

The Minerals Study and Geological Significance of Eclogite in Sumdo, Lhasa and Its Surrounding Rock Amphibolite

Qian Guo¹, Lifang Yu²

¹Guangdong Geological Experiment and Testing Center, Guangdong

²The Fifth Geological Brigade of Guangdong, Zhaoqing Guangdong

Email: 23565417@qq.com

Received: Sep. 6th, 2018; accepted: Sep. 21st, 2018; published: Sep. 28th, 2018

Abstract

Sumduo eclogite locates in the north east of Lhasa in Tibet, with the EW zonal distribution, and the edge of eclogite is plagioclase amphibolite. According to the analysis of mineral composition in garnet and clinopyroxene, phengite, which belongs to the main mineral in eclogite, we calculate the peak metamorphic temperature and pressure. The result is 662 - 802°C, 2.55 - 2.72 GPa. According to the analysis, the covariance figure of garnet and amphibole suggests that eclogite has been experienced the UHP metamorphism process. Apatite found in amphibolites has sulfide dissolution, and indicates that during the retrogressive metamorphic stages of eclogites, metamorphic fluids may experience the oxygen fugacity f_{O_2} reduced and the temperature shorten-term increase.

Keywords

Eclogite, Plagioclase Amphibolite, Apatite

拉萨地块松多榴辉岩及其退变质围岩斜长角闪岩主要矿物研究及其地质意义

郭倩¹, 于丽芳²

¹广东省地质实验测试中心, 广东 广州

²广东省地质局第五地质大队, 广东 肇庆

Email: 23565417@qq.com

收稿日期: 2018年9月6日; 录用日期: 2018年9月21日; 发布日期: 2018年9月28日

文章引用: 郭倩, 于丽芳. 拉萨地块松多榴辉岩及其退变质围岩斜长角闪岩主要矿物研究及其地质意义[J]. 地球科学前沿, 2018, 8(5): 973-981. DOI: 10.12677/ag.2018.85107

摘要

西藏松多榴辉岩位于拉萨市北东方向, 呈EW向带状分布, 边部为斜长角闪岩。根据对榴辉岩中主要矿物成分石榴石、辉石以及多硅白云母的矿物成分分析, 计算出峰期变质温度和压力。计算出来的温度和压力范围在柯世英榴辉岩相变线附近, 其压力为2.55~2.72 GPa之间, 温度为662℃~802℃。通过石榴石以及角闪石的协变图分析, 初步推断榴辉岩经历的峰期温度压力高于利用矿物温压计计算出来的结果, 由斜长角闪岩中发现的磷灰石的硫化物出溶体可知, 榴辉岩在退变质为角闪岩相阶段, 变质流体可能经历了氧逸度 f_{O_2} 的降低, 短时的增温过程。

关键词

榴辉岩, 斜长角闪岩, 磷灰石

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近 20 年来超高压变质岩和大陆圈深俯冲作用的许多重大发现, 有力地推动了大陆动力学研究。榴辉岩作为(超)高压变质岩的造山带重要岩石组成部分, 较好地保存了超高压变质作用峰期的矿物组成以及退变质过程的印记, 对揭示板块俯冲、碰撞造山的过程具有重要意义[1] [2]。

中国大别 - 苏鲁造山带有大量的榴辉岩产出, 是国际上研究超高压变质岩的热点地区。在青藏高原周边发现榴辉岩的产出, 如北侧的秦岭[3]、柴达木盆地北缘[4] [5]、阿尔金山[6]以及北祁连[7] [8]。经过研究表明, 这些榴辉岩都经历过超高压变质作用, 即在石英 - 柯世英相变线上(温压条件为 600℃~800℃, 2.6~3.2 GPa) [9] [10] [11]。近年来, 我国学者在青藏高原腹地多个构造带也发现了榴辉岩露头[12] [13] [14] [15]。2006 年, 杨经绥等在青藏高原拉萨地体的变质带内, 发现了一条榴辉岩带, 本文所研究的为其中西藏松多地体的榴辉岩样品及围岩斜长角闪岩。位于冈底斯岩浆岛弧带的北缘, 拉萨以东 100 多公里的松多 - 工布江达一带。榴辉岩带呈 EW 向带状分布, 露头连续, 宽 500~600 m, 已知延伸长度在 10 km 以上, 榴辉岩的外围为斜长角闪岩。斜长角闪岩的外围为一套分布广的白云母石英片岩等变质碎屑岩, 属一套低绿片岩相 - 低角闪岩相的变质岩[16]。中心部分十分新鲜, 在地表上呈高突起, 灰绿色, 边部则角闪石化退变质强烈。东西 2 个方向的沟中见有零星的露头和转石, 据此判定榴辉岩呈带状沿东西向延伸。

松多榴辉岩被人们发现和研究的时间较短, 前人研究者多致力与榴辉岩本身的同位素年代学、微量元素地球化学、地球动力学背景以及构造环境折返机制等方面。但是未见其榴辉岩与围岩的关系研究。松多榴辉岩与斜长角闪岩是否经受高压、超高压变质作用, 其对榴辉岩成因具有探讨作用。本文希望通过榴辉岩及其围岩斜长角闪岩的岩相学和矿物学、矿物化学特征去探讨其两者之间的关系, 能较为全面、准确地透视青藏高原的构造动态地质过程。

2. 榴辉岩岩相学及矿物成分分析

榴辉岩为中 - 粗粒变晶结构, 块状构造。主要矿物组合包括石榴石(20%~30%) + 绿辉石(40%~50%) + 金红石(3%~5%) + 云母(<3%) + 绿帘石 + 长石 + 角闪石 + 石英。

根据显微观察, 石榴子石呈变斑晶和基质两种形式存在。变斑晶石榴石粒径较大, 约 $3\sim 5\ \mu\text{m}$, 含多种矿物包裹体, 包括绿辉石、角闪石、石英、多硅白云母、绿帘石、金红石、绿泥石等。

石榴石变斑晶可含有大量包裹体, 呈筛孔状, 包裹体包括绿辉石、角闪石、石英、多硅白云母、绿帘石、金红石等, 可认为是榴辉岩在峰期变质前的矿物组合, 指示榴辉岩的原岩可能为绿片岩相至角闪岩相; 在电子探针(型号: JXA8800R, 工作电压: 20 KV, 工作电流: $5.0 \times 10^{-9}\ \text{A}$)检测下发现石榴石核部和边部存在成分分布不均匀性(如图 1(a)), 边部相对与核部来说, Pyr 端员组分较高(>0.25), Alm + Sps 端员组分较低(<0.5), 而核部的 Pyr 端员组分(<0.25), Alm + Sps 端员组分(>0.5), 如图 1(b)。研究表明[17][18][19], 榴辉岩中的石榴石生长环带是变质作用过程中温、压条件变化的结果, Mg/Fe 比率的增加, MnO 的含量降低, 伴随着了变质温度的增加, 反之则温度降低, 而 CaO 的含量随着压力的升高而升高。因此, 该地区榴辉岩中石榴石变斑晶核部至边部所发生成分的变化, 是一个温度升高的进变质生长过程。

而石榴石基质的成分显示与石榴石变斑晶边部部分相重叠, 说明形成的条件相似, 也表明石榴石基质和变斑晶的边部都是相对高温变质作用下的产物。基质中的绿辉石成分变化主要体现在硬玉(Jd)和霓石(Ae)端员组分的含量变化方面。如图 1(c), 包裹于石榴子石变斑晶内部的第 I 世代单斜辉石的计算结果其部分在 WEF-Jd-Ae 三角图[5][6]上落于霓石-普通辉石区域, 显示 Jd 端员组分含量低($25.74\%\sim 33.73\%$), Ae 端员组分含量最高; 部分落在绿辉石区域。第 II 世代单斜辉石全部为绿辉石, 显示 Jd 端员组分含量增

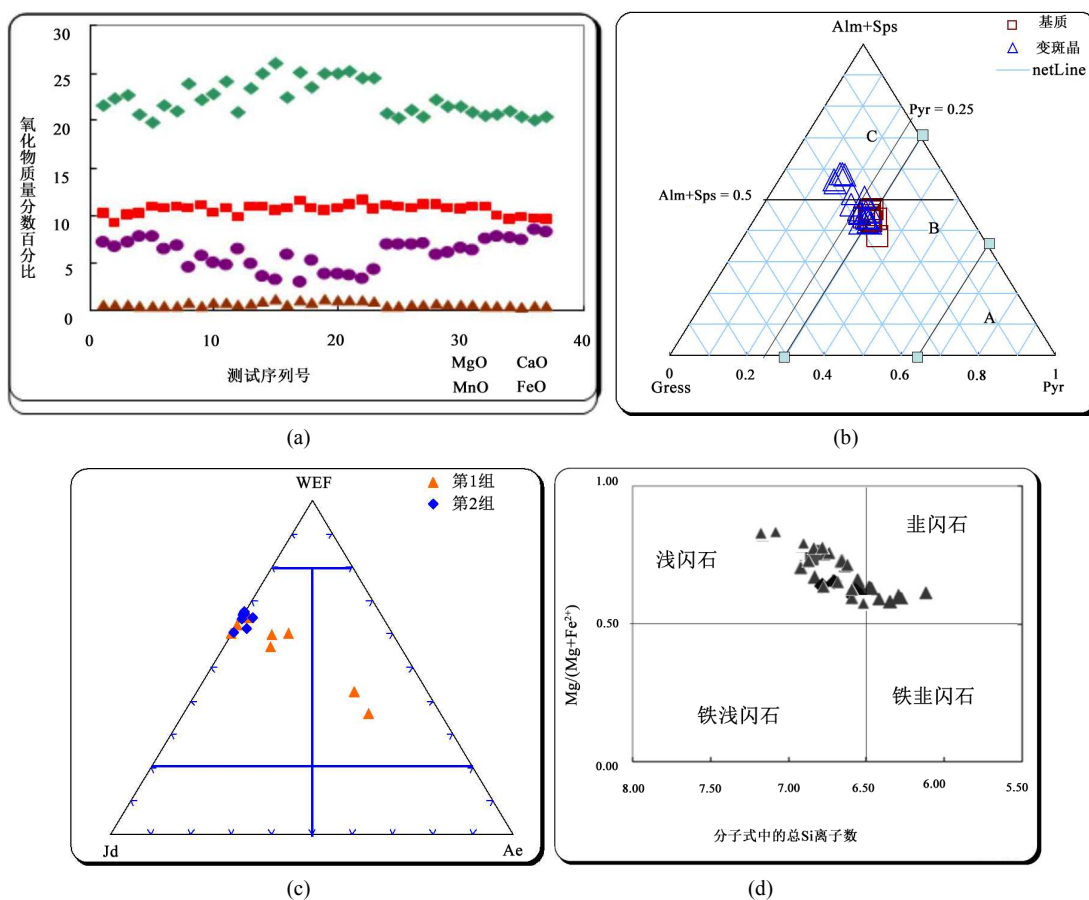


Figure 1. Compositional classification of mineral in eclogite. (a) Composition band of garnet; (b) Garnet in eclogite; (c) Pyroxene in eclogite; (d) Amphibole in eclogite

图 1. 榴辉岩的矿物成分分类。(a) 石榴石成分环带, (b) 榴辉岩中的石榴石(Alm-铁铝榴石; Sps-锰铝榴石; Grss-钙铝榴石; Pyr-镁铝榴石), (c) 榴辉岩中的辉石(WEF-普通辉石, Jd-硬玉, Ae-霓石), (d) 榴辉岩中的角闪石

高 32.10%~34.89%), Ae 端员组分降低。角闪石在榴辉岩中主要以叶片状与辉石石榴石接触产出, 根据角闪石专业委员会最新的角闪石命名法[20], 榴辉岩中的角闪石均为钙质角闪石(图 1(d)), 角闪石的 $Ca_B \geq 1.50$, $(Na + K_A) \geq 0.50$, $Ca_A < 0.50$ 。

3. 榴辉岩峰期变质 P-T 条件计算

利用电价平衡法对绿辉石中的 Fe^{2+} 进行校正然后用 Ravna (2000) [21] 温度计算公式和 Waters 和 Martin (1993) [22] 的 Grt-Cpx-Phen 压力计计算。选取榴辉岩样品中具有最高 Mg/Fe 比率的石榴石和出现在相同位置的绿辉石的成分来计算峰期变质温度, 然后选取基质中的多硅白云母与其配对, 来计算峰期变质压力。计算出来的温度和压力范围在柯世英榴辉岩相变线附近, 其压力为 2.55~2.72 GPa 之间, 温度为 662°C~802°C (如图 2)。

4. 斜长角闪岩岩相学及矿物学分析

斜长角闪岩呈绿色块状结构, 发育弱片理化。矿物组合为斜长石+角闪石+石榴石+金红石+磷灰石+榍石+绿帘石。石榴石多呈不规则粒状, 一般 Pyr 端员组分(<0.25), Alm + Sps 端员组分(<0.5)如(图 3(a)), 表明斜长角闪岩中的石榴石产于较高压低温的条件下。与榴辉岩中的变斑晶成分相当。角闪石呈长柱状, 半自形, 而且大多数含有浑圆状石英包裹体以及少量的针状包裹体(图 4)。角闪石均为钙质角闪石(图 3(b)), $Ca_B \geq 1.50$, $(Na + K_A) \geq 0.50$, $Ti < 0.50$, 其落于浅闪石-韭闪石区。磷灰石作为斜长角闪岩中常见副矿物, 以粒间矿物形式存在, 部分磷灰石发育出溶结构, 透射光显微镜下, 出溶棒不透明并且沿着磷灰石 C 轴方向分布, 半径为 1~2 μm , 长 20~80 μm , 反射光下显示为短的针状体和淡黄色的反射色(图 4(d))。利用 X 射线能谱仪测定(表 1) (束斑大小为 40 nm $\pm$, 分辨率为 4 $\mu m \pm$) 由于测试能谱束斑远大于磷灰石出溶晶体的尺度, 因此分析结果同时包含了磷灰石和出溶体的贡献, 分析时通过扣除磷灰石的贡献, 较准确地确定出溶体的化学组分, 主要由 Fe、Cu 和 S 三种元素组成, 少量 Cu 有时候取代 Fe 的位置, 大多数 Fe 和 S 的比例为 1:1 或者 1:2, 所以暂将其定为磁黄铁矿(FeS)和黄铁矿(FeS₂)。

5. 讨论

5.1. 石榴石

如图 5 所示为国内外典型变质岩中石榴石成分特征, 1~7 为超高压变质榴辉岩, 8~11 为高压变质榴

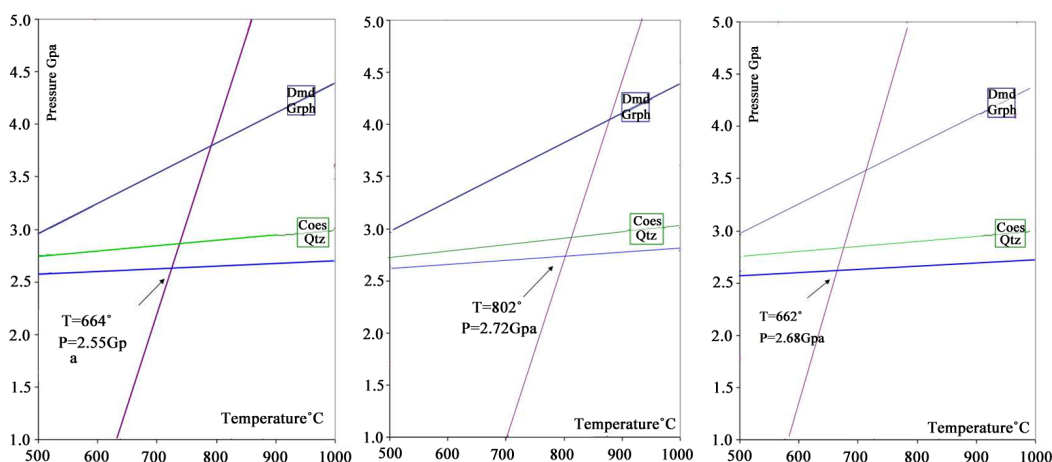


Figure 2. Thermocompression estimation of garnet-chloroprene-polysiliceous mica in eclogite

图 2. 榴辉岩的石榴石-绿辉石-多硅白云母的温压估算图解。Qtz-石英, Coes-柯世英, Dmd-金刚石, Grph-石墨

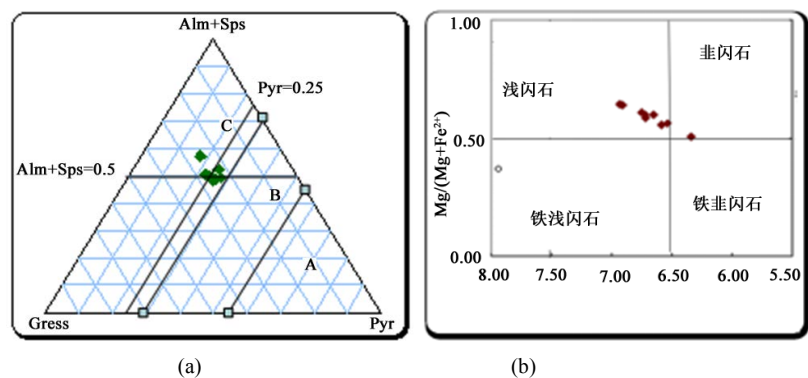


Figure 3. Compositional classification of amphibole in amphibolite and garnet: (a) Garnet in plagioclase amphibolite; (b) Amphibole in plagioclase amphibolite
图 3. 斜长角闪岩中的石榴石及角闪石成分分类: (a) 围岩中的石榴石成分分类; (b) 斜长角闪岩中的角闪石成分分类

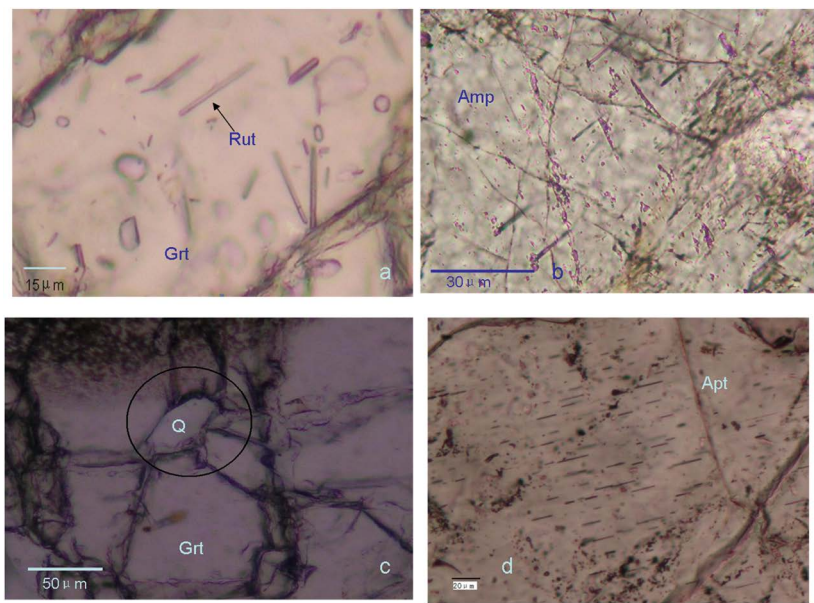
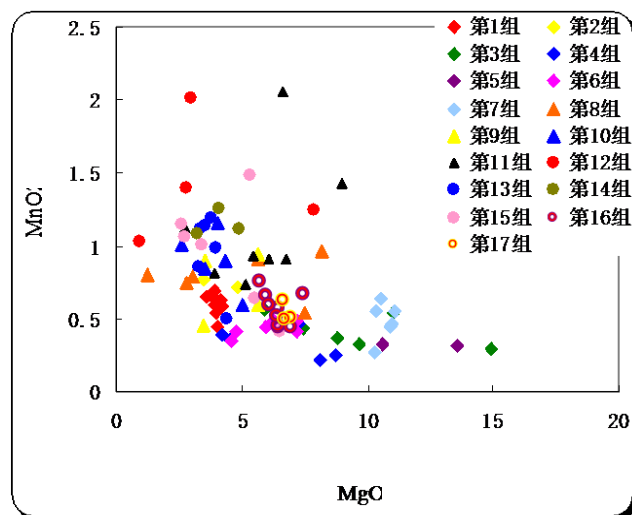


Figure 4. Mineralogy of amphibolites. (a) The rutile inclusions in garnet; (b) the needle-like inclusions in amphibole; (c) the crack quartz inclusion in garnet; (d) the opaque needle-like inclusions in apatite
图 4. 斜长角闪岩的矿物特征。(a) 石榴石中的金红石包裹体(单偏光); (b) 角闪石中的针状包裹体(单偏光); (c) 石榴石中的裂纹石英包裹体(单偏光); (d) 磷灰石中的不透明针状包裹体(单偏光)

Table 1. The EDX results of inclusions in apatite
表 1. 磷灰石中的包裹体能谱结果

In stats	F	P	S	Cl	Ca	Fe	Cu	Sn	O	Total
包裹体		18.3	1.54	0.49	36.07	2.21	0.34		41.05	100
包裹体		18.85	1	0.43	36.92	1.72			41.07	100
包裹体		18.44	1.27	0.38	36.91	1.98			41.02	100
包裹体	2.1	18.4	0.78	0.42	36.8	1.17	0.29		40.04	100
包裹体		18.9	0.61	0.34	37.71	0.94		0.66	40.83	100
包裹体	1.59	18.86	0.53	0.43	37.47	0.8			40.33	100
主晶矿物	1.34	19.2		0.4	38.17			0.69	40.21	100
主晶矿物	1.48	19.24		0.46	38.57				40.24	100
主晶矿物	1.44	19.19		0.41	38.13			0.65	40.18	100



1-青岛榴辉岩, 2-青岛榴辉岩退变成的石榴子石斜长角闪岩, 3-荣城榴辉岩, 4-岳西榴辉岩, 5-大别山片岩中的榴辉岩, 6-大别山经历超高压榴辉岩, 7-石马地区榴辉岩, 8-祁连西段龚岔口地区榴辉岩, 9-南苔南县一带榴辉岩, 10-信阳低温高压榴辉岩, 11-乌泰角闪岩中的石榴石, 12-宽坪群石榴子石斜长角闪岩, 13-塔特拉山含斜辉石角闪岩中的石榴石, 14-石马斜长角闪岩, 15-乌泰角闪岩中的石榴石, 16-松多角闪岩中的石榴石, 17-松多榴辉岩中的石榴石

Figure 5. MnO (%)–MgO (%) diagram of garnets from songduo amphibolite

图 5. 松多斜长角闪岩中石榴石小斑晶 MnO%和 MgO%的协变图

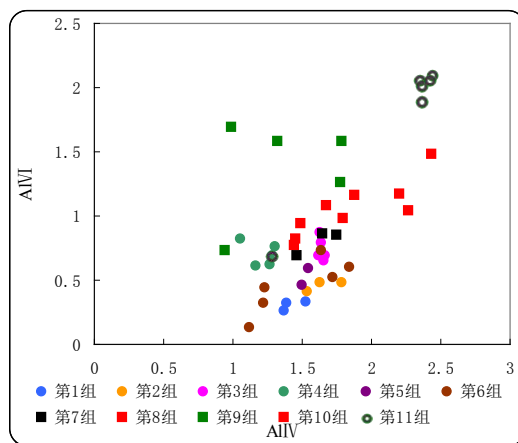
辉岩及其退变质岩, 12~15 为普通角闪岩相中的石榴石[23]–[33]。

李曙光等[23]提出, 石榴石在超高压变质含柯世英榴辉岩中 MnO 含量 $< 0.8\%$, 在柯石英的榴辉岩中 $< 1.16\%$, 在角闪岩相变质岩一般 $> 1.16\%$, 少数样品 MnO 含量较低, 但 $> 0.8\%$ 。而在同一岩性中, MgO 的含量升高意味着岩石形成温度升高。图 5 中的 MnO 和 MgO 含量的统计结果与此相符, 而松多斜长角闪岩中石榴石 Mn 含量大多 $< 0.8\%$, 可以初步推断其经历过超高压变质, 温度压力高于石英–柯石英相变线。

同时松多榴辉岩与含石榴石的斜长角闪岩中石榴石的 MgO 和 MnO 的含量相当, 差别不大; 大量的石榴子石化学组成环带结构表明[34] [35] [36], 石榴石化学成分重新平衡需要很高的温度和缓慢的抬升速率, 在碰撞造山带中通常是不存在这种形成环境的。而松多榴辉岩中的石榴石环带的核部仍保留了进变质前的高 MnO、低 MgO 的特点, 并没有被后期进变质作用及期后的退变质作用使化学平衡。因此可以推断, 变质作用可能并没有对石榴石的 MgO 和 MnO 等元素产生再平衡作用的影响。

5.2. 角闪石

角闪石形成的温压条件范围非常广, 可出现在高压变质的各个变质作用阶段, 但是化学成分的不同, 可以反映出形成条件的变化。汤姆生(Thomson)原则表示, 角闪石中四次配位的铝越多, 其形成温度越高; 六次配位的铝越高, 其形成压力越大。如图 6 所示, 榴辉岩及其退变质岩的角闪石均落在该图的右面或上半部。其一般情况下 $Al^{VI} > 1.0$, 李曙光等[31]通过研究表明角闪岩相岩石的角闪石具有类似的 Al^{VI} 变化范围(0.3~1.0)的, 随着变质程度增加, Al^{IV} 值系统变大(> 1.5)。当榴辉岩退变质岩中的角闪石 Al^{IV} 值较大时(> 1.7), 其 Al^{VI} 值也一定很高(> 1.0)。以下国内外地区的角闪石不同价态 Al 的投图, 也显示了相同规律。即 $Al^{VI} > 1.0$ 可以作为斜长角闪岩经过高压(超高压)变质的辅助证据的, 但是在经历过峰期变质后期其变动性较大可能会对结果产生影响。由图可知松多地区的 Al^{IV} 值 > 1.7 , 其 Al^{VI} 值 > 1.0 , 可推断其为经过高压(超高压)变质作用。



1-大别山英云闪长质-片麻岩, 2-大别山麻粒岩, 3-石马斜长角闪岩, 4-宽坪群斜长角闪岩, 5-石马斜长片麻岩, 6-塔特拉山含斜辉石角闪岩中的角闪石, 7-徐州-宿州地区榴辉岩类捕虏体中变质期后的角闪石, 8-徐州-宿州地区榴辉岩类捕虏体中变质峰期的角闪石, 9-大别山榴辉岩, 10-石马榴闪岩中粗晶角闪石, 11-松多榴辉岩中的角闪岩

Figure 6. Al^{IV} - Al^{VI} diagram of amphiboles from songduo eclogites

图 6. 松多榴辉岩中角闪石的 Al^{IV} ~ Al^{VI} 协变图。

如图 6, 是国内不同变质区域斜长角闪岩中 Al^{IV} ~ Al^{VI} 成份特征协变图。第 1~6 组是普通角闪岩, 第 7~10 组是经历高压(超高压)的变质岩[23] [26] [27] [31] [35] [36]。

5.3. 磷灰石

磷灰石是变质岩中的常见副矿物, 几乎可以在各种地质条件下稳定存在, 被认为是地质过程中的一种重要见证矿物, 对于岩石成因、流体演化等研究中都有重要指示意义。由上可知, 斜长角闪岩为榴辉岩经历过高压/超高压变质作用后退变质而成的。在斜长角闪岩中发现的磷灰石出溶黄铁矿和磁黄铁矿, 陈振宇的研究认为, 是由氧逸度的变化导致的[37]。Tpepper and Kuehner [38]研究认为, 磷灰石中氧逸度 f_{O_2} 的降低, 导致了熔体中 SO_4^{2-}/S^{2-} 的降低, 进而使磷灰石中的 S 含量降低, S 以 S^{2-} 与 Fe 结合硫化物形式出溶。

Peng *et al.* (1997) [39]的研究则表明, 除了氧逸度外, 控制磷灰石中 S 含量的最主要因素是共存熔体中 S 的含量, S 在磷灰石和熔体间的分配系数与温度强烈负相关, 即温度升高会使熔体中的 S 含量升高, 而磷灰石中的 S 含量降低。

即磷灰石中硫化物的出溶, 说明榴辉岩折返过程中出现氧逸度 f_{O_2} 的降低, 磷灰石中的 SO_4^{2-} 被还原成 S^{2-} 与 Fe、Cu 等元素结合成榴辉岩析出, 并有可能经历了短时的增温过程。

6. 结论与讨论

1) 通过榴辉岩岩相学以及矿物化学分析计算, 可知松多榴辉岩经历过高压/超高压变质, 变质的压力位于 2.55~2.72 GPa, 温度在 662℃~802℃ 以上。

2) 通过榴辉岩以及围岩斜长角闪岩中石榴石中 MnO 和 MgO 含量及其角闪石中 Al 的配位协变图分析, 初步推断榴辉岩经历的温度压力高于 600℃~800℃, 2.6~3.2 GPa, 即石英-柯石英相变线。其中斜长角闪岩为榴辉岩经历过超高压变质后退变质而成。

3) 斜长角闪岩的磷灰石中硫化物的出溶, 说明榴辉岩折返过程中可能经历了氧逸度 f_{O_2} 的降低, 并伴随着短时增温的过程。

基金项目

本文受国家重点及基础研究发展规划 973 项目(2009CB421004)、中国科学院创新项目(KZCX-YW-Q04)和国家自然科学基金(40772046)联合资助。

参考文献

- [1] 张泽明. 榴辉岩的研究意义及其新进展[J]. 地质科技情报, 1990, 9(3): 23-28.
- [2] 张开均, 唐显春. 青藏高原腹地榴辉岩研究进展及其地球动力学意义[J]. 科学通报, 2009, 54(13): 1804-1814.
- [3] 胡能高, 赵东林, 徐柏青, 王涛. 北秦岭含柯石英榴辉岩的发现及其意义[J]. 科学通报, 1994, 39(21): 2013.
- [4] 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 吴才来, 崔军文, 张建新, 陈文. 我国西部柴北缘地区发现榴辉岩[J]. 科学通报, 1998, 14(43): 1544-1548.
- [5] 张雪亭, 吕惠庆, 陈正兴, 张宝华, 李福祥, 朱跃升, 李朝兰, 王彦. 柴北缘造山带沙柳河地区榴辉岩相高压变质岩石的发现及初步研究[J]. 青海地质, 1999, 28(2): 1-12.
- [6] 刘良, 车自成, 罗金海. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义[J]. 科学通报, 1996, 41(16): 1485-1488.
- [7] Wu, H.Q., Feng, Y.M. and Song, S.G. (1993) Metamorphism and Deformation of Blueschist Belts and Their Tectonic Implications, North Qilian Mountains, China (in Special Issue on Chinese Metamorphism). *Journal of Metamorphic Geology*, **11**, 523-536. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1993.tb00169.x>
- [8] 孙勇, 陈丹玲. 超高压变质作用及大陆深俯冲[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2006, 36(1): 1-9.
- [9] 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 史仁灯, 吴才来, 张建新, 李海兵, 孟繁聪, 戎合. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别[J]. 地质学报, 2002, 76(4): 484-495.
- [10] 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 吴才来, 史仁灯, 张建新, 李海兵, 万渝生, 刘焰, 邱海峻, 刘福来, Shigenori Maruyama. 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.
- [11] 张建新, 杨经绥, 许志琴, 孟繁聪, 宋述光, 李海兵, 史仁灯. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据[J]. 科学通报, 2002, 47(3): 231-234.
- [12] 李才, 翟庆国, 董永, 黄小鹏. 青藏高原羌塘中部榴辉岩的发现及其意义[J]. 科学通报, 2006(51): 70-74.
- [13] 杨经绥, 许志琴, 李大福, 李化启, 李兆丽, 任玉峰, 徐向珍, 陈松永. 青藏高原拉萨地块中的大洋俯冲型榴辉岩: 古特提斯洋盆的残留?[J]. 地质通报, 2007(26): 1277-1287.
- [14] Zhang, K.J., Zhang, Y.X. and Tang, X.C. (2008) First Report of Eclogites from Central Tibet, China: Evidence for Ultra-Deep Continental Subduction Prior to the Cenozoic India-Asian Collision. *Terra Nova*, **20**, 302-308. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2008.00821.x>
- [15] 夏斌, 刘维亮, 周国庆, 韦振权, 王冉, 李建峰, 钟云, 胡西冲. 西藏蓬湖西镁质榴辉岩中的出溶物及其地质意义[J]. 南京大学学报(自然科学), 2013, 49(3): 356-387.
- [16] 杨经绥, 许志琴, 耿全如, 李兆丽, 徐向珍, 李天福, 任玉峰. 中国境内可能存在一条新的高压/超高压(?)变质带——青藏高原拉萨地体中发现榴辉岩带[J]. 地质学报, 2006, 8(12): 1787-1792.
- [17] Chen, N., Sun, M., You, Z. and Malps, J. (1998) Well Preserved Garnet Growth Zoning in Granulite from Dabie Mountains, Central China. *Journal of Metamorphic Geology*, **16**, 213-222.
- [18] Parkinson, C.D. (2000) Coesite Inclusions and Prograde Compositional Zonation of Garnet in White Schist of the HP-UHPM Kokchetav Massif, Kazakhstan: A Record of Progressive UHP Metamorphism. *Lithos*, 215-233.
- [19] 张寿广, 万渝生, 刘国惠, 丛日祥, 赵子然. 北秦岭宽坪群变质地质[M]. 北京: 科学技术出版社, 1991.
- [20] 角闪石专业委员会. 角闪石命名法——国际矿物学协会新矿物及矿物命名委员会角闪石专业委员会的报告[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(1): 84-101.
- [21] Ravana, E.K. (2000) The Garnet-Clinopyroxene Fe²⁺-Mg Geothermometer: An Updated Calibration. *Journal of Metamorphic Geology*, **18**, 211-219. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2000.00247.x>
- [22] Krogh-Ravana, E.J. and Terry, R. (2004) Geothermobarometry of UHP and HP Eclogites and Schists—An Evaluation of Equilibria among Garnet-Clinopyroxene-Kyanite-Phengite-Coesite/Quartz. *Journal of Metamorphic Geology*, **22**, 579-592. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2004.00534.x>
- [23] 李曙光, 肖益林. 大别山杂岩中两类斜长角闪岩的矿物学鉴别标志及对榴辉岩成因的意义[J]. 矿物学报, 1994,

- 14(2): 115-123.
- [24] 李曙光, 孙卫东, 葛宁洁, 王楠, 刘德良, 陈移之. 青岛榴辉岩相蛇绿混杂岩的岩石学证据及退变质 P-T 轨迹[J]. 岩石学报, 1992, 8(4): 355-363.
- [25] 韩宗珠. 山东荣成榴辉岩和石榴石橄榄岩的岩石学矿物化学及其成因[J]. 青岛海洋大学学报, 1992(1): 81-91.
- [26] 张泽明. 安徽岳西地区的含白云石柯石世英榴辉岩[J]. 岩石学报, 1992, 8(1): 97-103.
- [27] Okay, A.I. (1993) Petrology of a Diamond and Coesite-Bearing Metamorphic Terrain Dabie Shan, China. *European Journal of Mineralogy*, **5**, 659-675.
- [28] Zhang, R.Y., Liou, J.G., Zheng, Y.F. and Fu, B. (2003) Transition of UHP Eclogites to Gneissic Rocks of Low-Amphibolite Facies during Exhumation: Evidence from the Dabie Terrane, Central China. *Lithos*, **70**, 269-291.
- [29] 苏建平, 胡能高, 付国民. 祁连西段龚岔口地区榴闪岩的高压变质作用及其地质意义[J]. 矿物学报, 2004, 24(4): 391-398.
- [30] 张希道, 陈允福, 王桂枝. 鲁东南莒苔南县一带榴辉岩的特征[J]. 岩石学报, 1992, 8(1): 40-51.
- [31] Zhao, G., Cawood, P. and Lu, L. (1999) Petrology and P-T History of the Wutai Amphibolites: Implications for Tectonic Evolution of the Wutai Complex, China. *Precambrian Research*, **93**, 181-199.
[https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(98\)00090-4](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(98)00090-4)
- [32] 宋子季, 周青山, 李荣社. 陕西宽坪群某些前进变质矿物的研究[J]. 陕西地质, 1990(1): 14-28.
- [33] Janak, M., O'Brien, P.J., Hurai, V. and Reutel, C. (1996) Metamorphic Evolution and Fluid Composition of Garnet-Clinopyroxene Amphibolites from the Tatra Mountains, Western Carpathians. *Lithos*, **39**, 57-79.
- [34] 张泽明, 肖益林, 沈昆, 高勇军. 苏鲁超高压榴辉岩的石榴石生长成分环带及变质作用 P-T 轨迹[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 809-818.
- [35] 于海峰, 梅华林, 陆松年, 李铃. 甘肃北山榴辉岩矿物特征及温压条件[J]. 长春科技大学学报, 1999, 29(2): 110-116.
- [36] Zhai, M., et al. (1995) Petrological-Tectonic Units in the Coesite-Bearing Metamorphic Terrain of the Dabie Mountains, Central China and Their Geotectonic Implications. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, **11**, 1-13.
- [37] 陈振宇, 曾令森, 孟丽娟. 苏鲁榴辉岩中磷灰石的矿物学和微量元素地球化学[J]. 岩石学报, 2009, 25(7): 1664-1678.
- [38] Tepper, J.H. and Kuehner, S.M. (1999) Complex Zoning in Apatite from the Idaho Batholith: A Record of Magma Mixing and Intracrystalline Trace Element Diffusion. *American Mineralogist*, **84**, 581-595.
<https://doi.org/10.2138/am-1999-0412>
- [39] Peng, G.Y., Lu, J.F. and McGee, J.J. (1997) Factors Controlling Sulfur Concentrations in Volcanic Apatite. *American Mineralogist*, **82**, 1210-1224. <https://doi.org/10.2138/am-1997-11-1217>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org