

# 西藏加多捕勒铁铜矿床硫、铅同位素组成及成矿物质来源\*

牛旭宁<sup>1,2</sup>, 郑有业<sup>1,2,3\*\*</sup>, 徐净<sup>3</sup>, 吴松<sup>1,2</sup>

(1 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;  
3 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 加多捕勒铁铜矿床位于念青唐古拉成矿带西段。综合研究围岩、岩体与矿物的硫、铅同位素组成, 发现其矿物硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值变化范围为  $-2.1\%$ ~ $6.2\%$ ,  $\delta^{34}\text{S}_{\text{ss}}$  值为  $2.16\%$ , 总体具有岩浆硫的特征。矿物硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值与石英闪长岩、板岩中硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值相近, 表明矿物的硫源可能部分由板岩与石英闪长岩提供。矿物铅同位素组成比较均一,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的变化范围分别为  $18.27\sim 18.842$ 、 $15.653\sim 15.899$  和  $38.793\sim 39.703$ , 与冈底斯成矿带北亚带矿床矿物硫化物的铅同位素组成相近, 具有上地壳铅源的特征。矿物铅同位素组成与黑云母二长花岗岩、大理岩的铅同位素组成一致, 显示铅可能主要来源于黑云母二长花岗岩和大理岩。综合分析表明, 加多捕勒铁铜矿床硫、铅同位素的研究显示其成矿物质可能主要来源于黑云母二长花岗岩, 部分来源于中二叠统下拉组岩石, 少量由石英闪长岩提供, 它们为深入研究该矿床的成矿模式提供了资料。

**关键词** 地球化学; 铁铜矿床; 硫同位素; 铅同位素; 加多捕勒

中图分类号: P618.31; P618.41; P597<sup>+</sup>.1; P597<sup>+</sup>.2

文献标志码: A

## Sulfur and lead isotope composition and tracing of ore-forming material sources in Jiaduobule Fe-Cu deposit of Tibet

NIU XuNing<sup>1,2</sup>, ZHENG YouYe<sup>1,2,3</sup>, XU Jing<sup>3</sup> and WU Song<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

### Abstract

The Jiaduobule Fe-Cu deposit is located in the western Nyainqentanglha metallogenic belt. Based on S-Pb isotopic geochemical analysis of country rocks, magmatite and ores, the authors reveal that the  $\delta^{34}\text{S}$  values of the ores range from  $-2.1\%$  to  $6.2\%$  with the estimated  $\delta^{34}\text{S}_{\text{ss}}$  being  $2.16\%$ , showing typical characteristics of magmatic sulfur. The similar  $\delta^{34}\text{S}$  values of sulfide of ores to pyrite in quartz diorite and slate indicates that sulfur of the ores was possibly partly derived from quartz diorite and slate. The  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios of the ores range from  $18.27$  to  $18.842$ ,  $15.653$  to  $15.899$  and  $38.793$  to  $39.703$ , respectively, similar to features of the ore sulfides from the deposits in the north subzone of Gangdise metallogenic belt. On the whole, the lead was almost derived from the upper crust. The lead isotopic compositions of ores are similar to those of biotite monzonite and the marble. It is indicated that lead was possibly mainly derived from biotite monzonite and marble. In a word, the study of sulfur and lead isotopes indicates that the major source was possibly derived from biotite monzonite, with the addition of minor mate-

\* 本文得到西藏冈底斯成矿带西段关键科学技术难题研究与应用示范(编号:201511015)项目资助

第一作者简介 牛旭宁,女,1992年生,硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:1037256533@qq.com

收稿日期 2017-11-17;改回日期 2018-03-25。张绮玲编辑。

rials from Xiala Formation of Middle Permian and quartz diorite. The results achieved by the authors provide basic data for the mineralization model.

**Key words:** geochemistry, Fe-Cu deposit, sulfur isotope, lead isotope, Jiaduobule

念青唐古拉成矿带位于中部拉萨地体的冈底斯弧背断隆带,呈现出“东铅锌西铁铜”的分布特征(图1),成矿潜力巨大。目前,该成矿带上矿床的研究集中于东段铅锌矿床,如蒙亚啊、洞中拉、亚贵拉、拉屋等(王立强等,2010;费光春等,2011;张哨波等,2009;张炜等,2013)。对西段铁铜矿床,如加多捕勒、恰功、尼雄、日阿等矿床研究相对较少,仅对矿区基础地质和岩浆岩源区进行了分析,缺乏对矿床成因、成矿流体特征、成矿物质来源、矿床成因等深入探讨(谢玉玲等,2009;李应栩等,2011;于玉帅等,2011;2014;王彦峰,2017)。

加多捕勒铁铜矿床位于西藏谢通门县春哲乡,地理坐标为东经 $88^{\circ}35'5''\sim 88^{\circ}32'14''$ ;北纬 $29^{\circ}55'16''\sim 29^{\circ}57'16''$ ,矿床规模较小。前人对加多捕勒矿床的研究主要集中在矿区岩浆岩的形成时代和成因方面,对矿床的成矿物质来源方面研究较少。于玉帅等(2011;2014)和王彦峰(2017)对加多捕勒铁铜矿床的岩浆岩进行了研究,结果表明成矿岩体为黑云母二长花岗岩,形成于印度-亚洲大陆碰撞造山的主碰撞期,其岩浆源区具有壳幔混源特征;石英二长闪长岩为晚白垩世岩浆活动的产物,其形成可能与低缓角度俯冲的新特提斯洋壳有关。本

文在前人研究的基础上,对加多捕勒矿床的矿石、岩浆岩及围岩中硫化物和部分全岩进行了系统的硫、铅同位素的分析,揭示了成矿物质来源,为深入研究该矿床的成因,深化区域成矿规律、成因机理认识及指导同类矿床的进一步找矿,提供了一些基础资料。

## 1 区域地质背景

念青唐古拉成矿带(冈底斯弧背断隆带)位于噶尔-隆格尔-扎日南木错-措麦断裂带与沙莫勒-麦拉-洛巴堆-米拉山断裂之间,是一条具有巨大成矿潜力的多金属成矿带(图1)。研究区位于念青唐古拉成矿带西段。区域上主要出露石炭系一二叠系的陆表浅海相碎屑岩-碳酸盐岩建造;其次为新元古界念青唐古拉群、前奥陶系松多岩群等变质岩系。其中,新元古界念青唐古拉群为区内陆壳的结晶基底岩系,岩性主要为变粒岩-浅粒岩、片麻岩、麻粒岩及混合岩等。区内断裂构造和褶皱构造发育,构造形态复杂,以早期近东西向断裂构造和旁多-松多褶皱带为主。区内岩浆活动十分强烈,岩浆岩分布广泛,主要发育白垩纪花岗岩、古近纪林子宗群火山岩系,局部发育晚三叠世

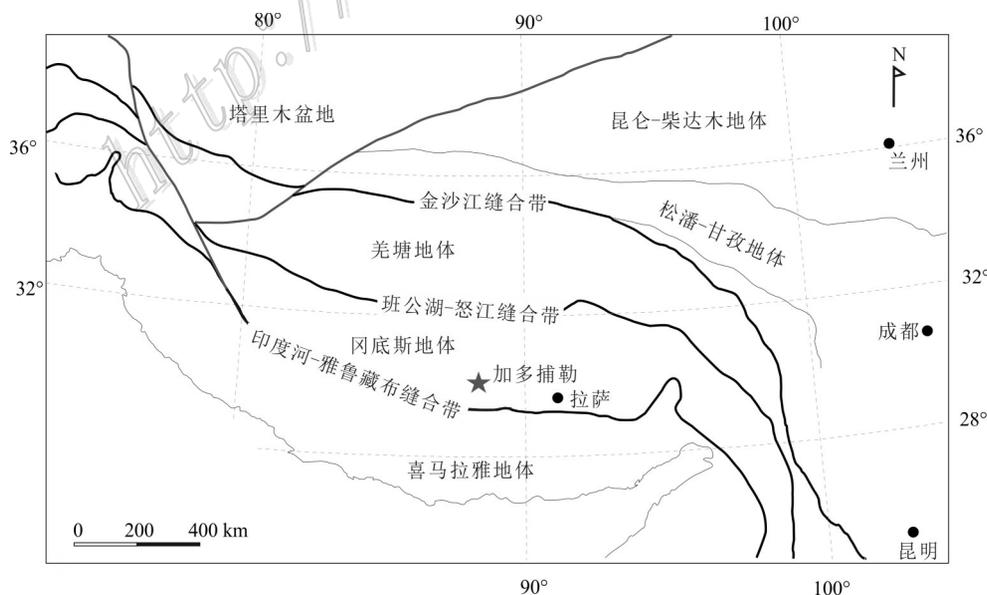


图1 冈底斯带区域地质简图(据 Zhu et al., 2011 修改)

Fig. 1 Regional geological map of the Gangdise belt (modified after Zhu et al., 2011)

花岗岩、侏罗纪花岗岩。区域上发育一条Fe-Cu-Pb-Zn-Ag-Mo成矿带,东部以铅锌矿床为主,代表性矿床为拉屋铜(铅)锌矿床、亚贵拉铅锌银(钼)矿床、蒙亚啊铅锌矿床、洞中拉铅锌矿床、洞中松多铅锌矿床;西部以铁铜矿床为主,代表性矿床为加多捕勒铁铜矿床、恰功铁矿床、尼雄铜铁矿床、日阿铜矿床。

## 2 矿区地质特征

### 2.1 矿区地质概况

矿区地层主要为古近系林子宗群年波组、典中

组火山岩系和中二叠统下拉组沉积地层。其中,年波组火山岩分布于矿区中部,典中组火山岩分布在矿区东北部,中二叠统下拉组灰白色厚层灰岩、生物碎屑微晶灰岩、大理岩夹薄层砂质板岩分布广泛,是区内主要的赋矿地层,与成矿作用关系密切(图2)。矿区内断裂和褶皱构造不发育。区内中酸性侵入岩发育,中粗粒黑云母二长花岗岩分布在矿区南部并伴随有少量同时代的辉长岩,深灰色中细粒石英闪长岩分布在矿区中部及东、西两侧(图2)。其中,黑云母二长花岗岩为矿区成矿岩体(于玉帅等,2011;2014;王彦峰,2017),其锆石年龄为51.42 Ma(王彦峰,2017),为始新世岩浆活动的产物;石英二长闪长

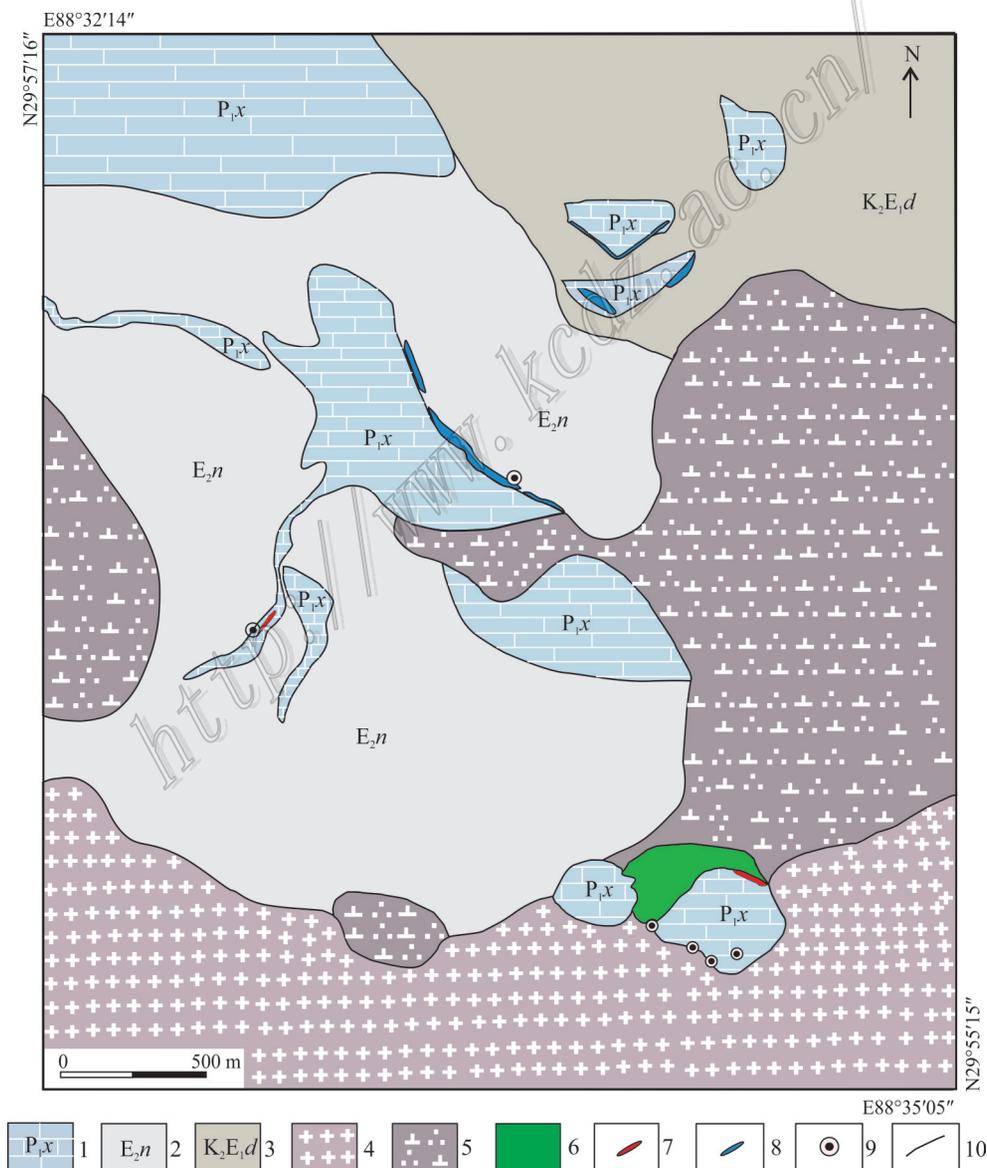


图2 加多捕勒铁铜矿床矿区地质简图(据于玉帅等,2011修改)

1—中二叠统下拉组灰岩、大理岩;2—古近系年波组火山岩;3—古近系典中组火山岩;4—始新世黑云母二长花岗岩;

5—晚白垩世石英闪长岩;6—矽卡岩;7—铁矿体;8—铜矿体;9—采样位置;10—地质界线

Fig. 2 Geological sketch map of the Jiaduobule Fe—Cu deposit (modified after Yu et al., 2011)

1—Limestone and marble of the Permian Xiala Formation; 2—Volcanic rocks of the Palaeogene Nianbo Formation; 3—Volcanic rocks of the Palaeogene Dianzhong Formation; 4—Eocene biotite monzogranite; 5—Upper Cretaceous quartz diorite;  
6—Skarn; 7—Iron orebody; 8—Copper orebody; 9—Sampling position; 10—Geological boundary

岩 84.3Ma(于玉帅等,2014),为晚白垩世岩浆活动的产物。

## 2.2 矿体特征

加多捕勒矽卡岩型铁铜矿床主要由铁矿体和铜矿体组成,并呈现出“北铜南铁”的趋势,其中铜矿体呈层状分布,地表可见孔雀石化,主要发育在矿区北部的中二叠统下拉组砂质板岩与大理岩接触的石榴子石矽卡岩中,呈北东向展布(图 3a)。矿区中部发育铁铜矿体,以脉状铁矿体为主,铁矿体呈北东向展布,主要发育在矽卡岩中,规模较小。南部的磁铁矿矿体呈北东向展布,主要发育在黑云母二长花岗岩与大理岩接触带的矽卡岩中(图 3b)。

## 2.3 矿石特征

矿区矿石类型主要有块状、团块状、浸染状氧化物矿石和浸染状、脉状硫化物矿石(图 4)。矿石矿物以磁铁矿、斑铜矿、黄铜矿为主,少量的赤铁矿、黄铁矿。脉石矿物主要有红色、红棕色、浅黄褐色以及绿色的石榴子石(图 4b、e、f)、阳起石(图 4d)、方解石(图 4c、d、g、i)、石英(图 4e、g)等。矿石构造主要有致密块状构造(图 4a、h)、稠密浸染状构造(图 4c)、条带状构造(图 4g)、斑杂状构造(图 4b、d、e、f)、团块状构造(图 4i)。矿石的结构相对较为简单,根据磁铁矿、斑铜矿以及黄铜矿的结晶程度及形成关系而言,矿石结构主要为交代结构、结晶结构,此外还存在固溶体分离结构、共结边

结构。

**交代结构:** 矿区内较为普遍。后期黄铜矿交代早期的斑铜矿(图 5a、b、d、i、f);后期的硫铋铜矿交代早期的斑铜矿(图 5b、e);后期的黄铜矿交代了早期的磁铁矿,呈残余结构(图 5h)。

**结晶结构:** 矿区内常见他形粒状结构。黄铁矿的他形粒状结构见图 5c。

**固溶体分离结构:** 黄铜矿在斑铜矿中呈细小至极细小的圆形、椭圆形、伸长的纺锤形的乳滴颗粒,形成乳滴状结构,黄铜矿与斑铜矿共生(图 5a、i)。

**共结边结构:** 黄铁矿与磁黄铁矿接触边界平滑,呈舒缓波状,形成共边结构(图 5g),两者共生。

通过以上对加多捕勒铁铜矿床矿石结构分析得出,磁铁矿早于黄铜矿、斑铜矿;其中黄铜矿有 2 期:一期为黄铜矿与斑铜矿共生,一期黄铜矿与硫铋铜矿共生交代早期的黄铜矿、斑铜矿;黄铁矿与磁黄铁矿共生。矿物的生成顺序大致为磁铁矿→黄铜矿-斑铜矿→硫铋铜矿-黄铜矿;黄铁矿-磁黄铁矿→方铅矿。

## 2.4 成矿期次

根据手标本样品和镜下的详细观察,按照矿物组合以及共生关系,矿区成矿期次大致可以分为干矽卡岩阶段、湿矽卡岩阶段、石英-硫化物阶段。其中,干矽卡岩阶段矿物主要以红棕色、绿色石榴子石(图 4b、e、f)以及辉石为主;湿矽卡岩阶段矿物以阳

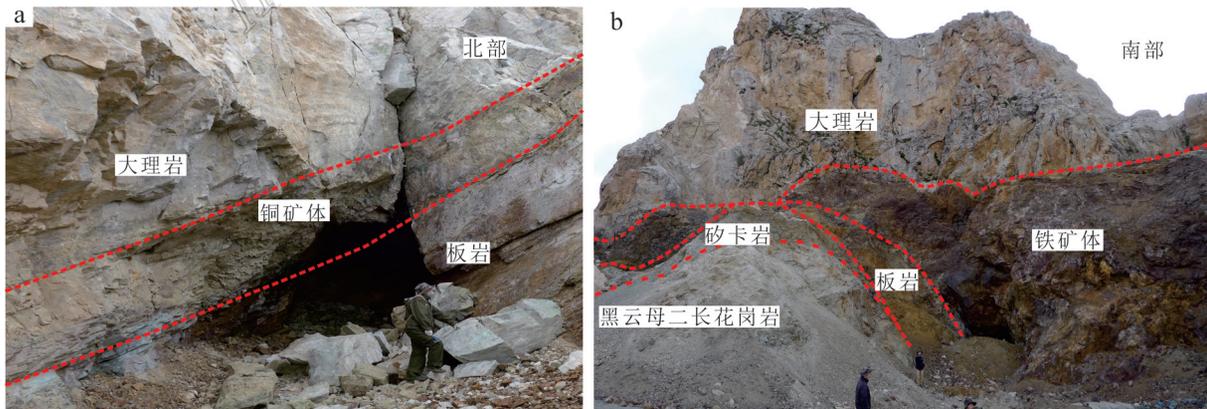


图 3 加多捕勒矿床铜矿体(a)及铁矿体(b)特征

Fig.3 Cu ore body (a) and Fe ore body (b) characteristics of the Jiaduobule Fe-Cu deposit

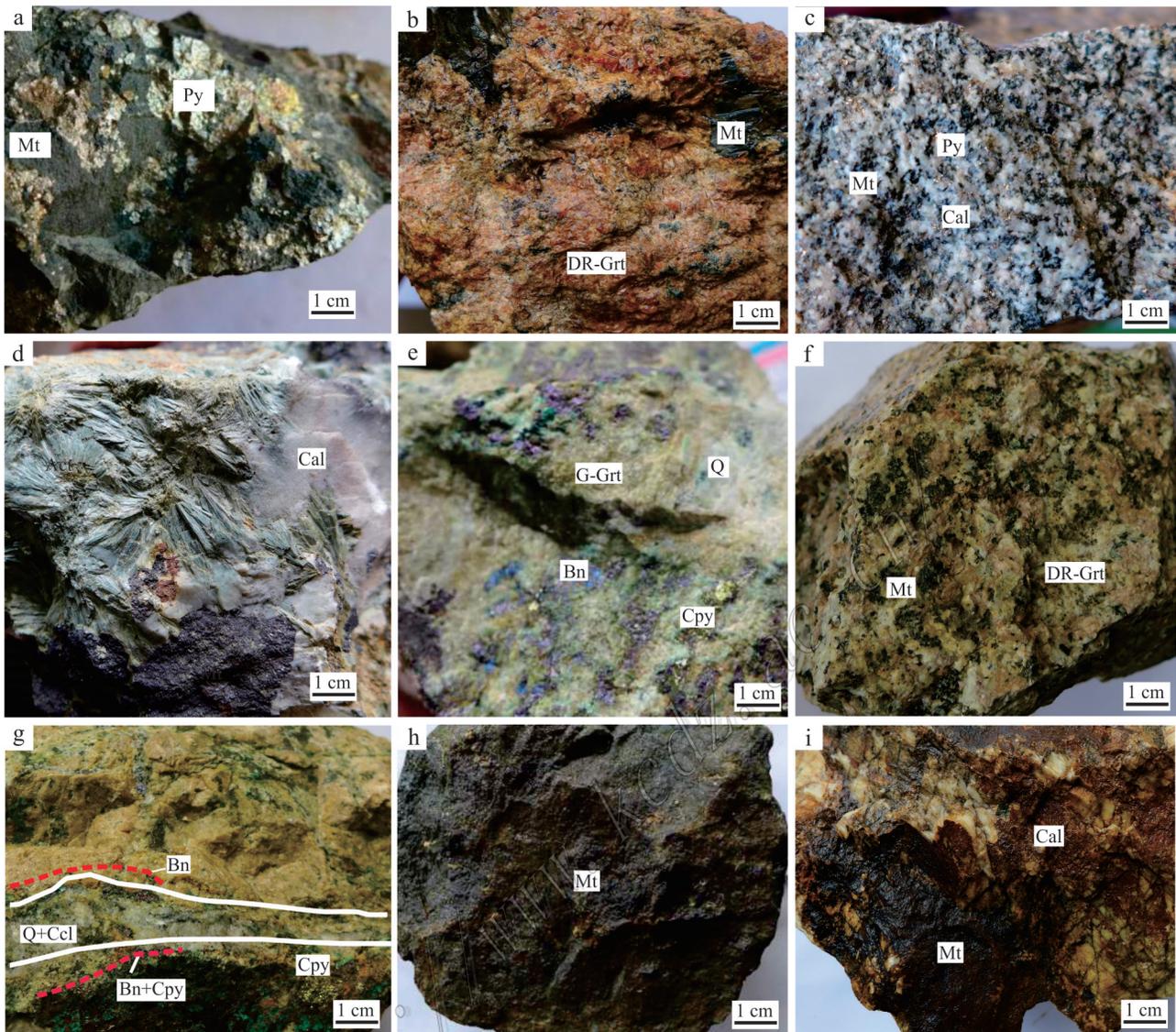


图4 加多捕勒矿床的矿石特征

- a. 含黄铁矿的块状磁铁矿; b. 红棕色石榴子石砂卡岩, 其中含磁铁矿; c. 浸染状磁铁矿、黄铁矿; d. 含团块状磁铁矿的阳起石砂卡岩; e. 绿色石榴子石砂卡岩, 其中含斑铜矿、黄铜矿; f. 红棕色石榴子石砂卡岩中见稠密浸染状磁铁矿; g. 条带状黄铜矿和斑铜矿, 发育石英-方解石脉; h. 致密块状磁铁矿; i. 方解石脉中见团块状磁铁矿  
 Py—黄铁矿; Mt—磁铁矿; DR-Grt—红棕色石榴子石; Act—阳起石; Cal—方解石; Cpy—黄铜矿; Bn—斑铜矿;  
 G-Grt—绿色石榴子石; Q—石英

Fig. 4 Ore characteristics of the Jiaduobule deposit

- a. Massive magnetite containing pyrite; b. Reddish brown garnet skarn containing magnetite; c. Magnetite and pyrite with dissemination structure; d. Actinolite skarn containing nodular magnetite; e. Green garnet skarn containing bornite and chalcopyrite; f. Reddish brown garnet skarn containing dense disseminated magnetite; g. Ribbon chalcopyrite and bornite with a quartz-calcite vein; h. Massive magnetite; i. Nodular magnetite in the calcite vein  
 Py—Pyrite; Mt—Magnetite; DR-Grt—Reddish brown garnet; Act—Actinolite; Cal—Calcite; Cpy—Chalcopyrite;  
 Bn—Bornite; G-Grt—Green garnet; Q—Quartz

起石(图4d)为主,少量绿帘石,并交代早期的石榴子石,该阶段大量磁铁矿(图4d、f)生成;石英-硫化物阶段矿物主要有斑铜矿(图5a)、黄铜矿(图5b)、石

英、方解石(图4g),含少量黄铁矿(图5c)。该阶段矿物交代、穿插石榴子石、辉石、磁铁矿等早期矿物(图5h);石英存在于砂卡岩的各个阶段;黄铜矿、斑铜

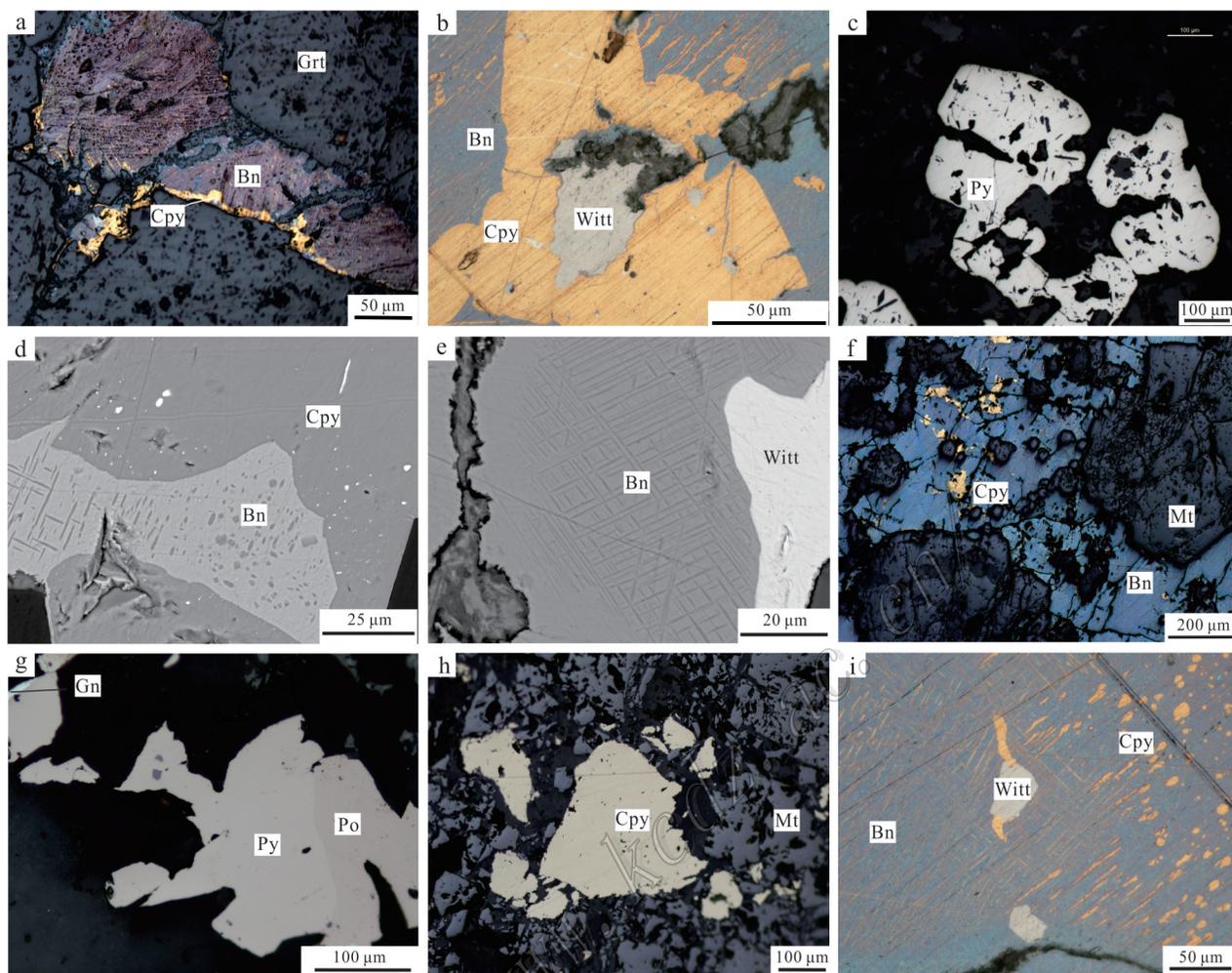


图 5 加多捕勒矿床的矿石结构

- a. 黄铜矿与斑铜矿形成固溶体分离结构;黄铜矿交代斑铜矿;b. 黄铜矿与硫铋铜矿交代斑铜矿;c. 他形粒状黄铁矿;  
d. 黄铜矿交代斑铜矿(BSE);e. 硫铋铜矿交代斑铜矿(BSE);f. 黄铜矿交代斑铜矿;g. 磁黄铁矿和黄铁矿  
形成共边结构;h. 黄铜矿交代磁铁矿;i. 黄铜矿与硫铋铜矿交代了与黄铜矿共生的斑铜矿  
Grt—石榴子石;Bn—斑铜矿;Cpy—黄铜矿;Witt—硫铋铜矿;Py—黄铁矿;Po—磁黄铁矿

Fig. 5 Ore structure of the Jiaduobule deposit

- a. Chalcopyrite and bornite assuming interstitial separation structure; chalcopyrite replacing bornite; b. Bornite replaced by chalcopyrite and wittichenite; c. Anhedral granular pyrite; d. Bornite replaced by chalcopyrite (BSE); e. Bornite replaced by wittichenite (BSE);  
f. Bornite replaced by chalcopyrite; g. Pyrrhotite and pyrite assuming edge-shared structure; h. Magnetite replaced by chalcopyrite; i. Chalcopyrite and wittichenite replacing bornite associated with chalcopyrite  
Grt—Garnet; Bn—Bornite; Cpy—Chalcopyrite; Witt—Wittichenite; Py—Pyrite; Po—Pyrrhotite

矿、黄铁矿等硫化物呈浸染状、斑杂状分布在矽卡岩矿物中(图 4e、g)。

## 2.5 围岩蚀变

加多捕勒矿床的围岩蚀变十分发育,以矽卡岩化(图 6a)为主,主要包括石榴子石矽卡岩化、透辉石矽卡岩化、阳起石矽卡岩化、绿帘石矽卡岩化、绿泥石矽卡岩化。成矿岩体黑云母二长花岗岩广泛发育褪色蚀变,主要为钠化(图 6b)、钾化(图 6c)。

## 3 样品及测试方法

硫、铅同位素研究对探讨成矿物质来源十分有效(张理刚,1985),为了更好的约束成矿物质来源,本文结合研究区地层和岩性特征,采集了矿区中主要地层、岩体以及矿体的样品做对比分析,明确矿体与地层、岩体的关系。取样位置见图 2。样品大多分



图6 加多捕勒矿床的蚀变类型

a. 矽卡岩化; b. 钠化; c. 钾化

Fig. 6 Alteration types of the Jiaduobule deposit

a. Skarn alteration; b. Sodic alteration; c. Potassic alteration

布在岩体与地层接触部位以及矿体附近。制样过程如下:首先选取具有代表性的样品,经过粉碎,在双目镜下手工挑选,使单矿物纯度达到99%以上。单矿物硫同位素分析样品质量为0.1 g,单矿物铅同位素分析样品质量在0.25 g。全岩的硫、铅同位素的分析样品质量为10 g,并且研磨至200目以下。样品的分析测试在北京核工业地质研究院测试中心。硫同位素测试仪器为MAT-251气体同位素质谱仪,测量结果以V-CDT为标准,分析精度优于 $\pm 0.2\%$ 。硫化物参考标准为GBW-04414、GBW-04415硫化银标准,其 $\delta^{33}\text{S}$ 值分别是 $-0.02\% \pm 0.11\%$ 和 $11.36\% \pm 0.14\%$ (刘汉彬等,2013)。铅同位素测试仪器为MAT-261,分析总体误差小于0.05%,测量精度为 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=2.165 \pm 0.015$ , $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.914 \pm 0.007$ , $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.059 \pm 0.002$ 。

## 4 分析结果及讨论

### 4.1 硫同位素组成

硫同位素组成见表1。

从表1可以看出,加多捕勒铁铜矿床样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 绝大多数为正值, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-2.1\% \sim 6.2\%$ (17件样品),平均值为2.2%。其中,黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-2.1\% \sim 5.9\%$ (9件样品),平均值为1.4%。斑铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $1.3\% \sim 3.4\%$ (4件样品),平均值为2.1%。黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-2.1\% \sim 6.2\%$ (4件样品),平均值为3.8%。黄铁矿主要来自南部磁铁矿体中后期的硫化物,黄铜矿与斑铜矿主要来自矿区北部与中部的矽卡岩中的铜矿化。根据所测样品的岩性差异

分析,石英闪长岩中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $0.3\% \sim 0.5\%$ ,板岩中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-2.1\% \sim -1.5\%$ ,北段黄铜矿-斑铜矿绿色石榴子石矽卡岩中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-2.1\% \sim 3.4\%$ ,南段磁铁矿中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $5.5\% \sim 6.2\%$ 。

通常认为,在硫同位素分馏达到平衡时,共生硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值按照辉钼矿—黄铜矿—斑铜矿—方铅矿的顺序递减(郑永飞等,2000)。加多捕勒共生矿物组合中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值大致为黄铜矿>斑铜矿,表明了加多捕勒矿床主成矿期共生硫化物的硫同位素

表1 加多捕勒铁铜矿床的硫同位素组成

Table 1 Sulfur isotope compositions of the Jiaduobule Fe-Cu deposit

样品编号	样品名称	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\%$
JD-143	含黄铁矿石英闪长岩	黄铁矿	0.5
JD15-96	含黄铁矿石英闪长岩	黄铁矿	0.3
JD15-98	含黄铁矿石英闪长岩	黄铁矿	0.3
JD-85	北段黄铜-斑铜矿绿色石榴子石矽卡岩	斑铜矿	3.4
JD-91	北段黄铜-斑铜矿绿色石榴子石矽卡岩	斑铜矿	2.5
JD-96	北段黄铜-斑铜矿黄色石榴子石矽卡岩	黄铜矿	-2.1
JD-96	北段黄铜-斑铜矿绿色石榴子石矽卡岩	斑铜矿	1.3
JD-64	北段黄铜-斑铜矿绿色石榴子石矽卡岩	斑铜矿	1.3
JD15-42	南段磁铁矿中含黄铁矿-黄铜矿	黄铜矿	5.5
JD15-42	南段磁铁矿中含黄铁矿-黄铜矿	黄铁矿	5.7
JD15-44	南段磁铁矿中含黄铁矿-黄铜矿	黄铜矿	5.7
JD15-44	南段磁铁矿中含黄铁矿-黄铜矿	黄铁矿	5.7
JD15-46	南段磁铁矿中含黄铁矿-黄铜矿	黄铁矿	5.9
JD15-46	南段磁铁矿中含黄铁矿-黄铜矿	黄铜矿	6.2
JD15-107	(矽卡岩化)板岩中的黄铁矿	黄铁矿	-1.5
JD15-108	(矽卡岩化)板岩中的黄铁矿	黄铁矿	-2.1
JD15-110	(矽卡岩化)板岩中的黄铁矿	黄铁矿	-1.8

表2 加多捕勒铁铜矿床和成矿带上其他矽卡岩矿床铅同位素组成  
Table 2 Lead isotope compositions of the Jiadubule Fe-Cu deposit and other skarn deposits in the metallogenic belt

样品号	样品名称	矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	$\mu$	$\omega$	Th/U	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	来源
JD15-96	含黄铁矿石英闪长岩	黄铁矿	16.817	0.006	15.481	0.003	37.497	0.008	9.49	41.19	4.20	17.60	52.94	
JD15-98	含黄铁矿石英闪长岩	黄铁矿	18.625	0.003	15.700	0.002	39.084	0.006	9.64	38.91	3.91	24.43	49.01	
JD-85	北段黄铜-斑铜矿-石榴子石矽卡岩	斑铜矿	18.760	0.003	15.798	0.003	39.460	0.006	9.82	40.63	4.00	30.93	60.17	
JD-91	北段黄铜-斑铜矿-石榴子石矽卡岩	斑铜矿	18.842	0.002	15.899	0.001	39.703	0.003	10.01	42.15	4.08	37.81	69.55	
JD-96	北段黄铜-斑铜矿-石榴子石矽卡岩	斑铜矿	18.622	0.003	15.752	0.003	39.216	0.011	9.74	39.97	3.97	28.11	55.48	
JD-64	北段黄铜-斑铜矿-石榴子石矽卡岩	斑铜矿	18.731	0.002	15.748	0.002	39.322	0.004	9.72	39.74	3.96	27.49	54.66	
JD15-42	南段磁铁矿-黄铁矿-黄铜矿矿石	黄铜矿	18.455	0.003	15.712	0.003	39.024	0.007	9.68	39.76	3.98	25.83	53.45	
JD15-42	南段磁铁矿-黄铁矿-黄铜矿矿石	黄铁矿	18.270	0.002	15.660	0.002	38.793	0.005	9.60	39.36	3.97	22.79	50.32	本文
JD15-44	南段磁铁矿-黄铁矿-黄铜矿矿石	黄铜矿	18.478	0.003	15.700	0.003	38.997	0.007	9.65	39.39	3.95	24.90	51.34	
JD15-44	南段磁铁矿-黄铁矿-黄铜矿矿石	黄铁矿	18.681	0.002	15.715	0.002	39.155	0.006	9.66	39.02	3.91	25.32	49.96	
JD15-46	南段磁铁矿-黄铁矿-黄铜矿矿石	黄铁矿	18.358	0.002	15.653	0.002	38.830	0.006	9.57	38.93	3.94	21.97	48.13	
JD15-107	(矽卡岩化)板岩	黄铁矿	17.400	0.002	15.510	0.002	37.920	0.004	9.42	39.43	4.05	15.86	46.81	
JD15-108	(矽卡岩化)板岩	黄铁矿	17.553	0.002	15.524	0.002	37.972	0.005	9.43	38.82	3.98	16.07	43.95	
JD15-110	(矽卡岩化)板岩	黄铁矿	18.637	0.002	15.700	0.002	39.066	0.004	9.64	38.77	3.89	24.40	48.15	
JD-28	大理岩(全岩)		18.713	0.002	15.707	0.002	39.058	0.004	9.64	38.38	3.85	24.66	45.91	
JD-130	大理岩(全岩)		18.691	0.002	15.684	0.002	39.061	0.004	9.60	38.29	3.86	23.11	45.42	
JD-108	大理岩(全岩)		18.566	0.003	15.624	0.003	38.676	0.006	9.50	36.86	3.76	19.26	35.77	
JD-3	黑云母二长花岗岩		18.704		15.621		38.986		9.48	37.34	3.81	18.74	40.57	
JD-4	黑云母二长花岗岩		18.771		15.638		39.081		9.50	37.5	3.82	19.85	43.16	王彦峰,
JD-5	黑云母二长花岗岩		18.766		15.633		39.057		9.49	37.39	3.81	19.52	42.47	2017
JD803-150	黑云母二长花岗岩		18.683		15.655		39.068		9.54	38.09	3.86	21.09	44.27	
CZC-12-1		黄铜矿	18.698		15.767		39.388							
CZC-12-2		方铅矿	18.660		15.723		39.248							
CZC-13-1		黄铜矿	18.676		15.720		39.294							
CZC-13-2		闪锌矿	18.659		15.720		39.229							
CZC-14-1		黄铜矿	18.675		15.740		39.292							
CZC-14-2		方铅矿	18.687		15.752		39.336							姜军胜
CZC-15-1		黄铜矿	18.689		15.749		39.334							等,2015
CZC-15-2		方铅矿	18.726		15.793		39.480							
CZC-18-1		黄铜矿	18.655		15.715		39.221							
CZC-18-2		方铅矿	18.663		15.721		39.231							
CZC-19-1		黄铜矿	18.669		15.731		39.258							
CZC-19-2		方铅矿	18.694		15.758		39.362							
E-2	细斑斑岩		18.602		15.672		39.053							
E-3	细斑斑岩		18.612		15.671		39.070							
E-4	细斑斑岩		18.708		15.784		39.481							
E-11	粗斑斑岩		18.807		15.715		39.608							
E-12	粗斑斑岩		18.620		15.644		39.055							杨勇等,
E-14	粗斑斑岩		18.727		15.654		39.300							2010
08NDZ-5		方铅矿	18.667		15.746		39.292							
08NDZ-1		方铅矿	18.571		15.655		39.021							
08ND-4		方铅矿	18.692		15.773		39.421							
08ND1-5		方铅矿	18.663		15.760		39.356							

注:样品号JD为加多捕勒铁铜矿床;CZC为查藏错铜铅锌矿床;E、08NDZ、08ND为纳如松多银铅矿床。

分馏基本达到平衡。

#### 4.2 铅同位素组成

铅同位素组成见表2。

加多捕勒铁铜矿床的21件样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为16.817~18.842; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.481~15.899; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为37.497~39.703。其中,石英闪长岩中硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为16.817~18.625(2件样品); $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为15.481~15.700; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为37.497~39.084。北段铜矿中硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为18.622~18.842(4件样品); $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为15.748~15.899; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为39.216~39.703。南段磁铁矿中硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为18.27~18.681(5件样品); $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为15.653~15.715; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为38.793~39.155。矽卡岩化(板岩)中硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为17.400~18.637(3件样品); $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为15.510~15.700; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为37.920~39.066。大理岩全岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为18.566~18.713(3件样品); $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为15.624~15.707; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为38.676~39.061。黑云母二长花岗岩全岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为18.683~18.771(4件样品); $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为15.621~15.655; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为38.986~39.081。根据铅同位素数据分析,北段铜矿与南段铁矿中硫化物的铅同位素组成相近,并与大理岩、黑云母二长花岗岩的铅同位素组成接近,与石英闪长岩及(矽卡岩化)板岩中硫化物的铅同位素组成有一定差距。

利用H-H单阶段铅演化模式(Hoefs, 1997)计算得出加多捕勒矿床相关参数见表2。其中, $\mu$ 值在9.42~10.01之间,平均值为9.61。 $\omega$ 值在36.86~42.15之间,平均值为39.04。Th/U比值在3.76~4.20之间,平均值为3.93。除 $\mu$ 值偏高以外, $\omega$ 、Th/U比

值均在正常铅的范围之内。而矿石铅的 $\mu$ 值在9.57~10.01之间; $\omega$ 值在38.93~42.15之间;Th/U比值在3.91~4.08之间。矿石铅的 $\mu$ 值、 $\omega$ 值、Th/U比值相对正常铅均偏高。

#### 4.3 硫的来源

硫同位素作为成矿物质来源有效的指示剂,在矿床研究中得到了极为广泛的应用,并取得了较好的研究成果(杨立强等,2014)。通过硫同位素组成分析,示踪成矿的物质来源,首先要确定成母岩的硫同位素组成,其中以热液的总硫同位素组成分析研究相对可靠(郑永飞等,2000)。硫元素存在2种稳定同位素 $^{32}\text{S}$ 、 $^{34}\text{S}$ ,且硫为变价元素,在热液中可出现多种价态,由于外部温度、压力的变化产生分馏。因此,热液矿物的硫同位素组成是 $t$ 和pH值的函数(郑永飞等,2000)。加多捕勒矿床主要有黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿等硫化物以及方解石等碳酸盐矿物,不存在硫酸盐矿物,说明形成的环境氧逸度低。在这种环境下,硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值可以代表热液中总硫同位素组成(李永胜等,2012)。硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值平均为2.16‰,所以热液中 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 大致为2.16‰。

硫同位素测试结果表明,17件样品的硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-2.1‰~6.2‰,变化范围略大,不具有塔式分布的特征(图7a),暗示该区存在不同性质、不同来源的热液混合。加多捕勒矿床采集的硫化物样品中北段铜矿中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-2.1‰~3.4‰,在0附近,具有岩浆硫的特点(Ohmoto et al., 1979),并与石英闪长岩和板岩中的硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值相近(图7b)。南段磁铁矿中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为5.5‰~6.2‰,超出了岩浆硫的范围,在矽卡岩型矿床中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值超出 $0\pm 5\%$ 的范围,是由于岩浆和围岩的相互作

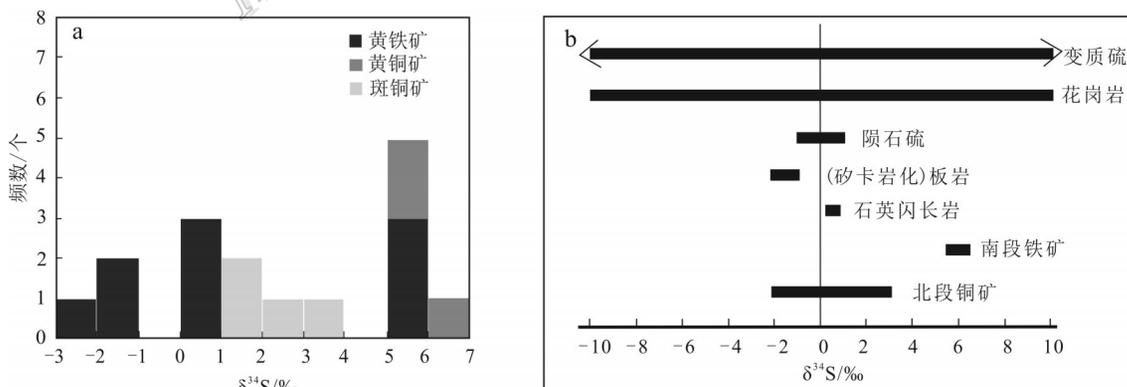


图7 加多捕勒铁铜矿床S同位素分布直方图(a)与组成分布图(b)

Fig.7 Histogram(a) and constitutional diagram(b) for sulfur isotope compositions of the Jiadubule Fe-Cu deposits

用,选择性同化围岩导致(王长明等,2011;储雪蕾等,2002)。如果成矿溶液总硫同位素组成为接近于零且为不大的正值,则矿床在成因上与花岗岩类侵入体相关,硫可能来源于侵入体(付强,2013)。加多捕勒矿床的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 值为2.16‰,成矿岩体为黑云母二长花岗岩(于玉帅等,2011;王彦峰,2017),推测加多捕勒矿床的硫可能主要来源于黑云母二长花岗岩,北段铜矿的硫部分由石英闪长岩和板岩提供。

#### 4.4 铅的来源

铅同位素能够提供铅来源的信息,指示与铅关系密切的铁、铜等成矿物质的来源(王长明等,2011)。多数学者认为上地壳铅具有高 $\mu$ 值( $\mu > 9.58$ );上地壳铅具有低 $\mu$ 值( $\mu = 8 \sim 9$ , Stacey et al., 1975)、低 $\omega$ 值;下地壳铅为低 $\mu$ 值、高 $\omega$ 值。中国大陆上地壳平均Th/U值为3.47(韩凤彬等,2012)。加多捕勒铁铜矿床的矿石铅 $\mu$ 值高于9.57,具有高 $\mu$ 值特征; $\omega$ 值大于38.79,明显高于正常铅的 $\omega$ 值( $35.55 \pm 0.59$ , 张静等,2009),Th/U比值高于3.91,大于中国大陆上地壳平均Th/U值。表明矿石铅具有上地壳铅源的特性,但不能排除幔源铅的可能性,因为壳幔的混合也极有可能达到上述比值。

为了更加明确铅来源,绘制了铅同位素模式图(图8)。从图8a中看出大部分矿石样品落在上地壳演化线附近甚至在其演化线之上,表明加多捕勒矿床的矿石铅来自较高成熟度的物源区;在图8b中,样品落在造山带演化线和下地壳演化线之间,并靠近造山带演化线,这类现象通常被解释为亏损铀的下地壳与富集铀的上地壳的混合或相互作用的产物(Doe et al., 1979)。图8中矿石铅同位素组成变化小,明显具有线性趋势,这种线性趋势通常被解释为铅具有混合来源(Canals et al., 1997; 蒋少涌等,2006)。综合分析表明,矿石铅具有上地壳源铅的来源,可能有少量幔源铅的加入。其次,图8中纳如松多矿床相比查藏错矿床的铅同位素组成,与加多捕勒矿床的铅同位素组成更为接近。其中,查藏错矿床的铅主要来源于上地壳(姜军胜等,2015),纳如松多矿床的铅具有壳幔混源的特性(杨勇等,2010)。研究表明, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化最能反映成矿物质来源的变化。因此,利用 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 图能更好的示踪物源(朱炳泉,1998)。 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 图(图9)表明矿石铅大部分落入上地壳铅的范围内,呈一条斜率较高的直线,显示其为相对稳定的陆块环境(费光春等,2011),具有壳源特征。根据上述分析推测,矿石

铅主要来源于上地壳,少量来源于地幔或者为地壳和地幔不同程度混染的结果。

从图8可以明显看出,矿石硫化物的铅同位素表现出与黑云母二长花岗岩、大理岩一致的铅同位素组成,与板岩、石英闪长岩中硫化物的铅同位素组成有一定差异;图9显示矿石与黑云母二长花岗岩、大理岩的 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 具有很好的线性关系,据此推测矿石铅可能来源于黑云母二长花岗岩和大理岩,少量来源于板岩和石英闪长岩。其中,黑云母二长花岗岩落在造山铅和下地壳铅演化线之间,并更加靠近造山铅曲线,表明加多捕勒黑云母二长花岗岩为壳幔混源花岗岩(程文斌等,2010)。这与付强(2013)提出的黑云母二长花岗岩为幔源岩浆与古地壳重熔岩浆混溶的产物观点不谋而合,而这也与上述矿石铅的来源分析一致。

加多捕勒铁铜矿床的赋矿地层为中二叠统下拉组,北段铜矿主要发育在中二叠统下拉组砂质板岩与大理岩接触带的石榴子石砂卡岩中,南段磁铁矿体主要发育在黑云母二长花岗岩与大理岩接触的砂卡岩体内,矿床地质特征(图2)和硫、铅同位素数据的综合分析表明,加多捕勒铁铜矿床的成矿物质来源为壳幔混源,可能主要来自于黑云母二长花岗岩,部分来源于中二叠统下拉组地层,石英闪长岩为北段铜矿体提供了部分成矿物质。

徐净(2017)总结了念青唐古拉带典型矿床的硫、铅同位素组成,认为无论东边铅锌矿还是西边的铁铜矿床,均与念青唐古拉结晶基底有关。程文斌等(2010)总结了冈底斯-念青唐古拉成矿带内典型矿床的硫化物铅同位素特征,并指出冈底斯成矿带从南向北,成矿物质由幔源到壳源,其中位于南冈底斯和冈底斯弧背断隆带的转换部位,以勒青拉、新嘎果、纳如松多为代表的Pb-Zn-Fe-Cu多金属矿床的铅具有混源铅的特征。加多捕勒矿床也位于南冈底斯和冈底斯弧背断隆带,与勒青拉、纳如松多等矿床具有一致的铅源。冈底斯北部的铅锌矿床和铁铜矿床具有相似的成矿时代,表明两类矿床在成因上具有相似性(付强,2013)。北部砂卡岩型铁铜矿床集中在68~63 Ma和51~48 Ma两个时间段,主要形成于印度-亚洲大陆的主碰撞阶段,加多捕勒矿床形成于始新世(于玉帅等,2014),与冈底斯北部砂卡岩型铁铜矿床的成矿时代一致。由此推测矿床形成于印度板块和欧亚板块的碰撞造山的主碰撞期,亏损的新特提斯洋壳熔

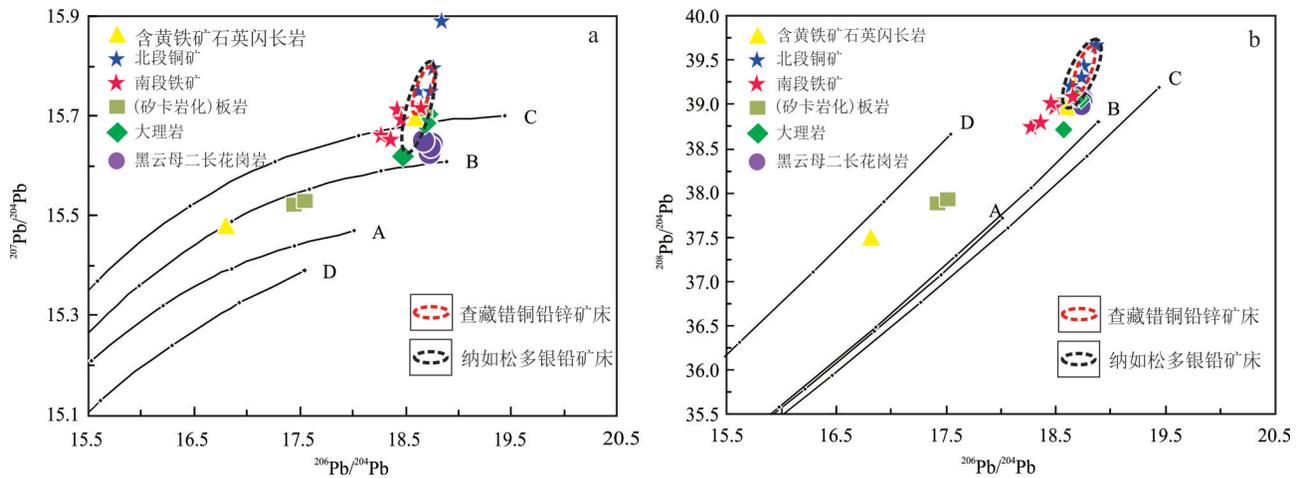


图8 加多捕勒铁铜矿床铅同位素模式图(底图据 Zartman et al.,1981)

A—地幔;B—造山带;C—上地壳;D—下地壳

Fig. 8 The plumbotectonic model of lead isotope for the Jiaduobule Fe-Cu deposit(after Zartman et al.,1981)

A—Mantle; B—The orogenic belt; C—The upper crust; D—The lower crust

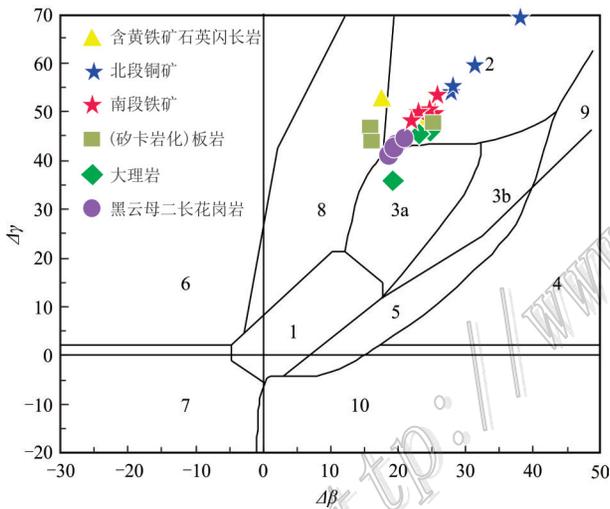


图9 加多捕勒铁铜矿床铅同位素  $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因分类图解

(据朱炳泉,1993)

1—地幔源铅;2—上地壳铅;3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a—岩浆作用;3b—沉积作用);4—化学沉积型铅;5—海底热水作用铅;6—中深变质作用铅;7—深变质下地壳铅;8—造山带铅;9—古老页岩上地壳铅;10—深变质下地壳铅

Fig. 9  $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$  genetic classification diagram of lead isotope of the Jiaduobule Fe-Cu deposit (after Zhu, 1993)

1—Lead from mantle; 2—Lead from upper crust; 3—Lead of subduction zone mixed with upper crust and mantle (3a—Magmatism; 3b—Sedimentation); 4—Lead of chemical deposition; 5—Lead of submarine hydrothermal activities; 6—Lead of intermediate metamorphism; 7—Lead of high-grade metamorphism in lower crust; 8—Lead from orogenic belt; 9—Lead of shale in upper crust; 10—Metamorphic lead

融形成高温的玄武质岩浆发生底侵作用(莫宣学, 2011;姜军胜等, 2015),造成了成熟地壳的念青唐古拉群结晶基底发生部分熔融,此后印度陆壳与特提斯洋壳断离,导致软流圈地幔流体上涌,与壳源岩浆混合形成以壳源物质为主,少量幔源物质为辅的混源岩浆,岩浆经岩浆房结晶分异作用后向上侵位形成黑云母二长花岗岩,并在侵位过程中与接触的围岩发生热接触交代作用,并携带了围岩中的成矿物质。因此,成矿物质从基底活化分离并在运移过程中携带了岩体和部分围岩中的成矿组分,最后富集沉淀。

### 5 结论

(1) 加多捕勒铁铜矿体主要赋存于中二叠统下拉组,矿体主要分为北段铜矿体、南段磁铁矿体,大多呈北东向展布。矿区发育多种中酸性侵入岩,其中始新世黑云母二长花岗岩为矿区成矿岩体。

(2) 加多捕勒矽卡岩铁铜矿床矿石硫化物(黄铁矿、黄铜矿和斑铜矿)的  $\delta^{34}S_{CDT}$  值主要集中在 1.3‰~6.2‰,其频率分布直方图不具有塔式分布特征,说明硫源不单一,且北段铜矿体中硫化物的  $\delta^{34}S_{CDT}$  值与石英闪长岩和板岩中的硫化物的  $\delta^{34}S_{CDT}$  值相似。 $\delta^{34}S_{\Sigma S}$  值为 2.16‰。由此推测矿石硫具有岩浆硫的特点,可能主要来源于黑云母二长花岗岩,石英闪长岩与板岩为其提供了部分

硫源。

(3) 矿石铅同位素值 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为18.27~18.842,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值在15.653~15.899,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值在38.793~39.703, 与黑云母二长花岗岩和大理岩的铅同位素组成相似, 与板岩、石英闪长岩的铅同位素组成有一定相似。根据硫、铅同位素的分析, 加多捕勒铁铜矿床成矿物质可能主要来源于黑云母二长花岗岩, 部分来源于中二叠统下拉组地层, 少量来源于石英闪长岩。

**致谢** 非常感谢徐净师兄和吴松师兄在本文数据收集和撰写的过程中对本文提出的宝贵意见, 也非常感谢其他师兄弟对本人的帮助和对文章撰写的支持。

## References

- Canals A and Cardellach E. 1997. Ore lead and sulphur isotope pattern from the low-temperature veins of the Catalonian Coastal Ranges (NE Spain)[J]. *Mineralium Deposita*, 32: 243-249.
- Cheng W B, Gu X X, Tang J X, Wang L Q, Lü P R, Zhong K H, Liu X J and Gao Y M. 2010. Lead isotope characteristics of ore sulfides from typical deposits in the Gangdese-Nyainqentanglha metallogenic belt: Implications for the zonation of ore-forming elements[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3350-3362(in Chinese with English abstract).
- Chu X L, Huo W G and Zhang X. 2002. S, C, and Pb isotopes and sources of metallogenetic elements of the Dajing Cu-polymetallic deposit in Linxi County, Inner Mongolia, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 566-574(in Chinese with English abstract).
- Doe B R and Zartman R E. 1979. Plumbotectonics, the Phanerozoic[A]. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (second edition)[M]. New York: Wiley Interscience, chap2: 22-70.
- Fei G C, Duo J, Wen C Q, Yang Z X, Long X R and Zhou X. 2011. S, Pb and Sr isotope compositions for tracing sources of ore-forming materials in Dongzhongla lead-zinc deposit in Tibet[J]. *Mineral Petrol.*, 31(4): 52-57(in Chinese with English abstract).
- Fu Q. 2013. Mineralization of skarn iron(copper) deposit in the north Gangdese belt, Tibet[D]. Supervisor: Hou Z Q and Zheng Y C. Beijing: China University of Geosciences. 2-3(in Chinese with English abstract).
- Han F B, Chen Z L, Liu Z R, Chen B L, Cui L L, Ding W J, Jiang R B, Li L, Zhou Y G and Wang Y. 2012. Sulfur-lead isotopic composition of the Wulagen Pb-Zn deposit in the northwestern margin of the Tarim basin, Wuqia area and its geological implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(5): 783-792(in Chinese with English abstract).
- Hoefs J. 1997. *Stable isotope geochemistry*[M]. Berlin: Springer Verlag. 119-120.
- Jiang J S, Zheng Y Y, Gao S B, Xu J, Tian K, Huang L L, Zhang Y C and Yin S J. 2015. Genesis of Chazangcuo Cu-Pb-Zn deposit, Tibet: Constraints from C-H-O-S-Pb isotope geochemistry[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 40(6): 1006-1016(in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Yang T, Li L, Zhao K D and Ling H F. 2006. Lead and sulfur isotopic compositions of sulfides from the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2597-2602(in Chinese with English abstract).
- Li Y S, Lü Z C, Yan G S, Zhen S M and Du Z Z. 2012. Isotopic characteristics of S-Pb-H-O of Jiama copper-polymetallic ore deposit, Tibet and their significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 72-81(in Chinese with English abstract).
- Li Y X, Xie Y L, Chen W, Tang Y W, Li G M, Zhang L, Liu Y F and Liu X M. 2011. U- Pb age and geochemical characteristics of zircon in monzogranite porphyry from Qiagong deposit, Tibet and geological implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 2023-2033(in Chinese with English abstract).
- Liu H B, Jin G S, Li J J, Han J, Zhang J F, Zhang J, Zhong F W and Guo D Q. 2013. Determination of stable isotope composition in uranium geological samples[J]. *World Nuclear Geoscience*, 30(3): 174-179(in Chinese with English abstract).
- Mo X X. 2011. Magmatism and evolution of the Tibetan plateau[J]. *Geological Journal of China Universities*, 17(3): 351-367(in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon[A]. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal deposits*[C]. New York: Wiley-Inter Science. 509-567.
- Stacey J S and Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 26(2): 207-221.
- Wang C M, Xu Y G, Wu G G, Zhang D, Yang L, Liu J G, Wan H Z, Di Y J, Yu X Q, He M Y and Zhang Y Y. 2011. C, O, S and Pb isotopes characteristics and sources of the ore metals in the Lengshuikeng Ag-Pb-Zn ore field, Jiangxi[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(1): 179-93(in Chinese with English abstract).
- Wang L Q, Gu X X, Cheng W B, Tang J X, Zhong K H and Liu X J. 2010. Sulfur and lead isotope composition and tracing for the sources of ore-forming materials in the Mengya' a Pb-Zn deposit, Tibet[J]. *Geoscience*, 24(1): 52-58.
- Wang Y F. 2017. Geology and ore-forming intrusion characteristics of the Jiaduobule skarn Fe-Cu deposit, Tibet[D]. Supervisor: Sun X and Zheng Y Y. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Xie Y L, Li Y X, Chang Z S, David R C and Chris G R. 2009. Magma tite evolution and characteristics of magmatic fluid in the Qiagong porphyry system[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(12): 1869-1886(in Chinese with English abstract).
- Xu J. 2017. Metallogenic mechanism and model of the Paleogene Fe-

- Cu-Pb-Zn skarn deposits in Nyainqentanglha, Tibet[D]. Supervisor: Zheng Y Y. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Yang L Q, Deng J, Wang Z L, Zhang L, Guo L N, Song M C and Zheng X L. 2014. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiadong gold province, eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2447-2467(in Chinese with English abstract).
- Yang Y, Luo T Y, Huang Z L, Yang Z S, Tian S H and Qian Z K. 2010. Sulfur and lead isotope compositions of the Narusongduo silver zinc-lead deposit in Tibet: Implications for the sources of plutons and metals in the deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 30(3): 311-318(in Chinese with English abstract).
- Yu Y S, Yang Z S, Duo J, Hou Z Q, Tian S H, Meng X J, Liu H F, Zhang J S, Wang H P and Liu Y C. 2011. Age and petrogenesis of magmatic rocks from Jiaduobule skarn Fe-Cu deposit in Tibet: Evidence from zircon SHRIMP U-Pb dating, Hf isotope and REE[J]. *Mineral Deposits*, 30(3): 420-434(in Chinese with English abstract).
- Yu Y S, Yang Z S, Meng X J, Tian S H and Liu Y C. 2014. Genesis of Late Cretaceous magmatic activity in the Jiaduobule iron-copper deposit, Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 50(2): 216-224(in Chinese with English abstract).
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics -the model[M]. *Tectonophysics*, 75(1/2): 135-162.
- Zhang J, Yang Y, Hu H Z, Wang Z G, Li G P and Li Z L. 2009. C-S-Pb isotope geochemistry of the Yindonggou orogenic-type silver deposit in Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2833-2842(in Chinese with English abstract).
- Zhang L G. 1985. The application of stable isotopes in geological science[M]. Xian: Shanxi Science and Technology Press(in Chinese with English abstract).
- Zhang S B, Gao M, Yue G L and Cui X F. 2009. Geological characteristics and brief origin analysis of Yaguila lead-zinc deposit, Tibet[J]. *Mineral Resources and Geology*, 23(4): 297-301(in Chinese with English abstract).
- Zhang W and Liu H W. 2013. Discussions on geological properties and metallogenic mechanism of magmatic skarn copper-zinc deposit: A case study of ore body V of Lawu copper-zinc deposit in Damxung County of Tibet[J]. *Journal of Geology*, 37(2): 212-218 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F and Chen J F. 2000. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Zhu B Q. 1993. The isotopic three-dimensional space topological diagram from ore leads for geochemical provinces and zoning of minerals[J]. *Geochemistry*, 3: 209-216(in Chinese with English abstract).
- Zhu B Q. 1998. Theory and application of isotope system in geoscience—the evolution of Chinese continental crust and mantle[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, Mo X X, Chung S L, Hou Z Q, Wang L Q and Wu F Y. 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1): 241-255.

### 附中文参考文献

- 程文斌, 顾雪祥, 唐菊兴, 王立强, 吕鹏瑞, 钟康惠, 刘晓吉, 高一鸣. 2010. 西藏冈底斯念青唐古拉成矿带典型矿床硫化物 Pb 同位素特征对成矿元素组合分带性的指示[J]. *岩石学报*, 26(11): 3350-3362.
- 储雪蕾, 霍卫国, 张巽. 2002. 内蒙古林西县大井铜多金属矿床的硫、碳和铅同位素及成矿物质来源[J]. *岩石学报*, 18(4): 566-574.
- 费光春, 多吉, 温春齐, 阳正熙, 龙训荣, 周雄. 2011. 西藏洞中拉铅锌矿床 S, Pb, Sr 同位素组成对成矿物质来源的示踪[J]. *矿物岩石*, 31(4): 52-57.
- 付强. 2013. 西藏冈底斯北部矽卡岩型铁(铜)矿床成矿作用研究(硕士论文)[D]. 导师: 侯增谦, 郑元川. 北京: 中国地质大学. 2-3 页.
- 韩凤彬, 陈正乐, 刘增仁, 陈柏林, 崔玲玲, 丁文君, 蒋荣宝, 李丽, 王永贵, 王永. 2012. 塔里木盆地西北缘乌恰地区乌拉根铅锌矿床 S-Pb 同位素特征及其地质意义[J]. *地质通报*, 31(5): 783-792.
- 姜军胜, 郑有业, 高顺宝, 徐净, 田坎, 黄亮亮, 张永超, 尹胜记. 2015. 西藏查藏错铜铅锌矿床成因: C-H-O-S-Pb 同位素制约[J]. *地球科学-中国大学学报*, 40(6): 1006-1016.
- 蒋少涌, 杨涛, 李亮, 赵葵东, 凌洪飞. 2006. 大西洋中脊 TAG 热液区硫化物铅和硫同位素研究[J]. *岩石学报*, 22(10): 2597-2602.
- 李永胜, 吕志成, 严光生, 甄世民, 杜泽忠. 2012. 西藏甲玛铜多金属矿床 S-Pb-H-O 同位素特征及其指示意义[J]. *地学前缘*, 19(4): 72-81.
- 李应栩, 谢玉玲, 陈伟, 唐燕文, 李光明, 张丽, 刘云飞, 柳小明. 2011. 西藏恰功铁矿二长花岗斑岩锆石的 Pb 年代学与地球化学特征及意义[J]. *岩石学报*, 27(7): 2023-2033.
- 刘汉彬, 金贵善, 李军杰, 韩娟, 张建锋, 张佳, 钟芳文, 郭东侨. 2013. 铀矿地质样品的稳定同位素组成测试方法[J]. *世界核地质科学*, 30(3): 174-179.
- 莫宣学. 2011. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. *高校地质学报*, 17(3): 351-367.
- 王长明, 徐贻赣, 吴淦国, 张达, 杨磊, 刘建光, 万浩章, 狄永军, 余心起, 何明跃, 张垚垚. 2011. 江西冷水坑 Ag-Pb-Zn 矿田碳、氧、硫、铅同位素特征及成矿物质来源[J]. *地学前缘*, 18(1): 179-193.
- 王立强, 顾雪祥, 程文斌, 唐菊兴, 钟康惠, 刘晓吉. 2010. 西藏蒙亚阿铅锌矿床 S, Pb 同位素组成及对成矿物质来源的示踪[J]. *现代地质*, 24(1): 52-58.
- 王彦峰. 2017. 西藏加多捕勒矽卡岩型铁铜矿床成矿岩体年代学与地球化学特征(硕士论文)[D]. 导师: 孙祥, 郑有业. 北京: 中国地质大学.
- 谢玉玲, 李应栩, Zhaoshan CHANG, David R COOKE, Chris G RYAN. 2009. 西藏恰功铁矿岩浆演化序列及斑岩出溶流体特征[J]. *地质学报*, 83(12): 1869-1886.
- 徐净. 2017. 西藏念青唐古拉古近纪矽卡岩型铁铜铅锌矿床成因机

- 制与成矿模式(博士论文)[D]. 导师:郑有业. 武汉:中国地质大学.
- 杨立强,邓军,王中亮,张良,郭林楠,宋明春,郑小礼. 2014. 胶东中生代金成矿系统[J]. 岩石学报,30(9): 2447-2467.
- 杨勇,罗泰义,黄智龙,杨竹森,田世洪,钱志宽. 2010. 西藏纳如松多银铅矿 S、Pb 同位素组成: 对成矿物质来源的指示[J]. 矿物学报,30(3): 311-318.
- 于玉帅,杨竹森,多吉,侯增谦,田世洪,孟祥金,刘鸿飞,张金树,王海平,刘英超. 2011. 西藏加多捕勒铁铜矿成矿岩体时代与成因: 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素与稀土元素证据[J]. 矿床地质,30(3): 420-434.
- 于玉帅,杨竹森,孟祥金,田世洪,刘英超. 2014. 西藏加多捕勒铁铜矿床晚白垩世岩浆活动成因[J]. 地质与勘探,50(2): 216-224.
- 张静,杨艳,胡海珠,王志光,李国平,李忠烈. 2009. 河南银洞沟造山型银矿床碳硫铅同位素地球化学[J]. 岩石学报,25(11): 2833-2842.
- 张理刚. 1985. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社.
- 张哨波,高明,岳国利,崔霄峰. 2009. 西藏亚贵拉铅锌矿床地质特征及成因浅析[J]. 矿产与地质,23(4):297-301.
- 张炜,刘宏伟. 2013. 岩浆矽卡岩铜锌矿床地质特征与成矿机制探讨——以西藏当雄县拉屋铜锌矿床 V 号矿体为例[J]. 地质学刊,37(2): 212-218.
- 郑永飞,陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社.
- 朱炳泉. 1993. 矿石 Pb 同位素三维空间拓扑图解用于地球化学省与矿种区划[J]. 地球化学,(3): 209-216.
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演[M]. 北京:科学出版社.

<http://www.kcdz.ac.cn/>