

西藏知不拉铜多金属矿床地质、石榴子石分带特征及其地质意义

丁 帅¹ 唐菊兴² 郑文宝² 姚晓峰³

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037;
3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

摘 要: 西藏知不拉铜多金属床是冈底斯成矿带东段典型的矽卡岩矿床, 石榴子石是矿区最主要的矽卡岩矿物, 其颗粒间的空隙是金属矿物的主要赋存部位。本文通过详细的钻孔编录, 结合岩矿鉴定及电子探针分析, 划分出两种不同类型的石榴子环带, 并在垂向上具有明显的分带: 产于顶板凝灰岩中的石榴子石以钙铁榴石为主, 环带中心颜色深, 向外逐渐变浅, 由纯钙铁榴石过渡到钙铝榴石, 而位于底板大理岩附近石榴子石多以钙铝榴石为主, 从环带核部向外颜色变深, 化学组成由钙铝榴石向钙铁榴石变化, 其它化学成分变化不大。反映该区上下两套不同性质围岩在石榴子石形成过程中所起的作用不同, 其中上部凝灰岩主要提供了 Fe, 底部大理岩则是 Ca 的来源, 热液流体贡献 Si、Al 及部分 Fe, 并随着环境和物质成分改变导致环带外侧具有不同于核部的变化趋势。这很好地解释了石榴子石矽卡岩在空间上具有上部为钙铁榴石、向下逐渐过渡到钙铝榴石的空间分带。石榴子石特征及分带显示了其属热液接触交代成因, 这为矿床类型的确定提供了依据, 也为在该区域内寻找类似矿床指明了方向。

关键词: 矽卡岩; 石榴子石环带; 形成机制; 分带性

中图分类号: P618.41; P578.94⁺7

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)02-0294-13

Geological and garnet zoning characteristics of the Zhibula copper polymetallic deposit in Tibet and their significance

DING Shuai¹, TANG Ju-xing², ZHENG Wen-bao² and YAO Xiao-feng³

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: The Zhibula copper polymetallic deposit is a typical skarn type deposit in eastern Gangdise metallogenic belt of Tibet, and garnet is the main skarn mineral in the ore district, with most metal minerals occurring between garnet grains. In this paper, such means as detailed borehole logging, rock-mineral identification under microscope and electron microprobe analysis were used to divide the zoning into two different types. There obviously exists vertical garnet zoning as follows: Garnet is mainly andradite in tuff comprising the roof, the garnet center is dark-colored and the color gradually becomes lighter towards the margin, accompanied by the change of the chemical composition from pure andradite to grossular. Garnet is mostly grossular near the marble floor, the color becomes dark from the center to the edge and the main chemical composition changes from andradite to grossular while other chemical components change quite insignificantly. These characteristics suggest that two

收稿日期: 2013-06-27; 修订日期: 2013-12-23

基金项目: 青藏专项资助项目(1212010818089); 中央公益性行业科研专项资助项目(200911007-02)

作者简介: 丁 帅(1987-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: tancer@qq.com; 通讯作者: 唐菊兴(1964-), 男, 博士, 研究员, 主要从事矿床勘查, E-mail: tangjuxing@126.com.

distinct wall rocks made different contributions to the garnet formation. In the upper part, tuff mainly provided Fe composition, whereas at the bottom, marble contributed Ca ingredient, and hydrothermal fluids contributed Si, Al and some Fe. The rim of the garnet zone is different from the core because the environment and material compositions changed gradually during the whole process. This well explains the vertical garnet skarn zoning characterized by the change of the grossular in the upper part to andradite in the lower part. At the same time, the characteristics and zoning of the garnet show that Zhibula is a metasomatic hydrothermal deposit. The results obtained by the authors not only provide the basic data for the study of deposit genesis but also indicate the criteria in search for similar deposits in this region.

Key words: skarn; garnet zoning; forming mechanism; zonation

冈底斯铜多金属成矿带作为我国重要的新生代斑岩成矿带(芮宗瑶等, 1984, 2004; 侯增谦等, 2001; 张洪涛等, 2004; 唐菊兴等, 2010b, 2011)。该带中大多数斑岩矿床都保留有较完整的斑岩成矿系统, 如甲玛斑岩铜多金属矿(唐菊兴等, 2010, 2011; 郑文宝等, 2011; 应立娟等, 2010)、驱龙巨型斑岩铜钼矿(孟祥金等, 2003; 郑有业等, 2004; 杨志明等, 2008; 肖波等, 2011)、邦铺斑岩铜钼矿(王立强等, 2011, 2012)等。知不拉铜多金属矿位于冈底斯成矿带中东段, 距驱龙超大型斑岩铜矿约 2 km, 是驱龙斑岩-矽卡岩成矿系统的重要组成部分, 已经达到大型高品位矽卡岩型铜多金属矿的规模。前人对该矿床研究多集中在成矿地质条件、年代学、岩石地球化学等方面, 并在矿床成因上存在火山喷流沉积型及岩浆热液接触交代型矿床等不同认识(姚鹏等, 2002; 李光明等, 2005; 余宏全等, 2005; 肖波等, 2011)。石榴子石作为矿区最主要造岩矿物, 深入解剖其特征及形成过程不仅可为矿床类型的确定提供佐证, 亦对区域找矿前景有所指示。本文通过对知不拉铜多金属矿床地质特征、石榴子石矿物学和分带性的研究, 从微观角度上探讨了矽卡岩的形成过程, 为矿床成因和驱龙外围找矿评价提供基础资料。

1 地质概况

知不拉矿区位于冈底斯铜多金属成矿带内, 北距驱龙斑岩铜矿约 2 km, 大地构造位置隶属于冈底斯-念青唐古拉板片次级构造单元冈底斯陆缘火山-岩浆弧东段。区内地层主要为中侏罗统叶巴组(J_2y)火山岩、火山碎屑岩, 其岩性以流纹斑岩、凝灰岩为主, 局部地段夹有大理岩化灰岩透镜体, 是知不拉铜多金属矿主要赋矿层位(图 1)。同时在叶巴组凝灰岩多发育大面积的角岩化及青磐岩化, 并在靠近大理

岩附近凝灰岩中有微弱细脉浸染状铜矿化。该套火山岩系为连续分布的钙碱性火山岩(耿全如等, 2005; 曾忠诚等, 2009), 形成于岛弧环境(耿全如等, 2005; 董彦辉等, 2006), 代表了新特提斯洋早期俯冲的产物(Chu *et al.*, 2006; 董彦辉等, 2006), 钟康惠等(2012)通过研究驱龙-甲玛地区推滑覆构造系特征, 认为该区域上的叶巴组火山沉积岩系大约在 50 Ma 时发生强烈韧性变形而成为一套构造岩系。该区侵入岩较为发育, 从基性到酸性均有分布, 尤以荣木错拉复式杂岩体发育最为广泛, 岩性主要为黑云母二长花岗斑岩、二长花岗斑岩、花岗闪长斑岩等, 是驱龙最主要的含矿岩体, 成岩成矿主要集中在中新世 16 Ma 左右(孟祥金等, 2003; 王亮亮等, 2006)。区内构造复杂, 褶皱、断裂是矿体主要控矿因素。

2 矿床地质特征

知不拉矿区共探明 4 个矽卡岩铜矿体, 均沿叶巴组地层中碳酸盐透镜体呈近东西向分布。矿体呈层状、薄板状、透镜状(平均厚度 10 m), 走向约 280°, 向北陡倾, 倾角 60°~80°。矿体在走向方向控制长约 400~1 200 m, 倾向方向延伸超过 500 m(图 2)。I、II、III 号矿体是区内主要工业矿体, 占有整个矿区资源量 90% 以上。截止目前, 共计查明 332+333 级别 Cu 资源量超过 40 万吨, 通过进一步的勘查, 资源量有望突破 50 万吨。

矿区矿石矿物成分较为简单, 金属矿物主要有黄铜矿、斑铜矿、磁铁矿及少量的辉钼矿、方铅矿、闪锌矿。非金属矿物主要以矽卡岩矿物为主, 包括石榴子石、透辉石、硅灰石、绿泥石、绿帘石等, 还有石英、方解石、石膏、硬石膏。按照矿物组合特点, 矿区矽卡岩可分为石榴石矽卡岩、透辉石石榴石矽卡岩、硅灰

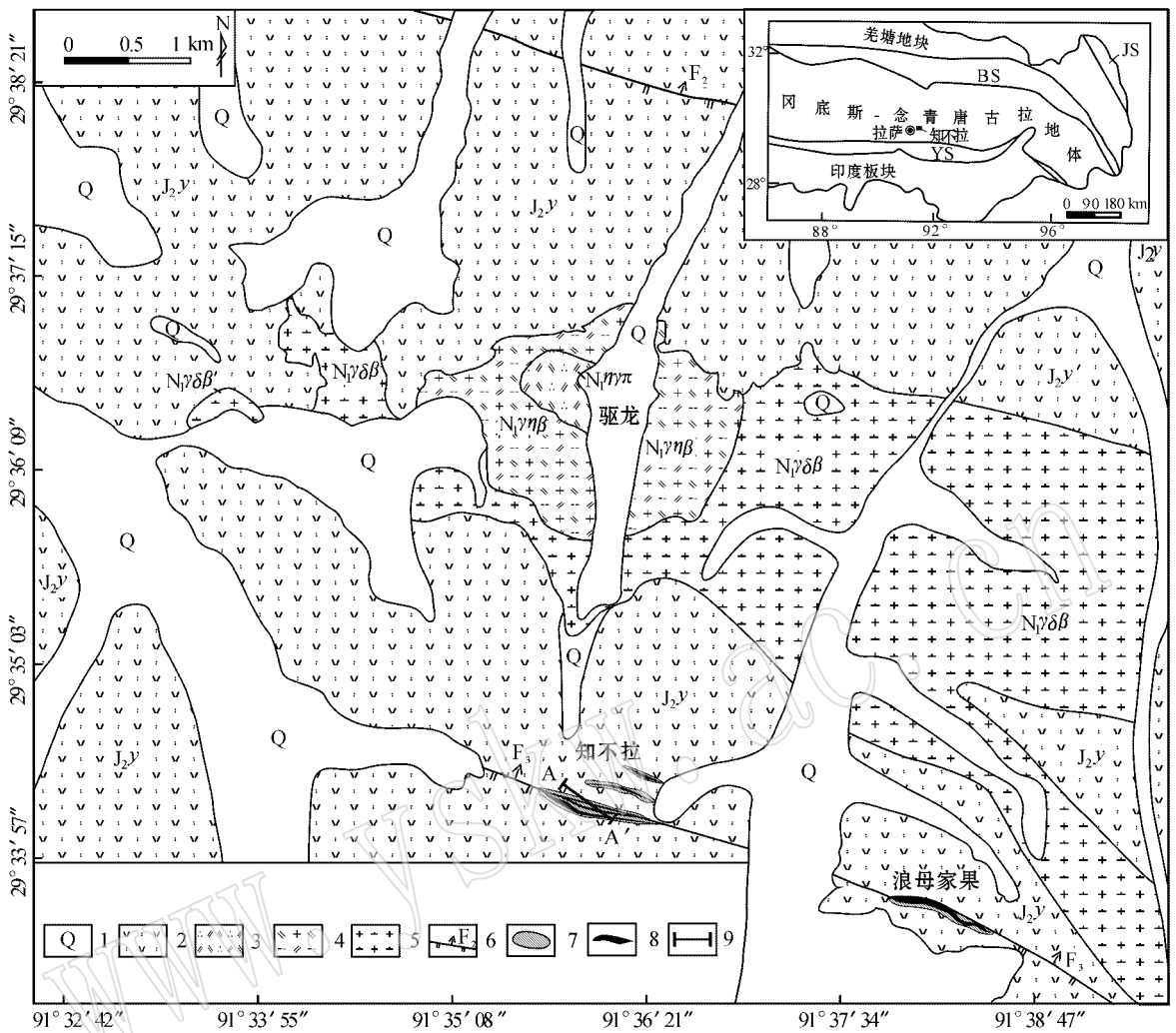


图1 知不拉矿区地质图(据西藏巨龙铜业有限公司, 2012^①)

Fig. 1 Geological map of the Zhibula ore district (after Tibet Julong Copper Industry, 2012^①)

1—第四系; 2—中侏罗系叶巴组凝灰岩及流纹岩; 3—中新世二长花岗岩斑岩; 4—中新世黑云母二长花岗岩斑岩; 5—中新世花岗岩长斑岩;
6—断层; 7—砂卡岩; 8—砂卡岩矿体; 9—所编剖面

1—Quaternary; 2—tuff and rhyolite of Jurassic Yeba Formation; 3—Miocene adamellite porphyry; 4—Miocene biotite adamellite;
5—Miocene granodiorite porphyry; 6—fault; 7—skarn; 8—skarn ore body; 9—logged section

石榴石砂卡岩、硅灰石砂卡岩及绿泥石+绿帘石砂卡岩等。其中绿泥石和绿帘石为后期退蚀变矿物,交代早期石榴石和辉石。不同类型砂卡岩常伴有不同矿化特征,且在空间上具有明显的分带特征(图3)。在矿体顶部主要为石榴石砂卡岩,并伴有少量黄铜矿和铅锌矿化,向深部逐渐过渡到透辉石石榴石砂卡岩,铜矿化明显增强,同时可见少量辉钼矿;在靠近矿体底部主要分布硅灰石砂卡岩,并以斑铜矿为主。此外,磁铁矿常呈脉状形式穿切或胶结石榴石砂卡岩,主要分布在矿体中-顶部位置。根据不同矿

物穿插关系、矿物组合及镜下特征,可将知不拉矿区矿化和蚀变大致划分为5个阶段:早期砂卡岩阶段主要形成石榴子石、透辉石和硅灰石等无水硅酸盐矿物。晚期退蚀变阶段以绿泥石、绿帘石、符山石、角闪石等含水矿物交代早期石榴石和辉石等为特征。需要指出的是,知不拉矿区绿泥石和绿帘石非常发育,除交代早期砂卡岩矿物以外,也有顶板青磐岩化形成的脉状和团斑状绿泥石和绿帘石。该阶段同时伴有大量磁铁矿形成,呈致密块状或脉状分布在石榴石砂卡岩中,反映了矿区热液流体是相对氧化性

① 西藏巨龙铜业有限公司. 2012. 西藏自治区墨竹工卡县知不拉矿区铜多金属矿产资源储量核实报告.

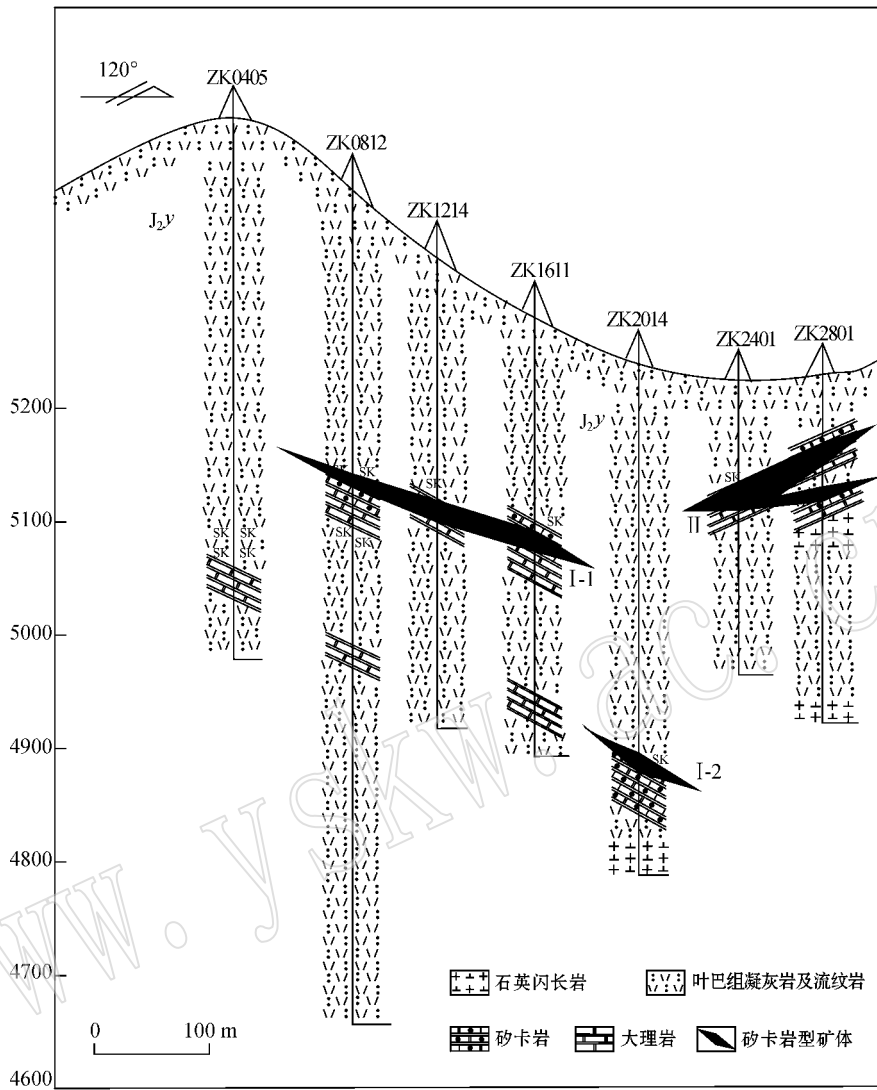


图 2 知不拉矿区横剖面图(具体位置见图 1)

Fig. 2 Transverse section of the Zhibula ore district(for detailed location see Fig. 1)

的。氧化阶段则有少量辉钼矿和磁铁矿等硫化物形成,并出现有少量石英。石英-硫化物阶段以大量铜(钼、铅、锌)矿化及石英出现为特征,这些金属硫化物多与石英共生呈脉状分布,部分呈团斑状、星散状分布在砂卡岩矿物颗粒之间,流体包裹体数据表明成矿热液具有明显的低盐度[0.5%~12%]和高盐度[30%~54%]两组,成矿温度主要集中在220°~380°(余宏全等,2005)。表生氧化阶段主要在靠近浅部位置,金属硫化物被不同程度地氧化为孔雀石、蓝铜矿及褐铁矿等。矿石矿物结构主要为中细粒-等粒、自形-半自形粒状、交代、环带结构等;矿石构造

有块状、浸染状、脉状-网脉状构造等。

3 石榴子石特征

3.1 石榴子石空间分布及矿物学特征

石榴子石是矿石中最主要的砂卡岩矿物,其颗粒间的空隙是金属矿物的主要赋存部位。按照其空间产出位置,将石榴子石分为两类:一类为产于或靠近顶板凝灰岩中的石榴子石,颜色深,颜色变化大,主要为黑褐色、红褐色、红棕色等,且粒度较细,晶形差,多呈致密团块状,多见其交代凝灰岩(图 4a、4b)。

| 岩性 | 岩性柱 | 换层孔深 | 岩石矿物组合 | 矿体类型 | 有用矿物组合 | 有用元素组合 |
|----------|--|---------|--|------------|-----------------------|-------------|
| 流纹质晶屑凝灰岩 | \ / △ △ : : \ / △ △ △ △ : \ / | 87.3 m | 长石+石英+蚀变矿物(石英、绿泥石、绿帘石、黑云母) | 矽卡岩型铜(钼)矿体 | | Cu Mo Pb Zn |
| 矽卡岩化凝灰岩 | : \ / △ △ : \ / △ △ SK △ : SK \ / △ △ SK : △ △ SK : \ / | 95.3 m | 长石+石英+矽卡岩矿物(石榴子石、透辉石、绿泥石、绿帘石、石英) | | 黄铜矿+辉钼矿 | |
| 石榴子石矽卡岩 | ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ | 108.4 m | 石榴子石+透辉石+透闪石+绿泥石+绿帘石+石英+方解石+阳起石+石膏 | | 黄铜矿+辉钼矿+斑铜矿+少量方铅矿及闪锌矿 | |
| 大理岩矽卡岩化 | SK SK SK SK SK SK SK SK | 111.4 m | 方解石+石榴子石+硅灰石+透辉石+透闪石+绿泥石+绿帘石+石英+方解石+阳起石+石膏 | | 黄铜矿+斑铜矿+辉钼矿 | |
| 大理岩 | | 210.9 m | 方解石 | | | |
| 石榴子石矽卡岩 | ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ | 220.3 m | 石榴子石+透辉石+透闪石+绿泥石+绿帘石+石英+方解石+阳起石+石膏 | | 黄铜矿+辉钼矿 | |
| 流纹质晶屑凝灰岩 | \ / △ △ : : \ / △ △ △ △ : \ / | 254.4 m | 长石+石英+蚀变矿物(石英、绿泥石、绿帘石、黑云母) | | | |

图 3 ZK2401 钻孔柱状图

Fig. 3 Columnar section of drill hole ZK2401

按照 Meinert(1992) 的矽卡岩分类方式, 这类矽卡岩属于类矽卡岩(skarnoid)。另一类是产于大理岩中的石榴子石, 颜色相对较浅且纯净, 主要为翠绿色、浅黄绿色等, 粒度较粗、晶形完整(图 4c), 多与硅灰石、方解石等矿物共生(图 4d)。

3.2 石榴子石环带及其成分特征

产于凝灰岩中的石榴子石环带核部颜色多为深黑褐色或棕色, 向外环带变细且颜色逐渐变浅呈韵律分布(图 4e); 位于大理岩附近的石榴子石环带特征明显相反, 中心为浅绿色, 向外环带亦变细且颜色逐渐变为深褐色(图 4f)。

镜下观察到石榴子石反射色变化大, 常见浅黄褐色、淡绿色、浅玫瑰色, 多呈自形-半自形粒状集合体, 为典型的菱形十二面体或四角八面体形态; 粒度大小不等, 为不等粒状连续分布, 多集中在 3~5 mm 之间; 正高-正极高突起, 干涉色呈一级深灰-灰色, 正交偏光镜下均质性和非均质性都可见(图 5a、5b、5c)。均质性多分布在石榴子石核部, 其成分多富铁, 并在边缘发育环带结构(图 5b); 而非均质性则主要

体现在具有光性异常的石榴子石环带上(图 5d、5e、5f), 表现为颜色深浅变化交替出现, 这种明暗变化反映其可能受成分影响较大。正是这种环带结构, 体现石榴子石形成经历了长时间物化环境变化(Jamtveit *et al.*, 1993), 故对其进行了电子探针分析。样品测试在中国地质大学(北京)电子探针实验室完成, 采用仪器为 JXA-8800 型电子探针, 测试加速电压为 20 kV, 束电流为 20 nA, 束斑直径为 5 μm, 分析结果见表 1。

由表 1 可知, 石榴子石都属钙质榴石系列, 与世界上矽卡岩型铜矿石榴石一致(Meinert, 1992)。在所选取的 4 个石榴子石环带 20 个测点中, SiO₂ 和 CaO 含量均十分相近, 平均为 38.58% 和 33.82%, 反映其来源比较稳定; Ti、Mn、Mg 含量低, 与 Fe 含量呈正比关系; Fe、Al 在不同产状石榴子石的环带中变化趋势明显不同, 位于顶板近凝灰岩的石榴子石环带中心更富铁, 向边缘 Al 含量逐渐升高, 而近大理岩的石榴子石由内向外 Al 含量降低、Fe 含量升高。

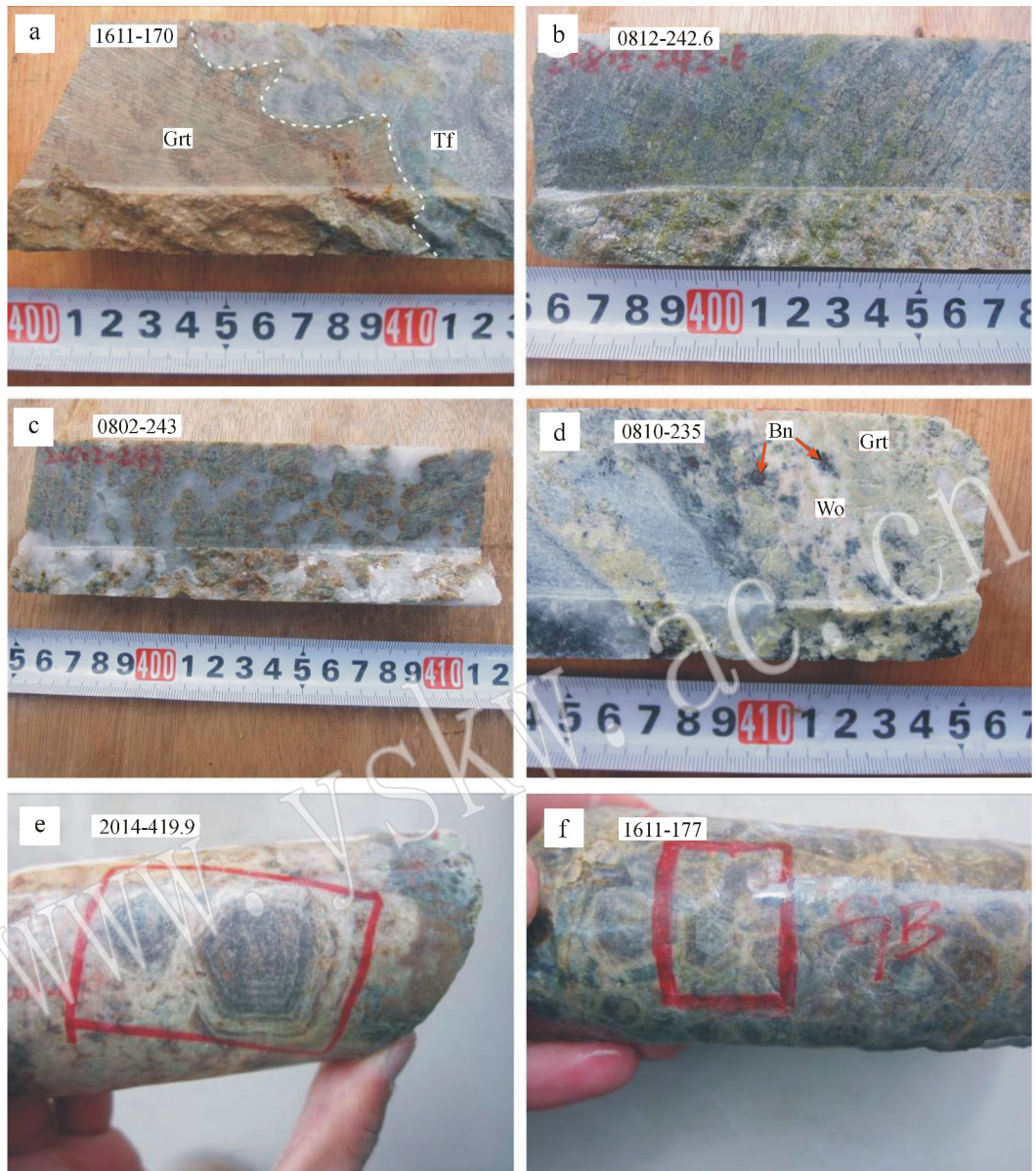


图 4 知不拉矿区石榴子石特征

Fig. 4 Characteristics of garnet from the Zhibula ore district

a—红棕色致密块状石榴子石与凝灰岩接触带；b—凝灰岩中石榴子石顺层分布，部分被绿帘石交代；c—大理岩中浅绿色—黄绿色粗粒石榴子石；d—石榴子石与硅灰石共生，斑铜矿分布在硅灰石中；e—石榴子石环带，核部红棕色(深)，边缘浅黄绿色(浅)；f—石榴子石环带，核部浅绿色(浅)，边缘红棕色(深)；Grt—石榴子石；Tf—凝灰岩；Wo—硅灰石；Bn—斑铜矿

a—contact zone between massive reddish brown garnet and tuff；b—garnet in tuff distributed along the layer, with some garnet replaced by epidote；c—light green-yellow green coarse-grained garnet in marble；d—garnet associated with wollastonite, bornite distributed in wollastonite；e—garnet zonation, reddish brown (dark) at the center, light yellow green (light) at the edge；f—garnet zonation, light green (light) at the center, reddish brown (dark) at the edge；Grt—garnet；Tf—tuff；Wo—wollastonite；Bn—bornite

4 讨论

4.1 石榴子石形成机制

钙铝—钙铁石榴子石是连续固溶体系列的矿物，

是矽卡岩及其有关矿床中分布最广的标型造岩矿物，同时与矿化存在一定联系(梁祥济, 1994; 赵斌, 1987; 张术根等, 2009)。石榴子石环带成分及变化规律对其形成环境有较好的指示作用, 尤其是对热液成因矽卡岩矿床, 记录了这种开放系统中物化条

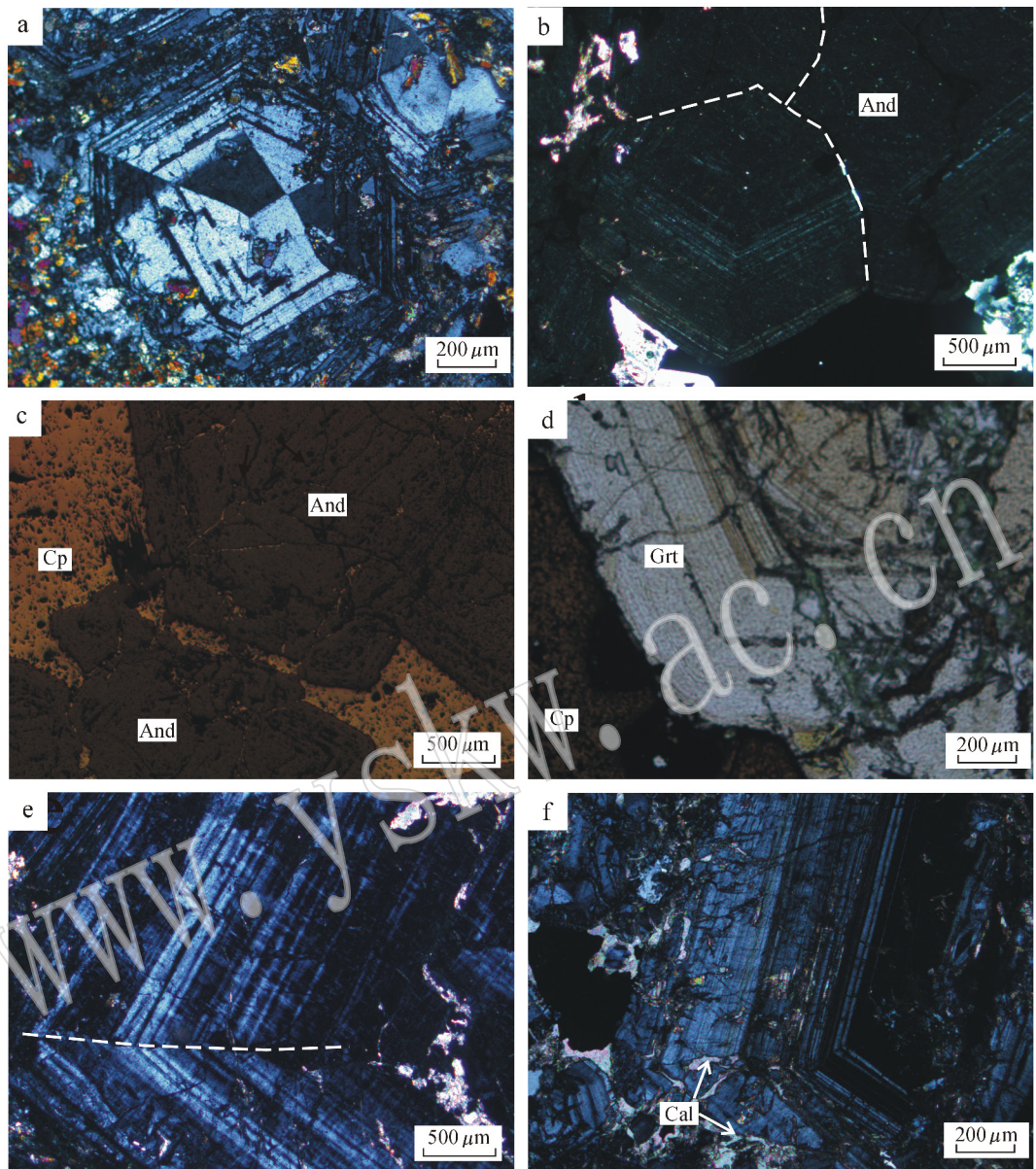


图 5 知不拉矿区石榴子石镜下照片

Fig. 5 Microscope photo of garnet from the Zhibula ore district

a—石榴子石菱形十二面体晶形,呈非均质性,核部具有扇形区(正交偏光); b—钙铁榴石均质性(正交偏光); c—石榴子石均质性,颗粒间填充有黄铜矿(单偏光); d—黄铜矿充填在石榴子颗粒间(单偏光); e—石榴子环带结构(正交偏光); f—石榴子环带结构,边缘被方解石溶蚀和交代(正交偏光); And—钙铁榴石; Grt—石榴子石; Cp—黄铜矿; Cal—方解石
 a—anisotropic and dodecahedral twinned garnet with sector zone at the core (crossed nicols); b—isotropic andradite (crossed nicols); c—isotropic andradite, chalcopyrite existent between garnets (plainlight); d—chalcopyrite existent between garnets (plainlight); e—garnet zonation (crossed nicols); f—garnet zonation, with the margin corroded and replaced by calcite (crossed nicols); And—andradite; Grt—garnet; Cp—chalcopyrite; Cal—calcite

件迅速变化过程,同时也提供了解释其形成机制的微观证据。

以往研究表明(赵斌等,1983;郭吉保,1987;张金民等,1988;梁祥济,1994),影响石榴子石形成的

因素主要取决于热液流体成分、温度、pH值、氧逸度(f_{O_2})及碳酸盐性质等物化条件。一般来说,钙铝—钙铁系列榴石形成温度和压力范围均较广,主要影响各端员组分含量及矿物粒度(梁祥济,1994);钙铝榴

w_B/%

表 1 知不拉铜多金属矿床卡岩中石榴子石电子探针分析结果

Table 1 Representative EMPA results of garnets from the skarn in the Zhibula copper polymetallic deposit

| 样品号 | ZK1611-175.2(靠近顶板) | | | | | ZK1611-186.1(靠近底板) | | | | | ZK2401-104.4(靠近顶板) | | | | | ZK2401-110.8(靠近底板) | | | | |
|--------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| | J1-1 | J1-2 | J1-3 | J1-4 | J2-1 | J2-2 | J2-3 | J2-4 | J2-5 | J2-6 | J2-7 | J3-1 | J3-2 | J3-3 | J4-1 | J4-2 | J4-3 | J4-4 | J4-5 | J4-6 |
| SiO ₂ | 39.18 | 38.31 | 39.10 | 37.97 | 39.57 | 39.96 | 38.94 | 39.01 | 38.18 | 38.74 | 39.44 | 36.72 | 37.34 | 36.73 | 39.94 | 38.59 | 39.14 | 38.98 | 39.61 | 38.29 |
| TiO ₂ | 0.50 | 0.62 | 0.16 | 0.30 | 0.15 | 0.26 | 0.06 | 0.24 | 0.18 | 0.14 | 0.09 | 0.20 | 0.03 | 0.00 | 0.61 | 2.09 | 1.74 | 2.11 | 0.61 | 2.35 |
| Al ₂ O ₃ | 10.20 | 13.81 | 9.28 | 17.06 | 18.33 | 19.30 | 10.35 | 17.31 | 12.64 | 13.97 | 9.14 | 2.00 | 3.76 | 2.43 | 19.66 | 14.13 | 17.95 | 8.19 | 3.87 | 8.64 |
| FeO | 15.05 | 12.53 | 16.23 | 10.35 | 6.21 | 3.93 | 14.98 | 7.52 | 14.33 | 12.38 | 16.34 | 28.31 | 25.59 | 27.45 | 3.17 | 9.97 | 5.13 | 15.58 | 19.43 | 14.79 |
| MnO | 0.54 | 0.44 | 0.47 | 0.37 | 0.80 | 0.57 | 0.66 | 0.55 | 0.62 | 0.61 | 0.45 | 0.15 | 0.04 | 0.15 | 0.47 | 0.52 | 0.53 | 0.30 | 0.38 | 0.50 |
| MgO | 0.24 | 0.14 | 0.19 | 0.11 | 0.65 | 0.64 | 0.49 | 0.56 | 0.16 | 0.14 | 0.69 | 0.17 | 0.25 | 0.23 | 0.67 | 0.43 | 0.69 | 0.51 | 0.80 | 0.57 |
| CaO | 34.37 | 33.45 | 33.79 | 33.10 | 34.39 | 34.66 | 33.42 | 33.88 | 33.32 | 33.50 | 34.11 | 32.46 | 32.79 | 32.52 | 34.93 | 34.37 | 34.63 | 34.58 | 34.90 | 34.27 |
| Si | 3.0596 | 2.9976 | 3.0850 | 2.9580 | 3.0108 | 3.0380 | 3.0710 | 3.0098 | 3.0015 | 3.0223 | 3.0807 | 2.9940 | 3.0200 | 3.0020 | 3.0267 | 2.9738 | 2.9793 | 3.0528 | 3.1633 | 3.0242 |
| Ti | 0.0294 | 0.0365 | 0.0095 | 0.0176 | 0.0086 | 0.0149 | 0.0036 | 0.0139 | 0.0107 | 0.0082 | 0.0053 | 0.0123 | 0.0018 | 0.0000 | 0.0348 | 0.1212 | 0.0996 | 0.1243 | 0.0367 | 0.1396 |
| Al | 0.9388 | 1.2735 | 0.8629 | 1.5664 | 1.6437 | 1.7293 | 0.9620 | 1.5740 | 1.1711 | 1.2845 | 0.8414 | 0.1922 | 0.3584 | 0.2341 | 1.7559 | 1.2833 | 1.6103 | 0.7560 | 0.3643 | 0.8043 |
| Cr | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Fe ³⁺ | 0.9829 | 0.7038 | 1.0709 | 0.4499 | 0.3434 | 0.2354 | 0.9880 | 0.4101 | 0.8208 | 0.6951 | 1.0674 | 1.8036 | 1.6271 | 1.7646 | 0.2009 | 0.6425 | 0.3266 | 1.0205 | 1.2977 | 0.9769 |
| Fe ²⁺ | 0.0000 | 0.1162 | 0.0000 | 0.2244 | 0.0518 | 0.0145 | 0.0000 | 0.0751 | 0.1213 | 0.1126 | 0.0000 | 0.1269 | 0.1038 | 0.1117 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Mn | 0.0357 | 0.0292 | 0.0314 | 0.0244 | 0.0516 | 0.0367 | 0.0441 | 0.0359 | 0.0413 | 0.0403 | 0.0298 | 0.0104 | 0.0027 | 0.0104 | 0.0302 | 0.0339 | 0.0342 | 0.0199 | 0.0257 | 0.0335 |
| Mg | 0.0279 | 0.0163 | 0.0224 | 0.0128 | 0.0737 | 0.0725 | 0.0576 | 0.0644 | 0.0188 | 0.0163 | 0.0804 | 0.0207 | 0.0301 | 0.0280 | 0.0757 | 0.0494 | 0.0783 | 0.0595 | 0.0952 | 0.0671 |
| Ca | 2.8758 | 2.8043 | 2.8565 | 2.7629 | 2.8036 | 2.8234 | 2.8240 | 2.8008 | 2.8066 | 2.8003 | 2.8547 | 2.8358 | 2.8415 | 2.8479 | 2.8561 | 2.8379 | 2.8243 | 2.9017 | 2.9863 | 2.9001 |
| Ura | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| And | 50.16 | 35.59 | 55.20 | 22.31 | 17.28 | 11.98 | 50.66 | 20.67 | 41.21 | 35.11 | 54.00 | 90.37 | 81.95 | 88.29 | 10.24 | 32.99 | 16.68 | 51.35 | 62.65 | 48.84 |
| Pyr | 0.95 | 0.55 | 0.77 | 0.42 | 2.47 | 2.46 | 1.97 | 2.16 | 0.63 | 0.55 | 2.71 | 0.69 | 1.01 | 0.93 | 2.57 | 1.69 | 2.67 | 2.00 | 3.07 | 2.24 |
| Spe | 1.22 | 0.98 | 1.08 | 0.81 | 1.73 | 1.25 | 1.51 | 1.21 | 1.38 | 1.36 | 1.00 | 0.35 | 0.09 | 0.35 | 1.03 | 1.16 | 1.16 | 0.67 | 0.83 | 1.11 |
| Gro | 47.68 | 58.96 | 42.96 | 69.04 | 76.78 | 83.82 | 45.87 | 73.43 | 52.72 | 59.19 | 42.28 | 4.36 | 13.46 | 6.70 | 86.16 | 64.15 | 79.49 | 45.99 | 33.46 | 47.81 |
| Alm | 0.00 | 3.92 | 0.00 | 7.42 | 1.74 | 0.49 | 0.00 | 2.52 | 4.06 | 3.79 | 0.00 | 4.24 | 3.49 | 3.73 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Other | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

注：Ura—钙铀榴石；And—钙钎榴石；Pyr—镁钎榴石；Spe—锰钎榴石；Gro—钙钎榴石；Alm—铁钎榴石。

石易在弱氧化-弱还原条件的中酸性反应溶液中晶出,而钙铁榴石在 $\text{pH}=4.5\sim 11.0$ 范围内的溶液、氧化-弱氧化环境中形成(张金民等, 1988; 梁祥济, 1994)。热液流体中化学成分对石榴子石种属形成至关重要,这在众多矿床实例及模拟实验都有论述,通常在这些模拟实验中均把 Si、Fe、Al 作为岩浆热液来源, Ca 则来源于碳酸盐岩(赵斌等, 1983; 梁祥济, 1994)。而在知不拉砂卡岩矿床中,产于凝灰岩附近的石榴子石环带由核部向边缘石榴子石成分由钙铁榴石过渡到钙铝榴石,靠近大理岩部位的石榴子石由中心向外变化为钙铁榴石,且越靠近上部凝灰岩部位铁质含量明显增高,铝质含量则呈反比例逐渐降低;而大理岩中石榴子石则呈相反趋势演化,其它成分如 Si、Ca、Mg、Ti、Mn 变化不明显。这反映了流体在交代过程中,物质消耗及物化环境变化对矿物成分影响至关重要,尤其在在不同岩性界面上更为突出(图 6)。受甲玛-卡军果推覆构造的控制,巨厚的叶巴组凝灰岩与层间的透镜状灰岩因受力不均,形成了层间破碎空间,当岩浆热液流体进入层间破碎带,

一方面,流体向上扩散交代上部高铁含量的凝灰岩,从凝灰岩中淋滤出部分铁质进入流体中,导致上部与凝灰岩接触带形成总体铁含量较高的钙铁石榴子石,并在微观上形成内部高铁含量、外环高铝含量的单个石榴子石环带特征;另一方面,流体向下扩散交代下部高钙含量灰岩,从灰岩中淋滤部分钙质进入流体中,导致下部与灰岩的接触带形成高钙含量的硅灰石砂卡岩;而在上部钙铁石榴子石与下部硅灰石之间,由于流体中铁、钙含量的消耗,铝含量占据优势,形成了总体上铝含量较高的钙铝石榴子石,并在微观上形成内部高铝含量、外环高铁含量的石榴子石环带特征(图 7)。

4.2 石榴子石分带的成因意义

过去对知不拉铜多金属矿床成因存在较大争议,如姚鹏等(2002)通过对知不拉矿区铜多金属矿体的产出状态和叶巴组火山岩系的研究,认为知不拉铜多金属矿是火山喷流型矿床;李光明等(2005)通过测定知不拉辉钼矿 Re-Os 年龄为 16.90 ± 0.64 Ma,认为其为岩浆热液接触交代型矿床。知不拉铜

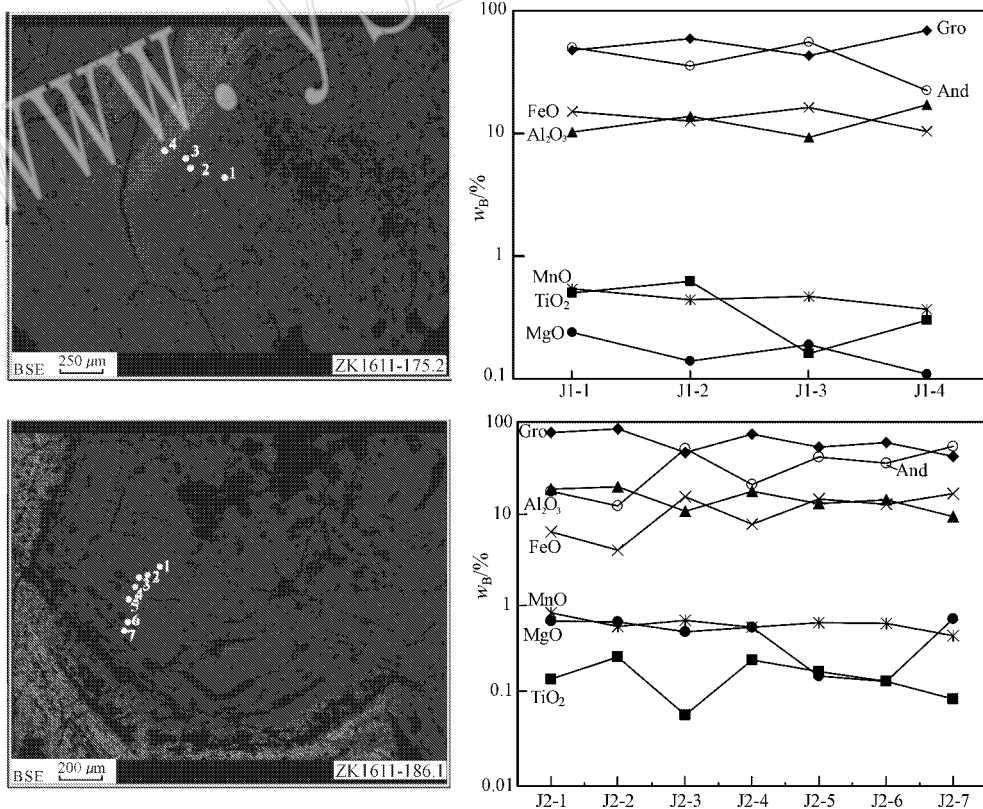


图 6 知不拉矿区石榴子石环带成分变化(核部-边缘)

Fig. 6 Composition variation of garnet zoning in the Zhibula ore district (from the core to the edge)

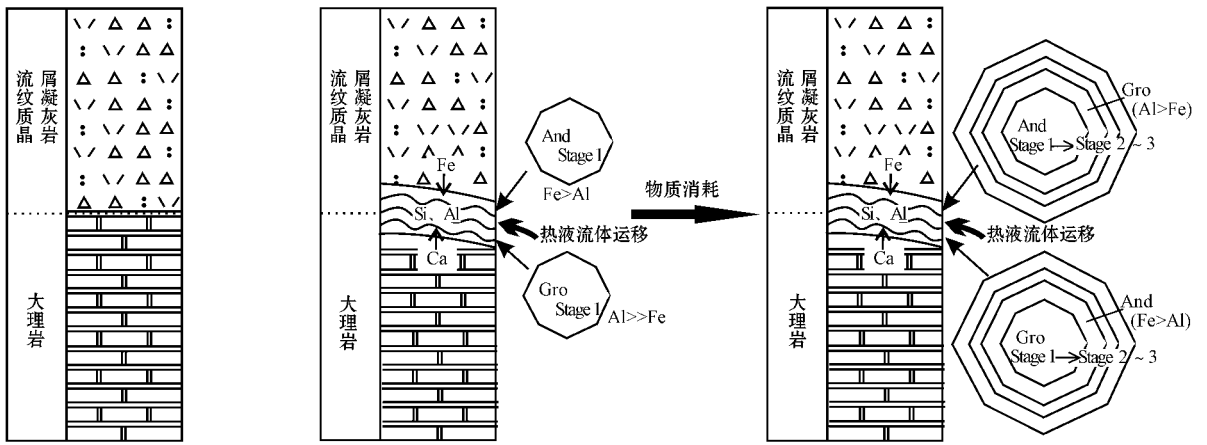


图 7 知不拉矿区石榴子石环带形成过程(理想模式)

Fig. 7 Formation of garnet zoning in the Zhibula ore district (ideal model)

And—钙铁榴石; Gro—钙铝榴石
And—grossular; Gro—andradite

多金属矽卡岩矿体主要产于叶巴组大理岩与顶部凝灰岩接触带的矽卡岩中,矽卡岩矿物在垂向上具有明显的分带性,即上部以石榴子石矽卡岩为主,底部多为硅灰石矽卡岩,且石榴子石同样具有上钙铁榴石、下部以钙铝榴石为主的分带性,反映了流体在“层间”流动过程中,不仅与底部碳酸盐岩发生交代,同时由于上覆岩层的圈闭,流体通过渗透、扩散与上部火山质碎屑岩也发生交代作用。这明显不同于典型火山喷流沉积矿床,后者往往是热液直接作用于底部,形成透辉岩与透闪岩(或双透岩)、重晶石岩或石膏层等典型喷流沉积岩(徐克勤等,1996)而上部围岩通常具有弱的矿化与蚀变,与围岩接触关系截然(颜文等,1993)。这与知不拉顶部有从矽卡岩过渡到矽卡岩化凝灰岩地质事实不符。此外,矿区石榴子石颜色多样,环带结构发育,其成分特征与典型的钙矽卡岩相似,后期常见绿泥石、绿帘石退蚀变矿物交代早期石榴石现象,且矿化以铜为主,其次为钼、铅、锌。这些都与典型热液交代型矽卡岩矿床一致。

4.3 找矿意义

世界范围内斑岩型矿床外围往往分布着与之相关的矽卡岩型矿体(Sillitoe, 2010),如犹他州 Tintic 和 Bingham 斑岩型 Cu-Mo-Au 矿外围分布一系列矽卡岩型 Cu-Au 矿;西南太平洋岛弧背景的印尼 Ertsberg-Grasberg 斑岩 Cu-Au 矿外围的矽卡岩 Cu-Au;我国长江中下游地区分布着 Cu、Fe 矽卡岩矿床等。在这些矽卡岩矿床中,矽卡岩矿物往往在空间上具有明显的分带性,并对应着不同类型的矿化。以往这

种分带性都集中在岩体与碳酸盐岩围岩接触带附近,而像知不拉这样的远离岩体的远端矽卡岩矿床中矽卡岩化及矿化在碎屑岩中也有分布,并构成主要赋矿围岩。类似这种现象在甲玛同样存在,即顶部林布宗组砂、板岩中发育矽卡岩,且同样具有垂向上的分带(唐晓倩等,2012),这些都是岩浆热液沿不同岩性层面上下交代的结果。因此在冈底斯东段(尤其是驱龙与甲玛之间),该区域上构造-岩浆活动复杂,大面积分布的叶巴组火山碎屑岩和碳酸盐岩透镜体为形成类似矽卡岩矿床提供有利条件,驱龙外围进一步寻找知不拉式的远端矽卡岩型铜多金属矿前景广阔。

5 结论

知不拉铜多金属矿床是冈底斯成矿带东段一个典型的矽卡岩矿床,石榴子石作为主要的矽卡岩矿物,其颗粒间裂隙是金属矿物赋存部位。通过详细的钻孔编录和石榴子石矿物学研究,得出以下结论:

- (1) 产于顶板凝灰岩中的石榴子石颜色深、粒度细、晶形差;底板大理岩附近石榴子石颜色浅、粒度较粗且晶形好。成分上有从上至下由钙铁榴石向钙铝榴石过渡的趋势。
- (2) 划分出两种不同类型石榴子石环带,不同产状的石榴子石其化学成分变化趋势不同:凝灰岩中石榴子石环带中心颜色深,向外逐渐变浅,相应地化学成分也由纯钙铁榴石过渡到钙铝榴石;而位于底

板大理岩中石榴子石环带由核部向外颜色变深,化学组成由钙铝向钙铁榴石变化。这是流体沿不同性质围岩交代的结果,也是宏观上具有上部钙铁榴石、下部钙铝榴石垂向分带性的微观体现。

(3) 石榴子石的空间分带性有别于火山喷流沉积矿床,其矿物特征、化学成分指示知不拉铜多金属矿为热液接触交代型矽卡岩矿床。

(4) 知不拉作为一个典型的远端矽卡岩矿床,矽卡岩化和矿化现象不仅在碳酸盐岩中存在,同样广泛分布在火山碎屑岩中,这将为驱龙外围寻找该类富铜矿体指明了方向。

致谢 感谢西藏巨龙铜业有限公司工作人员在本人野外工作过程中提供的支持;同时感谢中国地质大学(北京)郝金华老师在实验过程中提供的帮助。

References

- Chu M F, Chung S L, Song B, *et al.* 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of Southern Tibet[J]. *Geology*, 34: 745~748.
- Dong Yanhui, Xu Jifeng, Zeng Qinggao, *et al.* 2006. Is there a Neotethys' subduction record earlier than arcvolcanic rocks in the Sangri Group[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 661~668(in Chinese with English abstract).
- Geng Quanru, Pan Guitang, Jin Zhenmin, *et al.* 2005. Geochemistry and genesis of the yeba volcanic rocks in the Gangdise magmatic arc, Tibet[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(6): 747~760(in Chinese with English abstract).
- Guo Jibao. 1987. An experimental study of the formation conditions of grossular-andradite series garnets in Shizhuyuan skarn[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 7(4): 372~380(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Huang Wei, *et al.* 2001. The Gangdese porphyry copper belt: the second significant porphyry belt in Tibetan plateau[J]. *China Geology*, 28: 27~29(in Chinese with English abstract).
- Jamtveit B, Wogelius R A and Fraser D G. 1993. Zonation patterns of skarn garnets—records of hydrothermal system evolution [J]. *Geology*, 21(2): 113~116.
- Li Guangming, Rui Zongyao, Wang Gaoming, *et al.* 2005. Molybdenite Re-Os dating of Jiama and Zhibula polymetallic copperdeposits in Gangdese metallogenic belt of Tibet and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 24(5): 481~489(in Chinese with English abstract).
- Liang Xiangji. 1994. Garnets of grossular-andradite series: their characteristics and metasomatic mechanism[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 13(4): 342~352(in Chinese with English abstract).
- Meinert L D. 1992. Skarnsand skarn deposits[J]. *Geoscience Canada*, 19(4): 145~162.
- Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Gao Yongfeng, *et al.* 2003. Re-Os dating for molybdenite from Qulong porphyry copper deposit in Gangdese metallogenic belt, Xizang and its metallogenic significance [J]. *Geological Review*, 49(6): 660~666(in Chinese with English abstract).
- Rui Zongyao and Huang Chongke. 1984. Porphyry Copper (molybdenum) Deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Rui Zongyao, Li Guangming, Zhang Lisheng, *et al.* 2004. The response of porphyry copper deposits to important geological events in Xizang[J]. *Earth ScienceFrontiers*, 11(1): 145~152(in Chinese with English abstract).
- She Hongquan, Feng Chengyou, Zhang Dequan, *et al.* 2005. Characteristics and metallogenic potential of skarn copper-lead-zinc polymetallic deposits in central eastern Gangdese[J]. *Mineral Deposits*, 24(5): 508~520(in Chinese with English abstract).
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Economic Geology*, 105: 3~41.
- Tang Juxing, Wang Denghong, Wang Xiongwu, *et al.* 2010. Geological features and metallogenic model of the Jiama copper-polymetallic deposit in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(4): 495~506(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Deng Shilin, Zheng Wenbao, *et al.* 2011. An exploration model for Jiama copper polymetallic deposit in Maizhokunggar County, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 179~196(in Chinese with English abstract).
- Tang Xiaoqian, Wang Guozhi, Qin Zhipeng, *et al.* 2012. Mineralogical characteristics and genesis of garnet in the Jiama (Gyama) copper-polymetallic deposit of Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 633~640(in Chinese with English abstract).
- Wang Liangliang, Mo Xuanxue, Li Bing, *et al.* 2006. Geochronology and geochemistry of the ore-bearing porphyry in Qulong Cu (Mo) ore deposit, Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 1 001~1 008(in Chinese with English abstract).
- Wang Liqiang, Luo Maocheng, Yuan Zhijie, *et al.* 2012. Sulfur, Lead, Carbon and Oxygen isotope composition and source of ore-forming materials of the Bangpu Pb-Zn ore deposit in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 435~443(in Chinese with English abstract).
- Wang Liqiang, Tang Juxing, Chen Yuchuan, *et al.* 2011. LA-ICP-MS

- zircon U-Pb dating of ore-bearing monzogranite porphyry in Bangpu molybdenum(copper) deposit, Tibet and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 349~360(in Chinese with English abstract).
- Xiao Bo, Qin Kezhang, Li Guangming, *et al.* 2011. Distributions and characters of Zhibula-Langmujiaguo skarn Cu deposits environing the Qulong porphyry Cu-Mo deposit and their implications for ore-search towards the deep subsurface[J]. *Geology and Exploration*, 47(1): 43~53(in Chinese with English abstract).
- Xu Keqin, Wang Henian, Zhou Jianping, *et al.* 1996. A discussion on the exhalative sedimentary massive sulfide deposit of south China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2(3): 241~254(in Chinese with English abstract).
- Yan Wen and Li Chaoyang. 1993. Ore-formation of hydrothermal exhalative sedimentation and geological thinking[J]. *Advance in Earth Sciences*, 8(2): 40~45(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhiming, Hou Zengqian, Song Yucai, *et al.* 2008. Qulong super-large porphyry Cu deposit in Tibet: Geology, alteration and mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 27(3): 279~318(in Chinese with English abstract).
- Yao Peng, Wang Quanhai and Li Jingao. 2002. Ore and ore resource prospects of the Jiama-Qulong ore concentration area, Tibet [J]. *Geology in China*, 29(2): 197~202(in Chinese with English abstract).
- Ying Lijuan, Wang Denghong, Tang Juxing, *et al.* 2010. Re-Os dating of molybdenite occurring in different rocks from the Jiama copper deposit in Tibet and its metallogenic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(8): 1 165~1 174(in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhongcheng, Liu Demin, Zeren Zaxi, *et al.* 2009. Geochemistry and tectonic setting of lavas in the Yeba Formation in the eastern part of the Gangdise Belt[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(3): 435~445 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Bin, Barton M D. 1987. Compositional characteristics of garnets and pyroxenes in contact-metamorphic skarn deposits and their relationship to metallization [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 7(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Bin, Li Tongjin and Li Zhaoping. 1983. Experimental study of physicochemical conditions of the formation of skarns [J]. *Geochimica*, 9(3): 256~267 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongtao, Chen Renyi and Han Fanglin. 2004. Reunderstanding of metallogenic geological conditions of porphyry copper deposits in China[J]. *Mineral Deposits*, 23(2): 150~163(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinmin and Cao Zhengmin. 1988. Characters and growth conditions of garnets from Fushan iron deposit, Hebei province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Resaerch*, 3(2): 68~79(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shugen, Yang Huifang, Ding Cungen, *et al.* 2009. Research on relationship between mineralization and garnet in skarn in central part of NingZhen area [J]. *Mineral Petrol.*, 29(2): 44~53 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Wenbao, Chen Yuchuan, Tang Juxing, *et al.* 2011. Discovery and geological significance of tubular ore body in the Jiama field, Tibet [J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 195~206(in Chinese with English abstract).
- Zheng Youye, Xue Yingxi, Cheng Lijun, *et al.* 2004. Finding, characteristics and significances of Qulong superlarge porphyry copper (molybdenum) deposit, Tibet [J]. *Earth Science*, 29(1): 103~108(in Chinese with English abstract).
- Zhong Kanghui, Li Lei, Zhou Huiwen, *et al.* 2012. Features of Jiama (Gyama)-Kajunguo thrust-gliding nappe tectonic system in Tibet [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 411~423(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 董彦辉, 许继峰, 曾庆高, 等. 2006. 存在比桑日群弧火山岩更早的新特提斯俯冲记录么[J]. *岩石学报*, 22(3): 661~668.
- 耿全如, 潘桂棠, 金振民, 等. 2005. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩地球化学及成因[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(6): 747~760.
- 郭吉保. 1987. 石榴子石形成条件的实验研究[J]. *矿物学报*, 7(4): 372~380.
- 侯增谦, 曲晓明, 黄卫, 等. 2001. 冈底斯斑岩铜矿成矿带有望成为西藏第二条玉龙铜矿带[J]. *中国地质*, 28: 27~29.
- 李光明, 芮宗瑶, 王高明, 等. 2005. 西藏冈底斯成矿带甲玛和知不拉铜多金属矿床的 Re-Os 同位素年龄及其意义[J]. *矿床地质*, 24(5): 481~489.
- 梁祥济. 1994. 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*, 13(4): 342~52.
- 孟祥金, 侯增谦, 高永丰, 等. 2003. 西藏冈底斯成矿带驱龙铜矿 Re-Os 年龄及成矿学意义[J]. *地质评论*, 49(6): 660~666.
- 芮宗瑶, 黄崇柯. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床[M]. 北京: 地质出版社.
- 芮宗瑶, 李光明, 张立生, 等. 2004. 西藏斑岩铜矿对重大地质事件的响应[J]. *地学前缘*, 11(1): 145~152.
- 余宏全, 丰成友, 张德全, 等. 2005. 西藏冈底斯中东段砂卡岩铜-铅-锌多金属矿床特征及成矿远景分析[J]. *矿床地质*, 24(5): 508~520.
- 唐菊兴, 邓世林, 郑文宝, 等. 2011. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床勘查模型[J]. *矿床地质*, 30(2): 179~196.

- 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 等. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及其矿床模型[J]. 地球学报, 31(4): 495~506.
- 唐晓倩, 王国芝, 秦志鹏, 等. 2012. 西藏甲玛铜多金属矿石榴子石矿物学特征及成因意义[J]. 地球学报, 33(4): 633~640.
- 王立强, 罗茂澄, 袁志洁, 等. 2012. 西藏邦铺铅锌矿床 S、Pb、C、O 同位素组成及成矿物质来源研究[J]. 地球学报, 33(4): 435~443.
- 王立强, 唐菊兴, 陈毓川, 等. 2011. 西藏邦铺钼(铜)矿床含矿二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 矿床地质, 30(2): 349~360.
- 王亮亮, 莫宣学, 李冰, 等. 2006. 西藏驱龙斑岩铜矿含斑岩的年代学与地球化学[J]. 岩石学报, 22(4): 1001~1008.
- 肖波, 秦克章, 李光明, 等. 2011. 冈底斯驱龙斑岩铜-钼矿区外围矽卡岩型铜矿的分布、特征及深部找矿意义[J]. 地质与勘探, 47(1): 43~53.
- 徐克勤, 王鹤年, 周建平, 等. 1996. 论华南喷流-沉积块状硫化物矿床[J]. 高校地质学报, 2(3): 241~254.
- 颜文, 李朝阳. 1993. 热水喷流沉积成矿与地学思维[J]. 地球科学进展, 8(2): 40~45.
- 杨志明, 侯增谦, 宋玉财, 等. 2008. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床: 地质、蚀变与成矿[J]. 矿床地质, 27(3): 279~318.
- 姚鹏, 王全海, 李金高. 2002. 西藏甲玛-驱龙矿集区成矿远景[J]. 中国地质, 29(2): 197~202.
- 应立娟, 王登红, 唐菊兴, 等. 2010. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿不同矿石中辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其成矿意义[J]. 地质学报, 84(8): 1165~1174.
- 曾忠诚, 刘德民, 泽仁扎西, 等. 2009. 西藏冈底斯东段叶巴组火山岩地球化学特征及其地质构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 39(3): 435~445.
- 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[J]. 岩石矿物学杂志, 7(1): 1~8.
- 赵斌, 李统锦, 李昭平. 1983. 矽卡岩形成的物理化学条件实验研究[J]. 地球化学, 9(3): 256~267.
- 张洪涛, 陈仁义, 韩芳林. 2004. 重新认识中国斑岩铜矿的成矿地质条件[J]. 矿床地质, 23(2): 150~163.
- 张金民, 曹正民. 1988. 河北省涉县符山铁矿石石榴子石特征及其形成条件[J]. 地质找矿论丛, 3(2): 68~79.
- 张木根, 杨惠钊, 丁存根, 等. 2009. 宁镇中段矽卡岩的石榴子石与成矿关系研究[J]. 矿物岩石, 29(2): 44~53.
- 郑文宝, 陈毓川, 唐菊兴, 等. 2011. 西藏墨竹工卡县甲玛矿区筒状矿体的发现及其地质意义[J]. 矿床地质, 30(2): 195~206.
- 郑有业, 薛迎喜, 程力军, 等. 2004. 西藏驱龙超大型斑岩铜(钼)矿床: 发现、特征及意义[J]. 地球科学, 29(1): 103~108.
- 钟康惠, 李磊, 周慧文, 等. 2012. 西藏甲玛-卡军果推-滑覆构造系特征[J]. 地球学报, 33(4): 411~423.