

# 陕西陈家坝铜铅锌多金属矿床 C、H、O、S、Sr 同位素 地球化学示踪<sup>\*</sup>

丁 坤<sup>1</sup>, 王瑞廷<sup>2,1\*\*</sup>, 秦西社<sup>2</sup>, 梁 婷<sup>1</sup>, 杨秀清<sup>1</sup>, 栾 燕<sup>1,2</sup>, 郑崔勇<sup>3</sup>, 樊新祥<sup>4</sup>

(1 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2 西北有色地质矿业集团有限公司, 陕西 西安 710054; 3 汉中西北有色七一总队有限公司, 陕西 汉中 723000; 4 甘肃省地质矿产勘查开发局第四地质矿产勘查院, 甘肃 酒泉 735000)

**摘要** 陈家坝铜铅锌多金属矿床为近年来在陕西勉(县)-略(阳)-宁(强)铜金镍矿化集中区新发现的铜铅锌多金属矿床。为了查明陈家坝矿床成矿物质来源, 笔者开展了系统的C、H、O、S和Sr同位素地球化学研究。结果表明, 陈家坝矿区的围岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值范围-0.93‰~1.44‰, 平均值为0.35‰,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值范围14.14‰~27.49‰, 平均22.1‰, 为沉积成因海相碳酸盐岩。脉石矿物白云石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 范围在-0.53‰~0.89‰,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值范围12.12‰~13.23‰, 指示成矿流体中的CO<sub>2</sub>主要来自岩浆水, 少量CO<sub>2</sub>来源于围岩海相碳酸盐岩的溶解作用。成矿流体中δD值范围-91‰~-72‰,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值范围6.7‰~9.4‰, 在δD- $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解中主要落于原生岩浆水范围内, 成矿流体以岩浆流体为主。成矿流体与围岩的水-岩反应是导致该区铜铅锌矿床中白云石和黄铜矿、闪锌矿和方铅矿矿物沉淀结晶的主要机制。矿石金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围4.88‰~8.90‰, 平均值为7.37‰, 介于岩浆硫与海水硫之间, 且与矿集区内典型的徐家沟铜矿床矿石矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 变化区间重叠, 表明硫主要来自于岩浆硫, 部分硫来自海水硫酸盐。矿石中黄铁矿的初始锶同位素比值<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值为0.72, 高于赋矿围岩锶同位素比值, 接近大陆地壳的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值(0.719), 指示了成矿流体流经了雪花太坪组地层, 并与其中具有高<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值的白云岩进行水岩反应及同位素交换。

**关键词** 地球化学; 碳、氢、氧、硫、锶同位素组成; 成矿物质来源; 陈家坝 Cu-Pb-Zn 多金属矿床; 陕西

中图分类号: P618.51

文献标志码:A

## C, H, O, S, Sr isotopic geochemistry of Chenjiaba Cu-Pb-Zn polymetallic deposit, Shaanxi Province

DING Kun<sup>1</sup>, WANG RuiTing<sup>2,1</sup>, QIN XiShe<sup>2</sup>, LIANG Ting<sup>1</sup>, YANG XiuQing<sup>1</sup>, LUAN Yan<sup>1,2</sup>,  
ZHENG CuiYong<sup>3</sup> and FAN XinXiang<sup>4</sup>

(1 School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2 Northwest Nonferrous Geological Mining Group Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3 Northwest Nonferrous No. 711 Geological Party of Hanzhong, Hanzhong 723000, Shaanxi, China; 4 Fourth Institute of Geological and Mineral Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development, Jiuquan 735000, Gansu, China)

### Abstract

The Chenjiaba Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Shaanxi Province, located in Mian(xian)-Lue(yang)-Ning(qiang) Cu-Au-Ni ore concentration area, is a newly discovered deposit. In this paper, C, H, O, S and Sr isotopic geochemistry was systematically studied in order to understand comprehensively the source of ore-forming mate-

\* 本文研究得到国家自然科学基金青年科学基金项目(编号:41603040)、西北有色地质矿业集团有限公司博士后科研项目、中国地质调查局项目(编号:1212011220869)联合资助

第一作者简介 丁 坤,男,1990年生,博士研究生,矿产普查与勘探专业。Email:1003492885@qq.com

\*\* 通讯作者 王瑞廷,男,1969年生,教授级高级工程师,矿床学与矿产资源勘查研究方向。Email:wryf@163.com

收稿日期 2018-10-08; 改回日期 2019-01-31。张绮玲编辑。

rials. The analytical results show that  $^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  and  $^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  values of surrounding rocks are between  $-0.93\text{\textperthousand}$  and  $1.44\text{\textperthousand}$  and  $14.14\text{\textperthousand}$  and  $27.49\text{\textperthousand}$ , respectively, suggesting that the surrounding rocks were derived from marine carbonate dissolution. The  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  values of gangue dolomite samples are in the range of  $-0.53\text{\textperthousand} \sim -0.89\text{\textperthousand}$ , and the  $^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  values in the range of  $12.12\text{\textperthousand} \sim 13.23\text{\textperthousand}$ . In the Chenjiaba Cu-Pb-Zn polymetallic deposit, the  $\text{CO}_2$  in the ore-forming fluid was mainly derived from magmatic water, with a small amount from marine carbonate dissolution. The  $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$  of the quartz fluid inclusions is between  $-91\text{\textperthousand}$  and  $-72\text{\textperthousand}$ , the  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  is between  $6.7\text{\textperthousand}$  and  $9.4\text{\textperthousand}$ , and the  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  diagram shows that the main source of ore-forming fluid was magmatic water. Water-rock reaction between ore-forming fluid and surrounding rock was the main mechanism resulting in the precipitation and crystallization of dolomite, sphalerite, chalcopyrite and galena in Chenjiaba Cu-Pb-Zn polymetallic deposit, Shaanxi. Sulfur isotopic compositions ( $\delta^{34}\text{S}$  from  $4.88\text{\textperthousand}$  to  $8.90\text{\textperthousand}$ ,  $7.37\text{\textperthousand}$  on average) are both magmatic sulfur and seawater sulfur, consistent with the data of the typical Xujiagou Cu deposit in this area. The results indicate that sulfur sources were mainly sourced from magmatic sulfur with the addition of small amounts of seawater sulfur. The  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio of pyrite in the ore is  $0.7187$ , higher than  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio ( $0.7083$ ) of surrounding rock and similar to the ratio of continental crust ( $0.719$ ), suggesting that ore-forming fluid probably migrated through the formation of Xuehuataiping Formation, and experienced water-rock reaction and isotope exchange between the ore fluid and the dolomite which had high  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values.

**Key words:** geochemistry, C, H, O, S and Sr isotopes, metal sources, Chenjiaba Cu-Pb-Zn polymetallic deposit, Shaanxi

秦岭造山带为中国中部地区最为重要的金、铅、锌、铁、银、铜、镍等多金属成矿带(闫臻等,2007;王宗起等,2009;李红中等,2010;王瑞廷,2012)。勉县-略阳-宁强(以下简称勉略宁)金铜镍矿化集中区位于秦岭造山带中段扬子板块西北缘,该区矿床密集分布。已发现不同规模矿床(点)150余处,其中最为典型的矿床有煎茶岭超大型金矿床、煎茶岭大型镍(钴)矿床、东沟坝大型金铅锌多金属矿床、鱼洞子大型铁矿床和铜厂中型铜矿床等,显示出巨大的找矿潜力。陈家坝矿床为在勉略宁矿集区近年来新发现的铜铅锌多金属矿床,前人从矿床地质特征、控矿构造、古火山机构及矿床成因等方面对矿床进行了初步研究(陈广庭,1997;韩润生等,2000;丁坤,2017;丁坤等,2017;2018a;2018b),但研究程度较低,成矿物质来源依然不清,难以建立统一的成矿模式。本文以该矿床金属硫化物、石英、白云石及赋矿围岩为研究对象,在详细的野外地质调查基础上,系统开展碳、氢、氧、硫、锶同位素地球化学分析,以探讨陈家坝铜铅锌多金属矿床成矿物质来源,为勉略宁地区铜多金属矿床地质勘探提供新证据。

## 1 区域地质背景

陈家坝铜铅锌多金属矿床位于陕西省南部勉略

宁矿集区的核心部位,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),大地构造位置处于岛弧及其活动大陆边缘。

区域出露地层主要包括中、新元古界碧口岩群郭家沟岩组、东沟坝岩组和震旦系雪花太坪组,其中,盖层由震旦系雪花太坪组组成,为一套碎屑-化学沉积岩建造;基底由碧口岩群组成,出露广泛,整体为一套海相火山-沉积岩变质岩建造。郭家沟岩组在区域内中部及西南部广泛出露,可划分3个岩段:上岩段( $\text{Pt}_{2-3}\text{g}^3$ )岩性主要有凝灰质千枚岩、千枚岩砂板岩夹细碧岩;中岩段 $\text{Pt}_{2-3}\text{g}^2$ )以中酸性火山岩熔岩、凝灰岩为主,夹铁碳酸盐岩;下岩段( $\text{Pt}_{2-3}\text{g}^1$ )以基性火山熔岩、凝灰岩为主,夹角斑岩、铁碳酸盐岩,可见集块熔岩、枕状熔岩。东沟坝岩组( $\text{Pt}_3\text{d}$ )可划分为3个岩性段( $\text{Pt}_{2-3}\text{d}^3$ ):上岩段( $\text{Pt}_{2-3}\text{d}^3$ )以石英绢云母片岩、钠长片岩、凝灰岩、凝灰质砂板岩、千枚岩夹铁碳酸盐岩、硅质岩及灰岩、大理岩透镜体;中岩段( $\text{Pt}_{2-3}\text{d}^2$ )为石英角斑岩、角斑岩、中酸性凝灰岩、火山集块岩、角砾岩、夹重晶石岩、硅质岩和铁碳酸盐岩透镜体;下岩段( $\text{Pt}_{2-3}\text{d}^1$ )以细碧岩和基性凝灰岩为主,夹铁碳酸盐岩透镜体。下震旦统雪花太坪组区域主要分布于东南部及中部地区,可划分为3个岩段:上岩段( $\text{Z}_1\text{xh}^3$ )为巨厚层白云岩、硅化白云岩、含

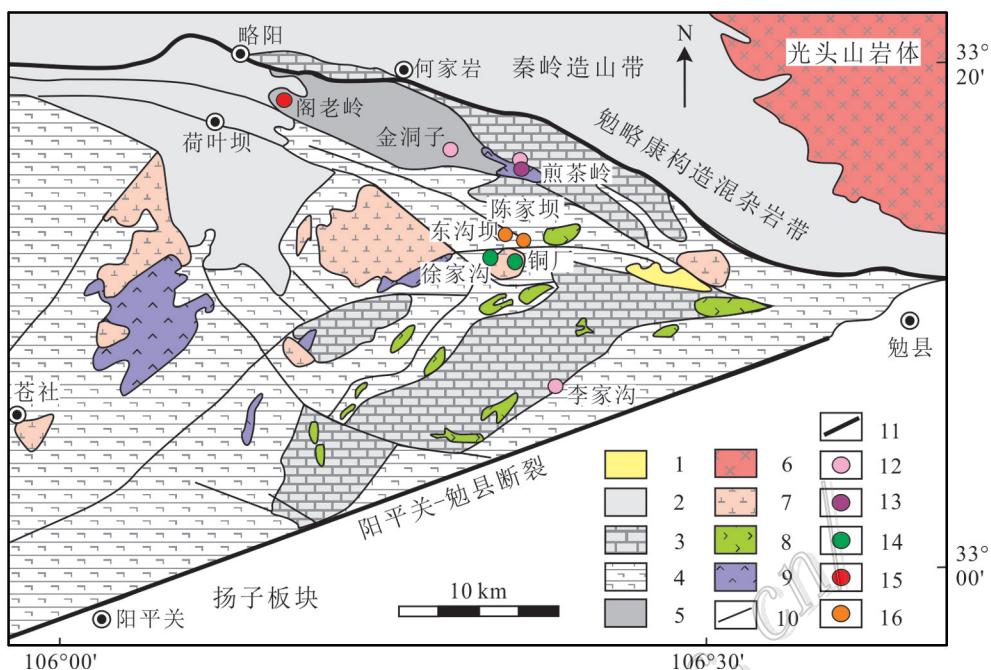


图1 勉略宁矿集区地质矿产略图(据李福让等,2009)

1—第四系沉积物;2—古生界—中生界;3—新元古界断头崖和九道拐组;4—新元古界碧口群;5—新太古代鱼洞子群;6—花岗岩;7—闪长岩;8—基性岩;9—超基性岩;10—断裂;11—基底断裂;12—金矿床;13—镍矿床;14—铜矿床;15—铁矿床;16—多金属矿床

Fig. 1 Geological-tectonic map of Mianxian-Lueyang-Ningqiang ore concentration area(after Li et al., 2009)

1—Quaternary sediments; 2—Paleozoic-Mesozoic; 3—Neoproterozoic Duantouya and Jiudaoguai Formation; 4—Neoproterozoic Bikou Group; 5—Neoproterozoic Yudongzi Group; 6—Granite; 7—Diorite; 8—Basic rock; 9—Ultra-basic rock; 10—Fault; 11—Basement fault; 12—Gold deposit; 13—Nickel deposit; 14—Copper deposit; 15—Iron deposit; 16—Polymetallic deposit

碳白云岩夹泥钙质板岩,底部见有白云质灰岩及屑状灰岩;中岩段( $Z_1xh^2$ )为泥钙质板岩、粉砂质板岩、绢云母千枚岩等;下岩段( $Z_1xh^1$ )为凝灰质砂岩、砾岩、含砾凝灰质粗砂。

该区经历了自新太古代以来的长期构造演化过程,区域成矿作用受火山机构控制。以徐家坝-陈家坝-七里沟构造岩相带为界,将勉略宁矿集区分为南、北2个构造-岩相带:北部构造-岩相带构造线方向为近EW向或NEE向,褶皱构造多为向北倒转的紧密线状背斜和向斜,断裂以NW-SE向为主;南部构造-岩相带,多为紧密线状连续褶皱,挤压标志明显,部分为倒转褶皱。

区域上岩浆活动十分频繁,除新元古代大规模火山喷发-次火山侵入作用外,其后的岩浆活动也较强(任小华,2008)。矿化类型与区内火山岩及岩浆岩具有成因联系。与新元古代基性火山岩及后期中酸性侵入岩有关的岩浆热液-构造改造型矿床:以铜厂铜矿床和徐家沟铜矿床为代表。与海相火山活动

有关的含铜块状硫化物矿床:以二里坝和陈家坝等矿床为代表(王瑞廷等,2004)。矿区岩浆岩主要分布于工作区东部和南部。岩性有超基性岩(已变质为蛇纹岩)、斜长花岗岩、闪长岩、闪长玢岩。

区域矿产具成带集中分布的特点,徐家坝-铜厂-七里沟铜多金属成矿带中已勘查发现十多个与古火山作用有关的大、中型铜、铅、锌、金、银等多金属矿床,由东向西依次为铜厂中型铜矿床、东沟坝大型金多金属矿床、徐家沟铜矿床、红土石含铜块状硫铁矿床、二里坝含铜块状硫铁矿床、东皇沟中型铅锌多金属矿床、徐家坝铜多金属矿床等。

## 2 矿床地质特征

陈家坝铜铅锌多金属矿床出露地层由下至上为中元古界碧口群郭家沟组第三岩段、东沟坝组中岩段、下震旦统雪花太坪组上岩段。郭家沟组第三岩段主要分布于矿区南部的超基性岩带南侧,岩性为

千枚岩、碳质板岩;中新元古界碧口岩群东沟坝岩组中岩段在矿区出露最为广泛,分布于矿区中部和北部,岩性主要有角斑岩、石英角斑岩、角斑质凝灰岩等;下震旦统雪花太坪组上岩段( $Z_1xh^3$ ):主要分部于矿区东、南部及西部的棺材山一带,岩性主要为白云岩。矿体围岩除石英角斑岩外,主要为下震旦统雪花太坪组上岩段硅化白云岩(图2)。

区内断裂构造十分发育,主要控矿构造为EW-NE向、NNW向、NE向断裂,这些断裂为成矿流体迁移、成矿物质富集提供了通道和空间(韩润生等,2000)。

根据区内地层、构造特征及矿(化)体集中分布规律,共圈出北、中、南3条矿化蚀变带。北矿化蚀变带产于石英角斑岩夹硅化白云岩中,矿化围岩为石英角斑岩,次为硅化白云岩;中矿化蚀变带产在新元古界东沟坝组中性火山岩与硅化白云岩接触部位,偏硅化白云岩一侧;南矿化蚀变带内矿化明显受走向构造控制,多集中分布在硅化白云岩中。

矿化蚀变带内共圈定铜铅锌矿体12条。矿体多呈层状、似层状产出,其形态、产状与围岩基本一致,总体走向近东西,倾向北,倾角 $55^\circ\sim65^\circ$ 。

根据组构特征,矿石分为团块状、网脉状和浸染状铜(铅锌)矿石(图3a~d)。矿石矿物主要有黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿(图3a~g),少量斑铜矿、自然金和黝铜矿;脉石矿物主要有方解石、石英,白云石、白云母、绿泥石和绢云母等(图3b,c,e)。

矿石矿物中黄铁矿有2期:早期黄铁矿晶形完好,为自形-半自形立方体结构(图3c,e);晚期黄铁矿受构造作用改造,呈半自形-他形立方体结构,多伴生有闪锌矿、黄铜矿,呈脉状及不规则团块状的集合体,沿黄铁矿边缘及裂隙中分布(图3f,h)。黄铁矿常被黄铜矿、闪锌矿交代,使黄铁矿呈不规则形态残留而呈交代残留结构(图3f,h)。闪锌矿呈他形细粒状、浸染状分布,常与方铅矿(图3a,b)、石英共生,或呈脉状交代黄铜矿(图3f),矿物普遍具碎裂现象(图3d)。

矿石结构主要是半自形-他形粒状结构、碎裂结构和充填-交代结构。矿石构造主要为网脉状和浸染状,局部为细脉状矿石,该结构构造为热液成矿作用的典型标志。含矿岩石由于受到构造作用影响较强,岩石裂隙发育,黄铜矿等硫化物沿其裂隙呈网脉

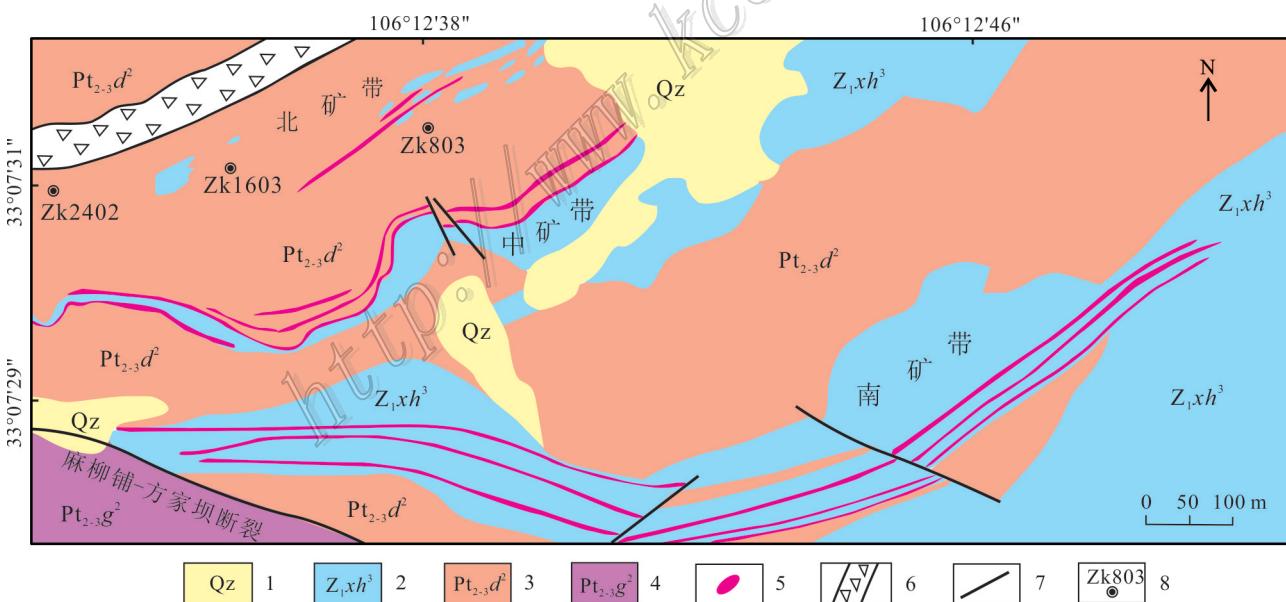


图2 陈家坝铜铅锌多金属矿床地质简图(据西北有色地质勘查局七一一总队,2016修改)

1—第四系沉积物;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—郭家沟组蛇纹岩;5—多金属矿(化)体;6—断层破碎带;7—断层;8—钻孔及其编号

Fig. 2 Geological map of Chenjiaba Cu-Pb-Zn polymetallic deposit (modified after No. 711 Geological Party, Northwest Bureau of Geological Exploration for Nonferrous Metals., 2016)

1—Quaternary sediments; 2—Xuehuataiping Formation dolomite, slate, limestone; 3—Donggouba Formation middle part braccia porphyry, quartz keratophyre, horny tuff; 4—Guojiaogou Formation serpentite; 5—Polymetalliferous orebody; 6—Fault fracture zone; 7—Fault; 8—Drill hole and its serial number

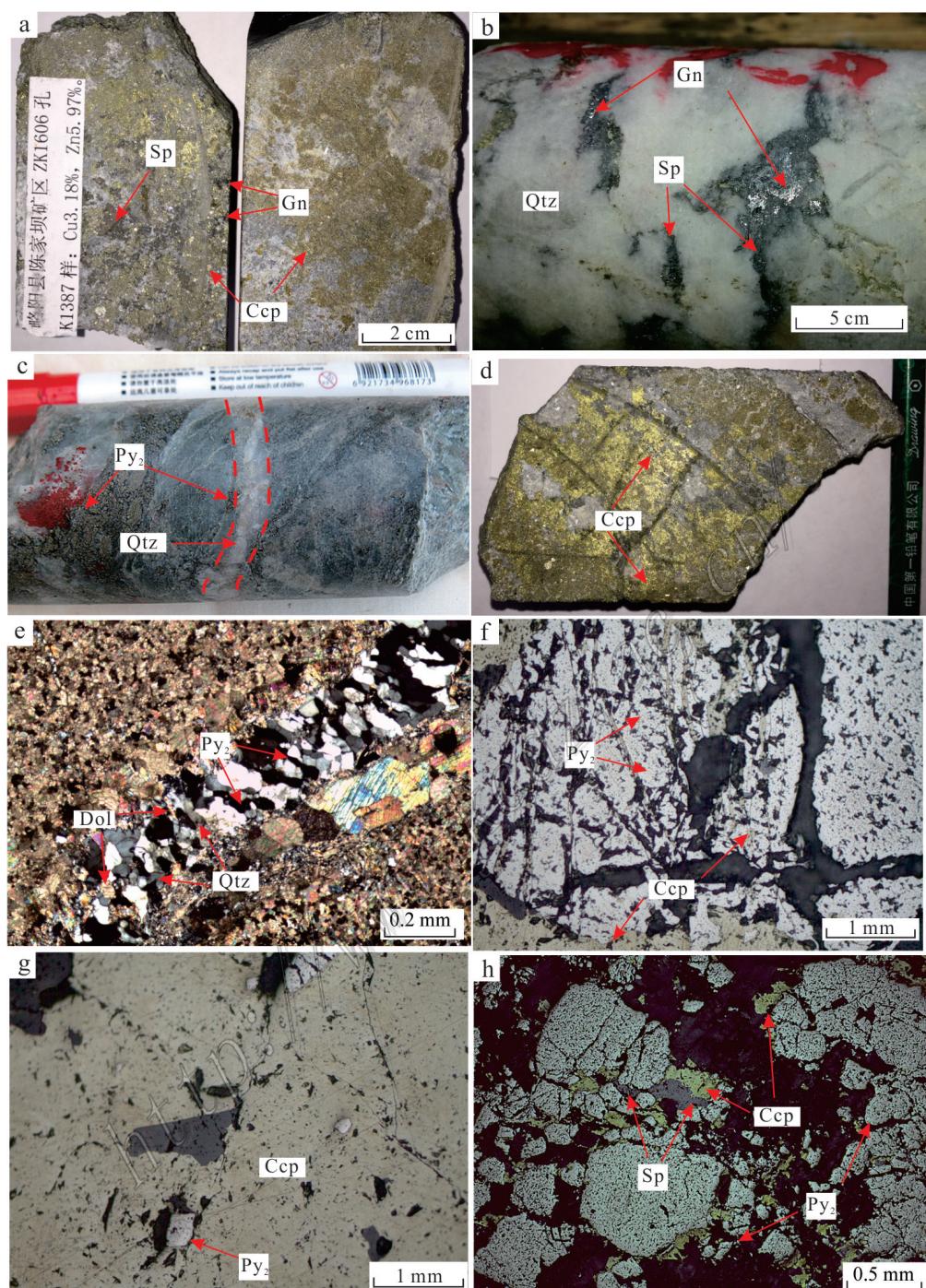


图3 陈家坝铜铅锌多金属矿床典型矿石及矿物组成特征照片

a. 硅化白云岩铜矿石;b. 石英脉铅锌矿石中黄铜矿、闪锌矿交代黄铁矿;c. 黄铁矿化石英角斑岩;d. 碎裂状矿体(方铅矿、闪锌矿);  
e. 黄铁矿-石英-白云石脉;f. 黄铜矿穿切和充填黄铁矿裂隙;g. 黄铜矿包裹晚期黄铁矿;h. 黄铁矿被黄铜矿和闪锌矿交代  
Py<sub>1</sub>—早期黄铁矿;Py<sub>2</sub>—晚期黄铁矿;Sp—闪锌矿;Ccp—黄铜矿;Gn—方铅矿;Dol—白云石;Qtz—石英

Fig. 3 Photos of typical ore and mineral compositions of the Chenjiaba Cu-Pb-Zn polymetallic deposit  
a. Silicified dolomite copper ore; b. Chalcopyrite and sphalerite metasomatic pyrite in quartz vein lead-zinc ores; c. Pyrite-bearing quartz

keratophyre; d. Fragmented ore (galena and sphalerite); e. Pyrite-quartz-dolomite vein; f. Chalcopyrite penetrating and filling  
pyrite fracture; g. Chalcopyrite encloses pyrite; h. Pyrite replaced by chalcopyrite and sphalerite

Py<sub>1</sub>—Early pyrite; Py<sub>2</sub>—Late pyrite; Sp—Sphalerite; Ccp—Chalcopyrite; Gn—Galena; Dol—Dolomite; Qtz—Quartz

状充填(图3d,f)。

矿区发育广泛的围岩热液蚀变,目前发现的围岩蚀变类型有硅化、碳酸盐化、绢云母化、绿泥石化、褐铁矿化和黄铁矿化等,与矿化密切相关的为硅化。“铁帽”常见于地表蚀变露头,主要呈褐红色,块状构造,局部具有蜂窝状构造,为直接找矿标志。

### 3 样品及分析方法

本次分析的样品均为采自钻孔岩芯(ZK1603、ZK2402、ZK803)的原生金属硫化物矿石及岩石,具体采样位置见表1。将所采集的新鲜样品进行逐级破碎、过筛,然后在双目镜下挑选粒径为40~60目、纯度大于99%的单矿物,单矿物的挑选在河北省廊坊区域地质调查研究院完成。碳、氢、氧、硫同位素测试工作由中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,Rb-Sr同位素测试分析由中国核工业北京地质研究院完成。

碳、氧同位素分析测试采用正磷酸法,在MF-ISOPRIME型质谱仪上完成。岩石样品研磨至74 μm(200目),烘干,称量400 mg,在50℃条件下烘置12 h后,送入质谱仪进行测定。碳、氧同位素测试标准为GBW04405,GBW04406和TB2GB04417。测试数据均按碳同位素国际标准(PDB标准)计算,测试精度为1‰。

氢、氧同位素测试采用仪器为MAT253同位素

质谱仪。首先,将所采集新鲜的样品进行粉碎、粗选、清洗,在双目镜下挑选粒径为40~60目的纯净石英,纯度大于99%。采用爆裂法收集包裹体中的水,为避免发生化学反应,通入N<sub>2</sub>气流保护,900℃条件下与金属锌反应转化为H<sub>2</sub>。氧同位素采用BrF<sub>5</sub>法,矿物与BrF<sub>5</sub>在500~680℃的真空条件下反应获得氧气,在700℃下将氧气与石墨反应生成二氧化碳。氢、氧同位素分析精度分别为±2%和±0.2‰。

硫同位素分析流程为:先将黄铁矿单矿物研磨至200目以下,用Cu<sub>2</sub>O做氧化剂制备样品,与硫化物单矿物混合发生反应,生成SO<sub>2</sub>并冷冻收集,使用MAT230C同位素质谱仪,采用连续流进样方式对硫化物样品进行硫同位素分析,硫同位素结果采用CDT标准,用δ<sup>34</sup>S表示,精度为±0.2‰。

黄铁矿单矿物Rb-Sr分析采用高压密闭熔样和阳离子交换技术分离和提纯,采用仪器型号为ISO-PROBE-T的热表面电离质谱仪测定,检测湿度为30%,检测温度为20℃。检测依据采用美国国家标准局标准样品NBS987: <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr=0.710 223±0.000 008,Sr的全流程空白为(5~7)×10<sup>-9</sup> g,Sr的质量分馏用<sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr=0.1194校正。<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr的误差值为0.01。

### 4 分析测试结果

#### 4.1 碳、氧同位素组成

本文的白云石单矿物采自与硫化物共生的矿石

表1 陈家坝铜铅锌多金属矿床矿石及岩石样品特征表

Table1 Characteristics of ore and rock samples in Chenjiaba Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

样号	样品性质	采样位置	样品特征
CJ-13	硅化白云岩	北矿带西部钻孔ZK1603,235 m	灰色-灰白色,细-微粒结构,块状构造,由白云石及铁白云石组成,含少量石英、方解石
CJ-14	硅化白云岩铜矿石	北矿带西部钻孔ZK1603,289.8 m	他形微细粒结构、浸染状构造,主要组成矿物为Py+Ccp+Qz
CJ-15	硅化白云岩铜矿石	北矿带西部钻孔ZK1603,259.8 m	粒状变晶结构、网脉状构造,主要组成矿物为Py+Ccp+Qz+Dol
CJ-16	硅化白云岩	北矿带西部钻孔ZK1603,280 m	灰色-灰白色,细-微粒结构,块状构造,由白云石及铁白云石组成,含少量石英、方解石
CJ-17	硅化白云岩铜矿石	北矿带西部钻孔ZK1603,310.7 m	半自形-他形粒状结构、块状构造,主要组成矿物为Py+Ccp+Qz+Dol+Gn+Sp
CJ-18	硅化白云岩	北矿带西部钻孔ZK1603,301.6 m	岩石呈灰色-灰白色,他形细粒结构,块状构造,由白云石及铁白云石组成,含少量石英、方解石
CJ-21	硅化白云岩铜(铅锌)矿石	北矿带西部钻孔ZK1603,96.9 m	粒状变晶结构、网脉状构造,主要组成矿物为Py+Ccp+Qz+Gn+Sp
CJ-22	硅化白云岩硫铁矿石	北矿带西部钻孔ZK803,210.5 m	碎裂结构、块状构造,主要组成矿物为Py+Qz+Ser+Sp
CJ-23	硅化白云岩铜矿石	北矿带东部钻孔ZK803,345.2 m	他形粒状结构、块状构造,主要组成矿物为Py+Ccp+Qz+Gn+Sp
CJ-24	硅化白云岩	北矿带西部钻孔ZK2402,509 m	灰色-灰白色,半自形-他形细粒结构,块状构造,由白云石及方解石组成,含少量石英
CJ-25	硅化白云岩	北矿带西部钻孔ZK2402,540 m	灰色-灰白色,他形细粒结构,块状构造,由白云石及方解石组成,含少量石英
CJ-44	石英角斑岩铜矿石	北矿带西部钻孔ZK2402,204 m	他形不等粒状结构、网脉状构造,主要组成矿物为Py+Ccp+Sp+Qz+Cal
CJ-45	硅化白云岩铜矿石	北矿带东部钻孔ZK803,54 m	他形不等粒状结构、块状构造,主要组成矿物为Py+Ccp+Qz+Dol+Gn+Sp
CJ-50	石英角斑岩铜矿石	北矿带东部钻孔ZK803,371.6 m	他形粒状结构、块状构造,主要组成矿物为Py+Ccp+Qz+Ser
CJ-51	石英角斑岩铜矿石	北矿带东部钻孔ZK803,120 m	他形粒状结构、块状构造,主要组成矿物为Py+Ccp+Qz+Ser

注:Py—晚期黄铁矿;Sp—闪锌矿;Ccp—黄铜矿;Gn—方铅矿;Cal—方解石;Qz—石英;Ser—绢云母;Dol—白云石。

样品中(图3e)。对陈家坝矿床中的白云石和白云岩样品进行碳氧同位素分析,结果见表2,白云石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{\textperthousand}$ 值范围 $-0.89\text{\textperthousand} \sim -0.53\text{\textperthousand}$ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{\textperthousand}$ 值范围 $12.12\text{\textperthousand} \sim 13.23\text{\textperthousand}$ ( $n=2$ )。白云岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{\textperthousand}$ 值范围 $-0.93\text{\textperthousand} \sim 1.44\text{\textperthousand}$ ,平均值为 $0.35\text{\textperthousand}$ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{\textperthousand}$ 值范围 $14.14\text{\textperthousand} \sim 27.49\text{\textperthousand}$ ,平均 $22.1\text{\textperthousand}$ ( $n=6$ )。由于矿床内未见共生石墨,所以白云石或流体包裹体热液中 $\text{CO}_2$ 的碳同位素组成可以近似作为成矿热液的总碳同位素组成。

#### 4.2 氢、氧同位素组成

陈家坝矿区8件矿石中石英的氢、氧同位素分析结果见表3, $\delta\text{D}/\text{\textperthousand}$ 值范围 $-91\text{\textperthousand} \sim -72\text{\textperthousand}$ ,平均为 $-78.6\text{\textperthousand}$ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{\textperthousand}$ 值范围 $14.2\text{\textperthousand} \sim 16.0\text{\textperthousand}$ ,平均 $14.95\text{\textperthousand}$ ( $n=8$ )。流体包裹体均一温度为成矿温度的下限,故可近似取流体包裹体最高均一温度作为成矿温度(王祥东等,2014)。根据石英与水的氧同位素分馏方程: $1000\ln a_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.40$ (Clayton et al., 1972),计算获得成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{\textperthousand}$ 值范围 $6.7\text{\textperthousand} \sim 9.4\text{\textperthousand}$ 。

#### 4.3 硫同位素组成

矿床中的12件金属硫化物硫同位素分析结果

表2 陈家坝铜铅锌多金属矿床白云岩及白云石  
碳、氧同位素组成

Table 2 C-O isotopic composition of the dolomite  
in Chenjiaba Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

样品号	测试对象	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{\textperthousand}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{\textperthousand}$
CJ-15	白云石	-0.53	12.12
CJ-17	白云石	-0.89	13.23
CJ-18	白云岩	0.84	20.98
CJ-13	白云岩	-0.56	19.37
CJ-25	白云岩	1.27	26.56
CJ-16	白云岩	-0.93	14.14
CJ-33	白云岩	0.03	23.96
CJ-24	白云岩	1.44	27.49

表3 陈家坝铜铅锌多金属矿床石英氢、氧同位素组成

Table 3 H-O isotopic compositions of quartz in  
Chenjiaba Cu-Pb-Zn Polymetallic deposit

样品号	矿物	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/\text{\textperthousand}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{\textperthousand}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{\textperthousand}$	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$
CJ-14	石英	-78	15.1	6.8	264
CJ-15	石英	-82	14.4	7.9	312
CJ-21	石英	-74	14.8	7.0	275
CJ-22	石英	-76	15.0	9.4	340
CJ-23	石英	-91	15.3	8.3	296
CJ-44	石英	-76	16.0	8.4	281
CJ-45	石英	-72	14.8	7.0	276
CJ-50	石英	-80	14.2	6.7	283

见表4, $\delta^{34}\text{S}/\text{\textperthousand}$ 值范围 $4.88\text{\textperthousand} \sim 8.90\text{\textperthousand}$ ,平均值为 $7.37\text{\textperthousand}$ ,极差为 $4.02\text{\textperthousand}$ ,变化范围相对较窄(图4)。黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}/\text{\textperthousand}$ 值范围 $7.82\text{\textperthousand} \sim 8.9\text{\textperthousand}$ ,平均值为 $8.40\text{\textperthousand}$ ( $n=6$ ),其中,早期黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}/\text{\textperthousand}$ 值范围 $7.82\text{\textperthousand} \sim 8.9\text{\textperthousand}$ ,平均值为 $8.37\text{\textperthousand}$ ( $n=5$ ),晚期黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}/\text{\textperthousand}$ 值 $8.55\text{\textperthousand}$ ;黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}/\text{\textperthousand}$ 值介于 $4.88\text{\textperthousand} \sim 7.35\text{\textperthousand}$ ,平均值为 $6.23\text{\textperthousand}$ ( $n=5$ );闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}/\text{\textperthousand}$ 值为 $6.92\text{\textperthousand}$ ( $n=1$ )。

#### 4.4 锶同位素组成

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值是判断成矿物质来源的一个良好标志,在矿床地质研究中,已被广泛地用于追踪流体来源、岩浆水及深源流体的壳幔混染作用(侯明兰等,2006)。通常在利用锶同位素资料解决地质问题时,需要根据矿物中的Rb含量或 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值对矿物锶同位素测定值进行初始化校正,但如果矿物中的 $w(\text{Rb})$ 较低,均小于 $4 \times 10^{-6}$ 时,对于矿物的锶同位素资料应用可免去这一校正过程(刘淑文等,2012)。本区黄铁矿样品的 $w(\text{Rb})$ 平均值为 $0.1966 \times 10^{-6}$ ,含量极低,没有校正的黄铁矿样品锶同位素测定结果,基本上代表了矿物形成时进入黄铁矿的初始值。

黄铁矿Rb、Sr测试结果如表5所示,陈家坝矿床

表4 陈家坝铜铅锌多金属矿床白云岩及白云石  
碳、氧同位素组成

Table 4 S isotopic composition of sulfides from the  
Chenjiaba Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

样品编号	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{\textperthousand}$	样品编号	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{\textperthousand}$
CJ-14	晚期黄铁矿	8.29	CJ-21	晚期黄铁矿	8.90
	黄铜矿	6.65		黄铜矿	5.23
CJ-15	晚期黄铁矿	7.82	CJ-22	早期黄铁矿	8.55
	黄铜矿	4.88		晚期黄铁矿	8.69
CJ-17	晚期黄铁矿	8.13	CJ-23	晚期黄铁矿	7.35
	黄铜矿	7.05		黄铜矿	7.35

表5 陈家坝铜铅锌多金属矿床矿石黄铁矿Rb、Sr同位素特征表

Table 5 The characteristics of Rb and Sr isotopes of  
pyrite in ore from the Chenjiaba deposit

样号	测定矿物	$w(\text{Rb})/(\mu\text{g/g})$	$w(\text{Sr})/(\mu\text{g/g})$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$
CJ-17	晚期黄铁矿	0.249	0.890	0.8090	0.725579 $\pm 26$
CJ-21	晚期黄铁矿	0.056	2.14	0.0752	0.720080 $\pm 11$
CJ-22	早期黄铁矿	0.504	2.36	0.6187	0.729981 $\pm 11$
CJ-23	晚期黄铁矿	0.164	0.651	0.7304	0.723159 $\pm 13$
CJ-36	早期黄铁矿	0.062	2.61	0.0691	0.722752 $\pm 8$
CJ-39	早期黄铁矿	0.117	2.24	0.1513	0.715204 $\pm 16$
CJ-41	晚期黄铁矿	0.414	48.2	0.0248	0.717026 $\pm 16$
CJ-45	早期黄铁矿	0.151	2.69	0.1624	0.720334 $\pm 17$
CJ-48	早期黄铁矿	0.067	2.16	0.0904	0.721347 $\pm 16$
CJ-51	晚期黄铁矿	0.182	1.60	0.3289	0.720745 $\pm 16$

中黄铁矿  $w(\text{Rb})$  为  $(0.056\sim0.504)\times10^{-6}$ , 黄铁矿总体上不含 Rb,  $w(\text{Sr})$  为  $(0.651\sim48.2)\times10^{-6}$ , 平均为  $6.55\times10^{-6}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  为 0.72 ( $n=10$ ), 其中, 早期黄铁矿  $w(\text{Rb})$  平均值为  $0.1802\times10^{-6}$ ,  $w(\text{Sr})$  平均值为  $2.41\times10^{-6}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  为 0.72 ( $n=5$ ), 晚期黄铁矿  $w(\text{Rb})$  平均值为  $0.213\times10^{-6}$ ,  $w(\text{Sr})$  平均值为  $10.696\times10^{-6}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  为 0.72 ( $n=5$ )。

## 5 讨 论

陈家坝矿床石英样品的氢、氧同位素分析结果(表3)表明, 成矿流体的  $\delta D$  值范围  $-91\text{\textperthousand}\sim-72\text{\textperthousand}$ , 整体在岩浆水范围内( $-80\text{\textperthousand}\sim-40\text{\textperthousand}$ ),  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值范围  $6.7\text{\textperthousand}\sim9.4\text{\textperthousand}$ , 与岩浆水( $7\text{\textperthousand}\sim10\text{\textperthousand}$ )范围(Hedenquist et al., 1994)接近。在  $\delta D-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  图解中(图5), 氢、氧同位素投影点主要落于原生岩浆水范围内。据前人研究, 铜厂矿田在空间上与火山机构有密切关系, 与岩浆作用有关的铜矿床较为发育, 如铜厂铜矿床、徐家沟铜矿床。叶霖等(1997)首次报道了铜厂铜矿床流体包裹体地球化学特征, 认为该矿床初始热液为岩浆水, 含矿流体是由岩浆热液与大气降水混合而成。周圣华(2008)认为铜厂铜矿床成矿流体来源于岩浆水、变质水及改造水。代军治等(2016)对徐家沟铜矿床进行了全岩微量元素、同位素及流体包裹体分析, 认为该矿床成矿流体为混合的岩浆水、变质水或建造水, 以岩浆水

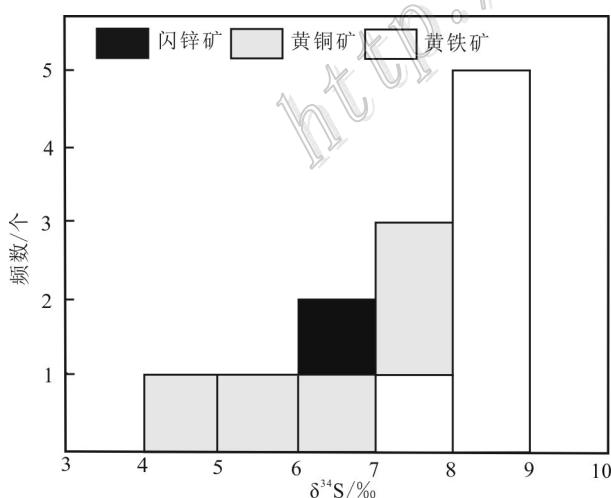


图4 陈家坝铜矿床硫化物硫同位素直方分布图

Fig. 4 Sulfide zonal texture histogram of Chenjiaba copper deposit

为主。从而岩浆流体在该区域矿床成矿过程中起重要作用, 进一步表明陈家坝矿床的成矿流体主要来自岩浆水。

陈家坝矿床白云岩及白云石样品在  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  图解(图6)中显示, 白云石样品点介于岩浆岩与海相碳酸盐岩之间, 靠近岩浆岩区域, 表明成矿流体中的碳主要来自岩浆水, 具有向海相碳酸盐岩逐渐演化的趋势。白云岩的样品点主要落在海相碳酸盐岩区域, 表明该矿床围岩(白云岩)为沉积成因碳酸盐岩, 与其地质特征吻合。

在  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  图解(图6)中显示碳、氧同位素呈近水平分布, Zheng (1993)认为是  $\text{CO}_2$  去气作用或者流体-围岩相互作用所致。热液流体一般以水为主,  $\text{CO}_2$  去气作用对流体氧同位素组成影响较小, 对碳同位素影响显著(郑永飞, 2001; 王志良等, 2004), 但研究区碳同位素组成变化范围较小, 因此, 本区碳、氧同位素呈近水平分布, 是由流体-围岩相互作用所致。白云岩  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  平均值为  $22.1\text{\textperthousand}$ , 小于现代海沉积的碳酸盐的值( $\delta^{18}\text{O}=25.05\text{\textperthousand}$ )(王英华等, 1983), 显示成矿流体中具有“ $\delta^{18}\text{O}$ 漂移”特征, 可能是成矿流体在向上迁移的过程中与白云岩发生水-岩交换作用, 导致  $\delta^{18}\text{O}$  漂移(张理刚, 1985; Han et al., 2014), 因而, 陈家坝铜铅锌多金属矿床成矿流体中的碳源主要来自岩浆水, 后期成矿流体在向上迁移的过程中与白云岩发生水-岩交换作用是导致矿床中白云石和矿石矿物黄

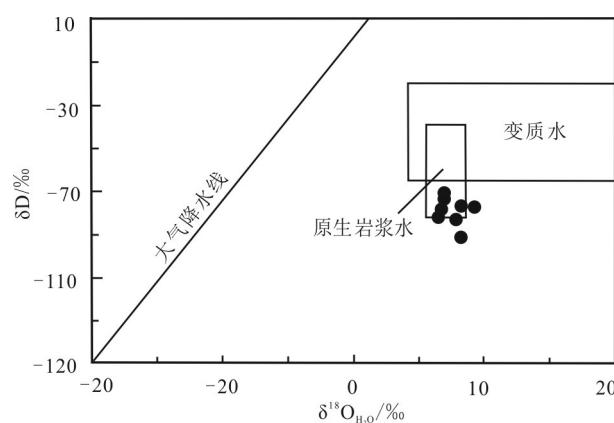


图5 陈家坝铜铅锌多金属矿床成矿流体氢、氧同位素组成图解(底图据 Taylor, 1978)

Fig. 5 Hydrogen and oxygen isotope diagrams of ore-forming fluids in the Chenjiaba Cu-Pb-Zn polymetallic deposit  
(base map after Taylor, 1978)

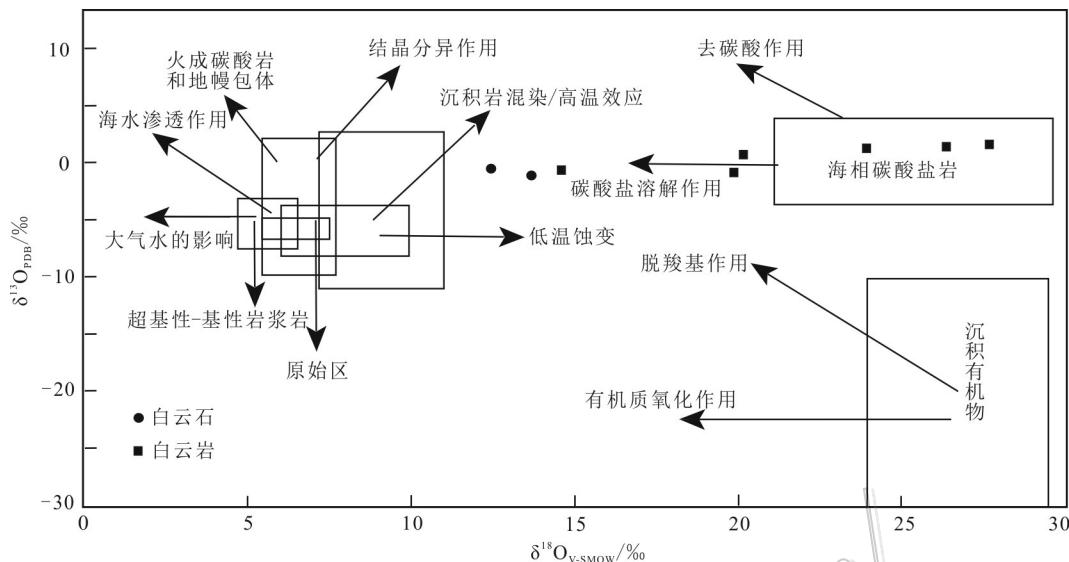


图6 矿石中白云石以及白云岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ - $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 图解(底图据刘建明等,1997;毛景文等,2002修改)

Fig.6  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  versus  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  diagram of dolomite and dolomite in ore from the Chenjiaba deposit  
(base map modified after Liu et al., 1997; Mao et al., 2002)

铜矿、闪锌矿和方铅矿沉淀的主要机制。

Ohmoto等(1979)认为,在矿物组合简单的情况下,矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值可代表成矿热液的总硫值( $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma}$ )。研究区矿石矿物以黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿为主,矿物组合较简单,故矿区硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值可代表成矿热液的硫同位素组成。研究区 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围4.88‰~8.90‰,平均值为7.37‰,介于岩浆硫 $\delta^{34}\text{S}=0\pm3\text{‰}$ 与海水硫 $\delta^{34}\text{S}=15\text{‰}$ 之间(Holser et al., 1996; 杨宗让, 2012),显示矿床硫源具有岩浆硫与海水硫混合的特点。与矿集区内典型的徐家沟铜矿床矿石矿物 $\delta^{34}\text{S}$ ( $\delta^{34}\text{S}=3.9\text{‰}\sim6.2\text{‰}$ ,平均值为4.8‰)变化区间重叠(李福让等,2009),暗示了它们硫源来源的相似性,硫源可能以岩浆硫为主。另外,陈家坝地区的成矿作用与火山作用强烈发育的背景一致,火山岩浆流体提供大量成矿金属元素,且碳、氢、氧同位素组成已经表明该矿床发生的成矿作用与岩浆活动密切相关,因此,推测矿床硫源主要来自岩浆硫,部分硫来自海水硫酸盐。

黄铁矿的初始锶同位素比值 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.72)高于幔源的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.7045),接近于大陆地壳的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.719),显示成矿流体有壳源物质加入。另外,白云岩是富放射性锶的重要储集层(丁振举等,1999),如震旦系川东南地区白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

值为0.72017(潘中华等,1996),但赋矿围岩震旦系白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值低于成矿流体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(张自超,1995; 刘淑文等,2012),因此,成矿流体在迁移的过程中与赋矿白云岩发生同位素交换也许导致沉淀出来的硫化物矿石具有较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值。该现象也存在于矿集区内铜厂铜矿床(丁振举等,1999)和云南会泽铅锌矿田中(李文博等,2006),均验证了成矿流体中高的放射性锶同位素是与赋矿白云岩进行同位素交换所致。

综上所述,同位素地球化学研究表明,该矿床成矿流体主要来自岩浆水,水岩反应强烈,与近矿围岩蚀变十分发育的特征一致。

## 6 结 论

陈家坝铜铅锌多金属矿床成矿流体主要来自岩浆水,少量来自于海水,成矿流体在向上迁移的过程中与白云岩发生水-岩交换作用;不同矿物中锶的来源主要为与岩浆作用有关的壳源锶,锶同位素组成是岩浆水与海水混合形成的热液与赋矿围岩进行同位素交换的结果;不同矿物中的碳和硫具有相同的来源,主要来源于岩浆水,部分硫来自海水硫酸盐,且与区域内徐家沟铜矿床的硫具有同源性,围岩为海相沉积成因碳酸盐岩。

## References

- Chen G T. 1997. Discussion on the Chenjiaba paleovolcanic mechanism in Lueyang, Shaanxi, China[J]. Journal of Shaanxi University of Technology: Natural Science Edition, (4): 14-19(in Chinese with English abstract).
- Clayton R N, Rex R W, Syers J K and Jackson M L. 1972. Oxygen isotope abundance in quartz from Pacific pelagic sediments[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 77(21): 3907-3915.
- Dai J Z, Chen L X, Wang R T, Zheng C Y, Li F Y and Li Y Q. 2016. Geological and geochemical characteristics and metallogenic model of Xujiagou copper deposit in Yaoyang County, Shaanxi Province[J]. Northwest Geology, 49(4): 99-109(in Chinese with English abstract).
- Ding K, Wang R T, Qian Z Z, Luan Y, Zhang T Y, Zheng C Y and Feng Y Q. 2017. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Chenjiaba Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Shaanxi Province[J]. Geology and Prospecting, 53(3): 436-444(in Chinese with English abstract).
- Ding K. 2017. Geological characteristics and genesis of the Chenjiaba copper-lead-zinc polymetallic deposit in Mianlveyang area, Shaanxi Province (Master's dissertation)[D]. Supervisor: Qian Z Z and Wang R T. Xi'an: Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- Ding K, Wang R T, Qian Z Z, Luan Y, Zhang T Y, Feng Y Q and Li Y Q. 2018a. Geochemical characteristics of trace elements and sulfur isotopes of sulfides from the Chenjiaba Cu-Pb-Zn polymetallic deposit, Lveyang County, Shaanxi Province[J]. Mineral and Petrochemical Bulletin, 37(2): 326-333(in Chinese with English abstract).
- Ding K, Liang T, Wang R T, Luan Y, Zhang T Y, Yang X Q and Li Y Q. 2018b. Geochemical characteristics of rare earth elements in the Chenjiaba copper-lead-zinc polymetallic deposit in Mianluoyang area, southern Shaanxi[J]. Geology of Northwest China, 51 (3): 93-104(in Chinese with English abstract).
- Ding Z J and Yao S Z. 1999. Characteristics of Sr and Pb isotopes in Tongchang copper deposit, Shaanxi Province, and their significance[J]. Mineralogy and Rock, 19(4): 78-81(in Chinese with English abstract).
- Han J S, Yao J M, Chen H Y and Deng X H. 2014. Fluid inclusion and stable isotope study of the Shagou Ag-Pb-Zn deposit, Luoning, Henan Province, China: Implications for the genesis of an orogenic lode Ag-Pb-Zn system[J]. Ore Geology Reviews, 62: 199-210(in Chinese with English abstract).
- Han R S and Liu C Q. 2000. Geochemical characteristics and location prediction of fault structures in Chenjiaba area, Tongchang ore-field[J]. Geology and Prospecting, 36(5): 66-69(in Chinese with English abstract).
- Hedenquist J W and Lowenstern J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. Nature, 370(6490): 519-527.
- Holser W T, Magaritz M and Ripperdan R L. 1996. Global isotopic events[A]. In: Walther O H, ed. Global events and event stratigraphy in the Phanerozoic[C]. Beilin: Springer-Verlag. 63-88.
- Hou M L, Jiang S Y, Jiang Y H and Ling H F. 2006. S-Pb isotopic geochemistry and Rb-Sr isotopic geochronology of the Penglai gold metallogenic belt in eastern Shandong Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(10): 2525-2533(in Chinese with English abstract).
- Li F R, Wang R T, Gao X H and Chen L X. 2009. Geological characteristics and ore-controlling factors of the Xujiagou copper deposit in Yaoyang County, Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Geology, 83(11): 1752-1761(in Chinese with English abstract).
- Li H Z, Zhou Y Z, Yang Z J, He J G, Ma Z W, Lü W C, Zhou G F, An Y F, Li W, Liang J and Wang C. 2010. Microregional compositional characteristics and evolution of siliceous rocks in the Bafangshan-Erlie lead-zinc mining area of the Western Qinling Mountains[J]. Geoscience Frontiers, 17(4): 290-298(in Chinese with English abstract).
- Li W B, Huang Z L and Zhang G. 2006. Sources of ore-forming materials in the Huize Pb-Zn ore field in Yunnan Province: Pb, S, C, H, O, Sr isotopic constraints[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(10): 2568-2580(in Chinese with English abstract).
- Liu J M and Liu J J .1997. Basinal fluid genetic model of fine disseminated gold deposits in the golden triangle area between Yunnan, Guizhou and Guangxi[J] . Acta Mineralogica Sinica, 17(4): 448-456(in Chinese with English abstract)
- Liu S W, Liu L F, Gao Y B, Ge X H, Zheng X Z, Zhang H D and Wang L. 2012. Sources of metallogenic materials for Mayuan Pb-Zn deposit on northern margin of Yangtze Plate: Evidence from C, O, H, S, Pb and Sr isotope geochemistry[J]. Mineral Deposits, 31(3): 545-554(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, He Y and Ding T P . 2002. Mantle fluids involved in metallogenesis of Jiaodong (east Shandong) gold district: Evidence of C, O and H isotopes[J]. Mineral Deposits, 21(2): 121-127(in Chinese with English abstract).
- No. 711 Geological Team, Northwest Bureau of Geological Exploration for Nonferrous Metals. 2016. 2016 work summary report of Chenjiaba general survey project in Lueyang County, Shaanxi Province[R].1-90(in Chinese).
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon[A]. In: Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits[C]. 2<sup>nd</sup> Edition. New York: J. Wiley and Sons, Inc. 798.
- Pan Z H and Fan D L. 1996. Isotope geochemistry of vein fluorite and barite deposits in Southeast Sichuan[J]. Acta Petrologica Sinica, 12(1): 127-136(in Chinese with English abstract).
- Ren X H. 2008. Metallogenesis and prospecting target prediction of metal deposits in Mianluoning Area, Shaanxi Province(Doctoral dissertation)[D]. Supervisor: Qian Z Z. Xi'an: Chang'an University (in Chinese with English abstract).

- Taylor H P. 1978. Oxygen and hydrogen isotope studies of plutonic granitic rocks[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 38(1): 177-210.
- Wang R T, Wang J Y, Li F R and Ouyang Z Y. 2004. Geological and geochemical characteristics of Tongchang-Xujiaba copper belt in Mian-Lue-Ning polymetallic ore concentration area[A]. *Papers of the 2nd National Symposium on Metallogenic Theory and Prospecting Method*(in Chinese).
- Wang R T. 2012. Research on comprehensive exploration technology of lead-zinc-silver-copper-gold deposits in the main ore-gathering areas in Shaanxi section of the Qinling orogenic belt[M]. Beijing: Geological Publishing House. 22-129(in Chinese with English abstract).
- Wang X D, Li X B, Mei W, Tang R K and LI C C. 2014. Characteristics and evolution of ore-forming fluids in Bairendaba Ag-Pb-Zn polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 33(2): 406-418(in Chinese with English abstract).
- Wang Y H, Liu B L, Chen C Y and Zhang X L. 1983. Oxygen and carbon isotope composition and carbonate diagenesis[J]. *Geological Review*, 29(3): 278-284(in Chinese).
- Wang Z L, Mao J W, Wu G G, Yang J M, Han C M, Ma T L and Zhang Z H. 2004. Hydrocarbon oxygen isotope evidence of mantle fluids participating in mineralization in the late mineralization of the Kanggur gold deposit, East Tianshan Mountains[J]. *Geological Journal*, 78(2): 195-202(in Chinese with English abstract).
- Wang Z Q, Yan Z, Wang T, Gao L D, Yan Q R, Chen J L, Li Q G, Ji-ang C F, Liu P, Zhang Y L, Xie C L and Xiang Z J. 2009. New progress in the study of the major difficult strata in the Qinling Orogenic Belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(5): 561-570(in Chinese with English abstract).
- Yan Z, Wang Z Q, Wang T, Yan Q R, Xiao W J, Li J L, Han F L and Chen J L. 2007. The formation of the tectonic setting of the Devonian in the Qinling orogenic belt: Constraints on the composition and geochemistry of clastic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (5): 1023-1042(in Chinese with English abstract).
- Yang Z R. 2012. Qinling Mountains orogenic belt large-scale metallogenetic system research (Doctoral dissertation)[D]. Supervisor: Liu J C. Xi'an: Chang'an University. 1-129(in Chinese with English abstract).
- Ye L and Liu T G. 1997. Geochemical characteristics of the inclusions of Tongchang copper deposit in the Yongningli area, southern Shaanxi Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 17(2): 194-199(in Chinese with English abstract).
- Zhang L G. 1985. The application of stable isotopes in geological sciences: The metallogenic hydrothermal mineralization and prospecting[M]. Shaanxi Science and Technology Press. 1-246(in Chinese ).
- Zhang Z C. 1995.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  data for some Middle-Late Proterozoic to Early Cambrian carbonate rocks in China[J]. *Geological Review*, 41(4): 349-354(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F and Hoefs J. 1993. Carbon and oxygen isotopic covariations in hydrothermal calcites[J]. *Mineralium Deposita*, 28: 79-89.
- Zheng Y F. 2001. Theoretical modeling of stable isotope systems and its applications to geochemistry of hydrothermal ore deposits[J]. *Mineral Deposits*, 20(1): 57-70(in Chinese with English abstract).
- Zhou S H. 2008. Geological characteristics and ore-forming fluid geochemistry of Tongchang copper-gold polymetallic deposit in Shaanxi Province[J]. *Chinese Geology*, 35(2): 298-304(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈广庭. 1997. 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*, (4): 14-19.
- 代军治, 陈荔湘, 王瑞廷, 郑崔勇, 李福让, 李永勤. 2016. 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*, 49(4): 99-109.
- 丁坤. 2017. 陕西省勉略宁地区陈家坝铜铅锌多金属矿床地质特征及矿床成因探讨(硕士论文)[D]. 导师:钱壮志,王瑞廷. 西安: 长安大学. 1-66.
- 丁坤, 王瑞廷, 钱壮志, 栾燕, 张天运, 郑崔勇, 冯延清. 2017a. 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*, 53(3): 436-444.
- 丁坤, 王瑞廷, 钱壮志, 栾燕, 张天运, 冯延清, 李永勤. 2018a. 陕西略阳陈家坝铜铅锌多金属矿床硫化物微量元素和硫同位素地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 37(2): 326-333.
- 丁坤, 梁婷, 王瑞廷, 栾燕, 张天运, 杨秀清, 李永勤. 2018b. 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[J]. *西北地质*, 51(3): 93-104.
- 丁振举, 姚书振. 1999. 陕西略阳铜厂铜矿床 Sr, Pb 同位素组成特征及其意义[J]. *矿物岩石*, 19(4): 78-81.
- 韩润生, 刘丛强. 2000. 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*, 36(5): 66-69.
- 侯明兰, 蒋少涌, 姜耀辉, 凌洪飞. 2006. 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*, 22 (10): 2525-2533.
- 李福让, 王瑞廷, 高晓宏, 陈荔湘. 2009. 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*, 83(11): 1752-1761.
- 李红中, 周永章, 杨志军, 何俊国, 马占武, 吕文超, 周国富, 安燕飞, 李文, 梁锦, 王驰. 2010. 西秦岭八方山一二里河 Pb-Zn 矿区硅质岩的微区成分特征及演化[J]. *地学前缘*, 17(4): 290-298.
- 李文博, 黄智龙, 张冠. 2006. 云南会泽铅锌矿田成矿物质来源: Pb, S, C, H, O, Sr 同位素制约[J]. *岩石学报*, 22(10): 2568-2580.
- 刘建明, 刘家军. 1997. 滇黔桂金三角区微细浸染型金矿床的盆地流体成因模式[J]. *矿物学报*, 17(4): 448-456.
- 刘淑文, 刘玲芳, 高永宝, 戈晓红, 郑绪忠, 张海东, 王亮. 2012. 扬子陆块北缘马元铅锌矿床成矿物质来源探讨: 来自 C, O, H, S, Pb, Sr 同位素地球化学的证据[J]. *矿床地质*, 31(3): 545-554.
- 毛景文, 赫英, 丁悌平. 2002. 胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧氢同位素证据[J]. *矿床地质*, 21(2): 121-127.

- 潘中华, 范德廉. 1996. 川东南脉状萤石-重晶石矿床同位素地球化学[J]. 岩石学报, 12(1): 127-136.
- 任小华. 2008. 陕西勉宁地区金属矿床成矿作用与找矿靶区预测研究(博士论文)[D]. 导师: 钱壮志. 西安: 长安大学. 1-150.
- 王瑞廷, 旺军谊, 李福让, 欧阳自远. 2004. 勉-略-宁多金属矿集区铜厂-徐家坝铜矿带地质地球化学特征[A]. 第二届全国成矿理论与找矿方法学术研讨会论文集[C].
- 王瑞廷. 2012. 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. 22-129.
- 王祥东, 吕新彪, 梅微, 唐然坤, 李春诚. 2014. 内蒙古拜仁达坝银铅锌多金属矿床成矿流体特征及其演化[J]. 矿床地质, 33(2): 406-418.
- 王英华, 刘本立, 陈承业, 张秀莲. 1983. 氧, 碳同位素组成与碳酸盐岩成岩作用[J]. 地质论评, 29(3): 278-284.
- 王志良, 毛景文, 吴淦国, 杨建民, 韩春明, 马天林, 张作衡. 2004. 东天山康古尔金矿成矿晚阶段地幔流体参与成矿作用的碳氢氧同位素证据[J]. 地质学报, 78(2): 195-202.
- 王宗起, 闫臻, 王涛, 高联达, 闫全人, 陈隽璐, 李秋根, 姜春发, 刘平, 张英利, 谢春林, 向忠金. 2009. 秦岭造山带主要疑难地层时代研究的新进展[J]. 地球学报, 30(5): 561-570.
- 闫臻, 王宗起, 王涛, 闫全人, 肖文交, 李继亮, 韩芳林, 陈隽璐. 2007. 秦岭造山带泥盆系形成构造环境: 来自碎屑岩组成和地球化学方面的约束[J]. 岩石学报, 23(5): 1023-1042.
- 西北有色地质勘查局七一一总队. 2016. 陕西省略阳县陈家坝普查项目2016年工作总结报告[R]. 1-90.
- 杨宗让. 2012. 秦岭造山带大型矿集区成矿系统研究(博士论文)[D]. 导师: 刘建朝. 西安: 长安大学. 1-129.
- 叶霖, 刘铁庚. 1997. 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, 17(2): 194-199.
- 张理刚. 1985. 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]. 陕西科学技术出版社. 1-246.
- 张自超. 1995. 我国某些元古宙及早寒武世碳酸盐岩石的锶同位素组成[J]. 地质论评, 41(4): 349-354.
- 郑永飞. 2001. 稳定同位素体系理论模式及其矿床地球化学应用[J]. 矿床地质, 20(1): 57-70.
- 周圣华. 2008. 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, 35(2): 298-304.