

云南香格里拉红山铜矿硫化物环带及地质意义*

俎波¹ 薛春纪^{1**} 亚夏尔¹ 王庆飞¹ 梁华英² 赵毅¹ 刘铭涛¹

ZU Bo¹, XUE ChunJi^{1**}, YA XiaEr¹, WANG QingFei¹, LIANG HuaYing², ZHAO Yi¹ and LIU MingTao¹

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2012-09-19 收稿, 2013-01-18 改回.

Zu B, Xue CJ, Ya XE, Wang QF, Liang HY, Zhao Y and Liu MT. 2013. Sulfide zonal texture and its geological significance of ores from the Hongshan copper deposit in Shangri-la, Yunnan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (4): 1203 – 1213

Abstract The Hongshan copper deposit, located in Shangri-la, Yunnan, China, is tectonically situated in the southern part of Sanjiang Tethyan Zhongdian island arc. It is one of the most significant deposits in this district and gets very popular concerned since its discovery with hotly debated about the genesis. It occurs slate, metaclastics and limestone interbedding with medium-basic volcanic rock and volcanoclastic rock and intruded by intermediate-acidity and ultrabasic dykes or stocks. Lenticular copper sulfide ore-bodies occur in bedded skarn bodies or adjacent to it, and is disrupted by post-metallogenic faults. The copper ores develop sulfide zonal texture with pyrite as nuclear, chalcopyrite as intermediate zone and pyrrhotite as external zone. Pyrite in the core is usually euhedral or subhedral crystal while the coating chalcopyrite and pyrrhotite are anhedral. Chalcopyrite precipitate around the early-formed pyrite, pyrrhotite which acted as the main body of the sulfide zonal texture grows around the chalcopyrite. The inner sulfide is generally replaced by the outer one. The sulfide zonal texture precipitates from the inside out as the following order: pyrite-chalcopyrite-pyrrhotite. Analysis of trace elements and S isotopes exhibit similar characteristics from different sulfides of the zonal texture, for example, moderate REE and strong Eu depletion with a gentle seagull REE pattern; riched in HFSE as U, Th, Zr, Hf and depleted in LILE as Rb, Sr and Ba; both the REE and TE distribution patterns of sulfides are similar to those of ultrabasic rocks in Hongshan area; whereas from nuclear pyrite to intermediate chalcopyrite and to external pyrrhotite, the total trace elements and REEs ($\sum \text{REE} 0.17371 \times 10^{-6}$, 1.22626×10^{-6} and 5.25925×10^{-6}) shows gradually increasing meanwhile Co/Ni and Se/Te gradually decreasing pattern. The above features indicate the mineralizing fluid trapping more crustal component during evolution. The $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ of 24 sulfides have a magmatic feature ranging from 3.81‰ and 5.23‰, and an order as $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}(\text{Po}) < \delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}(\text{Ccp}) < \delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}(\text{Py})$, indicating that the sulfur fractionation hadn't reached a thermodynamic equilibrium. The sulfide zonal texture of ores from Hongshan deposit is formed by a magmatic-dominated mineralizing fluid precipitating as the order pyrite-chalcopyrite-pyrrhotite, and accompanied with the decreasing of H_2S and O_2 fugacity or arising of pH value from the earlier to later.

Key words Sulfide zonal texture; Trace elements; S isotope; Hongshan copper deposit; Shangri-la, Yunnan Province

摘要 云南香格里拉县红山铜矿是三江义敦岛弧带南端重要铜矿床, 颇受关注, 成因认识分歧大。矿区出露上三叠统板岩、变碎屑岩和灰岩夹中性火山岩、火山碎屑岩以及少量侵入其中的中酸性和超基性岩脉、岩株, 透镜状铜硫化物矿体产在顺层状砂卡岩体内或边部, 成矿后断裂明显。矿石中普遍发育以黄铁矿为核部、黄铜矿为中间带、磁黄铁矿为边部带的硫化

* 本文受国家重点基础研究发展计划(2009CB421005)、国家自然科学基金(41072069、40930423、40772061)和高等学校学科创新引智计划(B07011)联合资助。

第一作者简介: 俎波, 男, 1989年生, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业

** 通讯作者: 薛春纪, 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 从事矿床学、矿产普查与勘探教学和研究工作, E-mail: chunji.xue@cugb.edu.cn

物环带,其中核部黄铁矿呈立方体自形-半自形晶,黄铜矿呈他形晶围绕黄铁矿沉淀,磁黄铁矿呈他形分布在黄铜矿外围,内带常被外带硫化物溶蚀交代。环带从内到外硫化物先后沉淀,矿物生成顺序为黄铁矿-黄铜矿-磁黄铁矿。环带中三种硫化物矿物的 REE 配分曲线和微量元素蛛网图极为相似,负 Eu 异常显著,富集 U、Th、Zr、Hf,亏损 Rb、Sr、Ba,与矿区超基性岩表现出较高相似性;环带从内到外,∑REE(0.17371×10^{-6} 、 1.22626×10^{-6} 、 5.25925×10^{-6})和微量元素含量依次升高,Co/Ni 和 Se/Te 比值降低,指示矿石硫化物沉淀过程中,可能伴随热液体系内地壳物质不断增加。环带中硫化物矿物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}} = 3.81\text{‰} \sim 5.23\text{‰}$,具有岩浆硫源特征, $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}_{\text{边部带磁黄铁矿}} (4.47\text{‰}) < \delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}_{\text{中间带黄铜矿}} (4.58\text{‰}) < \delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}_{\text{核部黄铁矿}} (4.65\text{‰})$,三种硫化物间没有达到同位素平衡分馏。红山铜矿石环带结构是岩浆热液为主成矿流体中黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿先后晶出成因,伴随硫化物环带的形成,热液系统从早到晚 H_2S 和 O_2 逸度降低或 pH 升高过程。

关键词 硫化物环带;微量元素;硫同位素;红山铜矿;云南香格里拉

中图法分类号 P578.2; P595; P618.41

云南香格里拉县红山铜矿床是国土资源大调查以来在三江中北段发现和评价的一处重要铜矿。铜矿化与顺层状产出的矽卡岩体空间关系密切(周维全等,1976;赵准,1995;黄崇柯等,2001),所在区域还产有普朗、浪都、雪鸡坪等俯冲背景中的一系列铜矿床,它们构成斑岩-矽卡岩成矿系统(杨岳清等,2002;曾普胜等,2004)。红山铜矿床颇受关注,前人对成岩成矿时代(李建康等,2007;黄肖潇等,2012)、区域成矿系统(宋保昌等,2006;徐兴旺等,2006)、成矿岩体特征(王新松等,2011)、同位素地球化学(王守旭等,2008)等进行了研究。杨岳清等(2002)、侯增谦等(2003)认为是远程熔体-溶液交代形成,王守旭等(2008)通过稳定同位素研究认为是中酸性火山岩局部同化碳酸盐围岩生成的富钙次生岩浆就位于碎屑岩与碳酸盐岩之间的构造薄弱带冷凝固结成矿,中国地质科学院矿产资源研究所(2006^①)认为是早三叠世 VMS 型矿床叠加了晚三叠世岩浆活动所形成,宋保昌等(2006)、徐兴旺等(2006)通过对含铁钙硅质岩的研究认为红山铜矿为陆相热泉喷流沉积成因,近年李建康等(2007)、李文昌等(2011)认为是印支期铜矿之上叠加燕山期钼成矿作用形成。本文在块状硫化物矿石中发现“黄铁矿-黄铜矿-磁黄铁矿”环带,通过矿相学及环带结构中元素和 S 同位素分析,试图为理解矿石的形成过程提供硫化物结构-化学约束。

1 区域地质

红山铜矿位于西南三江义敦岛弧带南端的中甸弧内。义敦岛弧带呈近 SN 向延伸,东侧以甘孜-理塘缝合带为界与扬子陆块相邻,西侧以德格-乡城断裂为界与中甸微陆块为邻,是晚三叠世甘孜-理塘洋向西俯冲形成的岛弧带(杨岳清等,2002;侯增谦等,2004;Hou *et al.*, 2007)。这个构造带经历了洋陆碰撞、弧陆碰撞及碰撞后伸展、陆内汇聚等地质过程,发育有岛弧安山岩和中酸性岩浆侵入体(侯增谦等,2003;杨岳清等,2002)。

晚三叠世,位于义敦岛弧东侧的甘孜-理塘洋向义敦岛弧下俯冲。在俯冲过程中,义敦岛弧先拗陷后隆升,拗陷时在原中-下三叠统浅海相沉积物之上发育了一套巨厚的碎屑岩、碳酸盐岩及火山岩系,这套沉积岩系构成了义敦岛弧地

层的主体,即曲嘎寺组(T_3q)、图姆沟组(T_3t)和喇嘛垭组(T_3lm)。义敦岛弧北部昌台弧,由于俯冲角度较陡,具有较强的拉性弧特征,发育大量双峰式火山岩,形成“呷村”式块状硫化物矿床(莫宣学等,1993;侯增谦等,2003);义敦岛弧南部,由于俯冲角度较缓,具有压性弧特征,产生大量钙碱性浅成、超浅成侵入岩,构成了中甸弧斑岩-矽卡岩成矿带,形成一系列斑岩、矽卡岩矿床,如普朗、雪鸡坪、春都等(杨岳清等,2002;侯增谦等,2003;曾普胜等,2004)。三叠纪之后甘孜-理塘洋彻底闭合,义敦岛弧在东西挤压应力下发生碰撞造山作用,诱发广泛的花岗岩浆上侵,而南段中甸弧由于碰撞作用较弱,岩浆活动也仅发现体瓦促和热林两个花岗岩岩株,近年发现铜厂沟与红山也存在燕山期成矿作用(李建康等,2007;李文昌等,2011,2012)。在青藏高原碰撞隆起的影响下,义敦岛弧发生陆内汇聚作用,在中甸地区发育大规模逆冲推覆构造和走滑剪切活动,在中甸内甬哥地区还有斑岩体的侵位并伴有金的矿化,在有几组断裂交汇的地表形成多个小岩瘤,估计深部连为一体(杨岳清等,2002)。

2 矿床地质

红山铜矿区由老到新主要出露上三叠统曲嘎寺组二、三段(T_3q^{2-3})和图姆沟组二段(T_3t^2) (图 1)。曲嘎寺组二段(T_3q^2)为深灰-灰色灰岩、板岩、变砂岩夹玄武岩、火山碎屑岩、变砾岩、硅质岩,发育水平层理;曲嘎寺组三段(T_3q^3)为深灰-灰色板岩、变砂岩、杂砂岩、灰岩,夹变砾岩、角砾状灰岩、硅质岩,发育水平层理。图姆沟组二段(T_3t^2)为灰-深灰色板岩、含粉砂质绢云板岩、变砂岩、安山岩、英安岩、流纹岩夹火山碎屑岩、硅质岩(陈应明等,1999^②)。赋矿层位为曲嘎寺组二段(T_3q^2)砂泥质板岩、大理岩和结晶灰岩,其中板岩分布最广,大理岩呈透镜状夹于板岩中(王守旭等,2008;黄崇柯等,2001)。含硫化物环带的块状硫化物矿石即赋存

① 中国地质科学院矿产资源研究所. 2006. 西南三江中甸斑岩型铜金矿找矿模型及技术方法

② 陈应明等. 1999. 1:50000 红山幅地质图说明书. 云南省地质矿产勘查开发局

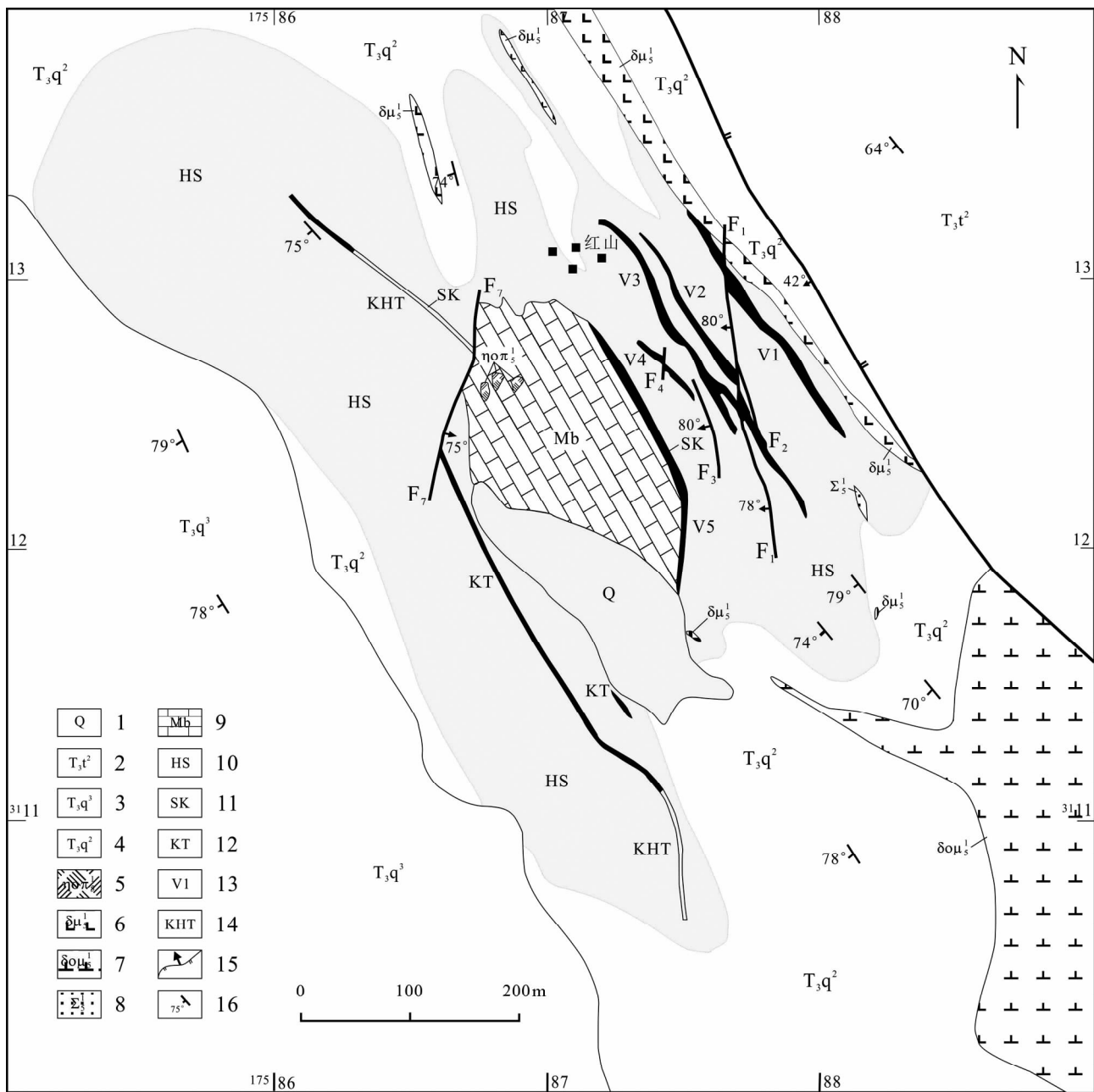


图1 红山铜矿区地质图(据云南省地质调查院,2004^①;王守旭等,2008 修改)

1-第四纪冲积、坡积、冰川堆积砂、砾、泥砾岩层;2-上三叠统图姆沟组二段板岩、砂岩、安山岩、夹火山碎屑岩、硅质岩;3-上三叠统曲嘎寺组三段板岩、砂岩、石灰岩,夹副砾岩、硅质岩;4-上三叠统曲嘎寺组二段灰岩、板岩、砂岩夹玄武岩火山碎屑岩、变质副砾岩;5-印支期石英二长斑岩;6-印支期闪长玢岩;7-印支期石英闪长玢岩;8-超基性岩;9-大理岩;10-角岩;11-砂卡岩;12-矿体;13-矿体及其编号;14-矿化体;15-逆断层;16-地层产状

Fig. 1 Geological sketch map of the Hongshan skarn copper deposit (after Wang *et al.* , 2008)

于曲嘎寺组二段角岩与大理岩之间的砂卡岩内或边部。

矿区零星显露出酸性侵入岩岩脉、岩株(图1),以印支期闪长玢岩、石英闪长玢岩、石英二长斑岩为主,东南部还有少量超基性岩。闪长玢岩分布在矿区东北部,与矿区主要构

造线方向一致,呈北西向延伸,规模较大,厚度达10m,延伸1km以上;呈脉状侵入于曲嘎寺组砂板岩层中,主要成分为斜长石和少量角闪石、石英,见黑云母、次闪石、绢云母和绿泥石等蚀变矿物,斑状结构,斑晶为中长石和普通角闪石,粒

① 云南省地质调查院. 2004. 云南中甸地区矿产资源评价. 2004年地质工作设计

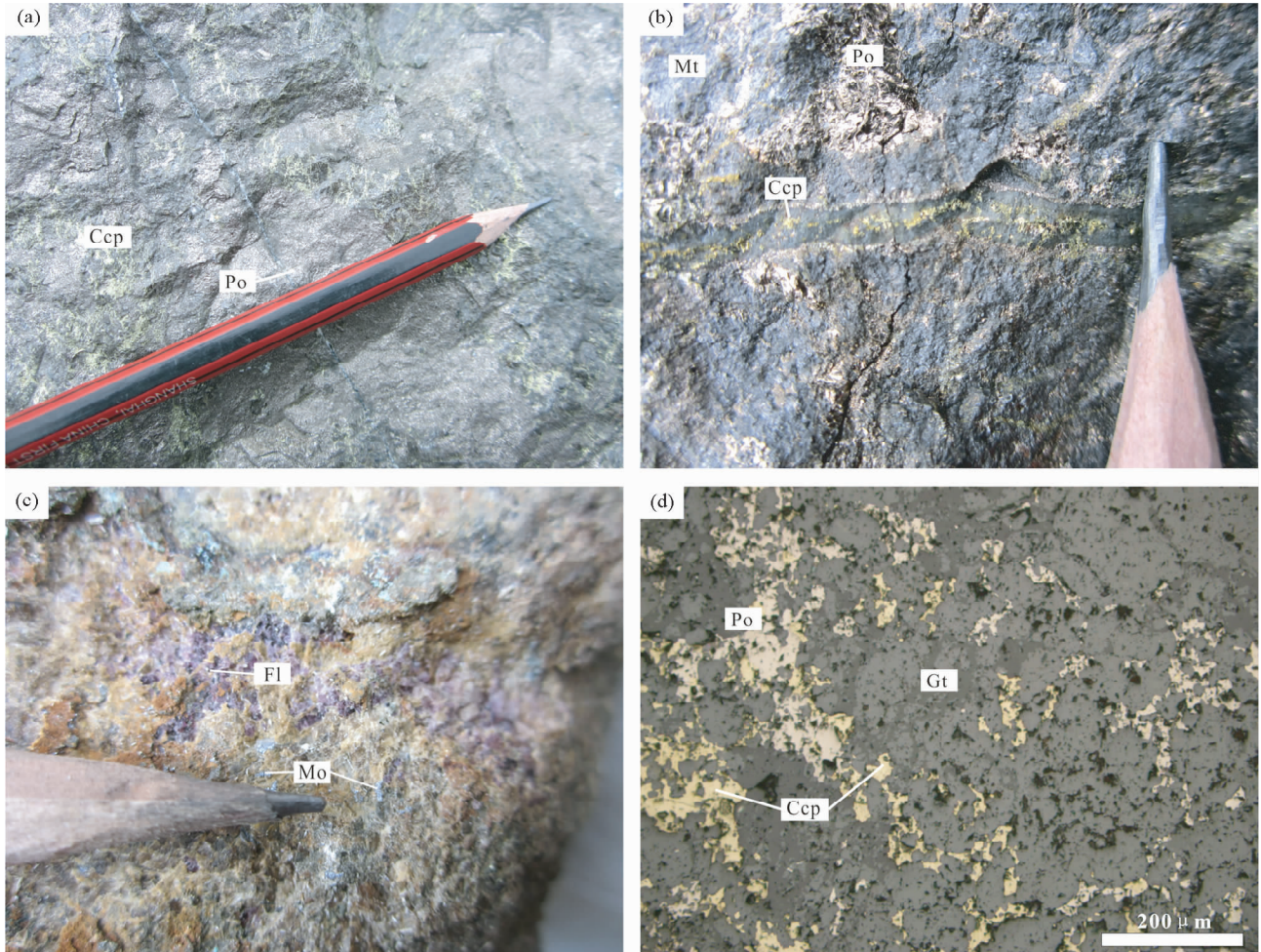


图2 红山铜矿床矿石组构特征

(a)-含铜磁黄铁矿矿石,硫化物主要为磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿,脉石矿物主要为石榴石等矽卡岩矿物,见黄铜矿在磁黄铁矿中浸染状产出;(b)-含铜磁铁矿矿石,见磁铁矿与磁黄铁矿及石英黄铜矿脉;(c)-含铜辉钼矿矿石,矽卡岩为主,含萤石及浸染状辉钼矿;(d)-磁黄铁矿、黄铜矿呈浸染状交代石榴石等矽卡岩矿物(-)。Gt-石榴石;Fl-萤石;Mt-磁铁矿;Mo-辉钼矿;Py-黄铁矿;Ccp-黄铜矿;Po-磁黄铁矿

Fig. 2 Ore-textures of Hongshan copper deposit

度由岩体中心向边缘变细,属钙碱性系列。石英闪长玢岩位于矿区东南角,呈岩株产出,灰黑色,见斜长石斑晶,成岩年龄为 216.1 ± 3.2 Ma (黄肖潇等,2012),地球化学性质与普朗复式岩体相似,是印支期甘孜-理塘洋向西俯冲时产物。石英二长斑岩分布在矿区西北部,主要成分为斜长石、钾长石和石英,具斑状结构,斑晶主要为长石、石英,局部发育硅化、黄铁矿化、辉钼矿化;侯增谦等(2003)研究认为属钙碱性和强过铝质系列;全岩 Rb-Sr 同位素年龄为 216Ma (云南省地质矿产局,1990;李文昌等,2010)。近年在红山钻探发现隐伏 Cu-Mo 矿化花岗斑岩体,被认为与上部石英脉中的辉钼矿成矿有直接联系,花岗斑岩 LA-ICP-MS U-Pb 测年为 81.1 ± 0.5 Ma (王新松等,2011),石英脉中辉钼矿 Re-Os 年龄为 77 ± 2 Ma (徐兴旺等,2006;李文昌等,2011),表明红山除了印支期 Cu 多金属成矿作用之外,还存在燕山晚期形成于造山后伸展环境的花岗斑岩型 Cu-Mo 成矿作用。在红山矿区东

侧出露超基性岩,主要为透闪蛇纹滑石化变形橄榄岩,属甘孜-理塘洋壳残留蛇绿岩岩片(李文昌等,2010)。

红山位于乡城-格咱断裂以东、黑水塘复式背斜西翼,矿区为一单斜构造,岩层倾向约 240° ,倾角 $60^\circ \sim 80^\circ$ 。矿区 F1、F2、F3、F4 均为成矿期后断层(图 1)。

红山铜矿有 4 个主矿体(图 1),分别编号为 I、II、III、IV,并有钨、钼矿化。铜矿体产出于上三叠统曲嘎寺组二段地层中,总体北北西走向,倾角 60° 左右,含矿部位主要为大理岩与板岩接触部位。围岩主要为矽卡岩、角岩与大理岩。矿体的形态和空间分布与矽卡岩一致,呈不规则透镜状。主矿体长 $158 \sim 1258$ m,平均厚度 $3.92 \sim 19.5$ m,Cu 平均品位 1.01% ,其中 I 号矿体最大,长度达到 1500 m (陈应明等,1999)。矽卡岩通常与角岩、大理岩相间排列。铜矿体几乎全部赋存在矽卡岩内或边部,仅有少量以脉状形式产在角岩和大理岩中且铜品位较低(侯增谦等,2003)。

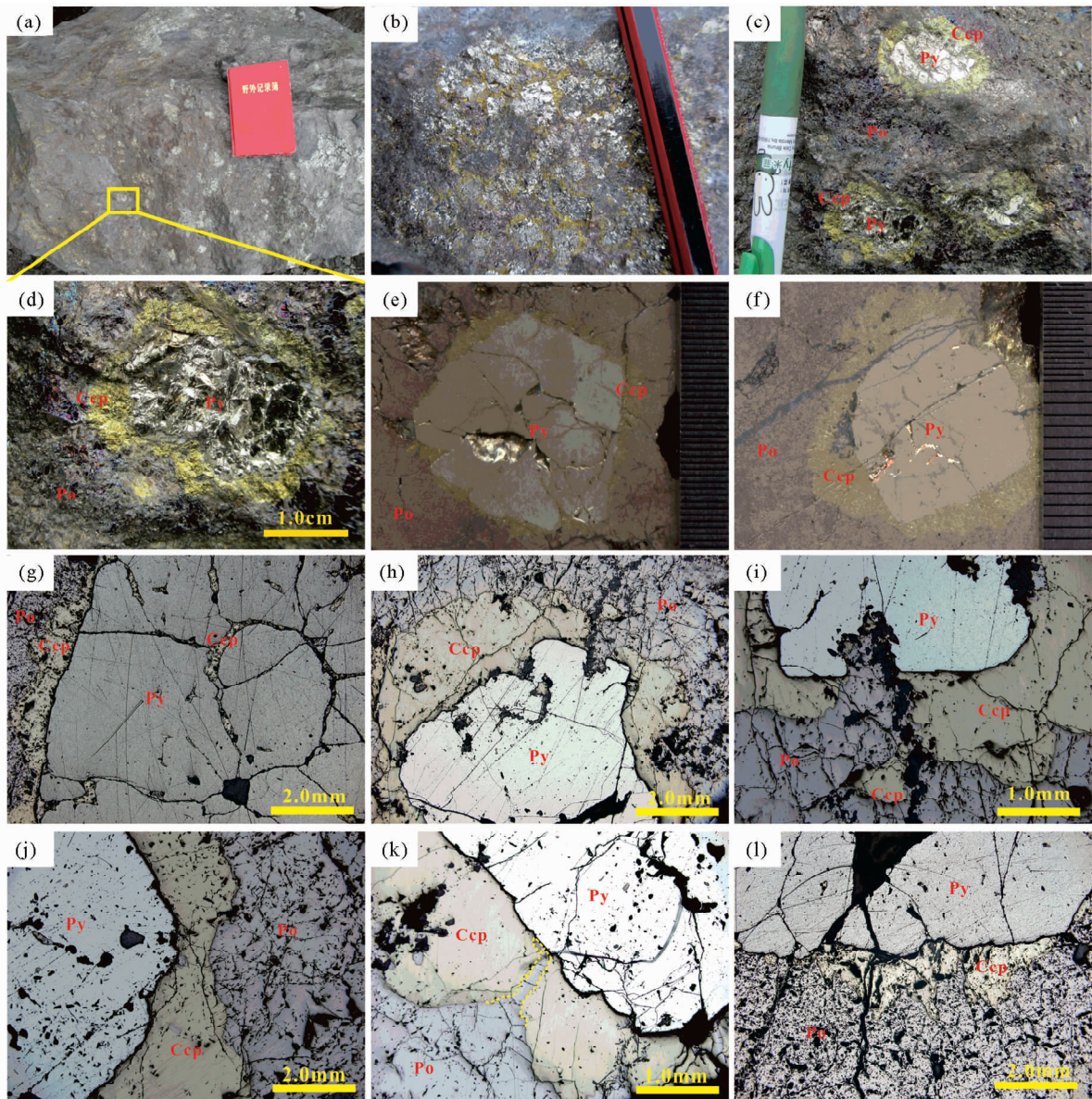


图3 红山铜矿石硫化物环带结构

(a)-在含铜磁黄铁矿矿石中,由内到外“黄铁矿-黄铜矿-磁黄铁矿”硫化物环带结构普遍存在;(b)-含铜磁黄铁矿矿石中硫化物环带结构在部分位置密集分布;(c)-黄铁矿在核部,黄铜矿围绕黄铁矿,磁黄铁矿围绕黄铜矿,显示明显的硫化物环带结构;(d)-较完整的硫化物环带结构,黄铁矿被中间带黄铜矿交代,整个硫化物环带结构被磁黄铁矿交代成浑圆状;(e)-硫化物环带中核部黄铁矿呈立方体晶形,中间带黄铜矿较薄;(f)-较完整的硫化物环带,核部黄铁矿自形好,中间带黄铜矿稳定存在,但在拐角位置明显减薄,形成港湾状;(g)-核部黄铁矿自形较好,黄铜矿沿黄铁矿裂隙进入黄铁矿内部;(h)-边部带磁黄铁矿溶蚀中间带黄铜矿甚至核部黄铁矿,在磁黄铁矿中见黄铜矿溶蚀残余;(i)-边部带磁黄铁矿交代溶蚀黄铜矿和黄铁矿,在磁黄铁矿中有黄铜矿交代残余;(j)-中间带黄铜矿围绕在黄铁矿周围,在部分位置被边部带磁黄铁矿交代溶蚀成港湾状;(k)-边部带磁黄铁矿溶蚀黄铜矿,直接与黄铁矿接触;(l)-中间带黄铜矿围绕在黄铁矿周围,被边部带磁黄铁矿溶蚀,呈不规则轮廓。(a-d)-野外及手标本现象;(e-f)-手标本磨光面现象;(g-l)-反射光下

Fig. 3 Sulfide zonal texture of Hongshan copper deposit

铜矿石自然类型包括含铜磁黄铁矿(图2a)、含铜磁铁矿(图2b)、含铜辉钼矿、含铜方铅矿、闪锌矿、含铜白钨矿等,含铜磁黄铁矿矿石是最主要类型。矿石中金属硫化物主要为磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿,其次为辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、辉铋矿、斑铜矿、白钨矿;脉石矿物主要有石榴子石、辉

石、阳起石、斜长石、方解石、石英,次为黑云母、绿泥石、绿帘石、绢云母、沸石、萤石等(图2c)。矿石矿物呈块状、浸染状和条带状构造和溶蚀交代(图2d)、粒状等结构。“黄铁矿-黄铜矿-磁黄铁矿”构成的硫化物环带结构普遍出现在块状含铜磁黄铁矿矿石中(图3)。

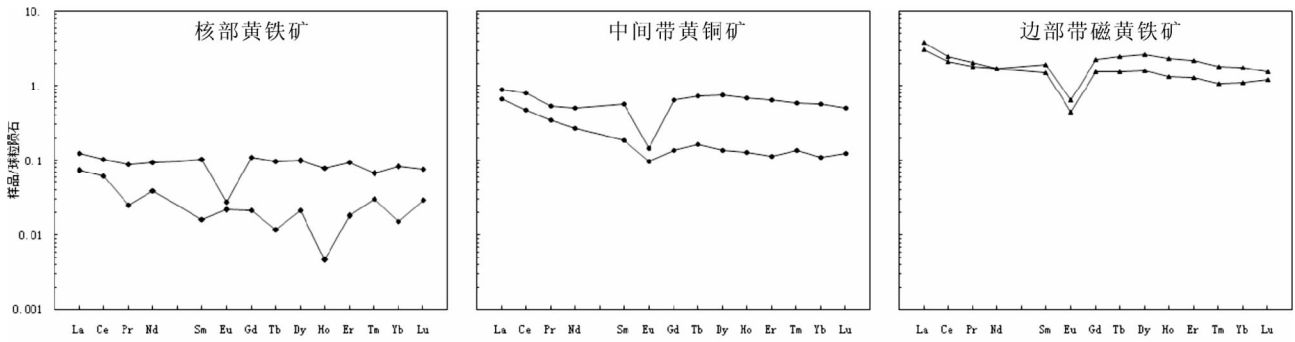


图4 云南红山铜矿石硫化物环带 REE 配分曲线 (球粒陨石标准化值据 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig.4 The chondrite-normalized REE distribution patterns of the sulfide zonal texture, Hongshan copper ores (normalization values after Sun and Mcdonough, 1989)

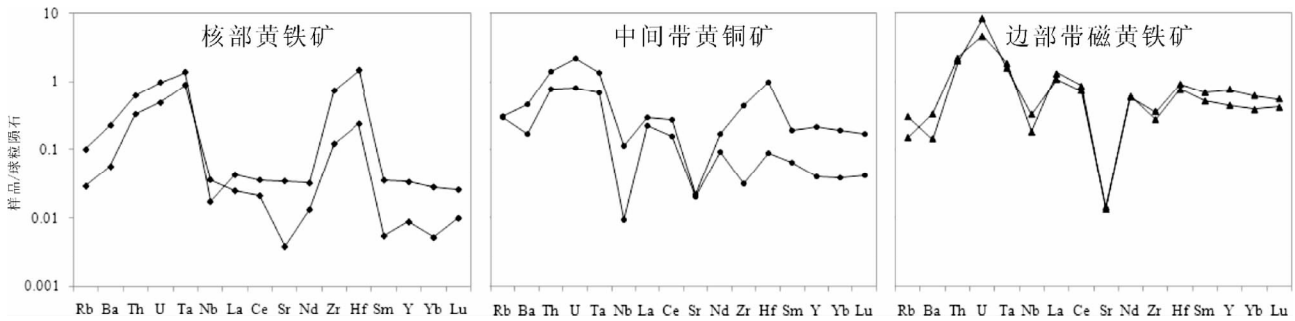


图5 红山铜矿石硫化物环带微量元素蛛网图 (球粒陨石标准化值据 Sun, 1980)

Fig.5 The chondrite-normalized trace element spidergram of the sulfide zonal texture, Hongshan copper ores (normalization values after Sun, 1980)

表1 云南红山铜矿石硫化物环带稀土元素分析结果 ($\times 10^{-6}$)

Table 1 Rare trace elements analysis results of the sulfide zonal texture, Hongshan copper deposit ($\times 10^{-6}$)

样品号 分析矿物 环带中位置	h7c	h9c	h7b	h9b	h7a	h9a
	黄铁矿 ^a		黄铜矿 ^b		磁黄铁矿 ^c	
	核部		中间带		边部带	
La	0.0293	0.01712	0.2114	0.15794	0.915	0.7314
Ce	0.06362	0.03746	0.4928	0.2854	1.5388	1.29
Pr	0.00844	0.00236	0.0497	0.0325	0.19974	0.1735
Nd	0.04364	0.01798	0.2298	0.1247	0.8156	0.799
Sm	0.01574	0.00246	0.08532	0.02838	0.2302	0.3028
Eu	0.00158	0.00126	0.00848	0.00556	0.02582	0.03744
Gd	0.02244	0.00436	0.13316	0.02794	0.3226	0.473
Tb	0.00366	0.00044	0.02738	0.00618	0.05948	0.09336
Dy	0.02516	0.00546	0.19194	0.03488	0.4104	0.6764
Ho	0.00446	0.00026	0.03832	0.00726	0.07698	0.1312
Er	0.01562	0.00298	0.10544	0.0186	0.2144	0.362
Tm	0.00168	0.00076	0.01472	0.00348	0.02746	0.0468
Yb	0.01394	0.00258	0.0968	0.0187	0.19186	0.3018
Lu	0.00192	0.00074	0.01264	0.0031	0.0311	0.04036
Y	0.15218	0.04026	0.9972	0.1857	2.044	3.456
ΣREE	0.17371		1.22626		5.25925	
δEu	0.25642	1.17344	0.24265	0.60222	0.28898	0.30174

注:在地质过程与矿产资源国家重点实验室(中国地质大学)ICP-MS 实验室完成,仪器型号 Agilent 公司产 4500A 型质谱仪

3 硫化物环带

红山铜矿体,尤其在 I、II、III 号矿体中含铜磁黄铁矿块状矿石内普遍可见硫化物环带(图 3a-c),在环带密集出现的位置每平方米可达到 40 个之多(图 3b)。含铜磁黄铁矿矿石中金属矿物主要为磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿,脉石矿物主要为石榴石、透辉石、阳起石等矽卡岩矿物。

硫化物环带的核部为黄铁矿,多呈立方体(少数五角十二面体)自形-半自形晶或其集合体,多集中在 1~4cm 左右,大者可超过 10cm;中间带为黄铜矿,他形集合体围绕核部黄铁矿沉淀,带宽从 1mm 至 1cm 不等;边部带为磁黄铁矿,他形集合体围绕中间带黄铜矿沉淀(图 3c-f)。矿相显微镜下可见,矿石硫化物环带的外部带对内部带的交代溶蚀现象(图 3g-l),内部带、尤其核部黄铁矿常被中间带黄铜矿交代溶蚀成浑圆状(图 3j, k)、不规则轮廓(图 3k, l)。这些矿相学现象反映环带从内到外硫化物先后形成晶出,矿物的生成顺序是黄铁矿-黄铜矿-磁黄铁矿。

表 2 云南红山铜矿石硫化物环带微量元素分析结果 (×10⁻⁶)

Table 2 Trace elements analysis results of the sulfide zonal texture, Hongshan copper deposit (×10⁻⁶)

样品号	h7c	h9c	h7b	h9b	h7a	h9a
分析矿物	黄铁矿		黄铜矿		磁黄铁矿	
环带中位置	核部		中间带		边部带	
Rb	0.06398	0.01846	0.19878	0.18768	0.09704	0.19012
Ba	1.5882	0.396	3.316	1.1876	2.35	0.9952
Th	0.05276	0.02842	0.12234	0.06686	0.19012	0.16928
U	0.02048	0.01032	0.04716	0.01724	0.0982	0.17358
Ta	0.05666	0.03708	0.0565	0.02892	0.07704	0.06398
Nb	0.01242	0.02568	0.08408	0.00672	0.1309	0.2312
Sr	0.7306	0.08202	0.4718	0.43	0.2866	0.3014
Zr	8.2000	1.3772	5.15	0.3592	3.116	4.004
Hf	0.4558	0.07466	0.3112	0.02738	0.2376	0.2814
Ti	5.3580	3.028	29.86	6.824	47.4	66.84
Co	727.20	385.60	4.018	1.992	1.0416	1.2334
Ni	19.898	32.460	2.080	1.8768	6.578	6.184
Se	22.340	17.060	14.082	12.808	12.810	12.940
Te	13.930	8.168	16.632	16.116	21.740	17.244
Th	0.05276	0.02842	0.12234	0.06686	0.19012	0.16928
U	0.02048	0.01032	0.04716	0.01724	0.0982	0.17358
Se/Te	1.84619		0.82071		0.66982	
Co/Ni	24.21281		1.49656		0.17890	

注：在地质过程与矿产资源国家重点实验室(中国地质大学) ICP-MS 实验室完成,仪器型号 Agilent 公司产 4500A 型质谱仪

表 3 云南红山铜矿石硫化物环带硫同位素分析结果 (δ³⁴S_{V-CDT}‰)

Table 3 Sulfur isotopic compositions (δ³⁴S_{V-CDT}‰) of sulfide zonal texture, Hongshan copper deposit

样品号	h1	h2	h5	h7	h8	h9	h10	h14	平均
边部带磁黄铁矿	5.17	4.80	4.32	4.16	4.26	4.63	4.59	3.81	4.47
中间带黄铜矿	4.82	5.07	4.21	4.36	4.66	4.42	4.83	4.29	4.58
核部黄铁矿	5.22	5.23	4.34	4.48	4.65	4.55	4.77	3.94	4.65

注：在地质过程与矿产资源国家重点实验室(中国地质大学) 稳定同位素实验室完成,仪器型号 EA-Isoprime 质谱仪

4 元素和同位素分析

采用金刚石切刀切割、物理破碎、淘洗过筛和实体显微镜逐粒挑选方法,从硫化物环带中分别选得核部黄铁矿、中间带黄铜矿、边部带磁黄铁矿单矿物样品,纯度 95%,在玛瑙研钵中磨至 200 目后进行微量元素的 ICP-MS 分析和硫同位素组成分析。元素分析在地质过程与矿产资源国家重点实验室(中国地质大学)完成,仪器型号为美国 Agilent 公司产 4500A 型质谱仪。硫化物环带微量元素分析结果见表 1、表 2,REE 配分曲线见图 4,微量元素蛛网图见图 5。

硫同位素分析采用 SO₂ 法在地质过程与矿产资源国家重点实验室(中国地质大学)完成,先用氧化法将硫化物样品加热到 1200℃ 燃烧成 SO₂ 气体,之后利用 EA-Isoprime 同位素质谱仪分析,结果采用国际标准 CDT 表达,分析误差 ≤0.2‰,分析结果见表 3、图 6。

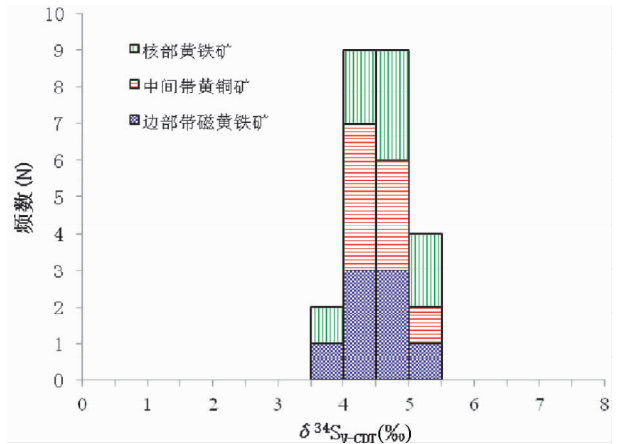


图 6 云南红山铜矿石硫化物环带硫同位素分布直方图

Fig. 6 S-isotopic histogram of sulfide zonal texture, Hongshan copper deposit

5 讨论

红山硫化物环带普遍出现在含铜硫化物矿石中,而在含铜磁铁矿等其它矿石类型中少见,说明这种环带结构是成矿过程中硫化物阶段的典型现象,反映了 Cu、Fe 硫化物矿化的某些重要性质。每个硫化物环带(图 3),核部为黄铁矿,中间带是黄铜矿,边部带为磁黄铁矿,三种硫化物矿物同心环状分布,形似“鸟眼”状;核部原来立方体自形晶黄铁矿常被中间带黄铜矿溶蚀交代成浑圆状,沿裂理中间带黄铜矿、甚至边部带磁黄铁矿常把核部黄铁矿溶蚀交代为港湾状不规则边界;中间带黄铜矿也常有被边部带磁黄铁矿溶蚀交代成波状弯曲而呈不规则边界的明显现象。这些现象证明硫化物环带外部带对内部带有明显溶蚀交代,在红山硫化物矿化阶段,黄铁矿(FeS₂)、黄铜矿(FeCuS₂)、磁黄铁矿(Fe_{1-x}S)先后晶出,三种硫化物矿物之间并非平衡共生而呈伴生关系。

红山硫化物环带核部黄铁矿样品 δ³⁴S_{V-CDT} = 3.94‰ ~ 5.23‰ (平均 4.65‰),中间带黄铜矿样品 δ³⁴S_{V-CDT} = 4.21‰ ~ 5.07‰ (平均 4.58‰),边部带磁黄铁矿样品 δ³⁴S_{V-CDT} = 3.81‰ ~ 5.17‰ (平均 4.47‰), δ³⁴S_{V-CDT}边部带磁黄铁矿 < δ³⁴S_{V-CDT}中间带黄铜矿 < δ³⁴S_{V-CDT}核部黄铁矿,反映环带中三种硫化物矿物之间没有达到硫同位素分馏平衡(Sakai, 1968; 陈岳龙等, 2005; Li and Liu, 2006; 陕亮等, 2009),进一步证实环带结构中硫化物之间的非平衡伴生关系,即黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿在硫化物矿化阶段先后晶出。相对于黄铜矿、磁黄铁矿,黄铁矿晶出要求热液系统具有较高的 H₂S 和 O₂ 逸度或较低的 pH 值,依据 Cu-Fe-S 体系 Eh-pH 相图(Gustafson, 1963; Corsini et al., 1980; Drüppel et al., 2006)判断,硫化物环带形成过程中,热液系统的 H₂S 和 O₂ 逸度降低或 pH 值升高。

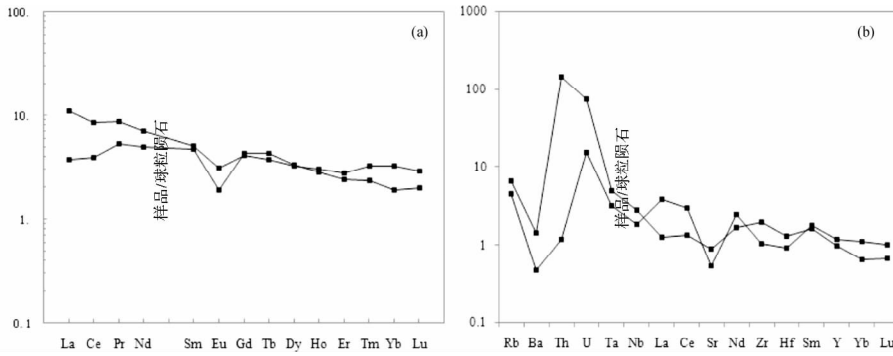


图7 红山矿区超基性岩 REE 配分曲线(a)和微量元素蛛网图(b) (数据来源于李文昌等,2010)

Fig.7 REE distribution patterns and trace element spidergram of ultrabasic rocks in Hongshan area (data after Li *et al.*, 2010)

表3和图6反映红山铜矿石硫化物环带的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 集中分布于3.81‰~5.23‰之间,极差仅1.42‰,均值为4.56‰;集中分布且较低的 $\delta^{34}\text{S}$ 值可能指示矿石硫统一来源于深源岩浆(陈岳龙等,2005;陕亮等,2009)。

红山铜矿石硫化物环带核部黄铁矿、中间带黄铜矿、边部带磁黄铁矿,虽然晶出有先后,且在环带中位置不同,但不同硫化物矿物具有极为相似的微量元素特征(图4、图5)。它们的轻重稀土元素分异均不明显, Eu 负异常显著(δEu 平均0.478), REE 配分曲线呈平缓“海鸥”型(图4);微量元素蛛网图均较为平坦,硫化物环带中不同硫化物均富集 U、Th、Zr、Hf 等高场强元素,而亏损 Rb、Sr、Ba 等大离子亲石元素。这可能说明硫化物环带中成矿金属元素具有相对一致的来源。通过与矿区中酸性侵入岩(图略)、基性-超基性岩(图7)进行对比,发现硫化物环带 REE 和微量元素特点与矿区中酸性侵入岩明显不同,而与矿区超基性岩十分相似。由于基性-超基性岩代表了下地壳或上地幔的来源,而中酸性岩代表了地壳深部的来源,因此可以判断成矿金属与深部岩浆关系密切。

从表1、表2和图4、图5可见,红山铜矿石硫化物环带由内到外,即从核部黄铁矿到中间带黄铜矿,再到边部带磁黄铁矿,硫化物的 ΣREE 依次升高(表1、图4)。硫化物矿物微量元素含量的变化受内、外两方面因素影响,内因是硫化物矿物的成分和结构,外因是晶出硫化物矿物的热液介质的物理化学条件。内因方面,红山铜矿石硫化物环带结构中的黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿均为铁的硫化物矿物,元素组成相似;黄铜矿中阳离子还有铜,铁(Ⅷ族)、铜(ⅠB族)属第四周期相邻族元素,铁为过渡金属,亲硫性明显,铜是亲硫元素,铁铜元素晶体化学性质相近(韩吟文等,2003;刘英俊等,1984;White, 2009);虽然黄铁矿具有等轴立方原始格子晶体结构,黄铜矿是四方体心格子结构,磁黄铁矿为六方原始格子结构(Hall and Stewart, 1973; Tossell *et al.*, 1981; 李胜荣, 2008),但已有文献中黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿对微量元素、尤其 REE 没有明显选择性富集趋势(Gadzhiev *et al.*, 2000)。所以,红山铜矿石硫化物环带中微量元素的变化可

能主要由于热液介质物理化学条件变化等外因所致。矿床地质特征指示红山铜矿石的成因与矽卡岩具有密切的联系(赵准,1995;侯增谦等,2003;王守旭等,2008)。矽卡岩相关矿化的实质是通过岩浆活动来自地球较深部的化学元素与岩浆所侵入的钙镁质盖层岩石发生化学反应的过程,常表现出显著的多阶段长期性矿化特点,从早到晚不同矿化阶段,地壳浅部成矿物质和大气降水参与矿化的程度不断加强(薛春纪等,2006;Meinert *et al.*, 2005; Pirajno, 2008)。在红山铜矿床所在地区,若以三叠系沉积盖层代表上地壳,其 $\Sigma\text{REE} = 109.4 \times 10^{-6} \sim 220.8 \times 10^{-6}$,平均 169.3×10^{-6} (黄建国和张留青,2005),中性和酸性侵入岩来自地壳相对深处,其 $\Sigma\text{REE} = 192.6 \times 10^{-6} \sim 315.0 \times 10^{-6}$,平均 218.9×10^{-6} (黄肖潇等,2012),基性-超基性岩来自下地壳或上地幔,其 $\Sigma\text{REE} = 9.77 \times 10^{-6} \sim 99.82 \times 10^{-6}$,平均 41.86×10^{-6} (李文昌等,2010);可见,研究区从上地幔到下地壳再到地壳深部, ΣREE 升高趋势明显。红山铜矿石硫化物环带先后晶出的黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿的微量元素总量,尤其 ΣREE 依次升高的变化特点很可能是矿化热液中地壳等更浅部物质更多参与成矿的响应。

REE^{3+} 的离子半径(0.098~0.116nm)与 Fe^{2+} (离子半径0.078nm)、 Cu^{2+} (离子半径0.054nm)差别较大(刘英俊等,1984;王中刚等,1989), REE^{3+} 替换硫化物晶格中阳离子较难,硫化物矿物中的 REE 主要来自流体包裹体(范建国等,2000;李厚民等,2003;王书来等,2004;毛光周等,2006),可通过硫化物样品稀土元素组成示踪成矿流体的某些性质(毛光周等,2006;Mao *et al.*, 2009)。富 F^- 热液轻重 REE 分异不明显,而富 Cl^- 热液富集 LREE(龙汉生等,2011);红山铜矿石硫化物环带轻重 REE 分异不明显,除解释为对超基性 REE 的继承外,也可能指示硫化物成矿热液富集 F^- ,矿石中也多见萤石,反映成矿流体具有岩浆热液性质。

红山铜矿石硫化物环带从内到外,硫化物中 Co、Se 含量均依次降低,Te 含量依次升高,而 Ni 含量有震荡(表2),Co/Ni 和 Se/Te 比值均依次降低(表2、图8)。热液矿石硫化物 Co/Ni 比值的降低与热液系统温度降低有关(李兆龙等,

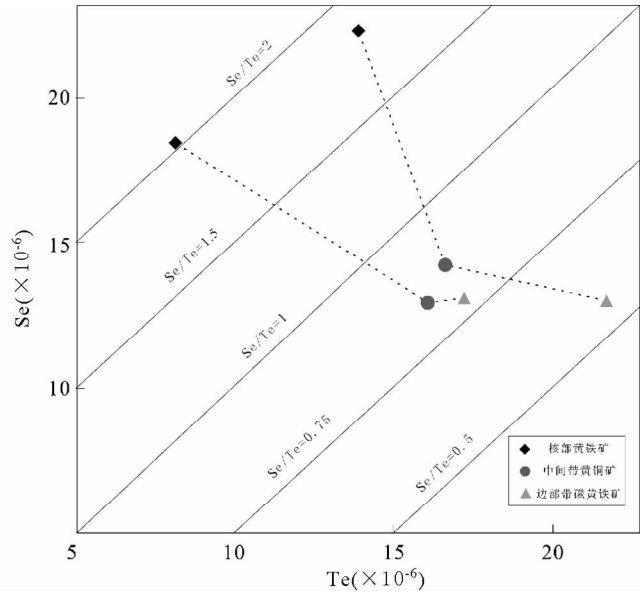
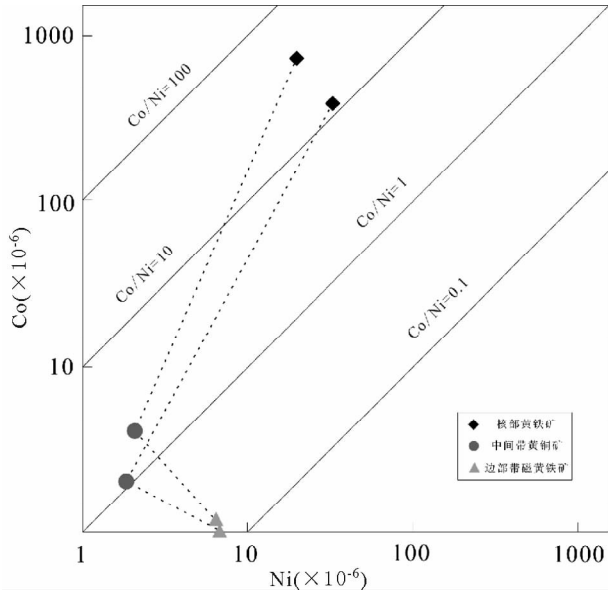


图8 红山铜矿石硫化物环带的 Co-Ni、Se-Te 元素组成

Fig.8 The Co-Ni and Se-Te compositions of the sulfides zonal texture, Hongshan copper deposit

1989;匡耀求,1991),通常热液矿石硫化物 Se/Te 比值随成矿温度降低也减小趋势明显(郑永飞,1982)。所以,红山硫化物环带从核部黄铁矿到中间带黄铜矿再到边部带磁黄铁矿,可能代表了成矿温度在硫化物矿化过程中逐渐降低的过程。

6 结论

云南香格里拉县红山铜矿石中发育以黄铁矿为核部、黄铜矿为中间带、磁黄铁矿为边部带的硫化物环带,内带常被外带硫化物溶蚀交代,环带中硫化物 $\delta^{34}S_{V-CDT}$ 边部带磁黄铁矿 (4.47‰) < $\delta^{34}S_{V-CDT}$ 中间带黄铜矿 (4.58‰) < $\delta^{34}S_{V-CDT}$ 核部黄铁矿 (4.65‰),环带从内到外硫化物先后晶出,矿物生成顺序为黄铁矿-黄铜矿-磁黄铁矿。

环带中三种硫化物矿物微量元素与矿区代表地幔源区的超基性岩相似,环带从内到外,硫化物的 ΣREE (0.17371‰、1.22626‰、5.25925‰)和微量元素含量依次升高,Co/Ni 和 Se/Te 比值依次降低,指示矿石硫化物沉淀过程中,可能伴有热液体系内壳源物质的增加。

红山铜矿石硫化物环带是岩浆热液为主成矿流体中黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿先后晶出成因,伴随硫化物环带的形成,热液系统从早到晚成矿温度逐渐降低,并伴随着 H₂S 和 O₂ 逸度降低或 pH 升高过程。

致谢 野外工作期间得到了云南神川矿业公司斯那次里、白马康主、鲁茸此里、和建文等同志的指导和帮助;宋庆伟硕士和陈永健硕士在实验研究过程中给予了很大的帮助;成文过程中得到了中国地质大学(北京)张德会教授、王建平副教授、段士刚博士的耐心指导和帮助;作者在此致以诚挚的

感谢!

References

Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province. 1990. Regional Geology of Yunnan Province. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 728 (in Chinese)

Chen YL, Yang ZF and Zhao ZD. 2005. Isotopic Geochronology and Geochemistry. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 441 (in Chinese)

Corsini F, Cortecchi G, Leone G and Tanelli G. 1980. Sulfur isotope study of the skarn-(Cu-Pb-Zn) sulfide deposit of Valle del Temperino, Campiglia Marittima, Tuscany, Italy. Economic Geology, 75(1): 83 - 96

Drüppel K, Wagner T and Boyce AJ. 2006. Evolution of sulfide mineralization in Ferrocarnatite, Swartbooisdrif Northwestern Namibia; Constraints from mineral compositions and sulfur isotopes. The Canadian Mineralogist, 44(4): 877 - 894

Fan JG, Ni P, Su WC, Qi L and Tian JH. 2000. Characteristics and significance of rare earth elements in quartz of Sidaogou hydrothermal gold deposit, Liaoning. Acta Petrologica Sinica, 16(4): 587 - 590 (in Chinese with English abstract)

Gadzhiev GG, Ismailov SM, Khamidov MM, Abdullaev KK and Sokolov VV. 2000. Thermophysical properties of sulfides of lanthanum, praseodymium, gadolinium, and dysprosium. High Temperature, 38(6): 875 - 879

Gustafson LB. 1963. Phase equilibria in the system Cu-Fe-As-S. Economic Geology, 58(5): 667 - 701

Hall SR and Stewart JM. 1973. The crystal structure refinement of chalcopyrite, CuFeS₂. Acta Crystallographica, B29: 579 - 585

Han YW, Ma ZD, Zhang HF, Zhang BR, Li FL, Gao S and Bao ZY. 2003. Geochemistry. Beijing: Geological Publishing House, 54 - 92 (in Chinese)

Hou ZQ, Yang YQ, Wang HP, Qu XM and Huang DH. 2003. Collision-Orogenic Progress and Mineralization System of Yidun Arc. Beijing: Geological Publishing House, 174 - 183 (in Chinese)

Hou ZQ, Yang YQ, Qu XM, Huang QH, Lü QT, Tian W, Hai P, Yu JJ and Tang SH. 2004. Tectonic evolution and mineralization systems

- of the Yidun arc orogen in Sanjiang region, China. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 110–129 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Zaw Khin, Pan GT, Mo XX, Xu Q, Hu YZ and Li XZ. 2007. Sanjiang Tethyan metallogenesis in SW China: Tectonic setting, metallogenic epochs and deposit types. *Ore Geology Review*, 31(4): 48–87
- Huang CK, Bai Y, Zhu YS, Wang HZ and Shang XZ. 2001. Yunnan Zhongdian Hongshan copper deposit. In: Huang CK (ed.). *China Copper Deposits*. Beijing: Geological Publishing House, 324–329 (in Chinese)
- Huang JG and Zhang LQ. 2005. The petrochemistry and tectonics of Late Triassic Tumugou Formation in Zhongdian. *Yunnan Geology*, 24(2): 186–192 (in Chinese with English abstract)
- Huang XX, Xu JF, Chen JL and Ren JB. 2012. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of two periods of intermediate-acid intrusive rocks from Hongshan area in Zhongdian arc. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1493–1506 (in Chinese with English abstract)
- Kuang YQ. 1991. Some problems on the application of trace-element geochemistry. *Geology and Prospecting*, (3): 48–52 (in Chinese)
- Li HM, Shen YC, Mao JW, Liu TB and Zhu HP. 2003. REE features of quartz and pyrite and their fluid inclusions: An example of Jiaojia-type gold deposits, northwestern Jiaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 267–274 (in Chinese with English abstract)
- Li JK, Li WC, Wang DH, Lu YX, Yin GH and Xue RS. 2007. Re-Os dating for ore-forming event in the late of Yanshan Epoch and research of ore-forming regularity in Zhongdian arc. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2415–2422 (in Chinese with English abstract)
- Li SR. 2008. *Crystallography and Mineralogy*. Beijing: Geological Publishing House, 346 (in Chinese)
- Li WC, Yin GH, Lu YX, Wang YB, Yu HJ, Cao XM and Zhang SQ. 2010. Delineation of Hongshan-Shudu oniholite melange in Gezan volcanic-magmatic arc and its significance, southwest “Jinsha-Lancang-Nu rivers”. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1661–1671 (in Chinese with English abstract)
- Li WC, Yin GH, Yu HJ, Lu YX and Liu XL. 2011. The porphyry metallogenesis of Geza volcanic magmatic arc in NW Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2541–2552 (in Chinese with English abstract)
- Li WC, Yu HJ, Yin GH, Cao XM, Huang DZ and Dong T. 2012. Re-Os dating of molybdenite from Tongchanggou Mo-polymetallic deposit in Northwest Yunnan and its metallogenic environment. *Mineral Deposits*, 31(2): 282–292 (in Chinese with English abstract)
- Li YB and Liu JM. 2006. Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(7): 1789–1795
- Li ZL, Xu WD and Pang WZ. 1989. Distribution characteristics of microelements in the Au-bearing sulfides from the gold ore deposits in East Shandong Province. *Geology and Mineral Resources Research*, 4(4): 35–46 (in Chinese with English abstract)
- Liu YJ, Cao LM, Li ZL, Wang HN, Chu TQ and Zhang JR. 1984. *Element Geochemistry*. Beijing: Science Press, 1–548 (in Chinese)
- Long HS, Luo TY, Huang ZL, Zhou MZ, Yang Y and Qian ZK. 2011. Rare earth element and trace element geochemistry of pyrite ores in the Laochang large size silver polymetallic deposit of Lancang, Yunnan Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3): 462–473 (in Chinese with English abstract)
- Mao GZ, Hua RM, Gao JF, Long GM, Lu HJ, Li WQ and Zhao KD. 2006. Existence of REE in different phases of gold-bearing pyrite in the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(4): 409–418 (in Chinese with English abstract)
- Mao GZ, Hua RM, Gao JF, Li WQ, Zhao KD, Long GM and Lu HJ. 2009. Existing forms of REE in gold-bearing pyrite of the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province, China. *Journal of Rare Earth*, 27(6): 1079–1087
- Meinert LD, Dipple GM and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 299–336
- Mo XX, Lu FX, Shen SY, Zhu QW, Hou ZQ, Yang KH, Deng JF, Liu XP, He CX, Ling PY, Zhang BM, Tai DQ, Chen MH, Hou HS, Ye S, Xue YX, Tang J, Wei QR and Fan L. 1993. *Volcanism and Mineralization in the Tethys of the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang Area*. Beijing: Geological Publishing House, 1–267 (in Chinese)
- Pirajno F. 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. New York: Springer, 535–577
- Sakai H. 1968. Isotopic properties of sulfur compounds in hydrothermal processes. *Geochemical Journal*, 2(1): 29–40
- Shan L, Zheng YY, Xu RK, Cao L, Zhang YL, Lian YL and Li YH. 2009. Review on sulfur isotopic tracing and hydrothermal metallogenesis. *Geology and Resources*, 18(3): 197–203 (in Chinese with English abstract)
- Song BC, Cai XP, Xu XW, Wang J, Qin KC and Zhang BL. 2006. Cenozoic hot-spring exhalative mineralization Hongshan copper-polymetallic deposit in Zhongdian, NW Yunnan. *Chinese Journal of Geology*, 41(4): 700–710 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS. 1980. Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 297(1431): 409–445
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmaism in the Ocean Basin*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Tossell JA, Vaughan DJ and Burdett JK. 1981. Pyrite, marcasite, and arsenopyrite type minerals: Crystal chemical and structural principles. *Physics and Chemistry of Minerals*, 7(4): 177–184
- Wang SL, Wang JB, Peng SL, Guo ZL and Chou YJ. 2004. REE geochemistry of ore fluids in the Koktag lead-zinc deposit, Xinjiang. *Geology in China*, 31(3): 308–314 (in Chinese with English abstract)
- Wang SX, Zhang XC, Leng CB, Qin CJ, Wang WQ and Zhao MC. 2008. Stable isotopic compositions of the Hongshan skarn copper deposit in the Zhongdian area and its implication for the copper mineralization process. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 480–488 (in Chinese with English abstract)
- Wang XS, Bi XW, Leng CB, Tang YY, Lan JB, Qi YQ and Shen NP. 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of granite porphyry in the Hongshan Cu-polymetallic deposit, Zhongdian, Northwest Yunnan, China and its geological implication. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3): 315–321 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZG, Yu XL and Zhao ZH. 1989. *Rare Earth Elements Geochemistry*. Beijing: Science Press, 1–535 (in Chinese)
- White WM. 2009. *Geochemistry*. Maryland: John-Hopkins University Press, 1–701
- Xu XW, Cai XP, Qu WJ, Song BC, Qin KC and Zhang BL. 2006. Later cretaceous granitic porphyritic Cu-Mo mineralization system in the Hongshan area, northwestern Yunnan and its significances for tectonics. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1422–1433 (in Chinese with English abstract)
- Xue CJ, Qi SJ and Huai HM. 2006. *Basic of Ore Deposits*. Beijing: Geological Publishing House, 89–110 (in Chinese)
- Yang YQ, Hou ZQ, Huang QH and Qu XM. 2002. Collision orogenic process and magmatic metallogenic system in Zhongdian arc. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(1): 17–24 (in Chinese with English abstract)
- Zeng PS, Wang HP, Mo XX, Yu XH, Li WC, Li TG, Li H and Yang CZ. 2004. Tectonic setting and prospects of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc belt. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(5): 535–540 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Z. 1995. The metallogenic model of indosinian porphyry-related copper-molybdenum deposit in Zhongdian Area. *Yunnan Geology*, 14(4): 342–349 (in Chinese)
- Zheng YF. 1982. Trace elements geological thermometer. *Northwestern Geology*, (3): 47–55 (in Chinese)
- Zhou WQ, Zhou QQ and Li YF. 1976. *Metallogeny Characteristics of Yunnan Gezan Skarn Copper Deposits*. Beijing: Geological

Publishing House, 104 – 109 (in Chinese)

附中文参考文献

陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹. 2005. 同位素地质年代学与地球化学. 北京: 地质出版社, 1 – 441

范建国, 倪培, 苏文超, 漆亮, 田京辉. 2000. 辽宁四道沟热液金矿床中石英的稀土元素特征及意义. 岩石学报, 16(4): 587 – 590

韩吟文, 马振东, 张宏飞, 张本仁, 李方林, 高山, 鲍征宇. 2003. 地球化学. 北京: 地质出版社, 54 – 92

侯增谦, 杨岳清, 王海平, 曲晓明, 黄典豪. 2003. 三江义敦岛弧碰撞造山过程与成矿系统. 北京: 地质出版社, 174 – 183

侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 黄典豪, 吕庆田, 田王, 海平, 余金杰, 唐绍华. 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统. 地质学报, 78(1): 110 – 129

黄崇柯, 白治, 朱裕生, 王惠章, 尚修治. 2001. 云南中甸红山铜矿床. 见: 黄崇柯编. 中国铜矿床. 北京: 地质出版社, 324 – 329

黄建国, 张留青. 2005. 中甸晚三叠世图姆沟组岩石化学与构造环境. 云南地质, 24(2): 186 – 192

黄肖潇, 许继峰, 陈建林, 任江波. 2012. 中甸岛弧红山地区两期中酸性侵入岩的年代学、地球化学特征及其成因. 岩石学报, 28(5): 1493 – 1506

匡耀求. 1991. 微量元素地球化学应用中的若干问题. 地质与勘探, (3): 48 – 52

李厚民, 沈远超, 毛景文, 刘铁斌, 朱和平. 2003. 石英、黄铁矿及其包裹体的稀土元素特征——以胶东焦家式金矿为例. 岩石学报, 19(2): 267 – 274

李建康, 李文昌, 王登红, 卢映祥, 尹光侯, 薛顺荣. 2007. 中甸弧燕山晚期成矿事件的 Re-Os 定年及成矿规律研究. 岩石学报, 23(10): 2415 – 2422

李胜荣. 2008. 结晶学与矿物学. 北京: 地质出版社, 346

李文昌, 尹光侯, 卢映祥, 王彦斌, 余海军, 曹晓民, 张世权. 2010. 西南“三江”格咱火山-岩浆弧中红山-属都蛇绿混杂岩带的厘定及其意义. 岩石学报, 26(6): 1661 – 1671

李文昌, 尹光侯, 余海军, 卢映祥, 刘学龙. 2011. 滇西北格咱火山-岩浆弧斑岩成矿作用. 岩石学报, 27(9): 2541 – 2552

李文昌, 余海军, 尹光侯, 曹晓民, 黄定柱, 董涛. 2012. 滇西北铜厂沟钨多金属矿床辉钨矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿环境. 矿床地质, 31(2): 282 – 292

李兆龙, 许文斗, 庞文忠. 1989. 胶东地区含金硫化物矿物微量元素分布规律. 地质找矿论丛, 4(4): 35 – 46

刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1 – 548

龙汉生, 罗泰义, 黄智龙, 周明忠, 杨勇, 钱志宽. 2011. 云南澜沧

老厂大型银多金属矿床黄铁矿稀土和微量元素地球化学. 矿物学报, 31(3): 462 – 473

毛光周, 华仁民, 高剑峰, 龙光明, 陆慧娟, 李伟强, 赵葵东. 2006. 江西金山含金黄铁矿的稀土元素赋存状态研究. 矿物学报, 26(4): 409 – 418

莫宣学, 路凤香, 沈上越, 朱勤文, 侯增谦, 杨开辉, 邓晋福, 刘祥福, 何昌祥, 林培英, 张保民, 郗道乾, 陈美华, 胡亨生, 叶松, 薛迎喜, 谭劲, 魏启荣, 范例. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿. 北京: 地质出版社, 1 – 267

陕亮, 郑有业, 许荣科, 曹亮, 张雨莲, 连永华, 李闰华. 2009. 硫同位素示踪与热液成矿作用研究. 地质与资源, 18(3): 197 – 203

宋保昌, 蔡新平, 徐兴旺, 王杰, 秦克章, 张宝林. 2006. 云南中甸红山铜-多金属矿床新生代热泉喷流沉积型矿床. 地质科学, 41(4): 700 – 710

王书来, 王京彬, 彭省临, 郭正林, 仇银江. 2004. 新疆可可塔勒铅锌矿成矿流体稀土元素地球化学特征. 中国地质, 31(3): 308 – 314

王守旭, 张兴春, 冷成彪, 秦朝建, 王外全, 赵茂春. 2008. 中甸红山矽卡岩铜矿稳定同位素特征及其对成矿过程的指示. 岩石学报, 24(3): 480 – 488

王新松, 毕献武, 冷成彪, 唐永永, 兰江波, 齐有强, 沈能平. 2011. 滇西北中甸红山 Cu 多金属矿床花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 矿物学报, 31(3): 315 – 321

王中刚, 于学元, 赵振华. 1989. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1 – 535

徐兴旺, 蔡新平, 屈文俊, 宋保昌, 秦克章, 张宝林. 2006. 滇西北红山晚白垩世花岗岩型 Cu-Mo 成矿系统及其大地构造学意义. 地质学报, 80(9): 1422 – 1433

薛春纪, 祁思敬, 隗合明. 2006. 基础矿床学. 北京: 地质出版社, 89 – 110

杨岳清, 侯增谦, 黄典豪, 曲晓明. 2002. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统. 地球学报, 23(1): 17 – 24

云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 – 728

曾普胜, 王海平, 莫宣学, 喻学惠, 李文昌, 李体刚, 李红, 杨朝志. 2004. 中甸岛弧带构造格架及斑岩铜矿前景. 地球学报, 25(5): 535 – 540

赵淮. 1995. 中甸地区与印支期斑岩有关的铜铅矿床成矿模式. 云南地质, 14(4): 342 – 349

郑永飞. 1982. 微量元素地质温度计. 西北地质, (3): 47 – 55

周维全, 周其勤, 李云飞. 1976. 云南格咱夕卡岩型铜矿成矿地质特征. 见: 中国地质科学院地质矿产研究所编. 铁铜矿产专辑. 北京: 地质出版社, 104 – 109