

大别地体新店超高压榴辉岩锆石 Lu-Hf 同位素研究

陈道公^{①*} 倪 涛^{①②} 谢烈文^③

(① 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 合肥 230026; ② 西北核技术研究所, 西安 710024; ③ 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化国家重点实验室, 北京 100029)

摘要 对大别山南部新店超高压变质榴辉岩中变质锆石进行了原位 LA-MC-ICP-MS 的 Lu-Hf 同位素分析, 发现变质增生锆石有低 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (0.000004~0.000211)和高 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (0.282544~0.282612)同位素组成, 原岩继承锆石和重结晶变质锆石具有高 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (0.000090~0.002144)和低 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (0.282266~0.282466)组成. 增生锆石的低 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 缘自变质作用锆石中 Lu 降低和 Hf 增高, 增生锆石的高 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 继承自岩石中其他高 Lu/Hf 比矿物演化所生成的高放射成因 Hf. 原岩锆石变质重结晶作用不会引起锆石 Lu-Hf 同位素明显再造, 锆石 Lu-Hf 体系比 U-Pb 体系有更好的稳定性. 增生锆石形成时的 Hf 同位素组成能代表同时代的变质全岩体系的 Hf 同位素组成. 新店榴辉岩原岩锆石形成时的 ε_{Hf} 值为 3.0, 表明其物源主要来自弱亏损地幔, 或者亏损地幔和古老地壳物质的混合.

关键词 变质增生锆石 原岩继承锆石 Lu-Hf 同位素 榴辉岩 大别山

Zr 和 Hf 的地球化学性质相似, 锆石中通常含有 1%~2% 的 HfO_2 , 是 Hf 的最重要的寄主矿物, 也是 Hf 同位素测定的理想矿物. 锆石中的 Lu/Hf 比极低, 通常小于 0.002, 因此锆石形成后随时间积累的由放射性同位素 ^{176}Lu 衰变而形成的放射成因 ^{176}Hf 很少, 测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值可以代表其形成时的 Hf 同位素组成, 因此如果把锆石的和 Lu-Hf 同位素示踪和 U-Pb 定年相结合, 就能够对其寄主岩石的形成时代和成因提供重要信息.

国际上锆石的 Hf 同位素研究大多数着重在岩浆岩成因和壳幔演化 [1~7], 国内亦如此 [8~10], 对变质岩和变质过程中锆石的 Hf 同位素变化研究很少. 对于大别超高压变质地体, 目前已积累了大量 U-Pb 年代学资料, 但关于 Hf 同位素研究的报道极为有限 [11,12]. 人们对超高压变质岩中变质锆石的 Lu-Hf 地球化学行为知之甚少, 不很了解各种成因锆石的 Hf 同位素特

征及其可能的指示意义. 近年来, 随着分析技术的不断提高, 特别是激光多接受器等离子体质谱 (LA-MC-ICP-MS) 技术的应用, 目前已能够成功地对几十微米大小的锆石区域进行精确的 Hf 同位素分析. 有鉴于此, 在对大别地体新店超高压变质榴辉岩锆石的微区 U-Pb SIMS 原位定年、微区氧同位素分析和微区微量元素测定基础上 [13,14], 本文进行了原位 LA-MC-ICP-MS 的 Lu-Hf 同位素研究, 给出了遭受不同变质重结晶的原岩继承锆石和变质增生锆石的 Hf 同位素组成及其变化规律, 指出了这种变化的原因, 为超高压变质作用过程中岩石和锆石 Lu-Hf 体系的地球化学行为提供了新的资料和证据, 并对超高压变质原岩的成因和性质进行了 Hf 同位素示踪.

1 地质背景

大别-苏鲁地体是扬子克拉通北缘和华北克拉通南

收稿日期: 2006-06-22; 接受日期: 2006-12-04

国家自然科学基金项目(批准号: 40573008)和教育部博士点基金项目(批准号: 20040358050)资助

* E-mail: dgchen@ustc.edu.cn

缘在三叠纪碰撞时的缝合部位^[15]. 该区榴辉岩和其他岩石中发现有柯石英和金刚石等超高压矿物^[16,17], 被认为是世界上最大的高压-超高压变质地体. 根据岩石构造组合, 大别山地区从北到南可以划分为四个岩石单元^[18,19]: 分别为北淮阳复理石带、北大别变质杂岩带、南大别超高压变质带及宿松高压变质杂岩带(图 1).

新店榴辉岩位于安徽潜山县新店, 属于南大别超高压变质榴辉岩带. 榴辉岩主要呈结核状、布丁状产于大理岩中, 直径一般只有几十厘米. 大理岩断续地呈带状分布. 大理岩和其所包裹的榴辉岩一起呈透镜状分布于二云斜长片麻岩中. 新店榴辉岩是大别山最早发现金刚石等超高压矿物包裹体的地方^[16,17].

2 Hf 同位素分析方法

Hf同位素分析是在北京中国科学院地质与地球物理所的Neptune多接受电感耦合等离子体质谱和Geolas-93 激光剥离取样系统中进行的. 将进行过SIMS(CAMECA-1270)U-Pb分析的环氧树脂样品座洗净后, 置于激光进样系统, 它能产生 193 nm波长的深紫外线激光, 并将能量均匀的聚焦于样品表面. 激光束斑大小为 63 μm , 剥离深度约为 30~50 μm , 激

光频率为 6~10 Hz, 激光输出功率为 35 J/cm², 剥离 200 组数据费时约 60 s 左右, 用He和Ar为载气将剥离的样品通过混合腔进入ICPMS分析系统. ¹⁷⁶Hf的两个同量异位数 ¹⁷⁶Yb和 ¹⁷⁶Lu干扰采用如下校正值 ¹⁷⁶Yb/¹⁷²Yb=0.5886, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu=0.02655. 详细的分析流程和干扰校正方法参阅文献^[20].

样品锆石的Lu-Hf同位素分析同时, 对 91500 标准锆石进行了 25 次测定, 获得的平均 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf和 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值分别为 0.000301±0.000001 与 0.282291±0.000023. 不同研究者给出的标准锆石 91500 的Lu-Hf同位素值有所不同, 本文采用Woodhead的测定值^[21](即 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf=0.000311, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf=0.282306)对样品Lu-Hf同位素测定值进行相应的校正. 校正前后的 δ_{Hf} 值之差不超过 0.5, 不会影响对结果的讨论. 另外, 在本文的计算和讨论中, 作为全球Lu-Hf同位素参考体系的数值分别为: (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{CHUR}=0.0332, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{CHUR}=0.282772; (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM}=0.0384, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM}=0.28325^[22,23], 其中CHUR和DM分别代表球粒陨石地幔和亏损地幔, ¹⁷⁶Lu的衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ ^[24].

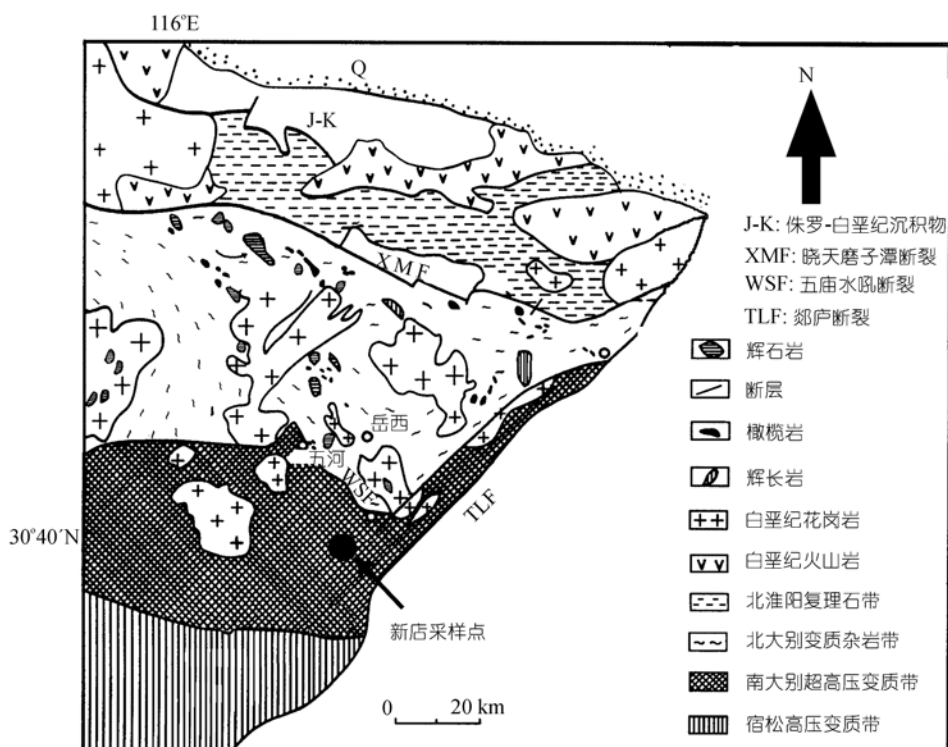


图 1 大别山超高压变质地体地质简图

3 锆石的 CL 结构和年龄

进行 Lu-Hf 同位素研究的新店榴辉岩锆石与之前进行 U-Pb 同位素分析的样品为同一组, 是从两个 30~40 cm 大小、编号为 01XD 和 CXD1 的榴辉岩团块中分选出来的。这些锆石颗粒均进行过阴极发光 (CL) 成像观察, 大部分 Lu-Hf 分析点都进行过 U-Pb SIMS 年龄测定。根据锆石的 CL 结构和获得的 U-Pb 年龄可以把新店榴辉岩锆石分为两大类: 一类是原岩岩浆锆石以及在超高压变质作用中遭受了不同程度变质重结晶原岩继承锆石, 它们多数呈不规则的浑圆状, 不同程度的保留了岩浆锆石的振荡环带结构, 有的环带粗细结构清晰可见, 有的则模糊, 环带的连续性也有所不同, 它反映了重结晶作用程度的不同。各分析点测定的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄除 01XD-10C 样品 (分析点 1) 外变化于 466~826 Ma^[13] 之间, 它们有的是一致年龄, 有的是不一致年龄, 不一致性也各不相同。凡 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄接近 800 Ma 的点都为一致年龄, 反映了原岩锆石的特征; 而 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较低的点都为不一致年龄, 主要是重结晶继承锆石, 反映了重结晶作用导致 Pb 丢失而引起的年龄降低。所以, 原岩锆石和变质重结晶继承锆石在某种意义上可视为同一类锆石, 它们表现为过渡关系, 在没有年龄数据时两者很难严格区分。另一类为变质增生锆石, 变质增生锆石有核-边结构, 核部为原岩锆石或重结晶继承锆石, 只有边部为增生锆石, 边部一般呈现很弱的 CL 发光, 多位于柱状锆石的二顶端 (如分析点 2 和 3), 某些锆石的核部很小, 增生锆石区域为锆石主体 (如分析点 29, 30 和 38~40), 变质增生锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄均在 220~240 Ma 之间, 都为一致年龄。

对 01XD 锆石进行了 28 点 SIMS 分析^[13], 得到上、下交点年龄 (811 ± 22) 和 (221 ± 26) Ma^[13]。4 个增生锆石的平均年龄为 (217 ± 6) Ma。CXD1 样品的 8 点增生锆石的平均年龄为 (218 ± 5) Ma, 核部锆石的两个年龄为 797 和 803 Ma, 这些年龄与 01XD 锆石交点年龄一致。因此在下面的 ϵ_{Hf} 计算中, 把 810 Ma 作为原岩锆石的结晶时间, 220 Ma 作为变质增生锆石的形成时间。

01XD10C 分析点 1 和其他岩浆锆石有明显不同的特征: 它的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄异常高 (1272 Ma); 有极

高的 U 和 Th 含量, 数倍于其他点的微量元素^[13], 异常高的 Th/U 比 (3.03); CL 发光极弱, 图像异常黑 (图 2)。同时, 所获得的 Lu-Hf 同位素也明显有别于其他分析点, 有异常高的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (0.007755), $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值与其他点有近数量级的差异, 有最大的 T_{DM} 年龄 (1665 Ma) 和最小的 $(\epsilon_{\text{Hf}})_{810}$ 值 -3.9。因此, 该粒锆石不属于新店榴辉岩原岩 810 Ma 岩浆活动产物, 它可能是岩浆捕获的外来晶, 或混染的古老地壳物质。在之后的讨论中该点数据被排除。

4 结果与讨论

对 22 颗锆石进行了 43 个分析点的 Lu-Hf 同位素分析, 其中 32 点和原有 U-Pb 同位素分析点为同一位置, 11 点未进行过年龄分析。根据 U-Pb 年龄和 CL 结构 (图 2), 32 点中的 23 点为原岩锆石和遭受部分重结晶的继承变质锆石, 9 点为变质增生锆石; 11 个没有年龄的分析点全部为原岩锆石和重结晶继承锆石。

需要说明, 本文把锆石 Lu-Hf 的 ICPMS 分析和 U-Pb 的 SIMS 分析位置视为相同, 是指离子束斑大小, 由于分析深度不一, 提取的样品量有数量级之差, 前者远大于后者。本文所获得的锆石的 Lu-Hf 同位素数据、计算的模式年龄和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值等参见表 1 和图 3~7。

4.1 锆石 Lu-Hf 同位素特征

由图 3 可知, 增生锆石和岩浆锆石及重结晶继承锆石的 Lu-Hf 同位素组成明显不同。增生锆石具有高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和低的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 组成, 分别变化于 0.282544~0.282612 和 0.000004~0.000211 之间; 原岩和重结晶锆石正好相反, 具有低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和高的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 组成, 分别为 0.282266~0.282466 和 0.000090~0.002144 (01XD10C 分析点 1 除外), 它们的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 组成位于两个不同区域。增生锆石具有较小的 Lu/Hf 比和 Hf 同位素变化范围; 遭受不同程度重结晶的原岩锆石有较大的 Lu/Hf 比和 Hf 同位素组成变化。新店榴辉岩变质增生锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 同位素变化, 与双河片麻岩和黄镇榴辉岩变质增生锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 同位素相比要稳定得多^[12], 前者变质增生锆石 ($\epsilon_{\text{Hf}})_0$ 值变化仅为 2.5, 后两者的变化达 10, 它们的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 变化大致在相同的范围内。

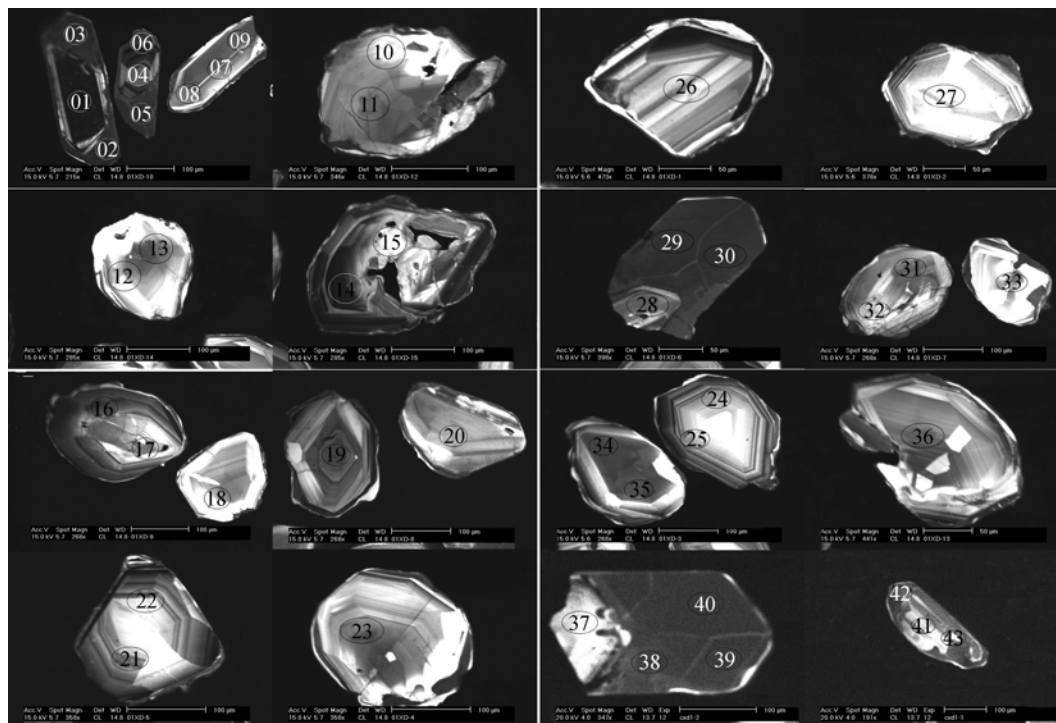


图 2 新店榴辉岩锆石 Lu-Hf 同位素分析点的锆石 CL 图像
椭圆形区域为 Lu-Hf 分析点位置, 1~36 为 01XD 样品, 37~43 为 CXD1 样品

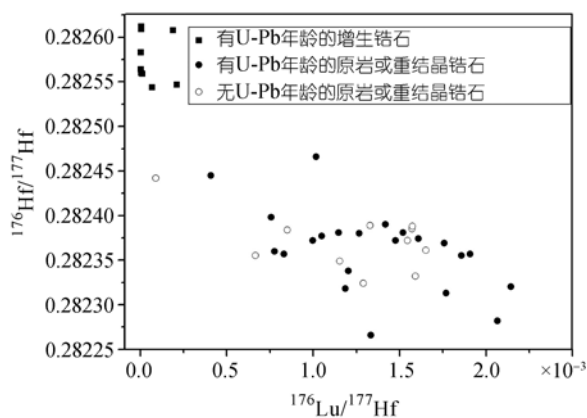


图 3 新店榴辉岩锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ - $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 关系

什么原因造成变质增生锆石和原岩及遭受部分重结晶的原岩锆石有明显不同的 Lu-Hf 同位素特征? 研究表明 [25], 无论是增生锆石还是重结晶锆石, 它们的 REE、尤其是 HREE 含量都要比原岩锆石低, 即超高压变质作用会导致锆石 HREE 含量下降。本文对新店榴辉岩锆石的 SIMS 微区 REE 分析结果也表

明, 增生锆石和重结晶锆石的 HREE 比原岩锆石低, 而且变质增生锆石比变质重结晶锆石 Lu 的下降要显著得多 [14]。用电子探针测定的大别山碧溪岭和韩长冲含柯石英超高压变质岩中锆石的 Hf 含量发现, 超高压变质作用形成的增生锆石 HfO_2 含量在 1.78~2.30 wt% (wt% 表示质量百分比, 下同) 之间, 而原岩继承锆石的 HfO_2 含量在 0.98~1.15 wt% [26], 相差近一倍。超高压变质作用中增生锆石的高 Hf 含量和锆石在高压环境下 Hf 分配系数增大有关 [27]。实验表明, 高压下每增加 10 kb, 锆石的 Zr-O 键长将减少 0.003 Å, Zr^{4+} 离子半径 (0.79 Å) 和 Hf^{4+} 离子半径 (0.78 Å) 之差大致和超高压变质压力环境相当, 这就大大增加了 Hf 替代 Zr 进入锆石晶格的可能性。相反, 由于分配系数的压力效应, 锆石中比 Zr^{4+} 离子半径大的其他离子, 如 U^{4+} (0.97 Å), Th^{4+} (1.02 Å) 在高压环境下就更难进入晶格, 这和以前所观察到的变质锆石 U, Th 及 Th/U 比的下降是一致的。因此, 榴辉岩变质增生锆石的低 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比是 Lu 降低和 Hf 增高的反相变化的共同结果。

表 1 新店榴辉岩锆石 Lu-Hf 同位素分析及有关数据^{a)}

分析 点	样品 编号	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	(ε _{Hf}) ₀	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) _{t1}	(ε _{Hf}) _{t1}	2σ	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) _{t2}	(ε _{Hf}) _{t2}	2σ	T _{DM} /Ma	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄/Ma	Th/U
岩浆和变质重结晶锆石															
1	01XD-10C	0.007755	0.282283	0.000029	-17.3	0.282252	-13.6	1.0	0.282165	-3.6	1.0	1665	869	1272	3.03
4	01XD-10B	0.001147	0.282381	0.000018	-13.8	0.282377	-9.2	0.6	0.282364	3.4	0.6	1236	814	817	0.88
7	01XD-10A	0.002067	0.282282	0.000039	-17.3	0.282274	-12.8	1.4	0.282251	-0.6	1.4	1410	716	755	1.49
8	01XD-10A	0.002144	0.282320	0.000035	-16.0	0.282311	-11.5	1.2	0.282287	0.7	1.2	1358	690	744	1.02
11	01XD-12	0.000776	0.282360	0.000019	-14.6	0.282356	-9.9	0.7	0.282348	2.9	0.7	1254	826	828	1.16
12	01XD-14	0.001608	0.282374	0.000018	-14.1	0.282367	-9.5	0.7	0.282350	2.9	0.7	1262	576	761	1.60
13	01XD-14	0.000407	0.282445	0.000016	-11.6	0.282443	-6.8	0.6	0.282438	6.1	0.6	1125	673	789	0.34
14	01XD-15	0.001050	0.282377	0.000018	-14.0	0.282372	-9.3	0.6	0.282361	3.3	0.6	1239	499	756	0.56
16	01XD-16	0.001417	0.282390	0.000017	-13.5	0.282384	-8.9	0.6	0.282368	3.6	0.6	1233	466	647	1.13
17	01XD-16	0.001476	0.282372	0.000017	-14.2	0.282365	-9.6	0.6	0.282349	2.9	0.6	1261	602	766	0.82
18	01XD-9	0.001017	0.282466	0.000021	-10.8	0.282462	-6.1	0.7	0.282451	6.5	0.7	1112	666	768	0.95
19	01XD-8	0.001758	0.282369	0.000020	-14.3	0.282361	-9.7	0.7	0.282342	2.7	0.7	1274	759	841	1.72
20	01XD-8	0.000830	0.282357	0.000019	-14.7	0.282354	-10.0	0.7	0.282344	2.7	0.7	1259	590	754	0.98
21	01XD-5	0.000997	0.282372	0.000021	-14.1	0.282368	-9.5	0.7	0.282357	3.2	0.7	1244	804	777	0.72
22	01XD-5	0.001187	0.282318	0.000017	-16.1	0.282313	-11.4	0.6	0.282300	1.2	0.6	1326	757	769	1.19
23	01XD-4	0.001769	0.282313	0.000019	-16.2	0.282305	-11.7	0.7	0.282286	0.7	0.7	1355	562	778	1.33
24	01XD-3	0.001266	0.282380	0.000020	-13.9	0.282375	-9.2	0.7	0.282361	3.3	0.7	1242	625	757	0.88
26	01XD-1	0.001908	0.282357	0.000018	-14.7	0.282349	-10.2	0.6	0.282328	2.2	0.6	1297	817	791	1.35
27	01XD-2	0.001519	0.282381	0.000019	-13.8	0.282375	-9.2	0.7	0.282358	3.2	0.7	1249	775	779	1.04
28	01XD-6	0.001334	0.282266	0.000050	-17.9	0.282260	-13.3	1.8	0.282246	-0.8	1.8	1405	490	632	0.61
34	01XD-3-1	0.001859	0.282355	0.000018	-14.7	0.282348	-10.2	0.6	0.282327	2.1	0.6	1297	758	780	0.76
37	CXD1-2	0.000756	0.282398	0.000024	-13.2	0.282395	-8.5	0.9	0.282386	4.2	0.9	1200	803	744	0.73
41	CXD1-1	0.001204	0.282338	0.000025	-15.4	0.282333	-10.7	0.9	0.282320	1.9	0.9	1299	797	747	1.34
6	01XD-10B	0.000090	0.282442	0.000030	-11.7	0.282442	-6.9	1.1	0.282441	6.2	1.1	1119			
9	01XD-10A	0.001592	0.282332	0.000017	-15.5	0.282326	-11.0	0.6	0.282308	1.5	0.6	1320			
10	01XD-12	0.001545	0.282372	0.000017	-14.2	0.282365	-9.6	0.6	0.282348	2.9	0.6	1263			
15	01XD-15	0.000851	0.282384	0.000016	-13.7	0.282381	-9.0	0.6	0.282371	3.7	0.6	1222			
25	01XD-3	0.001154	0.282349	0.000018	-15.0	0.282344	-10.3	0.6	0.282331	2.3	0.6	1282			
31	01XD-7	0.001653	0.282361	0.000016	-14.5	0.282354	-0.0	0.6	0.282336	2.4	0.6	1282			
32	01XD-7	0.001328	0.282389	0.000019	-13.5	0.282383	-8.9	0.7	0.282369	3.6	0.7	1231			
33	01XD-7	0.001291	0.282324	0.000019	-15.8	0.282319	-11.2	0.7	0.282304	1.3	0.7	1322			
35	01XD-3-1	0.001571	0.282385	0.000016	-13.7	0.282378	-9.1	0.6	0.282361	3.3	0.6	1245			
36	01XD-13	0.001574	0.282388	0.000020	-13.6	0.282381	-9.0	0.7	0.282364	3.4	0.7	1241			
43	CXD1-1	0.000666	0.282355	0.000028	-14.7	0.282353	-10.0	1.0	0.282345	2.8	1.0	1256			
增生锆石															
2	01XD-10C	0.000067	0.282544	0.000013	-8.1	0.282544	-3.3	0.4	0.282543	9.8	0.4	978	289		0.12
3	01XD-10C	0.000012	0.282559	0.000012	-7.5	0.282559	-2.7	0.4	0.282559	10.3	0.4	956	212		0.04
5	01XD-10B	0.000004	0.282560	0.000015	-7.5	0.282560	-2.7	0.5	0.282560	10.4	0.5	955	235		0.04
29	01XD-6	0.000004	0.282609	0.000010	-5.8	0.282609	-0.9	0.4	0.282609	12.1	0.4	888	244		0.04
30	01XD-6	0.000004	0.282612	0.000013	-5.6	0.282612	-0.8	0.4	0.282612	12.2	0.4	883	246		0.04
38	CXD1-2	0.000211	0.282547	0.000019	-7.9	0.282546	-3.2	0.7	0.282544	9.8	0.7	978	269		0.19
39	CXD1-2	0.000002	0.282583	0.000019	-6.7	0.282583	-1.9	0.7	0.282583	11.2	0.7	923	206		0.04
40	CXD1-2	0.000002	0.282564	0.000016	-7.3	0.282564	-2.5	0.6	0.282564	10.5	0.6	949	230		0.04
42	CXD1-1	0.000189	0.282608	0.000039	-5.8	0.282607	-1.0	1.4	0.282605	12.0	1.4	894	226		0.03

a) 表中 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄、²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄和 Th/U 比引自文献 [13]

变质增生锆石的高 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 特性不可能来自原岩锆石(低 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)的原地溶解再结晶, 否则, 增生锆石应该具有和原岩锆石相同的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$, 或者有更低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$, 因为它比原岩锆石有更低的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$. 增生锆石的高 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 特性只能继承自其他高 Lu/Hf 矿物(如石榴石, 磷钇矿等)的 Hf , 只有那些高 Lu/Hf 比的矿物, 经历时间演化, 才能产生高放射成因的 ^{176}Hf . 当这类矿物在超高压变质作用中发生分解或重结晶时, 释放出的 Hf 通过流体传输作为变质增生锆石 Hf 的来源, 才可使增生锆石有高 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 特性. 此外, 在同一颗粒锆石内增生边和继承核的 Hf 同位素组成 ϵ_{Hf} 值之差对继承核的 ϵ_{Hf} 值两者之间有负相关性(图 4), 也表明增生锆石和岩浆继承锆石之间无继承性. 这种反相关性可解释为由于增生边的 Hf 同位素组成比较均一, 它和增生作用发生在何处无关, 当增生作用发生在较高 ϵ_{Hf} 值的核部时, 它们的边-核差值就小, 反之, 当增生作用发生在较低 ϵ_{Hf} 值的核部时, 它们的差就大, 最大 ϵ_{Hf} 差值为 12.5. 这也表明同一颗粒内增生边和继

承核之间不存在由扩散作用引起的 Hf 同位素组成的继承关系.

在原岩锆石和重结晶继承锆石区域内, 未能观察到 $\text{Lu}-\text{Hf}$ 同位素之间存在某种明显的变化规律. 锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄和 Th/U 比值随着重结晶作用程度的增加而下降, 这一现象在新店榴辉岩、双河榴辉岩变质锆石的微区 $\text{U}-\text{Pb}$ 年代学 [13,28] 和阿尔卑斯超高压带变质岩 $\text{U}-\text{Pb}$ 年代学 [29-32] 的研究中被证实, 因此锆石的重结晶作用程度可用 $\text{U}-\text{Pb}$ 年龄的不一致性 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄与 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄比)来表示. 由图 5 可知, 遭受不同重结晶的原岩锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 组成和 $\text{U}-\text{Pb}$ 年龄不一致性之间无相关性, 说明重结晶作用对锆石的 $\text{Lu}-\text{Hf}$ 同位素组成影响不大, 重结晶锆石基本上保留了原岩锆石的 $\text{Lu}-\text{Hf}$ 同位素特征. 这表明, 锆石的 $\text{Lu}-\text{Hf}$ 是比 $\text{U}-\text{Pb}$ 更为稳定的示踪体系, 锆石的 $\text{Lu}-\text{Hf}$ 计时比 $\text{U}-\text{Pb}$ 计时具有更高的封闭温度, 在阿尔卑斯榴辉岩及 Franciscan 杂岩的 $\text{Lu}-\text{Hf}$ 定年 [33,34] 中所获得的 $\text{Lu}-\text{Hf}$ 年龄比 $\text{U}-\text{Pb}$ 和 $\text{Sm}-\text{Nd}$ 年龄要稳定得多, 精度也高.

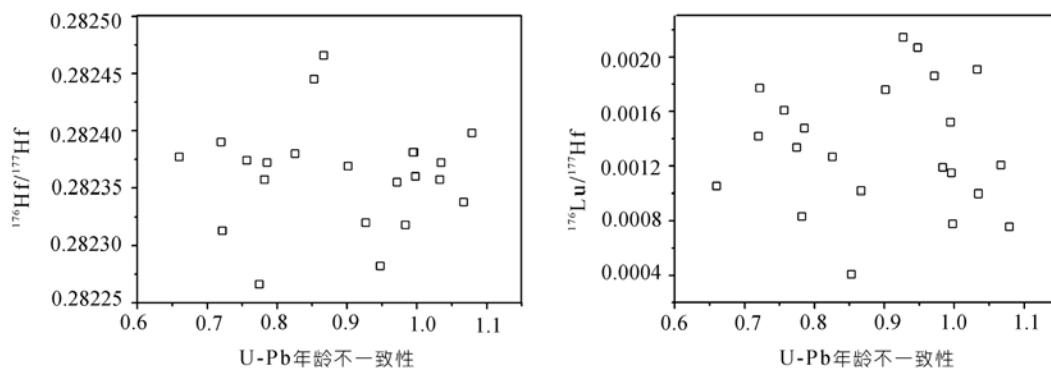


图 4 原岩继承锆石 $\text{Lu}-\text{Hf}$ 同位素特征和 $\text{U}-\text{Pb}$ 年龄不一致性关系

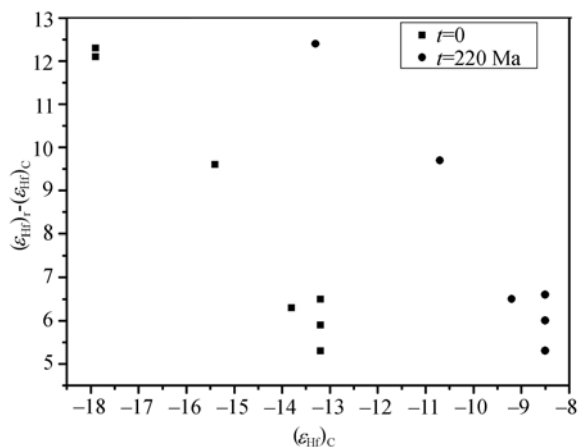


图 5 同颗粒锆石边、核之间 Hf 同位素组成关系

4.2 Hf 同位素原岩性质示踪

锆石形成时的 ϵ_{Hf} 值代表了其物源区的 Hf 同位素性质. 如果是岩浆锆石, 代表了形成锆石的岩浆 Hf 同位素组成; 如果是变质增生锆石, 则代表了形成锆石时变质流体所具有的 Hf 同位素组成. 根据前面所述变质增生锆石有较均一的 Hf 同位素组成, 假定增生锆石在形成时的 Hf 同位素组成代表了遭受超高压变质作用的全岩体系在 220 Ma(t_1)时的平均 Hf 同位素组成, 它经由流体输运供给增生锆石, 那么根据岩浆锆石在 810 Ma(t_2)和增生锆石在 220 Ma(t_1)时的 Hf 同位素组成, 由下述两个公式:

$$({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{全岩,测}} = ({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{t1} + ({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{全岩,测}} \times (e^{\lambda t1} - 1),$$

$$({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{全岩,测}} = ({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{t2} + ({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{全岩,测}} \times (e^{\lambda t2} - 1),$$

可以推算出全岩体系现今的平均 ${}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf}$ 组成. 计算得到全岩平均 ${}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf}$ 为 0.0213, $f_{\text{Lu/Hf}}$ 为 -0.36. 这与目前提出的镁铁质下地壳的 ${}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf}$ (0.022) 和 $f_{\text{Lu/Hf}}$ (-0.34) 平均值非常接近 [2,3], 在一定程度上反映了上述假定的有效性. 变质增生锆石形成时 Hf 同位素组成可以代表同时代变质全岩的 Hf 同位素组成的推测是否具有普遍意义尚有待更多实例验证.

图 6 显示新店榴辉岩原岩锆石在形成时(约 810 Ma)的 ε_{Hf} 值从 -0.6 变化至 6.1, 除个别点外, 30 个以上分析点都集中在 0~4 之间, 权重平均值为 3.0 ± 0.5 . 图 7 显示它们的亏损地幔模式年龄权重平均为 (1257 ± 20) Ma, 图中有一个很高的 T_{DM} 和很低的 ε_{Hf} 值是 01XD10C 异常点. 增生锆石在形成时(约 220 Ma)的 ε_{Hf} 值从 -3.3 变化至 -0.8, 加权平均值为 -2.0 ± 0.8 , 同一时间原岩锆石的 ε_{Hf} 值从 -13.6~-6.1, 加权平均值为 -9.7 ± 0.5 , 两者显著不同.

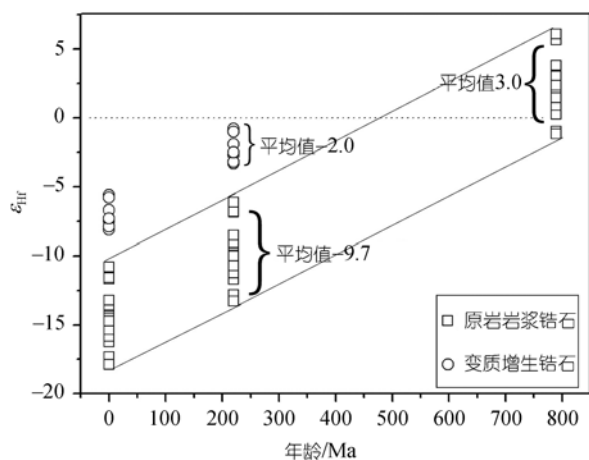


图 6 新店榴辉岩原岩继承锆石和增生锆石的 ε_{Hf} 值随时间演化关系

原岩岩浆锆石的模式年龄 T_{DM} 代表成岩物质脱离亏损地幔进入地壳的时间. 正的 ε_{Hf} 值表明形成新店榴辉岩的原岩物质直接来自于亏损或弱亏损地幔, 它们应是幔源成因的辉长质或玄武质岩石. 锆石 U-Pb 上交点年龄 810 Ma 代表变质原岩岩浆的结晶年龄, 因此锆石的 Hf 同位素模式年龄应该高于或大致和结晶年龄相当. 亏损地幔在 810 Ma 时的理论 ε_{Hf} 值

为 14, 新店榴辉岩原岩锆石的平均 $(\varepsilon_{\text{Hf}})_{810}$ 值为 3.0, 和球粒陨石地幔接近, 两者差表明其原岩成岩过程可能是复杂的, 经简单推测有两种可能: 一是原岩物质分离作用前, 亏损地幔在某时刻已遭受了一定程度的地幔富集作用, 它源自一个弱亏损地幔; 二是原岩物质从亏损地幔分离时遭受了古老地壳物质的混染, 使其 ε_{Hf} 值降低.

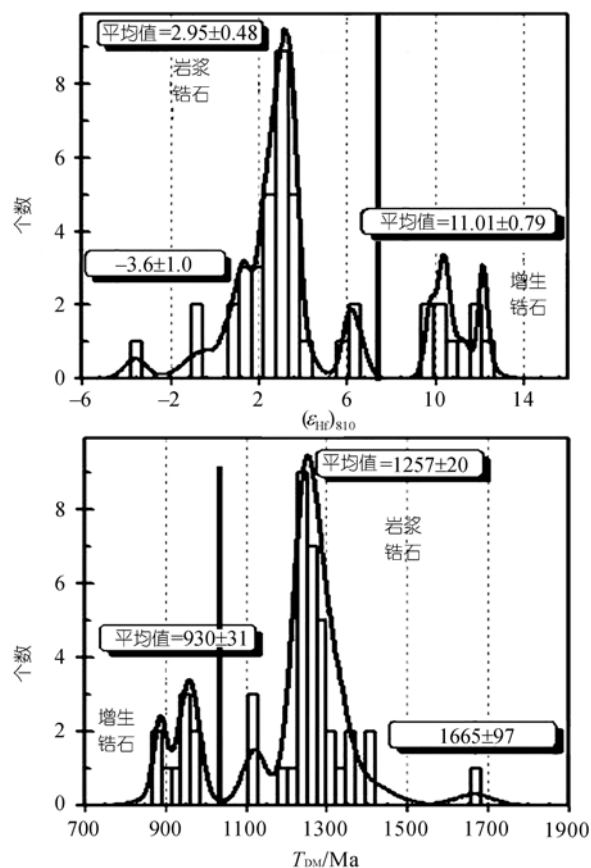


图 7 新店榴辉岩锆石的 $(\varepsilon_{\text{Hf}})_0$, T_{DM} 直方图
黑粗线为继承岩浆锆石和变质增生锆石的界线

所得新店榴辉岩原岩锆石形成时(810 Ma)的平均 ε_{Hf} 值 3.0 ± 0.5 , 和文献 [11] 中黄镇榴辉岩原岩锆石形成时(1800 Ma)的平均 ε_{Hf} 值 -4.3 ± 0.5 对比, 表明南大别地区遭受高压和超高压变质作用的榴辉岩原岩的物源是多成因、多时代的.

由于锆石有最低的 Lu/Hf 比值, 因而由它所给出的 Hf 模式年龄, 无论在何种情况下, 相对于全岩示踪体系, 其年龄是偏低的, 因此, 原岩继承锆石 Hf 模式年龄代表了最低的亏损地幔析出年龄或最年轻的地壳居留年龄.

5 结论

(1) 新店榴辉岩变质增生锆石和原岩继承锆石及部分重结晶锆石 Lu-Hf 同位素组成明显有差别, 增生锆石有高 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和低 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 组成, 原岩继承锆石和重结晶锆石具有低 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和高 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 组成, 增生锆石的低 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比是 Lu 降低和 Hf 增高的共同结果, 增生锆石的高 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 特性继承自高 Lu/Hf 矿物长期演化生成的高放射成因 Hf.

(2) 在超高压变质作用中, 锆石 Lu-Hf 体系比 U-Pb 体系有更高的封闭温度, 原岩锆石一定程度的变质重结晶作用不会引起显著的 Lu-Hf 同位素再造, 增生锆石形成时的 Hf 同位素组成有可能代表和变质作用同时间的全岩体系 Hf 同位素组成.

(3) 新店榴辉岩原岩锆石形成时的初始 ε_{Hf} 平均值为 3.0 ± 0.5 , 表明其物源主要来自亏损地幔, 并有一定古老地壳物质的混合.

致谢 野外工作期间得到安徽国土资源局地质矿产调查院周春亭教授级高级工程师帮助, Lu-Hf 同位素分析得到中国科学院地质与地球物理研究所杨岳衡博士帮助, 特致谢忱.

参 考 文 献

- Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. *Nature*, 1999, 399: 252—255[DOI]
- Amelin Y, Lee D C, Halliday A N. Early-middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 4205—4225[DOI]
- Bodet F, Scharer U. Evolution of the SE-Asian continent from U-Pb and Hf isotopes in single grains of zircon and baddeleyite from large rivers. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 2067—2091[DOI]
- Patchett P J, Kouvo O, Hedge C E, et al. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: evidence from Hf isotopes. *Contrib Mineral Petrol*, 1981, 78: 279—297[DOI]
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 133—147[DOI]
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma genesis, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pintan igneous Complex. *Lithos*, 2002, 61: 237—269[DOI]
- Anderson T, Griffin W L, Pearson N J. Crustal evolution in the SW part of the Baltic Shield: the Hf isotope evidence. *J Petrol*, 2002, 43: 1725—1747[DOI]
- 汪相, Griffin W L, 志成, 等. 湖南丫江桥花岗岩中锆石的 Hf 同位素地球化学. *科学通报*, 2003, 48(4): 379—382
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. 3.6 Ga lower crust in central China: New evidence on the assembly of North China craton. *Geology*, 2004, 32(3): 229—232[DOI]
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Widespread Archean basement beneath the Yangtze craton. *Geology*, 2004, 32(6): 417—420
- Zheng Y F, Wu Y B, Zhao Z F, et al. Metamorphic effect on zircon Lu-Hf and U-Pb isotope systems in ultrahigh-pressure eclogite-facies metagranite and metabasite. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 240: 378—400[DOI]
- Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in Dabie orogen. *Chem Geol*, 2006, 231: 135—158[DOI]
- 陈道公, Deloule E, 倪涛. 大别地体新店榴辉岩变质锆石 U-Pb 年龄和氧同位素研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(8): 691—699
- 倪涛, 陈道公, 靳平. 大别山变质岩锆石微区稀土元素和 Th, U 特征. *高校地质学报*, 2006, 12(2): 249—258
- Liou J G, Zhang R Y, Wang X, et al. Metamorphism and tectonics of high-pressure and ultrahigh-pressure belts in the Dabie-Sulu region, China. In: Yin A, Harrison M, eds. *The Tectonic Evolution of Asia*. New York: Cambridge University Press, 1996. 330—344
- Xu S, Okay A I, Ji S, et al. Diamond from Dabie Shan metamorphic rocks and its implications for tectonic setting. *Science*, 1992, 256: 80—92[DOI]
- Okay A I. Petrology of a diamond and coesite-bearing metamorphic terrane, Dabie Shan, China. *Eur J Mineral*, 1993, 5: 659—676
- Carswell D A, Wilson R N, Zhai M. Metamorphic evolution, mineral chemistry and thermobarometry of schists and orthogneisses hosting ultra-high pressure eclogites in the Dabie Shan of central China. *Lithos*, 2000, 52: 121—155[DOI]
- Cong B L, Zhai M G, Carswell D A, et al. Petrogenesis of ultrahigh-pressure rocks and their country rocks at Shuanghe in Dabie Shan, Central China. *Eur J Mineral*, 1995, 7: 119—138
- 徐平, 吴福元, 谢烈文, 等. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素. *科学通报*, 2004, 49(14): 1403—1410
- Woodhead J, Hergt J, Shelley M, et al. Zircon Hf-isotope analysis with an excimer laser, depth profiling, ablation of complex geometries, and concomitant age estimation. *Chem Geol*, 2004, 209: 121—135[DOI]
- Blichert-Toft J, Albarede F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 148: 243—258[DOI]
- Nowell G M, Kempton P D, Noble S R, et al. High precision Hf isotope measurements of MORB and OIB by thermal ionisation mass spectrometry: insights into the depleted mantle. *Chem Geol*, 1998, 149: 211—233[DOI]
- Scherer E, Munker C, Mezger K. Calibration of the lutetium-hafnium clock. *Science*, 2001, 293: 683—687[DOI]

- 25 Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *J Metamorph Geol*, 2000, 18: 423—439[DOI]
- 26 Wang X, Griffin W L. Unusual Hf contents in metamorphic zircon from coesite-bearing eclogites of the Dabie Mountains, east-central China: implications for the dating of ultrahigh-pressure metamorphism. *J Metamorph Geol*, 2004, 22: 629—637[DOI]
- 27 Hazen R M, Finger L W. Crystal structure and compressibility of zircon at high pressure. *Am Miner*, 1979, 64: 196—201
- 28 陈道公, Deloule E, 夏群科, 等. 大别山双河超高压榴辉岩中变质锆石: 离子探针和微区结构研究. *岩石学报*, 2002, 18(3): 369—377
- 29 Rubatto D, Gebauer G, Compagnoni R. Dating of eclogite-facies zircons: the age of Alpine metamorphism in the Sesia-Lanzo Zone (Western Alps). *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 167: 141—158[DOI]
- 30 Gebauer D. A P-T-t Path for an (Ultra?) high-Pressure ultramafic/mafic rock-association and its felsic country-rocks based on SHRIMP-dating of magmatic and metamorphic zircon domains. Example: Alps Arami (Central Swiss Alps). In: Basu A, Hart S, eds. *Earth Processes: Reading the Isotopic Code*. Geophysical Monograph, 95. Washington D C: American Geophysical Union, 1996. 307—329
- 31 Vavra G, Gebauer D, Schmid R, et al. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): an ion microprobe (SHRIMP) study. *Contrib Mineral Petrol*, 1996, 122: 337—358[DOI]
- 32 Vavra G, Schmid R, Gebauer D. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibole to granulite facies zircons: geochronology of the Ivrea zone (Southern Alps). *Contrib Mineral Petrol*, 1999, 134: 380—404[DOI]
- 33 Duchene 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[DOI]
- 34 Anczkiewicz R, Platt J P, Thirlwall M F, et al. Franciscan subduction off to a slow start: evidence from high-precision Lu-Hf garnet ages on high grade-blocks. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 225: 147—161[DOI]