

# 青海虎头崖铅锌矿床闪锌矿化学成分特征研究

雷 浩, 王智琳, 鲁安怀, 谷湘平, 易立文

(中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 青海虎头崖铅锌矿床是祁漫塔格成矿带矽卡岩型多金属矿的典型代表之一, 该矿区岩浆活动强烈, 具有 Fe、Cu、Mo、Pb、Zn 等多金属成矿元素组合。本文通过电子探针对该矿床中闪锌矿化学成分标型特征进行了详细研究, 探讨其中 Fe、Cd 等元素的分布状态和富集规律。研究表明, 矿床中闪锌矿可分为 3 个世代, 从早到晚闪锌矿颜色由黑色逐渐变为浅黄色, 矿物组合由闪锌矿-(方铅矿-黄铜矿)-黄铁矿-磁黄铁矿→闪锌矿-方铅矿-黄铜矿-黄铁矿-(磁黄铁矿)→闪锌矿-方铅矿-方解石或石英。早阶段形成的闪锌矿以富 Fe 贫 Zn 和 Cd 为特征, 而晚阶段形成的闪锌矿相对贫 Fe, 富 Zn 和 Cd。通过闪锌矿中的 FeS 含量估算获得成矿温度范围为 148~262°C。随着成矿阶段的演化, 3 个世代闪锌矿中 FeS 含量逐渐降低, 表明对应成矿温度的不断降低, 分别为 262~258、260~200、248~148°C。结合 Zn/Cd 含量比值变化范围, 认为虎头崖铅锌矿床应属于中温热液矿床。在空间分布上, 沿着热液流动方向, 闪锌矿中 Zn 含量逐渐增加, Fe 含量逐渐减少, Zn/Cd 变化范围增大, 指示矿床中热液流动方向为由北西西到南东东, 由深部到浅部, 与矿体走向一致。通过与国内其他不同类型铅锌矿床的对比, 发现虎头崖铅锌矿床闪锌矿中 Zn、Fe、Mn、Cd 等化学成分具有典型中温矽卡岩型矿床中闪锌矿化学成分的特征, 明显不同于层控型矿床、喷流沉积型矿床等其他类型矿床闪锌矿。结合该矿床地质特征和成矿作用过程, 我们认为虎头崖铅锌矿床为矽卡岩型矿床。

**关键词:** 闪锌矿, 矽卡岩, 化学成分标型, 虎头崖铅锌矿

中图分类号: P578.2<sup>+</sup>3; P618.4

文献标识码:

A 文章编号: 1000-6524(2014)05-0924-13

## A typomorphic study of sphalerite from the Hutouya Pb-Zn deposit in Qinghai Province

LEI Hao, WANG Zhi-lin, LU An-huai, GU Xiang-ping and YI Li-wen

(School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The Hutouya Pb-Zn ore deposit in Qinghai Province, a typical skarn polymetallic deposit in the Qimantag metallogenic belt, is characterized by intense magmatism and a combination of Fe, Cu, Mo, Pb, Zn and some other metallogenic elements. In this paper the authors studied in detail the typomorphic characteristics of chemical composition of sphalerite in this deposit by electron microprobe analysis so as to investigate the distribution and enrichment patterns of Fe and Cd in sphalerite from this deposit. Microscopic observations show that sphalerite can be divided into three generations varying in color from black to light yellow gradually. Accordingly, distinct mineral assemblages of ores are characterized by the variation from sphalerite-(galena-chalcopyrite)-pyrite-pyrrhotite through sphalerite-galena-chalcopyrite-pyrite-(pyrrhotite) to sphalerite-galena-calcite (or quartz). Electron microprobe analyses suggest that the early-stage sphalerite exhibits enrichment of Fe and

收稿日期: 2014-02-17; 修订日期: 2014-06-03

基金项目: 中国地质调查局地质调查工作项目(1212011121220)

作者简介: 雷 浩(1989-), 男, 汉族, 硕士, 从事成因矿物学与找矿矿物学专业, E-mail: leihao2013@sina.cn; 通讯作者: 鲁安怀(1962-), 男, 汉族, 教授, 主要从事成因矿物学与找矿矿物学专业, E-mail: ahlh@pku.edu.cn.

depletion of Zn, Cd. In contrast, the late-stage sphalerite shows relative depletion of Fe and enrichment of Zn, Cd. A range of ore-forming temperatures from 148 to 262°C is estimated according to the content of FeS in the sphalerite. The decreasing content of FeS in the sphalerite in the three generations is consistent with the corresponding decrease of ore-forming temperatures, namely from 262~258°C through 260~200°C to 248~148°C. In combination with the sphalerite Zn/Cd ratios, it is suggested that the Hutouya Pb-Zn deposit is a mesothermal deposit. Spatially, the flowing direction of the hydrothermal flux in this deposit was consistent with the strike of the orebody from NWW to SEE. Zn increased, Fe decreased, and the range of Zn/Cd ratios increased in the flow direction. The Zn, Fe, Mn elements of sphalerite in the Hutouya Pb-Zn deposit show characteristics of the typical skarn (magmatic hydrothermal) deposit, obviously different from things of SEDEX deposits, stratabound deposits, hydrothermal and hot brine mixed zinc deposits. Coupled with the geological characteristics and ore-forming processes, the authors hold that the Hutouya Zn-Pb deposit is a mesothermal skarn-type one.

**Key words:** sphalerite; skarn; typomorphic characteristics; Hutouya Pb-Zn deposit

青海祁漫塔格成矿带发育有一系列的矽卡岩型和斑岩型铁、铜、铅、锌、钼等多金属矿床(李世金等, 2008; 丰成友等, 2010; 景向阳等, 2010; 李东生等, 2010)。其中, 虎头崖铅锌矿床是该成矿带中的一个典型多金属矿床, 其规模已达大型, 目前的矿产勘查工作显示了其具有较大的找矿潜力。近年来, 本区地质矿产研究在成矿地质环境、蚀变矿化分带、成矿物质来源、成岩成矿时代等方面取得了较大进展, 其中关于矿床成因多认为是与岩浆活动有关的矽卡岩型(刘云华等, 2006; 丰成友等, 2011a; 胡杏花等, 2011; 马圣钡等, 2012)。但由于该矿区岩浆活动强烈、含碳酸盐岩地层时代多样, 铁铜铅锌锡钼等成矿元素组合复杂, 而且具有内、外接触带两种矽卡岩亚型的矿化类型, 目前该矿床还存在着其他的不同认识, 如喷流沉积-热液叠加改造型(舒晓峰等, 2012)和热液层状矽卡岩型(张爱奎等, 2008)等。

闪锌矿是铅锌多金属硫化物矿床中最常见、最重要的金属矿物之一, 常含有 Fe、Mn、Cd、Ga、Ge、In、Se、Te 等多种微量元素, 且这些元素蕴含着成矿地质条件、成矿物质来源等诸多成因信息(刘英俊等, 1984; 涂光炽等, 2003)。已有研究表明, 闪锌矿中微量元素组成特征可以为判别矿床成因类型和成矿作用过程提供有用信息(Qian, 1987; 韩照信, 1994; Huston *et al.*, 1995; Beaudoin, 2000; 涂光炽等, 2004; Di Benedetto *et al.*, 2005; Ishihara *et al.*, 2006; Gottesmann and Kampe, 2007; Ishihara *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2010; Ye *et al.*, 2011; 叶霖等, 2012)。在闪锌矿中, Cd 与 Fe 具有密切关系, 常以类质同像形式替换 Fe, 这种替代关系常受成

矿作用过程中压力、温度、构造-热液活动等因素的影响, 从而导致不同矿化阶段的闪锌矿中 Cd、Fe 含量具有明显差异(刘铁庚等, 2010b)。因此, 研究闪锌矿中 Zn、Fe 和 Cd 含量及其变化特征, 对认识成矿作用过程有着重要指示意义。本文通过电子探针对虎头崖铅锌矿床闪锌矿化学成分标型特征开展了详细的研究, 以查明其中 Fe、Cd 等元素的分布状态和富集规律, 并结合矿床地质特征, 探讨区内闪锌矿的成矿作用特征, 以期为进一步认识该矿床的成因提供证据, 也为进一步指导矿区找矿勘探和综合利用工作提供科学依据。

## 1 矿床地质概况

大地构造位置上, 祁漫塔格成矿带处于古亚洲与特提斯构造域结合部位的东昆仑多岛弧盆造山系的西端。其中, 虎头崖铅锌矿床位于东昆仑祁漫塔格山北坡, 东昆北断裂以北, 那陵郭勒河断裂北部。矿区内出露地层由老至新分别为: 中元古界蓟县系狼牙山组(碳酸盐岩段  $J_{x1}$ )、奥陶-志留系滩间山群火山岩组(OST)、下石炭统大干沟组( $C_1dg$ )、上石炭统统苏组( $C_2d$ )、上三叠统鄂拉山组( $T_3e$ ) (图 1)。中元古界蓟县系狼牙山组分布于矿区南侧, 主要由大理岩、灰岩和含铁石英砂岩组成; 奥陶-志留系滩间山群火山岩组分布于矿区中部, 主要由玄武岩、凝灰岩和硅质岩等组成; 下石炭统大干沟组岩性主要为灰岩、大理岩等, 地层岩石破碎强烈; 上石炭统统苏组分布于矿区北部, 主要岩性为大理岩、白云质灰岩夹薄层状灰岩; 上三叠统鄂拉山组分布于

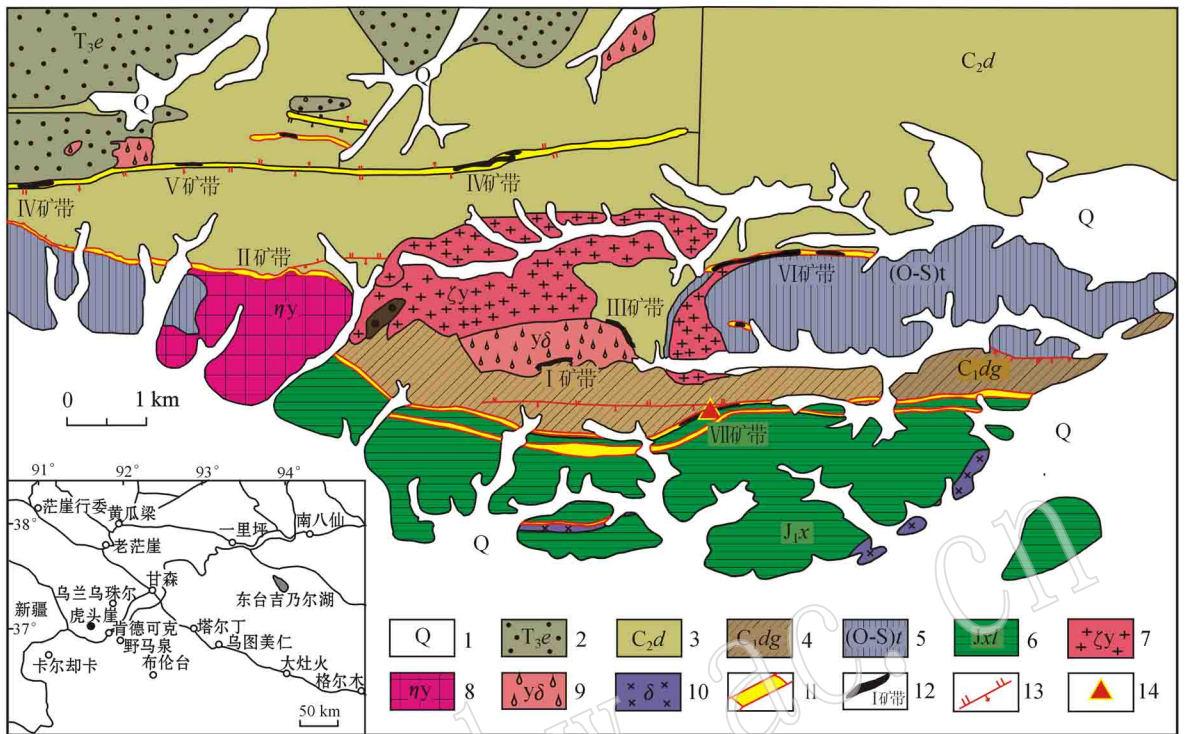


图 1 虎头崖铅锌矿床地质略图(据丰成友等, 2011a)

Fig. 1 Simplified geological map of the Hutouya Pb-Zn deposit (after Feng Chengyou *et al.*, 2011a)

- 1—第四系; 2—上三叠统鄂拉山组; 3—上石炭统缩敖苏组; 4—下石炭统大干沟组; 5—奥陶—志留系滩间山群; 6—蓟县系狼牙山组;  
7—钾长花岗岩; 8—二长花岗岩; 9—花岗闪长岩; 10—闪长岩; 11—砂卡岩化带; 12—矿带及编号; 13—断裂; 14—采样位置  
1—Quaternary; 2—Upper Triassic Elashan Formation; 3—Upper Carboniferous Di'aosu Formation; 4—Lower Carboniferous Dagangou Formation;  
5—Ordovician-Silurian Tanjianshan Group; 6—Langyashan Formation of Jixian System; 7—moyite; 8—mozonitic granite; 9—granodiorite;  
10—diorite; 11—skarnization zone; 12—orebody and its serial number; 13—fault; 14—sampling location

矿区西北部, 主要岩性为晶屑凝灰岩、流纹质含角砾凝灰岩、流纹质玻屑晶屑角砾熔结凝灰岩等。

研究区内岩浆侵入活动强烈, 以印支期中酸性岩浆为主, 岩性有花岗闪长岩、二长花岗岩、钾长花岗岩和闪长岩等。其中, 花岗闪长岩 (~235 Ma, 王松等, 2009) 主要侵位于缩敖苏组和鄂拉山组中, 与 I 矿带和 III 矿带有关; 二长花岗岩 (~219 Ma, 丰成友等, 2012) 分布于 II 矿带南侧, 侵位于滩间山群和缩敖苏组地层中, 控制着铜铅锌矿体的分布, 局部可见绢云母化、绿帘石化、绿泥石化和碳酸盐化等; 钾长花岗岩 (~204 Ma, 刘云华等, 2006) 在北、西和南侧分别侵位于缩敖苏组、滩间山群和大干沟组, 与磁铁矿体、铁铜锡多金属矿体有关; 闪长岩则位于矿区南侧呈脉状小面积侵位于狼牙山组地层中。

矿区褶皱、断裂等构造发育, 构造迹线均呈近 EW 向。其中景忍背斜位于矿区北部 IV 矿带一线, 北翼倾角 40°左右, 南翼 50°~65°, 轴部形成近 EW

向的压扭性断裂带; 狼牙山向斜位于矿区南部狼牙山组地层中, 北翼向南陡倾, 倾角 80°, 南翼北倾, 倾角 60°, 断裂带内岩石破碎, 角砾岩、碎裂岩、糜棱岩等随处可见。

上述地层与花岗质侵入体的接触部位, 以及不同地层之间、不同岩性界面、构造破碎带等常常发育砂卡岩化、硅化、绿泥石化等蚀变和铁铜锡铅锌等矿化现象。

虎头崖铅锌矿床主要受两条砂卡岩化构造破碎带控制, 矿化分布范围广。根据矿化产出部位和矿体集中分布特征, 可将该矿区分为 I、II、III、IV、V、VI、VII 矿化带。其中, I、II 矿化带和 VI 矿化带西端分别为花岗闪长岩、二长花岗岩与围岩接触交代形成的正接触带砂卡岩亚型, IV、V 矿化带和 VI 矿化带东端及 VII 矿化带为矿区北部碳酸盐岩地层内构造断裂带和矿区中南部不同围岩地层接触界面控制的外接触带砂卡岩亚型(丰成友等, 2010)。辉钼矿 Re-Os

等时线年龄表明Ⅴ矿带和Ⅶ矿带的年龄分别为  $225.0 \pm 4.0$  Ma 和  $230.1 \pm 4.7$  Ma(丰成友等, 2011a)。

另外,金属矿化元素组合、矿物组成和蚀变特征在空间上存在差异。自成矿岩体向外具有明显的矿化蚀变分带,长可达 2 km 以上,宽度数米到十几米不等,由岩体→接触带→含碳酸盐地层,金属成矿元素分别为 Mo→Fe-Sn-Cu-Co→Cu-Mo(Pb-Zn)→Pb-Zn,相应的蚀变由钾化、石榴石化、透辉石化过渡为绿帘石、绿泥石化、碳酸盐化(丰成友等, 2011b)。矿石类型以铅锌矿矿石、黄铁矿-铅锌矿矿石、黄铜矿-铅锌矿矿石、黄铜矿-黄铁矿-铅锌矿矿石为主。矿石结构以自形-半自形粒状结晶结构、半自形-它形粒状结晶结构、它形粒状填隙结构、固溶体分离结构、交代结构、交代残余结构为主,构造以块状、浸染状、斑杂状构造为主,其次为条纹状、团块状、细脉状、星点状构造。

根据矿物共生组合和矿物间的相互关系,可将矿化作用过程分为矽卡岩期、热液期和表生期。其中,矽卡岩期可划分为“干矽卡岩”阶段和“湿矽卡岩”阶段;“干矽卡岩”阶段主要以出现钙铝榴石、钙铁榴石、硅灰石等矽卡岩矿物为特征,“湿矽卡岩”阶段主要以出现符山石、绿帘石、金云母、阳起石等矽卡岩矿物为特征,并出现磁铁矿。热液期可划分为硫化物阶段和碳酸盐阶段,硫化物阶段主要出现辉钼矿、毒砂、磁黄铁矿、黄铁矿等高温热液条件下形成的硫化物,以及黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等中低温热液条件形成的硫化物,非金属矿物有石英、绿帘石、绿帘石、萤石、碳酸盐类矿物,碳酸盐阶段出现含碳酸盐岩细脉体穿插早期矿物,表生期形成了褐铁矿、铜蓝、孔雀石等次生矿物。

## 2 闪锌矿产出特征

在详细野外地质调查基础上,结合显微岩相观察,发现虎头崖铅锌矿床中闪锌矿具有较为复杂的结构构造。结构有半自形-它形粒状结构、固溶体分离结构、填隙结构、残余结构、细脉状穿插结构等,常见浸染状、团块状构造,偶见条带状、脉状、斑点状构造。

该矿床中闪锌矿按其颜色、粒度、结构及矿物组合关系可划分为 3 个世代。第 1 世代闪锌矿呈黑

色,他形粒状晶体,草莓状、斑点状、胶状,产于微条带-层状矿石或斑点状矿石中(图 2a),常与黄铁矿共生(图 2g),解理发育程度低,形成闪锌矿-(方铅矿-黄铜矿)-黄铁矿-磁黄铁矿矿物组合。多见闪锌矿交代磁黄铁矿,港湾状结构和交代残余结构常见(图 2d)。见少量黄铜矿呈乳滴状、不规则状。无方铅矿与之共生或有少量方铅矿出现。在空间上,各中段均有发育,主要常见于矿体深部的东北侧。第 2 世代闪锌矿呈深黑色-棕褐色,他形、半自形以及自形粒状晶体,粒度较粗(0.01~0.1 mm)(图 2b),常具环带状结构(图 2e),产于致密块状矿石中,形成闪锌矿-方铅矿-黄铜矿-黄铁矿-(磁黄铁矿)矿物组合。黄铜矿呈乳滴状、蠕虫状、串珠状、不规则状(图 2h),闪锌矿与方铅矿共生,二者所占比例相当,方铅矿不少于 10%,多达 40%,含有少量或不含磁黄铁矿。在空间上,各中段均有发育,主要常见于矿体中部。第 3 世代闪锌矿呈茶色-浅黄色(图 2c),他形晶,裂隙最为发育(图 2f),呈闪锌矿-石英脉或细脉和闪锌矿-方铅矿-方解石脉产出(图 2i),常穿插黄铜矿、磁黄铁矿等早期矿物。在空间上,仅在矿体中部和浅部产出,常见于浅部的西南侧。

## 3 闪锌矿化学成分特征

### 3.1 分析方法及结果

文中分析的样品产自虎头崖铅锌矿床中Ⅶ矿带不同开采中段。首先在光学显微镜下划分出闪锌矿形成世代,然后采用电子探针(EPMA)对不同世代的闪锌矿进行了化学成分分析。电子探针分析测试在中南大学地球科学与信息物理学院电子探针实验室完成,仪器型号为 EPMA-1720 型(日本岛津公司)。测试条件为:加速电压 20 kV,电流 15 nA,束斑直径为 1  $\mu$ m,仪器的检测限为 0.01%~0.05%。测试元素包括 S、Zn、Fe、Mn、Cd 等,采用 ZAF 校正法。S 和 Zn 元素的标样为 ZnS,Fe 元素的标样为 FeS<sub>2</sub>,Mn 元素的标样为 MnS,Cd 元素的标样为 CdS。共完成了 31 个样品、84 个测试点的电子探针成分分析,分析结果见表 1。

由电子探针分析结果(表 1)可知,闪锌矿中的 Zn 含量变化范围为 56.659%~65.353%,平均 61.344%,S 含量为 31.188%~34.202%,平均 33.241%,Fe 含量为 1.171%~10.962%,平均 4.997%

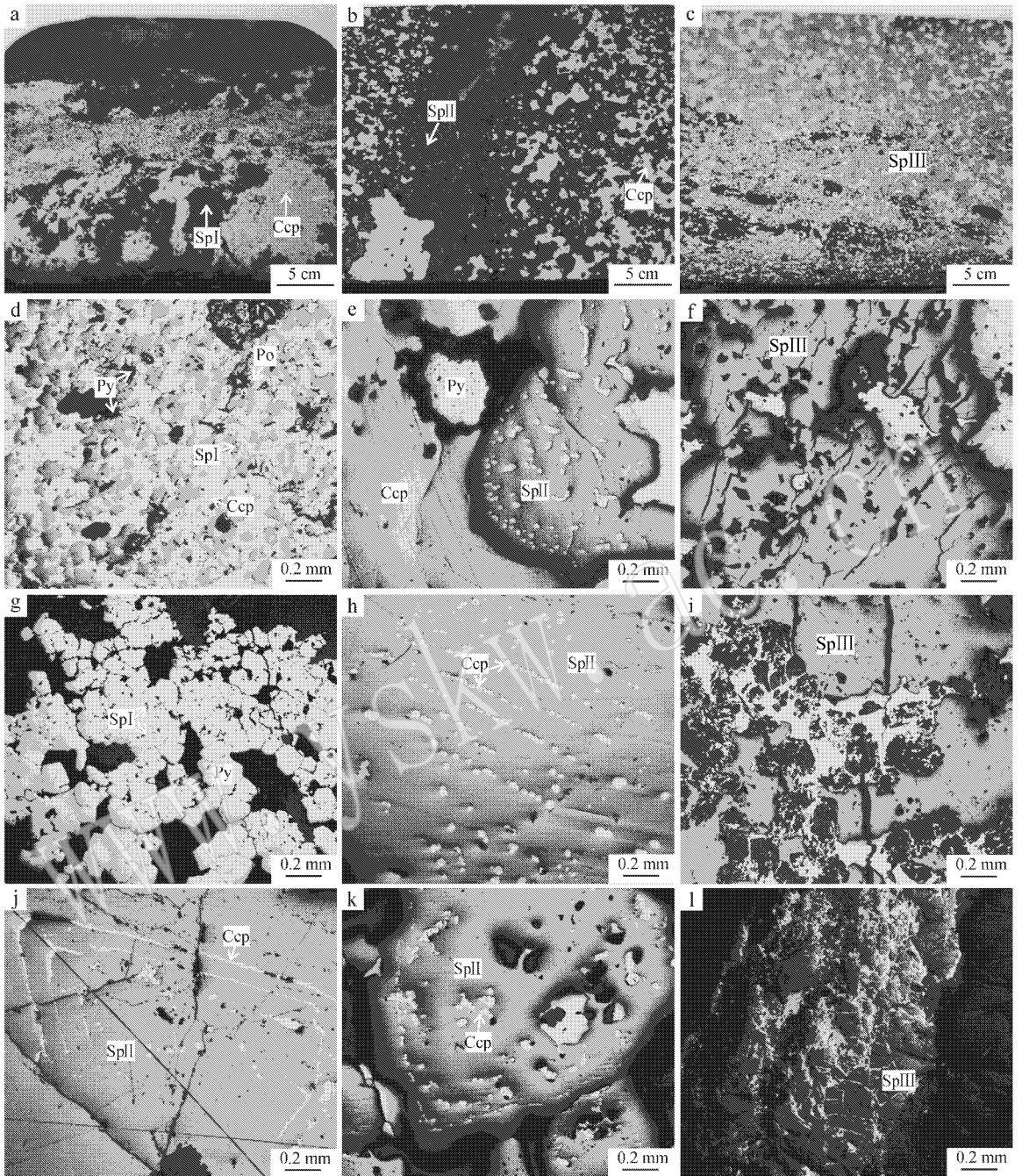


图 2 虎头崖铅锌矿床 3 个世代闪锌矿及典型矿物

Fig. 2 Sphalerite of three generations and typical minerals in the Hutouya Pb-Zn deposit

a—第 1 世代条带状闪锌矿 光片 ; b—第 2 世代浸染状闪锌矿 光片 ; c—第 3 世代浸染状闪锌矿 光片 ; d—第 1 世代闪锌矿交代磁黄铁矿 , 他形粒状 , 反射光 ; e—第 2 世代闪锌矿具黄铜矿环带结构 , 反射光 ; f—第 3 世代他形闪锌矿 , 裂隙发育 , 反射光 ; g—第 1 世代闪锌矿与黄铁矿共生 , 反射光 ; h—第 2 世代闪锌矿中定向乳滴状黄铜矿出溶 , 反射光 ; i—第 3 世代闪锌矿被脉石矿物交代 , 反射光 ; j—环带状出溶黄铜矿 , 反射光 ; k—环带状出溶黄铜矿与交代闪锌矿的黄铜矿 , 反射光 ; l—闪锌矿被脉石矿物交代 , 裂隙发育 , 反射光 ; Sp—闪锌矿 ; Ccp—黄铜矿 ; Py—黄铁矿 ; Po—黄铜矿

a—striped sphalerite of the first generation , polished section ; b—disseminated sphalerite of the second generation , polished section ; c—disseminated sphalerite of the third generation , reflected light ; d—xenomorphic-granular pyrrhotite replacing sphalerite , reflected light ; e—sphalerite characterized by chalcopyrite-zoning texture , reflected light ; f—xenomorphic sphalerite showing well-developed fissures , reflected light ; g—sphalerite intergrowing with pyrite framboids , reflected light ; h—exsolution of oriented droplet-like chalcopyrite in sphalerite , reflected light ; i—sphalerite replaced by gangue minerals , reflected light ; j—exsolved chalcopyrite displaying zoning texture , reflected light ; k—exsolved chalcopyrite with zoning texture and chalcopyrite replacing sphalerite , reflected light ; l—sphalerite replaced by gangue minerals showing well-developed fractures , reflected light ; Sp—sphalerite ; Ccp—chalcopyrite ; Py—pyrite ; Po—pyrrhotite

表 1 虎头崖铅锌矿床中闪锌矿电子探针成分分析结果

$w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of sphalerite from the Hutouya Pb-Zn deposit

世代	样号	S	Zn	Fe	Cd	Mn	Total	晶体化学式
第 1 世代	3950-9-1	32.180	59.067	8.149	0.424	0.263	100.083	$(Zn_{0.9}Fe_{0.145}Cd_{0.004}Mn_{0.005})_{1.054}S$
	3950-9-2	33.549	56.548	8.738	0.351	0.314	99.500	$(Zn_{0.827}Fe_{0.15}Cd_{0.003}Mn_{0.005})_{1.985}S$
	3950-9-3	34.185	56.879	8.837	0.208	0.341	100.450	$(Zn_{0.816}Fe_{0.148}Cd_{0.002}Mn_{0.006})_{1.972}S$
	4000-7a-1	33.742	55.873	10.962	0.355	0.090	101.022	$(Zn_{0.812}Fe_{0.187}Cd_{0.003}Mn_{0.002})_{1.003}S$
	4000-7a-2	33.693	56.563	10.643	0.307	0.115	101.321	$(Zn_{0.823}Fe_{0.181}Cd_{0.003}Mn_{0.002})_{1.009}S$
	4000-7c-1	32.478	56.670	10.415	0.246	0.098	99.907	$(Zn_{0.856}Fe_{0.184}Cd_{0.002}Mn_{0.002})_{1.044}S$
	4000-7c-2	33.385	55.659	9.426	0.340	0.193	99.003	$(Zn_{0.818}Fe_{0.162}Cd_{0.003}Mn_{0.003})_{1.986}S$
	4000-7c-3	34.081	57.424	9.245	0.304	0.131	101.185	$(Zn_{0.826}Fe_{0.156}Cd_{0.003}Mn_{0.002})_{1.987}S$
	4000-27-1	33.548	57.624	8.362	0.333	0.000	99.867	$(Zn_{0.843}Fe_{0.143}Cd_{0.003})_{1.988}S$
	4000-27-2	33.515	57.777	8.033	0.269	0.059	99.653	$(Zn_{0.846}Fe_{0.138}Cd_{0.002}Mn_{0.001})_{1.987}S$
	4000-27-3	33.624	57.435	8.305	0.409	0.000	99.773	$(Zn_{0.838}Fe_{0.142}Cd_{0.003})_{1.983}S$
	4000-16-1	34.108	59.126	6.548	0.361	0.332	100.475	$(Zn_{0.85}Fe_{0.11}Cd_{0.003}Mn_{0.006})_{1.969}S$
4100-16-2	34.061	58.359	6.853	0.375	0.311	99.959	$(Zn_{0.84}Fe_{0.116}Cd_{0.003}Mn_{0.005})_{1.964}S$	
4100-16-3	33.023	60.350	6.622	0.463	0.290	100.748	$(Zn_{0.896}Fe_{0.115}Cd_{0.004}Mn_{0.005})_{1.021}S$	
第 2 世代	3950-3-1	33.152	59.116	7.060	0.432	0.285	100.045	$(Zn_{0.875}Fe_{0.122}Cd_{0.004}Mn_{0.005})_{1.006}S$
	3950-3-2	33.154	60.550	6.799	0.434	0.271	101.208	$(Zn_{0.896}Fe_{0.118}Cd_{0.004}Mn_{0.005})_{1.022}S$
	3950-4-1	32.821	61.337	3.925	0.339	0.001	98.423	$(Zn_{0.917}Fe_{0.069}Cd_{0.003})_{1.988}S$
	3950-4-2	33.393	62.678	3.872	0.354	0.004	100.301	$(Zn_{0.921}Fe_{0.067}Cd_{0.003})_{1.995}S$
	3950-4-3	33.239	61.563	4.138	0.425	0.000	99.365	$(Zn_{0.909}Fe_{0.071}Cd_{0.004})_{1.984}S$
	3950-5-1	33.306	61.178	4.744	0.406	0.207	99.841	$(Zn_{0.901}Fe_{0.082}Cd_{0.003}Mn_{0.004})_{1.99}S$
	3950-5-2	31.961	63.152	5.191	0.428	0.289	101.021	$(Zn_{0.969}Fe_{0.093}Cd_{0.004}Mn_{0.005})_{1.072}S$
	3950-5-3	32.609	63.365	5.155	0.320	0.298	101.747	$(Zn_{0.953}Fe_{0.091}Cd_{0.003}Mn_{0.005})_{1.052}S$
	4000-1-1	33.411	62.648	4.998	0.402	0.524	101.983	$(Zn_{0.92}Fe_{0.086}Cd_{0.003}Mn_{0.009})_{1.018}S$
	4000-1-2	33.535	61.301	5.097	0.340	0.768	101.041	$(Zn_{0.897}Fe_{0.087}Cd_{0.003}Mn_{0.013})_{1}S$
	4000-2-1	32.914	60.956	5.583	0.396	0.781	100.630	$(Zn_{0.908}Fe_{0.097}Cd_{0.003}Mn_{0.014})_{1.023}S$
	4000-2-2	32.815	58.536	7.611	0.327	0.940	100.229	$(Zn_{0.875}Fe_{0.133}Cd_{0.003}Mn_{0.017})_{1.028}S$
	4000-6a-1	33.682	58.735	7.291	0.365	0.603	100.676	$(Zn_{0.855}Fe_{0.124}Cd_{0.003}Mn_{0.01})_{1.993}S$
	4000-6a-2	33.380	57.936	8.201	0.412	0.943	100.872	$(Zn_{0.851}Fe_{0.141}Cd_{0.004}Mn_{0.016})_{1.012}S$
	4000-9a-1	34.202	62.164	3.043	0.351	0.660	100.420	$(Zn_{0.892}Fe_{0.051}Cd_{0.003}Mn_{0.011})_{1.957}S$
	4000-9a-2	33.259	63.815	2.992	0.389	0.523	100.978	$(Zn_{0.941}Fe_{0.052}Cd_{0.003}Mn_{0.009})_{1.005}S$
	4000-9a-3	33.643	62.756	2.788	0.379	0.546	100.112	$(Zn_{0.915}Fe_{0.048}Cd_{0.003}Mn_{0.009})_{1.975}S$
	4000-18-1	33.130	61.491	4.657	0.427	0.026	99.731	$(Zn_{0.91}Fe_{0.081}Cd_{0.004})_{1.995}S$
	4000-18-2	33.647	59.581	5.289	0.399	0.134	99.050	$(Zn_{0.869}Fe_{0.09}Cd_{0.003}Mn_{0.002})_{1.965}S$
	4000-18-3	33.531	61.863	5.183	0.424	0.005	101.006	$(Zn_{0.905}Fe_{0.089}Cd_{0.004})_{1.997}S$
4000-19-1	33.035	61.324	5.161	0.446	0.220	100.186	$(Zn_{0.911}Fe_{0.09}Cd_{0.004}Mn_{0.004})_{1.008}S$	
4000-19-2	33.037	63.031	3.542	0.501	0.158	100.269	$(Zn_{0.936}Fe_{0.062}Cd_{0.004}Mn_{0.003})_{1.005}S$	
4000-20-1	33.177	62.183	4.408	0.262	0.212	100.242	$(Zn_{0.919}Fe_{0.076}Cd_{0.002}Mn_{0.004})_{1.002}S$	
4000-20-2	33.161	62.667	4.708	0.317	0.000	100.853	$(Zn_{0.927}Fe_{0.082}Cd_{0.003})_{1.011}S$	
4000-20-3	33.386	62.125	4.528	0.315	0.042	100.396	$(Zn_{0.913}Fe_{0.078}Cd_{0.003}Mn_{0.001})_{1.994}S$	
4000-22-1	33.006	62.995	3.512	0.484	0.159	100.156	$(Zn_{0.936}Fe_{0.061}Cd_{0.004}Mn_{0.003})_{1.004}S$	
4000-22-2	33.105	62.647	3.886	0.419	0.234	100.291	$(Zn_{0.928}Fe_{0.067}Cd_{0.004}Mn_{0.004})_{1.003}S$	
4000-22-3	32.956	63.315	3.735	0.515	0.171	100.692	$(Zn_{0.942}Fe_{0.065}Cd_{0.004}Mn_{0.003})_{1.015}S$	
第 3 世代	3950-7-1	33.473	61.041	5.401	0.327	0.157	100.399	$(Zn_{0.895}Fe_{0.093}Cd_{0.003}Mn_{0.003})_{1.993}S$
	3950-7-2	33.627	60.523	5.384	0.348	0.212	100.094	$(Zn_{0.883}Fe_{0.092}Cd_{0.003}Mn_{0.004})_{1.981}S$
	3950-8-1	32.848	61.877	4.447	0.410	0.031	99.613	$(Zn_{0.924}Fe_{0.078}Cd_{0.004}Mn_{0.001})_{1.006}S$
	3950-8-2	33.011	61.798	4.321	0.402	0.016	99.548	$(Zn_{0.918}Fe_{0.075}Cd_{0.003})_{1.997}S$
	3950-8-3	32.768	61.841	3.944	0.372	0.051	98.976	$(Zn_{0.926}Fe_{0.069}Cd_{0.003}Mn_{0.001})_{1.999}S$
	4000-5-1	32.283	63.258	3.014	0.330	0.037	98.922	$(Zn_{0.961}Fe_{0.054}Cd_{0.003}Mn_{0.001})_{1.018}S$
	4000-5-2	32.602	62.338	3.793	0.386	0.033	99.152	$(Zn_{0.938}Fe_{0.067}Cd_{0.003}Mn_{0.001})_{1.009}S$
	4000-5-3	32.498	62.207	3.547	0.319	0.067	98.638	$(Zn_{0.939}Fe_{0.063}Cd_{0.003}Mn_{0.001})_{1.006}S$
	4000-21-1	33.533	60.566	5.376	0.312	0.011	99.798	$(Zn_{0.886}Fe_{0.092}Cd_{0.003})_{1.981}S$
	4000-21-2	32.879	61.004	5.541	0.343	0.009	99.776	$(Zn_{0.91}Fe_{0.097}Cd_{0.003})_{1.01}S$
	4000-21-3	33.245	61.539	5.323	0.373	0.000	100.480	$(Zn_{0.908}Fe_{0.092}Cd_{0.003})_{1.003}S$

续表 1  
Continued Table 1

世代	样号	S	Zn	Fe	Cd	Mn	Total	晶体化学式
第 3 世代	4000-23-1	33.553	61.706	3.850	0.381	0.005	99.495	$(Zn_{0.902}Fe_{0.066}Cd_{0.003})_{\lambda.971}S$
	4000-23-2	33.758	59.974	6.403	0.342	0.003	100.480	$(Zn_{0.871}Fe_{0.109}Cd_{0.003})_{\lambda.983}S$
	4000-23-3	31.188	61.553	5.010	0.311	0.035	98.097	$(Zn_{0.968}Fe_{0.092}Cd_{0.003}Mn_{0.001})_{\lambda.064}S$
	4100-5-1	33.647	64.834	1.297	0.251	0.178	100.207	$(Zn_{0.945}Fe_{0.022}Cd_{0.002}Mn_{0.003})_{\lambda.973}S$
	4100-5-2	33.616	64.548	1.171	0.356	0.065	99.756	$(Zn_{0.942}Fe_{0.02}Cd_{0.003}Mn_{0.001})_{\lambda.966}S$
	4100-5-3	33.791	64.317	1.508	0.326	0.147	100.089	$(Zn_{0.934}Fe_{0.026}Cd_{0.003}Mn_{0.003})_{\lambda.965}S$
	4100-10-1	33.471	62.748	4.231	0.234	0.000	100.684	$(Zn_{0.92}Fe_{0.073}Cd_{0.002})_{\lambda.994}S$
	4100-10-2	33.384	61.569	4.185	0.284	0.018	99.440	$(Zn_{0.905}Fe_{0.072}Cd_{0.002})_{\lambda.979}S$
	4100-10-3	33.690	61.997	3.955	0.329	0.014	99.985	$(Zn_{0.903}Fe_{0.067}Cd_{0.003})_{\lambda.973}S$
	4100-12-1	33.098	60.774	5.818	0.420	0.382	100.492	$(Zn_{0.901}Fe_{0.101}Cd_{0.004}Mn_{0.007})_{\lambda.012}S$
	4100-12-2	33.017	61.251	4.527	0.351	0.163	99.309	$(Zn_{0.91}Fe_{0.079}Cd_{0.003}Mn_{0.003})_{\lambda.995}S$
	4100-13-1	33.135	59.902	4.577	0.306	0.233	98.153	$(Zn_{0.887}Fe_{0.079}Cd_{0.003}Mn_{0.004})_{\lambda.973}S$
	4100-13-2	33.004	63.284	4.823	0.399	0.182	101.692	$(Zn_{0.941}Fe_{0.084}Cd_{0.003}Mn_{0.003})_{\lambda.031}S$
	4100-13-3	32.665	63.858	4.804	0.378	0.191	101.896	$(Zn_{0.959}Fe_{0.084}Cd_{0.003}Mn_{0.003})_{\lambda.05}S$
	4100-17-1	33.509	61.973	4.043	0.343	0.000	99.868	$(Zn_{0.907}Fe_{0.069}Cd_{0.003})_{\lambda.979}S$
	4100-17-2	33.958	61.981	3.971	0.343	0.000	100.253	$(Zn_{0.895}Fe_{0.067}Cd_{0.003})_{\lambda.965}S$
	4100-17-3	33.038	61.088	4.052	0.308	0.005	98.491	$(Zn_{0.907}Fe_{0.07}Cd_{0.003})_{\lambda.98}S$
	4100-22-1	33.969	61.678	3.311	0.185	0.353	99.496	$(Zn_{0.891}Fe_{0.056}Cd_{0.002}Mn_{0.006})_{\lambda.954}S$
	4100-22-2	33.366	62.179	3.441	0.207	0.193	99.386	$(Zn_{0.914}Fe_{0.059}Cd_{0.002}Mn_{0.003})_{\lambda.978}S$
	4100-22-3	33.884	61.049	3.867	0.203	0.161	99.165	$(Zn_{0.884}Fe_{0.066}Cd_{0.002}Mn_{0.003})_{\lambda.954}S$
	4100-23-1	32.338	65.353	2.554	0.432	0.204	100.881	$(Zn_{0.991}Fe_{0.045}Cd_{0.004}Mn_{0.004})_{\lambda.044}S$
	4100-23-2	33.362	63.106	2.770	0.374	0.215	99.827	$(Zn_{0.928}Fe_{0.048}Cd_{0.003}Mn_{0.004})_{\lambda.982}S$
	4100-23-3	33.961	63.427	2.739	0.286	0.126	100.539	$(Zn_{0.916}Fe_{0.046}Cd_{0.002}Mn_{0.002})_{\lambda.967}S$
	4100-25-1	33.680	64.089	3.652	0.303	0.000	101.724	$(Zn_{0.933}Fe_{0.062}Cd_{0.003})_{\lambda.998}S$
4100-25-2	33.214	62.823	3.604	0.413	0.000	100.054	$(Zn_{0.928}Fe_{0.062}Cd_{0.004})_{\lambda.994}S$	
4100-25-3	33.790	63.338	3.617	0.315	0.002	101.062	$(Zn_{0.919}Fe_{0.061}Cd_{0.003})_{\lambda.984}S$	
4100-27-1	33.120	63.773	2.368	0.333	0.000	99.594	$(Zn_{0.944}Fe_{0.041}Cd_{0.003})_{\lambda.988}S$	
4100-27-2	33.236	64.250	2.439	0.288	0.000	100.213	$(Zn_{0.948}Fe_{0.042}Cd_{0.002})_{\lambda.993}S$	
4100-27-3	33.066	62.952	3.056	0.325	0.034	99.432	$(Zn_{0.934}Fe_{0.053}Cd_{0.003}Mn_{0.001})_{\lambda.99}S$	
4100-29-1	32.432	64.643	2.620	0.366	0.160	100.221	$(Zn_{0.978}Fe_{0.046}Cd_{0.003}Mn_{0.003})_{\lambda.03}S$	
4100-29-2	31.741	64.535	3.173	0.297	0.135	99.881	$(Zn_{0.997}Fe_{0.057}Cd_{0.003}Mn_{0.002})_{\lambda.06}S$	

注：闪锌矿晶体化学式的计算是以 S 为 1 摩尔数来计算的。测试者：雷浩；样号 3950-、4000-、4100- 分别代表采样位置为 3950 中段、4000 中段、4100 中段平硐。

Cd 含量为 0.185% ~ 0.515%，平均 0.353%，Mn 含量为 0 ~ 0.943%，平均 0.183%。其中早期形成的闪锌矿中 S、Zn、Fe、Cd 元素的含量分别为 32.180% ~ 34.185%、55.873% ~ 60.350%、6.548% ~ 10.962%、0.208% ~ 0.463%，中期形成的闪锌矿各元素含量分别为 31.961% ~ 34.202%、58.536% ~ 63.815%、2.788% ~ 8.201%、0.262% ~ 0.515%，晚期形成的闪锌矿各元素含量分别为 31.188% ~ 33.969%、59.902% ~ 64.834%、1.171% ~ 6.403%、0.185% ~ 0.432%。可见，虎头崖铅锌矿床的闪锌矿中 Zn、Fe 的变化范围较大，从第 1 世代到第 3 世代，闪锌矿中的 Fe 元素含量逐渐降低，Zn 元素含量逐渐升高，因此早期形成的闪锌矿富 Fe、贫 Zn，晚期形成的闪锌矿相对贫 Fe，富 Zn 和 Cd。

### 3.2 Fe 元素特征及指示意义

通过对比发现，虎头崖铅锌矿床不同世代的闪锌矿中 Fe 的含量有明显差异，第 1 世代闪锌矿中 Fe 的含量为 6.622% ~ 10.962%，第 2 世代闪锌矿中 Fe 的含量为 2.788% ~ 7.611%，第 3 世代闪锌矿中 Fe 的含量为 1.171% ~ 6.403%。由此可知，随着矿化阶段的演化，即从第 1 世代到第 2 世代再到第 3 世代，闪锌矿 Fe 含量逐渐降低。

研究表明闪锌矿中化学成分对成矿温度具有指示意义，其中 Fe 元素的含量与成矿温度往往具有正的相关性(刘铁庚等, 2010a)，可作为地质温度计(Kullerud, 1953; 卢焕章, 1975; 景向阳等, 2010)。该区早期富 Fe 到晚期贫 Fe 的演化特征指示了成矿作用过程中，成矿流体温度的逐渐降低，其中样品

4000-7a 中闪锌矿的 Fe 含量超过 10.5% ,暗示了成矿温度可能大于 300℃(刘英俊等,1984)。此外,闪锌矿中 FeS 含量可用来估计成矿温度范围(图 3)(卢焕章,1975),虎头崖铅锌矿床的闪锌矿中 FeS 的分子数为 2.38~18.27(表 1),从而推测成矿温度为 148~262℃(图 3),属于中温热液成矿。其中,从早到晚 3 个世代形成的闪锌矿中的 FeS 含量分别为 11.02%~18.27%、5.11%~14.11%、2.38%~10.89%,对应的成矿温度分别为 258~262℃、200~260℃、148~248℃(图 3)。该结果表明从第 1 世代到第 3 世代,闪锌矿的成矿温度逐渐降低。

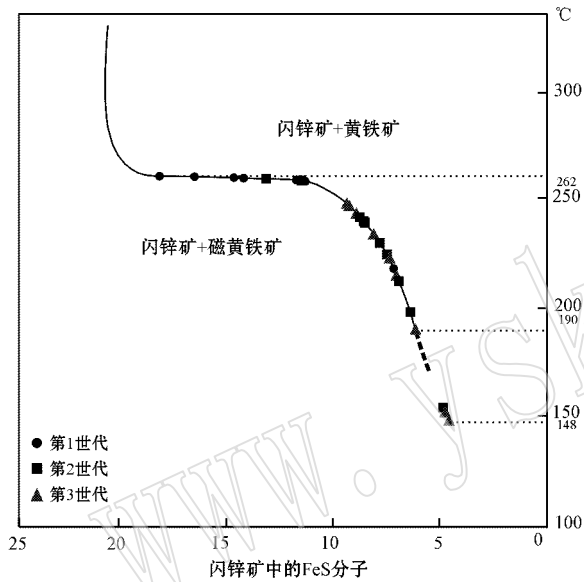


图 3 虎头崖闪锌矿中 FeS 含量与温度关系  
(据卢焕章,1975)

Fig. 3 The dependence between FeS in sphalerite and formation temperature (after Lu Huanzhang, 1975)

虎头崖铅锌矿床中的闪锌矿化学成分在空间上也存在着差异,其中深部矿体中闪锌矿的 Fe 含量为 3.85%~10.962%,部分闪锌矿的成分可达富铁闪锌矿端员(Fe > 10%),明显高于浅部矿体(1.171%~6.853%)指示了从深部到浅部成矿温度逐渐降低。由图 4a 可知,闪锌矿中 Fe 含量随 Zn 含量的升高而降低,两者呈负相关性,表明两者替代关系明显。通过对比不同采样地点闪锌矿中 Fe、Zn 的含量可知,在已进行开采的空间内,由深部到浅部,由北西西到南东东方向,闪锌矿的 Fe 含量逐渐减少,Zn 含量逐渐增加。根据闪锌矿中 Fe 对成矿温度的指示意义,由此可推断出成矿热液流动方向为北西西到南东东,由深部到浅部。

Fe 属于铁族元素,具有亲氧性和亲硫性双重特征,往往较 Zn 更早沉降形成磁铁矿等,而 Zn 为亲硫亲铜元素,在岩浆结晶过程中随着温度降低往往趋向于进入岩浆期后热液流体中,并在中、低温热液作用过程中沿断裂等有利空间沉降富集成矿(牟保磊等,1999)。在高温环境中 Fe 具有强烈类质同像置换闪锌矿中 Zn 的能力(刘铁庚,2010a),故本文第 1 世代闪锌矿中 Fe 元素含量明显高于第 2 世代和第 3 世代,本区自成矿岩体内部向外表现出明显的内 Fe 外 Zn 金属矿化蚀变带现象及元素富集特征现象也说明了这一点。

### 3.3 Cd 元素特征及指示意义

虎头崖铅锌矿床闪锌矿中 Cd 的含量范围为 0.255%~0.473%,平均为 0.348%,已达到工业综合利用要求(铅锌矿床伴生有用组分评价参考: Cd 的质量分数为 0.01,查自 DZ/T0214-2002 规范附录)。通常,Cd 元素以类质同像的方式存在于闪锌矿中,其含量保持在一定数值之间,较为稳定,与 Zn 具有相似的地球化学行为(郭承基,1965)。研究表明 Cd 元素的分布受成矿环境和成矿作用等因素的影响(Schwartz, 2000; 周家喜等, 2009; 刘铁庚, 2009)。由图 4b 可知,闪锌矿中 Cd 元素含量与 Zn 元素含量在第 1 世代呈正相关性,在第 2、3 世代中两者相关性较小。而在图 4c 中,Cd 元素的含量与 Zn/Cd 比值呈现明显的负相关性,此特征与典型的岩浆热液矿床矽卡岩中闪锌矿的特征相类似(司荣军等,2006)。

本区闪锌矿中 Zn/Cd 值变化范围为 123~333,平均为 181,与中温条件下形成闪锌矿的 Zn/Cd 值(100~500)相似(刘英俊等,1984)。其中第 1、第 2、第 3 世代闪锌矿中 Zn/Cd 值的变化范围分别为 130~273、123~237、145~333,晚期闪锌矿的 Zn/Cd 值变化范围明显增大,空间上由深到浅闪锌矿的 Zn/Cd 值变化范围分别为 137~273、123~237、130~333,浅部闪锌矿的 Zn/Cd 值变化范围明显增大。由此可知沿热液流动方向,闪锌矿中 Zn/Cd 值变化范围明显增大。

综上所述,本矿床中闪锌矿成矿温度以中温为主,该认识与前人流体包裹体的研究成果(徐国端,2010)一致,后者得出的成矿温度范围为 220~303℃,并根据闪锌矿矿物学特征和各世代成分特征,结合空间产出位置,推断流体运移方向为北西西到南东东,由深部到浅部,与矿体走向一致。



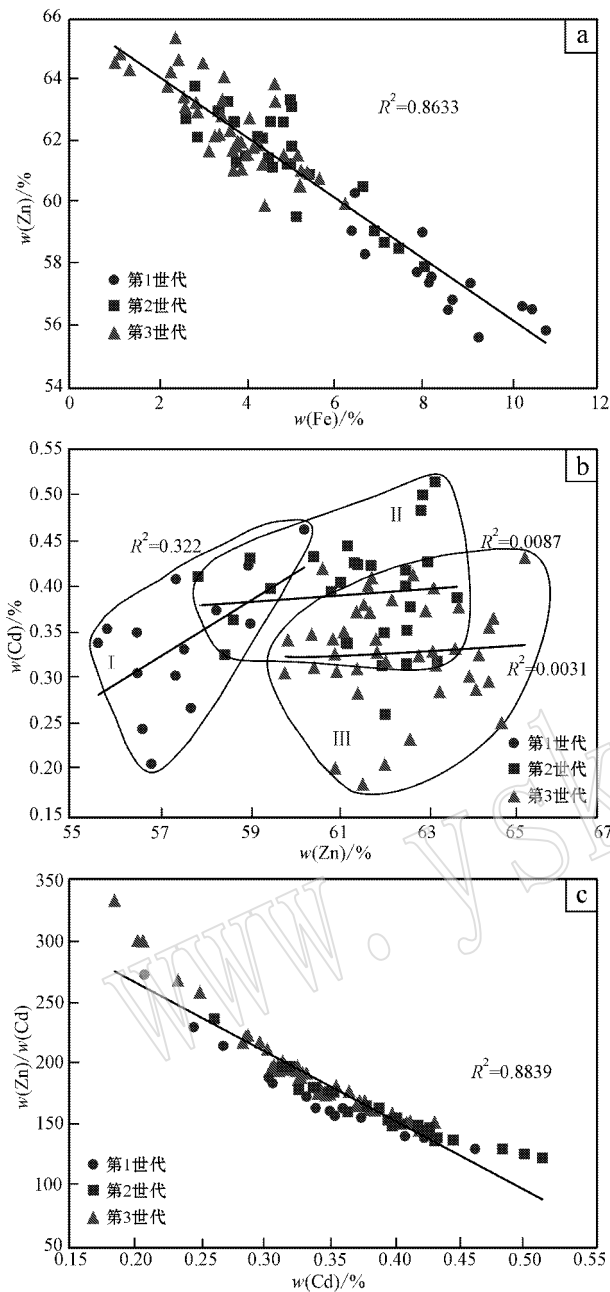


图 4 虎头崖铅锌矿床中闪锌矿 Zn-Fe (a)、Cd-Zr (b) 和 Zn/Cd-Cd (c) 图解

Fig. 4 Zn-Fe (a), Cd-Zr (b) and Zn/Cd-Cd (c) diagrams of sphalerite from the Hutouya Pb-Zn deposit

## 4 成矿作用探讨

虎头崖铅锌矿床中闪锌矿以富集 Zn、Fe、Cd、Mn 等元素为特征,且含量相对稳定。其中 Zn 元素的含量(56.66%~65.35%)普遍高于云南老厂喷流沉积型铅锌矿床中闪锌矿的 Zn 元素含量(49.75%

~55.07%) (表 2),略低于湖南桃林层控型铅锌矿床、广西下巴海底热液和热卤水混合型铅锌矿床中闪锌矿的 Zn 元素含量,这两类矿床中闪锌矿的 Zn 含量范围分别为 61.65%~66.44%、48.43%~55.34%。本文闪锌矿中 Fe、Mn 元素含量(1.17%~10.96%、0~0.94%)变化范围较大,明显不同于其他类型矿床中闪锌矿 Fe、Mn 元素变化范围,如四川底苏沉积改造型铅锌矿床(Fe 元素变化范围为 0.633%~1.43%)、广西泗顶二源地下水混合再造热液型铅锌矿床(Fe 元素变化范围为 0.62%~6.55%)、广东凡口热液沉积型铅锌矿床(Fe 元素变化范围为 1.07%~3.91%)、Mn 元素变化范围为 0.11%~0.24%),具有典型矽卡岩型、岩浆热液型矿床中闪锌矿 Fe、Mn 元素变化范围的特征,如内蒙古好布高矿床(Fe 元素变化范围为 4.5%~11.25%、Mn 元素变化范围为 0.26%~0.38%)、广西大厂锡多金属矿床(Fe 元素变化范围为 4.27%~11.88%)。此外,本矿床闪锌矿 Cd(0.19%~0.52%)的异常富集特征也有别于表 2 中典型矽卡岩型、岩浆热液型矿床中闪锌矿 Cd 元素的富集特征,可能暗示其独特的成矿机制。

已有的研究表明,虎头崖铅锌矿床中的矽卡岩具有高于酸性花岗岩、低于未蚀变碳酸盐岩的 MgO、CaO 含量,以及低于酸性花岗岩、高于未蚀变碳酸盐岩的 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 含量,是酸性侵入岩和石灰岩发生接触交代作用的产物(马圣钡, 2012)。矽卡岩中 FeO、MnO 均高于酸性花岗岩和未蚀变碳酸盐岩,则是由于深部含矿气水热液沿着被交代的岩石的裂隙系统向上渗滤所引起(马圣钡, 2012)。其中,矽卡岩化类型与金属矿化具有较好的成矿专属性,如分布于酸性花岗岩与滩间山群、绵敦苏组、大干沟组等碳酸盐岩地层接触带的钙矽卡岩常伴随 Fe、Cu(Mo)矿化,分布于大干沟组与狼牙山组的接触带、绵敦苏组构造断裂带的锰质矽卡岩常伴随 Pb、Zr(Ag)矿化,镁质矽卡岩在各地层均有分布,常伴随磁铁矿矿化(丰成友等, 2011b)。虎头崖铅锌矿床中黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿的 S 同位素( $\delta^{34}\text{S}=0.6\text{‰}\sim 8.3\text{‰}$ ,平均+4.4‰)研究结果表明,其成矿流体来源于海水和深源岩浆的混合,而铅同位素数据则指出成矿物质及热动力与印支中晚期高度分异的中酸性花岗质岩株有关(马圣钡等, 2012)。由此可见,虎头崖铅锌矿床是印支期(中晚三叠世)花岗质岩浆沿构造断裂侵位于石炭纪地层

表 2 不同类型矿床中闪锌矿化学成分含量对比表

$w_B/\%$

Table 2 Chemical compositions of sphalerite in different type of ore deposits

矿床名称	矿床类型	S	Zn	Fe	Cd	Mn	数据来源
青海虎头崖铅锌矿床	矽卡岩型	31.18~34.2	56.66~65.35	1.17~10.96	0.19~0.52	0~0.94	本文
四川底苏铅锌矿床	沉积改造型	32.68~34.42	63.84~64.98	0.633~1.43	未测	未测	朱赖民(1995)
四川大梁子铅锌矿床	层控型	32.37~33.42	63.54~65.06	1.16~2.27	0.36~0.68	未测	王小春(1991)
湖南桃林铅锌矿床	岩浆热液型层控型(为主)	32.43~33.21	61.65~66.44	0.55~3.30	0.13~0.18	未测	邹正光(1993)
广西泗顶铅锌矿床	二源地下水混合再造热液型	31.39~34.74	59.60~64.78	0.62~6.55	2.4~0.43	未测	张术根(1991)
广西下巴铅锌矿床	海底热液和热卤水混合型	26.14~28.48	48.43~55.34	0.53~1.87	0.12~0.61	未测	欧正等(2013)
云南老厂铅锌矿床	喷流沉积型	未测	49.75~55.07	9.23~10.9	0.35~0.42	0.17~0.26	叶霖等(2012)
广东凡口铅锌矿床	热水沉积型	24.57~41.47	49.9~61.14	1.07~3.91	0.11~0.24	0.01	吴延之等(1987)
福建丁家山铅锌矿床	热液型	32.62~33.96	50.52~63.94	2.19~12.4	0.27~0.62	未测	王未等(2012)
内蒙古好布高铅锌矿床	矽卡岩型	29.87~32.35	57.23~62.09	4.5~11.25	0.26~0.38	0.23~0.30	雷蕴芬等(1991)
湖南水口山铅锌矿床	岩浆热液型	未测	未测	3.58	0.24	0.4	李徽(1986)
江西七宝山铅锌矿床	岩浆热液型	未测	未测	11.42	0.2	0.19	李徽(1986)
广西大厂锡多金属矿床	岩浆热液型	32.84~32.95	51.78~60.42	4.27~11.88	0.40~0.41	0.52~0.56	周卫宁等(1987)

并与之发生交代作用的产物。随着岩浆冷凝固结晶成花岗岩体,富含碱质、硅质、矿质和挥发分的流体分离并沿破碎带运移,与围岩发生化学反应,并在有利部位发生金属沉淀并富集成矿,从而形成了矽卡岩型矿床,这一过程可能与大洋板块大规模俯冲碰撞构造背景有关(约 260~230 Ma)(郭正府等,1998)。此外,由于构造分布、金属元素化学性质以及交代围岩岩性不同,金属矿化由岩体到围岩呈带状分布,成矿元素分别为 Mo→Fe-Sn-Cu-Co→Cu-Md(Pb-Zn)→Pb-Zn。

综上所述,虎头崖铅锌矿床为矽卡岩型矿床,该矿床有利的成矿部位为东西向断裂构造及其同期形成的近于平行的次级断裂构造,上石炭统蒗苏组、下石炭统大干沟组、奥陶-志留系滩间山群与中酸性侵入岩接触带,中晚三叠世侵入岩体(枝)与碳酸盐岩地层的接触部位。

## 5 结论

(1) 虎头崖铅锌矿床中闪锌矿可划分为 3 个世代,从早期到晚期,闪锌矿颜色由黑色逐渐变为浅黄色,矿物组合由闪锌矿-(方铅矿-黄铜矿)-黄铁矿-磁黄铁矿变为闪锌矿-方铅矿-黄铜矿-黄铁矿-(磁黄铁矿),最后为闪锌矿-方铅矿-方解石或石英。

(2) 矿床中早阶段形成的闪锌矿富 Fe、贫 Zn 和 Cd,晚阶段形成的闪锌矿以贫 Fe、富 Zn 和 Cd 为特征。早、中、晚 3 个阶段的成矿温度分别为 258~

262、200~260 和 148~248℃,属于中低温热液矿床。其成矿热液可能流动方向为北西西到南东东,深部到浅部,与矿体走向一致。

(3) 虎头崖铅锌矿床中闪锌矿的 Zn、Fe、Mn 元素含量具有典型矽卡岩型(岩浆热液型)矿床中闪锌矿的特征,明显不同于喷流沉积型矿床、层控型矿床、海底热液和热卤水混合型矿床中闪锌矿的元素特征。结合矿区地质特征和以往研究成果,表明虎头崖铅锌矿床为矽卡岩型矿床。

## References

Beaudoin G. 2000. Acicular sphalerite enriched in Ag, Sb, and Cu embedded within color-banded sphalerite from the Kokanee Range, British Columbia, Canada[J]. *The Canadian Mineralogist*, 38(6): 1387~1398.

Di Benedetto F, Gian Bernardini P, Pilar C, et al. 2005. Compositional zoning in sphalerite crystals[J]. *American Mineralogist*, 90(8~9): 1384~1392.

Feng Chengyou, Li Dongsheng, Wu Zhengshou, et al. 2010. Major Types, Time-Space Distribution and Metallogenesis of Polymetallic Deposits in the Qimantage Metallogenic Belt, Eastern Kunlun Area[J]. *Northwestern Geology*, 43(4): 10~17 (in Chinese with English abstract).

Feng Chengyou, Wang Song, Li Guochen, et al. 2012. Middle to Late Triassic Granitoids in the Qimantage Area, Qinghai Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 665~678 (in Chinese with

- English abstract ).
- Feng Chengyou, Wang Xueping, Shu Xiaofeng, *et al.* 2011a. Isotopic Chronology of the Hutouya Skarn Lead-zinc Polymetallic Ore District in Qimantage Area of Qinghai Province and Its Geological Significance [ J ]. Journal of Jilin University( Earth Science Edition ), 41 ( 6 ): 1 806~1 816( in Chinese with English abstract ).
- Feng Chengyou, Zhao Yiming, Li Daxin, *et al.* 2011b. Skarn Types and Mineralogical Characteristics of the Fe-Cu-polymetallic Skarn Deposits in the Qimantage Area, Western Qinghai Province [ J ]. Acta Geologica Sinica, 85( 7 ): 1 108~1 115( in Chinese with English abstract ).
- Gottesmann W and Kampe A. 2007. Zn/Cd ratios in calcisilicate-hosted sphalerite ores at Tumurtijn-ovoo, Mongolia [ J ]. Chemie der Erde-Geochemistry, 67( 4 ): 323~328.
- Guo Chengji. 1965. Rare Element Geochemistry [ M ]. Beijing: Science Press( in Chinese with English abstract ).
- Guo Zhengfu, Deng Jinfu, Xu Zhiqin, *et al.* 1998. Late Palaeozoic-Mesozoic Intracontinental Orogenic Process and Intermediate-Acidic Igneous Rocks from the Eastern Kunlun Mountains of Northwestern China [ J ]. Geoscience, 12( 3 ): 344~352( in Chinese with English abstract ).
- Han Zhaoxin. 1994. The Typomorphic characteristic of the sphalerite in the Qinling Devonian system lead-zinc metallogenic Belt [ J ]. Xi'an College of Geology, 16: 12~17( in Chinese with English abstract ).
- Hu Xinghua, Zhu Guchang, Liu Huan, *et al.* 2011. Characteristics and Mineralization of the Hutouya Polymetallic Deposit in the Qimantage Metallogenic Belt [ J ]. Geology and Exploration, 47( 2 ): 216~221 ( in Chinese with English abstract ).
- Huston D L, Sie S H, Suter G F, *et al.* 1995. Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits; Part I, Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and Part II, Selenium levels in pyrite; comparison with delta <sup>34</sup>S values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems [ J ]. Economic Geology, 90( 5 ): 1 167~1 196.
- Ishihara Shunso and Endo Yuji. 2007. Indium and other trace elements in volcanogenic massive sulfide ores from the Kuroko, Besshi and other types in Japan [ J ]. Bull. Geol. Surv. Japan, 58: 7~22.
- Ishihara Shunso, Hoshino Kenichi, Murakami Hiroyasu, *et al.* 2006. Resource evaluation and some genetic aspects of indium in the Japanese ore deposits [ J ]. Resource Geology, 56( 3 ): 347~364.
- Jing Xiangyang, Wang Wei, Zhang Yongsheng, *et al.* 2010. Analysis on geological characteristics, genetic type and ore-finding prospect of Wulanwuzhuer copper deposit in Mangya, Qinghai Province [ J ]. Mineral Resources and Geology, 24( 3 ): 222~228( in Chinese with English abstract ).
- Kullerud G. 1953. The FeS-ZnS system: A geological thermometer [ J ]. Norsk Geologisk Tidsskrift, 32: 61~147.
- Lei Yunfen and Zhang Dequan. 1991. The standard features and formation conditions of skarn type zinc [ J ]. Journal of East China College of Geology, ( 14 ): 127~133( in Chinese with English abstract ).
- Li Dongsheng, Zhang Zhanyu, Su Shengshun, *et al.* 2010. Geological Characteristics and Genesis of the Kaerqueka Copper Molybdenum Deposit in Qinghai Province [ J ]. Northwestern Geology, 43: 239~244( in Chinese with English abstract ).
- Li Hui. 1986. Typomorphic Characteristics and genetic of sulfide minerals from Qiandongshan lead-zinc deposit in Fengxian [ J ]. Geology and Prospecting, 22: 36~41( in Chinese with English abstract ).
- Li Shijin, Sun Fengyue, Feng Chengyou, *et al.* 2008. Geochronological study on Yazigou polymetallic deposit in eastern Kunlun, Qinhai Province [ J ]. Acta Geologica Sinica, 82( 7 ): 949~955( in Chinese with English abstract ).
- Liu Tiegeng, Ye Lin, Zhou Jiayi, *et al.* 2009. Sphalerite color correlation relationship with Cd-Fe [ J ]. Acta Mineralogica Sinica, ( S1 ): 68~69( in Chinese with English abstract ).
- Liu Tiegeng, Ye Lin, Zhou Jiayi, *et al.* 2010a. The variation of Fe and Cd correlativity in sphalerite with the variation of the mineral color [ J ]. Geology in China, 37( 5 ): 1 457~1 468( in Chinese with English abstract ).
- Liu Tiegeng, Ye Lin, Zhou Jiayi, *et al.* 2010b. Cd primarily isomorphously replaces Fe but not Zn in sphalerite [ J ]. Acta Mineralogica Sinica, 30( 2 ): 179~184( in Chinese with English abstract ).
- Liu Yingjun, Cao Liming and Li Zhaoqing. 1984. Element Geochemistry [ M ]. Beijing: Science Press( in Chinese with English abstract ).
- Liu Yingjun, Zhang Jingrong, Sun Chengyuan, *et al.* 1984. Geochemistry of trace elements in granitoids in South China [ A ]. Granite Geology and Mineralization [ C ]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press( in Chinese ).
- Liu Yunhua, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, *et al.* 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Jingren granite, Yemaquan region of the east Kunlun and its geological significance [ J ]. Acta Petrologica Sinica, 22( 10 ): 2 457~2 463( in Chinese with English abstract ).
- Lu Huanzhang. 1975. Sphalerite geological thermometer and pressure gauge [ J ]. Geology-Geochemistry, 2: 1( in Chinese with English abstract ).
- Ma Shengchao. 2012. Alteration-Mineralization Zoning and Metallogeny of Hutouya Copper-Zinc-Lead Polymetallic Ore Deposit, Qimantage Area, Qinghai Province [ D ]. Chinese Academy of Geological Science( in Chinese ).
- Ma Shengchao, Feng Chengyou, Li Guocheng, *et al.* 2012. Sulfur and lead isotope compositions of the Hutouya copper-lead-zinc polymetal-

- lic deposit in Qinghai Province and their genetic significance[J]. *Geology and Exploration*, 48(2): 321~331( in Chinese with English abstract ).
- Mou Baolei. 1999. *Element Geochemistry*[ M ]. Beijing :Peking University Press( in Chinese with English abstract ).
- Ou Zheng , Wei Chongtao , Santigie Kekuda Sesay , *et al.* 2013. Study on accumulation regulation of Cd element in Xiaba Pb-Zn deposit , Guangxi Province[ J ]. *Nonferrous Metals( Mining Section )*, ( 1 ): 57~61( in Chinese with English abstract ).
- Qian Z. 1987. Trace elements in galena and sphalerite and their geochemical significance in distinguishing the genetic types of Pb-Zn ore deposits[ J ]. *Chinese Journal of Geochemistry* , 6( 2 ): 177~190.
- Schwartz M O. 2000. Cadmium in zinc deposits : Economic geology of a polluting element[ J ]. *International Geology Review* , 42 : 445 ~ 469.
- Shu Xiaofeng , Wang Xueping , Zhang Yulian , *et al.* 2012. Determination of multifarious genesis and prospecting of polymetallic metallogenic deposit in Hutouya , Qinghai[ J ]. *Northwestern Geology* , 45 ( 1 ): 165~173( in Chinese with English abstract ).
- Si Rongjun , Gu Xuexiang , Pang Xucheng , *et al.* 2006. Geochemical character of dispersed element in sphalerite from Fule Pb-Zn polymetal deposit , Yunnan Province[ J ]. *Journal of Mineralogy and Petrology* , 26( 1 ): 75~80( in Chinese with English abstract ).
- Tu Guangchi and Gao Zhenmin. 2003. Ore-forming mechanism of the dispersed element[ J ]. *Bulletin of the Chinese Academy of Science* , 5 : 358~361( in Chinese with English abstract ).
- Tu Guangchi , Gao Zhenmin , Hu Ruizhong , *et al.* 2004. *Geochemistry and Mineralization Mechanism of Dispersed Elements*[ M ]. Beijing : Geological Publishing House( in Chinese with English abstract ).
- Wang Changming , Deng Jun , Zhang Shouting , *et al.* 2010. Sediment-hosted Pb-Zn deposits in Southwest Sanjiang Tethys and Kangdian area on the western margin of Yangtze Craton[ J ]. *Acta Geologica Sinica-English Edition* , 84( 6 ): 1 428~1 438.
- Wang Mo , Qiu Yanxiu , Sun Hongtao , *et al.* 2012. The research of trace elements in sphalerite of Dingjiashan , Fujian and their influences on crystal structure[ J ]. *Geology of Fujian* , ( 4 ): 289~296( in Chinese with English abstract ).
- Wang Song , Feng Chengyou , Li Shijin , *et al.* 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granodiorite in the Kaerqueka polymetallic ore deposit , Qimantage Mountain , Qinghai Province , and its geological implications[ J ]. *Geology in China* , 36( 1 ): 74~84( in Chinese with English abstract ).
- Wang Xiaochun. 1991. Genesis analysis of Daliangzi Pb-Zn deposit in Sichuan Province[ J ]. *Mineral Resources and Geology* , ( 5 ): 151~156( in Chinese with English abstract ).
- Wu Yanzhi and Huang Wensheng. 1987 . The typomorphic peculiarities of the main ore minerals of Fankou lead-zinc deposit , Guangdong , and their genetic significance[ J ]. *Journal of Guilin University of Technology* , 7( 1 2 ): 1~10( in Chinese with English abstract ).
- Xu Guoduan. 2010. *Geology Geochemistry of Polymetallic Metallogenic Belt Typical Deposit from Qinghai Qimantage*[ D ]. Kunming University of Science and Technology( in Chinese with English abstract ).
- Ye Lin , Cook N J , Ciobanu C L , *et al.* 2011. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China : a LA-ICPMS study[ J ]. *Ore Geology Reviews* , 39( 4 ): 188~217.
- Ye Lin , Gao Wei , Yang Yulong , *et al.* 2012. Trace elements in sphalerite in Laochang Ph-Zn polymetallic deposit , Lancang , Yunnan Province[ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 28( 5 ): 1 362~1 372( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Aikui , Li Yunping , Liu Guanglian , *et al.* 2008. New understanding and significance of Hutouya copper lead and zinc deposit [ J ]. *Qinghai Homeland Economic Strategy* , ( 4 ): 25~27( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Qian. 1987. Trace elements in galena and sphalerite and their geochemical significance in distinguishing the genetic types of Pb-Zn ore deposits[ J ]. *Chinese Journal of Geochemistry* , 6( 2 ): 177~190.
- Zhang Shugen. 1991. A study on the typomorphic characteristics of sphalerite from siding lead-zinc orefield , Guangxi[ J ]. *Geology of Guangxi* , ( 4 ): 39~48( in Chinese with English abstract ).
- Zhou Jiayi , Huang Zhilong , Zhou Guofu , *et al.* 2009. The occurrence states and regularities of dispersed elements in Tianqiao Pb-Zn ore deposit , Guizhou Province , China[ J ]. *Acta Mineralogica Sinica* , 29 ( 4 ): 471~480( in Chinese with English abstract ).
- Zhou Weining , Fu Jinbao and Li Daming. 1987. The typomorphic characteristics of sphalerite from Dachang Tongkeng-Changpo deposit , Guangxi[ J ]. *Mineral Resources and Geology* , ( 4 ): 40~47( in Chinese with English abstract ).
- Zhu Laimin , Yuan Haihua and Luan Shiwei. 1995. Typomorphic characteristics and their significance of minor elements of sphalerite from Disu and Daliangzi Pb-Zn deposits , Sichuan[ J ]. *Acta Geologica Sichuan* , ( 1 ): 49~55( in Chinese with English abstract ).
- Zou Zhengguang. 1993. Study of mineralogic characteristics of sphalerite[ J ]. *Hunan Geology* , ( 12 ): 102~106( in Chinese with English abstract ).

## 附中文参考文献

丰成友,李东生,吴正寿,等. 2010. 东昆仑祁漫塔格成矿带矿床类

- 型、时空分布及多金属成矿作用[J]. 西北地质, 43(4): 10~17.
- 丰成友, 王松, 李国臣, 等. 2012. 青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩年代学、地球化学及成矿意义[J]. 岩石学报, 28(2): 665~678.
- 丰成友, 王雪萍, 舒晓峰, 等. 2011a. 青海祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿区年代学研究及地质意义[J]. 吉林大学学报地球科学版, 41(6): 1806~1816.
- 丰成友, 赵一鸣, 李大新, 等. 2011b. 青海西部祁漫塔格地区矽卡岩型铁铜多金属矿床的矽卡岩类型和矿物学特征[J]. 地质学报, 85(7): 1108~1115.
- 郭承基. 1965. 稀有元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 郭正府, 邓晋福, 许志琴, 等. 1998. 青藏东昆仑晚古生代—中生代中酸性火成岩与陆内造山过程[J]. 现代地质, 12(3): 344~352.
- 韩照信. 1994. 秦岭泥盆系铅锌成矿带中闪锌矿的标型特征[J]. 西安地质学院学报, 16: 12~17.
- 胡杏花, 朱谷昌, 刘欢, 等. 2011. 祁漫塔格矿带虎头崖多金属矿床特征和成矿作用分析[J]. 地质与勘探, 47(2): 216~221.
- 景向阳, 王维, 张永胜, 等. 2010. 青海省茫崖镇乌兰乌拉铜矿床地质特征、成因类型及其找矿前景分析[J]. 矿产与地质, (3): 222~228.
- 雷蕴芬, 张德全. 1991. 矽卡岩型闪锌矿的标型特征和形成条件[J]. 华东地质学院学报(14): 127~133.
- 李徽. 1986. 凤县铅洞山铅锌矿床硫化矿物标型特征及其成因探讨[J]. 地质与勘探, 22: 36~41.
- 李东生, 张占玉, 苏生顺, 等. 2010. 青海卡尔却卡铜铅矿床地质特征及成因探讨[J]. 西北地质, 43: 239~244.
- 李世金, 孙丰月, 丰成友, 等. 2008. 青海东昆仑鸭子沟多金属矿的成矿年代学研究[J]. 地质学报, 82(7): 949~955.
- 刘铁庚, 叶霖, 周家喜, 等. 2009. 闪锌矿的颜色与Cd-Fe相关性的关系[J]. 矿物学报, (S1): 68~69.
- 刘铁庚, 叶霖, 周家喜, 等. 2010a. 闪锌矿的Fe、Cd关系随其颜色变化而变化[J]. 中国地质, (5): 1457~1468.
- 刘铁庚, 叶霖, 周家喜, 等. 2010b. 闪锌矿中的Cd主要类质同象置换Fe而不是Zn[J]. 矿物学报, (2): 179~184.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 刘英俊, 张景荣, 孙承轅, 等. 1984. 华南花岗岩类中微量元素的地球化学特征[A]. 徐克勤, 涂光炽. 花岗岩地质与成矿[C]. 南京: 江苏科学技术出版社.
- 刘云华, 莫宣学, 喻学惠, 等. 2006. 东昆仑野马泉地区景忍花岗岩锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(10): 2457~2463.
- 卢焕章. 1975. 闪锌矿地质温度计和压力计[J]. 地质地球化学, 2: 1.
- 马圣钞, 丰成友, 李国臣, 等. 2012. 青海虎头崖铜铅锌多金属矿床硫、铅同位素组成及成因意义[J]. 地质与勘探, 48(2): 321~331.
- 马圣钞. 2012. 青海祁漫塔格地区虎头崖铜铅锌多金属矿床蚀变矿化分带及成因[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 牟保磊. 1999. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社.
- 欧正, 韦重韬, Santigie Kekuda Sesay, 等. 2013. 广西下巴铅锌矿床镉元素的富集规律研究[J]. 有色金属(矿山部分), (1): 57~61.
- 舒晓峰, 王雪萍, 张雨莲, 等. 2012. 青海虎头崖地区多金属矿床成因类型的厘定及找矿方向[J]. 西北地质, 45(1): 165~173.
- 司荣军, 顾雪祥, 庞绪成, 等. 2006. 云南省富乐铅锌多金属矿床闪锌矿中分散元素地球化学特征[J]. 矿物岩石, 26(1): 75~80.
- 涂光炽, 高振敏. 2003. 分散元素成矿机制研究获重大进展[J]. 中国科学院院刊, 5: 358~361.
- 涂光炽, 高振敏, 胡瑞忠, 等. 2004. 分散元素地球化学及成矿机制[M]. 北京: 地质出版社.
- 王末, 邱炎秀, 孙洪涛, 等. 2012. 福建尤溪丁家山矿区闪锌矿中微量元素及其对晶体结构影响研究[J]. 福建地质(4): 289~296.
- 王松, 丰成友, 李世金, 等. 2009. 青海祁漫塔格卡尔却卡铜多金属矿区花岗岩闪长岩锆石 SHRIMP-U-Pb 测年及其地质意义[J]. 中国地质, 36(1): 74~84.
- 王小春. 1991. 四川大梁子铅锌矿床的成因分析[J]. 矿产与地质, (5): 151~156.
- 吴延之, 黄生文. 1987. 广东凡口铅锌矿床主要金属矿物的标型特征及其成因意义[J]. 桂林冶金地质学院学报, 7(1~2): 1~10.
- 徐国端. 2010. 青海祁漫塔格多金属成矿带典型矿床地质地球化学研究[D]. 昆明理工大学.
- 叶霖, 高伟, 杨玉龙, 等. 2012. 云南澜沧老厂铅锌多金属矿床闪锌矿微量元素组成[J]. 岩石学报, (5): 1362~1372.
- 张爱奎, 李云平, 刘光莲, 等. 2008. 虎头崖铜铅锌矿床类型新认识及其意义[J]. 青海国土经略, (4): 25~27.
- 张术根. 1991. 泗顶铅锌矿田闪锌矿的标型特征研究[J]. 广西地质, (4): 39~48.
- 周家喜, 黄智龙, 周国富, 等. 2009. 贵州天桥铅锌矿床分散元素赋存状态及规律[J]. 矿物学报, (4): 471~480.
- 周卫宁, 傅金宝, 李达明. 1987. 广西大厂铜坑-长坡矿区闪锌矿的标型特征研究[J]. 矿产与地质, (4): 40~47.
- 朱赖民, 袁海华, 梁世伟. 1995. 金阳底苏东大梁子铅锌矿内闪锌矿微量元素标型特征及其研究意义[J]. 四川地质学报, (1): 49~55.
- 邹正光. 1993. 桃林闪锌矿的矿物学特征[J]. 湖南地质, (12): 102~106.