

榴辉岩中金红石 U-Pb 定年: 对大陆碰撞造山带形成和演化的制约

李秋立^{①*}, 杨亚楠^{①②}, 石永红^③, 林伟^①

① 岩石圈演化国家重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

② 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049;

③ 合肥工业大学资源和环境学院, 合肥 230009

* 联系人, E-mail: liqiuli@mail.iggcas.ac.cn

2013-05-17 收稿, 2013-07-08 接受, 2013-08-07 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2009CB825008)和国家自然科学基金(41222023)资助

摘要 金红石是高压-超高压变质岩中标志性变质矿物之一, 通常被认为是峰期变质矿物组合. 其主要成分除 TiO_2 外, 因含有众多其他微量元素(如: Nb, Ta, Zr, Hf, Cr, V, W 和 U 等)而成为主要研究对象. 通过对相应元素变化特征和年代学的研究, 可以反演包含金红石的主岩所经历的地质过程. 作为超高压岩石演化历史的记录者之一, 因岩石经历的温压条件不同和金红石 U-Pb 体系特征, 金红石的 U-Pb 定年体系可以分辨出其他方法没有记录的超高压岩石演化阶段. 通过研发金红石微区 U-Pb 定年工作标准样品, 进而建立了离子探针微区金红石 U-Pb 定年方法, 并将其应用到我国西南天山和大别-苏鲁造山带高压-超高压榴辉岩演化研究中, 为大陆碰撞造山带的形成和演化提供了制约.

关键词

金红石
榴辉岩
离子探针
U-Pb 体系定年
超高压变质作用

陆壳岩石中柯石英和金刚石等超高压矿物的发现, 证明陆壳可俯冲到地下上百公里并折返回地表, 超高压变质岩的形成和折返机制是大陆动力学研究的热点和前沿问题之一^[1]. 高压-超高压岩石见证了俯冲-碰撞造山带的演化历程, 记录了构造演化历史. 同位素年代学的任务就是对这些岩石的不同变质阶段进行定年, 从岩石的热演化历史来反演构造过程. 金红石是 TiO_2 类质同相中最普遍、最稳定的矿物, 在蓝片岩、榴辉岩和麻粒岩相岩石中通常作为标志性变质矿物之一. 由于金红石一般具有较高的 U/Pb 比值, 适于 U-Pb 体系定年, 且可根据金红石 Zr 含量计算温度, 因此可作为变质岩类演化历史研究的重要对象之一^[2-7]. 除主要成分 TiO_2 外, 因含有众多其他微量元素(如: Nb, Ta, Zr, Hf, Cr, V, W 和 U 等), 对其相应元素变化特征, 对包含金红石主岩所经历的地质过程具有重要指示意义. 金红石在年代学研究中的应

用已经有近 20 年的历史, 涉及多种分析方法, 但金红石 U-Pb 体系封闭温度、定年方法的适用性、定年结果解释依据等方面仍存在较多值得讨论的问题. 本文总结了金红石 U-Pb 体系特点及定年研究方法, 结合近年来在超高压变质岩中金红石的定年工作, 着重介绍金红石离子探针微区 U-Pb 定年流程, 并以 2 个实例介绍金红石 U-Pb 定年的适用性.

1 金红石 U-Pb 体系

金红石主要成分为 TiO_2 , U^{4+} 和 U^{6+} 与 Ti 离子半径相近, 因此可通过离子替换进入晶格. 但金红石 U 含量具有相当大的变化范围(0.01~400 ppm)(1 ppm=1 $\mu\text{g g}^{-1}$, 余同)^[6], 且随岩性不同通常有系统差异, 长英质麻粒岩中金红石 U 含量最高(平均~24 ppm), 而基性榴辉岩中金红石 U 含量最低(平均~5 ppm). 以往以样品全溶解方法认为金红石普通 Pb 较高, 但后来

引用格式: 李秋立, 杨亚楠, 石永红, 等. 榴辉岩中金红石 U-Pb 定年: 对大陆碰撞造山带形成和演化的制约. 科学通报, 2013, 58: 2279-2284

Li Q L, Yang Y N, Shi Y H, et al. Eclogite rutile U-Pb dating: constraint for formation and evolution of continental collisional orogen. Chin Sci Bull, 2013, 58: 2279-2284, doi: 10.1360/972013-590

通过微区测试证明, 纯净的金红石普通 Pb 含量非常低, 通常认为普通 Pb 高的原因主要是受矿物所含包裹体的影响^[3,4]. 因此金红石应是具有高 U/Pb 比值的矿物, 适宜于 U-Pb 定年体系.

对金红石 U-Pb 年龄的解释必须考虑的一个因素是封闭温度. 通过与实际地质演化历史对比发现, 金红石 U-Pb 年龄明显低于共生的榍石 U-Pb 年龄, 而与角闪石 Ar-Ar、白云母 Rb-Sr 年龄大致相当, 因而认为金红石封闭温度较低(400~500℃)^[2~4,8]. 而通过金红石 Pb 扩散实验研究, 却获得了金红石 Pb 扩散体系的封闭温度大约在 600℃^[9], 该结果得到 Vry 和 Baker^[10]研究工作的支持, 他们通过对一个经历缓慢冷却的麻粒岩地体进行研究, 由于麻粒岩峰期变质温度>700℃, 变质锆石所给出的 U-Pb 年龄为 1596±4~1562±4 Ma, 白云母 Rb-Sr 等时线年龄为 1485±6 Ma (对应~550℃封闭温度), 而激光剥蚀金红石原位 U-Pb 定年结果平均为 1544±8 Ma, 对应封闭温度约 640℃^[10]. 基于大颗粒金红石微区原位年龄从核部到边部连续降低的观察和误差函数模型计算, Kooijman 等人^[11]提出金红石并不具有单一的 Pb 封闭温度, 而是受有效扩散半径影响大, 从颗粒的核部到边部表现出逐渐降低的封闭温度. 我们对 Vry 和 Baker^[10]工作中 KRN-6 金红石样品进行了离子探针 Pb-Pb 定年测试, 所测样品颗粒约 200~1000 μm, 获得 Pb-Pb 年龄变化范围 1471±6~1584±16 Ma, 峰值 1533 Ma. 该结果的低值略低于白云母 Rb-Sr 年龄, 而最高值对应于锆石 U-Pb 年龄范围, 显示缓慢冷却岩石中金红石颗粒并不具有单一的封闭温度. 对应大颗粒金红石核部封闭温度可达 700℃以上, 而边部封闭温度则明显偏低(<500℃). 这样, 金红石 U-Pb 体系封闭温度特性为实现以单矿物单颗粒构造温度-时间演化历史提供了可能. 考虑到所用离子探针束斑约 20~30 μm, 且年龄低值测试点距最边部尚有 30 μm 以上的距离, 有理由推测直径 100 μm 以下金红石颗粒 U-Pb 封闭温度约 500℃或更低, 这与 Li 等人^[3]对大别山南部超高压榴辉岩中金红石 U-Pb 年龄对应的封闭温度估算值是一致的.

2 金红石 U-Pb 年龄测试方法

2.1 同位素稀释法+热电离质谱法(ID-TIMS)

该方法需将一定量的金红石颗粒与适宜的 U-Pb

稀释剂 [²³⁵U(-²³³U)-²⁰⁵Pb(-²⁰²Pb)] 一起酸溶以达到平衡, 通过离子交换柱分离出纯净的 U 和 Pb, 然后以热电离质谱测试获得高精度 U-Pb 元素和同位素比值以计算年龄^[2,3]. 该方法优点在于精度最高, 可达 0.1%以上, 是精确定值必选方法. 但由于溶解样品量相对较大, 自然界样品通常具有高普通 Pb 包裹体, 导致金红石通常具有较高的普通 Pb. 对经历了复杂变质过程岩石中的金红石, 由于其通常发育有退变边, 致使该方法适用性受到较大影响.

2.2 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱方法(LA-(MC)-ICPMS)

该方法可对金红石进行微区原位激光剥蚀, 剥蚀物质通过载气以气溶胶形式输送至高温炬管, 以等离子体离子化后经离子检测系统进行测试, 通过标准样品进行 Pb/U 分馏的校正. 该方法可以在偏光显微镜观察下对样品进行微区原位测试, 方便、快速. 由于激光剥蚀能量较大, 样品剥蚀深度较深, 对于较低 U 含量样品不能靠长时间剥蚀积分, 因而测试精度差. Zack 等人^[8]给出 LA-ICP-MS 方法测试金红石 U 含量极限值为 5 ppm. 另外, 由于剥蚀量较大, 例如 Vry 和 Baker^[10]用约 200 μm 激光束斑测试一个封闭温度从颗粒中心到边部变化范围大的样品, 所获得年龄具有不同封闭温度样品部分的平均年龄, 因而该方法的空间分辨率偏低.

2.3 离子探针方法(SIMS)

该方法采用聚焦一次离子激发样品表层二次离子, 再经静电场和大半径磁场双聚焦后引入离子检测系统测试^[4,12]. 离子探针测试采用束斑大小为 20~30 μm, 深度小于 1 μm. Li 等人^[4]采用 Cameca IMS 1280 离子探针微区测试发现, 以前通过 TIMS 方法研究过的大别山金河桥榴辉岩中的金红石 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值可达上千, 而样品用量较大的 TIMS 分析结果 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值小于 100^[2], 说明金红石中的普通 Pb 可能主要由其中的包裹体矿物所控制. 该工作采用 3 个已知年龄的金红石样品为基础, 参考实验室研发其他副矿物(锆石、斜锆石、钙钛矿、磷灰石、独居石等)离子探针 U-Pb 定年方法经验^[4,13~16], 采用 Pb/U vs. UO₂/U 幂函数关系式校正 Pb/U 分馏, 研发了金红石离子探针 U-Pb 定年方法, 并自主研发了两个金红石工作标样(DXK, U 含量~18 ppm, TIMS

定年结果 1782.6 ± 2.8 Ma; JDX, U 含量 ~ 15 ppm, TIMS 定年结果 518 ± 4 Ma), 为开展金红石离子探针定年研究奠定了基础. 离子探针测试样品剥蚀量仅有 10^{-9} g 数量级, 对低 U 含量样品可采取加长积分时间方式, 可测试 1 ppm U 含量金红石样品. 另外, 由于金红石内部较边部封闭温度高, 一些样品边部会经历明显 Pb 丢失但内部却不受影响, 如大别山石马超高压榴辉岩中金红石样品以颗粒全溶解的 ID-TIMS 方法分析结果表现出明显的放射成因 Pb 丢失现象, 而以 SIMS 方法分析核部则获得了合理的三叠纪冷却年龄(图 1).

2.4 普通 Pb 校正

U-Pb 定年计算需要进行普通 Pb 的扣除. 由于 Th^{4+} 离子半径与 Ti^{4+} 相差较大, 金红石普遍贫 Th, Th/U 比值一般小于 0.01, 因此一般认为 ^{208}Pb 基本没有放射成因而采用 ^{208}Pb 普通 Pb 校正方法^[8,12]. 然而由于纯净金红石普通 Pb 含量很低, ^{208}Pb 测量精度也较差, ^{208}Pb 普通 Pb 校正法仅适合于 f_{206} (普通 ^{206}Pb 量占总 ^{206}Pb 比例) 非常低的情况^[4,15]. 对于 U 含量非常低的样品, 即使微量 Th 含量也导致 Th/U 比值较大, 放射成因 ^{208}Pb 虽少但不可忽视, 此时 ^{207}Pb 普通 Pb 校正方法更为适合, 或者以未校正普通 Pb 数据采用 Tera-Wasserburg 图解拟合求解下交点方法获得年龄^[4,15].

3 应用实例

3.1 西天山榴辉岩变质时代测定

中国西部的西天山榴辉岩是典型的低温超高压榴辉岩, 其峰期变质温度压力约为 $570\sim 630^\circ\text{C}/2.7\sim$

3.3 GPa^[17,18]. 通常采用的峰期变质时代确定方法, 如石榴石 Sm-Nd 同位素体系定年, 由于变质温度低, 其初始同位素大多未能达到平衡, 导致分析所得年龄结果误差较大^[19,20]. 榴辉岩中过剩 Ar 的存在使得西天山榴辉岩中 Ar-Ar 体系所得结果有超过 100 Ma 的年龄跨度, 因此不能有效指示榴辉岩的峰期变质时代^[19-21]. 对于西天山榴辉岩中锆石 U-Pb 年龄, 同样依据高压矿物包裹体和低 Th/U 特征指示的变质锆石生长有两期, 一是 ~ 230 Ma^[22,23], 二是 ~ 320 Ma^[24]. 由于对这些同位素定年结果解释的差别, 就西天山榴辉岩相变质时代来说长期存在争论.

薄片下观察可见, 西天山榴辉岩中金红石全部或部分退变质为榍石, 很难通过常规矿物分选方法得到纯净的金红石样品用于 TIMS 分析, 因此微区原位测试成为必选. 我们采用 R10 金红石(1090 Ma, U=30 ppm)^[25] 为标样, 以金河桥榴辉岩中金红石为二级监测标样, 测定了西天山 3 个榴辉岩中金红石的 U-Pb 年龄, 结果分别为 308 ± 12 Ma (TS193 榴辉岩)、 320 ± 14 Ma (ZS-3 榴辉岩) 和 320 ± 10 Ma (07RU3, 榴辉岩脉体中的金红石巨晶). 这 3 个样品年龄在误差范围内一致, 以 3 个样品所有测点加权平均得到 318 ± 7 Ma 的年龄(图 2). 由于西天山榴辉岩的峰期变质温度不高, 将金红石 U-Pb 年龄解释为金红石生长年龄更为合理, 因此 318 ± 7 Ma 指示了西天山榴辉岩相变质的年龄^[4].

3.2 北大别榴辉岩金红石定年

已发表的北大别榴辉岩同位素年代学工作主要集中在锆石 U-Pb 年代学和少量石榴石 Sm-Nd 等时线

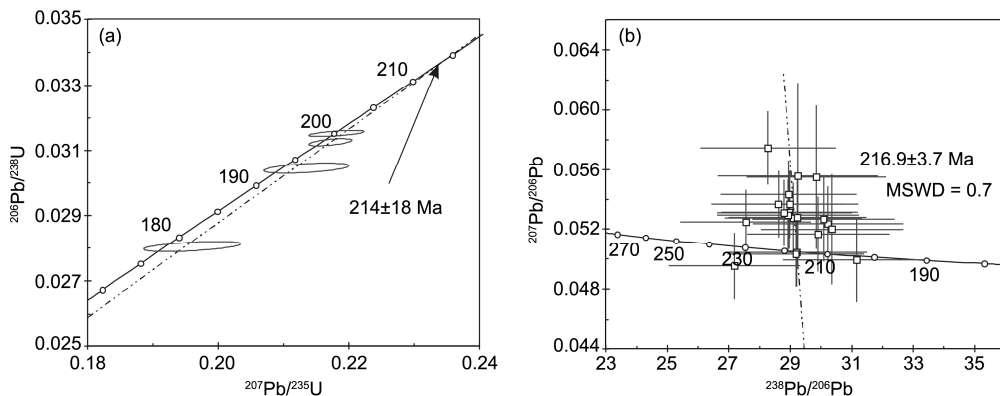


图 1 大别山石马榴辉岩中金红石 U-Pb 体系测试结果

(a) TIMS 方法, 明显的放射成因 Pb 丢失; (b) SIMS 方法, 金红石核部保留了三叠纪冷却年龄信息

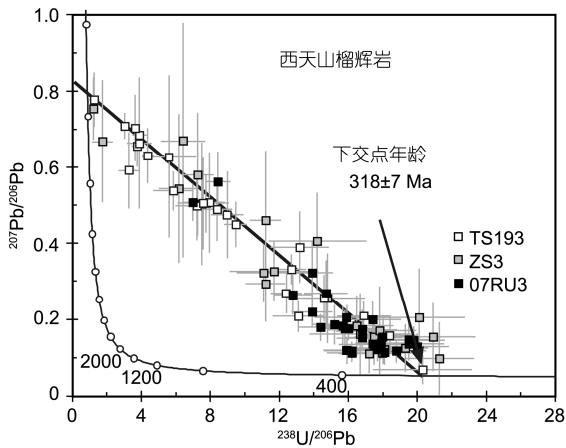


图2 西天山榴辉岩中金红石离子探针 U-Pb 定年结果

定年^[26,27]. 由于锆石和石榴石 Sm-Nd 体系的高封闭温度, 这两个体系只记录了俯冲和折返早期的高温变质过程. 我们根据金红石 U-Pb 体系封闭温度 (~500℃) 较低、对热扰动比较敏感这一特点, 试图恢复后期地质事件的记录. 由于金红石封闭温度受颗粒大小影响明显, 因此可以推测, 如果岩石经历缓慢冷却过程, 则不同大小颗粒会出现年龄梯度; 如果岩石经历高温热扰动后快速冷却, 则不同大小颗粒会给出一致的年龄.

我们对出露于安徽百丈崖、麻岩岭、上官庄的榴

辉岩以及湖北罗田的榴辉岩和英山月明的石榴辉岩进行了金红石 U-Pb 年代学研究, 对其中部分样品进行了锆石 U-Pb 定年研究. 榴辉岩中锆石均给出了三叠纪 U-Pb 年龄, 而榴辉岩中金红石 U-Pb 年龄如下: 安徽百丈崖榴辉岩 BZY-1 为 128.1±1.8 Ma, 麻岩岭榴辉岩 MYL-1 为 127.2±3.2 Ma, 上官庄榴辉岩 SGZ-1 为 127.8±2.6 Ma, 湖北罗田榴辉岩 LT-3 为 129.6±2.8 Ma, LT-4 为 129.4±3.3 Ma, 英山月明石榴辉石岩为 126.9±1.1 Ma(图 3). 这些年龄在误差范围内非常一致, 平均为 128±1 Ma. 金红石 U-Pb 年龄集中在早白垩世, 而锆石 U-Pb 年龄集中在三叠纪, 两者相差近 100 Myr. 对这个差别可以有两种解释, 一是北大别榴辉岩在三叠纪的构造折返并未抬升到金红石 Pb 扩散封闭温度以下的水平, 一直保持在高温状态, 金红石 U-Pb 体系处于开放体系; 二是在早白垩世受到大规模岩浆活动的影响, 导致金红石 U-Pb 时钟的重新启动.

前人对大别-苏鲁造山带超高压变质岩的同位素年代学研究已经明确: (1) 华南陆块与华北陆块在三叠纪碰撞引起超高压榴辉岩相变质事件^[1,28,29]; (2) 大别造山带在早白垩世时期经历了强烈的岩浆作用和混合岩化^[30-32]; (3) 深俯冲华南陆壳岩石在晚三叠世末期已经折返到地壳层位^[29,33], 早白垩世年龄

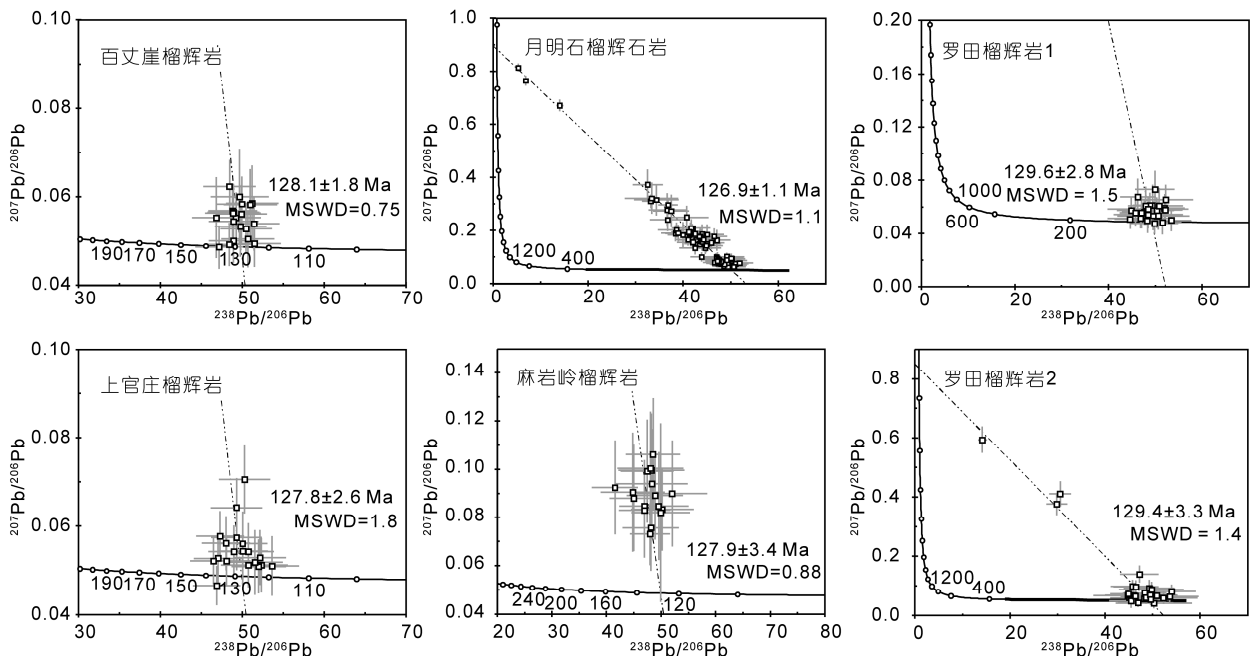


图3 北大别榴辉岩和石榴辉石岩中金红石离子探针 U-Pb 定年结果

记录的是碰撞后地质事件^[31]。北大别混合岩化发生在128~145 Ma, 部分熔融温度为700~800℃^[30,33], 在这样高的温度下包裹在榴辉岩中的金红石U-Pb体系受到影响是必然的。北大别榴辉岩不同样品中金红石颗粒大小不一, 差别可达几个数量级(几十微米到厘米级), 大颗粒金红石并不存在U-Pb年龄梯度, 大小颗粒均记录了一致的U-Pb年龄。这些特点说明, 这些榴辉岩在早白垩世受到加热后没有引起锆石U-Pb时钟的重新启动, 但是引起了金红石U-Pb时钟的重新启动。在北大别榴辉岩受到高温加热后又经历了一个快速冷却过程, 使金红石U-Pb体系完全开放然后快速冷却到500℃以下或更低, 结果金红石U-Pb体系得以近同时封闭。北大别片麻岩在早白垩世时期受到了岩浆和构造作用的改造^[34~36], 镁铁质和长英质岩浆岩的侵位年龄主要集中在125~130 Ma^[31], 这些与碰撞造山带构造垮塌和拆沉去根作用有关,

因此早白垩世加热事件可能对应于造山带加厚下地壳的部分熔融。

4 结论

金红石是高压-超高压变质岩石中标志性变质矿物之一。通过对相应元素变化特征和年代学的研究, 可以反演包含金红石的主岩所经历的地质过程。作为高压-超高压岩石演化历史的记录者之一, 金红石的U-Pb定年可以分辨出其他方法没有记录的超高压岩石的演化阶段。通过研发金红石微区U-Pb定年工作标准样品, 进而建立了离子探针微区金红石U-Pb定年方法, 为我们认识大陆深俯冲造山过程提供了一个新的研究方法。在我国西南天山和北大别-苏鲁造山带高压-超高压榴辉岩演化研究中, 金红石U-Pb定年为大陆碰撞造山带的形成和演化提供了制约。

参考文献

- Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. *Chem Geol*, 2012, 328: 5-48
- Mezger K, Hanson G N, Bohlen S R. High-precision U-Pb ages of metamorphic rutiles: Application to the cooling history of high-grade terranes. *Earth Planet Sci Lett*, 1989, 96: 106-118
- Li Q L, Li S G, Zheng Y F, et al. A high precision U-Pb age of metamorphic rutile in coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in central China: A new constraint on the cooling history. *Chem Geol*, 2003, 200: 255-265
- Li Q L, Lin W, Su W, et al. SIMS U-Pb rutile age of low-temperature eclogites from Southwestern Chinese Tianshan, NW China. *Lithos*, 2011, 122: 76-86
- 陈振宇, 李秋立. 大别山金河桥榴辉岩中金红石 Zr 温度计及其意义. *科学通报*, 2007, 52: 2638-2645
- Meinhold G. Rutile and its applications in earth sciences. *Earth-Sci Rev*, 2010, 102: 1-28
- Zheng Y F, Gao X Y, Chen R X, et al. Zr-in-rutile thermometry of eclogite in the Dabie orogen: Constraints on rutile growth during continental subduction-zone metamorphism. *J Asian Earth Sci*, 2011, 40: 427-451
- Zack T, Stockli D F, Luvizotto G L, et al. *In-situ* U/Pb rutile dating by LA-ICP-MS: ²⁰⁸Pb correction and prospects for thermochronological applications. *Contrib Mineral Petrol*, 2011, 162: 515-530
- Cherniak D J. Pb diffusion in rutile. *Contrib Mineral Petrol*, 2000, 139: 198-207
- Vry J K, Baker J A. LA-MC-ICP MS Pb-Pb dating of rutile from slowly cooled granulites: Confirmation of the high closure temperature for Pb diffusion in rutile. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70: 1807-1820
- Kooijman E, Mezger K, Berndt J. Constraints on the U-Pb systematics of metamorphic rutile from *in situ* LA-ICP-MS analysis. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 293: 321-330
- Clark D J, Hensen B J, Kinny P D. Geochronological constraints for a two-stage history of the Albany-Fraser Orogen, Western Australia. *Precambrian Res*, 2000, 102: 155-183
- Li Q L, Li X H, Liu Y, et al. Precise U-Pb and Th-Pb age determination of kimberlitic perovskites by secondary ion mass spectrometry. *Chem Geol*, 2010, 269: 396-405
- Li Q L, Li X H, Liu Y, et al. Precise U-Pb and Pb-Pb dating of Phanerozoic baddeleyite by SIMS with oxygen flooding technique. *J Anal At Spectrom*, 2010, 25: 1107-1113
- Li Q L, Li X H, Wu F Y, et al. *In-situ* SIMS U-Pb dating of phanerozoic apatite with low U and high common Pb. *Gondwana Res*, 2012, 21: 745-756
- Li Q L, Li X H, Lan Z W, et al. Monazite and xenotime U-Th-Pb geochronology by ion microprobe: Dating highly fractionated granites at Xihuashan tungsten mine, SE China. *Contrib Mineral Petrol*, 2013, doi: 10.1007/s00410-013-0865-6

- 17 Lü Z, Zhang L F, Du J X, et al. Coesite inclusions in garnet from eclogitic rocks in western Tianshan, northwest China: Convincing proof of UHP metamorphism. *Am Miner*, 2008, 93: 1845–1850
- 18 Lü Z, Zhang L, Du J, et al. Petrology of coesite-bearing eclogite from Habutengsu Valley, western Tianshan, NW China and its tectonometamorphic implication. *J Metamorph Geol*, 2009, 27: 773–787
- 19 Gao J, Klemd R. Formation of HP-LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: Geochemical and age constraints. *Lithos*, 2003, 66: 1–22
- 20 Lin W, Enami M. Prograde *P-T* trajectory of jadeite-bearing eclogite and associated HP/LT rocks from Western Tianshan, NW China. *Island Arc*, 2006, 15: 483–502
- 21 Lin W, Faure M, Shi Y H, et al. Paleozoic tectonics of the south-western Chinese Tianshan: New insights from a structural study of the high-pressure/low-temperature metamorphic belt. *Int J Earth Sci*, 2009, 98: 1259–1274
- 22 Zhang L F, Song S G, Ai Y L, et al. Relict coesite exsolution in omphacite from western Tianshan eclogites, China. *Am Miner*, 2005, 89: 180–186
- 23 Zhang L F, Ai Y L, Li X P, et al. Triassic collision of western Tianshan orogenic belt, China: Evidence from SHRIMP U-Pb dating of zircon from HP/UHP eclogitic rocks. *Lithos*, 2007, 96: 266–280
- 24 Su W, Gao J, Klemd R, et al. U-Pb zircon geochronology of Tianshan eclogites in NW China: Implication for the collision between the Yili and Tarim blocks of the southwestern Altai. *Eur J Mineral*, 2010, 22: 473–478
- 25 Luvizotto G L, Zack T, Meyer M P, et al. Rutile crystals as potential trace element and isotope mineral standards for microanalysis. *Chem Geol*, 2009, 261: 346–369
- 26 Liu Y C, Li S G, Gu X F, et al. Ultrahigh pressure eclogite transformed from mafic granulite in the Dabie orogen, east-central China. *J Metamorph Geol*, 2007, 25: 975–989
- 27 Liu Y C, Gu X F, Li S G, et al. Multistage metamorphic events in granulitized eclogites from the North Dabie complex zone, central China: Evidence from zircon U-Pb age, trace element and mineral inclusion. *Lithos*, 2011, 122: 107–121
- 28 Li S G, Xiao Y L, Liu D L, et al. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. *Chem Geol*, 1993, 109: 89–111
- 29 Li S G, Jagoutz E, Chen Y Z, et al. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, Central China. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 1077–1093
- 30 Wu Y B, Zheng Y F, Zhang S B, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions of migmatite from the North Dabie terrane in China: Constraints on partial melting. *J Metamorph Geol*, 2007, 25: 991–1009
- 31 赵子福, 郑永飞. 俯冲大陆岩石圈重熔: 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩成因. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39: 888–909
- 32 Wang S J, Li S G, Chen L J, et al. Geochronology and geochemistry of leucosomes in the North Dabie Terrane, East China: Implication for post-UHPM crustal melting during exhumation. *Contrib Mineral Petrol*, 2013, 165: 1009–1029
- 33 郑永飞. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别-苏鲁造山带为例. *科学通报*, 2008, 53: 2129–2152
- 34 Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 161: 215–230
- 35 Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, et al. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault. *J Geophys Res*, 2000, 105: 303–338
- 36 林伟, 冀文斌, 石永红, 等. 高压-超高压变质岩石多期构造折返: 桐柏-红安-大别造山带为例. *科学通报*, 2013, 58: 2259–2265