

俯冲碰撞带低 Nb/Ta 角闪岩：对大陆地壳成因的启示

丁兴¹⁾, 孙卫东²⁾

1) 中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室, 广东广州, 510640;

2) 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广东广州, 510640

太古代 TTG (奥长花岗岩-云英闪长岩-花岗闪长岩系列) 一般被认为代表大陆地壳最初的生长。有关它们的成因是最近十余年来颇具争论的一个热点问题。其中, 最关键的一个争论点在于大陆地壳的 Ti、Nb-Ta 负异常和亚球粒陨石值 Nb/Ta 比值 (平均 Nb/Ta 为 12~13, 低于球粒陨石值 19.9) 的成因。

要解决大陆地壳 Ti、Nb-Ta 的负异常, 可以采用金红石等富 Ti 矿物相残留来解释; 而要解决大陆地壳亚球粒陨石质 Nb/Ta 比值特征, 则需要某个导致 Nb 和 Ta 分异的地球化学过程。其中, 岩浆过程和俯冲变质过程均是候选。然而, 岩浆过程很容易解释高 Nb/Ta 的 TTG 成因, 而不容易解释低 Nb/Ta 的 TTG 成因, 因而俯冲变质过程被看作更合适的选择。最近几年, 中国研究者通过对苏鲁中国大陆超深钻样品中的榴辉岩、大别山榴辉岩、柴达木榴辉岩和西天山榴辉岩等超高压变质岩及脉体的研究, 均发现高场强元素 (HFSE) 在俯冲变质过程中能发生明显迁移和分异, 从而支持俯冲变质过程中 HFSE 元素分异的观点。然而, 该观点也遭到部分人反对。比如, Schmidt et al. (2009) 收集了全球 5 个不同俯冲碰撞带的 19 个 MORB 型榴辉岩, 测得他们的平均 Nb/Ta 比值为 14.2, 与全球 MORB 的平均 Nb/Ta 比值一致, 从而认为在洋壳榴辉岩化过程中 HFSE 并未分异。

鉴于以往的研究基本都关注榴辉岩, 而榴辉岩从深部抬升至地表又通常经历复杂的物理和化学变化, 因此, 我们重点关注了桐柏地区低温变质带中的大阜山角闪岩相变质辉长岩中的 HFSE, 试图弄清俯冲板片在榴辉岩化之前的地球化学变化, 从而描绘出俯冲变质过程中 HFSE 更为完整的活动轨迹, 继而为大陆地壳的成因问题提供新的启示。

1 地质背景和地质样品

大阜山变质辉长岩体位于湖北省枣阳境内, 出

露面积约 8 km²。在区域构造单元上, 大阜山岩体位于桐柏地区南部榴辉岩带和蓝片岩带交界上。岩体外围为中元古代变质杂岩, 内部被晚中生代超镁铁质岩侵入。岩体最新的锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果显示, 该岩体形成于约 662 Ma; 而围岩石英岩中的白云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年显示一个坪年龄 234±2Ma 和一个等时线年龄 237±3Ma, 结合区域的年龄资料, 显示该岩体很可能在 255Ma 左右开始经历俯冲进变质作用, 之后在中晚三叠世抬升至浅部。

根据大阜山变质辉长岩中石榴石、角闪石和金红石的成分, 之前的研究推算大阜山变质辉长岩峰期变质的 P-T 条件为 520°C~620°C 和 6~11.5kbar, 属于绿帘石石榴角闪岩相。该温压范围符合桐柏地区由北东向南西峰期条件逐渐递减的趋势。

大阜山变质辉长岩主要包括三种含金红石变质岩, 从外部到内部逐渐演变, 分别为弱变形或片麻化的含石榴石斜长角闪岩、斜长石榴闪岩和富金红石榴闪岩。其中, 含石榴石斜长角闪岩主要包括角闪石 (<35%)、钠长石 (<45%)、石榴石 (<8%)、金红石 (<1%) 和绿帘石、钠云母、钛铁矿、绿泥石等一些副矿物; 斜长石榴闪岩包含角闪石 (30~50%)、石榴石 (5~12%)、斜长石/钠长石 (20~40%)、绿帘石 (~5%)、金红石 (1~2%) 和云母、绿泥石、钛铁矿、方解石等副矿物; 富金红石榴闪岩主要包含角闪石 (45~60%)、石榴石 (15~30%)、斜长石 (<5%)、金红石 (2~4%) 和石英、钠长石、磷灰石、绿帘石、钛铁矿、绿泥石、云母、方解石、黄铁矿等副矿物。

岩石中可以观察到岩浆矿物的残晶或残留结构。1) 可见聚片双晶的斜长石斑晶残留结构, 其成分已经完全绿泥石化, 内部包含石榴石、角闪石或钠长石、绿帘石等矿物; 2) 可见具溶蚀结构的棕黄色角闪石斑晶, 具有明显的两组斜交解理, 不同于变质生长的绿色或蓝色角闪石; 3) 可见短柱状辉石的残留结构, 具有两组正交的解理, 但成分

已交代为角闪石,而角闪石内部包含两颗较大的金红石。整个残留结构又被细小的变质角闪石所包裹,外围再发育颗粒状的石榴石“岛链”结构。

三类岩石中,外围的含石榴石斜长角闪岩和斜长石榴闪岩发生明显的退变质作用,表现为斜长石退变质为钠长石或绿帘石、绿泥石、绢云母等,以及金红石被钛铁矿或榍石局部或完全交代;而岩体内部的富金红石榴闪岩相对经历较少的退变质作用,矿物颗粒发育完整,表面干净,未见明显的矿物交代。部分金红石表面出溶小片状或针状钛铁矿,或者金红石与角闪石或石榴石接触界面出现细小钛铁矿颗粒。

2 结果和讨论

2.1 全岩主、微量

大阜山变质辉长岩总体显示高铁低钾拉斑演化的趋势。主要元素中 SiO_2 介于 40.5~52.5 wt%, TiO_2 介于 0.57~4.19 wt%, Al_2O_3 介于 13.2~26.3 wt%, Fe_2O_3^* 介于 4.04~24.7 wt%, MgO 介于 1.09~7.56 wt%, CaO 介于 7.31~11.7 wt%, Na_2O 介于 2.14~4.01 wt%, K_2O 介于 0.23~0.60 wt%。从岩体外部到内部,总体上 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 含量降低, TiO_2 、 Fe_2O_3^* 和 MgO 含量升高;而 SiO_2 与 Al_2O_3 、 CaO 显示明显正相关,与 TiO_2 、 Fe_2O_3^* 和 MgO 显示明显负相关。在 AFM 图上,所有样品沿着拉斑系列演化线分布,其中,岩体内部部分富金红石榴闪岩位于富铁钛氧化物堆晶岩区域,但远离典型的辉长岩堆晶岩和超镁铁质堆晶岩。主量元素特征暗示大阜山岩体由外部到内部的三种岩石很可能为同一岩浆演化的结果,而内部发生局部的铁钛氧化物堆晶作用。

大阜山变质辉长岩在微量元素上可以分为两类:一类拥有较高的微量元素含量,在球粒陨石标准化的稀土配分图上,略微右倾,位于 OIB 和 E-MORB 曲线之间,不具明显的元素异常。在 N-MORB 标准化的蛛网图上,也位于 OIB 和 E-MORB 曲线之间,总体较为平滑,只显示明显的 Th-U 和 Zr-Hf 负异常以及略微的 Ti 正异常;另一类拥有较低的微量元素含量,在球粒陨石标准化的稀土配分图上,略微右倾,具明显的 Eu 正异常,曲线位于 E-MORB 或 N-MORB 之下。在 N-MORB 标准化的蛛网图上,显示明显的 Th-U、Nd-Zr-Hf 负异常以及明显的 Ba、Pb、Eu、Ti 和 Nb-Ta 正异常,该特征类似于西天山榴辉岩中受流体改造造成的

蓝片岩,且分布的曲线也位于受流体交代的蓝片岩和榴辉岩相石英英脉之间,暗示大阜山变质辉长岩受到了强烈的流体交代作用。而 Ba/Zr-La/Nb 协变图上,岩体内部富金红石榴闪岩到中间斜长榴闪岩到外部斜长角闪岩明显正相关,表明岩体由内到外遭受的流体作用越来越强。

相应地,大阜山变质辉长岩的 HFSE 体系也可划分为两类:一类相对富集 HFSE,拥有整体超陆壳质(高于陆壳平均值)Nb/Ta (13.3~16.5)和 Zr/Hf (36.3~43.8);第二类则拥有更低的 HFSE 和整体亚陆壳质(低于陆壳平均值)Nb/Ta (9.0~12.7)和 Zr/Hf (30.7~39.5)。就整个岩体而言,大阜山变质辉长岩大多数显示第二类的特征,第一类较为少见。我们认为第一类样品反映了大阜山石榴角闪岩相变质辉长岩原岩的特征,而第二类代表了变质改造的结果。

2.2 矿物成分环带

2.2.1 石榴石

大阜山变质辉长岩中的石榴石高 Al_2O_3 (16.96~21.88 wt%)、 FeO^* (23.81~32.84 wt%) 和低 MgO (0.81~3.58 wt%),显示铁铝榴石富集的平均成分。相对于苏鲁-大别榴辉岩中的石榴石,大阜山变质辉长岩中石榴石拥有更多铁铝榴石但更少的镁铝榴石端元组分。在 HFSE 含量方面,石榴石具有非常低的 Nb、Ta 含量 (Nb<0.23ppm, Ta<0.13ppm)和稍微高点的 Zr、Hf 含量 (Zr<6.2ppm, Hf<0.53ppm)及很低的 Zr/Hf (<21.3)。

同其他高压-超高压变质带中的石榴石一样,大阜山变质辉长岩中石榴石也显示明显环带,表现为核部窄小,边部宽缓,核部高铁铝榴石和镁铝榴石成分,但低钙铝榴石成分,显示进变质的生长成分环带。

2.2.2 角闪石

如前所述,大阜山变质辉长岩中的角闪石主要分两类:一类为岩浆型角闪石残晶,其成因与岩浆及岩浆热液相关,高 SiO_2 (>50wt%)、 MgO (15.4~20.3wt%) 和 $\text{Mg\#}$ (71~85),低 Al_2O_3 (2.5~5.0wt%) 和 FeO^* (6.6~11.4wt%),属于钙质镁角闪石;另一类为变质角闪石,成分则相反,低 SiO_2 (<50wt%)、 MgO (9.4~11.9wt%) 和 $\text{Mg\#}$ (44~63),高 Al_2O_3 (10.0~14.0wt%) 和 FeO^* (12.4~14.8wt%),属于钠钙质冻蓝闪石。在 HFSE 含量方面,角闪石也具有非常低的 Nb、Ta 含量和稍微高点的 Zr (1.8~7.2ppm)、Hf (Hf<0.73ppm)

含量及很低的 Zr/Hf (5.6~15.7)。

角闪石也展现与石榴石相似的成分环带：窄小核部高 SiO₂、MgO 和 Mg#，宽缓边部高 CaO、Al₂O₃ 和 FeO*；相应地，微量元素方面，窄小核部高 Ti、Co 和 Ni，宽缓边部高 V、Cr、Ba、Rb、Zr 和 Hf。窄小核部的主成分类似于第一类角闪石，可能暗示其核部是第一类角闪石与流体作用后的残余。

2.2.2 金红石

大阜山变质辉长岩中金红石整体显示亚球粒陨石质 Nb/Ta 和 Zr/Hf。金红石中 Nb 含量 75~318ppm，Ta 含量 4.3~21.2ppm，Zr 含量 29.7~202ppm，Hf 含量 1.8~8.3ppm。HFSE 含量类似于代表俯冲洋壳残留的 Roberts Victor 榴辉岩中的金红石，而远低于大陆造山型的阿尔卑斯榴辉岩中的金红石。相应地，大阜山变质辉长岩中金红石的 Nb/Ta 变化于 9.8~28.3，平均 14.4，Zr/Hf 变化于 9.1~51.7，平均 22.6。

同样地，大阜山变质辉长岩中的金红石也显示明显的窄小核部-宽缓边部的成分环带：小的核部 Nb (>180ppm)、Ta (>15ppm)、Zr (>70ppm)、Hf (>3.0ppm) 含量高，Nb/Ta (最低 9.8) 和 Zr/Hf (最低 21.1) 比值低；而宽缓边部则反之。金红石的微量元素环带结构特征不同于退变质作用形成的环带（通常核部宽缓、边部狭窄），也不同于元素扩散导致的成分剖面（通常平缓且定向一侧），应是进变质过程中的生长环带，反应的是生长过程中流体的变化。

鉴于大阜山石榴角闪岩相变质辉长岩全岩，尤其是主要矿物的 HFSE 成分环带特征，我们认为，大阜山变质辉长岩在俯冲过程中发生水化，至少遭受了来自下覆板片两种类型的流体强烈交代作用。首先是具有高的 HFSE 含量和低 Nb/Ta 的流体，然后是具有低的 HFSE 含量和高 Nb/Ta 的流体。考虑到流体成分的变化以及俯冲物质的变质反应，我们认为在俯冲脱水过程中，蓝片岩向角闪岩或角闪榴辉岩的转变（BAT）易于释放高 HFSE 含量和低 Nb/Ta 比值的流体。因为在 BAT 过程中，脱水矿物主要是硬柱石，而残留矿物主要是角闪石，由于此过程中无大量金红石出现，HFSE 易溶于流体中，从而使得释放的流体具有高 HFSE 特征，而残留矿物角闪石与流体的分配，会造成流体具有较低的 Nb/Ta。相应地，角闪岩或角闪榴辉岩向榴辉岩转变（AET）易于释放低 HFSE 含量和高 Nb/Ta 比值

的流体。因为在 AET 过程中，脱水矿物主要是角闪石，残留相是金红石、石榴石和绿辉石。由于此阶段金红石大量出现，吸收了体系中几乎所有的 Nb 和 Ta，造成释放的流体极其亏损 Nb-Ta。而由于流体与石榴石、绿辉石之间的 DNb/Ta<1，从而造成释放的流体具有高的 Nb/Ta。我们认为，大阜山变质辉长岩在俯冲水化过程中，首先吸收了来自下覆俯冲板片 BAT 过程释放的流体，然后较长时间地吸收了早期 AET 过程释放的流体。长期、强烈的流体交代作用使得大阜山变质辉长岩总体具有亚陆壳质 Nb/Ta 和 Zr/Hf 的特征。

因此，从大阜山石榴角闪岩相变质辉长岩研究中，我们可以获得最重要的信息包括：1) 在板块俯冲过程导致的长期的水-岩反应可以造成 Nb 和 Ta 明显分异；2) 俯冲脱水过程存在两类流体，一类高 HFSE 低 Nb/Ta，另一类反之；前者来自于 BAT 过程，后者来自 AET 过程。遭受两种流体交代的区域最终会显示叠加的效果；而先后经历 BAT 和 AET 过程的地质体则会产生相互抵消的效果。比如，BAT 过程产生低 Nb/Ta 流体同时，会使得地质体自身 Nb/Ta 升高；而 AET 过程产生高 Nb/Ta 流体，则会使地质体 Nb/Ta 降低。这解释了 Schmidt et al. (2009) 观察到的现象。同时也清楚表明，在对高压-超高压变质作用研究过程中，对于全岩的数据应保持谨慎；而原位分析可以获得更多信息；3) 在俯冲带会存在非常低 Nb/Ta 的区域，该区域可能存在于俯冲板块内部含水区、流体通道附近或地幔楔，是低 Nb/Ta 流体经水-岩反应输送的结果。在当今俯冲带，由于较冷的地温梯度，地幔楔的部分熔融是产生弧岩浆的主要过程，从而通过弧岩浆作用增生大陆地壳；而在高的地温梯度下，比如太古代，俯冲板块含水区的部分熔融则是大陆地壳生长的主要过程，从而形成大陆地壳独特的成分特征。

本文受国家自然科学基金项目（41002021, 41090373）和同位素地球化学国家重点实验室（中国科学院广州地球化学研究所）启动基金项目（SKLIG-QD-12-04）联合资助。部分内容参见 Ding, X., Hu, Y. H., Zhang, H., Li, C. Y., Ling, M. X., Sun, W. D. 2013. Major Nb/Ta fractionation recorded in garnet amphibolite facies metagabbro. *Journal of Geology*, 121(3): 255-274.