第 36 卷 第 6 期 36(6):1289~1315

编号:0258-7106(2017)06-1289-27

Doi: 10.16111/j.0258-7106.2017.06.003

西藏列廷冈铁多金属矿床矽卡岩矿物学特征及 其地质意义*

李 壮12 唐菊兴1** ,王立强1 杨 毅3 李松涛4 ,王 豪5 ,王 维6

(1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;2中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083;3 西藏自治区地质调查院,西藏 拉萨 850000;4 贵州省地质矿产勘查开发局 105地质大队,贵州 贵阳 550000;5 成都理工大学地球科学学院,四川成都 610059;6 四川省煤田地质局一四一队,四川德阳 618000)

摘 要 西藏列廷冈铁多金属矿床位于冈底斯北缘弧背断隆带内,是近年来勘查评价的规模可达中型的接触交代矽卡岩型矿床。矿区矽卡岩主要呈层状、似层状,矽卡岩型铁多金属矿体赋存于下,中三叠统查曲浦组、 $T_{1.2c}$)的卡岩和大理岩中,矿体呈透镜状、囊状、似层状产出,矽卡岩矿物较发育。为进一步查明矿床矽卡岩矿物种属及矽卡岩类型 剖析矽卡岩形成环境及其与矿化类型之间的关系,基于对矽卡岩矿物系统的显微镜下观测,利用电子探针对矿床主要矽卡岩矿物化学成分进行了系统分析。矽卡岩矿物主要为石榴子石、透辉石、角闪石、绿帘石、绿泥石等,矿床矽卡岩具典型钙矽卡岩特征。根据矿物共生组合及交代关系推断成矿流体经历了 5 个阶段,分别为早期矽卡岩阶段、退化蚀变阶段、早期热液阶段、石英硫化物阶段和碳酸盐阶段。特征矿物的电子探针分析结果表明,石榴子石主要为钙铁榴石-钙铝榴石系列、 $And_{18.37-99.89}Gro_{0.24-79.05}Ura + Pyr + Spe_{0.98-6.63}$),且发育环带结构,辉石主要为透辉石-钙铁辉石系列($Di_{53.56-99.91}Hd_{1.61-44.55}Jo_{0.08-5.11}),角闪石主要为阳起石,次为铁、镁角闪石,均属钙质角闪石系列、绿泥石主要为富铁的铁镁绿泥石,绿帘石贫 Fe、Mg。在矿床成矿演化过程中,其成矿环境是发生改变的,早期矽卡岩阶段到最晚期碳酸盐阶段,成矿环境至少经历了从高温、偏碱性的氧化环境到相对低温、偏酸性的还原环境的转变。$

关键词 地质学 铁多金属矿床 秘卡岩 矿物学 成矿环境 洌廷冈 洒藏

中图分类号:P618.31 文献标志码:A

Mineralogical characteristics of skarn in Lietinggang iron polymetallic deposit, Tibet and their geological significance

LI Zhuang^{1,2}, TANG JuXing¹, WANG LiQiang¹, YANG Yi³, LI SongTao⁴, WANG Hao⁵ and WANG Wei⁶

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 Geological Survey of Tibet, Lhasa 850000, Tibet, China; 4 105 Geological Party, Guizhou Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Guiyang 550000, Guizhou, China; 5 School of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 6 Team 141 of Sichuan Coalfield Geology Bureau, Deyang 618000, Sichuan, China)

^{*} 本文得到国家自然科学基金青年基金(编号:41403040)和中国地质调查局地质调查项目(编号:121201103000150004)联合资助 第一作者简介 李 壮 , 男 , 1989 年生 , 博士研究生 , 矿产普查与勘探专业。Email:lizhuangcags@126.com

^{* *} 通讯作者 唐菊兴,男,1964年生,博士生导师,研究员,主要从事矿床学和固体矿产勘查与评价研究。Email:tangjuxing@126.com 收稿日期 2016-09-28;改回日期 2017-07-26。赵海杰编辑。

Abstract

Located in the arc back fault zone on the northern margin of Gangdise, the Lietinggang iron polymetallic deposit in Tibet is a medium-sized contact metamorphic skarn deposit discovered in recent years. The skarns are mainly stratified and stratoid. The skarn iron polymetallic orebodies that occur in the skarn and marble of Lower-Middle Triassic Chaqupu Formation ($T_{1,2}c$) are lenticular, chambered and stratoid in form. In order to identify the mineral types and skarn types and analyze the relationship between the metallogenic environment and the mineralization type of the skarns, the authors, based on systematic microscopic observation of the skarn minerals, utilized the electron microprobe to analyse the composition of major skarn minerals in this deposit. Skarn minerals mainly include garnet, diopside, hornblende, epidote, chlorite, etc., and the skarns have typical characteristics of calcium skarn. According to the association combination and replacement relationship of the minerals, the authors infer that the ore-forming fluids experienced five stages, i.e., early-skarn stage, degeneration-alteration stage, early-hydrothermal stage, quartz-sulfide stage and carbonation stage. According to the results of electron microprobe analysis, the garnets are mainly andradite-grossular (And_{18,37~99,89}Gro_{0,24~79,05}Ura + Pyr + Spe_{0.98-6.63}), and the garnets always develop the zoning structure; the pyroxene is of diopside-hedenbergite series (Di_{53.56~99.91}Hd_{1.61~44.55}Jo_{0.08~5.11}); amphiboles are mainly actinolite and iron-magnesium hornblende belonging exclusively to the series of calcium amphibole; chlorite is mainly iron-rich iron-magnesium chlorite; epidote is poor in Fe and Mg. During the ore-forming process, the ore-forming environment varied from early-skarn stage to late carbonation stage, and the ore-forming environment at least underwent the conversion from high temperature, alkaline, oxidized environment to relatively low temperature, acid, reductive environment.

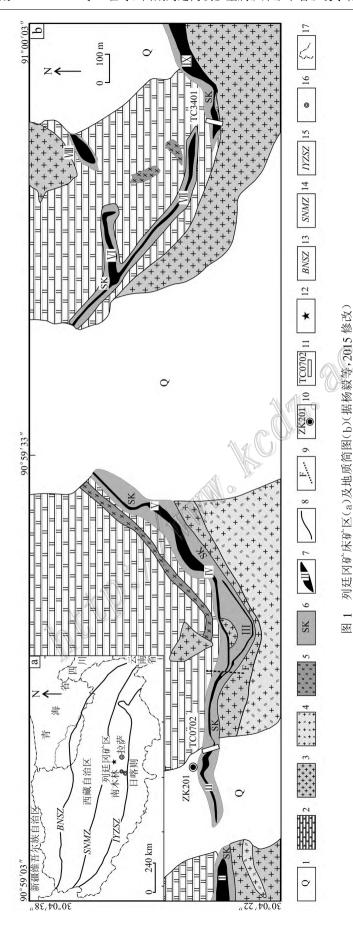
Key words: geology, iron polymetallic deposit, skarn, mineralogy, metallogenic environment, Lietinggang, Tibet

矽卡岩型 Cu、Fe、Pb、Zn、W、Sn 矿床是一种具有重要经济价值的矿床类型(Meinert,1992;Pons,2010 Somarin,2010;Mao et al.,2011) 其分布十分广泛。在中国、矽卡岩型矿床分布较广,众多金属矿产及非金属矿产均大都来源于矽卡岩型矿床,其中,矽卡岩型铁矿是中国富铁矿的主要来源,占整个富铁矿石的 50%以上(李厚民等,2012;张招崇等,2014 Zhang et al.,2014;费详惠等,2014)。在矽卡岩型矿床的研究中,矽卡岩矿物成分的研究具有十分重要的地位(Einaudi et al.,1981;1982;Smith et al.,2004)。作为矽卡岩矿床的含矿岩石,矽卡岩中不同矿物组合、分布及成因对于了解矿床成因及其成矿环境等均具有重要意义(Einaudi et al.,1981;1982;Xu et al.,2000;Somarin,2004;Meinert et al.,2005》。

列廷冈矿床位于西藏冈底斯成矿带北缘林周盆地 Fe-Mo-Cu-Pb-Zn 矿集区内,是近年来新发现的规模可达中型的矽卡岩型铁多金属矿床,前人主要针对其矿床成因、成岩成矿时代(杨毅等,2014;2015; 王立强,未刊资料)矿床地质特征(李壮等,2013) 岩石地球化学、流体包裹体特征、成矿物质来源(杨毅等 2015)磁铁矿单矿物特征(李壮等 2016)等方面进行了初步的研究。然而,目前尚缺乏对该矿床系统的矽卡岩矿物学特征研究。因此,文章重点选择矿床典型矽卡岩矿物作为研究对象,在显微镜观察的基础上,对矽卡岩矿物成分进行了系统研究,并对成矿环境、矿床成因进行了初步探讨。

1 矿床地质特征

列廷冈矿床的大地构造位置位于冈底斯弧背断隆带,矿区地层出露较简单,主要为下-中三叠统查曲浦组(T₁₋₂c)及第四系(Q)(图1)。查曲浦组为一套厚层碳酸盐岩,岩性为灰白色灰岩、白色大理岩,呈层状、似层状分布于矿区北侧,是矽卡岩型 Fe-Cu-Mo 矿体的主要赋矿围岩。第四系主要由残坡积物和冲洪积物等组成。矿区构造样式相对简单,主要为断裂构造,另发育褶皱、滑脱面构造、节理构造等。岩浆岩广泛出露,以中酸性侵入岩为主,分布于矿区南部,主要包括花岗斑岩((60.69±0.98)Ma)花岗



1—第四系; 2—大理岩; 3—花岗斑岩; 4—花岗闪长岩; 5—云斜煌斑岩; 6—矽卡岩; 7—矿体及编号; 8—地质界线; 9—不明性质断层; 10—钻孔及编号; 11—茶槽及编号; 12—矿区位置; 13一班公湖-怒江缝合带;14一狮泉河蛇绿岩带;15一雅鲁藏布江缝合带;16一地名;17一省(区)界线

—Quaternary: 2—Marble: 3—Granite porphyry: 4—Granodiorite: 5—Mica plagioclase lamprophyre: 6—Skarn: 7—Orebody and number: 8—Geological boundary: 9—Unknown fault: 10—Drilling and number: 11—Trench and number: 12—Deposit location: 13—Bangong Co-Nujiang suture zone: 14—Shiquan River-Nam Tso mélange zone: 15—Indus-Yarlung Zangbo suture zone: 16—Place Simplified ore area (a) and geological map (b) of the Lietinggang deposit (modified after Yang et al., 2015) Fig. 1

name; 17—Provincial (district) boundary

闪长岩((58.69±0.68) Ma)(杨毅等,2015),次为少量闪长岩、云斜煌斑岩和斜长角闪岩岩脉。

矿区主要发育 9 条砂卡岩型铁多金属矿体,自西向东依次编号为 I ~ IX 号矿体,多呈透镜状、长条状、囊状或似层状产出(图 2a、b),其中 I ~ V 号矿体构成西矿段, VI ~ IX 号矿体构成东矿段。矿石类型主要为砂卡岩型铁、铜(钼)矿石,次为发育于花岗斑岩及花岗闪长岩中的钼(铜)矿石,矿石具有上"铁"下"铜钼"的分带。矿石矿物主要为磁铁矿、黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿,次为磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等;脉石矿物主要为石榴子石、透辉石、角闪石、阳起石、绿帘石、绿泥石等砂卡岩矿物,次为石英、方解石等。

矿石构造多样,以块状构造(图 3a)、浸染状构造 为主(图 3c),次为条带状、脉状构造(图 3b)。矿石 结构包括自形晶粒状结构(图 3d)和半自形-他形晶粒状结构等结晶结构、充填结构、交代残余(图 3e)和交代假象(图 3f)等交代结构、固溶体分离结构。围岩蚀变主要为矽卡岩化,次为硅化、大理岩化。矿床的成矿过程分为2个成矿期:矽卡岩期和热液期;进一步划分为5个成矿阶段:早期矽卡岩阶段、退化蚀变阶段、早期热液阶段、石英-硫化物阶段和碳酸盐阶段(图 4)。

(1) 矽卡岩期

矽卡岩期主要包括早期矽卡岩阶段和退化蚀变阶段 2 个成矿阶段。早期矽卡岩阶段为无水矽卡岩阶段,主要形成钙铁榴石、钙铝榴石、透辉石等无水硅酸盐类矿物;晚期退化蚀变阶段主要形成阳起石、绿帘石、绿泥石、角闪石等含水硅酸盐类矿物,此外形成大量的块状磁铁矿及少量黄铁矿。

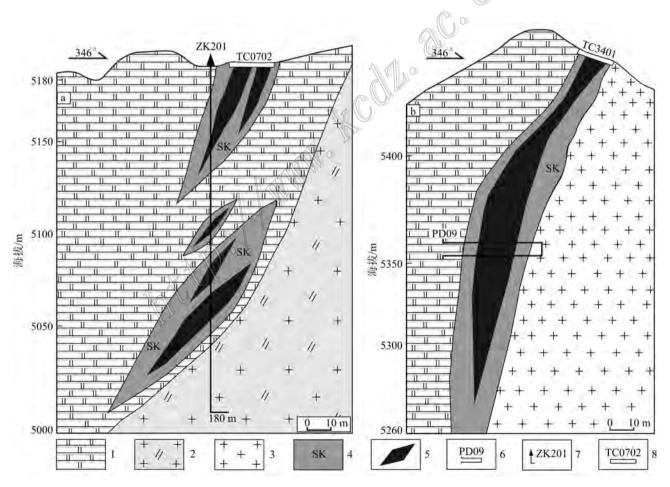


图 2 列廷冈矿床 || 号(a)及 || 号(b)矿体勘探剖面图(据马代海等,2012 修改)

1一大理岩; 2一花岗闪长岩; 3一花岗斑岩; 4一矽卡岩; 5一铁多金属矿体; 6一平硐及编号; 7一钻孔及编号; 8一探槽及编号

Fig. 2 Geological section of No. 2 (a) and No. 9 (b) orebody in the Lietinggang deposit (modified after Ma et al., 2012) 1—Marble; 2—Granodiorite; 3—Granite porphyry; 4—Skarn; 5—Iron polymetallic orebody; 6—Adit and number; 7—Drilling and number; 8—Trench and number

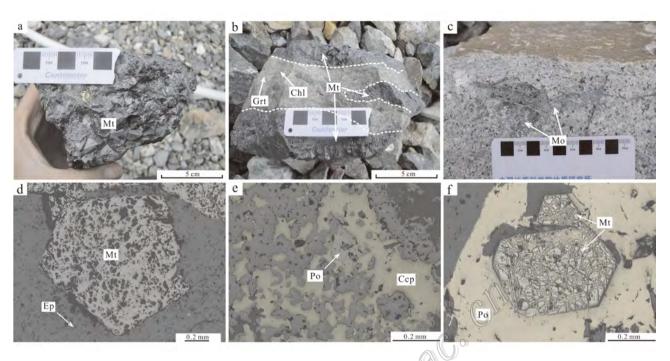


图 3 列廷冈矿床矿石组构特征图

a. 块状磁铁矿; b. 脉状磁铁矿; c. 花岗闪长岩中浸染状辉钼矿化; d. 自形晶粒状磁铁矿; e. 黄铜矿部分交代磁黄铁矿形成交代 残余结构; f. 磁铁矿交代早期石榴子石形成交代假象结构

Mt一磁铁矿; Mo一辉钼矿; Po一磁黄铁矿; Ccp一黄铜矿; Grt一石榴子石; Chl一绿泥石; Ep一绿帘石

Fig. 3 Photograph of ore structures in the Lietinggang deposit

 $a.\ Massive\ magnetite;\ b.\ Veined\ magnetite;\ c.\ The\ disseminated\ molybdenum\ in\ the\ granodiorite;\ d.\ Self-shaped\ magnetite\ grain;$

e. Pyrrhotite partially metasomatized by chalcopyrite; f. Early garnet metasomatized by magnetite

Mt-Magnetite: Mo-Molybdenite: Po-Pyrrhotite: Ccp-Chalcopyrite: Grt-Garnet: Chl-Chlorite: Ep-Epidote

(2) 热液期

热液期主要包括早期热液阶段、石英-硫化物阶段和碳酸盐阶段3个成矿阶段。早期热液阶段主要形成热液磁铁矿、石英、绢云母等。而石英-硫化物阶段主要形成石英、黄铜矿、辉钼矿、磁黄铁矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等;碳酸盐阶段主要形成方解石等碳酸盐矿物。

2 主要矽卡岩矿物特征

列廷冈矿区矽卡岩矿物较发育,且与成矿关系密切。根据主要的矽卡岩矿物组合,可将矿床矽卡岩划分为石榴子石矽卡岩、石榴子石透辉石矽卡岩、绿帘石绿泥石矽卡岩、角闪石绿帘石砂卡岩矿物主要有石榴子石、透辉石、角闪石、绿帘石、绿泥石等。主要的矽卡岩矿物特征描述如下。

2.1 石榴子石

石榴子石是列廷冈矿床中最为发育的矽卡岩矿 物,分布广泛。石榴子石主要发育于花岗斑岩或花 岗闪长岩与大理岩的接触带内外侧。野外手标本观 察可见,石榴子石的颜色常见为深棕色、棕黑色、黄 棕色等,其次为黄绿色、翠绿色、浅绿色(图 5a、b)。 石榴子石主要呈自形粒状,其次为他形粒状集合体 或细脉状。矿床发育2期(不同世代)石榴子石: ① 早期石榴子石呈深棕色、棕黑色,主要为钙铁榴 石系列,广泛分布(图 6a)。单偏光下颜色为浅棕褐 色,具正极高突起,多为自形,半自形晶,中,粗粒结 构,粒径约0.2~0.5 mm。石榴子石多发育环带结 构,边缘可见绿帘石化、磁铁矿化等现象(图 6c)。另 可见环带状石榴子石核部被磁铁矿、辉钼矿、方铅矿 等金属矿物交代(图 6c,d):②晚期石榴子石呈翠绿 色、浅绿色,主要为钙铝榴石系列。单偏光下呈浅黄 色、黄绿色(图6b),具光性异常的干涉色和高突起,

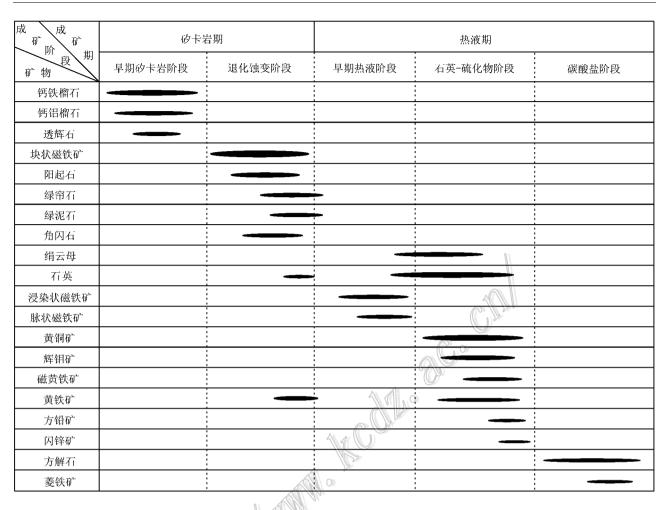


图 4 列廷冈矿床矿石矿物和脉石矿物共生组合及生成顺序(据李壮等 2016 修改)

Fig. 4 Association and formation sequence of the ore minerals and gangue minerals from the Lietinggang deposit (modified after Li et al., 2016)

他形-半自形晶粒状结构,粒径多集中于 $0.1 \sim 0.5$ mm 间。晚期石榴子石多交代早期石榴子石,形成宽窄不一的环带结构。

2.2 辉石

辉石是列廷冈矿床矽卡岩中的组成矿物之一,常与石榴子石、方解石、磁铁矿、黄铜矿等共存,其含量分布很不均匀,多以短柱状、粒状或放射状集合体产出,多呈自形-半自形晶结构,单个辉石颗粒粒径最大可达1 cm,最小0.5 mm。野外手标本中,辉石以透辉石为主,颜色多以墨绿色、浅绿色为主,颜色深浅不一(图 5c)。单偏光显微镜下,透辉石多为短柱状(图 6e),正交偏光下其干涉色可达一级橙黄色工级蓝绿干涉色(图 6f)。部分辉石颗粒发育后期绿泥石化、碳酸盐化等蚀变,并伴有磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿等矿化现象。

2.3 角闪石

角闪石主要形成于退化蚀变阶段,系交代早期的无水硅酸盐矿物或矽卡岩旁侧的碱质交代岩形成,形成时间明显晚于早期无水矽卡岩矿物。研究表明,产在钙质矽卡岩的角闪石均属于钙角闪石,矽卡岩矿物以阳起石、铁镁角闪石为主;产在镁质矽卡岩中的角闪石亦属于钙质角闪石,矽卡岩矿物主要为透闪石、韭闪石或浅闪石等(赵一鸣等,2003)。列廷冈矿床中,角闪石族矿物主要为阳起石和铁镁角闪石。①阳起石:手标本中常呈放射状集合体,颜色多为墨绿色(图5d)。单偏光显微镜下观察呈毛发状、放射状,具浅黄色、黄绿色,具明显多色性(图6g),正交偏光下干涉色为橙黄色,其裂隙处常发育磁铁矿、黄铁矿等金属矿物。阳起石常发生蚀变,镜下可见放射状阳起石发生绿泥石化或碳酸盐化

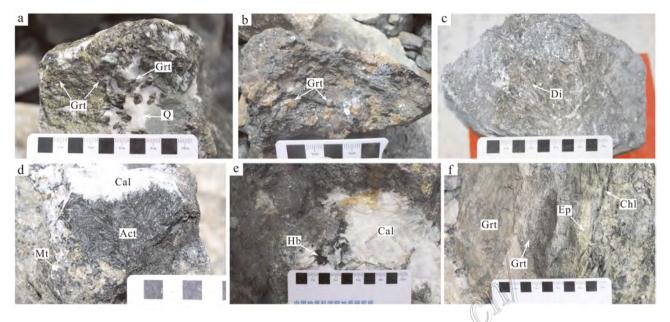


图 5 列廷冈矿床矽卡岩及矽卡岩矿物手标本特征

a. 早晚两期石榴子石; b. 呈浅棕色的早期石榴子石; c. 浅绿色柱状、放射状透辉石; d. 墨绿色毛发状阳起石集合体; e. 与方解石等 共生的角闪石集合体; f. 绿帘石绿泥石砂卡岩

Act—阳起石; Grt—石榴子石; Di—透辉石; Hb—角闪石; Ep—绿帘石; Chl—绿泥石; Mt—磁铁矿; Cal—方解石; Q—石英Fig. 5 Photograph of hand specimen features of skarns and skarn minerals from the Lietinggang deposit

a. Early and late two stages of garnets; b. Terminal pale-brown garnet; c. Light green columnar diopside; d. Dark green hairy actinolite assemblage; e. The hornblende aggregates together with calcite; f. Epidote and chlorite skarn

Act—Actinolite: Grt—Garnet: Di—Diopside: Hb—Hornblende: Ep, Epidote: Chl—Chlorite: Mt—Magnetite: Cal—Calcite: Q—Quartz

现象。② 铁镁角闪石: 手标本中多为短柱状、长条 状集合体,颜色为黑色(图 5e),呈团块状分布于早期 形成的石榴子石、透辉石的裂隙中。单偏光显微镜 下呈长柱状,墨绿色、棕褐色(图 6h),正交偏光下干 涉色为二级蓝至蓝绿色(图 6i)。

2.4 绿帘石

列廷冈矿床绿帘石常晚于石榴子石、透辉石,与 角闪石、方解石、石英等交代早期形成的石榴子石, 绿帘石的粒度通常较细,多呈星散状、不规则状集合 体产出,其次发育于岩体的裂隙处。手标本可见绿 帘石颜色常为黄绿色及翠绿色等(图 5f)。在单偏光 显微镜下观察,可见绿帘石呈浅黄色、姜黄色等颜色 (图 6j),具较弱的多色性特征,正高突起;正交偏光 下,颜色鲜艳,显示多为二级黄-二级蓝干涉色(图 6k)。在钙质矽卡岩中绿帘石与较富含钙的斜长石 以及其他矽卡岩晚期阶段矿物绿泥石、方解石、石英 等共生,它的形成标志着矽卡岩化过程中热液作用 和矿化作用的开始,对于寻找矽卡岩矿床有指示意 义(潘兆橹,1984)。

2.5 绿泥石

绿泥石同绿帘石一样,均为一种重要的含水硅

酸盐矿物,为典型的矽卡岩退变质阶段的产物,其产出明显晚于石榴子石、透辉石等无水矽卡岩矿物,常与绿帘石、角闪石、方解石、石英等矿物共生或交代早期矽卡岩矿物。列廷冈矿床绿泥石主要属铁镁绿泥石类,颜色多为浅绿色-墨绿色,颜色随其成分变化而变化,富含镁的绿泥石为浅蓝绿色,铁含量增多时,则颜色加深至墨绿色,形态主要呈他形粒状、细小鳞片状集合体。单偏光下,绿泥石颜色主要呈浅绿色和墨绿色,多呈叶片状、纤维状及针状集合体发育,具弱的多色性,正低突起(图 61);正交偏光下,具一级灰白干涉色。绿泥石常与绿帘石等矿物共生,早期砂卡岩矿物如石榴子石、透辉石等常发生后期绿泥石化。

3 样品采集与电子探针分析

本次研究对采自矿体平硐及近地表矿石堆内典型矽卡岩矿物石榴子石、辉石、角闪石、绿帘石、绿泥石等进行了电子探针分析,详细的样品特征和取样位置见表 1。选取典型矽卡岩样品,磨制成标准的电子探针片,利用莱卡DM2500P偏光显微镜进行镜下

表 1 西藏列廷冈矿床矽卡岩样品特征表

Table 1 The characteristics of skarn samples from the Lietinggang iron deposit in Tibet

样品编号	样品名称	样品采 集地点	样品手标本及显微镜下特征
LTG- I -2	透闪石绿泥石矽 卡岩	I 号矿体 PD01	浅绿色~墨绿色,粒状变晶结构,浸染状构造,发育脉宽约 0.50~1.0 cm 的 磁铁矿脉,可见明显透闪石、绿泥石化。镜下可见磁铁矿交代透闪石等砂卡岩矿物
LTG-II-1	角闪石绿泥石砂 卡岩	Ⅱ号矿体 PD02	浅褐~棕褐色,他形粒状结构,块状构造,可见星点状辉钼矿化。主要矽卡岩矿物为角闪石、绿泥石及少量石榴子石。单偏光下可见角闪石具多色性,正交偏光下具鲜艳干涉色特征
LTG- II -2	阳起石石榴子石 矽卡岩	II 号矿体 PD02	墨绿色,粒状变晶结构,块状构造,发育放射状阳起石集合体及浅棕色自形 石榴子石。单偏光下,阳起石呈毛发状,石榴石发育较好环带结构,另发 育磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿化
LTG-Ⅲ-1	矽卡岩化似斑状 花岗闪长岩	田号矿体 PD03	灰白色-浅褐色,似斑状结构,浸染状~块状构造。发育明显石榴子石化,另 局部可见弱的绿帘石、绿泥石化。手标木可见稀疏浸染状磁铁矿、少量辉 钼矿发育
LTG-III-2	砂卡岩化大理岩	Ⅲ号矿体 PD03	灰白色,局部呈棕褐色,不等粒变晶结构,浸染状构造。可见弱的矽卡岩化, 主要发育少量的绿帘石。手表本可见细粒浸染状的磁铁矿发育,另可见他 形黄铜矿
LTG-IV-1	砂卡岩化似斑状 二长花岗岩	Ⅳ号矿体矿 石堆	灰白色,似斑状结构,脉状~角砾状构造。发育弱砂卡岩化,镜下主要的砂卡岩矿物为石榴子石、透辉石及少量绿泥石。手标本见宽约 3~5 mm 的磁铁矿脉穿插发育及浸染状方铅矿
LTG-IV-2	石榴子石透闪石 绿帘石矽卡岩	IV号矿体矿 石堆	浅黄绿色、灰黑色,细粒变晶结构,浸染状构造。镜下主要可见石榴子石、 毛发状透闪石及绿帘石等砂卡岩矿物。镜下可见磁铁矿局部交代阳起石颗 粒形成交代残余结构
LTG-IV-3	透辉石透闪石砂 卡岩	Ⅳ号矿体矿 石堆	墨绿色, 局部呈黄褐色, 不等粒变晶结构, 块状构造。镜下可见呈放射状集合体的透闪石、短柱状辉石颗粒, 另发育少量姜黄色的绿帘石颗粒。金属矿物为磁铁矿、磁黄铁矿等
LTG-IV-5	石榴子石矽卡岩	Ⅳ号矿体矿 石堆	棕褐色、浅黄褐色,自形晶粒状结构,块状构造,可见粒径约 1.0 cm 的自形石榴子石颗粒。镜下可见石榴子石发育环带结构,且环带边缘及核部发育少量的辉钼矿化
LTG-V-1	透辉石角闪石矽 卡岩	V 号矿体矿 石堆	浅绿色-墨绿色,块状构造,主要矽卡岩矿物为透辉石、角闪石。正交偏光镜 下可见二级蓝干涉色的透辉石,可见黄铁矿、磁黄铁矿等金属硫化物发育 于透辉石、角闪石的矿物裂隙间
LTG-VII-3	石榴子石电气石 矽卡岩	Ⅷ号矿体矿 石堆	浅棕~棕黑色,手标本可见粒径约 0.5 cm 的石榴子石及呈花瓣状的电气石集合体。正交偏光下可见石榴子石宽窄不一的环带结构及电气石的弱多色性。
PD02-50.8 m	绿帘石矽卡岩	PD02 内 50.8 m 处	手标本呈浅黄绿色-暗绿色,粒状结构,块状构造,主要发育绿帘石、绿泥石等矽卡岩矿物,偶见辉石,绿帘石约占整个矽卡岩矿物的40%。单偏光下,可见绿帘石主要为姜黄色,呈自形粒状与绿泥石共生
PD02-68.9 m	透辉石绿帘石矽 卡岩	PD02 内 68.9 m 处	浅暗黄绿~浅褐绿色,结晶结构,块状构造,主要发育透辉石、绿帘石及少量介闪石等矽卡岩矿物。单偏光下透辉石主要为短柱状,具较高的干涉色;绿帘石主要呈姜黄色的粒状颗粒
PD02-89.4 m	绿帘石矽卡岩	PD02 内 89.4 m 处	手标本呈浅黄绿色,块状构造。主要矽卡岩矿物为绿帘石,次为绿泥石、角 闪石等矽卡岩矿物。单偏光下可见绿帘石主要为白形-半白形粒状结构,浅 黄色,颗粒间隙处发育黄铜矿
PD02-105.5 m	石榴子石绿 泥石矽卡岩	PD02 内 105.5 m 处	手标本呈浅黄棕色,粒状结晶结构,块状构造。主要砂卡岩矿物为石榴子石, 其次为绿泥石。单偏光下石榴子石多发育环带结构,绿泥石多为细粒集合 体发育
ZK2702-108 m	石榴子石透 辉石矽卡岩	ZK2702 108.0 m 处	手标本主要呈褟绿色,粒状结构,块状构造。主要砂卡岩矿物为石榴子石及 透辉石。单偏光下可见石榴子石多发育环带结构,透辉石具高级干涉色

观察和照相圈点,进行电子探针分析实验。电子探针测试在福州大学紫金矿业学院矿产资源研究中心实验室完成,分析仪器型号为 JXA-8230 电子探针,

测试电压 $15~\rm kV$,电流为 $20~\rm nA$,实际分析束斑直径 $5~\rm \mu m$ 检出限及标定矿物依据电子探针定量分析方法通则 (GB/T15074-2008).

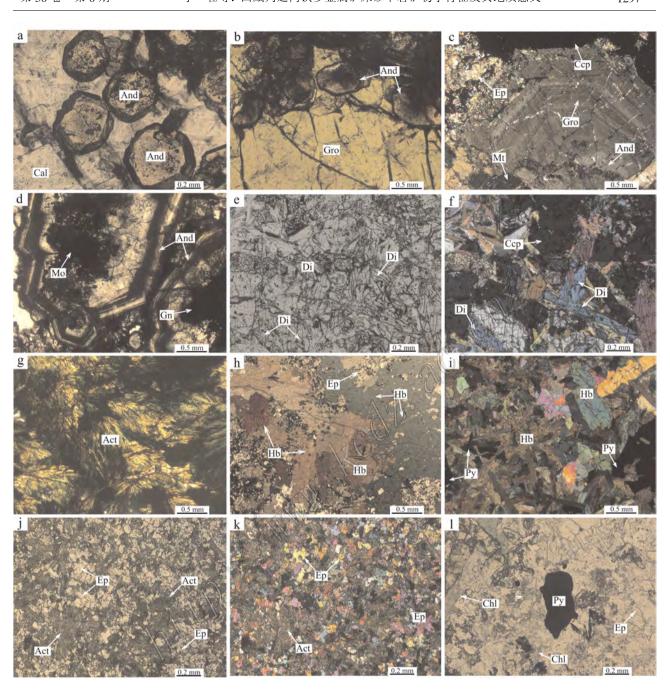


图 6 列廷冈矿床矽卡岩矿物偏光显微镜下特征

a. 自形粒状钙铁榴石颗粒(-); b. 钙铁榴石和钙铝榴石集合体(-); c. 具环带结构的石榴子石(+); d. 环带状石榴子石核部发育辉钼矿和方铅矿化(-); e. 短柱状辉石集合体(-); f. 具高级干涉色的透辉石颗粒(+); g. 毛发状阳起石集合体(-); h. 浅褐色一深棕色角闪石(-); i. 具二级蓝干涉色的角闪石(+); j. 阳起石与绿帘石共生(-); k. 具鲜艳干涉色的绿帘石集合体(+); l. 浅绿色绿泥石(-); (+) 正交偏光; (-) 单偏光

And—钙铁榴石; Gro—钙铝榴石; Di—透辉石; Act—阳起石; Hb—角闪石; Chl—绿泥石; Ep—绿帘石; Cal—方解石; Ccp—黄铜矿; Mt—磁铁矿; Mo—辉钼矿; Py—黄铁矿; Gn—方铅矿

Fig. 6 The microscopic characteristics of skarn minerals from the Lietinggang deposit

a. Euhedral andradite (-); b. Andradite and grossular (-); c. Zoning structure of garnet (+); d. Molybdenite and galena mineralization in the core of ring-shaped garnet (-); e. Columnar shaped pyroxene (-); f. Diopside with high-level interference color (+); g. Hairy actinolite assemblages (-); h. Light brown to dark brown Hornblende assemblage (-); i. Epidote and actinolite (+); j. Actinolite with epidote (-); k. Epidote assemblage with bold interference color (+); l. Light green chlorite (-); (+) crossed nicols; (-) plain light

And—Andradite; Gro—Grossular; Di—Diopside; Act—Actinolite; Hb—Hornblende; Chl—Chlorite; Ep—Epidote; Cal—Calcite; Ccp—Chalcopyrite; Mt—Magnetite; Mo—Molybdenite; Py—Pyrite; Gn—Galena

3.1 石榴子石

本次研究为采自Ⅲ号(5120 m) N号(5100 m) W号矿体(5080 m) 平硐 PD02(5320 m) 及钻孔 ZK2702(5537 m) 中的矽卡岩样品共计 6 件,选择样品中典型石榴子石进行电子探针分析,本次实验共计完成 20 个点位分析,分析结果见表 2。石榴子石中v(SiO2)变化范围为 34.57%~38.29%,平均值为 36.97%;v(CaO)为 32.41%~36.26%,平均值为 34.37%;v(TFeO)为 5.83%~28.79%,平均值为 18.56%;v(Al2O3)为 0.12%~17.80%,平均值为 8.04%;v(Na2O) v(MgO) v(MnO) v(TiO2)v(Cr2O3)均较低。通过计算得到石榴子

石阳离子数和端员组分 结果见表 2。分析结果表明列廷冈矿床石榴子石主要为 And 值变化于 18.37% ~99.89%之间的钙铁榴石(And), π (And)平均值为 61.93%;次为钙铝榴石(Gro), π (Gro)变化范围为 0.24% ~79.05%,平均值为 35.66%;含少量的钙铬榴石+镁铝榴石+锰铝榴石(Ura+Pyr+Spe),含量变化范围为 0.98% ~ 6.63%,平均值为 2.38%属钙铁榴石-钙铝榴石系列(And_{18.37~99.89} Gro_{0.24~79.05}Ura+Pyr+Spe_{0.98~6.63}),且钙铁榴石与钙铝榴石含量呈线性负相关变化(图 7a)。石榴子石端员组分图解(图 7b)同样显示出,列廷冈矿床石榴子石属于钙铁榴石-钙铝榴石系列,且端员组分与世

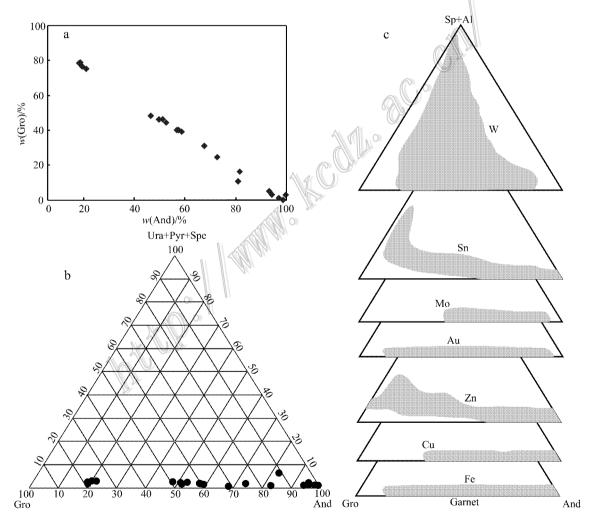


图 7 列廷冈矿床石榴子石 And-Gro 相关性图解 a 和端员组分图解 b 及与世界矽卡岩型矿床对比 c () 底图据 Meinert et al. 2005)

And—钙铁榴石;Gro—钙铝榴石;Ura—钙铬榴石;Pyr—镁铝榴石;Spe—锰铝榴石

Fig. 7 The And-Gro correlation diagram (a) and endmember diagram (b) and comparison of endmember composition of garnets from the Lietinggang deposit with that from the world skarn deposits (c) (base map after Meinert et al., 2005)

And—Andradite; Gro—Grossular; Ura—Uvarovite; Pyr—Pyrope; Spe—Spessartine

表 2 列廷冈矿床石榴子石电子探针分析结果(w(B)/%)和阳离子端员组分

Table 2 Components (w(B)/%) and endmember compositions of garnet from the Lietinggang deposit through electron probe analysis

			•					•				3					,			
47 87 87 87 87 87 87 87 87 87 87 87 87 87			LTG	LTG-∭-3				ZK2702-108 $^{\mathrm{m}}$	-108 m				LTG-IV-1	V -1			LTG-∭-1		PD02-105.5 m	5.5 m
が出	01	02	03	04	05	90	01	02	03	04	01	02	03	04	05	90	01	02	01	02
										w(B)/%	%									
Na_2O	0.02	0	0.01	0.07	0	0.05	0	0.03	0.04	0.01	0.05	0.02	0.03	0	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03
$_{\rm MgO}$	0.16	0.10	0.20	0.10	0.25	0.07	0.49	0.41	0.43	0.33	0.08	0.07	0.09	90.0	0.05	90.0	0.08	0	0.23	0.20
Al_2O_3	2.90	5.71	1.05	6.72	0.05	10.00	17.73	17.80	17.45	17.70	8.74	11.55	0.12	3.82	0	9.22	10.80	1.15	8.18	10.16
SiO_2	34.57	36.32	36.07	36.93	35.82	37.67	38.11	38.06	38.00	38.23	37.35	37.70	35.84	36.78	35.83	36.82	37.43	36.00	37.58	38.29
K_2O	0.01	0.01	0.01	0	0	0	00	0.01	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0
CaO	33.62	34.12	33.37	34.38	33.71	34.80	36.09	35.34	35.30	36.26	34.54	34.02	33.31	33.97	32.41	34.35	34.26	33.28	35.07	35.20
FeO	24.58	21.85	27.00	20.09	28.40	16.10	5.83	6.22	69.9	5.96	17.35	15.14	28.52	24.34	28.79	17.36	15.69	27.74	17.93	15.67
MnO	0.40	0.70	0.27	0.26	0.21	1.10	0.47	0.76	0.72	0.38	0.81	1.18	0.44	0.44	1.01	0.88	1.00	0.73	0.40	0.48
Cr_2O_3	1.59	90.0	0	0	0	0.01	0	0.05	0.01	0.02	0	0	0	0.02	0.03	0.01	0	0	0.01	0.04
TiO_2	0	0.05	0	0.11	0	0.10	0.54	0.70	0.75	0,51	0.16	0.24	0	0.03	0	0.10	0.18	0	0.31	0.27
总和	97.88	68.86	94.98	98.66	98.44	99.90	99.26	99.38	99.38	99.39	80.66	99.92	98.35	99.46	98.17	98.81	99.46	98.92	99.72	100.34
							2	W 12 ↑ O J	原子为基	惟计算的	原子为基准计算的阳离子数和端员组分/%	和端员组分	}/%							
S	2.89	2.96	3.00	2.99	2.98	2.98	2.94	2.94	2.93	2.95	2.99	2.97	2.99	2.99	3.00	2.96	2.97	2.98	2.99	3.00
Ξ	0	0	0	0.01	0	0.01	0.03	0.04	0.04	0.03	0.01	0.01	0	0	0	0.01	0.01	0	0.02	0.02
Al	0.29	0.55	0.10	0.64	0	0.93	1.61	1.62	1.59	1.61	0.82	1.07	0.01	0.37	0	0.87	1.01	0.11	0.77	0.94
C	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	٥	e e	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe^{3+}	1.68	1.48	1.88	1.36	1.98	1.07	0.38	0.39	0.43	0.38	1.16	0.94	1.99	1.64	2.00	1.15	1.01	1.90	1.19	1.03
Fe^{2+}	0.04	0.01	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0	0.06		0.01	0.02	0.01	0.04	0.02	0	0
Mn	0.03	0.05	0.05	0.05	0.02	0.07	0.03	0.05	0.05	0.02	0.05	0.08	0.03	0.03	0.07	90.0	0.07	0.05	0.03	0.03
m Mg	0.05	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	90.00	0.05	0.05	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.03	0.02
Ca	3.02	2.97	2.98	2.98	3.01	2.95	2.98	2.92	2.92	2.99	2.96	2.87	2.98	2.96	2.91	2.96	2.91	2.95	2.99	2.96
And	81.11	72.84	93.37	67.74	97.13	52.69	18.37	19.58	21.17	18.84	57.57	46.67	98.81	81.72	68.66	56.89	49.89	94.41	58.80	51.18
Gro	10.92	24.73	5.20	31.27	1.37	44.59	78.80	76.87	75.41	79.05	40.32	48.52	0.24	16.50	3.13	40.39	46.41	3.28	39.40	46.87
Ura + Pyr + Spe 6.63	9 6.63	2.15	1.43	0.98	1.51	2.72	2.83	3.35	3.24	2.10	2.12	2.87	1.42	1.30	2.69	2.25	2.54	1.70	1.80	1.95
注:电子探针实验于福州大学电子探针实验室完成;TFeO一全铁,And一钙铁榴石,Gro一钙铝榴石,Ura一钙铬榴石,Pyr一镁铝榴石,Spe一锰铝榴石。	计实验于	福州大学	电子探针	实验室完)	或: TFeO-	-全铁, Ar	ıd──钙铁材	曾石, Gro-	一钙铝榴和	⊑, Ura—ŧ	再铬榴石,	Pyr—镁锟	¹ 榴石, Spc	锰铝榴]石。					

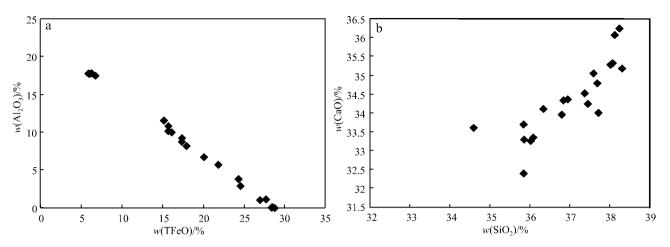


图 8 列廷冈矿床石榴子石 zu(TFeO)-zu(Al₂O₃)(a)和 zu(SiO₂)-zu(CaO)(b)相关性图解

Fig. 8 u(TFeO) u(Al₂O₃)(a) and u(SiO₂) u(CaO)(b) correlation diagrams of garnets from the Lietinggang deposit

界绝大部分矽卡岩型铁铜多金属矿床相似(图 7c)。 此外 石榴子石u(TFeO)u(Al $_2$ O $_3$)图解中(图 8), u(TFeO) $_2$ (Al $_2$ O $_3$)是明显的线性负相关关系(图 8a),u(SiO $_2$) $_2$ (CaO)之间显示了一定的线性正相关关系(图 8b)。石榴子石成分中随着u(Fe)的增加 $_1$ u(Al)具有明显降低趋势 $_1$ 00块了钙铁榴石-钙铝榴石固溶体系列成分的变化特征且形成于一个非平衡条件下(赵劲松等 $_1$ 1996)。

电子探针数据(表 2)显示,在空间上,由地下深部到地表浅部,石榴子的矿物成分出现规律性变化,在靠近岩体的近端砂卡岩(VII、IV 和 III 号)中石榴子石主要为钙铁榴石,端员平均组分依次为:And_{77.48} Gro_{19.68}、And_{73.59} Gro_{24.85}、And_{72.15} Gro_{24.85};中部(PD02)石榴子石为钙铁榴石-钙铝榴石过渡系列,其端员平均组分为:And_{84.99} Gro_{43.14};远端砂卡岩(ZK2702)中石榴子石主要为钙铝榴石,其端员平均组分为And_{19.49}Gro_{77.53}。随着石榴子石中成分的变化,颜色也发生改变,从近端矽卡岩到远端矽卡岩((VII、IV、III)→PD02→ZK2702),石榴子石颜色具有深部到浅部从红棕色→浅绿色→黄褐色的空间变化规律。

列廷冈矿床石榴子石普遍发育环带结构,在正交偏光下环带结构呈现出黑白相间的光性异常,宽度不一,具内带较宽而外带较窄的特征。对石榴子石环带研究结果表明,正交偏光下观察发现的环带颜色深浅变化系其所含 $\mathfrak{u}(Al_2O_3)$, $\mathfrak{u}(TFeO)$ 及 $\mathfrak{u}(CaO)$ 不同所致。以 LTG- \mathbb{W} -1 和 LTG- \mathbb{W} -3 共 2 件样品为例,如图 9 所示, 浅色环带和暗色环带其成

分存在明显的差异,总体表现为浅色环带中的 $\mathfrak{u}(\mathsf{TFeO})$ 比暗色环带中 $\mathfrak{u}(\mathsf{TFeO})$ 偏高(图 9a、b中点 1、3、5),暗色环带中 $\mathfrak{u}(\mathsf{Al_2O_3})$ 比浅色环带中 $\mathfrak{u}(\mathsf{Al_2O_3})$ 高(图 9a、b中点 2、4、6);而随着浅色环带→暗色环带的逐渐变化, $\mathfrak{u}(\mathsf{SiO_2})$ 和 $\mathfrak{u}(\mathsf{CaO})$ 均相对稳定且呈现一致的变化关系(图 9a、b)。由核部到边部 整体上具钙铁榴石向钙铝榴石逐渐过渡的趋势,这反映出随着外界成矿物理化学环境的变化,铁质逐步被析出沉淀的过程(周振华等 2011)。

3.2 辉石

本次研究共采集列廷冈矿床辉石矽卡岩、石榴 子石辉石矽卡岩样品共5件,经详细的显微镜下鉴 定 共计完成了 13 个点位的电子探针分析 ,测试结 果见表 3。电子探针结果显示,列廷冈矿床辉石族矿 物主要为透辉石和钙铁辉石。透辉石主要成分 w(SiO2) 变化范围为 52.50%~55.80%, 平均值为 53.76% ; a (MgO)为 14.59%~17.94% ,平均值为 16.07%; a(CaO)为23.72%~26.84%, 平均值为 25.19%; a(TFeO)为 1.09%~6.83%, 平均值为 3.68% ; α (Al₂O₃)为 $0.19\% \sim 0.91\%$,平均值为 0.45%; (MnO)为 0.02% ~ 1.52%, 平均值为 0.49%;Na₂O、K₂O、Cr₂O₃、TiO₂含量均普遍较低。 钙铁辉石主要成分 $\mathfrak{u}(SiO_2)$ 范围为 51.89% ~ 52.27%,平均值为51.93%; a(TFeO)为13.91%~ 15.86% ,平均值为 14.94% ;ω(MgO)为 8.46% ~ 9.27%,平均值为 8.86%; a(CaO)为 21.60%~ 22.44% ,平均值为 22.13% ;α(Al₂O₃)为 0.34% ~ 0.78% ,平均值为0.52% ;a(MnO)为0.52%~0.97% ,

表 3 列廷冈矿床辉石电子探针分析结果(w(B)/%)和阳离子端员组分

Table 3 Components (w(B)/%) and endmember compositions of pyroxene from the Lietingsang deposit through electron probe analysis

粗グ													
	01	01	02	03	04	05	90	01	01	02	01	02	03
							w(B)/%						
Na_2O	0.14	0.51	1.05	0.18	0.23	0.29	0.25	0.03	0.03	0.04	0.33	0.25	0.10
$_{ m MgO}$	13.45	9.27	8.46	14.75	15.08	14.59	14.88	16.06	17.26	16.60	16.50	17.02	17.94
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	0.78	0.34	0.43	0.31	0.45	0.39	0.42	0.91	0.65	0.40	09.0	0.19	0.23
SiO_2	52.27	51.89	51.64	53.71	53.49	53.14	53.74	52.97	52.50	53.50	55.80	55.43	53.38
K_2O	0.09	0.07	0	0	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.07	0.12	0.03
CaO	21.60	22.44	22.35	24.00	924.14	23.72	23.86	25.85	25.50	25.60	26.84	25.69	26.76
TFeO	13.91	15.06	15.86	6.67	6.49	6.83	6.70	2.57	1.09	1.16	2.05	1.81	1.44
MnO	0.97	0.68	0.52	0.23	0.30	0.37	0.42	1.52	0.83	0.93	0.20	0.05	0.03
Cr_2O_3	0	0.04	0.02	0.03	0.07	0.07	0.01	0.03	0	0.03	0	0	0
TiO_2	0	0	0	0.06	0		0.02	0.08	0.06	0.05	0.03	0.04	0.16
总和	103.21	100.30	100.33	99.94	100.26	99.42	100.31	100.04	97.93	98.32	102.42	100.57	100.07
					以6个C	11/1	能计算的阳离子	数和端员组分/%					
:Z	1.94	2.00	1.99	1.99	1.98	1.99	1.99	1.95	1.96	1.98	1.99	2.00	1.95
$\mathrm{Al}^{\mathrm{IV}}$	0	0	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0	0	0.02	0.01	0	0
Al^{M}	0	0.01	0.01	0.01	0	0	0.01	0	0	0	0.01	0.01	0
Ŧ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0	110	0	0	0	0	0	0
Fe^{3+}	0.15	0.05	0.10	0.02	0.05	0.04	0.03	80.08	0.08	0.02	0.03	0.01	0.13
Fe^{2+}	0.27	0.43	0.41	0.19	0.15	0.17	0.17		0	0.02	0.03	0.05	0
Mn	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01	0	0
Mg	0.74	0.53	0.49	0.82	0.83	0.81	0.82	0.88	96.0	0.92	0.88	0.92	0.98
౮	98.0	0.92	0.92	0.95	96.0	0.95	0.95	1.02	1.02	1.02	1.03	0.99	1.05
Na	0.01	0.04	0.08	0.01	0.05	0.02	0.05	0		0	0.05	0.02	0.01
X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0
Ξ	70.96	53.93	53.56	80.45	84.27	81.91	81.58	94.89	97.35	95.36	96.10	95.18	99.91
РН	26.14	43.83	44.55	18.83	14.77	16.91	17.11	0	0	1.61	3.24	4.75	0
of	2.90	2.25	1.89	0.72	0.96	1.18	1.31	5.11	2.65	3.03	0.65	0.08	0.00
$\mathrm{Mn/Fe}$	0.07	0.05	0.03	0.04	0.05	90.0	90.0	0.59	0.31	0.81	0.10	0.01	0.01
${ m Mg/Fe}$	1.75	1.10	96.0	3.95	4.16	3.82	3.97	10.92	11.52	25.51	14.36	16.74	7.55

注:电子探针实验于福州大学电子探针实验室完成; Di一透辉石; Hd一钙铁辉石; Jo-锰钙辉石。

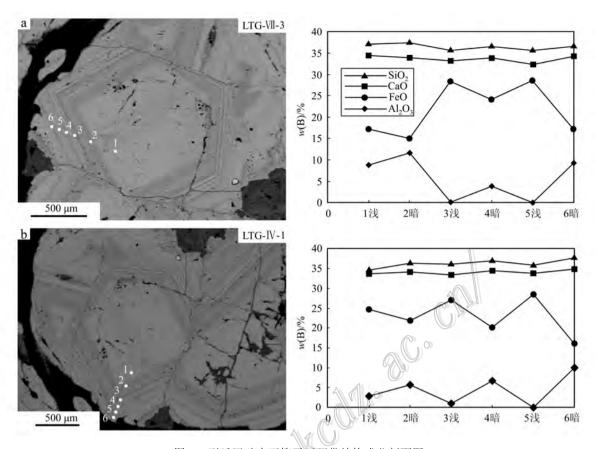


图 9 列廷冈矿床石榴子石环带结构成分剖面图

Fig. 9 The compositional section diagram of garnets with zoning structural from the Lietinggang deposit

平均值为 0.72%; $w(K_2O)$ 、 $w(Cr_2O_3)$ 、 $w(Na_2O)$ 、 $w(TiO_2)$ 均 较 低。辉 石 主 量 元 素 图 解 显 示, $w(SiO_2)$ 与w(MgO)、w(CaO)与w(MgO)呈线性正相关关系(图 10a、b),而 w(MgO)与w(TFeO)、w(CaO)与w(TFeO)是线性负相关关系(图 10c、d)。

辉石阳离子数及端员组分含量见表 3。端员组分亦显示,列廷冈矿床辉石主要为透辉石(Di),变化范围为 53.56%~99.91%,平均值为 83.50%;次为钙铁辉石(Hd),含量变化范围为 1.61%~44.55%,平均值为 14.75%。列廷冈矿床辉石属于透辉石-钙铁辉石系列(Di_{53.56~99.91} Hd_{1.61~44.55} Jo_{0.08~5.11}),辉石端员组分图解(图 11a)显示出相同的特征,且辉石端员组分与世界上绝大部分矽卡岩型铁铜多金属矿床辉石组分相似(图 11b)。

3.3 角闪石

本次共计完成角闪石 19 个点位的电子探针成分分析(表 4)。分析结果表明,列廷冈矿床角闪石类矿物主要为阳起石、铁角闪石和镁角闪石。阳起石

主要成分 $w(SiO_2)$ 变化范围为 $50.58\% \sim 53.19\%$, 平均值为 51.95%; w(CaO)为 $11.77\% \sim 12.95\%$, 平均值为 12.55%; w(MgO)为 12.15%~14.41%, 平均值为 13.09%; w(TFeO)为 12.61%~21.25%, 平均值为 16.58%; w(Al₂O₃)为 1.07%~3.61%,平 均值为 2.46%。此外, 含少量 MnO、Na₂O、K₂O 和 TiO_{2} ,其含量均较低。铁角闪石主要成分 $w(SiO_{2})$ 为 41.59%~44.04%,平均值为 42.57%; w(TFeO) 为 23.06% ~ 24.30%, 平均值为 23.61%; w(CaO) 为 11.97%~12.24%,平均值为 12.12%; w(MgO) 为 6.00%~7.24%,平均值为 6.43%; w(Al₂O₃)为 9.04%~10.88%,平均值为 10.24%; w(Na₂O)为 1.07%~1.69%,平均为1.28%。其次含有少量的 K₂O、MnO、TiO₂。镁角闪石主要成分 ω(SiO₂)为 47.51%~48.53%,平均值为48.02%; w(MgO)为 11.48%~12.19%,平均值为 11.84%; w(CaO)为 10.98%~13.13%,平均值为 12.05%; w(Al₂O₃)为 4.47%~5.63%,平均为5.05%; ω(Na₂O)为1.88%~

表 4 列廷冈矿床角闪石电子探针分析结果($w(\mathbf{B})/\%$)和阳离子数端员组分

Table 4 Components (w(B)/%) and endmember compositions of amphibole from the Lietinggang deposit through electron probe analysis

			•				•		•)	•)	1	•			
44		LTG- II -1		LTC	LTG-W-3					LTG- II -1	Ⅱ-1					LTG- II -2	1 -2	LTG-V-1	V -1
T H	01	02	03	01	050	01	02	03	90	05	90	07	80	60	10	01	02	01	02
									[]m	w(B)/%									
Na_2O	0.35	0.28	0.46	0.14	0.4	0.32	0.46	0.34	0.39	0.39	0.40	0.34	1.08	1.69	1.07	0.26	0.22	1.88	2.33
MgO	12.87	14.02	12.15	14.41	13.21	13.57	12.69	13.69	13.20	12.44	12.97	12.72	6.05	00.9	7.24	12.20	9.82	11.48	12.19
Al_2O_3	3.22	2.17	3.48	1.07	1.29	2.20	9 3.55	1.81	2.68	3.61	3.09	2.93	10.80	10.88	9.04	1.75	1.61	4.47	5.63
SiO_2	51.88	53.19	50.94	52.68	52.00	52.42	51.16	53.05	51.85	50.58	51.70	51.50	42.07	41.59	44.04	52.27	52.05	48.53	47.51
K_2O	0.21	0.16	0.26	0.07	0.15	0.21	0.30	0.18	0.26	0.25	0.21	0.23	1.08	1.18	98.0	0.17	0.14	99.0	0.83
CaO	12.65	12.95	12.61	11.94	11.77	12.76	12.52	12.58	12.73	12.81	12.74	12.73	12.24	11.97	12.15	12.43	12.49	13.13	10.98
TFeO	16.71	15.39	17.89	12.61	14.77	16.11	17.31	16.16	16.25	16.63	16.44	16.84	24.30	23.47	23.06	17.81	21.25	17.36	17.27
MnO	0.62	0.63	0.62	0.89	0.62	0.55	99.0	89.0	0.76	0.67	0.59	0.69	69.0	0.68	0.67	0.91	1.33	0.38	0.41
TiO_2	0.14	0	0	0	0	0.03	0.03	0.09	1	90.0	0.03	0.09	0.12	0.17	0.19	0.03	90.0	0.48	0.91
总和	98.65	98.79	98.41	93.81	93.95	98.17	89.86	98.58	98.12	97.44	98.17	98.07	98.43	97.63	98.32	97.83	98.97	98.37	98.06
							以23个	トの原子)	与基准计算	O 原子为基准计算的阳离子数和端员组分/%	2数和端身	3组分/%							
જ	7.58	7.71	7.52	7.92	7.88	7.68	7.51	7.73	7.62	7.51	7.59	7.59	6.53	6.51	6.77	7.75	7.76	7.25	7.10
$\mathrm{Al}^{\mathrm{IV}}$	0.42	0.30	0.48	0.08	0.12	0.32	0.49	0.27	0.38	0.49	0.41	0.41	1.47	1.49	1.23	0.25	0.24	0.75	06.00
$\mathrm{Al}^{\mathbb{N}}$	0.14	0.08	0.13	0.11	0.12	90.0	0.13	0.04	0.08	0.14	0.12	0.10	0.50	0.51	0.41	0.05	0.04	0.04	0.09
Ti	0.02	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0.01		0.01	0.01	0.02	0.02	0	0.01	0.05	0.10
Fe^{3+}	08.0	0.84	0.73	0.99	96.0	0.81	0.73	0.83	0.77	0.75	0.78	0.78	0.26	0.16	0.37	0.85	98.0	0.36	0.28
Fe^{2+}	1.24	1.03	1.47	09.0	0.91	1.17	1.40	1.14	1.23	1.31	1.23	1.29	2,89	2.91	2.60	1.36	1.79	1.81	1.88
Mn	0.08	0.08	0.08	0.11	0.08	0.07	0.08	0.08	0.09	0.08	0.07	0.00	0.09	0.00	0.09	0.11	0.17	0.05	0.05
Mg	2.80	3.03	2.67	3.23	2.99	2.96	2.78	2.97	2.89	2.75	2.84	2.80	1.40	1.40	1.66	2.70	2.18	2.56	2.72
Ca	1.98	2.01	2.00	1.92	1.91	2.00	1.97	1.96	2.00	2.04	2.00	2.01	2.04	2.01	2.00	1.97	1.99	2.10	1.76
$N_{\rm a}$	0.10	0.08	0.13	0.04	0.04	0.09	0.13	0.10	0.11	0.11	0.11	0.10	0.33	0.51	0.32	0.07	90.0	0.54	0.68
X	0.04	0.03	0.05	0.01	0.03	0.04	90.0	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04	0.21	0.24	0.17	0.03	0.03	0.13	0.16
	1	3	1	1															Ī

注: 电子探针实验于福州大学电子探针实验室完成。

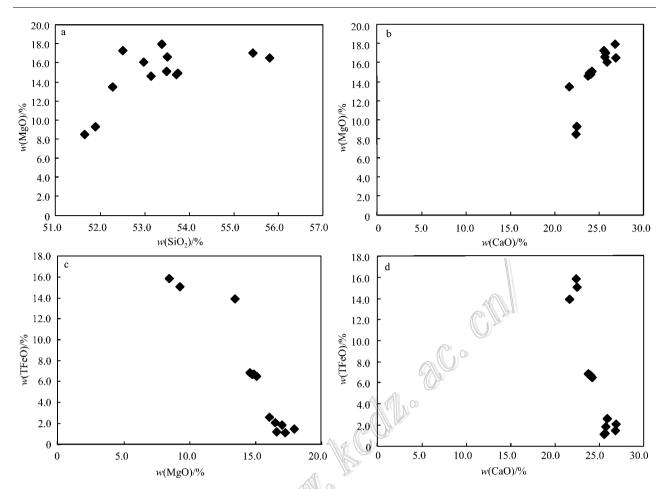


图 10 列廷冈矿床辉石主量元素相关性图解

Fig. 10 The correlation diagrams of major elements in pyroxene from the Lietinggang deposit

2.33% 平均为 2.10%。此外 ,还含有少量的 TiO₂、 K₂O、MnO。

根据 Leake 等(1997)对角闪石族矿物的分类图解 对列廷冈矿床角闪石进行投图 结果大多数据点落在阳起石范畴内 部分数据点落在铁角闪石和镁角闪石区域 ,且均属于钙质角闪石类(图12),与上述探针结果一致 ,这也与中国与花岗岩类有关的砂卡岩中的角闪石测定结果相吻合(赵一鸣等 2003)。3.4 绿泥石

本次对绿泥石共计完成了 16 个点位的电子探针成分分析 结果列于表 5。分析结果表明 ,列廷冈矿床绿泥石主要为铁绿泥石和镁绿泥石。其中 ,铁绿泥石主要成分 π (SiO_2)为 $21.95\% \sim 31.58\%$,平均值为 28.28% ; π (TFeO)为 $27.56\% \sim 38.37\%$,平均值为 33.69% ; π (MgO)为 $7.10\% \sim 9.93\%$,平均值为 8.31% ; π (Mloo)为 $10.49\% \sim 18.07\%$,平均值为 13.18% ; π (mloo)为 $10.58\% \sim 1.16\%$,平均值为 13.18% ; π (mloo)为 $10.58\% \sim 1.16\%$,平均值为 13.18% ; π (mloo)为 $10.58\% \sim 1.16\%$,平均值

绿泥石主要成分 α (SiO₂)为 25.31% \sim 32.14%, 平均值为 26.75%; α (MgO)为 10.24% \sim 14.50%, 平均值 12.03%; α (TFeO)为 22.85% \sim 31.05%, 平均值为 28.55%; α (Al₂O₃)为 12.44% \sim 18.96%, 平均值为 17.78%; α (MnO)为 0.74% \sim 1.29%, 平均值为 0.92%; 此外,含少量的 CaO、Na₂O、K₂O、TiO₂等。样品中 Mg/(Mg+Fe)值变化范围为 0.25 \sim 0.50(平均值为 0.38); Fe/(Fe+Mg)值变化范围为 0.50 \sim 0.75(平均值为 0.62), 指示绿泥石相对富铁。本文采用应用广泛的绿泥石 Fe-Si 分类图解(Deer et al., 1962), 对矿床中绿泥石进行分类投图(图 13a, Fe、Si 原子数以 28 个 O原子为计算标准),在 Fe-Si 分类图解中,这些绿泥石主要是铁绿泥石和富铁的铁镁绿泥石,绿泥石中 α (TFeO)较高(22.85% \sim 38.37%) 暗示热液晚期阶段仍然富铁质。

3.5 绿帘石

本次共计完成了 16 点位的绿帘石电子探针分析,分析结果列于表6。结果表明,矽卡岩中绿帘

列廷冈矿床绿泥石电子探针分析结果(w(B)/%)和阳离子数端员组分 赤っ

e analysis
ctron prob
gh ele
throu
deposit
ietinggang
the I
from
chlorite
s of
composition
endmember
and 6
(%)
Components (
Table 5

			•			•			J	•)		_			
44		LTG-W-1		Id	$PD02\text{-}105.5\mathrm{m}$						LTG- I -2	I -2				
出	01	02	03	01	02	03	01	02	03	04	05	90	07	80	60	10
					1			w(B)/%	%							
SiO_2	31.58	31.11	31.57	27.24	32.14	28.18	25.67	26.34	26.37	26.21	25.94	25.60	25.31	25.72	26.26	21.95
${ m TiO}_2$	0	0.18	0.14	0.10	0.13	90.0	0.04	0	0.02	0.03	0.02	0.09	0.03	0.02	0	0
Al_2O_3	10.96	10.49	10.59	12.85	12.44	916.69	18.84	18.86	18.80	18.07	17.91	18.01	18.63	18.66	18.96	16.15
FeO	37.73	37.71	38.37	28.96	22.85	28.40	28.19	30.58	28.37	31.84	29.92	31.05	29.11	31.00	26.02	27.56
MnO	0.59	0.58	0.86	1.16	0.94	1.29	0.82	0.84	0.74	0.85	0.95	1.04	0.88	0.97	0.77	08.0
$_{ m MgO}$	7.62	7.26	7.10	9.93	12.98	12.58	12.92	10.86	13.27	9.59	10.24	10.42	11.72	10.78	14.50	8.34
CaO	99.0	0.67	0.67	09.0	0.57	0.40	0.09	0.21	0.19	0.21	0.95	0.20	0.20	0.20	0.17	6.87
Na_2O	90.0	0.05	0.08	0.16	0.21	0.18	0.02	0.08	0.01	0.04	0.04	90.00	0.04	0.00	0.03	0.03
K_2O	0.01	0.01	0.02	0.15	2.78	0.20	0.03	0.05	0.02	0.03	0.07	0.02	0.03	0.02	0.03	0.01
总和	89.21	88.06	89.40	81.15	85.04	88.98	86.62	88.82	87.78	86.87	86.04	86.49	85.95	87.43	86.74	81.71
						以14个	· O 原子为	智	阳离子数	和端员组分/	%					
SS.	6.92	6.93	6.94	6.40	6.87	6.02	5.59	5.69	5.65	5.77	5.74	5.66	5.59	5.63	5.64	5.21
$\mathrm{Al}^{\mathrm{IV}}$	1.08	1.07	1.06	1.60	1.13	1.98	2.41	2.31	2.35	2.23	2.26	2.34	2.41	2.37	2.36	2.79
$AI^{\rm VI}$	1.77	1.70	1.71	1.98	2.07	2.24	2.42	2.50	2.40	2.47	2.42	2.36	2.44	2.45	2.44	1.79
Ţ	0	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0	0	0.01	0	0.01	0.01	0	0	0
Fe ³⁺	0.39	0.39	0.39	0.20	0.20	0.12	0.02	0.12	0.05	6.17	0.11	90.0	0.03	0.05	0.04	0
Fe^{2+}	6.53	6.63	6.67	5.49	3.89	4.96	5.11	5.40	5.04	5.70	5.42	5.68	5.34	5.63	4.64	5.87
Mn	0.11	0.11	0.16	0.23	0.17	0.23	0.15	0.15	0.13	0.16	0.18	0.20	0.16	0.18	0.14	0.16
Mg	2.49	2.41	2.33	3.48	4.14	4.00	4.19	3.50	4.24	3.15	3.38	3.44	3.86	3.52	4.64	2.95
Ca	0.15	0.16	0.16	0.15	0.13	0.09	0.02	0.05	0.04	0.05	0.23	0.05	0.05	0.05	0.04	1.75
N_a	0.05	0.04	90.0	0.15	0.18	0.15	0.02	0.07	0.01	0.04	0.03	0.05	0.03	0.05	0.02	0.03
×	0.01	0.01	0.01	0.09	1.52	0.11	0.01	0.03	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0
$\mathrm{Fe}/(\mathrm{Fe}+\mathrm{Mg})$	0.74	0.74	0.75	0.62	0.50	0.56	0.55	0.61	0.55	0.65	0.62	0.63	0.58	0.62	0.50	0.67
Mg/(Mg + Fe)	0.26	0.26	0.25	0.38	0.50	0.44	0.45	0.39	0.45	0.35	0.38	0.37	0.42	0.38	0.50	0.33

表 6 列廷冈矿床绿帘石电子探针分析结果(w(B)/%)和阳离子数端员组分

Table 6 Components (w(B)/%) and endmember compositions of epidote from the Lietinggang deposit through electron probe analysis

						,										
484		LTG-IV-2		LTG-II-1		LTG-∭-2	.∭-2		PD02-50.8m	50.8m	PD02-68.9m	.8.9m		PD02-89.4m	89.4m	
がある。	01	02	01	02	10	02	03	04	01	02	01	02	01	02	03	04
				W				w(w(B)/%							
SiO_2	37.91	37.84	38.00	37.81	38.39	38.41	38.12	38.02	38.35	38.12	37.34	37.08	36.93	38.03	38.22	37.65
TiO_2	0.13	0.05	0	0.04		0.05	0	0.05	90.00	0.11	90.0	0.19	0.22	0.25	0	0.25
Al_2O_3	24.17	23.41	23.80	23.14	23.63	23.34	23.53	22.91	24.35	24.33	23.76	23.68	24.42	24.51	25.40	24.86
FeO	10.30	11.11	11.55	12.71	11.83	12.68	11.90	12.54	11.42	11.03	11.92	11.68	10.35	10.69	9.63	10.27
MnO	0.18	0.46	0.19	0.10	0.31	0.18	0.52	0.19	0.50	0.17	0.15	0.24	0.14	0.14	0.07	0.16
MgO	0.06	0	0.03	0.02	0	0.01	0.04	0.03	0	0.03	90.00	0.05	0.03	0.04	0.01	0.03
CaO	23.19	22.41	23.68	23.63	23.27	23.45	23.01	23.48	23.25	23.79	23.64	23.45	23.92	23.74	24.02	23.91
Na_2O	0.05	0	0	0	0.03	0.04	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.04	0.01	0	0.04
K_2O	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0	0	0.01	0	0	0
总和	95.96	95.25	97.25	97.45	97.46	98.16	97.27	97.59	76.76	97.59	96.96	96.38	90.96	97.41	97.35	97.17
						<i>≦</i>	以12个0原子为基准计		掌的阳离子	算的阳离子数及端员组分/%	分/%					
S	3.23	3.26	3.22	3.22	3.25	3.24	3.24	3.24	3.22	3.21	3.19	3.18	3.16	3.20	3.20	3.18
Al^{N}	2.43	2.38	2.38	2.32	2.36	2.32	2.36	2.30	2.41	2,41	2.39	2.40	2.46	2.43	2.51	2.47
Al^{M}	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
Fe^{3+}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	000	0	0	0	0	0	0
$\mathrm{Fe}^{2^{+}}$	0.73	08.0	0.82	0.91	0.84	0.89	0.85	0.89	08.0	0.78	0.85	0.84	0.74	0.75	0.67	0.72
Ξ	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0.01	0.01	0.02	0	0.05
$M_{\rm D}$	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0	0.01
Mg	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0	0	0
Ca	2.12	2.07	2.15	2.16	2.11	2.12	2.09	2.14	2.09	2.15	2.16	2.16	2.19	2.14	2.16	2.16
Na	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0	0	0	0.01	0	0	0.01
К	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

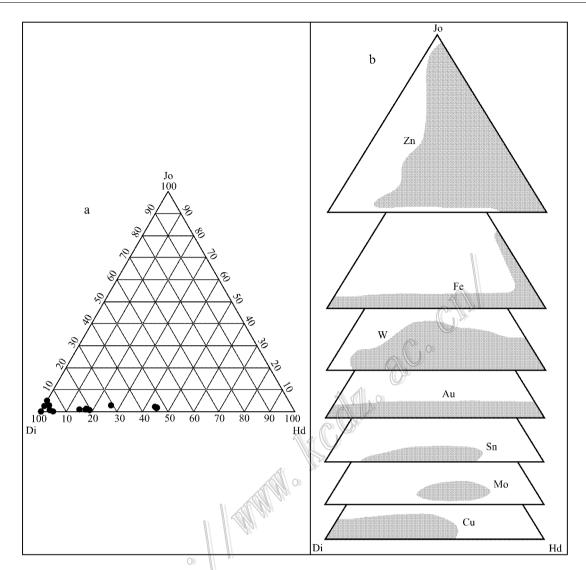


图 11 列廷冈矿床辉石端员组分图解 a)及与世界矽卡岩型矿床对比(b)(底图据 Meinert et al. 2005) Di—透辉石 ;Hd—钙铁辉石 ;Jo—锰钙辉石

Fig. 11 Endmember diagram and the comparative diagram of endmember compositions of pyroxenes from the Lietinggang deposit (a) with that from the world skarn deposits (b) (base map after Meinert et al., 2005)

Di—Diopside; Hd—Hedenbergite; Jo—Johannsenite

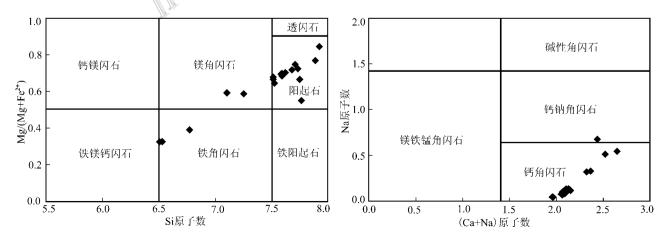


图 12 列廷冈矿床角闪石分类图解(底图据 Leake et al.,1997)

Fig. 12 The classification diagrams of amphibole from the Lietinggang deposit (base map after Leake et al., 1997)

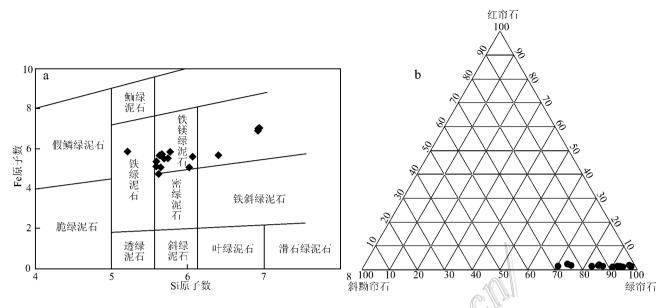


图 13 列廷冈矿床绿泥石分类图解 a (底图据 Deer et al. ,1962)和绿帘石端员组分图解 b (底图据潘兆橹 ,1984)
Fig. 13 The classification diagrams of chlorite(a) (base map after Deer et al. ,1962) and endmember diagram of epidote from the Lietinggang deposit (b) (base map after Pan, 1984)

石的主要化学成分为: $w(SiO_2)$ 为 36.93% ~ 38.41% 平均为 37.89%; $w(Al_2O_3)$ 为 22.91% ~ 25.40% 平均值为 23.95%; w(CaO)变化范围为 22.41% ~ 24.02% 平均值为 23.49%; w(TFeO)为 9.63% ~ 12.71%,平均值为 11.35%; $w(Na_2O)$ 0 $w(K_2O)$ 1 w(MnO)1 w(MgO)1 $w(TiO_2)$ 2 $w(Cr_2O_3)$ 均普遍较低。据绿帘石端员组分图解(图 13b1)可知,列廷冈矿床帘石族矿物均属于绿帘石范畴。

4 讨论

4.1 矽卡岩类型及矿床成因

矽卡岩矿物研究是矽卡岩矿床定义和分类的基础 在矽卡岩矿床研究中占有重要地位(Einaudi et al.,1981;1982)。列廷冈矿床中,矽卡岩矿物以石榴子石、透辉石为主,其次为阳起石、角闪石、绿帘石、绿泥石等,石榴子石属于钙铁榴石-钙铝榴石系列,辉石属于透辉石-钙铁辉石系列,角闪石属于钙质角闪石系列。矽卡岩可划分为交代矽卡岩和变质矽卡岩,交代矽卡岩按照矿物成分的不同又可分为钙质矽卡岩、镁质矽卡岩、锰质矽卡岩以及碱质矽卡岩(Einaudi et al.,1982;赵一鸣等,2012;王立强等,2014)。列廷冈矿床的矽卡岩矿物组合及特征综合表明,矽卡岩应属于典型交代矽卡岩中的钙质矽卡

岩类。

列廷冈矿区围岩以灰岩、大理岩为主 ,zz(MgO) 极少 在热液交代过程中 围岩的钙质成分控制着矽 卡岩 矿 物 组 合 的 种 类。当 围 岩 碳 酸 盐 岩 中 的 w(MgO)小于 2%时,只形成钙矽卡岩;当w(MgO) 为 2%~10%时,只形成透辉石、金云母等矿物,很少 出现镁橄榄石、硅镁石等富镁矿物(Einaudi et al., 1981 | 李大新等 ,2011) | 当 w(MgO)高于 10% ~ 5% 时,可出现较典型的镁矽卡岩矿物组合,如镁橄榄 石、透辉石、尖晶石、硅镁石族、金云母等。 近年来 , 在列廷冈矿区花岗斑岩及花岗闪长岩与大理岩接触 带发现了大面积赋矿矽卡岩产出,矿体主要呈似层 状、透镜状及囊状等(图2)属典型矽卡岩型矿床的 矿体产出特征。结合野外地质调查及室内研究与勘 探成果,发现矿区矿石构造以块状构造、浸染状构 造、脉状构造为主(图3):显微镜下,矿石结构以自形 粒状结构为主 发育各种交代结构(图3),后期金属 矿物交代前期金属矿物的现象普遍存在 ,如黄铜矿 被后期磁黄铁矿等交代 ,形成港湾状或不规则状交 代残余结构(图3)此矿石组构亦为典型矽卡岩型矿 床的矿石组构特征。此外,在矽卡岩矿物共生组合 方面,列廷冈矿床矽卡岩矿物组合主要为钙铁-钙铝 榴石、透辉石-钙铁辉石、角闪石、绿帘石、绿泥石等, 属于典型的钙质交代矽卡岩矿物组合类型(赵一鸣 , 2002 赵一鸣等,2012),系接触交代成因。综上所

述 ,列廷冈矿床主要发育一套钙质矽卡岩组合 ,矿床 成因类型为典型的接触交代矽卡岩型铁多金属矿 床。

4.2 矽卡岩矿物对成矿环境的指示

矽卡岩矿物组成与侵入岩成分、围岩组分、深度、氧逸度、温度和压力密切相关(Titley,1973;Burton et al.,1982;Meinert,1997;Calagari et al.,2006)。因此,通过对矽卡岩矿床主要矽卡岩矿物成分、共生组合等方面的综合研究,可以反演矿床成岩成矿过程中其物理化学条件的变化(Meinert et al.,2005,赵苗等 2015)。

大量研究证实,矽卡岩型铁矿早期是以岩浆流 体为主,且这种岩浆流体一般为高温(>500℃),碱 性 pH>7)的高盐度流体(周振华等,2011;张作衡 等 2012 ,范裕等 ,2012 ,洪为等 ,2012a) ,这种碱性高 温高盐度流体与其岩浆岩中斜长石等矿物作用不断 消耗 Na+ ,从而导致 Ca²⁺、Mg²⁺ 及 Fe²⁺ 进入流体 中,为后期矽卡岩化和铁矿富集创造了物质基础,随 着石榴子石、辉石等矿物的结晶,溶液中镁、钙、铁减 少 成矿元素的增加使溶液的 pH 值降低(姚磊等, 2012 | 彭慧娟等 | 2014) | 成矿环境从碱性最终逐渐转令 变为酸性环境、张招崇等、2014)。 矽卡岩阶段、低酸 度、高氧逸度条件下 S 以 SO² 的形式溶解于溶液 0 中,有利于铁矿的形成 Meinert et al., 2005 涨招崇 等 2014) 流在低氧逸度、酸性条件下,不利于早期 磁铁矿再溶解形成富铁矿(Hu et al., 2014 湖浩等, 2014 》。当温度>350℃时,铁以 Na(FeCl4) Na(Fe-物逐渐被 S^2 的络合物所代替(Pirajno, 2009),且 S^2 -主要通过 $3FeO + SO_4^2 = Fe_3O_4 + S^2 + 3/2O_2$ 方 式形成(Rona, 1984; Hutchinson, 1990)。石英硫化 物阶段 随着氧逸度降低、温度压力降低及大气降水 量增加,铁的络合物变得不稳定而释放出大量低价 态的 S^2 与流体中的铜、铅、锌等贱金属结合形成大 量金属硫化物。碳酸盐阶段,温度、压力进一步下 降 溶解于水中的 CO_2 将与流体中的 Ca^{2+} 结合形成 方解石等碳酸盐矿物(张招崇等 2014)。

不同氧化还原环境中形成特定的矽卡岩矿物,因此,矽卡岩中不同矿物的种属、组合、分布及不同端员组分常用以判定形成环境的氧化还原状态(Sato,1980;Brown et al.,1985;常印佛等,1991;Kwak,1994;Somarin,2004;宋国学等,2010)特别是石榴子石矿物成分的变化对于示踪矽卡岩的形成

环境具重要的指示意义(Gaspar et al. ,2008 ;陈雷 等 2012)。列廷冈矿床石榴子石矿物端员组成为 $And_{18.37\sim99.89}Gro_{0.24\sim79.05}Ura + Pyr + Spe_{0.98\sim6.63}$ 辉石的端员组分为 Di_{53.56~99.91} Hd_{1.61~44.55} JO0.08~5.11 两者成分变化范围均较大 这表明矽卡岩 矿物形成于一个非平衡条件下(赵劲松等,1996;周 振华等 2011 ;黄华等 2014) 指示其成矿环境有所 变化。列廷冈矿床石榴子石普遍发育'震荡'环带结 构 ,由于石榴子石中 Fe3+和 Al3+价态相同 ,半径相 近(Fe³⁺为0.078 nm ,Al³⁺为0.054 nm) 潘兆橹等, 1984),Fe 和 Al 易发生替代,故而从环带核部向边 缘、浅环带到暗环带其 TFeO、Al₂O₃ 含量均呈现此消 彼长的关系(图9),这说明石榴子石的环带结构是内 部化学成分的外在表现 其环带成分的变化特征能 提供热液流体演化过程的重要信息(陈能松等, 2003 Smith et al., 2004)。自石榴子石环带核部至 边缘 ,Fe, A1 阳离子数呈高低交替出现 ,并无明显上 升或下降趋势(图9)表明列廷冈矿床矽卡岩形成于 动荡的环境中,并非连续的生长过程而存在明显的 生长间断 ,其成矿流体的温度、pH 值、氧逸度和盐度 不断变化,物理化学环境随着成矿过程的不断演化 逐步发生了改变(Hickmott et al. , 1992 ; 张泽明等 , 2005 Cheng et al. , 2009)

列廷冈矿床早期矽卡岩阶段,石榴子石主要为 钙铁榴石 辉石以透辉石为主 钙铁榴石的形成需要 大量 Fe^{3+} ,而以透辉石为主的辉石和以钙铁榴石为 主的石榴子石均形成于相对氧化的环境(Meinert, 1992 ;Kwak , 1994 ;Misra , 2000 ;Lu et al. , 2003) 这 反映了该矿床的矽卡岩具有氧化型矽卡岩的特征; 同时,对钙铁榴石-钙铝榴石形成的物理化学条件进 行了实验研究发现, 钙铁榴石主要形成于温度为 450 \sim 600℃、pH = 4.0 \sim 11.0 的氧化-弱氧化的碱性环 境 赵斌等 ,1987 深祥济等 ,2000) ,综合指示列廷冈 矿床在早期矽卡岩阶段的成矿流体呈高温、低酸度 和较高氧逸度的状态(梁祥济,1994;赵一鸣等, 1990)。到了退化蚀变阶段,发育大量富含铁质和 OH-的退变质矿物阳起石、角闪石、绿泥石等,消耗 了流体中大量的 H+ ,致使溶液呈碱性 ,形成碱性流 体 、铁质逐渐被消耗析出形成磁铁矿 ,导致 Fe³⁺/ Fe²⁺比值增大 氧逸度继续升高 从而形成高氧逸度 的成矿流体。列廷冈矿床中,从早期矽卡岩阶段到 退化蚀变阶段 成矿流体为高氧逸度的碱性流体 其 成矿环境均为相对氧化的碱性环境。

早期热液阶段(即退化蚀变阶段晚期),绿泥石、 角闪石、阳起石等退化蚀变矿物交代早期石榴子石 等矽卡岩矿物(图 6c),耗"氧"加剧;在早期热液阶 段,铁质不断析出形成浸染状和脉状磁铁矿(图4), 成矿流体中 Cu-Pb-Zn/Fe 比值变大,从而改变了成 矿流体的氧化还原状态,使以高价态(5°+、5⁴+)存在 的S易于被还原成低价态还原性S2-(Hezarkhami et al., 1999; 于玉帅等 2012)。到了石英硫化物阶段, 列廷冈矿床石英流体包裹体均一温度平均值为 316℃(杨毅, 2015),此温度范围最有利于矽卡岩矿 床的矿质沉淀富集(芮宗瑶等,2003),此外,在早期 热液阶段形成的大量还原性 S^{2-} 、低氧逸度、高 Cu/Fe 比值及高 pH 值环境、促使 Cu、Pb、Zn 等金属矿质 在流体中的溶解度降低(Hezarkhani et al., 1999), 而与 S^{2-} 结合形成黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等硫化物 沉淀析出 成矿环境由相对氧化的碱性环境转换为 相对还原的碱性环境。晚期碳酸盐阶段,温度降至 120~200℃(杨毅等 2015)此时成矿流体已变为中 低温(160~203℃)。 另发育极少量的富铁绿泥石 化 这也佐证了热液流体具有还原性的特点(Inoue, 1995)。在碳酸盐阶段,成矿环境为低温、酸性的还 原环境 不利于矿质沉淀富集 故成矿作用终止。

综上所述,在列廷冈矿床整个矽卡岩系统成矿 演化过程中,随着不同成矿阶段、不同矿物的结晶沉 淀,其成矿物理化学条件是发生改变的,从早期矽卡 岩阶段到晚期碳酸盐阶段,其成矿环境至少经历了 从高温、碱性的氧化环境向低温、酸性的还原环境转 变。

4.3 矽卡岩矿物对金属矿化类型的指示

在中国许多矽卡岩型多金属矿床中,石榴子石的颜色、物理性质、化学成分在各接触带和矿化带的不同部位都有明显的变化,石榴子石除可作为衡量矿化介质酸碱度的标尺之外(姚磊等,2012;彭慧娟等2014)还可以用来指示矽卡岩的成岩成矿过程和作为指示矿化种属的直接标志(林文蔚等,1990;洪为等,2012b;田明君等,2014)。

石榴子石化是成矿作用的准备阶段,也是矽卡岩较斑岩更富集金属硫化物的原因之一(Somarin,2010),列廷冈矿床石榴子石主要为钙铁榴石-钙铝榴石系列(图7),其中,钙铁榴石(And)含量范围为18.37%~99.89%,平均值61.93%;钙铝榴石含量范围为0.24%~79.05%,平均含量35.66%;艾永富等(1981)研究认为与Fe矿化相关的石榴子石成

分近干钙铁榴石,钙铁榴石分子含量高达 77.5%~ 92.6% ;与 Fe-Cu 多金属矿化相关的石榴子石为钙 铁榴石-钙铝榴石的过渡成分,钙铁榴石分子含量介 于 30.64%~60.31% 之间 ;与 Mo(Cu) Mo 矿化有 关的石榴子石成分近于钙铝榴石,钙铁榴石分子含 量为 13%~26%。列廷冈矿床石榴子石成分与 Fe-Cu-Mo 多金属矿化相关的石榴子石成分含量相近, 且石榴子石和辉石的端员组分与世界大型矽卡岩型 铁铜钼多金属矿床的端员组分相近(图 7c、图 11b), 指示列廷冈矿床属于铁(铜钼)等多金属矿化类型, 其结果与地质事实符合。此外 ,角闪石对判别矽卡 岩矿床的含矿性起着重要作用,列廷冈矿床角闪石 主要为阳起石 伴少量铁角闪石和镁角闪石 且均属 于钙质角闪石类,而与钙质角闪石伴生的金属矿化 类型主要有 Fe、Cu、Mo、W、Au 等(赵一鸣等 ,2003) , 指示列廷冈矿床的矿化类型符合铁铜钼多金属矿化 类型 ,这与地质事实一致。此外 ,通过对矿床野外矿 石手标本及镜下观察发现,磁铁矿、黄铜矿、方铅矿 等金属硫化物呈脉状充填发育于石榴子石、透辉石 等矽卡岩矿物的裂隙中 这表明在整个成矿过程中, 金属矿化与矽卡岩矿物的结晶沉淀密切相关。

Nakano等(1994)指出,辉石 Mn/Fe、Mg/Fe 比值变化可以指示矽卡岩金属矿化的类型。赵一鸣等(1997)研究表明,矽卡岩型铁矿、铜矿床等具有辉石 Mn/Fe<0.1 的特征,矽卡岩铅锌矿床具锰钙铁辉石 Mn/Fe>0.1、Mg/Fe<1 的特征,矽卡岩钨矿床辉石 具有 Mn/Fe 和 Mg/Fe 比值(Mn/Fe=0.1~0.3、Mg/Fe=1~4)偏高但比铅锌矿偏低的特征;矽卡岩矿床中的钙铁辉石具 Mn/Fe、Mg/Fe 比值偏低的特征。列廷冈矿床辉石 Mn/Fe 比值范围为 0.01~0.81,平均值为 0.17,较一般矽卡岩型铁(铜)矿偏高,指示列廷冈矿床的矿化类型为多金属矿化;Mg/Fe 比值范围变化于 0.96~25.51 之间,平均值为 8.18 较一般矽卡岩型矿床值稍高,亦指示列廷冈矿床的矿化类型属铁、铜、钼多金属矿化的范畴,这与该矿床的地质事实相一致。

5 结 论

(1)列廷冈矿床主要发育一套钙质矽卡岩组合 主要矽卡岩矿物有石榴子石、透辉石、阳起石、绿帘石、绿泥石 矽卡岩矿物含铁量均较高。电子探针测试结果表明:石榴子石主要属钙铁榴石-钙铝榴石

系列,辉石属透辉石-钙铁辉石系列;角闪石多数为阳起石,次为铁镁角闪石,且均具钙质角闪石属性;绿泥石主要为铁绿泥石和镁绿泥石,相对富铁。列廷冈矿床矽卡岩矿物特征综合表明其矿床成因类型属于典型的接触交代矽卡岩型矿床。

- (2)列廷冈矿床成矿过程较复杂,主要包括2个成矿期和5个成矿阶段:早期矽卡岩阶段、退化蚀变阶段、早期热液阶段、石英-硫化物阶段及碳酸盐阶段。石榴子石广泛发育震荡环带结构,指示该矿床形成于一个不平衡的条件下,其成矿热液流体具多期多阶段特征。随着成矿过程的逐步演化,其成矿环境也发生了改变,且至少经历了从早期矽卡岩阶段高温、偏碱性的氧化环境到晚期碳酸盐阶段低温、偏酸性的还原环境的转换。
- (3)列廷冈矿床石榴子石及辉石端员组分特征、角闪石成分特征及具稍高的 Mn/Fe 和 Mg/Fe 比值特征 综合指示其矿化类型属于铁、铜、钼等多金属矿化类型 这与地质事实本身相吻合。

志 谢 感谢西藏拉萨普信矿业及西藏地质调查院在野外工作中给予的帮助;感谢福州大学紫金矿业学院电子探针实验室刘文元老师在实验过程中的大力支持和耐心指导;感谢匿名审稿人在审稿过程中提出的宝贵意见。在此一并表示衷心感谢!

References

- Ai YF and Jin Y L. 1981. The study of the relationship between the mineralization and the garnet in the skarn ore deposits J J. Peking University (Natural Science), 10(1):83-90(in Chinese with English abstract).
- Brown P E, Bowman J R and Kelly W C. 1985. Petrologic and stable isotope constraints on the source and evolution of skarn-forming fluids at Pine Creek, California J J. Econ. Geol., 80(1):72-95.
- Burton J C and Taylor L A. 1982. The fO_2 -T and fS_2 -T sability relations of hedenberigite and of hedenbergite joh-annsenite solid solutions J J. Econ. Geol. , 77(4):764-783.
- Calagari A A and Hosseinzadeh G. 2006. The mineralogy of copperbearing skarn to the east of the Sungun-Chay river, East-Azarbaidjan, Irar J. J. Journal of Asian Earth Sciences, 28(4):423-438.
- Chang Y F, Liu X P and Wu Y C. 1991. The copper-iron belt of the Middle and Lower reaches of Yangtze River [M]. Beijing: Geological Publishing House. 379p (in Chinese with English ab-

stract).

- Chen L, Qin KZ, Li GM, Li JX, Xiao B, Jiang HZ, Zhao JX, Fan X and Jiang SY. 2012. Geological and skarn mineral characteristics of Nuri Cu-W-Mo deposit in southeast Gangdese, Tibet [J]. Mineral Deposits, 31(3): 417-437(in Chinese with English abstract).
- Chen N S, Sun M, Yang Y, Liu R and Wang QY. 2003. Major And trace element zoning in metamorphic garnets and their metamorphic process implications J. Earth Science Frontiers China University of Geosciences, Beijing), 10(3):315-320(in Chinese with English abstract).
- Cheng S H, Lai X Y and You Z D. 2009. PT paths derived from garnet growth zoning in Danba domal metamorphic terrain, Sichuan Province, West Chinf J J. Journal of Earth Science, 20:219-240.
- Deer W A, Howie R A and Zussman J. 1962. Rock forming minerals, sheet silicates M. London: Longman. 1-270.
- Einaudi M T and Burt D M. 1982. Introduction, terminology, classification, and composition of skarn deposits J J. Econ. Geol., 77 (4):745-754.
- Einaudi M. T., Meinert L. D. and Newberry R. J. 1981. Skarn deposits J. Econ. Geol., 75th Anniversary Volume, 317-391.
- Fan Y, Zhou TF, Hao L, Yuan F, Zhang LJ and Wang WC. 2012.

 Ore-forming fluid characteristics of Nihe iron deposit in Lu-zong basin, Anhui Province and its significance to ore genesis JJ. Acta Petrologica Sinica, 28(10) 3113-3124(in Chinese with English abstract).
- Fei X H, Zhang Z C and Han L. 2014. Mineralogy of the Zhangjiawa skarn iron deposit in Shandong Province and its implications for metallogenic environment [J]. Geology in China, 42(6): 1873-1896 in Chinese with English abstract).
- Gaspar M, Knaack C and Meinert L D. 2008. REE in skarn systems: A LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72(1):185-205.
- Hezarkhami A, Williams Jones A E and Gammons C H. 1999. Factors controlling copper solubility and chalcopyrite deposition in the Sungun porphyry copper deposit, Iran [J]. Mineralium Deposita, 34 (8):770-783.
- Hickmott D and Spear F S. 1992. Major and trace element zoning in garnets from calcareous pelites in the NW Shelburne falls quadrangle, Massachusetts: Garnet growth histories in retrograded rocks[J]. Journal of Petrology, 33(5):965-1005.
- Hong W, Zhang ZH, LiFM and Liu XZ. 2012a. Stable isotopic characteristics of the Chagangnuoer iron deposit in western Tianshan, Xinjiang and its geological significance Jl Rock and Mineral Analy-

质

- sis, 31(6):1077-1087(in Chinese with English abstract).
- Hong W , Zhang Z H , Zhao J , Wang Z H , Li F M , Shi F P and Liu X Z. 2012b. Mineralogy of the Chagangnuoer iron deposit in western Tianshan mountains , Xinjiang , and its geological significance J J Acta Petrologica et Mineralogica , 31(2):191-211 (in Chinese with English abstract).
- Hu H, Duan Z, Luo Y, Ren Z and Li J W. 2014. Geochemical characteristics of magnetite from the Chengchao iron deposit in the Daye district: Insights into ore genesis J. Acta Petrologica Sinica, 30 (5):1292-1306 in Chinese with English abstract).
- Hu H, Li J W, Lentz D, Ren Z, Zhao X F, Deng X D and Hall D. 2014. Dissolution-reprecipitation process of magnetite from the Chengchao iron deposit: Insights into ore genesis and implication for in-situ chemical analysis of magnetite [J]. Ore Geology Reviews, 57 393-405.
- Huang H, Zhang CQ, Zhou YM, LiuB, Xie YF, Dong YT, Yang CH and Dong WW. 2014. Skarn mineralogy and zoning model of the Jinchanghe copper-zinc-iron polymetallic deposit in Yunnan Province Jl. Acta Petrologica et Mineralogica, 33(1):127-148(in Chinese with English abstract).
- Hutchinson R W. 1990. Precious metals in massive base metal sulfide deposit [J]. Geologische Rundschau, 79(2) 241-263.
- Inoue A. 1995. Formation pf clay minerals in hydrothermal environments vied M. Drigin and Mineralogy of Clay, Berlin: Springer, 268-330.
- Kwak T A. 1994. Hydrothermal alteration in carbonate-replacement deposits J J. Geological Association of Canada Short Course Notes, 11:381-402.
- Leake BE, Wolley AR and Arps CES. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new mineral and mineral name. J. The Canadian Mineralogist, 35:219-246.
- Li D X , Feng C Y , Zhao Y M , Li Z F , Liu J N and Xiao Y . 2011.

 Mineralization and alteration types and skarn mineralogy of Kaerqueka copper polymetallic deposit in Qinghai Province[J].

 Journal of Jilin University(Earth Science Edition) , 41(6): 342-352(in Chinese with English abstract).
- Li H M, Chen Y C and Li L X. 2012. The mineralization regularity of iron ore in Chinal M l. Beijing: Geological Publishing House. 385p (in Chinese with English abstract).
- Li Z , Wang L Q , Lin X , Yang Y and Kang H R. 2013. The geological characteristics of Lietinggang iron polymetallic deposit in Tibe [CC].

 Acta Mineralogica Sinica , sup: 934-935(in Chinese with English abstract).

- Li Z , Tang J X , Wang L Q , Yang Y and Zhong Y. 2016. Geochemical characteristics of magnetites from the Lietinggang iron polymetallic deposit of Tibet and its geological significance J J Acta Petrologica et Mineralogica , 35(5): 821-839 (in Chinese with English abstract).
- Liang X J and Wang F S. 2000. Experimental study on the formation mechanism of the contact metasomatic skarn gold deposits J J. Gold Geology, 6(1):1-14(in Chinese with English abstract).
- Liang X J. 1994. Garnets of grossular-andradite series: Their characteristics an metasomatic mechanism [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 13(4): 342-352(in Chinese with English abstract).
- Lin W W, Zhao Y M and Jiang C J. 1990. Characteristics of paragenetic clinopyroxene-garnet pairs in skarn deposits and their geological significanc [J]. Mineral Deposits, 9(3): 237-256(in Chinese with English abstract).
- Lu H Z, Liu Y M and Wang CL. 2003. Mineralization an fluid inclusion study of the Shizuyuan W-Sn-Mo-F skarn deposit, Hunan Province, China J.1. Econ. Geol., 98:955-974.
- Ma D.H., Peng H.K. and Chen L. 2012. The census report of Lietinggang iron deposit in Duilong-Deqing county, Tibe [R] (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q and Duan C. 2011. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-strata bound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the middle-lower Yangtze river valley, eastern Chinf J J. Ore Geology Reviews, 43(1):294-314.
- Meinert L.D. 1992. Skarns and skarn deposits J.J. Geoscience Canada, 19:145-162.
- Meinert L.D. 1997. Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration J. Exploration and Mining Geology, 6(2):185-208.
- Meinert L. D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits J. Economic Geology 100th Anniversary Volume I:299-336.
- Misra K C. 2000. Understanding mineral deposit M J. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publisher.
- Nakano T , Yoshino T , Shimazaki H and Shimizu M. 1994. Pyroxene composition as an indicator in the classification of skarn deposits J]. Econ. Geol. , 89(7):1567-1580.
- Pan Z L. 1984. Crystallography and mineralogy (volume [I I M]. Beijing: Geological Publishing House. 274p (in Chinese with English abstract).
- Peng H J , Li H Y , Pei R F , Zhang C Q , Zhou Y M , Tian G , Li X and Long F. 2014. Mineralogical characteristics and metallogeny of the Hongniu-Hongshan copper deposit in Zhongdian area , Yunnan

- Province, China J. Acta Petrologica Sinica, 30(1):237-256(in Chinese with English abstract).
- Pirajno F. 2009. Hydrothermal processes and mineral systems [J]. Berlin, Germany: Springer. 1016.
- Pons J. 2010. Geology, petrography and geochemistry of igneous rocks related to mineralized skarns in the NW Neuquén basin, Argentina: Implications for Cordilleran skarn exploration J. Ore Geology Reviews, 38(1-2):37-58.
- Rona P A. 1984. Hydrothermal mineralization at seafloor spreading centers J. B. Earth Science Reviews , 20(1):1-104.
- Rui Z Y , Li Y Q , Wang L S and Wang Y T. 2003. Approach to oreforming conditions in light of ore fluid inclusions J]. Mineral Deposits , 22(1):13-23(in Chinese with English abstract).
- Sato K. 1980. Tungsten skarn deposit of the Fujigatani mine, southwest Japar [J]. Econ. Geol., 75(7):1066-1082.
- Smith M P, Henderson P, Jeffries T, Long J and Williams C T. 2004.

 The rare earth elements and uranium in garnets from the Beinn an Dubhaich Aureole, Skye, Scotland, UK: Constraints on processes in a dynamic hydrothermal system [J]. Journal of Petrology, 45 (3):457-484.
- Somarin A K. 2004. Garnet composition as an indicator of Cumineralization: Evidence from skarn deposits of NW Irar[J]. Journal of Geochemical Exploration, 81(1):47-57.
- Somarin A K. 2010. Garnetization as a ground preparation process for copper mineralization: Evidence from the Mazraeh skarn deposit, Iraf J]. International Journal of Earth Sciences, 99(2):343-356.
- Song G X , Qin K Z and Li G M. 2010. Study on the fluid inclusions and S-H-O isotopic compositions of skarn-porphyry type W-Mo deposits in Chizhou area in the middle-lower Yangtze valley J J. Acta Petrologica Sinica , 26(9): 2768-2782 (in Chinese with English abstract).
- Tian M J, Li Y G, Wan H Z, Zhang Y and Gao T T. 2014. Characteristics of skarn minerals in Yongping copper deposit Jiangxi Province, and geological significances [J]. Acta Petrologica, 30 (12):3741-375% in Chinese with English abstract).
- Titley S.R. 1973. "Pyrometasomatic": An alteration type [J]. Econ. Geol., 68(8):1326-1329.
- Wang L Q , Tang J X , Chen W , Luo M C , Kang H R and Leng Q F. 2014. Mineralogical characteristics of skarn in the Bangpu Mo polymetallic deposit , Tibet , and their geological significance J]. Geology in China , 41(2): 562-576 in Chinese with English abstract).
- Xu G and Lin X. 2000. Geology and geochemistry of the Changlongshan skarn iron deposit, Anhui Province, China[J]. Ore Geology Reviews, 16:91-106.

- Yang Y , Duo J , Liu H F , Zhang J S , Wang L Q , Zhang Z and Hu Z H. $2014. \ \ Re\text{-Os dating of molybdenite from the Lietinggang iron polymetallic deposit of Tibet and its geological significance J]. Geology in China , 41(5):1554-1564 (in Chinese with English abstract).$
- Yang Y. 2015. The Study on geological characteristics of Lietinggang iron polymetallic deposit, Tibet and metallogenic regularity of typical deposits in the North Gangdese metllogenic Belt (doctoral dissertation for Ph.D.) [D]. Supervisor: Duo Ji. Sichuan: Chengdu University of Technology. 150 ft in Chinese with English abstract).
- Yang Y, Duo J, Dexi-YZ, Liu HF, Zhang JS, Zhang Z, Hao JT and Liu MM. 2015. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic composition of intrusions in the Lietinggang iron polymetallic deposit in Tibet and their geological significance JJ. Acta Petrologica et Mineralogica, 34(3):1-13(in Chinese with English abstract).
- Yao L, Xie GQ, Zhang CS, Liu JL, Yang HB, Zheng XW and Liu XF. 2012. Mineral characteristics of skarns in the Chengchao large-scale Fe deposit of southeastern Hubei Province and their geological significance JJ. Acta Petrologica Sinica, 28(1):133-146(in Chinese with English abstract).
- Yu Y S , Yang Z S , Liu Y C , Tian S H , Zhao C , Gao Y , Ji X H , Hu W Z and Cao S H. 2012. Mineralogical characteristics of skarn in Ri 'a copper deposit of Nixiong orefield , Tibet , and their geological significanc [J]. Mineral Deposits , 31(4):775-790(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C , Hou T , Li H M , Li J W , Zhang Z H and Song X Y . 2014. Enrichment mechanism of iron magmatic hydrothermal system [J]. Acta Petrologica Sinica , 30(5):1189-1204 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Hou T, Santosh M., Li H M, Li J W, Zhang Z H, Song X Y and Wang M. 2014. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: An overview J. Ore Geology Reviews, 57, 247-263.
- Zhang Z H , Hong W , Jiang Z H , Duan S G , Wang Z H , Li F M , Shi F P , Zhao J and Zheng R Q. 2012. Geological features , mineralization types and metallogenic setting of late Paleozoic iron deposits in western Tianshan mountains of Xinjiang J J. Mineral Deposits , 31 (5) 941-964 in Chinese with English abstract).
- Zhang Z M, Xiao Y L, Shen K and Gao Y J. 2005. Garnet growth compositional zonation and metamorphic P-T path of the ultrahighpress eclogites from the Sulu orogenic belt, eastern central Chin [J]. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 809-818 (inChinese with English abstract).
- Zhao B and Barton M D. 1987. Compositional characteristics of garnets and pyroxenes in contact-metasomatic skarn deposits and their rela-

- tionship to mineralization [J]. Acta Mineralogica Sinica , 7(1): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Zhao J S and Newb. 1996. Novel knowledge on the origin and mineralization of skarns from Shizhuyuar [J]. Acta Mineralogica Sinica , 16 (4): 442-449 in Chinese with English abstract).
- Zhao M, Pan XF, Li Y, Chen GH, Zhang C, Kang C, Wei J, Zhang TF and Liu Q. 2015. Mineralogical characteristics and geological significance of the Zhuxi Cu-W polymetallic ore deposit, Jiangxi Province JJ. Geological Bulletin of China, 34(2/3):548-568.
- Zhao Y M, Lin W W and Bi C S. 1990. The skarn deposits in China M. Beijing: Geological Publishing House. 164-171p (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M , Zhang Y N and Lin W W. 1997. Characteristics of pyroxenes and pyroxenoids in skarn deposits of China and their relationship with metallization [J]. Mineral Deposits , 16(4):318-329 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M. 2002. Some new important advances in study of skarn deposit J J. Mineral Deposits , 21(2):113-120(in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M and Li D X. 2003. Amphiboles in skarn deposits of Chin $\{ J \}$ Mineral Deposits , 22(4): 345-359(in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M , Lin W W and Bi C S. 2012. Skarn ore deposits in China [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-115p (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z H , Liu H W , Chang W X , Lv L S , Li T , Yang Y J , Zhang R J and Ji X H. 2011. Mineralogical characteristics of skarns in the Huanggang Sn-Fe deposit of inner Mongolia and their metallogenic indicating significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica , 30 (1):97-112(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 艾永富,金玲年.1981.石榴石成分与矿化关系的初步研究[]].北京大学学报(自然科学版),10(1):83-90.
- 常印佛,刘湘培,吴言昌.1991.长江中下游铜铁成矿带[M].北京: 地质出版社.379页.
- 陈雷,秦克章,李光明,李金祥,肖波,江化寨,赵俊兴,范新,江善元. 2012. 西藏冈底斯南缘努日钨钼矿床地质特征与矽卡岩矿物学研究[]] 矿床地质,31(3):417-437.
- 陈能松,孙敏,杨勇,刘嵘,王勤燕. 2003. 变质石榴石的成分环带与变质过程,]. 地学前缘, 10(3): 315-320.
- 范裕,周涛发,郝麟,袁峰,张乐骏,王文财. 2012. 安慰庐枞盆地 泥河铁矿床成矿流体特征及其对矿床成因的指示[J]. 岩石学

- 报,28(10):3113-3124.
- 费详惠,张招崇,韩鎏.2014.山东张家洼矽卡岩型铁矿矿物学特征 及其对成矿环境的指示意义[]].中国地质,4((6):1873-1896.
- 洪为,张作衡,李凤鸣,刘兴忠. 2012a. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床 稳定同位素特征及其地质意义[J]. 岩矿测试,31(6):1077-1087.
- 洪为,张作衡,赵军,王志华,李凤鸣,石福品,刘兴忠. 2012b. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志,31(2):191-211.
- 胡浩,段壮,LuoY,任●,李建威.2014. 长江中下游成矿带鄂东南矿集区程潮矿床磁铁矿的微量元素组成及其对矿床成因的制约[J]. 岩石学报,30(5):1292-1306.
- 黄华,张长青,周云满,刘博,谢永富,董云涛,杨春海,董文伟. 2014. 云南金厂河铁铜铅锌多金属矿床矽卡岩矿物学特征及蚀 变分带[1]. 岩石矿物学杂志,33(1):127-148.
- 李大新,丰成友,赵一鸣,李泽峰,刘建楠,肖晔.2011.青海卡而却卡铜多金属矿床蚀变矿化类型及矽卡岩矿物学特征 J]. 吉林大学学报 地球科学版),41(6):342-352.
- 李厚民,陈毓川,李立兴. 2012. 中国铁矿成矿规律[M]. 北京:地质出版社. 385页.
- 李壮,王立强,林鑫,杨毅,康浩然,2013.西藏列廷冈铁多金属矿 床地质特征 C].矿物学报,增刊:934-935.
- 李壮,唐菊兴,王立强,杨毅,钟毅.2016.西藏列廷冈铁多金属矿床磁铁矿元素地球化学特征及地质意义[J].岩石矿物学杂志,35(5):821-839.
- 梁祥济,王福生. 2000. 接触交代矽卡岩型金矿床形成机理的实验研究[]] 黄金地质, ((1):1-14.
- 梁祥济. 1994. 钙铝-钙铁榴石系列石榴子石的特征及其交代机 理 J]. 岩石矿物学杂志,13(4):342-352.
- 林文蔚,赵一鸣,蒋崇俊.1990.矽卡岩矿床中共生单斜辉石-石榴 子石特征及其地质意义[J].矿床地质,(3):195-207.
- 马代海,彭火坤,陈雳. 2012. 西藏自治区堆龙德庆县列廷冈铁矿区 普查报告 R].
- 潘兆橹. 1984. 结晶学与矿物学(下册]M]. 北京:地质出版社. 274页.
- 彭慧娟,李洪英,裴荣富,张长青,周云满,田广,李建新,龙飞. 2014. 云南中甸红牛-红山矽卡岩型铜矿床矿物学特征与成矿作 用[J]. 岩石学报,30(1):237-256.
- 芮宗瑶,李荫清,王龙生,王艺天. 2003. 从流体包裹体研究探讨金属矿床成矿条件[J]. 矿床地质,22(1):13-23.
- 宋国学,秦克章,李光明. 2010. 长江中下游池州地区矽卡岩-斑岩型 $W-M_0$ 矿床流体包裹体与 H,O,S 同位素研究[]]. 岩石学报,26(9):2768-2782.
- 田明君,李永刚,万浩章,张宇,高婷婷. 2014. 江西永平铜矿矽卡

- 岩矿物学特征及其地质意义[J] 岩石学报,30(12):3741-3758.
- 王立强,唐菊兴,陈伟,罗茂澄,康浩然,冷秋锋.2014. 西藏邦铺 钼多金属矿床矽卡岩矿物学特征及其地质意义[J]. 中国地质,41(2):562-576.
- 杨毅, 多吉, 刘鸿飞, 张金树, 王立强, 张志, 胡正华. 2014. 西藏列廷冈铁多金属矿床辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 41(5):1554-1564.
- 杨毅. 2015. 西藏列廷冈铁多金属矿床地质特征及冈底斯北缘成矿规律研究 博士论文 [D] 导师 多吉. 成都 成都理工大学.150页.
- 杨毅,多吉,德西央宗,刘鸿飞,张金树,张志,郝建亭,刘苗苗. 2015. 西藏列廷冈铁多金属矿侵入岩锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素组成及其地质意义 11. 岩石矿物学杂志,34(3):1-13.
- 姚磊,谢桂青,张承帅,刘佳林,杨海波,郑先伟,刘晓帆. 2012. 鄂东南矿集区程潮大型矽卡岩铁矿的矿物学特征及其地质意义 [1]. 岩石学报,28(1):133-146.
- 于玉帅,杨竹森,刘英超,田世洪,赵灿,高原,纪现华,胡为正,曹 圣华. 2012. 西藏尼雄矿田日阿铜矿床矽卡岩矿物学特征及地 质意义[1]. 矿床地质,31(4):775-790.
- 张泽明,肖益林,沈昆,高勇军.2005. 苏鲁超高压榴辉岩的石榴石生产成分环带及变质作用P-T轨迹[J]. 岩石学报,21(3)809-818.
- 张招崇,侯通,李厚民,李健威,张作衡,宋谢炎,2014. 岩浆-热液

- 系统中铁的富集机制探讨[]] 岩石学报,3((5):1189-1204.
- 张作衡,洪为,蒋宗胜,段士刚,王志华,李凤鸣,石福品,赵军,郑 仁乔. 2012. 新疆西天山晚古生代铁矿床的地质特征、矿化类型 及形成环境 J]. 矿床地质,31(5):941-964.
- 赵斌, Barton M.D. 1987. 接触交代矽卡岩型矿床中石榴子石和辉石 成分特点及其与矿化的关系[1]. 矿物学报, 7(1):1-8.
- 赵劲松, Newb. 1996. 对柿竹园矽卡岩成因及其成矿作用的新认识[]. 矿物学报, 16(4): 442-449.
- 赵苗,潘小菲,李岩,陈国华,张诚,康川,魏锦,张天福,刘茜. 2015. 江西朱溪铜钨多金属矿床矽卡岩矿物学特征及其地质意 义[1]. 地质通报,34(2-3):548-568.
- 赵一鸣,林文蔚,毕承思. 1990. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京:地质 出版社. 164-171页.
- 赵一鸣,张轶男,林文蔚.1997.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[1]。矿床地质,16(4):318-329.
- 赵一鸣. 2002. 夕卡岩矿床研究的某些重要新进展[J]. 矿床地质, 21(2):113-120
- 赵一鸣,李大新,2003. 中国夕卡岩矿床中的角闪石[J]. 矿床地质,22(4):345-359.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思. 2012. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京:地质出版社.1-115页.
- 周振华,刘宏伟,常帼雄,吕林素,李涛,杨永军,张瑞军,纪显合. 2011. 内蒙古黄岗锡铁矿床矽卡岩矿物学特征及其成矿意义 [J]. 岩石矿物学杂志,3((1):97-112.