

姚晓峰, 叶天竺, 唐菊兴, 等. 西藏甲玛矿床硅钙界面对矽卡岩成岩及多金属成矿的影响[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1577-1593.

Yao Xiaofeng, Ye Tianzhu, Tang Juxing, et al. The effect of Si-Ca interface on skarn formation and polymetallic mineralization in the Jiama deposit, Tibet[J]. Geology in China, 2014, 41(5): 1577-1593(in Chinese with English abstract).

西藏甲玛矿床硅钙界面对 矽卡岩成岩及多金属成矿的影响

姚晓峰^{1,2} 叶天竺¹ 唐菊兴³ 郑文宝³ 丁 帅⁴ 李永胜¹ 甄世民¹

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

3. 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;

4. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: 西藏甲玛铜多金属矿床为冈底斯成矿带的超大型矿床之一, 其矽卡岩型主矿体受林布宗组砂板岩、角岩(硅铝质岩石)和多底沟组大理岩(钙质岩石)的岩性界面所控制。基于岩、矿心地质编录, 开展矽卡岩岩石、矿物分带及矽卡岩地球化学、矿物化学研究, 探讨硅钙岩性界面对矽卡岩及多金属矿体形成的影响。从顶板至底板由石榴子石矽卡岩、硅灰石石榴子石矽卡岩至硅灰石矽卡岩表现出 SiO_2 、 CaO 逐渐增加和 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 + FeO 逐渐减少的趋势, 石榴子石矽卡岩、硅灰石矽卡岩的稀土元素和微量元素特征对顶板、底板岩石表现出明显的继承性。靠近顶板的矽卡岩中石榴子石属于钙铝-钙铁过渡系列, 由石榴石核部向外环带具有 Al 含量减少、Fe 含量增加的特点; 靠近底板矽卡岩相对于靠近顶板具有钙铁榴石比例增加、钙铝榴石比例减少特征, 由核部向外围未见明显的环带成分演变特征。矽卡岩是流体与硅铝质、钙质岩石水岩反应的产物, 沿硅钙界面流体减压沸腾、地下水混合作用和界面内垂向的流体地球化学障是主要的致矿机制。硅、铝质岩石化学性质、物理性质差异是界面控矿的主要因素, 硅钙面复合张性构造带、岩浆热事件增加界面渗透率差异有利于矿体规模的增加和品位提高。

关键词: 甲玛; 硅钙界面; 矽卡岩; 岩石地球化学; 矿物化学; 成矿作用

中图分类号: P616; P611 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2014)05-1577-17

1 引 言

近些年在西藏冈底斯成矿带发现了一批斑岩、矽卡岩型矿床^[1-3], 与传统意义的典型矽卡岩矿床不同的是, 矽卡岩主要受硅铝质岩石和钙质岩石的岩性界面所控制, 矽卡岩矿体呈层状、似层状产出, 矿床可达大型、超大型规模, 如甲玛、亚贵拉、蒙亚啊、

拉屋等矿床^[3], 这对传统意义的矽卡岩及矽卡岩型矿床成因的认识给予了新的启示。关于岩性界面控矿特征已有研究者做出探索和总结, 除去成矿作用与界面空间关系密切外, 界面中应力条件、物理、化学条件变化或差异是主要的致矿因素^[4-6]; 有研究者基于危机矿山深部找矿新成果进一步总结了不同成矿作用体系中的硅钙界面控矿因素^[7-8]。本文

收稿日期: 2014-02-17; 改回日期: 2014-06-03

基金项目: 中国地质调查局西藏大型矿床成矿专属性研究(资[2012]03-002-055)、重点成矿区带矿产勘查跟踪与成果集成研究(1212011085534)、青藏专项(1212010818089)、全国地质勘查进展分析(1212011121126)联合资助。

作者简介: 姚晓峰, 男, 1986年生, 博士, 助理研究员, 主要从事成矿规律研究; E-mail: 289332792@qq.com。

通讯作者: 唐菊兴, 男, 1964年生, 博士, 研究员, 主要从事矿床学研究; E-mail: tangjuxing@126.com。

以西藏甲玛超大型矿床为例,通过岩心地质编录总结硅钙界面矽卡岩的岩石及矿物的空间分布特征,基于矽卡岩及其顶底板围岩地球化学特征进行元素迁移质量平衡计算^[9],还原在矽卡岩形成过程中的组分迁移情况;对靠近顶板、底板位置的典型矽卡岩矿物进行矿物化学研究,从微观尺度为矽卡岩及矿体形成给出指示。文中进一步探讨硅钙界面控岩、控矿机制,讨论了矿床硅钙界面对矽卡岩成岩与多金属成矿的影响因素,这对类似矿床的找矿

预测工作具有重要指示意义。

2 矿床地质特征

西藏甲玛铜多金属矿床位于冈底斯—念青唐古拉板片中南部冈底斯火山岩浆弧带内,该矿床是冈底斯中段产出的超大型铜多金属矿床之一^[10]。矿区出露地层主要为下白垩统林布宗组(K_1l)砂板岩、角岩和上侏罗统多底沟组(J_3d)灰岩、大理岩,第四系仅在牛马塘地区有少量出露(图1)。矿区岩浆岩在

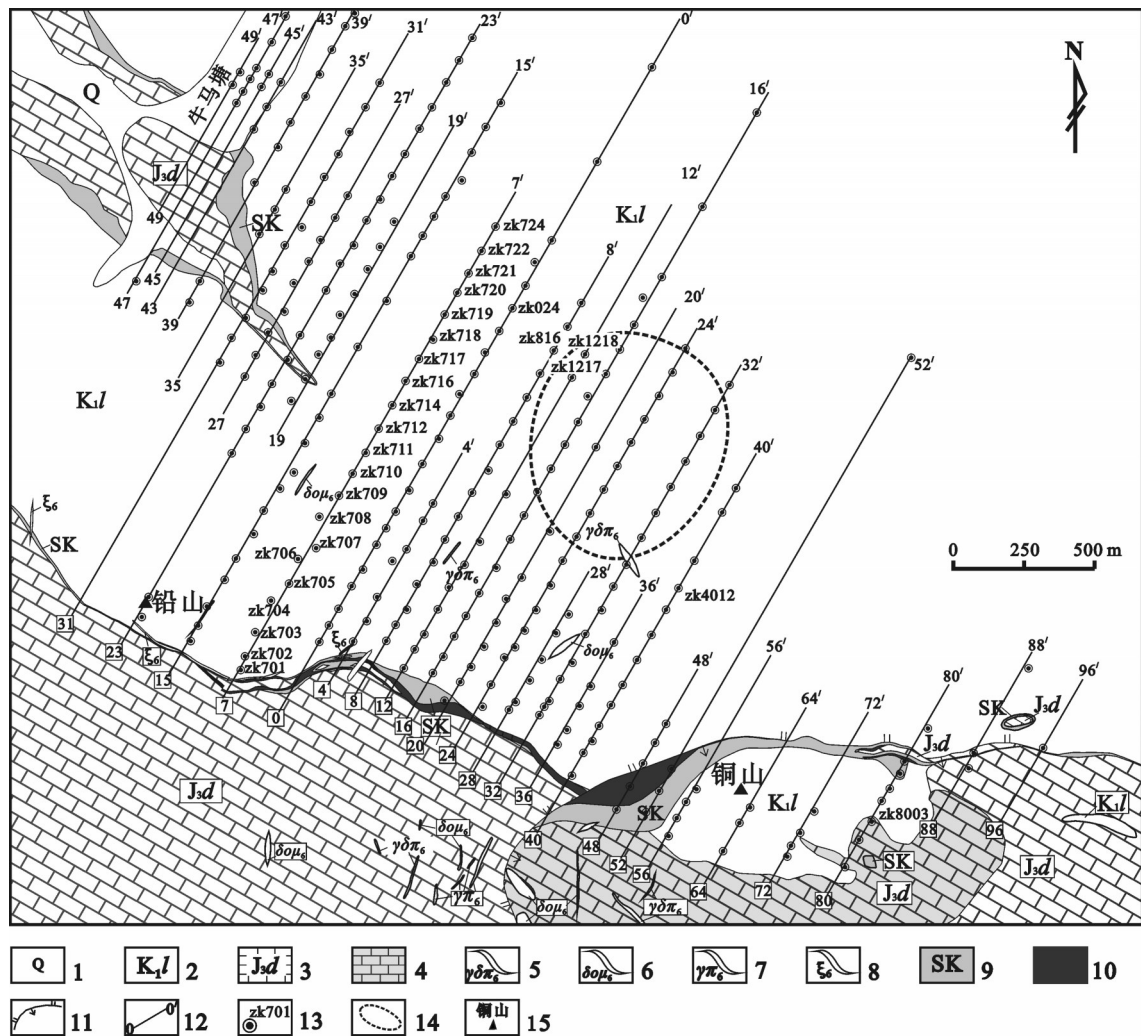


图1 甲玛铜多金属矿床地质图(据文献[14]修改)

- 1—第四系残坡积物、冲洪积物; 2—下白垩统林布宗组砂板岩、角岩; 3—上侏罗统多底沟组灰岩、大理岩; 4—矽卡岩化大理岩; 5—花岗闪长斑岩脉; 6—石英闪长玢岩脉; 7—花岗斑岩脉; 8—花岗细晶岩脉; 9—矽卡岩; 10—矽卡岩型矿体; 11—滑覆构造断裂; 12—勘探线及编号; 13—主要编录钻孔及编号; 14—深部斑岩体平面投影位置; 15—矿区地名

Fig. 1 Geological sketch map of the Jiama copper polymetallic deposit (modified after reference [14])

- 1—Quaternary residual-slope wash, alluvium-diluvium; 2— K_1l sandy slate and hornfels; 3— J_3d limestone and marble; 4—Skarnized marble; 5—Granodiorite porphyry dike; 6—Quartz diorite porphyry dike; 7—Granite porphyry dike; 8—Fine-grained granitic dike; 9—Skarn; 10—Skarn orebody; 11—Decollement fault; 12—Exploration line and its serial number; 13—Logged drill hole; 14—Plane projection location of concealed porphyry; 15—Name of ore district

地表主要呈脉岩产出,岩石类型包括花岗斑岩、二长花岗斑岩、花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩、闪长玢岩、闪斜煌斑岩、角闪辉绿(玢)岩等,与成矿关系密切的为花岗斑岩,经历了一定程度的岩浆混合作用^[11-12],其主要在0~40号勘探线之间深部产出。

矿体类型主要有产于矽卡岩中的铜多金属矿体、产于8~40线角岩中的铜(钼、金银)矿体和产于斑岩中的钼(铜)矿体,三者为与同一斑岩成矿系统有关的不同矿体形式。矽卡岩型铜多金属矿体主要赋存在砂板岩、角岩(顶板)与灰岩、大理岩(底板)之间的层间构造带中,矿体与矽卡岩密切共生,矿体主要呈似层状、层状、透镜状产出(图2),主要为浸染状、块状和网脉状构造矿石,主要有用矿物为黄铜矿、斑铜矿、黝铜矿、辉钼矿、辉铜矿、方铅矿和闪锌矿。角岩型矿体分布于靠近热液中心的角岩中,主矿体主要呈厚大块状、直立筒状、不规则状于矽卡岩型矿体的顶板产出^[10, 13, 14](图2),主要为脉状和网脉状构造矿石,主要有用矿物为黄铜矿、辉钼矿。斑岩型矿体为最近勘查工作所发现的,在12~32线之间深部的花岗斑岩体内近全岩发育,主要为脉状和网脉状构造矿石,主要的有用矿物为辉钼矿和黄铜矿。

3 矽卡岩内矿物空间分带特征

3.1 矽卡岩矿物空间分带特征

矽卡岩总体上主要呈层状、似层状、厚大透镜状赋存于林布宗组角岩、板岩和多底沟组大理岩之间的层间构造带内,在走向和倾向上延长3~4 km。矽卡岩矿物组成主要有石榴子石、硅灰石、透辉石、绿帘石、绿泥石等(图3),该几种矿物的空间分布特征在产状较陡和相对平缓的矽卡岩矿体中具有不同表现样式。缓矿体中矽卡岩由顶板至底板多具有矽卡岩化角岩-石榴子石矽卡岩-硅灰石矽卡岩-矽卡岩化大理岩的分带特征,且在平面上远离热液中心方向可见矽卡岩整体厚度逐渐变小,硅灰石矽卡岩带趋于尖灭(图4-a);陡矿体中矽卡岩从上至下主要为矽卡岩化角岩和石榴子石矽卡岩,靠近底板零星发育硅灰石矽卡岩和矽卡岩化大理岩。

矽卡岩化角岩中多以矽卡岩矿物脉充填形式发育,交代程度由弱至强表现出细脉状、脉状、角砾状构造,其交界线较规则且交代范围较窄,矽卡

岩矿物粒度较细(图3-a~c)。矽卡岩中早阶段形成的石榴子石、硅灰石等矿物分带被晚阶段形成的绿泥石、绿帘石、石英和碳酸盐等矿物在空间上无序交代和穿插。大理岩内的矽卡岩化交代现象更加普遍和强烈,矽卡岩矿物多呈火苗状、脉状、浸染状发育,矽卡岩矿物粒度也相对较大(图3-d~g)。

需要指出的是,靠近热液中心局部位置由于受后期热液多次叠加使缓矿体分带更加复杂多样。在垂向上发育多层石榴子石矽卡岩-硅灰石矽卡岩的分带特征(图4-a),同时可见早阶段矽卡岩被晚阶段矽卡岩脉体所穿插现象,主要有硅灰石+石英±硫化物脉体、石英+石榴子石±硅灰石±绿帘石±硫化物、硅灰石±石英脉和石英±硫化物脉体等形式(图3-e~g);也可见早阶段矽卡岩被引爆、胶结现象,胶结物为石英、绿泥石和硬石膏(图3-h)。

3.2 有用金属矿物空间分带特征

矽卡岩矿体有用金属矿物主要有黄铜矿、辉钼矿、斑铜矿、黝铜矿、辉铜矿、方铅矿、闪锌矿,此外通过显微观察和扫描电镜可见发育有自然金、自然银、碲银矿、银金矿等矿物^[15-16],存在有黄铜矿-斑铜矿、斑铜矿-黝铜矿、方铅矿-闪锌矿等共生矿物对,不同的金属矿物在空间上具有一定分布规律。在平面上金、银、铅、锌矿化主要在陡矿体及其与缓矿体的过渡位置相对发育;铜矿化在不同位置皆有不同程度发育,在靠近热液中心位置丰度更高;钼矿化主要在靠近热液中心相对富集(图4-b~g);由中心向外表现为辉钼矿+黄铜矿±斑铜矿±黝铜矿→黄铜矿+斑铜矿±黝铜矿→黄铜矿+方铅矿+闪锌矿的分带形式(图4-b~f)。在热液中心和外围由上至下分别可见辉钼矿+黄铜矿→黄铜矿+斑铜矿±黝铜矿和方铅矿+闪锌矿+黄铜矿→黄铜矿±方铅矿±闪锌矿的分带形式(图4-b~f),同时在靠近热液中心局部位置早阶段矿化分带被稍晚的脉状矿化所叠加,主要表现为含黄铜矿、斑铜矿和辉钼矿石英脉的穿插,使矿体厚度变大、品位变富。

4 矽卡岩地球化学特征

4.1 岩石地球化学特征

选取了矽卡岩矿体中靠近顶板的石榴子石矽卡岩、靠近底板的硅灰石矽卡岩及其二者之间过渡的硅灰石石榴子石矽卡岩进行岩石地球化学特征

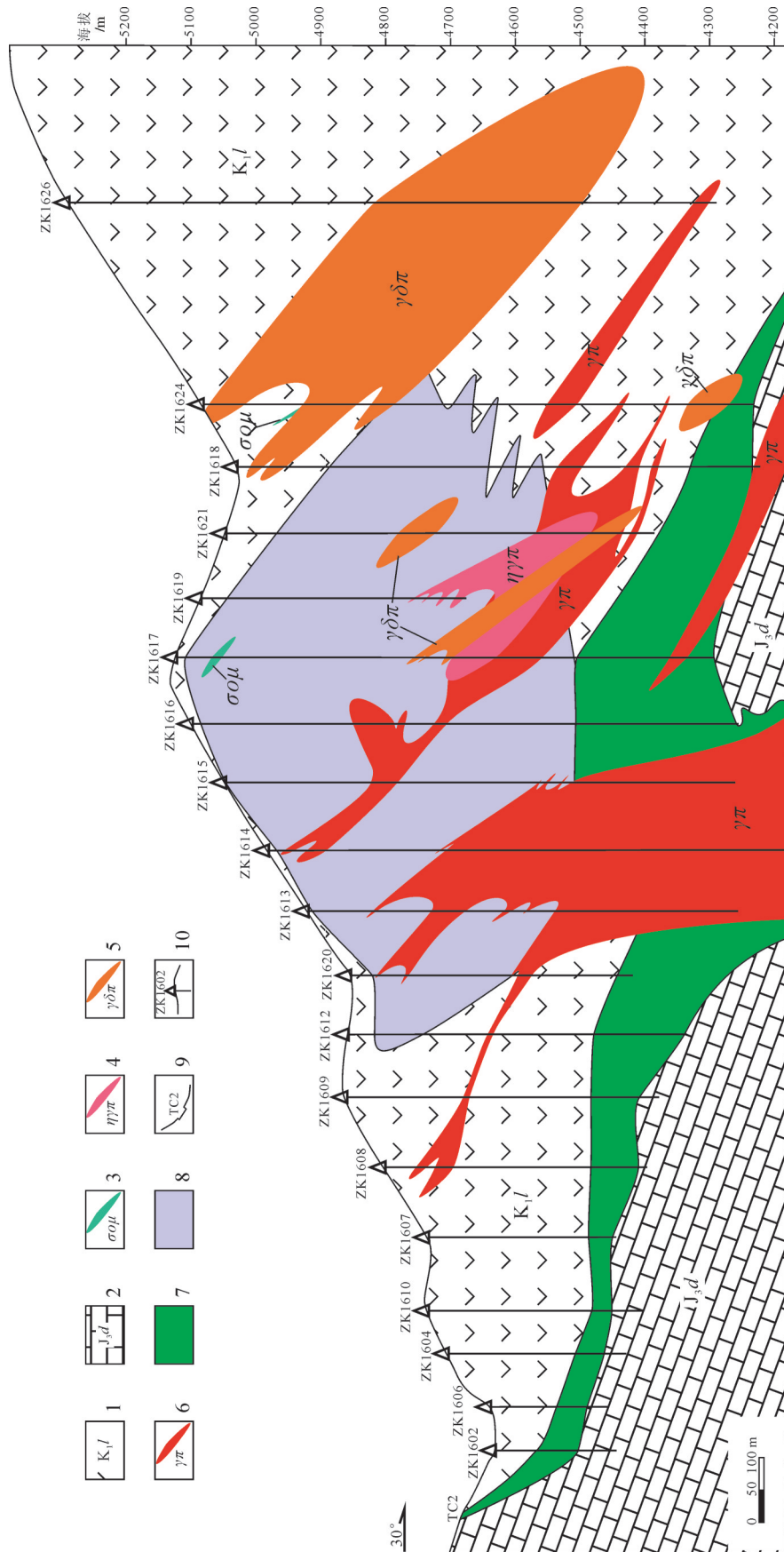


图2 甲玛铜多金属矿床 16 号勘探线剖面图^[14]

1—林布宗组砂板岩、角岩；2—多底沟组灰岩、大理岩；3—石英闪长玢岩；4—二长花岗斑岩；5—花岗闪长斑岩；6—花岗闪长斑岩中的铜多金属矿体；7—砂卡岩中的铜多金属矿体；8—角岩中的铜钼矿体；9—探槽及编号；10—钻孔及编号

Fig. 2 Geological section along No. 16 exploration line in the Jiama copper polymetallic deposit^[14]

1—K₁/l sandy slate and hornfels; 2—J₃d limestone and marble; 3—Quartz diorite porphyry dike; 4—Monzonitic granite porphyry; 5—Granodioritic porphyry; 6—Molybdenum orebody in granite porphyry; 7—Copper polymetallic orebody in skarn; 8—Copper and molybdenum orebody in hornfels; 9—Trench; 10—Drill hole

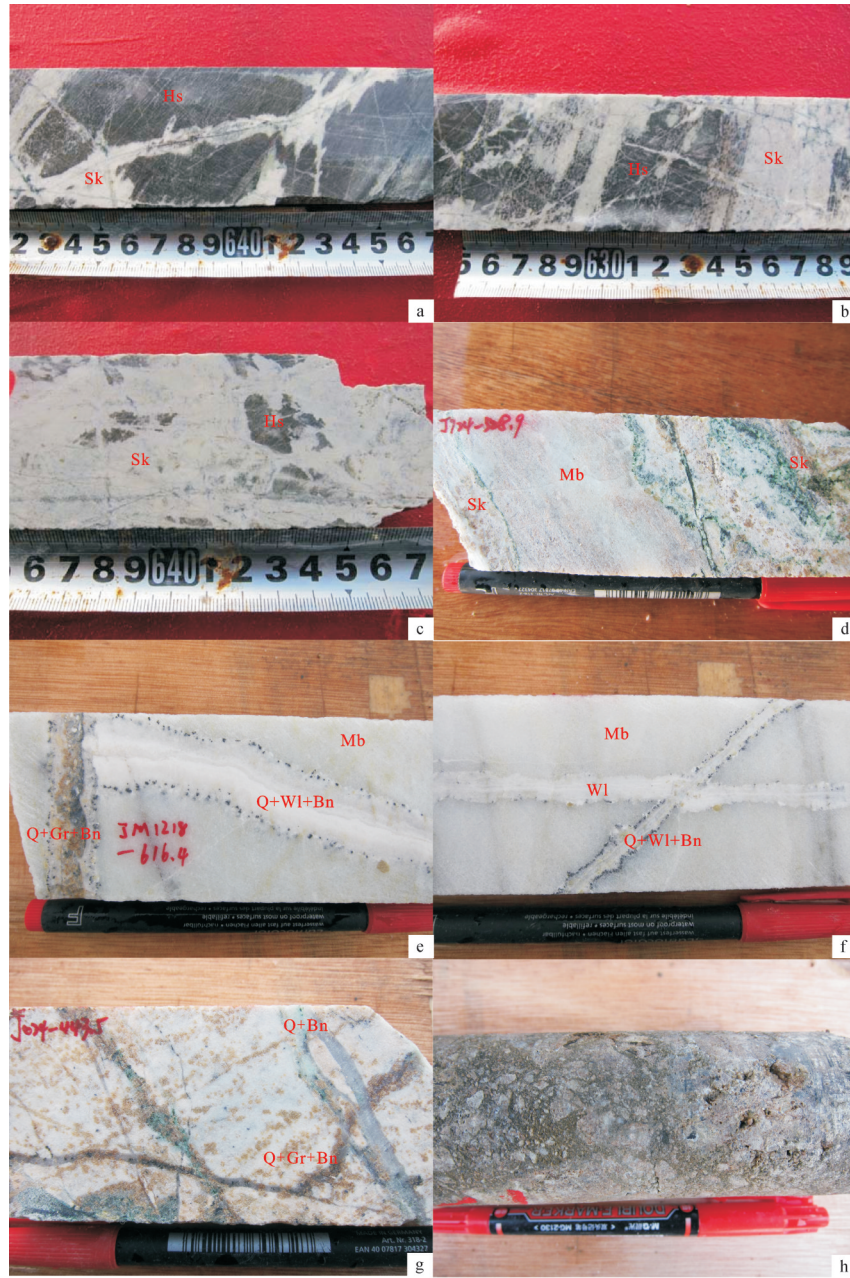


图3 甲玛矿床矽卡岩典型现象

a—JM3605-508.5角岩内细脉状矽卡岩化; b—JM3605-513.4角岩内脉状矽卡岩化; c—JM3605-524.0角岩内角砾状矽卡岩化; d—JM724-528.9大理岩内浸染状矽卡岩化; e—JM1218-616.4大理岩内石英+硅灰石+斑铜矿脉体被石英+石榴子石+斑铜矿所切; f—JM420-646.6大理岩内石英+硅灰石+斑铜矿脉体被无矿硅灰石脉体所切; g—JM024-443.5矽卡岩内石英+石榴子石+硅灰石+斑铜矿脉体被石英硫化物脉体所切; h—JM1217-801.1早阶段矽卡岩被石英、绿泥石、硬石膏等矿物所胶结现象;

代号: JM—甲玛矿区 Gr—石榴子石; Wl—硅灰石; Hs—角岩; Sk—矽卡岩; Mb—大理岩

Fig. 3 Petrography of skarn in the Jiama deposit

a—Skarn vein in hornfels from sample JM3605-508.5; b—Huge skarn vein in hornfels from sample JM3605-513.4; c— Brecciated skarnization in hornfels from sample JM3605-524.0; d— Disseminated skarnization in marble from sample JM724-528.9; e— Quartz-wollastonite-bornite vein cut by quartz-garnet-bornite vein in marble from sample JM1218-616.4; f— Quartz-wollastonite-bornite vein cut by barren wollastonite vein in marble from sample JM420-646.6; g— Quartz-garnet-wollastonite-bornite vein cut by quartz-sulfide vein in skarn from sample JM024-443.5; h— Pre-existing skarn cemented by quartz, chlorite and anhydrite;

JM—Jiama deposit; Gr—Garnet; Wl— Wollastonite; Hs—Hornfels; Sk—Skarn; Mb—Marble

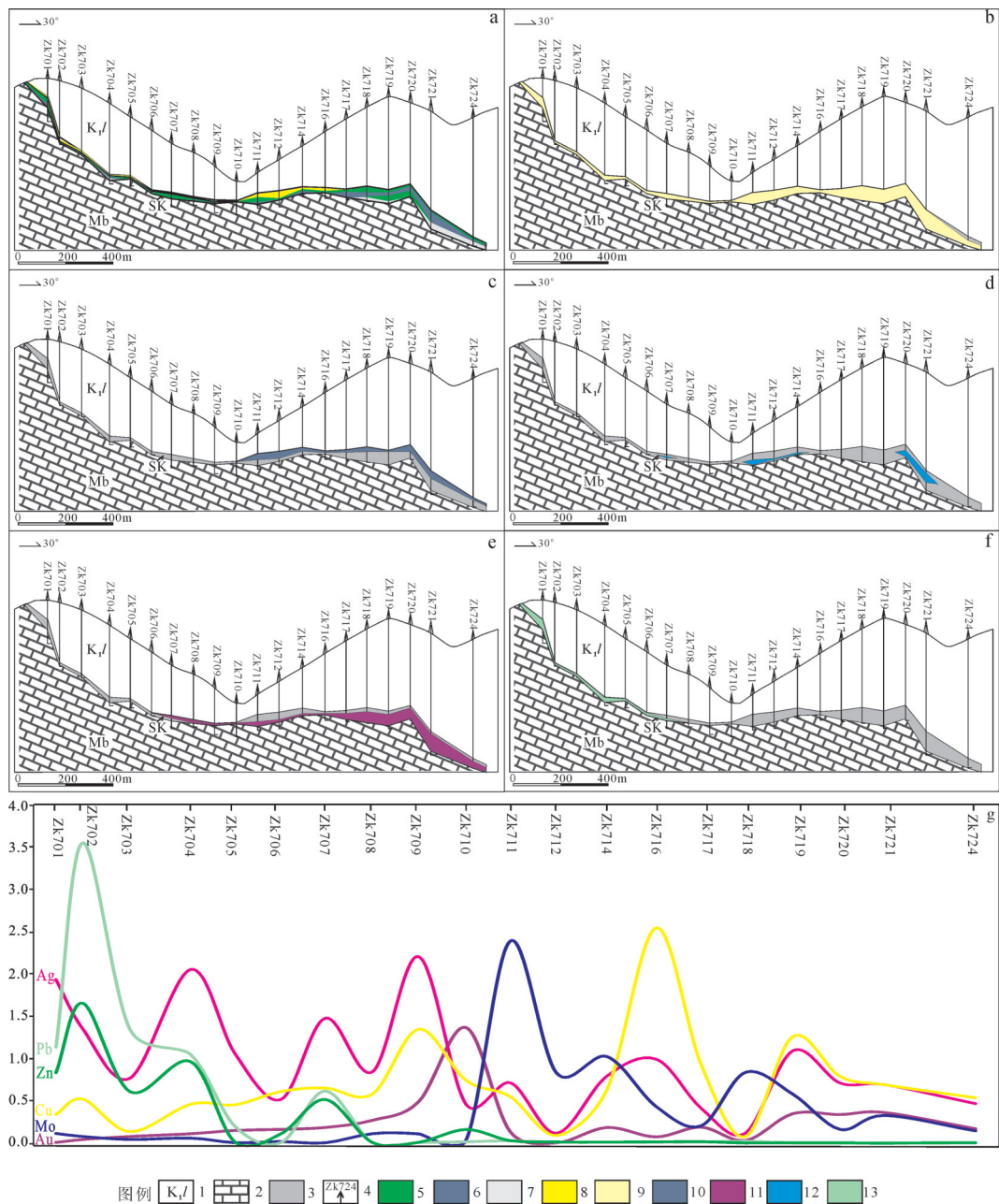


图4 甲玛矿区7线剖面砂卡岩矿物及成矿元素分带示意图

a—砂卡岩非金属特征矿物分带示意图; b-f—砂卡岩内主要有用金属矿物分带示意图; g—成矿元素分带示意图(元素丰度单位: Cu、Pb、Zn/10⁻², Au/10⁻⁶, Ag/2×10⁻⁵, Mo/10⁻³); 1—林布宗组角岩、砂板岩; 2—多底沟组大理岩、灰岩; 3—砂卡岩(未分); 4—钻孔位置及编号; 5—石榴子石含量大于硅灰石含量; 6—硅灰石含量大于石榴子石含量; 7—砂卡岩化大理岩; 8—砂卡岩化角岩; 9—黄铜矿; 10—辉钼矿; 11—斑铜矿; 12—黝铜矿; 13—方铅矿+闪锌矿

Fig.4 Geological longitudinal section along No. 7 exploration line, showing zoning characteristics of minerals, ore-forming elements in skarn orebody from Jiama

a—Zoning map of characteristic minerals of skarn; b-f—Zoning map of valuable metallic minerals of skarn orebody; g—Zoning map of ore-forming elements (Cu, Pb, Zn/10⁻², Au/10⁻⁶, Ag/2×10⁻⁵, Mo/10⁻³); 1—K₁l sandy slate and hornfels; 2—J₂d limestone and marble; 3—Undivided skarn; 4—Drill hole; 5—Area where garnet is more than wollastonite in skarn; 6—Area where wollastonite is more than garnet in skarn; 7—Skarnized marble; 8—Skarnized hornfels; 9—Chalcopyrite; 10—Molybdenite; 11—Bornite; 12—Clinohedrite; 13—Galena+ sphalerite

表1 甲玛矿床矽卡岩及其顶底板主量元素、微量元素丰度及热液作用过程组分迁移计算结果
Table 1 Analytical results of skarn, marble and horfels and calculation results of component migration during water-rock interaction in the Jiama deposit

分析 项目	石榴子石砂卡岩				硅灰石矽卡岩				大理岩				石榴子石砂卡岩		质量迁移	
	IPD15-B3	IPD19-B4	JM24-11B2	IPD16-B7	JM19-B3	IPD13-B1	JM24-1B3	弱蚀变角 岩平均值	大理岩 平均值	石榴子石砂 卡岩平均值	硅灰石矽子 矽卡岩平均值	硅灰石矽卡 岩平均值	角 子 岩 → 矽 卡 岩	大理岩 → 矽 卡 岩		
SiO ₂	42.18	35.84	35.07	43.84	42.93	48.47	48.68	56.87	6.61	37.70	43.38	48.58	-2.36	111.49		
TiO ₂	0.52	0.20	0.37	0.19	0.25	0.01	0.01	0.68	0.02	0.36	0.22	0.01	-0.16	0.00		
Al ₂ O ₃	5.77	7.41	9.66	3.49	2.90	0.16	0.09	19.12	0.34	7.61	3.19	0.12	-8.11	-0.04		
TiFe	3.71	10.82	5.72	4.69	6.15	<0.01	<0.01	4.99	0.02	6.75	5.42	0.00	4.77	-0.01		
MnO	0.78	0.59	0.61	0.58	0.52	0.40	0.69	0.05	0.13	0.66	0.55	0.55	0.90	1.20		
MgO	10.98	2.21	2.65	0.87	1.82	0.22	0.13	2.49	0.27	5.28	1.35	0.17	5.14	0.15		
CaO	29.61	26.95	29.24	36.74	35.47	42.72	45.09	3.18	50.80	28.60	36.11	43.91	38.17	55.95		
Na ₂ O	0.07	0.15	0.11	0.18	0.06	0.05	0.05	1.10	0.11	0.11	0.12	0.05	-0.94	0.01		
K ₂ O	0.03	0.73	0.38	0.02	0.03	0.01	0.02	4.62	0.09	0.38	0.02	0.02	-4.07	-0.05		
P ₂ O ₅	0.37	0.75	0.19	0.12	0.35	0.01	0.00	0.17	0.03	0.43	0.23	0.00	0.46	-0.02		
La	47.93	37.32	5.59	18.85	37.18	2.31	1.38	43.76	3.80	30.28	28.02	1.85	0.02	0.69		
Ce	57.45	72.65	12.15	28.40	56.38	3.10	3.82	85.94	5.13	47.42	42.39	3.46	-17.38	3.29		
Pr	6.51	8.99	1.59	3.96	6.75	0.39	0.54	9.05	0.74	5.70	5.35	0.46	-0.81	0.39		
Nd	26.10	38.94	7.10	16.27	26.05	1.69	2.30	34.38	3.05	24.05	21.16	1.99	0.39	1.80		
Sm	5.17	8.14	2.03	3.48	5.38	0.37	0.56	6.51	0.68	5.11	4.43	0.46	0.88	0.45		
Eu	1.94	2.02	0.47	0.58	1.16	0.13	0.15	1.35	0.26	1.48	0.87	0.14	0.78	0.08		
Gd	5.55	7.63	2.24	3.81	6.53	0.43	0.48	5.90	0.80	5.14	5.17	0.45	1.53	0.30		
Tb	0.85	1.07	0.34	0.61	1.08	0.07	0.07	0.95	0.19	0.75	0.84	0.14	-0.02			
Dy	5.56	6.64	1.82	4.24	6.76	0.46	0.49	5.83	0.82	4.67	6.69	0.48	0.93	0.34		
Ho	1.13	1.26	0.32	0.88	1.43	0.09	0.10	1.17	0.25	0.90	1.16	0.10	0.14	-0.02		
Er	3.30	3.63	0.97	2.81	4.26	0.26	0.32	3.59	0.50	2.63	3.53	0.29	0.22	0.21		
Tm	0.47	0.48	0.13	0.43	0.58	<0.05	<0.05	0.51	0.12	0.36	0.50	0.01	0.01	-0.09		
Yb	3.03	3.30	0.88	2.97	4.10	0.24	0.32	3.69	0.49	2.40	3.53	0.28	-0.21	0.19		
Lu	0.44	0.43	0.13	0.47	0.55	<0.05	<0.05	0.51	0.11	0.33	0.51	0.01	-0.03	-0.08		
ΣREE	165.42	192.50	35.74	87.76	158.16	9.54	10.54	203.13	16.94	131.22	122.96	10.04	-13.41	7.53		

续表 1

分析项目	石榴子石砂卡岩				硅灰石石榴子砂卡岩				硅灰石砂卡岩				弱蚀变角闪大理岩平均				石榴子石砂卡岩平均				硅灰石石榴子砂卡岩平均				质量迁移			
	IPD15-B3	IPD19-B4	JM24-11B2	IPD16-B7	JM19-B3	IPD13-B1	JM24-1B3	平均值	值	平均值	值	平均值	值	平均值	值	平均值	值	平均值	值	平均值	值	平均值	值	平均值	值	平均值	值	
Rb	3.95	48.94	30.65	2.05	2.31	1.05	1.58	304.60	7.66	27.85	2.18	1.31	264.34	-4.47														
Sr	24.89	23.88	17.51	55.47	19.20	5.89	12.30	252.00	388.95	22.09	37.34	9.10	-220.05	-366.83														
Y	35.25	39.28	8.83	26.30	48.63	3.37	3.35	27.90	5.83	27.79	37.47	3.36	12.28	2.33														
Zr	124.90	61.55	91.27	81.81	77.00	5.21	2.33	177.30	8.45	92.57	79.41	3.77	-43.45	0.71														
Nb	5.86	3.72	5.49	3.36	4.56	0.10	0.05	12.00	0.38	5.03	3.96	0.08	-4.73	-0.20														
Ba	7.36	43.99	62.43	7.27	5.38	3.87	12.17	552.40	67.90	37.93	6.33	8.02	-497.56	-48.41														
Hf	3.60	1.62	2.71	2.19	1.88	0.13	0.06	5.00	0.24	2.64	2.03	0.09	-1.18	-0.01														
Ta	0.44	0.24	0.40	0.20	0.28	<0.05	<0.05	1.00	0.10	0.36	0.24	0.01	-0.48	-0.07														
Pb	24.11	32.21	12.63	4395.00	18.65	67.47	12.36	351.80	73.38	22.98	2206.83	39.92	-318.57	23.67														
Th	5.45	4.20	18.61	2.47	3.67	0.23	0.26	14.70	0.50	9.42	3.07	0.24	-1.08	0.09														
U	5.03	5.19	1.09	2.94	5.01	1.10	0.26	5.00	1.51	3.77	3.97	0.68	0.45	0.14														
Au	1.12	2.09	0.83	3.48	245.00	0.25	0.84	45.00	2.08	1.35	124.24	0.55	-43.05	-0.75														
As	64.11	54.23	15.66	405.00	121.80	38.79	18.39	771.10	38.55	44.67	263.40	28.59	-706.52	30.96														
Sb	44.50	20.00	6.67	404.00	98.70	17.40	2.41	8.00	6.70	23.72	251.35	9.91	26.30	17.38														
Co	29.32	9.91	11.73	15.63	9.21	4.20	4.31	18.70	2.90	16.99	12.42	4.26	5.86	7.45														
Ag	0.06	0.60	0.07	9.33	9.34	0.07	0.07	1.20	0.16	0.24	9.34	0.07	-0.85	0.01														
Ni	176.80	39.82	34.17	27.30	40.49	15.00	20.41	62.70	14.74	83.60	33.90	17.71	58.17	28.31														
Sn	3.17	8.45	1.87	2.49	12.82	0.12	0.08	3.20	0.23	4.49	7.65	0.10	3.30	0.01														
Bi	6.71	3.70	0.33	31.29	39.74	0.52	0.20	7.70	0.20	3.58	35.52	0.36	-2.52	0.68														
Cr	49.87	17.86	15.24	7.54	23.95	3.77	2.67	60.20	4.45	27.66	15.74	3.22	-20.21	3.38														
V	86.37	120.40	82.04	16.24	34.71	2.02	1.51	154.80	4.48	96.27	25.48	1.76	-15.60	-0.19														
Zn	177.20	52.38	33.98	4568.00	63.37	40.50	17.94	339.10	61.61	87.85	2315.69	29.22	-212.07	9.43														
Mo	0.95	106.28	240.28	0.53	126.48	0.35	0.14	35.00	0.57	115.84	63.50	0.24	132.49	0.02														
W	2.49	7.55	11.86	2.40	2.43	0.36	0.21	16.00	0.60	7.30	2.42	0.29	-5.44	0.09														
Cu	13.88	753.50	56.46	1158.00	2751.00	6.58	21.66	217.50	12.96	274.61	1954.50	14.12	179.57	21.37														
Ga	12.57	14.86	7.59	10.36	0.65	0.92	24.70	0.79	15.15	8.97	0.79	-2.79	1.13															

注: 氧化物单位%, 微量元素 10^{-6} , 元素分析数据引自文献[17]。

对比研究。石榴子石矽卡岩呈黄绿色、翠绿色,中-粗粒结构,块状构造,石榴子石含量在70%~85%,绿帘石含量在5%~10%,石英含量在5%~10%,透辉石含量2%~5%,绿泥石含量在2%~5%,方解石含量在2%~5%,硅灰石含量小于1%。硅灰石石榴子石矽卡岩呈浅绿色、灰白色,中-细粒结构,团斑状构造、块状构造,石榴子石含量在30%~50%,硅灰石含量在25%~40%,绿帘石含量在3%~7%,石英含量在3%~7%,绿泥石含量在2%~5%,透辉石含量2%~5%,方解石含量在2%~5%。硅灰石矽卡岩呈白色、灰白色,针状、放射状结构,块状构造,硅灰石含量在70%~90%,石英含量在5%~10%,方解石含量在2%~5%,石榴子石含量小于5%。

石榴子石矽卡岩内 SiO_2 为 35.07%~42.18%, Al_2O_3 为 5.77%~9.66%, $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ 为 3.71%~10.82%, MgO 为 2.21%~10.98%, CaO 为 26.95%~29.61%, MnO 为 0.61%~0.78%, Na_2O 和 K_2O 都较低;硅灰石石榴子石矽卡岩内 SiO_2 为 42.93%~43.84%, Al_2O_3 为 2.90%~3.49%, $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ 为 4.69%~6.15%, MgO 为 0.87%~1.82%, CaO 为 35.47%~37.64%, MnO 为 0.52%~0.58%, Na_2O 和 K_2O 都较低;硅灰石矽卡岩内 SiO_2 为 48.47%~48.68%, Al_2O_3 为 0.09%~0.16%, MgO 为 0.13%~0.22%, CaO 为 42.72%~45.09%, MnO 为 0.40%~0.69%, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ 、 Na_2O 和 K_2O 都较低(表1)。

从顶板至底板由石榴子石矽卡岩、硅灰石石榴子石矽卡岩至硅灰石矽卡岩表现出 SiO_2 、 CaO 逐渐增加和 Al_2O_3 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ 逐渐减少的趋势。矽卡岩的稀土元素和微量元素含量介于顶底板之间,并且具有与顶底板类似的元素富集和亏损特征,总体具有轻稀土富集、弱负异常的稀土配分型式和富集 Rb、Th、U、Pb 元素和亏损 Ba、Ta、Nb、Sr 元素的微量元素特征;石榴子石矽卡岩和硅灰石矽卡岩对顶板和底板表现出明显的继承性,二者之间过渡的硅灰石石榴子石矽卡岩稀土和微量元素配分曲线介于其间(图5)。

4.2 硅灰石、石榴子石的矿物学特征

在钻孔岩心中采取了靠近顶板和底板的矽卡岩,其中,靠近顶板的矽卡岩主要为石榴子石矽卡岩,石榴子石含量大于75%,硅灰石含量小于10%;靠近底板的矽卡岩主要为石榴子石硅灰石矽卡岩

和硅灰石矽卡岩,石榴子石含量在5%~20%,硅灰石含量在70%~90%。分别对靠近顶板和底板的石榴子石、硅灰石矿物进行电子探针测试,测试工作在中国地质大学(北京)科学研究院实验中心 EPMA 实验室完成,仪器型号为 EPMA-1600,测试电压为 15 kV,电流为 10 nA,束斑为 1 μm 。

在靠近角岩一侧矽卡岩中石榴子石多呈不完整的晶形产出,多发育暗色的蚀变带,其中可见热液钙长石发育(表2);靠近矽卡岩一侧的石榴子石可见发育明显的环带特征(图6)。石榴子石的 SiO_2 含量在 37.35%~40.22%, Al_2O_3 含量在 9.18%~19.88%, CaO 含量在 34.05%~36.57%, TFe 含量在 2.34%~17.26%, TiO_2 含量在 0.31%~1.63%,石榴子石属于钙铝-钙铁过渡系列,石榴子石由核部向外围具有 Al 含量减少、Fe 含量增加的规律(表2、图7)。靠近顶板的硅灰石的 SiO_2 含量在 49.33%~49.79%, CaO 含量在 48.22%~48.34%, TFe 含量在 0.17%~0.37%, MnO 含量在 0.6%~0.78%,其他成分含量较低(表2)。

靠近底板大理岩的矽卡岩内可见石榴子石呈独立粒状的形式产出,可见发育相对较完整的环带(图6)。石榴子石 SiO_2 含量在 33.19%~34.45%, Al_2O_3 含量在 0.06%~5.70%, CaO 含量在 33.06%~34.45%, TFe 含量在 22.7%~29.69%,其他成分含量较低,石榴子石属于钙铁-钙铝榴石系列,相对于靠近顶板石榴子石具有钙铁榴石系列增加、钙铝榴石系列减少特征,由核部到外围未见明显的环带成分演变特征(表2、图7)。靠近大理岩硅灰石的 SiO_2 含量在 49.40%~49.98%, CaO 含量在 49.26%~49.36%, TFe 含量在 0.07%~0.20%, MnO 含量在 0.07%~0.14%,其他成分含量较低(表2),与靠近顶板硅灰石无明显差异。

5 讨论

5.1 矽卡岩形成过程中的组分迁移

在典型矽卡岩矿床中矽卡岩是岩浆及其期后热液和大理岩、砂岩等围岩之间的接触交代所形成,与之不同的是,受硅钙界面控制的远端矽卡岩大部分远离岩体发育,更多地为流体交代和改造围岩的产物^[18]。为了探讨甲玛矿床硅钙界面矽卡岩形成过程,基于矽卡岩垂向分带,简化为角岩主要形成石榴子石矽卡岩和大理岩主要形成硅灰石矽卡岩的认识,进一步利用元素迁移质量平衡计算方

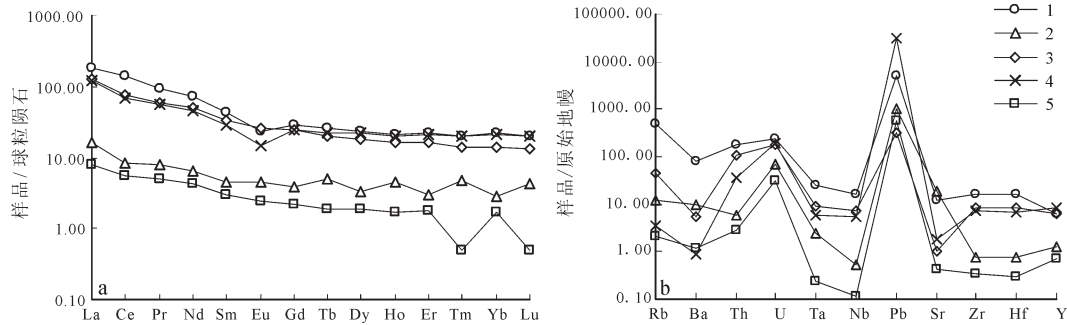


图5 甲玛矿床矽卡岩及其顶底板稀土元素配分形式图(a)及微量元素蛛网图(b)

1—角岩平均值; 2—大理岩平均值; 3—石榴子石矽卡岩平均值; 4—硅灰石石榴子石矽卡岩平均值; 5—硅灰石矽卡岩平均值

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primary mantle-normalized trace elements patterns (b) for skarn, marble and hornfels from Jiama

1—Average content of hornfels; 2—Average content of marble; 3— Average content of garnet skarn; 4—Average content of wollastonite garnet skarn; 5—Average content of wollastonite skarn

法^[7]对成岩过程组分迁移情况进行恢复。斑岩热液作用过程中Ti、Al、稀土元素和高场强元素一般活动性较差^[9], 本次研究主要选取Ti、Al、Pr、Nd、Ga、Y、Zr、Nb、Hf、Ta等元素为备选惰性元素, 进一步根据惰性元素协变关系优选不活动元素和确定等浓度斜率。

角岩形成石榴子石矽卡岩过程中Ti、Hf、Pr、Nd、Zr、Ga活动性差, 通过原点的等浓度线的斜率(k)为0.6916; 大理岩形成硅灰石矽卡岩中Ti、Hf、Zr、Pr、Al活动性差, 其等浓度线的斜率(k)为0.4113(图8); 指示二者在形成矽卡岩后单位质量增加明显。同时, 矿床中无矿角岩和无矿大理岩的小体重(密度)平均值分别为2.64 g/cm³和2.61 g/cm³, 而矽卡岩的小体重(密度)为3.13 g/cm³^①, 这也佐证了矽卡岩形成过程中单位质量的明显增加的认识, 说明该过程中热液成分带入总量大于成分的带出总量。

在计算出 k 的基础上, 通过定量计算获得了2个过程组分带入带出情况(表1, 图9)。角岩形成石榴子石矽卡岩过程中, 大量的Ca和一定量的Mg、Fe迁入与流体中Mg²⁺、Ca²⁺、Fe²⁺离子进入角岩有关, K的迁出主要与流体与角岩中钾长石和黑云母发生离子置换将K⁺带出有关, Si、Al表现为迁出特征可能为流体成分的注入而导致其浓度稀释不均匀所导致; 稀土元

素仅见Ce明显的迁出特征, 其余元素的迁移量在 2×10^{-6} 以内; 微量元素主要表现为Cu、Mo的迁入特征和Rb、Sr、Ba、Pb、Zn、As的迁出特征(表1, 图9)。

大理岩形成硅灰石矽卡岩过程中, 仅可见Si及其1/2比例的Ca迁入, 形成以硅灰石为主的矽卡岩; 稀土元素总体上以迁入为主, 但是迁移量在 4×10^{-6} 以内; 微量元素主要表现为Pb、Zn、As、Sb、Cu的迁入特征和Sr、Ba的迁出特征(表1, 图9)。

对于石榴子石矽卡岩和硅灰石矽卡岩的不等比例岩石系列, 其空间上位于石榴子石矽卡岩和硅灰石矽卡岩的过渡位置, 其原岩既可能为单一的大理岩, 也可能是角岩、大理岩的双原岩系统, 可视不等比例的角岩和大理岩流体交代作用产物。

5.2 矽卡岩矿体的形成

甲玛矿床林布宗组板岩、角岩(顶板)和多底沟组灰岩、大理岩(底板)构成了硅钙界面, 顶板脆性强而底板韧性强有利于构造活动过程中形成扩容空间, 而顶板相对稳定的化学性质有利于流体沿界面间持续运移和发生水岩反应, 这为流体运移、演化和水岩反应提供良好的物理和化学条件。矽卡岩内流体包裹体研究显示流体经历了减压沸腾和地下水混合过程^[20-24], 流体包裹体的减压沸腾现象沿硅钙界面内矽卡岩普遍发育^[23]。减压沸腾过程中

①唐菊兴, 王登红, 钟康惠, 等. 西藏自治区墨竹工卡县甲玛矿区牛马塘矿段铜多金属矿勘探报告[R]. 拉萨: 西藏国土资源厅, 2011.

表2 甲玛矿床角闪岩、矽卡岩内矿物电子探针分析结果(%)
Table 2 Electron microprobe analyses of minerals in skarn, hornfels in the Jiama deposit (%)

点号	采样位置	测试矿物及位置	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	Total
T1-1-4-1	J717-304.6	靠近顶板石榴子石核部	0.03	0.2	17.93	37.61		36.35	1.63	0.77	4.47	98.99
T1-1-4-2	ZK717 钻孔 304.6 m 深处	靠近顶板石榴子石过渡带	0.38	0.14	19.26	40.22	0.45	34.05	0.31	0.83	3.81	99.44
T1-1-4-3		靠近顶板石榴子石外缘	0.11		12.04	37.37		35.41	0.55	0.35	13.68	99.51
T1-1-1-3		靠近顶板石榴子石核部	0.04	0.09	17.51	38.02		36.38	1.35	0.97	5.42	99.78
T1-1-1-4		靠近顶板石榴子石过渡带	0.5	0.17	19.37	38.49	0.15	36.23	0.41	0.76	3.27	99.36
T1-1-1-5		靠近顶板石榴子石外缘	0.06	0.1	9.18	36.72	0.05	35.18	0.16	0.3	17.26	99.01
T1-1-2-1		靠近顶板石榴子石核部	0.08	0.3	19.88	38.58	0	36.57	1.12	0.68	2.34	99.55
T1-1-2-2		靠近顶板石榴子石过渡带	0.21	0.07	17.53	37.95		35.61	0.92	1.11	5.41	98.82
T1-1-2-3		靠近顶板石榴子石外缘	0.12	0.2	13.74	37.35		35.92	1.07	0.78	10.85	100.04
T1-1-1-1	J717-304.6	顶板岩内钠长石	9.59		22.26	64.03	0.1	3.46		0.13		99.58
T1-1-1-2	ZK717 钻孔 304.6 m 深处	顶板岩内钙长石	0.14	2.86	17.4	36.8		37.22	1.16	0.49	1.61	97.68
T1-1-2-4		顶板岩内钙长石	0.37	0.01	35.41	43.43		20.19				99.41
T1-2-1-1	J716-255.2	靠近顶板硅灰石	0.05	0.06		49.79		48.22	0.01	0.6	0.37	99.1
T1-2-1-2	ZK716 钻孔 255.2 m 深处	靠近顶板硅灰石	0.11	0.09	0.02	49.33		48.34		0.78	0.17	98.84
T1-5-2-1	J4012-717.4	靠近底板石榴子石核部		0	0.13	35.78		34.1		0.37	28.94	99.32
T1-5-2-2	ZK4012 钻孔 717.4 m 深处	靠近底板石榴子石过渡带	0.27	0.21	0.32	36.28		33.94	0.04	0.22	28.3	99.58
T1-5-2-3		靠近底板石榴子石外缘	0.06		0.16	35.68		33.87	0.07	0.34	29.69	99.88
T1-6-1-1	J716-258.7	靠近底板石榴子石核部	0.04	0.17	5.70	37.39	0.00	33.08		0.20	22.70	99.27
T1-6-1-2	ZK716 钻孔 258.7 m 深处	靠近底板石榴子石过渡带	0.13	0.28	5.32	37.31		33.06		0.30	22.78	99.17
T1-6-1-3		靠近底板石榴子石外缘	0.02	0.24	4.97	37.74		33.30	0.08	23.60	99.95	
T1-4-1-3	J1218-619	靠近底板硅灰石	0.01	0.01		49.92		49.26		0.07	0.1	99.37
T1-4-3-1	ZK1218 钻孔 619 m 深处	靠近底板硅灰石	0.13	0.07		49.98	0.03	49.3	0.05	0.14	0.2	99.89

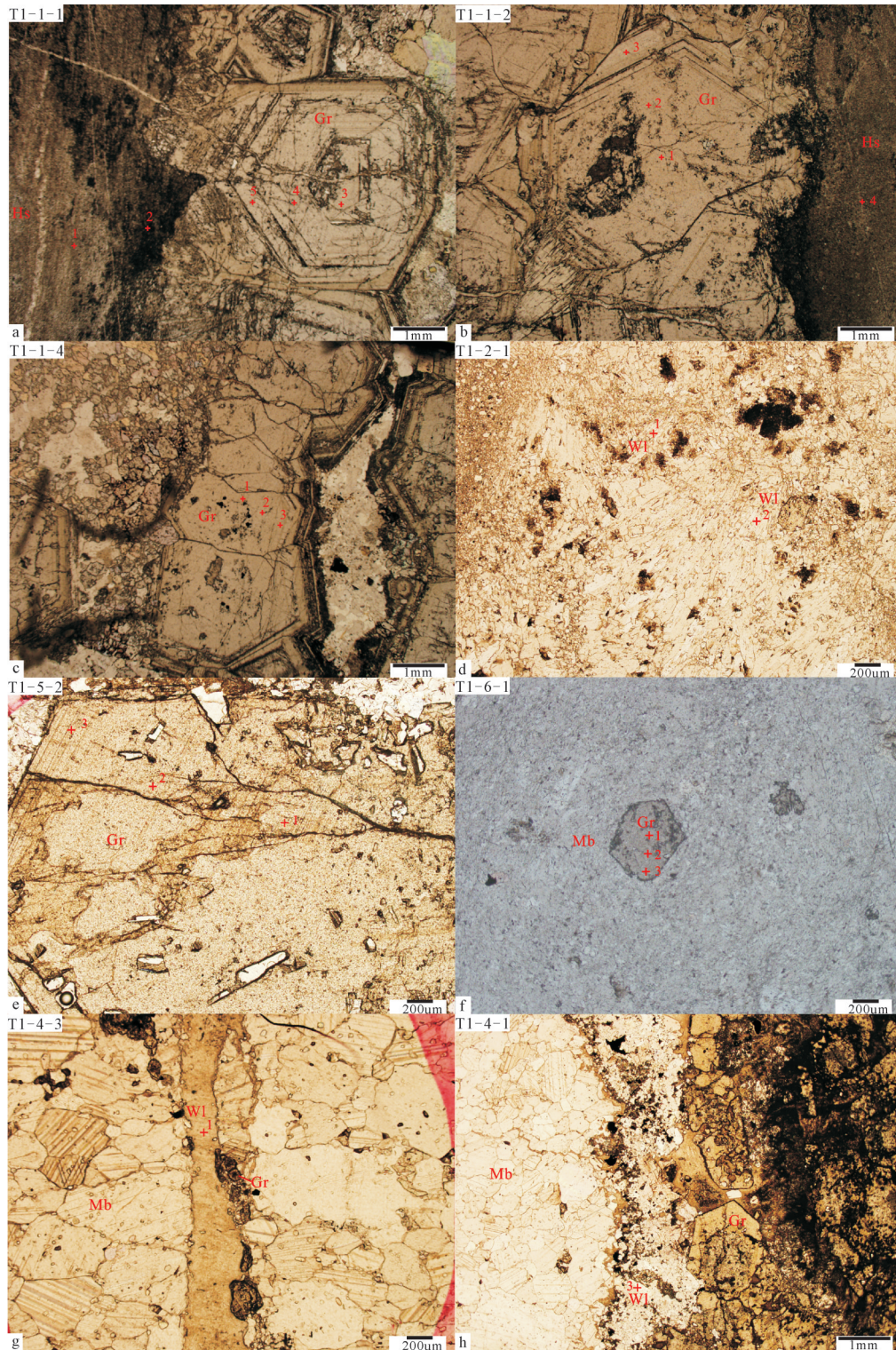


图6 甲玛矿床靠近顶板、底板砂卡岩内特征矿物电子探针点位分布图

Gr—石榴子石; Wl—硅灰石; Hs—角岩; Sk—砂卡岩; Mb—大理岩

Fig.6 Microscope photographs and EPMA position of garnet in skarn near hornfels and marble from the Jiama deposit

Gr—Garnet; Wl—Wollastonite; Hs—Hornfels; Sk—Skarn; Mb—Marble

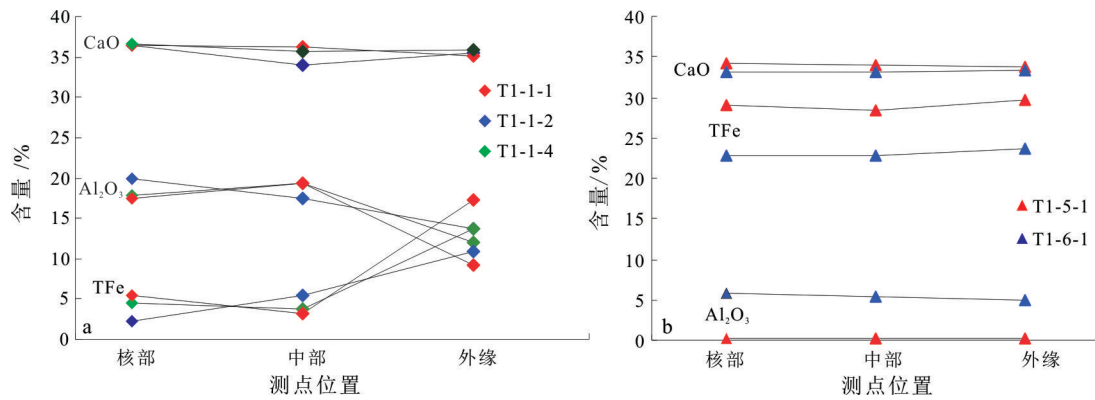


图7 甲玛矿床矽卡岩内石榴子石环带成分变化图解
a—靠近顶板角岩的矽卡岩; b—靠近底板大理岩的矽卡岩
Fig.7 Composition variation of zoned garnet in skarn from the Jima deposit
a—Skarn near hornfels; b—Skarn near marble

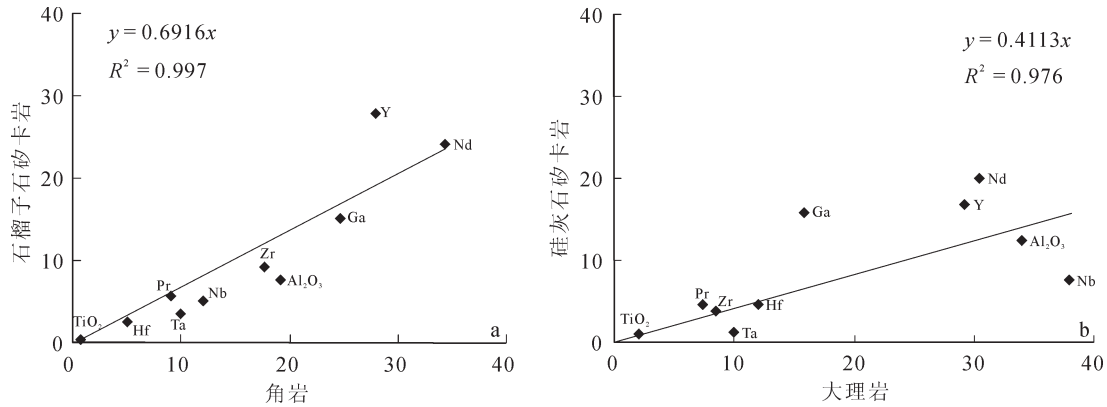


图8 甲玛矿床矽卡岩形成过程惰性组分协变图解
a—角岩形成石榴子石矽卡岩; b—大理岩形成硅灰石矽卡岩(图a元素丰度单位: Al_2O_3 、 TiO_2 /%, $Ta/10^{-5}$ 、 Pr 、 Hf 、 Nd 、 Ga 、 Y 、 $Nb/10^{-6}$ 、 $Zr/10^{-7}$; 图b元素丰度单位: Al_2O_3 、 $TiO_2/10^{-4}$ 、 Zr 、 Pr 、 $Nd/10^{-7}$ 、 $Y/2 \times 10^{-7}$ 、 Ta 、 $Nb/10^{-8}$ 、 $Hf/2 \times 10^{-8}$ 、 $Ga/5 \times 10^{-8}$)
Fig. 8 Isocon diagram for hornfels and marble from the Jima deposit
a—Hornfels altered into garnet skarn; b—Marble altered into wollastonite skarn; (diagram a: Al_2O_3 、 TiO_2 /%; $Ta/10^{-5}$ 、 Pr 、 Hf 、 Nd 、 Ga 、 Y 、 $Nb/10^{-6}$ 、 $Zr/10^{-7}$; diagram b: Al_2O_3 、 $TiO_2/10^{-4}$ 、 Zr 、 Pr 、 $Nd/10^{-7}$ 、 $Y/2 \times 10^{-7}$ 、 Ta 、 $Nb/10^{-8}$ 、 $Hf/2 \times 10^{-8}$ 、 $Ga/5 \times 10^{-8}$)

SO_2 、 CO_2 等气体的逃逸使流体中的pH值升高^[25], 地下水的掺入使得流体的浓度、温度降低和氧逸度、pH值升高^[26], 这些因素导致载矿络合物解离和矿质析出^[27-29]。

此外, 硅钙界面内水岩反应过程中形成的流体地球化学障也是导致矿质析出的重要因素。上已述及, 矽卡岩中靠近顶板石榴子石以钙铝榴石、钙铝-钙铁榴石为主, 靠近底板石榴子石具有钙铁系列增加、钙铝系列减少的特征。前人对钙铝-钙铁系列石榴子石形成的物理化学条件试验成果表明,

钙铁榴石一般形成于450~600℃、pH=4.0~11.0、氧化-弱氧化的环境中, 钙铝榴石一般在550~700℃、中-酸性溶液、弱氧化-弱还原条件下晶出^[30]。这暗示高温气水热液在林布宗组-多底沟组层间扩容空间运移和水岩反应过程中, 靠近顶板位置流体环境相对偏酸性和还原特征, 靠近底板位置流体环境相对偏碱性和氧化特征。顶底板之间流体酸碱度和氧逸度差异构成了地球化学障, 同样促使载矿络合物解离而矿质沉淀^[17]。

流体沿硅钙界面运移、演化和水岩反应过程

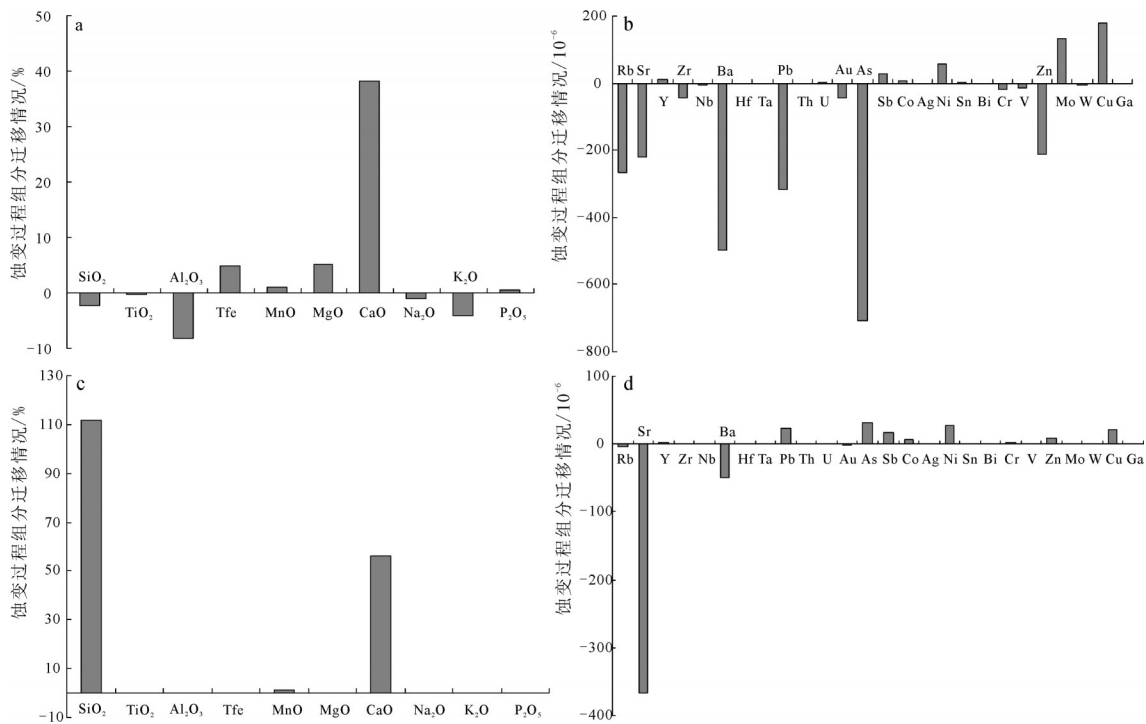


图9 甲玛矿床靠近顶、底板矽卡岩形成过程常量组分和微量元素迁移图解

a、b—角岩形成石榴子石矽卡岩；c、d—大理岩形成硅灰石矽卡岩

Fig. 9 Gains and losses of major elements and trace elements during skarn formation near hornfels and marble

a, b—Hornfels altered into garnet skarn; c, d—Marble altered into wollastonite skarn

中,含铜、钼、金、银、铅、锌络合物对流体环境减压、降温、pH值和氧逸度升高等变化的灵敏度不同是导致金属矿物分带的主要因素。流体环境从上到下氧逸度升高是造成矽卡岩矿体内黄铜矿→黄铜矿+斑铜矿±黝铜矿分带的重要因素^[31],由中心至外围辉钼矿+黄铜矿±斑铜矿±黝铜矿→黄铜矿+斑铜矿±黝铜矿→黄铜矿+方铅矿+闪锌矿的分带特征更多地与这些金属矿物的形成温度区间有关。

5.3 硅钙界面对矽卡岩成岩及多金属成矿的影响因素

前人总结的不同组合的硅钙界面中,物理、化学性质差异导致的异相定位和形成地球化学障是界面控矿的重要因素^[6],甲玛矿床硅钙界面上下围岩物理、化学条件差异对控岩控矿同样具有明显的影响。硅铝质岩石和钙质岩石是形成矽卡岩的物质基础,二者不同的化学性质导致其发生热液交代作用分别形成了以石榴子石矽卡岩和以硅灰石矽卡岩为主的两个端元产物,不同比例的原岩组合和多次热液交代作用形成了介于两个端元之间的过

渡矽卡岩类型。同时,硅铝质岩石和钙质岩石不同的物理化学性质导致了流体在二者之间运移、演化和水岩反应过程中形成酸-碱、氧化-还原地球化学障,有利于矿质沉淀和富集。

此外,甲玛矿床构造、岩浆活动对硅钙面的叠加和改造也是影响成岩成矿重要因素。始新世末伴随着区域上由北向南的推覆-滑覆构造作用,甲玛矿区中林布宗组和多底沟组之间形成了上陡下缓的层间构造带。该层间构造带内产状较陡处的矽卡岩及矿体厚度较小,而平缓处矽卡岩和矿体厚度明显增厚,在靠近岩体侵位中心的ZK024的矽卡岩矿体厚度可达400余米。该扩容空间的产状和空间位置对热液的涌入量和水岩反应时间具有明显的影响或制约,指示硅钙界面复合其他张性构造带更加有利于矿质大量积聚。受深部岩浆活动热烘烤作用的影响,板岩发生角岩化使得矿物粒度变细,灰岩发生大理岩化使得方解石发生重结晶而粒度变粗,由上至下形成了低孔隙度-高孔隙度的差异渗透率体系,这使得上陡下缓的层间构造带屏蔽

性能增强,更加有利于热源储存、反应和矿化富集。

6 结 论

(1)甲玛铜多金属矿床的林布宗组砂板岩、角岩和多底沟组灰岩、大理岩之间构成了硅钙界面,该界面控制着矽卡岩及矽卡岩型矿体的分布。矿体中矽卡岩由顶板至底板多具有矽卡岩化角岩-石榴子石矽卡岩-硅灰石矽卡岩-矽卡岩化大理岩的分带特征,靠近热液中心位置受后期热液多次叠加矽卡岩厚度增大,在垂向上具有多层石榴子石矽卡岩-硅灰石矽卡岩的分带性特征。金属矿物由中心向外表现为辉钼矿+黄铜矿±斑铜矿±黝铜矿→黄铜矿+斑铜矿±黝铜矿→黄铜矿+方铅矿+闪锌矿的分带形式;在热液中心和外围由上至下分别可见辉钼矿+黄铜矿→黄铜矿+斑铜矿±黝铜矿和方铅矿+闪锌矿+黄铜矿→黄铜矿±方铅矿±闪锌矿的分带形式。

(2)矽卡岩内从上至下由石榴子石矽卡岩、硅灰石石榴子石矽卡岩至硅灰石矽卡岩表现出 SiO_2 、 CaO 逐渐增加和 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 + FeO 逐渐减少的趋势,石榴子石矽卡岩、硅灰石矽卡岩的稀土元素和微量元素特征对顶板、底板表现出明显的继承性。

(3)靠近顶板矽卡岩中石榴子石属于钙铝-钙铁过渡系列,由核部向外围具有Al含量减少、Fe含量增加的特征;靠近底板矽卡岩中石榴子石相对于靠近顶板具有钙铁榴石系列比例增加、钙铝榴石系列比例减少特征,由核部向外围未见明显的环带成分演变特征;靠近顶板、底板的硅灰石无明显差异特征。

(4)硅钙界面控制的矽卡岩是硅铝质岩石和钙质岩石的水岩反应产物,沿硅钙界面流体减压沸腾、地下水混合作用和界面内垂向的流体地球化学障是主要的致矿机制。硅铝质岩石和钙质岩石地球化学性质、物理性质差异是界面控矿的主要因素,硅钙界面复合其他张性构造带、岩浆热事件增加界面上下渗透率差异有利于矿体规模的增加和品位变富。

致谢:审稿专家及责任编辑杨艳博士对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

[1] 芮宗瑶,陆彦,李光明,等. 西藏斑岩铜矿的前景展望[J]. 中国地质, 2003, 30(3): 302-308.
Rui Zongyao, Lu Yan, Li Guangming, et al. Looking forward to the

prospects of porphyry copper deposits in Tibet[J]. *Geology in China*, 2003, 30(3): 302-308(in Chinese with English abstract).

[2] 郑有业,多吉,王瑞江,等. 西藏冈底斯巨型斑岩铜矿带勘查研究最新进展[J]. 中国地质, 2007, 34(2): 324-334.
Zheng Youye, Duo Ji, Wang Ruijiang, et al. New Advances in the study of the gigantic Gangdise porphyry copper metallogenic zone, Tibet[J]. *Geology in China*, 2007, 34(2): 324-334(in Chinese with English abstract).

[3] 唐菊兴,多吉,刘鸿飞,等. 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, 2012, 33(4): 393-410.
Tang Juxing, Duo Ji, Liu Hongfei, et al. Minerogenetic series of ore deposits in the east part of the Gangdise Metallogenic Belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(4): 393-410(in Chinese with English abstract).

[4] 邓军,吕古贤,杨立强,等. 构造应力场转换与界面成矿[J]. 地球学报, 1998, 19(3): 244-250.
Deng Jun, Lv Guxian, Yang Liqiang, et al. The transformation of tectonic stress field and interfacial metallogenesis[J]. *Acta Geoscientica*, 1998, 19(3): 244-250(in Chinese with English abstract).

[5] 倪师军,张成江,滕彦国. 成矿流体地球化学界面: I概念的由来及发展[J]. 地质地球化学, 2001, 29(3): 19-21.
Ni Shijun, Zhang Chengjiang, Teng Yanguo. Ore-forming fluid geochemical interface: I. origin and development[J]. *Geology-Geochemistry*, 2001, 29(3): 19-21(in Chinese with English abstract).

[6] 吕古贤,邓军,倪师军,等. 构造物理化学成矿理论问题探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(3): 250-263.
Lv Guxian, Deng Jun, Ni Shijun, et al. Research on metallogenetic theory of tectono-physicochemistry[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2003, 27(3): 250-263(in Chinese with English abstract).

[7] 叶天竺,薛建玲. 金属矿床深部找矿中的地质研究[J]. 中国地质, 2007, 34(5): 855-869.
Ye Tianzhu, Xue Jianling. Geological study in search of metallic ore deposits at depth[J]. *Geology in China*, 2007, 34(5): 855-869 (in Chinese with English abstract).

[8] 张长青,叶天竺,吴越,等. Si/Ca界面对铅锌矿床的定位的控制作用及其找矿意义[J]. 矿床地质, 2012, 31(3): 405-416.
Zhang Changqing, Ye Tianzhu, Wu Yue, et al. Discussion on controlling role of Si-Ca boundary in locating Pb-Zn deposits and its prospecting significance[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(3): 405-416(in Chinese with English abstract).

[9] Grant J A. The isocon diagram——A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration[J]. *Economic Geology*, 1986, 81: 1976-1982.

[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.
Tang Juxing, Wang Denghong, Wang Xiongwu, et al. Geological features and metallogenic model of the Jima copper-

- polymetallic deposit in Tibet[J]. *Acta geoscientica sinica*, 2010, 31(4): 495–506(in Chinese with English abstract).
- [11] 彭惠娟, 汪雄武, Müller Axel, 等. 西藏甲玛铜多金属矿区成矿斑岩的岩浆混合作用: 石英及长石斑晶新证据[J]. *矿床地质*, 2011, 30(2): 249–265.
- Peng Huijuan, Wang Xiongwu, Müller Axel, et al. Magma mixing in Jiama Cu–polymetallic deposit of Tibet: Evidence from quartz and feldspar phenocrysts[J]. *Mineral Deposits*, 2011, 30(2): 249–265(in Chinese with English abstract).
- [12] 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).
- [13] 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 Jvxing, et al. Discovery of the tubular ore body in Jiama ore district in Tibet and its geological significance[J]. *Mineral deposit*, 2011, 30(2): 207–218 (in Chinese with English abstract).
- [14] 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;
- Tang Jvxing, Zheng Wenbao, Chen Yuchuan, et al. Prospecting breakthrough of the deep porphyry ore body and its significance in Jiama copper polymetallic deposit, Tibet, China[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2013, 43(4), 1100–1110 (in Chinese with English abstract).
- [15] 钟裕锋, 唐菊兴, 钟康惠, 等. 西藏甲玛铜多金属矿金的赋存状态[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(3): 298–305.
- Zhong Yufeng, Tang Jvxing, Zhong Kanghui, et al. Preliminary study on the occurrence state of Au in Jiama copper–polymetallic deposit, Tibet[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2011, 38(3): 298–305(in Chinese with English abstract).
- [16] 郑文宝, 唐菊兴, 汪雄武, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床金矿地质特征及成矿作用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(1), 181–196.
- Zheng Wenbao, Tang Jvxing, Wang Xiongwu, et al. Analysis on gold metallization in Jiama copper polymetallic deposit, Tibet[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2012, 42(1), 181–196(in Chinese with English abstract).
- [17] 郑文宝. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床地球化学特征[D]. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学, 2009.
- Zheng Wenbao. Geochemical characteristic of Jiama polymetallic copper deposit, Maizhokunggar county, Tibet[D]. Master's degree paper. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [18] Sillitoe R H. Porphyry copper systems[J]. *Economic Geology*, 2010, 105: 3–41.
- [19] Ulrich T, Heinrich C A. Geology and alteration geochemistry of the porphyry Cu–Au deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina[J]. *Economic Geology*, 2001, 96: 1719–1742.
- [20] 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]. 硕士学位论文, 成都: 成都理工大学, 2010.
- Zhou Yun. Characteristic and evolution of ore–forming fluids from Jiama polymetallic copper deposit, Maizhokunggar county, Tibet[D]. Master Degree Dissertation. Chengdu: Chengdu University of technology, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [21] 周云, 汪雄武, 唐菊兴, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床成矿流体来源及演化[J]. *矿床地质*, 2011, 30(2): 231–248.
- Zhou Yun, Wang XiongWu, Tang Jvxing, et al. Origin and evolution of ore–forming fluids from Jiama copper polymetallic deposit in Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 2011, 30(2): 231–248(in Chinese with English abstract).
- [22] 周云, 唐菊兴, 秦志鹏, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床成因研究——来自流体包裹体的证据[J]. *地球学报*, 2012, 33(4): 485–500.
- Zhou Yun, Tang Jvxing, Qin Zhipeng, et al. A study of fluid inclusions and their constraints on the genesis of the Jiama copper polymetallic deposit in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(4): 485–500(in Chinese with English abstract).
- [23] 姚晓峰. 西藏甲玛、驱龙成矿作用对比研究[D]. 博士论文, 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- Yao Xiaofeng. A comparative study on ore–forming between Jiama and Qulong deposits, Tibet, China[D]. Doctoral Degree Dissertation. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2013 (in Chinese with English abstract).
- [24] 郭文铂, 郑文宝, 唐菊兴, 等. 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[J]. *中国地质*, 2014, 41(2): 510–528.
- Guo Wenbo, Zheng Wenbao, Tang Juxing, et al. Geochemical constraints on the source of metallogenic fluids and materials in the Jiama polymetallic Cu deposit, Tibet[J]. *Geology in China*, 2014, 41(2): 510–528(in Chinese with English abstract).
- [25] Barnes H L. *Geochemistry of hydrothermal ore Deposits*[M]. John Wiley & Sons inc, 1979: 404–460.
- [26] 张德会. 流体的沸腾和混合在热液成矿中的意义[J]. *地球科学进展*, 1997, 12(6): 546–552.
- Zhang Dehui. Some new advances in ore–forming fluid geochemistry on boiling and mixing of fluid during the processes of hydrothermal deposit[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1997, 12(6): 546–552(in Chinese with English abstract).
- [27] Williams–Jones A E, Heinrich C A. Vapor transport of metals and the formation of magmatic–hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 2005, 100(7): 1287–1312.
- [28] Hezarkhani A. Hydrothermal fluid geochemistry at the Chah–Firuzeh porphyry copper deposit, Iran: Evidence from fluid inclusion[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009, 101(3):

- 254–264.
- [29] Rusk B G, Reed M H. Fluid inclusion evidence for magmatic–hydrothermal fluid evolution in the porphyry copper–molybdenum deposit at Butte, Montana[J]. *Economic Geology*, 2008, 103(2): 307–334.
- [30] 梁祥济. 钙铝–钙铁系列石榴子石的特征及其交代机理[J]. *岩石矿物学杂志*, 1994, 13(4): 342–352.
- Liang Xiangji. Garnets of grossular–andradite series: Their characteristics and metasomatic mechanism[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 1994, 13(4): 342–352(in Chinese with English abstract).
- [31] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科技出版社, 1984: 283–294.
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, et al. *Element geochemistry*[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1984: 283–294(in Chinese).

The effect of Si–Ca interface on skarn formation and polymetallic mineralization in the Jiama deposit, Tibet

YAO Xiao–feng^{1,2}, YE Tian–zhu¹, TANG Jv–xing³, ZHENG Wen–bao³,
DING Shuai⁴, LI Yong–sheng¹, ZHENG Shi–min¹

(1. *Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China*; 2. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 3. *Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment of Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 4. *Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*)

Abstract: The Jiama deposit is a superlarge copper–polymetallic deposit in Gangdise metallogenic belt in Tibet, and its main skarn type orebody is distributed along the interface between Early Cretaceous Linbung Formation hornfels (salic) and Late Jurassic Duodigou Formation marble (calc). Based on the zonation of skarn between the Si–Ca interface, the authors studied petrological geochemistry and mineral chemistry of skarns in different zones, with the purpose of studying the effect of Si–Ca interface on the formation of skarn and orebody. It is shown that the values of SiO₂ and CaO increase and the values of Al₂O₃ and TFe decrease downwards from garnet skarn through garnet wollastonite skarn to wollastonite skarn along the interface belt. The rare and trace elements geochemical characteristics of garnet skarn and wollastonite skarn are restricted by hornfels and marble respectively. Garnets within skarn near the roof of the Si–Ca interface are transition series between grossular and alchochroite, in which values of Al decrease and values of Fe increase from core outwards, while garnets within skarn near the bottom of the interface have more Fe values and less Al content than the former garnet series, in which values of Al and Fe change a bit from core outwards. Skarns are hydrothermal reaction products through alteration of salic and calc rocks. Fluid decompression boiling and groundwater mixing along the Si–Ca interface and vertical fluid geochemical barrier along the interface belt seem to have been the main factors influencing orebody formation in the Jiama deposit. The difference of chemistry and physical characteristics between salic and calc rocks had important effect on the ore–forming process along Si–Ca interface. The interface overlap extension structure and magmatic thermal event that increased permeability from roof to bottom along the interface belt contributed to the scale increase and grade enrichment of the orebody.

Key words: Jiama; Si–Ca interface; skarn; petrological geochemistry; mineral chemistry; ore–forming process

About the first author: YAO Xiao–feng, male, born in 1986, assistant researcher, doctor, mainly engages in the study of metallogenic regularity; E–mail: 289332792@qq.com.

About the corresponding author: TANG Jv–xing, male, born in 1964, professor, doctor, mainly engages in the study of economic geology; E–mail: tangjuxing@126.com.