

文章编号: 1000-4734(2013)03-0278-09

云南中甸地区浪都矽卡岩型铜矿床 矽卡岩矿物学特征

任涛¹, 钟宏², 张兴春², 韩润生¹, 马美娟¹

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 浪都矽卡岩型铜矿床位于义敦岛弧南段的中甸岛弧。该矿床矽卡岩矿物有辉石、石榴石、角闪石、绿帘石和绿泥石等。本文利用电子探针对该矿床中主要矽卡岩矿物的化学成分进行测试, 结果表明石榴石成分变化于 $Ad_{57.94}Gr_{6.41}Al_{1.3}$ 之间, 为钙铁榴石-钙铝榴石固溶体系列, 以钙铁榴石为主; 辉石端元组分为 $Hd_{78.92}Di_{3.12}Jo_{5.9}$, 以钙铁辉石为主。在钙质矽卡岩中广泛发育铁闪石、铁阳起石、绿帘石、方解石等矿物共生矿物研究表明浪都矽卡岩形成环境经历了早期相对高温、氧化的碱性环境到晚期相对低温、还原的酸性环境。

关键词: 矽卡岩; 矿物学; 铜矿床; 云南

中图分类号: P571; P575

文献标识码: A

作者简介: 任涛, 男, 1982年生, 博士, 地球化学专业. E-mail: rtao1982@126.com

中甸地区是我国具有巨大找矿前景的区域, 目前已发现矿床(点)共计30余处, 构成了包括斑岩型、矽卡岩型和低温热液型矿床在内的铜多金属成矿带。普朗、雪鸡坪、春都、烂泥塘、卓玛、松诺等属于斑岩型矿床, 红山、浪都等则属于矽卡岩型矿床。本文首次分析了浪都矿床中主要矽卡岩矿物的化学成分, 并根据不同矽卡岩矿物组合讨论了该矿床矽卡岩的形成环境, 为本矿床成矿物理化学条件研究提供了新的启示和思路。

1 地质背景

浪都矽卡岩型铜矿床位于滇西北香格里拉县格咱乡, 大地构造位置位于三江义敦岛弧南端的中甸岛弧。早三叠世, 中甸地区处于甘孜—理塘洋盆西侧的被动大陆边缘; 晚三叠世中晚期, 甘孜—理塘洋壳向西俯冲, 中甸褶皱带东缘由被动大陆边缘转为活动大陆边缘, 沿俯冲方向依次发育岛弧和弧后盆地, 构成了完整的沟-弧-盆体系; 晚三叠世末, 甘孜—理塘洋盆闭合, 经短暂

的残留海发育阶段, 最后碰撞造山^[4,5]。这一构造体制的完成, 奠定了中甸地区三叠纪末至今的基本构造格局。与之对应晚三叠世发生了频繁的中酸性岩浆侵入活动和火山活动, 形成了大量规模较小的以闪长玢岩-二长斑岩为主体的岩株、岩枝、岩脉等复式岩体。形成了众多的矿床(矿点), 并形成了相关的斑岩型-矽卡岩型-低温热液型多金属成矿系统^[4]。

浪都铜矿床由原云南省地矿局第一区调队于1964年发现。2007年云南华西矿产资源有限公司对0.98 km²的首采区进行详查, 初步认定铜资源量10万吨, 达中型规模。矿体主要产于斑岩岩体与碳酸盐岩接触带, 围岩具角岩化、大理岩化、矽卡岩化、绢云母化, 并形成较为典型的矽卡岩型矿体。由于岩体众多, 形成的矽卡岩也很分散, 故矿体也不集中, 根据含矿矽卡岩在空间上的展布特征, 可划出6个矿群, 21个矿体(图1)。

矿区主要地层为上三叠统曲嘎寺组三段(T_3q^3)、上三叠统图姆沟组一段(T_3t^1), 曲嘎寺组(T_3q)为赋矿地层, 为一套碎屑岩及碳酸盐岩。矿区出露浅成-超浅成复式中酸性斑(玢)岩体, 面积约0.3 km²(图1), 沿北西向浪都次级背斜倾末端顺层侵入于上三叠统图姆沟组(T_3t)、曲嘎寺组(T_3q)地层的层间破碎带及断裂破碎带中。

收稿日期: 2012-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 41203039); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-YW-111; KZCX2-YW-136); 昆明理工大学成矿动力学及隐伏矿预测创新团队(2008)

岩体以石英二长斑岩和花岗闪长玢岩为主, 还出现少量石英闪长玢岩; 岩体的岩相分带不明显, 主要为斑状-细粒结构, 块状构造。在空间上除 IV 矿体群与花岗闪长斑岩关系密切外, 其余矿体都产于石英二长斑岩的接触带或岩体内部。曾普胜^[5]采用黑云母 Ar-Ar 法对矿区石英二长斑岩的定年结果为 216.93 ± 4.34 Ma, 基本上确定为印支期, 与中甸地区普朗、雪鸡坪等侵入岩侵位时代一致。

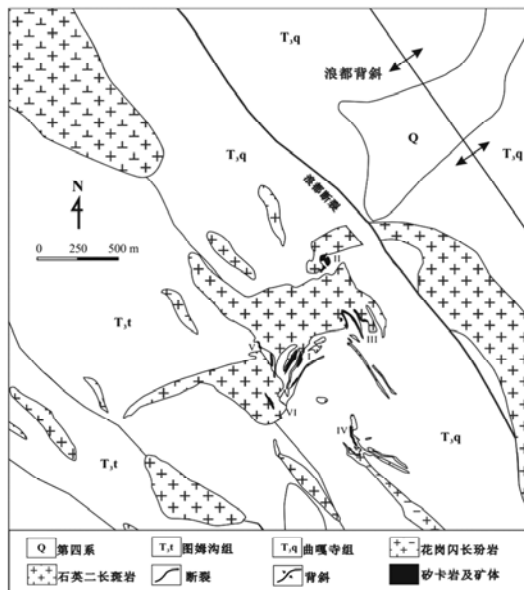


图1 浪都矿区地质图(据浪都矿床详查报告修改)
Fig. 1. Geological sketch map of Langdu deposit.

2 砂卡岩矿物学研究

2.1 辉石

辉石是矿区最主要的砂卡岩矿物, 手标本上呈灰绿-墨绿色, 板状, 自形程度高(图 2c、e), 主要见于矿石样品中。矿区内辉石砂卡岩都不同程度遭受了后期热液蚀变, 辉石晶体常被后期石英脉、方解石脉切穿或局部发生溶蚀交代作用(图 2f), 形成纤维状、放射状铁阳起石或铁闪石(图 2k、l)。

辉石电子探针部分分析结果列于表 1。结果显示, 矿床中辉石具有明显的富 Fe 特征, 常含少量 MnO、Al₂O₃、Cr₂O₃ 及 Na₂O 等, 几乎所有的 2 价离子都为 Ca²⁺ (阳离子数变化于 0.97~1.02) 和 Fe²⁺ (阳离子数为 0.77~0.88), 表明其主要成分为钙铁辉石(Hd; 图 3a), 含有少量透辉石(Di)和锰钙辉石(Jo)。如此高 Fe²⁺ 质量分数说明钙铁辉石是在相对较低的氧逸度

条件下形成。

2.2 石榴石

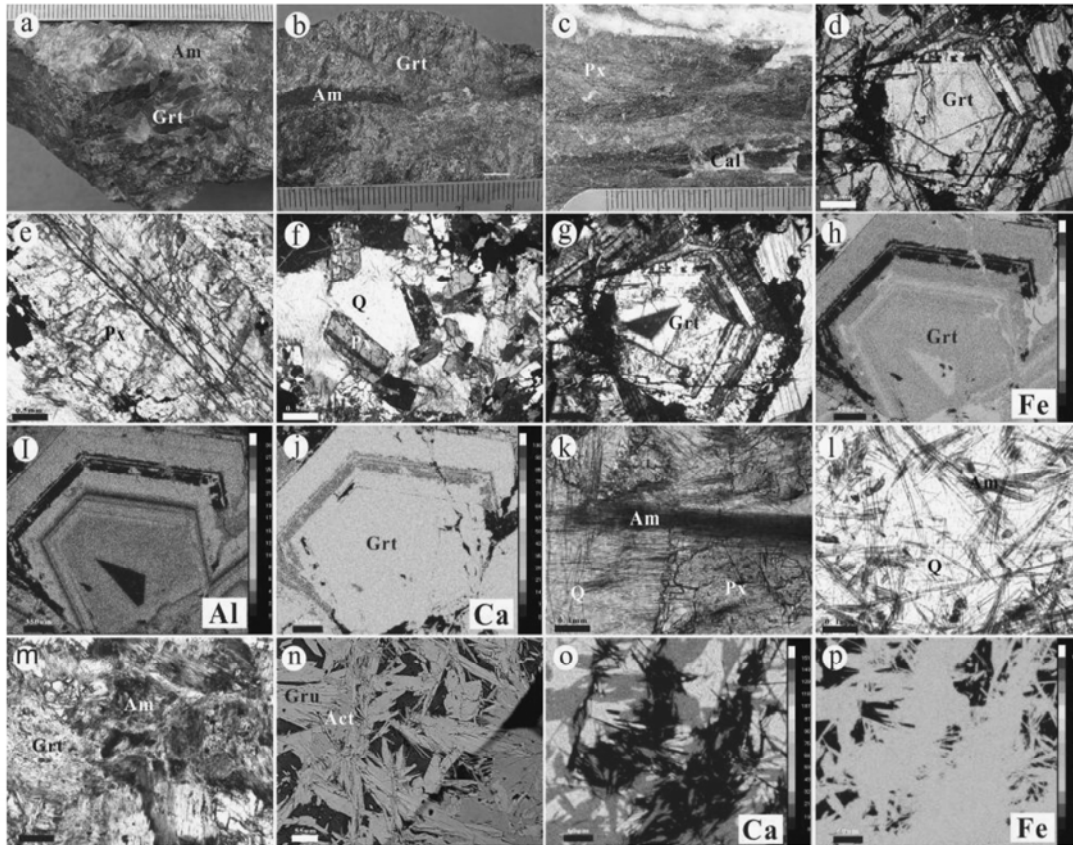
石榴石是矿区普遍发育的一类砂卡岩矿物, 其数量仅次于辉石, 手标本上呈粗粒十二面体状或四角八面体状(图 2a、b), 少数他形晶, 构成细粒集合体。偏光镜下石榴石异常光性环带非常发育(图 2d、g、h、i、j), 有时在一个晶体上规则环带多达十几圈。石榴石砂卡岩也遭受了后期热液蚀变, 显微镜下观察到脉状角闪石、碳酸盐和石英等矿物切穿石榴石晶体(图 2d、j)。

部分石榴石电子探针分析结果列于表 2。石榴石成分以钙系石榴石为主, 具有明显富 CaO、Fe₂O₃ 及 Al₂O₃ 特征, Ca²⁺、Fe³⁺ 离子数分别达 2.81~3.29、1.15~1.86, 且 CaO > TFeO + Al₂O₃。端元分子组成以钙铁榴石(And 质量分数占 57%~94%; 图 3b)为主, 含有一定数量钙铝榴石(Gr 质量分数占 6%~41%; 图 3b)和铝系石榴石(Alm+Spe+Pyr), 其中铝质石榴石以铁铝榴石(Alm)为主, 还含有少量的锰铝榴石(Sp)和镁铝榴石(Pyr)。在图 4 中 Al₂O₃ 与 Fe₂O₃ 具有良好的负相关关系; 二价 Mn²⁺ 离子质量分数较低, MgO+MnO 与 CaO 呈弱正相关关系。

石榴石环带结构发育, 端元成分变化较大, 同一石榴石颗粒内, 从核部到边缘成分变化明显, 局部超过 30%, 总体上表现为核部富 Fe, 中间部位钙铝榴石及铝系石榴石分子质量分数逐渐增加, 晶体边缘 Fe 质量分数明显升高, 反映出与石榴石平衡的热液成分不断变化。

2.3 铁闪石

铁闪石是矿区常见的一类退化蚀变阶段砂卡岩矿物, 不同程度交代或完全替换石榴石, 对钙铁辉石交代较弱。手标本上, 铁闪石往往呈墨绿色-黑色细脉状切穿石榴石(图 2b)或呈墨绿色鳞片状、浸染状分布于石榴石中(图 2a), 有时单个石榴石晶体也被蚀变为片状铁闪石矿物(图 2m)。显微镜下观察发现纤维状、放射状铁闪石(图 2k、l)多数为后期热液交代辉石的产物。铁闪石电子探针分析结果列于表 3, 由表可见浪都矿床中铁闪石具有高铁 FeO_T (32.53%~35.62%) 特征, MgO 质量分数变化于 0.48%~2.77%, Al₂O₃ 质量分数为 2.66%~8.16%, CaO 质量分数为 10.09%~11.18%, 含少量的 K₂O 和 Na₂O。在角闪石分类图解(图 5)中, 绝大多数样品落入铁闪石范围内。

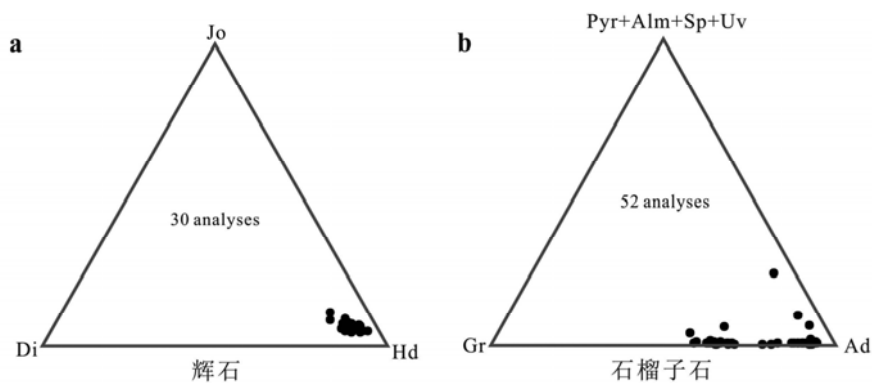


a-棕红色五角十二面体状石榴石，局部蚀变为鳞片状墨绿色闪石类矿物；b-后期形成的脉状闪石类矿物切穿早期形成的石榴石；c-板状墨绿色辉石，裂隙被细脉状方解石（大理岩）充填；d-五角十二面体状石榴石晶体，局部见细脉状、不规则状闪石类矿物（单偏光下）；e-板状淡绿色辉石，裂隙中充填为硫化物（单偏光下）；f-分布于后期石英脉中的柱状辉石（正交偏光），为石英脉灌入过程中破坏板状辉石的结果；g-石榴石环带结构（正交偏光）；h,i,j-分别为石榴石 Fe、Al、Ca 元素质量分数电子探针面扫描照片；k,l-辉石受后期热液交代、蚀变作用形成纤维状闪石类矿物；m-片状闪石类矿物残余结构，为石榴石受热液蚀变后形成；n-闪石类矿物（背散射光），深色矿物为铁阳起石，浅色矿物为铁闪石；o,p-分别为闪石类矿物 Ca、Fe 元素电子探针面扫描照片

缩写：Grt=石榴石；Px=辉石；Am=角闪石；Q=石英；Cal=方解石；Gru=铁闪石；Act=阳起石

图 2 浪都矿床中矽卡岩矿物手标本、显微及背散射图像

Fig. 2. Specimens, photomicrographs and backscattered images for skarn minerals from Langdu deposit.



Jo=锰钙辉石；Di=透辉石；Hd=钙铁辉石；Sp=锰铝榴石；Pyr=镁铝榴石；Ad=钙铁榴石；Gr=钙铝榴石；Alm=铁铝榴石；Uv=钙铬榴石

图 3 浪都矿床中辉石(a)和石榴石(b)端元分子三角图解

Fig. 3. End members of pyroxenes (a) and garnets (b) from Langdu deposit.

表1 浪都矿床中代表性辉石化学成分(%)

Table 1. Representative microprobe analyses of pyroxene from Langdu deposit (%)

样号	LD19-01	LD19-02	LD19-03	LD1502-1	LD1502-02	LD1502-03	LD1502-06	LD1902-05	LD1902-06	LD1902-07
Na ₂ O	0.07	0.08	0.08	0.06	0.06	0.11	0.11	0.05	0.04	0.04
MgO	1.26	1.42	1.17	1.77	1.06	1.24	0.79	1.19	1.11	0.52
Al ₂ O ₃	0.01	0.01	0.01	0.04	0.05	0.22	0.04	0.04	0.11	0.00
SiO ₂	49.16	49.40	49.40	49.52	48.62	49.14	49.10	49.38	48.86	48.74
CaO	23.26	23.09	22.89	22.04	22.77	22.76	23.00	22.99	22.97	23.08
TiO ₂	-	0.02	0.02	0.01	-	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02
FeO	24.63	23.10	24.37	22.59	24.32	23.77	25.01	24.23	24.72	25.49
MnO	1.38	2.02	1.33	3.16	2.11	2.51	1.45	1.45	1.47	1.29
Total	99.77	99.13	99.26	99.18	99.00	99.75	99.50	99.36	99.30	99.17
基于6个氧原子计算的阳离子数										
Na	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Mg	0.08	0.09	0.07	0.11	0.07	0.08	0.05	0.07	0.07	0.03
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00
Si	2.01	2.03	2.03	2.03	2.01	2.01	2.02	2.03	2.01	2.02
Ca	1.02	1.02	1.01	0.97	1.01	1.00	1.01	1.01	1.01	1.02
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.84	0.79	0.84	0.77	0.84	0.81	0.86	0.83	0.85	0.88
Mn	0.05	0.07	0.05	0.11	0.07	0.09	0.05	0.05	0.05	0.05
摩尔分数										
透辉石	8.03	9.21	7.54	11.01	6.74	7.82	5.08	7.70	7.08	3.35
锰钙辉石	4.94	7.38	4.86	11.05	7.53	8.91	5.25	5.29	5.28	4.71
钙铁辉石	87.03	83.40	87.60	77.94	85.73	83.27	89.67	87.01	87.64	91.94

表2 浪都矿床中代表性石榴石化学成分(%)

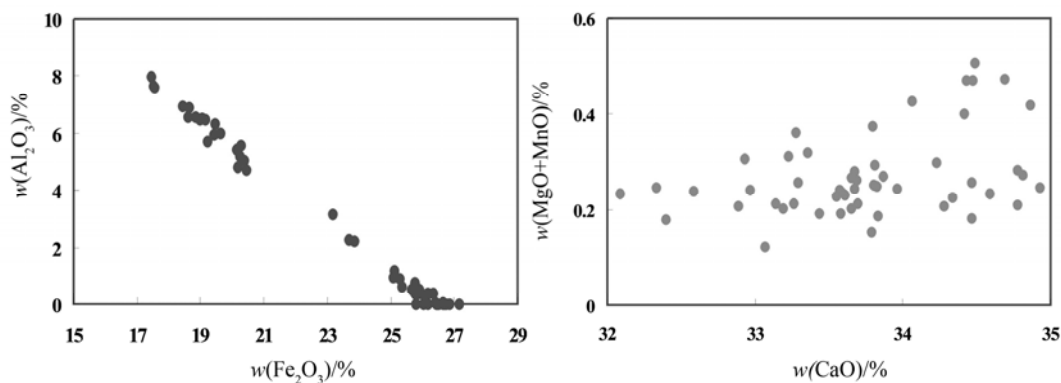
Table 2. Representative microprobe analyses of garnet from Langdu deposit (%)

样号	LD4102-10	LD4102-11	LD4102-12	LD4102-13	LD4302-08	LD4302-09	LD4302-10	LD4302-11	LD44-08	LD44-09
SiO ₂	37.32	37.09	37.16	36.83	37.31	37.17	36.25	36.89	36.28	36.10
Al ₂ O ₃	7.99	7.58	6.56	5.99	7.65	6.89	0.00	6.32	0.00	0.90
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.11	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04
FeO	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ₂ O ₃	18.78	19.50	20.94	21.82	19.46	20.72	30.17	21.63	29.73	28.09
MnO	0.41	0.40	0.38	0.49	0.45	0.39	0.17	0.22	0.23	0.20
CaO	34.06	34.86	34.69	34.49	34.47	34.42	33.70	35.04	33.67	33.69
T	99.14	99.46	99.95	99.65	99.36	99.62	100.34	100.17	99.97	99.10
基于24个氧原子计算的阳离子数										
Si	3.06	3.05	3.04	3.25	3.06	3.30	2.82	3.23	3.02	3.04
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.73	0.64	0.58	0.00	0.67	0.00	0.58	0.04	0.09	0.12
Cr	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	1.15	1.21	1.29	1.45	1.20	1.39	1.77	1.42	1.86	1.78
Mn	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01
Ca	2.99	3.07	3.04	3.26	3.03	3.28	2.81	3.29	3.00	3.04
摩尔分数										
钙铬榴石	0.04	0.00	0.36	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.13
钙铁榴石	56.79	58.38	62.80	65.87	58.81	62.84	93.81	64.69	92.47	87.30
铁铝榴石	2.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
锰铝榴石	0.94	0.89	0.86	1.10	1.01	0.88	0.38	0.49	0.54	0.47
镁铝榴石	0.06	0.05	0.37	0.08	0.09	0.04	0.16	0.03	0.05	0.16
钙铝榴石	40.95	40.68	35.61	32.90	40.08	36.24	5.65	34.79	6.92	11.95

表 3 浪都矿床中代表性铁闪石化学成分(%)

Table 3. Representative microprobe analyses of grunerite from Langdu deposit (%)

样号	LD4402-19	LD4222	LD4208	LD4209	LD4210	LD4212	LD4213	LD4214	LD4217	LD4218	LD4220	LD4221
SiO ₂	44.59	43.68	43.01	44.80	39.45	43.37	45.58	45.54	43.94	44.89	42.09	39.66
Al ₂ O ₃	4.75	4.20	5.61	3.94	8.10	4.44	3.18	2.66	3.98	3.71	6.02	8.16
FeO _T	32.53	34.55	34.92	35.05	34.08	35.26	34.93	35.62	35.31	34.44	34.15	34.20
MnO	0.86	1.15	0.87	1.06	0.68	1.20	1.45	1.38	1.25	1.07	0.73	0.74
MgO	2.77	1.14	1.06	1.34	0.94	0.88	1.10	0.92	0.90	1.23	0.90	0.48
CaO	10.87	10.57	10.43	10.81	10.53	10.09	10.17	10.24	10.26	10.69	10.84	11.18
Na ₂ O	0.36	0.65	0.70	0.57	0.71	0.80	0.59	0.49	0.63	0.56	0.55	0.92
K ₂ O	0.51	0.18	0.41	0.19	0.90	0.23	0.20	0.20	0.28	0.20	0.50	0.77
T	97.24	96.12	97.00	97.77	95.40	96.27	97.19	97.06	96.57	96.79	95.78	96.11
以 23 个氧为基准计算的阳离子数												
Si	7.22	7.26	7.09	7.31	6.66	7.22	7.46	7.50	7.29	7.37	7.02	6.66
Al ^{IV}	0.78	0.74	0.91	0.69	1.34	0.78	0.54	0.50	0.71	0.63	0.98	1.34
Al ^{VI}	0.13	0.08	0.18	0.06	0.27	0.09	0.08	0.01	0.07	0.09	0.21	0.27
Fe ³⁺	0.57	0.55	0.48	0.58	0.25	0.50	0.66	0.66	0.55	0.62	0.47	0.23
Fe ²⁺	3.84	4.26	4.34	4.21	4.56	4.41	4.13	4.25	4.35	4.11	4.29	4.57
Mn	0.12	0.16	0.12	0.15	0.10	0.17	0.20	0.19	0.18	0.15	0.10	0.11
Mg	0.67	0.28	0.26	0.33	0.24	0.22	0.27	0.23	0.22	0.30	0.22	0.12
Ca	1.89	1.88	1.84	1.89	1.90	1.80	1.78	1.81	1.82	1.88	1.94	2.01
Na	0.11	0.21	0.22	0.18	0.23	0.26	0.19	0.16	0.20	0.18	0.18	0.30
K	0.11	0.04	0.09	0.04	0.19	0.05	0.04	0.04	0.06	0.04	0.11	0.16
阳离子总量	15.43	15.45	15.52	15.42	15.75	15.50	15.34	15.34	15.45	15.38	15.53	15.77
Si _T [*]	7.22	7.26	7.09	7.31	6.66	7.22	7.46	7.50	7.29	7.37	7.02	6.66
Al _T	0.78	0.74	0.91	0.69	1.34	0.78	0.54	0.50	0.71	0.63	0.98	1.34
Al _C	0.13	0.08	0.18	0.06	0.27	0.09	0.08	0.01	0.07	0.09	0.21	0.27
Fe ³⁺ _C	0.57	0.55	0.48	0.58	0.25	0.50	0.66	0.66	0.55	0.62	0.47	0.23
Mg _C	0.67	0.28	0.26	0.33	0.24	0.22	0.27	0.23	0.22	0.30	0.22	0.12
Fe ²⁺ _C	3.63	4.09	4.09	4.04	4.24	4.19	4.00	4.10	4.16	3.98	4.09	4.38
Fe ²⁺ _B	0.21	0.16	0.25	0.17	0.32	0.22	0.13	0.15	0.19	0.13	0.20	0.19
Mn _B	0.12	0.16	0.12	0.15	0.10	0.17	0.20	0.19	0.18	0.15	0.10	0.11
Ca _B	1.67	1.67	1.63	1.68	1.58	1.61	1.67	1.66	1.63	1.73	1.70	1.71
Ca _A	0.21	0.21	0.21	0.21	0.32	0.19	0.11	0.14	0.19	0.16	0.24	0.31
Na _A	0.11	0.21	0.22	0.18	0.23	0.26	0.19	0.16	0.20	0.18	0.18	0.30
K _A	0.11	0.04	0.09	0.04	0.19	0.05	0.04	0.04	0.06	0.04	0.11	0.16

图 4 浪都矿床石榴石 Al₂O₃-Fe₂O₃ 和 CaO-MgO+MnO 图解Fig. 4. Plot of Al₂O₃ vs. Fe₂O₃ and CaO vs. MgO+MnO for garnets from Landgu deposit.

2.4 铁阳起石

通常情况下, 铁阳起石和铁闪石是共生的, 手标本上无法区别, 在光学显微镜下, 二者光性上的差别也不明显, 但在背散射光下, 阳起石比铁闪石暗(图 2n)。电子探针面扫描图像也能清楚区分阳起石和铁闪石(图 2o、p)。阳起石电子探针波谱分析结果见表 4, 其化学成分主要为 Si 和 Fe, 质量分数分别为 44.98%~46.31% 和 38.06%~39.48%, Al₂O₃ 质量分数为 4.71%~5.4%, 其他少量成分包括 Na₂O、MgO、K₂O、CaO、MnO 等。在角闪石分类图解(图 5)中, 所有样品落入铁阳起石范围。

在浪都钙系砂卡岩中, 普遍发育铁闪石和铁阳起石, 其成分(原子系数)特点是高铁 Fe²⁺=3.84~4.58、钙变化较大 Ca_B=0.12~1.73, 其它主量元素分别为 Si=6.66~7.77, Al^{IV}=0.23~1.34, (Na+K)_A=0.20~0.49, Mg/(Mg+Fe²⁺)=0.03~0.15。

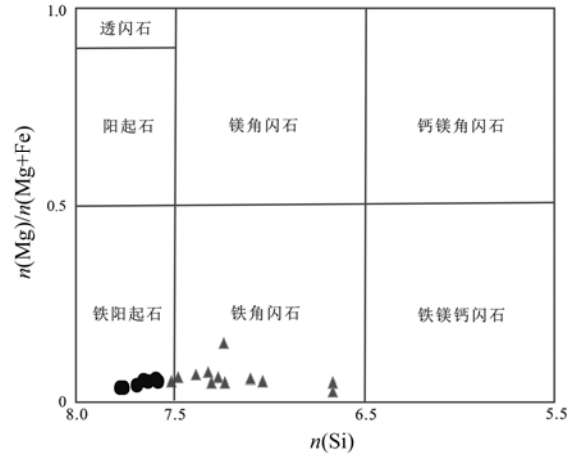


图 5 角闪石分类图解

Fig. 5. Classification of amphiboles from Langdu deposit.

2.5 绿泥石和碳酸盐矿物

绿泥石在砂卡岩中既成脉状, 也呈不规则片状交代辉石或石榴石。碳酸盐矿物虽然数量不

表 4 浪都矿床中代表性阳起石化学成分(%)

Table 4. Representative microprobe analyses of actinolite from Langdu deposit (%)

样号	LD4211	LD4215	LD4216	LD4219	LD4102-2	LD4102-21	LD4402-17
SiO ₂	44.98	45.79	45.58	45.60	46.29	46.31	46.27
Al ₂ O ₃	5.40	5.13	5.35	5.31	4.71	4.73	4.80
FeO _T	38.85	38.64	38.06	38.14	39.48	38.76	39.43
MnO	1.69	1.69	1.79	1.99	1.04	1.01	1.13
MgO	0.98	1.02	0.94	1.11	0.66	0.66	0.79
CaO	0.68	0.84	0.82	0.74	0.82	1.00	0.84
Na ₂ O	0.02	0.11	0.06	0.30	0.00	0.00	0.06
K ₂ O	1.57	1.22	1.93	2.22	1.12	1.26	2.33
T	94.16	94.44	94.53	95.40	94.12	93.73	95.63
以 23 个氧为基准计算的阳离子数							
Si	7.57	7.65	7.62	7.58	7.75	7.77	7.68
Al ^{IV}	0.43	0.35	0.38	0.42	0.25	0.23	0.32
Al ^{VI}	0.64	0.66	0.68	0.62	0.68	0.70	0.62
Fe ³⁺	0.94	1.01	0.93	0.82	1.09	1.10	0.89
Fe ²⁺	4.53	4.39	4.39	4.49	4.43	4.34	4.58
Mn	0.24	0.24	0.25	0.28	0.15	0.14	0.16
Mg	0.25	0.25	0.23	0.28	0.16	0.17	0.20
Ca	0.12	0.15	0.15	0.13	0.15	0.18	0.15
Na	0.01	0.04	0.02	0.10	0.00	0.00	0.02
K	0.34	0.26	0.41	0.47	0.24	0.27	0.49
阳离子总量	15.06	14.99	15.07	15.18	14.91	14.90	15.11
Si _T [*]	7.57	7.65	7.62	7.58	7.75	7.77	7.68
Al _T	0.43	0.35	0.38	0.42	0.25	0.23	0.32
Al _C	0.64	0.66	0.68	0.62	0.68	0.70	0.62
Fe ³⁺ _C	0.94	1.01	0.93	0.82	1.09	1.10	0.89
Mg _C	0.25	0.25	0.23	0.28	0.16	0.17	0.20
Fe ²⁺ _C	3.18	3.08	3.15	3.28	3.06	3.03	3.29
Fe ²⁺ _B	1.36	1.31	1.23	1.20	1.37	1.31	1.29
Mn _B	0.24	0.24	0.25	0.28	0.15	0.14	0.16
Ca _B	0.12	0.15	0.15	0.13	0.15	0.18	0.15
K _A	0.34	0.26	0.41	0.47	0.24	0.27	0.49

多,但普遍存在,他们是矽卡岩化和矿化过程中新生成的矿物,与石榴石、辉石、阳起石共生,多以细脉状出现,与黄铁矿、黄铜矿伴生。

3 讨论

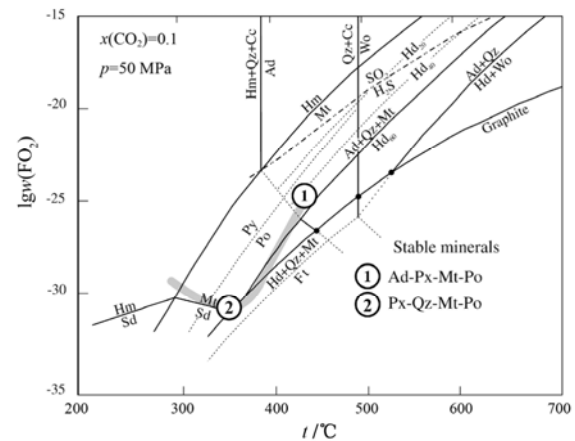
对于矽卡岩的成因,主要有以下 5 种观点:

①接触交代成因,即传统的接触交代矽卡岩,由中酸性侵入岩或热液交代碳酸盐岩或铝质岩石形成^[2,6];②岩浆成因,即岩浆矽卡岩,由深部岩浆在上升侵位过程中与围岩发生反应形成矽卡岩质岩浆^[7-9];③区域变质成因,几乎全产在与古生代结晶基底有关的区域变质作用形成的一套变质沉积岩系中^[10];④热水喷流沉积成因,研究者认为此类矽卡岩与海底热水喷流沉积作用有关^[11,12];⑤火山(气)热液成因,产于火山沉积岩中的一类矽卡岩及矿床^[13]。空间上,浪都矽卡岩产于曲嘎寺组(T₃q)灰岩和侵入岩的接触带,在形态和空间分布上与岩浆岩关系密切,基本可以确定该矿床为典型的接触交代矽卡岩。柯尔仁斯基首先提出了矽卡岩化作用的接触交代反应理论。根据这一理论,矽卡岩是由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热液作用下,通过接触交代反应生成,在这里扩散作用起主导作用。另一种类型是接触渗滤矽卡岩,它也发生在碳酸盐岩石和铝硅酸盐岩石的接触带,是组分被溶液单方向搬运(渗滤)的结果^[2]。Einaudi 和 Burt^[6]认为渗滤作用是矽卡岩形成的主要过程。这个阶段流体中虽然含有大量成矿元素,但 S 质量分数相对较低,只有少量硫化物沉淀,通常不具有工业意义^[14,15]。由于温度降低导致成矿流体中 Fe 达到饱和,形成大量磁铁矿。

前人研究认为晚矽卡岩阶段形成的阳起石、透闪石、绿帘石等含水硅酸盐矿物也是在接近超临界状态下流体交代的结果^[3]。Brown 等^[16]通过对美国加利福尼亚州 Pine Creek 钨矿研究认为退化蚀变阶段矽卡岩矿物形成于石英-硫化物之后。就浪都矽卡岩矿床而言,晚矽卡岩矿物与石英、硫化物、方解石等矿物密切共生,从矿物学上反映了其可能近于同期形成。实验岩石学研究表明,透闪石、铁透闪石及过渡的阳起石只能在中性或酸性介质中形成,当配料为碳酸盐类并在氯化物溶液中最有利于上述矿物的生成。大量石榴石、辉石及其共生矿物对研究表明^[6,17-20],矽卡岩矿床中辉石和石榴石的成分不仅能反映矽

卡岩形成时的物理化学条件(如氧逸度、酸碱度等),而且还与其伴生的金属矿化类型密切相关,它们的成分变化对成矿作用有指示意义,在一定条件下可作为找矿标志。

浪都矿床氧化还原条件及硫逸度可以通过矿床中主要硅酸盐矿物、硫化物和氧化物进行估计(图6)。钙铁榴石-钙铁辉石-磁黄铁矿组合在图6中位于①区,说明早期矽卡岩是在高温、高压及相对较高的氧逸度条件下形成。前人曾用 CaO (CaCO₃)、FeO、SiO₂及 H₂O 和 Na₂CO₃ 溶液,在温度为 480 °C、500 °C、600 °C 及压力为 900~1000 MPa 条件下合成了钙铁榴石。据 25 个实验结果,最有利于钙铁榴石形成的条件为碱性溶液 (Na₂CO₃、Na₂SiO₃ 等)。浪都矿床主要以钙铁辉石-石英-磁黄铁矿-磁铁矿矿物组合为主,这种矿物组合在图6中位于②区,说明浪都辉石矽卡岩产于中高温、中等压力条件及相对较低的氧逸度和硫逸度(低于赤铁矿和磁铁矿及黄铁矿和磁黄铁矿缓冲线)条件。实验研究表明,在酸性溶液中,钙铁辉石可在 470 MPa、500~600 °C 时形成,但若元素的组合不同,也可以在 300~400 °C、500×10⁵~830×10⁵ Pa 下形成。与透辉石相比,钙铁辉石的成分中需含有铁,但若溶液中有过量的铁时,即使在 1000×10⁵ Pa 下也不能合成钙铁辉石。



Ad-钙铁榴石; Px-辉石; Mt-磁铁矿; Po-磁黄铁矿; Qz-石英;
Am-角闪石; Sd-菱铁矿; Hm-赤铁矿; Py-黄铁矿

图 6 矽卡岩矿物形成环境判别图(底图据文献 [21]修改)

Fig. 6. Temperature vs. f_{O_2} diagram, showing the stability fields of major skarn silicates, oxide, sulfide, and carbonate minerals.

4 结论

浪都铜矿床属于典型的接触交代矽卡岩型

矿床。石榴石和辉石化学成分分别为钙铁榴石-钙铝榴石和钙铁辉石-透辉石固溶体系列,角闪石以铁闪石为主,矿区也存在大量铁阳起石。钙铁榴石-钙铁辉石-磁黄铁矿组合,说明浪都矿床早期矽卡岩矿物在高温、高压及相对较高的氧逸度条件下形成。钙铁辉石-石英-磁黄铁矿-磁铁矿矿物组合反映了中温、中等压力条件及相对较低的氧逸度、硫逸度(低于赤铁矿和磁铁矿及黄铁矿

和磁黄铁矿缓冲线)和pH值。因此浪都矿床成岩环境经历了早期高温、高压、高氧逸度到晚期中温、中压和低氧逸度的转变。

致谢: 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室周国富研究员、郑文琴工程师在矿物成分分析方面给予了很大帮助,昆明理工大学冉崇英教授对本文初稿提出了宝贵建议,在此表示真挚的谢意。

参 考 文 献:

- [1] Meinert L D, Dipple G, Nicolescu S. World skarn deposits [J]. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume, 2005: 299-336.
- [2] 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 等. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [3] 姚凤良, 孙丰月. 矿床学教程[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 78-90.
- [4] 杨岳清, 侯增谦, 黄典豪, 等. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统[J]. 地球学报, 2002, 23(1): 17-24.
- [5] 曾普胜, 王海平, 莫宣学, 等. 中甸岛弧带构造格架及斑岩铜矿前景[J]. 地球学报, 2004, 25(5): 535-540.
- [6] Einaudi M, Burt D. Introduction; terminology, classification, and composition of skarn deposits [J]. *Economic Geology*, 1982, 77(4): 745-754.
- [7] 赵斌, 赵劲松, 张重泽, 等. 岩浆成因矽卡岩的实验证据[J]. 科学通报, 1993, 38(21): 1986-1989.
- [8] 赵一鸣, 唐开健. 安徽淮北三铺地区镁矽卡岩金(铜, 铁)矿床生成地质环境、分带和流体演化[J]. 矿床地质, 1999, 18(1): 1-10.
- [9] 吴言昌, 邵桂清, 吴炼. 岩浆矽卡岩及其矿床[J]. 安徽地质, 1996, 6(2): 30-39.
- [10] 曾志刚, 李朝阳. 老君山成矿区变质成因矽卡岩的地质地球化学特征[J]. 矿物学报, 1999, 19(1): 48-55.
- [11] Skaarup P. Strata-bound scheelite mineralisation in skarns and gneisses from the Bindal area, Northern Norway [J]. *Mineralium Deposita*, 1974, 9(4): 299-308.
- [12] 姚鹏, 顾雪祥, 李金高, 范文玉. 甲马铜多金属矿床层控矽卡岩流体包裹体特征及其成因意义[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2006, 33(3): 285-293.
- [13] 张仁杰, 马国干. 海南石碌铁矿的 Sm-Nd 法年龄及其意义[J]. 地质科学, 1992, (1): 38-43.
- [14] Meinert L D, Hefton K K, Mayes D, Tasiran I. Geology, zonation, and fluid evolution of the Big Gossan Cu-Au skarn deposit, Ertsberg district, Irian Jaya [J]. *Economic Geology*, 1997, 92: 509-534.
- [15] Meinert L D, Hedenquist J W, Satoh H, Matsuhisa Y. Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu-Au ore deposits by magmatic fluids [J]. *Economic Geology*, 2003, 98: 147-156.
- [16] Brown P E, Bowman J R, Kelly W C. Petrologic and stable isotope constraints on the source and evolution of skarn-forming fluids at Pine Creek, California [J]. *Economic Geology*, 1985, 80: 72-95.
- [17] 赵斌. 中国主要矽卡岩及矽卡岩型矿床[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-268.
- [18] 林文蔚, 赵一鸣, 蒋崇俊. 矽卡岩矿床中共生单斜辉石-石榴石特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 1990, 9(3): 195-207.
- [19] Nakano T, Yoshino T, Shimazaki H, Shimizu M. Pyroxene composition as an indicator in the classification of skarn deposits [J]. *Economic Geology*, 1994, 89(7): 1567-1580.
- [20] Somarin A K. Garnet composition as an indicator of Cu mineralization: evidence from skarn deposits of NW Iran [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2004, 81: 47-57.
- [21] Meinert L D. Skarn, manto, and breccia pipe formation in sedimentary rocks of the Cananea mining district, Sonora, Mexico [J]. *Economic Geology*, 1982, 77(4): 919-949.

Mineralogical Characteristics of Skarns in Langdu Skarn Copper Deposit, Zhongdian, Yunnan Province, China

Ren Tao¹, ZHONG Hong², ZHANG Xing-chun², HAN Run-sheng¹, MA Mei-juan¹

(1. Faculty of Land and Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: Langdu skarn copper deposit is an important skarn copper deposit hosted by the transition zone of Triassic Qugasi Formation and intrusive rocks in Zhongdian area, NW Yunnan, China. Its skarn mineral mainly consists of garnet, pyroxene, amphibole, epidote and etc. Using electronic probe, we detailed analyzed the chemical composition of major skarn minerals. Results show that garnet is andradite to grossular solid solution series, ranging in composition of $Ad_{57-94}Gr_{6-41}Al_{1-3}$. End-member of pyroxene is $Hd_{78-92}Di_{3-12}Jo_{5-9}$, falling into calcium group. Actinolite, grunerite, epidote, and calcite are abundant. Different mineral assemblages reflect that the environment of skarn formation experienced the conversion from relatively high temperature under oxidation condition to low temperature under reduction condition.

Key words: skarn; mineralogy; copper deposit; Yunnan