

# 石榴石 Lu-Hf 年代学及其在大别造山带研究中的进展

程昊\*, 曹达迪

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

\* 联系人, E-mail: oahgnehc@gmail.com

2013-05-20 收稿, 2013-06-13 接受, 2013-08-07 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2009CB825006)和中央高校基本科研业务费专项资金资助

**摘要** 高 Lu/Hf 比的石榴石可以用于构筑高精度的 Lu-Hf 等时线, 因而石榴石 Lu-Hf 法被广泛地应用于各类岩石的定年研究中. 特别是在造山带研究中, 石榴石 Lu-Hf 法揭示了许多其他定年体系所不能揭示的信息. 但是由于石榴石生长历史复杂, 影响石榴石 Lu-Hf 定年结果的因素多样, 合理解释石榴石 Lu-Hf 年龄指示的地质意义成为石榴石 Lu-Hf 年代学研究的难点. 这些因素包括石榴石成核和生长模式、包体、子体同位素不平衡、石榴石生长历史和人为因素等. 本文对这些影响因素进行了总结, 并以大别造山带为例介绍了石榴石 Lu-Hf 年代学在碰撞造山带研究中的进展. 对大别造山带东部高压和超高压陆壳属性的榴辉岩进行了 Lu-Hf 年代学的研究, 从一个新的角度认识到华北和扬子在大别地区发生陆-陆碰撞的最晚时间约 240 Ma. 西大别洋壳属性的榴辉岩约 260 Ma 的 Lu-Hf 年龄指示大别地区较大规模的洋壳俯冲应结束于约 260 Ma, 该区部分榴辉岩很可能经历了两期高压变质事件. 桐柏地区陆壳属性的榴辉岩约 256 Ma 的 Lu-Hf 年龄表明华北和扬子桐柏地区发生陆-陆碰撞的时间早于大别地区.

**关键词**

年代学  
Lu-Hf  
榴辉岩  
石榴石  
大别  
洋壳  
超高压  
俯冲

Lu-Hf 定年已经被应用于各大类岩石的年代学研究中<sup>[1-6]</sup>. 石榴石是变质岩中很常见的主矿物. 由于 Lu 的高亲石榴石性, 绝大多数石榴石具有高 Lu/Hf 比可构筑高精度的 Lu-Hf 等时线<sup>[7]</sup>, 同时石榴石中往往包含有不同的矿物包裹体矿物组合, 可以用来指示石榴石的生长期次<sup>[8,9]</sup>. 将石榴石不同生长期次的年龄信息与石榴石中记录的寄主岩石温压演化信息结合<sup>[10-12]</sup>, 可有效反演造山带演化的 *P-T-t* 轨迹, 确定岩石不同变质事件的年代和持续时间. 这使得通过石榴石 Lu-Hf 年代学的手段研究多期造山成为可能<sup>[13]</sup>. 榴辉岩等高压变质岩中石榴石颗粒的大小常常不足以采用微区取样的技术来进行单颗粒石榴石微区定年, 只能通过分选大量的石榴石碎片来进行测试<sup>[14]</sup>. 由于不满足严格意义上的同源、同时和封闭的等时线要求, 获得的石榴石 Lu-Hf 年龄实际上是混合年龄. 但结合岩石学和年代学的证据往往能

赋予这些混合年龄以合理和明确的地质解释. 大别造山带石榴石 Lu-Hf 年代学的研究尚处在起步阶段, 但已经为造山带的演化提供了许多新的年代学数据, 并对诸如洋壳到陆壳俯冲的转换时间, 高压和超高压变质时间以及退变质时间等的解读提供了其他定年体系不能提供的重要信息. 我们回顾了近些年来 Lu-Hf 年代学在大别造山带取得的研究进展并揭示出石榴石 Lu-Hf 年代学在造山带研究中的巨大潜力.

## 1 石榴石 Lu-Hf 等时线

放射性同位素定年的等时线法必须满足同源、同时和封闭这 3 个基本条件. 不满足这些前提的回归拟合线都不是严格意义上的等时线. 然而, 当相对于这些条件的偏差是可以忽略或者偏差本身具有明确地质意义的情况下, 虽无法确定严格意义上的等时线, 但获得的混合年龄依然能提供有益的地质信息<sup>[13-15]</sup>.

**引用格式:** 程昊, 曹达迪. 石榴石 Lu-Hf 年代学及其在大别造山带研究中的进展. 科学通报, 2013, 57: 2271-2278

Cheng H, Cao D D. Recent advances in garnet Lu-Hf geochronology and its applications in the Dabie orogen. Chin Sci Bull, 2013, 58: 2271-2278.  
doi: 10.1360/972013-608

## 1.1 同源性

同源性的条件即要求测试的石榴石, 共生矿物和全岩之间初始子体同位素平衡, 但是地质过程中都或多或少存在初始子体同位素不一致的情况<sup>[16]</sup>. 由于高级变质岩全岩具有较低的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值以及  $^{176}\text{Lu}$  较长的半衰期, 并且在石榴石结晶期间基质中极度亏损 Lu, 结晶石榴石与全岩间一般满足子体同位素平衡的条件. 石榴石在不同的成核和生长阶段可能继承了不同的反应物的子体同位素特征, 导致其相对全岩初始等时线斜率或正或负, 从而影响等时线年龄的准确性. 对于含有残留的具有显著古老核的石榴石定年, 残留成分势必会增大全岩的 Lu/Hf 比值, 一般会降低等时线表观年龄<sup>[5,13]</sup>. 而与石榴石共生的矿物, 可能继承于不同反应矿物的子体同位素特征, 没有通过扩散或重结晶达到子体同位素平衡, 拟合的年龄不对应真实的矿物生长结晶年龄<sup>[16]</sup>. 但由于典型造山带变质岩中石榴石往往具有较大的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比, 初始子体同位素不一致的影响会随时间而变得可以忽略. 变质岩石榴石中常见大量的固相包体, 例如单斜辉石、角闪石、绿泥石、云母、锆石、磷灰石、金红石和榍石等. 这些常见包体矿物中, 富集 Lu 元素的磷灰石和含大量 Hf 的锆石和金红石包体对石榴石 Lu-Hf 定年不容忽视, 其他常见矿物包体往往具有与石榴石一致或者近似的初始子体同位素比值, 所以少量的这些包体的混染对同源性的影响较少<sup>[5]</sup>. 继承性的富 Hf 的包体, 如锆石和金红石, 则会显著降低全岩或者石榴石的子体同位素比值, 进而影响年龄<sup>[7]</sup>. 由于双目显微镜下的大多数金红石和石榴石的颜色差异显著, 仔细地分选矿物可以把绝大部分的金红石剔除. 但由于大多数锆石包体的无色性和透明的性质, 难以将包体全部挑除, 只能通过选择性溶解的办法来减少和避免锆石的影响<sup>[14]</sup>.

## 1.2 同时性

变质岩中不同粒径的石榴石往往包含不同的年龄信息<sup>[6,13,17]</sup>, 后成核的石榴石相比先成核的石榴石年龄势必更小. 常规石榴石 Lu-Hf 定年是通过分选大量的石榴石碎片进行测试, 得到的拟合线是一条混合等时线, 严格意义上来讲, 该拟合线不满足同时性的条件, 但该拟合线具有统计意义, 其指示的年龄依然反映了石榴石结晶生长的某一阶段的年龄. 所以

对石榴石进行粒径统计分析, 获得石榴石成核和生长的信息, 就可以指示出混合等时线年龄代表的石榴石粒径范围, 从而正确解读年龄对应的石榴石生长阶段<sup>[18]</sup>. 对于单颗石榴石, 由于石榴石不同部位可能源于不同的矿物化学反应, 不同部位不满足等时线同时性的条件. 由于石榴石的体积效应<sup>[14,19-21]</sup>(图 1)造成石榴石的核部和边部的贡献量的差异, 以及石榴石不同样式的生长环带, 石榴石 Lu-Hf 定年给出的实际上是混合年龄<sup>[5,13,14,22]</sup>. 对于高级变质岩, 石榴石生长主要受到两种模式控制: 界面控制和扩散控制. 不同的生长模式会导致石榴石具有不同的元素分带特征, 叠加反应矿物的影响共同决定了石榴石成分环带的最终样式<sup>[11]</sup>. 一般情况下, 界面控制下生长的石榴石, 其累积的 Lu 含量偏向于核部, 其 Lu-Hf 混合年龄更倾向于进变质时间, 而扩散控制下生长的石榴石, 其累积 Lu 含量偏向于石榴石幔部, 甚至边部, 其 Lu-Hf 混合年龄偏向后期石榴石生长的时间. 所以溶液法获得的测试点反映了不同比例核部和边部石榴石的混合, 对应在回归线上为不同的年龄和不同 Lu/Hf 比石榴石的混合. 对于快速连续生长的石榴石, 石榴石不同部位基本上满足同时同源性的条件, 能给出高精度的等时线年龄. 但是, 如果石榴石经历了冗长的生长, 石榴石不同部位年龄差异较大, 这就不满足同时性的条件, 只能获得精度较差的混合年龄, 但该年龄仍可能指示了整个石榴石生长历程的一个时间点<sup>[23]</sup>. 对于幕式生长的石榴石, 回归拟合线的年龄则是几个阶段的混合时间, 没有明确的地质意义. 值得注意的是, 在 Lu-Hf 样品准备过程中, 总是人为地剔除含包体石榴石碎片, 倾向性地选择了某一阶段生长的无/少包体的石榴石, 测试的样品仍可能满足了同源和同时性, 可能得到高精度的有明确地质意义的等时线年龄<sup>[6,14,24,25]</sup>.

## 1.3 封闭性

对封闭温度的解读是诠释放射性同位素年龄代表矿物生长/结晶年龄或冷却年龄的重要前提. 一般认为, 石榴石 Lu-Hf 体系封闭温度不低于 Sm-Nd 体系的封闭温度<sup>[7]</sup>, 具有较高的封闭温度(>630℃<sup>[26]</sup>; >790℃<sup>[25]</sup>; ~1000℃<sup>[4]</sup>). 高封闭温度使得石榴石 Lu-Hf 定年应用于高级变质岩的研究具有广阔的前景. 由于影响石榴石 Lu-Hf 体系封闭温度的影响因素

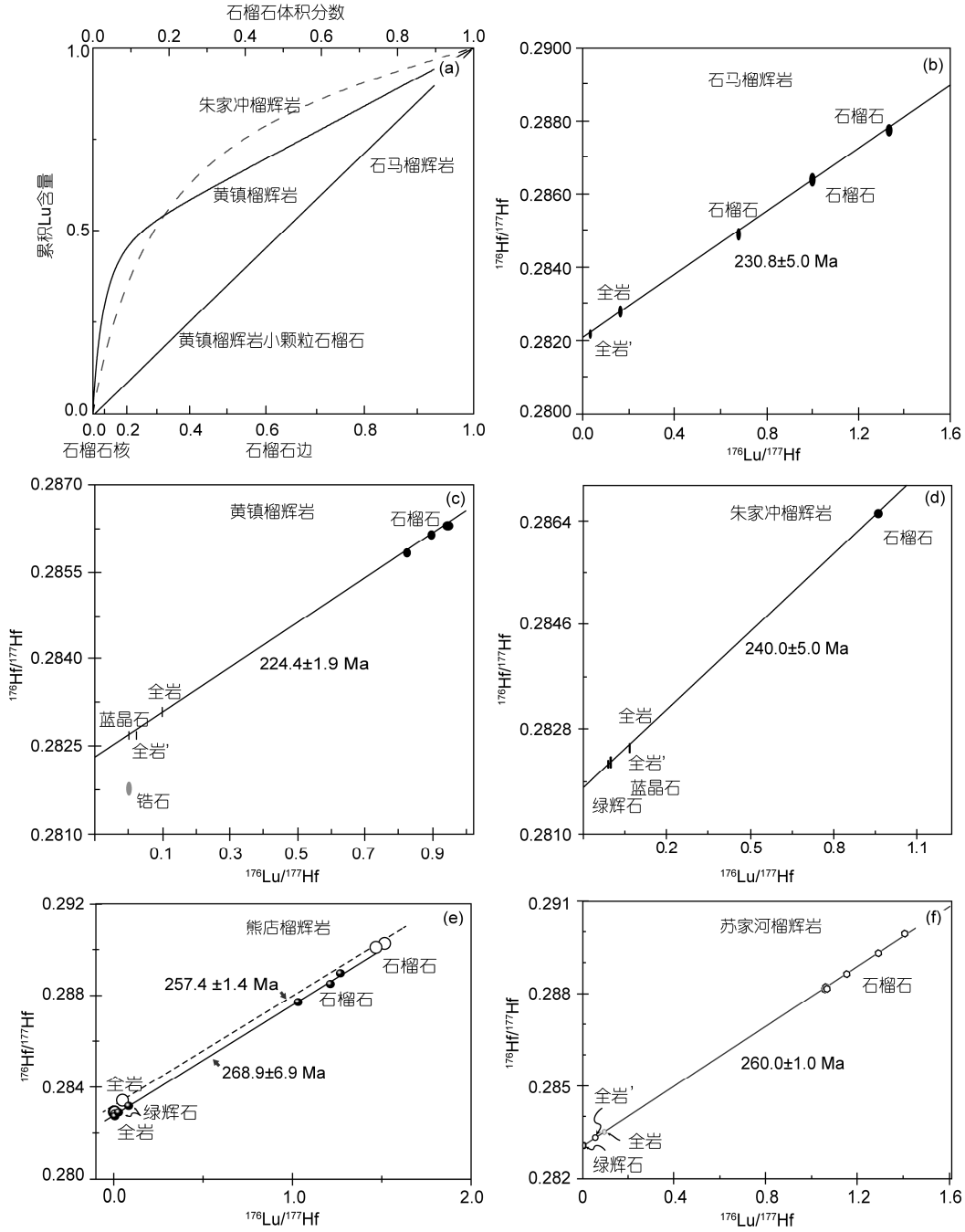


图 1 石榴石的体积效应(a)和大别榴辉岩 Lu-Hf 年龄(b)~(f)

(a)引自文献[14]; (b)~(f)引自文献[19~21]。朱家冲榴辉岩 Lu 主要集中在石榴石的核部，石榴石 Lu-Hf 年龄反映了进变质年龄；黄镇榴辉岩虽然大颗粒石榴石 Lu 累积含量更偏向于核部，但小石榴石累积 Lu 含量偏向于边部，由于歧视性挑矿效应，得到的石榴石 Lu-Hf 反映了石榴石边部生长年龄。石马榴辉岩石榴石累积 Lu 含量偏向于边部，定年结果更接近石榴石边部生长年龄。全岩'，代表溶样弹消解方式；其余为普通 PFA 溶样方式，详细流程参见文献[14]

较多，这为估算研究实例中石榴石 Lu-Hf 封闭温度带来重重困难，研究中只能通过测定石榴石中元素的环境信息来判断石榴石遭受扩散改造的程度<sup>[14,27,28]</sup>。

石榴石在后期退变质过程中可能经历各种改造，部分或者完全重置石榴石 Lu-Hf 体系。流体作用下石榴石的重结晶过程，会重置 Lu-Hf 体系，得到的年龄反

映了石榴石重结晶年龄<sup>[18,29]</sup>。而后期的热扰动可能部分或者完全重置石榴石 Lu-Hf 体系, 对这类样品进行 Lu-Hf 定年得到的混合年龄地质意义不明确<sup>[30]</sup>。退变质过程中, 石榴石可能在高温或者流体作用下发生溶蚀过程, 由于 Lu 元素的高亲石榴石性质, 被溶蚀的石榴石边部 Lu 会被重吸收出现边部陡然升高的 Lu 元素特征, 而 Hf 元素含量基本不变, 进而升高整个石榴石 Lu/Hf 比, 最终得到小于石榴石结晶时间的表观等时线年龄<sup>[31]</sup>。

所以在进行石榴石 Lu-Hf 定年前首先要对样品进行构造背景分析, 岩矿观察和寄主岩石的变质演化历程的恢复。在明确了定年的目的之后, 对样品中石榴石进行详细的显微构造观察, 包裹体和成分分带测定, 在充分考虑那些可能影响同源、同时和封闭这3个基本条件的各种因素的基础上, 选择合适的矿物分离手段和化学分析流程来进行 Lu-Hf 定年测定。同时结合其他同位素体系, 如 Sm-Nd 和锆石 U-Pb,

方能正确解读 Lu-Hf 年龄代表的地质意义。图2以变质榴辉岩为例示意性地介绍了进入化学流程前的石榴石 Lu-Hf 定年各个步骤及注意事项。

## 2 大别地区洋壳和陆壳的俯冲与折返时限

### 2.1 洋壳俯冲到陆壳俯冲转换时限

Cheng 等人<sup>[19-21]</sup>对西大别造山带浒湾剪切带中出露的熊店洋壳榴辉岩进行了研究, 得到石榴石-绿辉石-全岩 Lu-Hf 等时线年龄为 260~270 Ma。该样品中保留有进变质环带, 说明扩散重置影响很小。大颗粒的石榴石明显分为富包体的核部和无包体的边部, 暗示石榴石的两期生长。小颗粒石榴石成分与大颗粒的石榴石边部成分一致, 石榴石核部与幔部的绿辉石包体存在, 说明大颗粒的石榴石边部和小颗粒的石榴石生长并非处于进变质阶段。由于歧视性的挑矿过程选择了没有包体的石榴石边部和小颗粒

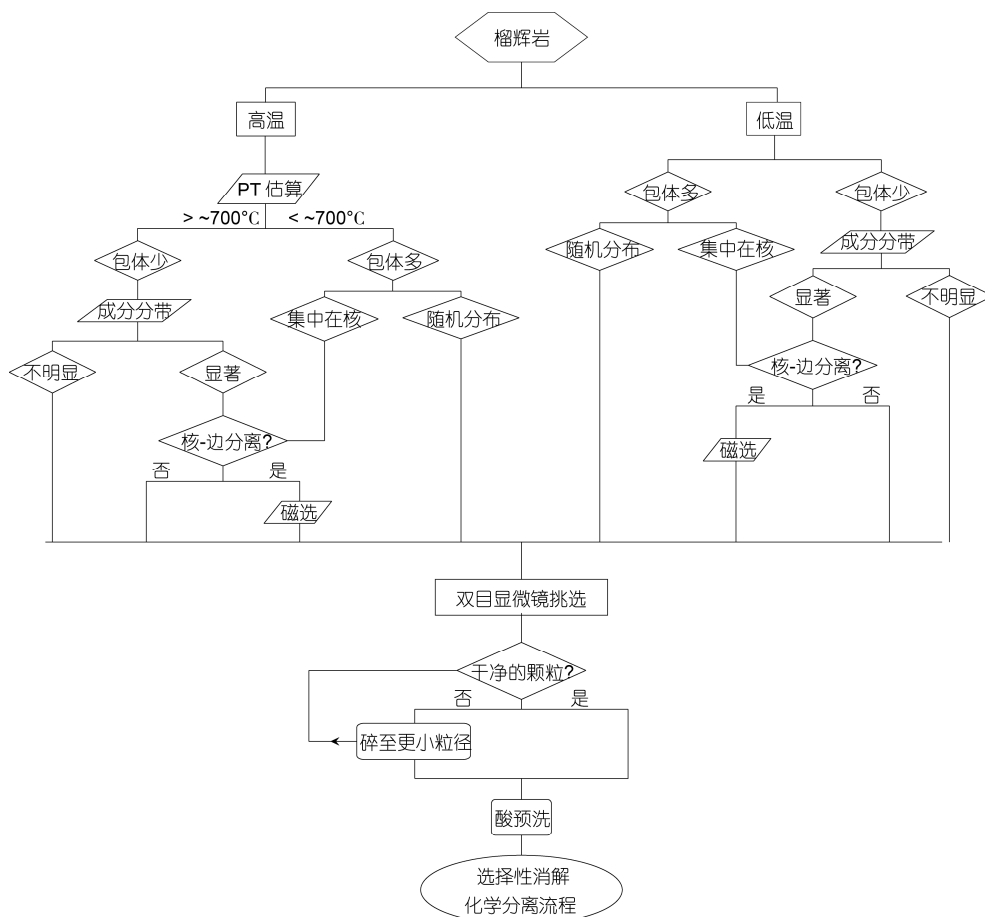


图2 变质榴辉岩 Lu-Hf 定年化学流程前期处理策略示意图

石榴石, 加上几何效应的影响, 该年龄最合理的解释应是其代表了石榴石后期生长的时代, 约束了榴辉岩相变质时间的下限(图 1)。该样品中锆石 U-Pb 定年给出一组约 315 Ma 年龄, 对应的锆石含有与基质石榴石核部成分类似的石榴石包体, 该年龄应为洋壳进变质年龄, 说明该地区的洋壳俯冲开始于约 315 Ma 之前。结合其他学者获得的石炭纪锆石 U-Pb 年龄<sup>[32-34]</sup>, 表明陆壳深俯冲开始时间不早于约 260 Ma。石炭纪和二叠纪两期高压变质年龄说明该地区的洋壳要么持续俯冲了约 50 Ma 或者经历了两次高压变质事件。由于持续俯冲要求极其慢速(0.1 mm/a)的俯冲, 这与普遍的观点不一致<sup>[35]</sup>。熊店以东的学河地区同时出露有陆壳和洋壳属性的榴辉岩, 最近的研究表明这些榴辉岩记录了石炭纪<sup>[34]</sup>和二叠纪的变质事件。因此, 我们倾向于认为该地区存在仅经历了石炭纪高压变质的榴辉岩, 一部分石炭纪高压变质岩可能卷入了二叠纪的深俯冲而再次遭受高压变质。

## 2.2 陆壳俯冲时限

对东大别造山带朱家冲和石马榴辉岩进行石榴石 Lu-Hf 定年研究<sup>[14]</sup>(图 1), 得到 Lu-Hf 等时线年龄分别为 240.0±5.0 Ma (石榴石-单斜辉石-蓝晶石-全岩 4 点等时线)和 230.8±5.0 Ma (石榴石-全岩 5 点等时线), 以及对应的石榴石 Sm-Nd 年龄 222.5±5.0 Ma (石榴石-单斜辉石-蓝晶石-全岩 5 点等时线)和 223.2±2.1 Ma (石榴石-单斜辉石-全岩 6 点等时线)。朱家冲榴辉岩中石榴石保存有良好的主量元素和微量元素环带, 其 Lu-Hf 年龄应反映了石榴石生长早期的时间, 暗示大陆俯冲开始于 240 Ma 之前。由于朱家冲榴辉岩具有低于 Lu-Hf 和 Sm-Nd 封闭温度的峰期变质温度, 以及高于 80% 的 Lu 都集中于石榴石核部(图 1(a)), 因此该 Lu-Hf 年龄与 Sm-Nd 年龄间的 17.5 Ma 的差别是石榴石生长时间跨度的最小估计。石马榴辉岩中石榴石成分环带非常弱, 与其较高的峰期变质温度一致; 其 Lu-Hf 和 Sm-Nd 年龄应代表了冷却年龄, Sm-Nd 和 Lu-Hf 年龄的差异很可能反映了两种体系的封闭温度差异, 表明俯冲陆壳的初始抬升时间应早于约 230 Ma。大别西部的桐柏造山带是衔接秦岭和大别的纽带地区。桐柏陆壳性质的榴辉岩给出的石榴石-全岩 Lu-Hf 年龄为 256.4±2.6, 252.3±3.4 和 246.9±3.2 Ma<sup>[24]</sup>。鉴于石榴石从核部到边部都有绿辉石包裹体及其中保存完好的进变质环带, 这些年龄

被解释为高压榴辉岩相的时间, 说明桐柏地区的扬子板块和华北板块的碰撞时间不晚于约 256 Ma。

## 2.3 退变质时限

Schmidt 等人<sup>[27]</sup>对东大别山造山带及中国大陆科学钻探钻孔榴辉岩石榴石-单斜辉石进行了 Lu-Hf 定年, 5 个样品给出非常一致的年龄, 平均 223.0±0.9 Ma, 与同一样品的石榴石-单斜辉石-全岩 Sm-Nd 年龄(221.4±1.5 Ma)一致。这些样品中石榴石中保存了典型的 Lu 进变质环带, 作者提出这些石榴石可能是在超高压环境下流体作用下短时间生长的。进一步对钻孔区榴辉岩进行的定年给出一致的石榴石-单斜辉石 Lu-Hf 等时线年龄, 平均为 216.9±1.2 Ma<sup>[28]</sup>。研究样品的石榴石主量元素环带已经完全均一化, 但仍保存着良好的稀土元素的进变质环带, 该年龄被解释为反映了石榴石在超高压变质过程中某一阶段的重结晶年龄。Brouwer 等人<sup>[36]</sup>认为苏鲁-大别造山带(超)高压变质反应在 250~230 Ma, 认为 Schmidt 等人<sup>[24,25]</sup>获得的约 220 Ma 的年龄记录的是流体作用下的石榴石的重结晶时间而不是(超)高压环境下的石榴石生长时间, 该年龄应该代表陆壳折返阶段的冷却年龄。

我们研究东大别造山带朱家冲附近的榴辉岩时, 发现一些样品同时含有普通和岛礁状的石榴石<sup>[18,37]</sup>。岛礁状石榴石的“残留”核部与普通石榴石的退变质边的成分和晶体取向一致说明这种岛礁构造是后期退变质的产物。进一步对该岩石进行了年代学的工作, 获得的石榴石-全岩 Lu-Hf 年龄约为 221 Ma。由于普通石榴石和岛礁状石榴石最边部成分, 岛礁状石榴石桥型部位和小石榴石成分一致, 说明很可能是同一时期成核生长的石榴石, 结合石榴石正偏态的粒度分布及体积效应, 得到的石榴石 Lu-Hf 年龄反映了该时期即流体作用下石榴石的生长时间, 对应榴辉岩折返初期流体作用下的石榴石重结晶时间。这与东大别黄镇榴辉岩记录的约 220 Ma 的石榴石 Lu-Hf 和 Sm-Nd 年龄一致<sup>[14,38]</sup>。西大别造山带含榴花岗片麻岩石榴石-全岩 Lu-Hf 年龄为 212.2±0.7 Ma<sup>[29]</sup>。样品的石榴石主要元素环带很微弱, 仅在最边缘部分呈 Mn 和 Ca 含量升高和 Fe 含量降低的趋势。结合其单边递减/增非中心对称微量元素分布特征以及包体的缺乏, 该石榴石应经历了溶蚀-重结晶过程, 该年龄被解释为石榴石重结晶时代, 对应一期退变质

作用流体活动. 因此, 大别造山带陆壳折返退变质过程应早于 220 Ma.

### 2.4 从洋壳俯冲到陆壳碰撞

已有的大别造山带石榴石 Lu-Hf 年龄大部分被解释为石榴石生长的年龄, 而这些短时间内的石榴石生长事件说明石榴石在整个俯冲造山过程中并非连续生长, 而是幕式生长. 这些分散的年龄数据记录了整个大别造山带从洋壳俯冲到陆壳碰撞折返约 100 Ma 的时间跨度(图 3).

近几年来, 越来越多的证据表明多期高压榴辉岩相变质和/或多期俯冲-折返在不同造山带都有记录<sup>[13,39-43]</sup>, 这与构造模拟预见的结果一致<sup>[42,43]</sup>. 大别造山带洋壳俯冲可能经历了两期高压变质事件. 这与阿尔卑斯造山带 Trescolmen 榴辉岩石榴石中得到古生代和新生代 Lu-Hf 年龄<sup>[13]</sup>类似. 研究表明浒湾剪切带在石炭纪可能是一个独立的构造单元, 经历了一次俯冲折返运动, 然后在二叠纪伴随洋壳再次俯冲到华北板块下. 但石炭纪的年龄记录只有来自锆石 U-Pb 的证据, 没有石榴石 Lu-Hf 年龄证据. 可能的原因是石炭纪的高压矿物组合在二叠纪变质过程中完全被重置, 而锆石并没有显著的增生/重结晶. 对这种年龄解耦的解释可以有两种模式. 一种是俯冲-增生模型: 洋壳经历了一次冗长的俯冲事件, 石炭纪俯冲的洋壳在大陆弧下形成一个增生楔, 部分洋壳物质从俯冲洋壳上拆离并维持在原位, 并被夹带在随后俯冲的洋壳中在二叠纪再次发生高压变质<sup>[44]</sup>. 这种模式需要解释增生楔阶段的热平衡和锆石不生长的问题. 另一种是悠悠球型俯冲模式<sup>[39]</sup>: 石炭纪和二叠纪两个榴辉岩相高压变质年龄组指示

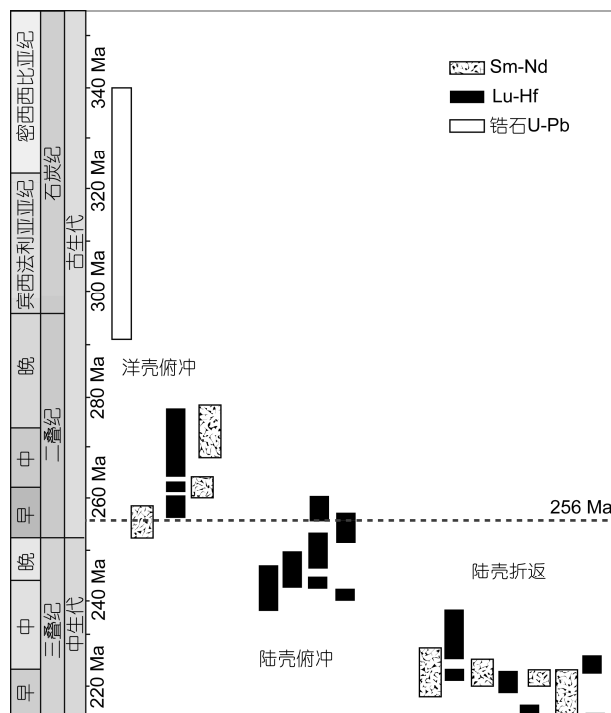


图 3 大别造山带石榴石 Lu-Hf 年龄和 Sm-Nd 年龄统计  
数据来自文献[21]及其中文献

了洋壳在石炭纪俯冲变质然后折返, 随后再次在二叠纪被卷入俯冲带, 岩片发生第二次榴辉岩相的叠加高压变质. 这种模式需要解释叠加俯冲的动力学机制的问题. 大别造山带不同地区的陆壳榴辉岩指示的峰期变质时间的石榴石 Lu-Hf 年龄不尽相同, 不同地点的榴辉岩 Lu-Hf 年龄都被解释为石榴石生长结晶的年龄从东向西变老, 这与锆石 U-Pb 年龄的趋势一致<sup>[44]</sup>, 暗示扬子板块与华北板块的碰撞可能先西后东或是由俯冲深度不同导致的时间差异.

致谢 感谢审稿人提出细致的修改意见和建议. 谨以此文纪念叶凯老师.

### 参考文献

- 1 Duchêne S, Blichert-Toft J, Luais B, et al. The Lu-Hf dating of garnets and the ages of the Alpine high-pressure metamorphism. *Nature*, 1997, 387: 586-589
- 2 Barfod G H, Albarède F, Knoll A H, et al. New Lu-Hf and Pb-Pb age constrains on the earliest animal fossils. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 201: 203-212
- 3 Mulcahy S R, King R L, Vervoort J D. Lawsonite Lu-Hf geochronology: A new geochronometer for subduction zone processes. *Geology*, 2009, 37: 987-990
- 4 Shu Q, Brey G P, Gerdes A, et al. Eclogites and garnet pyroxenites from the mantle: Their age and ageing-two point isochrons, Sm-Nd and Lu-Hf closure temperatures, model ages. *Eur Mineral Conference*, 2012, 1, EMC2012-590

- 5 Brovarone A V, Herwartz D. Timing of HP metamorphism in the Schistes Lustrés of Alpine Corsica: New Lu-Hf garnet and lawsonite ages. *Lithos*, 2013, 172-173: 175–191
- 6 Nagel T J, Herwartz D, Rexroth S, et al. Lu-Hf dating, petrography, and tectonic implications of the youngest Apine eclogites (Tauern Window, Austria). *Lithos*, 2013, 170-171: 179–190
- 7 Scherer E E, Cameron K L, Blichert-Toft J. Lu-Hf garnet geochronology: Closure temperature relative to the Sm-Nd system and the effects of trace mineral inclusions. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 3413–3432
- 8 Carswell D A, Brueckner H K, Cuthbert S J, et al. The timing of stabilisation and the exhumation rate for ultra-high pressure rocks in the Western Gneiss Region of Norway. *J Metamorph Geol*, 2003, 21: 601–612
- 9 Davis P B, Whitney D L. Petrogenesis of lawsonite and epidote eclogite and blueschist, Sifrihisar Massif, Turkey. *J Metamorph Geol*, 2006, 24: 823–849
- 10 Konrad-Scholke M, Handy M R, Babist J, et al. Thermodynamic modelling of diffusion-controlled garnet growth. *Contrib Mineral Petrol*, 2005, 149: 181–195
- 11 Konrad-Scholke M, O'Brien P J, Capitani C D, et al. Garnet growth at high- and ultra-high pressure conditions and the effect of element fractionation on mineral modes and composition. *Lithos*, 2008, 103: 309–332
- 12 King R L, Bebout G E, Kobayashi K, et al. Ultrahigh-pressure metabasaltic garnets as probes into deep subduction zone chemical cycling. *Geochem Geophys Geosystems*, 2004, 5: 1–17
- 13 Herwartz D, Nagel T J, Münker C, et al. Tracing two orogenic cycles in one eclogite sample by Lu-Hf garnet chronometry. *Nat Geosci*, 2011, 4: 178–183
- 14 Cheng H, King R L, Nakamura E, et al. Coupled Lu-Hf and Sm-Nd geochronology constrains garnet growth in ultra-high-pressure eclogites from the Dabie orogen. *J Metamorph Geol*, 2008, 26: 741–758
- 15 Lapen T J, Johnson C M, Baumgartner L P, et al. Burial rates during prograde metamorphism of an ultra-high-pressure terrane: An example from Lago di Cignana, western Alps, Italy. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 215: 57–72
- 16 Romer R L, Rötzler J. The role of element distribution for the isotopic dating of metamorphic minerals. *Eur J Mineral*, 2011, 23: 17–33
- 17 Anczkiewicz R, Thirlwall M, Alard O, et al. Diffusional homogenization of light REE in garnet from the Day Nui Con Voi Massif in N-Vietnam: Implications for Sm-Nd geochronology and timing of metamorphism in the Red River shear zone. *Chem Geol*, 2012, 318-319: 16–30
- 18 Cheng H, Nakamura E, Zhou Z. Garnet Lu-Hf dating of retrograde fluid activity during ultrahigh-pressure metamorphic eclogites exhumation. *Mineral Petrol*, 2009, 95: 315–326
- 19 Cheng H, King R L, Nakamura E, et al. Transitional time of oceanic to continental subduction in the Dabie orogen: Constraints from U-Pb, Lu-Hf, Sm-Nd and Ar-Ar multichronometric dating. *Lithos*, 2009, 110: 327–342
- 20 Cheng H, DuFrane S A, Vervoort J D, et al. Protracted oceanic subduction prior to continental subduction: New Lu-Hf and Sm-Nd geochronology of oceanic-type high-pressure eclogite in the western Dabie orogen. *Am Mineral*, 2010, 95: 1214–1223
- 21 Cheng H, Zhang C, Vervoort J D, et al. New Lu-Hf and Sm-Nd geochronology constrains the subduction of oceanic crust during the Carboniferous-Permian in the Dabie orogen. *J Asian Earth Sci*, 2013, 63: 139–150
- 22 Skora S, Lapen T J, Baumgartner L P, et al. The duration of prograde garnet crystallization in the UHP eclogites at Lago di Cignana, Italy. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 287: 402–411
- 23 Kohn M J. Models of garnet differential geochronology. *Geochim Cosmochim Acta*, 2009, 73: 170–182
- 24 Cheng H, Zhang C, Vervoort J D, et al. New Lu-Hf geochronology constrains the onset of continental subduction in the Dabie orogen. *Lithos*, 2011, 121: 41–54
- 25 Cheng H, Zhang C, Vervoort J D, et al. Timing of eclogite facies metamorphism in the North Qinling by U-Pb and Lu-Hf geochronology. *Lithos*, 2012, 136-139: 46–59
- 26 Skora S, Baumgartner L R, Nahlen N J, et al. Estimation of a maximum Lu diffusion rate in a natural eclogite garnet. *Swiss J Geosci*, 2008, 101: 637–650
- 27 Schmidt A, Weyer S, Mezger K, et al. Rapid eclogitisation of the Dabie-Sulu UHP terrane: Constraints from Lu-Hf garnet geochronology. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 273: 203–213
- 28 Schmidt A, Mezger K, O'Brien P J. The time of eclogite formation in the ultrahigh pressure rocks of the Sulu terrane. *Lithos*, 2011, 125: 743–756
- 29 张超, 程昊, Vervoort J D. 含榴花岗片麻岩 Lu-Hf 年代学初探. *地球化学*, 2012, 41: 371–379
- 30 Anczkiewicz R, Szczepański J, Mazur S, et al. Lu-Hf geochronology and trace element distribution in garnet: Implications for uplift and exhumation of ultra-high pressure granulites in the Sudetes, SW Poland. *Lithos*, 2007, 95: 363–380

- 31 Kelly E D, Carlson W D, Connelly J N. Implications of garnet resorption for the Lu-Hf garnet geochronometer: An example from the contact aureole of the Makhavinekh Lake Pluton, Labrador. *J Metamorph Geol*, 2011, 29: 901–916
- 32 Sun W D, Williams I S, Li S G. Carboniferous and Triassic eclogites in the western Dabie Mountains, east-central China: Evidence for protracted convergence of the North and South China blocks. *J Metamorph Geol*, 2002, 20: 873–886
- 33 Wu Y B, Hanchar J M, Gao S, et al. Age and nature of eclogites in the Huwan shear zone, and the multi-stage evolution of the Qinling-Dabie-Sulu orogen, central China. *Earth Planet Sci Lett*, 277: 345–354
- 34 Liu X, Wu Y B, Gao S, et al. Zircon U-Pb and Hf evidence for coupled subduction of oceanic and continental crust during the Carboniferous in the Huwan shear zone, western Dabie orogen, central China. *J Metamorph Geol*, 2011, 29: 233–249
- 35 Lallemand S, Heuret A, Boutelier D. On the relationships between slab dip, back-arc stress, upper plate absolute motion, and crustal nature in subduction zones. *Geochem Geophys Geosystems*, 2005, 6: Q09006
- 36 Brouwer F M, Groen M, Nebel O, et al. Coherence of the Dabie Shan UHPM terrane investigated by Lu-Hf and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of eclogites. In: Dobrzhinetskaya L F, Faryad S W, Wallis S, et al, eds. *UHP Metamorphism, 25 Years After Findings of Coesite and Diamond*. Amsterdam: Elsevier, 2011. 325–357
- 37 Cheng H, Nakamura E, Kobayashi K, et al. Origin of atoll garnets in eclogites and implications for the redistribution of trace elements during slab exhumation in a continental subduction zone. *Am Mineral*, 2007, 92: 1119–1129
- 38 Cheng H, Vervoort J D, Li X H, et al. The growth interval of garnet in the UHP eclogites from the Dabie orogen, China. *Am Mineral*, 2011, 96: 1300–1307
- 39 Rubatto D, Regis D, Hermann J, et al. Yo-yo subduction recorded by accessory minerals in the Italian Western Alps. *Nat Geosci*, 2011, 4: 338–342
- 40 Root D, Corfu F. U-Pb geochronology of two discrete Ordovician high-pressure metamorphic events in the Seve Nappe Complex, Scandinavian Caledonides. *Contrib Mineral Petrol*, 2012, 163: 769–788
- 41 Kirchenbaur M, Pleuger J, Jahn-Awe S, et al. Timing of high-pressure metamorphic events in the Bulgarian Rhodopes from Lu-Hf garnet geochronology. *Contrib Mineral Petrol*, 2012, 163: 897–921
- 42 Brueckner H K. Dunk, dunkless and re-dunk tectonics: A model for metamorphism, lack of metamorphism, and repeated metamorphism of HP/UHP terranes. *Int Geol Rev*, 2006, 48: 978–995
- 43 Gerya T, Stockhert B, Perchuk A. Exhumation of high-pressure metamorphic rocks in a subduction channel: A numerical simulation. *Tectonics*, 2002, 21: 1–19
- 44 Liu X C, Jahn B M, Hu J, et al. Metamorphic patterns and SHRIMP zircon ages of medium-to-high grade rocks from the Tongbai orogen, central China: Implications for multiple accretion/collision processes prior to terminal continental collision. *J Metamorph Geol*, 2011, 29: 979–1002