

青龙山榴辉岩高压变质新生锆石 SHRIMP U-Pb 定年、微量元素及矿物包裹体研究

李秋立 李曙光* 侯振辉 洪吉安 杨蔚

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026; 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029.

* 联系人, E-mail: lsg@ustc.edu.cn)

摘要 对青龙山一榴辉岩的锆石成因及年龄进行了综合研究, 阴极发光(CL)显微图像显示该锆石无继承锆石核, 其矿物包裹体成分及微量元素特征表明它是高压变质新生锆石, 并获得该锆石的高精度离子探针(SHRIMP)平均 U-Pb 年龄为 227.4 ± 3.5 Ma. 该年龄给出了青龙山榴辉岩峰期变质时代的最佳估计.

关键词 SHRIMP U-Pb 定年 微量元素 包裹体 峰期变质时代

对高级变质岩中的变质锆石进行U-Pb定年以获得变质年龄是人们常用的方法. 早期人们通过变质成因锆石浑圆的外形及阴极发光图像缺少岩浆锆石韵律环带特征来识别变质锆石^[1-6], 后来人们又进一步发现低Th/U比也是变质锆石的主要特征^[7-9], 然而对符合上述特征的变质锆石进行定年却给出了较大的年龄范围, 如大别-苏鲁超高压带, 变质锆石U-Pb年龄的范围可达 205~245 Ma^[6,8,10-17]. 以后人们逐渐认识到, 变质锆石可以有多种成因^[18-26]. 大别-苏鲁超高压带内锆石微区包体矿物性质及相应阴极发光图像研究表明, 单颗锆石有可能具有多圈层的生长带, 自核心向边缘一般为: 原岩岩浆锆石核; 变质重结晶锆石; 超高压变质增生锆石; 退变质增生锆石^[27-29]. 值得注意的是, 单凭CL图像很难确切区分高压变质新生锆石和变质重结晶锆石区域, 因为它们都不具有岩浆锆石特有的韵律环带结构, 又大都处在岩浆锆石核外围, 并被最外层退变质锆石边所包裹^[26,30,31]. 因而, 在不能很好区分上述不同成因变质锆石的情况下, 所获得的变质锆石U-Pb年龄仍然是一种混合年龄, 不具确切地质意义.

要获得确切的超高压峰期变质时代, 应选取超高压变质时期的新生锆石进行测定. 但这一方法的重要前提条件是我们能正确的区分, 判断不同锆石微区的成因, 以及该微区必须具有足够的宽度. 锆石所含矿物包裹体的种类大多可以帮助判别含包体微区的生长条件, 近年来许多作者根据锆石包裹体矿物的性质区分锆石不同成因区域并进行SHRIMP分析^[13,15-17,30,32,33]. 通过矿物包体的种类可以识别出超

高压岩石中的锆石一般具有原岩残留锆石、高压增生锆石、退变质时期增生锆石. 值得注意的是在某些具有韵律环带特征的继承岩浆锆石核中也发现有柯石英包体^[29], 虽然这种柯石英包体是否是沿裂纹挤进去的还是由其他机制形成的尚不清楚, 但说明仅凭CL图像和包裹矿物成分还不足以确切地判定超高压变质成因锆石. 此外, 考虑到CL图像不能很好区分变质重结晶锆石和高压变质新生锆石, 这样如果不能提供其他方面的判据(如微量元素), 就有可能带来所测区域为继承锆石或重结晶锆石的危险. 因为变质新生锆石与变质重结晶锆石不一样, 尤其若重结晶锆石未能将原蜕晶化锆石所含放射成因Pb排除干净的话, 会给出偏高的年龄值^[18]. 一些学者通过锆石微区微量元素的特征来研究所测微区的成因属性, 取得了较大的成功^[14,26,30,33-35]. 例如, Hermann等人^[30]对北哈萨克斯坦超高压岩石中锆石的研究发现, 具有类似CL特征的区域可能具有不同的成因, 其稀土元素特征明显不同. Hoskin等人^[26]研究了锆石固态变质重结晶域的微量元素特征, 指出变质过程对锆石的稀土元素影响不明显. Rubatto^[34]将锆石的稀土元素特征与其生长条件对应起来. 显然, 如果结合以上两种判别方法, 确切区分所测锆石区域的成因属性, 则可给出有明确地质含义的锆石年龄. Sun等人^[33]综合应用锆石包体矿物成分及锆石微量元素的判据, 对大别山沂湾剪切带古生代洋壳俯冲成因榴辉岩的锆石成因进行了研究, 并获得了很好的结果. 最近刘敦一等人^[17]对双河硬玉石英岩中锆石进行了类似研究, 提出了对超高压岩石峰期变质时代为

243±1Ma的新观点. 然而对于原岩为沉积岩的硬玉石英岩, 与榴辉岩相比, 在相同的温压地质条件下, 其所发生的变质反应不同, 因而其锆石增生历史应该有一定的差别.

本工作在青龙山一榴辉岩中找到了不含岩浆锆石核的纯变质锆石样品. 通过综合应用阴极发光显微图像分析、矿物包裹体研究及微量元素测定, 论证了所测锆石为高压变质阶段新生成锆石, 其 SHRIMP U-Pb 定年结果的平均值应该是榴辉岩峰期变质阶段时代的最佳估计.

1 地质背景及样品

苏鲁高压-超高压变质带是大别山地体被郟庐断裂平移的东延部分, 江苏东海县青龙山位于苏鲁超高压带的西南部(图 1). 青龙山榴辉岩因多硅白云母过剩的发现^[37]和极低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的发现^[38,39]而闻名. 其地质概况可参见相关文献^[36-41]. Li等人^[37]对青龙山榴辉岩进行了高压矿物Sm-Nd同位素定年及多硅白云母Rb-Sr分析, 分别给出 226.3±4.5 Ma(Sm-Nd)和 219±0.5 Ma(Rb-Sr)年龄. 刘福来等人^[15]测定了东海地区片麻岩中含柯石英包体的变质锆石幔部平均年龄为 229±4 Ma, 含石英等低压矿物包体的变质锆石退变边平均年龄为 211±4 Ma, 其中含柯石英锆石微区年龄值与南大别超高压变质岩的定年结果一致^[42-44]. 青龙山超高压变质带温压条件估计为 700~890 MPa, 压力>2.8 GPa^[41]. 本文样品(02QL-2)为青龙山含柯石英榴辉岩, 样品片理化发育, 主要矿物组合为石榴石+绿辉石+多硅白云母+金红石+蓝晶石+石英.

2 分析方法

在天津地质矿产研究所从大约 20 kg 的榴辉岩中经常规分选程序分离出锆石. 锆石的U-Th-Pb分析在北京离子探针中心的SHRIMP 型离子探针仪器上完成, 标准测定流程见文献^[45]. 将锆石颗粒与标样(RSES)一起置于环氧树脂样品座中, 然后磨至一半大小, 使锆石内部暴露, 用于进行透射光、反射光及阴极发光(CL)显微图像分析, 选择没有裂隙及包裹体的颗粒或视域进行SHRIMP分析. 应用RSES参考锆石 TEM (417 Ma)进行元素间的分馏校正. 应用SL13(年龄 572 Ma; U 含量 238 μg/g)标定样品的U, Th 和 Pb 含量. 普通 Pb 校正采用实测 ²⁰⁴Pb 值, 使用 Stacey and Kramer 的两阶段模式进行扣除. 因为是年

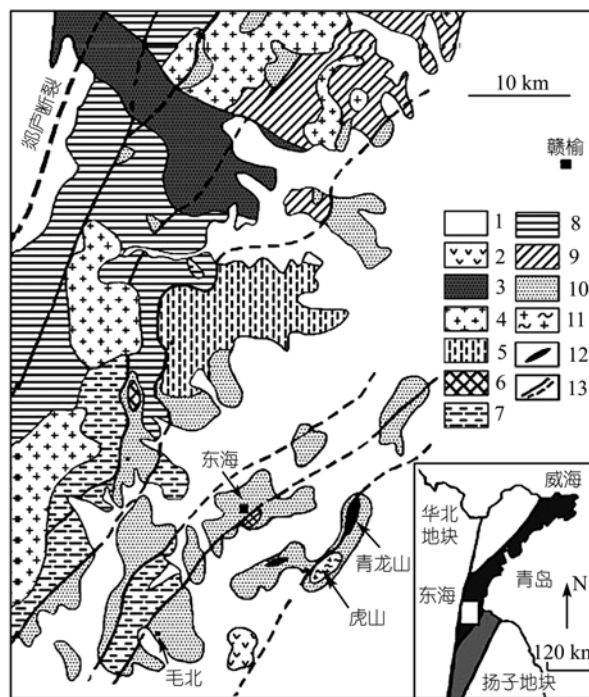


图 1 苏鲁东海地区地质简图(据文献^[36])

1. 第四系; 2. 第三纪玄武岩; 3. 白垩纪盆地沉积; 4. 造山期后未变质花岗岩; 5. 含霓石和角闪石的二长花岗质片麻岩; 6. 角闪黑云斜长花岗质片麻岩; 7. 含石榴子石和黑云母的斜长(二长)花岗质片麻岩; 8. 含黑云母二长花岗质片麻岩; 9. 钾长花岗质片麻岩; 10. 表壳岩系; 11. 含黄铁矿绿帘黑云二长花岗质片麻岩; 12. 榴辉岩和超基性岩; 13. 剪切带或断层

轻锆石, 所报道年龄数据为 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄. 各种同位素比值及年龄误差均为 1σ. 数据处理采用 Ludwig SQUID1.0 及 ISOPLOT 程序^[46,47].

锆石包裹体研究在北京大学地球与空间科学学院通过显微 Raman 光谱完成. 该仪器为英国 Renishaw 公司 RM-1000 型激光 Raman 光谱仪, 工作条件为 514 nm 激光器, 发射功率 20 mW, 样品接收功率 4.5 mW, 扫描时间 10 秒.

锆石的微区原位微量元素分析在西北大学地质学系大陆动力学实验室的 LA-ICPMS 上完成, 详细分析流程参见文献^[48]. 实验时 ArF 激光束工作波长为 193 nm, 束斑直径为 40 μm, 频率为 10 Hz, 激光束能量为 170 mJ. 以锆石的 SiO₂ 含量作为内部标准, 以 NIST612 为外部标准, 数据处理采用 Glitter 程序.

3 分析结果

所测青龙山榴辉岩(02QL-2)中锆石为无色透明浑圆状, 粒径 50~80 μm, CL 显微图像(图 2)显示无核

表 1 青龙山榴辉岩(02QL-2)锆石微量元素数据($\mu\text{g/g}$)

分析点编号	1	2	5	6	7
La	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04
Ce	0.83	1.46	1.08	0.83	1.17
Pr	0.04	0.03	0.04	0.05	0.03
Nd	0.18	0.24	0.24	0.23	0.31
Sm	0.19	0.13	0.12	0.20	0.15
Eu	0.08	0.10	0.13	0.06	0.12
Gd	0.43	0.86	0.72	0.54	0.75
Tb	0.16	0.30	0.28	0.16	0.18
Dy	2.62	2.50	2.57	1.97	2.81
Ho	0.88	0.87	0.74	0.68	0.69
Er	2.99	2.78	2.43	2.45	2.87
Tm	0.59	0.45	0.37	0.38	0.45
Yb	5.66	3.84	3.10	3.64	3.75
Lu	1.07	0.53	0.55	0.50	0.63
ΣREE	15.73	14.13	12.39	11.72	13.93
Ca	1153	1317	1089	1217	1232
Sc	336	361	362	359	369
Ti	49	55	46	91	157
V	9.06	5.63	4.6	5.13	5.18
Rb	0.23	0.27	0.24	0.31	0.48
Sr	0.49	0.3	0.42	0.36	0.33
Y	29	28	24	22	29
Nb	0.29	0.31	0.17	0.37	0.46
Ta	0.04	0.06	0.03	0.04	0.06
Cs	0.02	0.04	0.03	0.05	0.04
Ba	0.29	0.33	0.88	2.3	0.37
Hf	8410	9213	8921	9063	8448
P	78	79	82	76	84
Pb	0.31	0.37	0.30	0.41	0.34
年龄	224 Ma	227 Ma	218 Ma	235 Ma	232 Ma

边结构及韵律环带特征. 该锆石富含矿物包裹体, 利用电子探针定性及激光 Raman 光谱分析了大多数锆石的矿物包裹体成分, 鉴别出为金红石、石榴石、绿辉石等高压矿物(图 3), 未见低压矿物包裹体. 金红石标识峰为 $611\sim 615\text{ cm}^{-1}$, 石榴石标识峰为 $904\sim 915\text{ cm}^{-1}$, 绿辉石为 $677\sim 688\text{ cm}^{-1}$. 在部分锆石年龄测试点位置进行了稀土元素和其他微量元素测定, 结果见表 1, 稀土元素配分模型见图 4. 表 2 列出了 SHRIMP U-Pb 分析的 12 个点数据, 除 9 号分析点外, 所有锆石分析点数据在谐和图上成群分布, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值属同一母体, 其加权平均值为 $227.4\pm 3.5\text{ Ma}$ (图 5), 9 号锆石分析点数据明显与其他锆石不同, $\text{Th}/\text{U}=0.29$, 年龄为 300 Ma, 可能是未完全重置的变质重结晶锆石.

4 讨论

单从本工作的青龙山榴辉岩锆石 CL 图像(图 2)来看, 内部结构均一, 不具核边结构及韵律环带特

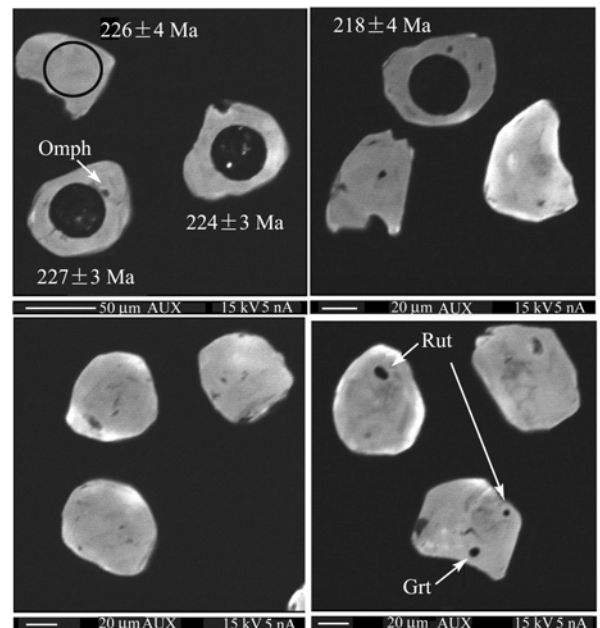


图 2 青龙山榴辉岩(02QL-2)典型锆石 CL 图像
锆石中黑圆坑为 LA-ICPMS 融蚀坑, 同时为 SHRIMP 分析点位

征,它或者是单纯的变质新生锆石,或者是完全变质重结晶锆石,确切判别成因还需要其他判据.

锆石的包裹体矿物主要为石榴石、金红石、绿辉石等矿物,此外,薄片观察发现,锆石主要作为高压矿物(石榴石、绿辉石等)包裹体形式存在. 这些细粒矿物包裹体可能是榴辉岩相早期阶段和峰期超高压阶段的锆石结晶生长过程中捕获而成.

由表 1 可见, 所测五颗锆石的微量元素含量均一, 稀土元素球粒陨石标准化配分模型一致(图 4), 说明这些锆石生长于相同的环境. Yb_n/Dy_n 比值介于 1.8~3.2 之间, 与阿尔卑斯榴辉岩中锆石的稀土元素配分模型(图 4)进行比较, 该榴辉岩中锆石重稀土组配分模型与阿尔卑斯榴辉岩中变质锆石一致, 均较平坦, 显示了与富重稀土的石榴石同期结晶的特点, 弱或无 Eu 异常说明没有长石的存在, 证明锆石的生成环境不是岩浆条件^[33,34]. 锆石的低 Nb, Ta 含量(分别为 0.17~0.46, 0.03~0.06 $\mu\text{g/g}$)证明它是与富 Nb, Ta 的金红石同期结晶的^[14].

SHRIMP U-Pb 分析结果见表 2. 9 号测试点年龄明显老于其他分析点, 而在 CL 图像上该锆石与其他 11 个测试锆石颗粒的 CL 图像没有区别, 都是均一无核为特征, 但其高 Th/U 比(0.29)指示它与其他高压变质新生锆石(<0.07)有明显差别, 可能是未完全重结

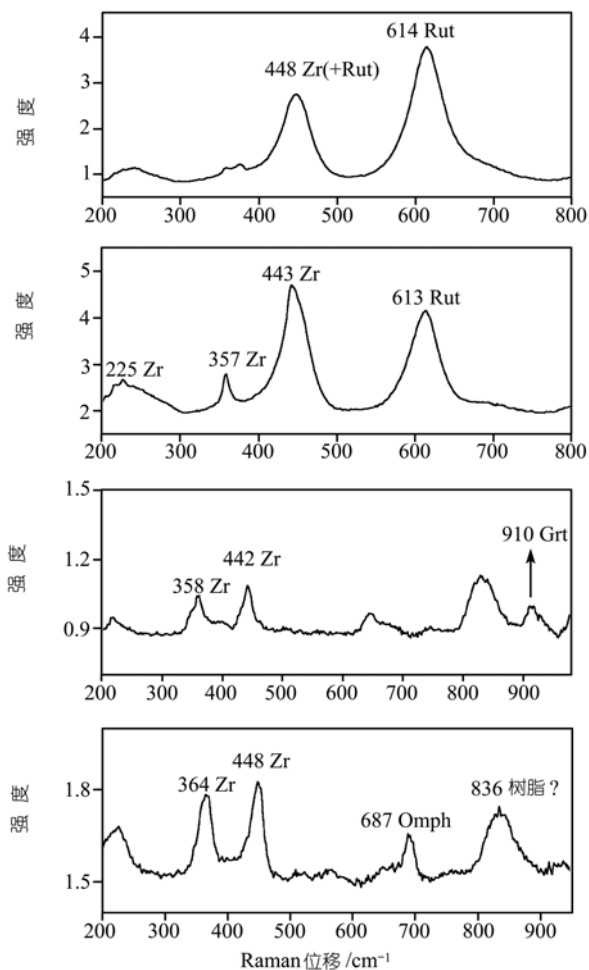


图3 青龙山榴辉岩(02QL-2)锆石包裹体激光 Raman 光谱谱图

Rut: 金红石; Grt: 石榴石; Zr: 锆石; Omph: 绿辉石

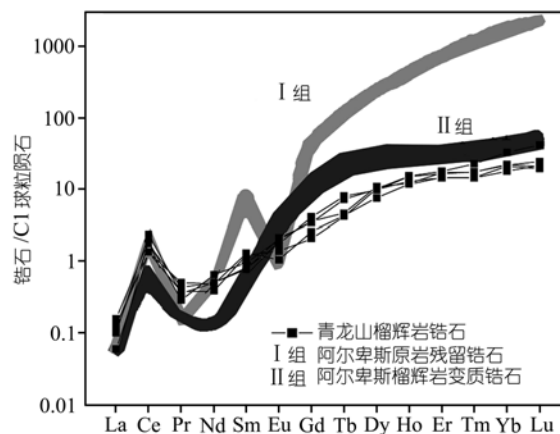


图4 青龙山榴辉岩锆石球粒陨石标准化稀土元素配分模型, 组数据取自文献[34]

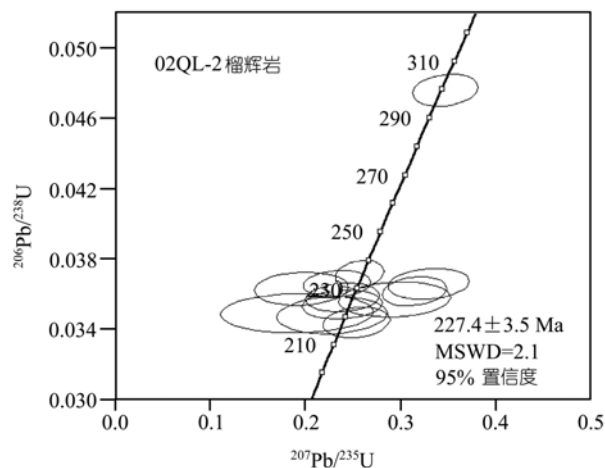


图5 青龙山榴辉岩(02QL-2)锆石 U-Pb 年龄谐和图

表2 青龙山榴辉岩(02QL-2)锆石 SHRIMP 分析数据^{a)}

编号	²⁰⁶ Pb _c /%	U/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Th/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Th/U	²⁰⁶ Pb*/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb* (%)	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U (%)	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U (%)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma
1	1.35	105	3	0.03	3.23	0.0488 (12)	0.0354 (1.5)	0.238 (12)	224.3 ± 3.4
2	1.11	106	5	0.05	3.30	0.0483 (11)	0.0358 (1.5)	0.239 (11)	226.8 ± 3.3
3	2.23	67	2	0.03	2.10	0.0597 (13)	0.0357 (1.6)	0.294 (13)	226.3 ± 4.1
4	3.12	82	2	0.03	2.63	0.0390 (17)	0.0363 (1.7)	0.195 (17)	229.8 ± 3.9
5	0.83	68	3	0.04	2.01	0.0535 (9.0)	0.0344 (1.7)	0.254 (9)	218.1 ± 3.6
6	0.70	92	3	0.03	2.96	0.0502 (6.4)	0.0371 (1.4)	0.257 (6.5)	235.0 ± 3.3
7	0.50	93	4	0.05	2.95	0.0653 (8.4)	0.0366 (1.6)	0.330 (8.6)	231.8 ± 3.5
8	0.00	86	5	0.06	2.66	0.0631 (7.0)	0.0362 (1.4)	0.315 (7)	229.0 ± 3.4
9	0.62	148	42	0.29	6.07	0.0529 (6.5)	0.0476 (1.3)	0.347 (6.6)	299.8 ± 3.7
10	2.38	63	4	0.07	1.94	0.0400 (28)	0.0349 (2.1)	0.191 (28)	221.2 ± 4.6
11	2.97	89	3	0.04	2.75	0.0475 (17)	0.0348 (2.0)	0.228 (17)	220.5 ± 4.3
12	1.27	141	4	0.03	4.47	0.0462 (9.9)	0.0366 (1.4)	0.233 (10)	231.5 ± 3.1

a) 误差为 1 σ , Pb_c 和 Pb* 分别为普通和放射成因 Pb, 标准的误差是 0.26%. 普通 Pb 校正采用实际测量 ²⁰⁴Pb 值

晶的原岩残留锆石. 这进一步说明 CL 图像不能帮助判别区分变质重结晶锆石和变质新生锆石. 其他 11 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 218~235 Ma, 在一致曲线图中数据点成群分布, 其加权平均值为 227.4 ± 3.5 Ma (MSWD = 2.1, 图 5). 锆石较低的 U 含量 (<150 $\mu\text{g/g}$) 暗示丢失放射成因 Pb 的可能性很小, 因而加权平均年龄值反映的是锆石平均生成时代.

据青龙山榴辉岩中锆石的包裹体及微量元素特征综合判定, 该锆石与石榴石、金红石等高压矿物同期结晶. 青龙山地区超高压岩石峰期变质温度可达 800 °C, 石榴石一般不能保留成分生长环带. 但对超高压榴辉岩中大颗粒石榴石的详细矿物学研究表明, 石榴石中心部位含有低压矿物包体成分, 而边缘则包裹有金红石、绿辉石等高压矿物^[49]. 由于矿物的重结晶作用主要取决于温度, 则超高压榴辉岩中石榴石应主要生长于温度峰期前的进变质过程中, 因而与石榴石同期生长锆石的随机测定年龄值的统计平均可能高估了峰期变质时代, 但考虑到超高压岩石在温度峰期后的快速冷却^[44], 它应非常接近峰期变质时代. 超高压变质岩 Zr 的地球化学研究表明, 榴辉岩相前进变质反应及压力升高导致的石榴子石 Zr 含量下降可释放 Zr, 从而提供超高压变质锆石增生所需 Zr 的来源^[50], 而降压过程中仅金红石退变质为榍石的角闪岩相退变质反应可释放 Zr^[1]. 因此, 榴辉岩中超高压变质增生锆石很可能主要是在峰期前和峰期时形成的, 其加权平均年龄值最接近超高压变质岩石的峰期变质时代. 本文青龙山榴辉岩中与石榴石同期生长锆石的 SHRIMP 平均测定值为 227.4 ± 3.5 Ma, 与刘福来等人^[15]报道的东海地区超高压片麻岩中含柯石英包裹体的锆石幔部年龄 (229 ± 4 Ma) 一致, 最近刘福来等人^[16]对超高压岩石中含柯石英及流体包裹体的变质增生锆石域定年结果为 233.7 ± 4.3 Ma, 也获得了与上述年龄一致的结果. 采自同一岩体榴辉岩样品的 3 个高压矿物 (石榴石+绿辉石+金红石) Sm-Nd 等时线年龄 (226.3 ± 4.5 Ma)^[37] 与以上锆石年龄一致, 它支持将达到高压变质平衡的三矿物 Sm-Nd 等时线年龄 (226 Ma) 视为大别-苏鲁榴辉岩超高压峰期变质时代的论点^[43,44].

5 结论

超高压变质岩中变质锆石成因的复杂性是人们

对锆石 U-Pb 定年结果的解释产生较大争议的主要原因. 综合应用阴极发光 (CL) 图像、锆石矿物包裹体研究及微量元素测定, 可帮助我们判定变质锆石的成因. 本工作的综合研究表明, 所测青龙山榴辉岩锆石是在榴辉岩相变质阶段新生成的锆石, 它的高精度离子探针 (SHRIMP) 定年结果平均值 227.4 ± 3.5 Ma 较好的反映了青龙山榴辉岩的峰期变质时代.

致谢 SHRIMP 定年工作得到刘敦一教授工作组的悉心帮助, 陶华老师担任了锆石的制靶工作, 简平、宋彪研究员在锆石分析中给予了指导, 张立飞教授、刘景波研究员、任景秋等对 Raman 光谱工作给予了指导, 激光 ICP-MS 锆石微区微量元素分析得到袁洪林的帮助, 德国马普化学所 J. Huth 博士对锆石的 CL 图像拍摄提供了条件, 本文承蒙郑永飞教授、简平和刘福来研究员审阅并提出宝贵修改意见, 在此一并表示感谢. 本工作受国家重点基础研究发展规划项目 (G1999075503)、国家自然科学基金 (批准号: 40173014) 和中国博士后科学基金资助.

参 考 文 献

- Gebauer D, Grauenfelder M. U-Pb zircon and Rb-Sr mineral dating of eclogites and their country rocks example: Munchberg gneiss massif, Northeast Bavaria. *Earth Planet Sci Lett*, 1979, 42: 35-44
- Peucat J J, Vidal P h, Godard G, et al. Precambrian U-Pb zircon ages in eclogites and garnet pyroxenites from South Brittany (France): And old oceanic crust in the west European Hercynian belt? *Earth Planet Sci Lett*, 1982, 60: 70-78 [DOI](#)
- Pidgeon R T. Recrystallization of oscillatory-zoned zircon: some geochronological and petrological implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1992, 110: 463-472 [DOI](#)
- Gebauer D, Schertl H-P, Brix M, et al. 35Ma old ultrahigh—pressure metamorphism and evidence for very rapid exhumation in the Dora Maira Massif, Western Alps. *Lithos*, 1997, 41: 5-24
- 李曙光, 李惠民, 陈移之, 等. 大别-苏鲁地体超高压变质年代学——锆石 U-Pb 同位素体系. *中国科学, D 辑*, 1997, 27(3): 200-206
- 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 [DOI](#)
- Vavara G, Schmid R, Gebauer D. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibole to granulite facies zircon: Geochronology of the Ivren Zones (Southern Alps). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 134: 380-404 [DOI](#)
- Rowley D B, Xue F, Tucker R D, et al. Ages of ultrahigh pressure metamorphic and protolith orthogenisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb zircon geochronology. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 151: 191-203 [DOI](#)
- 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](#)
- Ames L, Tilton G R, Zhou G Z. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze Cratons: U-Pb Zircon dating of coesite-bearing eclogites. *Geology*, 1993, 21: 339-342 [DOI](#)

1) 侯振辉. 中国科学技术大学博士论文. 2004

- 11 Ames L, Zhou G Z, Xiong B C. Geochronology and isotopic character of ultrahigh pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. *Tectonics*, 1996, 15: 472~489 [DOI]
- 12 Ayers J C, Dunkle S, Gao S, et al. Constraints on timing of peak and retrograde metamorphism in the Dabie Shan ultrahigh-pressure metamorphic belt, east-central China, using U-Th-Pb dating of zircon and monazite. *Chem Geol*, 2002, 186: 315~331 [DOI]
- 13 Yang J S, Wooden J L, Wu C L, et al. SHRIMP U-Pb dating of coesite-bearing zircon from the ultrahigh-pressure metamorphic rocks, Sulu terrane, east China. *Journal of Metamorphic Geology*, 2003, 21: 551~560
- 14 吴元保, 陈道公, 夏群科, 等. 大别山黄镇榴辉岩锆石的微区微量元素分析: 榴辉岩相变质锆石的微量元素特征. *科学通报*, 2002, 47(11): 861~863
- 15 刘福来, 许志琴, 宋彪. 苏鲁地体超高压和退变质时代的厘定: 来自片麻岩锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年的证据. *地质学报*, 2003, 77(2): 229~237
- 16 刘福来, 许志琴. 南苏鲁超高压岩石含柯石英锆石中的流体包裹体. *科学通报*, 2004, 49(2): 181~189
- 17 刘敦一, 简平. 大别山双河硬玉石英岩的超高压变质和退变质事件——SHRIMP 测年的证据. *地质学报*, 2004, 78(2): 211~217
- 18 Mezger K, Krogstad E J. Interpretation of discordant U-Pb zircon ages: An evaluation. *J metamorphic Geol*, 1997, 15: 127~140 [DOI]
- 19 Roberts M P, Finger F. Do U-Pb zircon ages from granulites reflect peak metamorphic conditions? *Geology*, 1997, 25: 319~322 [DOI]
- 20 Fraser G, Eillis D, Eggin S M. Zirconium abundance in granulite-facies minerals, with implications for zircon geochronology in high-grade rocks. *Geology*, 1997, 25: 607~610 [DOI]
- 21 Pan Y. Zircon- and monazite-forming metamorphic reactions at Manitouwadge, Ontario. *Canadian Mineralogist*, 1997, 35: 105~118
- 22 Williams I S, Buick I S, Cartwright I. An extended episode of early Mesoproterozoic fluid in the Reynolds Range, central Australia. *Journal of Metamorphic Geology*, 1996, 14: 29~47
- 23 Black L P, Williams I S, Compston W. Four zircon ages from one rock: The history of a 3930 Ma-old granulite from Mount Sones, Enderby Land, Antarctica. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 94: 427~437 [DOI]
- 24 Friend C R L, Kinny P D. New evidence for protolith ages of Lewisian granulites, northwest Scotland. *Geology*, 1995, 23: 1027~1030 [DOI]
- 25 Bowring S A, Williams I S. Priscoan (4.00-4.03 Ga) orthogneisses from northwest Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 134: 3~16 [DOI]
- 26 Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18: 423~439 [DOI]
- 27 Liu F L, Xu Z Q, Katayama I, et al. Mineral inclusions in zircons of para- and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD-PP1, Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Lithos*, 2001, 59: 199~215 [DOI]
- 28 Ye K, Yao Y P, Cong B, et al. Areal extent of ultra-high pressure metamorphism in the Sulu terrane of east China: Evidence from coesite inclusions in zircon from country rock granitic gneiss. *Lithos*, 2000, 52: 157~164 [DOI]
- 29 Liu J B, Ye K, Maruyama S, et al. Mineral inclusions in zircon from gneisses in the ultrahigh pressure zone of the Dabie Mountains, China. *J Geology*, 2001, 109: 523~535 [DOI]
- 30 Hermann J, Rubatto D, Korsakov A, et al. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous deeply subducted continental crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 141: 66~82
- 31 陈道公, Deloule E, 程昊, 等. 大别-苏鲁变质岩锆石微区氧同位素特征初探: 离子探针原位分析. *科学通报*, 2003, 48(16): 1732~1739 [摘要] [PDF]
- 32 Katayama I, Maruyama S, Parkinson C D, et al. Ion micro-probe U-Pb zircon geochronology of peak and retrograde stages of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Kokchetav massif, northern Kazakhstan. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 188: 185~198 [DOI]
- 33 Sun W D, Williams I, 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. *Journal of Metamorphic Geology*, 2002, 20: 873~886 [DOI]
- 34 Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 2002, 184: 123~138 [DOI]
- 35 Katayama I, Muko A, Lizuka T, et al. Dating of zircon from Ti-clinohumite-bearing garnet peridotite: Implication for timing of mantle metasomatism. *Geology*, 2003, 31: 713~716 [DOI]
- 36 刘福来, 张泽明, 许志琴. 苏鲁地体超高压矿物的三维空间分布. *地质学报*, 2003, 77: 69~84
- 37 Li S G, Wang S S, Chen Y Z, et al. Excess argon in phengite from eclogite: Evidence from dating of eclogite minerals by Sm-Nd, Rb-Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ methods. *Chem Geol*, 1994, 112: 343~350 [DOI]
- 38 Yui T F, Rumble D, Chen C H, et al. Stable isotope characteristics of eclogites from the ultra-high-pressure metamorphic terrain, east-central China. *Chem Geol*, 1997, 137: 135~147 [DOI]
- 39 Zheng Y F, Fu B, Li Y L, et al. Oxygen and hydrogen isotope geochemistry of ultrahigh pressure eclogites from the Dabie Mountains and the Sulu terrane. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 155: 113~129 [DOI]
- 40 Rumble D, Yui T F. The Qinglongshan oxygen and hydrogen isotope anomaly near Donghai in Jiangsu province, China. *Geochim Cosmochim Acta*, 1998, 62: 3307~3321 [DOI]
- 41 Zhang R Y, Hirajima T, Banno S, et al. Petrology of ultra-high-pressure rocks from the southern Su-Lu region, eastern China. *J Metamor Geol*, 1995, 13: 659~675
- 42 Li S G, Xiao Y L, Liou D, et al. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-eclogites: Timing and processes. *Chem Geol*, 1993, 109: 89~111 [DOI]
- 43 Li S G, Jagoutz E, Chen Y Z, et al. Sm-Nd, Rb-Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic systematics of the ultrahigh pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu belt, Central China: A retrospective view. *International Geol Review*, 1999, 41(12): 1114~1124
- 44 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 (6): 1077~1093 [DOI]
- 45 Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, et al. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. *J Geol Soc Lond*, 1992, 149: 171~184
- 46 Ludwig K R. *Squid 1.02: A user manual*. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 2001, 2: 19
- 47 Ludwig K.R. *Users Manual for Isoplot/Ex: A Geochronological Toolkit for Microsoft excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley, CA, USAA, 2000. 53
- 48 Gao S, Liu X M, Yuan H L, et al. Determination of forty-two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *The Journal of Geostandards and Geoanalysis*, 2002, 26(2): 181~196
- 49 Enami M, Nagasaki A, Prograde P-T path of kyanite eclogites from Junan in the Sulu ultrahigh-pressure province, eastern China. *The Island Arc*, 1999, 8: 459~474 [DOI]
- 50 Donohue C L, Manning C E, Essene E J. The pressure and temperature dependence of Zr and Ti substitution in almandine. Abstract of GSA annual meeting, 2001

(2004-06-22 收稿, 2004-08-11 收修改稿)