

西藏甲玛铜多金属矿硫同位素地球化学研究

应立娟¹⁾, 郑文宝¹⁾, 王巍平¹⁾, 冷秋锋²⁾, 丁 帅²⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2) 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059

摘 要: 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床位于冈底斯成矿带东段, Cu、Mo、Pb+Zn、Au、Ag 均达大型规模, 并伴生 Co、Bi、W、Ni 等多金属矿化。黄铜矿、斑铜矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿、辉铜矿等硫化物为主要的矿石矿物, 硫酸盐矿物以硬石膏为主, 含矿岩浆岩以花岗斑岩、二长花岗斑岩和花岗闪长斑岩为主。通过对甲玛矿区主要硫化物和硬石膏的硫同位素分析, 并结合前人研究, 甲玛矿区硫化物的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $-13.6\text{‰} \sim +12.5\text{‰}$, 平均值 -1.33‰ (样品数 86)、硬石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 值 $+0.5\text{‰} \sim +1.8\text{‰}$, 平均值 $+1.13\text{‰}$ (样品数 3)、岩浆岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值 $-0.7\text{‰} \sim -0.2\text{‰}$, 平均值 -0.5‰ (样品数 3), 与岩浆硫 $\delta^{34}\text{S}$ 值 $0 \pm 3\text{‰}$ 一致。闪锌矿-方铅矿-黄铜矿矿物对的硫同位素地质温度计, 显示成矿温度为 $408 \sim 433^\circ\text{C}$, 说明其形成时硫同位素处于平衡状态。冈底斯成矿带上的驱龙等斑岩型矿床中硫化物和岩浆岩硫同位素, 均具有 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围小, 平均值接近 0 值, 与岩浆硫特征一致的特点, 反映了甲玛铜多金属矿床具有矽卡岩-斑岩型矿床硫同位素地球化学特征, 硫以岩浆来源为主。

关键词: 硫同位素; 硫化物; 斑岩; 甲玛; 冈底斯

中图分类号: P618.41; P597.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.04.12

Stable Isotopes Geochemistry of the Jiama(Gyama) Copper Polymetallic Deposit in Tibet

YING Li-juan¹⁾, ZHENG Wen-bao¹⁾, WANG Wei-ping¹⁾, LENG Qiu-feng²⁾, DING Shuai²⁾

1) MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Geoscience Institute, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059

Abstract: The Jiama(Gyama) copper polymetallic deposit in Maizhokunggar County of Tibet is located in the eastern part of the Gangdise metallogenic belt. The metal resources of Cu, Mo, Pb+Zn, Au and Ag have all reached the scale of the large-size deposit in association with Co, Bi, W and Ni. The main ore minerals include chalcopyrite, bornite, molybdenite, galena, sphalerite, tetrahedrite and chalcocite, with anhydrite being the main sulfate mineral. Granite monzogranite and granodiorite porphyries constitute the dominant ore-bearing magmatic rocks. Sulfur isotope analyses in combination with other available data indicate that $\delta^{34}\text{S}$ values of sulfur isotope in sulfides are $-13.6\text{‰} \sim +12.5\text{‰}$, with an average of 1.33‰ for 86 samples, those in anhydrite are $+0.5\text{‰} \sim +1.8\text{‰}$, with an average of $+1.13\text{‰}$ for 3 samples, and those in porphyries are $-0.7\text{‰} \sim -0.2\text{‰}$ with an average of -0.5‰ for 3 samples, which are consistent with the magmatic sulfur value ($0 \pm 3\text{‰}$). Sulfur isotopic geothermometer of mineral pairs such as sphalerite-galena-chalcopyrite shows the temperature of $408 \sim 433^\circ\text{C}$, indicating that sulfur isotopes in these minerals were in an equilibrium state during their formation. $\delta^{34}\text{S}$ values of

本文由国家 973 项目(编号: 2011CB403103)、中央公益性行业科研专项(编号: 200911007-02)和成矿作用与资源评价重点实验室开放基金项目联合资助。

收稿日期: 2012-04-26; 改回日期: 2012-05-14。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 应立娟, 女, 1981 年生。助理研究员。主要从事矿床学研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。电话: 010-68999527。E-mail: biyuntian518@sina.com。

表 1 甲玛硫同位素分析样品
Table 1 Samples for S isotope analysis in the Jiama(Gyama) ore deposit

测试对象	围岩	样品数
黄铜矿	角岩(2)、矽卡岩(5)、硅化角岩破碎带中石英脉(1)、大理岩中硫化物脉(1)	9
黄铁矿	硅化角岩(4)、碳质板岩(1)、细晶花岗斑岩裂隙充填物(1)、矽卡岩石英脉(1)	7
辉钼矿	角岩	5
磁黄铁矿	板岩、绢云母板岩和角岩破碎带中石英脉	3
黝铜矿	硅灰石矽卡岩	2
斑铜矿	硅灰石矽卡岩	1
方铅矿	大理岩中矿脉	1
辉铜矿	角岩中石英脉	1
闪锌矿	大理岩中矿脉	1
硬石膏	硅化角岩	3
总计	板岩(3)、角岩(17)、矽卡岩(9)、大理岩(3)、斑岩(1)	33

石英脉中黄铁矿。本次分析样品以硫化物为主, 包括甲玛矿区主要的各类硫化物和硬石膏(图 2)。其中, 3 组矿物对各产于同一块标本, 硅灰石矽卡岩样品中的斑铜矿-黝铜矿、硅化角岩中黄铜矿-黄铁矿、大理岩中硫化物脉中黄铜矿-方铅矿-闪锌矿。

硫同位素分析由中国地质科学院矿产资源研究所同位素室完成。硫化物以 Cu_2O 作氧化剂制备测试样品, 在真空系统和高温条件下, 硫化物与 Cu_2O 反应, 硫全部转化为纯净的 SO_2 气体, 测定其 ^{34}S 与 ^{32}S 的比值。硫酸盐与 V_2O_5 在真空系统和高温条件下反应, 硫酸盐中的硫转化为纯净的 SO_2 。由 MAT-233 质谱仪测定, 采用 CDT 国际标准, 分析精度 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

3 分析结果

甲玛矿区硫化物的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $-13.6\text{‰} \sim +12.5\text{‰}$, 平均值 -1.33‰ (样品数 86), 硫酸盐(硬石膏)样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化小, $+0.5\text{‰} \sim +1.8\text{‰}$, 平均值 $+1.13\text{‰}$ (样品数 3; 图 3)。黄铜矿、磁黄铁矿样品中均有个别 $\delta^{34}\text{S}$ 值为较大的负值 (-16.8‰) 或正值 ($+7.7\text{‰}$) (表 2), 但平均值 -1‰ 和 -0.73‰ 。辉钼矿以正值为主, $\delta^{34}\text{S}$ 值域较大, 极差达 16‰ , 平均值为 $+3.37\text{‰}$ 。辉铜矿仅一个值, 为 -13.6‰ 。硫化物与硬石膏的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值与花岗斑岩、二长花岗斑岩全岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 ($-0.7\text{‰} \sim -0.2\text{‰}$) 接近。

将甲玛矿区 16 号勘探线上的硫化物和硬石膏样品的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值投于剖面图上(图 4), 垂向上, $\delta^{34}\text{S}$ 值呈减小的趋势。矽卡岩中黄铜矿、斑铜矿和黝铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值相近, $-1.9\text{‰} \sim -2.5\text{‰}$, 尤其是钻孔 ZK1602 中 104.3 m 处共生的斑铜矿和黝铜矿, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -2.4‰ 和 -2.5‰ 。辉钼矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值均为正值, 且变化较大 ($+2.4\text{‰} \sim +12.5\text{‰}$), 充填角岩中裂隙或产

于角岩石英脉中。钻孔 ZK1626 样品虽均为角岩, 但 $\delta^{34}\text{S}$ 值垂向上仍呈减小的趋势。

4 讨论

4.1 硫的来源

甲玛矿区硫化物的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值 -1.33‰ (样品数 86), 硫酸盐(硬石膏)平均值 $+1.13\text{‰}$ (样品数 3), 花岗斑岩和二长花岗斑岩平均值 -0.5‰ (样品数 3), 均接近 0 值, 与岩浆硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 ($0 \pm 3\text{‰}$) 相似 (Ohmoto, 1986; Ripley, 1986)。

磁黄铁矿个别样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为较大负值 (-16.8‰), 产于顶板的地层中, 可能属于地层沉积过程中形成的早期硫化物, 但板岩石英脉中磁黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-1.2\text{‰} \sim -0.4\text{‰}$, 与岩浆硫特征一致, 属于后期的热液产物。辉钼矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值以正值为主, 极差达 16‰ , 平均值为 $+3.37\text{‰}$, 明显富集重硫。黄铜矿个别样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为较大正值 (JM3506-65, $+7.7\text{‰}$), 在硅化角岩中呈细脉浸染状, 但其他黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围小, 平均值 -1.0‰ 。辉铜矿仅一个值, 为 -13.6‰ , 为角岩石英脉中产物。黄铜矿、辉钼矿、辉铜矿的个别 $\delta^{34}\text{S}$ 异常值, 可能与热液蚀变引起的物理化学条件改变有关, 导致流体中硫同位素分馏的差异。

黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $-4.85\text{‰} \sim +1.8\text{‰}$, 平均值 -1.15‰ 。矽卡岩中半自形-它形细粒浸染状黄铁矿和少量它形黄铜矿, 黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+0.2\text{‰}$, 硅化角岩中它形浸染状黄铁矿与黄铜矿, 黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -1.0‰ , 硅化角岩中粗粒黄铁矿-磁黄铁矿, 黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -1.5‰ (图 2), 但 3 件样品均与石英关系密切。甲玛黄铁矿中硫同位素的分馏可能受围岩、矿物组合和不同阶段热液作用的影响, 但影响



图 2 甲玛硫同位素分析矿物及结果(%)

Fig. 2 Photographs of minerals for sulfur isotope analysis and analytical results

Anh-硬石膏; Cp-黄铜矿; Gn-方铅矿; Mol-辉钼矿; Py-黄铁矿; Pyr-磁黄铁矿; Sph-闪锌矿; Tra-黝铜矿
Anh-anhydrite; Cp-chalcopyrite; Gn-galena; Mol-molybdenite; Py-pyrite; Pyr-pyrrhotite; Sph-sphalerite; Tra-tetrahedrite

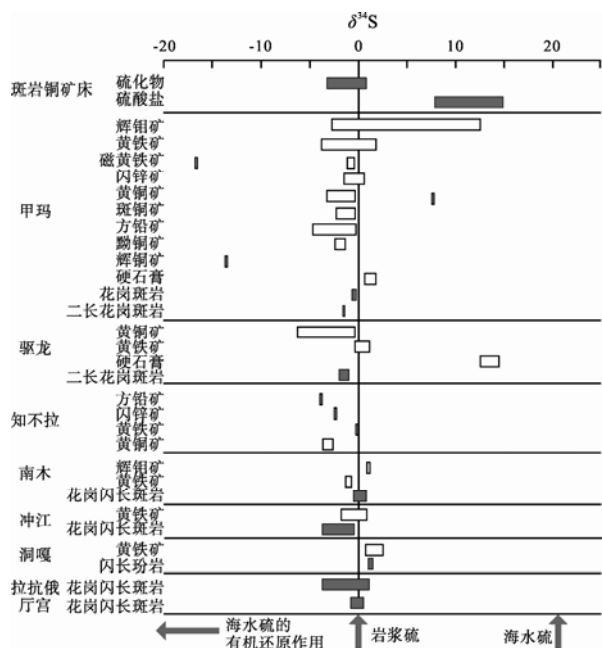


图3 冈底斯斑岩铜矿床硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值

Fig. 3 $\delta^{34}\text{S}$ values for sulfur-bearing minerals/rocks from porphyry copper deposits in Gangdise

不大, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 值仍反映其岩浆来源。

甲玛硬石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(+0.5‰~+1.8‰)明显低于其他斑岩型矿床中的硬石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 值, 如驱龙斑岩型铜矿为+12.5‰~+14.4‰、美国 Arizona 的 Mineral Park 斑岩型铜矿为+8.0‰~+22.7‰、加拿大 Quebec 的 Mines Gaspé 斑岩型铜矿为+6.6‰~+8.1‰、智利 El Salvador 斑岩铜矿为+8.2‰~+12.1‰、安徽罗斑岩型铁矿+15.2‰~+19.3‰ (Field et al., 1976; Shelton et al., 1982; Lang et al., 1989; Zheng, 1991; 孟祥金等, 2006)。热液成矿体系中硫化物-硫酸盐之间的硫同位素分馏过程是复杂

多变的, $\delta^{34}\text{S}$ 值的变化受 T、 $f\text{O}_2$ 、pH 值、流体中各相的硫同位素组成和形成时体系封闭性质等因素的制约(Ohmoto, 1979; 郑永飞, 2001)。由于未对甲玛矿床硫化物-硬石膏矿物开展硫同位素分析, 目前还不能对成矿流体中硫化物-硬石膏形成时硫同位素的平衡问题展开讨论。但甲玛硬石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 值与硫化物、岩浆岩一致, 指示其与岩浆的成因联系。

甲玛的含矿斑岩: 花岗斑岩和二长花岗斑岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值均变化较小, -0.7‰~+0.2‰, 集中于 0 值附近。冈底斯成矿带上, 驱龙、南木、冲江、洞嘎、拉抗俄和厅宫的花岗斑岩和花岗闪长斑岩均变化范围小, 集中于-3.8‰~+1.1‰之间。甲玛与其他矿床中硫同位素的特征显示, 硫化物与岩浆岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值相似, 集中于 0 值附近, 显示了岩浆来源, 反映了硫化物矿石矿物与花岗质斑岩的密切成因联系。

综合甲玛硫化物、硫酸盐和岩浆岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值特征, 认为甲玛矿床硫同位素来源于岩浆, 但可能存在极少量与地层沉积同期形成的具较大负值的磁黄铁矿, 且后期热液蚀变可能引起硫化物富集重硫。

4.2 地质温度计

共生硫化物之间的 $\delta^{34}\text{S}$ 分馏作为温度的函数, 可用于作为硫同位素温度计, 通过测定共生矿物的温度亦可判断同位素是否达到平衡(Rollinson, 1993)。甲玛、驱龙和知不拉矿床中硫同位素分析的硫化物样品中, 存在 4 种矿物对, 12 件样品, 分别计算其温度(表 3)。方铅矿-黄铜矿组合的矿物对计算获得的温度较高, 345~533℃, $\Delta\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 0.3‰~1.7‰, 但 JM-03 矽卡岩中黄铜矿-方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值估算的温度值为负值, 两矿物形成时的硫同

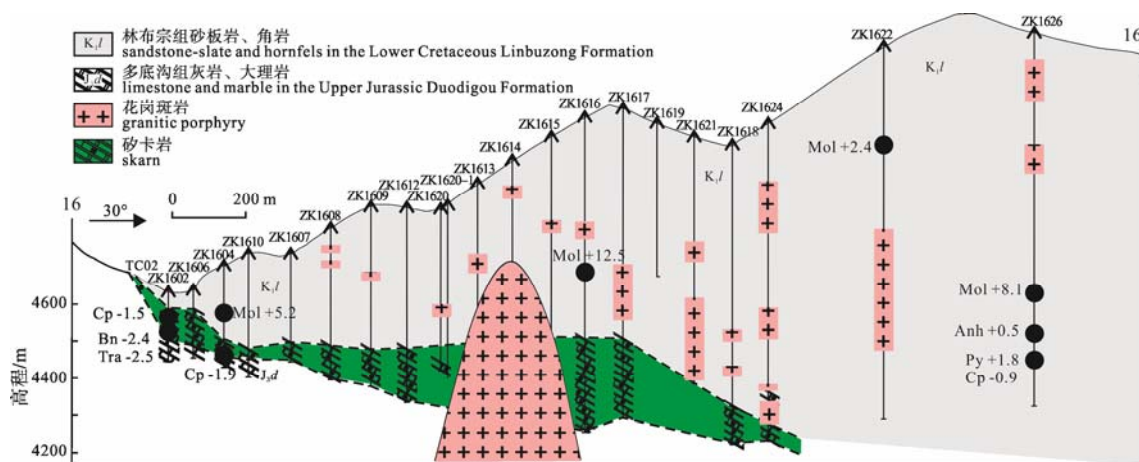


图4 甲玛 16 线剖面图及样品分布与 $\delta^{34}\text{S}$ 值(‰)

Fig. 4 Geological section along No. 16 exploration line and distribution of samples and their $\delta^{34}\text{S}$ values(‰)

Anh-硬石膏; Cp-黄铜矿; Mol-辉钼矿; Py-黄铁矿; Tra-黝铜矿; Bn-斑铜矿

Anh-anhydrite; Cp-chalcopyrite; Mol-molybdenite; Py-pyrite; Tra-tetrahedrite; Bn-bornite

表 2 甲玛硫同位素分析结果及其他矿区硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值
Table 2 $\delta^{34}\text{S}$ values of S isotope in samples from Jiama(Gyama) and neighboring deposits

矿床	样品	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	平均值/ ‰	样品数	资料来源
甲玛	辉钼矿	-2.98~+12.5	3.37	7	本文; 杜光树等, 1998; 姚鹏等, 2002; 李永胜, 2009; 周云, 2010
甲玛	黄铜矿	-3.3~+0.6; +7.7	-1.0(未包括+7.7)	19	
甲玛	斑铜矿	-2.4~-0.3	-1.04	7	
甲玛	辉铜矿	-13.6	-13.6	1	
甲玛	黝铜矿	-2.5~-1.5	-2.17	3	
甲玛	方铅矿	-4.78~-0.27	-2.84	19	
甲玛	闪锌矿	-1.59~+0.6	-0.16	3	
甲玛	黄铁矿	-4.85~+1.8	-1.15	23	
甲玛	磁黄铁矿	-16.8; -1.2~-0.4	-0.73(未包括-16.8)	4	本文; 杜光树等, 1998
甲玛	硬石膏	+0.5~+1.8	1.13	3	本文
甲玛	花岗斑岩	-0.7~-0.2	-0.45	2	曲晓明等, 2001
甲玛	二长花岗斑岩	-0.6	-0.6	1	Qu et al., 2007
驱龙	黄铁矿	-0.3~+1.1	0.4	5	余宏全等, 2006
驱龙	黄铜矿	-6.3~-0.3	-2.09	8	孟祥金等, 2006; 余宏全等, 2006
驱龙	硬石膏	+12.5~+14.4	13.4	4	孟祥金等, 2006
驱龙	二长花岗斑岩	-2.1~-1.1	-1.6	3	
知不拉	方铅矿	-3.9	-3.9	1	余宏全等, 2006
知不拉	闪锌矿	-2.5	-2.5	1	
知不拉	黄铁矿	-0.1	-0.1	1	
知不拉	黄铜矿	-3.7~-2.8	-3.25	2	
南木	辉钼矿	+0.9~+1.2	1.05	2	曲晓明等, 2001
南木	黄铁矿	-0.8~-1.4	-0.73	3	
南木	花岗闪长斑岩	-0.6~+0.8	0.1	2	
洞嘎	黄铁矿	+0.7~+2.4	1.68	5	
洞嘎	闪长玢岩	+1.0~+1.3	1.15	2	
拉抗俄	花岗闪长斑岩	-3.8~+1.1	-1.53	3	
厅宫	花岗闪长斑岩	-0.9~-0.5	-0.7	2	孟祥金等, 2006
冲江	黄铁矿	-1.9~+0.9	-0.87	3	
冲江	花岗闪长斑岩	-3.8~-0.4	-1.68	4	

位素可能不平衡。大理岩中闪锌矿-方铅矿-黄铜矿脉(JM3601-286.01, 图 2), 计算的温度分别为 408℃、412℃、433℃, 反映了硫化物形成时硫同位素达到了平衡, 可作为地质温度计, 显示了上述硫化物的形成温度集中于 408~433℃, 处于中高温阶段。甲玛矿床中闪锌矿-黄铜矿固溶体结构发育, 该固溶体结构矿物对的形成温度在 350~500℃之间, 与硫同位素估算的温度一致。而黄铁矿-黄铜矿矿物对计算的温度变化较大, 硫化物矿物对形成时硫同位素可能受到扰动, 或是不同矿床中不同阶段形成的矿物组合。

甲玛矿床中各硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值(‰)为: 辉

钼矿(+3.37)>黄铁矿(-1.15)、磁黄铁矿(-0.73)、闪锌矿(-0.16)、黄铜矿(-1.0)、斑铜矿(-1.04)>方铅矿(-2.84)、黝铜矿(-2.17)>辉铜矿(-13.6), 与硫同位素平衡状态下, $\delta^{34}\text{S}$ 值在硫化物中的序次基本一致, 取决于硫-金属键和矿物晶体特征等化学性质(Li et al, 2006)。大理岩闪锌矿-方铅矿-黄铜矿脉中, 闪锌矿(+0.6‰)>黄铜矿(+0.3‰)>方铅矿(-1.1‰), $\delta^{34}\text{S}$ 值的变化与共生矿物组合结晶的顺序一致, 显示了形成时硫同位素处于平衡状态。

4.3 矿床成因

甲玛多金属矿床属于矽卡岩-斑岩型矿床, 主矿体赋存于矽卡岩中, 但该矽卡岩与斑岩系统有关, 形成斑岩-矽卡岩-角岩三位一体的成矿系统(唐菊

表 3 甲玛、驱龙、知不拉硫同位素地质温度计
Table 3 Temperatures calculated by sulfur isotopes of mineral pairs in Jiama(Gyama), Qulong and Zhibula

矿物对	分馏系数方程	参考文献	矿床	样号	样品	温度
闪锌矿-方铅矿	$1000\ln\alpha=0.8(\times 10^6/T^2)$	Kajiwara et al., 1971	甲玛	JM3601-286.1	大理岩中硫化物脉	412℃
			知不拉	QL326	矽卡岩	482℃
黄铁矿-黄铜矿	$1000\ln\alpha=0.45(\times 10^6/T^2)$	Ohmoto et al., 1979	甲玛	JM1626-874.8	硅化角岩	135℃
			驱龙	QZK2-20	矽卡岩	593℃
			驱龙	QZK2-10	矽卡岩	274℃
				PD103-CK2-162Y	矽卡岩	533℃
黄铜矿-方铅矿	$1000\ln\alpha=0.65(\times 10^6/T^2)$	Kajiwara et al., 1971; Friedman et al., 1977		JM-17	矽卡岩	408℃
			甲玛	JM108	矽卡岩	385℃
				JM111	矽卡岩	345℃
				JM-03	矽卡岩	
				JM3601-286.1	大理岩中硫化物脉	408℃
闪锌矿-黄铜矿	$1000\ln\alpha=0.15(\times 10^6/T^2)$	Kajiwara et al., 1971; Friedman et al., 1977	甲玛	JM3601-286.1	大理岩中硫化物脉	433℃

兴等, 2010; 王登红等, 2011)。前人对斑岩型、矽卡岩型铜矿床中硫同位素的研究表明, 虽然成矿地质背景不同, 成矿时代不一, 但硫同位素组成具有下列共同特征, 甲玛硫同位素完全符合。1) $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围狭窄, 比较集中, 极差一般不超过 10‰, 与岩浆硫相近(中国地质调查局同位素地球化学开放研究实验室, 2001)。甲玛矿床中硫化物、硫酸盐、岩浆岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值较集中, 除个别样品, 且冈底斯成矿带上驱龙等斑岩铜矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化小。2) 单个矿床中 $\delta^{34}\text{S}$ 的算术平均值很小, 例如西藏扎那尔斑岩矿床平均+4.23‰, 大部分斑岩型铜矿床小于+2.5‰, 国外斑岩铜矿床亦有类似特征, 如宾厄姆矿床为-0.6‰±1.5‰, 比尤特矿床为+0.4‰, 均分布在岩浆成因硫的特征范围之内(马鸿文, 1990; Gammons et al., 2009; Seo et al., 2012)。甲玛矿床硫化物、硫酸盐、岩浆岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值平均为-1.22‰, 在岩浆硫变化范围内。

冈底斯成矿带西段洞嘎矿区 $\delta^{34}\text{S}$ 值最高, 在+0.7‰~+2.4‰之间, 平均+1.53‰(样品数 7)。沿成矿带往东, $\delta^{34}\text{S}$ 值平均为冲江-0.06‰(7)、厅宫-0.7‰(2)、南木-0.01‰(7)、拉抗俄-1.53‰(3)、驱龙-1.22‰(16)、知不拉-2.6‰(5)、甲玛-1.22‰(92)。平均值计算时包括各个矿床中的硫化物、硬石膏和岩浆岩全岩的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值, 除了驱龙矿床的硬石膏, 具有较高的正值(+12.5‰~+14.4‰), 未参与计算。从区域分布看, 冈底斯成矿带, 斑岩铜矿床中从西至东, 硫化物和含矿斑岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值越来越偏负值, 可能与越来越多的俯冲沉积物加入岩浆源区有

关(曲晓明等, 2002)。

5 结论

- (1) 甲玛铜多金属矿床中硫化物、硬石膏和岩浆岩的硫同位素组成一致, 显示岩浆硫的组成特点。
- (2) 共生硫化物矿物对: 闪锌矿-方铅矿-黄铜矿, 硫同位素地质温度计表明其形成于 400℃左右, 形成时硫同位素处于平衡状态。
- (3) 与冈底斯成矿带上的驱龙、知不拉、洞嘎、南木、冲江、厅宫、拉抗俄等斑岩型矿床中硫化物、硫酸盐和岩浆岩硫同位素对比, 甲玛硫同位素组成与其基本一致, 均具有 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围小, 平均值接近 0 值的特点, 反映了甲玛铜多金属矿床与斑岩的成因联系, 与区域上其他斑岩型矿床的一致性。

致谢: 感谢中国地质科学院矿产资源研究所王登红研究员、唐菊兴研究员对本文的指导, 感谢中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室的王成玉老师、罗续荣老师和高建飞博士对硫同位素的分析测试工作。

参考文献:

杜光树, 姚鹏, 潘凤雏. 1998. 喷流成因矽卡岩与成矿-以西藏玛铜多金属矿床为例[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 82-113.

侯增谦, 由晓明, 杨竹森, 孟祥金, 李振清, 杨志明, 郑绵平, 郑有业, 聂凤军, 高永丰, 江思宏, 李光明. 2006. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用[J]. 矿床地质, 25(6): 629-651.

李永胜. 2009. 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: 1-79.
- 马鸿文. 1990. 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.
- 孟祥金, 侯增谦, 李振清. 2006. 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, 80(4): 554-560.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 朱弟成, 王立全, 李光明, 赵志丹, 耿全如, 廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(3): 521-533.
- 曲晓明, 侯增谦, 李佑国. 2002. S, P 同位素对冈底斯斑岩铜矿带成矿物质来源和造山带物质循环的指示[J]. 地质通报, 21(11): 768-776.
- 余宏全, 丰成友, 张德全, 李光明, 刘波, 李进文. 2006. 西藏冈底斯铜矿带甲玛夕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, 22(3): 689-696.
- 唐菊兴, 邓世林, 郑文宝, 应立娟, 汪雄武, 钟康惠, 秦志鹏, 丁枫, 黎枫估, 唐晓倩, 钟裕峰, 彭慧娟. 2011. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床勘查模型[J]. 矿床地质, 30(2): 179-196.
- 唐菊兴, 多吉, 刘鸿飞, 郎兴海, 张金树, 郑文宝, 应立娟. 2012. 冈底斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. 地球学报, 33(4): 393-410.
- 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 钟康惠, 应立娟, 郑文宝, 黎枫估, 郭娜, 秦志鹏, 姚晓峰, 李磊, 王友, 唐晓倩. 2010. 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, 31(4): 495-506.
- 王登红, 唐菊兴, 应立娟, 芮宗瑶, 郑文宝. 2011. 甲玛与世界级铜矿的初步对比及下一步找矿工作建议[J]. 矿床地质, 30(2): 197-206.
- 姚鹏, 郑明华, 彭勇民, 李金高, 栗登奎, 范文玉. 2002. 西藏冈底斯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, 48(5): 468-479.
- 郑永飞. 2001. 稳定同位素体系理论模式及其矿床地球化学应用[J]. 矿床地质, 20(1): 57-70.
- 中国地质调查局同位素地球化学开放研究实验室. 2001. 矿床稳定同位素地球化学研究[R]. 宜昌: 中国地质调查局同位素地球化学开放研究实验室.
- 周云. 2010. 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: 1-91.
- phyry copper deposit at El Salvador, Chile[J]. *Economic Geology*, 71(8): 1533-1548.
- FRIEDMAN I, O'NEIL J R. 1977. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest[M]. Washington: USGPO.
- GAMMONS C H, SNYDER D M, POULSON S R, PETRITZ K. 2009. Geochemistry and stable isotopes of the flooded underground mine workings of Butte, Montana[J]. *Economic Geology*, 104(8): 1213-1234.
- HOU Zeng-qian, QU Xiao-ming, YANG Zhu-sen, MENG Xiang-jin, LI Zhen-qing, YANG Zhi-ming, ZHENG Mian-ping, ZHENG You-ye, NIE Feng-jun, GAO Yong-feng, JIANG Si-hong, LI Guang-ming. 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(6): 629-651(in Chinese with English abstract).
- HOU Z Q, ZHANG H R, PAN X F, YANG Z M. 2011. Porphyry Cu (-Mo-Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust: Examples from the eastern Tethyan metallogenic domain[J]. *Ore Geology Reviews*, 39(1-2): 21-45.
- KAJIWARA Y, KROUSE H R. 1971. Sulfur isotope partitioning in metallic sulfide systems[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(11): 1397-1408.
- LANG J R, GUAN Y, EASTOE C J. 1989. Stable isotope studies of sulfates and sulfides in the Mineral Park porphyry Cu-Mo system, Arizona[J]. *Economic Geology*, 84(3): 650-662.
- LI Y B, LIU J M. 2006. Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(7): 1789-1795.
- LI Yong-sheng. 2009. Geological characteristics and genesis of polymetallic copper deposit of Jiama, Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences: 1-79(in Chinese).
- MA Hong-wen. 1990. Granitoid and mineralization of the Yulong porphyry copper belt in eastern Tibet[M]. Wuhan: China University of Geosciences Publishing House(in Chinese).
- MENG Xiang-jin, HOU Zeng-qian, LI Zhen-qing. 2006. Sulfur and lead isotope compositions of the Qulong porphyry copper deposit, Tibet: implications for the sources of plutons and metals in the deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(4): 554-560(in Chinese with English abstract).
- OHMOTO H. 1979. Isotope of sulfur and carbon[M]// *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. John Wiley Sons: 509-567.
- OHMOTO H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 16(1): 491-559.
- Open Laboratory of Isotopic Geochemistry, C. G. S. 2001. Stable

References:

- DU Guang-shu, YAO Peng, PAN Feng-chu. 1998. Sedimentation-exhalation skarn and its mineralization: an example from the Jiama copper-polymetallic deposit, Tibet[M]. Chengdu: Sichuan Science Press: 82-113(in Chinese).
- FIELD C W, GUSTAFSON L B. 1976. Sulfur isotopes in the por-

- isotope geochemistry study of ore deposit[R]. Yichang: lecture note for seminar on the isotope geochemistry theory, method and its geological significance(in Chinese).
- PAN Gui-tang, MO Xuan-xue, HOU Zeng-qian, ZHU Di-cheng, WANG Li-quan, LI Guang-ming, ZHAO Zhi-dan, GENG Quan-ru, LIAO Zhong-li. 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521-533(in Chinese with English abstract).
- QU Xiao-ming, HOU Zeng-qian, LI You-guo. 2002. Implications of S and Pb isotopic compositions of the Gangdise porphyry copper belt for the ore-forming material source and material recycling within the orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(11): 768-776(in Chinese with English abstract).
- QU X M, HOU Z Q, ZAW K, LI Y G. 2007. Characteristics and genesis of Gangdese porphyry copper deposits in the southern Tibetan Plateau: Preliminary geochemical and geochronological results[J]. *Ore Geology Reviews*, 31(1-4): 205-223.
- RIPLEY E M. 1986. Origin and concentration mechanisms of copper and nickel in Duluth Complex sulfide zones; a dilemma[J]. *Economic Geology*, 81(4): 974-978.
- ROLLINSON H R. 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation[M]. New York: Longman Scientific & Technical Essex.
- SEO J H, GUILLONG M, HEINRICH C A. 2012. Separation of Molybdenum and Copper in Porphyry Deposits: The Roles of Sulfur, Redox, and pH in Ore Mineral Deposition at Bingham Canyon[J]. *Economic Geology*, 107(2): 333-356.
- SHE Hong-quan, FENG Cheng-you, ZHANG De-quan, LI Guang-ming, LIU Bo, LI Jin-wen. 2006. 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*, 22(3): 689-696(in Chinese with English abstract).
- SHELTON K L, RYE D M. 1982. Sulfur isotopic compositions of ores from Mines Gaspé, Quebec: an example of sulfate-sulfide isotopic disequilibria in ore-forming fluids with applications to other porphyry-type deposits[J]. *Economic Geology*, 77(7): 1688-1709.
- TANG Ju-xing, DENG Shi-lin, ZHENG Wen-bao, YING Li-juan, WANG Xiong-wu, ZHONG Kang-hui, QIN Zhi-ping, DING Feng, LI Feng-ji, TANG Xiao-qian, ZHONG Yu-feng, PENG Hui-juan. 2011. An exploration model for Jiama copper polymetallic deposit in Maizhokunggar County, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 179-196(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, Dorji, LIU Hong-fei, LANG Xing-hai, ZHANG Jin-shu, ZHENG Wen-bao, YING Li-juan. 2012. Minerogenic Series of Ore Deposits in the East Part of the Gangdise Metallogenic Belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 393-410(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, WANG Deng-hong, WANG Xiong-wu, ZHONG Kang-hui, YING Li-juan, ZHENG Wen-bao, LI Feng-ji, GUO Na, QIN Zhi-peng. 2010. Geological features and metallogenic model of the Jiama copper-polymetallic deposit in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(4): 495-506(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, TANG Ju-xing, YING Li-juan, RUI Zong-yao, ZHENG Wen-bao. 2011. A preliminary comparison between Jiama and worldclass copper deposits and an analysis of the prospecting potential[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 197-206 (in Chinese with English abstract).
- YANG Z M, HOU Z Q, WHITE N C, CHANG Z S, LI Z Q, SONG Y C. 2009. Geology of the post-collisional porphyry copper-molybdenum deposit at Qulong, Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1-3): 133-159.
- YAO Peng, ZHENG Ming-hua, PENG Yong-min, LI Jin-gao, SU Deng-kui, FAN Wen-yu. 2002. Sources of ore-forming materials and the genesis of the Jiama copper and polymetallic deposit in Gangdise island-arc belt, Xizang[J]. *Geological Review*, 48(5): 468-479(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Y F. 1991. Sulphur isotopic fractionation between sulphate and sulphide in hydrothermal ore deposits: disequilibrium vs equilibrium processes[J]. *Terra Nova*, 3(5): 510-516.
- ZHENG Yong-fei. 2001. Theoretical modeling of stable isotope systems and its applications to geochemistry of hydrothermal ore deposits[J]. *Mineral Deposits*, 20(1): 57-70(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yun. 2010. Characteristic and evolution of ore-forming fluids from Jiama polymetallic copper deposit, Mozhuogongka county, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-91(in Chinese with English abstract).