

新疆西天山查岗诺尔铁矿床环带石榴子石和绿帘石的发现及意义*

冯浩轩^{1,2,3}, 申萍^{1,2,3**}, 李昌昊^{1,2}, 武阳^{1,2,3}, 石福品⁴, 李文广^{1,2}

(1 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 3 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029; 4 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第三地质大队, 新疆 库尔勒 841000)

摘要 查岗诺尔铁矿是新疆西天山阿吾拉勒铁矿带内的重要大型铁矿床之一。矿体赋存在下石炭统大哈拉军山组安山质火山岩中,与普遍发育的石榴子石化、阳起石化和绿帘石化时空关系密切。石榴子石和绿帘石分属不同热液成矿阶段,它们均发育丰富的环带结构,具体表现为明显地颜色、干涉色、背散射图像及成分(FeO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MnO 、 TiO_2)等差异性。石榴子石具有2个世代、3个类型。早世代石榴子石(Grt1和Grt2)产于块状石榴子石-磁铁矿蚀变岩,呈褐黄色,粒度较细,发育核-边结构,呈非均质性,显示异常干涉色,其核部(Grt1-c)均匀相对富钙铝榴石($\text{Gro}_{31-53}\text{And}_{41-43}\text{Spr}_{4-8}$),而边部(Grt1-r)发育振荡成分环带,总体相对富钙铁榴石($\text{Gro}_{18-35}\text{And}_{60-77}\text{Spr}_{4-6}$);Grt2核部(Grt2-c)呈均质性,为钙铁榴石($\text{And}_{99-100}\text{Spr}_{0-1}$),边部显示异常干涉色,发育振荡成分环带,为钙铝铁榴石($\text{Gro}_{34-54}\text{And}_{38-61}\text{Spr}_{6-9}$)。晚世代的石榴子石(Grt3)以细脉状或角砾胶结物形式分布,呈红褐色,自形粗粒结构,显非均质性,发育振荡成分环带,端员组分总体以钙铁榴石为主,次为钙铝榴石($\text{Gro}_{27-43}\text{And}_{50-68}\text{Spr}_{3-8}$)。石榴子石结构和元素含量变化表明,早期石榴子石形成于弱氧化-氧化、中性-碱性流体体系,其中向边部生长过程,由于新注入流体以及周期性压力汇聚和释放,体系的氧逸度、pH值呈振荡变化;晚期石榴子石形成于弱氧化、弱碱性、动荡的开放流体环境。绿帘石发育3个世代(Ep1、Ep2和Ep3)。Ep1发育核-边结构,核部(Ep1-c)均匀无环带, X_{Fe} 值($X_{\text{Fe}}=\text{Fe}^{3+}/(\text{Al}+\text{Fe}^{3+})$,原子比值)为0.19~0.21, $w(\text{MnO})$ 为0.05%~0.18%, $w(\text{TiO}_2)$ 为0.10%~0.12%,生长边(Ep1-r)多发育振荡环带, X_{Fe} 值为0.26~0.29, $w(\text{MnO})$ 为0.01%~0.14%, $w(\text{TiO}_2)$ 为0.19%~0.26%。Ep2沿Ep1-r边缘生长,不均匀且经历了溶解-再沉淀过程, X_{Fe} 值为0.15~0.20, $w(\text{MnO})$ 为0.42%~1.19%, $w(\text{TiO}_2)$ 为0.02%~0.07%。Ep3呈柱状或不规则粒状交代Ep2、贴近或穿切Ep1-r生长,较均匀、无环带结构, X_{Fe} 值为0.28~0.37, $w(\text{MnO})$ 为0.12%~0.77%, $w(\text{TiO}_2)$ 为0.02%~0.10%。绿帘石成分变化表明,从Ep1-c到Ep1-r,到Ep2,再到Ep3,流体体系氧逸度经历了先增加,后降低,再升高的变化过程。同时,流体成分也在变化,先从相对贫Ti和Mn向相对富Ti贫Mn演化,而后又变为富Mn贫Ti。因此,在热液磁铁矿矿化阶段,查岗诺尔铁矿的成矿热液的物理-化学环境是不断变化的。研究显示,石榴子石和绿帘石结构和成分研究可以刻画热液成矿系统的流体演化历史。

关键字 地质学;石榴子石;绿帘石;成分环带;物理化学条件;查岗诺尔铁矿;西天山

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

Discovery of zoned garnet and epidote in Chagangnuoer iron deposit, western Tianshan Mountains, Xinjiang, and its significance

FENG HaoXuan^{1,2,3}, SHEN Ping^{1,2,3}, LI ChangHao^{1,2}, WU Yang^{1,2,3}, SHI FuPin⁴ and LI WenGuang^{1,2}

(1 Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 College of Earth and Planetary Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

* 本文得到国家重点研发计划项目(编号:2018YFC0604004)资助

第一作者简介 冯浩轩,男,1990年生,博士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:987302504@qq.com

** 通讯作者 申萍,女,1964年生,研究员,主要从事金属矿床成矿作用研究。Email:pshen@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期 2020-03-17;改回日期 2020-05-11。秦思婷编辑。

3 Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4 No. 3 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract

The Chagangnuoer iron deposit is one of the large-size iron deposits within the Awulale metallogenic belt, West Tianshan, Xinjiang. It is hosted in the andesitic volcanic rocks of the Lower Carboniferous Dahalajunshan Formation. Spatially and temporally, iron orebodies are associated with the well-developed hydrothermal garnet, actinolite, and epidote. The garnet and epidote are the main minerals in different hydrothermal stages. Both of them have zoned texture, shown by the color, grain-size, optical characteristics, BSE image, and chemical composition. There are two generations of garnet, consisting of three different types. The early generation garnet (Grt1 and Grt2) commonly occurs in massive garnet-magnetite rocks, and is characterized by brown-yellow color, relatively smaller size, and obvious core to rim zonation. Grt1 shows anomalous optical characteristics under crossed nicols; the core (Grt1-c) is relatively rich in the grossular ($\text{Gro}_{51-53}\text{And}_{41-43}\text{Spr}_{4-8}$), while the rim (Grt1-r) with oscillatory zoning is richer in andradite ($\text{Gro}_{18-35}\text{And}_{60-77}\text{Spr}_{4-6}$). Grt2 is characterized by inverse core to rim zonation. The core (Grt2-c) is isotropic andradite ($\text{And}_{99-100}\text{Spr}_{0-1}$). However, the rim (Grt2-r) shows anomalous optical characteristics under crossed nicols, and is of anisotropic andradite-grossular series ($\text{Gro}_{34-54}\text{And}_{38-61}\text{Spr}_{6-9}$) with oscillatory chemical zonation. The late generation garnet, named Grt3, generally occurs as veinlets or cements of the magnetite breccia. The Grt3 is different from the Grt1 and Grt2 by its reddish brown color, larger grain size, and oscillatory zoning. The end members of garnet are mainly andradite, followed by grossular ($\text{Gro}_{27-43}\text{And}_{50-68}\text{Spr}_{3-8}$). The garnet texture and chemical composition variations indicate that, during the early garnet deposition, the fluids were weakly oxidized to oxidized, and intermediate to alkaline. During the process of the rims formation, the oxygen fugacity and pH values changed regularly, due to the addition of Fe-richer fluids or related periodic fluctuations of pressure build-up and release. In the late garnet stage, there were weakly oxidized and mildly alkaline fluids in a relatively open system. Three generations of epidote were recognized, named Ep1, Ep2, and Ep3. Ep1 is typically composed of a core ($X_{\text{Fe}}=0.19\sim0.21$) and an overgrowth rim ($X_{\text{Fe}}=0.26\sim0.29$), which mostly shows oscillatory zoning and has highest TiO_2 content (0.19%~0.26%). Ep1 has the lowest MnO content (0.01%~0.18%). Ep2 ($X_{\text{Fe}}=0.15\sim0.20$) is heterogeneous and has undergone dissolution-reprecipitation process. It is characterized by lowest TiO_2 content (0.02%~0.07%) but highest MnO content (0.42%~1.19%). Ep3 ($X_{\text{Fe}}=0.28\sim0.37$) is homogeneous and has replaced the Ep2. Its MnO content is 0.12%~0.77%, and TiO_2 content is 0.02%~0.10%. The chemical variation from Ep1-c to Ep3 indicates that, in the late stage of the iron mineralization, the oxygen fugacity of fluid increased firstly, then reduced, and finally increased again. At the same time, the fluid composition also changed, from poorness in Ti and Mn to richness in Ti, and then richness in Mn. Therefore, during the hydrothermal iron mineralization stages in the Chagangnuoer deposit, the physical-chemical condition evolution was complex. This research indicates that, in addition to the garnet, the epidote can be a potential tracer for fluid evolution in the hydrothermal ore deposit based on detailed texture and chemical study.

Key words: geology, garnet, epidote, oscillatory zoning, physical-chemical condition, Chagangnuoer iron deposit, western Tianshan

石榴子石是矽卡岩矿床中最常研究的矿物,积累了大量研究成果。矽卡岩矿床中的石榴子石通常发育成分环带,它们是流体演化和流体成分变化的重要标志 (Jamtveit et al., 1993; Clechenko et al., 2003; Ciobanu et al., 2004; Gaspar et al., 2008; Boc-

chio et al., 2010; 高雪等, 2014; Zhai et al., 2014; 王伟等, 2016; Park et al., 2017; 边晓龙等, 2019)。根据主量元素组成,石榴子石具有6种端员组分,端员组分种类的不同往往与其形成环境密切相关,如钙铁榴石通常形成于相对氧化、碱性的环境,而钙铝榴石则

利于在相对还原、酸性的环境中形成(赵斌等,1983;艾永富等,1981;Meinert et al.,2005)。石榴子石的微量元素组成可以有效地反映某些成岩成矿信息,稀土元素(REE)和O同位素等则可以有效示踪流体来源和约束流体性质(Page et al.,2010;Ferry et al.,2014;王伟等,2016;Park et al.,2017;Ryan-Davis et al.,2019)。

绿帘石是一种含水Ca-Al硅酸盐矿物,广泛分布在矽卡岩矿床、俯冲带变质岩、地热系统和岩浆岩中(Bird et al.,2004;Schmid et al.,2004;Meinert et al.,2005;Guo et al.,2014)。绿帘石可以显著富集各类微量元素,特别是二价大离子亲石元素(Sr和Pb),稀土元素(REE)和过渡族金属元素(唐盼等,2019)。因此,绿帘石能够记录相应地质过程中的大量地质信息。热液绿帘石通常发育明显的成分环带结构(Caruso et al.,1988;Bird et al.,2004;Guo et al.,

2014),它们是热液流体通量、温度、氧化-还原条件、CO₂浓度、pH值条件以及流体中Al³⁺和Fe³⁺复合物物种等变化的产物(Bird et al.,2004;Guo et al.,2014)。因此,环带绿帘石对精细刻画热液流体物理-化学条件演化、流体成分变化以及流体来源等具有重要意义(唐盼等,2019)。

新疆西天山造山带是中亚成矿域南段内重要铜-钼-金-铁成矿省,发育斑岩型铜-钼矿、浅成低温热液型金矿和火山热液型铁矿(图1;Qin et al.,2002;Zhai et al.,2009;Zhang D et al.,2010;Pirajno et al.,2011;Pirajno,2012;Zhang X et al.,2015),其中,海相火山岩型铁矿床主要集中在阿吾拉勒铁矿带,发育查岗诺尔、智博、敦德、备战、古伦沟、松湖和雾岭等一系列大-中型矿床(图1;冯金星等,2010;董连慧等,2011;Zhang X et al.,2015),总资源量约为11.7亿吨(Zhang et al.,2014)。这些铁矿床规模大,

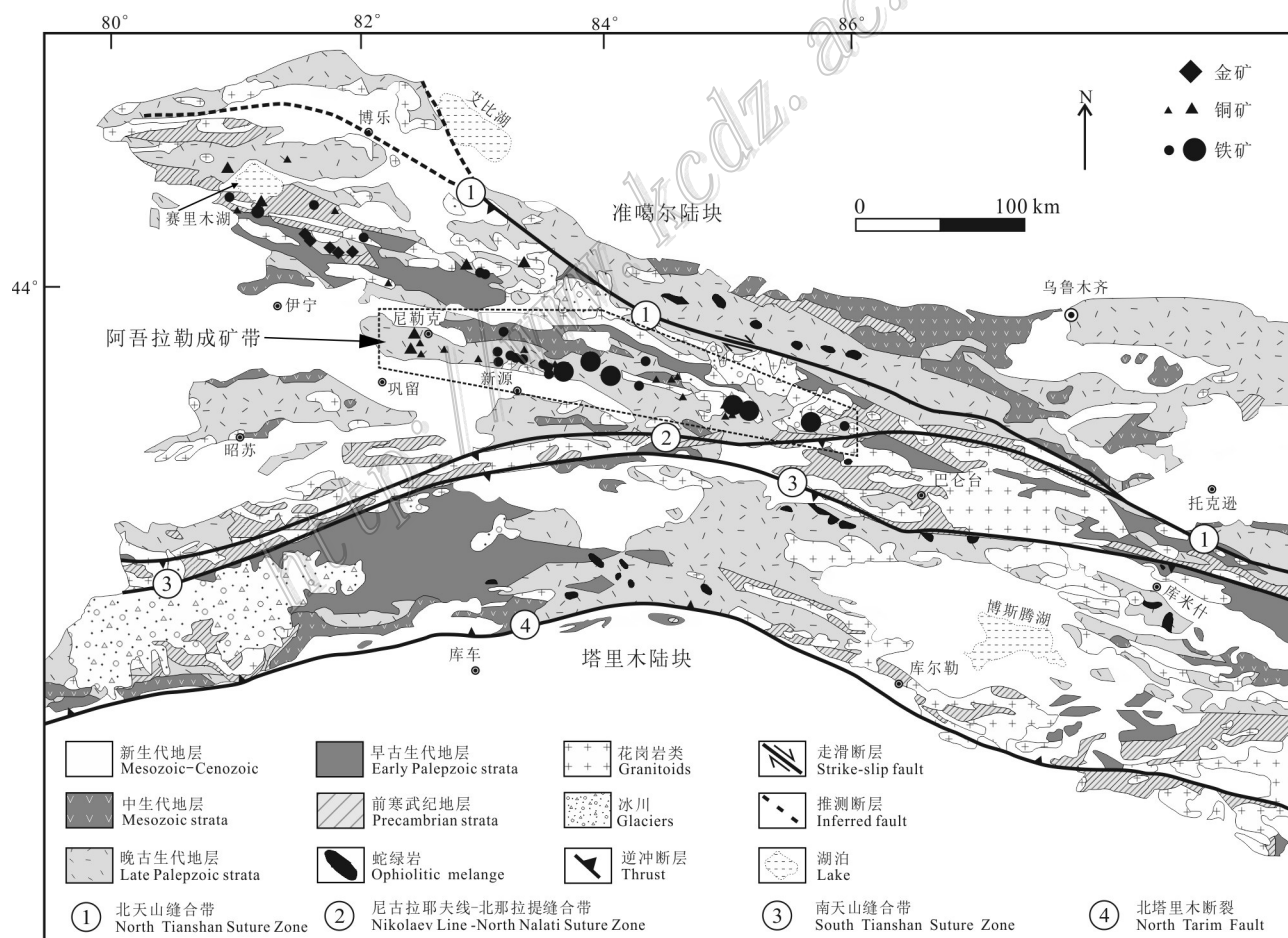


图1 西天山造山带大地构造及矿产分布图(改自 Gao et al.,2009;Zhang et al.,2015)

Fig. 1 Tectonic map of Western Tianshan orogen belt, showing the distribution of iron, gold, and copper deposits, and the location of the Awulale iron metallogenic belt(modified after Gao et al.,2009;Zhang et al.,2015)

富铁矿石($w(\text{TFeO}) > 50\%$)占比高(约30%)(Zhang et al., 2014),其中备战和智博铁矿富矿资源超过50%(董连慧等, 2011)。空间上,这些铁矿床常产于火山活动的中心或其附近,海相中基性-中酸性火山岩、次火山岩或火山碎屑岩为直接赋矿围岩(图2;张喜, 2013)。火山岩型铁矿床的围岩蚀变常发育矽卡岩化,包括钠长石化、透辉石化、阳起石化、绿帘石化、绿泥石化和硅化等(洪为等, 2012d; 张作衡等, 2012; 张喜, 2013),但与传统的矽卡岩型铁矿床不同,它们缺乏相应的侵入岩(张作衡等, 2012; 张招崇等, 2014)。

查岗诺尔大型铁矿床位于阿吾拉勒铁矿带东段,资源量超过2亿吨(图1;洪为等, 2012d)。矿区发育矽卡岩化蚀变,广泛分布的石榴子石化、阳起石化和绿帘石化与铁矿体具有密切的时空关系(图3;洪为等, 2012d; Zhang X et al., 2015)。石榴子石和绿帘石是不同热液磁铁矿化阶段的常见矿物,前人除对查岗诺尔铁矿床的火山岩-侵入岩地球化学和年代学、矿床地质矿床地球化学和成矿年代学已经做较多研究外,也开展了一些矿物学工作(汪帮耀等, 2011; 洪为, 2012a; 2012b; 2012c; 2012d; 张喜, 2013; Zhang X et al., 2015)。然而,前人的矿物学研

究对石榴子石和绿帘石矿物内部结构并未涉及,尤其是绿帘石。因此,它们中保存的热液成矿阶段成矿流体的物理-化学条件信息并未得到精细的解析。本次研究中,笔者基于岩相学、矿相学和背散射图像综合观察,发现石榴子石和绿帘石发育丰富内部环带结构,并以此识别出2个世代、3类石榴子石,3个世代绿帘石。在此基础上,笔者开展了详细地电子探针分析,厘定石榴子石和绿帘石矿物结构差异性在成分上的表征。最后,笔者根据石榴子石、绿帘石的环带结构和化学成分,对早、晚成矿阶段流体演化进行了精细刻画。

1 区域地质

西天山造山带北邻准噶尔盆地,南接塔里木盆地,自北而南可以分为北天山弧增生体、伊犁地块、中天山复合弧地体和塔里木地块北缘4个不同构造单元(图1; Gao et al., 1998; 2009; 2015; 高俊等, 2009)。早古生代以来,西天山经历了复杂的构造演化,其形成与准噶尔、伊犁、中天山、塔里木等多个微陆块多阶段拼贴、增生,以及相伴随的贴尔斯克依

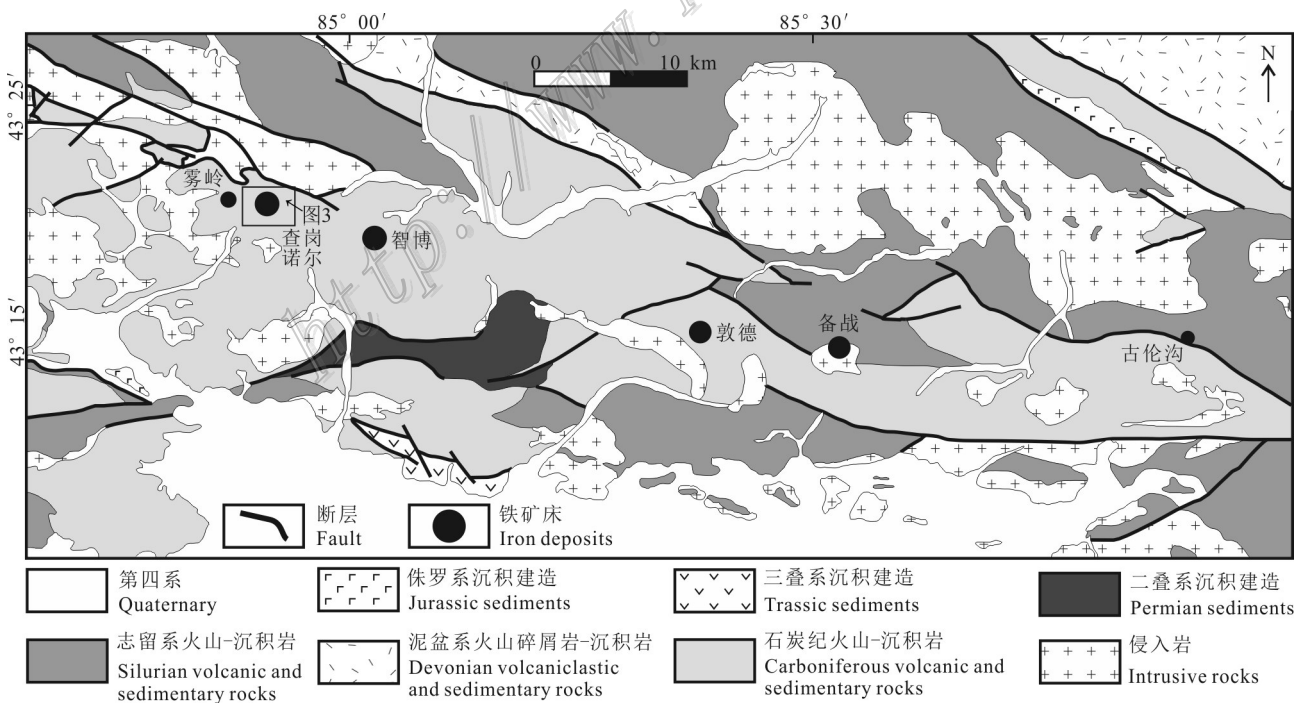


图2 阿吾拉勒铁铜成矿带东段地质简图(据冯金星等, 2010; 张喜, 2013 修改)

Fig. 2 Geological map of the eastern segment of the Awulale iron-copper metallogenic belt(modified after Feng et al., 2010; Zhang, 2013)

洋、北天山洋和南天山洋的关闭等过程密切相关(Windley et al., 2007; Gao et al., 2009; Charvet et al., 2011)。

阿吾拉勒成矿带位于西天山造山带中部,处于北天山弧增生体、伊犁地块和中天山复合弧地体的三角地带,其北部为中天山北缘断裂,南部为那拉提北缘断裂(图1)。阿吾拉勒铁矿带出露地层齐全,除了主要由中-新元古代片岩、大理岩、混合岩和碎屑岩组成的前寒武基底之外,还有志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系和第四系(图2)。志留系和泥盆系沿成矿带南、北边缘出露,主要为火山沉积岩。石炭系分布最广,以火山岩和火山碎屑岩为主,是大洋板片俯冲的产物(图2; Wang et al., 2007),其中,下石炭统以大哈拉军山组和伊什基里克组出露最为广泛,同时大哈拉军山组还是成矿带内重要铁矿床的赋存层位(冯金星等, 2010; 汪邦耀等, 2011; 张喜, 2013)。二叠系、三叠系和侏罗系仅在局部地区出露,岩性主要为砾岩、砂岩、泥岩和页岩(图2; 冯金星等, 2010)。阿吾拉勒成矿带内岩浆活动强烈,发育晚奥陶世—二叠纪侵入岩,岩石类型多样,包括碱性岩、中-酸性岩(张喜, 2013)。构造上,阿吾拉勒铁矿带发育多条东西向、向北陡倾的高角度断裂和1个向斜构造(图2)。此外,遥感影像显示,该成矿带还存在破火山口,与铁成矿作用具有密切时空联系(董连慧等, 2011; Zhang X et al., 2015)。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

查岗诺尔铁矿区出露地层主要为下石炭统大哈拉军山组和上石炭统伊什基里克组。大哈拉军山组分布于矿区F2断裂以南,查岗诺尔河两侧地区(图3a),岩性主要为玄武岩、玄武安山岩、安山岩、粗面岩和玄武质(安山质)凝灰岩等,局部发育大理岩夹层状凝灰岩和火山角砾岩(张喜, 2013)。伊什基里克组覆盖于大哈拉军山组之上,出露在F2断裂以北和F10断裂以东地区(图3a、b),岩性包括安山岩、安山质晶屑凝灰岩、安山质凝灰角砾岩、含角砾晶屑岩屑凝灰岩、火山角砾岩和火山集块岩组成(汪邦耀等, 2011; 张喜, 2013)。

由于查岗诺尔矿床处于大型古火山机构西缘,矿区环状断裂和火山穹隆构造均发育(图3a)。断裂按产状可分为2组:① NW向至EW向断裂,包括

F1、F2、F3等,倾角 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$;② 环破火山口呈弧形展布的断裂,如F4、F8、F10等,倾角 $40^{\circ}\sim 75^{\circ}$ (汪邦耀等, 2011; 张喜, 2013)。F8断裂和F10断裂明显与I号矿体及周缘围岩蚀变的分布密切相关。F8断裂走向NNE向-NE向延伸,倾角约 60° ,F10断裂呈弧形展布,断层面倾角约 70° (张喜, 2013)。火山穹隆分布在F2和F10断裂之间,总体呈NNE向-NE向-EW向延伸(张喜, 2013)。

矿区岩浆岩发育晚石炭世闪长玢岩、石英闪长玢岩、花岗岩、正长花岗岩、和花岗闪长岩以及晚石炭世—早二叠世放射状岩脉和岩墙。浅成闪长玢岩和石英闪长玢岩呈小岩株侵入到赋矿地层中,主要分布在II号矿体附近,中深成正长花岗岩、花岗岩和花岗闪长岩规模较大,呈岩株状侵入到石炭纪地层中,主要分布在F3断裂东北部(张喜, 2013; Sun et al., 2015)。Sun等(2015)通过LA-ICP-MS锆石U-Pb定年方法测得II号矿体附近2件花岗岩年龄为 $(249.9\pm 1.3)\text{Ma}$ 和 $(249\pm 1.9)\text{Ma}$,F1断裂东北侧花岗闪长岩年龄为 $(305\pm 1.3)\text{Ma}$ 。张喜(2013)在矿区东部新发现一钾长花岗岩岩株,锆石U-Pb年龄为 $(319.4\pm 2.1)\text{Ma}$ 。岩脉和岩墙以辉绿玢岩、闪长玢岩脉为主,通常密集成群出现,但规模较小,宽约 $0.5\sim 2\text{m}$,长十米至百余米。空间上,它们呈放射状垂直火山环状构造分布,产状陡倾,倾角不低于 70° (张喜, 2013)。

2.2 矿体地质与围岩蚀变

查岗诺尔铁矿矿体赋存在大哈拉军山第三亚组第一段灰绿色安山岩和安山质火山碎屑岩中,矿体形态比较规则,呈层状、似层状和透镜状,主要由I号和II号矿体组成,其中I号矿体占总资源量的95%以上(图3a、b)。I号矿体分布在查岗诺尔河以东,顶、底板为安山质凝灰岩和透镜状大理岩,矿体总体呈NE向-SW向环状分布在F8和F10断裂之间,倾向总体向东,倾角为 $105^{\circ}\sim 153^{\circ}$,倾角较缓,一般为 $15^{\circ}\sim 36^{\circ}$,局部呈水平产出(汪邦耀等, 2011; 洪为等, 2012d; 张喜, 2013; 图)。I号矿体厚度最小为 2.48m ,最大为 226.9m ,平均厚度为 87.26m ,矿石最高品位64.2%,最低品位20.2%,平均品位为35.6%(洪为等, 2012d; 张喜, 2013)。II号矿体分布在查汗乌苏河以西,呈带状或椭圆状位于F2断裂南侧,倾向北西,倾角 $30^{\circ}\sim 43^{\circ}$,平均厚度 45m ,平均品位32.66%(汪邦耀等, 2011)。

铁矿体中矿石矿物主要为磁铁矿,伴生少量赤

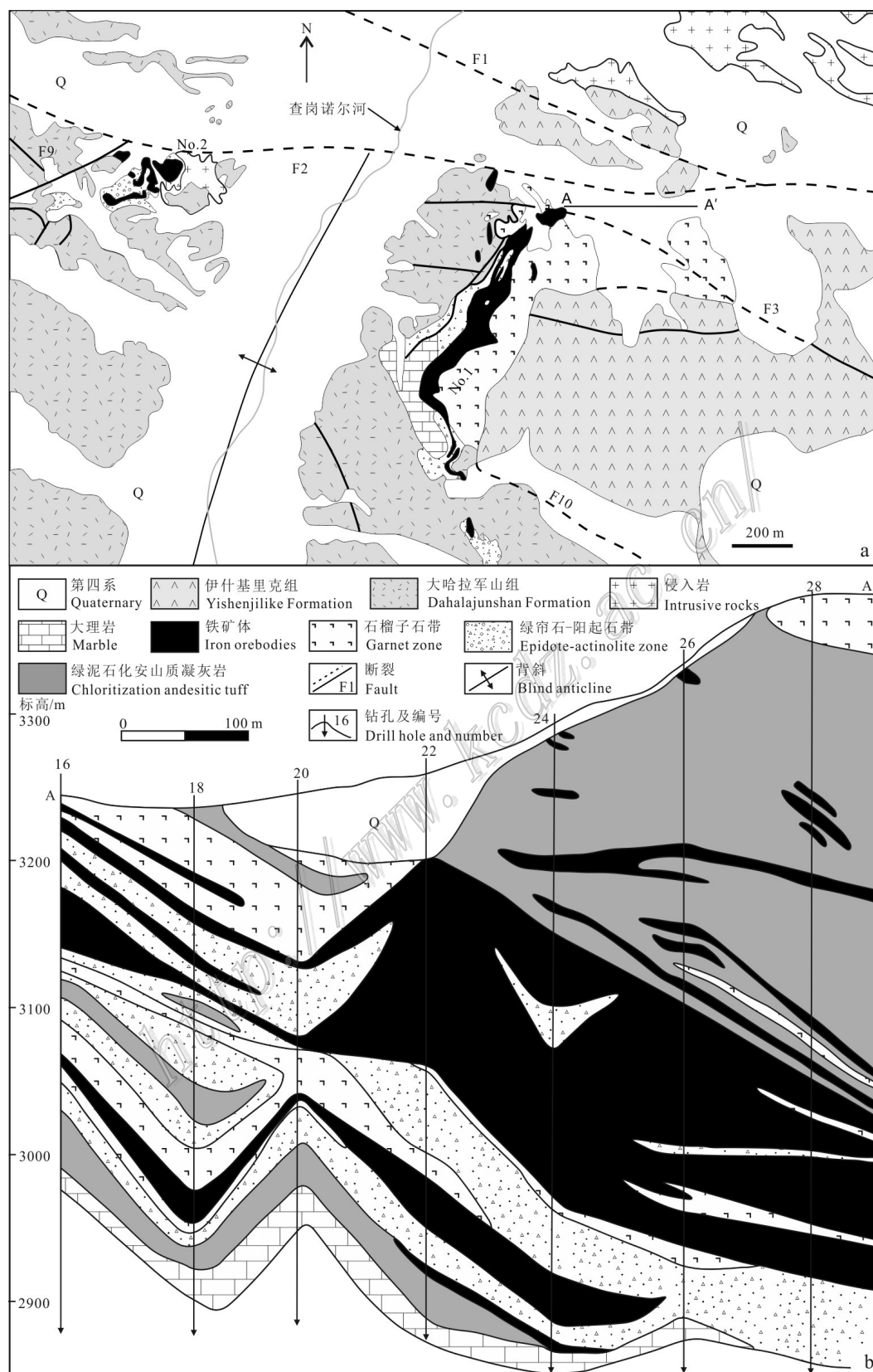


图3 查岗诺尔铁矿矿区地质图(a)和A-A'勘探线剖面图(b)(改自冯金星等,2010;洪为等,2012a)

Fig. 3 Geological map of the Chagangnuoer iron deposit(a) and the A-A' cross section(b)(modified after Feng et al.,2010; Hong et al.,2012a)

铁矿、镜铁矿、黄铁矿和黄铜矿,脉石矿物发育石榴子石、阳起石、钾长石、钠长石、透辉石、透闪石、绿帘石和方解石(张喜,2013)。铁矿石类型多样,根据磁铁矿产状可分为致密块状矿石、浸染状矿石、角砾状矿石、斑点状矿石、条带状矿石和流动状矿石等,其中以浸染状矿石为主(张喜,2013)。在角砾状矿石中,磁铁矿不仅可以呈角砾,而且也可以作为胶结物。当角砾为磁铁矿时,胶结物为石榴子石和阳起石,而当胶结物为磁铁矿时,角砾则为大哈拉军山组火山岩,以安山质凝灰岩为主(洪为等,2012d;张喜,2013)。

赋矿地层大哈拉军山组火山岩蚀变强烈,发育钠长石化、阳起石化、石榴子石化、透辉石化、透闪石化、钾长石化、绿帘石化、绿泥石化、方柱石化和碳酸盐化(张喜,2013)。其中,石榴子石化发育最为普遍,与铁矿体的关系也最为密切。在I号矿体所在范围内,围岩蚀变呈NE-SW向带状分布,长1800余米,宽500~600 m,根据不同矿物组合,自西向东,地在表出露的围岩蚀变可大致分出石榴子石蚀变带、阳起石-绿帘石蚀变带、磁铁矿矿体、阳起石-绿帘石蚀变带和大理岩蚀变带(图3a;洪为等,2012a)。垂向上,自上而下依次为绿泥石化安山质凝灰岩带、石榴子石蚀变带、磁铁矿矿体、阳起石-绿帘石蚀变带、石榴子石蚀变带、磁铁矿体、阳起石-绿帘石蚀变带、绿泥石化安山质凝灰岩带及大理岩带(图3b)。II号矿体周围发育面状蚀变带,以阳起石化和绿帘石化最为发育。东北端稍具环带特征,以磁铁矿为中心向外,大体依次为阳起石-磁铁矿带或石榴子石-磁铁矿带、阳起石-绿帘石带和透辉石-石榴子石蚀变带(图3a;张喜,2013)。垂向上,自上而下依次为铁矿体或石榴子石蚀变带、绿帘石化-阳起石蚀变带、闪长玢岩及安山质凝灰岩(洪为等,2012)。

整个铁矿化与蚀变作用可划分为岩浆成矿期和热液成矿期(洪为等,2012a)。岩浆成矿期可细分为磁铁矿-透辉石阶段和绿帘石-阳起石阶段,热液成矿期分为磁铁矿-石榴子石-阳起石阶段、青磐岩化阶段、硫化物阶段和石英-碳酸盐阶段(洪为等,2012a)。磁铁矿化发生在岩浆期磁铁矿-透辉石阶段和热液期磁铁矿-石榴子石-阳起石阶段和青磐岩化阶段,但以磁铁矿-石榴子石-阳起石阶段为主要矿化时期(洪为等,2012a)。在磁铁矿-透辉石阶段,细粒磁铁矿多呈块状、角砾状和浸染状,其中块状磁铁矿矿石有的与安山质凝灰岩之间呈截然接触;角砾状矿石中角砾为安山质岩屑,总体上分布凌乱,胶结

物为磁铁矿(洪为等,2012a)。在磁铁矿-石榴子石-阳起石阶段,磁铁矿分布在角砾状矿石、“豹纹”状矿石、斑杂状矿石、条带状矿石及浸染状矿石之中,其颜色较深且结晶较好(洪为等,2012a)。此外,该阶段石榴子石发育,且可分为2个不同世代(洪为等,2012a;张喜,2013),早世代石榴子石粒较细(<2 mm),呈土黄色/褐黄色,多分布在矿体下部,与磁铁矿共存,形成块状磁铁矿-石榴子石岩(图4a~f),而晚世代石榴子石粒粗,晶形较大,可达2 mm~2 cm,呈褐红色,多分布在矿体上部(洪为等,2012a),以胶结物或沿裂隙充填形成石榴子石细脉的形式产出(图4g~i;张喜,2013)。青磐岩化阶段,出现绿帘石+绿泥石矿物组合,形成时间同时或晚于磁铁矿,常发育浸染状矿石(洪为等,2012a)。

3 样品采集与分析方法

本次研究从查岗诺尔铁矿的I号和II号矿体不同部位共采集30余件含石榴子石、绿帘石的岩矿石样品。将所有样品手标本磨制成光薄片,通过详细的显微镜下观察鉴定,并用扫描电镜-背散射图像分析,笔者最终选择了3件代表性的石榴子石样品和1件绿帘石,进行了细致地矿物学成分研究。其中,2件石榴子石样品(18CG-6和18CG-21)来自磁铁矿-石榴子石岩,几乎全由早世代褐黄色石榴子石和磁铁矿组成,其中磁铁矿主要分布在石榴子石粒间,并发育环带结构,少量磁铁矿可包裹石榴子石(图4a~f);另1件石榴子石样品(18CG-29)含晚世代褐红色石榴子石,其与少量自形阳起石呈胶结物形式分布(图4g~i)。绿帘石样品(18CG-12)发育绿色自形-半自形柱状、粒状绿帘石集合体,可见其后期又被方解石-黄铁矿穿切、包裹。

电子探针分析和背散射图像观察在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室完成,仪器型号为JXA8100,工作电压为15 kV,电流20 nA,束斑5 μm 。标准样品采用天然样品和人工合成氧化物,分析精度优于2.0%。

4 分析结果

4.1 多世代石榴子石结构及成分特征

4.1.1 石榴子石类型及其内部结构特征

基于光学显微镜和背散射下的矿相学观察,发

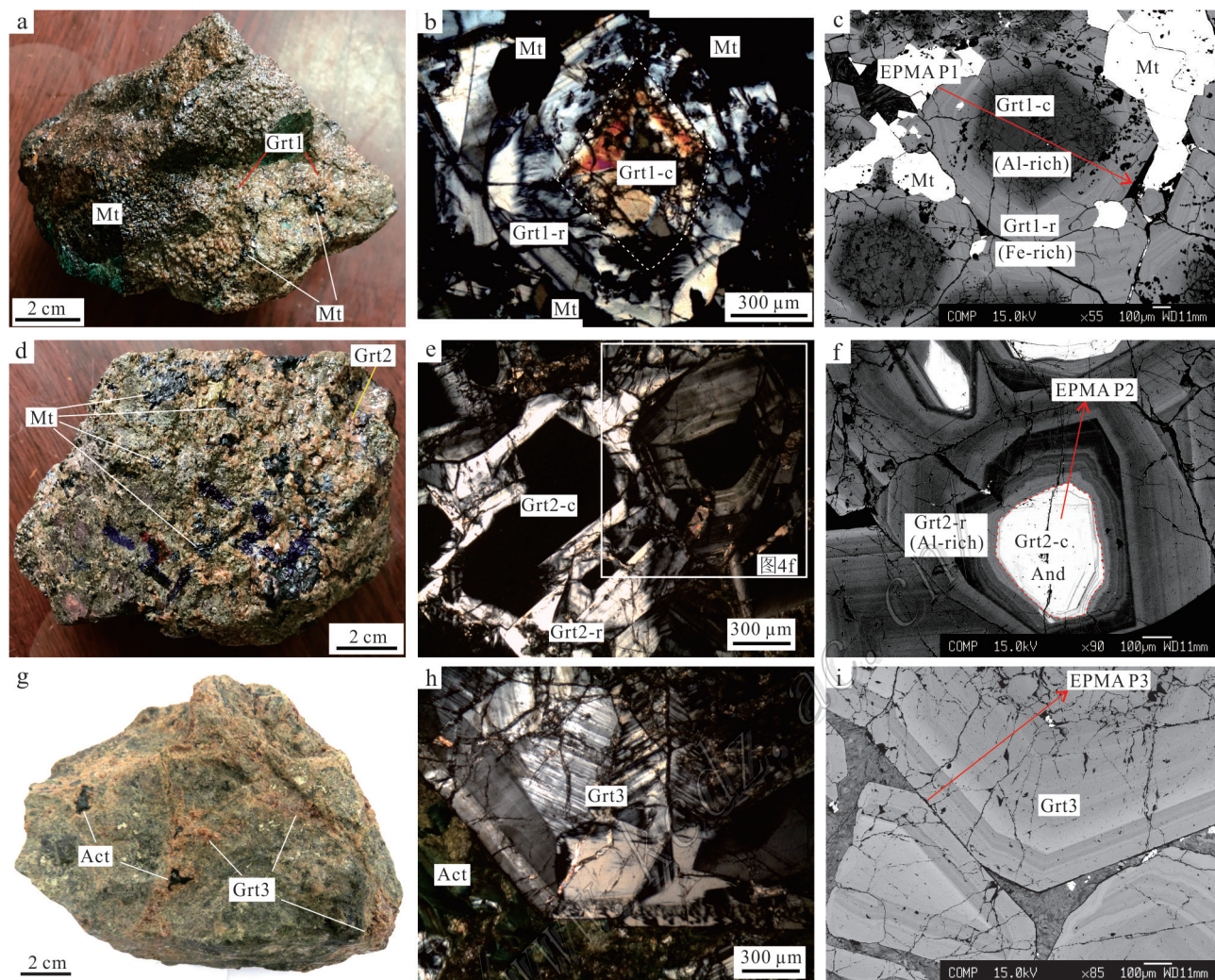


图4 查岗诺尔铁矿不同世代石榴子石手标本和显微照片

Grt1 石榴子石的手标本(a)和正交偏光(b)、背散射照片(c);Grt1 石榴子石的手标本(d)和正交偏光(e)、背散射照片(f);

Grt1 石榴子石的手标本(g)和正交偏光(h)、背散射照片(i)

Act—阳起石;Mt—磁铁矿

Fig. 4 Hand specimens and microphotographs of the three types of typical garnets in the Chagangnuoer iron deposit

Hand specimen(a), microphotographs under crossed nicols(b) and BSE image(c) of the Grt1 garnet; Hand specimen(d),

microphotographs under crossed nicols(e) and BSE image(f) of the Grt2 garnet; Hand specimen(g),

microphotographs under crossed nicols(h) and BSE image(i) of the Grt1 garnet

Act—Actinolite; Mt—Magnetite

现查岗诺尔铁矿区的早期石榴子石结构复杂,发育2类不同的石榴子石(Grt1和Grt2);晚期石榴子石类型单一,普遍发育振荡环带(Grt3)。因此,查岗诺尔铁矿区共发育3类石榴子石(图4)。它们的内部结构特征如下:

Grt1:发育核-边结构,核部(Grt1-c)干涉色一级黄白色-橙色,不发育环带,生长边(Grt1-r)干涉色一级灰白色,发育振荡环带(图4b)。背散射图像中,

Grt1-c呈灰黑色,Grt1-r由浅灰色-浅灰白色韵律环带组成(图4c)。Grt1-r含细小磁铁矿包裹体,边缘与磁铁矿直接接触(图4c),表明其与磁铁矿同时沉淀。

Grt2:发育核-边结构,但与Grt1不同,其核部(Grt2-c)为均质体,正交镜下显全消光,生长边(Grt2-r)干涉色为一级灰色-白色,发育振荡环带(图4e)。背散射图像显示,Grt2-c呈明亮白色,Grt2-r较为多样,呈浅灰色-灰黑色(图4f)。而且,从Grt2-c向

外, Grt-2r 的背散射亮度先逐渐降低, 当降至最暗以后, 其亮度便突然增强, 并呈现浅灰色-灰色交替的韵律性变化(图 4f)。

Grt3: 发育振荡环带结构, 干涉色为一级灰色-黄白色, 背散射图像呈浅灰色-灰白色(图 4h, i)。空间上与阳起石共生, 而且, 其内部裂隙发育, 可充填少量绿帘石。

4.1.2 石榴子石的主量元素

在本次研究中, 选取了 3 件代表性石榴子石进行了细致的电子探针成分分析, 早期 Grt1、Grt2 石榴子石, 晚期 Grt3 石榴子石样品各 1 件, 各类石榴子石电子探针成分分析结果见表 1。不同石榴子石的元素组成主要为 SiO_2 、 CaO 、 FeO^T 和 Al_2O_3 , 少量 MnO 、 MgO 和 TiO_2 。总体上, SiO_2 和 CaO 含量变化并不大, 而 FeO^T 和 Al_2O_3 含量变化较大。 $w(\text{SiO}_2)$ 为 35.75%~38.90%, $w(\text{CaO})$ 为 32.71%~35.02%, 两者整体呈正相关关系; $w(\text{FeO}^T)$ 为 12.51%~28.50%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 0~12.80%, 两者具有明显负相关关系; $w(\text{MnO})$ 为 0.32%~1.12%, $w(\text{MgO})$ 为 0~0.22%, $w(\text{TiO}_2)$ 为 0~2.52%。根据主量元素含量计算, 石榴子石属于钙铝榴石-钙铁榴石固溶体系列, 其中以钙铁榴石(And; 38%~100%)和钙铝榴石(Gro; 0~56%)为主, 少量锰铝榴石(Spe)、镁铝榴石(Pyr)和铁铝榴石(Alm)(图 5)。

Grt1: Grt1-c 的 $w(\text{FeO}^T)$ 为 13.60%~14.18%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 11.82%~12.46%; 钙铁榴石端员组分占 51%~53%(Gro₅₁₋₅₃And₄₁₋₄₃Spr₄₋₈)。Grt1-r 较 Grt1-c 富铁而贫铝, $w(\text{FeO}^T)$ 为 14.76%~28.50%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 0~12.80%, 钙铁榴石端员组分占 60%~77%(Gro₁₈₋₃₅And₆₀₋₇₇Spr₄₋₆)。从成分剖面中可以看出(图 6a), Grt1 从核部到边部, 石榴子石成分变化明显, 呈现钙铁榴石端员组分先增加而后在边部显示较弱的振荡变化趋势。

Grt2: Grt2-c 具有最高的 $w(\text{FeO}^T)$ (28.32%~28.49%), 而最低的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (0~0.12%), 属于钙铁榴石(And₉₉₋₁₀₀Spr₀₋₁)。Grt2-r 的成分变化最大, $w(\text{FeO}^T)$ 为 18.55%~22.93%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 4.84%~8.12%, 钙铁榴石端员组分占 60%~77%(Gro₀₋₅₆And₃₈₋₁₀₀Spr₀₋₉)。此外, Grt2-c 的部分环带具有最高的 $w(\text{TiO}_2)$ (1.00%~2.52%)。如图 6b 所示, 从核部到生长边, 石榴子石成分从钙铁榴石开始, 钙铁榴石端员组分先逐渐减少、钙铝榴石端员组分逐渐增加, 接着钙铁榴石端员组分突然增加、钙铝榴石组

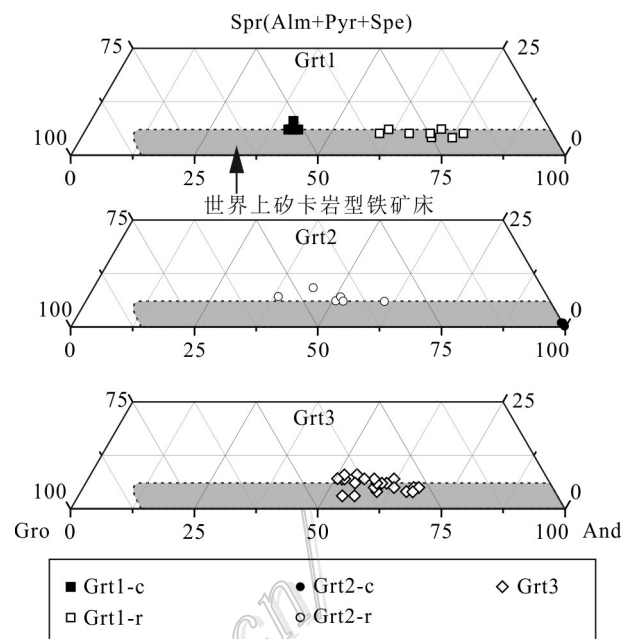


图 5 查岗诺尔铁矿石石榴子石端员组分三角图解
And—钙铁榴石; Alm—铁铝榴石; Gro—钙铝榴石; Pyr—镁铝榴石;
Spe—锰铝榴石

Fig. 5 The end member composition diagram of garnet in the Chagangnuoer iron deposit

And—Andradite; Alm—Almandine; Gro—Grossularite;
Pyr—Pyrope; Spe—Spessartine

分突然减少, 然后钙铁榴石和钙铝榴石端员组分呈现振荡变化。

Grt3: $w(\text{FeO}^T)$ 为 16.62%~21.27%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 6.63%~10.19%; 钙铁榴石端员组分占 50%~68%(Gro₂₇₋₄₃And₅₀₋₆₈Spr₃₋₈)。总体看来, 从核部到边部, Grt3 的钙铁榴石和钙铝榴石端员组分呈现振荡变化(图 6c)。

4.2 多世代绿帘石结构及成分特征

在查岗诺尔铁矿床, 绿帘石形成于热液成矿期青盘岩化阶段(洪为等, 2012a), 存在 3 个不同世代, 从早到晚依次为 Ep1、Ep2 和 Ep3, 不同世代绿帘石具有明显不同的干涉色、背散射图像和成分特征(表 2, 图 7a~g, 图 8)。

Ep1: 呈粗粒自形-半自形晶, 正交偏光显微镜和背散射图像下表面干净, 多发育核-边结构。Ep1 核部(Ep1-c)具有较为均匀的一级紫红或姜黄异常干涉色、灰黑色背散射图像, 且不发育振荡化带结构, 而 Ep1 边部(Ep1-r)的干涉色较为鲜艳的二-三级干涉色, 背散射图像也较亮, 呈浅灰色-灰白色(图 7a、

表1 查岗诺尔铁石榴子石电子探针分析结果
Table 1 Representative EPMA results of garnet in the Chagangnuoer iron deposit

组分	18CG-6-Grt-1	18CG-6-Grt-2	18CG-6-Grt-3	18CG-6-Grt-4	18CG-6-Grt-5	18CG-6-Grt-6	18CG-6-Grt-7	18CG-6-Grt-8	18CG-6-Grt-9	18CG-6-Grt-10	18CG-6-Grt-11	18CG-6-Grt-12	18CG-6-Grt-13	18CG-21-Grt1
	Grt1-r	Grt1-r	Grt1-r	Grt1-r	Grt1-r	Grt1-e	Grt1-e	Grt1-e	Grt1-e	Grt1-e	Grt1-r	Grt1-r	Grt1-r	Grt2-e
	<i>w(B)/%</i>													
SiO ₂	37.75	37.45	37.00	37.14	37.78	38.66	38.80	38.37	38.52	38.69	37.96	37.51	37.78	35.92
TiO ₂	0.09	0.19	0.66	0.78	0.44	0.43	0.38	0.55	0.22	0.40	0.34	0.16	0.08	0
Al ₂ O ₃	6.03	6.00	4.84	4.50	8.12	12.46	11.82	12.14	12.14	12.07	7.77	5.63	7.14	0.12
Cr ₂ O ₃	0.05	0.01	0	0.02	0.03	0	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0	0.03	0.04
FeO	22.08	21.63	22.27	22.93	18.55	13.60	13.99	13.60	14.18	13.90	19.22	22.15	20.68	28.49
MnO	0.57	0.66	0.42	0.50	0.69	1.00	0.91	0.89	0.93	0.90	0.65	0.52	0.69	0.48
MgO	0.07	0.05	0.08	0.10	0.08	0.13	0.08	0.15	0.15	0.14	0.10	0.07	0.04	0.02
CaO	33.85	33.44	33.70	33.56	33.78	34.12	33.86	34.00	34.07	34.26	33.57	33.28	33.51	32.75
Na ₂ O	0	0.01	0.04	0	0	0.03	0	0	0	0	0.06	0	0.02	0
K ₂ O	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0.03
总和	100.49	99.44	99.01	99.53	99.48	100.43	99.86	99.71	100.25	100.39	99.70	99.32	99.97	97.85
基于12个氧原子为标准计算														
Fe ₂ O ₃	23.25	22.56	23.72	23.89	19.03	13.43	12.99	13.26	14.27	13.69	19.62	22.71	21.33	31.20
FeO	1.16	1.33	0.92	1.43	1.42	1.52	2.30	1.67	1.34	1.57	1.56	1.71	1.48	0.41
Si	3.01	3.02	3.01	3.01	3.02	3.01	3.05	3.02	3.01	3.02	3.03	3.03	3.02	3.01
Ti	0.01	0.01	0.04	0.05	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0	0
Al	0.57	0.57	0.46	0.43	0.76	1.14	1.09	1.12	1.12	1.11	0.73	0.54	0.67	0.01
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ³⁺	1.39	1.36	1.45	1.45	1.14	0.78	0.77	0.78	0.84	0.80	1.17	1.38	1.28	1.96
Fe ²⁺	0.08	0.09	0.06	0.10	0.09	0.10	0.15	0.11	0.09	0.10	0.10	0.12	0.10	0.03
Mn	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.04	0.05	0.03
Mg	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0	0
Ca	2.90	2.89	2.94	2.91	2.89	2.85	2.85	2.86	2.85	2.87	2.87	2.88	2.87	2.94
Na ⁺	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0
K ⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
And	0.71	0.71	0.76	0.77	0.60	0.41	0.41	0.41	0.43	0.42	0.62	0.72	0.66	0.99
Alm	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.01
Spe	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
Pyr	0	0	0	0	0	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0
Gro	0.25	0.25	0.21	0.18	0.35	0.53	0.51	0.52	0.51	0.52	0.33	0.22	0.29	-0.02

续表 1-1
Continued Table 1-1

组分	18CG-21-Grt2	18CG-21-Grt-1	18CG-21-Grt-2	18CG-21-Grt-3	18CG-21-Grt-4	18CG-21-Grt-5	18CG-21-Grt-6	18CG-21-Grt-7	18CG-21-Grt-1	18CG-21-Grt-2	18CG-21-Grt-3	18CG-21-Grt-4	18CG-21-Grt-5	18CG-21-Grt-6
	Grt2-c	Grt2-c	Grt2-r	Grt2-r	Grt2-r	Grt2-r	Grt2-r	Grt2-r	Grt2-r	Grt2-r	Grt2-r	Grt2-r	Grt2-r	Grt2-r
	wt(B)/%													
SiO ₂	36.18	36.10	37.46	37.61	37.52	37.56	38.90	38.57	38.12	37.90	37.62	38.00	37.98	37.80
TiO ₂	0	0.05	1.00	2.03	2.52	1.10	0.23	0.13	0.06	0.04	0	0.28	0.33	0.04
Al ₂ O ₃	0	0	7.69	9.24	10.38	9.53	12.79	10.19	9.28	8.33	6.93	10.07	9.98	8.54
Cr ₂ O ₃	0.02	0	0.01	0.03	0.05	0.05	0.03	0	0.07	0.02	0.08	0.03	0.04	0.08
FeO	28.50	28.32	18.44	15.53	14.06	16.14	13.02	16.22	17.30	18.68	21.13	17.20	17.18	18.89
MnO	0.36	0.39	0.59	0.70	0.82	0.69	1.12	0.78	0.73	0.70	0.65	0.80	0.85	0.76
MgO	0.06	0.09	0.11	0.21	0.22	0.15	0.16	0.16	0.05	0.09	0.07	0.07	0.05	0.02
CaO	33.32	33.00	33.73	34.26	33.92	34.01	33.91	33.95	34.48	34.03	33.34	33.33	33.29	33.43
Na ₂ O	0	0.02	0.03	0.02	0.02	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0
K ₂ O	0.01	0	0.01	0	0	0	0.01	0	0	0	0.01	0	0.03	0.02
总和	98.45	97.97	99.07	99.63	99.51	99.23	100.17	100.00	100.09	99.81	99.83	99.78	99.73	99.58
基于12个氧原子为标准计算														
Fe ₂ O ₃	31.55	31.14	18.79	15.37	13.01	16.41	12.42	16.15	18.54	19.85	21.84	16.81	16.85	19.26
FeO	0.10	0.29	1.53	1.70	2.35	1.37	1.84	1.68	0.62	0.81	1.47	2.07	2.01	1.55
Si	3.01	3.02	3.01	2.99	2.98	3.00	3.04	3.04	3.01	3.02	3.02	3.01	3.01	3.02
Ti	0	0	0.06	0.12	0.15	0.07	0.01	0.01	0	0	0	0.02	0.02	0
Al	0	0	0.73	0.86	0.97	0.89	1.17	0.95	0.86	0.78	0.65	0.94	0.93	0.80
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
Fe ³⁺	1.97	1.95	1.13	0.92	0.77	0.98	0.73	0.96	1.10	1.18	1.31	1.00	1.00	1.15
Fe ²⁺	0.01	0.02	0.10	0.11	0.16	0.09	0.12	0.11	0.04	0.05	0.10	0.14	0.13	0.10
Mn	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.05
Mg	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0
Ca	2.97	2.96	2.91	2.92	2.88	2.91	2.84	2.87	2.92	2.90	2.86	2.83	2.83	2.86
Na ⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K ⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
And	1.00	1.00	0.61	0.51	0.44	0.52	0.38	0.50	0.56	0.60	0.67	0.52	0.52	0.59
Alm	0	0.01	0.04	0.04	0.06	0.03	0.04	0.04	0.01	0.02	0.03	0.05	0.05	0.04
Spe	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02
Pyr	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0
Gro	-0.01	-0.02	0.34	0.42	0.46	0.42	0.54	0.43	0.41	0.36	0.28	0.42	0.41	0.36

续表 1-2
Continued Table 1-2

组分	18CG-29- Grt-7	18CG-29- Grt-9	18CG-29- Grt-10	18CG-29- Grt-11	18CG-29- Grt-12	18CG-29- Grt-13	18CG-29- Grt-14	18CG-29- Grt-15	18CG-29- Grt-16	18CG-29- Grt-17	18CG-29- Grt-18	18CG-29- Grt-19	18CG-29- Grt-20	18CG-29- Grt-21
	Grt3	Grt3	Grt3	Grt3	Grt3	Grt3	Grt3	Grt3	Grt3	Grt3	Grt3	Grt3	Grt3	Grt3
	$w(B)/\%$													
SiO ₂	37.88	37.73	38.22	38.30	37.46	37.57	37.39	37.97	37.58	38.18	38.20	37.40	37.81	38.49
TiO ₂	0.09	0.01	0.28	0.06	0.10	0	0	0.03	0.05	0.02	0.11	0	0.06	0.19
Al ₂ O ₃	7.61	8.27	9.81	9.48	7.57	6.95	6.63	9.45	8.46	8.55	8.98	6.74	9.97	10.19
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0.04	0	0	0.01	0	0.02	0.01	0.01	0.02	0.07	0
FeO	19.78	19.00	17.13	17.94	19.78	20.13	21.27	17.77	19.06	18.82	18.17	20.83	16.62	16.75
MnO	0.68	0.74	0.90	0.92	0.66	0.68	0.61	0.82	0.68	0.71	0.77	0.66	0.84	0.90
MgO	0.04	0.02	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0.04	0.06	0.03	0.05	0.07	0.04
CaO	33.18	33.22	33.30	33.06	33.23	33.56	33.31	33.28	33.05	33.22	33.39	33.56	34.11	33.37
Na ₂ O	0.01	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0.03	0	0.05
K ₂ O	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0.04	0	0	0	0.02
总和	99.27	99.00	99.70	99.82	98.81	98.91	99.24	99.37	98.94	99.61	99.66	99.29	99.55	100.00
基于12个氧原子为标准计算														
Fe ₂ O ₃	19.70	19.14	16.51	17.15	20.16	21.04	22.12	17.65	19.09	18.50	17.79	22.25	17.82	16.13
FeO	2.05	1.78	2.27	2.51	1.63	1.19	1.36	1.89	1.88	2.17	2.16	0.81	0.58	2.22
Si	3.04	3.03	3.03	3.04	3.02	3.03	3.02	3.03	3.02	3.05	3.04	3.01	3.00	3.04
Ti	0.01	0	0.02	0	0.01	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0.01
Al	0.72	0.78	0.92	0.89	0.72	0.66	0.63	0.89	0.80	0.80	0.84	0.64	0.93	0.95
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ³⁺	1.19	1.15	0.98	1.02	1.22	1.27	1.34	1.06	1.15	1.11	1.06	1.34	1.06	0.96
Fe ²⁺	0.14	0.12	0.15	0.17	0.11	0.08	0.09	0.13	0.13	0.14	0.14	0.05	0.04	0.15
Mn	0.05	0.05	0.06	0.06	0.04	0.05	0.04	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06
Mg	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0.01	0	0.01	0.01	0
Ca	2.86	2.86	2.83	2.81	2.87	2.90	2.88	2.84	2.85	2.84	2.85	2.90	2.90	2.83
Na ⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0.01
K ⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
And	0.62	0.60	0.52	0.54	0.63	0.66	0.68	0.54	0.59	0.58	0.56	0.68	0.53	0.50
Alm	0.05	0.04	0.05	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.02	0.01	0.05
Spe	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Pyr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gro	0.31	0.34	0.41	0.38	0.32	0.30	0.27	0.39	0.35	0.35	0.37	0.29	0.43	0.42

表 2 查岗诺尔铁矿绿帘石电子探针分析结果

Table 2 The EPMA results of epidote in the Chagangnuoer iron deposit

组分	G1-1 Ep3	G1-2 Ep3	G1-3 Ep1-r	G1-4 Ep1-r	G1-5 Ep1-r	G1-6 Ep1-r	G1-7 Ep1-r	G1-8 Ep2	G1-9 Ep2	G1-10 Ep3	G2-1 Ep3	G2-2 Ep2	G2-3 Ep1-r	G2-4 Ep1-r
<i>w(B)/%</i>														
SiO ₂	39.03	38.46	38.34	38.23	38.50	38.54	38.64	37.90	38.04	38.43	38.31	38.48	38.48	38.80
TiO ₂	0.10	0.08	0.26	0.26	0.21	0.25	0.24	0	0.04	0.03	0.07	0.05	0.29	0.29
Al ₂ O ₃	22.95	23.02	22.34	23.16	23.23	23.01	22.91	24.76	26.25	21.61	20.46	26.10	22.36	22.93
Cr ₂ O ₃	0.04	0	0.03	0	0.01	0	0.03	0	0	0	0.04	0.03	0.03	0
FeO	12.58	12.27	12.97	11.28	11.94	11.98	12.22	8.71	6.69	13.76	15.03	8.37	13.03	12.38
MnO	0.14	0.34	0.08	0.01	0.05	0.09	0.06	1.19	0.95	0.18	0.42	0.79	0.11	0.09
MgO	0.03	0.02	0.06	0	0.03	0.01	0.04	0.04	0.04	0	0.05	0	0.03	0.01
CaO	23.43	22.83	23.34	23.52	23.28	23.19	23.49	23.43	23.39	23.30	22.78	23.08	23.28	23.33
Na ₂ O	0	0	0	0.02	0.02	0.01	0	0	0.02	0.02	0.03	0	0.03	0
K ₂ O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0	0.03	0
总和	98.30	97.02	97.42	96.48	97.27	97.08	97.63	96.03	95.42	97.35	97.21	96.90	97.67	97.83
组分	G2-5 Ep1-r	G2-6 Ep1-c	G2-7 Ep1-c	G2-8 Ep1-c	G2-9 Ep1-r	G2-10 Ep1-r	G3-1 Ep3	G3-2 Ep3	G3-3 Ep3	G3-4 Ep2	G3-5 Ep2	G3-6 Ep2	G3-7 Ep2	G3-8 Ep2
<i>w(B)/%</i>														
SiO ₂	38.40	39.03	38.95	39.23	38.65	38.34	37.43	38.08	37.92	39.20	38.71	38.65	38.53	39.05
TiO ₂	0.19	0.10	0.12	0.11	0.22	0.23	0.02	0.08	0.02	0.02	0.06	0.03	0.07	0.02
Al ₂ O ₃	22.26	25.71	25.44	26.05	23.09	22.40	20.06	21.16	19.75	25.82	24.35	26.05	25.42	25.61
Cr ₂ O ₃	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0.01	0.02	0
FeO	12.65	9.23	9.31	8.81	12.47	13.14	15.29	14.10	16.29	8.53	9.92	8.28	8.66	8.75
MnO	0.14	0.18	0.09	0.05	0.04	0.07	0.12	0.20	0.77	0.97	0.42	0.79	0.75	0.73
MgO	0.01	0.03	0.01	0	0.02	0.02	0	0.01	0	0	0	0	0.05	0.01
CaO	23.27	23.62	23.95	23.78	23.28	23.46	22.89	22.98	23.01	22.83	23.03	23.84	23.49	23.05
Na ₂ O	0	0	0	0.01	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0.02	0.01
K ₂ O	0.01	0.02	0	0.01	0	0.03	0	0.01	0	0	0	0	0	0
总和	96.92	97.91	97.88	98.07	97.77	97.71	95.81	96.61	97.76	97.39	96.49	97.65	97.01	97.23

c)。此外,Ep1-r的干涉色的变化和BSE图像的明暗程度呈韵律性变化,且二者具有很好的对应性,表明Ep1-r发育振荡环带结构(图7b,d)。Ep1-c的 $w(\text{SiO}_2)$ 为38.95%~39.23%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为25.44%~26.05%, $w(\text{FeO}^\text{T})$ 8.81%~9.31%, $w(\text{CaO})$ 为23.62%~23.95%, $w(\text{MnO})$ 为0.05%~0.18%, $w(\text{TiO}_2)$ 为0.10%~0.12%, $w(\text{V}_2\text{O}_5)$ 为0.04%~0.07%(表2)。相较于Ep1-c,Ep1-r以具有更高的 $w(\text{FeO}^\text{T})$ (13.76%~16.29%)、 $w(\text{TiO}_2)$ (0.19%~0.26%),更低的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (19.75%~21.61%),以及相近的其他元素含量(表2,图7f,图8b)为特征。

Ep2:呈不规则粒状,常被Ep3包裹、交代或交切,有时其内含Ep1包裹体或紧贴Ep1生长(图7a,c),它具有一级紫红异常干涉色和二级蓝干涉色,背散射图像总体也呈灰黑色,不发育振荡环带(图7a~e)。所有世代绿帘石中,Ep2具有最高的 $w(\text{MnO})$ (0.42%~1.19%),而其他主要元素含量与Ep1-c相似,仅 $w(\text{TiO}_2)$ (0.02%~0.07%)较Ep1-c稍低一些(表

2,图7f,图8a,b)。

Ep3:呈柱状和不规则粒状,通常围绕Ep1-r、Ep2边缘生长,或交代石榴子石,与阳起石、磁铁矿等伴生(图7a,c,e)。它具有鲜亮的不均匀二-三级干涉色,背散射图像显示弱不均匀性,总体呈亮灰白色(图7a~e)。除了相对较高 $w(\text{MnO})$ (0.12%~0.77%)和较低 $w(\text{TiO}_2)$ (0.02%~0.10%)以外,Ep3的元素组成与Ep1-r较为相似(表2,图7f,g,图8a,b)。

总之,不同世代绿帘石的干涉色、背散射图像和FeO、Al₂O₃、MnO含量存在明显的协变关系,由早到晚,从Ep1-c、Ep1-r、Ep2到Ep3,绿帘石FeO、Al₂O₃、MnO含量呈现出一定地周期性变化。

5 讨 论

5.1 石榴子石形成的物理化学条件

矽卡岩矿床中,石榴子石成分的变化与其形成

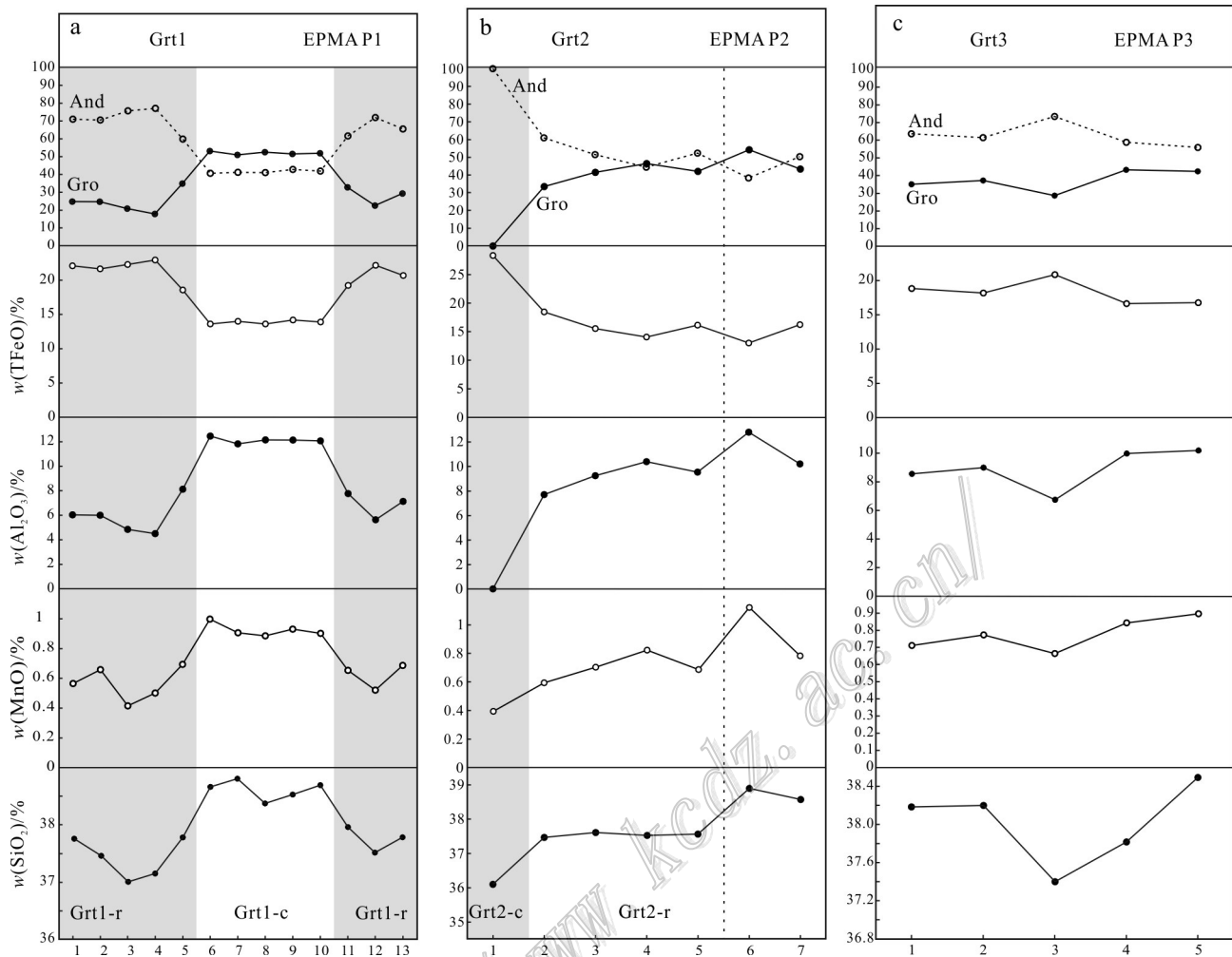


图6 查岗诺尔铁矿三类石榴子石(a、b、c)环带成分变化示意图(剖面位置见图4c、f、i)

Fig. 6 The composition variation diagrams of garnet zonation (a, b, c) in the Chagangnuoer iron deposit (the location of EPMA analytical profiles shown in Fig. 4c, f, i)

的物理化学条件密切相关(艾永富等,1981;赵斌等,1983)。实验研究表明,在氧化条件下,常形成钙铁榴石,而在弱还原条件下,常形成富钙铝榴石(赵斌等,1983)。而且,中-碱性环境对钙铁榴石形成最佳,而酸性环境最利于钙铝榴石的形成(低pH值时易于形成六次配位的Al),近等量的钙铁与钙铝榴石端员组分的石榴子石在相对中性的条件下形成(艾永富等,1981)。因此,矽卡岩矿床研究中,石榴子石成分常被用来定性约束成矿过程氧化还原条件和pH值变化(李金祥等,2011;姚磊等,2012;费祥惠等,2014;高雪等,2014;王伟等,2016;李壮等,2017;边晓龙等,2019)。

查岗诺尔铁矿床早期石榴子石核部Grt1-c的钙铝榴石组分略多于钙铁榴石($Gro_{51-53}And_{41-43}Spr_{4-8}$),

表明其形成于弱氧化、弱碱性条件下;边部Grt1-r以钙铁榴石组分占优($Gro_{18-35}And_{60-77}Spr_{4-6}$),表明Grt1-r形成于比Grt1-c氧化且更偏碱性的流体环境。而且,Grt1-r发育细振荡环带,且明暗环带之间的 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 含量呈现交替变化(图4c,图6a),这与多次周期性流体压力的聚集和释放有关,即流体的周期性沸腾作用,而与石榴子石形成时的温度无关(Yardley et al., 1991; Harlov et al., 2012; Park et al., 2017)。从Grt1-c到Grt1-r, FeO^{+} 含量是突然增加的,而且形貌上它们之间呈不整合接触(图4c),因此,推测Grt1-r的形成与新注入的富铁流体相关,而非单一流体的连续演化。

早期Grt2石榴子石核部Grt2-c几乎为纯钙铁榴石($And_{99-100}Spr_{0-1}$),暗示其形成于富铁、氧化、碱性的

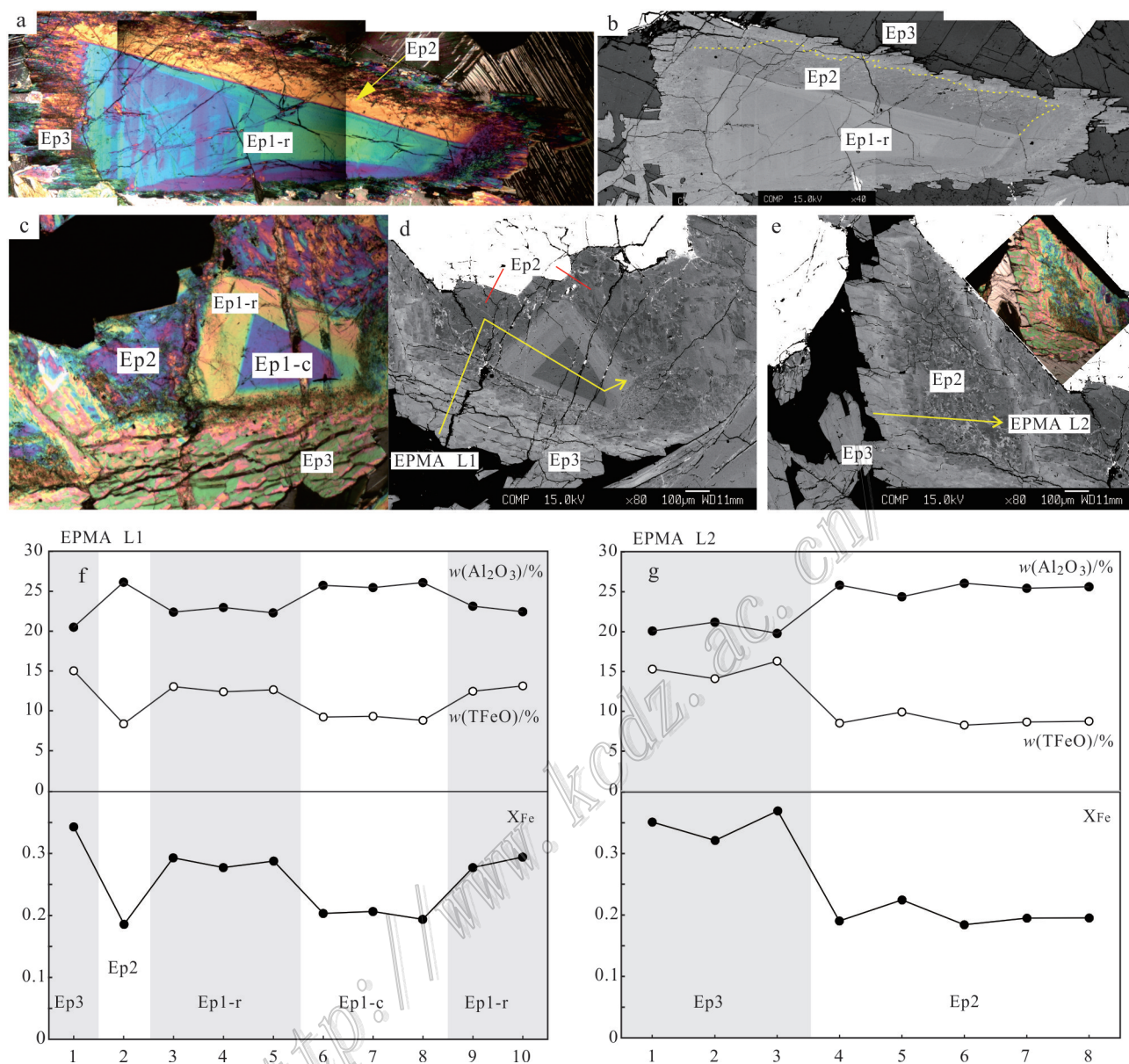


图7 查岗诺尔铁矿不同世代绿帘石正交偏光照片(a,c)、BSE图像(b,d,e)及典型电子探针成分剖面示意图(f,g)
Fig. 7 Microphotographs under crossed nicols(a,c), BSE images (b,d,e) and compositional zonation profile (f,g) showing the compositional characteristics of three generations epidotes in the Chagangnuoer iron deposit

热液流体;边部Grt2-r的钙铁榴石与钙铝榴石端员组分含量相似($Gro_{34-54}And_{38-61}Spr_{6-9}$),指示此时流体具有弱氧化、弱碱性特征。在大多数矽卡岩矿床中,石榴子石核部多富集钙铝榴石,向边部多富集钙铁榴石(Gaspar et al., 2008;王伟等, 2016)。相比而言,早期Grt2石榴子石明显不同,其发育反环带结构,即核部(Grt2-c)富钙铁榴石,边部(Grt2-r)富钙铝榴石(表1,图5,图6b)。如图4f所示,Grt2-r以灰黑色环带为界可进一步分为2个不同部分,此带内侧从

Grt2-c向外,石榴子石的背散射图像整体亮度从Grt2-c向外依次变暗,无明显明暗振荡变化,暗示此时石榴子石一直处于封闭或近封闭体系,并无压力明显压力波动。然而,矿物反环带结构同样可以在封闭体系中由流/熔体成分发生逆向变化而产生(Streck, 2008)。Grt2-r中灰黑色环带内侧石榴子石的 Al_2O_3 和 TiO_2 含量相对Grt2-c明显是升高的(表1,图6b),这可能反映了水-岩作用过程中大哈拉军山组火山岩中的富Al和富Ti矿物,如斜长石、黑云母

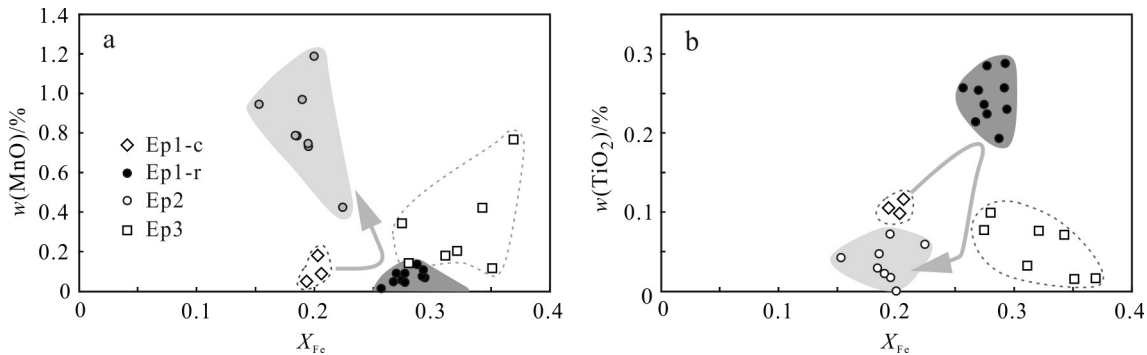


图8 查岗诺尔铁矿绿帘石 X_{Fe} -MnO图解(a)和 X_{Fe} -TiO₂图解(b)

Fig. 8 X_{Fe} -MnO (a), and X_{Fe} -TiO₂ (b) diagrams of three generations epidotes in the Chagangnuoer iron deposit

和辉石(洪为, 2012), 分解释放 Al 和 Ti, 进而参与石榴子石结晶。对于 Grt2-r 中灰黑色环带外侧石榴子石, 其比内侧 TiO₂ 含量降低(图 6b), 而且还发育明暗相间振荡环带, 表明流体开始起主导作用, 且流体压力呈周期性变化(Yardley et al., 1991; Stowell et al., 1996; Harlov et al., 2012; Park et al., 2017)。

晚期 Grt3 的钙铁榴石比钙铝榴石端员组分稍占优势(Gro₂₇₋₄₃And₅₀₋₆₈Spr₃₋₈), 表明其总体也形成于弱氧化、弱碱性环境。此外, Grt3 发育明暗相间的振荡环带, 且其通常作为角砾胶结物或细脉产出。因此, 它的形成环境可能为开放、振荡的物理化学环境。3 类石榴子石复杂的成分和结构变化所反映的主成矿阶段氧化还原条件的多变和氧化的富铁流体多次注入可能导致成矿体系铁质的不断浓集而形成大规模铁矿化。

5.2 绿帘石多阶段生长对流体演化的指示

绿帘石作为常见的含水矿物, 其形成过程与流体直接相关。因此, 绿帘石中记录了重要的相关流体的成分、温度、压力和氧逸度等信息(Holdaway, 1972; Bird et al., 2004; Enami et al., 2004; Mattinson et al., 2004; Feineman et al., 2007)。绿帘石的主量组分变化主要涉及 M³⁺ 结构位置的 Fe³⁺-Al³⁺ 替换(Bird et al., 2004; 唐盼等, 2019)。实验研究证实, 绿帘石的 Fe 含量(X_{Fe} 值)与体系氧逸度和铁含量有关。通常氧化程度越高, 绿帘石往往更富 Fe (X_{Fe} 值大)(Holdaway, 1972; Liou, 1973)。在自然体系中, 这一结论也得到了证实, 如 Guo 等(2017)便识别出绿片岩相富 Fe (高 X_{Fe} 值) 绿帘石的形成与高氧逸度流体渗透有关。

查岗诺尔铁矿中的绿帘石与许多地热系统和矽卡岩型矿床中的热液绿帘石一样, 呈现多阶段生长

并发育复杂的内部环带结构(Bird et al., 2004; Kelmdnd, 2004 及其参考文献)。早世代绿帘石(Ep1)发育核-边结构(图 7a~d), 指示存在 2 个阶段的生长历史。核部(Ep1-c)为低 X_{Fe} 值(0.19~0.21), 边部 Ep1-r 的 X_{Fe} 值明显稍高(0.26~0.32)(图 7f, 图 8), 表明边部(Ep1-r)相对核部(Ep1-c), 其形成的氧逸度更高。边部(Ep1-r)往往还发育明暗相间的细振荡环带(图 7a, b), 表明边部的相关流体环境较为动荡。在微量元素组成上, 从核部(Ep1-c)到边部(Ep1-r), MnO 含量基本没变, 但 TiO₂ 含量显著增加(图 8a, b)。流体中矿物发生结晶时, Cr、V、Ti 和 V 等难溶元素通常较早发生沉淀。所以, 边部(Ep1-r)若是从结晶出核部(Ep1-c)后的残余流体中沉淀出来的, 其应该具有更低的 TiO₂ 含量。因此, 富 Ti 的边部(Ep1-r)指示其形成过程中流体的成分也发生了变化。

中世代绿帘石 Ep2 的 X_{Fe} 值(0.15~0.20)与早世代绿帘石的核部 Ep1-c 相似, 但低于早世代绿帘石的边部 Ep1-r 的 X_{Fe} 值(0.26~0.32)(图 7f), 表明流体氧逸度发生了降低。在微量元素组成上, Ep2 的 MnO 含量明显增加, 最大可达 1.19%, 是所有绿帘石中 MnO 含量最高的(图 8a)。因此, 与中世代绿帘石 Ep2 相关的流体是富 MnO 的流体。晚世代绿帘石 Ep3 的 X_{Fe} 值(0.28~0.37)的与早世代绿帘石边部 Ep1-r 相似, 但比中世代 Ep2 的 X_{Fe} 值高(图 7f, g, 图 8), 表明此时流体比与 Ep2 平衡的流体氧逸度高。微量元素组成上, Ep3 的 TiO₂ 含量与 Ep2 相似, 而 MnO 含量偏低且变化相对较大(0.14%~0.77%), 但高于 Ep1(图 8a, b)。在结构上, Ep3 与 Ep2 的边界多不规则, 呈现交代关系。因此, Ep3 可能形成于较贫 MnO 和 TiO₂ 的流体, 而并不是由于 Ep3 从 Ep2 结晶后的残余流体中沉淀的结果, 它的 MnO 可能部分继

承自Ep2。

综上所述,由早到晚,从Ep1-c、Ep1-r到Ep2,再到Ep3,流体氧逸度经历了先升高、后降低、再升高的变化过程。同时,与之相平衡的流体的成分也是变化的,Ep1-r形成于相对富TiO₂的流体,Ep2形成于富MnO的流体,而与Ep3相关的流体的MnO和TiO₂含量较低。

6 结 论

(1) 查岗诺尔铁矿发育早世代(Grt1和Grt2)和晚世代(Grt3)3类不同类型的石榴子石,早世代石榴子石Grt1和Grt2发育明显核-边结构,晚世代石榴子石Grt3发育单一振荡环带结构。早世代石榴子石Grt1属于钙铁榴石-钙铝榴石系列,其中核部(Grt1-c)钙铁榴石-钙铝榴石端员组分相当,边部(Grt1-r)则明显更为富集钙铝榴石组分且显示振荡变化。早世代石榴子石Grt2核部(Grt2-c)均匀,为钙铁榴石,边部(Grt2-r)发育成分环带,为钙铁榴石-钙铝榴石系列。晚世代Grt3主要为钙铁榴石,次为钙铝榴石,二者含量相差不大。这些石榴子石复杂的结构和成分上的变化与早期成矿环境的氧逸度、pH值条件、压力波动、水-岩反应以及新流体注入等有关。

(2) 查岗诺尔铁矿发育3个世代绿帘石(Ep1、Ep2和Ep3),它们之间具有明显不同的结构和成分。系统的EPMA分析结果显示,结构上的差异主要与Al、Fe、Mn、Ti等元素的含量变化相关。不同世代绿帘石之间这些元素含量上的差异性指示流体体系氧逸度经历了先增加、后降低、再升高的变化过程。同时,流体成分先从相对贫Ti和Mn向相对富Ti贫Mn演化,而后又变为富Mn贫Ti。

致 谢 电子探针分析过程中得到了中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室贾丽辉老师的大力帮助,感谢杨富全研究员和一位匿名审稿人评阅了全文并提出了很多宝贵修改意见和建议,在此一并表示衷心感谢!

References

Ai Y F and Jin L N. 1981. The study of the relationship between the mineralization and the garnet in the skarn ore deposits[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 9 (1): 83-90(in

Chinese with English abstract).

- Bian X L, Zhang J, Wang J L, Liu C F and Yu H J. 2019. In situ analysis of garnets from the Hongshan skarn copper deposit in north-west Yunnan Province and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35 (5): 1463-1477(in Chinese with English abstract).
- Bird D K and Spieler A R. 2004. Epidote in geothermal systems[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 56 (1): 235-300.
- Bocchio R, Adamo I and Diella V. 2010. The profile of trace elements, including the REE, in gem-quality green andradite from classic localities[J]. *The Canadian Mineralogist*, 48 (5): 1205-1216.
- Caruso L J, Bird D K, Cho M and Liou J G. 1988. Epidote-bearing veins in the State 2~14 Drill Hole: Implications for hydrothermal fluid composition[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93 (B11): 13123-13133.
- Charvet J, Shu L S, Laurent-Charvet S, Wang B, Faure M, Cluzel D, Chen Y and De Jong K. 2011. Palaeozoic tectonic evolution of the Tianshan belt, NW China[J]. *Science China Earth Science*, 54 (2): 166-184.
- Ciobanu C L and Cook N J. 2004. Skarn textures and a case study: The Ocna de Fier-Dognecea orefield, Banat, Romania[J]. *Ore Geology Reviews*, 24 (3-4): 315-370.
- Clechenko C C and Valley J W. 2003. Oscillatory zoning in garnet from the Willsboro Wollastonite skarn, adirondack Mts, New York: A record of shallow hydrothermal processes preserved in a granulite facies terrane[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21 (8): 771-784.
- Dong L H, Feng J, Zhuang D Z, Li F M, Qu X, Liu D Q and Tang Y L. 2011. Discussion of metallogenic models, mineralization characteristic and main type of rich iron ore of Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 29 (4): 416-422(in Chinese with English abstract).
- Enami M, Liou J G and Mattinson C G. 2004. Epidote minerals in high P/T metamorphic terranes: Subduction zone and high- to ultra-high-pressure metamorphism[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 56: 347-398.
- Fei X H, Zhang Z C and Han L. 2014. Mineralogy of the Zhangjiawa skarn iron deposit in Shangdong Province and its implications for metallogenic environment[J]. *Geology in China*, 41(6): 1873-1896 (in Chinese with English abstract).
- Feineman M D, Ryerson F J, DePaolo D J and Plank T. 2007. Zoisite-aqueous fluid trace element partitioning with implications for subduction zone fluid composition[J]. *Chemical Geology*, 239: 250-265.
- Feng J X, Shi F P, Wang B Y, Hu J M, Wang J T and Tian J Q. 2010. The syngenetic volcanogenic iron ore deposit in Awulale metallogenetic belt western Tianshan mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-132(in Chinese).
- Ferry J M, Kitajima K, Strickland A and Valley J W. 2014. Ion microprobe survey of the grain-scale oxygen isotope geochemistry of minerals in metamorphic rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 144: 403-433.

- Gao J, Li M, Xiao X, Tang Y and He G. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China[J]. *Tectonophysics*, 287 (1): 213-231.
- Gao J, Long L, Klemd R, Qian Q, Liu D, Xiong X, Su W, Liu W, Wang Y T and Yang F. 2009. Tectonic evolution of the south Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98 (6): 1221.
- Gao J, Qian Q, Long L L, Zhang X, Li J L and Su W. 2009. Accretionary orogenic process of western Tianshan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1804-1816(in Chinese with English abstract).
- Gao J, Wang X S, Klemd R, Jiang T, Qian Q, Mu L X and Ma Y Z. 2015. Record of assembly and breakup of Rodinia in the southwestern Altaids: Evidence from Neoproterozoic magmatism in the Chinese western Tianshan Orogen[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113 (1): 173-193.
- Gao X, Deng J, Meng J Y, Yan H, Li J X, Yang C H, Sun N and Wei C. 2014. Characteristics of garnet in the Hongni skarn copper deposit, western Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2695-2708(in Chinese with English abstract).
- Gaspar M, Knaack C, Meinert L D and Moretti R. 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.
- Guo S, Tang P, Su B, Chen Y, Ye K, Zhang L M, Gao Y J, Liu J B and Yang Y H. 2017. Unusual replacement of Fe-Ti oxides by rutile during retrogression in amphibolite-hosted veins (Dabie UHP terrane): A mineralogical record of fluid-induced oxidation processes in exhumed UHP slabs[J]. *American Mineralogist*, 102 (11): 2268-2283.
- Guo S, Ye K, Yang Y H, Chen Y, Zhang L M, Liu J B, Mao Q and Ma Y G. 2014. In situ Sr isotopic analyses of epidote: Tracing the sources of multi-stage fluids in ultrahigh-pressure eclogite (Ganghe, Dabie terrane)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 167 (2): 975.
- Harlov D E and Austrheim H. 2012. Metasomatism and the chemical transformation of rock: The role of fluids in terrestrial and extra-terrestrial processes[M]. Springer Science & Business Media.
- Holdaway M J. 1972. Thermal stability of Al-Fe epidote as a function of $f(\text{O}_2)$ and Fe content[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 37 (4): 307-340.
- Hong W. 2012. Geological characteristics and ore genesis of the Chagangnuoer iron deposit in the western Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China (Master degree thesis)[D]. Tutor: Zhang Z H. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- Hong W, Zhang Z H, Jiang Z S, Li F M and Liu X Z. 2012a. Magnetite and garnet trace element characteristics from the Chagangnuoer iron deposit in the western Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China: Constrain for ore genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (7): 2089-2102(in Chinese with English abstract).
- Hong W, Zhang Z H, Li H Q, Li F M and Liu X Z. 2012b. Metallogenic epoch of Chagangnuoer iron deposit in western Tianshan Mountains, Xinjiang: Information from garnet Sm-Nd isochron age[J]. *Mineral Deposits*, 31 (5): 1067-1074(in Chinese with English abstract).
- Hong W, Zhang Z H, Li F M and Liu X Z. 2012c. Stable isotopic characteristics of the Chagangnuoer iron deposit in western Tianshan, Xinjiang and its geological significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 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. 2012d. Mineralogy of the Chagangnuoer iron deposit in western Tianshan Mountains, Xinjiang, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(2): 191-211(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.
- Jamtveit B. 1991. Oscillatory zonation patterns in hydrothermal grossular-andradite garnet; nonlinear dynamics in regions of immiscibility[J]. *American Mineralogist*, 76 (7-8): 1319-1327.
- Klemd R. 2004. Fluid inclusions in epidote minerals and fluid development in epidote-bearing rocks[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 56(1): 197-234.
- Li J X, Qin K Z, Li G M, Lin J D, Xiao B, Jiang H Z, Han F J, Huang S F, Chen L and Zhao J X. 2011. Zircon U-Pb geochronology and garnet composition of Qiangdui Cu-Mo deposit in the eastern section of Gangdese and their significance[J]. *Geology and Exploration*, 47(1): 11-19(in Chinese with English abstract).
- Li Z, Tang J X, Wang L Q, Yang Y, Li S T, Wang H and Wang W. 2017. Mineralogical characteristics of skarn in Lietinggang iron polymetallic deposit, Tibet and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 36(6): 1289-1315(in Chinese with English abstract).
- Liou J G. 1973. Synthesis and stability relations of epidote, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Fe-Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$ [J]. *Journal of Petrology*, 14 (3): 381-413.
- Mattinson C G, Zhang R Y, Tsujimori T and Liou J G. 2004. Epidote-rich talc-kyanite-phengite eclogites, Sulu terrane, eastern China: P - T - $f(\text{O}_2)$ estimates and the significance of the epidote-talc assemblage in eclogite[J]. *American Mineralogist*, 89: 1772-1783.
- Meinert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits[A]. In: Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J and Richards J P, eds. *Economic Geology 100th Anniversary Volume 1905~2005*[C]. Amsterdam: Elsevier Science B V. 299-336.
- Page F Z, Kita N T and Valley J W. 2010. Ion microprobe analysis of oxygen isotopes in garnets of complex chemistry[J]. *Chemical Geology*, 270 (1-4): 9-19.
- Park C, Song Y, Kang I M, Shim J, Chung D and Park C S. 2017. Metasomatic changes during periodic fluid flux recorded in garnet from the Weondong W-skarn deposit, South Korea[J]. *Chemical Geology*, 451: 135-153.

- Pirajno F, Seltmann R and Yang Y. 2011. A review of mineral systems and associated tectonic settings of northern Xinjiang, NW China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2 (2): 157-185.
- Pirajno F. 2012. The geology and tectonic settings of China's mineral deposits[M]. Springer Science & Business Media.
- Qin K Z, Sun S, Li J, Fang T, Wang S and Liu W. 2002. Paleozoic epithermal Au and porphyry Cu deposits in North Xinjiang, China: Epochs, features, tectonic linkage and exploration significance[J]. *Resource Geology*, 52 (4): 291-300.
- Stowell H H, Menard T and Ridgway C K. 1996. Ca-metasomatism and chemical zonation of garnet in contact metamorphic aureoles, Juneau gold belt, Southeastern Alaska[J]. *The Canadian Mineralogist*, 34(6): 1195-1209.
- Strech M J. 2008. Mineral textures and zoning as evidence for open system processes[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69 (1): 595-622.
- Sun W L, Niu Y N, Ma Y X, Yi L Y, Zhang G R, Hu Z X, Zhang Z W, Chen S, Li J Y, Wang X H and Gong H M. 2015. Petrogenesis of the Chagangnuoer deposit, NW China: A general model for submarine volcanic-hosted skarn iron deposits[J]. *Science Bulletin*, 60 (3): 367-379.
- Ryan-Davis J, Lackey J S, Gevedon M, Barnes J D, Lee C A, Kitajima K and Valley J W. 2019. Andradite skarn garnet records of exceptionally low $\delta^{18}\text{O}$ values within an Early Cretaceous hydrothermal system, Sierra Nevada, CA[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 174 (8): 68.
- Schmidt M W and Poli S. 2004. Magmatic epidote[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 56 (1): 399-430.
- Tang P and Guo S. 2019. Epidote records subduction-zone metamorphic fluids actions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35 (7): 2045-2060 (in Chinese with English abstract).
- Wang B, Shu L, Cluzel D, Faure M and Charvet J. 2007. Geochemical constraints on Carboniferous volcanic rocks of the Yili Block (Xinjiang, NW China): Implication for the tectonic evolution of western Tianshan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29: 148-159.
- Wang B Y, Hu X J, Wang J T, Shao Q H, Ling J L, Guo N X, Zhao Y F, Xia D Z and Jiang C Y. 2011. Geological characteristics and genesis of Chagannur iron deposit in western Tianshan, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 30 (3): 385-402(in Chinese with English abstract).
- Wang W, Wang M F, Liu K and Guo X N. 2016. The current status and prospects of the study of garnet in skarn for hydrothermal fluid evolution tracing and mineralization zoning[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35 (1): 147-161(in Chinese with English abstract).
- Windley B F, Alexiev D, Xiao W J, Kröner A and Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian orogenic belt[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 164 (1): 31-47.
- Yao L, Xie G Q, Zhang C S, Liu J L, Yang H B, Zheng X W and Liu X F. 2012. Mineral characteristics of skarns in the Chengchao large-scale Fe deposit of southeastern Hubei Province and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1) 133-146(in Chinese with English abstract).
- Yardley B W D, Rochelle C A and Barnicoat A C. 1991. Oscillatory zoning in metamorphic minerals: An indicator of infiltration metasomatism[J]. *Mineralogical Magazine*, 55(380): 357-365.
- Zhai D G, Liu J J, Zhang H Y, Wang J P, Su L, Yang X A and Wu S H. 2014. Origin of oscillatory zoned garnets from the Xieertala Fe-Zn skarn deposit, northern China: In situ LA-ICP-MS evidence[J]. *Lithos*, 190: 279-291.
- Zhai W, Sun X, Sun W, Su L, He X and Wu Y. 2009. Geology, geochemistry, and genesis of Axi: A Paleozoic low-sulfidation type epithermal gold deposit in Xinjiang, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 36 (4): 265-281.
- Zhang D, Zhang Z, Xue C, Zhao Z and Liu J. 2010. Geochronology and geochemistry of the ore-forming porphyries in the Lailisigao'er-Lamasu region of the western Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China: Implications for petrogenesis, metallogenesis, and tectonic setting[J]. *The Journal of Geology*, 118 (5): 543-563.
- Zhang X. 2013. The metallogenic tectonic setting and metallogenesis of Zhibo and Chagangnuoer iron ore deposits, western Tianshan Mountains(Ph.D. thesis)[D]. Tutor: Dong L H and Gao J. Beijing: University of Chinese Academy of Science(in Chinese with English abstract).
- Zhang X, Klemd R, Gao J, Dong L H, Wang X S, Haase K, Jiang T and Qian Q. 2015. Metallogenesis of the Zhibo and Chagangnuoer volcanic iron oxide deposits in the Awulale iron metallogenic belt, western Tianshan orogen, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 151-172.
- Zhang Z C, Hou T, Santosh M, Li H, 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 C, Hou T, Li H M, Li J W, Zhang Z H and Song X Y. 2014. Enrichment mechanism of iron in magmatic-hydrothermal system[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5) : 1189-1204(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z H, Hong W, Jiang Z S, 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]. *Mineral Deposits*, 31(5): 941-964(in Chinese with English abstract).
- Zhao B, Li T J and Li Z P. 1983. Experimental study of physico-chemical conditions of the formation of skarns[J]. *Geochimica*, (3): 256-267(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 艾永富, 金玲年. 1981. 石榴子石成分与矿化关系的初步研究[J]. 北京大学学报, 9 (1): 83-90.

- 边晓龙,张静,王佳琳,刘春发,余海军. 2019. 滇西北红山砂卡岩型铜矿床石榴子石原位成分及其地质意义[J]. 岩石学报, 35 (5): 1463-1477.
- 董连慧,冯京,庄道泽,李凤鸣,屈迅,刘德权,唐延龄. 2011. 新疆富铁矿成矿特征及主攻类型成矿模式探讨[J]. 新疆地质, 29 (4): 416-422.
- 费详惠,张招崇,韩鑒. 2014. 山东张家洼砂卡岩型铁矿矿物学特征及其对成矿环境的指示意义[J]. 中国地质, 41(6): 1873-1896.
- 冯金星,石福品,王邦耀,胡秀军,王江涛,田敬伦. 2010. 西天山阿吾拉勒成矿带火山岩型铁矿[M]. 北京:地质出版社. 1-132.
- 高俊,钱青,龙灵利,张喜,李继磊,苏文. 2009. 西天山的增生造山过程[J]. 地质通报, 28(12): 1804-1816.
- 高雪,邓军,孟健寅,闫寒,李建新,杨春海,孙诺,魏超. 2014. 滇西红牛砂卡岩型铜矿床石榴子石特征[J]. 岩石学报, 30(9): 2695-2708.
- 洪为. 2012. 新疆西天山查岗诺尔铁矿地质特征与矿床成因(硕士学位论文)[D]. 导师:张作衡. 北京:中国地质科学院.
- 洪为,张作衡,蒋宗胜,李凤鸣,刘兴忠. 2012a. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床磁铁矿和石榴子石微量元素特征及其对矿床成因的制约[J]. 岩石学报, 28(7): 2089-2102.
- 洪为,张作衡,李华芹,李凤鸣,刘兴忠. 2012b. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床成矿时代[J]. 矿床地质, 31 (5): 1067-1074.
- 洪为,张作衡,李凤鸣,刘兴忠. 2012c. 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. 2012d. 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.
- 李金祥,秦克章,李光明,林金灯,肖波,江化寨,韩逢杰,黄树峰,陈雷,赵俊兴. 2011. 冈底斯东段羌塘桐钼矿床年代学、砂卡岩石榴石成分及其意义[J]. 地质与勘探, 47(1): 11-19.
- 李壮,唐菊兴,王立强,杨毅,李松涛,王豪,王维. 2017. 西藏列廷冈铁多金属矿床砂卡岩矿物学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 36(6): 1289-1315.
- 唐盼,郭顺. 2019. 绿帘石记录俯冲带变质流体活动[J]. 岩石学报, 35 (7): 2045-2060.
- 汪帮耀,胡秀军,王江涛,邵青红,凌锦兰,郭娜欣,赵彦锋,夏昭德,姜常义. 2011. 西天山查岗诺尔铁矿床地质特征及矿床成因研究[J]. 矿床地质, 30 (3): 385-402.
- 王伟,王敏芳,刘坤,郭晓南. 2016. 砂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, 35 (1): 147-161.
- 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砂卡岩铁矿的矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(1): 133-146.
- 张喜. 2013. 西天山智博和查岗诺尔铁矿成矿背景与成矿作用研究(博士学位论文)[D]. 导师:董连慧,高俊. 北京:中国科学院大学.
- 张招崇,侯通,李厚民,李建威,张作衡,宋谢炎. 2014. 岩浆-热液系统中铁的富集机制探讨[J]. 岩石学报, 30(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,李统锦,李昭平. 1983. 夕卡岩形成的物理化学条件实验研究[J]. 地球化学, (3): 256-267.