

西藏甲玛铜多金属矿床流体、成矿物质来源的地球化学约束

郭文铂¹ 郑文宝^{2,3} 唐菊兴² 应立娟² 王艺云¹ 林彬¹

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:甲玛铜多金属矿是西藏冈底斯成矿带中东段勘查程度最高、成矿元素与矿体类型复杂的超大型斑岩-矽卡岩型矿床。前人在控岩-控矿构造、矿床地质、地球化学、矿床模型等方面已经完成了大量的研究工作,但对于矿床成矿机制研究方面尚存不足,特别是流体、成矿物质的来源方面欠缺系统的研究工作和对资料的全面梳理。文章在大量阅研和总结前人研究资料的基础上,以矿区16号勘探线作为典型剖面开展了氧同位素填图,同时对硫同位素进行了必要的样品补充采集。通过综合研究,有证据表明甲玛矿区深部隐伏斑岩体存在岩浆流体的出溶,在此基础上,氢、氧同位素组成表明矿化由早到晚演化过程中,流体由岩浆水向大气降水增加方向演化;同时,氧同位素填图以及流体包裹体平面均一温度分布确定成矿流体源位于矿区zk1616~zk3216一带。此外,S、Si同位素组成均表明了矿区成矿物质主要来源于成矿岩浆岩,而铅同位素的研究进一步说明成矿物质主要来源于冈底斯后碰撞环境下因地壳减薄、地幔上涌导致的壳幔混合作用。文章依据地球化学的研究成果,探讨矿床流体、成矿物质的来源,为甲玛矿床成因、成矿机制研究夯实基础。

关键词:同位素地球化学;流体来源;成矿物质来源;斑岩-矽卡岩型矿床;甲玛

中图分类号:P618.4;P611 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)02-0510-19

西藏甲玛铜多金属矿床发现于20世纪50年代,于90年代,西藏地勘局完成了矿区铅山—铜山近2 km²范围内的详查地质工作,提交铜+铅+锌资源量约85万t(332+333级),主攻矿种为铅锌矿;与此同时,早期一些学者主要根据矽卡岩型铅(铜)矿体呈层状、似层状产出,矿石中可见到条带状构造等特征,提出该矿床成因属于海底喷流沉积成矿(SEDEX)^[1,2],并以此矿床成因观点指导勘查。2006年开始,项目组在前人工作基础上,对甲玛矿区进

行了全面地质勘探工作,施工钻孔近400个,勘查面积扩大至10 km²,在斑岩-矽卡岩型矿床成因观点的指导下,找矿取得重大突破;累计查明矽卡岩+角岩+斑岩型矿体中铜资源量约680万t、钼资源量约65万t、铅+锌资源量大于100万t、伴生金约170t、伴生银约10000 t^{①②};同时,在控岩-控矿构造、矿床地质、地球化学、矿床模型等方面开展了大量的研究工作^[3-8]。但对于矿床成矿机制研究方面尚存不足,特别是流体、成矿物质的来源方面欠缺系统的

收稿日期:2013-05-28;改回日期:2014-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41302060)、中国地质调查局地质调查项目(12120113093700)和国家重点基础研究发展计划“973计划”(2011CB403103)联合资助。

作者简介:郭文铂,男,1976年生,在职博士生,构造地质学专业;E-mail:guowenbo@cdu.cn。

通讯作者:郑文宝,男,1982年生,博士后,主要从事矿床勘查与研究;E-mail:zhengwenbao2009@sina.com。

①唐菊兴,王登红,钟康惠,等. 西藏自治区墨竹工卡县甲玛铜多金属矿区0—16—40—80、0—15线矿段铜多金属矿勘探报告[R]. 拉萨:西藏国土资源厅,2009。

②唐菊兴,王登红,汪雄武,等. 西藏自治区墨竹工卡县甲玛矿区则古朗矿段铜多金属矿详查报告[R]. 拉萨:西藏国土资源厅,2012。

研究工作和对资料的全面梳理。本文在大量阅读和总结前人研究资料的基础上,以矿区16号勘探线作为典型剖面开展了氧同位素填图,同时对硫同位素进行了必要的样品补充采集,探讨了矿床流体、成矿物质的来源问题,为矿床成因、成矿机制研究夯实了基础。

1 区域及矿区地质

甲玛矿区大地构造位置处于西藏冈底斯—念青唐古拉(地体)板片中南部。区域及矿区地层主

要为岛弧及被动陆缘火山沉积岩系,与成矿有关地层主要为上侏罗统多底沟组(J_3d ,灰白色大理岩、结晶灰岩,夹泥灰岩、灰黑色砾屑灰岩、碎屑泥晶灰岩),以及下白垩统林布宗组(K_1l ,上部为岩屑砂岩、石英砂岩、岩屑石英粉砂岩与泥质板岩互层;下部为泥质板岩,炭质页岩夹粉、细砂岩,含生物碎屑泥晶灰岩)(图1)^[9]。

区域上岩浆岩发育,分布广泛,既有出露面积巨大的深成侵入体,又有巨厚的火山岩,主要分布在雅鲁藏布江断裂以北,是冈底斯火山岩浆弧的重

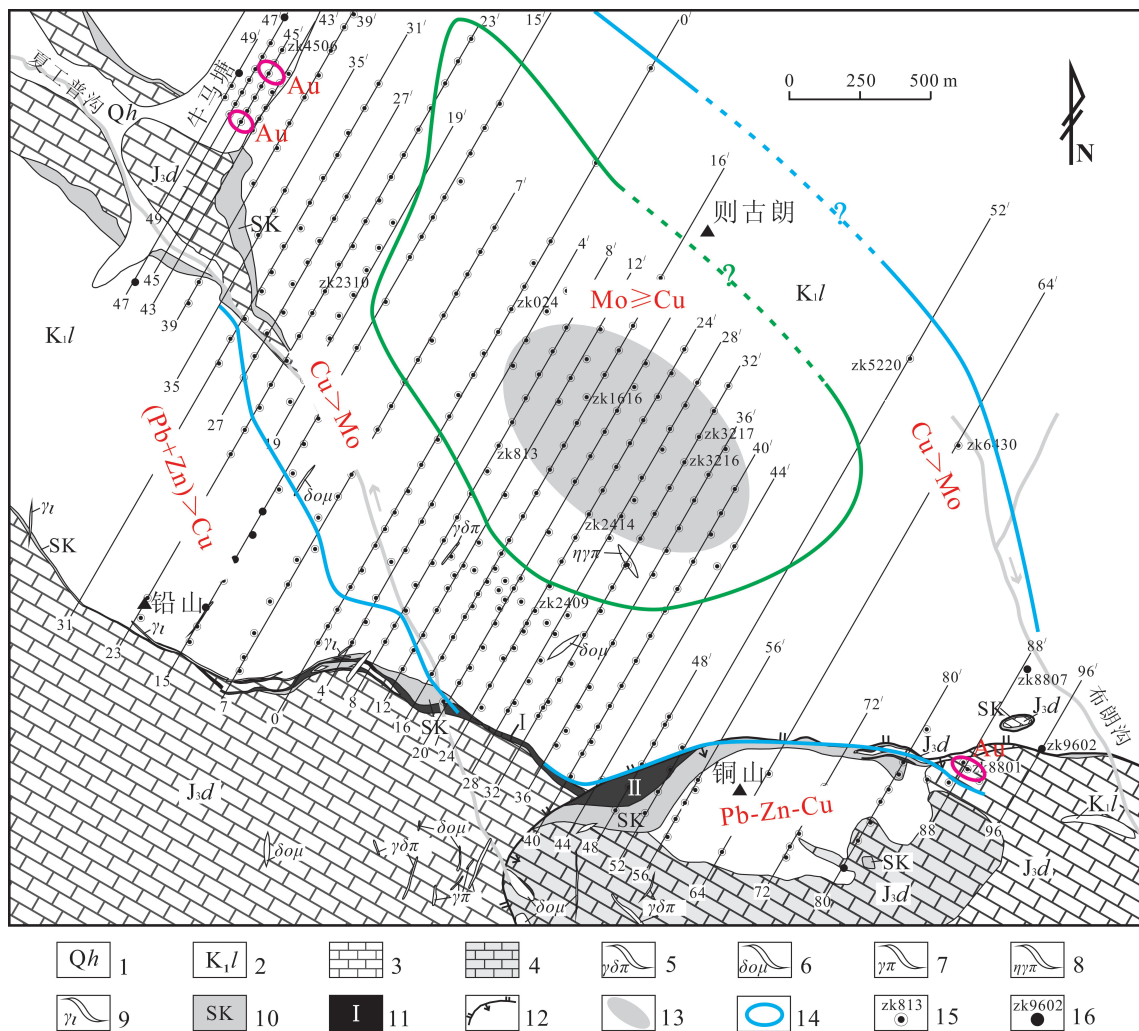


图1 甲玛矿区地质、成矿元素分布简图

1—第四系冲、洪积物;2—林布宗组砂板岩、角岩;3—多底沟组灰岩、大理岩;4—砂卡岩化大理岩;5—花岗岩闪长斑岩;6—石英闪长玢岩;7—花岗岩;8—二长花岗岩;9—细晶岩;10—砂卡岩;11—砂卡岩型矿体及编号;12—滑覆断层;13—深部隐伏斑岩位置;14—砂卡岩矿体的元素分带;15—见矿钻孔及编号;16—未见矿钻孔及编号

Fig.1 Geology and elements zonation of the Jiama ore district

1—Quaternary; 2—Sand-slate and hornfels of Linbuzong Formation; 3—Limestone and hornfels of Duodigou Formation; 4—Skarnized marble; 5—Granodiorite porphyry; 6—Quartz diorite porphyrite; 7—Granite porphyry; 8—Monzonitic granite porphyry; 9—Aplite; 10—Skarn; 11—Skarn ore body and its serial number; 12—Gliding nappe fault; 13—Location of concealed porphyry; 14—Element zonation of skarn ore body; 15—Ore-bearing drill hole and its serial number; 16—Barren drill hole and its serial number

要组成部分。矿区岩浆岩在浅部呈脉岩产出,深部存在含矿斑岩体。岩石主要类型及侵位序次为石英闪长玢岩→花岗斑岩→二长花岗斑岩→花岗闪长斑岩,岩浆岩的主要成岩年龄集中在16.5~15.0 Ma^[10]。含矿斑岩及矽卡岩、角岩中辉钼矿 Re-Os 等时线年龄主要为15.5~14.0 Ma^[11],成岩成矿具有继承性。

受印度板块和欧亚板块碰撞影响,冈底斯—念青唐古拉地体南缘的构造线总体走势近EW向,由于区域长期走滑效应,次级构造线多呈NWW向,以发育若干NWW向的推覆构造系为特征。甲玛矿区受控于由北向南推覆构造及由南向北滑覆构造。矿区推覆构造由一系列倒转褶皱组成:红塔背斜、

牛马塘背斜以及夏工普向斜;矿区滑覆体分布于红塔山—布朗沟—莫古郎沟一带,自南向北,滑覆体可分为:滑覆体后部带、滑覆体中部带和滑覆体前部带3部分,整个滑覆体的出露面积约为4 km²。

2 矿床地质

2.1 矿体特征

甲玛铜多金属矿床以铜为主成矿元素,共生钼、铅、锌,伴生金、银。根据主、共生矿种产出的赋矿围岩的不同,甲玛铜多金属矿床主要由4种矿体类型组成(四位一体):产于矽卡岩中的铜多金属矿体、产于角岩中的铜钼矿体、产于斑岩中的钼(铜)矿体以及产于外围构造破碎带中的独立金矿体(图2)。

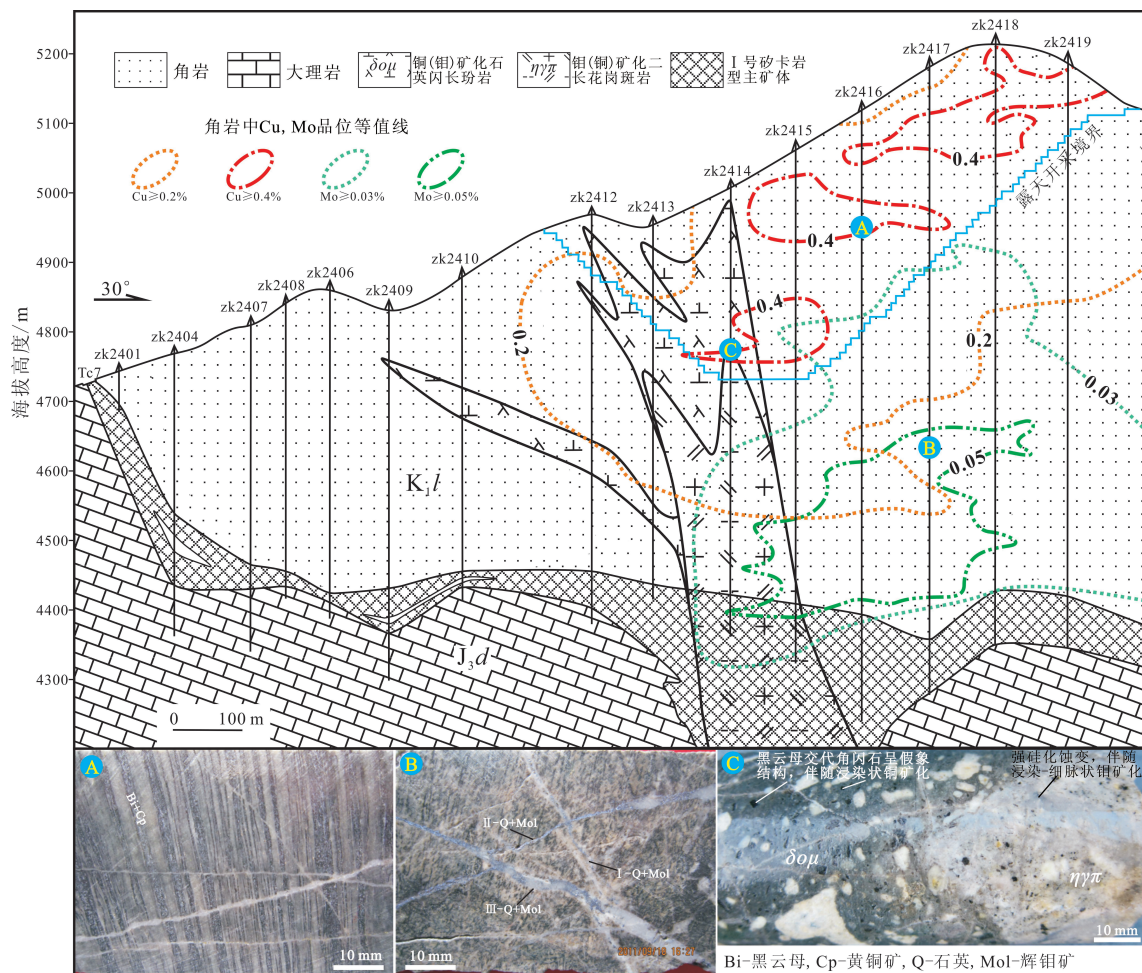


图2 甲玛矿床24号地质剖面图

A—浸染状铜矿化角岩矿石;B—脉状钼矿化角岩矿石;C—早期铜矿化石英闪长玢岩与晚期钼矿化二长花岗斑岩接触带

Fig.2 No. 24 geological section of the Jiama deposit

A—Disseminated copper ores of hornfels; B—Vein molybdenum ores of hornfels; C—Contact zone between early copper mineralized quartz diorite porphyrite and late molybdenum mineralized monzonitic granite porphyry

2.1.1 产于矽卡岩中的铜多金属矿体

矿体主要呈似层状、厚板状产于上覆林布宗组砂板岩、角岩与下覆多底沟组灰岩、大理岩的层间构造带内;矿体走向NW—SE(约 300°),延长达2850 m;矿体倾向NE(30°),延伸超过2500 m(未控制边界);I号主矿体具有2方面的变化特征:(1)倾角变化:矿体受推覆构造控制具有明显的陡→缓→陡的变化特征,上部陡矿体倾角一般介于 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$,位于铅山;中部缓矿体是I号矿体的主体部分,倾角一般小于 20° ,位于夏工普沟以北则古朗以南近 5 km^2 范围内;深部陡矿体位于则古朗以北,倾角一般为 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。(2)厚度变化:矿体受斑岩成矿作用控制由近斑岩接触带至外围(四周),矿体厚度由厚变薄。近斑岩接触带约 1 km^2 范围内,矽卡岩矿体厚度均超过100 m,位于0~40线,其中见矿最厚钻孔zk1218,矽卡岩矿体厚度为328.98 m,铜平均品位0.49%,钼平均品位0.073%;远离接触带向四周矿体厚度变薄,平均约20 m,少数小范围内矿体厚度受构造虚脱部位控制突然变厚,厚度亦可达50~100 m,如zk2310附近。I号矿体平均品位大致为:Cu 0.8%,Mo 0.06%,Pb+Zn 3.0%,Au 0.26 g/t,Ag 15 g/t,矿体内存在多个富矿块段,如zk2310附近、zk2409附近以及zk410附近,其中zk2409孔中单样铜平均品位可高达49.28%、伴生金品位98 g/t。矽卡岩矿石以浸染状、团块状、块状构造为主,镜下主要见典型的黄铜矿-闪锌矿、斑铜矿-黄铜矿形成的固溶体分离结构以及各种交代结构;矿石中主要的矿石矿物包括黄铜矿、斑铜矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼矿、自然金等,脉石矿物主要为矽卡岩矿物和石英。

2.1.2 产于角岩中的铜钼矿体

矿体整体上呈直立筒状产于0~44线则古朗地区以南约 1 km^2 范围内,即位于深部隐伏斑岩以及巨厚矽卡岩矿体之上。矿体走向约 300° ,延长1100 m;近直立,最大见矿厚度孔zk3217,见矿厚度940.29 m,铜平均品位0.26%,钼平均品位0.051%;矿体平均品位大致为:Cu 0.25%,Mo 0.06%,矿体的品位、厚度变化均较稳定;矿体中见有大量穿插的成矿脉岩以及后期无矿脉岩。角岩中具有明显的上铜下钼元素分带现象,铜矿化主要表现为黄铜矿呈浸染状产于条带状黑云母角岩中,与早期顺层硅化、黑云母化关系密切(图2-A);钼矿化主要呈石

英-辉钼矿脉产于强硅化角岩中(图2-B)。

2.1.3 产于斑岩中的钼(铜)矿体

甲玛斑岩矿体为隐伏矿体,赋存海拔标高一般处于4600 m以下。与铜矿化有关的含矿岩体主要为偏中性的石英闪长玢岩,与钼矿化有关的含矿岩体主要为偏酸性的二长花岗斑岩、花岗斑岩(图2-C)。经初步查明,矿体主要呈筒状产于0~40线则古朗地区以南(zk1616~zk3216一带)。矿体走向NW—SE,约 300° ,延长约800 m;近直立,矿体延伸大于600 m(深部未控制),目前已有多个钻孔控制到该斑岩矿体。围绕斑岩矿体接触带,矽卡岩矿体产出厚度都超过100 m,且在岩体一侧有内矽卡岩产出。总体上,石英闪长玢岩中铜的平均品位一般在0.35%左右,伴生钼;二长花岗斑岩中钼的平均品位一般在0.08%左右,伴生铜。

2.1.4 产于外围构造破碎带中的独立金矿体

该类型金矿体基本都产于距离矿区中心斑岩体近 1 km^2 范围外的张性断层中,与赋矿围岩无关,既可产于远端矽卡岩中,也可产于远离岩体的板岩破碎带以及晚期岩脉中,成矿年龄比主成矿期晚约 $1.5\text{ Ma}^{[8]}$ 。矿石中石英晶洞构造发育,矿物组合为自然金+黄铁矿+毒砂+褐铁矿+石英,与金矿化有关的蚀变为硅化、黄铁矿化、碳酸盐化。

2.2 矿化期次

(1) 岩浆期

主要为物质的准备阶段,形成各种岩浆期矿物,主要包括斜长石、钾长石、角闪石、普通辉石、黑云母、白云母、石英等。

(2) 气水-热液矿化期

①矽卡岩-硅酸盐阶段:与成矿斑岩有关的早期气水-热液,主要沿斑岩接触带以及林布宗组与多底沟组层间构造带交代斑岩和大理岩形成内、外矽卡岩。矽卡岩矿物主要有石榴子石、辉石、硅灰石等,少见磁铁矿化;斑岩中见有矽卡岩化与钾长石化。矽卡岩矿物间生成顺序多为同期形成。角岩中顺层交代形成的早期无矿石英脉也视为这一时期的产物。

②退化蚀变阶段:常见早期矽卡岩被晚期矽卡岩穿切、交代或叠加,如绿帘石交代石榴子石保留石榴子石晶形而呈假象结构。退化蚀变矿物主要有闪石类、阳起石、绿帘石、硬石膏等矿物。矽卡岩

中主要的矿化为浸染状黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿化。斑岩中发育钾长石化、绢英岩化等蚀变,有少量浸染状黄铜矿与黄铁矿化。

③石英-铜硫化物阶段:矽卡岩中发生较大规模的浸染状黄铜矿化、斑铜矿化及少量辉铜矿化与辉钼矿化,矿物生成顺序大致为黄铁矿→斑铜矿→黄铜矿→辉铜矿→蓝辉铜矿→辉钼矿,斑铜矿常被黄铜矿、蓝辉铜矿交代呈残余结构;而斑岩、角岩中的黄铜矿化均与黑云母蚀变有关,在斑岩中黑云母交代长石、角闪石斑晶及基质伴随黄铜矿化,角岩中以生成石英-黑云母-黄铜矿为特征。

④石英-铜钼硫化物阶段:矽卡岩中的主成矿阶段,形成浸染-脉状、块状黄铜矿化、斑铜矿化与辉钼矿化;这一时期斑岩与角岩中以大规模的石英-黄铜矿-辉钼矿脉发育为特征,脉体交错,切割关系不明显,视为同时期成矿。

⑤石英-铜铅锌硫化物阶段:矽卡岩中常见团块状、块状黄铜矿化、方铅矿化、闪锌矿化、黝铜矿化;斑岩与角岩中可见近直立的石英-辉钼矿或石英-黄铜矿脉发育,脉体一般宽10 mm左右,脉壁较平直,脉中见空洞,金属硫化物粒度较粗。

⑥石英-金成矿阶段:在矿区外围的板岩、石英闪长玢岩以及矽卡岩中均可形成独立的金矿,与硅化蚀变密切相关,矽卡岩中金矿化还与磁黄铁矿有关。这一时期斑岩和角岩顶部形成少量纯黄铁矿宽脉、方解石-硬石膏-方铅矿脉。

(3) 风化期

这一时期主要为氧化作用,见于近地表、断裂带与老硐中,氧化带深度一般小于30 m。主要矿物有孔雀石、铜蓝、褐铁矿等。矿石构造多为蜂窝状、土状。

3 同位素组成特征

3.1 样品采集与测试

本次用于分析测试的H、O和S同位素样品均采自甲玛铜多金属矿床钻孔岩心。H、O同位素样品主要采集不同期次石英脉中的石英,S同位素样品主要采集矽卡岩矿石中的金属硫化物。样品主要分析方法和步骤:首先将样品经手工进行逐级破碎、过筛至40~60目,再在双目镜下进行挑选,得到纯度均大于99%的单矿物样品5 g以上。将挑纯的

单矿物样品在玛瑙钵内研磨至200目以下,送国家地质测试与分析中心进行分析。S同位素测试过程中将部分挑好的单矿物样品与氧化亚铜按一定比例研磨、混合均匀后,进行氧化反应生成SO₂并用冷冻法收集,然后用MAT251气体同位素质谱仪分析硫同位素组成,测量结果以V-CDT为标准,分析精度优于±0.2‰。H、O同位素测试主要根据天然水中氢同位素锌还原法测定,测试矿物主要为石英。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 根据公式 $1000\ln\alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6/T^{-2} - 2.90$ ^[12] 计算所得。

3.2 氢、氧同位素

氢、氧同位素在推断热液流体来源及演化时是比较有用的^[12, 13]。理论上,钾化蚀变主要为岩浆水,绢云母化、青磐岩化以及泥化蚀变都有不同比例的大气降水参与^[12, 14-16];所以不同蚀变带具有不同的氢、氧同位素组成,但总体上从钾化蚀变向青磐岩化蚀变演化,氢、氧同位素均表现出分馏程度降低,指示热液性质由岩浆水逐步向大气降水转变。甲玛铜多金属矿床斑岩体为隐伏体,其蚀变特征主要反映在上覆地层角岩中,但条带状热液黑云母蚀变(钾化)、绿泥石-绿帘石蚀变以及泥化蚀变常在斑岩上部角岩中叠加在一起,不易区分;尽管如此,通过对不同蚀变中石英脉的氢、氧同位素研究表明,与典型斑岩矿床类似,热液流体总体演化路径仍是岩浆水向大气降水演化(图3)。尽管角岩中蚀变带叠加复杂,氢、氧同位素组成影响热液演化的判别,

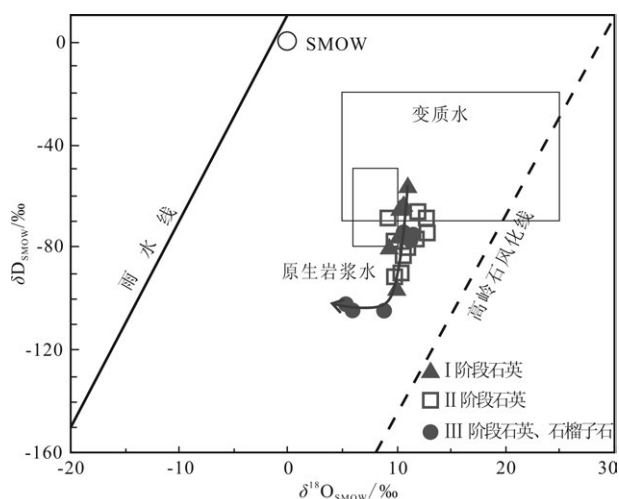


图3 甲玛矿床氢、氧同位素组成及演化(底图据文献[13])
Fig.3 Composition and evolution of hydrogen and oxygen isotopes of the Jiama deposit (Base map after [13])

但是针对斑岩矿床而言,根据不同期次石英脉体的氢、氧同位素组成特征研究流体演化仍是比较有用的。甲玛角岩中石英脉体的期次多达5期以上,最主要、普遍的有2期,其中I阶段基本顺变余层理产出的石英脉体形成最早,具有与之平行的热液黑云母条带,脉壁不规则,见与角岩接触部位有交代现象,此阶段与铜矿化关系最为密切;II阶段石英脉体产状较I阶段陡,一般倾角大于 50° ,脉体宽度变化较大,为1~10 mm,脉壁不规则,以交代、充填为主,与铜、钼矿化关系密切;III阶段石英主要呈团斑状产于矽卡岩中,与II阶段石英脉体形成时间相当或稍晚,与铜、钼矿化均有关。上述3个阶段石英中的氢、氧同位素组成特征见表1,各阶段氢、氧同位

素组成均反映流体由岩浆水向大气降水演化的趋势(图3)。

利用氧同位素填图判断矿区流体来源并进行深部成矿预测的思路,在国内首先是由张理刚提出^[20]。此种方法通过对各种类型热液矿床的实验研究,均获得了较好的效果^[21]。本次氢、氧同位素研究较为系统的针对矿区中部的16号勘探线进行了样品采集。结果表明顺着岩体侵位路径出现了氧同位素的相对低值(图4),根据世界上正常花岗岩类 $\delta^{18}\text{O}$ 鉴于 $7\text{‰}\sim 10\text{‰}$ 的统计结果^[22],图4说明了花岗斑岩侵位过程中有分泌岩浆流体,且以zk1612~zk1616为中心,向两侧演化,导致了氧同位素的递变规律。

表1 甲玛矿床氢、氧同位素组成
Table 1 Composition of hydrogen and oxygen isotopes of the Jiama deposit

脉体期次/阶段	样品号	测定矿物	岩性	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	$\delta\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	资料来源
I	JM4804-235.1	石英	角岩	-79.9	9.4	4.4	361.2	[17]
	JM4804-288.5	石英	角岩	-95.8	10.0	5.2	367.4	[17]
	JM3209-133.3	石英	角岩	-75.3	10.2	5.1	358.3	[17]
	JM1618-592.16	石英	角岩	-65.0	10.6	5.4	354.0	本文
	JM1618-662.46	石英	角岩	-65.0	10.4	5.2	354.0	本文
	M1622-991.1	石英	角岩	-63.0	10.8	5.6	354.0	本文
	M1622-1000.9	石英	角岩	-56.0	11.0	5.8	354.0	本文
II	JM2008-336.3	石英	斑岩	-91.4	9.8	4.1	335.8	[17]
	JM4803-44.8	石英	角岩	-75.4	10.6	4.4	319.5	[17]
	JM1604-160.1	石英	角岩	-74.0	12.9	6.2	305.0	本文
	JM1607-173.8	石英	角岩	-79.0	10.6	3.9	305.0	本文
	JM1608-202.35	石英	角岩	-77.0	11.7	5.0	305.0	本文
	JM1609-105.3	石英	斑岩	-69.0	9.2	2.5	305.0	本文
	JM1616-237.2	石英	角岩	-80.0	11.0	4.3	305.0	本文
	JM1616-389.2	石英	斑岩	-78.0	9.8	3.1	305.0	本文
	JM1622-198.5	石英	角岩	-66.0	12.0	5.3	305.0	本文
	JM1622-347	石英	角岩	-69.0	12.7	6.0	305.0	本文
	JM1622-457.4	石英	角岩	-83.0	10.5	3.8	305.0	本文
	M1622-818.18	石英	角岩	-90.0	10.4	3.7	305.0	本文
III	JMTSPD11-B2	石英	矽卡岩	-104.1	8.7	2.4	317.8	[17]
	JMKSH4	石英	矽卡岩	-74.4	10.5	4.2	317.8	[17]
	JP1-22	石榴子石	矽卡岩	-102.0	5.4	0.9	---	[18]
	JP1-25	石榴子石	矽卡岩	-104.0	6.0	1.5	---	[18]
	JM-105	石英	矽卡岩	-75.0	11.5	3.9	304.0	[19]
	JM-114	石英	矽卡岩	-78.0	11.2	3.6	304.0	[19]

注:“本文”温度为均一温度^[6],其他引用温度为计算温度,“---”表示未测定。

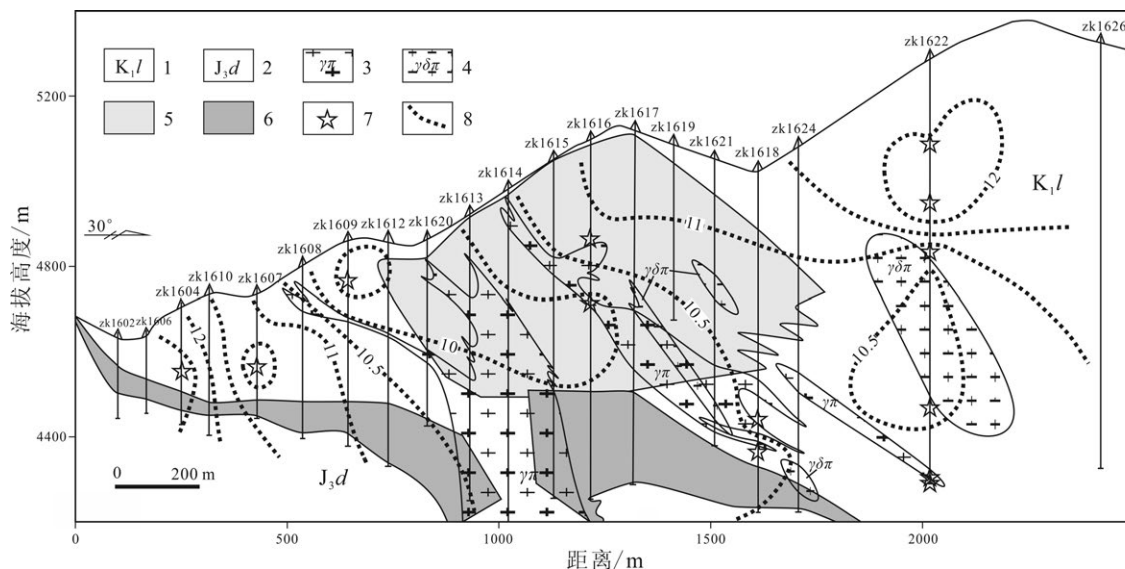


图4 甲玛矿床16号剖面氧同位素组成及演化

1—下白垩统林布宗组砂板岩、角岩;2—上侏罗统多底沟组灰岩、大理岩;3—钼(铜)矿化花岗斑岩;4—花岗闪长斑岩;
5—角岩型铜钼矿体;6—矽卡岩型铜多金属矿体;7—氧同位素样品采集位置;8—氧同位素等值线

Fig. 4 Composition and evolution of oxygen isotopes along No. 16 section in the Jiama deposit

1—Sand-slate and hornfels of Linbuzong Formation; 2—Limestone and marble of Duodigou Formation; 3—Mo (Cu) mineralized granite porphyry; 4—Granodiorite porphyry; 5—Hornfels type Cu-Mo ore body; 6—Skarn type polymetallic copper ore body; 7—Location of oxygen isotopic sample; 8—Oxygen isotopic contours

3.3 硫同位素

对于热液矿床进行硫同位素的研究时,由于硫化物沉淀过程中,矿物与流体间存在硫同位素分馏,分馏的程度取决于成矿的物理化学条件,因此,只有成矿流体中总硫的同位素组成才能更准确地反映成矿的硫源特征^[23]。周云通过对甲玛矿床斑岩中熔融包裹体以及矽卡岩阶段、石英硫化物阶段流体包裹体的详细研究后认为甲玛矽卡岩矿化过程中流体 f_{O_2} 介于-39.5~46.8, PH值5.57~4.84^[6]。很明显,这样的成矿物理化学条件是不利于硫同位素分馏的^[23-24];加之矽卡岩中矿石矿物组合多为金属硫化物(黄铜矿+黄铁矿组合常见),且含有一定量的磁黄铁矿,表明了甲玛矿床成矿流体中硫同位素分馏能力较差,即 $\delta^{34}S_{H,S} \approx \delta^{34}S_{流体}$ 。

根据上述研究,甲玛矿床硫化物的硫同位素组成便可反映成矿流体中硫同位素的特征。当含硫矿物由一个统一的流体相沉淀出来,并且没有突发地质事件打破这个平衡系统时, $\delta^{34}S$ 在含硫矿物间会进行有序分配,含硫矿物中 $\delta^{34}S$ 的含量主要与金属-硫键间结合强度有关。酒井首先指出平衡条件下共生矿物间硫同位素组成上的差异,后来经大量的实际观测和

实验得出含硫化合物及矿物间富 ^{34}S 的顺序为: $SO_4^{2-} > SO_3^{2-} > SO_2 > SCO > Sx \sim H_2S \sim HS^- > S^{2-}$ ^[25-27]。通过对甲玛矿床主要含硫矿物硫同位素的测定,硫化物中硫同位素的富集规律明显:辉钼矿>黄铁矿>磁黄铁矿>黄铜矿>斑铜矿>黝铜矿>方铅矿>辉铜矿(表2,图5),甲玛矿床中硫化物的硫同位素含量变化同酒井总结的顺序完全一致,表明甲玛矿床在主要的气水-热液成矿期成矿作用过程是在平衡状态下进行的,其中黄铁矿和磁黄铁矿中均有一个样品偏差较大,可能为炭质板岩中混入的不纯样品。甲玛硫酸盐矿物分布较少,以硬石膏为主,硬石膏主要与矽卡岩中斑铜矿共生,本次测定的3个硬石膏样品,硫同位素均为正值,0.5‰~1.8‰,表现出了 SO_4^{2-} 对硫同位素的富集作用(表2,图5)。

总的来说,甲玛铜多金属矿床金属硫化物与硫酸盐中硫同位素变化于-13.6‰~12.5‰,变化范围大,达26.1‰,平均值-0.788‰(图6);整个硫同位素组成符合标准正态分布,主要集中在-4.0‰~3.0‰,暗示硫同位素发生过均一化作用;而整个范围变化较宽,表明有少数金属矿物可能吸取了地壳

表2 甲玛矿床硫同位素组成特征
Table 2 Composition of sulfur isotope in the Jiama deposit

序号	样品号	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	资料来源	序号	样品号	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	资料来源
1	甲玛矿床	斑铜矿	-1.2	[18]	38	RY	黄铁矿	-1.3	[6]
2	JMPD12-Y50.3	斑铜矿	-0.5	[17]	39	YXK-1-B1	黄铁矿	-0.7	[6]
3	M2804-413.85	斑铜矿	-0.3	[17]	40	JM-03	黄铜矿	-0.9	[28]
4	JMKSH4	斑铜矿	-1.2	[17]	41	JM-17	黄铜矿	-1.0	[28]
5	JM1609-451	斑铜矿	-0.6	[17]	42	甲玛矿床	黄铜矿	-1.0	[18]
6	JM2802-324.8	斑铜矿	-1.1	[17]	43	JM108	黄铜矿	-0.1	[19]
7	JM1602-104.3	斑铜矿	-2.4	本文	44	JM111	黄铜矿	-0.4	[19]
8	93103	磁黄铁	-16.8	[1]	45	JM114	黄铜矿	-0.3	[19]
9	JM706-156	磁黄铁	-1.2	本文	46	JM6405F-145.2	黄铜矿	-0.2	[17]
10	JM8801-61.1	磁黄铁	-0.4	本文	47	JMPD103-CK2-1	黄铜矿	-1.2	[17]
11	JM8802-253.2	磁黄铁	-0.6	本文	48	JM1602-65.9	黄铜矿	-1.5	本文
12	92024	方铅矿	-3.7	[1]	49	JM1604-236.3	黄铜矿	-1.9	本文
13	92159	方铅矿	-4.4	[1]	50	JM1626-874.8	黄铜矿	-0.9	本文
14	JM-03	方铅矿	-0.3	[28]	51	JM3506-65	黄铜矿	7.7	本文
15	JM-17	方铅矿	-2.4	[28]	52	JM2309-149.8	黄铜矿	-1.4	本文
16	JM106	方铅矿	-2.2	[19]	53	JM2312-261.7	黄铜矿	-2.5	本文
17	JM108	方铅矿	-1.6	[19]	54	JM3601-286.1	黄铜矿	0.3	本文
18	JM111	方铅矿	-2.1	[19]	55	JM3608-713.8	黄铜矿	0.6	本文
19	JMKSH3	方铅矿	-2.2	[17]	56	JM8006-192.5	黄铜矿	-2.6	本文
20	JMKSH8	方铅矿	-2.3	[17]	57	JM2312-134.62	黄铜矿	-3.3	本文
21	JM5602-189.5	方铅矿	-2.5	[17]	58	YXK-30	黄铜矿	-0.7	[6]
22	JMPD103-CK2-162	方铅矿	-2.2	[17]	59	JM09-4	黄铜矿	-1.5	[6]
23	JM3601-286.1	方铅矿	-1.1	本文	60	JM126-3	辉钼矿	-1.6	[19]
24	YXK-20	方铅矿	-4.8	[6]	61	JM1604-119.9	辉钼矿	5.2	本文
25	92119	黄铁矿	-1.6	[1]	62	JM1616-407.9	辉钼矿	12.5	本文
26	92034	黄铁矿	-1.5	[1]	63	JM1622-256.7	辉钼矿	2.4	本文
27	92047	黄铁矿	-4.9	[1]	64	JM1626-695	辉钼矿	8.1	本文
28	92056	黄铁矿	-1.1	[1]	65	JM3216-767.5	辉钼矿	0.0	本文
29	92086	黄铁矿	-1.0	[1]	66	YXK-4-B7	辉钼矿	-3.0	[6]
30	92003	黄铁矿	-1.9	[1]	67	JM3601-286.1	闪锌矿	0.6	本文
31	JM1626-874.8	黄铁矿	1.8	本文	68	JM3106-36.4	辉铜矿	-13.6	本文
32	JM1524-142.4	黄铁矿	-14.1	本文	69	JM1626-804.2	石膏	0.5	本文
33	JM1528-84.6	黄铁矿	1.4	本文	70	JM1626-981.06	石膏	1.8	本文
34	JM705-167.1	黄铁矿	-0.9	本文	71	JM3216-690.4	石膏	1.1	本文
35	JM3216-56.6	黄铁矿	-0.7	本文	72	JM114	黝铜矿	-1.5	[19]
36	JM6405-74	黄铁矿	0.2	本文	73	JM1602-104.3	黝铜矿	-2.5	本文
37	YXK-22	黄铁矿	0.8	[6]	74	JM1524-136.3	黝铜矿	-1.5	本文

注:“本文”数据由国家地质测试中心完成。

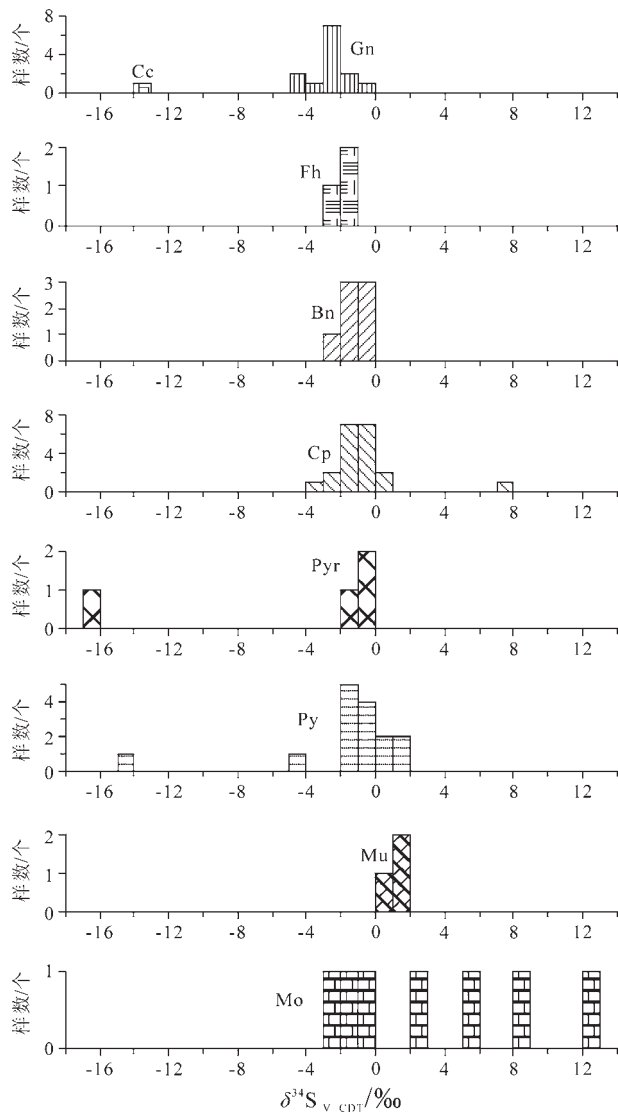


图5 甲玛矿床主要含硫矿物 $\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$ 分布直方图
Cc—辉铜矿; Gn—方铅矿; Fh—黝铜矿; Bn—斑铜矿; Cp—黄铜矿;
Pyr—磁黄铁矿; Py—黄铁矿; Mu—硬石膏; Mo—辉钼矿;
数据源自表2

Fig.5 $\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$ histogram of main sulfides and sulfates of the Jiama deposit

Cc□Chalcocite; Gn□Galena; Fh□Tetrahedrite; Bn□Bornite;
Cp□Chalcopyrite; Pyr□Pyrrhotite; Py□Pyrite; Mu□Muriacite;
Mo□Molybdenite; Data from Table2

中的不同硫源。硫同位素平均值位于0附近,反映了幔源硫源的特征^[23]。

3.4 铅同位素

甲玛铅同位素研究覆盖了矿区主要岩石类型与金属矿物种类,包括多底沟组地层——灰岩、主要岩

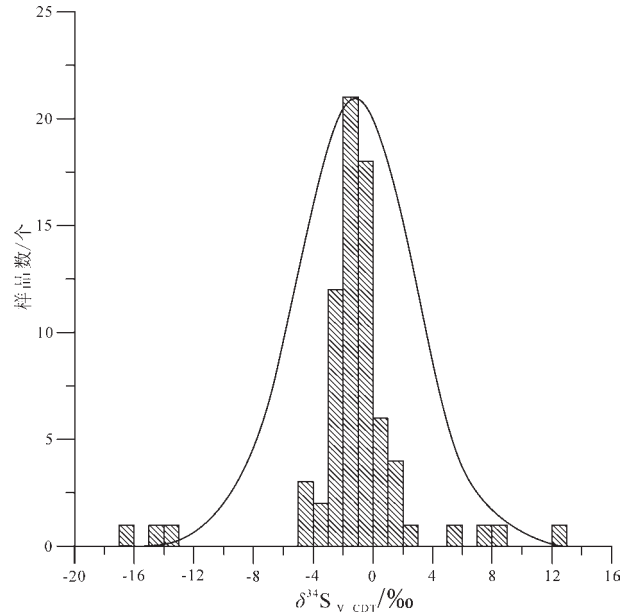


图6 甲玛矿床硫同位素分布直方图

Fig.6 Sulfur isotopic histogram of the Jiama deposit

浆岩——斑岩、金属矿物方铅矿、黄铁矿、黄铜矿等(金属矿物均采自矽卡岩矿石中)。姚鹏等在甲玛地区区域上采集的安山质火山岩^①,认为是弧后盆地基底的产物, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为18.35~18.68, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.56~15.94, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为38.40~38.84;矿区斑岩全岩分析结果: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为17.344~18.765、极差1.421, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.362~15.730、极差0.368, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为37.522~38.997、极差1.475;矿区辉长岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为17.776~18.124, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.502~15.527, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为38.040~38.435;矽卡岩矿石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为18.13~18.27, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.47, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为38.41~38.51;主要铅矿物方铅矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为18.150~18.752、极差0.602, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.480~15.686、极差0.206, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为38.850~39.135、极差0.285;含铅矿物黄铁矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为18.557~18.685, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.597~15.657, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为32.288~38.952;含铅矿物黄铜矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为18.584~18.752, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.615~15.638, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为38.944~39.058;矿区地层灰岩中 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为17.28~17.38, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.21~15.25, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为37.84~37.91(表3)。总的看来,主要铅矿物方铅矿相对于斑岩而言,表现出 ^{208}Pb 的弱富集;黄铜矿与方铅矿的铅同位素组成类似,均较富集 ^{208}Pb ;而黄铁矿中有1件样品 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

①姚鹏. 西藏甲玛铜多金属矿床控矿条件、定位机制及成矿远景预测[R]. 成都: 西南地质调查中心, 2000.

表3 甲玛矿床铅同位素组成特征
Table 3 Composition of lead isotope in the Jiama deposit

样品号	测试矿物/岩石	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	μ	ω	Tb/U	V1	V2	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	资料来源
b2027-1	安山质火山岩	18.350	15.560	38.400	1.179	9.39	36.32	3.74	59.10	50.71	69.47	15.40	31.73	[1]
P56-b	安山质火山岩	18.680	15.940	38.840	1.172	10.11	39.89	3.82	94.83	81.94	106.53	41.28	53.35	[1]
93002	斑岩	18.680	15.670	38.760	1.192	9.57	37.02	3.74	68.76	60.42	80.78	22.16	36.94	[1]
93024	斑岩	18.660	15.730	38.990	1.186	9.69	38.62	3.86	80.33	62.58	86.53	26.44	47.01	[1]
JM-19	斑岩	18.765	15.622	38.997	1.201	9.47	37.05	3.79	72.37	58.08	81.24	18.80	40.73	[28]
JM-21	斑岩	18.753	15.616	38.966	1.201	9.46	36.94	3.78	71.32	57.71	80.55	18.41	39.91	[28]
93002	斑岩	18.680	15.670	38.760	1.192	9.57	37.02	3.74	68.76	60.42	80.78	22.16	36.94	[18]
93024	斑岩	18.680	15.730	38.990	1.188	9.69	38.51	3.85	79.79	62.86	86.57	26.38	46.38	[18]
JM-16	斑岩	18.628	15.626	38.930	1.192	9.49	37.56	3.83	70.19	54.15	76.39	19.22	40.70	[29]
JMY-01	斑岩	18.639	15.620	38.924	1.193	9.48	37.42	3.82	69.18	53.87	75.82	18.76	39.85	[29]
JMY-04	斑岩	18.661	15.618	38.960	1.195	9.47	37.42	3.82	69.25	53.62	75.68	18.56	39.99	[29]
IPD18-B2	斑岩	18.397	15.563	38.558	1.182	9.39	36.73	3.79	61.86	49.84	69.83	15.47	34.63	[30]
TWQ06-R	斑岩	18.392	15.626	38.659	1.177	9.52	37.77	3.84	70.25	53.93	75.96	19.94	40.97	[30]
TSPD-13-CM2	斑岩	18.528	15.644	38.914	1.184	9.54	38.22	3.88	74.26	54.44	77.94	20.78	44.46	[30]
XBS	斑岩	18.405	15.598	38.596	1.180	9.46	37.17	3.80	65.79	52.46	73.26	17.92	37.33	[30]
莫古朗	斑岩	17.344	15.362	37.522	1.129	9.13	36.47	3.87	49.02	31.56	50.07	5.23	30.03	[30]
DYF	斑岩	18.530	15.626	38.876	1.186	9.50	37.88	3.86	71.62	53.39	76.19	19.50	42.38	[30]
DLF	斑岩	18.338	15.578	38.634	1.177	9.43	37.51	3.85	66.75	49.46	71.21	16.72	39.40	[30]
93103	磁黄铁矿	18.936	16.136	39.565	1.174	10.47	43.40	4.01	122.74	93.50	125.55	54.34	75.10	[1]
93159	方铅矿	18.615	15.620	38.947	1.192	9.48	37.64	3.84	70.40	53.28	75.78	18.83	41.23	[1]
92034	方铅矿	18.605	15.605	38.904	1.192	9.45	37.38	3.83	68.25	52.37	74.29	17.81	39.56	[1]
JPI-21	方铅矿	18.150	15.480	38.850	1.173	9.26	38.52	4.03	68.25	36.34	61.41	10.39	45.89	[1]
93159	方铅矿	18.620	15.620	38.950	1.192	9.48	37.63	3.84	70.33	53.32	75.78	18.82	41.15	[1]
92034	方铅矿	18.610	15.610	38.910	1.192	9.46	37.43	3.83	68.72	52.79	74.79	18.14	39.84	[1]

续表3

样品号	测试矿物/岩石	$^{306}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{306}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	μ	ω	Th/U	V1	V2	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	资料来源
JM-03	方铅矿	18.728	15.608	38.961	1.200	9.45	36.97	3.79	70.56	56.37	79.11	17.89	39.77	[28]
JM-17	方铅矿	18.752	15.633	39.047	1.200	9.50	37.42	3.81	73.23	57.15	80.49	19.52	42.07	[28]
JPI-21	方铅矿	18.150	15.480	38.850	1.173	9.26	38.52	4.03	68.25	36.34	61.41	10.39	45.89	[18]
JMKSH3	方铅矿	18.661	15.686	39.135	1.190	9.61	38.77	3.90	79.77	57.34	82.29	23.34	48.47	[17]
JMKSH8	方铅矿	18.603	15.643	39.001	1.189	9.53	38.14	3.87	74.17	54.43	77.99	20.48	44.34	[17]
JMK5602-189.5	方铅矿	18.640	15.669	39.086	1.190	9.58	38.53	3.89	77.60	56.17	80.59	22.20	46.88	[17]
JMY-03	方铅矿	18.728	15.608	38.961	1.200	9.45	36.97	3.79	70.56	56.37	79.11	17.89	39.77	[29]
JMY-17	方铅矿	18.752	15.633	39.074	1.200	9.50	37.52	3.82	73.88	56.85	80.49	19.52	42.79	[29]
YXK-20	方铅矿	18.588	15.634	39.010	1.189	9.51	38.18	3.89	73.97	53.38	77.09	19.89	44.57	[6]
YXK-22	黄铁矿	18.685	15.657	32.288	1.193	9.55	11.17	1.13	-87.87	130.93	79.52	21.23	-136.94	[6]
RY	黄铁矿	18.557	15.597	38.939	1.190	9.44	37.71	3.87	69.69	50.65	73.42	17.38	41.59	[6]
YXK-1-B1	黄铁矿	18.600	15.628	38.952	1.190	9.50	37.82	3.85	71.69	53.69	76.53	19.44	42.29	[6]
JM-03	黄铜矿	18.725	15.615	38.987	1.199	9.46	37.16	3.80	71.11	56.09	78.94	18.35	40.47	[28]
JM-17	黄铜矿	18.752	15.638	39.058	1.199	9.51	37.51	3.82	73.50	57.14	80.49	19.85	42.36	[28]
JMY-03	黄铜矿	18.725	15.615	38.987	1.199	9.46	37.16	3.80	71.11	56.09	78.94	18.35	40.47	[29]
JMY-17	黄铜矿	18.752	15.638	39.058	1.199	9.51	37.51	3.82	73.50	57.14	80.49	19.85	42.36	[29]
YXK-30	黄铜矿	18.607	15.625	38.944	1.191	9.49	37.72	3.85	71.02	53.62	76.25	19.21	41.69	[6]
JM09-4	黄铜矿	18.584	15.620	38.956	1.190	9.49	37.85	3.86	71.48	52.75	75.71	18.92	42.46	[6]
SP2(2)	灰岩	17.280	15.250	37.910	1.133	8.91	37.49	4.07	50.25	16.77	39.08	-2.67	36.79	[18]
SP-15	灰岩	17.380	15.210	37.840	1.143	8.81	36.16	3.97	41.62	15.19	34.88	-6.03	29.24	[18]
YXK-4-B7	辉钼矿	18.484	15.547	39.740	1.189	9.35	40.81	4.22	86.29	36.61	68.40	14.08	62.55	[6]
JM2307-210.7	辉长岩	17.776	15.502	38.040	1.147	9.35	37.52	3.88	61.52	42.60	63.44	13.40	37.39	[30]
PD24	辉长岩	18.124	15.527	38.435	1.167	9.35	37.41	3.87	63.33	44.59	66.00	13.82	38.15	[30]
JPI-23	砂卡岩矿石	18.130	15.470	38.510	1.172	9.24	37.14	3.89	59.68	39.02	60.41	9.75	36.83	[18]
JPI-26	砂卡岩矿石	18.270	15.470	38.410	1.181	9.22	35.95	3.77	53.22	41.97	60.53	9.30	29.57	[18]

注:①姚鹏.西藏甲玛铜多金属矿床控矿条件、定位机制及成矿远景预测[R].成都:西南地质调查中心,2000.

仅为32.288,可能为沉积成因;磁黄铁矿相对方铅矿更富集²⁰⁷Pb,辉钼矿表现出对²⁰⁸Pb最为富集;矿区地层岩石铅同位素组成较斑岩和金属矿物均低。

铅源的判别是矿床学需要解决的重要问题之

一。通过对²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb的判别分析(图7),甲玛矿区铅来源主要是造山带和下地壳铅,有铅源混合的现象。进一步通过对铅同位素参数分析(图8),铅来源主要为造山带、

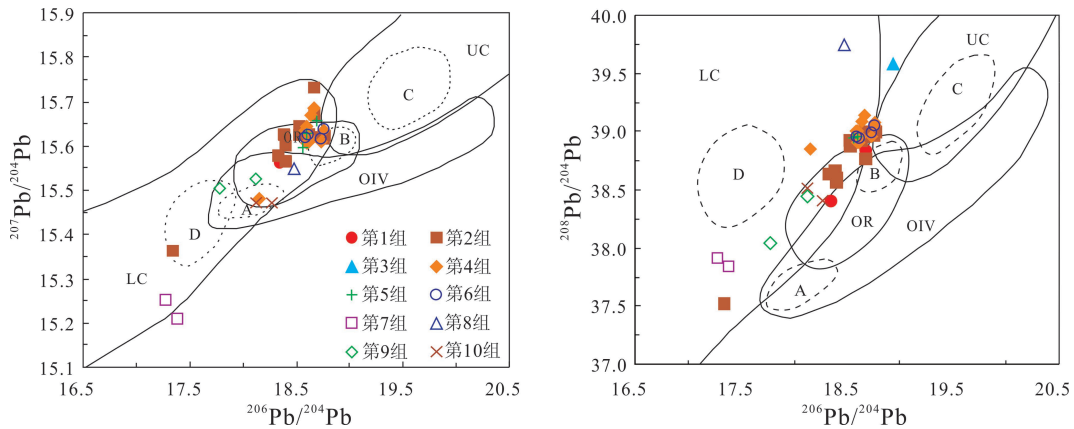


图7 甲玛矿床铅来源判别(底图据文献[31])

OIV—洋岛火山岩;OR—造山带;UC—上地壳;LC—下地壳;A, B, C, D分别为各区域中样品相对集中区;第1组—安山质火山岩;第2组—斑岩;第3组—磁黄铁矿;第4组—方铅矿;第5组—黄铁矿;第6组—黄铜矿;第7组—灰岩;第8组—辉钼矿;第9组—辉钼矿;第10组—矽卡岩矿石

Fig.7 Discriminant diagrams for lead origin in the Jiama deposit (base map after [31])

OIV—Ocean island volcanic rock; OR—Orogen; UC—Upper crust; LC—Lower crust; A, B, C, D show concentration areas in various regions; The first group—Andesitic volcanic rock; The second group—Porphyry; The third group—Pyrrhotite; The fourth group—Galena; The fifth group—Pyrite; The sixth group—Chalcopyrite; The seventh group—Limestone; The eighth group—Molybdenite; The ninth group—Gabbro; The tenth group—Skarn ores

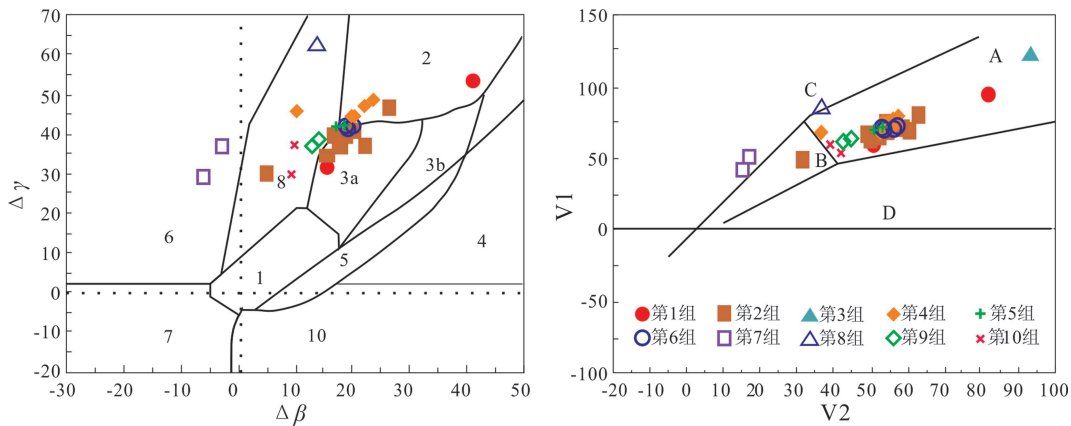


图8 甲玛矿床铅同位素参数判别图(底图据文献[32, 33])

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—退变质铅;A—华南;B—扬子;C—华北;D—北疆;第1组—安山质火山岩;第2组—斑岩;第3组—磁黄铁矿;第4组—方铅矿;第5组—黄铁矿;第6组—黄铜矿;第7组—灰岩;第8组—辉钼矿;第9组—辉钼矿;第10组—矽卡岩矿石

Fig.8 Discriminant diagrams of lead isotopic parameters in the Jiama deposit (base map after [32, 33])

1—Mantle lead; 2—Upper crust lead; 3—Subduction lead of upper crust and mantle (3a—magmatism; 3b—sedimentation); 4—Chemical sedimentation lead; 5—Sea floor—exhalation sedimentation lead; 6—Mesometamorphism lead; 7—Hypozonal metamorphism lead; 8—Orogenic lead; 9—Upper crust of ancient shale lead; 10—Retrograde metamorphism lead; A—South China; B—Yangtze block; C—North China; D—North Xinjiang; The first group—Andesitic volcanic; The second group—Porphyry; The third group—Pyrrhotite; The fourth group—Galena; The fifth group—Pyrite; The sixth group—Chalcopyrite; The seventh group—Limestone; The eighth group—Molybdenite; The ninth group—Gabbro; The tenth group—Skarn ores

上地壳以及与岩浆作用有关的上地壳与地幔混合的俯冲带铅;而灰岩主要为中深变质作用铅,说明采集的样品灰岩实际上可能已经蚀变为大理岩或有大理岩化。

3.5 硅同位素

硅在地球中的丰度仅次于氧,但其在地质学领域的应用却要滞后氢、氧同位素近30年^[34]。已有的硅同位素研究资料表明,其分布可以较氢、氧同位素更精细地确定矿床的成因类型^[34,35]。杜光树等通过测定甲玛矿区矽卡岩以及石英脉中硅同位素组成^[1],认为甲玛矽卡岩为喷流沉积成因;但是,根据丁梯平等对多种岩、矿石类型硅同位素分布范围的统计结果^[34],典型喷流沉积产物的硅同位素基本都小于0甚至小于-1,如“黑烟囱”硅质沉淀、条带状含铁石英岩等;而花岗岩类硅同位素一般位于0附近,变化范围较小,中值接近于0(图9)。甲玛矽卡岩的硅同位素在-0.2‰~0.3‰,中值接近于0,变化范围极小(图9),且已测矿区脉岩硅同位素为0^[1],因此,

甲玛矽卡岩很显然是和花岗岩类成矿有关。

4 流体、成矿物质来源讨论

4.1 岩浆—热液过渡证据

对于热液矿床而言,岩浆中有流体出溶,是成矿的必要条件。岩浆侵位过程中流体的出溶一般通过多次的“沸腾作用”完成,流体在出溶过程中会留下一些地质现象和证据,是辨别流体出溶作用是否存在的窗口。甲玛斑岩—矽卡岩矿床中已发现岩浆热液过渡证据包括:①显微晶洞构造,即矿物中存在相连的显微空腔;②单向固结结构,即UST结构,主要发育在不同期次岩体的接触带或岩体与角岩的接触带;③溶蚀港湾状石英,即斑岩中的石英斑晶多具有溶蚀现象,是由于富F流体粘附在石英斑晶上,对其进行化学腐蚀,形成溶蚀蠕虫结构;④萤石等代表高挥发分活动矿物的大量存在;⑤熔融包裹体周边分布有稀疏的流体包裹体群,也是流体从岩浆中出溶的重要证据^[36-39]。

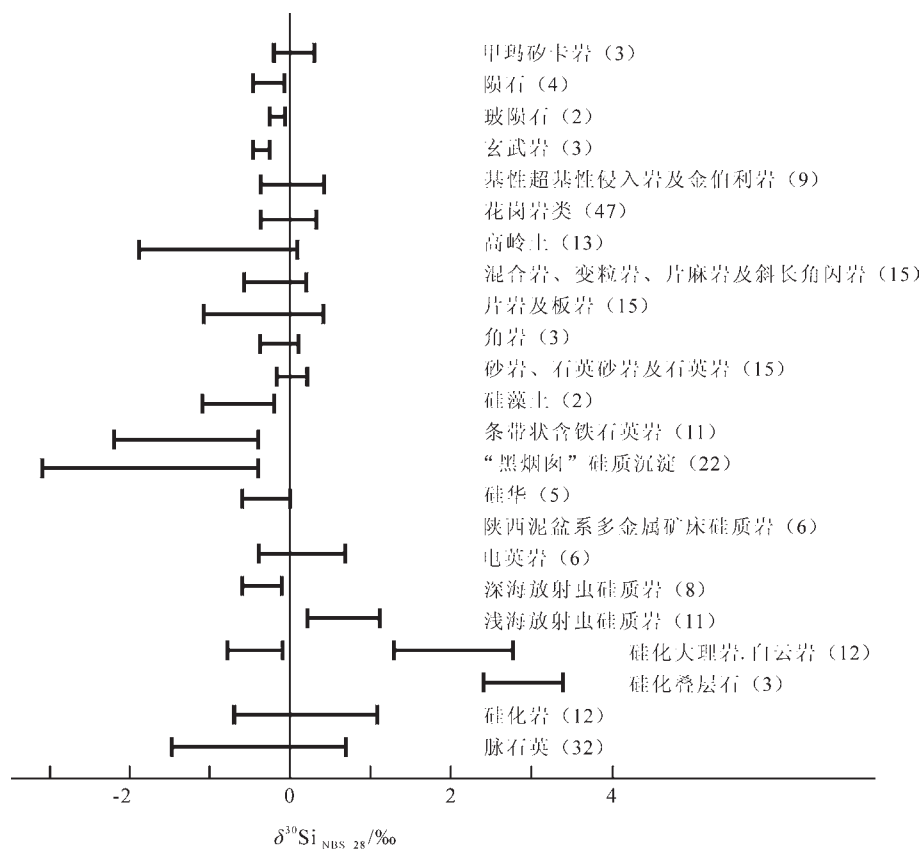


图9 自然界硅同位素分布特征(底图据文献[34])

Fig.9 Silicon isotopic distribution in nature (base map after [34])

4.2 流体的源区

岩浆中热液流体的出溶为成矿提供前提条件,而不同期次的矿化石英-硫化物脉体的氢、氧同位素组成表明成矿确实与岩浆水有关,即矿化由早期至晚期,流体组成由岩浆水向大气降水演化,表明晚期成矿过程中大气降水参与的重要性^[40]。同时,流体包裹体的平面均一温度分布研究表明,甲玛流体源(中心)位于zk1616~zk3216一带^[6],与成矿元素分带(以zk1616~zk3216为中心,向外依次出现Mo±Cu±Au±Ag → Cu+Mo+Au+Ag → Cu±Mo+Au+Ag → Pb+Zn+Cu+Au+Ag → Au±Ag±Cu)(图1)以及剖面岩石地球化学异常分布(zk1616主要为W, Sn, Mo, Bi等高温元素富集,向外逐渐过渡为中温及低温元素组合)完全一致^[41, 42]。上述研究结果充分表明,甲玛矿床成矿流体源(中心)位于zk1616~zk3216一带(图1)。

4.3 成矿物质来源

对于与岩浆热液成矿有关的矿床,成矿物质与成矿流体基本是统一的,当然并不排除流体在运移过程中可以从围岩中萃取部分成矿物质。根据甲玛矿床S、Si同位素研究结果,成矿物质主要来源于岩浆岩,由此,最终物质来源的追溯则集中在岩浆岩的起源问题上。根据铅同位素示踪结果,甲玛矿区斑岩与矿石的铅同位素组成基本一致,主要为造山带以及与岩浆作用有关的壳幔混合铅来源为主(图8),介于雅鲁藏布江蛇绿岩和喜马拉雅片麻岩和花岗岩的铅同位素组成之间,构成拉萨地块岩浆岩的铅同位素组成(图10-A、B)。

甲玛矿床所处的冈底斯成矿带后碰撞环境下花岗岩的铅同位素与主碰撞期花岗岩(以玉龙矿带为主)的铅同位素组成特征有所不同,主碰撞期花岗岩全岩的铅主要为上地壳来源,而后碰撞期花岗

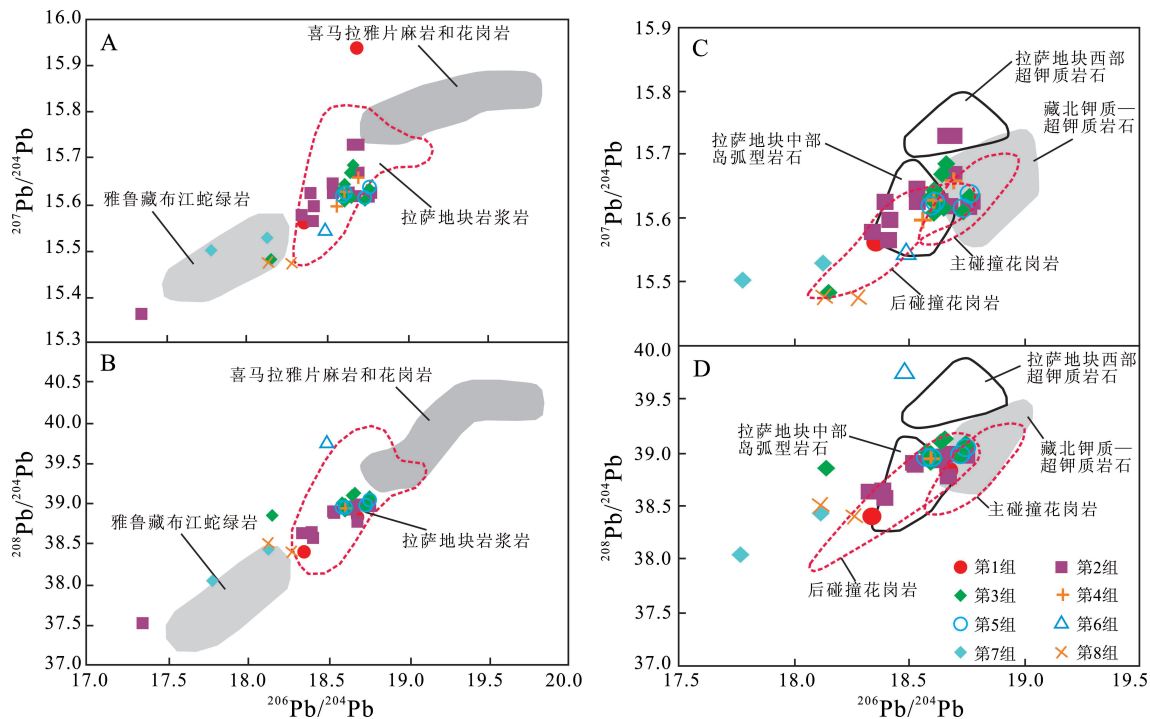


图10 甲玛矿床铅同位素特征

阴影部分范围引自文献[43];主碰撞花岗岩数据引自文献[44];后碰撞花岗岩数据引自表3以及文献[28, 43];

第1组—安山质火山岩;第2组—斑岩;第3组—磁黄铁矿;第4组—方铅矿;第5组—黄铁矿;

第6组—黄铜矿;第7组—灰岩;第8组—辉钼矿

Fig.10 Lead isotopic characteristics of the Jiama deposit

Limits of the shaded part after [43]; Collisional granite data after [44]; Post-collisional granite data after Table 3 and [28, 43];

The first group—Andesitic volcanic; The second group—Porphyry; The third group—Pyrrhotite; The fourth group—Galena;

The fifth group—Pyrite; The sixth group—Chalcopyrite; The seventh group—Limestone; The eighth group—Molybdenite

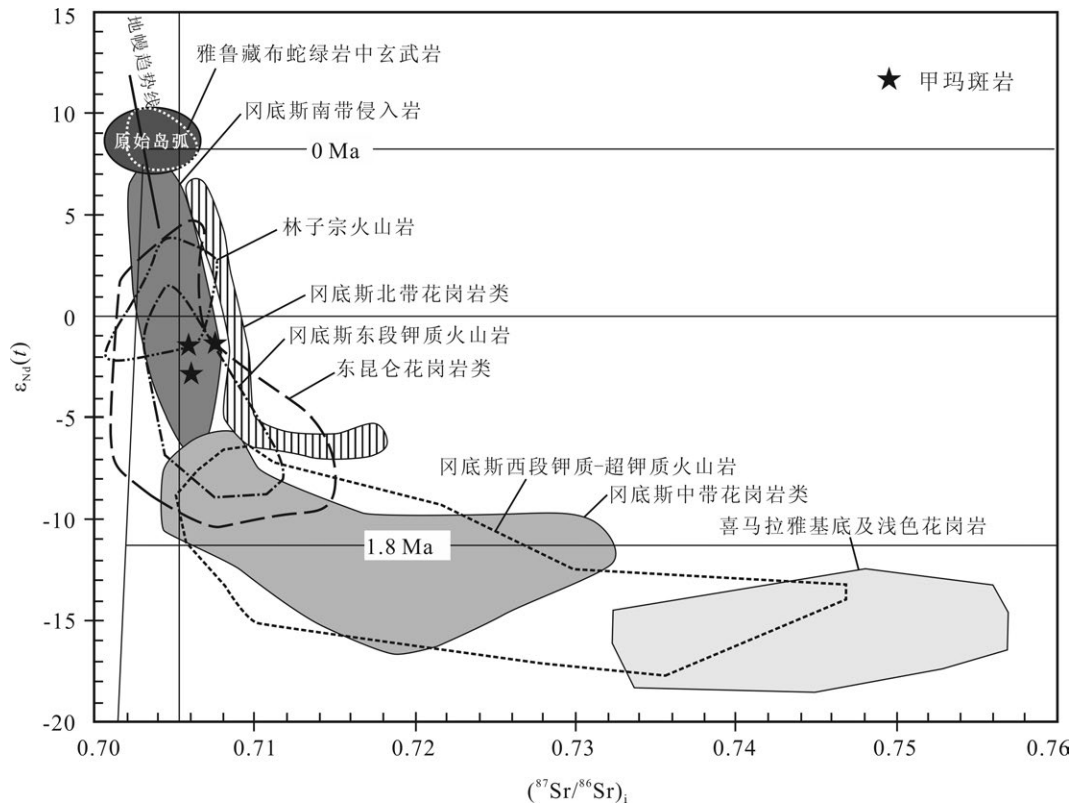


图 11 甲玛斑岩 Sr-Nd 同位素特征(底图据文献[45], 甲玛数据引自文献[50])

Fig. 11 Sr-Nd isotopic characteristics of the Jiama porphyry (base map after [45], Jiama data after [50])

岩中铅主要为壳幔混合来源(图 10-C、D);亦即主碰撞期成矿物质来源以壳源为主,后碰撞期成矿物质的幔源成分明显增多。这说明在印度-欧亚板块碰撞过程中,不同碰撞造山阶段形成了不同起源的花岗岩, Sr-Nd 同位素提供了同样的证据^[45](图 11)。主碰撞期花岗岩主要源于板块主碰撞过程中地壳加厚形成的上地壳岩基;而后碰撞期花岗岩主要源于洋壳断离导致岩石圈上涌、地壳减薄,通过伸展断裂上升定位形成的岩浆房^[46-48]。此外,从矿区尺度来讲,在中酸性岩浆房的演化过程中,基性岩浆的混合作用为矿床铜、金成矿提供了重要的成矿物质来源^[49]。

5 结论

根据上述研究,甲玛矿床各类同位素地球化学特征对矿床流体、成矿物质来源的约束可以归纳为:

(1) 岩浆-热液过渡证据存在,矿化由早至晚,流体由岩浆水向大气降水增加方向演化;同时,氧

同位素填图以及流体包裹体均一温度平面分布表明成矿流体源位于矿区 zk1616-zk3216 一带。

(2) 甲玛矽卡岩形成的主要物理化学条件为中等氧逸度偏酸性条件,不利于硫同位素分馏,硫化物中硫同位素的富集规律:辉钼矿 > 黄铁矿 > 磁黄铁矿 > 黄铜矿 > 斑铜矿 > 黝铜矿 > 方铅矿 > 辉铜矿,表明矿床整体的成矿作用达到平衡,硫化物是在最主要的一期成矿过程中形成;同时,硫化物的硫同位素总体位于 0 附近,单一峰值,说明了硫的岩浆来源特征;此外,硅同位素组成亦表明硅的来源主要为矿区花岗岩类。

(3) 甲玛矿区铅来源主要是造山带和下地壳铅,有铅源混合的现象。进一步通过对铅同位素参数分析,铅来源主要为造山带、上地壳以及与岩浆作用有关的上地壳与地幔混合的俯冲带铅,与后碰撞环境下地壳减薄、地幔上涌导致的壳幔混合作用有关。

致谢: 本文的完成首先要感谢多吉院士、栗登逵高级工程师、刘鸿飞教授级高级工程师的指导,

以及秦志鹏博士、周云博士等同志的帮助,同时感谢匿名审稿专家提出的宝贵修改意见!感谢西藏华泰龙矿业开发有限公司为笔者的野外工作和室内工作提供了资助。

参考文献(References):

- [1] 杜光树, 姚鹏, 潘凤雏, 等. 喷流成因矽卡岩与成矿——以西藏甲玛铜多金属矿床为例[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1998: 1–132.
Du Guangshu, Yao Peng, Pan Fengchu, et al. Sedimentation–Exhalation Skarn and Ore–Formation Exemplified by Jiama Copper–Polymetallic Deposit, Xizang[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Publishing House, 1998: 123–132(in Chinese with English abstract).
- [2] 潘凤雏, 邓军, 姚鹏, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床矽卡岩的喷流成因[J]. 现代地质, 2002, 16(4): 360–364.
Pan Fengchu, Deng Jun, Yao Peng, et al. The eruptive origins of copper and multi–metal deposits in the skarns in Jiama, Tibet[J]. Geoscience, 2002, 16(4): 360–364(in Chinese with English abstract).
- [3] 钟康惠, 李磊, 周慧文, 等. 西藏甲玛—卡军果推、滑覆构造系特征[J]. 地球学报, 2012, 33(4): 411–423.
Zhong Kanghui, Li Lei, Zhou Huiwen, et al. Features of Jiama—Kajunguo thrust–gliding nappe tectonic system in Tibet[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2012, 33(4): 411–423(in Chinese with English abstract).
- [4] 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.
Tang Juxing, Wang Denghong, Wang Xiongwu, et al. Geological features and metallogenic model of the Jiama copper–polymetallic deposit in Tibet[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2010, 31(4): 495–506 (in Chinese with English abstract).
- [5] 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): 72–80.
Li Yongsheng, Lv Zhicheng, Yan Guangsheng, et al. Isotopic characteristics of S, Pb, H and O of Jiama copper–polymetallic ore deposit, Tibet and their significance[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(4): 72–80 (in Chinese with English abstract).
- [6] 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, 2010.
Zhou Yun. Characteristic and Evolution of Ore–forming Fluids from Jiama Polymetallic Copper Deposit, Mozhuogongka County, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010(in Chinese with English abstract).
- [7] 郑文宝. 西藏甲玛铜多金属矿床成矿模式与找矿模型[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
Zheng Wenbao. The Study on Metallogenic Model and Prospecting Pattern for Jiama Polymetallic Copper Deposit, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012(in Chinese with English abstract).
- [8] 应立娟. 西藏甲玛铜多金属矿床成矿机制研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.
Ying Lijuan. The Metallogeny of the Jiama Copper Polymetallic Deposit in Tibet[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2012(in Chinese with English abstract).
- [9] 西藏地矿局. 西藏自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 160–194.
Bureau of geology and mineral. Regional Geology of Xizang (Tibet) Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 160–194(in Chinese with English abstract).
- [10] 秦志鹏, 汪雄武, 多吉, 等. 西藏甲玛酸性侵入岩LA–ICP–MS锆石U–Pb定年及成矿意义[J]. 矿床地质, 2011, 30(2): 339–348.
Qin Zhipeng, Wang Xiongwu, Duo Ji, et al. LA–ICP–MS U–Pb zircon age of intermediate–acidic intrusive rocks in Jiama of Tibet and its metallogenic significance[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(2): 339–348(in Chinese with English abstract).
- [11] 应立娟, 王登红, 唐菊兴, 等. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿不同矿石中辉钼矿Re–Os同位素定年及其成矿意义[J]. 地质学报, 2010, 84(8): 1165–1174.
Ying Lijuan, Wang Denghong, Tang Juxing, et al. Re–Os dating of molybdenite from the Jiama copper polymetallic deposit in Tibet and its metallogenic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(8): 1165–1174(in Chinese with English abstract).
- [12] Taylor H P Jr. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits[C]//Barnes H L(ed.), Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 1979, 2: 236–277.
- [13] Taylor H P Jr. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. Economic Geology, 1974, 69: 843–883.
- [14] Sheppard S M F and Taylor H P Jr. Hydrogen and oxygen isotope evidence for the origins of water in the Boulder batholith and the Butte ore deposits, Montana[J]. Economic Geology, 1974, 69: 926–946.
- [15] Dilles J H, Solomon G C, Taylor H P Jr, et al. Oxygen and hydrogen isotope characteristics of hydrothermal alteration at the Ann–Mason porphyry copper deposit, Yerington, Nevada[J]. Economic Geology, 1992, 87: 44–63.
- [16] USGS. Porphyry Copper Deposit Model[R]. Scientific Investigations Report 2010–5010–B, 2010, 1–158.
- [17] 李永胜. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及矿床成因探讨[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
Li Yongsheng. Geological Characteristics and Genesis of the Jiama Polymetallic Copper Deposit in Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009(in Chinese with English abstract).
- [18] 姚鹏, 郑明华, 彭勇明, 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): 469–

478.
Yao Peng, Zheng Minghua, Peng Yongming, et al. Sources of ore-forming materials and the genesis of the Jiama copper and polymetallic deposit in Gandise island-arc belt, Xizang[J]. Geological Review, 2002, 48(5): 469-478(in Chinese with English abstract).
- [19] 余宏全, 丰成友, 张德全, 等. 西藏冈底斯铜矿带甲马砂卡岩型铜多金属矿床与驱龙斑岩型铜矿流体包裹体特征对比研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 690-696.
She Hongquan, Feng Chengyou, Zhang Dequan, et al. Study on the fluid inclusions from Jiama skarn copper polymetallic deposit and Qulong porphyry copper deposit in Gandese copper belt, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(3): 690-696(in Chinese with English abstract).
- [20] 张理刚, 陈振胜, 刘敬秀, 等. 两阶段水-岩同位素交换理论及其勘查应用[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 1-173.
Zhang Ligang, Chen Zhensheng, Liu Jingxiu, et al. Two Stages Water-Rock Theoretical Interaction and Exploration Application[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 1-173(in Chinese with English abstract).
- [21] 储雪蕾. 氢氧同位素探矿的理论与实践—推荐一本新书《两阶段水-岩同位素交换理论及其勘查应用》[J]. 矿床地质, 1996, 15(1): 95-96.
Chu Xuelei. Theory and practice of hydrogen and oxygen isotope—recommend a new book 《Two stages water-rock theoretical interaction and exploration application》[J]. Mineral Deposits, 1996, 15(1): 95-96(in Chinese).
- [22] 丁梯平. 氢氧同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1980: 1-171.
Ding Tiping. Hydrogen and Oxygen Isotopic Chemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980: 1-171(in Chinese).
- [23] 赵瑞. 硫同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 1-145.
Zhao Rui. Sulfur Isotopic Chemistry[M]. Beijing: Science Press, 1980: 1-145(in Chinese).
- [24] 陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹. 同位素地质年代学与地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 262-276.
Chen Yuelong, Yang Zhongfang, Zhao Zhidan. Isotopic Geochronology and Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 262-276(in Chinese).
- [25] Sakai H. Fractionation of sulfur isotopes in nature[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1957, 12(2): 150-169.
- [26] Sakai H. Isotopic properties of sulfur compounds in hydrothermal processes[J]. Geochemical Journal, 1968, 2(1): 29-49.
- [27] Bachinski D J. Bond strength and sulfur isotopic fractionation in coexisting sulfides[J]. Economic Geology, 1969, 64(1): 56-65.
- [28] 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): 356-364.
Qu Xiaoming, Hou Zengqian, Huang Wei. Is gangdese porphyry copper belt the second "Yulong" copper belt? [J]. Mineral Deposits, 2001, 20(4): 356-364(in Chinese with English abstract).
- [29] Qu X M, Hou Z Q, Khin Z, 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: 205-223.
- [30] 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, 2010.
Qin Zhipeng. The Diagenesis and Mineralization of Adakite-like Rock form Jiama Copper Polymetallic Deposits of Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010(in Chinese with English abstract).
- [31] Zartman R E and Doe B R. Plumbotectonics—the model[J]. Tectonophysics, 1981, 75: 135-162.
- [32] 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: 1-311.
Zhu Binquan. Isotopic Theory and Application in Earth Science—Discuss Crust-Mantle Evolution of Chinese Continent[M]. Beijing: Science Press, 1998: 1-311(in Chinese).
- [33] 朱炳泉. 地球化学省与地球化学急变带[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 12.
Zhu Binquan. Geochemical Province and Steep Zones[M]. Beijing: Science Press, 2001: 12(in Chinese).
- [34] 丁梯平, 蒋少涌, 万德芳, 等. 硅同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-102.
Ding Tiping, Jiang Shaoyong, Wan Defang, et al. Silicon Isotopic Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 1-102(in Chinese).
- [35] 李延河, 丁梯平, 万德芳. 硅同位素动力学分馏的实验研究及地质应用[J]. 矿床地质, 1994, 13(3): 282-288.
Li Yanhe, Ding Tiping, Wan Defang. Experimental study of silicon isotope dynamic fractionation and its geological application[J]. Mineral Deposits, 1994, 13(3): 282-288 (in Chinese with English abstract).
- [36] Soloviev S G. Geology, mineralization, and fluid inclusion characteristics the Kenu W-Mo skarn and Mo-W-Cu-Au alkali porphyry deposit, Tien Shan, Kyrgyzstan[J]. Economic Geology, 2011, 106: 193-222.
- [37] Mysen B O. Speciation and mixing behavior of silica-saturated aqueous fluid at high temperature and pressure[J]. American Mineralogist, 2010, 95: 1807-1816.
- [38] 周小栋, 郭坤一, 陈国光, 等. 宁芜北部脉状铜矿床地质与成矿流体特征研究[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1622-1633.
Zhou Xiaodong, Guo Kunyi, Chen Guoguang, et al. Geological and ore-forming fluid characteristics of vein type copper deposits in northern Ningwu area[J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1622-1633(in Chinese with English abstract).
- [39] Zhong J, Chen Y J, Pirajno F, et al. Geology, geochronology, fluid inclusion and H-O isotope geochemistry of the Luoboling porphyry Cu-Mo deposit, Zijinshan orefield, Fujian province,

- China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 57: 61–77.
- [40] 向君峰, 裴荣富, 叶会寿, 等. 南泥湖—三道庄钨(钨)矿床成矿流体的碳氢氧同位素研究及其启示[J]. *中国地质*, 2012, 39(6): 1778–1789.
- Xiang Junfeng, Pei Rongfu, Ye Huishou, et al. Source and evolution of the ore-forming fluid in the Nannihu–Sandaozhuang Mo(W) deposit Constraints from C–H–O stable isotope data[J]. *Geology in China*, 2012, 39(6): 1778–1789(in Chinese with English abstract).
- [41] 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): 775–782.
- Zheng Wenbao, Chen Yuchuan, Song Xin, et al. Element distribution and geological significance of Jiama copper-polymetallic deposit, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(5): 775–782(in Chinese with English abstract).
- [42] 郑文宝, 陈毓川, 唐菊兴, 等. 西藏墨竹工卡县甲玛矿区筒状矿体的发现及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2011, 30(2): 207–218.
- Zheng Wenbao, Chen Yuchuan, Tang Juxing, et al. Discovery and geological significance of tubular ore body in the Jiama field, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 2011, 30(2): 207–218(in Chinese with English abstract).
- [43] 赵志丹, 莫宣学, 董国臣, 等. 青藏高原Pb同位素地球化学及其意义[J]. *现代地质*, 2007, 21(2): 265–272.
- Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, Dong Guocheng, et al. Pb isotopic geochemistry of Tibetan plateau and its implications[J]. *Geoscience*, 2007, 21(2): 265–272(in Chinese with English abstract).
- [44] 马鸿文. 西藏玉龙斑岩铜矿带花岗岩类与成矿[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990: 123–131.
- Ma Hongwen. Petrology and Mineralization of Granites in Yulong Porphyry Copper Belt, Tibet[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1990: 123–131(in Chinese with English abstract).
- [45] 莫宣学, 赵志丹, 喻学惠, 等. 青藏高原新生代碰撞—后碰撞火成岩[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 12–152.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Yu Xuehui, et al. Cenozoic Collisional—Postcollisional Igneous Rocks in the Tibetan Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 12–152 (in Chinese with English abstract).
- [46] Richards J P. Post-subduction porphyry Cu–Au and epithermal Au deposits—Products of remelting of subduction modified lithosphere[J]. *Geology*, 2009, 37: 247–250.
- [47] 赵文津. 大型斑岩铜矿成矿的深部构造岩浆活动背景[J]. *中国地质*, 2007, 34(2): 179–205.
- Zhao Wenjin. Deep tectono-magmatic setting for metallogenesis of large porphyry copper deposits[J]. *Geology in China*, 2007, 34(2): 179–205(in Chinese with English abstract).
- [48] 侯增谦, 钟大赉, 邓万明. 青藏高原东缘斑岩铜钼金成矿带的构造模式[J]. *中国地质*, 2004, 31(1): 1–14.
- Hou Zengqian, Zhong Dalai, Deng Wanming. A tectonic model for porphyry copper-molybdenum-gold metallogenic belts on the eastern margin of the Qinghai Tibet Plateau[J]. *Geology in China*, 2004, 31(1): 1–14(in Chinese with English abstract).
- [49] 苟正彬, 汪雄武, 彭慧娟, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床岩浆混合作用及对成矿的贡献[J]. *中国地质*, 2012, 39(1): 156–169.
- Gou Zhengbin, Wang Xiongwu, Peng Huijuan, et al. The role of magma mingling in mineralization of the Jiama copper-polymetallic deposit in Tibet[J]. *Geology in China*, 2012, 39(1): 156–169 (in Chinese with English abstract).
- [50] 秦志鹏, 汪雄武, 唐菊兴, 等. 西藏甲玛过铝质花岗岩的地球化学特征及成因意义[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(1): 76–84.
- Qin Zhipeng, Wang Xiongwu, Tang Juxing, et al. Geochemical characteristics and their implications of peraluminous granite in the Jiama deposit, Tibet[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 2011, 38(1): 76–84 (in Chinese with English abstract).

Geochemical constraints on the source of metallogenic fluids and materials in the Jiama polymetallic Cu deposit, Tibet

GUO Wen-bo¹, ZHENG Wen-bao^{2,3}, TANG Ju-xing²,
YING Li-juan², WANG Yi-yun¹, LIN-Bin¹

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Located in central eastern Gangdise metallogenic belt, the Jiama polymetallic copper deposit is a giant porphyry-skarn type deposit characterized by the highest level of exploration and complex ore-forming elements and ore body types. Previous researchers have already completed a lot of research work, which includes rock and ore-controlling structure, deposit geology, geochemistry, model of the deposit and some other aspects; nevertheless, researches on metallogenic mechanism of the deposit remain very insufficient. The source of fluid materials lacks systematic study and the information lacks comprehensive rearrangement. Based on reading lots of research reports and summarizing the data obtained by previous studies, the authors carried out the oxygen isotope mapping and collected necessary additional samples of sulfur isotope along No. 16 exploration line which served as the typical cross section. A comprehensive study reveals that there existed magmatic fluid exsolution in the deep-seated porphyry concealed under the Jiama ore district, and hydrogen and oxygen isotopic combination suggests that from the early stage to the late stage of mineralization, fluid evolved gradually from the magmatic water to the atmospheric water. In addition, the oxygen isotope mapping and the distribution of uniform temperature plane of fluid inclusions demonstrate that the source of ore-forming fluids was located around drill hole zk1616~zk3216 in this ore district. S, Si isotopic combination implies that the materials were mainly derived from the ore-forming magmatic rocks, and the study of lead isotope further indicates that the metallogenic materials came from the collision environment in Gangdise; the crustal thinning and the crust-mantle upwelling led to the mixture of the crust and the mantle. Based on the study of geochemistry, the authors probed into the source of fluid and metallogenic materials, and the results obtained have laid a solid foundation for the study of the genesis and the metallogenic mechanism of the Jiama ore deposit.

Key words: isotopic geochemistry; source of fluids; source of metallogenic materials; porphyry-skarn deposit; Jiama

About the first author: GUO Wen-bo, male, born in 1976, doctor candidate, majors in structural geology; E-mail: guowenbo@cdu.cn.

About the corresponding author: ZHENG Wen-bao, male, born in 1982, post-doctoral researcher, engages in the study and exploration of ore deposits; E-mail: zhengwenbao2009@sina.com.