

文章编号: 1000-4734(2018) 02-0205-09

西藏甲玛斑岩-矽卡岩型铜多金属矿床原位 Pb 同位素组成研究

郑石基^{1,2}, 钟宏^{1,2*}, 张忠坤³, 王广南⁴, 柏中杰¹, 胡文俊¹

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西藏华泰龙矿业开发有限公司, 西藏 拉萨 850200;
4. 中国黄金集团公司, 北京 100011)

摘 要: 西藏甲玛斑岩-矽卡岩型铜多金属矿床的成矿期次可划分为成矿前斯和矽卡岩成矿期(铜钼阶段、铜铋阶段、铁铜阶段和铜铅锌阶段)。应用飞秒激光剥蚀多接收等离子体质谱(fsLA-MC-ICP-MS) 对甲玛矿床主要矿石中的硫化物和斑岩中的长石斑晶进行原位微区 Pb 同位素组成分析, 测定结果与前人运用化学溶样法获得的 Pb 同位素组成基本一致, 表明原位 Pb 同位素分析技术具有很高的可靠性。不同成矿阶段的硫化物的 Pb 同位素组成总体一致, 表明成矿物质来自同一岩浆源区。斜长石和钾长石的 Pb 同位素组成对比研究显示, 花岗斑岩与甲玛矿床的形成有直接成因联系, 而花岗闪长斑岩很可能与成矿作用无关。通过对甲玛成矿物质来源的研究表明, 有较多幔源物质加入的新生加厚下地壳部分熔融形成的岩浆为甲玛超大型矿床的形成提供了充足的 Cu、Au 等成矿物质。

关键词: 甲玛矿床; 飞秒激光剥蚀; Pb 同位素组成; 成矿物质

中图分类号: P597 文献标识码: A doi: 10. 16461/j.cnki.1000-4734. 2018. 026

作者简介: 郑石基, 男, 1990 生, 硕士研究生, 主要从事岩浆热液矿床研究。E-mail: zhengshiji@mail.gyig.ac.cn

The *In-situ* Pb Isotopic Compositions of Jiama Porphyry-Skarn Copper-Polymetallic Deposit , Tibet , China

ZHENG Shi-ji^{1,2}, ZHONG Hong^{1,2*}, ZHANG Zhong-kun³, WANG Guang-nan⁴, BAI Zhong-jie¹, HU Wen-jun¹

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry , Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550081 , China; 2. University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China; 3. Tibet Huatailong Mining Development Corporation , Lhasa 850200 , China; 4. National Gold Group Corporation , Beijing 100011 , China)

Abstract: The ore-forming periods of Jiama porphyry-skarn copper-polymetallic deposit are divided into pre-mineralization period and skarn-mineralization period (including Cu-Mo stage , Cu-Bi stage , Fe-Cu stage and Cu-Pb-Zn stage) . This paper presents *in-situ* Pb isotopic compositions of major sulfides and feldspars from Jiama deposit determined by using a femtosecond laser-ablation multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry (fsLA-MC-ICP-MS) . These results are roughly in agreement with those of previous studies utilizing the chemical solution method , indicating that *in-situ* micro-analytical method for Pb isotope is highly reliable. The Pb isotopic compositions of sulfides at different stages are slightly variable but overall identical , implying that the corresponding ore-forming materials are derived from the same magmatic source. The Pb isotopic compositions of K-feldspars and plagioclases reveal that the granite porphyry is directly related to the formation of Jiama deposit and the granodiorite porphyry is probably not associated with mineralization. This study proposes that the magmas originated from partial melting of the newly thickened juvenile lower crust , involved with relatively abundant mantle-derived materials , supplied sufficient metals of Cu and Au for the generation of the giant Jiama deposit.

Keywords: Jiama deposit; femtosecond laser-ablation; Pb isotopic composition; ore-forming material

收稿日期: 2017-03-31

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(编号: 41425011) ; 国家自然科学基金(编号: 41303016)

*通讯作者, 钟宏, E-mail: zhonghong@vip.gyig.ac.cn

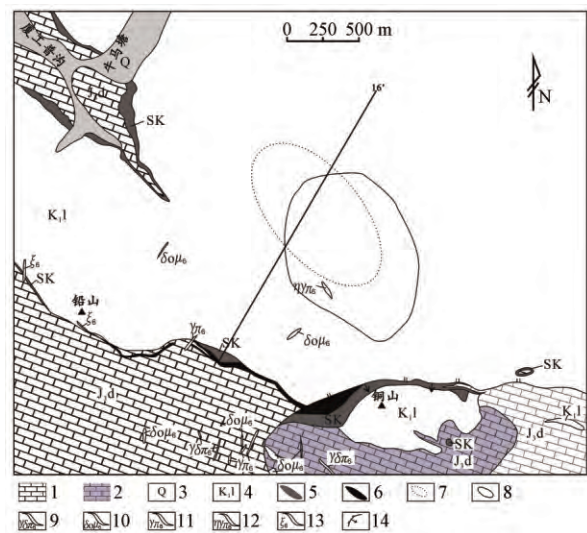
Pb 同位素组成对研究地质过程具有重要的示踪作用,在矿床学研究中可以用来指示成矿物质来源^[1-3]。传统的 Pb 同位素分析主要采用整体化学溶样法,然后用 TIMS 或者 MC-ICP-MS 测定,其测试精度虽然高,但周期长、处理流程复杂^[4]。与传统分析方法相比,激光剥蚀原位分析技术不需要溶样及复杂的化学分离,分析快速且经济,此外,还能获取不同期次单颗粒矿物的 Pb 同位素组成^[5-6]。应用 LA-MC-ICP-MS 分析 Pb 同位素还存在一些问题,比如质量歧视效应、外标参考物质的基体匹配和激光剥蚀和传输过程中的分馏效应。而飞秒激光剥蚀方法可通过减少剥蚀时间,大大降低基体的热效应以及降低剥蚀和传输过程中的分馏^[4]。Pb 含量会影响原位分析误差,但在成矿晚期低温阶段,硫化物的 Pb 含量相对较高^[7]。²⁰⁴Hg 与²⁰⁴Pb 是同质异位素,Hg 含量高会对低含量样品的 Pb 同位素造成严重干扰,可以通过活性炭过滤 Hg 可以提高 Pb 同位素的精度^[5-6]。

本文通过飞秒激光剥蚀多接收等离子体质谱(fsLA-MC-ICP-MS)方法原位分析西藏甲玛斑岩-矽卡岩型铜多金属矿床中主要矿物的硫化物和斑岩的长石斑晶的 Pb 同位素组成,目的在于:①与前人化学法得到的 Pb 同位素组成数据进行对比,验证原位分析方法的可靠性;②区别成矿/非成矿岩体;③探讨甲玛矿床的成矿物质来源。

1 矿区地质

西藏甲玛斑岩-矽卡岩型铜多金属矿床位于冈底斯-念青唐古拉板块冈底斯火山弧东部,是冈底斯成矿带 1 个重要的多金属矿床,其所含 Cu、Mo、Pb、Zn 以及伴生的 Au、Ag 均达到大型以上规模^[10-13]。矿区出露地层有下白垩统林布宗组(K₁l)和上侏罗统多底沟组(J₃d),其中林布宗组岩性主要为砂板岩,多底沟组为灰岩和大理岩^[12,13](图 1)。矿区主要有斑岩型、矽卡岩型和角岩型矿体,其中矽卡岩矿体是甲玛矿床中最重要的矿体类型,富集多种金属元素。矽卡岩矿体主要产于林布宗组与多底沟组之间,或受推覆构造所控制。斑岩矿体位于矽卡岩的底部,角岩型矿体位于矽卡岩的上部和产于斑岩体的外围^[14]。矿区发育多类中酸性侵入体,主要有花岗斑岩、二长花岗斑岩、花岗闪长斑岩以及石英闪长玢岩等(图 2) 均有不同程度的 Cu、Mo 矿化,以花岗斑

岩的矿化最强^[15-16],其中花岗斑岩被花岗闪长斑岩所穿切^[16],显示花岗闪长斑岩晚于花岗斑岩^[16]。花岗斑岩中的斑晶矿物主要为钾长石、石英、斜长石,及少量黑云母和角闪石,花岗闪长斑岩的斑晶主要为斜长石,含少量石英斑晶。矿石结构主要有交代结构、固溶体结构、结晶结构等,矿石构造主要为块状构造、浸染状构造等。矿石矿物主要有黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、黝铜矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿,脉石矿物主要为矽卡岩矿物(石榴石、硅灰石、透辉石以及透闪石等)和石英、方解石、萤石等^[10,17-20]。



1-底底沟组灰岩、大理岩; 2-矽卡岩化大理岩; 3-第四系冲、洪积物; 4-林布宗组砂板岩、角岩; 5-矽卡岩; 6-矿体; 7-深部斑岩矿体; 8-角岩矿体; 9-花岗闪长斑岩脉; 10-石英闪长玢岩脉; 11-花岗斑岩脉; 12-二长花岗斑岩脉; 13-花岗细晶岩脉; 14-滑脱断层
图 1 甲玛铜多金属矿床矿区地质图(据文献[10,11])

Fig.1. Geological map of Jiama copper-polymetallic deposit.

在辉钼矿矿石中,辉钼矿呈片状产出于硅灰石矿物之间,表明辉钼矿的成矿较早且成矿温度较高。斑铜矿矿石中,斑铜矿为主要的硫化物,黄铜矿、硫铋铜矿、辉铜矿等矿物从斑铜矿出溶呈条带状片状格子状等形态;脉石矿物主要为石榴石、硅灰石和石英,代表着进入了开始进入石英-硫化物成矿的阶段。黄铁矿-黄铜矿矿石中,黄铜矿和黄铁矿为主要的硫化物,有少量粒状的白钨矿和叶碲铋矿分布于黄铜矿和黄铁矿中,黄铜矿交代早期形成的黄铁矿;脉石矿物主要为石英,代表着石英-硫化物成矿的主要阶段。铜铅矿矿石中,方铅矿、闪锌矿、黄铜矿为主要的硫化物,还有少量的赤铁矿、黝铜矿等矿物;脉石矿物为石榴石、少

量的石英和方解石,金属硫化物与方解石同期,大量交代矽卡岩矿物,代表着矽卡成矿进入晚期阶段。综合李永胜^[21]和周云^[22]以及矽卡岩成矿 2 期 5 阶段的成矿模式将甲玛分为矽卡岩成矿期和

成矿前 2 期,具体矿物生成顺序见表 1,辉钼矿矿石、斑铜矿矿石、黄铁黄铜矿石、铅锌矿矿石分别对应于矽卡岩成矿期的铜钼阶段、铜铋阶段、铁铜阶段和铜铅锌阶段。

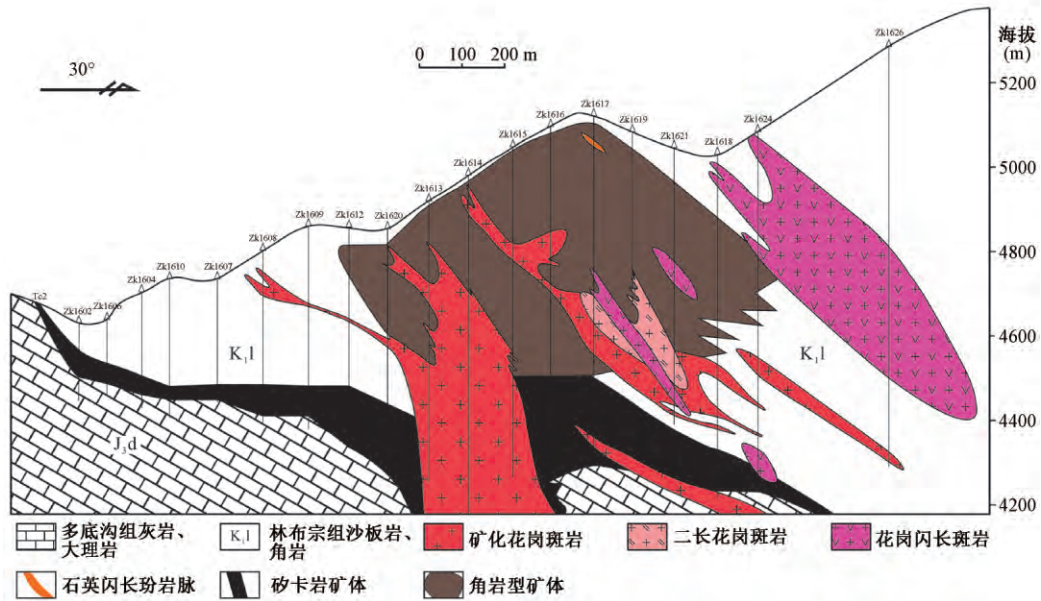


图 2 甲玛矿区 16 号勘探线剖面图(据文献 [31])

Fig.2. Section map of No. 16 profile of Jiama deposit.

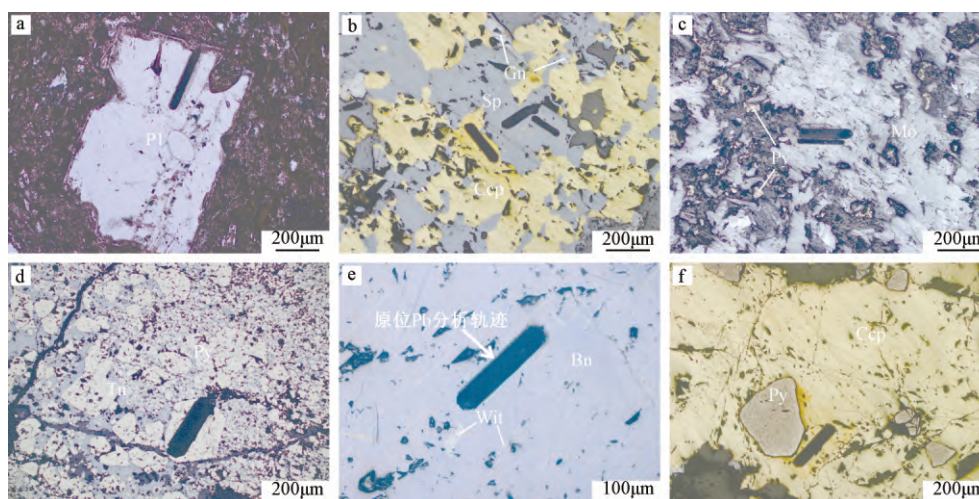
表 1 甲玛矿床不同矿石类型主要矿物生成顺序表

Table 1. Sequence of main minerals in Jiama copper-polymetallic deposit

	矽卡岩成矿前期		矽卡岩成矿期			
	硅酸盐		铜钼阶段	铜铋阶段	铁铜阶段	铜铅锌阶段
钾长石	■					
斜长石	■					
石榴石	■					
硅灰石	■					
辉钼矿			■			
斑铜矿			■	■		
硫铋铜矿				■		
黄铜矿			■	■	■	
黄铁矿			■	■	■	
闪锌矿						■
方铅矿						■
石英	■		■	■	■	
方解石					■	■

2 分析方法

本文研究的样品主要采集于西藏甲玛斑岩-矽卡岩型铜多金属矿床中的矽卡岩型矿体中。原位 Pb 位素组成分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室利用飞秒激光剥蚀原位分析技术完成。选择不同类型的硫化物矿石和斑岩切割新鲜面制作成激光片,通过显微镜下观察鉴定矿物的类型和特征,选择并圈出大小合适的矿物以满足测试要求。本次测试所选硫化物有黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿、闪锌矿、方铅矿和辉钼矿。岩石样品选择花岗斑岩和花岗闪长斑岩,花岗斑岩选择的矿物为钾长石斑晶,花岗闪长斑岩选择的矿物为斜长石斑晶,选择平整光滑面、避开裂隙和杂质。标样为硅酸盐玻璃 NIST SRM610,每隔 6 个实际样品点分析 1 次或者 2 次。由于方铅矿的铅含量特别高,选择的激光束斑为 2 μm,剥蚀速度为 2 μm/s,电流为 3 Hz。其它的硫化物和长石的分析束斑为 65 μm,剥蚀速度为 10 μm/s,电流 250 Hz,剥蚀轨迹以及矿物类型见图 3。在击



a-花岗闪长斑岩的斜长石斑晶; b-铜铅锌矿石中黄铜矿交代闪锌矿; c-角岩型辉钼矿以及后期的黄铁矿; d-黝铜矿矿石中黝铜矿交代黄铁矿; e-斑铜矿矿石中斑铜矿与硫铋铜矿固溶体分离结构; f-黄铜矿矿石中黄铜矿交代黄铁矿(Pl-斜长石; Ccp-黄铜矿; Mo-辉钼矿; Bn-斑铜矿; Wit-硫铋铜矿; Py-黄铁矿; Tn-砷黝铜矿; Sp-闪锌矿; Gn-方铅矿)

图 3 长石和硫化物镜下特征(图中的黑色条带为飞秒激光剥蚀的痕迹)

Fig.3. Characteristics of measured feldspars and sulfides under the microscope (thick lines in black represent the tracks of femtosecond laser-ablation).

打样品过程中,方铅矿和闪锌矿的 Pb 同位素信号最高,而黄铜矿和黄铁矿的 Pb 同位素信号较低。在数据处理过程中,尽可能选择平坦的信号峰进行计算处理。

3 分析结果

通过飞秒激光剥蚀原位分析方法获得 28 个样品中不同矿物的 100 个 Pb 同位素组成数据列于表 2。结合矿物生成顺序表 1,不同阶段矿物的 Pb 同位素组成范围见图 4。不同阶段的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值呈协调变化趋势。岩浆期矿物主要为斜长石和钾长石,斜长石的 Pb 同位素组成范围为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 18.430~18.716, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15.539~15.640, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 38.573~38.862; 钾长石 Pb 同位素组成范围为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 18.684~18.696, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15.670~15.697, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 39.070~39.167。辉钼矿阶段的辉钼矿的 Pb 同位素组成为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 18.649~19.137, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15.672~15.889, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 39.076~39.596; 斑铜矿阶段的斑铜矿的 Pb 同位素组成为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 18.661~18.913, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

15.667~15.752, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 38.867~39.224。黄铜矿和黄铁矿在各个成矿阶段都有分布,黄铜矿的 Pb 同位素组成范围为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 18.653~19.735, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15.655~16.011, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 38.972~39.585; 黄铁矿的 Pb 同位素组成范围为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 18.659~19.360, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15.663~15.852, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 39.044~39.515。铜铅锌阶段中方铅矿的 Pb 同位素组成为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 18.649~18.675, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15.669~15.702, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 39.070~39.185; 闪锌矿的 Pb 同位素组成为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 18.585~18.844, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15.621~15.734, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 38.801~39.144。方铅矿的 Pb 同位素组成变化范围最小,而黄铜矿和黄铁矿的 Pb 同位素组成变化范围较大(图 4)。总体而言,不同类型硫化物的 Pb 同位素组成基本一致(图 4)。钾长石的 Pb 同位素组成与硫化物的 Pb 同位素组成基本一致,斜长石的 Pb 同位素组成则相对较低。依据 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值相关图(图 4 d) 硫化物的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 之间表现出明显的线性关系,钾长石分布在拟合曲线上,斜长石位于硫化物的拟合曲线之下。

表 2 甲玛铜多金属矿床长石和硫化物 Pb 同位素组成

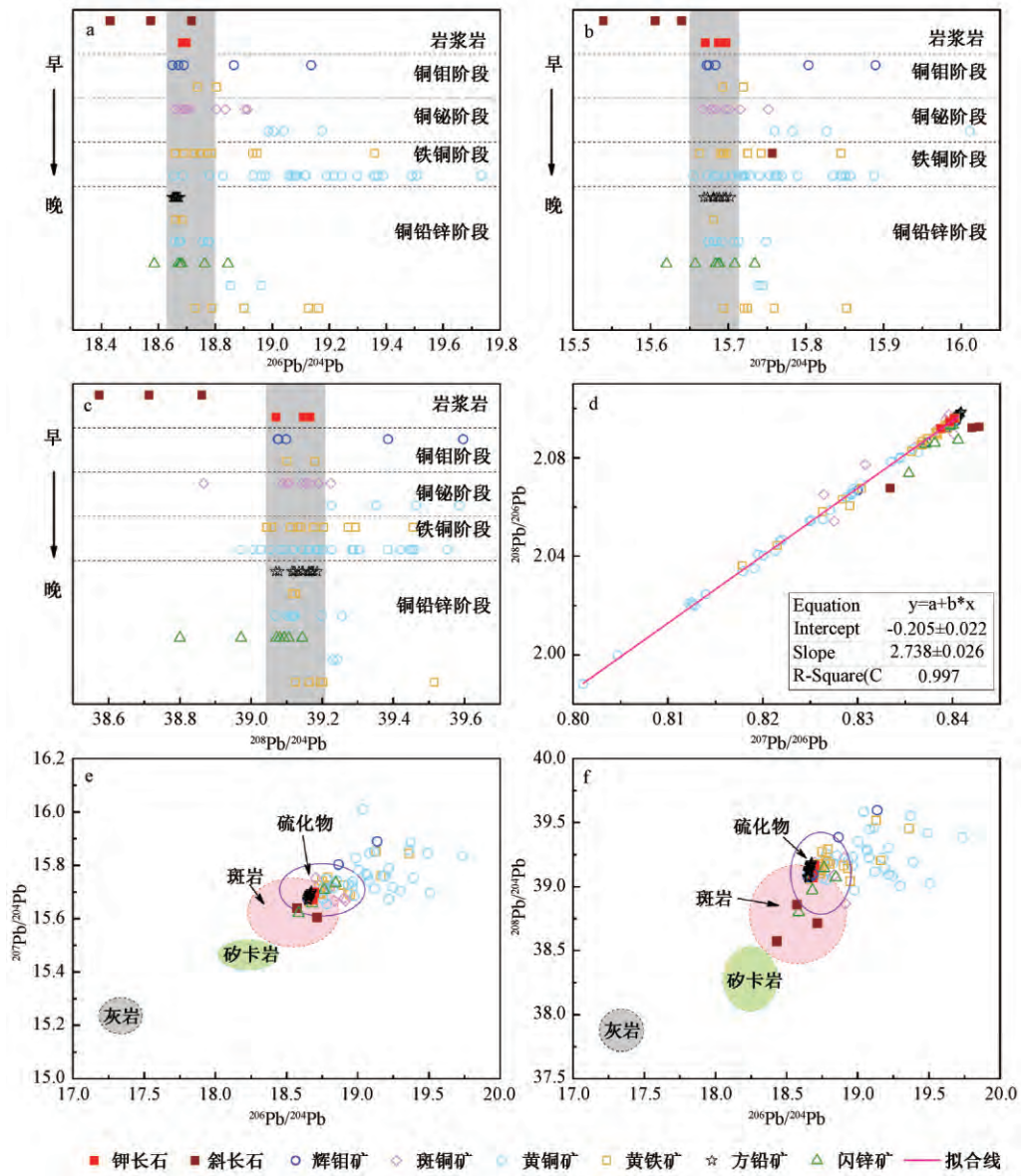
Table 2. Pb isotopic compositions of feldspars and sulfides in Jiama copper-polymetallic deposit

矿物	序号	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
Pl	JM1502-01	18.430	0.045	15.539	0.039	38.573	0.095	2.092	0.000	0.843	0.000
Pl	JM1502-02	18.572	0.039	15.640	0.033	38.862	0.081	2.092	0.000	0.842	0.000
Pl	JM1502-03	18.716	0.069	15.606	0.057	38.714	0.141	2.068	0.000	0.833	0.000
Kf	JM1516-01	18.696	0.013	15.697	0.011	39.167	0.028	2.095	0.000	0.840	0.000
Kf	JM1516-02	18.684	0.032	15.670	0.027	39.070	0.067	2.092	0.000	0.839	0.000
Kf	JM1516-03	18.685	0.036	15.687	0.030	39.148	0.075	2.096	0.000	0.840	0.000
Py	JM1505-01	18.737	0.022	15.693	0.018	39.101	0.044	2.085	0.000	0.837	0.000
Py	JM1505-02	18.803	0.035	15.719	0.030	39.178	0.074	2.083	0.000	0.836	0.000
Mo	JM1505-03	18.670	0.006	15.675	0.005	39.077	0.012	2.092	0.000	0.839	0.000
Mo	JM1505-04	18.649	0.003	15.672	0.003	39.076	0.008	2.095	0.000	0.840	0.000
Mo	JM1505-05	18.689	0.003	15.684	0.003	39.098	0.007	2.092	0.000	0.839	0.000
Mo	JM1533-01	19.137	0.041	15.889	0.032	39.596	0.078	2.067	0.001	0.830	0.000
Mo	JM1533-02	18.865	0.025	15.803	0.020	39.385	0.049	2.087	0.000	0.837	0.000
Mo	JM1533-03	18.865	0.025	15.803	0.020	39.385	0.049	2.087	0.000	0.837	0.000
Bn	JM1519-01	18.703	0.015	15.752	0.022	39.143	0.048	2.090	0.001	0.840	0.001
Bn	JM1519-02	18.803	0.017	15.715	0.015	39.190	0.036	2.084	0.001	0.836	0.000
Bn	JM1523-01	18.697	0.017	15.701	0.015	39.189	0.037	2.096	0.001	0.839	0.000
Bn	JM1523-02	18.676	0.016	15.684	0.015	39.166	0.036	2.098	0.001	0.840	0.000
Bn	JM1538-01	18.683	0.007	15.683	0.006	39.108	0.016	2.093	0.000	0.839	0.000
Bn	JM1538-02	18.904	0.059	15.677	0.054	39.224	0.129	2.065	0.003	0.826	0.001
Bn	JM1538-03	18.711	0.010	15.697	0.013	39.154	0.029	2.091	0.001	0.838	0.000
Bn	JM1548-01	18.913	0.066	15.667	0.063	38.867	0.145	2.054	0.003	0.828	0.001
Bn	JM1548-02	18.835	0.049	15.667	0.043	39.090	0.105	2.077	0.002	0.831	0.001
Bn	JM1548-03	18.661	0.005	15.678	0.005	39.102	0.013	2.095	0.000	0.840	0.000
Cpy	JM1519-03	19.174	0.050	15.760	0.041	39.226	0.100	2.046	0.001	0.822	0.000
Cpy	JM1519-04	19.004	0.037	15.783	0.030	39.353	0.074	2.065	0.001	0.829	0.000
Cpy	JM1548-04	19.040	0.079	16.011	0.072	39.585	0.161	2.042	0.003	0.821	0.001
Cpy	JM1548-05	18.986	0.057	15.827	0.046	39.463	0.115	2.080	0.001	0.835	0.000
Py	JM1526-02	18.772	0.029	15.725	0.024	39.203	0.063	2.085	0.001	0.837	0.000
Py	JM1526-03	18.690	0.009	15.693	0.009	39.110	0.023	2.092	0.000	0.839	0.000
Py	JM1540-01	18.946	0.120	15.690	0.100	39.044	0.245	2.061	0.002	0.829	0.001
Py	JM1542-05	18.659	0.014	15.663	0.013	39.059	0.032	2.093	0.000	0.839	0.000
Py	JM1543-01	19.360	0.124	15.845	0.101	39.456	0.252	2.036	0.001	0.818	0.001
Py	JM1544-01	18.788	0.032	15.757	0.027	39.293	0.067	2.090	0.000	0.838	0.000
Py	JM1544-02	18.726	0.048	15.725	0.041	39.176	0.104	2.089	0.000	0.838	0.000
Py	JM1545-03	18.931	0.040	15.698	0.032	39.141	0.079	2.063	0.002	0.828	0.001
Py	JM1545-04	18.749	0.015	15.742	0.012	39.273	0.030	2.094	0.000	0.840	0.000
Py	JM1545-05	18.745	0.017	15.694	0.013	39.133	0.033	2.090	0.000	0.838	0.000
Cpy	JM1514-01	18.826	0.017	15.716	0.014	39.182	0.036	2.080	0.000	0.834	0.000
Cpy	JM1514-02	18.932	0.024	15.728	0.020	39.202	0.049	2.069	0.000	0.830	0.000
Cpy	JM1520-01	19.084	0.062	15.846	0.050	39.447	0.122	2.066	0.001	0.829	0.000
Cpy	JM1520-02	19.079	0.075	15.740	0.062	39.227	0.157	2.055	0.001	0.825	0.000
Cpy	JM1520-03	18.975	0.084	15.686	0.070	38.972	0.174	2.055	0.001	0.826	0.000
Cpy	JM1526-01	19.389	0.112	15.753	0.092	39.190	0.227	2.020	0.002	0.813	0.001
Cpy	JM1526-04	19.118	0.076	15.713	0.062	39.117	0.152	2.047	0.001	0.822	0.000
Cpy	JM1526-05	19.059	0.055	15.768	0.043	39.288	0.110	2.059	0.001	0.827	0.000
Cpy	JM1540-03	19.244	0.110	15.719	0.088	39.085	0.219	2.021	0.001	0.812	0.001

续表 2

矿物	序号	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
Cpy	JM1540-04	19.216	0.110	15.790	0.086	39.304	0.216	2.040	0.002	0.820	0.001
Cpy	JM1540-05	19.191	0.095	15.760	0.079	39.146	0.194	2.035	0.001	0.819	0.000
Cpy	JM1541.1-01	19.370	0.075	15.888	0.060	39.552	0.148	2.041	0.002	0.819	0.001
Cpy	JM1541.1-02	19.489	0.097	15.844	0.079	39.419	0.196	2.020	0.001	0.813	0.000
Cpy	JM1541.1-03	19.735	0.135	15.835	0.107	39.385	0.269	2.000	0.002	0.805	0.001
Cpy	JM1543-03	19.298	0.103	15.704	0.083	39.005	0.207	2.020	0.001	0.812	0.000
Cpy	JM1543-04	19.357	0.086	15.857	0.066	39.454	0.164	2.034	0.003	0.818	0.001
Cpy	JM1545-01	19.068	0.053	15.763	0.039	39.283	0.097	2.054	0.002	0.825	0.001
Cpy	JM1545-02	19.508	0.095	15.696	0.076	39.027	0.189	1.988	0.002	0.801	0.001
Cpy	JM1550-01	19.217	0.121	15.673	0.099	39.096	0.245	2.025	0.002	0.814	0.001
Cpy	JM1542-01	19.116	0.066	15.851	0.055	39.461	0.137	2.064	0.001	0.829	0.000
Cpy	JM1542-02	18.961	0.067	15.721	0.056	39.166	0.140	2.066	0.001	0.830	0.000
Cpy	JM1542-03	18.780	0.043	15.655	0.036	39.053	0.090	2.078	0.001	0.834	0.000
Cpy	JM1542-04	18.685	0.008	15.695	0.007	39.162	0.020	2.093	0.000	0.840	0.000
Cpy	JM1543-02	18.653	0.001	15.681	0.001	39.119	0.004	2.097	0.000	0.841	0.000
Gn	JM1506-01	18.649	0.003	15.673	0.003	39.079	0.008	2.096	0.000	0.840	0.000
Gn	JM1506-03	18.652	0.003	15.669	0.004	39.070	0.011	2.096	0.000	0.841	0.000
Gn	JM1508-01	18.657	0.002	15.681	0.002	39.119	0.006	2.097	0.000	0.840	0.000
Gn	JM1508-02	18.656	0.002	15.680	0.002	39.116	0.006	2.097	0.000	0.840	0.000
Gn	JM1509-01	18.658	0.002	15.685	0.002	39.135	0.006	2.097	0.000	0.841	0.000
Gn	JM1509-02	18.654	0.003	15.681	0.003	39.124	0.009	2.097	0.000	0.841	0.000
Gn	JM1510-01	18.663	0.002	15.688	0.003	39.146	0.007	2.098	0.000	0.841	0.000
Gn	JM1510-02	18.669	0.003	15.693	0.003	39.164	0.008	2.098	0.000	0.841	0.000
Gn	JM1511-03	18.670	0.003	15.696	0.003	39.171	0.009	2.098	0.000	0.841	0.000
Gn	JM1511-04	18.671	0.003	15.697	0.003	39.175	0.010	2.099	0.000	0.841	0.000
Gn	JM1512-01	18.675	0.003	15.702	0.003	39.185	0.009	2.098	0.000	0.841	0.000
Gn	JM1512-02	18.665	0.006	15.694	0.005	39.162	0.014	2.098	0.000	0.841	0.000
Gn	JM1513-03	18.668	0.002	15.696	0.002	39.169	0.007	2.098	0.000	0.841	0.000
Gn	JM1513-04	18.659	0.005	15.688	0.005	39.146	0.012	2.098	0.000	0.841	0.000
Gn	JM1541.2-01	18.663	0.002	15.688	0.002	39.143	0.007	2.097	0.000	0.841	0.000
Gn	JM1541.2-02	18.663	0.002	15.688	0.002	39.143	0.006	2.097	0.000	0.841	0.000
Py	JM1508-03	18.661	0.004	15.681	0.003	39.124	0.009	2.096	0.000	0.840	0.000
Py	JM1509-04	18.683	0.004	15.681	0.003	39.117	0.008	2.093	0.000	0.839	0.000
Cpy	JM1506-02	18.673	0.011	15.692	0.010	39.119	0.026	2.093	0.000	0.840	0.000
Cpy	JM1510-03	18.774	0.012	15.707	0.010	39.117	0.026	2.082	0.000	0.836	0.000
Cpy	JM1511-01	18.757	0.031	15.713	0.026	39.198	0.065	2.090	0.000	0.838	0.000
Cpy	JM1511-02	18.657	0.004	15.674	0.004	39.102	0.009	2.096	0.000	0.840	0.000
Cpy	JM1513-01	18.677	0.003	15.685	0.003	39.123	0.008	2.095	0.000	0.840	0.000
Cpy	JM1513-02	18.672	0.003	15.681	0.003	39.111	0.009	2.095	0.000	0.840	0.000
Cpy	JM1541.2-05	18.757	0.029	15.675	0.024	39.069	0.060	2.083	0.000	0.836	0.000
Cpy	JM1541.2-06	18.778	0.025	15.749	0.021	39.256	0.051	2.090	0.000	0.838	0.000
Sp	JM1509-03	18.679	0.006	15.689	0.006	39.106	0.014	2.093	0.000	0.840	0.000
Sp	JM1510-04	18.762	0.011	15.708	0.009	39.144	0.023	2.086	0.000	0.837	0.000
Sp	JM1512-03	18.677	0.006	15.687	0.005	39.094	0.014	2.093	0.000	0.840	0.000
Sp	JM1512-04	18.669	0.005	15.684	0.004	39.081	0.010	2.093	0.000	0.840	0.000
Sp	JM1541.2-03	18.585	0.023	15.621	0.019	38.801	0.048	2.087	0.000	0.841	0.000
Sp	JM1541.2-04	18.844	0.060	15.734	0.050	39.071	0.124	2.074	0.000	0.835	0.000
Sp	JM1541.2-07	18.682	0.016	15.657	0.014	38.972	0.035	2.086	0.000	0.838	0.000
Py	JM1515-01	18.728	0.012	15.694	0.010	39.124	0.025	2.088	0.000	0.837	0.000
Py	JM1515-02	18.788	0.011	15.720	0.009	39.196	0.023	2.087	0.000	0.837	0.000
Py	JM1539-01	19.127	0.057	15.852	0.039	39.515	0.097	2.058	0.002	0.826	0.001
Py	JM1539-02	18.901	0.039	15.725	0.031	39.164	0.090	2.068	0.001	0.830	0.001
Py	JM1539-03	19.162	0.058	15.759	0.048	39.203	0.118	2.044	0.001	0.822	0.000

注: Pl-斜长石; Kf-钾长石; Mo-辉钼矿; Py-黄铁矿; Cpy-黄铜矿; Py-黄铁矿; Sp-闪锌矿; Gn-方铅矿。



a、b、c-不同阶段长石和硫化物的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 的比值; d-²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb-²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb 组成图; e、f-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 和 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 组成图,其中椭圆范围代表前人化学法得到 Pb 同位素组成结果的范围(据文献[11]、[21]、[23-27])

图 4 西藏甲玛矿床不同矿物的 Pb 同位素组成图

Fig.4. Diagrams of Pb isotope composition for different minerals in Jima deposit.

4 讨论

综合前人通过化学溶样法获得的林布宗组灰岩、矿化矽卡岩、斑岩岩体和硫化物的 Pb 同位素组成数据^[11, 21, 23-28]和本文测试结果,表明不同地质体具有较大的 Pb 同位素组成变化(图 4e、f)。矽卡岩的 Pb 同位素组成介于地层于斑岩岩体的 Pb 同位素组成之间。矽卡岩是中酸性岩体与碳酸盐岩接触交代反应的产物,其 Pb 同位素组成呈现斑岩岩体 Pb 与灰岩 Pb 之间混合趋势。斑

岩的 Pb 同位素组成与硫化物的 Pb 同位素组成范围不是完全一致,表明甲玛矿区内并非所有斑岩岩体与成矿作用有直接成因联系,我们认为仅有 Pb 同位素组成与硫化物相似的斑岩体与成矿密切相关。我们获得的长石 Pb 同位素组成与前人测定的斑岩的 Pb 同位素组成一致,硫化物的 Pb 同位素组成也与前人获得的相关同位素组成范围一致,表明原位 Pb 同位素分析数据具有很高可信度。硫化物的 Pb 同位素组成可以代表成矿热液的 Pb 同位素组成并能指示成矿物质的源

区^[2]。尽管甲玛矿区中不同成矿阶段硫化物的 Pb 同位素组成有一定变化(图 4 a、b、c),但其整体上基本一致,表明成矿物质来自同一源区。

长石的 Pb 同位素组成可代表岩浆的 Pb 同位素特征^[2, 28, 29]。花岗斑岩中钾长石斑晶的 Pb 同位素组成与硫化物的 Pb 同位素组成基本一致(图 4 a、b、c),且矿体与其密切共生,显示花岗斑岩岩体对成矿作用有直接贡献。花岗闪长斑岩中斜长石斑晶的 Pb 同位素组成低于硫化物的 Pb 同位素组成,表明花岗闪长斑岩岩体可能与成矿无直接成因联系。前人研究表明甲玛矿床的成矿物质来源于岩浆^[11, 43],我们的钾长石 Pb 同位素组成结果进一步证实该矿床的成矿物质来自斑岩体。秦志鹏等^[16]测定的花岗斑岩岩体年龄与成矿年龄一致,而花岗闪长斑岩的形成晚于成矿期,表明花岗斑岩为甲玛矿床的成矿岩体,而花岗闪长斑岩则与成矿无关。

已有的研究显示,甲玛矿床成矿年代与冈底斯成矿带驱龙、厅宫、帮浦、冲江、南木等铜矿床接近,为距今 15Ma 左右^[30-32],形成于印度—亚洲大陆碰撞的后碰撞期^[33-36]。驱龙、冲江、南木等矿床中硫化物的 Pb 同位素组成为²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 18.424 ~ 18.591, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 15.576 ~ 15.636, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 38.557 ~ 38.883, 而帮浦矿床中硫化物矿物的 Pb 同位素组成为²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 18.45 ~ 18.88, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 15.609 ~ 15.824, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 38.715 ~ 39.168。矿床的同位素组成指示着有幔源物质的特征^[35, 37, 38]。甲玛的 Pb 同位素组成稍高于驱龙、冲江和南木,而稍微低于帮浦,表明 Pb 同位素组成较驱龙更多的壳源物质。李永胜等^[11]、周云等^[26]计算甲玛矿区 Pb 同位素的模式年龄与成矿年龄不一致,认为有放射性铅的加入,可能存在不同的源区物质的加入。前人的研究认为冈底斯成矿带中新世斑岩型矿床的岩浆起源于新生加厚的铁镁质下地壳的部分熔融,且有幔源物质的加入^[33, 39-43],而大型斑岩矿床系统中的 Cu、Au 多来源于地幔^[43]。新生加厚的下地壳可以解释甲玛矿床 Pb 同位素组成较高,而甲玛矿床以富集 Cu、Au 为特征,应有地幔物质的较大贡献。本研究由此认为,碰撞作用导致新生下地壳加厚且有较多幔源物质的加入,新生下地壳的部分熔融为甲玛铜多金属矿床的形成提供巨量的成矿物质。

5 结 论

1) 甲玛矿床的原位 Pb 同位素组成与前人的数据基本一致,表明原位 Pb 同位分析技术具有很高的可靠性。单颗粒矿物的原位 Pb 同位素组成,可用于识别不同成矿阶段矿物的 Pb 同位素组成差异、区分不同的成矿源及判别岩体与成矿的成因联系。

2) 花岗斑岩中钾长石斑晶与硫化物的 Pb 同位素组成基本一致,显示花岗斑岩与成矿金属具有相同物质来源,花岗斑岩岩体与甲玛矿床的形成密切相关。花岗闪长斑岩中斜长石的 Pb 同位素比值低于硫化物,表明花岗闪长斑岩很可能与成矿作用无成因关系联系。

3) 不同阶段硫化物的原位 Pb 同位素组成显示成矿物质均来源于岩浆,有部分幔源物质加入新生加厚下地壳,其部分熔融作用为甲玛超大型矿床的形成提供了充足的 Cu、Au 等成矿物质。

致 谢:感谢西北大学大陆动力学国家重点实验室包志安工程师在 fsLA-MC-ICP-MS 原位分析过程中以及数据的校正上给予的帮助。

参 考 文 献:

- [1] 张文,胡兆初,金振民,等. 激光剥蚀多接收杯电感耦合等离子体质谱仪原位分析硫化物铅同位素组成[J]. 分析化学, 2017, 45(1): 14-22.
- [2] 张理刚. 长石铅和矿石铅同位素组成及其地质意义[J]. 矿床地质, 1988, 7(2): 55-64.
- [3] 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.
- [4] 熊潇,朱赖民,袁洪林,等. 北秦岭铜峪铜矿床铅同位素的 fsLA-MC-ICP-MS 微区原位分析测定及其地质意义[J]. 科学通报, 2016, 61(25): 2811-2822.
- [5] 袁洪林,殷琮,刘旭,等. 飞秒激光剥蚀多接收等离体质谱分析硫化物中 Pb 同位素组成研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(9): 1285-1293.
- [6] Darling J R, Storey C D, Hawkesworth C J, et al. In-situ Pb isotope analysis of Fe - Ni - Cu sulphides by laser ablation multi-collector ICPMS: New insights into ore formation in the Sudbury impact melt sheet [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 99: 1-17.
- [7] Woodhead J, Hergt J, Meffre S, et al. In situ Pb - isotope analysis of pyrite by laser ablation (multi-collector and quadrupole) ICPMS [J]. *Chemical Geology*, 2009, 262(3-4): 344-354.
- [8] 唐菊兴,郑文宝,陈毓川,等. 西藏甲玛铜多金属矿床深部斑岩矿体找矿突破及其意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(4): 1100-1110.

- [9] 王艺云. 西藏甲玛铜多金属矿床铜钼分离机制探讨[D]. 成都: 成都理工大学(硕士论文), 2014.
- [10] 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及其矿床模型[J]. 地球学报, 2010, 31(4): 495-506.
- [11] 李永胜, 吕志成, 严光生, 等. 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, 2012, 19(4): 72-81.
- [12] 郑文宝, 陈毓川, 宋鑫, 等. 西藏甲玛铜多金属矿元素分布规律及地质意义[J]. 矿床地质, 2010, 29(5): 775-784.
- [13] 应立娟, 郑文宝, 王崴平, 等. 西藏甲玛铜多金属矿硫同位素地球化学研究[J]. 地球学报, 2012, 33(4): 519-527.
- [14] 唐菊兴, 邓世林, 郑文宝, 等. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床勘查模型[J]. 矿床地质, 2011, 30(2): 179-196.
- [15] 应立娟, 唐菊兴, 王登红, 等. 西藏甲玛超大型铜钼石榴子石特征及成因意义[J]. 地质学报, 2012, 86(11): 1735-1747.
- [16] 秦志鹏, 汪雄武, 多吉, 等. 西藏甲玛中酸性侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿意义[J]. 矿床地质, 2011, 30(2): 339-348.
- [17] 王焕. 西藏甲玛铜多金属矿床矿物学特征及其成因意义研究[D]. 北京: 中国地质科学院(硕士论文), 2011.
- [18] 唐晓倩, 王国芝, 秦志鹏, 等. 西藏甲玛铜多金属矿石榴子石矿物学特征及成因意义[J]. 地球学报, 2012, 33(4): 633-640.
- [19] 姚晓峰, 王友, 畅哲生, 等. 西藏甲玛铜多金属矿夕卡岩特征及成因意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, 38(6): 662-670.
- [20] 秦志鹏. 西藏甲玛铜多金属矿床成因模式[D]. 成都: 成都理工大学(博士论文), 2013.
- [21] 周云. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿成矿流体特征及演化[D]. 成都: 成都理工大学(硕士论文), 2010.
- [22] 李永胜. 西藏甲玛铜多金属矿床地质物征及矿床成因探讨[D]. 北京: 中国地质大学(北京)(硕士论文), 2009.
- [23] 姚鹏, 郑明华, 彭勇民, 等. 西藏冈底斯岛弧带甲玛铜多金属矿床成矿物质来源及成因研究[J]. 地质论评, 2002, 48(5): 468-479.
- [24] 曲晓明, 侯增谦, 黄卫. 冈底斯斑岩铜矿(化) 带: 西藏第二条“玉龙”铜矿带? [J]. 矿床地质, 2001, 20(4): 355-366.
- [25] Qu X M, Hou Z Q, Zaw K, et al. Characteristics and genesis of Gangdese porphyry copper deposits in the southern Tibetan Plateau: Preliminary geochemical and geochronological results [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31(1-4): 205-223.
- [26] 周云, 唐菊兴, 秦志鹏, 等. 甲玛铜多金属矿床 S、Pb 同位素组成及地质意义[J]. 金属矿山, 2012, 41(6): 102-105.
- [27] 秦志鹏. 西藏甲玛铜多金属矿床似埃达克岩的成岩成矿作用[D]. 成都: 成都理工大学(硕士论文), 2010.
- [28] Gagnevin D, Daly J S, Waight T E, et al. Pb isotopic zoning of K-feldspar megacrysts determined by Laser Ablation Multi-Collector ICP-MS: Insights into granite petrogenesis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(7): 1899-1915.
- [29] Tyrrell S, Haughton P D W, Daly J S. Drainage reorganization during breakup of Pangea revealed by in-situ Pb isotopic analysis of detrital K-feldspar [J]. *Geology*, 2007, 35(11): 971-974.
- [30] 应立娟, 唐菊兴, 王登红, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床矽卡岩中辉钼矿铼-钨同位素定年及其成矿意义[J]. 岩矿测试, 2009, 28(3): 265-268.
- [31] 应立娟, 王登红, 唐菊兴, 等. 西藏甲玛铜多金属矿辉钼矿 Re-Os 定年及其成矿意义[J]. 地质学报, 2010, 84(8): 1165-1174.
- [32] 李光明, 芮宗瑶, 王高明, 等. 西藏冈底斯成矿带甲玛和知不拉铜多金属矿床的 Re-Os 同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 2005, 24(5): 481-489.
- [33] 侯增谦, 郑远川, 杨志明, 等. 大陆碰撞成矿作用: I. 冈底斯新生代斑岩成矿系统[J]. 矿床地质, 2012, 31(4): 647-670.
- [34] 李光明, 芮宗瑶. 西藏冈底斯成矿带斑岩铜矿的成岩成矿年龄[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(2): 165-170.
- [35] 应立娟, 王阔, 王开建. 西藏驱龙-甲玛-邦铺铜矿集区铅同位素地球化学示踪研究[J]. 岩矿测试, 2016, 35(3): 320-328.
- [36] 赵涵. 冈底斯成矿带中、新生代铜矿成矿规律研究[D]. 成都: 成都理工大学(硕士论文), 2012.
- [37] 孟祥金, 侯增谦, 李振清. 西藏驱龙斑岩铜矿 S、Pb 同位素组成: 对含矿斑岩与成矿物质来源的指示[J]. 地质学报, 2006, 80(4): 554-560.
- [38] 程文斌, 顾雪祥, 唐菊兴, 王立强, 吕鹏瑞, 钟康惠, 刘晓吉, 高一鸣. 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, 2010, 26(11): 3350-3362.
- [39] Li J X, Qin K Z, Li G M, et al. Post-collisional ore-bearing adakitic porphyries from Gangdese porphyry copper belt, southern Tibet: Melting of thickened juvenile arc lower crust [J]. *Lithos*, 2011, 126(3-4): 265-277.
- [40] 秦克章, 夏代祥, 李光明, 等. 西藏驱龙斑岩-夕卡岩铜钼矿床[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [41] Richards J P. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere [J]. *Geology*, 2009, 37(3): 247-250.
- [42] Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, et al. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 220(1-2): 139-155.
- [43] Hou Z Q, Yang Z M, Qu X M, et al. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen [J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 36(1-3): 25-51.
- [44] Hou Z Q, Zhang H R, Pan X F, et al. Porphyry Cu (- Mo - Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust: examples from the eastern Tethyan metallogenic domain [J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 39(1-2): 21-45.
- [45] Peacock S M. Large-scale hydration of the lithosphere above subducting slabs [J]. *Chemical Geology*, 1993, 108(1-4): 49-59.