麻粒岩的石榴石 Sm-Nd 和 U-Pb 同位素体系： 欧洲华力西造山带实例

陈福坤

(Institut fuer Mineralogie, Petrologie und Geochemie, Universitaet Tuebingen, 72074 Tuebingen, Germany; 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029. E-mail: fukun.chen@uni-tuebingen.de)

摘要 报道德国黑森林地区(BF)华力西造山带高级变质基底的基性麻粒岩中锆石和石榴石年龄, 并讨论其同位素体系的封闭温度. 采用锆石 U-Pb 和 Pb-Pb 蒸发法分析, 得到 340 Ma 左右至 414 Ma 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 而且大部分集中在 340 Ma 左右. 而石榴石的 Sm-Nd 和 Pb-Pb 等时线年龄分别为 (398 ± 3) 和 (411 ± 14) Ma, 老于大部分的锆石年龄. 这一现象暗示, 在 340 Ma 左右的麻粒岩相变质作用(800℃左右)过程中, 可能由于重结晶作用或蜕晶作用使大部分锆石丢失其放射成因 Pb. 而石榴石的 Sm-Nd 和 U-Pb 同位素体系保存了变质作用峰期之前的年代学信息. 这一现象可能说明该变质作用是在无流体参与的条件下去进行的. 该实例表明, 采用 Sm-Nd 和 U-Pb 方法对高级变质岩石定年, 在某些情况下石榴石可能是更好的候选矿物.

关键词 华力西 麻粒岩 石榴石 Sm-Nd U-Pb

普遍认为, 石榴石是对高级变质岩石定年的最理想的候选矿物之一, 特别是采用 Sm-Nd 和 U-Pb 方法^[1-4]. 对来自加拿大 Pikwitonei 晚太古代麻粒岩地体石榴石 U-Pb 同位素体系的仔细研究表明, 体系具有很高的同位素封闭温度, 为 800℃左右^[1]. 这一封闭温度的估计使得该体系可与锆石的 U-Pb 同位素体系相比^[5,6]. 相比之下, 石榴石的 Sm-Nd 同位素封闭温度一般在 650℃左右^[2-4]. 然而, 高于 850℃的封闭温度也有报道^[7,8]. 众所周知, 离子扩散导致放射成因同位素子体丢失, 而其扩散速度敏感地受很多因素的影响, 如颗粒大小、变质温度与压力、冷却速率、放射性同位素母体的含量^[1,9,10], 流体的参与^[11], 等等. 尽管有上述诸多因素以及富含稀土元素的矿物相包体(如细小而丰富的锆石和独居石包体)的影响^[12], 近几年, 逐步酸淋滤方法的成功应用使得石榴石定年方法的影响大幅度提高^[13,14]. 本文的分析结果显示一个令人感兴趣的现象, 即大部分锆石 U-Pb 年龄年轻于共存的石榴石 Sm-Nd 和 Pb-Pb 等时线年龄. 这一现象为讨论高级变质岩锆石和石榴石定年问题提供了实例.

1 地质背景

德国黑森林地区(BF, 德语为 Schwarzwald; 图1)位于欧洲华力西造山带中. 该造山带由3个主要的近

东西向构造单元组成, 从北至南为 Rheinohercynian, Saxothuringian 和 Moldanubian 带, 形成于中-晚古生代位于东南的非洲板块和位于西北的劳伦-巴尔提卡大陆块及其间的微板块的碰撞^[15]. 黑森林地区基底由在北部的 Saxothuringian 带和在中南部的 Moldanubian 带两部分组成. 后者由一条低级变质杂砂岩带分成两部分, 即中部和南部基底. 这两个 Moldanubian 基底主要由角闪岩相的副片麻岩、混合岩、少量的长英质岩和正片麻岩组成. 榴辉岩及高压麻粒岩以透镜体形式出露在中部的副片麻岩中. 这些正片麻岩代表早古生代大陆岛弧岩浆作用的产物^[16]. 来自基底南部的 Wiese-Wehra 推覆体的证据表明, 一系列的晚造山期事件(包括洋盆闭合、板块碰撞和地体推覆叠加等)发生在约 350 ~ 342 Ma 之间^[17]. 在 330 Ma 左右, 基底经历了华力西期高温低压变质作用^[18], 并在 330 Ma 左右有大量的晚华力西花岗岩侵入活动^[19].

2 分析方法

全岩粉末微量和稀土元素含量用纽芬兰 St. John's Memorial 大学的 ICP-MS 质谱仪采用标准程序^[20]测定. 主量元素含量用 XRF 光谱仪测定. 同位素比值的测量采用 Tuebingen 大学的 Finnigan MAT262 质谱仪. 单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释法和

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2002-47-11-864>

图 1 黑森林地区的 Moldanubian 带地质简图
BF: 黑森林; RH: Rhenohercynian 带; ST: Saxothuringian 带;
BM: Bohemian 地体; V: Vosges

Pb-Pb 蒸发法的测量采用标准方法^[16]. U-Pb 同位素稀释法采用 Max-Planck 化学研究所的 ²³⁸U-²⁰⁵Pb 稀释剂. Pb 和 U 的全流程本底分别小于 10 pg. Pb-Pb 蒸发法的同位素测量采用动态质量跳扫模式, 质量系列为 206-207-204-206-207. 石榴石同位素分析采用逐

步酸淋滤方法, 该方法近几年成功地应用在变质作用事件的定年^[13,14]. 在本研究中, 仅那些无可见包体的石榴石颗粒在双目显微镜下被挑选出来用于分析. 在完全分解之前, 两个石榴石组分首先分别采用两套淋滤程序, 即: (1) 在 6 mol/L 的热盐酸中淋滤(约 4 小时)后, 研磨至 10 μm 左右, 再在 7 mol/L 的热硝酸中淋滤(约 4 小时); (2) 逐步在 6 mol/L 的热盐酸(约 4 小时)、7 mol/L 的热氢溴酸(约 2 小时)、22 mol/L 的热氢氟酸(约 10 分钟)和 14 mol/L 的热硝酸(约 1 小时)中淋滤. 石榴石残留相在加入 ¹⁴⁹Sm-¹⁵⁰Nd 稀释剂和 22 mol/L 的氢氟酸 + 14 mol/L 硝酸混合试剂后高压加热(大于 10 MPa, 200℃)7 天以确保完全分解. Sm-Nd 及 Pb 的分离和纯化采用标准程序^[21]. Pb 全流程本底小于 50 pg, Sm 和 Nd 全流程本底分别为 10 和 30 pg 左右.

3 分析结果

本文所分析的基性麻粒岩样品来自黑森林基底中部(图 1). 这一地区的基性麻粒岩经历了高温高压变质作用, 变质条件大约为 800℃和 0.7 ~ 1.1 GPa^[22]. 角闪岩相退变质普遍地存在, 而榴辉岩相矿物组合的残留也偶尔可以观察到^[22]. 5 个单颗粒锆石组分给出谐和的 U-Pb 年龄, 但其 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄值变化在 342 ~ 372 Ma 之间(表 1 和图 2(a)). 同样地, 采用蒸发法分析, 另外 5 个单颗粒也得到不同的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄, 为 345 ~ 414 Ma 之间(表 2 和图 2(b)). 石榴石淋滤残留相得到在误差范围内相似的 Pb-Pb 和 Sm-Nd 年龄, 分别为(411 ± 14)和(398 ± 3) Ma(表 3, 图 2(c), (d)), 明显地老于大部分锆石年龄.

表 1 单颗粒锆石 U-Pb 分析数据

锆石特征	原子数比值					表面年龄/Ma		
	Pb*/U	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb
短粗, 浅棕色	0.059	372	0.05461 ± 28	0.4019 ± 156	0.05338 ± 193	342.8	343.1	344.9
短粗, 浅棕色	0.057	2463	0.05457 ± 22	0.4012 ± 23	0.05332 ± 20	342.5	342.5	342.5
长, 浅棕色	0.060	2635	0.05647 ± 24	0.4174 ± 27	0.05360 ± 25	354.2	354.2	354.5
长, 浅棕色	0.066	5136	0.05941 ± 25	0.4426 ± 32	0.05404 ± 30	372.0	372.1	372.5
细长, 浅棕色	0.065	614	0.05919 ± 28	0.4407 ± 124	0.05400 ± 141	370.7	370.8	371.1

表 2 单颗粒锆石蒸发法分析结果

颗粒	锆石特征	扫描数	平均 ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 值	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄/Ma
1	细长, 浅棕色	102	0.053400 ± 190	345.8 ± 8.4
2	细长, 浅棕色	27	0.053424 ± 167	346.9 ± 7.0
3	短粗, 浅棕色	134	0.053368 ± 163	344.5 ± 6.8
颗粒 1 ~ 3 平均值			0.053392 ± 47	345.5 ± 2.0
4	长, 浅棕色	25	0.053989 ± 159	370.0 ± 6.6
5	粗, 黄色	79	0.055054 ± 161	414.4 ± 6.5

表 3 全岩和石榴石淋滤残留相 Sm-Nd 和 Pb 同位素分析数据^{a)}

样品	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	ε _{Nd} (0)	ε _{Nd} (t)
全岩	18.555 ± 4	15.621 ± 3	38.260 ± 8	0.2166	0.513148 ± 10	+9.9	+8.9
R-b	81.189 ± 118	19.063 ± 28	43.425 ± 60	1.1683	0.515627 ± 10		
R-a	21.933 ± 16	15.795 ± 12	38.725 ± 29	1.0240	0.515265 ± 11		

a) R-a 和 R-b 为淋滤程序(a)和(b)的残留相; t = 410 Ma

图 2 锆石和石榴石年龄

(a) 锆石 U-Pb 谱和曲线图的投影; (b) 锆石蒸发法 Pb-Pb 年龄直方图; (c) 石榴石淋滤残留相 Sm-Nd 年龄; (d) 石榴石淋滤残留相 Pb-Pb 年龄。
WR 表示全岩; R-a 和 R-b 分别为淋滤程序(a)和(b)的残留相

以质量比例计算, 该基性麻粒岩含有大约 49% 的 SiO₂, 15% 的 Al₂O₃, 6% 的 MgO, 10% 的 CaO, 11% 的 Fe₂O₃(Fe 总值), 小于 4% 的 (Na₂O + K₂O), 并有高 Cr, Ni 含量(262 和 41 μg/g)和高 ε_{Nd} 值(+8.9, 以 410 Ma 计算), 类似于 400 Ma 时亏损地幔的 ε_{Nd} 值。标准化的稀土配分模式图(图 3(a))表明该样品具有轻稀土亏损和平坦的重稀土配分模式, 类似于洋中脊玄武岩 (MORB) 的稀土配分模式, 仅有 Hf 负异常而无 Nb 和

图 3 稀土元素和微量元素配分模式

Ti 负异常(图 3(b)). 这些地球化学和同位素特征表明很可能是亏损地幔来源.

4 讨论与结论

在正常的地体冷却速度条件下, 一般颗粒大小(毫米级)的石榴石 Sm-Nd 同位素体系的封闭温度估计大约在 650℃^[2,4], 而其 U-Pb 同位素体系与锆石类似, 具有较高的封闭温度^[1,5,6]. 然而, 矿物的同位素体系在变质作用叠加时是否封闭, 不仅取决于变质作用的温度, 本身颗粒大小和其所在地质体的冷却速度, 也很大程度依赖于其晶格的破坏程度或蜕晶作用^[11,9,10]、重结晶程度^[23]和流体的参与^[11]. 本文获得的表面自相矛盾的锆石和石榴石年龄, 即石榴石的 Sm-Nd 和 Pb-Pb 年龄老于大部分的锆石年龄, 可以解释为该石榴石 Sm-Nd 和 U-Pb 同位素体系甚至在大约 800℃ 的变质峰期条件下也保持封闭状态. 观察到的基性麻粒岩中榴辉岩相矿物组合的残留很可能指示麻粒岩相变质作用和后期的角闪岩相的叠加过程是在无流体参与的条件下完成的. 一般认为, 在无重结晶发生时, 离子的热力体积扩散进程非常缓慢,

而在流体作用下的重结晶环境里, 同位素的转移速度会得到极大的提高, 其程度取决于流体的特性和流体与岩石的比例关系^[11].

本文所分析的基性麻粒岩的例子可能暗示, 在麻粒岩相的变质过程中, 大部分的锆石发生重结晶, 而石榴石没有或仅小部分地经历重结晶过程. 345 Ma 左右的锆石年龄可能代表早石炭纪的高-中压麻粒岩相的变质作用. 在欧洲华力西造山带的东部, 该变质作用的年代已经较准确地测定^[24]. 紧接着, 华力西 Moldanubian 带的基底在 340 ~ 320 Ma 左右时经历了高温低压变质作用. 基底的各类岩石基本上记录了该变质过程^[25,26]. 另一方面, 大量近期获得的同位素年龄数据表明, 在 Moldanubian 带, 特别在 Bohemian 地体内, 可能存在两期不同的高压变质作用, 即在 420 ~ 370 Ma 左右和 350 ~ 330 Ma 左右^[27]. 类似的现象也可以在黑森林地区的高压变质岩石观察到^[21]. 大部分 420 ~ 370 Ma 左右的年龄数据主要是石榴石 Sm-Nd 等时线年龄, 而 350 ~ 330 Ma 左右的年龄数据则记录在部分石榴石 Sm-Nd 同位素体系, 特别是在榴辉岩和麻粒岩的锆石和独居石 U-Pb 同位素体系内.

该基性麻粒岩的原岩最晚形成于 414 Ma 左右(锆石年龄), 即早泥盆纪或更早. 地球化学和同位素证据, 如 ϵ_{Nd} 值很高(+8.9, 以 410 Ma 计算)和亏损的轻稀土含量可能暗示该原岩代表洋壳的残留体. 该洋盆的打开时间可能是早古生代^[28], 而在 350 Ma 左右关闭^[17]. 石榴石 Sm-Nd 和 Pb-Pb 等时线年龄(分别为 (398 ± 3) 和 (411 ± 14) Ma)很可能代表另一期变质作用时代. 由此可见, 石榴石 Sm-Nd 和 U-Pb 体系并未受到 340 Ma 左右的麻粒岩相变质作用的影响, 也没有明显地受到 330 Ma 左右的高温低压变质作用的改造.

从该实例的数据看, 高级变质岩石中的石榴石矿物具有保存代表峰期变质作用的年代学信息的可能性. 该可能性取决于外界条件, 如流体的参与和重结晶作用, 等等. 大部分的锆石的 U-Pb 年龄年轻于共存的石榴石的 Sm-Nd 和 Pb-Pb 等时线年龄的事实说明, 石榴石的 Sm-Nd 和 U-Pb 同位素体系的封闭温度可以达到 800℃ 左右, 而同时由于重结晶作用或蜕晶作用的影响, 锆石丢失其放射性的子体同位素.

致谢 作者衷心感谢慕尼黑 Hanns-Seidel 基金会的前期资助、M. Satir 和 E. Hegner 对实验条件的支持、H. P. Hann 的野外指导、J. Loeschke 和 W. Todt 的讨论和郭敬辉的建设性意见. 本工作受德国研究基金会(DFG)资助.

参 考 文 献

- 1 Mezger K, Essene E J, Halliday A N. Closure temperatures of the Sm-Nd system in metamorphic garnets. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 113: 397~409
- 2 Mezger K, Hanson G N, Bohlen S R. U-Pb systematics of garnet: Dating the growth of garnet in the Late Archean Pikwitonei granulite domain at Cauchon and Natawahunan Lakes, Manitoba, Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1989, 101: 136~148
- 3 Burton K W, Kohn M J, Cohen A S, et al. The relative diffusion of Pb, Nd, Sr and O in garnet. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 133: 199~211
- 4 Ganguly J, Tirone M, Hervig R L. Diffusion kinetics of Samarium and Neodymium in garnet, and a method for determining cooling rates of rocks. *Science*, 1998, 281: 805~807
- 5 Lee J K W, Williams I S, Ellis D J. Pb, U and Th diffusion in natural zircon. *Nature*, 1997, 390: 159~161
- 6 Cherniak D J, Watson E B. Pb diffusion in zircon. *Chemical Geology*, 2000, 172: 5~24
- 7 Cohen A S, O'Nions R K, Siegenthaler R, et al. Chronology of the pressure-temperature history recorded by a granulite terrane. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 98: 303~311
- 8 Jagoutz E. Nd and Sr systematics in an eclogite xenolith from Tanzania: Evidence for frozen mineral equilibria in the continental lithosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52: 1285~1293
- 9 Davis D W, Krogh T E. Preferential dissolution of ^{234}U and radiogenic Pb from α -recoil-damaged lattice sites in zircon: Implications for thermal histories and Pb isotopic fractionation in the near surface environment. *Chemical Geology*, 2000, 172: 41~58
- 10 Nasdala L, Pidgeon R T, Wolf D. Heterogeneous metamictization of zircon on a microscale. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60: 1091~1097
- 11 Villa I M. Isotopic closure. *Terra Nova*, 1997, 10: 42~47
- 12 Zhou B, Hensen B J. Inherited Sm/Nd isotope components preserved in monazite inclusions within garnets in leucogneiss from East Antarctica and implications for closure temperature studies. *Chemical Geology*, 1995, 121: 317~326
- 13 DeWolf C P, Zeissler C J, Halliday A N, et al. The role of inclusions in U-Pb and Sm-Nd garnet geochronology: Stepwise dissolution experiments and trace uranium mapping by fission track analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60: 121~134
- 14 Frei R, Villa M I, Nägler Th F, et al. Single mineral dating by the Pb-Pb step-leaching method: Assessing the mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61: 393~414
- 15 Matte P. Tectonics and plate tectonics model for the Variscan belt of Europe. *Tectonophysics*, 1986, 126: 329~374
- 16 Chen F, Hegner E, Todt W. Zircon ages and Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany: Evidence for a Cambrian magmatic arc. *International Journal of Earth Sciences*, 2000, 88: 791~802
- 17 Hegner E, Chen F, Hann H P. Chronology of basin closure and thrusting in the internal zone of the Variscan belt in the Schwarzwald, Germany: Evidence from zircon ages, trace element geochemistry, and Nd isotopic data. *Tectonophysics*, 2001, 332: 169~184
- 18 Kalt A, Grauert B, Baumann A. Rb-Sr and U-Pb isotope studies on migmatites from the Schwarzwald (Germany): Constraints on isotopic resetting during Variscan high-temperature metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology*, 1994, 12: 667~680
- 19 Schaltegger U. U-Pb geochronology of the southern Black Forest Batholith (Central Variscan Belt): Timing of exhumation and granite emplacement. *International Journal of Earth Sciences*, 2000, 88: 814~828
- 20 Jenner G A, Longerich H P, Jackson S E, et al. ICP-MS—a powerful new tool for high precision trace element analysis in earth sciences: Evidence from analysis of selected USGS standards. *Chemical Geology*, 1990, 83: 133~148
- 21 Chen F, Todt W, Hann H P. Zircon and garnet geochronology of eclogites from the Moldanubian zone of the Black Forest, Germany. *Journal of Geology*, 2002 (in press)
- 22 Hanel M, Lippolt H J, Kober B, et al. Lower Carboniferous granulites in the Schwarzwald basement near Hohengeroldseck (SW-Germany). *Naturwissenschaften*, 1993, 80: 25~28
- 23 Pidgeon R T. Recrystallization of oscillatory-zoned zircon: Some geochronological and petrological implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1992, 110: 463~472
- 24 Kroener A, O'Brien P J, Nemchin A A, et al. Zircon ages for high pressure granulites from South Bohemian, Czech Republic, and their connection to Carboniferous high temperature processes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2000, 138: 127~142
- 25 Kroener A, Willner A P. Time of formation and peak of Variscan HP-HT metamorphism of quartz-feldspar rocks in the central Erzgebirge, Saxony, Germany. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1998, 132: 1~20
- 26 Buettner S, Kruhl J H. The evolution of a late-Variscan high-T/low-P region: The southeastern margin of the Bohemian massif. *Geologische Rundschau*, 1997, 86: 21~38
- 27 O'Brien P J, Carswell D A. Tectonometamorphic evolution of the Bohemian Massif: Evidence from high pressure metamorphic rocks. *Geologische Rundschau*, 1993, 82: 531~555
- 28 Pin C, Marini F. Early Ordovician continental break-up in Variscan Europe: Nd-Sr isotope and trace element evidence from bimodal igneous associations of the Southern Massif Central, France. *Lithos*, 1993, 29: 177~196

(2001-12-26 收稿, 2002-03-20 收修改稿)

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2002-47-11-868>