

西藏墨竹工卡地区甲玛铜多金属矿床矽卡岩矿物学特征及其地质意义

王 焕¹, 唐菊兴¹, 王立强¹, 应立娟¹, 郑文宝², 唐晓倩²

WANG Huan¹, TANG Ju-xing¹, WANG Li-qiang¹,

YING Li-juan¹, ZHENG Wen-bao², TANG Xiao-qian²

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059

1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan China

摘要:为研究西藏甲玛铜多金属矿床中矽卡岩的矿物学特征,进一步确定矿床成因类型,利用电子探针测试和镜下鉴定手段对矽卡岩矿物中的石榴子石、辉石、硅灰石等矿物成分进行了分析。测试结果表明,矽卡岩中石榴子石以钙铁榴石-钙铝榴石为主,辉石以透辉石为主,甲玛矿床矽卡岩属于交代矽卡岩中典型的钙矽卡岩。结合前人对矿区矽卡岩、围岩和花岗岩类的岩石地球化学、矿床成矿年代学等的研究,进一步证实甲玛铜多金属矿床系矿区花岗岩类岩浆交代大理岩形成的典型矽卡岩型矿床。

关键词:矽卡岩矿物;地球化学;矿床成因;西藏甲玛地区

中图分类号: P618.41; P57

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2011)05-0783-15

Wang H, Tang J X, Wang L Q, Ying L J, Zheng W B, Tang X Q. Mineralogical characteristics of skarns in the Jiama copper polymetallic deposit of Mozhuogongka area, Tibet and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30 (5):783-797

Abstract: In order to study mineralogical characteristics of skarns in the Jiama copper polymetallic deposit and further identify genetic type of this ore deposit, this paper has studied such skarn minerals as garnet, augite and wollastonite by means of electron microprobe analysis and microscopic examination. The results show that garnets in the ore deposit are mainly andradite-grossularite and augites are mainly diopside. The skarns in the Jiama ore deposit belong to typical calcic skarns. Based on previous researches on the geochemistry of skarns, wall rocks, granite and on geochronology, this paper has revealed the genetic mechanism of the Jiama copper polymetallic deposit. Mineralization was closely related to the granites and the ore deposit resulted from the replacement of the marble by granitoid magma. The Jiama ore deposit is a typical skarn deposit.

Key words: skarn mineral; geochemistry; genesis of the ore deposit; Jiama area, Tibet

西藏甲玛铜多金属矿床自20世纪50年代发现至今,通过2008年以来的找矿勘查和科学研究工作取得了重大进展,现已经成为藏中有色金属开发基地唯一一个步入开发阶段的超大型铜多金属矿

床。随着研究的不断深入,甲玛铜多金属矿床成矿模型日益得到完善,形成了斑岩-矽卡岩-角闪岩型三位一体的成矿模式^[1-2]。尽管如此,矿床岩石学和矿物学研究依然薄弱。本文选取矽卡岩型矿体的主要矽

收稿日期:2011-02-13;修订日期:2011-03-18

资助项目:国家“973”项目(编号:2011CB403103)、中央公益性行业科研专项《西藏甲玛斑岩铜多金属矿科学基地研究》课题(编号:200911007-02)、青藏专项(编号:1212010012005)、中金集团重点勘探项目(编号:E0804)

作者简介:王焕(1983-),女,硕士,从事矿物学和矿床学研究。E-mail: wanghuan0920@tom.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

卡岩矿物进行电子探针分析, 进一步阐述矽卡岩矿物的特征, 为矿床成因的确定提供依据。

1 矿床地质概况

甲玛铜多金属矿床位于西藏特提斯构造域冈底斯斑岩成矿带东段, 矿区出露地层主要为一套被动陆缘碎屑-碳酸盐岩岩系, 包括上侏罗统多底沟组(J_3d)、下白垩统林布宗组(K_1l)和少量第四系(Q)。下白垩统林布宗组为矿区出露面积最广的地层, 岩性以砂岩、板岩、角岩为主。上侏罗统多底沟组分布于矿区南部和西北部牛马塘一带, 岩性为灰黑色中厚

层灰岩、大理岩(图 1)。矿区岩浆活动频繁, 岩浆岩石类型、侵入期次较多, 含矿性较好的岩浆岩主要是偏中性的斑岩体^[3]。矿区构造以推覆、滑覆构造及由此形成的层间构造为主, 层间扩容构造为矽卡岩矿体的主要赋存空间^[1]。

甲玛铜多金属矿床矿石成因类型可分为斑岩型钼(铜)矿石、矽卡岩型铜铅锌钼多金属矿石、角岩型钼(铜)矿石等, 以矽卡岩型矿石为主。矿石矿物以斑铜矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿、辉钼矿等为主, 次为辉铜矿、铜蓝、孔雀石、含金银矿物和铋、钨矿物等。脉石矿物以矽卡岩矿物、石英等为主, 次为

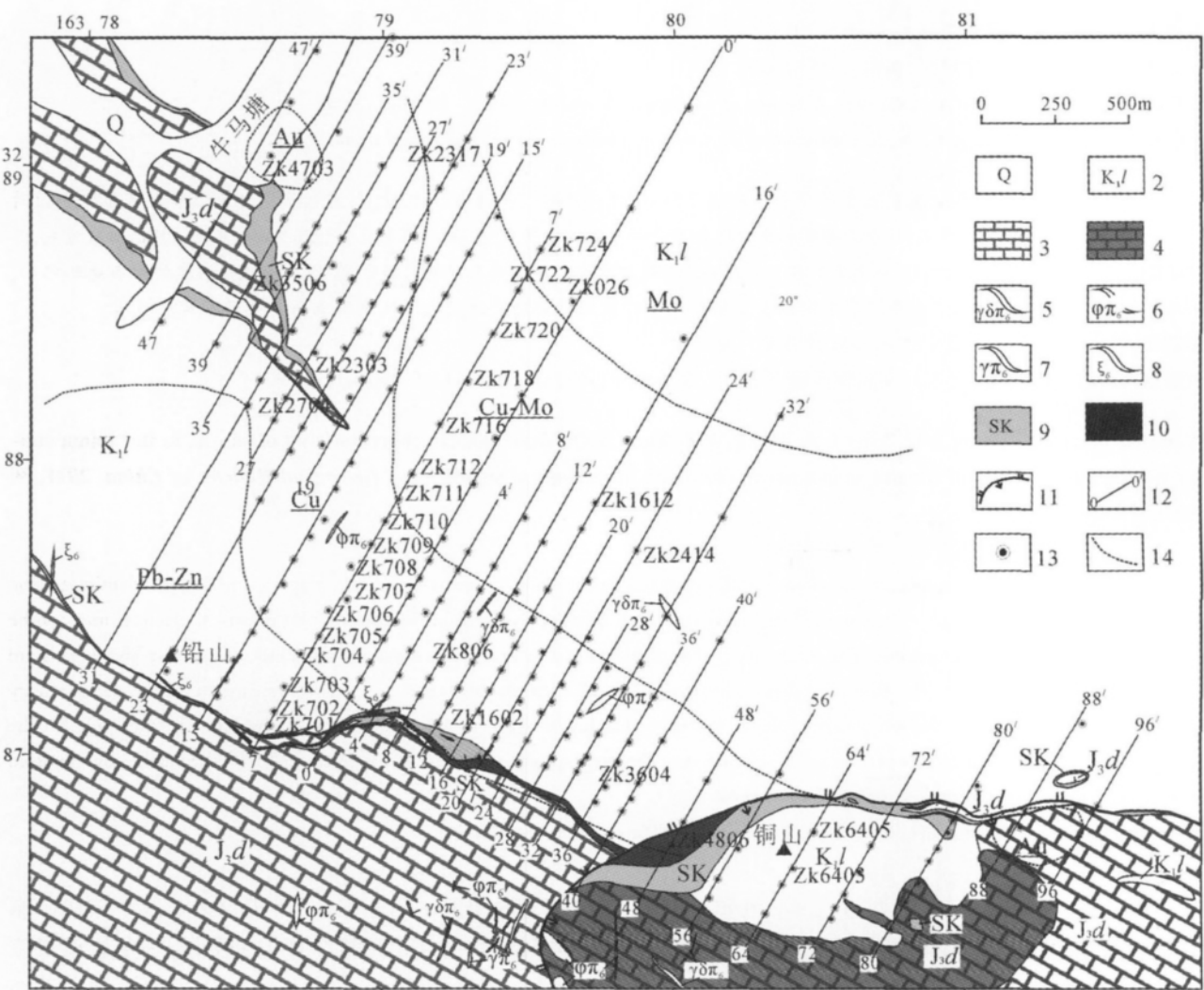
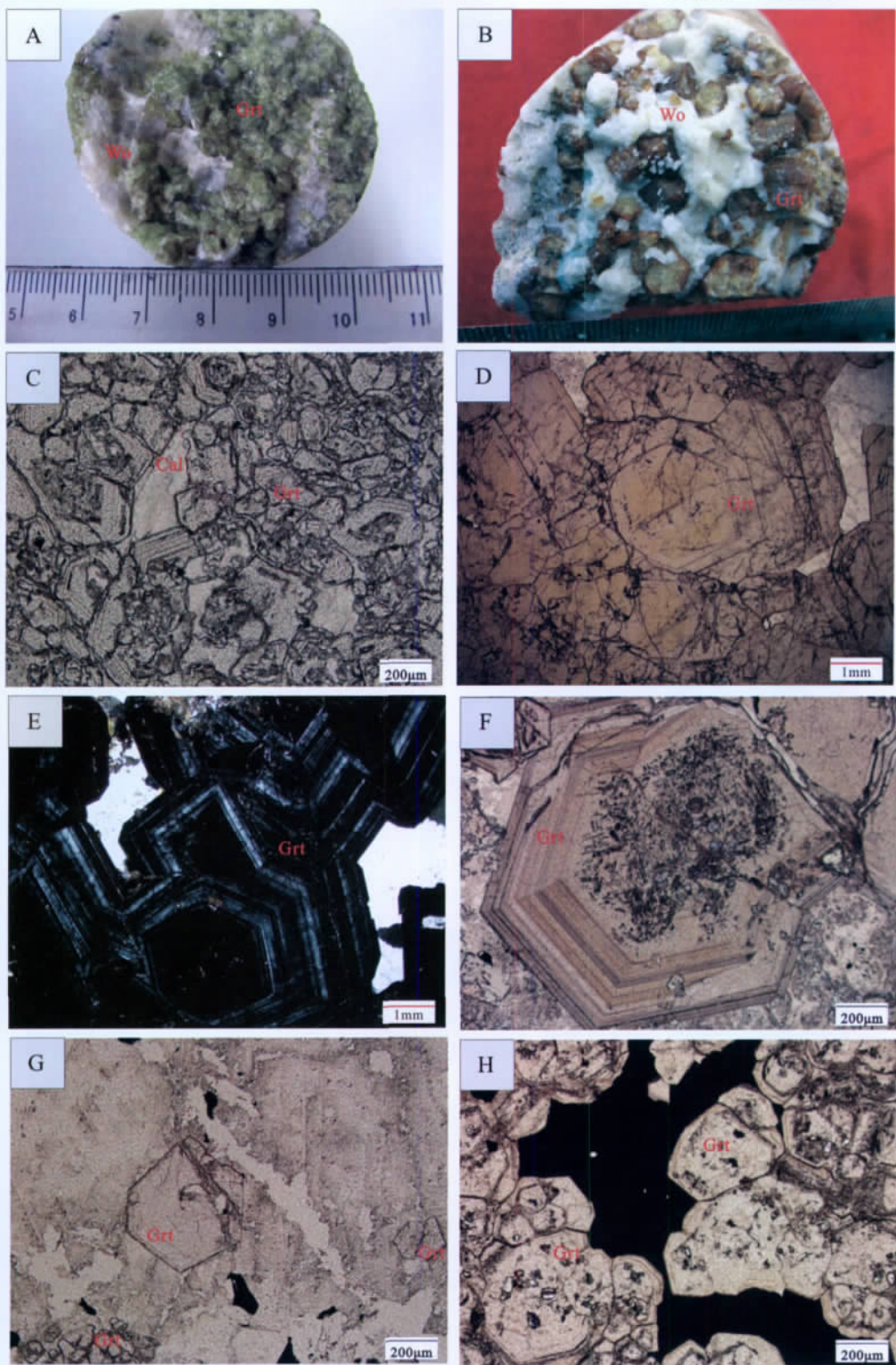


图 1 甲玛铜多金属矿床地质简图和元素分带(据参考文献①修改)

Fig. 1 Simplified geological map and ore element zoning of the Jiamay Cu polymetallic ore deposit

- 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—石英钠长斑岩脉;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—钻孔;14—元素分带界线

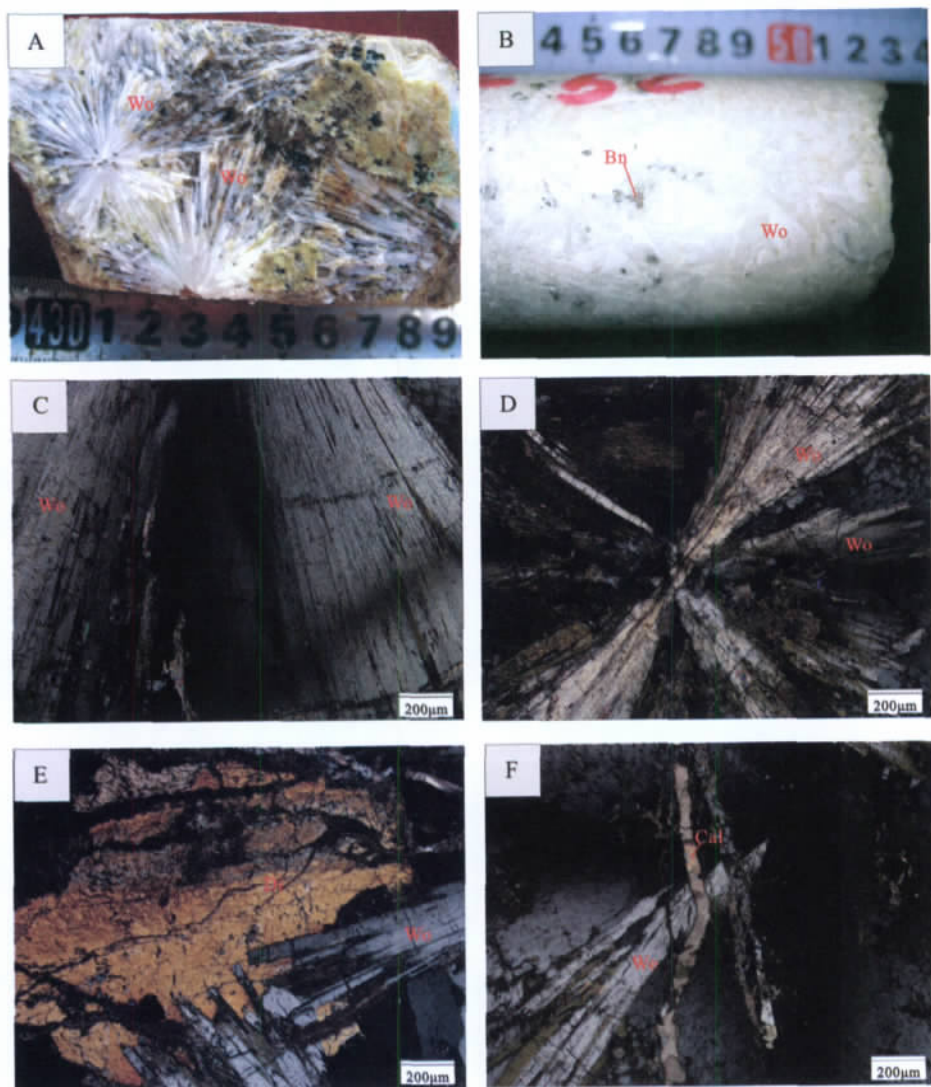
图版 I Plate I



A. ZK4806-548.48m 硅灰石石榴子石矽卡岩中的黄绿色石榴子石颗粒;B. ZK1612-477.7m 硅灰石石榴子石矽卡岩中的自形石榴子石; C. ZK2001-101.2m 石榴子石矽卡岩中的淡褐色石榴子石(单偏光);D. ZK3604-464.9m 石榴子石矽卡岩中的黄褐色石榴子石(单偏光); E. ZK3604-464.9m 石榴子石矽卡岩中石榴子石环带(正交偏光); F. ZK1602-108.8m 石榴子石矽卡岩中的环带石榴子石蚀变(单偏光); G. ZK2001-101.2m 石榴子石矽卡岩中的石榴子石错断及碎裂(单偏光);H. ZK6405-146.4m 石榴子石矽卡岩石榴子石颗粒间的金属矿物(单偏光);

Grt—石榴子石;Cal—方解石;Wo—硅灰石;ZK4806—钻孔号;548.48m—孔深

图版 II Plate II



A. ZK018—321.52 m 硅灰石矽卡岩中的放射状硅灰石; B. ZK2303—50.60m 硅灰石矽卡岩中的硅灰石;
C. ZK5601—64.9m 硅灰石矽卡岩中的硅灰石一级灰白干涉色(正交偏光); D. ZK5601—64.9m 硅灰石
矽卡岩中的硅灰石一级黄白干涉色(正交偏光); E. ZK5601—64.9m 硅灰石矽卡岩中硅灰石穿插透辉石
(正交偏光); F. ZK5601—64.9m 硅灰石矽卡岩中石英穿插硅灰石形成错断(正交偏光);
ZK018—钻孔号; 321.52m—孔深; Wo—硅灰石; Bn—斑铜矿; Di—透辉石; Cal—方解石

斜长石、钾长石、石膏、绿泥石、萤石、方解石等。矿床围岩蚀变主要为角岩化、矽卡岩化、大理岩化、硅化及斑岩体中钾化、硅化、黄铁绢英岩化,局部见矽卡岩矿物退变质作用形成的泥化、青磐岩化。

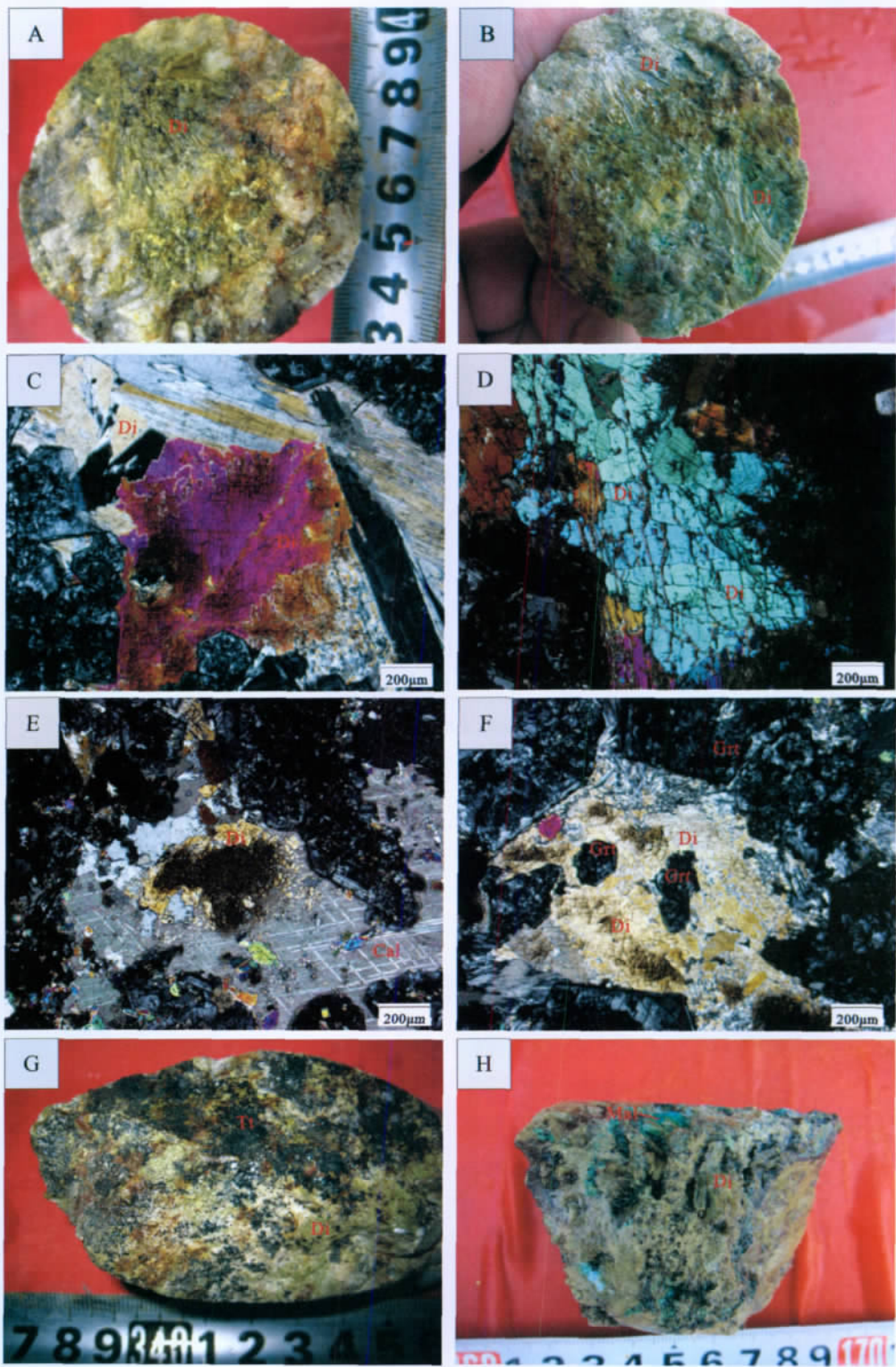
2 矽卡岩的特征

2.1 矽卡岩和矽卡岩矿体

矽卡岩型铜多金属矿体作为甲玛矿床的主要矿体类型,赋存于多底沟组与林布宗组之间。林布宗组

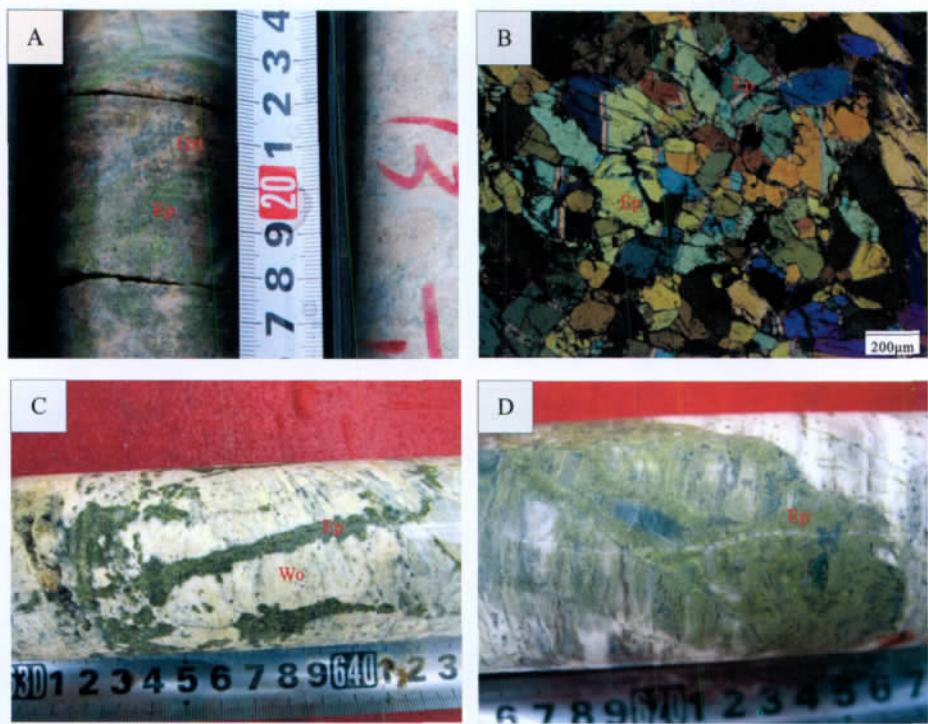
角岩、砂板岩和多底沟组大理岩分别为矽卡岩矿体的顶底板。矽卡岩型矿体由规模巨大的层状、似层状 I-1 号主矿体和 8 个透镜状、似层状小矿体 (I-2~I-9) 组成,矿体为北西西走向,倾向北北东,沿走向延伸近 4000m,沿倾向延伸近 3200m。其中 I-1 号矽卡岩型主矿体主要受多底沟组与林布宗组的层间构造和甲玛—卡军果推覆构造体系的控制,其它 8 个小矿体均产于矿区滑覆体内,受滑覆构造的控制。

图版 III Plate III



A. ZK3506-17.2m 矽卡岩中的放射状透辉石; B. ZK2319-625.1m 矽卡岩中的墨绿色透辉石; C. ZK3108-44.8m 石榴子石硅灰石矽卡岩中的高干涉色透辉石(正交偏光); D. ZK5601-64.3m 硅灰石石榴子石矽卡岩中透辉石近于正交的辉石式解理(正交偏光); E. ZK3108-44.8m 石榴子石硅灰石矽卡岩中透辉石退化蚀变现象(正交偏光); F. ZK3108-44.8m 石榴子石-硅灰石矽卡岩透辉石包裹自形石榴子石(正交偏光); G. ZK6403-98.4 m 透辉石矽卡岩中的浸染状黝铜矿; H. ZK4703-69.53m 矽卡岩破碎带中的透辉石、孔雀石; ZK3506-17.2m 一钻孔号; 17.2m 一孔深; Di-透辉石; Cal-方解石; Grt-石榴子石。

图版Ⅳ PlateⅣ



A. ZK806-167.1m 石榴子石砂卡岩中的绿帘石; B. ZK5601-64.3m 硅灰石-石榴子石砂卡岩中绿帘石成群出现(正交偏光); C. ZK2319-624.3m 砂卡岩中的绿帘石化; D. ZK2317-386.22m 砂卡岩化角岩中的绿帘石; ZK806—钻孔号; 167.1m—孔深; Ep—绿帘石; Grt—石榴子石; Wo—硅灰石

表 1 甲玛矿床砂卡岩矿物和主要金属元素分带特征

Table 1 Characteristics of skarn minerals zoning and main metallic elements zoning

海拔/m	有用元素组合	砂卡岩矿物分带趋势	元素品位变化/%			
			Pb	Zn	Cu	Mo
4900~4800	Pb-Zn	石榴子石+绿帘石(透辉石)				
		石榴子石+透辉石(透闪石-电气石)				
4800~4700	Cu-Mo Pb-Zn	石榴子石				
		石榴子石+硅灰石				
4700~4600	Cu(Mo)	硅灰石+石榴子石				
4600~4500	Mo(Cu)	硅灰石				

根据主要的砂卡岩矿物组合可将矿床砂卡岩划分为石榴子石砂卡岩、硅灰石砂卡岩、透辉石砂卡岩、透辉石-石榴子石砂卡岩、硅灰石-石榴子石砂卡岩、石榴子石-硅灰石砂卡岩、透闪石-石榴子石砂卡岩、绿帘石-硅灰石砂卡岩等,以石榴子石砂卡岩、硅灰石砂卡岩为主。硅灰石砂卡岩矿物组合为硅灰石+少量石榴子石,石榴子石砂卡岩矿物组合为石榴子石+辉石+少量硅灰石+少量透闪石。

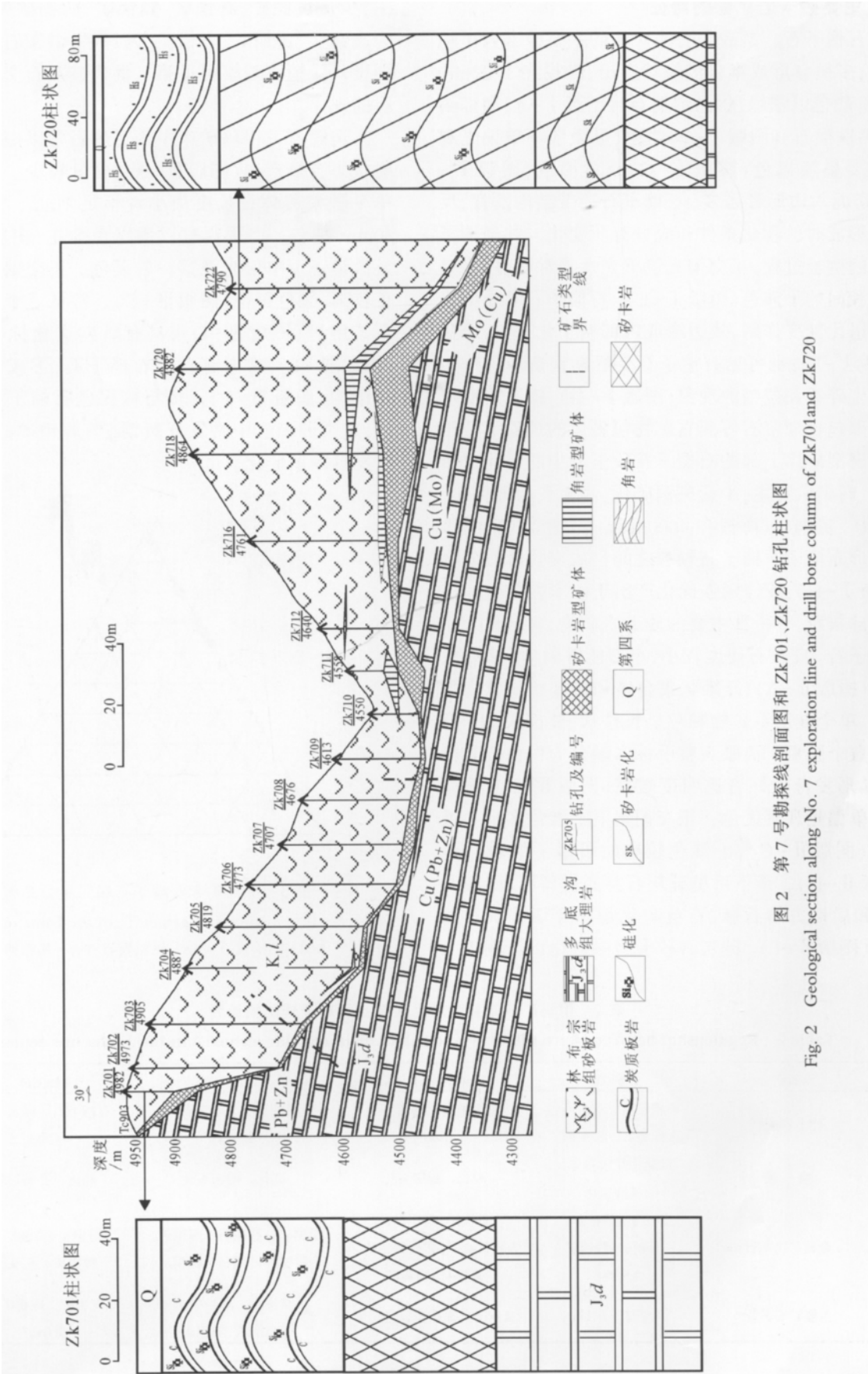


图 2 第 7 号勘探线剖面图和 Zk701、Zk720 钻孔柱状图

Fig. 2 Geological section along No. 7 exploration line and drill bore column of Zk701 and Zk720

2.2 主要矽卡岩矿物的特征

石榴子石,是矽卡岩型矿体的主要矽卡岩矿物之一,多呈自形或半自形粒状产出,粒径在 1~20mm 之间。颜色以翠绿色(钙铝榴石)(图版 I-A)和棕褐色(钙铁榴石)(图版 I-B)为主,显微镜下单偏光观察主要呈淡褐色(图版 I-C)或黄褐色(图版 I-D),切面六边形者居多。石榴子石环带结构发育,反映其形成时的物化条件和成分有所变化,并经历了较长的生长过程。正交偏光镜下光性异常明显,多呈黑白相间的干涉色(图版 I-E)。石榴子石常受到后期的退化蚀变作用,致边缘或内部粘土化、绢云母化(图版 I-F);也可见石榴子石受后期构造应力作用而发生碎裂和位错的现象(图版 I-G)。镜下观察可见内部包含绿帘石等其它矿物包裹体的现象。位于矽卡岩型矿体上部的石榴子石矽卡岩中的矿化以黄铜矿、辉钼矿为主,少量斑铜矿化,浅地表为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿(海拔在 4600m 以上)。金属矿物多呈它形充填于石榴子石颗粒之间,或交代脉石矿物(图版 I-H),或伴随强硅化产出于矽卡岩中。

硅灰石,另一种主要的矽卡岩矿物,含量仅次于石榴子石。硅灰石硬度较小,小刀能够刻动。多以放射状(图版 II-A)、纤维状集合体和局部团块状密集产出。单个硅灰石矿物颗粒呈长柱状,柱长从几个毫米到数个厘米。肉眼观察手标本颜色为白色或乳白色,晶形发育较好者透明度较高(图版 II-B);显微镜下单偏光观察无色,正交偏光下干涉色多呈一级灰白(图版 II-C),干涉色较高时可呈一级黄白色(图版 II-D)。镜下可见硅灰石穿插透辉石(图版 II-E)和后期方解石脉、石英硫化物脉穿切硅灰石的现象(图版 II-F)。硅灰石矽卡岩中矿化以斑铜矿为

主,少量黄铜矿、辉铜矿、黝铜矿、辉钼矿等,近地表为斑铜矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿。硅灰石有 2 个不同世代,镜下观察可见第二世代硅灰石交代石榴子石的现象。

透辉石,甲玛矿床中的透辉石常以短柱状或放射状集合体产出(图版 III-A),含量较少。晶形好的单个颗粒透辉石长度最小者不足 1mm,最大可达 30mm 左右。肉眼观察以墨绿色为主(图版 III-B),显微镜镜下单偏光观察一般无色,正交偏光下干涉色较高、颜色鲜艳(图版 III-C)。常见近于正交的辉石式解理(图版 III-D),具有后期退化蚀变的现象(图版 III-E),常嵌有自形石榴子石,形成典型的嵌晶结构(图版 III-F)。多与棕褐色石榴子石密切共生,这类矽卡岩中常发育黄铜矿+辉钼矿的矿化,有时发育黝铜矿化。

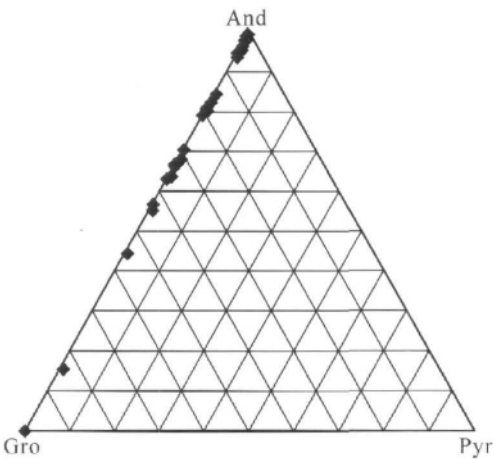


图 3 甲玛矿床石榴子石端元组分解
Fig. 3 End members of garnets from the Jiamma ore deposit
And—钙铁榴石;Gro—钙铝榴石;Pyr—镁铝榴石

表 2 甲玛矿床主要金属元素组合和矽卡岩矿物组合

Table 2 Relationship between skarn mineral groups and main metallic elements in the Jiamma ore deposit

元素组合	Pb+Zn	Cu、Mo(Pb+Zn)、(Au-Ag)	Cu(Mo)	Mo(Cu)
矽卡岩矿物	石榴子石、透辉石、 绿帘石、硅灰石	石榴子石、绿帘石、 硅灰石	石榴子石、绿帘石、 硅灰石	石榴子石、硅灰石、 绿帘石
蚀 变	硅化、绿帘石化、 碳酸盐化	硅化、绿帘石化	硅化、绿帘石化	硅化、孔雀石化
金属矿物组合	方铅矿+闪锌矿、 黄铜矿+黝铜矿 +辉铜矿	黄铜矿+斑铜矿、 方铅矿+闪锌矿、辉钼矿、 斑铜矿+黝铜矿	黄铜矿、孔雀石、辉钼矿、 黄铜矿+斑铜矿+黝铜矿	斑铜矿+黄铜矿、 辉钼矿、孔雀石
主要矿石矿物	方铅矿、闪锌矿	黄铜矿、斑铜矿、方铅矿	黄铜矿、辉钼矿、 斑铜矿、黝铜矿	辉钼矿、斑铜矿、 黄铜矿

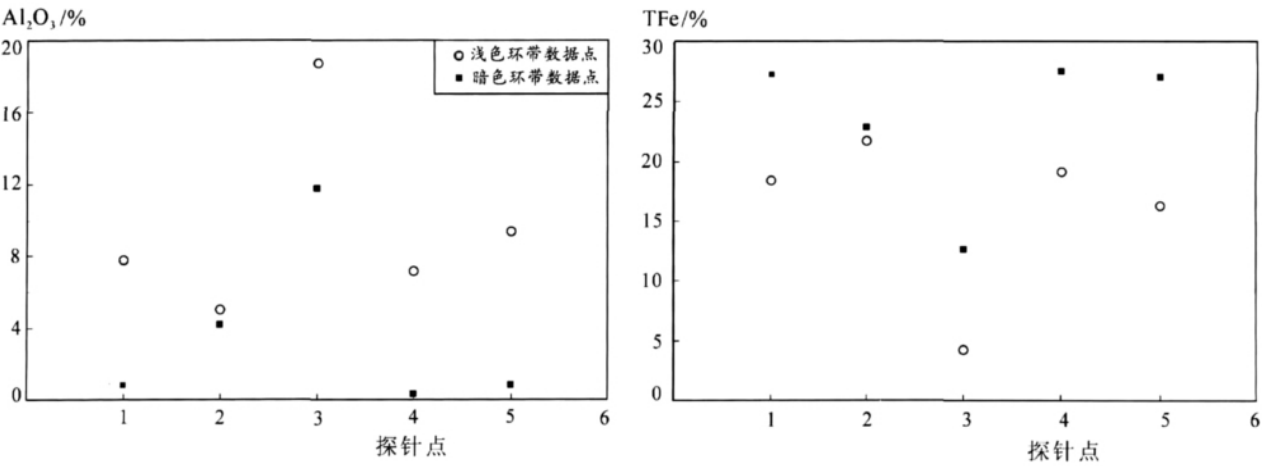


图 4 甲玛矿床石榴子石 Al_2O_3 、TFe 含量与环带干涉色的关系

Fig. 4 Relationship between content of Al_2O_3 , TFe and interference colors of garnets in the Jiama ore deposit

表 3 甲玛矿床石榴子石电子探针分析结果和端元组分

Table 3 Electron microprobe analyses, ion proportions and end members of representative garnets from the Jiama ore deposit

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	NiO	K ₂ O	总和
JM1602-108.8	35.917	0.092	7.767	0.058	18.422	0.272	0.021	34.791	0.000	0.000	0.008	97.359
JM1602-108.8	36.053	0.058	5.040	0.017	21.710	0.185	0.029	34.712	0.058	0.000	0.000	97.862
JM1602-108.8	35.559	0.018	0.824	0.000	27.226	0.106	0.051	33.891	0.000	0.043	0.009	97.738
JM1602-108.8	35.601	0.009	4.177	0.025	22.782	0.154	0.004	34.529	0.041	0.016	0.016	97.373
JM1602-127.7	37.972	0.783	18.735	0.013	4.234	0.677	0.224	36.171	0.028	0.013	0.001	98.879
JM1602-127.7	37.173	1.182	11.734	0.009	12.580	0.162	0.180	35.918	0.030	0.033	0.000	99.033
JM1602-127.7	36.570	0.000	6.836	0.019	19.157	0.133	0.098	35.137	0.000	0.000	0.000	97.988
JM1604-200.7	35.781	0.059	5.845	0.004	21.010	0.154	0.016	34.730	0.005	0.016	0.000	97.657
JM1604-200.7	35.122	0.071	1.184	0.000	26.376	0.213	0.000	33.698	0.000	0.029	0.000	96.766
JM2805-449.5	36.545	0.133	7.138	0.019	19.186	0.455	0.089	34.425	0.018	0.000	0.000	98.037
JM2805-449.5	35.459	0.000	0.304	0.008	27.547	0.044	0.000	33.776	0.024	0.022	0.006	97.248
JM8003-215.2-B4	35.203	0.880	9.361	0.041	16.287	0.344	0.008	35.242	0.033	0.000	0.002	97.418
JM8003-215.2-B4	35.011	0.015	0.775	0.000	27.081	0.242	0.088	34.058	0.000	0.011	0.000	97.333
JM2409-429.75	35.581	0.000	0.026	0.000	26.943	0.191	0.019	33.473	0.000	0.009	0.000	96.261
JM2409-429.75	36.010	0.000	0.013	0.008	28.211	0.229	0.008	33.550	0.000	0.029	0.000	98.063
JM2409-429.75	35.721	0.000	0.052	0.000	28.082	0.256	0.051	33.480	0.020	0.055	0.000	97.728
JM1602-63.8	36.874	0.236	8.480	0.039	16.905	0.379	0.112	35.034	0.005	0.011	0.000	98.085
JM1602-63.8	36.679	0.507	9.464	0.004	15.903	0.532	0.230	34.625	0.117	0.000	0.020	98.106
JM1602-63.8	36.371	0.427	6.369	0.000	18.969	0.313	0.173	34.791	0.000	0.006	0.000	97.419
JM2409-391.35	36.449	1.049	8.069	0.000	16.763	0.414	0.003	35.049	0.038	0.000	0.004	97.839
JM2409-391.35	37.903	0.245	14.871	0.026	9.028	0.988	0.086	35.315	0.061	0.000	0.014	98.551
JM2409-431.9	35.412	0.006	0.266	0.009	27.477	0.270	0.128	33.533	0.000	0.016	0.000	97.120
JM2805-449.5	35.776	0.023	3.882	0.006	22.815	0.160	0.150	34.174	0.075	0.000	0.000	97.061

续表 3

样号	Si	Ti	Al	Cr	Fe ³⁺	Mn	Mg	Ca	And	Gro	Pyr	Spe
JM1602-108.8	2.941	0.006	0.750	0.004	1.282	0.019	0.003	3.052	62.990	36.800	0.080	0.620
JM1602-108.8	2.963	0.004	0.488	0.001	1.533	0.013	0.004	3.057	75.800	24.930	0.120	0.420
JM1602-108.8	2.975	0.001	0.081	0.000	1.934	0.008	0.006	3.039	95.970	4.530	0.210	0.250
JM1602-108.8	2.955	0.001	0.409	0.002	1.619	0.011	0.000	3.071	79.790	21.000	0.020	0.360
JM1602-127.7	2.931	0.045	1.704	0.001	0.311	0.044	0.026	2.991	15.420	83.470	0.850	1.460
JM1602-127.7	2.934	0.070	1.092	0.001	0.905	0.011	0.021	3.038	45.310	56.080	0.710	0.360
JM1602-127.7	2.974	0.000	0.655	0.001	1.361	0.009	0.012	3.062	67.450	33.690	0.390	0.300
JM1604-200.7	2.944	0.004	0.567	0.000	1.468	0.011	0.002	3.062	72.130	28.160	0.060	0.350
JM1604-200.7	2.967	0.005	0.118	0.000	1.901	0.015	0.000	3.050	94.160	6.570	0.000	0.500
JM2805-449.5	2.972	0.008	0.684	0.001	1.328	0.031	0.011	3.000	65.950	33.340	0.360	1.040
JM2805-449.5	2.987	0.000	0.030	0.001	1.978	0.003	0.000	3.048	98.470	2.650	0.000	0.100
JM8003-215.2-B4	2.873	0.054	0.900	0.003	1.145	0.024	0.001	3.082	55.920	44.250	0.030	0.770
JM8003-215.2-B4	2.948	0.001	0.077	0.000	1.957	0.017	0.011	3.073	96.220	4.490	0.360	0.570
JM2409-429.75	3.017	0.000	0.003	0.000	1.986	0.014	0.002	3.041	99.870	2.100	0.080	0.460
JM2409-429.75	3.006	0.000	0.001	0.001	1.994	0.016	0.001	3.001	99.910	0.310	0.030	0.540
JM2409-429.75	2.996	0.000	0.005	0.000	1.998	0.018	0.006	3.008	99.740	0.380	0.210	0.610
JM1602-63.8	2.975	0.014	0.806	0.002	1.198	0.026	0.013	3.029	59.700	40.780	0.450	0.860
JM1602-63.8	2.955	0.031	0.899	0.000	1.110	0.036	0.028	2.989	55.260	43.890	0.920	1.200
JM1602-63.8	2.973	0.026	0.614	0.000	1.387	0.022	0.021	3.047	69.320	32.240	0.700	0.720
JM2409-391.35	2.951	0.064	0.770	0.000	1.220	0.028	0.000	3.041	61.300	40.570	0.010	0.950
JM2409-391.35	2.976	0.014	1.376	0.002	0.629	0.066	0.010	2.971	31.350	67.260	0.330	2.180
JM2409-431.9	2.984	0.000	0.026	0.001	1.983	0.019	0.016	3.027	98.660	1.700	0.530	0.640
JM2805-449.5	2.974	0.001	0.380	0.000	1.636	0.011	0.019	3.044	81.120	19.510	0.610	0.370

注:含量%

绿帘石,矽卡岩阶段形成的绿帘石粒度较细小,多呈弥散状(图版IV-A)、不规则状;显微镜下鉴定见其呈较自形颗粒或成群出现(图版IV-B)。在矽卡岩退化蚀变作用阶段或矽卡岩裂隙中可见晶形较好的绿帘石(图版IV-C)。岩心中的绿帘石多为翠绿色,镜下为黄绿色、弱多色性,干涉色较高,颜色鲜艳,可见其被石榴子石等矿物包裹。绿帘石出现在靠近上部矽卡岩化角岩的部位,在矽卡岩化角岩中也有大量绿帘石存在(图版IV-D),与矿化关系不密切。

2.3 矽卡岩矿物分带

笔者通过大量岩心编录,对甲玛铜多金属矿床中矽卡岩矿物的基本分带特征、主要金属元素品位变化进行归纳总结,结果见表1。研究表明,甲玛铜多金属矿床矽卡岩矿物自下而上多呈现出硅灰石→

硅灰石+石榴子石→石榴子石+硅灰石→石榴子石+透辉石+(透闪石、电气石)→石榴子石+绿帘石+(透辉石)的分带现象。有用金属元素 Pb、Zn 多在矽卡岩矿体上部富集,形成有用矿体;而元素 Cu、Mo 主要产于矽卡岩体较下部的层位。

现以 7 号勘探线为例具体说明(图 2,表 2)。以铅—锌矿为主的钻孔(以 Zk701 为典型钻孔)柱状图上层位结构典型,由上向下依次为第四系残坡积物→炭质板岩(硅化)→矽卡岩→大理岩,矿体赋存在矽卡岩中,矽卡岩矿物以石榴子石为主,约占矽卡岩矿物的 65%,其次为硅灰石,含量约占矽卡岩矿物的 20%,矿石矿物方铅矿与闪锌矿多伴生产出。以铜—钼矿为主的钻孔(以 Zk720 为典型钻孔)柱状图上结构较为复杂,为第四系残坡积物→炭质板岩(角岩化)→硅化角岩→矽卡岩化角岩→矽卡岩→矽卡

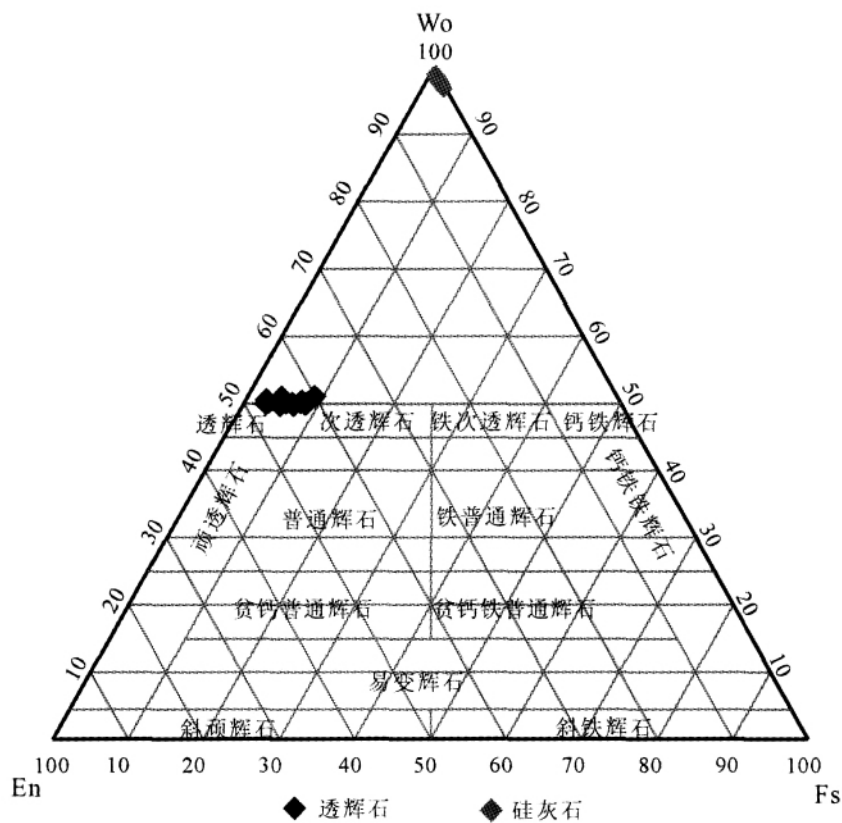


图 5 甲玛矿床辉石和硅灰石分类图解(底图据参考文献 [6])

Fig. 5 Classification of pyroxenes in the Jiama ore deposit

表 4 甲玛矿床辉石分析结果和阳离子数、端元组分

Table 4 Electron microprobe analyses, ion proportions and end members of representative pyroxenes from the Jiama ore deposit

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	NiO	K ₂ O	总和
JM2409-429.75	54.684	0.008	0.399	0.013	0.957	0.449	17.407	25.841	0.121	0.011	0.000	99.890
JM2409-429.75	54.054	0.001	0.039	0.027	1.800	0.886	16.780	25.965	0.000	0.040	0.000	99.592
JM2409-429.75	54.444	0.023	0.026	0.009	0.888	0.706	17.484	25.923	0.000	0.000	0.000	99.503
JM2409-429.75	54.015	0.012	0.137	0.000	1.608	0.797	16.268	25.766	0.000	0.028	0.001	98.632
JM2409-453.1	54.994	0.000	0.162	0.000	0.641	0.754	17.422	25.543	0.023	0.003	0.019	99.561
JM2409-455.85	53.709	0.004	0.198	0.031	4.118	0.701	15.471	25.412	0.119	0.015	0.000	99.778
JM2409-455.85	54.627	0.015	0.225	0.000	2.993	0.728	16.141	25.588	0.100	0.031	0.000	100.448
JM2409-455.85	51.656	0.009	0.301	0.196	4.281	0.777	14.116	24.789	0.027	0.068	0.002	96.222
JM2409-455.85	53.362	0.020	0.184	0.002	3.500	0.783	15.606	25.463	0.101	0.018	0.005	99.044
JM2409-455.85	53.488	0.013	0.371	0.000	2.110	0.702	16.591	25.703	0.050	0.063	0.000	99.091
JM2805-449.5	53.469	0.000	0.054	0.009	2.336	0.740	16.434	25.703	0.000	0.000	0.000	98.745
JM2805-449.5	53.478	0.000	0.102	0.000	3.092	0.769	16.200	25.511	0.000	0.000	0.000	99.152
JM2805-449.5	53.581	0.024	0.358	0.000	0.973	0.262	17.258	25.783	0.043	0.000	0.000	98.282
JM2805-449.5	54.339	0.011	0.345	0.036	2.268	0.401	16.815	25.484	0.128	0.000	0.003	99.830
JM2805-449.5	53.192	0.000	0.043	0.000	4.032	0.882	15.412	25.577	0.042	0.000	0.000	99.180
JM2805-449.5	53.307	0.000	0.049	0.029	3.571	0.865	15.470	25.486	0.000	0.008	0.000	98.785

续表 4

样号	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Wo	En	Fs
JM2409-429.75	1.988	0.012	0.005	0.000	0.000	0.022	0.007	0.014	0.943	1.007	0.009	0.000	50.29	47.14	2.14
JM2409-429.75	1.986	0.000	0.000	0.000	0.001	0.038	0.017	0.028	0.919	1.022	0.000	0.000	50.50	45.41	4.09
JM2409-429.75	1.990	0.001	0.000	0.001	0.000	0.026	0.001	0.022	0.953	1.015	0.000	0.000	50.34	47.24	2.43
JM2409-429.75	1.998	0.002	0.004	0.000	0.000	0.000	0.050	0.025	0.897	1.021	0.000	0.000	51.24	45.01	3.75
JM2409-453.1	2.002	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.020	0.023	0.945	0.996	0.002	0.001	50.16	47.60	2.15
JM2409-455.85	1.986	0.000	0.000	0.000	0.001	0.040	0.087	0.022	0.853	1.007	0.009	0.000	49.91	42.28	7.38
JM2409-455.85	1.994	0.006	0.004	0.000	0.000	0.013	0.079	0.023	0.878	1.001	0.007	0.000	50.04	43.92	5.69
JM2409-455.85	1.987	0.013	0.001	0.000	0.006	0.011	0.126	0.025	0.810	1.022	0.002	0.000	51.18	40.55	8.16
JM2409-455.85	1.985	0.001	0.000	0.001	0.000	0.043	0.065	0.025	0.865	1.015	0.007	0.000	50.22	42.83	6.59
JM2409-455.85	1.977	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049	0.016	0.022	0.914	1.018	0.004	0.000	50.33	45.20	4.30
JM2805-449.5	1.984	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043	0.030	0.023	0.909	1.022	0.000	0.000	50.43	44.86	4.71
JM2805-449.5	1.982	0.000	0.000	0.000	0.000	0.046	0.050	0.024	0.895	1.013	0.000	0.000	49.96	44.14	5.90
JM2805-449.5	1.981	0.001	0.000	0.001	0.000	0.035	0.000	0.008	0.951	1.022	0.003	0.000	50.72	47.23	1.90
JM2805-449.5	1.987	0.013	0.002	0.000	0.001	0.028	0.041	0.012	0.917	0.998	0.009	0.000	49.78	45.70	4.07
JM2805-449.5	1.982	0.000	0.000	0.000	0.000	0.055	0.071	0.028	0.856	1.021	0.003	0.000	50.22	42.11	7.52
JM2805-449.5	1.989	0.000	0.000	0.000	0.001	0.029	0.082	0.027	0.860	1.019	0.000	0.000	50.49	42.64	6.86

注:含量%

岩化大理岩→大理岩,矿体赋存在矽卡岩化角岩和矽卡岩中。矽卡岩矿物具有分带性:与角岩接触过渡部分出现一小段不含矿的石榴子石矽卡岩,石榴子石晶形较好,多为钙铝榴石(黄绿色);向下为块状石榴子石,矿化较好,石榴子石粒度逐渐变大,多出现钙铁榴石(棕褐色),矿石矿物以黄铜矿为主,其次为辉钼矿;在靠近下部大理岩部分开始出现硅灰石石榴子石矽卡岩,进而过渡为硅灰石矽卡岩,矽卡岩矿物以硅灰石为主,可见少量透辉石硅灰石矽卡岩,矿石矿物以斑铜矿为主,其次为黝铜矿、黄铜矿,少量辉钼矿(表 2)。

3 电子探针分析

3.1 样品和分析方法

本次研究对采自钻孔岩心中典型的矽卡岩矿物石榴子石、透辉石和硅灰石进行了电子探针分析,这些样品均为矿床干矽卡岩阶段典型的矽卡岩。电子探针分析在中国地质科学院矿产资源研究所完成,采用仪器为 JXA-8800 型电子探针,测试加速电压为 20kV,束电流为 20nA,束斑直径为 5μm。

3.2 石榴子石分析结果

甲玛矿床 26 件矽卡岩样品中石榴子石的电子探针分析结果见表 3。计算出的石榴子石端元组分如表 3 和图 3 所示,端元组分以钙铁榴石为主,变化范围为 15.42%~99.88%,平均值 77.68%;其次为钙铝榴石,含量变化范围为 0.38%~83.47%,平均值为 22.53,其较大的成分变化特征反映出矽卡岩不是在一个完全封闭的平衡条件下形成的^[4]。

甲玛矿床石榴子石环带结构十分发育,根据该特征对部分石榴子石样品分别按照内核—中部边缘(如:样品 JM2409-429.75、JM1602-63.8)和浅色—暗色环带的不同(如:样品 JM1602-108.8、JM1602-127.7 等)进行了电子探针分析。分析结果表明,甲玛矿床石榴子石从内带到外带成分有所变化,反映了石榴子石在形成过程中物理化学环境有所改变^[5];石榴子石暗带相对于浅色带普遍具有 SiO₂、TiO₂、Al₂O₃ 含量偏低和 TFeO 含量偏高的成分变化特点(图 4);对石榴子石中 MnO 和 TiO₂ 的含量分析表明,石榴子石暗色带相对于浅色带 Mn、Ti 含量呈降低的趋势。

3.3 透辉石和硅灰石分析结果

甲玛矿床 16 件辉石和 22 件硅灰石样品的电子探针分析结果及端元组分见表 4、图 5。甲玛铜多金属矿床矽卡岩中的辉石主要为透辉石,透辉石组分变化范围 W_o 为 47.98%~51.24%,平均值为 50.36%, En 为 40.55%~47.60%,平均值为 44.62%, Fs 为 1.90%~8.16%,平均值为 4.85%; Mn/Fe 比值除 2 个样品较高(1.18 和 0.80)外,其余变化范围为 0.17~0.50,平均值为 0.38。硅灰石组分变化范围 W_o 为 98.09%~99.5%,平均值为 98.82%, En 为 0~0.17%,平均值为 0.007%, Fs 为 0.66%~1.99%,平均值为 1.075%。

4 讨 论

4.1 矿床成因

关于甲玛铜多金属矿床的成因一直以来存在 2

种不同的观点:一是热水喷流沉积成因型^[7-10],二是矽卡岩型^②^[11-13]。尽管对矿床成因存在争论,但是甲玛矿区广泛发育的厚—巨厚的矽卡岩和大量产出的粒度粗大、晶形较好的石榴子石、透辉石、硅灰石、绿帘石等矽卡岩矿物的存在却是不争的事实。矽卡岩为铜、钼、铅、锌矿体最主要的赋矿岩体,石榴子石、硅灰石等矽卡岩矿物与矿床含铜矿物之间具有密切的空间和成因联系^[14]。矿区石榴子石、辉石端元的变化与世界典型的大型矽卡岩型铜矿床相应端元组分的变化趋势^[15]一致。此外,应立娟等^[16]利用辉钼矿 $Re-Os$ 同位素定年手段测得甲玛矿床矽卡岩、角岩、斑岩、大理岩—灰岩等多种矿石类型的成矿时代一致,为中新世;辉钼矿主要形成于热液成矿期的辉钼矿—黄铜矿阶段,与岩浆—热液成矿作用密切相关。郑文宝等^[2]、姚晓峰等^[17]通过对矿床矽卡岩、矽卡

表 5 甲玛矿床硅灰石分析结果和阳离子数、端元组分
Table 5 Electron microprobe analyses, ion proportions and end members
of representative wollastonite from the Jiama ore deposit

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	NiO	K ₂ O	总和
JM1602-63.7	50.627	0.000	0.000	0.030	0.124	0.781	0.018	47.374	0.019	0.003	0.013	98.989
JM1602-63.8	50.996	0.015	0.000	0.000	0.178	0.807	0.054	47.884	0.044	0.011	0.003	99.992
JM1602-63.8	50.761	0.021	0.000	0.000	0.076	0.514	0.092	48.181	0.009	0.000	0.000	99.654
JM1602-104.3	50.675	0.000	0.000	0.009	0.742	0.800	0.019	46.836	0.000	0.003	0.000	99.084
JM1602-104.3	51.249	0.000	0.006	0.000	0.137	0.617	0.000	48.032	0.017	0.000	0.004	100.062
JM1602-127.7	51.429	0.000	0.006	0.000	0.163	0.302	0.054	48.131	0.001	0.000	0.003	100.089
JM1607-264.3	51.010	0.001	0.000	0.000	0.048	0.410	0.000	48.184	0.023	0.000	0.000	99.676
JM1607-264.3	51.071	0.000	0.000	0.000	0.156	0.863	0.006	47.458	0.000	0.028	0.000	99.582
JM1607-264.3	51.516	0.004	0.003	0.036	0.112	0.601	0.041	47.703	0.012	0.002	0.000	100.030
JM1607-264.3	51.442	0.000	0.000	0.009	0.086	1.124	0.000	47.105	0.000	0.025	0.000	99.791
JM1607-282.6	51.019	0.026	0.019	0.093	0.098	0.556	0.004	47.545	0.000	0.000	0.037	99.397
JM1608-388.3-1	50.291	0.001	0.000	0.020	0.051	0.349	0.059	47.411	0.000	0.001	0.000	98.183
JM1608-388.3-1	51.427	0.006	0.000	0.036	0.007	0.233	0.027	48.302	0.000	0.026	0.000	100.064
JM2409-429.75	51.596	0.000	0.000	0.000	0.033	0.468	0.045	47.758	0.010	0.000	0.002	99.912
JM2409-429.75	51.072	0.009	0.000	0.041	0.025	0.341	0.018	48.273	0.000	0.000	0.000	99.779
JM2409-429.75	51.304	0.000	0.000	0.000	0.083	0.406	0.000	48.100	0.000	0.000	0.003	99.896
JM2409-453.1	51.472	0.000	0.013	0.023	0.017	0.484	0.047	47.982	0.003	0.002	0.000	100.043
JM2805-449.5	50.622	0.009	0.000	0.034	0.128	0.491	0.028	47.940	0.013	0.000	0.001	99.266
JM2805-449.5	51.054	0.000	0.000	0.050	0.066	0.376	0.013	48.115	0.000	0.000	0.000	99.674
JM2805-449.5	50.874	0.000	0.000	0.000	0.159	0.504	0.006	47.977	0.000	0.004	0.000	99.524
JM2805-449.5	51.244	0.003	0.000	0.000	0.120	0.290	0.028	48.267	0.012	0.000	0.006	99.970
JM2805-463	50.605	0.001	0.014	0.045	0.111	0.474	0.037	47.526	0.000	0.035	0.002	98.850

续表 5

样号	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Wo	En	Fs
JM1602-63.7	1.987	0.000	0.000	0.000	0.001	0.040	0.000	0.026	0.001	1.992	0.001	0.001	98.390	0.050	1.480
JM1602-63.8	1.983	0.000	0.000	0.000	0.000	0.054	0.000	0.027	0.003	1.995	0.003	0.000	98.090	0.150	1.590
JM1602-63.8	1.980	0.001	0.000	0.001	0.000	0.059	0.000	0.017	0.005	2.014	0.001	0.000	98.750	0.260	0.950
JM1602-104.3	1.989	0.000	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.027	0.001	1.970	0.000	0.000	97.430	0.050	2.520
JM1602-104.3	1.989	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.000	0.020	0.000	1.997	0.001	0.000	98.720	0.000	1.220
JM1602-127.7	1.992	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024	0.000	0.010	0.003	1.997	0.000	0.000	99.090	0.150	0.750
JM1607-264.3	1.987	0.000	0.000	0.000	0.000	0.042	0.000	0.014	0.000	2.011	0.002	0.000	99.170	0.000	0.740
JM1607-264.3	1.992	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025	0.000	0.029	0.000	1.983	0.000	0.000	98.320	0.020	1.670
JM1607-264.3	1.996	0.000	0.000	0.000	0.001	0.012	0.000	0.020	0.002	1.980	0.001	0.000	98.670	0.120	1.160
JM1607-264.3	1.999	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.037	0.000	1.961	0.000	0.000	98.010	0.000	1.990
JM1607-282.6	1.991	0.001	0.000	0.001	0.003	0.022	0.000	0.018	0.000	1.988	0.000	0.002	98.920	0.010	1.070
JM1608-388.3-1	1.987	0.000	0.000	0.000	0.001	0.037	0.000	0.012	0.003	2.007	0.000	0.000	99.170	0.170	0.660
JM1608-388.3-1	1.992	0.000	0.000	0.000	0.001	0.022	0.000	0.008	0.002	2.005	0.000	0.000	99.530	0.080	0.390
JM2409-429.75	1.999	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.015	0.003	1.983	0.001	0.000	99.010	0.130	0.820
JM2409-429.75	1.986	0.000	0.000	0.000	0.001	0.038	0.000	0.011	0.001	2.012	0.000	0.000	99.350	0.050	0.590
JM2409-429.75	1.992	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025	0.000	0.013	0.000	2.001	0.000	0.000	99.200	0.000	0.800
JM2409-453.1	1.994	0.000	0.000	0.000	0.001	0.017	0.000	0.016	0.003	1.991	0.000	0.000	99.040	0.130	0.820
JM2805-449.5	1.982	0.000	0.000	0.000	0.001	0.053	0.000	0.016	0.002	2.011	0.001	0.000	98.870	0.080	1.010
JM2805-449.5	1.988	0.000	0.000	0.000	0.002	0.035	0.000	0.012	0.001	2.007	0.000	0.000	99.240	0.040	0.720
JM2805-449.5	1.986	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043	0.000	0.017	0.000	2.006	0.000	0.000	98.910	0.020	1.080
JM2805-449.5	1.989	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.000	0.010	0.002	2.007	0.001	0.000	99.210	0.080	0.660
JM2805-463	1.988	0.000	0.000	0.000	0.001	0.034	0.000	0.016	0.002	2.000	0.000	0.000	98.930	0.110	0.960

注:含量%

岩顶底板围岩和花岗岩类的主量元素、微量元素、稀土元素地球化学进行了研究,认为矽卡岩系矿区花岗岩类交代大理岩形成的。上述矿床的成矿年代学,岩石、矿物地球化学和大量的地质事实共同指示了矿床形成与矿区岩浆岩的密切关系,矿床类型属于岩浆热液交代成因的典型的矽卡岩型矿床。

4.2 对成矿环境的指示

交代矽卡岩按矿物组成和被交代的碳酸盐岩围岩的差别,划分为钙矽卡岩和镁矽卡岩两类^[18]。钙矽卡岩主要由钙铁—钙铝系列石榴子石、透辉石和钙铁辉石系列辉石、硅灰石、方柱石等组成,围岩是灰岩。本次研究结果表明,甲玛矿床矽卡岩矿物组合为钙铁榴石—钙铝榴石+透辉石+硅灰石组合,为典型的钙矽卡岩。

矽卡岩矿物成分能够提供关于矽卡岩和成矿环

境的重要信息^[18-20]。钙铝榴石、钙铁榴石一般于接触变质条件下生成,形成压力不大^[6]。甲玛铜多金属矿床中的石榴子石以钙铁榴石—钙铝榴石为主,因此甲玛矿床石榴子石矽卡岩形成时所需压力不大。钙铝—钙铁系列石榴子石形成的物理化学条件试验研究表明^[21],钙铁榴石一般形成于 450~600℃、pH=4.0~11.0 的氧化—弱氧化环境中,而钙铝榴石则在 550~700℃、中—酸性溶液的弱氧化—弱还原条件下晶出。一般认为,氧化型矿床辉石成分以透辉石为主,石榴子石以钙铁榴石为主^[22]。甲玛矿床透辉石多伴随棕红色钙铁榴石产出,表明该阶段矿床处于相对氧化的环境。甲玛矿床硅灰石矽卡岩位于矽卡岩体底部,向上过渡为石榴子石矽卡岩,指示随着与岩体热源距离的增加温度有不断降低的趋势。

Nakano 等指出,辉石的 Mn/Fe 比值变化可以

指示矽卡岩金属矿化的类型。赵一鸣等^[23]的研究表明,矽卡岩铁、金矿床和部分铜矿床中辉石的Mn/Fe比值多小于0.1;矽卡岩铅锌矿床中锰钙铁辉石Mn/Fe比值大多高于0.1,其Mg/Fe比值小于1;矽卡岩钨矿床中辉石的Mn/Fe比值多在0.1~0.3之间,比铅锌矿床中的稍低;矽卡岩铜、钼矿床中的透辉石Mn/Fe比值比矽卡岩铁、金矿床中透辉石的要稍高一些。甲玛矿床辉石Mn/Fe比值除2个较高值(1.18和0.80)外,其余变化范围为0.17~0.50,指示甲玛矿床矿化类型属于多金属矿床,与地质事实一致。

5 结 论

(1)甲玛矿床中的石榴子石属于钙铁榴石-钙铝榴石系列,辉石为典型的透辉石系列,矿床矽卡岩属于较为典型的钙矽卡岩。

(2)对甲玛矿床石榴子石、透辉石、硅灰石等矽卡岩矿物的研究进一步证实了甲玛铜多金属矿床属于典型的热液交代成因的矽卡岩型多金属矿床。

(3)甲玛矿床形成过程中经历了还原-氧化环境的转变;辉石Mn/Fe比值变化指示甲玛矿床矿化类型属于多金属矿床,与地质事实相符。

致谢:在野外工作期间得到成都理工大学博士研究生秦志鹏和硕士研究生钟裕峰、邓世林的指导和帮助,中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室陈振宇老师给予帮助,在此一并致谢。

参考文献

- [1]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.
- [2]郑文宝,唐菊兴,畅哲生,等.西藏甲玛铜多金属矿床地质地球化学特征及成因浅析[J].地质与勘探,2010,46(6):985-992.
- [3]郑文宝,黎枫估,唐菊兴,等.西藏墨竹工卡地区甲玛矽卡岩型铜多金属矿体的变化性[J].地质通报,2010,29(10):1486-1494.
- [4]赵劲松,Newberry R.对柿竹园夕卡岩成因及其成矿作用的新认识[J].矿物学报,1996,16(4):442-449.
- [5]徐林刚,毛景文,杨富全,等.新疆蒙库铁矿床矽卡岩矿物学特征及其意义[J].矿床地质,2007,26(4):455-464.
- [6]潘兆橐,赵爱醒,潘铁红.结晶学及矿物学[M].北京:地质出版社,1993:138.

- [7]杜光树,姚鹏,潘凤雏,等.喷流成因矽卡岩与成矿——以西藏甲玛铜金属矿床为例[M].成都:四川科学技术出版社,1998:74-78.
- [8]姚鹏,杜光树.西藏甲玛多金属矿床容矿岩石的地球化学特征及其成因初步研究[J].沉积与特提斯地质,1999,23:46-57.
- [9]姚鹏,郑明华,彭勇民,等.西藏冈底斯岛弧带甲玛铜多金属矿床成矿物质来源及成因研究[J].地质论评,2002,48(5):468-479.
- [10]潘凤雏,邓军,姚鹏,等.西藏甲玛铜多金属矿床夕卡岩的喷流成因[J].现代地质,2002,16(4):359-364.
- [11]李光明,芮宗瑶,林方成,等.西藏甲玛和驱龙矽卡岩型铜多金属矿床的Re-Os年龄及意义[C]//欧阳自远.第二届全国成矿理论与找矿方法学术研讨会论文集,2004:32.
- [12]李光明,芮宗瑶,王高明.西藏冈底斯成矿带甲玛和知不拉铜多金属矿床的Re-Os同位素年龄及其意义[J].矿床地质,2005,24(5):481-489.
- [13]冯孝良,管仕平,牟传龙,等.西藏甲玛铜多金属矿床的岩浆热液交代成因——地质与地球化学证据[J].地质地球化学,2001,29(4):40-48.
- [14]王焕,唐菊兴,应立娟,等.西藏甲玛铜多金属矿床主要矿石矿物特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2011,38(1):103-112.
- [15]Meinert L D. Skarns and skarn deposits [J]. Geoscience Canada,1992,19:145-162.
- [16]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.
- [17]姚晓峰,王友,畅哲生,等.西藏甲玛铜多金属矿矽卡岩基本特征及其成因意义[J].成都理工大学学报(自然科学版),2011,待刊.
- [18]Einaudi M T,Meinert L D, Newberry R J.Skarn deposits [M]. Economic Geology,75th Anniv., 1981:317-391.
- [19]Lu Huanzhang,Liu Yimao,Wang Changlie,et al.Mineralization and fluid inclusion study of the Shizuyuan W-Sn-Bi-Mo-F skarn deposit,Hunan Province,China[J]. Econ. Geol.,2003,98:955-974.
- [20]Ahmed Z, Hariiri M M.Formation and mineral chemistry of a calcic skarn from Al-Madhiq,SW Saudi Arabia[J]. Chemie der Erde Geochemistry, 2006,66:187-201.
- [21]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.
- [22]Misra K C.Understanding Mineral Deposit [M]. Dordrecht, The Netherlands:Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [23]赵一鸣,张铁男,林文蔚.我国夕卡岩矿床中的辉石和似辉石特征及其与金属矿化的关系[J].矿床地质,1997,16(4):318-329.
- 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外围铜多金属矿详查报告.中国地质科学院矿产资源研究所,2009.
- ②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勘探报告.中国地质科学院矿产资源研究所,2009.