花岗质岩浆活动有关, 这 3 个主成矿期所对应的地球动力学背景分别是华北板块与扬子板块碰撞造山后陆内造山和伸展过程、南北主应力场向东西主应力场构造体制大转折以及东西向岩石圈大规模减薄作用. 依据前人的研究成果, 推测蒲阵沟矿区所处的卢氏多金属矿集区成岩成矿作用与华北克拉通南缘南北主应力场向东西主应力场构造体制大转折晚期伴随的东西向岩石圈大规模减薄所形成的岩浆作用有关.

5.2 成矿物质来源

硫同位素对矿床成矿物质的来源可以起到较好的示踪作用. 从前人^①硫同位素研究成果看, 蒲阵沟铅锌银多金属矿床金属硫化物中硫同位素组成变化范围较窄, 变化范围 $-0.3\text{‰} \sim +5.8\text{‰}$ 之间, 绝对值小, $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 0.89‰ , 与陨石硫接近, 样品频数呈塔式效应, 反映蒲阵沟铅锌银多金属矿床具深源硫同位素及分馏特征. 这与王长明等^[23]、武广等^[11]、王昊等^[24]以及吕文德等^[25]在区域上相邻矿区获得的研究结果基本一致. 初步认为本区硫组份来自均一的同一硫源, 即地壳的下部或上地幔. 根据前人^[11]在邻区银家沟多金属矿床获得的氢、氧同位素分析结果, 成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水-SMOW}}$ 介于 $4.0\text{‰} \sim 8.6\text{‰}$, $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 介于 $-64\text{‰} \sim -52\text{‰}$ 之间, H、

O 同位素组成显示成矿热液主要来自岩浆水, 成矿与燕山期酸性岩体有关.

在矿床地球化学研究中, 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值是判断成矿物质来源、岩浆流体以及深源流体壳幔混染作用的重要指标^[26]. 蒲阵沟矿区所在的卢氏多金属硫化物矿集区中, 楼房银铜矿锶同位素 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.0331 \sim 2.954$, 平均值为 0.9955 , 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.71095 \sim 0.71106$, 平均值为 0.71100 ; 柳关铅锌矿锶 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.1649 \sim 5.863$, 平均值为 1.96 , 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.71100 \sim 0.71115$, 平均值为 0.71107 ^[2]. 李铁刚等^[10]通过对相邻矿区银家沟斑岩体 Sr-Nd-Pb 同位素研究, 得出银家沟硫铁多金属矿床成矿岩体的源区主要是中生代 A 型俯冲过程中俯冲到华北克拉通南缘之下的北秦岭地体中的宽坪群, 并有少量太华群基底物质混入. 武广等^[11]得出银家沟矿床辉钼矿 Re 含量 $38.5 \times 10^{-6} \sim 43.2 \times 10^{-6}$, 暗示成矿物质来自壳幔混源, 而不可能主要来自古老下地壳物质组成的太华群. 而根据银家沟花岗斑岩 Rb-Sr 同位素年龄值计算的初始比值 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 分别为 0.7034 及 $0.707 \sim 0.708$, 锶演化图上落于大陆拉斑玄武岩范畴, 或高于幔源物界线, 表明斑岩体具有来源自上地幔或地壳底部玄武岩分熔体特征^[27]. 另外, 区域内与成矿相关的晚中生代花岗岩初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.7033 \sim 0.7105$, 均为壳幔混合成因^[28]. 蒲阵沟岩体与区域内中生代成矿岩体的地质特征及时代基本一致, 它们形成于相同的地球动力学环境^[1-2, 6, 18], 由此推断蒲阵沟岩体及其衍生的铅锌银等成矿物质来源, 具有相似的壳幔混合成因.

5.3 稀散金属铟迁移富集规律

区域上鲜见稀散金属找矿成果的相关报道, 仅在蒲阵沟矿区东部栾川矿集区的骆驼山铜铅锌多金属矿床发现伴生铟、镉等稀散金属, 而本次在蒲阵沟多金属矿区新发现的稀散金属铟达到了大型规模, 因此对其独特的富集规律和成因机制探讨如下.

目前, 国内外多数研究表明, 稀散金属铟的来源与岩浆热液系统密切相关^[29-33]. 张荣臻等^[34]通过对骆驼山矿床不同类型围岩、矿石以及不同矿物中的铟、锡、镉等元素的含量、分布特征及相关性研究, 认为骆驼山矿床中的铟矿化主要形成在 Zn-Cu-S 多金属成矿阶段, 铟主要赋存在闪锌矿和黄铜矿中, 由此说明铟元素

①灵宝市矿山技术服务中心. 河南省灵宝市朱阳镇蒲阵沟矿区铅锌矿详查报告. 2007.

与闪锌矿或黄铜矿有密切的成因关系,并推断骆驼山矿床中的钢可能与其他成矿物质一样主要来自深部岩浆。李晓峰等^[31]发现广西大厂锡多金属矿区的岩墙具有较高的钢含量,并初步认为钢来源于与花岗岩相关的岩浆源区。陈程以及朱笑青等^[35-36]研究认为:锡元素在稀散金属钢的迁移和富集过程中起着至关重要的作用,锡元素的有无或者含量的高低是矿床富钢与贫钢的有效指示,富钢的矿床往往也是富锡矿床。而蒲阵沟铅锌银多金属矿区尚未发现有含锡的独立矿物,不同类型矿石及围岩的分析测试也显示是贫锡的,通过分析矿体的顶底板围岩(石英砂岩和白云岩)中钢、铊等稀散元素含量均小于检出限,而含矿断裂构造带样品分析结果显示,钢、铊、铊含量均达到了伴生矿产的综合利用指标,表现出重要的工业利用价值。通过相关性分析,钢的富集主要与矿石中锌、铅元素的含量呈正相关^①,与银元素含量无明显的规律可循,这与河南栾川骆驼山多金属矿区^[34]以及内蒙古索家沟多金属矿区^[37]的研究成果大致相同。由于钢具有亲铁和亲硫双重地球化学性质,在沉淀成矿过程中,钢主要以类质同象形式赋存于闪锌矿中^[34],而蒲阵沟银铅锌多金属矿床中高钢含量与锡含量的关系不明显,因此该类型矿床中钢的迁移富集规律及成因机制有待深入研究。

5.4 成矿机制

东秦岭地区自晚古生代碰撞开始,到中生代全面碰撞造山,区域内断裂构造极其发育^[38]。在中生代,华北板块与扬子板块由于强大的南北向挤压、碰撞作用,软流圈物质上涌,华北板块南缘的幔源岩浆在壳幔边界附近发生底侵作用,诱发碰撞加厚的下地壳部分熔融,形成富含铅、锌、银、钼等成矿元素的花岗质岩浆,沿着北北东向断层与近东西向断层的交汇处上升,并在较高的构造层次上侵入而形成花岗斑岩体以及岩浆期后中高温含矿流体^[23, 39-40]。这种含矿流体,一部分在岩体的外接触带交代围岩,形成夕卡岩型矿床,另一部分则随着温度和压力的降低而转化为矿化流体,充填围岩断裂带,形成热液脉型铅锌银多金属矿床。通过对蒲阵沟铅锌银多金属矿床的地质特征、年代学以及成矿物质来源的探讨,矿床无论在空间上、时间上、成因上均与晚侏罗—早白垩世的花岗质岩浆密切相关。本区及邻区获得的氢、氧、硫同位素分析结果显示成矿热

液主要来自岩浆水,成矿物质来源具有壳幔混合成因,除来自深部同熔岩浆外,在矿液运移过程中可能有部分地壳物质的加入。矿区多期活动的断裂构造带 F2 以及层间(高山河组三段和龙家园组一段之间)薄弱带 F1,为岩浆期后热液的运移提供了有利通道,气水溶液在运移过程中,一方面从地层中萃取 Pb、Zn 等金属元素,同时又从同源岩浆中带出 Pb、Zn、Ag 等组分,在蒲阵沟岩体外接触带及其周围层间断裂中形成铅锌银多金属矿体。

根据区域上燕山期中酸性小岩体成矿、控矿特征,结合本区矿床地质、年代学等特征,初步认为蒲阵沟铅锌银多金属矿床的形成与晚侏罗—早白垩世花岗岩浆关系密切,主要产于官道口群龙家园组白云岩与高山河组石英砂岩平行不整合面(硅钙面)的层间断裂带,是岩浆期后热液型脉状银铅锌多金属矿床。

6 结论

(1)蒲阵沟矿区新发现铅锌银多金属含矿构造蚀变带 2 条,初步圈定铅锌银多金属矿体 2 个,伴生钢、铊、铊等稀散金属,钢金属量达到大型规模,铅锌矿资源量有望达到中型。新发现的稀散金属钢、铊等资源潜力巨大,对区域上具备相同成矿地质条件的老矿山寻找新矿种起到积极的指示作用。

(2)总结了区内铅锌银多金属(伴生钢、铊、铊)矿的地质特征、地球物理异常特征以及矿化富集规律。认为蒲阵沟铅锌银多金属矿床主要产于官道口群龙家园组白云岩与高山河组石英砂岩平行不整合面(硅钙面)的层间断裂带,矿床的形成严格受地层及断裂带控制,构造蚀变带和铅锌多金属矿体具有低阻、高极化的激电异常特征。断裂+层间构造带控矿以及低阻、高极化激电异常是蒲阵沟多金属矿区重要的找矿标志,这对区域上地质找矿具有良好的借鉴意义。

(3)通过对蒲阵沟铅锌银多金属矿床的地质特征、年代学以及成矿物质来源的探讨,认为蒲阵沟岩体及其衍生的铅锌银(伴生钢、铊、铊)等成矿物质来源,具有壳幔混合成因,矿床形成于晚侏罗—早白垩世,是岩浆期后热液型脉状银铅锌多金属矿床,该矿床的成岩成矿作用可能与华北克拉通南缘南北主应力场向东西主应力场构造体制大转折晚期伴随的东西向岩石圈大

①河南省第一地质矿产调查院. 河南省灵宝市麻林河银铅锌矿普查报告. 2023.

规模减薄所形成的岩浆作用有关。

致谢:野外地质工作及室内综合研究工作得到了冯建之、杜欣、焦守敬、程广国、白世平等几位业内专家的悉心指导,文章修改过程得到了审稿老师及编辑部老师的指导和帮助,在此一并表示感谢。

参考文献(References):

- [1]胡浩,李建威,邓晓东.洛南-卢氏地区与铁铜多金属矿床有关的酸性侵入岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J].矿床地质,2011,30(6):979-1001.
Hu H, Li J W, Deng X D. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of granitoid intrusions related to iron-copper polymetallic deposits in Luonan-Lushi area of southern North China Craton and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(6): 979-1001.
- [2]张哲铭,曾庆栋,高帅,等.华北克拉通南缘卢氏多金属矿集区硫化物 Rb-Sr 定年及地质意义[J].岩石学报,2019,35(7):2013-2025.
Zhang Z M, Zeng Q D, Gao S, et al. The Rb-Sr isotopic dating of sulfides and geological significance of the Lushi polymetallic ore-concentrated area in southern margin of the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(7): 2013-2025.
- [3]陈衍景,郭抗衡.河南银家沟矽卡岩型金矿的地质地球化学特征及成因[J].矿床地质,1993,12(3):265-272.
Chen Y J, Guo K H. Geology, geochemistry and genesis of the Yinjiagou skarn type gold deposit, Henan Province[J]. Mineral Deposits, 1993, 12(3): 265-272.
- [4]王长明,邓军,张寿庭,等.河南卢氏-栾川地区铅锌矿成矿多样性分析及成矿预测[J].地质通报,2005,24(10/11):1074-1080.
Wang C M, Deng J, Zhang S T, et al. Analysis of diversity of lead-zinc mineralization and prediction of ore deposits in the Lushi-Luanchuan area, Henan, China[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(10/11): 1074-1080.
- [5]杨德彬,许文良,王冬艳,等.河南三门峡市曲里石英闪长斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J].中国地质,2004,31(4):379-383.
Yang D B, Xu W L, Wang D Y, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Quli quartz diorite porphyry, Sanmenxia City, Henan, and its geological significance[J]. Geology in China, 2004, 31(4): 379-383.
- [6]毛景文,叶会寿,王瑞廷,等.东秦岭中生代钨铅锌银多金属矿床模型及其找矿评价[J].地质通报,2009,28(1):72-79.
Mao J W, Ye H S, Wang R T, et al. Mineral deposit model of Mesozoic porphyry Mo and vein-type Pb-Zn-Ag ore deposits in the Eastern Qinling [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(1): 72-79.
- [7]肖中军,孙卫志.河南卢氏夜长坪钨钼矿床成矿条件及找矿远景分析[J].地质调查与研究,2007,30(2):141-148.
Xiao Z J, Sun W Z. Ore-forming conditions and prospecting of the Yechangping Mo-W deposit in Lushi County, Henan Province [J]. Geological Survey and Research, 2007, 30(2): 141-148.
- [8]颜正信,孙卫志,张年成,等.河南灵宝银家沟硫铁多金属矿床成矿地质条件及找矿方向[J].地质调查与研究,2007,30(2):149-157.
Yan Z X, Sun W Z, Zhang N C, et al. Geological condition and prospecting of the Yinjiagou pyrite-polymetallic deposit in Henan Province[J]. Geological Survey and Research, 2007, 30(2): 149-157.
- [9]毛冰,叶会寿,李超,等.豫西夜长坪钨钼矿床辉钼矿-钼同位素年龄及地质意义[J].矿床地质,2011,30(6):1069-1074.
Mao B, Ye H S, Li C, et al. Molybdenite Re-Os isochron age of Yechangping Mo deposit in western Henan Province and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(6): 1069-1074.
- [10]李铁刚,武广,陈毓川,等.豫西银家沟杂岩体年代学、地球化学和岩石成因[J].岩石学报,2013,29(1):46-66.
Li T G, Wu G, Chen Y C, et al. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Yinjiagou complex in western Henan Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(1): 46-66.
- [11]武广,陈毓川,李宗彦,等.豫西银家沟硫铁多金属矿床 Re-Os 和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地质意义[J].矿床地质,2013,32(4):810-822.
Wu G, Chen Y C, Li Z Y, et al. Molybdenite Re-Os and sericite ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of Yinjiagou pyrite-polymetallic deposit in western Henan Province, and their geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 32(4): 810-822.
- [12]晏国龙,王佐满,李永全,等.河南夜长坪钨钼矿床 Re-Os 同位素年龄及地质意义[J].矿产勘查,2012,3(2):184-193.
Yan G L, Wang Z M, Li Y Q, et al. Re-Os isotope ages of molybdenite and their geological significance of Yechangping molybdenum deposit, Henan[J]. Mineral Exploration, 2012, 3(2): 184-193.
- [13]曾令君,星玉才,周栋,等.河南卢氏八宝山花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成特征[J].大地构造与成矿学,2013,37(1):65-77.
Zeng L J, Xing Y C, Zhou D, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and Hf isotope composition of the Babaoshan granite porphyries in Lushi County, Henan Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(1): 65-77.
- [14]冷小明,高峰辉,王亚伟,等.河南省卢氏县八宝山铜矿床地质特征及成因[J].地质与勘探,2023,59(1):70-84.
Leng X M, Gao F H, Wang Y W, et al. Geological characteristics and genesis of the Babaoshan copper deposit in Lushi County of Henan Province[J]. Geology and Exploration, 2023, 59(1): 70-84.
- [15]刘玉刚,冯绍平,张苏坤,等.豫西银家沟硫铁多金属矿床元素地球化学特征研究[J].矿产勘查,2023,14(9):1630-1640.
Liu Y G, Feng S P, Zhang S K, et al. Study on element geochemical characteristics of the Yinjiagou pyrite-polymetallic deposit, western Henan Province[J]. Mineral Exploration, 2023, 14(9): 1630-1640.
- [16]李文智,郭锐,罗明伟,等.河南灵宝银家沟硫铁多金属矿床地质特征及成矿模式[J].地质找矿论丛,2014,29(3):344-349.

- Li W Z, Guo R, Luo M W, et al. Geological features and prospecting model of Yinjiagou pyrite polymetallic deposit in Lingbao County, Henan Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2014, 29(3): 344-349.
- [17]周栋, 包志伟, 姚军明, 等. 豫西卢氏八宝山铁铜多金属矿床黄铁矿成分研究[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(1): 128-138.
- Zhou D, Bao Z W, Yao J M, et al. Chemistry of pyrites from Babaoshan iron and copper polymetallic ore deposit in western Henan province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2015, 39(1): 128-138.
- [18]梁涛, 卢仁, 罗照华, 等. 豫西熊耳山蒿坪沟黑云母花岗岩斑岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 2015, 61(4): 901-912.
- Liang T, Lu R, Luo Z H, et al. LA-ICP-MS U-Pb age of zircons from Haopinggou biotite granite porphyry in Xiong'er Mountain, western Henan Province, and its geologic implications[J]. Geological Review, 2015, 61(4): 901-912.
- [19]叶会寿. 华北陆块南缘中生代构造演化与铅锌银成矿作用[D]. 北京: 中国地质科学院, 2006.
- Ye H S. The Mesozoic tectonic evolution and Pb-Zn-Ag mellogeny in the South margin of North China Craton[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2006.
- [20]高建京, 毛景文, 陈懋弘, 等. 豫西铁炉坪银铅矿床矿脉构造解析及近矿蚀变岩绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄测定[J]. 地质学报, 2011, 85(7): 1172-1187.
- Gao J J, Mao J W, Chen M H, et al. Vein structure analysis and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of sericite from sub-ore altered rocks in the Tieluping large-size Ag-Pb deposit of western Henan Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(7): 1172-1187.
- [21]Li Z K, Li J W, Zhao X F, et al. Crustal-extension Ag-Pb-Zn veins in the Xiong'er shan district, southern North China Craton: Constraints from the Shagou deposit[J]. Economic Geology, 2013, 108(7): 1703-1729.
- [22]毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 169-188.
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, et al. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(1): 169-188.
- [23]王长明, 张寿庭, 邓军, 等. 河南冷水北沟铅锌矿地质地球化学特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 2007, 26(2): 175-183.
- Wang C M, Zhang S T, Deng J, et al. Geological-geochemical features and genesis of Lengshuibegou Pb-Zn deposit in Henan [J]. Mineral Deposits, 2007, 26(2): 175-183.
- [24]王昊, 路坦, 李健, 等. 河南铁炉坪银铅矿床地质特征及找矿标志[J]. 矿产勘查, 2013, 4(2): 137-145.
- Wang H, Lu T, Li J, et al. Geological characteristics of the Tieluping silver-lead deposit and prospecting criteria, Henan [J]. Mineral Exploration, 2013, 4(2): 137-145.
- [25]吕文德, 孙卫志. 卢氏-栾川地体铅锌矿成矿地质条件分析及找矿远景[J]. 矿产与地质, 2004, 18(6): 507-516.
- Lv W D, Sun W Z. Metallogenic condition of lead and zinc deposit in Lushi-Lanchuan terrain[J]. Mineral Resources and Geology, 2004, 18(6): 507-516.
- [26]侯明兰, 蒋少涌, 姜耀辉, 等. 胶东蓬莱金成矿区的 S-Pb 同位素地球化学和 Rb-Sr 同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2525-2533.
- Hou M L, Jiang S Y, Jiang Y H, et al. S-Pb isotope geochemistry and Rb-Sr geochronology of the Penglai gold field in the eastern Shandong province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(10): 2525-2533.
- [27]庞振山. 河南省西部地区中生代花岗岩类地质特征及成因[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- Pang Z S. Geological characteristics and genesis of the Mesozoic granitoids in western Henan [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006.
- [28]王晓霞, 王涛, 齐秋菊, 等. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1573-1593.
- Wang X X, Wang T, Qi Q J, et al. Temporal-spatial variations, origin and their tectonic significance of the Late Mesozoic granites in the Qinling, Central China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1573-1593.
- [29]徐净, 李晓峰. 矿床时空分布、成矿背景及其成矿过程[J]. 岩石学报, 2018, 34(12): 3611-3626.
- Xu J, Li X F. Spatial and temporal distributions, metallogenic backgrounds and processes of indium deposits [J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(12): 3611-3626.
- [30]李晓峰, Yasushi W, 毛景文. 铜矿床研究现状及其展望[J]. 矿床地质, 2007, 26(4): 475-480.
- Li X F, Yasushi W, Mao J W. Research situation and economic value of indium deposits[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(4): 475-480.
- [31]李晓峰, 杨锋, 陈振宇, 等. 广西大厂锡矿铜的地球化学特征及成因机制初探[J]. 矿床地质, 2010, 29(5): 903-914.
- Li X F, Yang F, Chen Z Y, et al. A tentative discussion on geochemistry and genesis of indium in Dachang tin ore district, Guangxi [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(5): 903-914.
- [32]Cook N J, Sundblad K, Valkama M, et al. Indium mineralisation in A-type granites in southeastern Finland: insights into mineralogy and partitioning between coexisting minerals[J]. Chemical Geology, 2011, 284(1/2): 62-73.
- [33]Ishihara S, Murakami H, Li X F. 2011. Indium concentration in zinc ores in plutonic and volcanic environments: examples at the Dulong and Dachang mines, South China [J]. Bulletin of the Geological Survey of Japan, 2011, 62(7/8): 259-272.
- [34]张荣臻, 鲍波, 郭波, 等. 河南骆驼山硫多金属矿床铜的分布富集规律[J]. 地质学报, 2023, 97(8): 2547-2562.
- Zhang R Z, Bao B, Guo B, et al. Distribution and enrichment

- characteristics of indium in the Luotuoshan sulfur polymetallic deposit, Henan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(8): 2547–2562.
- [35] 陈程, 赵太平. 岩浆-热液系统中铜的成矿作用[J]. *矿床地质*, 2021, 40(2): 206–220.
- Chen C, Zhao T P. Metallogenesis of indium in magmatic hydrothermal system[J]. *Mineral Deposits*, 2021, 40(2): 206–220.
- [36] 朱笑青, 张乾, 何玉良, 等. 富铜及贫铜矿床成矿流体中铜与锡铅锌的关系研究[J]. *地球化学*, 2006, 35(1): 6–12.
- Zhu X Q, Zhang Q, He Y L, et al. Relationships between indium and tin, zinc and lead in ore-forming fluid from the indium-rich and -poor deposits in China[J]. *Geochimica*, 2006, 35(1): 6–12.
- [37] 李新, 李香资, 权知心, 等. 内蒙古索家沟银铅锌矿床伴生稀散金属镉、镓的富集特征研究[J]. *矿产与地质*, 2022, 36(3): 535–540.
- Li X, Li X Z, Quan Z X, et al. Enrichment characteristics of associated rare metal Cd and Ga in Suojiagou Ag-Pb-Zn deposit in Inner Mongolia [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2022, 36(3): 535–540.
- [38] 唐利, 张寿庭, 曹华文, 等. 河南栾川三道沟铅锌银矿床成矿流体地球化学特征[J]. *现代地质*, 2014, 28(2): 359–368.
- Tang L, Zhang S T, Cao H W, et al. Geochemical features of ore-forming fluids of the Sandaogou Pb-Zn-Ag deposit in Luanchuan County, Henan Province[J]. *Geoscience*, 2014, 28(2): 359–368.
- [39] 陈衍景, 李晶, Pirajno F, 等. 东秦岭上官金矿流体成矿作用: 矿床地质和包裹体研究[J]. *矿物岩石*, 2004, 24(3): 1–12.
- Chen Y J, Li J, Pirajno F, et al. Hydrothermal metallogeny of the Shanggong gold deposit, East Qinling: Studies on ore geology and fluid inclusion geochemistry[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2004, 24(3): 1–12.
- [40] 焦天龙, 李进文, 郭向国, 等. 内蒙古二道河铅锌银矿床成矿流体、物质来源及成因探讨[J]. *中国地质*, 2024, 51(2): 426–442.
- Jiao T L, Li J W, Guo X G, et al. Discussion on the ore-forming fluids, materials sources and genesis of Erdaohe Pb-Zn-Ag deposit, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 2024, 51(2): 426–442.

(上接第 441 页/Continued from Page 441)

- [20] 叶枫, 董国臣, 任建勋, 等. 山西黄榆沟岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 2021, 35(3): 787–797.
- Ye F, Dong G C, Ren J X, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and geological significance of Huangyugou intrusion, Shanxi Province[J]. *Geoscience*, 2021, 35(3): 787–797.
- [21] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345.
- [22] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [C]// Holland H D, Turekian K K. *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Elsevier, Amsterdam, 2014: 1–51. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-095975-7.00301-6>.
- [23] Chen B, Zhai M G, Shao J A. Petrogenesis and significance of the Mesozoic North Taihang complex: Major and trace element evidence [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(9): 941–953.
- [24] Chen B, Jahn B M, Arakawa Y, et al. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang Orogen, North China Craton: Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004, 148(4): 489–501.
- [25] Chen B, Tian W, Zhai M G, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mesozoic magmatism in the Taihang Mountains and other places of the North China Craton, with implications for petrogenesis and geodynamic setting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(1): 13–24.
- [26] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics: The model[J]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1/2): 135–162.