

陕南勉略阳地区陈家坝铜铅锌多金属矿床 稀土元素地球化学特征

丁坤¹, 梁婷^{1,2}, 王瑞廷^{3,1}, 栾燕^{1,2}, 张天运⁴, 杨秀清^{1,2}, 李永勤⁴

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学成矿作用及其动力学实验室, 陕西 西安 710054; 3. 西北有色地质矿业集团有限公司, 陕西 西安 710054;
4. 汉中西北有色七一一总队有限公司, 陕西 汉中 723000)

摘要:陕西省陈家坝铜铅锌多金属矿床是勉(县)—略(阳)—阳(平关)三角地区新发现的铜铅锌多金属矿床, 通过对矿石及矿区地质体的微量与稀土元素地球化学对比分析, 对陈家坝铜铅锌多金属矿床进行了成矿流体特征与成矿机制研究。研究表明, 矿石富集 LREE、Th/La、Nb/La、Hf/Sm 值均小于 1, 指示成矿流体以富 Cl 为主。矿石的稀土元素配分曲线、微量元素蛛网图及含量类似于赋矿层位硅化白云岩, 推断矿石为同生沉积成矿。矿石显示 Ce 负异常及 Eu 正异常, 与海底高温热液及其沉积物的稀土元素组成和变化特征相似, 反映了矿石与海底热流体及其沉积物形成过程相似, 说明该区矿石形成于还原环境, 成矿过程中岩浆流体、热卤水与海水组成的混合流体使其更有利于成矿。因此, 认为成矿流体具有岩浆流体混合热卤水与海水的特征, 流体之间的混合作用与水-岩作用是导致铜铅锌等成矿元素富集、沉淀的重要机制。

关键词:稀土元素; 微量元素; 成矿流体来源; 陈家坝; 陕西

中图分类号:P618.41; P618.42; P618.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-6248(2018)03-0093-12

REE Characteristics of the Chenjiaba Cu – Pb – Zn Polymetallic Deposit in Mian-Lue-Yang Area, Southern Shaanxi Province

DING Kun¹, LIANG Ting^{1,2}, WANG Ruiting^{3,1}, LUAN Yan^{1,2},
ZHANG Tianyun⁴, YANG Xiuqing^{1,2}, LI Yongqin⁴

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. The Laboratory of Mineralization and Dynamics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
3. Northwest Nonferrous Geological Mining Group Limited Company, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Hanzhong No. 711 Geological Team, Northwest Nonferrous Geological Mining Group Limited Company, Hanzhong 723000, Shaanxi, China)

Abstract: The Chenjiaba deposit is a new Cu – Pb – Zn polymetallic deposit discovered in Mianxian-Lueyang-Yang Pingguan triangle area, Shaanxi Province. Based on the geochemical comparison between trace elements and rare earth elements in ore and geological bodies, the ore-forming fluid characteristics and metallogenic mechanism of this deposit have been studied. The result

收稿日期: 2017-12-10; 修回日期: 2018-03-30

基金项目: 中国地调查局项目“中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务”(DD20160346), 中国地质调查局地质调查项目“秦岭-大巴山-大别山成矿规律及找矿方向研究”(1212011220869), 国家重点研发计划项目“深地资源勘查开采”专项(2017YFC0602701)”

作者简介: 丁坤(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事矿产普查方向的研究工作。E-mail: 1003492885@qq.com

shows that the ore in this deposit is rich in LREE, the Th/La, Nb/La and Hf/Sm ratios are all less than 1, respectively, indicting the geochemical feature of ore-forming fluid mainly enriched in Cl element. The ore has similar REE distribution curve, trace element cobweb diagram and element content with the silicified dolomite in ore-bearing horizon, suggesting that the ore formed by syngenetic sedimentary mineralization. The ore has negative Ce anomalies and positive Eu anomalies, which is similar to those of seafloor hydrothermal fluids and their sediments, indicating that the ore formed in a reducing environment. In the process of mineralization, the mixture of magmatic fluid, hot brine and sea water makes it more favorable for mineralization. Therefore, it is considered that the ore-forming fluid has the geochemical characteristics of the magmatic fluid mixed with hot brine and seawater. The fluid mixing action and the water rock interaction are important mechanisms for the enrichment and precipitation of Cu, Pb and Zn ore-forming elements.

Keywords: rare earth elements; trace elements; source of ore-forming fluids; Chenjiaba; Shaanxi

勉(县)一略(阳)一阳(平关)三角地区是陕西省南部重要的多(贵)金属矿集区,已发现有铁、金、铜、铁、铅锌、镍、钴矿床(点)150余处。其中,大型铁矿床2处,大型镍矿床1处,大中型金矿床3处,中小型铜铅锌多金属矿床3处,具有良好的成矿区位优势(王瑞廷等,2012)。该矿集区内有2个成矿带,北部赵家沟-煎茶岭-金洞子构造破碎蚀变带,为区内重要的金-镍-多金属成矿带;中部徐家坝-陈家坝-七里沟弧形构造岩浆岩带,是区内重要的铜多金属成矿带。铜厂矿田位于“勉略阳”三角地带中部的徐家坝-陈家坝-七里沟构造岩浆岩带中段,不同学者对位于铜厂矿田中构造岩浆岩带铜矿床的矿床(化)类型、成岩成矿年龄、成矿物质来源、构造环境及找矿标志等进行了探讨(韩润生等,2000;叶霖等,1999;丁振举等,1998),认为该成矿带内的主要矿床成矿条件基本相同,其形成于中、新元古代时期,与海相火山及岩浆作用有关的铜矿床较为发育。

随着稀土元素测试精度的不断提高,稀土元素地球化学示踪方法在水-岩作用、岩浆结晶分异等地质地球化学过程及其环境条件研究等方面显示出独到的作用(MILLS et al., 1995; KLINHAMMER et al., 1994; 于海涛等, 2016)。因此,近年来,稀土元素地球化学分析被用于勉略阳地区构造岩浆岩带中多金属矿床的流体研究,相继得到大批精确的流体数据(丁振举等, 2003a, 2003b; 李福让等, 2009; 叶霖等, 1997)。目前对其中一些矿床分析已获得了精确的流体数据,通过分析可知:铜厂铜矿床、徐家沟铜矿床的成矿流体来源广泛,成矿流体为混合的变质水、岩浆水及建造水(周圣华, 2008; 代军治等,

2016)。这些研究作为准确厘定勉(县)-略(阳)-阳(平关)地区铜多金属矿床的成矿环境及成矿流体来源与演化特点,提供了地质依据。

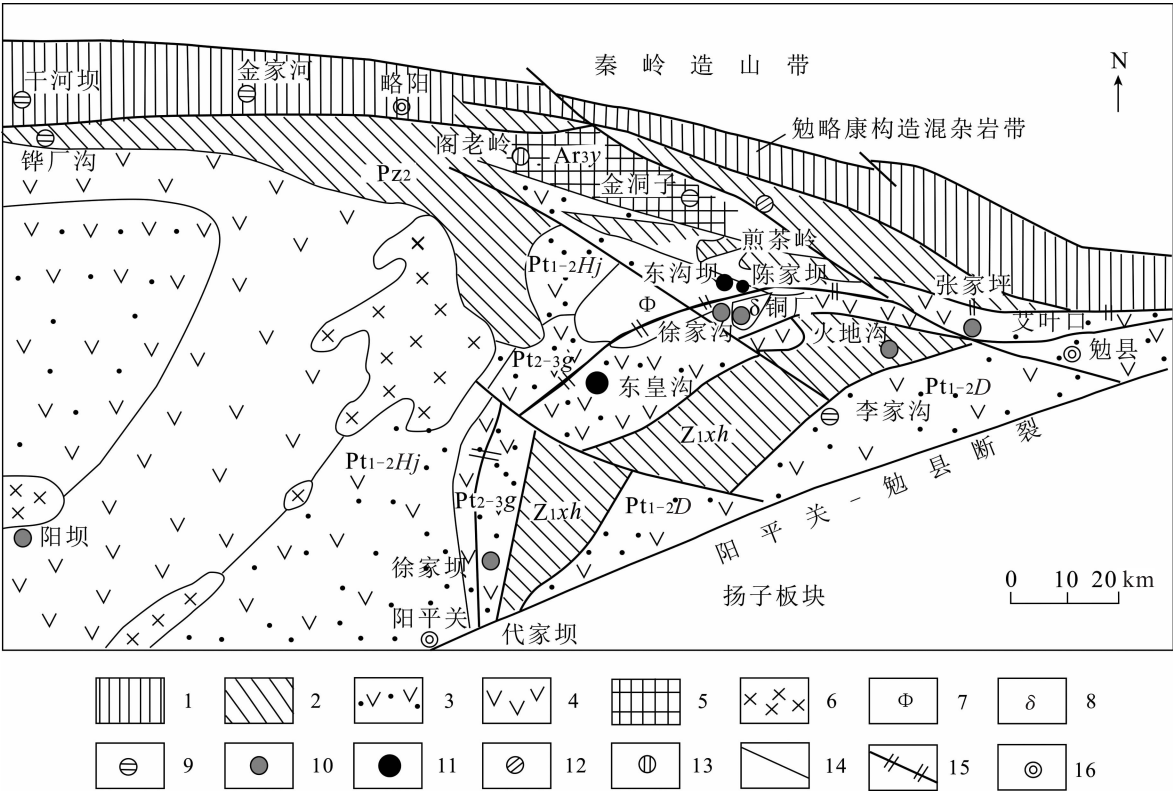
陈家坝铜铅锌多金属矿床是勉(县)-略(阳)-阳(平关)三角地区新发现的铜铅锌多金属矿床。前人的研究侧重于陈家坝铜铅锌多金属矿床的地质特征、构造特征、岩石学、火山机构(韩润生等, 2000; 富公勤等, 1996; 陈广庭, 1997; 丁坤等, 2017a, 2017b)等方面,然而对形成矿床非常重要的成矿流体却少有研究。基于上述考虑,笔者以矿区北矿带中的岩(矿)石为研究对象,开展了岩相学、稀土元素等地球化学示踪研究,对成矿过程中流体的来源、演化及成矿机制进行了初步探讨,为勉略阳地区寻找该类型矿床提供找矿思路。

1 区域地质背景

勉(县)-略(阳)-阳(平关)三角地区为秦岭造山带主要的铜多金属矿化集中区,北以勉略康构造混杂岩带为界与秦岭造山带相连,南以阳平关-勉县断裂为界与扬子板块相接(图1),大地构造位置为岛弧及其活动大陆边缘。出露地层由老到新主要有新太古界鱼洞子组(Ar_3y),中、古元古界何家岩群($Pt_{1-2}Hj$)、大安岩群($Pt_{1-2}D$),中、新元古界碧口岩群($Pt_{2-3}g$)及震旦系雪花坪组(Z_1xh)。其中,中新元古界碧口岩群郭家沟组为浅变质海相火山岩-沉积岩系,岩性多为碳质板岩、细碧岩、灰岩、千枚岩等,Rb-Sr法等时线年龄为800~1000 Ma,郭家沟组细碧岩为东皇沟中型铅锌多金属矿床、铜厂铜矿

床、徐家沟铜矿床的主要赋矿层位;而中新元古界碧口岩群东沟坝组以中酸性火山岩为主,其 Rb - Sr 法等时线年龄为 700~800 Ma;震旦系雪花太坪组(Z_1Xh)以沉积碳酸盐岩为主。区域断裂构造十分发育,重要的控矿构造主要为 EW—NEE 向、NWW

向、NE 向断裂(韩润生等,2000),这些方向的断裂为成矿流体的迁移、成矿物质富集提供了通道和空间。区内岩浆侵入活动频繁,表现为多期次的,从超基性到酸性均有出露,如铜厂侵入闪长岩体、七里沟矿床侵入酸性岩体。



1. 勉略构造混杂岩带;2. 震旦系碎屑-碳酸盐岩;3. 中新元古界中酸性火山岩;4. 中部火山岩浆岩带;5. 新太古代鱼洞子杂岩;6. 基性岩体;7. 超基性岩与酸性岩;8. 闪长岩;9. 金矿床;10. 铜矿床;11. 多金属矿床;12. 镍矿床;13. 铁矿床;14. 区域断裂;15. 古基底缝合带;16. 城市; Ar_{3y}. 新太古界鱼洞子组; Pt_{1-2Hj}. 中、古元古界何家岩群; Pt_{1-2D}. 大安岩群; Pt_{2-3g}. 中、新元古界碧口岩群; Z_{1xh}. 震旦系雪花太坪组

图 1 陕南勉县—略阳—阳平关三角地区地质构造略图(据李福让等,2009)

Fig. 1 The Sketch map of geological structure of the delta region of Mianxian-Lueyang-Yangpingguan in southern Shaanxi

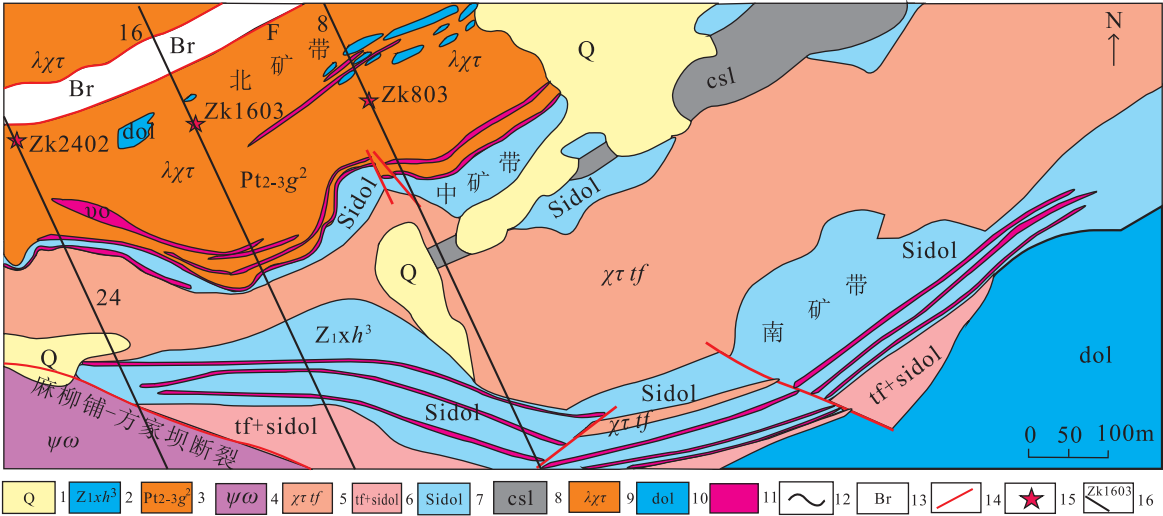
2 矿床地质

陈家坝铜铅锌多金属矿床位于铜厂铜矿床北侧(图 2),矿体主要赋存于硅化白云岩中,少量赋存在石英角斑岩中,矿区主要出露地层为中新元古界碧口岩群东沟坝组($Pt_{2-3}g^2$)浅变质海相火山岩-沉积岩系,由角斑质凝灰岩、角斑岩、石英角斑岩组成。中上元古界碧口岩群郭家沟岩组第三岩段以碳质板岩为主。下震旦统雪花太坪组上岩段

(Z_1xh^3)主要分布于矿区东、南部,岩性以白云岩为主。矿区断裂构造发育,主要为 EW—NEE 向、NE 向断裂。矿体与围岩产状基本一致,总体走向近东西,倾向北或北西,倾角 $65^{\circ}\sim 90^{\circ}$,呈层状、似层状产出。矿化类型主要是硅化白云岩中的块状(图 3a)、碎裂状(图 3b)和浸染状矿化(图 3c),其次是角斑岩、石英角斑岩、碳质板岩中的条带状、细脉状、网脉状和角砾状矿化。金属矿物自然组合有:黄铜矿-黄铁矿(图 3d)、闪锌矿-黄铁矿(图 3e)、黄铜矿-闪锌矿-黄铁矿(图 3f)、方铅矿-闪锌

矿-黄铁矿、方铅矿-闪锌矿,不同类型矿石在矿体中无一定的分布规律性。主要蚀变作用有绿泥石

化、绢云母化、硅化和黄铁矿化,其中与成矿关系密切的为黄铁矿化和硅化。



1. 第四系;2. 雪花太坪组白云岩、板岩、灰岩;3. 东沟坝组中岩段角斑岩、石英角斑岩、角斑质凝灰岩;4. 蛇纹岩;5. 角斑质凝灰岩;6. 凝灰岩夹硅化白云岩;7. 硅化白云岩;8. 碳质板岩;9. 石英角斑岩;10. 白云岩;11. 多金属矿(化)体;12. 地质界线;13. 断层破碎带;14. 断层;15. 采样钻孔位置;16. 勘探线及编号

图2 陈家坝铜铅锌多金属矿床地质简图(据汉中西北有色七一一总队有限公司修改,2016)

Fig. 2 Geological map of Chenjiaba Cu Pb Zn polymetallic deposit

3 样品采集及特征

本次研究所采集的 21 件样品来自陈家坝铜铅锌多金属矿床 ZK1603、ZK803 和 ZK2402,包括 5 件硅化白云岩、6 件石英角斑岩、6 件碳质板岩、5 件矿石。

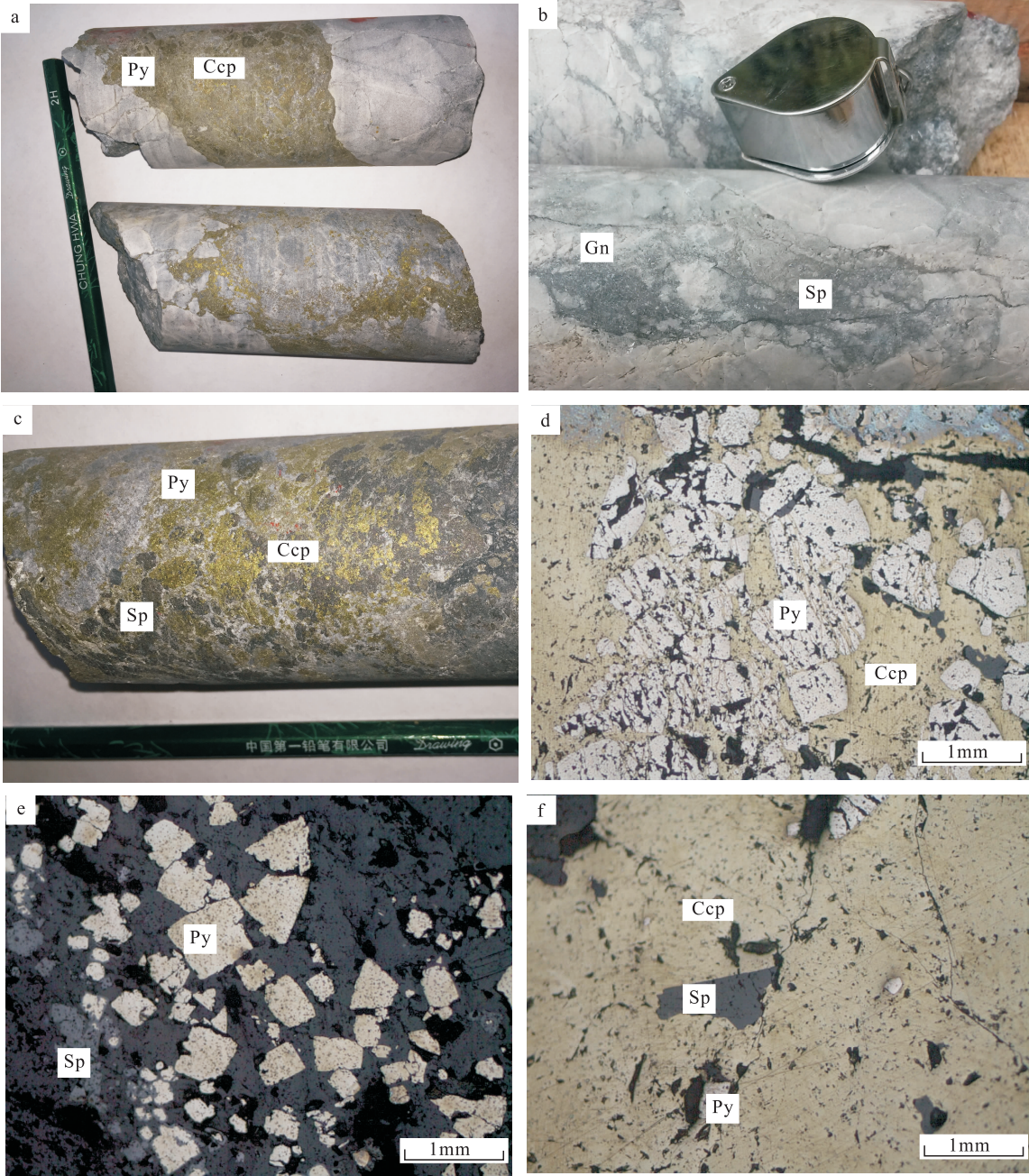
灰绿-绿灰色斑状石英角斑岩($q\chi\tau$):6 件样品(CJ. 8、CJ. 9、CJ. 10)与(CJ. 26、CJ. 27、CJ - 28)分别采自 ZK803 和 ZK2402,具体采样位置如图 2 所示。岩石分布于矿区的西北部,呈灰绿-绿灰色,斑状结构,边部偶见碎裂结构,块状或片状构造。主要由钠长石、石英、绢云母、黑云母组成,其次是铁方解石、绿泥石、绿帘石、钾长石、磁铁矿、黄铁矿和镜铁矿。斑晶以钠长石和石英为主,约占 4%~5%。基质以绢云母为主(80%),次之为石英和黑云母,其他矿物很少。

灰-灰白色泥微晶-晶粒白云岩:5 件样品(CJ - 2、CJ - 13、CJ - 18)与(CJ - 24、CJ - 25)分别采自 ZK1603 和 ZK2402,具体采样位置如图 2 所示。岩

石主要分布于矿区中部,分两层,北侧一层出露较稳定,东西延长约为 1 800 m,为主要含矿层。岩石呈灰-灰白色,常见泥微晶结构和晶粒结构,大部分为块状构造,少部分为角砾状构造,由白云石及方解石组成,含少量石英、铁方解石、滑石、钠长石、绿泥石、白云母、绢云母、磷灰石与碳质,金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿、斑铜矿、闪锌矿、方铅矿及褐铁矿等。

灰-灰黑色碳质板岩:6 件样品(CJ - 38、CJ - 42、CJ - 30、CJ - 31)与(CJ - 19、CJ - 20)分别采自 ZK2402 和 ZK1603,具体采样位置如图 2 所示。岩石呈灰-灰黑色,板状结构,块状构造。主要由绢云母、碳质、石英和白云石组成,其次是铁白云石、绿泥石和滑石,并含少量闪锌矿、黄铁矿和褐铁矿。

5 件矿石样品(CJ - 14、CJ - 17、CJ - 21)与(CJ - 22、CJ - 23)分别采自 ZK1603 和 ZK803,具体采样位置如图 2 所示。矿区内的矿石矿物主要为金属硫化物,以黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿和方铅矿为主,次生矿物有蓝铜矿、黝铜矿和斑铜矿;脉石矿物主要有白云石、绢云母、方解石、绿泥石、重晶石和石英。



a. 硅化白云岩中块状矿体(黄铜矿、黄铁矿);b. 硅化白云岩中碎裂状矿体(方铅矿、闪锌矿);c. 硅化白云岩中稠密浸染状矿体(黄铜矿、闪锌矿、黄铁矿);d. 黄铜矿穿切和充填黄铁矿裂隙;e. 石英角斑岩中黄铁矿呈自形-半自形粒状,部分黄铁矿包裹在闪锌矿中;f. 黄铁矿与闪锌矿包裹在黄铜矿;Py. 黄铁矿;Sp. 闪锌矿;Ccp. 黄铜矿;Gn. 方铅矿

图 3 陈家坝铜铅锌多金属矿床部分矿石类型及矿物组成特征照片

Fig. 3 Some ore types and mineral composition characteristics photos of the Chenjiaba Cu Pb Zn polymetallic deposit

4 样品测试与分析结果

勉略阳三角区经历了自新太古代以来不同构造

体制下的多次构造、岩浆热事件和变质变形的复杂地质作用。研究表明,REE、Nb、Th 和 Zr 等不相容元素组合在海水蚀变作用和后期变质作用下,也能指示原岩的地质属性。因此笔者采用活动性弱的微

量元素与稀土元素来示踪成矿过程中流体的来源与岩石形成构造环境。微量元素、稀土元素分析在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室测试完成,采用美国 X-7 型 ICP-MS 仪器,分析精度优于 1%~3%。

矿区硅化白云岩、碳质板岩、石英角斑岩、矿石的稀土及微量元素含量见表 1。由微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4a),可以发现,大离子亲石元素(LILF)Rb、Ba、Sr 富集,具有明显的 Pb 正异常, Th、Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等高场强元素呈现负异常。其稀土元素的球粒陨石标准化曲线为轻稀土略富集的右倾型(图 4b),以 LREE 相对富集、中弱 Ce 负异常及弱 Eu 正异常为主要特征, ΣREE 含量为 $2.44 \times 10^{-6} \sim 22.6 \times 10^{-6}$, 平均为 10.35×10^{-6} , 含量偏低, $\delta \text{Eu} = 1.07 \sim 1.4$, $\delta \text{Ce} = 0.43 \sim 0.46$ 。其中轻、重稀土分异均相对较弱, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 3.01 \sim 7.58$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 1.24 \sim 2.56$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.42 \sim 2.57$ 。

硅化白云岩为主要富矿围岩,从微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4c)上,可以发现 Th、Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等高场强元素呈现负异常,具有明显的 Pb 正异常。其稀土元素的球粒陨石标准化曲线为轻稀土略富集的右倾型(图 4d),轻稀土分异较强, ΣREE 为 $5.62 \times 10^{-6} \sim 21.28 \times 10^{-6}$, 平均为 12.66×10^{-6} , 含量偏低, $\delta \text{Eu} (1.15 \sim 4.76)$ 正异常, $\delta \text{Ce} (0.28 \sim 0.54)$ 中弱负异常,轻稀土分馏较强, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 4.03 \sim 6.82$, 而重稀土分馏较弱, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 0.81 \sim 4.18$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.18 \sim 5.07$ 。

碧口岩群东沟坝组石英角斑岩为矿区中酸性喷出岩。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4e)上,所有样品均富集大离子亲石元素(LILF)Rb、Ba、Sr,具有明显的 Nb、Ta 负异常。稀土配分曲线向右倾斜(图 4f),轻稀土富集明显, ΣREE 含量为 $20.45 \times 10^{-6} \sim 202.7 \times 10^{-6}$, 平均为 103.43×10^{-6} , 元素含量变化较大, $\delta \text{Eu} = 0.87 \sim 1.77$, $\delta \text{Ce} = 0.43 \sim 0.53$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.88 \sim 29.91$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 1.62 \sim 5.56$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.26 \sim 4.96$ 。

碳质板岩为碧口岩群郭家沟岩组主要岩性,微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 4g)显示,富集大离子亲石元素(LILF)Rb、Ba,具有明显的 Pb 正异常和 Nb、Ta 负异常。稀土配分曲线向右缓倾斜

(图 4h),稀土元素含量变化较大, ΣREE 含量为 $60.66 \times 10^{-6} \sim 204.77 \times 10^{-6}$, 平均为 141.36×10^{-6} , $\delta \text{Eu} = 0.76 \sim 1.12$, $\delta \text{Ce} = 0.47 \sim 0.51$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 4.04 \sim 10.7$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 2.78 \sim 4.72$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.33 \sim 1.7$ 。

各类岩(矿)石稀土元素总量显示石英角斑岩>碳质板岩>硅化白云岩>矿石,硅化白云岩与矿石比较相似。此外,在微量元素蛛网图及含量方面也表现出这种差异,矿石与硅化白云岩均亏损 Th、Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等高场强元素和大量富集 Pb 成矿元素,认为矿石与白云岩关系甚为密切,表明矿石为同生沉积成矿。

5 讨论

5.1 成矿过程中微量元素地球化学行为

前人研究发现,一般富 Cl 的热液富集轻稀土元素(LREE), Th/La、Nb/La、Hf/Sm 值 < 1 , 富 F 热液富集轻稀土元素和高场强元素(HFSE), Th/La、Nb/La、Hf/Sm 值 > 1 (KEPPLE et al., 1996)。陈家坝矿床矿石微量元素特征表明,其亏损 HFSE 和富集 LREE, Th/La 平均值为 0.42, Nb/La 均值为 0.64, Hf/Sm 均值为 0.09, 均小于 1, 指示陈家坝矿床的成矿流体为富 Cl 流体。

5.2 矿石 Ce 负异常及 Eu 正异常与成矿流体来源

地质体中稀土元素地球化学特征在岩石成因、成岩成矿物理化学条件中得到广泛应用(韩吟文等, 2003)。在还原条件下, Eu^{3+} 还原为 Eu^{2+} , 因 Eu^{2+} 与 REE^{3+} 的地球化学行为差别较大将发生分离,造成 Eu 在 REE 球粒陨石标准化图解中显示正异常或负异常。BAU(1991)认为, Eu^{3+} 还原为 Eu^{2+} 的氧逸度与压力、pH、温度条件等有关,温度是影响 Eu 是否显示正异常的重要条件,且 Eu 正异常仅仅出现于高温热液流体($T > 200^\circ\text{C}$)中,可作为高温热液流体参与水-岩反应。在氧化条件下, Ce 可呈 Ce^{4+} , 其离子电位与 REE^{3+} 的地球化学行为差别较大将发生分离,形成 Ce 的正异常或负异常。Ce 负异常与海水加入有关,是系统深部热液流体在上升过程中与一定量的海水在浅部混合,被标记上了海水的标志(丁振举等, 2003a)。

测试样品中硅化白云岩 $\delta \text{Eu} = 1.15 \sim 4.76$, $\delta \text{Ce} = 0.28 \sim 0.54$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 3.07 \sim 6.40$, 显

表 1 陈家坝矿床硅化白云岩、碳质板岩、石英角斑岩、矿石微量元素含量表(10^{-6})

Tab. 1 Contents of silicified dolomite, carbonaceous slate, quartz porphyry, ore trace and rare earth elements in Chenjiaba deposit(10^{-6})

矿床岩性	硅化白云岩	硅化白云岩	硅化白云岩	硅化白云岩	石英角斑岩	石英角斑岩	石英角斑岩	石英角斑岩	石英角斑岩	石英角斑岩	石英角斑岩
样号	CJ-2	CJ-13	CJ-18	CJ-24	CJ-25	CJ-8	CJ-9	CJ-10	CJ-26	CJ-27	CJ-28
Rb	0.12	0.07	0.56	0.33	0.14	95.20	115.20	8.00	85.09	80.13	34.54
Ba	2 354.47	3 843.79	1 322.51	104.93	99.02	1 130.01	1 492.00	602.11	1 603.79	2 180.22	1 264.60
Th	3.34	5.90	4.10	2.05	2.51	4.25	5.23	8.25	4.57	4.98	5.07
U	6.96	10.30	6.82	4.07	5.00	7.48	8.82	10.16	6.73	6.95	6.25
Nb	0.16	0.16	0.11	0.09	0.07	3.42	14.74	3.05	1.54	6.42	2.09
Ta	0.04	0.02	0.02	0.04	0.04	0.24	0.75	0.10	0.14	0.22	0.05
La	3.25	2.86	1.16	1.89	1.87	5.15	3.27	29.01	13.41	35.30	30.38
Ce	2.73	2.99	1.37	6.29	3.37	10.73	6.51	61.80	22.70	83.22	75.15
Pb	36.90	70.35	666.67	4.25	5.36	7.54	3.17	2.22	2.72	14.05	5.46
Pr	0.54	0.57	0.23	1.33	0.53	1.49	0.85	7.04	2.39	11.00	8.84
Sr	96.01	141.01	119.30	674.87	119.59	1 006.64	307.16	111.57	92.31	127.69	61.02
Nd	2.35	2.41	1.01	6.88	2.48	7.14	3.70	27.47	8.88	46.63	34.90
Sm	1.41	1.72	1.99	1.47	1.58	2.00	1.06	4.88	1.52	8.78	5.95
Zr	0.04	0.06	0.03	0.03	0.02	35.65	37.64	89.40	90.75	52.73	156.12
Hf	0.49	0.46	0.26	1.47	0.53	1.15	1.20	2.27	2.22	1.27	3.66
Eu	0.53	0.76	0.32	0.54	0.21	0.75	0.58	1.27	0.85	2.69	1.59
Gd	0.80	0.57	0.32	0.81	0.58	2.87	1.31	3.80	1.36	6.91	4.39
Tb	11.93	5.69	3.70	6.10	6.11	0.49	0.21	0.42	0.15	0.76	0.49
Dy	0.20	0.12	0.07	0.15	0.12	3.26	1.25	1.80	0.75	3.53	2.02
Y	0.51	0.35	0.18	0.19	0.31	19.03	5.31	7.34	3.65	15.53	6.61
Ho	0.08	0.05	0.02	0.02	0.04	0.67	0.23	0.30	0.13	0.60	0.35
Yb	0.12	0.07	0.56	0.33	0.14	1.84	0.66	0.65	0.36	1.26	0.71
Lu	2 354.47	3 843.79	1 322.51	104.93	99.02	0.28	0.11	0.09	0.06	0.18	0.11
ΣREE	13.11	12.11	5.62	21.28	11.16	39.06	20.45	139.40	52.97	202.73	165.94
δEu	2.64	4.76	3.22	1.22	1.15	0.96	1.52	0.87	1.77	1.02	0.91
(La/Yb) _N	4.32	5.51	4.35	6.82	4.03	1.88	3.35	29.91	24.95	18.87	28.65
(Gd/Yb) _N	1.23	1.18	1.60	5.07	1.56	1.26	1.61	4.69	3.02	4.42	4.96
(La/Sm) _N	4.18	3.92	2.75	0.81	2.20	1.62	1.95	3.74	5.56	2.53	3.21
LREE/HREE	3.07	4.83	3.47	6.40	4.16	2.31	3.56	16.56	15.43	12.42	17.19
δCe	0.54	0.51	0.51	0.28	0.44	0.44	0.46	0.47	0.53	0.43	0.44

续表 1

矿床岩性		硅化白云岩	硅化白云岩	硅化白云岩	硅化白云岩	硅化白云岩	石英角斑岩	石英角斑岩	石英角斑岩	石英角斑岩	石英角斑岩	石英角斑岩
样号	CJ-2	CJ-13	CJ-18	CJ-24	CJ-25	CJ-8	CJ-9	CJ-10	CJ-26	CJ-27	CJ-28	
Rb	128.65	119.11	49.91	71.71	125.31	120.89	3.35	7.78	13.90	9.84	3.40	
Ba	5 148.33	4 280.75	2 539.35	1 552.33	2 582.20	4 098.82	123.06	247.17	556.42	375.12	97.97	
Th	11.80	9.06	6.99	7.68	15.34	9.89	0.56	0.64	0.57	1.55	0.21	
U	5.18	6.70	9.68	6.02	7.08	3.71	0.83	0.90	1.08	0.96	0.45	
Nb	12.95	25.19	8.34	8.70	17.64	22.94	0.46	0.93	0.87	3.02	0.10	
Ta	0.79	1.35	0.46	0.49	1.02	1.34	0.05	0.07	0.06	0.14	0.04	
La	30.56	42.19	11.52	16.52	35.80	45.03	1.51	1.19	3.89	1.46	0.34	
Ce	61.28	78.95	20.02	30.58	70.26	79.16	3.07	2.49	8.39	3.34	0.71	
Pb	17.56	79.60	65.51	24.99	31.90	106.02	93.04	374.90	687.28	99.03	556.45	
Pr	7.56	9.27	2.69	3.36	8.42	10.05	0.40	0.33	1.07	0.45	0.10	
Sr	33.10	57.56	70.70	150.80	30.08	53.93	32.89	50.05	165.67	59.13	12.65	
Nd	28.13	34.43	10.67	12.49	31.04	38.32	1.56	1.52	4.58	2.05	0.49	
Sm	5.22	5.62	2.61	2.23	5.10	7.18	0.37	0.45	1.14	0.65	0.17	
Zr	164.28	149.11	55.23	110.23	191.29	168.93	2.51	8.45	11.35	17.58	1.00	
Hf	4.82	3.94	1.50	2.87	5.64	4.54	0.02	0.05	0.07	0.10	0.01	
Eu	1.55	1.69	1.03	0.87	1.30	1.78	0.13	0.21	0.48	0.30	0.07	
Gd	4.69	5.79	3.27	2.54	4.74	6.97	0.38	0.48	1.16	0.70	0.13	
Tb	0.64	0.82	0.48	0.38	0.67	0.98	0.07	0.09	0.15	0.12	0.03	
Dy	3.70	4.62	3.19	2.37	3.81	5.88	0.34	0.52	0.78	0.66	0.18	
Y	19.36	28.41	20.50	13.51	18.97	40.39	1.63	2.85	3.29	2.89	0.90	
Ho	0.75	0.97	0.65	0.50	0.79	1.22	0.06	0.10	0.13	0.11	0.03	
Yb	2.25	2.87	1.92	1.55	2.26	3.49	0.13	0.25	0.36	0.26	0.08	
Lu	0.33	0.43	0.32	0.25	0.34	0.52	0.02	0.04	0.04	0.03	0.01	
ΣREE	149.14	190.89	60.66	75.44	167.26	204.77	8.24	8.01	22.60	10.45	2.44	
δEu	0.94	0.90	1.08	1.12	0.80	0.76	1.07	1.39	1.28	1.33	1.40	
(La/Yb) _N	9.17	9.92	4.04	7.20	10.70	8.70	7.58	3.18	7.20	3.84	3.01	
(Gd/Yb) _N	1.68	1.63	1.37	1.33	1.70	1.61	2.30	1.54	2.57	2.20	1.42	
(La/Sm) _N	3.68	4.72	2.78	4.67	4.41	3.95	2.56	1.68	2.15	1.40	1.24	
LREE/HREE	9.05	9.19	4.00	7.03	9.91	7.81	5.86	3.42	6.43	3.73	3.41	
δCe	0.47	0.49	0.48	0.51	0.48	0.48	0.46	0.45	0.45	0.43	0.43	

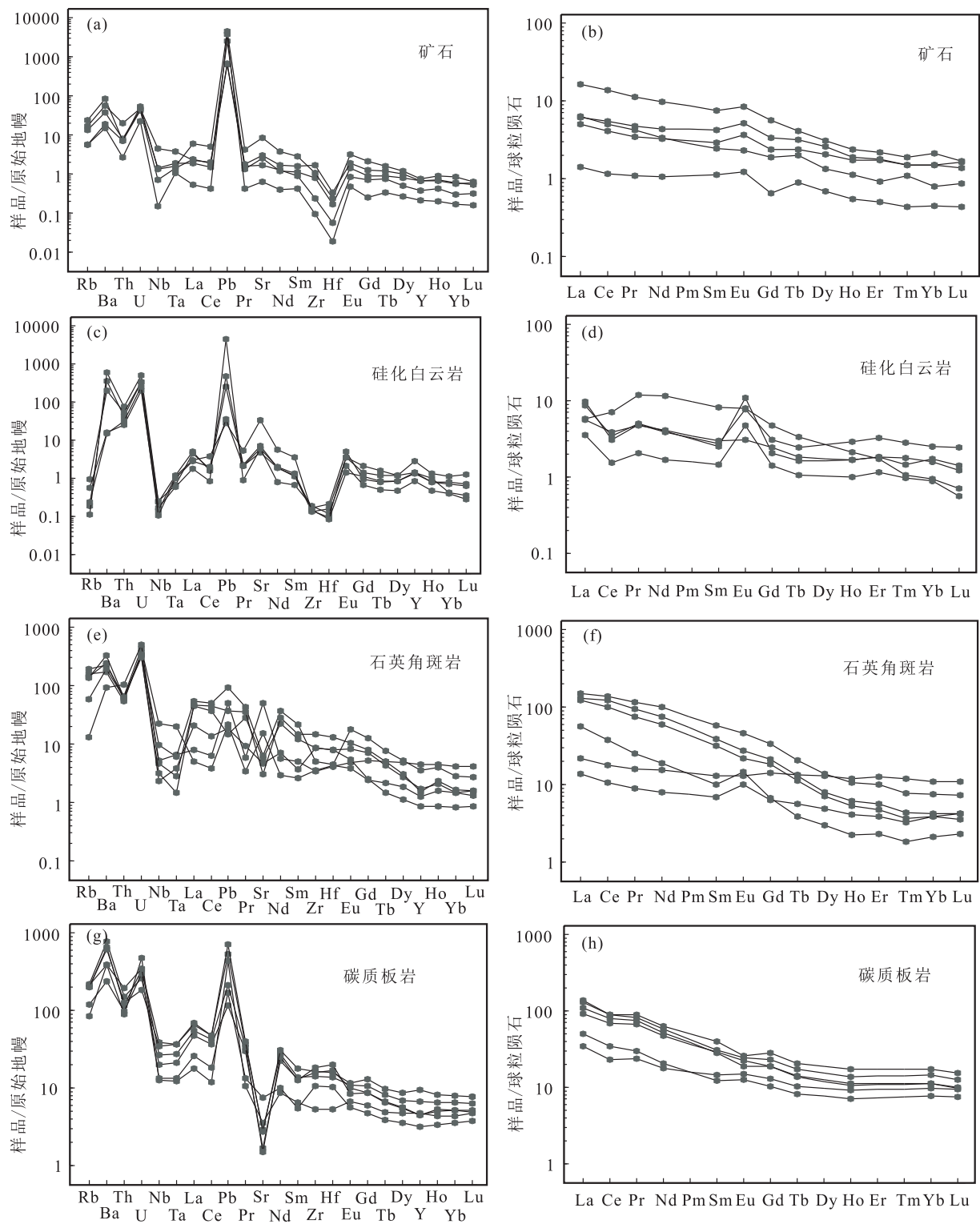


图4 陈家坝铜铅锌多金属矿床矿石、硅化白云岩、石英角斑岩、碳质板岩原始地幔标准化不相容元素配分图解与稀土元素球粒陨石标准化图解(标准化值据 SUN et al. ,1989)

Fig. 4 Normalized element matching diagramming of primitive mantle and standardization of rare earth chondrite meteorites Chen Jiaba copper,lead and zinc polymetallic ore deposit including ore, silicified dolomite, quartz porphyry and carbonaceous slate (Normalized value after SUN et al. , 1989)

示中弱 Ce 负异常及正 Eu 异常;矿石 $\delta\text{Eu}=1.07\sim 1.4$, $\delta\text{Ce}=0.43\sim 0.46$, $\text{LREE}/\text{HREE}=3.41\sim 6.43$, 显示中弱 Ce 负异常及弱正 Eu 异常。其均以 LREE 相对富集、Ce 负异常及 Eu 正异常为主要特征,反映了矿床成矿物质的多元性。赋矿白云岩与矿石中的 Ce、Eu 异常特征,与海底高温热液及其沉积物的稀土元素组成和变化特征相似,反映了矿石沉淀可能是由海水和热卤水发生对流作用,其形成过程与海底热流体及其沉积物相似(丁振举, 2003b; MILLS et al., 1995; KLINHAMMER et al., 1994)。这与陈家坝矿床硫源是由卤水硫酸盐与海水硫酸盐混合组成观点一致。对国内外 VMS 矿床大量研究表明,这类矿床的赋矿围岩及矿石一般都表现为 Eu 正异常(SHIKAZONO et al., 1999, 2008; 别风雷等, 2000; 燕长海等, 2008)。陈家坝矿床在空间上与火山机构关系密切,根据其石英的流体包裹体分析显示,矿床形成过程中受到岩浆水的影响。

综上所述,陈家坝铜铅锌多金属矿床为 VMS 型矿床,成矿过程较为复杂,该区矿石形成于还原环境中,由岩浆流体、热卤水及海水组成的混合流体是 Cu、Pb、Zn 等成矿元素沉淀的主要机制。

5.3 成矿机制探讨

成矿作用是矿床学研究的重点(毛景文等, 2000)。矿质元素沉淀的机制有多种。例如,水-岩作用、流体温度和压力的降低、pH 值变化及流体混合作用等。其中,水-岩作用与流体之间的混合作用是金属成矿作用的重要机制。

陈家坝铜铅锌多金属矿床成矿作用异常复杂,具有同位、多期、多矿化、多源(成矿物质、热液来源及热源)、多阶段等特点,属于叠加复合型矿床(丁振举等, 1998)。在勉略阳地区中部南北地体拼接带上,分布有区域最主要的中酸性火山喷发活动带。在新元古代岛弧及其活动大陆边缘环境中(叶霖等, 1997),海底火山作用产生高温、富 Cl 的岩浆热液,该热液虽未携带大量矿质元素,但是与围岩发生水-岩作用,使围岩的微量金属元素活化从而富集。上升的高温的岩浆流体与向下迁移的海水和热卤水沿着 NWW 向和 NEE 向共轭断裂发生流体混合作

用,导致岩浆热液温度、压力等逐渐降低。伴随海水的渗透,原有的物理化学平衡被打破,从而成矿流体中的金属硫化物富集沉淀。

6 结论

(1)陈家坝铜铅锌多金属矿床亏损 HFSE 和富集 LREE, Th/La 平均值为 0.42, Nb/La 均值为 0.64, Hf/Sm 均值为 0.09, 比值均小于 1, 指示陈家坝矿床的成矿流体为富 Cl 流体。

(2)各类岩(矿)石稀土元素总量显示石英角斑岩>碳质板岩>硅化白云岩>矿石, 硅化白云岩与矿石比较相似, 表明矿石为同生沉积成矿。

(3)陈家坝铜铅锌多金属矿床为 VMS 型矿床, 岩浆流体与向下迁移的海水和热卤水沿着 NWW 向和 NEE 向共轭断裂发生混合, 并与围岩发生水-岩作用而形成金属硫化物富集沉淀。

参考文献(References):

- 别风雷, 李胜荣. 川西呷村超大黑矿型矿床成矿流体稀土元素组成[J]. 岩石学报, 2000, 16(4): 575-580.
- BIE Fenglei, LI Shengrong. Sichuan GACUN superlarge Kuruko type deposit metallogenic fluid REE composition. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16 (4): 575-580.
- 陈广庭. 陕西略阳陈家坝古火山机构的探讨[J]. 陕西理工学院学报:自然科学版, 1997, (4): 14-19.
- CHEN Guangting. A discussion on the ancient volcano mechanism of Chen Jiaba, Lueyang, Shaanxi [J]. Journal of Shaanxi University of Technology :Natural Science Edition, 1997, (4): 14-19.
- 丁振举, 姚书振, 周宗桂, 等. 陕西略阳铜厂铜矿成矿时代及地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 1998, 20(3): 18-29.
- DING Zhenju, YAO Shuzhen, ZHOU Zonggui, et al. The metallogenic epoch and geological significance of copper ore in Lueyang, Shaanxi[J]. Shaanxi Journal of Geoscience and Environment, 1998, 20(3): 18-29.
- 丁振举, 刘丛强, 姚书振, 等. 东沟坝多金属矿床矿质来源

- 的稀土元素地球化学限制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(4): 437-442.
- DING Zhenju, LIU Congqiang, YAO Shuzhen, et al. Geochemistry of rare earth elements limit mineral sources of the Donggouba polymetallic deposit [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33 (4): 437-442.
- 丁坤,王瑞廷,钱壮志,等. 陕西省陈家坝铜铅锌多金属矿床地质地球化学特征及矿床成因探讨[J]. 地质与勘探, 2017,53(3):436-444.
- DING Kun, WANG Ruiting, QIAN Zhuangzhi, et al. Geological and geochemical characteristics and ore genesis of the Chen Jiaba polymetallic deposit, Shaanxi Province [J]. Geology and Exploration, 2017,53 (3): 436-444.
- 丁坤. 陕西省勉略阳地区陈家坝铜铅锌多金属矿床地质特征及矿床成因探讨[D]. 西安:长安大学,2017,1-58.
- DING Kun. Geological characteristics and genesis of the Chenjiaba CU - Pb-Zn polymetallic deposit in the Lueyang area of ShaanxiProvince[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017,1-58.
- 代军治,陈荔湘,王瑞廷,等. 陕西省略阳县徐家沟铜矿床地质地球化学特征及成矿模式[J]. 西北地质, 2016, 49(4): 99-109.
- DAI Junzhi, CHEN Lixiang, WANG Ruiting, et al. Geological and geochemical characteristics and metallogenic model of the Xujiagou copper deposit in Lueyang County, Shaanxi province [J]. Northwest Geology, 2016, 49 (4): 99-109.
- 丁振举,姚书振,刘丛强,等. 东沟坝多金属矿床喷流沉积成矿特征的稀土元素地球化学示踪[J]. 岩石学报, 2003, 19(4): 792-798.
- DING Zhenju, YAO Shuzhen, LIU Congqiang, et al. Donggouba polymetallic deposit exhalative sedimentary metallogenic characteristics of the REE geochemical tracer [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19 (4): 792-798.
- 富公勤,石林,李世麟. 陕西省陈家坝变质火山体系[J]. 矿物岩石,1996,16(3):1-16.
- FU Gongqin, SHI Lin, LI Shilin. The Mineral rocks of the Chen Jiaba metamorphic volcano system in Shaanxi Province [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1996, 16 (3): 1-16.
- 韩润生,刘丛强,马德云,等. 铜石矿田陈家坝地区断裂构造地球化学特征及定位预测[J]. 地质与勘探, 2000,36 (5):66-69.
- HAN Runsheng, LIU Congqiang, MA Deyun, et al. Geochemical characteristics and location prediction of the fracture structure in the Chen Jiaba area, Tongshi [J]. Geology and Exploration, 2000, 36 (5):66-69.
- 韩吟文,马振东,张宏飞. 地球化学[M]. 北京:地质出版社, 2003:1-370.
- HAN Yinwen, MA Zhendong, ZHANG Hongfei. Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003:1-370.
- 高仁祥,陈琛,吴尊,等. 磷酸法测定碳、氧同位素[J]. 石油实验地质,1984,6(1):72-75.
- GAO Renxiang, CHEN Chen, WU Chun, et al. Determination of carbon and oxygen isotopes by phosphoric acid method [J]. Petroleum Experimental Geology, 1984, 6 (1): 72-75.
- 李福让,王瑞廷,高晓宏,等. 陕西省略阳县徐家沟铜矿床成矿地质特征及控矿因素[J]. 地质学报, 2009,83(11): 1752-1761.
- LI Furang, WANG Ruiting, GAO Xiaohong, et al. The geological characteristics and ore controlling factors of Xujiagou copper deposit in Lueyang County, Shaanxi province [J]. Acta Geology Sinica, 2009, 83 (11): 1752-1761.
- 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 Jingwen, XIE Guiqing, ZHANG Zuoheng, et al. The Mesozoic large-scale metallogenesis in northern China and its geodynamic background [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21 (1): 169-188.
- 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,2012:1-275.
- WANG Ruiting, WANG Dongsheng, DAI Junzhi, et al. The comprehensive exploration technology of lead zinc silver copper gold deposit in the main ore concentration area of Shaanxi section of Qinling Mountains orogenic belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 1-275.
- 叶霖, 刘铁庚. 陕南勉宁略地区铜厂铜矿包裹体地球化学特征研究[J]. 矿物学报, 1997, 17(2): 194-199.
- YE Lin, LIU Tiegeng. Study on the geochemical characteristics of the inclusions in copper ore deposits in the Mian Ninglu region, southern Shaanxi [J]. Journal of Minerals, 1997, 17 (2): 194-199.
- 叶霖, 刘铁庚, 王兴理. 陕南勉宁略地区铜厂铜矿找矿标志探讨[J]. 矿物学报, 1999, 19(1): 103-107.
- YE Lin, LIU Tiegeng, WANG Xingli. Exploration of copper ore prospecting markers in the copper factory, Mian Ninglu region, southern Shaanxi [J]. Mineral Journal, 1999, 19 (1): 103-107.
- 燕长海, 徐勇航, 彭翼, 等. 东秦岭二郎坪群火山岩中火山成因块状硫化物矿床地质地球化学特征及其成因讨论[J]. 矿床地质, 2008, 27(1): 14-27.
- YAN Changhai, XU Yonghang, PENG Yi, et al. Geological and geochemical characteristics and genesis of volcanic hosted massive sulfide deposits in volcanic rocks of Erlang Ping group in eastern Qinling Mountains [J]. Ore Geology, 2008, 27 (1): 14-27.
- 于海涛, 孟庆海, 郭骞. 河南嵩山石榴岩体稀土元素特征及矿源研究[J]. 西北地质, 2016, 49(1): 34-38.
- YU Haitao, MENG Qinghai, GUO Qian. Study on the characteristics of rare earth elements and ore sources of Songshan stone scale rock mass in Henan [J]. Northwest Geology, 2016, 49 (1): 34-38.
- 周圣华. 陕西铜厂铜金多金属矿床地质特征及成矿流体地球化学[J]. 中国地质, 2008, 35(2): 298-304.
- ZHOU Shenghua. The geological characteristics and metallogenetic fluid geochemistry of the copper gold polymetallic deposit in the Shaanxi copper plant [J]. China Geology, 2008, 35 (2): 298-304.
- 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用: 金属活化热液成矿作用及找矿[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985, 1-246.
- ZHANG Ligang. Application of stable isotopes in Geological Science: metal activated hydrothermal mineralization and prospecting [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1985, 1-246.
- BAU M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium [J]. Chemical Geology, 1991, 93(3-4): 219-230.
- G. P. KLINKHAMMER, ELDERFIELD H., EDMOND J. M., et al. Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluids from mid-ocean ridges [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58 (23): 5105-5113.
- KEPPLER H. Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction-zone fluids [J]. Nature, 1996, 380(6571): 237-240.
- RACHEL A. Mills, ELDERFIELD H. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26° N Mid-Atlantic Ridge [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(17): 3511-3524.
- SHIKAZONO N., OGAWA Y., UTADA M., et al. Geochemical behavior of rare earth elements in hydrothermally altered rocks of the Kuroko mining area, Japan [J]. J Geochem Expl, 2008, 98: 65-79.
- SHIKAZONO N. Rare earth element geochemistry of Kuroko ores and hydrothermal altered rocks: Implication for evolution of submarine hydrothermal system at back arc basin [J]. Res Geol Spec Issue, 1999, No. 20: 23-30.
- SUN SS, MCDONOUGH WF. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.