

苏鲁地体胡家林和梭罗树三叠纪变质超基性岩 U-Pb、Lu-Hf 和 O 同位素地球化学研究

龚冰 郑永飞 陈斌 吴元保

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 胡家林超基性岩单矿物氧同位素组成基本上接近正常地幔值(石榴石 4.7‰~5.4‰)。梭罗树超基性岩及其共生榴辉岩具有氧同位素正异常(超基性岩中石榴石 9.8‰~10.4‰,榴辉岩中石榴石 9.0‰~12.1‰)指示超基性岩和榴辉岩原岩可能在板块俯冲之前,在浅层或地表环境中经历过蛇绿岩套顶部相似的低温热液蚀变。胡家林超基性岩样品中的变质锆石年龄 227.2 ± 2.4 Ma,可能代表俯冲板块经峰期超高压变质后,折返初期从金刚石榴辉岩相降压至柯石英榴辉岩相过程中流体活动和锆石结晶的年龄。梭罗树超基性岩样品中变质锆石的一组变质年龄 240.4 ± 2.4 Ma 代表了板块俯冲至超高压峰期变质之前流体活动过程中锆石的结晶年龄,而另一组变质年龄 217.1 ± 3.3 Ma 代表了板块折返过程中高压榴辉岩相重结晶条件下的锆石结晶年龄。从变质锆石到重结晶锆石,其 Th/U 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 呈现出相似的变化趋势,可能指示了变质作用对锆石中的 U-Th-Pb 同位素体系和 Lu-Hf 同位素体系产生相似的地球化学效应。梭罗树超基性岩可能来源于俯冲地壳内部的“残留地幔”。胡家林超基性岩重结晶锆石中继承的放射成因铅或者来源于俯冲地壳与仰冲盘底部石榴辉石岩相地幔发生的壳幔相互作用而导致碎屑锆石的重结晶,或者来源于超基性岩岩浆在板块俯冲前,通过底侵作用上升侵位与地壳物质发生混染形成岩浆锆石,这种岩浆锆石在超高压变质过程中经历了重结晶。

关键词 超基性岩 锆石 U-Pb Lu-Hf O 同位素

Zircon U-Pb Age, Lu-Hf and O Isotope Geochemistry of Triassic Meta-Ultramafic Rocks at Hujialin and Suoluoshu in the Sulu Orogenic Belt

GONG Bing ZHENG Yongfei CHEN Bin WU Yuanbao

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 Zircon U-Pb dating, Lu-Hf and O isotope analyses were carried out for meta-ultramafic rocks at Hujialin and Suoluoshu in the Sulu orogenic belt. The results indicate that despite significant difference in their $\delta^{18}\text{O}$ values, the ultramafic rocks experienced Triassic metamorphism during the subduction of the South China plate beneath the North China block. Zircon U-Pb and Lu-Hf isotope systems were reset by crustal contamination during the Triassic subduction, with the fluid activity at the onset of ultrahigh pressure metamorphism and decompression exhumation from ultrahigh pressure to high pressure phases.

Key words ultramafic rocks zircon U-Pb Lu-Hf O isotope

前人对大别-苏鲁超高压变质带中的超基性岩进行了许多岩石学和地球化学方面的研究,取得了不少成果和进展。但是对其岩石成因和形成的构造背景的认识仍存在较大的分歧。对于大别-苏鲁超高压变质带中超基性岩的物质来源和演化途径主要有以下几种不同的认识:①来源于俯冲板块内部的

“残留地幔”随俯冲板块俯冲折返并经历了超高压变质作用;②来源于仰冲盘底部的地幔,被俯冲板块带入深部地幔并经历了超高压变质作用;③来源于大陆岩石圈地幔,在俯冲板块折返过程中被带回地表。在大别-苏鲁超高压变质带的超基性岩中发现了大量的超高压变质作用的矿物组合和出溶体,

表明这些岩石可能来自地幔深部,或者曾经在大陆地壳俯冲时被带到过地幔深部。对苏鲁芝麻坊石榴橄榄岩和胡家林石榴辉岩中进行 SHRIMP 法锆石 U-Pb 定年,得到 216~224 Ma 的年龄。这些年龄要明显晚于超高压变质作用的峰期时间(240~226 Ma),指示了深俯冲大陆板块折返过程中的锆石生长时间为晚三叠世。超基性岩氧同位素组成的分析指示,芝麻坊的石榴橄榄岩的源岩来自地幔,并且在经历超高压变质之前曾经在地壳深度出露,受到过地壳物质的混染。

本文对苏鲁超高压变质带中梭罗树和胡家林超基性岩体进行了系统的矿物氧同位素组成分析,并对其中的锆石进行了 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析。希望根据这些来确定超基性岩中锆石的形成机制,以及变质锆石的结晶与流体活动及超高压变质作用之间的关系,并对苏鲁超基性岩的成因和演化提供了进一步的证据。

1 氧同位素

胡家林超基性岩单矿物氧同位素组成基本上接近正常地幔值(石榴石 4.7‰~5.4‰,单斜辉石 4.8‰~5.7‰,橄榄石 5.0‰~6.2‰),单斜辉石-石榴石矿物对氧同位素温度为 600~1 000 °C,指示胡家林超基性岩经历了榴辉岩相变质作用,达到并保存了榴辉岩相条件下的氧同位素平衡。

梭罗树超基性岩及其共生榴辉岩具有氧同位素正异常(超基性岩中石榴石 9.8‰~10.4‰,蛇纹石 10.5‰~11.6‰,榴辉岩中石榴石 9.0‰~12.1‰,绿辉石 8.5‰~10.9‰),其中石英-矿物对氧同位素温度为 400~650 °C,指示石榴橄榄岩随俯冲板块折返过程中矿物对之间经受了退变质条件下的氧同位素交换再平衡。梭罗树榴辉岩和超基性岩的围岩是片麻岩,片麻岩中单矿物 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对较低(-5.0‰~4.9‰),石英-矿物对氧同位素温度为 300~650 °C,指示片麻岩在退变质过程中矿物对之间达到了氧同位素再平衡。其中石榴石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -2.1‰~0.5‰,远低于地幔值(5.3±0.3)‰。对于梭罗树蛇纹岩和围岩片麻岩界线处的蛇纹岩样品中磁铁矿的 $\delta^{18}\text{O}$ 值低达 -7.0‰,而远离界线处蛇纹岩样品中磁铁矿的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -1.2‰~1.9‰,这反映了板块折返过程中片麻岩围岩矿物的羟基会释放出来形成退变质流体。这种退变质流体具有亏损¹⁸O 的特点,指示梭罗树超基性岩和榴辉岩高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值不可能由板块俯冲和折返过程中片麻岩围岩释放的变质流体造成的。因此超基性岩和榴辉岩

原岩可能在板块俯冲之前,在浅层或地表环境中经历过蛇绿岩套顶部相似的低温热液蚀变。梭罗树超基性岩可能来源于俯冲板块内部的“残留地幔”,随俯冲板块俯冲折返并经历了超高压变质作用。

2 锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素

结合锆石 CL 照片和 U-Pb 定年,胡家林超基性岩样品中的锆石分为变质锆石(新生)和重结晶锆石。不一致线上下交点年龄分别为 893±79 Ma 和 227±7 Ma(MSWD=0.27),分布于不一致线下交点处谐和线上的 4 个点 $T_{206}/_{238}$ 的加权平均年龄为 227.2±2.4 Ma(MSWD=0.37),与不一致线下交点年龄在误差范围内一致,应该代表了变质锆石形成年龄,与大别-苏鲁超高压变质作用年龄一致。这指示胡家林超基性岩经历了三叠纪超高压变质作用,因此与单斜辉石-石榴石矿物对氧同位素温度计得到的榴辉岩相变质温度 600~1 000 °C 是一致的。胡家林超基性岩样品中的变质锆石年龄为 227.2±2.4 Ma,与副片麻岩中含柯石英锆石微区的 SHRIMP 定年结果 227±2 Ma、231±4 Ma 和 234±4 Ma 相比,可能代表俯冲板块经峰期超高压变质后,折返初期从金刚石榴辉岩相降压至柯石英榴辉岩相过程中流体活动和锆石结晶的年龄。不一致线上交点年龄为 893±79 Ma,由于在变质过程中重结晶作用影响,因此这个上交点年龄误差较大。

对梭罗树超基性岩样品中锆石 U-Pb 定年,得到两组变质年龄 240.4±2.4 Ma 和 217.1±3.3 Ma,分别代表超高压峰期变质前、后变质锆石的形成时间。对于变质锆石的形成,流体的作用非常重要,它能够为变质锆石的形成提供 Zr 和 Si。在超高压变质的峰期,流体活动非常有限,而在板块俯冲和折返过程中,由于板块内部压力和深度的变化,会导致含水矿物中水的释放和羟基的出溶,从而形成变质流体。梭罗树超基性岩蛇纹岩化程度强烈,暗示了梭罗树超基性岩在俯冲板块俯冲、折返过程中有充分的流体释放。因此,梭罗树超基性岩样品中变质锆石的一组变质年龄 240.4±2.4 Ma 可能代表了板块俯冲至超高压峰期变质之前流体活动过程中锆石的结晶年龄,而另一组变质年龄 217.1±3.3 Ma 可能代表了板块折返过程中高压榴辉岩重结晶条件下的锆石结晶年龄。

胡家林超基性岩样品中变质锆石的 Th/U 为 0.02~0.03,梭罗树超基性岩样品中变质锆石的 Th/U 为 0.03~0.07,表现出典型的变质成因特征。而胡家林超基性岩样品中重结晶锆石的 Th/U 为

0.24~1.77, 指示其原岩可能为岩浆成因, 岩浆锆石在变质过程中经历了重结晶或部分重结晶, 其 U-Pb 体系遭受了不同程度的改造。两个超基性岩样品中变质锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000001~0.000036, 而胡家林超基性岩样品中重结晶锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000327~0.000778。从变质锆石到重结晶锆石, 它们的 Th/U 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 呈现出相似的变化趋势。这可能指示了变质作用对锆石中的 U-Th-Pb 同位素体系和 Lu-Hf 同位素体系产生相似的地球化学效应。

变质锆石中的 Th/U 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 特征可能反映了变质流体中 Th/U 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 特征。由于石榴石是富集重稀土元素(HREE)的主要造岩矿物, 在超高压变质条件下石榴石的形成或重结晶可能造成变质流体中重稀土元素(HREE)的亏损, 从而导致与石榴石共生的矿物(如变质锆石)亏损 HREE。因此, 超基性岩中的变质锆石低的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值可能与板块俯冲和折返过程中石榴石的形成和重结晶有关。

3 对超基性岩起源和演化的制约

对梭罗树石榴橄榄岩样品中锆石的 U-Pb 定年, 得到两组变质年龄 240.4 ± 2.4 Ma (MSWD = 1.3) 和 217.1 ± 3.3 Ma (MSWD = 1.05)。对于其 Lu-Hf 同位素, 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t_1)$ 为 12.0~14.6, 加权平均 $\epsilon_{\text{Hf}}(t_1)$ 为 13.1 ± 0.6 (MSWD = 0.52), t_{DMI} 为 870~972 Ma, 加权平均 t_{DMI} 为 927 ± 21 Ma (MSWD = 1.07)。这可能指示了形成锆石的超基性岩岩浆来源于中元古代末期—新元古代早期的亏损地幔, 并在约 900 Ma 左右通过底侵作用上升侵位形成俯冲地壳内部的“残留地幔”, 与地壳物质发生的混染作用使其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t_1)$ 有所降低, 而 t_{DMI} 略有升高。并在浅

层或地表环境中经历过蛇绿岩套顶部相似的低温热液蚀变, 导致其氧同位素组成正异常。

对胡家林石榴辉石岩中锆石的 U-Pb 定年, 不一致线上下交点年龄分别为 893 ± 79 Ma 和 227 ± 7 Ma (MSWD = 0.27)。对于重结晶锆石的 Lu-Hf 同位素, 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t_1)$ 为 8.5~10.6, t_{DMI} 为 1 028~1 109 Ma, 对于变质锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t_1)$ 为 8.9~9.6, t_{DMI} 为 1 062~1 102 Ma, 与重结晶锆石基本一致, 说明虽然其 Lu/Hf 比受变质作用影响较大, 但 Hf 同位素组成基本继承了原岩特点。对于重结晶锆石中继承的放射成因 Pb 的来源可能是由以下两种机制产生: ① 亏损地幔的超基性岩岩浆在 800~900 Ma 左右通过底侵作用上升侵位时, 与地壳物质发生混染形成岩浆锆石, 这种构造侵位于俯冲板块内部的超基性岩随俯冲板块俯冲折返, 岩浆锆石在超高压峰期变质后由于含水矿物中水的释放和羟基的出溶经历了重结晶, 其 U-Pb 体系遭受了不同程度的改造; ② 俯冲板块在俯冲至 100 km 或更深的深度时, 由于俯冲板块内部流体的释放和/或深部温度足够的高, 俯冲板块会呈塑性, 由于重力效应, 在俯冲板块表层和仰冲盘底层的石榴辉石岩相的地幔之间发生壳幔相互作用, 石榴辉石岩相的地幔物质会进入塑性的俯冲地壳中, 而俯冲地壳的流体/物质会交代上覆地幔和进入俯冲地壳的地幔物质, 碎屑锆石会在缝合界面重结晶或部分重结晶。重结晶锆石中继承的放射成因 Pb 的来源如果是前者, 则指示胡家林超基性岩与大别山地区的碧溪岭和毛屋的超基性岩一样, 在超高压变质之前就侵位于俯冲地壳, 如果是后者, 则指示胡家林超基性岩来源于仰冲盘底部的石榴辉石岩相地幔, 并与俯冲地壳物质发生了壳幔相互作用。进一步的研究工作将区别这两种不同的机制。