

东升庙多金属硫化物矿床主要含矿岩系地质地球化学特征及对矿床成因的指示意义

高兆富^{1,2}, 朱祥坤¹, 罗照华², 孙 剑¹, 张飞飞¹, 高文革³, 王炳林³, 钟畅怀³

(1. 中国地质科学院 地质研究所 国土资源部同位素地质重点实验室, 大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037; 2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 内蒙古东升庙矿业有限责任公司, 内蒙古 巴彦淖尔 015543)

摘 要: 东升庙矿床是内蒙古狼山-渣尔泰山成矿带上最大的锌多金属矿床, 主要含矿岩系是狼山群第2岩组。通过对矿区地质现象的野外观察和钻孔样品地球化学特征的研究, 结合国际上同类矿床最新研究进展, 对东升庙矿床主矿体的成矿过程提出了新观点。岩、矿石样品的岩相学研究结果显示, 不同岩段的岩、矿石有不同的组构特征: 第4岩性段中部菱铁矿矿石为典型的细粒镶嵌结构和块状构造, 具明显的化学沉积特征; 第4岩性段底部②号矿体中的闪锌矿矿石具半自形-它形晶粒结构或溶蚀结构, 多为角砾状构造或块状构造, 有明显的充填-交代现象; 第3岩性段以绢云石墨片岩为主的黑色岩系网脉状矿化普遍, 常见后期热液充填现象。岩、矿石样品的地球化学研究结果显示, 菱铁矿矿石和闪锌矿矿石有相似的微量元素富集特征和稀土元素配分曲线, 可能具有同一物质来源。而第3岩性段的绢云石墨片岩有不同的微量元素富集特征和稀土元素配分曲线, 可能是多期热液活动作用的结果。值得一提的是, 在②号主矿体硫化物矿石中不但发现有来自于矿体下部的有一定磨圆度的绢云石墨片岩碎屑角砾, 还有一些来自上部围岩的含炭质白云大理岩角砾。此类碎屑角砾可能是交代残余或者交代过程中垮塌的产物, 无法用同时沉积解释。综合分析认为第3岩性段的网脉状矿化是后期热液充填的结果, 而第4岩性段底部的②号矿体是含矿热液选择性交代碳酸盐地层而成矿, 菱铁矿矿体是富铁热液运移到海底后沉积生成。相对于传统的喷流沉积成矿方式, 本文认为交代作用对东升庙主矿体的形成起到了关键作用。

关键词: 狼山成矿带; 东升庙多金属矿床; 地质和地球化学特征; 选择性交代

中图分类号: P618.43; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)05-0825-16

Geological and geochemical characteristics of the main ore-bearing rock series in the Dongshengmiao superlarge polymetallic sulfide deposit and their implications for ore genesis

GAO Zhao-fu^{1,2}, ZHU Xiang-kun¹, LUO Zhao-hua², SUN Jian¹, ZHANG Fei-fei¹, GAO Wen-ge³,
WANG Bing-lin³ and ZHONG Chang-huai³

(1. Laboratory of Isotope Geology, MLR, State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Inner Mongolia Dongshengmiao Mining Co., Ltd., Bayannur 015543, China)

Abstract: The Dongshengmiao deposit is a superlarge lead zinc polymetallic deposit occurring in the Langshan-Zhaertaishan metallogenic belt of Inner Mongolia, and the main ore-bearing rock is the second Formation of

收稿日期: 2013-03-24; 修订日期: 2014-06-04

基金项目: 国土资源部地质调查项目(12120113015700)

作者简介: 高兆富(1989-), 男, 硕士研究生, 矿床学专业, E-mail: gaozhaofu@163.com; 通讯作者: 朱祥坤(1961-), 男, 研究员, 长期从事同位素地球化学研究, E-mail: xiangkun@cags.ac.cn

Langshan Group. In this paper, the authors combined the study of multiple suites of core samples which cover the main ore-bearing rock series with the recent study of hydrothermal deposits abroad, and arrived at some new understanding of the major orebody of the Dongshengmiao deposit. The rock and ore in different lithologic members have different fabric characteristics: in the middle of the fourth lithologic member, siderite ores show fine mosaic texture and massive structure, with obvious characteristics of chemical sedimentation; at the bottom of the fourth lithologic member, sphalerite ores of the No. 2 orebody exhibit hypautomorphic-allotriomorphic crystalline granular texture or dissolution texture, and mostly show massive, banding or brecciated structure, with obvious filling-metasomatic phenomenon; stockwork mineralization is generally existent in the third lithologic member which is sericite-grapholite based, with very common later hydrothermal filling phenomenon. In addition, geochemical study of the rock and ore indicates that siderite ore shares similar trace element enrichment and REE distribution pattern to sphalerite ore, so they may have had the same provenance. However, sericite-grapholite in the third lithologic member has different trace element enrichment features and REE distribution curves, probably resulting from multi-stage hydrothermal activity. It is worth mentioning that we can find dolomite-marble fragment breccia which belongs to upside wall rock and they are different from sericite-grapholite fragment breccia. The dolomite-marble fragment breccias resulted probably from replacement. Comprehensive analysis shows that stockwork mineralization in the third lithologic member was caused by later hydrothermal filling, while the No. 2 orebody at the bottom of the fourth lithologic member might have resulted from ore-bearing hydrothermal selective replacement of carbonate strata, and siderite orebody's mineralization might be attributed to the migration of the iron-rich hydrothermal solution to the bottom of ocean and the subsequent precipitation. Ore-bearing hydrothermal replacement played a key role in the ore-forming progress of the major orebody in the Dongshengmiao deposit. The result achieved by the authors has deepened the understanding of the SEDEX deposit.

Key words: Langshan metallogenic belt; Dongshengmiao polymetallic deposit; geological and geochemical characteristics; selective replacement

内蒙古狼山-渣尔泰山造山带的元古宙地层中赋存有东升庙、炭窑口、甲生盘等大型的铅锌矿床,形成了华北板块北缘最重要的多金属成矿带(图 1)。狼山-渣尔泰山造山带的形成经历了新太古代结晶基底形成、中元古代被动大陆边缘裂解(翟明国等,2000)、新元古代晚期开始的活动陆缘、古生代以来陆壳增生造山的漫长演化过程(彭润民等,2007),在记录了西伯利亚板块与华北板块离散、汇聚历史的同时,也相应形成了丰富的锌、铅、铜、铁等矿产资源。

前人对狼山-渣尔泰山成矿带开展了详细的调查和研究工作(彭润民等,2004,2007;夏学惠等,2007)。东升庙矿床是狼山-渣尔泰山成矿带中最大的锌多金属硫化物矿床,前人分别在东升庙矿床的含矿岩系特征(江晓庆,1993)、矿物学特征(夏学惠等,1990;夏学惠,1992b)、同位素地球化学特征(夏学惠等,1990;夏学惠,1992b)以及成矿作用(夏学惠,1992a,1992c;江晓庆,1993,1994;张志斌等,2010;周朝宪等,2012)等方面进行了大量研究,提

出了不同的成因观点:夏学惠(1992a)通过详细地质勘查以及地球化学分析等工作,认为东升庙矿床是海底喷气热水沉积-弱改造型矿床。江晓庆(1994)通过同位素分析结果、包裹体测温及成分分析资料、成矿组分的空间分布特征以及围岩的地球化学特征等研究,认为东升庙多金属矿床属弱变质喷气-沉积矿床,热液喷出海底后与海水混合,然后扩散,形成热卤水池,金属硫化物在池底沉淀,形成层状矿体,多期、多阶段的喷气活动形成了多层矿体。彭润民等(2004)通过多年研究发现该成矿带既有 SEDEX (sedimentary exhalative) 型矿床的一些成矿特征,又有 VMS (volcanic associated massive sulfide) 型矿床的某些成矿特点,成矿作用与火山活动密切相关,因此提出狼山群中的东升庙、炭窑口、霍各乞 3 个矿床可归于 SEDEX 型-VMS 型之间但靠近 SEDEX 型一侧的矿床。

总的来讲,目前大家一致认为沉积喷流成矿是东升庙矿床的主要成矿方式(夏学惠,1992a;江晓庆,

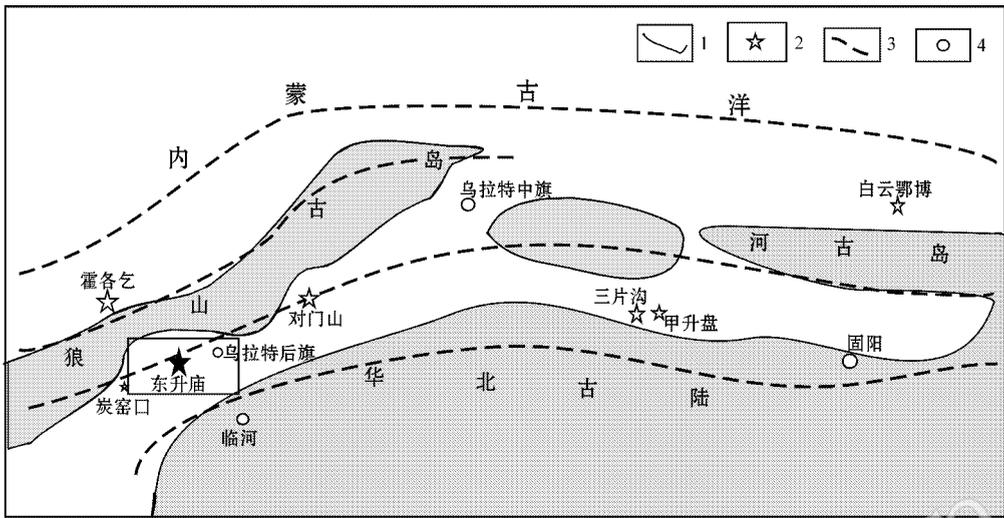


图 1 华北板块北缘西段古环境示意图(引自涂光炽, 1999)

Fig. 1 The sketch map of paleoenvironment on the northwestern margin of the North China platform(after Tu Guangchi, 1999)

1—陆洋边界；2—重要矿床；3—推测基底断裂；4—主要地名

1—border line between mainland and ocean；2—key deposit；3—inferred basement fracture；4—main geographic name

1994；彭润民等 2004；张志斌等 2010；周朝宪等，2012)。这符合大家对 SEDEX 型矿床的传统认识。目前国际上对沉积岩中硫化物矿床的最新研究(David *et al.*，2010)表明，选择性交代碳酸盐地层对以碎屑岩为主要赋矿围岩的硫化物矿床成因有更重要的意义，甚至可能是最主要的成矿机制。东升庙矿床中的矿体主要产出于碎屑岩中，与广泛存在交代成矿作用的澳大利亚的 Broken Hill、阿拉斯加的 Red Dog 以及加拿大的 Sullivan 等著名矿床有着相似的特征(David *et al.*，2010)，交代作用在东升庙矿床中对成矿的贡献多少，值得深入研究。

东升庙多金属矿床产于中元古界狼山群[相当于区域地质志(内蒙古自治区地质矿产局, 1991)中的渣尔泰山群,属于中元古界长城系],是目前狼山多金属成矿带内发现的最大的铅锌矿床,主要含矿层位是狼山群第 2 岩组(图 2)。鉴于狼山群中相同层位还赋存了炭窑口、霍各乞等多个大型的硫化物矿床,对东升庙多金属矿床主要含矿岩系的研究可以增进对狼山多金属成矿带相应赋矿地层的认识,从而对整个地区的矿床研究和调查有着重大意义。

1 含矿岩系地质特征

1.1 含矿岩系地层特征

狼山成矿带的赋矿地层是中元古界狼山群,与

渣尔泰山群的原岩建造基本相似,具有一定的可比性。从总体上看,狼山群的第 2 岩组相当于渣尔泰山群的“增隆昌组+阿古鲁沟组”,它们形成时代相近,变质程度相同。含矿岩系原岩属克拉通边缘断陷盆地滨浅海-海湾或泻湖相的富含碳质、泥质的粉砂岩-碳酸盐岩建造(彭润民等,2004)。在前人地层研究工作(夏学惠等,1990;夏学惠,1992a, 1992b, 1992c;彭润民等,2004, 2007;张志斌等,2010;周朝宪等,2012)的基础上,结合对多个狼山群第 2 岩组岩芯样品(表 1)的分析,将狼山群第 2 岩组分 4 个岩性段,自下而上分述如下:

(1) 第 1 岩性段(石英岩岩性段) $(Pt_2Ln_1^1)$

该岩性段岩性以石英岩为主,地表分布较为普遍,但厚度变化大,由几米至几十米,在局部地段缺失。有研究(江晓庆,1993)认为,这个岩性段的石英岩是硅化作用的产物,是大规模矿化的前奏。

(2) 第 2 岩性段(白云石大理岩岩性段) $(Pt_2Ln_2^2)$

该岩性段为矿区重要含矿岩段之一,以不含碳的白云石大理岩为主,底部由含磷变质砂岩、薄层状硅铁质白云石大理岩组成。本岩性段有层状黄铁矿体产出,但铅锌含量较低。

(3) 第 3 岩性段(绢云石墨片岩岩性段) $(Pt_2Ln_3^3)$

该岩性段也是重要含矿岩段,主要由绢云母石

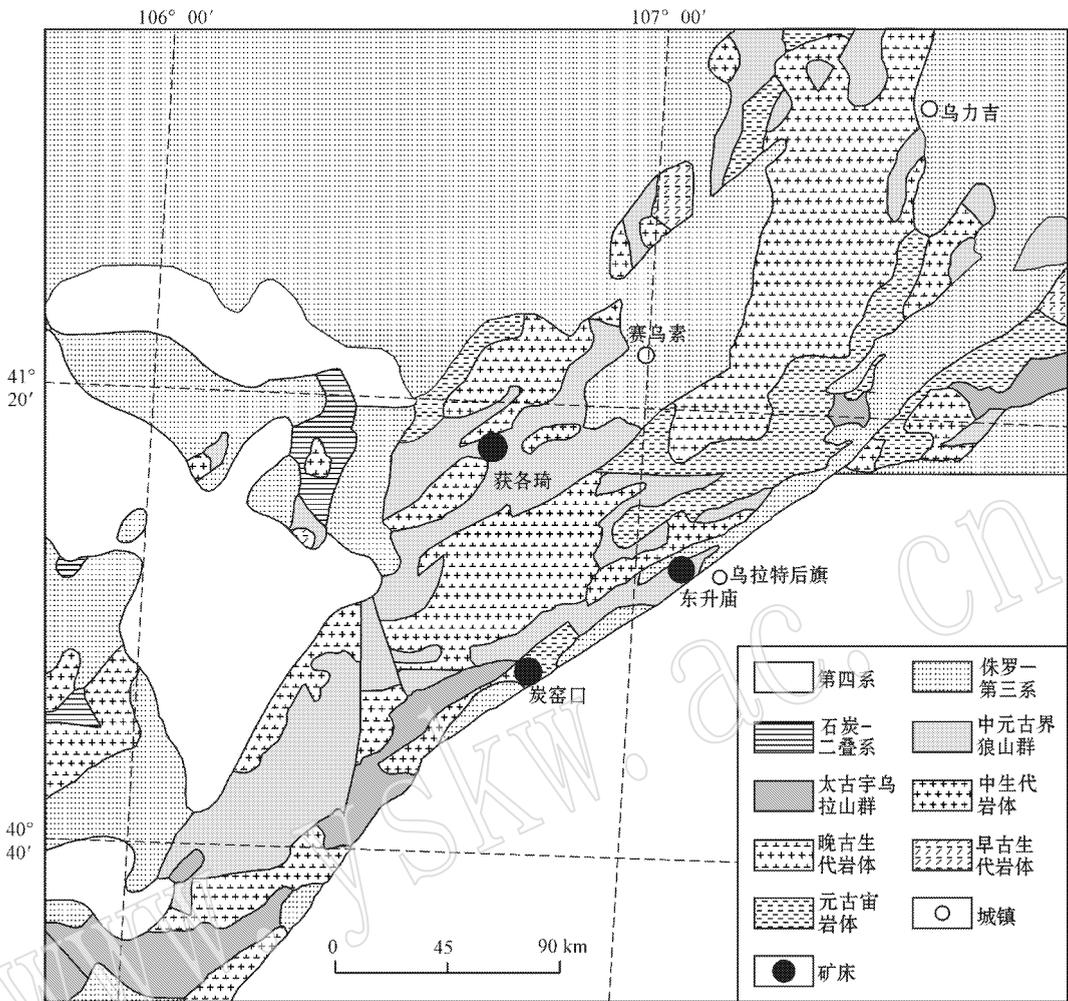


图 2 狼山成矿带区域地质图(据彭润民等, 2007)

Fig. 2 Regional geological map of the Langshan metallogenic belt (modified after Peng Runmin *et al.*, 2007)

墨片岩组成,局部为炭质千枚岩。本性岩段以富含石墨且网脉状矿化普遍为特征。

(4) 第 4 岩性段(含石墨白云石大理岩岩性段) ($Pt_2Ln_4^4$)

该岩性段为矿区的主要含矿岩性段,以薄层状含炭质白云石大理岩为主,夹黑云石英片岩、绢云石墨片岩。与第 2 岩组第 2 岩性段的白云石大理岩的区别是后者为纯净的白云石大理岩,不含炭质成分。底部出现白云石大理岩与黑云磁铁白云石大理岩互层。顶部为绢云石墨片岩与方解石白云石大理岩。该岩性段底部有矿区最大的锌硫复合矿体②号矿体产出。②号矿体形态总体上呈透镜体状,矿体厚度变化较大,平均厚度为 15 m 左右,含围岩角砾的黄铁矿-闪锌矿矿石(图 3a)以及细粒块状富锌矿石

(图 3b)为主,矿石矿物主要为黄铁矿、闪锌矿、磁黄铁矿等,方铅矿次之,黄铜矿含量极少。

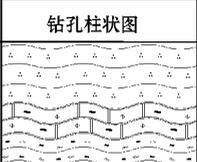
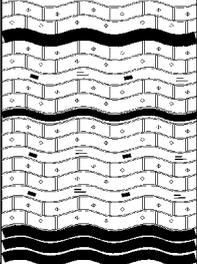
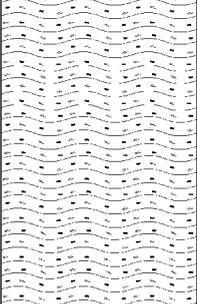
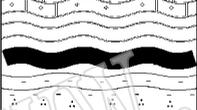
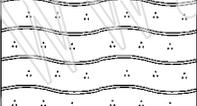
1.2 岩相与矿相特征

通过镜下观察并结合电子探针分析发现,矿区主要脉石矿物常见石英(图 4a)、(铁)白云石(图 4b)、菱铁矿(图 4b)、石墨、重晶石(图 4b)、氟磷灰石(图 4d)、透闪石、石榴子石(图 3d)、绢云母、黑云母等,另外有少量微斜长石、方解石、电气石、金红石以及钾长石等。本次研究在菱铁矿矿石中发现了与重晶石共生的铝硅钡石(图 4b)。

东升庙区内主要原生金属矿物有:黄铁矿(图 3a、图 4a、4c)、磁黄铁矿(图 3c、3d、3e)、闪锌矿(图 3a、3b、图 4c)、方铅矿、黄铜矿及磁铁矿(图 4a)。次生金属矿物主要有褐铁矿、针铁矿、孔雀石、赤铁矿等。

表1 东升庙矿区3号钻孔岩性特征

Table 1 Lithologic characteristics of No.3 drill hole

地层名称	钻孔柱状图	岩性特征
第3岩组 第1岩性段		石英片岩和块状石英岩为主,不含矿,总厚度为100 m
第2岩组 第4岩性段		含碳质白云大理岩为主,局部夹绢云石墨片岩,中部赋存菱铁矿层和④号硫矿体,底部产出矿区最大的②号锌-硫矿体,矿石类型以含角砾块状矿石为主,总厚度为220 m
第2岩组 第3岩性段		绢云石墨片岩为主,网脉状磁黄铁矿和不规则团块状黄铁矿常见。第3岩性段加上第4岩性段的绢云石墨片岩统称为黑色岩系,是矿区最重要的赋矿围岩,第3岩性段总厚度为235 m
第2岩组 第2岩性段		底部为云母片岩,见①号硫矿体,顶部为白云大理岩,总厚度为70 m
第1岩组 第1岩性段		石英岩为主,未见明显矿化,上部有地层缺失

矿区内矿体产出与围岩岩性有一定关系,成矿作用有明显的岩控特征。在矿区内狼山群第2岩组中不同岩段中所赋存的矿体对应不同的矿石类型(表2)。

矿区内矿石的组构特征与国内外典型沉积喷流型矿床有一定的相似性,以发育角砾状(图3a、图5f、5g)、块状(图3b)以及似纹层状(图5a、5c、5d)富硫化物矿石为主,部分矿石呈网脉状、细脉浸染状(图3c、3d),矿石结构多为细粒镶嵌结构或不同自形程度的结晶结构。这可能反映了矿石是由化学沉积和热液充填-交代两种不同的成矿作用形成的。

下面分别对矿区内常见的矿石构造进行描述:

(1) 角砾状构造

角砾状构造是东升庙②号主矿体中最常见的矿石构造类型,从矿体西部到东部都能见到,夏学惠等(1990)把这种富含角砾的矿石称为“碎屑型”矿石。

闪锌矿矿石以棕褐色、棕红色的铁闪锌矿为主,含量在60%以上,另外还有磁黄铁矿、黄铜矿以及黄铁矿等。在闪锌矿矿石中可以看到不同岩性的碎屑角砾,其中最常见的是围岩角砾类型是不同磨圆程度的绢云石墨片岩碎屑(图4c),可能是主矿体下盘围岩破碎后经成矿热液搬运后的产物。硫化物矿石中常见的围岩角砾还有含碳白云大理岩碎屑(图3a、图5f、5g、5h),碎屑磨圆差,碎屑被闪锌矿(图5g)、黄铁矿(图5f)、磁黄铁矿(图5h)或者黄铜矿(图5h)为主的硫化物包裹,在较大碎屑中还可以看到磁黄铁矿、闪锌矿以及黄铜矿等硫化物脉的充填(图5h)。在②号主矿体的闪锌矿矿石岩芯(图3a)中同时产出两种类型的碎屑:一种是黑色的碳质角砾,颗粒较小,在1~10 mm之间,磨圆较好,在闪锌矿矿石中均匀分布,表明碳质碎屑角砾经过较远距离搬运;另一种是浅色的含碳质白云石大理岩角砾,颗粒较为粗大,磨圆差。通过野外地质和岩芯样品观察可以发现,后者在主矿体的硫化物矿石中分布不均匀,在矿体的边部较为常见并能见到呈一定定向性展布(图3a),表明其没有经过远距离搬运,是交代残余或垮塌的产物。除了围岩角砾,矿石中还可以见到少量矿石角砾(图5e),亮黄色的黄铁矿角砾直径约10 cm,被棕褐色的闪锌矿矿石包裹,是富锌热液运移过程中将早期形成的黄铁矿矿石破碎、搬运、沉淀的结果。

(2) 块状构造

区内的黄铁矿矿石以及主矿体中部分闪锌矿矿石(图3b)多为不同结晶程度的块状构造。在②号主矿体中块状黄铁矿矿石常与角砾状闪锌矿矿石互层产出(图3a),黄铁矿颗粒大小在0.5~3 mm之间,具半自形-它形晶粒结构,部分矿石的黄铁矿可见变晶增大现象。块状闪锌矿矿石(图3b)主要由闪锌矿、磁黄铁矿、方铅矿以及少量黄铁矿组成,矿石为细粒镶嵌结构,角砾状闪锌矿矿石随着角砾碎屑含量减少会过渡为块状构造矿石。在②号主矿体上部地层中产出的菱铁矿层,其中的菱铁矿矿石(图3f)具典型的细粒结晶结构和块状构造,是化学沉积的产物。

(3) 似层状构造

似层状构造是富硫化物矿石的常见构造类型。硫化物层以黄铁矿和磁黄铁矿为主,或宽或窄(图5b),并且存在一定弯曲扭转以及分叉复合(图5a),黄铁矿层之间是富铁白云石大理岩为主的围岩或者是早期形成的磁黄铁矿等。黄铁矿新鲜面呈亮黄色,空气中氧化后呈暗黄色。磁黄铁矿新鲜面呈棕

表 2 含矿岩系岩性及主要矿体地质特征

Table 2 Geological characteristics of ore-bearing formations and main orebodies

地层层位	围岩岩性	矿石种类	主要矿石构造	赋存矿体
Pt ₂ Ln ⁴	含石墨白云石大理岩为主	黄铁矿矿石、锌矿石、菱铁铁矿石	角砾构造、块状构造	②、③、④
Pt ₂ Ln ³	绢云石墨片岩、炭质板岩	锌矿石、磁黄铁矿矿石	网脉状构造、细纹层状构造	⑨、⑩、⑪
Pt ₂ Ln ²	白云石大理岩或片岩	黄铁矿矿石	条带-纹层状构造	①、⑦、⑧



图 3 东升庙矿区主要的矿石构造类型

Fig. 3 Main ore structures in the Dongshengmiao ore district

a—含有白云大理岩围岩的硫化物矿石；b—块状构造矿石；c—网脉状磁黄铁矿与黄铜矿共生；d—网脉状磁黄铁矿附近的大量石榴子石；
e—网脉状磁黄铁矿；f—菱铁铁矿石块状构造

a—sulfide ores containing dolomite-marble; b—massive structure; c—coexistent stockwork pyrrhotite and chalcopyrite; d—abundant garnets near stockwork pyrrhotite; e—stockwork pyrrhotite; f—siderite ore with massive structure

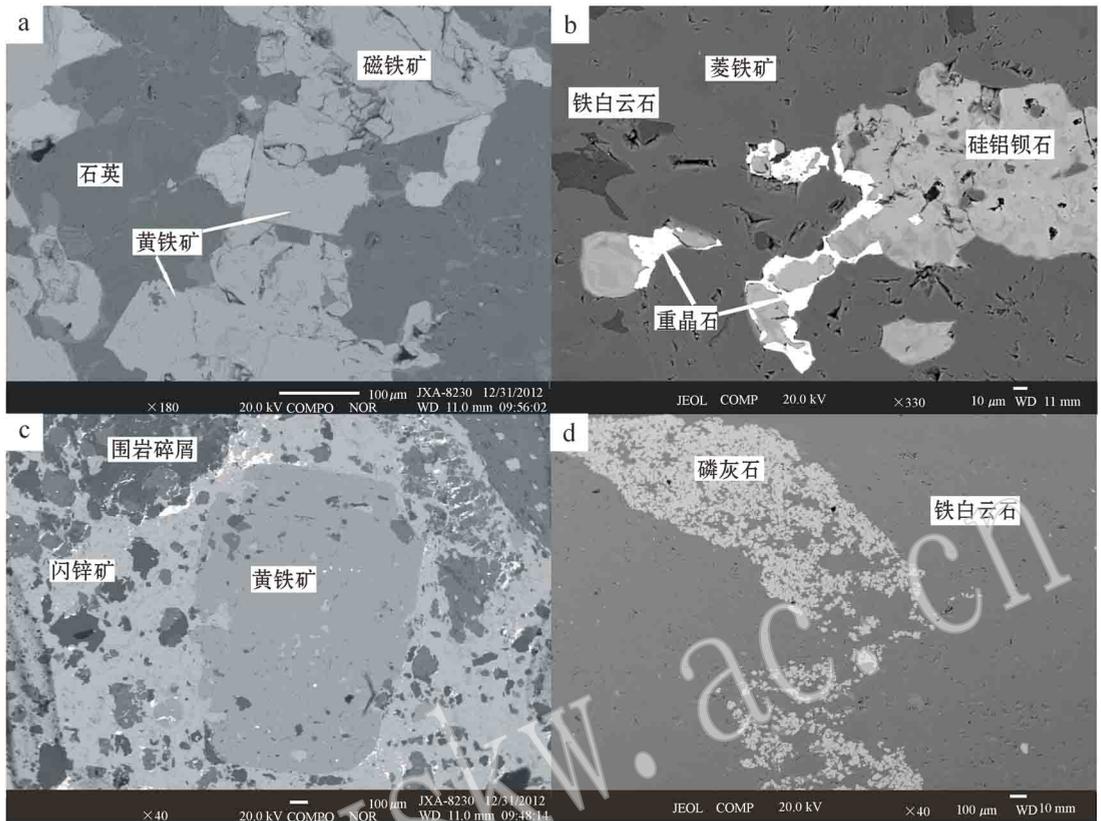


图4 矿石和围岩的背散射电子图像

Fig. 4 Back scattered electron images of ores and wall rocks

a—黄铁矿矿石(ZK3-5); b—菱铁矿矿石(ZK3-6); c—富锌矿石(ZK3-10); d—白云大理岩(ZK3-22)
a—pyrite ore (ZK3-5); b—siderite ore (ZK3-6); c—zinc ore (ZK3-10); d—dolomite-marble (ZK3-22)

褐色,在空气中氧化后呈深褐色。这种类型的矿石区别于同生沉积生成的层状构造矿石,是后期热液充填、交代围岩或矿石的产物。

(4) 纹层状构造和网脉状构造

东升庙矿区内纹层状构造的硫化物矿石主要产于第3岩性段的绢云石墨片岩中,由于纹层状构造并不常见而且第3岩性段中网脉状矿化(图3c、3d、3e)广泛发育,可以发现充填成因的单向黄铁矿脉(图5d)。可以认为在绢云石墨片岩中产出的纹层状矿石是含矿热液在围岩局部顺着围岩解理面充填的产物,即成岩后的矿化,这不同于“纹层状矿石是同生沉积的结果”这一传统认识。纹层状矿化以黄铁矿和磁黄铁矿矿化较为常见(图5d),可见2~10 mm宽的细层状硫化物层沿围岩解理发育但延伸并不远。网脉状矿化以磁黄铁矿和黄铜矿矿化为主,大量磁黄铁矿以及少量黄铜矿呈填隙状分布(图3c、3d)。随着矿化作用加强,网脉状矿化(图3e)会逐渐过渡为角砾状构造(图5c、5d)。

2 含矿岩系地球化学特征

2.1 样品采集与分析方法

本次分析测试样品均采自东升庙矿区36勘探线3号钻孔岩芯,其中白云大理岩2件,绢云石墨片岩6件,云母片岩、富钾板岩、富锌矿石和菱铁矿矿石样品各1件。主、微量元素测试均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。主量元素使用X射线荧光光谱仪(飞利浦PW2404)完成,其中 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MgO 、 Na_2O 检测限为0.015%, CaO 、 K_2O 、 TiO_2 检测限为0.01%, TFe_2O_3 、 MnO 、 P_2O_5 检测限为0.005%; FeO 用容量法完成(检测限为0.1%)。微量元素测试方式如下:样品用氢氟酸和硝酸在封闭溶样器中溶解,电热板加热赶尽氢氟酸,再用硝酸密封溶解,稀释后,使用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法完成微量元素及稀土元素的测定。



图 5 成岩成矿期后热液作用

Fig. 5 Post-diagenetic and ore hydrothermal process

- a—似层状硫化物；b—成矿前的围岩变形；c—交代形成的似层状硫化物矿石；d—热液交代围岩形成的硫化物矿石；e—闪锌矿交代早期黄铁矿；f—黄铁矿交代碳酸盐岩地层；g—闪锌矿交代碳酸盐岩地层；h—黄铜矿和磁黄铁矿交代碳酸盐岩地层
- a—stratiform sulfide; b—pre-ore wall rock deformation; c—hydrothermal solution filling and replacing wall rock; d—massive sulfide replacement of wall rock; e—pyrite in sphalerite ores; f—incompletely replaced carbonate formations; g—hydrothermal solution selectively replacing carbonate; h—hydrothermal replacement

2.2 主量元素特征

样品主量元素测试结果如表3所示。第2岩性段两种不同岩性岩石主量元素差别较大,其中ZK3-

22白云大理岩样品由于有网脉状石英细脉, SiO_2 的含量比一般白云大理岩稍高;ZK3-24富钾板岩相比ZK3-27云母片岩 SiO_2 的含量稍低, K_2O 含量较高。

表3 主量元素测试结果

$\omega_B/\%$

Table 3 Major element compositions of bulk samples

样品编号	样品名称	SiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	TiO_2	P_2O_5	烧失量	总量
ZK3-3	白云大理岩	23.24	5.02	9.73	12.00	18.83	<0.01	2.90	0.64	0.33	0.41	25.87	99.00
ZK3-6	菱铁矿矿石	5.16	0.36	44.21	12.56	2.97	<0.01	0.13	2.21	<0.01	0.36	31.94	99.90
ZK3-7	石墨绢云片岩	66.87	14.99	2.22	1.40	0.49	0.20	8.68	0.08	0.72	0.31	4.03	99.75
ZK3-9	富锌矿石	4.92	0.79	20.26	1.04	3.32	9.37	0.38	0.94	0.04	2.03	13.24	56.30
ZK3-13	绢云石墨片岩	72.11	13.61	1.40	1.93	0.44	0.22	6.75	0.02	0.68	0.26	2.50	99.70
ZK3-15	绢云石墨片岩	49.50	16.56	5.63	3.04	2.95	0.11	6.08	0.06	0.54	2.19	13.33	99.85
ZK3-16	绢云石墨片岩	72.92	11.06	3.06	2.47	0.67	0.10	4.51	0.06	0.53	0.29	4.31	99.85
ZK3-17	绢云石墨片岩	66.99	12.58	3.59	3.75	0.49	0.17	4.49	0.13	0.55	0.31	6.92	99.80
ZK3-20	绢云石墨片岩	75.37	7.20	4.29	2.98	0.64	0.19	2.58	0.07	0.30	0.30	5.96	99.70
ZK3-22	白云大理岩	8.41	0.38	1.98	18.53	28.05	<0.01	0.13	0.31	0.03	0.08	42.06	99.95
ZK3-24	富钾板岩	54.99	18.70	6.51	3.94	0.29	0.54	12.53	0.22	0.75	0.18	1.31	99.94
ZK3-27	云母片岩	60.43	16.21	8.55	4.41	0.56	0.29	6.52	0.22	0.69	0.20	1.90	99.70

第3岩性段中分析的5个绢云石墨片岩主量元素含量比较相近, SiO_2 含量在49.50%~75.37%之间,平均为67.38%。另外,样品中含量超过1%的成分有 Al_2O_3 (平均12.20%)、 Fe_2O_3 (平均3.59%)、 MgO (平均2.83%)。其中,样品ZK3-15的 SiO_2 含量较低,但 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 以及 P_2O_5 的含量相对较高,具有一定的特殊性。

第4岩性段岩性变化较大,所分析的4个样品的主量元素差别较大。其中ZK3-7石墨绢云片岩的主量元素含量与第3岩性段的绢云石墨片岩相近,ZK3-6菱铁矿和ZK3-9富锌矿石样品的 TFe_2O_3 的含量较高,分别为44.21%和20.26%。 K_2O 和 Al_2O_3 的含量较低,都在1%之下。

2.3 微量元素特征

根据查瓦里斯基的元素地球化学分类(韩吟文等2003),本次测试的微量元素可分为造岩碱性元素Li、Rb、Sr、Cs、Be、Ba,高温矿床成矿元素Zr、Nb、Hf、Ta、Mo、W、Re,放射性元素Th、U,金属成矿元素Cu、Pb、Zn、Ga、Bi、Cd、In、Sb,以及铁族元素V、Cr、Co、Ni。

分析数据(表4)表明,岩石中微量元素的含量与其所依存的岩类有关,在不同的岩石中表现出较大的差异性。总的来说,在含有较多粘土物质和有机质碎屑沉积岩中微量元素含量较高;在以化学沉积为主形成的沉积产物中多数微量元素含量相对较低,但部分元素含量较高。测试得到的微量元素数据通过PAAS标准化后,总体特征如下:

(1)含矿岩系总体上相对富集亲硫元素:不同类型的样品的Zn、Pb、Cd、Sb等元素相对于PAAS都有明显的富集。

(2)菱铁矿矿石和富锌矿石(图6a)微量元素总体含量并不高,其中菱铁矿的Ba、Sb、Zn、Cd和In相对于PAAS较为富集;富锌矿石相对富集Pb、Sb、Zn、Cd、Mo、In、Bi和Tl,其中Cd含量是PAAS的1000倍以上。两种矿石中的Be、Co、Zn、Cd、Zn、Sb、Pb等元素相对于自身其它元素都有一定的富集。

(3)围岩微量元素比较明显的特征是某些热液特征元素都有不同程度的富集:第2、4岩性段中的白云大理岩样品(图6b)微量元素含量差别较大,第4岩性段的ZK3-3较第2岩性段的ZK3-22明显富集各种微量元素。在第2、3岩性段以绢云石墨片岩为主的黑色岩系(图6c)中,Ba、U、Pb、Sb、Zn、Cd、Mo、Be和Tl等元素相对PAAS富集,In、Ti、V、Cr、Co、Ni、Sc、Cs等相对PAAS亏损。另外,第2岩性段中的富钾板岩和云母片岩(图6d)的微量元素含量与第3、4岩性段中以绢云石墨片岩为主的黑色岩系差别较大,只有Tl、Ba和Zn等少数元素相对PAAS富集。

(4)分散元素In在矿石中相对富集,其中在富锌矿石中富集百倍以上,而在各类围岩中相对亏损。这是由于In的地球化学性质与Zn相似,比较容易进入闪锌矿中。除在碳酸盐类岩石中稍有亏损外,分散元素Tl在各类岩石中都有明显的富集,这是由于其地球化学性质与Cu、Pb、Zn等元素相似,常以微量元素形式进入硫化物和硫酸盐矿物中。

表 4 微量元素元素测试结果

 $w_B/10^{-6}$

Table 4 Trace element compositions of samples from the Dongshengmiao ore deposit

样品编号	ZK3-3	ZK3-6	ZK3-7	ZK3-9	ZK3-13	ZK3-15	ZK3-16	ZK3-17	ZK3-20	ZK3-22	ZK3-24	ZK3-27
样品名称	白云大理岩	菱铁矿	石墨绢云片岩	富锌矿石	绢云石墨片岩	绢云石墨片岩	绢云石墨片岩	绢云石墨片岩	绢云石墨片岩	白云大理岩	富钾板岩	云母片岩
Li	14.10	0.89	30.1	7.57	54.20	71.70	55.00	46.00	28.20	2.49	37.40	51.30
Be	2.58	0.29	6.92	0.55	4.94	6.42	3.26	4.44	2.57	0.26	3.78	2.20
Sc	6.53	0.61	11.8	0.76	7.18	16.4	8.31	10.50	6.29	0.91	17.50	16.40
V	55.20	15.90	85.00	14.90	67.30	165.00	60.70	76.20	41.70	9.57	121.00	110.00
Cr	28.40	3.66	73.50	5.35	63.40	64.70	55.00	56.30	34.70	4.13	119	93.80
Co	16.50	38.90	2.23	36.90	2.23	11.90	4.14	5.05	10.30	1.55	13.30	38.10
Ni	30.90	4.09	5.85	19.10	4.59	15.50	9.15	7.54	10.90	16.70	33.10	53.20
Cu	62.60	40.50	22.80	95.70	17.80	24.00	35.20	30.80	53.10	1.17	39.80	4.64
Zn	77.90	223.00	91.20	/	336	71.10	1690	294	1699	21.10	299	138
Ga	8.99	10.60	21.10	7.20	22.20	21.90	17.50	17.90	11.70	1.72	28.20	24.80
Rb	51.70	3.14	173.00	10.70	165.00	213.00	116	189.00	114.00	3.93	219	219
Sr	166.00	59.70	21.20	37.00	48.60	71.40	21.00	47.60	35.00	181.00	206	47.10
Nb	3.51	0.37	15.60	1.63	19.60	9.90	13.40	15.10	10.70	0.443	12.70	12.70
Mo	1.89	0.27	1.97	3.71	0.71	13.50	1.88	1.36	2.47	0.40	0.39	0.15
Cd	0.12	0.58	0.09	340.0	0.42	0.12	3.79	0.65	3.12	0.04	0.06	0.04
In	0.04	0.92	0.08	5.78	0.09	0.02	0.06	0.03	0.05	0.02	0.03	0.07
Sb	0.81	1.47	0.66	4.21	1.21	1.27	0.49	0.49	1.14	0.09	0.66	0.16
Cs	0.85	0.18	2.83	0.51	3.59	5.78	3.69	8.90	6.53	0.04	4.19	10.20
Ba	513.00	2073	2075	84.30	940	851	530	466	571.00	38.10	6832	1109
Ta	0.35	0.02	1.24	0.12	1.58	0.45	0.94	1.15	0.85	0.03	1.06	0.81
W	0.94	0.13	2.35	0.75	2.28	4.23	2.92	2.37	1.17	0.27	0.66	0.87
Tl	1.98	0.23	8.10	11.50	2.16	8.24	2.08	9.82	7.82	0.06	18.70	10.10
Pb	22.50	4.43	24.50	/	43.00	32.10	8.38	11.70	885.00	4.36	87.9	7.46
Bi	0.25	0.05	0.08	1.38	0.05	0.07	0.05	0.02	0.26	0.03	0.02	0.02
Th	3.09	0.45	13.40	1.21	20.50	11.50	13.90	15.40	8.09	0.50	12.80	12.50
U	0.92	0.32	3.96	0.98	4.74	8.24	4.39	3.72	2.20	0.42	1.11	1.57
Zr	31.40	4.81	121.00	11.30	180	82.50	103.00	124.00	75.20	7.86	59.60	85.90
Hf	0.85	0.10	3.14	0.35	4.85	2.22	2.89	3.78	2.16	0.21	1.54	2.38

注 /表示超出仪器检测范围。

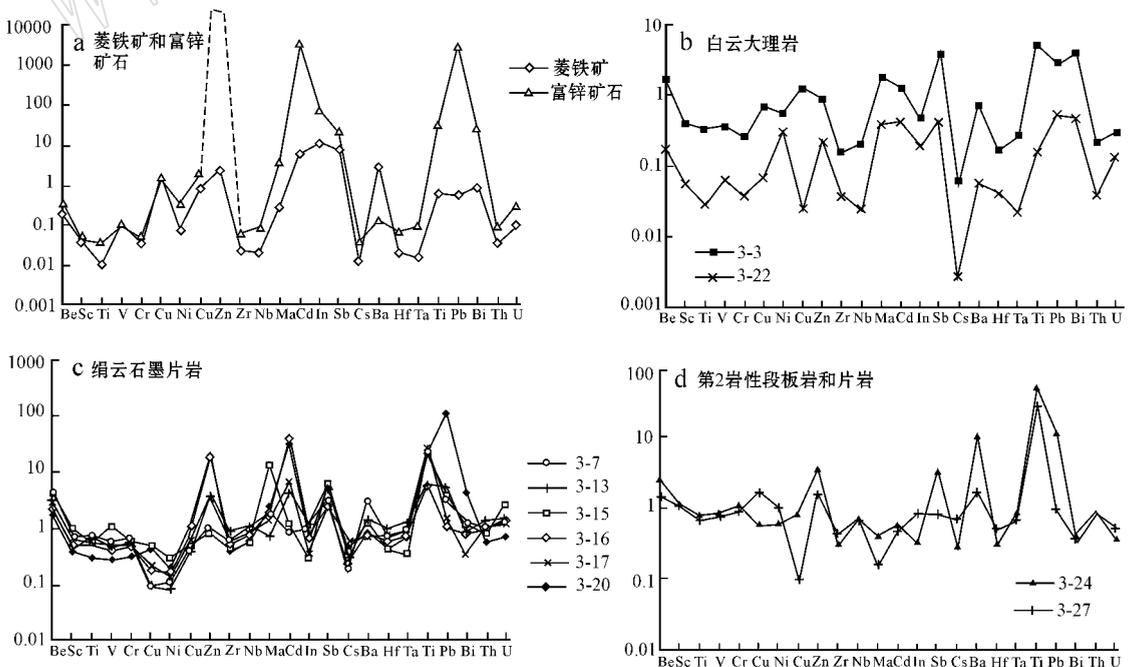


图 6 微量元素 PAAS 标准化图解

Fig. 6 PAAS-normalized trace element patterns

2.4 稀土元素特征

δCe 为 Ce 的异常系数,是重要的氧化还原指标。传统的 Ce 异常计算公式为 $Ce/Ce^* = 2 C_{ePAAS} / (La_{PAAS} + Pr_{PAAS})$ 或 $Ce/Ce^* = 3 C_{ePAAS} / (2 La_{PAAS} + Nd_{PAAS})$, 但因为在海水等水成体系中,通常会产生一定的 La 和 Gd 正异常,因此这样计算可能会导致明显的 Ce 异常而影响分析。运用 Lawrence 等 (2006) 提出的公式对 Ce 异常计算,避免了使用 La 和 Gd 两个元素,代之以用最邻近的没有异常的其他元素进行计算,结果更能代表真实情况 (Ling *et al.*, 2011)。本文 La、Ce、Gd 异常采用 Lawrence 等 (2006) 提出的公式计算: $La/La^* = La_{PAAS} / (Pr_{PAAS}^3 / Nd_{PAAS}^2)$, $Ce/Ce^* = C_{ePAAS} / (Pr_{PAAS}^2 + Nd_{PAAS})$, $Gd/Gd^* = Gd_{PAAS} / (Tb_{PAAS}^2 + Sm_{PAAS})^{1/3}$, 而 Y 异常采用 Bau 和 Dulski (1996) 的公式计算: $Y/Y^* = Y_{PAAS} / (0.5 Dy_{PAAS} + 0.5 Ho_{PAAS})$, Eu 异常采用传统的公式计算: $Eu/Eu^* = 2 Eu_{PAAS} / (Sm_{PAAS} + Gd_{PAAS})$ 。下标 PAAS 表示对数据对进行 Post Archean Australian Shale (McLennan, 1989) 标准化。

δEu 为 Eu 的异常系数,既可灵敏地反映体系内的地球化学状态,又是鉴别物质来源和判定构造环境的重要参数。Eu 属于变价元素,具有 2 种价态,即 Eu^{2+} 和 Eu^{3+} 价态。Eu 异常的产生主要取决于 Eu^{2+} 和 Eu^{3+} 的平衡。在较高温热液蚀变过程中, Eu 相对于其他稀土元素可能发生显著分馏。一般将 Eu 正异常看做热液活动的标志。别风雷等 (2000) 认为,无论是通过矿石间接判别方法,还是从矿石流体包裹体中直接测定结果,都表明硫化物矿床成矿流体的 REE 分配模式均为轻稀土元素富集型,具有明显的 Eu 正异常特征。

下面对不同类型的岩、矿石的稀土元素特征 (表 5) 进行分析:

ZK3-6 菱铁矿矿石、ZK3-9 富锌矿石的稀土元素总量都相对较低,分别为 20.11×10^{-6} 和 39.34×10^{-6} , 轻重稀土元素比值分别为 2.46 和 3.17。菱铁矿和富锌矿石的 δCe 的值分别为 0.73 和 0.89, 两者也都呈现不同程度的 Eu 正异常, δEu 值分别为 3.93 和 1.51。两者的稀土元素 PAAS 标准化图解如图 7a 所示。

表 5 REE 分析测试结果

$w_B/10^{-6}$

Table 5 REE compositions of samples from the Dongshengmiao ore deposit

样品编号	ZK3-3	ZK3-6	ZK3-7	ZK3-9	ZK3-13	ZK3-15	ZK3-16	ZK3-17	ZK3-20	ZK3-22	ZK3-24	ZK3-27
样品名称	白云大理岩	菱铁矿矿石	石墨绢云片岩	富锌矿石	绢云石墨片岩	绢云石墨片岩	绢云石墨片岩	绢云石墨片岩	绢云石墨片岩	白云大理岩	富钾板岩	云母片岩
La	16.1	2.78	43.1	8.09	53.1	19	33.8	53.8	24.3	2.55	52.7	54.7
Ce	33.1	5.99	79.9	13.4	98.2	39.8	66.1	99.2	44.4	4.75	97.8	101
Pr	4.07	0.77	8.71	1.43	10.8	5.25	7.21	11.4	5.2	0.497	11.7	11.6
Nd	15.3	3.24	30.8	5.5	39.5	22.2	26.1	41.4	18.2	1.83	43.6	42.7
Sm	3.17	0.8	4.61	1.14	6.02	5.68	4.14	6.95	3.43	0.379	7.36	7.73
Eu	0.81	0.71	1.08	0.34	1.08	1.23	0.74	1.34	0.84	0.10	3.7	1.74
Gd	2.98	0.89	2.75	0.98	3.82	5.64	2.9	5.36	3.2	0.24	5.3	6.13
Tb	0.47	0.12	0.33	0.16	0.55	1.05	0.43	0.75	0.56	0.07	0.68	0.97
Dy	2.81	0.46	1.51	0.74	2.53	6.35	2.01	3.62	3.42	0.23	2.79	5.06
Y	16	3.67	9.13	6.05	12.3	36.6	10.7	16.5	20.8	2.14	10.8	23.3
Ho	0.54	0.09	0.27	0.19	0.44	1.29	0.39	0.63	0.66	0.07	0.42	0.9
Er	1.51	0.27	0.78	0.57	1.22	3.66	1.02	1.57	1.77	0.20	0.91	1.91
Tm	0.27	0.03	0.13	0.08	0.21	0.57	0.21	0.25	0.28	0.03	0.13	0.3
Yb	1.6	0.26	0.79	0.60	1.42	3.92	1.01	1.8	1.83	0.20	0.98	1.67
Ce/Ce*	0.63	0.73	0.53	0.89	0.46	0.50	0.58	0.43	0.63	1.04	0.40	0.43
Eu/Eu*	1.24	3.93	1.41	1.51	1.05	1.02	1.01	1.03	1.19	1.54	2.78	1.19
La/La*	0.88	0.99	0.97	1.31	1.03	1.01	0.96	0.98	0.90	1.09	0.98	1.00
Gd/Gd*	1.07	1.27	1.10	1.03	1.00	0.98	1.01	1.09	1.00	0.65	1.13	1.01
Y/Y*	1.03	1.46	1.14	1.26	0.92	1.02	0.96	0.87	1.10	1.37	0.79	0.87
ΣREE	98.96	20.11	184.02	39.34	231.36	152.70	156.96	244.83	129.12	13.31	239.01	259.92
LREE/HREE	2.75	2.46	10.63	3.17	9.21	1.56	7.32	6.96	2.94	3.16	9.79	5.43
$(La/Sm)_{PAAS}$	0.74	0.50	1.36	1.03	1.28	0.49	1.19	1.12	1.03	0.98	1.04	1.03

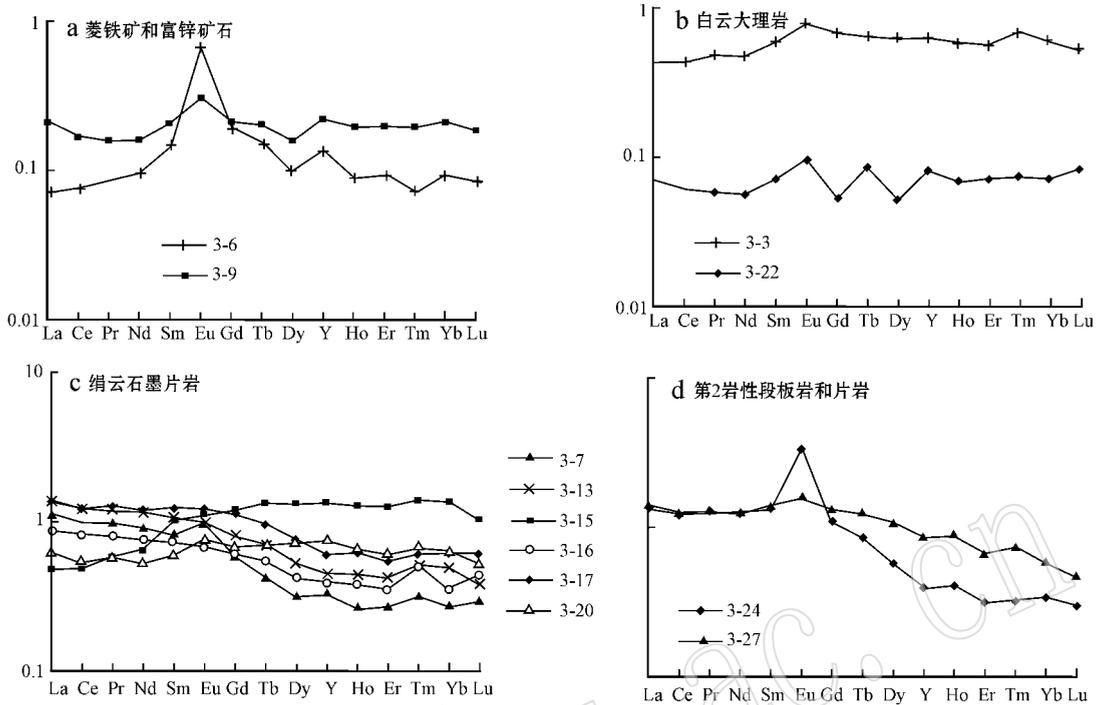


图7 稀土元素 PAAS 标准化图解

Fig. 7 PAAS normalized REE patterns

ZK3-22 白云大理岩的稀土元素总量为 13.31×10^{-6} ，轻重稀土元素比值为 3.16。而第 4 岩性段的 ZK3-3 含碳质白云大理岩的稀土元素总量相对较高，为 98.96×10^{-6} ，轻重稀土元素比值为 2.75。两者 δCe 的值分别为 1.04 和 0.63， δEu 值分别为 1.54 和 1.24。二者的稀土元素 PAAS 标准化图解如图 7b 所示。

以绢云石墨片岩为主的黑色岩系的稀土元素总量较高，含量在 $(129.12 \sim 231.36) \times 10^{-6}$ 之间，平均值为 182.995×10^{-6} 。这跟沉积物中粘土和有机质等对稀土元素有较强的吸附作用有关。从轻重稀土元素比值来看，除 ZK3-15 外，其余样品相对富集轻稀土元素，ZK3-15 绢云石墨片岩的 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{PAAS}}$ 比值与其他几个样品差别较大，比较特殊。通过 PAAS 标准化后，第 3 岩性段绢云石墨片岩的 δEu 值在 1.01~1.19 之间，平均值为 1.06，除了 ZK3-20 (Eu/Eu^* 为 1.19) 外基本没有 Eu 异常。而第 4 岩性段的绢云石墨片岩 ZK3-7 的 δEu 值较大，为 1.41。样品的稀土元素 PAAS 标准化图解如图 7c 所示。

第 2 岩性段中产出的富钾板岩和云母片岩稀土元素总量相当，分别为 259.92 和 239.02，轻重稀土元素比值相对较大，分别为 5.43 和 9.79，其中富钾

板岩有较大的正铈异常， δEu 值为 2.78。两者的稀土元素 PAAS 标准化图解如图 7d 所示。

3 对矿床成因的指示

3.1 充填-交代作用成矿的证据

碎屑岩地层是整个东升庙矿区内最主要的赋矿围岩，碎屑岩围岩常见纹层状(图 5d)、脉状(图 3d)或网脉状(图 3c、3e、图 5a)矿化，有明显后期热液充填的痕迹，这与微量及稀土元素特征所表现的热液活动影响是一致的。另外，在野外可以看到闪锌矿矿石是充填在发生变形后的绢云石墨片岩裂隙中的(图 5b)，表明成岩作用之后确实是发生了闪锌矿矿化。

东升庙②号“互层”矿体产在狼山群第 2 岩性组第 4 岩段(即含石墨白云石大理岩岩段)底部，底板围岩为第 3 岩性段绢云石墨片岩。结合上文提到的富锌矿石中被溶蚀的黄铁矿角砾(图 5e)、镜下闪锌矿对黄铁矿的交代现象以及“互层”的两种矿石中有不同类型的围岩角砾，初步认为②号矿体的闪锌矿矿石是在黄铁矿矿石成矿后，沿一定构造裂隙对早期黄铁矿进行了溶蚀交代。

东升庙主矿体中硫化物矿石多含碎屑角砾,碎屑成分与矿区含矿建造的沉积岩基本一致(图 3a、4c、5f、5g、5h),主要是与围岩成分相同的千枚岩、碳酸盐岩、黑云母片岩、石英岩,以及与下部矿层成分相同的黄铁矿角砾(图 5e,夏学惠等,1990)。对于②号主矿体,其产出在第3岩性段的绢云石墨片岩和第4岩性段的白云大理岩之间,其硫化物矿石中发现不但有来自于矿体下部的有一定磨圆的绢云石墨片岩碎屑角砾,还有一些来自上部围岩的白云大理岩。此类岩石与绢云石墨片岩碎屑不同,可见长条状或者磨圆极差的碎屑角砾,是交代残余或者交代过程中垮塌的产物,特别像是有一定定向性的白云大理岩角砾(图 3a、5f、5g)相对于成矿流体搬运,更像是交代残余的产物。按照传统的喷流沉积成矿理论,白云大理岩是主矿体成矿后沉积生成的,然而这不能解释矿体中常见的白云大理岩角砾(图 3a、5f、5g、5h)。碳同位素的研究(江晓庆,1994)表明,热液与围岩中的白云石发生过强烈的混合作用,矿区中较为常见的碳酸盐岩残余也直接说明了热液与白云石大理岩发生了混合并交代围岩。江晓庆(1993)也认为网脉状、角砾状构造反映了热液交代及充填成矿形态不规则的“碎屑型”矿体是热液充填和交代的产物。其中②号矿体的矿石具有典型的角砾状构造(图 3a、5f、5g、5h),角砾可能是由热液充填坍塌或不完全交代作用形成。

对于第3岩性段以绢云石墨片岩为主的黑色岩系,在野外可以看到广泛发育热液充填作用。测试的6个绢云石墨片岩样品中 ZK3-15 和 ZK3-20 可见热液充填而成的纹层状黄铁矿化,其余样品没有明显矿化。由图 6c、7c 可以看到不同矿化程度的围岩有不一样的微量元素特征。从图 6c 可以看到,与其它绢云石墨片岩相比,ZK3-15 和 ZK3-20 在多数微量元素方面相对富集,特别是 Sb、Pb、Mo、Bi、Tl 等元素明显富集。研究发现,Ba、As、Sb、Bi、U 含量较高是热水沉积的重要标志(彭军等,2000)。通过对除 ZK3-15、ZK3-20 外的绢云石墨片岩的微量元素研究,发现这些样品与典型的黑色岩系有所差异,其中最明显的特点就是 Sb、Ba 等元素相对于 PAAS 的明显富集。Sb、Ba 和 As 在海水中的含量很低,一般不能在正常的沉积物中富集,而在现代海底热水中含量很高,这3种元素(特别是 Ba)是热液活动重要的标志元素(李胜荣等,1996),Sb、Ba 等元素的富集也指示 ZK3-15、ZK3-20 受到了相对较大的热液活动影

响。

通过 PAAS 标准化后,除了样品 ZK3-20(δE_u 值为 1.19)外,其余样品的 E_u 正异常并不明显。不过从样品通过 PAAS 标准化后稀土元素配分曲线的特点来看,轻重稀土元素还是产生了不同于正常碎屑沉积过程的分馏。绢云石墨片岩的稀土元素通过 PAAS 标准化后,配分曲线呈现两种类型:4 个样品呈比较明显的右倾,且稀土元素总量相对较大,LREE/HREE 在 6.96~9.21 之间;而 ZK3-15 和 ZK3-20 两个样品的 PAAS 标准化曲线却分别呈现比较明显的左倾和接近于水平,稀土元素总量相对较小。不同的稀土元素配分曲线可能指示这套地层受到不同期次热液作用的影响。

ZK3-24 富钾板岩离矿体较近呈网脉状矿化特点,通过 PAAS 标准化后,稀土元素配分曲线呈现以下特点:有明显的轻稀土元素富集、轻重稀土元素比值接近以及具有正 E_u 异常,同时富集 Pb、Zn、Ba、Sb、Be 和 Tl 等元素。ZK3-27 云母片岩离矿体较远,没有明显的矿化,只有 Zn、Co、Tl 几个元素相对 PAAS 富集,而且也没有明显正 E_u 异常。

上述研究表明,整个含矿岩系的赋矿围岩都有不同程度的热液活动影响,其中碎屑岩地层以充填作用为主,而碳酸盐地层则被含矿热液选择性交代。富锌矿石是富矿热液充填-交代碳酸盐地层和早期黄铁矿的产物。

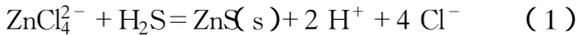
3.2 主矿体交代作用成矿的机理

产在 ZK3-9 富锌矿石上部地层中的 ZK3-6 菱铁矿矿石未见明显角砾,为典型的块状构造的矿石。前人在论述热水沉积岩的矿物组成时,曾特别强调重晶石、铝硅钡石、镁电气石的矿物组合可作为热水沉积的标志(冯胜斌等,2007)。通过镜下观察,在菱铁矿中发现有重晶石和铝硅钡石(图 3c、3d),可能是在较高氧逸度条件的海洋环境下生成的。结合矿石的块状构造和细粒镶嵌结构的特征,可以推测东升庙矿区在硫化物矿体上部产出的菱铁矿矿石不同于主矿体角砾状硫化物矿石的充填-交代成因,而是富铁热液沉淀的结果。

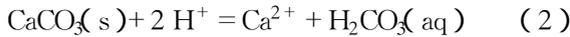
由图 5a 可以看出,菱铁矿矿石和富锌矿石样品的 Sb、In、Cd 等元素相对富集,并且稀土元素配分曲线相似,而且由图 7a 可以发现两者经过 PAAS 标准化后都有比较明显的 E_u 正异常,由此推断两者有同一成矿物质来源。根据前人研究(袁见齐等,1985; David *et al.*, 2010),富锌矿石和菱铁矿矿石的形成

机制如下：

富含金属离子和硫酸根离子的热液在重力差作用下沿构造裂隙向上运移,当热液运移到第 3 岩性段黑色岩系时,其中的硫酸根离子被黑色岩系中的甲烷和有机质等还原成硫化氢,同时与金属离子结合发生锌、铁以及铅等金属的硫化物的卸载。由于②号矿体是以富锌矿石为主的硫化物矿体,下面以锌的结晶沉淀为例介绍含矿热液中硫化物卸载的化学反应过程：

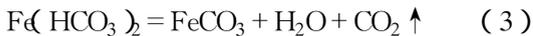


从反应式(1)可以看出锌等金属硫化物发生大量卸载的同时,会产生大量的 H^+ ,造成的酸性环境使得热液对第 4 岩性段底部的碳酸盐地层进行选择性交代,化学反应过程如反应式(2)：



碳酸盐地层被热液选择性交代的同时,围岩地层可能发生垮塌为矿体形成提供了赋矿空间。由此可以发现碳酸盐地层的存在对富矿体形成具有一定必要性:中和热液中的氢离子和提供赋矿空间。这也解释了为什么在黑色岩系中广泛发育纹层状或网脉状矿化而在黑色岩系和碳酸盐地层之间产出厚大硫化物矿体。

硫化物卸载后如果热液中有过量的铁,会与碳酸氢根离子一起向上部地层运移。压力的降低会影响热液中溶质的溶解度。压力降低引起热液产生“沸腾”作用,不但增加溶液中溶质的浓度,更重要的是能使 HF 、 HCl 、 H_2O 等挥发组分从溶液中析出,使剩余溶液的碱性增高,从而搬运金属的能力降低。含矿热液运移到海底,菱铁矿会发生沉淀,如反应式(3)所示,可在温度不太高的条件下,由于压力迅速降低,重碳酸盐发生分解而形成(袁见齐等,1985)。



通过对②号主矿体地质特征的观察,发现交代作用是广泛存在于东升庙矿区的主要含矿岩系中,认为交代成矿对于东升庙矿床的贡献没有引起足够的重视。结合前人对矿区成矿过程的研究(江晓庆,1994;夏学惠等,1990;夏学惠,1992a,1992b,1992c),认为目前国际上对同类矿床最新的成因解释,即含矿热液选择性交代碳酸盐地层能更好地解释东升庙主矿体的成矿过程,这是对 SEDEX 型矿床成因的认识深化的过程。

4 结论

东升庙矿区含矿岩系不同层位的岩、矿石有不一样的组构特征,矿区最大的②号矿体,矿石常见角砾状构造,下部第 3 岩性段以绢云石墨片岩为主的黑色岩系网脉状矿化明显,②号矿体上部的菱铁矿矿石为细粒镶嵌结构和块状构造,具有典型的化学沉积组构特征。在②号矿体各种硫化物矿石中发现矿体上盘围岩(白云大理岩)角砾,用国际上同类矿床的最新成矿机制,即热液选择性交代碳酸盐能更好地解释②号主矿体的形成过程。结合对整个矿区地质特点的研究和含矿岩系样品的地球化学特征认为,东升庙矿区整个含矿岩系有较为明显的热液活动特征,第 3 岩性段的成矿为后期热液充填作用为主造成的矿化,②号硫化物矿体是热液充填+交代碳酸盐地层而成矿,而菱铁矿矿石与②号硫化物矿体有相似成矿物质来源,可能是富铁热液喷流沉淀的结果。这样,东升庙矿床主矿体从下盘到上盘就构成了一个“充填-交代+充填-化学沉积”的矿化模式。其中交代作用在东升庙主矿体成矿中的贡献应该引起足够的重视,甚至在东升庙区内其它矿体中的作用也值得进一步研究。

致谢 野外工作中得到了内蒙古自治区有色地质勘查局 511 地质队总工程师聂志勇和内蒙古东升庙矿业有限责任公司总经理菅玉荣、总工凌世彬及公司其他技术人员的大力帮助,夏学惠教授级高工对论文进行了认真评审并提出了建设性意见,在此一并致谢。

References

- Bau M and Dulski P. 1996. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman Iron-Formations, Transvaal Supergroup South Africa[J]. *Precambrian Research*, 79: 37~55.
- Bie Fenglei, Li Shengrong, Hou Zengqian, *et al.* 2000. Polymetallic sulfide deposits at modern seafloor: an overview[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 27(4): 335~342 (in Chinese with English abstract).
- David L, Dwight C B, David H, *et al.* 2010. Sediment-hosted lead-zinc

- deposits in earth history[J]. *Economic Geology*, 105: 593~625.
- Feng Shengbin, Zhou Hongrui, Yan Changhai, *et al.* 2007. The geochemical characteristics of cherts of Erlangping Group in East Qinling and their sedimentary environment importance[J]. *Geoscience*, 21(4): 378~383(in Chinese with English abstract).
- Han Yinwen and Ma Zhendong. 2003. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 248~250(in Chinese).
- Inner Mongolia Geology and Mineral Bureau. 1991. *Regional Geology of the Inner Mongolia*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~72(in Chinese).
- Jiang Xiaoqing. 1993. The geological characteristics of Dongshengmiao phrite-polymetallic sulfide deposit, Inner Mongolia[J]. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 27~28: 103~115(in Chinese with English abstract).
- Jiang Xiaoqing. 1994. Some evidence for contemporaneous faults in the Dongshengmiao sulfide polymetallic ore district in Inner Mongolia and the genesis of the ore deposit[J]. *Mineral Deposits*, 13(1): 49~60(in Chinese with English abstract).
- Lawrence M G, Greig A, Collerson K D, *et al.* 2006. Rare earth element and yttrium variability in South East Queensland waterways[J]. *Aquatic Geochemistry*, 12: 39~72.
- Li Shengrong and Gao Zhenmin. 1996. Silicalite of hydrothermal origin in the lower cambrian black rock series of South China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 16(4): 416~422(in Chinese with English abstract).
- Ling H F, Chen X, Li D, *et al.* 2013. Cerium anomaly variations in Ediacaran—earliest Cambrian carbonates from the Yangtze Gorges area, South China: Implications for oxygenation of coeval shallow seawater[J]. *Precambrian Research*, 255: 110~127.
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21: 169~200.
- Peng Jun, Tian Jingchun, Yi Haisheng, *et al.* 2000. The Late Precambrian Hot Water Sedimentation of the Southeast Yangtze Plate Continental Margin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(1): 107~113(in Chinese with English abstract).
- Peng Runmin and Zhai Yusheng. 2004. The characteristics of hydrothermal exhalative mineralization of the Langshan-Zhaertai belt, Inner Mongolia, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 257~264(in Chinese with English abstract).
- Peng Runmin, Zhai Yusheng, Han Xuefeng *et al.* 2007. Mineralization response to the structural evolution in the Langshan orogenic belt, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 679~688(in Chinese with English abstract).
- Tu Guangchi. 1999. On the central Asia metallogenic province[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 34(1): 397~404(in Chinese).
- Xia Xuehui and Zhao Xiao. 1990. The origin of clastic type ores of the Dongshengmiao polymetallic sulfide deposit, Inner Mongolia[J]. *Geology and Exploration*, 26(7): 30~41(in Chinese with English abstract).
- Xia Xuehui. 1992a. Ore-forming characteristics and genetic discussion of the Dongshengmiao polymetallic pyrite deposits in the Langshan metallogenic belt, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 11(4): 374~383(in Chinese with English abstract).
- Xia Xuehui. 1992b. Characteristics and formation conditions of sphalerite in the Dongshengmiao polymetallic pyrite deposit[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 11(4): 375~383(in Chinese with English abstract).
- Xia Xuehui, Wang Ga, Yuan Jiazong, *et al.* 2007. Resource prediction of the prospects in the metallogenic belts of the north margin of north China platform[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 29(2): 65~87(in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo and Bian Aiguo. 2000. The end of the Neoproterozoic supercontinent mosaic and Paleoproterozoic—Mesoproterozoic cleavage of the North China Craton[J]. *Science in China Series(D)*, 30(Supplement): 129~137(in Chinese).
- Zhang Zhibin, Li Jianhua, Huang Chaoyi, *et al.* 2010. Study on genesis and ore prospecting of Dongshengmiao deposit in Inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 40(4): 791~800(in Chinese with English abstract).
- Zhou Chaoxian, Zhang Yunguo, Tang Pingzhi, *et al.* 2012. A discussion on genesis and ore prospecting of Dongshengmiao deposit, Inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 42(6): 1656~1664(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 别风雷, 李胜荣, 侯增谦, 等. 2000. 现代海底多金属硫化物矿床[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 27(4): 335~342.
- 冯胜斌, 周洪瑞, 燕长海, 等. 2007. 东秦岭二郎坪群硅质岩地球化学特征及其沉积环境意义[J]. *现代地质*, 21(4): 378~383.
- 韩吟文, 马振东. 2003. *地球化学*[M]. 北京: 地质出版社, 248~250.
- 江晓庆. 1993. 内蒙古东升庙多金属矿床地质特征[J]. *中国地质科学院院报*, 27~28: 103~115.
- 江晓庆. 1994. 内蒙东升庙硫化物多金属矿床同生断层的一些证据及矿床成因[J]. *矿床地质*, 13(1): 49~60.
- 李胜荣, 高振敏. 1996. 华南下寒武统黑色岩系中的热水成因硅质岩[J]. *矿物学报*, 16(4): 416~422.

- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1~725.
- 彭军, 田景春, 伊海生, 等. 2000. 扬子板块东南大陆边缘晚前寒武纪热水沉积作用[J]. 沉积学报, 18(1): 107~113.
- 彭润民, 翟裕生. 2004. 内蒙古狼山-渣尔泰山中元古代被动陆缘热水喷流成矿特征[J]. 地学前缘, 11(1): 257~264.
- 彭润民, 翟裕生, 韩雪峰, 等. 2007. 内蒙古狼山造山带构造演化与成矿响应[J]. 岩石学报, 23(3): 679~688.
- 夏学惠. 1992a. 内蒙狼山成矿带东升庙多金属硫铁矿床成矿特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 11(4): 374~383.
- 夏学惠. 1992b. 东升庙多金属硫铁矿床闪锌矿特征及形成条件[J]. 岩石矿物学杂志, 11(4): 375~383.
- 夏学惠. 1992c. 狼山成矿带元宙陆缘裂谷型海底喷气沉积多金属硫铁矿床成矿特征[J]. 化工地质, 14(4): 1~11.
- 夏学惠, 王生, 袁家忠, 等. 2007. 华北地台北缘三个硫-多金属成矿带中几个远景区的资源预测[J]. 化工矿产地质, 29(2): 65~87.
- 夏学惠, 赵晓. 1990. 内蒙东升庙多金属硫铁矿床碎屑型矿石的成因及其研究意义[J]. 地质与勘探, 26(7): 30~41.
- 涂光炽. 1999. 初议中亚成矿域[J]. 地质科学, 34(1): 397~404.
- 袁见齐, 朱上庆, 翟裕生. 1985. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社, 83~86.
- 翟明国, 卞爱国. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末—中元古代裂解[J]. 中国科学(D辑), 30(增刊): 129~137.
- 张志斌, 李建华, 黄超义, 等. 2010. 东升庙矿床成因和找矿研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(4): 791~800.
- 周朝宪, 张云国, 唐萍芝, 等. 2012. 东升庙矿床成因和找矿研究——与张志斌等商榷[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(6): 1656~1664.

www.yskw.ac.cn