

# 从 REE 和硅同位素特征探讨西藏甲马矿床 层状夕卡岩成因

姚 鹏<sup>1,2</sup> 李金高<sup>3</sup> 顾雪祥<sup>1,4</sup> 郑明华<sup>1</sup> 陈建坤<sup>5</sup>

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 成都地质矿产研究所, 四川成都 610082; 3. 西藏地质勘查局, 西藏 拉萨 850000; 4. 中国地质大学, 北京 100083; 5. 西藏自治区政府办公厅, 拉萨 850000)

**摘 要:**在对西藏甲马铜多金属矿床地质特征分析的基础上,对矿床中层状夕卡岩的 REE 及 Si 同位素地球化学特征进行了研究,并与典型岩浆热液接触交代夕卡岩、典型热水喷流型矿床和现代海底热流体进行对比,显示该矿床层状夕卡岩与典型岩浆热液接触交代夕卡岩存在较大差异,而与现代海底热流体和喷流型矿床及其共生的热水沉积岩有较大的相似性。因此认为,甲马矿床层状夕卡岩的形成与岩浆热液没有直接的成因联系,而与古海底热水活动有关,应属热水喷流成因。这为其共生矿床的成因提供了有力的证据。

**关键词:**甲马铜多金属矿床,层状夕卡岩,REE, Si 同位素,西藏

中图分类号: P588.31<sup>+</sup>2, P595, P597<sup>+</sup>.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2006)04-0305-09

## A discussion on the genesis of the stratabound skarn in the Jiama copper and polymetallic deposit of Tibet on the basis of REE and silicon isotope geochemistry

YAO Peng<sup>1,2</sup>, LI Jin-gao<sup>3</sup>, GU Xue-xiang<sup>1,4</sup>, ZHENG Ming-hua<sup>1</sup> and CHEN Jian-kun<sup>5</sup>

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, China; 3. Xizang Bureau of Geology and Mineral Resources, Lhasa 850000, China; 4. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 5. General Office of the Government of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China)

**Abstract:** Located in a back-arc sedimentary basin in Gandise island-arc, the Jiama copper and polymetallic deposit occurs as stratiform and stratoid bodies in the transitional zone between the reef limestone ( $J_3d$ ) and sandy slate ( $K_1l$ ). Stratabound skarn is the ore-bearing rock in the Jiama deposit. With its unique geological characteristics, it has aroused great interest among investigators. Based on REE and silicon isotope characteristics of the Jiama stratabound skarn and a comparison with typical magmatic-hydrothermal contact metasomatism skarn, Sedex deposit and modern seafloor hydrothermal fluid, the authors hold that the stratabound skarn in Jiama deposit is different greatly from the typical magmatic-hydrothermal contact metasomatic skarn, but is comparable with modern seafloor hydrothermal fluid, Sedex deposit and associated hydrothermal sedimentary rock. It is thus concluded that the stratabound skarn of the Jiama deposit has nothing to do with the magmatic-hydrothermal solution, but is associated with the old seafloor hydrothermal circulatory system. It should genetically belong to hydrothermal exhalation. The study has provided valuable evidence for the origin of the Jiama copper and

收稿日期: 2005-10-31; 修订日期: 2006-02-20

基金项目: 科技部重点基础研究专项(2003CCA019); 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室基金, 原地矿部定向基金资助项目(地科 97-20)

作者简介: 姚 鹏(1965-), 博士, 主要从事岩石学和矿床学研究, E-mail: cdypeng@cgs.gov.cn.

polymetallic deposit.

**Key words:** Jiamia copper and polymetallic deposit; stratabound skarn; REE; silicon isotopes; Tibet

夕卡岩及夕卡岩型矿床作为流体作用的直接产物,是研究流体成岩、成矿的一个重要窗口。传统观点将夕卡岩普遍定义为“两种化学性质不平衡的介质——碳酸盐岩石和铝硅酸盐岩石在高温岩浆期后溶液作用下,通过接触反应交代而生成”。该观点在矿床学研究和实践中一直占据着主导地位,并为许多学者所沿用。新近研究发现一些夕卡岩(矿床)往往并不是产于岩浆岩与碳酸盐岩石的接触带之间,而是产于地层(包括火山岩系、区域变质岩系)中,并严格受地层所控制,如澳大利亚的 Broken Hill (Stanton, 1983)、挪威(Skaarup, 1974)、奥地利(Raith, 1991)及我国青海鄂拉山地区(李福东等, 1993)等矿床便是很好的实例。通过进一步研究发现,这些夕卡岩并非由高温岩浆热液作用形成,而是由其他一些中低温热水流体作用形成,这已得到岩石学、矿物学和成岩成矿实验所证实(梁祥济等, 1988, 1991)。

近年来,笔者在西藏冈底斯南缘火山-岩浆弧的弧后盆地中,也发现了甲马铜多金属矿床产于层状夕卡岩中并受控于地层(特别是礁灰岩)。本文在野外宏观地质研究的基础上,采用REE及Si同位素地球化学方法,研究该层状夕卡岩与有关地质体的关系,进而探讨层状夕卡岩的成因,为确定矿床成因提供有力证据。

## 1 层状夕卡岩产出地质背景及特征

### 1.1 地质背景

甲马层状夕卡岩铜多金属矿床(以下简称甲马矿床)位于青藏高原南部的冈底斯南缘火山-岩浆弧的中东部。该构造带处于雅鲁藏布江缝合带与拉萨地块之间,是新特提斯洋盆向拉萨地块南缘多次俯冲所形成的(王全海等, 2002; 姚鹏等, 2002b)。据新近该区1:25万地质填图的综合研究(任纪舜等, 2004),冈底斯南缘曾经历了印支、燕山和喜马拉雅三阶段脉动式汇聚造山过程。另外,笔者的研究成果(姚鹏等, 2004)也表明,随着新特提斯主洋盆从三叠纪晚期开始俯冲消减,冈底斯南缘经历了如下几个阶段:①早期( $J_2$ )洋壳俯冲形成的火山弧阶段;②

晚期洋壳俯冲形成的火山弧阶段( $J_3-K_1$ );③弧后扩张与盆地沉积阶段( $J_3-K$ );④俯冲洋壳最终消减完毕(洋消失)至陆-陆开始碰撞阶段(64~41 Ma);⑤碰撞造山-快速隆升-山根拆沉阶段(20~10 Ma)。上述每个构造演化阶段,均有各具特色的重要矿床类型的形成,其中弧后扩张与盆地沉积阶段所形成的弧后盆地(图1)为古海底热水喷流型矿床的形成创造了极为重要的条件。

甲马矿床位于弧后扩张与盆地沉积阶段( $J_3-K$ )所形成的弧后盆地中(图1)。该盆地是在早期(中侏罗世)陆缘火山弧所构成的具过渡性地壳性质的基底上沉积形成的(彭勇民等, 2001),是雅江洋盆于晚期俯冲消减( $J_3-K$ )作用形成的产物(姚鹏等, 2004)。盆地呈近东西向展布,长达90 km,宽30~50 km,其中沉积了厚达2万余米的中生代地层,主要由自晚三叠世末以来的侏罗纪-白垩纪地层所组成。其中以上侏罗统多底沟组( $J_3d$ )和下白垩统林布宗组( $K_1l$ )较为发育,也特别重要,是层状夕卡岩成岩、成矿重要地层层位。层状夕卡岩及产于其中的铜多金属矿床,以固定层位产于上侏罗统多底沟组( $J_3d$ )和下白垩统林布宗组( $K_1l$ )之间,分布连续稳定,是上侏罗统-下白垩统沉积地层柱中不可缺少的重要组成部分(图2)。

### 1.2 层状夕卡岩的基本地质特征

层状夕卡岩是甲马矿床中最重要含矿岩石,它沿NWW-SEE向,呈层状、似层状产于碳酸盐岩相与细碎屑岩相之间的多底沟组( $J_3d$ )礁灰岩顶部,热水沉积岩(透辉石-斜长石岩)的底部(图2),并随地层的褶皱而同时褶皱(图3)。夕卡岩沿走向延伸长达4.5 km(图4),厚一般为十至数十米,最厚可达120 m。岩石绝大部分被矿化,构成“全岩矿体”,即夕卡岩矿体(床),主要由石榴石、透辉石和硅灰石及黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等多种金属硫化物组成。岩石具明显的斑状、残缕状、网脉状、脉状、团块状等交代结构构造,并具有明显规律的热液蚀变分带现象,其中常见有灰岩夹层及其残留体分布。

与层状夕卡岩矿体密切相关的地质体为其上覆的透辉石-斜长石岩,它系甲马矿床次要含矿岩石。

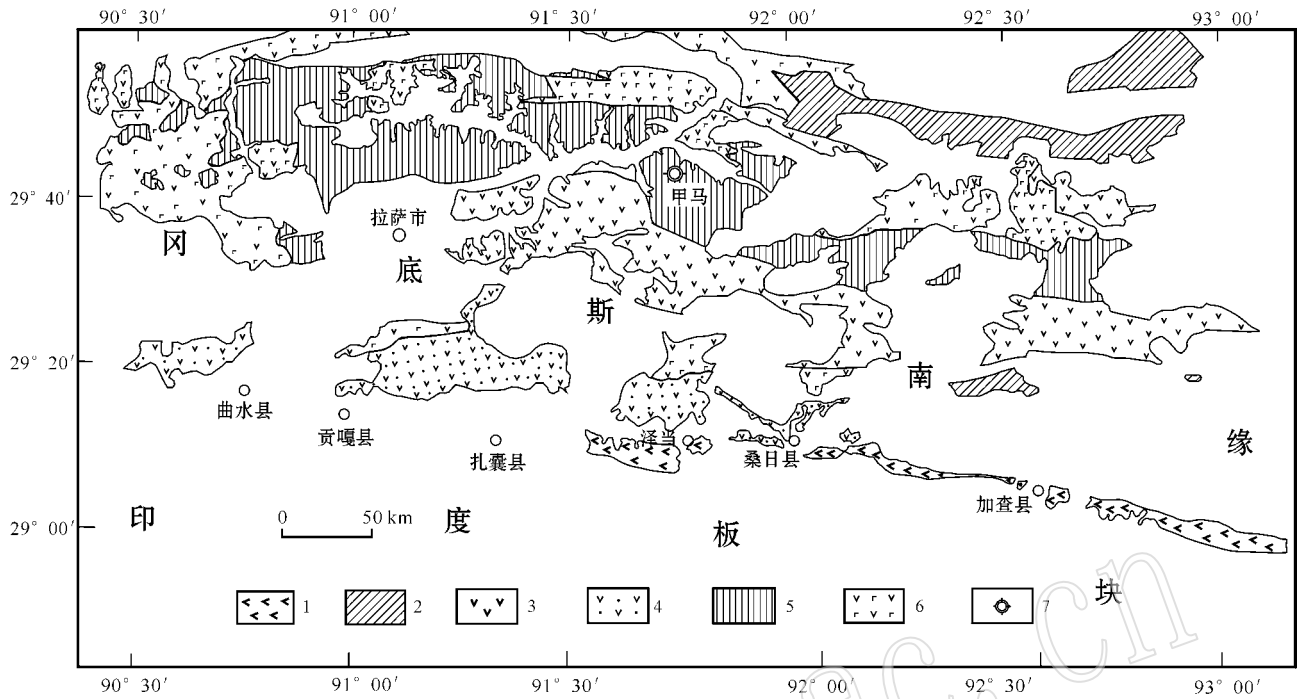


图 1 冈底斯南缘火山-岩浆弧地质构造及甲马矿床位置图

Fig. 1 Geological structural map of Gangdise volcano-magma arc and location of Jiama ore deposit

- 1—雅鲁藏布江蛇绿岩带 2—冈底斯陆块老基底 3—早期洋壳俯冲形成的火山弧( $J_2$ ) 4—晚期洋壳俯冲形成的火山弧( $J_3-K_1$ );  
 5—弧后扩张形成的弧后盆地( $J_3-K$ ) 6—俯冲洋壳消减完毕至陆-陆开始碰撞形成的火山弧(64~41 Ma) 7—甲马矿床  
 1—Yarlung Zangbo ophiolite zone; 2—old basement of the Gangdise continent; 3—volcanic arc ( $J_2$ ) of the early ocean crust subduction;  
 4—volcanic arc ( $J_3-K_1$ ) of the late ocean crust subduction; 5—post-arc spreading basin; 6—volcanic  
 arc (64~41 Ma) formed by the completion of the ocean crust subduction—the beginning of the collision of plate; 7—Jiama deposit

研究资料表明<sup>①</sup>，它是与古海底热水活动有关的异常地热盆地中的一种特殊沉积岩相，具有鲜明的热水沉积特征：①呈层状、似层状产出；②与上覆的林布宗组( $K_{1l}$ )碎屑岩呈渐变过渡关系；③透辉石-斜长石岩的层纹、条带的产状与上覆的林布宗组( $K_{1l}$ )碎屑岩的层理协调一致；④岩石具有层纹、条带和雏晶、微晶等标型的热水沉积结构构造；⑤富含亲热水元素，如 As、Sb、Ba、Ag、Au、Cu、Pb、Zn 等；⑦岩石主要由透辉石、钙质斜长石( $An_{29.9\sim 84.6}$ )和金属硫化物组成。

矿区内岩浆侵入岩与层状、似层状展布的夕卡岩矿化没有直接的成因关系。矿区出露的岩体主要为闪长岩、花岗斑岩、石英钠长斑岩、花岗闪长斑岩等酸性岩类。这些岩石的产状有两种：一类呈密集的岩脉群产出；另一类呈小岩株产出(图 4)。岩脉群主要分布于矿区中部，与层状夕卡岩矿体相交切，

而小斑岩株主要分布于矿区南部，两种产状岩体的同位素年龄为 10~20 Ma (K-Ar 法)。它们属冈底斯岩浆弧的一部分，其形成是由于印度板块与欧亚板块大规模碰撞后冈底斯逆冲断裂活动所致(侯增谦等 2001)。而夕卡岩矿体呈层状、似层状展布于多底沟组( $J_3d$ )顶部的礁灰岩与林布宗组( $K_{1l}$ )下部的砂板岩之间，其产状大致与地层的褶皱呈和谐关系(图 3)，而斜切夕卡岩矿层的后期岩脉未见其同围岩地层有和谐的褶皱形变。两者之间的穿插及其与围岩地层的产状关系充分表明，岩脉明显晚于夕卡岩矿体形成。

以上两类含矿岩石在空间上关系十分密切，形影相随，紧密共生，整合接触，均呈层状-似层状产出，并随上下地层同步褶皱；在时间上，两者生成时间总体上(地质期)相同，但在形成阶段上，夕卡岩形成较晚，透辉石-斜长石岩生成较早；在矿物组成方

① 姚 鹏等. 2000. 西藏甲马铜多金属矿床控矿条件、定位机制及成矿远景预测(R). 成都地质矿产研究所科研成果报告.



表 1 甲马层状(控)夕卡岩及有关岩石的稀土元素分析结果

$w_B/10^{-6}$

Table 1 REE analytical results of Jiama stratabound skarn and associated rocks using NAA method

名称	样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE
层状控夕卡岩	94107	6.65	13.85	2.48	8.65	1.55	0.59	1.34	0.21	1.31	0.25	0.68	0.09	0.53	0.08	8.81	47.07
	94108	6.91	12.03	1.98	8.59	2.11	0.44	2.35	0.36	2.36	0.44	1.23	0.17	0.89	0.15	15.11	55.12
	94112	2.19	3.88	0.75	2.6	0.57	0.16	0.56	0.09	0.61	0.12	0.33	0.05	0.3	0.05	11.27	35.76
	94055	1.49	4.61	1.36	7.94	2	1.06	1.87	0.3	1.8	0.32	0.85	0.12	0.67	0.1	3.83	16.09
	93098(2) 平均	6.54	13.05	1.51	6.77	2.22	0.697	3.21	0.665	4.74	0.945	2.66	0.412	2.455	0.388	29.77	76.03
透辉石-斜长石岩	93127	31.16	42.52	5.22	18.16	3.09	0.97	2.99	0.426	2.9	0.601	1.77	0.269	1.632	0.248	18.40	130.36
	93146	24.59	38.25	4.78	18.81	3.76	0.705	3.67	0.511	3.42	0.704	2.03	0.326	2.107	0.34	23.65	127.65
	94053	25.2	38.2	5.51	21.77	5.08	1.24	5.22	0.79	5.34	1.06	3.01	0.45	2.68	0.41	32.76	148.72
	94238a	18.43	36.6	4.8	19.29	4.21	0.74	4.32	0.72	4.63	0.92	2.64	0.41	2.48	0.4	27.85	128.44
	平均	24.85	38.89	5.08	19.51	4.04	0.91	4.05	0.61	4.07	0.82	2.36	0.36	2.22	0.35	25.67	133.79
岩浆岩脉	93002	44.61	81.86	8.51	30.46	4.38	0.963	2.52	0.23	1.28	0.243	0.5	0.073	0.4	0.065	5.91	182.00
	93012	14.94	31.1	3.71	16.46	3.63	1.069	3.46	0.514	3.12	0.603	1.63	0.259	1.506	0.238	17.05	99.29
	93158	26.74	47.35	5.09	17.16	2.48	0.604	1.68	0.187	1.28	0.246	0.68	0.107	0.692	0.109	19.63	124.04
	93021	9.18	20.96	2.35	8.53	2.29	0.149	2.41	0.471	3.17	0.618	1.74	0.28	0.75	0.259	13.75	66.91
	平均	23.87	45.32	4.92	18.15	3.20	0.70	2.52	0.35	2.21	0.43	1.14	0.18	0.84	0.17	14.09	118.09
碳酸盐岩	93006	7.1	12.38	1.73	6.26	1.25	0.101	1.18	0.17	1.21	0.244	0.69	0.103	0.652	0.104	7.22	40.39
	93163	1.86	2.57	0.54	0.87	0.22	0.031	0.11	0.017	0.1	0.022	0.05	0.009	0.048	0.009	0.70	7.16
	94105	5.82	7.97	1.03	3.04	0.52	0.09	0.46	0.07	0.45	0.09	0.24	0.03	0.19	0.03	2.90	22.93
	平均	4.93	7.64	1.1	3.39	0.66	0.07	0.58	0.09	0.59	0.12	0.33	0.05	0.30	0.05	3.61	23.51

样品均由成都理工大学采用 NAA(中子活化)分析。

表 2 甲马矿床不同地质体与典型岩浆热液接触交代夕卡岩、热水沉积岩的稀土元素参数特征对比

Table 2 REE parameter characteristics of different geological bodies in the Jiama copper and polymetallic deposit, typical magmatic hydrothermal contact metasomatic skarn and hydrothermal sedimentary rock

矿床	地质体	样品数	ΣREE/10 <sup>-6</sup>	ΣCe/ΣY	La/Yb	δEu	δCe	资料来源
甲马铜多金属矿床	层状含夕卡岩	5	46.01	1.19	4.91	1.12	0.71	本文
	透辉石-斜长石岩	4	133.79	2.30	11.19	0.75	0.67	
	盆地容矿礁灰岩	3	23.51	3.11	16.43	0.39	0.66	
	中酸性岩脉	4	118.09	4.38	28.42	0.79		
岩浆热液接触交代矿床 (长江中下游)	夕卡岩	15	121.01	6.60	35.66	0.92	0.88	赵斌等(1999)
热水沉积矿床(南秦岭)	热水沉积岩	2	67.39	3.37	4.17	1.28	0.68	薛春纪等(1996)

由表 2 可以看出:甲马矿床的层状(控)夕卡岩  $\Sigma\text{REE} = 46.01 \times 10^{-6}$  (平均),  $\delta\text{Eu} = 1.12$  (平均) 与典型岩浆热液交代夕卡岩 ( $\Sigma\text{REE} = 121.01 \times 10^{-6}$ ,  $\delta\text{Eu} = 0.92$ ) 相比,  $\Sigma\text{REE}$  明显偏低, 而  $\delta\text{Eu}$  偏高; 甲马矿床的层状夕卡岩具 Ce 负异常、Eu 正异常和斜率较缓、向右倾的 REE 配分型式, 这与典型岩浆热液交代夕卡岩的  $\delta\text{Ce}$  异常不明显、不具 Eu 正异常和斜率较陡的 REE 配分型式形成鲜明对照。这暗示形成甲马矿床层状夕卡岩的流体与形成典型岩浆热液交代夕卡岩的流体-岩浆热液有所差别, 非岩浆热液所为。一般认为, 岩浆热液交代夕卡岩是由岩浆热液系统分泌出的热液交代灰岩而形成的。因此, 这类

夕卡岩必然要继承岩浆系统的高  $\Sigma\text{REE}$  特征和不同岩浆性质的  $\delta\text{Eu}$  特征, 其 REE 配分型式一般与有关岩浆岩平行分布, 各种参数特征也极为类似(赵斌等, 1999)。但甲马矿床的层状夕卡岩并非如此。

由表 2 可看出, 甲马矿床的透辉石-斜长石岩的特征参数  $\delta\text{Ce} = 0.67$ ,  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y} = 2.30$  与南秦岭地区的热水沉积岩 ( $\delta\text{Ce} = 0.68$ ,  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y} = 3.37$ ) 极为类似(薛春纪, 1996), 而且, 其 REE 配分型式与之也极为相似, 表现在 REE 配分型式都具有 Ce 负异常、斜率相差不大的特征, 唯其  $\Sigma\text{REE}$  ( $133.79 \times 10^{-6}$ ) 偏大。笔者认为, 这是由于在热水沉积过程中, 有其他正常沉积作用参与结果所致。因此, 从总体 REE

地球化学特征看,甲马矿床的透辉石-斜长石岩反映出热水沉积的特征,这与岩石的宏观和微观现象是相一致的。

将甲马矿床层状夕卡岩和透辉石-斜长石岩的稀土元素配分曲线绘制在周永章等(1994)总结的划分热水沉积岩和正常沉积岩的图中(图5)。从该图可看出,甲马矿床辉石-斜长石岩与粤西古水热水沉积硅岩的稀土配分曲线一起分布于热水沉积岩的范围内,表明分布于夕卡岩层之上的透辉石-斜长石岩具热水沉积的特征,夕卡岩也同样分布其内,暗示着甲马矿床层状夕卡岩的形成,也与具热水沉积特征的透辉石-斜长石岩一样,是在同一古海底热水循环流体系统活动的产物,它们在岩石结构构造上的差异仅是流体活动的环境差异造成的。

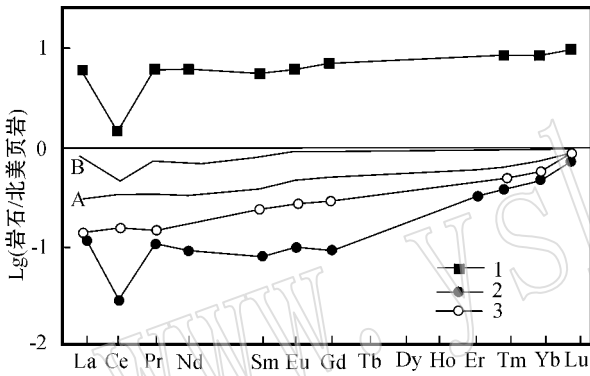


图 5 甲马层状(控)含矿夕卡岩及透辉石-斜长石岩与国内典型热水沉积岩平均 REE 配分模式的对比

Fig. 5 A Comparison of the average REE pattern between the Jiama stratabound ore-bearing skarn or diopside-plagioclase rock and the typical hydrothermal sedimentary rock in China

1—热水沉积上限 2—热水沉积下限 3—古水硅岩平均;A—甲马层状含矿夕卡岩;B—甲马透辉石-斜长石岩(1~3 数据引自周永章等,1994)

1—upper limit of hydrothermal sediments; 2—lower limit of hydrothermal sediments; 3—average of Gushui siliceous rocks; A—Jiama stratabound ore-bearing skarn; B—Jiama diopside-plagioclase rock (data of 1~3 from Zhou Yongzhang *et al.*, 1994)

## 2.2 甲马矿床层状夕卡岩与之有可能有成因联系的地质体稀土元素组成特征的对比

由表 1、表 2 及图 6 可看出:

(1)层状夕卡岩的 REE 配分型式(图 6)与热水沉积透辉石-斜长石岩具有非常相似的配分型式,两条曲线平行展布,都具有 Ce 异常的特点,说明它们具有类似的成因。另除 Eu 异常外,层状夕卡岩与礁灰岩也具有类似的 REE 配分型式,所不同的是,层

状夕卡岩具 Eu 正异常,而礁灰岩具明显的 Eu 负异常。这说明,形成层状夕卡岩的流体主要为强烈富集 Eu 的流体,这种性质的流体极有可能来自于类似现代海底循环系统的热液(韩发等,1997;卢焕章,1997)。该流体通过交代礁灰岩,从而生成了富集 Eu 的热水交代层状夕卡岩。因此,从 REE 配分型式上,层状夕卡岩既反映了流体的性质,同时也体现了礁灰岩的 REE 配分型式。

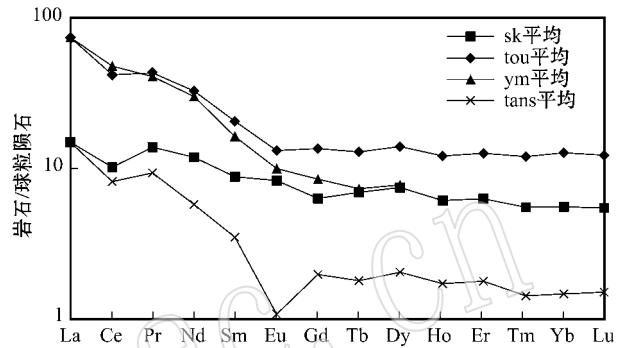


图 6 甲马矿床层状(控)含矿夕卡岩与岩浆岩脉、热水沉积透辉石-斜长石岩及礁灰岩的 REE 配分模式对比

Fig. 6 A Comparison of the REE pattern between the stratabound skarn and dyke, hydrothermal sedimentary diopside-plagioclase rock and reef limestones from the Jiama deposit

sk 平均—矿区层状(控)含矿夕卡岩平均值; tou 平均—矿区热水沉积透辉石-斜长石岩平均值; ym—矿区穿含矿夕卡岩层的岩浆岩脉平均值; tans 平均—矿区容矿地层礁灰岩平均值

sk average—average value of the stratabound skarn in Jiama deposit; tou average—average value of the hydrothermal sedimentary diopside-plagioclase rock; tans average—average value of the reef limestones from the Jiama deposit

(2)与层状夕卡岩、透辉石-斜长石岩及礁灰岩的 REE 配分型式所不同的是,矿床穿切层状夕卡岩岩脉的 REE 配分型式,明显比上述三者的 REE 曲线斜率大,曲线不协调(图 6),表现在  $\Sigma Ce/\Sigma Y$ 、 $La/Yb$  值上也大,从而说明了甲马层状夕卡岩与穿切层状夕卡岩的岩脉不具直接的成因关系。

综上所述,从稀土元素特征来看,甲马矿床含矿层状夕卡岩,与国内典型岩浆热液夕卡岩矿床本身穿切层状夕卡岩的岩脉差异均较明显。但在与国内典型热水沉积岩和与矿床本身具热水沉积特征的透辉石-斜长石岩的对比中,甲马矿床含矿夕卡岩层显示出与其的相似性。这暗示着,形成甲马矿床层状夕卡岩的热水流体可能与古海底热水流体有关。

### 3 硅同位素地球化学特征

硅同位素在地质学研究上起步较晚,与其他成熟的稳定同位素如 H、O、S 等相比,它仍处在发展阶段。正因为如此,笔者大胆尝试,以硅同位素为研究手段,对甲马矿床中层状夕卡岩进行研究,为探索它与伴生矿床的成因提供了新证据。为了更有效地探讨甲马层状含矿夕卡岩的成因,笔者在采集该岩石样品的同时,也对与其有联系的地质体进行了采样,一并做了硅同位素测定。测试工作由中国地质科学院矿产资源研究所承担,采用的方法为 SiF<sub>4</sub> 法,分析仪器采用 MAT-251 EM 质谱仪,分析精密度:±0.1‰,分析结果列于表 3。为了便于对比,在该表中还列入了国内外比较典型的热水沉积岩的硅同位素分析结果。从表 3 中可看出:

(1) 甲马矿床“二层楼”结构的上层,透辉石-斜长石岩的 δ<sup>30</sup>Si = -0.1‰ ~ -0.2‰,与加拿大 Sullivan 铅锌矿的上矿层——层状电英岩(丁梯平等, 1994) 现代海底黑烟囱(马里亚那海槽海底热液沉

积物) 云南腾冲温泉作用形成的石英脉 δ<sup>30</sup>Si 值(李延河等, 1994) 比较接近,并与青海鄂拉山地区的热液成因硅质岩、条纹条带夕卡岩(李福东等, 1993) 一致,说明透辉石-斜长石岩硅的来源与之相似,可能来源于类似于现代海底循环热水流体系统的热热水体系。此外,据 Douthitt(1982)、Clayton(1986)、丁梯平(1988) 和宋天锐(1989) 等对不同硅质来源的硅同位素组成研究表明,生物成因的硅质岩 δ<sup>30</sup>Si 值变化范围较大,可从负值变化到正值,而火山喷发-化学沉积成因硅质岩 δ<sup>30</sup>Si 值变化较小,在 0‰ ~ -1‰ 范围内。甲马矿床透辉石-斜长石岩的 δ<sup>30</sup>Si(‰) 值变化非常窄,且正好处于火山喷发-化学沉积硅质岩的硅同位素组成范围内,而与交代成因硅质岩、生物成因硅质岩明显不同。

(2) 甲马矿床“二层楼”结构的下层,层状夕卡岩的 δ<sup>30</sup>Si 值为 0.3‰,与透辉石-斜长石岩的 δ<sup>30</sup>Si 值(-0.1‰ ~ -0.2‰) 存在明显的差别。上述两类岩石在硅同位素组成上的差异与加拿大 Sullivan 典型喷流型铅锌矿床中产于矿体下盘的漏斗状电英岩热水蚀变带[δ<sup>30</sup>Si = 0(‰)] 和产于矿体、矿体直接底板

表 3 甲马矿床层状(控)含矿夕卡岩、透辉石-斜长石岩及岩脉硅同位素组成

Table 3 Silicon isotopes composition of the stratabound skarn, diopside-plagioclase rock and dykes from the Jiama deposit

矿区	样号	矿床部位	岩石名称	采样地点	δ <sup>30</sup> Si(NBS-28) ‰	资料来源
甲马铜多金属矿床	甲 94105	上矿层	透辉石-斜长石岩	铜山	-0.2	本文
	甲 94091	(早期)	透辉石-斜长石岩	Tc14	-0.1	
	甲 090	下矿层(晚期)	层状-似层状含矿夕卡岩	ZK1610	0.3	
	甲 94092		岩脉	红水沟	0.0	
加拿大 Sullivan 铅锌矿		上矿层	矿体和矿体直接		-0.3 ~ -0.5,	丁梯平等(1994)
		(早期)	底板层状电英岩		两件平均 -0.4	
		下脉	漏斗状蚀变带		0(3 件样品)	
		(晚期)	中电英岩			
	b-203		热水成因硅质岩		-0.3	
青海鄂拉山地区	90ETY74		热水成因不纯硅质岩		-0.2	李福东等(1993)
	90Esd-33		热水成因条纹条带夕卡岩		-0.1	
	95Ess95		晚期石英细脉		-0.3	
云南腾冲温泉			石英脉		-0.8 ~ -0.4, 平均 -0.6	李延河等(1994)
马里亚那海槽现代海底黑烟囱			海底热液沉积物		-0.4 ~ -3.1, 平均 -1.6	李延河等(1994)
迁安			条带状磁铁石英岩		-1.4 ~ -0.8, 平均 -1.1	李延河等(1994)
弓长岭			条带状磁铁石英岩		-2.2 ~ -0.8, 平均 -1.3	蒋少涌等(1992)

的热液沉积层状电英岩[δ<sup>30</sup>Si = -0.3‰ ~ -0.5‰] 的硅同位素组成差异(丁梯平等, 1994) 颇为类似。这一现象说明,在同一热水体系中形成的热水蚀交代岩与热水沉积岩,它们的硅同位素组成上存在一定变化规律,即在矿床的空间结构上由上层到下

层,时间上由早期至晚期,δ<sup>30</sup>Si 值存在由低值向高值的变化趋势(表 3)。这一规律已得到硅同位素分馏实验佐证。据硅同位素分馏实验(Douthitt, 1982; 李延河等, 1994),在硅同位素动力分馏过程中沉淀硅和溶解硅的硅同位素演化是有一定规律的,即在

同一个热水体系中,最先沉淀出的  $\text{SiO}_2$  之  $\delta^{30}\text{Si}$  值可以比该热水体系中初始溶解硅的  $\delta^{30}\text{Si}$  值低 1.0 左右,最后沉淀的  $\text{SiO}_2$  可以比初始溶解硅  $\delta^{30}\text{Si}$  高 2.0 以上。由此可以看出,加拿大 Sullivan 喷流型铅锌矿床的热水蚀变电英岩和热水沉积层状电英岩的  $\delta^{30}\text{Si}$  值之间的差异,以及甲马矿床的夕卡岩和透辉石-斜长石岩的  $\delta^{30}\text{Si}$  值之间的差异,均为各自热水体系硅同位素动力学分馏效应造成的。即,热水沉积岩是先从自身的热热水体系中形成,因而具有较低的  $\delta^{30}\text{Si}$  值;由于热水蚀变交代岩是在热水体系内已产生热水沉积岩后形成的,因而具有相对高的  $\delta^{30}\text{Si}$  值。

鉴于甲马矿床的结构与加拿大 Sullivan 典型热水喷流型铅锌矿床大体类似,特别是两者具有相同的硅同位素分馏演化规律,从而进一步说明了甲马矿床的层状夕卡岩和透辉石-斜长石岩为同一古海底热水循环体系下以不同时间、不同方式形成的产物,无疑应为热水喷流成因,其伴生的矿床亦然。

## 4 结论

对甲马铜多金属矿床层状夕卡岩的 REE 和 Si 同位素地球化学特征与典型岩浆热液接触交代夕卡岩、典型热水喷流型矿床,以及层状夕卡岩与其相关地质体的 REE 及 Si 同位素的地球化学特征的对比分析研究表明,甲马铜多金属矿床层状夕卡岩显示出与典型的、传统的岩浆热液接触交代夕卡岩存在较大差异,而与喷流型矿床及其共生的热水沉积岩有较大的相似性。另外,特别是野外地质特征与测试分析结果吻合很好。由此推测甲马矿床层状夕卡岩的形成与岩浆热液没有直接的成因联系,而与古海底热水活动有关,无疑应属热水喷流成因。

## References

- Clayton R N. 1986. High temperature isotope effects in the early solar system [A]. Valley *et al.* Review in Mineralogy [C], 16: 129~139.
- Ding Tiping, Jiang Shaoyong, Wan Defang, *et al.* 1994. The Geochemistry of Isotopes of Silicon [M]. Beijing: Geol. Publ. House, 1~102 (in Chinese).
- Ding Tiping, Wan Defang, Li Jincheng, *et al.* 1988. The analytic method of silicon isotopes and its geological application [J]. Mineral Deposits, 7(4): 90~96 (in Chinese).
- Douthitt C B. 1982. The geochemistry of the stable of the stable isotopes of silicon [J]. Geoch. et Cosmoch. Acta, 46: 1449.
- Han Fa, Zhao Rusong, Shen Jianzhong, *et al.* 1997. Geology and Origin of Ores in the Dachang Tin-Polymetallic Ore Field [M]. Beijing: Geol. Publ. House, 33~57 (in Chinese).
- Jiang shaoyong and Ding Tiping. 1992. Characteristics of silicon isotope composition for the Archeozoic banding BIF from Gongchangling, Liaoning [J]. Science in China (B), 37(6): 626~631 (in Chinese).
- Li Fudong, Zhang Hanwen, Song Zhijie, *et al.* 1993. Thermal Water Metallogenic Model in Ngola Shan Region [M]. Xi'an Jiaotong University Press, 96~218 (in Chinese).
- Li Yanhe, Ding Tiping and Wan Defang. 1994. Experimental study of silicon isotope dynamic fractionation and its geological application [J]. Mineral Deposits, 13(3): 282~288 (in Chinese).
- Liang Xiangji and Qiao li. 1988. Experimental study on the formation of metasomatic rocks and related iron deposits in metamorphose sedimentary rock [J]. Bulletin of The Chinese Academy of Geological Sciences, (18): 159~194 (in Chinese).
- Liang Xiangji and Qiao li. 1991. Experimental study on the formation of metasomatic rocks and related iron deposits in volcanic rock [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 10(4): 300~314 (in Chinese).
- Lu Huanzhang. 1997. Metallogenic Fluids [M]. Beijing: Sci. Tech. Press, 5~90 (in Chinese).
- Peng Yongmin, Yao Peng and Li Jingao. 2001. Upper Jurassic-Cretaceous sequence stratigraphy and mineralization in the Jiama copper-multi-metallic mining area of Tibet [J]. Geological Review, 47(6): 584~589 (in Chinese).
- Raith J G. 1991. Stratabound tungsten mineralization in regional metamorphic calc-silicate rocks from the Austroalpine Crystalline Complex [J]. Austria. Mineral Deposita, 26: 72~80.
- Ren Jishun and Xiao Liwei. 2004. Lifting the mysterious veil of the tectonics of the Qinghai-Tibet Plateau by 1:250000 geological mapping [J]. Geological Bulletin of China, 23(1): 1~11 (in Chinese).
- Skaarup P. 1974. Stratabound scheelite mineralizations in skarn and gneisses from the Bindal area, Northern Norway [J]. Mineral Deposita, 9: 299~308.
- Stanton R L. 1983. Stratiform ores and metamorphic processes—Some thoughts arising from Broken Hill [J]. Broken Hill conference, 11~28.
- Song Tianrui and Ding Tiping. 1989. A new attempt of silicon isotopes ( $\delta^{30}\text{Si}$ ) applied analyse of sedimentary facies from sillilit [J]. Chinese Science Bulletin, 34(18): 1408~1411 (in Chinese).
- Wang Quanhai, Wang Baosheng, Li Jingao, *et al.* 2002. Basic features and ore prospect evaluation of the Gangdise island arc, Tibet, and its copper polymetallic ore belt [J]. Geological Bulletin of China, 21(1): 35~40 (in Chinese).
- Xue Chunji, Ma Guoliang, Wei Heming, *et al.* 1996. REE geochemistry of main types of hydrsthermal sedimentary rocks in south Qinling [J]. Journal of Xi'an College of Geology, 18(3): 21~28 (in Chinese).
- Yao Peng, Gu Xuexiang, Li Jingao, *et al.* 2004. A elementary discussion on relationship between evolution and ore-forming in Gangdise



- island arc belt, Tibet [A]. Liu Jianming, Gu Xuexiang, Cheng Jianping. Theory and Practice of Geology-Symposium on congratulating Prof. Zheng Minghua engaged work of the geology 50 anniversary and 70 birthday [C], Beijing: Science Press, 372~378 (in Chinese).
- Yao Peng, Wang Quanhai and Li Jingao. 2002a. Ore and ore resource prospects of the Jiama-Qulong ore concentration area, Tibet [J]. Geology in China, 29(2): 197~202 (in Chinese).
- Yao Peng, Zheng Minghua, Peng Yongmin, et al. 2002b. Sources of ore-forming materials and the genesis of the Jiama copper and polymetallic deposit in Gangdise island-arc belt, Xizang [J]. Geological Review, 49(5): 468~479 (in Chinese).
- Zhao Bin, Zhao Jinsong and Liu Haichen. 1999. REE geochemical studies of whole rock and rock-forming minerals in skarns from Cu (Au), Cu-F(Au) and Fe ore deposits distributed along middle-lower reaches of Yangtze River, China [J]. Geochimica, 28(2): 113~125 (in Chinese).
- Zhou Yongzhang, Tu Guangzhi, Edward H C, et al. 1994. Hydrothermal Origin of Top Sinian Chert Formation at Gusui, Western Guangdong, China: Petrologic and Geochemical Evidence [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 12(3): 1~11 (in Chinese).
- 李福东, 张汉文, 宋治杰, 等. 1993. 鄂拉山地区热水成矿模式(以Cu为主多金属) [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1~312.
- 李延河, 丁梯平, 万德芳. 1994. 硅同位素动力学分馏的实验研究及地质应用 [J]. 矿床地质, 13(3): 282~288.
- 梁祥济, 乔莉. 1988. 沉积变质中交代岩和有关铁矿形成机理的实验研究 [J]. 中国地质科学院院报 (18): 159~194.
- 梁祥济, 乔莉. 1991. 火山岩中交代岩和铁矿的实验研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 10(4): 300~314.
- 卢焕章. 1997. 成矿流体系 [M]. 北京: 北京科学技术出版社, 5~90.
- 彭勇民, 姚鹏, 李金高, 等. 2001. 西藏甲马铜多金属矿区上侏罗统-白垩系层序地层与成矿 [J]. 地质论评, 47(6): 584~589.
- 任纪舜, 肖黎薇. 2004. 1:25万地质填图进一步揭开了青藏高原大地构造的神秘面纱 [J]. 地质通报, 23(1): 1~11.
- 宋天锐, 丁梯平. 1989. 硅质岩中的硅同位素( $\delta^{30}\text{Si}$ )应用于沉积相分析的新尝试 [J]. 科学通报, 34(18): 1408~1411.
- 王全海, 王保生, 李金高, 等. 2002. 西藏冈底斯岛弧及其铜多金属矿带的基本特征与远景评估 [J]. 地质通报, 21(1): 35~40.
- 薛春纪, 马国良, 魏合明, 等. 1996. 南秦岭主要类型热水沉积岩的REE地球化学 [J]. 西安工程学院学报, 18(3): 21~28.
- 姚鹏, 顾雪祥, 李金高, 等. 2004. 西藏冈底斯南缘火山-岩浆弧的形成与成矿初探 [A]. 刘建明, 顾雪祥, 陈建平. 矿床学理论与实践——祝贺郑明华教授从事地质工作五十周年暨70寿辰论文集 [C]. 北京: 科学出版社, 372~378.
- 姚鹏, 王全海, 李金高. 2002a. 西藏甲马—驱龙矿集区成矿远景 [J]. 中国地质, 29(2): 197~202.
- 姚鹏, 郑明华, 彭勇民, 等. 2002b. 西藏冈底斯岛弧带甲马铜多金属矿床成矿物质来源及成因研究 [J]. 地质论评, 49(5): 468~479.
- 赵斌, 赵劲松, 刘海臣. 1999. 长江中下游地区若干Cu(Au)-Cu-F(Au)和Fe矿床中钙质夕卡岩的稀土元素地球化学 [J]. 地球化学, 28(2): 113~125.
- 周永章, 涂光炽, Edward H C, 等. 1994. 粤西古水剖面震旦系顶部层状硅岩的热水成因属性: 岩石学和地球化学证据 [J]. 沉积学报, 12(3): 1~11.

## 附中文参考文献

- 丁梯平, 蒋少涌, 万德芳, 等. 1994. 硅同位素地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 1~102.
- 丁梯平, 万德芳, 李金城, 等. 1988. 硅同位素测量方法及其地质应用 [J]. 矿床地质, 7(4): 90~96.
- 韩发, 赵汝松, 沈建忠, 等. 1997. 大厂锡多金属矿床地质及成因 [M]. 北京: 地质出版社, 33~57.
- 侯增谦, 曲晓明, 黄卫, 等. 2001. 冈底斯斑岩铜矿成矿带有望成为西藏第二条“玉龙”铜矿带 [J]. 中国地质, 28(10): 27~29.
- 蒋少涌, 丁梯平. 1992. 辽宁弓长岭太古代条带状硅铁建造(BIF)的硅同位素组成特征 [J]. 中国科学(B), 37(6): 626~631.