

威海地区超高压变质花岗岩成因 : 锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究

唐 俊 郑永飞 吴元保 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 在苏鲁超高压变质带东北段威海地区皂埠镇发现锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值低至 -7.8‰ 左右的变质花岗岩,对这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 值变质花岗岩进行了锆石 SHRIMP 法 U-Pb 定年和系统的激光氟化法矿物氧同位素分析,结果对低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石成因和变质花岗岩的原岩性质提供了制约。研究得到 ① 这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石以新元古代岩浆锆石为主,但部分岩浆锆石在印支期超高压变质作用过程中发生了不同程度的重结晶作用。 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -7.08‰ 的岩浆核锆石 U-Pb 定年得到的变质花岗岩原岩谐和年龄和不一致线上交点年龄分别为 $760 \pm 49 \text{ Ma}$ 和 $751 \pm 27 \text{ Ma}$,变质谐和年龄和不一致线下交点年龄分别为 $232 \pm 4 \text{ Ma}$ 和 $241 \pm 33 \text{ Ma}$,指示其原岩为新元古代花岗岩并经历了印支期变质作用;② 锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值在局部范围内变化于 $-7.76\text{‰} \sim 5.40\text{‰}$ 之间,低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆锆石表明它们是从新元古代低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆中直接结晶形成,锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值的局部变化表明其原岩岩浆的氧同位素组成具有不均一性,指示低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆源区物质曾经在地表与极度亏损 ^{18}O 的大气降水发生过不同程度的高温水岩反应。威海皂埠镇地区和东海青龙山地区的花岗片麻岩在原岩时代、变质时代和氧同位素组成等方面基本相同,指示其应具有相同的原岩性质,并经历了相同的变质作用和水岩相互作用过程。因此,极度亏损 ^{18}O 的新元古代双峰式基性-酸性岩浆岩可能分布于整个大别-苏鲁造山带。

关键词 苏鲁造山带 变质花岗岩 锆石 U-Pb 定年 氧同位素 原岩性质

Zircon U-Pb Dating and Oxygen Isotopes of UHP Metagranite from Weihai Area , Northeast Sulu Orogenic Belt

TANG Jun ZHENG Yongfei WU Yuanbao 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 Extremely ^{18}O -depleted zircons in granitic gneisses , whose $\delta^{18}\text{O}$ values are as low as -7.8‰ , were found in Zaobuzhen of Weihai area , the northeastern end of the Sulu orogenic belt. SHRIMP zircon U-Pb ages and oxygen isotope compositions were determined for the low $\delta^{18}\text{O}$ zircons. CL images reveal that the low $\delta^{18}\text{O}$ zircons are primarily of igneous origin , but some grains have undergone metamorphic recrystallization. The igneous zircons from a granitic gneiss sample yield a concordant U-Pb age of $760 \pm 49 \text{ Ma}$ and an upper intercepted age of $751 \pm 27 \text{ Ma}$, indicating a protolith of middle Neoproterozoic age. Metamorphic zircons from the same sample yield a concordant U-Pb age of $232 \pm 4 \text{ Ma}$ and a lower intercepted age of $241 \pm 33 \text{ Ma}$, pointing to the Triassic UHP metamorphism. Most of the igneous zircons have unusually variable $\delta^{18}\text{O}$ values of $-7.76\text{‰} \sim 5.40\text{‰}$, implying that the gneiss protolith was intruded as low $\delta^{18}\text{O}$ magma generated by partial melting of altered rocks which had suffered intense water-rock interaction with a low $\delta^{18}\text{O}$ fluid at high temperatures during Neoproterozoic.

Key words Sulu orogenic belt metagranite zircon U-Pb dating oxygen isotopes property of protolith

氧在锆石中的扩散速率极低,因此锆石具有较高的氧同位素封闭温度。在亚固相条件下,锆石可以不受后期高温热液蚀变作用和高级变质作用的影响,能够提供变质岩原岩的氧同位素信息。所以,将

锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究相结合,能够对变质岩的原岩性质提供有效制约。先前对大别-苏鲁造山带变质岩系统的矿物氧同位素研究表明,变质岩岩浆(花岗片麻岩和榴辉岩)不同程度地亏损 ^{18}O ,

其中的锆石也普遍亏损 ^{18}O ,多数锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于地幔值(5.3 ± 0.3)‰的范围,指示这些变质岩原岩在超高压变质作用之前曾经与地表水发生过强烈的高温热液蚀变作用,而且发生水岩反应的范围超过 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。已有的研究认为,大别-苏鲁地区大规模 ^{18}O 亏损事件形成于新元古代大陆裂谷环境,其成因与新元古代 Rodinia 超大陆裂解和全球性冰川事件有关,而高温水岩反应的流体主要来源于极度亏损 ^{18}O 的严寒气候大气降水或冰川溶融水。

胶东地块东部地区位于苏鲁超高压变质带的东北段,花岗片麻岩和榴辉岩中的锆石也显著亏损 ^{18}O ,与大别、东海及胶南等地超高压变质岩区域性 ^{18}O 亏损现象一致。因此大别-苏鲁超高压变质带 ^{18}O 亏损范围可从青岛仰口地区进一步扩大至荣成和威海等地区, ^{18}O 亏损面积应超过 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在此次研究中,笔者首次在威海地区皂埠镇发现锆石极度亏损的变质花岗岩,其中锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值可低至 -7.8 ‰,与江苏东海青龙山地区花岗片麻岩中的锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值非常相似。本文对这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石进行了详细的 CL 结构分析、SHRIMP 法 U-Pb 定年和系统的氧同位素分析。

1 地质背景简介和样品描述

胶东地块东部地区出露的岩石类型以新元古代花岗岩和中生代花岗岩为主,其中新元古代花岗岩经历了三叠纪超高压变质作用,经变形变质后形成花岗片麻岩,在花岗片麻岩中分布有大量的含柯石英榴辉岩包体。此次研究的 7 个花岗片麻岩样品均位于威海地区皂埠镇沙龙王村附近,其中有一个样品为拣块样品,两个样品位于海滩边,二者相距 3 m,其他 4 个样品采自村口一条公路剖面,该公路剖面位于两个海滩样品南部约 300 m 左右,剖面走向近 EW 向,长度约 55 m。这 7 个样品的岩性均为黑云母二长花岗片麻岩,矿物组合为石英+钾长石+斜长石+黑云母+角闪石+绿帘石+石榴石+磷灰石+锆石+榍石+磁铁矿。皂埠镇花岗片麻岩片麻理发育,不仅暗色矿物具有明显的定向性,许多浅色矿物如石英和长石也被定向拉长,具有韧性剪切特征。

本文对 1 个花岗片麻岩样品中的锆石作了 CL 结构分析和 SHRIMP 法 U-Pb 定年,并对这 7 个样品作了系统的单矿物氧同位素分析。

2 锆石 U-Pb 年龄

用来进行 SHRIMP 定年的锆石晶体大小在

100~200 μm 左右,晶形以自形长柱状为主,少数为自形短柱状,柱面和锥面均较发育,长短轴之比为 2:1 至 4:1,具岩浆锆石晶形特征。在 CL 图像中,多数锆石具有明显的岩浆环带结构,且 Th/U 比值较高(>0.4),表明这些锆石均为岩浆成因;部分岩浆锆石受后期变质重结晶作用影响,岩浆环带变得模糊或消失,CL 强度呈面状或杂斑状分布,Th/U 比值较低(<0.2),具变质重结晶锆石特征。

对其中的 5 粒锆石总共分析了 10 个分析点,其中有 4 个点均位于不一致线上交点谐和线上,其他 6 个分析点由于受后期不同程度变质重结晶作用影响而沿不一致线分布,该不一致线上交点和下交点年龄分别为 $751 \pm 27 \text{ Ma}$ 和 $241 \pm 33 \text{ Ma}$ (MSWD=2.3)。分布于不一致线上交点处谐和线上的 4 个点 $T_{206/238}$ 加权平均年龄为 $760 \pm 49 \text{ Ma}$ (MSWD=8.7),与不一致线上交点年龄在误差范围内一致,该组谐和年龄应指示片麻岩原岩形成时间。位于下交点谐和线上 3 个完全重结晶锆石分析点的 $T_{206/238}$ 加权平均年龄为 $232 \pm 4 \text{ Ma}$ (MSWD=0.69),也与不一致线下交点年龄在误差范围内一致,该组谐和年龄应代表超高压变质作用时间。

3 氧同位素

威海皂埠镇花岗片麻岩的氧同位素变化范围较大。沙龙王村海滩处的 2 个样品具有相对较高的氧同位素组成,而且单矿物和全岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围较小。沙龙王村口公路剖面的 4 个样品以及附近的 1 个拣块样品则具有显著的 ^{18}O 亏损特征,而且单矿物和全岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围较大,尤其是锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化于 -7.76 ‰~ -1.17 ‰,均明显低于地幔锆石值(5.3 ± 0.3)‰的范围;与锆石相比,石英、钾长石、斜长石、磁铁矿等单矿物以及全岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围相对较小一些。

位于沙龙王村海滩处的 2 个花岗片麻岩样品的单矿物基本处于不同变质条件下的氧同位素平衡状态。其中长石和磁铁矿等矿物在角闪岩相退变质作用过程中达到并基本保持了氧同位素平衡状态。石英-锆石矿物对的氧同位素温度略低于花岗岩($750 \sim 850$ °C)岩浆结晶温度,说明石英在岩浆冷却和/或变质作用过程中的与其他矿物发生了氧同位素交换,导致石英 $\delta^{18}\text{O}$ 值略有上升。

位于沙龙王村口处的 5 个花岗片麻岩样品中的部分单矿物也处于不同变质条件下的氧同位素平衡状态。其中部分石榴石和榍石达到并保存了榴辉岩相变质作用条件下的氧同位素平衡状态,磁铁矿在

角闪岩相退变质作用过程中达到并保存了氧同位素平衡状态。5 个石英-锆石矿物对中有 1 个样品给出了 830 ℃ 的平衡温度,有 3 个样品给出了 465~635 ℃ 的较低温度,说明石英 $\delta^{18}\text{O}$ 值在变质作用过程中也受到了不同程度的改造。有 1 个样品中的石英和锆石的氧同位素分馏出现倒转现象,说明相对锆石而言,该样品的石英 $\delta^{18}\text{O}$ 值在原岩(花岗岩)形成之后被强烈化学再造,导致石英与锆石处于明显的氧同位素不平衡状态。5 个样品中石英与钾长石和斜长石也明显处于氧同位素不平衡状态,多数石英-长石的氧同位素分馏出现倒转,表明在角闪岩相变质作用之后,钾长石和斜长石又与后期流体在亚固相条件下发生了不同程度的氧同位素交换,导致长石 $\delta^{18}\text{O}$ 值不同程度的升高。

4 花岗片麻岩低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石成因

大别-苏鲁造山带中新元古代变质岩浆岩(花岗片麻岩和榴辉岩)中低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石主要形成于新元古代中期。先前的研究得到,扬子板块北缘新元古代双峰式(酸性-基性)裂谷岩浆活动的时间主要集中在 700~800 Ma,其中在 750 Ma 左右岩浆活动最强烈。早期裂谷型岩浆活动可以启动高温大气降水热液蚀变,形成低 $\delta^{18}\text{O}$ 值热液蚀变岩石;这些热液蚀变岩石由于富含大量水,会导致其熔点显著降低。随着裂谷构造活动的延续,这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 值蚀变岩石(尤其是酸性蚀变岩石)可以发生断裂重熔,从而形成低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆,并从中结晶出低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆锆石。大别地区北淮阳浅变质带中新元古代低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆岩的发现,表明这些热液蚀变岩在新元古代的确通过重熔作用形成了低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆,并从中结晶出低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石。目前世界其他地区发现的低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆岩基本上也都是由低 $\delta^{18}\text{O}$ 值高温热液蚀变岩石通过重熔作用而形成。

胶东地块东部花岗片麻岩也普遍亏损 ^{18}O ,虽然锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有较大的变化范围,但多数锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于地幔值 (5.3 ± 0.3) ‰,其中低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石变化于 $-0.42\text{‰} \sim 4.14\text{‰}$ 之间,多数集中在 $3\text{‰} \sim 4\text{‰}$ 左右。无论是低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石还是高 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石均由不同比例的新元古代原岩岩浆锆石和变质重结晶锆石组成,岩浆核锆石的结晶时代在年龄误差范围内也基本一致,指示这些以低 $\delta^{18}\text{O}$ 值为主的岩浆核锆石是从新元古代低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆中直接结晶形成。因为花岗片麻岩锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值与全岩 SiO_2 含量之间没有明显的相关性,所以引起岩浆锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值发生局部变化的主要原因不是由原岩岩浆侵位时与围岩同化混染所致,而是指示其原岩岩浆氧同位素组成

在局部范围内具有不均一性,这种不均一性可能继承了其源区岩石氧同位素组成的特点,是遭受程度不同的热液蚀变岩石再经受重熔的典型特征。但是极度亏损 ^{18}O 的锆石其全岩 SiO_2 含量总体偏高一些,因此 $\delta^{18}\text{O}$ 值非常低的岩浆在局部范围内存在着同化混染的可能性。

用作 SHRIMP 法定年的锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -7.08‰ , CL 结构分析和 U-Pb 定年结果表明,这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石同样由原岩岩浆锆石和变质重结晶锆石组成,其中岩浆锆石不仅保存有完好的长柱状晶形,而且还保存了较清晰的岩浆环带,锆石不仅具有较高的 Th/U 比值 (>0.4),而且多数还给出了新元古代 750 Ma 左右的谐和年龄,说明这些岩浆锆石的 U-Pb 体系基本未受到后期地质作用的扰动。与此同时,也有部分岩浆锆石受印支期超高压变质作用影响而发生了不同程度的重结晶作用。这些重结晶锆石虽然还保留了较好的长柱状岩浆锆石晶形,但原先的岩浆环带已变得非常模糊甚至消失。这些重结晶锆石总体具有较低的 Th/U 比值 (<0.2),年龄结果也沿着不一致线分布,其中有 3 个分析点给出了超高压变质作用谐和年龄,说明这些重结晶锆石的 U-Pb 体系在超高压变质作用过程中受到了不同程度的扰动甚至完全重置。

对大别-苏鲁地区变质岩锆石微区氧同位素分析表明原岩岩浆锆石与变质增生或重结晶锆石之间没有明显的氧同位素组成差异;另外,对东海青龙山地区花岗片麻岩中 $\delta^{18}\text{O}$ 值低至 $-5\text{‰} \sim -7\text{‰}$ 的锆石采用空气剥蚀技术得到的锆石内部岩浆核 $\delta^{18}\text{O}$ 值与未采用空气剥蚀技术得到的整体锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值基本一致,表明这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要代表锆石内部新元古代岩浆核的氧同位素组成。以上分析表明,大别-苏鲁地区印支期超高压变质作用对变质岩原岩岩浆锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值并没有产生明显的改变。

虽然本文多数样品的单矿物在变质作用过程中发生了氧同位素再平衡现象,但有 1 个样品中的石英-锆石矿物对仍然给出了 830 ℃ 氧同位素温度,说明该样品中的石英和锆石基本保存了原岩岩浆结晶时的氧同位素平衡状态,其全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值与原岩岩浆 $\delta^{18}\text{O}$ 估计值范围也比较一致。因此可以认为这些低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石主要反映原岩岩浆锆石的氧同位素组成,这些锆石是从极度亏损 ^{18}O 的岩浆中直接结晶形成。威海皂埠镇地区和东海青龙山地区的花岗片麻岩在锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成等方面基本相同,指示它们应具有相同的原岩性质,并经历了相同的变质作用和水-岩相互作用过程。