

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.235>



高压—超高压变质岩石中不同成因的石榴石

夏琼霞

中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026

摘要: 石榴石是高压—超高压变质岩石中最重要的变质矿物之一, 是研究俯冲带深部变质和熔融过程的理想研究对象. 通过对俯冲带内不同条件下形成的石榴石进行详细研究, 确定了岩浆成因、变质成因和转熔成因石榴石. 岩浆石榴石是岩浆熔体在冷却过程中结晶形成, 成分主要为锰铝榴石—铁铝榴石, 通常含有石英、长石、磷灰石等晶体包裹体. 变质石榴石是在亚固相条件下通过变质反应形成, 包裹体为参与变质反应的矿物组合; 进变质生长的石榴石通常显示核部到边部锰铝榴石降低的特征. 转熔石榴石是在超固相条件下通过转熔反应形成, 通常含有晶体包裹体, 其中既有从转熔熔体结晶的矿物包裹体, 也有转熔反应残留的矿物包裹体. 对超高压变质岩石中转熔石榴石的识别, 可以为深俯冲陆壳岩石的部分熔融提供重要的岩石学证据, 是大陆俯冲带部分熔融研究的重要进展之一.

关键词: 转熔石榴石; 变质石榴石; 岩浆石榴石; 高压—超高压; 部分熔融; 岩石学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2019)12-4042-08

收稿日期: 2019-08-29

Different Origins of Garnet in High to Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks

Xia Qiongxia

CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: Garnet is one of the most important mineral in high pressure (HP) to ultrahigh pressure (UHP) metamorphic rocks. It is an ideal phase to constrain the P - T - t conditions of metamorphic and anatexis processes during continental subduction zone metamorphism. Garnets from subduction zone metamorphic rocks can be classified into metamorphic, magmatic and peritectic garnets based on their typical features. Magmatic garnet crystallizes from magmatic melts, shows almandine-spessartine in compositions and contains crystal inclusions such as quartz, feldspar and apatite. Metamorphic garnet forms through metamorphic reactions at subsolidus conditions, shows decreasing spessartine from core to rim, and contains crystal inclusions mainly composed of metamorphic reactants. Peritectic garnet forms through peritectic reactions at supersolidus conditions, and contains crystal inclusions consisting of not only minerals crystallized from peritectic melts but also residual minerals from peritectic reactants. The identification of peritectic garnet in UHP metamorphic rocks provides unique evidence for partial melting of the deeply subducted continental crust, which is an important progress in crustal anatexis of collisional orogens.

Key words: peritectic garnet; metamorphic garnet; magmatic garnet; high to ultrahigh pressure; partial melting; petrology.

基金项目: 国家“973”计划项目(No.2015CB856104); 国家自然科学基金项目(Nos.41822201, 41772048).

作者简介: 夏琼霞(1979—), 女, 博士, 特任教授, 主要从事造山带变质岩石学和地球化学. ORCID: 0000-0002-2681-3646. E-mail: qxxia@ustc.edu.cn

引用格式: 夏琼霞, 2019. 高压—超高压变质岩石中不同成因的石榴石. 地球科学, 44(12):4042-4049.

0 引言

石榴石是俯冲带变质岩的重要组成矿物,也是岩石地球化学研究中非常有用的矿物之一.石榴石的化学成分环带与温度、压力以及共生矿物组合密切相关,可以为寄主岩石经历的变质演化提供重要的信息(Carswell *et al.*, 1997, 2000; Konrad-Schmolke *et al.*, 2008).但是,这种复杂的环带结构也为解释石榴石及其寄主岩石所经历的变质历史带来了一定的难度,对石榴石在变质岩研究中的应用提出了挑战.研究发现,俯冲带变质岩石中的石榴石具有多种成因,可以生长于变质过程的不同阶段(Kohn *et al.*, 1997; Xia and Zhou, 2017).早期对石榴石的研究主要集中于石榴石内元素扩散规律、石榴石 Sm-Nd 和 Lu-Hf 定年、石榴石与其他镁铁质矿物的 Fe-Mg 交换地质温压计等方面的应用,而对于石榴石内部的不均一性没有引起足够的重视,使得部分研究在应用石榴石进行温度和压力估算时出现偏差.特别地,在俯冲带高级变质岩(如榴辉岩、片麻岩、混合岩和麻粒岩等)中,由于既有俯冲进变质和/或退变质反应形成的变质石榴石,又有部分熔融条件下形成的转熔石榴石,以及从深熔熔体中结晶的岩浆石榴石.这些不同成因的石榴石可能出现在同一颗粒上,记录了不同的变质脱水或部分熔融条件,如果不进行有效区分,将会导致应用石榴石进行温度、压力和熔/流体条件估算时得到片面甚至错误的结论.因此,对不同变质阶段形成的石榴石进行准确识别,确定它们的形成机制,是应用石榴石研究俯冲带变质作用的基础和前提.

1 超高压变质岩石中的变质石榴石和转熔石榴石

大别山双河地区超高压榴辉岩的围岩花岗片麻岩,由于其中含有丰富的自形和粗粒石榴石,通常被认为是含榴花岗岩.片麻岩中锆石 U-Pb 定年得到的变质年龄为三叠纪(220~240 Ma),说明这些花岗片麻岩和寄主榴辉岩一样,同样经历了三叠纪超高压变质作用.但是这些经历超高压变质的片麻岩在板片折返过程中是否经历了部分熔融?这是俯冲带变质和部分熔融研究需要确定的重要科学问题.Xia *et al.*(2016)对双河地区超高压变质花岗片麻岩进行了详细的岩石学观察、石榴石主微量元素剖面分析及热力学相平衡模拟研究.结果发现,这些花岗片麻

岩在折返过程中的确经历了低程度熔融.岩石折返熔融过程中形成的转熔石榴石,与超高压变质条件下形成的变质成因石榴石具有差异,对转熔石榴石形成机制的研究也为探讨俯冲带岩石的部分熔融成因机制提供了准确的矿物学和岩石学依据.

片麻岩曾经历过深熔作用的典型微结构有:长石或石英以微小的细脉状填充在颗粒边界(图 1a),并呈尖锐状接触,形成很小的二面夹角(图 1b).这些显微特征与深熔岩石和部分熔融实验下熔体的微结构特征非常相似(Holness and Sawyer, 2008; Sawyer, 2010; Chen *et al.*, 2013).石榴石的背散射图像显示补丁状结构(图 1c 和 1d),与超高压条件下部分熔融实验中深熔石榴石的特征也非常相似(Perchuk *et al.*, 2005, 2008; Liu *et al.*, 2014).背散射发亮的补丁状石榴石通常位于石榴石颗粒边部,或者围绕裂隙、石英包裹体或多相包体生长,说明补丁状石榴石的生长与深熔熔体密切相关,可能为转熔石榴石(Grt-II).进一步的成分分析显示,核部背散射图像较暗的早期石榴石(Grt-I)、钙铝榴石和铁铝榴石含量高,锰铝榴石和镁铝榴石含量低(图 1e),稀土元素配分显示平坦的中—重稀土配分特征, HREE 含量低(图 1f).相反地,背散射图像较亮的晚期石榴石(Grt-II)、钙铝榴石和铁铝榴石含量低,而锰铝榴石、镁铝榴石含量高, HREE 含量高,稀土元素配分显示陡峭的中—重稀土特征.根据锆石和楣石的 U-Pb 定年,以及它们与石榴石的微量元素配分特征,获得两种石榴石的生长时间分别为 250~240 Ma (Grt-I)和 220~210 Ma (Grt-II),分别对应于俯冲进变质和折返退变质阶段.

热力学相平衡模拟计算显示,早期石榴石(Grt-I)的成分投点位于超高压变质相区域(>3.3 GPa/750 °C),为俯冲进变质过程中通过变质反应形成的石榴石,而晚期石榴石(Grt-II)的成分投点位于熔体存在的高压变质相区域(1.2 GPa/700 °C),是折返降压部分熔融过程中通过转熔反应形成的石榴石,即转熔石榴石.相平衡模拟的矿物含量变化还显示,深俯冲岩石在折返过程中,多硅白云母和石榴石含量降低,而黑云母和熔体含量增加.据此可以推测形成转熔石榴石的转熔反应为:

变质石榴石 + 多硅白云母 + 斜长石 + 石英 → 转熔石榴石 + 黑云母 + 钾长石 + 熔体.

俯冲进变质生长的变质石榴石(Grt-I),在折返过程中发生了不稳定分解并重新生长形成了新的

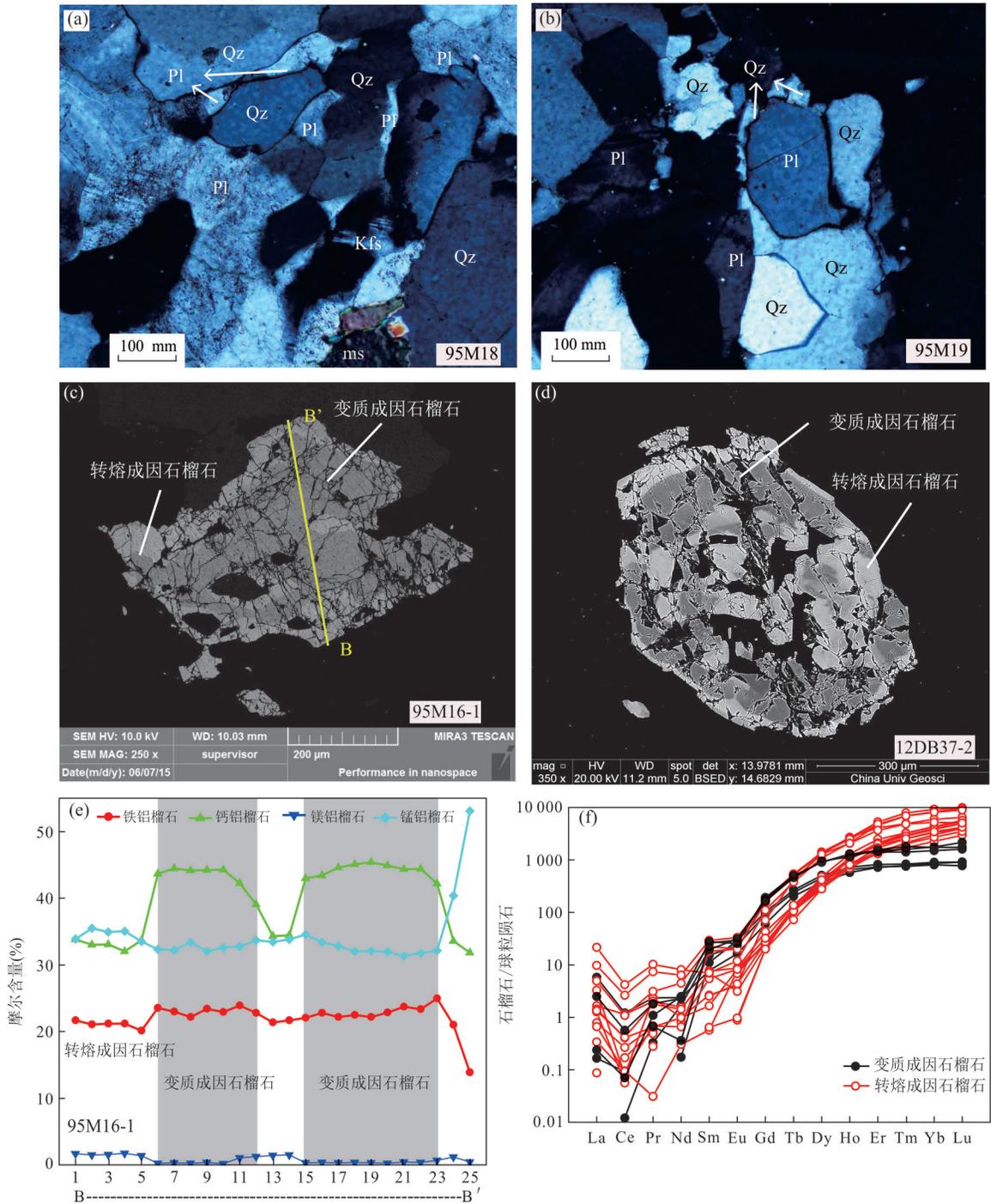


图 1 大别山双河地区超高压变质片麻岩中变质成因和转熔成因石榴石

Fig.1 Metamorphic and peritectic garnets in anatectic UHP metamorphic gneiss at Shuanghe in the Dabie orogen
修改自 Xia *et al.* (2016)

石榴石即转熔石榴石 (Grt-II)。

因此,在超高压变质的花岗片麻岩中,既有俯冲进变质生长的变质石榴石,也有在折返过程中生长的转熔石榴石.超高压变质岩石中变质成因和转熔成因石榴石的准确识别,为认识超高压变质岩石的部分熔融提供了更加准确的岩石学依据(Xia *et al.*, 2016)。

2 高压混合岩中转熔石榴石和岩浆石榴石

喜马拉雅造山带东构造结附近发育了广泛的部分熔融和混合岩化,形成了不同规模的混合岩、片麻岩、角闪岩以及淡色花岗岩、伟晶岩和石英脉。

为了理解喜马拉雅造山带不同形式的地壳深熔与印度板块俯冲之间的关系,以及喜马拉雅淡色花岗岩的成因机制, Xia *et al.* (2019) 对东构造结附近的混合岩、长英质脉体以及脉状花岗岩进行了详细的锆石学、岩石学和元素地球化学以及相平衡综合研究,特别是对不同岩石单元中的石榴石进行了详细的研究,确定出转熔反应和深熔熔体中结晶两种成因的石榴石,并进一步确定了该区地壳深熔的多种形式。

锆石 U-Pb 定年研究显示,混合岩和长英质脉体中变质时代与脉状花岗岩的结晶时代一致,均为始新世 (~49 Ma)。根据石榴石的产状、包裹体、主量元素以及微量元素的特征,混合岩和脉状花岗岩中石榴石具有两种不同的成因:转熔成因和岩浆成因。混合岩深色体和长英质脉体中石榴石主要为转熔成因,表现为他形单晶或聚晶,含有丰富的高 Ti 云母和石英等单晶包裹体(图 2a),以及 Qtz+Bt+Ilm+Apa 等多相固体包裹体,主量元素成分分析显示铁铝榴石含量最高,其次为镁铝榴石,钙铝榴石和锰铝榴石含量最低。主量元素剖面显示核一边 Ca 含量升高,而 Fe、Mn、Mg 变化不明显(图 2b),指示石榴石形成于高温变质阶段。微量元素剖面显示为 HREE 含量从核到边逐渐降低(图 2c),L-MREE 变化不明显,Sc、Y、Ti、V、Cr 等微量元素含量也逐渐降低,指示石榴石的形成与云母类矿物的分解有关。石榴石中 Y 含量通常与变质温度呈负相关,因此转熔石榴石中 Y 含量从核到边逐渐降低指示了进变质过程中温度升高的过程。依据石榴石的核部成分、矿物组合以及全岩相平衡模拟,得到混合岩发生部分熔融的峰期条件分别为 760~800 °C 和 0.9~1.05 GPa。相平衡模拟得到的视剖面以及进变质阶段矿物含量的变化趋势可以发现,部分熔融的初期来源于加水熔融,而转熔石榴石的形成主要来源于后期的黑云母脱水熔融。另外,这些石榴石的重稀土与寄主岩石中 ~49 Ma 的变质锆石的重稀土配分系数 $D^{zircon/garnet}$ 范围为 1.0~5.1,这一结果与 Rubatto and Hermann (2007) 通过高温高压实验得到的平衡配分系数非常相似,说明部分熔融阶段转熔石榴石和锆石达到了平衡,因此可以确定该转熔石榴石的形成时间约为 49 Ma。

另一方面,脉状花岗岩中石榴石既有岩浆成因,也有转熔成因。其中岩浆成因石榴石表现为较小的单颗粒(200~300 μm),含有石英和磷灰石等

单晶包裹体,主量元素和微量元素都显示均一的成分特征,或者从核部到边部,钙铝榴石和锰铝榴石含量升高,而铁铝榴石和镁铝榴石含量降低,重稀土含量逐渐升高的环带特征,这些显示了单阶段岩浆成因石榴石的特征。脉状花岗岩中还有一种大颗粒的石榴石(图 2d),核部含有 Kfs+Ab 等多相固体包裹体,边部含有丰富的石英包裹体,主微量元素剖面显示两阶段生长的特征,从核部到边部,锰铝榴石含量先降低后升高,铁铝榴石先升高再降低,镁铝榴石含量一直降低,而钙铝榴石一直升高(图 2e),HREE 含量也显示先降低后升高的趋势(图 2f)。因此,脉状花岗岩中石榴石的核部为转熔石榴石,与混合岩和长英质脉体中转熔石榴石一样,主要形成于围岩富黑云母片麻岩中黑云母的转熔反应,而边部具有因为岩浆成因的增生石榴石,结晶于部分熔融产生的熔体。根据与石榴石接触的黑云母、斜长石的矿物成分,通过石榴石—黑云母地质温度计(Holdaway, 2000)和石榴石—黑云母—斜长石—石英地质压力计(Wu *et al.*, 2004),计算得到脉状花岗岩结晶的条件为 620~650 °C 和 0.4~0.5 GPa。该岩浆石榴石与寄主岩石中 ~49 Ma 的岩浆锆石达到了重稀土平衡配分,而核部的转熔石榴石与寄主岩石中 ~49 Ma 的岩浆锆石未达到重稀土平衡配分,指示这些岩浆石榴石的形成时间约为 49 Ma。需要指出的是,虽然混合岩和脉状花岗岩中锆石定年得到的结果在误差范围内是一致的,但是根据转熔石榴石位于核部,而岩浆石榴石位于边部,可以确定转熔石榴石的形成时间应略早于岩浆石榴石。

根据长英质脉体和脉状花岗岩的全岩主微量元素特征,可以判定具有相对高 Ca 低 K 含量,低 Rb/Sr 比值、高 Sr/Ba 比值的长英质脉体来源于原岩黑云母片麻岩的加水熔融,而具有低 Ca 高 K 含量、高 Rb/Sr 比值、低 Sr/Ba 比值的脉状花岗岩来源于黑云母片麻岩的脱水熔融,其矿物组成中含有的钾长石进一步说明其来源于云母类矿物的脱水分解。锆石的原位氧同位素特征也同样证实了这一推断。长英质脉体中转熔锆石的氧同位素组成的平均值分别为 $7.3\% \pm 0.4\%$ 和 $6.9\% \pm 0.2\%$,与残留锆石的氧同位素组成 ($7.7\% \pm 0.8\%$) 相似或显著低于残留锆石的氧同位素组成 ($9.7\% \pm 2.0\%$),说明有外来流体的加入,很有可能是源区的加水熔融形成的。脉状花岗岩中深熔锆石的氧同位素平均组成为 $9.0\% \pm 0.5\%$,与其残留锆石的氧同位素平均组成

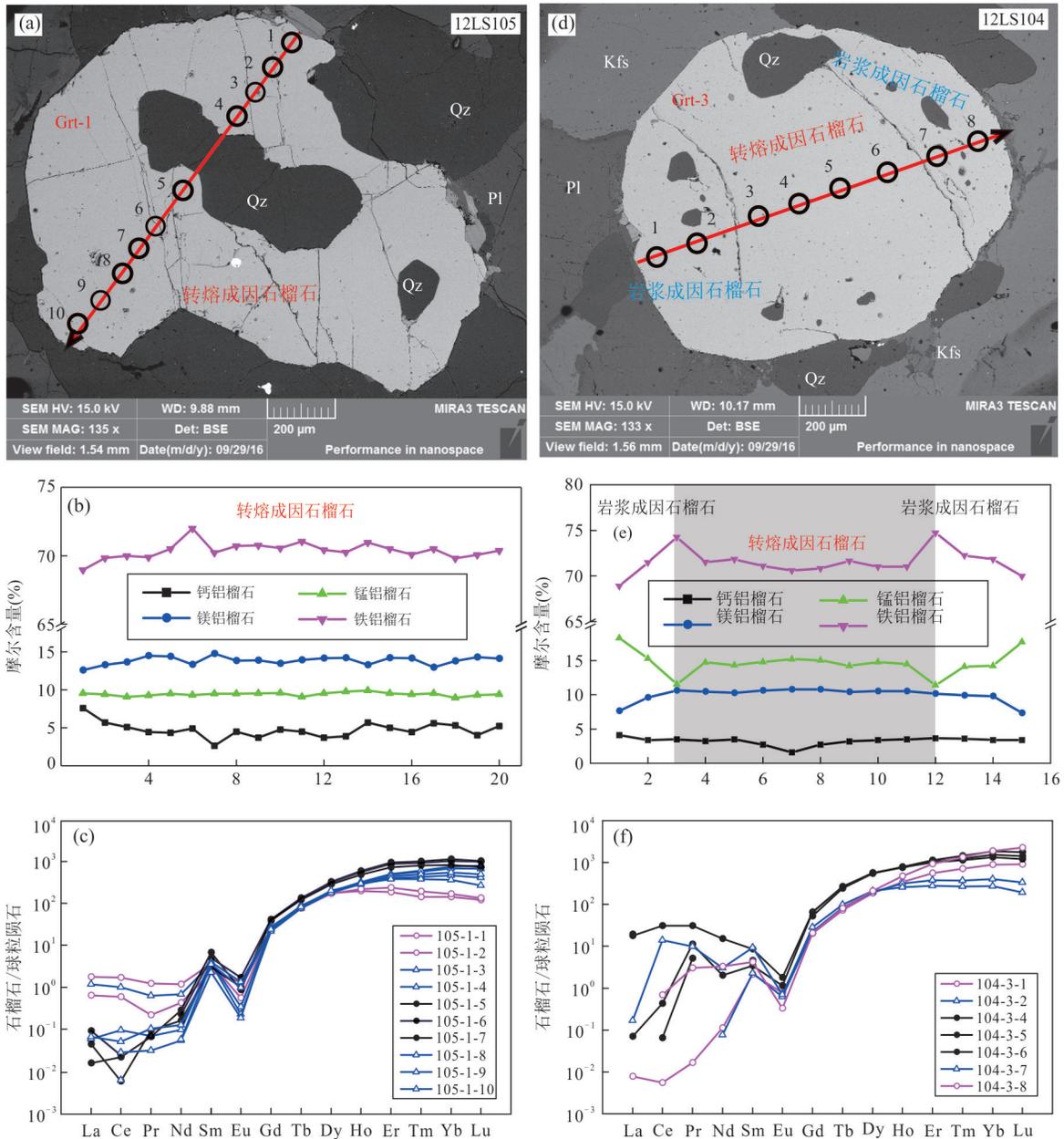


图2 喜马拉雅东构造结高压混合岩和脉状花岗岩中转熔石榴石和岩浆石榴石

Fig.2 Peritectic and magmatic garnets in HP migmatites and vein granites from eastern Himalayan syntaxis

修改自 Xia *et al.*(2019)

(8.2%±0.8%)相似,证实其来源于源区的脱水熔融.结合野外观察的结果,脉状花岗岩切穿混合岩和长英质脉体,可以推测该区至少经历了两期部分熔融,早期发生了加水熔融,形成混合岩和长英质脉体,之后发生黑云母脱水熔融,形成了脉状花岗岩.

据此,通过对喜马拉雅东构造结高压混合岩中转熔石榴石和岩浆石榴石的识别,确定了该区混合岩的熔融机制.另外,对脉状花岗岩中转熔石榴石的确定,进一步证实了淡色花岗岩的加水熔融和脱水熔融成因机制,也为探讨喜马拉雅造山带的构造演

化历史提供了重要的研究方向.

3 不同成因石榴石的特征

前面已经提到,石榴石在研究高压—超高压岩石的变质演化历史时,具有非常重要的作用.但是,其成因的复杂性对于石榴石的应用也引发了更多的不确定性.因此,建立不同成因石榴石的区分和识别依据显得尤为重要.Xia and Zhou(2017)根据不同地质体高压—超高压变质岩石中石榴石的特征,

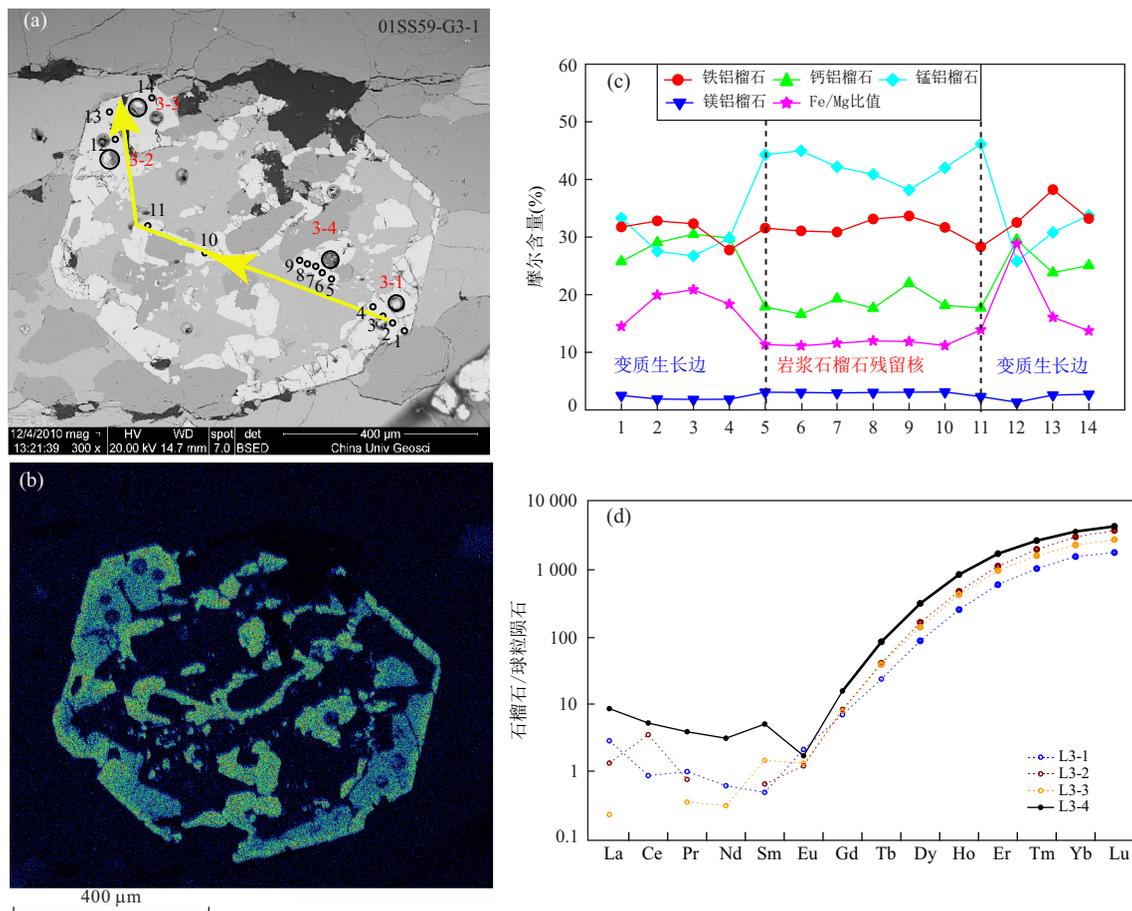


图3 超高压变质花岗岩中岩浆石榴石残斑核和变质生长石榴石幔部和边部

Fig.3 The residual of magmatic garnet in the core and new growth of metamorphic garnet in the mantle and rims from the UHP metamorphosed granites

a. 背散射图像; b. Mn元素分布图示; c. 主量元素剖面; d. 稀土元素剖面; 修改自 Xia *et al.* (2012)

将石榴石分为岩浆成因、变质成因和转熔成因 3 种类型。一般来说, 可以通过石榴石的主量元素环带对其成因进行初步判断, 但由于石榴石的主量元素成分环带在高温条件下容易受到扩散的影响, 而微量元素环带受温度影响较小, 因此在甄别石榴石的成因机制时, 其微量元素、矿物或熔/流体包裹体, 以及全岩成分的热力学平衡相图, 都是判别石榴石成因机制的重要依据。

岩浆成因的石榴石通常显示平坦的锰铝榴石分布, 或核部向边部锰铝榴石升高的分布。与变质成因石榴石相比, 岩浆成因石榴石通常具有较高的锰铝榴石和微量元素含量。在高压—超高压变质岩石中通常显示残斑状, 如南大别低温超高压变质花岗岩中, 经历了三叠纪超高压变质作用, 变质石榴石核部仍保留有原始岩浆石榴石的残斑(图3), 并保存了初始的岩浆生长环带, 这不仅与石榴石经历的温度、压力和持续时间密切相关, 石榴石的粒度也是一个重要的因素

(Xia *et al.*, 2012)。另外, 在高压—超高压变质的深熔岩石中, 深熔熔体冷却过程中也可能结晶出岩浆石榴石。这种类型的岩浆石榴石通常具有较完整的六边形晶形, 且边界平直, 包裹体主要是岩浆成因的石英、磷灰石或熔体包裹体, 其成分主要为锰铝榴石—铁铝榴石, 且锰铝榴石显示核—边持续升高的特征, 指示结晶过程中温度的降低。不同演化阶段产生的岩浆石榴石成分也有一定差异, 通常在演化早期, 石榴石成分以低 MnO 高 FeO 为特征, 而在演化晚期, 石榴石成分显示高 MnO 低 FeO 特征, 这可能与 MnO 在熔体中不相容有关, 初始熔体中低 MnO, 因而结晶的石榴石也显示较低的 MnO 含量, 而在演化晚期, 熔体中 MnO 逐渐富集, 因而结晶的石榴石 MnO 含量也较高, 这与一些高温高压实验低程度部分熔融时结晶的岩浆石榴石具有较低的 MnO 含量, 而一些伟晶岩中石榴石具有明显较高的 MnO 含量是一致的。

变质成因的石榴石是高压—超高压岩石中石榴

石的主要成员,它可以生长于变质过程的不同阶段,包括俯冲进变质和折返退变质.需要说明的是,这里的进变质和退变质反应主要是指大陆俯冲带过程中压力的变化,即俯冲和折返两个阶段的变质过程(Zheng and Chen, 2017).在不同的变质过程中,变质石榴石的成分环带通常十分复杂,其中进变质生长的石榴石通常形成于板片俯冲阶段,其生长的主量元素环带显示核部到边部锰铝榴石降低的“哑铃形”分布,但是铁铝榴石、钙铝榴石和镁铝榴石的环带分布通常受控于变质温度、压力、全岩成分以及共生矿物等因素的影响而没有统一的变化规律.结合石榴石的微量元素、包裹体矿物组合以及全岩相平衡可以进行综合判别,通常进变质反应形成的石榴石,从核部到边部,其包裹体矿物组合为低温/低压组合向高温/高压(超高压)组合过渡,而退变质形成的石榴石含有的包裹体主要为低压矿物.

转熔石榴石主要形成于高压—超高压变质岩的深熔过程中,由于与熔体的相互作用,使得转熔石榴石常表现为内部呈补丁状而边缘呈锯齿状,可能含有熔体包裹体、多相矿物包裹体以及变质反应物的残留等包裹体,其主量元素和微量元素成分环带与变质成因石榴石的元素环带具有明显的差异.转熔石榴石是高压—超高压岩石在部分熔融过程中通过转熔反应形成的,通常发生在板片折返初期,主要通过白云母、黑云母、角闪石、帘石等含水矿物的脱水熔融或加水熔融来实现.其主微量成分环带不仅受控于部分熔融时的温压条件和母岩成分,而且还受控于形成石榴石的熔融反应类型、熔融产生的熔体成分以及共生矿物的种类等.一般来说,与变质石榴石相比,转熔石榴石通常具有较高的Mn-Fe元素含量,与岩浆石榴石相比,转熔石榴石Mn含量较低.

对不同成因石榴石生长时限的制约,可以通过单颗粒原位Sm-Nd或Lu-Hf等时线定年直接限定,但由于石榴石可能存在多期次,以及内部含有的包裹体,使得单颗粒原位Sm-Nd或Lu-Hf等时线定年得到的年龄通常有一定的偏差(Dragovic *et al.*, 2012; Cheng *et al.*, 2016).另外,通过石榴石内部的锆石、独居石、榍石、金红石等矿物包裹体的U-Pb定年,可以间接获得寄主石榴石的形成时限(Cheng *et al.*, 2011; Cutts *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2015).但是,在利用包裹体进行间接定年时,必须明确定年矿物包裹体与寄主石榴石之间的先后形成关系,才能对石榴石的生长时限给出准确的制约.

4 结语和展望

对高压—超高压变质岩石中不同成因石榴石的准确识别,极大地丰富了区域变质岩中对石榴石特性的理解,也为不同岩石体系中复杂的石榴石成因机制提供了可靠的判别标准.特别是关于超高压岩石中转熔成因石榴石的识别,为超高压岩石的部分熔融提供了重要依据,是俯冲带研究的重要进展之一.但是,目前对于不同成因石榴石的元素环带与变质温压条件之间的准确对应关系还并不能完全确定.尽管相平衡模拟提供了目前较为可靠的方法,但是由于相平衡模拟是建立在等化学模拟的基础之上,而变质—深熔反应很有可能是在开放体系下进行的,因此在确定多期变质反应或转熔反应时通常需要进行一些条件的近似或假设,这些都会对变质—转熔反应的确定产生很大的影响,因此在以后的工作中还有待进一步的深化.此外在利用相平衡解释岩石的变质反应和石榴石成因时,还需要仔细核实实际样品中矿物的平衡与否,矿物的共生组合关系,以及不同阶段对应的成分特征等.同时,通过实验岩石学获得的不同成因石榴石的结构、成分等特征,也为天然样品中石榴石的成因机制提供了重要的借鉴和参考(Perchuk *et al.*, 2005, 2008).另外,石榴石的原位定年技术,也有待进一步的开发,以准确限定石榴石的生长时限.

致谢:感谢两位审稿人提出的宝贵意见和建议.

References

- Carswell, D. A., O'Brien, P. J., Wilson, R. N., et al., 1997. Thermobarometry of Phengite-Bearing Eclogites in the Dabie Mountains of Central China. *Journal of Metamorphic Geology*, 15(2): 239–252. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1997.00014.x>
- Carswell, D. A., Wilson, R. N., Zhai, M. G., 2000. Metamorphic Evolution, Mineral Chemistry and Thermobarometry of Schists and Orthogneisses Hosting Ultra-High Pressure Eclogites in the Dabieshan of Central China. *Lithos*, 52(1–4): 121–155. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(99\)00088-2](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(99)00088-2)
- Chen, Y. X., Zheng, Y. F., Hu, Z. C., 2013. Synexhumation Anatexis of Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks: Petrological Evidence from Granitic Gneiss in the Sulu Orogen. *Lithos*, 156: 69–96. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.10.008>
- Chen, Y. X., Zhou, K., Zheng, Y. F., et al., 2015. Garnet Geo-

- chemistry Records the Action of Metamorphic Fluids in Ultrahigh-Pressure Dioritic Gneiss from the Sulu Orogen. *Chemical Geology*, 398: 46–60. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.01.021>
- Cheng, H., Liu, X.C., Vervoort, J.D., et al., 2016. Micro-Sampling Lu-Hf Geochronology Reveals Episodic Garnet Growth and Multiple High-P Metamorphic Events. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(4): 363–377. <https://doi.org/10.1111/jmg.12185>
- Cheng, H., Vervoort, J.D., Li, X., et al., 2011. The Growth Interval of Garnet in the UHP Eclogites from the Dabie Orogen, China. *American Mineralogist*, 96(8–9): 1300–1307. <https://doi.org/10.2138/am.2011.3737>
- Cutts, K.A., Kinny, P.D., Strachan, R.A., et al., 2010. Three Metamorphic Events Recorded in a Single Garnet: Integrated Phase Modelling, In Situ LA-ICPMS and SIMS Geochronology from the Moine Supergroup, NW Scotland. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(3): 249–267. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00863.x>
- Dragovic, B., Samanta, L.M., Baxter, E.F., et al., 2012. Using Garnet to Constrain the Duration and Rate of Water-Releasing Metamorphic Reactions during Subduction: An Example from Sifnos, Greece. *Chemical Geology*, 314–317: 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.04.016>
- Holdaway, M.J., 2000. Application of New Experimental and Garnet Margules Data to the Garnet-Biotite Geothermometer. *American Mineralogist*, 85(7–8): 881–892. <https://doi.org/10.2138/am-2000-0701>
- Holness, M.B., Sawyer, E.W., 2008. On the Pseudomorphing of Melt-Filled Pores during the Crystallization of Migmatites. *Journal of Petrology*, 49(7): 1343–1363. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn028>
- Kohn, M., Spear, F.S., Valley, J.W., 1997. Dehydration-Melting and Fluid Recycling during Metamorphism: Rangeley Formation, New Hampshire, USA. *Journal of Petrology*, 38(9): 1255–1277. <https://doi.org/10.1093/petrology/38.9.1255>
- Konrad-Schmolke, M., Zack, T., O'Brien, P.J., et al., 2008. Combined Thermodynamic and Rare Earth Element Modeling of Garnet Growth During Subduction: Examples from Ultrahigh-Pressure Eclogite of the Western Gneiss Region, Norway. *Earth Planet. Science. Letters.*, 272(1–2): 488–498. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.05.018>
- Liu, P.L., Wu, Y., Liu, Q., et al., 2014. Partial Melting of UHP Calc-Gneiss from the Dabie Mountains. *Lithos*, 192–195: 86–101. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.01.012>
- Perchuk, A.L., Burchard, M., Maresch, W.V., et al., 2005. Fluid-Mediated Modification of Garnet Interiors under Ultrahigh-Pressure Conditions. *Terra Nova*, 17(6): 545–553. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2005.00647.x>
- Perchuk, A.L., Burchard, M., Maresch, W.V., et al., 2008. Melting of Hydrous and Carbonate Mineral Inclusions in Garnet Host during Ultrahigh Pressure Experiments. *Lithos*, 103(1–2): 25–45. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.09.008>
- Rubatto, D., Hermann, J., 2007. Experimental Zircon/Melt and Zircon/Garnet Trace Element Partitioning and Implications for the Geochronology of Crustal Rocks. *Chemical Geology*, 241(1–2): 38–61. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.01.027>
- Sawyer, E.W., 2010. Migmatites Formed by Water-Fluxed Partial Melting of a Leucogranodiorite Protolith: Microstructures in the Residual Rocks and Source of the Fluid. *Lithos*, 116(3–4): 273–286. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.07.003>
- Wu, C.M., 2004. Empirical Garnet-Biotite-Plagioclase-Quartz (GBPQ) Geobarometry in Medium- to High-Grade Metapelites. *Journal of Petrology*, 45(9): 1907–1921. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh038>
- Xia, Q.X., Gao, P., Yang, G., et al., 2019. The Origin of Garnets in Anatectic Rocks from the Eastern Himalayan Syntaxis, Southeast Tibet: Constraints from Major and Trace Element Zoning and Phase Equilibrium Relationships. *J. Petrol.*(in revision).
- Xia, Q.X., Wang, H.Z., Zhou, L.G., et al., 2016. Growth of Metamorphic and Peritectic Garnets in Ultrahigh-Pressure Metagranite during Continental Subduction and Exhumation in the Dabie Orogen. *Lithos*, 266–267: 158–181. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.08.043>
- Xia, Q.X., Zheng, Y.F., Lu, X.N., et al., 2012. Formation of Metamorphic and Metamorphosed Garnets in the Low-T/UHP Metagranite during Continental Collision in the Dabie Orogen. *Lithos*, 136–139: 73–92. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.10.004>
- Xia, Q.X., Zhou, L.G., 2017. Different Origins of Garnet in High Pressure to Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 130–148. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2017.03.037>
- Zheng, Y.F., Chen, R.X., 2017. Regional Metamorphism at Extreme Conditions: Implications for Orogeny at Convergent Plate Margins. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 46–73. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2017.03.009>