

大别山双河超高压变质矿物 O 同位素平衡及其对 Sm-Nd 和 Rb-Sr 等时线年龄有效性的制约

赵子福 郑永飞 李曙光 龚 冰

中国科学院壳幔物质与环境重点实验室 中国科学技术大学
地球和空间科学学院 安徽 合肥, 230026

摘 要 对大别造山带双河超高压榴辉岩和片麻岩 Sm-Nd 和 Rb-Sr 等时线矿物进行了 O 同位素地质测温。尽管 Sm-Nd 等时线给出一致的三叠纪年龄(213 ~ 238 Ma), 同一样品 Rb-Sr 等时线却给出侏罗纪年龄(171 ~ 174 Ma)。片麻岩、榴辉岩和榴闪岩矿物对 O 同位素测温得到 600 ~ 720 °C 和 420 ~ 550 °C 两组温度, 分别对应于约 225 ± 5 Ma 榴辉岩相变质和约 175 ± 5 Ma 角闪岩相退变质条件下停止同位素扩散交换的温度。同一样品三叠纪 Sm-Nd 等时线年龄的保存、侏罗纪 Rb-Sr 等时线年龄的出现以及有规律的 O 同位素温度, 表明在角闪岩相退变质过程中, Sr 和 O 在含水矿物(如黑云母和角闪石)中的扩散速率在手标本尺度上比石榴石 Nd 和多硅白云母 Sr 的扩散速率快。

关键词 榴辉岩和片麻岩 O 同位素 Sr-Nd 同位素 矿物等时线 扩散平衡

Oxygen Isotope Equilibrium between UHP Metamorphic Minerals at Shuanghe in the Dabie Orogenic Belt and Its Constraints on Sm-Nd and Rb-Sr Chronometers

ZHAO Zifu ZHENG Yongfei LI Shuguang GONG Bing

CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences,
University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, 230026

Abstract As the rates of Nd, Sr and O diffusion in metamorphic minerals are comparable in many cases, the state of O isotope equilibrium between metamorphic minerals can provide a test for the validity of mineral Sm-Nd and Rb-Sr chronometers. In order to illustrate this applicability, the authors carried out O isotope geothermometry for Sm-Nd and Rb-Sr isochron minerals from UHP eclogites and gneisses at Shuanghe in Dabie terrane of eastern Central China. Although the Sm-Nd isochrons give consistent Triassic ages of 213 ~ 238 Ma for eclogite-facies metamorphism, the Rb-Sr isochrons give Jurassic ages of 171 ~ 174 Ma for the same samples. O isotope geothermometry of the gneiss, eclogite and amphibolite minerals yields two sets of temperatures of 600 ~ 720 °C and 420 ~ 550 °C, respectively, corresponding to the cessation of isotopic exchange by diffusion at about 225 ± 5 Ma during eclogite-facies recrystallization and that at about 175 ± 5 Ma during amphibolite-facies retrogression.

Key words eclogite and gneiss oxygen isotopes Sr-Nd isotopes mineral isochron diffusion equilibrium

1 引言

两个或三个矿物的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 等时线常被用于高压和超高压变质岩年龄测定,但由于存在同位素不平衡和/或封闭温度不确定性,等时线年龄经常难以得到合理的地质解释。等时线矿物之间 Nd 和 Sr 同位素不平衡经常导致错误的地质年龄,因此,除了放射成因同位素体系自身外,还必须借助其他同位素体系(如, O)以及地球化学和岩石学特

征来进行全面分析。先前通过对苏鲁地体三叠纪超高压榴辉岩的研究发现,变质矿物 O 与 Sm-Nd 同位素体系平衡或非平衡状态之间存在直接的对应关系。榴辉岩中某些绿辉石-石榴石矿物对表现出榴辉岩相 O 同位素平衡分馏,其矿物 Sm-Nd 等时线也给出有意义的三叠纪年龄。相反,一些绿辉石-石榴石矿物对表现出 O 同位素不平衡分馏,其矿物 Sm-Nd 等时线给出无地质意义的非三叠纪年龄。对大别山-苏鲁造山带超高压榴辉岩和片麻岩以及邻区

中生代花岗岩等大量实例研究表明,矿物对 O 同位素平衡与否能够对矿物 Sm-Nd 和 Rb-Sr 体系是否达到并保持同位素平衡以及矿物内部等时线定年结果的有效性给予直接制约。

导致高级变质矿物之间放射性和稳定同位素不平衡的因素包括以下几个方面:①变质作用过程中岩浆矿物继承,例如,辉长岩到榴辉岩不完全变质反应;②矿物中存在副矿物包裹体,例如,石榴石和绿辉石中存在磷灰石、金红石和锆石包裹体;③同位素分带,例如,矿物多期生长;④退变质反应如后成结晶或交代作用。

无论是矿物 Sm-Nd 或 Rb-Sr 内部等时线定年还是 O 同位素地质测温,同位素体系在它们形成时是否达到并保持平衡都是最重要的前提(Zheng 等, 2002)。如果矿物之间没有达到并保持同位素平衡,得到的表面年龄不能代表地质事件的年龄,共存矿物之间的 O 同位素分馏也不能用于地质测温。如果达到并保持同位素平衡,不但能够得到具有地质意义的等时线年龄,而且能够获得岩石形成时或之后矿物之间达到平衡条件下的 O 同位素温度。因此,扩散对火成岩和变质岩矿物内部和矿物之间微量元素和同位素的分配起着非常重要的作用。对地质年代学工作者来说,检验变质矿物之间放射成因同位素体系平衡与否非常重要。变质矿物之间 O 同位素平衡状况能够为矿物 Sm-Nd 和 Rb-Sr 内部等时线定年的有效性提供直接判据。本文对大别山双河超高压变质岩已经进行过地质年代学研究的同一样品进行了系统的矿物 O 同位素分析,在此基础上讨论了矿物 O 同位素温度与矿物 Sm-Nd 和 Rb-Sr 等时线年龄之间的对应关系及其所代表的地质意义。

2 地质背景和样品

本文研究的样品为采自大别造山带中部的双河地区,地表出露的超高压变质岩有榴辉岩(榴闪岩)、黑云母副片麻岩、花岗片麻岩、大理岩和硬玉石英岩。双河超高压变质岩为一拉长的构造接触岩片,走向为 NNW—SSE,出露面积约为 1 km²。榴辉岩与副片麻岩、大理岩或硬玉石英岩呈互层状产出,它们被一个右旋走滑断层分割为两个岩片,围岩为花岗片麻岩。

双河超高压岩石经历了 3 期变质阶段:①峰期超高压榴辉岩相,石榴石中发现有柯石英和富集硬玉的绿辉石包裹体,变质温度为 720~880 °C,压力

大于 2 800 MPa;②高压榴辉岩相重结晶,表现为石榴石和绿辉石与石英而不是柯石英共生,变质温压条件为 630~760 °C 和 1 300~1 600 MPa;③角闪岩相退变质,出现各种后成合晶如角闪石+钠质斜长石,榴辉岩中绿辉石消失。温压条件为 470~570 °C 和 600~800 MPa。

前人对双河榴辉岩、黑云母副片麻岩、花岗片麻岩和硬玉石英岩进行了详细的 U-Pb、Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素定年。利用 Wetherill 型不一致线得到的黑云母副片麻岩锆石 U-Pb 下交点年龄分别为 237±4 Ma 和 233±21 Ma,花岗片麻岩下交点年龄分别为 228±12 Ma 和 226±8 Ma。榴辉岩矿物 Sm-Nd 内部等时线测定给出的年龄为 226±3 Ma 和 242±3 Ma,黑云母副片麻岩年龄为 227±2 Ma、231±35 Ma 和 246±2 Ma,花岗片麻岩年龄为 213±5 Ma。榴辉岩矿物 Rb-Sr 内部等时线测定给出的年龄为 174±8 Ma,黑云母副片麻岩年龄为 167±3 Ma 至 202±6 Ma,花岗片麻岩年龄为 171±3 Ma 和 173±3 Ma。结合大别山其他地区超高压变质岩年龄结果,证实双河超高压变质作用也发生在三叠纪,在早侏罗世经历了角闪岩相退变质作用。尽管早白垩世岩浆活动对北大别带变质岩发生了不同程度的改造,但是对中大别带的影响至今尚未发现。

本文 O 同位素分析用矿物与先前进行 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素定年的矿物属同一样品,包括一件黑云母副片麻岩、一件花岗片麻岩、一件榴辉岩和一件榴闪岩。其岩相学特征简要概述如下:①副片麻岩(92HT-1)与含有榴辉岩团块的大理岩互层,主要由石英、石榴石、绿帘石、黑云母、多硅白云母和斜长石以及少量的榍石和金红石组成,多硅白云母部分被黑云母替代,金红石部分被榍石替代;②花岗片麻岩(92SH-1)为榴辉岩和副片麻岩的区域围岩,主要由石英、钾长石、斜长石、黑云母、绿帘石和石榴石(锰铝榴石含量高达 18.6~34.9 mol%,镁铝榴石含量低至 1.0~3.8 mol%)组成;③榴辉岩(92HT-4)为细粒块状,主要由石榴石、绿辉石、金红石和石英以及少量角闪石组成,石榴石中发现了残留的柯石英或其假象包体;④榴闪岩(92HT-12)为一退变榴辉岩,呈团块状产于大理岩中,由石英、方解石、石榴石、角闪石、斜长石和榍石以及少量磷灰石和锆石组成。除石榴石中的绿辉石包裹体外,其他绿辉石都退变为角闪石,但没有发现黑云母。与角闪石和榍石共生的重结晶石英和磷灰石常见。另外,榍石以

冠状体形式环绕钛铁矿, 钛铁矿中含有残留金红石。

3 O 同位素

等温图是一种展示石英与其他矿物之间 O 同位素分馏作为温度函数的直观图解。双河副片麻岩、花岗片麻岩、榴辉岩和榴闪岩 O 同位素测温给出两组温度, 第一组为 600~720 °C, 第二组为 420~540 °C。与已知的岩石学测温结果相比, 第一组可能对应折返过程中难熔矿物保存的榴辉岩相变质温度, 第二组对应含水矿物由于角闪岩相退变质而引起的同位素再造温度。

在副片麻岩 92HT-1 中, 多硅白云母和石榴石 O 同位素温度为 600~645 °C, 代表冷却过程中榴辉岩相温度, 但角闪岩相退变质再造了黑云母 O 同位素组成, 得到 510 °C 的较低温度。黑云母氧扩散速率比石榴石和多硅白云母快, 因此 O 同位素容易发生再造。

在花岗片麻岩 92SH-1 中, 退变质矿物如斜长石、黑云母和绿帘石-石英矿物对给出一致的 410~430 °C 的温度, 表明角闪岩相重结晶过程中 O 同位素达到了再平衡。然而, 该样品石榴石 O 同位素温度为 630 °C, 表明其保存了折返过程中榴辉岩相变质温度。与斜长石、黑云母和绿帘石相比, 石榴石具有较慢的氧扩散速率。

在榴辉岩 92HT-4 中, 绿辉石和石榴石 O 同位素温度为 700~730 °C, 表明难熔矿物保存了超高压变质条件, 但金红石由于角闪岩相退变质而得到 520 °C 的较低温度。金红石不仅氧扩散速率比石榴石和绿辉石快, 而且容易遭受退变质重结晶, 所以具有低的氧扩散封闭温度。在榴闪岩 92HT-12 中, 以下观察表明石榴石与其他矿物之间处于同位素不平衡状态: ① 测定的石英、斜长石、角闪石与石榴石之间 O 同位素分馏太大, 相互之间不平衡; ② 测定的石榴石与榍石之间的分馏为负值, 与热力学平衡条件下 ^{18}O 富集顺序相反; ③ 石英-石榴石矿物对给出不合理低的 O 同位素温度 ($< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$), 而石榴石具有慢的氧扩散速率, 应该得到较高的 O 同位素温度。因此, 石榴石是原岩榴辉岩的残留矿物, 而其他矿物是角闪岩相退变质新形成的后成结晶。然而, 榍石、角闪石和斜长石-石英矿物对分别给出依次降低的封闭温度 (720 °C、550~500 °C), 表明从榴辉岩相到角闪岩相缓慢冷却过程中由于退化交换而出现不同程度的 O 同位素再造。

4 讨论

双河两个片麻岩和一个角闪岩矿物 Rb-Sr 内部等时线年龄 (174 ± 8 Ma 至 171 ± 3 Ma) 为约 420~540 °C 温度条件下角闪岩相退变质作用停止的时间。同一样品三叠纪 Sm-Nd 等时线年龄的保存, 表明在角闪岩相退变质过程中, 超高压矿物的 Sr 扩散速率在手标本尺度比 Nd 快。副片麻岩 92HT-1 经历了强烈的角闪岩相退变质作用, 但部分退变的 Gt + Ep + Bi + Wr 组合仍然给出了合理的 Sm-Nd 等时线年龄 246 ± 2 Ma, 表明在退变质过程中 REE 具有比 Sr 和 O 更低的活动性。石榴石、多硅白云母和黑云母具有明显不同的 Sr 扩散速率, 但副片麻岩 92HT-1 中 Bi + Phg + Gt + Wr 组合仍然给出合理的 Rb-Sr 等时线年龄 174 ± 4 Ma, 表明角闪岩相退变质之后从 500 °C 开始的快速冷却。但是, Phg-Gt Rb-Sr 体系可能在榴辉岩相变质之后的约 600 °C 和 219 ± 7 Ma 封闭。这表明多硅白云母的 Sr 扩散封闭温度比黑云母高。

226 ± 3 Ma 的三叠纪年龄和 720 °C 的 O 同位素温度清楚地表明榴辉岩样品 92HT-4 中石榴石与绿辉石之间保存了榴辉岩相 Sm-Nd 同位素平衡。在苏鲁地体青龙山榴辉岩中也发现存在类似的情况, 700~800 °C 的 O 同位素温度对应于非常一致的 Sm-Nd (226 ± 5 Ma) 和 Rb-Sr (220 ± 1 Ma) 等时线年龄。这表明多硅白云母的 Sr 扩散封闭温度可能低于但接近石榴石的 Nd 扩散封闭温度。

榴闪岩 92HT-12 为角闪岩相条件下榴辉岩强烈退变的产物。残留和退变的矿物组合 Gt + Amp + Tt + Ap + Wr 给出的 Sm-Nd 等时线年龄为 238 ± 3 Ma, 而 Amp + Wr 矿物组合给出的 Rb-Sr 等时线年龄为 174 ± 8 Ma。新结晶的矿物之间达到了 O 同位素再平衡, 得到的石英-角闪石和石英-斜长石矿物对再造温度分别为 540 °C 和 500 °C。这表明在角闪岩相退变质过程中, 稀土元素在相对封闭的体系中活动有限, 但 Sr 和 O 在同等变质条件下活动性相对较大。石榴石数据点向下偏离等时线以及出现极低的 O 同位素温度, 指示残留石榴石和新生矿物之间存在明显的 Sr 和 O 同位素不平衡。

虽然 Sm-Nd 等时线给出一致的三叠纪超高压变质年龄 (213~238 Ma), 但同一样品 Rb-Sr 等时线却给出侏罗纪年龄 (171~174 Ma)。片麻岩、榴辉岩和榴闪岩矿物 O 同位素地质测温得到 600~720 °C 和 420~540 °C 两组温度, 分别对应于约 225 ± 5

Ma 榴辉岩相变质和约 175 ± 5 Ma 角闪岩相退变质过程中持续的同位素再造停止的温度。同一样品三叠纪 Sm-Nd 等时线年龄的保存和侏罗纪 Rb-Sr 等时线年龄的出现以及有规律的 O 同位素温度,表明角闪岩相退变质过程中超高压矿物 Sr 和 O 的扩散速率在手标本尺度比 Nd 快。这与实验测定结果是一致的,同一矿物中三价阳离子(如,REE)的扩散速率比二价阳离子(如,Ca、Mg 或 Fe)要慢。实验研究也显示出相反的压力效应:透辉石和铁铝榴石中 Sm-Nd 的扩散速率随着压力的增加而降低,而 Sr 和 O 在硅酸盐矿物中的扩散速率随压力的增加而增加。由于 Sr 和 O 的扩散速率对压力变化的响应不同,板块折返过程中变质矿物 Sr 扩散速率可能会变得比 O 快。

双河超高压变质岩实例研究显示,等时线矿物之间较慢的 Nd 同位素再平衡速率是由于受具有高 Sm/Nd 比值但 Sm-Nd 扩散速率比 Sr 慢的石榴石控制。与此相反,快的 Sr 同位素再平衡速率反映含水矿物(如黑云母和角闪石)具有快的 Sr 迁移速率,它们不仅具有高的 Rb/Sr 比值,而且 Sr 扩散速率比其他矿物快。然而,副片麻岩和榴辉岩中含多硅白云母的 Rb-Sr 等时线三叠纪年龄的保存表明,多硅白云母 Sr 扩散速率比黑云母和角闪石慢,但快于或接近于石榴石 Nd 的扩散速率。因为 Sm-Nd 和 Rb-Sr 等时线的构成主要受高母/子体比值矿物控制,因此多硅白云母 Nd 和 Sr 扩散速率的差异指示了后期地质事件对等时线再造的程度。