

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 敦煌地块南缘晚古生代俯冲增生杂岩：对中亚 造山带南缘大地构造格局的意义

石梦岩<sup>1</sup>, 侯泉林<sup>2\*</sup>, 吴春明<sup>2</sup>, 闫全人<sup>2</sup>, 程南南<sup>1</sup>, 张谦<sup>2</sup>, 王浩<sup>3</sup>

1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454003;

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

造山带演化是地球科学领域前沿探索的永恒主题。中亚造山带是地球表面最大的显生宙增生型造山带, 已成为研究造山作用的天然实验室(Şengör et al., 1993; Xiao et al., 2003)。中亚造山带南缘如何向南扩展, 对深入理解增生造山作用过程及中亚构造域与特提斯构造域的衔接关系具有重要科学意义, 是地质学界的研究热点(Xiao et al., 2015)。作为中亚造山带中段南缘的关键构造单元, 敦煌地块的大地构造属性长期备受关注且颇有争议。传统观点认为敦煌地块是古亚洲洋南侧的前寒武纪大陆地块, 并以大陆板块形式参与了古亚洲洋南缘的最终拼贴过程(贺振宇等, 2014; Tian and Xiao, 2019)。然而, 近年来的研究认为敦煌地块卷入了古亚洲洋南部的俯冲增生造山过程, 属于中亚造山带南缘的增生系统(Zhao et al., 2016; 石梦岩等, 2017; Wang et al., 2017)。这一争议限制了对中亚造山带南缘扩展方式及增生造山过程的理解。

俯冲增生杂岩发育在大洋板块俯冲带, 最终可就位于碰撞造山带, 代表古汇聚板块边界遗迹, 记录大洋板块消亡和造山带形成过程的重要信息(Hsu et al., 1968; 闫臻等, 2018; 周建波, 2020)。敦煌地块南缘红柳峡地区主要出露一套变质杂岩, 由变质沉积岩、变质基性岩和大理岩等组成, 广泛发育叠瓦式逆冲断层、韧性剪切带、紧闭-倒转褶

皱和“基质夹岩块”组构(石梦岩等, 2017)。变质基性岩(角闪岩、麻粒岩、榴辉岩)普遍记录了志留纪-泥盆纪“顺时针型”变质作用  $P-T$  轨迹(Wang et al., 2017a, b, 2018), 其赋存的围岩基质为浅变质的晚古生代海沟浊积岩(石梦岩等, 2018)。以上研究表明, 红柳峡变质杂岩可能具有增生杂岩的构造属性, 但其中变质基性岩的原岩和来源目前尚不清楚, 致使上述推论仍存疑。

针对以上问题, 本研究对红柳峡杂岩中变质基性岩的野外产状和全岩地球化学进行了综合分析。野外露头中, 变质基性岩主要以构造岩块的形式裹杂于变质沉积岩中, 显示“基质夹岩块”组构, 或以构造岩片-推覆体形式产出。全岩不活动微量元素组成显示 3 组不同组分, 分别具有类似于洋中脊拉斑玄武岩、洋底高原碱性玄武岩、洋内岛弧钙碱性玄武岩的特征, 表明变质基性岩的原岩属于大洋岩石圈物质组分。并且, 它们于早志留世至中泥盆世期间在俯冲带不同深度发生了变质作用。基于此, 认为红柳峡变质杂岩是形成于大洋板块俯冲阶段的俯冲增生杂岩, 晚古生代之后就位于造山带内。这一结果证实敦煌地区古生代期间存在大洋板块俯冲过程, 表明敦煌地块的大地构造属性应为古生代造山带而不是前寒武纪陆块。结合区域地质背景, 敦煌造山带很可能属于中亚造山带的南延。

基金项目: 河南省高校基本科研业务费专项资金(NSFRF210302); 国家自然科学基金(41730215、41872238); 河南理工大学博士基金(760307/018)

第一作者简介: 石梦岩(1991-), 讲师, 从事构造地质学、造山带演化研究. E-mail: shimengyan@hpu.edu.cn

\*通信作者简介: 侯泉林(1963-), 教授, 博士生导师, 主要从事构造地质学方面研究, E-mail: quhou@ucas.ac.cn

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 华南蚀变玄武岩的 Li 同位素组成对形成低 $\delta^7\text{Li}$ 值的大陆型榴辉岩的意义

余成龙<sup>1</sup>, 肖益林<sup>1,2\*</sup>, 王洋洋<sup>1</sup>, Olivier Nadeau<sup>3</sup>, 孙贺<sup>1,4</sup>,  
万红琼<sup>1</sup>, 李东永<sup>1</sup>, 王晓霞<sup>1</sup>, 谭东波<sup>1</sup>

1. 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, 合肥, 230026;

2. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥, 230026;

3. 中国地质大学(武汉)经济地质与环境同位素实验室, 武汉, 430000;

4. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥, 230009

近 20 年来, 众多研究均发现俯冲带榴辉岩具有比 MORB 更低的 Li 同位素组成, 并提出了各种成因模型来解释该现象, 譬如, 俯冲板片脱水, 板片折返中的流体交代以及扩散等。然而这些成因模型都是基于蚀变洋壳来构建, 忽视了大陆型与大洋型榴辉岩在原岩上 Li 同位素特征可能存在的差异。为此, 我们详细测试和分析了华南地区新鲜和蚀变玄武岩的矿物组成, 主微量元素和 Li 同位素组成, 结果发现: 相对于新鲜玄武岩的 Li 含量和 Li 同位素组成 (Li: 5.4 ppm,  $\delta^7\text{Li}$ : 3 ‰), 蚀变玄武岩具有更高的 Li 含量和更低的  $\delta^7\text{Li}$  值 (藩坑玄武岩的 Li: 11.4~30.4 ppm,  $\delta^7\text{Li}$ : -4.3‰ ~ -1.8‰; 青山玄武岩的 Li: 61.0~117.7 ppm,  $\delta^7\text{Li}$ : -4.3‰ ~ -1.8‰)。在排除地幔源区和岩浆过程的影响后, 我们发现蚀变玄武岩含有大量的次生矿物 (例如: 绿泥石和绿帘石) 和矿物中的流体包裹体, 并且烧蚀量 (LOI) 越高的蚀变玄武岩含有更高 Li 含量, 这说

明了热液流体带来了大量的 Li 进入蚀变玄武岩。然而, 藩坑玄武岩具有不同于青山玄武岩的特点。首先, 藩坑玄武岩具有相对青山玄武岩具有更低的 Ba, La, U 等流体活动性元素, 并且藩坑玄武岩的  $\delta^7\text{Li}$  值随着 LOI 和 Nb/U 的升高而降低, 这说明在藩坑玄武岩热液蚀变后还经历了大陆风化。此外, 绿泥石作为藩坑玄武岩中主要的次生矿物相, 具有比全岩更高的 Li 和 Zn 含量, 并且绿泥石含量越高, 藩坑玄武岩的  $\delta^7\text{Li}$  值越低。这些说明有绿泥石等粘土矿物参与下的大陆风化是降低蚀变玄武岩的 Li 同位素组成的关键。结合前人研究, 相比于蚀变洋壳的  $\delta^7\text{Li}$  值, 经历大陆风化的蚀变玄武岩具有更低的 Li 同位素组成。在维持玄武岩主体成分的基础上, 风化后的蚀变玄武岩的  $\delta^7\text{Li}$  值可以降至 -10‰。在不排除板片脱水, 流体交代和扩散等过程的影响下, 经历大陆风化的原岩是低  $\delta^7\text{Li}$  值的大陆榴辉岩的形成不可忽视的要素之一。

基金项目: 国家重点研发计划项目; 中国科学院战略性先导研究计划 (B); 国家自然科学基金项目 (2018YFA0702701; XDB18000000; 42073003)

第一作者简介: 余成龙 (1994-), 博士研究生, 研究方向: 同位素地球化学和微量元素地球化学研究. E-mail: ycllovey@mail.ustc.edu.cn

\*通信作者简介: 肖益林 (1962-), 教授, 研究方向: 变质流体、元素与同位素地球化学. E-mail: ylxiao@ustc.edu.cn.

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 变质过程中石榴石巨晶的 Li-Mg 同位素地球化学特征研究

李星<sup>1</sup>, 肖益林<sup>1,2\*</sup>, 李东永<sup>1</sup>, 刘海洋<sup>1</sup>, 张泽明<sup>3</sup>

1. 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;

2. 中国科学院比较行星学卓越创新中心;

3. 中国地质科学院地质研究所

石榴石作为俯冲带高压-超高压 (HP-UHP) 变质岩的重要组成矿物之一, 能够有效地记录俯冲过程的变质演化历史, 在地学研究领域发挥着举足轻重的作用。前人对石榴石的内部元素扩散、放射性同位素定年、矿物对地质温压计等方面进行了详细的研究, 然而对其原位微区同位素组成的研究仍然比较匮乏。巨晶石榴石由于其具有较大的生长半径, 较高的封闭温度, 能够更真实地记录变质过程中的生长信息。基于此, 我们选取了峰期温压条件达到角闪岩相变质作用的雅拉香波片岩中直径约 6cm 石榴石巨晶为研究对象, 利用微钻取样仪, 沿着石榴石剖面进行均匀采样, 将得到的 16 件石榴石粉末样品进行 Li-Mg 同位素分析。其中, 石榴石剖面  $\delta^7\text{Li}$  同位素组成表现为由核到边先降低而后短暂升高再降低的两阶段特征, 而  $\delta^{26}\text{Mg}$  同位素组成则显示为单阶段升高特征。通过模拟计算表明, 石榴石中  $\delta^7\text{Li}$  同位素组成的两阶段特

征对应于进变质作用中绿泥石和云母的先后脱水, 而通过前人给出的矿物对同位素分馏公式可计算得到  $\delta^{26}\text{Mg}$  同位素组成的单阶段特征是受控于进变质过程中温度升高导致的矿物相间的同位素分馏。这表明, Li、Mg 进入石榴石内部的机制存在差异性, 即俯冲板片脱水过程中释放 Li 进入流体, 进而在流体和石榴石之间进行元素再分配进入石榴石, 石榴石内部的 Li 同位素记录了变质脱水过程; 而石榴石中的 Mg 则主要从反应物(绿泥石、黑云母)中直接继承而来, 在这个过程 Mg 同位素主要受控于温度主导的矿物相间同位素分馏, 脱水过程对其影响较小。同时, 大颗粒石榴石内部至少到角闪岩相可以很好地保留 Li-Mg 同位素生长信息。俯冲板片在进行到角闪岩相变质阶段时, 全岩 Li-Mg 同位素可能不会发生明显的分馏, 但在矿物-矿物/流体之间同位素会进行再分配。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41729001; No.42073003; No.41673031)

第一作者简介: 李星 (1994-), 博士研究生, 研究方向: 岩石地球化学研究. E-mail: lx7064@mail.ustc.edu.cn

\*通信作者简介: 肖益林, 教授, 博士生导师, 研究方向: 俯冲带流体、元素与同位素地球化学. E-mail: ylxiao@ustc.edu.cn

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 淡色花岗岩放射性生热导致超高温变质作用： 二维动力学数值模拟研究

樊银龙<sup>1</sup>，张立飞<sup>1,\*</sup>，李忠海<sup>2</sup>，王杨<sup>2</sup>

1. 北京大学 地球与空间科学学院 造山带与地壳演化教育部重点实验室，北京 100871；

2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院 计算地球动力学重点实验室，北京 100049

喜马拉雅造山带是新生代印度与亚洲大陆板块碰撞的产物，是世界上最典型的，且正在进行的碰撞造山带。作为喜马拉雅造山带的核部，高喜马拉雅结晶岩系(GHC)内广泛的高级变质作用和深熔作用完整的记录了喜马拉雅造山带的演化过程。近年来在 Ama Drime Massif 岩体(Wang et al.,2021)以及亚东地区发现一些高压榴辉岩经历了超高温变质作用，然而，对于超高温变质作用的热源却一直存在争议。一些学者认为，在大陆碰撞过程中岩石圈减薄导致的上涌软流圈提供了热源，但是高喜马拉雅结晶岩系(GHC)目前没有发现地幔来源的镁铁质岩石。值得注意的是，在高喜马拉雅结晶岩系(GHC)分布有世界瞩目的淡色花岗岩带，这些淡色花岗岩总体上表现为富集大离子亲石元素 K、Rb 和放射性元素 U(吴福元等，2015)，具有较高的放射性生热率，我们认为这可能是超高温变质的热量来源。为了评估放射性生热在超

高温变质作用中的贡献，我们使用二维动力学数值模型 I2VIS 开展一系列数值模拟实验，模拟了大陆上地壳在不同的放射性生热条件下的碰撞过程。数值模型的结果显示发生上地壳的放射性生热率的升高可以引起其中下地壳的深度下温度升高，并达到超高温麻粒岩相。数值模型的预测与地质观测的结果相一致，例如：高喜马拉雅结晶岩系(GHC)的 P-T-t 轨迹；在高级变质地体中分布的大量的由上地壳部分熔融形成的淡色花岗岩。本次动力学模拟实验的结果表明放射性生热对俯冲地壳折返阶段温度的提高具有重要影响，除此之外，造山过程中的剪切生热可以提高变质温度，但是只能发生在进变质阶段，在没有提高放射性生热率的情况下，通常不会导致超高温变质作用的发生。全球碰撞造山带广泛分布的淡色花岗岩和超高温麻粒岩组合表明，放射性生热对超高温变质作用的热量来源具有重要贡献。

基金项目：国家自然科学基金项目(41121062)

第一作者简介：樊银龙(1996-)，博士研究生，研究方向：变质岩石学与动力学模拟。E-mail: ylfan@pku.edu.cn

\*通信作者简介：张立飞(1963-)，理学博士，教授，主要从事变质地质学研究。E-mail: lfzhang@pku.edu.cn

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 大陆深俯冲过程中的超临界流体： 来自超高压绿辉石中多相流体包裹体的证据

金德时<sup>1</sup>, 肖益林<sup>1,2\*</sup>, 谭东波<sup>1</sup>

1. 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, 合肥 230026;

2. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

流体作为各种地质活动中不可或缺的部分, 可大致分为熔体、富水流体以及高温高压条件下形成的成分介于两者之间的超临界流体 (Manning, 2004)。超临界流体本身极强的元素迁移能力使其成为深部地质过程尤其是俯冲带物质迁移的有效载体 (Kessel 等, 2005)。因此, 超临界地质流体的形成和演化可能在地球内部物质循环、俯冲带岩浆作用和俯冲带成矿等方面都可发挥巨大作用。超临界流体在温压降低以及与围岩反应后会发生分溶, 而这种“不稳定性”会使其在很难在天然岩石样品中保存下来。尽管相关实验岩石学和地球化学的工作已经为超临界流体的研究提供了一定的理论基础, 但是目前对超临界流体识别和成分计算还处于经验推测和半定量估算的阶段。出露于造山带中的高压-超高压变质脉体被认为是俯冲带深部流体活动的直接记录 (郭顺等, 2019), 为深部流体研究提供了天然的研究对象。多相包裹体作为最有可能代表原始超临界流体的天然样品, 在超临界流体识别以及流体成分重建方面有着巨大潜力。

本次研究在位于中国大别山的碧溪岭超高压变质脉体的绿辉石中发现了原生的多相流体包裹体

(MFIs)。MFIs 呈负晶型且子矿物的组成相对固定: 石英+硬石膏+方解石±重晶石±铁铝闪石±阳起石+流体水。我们认为 MFIs 代表了超高压条件下在绿辉石结晶阶段被捕获的早期成脉流体。通过激光拉曼体扫描技术对包裹体进行三维成像和进一步的建模分析, 首次定量地计算了包裹体所捕获的流体成分: 19.8wt.%SiO<sub>2</sub>, 14.2wt.%CaO, 1.5wt.%BaO, 5.6wt.%CO<sub>2</sub>, 10.5wt.%SO<sub>3</sub>, 46.8wt.%H<sub>2</sub>O, 1.6wt.%(Mg,Fe)O, 0.2wt.%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, with trace of Li<sub>2</sub>O。成脉流体的成分介于含水熔体和富水流体之间, 符合超临界流体高溶质含量和高水含量的特点。结合碧溪岭榴辉岩的峰期变质温压条件 (>4.0GPa, ~1000°C; 肖益林等, 2000) 以及变质脉体中的柯石英、金红石等特征矿物的出现, 我们认为所计算出的成脉流体代表了超高压条件下的超临界流体。MFIs 中普遍存在的大量的方解石和硬石膏表明超临界流体对俯冲板片所赋存的碳酸盐和硫酸盐矿物有着极强的溶解迁移能力。这种异常强的迁移能力意味着超临界流体很可能对于地球深部的碳、硫循环有着重要的意义。此外, 本研究也表明拉曼成像和建模分析为天然样品中超临界流体的识别提供了一种新的、直接有效的方法。

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0702701)

第一作者简介: 金德时 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 俯冲带深部流体研究. E-mail: jinds@mail.ustc.edu.cn

\*通信作者简介: 肖益林 (1962-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 俯冲带变质流体研究. E-mail: ylxiao@ustc.edu.cn

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 华北克拉通北缘古元古代变质作用与构造演化

魏春景\*

北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

华北克拉通北缘红旗营子杂岩主要由蛇绿混杂岩、表壳岩和花岗质片麻岩组成, 记录了古元古代洋壳俯冲、碰撞以及之后的多期复杂构造演化信息。赤城混杂岩主要由退变榴辉岩、斜长角闪岩和超基性岩块体以及变沉积岩基质组成。其中退变榴辉岩记录了进变质、压力峰期、峰期后降压三个变质演化阶段, 峰期  $P-T$  条件为  $>22 \text{ kbar} / \sim 750 \text{ }^\circ\text{C}$ , 地热梯度为  $\sim 9 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ 。而斜长角闪岩则记录了峰期前升温、温度峰期和峰期后冷却的变质过程, 峰期温压条件为  $5\sim 7 \text{ kbar} / 780\sim 830 \text{ }^\circ\text{C}$ , 地热梯度为  $\sim 35 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ 。系统变质作用和年代学研究表明赤城混杂岩榴辉岩相变质作用发生于  $\sim 1.90 \text{ Ga}$ , 榴辉岩峰期变质之后并未折返至地表, 而是折返至下地壳深度, 并在  $\sim 1.66 \text{ Ga}$ 、 $\sim 450 \text{ Ma}$  以及  $360\sim 270 \text{ Ma}$  (晚古生代) 经历了多期热事件叠加改造。并且, 榴辉岩相峰期变质作用指示在古元古代晚期华北克拉通北缘发生了洋壳冷俯冲; 斜长角闪岩的低压变质作用指示晚古生代 ( $360\sim 270 \text{ Ma}$ ) 华北克拉通北缘的区域伸展事件。

红旗营子表壳岩中 (十字) 石榴云母片岩, 作为一个极端实例, 记录了 4 期变质作用。第一期为高压麻粒岩相, 峰期变质条件为  $10\sim 11 \text{ kbar} / > 780 \text{ }^\circ\text{C}$ , 顺时针型  $P-T$  轨迹, 变质年龄为  $\sim 1.95 \text{ Ga}$ ; 第二期为含十字石的低角闪岩相, 峰期条件为  $6\sim 7 \text{ kbar} / 610\sim 630 \text{ }^\circ\text{C}$ , 顺时针型  $P-T$  轨迹, 变质时间为  $\sim 1.85 \text{ Ga}$ ; 第三期以局部出现红柱石为特征, 为低压相系, 可能发生于晚古生代; 第四期以局部叠加绿片岩相组合为特征, 推测变质时间为  $250\sim 230 \text{ Ma}$ 。

红旗营子杂岩的多期变质作用表明, 华北克拉通在  $\sim 1.95 \text{ Ga}$  时发生了第一次碰撞造山, 形成以高压麻粒岩为特征的中压型变质作用, 随后伴随地幔上涌局部出现超高温变质作用; 在  $\sim 1.90 \text{ Ga}$  时期华北克拉通北缘发生了洋壳冷俯冲, 表明现代样式板块构造在古元古代晚期已经启动; 在  $\sim 1.85 \text{ Ga}$  华北克拉通北缘又发生一次陆陆碰撞事件。随后, 红旗营子杂岩折返至中、下地壳深度, 经历了中元古代早期、早古生代、晚古生代到中生代多期热事件的叠加改造。

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 中国大陆科学钻探工程 ZK703 孔橄榄岩和榴辉岩 接触边界的流体活动研究

雷静<sup>1</sup>, 肖益林<sup>1\*</sup>, 吴石头<sup>2</sup>, 张泽明<sup>3</sup>

1. 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, 合肥 230000;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100000;

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100000

本研究对中国大陆科学钻探工程(CCSZ)ZK703 钻孔中的石榴橄榄岩和榴辉岩的接触边界进行了岩相学和矿物原位主微量元素分析。结果表明:(1) 岩性接触边界中的矿物类型主要为绿辉石、石榴石和少量斜方辉石,以及少量黄铁矿、钛铁矿等不透明矿物。接触边界中角闪石、绿泥石等含水矿物的出现,表明在退变质阶段经历了水岩交互作用。(2) 单斜辉石可以分为低 Ca (Cpx-I) 和高 Ca (Cpx-II) 两种类型,后者以小颗粒形式分布于前者边部。Cpx-II 相对于 Cpx-I 具有富 Ca、Mg, 贫 Al, 低 Ti/Eu 比值、低高

场强元素含量的特点,表明其经历了碳酸盐流体的交代。温度计算显示, Cpx-II 由核到边温度逐渐升高,表明其形成于进变质阶段。(3) 石榴石边部常退变为角闪石。石榴石由核部到边部,稀土元素含量逐渐增加, P、Ti、Zr、Hf 等高场强元素含量逐渐增加。(4) 角闪石由核部到边部,稀土元素含量逐渐增加, Sc、Bi 等稀有金属元素含量增加。因此,岩性接触边界至少经历了两期流体活动,即进变质阶段溶质含量较低的碳酸盐流体活动,和退变质阶段逐渐富含难迁移元素的流体活动。

基金项目: 超临界地质流体活动的识别技术 (2018YFA0702701)

第一作者简介: 雷静 (1995-), 博士研究生, 研究方向: 变质流体和矿物微区地球化学研究. E-mail: mrlei@mail.ustc.edu.cn

\*通信作者简介: 肖益林 (1962-), 教授, 研究方向: 变质流体和矿物微区地球化学研究. E-mail: ylxiao@ustc.edu.cn

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 东南极茹尔群岛超高温麻粒岩的多期变质作用及大地构造意义

全来喜<sup>1</sup>, 刘兆<sup>1</sup>, 杨文强<sup>1</sup>, 王彦斌<sup>2</sup>

1. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质系, 西安 710069;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

茹尔群岛 (Rauer Group) 位于东南极普里兹构造带的东部边缘, 代表一个由新太古代和中元古代岩石组成的复合高级变质地体 (Harley, 1998)。新太古代正片麻岩含有富 Mg-Al 的含假蓝宝石的超高温 (>900 °C) 变泥质麻粒岩等组合 (梅瑟副片麻岩组合), 该岩石组合由富 Mg 的含假蓝宝石变泥质麻粒岩、富 Al 的石榴石-矽线石泥质片麻岩、斜方辉石-矽线石石英岩、含石榴石镁铁质麻粒岩和钙硅酸盐麻粒岩等组成 (Harley, 1998; Tong & Wilson, 2006)。这些超高温麻粒岩尤其是含假蓝宝石变泥质麻粒岩和含石榴石镁铁质麻粒岩中保留了由进变质阶段和峰期超高温变质阶段及峰期后退变质减压-冷却阶段组成的多期变质矿物组合与变质反应结构, 表明它们经历了典型的多期变质作用演化历史 (Harley, 1998; Tong & Wilson, 2006)。

目前, 国内外不同研究者得出了具有不同超高温峰期条件和峰期前及峰期后演化历史的不同形式的顺时针变质 P-T 轨迹, 而且超高温变质事件发生的时间和构造背景也存在较大分歧。例如, 研究者认为峰期前进变质演化阶段位于矽线石稳定域内 (Harley, 1998; Kelsey et al, 2003, 2007), 笔者认为峰期前

进变质演化阶段经过蓝晶石稳定域 (Tong & Wilson, 2006), 并得到之后研究者的证实 (Harley et al, 2009; Harley, 2016)。此外, 一种观点认为超高温变质事件发生于格林维尔造山期 (~1000 Ma), 并与罗迪尼亚超大陆聚合有关 (Tong & Wilson, 2006; Wang et al, 2007), 而第二种认为超高温变质事件发生于泛非造山期 (~590 Ma 或 ~530 Ma), 并与冈瓦纳超大陆聚合有关 (Hensen et al, 1997; Kelsey et al, 2007; Harley, 2016; Hokada et al, 2016)。鉴于此, 我们对含假蓝宝石变泥质麻粒岩和含石榴石镁铁质麻粒岩中锆石进行了 SHRIMP U-Pb 定年分析, 并分别获得了两组变质年龄数据, 前者为 (918±29) Ma 和 (523±9) Ma, 而后者为 (886±13) Ma 和 (532±11) Ma。新的锆石 U-Pb 年龄结果支持了该区超高温麻粒岩经历了多期变质演化历史, 进变质和峰期变质事件发生于早新元古代造山事件期间, 而叠加的退变质阶段发生于泛非造山事件期间, 并分别与罗迪尼亚和冈瓦纳超大陆聚合有关。

致谢: 感谢中国第二十七次和第三十三次南极科学考察队在东南极茹尔群岛的野外地质考察期间给与的后勤支持和保障。



· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 俯冲带流体中磷的行为

钟日晨, 张敏, 于畅

北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083

俯冲板片所释放的流体或熔体是俯冲带物质循环的主要介质, 也是主导元素全球循环的关键。前人对于大离子亲石元素、高场强元素、稀土元素等在板片流体或熔体中的行为有较为系统的研究, 但对于磷的活动性研究相对较少。本次研究中, 我们采用热力学模拟方法, 计算了 550~780 °C、3~5 GPa 温压范围内与含磷灰石榴辉岩平衡的流体的成分。

模拟结果显示, 在与榴辉岩平衡的流体中, 磷的溶解度随压力的升高而大幅度上升。在弧下深度, 磷表现出较强的流体活动性。为进一步验证这一结论, 我们统计了全球弧岩浆的地球化学数据。结果表明, 磷在板片流体中的活动性高于板片熔体, 即板片流体是造成地幔交代过程中磷富集的主要介质。

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 俄罗斯白海造山带前寒武纪榴辉岩变质演化过程

李小犁<sup>1\*</sup>, 张立飞<sup>1</sup>, 魏春景<sup>1</sup>, 郭敬辉<sup>2</sup>, SLABUNOV A.I.<sup>3</sup>

1. 北京大学, 地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029;

3. Karelian Research Center of Russian Academy of Sciences, Russia, 185910

俄罗斯白海造山带位于波罗的海地盾(克拉通)东部, 毗邻拉普兰-科拉造山带和瑞典芬兰造山带。这里报道有目前最古老的太古代基性榴辉岩(Mints et al., 2010), 是研究前寒武纪板块造山运动的关键对象。截至目前为止, 对白海榴辉岩的变质时间和变质温压条件的讨论还在持续中, 尚未定论。首先, 随着研究的深入, 古元古代榴辉岩相变质事件得到了越来越多的岩石学证据支持, 尤其是近来我们团队发现的保存完好的古元古代(1.9 Ga)新鲜榴辉岩(Li et al., 2017), 更是确定了这一点。而另一种观点则认为, 可能存在两次榴辉岩相变质作用—太古代和古元古代, 的叠加, 且在出露产状上, 太古代榴辉岩和古元古代榴辉岩可以并存; 前者被认为与太古代洋壳俯冲有关, 而后者则一般认为是大陆地壳加厚所致(Slabunov et al., 2021)。其次, 受限于榴辉岩基性的岩石地球化学成分, 且大都缺少关键的温压指示矿物和/或(石榴石)化学成分环带, 无论是矿物组合温压计计算, 还是相平衡模拟计算, 榴辉岩相峰期变质条件的限定暂时还有一定的不确定性, 估值大都处于处于一个较为宽泛的范围(特别是温度)。与此同时, 由于后期高温麻粒岩相变质作用的叠加—个别研究人员甚至提出了局部存在超高温 UHT 变质作用的观点, 这对正确厘定峰期变质作用温压条件有提出了新的挑战。另一方面, 榴辉岩的前进变质演化过程也不是很明了, 目前只能通过一些存疑的矿物包裹体(石榴石或锆石)来揣测, 具有很大的不确定性, 而这又对合理解释榴辉岩的变质演化动力学模型造成了困难, 也是当下争议比较大的问题, 诸如洋壳俯冲? 陆壳俯冲? 碰撞? 地壳加厚? 模型的探讨。最后, 值得提醒的是, 白海榴辉岩在产状上存在两种明显的不同类型, 包括: (1) 位于强烈混合岩化和构造变形的 TTG 片麻岩基底中的透镜体状榴辉岩(Gridino-type), 和 (2) 位于同样构造变形强烈的

灰色片麻岩岩体中的连续块状榴辉岩(Salma-type)。前者一般认为是典型的大陆俯冲碰撞成因类型, 与我国华北克拉通(恒山)地区类似。而后的成因不是很明确。

近来, 我们通过对 Salma 地区不同露头的榴辉岩-退变榴辉岩以及伴生岩石进行了详尽的岩石学研究, 并结合锆石 U-Pb 定年以及 Lu-Hf 同位素的分析, 首次确定了 Salma 榴辉岩的进变质演化轨迹, 同时, 再次认定了榴辉岩相变质的时间是古元古代(1.93 Ga)。研究区域 Uzkaya Salma 榴辉岩区位于白海造山带与科拉微大陆接壤的大陆边缘, 剖面出露位置在摩尔曼斯克-圣彼得堡联邦高速公路 1198 路段附近, 这里也是第 13 届国际榴辉岩大会的野外考察露头地点之一。其岩石组合包括基性榴辉岩、后成合晶型退变榴辉岩、角闪岩、变超基性岩、石榴石岩以及长英质岩墙/脉, 围岩则是太古代灰色片麻岩。早前报道的中太古代榴辉岩就是来自这里(Mints et al., 2010); 而后, 我们团队在附近有发现了保存较好的古元古代榴辉岩(Li et al., 2017)。本文的研究对象包括基性退变榴辉岩、石榴石岩化了的(退变)榴辉岩以及石榴石岩。研究中关键的发现包括在榴辉岩的石榴石中确定了非常完整的进变质生长环带, 包括主量、微量元素(稀土)的规律分布, 并且还发现有早期的(低级)含水矿物包裹体(石榴石核部)的保存。通过全岩 XRF 成分相平衡模拟计算, 我们推断出了一个合理的寄主石榴辉岩进变质演化轨迹, 并在 2.3 GPa, 660-670 °C 条件下达到峰期变质; 而在随后的抬升过程中, 经历了退变质的高温叠加作用, 这与包括我们团队在内的研究人员的报道是一致的。因此, 整体上, Salma 榴辉岩经历了一个顺时针的变质演化过程。其次, 通过对锆石的相关研究, 我们发现其继承核部均为太古代年龄, 而变质生长边则全部为古元古代年龄—包括 1.93 Ga, 1.86 Ga 和 1.72 G 三个次时代。结合

基金项目: 俄罗斯白海早前寒武纪榴辉岩的岩石学研究及其大地构造意义(4187219)

第一作者简介: 李小犁(1982-), 高级工程师, 研究方向: 变质岩石学 研究. E-mail: xiaoli.li@pku.edu.cn

\*通信作者简介: 同第一作者

锆石微量元素地球化学特征、Th-U 比值以及矿物包裹体分析,我们认为,太古代年龄反映了原岩年龄(如 2.89 Ga)和/或区域热事件记录(2.7 Ga, 2.5 Ga),而变质边则与榴辉岩相变质有关,并在后期的伴随有流体/熔体活动的高温麻粒岩相叠加下被进一步改造。这在锆石的 Lu-Hf 同位素特征上也同样得到了体现。第三,榴辉岩的全岩地球化学特征,以及锆石中的微量元素和 Lu-Hf 同位素特征,都揭示了一个可能的大洋洋壳、亏损地幔源区的(太古代?)原岩,这为探讨榴辉岩的成因机制提供了重要的参考线索,也就是说,Salma 榴辉岩极有可能是目前

最古老的洋壳俯冲产物,这将更新我们对前寒武纪板块造山运动的认识。最后,结合白海造山带的区域地质背景,以及全球视野下的古元古代造山活动,我们认为,Salma 榴辉岩形成于古元古代较冷地热梯度下的(洋壳)俯冲过程,与拉普兰-科拉造山运动的变质演化过程相呼应,同时,揭示了现代板块运动的启动时间至少应该在古元古代以前。而结合全球范围内陆续发现的其他“冷”高压变质岩,均与 Columbia 超大陆缝合造山带相关,因此,我们提出,Columbia 超大陆的出现和分解,标志着现代板块运动的开始。

• 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 •

## Metamorphic evolution of mafic granulite and garnet amphibolite in the South Altyn Orogen, West China: Insights from petrography, phase equilibria modeling and geochronology

Xin Li, Liang Liu\*

State key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

The South Altyn high-pressure–ultrahigh-pressure (HP–UHP) metamorphic belt in Western China records the processes of deep continental subduction (>150–300 km). We report a combined investigation on petrology, geochronology and phase modeling for mafic granulite (sample AY1841) and garnet amphibolite (sample AY1853) from the Yinggelisayi area. The mafic granulite pods hosted by massive granitic gneiss were discovered in western area of the Yinggelisayi, and the garnet amphibolite pods also hosted by granitic gneiss were exposed in eastern Yinggelisayi. Four stages of metamorphic evolution are constrained for mafic granulite: (I) A possible pre-peak prograde stage of metamorphism from ~15.8 kbar/600 °C to ~19.2 kbar/655 °C recorded by the chemical zoning of garnet core. (II) The peak stage is modeled to possibly reach a maximum  $P$ – $T$  condition of ~36.2 kbar/920 °C inferred from the chemical zoning of garnet mantle. (III) A post peak decompression evolution is characterized by intergrowths of clinopyroxene + plagioclase and biotite + plagioclase, and this stage is recorded by the compositions of garnet rim with modeling suggesting an evolution from ~17.8 kbar/820 °C to ~11.5 kbar/826 °C. (IV) A subsequent evolution is characterized by

kelyphitic rims of plagioclase + amphibole around garnet and the amphibole coronas that encompass symplectitic clinopyroxene with evolution from ~11.5 kbar/826 °C to ~8.7 kbar/735 °C. The garnet amphibolites were interpreted to have been experienced decompression-dominated evolution that can be divided into three stages. (I) A possible peak eclogite facies stage is modeled to be roughly stable at  $P > 25$  kbar and  $T > 800$  °C recorded by the chemical zoning of garnet core. (II) A post peak near-isothermal decompression from ~23.8 kbar/875 °C to ~10 kbar/852 °C is characterized by decomposition of omphacite that produced the local symplectites of clinopyroxene + plagioclase. (III) The late-stage retrogression from ~9.8 kbar/848 °C to ~5.8 kbar/645 °C is marked by the kelyphitic rims of plagioclase + hornblende around garnet and of hornblende + ilmenite around clinopyroxene. Zircon U–Pb dating yielded two distinct clusters of ages: *c.* 897 Ma magmatic protolith ages and *c.* 500 Ma metamorphic ages, the latter of which are interpreted as the timing of the peak eclogite-facies metamorphism. We thus propose that a substantial crustal component in the South Altyn HP–UHP metamorphic belt appears to have shared a common history of early Paleozoic subduction to mantle depths and later exhumation.

\*Corresponding author, E-mail: liuliang@nwu.edu.cn

• 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 •

## Diapiric heating during the amphibolitization of eclogites from Catalina Island, SW California

Jie Dong, Baofu Han\*, Chunjing Wei\*

MOE Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871

The Catalina Schist is a Cretaceous subduction-related metamorphic complex that outcropped on the Santa Catalina Island, SW California, which can provide fossil records for oceanic subduction zones. It contains three subunits of greenschist, blueschist and amphibolite facies. The amphibolite unit was inferred to show peak  $P$ - $T$  conditions of 0.7~1.44 GPa/600~750 °C (Harvey et al., 2020) with an anomalously high thermal gradient of 15~20 °C/km, in contradiction with the thermal structures of modern subduction zones (Syracuse et al., 2010). We conducted comprehensive investigations on petrology, geochronology and phase modelling for garnet amphibolites (samples CA20-1 & CA20-2) from the Catalina Schist. They consist of garnet, amphibole, clinopyroxene, epidote, rutile, titanite, quartz with or without lawsonite pseudomorphs, chlorite, phengite and plagioclase. Three stages (I→III) of metamorphic evolution are inferred. A prograde to peak stage evolution (I) within high-pressure (HP) eclogite facies is recorded by the notable chemical zoning of garnet core and mantle and also the presence of lawsonite pseudomorphs within garnet, yielding  $P$ - $T$  vectors of 2.2 GPa/510 °C→2.35 GPa/580 °C for sample CA20-2 and 1.8 GPa/<500 °C→2.6 GPa/575 °C for sample CA20-1. A subsequent post-peak decompression evolution (IIA) is recorded by the decomposition of lawsonite to form phengite ( $Si = 3.44\sim 3.45$  p.f.u.) + chlorite + epidote + quartz in CA20-1, indicating pressures decrease to 2.3~2.25 GPa/585~590 °C. This is followed by a decompressional heating (IIB) to

HP-high temperature (HT) amphibolite-granulite facies (IIIA) where the stage IIIA is witnessed by the mineral assemblages of garnet rim, epidote, amphibole, titanite and quartz in CA20-2, yielding  $P$ - $T$  conditions of 1.0~1.3 GPa/745~815 °C. The decompressional heating process is consistent with the decreasing jadeite contents (24→10 mol%) in clinopyroxene ( $P = 1.9\rightarrow 1.2$  GPa), the increasing Ti contents (0.06→0.10 p.f.u.) in amphibole ( $T = \sim 700\rightarrow 780$  °C), Zr-in-rutile (660~715 °C/1.5 GPa) and Zr-in-titanite thermometry results (763~780 °C/1.2 GPa). Finally, a decompressional cooling in low-pressure (LP) amphibolite-granulite facies (IIIB) is defined marked by the formation of plagioclase in sample CA20-2, indicative of  $P$ - $T$  conditions from 1.0 GPa/810~820 °C to 0.8 GPa/770 °C. Zircon and rutile U-Pb dating yield two metamorphic ages of *c.* 120~104 Ma and *c.* 106 Ma. Combining geochronology data from literatures, the stage I eclogite facies metamorphism occurred at 120~115 Ma and HT overprinting in stage III happened at >106~108 Ma. The metamorphic  $P$ - $T$ - $t$  path suggests the garnet amphibolites have recorded an earlier cold oceanic subduction (with thermal gradients of ~6 °C/km) to depths of ~80~90 km. Then, it is followed by diapiric exhumation (at a rate of ~4.4~5.7 mm/yr) with the assistance of possibly buoyant serpentinites and sediments, firstly along the subduction channel and then through the hydrated mantle wedge to the base of a lower crust (~40~50 km) to experience the HT overprintings (with thermal gradients of 15~20 °C/km).

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (4210020093)

第一作者简介: Jie Dong (1993-), 博士后, 研究方向: 变质岩石学. E-mail: jdong@pku.edu.cn

\*通信作者简介: Baofu Han (1960-), 教授, 研究方向: 区域大地构造和深部地质作用. E-mail: bfhan@pku.edu.cn

\*通信作者简介: Chunjing Wei (1962-), 教授, 研究方向: 变质岩相平衡与地壳演化. E-mail: cjwei@pku.edu.cn

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## Thermal regime of the lower crust in the eastern Khondalite Belt, North China Craton, constrained by Zr-in-rutile thermometry mapping

齐扬<sup>1,2,3</sup>, 郑园园<sup>1,2,3</sup>, 黄广宇<sup>1,2</sup>, 焦淑娟<sup>1,2\*</sup>, 郭敬辉<sup>1,2,3\*</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院地球科学研究所, 北京 100029;
3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

The ultrahigh temperature (UHT) metamorphism represents the hottest metamorphic conditions in the lower crust, and its generation is significant for our understanding of the crust differentiation and crust-mantle interaction. Several Paleoproterozoic UHT metamorphosed localities have been reported from the eastern Khondalite Belt, North China Craton. However, the precious spatial scale that was affected by this UHT metamorphism is still unknown, and therefore the mechanism to generate UHT metamorphism is under broad debate. Zr-in-rutile thermometry is regarded as a valid tool to estimate the near-peak metamorphic temperature of UHT granulites. Here we establish the thermal regime of the lower crust in the eastern Khondalite Belt using large-scale (~10000 km<sup>2</sup>) Zr-in-rutile thermometry mapping. A total amount of 38 rutile-bearing garnet-sillimanite gneisses were collected, and rutile that is away from zircon and without ilmenite

reaction rims were selected for the electron microprobe analysis. The results show that the UHT metamorphism in the eastern Khondalite Belt is at least 3000 km<sup>2</sup> of spatial size, and its distribution is unrelated to the minor mafic magmatism intrusion in this region, but is closely related with the large-scale charnockite. Such large-scale UHT metamorphism and/or charnockite-minor magmatism association are proposed to have developed during a post-collisional extension setting, and the heat source of the UHT metamorphism is both the radiogenic heating of overthickened orogen and additionally elevated mantle flux due to subsequent lithosphere extension and asthenosphere upwelling. The large-scale UHT metamorphosed terranes are well exposed during the Precambrian period and we suggest that they probably have formed during similar tectono-thermal process in large and hot continental collision belts.

基金项目: 本文受国家自然科学基金项目(41890832, 42122018, 41672189)和中国科学院青年创新促进会(2018089)联合资助

第一作者简介: 齐扬(1997-), 博士研究生, 研究方向: 前寒武纪高温-超高温变质作用研究. E-mail: yangqi199701@163.com

\*通信作者简介: 焦淑娟(1984-), 副研究员, 研究方向: 前寒武纪高温-超高温变质作用和深熔作用方面研究. E-mail: jiaoshujuan@mail.iggcas.ac.cn

\*通信作者简介: 郭敬辉(1963-), 研究员, 研究方向: 前寒武纪地质学、变质岩石学、岩石地球化学和同位素年代学研究. E-mail: jhguo@mail.iggcas.ac.cn

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## Ba 同位素在高压变质作用和流体演化过程中的行为

古晓锋, 黄方

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

钡 (Ba) 同位素近年来开始被用来研究高温岩浆过程和板块俯冲对壳幔物质循环影响。由于 Ba 在地壳中的丰度远高于地幔 (456 vs. 6.9  $\mu\text{g/g}$ ) 且地球各储库的 Ba 同位素组成变化很大, 同时 Ba 在板片俯冲过程中容易随流/熔体迁移, 这使得 Ba 同位素成为示踪壳幔物质循环的有效工具。但目前尚不了解 Ba 同位素在俯冲带流体活动中的地球化学行为。

保存在高压-超高压榴辉岩中的变质脉体能提供俯冲带流体的直接信息, 是研究 Ba 同位素在俯冲带流体活动中的行为的绝佳对象。我们选择了两套分别来自于中大别超高压变质带港河和花凉亭地区的榴辉岩和变质脉样品, 开展了详细的 Ba 同位素分析工作。这两套样品中脉体都来源于榴辉岩中硬柱石脱水以及随后与接触榴辉岩发生的水-岩相互作用, 分别代表了超高压流体的单期次结晶和封闭体系下的多期次结晶。

结果显示, 这些样品的  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  整体变化非常大, 从 -0.18‰ 到 0.46‰, 而且港河和花凉亭体系分别显示出不同的 Ba 同位素变化特征。在港河, 榴辉岩具有基本一致的  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  值 (-0.01‰ 到 0.03‰), 而变质脉的  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  值则为 0.17‰, 明显高于榴辉岩。这个结果说明变质脱水过程能够造成 Ba 同位素分馏, 生成的流体具有重 Ba 同位素组成, 但这个过

程对榴辉岩本身的 Ba 同位素影响不大。这是因为榴辉岩的变质脱水过程主要涉及到具有低 Ba 含量、高  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  值的绿帘石的溶解和迁移, 而具有极高的 Ba 含量和低  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  值的多硅白云母则几乎没有被溶解。在花凉亭, 三期变质脉中的绿帘石的  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  值从 0.18‰ 逐渐升高到 0.47‰, 表明绿帘石在从变质流体中结晶时倾向于富集轻 Ba 同位素, 从而导致残余流体的 Ba 同位素组成越来越重。此外, 花凉亭退变质成因角闪岩的  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  值从 -0.11‰ 变化到 0.46‰, 结合其  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{initial}}$  可以分为两类, 分别对应了来自榴辉岩本身 (高  $\delta^{138/134}\text{Ba}$ , 均一的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{initial}}$ ) 和来自围岩片麻岩的流体 (低  $\delta^{138/134}\text{Ba}$ , 变化的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{\text{initial}}$ )。这表明花凉亭榴辉岩在折返后期还经历了来自片麻岩的流体交代, 并因此导致部分榴辉岩和脉体具有异常的低  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  特征 (-0.18 ~ -0.08‰), 揭示了板片折返中流体交代的复杂性。

本文的研究结果表明, Ba 同位素在俯冲带流体过程中会发生明显分馏, 生成的变质流体具有比俯冲物质更重的 Ba 同位素组成。这意味着, 即便是具有类似于地幔值的蚀变洋壳通过俯冲脱水也可能生成偏重的流体。因此, 在利用 Ba 同位素量化不同俯冲物质源区的贡献时, 特别是当涉及到变质脱水或者流体活动时, 需要仔细考虑 Ba 同位素分馏的影响。

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 俯冲带流体过程中的 Ba 同位素分馏: 来自大别超 高压榴辉岩及石英脉的制约

徐娟, 古晓锋, 黄方

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

钡 (Ba) 是大离子亲石元素, 在地壳物质深俯冲时中极易进入熔/流体中并交代地幔楔。由于 Ba 在地壳和地幔中存在显著的含量差异, Ba 同位素在示踪俯冲物质再循环方面具有巨大优势。应用 Ba 同位素示踪的一个重要前提是了解 Ba 同位素在俯冲带流体活动中的分馏行为, 然而目前这方面的研究开展的很少。为此, 我们选取了大别山碧溪岭地区的俯冲带超高压榴辉岩及其中的变质石英脉, 开展了系统的主-微量元素、Sr-Nd-Ba 同位素研究。

结果显示, 研究区榴辉岩和石英脉具有相似的 Sr-Nd 同位素组成, 表明形成石英脉的流体主要来源于榴辉岩。这些样品的全岩的 Ba 同位素组成变化很大,  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  从 -0.12 到 0.40‰。其中榴辉岩的 Ba 同位素组成相对均一,  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  为 -0.12 ~ -0.03‰, 平均值为 -0.08‰, 比 MORB 值略轻。与此相比, 高压变质石英脉的  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  从 0.16 变化到 0.51‰, 都显著高于榴辉岩, 平均值为 0.39‰, 表明榴辉岩流体

活动过程中发生了显著的 Ba 同位素分馏。此外, 被脉体包裹的榴辉岩的  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  为 0.32 ~ 0.40‰, 平均值为 0.35‰, 而脉体中石英颗粒的  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  为 0.26 ~ 0.35‰, 平均值为 0.30‰, 与前者在误差范围内基本一致。它们的  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  值则可能代表了初始流体的 Ba 同位素组成, 表明榴辉岩的脱水过程释放的流体具有重 Ba 同位素特征, 这可能与榴辉岩中多硅白云母的分解反应有关。对榴辉岩中单矿物的 Ba 同位素分析表明, 多硅白云母分解生成的黑云母具有较轻的 Ba 同位素组成, 相应地, 释放的流体因此富集重的 Ba 同位素。

综上所述, 我们得出以下结论: 1) 形成碧溪岭石英脉的流体主要来源于榴辉岩内部; 2) 初始脉体的  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  可以限定为 0.30 ~ 0.35‰, 远高于榴辉岩, 表明榴辉岩流体释放过程能造成显著的 Ba 同位素分馏; 3) 榴辉岩与流体之间显著的 Ba 同位素分馏是由多硅白云母分解生成黑云母导致的。



· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 鲁西绿岩带型泰山蛇纹石玉的 H-O-Li 同位素: 对蛇纹石成玉过程的约束

杨炯<sup>1,2</sup>, 丘志力<sup>1,4\*</sup>, 肖益林<sup>3\*</sup>, 张跃峰<sup>1</sup>, 李尹<sup>3</sup>, 赖舒琪<sup>1</sup>

1. 中山大学 地球科学与工程学院, 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275;

2. 泰山学院 旅游学院, 山东 泰安 271000;

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

4. 桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541006

蛇纹石玉最早的使用历史可达 3 万年左右, 也是中国近万年玉文化史中使用最早和最重要的玉石矿产资源种类之一(邓聪, 1998); 蛇纹石是富水硅酸盐矿物, 是超基性岩蚀变的产物, 板块俯冲工厂的蛇纹石化作用因涉及到板块俯冲动力学作用机制以及地球早期生命的起源等重大科学问题而越发受到重视(Evans, 2010; Schwartz et al., 2013; 肖益林等, 2015)。

蛇纹石化流体的来源、化学性质(例如温度、压力、氧逸度、硫逸度等)等, 对成矿过程、成矿环境等具有重要指示意义(Peters et al., 2017)。近年来蛇纹石化作用的机制、水-岩作用过程岩石矿物地球化学特征、体积的变化以及水的来源等问题一直备受关注, 并取得了重要进展, 但很多问题仍存在争议(黄瑞芳等, 2013; Marshall et al., 2017)。

泰山蛇纹石玉是鲁西太古代绿岩带雁翎关岩组超镁铁岩蛇纹石化的产物(李宗成, 2018), 最新研究表明, 距今 5000 多年前的大汶口文化时期海岱地区先民已经开始使用泰山玉, 并有可能与相邻中原文化区、东北辽河流域红山文化区等存在玉文化交流(杨炯等, 2021)。目前, 对流体与蛇纹石玉成矿作用过程的研究仍然薄弱。本文在对泰山蛇纹石玉开展主量、微量元素测试的基础上, 重点开展了 H-O-Li 同位素的分析, 旨在为确定蛇纹石玉矿化流体的性质、来源, 为进一步确定泰山蛇纹石玉的成玉过程提供约束。测试结果显示, 泰山蛇纹石玉  $\delta D$  变化范围为  $-92.2 \sim -119.2\text{‰}$ ,  $\delta^{18}O$  变化范围为  $-9 \sim -1.2\text{‰}$ , 与由海水热液蚀变引起的大洋型蛇纹岩的  $\delta^{18}O$  值和  $\delta D$

值(分别为  $0.8\text{‰} \sim 6.7\text{‰}$ ,  $-35\text{‰} \sim -68\text{‰}$ )和大陆蛇纹岩杂岩型蛇纹岩的  $\delta^{18}O$  值和  $\delta D$  值(分别为  $1.8\text{‰} \sim 9.2\text{‰}$ ,  $-80\text{‰} \sim -149\text{‰}$ ) (Wenner et al., 1973, 1974) 均有较大差异, 显示出后期蛇纹石玉成玉流体对蛇纹岩具有明显影响。

根据蛇纹石-水间的氢和氧同位素分馏方程(Zheng, 1993; Saccoccia et al., 2009), 所得泰山蛇纹石玉平衡流体的  $\delta DH_2O$  变化范围为  $-92.1 \sim -65.1\text{‰}$ ,  $\delta^{18}OH_2O$  变化范围为  $-9 \sim -1.2\text{‰}$ ,  $\delta DH_2O$  变化范围与大气降水、原生岩浆水、变质水均有重叠, 但  $\delta^{18}OH_2O$  变化范围则较小, 与岩浆水和变质水均有较大差异, 落在大气降水范围。

泰山蛇纹石玉 Li 含量为  $0.67 \sim 2.49 \text{ ug/g}$ , 均值为  $1.45 \text{ ug/g}$ , 与地幔岩接近(正常地幔 Li 含量的平均值  $1.5 \text{ ug/g}$ );  $\delta_7Li\text{‰}$  为  $14.6 \sim 20.3\text{‰}$ , 均值为  $17.9\text{‰}$  ( $n=3$ ), 明显高于陆壳、洋壳和地幔的  $\delta_7Li$  值(分别为  $1.2\text{‰}$ 、 $1.5\text{‰}$ 和  $4\text{‰}$ ); 其中, 泰山最早期蛇纹石化产物墨玉的  $\delta_7Li$  值略高于泰山碧玉。根据自然界中各圈层 Li 含量和  $\delta_7Li$  值(Teng et al., 2008; Ponzevera et al., 2015; 万红琼等, 2015), 认为, 泰山蛇纹石玉低的 Li 值和高的  $\delta_7Li$  值可以用水圈为主、另有热液流体对蛇纹石进行后期交代, 并在高水/岩比条件下完成玉化过程来解释。

根据泰山蛇纹石玉成玉过程 H-O-Li 同位素的指示, 结合野外及镜下观察和玉石的岩石矿物学地球化学特征, 推测泰山玉成玉和蛇纹石化过程多阶段水岩反应有关。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41673032; 42073003); 山东省自然科学基金(ZR2015DM008)

第一作者简介: 杨炯(1970-), 中山大学地球科学与工程学院博士生, 泰山学院副教授, 宝玉石成矿与资源可持续利用及玉石文化演化。E-mail: tsxyj@163.com

\*共同通讯作者: 丘志力(1963-), 中山大学地球科学与工程学院教授, 博导, 宝玉石成矿与重大地质作用过程及古玉文化演化。E-mail: qiuzhili@mail.sysu.edu.cn

肖益林(1962-), 中国科学技术大学地球和空间科学学院教授, 博导, 同位素地球化学。E-mail: ylxiao@ustc.edu.cn

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 南阿尔金淡水泉石榴石辉石岩中多期次生长矿物的地球化学和年代学特征

曹玉亭<sup>1,2\*</sup>, 宋里豪<sup>1</sup>, 刘良<sup>2</sup>, 王超<sup>2</sup>, 盖永升<sup>2</sup>

1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590;

2. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安 710069

南阿尔金淡水泉地区石榴石辉石岩(退变榴辉岩)中发现多期次生长的石榴石和榭石, 本文对石榴石和榭石进行了微区原位元素分析和榭石的 U-Th-Pb 定年分析。该岩石中的石榴石主量元素保存了较好的成分环带, 从核部到边部具有 CaO 和 MnO 先降低后升高, MgO 先升高后降低的特征。综合岩相学观察、相平衡计算和石榴石的主量元素特征, 确定该岩石分别经历了进变质阶段(Grt1+Ep+Amp+Pl+Qz)、峰期榴辉岩相阶段(Grt2+Cpx+Rt±Ttn)、高压麻粒岩相退变质阶段(Grt+Cpx+Pl+Ttn)和麻粒岩相退变质阶段(Grt+Cpx+Amp+Pl)。微量元素分析结果表明石榴石显示轻微的 Eu 负异常特征和相对平坦的重稀土配分模式, 从核部到边部重稀土具有逐渐降低的趋势。

榭石的核部和边部具有均一的主量元素, 但显示不同的稀土配分模式。暗色的核部具有较低的稀土含量、无 Eu 异常和明显的重稀土亏损的特征, 表明这些榭石与石榴石共生以及斜长石缺失的特

征, 与榴辉岩相向麻粒岩相转变过程中的生长特征一致; 亮的边部具有较高的稀土含量、中等的 Eu 异常和重稀土亏损的特征, 表明这些榭石是在麻粒岩相阶段石榴石和斜长石共同存在的条件下生长的。U-Pb 定年结果显示榭石的核部和边部至少记录了两期变质年龄(493±21) Ma 和(447±34) Ma, 根据微量元素特征确定这两期年龄分别代表峰期变质年龄和后期麻粒岩相叠加年龄。这两组年龄分别对应于南阿尔金高压-超高压变质岩石的峰期变质和高压麻粒岩相退变质阶段(Cao et al., 2019; Gai et al., 2021; Liu et al., 2012; 盖永升, 2018; )。因此, 淡水泉地区石榴石辉石岩(退变榴辉岩)中多期次生长的矿物记录了陆壳俯冲折返过程中经历的完整的变质演化历史。矿物微量元素特征表明石榴石和榭石在多期次生长过程中微量元素近似的达到了化学平衡, 从而为正确认识陆壳俯冲带变质作用与元素迁移之间的地球化学联系提供了重要的岩石成因信息。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42172067), 山东省自然科学基金(ZR2019BD046), 山东科技大学“菁英计划”项目

第一作者简介: 曹玉亭(1985-), 女, 副教授, 研究方向: 变质岩研究. E-mail: caoyuting@sdust.edu.cn

\*通信作者简介: 曹玉亭(1985.08-), 女, 副教授, 研究方向: 变质岩研究. E-mail: caoyuting@sdust.edu.cn

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 东古特提斯马江缝合带暖俯冲高压变质演化

王慧宁<sup>1</sup>, 刘福来<sup>1</sup>, 王舫<sup>1</sup>, 冀磊<sup>2</sup>, 朱建江<sup>1</sup>

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 中国地质科学院, 北京 100037

点苍山-哀牢山-马江造山带位于印支地块和华南板块之间, 在空间上横跨我国青藏高原东南缘和东南亚越南、老挝等地区和国家, 延伸规模长达上千公里, 是一条重要的东古特提斯造山带。有关该造山带俯冲-碰撞等深部地质过程的研究对于深入探索东古特提斯构造域的形成与演化, 揭示青藏高原及东南亚微陆块汇聚动力学过程具有非常重要的科学意义。然而, 新生代时期强烈的走滑剪切运动和深熔作用在点苍山-哀牢山缝合带广泛发育, 严重破坏了与古特提斯演化相关的地质证据, 特别是与板块俯冲相关的三叠纪高压变质记录在点苍山-哀牢山缝合带极为少见, 而在越南北部的马江缝合带, 新鲜的榴辉岩广泛分布, 它们多呈构造块体或透镜体形式赋存于围岩石榴云母片岩之中。但有关马江榴辉岩的岩石成因和变质演化特征一直存在较大争议, 关于马江缝合带的俯冲性质、板块俯冲过程及俯冲热演化历史仍是未解之谜, 严重制约了学者们对东古特提斯俯冲-造山演化动力学过程与机制的准确理解。围绕上述关键科学问题, 本研究以马江缝合带榴辉岩及围岩变沉积岩为研究对象, 详细开展矿物学、岩石学、地球化学和同位素定年等系统研究。研究表明, 马江榴辉岩具有典型洋壳 MORB 性质的元素配分型式、Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素组成。通过岩浆锆石的定年研究, 首次限定出榴辉岩的原岩形成时代为  $425.4 \pm 3.6$  Ma, 该年龄数据不仅是金沙江-哀牢山-马江缝合带内唯一的榴辉岩原岩年龄, 而且代表东古特提斯洋最老的形成时限, 充分证明金沙江-哀牢山-马江古特提斯洋并不是

昌宁-孟连洋向西俯冲的弧后盆地, 而是长期演化的古老洋盆, 该洋盆至少在中-晚志留世就已经存在并持续演化至中二叠世。与昌宁-孟连带冷俯冲型榴辉岩截然不同的是, 马江榴辉岩所记录的进变质(绿帘石等)、峰期变质(石榴石+绿辉石+绿帘石+多硅白云母+金红石±蓝透闪石+石英, 595-677 °C/19.6-22.2 kbar)和退变质(钙质闪石+绿帘石)矿物组合、温压条件和变质 P-T 演化轨迹(俯冲地热梯度 8-12°C/km)的样式均显示出洋壳暖俯冲的典型特征。综合锆石、金红石、独居石和多硅白云母等多种矿物联合定年研究, 我们将榴辉岩相峰期变质和峰后早期退变质时代分别限定在 239-234 Ma 和 231-229 Ma, 同时发现围岩石榴云母片岩普遍记录了高压变质作用, 且高压变质时代与榴辉岩十分相近。综合围岩的碎屑锆石年龄结果, 表明马江缝合带高压变质地体是古特提斯洋壳最终闭合、华南板块向印支地块之下初始俯冲-碰撞的产物。结合前人研究成果, 我们发现与三叠纪俯冲-碰撞相关的变质事件在金沙江、哀牢山和马江缝合带广泛发育, 这些岩石(如金沙江带内的白玉榴辉岩)无论从矿物组合、高压变质条件和变质年代格架等均与马江榴辉岩十分相似, 因此, 我们厘定出北起藏东白玉, 经滇西鲁甸, 向西南一直延至越北马江的一条延伸长达 1500 公里、宽约 40 km 的高压变质带。马江榴辉岩及围岩的系统研究对深入探讨古特提斯构造域大洋演化、洋-陆转换、大陆汇聚等完整的造山带演化历史及深部动力学机制具有至关重要的科学意义。

资助项目: 国家自然科学基金项目(91855206, 42102053, 40725007)

第一作者简介: 王慧宁(1991-), 副研究员, 研究方向: 俯冲带高压变质地质学. E-mail: wanghuining1@163.com

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 俯冲—碰撞带熔/流体-大理岩反应和深部碳迁移

郭顺

中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

汇聚板块边缘的碳循环制约着地球内部—表生系统的碳收支平衡和长期的气候—环境演化。最新估算表明俯冲—碰撞造山带的变质脱碳通量接近甚至高于洋中脊和岛弧的脱碳通量, 是评估全球碳循环不可忽视的环节。大理岩(变质碳酸盐沉积物)是俯冲—碰撞造山带最重要的碳源, 目前对于这些大理岩脱碳的岩石学机制和  $\text{CO}_2$  通量控制因素等关键问题仍然缺乏深入的了解。本文关注了俯冲—碰撞造山带两个重要地质过程中变质脱碳活动: (1) 俯冲板片释放的熔体与上覆大理岩的反应过程; (2) 碰撞后幔源岩

浆/流体与上盘地壳中大理岩反应过程。详细的岩石学、地球化学、热力学模拟和碳迁移计算揭示: (1) 熔/流体渗透大理岩及二者之间的交代反应可引发显著的  $\text{CO}_2$  释放, 并形成低黏度含碳熔/流体, 促使碳发生长距离迁移; (2) 交代熔/流体成分控制了脱碳反应产物和脱碳量; (3) 在整个造山旋回中, 大理岩经历了幕式(间隔 $>5 \text{ Ma}$ )多期流体渗透脱碳过程, 不同期次渗透引发的脱碳量存在明显差异。(4) 熔/流体—大理岩反应也导致金属和非金属矿产的形成和富集。

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 巨型古特提斯冷俯冲高压-超高压变质带

刘福来<sup>1</sup>, 王慧宁<sup>1</sup>, 孙载波<sup>2</sup>, 冀磊<sup>3</sup>, 王舫<sup>1</sup>

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 云南省地质调查院, 云南 昆明 650216;

3. 中国地质科学院, 北京 100037

古特提斯构造域的形成与演化是国际地学领域研究的前沿和热点。古特提斯主缝合带从我国青藏高原北缘的龙木错-双湖带, 经西南三江的昌宁-孟连带一直向东南亚延伸, 空间规模长达上万公里, 代表古特提斯主洋盆的残迹。长期以来, 由于缺乏高压变质演化的系统研究, 有关古特提斯主缝合带的空间延伸和展布规律并不清楚, 直接制约了地质学家们对古特提斯构造域板块汇聚深部动力学过程的准确理解。围绕上述关键科学问题, 本研究通过对昌宁-孟连缝合带和龙木错-双湖缝合带典型高压岩石开展矿物学、岩石学、变质演化、地球化学和年代学等系统研究, 首次在昌宁-孟连缝合带同时发现含硬柱石的榴辉岩和蓝片岩, 硬柱石作为极端富水矿物, 在板块俯冲带内很难保存下来, 昌宁-孟连带内含硬柱石的榴辉岩和蓝片岩的首次发现表明该带为典型的冷俯冲型造山带。研究表明, 昌宁-孟连带不仅出露典型的洋壳

型榴辉岩和蓝片岩, 而且存在陆壳型榴辉岩, 这些洋壳型和陆壳型高压变基性岩的地球化学和同位素年代学存在显著差异。但各类不同性质的榴辉岩和蓝片岩具有非常相似的矿物组合与演化序列、变质温压条件和 P-T-t 演化轨迹的样式, 这些特征指示了大洋板块拖拽大陆地壳经历连续且快速的高角度冷俯冲和快速折返的演化过程。通过与龙木错-双湖缝合带榴辉岩和蓝片岩进行综合对比, 发现昌宁-孟连缝合带和龙木错-双湖缝合带高压-超高压岩石在野外产状、岩石学、地球化学和年代学格架均可进行对比。最终, 我们厘定出从青藏高原北缘及其东南缘延伸至少长达 2000 公里的冷俯冲高压-超高压变质带。巨型古特提斯冷俯冲高压-超高压变质带的准确厘定对于深入探索古特提斯构造域的形成演化和青藏高原及东南缘微陆块汇聚拼合过程具有重要科学意义!

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 俯冲带 Li 和 B 的循环——来自昌宁-孟连缝合带榴辉岩及围岩云母片岩 Li-B 同位素研究

王丹<sup>1\*</sup>, Rolf L. Romer<sup>2</sup>, 刘福来<sup>1\*</sup>, Glodny Johannes

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany, D-14473

俯冲带是物质循环最主要的场所。锂 (Li) 和硼 (B) 是流体活动元素, 俯冲洋壳和沉积物发生递进变质作用, 使板片不断释放 Li 和 B, 而残余的板片具有越来越轻的  $\delta^7\text{Li}$  和  $\delta^{11}\text{B}$  值。然而, 目前发现的榴辉岩和蓝片岩具有变化的 Li 和 B 含量及同位素比值, 这不仅仅由俯冲过程中的同位素分馏引起的。Li 和 B 在递进变质或者折返期间发生了重新分配, 俯冲板片 Li 和 B 的得失主要受控于矿物相中 Li 和 B 的变化行为。洋壳在递进变质和退变质过程矿物相的分配行为以及相邻岩石单元之间 Li 和 B 交换作用 (例如榴辉岩及其围岩共同研究) 是理解上述过程的关键。中国西南部的昌宁-孟连缝合带以出露不同变质  $P$ - $T$  路径和  $P$ - $T$  峰值条件的榴辉岩为特征, 该地区是研究俯冲带不同类型榴辉岩在递进变质或退变质过程中 Li 和 B 变化行为的天然实验室。针对上述科学问题, 我们开展了低温和高温榴辉岩及围岩云母片岩的矿物学研究, 以及全岩 Li 和 B 的同位素工作, 通过研究得到以下一些认识。

低温榴辉岩的 Li 含量和  $\delta^7\text{Li}$  值与云母片岩具有相同的变化范围 (8.7–27.0 ppm, -3.8 to +3.0 ‰)。由于低温榴辉岩呈透镜或块状产于云母片岩中, 因此, 云母片岩中的 Li 可能从片岩转移到榴辉岩中。片岩中的 Li 添加到低温榴辉岩中可以通过以下两种途径, 即发生在递进变质作用或退变质作用过程中。由于峰期矿物相绿辉石控制了低温榴辉岩样品 Li 的预算, 因此, 低温榴辉岩更可能在递进变质过程中添加了来自围岩云母片岩的 Li。低温榴辉岩的 Li 记录的是进变质至峰期阶段与围岩流体交换后的 Li 同位素特征。高温榴辉岩具有非常轻的  $\delta^7\text{Li}$  值 (-13.2 至 -5.8 ‰), 远低于云母片岩, 说明在递进变质过程中受到来自低  $\delta^7\text{Li}$  值流体的影响。高温榴辉岩与云母

片岩具有差异的  $\delta^7\text{Li}$  值, 也表明高温榴辉岩是在峰期变质作用过后, 与云母片岩呈构造接触关系。低温和高温榴辉岩中的  $\delta^7\text{Li}$  差异性, 反映了它们在前进变质过程中不同的流体-岩石反应历史。

在低温榴辉岩中, 多硅白云母、蓝闪石和绿辉石是主要的 B 赋存相。其中, 多硅白云母贡献了全岩 B 预算的 45%。低温榴辉岩的  $\delta^{11}\text{B}$  值 (-15.05 至 -8.05 ‰) 明显低于 MORB (-7.1 ‰) 和 AOC (+0.8 ‰), 与云母片岩具有相似的  $\delta^{11}\text{B}$  值。B 与  $\delta^{11}\text{B}$  值之间没有相关性, 表明在递进变质过程中榴辉岩 B 损失不是轻 B 变化的唯一原因。相反, 低温榴辉岩的 B 预算和同位素组成在折返过程中受到来自云母片岩的流体渗透的影响, 从而也导致了榴辉岩全岩富集 LILE。在高温榴辉岩中, 角闪石是主要的 B 寄主矿物, 对全岩 B 预算的贡献高达 70%。由于角闪石在退变质过程中取代绿辉石, 因此, 在折返过程中有额外的 B 添加至高温榴辉岩。高温榴辉岩与低温榴辉岩具有相似的 B 和  $\delta^{11}\text{B}$  变化范围, B 的变化行为表明了, 两类榴辉岩都在折返过程中受到来自围岩云母片岩释放流体影响, 使得榴辉岩具有轻 B 同位素组成。

榴辉岩和云母片岩的矿物学特征和全岩 Li-B 同位素结果, 表明榴辉岩记录了俯冲进变质过程与围岩流体交换的 Li 同位素特征, 而榴辉岩的 B 同位素记录了折返过程来自围岩云母片岩释放的流体影响。云母片岩具有高 B 含量和轻 B 同位素组成, 是俯冲带 B 的重要来源, 同时轻 B 同位素组成可以进入地幔楔, 轻 B 特征可以被幔源岩浆作用所继承。昌宁-孟连缝合带的榴辉岩和云母片岩的 Li 和 B 含量及同位素研究工作, 揭示了榴辉岩在俯冲过程与围岩的相互作用是影响 Li 和 B 变化的重要原因。

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 91855206; 0725007); 中国地质科学院地质研究所基本科研业务费 (编号: J2001); 自然资源部深地重点实验室 (编号: J1901-20-2)

第一作者简介: 王丹 (1987-), 副研究员, 研究方向: 前寒武纪地质演化及俯冲带 Li-B 同位素. E-mail: wangd221@gmail.com

\*通信作者简介: 刘福来 (1963-), 研究员, 研究方向: 变质作用及复合造山带演化. E-mail: lf0225@sina.com

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 俯冲带温度条件下柯石英的水溶解度: 实验研究

严薇<sup>1,2\*</sup>, 吕明达<sup>2</sup>, 吴丹<sup>3</sup>, 孙卫东<sup>4</sup>, 李小虎<sup>1</sup>, 何明跃<sup>5</sup>, 刘曦<sup>2</sup>

1. 自然资源部第二海洋研究所 海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012;

2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;

3. 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;

4. 中国科学院海洋研究所 深海研究中心, 山东 青岛 266071;

5. 中国地质大学(北京) 珠宝学院, 北京 100083

板块俯冲通常具有一个鲜明的特点: 低温。高温高压实验研究表明, 无论是花岗岩或玄武岩体系均能在较低温度下形成柯石英。然而, 这种形成于低温下的柯石英结构中能赋存多少水并不清楚。目前已报道的柯石英水溶解度数据都是建立在远高于俯冲带真实温度的条件下 ( $> \sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 仅少数实验在较低温度下进行 (例如  $700\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 却未能检测到结构水的存在, 这主要是因为他们合成的柯石英颗粒太小而难以较好地利用红外光谱检测。

为了限制俯冲带真实温度下柯石英的水溶解度, 本研究在  $3\text{--}6\text{ GPa}$ 、 $600\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下合成了一系列与流体共存的柯石英。多数实验在  $\text{SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$  体系中进行, 部分实验中加入了少量硼。通过延长加热时间 (从 5 至 15 天不等), 所有高压实验均成功合成了大颗粒的柯石英晶体 ( $100\text{--}1300\text{ }\mu\text{m}$ ), 再利用红外光谱检测水含量。结果表明, I 型石榴石取代 ( $\text{Si}^{4+(\text{Si}2)} + 4\text{O}^{2-} = [{}^4\text{Y}(\text{Si}2) + 4\text{OH}^-]$ ) 是主要的水结合机制, 而 B 缺陷 ( $\text{H}^+ + \text{B}^{3+} \leftrightarrow \text{Si}^{4+}$ ) 的作用有限。柯石英的水溶解度与温度、压力均呈正相关关系, 可以表示为经验方程  $c_{\text{H}_2\text{O}} = -49(17) + 6.0(21) \times P + 0.06(2) \times T$  ( $c_{\text{H}_2\text{O}}$  代

表水含量 (ppm),  $P$  代表压力 (GPa),  $T$  代表温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )) 或热力学方程  $c_{\text{OH}} = \exp\left(\frac{\Delta S^{\text{lbar}}}{R}\right) f_{\text{H}_2\text{O}}^2$

$\exp\left(\frac{-\Delta H^{\text{lbar}} - \Delta V^{\text{solid}} P}{RT}\right)$  ( $c_{\text{OH}}$  代表水溶解度 ( $\text{H}/10^6$

$\text{Si}$ ),  $f_{\text{H}_2\text{O}}$  代表水逸度 (GPa),  $R$  代表气体常数,  $P$  代表压力 (GPa),  $T$  代表温度 (K),  $\Delta S^{\text{lbar}}$  代表反应熵变 ( $18.5(509)\text{ J/mol/K}$ ),  $\Delta H^{\text{lbar}}$  代表反应焓变 ( $-10.7(516)\text{ kJ/mol}$ ),  $\Delta V^{\text{solid}}$  代表柯石英羟基化后的体积变化 ( $23.6(42)\text{ cm}^3/\text{mol}$ )。由此可知, 俯冲带中柯石英的水溶解度应为  $\sim 0\text{--}123\text{ ppm H}_2\text{O}$ 。当起源较深的柯石英变得亚稳时 (即其温度、压力条件靠近柯石英/石英相边界), 其水含量可能小于  $\sim 10\text{ ppm H}_2\text{O}$ 。随着折返过程进行, 这些微量水可能迅速丢失, 亚稳柯石英将不再含结构水, 与自然界折返的超高压变质岩中发现的柯石英的含水性相符。由于结构水的存在极大地加速了柯石英退变质为石英, 无水可能是亚稳柯石英在超高压岩石中得以保存的关键因素。

· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 增生型造山带地壳改造与成熟化的变质岩石学记录: 以中国阿尔泰造山带为例

蒋映德<sup>1\*</sup>, 孙敏<sup>2</sup>, Karel Schulmann<sup>3,4</sup>, 汪晟<sup>5</sup>, 袁超<sup>1</sup>

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. 香港大学 地球科学系, 香港;

3. 捷克地质调查局 捷克;

4. 法国斯特拉斯堡大学 斯特拉斯堡

5. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601

造山带的形成和演化是地球科学研究的基本内容。造山作用过程中复杂的物理化学过程, 体现在其多期次的及岩浆活动特征之中。因此, 构造变形-变质作用-岩浆活动相匹配, 是服务于造山动力学过程解析的重点亦是难点研究内容。位于中亚腹地的中国阿尔泰造山带, 以多期次构造变形-变质作用-岩浆活动为特征, 是开展造山带综合研究的天热实验室。

现今大陆地壳的平均组成日渐明晰, 但成熟大陆地壳的形成机制仍是固体地球科学探究的重要科学问题。一般认为, 岛弧岩浆活动对大陆成熟化过程有着至关重要的贡献。对于活动大陆边缘, 除岛弧岩浆活外动, 还有大量从俯冲板上铲刮下来并堆积在大陆弧边缘的增生杂岩。这些成分复杂的增生杂岩在活动陆缘强烈的壳幔作用过程中, 即大陆花岗质地壳的形成过程中, 如何演化并是否最终转换成成熟大陆的一部分是一个非常值得探究的重要科学问题。

在中亚造山带中, 广泛分布的增生杂岩和大量发育的花岗岩是其最重要的地表地质特征。与岩浆发育相伴的往往是增生杂岩的多期次构造变形特征及变质演化过程, 揭示了后者经历了显著地壳改造过程。位于中亚造山带腹地的中国阿尔泰地区就是其最典型的代表。前人从岩浆岩演化的角度推动了学界对该区域地壳演化的认知; 近年来, 本研究团队从构造变形与变质演化入手, 为理解区域地壳改造与成熟化提供了新的视角。研究显示该区域第 1 期变形与造山作用初期(晚志留纪)地壳因俯冲-挤压而不断增厚相关, 以发育“中压型”近水平变质组构为特征; 而第 2

期变形以中泥盆纪(400-390 Ma)地壳伸展-减薄过程为特征, 发育近水平岩浆-混合岩化组构及“高温低压”变质矿物组合(石榴石+堇青石+钾长石+矽线石); 与之对应的是在地壳深部及浅部分别形成大量的花岗岩及流纹岩; 紧随其后是造山主期(390-380Ma)挤压背景下而形成的构造挤出作用有关, 形成一系列近直立高温变质组构及花岗岩-混合岩穹窿; 最后, 整体阿尔泰泥盆纪构造-变质产物在二叠纪(290-270 Ma)经历了第三期 NE-SW 向强烈构造缩短及相应变质的叠加改造, 在其南缘发育高温-超高温及“红柱石”型“高温低压”变质矿物组合。研究还表明泥盆纪变质-变形改造推动了该区域地壳成熟化过程: 早期地壳深熔作用伴随着区域尺度上的岩石圈水平伸展与减薄、深熔熔体的析出, 形成区域尺度上大规模的近水平熔体条带; 晚期近水平的地壳缩短挤压使得熔体向挤压褶皱的轴面通道大量汇聚, 进而发生大规模的垂直向上流动, 造成大量长英质熔体经抽离后在中上地壳就位形成花岗岩, 及下地壳高密度麻粒岩相铁镁质残留体的堆积。

综合区域资料, 我们的研究指出, 泥盆纪构造热事件与阿尔泰造山带在该时间所处的俯冲-增生体制下俯冲板片的角度变化相关。增生杂岩的深熔从而造成经简单堆积的活动陆缘沉积物转变成成分异明显的成熟大陆地壳可能是增生型大陆地壳演化的又一重要机制。增生型造山带中俯冲板片前进和后撤的反复转换过程导致了区域上应力场的转变并提供了地壳深熔所需的异常热; 这对促成增生型造山带中地壳深熔与流动及大陆地壳的成熟化过程至关重要。



· 专题 6: 俯冲带变质作用与造山带演化 ·

## 昌宁-孟连古特提斯榴辉岩化变辉长岩变质演化

王慧宁<sup>1</sup>, 刘福来<sup>1</sup>, 孙载波<sup>2</sup>, 冀磊<sup>3</sup>, 王舫<sup>1</sup>, 朱建江<sup>1</sup>

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 云南省地质调查院, 昆明 650216;

3. 中国地质科学院, 北京 100037

俯冲带形成演化的研究一直是国际地学研究的前沿和热点。板块俯冲伴随强烈的塑形流变、物质成分演变与流体作用。在俯冲界面处, 板片在不同的俯冲深度经历不同程度的脱水反应和成分交换, 原始矿物普遍发生分解和变质重结晶, 转变为新的矿物相, 形成各式各样的高压岩石。因此, 在俯冲带高压变质岩中是不可能出现原岩(岩浆或沉积)矿物的。但是, 在极少数高压岩石中, 仍然能够发现原岩矿物的保留, 最典型的例子, 就是在榴辉岩内保存辉长岩的矿物组合。这种岩浆矿物能够在高压岩石内完好保存的现象体现了俯冲带深部复杂的元素扩散和流体迁移-富集过程, 因此这类特殊的高压岩石的变质演化的研究对于有效揭示俯冲带复杂的物质成分交换过程具有重要的科学意义。然而, 几乎所有的榴辉岩化变辉长岩均形成于大陆深俯冲过程, 辉长岩作为蛇绿岩洋壳重要的组成部分, 在大洋俯冲过程中是否能够保存早期岩浆矿物的残留? 目前并不清楚。本研究通过对昌宁-孟连古特提斯缝合带高压岩石开展研究, 发现了典型的洋壳型榴辉岩化变辉长岩。

榴辉岩化变辉长岩与玄武岩型榴辉岩在空间上紧密共生, 但与后者的地球化学特征存在显著差异, 榴辉岩化变辉长岩具有 N-MORB 形式的稀土元素配分和 Eu 元素的正异常, 他们的元素地球化学组成与现今洋壳辉长岩十分一致。全岩 Nd 同位素组成也显示典型的洋壳来源的原岩性质。榴辉岩化变辉长岩中典型的高压变质矿物主要包括石榴石、绿辉石、蓝晶石、多硅白云母、滑石和金红石。在绿辉石、蓝透闪石和斜黝帘石的边部或裂隙处, 普遍发育透辉石、钠质长石、绿帘石后成合晶。典型的岩浆矿物十分少见, 主要包括透辉石、钙质长石和钛铁矿。岩浆型透辉石与变质型透辉石的 Na 和 Al 含量存在明显区别, 岩

浆型透辉石多呈半自形残留体分布于蓝透闪石之内, 部分可见岩浆型透辉石呈细颗粒被绿辉石所包裹或者与绿辉石、滑石等高压矿物交生产出, 表明岩浆矿物并未经过水化过程而在高压变质条件下直接转化为榴辉岩相矿物组合。钙质斜长石的 An 牌号高达 70-90, 为培长石, 可见培长石多呈细条状残留体, 被钠长石、透辉石和钙质闪石集合体所包围。结合矿物温压计、平均温压计和热力学相平衡模拟等多种方法, 我们对不同变质阶段的温压条件进行了准确限定, 峰期榴辉岩相 P-T 条件为 25.6-27.1 kbar/595-637°C、峰后早期退变矿物绿帘石和蓝透闪石生长的变质条件为 15.3-17.9 kbar/563-605 °C, 晚期后成合晶形成于 5.5-7.3 kbar/470-500 °C 的变质条件。通过综合对比与分析, 我们发现榴辉岩化变辉长岩与昌宁-孟连带内其他类型的洋壳榴辉岩具有相似的高压矿物组合、矿物演化序列和 P-T 轨迹的样式, 表明它们共同记录了洋壳板片快速的冷俯冲和快速折返过程。

结合地震学证据, 我们提出正是由于快速的冷俯冲和快速折返过程导致俯冲界面不同层位的俯冲板片之间含水流体来不及发生完全扩散与交代, 元素迁移极为有限, 岩浆矿物发生不完全重结晶和变质生长, 此外, 辉长岩自身结构的致密性和没有经历强烈变形改造, 进一步阻止了流体广泛渗透, 由此可见, 大洋板片冷俯冲体系内, 岩浆矿物能够在高压变质和折返退变质阶段保持亚稳定状态而得以保存。

昌宁-孟连造山带榴辉岩化变辉长岩的发现表明在大洋俯冲带, 流体交代、元素迁移和矿物演变过程远比我们想象中要更加复杂, 这对反演古特提斯构造域汇聚板块边界元素迁移富集机理及相关的金属元素富集成矿过程等研究具有重要的启示意义。