

文章编号:1672-6561(2016)02-0143-17

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

柴北缘超高压变质带折返过程对金红石成矿 的制约:来自鱼卡和铁石观西地区 石榴石成分环带的证据

陈 鑫¹, 郑有业^{1,2,3}, 许荣科², 国显正², 王会敏¹, 蔡鹏捷²,
杜文洋², 林成贵³, 方昌坦³, 卢 锐², 范贤斌³

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院,
湖北 武汉 430074; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘 要: 鱼卡和铁石观西榴辉岩均位于柴北缘超高压变质带, 近期在鱼卡地区发现了大型以上的榴辉岩型金红石矿床, 但在铁石观西地区仅发现钛矿化, 两区成矿前景不同。在对两区进行详细野外地质观测、镜下观察及电子探针分析的基础上, 通过 LA-ICP-MS 系统研究了榴辉岩中石榴石的主、微量元素特征等。结果表明: 鱼卡和铁石观西榴辉岩虽然产状基本一致, 但鱼卡榴辉岩基本无退变, 石榴石较自形, 含较多的包裹体, 石榴石中的主、微量元素成分呈环带分布, 慢边部富集稀土元素, 而铁石观西榴辉岩退变较强, 矿物他形, 石榴石包裹体数量较少, 部分石榴石单矿物主量元素环带已经被均一化, 核慢部相对边部更富集稀土元素。结合年代学等证据, 鱼卡榴辉岩的形成经历了相对快速俯冲和折返的动力学过程, 钛成矿作用中金红石很少转变为钛铁矿, 而铁石观西榴辉岩经历了一个快速俯冲而折返速率较缓慢的动力学过程, 钛成矿作用中金红石大多转变成了钛铁矿。揭示鱼卡和铁石观西钛物相、动力学过程等差异的原因及标志, 为柴北缘超高压变质带内进一步寻找榴辉岩型金红石矿床提供了依据与方向。

关键词: 石榴石; 主量元素; 微量元素; 金红石矿床; 榴辉岩; 超高压变质带; 柴达木盆地

中图分类号: P588.3 **文献标志码:** A

Exhumation Processes of UHP Metamorphic Belt in the Northern Qaidam and Their Constraints to Rutile Mineralization: Evidences from Compositional Zoning of Garnets in Yuqia and West Tieshiguan Areas

CHEN Xin¹, ZHENG You-ye^{1,2,3}, XU Rong-ke², GUO Xian-zheng², WANG Hui-min¹,
CAI Peng-jie², DU Wen-yang², LIN Cheng-gui³, FANG Chang-tan³, LU Rui², FAN Xian-bin³

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

3. College of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The ore-forming prospect of eclogite-type rutile in Yuqia is different from that in West Tieshiguan, located in the northern Qaidam ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt. Recently, the large eclogite-type rutile ore deposit in Yuqia is found, but only titanium

收稿日期: 2015-11-17

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(1212011121204); 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT14R56)

作者简介: 陈 鑫(1991-), 男, 湖南溆浦人, 工学博士研究生, E-mail: 18766969211@163.com。

通讯作者: 郑有业(1962-), 男, 河南信阳人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: zhyouye@163.com。

mineralization in West Tieshiguan is found. Based on detailed field geological and microscopic observation, the major elements were analyzed by electron probe; moreover, the in-situ trace element contents in garnet collected from the deposits were performed by LA-ICP-MS. The results show that the occurrences of Yuqia and West Tieshiguan eclogites are basically identical. Yuqia eclogite degenerates weakly with mineral idiomorphic granular, and garnets contain more inclusions. Major and trace earth elements have well-developed zoning characteristic, and the mantle and rim enrich rare earth element in garnets. Relatively, the degeneration of West Tieshiguan eclogite is strong and mineral xenomorphic-granular. Some garnets of eclogites contain less inclusions and the zoning of major element has been homogenized, rare earth elements of the core and mantle are more than the side. Combining the chronology evidences, Yuqia eclogite undergoes rapid subduction and exhumation of the dynamic process, and the rutiles barely turn into ilmenites. West Tieshiguan eclogite undergoes an evolution history with a rapid burial and slow uplift, and the rutiles nearly turn into ilmenites, which reveal the differences between the dynamics process and the occurrence state of rutile. These characters provide directions for the study area to further find eclogite-type rutile deposits in the northern Qaidam UHP metamorphic belt.

Key words: garnet; major element; trace element; rutile deposit; eclogite; UHP metamorphic belt; Qaidam Basin

0 引言

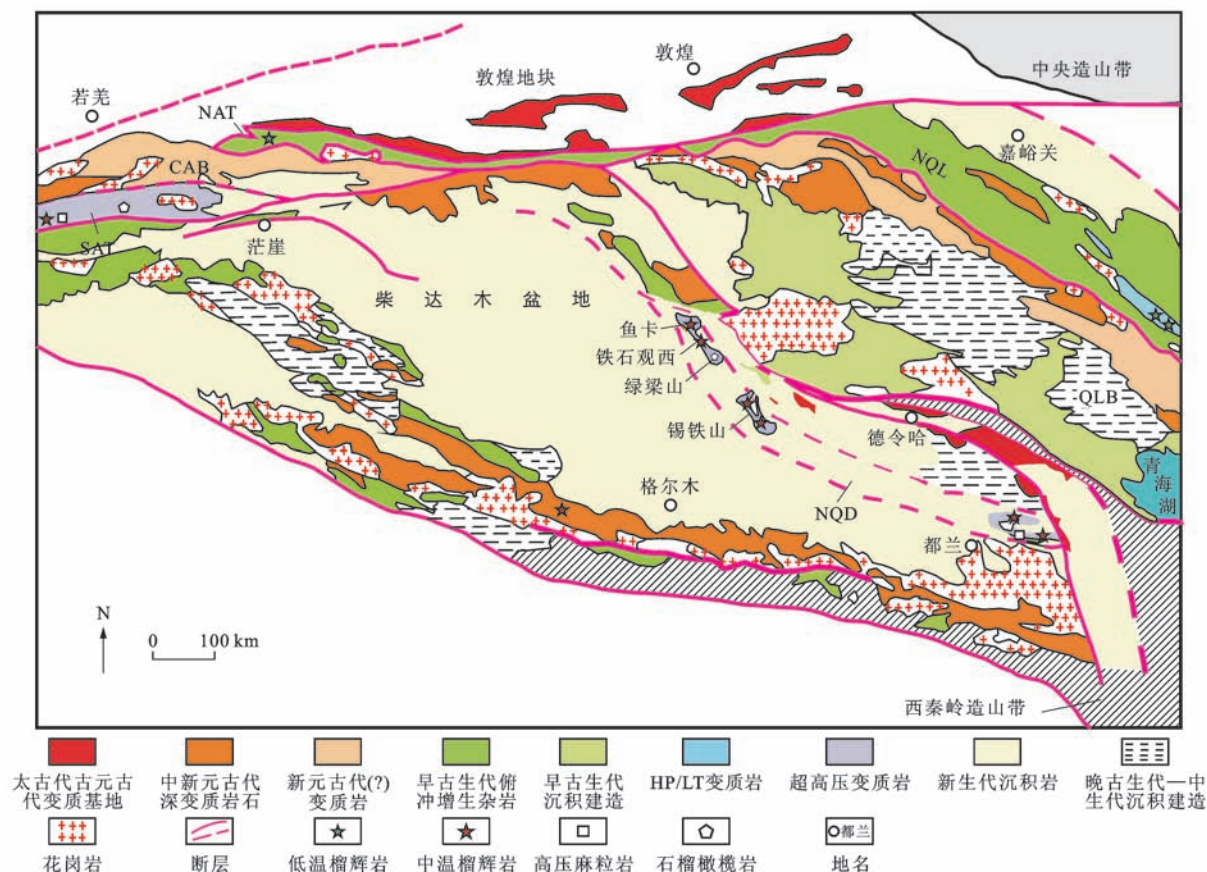
柴达木盆地北缘(简称“柴北缘”)是近年来发现并确立的一条超高压变质带,位于祁连地块与柴达木地块之间,从青海省都兰县沙柳河—野马滩朝西北方向延伸到锡铁山、绿梁山、铁石观西、鱼卡一带,长约 400 km,是典型的早古生代大陆型俯冲碰撞带^[1-7]。其中,柯石英包裹体首先发现于都兰北带泥质片麻岩的锆石中^[8],之后在都兰和鱼卡榴辉岩薄片以及都兰和锡铁山榴辉岩锆石中有新的柯石英包裹体被发现^[9-11]。绿梁山石榴橄榄岩锆石中发现有金刚石包裹体^[12],使阿尔金—柴北缘地区成为继大别—苏鲁地区之后,在中国发现的又一条被巨型走滑断裂所切割的高压—超高压变质带,引起了中外学者的普遍关注^[13-14]。郑有业团队在开展绿梁山—双口山矿产调查工作中,在成矿系列理论的指导下,通过与大别—苏鲁超高压变质带类比,提出了在大柴旦一带的超高压变质带内有找到大—中型榴辉岩型金红石矿床的远景,并最终在鱼卡—铁石观西一带找到了榴辉岩型钛矿床,从而实现了在柴北缘一带钛矿床找矿突破^[15]。经过 2012~2015 年的不懈努力,鱼卡钛资源量已经达到大型以上规模,钛矿物主要为金红石,具有很好的工业利用价值;而铁石观西榴辉岩中 TiO_2 含量较高,采集的大部分榴辉岩样品 TiO_2 含量(质量分数,下同)在 2% 以上,但钛

物相主要以钛铁矿为主,工业价值不大。在区域上,鱼卡、铁石观西都属于鱼卡—绿梁山超高压变质地块^[16],钛物相存在较大差异的原因需要进一步研究,以便更好地服务于其他超高压变质地块中榴辉岩型金红石矿床的寻找。

本文在详细野外地质填图、镜下观察以及电子探针分析的基础上,结合石榴石环带特征,利用 LA-ICP-MS 技术分析鱼卡和铁石观西榴辉岩中石榴石主、微量元素特点,揭示鱼卡和铁石观西钛矿物存在差异的原因,为柴北缘超高压变质带内进一步寻找榴辉岩型金红石矿床提供依据与方向。

1 区域地质背景

柴北缘超高压变质带位于青海省境内,呈 NWW—SEE 向展布,北侧是祁连地块,南侧为柴达木地块,东接秦岭造山带(图 1),西端被阿尔金断裂所切^[4,17],是一个形成于早古生代的典型大陆型俯冲碰撞构造带^[18-21],从东南到西北共分为都兰、锡铁山、绿梁山—铁石观西、鱼卡 4 个超高压变质体,鱼卡、铁石观西超高压变质体位于其中西段(图 1)^[19,21-22]。超高压变质带主要出露地层为中元古界鱼卡河岩群、古生界滩间山群、泥盆纪耗牛山组砂砾岩和火山碎屑岩以及城墙沟组生物碎屑灰岩、中—上新统油砂山组和狮子沟组以及较大面积分布的不同成因类型的第四纪堆积物(图 2)。区内 NW



NQL 为北祁连俯冲杂岩带; NAT 为北阿尔金俯冲杂岩带; CAB 为中阿尔金地块; QLB 为祁连地块; SAT 为南阿尔金俯冲碰撞杂岩带; NQD 为柴北缘俯冲碰撞杂岩带; 图件引自文献[23], 有所修改

图1 柴北缘超高压变质带地质简图

Fig. 1 Geological Sketch Map of the Northern Qaidam UHP Metamorphic Belt

向断裂构造发育,榴辉岩、片岩和片麻岩都受到强烈的韧性剪切。岩浆活动频繁,从元古代到晚古生代岩浆活动都有不同程度地保留,尤其是中—新元古代、早古生代岩浆活动最为强烈^[5]。

前人对鱼卡地区的榴辉岩进行了大量研究。陈丹玲等认为该地区榴辉岩中的石榴石经历了前榴辉岩相、榴辉岩相及后榴辉岩相3个主要变质演化阶段,榴辉岩中进变质矿物组合和生长环带的保存说明榴辉岩的形成经历了相对快速俯冲和折返的动力学过程^[13]。陈丹玲等在该地区得到粗粒多硅白云母榴辉岩和细粒块状榴辉岩近乎一致的变质年龄和原岩年龄,分别为 (436 ± 3) Ma 和 (431 ± 4) Ma 以及 $783 \sim 793$ Ma 和 $748 \sim 759$ Ma^[2]; Zhang 等使用含柯石英榴辉岩进行温压测定,得到峰期榴辉岩相温度(T)和压力(P)条件为 $P=2.7 \sim 3.4$ GPa, $T=610 \sim 700$ °C^[24]。Song 等研究了该地区高钛榴辉岩和低钛榴辉岩,认为高钛部分具有洋岛玄武岩的特点,岩石稀土元素总含量高,轻稀土元素表现为强富集型,而低钛类具洋中脊玄武岩的特点;同

时,结合 Nd 同位素和 U-Pb 年代学的证据,认为榴辉岩的原岩是 850 Ma 左右的大陆溢流玄武岩^[4]。陈鑫等认为铁石观西退变榴辉岩保留有超高压变质峰期矿物组合(石榴石+绿辉石+多硅白云母+金红石),大部分石榴石保留有明显的生长环带,通过用 Waters-Martin Gt-Omp-Phe 压力计^[25] 和 Ravna Gt-Omp Fe^{2+} -Mg 交换温度计^[26] 获得变质峰期温度范围为 $694 \sim 791$ °C,压力范围为 $2.5 \sim 2.6$ GPa,表明其经历了高压变质作用^[27]。宋述光等在与铁石观西相距超过 20 km 的绿梁山地区石榴橄榄岩金刚石包裹体和石榴石中发现两种辉石、金红石和钠质闪石出溶片晶等,证明柴北缘超高压变质带部分岩石经历了 $100 \sim 200$ km 地幔深度的超高压变质作用^[5,12-18,22]。张建新等在绿梁山发现了基性麻粒岩,通过传统温压计计算得到其形成的温压条件为: $P=0.96 \sim 1.35$ GPa, $T=730 \sim 870$ °C;根据石榴石中残留的绿辉石,推断该基性麻粒岩是榴辉岩退变而来^[16]。尽管不少学者在绿梁山地区进行了大量研究工作,但是否存在榴辉岩,迄今没有相关报道。

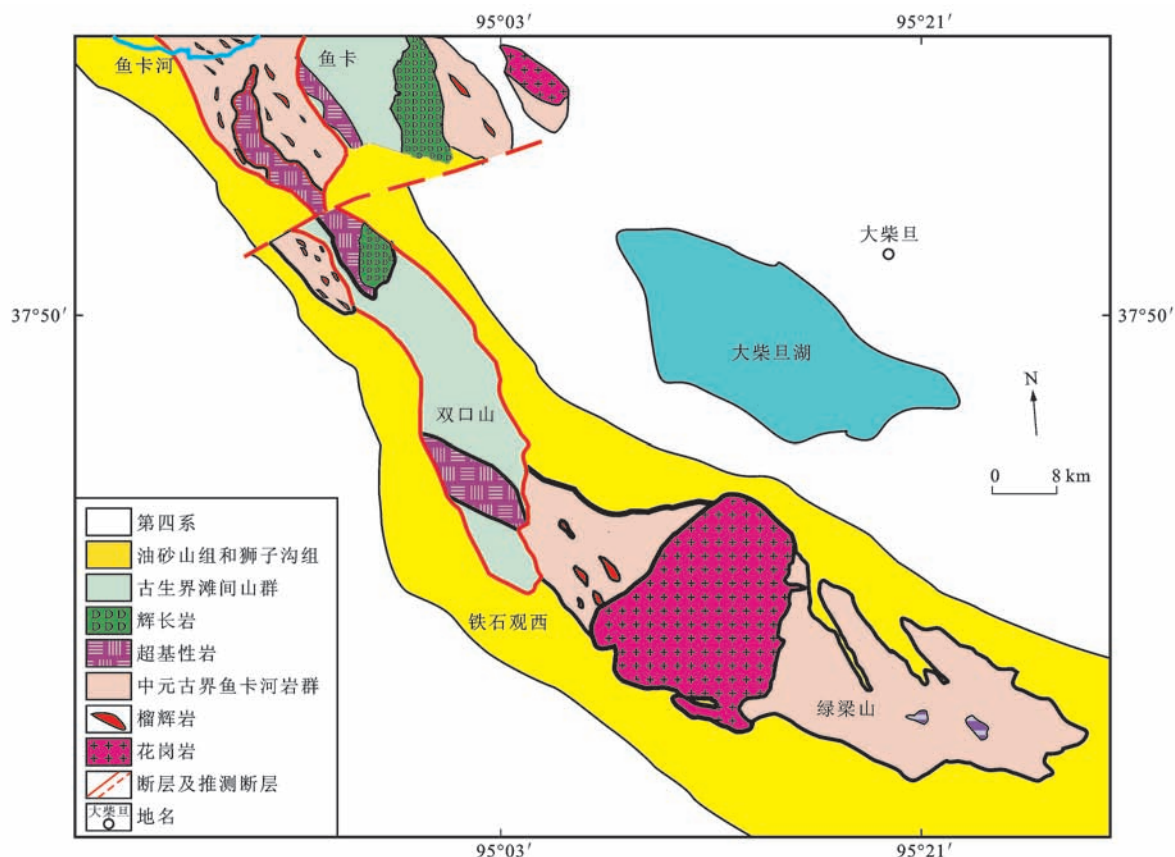


图2 鱼卡—绿梁山地区地质简图

Fig. 2 Geological Sketch Map of Yuqia-Luliangshan Area

2 矿床地质特征

鱼卡金红石矿区出露的地层主要为鱼卡河岩群, 岩性主要为云母石英片岩、大理岩、榴辉岩等, 片岩、大理岩、榴辉岩在空间上整合接触, 产状基本一致(图3), 其中与榴辉岩接触的大理岩和片岩局部具有石榴石化。矿区构造线为NW走向, 断层较为发育, 钻孔中能够看到糜棱岩化的榴辉岩等断层破碎带, 没有发现大型褶皱构造。矿区岩浆岩分布广泛。榴辉岩呈NW—SE走向, 主要呈极灰黑—灰绿色, 多呈透镜状或条带状及似层状产于云母石英片岩、英云闪长质片麻岩、大理岩之中, 整体相连, 断续分布(图3)。其中, 出露规模较大的主要分布在鱼卡河北岸, 宽度为30~80 m, 其中4号矿体断续相连长达2 000 m, TiO_2 平均品位在2.5%以上。

铁石观西一带榴辉岩呈透镜状、条带状分布在片麻岩中, 最大的榴辉岩矿体累积宽度达到80 m, TiO_2 平均品位在2%以上, 小的榴辉岩透镜体宽度仅1~3 m(图4、5)。该地区榴辉岩都表现出不同程度的退变, 其透镜体中间退变一般较弱, 石榴石颗粒较多(图5), 部分辉石为暗绿色, 边缘石榴石明显较

少, 大部分绿辉石退变为黑色角闪石, 榴辉岩中有不同宽度的伟晶岩脉侵入, 伟晶岩脉中偶见钛铁矿和金红石团块, 粒度为1~5 cm。

3 样品特征及研究方法

3.1 样品特征

鱼卡榴辉岩产自鱼卡河北岸(图3), 呈鲜绿色, 具粒状变晶结构、块状构造, 岩石的矿物组合主要为石榴石+绿辉石+黝帘石+金红石+多硅白云母+石英+角闪石[图6(a)~(c)], 其中石榴石体积分数为15%~35%, 绿辉石为25%~40%, 石英为1%~35%, 黝帘石为5%~10%, 角闪石为3%~6%。石榴石粒度为0.5~3.0 mm, 核部为较浅的粉红色, 幔边部为深红色, 即具颜色分带, 具有明显的核幔边结构。石榴石内有明显的矿物包裹体, 核部包裹的矿物主要是绿帘石+角闪石+斜长石+石英, 与陈丹玲等在鱼卡石榴石成分环带及矿物反应结构研究中的结果^[13]基本一致, 表明其形成在前榴辉岩阶段; 幔部包裹有多硅白云母、石英和金红石等矿物组合[图6(b)], 且石英均被包裹在石榴石中, 石榴石具有放射状结构[图6(d)]; 边部与绿辉石、

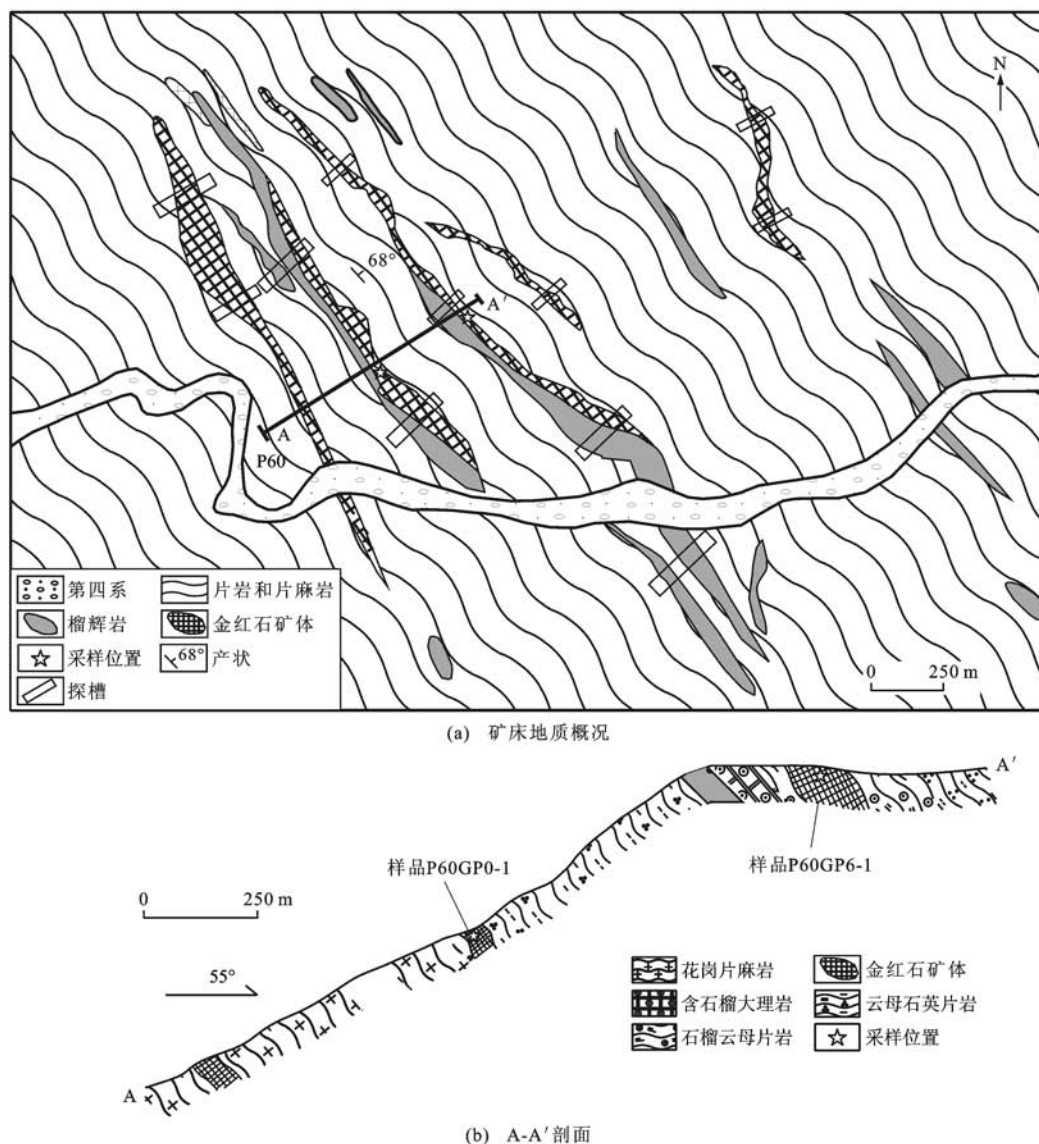


图3 鱼卡金红石矿床地质简图及剖面

Fig. 3 Sketch Geological Map of Yuqia Rutile Deposit and Its Profile

石榴石、多硅白云母和黝帘石等矿物共生[图 6(c)],属于同期变质矿物组合,表明其形成在超高压变质的峰期。绿辉石边缘局部退变为角闪石或普通辉石[图 6(c)],部分薄片中还能见到角闪石和长石形成的后成合晶,表明其经历了后期的角闪岩相变质^[12]。

铁石观西榴辉岩主要为退变榴辉岩,发育粒状变晶结构、块状构造,矿物自形程度较差。石榴石体积分数为 15%~35%,绿辉石为 15%~24%,角闪石为 20%~30%,石英为 8%~10%,斜长石为 5%~8%,金红石+钛铁矿为 1%~5%,黑云母为 2%。石榴石多裂纹,粒度一般为 0.2~1.5 mm,核幔部包裹有金红石、绿辉石,边部被斜长石、角闪石充填,没有明显的矿物环带[图 6(e)、(f)];单斜辉石有两种形

态,即包裹在石榴石中的绿辉石和绿辉石分解后形成的单斜辉石,边部有斜长石形成的白眼圈[图 5(h)、(i)],退变较强的绿辉石已经完全退变为长石和角闪石组成的后成合晶[图 6(i)]。

3.2 研究方法

钛物相分析主要使用薄片观察法,观察薄片中铁的赋存形式,进行目估统计。鱼卡地区观察近 300 片薄片,铁石观西地区观察 100 多片薄片,配合化学样(每件化学样对应一件薄片样)进行了榴辉岩中金红石和钛铁矿相对含量的划分。薄片制作工作由中国地质大学(武汉)资源学院岩矿实验室完成,薄片中铁物相统计由项目组成员完成。

鱼卡地区主要分析了 P60 剖面中的两个样品 P60GP0-1 和 P60GP6-1 的榴辉岩(图 3),铁石观西

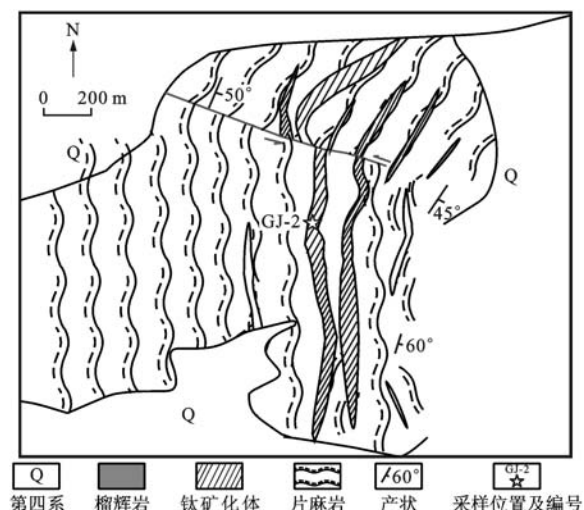


图4 铁石观西地区钛矿化体地质简图

Fig. 4 Sketch Geological Map of Titanium

Mineralization in West Tieshiguan Area

地区分析了样品 GJ-2 的榴辉岩(图 4)。矿物电子探针分析由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资

源国家重点实验室完成,首先在光学显微镜下确定矿物,对需要进行电子探针分析的矿物进行标记,然后使用 JXA-8100 电子探针分析仪对矿物的主量元素成分进行分析,试验条件包括:加速电压为 15 kV,电子束流为 20 nA,束斑直径小于 1 μm 。

石榴石的原位微区微量元素成分分析由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)完成,激光剥蚀系统是配备有 193 nm ArF-excimer 激光器的 GeoLas 2005。分析采用的激光剥蚀孔径为 32 μm ,激光脉冲为 8 Hz,能量为 80 mJ。对于单颗粒石榴石的微量元素测定,首先在电子显微镜下进行观察,将欲进行分析的单颗粒石榴石进行标记,然后对做好标记位置的石榴石利用 LA-ICP-MS 进行微量元素含量分析,一共分析 22 个点,根据 SiO_2 含量对其中的 5 个点进行剔除,得到 17 个有效分析点。分析结果见表 1、2。



(a) 鱼卡地区产于片岩中的条带状榴辉岩矿体,走向为NW—SE,矿体宽度为50~80 m



(b) 铁石观西地区产于片麻岩中条带状榴辉岩矿体,宽5~10 m,边缘有伟晶岩脉穿插



(c) 鱼卡榴辉岩矿体中石榴石变斑晶粒度达到1~3 mm



(d) 铁石观西退变榴辉岩矿体中的石榴石变斑晶

图5 鱼卡—铁石观西地区榴辉岩野外产状

Fig. 5 Field Occurrences of Eclogites in Yuqia-West Tieshiguan Area

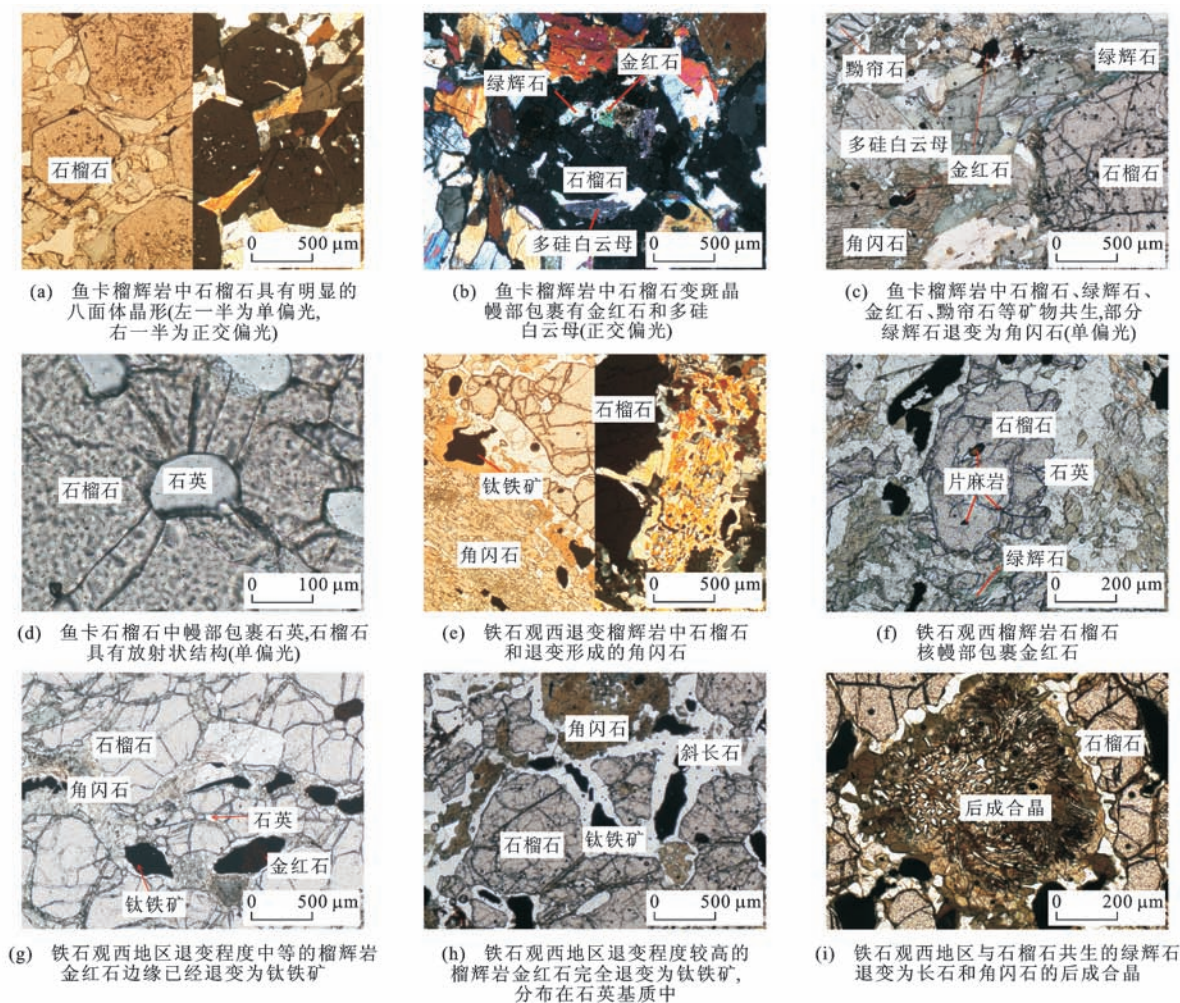


图6 鱼卡—铁石观西地区石榴石镜下照片

Fig. 6 Microscopic Photos of Garnets in Yuqia-West Tieshiguan Area

4 结果分析

4.1 钛物相分析

从大量薄片统计结果来看,鱼卡一带榴辉岩中钛的主要物相为金红石,总体平均可超过80%。金红石赋存状态大体可以分为5种,即包裹[图7(a)]、粒间充填[图7(b)]、后期串珠状[图7(c)]、蚀变残余[图7(d)]、丝缕状[图7(e)]等形式。大部分金红石呈粒状和串珠状分布在矿物颗粒间,或者包裹在矿物颗粒中。只有少部分金红石具有蚀变残余结构,边缘存在榍石和钛铁矿的退化边,充填在石榴石、绿辉石的颗粒间,这类金红石粒度较大(0.1~0.4 mm)[图7(b)]。另外,还有少量呈细粒包裹体的形式存在于石榴石或绿辉石中,这类金红石粒度普遍偏小,多在0.05~0.08 mm之间[图7(a)],丝缕状金红石粒度更小,广泛分布在石榴石或绿辉石矿物颗粒裂隙间中。这类金红石的形成主要与超高压变质

后期降压过程有关,石榴石、绿辉石中钛从矿物中转移出来,在适合的空间形成丝缕状金红石[图7(e)]。

铁石观西钛物相分析的钛铁矿占80%以上,多数钛铁矿呈粒状、串珠状分布在石英和长石组成的流体之中,少量的金红石包裹在石榴石[图7(h)]或绿辉石中。受到后期流体的影响不同,钛物相也存在差别,后期流体作用较弱的钛铁矿中心部位残留有少量金红石[图6(g)],流体作用较强的榴辉岩中金红石已经完全退变为钛铁矿[图7(i)],在入侵榴辉岩的伟晶岩中出现的黑色团块主要为金红石和钛铁矿的集合体[图7(f)],钛铁矿的成分可以占据30%[图7(g)]。

4.2 石榴石主量元素特征

鱼卡榴辉岩中石榴石主要成分为 $\text{Alm}_{47.39-58.40} \text{Sp}_{50.48-4.50} \text{Grs}_{25.64-34.45} \text{Prp}_{10.64-16.47}$,其中镁铝榴石(Prp)摩尔分数低于34.45%,在石榴石 $\text{Alm} + \text{Sps} - \text{Prp} - \text{Grs}$ 三角图解中落入C区(图8),即相当于C类^[27]。

表 1 石榴石主量元素分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Major Elements of Garnets

样品号	P60GP0- 1-04	P60GP0- 1-05	P60GP0- 1-06	P60GP0- 1-07	P60GP0- 1-08	P60GP6- 1-09	P60GP6- 1-10	P60GP6- 1-11	P60GP6- 1-12	P60GP6- 1-13	GJ- 2-01	GJ- 2-02	GJ- 2-03	GJ- 2-04	GJ- 2-05	GJ- 2-06	GJ- 2-07
$w(\text{SiO}_2)/\%$	38.91	38.28	38.87	38.09	39.89	36.57	38.18	37.84	38.09	38.53	39.16	38.12	38.68	38.91	38.05	39.02	38.42
$w(\text{TiO}_2)/\%$	0.07	0.12	0.08	0.09	0.04	0.07	0.10	0.29	0.15	0.07	0.06	0.07	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	21.34	21.01	21.12	21.39	21.77	21.65	22.79	22.31	22.34	22.48	20.95	21.24	20.96	20.85	21.06	20.66	20.84
$w(\text{Cr}_2\text{O}_3)/\%$	0.22	0.23	0.23	0.19	0.18	0.12	0.23	0.01	0.44	0.29	0.19	0.19	0.10	0.12	0.12	0.08	0.08
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$																	
$w(\text{FeO})/\%$	24.45	25.09	24.34	26.56	23.73	22.94	22.98	23.86	22.99	23.70	32.48	32.94	32.93	32.82	33.38	32.85	33.08
$w(\text{MnO})/\%$	0.36	2.01	0.87	0.42	0.22	0.47	0.44	0.71	0.55	0.48	0.21	0.23	0.31	0.42	0.51	0.68	0.66
$w(\text{MgO})/\%$	4.21	2.70	3.31	2.22	4.79	3.69	3.29	3.63	3.28	3.72	3.11	3.06	2.53	2.39	2.41	2.29	2.42
$w(\text{CaO})/\%$	10.44	10.67	11.29	11.12	9.47	12.67	11.98	11.19	12.30	10.78	3.91	4.18	4.40	4.39	4.38	4.31	4.37
$w_{\text{total}}/\%$	100.00	100.11	100.11	100.08	100.09	98.18	99.99	99.84	100.14	100.05	100.07	100.03	100.00	99.99	99.99	99.97	99.95
$w(\text{Si})/\%$	3.03	3.01	3.03	3.00	3.07	2.92	2.97	2.96	2.96	2.99	3.09	3.03	3.08	3.09	3.04	3.10	3.07
$w(\text{Ti})/\%$	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
$w(\text{Al})/\%$	1.96	1.95	1.94	1.99	1.98	2.04	2.09	2.05	2.05	2.06	1.95	1.99	1.96	1.95	1.98	1.94	1.96
$w(\text{Cr})/\%$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
$w(\text{Fe}^{3+})/\%$	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$w(\text{Fe}^{2+})/\%$	1.58	1.63	1.57	1.75	1.53	1.52	1.49	1.56	1.50	1.54	2.15	2.19	2.19	2.18	2.23	2.19	2.21
$w(\text{Mn})/\%$	0.02	0.13	0.06	0.03	0.01	0.03	0.03	0.05	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.04
$w(\text{Mg})/\%$	0.49	0.32	0.38	0.26	0.55	0.44	0.38	0.42	0.38	0.43	0.37	0.36	0.30	0.28	0.29	0.27	0.29
$w(\text{Ca})/\%$	0.87	0.90	0.94	0.94	0.78	1.08	1.00	0.94	1.03	0.90	0.33	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
$w_{\text{total1}}/\%$	7.98	7.99	7.97	7.99	7.93	8.05	7.98	8.00	7.99	7.97	7.91	7.96	7.94	7.92	7.95	7.92	7.95
$\varphi_{\text{alm}}/\%$	53.39	54.66	53.14	58.40	51.28	49.50	47.39	50.57	48.05	49.45	72.91	72.91	74.09	74.21	74.68	75.03	74.91
$\varphi_{\text{sps}}/\%$	0.80	4.50	1.95	0.93	0.48	1.04	0.93	1.53	1.17	1.02	0.48	0.52	0.70	0.95	1.15	1.57	1.51
$\varphi_{\text{grs}}/\%$	28.27	28.30	30.36	30.73	25.64	34.45	30.97	30.35	31.62	27.97	10.66	11.27	12.35	12.35	12.17	12.35	12.42
$\varphi_{\text{prp}}/\%$	16.47	10.64	13.00	8.68	18.45	14.26	12.10	13.72	12.21	13.85	12.43	12.06	10.14	9.65	9.62	9.32	9.76

注: $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量; w_{total} 为主量化合物总含量; w_{total1} 为主量元素总含量; φ_{alm} 、 φ_{sps} 、 φ_{grs} 、 φ_{prp} 分别为铁铝榴石、锰铝榴石、钙铝榴石、镁铝榴石体积分数。

石榴石主量元素具有明显的成分环带,即从核部到边部镁铝榴石摩尔分数明显升高,锰铝榴石(Sps)摩尔分数从中心到边缘逐渐降低^[23,25-29],钙铝榴石(Grs)摩尔分数呈现稍微复杂的变化,核部到核幔部摩尔分数依次升高,核幔部到边部摩尔分数又呈降低的趋势(图 9)。

铁石观西榴辉岩中石榴石主要成分为 $\text{Alm}_{72.91-75.03}\text{Sps}_{0.48-1.57}\text{Grs}_{10.66-12.42}\text{Prp}_{9.32-12.43}$,其中镁铝榴石摩尔分数低于 12.43%,在石榴石 Alm + Sps-Prp-Grs 三角图解中落入 C 区(图 8)。相对于铁石观石榴石鱼卡石榴石有明显的不同,其中铁铝榴石(Alm)明显增多,而钙铝榴石明显减少。大部分石榴石保留有生长环带^[27],部分石榴石主量元

素基本无环带分异特征,Alm、Grs、Prp、Sps 在石榴石成分剖面上呈直线分布规律[图 9(b)、(d)、(g)、(j)]。

4.3 石榴石微量元素和稀土元素特征

由鱼卡榴辉岩样品中石榴石稀土元素分析结果可知,球粒陨石标准化稀土元素配分模式为重稀土元素富集的分布模式[图 9(e)、(h)]。稀土元素总含量为 $(12.11 \sim 107.79) \times 10^{-6}$, $w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$ 值为 0.06~0.70,轻、重稀土元素之间具有明显的分馏, Eu 异常为 0.65~2.07, Ce 异常为 0.88~2.02,稀土元素环带特征明显;中心部位稀土元素含量相对边部较低(表 2),在样品 P60GP6-1 中一颗石榴石从中心到边部稀土元素含量依次升高[图 9(h)]。

表 2 石榴石微量元素和稀土元素分析结果

Tab. 2 Analysis Results of Trace and Rare Earth Elements of Garnets

样品号	P60GP0- 1-04	P60GP0- 1-05	P60GP0- 1-06	P60GP0- 1-07	P60GP0- 1-08	P60GP6- 1-09	P60GP6- 1-10	P60GP6- 1-11	P60GP6- 1-12	P60GP6- 1-13	GJ- 2-01	GJ- 2-02	GJ- 2-03	GJ- 2-04	GJ- 2-05	GJ- 2-06	GJ- 2-07
$w(\text{Li})/10^{-6}$	4.06	7.65	3.25	2.75	1.77	4.47	6.13	5.84	5.04	3.10	3.06	5.28	2.70	5.44	5.18	5.57	6.49
$w(\text{B})/10^{-6}$	4.67	4.62	4.69	4.57	4.66	3.86	4.09	4.04	4.90	4.14	3.15	3.10	3.13	3.59	3.28	3.44	3.44
$w(\text{Sc})/10^{-6}$	106.76	80.39	117.29	102.00	58.21	60.41	75.89	54.64	67.39	66.22	28.60	49.13	105.49	143.65	160.95	131.12	135.20
$w(\text{V})/10^{-6}$	112.67	121.43	133.49	124.75	63.84	77.58	178.55	151.10	207.77	95.02	276.66	274.35	241.08	229.79	191.71	171.86	182.67
$w(\text{Cr})/10^{-6}$	152.79	158.84	159.38	130.71	126.01	83.50	157.04	10.08	303.84	198.20	127.77	130.83	69.41	78.95	83.63	53.12	55.66
$w(\text{Ga})/10^{-6}$	10.92	4.25	6.04	10.20	8.21	10.31	10.19	7.57	9.52	9.72	8.69	8.80	7.94	7.52	6.98	7.22	7.72
$w(\text{La})/10^{-6}$						2.11	0.61	0.06	2.14	2.48							0.01
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	0.01					5.94	1.61	0.17	6.75	6.99		0.07	0.01		0.01		0.04
$w(\text{Pr})/10^{-6}$		0.01				1.31	0.28	0.01	0.78	0.87	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01		0.01
$w(\text{Nd})/10^{-6}$						7.72	0.81	0.16	2.57	2.59	0.34	0.29	0.48	0.51	0.40	0.23	0.34
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	0.04		0.04		0.04	4.86	0.27	0.17	0.93	1.19	1.22	1.79	2.34	2.30	2.35	2.33	2.24
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	0.15	0.02	0.04	0.09	0.18	1.42	0.15	0.09	0.40	0.82	0.87	0.84	1.25	1.44	1.58	1.76	1.60
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	1.94	0.03	0.25	0.84	1.91	9.35	1.22	1.03	1.79	5.42	2.34	2.93	3.50	3.62	6.01	5.70	5.64
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	1.56	0.08	0.17	0.60	1.35	2.18	0.57	0.26	0.36	3.00	0.35	0.71	0.82	0.64	0.94	0.90	1.02
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	20.62	2.17	4.44	10.19	12.63	20.23	7.33	2.74	5.11	31.63	1.80	4.76	5.77	3.94	7.16	4.40	4.86
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	4.57	1.11	1.68	3.81	1.54	4.44	2.00	0.75	1.32	7.39	0.29	0.77	1.14	0.75	1.13	0.83	0.85
$w(\text{Er})/10^{-6}$	10.70	7.24	9.13	10.90	3.33	12.90	6.40	2.52	4.86	21.80	0.85	2.30	2.88	2.34	4.16	1.93	2.42
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	1.26	1.66	1.32	1.39	0.46	1.99	0.94	0.40	0.72	2.99	0.09	0.24	0.39	0.34	0.45	0.22	0.25
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	6.63	17.6	9.68	8.47	2.88	12.20	5.53	3.19	4.36	18.10	0.61	1.61	2.32	1.88	2.77	1.06	1.47
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	1.13	3.18	1.51	0.94	0.53	1.91	1.04	0.56	0.86	2.52	0.09	0.20	0.31	0.21	0.34	0.16	0.18
$w(\text{Y})/10^{-6}$	106.0	35.5	54.4	106.0	39.2	116.0	52.6	22.7	38.9	184.0	11.0	25.9	31.7	23.5	36.6	25.0	25.7
$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	48.61	33.10	28.26	37.23	24.85	88.56	28.76	12.11	32.95	107.79	8.85	16.54	21.23	17.98	27.31	19.52	20.93
$w_{\text{LREE}}/10^{-6}$	0.20	0.03	0.08	0.09	0.22	23.36	3.73	0.66	13.57	14.94	2.44	3.02	4.10	4.26	4.35	4.32	4.24
$w_{\text{HREE}}/10^{-6}$	48.41	33.07	28.18	37.14	24.63	65.20	25.03	11.45	19.38	92.85	6.41	13.52	17.13	13.72	22.96	15.20	16.69
Eu 异常	1.71	0.90	1.20	0.87	2.07	0.65	0.77	0.68	0.96	0.98	1.57	1.12	1.34	1.53	1.29	1.48	1.38
Ce 异常	0.97	1.00	1.09	0.89	0.95	0.88	0.96	2.02	1.29	1.17	1.17	1.12	0.99	1.12	1.03	1.01	0.98

注: w_{REE} 为稀土元素总含量; w_{LREE} 为轻稀土元素总含量; w_{HREE} 为重稀土元素总含量。

铁石观西榴辉岩样品中石榴石稀土元素分析结果可知[图 9(k)],球粒陨石标准化稀土元素配分模式为中、重稀土元素配分从陡峭型过渡到平坦型,富集中稀土元素,稀土元素总含量为 $(8.85\sim27.31)\times10^{-6}$, $w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$ 值介于 $0.19\sim0.38$,轻、重稀土元素之间发生明显的分馏,Eu 异常为 $1.12\sim1.57$,稀土元素环带特征明显,总体上表现为石榴石中心富集重稀土元素,边缘重稀土元素含量相对较少(表 2)。

从微量元素来看,鱼卡和铁石观西石榴石都表现出一定的微量元素环带, TiO_2 环带较为明显,石榴石中的 TiO_2 从核部到边部有减少趋势。其他元素 Li、Sc、Y、V、Ga 及 Tb 在石榴石核部和边部有一定的差异(表 2)。

5 讨 论

5.1 石榴石环带特征

石榴石具有难熔和流体中低溶解能力的特点,是研究高级变质作用的重要矿物之一。石榴石的化学成分环带与温度、压力以及与之平衡的共生矿物组合密切相关。利用石榴石来研究榴辉岩经历的变质演化过程有非常广泛的应用^[30-33],但是当温度超过 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且持续一定时间时,石榴石中主量元素环带很容易受到热扩散影响而被改造甚至均一化^[32],而稀土元素和高场强元素由于具有较大的离子半径,热扩散作用对其影响不大,环带可以得到很好的保存^[33-34]。与主量元素成分相比,石榴石内微量元

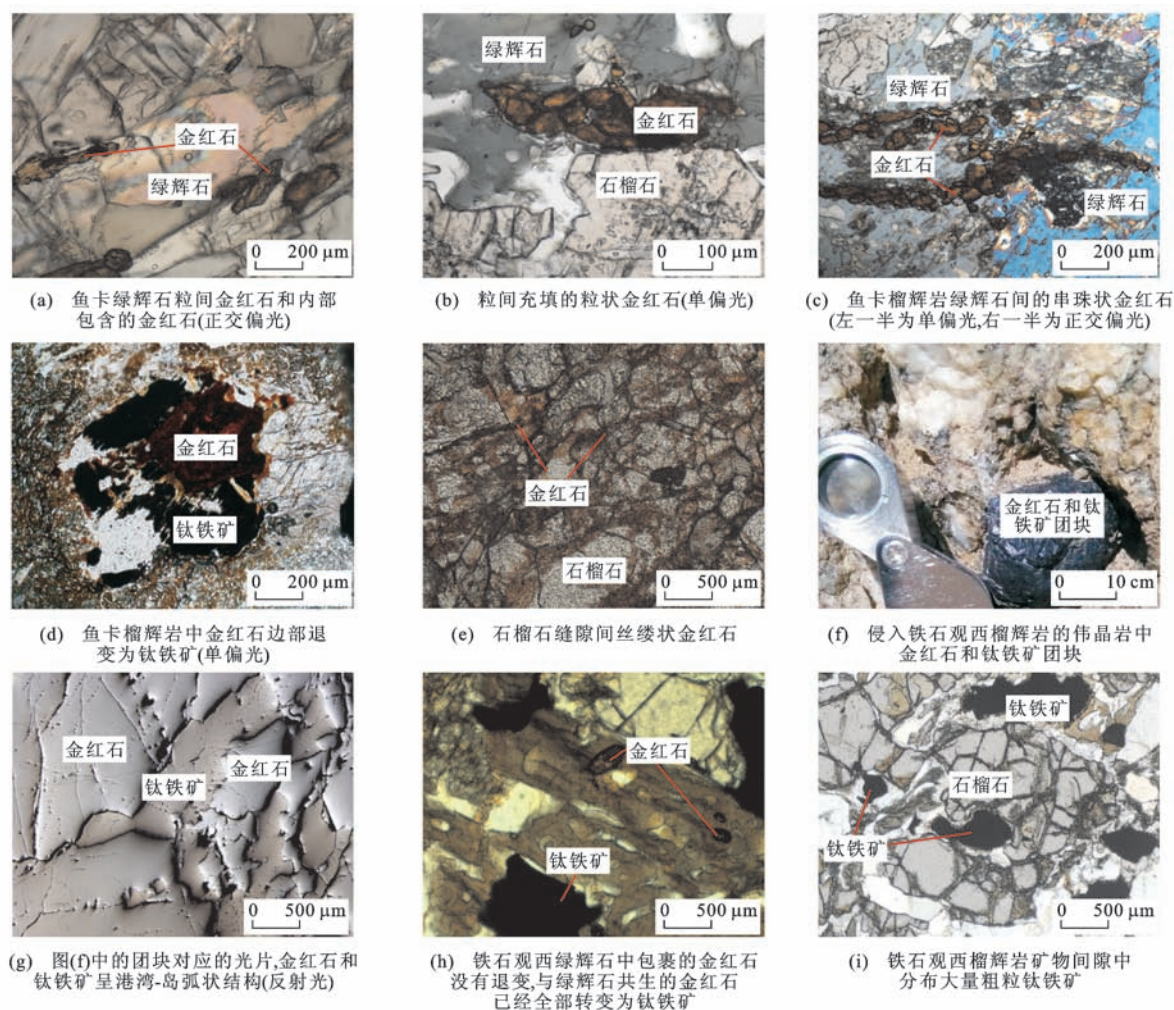
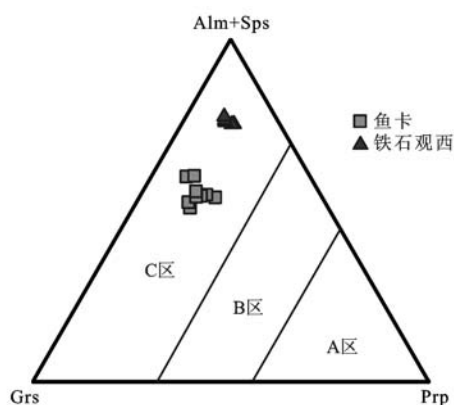


图 7 鱼卡—铁石观西地区金红石赋存状态

Fig. 7 Occurrences of Rutile in Yuqia-West Tieshiguan Area



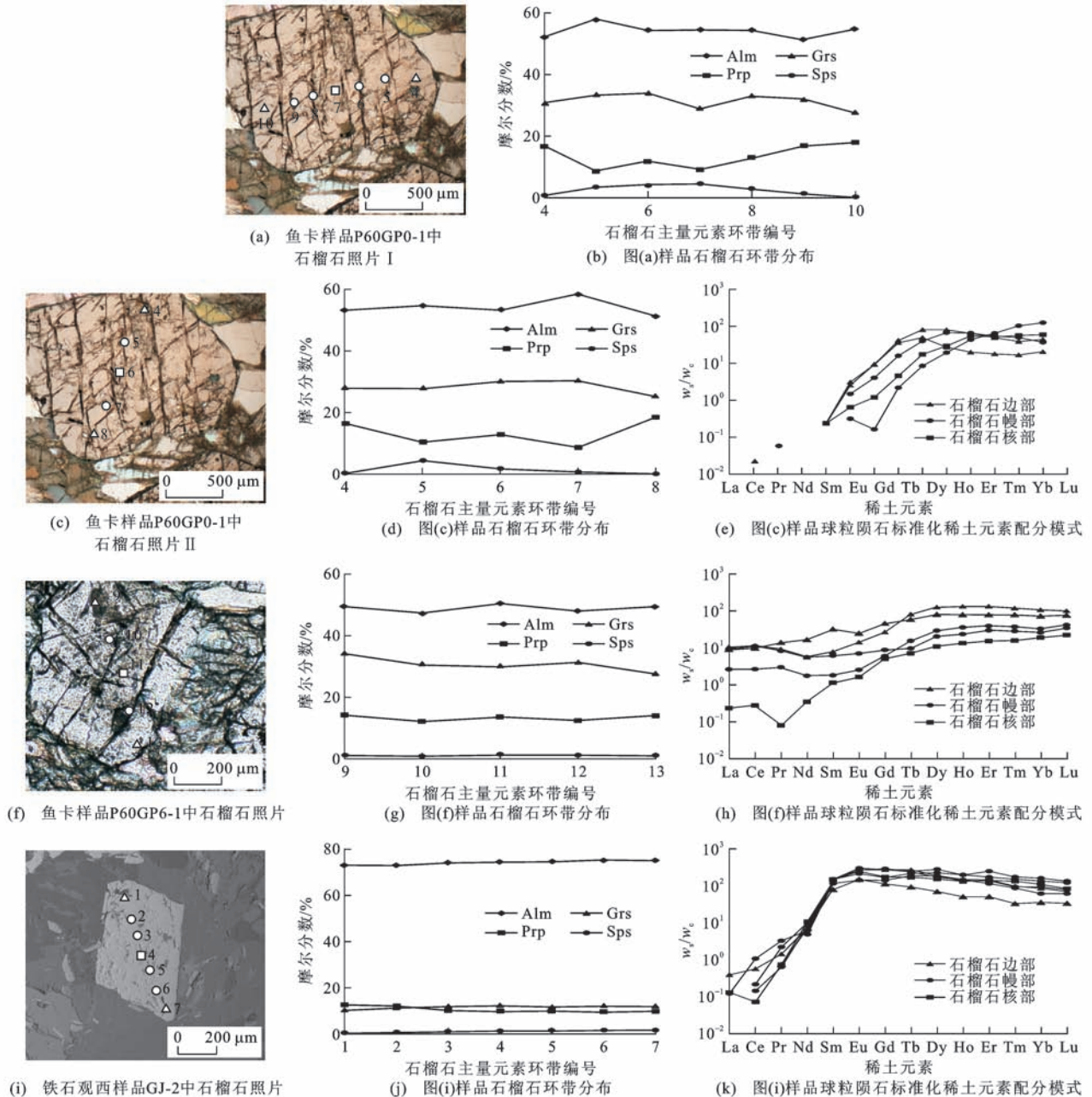
A 区为金伯利岩、玄武岩中的包体及超镁铁岩中的层状榴辉岩体;B 区为角闪岩相或麻粒岩相地体的副片麻岩或混合岩带透镜状榴辉岩;C 区为阿尔卑斯型变质岩或蓝片岩中的带状榴辉岩透镜体;图件引自文献[28]

图 8 鱼卡和铁石观西榴辉岩中石榴石成分图解

Fig. 8 Composition of Garnets from Yuqia and West Tieshiguan Eclogites

素成分对岩石形成的化学动力学和矿物组合的变化更为敏感,可以很好地指示与石榴石的生长或重结晶相关的矿物化学反应^[35]。结合矿物学特征,研究鱼卡和铁石观西石榴石主、微量元素成分的差异,进一步分析差异存在的原因。

鱼卡石榴石颜色从宏观上就有较好的分带,矿物包裹体分带特征明显,核部包裹长石、角闪石等高压阶段形成的矿物,幔边部包裹有绿辉石、多硅白云母和金红石等超高压阶段形成的矿物。在主量元素分布上,石榴石都有明显的主量元素环带,镁铝榴石含量从石榴石核部到边部不断升高,而钙铝榴石从核部到幔部先升高,然后从幔部到边部降低,锰铝榴石有明显的钟型分布特征^[29]。钙铝榴石含量与压力呈正相关,镁铝榴石含量与温度也呈正相关^[36-38]。这一成分环带可以看出石榴石核部到边部温度都在升高,而压力从核部到核幔部逐步升高,但是从核幔



w_s 为样品含量; w_c 为球粒陨石含量; 图(a)、(c)、(f)、(i)中编号为石榴石主量元素环带编号, 编号对应的正方形为石榴石核部, 对应的圆形为石榴石幔部, 对应的三角形为石榴石边部; 图(e)、(h)、(k)中, 相同线条对应不同样品; 球粒陨石参考值引自文献[39]

图9 鱼卡和铁石观西榴辉岩中石榴石镜下照片、主量元素环带分布和球粒陨石标准化稀土元素配分模式

Fig. 9 Microscopic Photos, Major Element Distributions and Chondrite-normalized REE Patterns of Garnets from Yuqia and West Tieshiguan Eclogites

部到边部逐渐降低, 表明石榴石的峰期变质温度和压力不是同时到达的, 且温度的峰值晚于压力的峰值, 但榴辉岩中进变质矿物组合和生长环带的保存说明榴辉岩的形成经历了相对快速俯冲和折返的动力学过程^[13]。

在分析稀土元素和微量元素含量时, 鱼卡石榴石也呈现出明显的环带, 从核部到边部都出现 Eu 异常, 总体趋势为从核部到边部 Eu 异常有上升趋

势, 这主要与石榴石生长过程中在核部和边缘经历角闪岩相向榴辉岩相过渡有关: 在角闪岩相环境中出现强烈的负 Eu 异常, 在榴辉岩相环境中为正 Eu 异常; 石榴石中心部位显示负 Ce 异常, 而边缘显示正 Ce 异常, 这说明石榴石在经历前榴辉岩相向榴辉岩相转变过程中, 环境发生了变化, 由氧化环境转变到一种还原环境, 这也符合超高压变质过程中随着俯冲深度的增加而氧气逐渐变少的过程; 石榴石

核部到边部稀土元素有增加趋势,稀土元素由于其较大的粒子半径,在向超高压转变过程中,在较高的温压条件下进一步进入矿物相中^[30]。以上特征表明,石榴石核部和幔边在形成过程中经历了不同的环境。结合前人的研究成果^[13],石榴石在变质的不同阶段一直在生长。

铁石观西地区矿物自形程度差,石榴石多裂纹,石榴石中包裹体较少,石榴石的核幔部包裹有少量的金红石和绿辉石,石榴石边部具有斜长石形成的白眼圈,在区域上被认为主要与后期的麻粒岩相叠加有关,因为围岩存在麻粒岩相叠加的证据^[16]。大部分石榴石保留有生长环带,部分石榴石主量元素已经完全均一化,镁铝榴石、钙铝榴石、铁铝榴石和锰铝榴石在石榴石剖面中核幔差异不大,在剖面上接近直线,也说明了此榴辉岩经历了高温叠加。稀土元素特征表明,少量石榴石的核部稀土元素含量较高,边部相对较低,说明石榴石核部生长环境相对边部压力条件更高,导致稀土元素在核部更富集。核部和边部都出现正 Eu 异常,说明岩石在发生超高压变质过程中没有斜长石产生,对应的核部也没有长石矿物发现。而微量元素大离子亲石元素、过渡金属元素、高场强元素等在一定程度上也表现为均一化,只有少部分元素(如稀土元素、Li 和 Sc 等)在核幔边的差异较大,这可能主要与这些元素的离子半径有关^[40],在高温作用下,微量元素在石榴石中的扩散速度差异不同,被均一化的程度不同。以上特征表明,该石榴石也经历过不同的生长阶段,由于峰期温度较高,后期经历麻粒岩相的叠加,导致部分石榴石受到不同程度的均一化。

5.2 钛成矿作用阶段划分

柴北缘榴辉岩型金红石矿床与大别—苏鲁地区发现的榴辉岩型金红石矿床构造背景、空间分布特征相似,矿体形态特征、矿体规模品位、矿石组构特征相近,金红石赋存状态相似^[15]。王汝成等根据大别—苏鲁地区发现的榴辉岩型金红石矿床,认为大陆板块汇聚边界的钛成矿作用经历了原岩的初始富集、陆壳物质俯冲过程中钛的成矿作用、俯冲板块折返过程中钛的成矿作用和流体阶段钛的成矿作用等 4 个主要成矿阶段^[41]。本地区与这 4 个阶段基本一致,第一阶段为原岩的初始富集,榴辉岩中钛的原始富集主要与原岩相关,富钛基性原岩是榴辉岩型金红石矿床形成的物质基础,高压区域变质作用是这

类矿床形成的必要条件^[42],结合本地区鱼卡和铁石观西榴辉岩经历的超高压变质作用,部分榴辉岩中 TiO₂ 含量较高,具备形成榴辉岩型金红石矿床的条件。第二阶段为陆壳物质俯冲过程中钛的成矿作用,该阶段为金红石形成的主要阶段,根据石榴石环带证据,又可以分为 2 个亚阶段,即前榴辉岩相阶段和榴辉岩相阶段。前榴辉岩相阶段几乎不形成金红石,钛基本以游离态和钛铁矿的形式存在,使得石榴石中心钛含量较高;榴辉岩相阶段为峰期阶段,是金红石的主成矿阶段,金红石分布在石榴石和绿辉石中的不同部位,其中鱼卡榴辉岩主要分布在幔部和边部,而铁石观西榴辉岩在核部也有出现,该阶段在基质中最容易形成粒状和串珠状金红石,主要来自角闪石和钛铁矿反应,生成金红石、绿辉石和水,反应式为 $\text{Na}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2 + 3\text{CaTiSiO}_5 = 3\text{TiO}_2 + 2\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 + 3\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ^[43]。笔者依据 Tomkins 等提出的在 2.5 GPa 条件下金红石锆石含量温度计^[44]进行计算,得到鱼卡地区温度范围为 625 °C~725 °C,其与峰期变质温度一致,也得到铁石观西地区温度范围为 754 °C~991 °C(未发表),温度较高。为什么会出现这么高的温度范围?笔者还未得出合理解释,可能因为含有亚颗粒的锆石包裹体。总之,鱼卡和铁石观西地区金红石主要形成在超高压峰期阶段。金红石的大量形成导致石榴石中幔部和边部钛含量较少。第三阶段为俯冲板块折返过程中钛的成矿作用,根据石榴石环带证据,鱼卡和铁石观西地区都经历了折返过程,石榴石环带说明温度在升高,而压力在降低,在这种情况下金红石将会出溶,在绿辉石和石榴石中游离的钛出溶形成一些金红石微粒,在鱼卡和铁石观西地区都已经见到了在矿物颗粒间出溶的针状金红石,变质反应式为 $\text{M}_3(\text{MTi})\text{SiO}_{12} + \text{CaAl}_2\text{SiO}_6 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{M}_3\text{Al}_{12}\text{Si}_3\text{O}_{12} + \text{TiO}_2 + \text{CaMSi}_2\text{O}_6$ ^[45],在矿物颗粒间隙可以形成丝缕状金红石[图 7(e)],在鱼卡地区见到的丝缕状金红石较多,铁石观西地区没有发现这种丝缕状金红石。在折返过程中,随着温压条件的改变,金红石会变成钛铁矿,反应式为 $\text{TiO}_2 + \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{FeTiO}_3$ ^[46],鱼卡地区该阶段持续时间短,金红石少部分发生退变,铁石观西地区该阶段持续时间较长,金红石在该阶段基本全部转变为钛铁矿,只有少部分矿物中包裹的金红石没有发生退变。随着流体的增强,金红石或钛铁矿可能转变为榍石^[47],

在金红石和钛铁矿中经常出现榍石边。第四阶段为流体阶段钛的成矿作用,伴随着超高压变质的折返,岩浆活动的增强也会影响到钛的迁移,在铁石观西伟晶岩中发现大量的钛铁矿团块,说明在后期强流体作用下,钛元素发生了迁移,在适当的空间内形成了钛铁矿和金红石团块[图7(f)]。

5.3 石榴石环带对金红石成矿的指示意义

柴北缘高压—超高压变质带中不同地点的榴辉岩在形成过程中经历了同一峰期变质事件,但在折返过程中经历了不同的构造热演化历史^[13]。陈丹玲等在鱼卡地区使用粗粒多硅白云母榴辉岩和细粒块状榴辉岩中锆石 LA-ICP-MS 微区定年,得到的加权平均年龄((434±2)Ma)代表鱼卡河超高压榴辉岩的变质年龄和大陆深俯冲的时代^[2]。铁石观西地区没有进行定年工作,距离铁石观西地区不到30 km 的绿梁山地区石榴橄榄岩和石榴辉石岩锆石 U-Pb 定年超高压变质峰期年龄为 420~430 Ma^[12],说明铁石观西地区经历超高压变质的时限与鱼卡地区基本一致,鱼卡和铁石观西地区等都同时经历了同一期超高压变质作用。

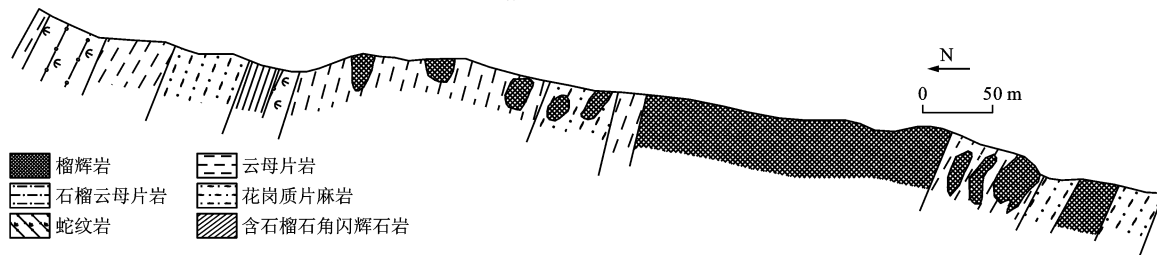
然而,鱼卡榴辉岩中进变质矿物组合和生长环带的保存说明榴辉岩的形成经历了相对快速俯冲和折返的动力学过程^[13],其冷却速率为 13~19 °C·Ma⁻¹^[5,48]。在俯冲板块折返过程中钛的成矿作用和流体阶段钛的成矿作用中,金红石很少转变为钛铁矿,导致鱼卡地区形成了一个大型以上的榴辉岩型金红石矿床。铁石观西地区矿物温度计和金红石锆石含量温度计测得温度都较高,金红石主要形成在超高压变质峰期阶段,后期经历了麻粒岩相的叠加,流体作用较强。笔者近期在与铁石观西相距 30 km 的绿梁山地区发现了榴辉岩,并得到从超高压榴辉岩相到高压麻粒岩相的折返速率为每年 2 mm,经历的冷却速率为 5~11 °C·Ma⁻¹(未发表),石榴石环带信息

说明该地区榴辉岩经历的峰期温度较高,后期退变较强,部分石榴石出现均一化。这些信息可以得出铁石观西地区经历了一个快速俯冲而折返速率缓慢的动力学过程。

柴北缘超高压变质带从都兰、锡铁山、绿梁山、铁石观西到鱼卡一带,长达 400 km,形成超大型金红石矿床的可能性很大。各变质体经历的超高压变质时间基本一致,但折返过程经历的构造热历史不同^[13],因此,形成钛矿床的可能性也不同。锡铁山榴辉岩主要为退变榴辉岩,峰期温压条件为 $T=745\text{ °C} \sim 790\text{ °C}$, $P>2.8\text{ GPa}$ ^[49],锡铁山超高压变质带冷却速率为 3~4 °C·Ma⁻¹,锡铁山地区的冷却速率过慢,其岩相学特征与铁石观西地区相似,形成金红石矿床的可能性较小。都兰榴辉岩主要分为南带和北带,都兰南带榴辉岩折返过程中经历了高压麻粒岩相变质的改造,高压麻粒岩阶段的温压条件为 $P=1.9\sim2.0\text{ GPa}$, $T=873\text{ °C} \sim 948\text{ °C}$,并进一步经历了角闪岩相退化变质。都兰南带榴辉岩折返速率较慢,发生了壳幔过渡带(或加厚的深部地壳)层次的强烈热松弛^[22],矿物退变较大,形成金红石矿床的可能性小;都兰北带榴辉岩柯石英假象和温压计算表明榴辉岩峰期变质的压力(2.8~3.3 GPa)都在柯石英的稳定域,主要为新鲜的榴辉岩,基本没有发生退变质^[5],与鱼卡榴辉岩岩相学特征相似。宋述光等在都兰北带发现了大量榴辉岩,单个榴辉岩体最大厚度可达 200 m(图 10),TiO₂ 分布不均^[1]。10 个榴辉岩原岩样品中,TiO₂ 平均含量为 1.98%,最高含量可达 5.48%(表 3),具有一定的找矿潜力^[1]。

6 结 语

(1)鱼卡榴辉岩中石榴石较自形,含有较多的包裹体,主量元素环带明显,稀土元素整体表现出富集重稀土元素配分模式,幔边部相对核部更富集稀土



图件引自文献[1]

图 10 都兰北带榴辉岩剖面

Fig. 10 Profile of Eclogite in the Northern Belt of Dulan

表 3 都兰北带部分榴辉岩 TiO_2 含量
Tab. 3 TiO_2 Contents of Some Eclogites in the
Northern Belt of Dulan

地区	采样点位	$w(\text{TiO}_2)/\%$
都兰北带	99Y102	1.66
都兰北带	99Y113	5.48
都兰北带	99Y115	1.66
都兰北带	99Y308	1.15
都兰北带	99Y318	1.78
都兰北带	99Y319	1.97
都兰北带	99Y313	2.16
都兰北带	00Y201	1.19
都兰北带	00Y204	1.12
都兰北带	00Y209	1.62

注:表引自文献[1]。

元素。鱼卡榴辉岩中石榴石经历了多期生长阶段,且石榴石的峰期变质温度和压力不是同时到达的,温度的峰值晚于压力的峰值。结合岩相学和石榴石环带证据,鱼卡地区经历了相对快速的俯冲和折返历史,导致鱼卡地区形成了一个大型以上的金红石矿床。

(2)铁石观西榴辉岩主要为退变榴辉岩,矿物自形程度较差。石榴石包裹体数量很少,部分主量元素已经完全均一化,石榴石核幔部相对边部更富集稀土元素;石榴石也经历了多期生长,但是峰期温度较高,后期退变质作用较强,榴辉岩发生了明显的退变质作用。结合岩相学和年龄证据,铁石观西地区经历了快速俯冲而折返速率缓慢的动力学过程,导致铁石观西榴辉岩中的金红石大多变成了钛铁矿。

(3)鱼卡和铁石观西地区岩相学和动力学对比分析表明,金红石保存完好主要与后期榴辉岩的折返过程相关,折返速率和冷却历史是制约金红石成矿的关键因素。折返速率过慢和冷却历史过长使得榴辉岩发生强烈的退变质作用。对比柴北缘超高压变质带各超高压变质地体的岩相学特征和折返过程,除鱼卡地区外,都兰北带榴辉岩中 TiO_2 含量较高,后期退变质作用影响较小,榴辉岩较为新鲜,具有形成金红石矿床的潜力。

野外工作中,项目组其他成员提供了大量帮助,薄片观察得到中国地质大学(武汉)资源学院陆建培老师的认真指导,在此一并感谢!

参考文献:

References:

- [1] SONG S G, YANG J S, LIOU J G, et al. Petrology, Geochemistry and Isotopic Ages of Eclogites from the Dulan UHPM Terrane, the North Qaidam, NW China [J]. *Lithos*, 2003, 70(3/4): 195-211.
- [2] 陈丹玲, 孙 勇, 刘 良, 等. 柴北缘鱼卡河榴辉岩的超高压变质年龄: 锆石 LA-ICP-MS 微区定年[J]. 中国科学: D 辑, 地球科学, 2007, 37(增 1): 279-287. CHEN Dan-ling, SUN Yong, LIU Liang, et al. Ultrahigh Pressure Metamorphic Age of Eclogites in Qaidam Yuqia River: Zircon Dating LA-ICP-MS Micro Area[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2007, 37(S1): 279-287.
- [3] 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 柴达木盆地北缘早古生代高压—超高压变质带中发现典型超高压矿物: 柯石英[J]. 地质学报, 2001, 75(2): 175-179. YANG Jing-sui, SONG Shu-guang, XU Zhi-qin, et al. Discovery of Coesite in the North Qaidam Early Paleozoic Ultrahigh-high Pressure (UHP-HP) Metamorphic Belt, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2): 175-179.
- [4] SONG S G, SU L, LI X H, et al. Tracing the 850 Ma Continental Flood Basalts from a Piece of Subducted Continental Crust in the North Qaidam UHPM Belt, NW China[J]. *Precambrian Research*, 2010, 183(4): 805-816.
- [5] SONG S G, NIU Y L, SU L, et al. Continental Orogenesis from Ocean Subduction, Continent Collision/Subduction, to Orogen Collapse, and Orogen Recycling: The Example of the North Qaidam UHPM belt, NW China[J]. *Earth-science Reviews*, 2014, 129: 59-84.
- [6] SONG S G, SU L, NIU Y L, et al. Two Types of Peridotite in North Qaidam UHPM Belt and Their Tectonic Implications for Oceanic and Continental Subduction: A Review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(3/4): 285-297.
- [7] XIONG Q, ZHENG J P, GRIFFIN W L, et al. Zircons in the Shenglikou Ultrahigh-pressure Garnet Peridotite Massif and Its Country Rocks from the North Qaidam Terrane (Western China): Meso-Neoproterozoic Crust-mantle Coupling and Early Paleozoic Convergent Plate-margin Processes[J]. *Precambrian Research*, 2011, 187(1/2): 33-57.
- [8] SONG S G, YANG J S, XU Z Q, et al. Metamorphic

- Evolution of the Coesite-bearing Ultrahigh-pressure Terrane in the North Qaidam, Northern Tibet, NW China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2003, 21(6):631-644.
- [9] ZHANG G B, ELLIS D J, CHRISTY A G, et al. UHP Metamorphic Evolution of Coesite-bearing Eclogite from the Yuka Terrane, North Qaidam UHPM Belt, NW China[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2009, 21(6):1287-1300.
- [10] LIU X C, WU Y B, GAO S, et al. First Record and Timing of UHP Metamorphism from Zircon in the Xitieshan Terrane: Implications for the Evolution of the Entire North Qaidam Metamorphic Belt[J]. *American Mineralogist*, 2012, 97(7):1083-1093.
- [11] 吴才来, 郜源红, 李兆丽, 等. 都兰花岗岩锆石 SHRIMP 定年及柴北缘超高压带花岗岩年代学格架[J]. *中国科学:地球科学*, 2014, 44(10):2142-2159.
- WU Cai-lai, GAO Yuan-hong, LI Zhao-li, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Granites from Dulan and the Chronological Framework of the North Qaidam UHP Belt, NW China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(10):2142-2159.
- [12] SONG S G, ZHANG L F, NIU Y L, et al. Geochronology of Diamond-bearing Zircons from Garnet Peridotite in the North Qaidam UHPM Belt, Northern Tibetan Plateau: A Record of Complex Histories from Oceanic Lithosphere Subduction to Continental Collision[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 234(1/2):99-118.
- [13] 陈丹玲, 孙勇, 刘良, 等. 柴北缘鱼卡河榴辉岩的变质演化: 石榴石成分环带及矿物反应结构的证据[J]. *岩石学报*, 2005, 21(4):1039-1048.
- CHEN Dan-ling, SUN Yong, LIU Liang, et al. Metamorphic Evolution of the Yuka Eclogite in the North Qaidam, NW China: Evidences from the Compositional Zonation of Garnet and Reaction Texture in the Rock[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(4):1039-1048.
- [14] 朱小辉, 陈丹玲, 刘良, 等. 柴北缘绿梁山地区早古生代弧后盆地型蛇绿岩的年代学、地球化学及大地构造意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3):822-834.
- ZHU Xiao-hui, CHEN Dan-ling, LIU Liang, et al. Geochronology, Geochemistry and Significance of the Early Paleozoic Back-arc Type Ophiolite in Luliangshan Area, North Qaidam[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(3):822-834.
- [15] 王永开, 徐永利, 郑有业, 等. 柴达木盆地北缘鱼卡—铁石观一带金红石矿床的发现及其地质意义[J]. *地质通报*, 2014, 33(6):900-911.
- WANG Yong-kai, XU Yong-li, ZHENG You-ye, et al. The Discovery of Rutile Deposits in Yuqia-Tieshiguan Area on the Northern Margin of Qaidam Basin and Its Geological Significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(6):900-911.
- [16] 张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 等. 柴北缘绿梁山高压基性麻粒岩的变质演化历史: 岩石学及锆石 SHRIMP 年代学证据[J]. *地学前缘*, 2007, 14(1):85-97.
- ZHANG Jian-xin, MENG Fan-cong, YU Sheng-yao, et al. Metamorphic History Recorded in High Pressure Mafic Granulites in the Luliangshan Mountains to the North of Qaidam Basin, Northwest China: Evidence from Petrology and Zircon SHRIMP Geochronology[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1):85-97.
- [17] 张贵宾, 张立飞, 宋述光. 柴北缘超高压变质带: 从大洋到大陆的深俯冲过程[J]. *高校地质学报*, 2012, 18(1):28-40.
- ZHANG Gui-bin, ZHANG Li-fei, SONG Shu-guang. An Overview of the Tectonic Evolution of North Qaidam UHPM Belt: From Oceanic Subduction to Continental Collision[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2012, 18(1):28-40.
- [18] 宋述光, 张立飞, 牛耀龄, 等. 大陆碰撞造山带的两类橄榄岩: 以柴北缘超高压变质带为例[J]. *地学前缘*, 2007, 14(2):129-138.
- SONG Shu-guang, ZHANG Li-fei, NIU Yao-ling, et al. Two Types of Peridotite in Continental Orogenic Belts: A Case Study from the North Qaidam UHP Metamorphic Belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(2):129-138.
- [19] 宋述光, 张贵宾, 张聪, 等. 大洋俯冲和大陆碰撞的动力学过程: 北祁连—柴北缘高压—超高压变质带的岩石学制约[J]. *科学通报*, 2013, 58(23):2240-2245.
- SONG Shu-guang, ZHANG Gui-bin, ZHANG Cong, et al. Dynamic Process of Oceanic Subduction and Continental Collision: Petrological Constraints of HP-UHP Belts in Qilian-Qaidam, the Northern Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(23):2240-2245.
- [20] 张立飞, 吕增, 张贵宾, 等. 大洋型超高压变质带的地质特征及其研究意义: 以西南天山、柴北缘超高压变质带为例[J]. *科学通报*, 2008, 53(18):2166-2175.
- ZHANG Li-fei, LU Zeng, ZHANG Gui-bin, et al. Ocean Type Ultrahigh Pressure Metamorphic Zone of Geo-

- logical Characteristics and the Research Significance: An Example in Southwest Tianshan Mountains, Qaidam Ultrahigh Pressure Metamorphic Zone[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(18): 2166-2175.
- [21] 宋述光, 张 聪, 李献华, 等. 柴北缘超高压带中锡铁石榴辉岩的变质时代[J]. 岩石学报, 2011, 27(4): 1191-1197.
SONG Shu-guang, ZHANG Cong, LI Xian-hua, et al. HP/UHP Metamorphic Time of Eclogite in the Xitieshan Terrane, North Qaidam UHPM Belt, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(4): 1191-1197.
- [22] 宋述光, NIU Yao-ling, 张立飞. 榴辉岩的两种变质演化轨迹和俯冲大陆地壳的差异折返: 以柴北缘都兰超高压地体为例[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 515-525.
SONG Shu-guang, NIU Yao-ling, ZHANG Li-fei. Two Different Metamorphic Paths of Eclogites and Differential Exhumation of Subducted Continental Crust: A Case Study of the Dulan UHP Terrane in the North Qaidam UHP Belt[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3): 515-525.
- [23] 张建新, 于胜尧, 李云帅, 等. 原特提斯洋的俯冲、增生及闭合: 阿尔金—祁连—柴北缘造山系早古生代增生/碰撞造山作用[J]. 岩石学报, 2015, 31(12): 3531-3554.
ZHANG Jian-xin, YU Sheng-yao, LI Yun-shuai, et al. Subduction, Accretion and Closure of Proto-Tethyan Ocean: Early Paleozoic Accretion/Collision Orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam Orogenic System[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(12): 3531-3554.
- [24] ZHANG G B, ZHANG L F, SONG S G, et al. UHP Metamorphic Evolution and SHRIMP Geochronology of a Coesite-bearing Meta-ophiolitic Gabbro in the North Qaidam, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35(3/4): 310-322.
- [25] WATERS D J, MARTIN H N. Geobarometry of Phengite-bearing Eclogites[J]. Terra Abstracts, 1993, 5: 410-411.
- [26] RAVNA E. The Garnet-clinopyroxene Fe^{2+} -Mg Geothermometer: An Updated Calibration[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18(2): 211-219.
- [27] 陈 鑫, 许荣科, 郑有业, 等. 青海柴北缘 UHP 变质带铁石观石榴辉岩峰期温度的确定及其地质意义[J]. 地质通报, 2015, 34(12): 2292-2301.
CHEN Xin, XU Rong-ke, ZHENG You-ye, et al. The Determination of Peak Temperature of Eclogites in the West of Tieshiguan Area, North Qaidam UHP Belt of Qinghai Province, and Its Geological Significance[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(12): 2292-2301.
- [28] COLEMAN R G, LEE D E, BEATTY L B, et al. Eclogites and Eclogites: Their Differences and Similarities[J]. Geological Society of America Bulletin, 1965, 76(5): 483.
- [29] DEER W A, HOWIE R A, ZUSSMAN J. Rock Forming Minerals: Orthosilicates, Volume 1A[R]. London: Geological Society of London, 1982.
- [30] 夏琼霞, 周李岗, 郑永飞. 大陆俯冲带超高压变质岩石中石榴石的环带和多阶段生长[J]. 科学通报, 2013, 58(22): 2138-2144.
XIA Qiong-xia, ZHOU Li-gang, ZHENG Yong-fei. Zonation and Multiphase Growth of Garnet in UHP Metamorphic Rocks of Continental Subduction Zone[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(22): 2138-2144.
- [31] LIU L, WANG C, CAO Y, et al. Geochronology of Multi-stage Metamorphic Events: Constraints on Episodic Zircon Growth from the UHP Eclogite in the South Altyn, NW China[J]. Lithos, 2012, 136/137: 10-26.
- [32] GANGULY J. Cation Diffusion Kinetics in Aluminosilicate Garnets and Geological Applications[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2010, 72(1): 559-601.
- [33] CHERNOFF C B, CARLSON W D. Trace Element Zoning as a Record of Chemical Disequilibrium During Garnet Growth[J]. Geology, 1999, 27(6): 555-558.
- [34] SPEAR F S, KOHN M J. Trace Element Zoning in Garnet as a Monitor of Crustal Melting[J]. Geology, 1996, 24(12): 1099-1102.
- [35] KONRAD-SCHMOLKE M, ZACK T, O'BRIEN P J, et al. Combined Thermodynamic and Rare Earth Element Modelling of Garnet Growth During Subduction: Examples from Ultrahigh-pressure Eclogite of the Western Gneiss Region, Norway[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 272(1/2): 488-498.
- [36] SCHERTL H P, SOBOLEV N V. The Kokchetav Massif, Kazakhstan: "Type Locality" of Diamond-bearing UHP Metamorphic Rocks[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 63: 5-38.
- [37] BARRON L, MERNAGH T P, BARRON B J, et al. Spectroscopic Research on Ultrahigh Pressure (UHP) Macrodiamond at Copeton and Bingara NSW,

- Eastern Australia[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2011, 80(1):112-118.
- [38] 徐树桐, 苏文, 刘贻灿, 等. 安徽大别山含金刚石高压变质岩及其矿物共生组合和变质条件[J]. *安徽地质*, 1991, 1(1):3-18.
- XU Shu-tong, SU Wen, LIU Yi-can, et al. Diamondiferous High-pressure Metamorphic Rocks in Dabie-shan, Anhui: Mineral Paragenesis and Metamorphic Conditions[J]. *Geology of Anhui*, 1991, 1(1):3-18.
- [39] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42:313-345.
- [40] ALLINGER N L, ZHOU X F, BERGSMAN J. Molecular Mechanics Parameters[J]. *Journal of Molecular Structure; Theochem*, 1994, 312(1):69-83.
- [41] 王汝成, 邱检生, 倪培, 等. 苏鲁超高压榴辉岩中的钛成矿作用: 大陆板块汇聚边界的成矿作用[J]. *地质学报*, 2006, 80(12):1827-1834.
- WANG Ru-cheng, QIU Jian-sheng, NI Pei, et al. Titanium Mineralization in Sulu Ultrahigh-pressure Eclogites: Mineralization at the Convergent Boundary Between North China Plate and Yangtze Plate[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 80(12):1827-1834.
- [42] 邱检生, 王汝成, 蒋少涌, 等. 中国大陆科学钻探主孔高钛与低钛榴辉岩地球化学特征对比及其对金红石成矿的指示意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(7):1875-1882.
- QIU Jian-sheng, WANG Ru-cheng, JIANG Shao-yong, et al. Geochemical Comparison Between High-Ti and Low-Ti Eclogites from the Main Hole of the Chinese Continental Scientific Drill Project and Its Implications for Rutile Mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(7):1875-1882.
- [43] ZHANG G B, ELLIS D J, CHRISTY A G, et al. Zr-in-rutile Thermometry in HP/UHP Eclogites from Western China[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2010, 160(3):427-439.
- [44] TOMKINS H S, POWELL R, ELLIS D J. The Pressure Dependence of the Zirconium-in-rutile Thermometer[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2007, 25(6):703-713.
- [45] ZHANG R Y, ZHAI S M, FEI Y W, et al. Titanium Solubility in Coexisting Garnet and Clinopyroxene at very High Pressure: The Significance of Exsolved Rutile in Garnet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 216(4):591-601.
- [46] 徐珏, 陈毓川, 王登红, 等. 中国大陆科学钻探主孔100~2 000米超高压变质岩中的钛矿化[J]. *岩石学报*, 2004, 20(1):119-126.
- XU Jue, CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, et al. Titanium Mineralization in the Ultrahigh-pressure Metamorphic Rocks from Chinese Continental Scientific Drilling 100-2 000 m Main Hole[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1):119-126.
- [47] 王硕, 王汝成, 邱检生, 等. CCSD主孔超高压榴辉岩金红石中的矿物包裹体研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(1):61-70.
- WANG Shuo, WANG Ru-cheng, QIU Jian-sheng, et al. Mineral Inclusions in Rutile of Sulu UHP Eclogites from the Main Drill Hole of CCSD, Donghai[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2006, 25(1):61-70.
- [48] 张贵宾, 张立飞, 宁远煜, 等. 柴北缘超高压变质带的冷却历史: 来自副片麻岩中锆石、金红石的 U-Pb 年代学和温度信息[J]. *岩石学报*, 2014, 30(10):2835-2842.
- ZHANG Gui-bin, ZHANG Li-fei, NING Yuan-yu, et al. Cooling History for North Qaidam UHPM Belt: Constraints from Zircon, Rutile U-Pb Dating and Thermometry in Paragneiss[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(10):2835-2842.
- [49] 张聪, 田作林, 张立飞, 等. 柴北缘锡铁山两类榴辉岩的退变质过程及其对俯冲带折返机制的制约[J]. *地质通报*, 2013, 32(12):2044-2054.
- ZHANG Cong, TIAN Zuo-lin, ZHANG Li-fei, et al. The Retrograde Process of Two Types of Eclogite in the Xitieshan Terrane, North Qaidam and Its Constraint of the Exhumation Mechanism in the Subduction Zone[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(12):2044-2054.