

刘学龙, 李文昌, 张娜, 等. 云南格咱岛弧带南缘铜厂沟斑岩型铜钼矿床硫铅同位素特征与成矿物质来源示踪[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 209–220.

Liu Xuelong, Li Wenchang, Zhang Na, et al. Characteristics of sulfur and lead Isotopes and tracing of mineral sources in the Tongchanggou porphyry Mo(Cu) deposit at the southern edge of Geza arc belt, Yunnan[J]. Geology in China, 2016, 43(1): 209–220(in Chinese with English abstract).

云南格咱岛弧带南缘铜厂沟斑岩型铜钼矿床硫铅同位素特征与成矿物质来源示踪

刘学龙¹ 李文昌^{1,2} 张 娜¹ 杨富成¹ 康 健¹ 张 彪¹

(1. 昆明理工大学, 云南 昆明 650093; 2. 云南省地质调查局, 云南 昆明 650051)

摘要: 铜厂沟斑岩型铜钼矿床位于格咱岛弧成矿带南缘, 是西南三江地区近年来新发现的大型斑岩型铜钼多金属矿床。本文通过硫、铅同位素的示踪研究, 探讨了成矿物质的来源。测试结果表明, 矿石中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 -0.7% ~ $+3.8\%$, 平均为 0.79% , 变化范围很小, 表明硫同位素来源单一, 显示岩浆源硫同位素组成的特征。矿石矿物的铅同位素组成, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $18.3325\sim 18.694$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $15.588\sim 15.663$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $38.454\sim 39.008$, 铅同位素组成较为稳定, 显示正常铅的特征。铅同位素组成与特征参数($\Delta\beta$ 与 $\Delta\gamma$, V_1 与 V_2)之间具有明显的正相关性, 依据铅构造模式判别和成因分类的综合分析, 铜厂沟斑岩型铜钼矿床的铅主要来源于深部, 并显示壳幔混合来源的特征。矿床的成矿作用与燕山期岩浆侵入岩活动存在较密切的关系, 但地层源的成矿物质对矿床的形成有一定的物质贡献。

关键词: 斑岩型铜钼矿床; 硫同位素; 铅同位素; 成矿物质来源; 铜厂沟; 格咱岛弧南缘

中图分类号: P618.41; P618.65; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)01-0209-12

Characteristics of sulfur and lead isotopes and tracing of mineral sources in the Tongchanggou porphyry Mo(Cu) deposit at the southern edge of Geza arc belt, Yunnan

LIU Xue-long¹, LI Wen-chang^{1,2}, Zhang Na¹, YANG Fu-cheng¹, KANG Jian¹, ZHANG Biao¹

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. Yunnan Geological Survey, Kunming 650051, Yunnan, China)

Abstract: Located on the southern margin of the Geza island arc, the Tongchanggou porphyry deposit is a large-sized Mo(Cu) polymetallic deposit discovered in recent years in southwest Sanjiang region. In this paper, the authors investigated the sources of minerals through sulfur and lead isotope tracer study. Testing results show that the $\delta^{34}\text{S}$ values of ore sulfides vary in the range of

收稿日期: 2014-12-23; 改回日期: 2015-02-03

基金项目: 中国地质调查局项目(12120114013701)、中国博士后科学基金项目(2014M552547XB)、昆明理工大学省级人培项目(KKSY201421042)联合资助。

作者简介: 刘学龙, 男, 1983年生, 博士后, 讲师, 矿床学专业, 从事云南“三江”地区的地质矿产研究及矿床学教学工作;

E-mail: xuelongliu@foxmail.com。

通讯作者: 李文昌, 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 从事云南省地质矿产勘查与研究; E-mail: Lwcyndd@163.com。

-0.7‰—+3.8‰, 0.79‰ on average. The variation range is very small, which indicates a single source of the sulfur isotope and displays the characteristics of magmatic source sulfur isotopic composition. The lead isotopic composition of ore minerals is characterized by $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ranging from 18.3325 to 18.694, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ranging from 15.588 to 15.663, and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ranging from 38.454 to 39.008, exhibiting relatively stable Pb isotopic composition and showing the normal lead characteristics. There is a significant positive correlation between lead isotopic composition and characteristic parameters ($\Delta\beta$ and $\Delta\gamma$, V_1 and V_2). Lead structural model identification and genetic classification comprehensive analysis suggest that the lead isotopes of the Tongchanggou porphyry Mo(Cu) deposit were mainly derived from the depth and show the crust-mantle mixed source characteristics. The mineralization had a close relationship with Yanshanian magmatic intrusion, with the minerals of the strata also making some contribution.

Key words: porphyry Mo(Cu) deposit; sulfur isotope; lead isotope; mineral resource; Tongchanggou; southern edge of Geza arc

About the first author: LIU Xue-long, male, born in 1983, postdoctoral, major in mineral deposit geology; mainly engages in geology and mineral resources study of Sanjiang region in Yunnan Province; E-mail: xuelongliu@foxmail.com.

About the corresponding author: LI Wen-chang, male, born in 1962, doctor, professor and supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of geology and mineral resources in Sanjiang region; E-mail: lwcyndd@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No.12120114013701), China Postdoctoral Science Foundation (No.2014M552547XB) and the Project for Province Personnel Training Fund of Kunming University of Science and Technology (No.KKSY201421042).

格咱岛弧成矿带是西南三江地区重要的铜钼(金)多金属矿集区,也是国家首批部署的整装勘查区之一。区内金属矿床众多,已发现超大型矿床1处(普朗铜矿),大型矿床3处(雪鸡坪铜矿、红山铜钼矿、铜厂沟铜钼矿),中型矿床7处。矿床的形成多与中酸性岩浆侵入有着密切的联系,是地质找矿与科学研究的热点地区之一^[1-2]。铜厂沟铜钼矿床是燕山期成矿作用的典型代表,但对该矿床的研究工作较为薄弱,目前的报道主要集中在矿床地质特征、控矿因素及成矿时代的初步探讨方面^[3-6]。对于成矿物质的来源,矿床成因机制问题尚缺乏深入研究,这制约了对燕山期铜钼矿床成矿规律的研究,从而限制了在格咱地区类似矿床的进一步勘探工作。由此,本文在前人研究工作的基础上,系统总结了矿床地质特征,分析了矿床的硫铅同位素特征,探讨了成矿物质来源,结合成矿时代与构造背景,对铜厂沟铜钼矿床形成的成矿机制进行了总结和

山过程,最后又遭受了新特提斯时期(65~28 Ma)的陆内汇聚和大规模剪切平移作用的叠加改造^[9-11]。印支期俯冲造山成矿作用,形成了斑岩-矽卡岩型铜多金属矿床(普朗、雪鸡坪、红山),对此已有较深入的研究工作;燕山晚期碰撞造山期后成矿作用形成了斑岩型铜钼矿床,研究工作尚需开展和深入。铜厂沟铜钼多金属矿床大地构造位于格咱岛弧南端,并处于扬子陆块西缘拗陷带和甘孜-理塘结合带的交汇部位(图1-a),是格咱岛弧构造-岩浆成矿带燕山期铜钼多金属成矿作用的典型代表,也是该区近年来整装勘查实施以来取得的重大找矿成果。矿区北部是格咱岛弧带向南急剧收缩部位,南部为扬子陆块西缘拗陷带。区内岩浆岩发育,火山岩主要以玄武岩为主,侵入岩有燕山期中酸性浅成岩体沿铜厂断裂附近分布,岩性主要为花岗闪长斑岩($\gamma\delta\pi$),次为辉绿玢岩($\beta\mu$)。区域变质作用较为普遍,分布范围广,形成大面积浅变质岩,主要表现为岩石中矿物重结晶和定向排列,形成大面积的板岩、变质砂岩。

1 区域地质背景及矿床地质特征

1.1 区域地质背景

格咱岛弧成矿带是西南三江构造-岩浆岩带的重要组成部分,是中国近年来新发现的铜多金属矿集区^[7-8]。格咱岛弧在结构及时空演化上保持了义敦岛弧的共性,它始于印支晚期(235~210 Ma)的大规模洋壳俯冲,其后经历了燕山期(88~80 Ma)的碰撞造

1.2 矿床地质特征

矿区内出露地层主要为二叠系冈达概组(Pg),岩性为灰-灰绿色玄武岩夹火山角砾岩;下部为凝灰岩夹板岩、大理岩;二叠系上统黑泥哨组(P₂h),岩性为灰绿色、深灰色玄武岩夹火山角砾岩、灰岩透镜体、粉砂岩及煤线;三叠系中统北衙组(T₂b),为一套滨-浅海相的碳酸盐岩沉积建造,分布于矿区大

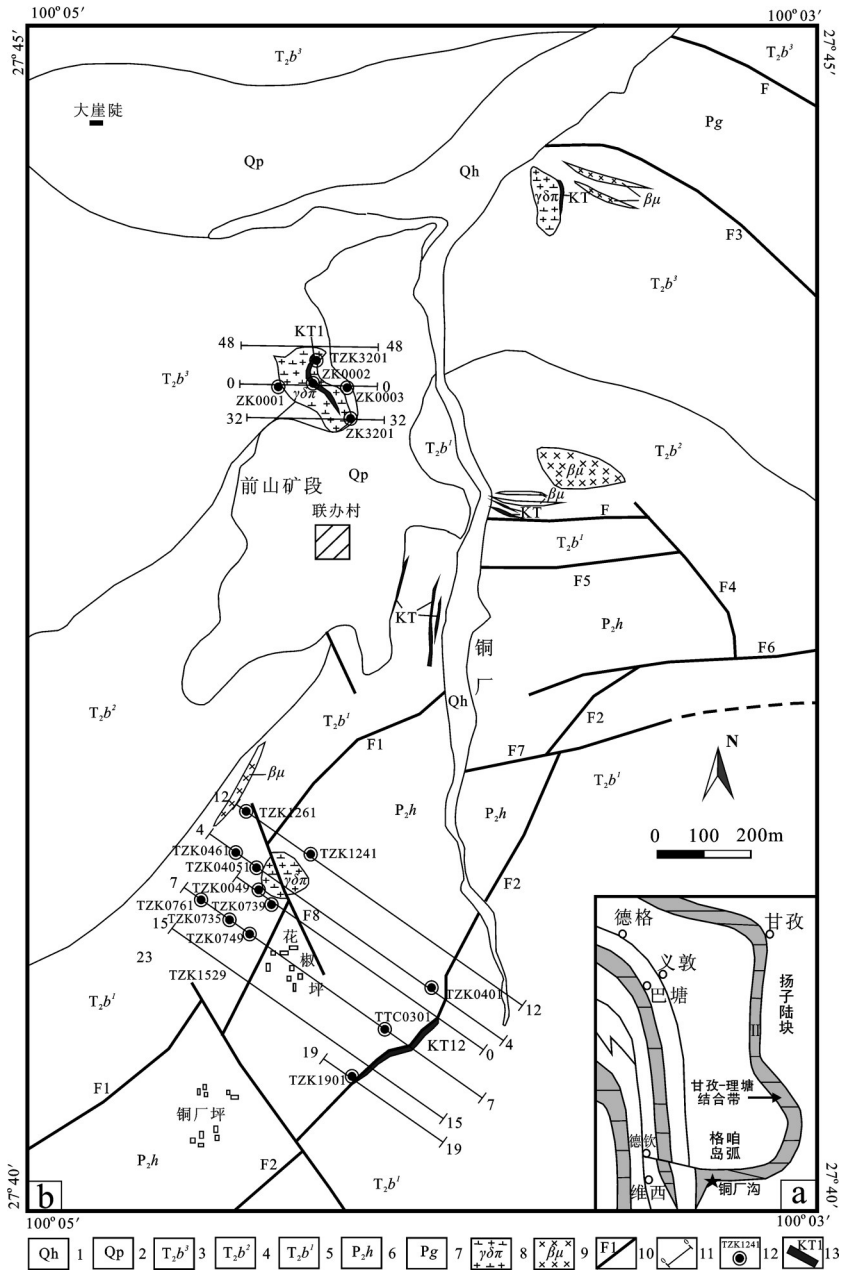


图1 铜厂沟斑岩型铜钼矿床地质简图(据资料①修编)

a—区域大地构造位置;b—铜厂沟岩浆岩分布图

- 1—第四系全新统; 2—第四系更新统; 3—北衙组三段灰岩; 4—北衙组二段白质灰岩; 5—北衙组一段大理岩, 夹薄层状砂卡岩;
6—黑泥哨组玄武岩; 7—冈达概组玄武岩夹火山角砾岩; 8—花岗闪长斑岩; 9—辉绿玢岩; 10—断层及编号; 11—勘探线及编号;
12—见矿钻孔及编号; 13—矿体及编号

Fig. 1 Simplified geological map of the Tongchanggou Mo(Cu) porphyry deposit (modified after reference①)

a—Tectonic map of Disuga porphyries, b—Distribution of magmatic rocks in Disuga

- 1—Quaternary Holocene; 2—Quaternary Pleistocene; 3—Limestone of 3rd member of Beiya Formation; 4—Dolomitic limestone of 2nd member of Beiya Formation; 5—Marble with thin skarn of 1st member of Beiya Formation; 6—Basalt of Heinishao Formation; 7—Basalt intercalated with volcanic breccia; 8—Granodiorite porphyry; 9—Diabase; 10—Fault and its serial number; 11—Exploration line and its serial number; 12—Ore—intersecting drill hole and its serial number; 13—orebody and its serial number

①曹晓民, 张世权, 范玉华, 等. 云南香格里拉县格咱地区铜多金属矿整装勘查成果报告[R]. 昆明: 云南省地质调查院, 2013.

部分地区;及少量第四系更新统(Qp)、全新统(Qh)(图1-b)。矿区为一轴向南北向的背斜构造,纵贯矿区中部,由于受后期断裂破坏,致使背斜出露残缺不全。主干断裂属铜厂断裂(F1)的北段,铜厂断裂沿背斜轴部通过,次级断裂较发育,主要有近EW向、NE向、NW向3组。矿区岩浆岩发育,火山岩主要以玄武岩为主,分布于冈达概组(Pg)和黑泥哨组(P_{2h})地层内。侵入岩主要有燕山期中酸性浅成岩体沿铜厂断裂附近分布,岩浆岩出露面积均小于0.1 km²,主要岩体有铜厂以北近东西向排列的两个辉绿玢岩($\beta\mu$),与铜钼多金属成矿作用密切相关的主要为呈不规则状侵入的花岗闪长斑岩($\gamma\delta\pi$)。岩石学研究表明,花岗闪长斑岩具明显斑状结构,块状构造,斑晶成分主要为自形-半自形的斜长石(20%~30%)、钾长石(10%~15%)、石英(1%~5%)、角闪石约5%,基质为斜长石、石英、黑云母、角闪石,副矿物为锆石、磷灰石、榍石、磁铁矿等(图2)。

主要控制的工业矿体有2个(KT1、KT12)。KT1产于联办村北部,主要产于北衙组一段内的矽卡岩中,少量赋存于与之接触的花岗闪长斑岩体中。工程控制矿体长为420 m,控制斜深380 m。产于围岩接触带中的矿体呈似层状产出,总体向NW陡倾,倾角50°~76°。矿体为钼矿体,局部具弱铜矿化,矿体表现为铜钼共生矿,铜钼元素有垂直分带现象,矿体浅部以铜为主,中部为铜钼共生矿,深部以钼为

主(图3)。矿体厚度为1.15~69.50 m,平均为31.69 m,铜品位0.11%~7.32%,平均1.45%;钼品位为0.03%~0.13%,平均品位0.11%;局部伴生银,银品位为3.83~11.80 g/t,平均8.05 g/t。KT12矿体主要赋存于矿区南部的花岗闪长斑岩中,少量分布在接触带附近的矽卡岩中,矿体以钼矿化为主,局部伴有较弱铜矿化。由钻探工程控制,工程间距100~300 m,工程控制长500 m,控制斜深738 m。岩体呈似岩株状产出,总体向NW倾斜,矿体为钼矿体,局部具弱铜矿化,矿体厚度为1.01~472.00 m,平均为233.18 m,钼品位为0.03%~0.25%,平均为0.09%。矿区共探获铜金属量1.73万t,钼金属量25.90万t,矿床规模达大型。

矿区内铜钼多金属矿化主要产于花岗闪长斑岩岩体内及围岩接触带内,辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿等金属硫化物主要以脉状-细脉状沿节理裂隙、断层破碎带分布或以浸染状在斑岩体内分布,表现出斑岩型矿床的基本矿化特征。矿石中主要工业矿物为辉钼矿、黄铜矿,其他金属矿物有黄铁矿、蓝铜矿、孔雀石、磁铁矿;脉石矿物有石英、方解石、钾长石、黑云母、黏土及少量次生矿物。矿石矿物以中粒-细粒结构为主,具自形-半自形晶粒结构,他形粒状结构,压碎结构次之;矿石构造以脉状、细脉状、浸染状构造为主(图4-a-c),薄膜状、皮壳状、土状构造次之,主要见于氧化带及混合带。辉钼矿呈

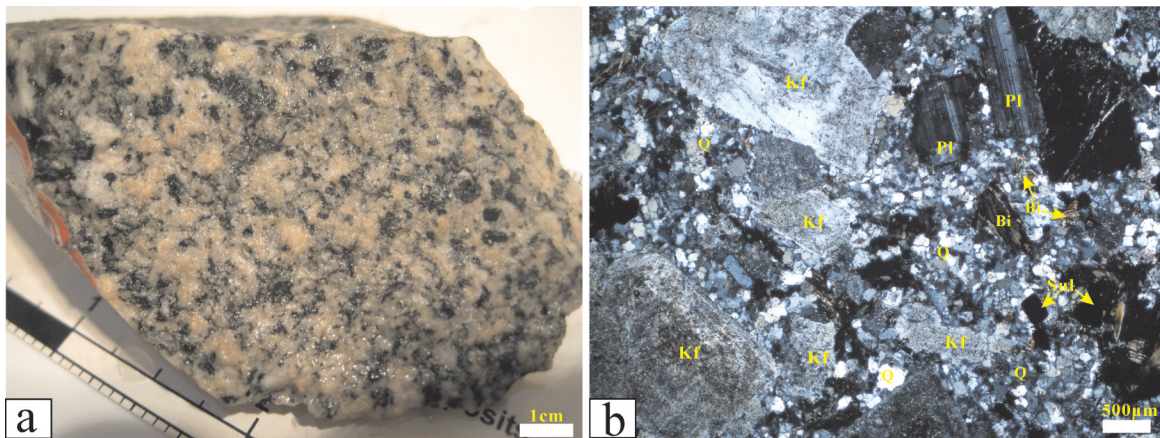


图2 铜厂沟花岗闪长斑岩石及显微特征

a—花岗闪长斑岩,岩石具斑状结构、块状构造;b—花岗闪长斑岩中斜长石(Pl)斑晶具聚片双晶和环带构造,岩石由斜长石(Pl)、钾长石(Kf)、石英(Q)、黑云母等组成

Fig.2 Rocks and microscopic characteristics of granodiorite porphyry from Tongchanggou

a—Granodiorite porphyry, with porphyritic texture, massive structure; b—Plagioclase (Pl) phenocrysts with polysynthetic twins and a ring-shaped structure in granodiorite porphyry, rocks composed of plagioclase (Pl), feldspar (Kf), quartz (Q), biotite and other minerals

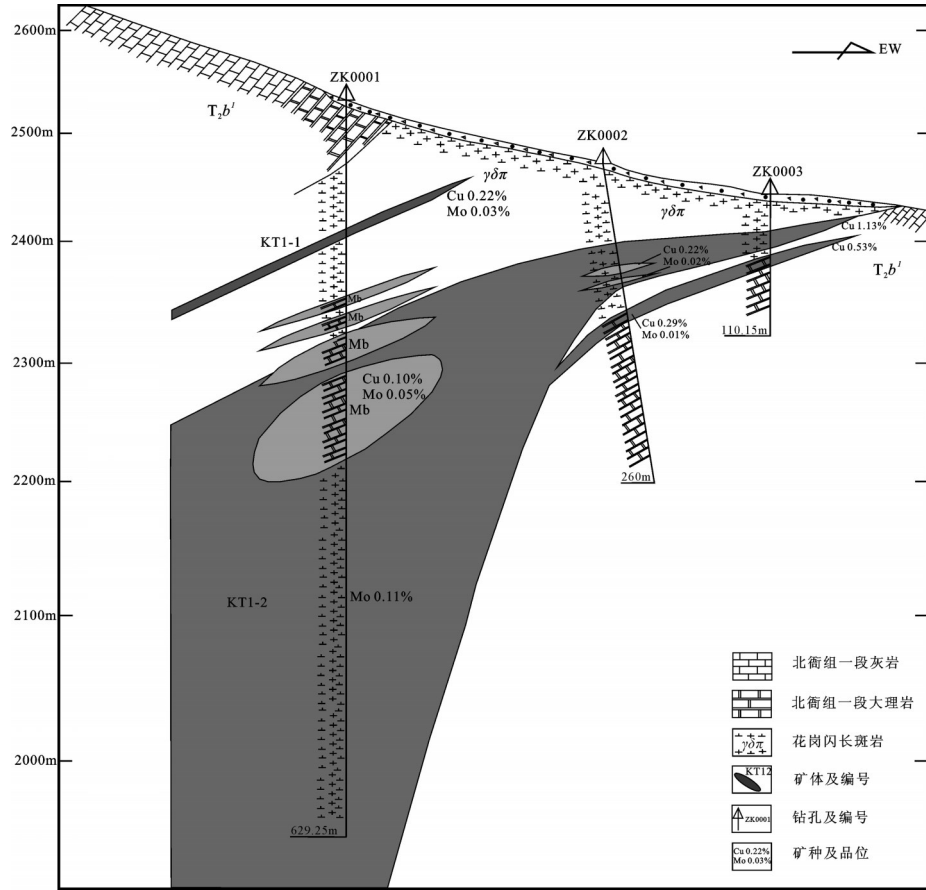


图3 铜厂沟铜钼矿床0号勘探线剖面图(据资料①修改)

Fig.3 Geological section along No. 0 line in the Tongchanggou porphyry Mo(Cu) deposit (modified after reference ①)

束状、菊花状集合体分布(图4-d~e), 黄铜矿、蓝铜矿、孔雀石及黄铁矿呈他形粒状均匀或不均匀地嵌布于矿石之中, 黄铁矿常发育压碎结构(图4-f)。

2 样品的采集与分析方法

样品采自格咱岛弧成矿带南缘的铜厂沟斑岩型铜钼矿床的典型钻孔和探矿坑道内, 硫同位素分析样品中有辉钼矿6件, 黄铁矿14件, 黄铜矿1件, 取样位置见表1。首先将样品碎至40~80目, 在双目镜下分别挑选出辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿单矿物, 单矿物的挑选其纯度达99%以上。硫同位素测定采用MAT251气体同位素质谱仪分析, 测量结果以V-CDT为标准, 分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。铅同位素样品的制备与分析测试在核工业地质研究院分析测试中心完成, 首先称取适量的样品加入聚四氟乙烯坩

锅中, 加入纯化的 $\text{HF}+\text{HClO}_4$ 酸溶液, 之后使用强碱性阳离子交换树脂, 依次加入纯化的 HBr 和 HCl 酸对铅进行分离; 最后在室温 20°C , 相对湿度30%的条件下, 在ISOPROBE-T热电离质谱仪完成铅同位素比值的测定, 分析误差以 2σ 计。

3 测试结果

3.1 硫同位素组成

成矿物质是构成成矿系统和形成矿床的物质基础, 铜厂沟斑岩型铜钼矿床金属硫化物的硫同位素分析数据见表1所示。矿石中辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿硫同位素组成表明硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $-0.7\text{‰}\sim+3.8\text{‰}$, 平均 $+0.79\text{‰}$, 变化范围较小。其中, 6件辉钼矿的 $\delta^{34}\text{S} = +0.1\text{‰}\sim+3.8\text{‰}$, 平均为 1.15‰ ; 14件黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S} = -0.7\text{‰}\sim+1.4\text{‰}$, 平均

①曹晓民, 张世权, 范玉华, 等. 云南香格里拉县格咱地区铜多金属矿整装勘查成果报告[R]. 昆明: 云南省地质调查院, 2013.

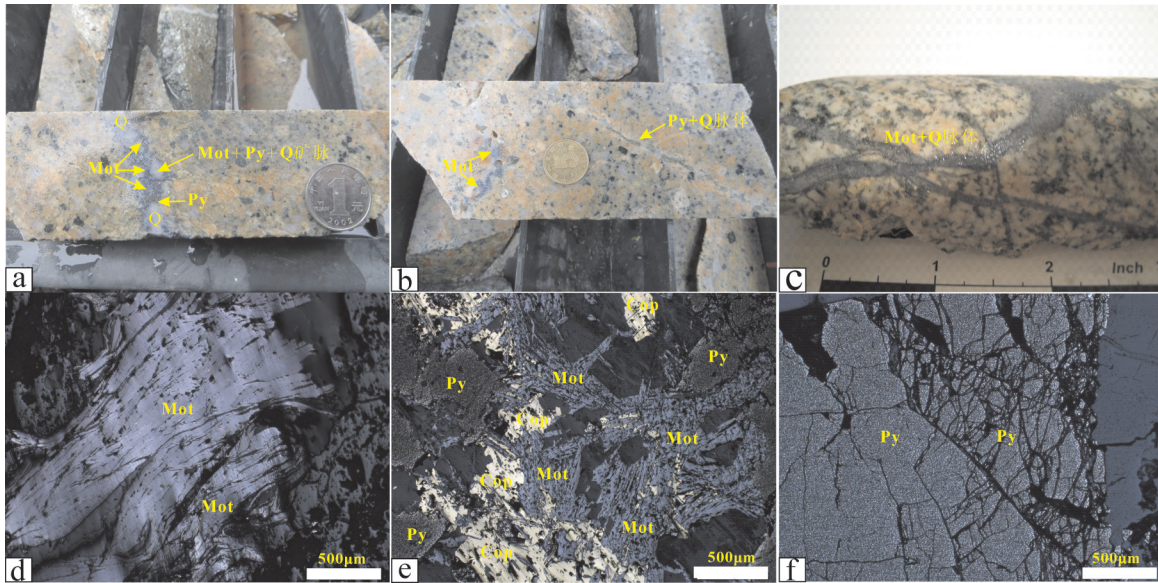


图4 铜厂沟斑岩型铜钼矿床矿石特征及显微照片

a—花岗闪长斑岩中的辉钼矿化石英脉; b—花岗闪长斑岩中呈浸染状分布的辉钼矿和黄铁矿细脉; c—花岗闪长斑岩中网脉状辉钼矿化; d—石英脉中呈束状集合体的辉钼矿; e—花岗闪长斑岩中辉钼矿、黄铜矿、黄铜矿共生组合, 辉钼矿呈菊花状集合体, 黄铜矿常与辉钼矿相互包裹; f—黄铁矿中发育的压碎结构; Mot—辉钼矿; Cop—黄铜矿; Py—黄铁矿; Q—石英

Fig.4 Ore characteristics and photomicrographs of the Tongchanggou porphyry Mo(Cu) deposit

a—Molybdenite mineralization in quartz veins from granodiorite porphyry; b—Molybdenite and pyrite of disseminated distribution in granodiorite porphyry; c—Stockwork molybdenite mineralization in granodiorite porphyry; d—Bundle aggregate molybdenite in quartz vein; e—Molybdenite daisy-like aggregates, chalcopyrite and molybdenite wrapped in each other; f—Crushing structure in pyrite; Mot—Molybdenite; Cop—Chalcopyrite; Py—Pyrite; Q—Quartz

为+0.66‰; 1件黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}=0.4\text{‰}$, 硫同位素呈明显的塔式分布(图5), 显示硫同位素组成比较稳定, 并具有单一来源的特征, 说明矿石中组成辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿的硫同位素组成与幔源硫或者源于深部与岩浆作用有关的硫同位素组成比较一致($\delta^{34}\text{S}=0\pm 3\text{‰}^{[12]}$)。不同的矿化类型, 硫同位素的变化范围也基本一致, 表明硫可能来自深部(上地幔或下地壳)的岩浆。另外, 铜厂沟斑岩型铜钼矿床矿石中硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 表现出: $\delta^{34}\text{S}_{\text{辉钼矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铜矿}}$ 的变化规律。通常认为, 在硫同位素分馏达到平衡条件下, 共生硫化物(包括硫酸盐)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值按硫酸盐→辉钼矿→黄铁矿→磁黄铁矿和闪锌矿→黄铜矿→方铅矿的顺序递减^[13-14]。因此, 铜厂沟铜钼矿床热液成矿系统内不同的硫化物间硫同位素分馏基本达到平衡。矿石中辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 组成指示了成矿流体中硫的来源。

3.2 铅同位素组成

铜厂沟斑岩型铜钼矿床金属硫化物的铅同位素分析数据如表2所示, 矿石中硫化物(辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿)的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为18.332~

18.694, 平均值为18.546, 极差为0.0019; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.588~15.663, 平均值为15.619, 极差为0.0016, 变化范围不大; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为38.454~39.088, 平均值为38.892, 极差为0.0039。上述表明, 不同类型的矿石中硫化物铅同位素比值十分稳定, 变化范围较小, 显示正常铅的特征。矿石铅同位素组成的一致性表明, 不同类型的矿化可能形成于同一地质事件, 来源于同一成矿热液, 只是在不同的构造部位流体汇聚形成了不同的矿化类型^[15]。

4 讨论

4.1 硫的来源

金属热液成矿系统中硫同位素的研究是一种指示成矿物质来源的有效方法^[16]。热液矿床中硫化物的硫同位素的分馏效应取决于成矿溶液中总硫同位素组成、氧逸度(f_{O_2})、pH值、离子强度和温度因素的影响^[17]。热液成因硫化物的硫同位素组成, 不仅取决于其源区物质的 $\delta^{34}\text{S}$ 值, 也与成矿流体演化的物理化学条件有关。因此, 金属矿床的热液成矿系统中形成的硫化物和硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 值一般不能完

表1 铜厂沟斑岩型铜钼矿床硫化物硫同位素组成

Table 1 Sulfur isotopic composition of sulfides from the Tongchanggou porphyry Mo(Cu) deposit

样品编号	取样位置	矿石特征	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
CCG-01	ZK4207, 深度 200 m	花岗闪长斑岩的浸染状辉钼矿化	黄铁矿	-0.1
CCG-02	ZK0001, 深度 230 m	花岗闪长斑岩的浸染状辉钼矿化	黄铁矿	-0.7
CCG-04	ZK0001, 深度 300 m	花岗闪长斑岩的浸染状辉钼矿化	黄铁矿	0.6
CCG-08	ZK0001, 深度 320 m	花岗闪长斑岩的脉状状辉钼矿化	黄铁矿	1.0
CCG-10	TZK3201, 深度 380 m	花岗闪长斑岩的脉状状辉钼矿化	黄铁矿	0.2
LBB-03-2	ZK0804, 深度 240 m	玄武岩的浸染状黄铁矿	黄铁矿	0.5
LBB-10-4	ZK3201, 深度 245 m	花岗闪长斑岩的浸染状辉钼矿	辉钼矿	0.1
LBB-06	ZK0804, 深度 272 m	花岗闪长斑岩的浸染状矿化	黄铜矿	0.4
LBB-10-6	ZK3201, 深度 215 m	花岗闪长斑岩中的细脉状辉钼矿	辉钼矿	0.7
LBB-10-16	ZK3201, 深度 208 m	花岗闪长斑岩中的细脉状辉钼矿	辉钼矿	1.1
LBB-10-16	ZK3201, 深度 208 m	花岗闪长斑岩中的细脉状辉钼矿	黄铁矿	1.4
LBB-10-17	ZK3201, 深度 209 m	花岗闪长斑岩中的细脉状辉钼矿	黄铁矿	0.7
LBB-10-22	ZK3201, 深度 198 m	钾长石化花岗闪长斑岩中的浸染状辉钼矿	黄铁矿	0.7
LBB-10-22	ZK3201, 深度 198 m	钾长石化花岗闪长斑岩中的浸染状辉钼矿	辉钼矿	1.1
LBB-10-23	ZK3201, 深度 180 m	花岗闪长斑岩中的脉状矿化	黄铁矿	1.4
LBB-10-28	ZK3802, 深度 202 m	花岗闪长斑岩中富集黄铜矿化	黄铁矿	1.2
LBB-10-31	ZK3802, 深度 221.5 m	石英脉中的辉钼矿化	辉钼矿	3.8
LBB-10-37	ZK1601, 深度 288 m	花岗闪长斑岩中的细脉状辉钼矿	辉钼矿	0.1
LBB-10-40	ZK1601, 深度 448 m	砂卡岩中黄铁矿化	黄铁矿	0.8
LBB-48	ZK4401, 深度 718 m	花岗闪长斑岩中的细脉状辉钼矿化	黄铁矿	0.8
LBB-78-2	ZK4401, 深度 977 m	花岗闪长斑岩中的网脉状辉钼矿化	黄铁矿	0.8

注: 样品由核工业北京地质研究院分析测试中心测试。

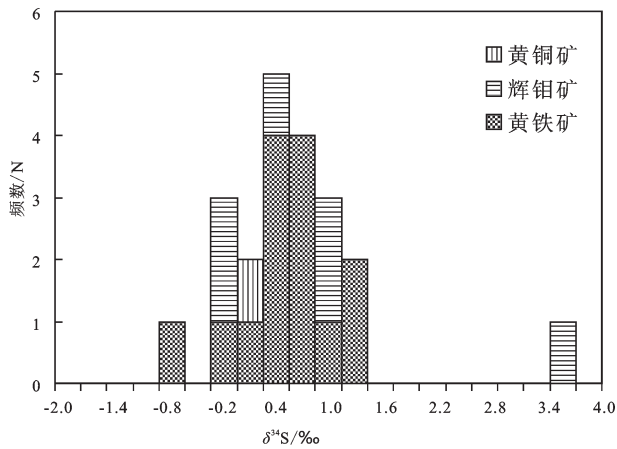


图5 铜厂沟铜钼矿床硫同位素组成直方图
Fig.5 Sulfur composition histogram of the Tongchanggou porphyry Mo(Cu) deposit

全等同于总硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值。矿相学的研究表明,铜厂沟铜钼矿床的矿石中矿物共生组合为辉钼矿-黄铁矿-黄铜矿-蓝铜矿-硅酸盐矿物,矿石矿物组合缺少重晶石、石膏等硫酸盐矿物。表明原始成矿流体为还原性流体,硫主要以 HS^- 和 S^{2-} 的形式在流体内存在^[18],因此,矿石中的矿物组合较为简单,且缺乏硫酸盐矿物共生,因而铜厂沟铜钼矿床矿石中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 与整个成矿流体系统中的 $\delta^{34}\text{S}$ 基本一致,矿石矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 可以代表成矿流体的硫同位素组成,即 $\delta^{34}\text{S}_{\text{硫化物}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\text{S}_2\text{O}}$ 。

关于 $\delta^{34}\text{S}$ 来源的判别有3种不同类型的解释:幔源硫,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值约为 $0 \pm 3\text{‰}$;现代海水中的硫 $\delta^{34}\text{S}$ 值约为 $+20\text{‰}$;强烈还原(沉积的)硫 $\delta^{34}\text{S}$ 值具有较大的负值^[10]。本文研究所获得的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值在0值附近(图6),与岩浆热液流体所形成的矿床的硫同位素值接近^[13]。 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围及平均值与岩浆热液金属矿床中的同种硫化物相似,表明在铜钼多金属矿化带的形成过程中,岩浆热液流体发挥了重要作用^[19]。文中1件辉钼矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 3.8‰ ,这也说明物质源区有沉积物地层的贡献。区内大面积出露的沉积岩地层(特别是富 $\delta^{34}\text{S}$ 海相碳酸盐岩地层)为成矿作用提供了一定数量的硫源,但是与花岗闪长斑岩有关的岩浆侵入作用相关的岩浆硫为成矿作用提供了必要的硫源。因此,铜厂沟铜钼矿床硫化物主要来自于燕山期花岗质岩浆在结晶分异过程中产生的岩浆热液。

4.2 铅的来源

在普通铅矿物形成以后,其铅同位素由于质量大且不活泼其组成基本不变,能较好地反映普通铅矿物物源的U、Th、Pb丰度特征,为此常用来示踪成矿物质的来源^[20],约束含矿岩体的岩浆转换的地球化学过程,探讨热液流体的起源^[21]。Doe、Zartman等以及Haines(1981)绘制了Pb同位素随时间的演化曲线^[22]。 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 可以很好地判别

表2 铜厂沟斑岩型铜钼矿床硫化物铅同位素组成

Table 2 Lead isotopic composition of ores in the Tongchanggou porphyry Mo(Cu) deposit

样品号	测试矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2σ	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2σ
LBB-03-2	黄铁矿	18.494	0.002	15.634	0.002	38.876	0.004
LBB-10-4	辉钼矿	18.332	0.002	15.594	0.002	38.619	0.005
LBB-06	黄铜矿	18.463	0.002	15.588	0.002	38.454	0.004
LBB-10-6	辉钼矿	18.515	0.003	15.599	0.002	38.864	0.003
LBB-10-16	辉钼矿	18.694	0.001	15.624	0.001	39.076	0.003
LBB-10-22	黄铁矿	18.665	0.002	15.619	0.001	39.047	0.004
LBB-10-22	辉钼矿	18.576	0.002	15.625	0.001	39.008	0.003
LBB-10-31	辉钼矿	18.554	0.002	15.663	0.002	39.088	0.007
LBB-10-37	辉钼矿	18.550	0.002	15.609	0.002	38.862	0.005
LBB-48	黄铁矿	18.620	0.001	15.630	0.001	39.023	0.001

注: 样品由核工业北京地质研究院分析测试中心测试。

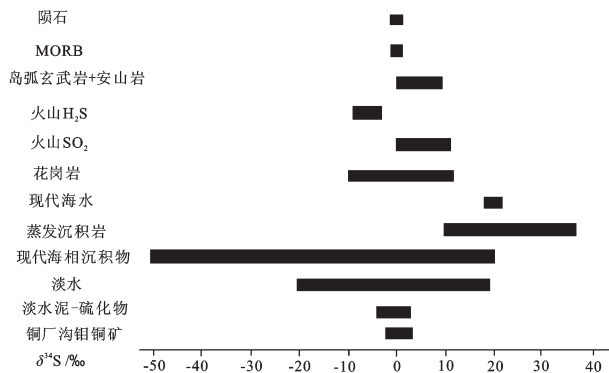


图6 铜厂沟铜钼矿硫同位素组成分布图

Fig.6 Distribution of $\delta^{34}\text{S}$ of ore sulfides from the Tongchanggou porphyry Mo(Cu) deposit

上部地壳、下部地壳及地幔, 而 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 则较好地地区分了上部地壳、下部地壳及地幔的构造源区。将铜厂沟铜钼矿床的矿石铅同位素数据投影铅 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 坐标标图中落入造山带铅演化线及下地壳的范围, 在铅同位素 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 坐标图中样品主要集中于下地壳一侧并靠近造山带演化线(图7)。但是, 只依据铅同位素构造模式并不能有效判别金属矿床中铅的来源, 对于各储库的铅源需要参考铅同位素的特征参数进行综合分析^[23]。

利用Holmes-Houermans的H-H单阶段铅同位素演化模式^[24-25], 计算得到铜厂沟铜钼矿矿石中硫化物的铅同位素特征参数(表3)。铅同位素的特征参数 $\mu=9.43\sim 9.57$, 平均为9.49, 高于正常铅($\mu=$

8.686~9.238)的 μ 值^[26]; ω 值($\omega=36.19\sim 38.96$), 平均为37.78, 同样高于正常铅的 ω 值(35.55 ± 0.59), 这表明铅源区物质的成熟度较高, 相对富集铀铅, 铅同位素较为集中, 具有上地壳铅同位素组成的特点。依据Chen et al.^[27]按 μ 值对铅同位素的分类, 铜厂沟铜钼矿床矿石铅同位素组成更接近于高 μ 值(9.81)的演化铅, 属由地幔源转入壳层的铅演化模式, 并受壳层物质的影响, 显出了壳幔混源的特征。

本次研究新获样品均为正常铅, 表明其铅源的U-Th-Pb体系没有发生分离或是没有受到其他U-Th-Pb体系的物质混染, 可以用正常铅计算其模式年龄值。采用H-H模式, 获得模式年龄平均值为90.1 Ma, 属燕山晚期。已有研究成果表明, 铜厂沟铜钼矿床的辉钼矿Re-Os年龄为 (85 ± 2) Ma^[3], 辉钼矿化花岗闪长斑岩的锆石U-Pb年龄为 (87.4 ± 0.32) Ma(作者未发表数据), 这说明铅同位素的模式平均年龄与铜厂沟铜钼矿床的成岩成矿的主要时限基本一致, 属燕山晚期。铜厂沟铜钼矿床中矿石铅投影点分布非常集中, 且均位于普通铅的范围内, 加之铅同位素比值的极差较小, 其模式年龄大多与地质背景相符, 因此也表明属正常铅^[28]。

此外, 通过对铅同位素特征参数的计算, 得到铅同位素矢量特征值 V_1 为52.33~97.27, 平均为72.35; 特征值 V_2 为40.79~73.52, 平均为53.37(表3)。在铅同位素矢量特征值的投点图中, 反映了良好的线性正相关关系(图8)。铅同位素的组成整体上呈线性相关的分布关系, 这一规律说明各种类型

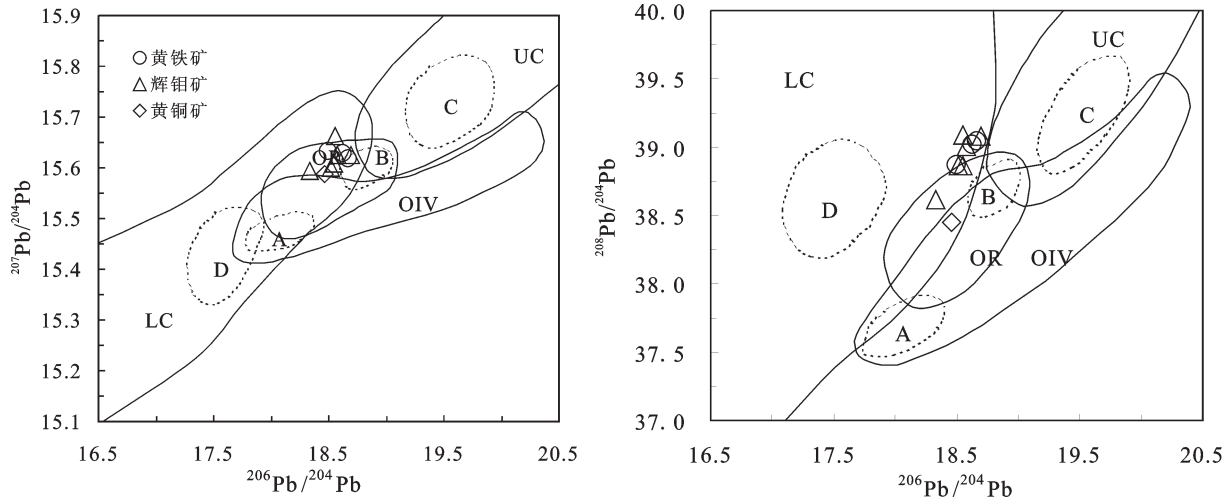


图7 铅同位素 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境判别图解(据文献[22])

LC—下地壳; UC—上地壳; OIV—洋岛火山岩; OR—造山带; A、B、C、D分别为各区中样品的相对集中区

Fig.7 Pb isotope $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ tectonic environment discrimination diagram (after reference [22])

LC—Lower crust; UC—Upper crust; OIV—Ocean island volcanics; OR—Orogenic belt; A, B, C, D show the relative concentration areas

表3 铜厂沟斑岩型铜钼矿硫化物铅同位素参数

Table 3 Lead isotope parameters of sulfides in the Tongchanggou porphyry Mo(Cu) deposit

样号	样品名称	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	t/Ma	μ	ω	Th/U	V_1	V_2	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
LBB-03-2	黄铁矿	1.1829	148.5	9.52	38.16	3.88	73.37	53.57	76.91	20.18	43.98
LBB-10-4	辉钼矿	1.1756	216.5	9.46	37.64	3.85	68.03	50.89	72.76	17.87	40.07
LBB-06	黄铜矿	1.1844	113.2	9.43	36.19	3.71	59.82	53.98	72.38	17.03	31.11
LBB-10-6	辉钼矿	1.1869	88.9	9.45	37.66	3.86	69.25	51.07	73.54	17.65	41.04
LBB-10-16	辉钼矿	1.1965	-10.9	9.48	37.76	3.85	72.46	53.81	77.15	18.93	42.84
LBB-10-22	黄铁矿	1.195	4	9.48	37.75	3.85	71.31	52.8	75.78	18.62	42.24
LBB-10-22	辉钼矿	1.1889	77.3	9.5	38.15	3.89	73.42	52.48	76.19	19.3	44.39
LBB-10-31	辉钼矿	1.1846	141.2	9.57	38.96	3.94	79.48	54.45	79.83	22.04	49.35
LBB-10-37	辉钼矿	1.1884	76	9.47	37.55	3.84	69.16	52.41	74.58	18.25	40.43
LBB-48	黄铁矿	1.1913	51.4	9.5	38.01	3.87	73.02	53.35	76.76	19.52	43.66

注: 样品由核工业北京地质研究院分析测试中心测试, 铅同位素特征参数计算由Geokit软件计算完成。

的矿石中铅同位素来源的继承性和相关性, 表明铅同位素主要来源于深部(地幔和下地壳), 但演化过程中存在有上地壳铅源的混染, 说明铅的来源具有多样性。朱炳泉等^[26]的研究表明, 依据不同成因岩石铅同位素组合矿石铅同位素的组成, 利用矿石矿物铅同位素参数值 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因分类图解可以对成矿物质进行较为有效的判别, 该图解消除了时间因素的影响, 理论上比全球性的铅演化模式有更好的示踪效果。在铅同位素特征参数值 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 的成因分类图解中(图9), 大部分投影点落入上地壳与岩浆

作用相关的地幔混合的俯冲带(岩浆作用)与上地壳铅同位素的过渡范围内。而且, 样品点都比较靠近造山带区, 这反映了该区的成矿物质来源与碰撞造山后的构造演化可能存在密切关系。说明铅同位素来源于造山带构造-岩浆事件中岩浆热液的带入, 并且与来自于地层活化的铅存在混合作用。

4.3 矿床成因机制探讨

已有的研究成果表明, 格咱岛弧成矿带铜钼多金属矿床主要形成于印支期、燕山期中酸性岩浆侵入作用, 区内成矿作用显示了叠加改造的普遍性、

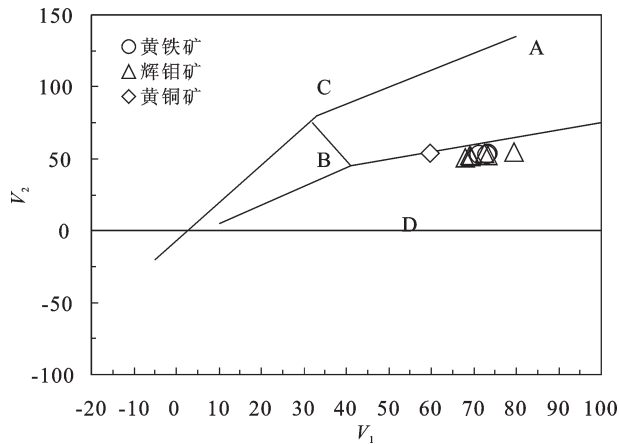


图8 铜厂沟斑岩型铜钼硫化物铅同位素矢量特征值 V_1 - V_2 特征图解

A—华南; B—扬子; C—华北; D—北疆

Fig. 8 Diagram of characteristic V_1 and V_2 values of lead isotopic composition of sulfides from the Tongchanggou porphyry Mo(Cu) deposit

A—South China; B—Yangtze; C—North China; D—Northern Xinjiang

物质来源的多样性和成矿元素的复杂性。

印支期,自晚三叠世甘孜—理塘洋壳向西发生俯冲以来,源自俯冲板片的脱水流体随地幔的交代诱发幔岩的熔融,导致区内钙碱性岩浆发生浅成—超浅成侵位和斑岩型Cu矿(普朗、雪鸡坪、春都)及矽卡岩型Cu多金属矿床(红山、浪都)的形成。进入燕山期以来,受碰撞造山及造山后伸展作用的影响和制约,该区发育有陆壳重融型花岗岩浆的侵入作用^[1],标志着造山后伸展作用的开始,同时伴随有Mo、W、Cu多金属矿床成矿作用的发生,形成了与二长花岗斑岩有关的Mo、W斑岩型矿床(休瓦促)以及沿构造破碎带发育的含金富银的石英脉型Sn、W多金属矿床,其空间上形成了本区另一条重要的构造—岩浆成矿带。燕山晚期,陆壳重融型岩浆的侵位揭示了格咱岛弧地区区域应力场发生了重大的转变,主要由NNW向的挤压转变为近NS向的伸展,这表明该区地壳加厚作用的减弱或是停止^[29]。造山作用的 P - T - t 轨迹表明,在挤压应力场向伸展转变的过程会引起物质的熔融和成矿流体的形成,从而导致强烈的岩浆作用和流体活动,是成岩成矿作用发育形成的有利阶段^[30]。由于地壳的增厚,山根温度相对低于软流圈温度,这种热—物质结构产生潜在的重力失衡,导致去根作用或下地壳的拆沉作用,其结果是下部热的软流圈大幅上涌并导致地

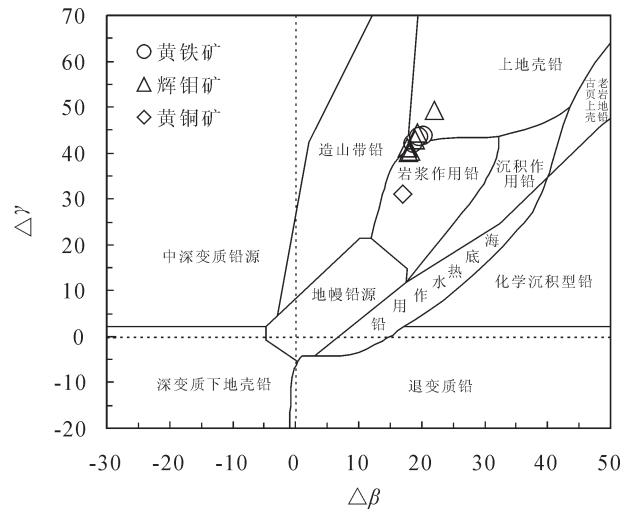


图9 铜厂沟斑岩型Mo(Cu)矿床硫化物铅同位素 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因分类图解(底图据文献[26])

Fig. 9 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ diagram for genetic classification of sulfides from the Tongchanggou porphyry Mo(Cu) deposit (after reference [26])

壳部分熔融,造成大规模的岩浆侵入事件,即A型花岗岩的大规模发育。本区造山后伸展作用的主体主要发生在138~75 Ma,伸展的高峰时段可能在80 Ma,铜厂沟成矿斑岩体正是形成于这样的地质构造背景^[11, 29, 31]。

自晚三叠世以来,格咱地区大规模的构造—岩浆作用使得岩浆与地层中的成矿元素相互叠加富集,导致大量Cu、Mo、Au等成矿元素预富集形成初时矿源层之一,为之后的斑岩型Cu—Mo多金属矿床的形成奠定了物质基础。至燕山晚期,区域性的伸展作用伴随有大规模的构造—岩浆—成矿事件。拉巴河断裂是区内的一个深大断裂,这为幔源岩浆的底侵及诱发地壳物质的部分熔融,发生强烈的壳幔混合作用,进而为铜厂沟成矿斑岩体提供了有利条件。在岩浆混合的作用过程中,从深部带入大量的Mo、Cu等成矿元素,含矿岩浆及成矿流体沿拉巴河断裂上升,并最终在NE向的铜厂次级断裂(F_1)定位,以花岗闪长斑岩小岩体的形式产出。硫、铅同位素的示踪表明,成矿物质主要来源于与造山作用相关的岩浆,在岩浆上升侵位的过程中,伴随壳源物质的熔融,致使成矿流体显示壳幔混源的特征,这从硫铅同位素的示踪研究中已经获得了有效证实。随着岩浆和流体上升至地壳浅部,温度和压力随之降低,岩浆发生分异演化,成矿元素Mo、Cu等

集聚到岩体的顶部,通过与碳酸盐岩的围岩发生交代作用形成了钙质矽卡岩和Cu、Mo矿化。由于岩浆的冷凝,流体内压不断增大,形成网脉状的破裂系统,节理(裂隙)构造的贯通导致聚集在岩体顶部的成矿流体发生沸腾,流体沿裂隙向减压方向运移并扩散,经过强烈的水岩反应,含矿热液中的金属络合物发生分解,并沉淀富集形成脉状、网脉状辉钼矿化。综上所述,有利的构造环境、强烈的岩浆作用、多源的物源条件致使铜厂沟大型斑岩型铜钼矿床最终得以形成。

5 结 论

(1)铜厂沟铜钼矿床矿石中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $-0.7\text{‰}\sim 3.8\text{‰}$,平均为 0.79‰ ,变化范围很小,表明硫同位素来源单一,显示岩浆源硫同位素组成的特征。表明,硫主要来自于燕山期花岗质岩浆在结晶分异过程中产生的岩浆热液。区内大面积出露的沉积岩地层(特别是富 $\delta^{34}\text{S}$ 海相碳酸盐岩地层)为成矿作用提供了一定数量的硫源。

(2)铜厂沟铜钼矿床铅同位素的研究表明, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $18.3325\sim 18.694$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $15.588\sim 15.663$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $38.454\sim 39.008$,铅同位素组成较为稳定,显示正常铅的特征。分析表明,成矿物质来源与碰撞造山后的构造演化可能存在密切关系,铅同位素来源于造山带构造-岩浆事件中岩浆热液的带入,并且与来自于地层活化的铅存在混合作用。

(3)铜厂沟铜钼矿床的形成与燕山期岩浆侵入岩活动存在较密切的关系,但地层源的成矿物质对矿床的形成有一定的物质贡献,成矿物质来源具有多源、深源-浅源混合的特点。

致谢: 本文是综合多个项目的研究成果,野外地质调查工作得到云南省地质调查院矿产地质调查所李冰高级工程师、云南鼎立矿业公司梅社华副总经理、云南宝丰矿业公司李石磊总经理的帮助和支持;成文后审稿专家及编辑部杨艳老师又对本文提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

参考文献(Reference):

[1] 李文昌,刘学龙,曾普胜,等. 云南普朗斑岩型铜矿成矿岩体的基本特征[J]. 中国地质, 2011, 38(2): 403-414.
Li Wenchang, Liu Xuelong, Zeng Pusheng, et al. The characteristics of metallogenic rocks in the Pulang porphyry copper

deposit of Yunnan Province[J]. *Geology in China*, 2011, 38(2): 403-414(in Chinese with English abstract).

[2] 范玉华,李文昌. 云南普朗斑岩铜矿床地质特征[J]. *中国地质*, 2006, 33(2): 352-362.
Fan Yuhua, Li Wenchang. Geological characteristics of the Pulang porphyry copper deposit, Yunnan[J]. *Geology in China*, 2006, 33(2): 352-362(in Chinese with English abstract).

[3] 李文昌,余海军,尹光侯,等. 滇西北铜厂沟钼多金属矿床辉钼矿Re-Os同位素年龄及其成矿环境[J]. *矿床地质*, 2012, 31(2): 282-292.
Li Wenchang, Yu Haijun, Yin Guanghou, et al. Re-Os dating of molybdenite from Tongchanggou Mo-polymetallic deposit in northwest Yunnan and its metallogenic environment[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(2): 282-292 (in Chinese with English abstract).

[4] 刘学龙,李文昌,尹光侯. 云南格咱岛弧斑岩-矽卡岩铜、钼(金)矿床成矿系统[J]. *中国地质*, 2012, 39(4): 1007-1012.
Liu Xuelong, Li Wenchang, Yin Guanghou. The metallogenic system of porphyry-skarn type Cu, Mo(Au) polymetallic deposits in Geza island arc of Yunnan Province[J]. *Geology in China*, 2012, 39(4): 1007-1012 (in Chinese with English abstract).

[5] 杨丽梅,伍建斌,李宗勇,等. 中甸铜厂沟铜钼矿床地质及成因探讨[J]. *云南地质*, 2013, 32(1): 121-124.
Yang Limei, Wu Jianbin, Li Zongyong, et al. The geology and genesis of Tongchanggou Cu-Mo deposit, Zhongdian[J]. *Yunnan Geology*, 2013, 32(1): 121-124 (in Chinese with English abstract).

[6] 刘军. 云南铜厂沟铜钼矿床地质特征及找矿方向[J]. *西部探工程*, 2013, 25(3): 105-107.
Liu Jun. Geological characteristics and ore prospecting direction of Tongchanggou Cu-Mo deposit in Yunnan Province[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2013, 25(3): 105-107 (in Chinese with English abstract).

[7] Li Wenchang, Yin Guanghou, Yu Haijun, et al. The Yanshanian granites and associated Mo-polymetallic mineralization in the Xiangcheng-Luoji area of the Sanjiang-Yangtze conjunction zone in southwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(6): 1742-1756.

[8] 金灿海,范文玉,张海,等. 云南卓玛铅锌矿床地球化学特征及矿床成因[J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1902-1911.
Jin Canhai, Fan Wenyu, Zhang Hai, et al. Geochemical characteristics and genesis of the Zhuoma lead-zinc deposit in Yunnan Province[J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1902-1911(in Chinese with English abstract).

[9] 杨岳清,侯增谦,黄典豪,等. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统[J]. *地球学报*, 2002, 23(1): 17-24.
Yang Yueqing, Hou Zengqian, Huang Dianhao, et al. Collision orogenic process and magmatic metallogenic system in Zhongdian arc[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2002, 23(1): 17-24 (in Chinese with English abstract).

[10] 侯增谦,杨岳清,曲晓明,等. 三江地区义敦岛弧造山带演化及成矿系统[J]. *地质学报*, 2004, 13(1): 109-120.
Hou Zengqian, Yang Yueqing, Qu Xiaoming, et al. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun arc orogen in Sanjiang region, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 13(1):

- 109–120 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李文昌. 义敦岛弧构造演化与普朗超大型斑岩铜矿成矿模型[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007: 15–80.
Li Wenchang. The Tectonic Evolution of the Yidun Island Arc and the Metallogenic Model of the Pulang Porphyry Copper Deposit, Yunnan, SW China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007: 15–80 (in Chinese with English abstract).
- [12] Rollinson H R. Using Geological Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. New York: John Wiley and Sons, 1993: 1–352.
- [13] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1985: 23–120.
Zhang Ligang. Application of Stable Isotopes in Geological Sciences [M]. Xian: Shaanxi Science and Technology Press, 1985: 23–120 (in Chinese).
- [14] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 1–247 (in Chinese).
Zheng Yongfei, Chen Jiangfeng. Stable Isotope Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 1–247 (in Chinese).
- [15] 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学, 2002, 30(3): 73–81.
Wu Kaixing, Hu Ruizhong, Bi Xianwu. Ore lead isotopes as a tracer for ore-forming material sources: A review[J]. Geology Geochemistry, 2002, 30(3): 73–81 (in Chinese with English abstract).
- [16] Ohmoto H, Rye R Q. Isotopic of Sulfur and Carbon. Barnes H I. Geochemical of Hydrothermal Ore Deposits[M]. New York: John Wiley and Sons, 1979: 491–559.
- [17] Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopic in hydrothermal ore deposits[J]. Economic Geology, 1972, 67(5): 551–578.
- [18] 刘军, 武广, 陈方伍, 等. 河南省石寨沟金矿床成矿流体特征及硫铅同位素研究[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1798–1811.
Liu Jun, Wu Guang, Chen Fangwu, et al. Fluid inclusion and S, Pb isotope study of the Shizhaigou gold deposit in Henan Province[J]. Geology in China, 2012, 39(6): 1798–1811(in Chinese with English abstract).
- [19] 聂凤军, 温银维, 赵元艺, 等. 内蒙古白音查干银多金属矿化区地质特征及找矿方向[J]. 矿床地质, 2007, 26(2): 213–220.
Nie Fengjun, Wen Yinwei, Zhao Yuanyi, et al. Geological features and prospecting directions of Bayinchagan silver polymetallic mineralized area in Xi Ujmqin Banner, central-eastern Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(2): 213–220 (in Chinese with English abstract).
- [20] Doe B R. The application of the lead isotopes to the problems of ore genesis and ore prospect evaluation: A review[J]. Economic Geology, 1974, 69: 757–776.
- [21] 楚克磊, 毛景文, 陈懋弘, 等. 广东圆珠顶斑岩型铜钼矿床成矿物质、成矿流体来源和成矿机理研究[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 115–125.
Chu Kelei, Mao Jingwen, Chen Maohong, et al. Source of metallogenic materials and ore-forming fluids, and metallogenic mechanism of the Yuanzhuding porphyry Cu–Mo deposit, western Guangdong Province, South China[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(5): 115–125 (in Chinese with English abstract).
- [22] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—the model[J]. Tectonophysics, 1981, 175(1/2): 135–162.
- [23] 杜玉雕, 刘家军, 余心起, 等. 安徽逍遥坞多金属矿床成矿物质来源与成矿: 碳、硫和铅同位素证据[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 566–579.
Du Yudiao, Liu Jiajun, Yu Xinqi, et al. The sources of metallogenic materials and mineralization of the Xiaoyao W-polymetallic deposit in Anhui Province: Evidence from carbon, sulfur and lead isotopes[J]. Geology in China, 2013, 40(2): 566–579(in Chinese with English abstract).
- [24] Holmes A. An estimate of the age of the Earth[J]. Nature, 1946, 157: 680–684.
- [25] Holmes A. A revised estimate of the age of the Earth[J]. Nature, 1947, 159: 127–128.
- [26] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 216–230.
Zhu Bingquan. Theory and Application of Isotopic System in Earth Science——Concurrently Discuss the Crust–Mantle Evolution of Chinese Mainland[M]. Beijing: Science Press, 1988: 216–230 (in Chinese).
- [27] Chen Yuwei, Mao Cunxiao, Zhu Bingquan. Lead isotopic composition and genesis of Phanerozoic metal deposits in China[J]. Geochemistry, 1982, 1(2): 137–158.
- [28] 刘学龙, 李文昌, 尹光侯. 云南格咱岛弧岩浆成矿带铅同位素特征及成矿物质来源示踪[J]. 现代地质, 2012, 26(3): 445–452.
Liu Xuelong, Li Wenchang, Yin Guanghou, et al. Lead isotope characteristics and tracing significance of ore metallogenic material in Geza arc metallogenic belt, Yunnan[J]. Geoscience, 2012, 26(3): 445–452 (in Chinese with English abstract).
- [29] 刘学龙, 李文昌, 尹光侯. 云南格咱岛弧印支期地壳隆升与剥蚀及其地质意义: 来自黑云母矿物压力计的证据[J]. 现代地质, 2013, 27(3): 537–546.
Liu Xuelong, Li Wenchang, Yin Guanghou. The crust uplift–denudation and its implications in Geza island arc since Indosinian, Yunnan Province[J]. Geoscience, 2013, 27(3): 537–546 (in Chinese with English abstract).
- [30] 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1181–1196.
Cheng Yanjing. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential[J]. Geology in China, 2006, 33(6): 1181–1196 (in Chinese with English abstract).
- [31] 刘学龙. 云南格咱岛弧印支期斑岩型铜矿成矿系统与矿床变化保存研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013: 5–80.
Liu Xuelong. The Research on Porphyry Copper Metallogenic System and Post–Ore Modification and Preservation Since The Indosinian in Geza Arc, Yunnan, SW China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013: 5–80 (in Chinese with English abstract).