

文章编号: 1000-4734(2018)03-0290-13

云南都龙锡锌多金属矿床矽卡岩 矿物学特征与地质意义

李丕优¹ 燕永锋^{1*} 杨光树¹ 贾福聚¹ 田振东^{2,3} 崔东豪¹ 田正伟¹ 康明敏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 550081; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 都龙锡锌矿床位于云南省马关县境内, 是我国第 3 大锡多金属矿床。前人对该矿床进行了大量的研究工作, 但关于该矿床的成因仍存争议, 有岩浆热液、喷流沉积和沉积-变质-热液改造 3 种成因观点。矽卡岩作为矿区最重要的含矿岩石, 对其开展相关的研究工作对于解决上述争议具有重要的意义。本文在详细的镜下鉴定工作之上, 对矽卡岩中的石榴子石、辉石和角闪石进行了电子探针成分分析。分析结果表明, 矽卡岩中石榴子石为钙铁榴石-钙铝榴石系列, 辉石主要为透辉石-钙铁辉石系列, 角闪石主要为阳起石和铁阳起石, 另含有少量的铁角闪石。结合前人年代学、流体包裹体、硫、铅和碳同位素等方面研究资料, 认为该矿床成因类型为岩浆热液成因的矽卡岩型多金属矿床。

关键词: 都龙锡锌矿床; 矿物学特征; 矽卡岩; 矿床成因

中图分类号: P618.41 文献标识码: A doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2018.032

作者简介: 李丕优, 女, 1992 年生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: 710447834@qq.com

Mineralogical Characteristics of Skarns from Dulong Sn-Zn Polymetallic Deposit in Yunnan Province and Their Geological Significances

LI Pi-you¹, YAN Yong-feng^{1*}, YANG Guang-shu¹, JIA Fu-ju¹, TIAN Zhen-dong^{2,3}, CUI Dong-hao¹,
TIAN Zheng-wei¹, KANG Ming-min¹

(1. Faculty of Land 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 550081, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Dulong Sn-Zn deposit, located in Maguan County of Yunnan Province, is the third largest tin polymetallic deposit in China. Voluminous previous researches have reached there exist three kinds of views on the metallogenesis of the deposit, including magmatic hydrothermal, sedimentary exhalative, and the SEDEX ore source bed superimposed with regional metamorphism and magmatic hydrothermal activity. To carry out some relevant works on the skarn which is of the most important host rocks of the deposit is significantly important for solving the existed controversies on the metallogenesis. On the basis of the detailed microscopy work, chemical compositions of garnet, pyroxene, and amphibole of skarns have been analyzed by using electron microprobe (EPMA) in this paper. Results show that the garnet belongs to the andradite-grossular series, the pyroxene belongs to diopside-hedenbergite series, and the amphibole is mainly actinolite and ferroactinolite with minor ferrohornblende. Combining with previous published data of geochronology, fluid inclusions, sulfur, lead and carbon isotopes, we proposed that the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit is of a magmatic hydrothermal skarn type.

Keywords: Dulong Sn-Zn deposit; mineralogical characteristics; skarn; genesis of deposit

收稿日期: 2017-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41373050)

*通讯作者, E-mail: lyy701018@vip.sina.com

都龙锡锌多金属矿床位于白垩纪南岭花岗岩大规模 W-Sn 多金属成矿带的西南端,是继个旧、大厂之后中国已探明的第 3 大锡矿床,是一个以锡、锌为主,并伴有铅、铜、钼、铁、银、镉、铟、镓、锗等多种元素的超大型矿床^[1-2]。已探明金属储量 Zn>5×10⁹ kg, Sn>4×10⁸ kg, Cu 2×10⁸ kg 以上, Pb 2×10⁹ kg 以上, W 5×10⁷ kg 以上, In 7×10⁶ kg^[1]。前人对该矿床的成矿年代学、成矿物质来源和成矿流体演化等方面进行了大量的研究,取得了丰硕的研究成果^[3-7]。但关于该矿床的成因仍存在着较大的分歧,主要有岩浆热液、喷流沉积和沉积-变质-热液改造成因^[7-11]。作为矿区最主要的赋矿岩石类型,矽卡岩在空间上和成因上均和锡、锌等多金属矿化密切相关^[12],因此,对矽卡岩开展相应的研究,对于探讨矿床的成因类型具有十分重要的意义。

矽卡岩中矿物组合和成分特征是矽卡岩(矿床)识别和分类的重要依据,其矿物化学成分特征蕴含丰富的成因信息^[13-14]。其中,石榴子石的震荡环带结构可以记录成矿流体的演化过程和形成环境^[15]。辉石、角闪石、绿泥石等矿物不仅可以记录成矿时的物理化学条件,而且可以指示金属矿化的类型^[16-17]。本文在大量的野外调研和详细的岩相学观察基础上,对都龙锡锌矿床矽卡

岩中石榴子石、辉石和角闪石进行了电子探针成分分析,旨在揭示矽卡岩的形成环境及其与区内锡锌多金属矿化的关系,为矿床成因类型划分提供科学依据。

1 区域地质背景

老君山地区位于云南省东南部,大地构造处于扬子地块、华夏地块和印支地块的结合部位,是我国重要的钨锡多金属矿集区,形成了都龙锡锌多金属矿、南秧田钨矿和新寨锡矿等一系列大型-超大型矿床(图 1a)。区内出露地层较全,包括元古界、古生界、中生界和新生界。其中,元古界地层主要由陆源碎屑岩、碳酸盐岩及中基性火山岩组成;古生界地层主要由碳酸盐岩、碎屑岩和少量的玄武岩组成;新生界地层主要为砂岩、泥岩及第四系沉积物(图 1b)。古元古代猛硐群为老君山地区出露最老的地层,刘玉平等^[18]报道了猛硐群石英角闪斜长片麻岩 2 组结晶年龄,分别为(761±12) Ma 和(829±10) Ma。区内岩浆活动广泛,主要由新元古代的中基性火山岩、古生代的南温河花岗岩和中生代老君山花岗岩组成(图 1b)。区域断裂构造发育,包括东西向的弥勒-师宗断裂、北西向的红河断裂、哀牢山断裂和文山-麻栗坡断裂。

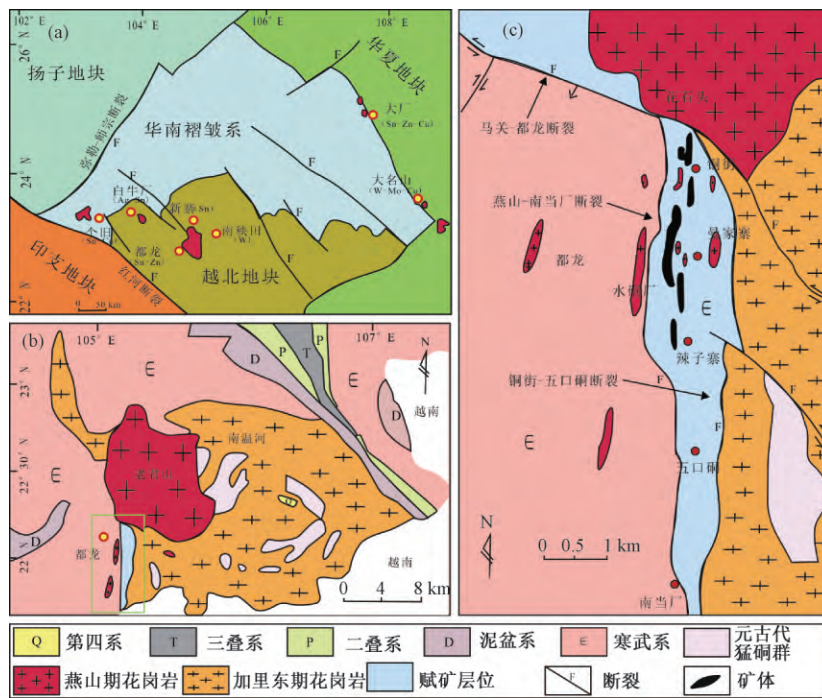
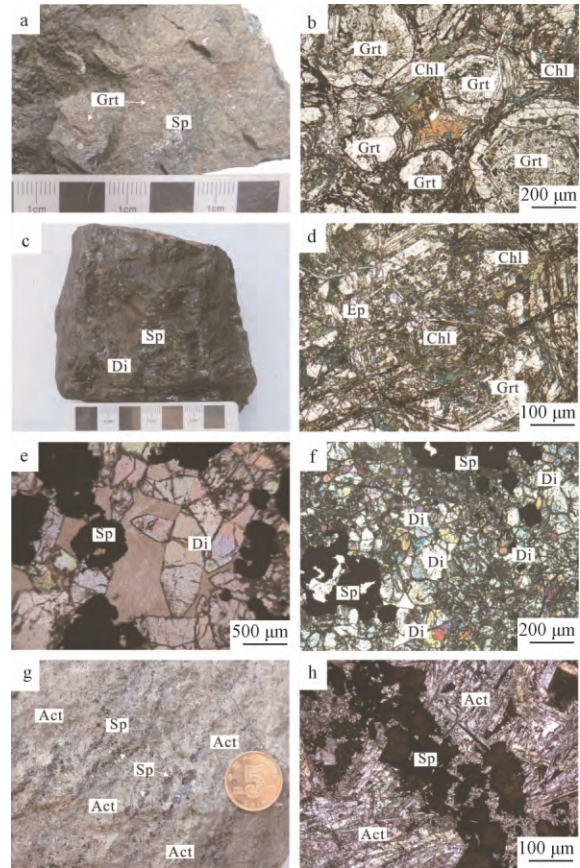


图 1 都龙锡锌多金属矿区及邻区地质简图(修改自文献[19])

Fig.1. Simplified geological map for the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit and adjacent regions(after reference [19]).

2 矿床地质特征

都龙砂卡岩型锡锌多金属矿床位于云南省马关县境内,是一个以锡、锌为主伴有铜、钨、钼、铅、银、铜、铁等元素的大型多金属矿床,主要包括铜街、曼家寨、辣子寨、五口硐和南当厂 5 个矿段(图 1c)。其中,曼家寨矿段已达到超大型规模,铜街矿段和其他 3 个矿段分别达到大型和中型规模^[3]。矿区出露的地层主要为新元古界一下寒武统新寨岩组和中寒武统田蓬组、龙哈组,其中田蓬组为赋矿地层^[2,8,20],田蓬组上部为云母石英片岩、白云母大理岩;中部为石英云母片岩、绿泥石片岩、大理岩、复杂砂卡岩;下部以片麻岩、变粒岩为主,夹少量大理岩、简单砂卡岩等。赋矿层位主要是田蓬组第 2 段与第 3 段过渡带。矿区构造主要为北西向的马关—都龙断裂、近南北向的铜街—五口硐断裂和花石头—南当厂断裂。其中,马关—都龙断裂为矿区主要的控矿构造^[4],老君山复式花岗岩分布于矿区北侧,与围岩地层呈陡倾接触关系,倾向 50°~65°,南北两端倾角为 20°~25°^[21]。该复式岩体主要由 3 个亚期组成,第 1 期中—粗粒二云二长花岗岩呈岩基状侵入到中、下寒武统地层之中,其形成时代为(87.2±0.6)~(96±2) Ma,约占该复式岩体 2/3;第 2 期中细粒二云母花岗岩呈岩基状侵入到第 1 期花岗岩之中,其形成时代为(86.8±0.4) Ma,主要分布在复式岩体中心附近,约占该复式岩体的 1/3;第 3 期花岗岩规模较小,呈岩枝侵入到第 1、2 期花岗岩和围岩地层当中,其岩性主要为花岗斑岩和花岗细晶岩^[3,22]。矿体主要呈层状、似层状、透镜状、囊状和网脉状产出,中寒武统田蓬组当中,在平面上和剖面上分别呈近南北向带状分布和叠瓦状分布^[7](图 1c)。层状砂卡岩为矿区主要的含矿岩石,其空间分布与矿体的产出密切相关。矿床的矿石类型包括锡石—硫化物—砂卡岩型、硫化物—碳酸盐型和硫化物—萤石—石英脉型^[20]。该矿床砂卡岩矿物发育,主要由石榴子石、透辉石、符山石和镁橄榄石组成,退化蚀变矿物有阳起石、绿泥石、绿帘石和蛇纹石,根据矿物组合可进一步将砂卡岩划分为石榴子石砂卡岩、透辉石砂卡岩、阳起石砂卡岩和镁质砂卡岩。根据矿物共生组合和穿插关系,可划分为 5 个成矿阶段(表 1):



a-石榴子石砂卡岩; b-绿泥石交代早期的砂卡岩矿物石榴子石; c-透辉石砂卡岩; d-绿泥石、绿帘石交代早期的砂卡岩矿物石榴子石; e、f-闪锌矿交代早期砂卡岩矿物透辉石; g、h-闪锌矿脉切穿自形—半自形的阳起石集合体; Grt-石榴子石; Di-透辉石; Act-阳起石; Chl-绿泥石; Ep-绿帘石; Sp-闪锌矿

图 2 都龙锡锌多金属矿床典型砂卡岩矿物镜下特征
Fig. 2. Photos and microphotographs for typical minerals in skarn specimen from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit.

1) 早期砂卡岩阶段: 主要形成石榴子石、辉石、符山石和镁橄榄石等无水硅酸盐矿物。石榴子石多呈褐色,少量为黄绿色,自形—半自形粒状或块状,粒径一般 0.1~3.5 mm,单偏光下无色—淡黄色,正高突起,糙面显著,显微裂纹发育,多具环带结构,正交光下多显均质性,呈全消光(图 2 a、b、d)。辉石在手标本上呈淡绿色—深绿色,呈短柱状、粒状或放射状产出,单偏光下呈无色,局部见辉石颗粒被闪锌矿等后期矿物交代(图 2c、e、f)。符山石在手标本上为黄褐色,显微镜下为无色,正高突起,极完全解理,呈放射状、纤维状集合体产出,常与石榴子石共生(引自王小娟^[23])。

表 1 都龙锡锌多金属矿床主要矿物生成顺序表

Table 1. Mineral generation sequence of the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit

矿化阶段 矿物	早期矽卡岩阶段	晚期矽卡岩阶段	氧化物阶段	石英硫化物阶段	碳酸盐阶段
石榴子石	████████				
辉石	████████				
符山石	██████				
镁橄榄石	███				
阳起石		████████			
绿泥石		████████			
绿帘石		████████			
金云母		██████			
锡石			████████		
磁铁矿			████████		
辉钼矿	██████				
毒砂				████████	
磁黄铁矿				████████	
黄铜矿				████████	
方铅矿				████████	
闪锌矿				████████	
黄铁矿				████████	
石英			████████		
方解石					████████

2) 晚期矽卡岩阶段: 主要生成角闪石、绿泥石和绿帘石等含水硅酸盐矿物, 交代早期矽卡岩矿物。角闪石多呈长柱状、放射状分布, 单偏光下呈浅绿色-墨绿色, 多色性明显, 常与闪锌矿共生(图 2 g、h)。绿泥石呈墨绿色, 呈片状或粒状产出, 交代早期矽卡岩矿物(图 2b、d)。绿帘石手标本上为翠绿色, 镜下呈粒状、板状、柱状, 正高突起, 分布于石榴子石、辉石颗粒边部或内部(图 2 d)。

3) 氧化物阶段: 该阶段主要形成磁铁矿和锡石, 具体描述见王小娟^[23]和鲍谈^[24]。

4) 石英硫化物阶段: 该阶段生成的矿物主要有黄铜矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和石英(图 3)。金属矿物在手标本上常呈团块状、团块状、稠密浸染状、条带状和脉状产出(图 3 a-d)。

5) 碳酸盐阶段: 该阶段矿物主要为方解石, 并含有少量的方铅矿和闪锌矿。

矿石结构主要有固溶体分离结构(图 3f)、交代结构和交代残余结构(图 2e、f、h)^[25]。矿石构造主要有块状构造、层状-纹层状构造、条带状构造、浸染状构造和脉状构造(图 3 a-d)^[7]。

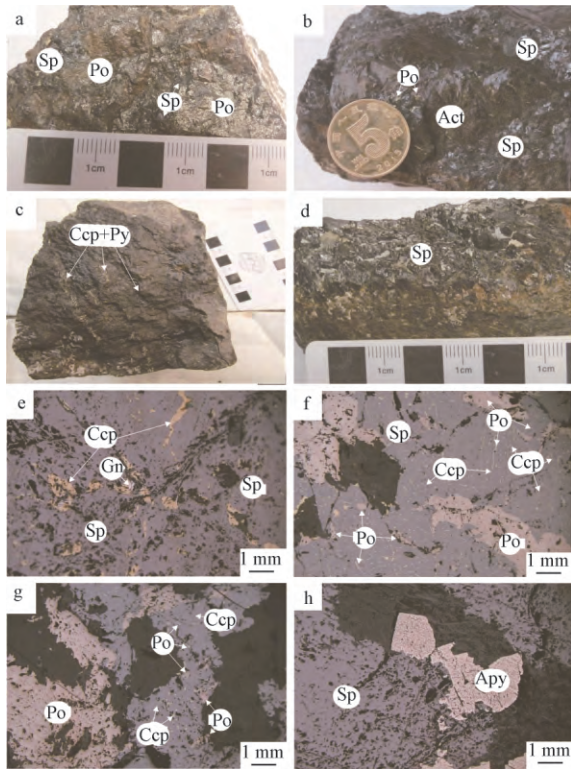
3 样品及分析测试方法

主要选取都龙矿区的矽卡岩样品, 对样品进行光薄片制作, 在详细的镜下鉴定工作基础上, 以石榴子石、辉石、角闪石为研究对象。其电子探针成分分析在长安大学国土资源部成矿作用及其动力学开放实验室完成, 仪器型号为日本电子 JXA8100, 测试加速电压 15 kV, 电流为 10 nA, 束斑直径 10 μm, 电子探针定量分析方法采用中华人民共和国国家标准 GB/T15617-2008, 使用 ZAF 氧化物修正计算, 分析精度优于 5%。

4 矽卡岩矿物化学成分特征

4.1 石榴子石

石榴子石是都龙锡锌矿床中重要的矽卡岩矿物, 矿区石榴子石多呈自形-半自形晶, 粒径一般 0.1~3.5 mm, 单偏光下无色-淡黄色, 正高突起, 糙面显著, 显微裂纹发育, 多具环带结构, 正交光下多显均质性, 呈全消光(图 2b、d)。本次石榴子石测点分析共完成 23 个, 其电子探针成分分析结果见表 2。从表中可以看出, 都龙锡锌矿区石榴子石主要为钙铁榴石(Adr)和钙铝榴石(Grs), 另



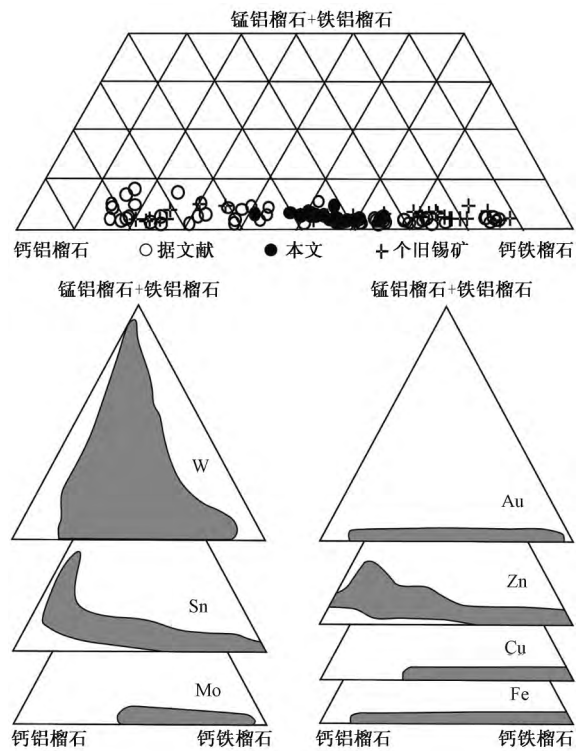
a、b-块状硫化物矿石；c-条带状硫化物矿石；d-脉状硫化物矿石；e-闪锌矿中细脉状、星点状黄铜矿；f、g 闪锌矿和磁黄铁矿交生在一起，闪锌矿中有乳滴状、叶片状黄铜矿、磁黄铁矿出溶；h-闪锌矿交代毒砂和砂卡岩矿物；Act-阳起石；Sp-闪锌矿；Po-磁黄铁矿；Ccp-黄铜矿；Gn-方铅矿；Apy-毒砂

图3 都龙锡锌多金属矿床典型矿石类型和显微照片
Fig.3. Photos and microphotographs for typical ores and sulfides from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit.

含少量的铁铝榴石(Alm)、锰铝榴石(Sps)和镁铝榴石(Prp)属钙铁榴石-钙铝榴石系列,与个旧锡矿以及世界典型砂卡岩型锡矿床中石榴子石具有相似分布区间^[14](图4)。从核部到边部,钙铁榴石质量分数先降低后升高,钙铝榴石质量分数先升高后降低(图5),显示出明显的韵律环带特征。

4.2 辉石

辉石是早期砂卡岩阶段常见的硅酸盐矿物,多呈半自形柱状-它形粒状,大小一般5~15 mm,部分2~5 mm,少部分0.5~2 mm。单偏光下呈无色,正高突起,干涉色二级蓝绿至橙黄,被黑云母、石英、方解石及不透明矿物交代呈交代残留结构(图2c、e、f)。都龙锡锌矿床中辉石电子探针分析结果见表3 $w(\text{SiO}_2)$ 为48.21%~49.97%,平均



●代表本文分析测试数据；○代表都龙锡锌多金属矿床,据文献[27-28]；+代表个旧砂卡岩型锡多金属矿床数据,据文献[29-31]

图4 都龙锡锌多金属矿床石榴子石成分组成与世界砂卡岩型矿床石榴子石成分对比(底图据文献[14])
Fig.4. Compositional plots for garnets from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit in comparison with those of other skarn deposits in the world(after reference [14]).

值为48.87%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为0.04%~1.26%,平均值为0.72%; $w(\text{FeO}_1)$ 为15.20%~21.64%,平均值为18.78%; $w(\text{MgO})$ 为1.42%~6.64%,平均值为3.95%; $w(\text{CaO})$ 为21.53%~23.66%,平均值为23.07%。本文研究样品与前人部分研究结果^[23, 27-28]相比,具有较高的 $w(\text{FeO}_1)$ 和较低的 $w(\text{MgO})$ 。王小娟^[23]通过系统的研究发现,随着距离深部隐伏岩体的远近,辉石的成分会发生明显的规律性变化,因此,我们认为造成上述样品间成分差异的原因可能和采样位置(深度)有关。在Wo-En-Fs判别图解中(图6a),研究区绝大部分样品落入透辉石、次透辉石和铁次透辉石区域,较少样品投入钙铁辉石区域,属于典型的透辉石-钙铁辉石固溶体系列。其化学成分与世界典型砂卡岩型锡锌矿床相似,但也存在着一定的差异(图6b、c)。

表 2 都龙锡锌多金属矿床代表性石榴子石电子探针分析结果 (w_B/%)

Table 2. Electron microprobe analyses of representative garnets from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit

样品编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Cr ₂ O ₃	Total	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Cr	Alm	Adr	Prp	Sps	Gro
M68-2-1	36.09	0.46	6.87	19.29	0.32	0.25	34.37	0.05	97.70	2.95	0.03	0.66	1.32	0.02	0.03	3.01	0.00	0.00	64.58	0.99	0.72	33.54
M68-2-2	36.21	0.50	7.37	17.88	0.62	0.18	34.47	0.03	97.26	2.97	0.03	0.71	1.23	0.04	0.02	3.03	0.00	0.00	59.45	0.71	1.39	38.35
M68-2-3	35.90	0.47	7.02	18.26	0.50	0.15	34.51	—	96.81	2.96	0.03	0.68	1.26	0.03	0.02	3.05	0.00	0.00	60.88	0.59	1.13	37.40
M68-2-4	35.47	0.39	7.00	19.42	0.54	0.22	34.70	—	97.74	2.91	0.02	0.68	1.33	0.04	0.03	3.05	0.00	0.00	64.17	0.86	1.20	33.76
M68-2-5	36.20	0.52	7.74	17.24	0.84	0.20	34.75	0.05	97.54	2.96	0.03	0.75	1.18	0.06	0.02	3.04	0.00	0.00	56.55	0.78	1.86	40.65
M68-2-6	34.86	0.55	6.25	20.11	0.78	0.13	33.12	0.04	95.84	2.92	0.03	0.62	1.41	0.06	0.02	2.97	0.00	0.00	69.42	0.53	1.82	28.10
M68-2-7	35.70	0.52	8.26	16.52	1.11	0.24	34.52	0.10	96.97	2.94	0.03	0.80	1.14	0.08	0.03	3.04	0.01	0.00	54.13	0.93	2.46	42.17
M68-2-8	36.08	0.57	8.20	17.37	0.91	0.17	34.29	—	97.59	2.94	0.03	0.79	1.19	0.06	0.02	3.00	0.00	0.00	57.70	0.67	2.04	39.59
M68-2-9	35.35	0.57	7.39	17.92	0.80	0.17	34.05	0.21	96.46	2.93	0.04	0.72	1.24	0.06	0.02	3.02	0.01	0.00	60.08	0.68	1.81	36.76
M68-2-10	35.23	0.16	5.33	20.55	0.62	0.03	34.20	—	96.12	2.95	0.01	0.53	1.44	0.04	0.00	3.07	0.00	0.00	69.27	0.12	1.41	29.19
M68-2-11	35.35	0.26	4.81	20.69	0.64	0.09	34.28	0.07	96.19	2.97	0.02	0.48	1.45	0.05	0.01	3.08	0.00	0.00	69.39	0.36	1.45	28.58
M68-3-1	35.74	1.90	7.78	13.66	0.48	0.50	35.12	0.04	95.22	2.98	0.12	0.76	0.95	0.03	0.06	3.13	0.00	0.00	44.19	1.92	1.05	52.72
M68-3-2	36.13	0.28	7.24	18.13	0.74	0.20	34.34	0.04	97.10	2.97	0.02	0.70	1.25	0.05	0.02	3.02	0.00	0.00	60.30	0.79	1.66	37.12
M68-3-3	36.04	0.53	7.86	16.72	0.87	0.18	34.35	0.07	96.62	2.97	0.03	0.76	1.15	0.06	0.02	3.03	0.00	0.00	55.47	0.71	1.95	41.65
M68-3-4	35.97	0.47	8.84	17.00	2.64	0.03	33.99	—	98.94	2.91	0.03	0.84	1.15	0.18	0.00	2.95	0.00	0.00	55.11	0.12	5.78	39.00
M68-3-5	36.08	0.56	6.41	19.41	0.56	0.18	34.23	—	97.43	2.96	0.03	0.62	1.33	0.04	0.02	3.01	0.00	0.00	65.07	0.72	1.27	32.94
M68-3-6	35.95	0.44	8.11	17.02	0.92	0.15	34.36	0.08	97.03	2.95	0.03	0.78	1.17	0.06	0.02	3.02	0.01	0.00	56.46	0.59	2.06	40.64
M68-3-7	35.45	0.91	7.53	16.24	0.76	0.28	34.65	0.02	95.84	2.95	0.06	0.74	1.13	0.05	0.03	3.09	0.00	0.00	53.35	1.09	1.69	43.81
M68-3-8	36.31	1.02	8.27	16.79	1.07	0.19	34.57	0.05	98.27	2.94	0.06	0.79	1.14	0.07	0.02	3.00	0.00	0.00	55.09	0.74	2.37	41.64
M68-3-9	36.27	0.17	8.47	17.78	1.83	0.12	33.91	0.06	98.61	2.94	0.01	0.81	1.20	0.13	0.01	2.94	0.00	0.00	58.60	0.47	4.07	36.67
M68-3-10	35.94	0.60	6.19	18.67	0.54	0.12	34.43	0.03	96.52	2.98	0.04	0.60	1.29	0.04	0.01	3.06	0.00	0.00	62.41	0.48	1.22	35.80
M68-3-11	36.98	0.25	7.24	18.64	0.54	0.23	34.05	—	97.93	3.00	0.02	0.69	1.27	0.04	0.03	2.96	0.00	0.00	62.72	0.92	1.23	35.14

注:以 12 个氧原子为标准计算的阳离子;FeO 代表全铁质量分数;— 表示低于检测限;Alm-铁铝榴石;Adr-铁铝榴石;Prp-镁铝榴石;Sps-锰铝榴石;Grs-钙铝榴石。

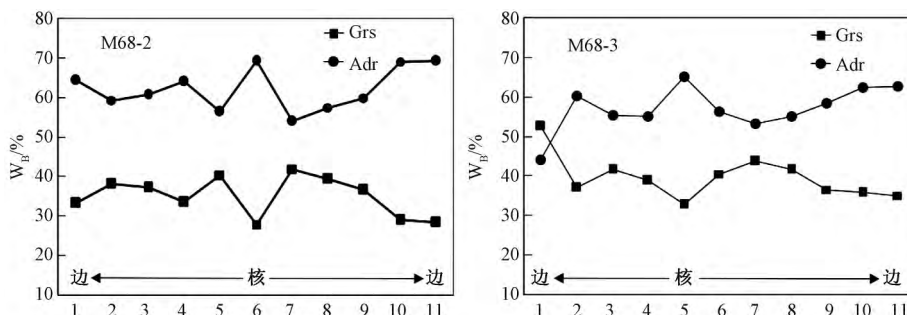


图 5 都龙锡锌多金属矿床石榴子石端元组分图解

Fig.5. Profiles of endmember compositional variation across grains of garnets from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit.

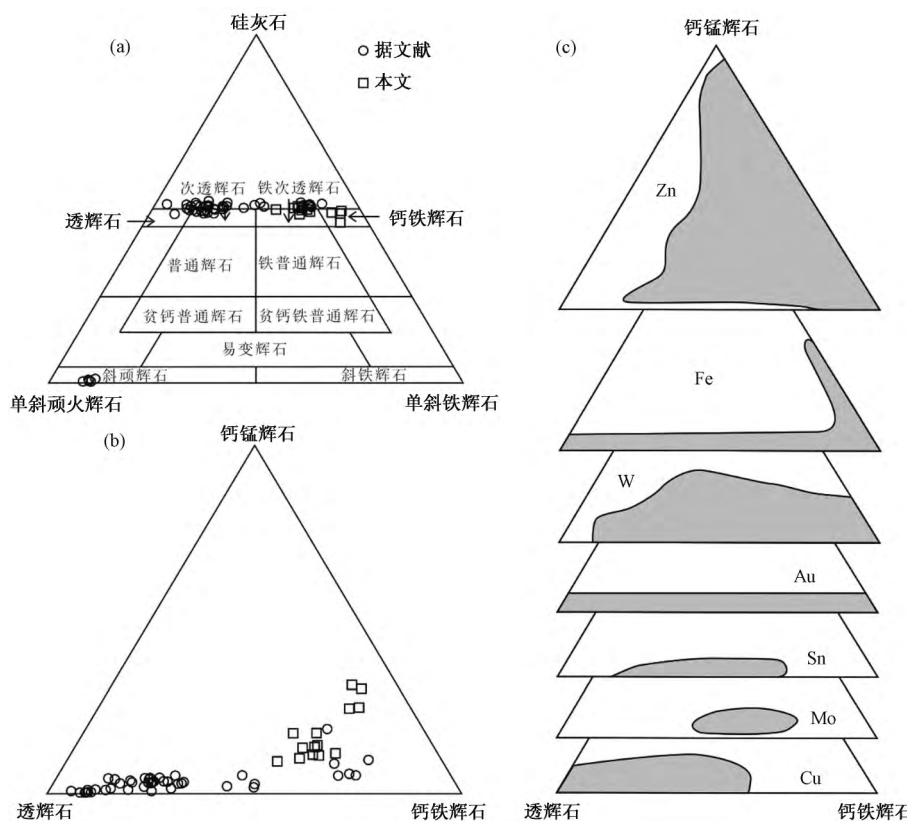


图 6 都龙锡锌多金属矿床辉石分类图解(a, b) 以及与世界矽卡岩型矿床辉石成分对比(c) (底图分别据文献 [14] 和 [32])

Fig.6. Classification of pyroxenes from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit(a, b) and in comparison with those of other skarn deposits in the world(c) (after reference [14] and [32]).

4.3 角闪石

角闪石是都龙锡锌矿床常见的退化蚀变矿物,呈长柱状、放射状分布,交代早期的矽卡岩矿物,也被晚期方解石和硫化物交代,单偏光下呈浅绿色-墨绿色(图 2e、f)。其电子探针成分分析结果见表 4,从表中可以看出,其化学成分 $w(\text{SiO}_2)$ 为 39.29% ~ 52.26%, 平均值为 45.83%;

$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 0.42% ~ 25.59%, 平均值为 6.50%; $w(\text{FeO})$ 为 6.94% ~ 31.35%, 平均值为 22.71%; $w(\text{MgO})$ 为 0.04% ~ 13.55%, 平均值为 4.59%; $w(\text{CaO})$ 为 8.04% ~ 33.54%, 平均值为 14.78%。根据 Leake et al^[33] 的分类图解可知,样品中角闪石主要为铁阳起石和阳起石,另含少量的铁角闪石(图 7)。

表 3 都龙锡锌多金属矿床代表性辉石电子探针分析结果 ($w_B / \%$)

Table 3. Electron microprobe analyses of representative pyroxenes from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit

样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	total
M29-1-1	49.97	0.06	1.20	15.20	2.60	6.64	22.88	0.16	0.02	0.01	98.74
M29-1-2	48.63	0.00	0.48	18.91	4.62	4.08	23.11	0.14	0.03	0.00	100.00
M29-2-1	49.52	0.04	0.76	18.09	3.01	4.78	23.66	0.15	0.00	0.03	100.04
M29-2-2	48.70	0.03	0.04	20.32	6.61	2.35	23.13	0.07	0.01	0.00	101.26
M29-2-3	49.19	0.02	0.83	19.11	3.07	3.83	23.36	0.22	0.01	0.00	99.64
M29-2-4	48.60	0.00	0.08	20.19	8.37	1.70	23.20	0.09	0.00	0.03	102.26
M29-2-5	48.70	0.05	0.92	18.14	2.62	5.18	23.44	0.21	0.00	0.02	99.28
M29-2-6	48.73	0.05	0.89	18.84	2.90	4.49	23.36	0.12	0.00	0.00	99.38
M29-3-1	48.70	0.03	0.32	21.64	7.16	2.09	21.53	0.09	0.01	0.01	101.58
M29-3-2	48.23	0.06	1.24	19.17	3.54	4.17	23.15	0.25	0.02	0.00	99.83
M29-3-3	48.80	0.07	0.92	17.44	4.67	5.06	22.70	0.22	0.02	0.00	99.90
M29-3-4	48.38	0.06	1.26	18.04	3.41	4.85	23.46	0.12	0.00	0.00	99.58
M29-3-5	49.86	0.08	1.01	18.23	3.69	4.65	23.12	0.24	0.02	0.03	100.93
M29-3-6	48.21	0.04	0.15	19.56	8.06	1.42	22.85	0.11	0.00	0.00	100.40
样品	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Wo	En	Fs
M29-1-1	1.98	0.02	0.03	0.00	0.50	0.09	0.39	0.97	49.39	19.94	30.05
M29-1-2	1.96	0.00	0.00	0.10	0.53	0.16	0.25	1.00	48.83	11.99	38.64
M29-2-1	1.97	0.03	0.01	0.05	0.55	0.10	0.28	1.01	50.31	14.14	34.97
M29-2-2	1.97	0.00	0.00	0.10	0.58	0.23	0.14	1.00	48.71	6.89	44.13
M29-2-3	1.98	0.02	0.01	0.04	0.60	0.10	0.23	1.01	50.37	11.49	37.29
M29-2-4	1.96	0.00	0.00	0.12	0.55	0.29	0.10	1.00	48.39	4.93	46.33
M29-2-5	1.95	0.00	0.00	0.09	0.51	0.09	0.31	1.01	49.71	15.29	34.19
M29-2-6	1.96	0.04	0.00	0.07	0.57	0.10	0.27	1.01	49.98	13.37	36.19
M29-3-1	1.97	0.00	0.00	0.08	0.65	0.25	0.13	0.93	45.77	6.18	47.70
M29-3-2	1.94	0.06	0.00	0.11	0.53	0.12	0.25	1.00	49.23	12.34	37.47
M29-3-3	1.95	0.00	0.00	0.10	0.48	0.16	0.30	0.97	47.96	14.87	36.33
M29-3-4	1.94	0.06	0.00	0.09	0.51	0.12	0.29	1.01	49.82	14.33	35.39
M29-3-5	1.97	0.03	0.02	0.04	0.55	0.12	0.27	0.98	49.07	13.73	36.28
M29-3-6	1.97	0.00	0.00	0.08	0.58	0.28	0.09	1.00	49.07	4.24	46.25

注: 以 6 个氧原子为标准计算的阳离子; FeO 代表全铁质量分数; Wo-硅灰石; En-单斜顽火辉石; Fs-单斜铁辉石。

表 4 都龙锡锌多金属矿床代表性角闪石电子探针分析结果 ($w_B / \%$)

Table 4. Electron microprobe analyses of representative amphiboles from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit

样品	M14-	M14-	M14-	M14-	M14-	M14-	M14-	M14-	M73-	M73-	M73-	M73-	M73-	M73-
编号	1-1	2-2	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
SiO ₂	46.00	51.03	52.26	50.54	43.75	50.35	43.85	46.67	48.59	48.02	48.26	49.28	47.85	46.14
TiO ₂	0.16	0.07	0.10	0.02	0.14	0.08	0.06	0.09	0.05	0.16	0.11	0.08	0.07	0.16
Al ₂ O ₃	4.41	0.42	0.59	1.65	10.85	1.65	5.10	3.33	1.61	3.06	2.09	1.76	2.15	5.09
FeO	25.06	20.38	19.83	23.49	23.80	23.39	27.70	28.28	29.70	28.07	28.54	26.66	26.77	25.92
MnO	2.10	1.11	0.85	0.95	1.83	1.10	0.83	1.40	1.50	1.23	1.07	1.25	1.42	1.94
MgO	4.72	10.50	11.10	8.24	3.47	7.78	5.82	2.66	3.12	4.03	3.55	5.06	5.06	4.48
CaO	11.64	10.93	11.58	12.15	12.02	11.50	10.80	11.27	11.30	11.55	11.67	11.64	11.74	11.53
Na ₂ O	0.36	0.06	0.18	0.19	0.53	0.28	0.42	0.34	0.17	0.23	0.18	0.13	0.20	0.53
K ₂ O	0.25	0.06	0.08	0.11	0.52	0.06	0.29	0.19	0.15	0.13	0.19	0.14	0.08	0.32
Total	94.70	94.56	96.57	97.34	96.91	96.19	94.87	94.23	96.19	96.48	95.66	96.00	95.34	96.11
Si	7.41	7.91	7.90	7.75	6.83	7.80	7.13	7.63	7.80	7.62	7.75	7.80	7.67	7.34
Al ^{IV}	0.59	0.08	0.10	0.25	1.17	0.20	0.87	0.37	0.20	0.38	0.25	0.20	0.33	0.66
Al ^{VI}	0.25	0.00	0.00	0.05	0.83	0.10	0.10	0.27	0.11	0.19	0.14	0.12	0.07	0.29
Ti	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
Fe ³⁺	0.77	0.94	0.93	0.86	0.72	0.91	0.53	0.89	0.92	0.88	0.91	0.94	0.84	0.72
Fe ²⁺	2.61	1.70	1.58	2.15	2.39	2.12	3.24	2.98	3.07	2.85	2.92	2.59	2.75	2.73
Mn	0.29	0.15	0.11	0.12	0.24	0.14	0.11	0.19	0.20	0.17	0.15	0.17	0.19	0.26
Mg	1.13	2.43	2.50	1.88	0.81	1.80	1.41	0.65	0.75	0.95	0.85	1.19	1.21	1.06
Ca	2.01	1.82	1.88	2.00	2.01	1.91	1.88	1.97	1.94	1.96	2.01	1.97	2.02	1.97
Na	0.11	0.02	0.05	0.06	0.16	0.08	0.13	0.11	0.05	0.07	0.06	0.04	0.06	0.16
K	0.05	0.01	0.02	0.02	0.10	0.01	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.06

注: 以 23 个氧原子为标准计算的阳离子。

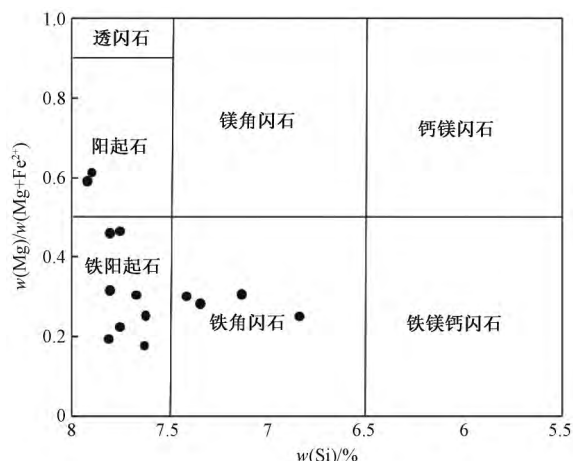


图 7 都龙锡锌多金属矿床角闪石分类图解
(底图据文献 [33])

Fig.7. Classification of amphiboles from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit(after reference [33]).

5 讨论

5.1 矽卡岩与矿化的关系

根据形成机理的不同,矽卡岩可分为交代矽卡岩和变质矽卡岩^[13]。其中,交代矽卡岩又可进一步划分为钙矽卡岩、镁矽卡岩、锰质夕卡岩和碱质夕卡岩^[17,34]。钙矽卡岩形态多样,可呈层状、似层状、透镜状、囊状和不规则状,常见的矿物组合为钙铁-钙铝系列石榴子石、透辉石-钙铁辉石系列辉石、硅灰石、阳起石、绿帘石和符山石等矿物,与 W、Sn、Mo、Cu、Fe、Pb、Zn、Bi 和 Au 等金属矿化密切相关;镁矽卡岩主要由铝透辉石、尖晶石、镁橄榄石、金云母和方镁石等富镁富铝的硅酸盐矿物组成,其矿化类型多样,可伴随有 Fe、Cu、Pb、Zn、W、Mo、Sn、Be 等金属矿化;锰质矽卡岩则

主要由锰钙辉石、锰钙铁辉石、锰铝榴石、蔷薇辉石和锰黑柱石等含钙锰的硅酸盐矿物组成,往往和 Pb-Zn(Cu-Ag) 等金属矿化相关;而碱质矽卡岩则主要由霓石、霓辉石、钠铁闪石、钠透闪石、霞石和钾长石等富含钠钾的矿物组成,与 Th、U、Nb、REE 矿化密切相关^[17]。都龙锡锌矿区矽卡岩主要由钙铁榴石、钙铝榴石、透辉石、钙铁辉石、阳起石、透闪石、符山石、金云母和蛇纹石等矿物组成,主要为钙质矽卡岩,在铜街和曼家寨矿段含有少量的镁质矽卡岩^[27],伴随有 Sn、Zn、Cu、Mo、Pb、Zn 等多金属矿化。

前人研究表明,不同类型矽卡岩矿床中石榴子石和辉石的成分具有一定的差异^[14,16-17,23,35](图 4、6),我们将前人研究结果汇总后见表 5。由表 5 可知,矽卡岩型铁铜矿床石榴子石、辉石分别为钙铁榴石、透辉石和次透辉石;矽卡岩型白钨矿床中石榴子石、辉石分别为钙铁榴石和次透辉石,另含有少量锰铝榴石和锰钙辉石;含钼矽卡岩中石榴子石为钙铝榴石和钙铁榴石的过渡种属,钙铝榴石质量分数相对较高,辉石为透辉石和次透辉石;矽卡岩型锡矿中石榴子石为钙铝榴石和钙铁榴石的固溶体系列,辉石钙铁辉石和次透辉石。研究区石榴子石、辉石和角闪石具有较大的成分变化范围,石榴子石为钙铝榴石和钙铁榴石的固溶体系列,辉石主要为透辉石、次透辉石和铁次透辉石,另含有少量的钙铁辉石,角闪石类型包括铁阳起石、阳起石和铁质角闪石。上述矽卡岩矿物成分难以与某一特定类型的矽卡岩矿床相对应,而可对应于多种类型的矽卡岩矿床,这与都龙锡锌矿床出现多种类型的金属矿化相吻合。辉石的 Mn/Fe 比值和 Mg/Fe 比值可以指示金属的矿化类型^[16,23,35],由表 5 易知,矽卡岩型铁、铜、金矿

表 5 不同类型矽卡岩矿床中石榴子石、辉石成分特征

Table 5. Compositional characteristics of garnets and pyroxenes from various types of skarn deposits

矿化类型	石榴子石端元组分	辉石端元组分	辉石		辉石中 $w(\text{Zn}) / 10^{-6}$
			$w(\text{Mn}) / w(\text{Fe})$	$w(\text{Mg}) / w(\text{Fe})$	
Fe、Cu、Au	钙铁榴石	透辉石、次透辉石	<0.1	<1	50~450, 通常小于 200
Mo	钙铁榴石- 钙铝榴石过渡系列				
Pb、Zn	钙铁榴石、钙锰榴石	钙铁辉石、钙锰辉石	>0.1	<1	150~500, 通常大于 200
W	钙铁榴石、锰铝榴石	次透辉石, 少量锰钙辉石	0.1~0.31	1~4	具有较大的变化范围, 通常大于 500
Sn	钙铁榴石- 钙铝榴石过渡系列	钙铁辉石和次透辉石	0.12~0.15	0.22	

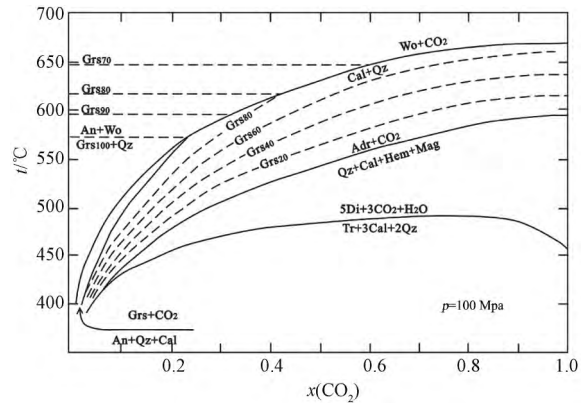
注:数据来源据文献[14]、[16]、[17]、[23]和[35]。

床 Mn/Fe 比值通常小于 0.1; 矽卡岩型铅锌矿床 Mn/Fe 比值通常大于 0.1, Mg/Fe 比值小于 1; 矽卡岩型钨矿床中 Mn/Fe 变化于 0.1~0.31, Mg/Fe 比值介于 1~4; 矽卡岩型锡矿床中 Mn/Fe 大约为 0.15^[36]。都龙锡锌矿床中辉石 Mn/Fe 比值变化范围为 0.01~0.52, Mg/Fe 比值变化范围介于 0.15~18.07, 这也与都龙矿区 Sn、Zn、Cu、Mo、Pb、Zn 等多金属矿化相一致。

5.2 矽卡岩对成矿环境的指示意义

矽卡岩矿物化学成分特征记录了其形成时的物理化学条件(温度、氧逸度和酸碱度等),不仅可以为矿床的形成环境提供重要的信息,而且可以指示金属的矿化类型^[17, 37]。大量研究表明,钙铁榴石和透辉石形成于相对氧化的环境中,而钙铝榴石和钙铁辉石则形成于偏酸性还原的环境中^[15]。实验岩石学研究表明,钙铁榴石形成于 450~600 °C、pH = 4.0~11.0 的氧化-弱氧化条件,钙铝榴石形成于 550~700 °C、中酸性的弱氧化-弱还原条件^[38]。Jamtveit 等^[37, 39] 研究发现,成矿流体中氧逸度升高和温度、盐度降低有利于钙铁榴石的形成。研究区石榴子石具有较大的成分变化范围(图 4),且具有明显的振荡环带,从核部到边部钙铁榴石质量分数先降低后升高,钙铝榴石质量分数先升高后降低,这与前人的研究结果相一致^[23, 27],说明在其形成过程中,流体的氧逸度呈现先降低后升高的趋势。这一成矿流体演化过程,说明在流体演化的早期阶段,随着岩浆热液与围岩碳酸盐岩发生广泛的交代作用,岩浆热液从围岩中萃取了大量的 Ca²⁺ 和 Mg²⁺,从而降低了热液中 Fe 的浓度,因此会呈现 Fe 质量分数和 pH 值降低的趋势^[15]。而在岩浆演化的晚期阶段,由于大气降水的加入^[27],使得成矿热液的温度和 pH 值降低、氧逸度升高,从而抑制了反应的进行,使得成矿热液中 Fe 的浓度升高而形成大量的铁铝榴石。由于石榴子石具有流体中低溶解能力和难熔的特点^[40],其稀土元素(REE)可以有效的示踪物源和流体演化过程^[37]。王金良等^[27] 对具有环带的石榴子石进行了 LA-ICP-MS 微量元素分析,结果显示,从核部到边部具有相似的 REE 质量分数和配分型式,指示其形成于一个相对稳定、开放的环境。对于绝大多数矽卡岩矿床,成矿流体中 CO₂ 摩尔分数变化于 0.2~0.5^[13]。结合 t-x(CO₂) 图解和石榴子石化学成分特征我们

得知,石榴子石形成的温度范围大约为 490~630 °C。



注: An-钙长石; Cal-方解石; Di-透辉石;
Grs-钙铝榴石; Adr-钙铁榴石; Hem-赤铁矿;
Mag-磁铁矿; Qz-石英; Tr-透闪石; Wo-硅灰石

图 8 都龙锡锌多金属矿床石榴子石 T-X CO₂ 图解

(转引自 Baghban et al^[41])

Fig.8. A plot of T-XCO₂ for garnets from the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit.

5.3 矿床成因类型探讨

周建平等^[10] 发现都龙锡锌矿区存在大量的条带状矿石、鲕状黄铁矿和丝状管形虫等喷流沉积结构特征,认为该矿床为喷流沉积成因。刘玉平等^[8, 42] 对矿区矿石 Pb 同位素、硫化物 S 同位素和含矿层状矽卡岩地球化学研究,提出该矿床经历了热水沉积-变质改造-岩浆热液叠加 3 个阶段,为热水沉积-变质改造-岩浆热液叠加成因。另一部分学者则认为该矿床为岩浆热液成因^[3, 4, 7, 9, 20]。虽然前人对该矿床的成因类型存在较大的争议,但矿体的产出与矽卡岩密切相关是一个不争的地质事实^[12]。如上所述,矽卡岩矿物不仅可以用来指示金属的矿化类型和矿床形成的物理化学条件,而且对于成矿流体的演化和成矿成因具有重要的指示意义^[37, 43]。研究表明,石榴子石主要通过区域变质作用、海底喷流沉积作用、岩浆作用和热液交代作用 4 种方式形成。区域变质作用形成的石榴子石主要包括铁铝榴石、锰铝榴石和钙铝榴石 3 种端元组分,且常具有明显的正环带,从核部到边部,铁铝榴石质量分数升高,锰铝榴石质量分数降低^[40, 44]。由于海水中具有较高的 Fe、Mn 质量分数,因此海底喷流沉积作用形成的石榴子石往往为铁铝榴石和锰铝榴石^[45]。由于在岩浆冷却过程中,岩浆中 w(Mn)/w(Fe +

Mg) 比值逐渐升高,导致石榴子石边部最富集 Mn,所以花岗岩中石榴子石化学成分常呈现出反环带的特征,即核部富集铁铝榴石,边部富集锰铝榴石^[40]。此外,由于 Y、Ho 具有相似的地球化学性质,结晶分异和部分熔融过程中不会造成 Y 和 Ho 的分异,因此岩浆作用形成的石榴子石 $w(Y)/w(Ho)$ 比值应接近球粒陨石值^[43,46]。而热液交代作用形成的石榴子石主要由钙铁榴石和钙铝榴石两个端元组分形成,且往往早期为钙铝榴石,晚期为铁铝榴石,由于在热液过程中可造成 Y、Ho 的分异,其 $w(Y)/w(Ho)$ 比可不同于球粒陨石^[43,47]。由表 2 可知,都龙锡锌多金属矿床中主要为钙铁榴石和钙铝榴石,而锰铝榴石的质量分数很低,且不含有铁铝榴石, $w(Y)/w(Ho)$ 值(数据据文献^[23,27])具有大的变化范围(1.47~53.25),明显不同于球粒陨石中 $w(Y)/w(Ho)$ 比值(28),其成分特征与世界典型矽卡岩型锡锌矿床相似,因此,我们认为研究区石榴子石为热液交代成因。此外,都龙锡锌多金属矿床中石榴子石早期主要为钙铝榴石,而晚期主要为钙铁榴石,这与绝大多数矽卡岩矿床中石榴子石成分变化特征相一致^[13]。王金良等^[27]通过 LA-ICP-MS 对矿区石榴子石进行了原位微区成分分析,结果显示,矿区石榴子石明显富集 LREE、亏损 HREE,其稀土配分形式与日本岩浆热液成因的 Yoshiwara-Sannotake 矽卡岩型矿床和老君山花岗岩的稀土配分形式一致。因此,我们认为石榴子石的形成主要和区内燕山期老君山花岗岩体分异的岩浆热液有关,而未受到喷流沉积和变质热液的叠加作用。由于个旧锡多金属矿床与都龙锡锌多金属矿床具有相似的地质特征、成矿成岩时代和成矿动力学背景,均形成于华南板块晚白垩世板内伸展构造背景之下^[19,22],我们将 2 个矿床石榴子石对比研究发现,两者具有非常相似的成分变化范围,暗示两者可能具有相似的成因类型。近年来,不同学者对个旧锡多金属矿床进行了大量的研究表明,该矿床为岩浆热液成因,而非喷流沉积成因^[48-52]。刘玉平等^[53]通过锡石 TIMS U-Pb 方法得到成矿年龄为 (82.0 ± 9.6) Ma,李进文等^[5]通过辉钼矿 Re-Os 获得成矿年龄为 75~79 Ma,王晓娟等^[6]通过 LA-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年获得成矿年龄为 87~89 Ma。虽然不同学者对该矿床获得的成矿年龄不完全相同,但总的来说,其成矿年龄与区内燕山期花岗斑岩的成岩年龄(86~88

Ma) 均接近或稍晚^[5,19,21,22,54]。除受矽卡岩控制之外,矿体的产出也明显受到深部隐伏岩体形态的控制,W、Sn、Cu、Mo、Zn 等富矿体往往产于隐伏岩体凸起部位上方,而在凸起部位两侧尖灭或变薄^[55]。且以老君山花岗岩体为中心,具有明显的矿物组合分带和矿化类型分带规律,从花岗岩到大理岩依次为透辉石-钙铝榴石带→透闪石-透辉石带→绿帘石-透辉石带→绿泥石-阳起石带→方解石-蛇纹石带^[56];从下往上,依次为 W-Be-Bi-Mo-Sn-Cu-Zn-Ag-As 矿化^[19,57]。S 同位素组成具有较窄的分布区间,主要集中在 $-1.5\% \sim +4.85\%$ 范围内,具有岩浆硫同位素的分布特征^[4,9,57]; $\delta^{13}C$ 变化范围为 $-3.09\% \sim -8.57\%$,平均值为 -6.57% ,与岩浆碳同位素分布一致,而明显偏离围岩大理岩的分布范围^[4]。矿石 Pb 同位素也与花岗岩中长石 Pb 同位素一致,而与围岩大理岩和片岩 Pb 同位素具有较大的差异^[3]。除此之外,氢、氧同位素研究也表明成矿流体主要来自岩浆,后期有少量大气降水的加入^[4,9]。

综上所述,都龙锡锌多金属矿床的形成与区内燕山期花岗质岩浆活动密切相关,属于岩浆热液交代成因的矽卡岩型多金属矿床。

6 结 论

本文在前人研究的基础之上,通过都龙锡锌多金属矿床矽卡岩矿物学特征研究,取得了以下几点认识:

1) 都龙锡锌多金属矿床矽卡岩矿物中石榴子石为钙铁榴石-钙铝榴石系列,辉石为透辉石-钙铁辉石系列,角闪石主要为阳起石和铁阳起石,另含有少量的铁角闪石。

2) 矽卡岩中石榴子石和辉石化学成分特征、辉石中 Mn/Fe 和 Mg/Fe 比值均指示该矿床应属于多金属矿化类型,这与都龙锡锌多金属矿床出现 Sn、Zn、Cu、Pb、Zn、Bi、In 等多金属矿化的地质事实相符。

3) 结合前人研究成果,我们认为都龙锡锌多金属矿床属于岩浆热液成因的矽卡岩型多金属矿床。

参 考 文 献:

- [1] 李廷俊,周磊,赵云魁,等. 都龙矿区矿产资源开发利用历史与现状[J]. 矿物学报, 2016, 36(4): 463-470.
- [2] 李长哲,曾凯,刘恒达,等. 云南马关都龙超大型锡锌铜多

- 金属矿床成因评述[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2014, 15(4): 99-105.
- [3] 何芳,张乾,刘玉平,等. 云南都龙锡锌多金属矿床铅同位素组成: 成矿金属来源制约[J]. 矿物学报, 2015, 35(3): 309-317.
- [4] 何芳,张乾,王大鹏,等. 云南都龙 Sn-Zn 多金属矿床成矿物质来源——硫、碳、氧稳定同位素证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(6): 900-907.
- [5] 李进文,裴荣富,王永磊,等. 云南都龙锡锌矿区同位素年代学研究[J]. 矿床地质, 2013, 32(4): 767-782.
- [6] 王小娟,刘玉平,缪应理,等. 都龙锡锌多金属矿床 LA-MC-CPMS 锡石 U-Pb 测年及其意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 867-876.
- [7] 叶霖,鲍谈,刘玉平,等. 云南都龙锡锌多金属矿床成矿阶段与成矿流体[J]. 矿物学报, 2016, 36(4): 503-509.
- [8] 刘玉平. 一个受后期改造和热液叠加的块状硫化物矿床——都龙超大型锡锌多金属矿床[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1998, 17(1): 22-24.
- [9] 宋焕斌. 云南东南部都龙锡石-硫化物型矿床的成矿特征[J]. 矿床地质, 1989, 8(4): 29-38.
- [10] 周建平,徐克勤,华仁民,等. 滇东南喷流沉积块状硫化物特征与矿床成因[J]. 矿物学报, 1998, 18(2): 158-168.
- [11] 贾福聚,燕永锋,伍伟,等. 云南老君山锡多金属成矿区硫、铅、氢、氧同位素地球化学[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1): 105-118.
- [12] 刘玉平,李朝阳,刘家军. 都龙矿床含矿层状矽卡岩成因的地质地球化学证据[J]. 矿物学报, 2000, 20(4): 378-384.
- [13] Einaudi M T, Meinert L D, Newberry R J. Skarn deposits [A]. *Economic Geology 75th Anniversary Volume* [C]. Littleton: Society of Economic Geologists, 1981: 317-391.
- [14] Meinert L D, Dipple G M, Nicolescu S. World skarn deposits [A]. *Economic Geology 100th Anniversary Volume* [C]. Littleton: Society of Economic Geologists, 2005: 299-336.
- [15] 王伟,王敏芳,刘坤,等. 矽卡岩中石榴子石在示踪热液流体演化和矿化分带中的研究现状及其展望[J]. 岩石矿物学杂志, 2016, 35(1): 147-161.
- [16] Nakano T, Yoshino T, Shimazaki H, et al. Pyroxene composition as an indicator in the classification of skarn deposits [J]. *Economic Geology*, 1994, 89(7): 1567-1580.
- [17] 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: 1-354.
- [18] 刘玉平,叶霖,李朝阳,等. 滇东南发现新元古代岩浆岩: SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 916-926.
- [19] Xu B, Jiang S Y, Wang R, et al. Late Cretaceous granites from the giant Dulong Sn-polymetallic ore district in Yunnan Province, South China: Geochronology, geochemistry, mineral chemistry and Nd-Hf isotopic compositions [J]. *Lithos*, 2015, 218-219: 54-72.
- [20] 缪应理,张世奎,韦文彪,等. 云南都龙锡多金属矿床金石坡矿段钨铜钼矿化特征及地质意义[J]. 矿物学报, 2013, 33(4): 510-514.
- [21] 韦文彪,刀学强,赵迁,等. 滇东南都龙锡锌多金属矿床一种新的铜矿化类型[J]. 矿物学报, 2016, 36(4): 455-462.
- [22] 蓝江波,刘玉平,叶霖,等. 滇东南燕山晚期老君山花岗岩的地球化学特征与年龄谱系[J]. 矿物学报, 2016, 36(4): 441-454.
- [23] 王小娟. 云南都龙锡锌多金属矿床找矿矿物学与成矿年代学[D]. 北京: 中国科学院大学(硕士论文), 2014.
- [24] 鲍谈. 云南都龙矽卡岩型锡锌多金属矿床成矿流体及成矿机制研究[D]. 北京: 中国科学院大学(硕士论文), 2014.
- [25] 李忠烜,刘玉平,叶霖,等. 云南马关都龙锡锌多金属矿床鲕状黄铁矿微束分析[J]. 矿物学报, 2016, 36(4): 510-518.
- [26] Whitney D L, Evans B W. Abbreviations for names of rock-forming minerals [J]. *American Mineralogist*, 2010, 95(1): 185-187.
- [27] 王金良,王小娟,刘玉平,等. 都龙锡矿床矽卡岩石榴子石地球化学特征与成矿-找矿意义[J]. 矿物学报, 2016, 36(4): 519-528.
- [28] 赵震宇. 云南省马关县都龙锡多金属矿床—岩浆作用及矿床成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京)(博士论文), 2017.
- [29] Chen J, Halls C, Stanley C J. Mineral association and mineralogical criteria for the formation conditions of a B-F-Sn-Bi skarn in Damoshan, Gejiu tin field, Southwest China [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1992, 11(2): 140-155.
- [30] 韩松,黄忠祥. 云南个旧打磨山钙质矽卡岩及石榴石的稀土元素地球化学特征[J]. 岩石学报, 1993, 9(2): 192-198.
- [31] 贾润幸,方维萱. 云南个旧锡多金属矿床石榴石地球化学特征及其指示意义[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(5): 578-586.
- [32] Poldervaart A, Hess H H. Pyroxenes in the crystallization of basaltic magma [J]. *Journal of Geology*, 1951, 59(5): 472-489.
- [33] Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, et al. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names [J]. *The Canadian Mineralogist*, 1997, 35: 219-246.
- [34] 赵一鸣,林文蔚,张德全,等. 交代成矿作用及其找矿意义: 几个重要含矿交代建造的研究[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1992: 1-158.
- [35] 赵一鸣,张轶男,林文蔚. 我国矽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): 31-32, 36-38, 40-42.
- [36] 赵飞,尹京武,王梦亚,等. 湖南黄沙坪矽卡岩矿物学特征及地质意义[J]. 现代地质, 2016, 30(5): 1038-1050.
- [37] Jamtveit B, Wogelius R A, Fraser D G. Zonation patterns of skarn garnets: records of hydrothermal system evolution [J]. *Geology*, 1993, 21(2): 113-116.

- [38] 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.
- [39] Jamtveit B, Agnarsdottir K V, Wood B J. On the origin of zoned grossular-andradite garnets in hydrothermal systems[J]. *European Journal of Mineralogy*, 1995, 7(6): 1399-1410.
- [40] 夏琼霞, 郑永飞. 高压-超高压变质岩石中石榴石的环带和成因[J]. 岩石学报, 2011, 27(2): 433-450.
- [41] Baghban S, Hosseinzadeh M R, Moayyed M, et al. Chemical composition and evolution of the garnets in the Astamal Fe-LREE distal skarn deposit, Qara-Dagh-Sabalan metallogenic belt, Lesser Caucasus, NW Iran [J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 78: 166-175.
- [42] 刘玉平, 李朝阳, 谷团, 等. 都龙锡锌多金属矿床成矿物质来源的同位素示踪[J]. 地质地球化学, 2000, 28(4): 75-82.
- [43] Zhang Y, Shao Y J, Wu C D, et al. LA-ICP-MS trace element geochemistry of garnets: constraints on hydrothermal fluid evolution and genesis of the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit, eastern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 86: 426-439.
- [44] 陈曼云, 金巍, 郑常青. 变质岩鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 1-238.
- [45] Gemmill J B, Zantop H, Meinert L D. Genesis of the Aguilar zinc-lead-silver deposit, Argentina; contact metasomatic vs. sedimentary exhalative [J]. *Economic Geology*, 1992, 87(8): 2085-2112.
- [46] Anders E, Grevesse N. Abundances of the elements: Meteoritic and solar [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(1): 197-214.
- [47] Nozaki Y, Zhang J, Amakawa H. The fractionation between Y and Ho in the marine environment [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148(1-2): 329-340.
- [48] Cheng Y B, Mao J W, Rusk B, et al. Geology and genesis of Kafang Cu-Sn deposit, Gejiu district, SW China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 48: 180-196.
- [49] Cheng Y B, Mao J W, Zhu X K, et al. Iron isotope fractionation during supergene weathering process and its application to constrain ore genesis in Gaosong deposit, Gejiu district, SW China [J]. *Gondwana Research*, 2015, 27(3): 1283-1291.
- [50] Guo J, Zhang R Q, Li C Y, et al. Genesis of the Gaosong Sn-Cu deposit, Gejiu district, SW China: Constraints from *in situ* LA-ICP-MS cassiterite U-Pb dating and trace element fingerprinting [J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 92: 627-642.
- [51] Liao S L, Chen S Y, Deng X H, et al. Fluid inclusion characteristics and geological significance of the Xi'ao copper-tin polymetallic deposit in Gejiu, Yunnan Province [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79: 455-467.
- [52] Zhang J W, Dai C G, Huang Z L, et al. Age and petrogenesis of Anisian magnesian alkali basalts and their genetic association with the Kafang stratiform Cu deposit in the Gejiu supergiant tin-polymetallic district, SW China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 69: 403-416.
- [53] 刘玉平, 李朝阳, 廖震, 等. 都龙超大型锡锌铜多金属矿床矿石组构学与年代学[J]. 矿床地质, 2010, 29(S1): 479-480.
- [54] 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 等. 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 967-976.
- [55] 苏航, 韦文彪, 陶志华, 等. 云南都龙矿区隐伏花岗岩地质地球化学特征与锡锌成矿作用[J]. 矿物学报, 2016, 36(4): 488-496.
- [56] 黄拯. 云南都龙多金属矿床曼家寨矿段砂卡岩的矿物组合分带规律及其地球化学特征研究[D]. 昆明: 昆明理工大学(硕士论文), 2016.
- [57] 忻建刚, 袁奎荣. 云南都龙隐伏花岗岩的特征及其成矿作用[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1993, 13(2): 121-129.