

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

大别山麻粒岩包体的氧同位素研究

肖益林 郑永飞 傅斌 龚冰 葛宁洁

(中国科学技术大学地球和空间科学系,合肥,230026)

内容提要 对北大别变质杂岩中的麻粒岩包体进行详细的氧同位素地球化学研究,发现其全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低,为 3.3‰~4.4‰。在麻粒岩相变质条件下,大别山麻粒岩包体的共存矿物对之间达到并保存了氧同位素平衡,后期退变质作用未明显破坏这种平衡。由矿物氧同位素地质测温得到的顶峰变质温度 800~875℃,与一般麻粒岩相变质温度相吻合。在变质作用之前或顶峰变质作用过程中,大别山麻粒岩包体的原岩曾与 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于 3‰ 的外来流体发生了高温水-岩交换作用,并且这种交换作用在一定范围内是相对均一的。

关键词 流体作用 地质测温 氧同位素 麻粒岩包体 大别山

深部地壳岩石的化学成分、微量元素和同位素组成特征是目前地球科学中争论的焦点之一,而对麻粒岩的研究能对这些方面提供非常重要的信息,并且关于深部地壳结构的很多假设和关于陆壳演化的模型均基于对麻粒岩的研究^[1]。根据麻粒岩的产状可分为两大类:大面积出露的麻粒岩地体和存在于其它岩石中的麻粒岩包体。尽管麻粒岩地体在深部地壳形成和演化的研究中起着独特的作用,但对于氧同位素研究而言,麻粒岩包体可能更完整地保存了其原始的同位素组成^[2]。

自柯石英和显微金刚石在大别山变质带的榴辉岩中被发现以来^[3~5],该地区已成为国际国内地学界研究的热点。前人已对该区的超高压岩石(特别是超高压榴辉岩)进行了大量的岩石学、地质年代学、地球化学、矿物学及构造地质学方面的研究工作,这些研究对了解大别山地区变质岩石的成因和演化、华北与扬子两大板块的碰撞时间和造山作用的地球动力学均具有非常重要的意义。对该地区同样具有重要地质意义的麻粒岩,沈其韩等^[6]、徐树桐等^[7]、周汉文^[8]和 Zhang 等^[9]已经进行过详细的岩石学研究,但尚未见有同位素地球化学方面的报道。笔者对位于北大别地区的麻粒岩包体进行了氧同位素地球化学研究,现将结果报告如下。

1 地质背景与样品

大别山造山带是东西走向的秦岭—大别造山带的东延部分,其变质杂岩构成了扬子板块和华北板块的碰撞带。基于岩石大地构造的研究^[7, 9, 10],大别山造山带可划分为 4 个构造单元:佛子岭低级变质单元、北大别高温变质单元、南大别超高压变质单元以及宿松变质单元。南大别超高压变质带榴辉岩中产有柯石英和金刚石^[3~5],为研究陆壳物质俯冲至 100 km 以下的地幔深度提供了简单而直接的证据。研究地区位于安徽省金寨县境内(图 1),其中样品 95DBH-3、95DBH-4 和 95DBH-5 采自燕子河地区,而样品 95ML-4 采自与燕子河相距约

注:本文为国家自然科学基金(编号 49794042 和 49453003)和中国科学院重大项目基金资助。

本文 1997 年 3 月收到,10 月改回,郝梓国编辑。

30 km 的前畈地区,两者均属北大别变质杂岩带。两地麻粒岩露头均呈透镜状包体出露于大面积分布的角闪岩相片麻岩中。麻粒岩包体大小不等,小为几十厘米大至几十米宽。它们和围岩发育有相同的片麻状构造,但二者具有不和谐的变质特征。研究所用样品分别采自一出露面积约 100m² 的较大的麻粒岩露头上(燕子河)和一出露面积约 1m² 的较小的露头上(前畈),其中燕子河地区的 3 个样品大致沿南北向穿过采样露头的剖面分布。

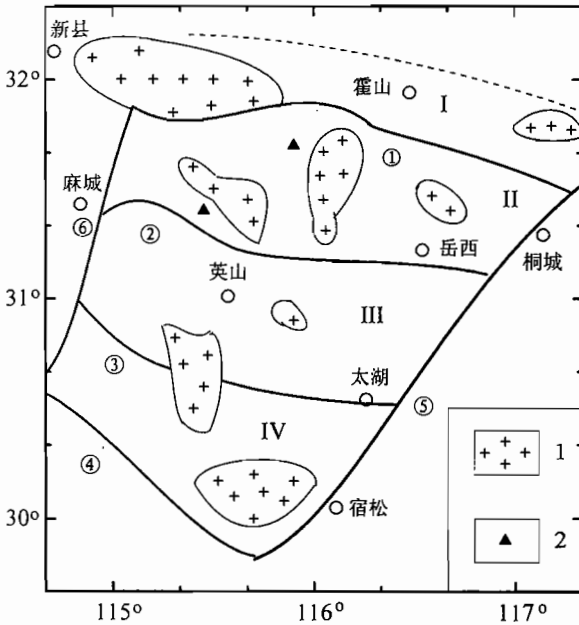


图 1 大别山地质简图

Fig. 1 Geological map for the Dabie Mountains

I—佛子岭低级变质单元; II—北大别高温变质单元; III—南大别超高压变质单元; IV—宿松变质单元; ①—晓天—磨子潭断裂; ②—五河—水吼断裂; ③—黄镇—花凉亭断裂; ④—广济—襄樊断裂; ⑤—郟城—庐江断裂; ⑥—商城—麻城断裂; 1—中生代花岗岩; 2—采样位置

I—Foziling low-grade metamorphic unit; II—Northern Dabie high-*T* metamorphic unit; III—Southern Dabie ultrahigh-*P* unit; IV—Susong metamorphic unit. ①—Xiaotian—Mozitan fault; ②—Wuhe—Shuihou fault; ③—Huangzhen—Hualiangting fault; ④—Guangji—Xiangfan fault; ⑤—Tancheng—Lujiang fault; ⑥—Shangcheng—Macheng fault; 1—Mesozoic granite; 2—sample locality

徐树桐等^[7]对燕子河麻粒岩进行过岩石学研究,发现有些紫苏辉石和单斜辉石变斑晶已经发生变形,指示岩石遭受过韧性剪切作用。他们还发现麻粒岩与榴辉岩相变质的石榴橄榄岩共生,反映出麻粒岩属于高压型。王江海^[11]在湖北罗田黄土岭的麻粒岩中发现了石榴石分解成堇青石—紫苏辉石的降压反应,并得到矿物的顶峰变质温度为 870℃。

本文研究的 4 个样品的手标本由于所含暗色矿物的比重不同而呈不同深浅的颜色;样品 95DBH-4 和 95ML-4 为黑灰色,95DBH-3 和 95DBH-5 为灰色。岩相学观察表明,其一般的矿物组合为:单斜辉石+斜方辉石+角闪石+黑云母+斜长石+石英,副矿物为磷灰石、磁铁矿、少量的金红石及锆石等。单斜辉石为透辉石;斜方辉石具明显多色性,结合其它镜下特征鉴定为紫苏辉石。镜下鉴定表明,4 个样品中均或多或少含有麻粒岩相变质作用的特征矿物紫苏辉石。斜长石牌号 *An* 在 40 左右。岩石多呈细—中粒等粒变晶结构,后期变形而微具片理。周汉文^[8]认为大别山麻粒岩相岩石经历了以下两个退变质过程:①以降压为主而温度降低很小的变质作用;②以降温水化为特征的退变质作用。Zhang 等^[9]也得到北大别麻粒岩的 *PT* 轨迹近于等热型,而不是等压型,并认为北大别麻粒

岩属高压型。但是镜下观察表明,除部分辉石表面有较明显的“发污”外,本文所用的样品退变质作用并不很强烈,各种不同矿物之间未见明显的先后次序关系。

2 氧同位素分析

分析样品均为经电磁选富集后再在双目镜下用手挑纯的单矿物,分析的矿物包括石英、斜长石、辉石、角闪石、黑云母、磁铁矿、磷灰石。其中辉石由于分离技术上的困难而未能把斜方辉

石和单斜辉石区分开来。硅酸盐和金属氧化物的氧同位素分析采用常规 BrF_5 分析法^[12]:将样品在一定温度下的镍反应管中与五氟化溴反应得到氧气,然后氧气通过灼热的碳棒转化为二氧化碳用作质谱分析。同位素组成测定在南京大学质谱仪 MAT-252 上进行,结果以 $\delta^{18}\text{O}$ 相对于 SMOW 标准表示。样品的重复分析结果表明,其分析误差优于 $\pm 0.2\%$ 。所有测定结果如表 1 所示。

3 讨论

如表 1 数据所示,燕子河地区麻粒岩全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $3.3\% \sim 4.4\%$;主要组成矿物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为:石英 $5.1\% \sim 6.3\%$,斜长石 $3.2\% \sim 4.5\%$,辉石 3.4% ,角闪石 $2.9\% \sim 3.8\%$,黑云母 $0.6\% \sim 2.1\%$ 。其副矿物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为:磁铁矿 1.7% ,磷灰石 3.1% 。这些值除了样品 95DBH-3 中的磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 值略高于黑云母外,其它值均符合常见变质矿物之间 $\delta^{18}\text{O}$ 值的富集顺序^[13~15]。共存矿物对之间的氧同位素分馏未出现倒转,指示在麻粒岩相的高温变质条件下,所研究的麻粒岩内共存矿物对之间达到或接近氧同位素平衡。根据共存矿物对之间的氧同位素分馏值,应用 Zheng^[13~15]理论校准的矿物对氧同位素分馏系数,计算了不同矿物对之间的氧同位素平衡温度,结果见表 1,误差为 $\pm 30 \sim 50^\circ\text{C}$ 。对于一组石英—辉石矿物对、一组石英—磁铁矿矿物对和四组石英—角闪石矿物对计算所得的温度为 $800 \sim 875^\circ\text{C}$,这与 Newton 等人^[16]从麻粒岩相变质矿物组合的稳定区域所获得的麻粒岩相变质温度吻合的非常好。由四组石英—斜长石矿物对得出的氧同位素平衡温度为 $620 \sim 690^\circ\text{C}$,三组石英—黑云母矿物对算得的温度为 $505 \sim 725^\circ\text{C}$,一组石英—磷灰石矿物对算得温度为 450°C (图 2)。

由于麻粒岩形成温度很高,且岩石中水含量相对很低,故岩石在冷却过程中,氧同位素退化交换作用主要通过扩散来进行。对于矿物氧扩散,存在如下的矿物封闭温度(T_c)与冷却速率(dT/dt)关系式^[17]:

表 1 大别山麻粒岩包体矿物氧同位素组成及其平衡温度计算
Table 1 Oxygen isotope compositions of minerals from granulite inclusion in the Dabie Mountains and their temperature estimates

样品号	矿物名称	矿物含量 (%)	颗粒半径 (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	矿物对	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	平衡温度 ($^\circ\text{C}$)
95DBH-3	石英	30	0.05~0.5	5.6			
	斜长石	45	0.1~0.5	3.9	Qz-Pl	1.7	670
	辉石	2	0.6	3.4	Qz-Px	2.2	840
	角闪石	5	0.4~0.5	3.1	Qz-Hb	2.5	800
	磁铁矿	1	0.05	1.7	Qz-Mt	3.9	850
	黑云母	15	0.05	0.6	Qz-Bi	5.0	505
95DBH-4	石英	15	0.2	5.1			
	斜长石	40	0.25	3.2	Qz-Pl	1.9	620
	角闪石	32	0.3	2.9	Qz-Hb	2.2	875
	黑云母	10	0.1	2.1	Qz-Bi	3.0	725
	全岩			3.3			
95DBH-5	石英	25	0.1~0.75	6.2			
	斜长石	42	0.25~0.75	4.5	Qz-Pl	1.7	690
	角闪石	3	0.5	3.8	Qz-Hb	2.4	830
	磷灰石	1	0.05	3.1	Qz-Ap	3.1	450
	黑云母	25	0.1	1.7	Qz-Bi	4.5	510
95ML-4	石英	15	0.1	6.3			
	斜长石	40	0.1	4.4	Qz-Pl	1.9	625
	角闪石	40	0.1	3.8	Qz-Hb	2.5	800
	全岩			4.4			

注:Qz—石英;Pl—斜长石($An=40$);Px—辉石;Hb—角闪石;Mt—磁铁矿;Bi—黑云母;Ap—磷灰石。平衡温度由 Zheng 的校准曲线^[13~15]计算得到。

$$\frac{Q}{RT_c} = \ln \left(- \frac{ART_c^2 D_0 / a^2}{QdT/dt} \right) \quad (1)$$

式中 Q 为活化能, R 为气体常数, A 为各向异性系数, D_0 为扩散系数, a 为矿物颗粒的有效扩散半径。

利用 Gilletti 的封闭体系缓慢冷却模型^[18, 19], 我们可以对麻粒岩中矿物氧同位素组成的变化值进行计算。计算时使用 Zheng^[13~15] 的理论分馏曲线和 Fortier 和 Gilletti^[20] 经验推导出的扩散数据。设岩石冷却的初始温度为 850℃, 以样品 95DBH-3 为例, 在冷却速率分别为 10℃/Ma 和 100℃/Ma 下, 石英—斜长石对、石英—黑云母对和辉石—角闪石对的预测结果与实测值吻合较好(表 2)。这是因为在无水条件下辉石、角闪石和磁铁矿的氧同位素封闭温度 > 650℃, 而石英、斜长石和黑云母的封闭温度 < 550℃, 因此可以认为由石英—辉石对、石英—角闪石对和石英—磁铁矿矿物对算得的氧同位素平衡温度记录了大别山麻粒岩相顶峰变质作用的温度条件; 而对于石英—斜长石、石英—黑云母、石英—磷灰石矿物对由于它们的氧扩散封闭温度相对较低, 记录的可能是麻粒岩相岩石经历顶峰变质作用之后的冷却温度。

Zhang 等^[9] 得到北大别麻粒岩的 PT 轨迹近于等热型, 麻粒岩的顶峰变质温度为 800~830℃, 压力为 1.0~1.4GPa, 温度梯度为约 20℃/km (低于混合片麻岩的温度梯度 35℃/km)。岩相学观察结果表明, 所研究样品中各主要组成矿物之间呈共生关系, 未见明显的先后顺序, 这说明角闪石、黑云母等含水矿物在麻粒岩相变质条件下仍稳定存在。含水矿物在高温高压变质条件下稳定存在的例子很多, 如在我国内蒙、河北等地, 苏联阿尔丹地盾区, 印度中南部等地的麻粒岩中都有含水矿物的存在^[6]。在大别山地区角闪石等含水矿物在超高压变质的榴辉岩中以包裹体形式稳定存在^[21], 这种情况被认为是变质时岩层中 P_{H_2O} 值各处不同, 使脱水反应在某些岩石中不易进行, 所以角闪石、黑云母等含水矿物仍稳定存在^[22]。

沈其韩等^[6] 对中国不同地区的麻粒岩的全岩 $\delta^{18}O$ 值进行了统计分析, 发现其变化范围为 2.5‰~11.1‰。他们按照氧同位素组成上的差异, 将中国麻粒岩分为以下 3 种类型: ①以河北宣化太古代崇礼群基性麻粒岩为代表, $\delta^{18}O$ 值为 2.5‰~6.7‰, 平均值

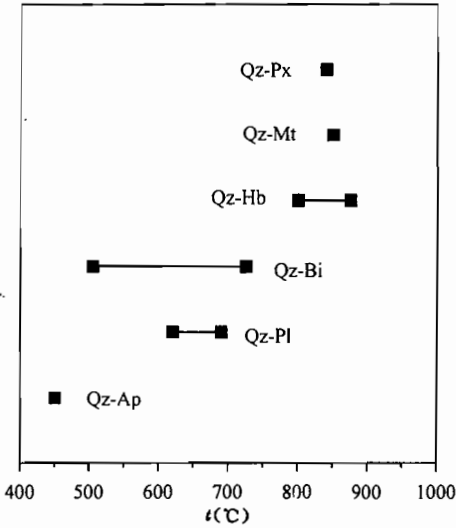


图 2 大别山麻粒岩包体石英与其他矿物对之间的氧同位素温度对比

Fig. 2 Comparison of temperatures calculated by oxygen isotope geothermometry of quartz-mineral in granulite inclusion from the Dabie Mountains (缩写符号意义见表 1)

(symbols are same as Table 1)

表 2 大别山麻粒岩包体矿物的 $\delta^{18}O$ 预测值与实测值比较

Table 2 Comparison of predicted $\delta^{18}O$ values to the measured $\delta^{18}O$ values of the minerals in the granulite inclusions

样品号	矿物对	$\delta^{18}O$		
		实测值	预测值	
			10℃/Ma	100℃/Ma
95DBH-3	Qz-Pl	+1.7	+1.5	+1.4
	Qz-Bi	+5.0	+5.4	+4.9
	Px-Hb	+0.3	+0.3	+0.3
95DBH-4	Qz-Pl	+1.9	+1.6	+1.5
	Qz-Bi	+3.0	+5.3	+4.9
95DBH-5	Qz-Pl	+1.7	+1.5	+1.4
	Qz-Bi	+4.5	+5.2	+4.8
95ML-4	Qz-Pl	+1.9	+1.8	+1.6

注: 预测值是在不同冷却速率下计算, 取冷却初始温度为 850℃。

4.2‰;②以内蒙集宁群和河北迁西群基性麻粒岩为代表, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 6.0‰~11.0‰,平均值>8.0‰;③山东沂水二辉斜长麻粒岩, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 4.7‰~8.1‰,平均为 6.3‰。大别山麻粒岩包体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 3.3‰~4.4‰(表 1),与河北宣化麻粒岩相近。大别山南部双河榴辉岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -3‰~+7‰^[23],碧溪岭榴辉岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 +3‰~+5‰^[24]。Kempton 和 Harmon^[2]统计了采自世界范围内 8 个露头的麻粒岩包体(2 个采自北美,2 个采自澳大利亚,4 个采自欧亚大陆)的全岩化学成分与其 $\delta^{18}\text{O}$ 值的关系。他们依据岩石中 SiO_2 的含量对不同的麻粒岩包体进行了分类: $\text{SiO}_2 < 54\%$ 为基性, $\text{SiO}_2 > 66\%$ 为酸性,介于二者之间为中性。统计结果表明^[2]:绝大多数基性麻粒岩包体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围为 7.9‰~1.6‰,绝大多数中性麻粒岩包体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 8.1‰~1.8‰,而酸性的和变沉积岩的麻粒岩包体 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 10.1‰~2.0‰。因此,可以认为正常变质的麻粒岩包体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值不应低于 6‰,具体取决于原岩的化学成分。然而,大别山麻粒岩包体的全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值低达 3.3‰~4.4‰,明显低于世界各地其它麻粒岩包体的全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值的下限(图 3),也低于正常变质岩的氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值^[25]。这种低 $\delta^{18}\text{O}$ 值的存在表明,在麻粒岩包体的形成过程中(即麻粒岩相变质作用过程中)可能有外部低 $\delta^{18}\text{O}$ 值流体(如海水或大气降水)的直接参与。

Newton 等^[26]指出,麻粒岩可发育于富 CO_2 流体流经的角闪岩并且驱动了脱水反应的地方。现在已经认识到,局部规模的麻粒岩是由 CO_2 渗滤所形成的^[27]。在下部地壳,引起岩石 $\delta^{18}\text{O}$ 值不同的可能原因有 4 个方面:① 矿物学方面的变化;② 结晶或变质温度不同而引起的变化;③ 变质原岩性质的变化;④ 岩石与渗滤流体或脱水流体之间的同位素交换。但前面 3 个原因不可能使全岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于 6‰。对大别山超高压榴辉岩的氢氧同位素组成的研究表明^[23,24],榴辉岩的原岩曾与古大气降水之间发生过不同程度的同位素交换。因此,在形成大别山麻粒岩包体的变质作用期间或之前,原岩与外来流体之间同样有可能发生了显著的水-岩交换作用,然而流体的作用在一定范围内则是相对均一的(因为相距近 30 km 的两个露头的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 3.3‰和 4.4‰)。根据理论校准的矿物-水体系氧同位素平衡分馏系数^[14],在高温变质条件下,石英相对于水稍微富集 ^{18}O ,而辉石、角闪石、黑云母相对于水亏损 ^{18}O 。因此,要求有一个 $\delta^{18}\text{O}$ 值 $\leq 3\%$ 的流体在高温下与麻粒岩包体的原岩发生相对均一的水-岩交换反应,以降低岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

在地壳不同深度的变质作用过程中,富水流体流经麻粒岩区的裂隙和剪切带时引起水解反应,结果在 $> 1.0\text{GPa}$ 压力下将麻粒岩改造为榴辉岩^[28,29],而在低压下则形成角闪岩^[30]。

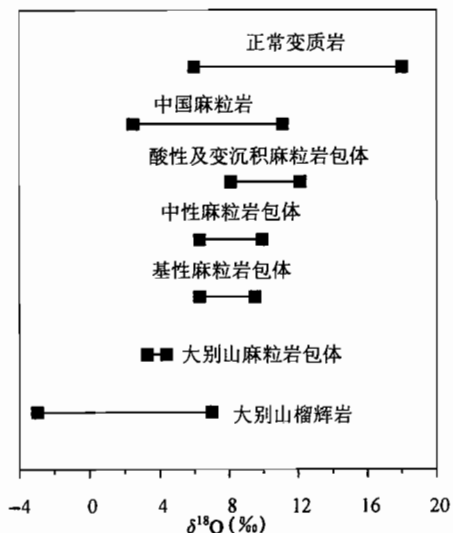


图 3 大别山麻粒岩包体与世界上各类麻粒岩包体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值比较图

Fig. 3 Plot for $\delta^{18}\text{O}$ values of granulite inclusion from the Dabie Mountains vs. those in the World

国外麻粒岩数据见文献[2];中国麻粒岩数据见文献[6];大别山麻粒岩数据见本文;大别山榴辉岩数据见文献[23,24];正常变质岩数据见文献[25]
Data sources: abroad granulites see reference [2], Chinese granulites see reference [6], Dabie granulites (this study), Dabie eclogites see reference [23,24], normal metamorphic rocks see reference [25]

由于地表水不可能直接渗透至下地壳深度,因此在高温变质作用期间这些麻粒岩包体可能是间接与地表水发生相互作用。岩相学观察得到,所研究样品的退变质作用不发育;氧同位素分析得到,各矿物之间保持了氧同位素平衡。这些排除了变质期后阶段外来流体加入引起 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低的可能性。进一步的研究有待于确定,大别山麻粒岩包体的 ^{18}O 亏损是否与该造山带内产出的榴辉岩一样,在变质之前经历了与大气降水成因热液的蚀变作用^[23]。

野外工作得到江来利高级工程师的帮助,同位素分析得到黄耀生教授支持,在此一并致以衷心的感谢!

参 考 文 献

- 1 Fountain D M, Salisbury M H. Exposed cross-sections through the continental crust: Implications for crustal structure, petrology and evolution. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 1981, 56: 263~277.
- 2 Kempton P D, Harmon R S. Oxygen isotope evidence for large-scale hybridization of the lower crust during magmatic underplating. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1992, 56: 971~986.
- 3 Okay A I, Xu S T, Sengor A M C. Coesite from the Dabie Shan eclogites central China. *Eur. J. Mineral.*, 1989, 1: 595~598.
- 4 Wang X M, Liou J G, Mao H K. Coesite-bearing eclogite from Dabie Mountains in central China. *Geology*, 1989, 17: 1085~1088.
- 5 Xu S T, Okay A I, Ji S Y. Diamonds from Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 1992, 256: 80~82.
- 6 沈其韩,徐惠芬,张宗清等. 中国早前寒武纪麻粒岩. 北京:地质出版社,1992. 1~237页.
- 7 徐树桐,刘贻灿,江来利等. 大别山的构造格局和演化. 北京:科学出版社,1994. 1~175页.
- 8 周汉文. 大别杂岩和红安群的变质作用过程. 见:索书田,桑隆康,韩郁菁等著,大别山前寒武纪变质地体岩石学与构造学. 武汉:中国地质大学出版社,1993. 105~150页.
- 9 Zhang R Y, Liou J G, Tsai C H. Petrogenesis of a high-temperature metamorphic terrane: A new tectonic interpretation for the northern Dabieshan, central China. *J. Metamorphic Geol.*, 1996, 14: 319~333.
- 10 Cong B L, Wang Q C, Zhai M G, et al. UHP metamorphic rocks in the Dabie-Su-Lu region. *Island Arc*, 1994, 3: 135~150.
- 11 王江海. 大别杂岩的早期演化及混合岩成因机制. 武汉:中国地质大学出版社,1991. 1~134页.
- 12 Clayton R N, Mayeda T K. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1963, 27: 43~52.
- 13 Zheng Y F. Calculation of oxygen isotope fractionation in metal oxides. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, 55: 2299~2307.
- 14 Zheng Y F. Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, 57: 1079~1091.
- 15 Zheng Y F. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxy-bearing silicates. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 1993, 120: 247~263.
- 16 Newton R C, Perkins D. Ancient granulite terrains: 8 kbar metamorphism. *EOS*, 1981, 62: 420.
- 17 Dodson M H. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1973, 40: 259~274.
- 18 Giletti B J. Diffusion effect on oxygen isotope temperatures of slowly cooled igneous and metamorphic rocks. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 1986, 77: 218~228.
- 19 傅斌,汪学军,郑永飞. 矿物氧扩散与氧同位素退化交换作用. 高校地质学报, 1995, 1: 67~79.
- 20 Fortier S M, Giletti B J. An empirical model for predicting diffusion coefficients in silicate minerals. *Science*, 1989, 245: 1481~1484.
- 21 Zhang R Y, Liou J G. Significance of magnesite paragenesis in ultrahigh-*P* metamorphic rocks. *Am. Mineral.*, 1994, 79: 397~400.
- 22 贺同兴,卢良兆,李树勋等. 变质岩岩石学. 北京:地质出版社,1980. 1~254页.
- 23 郑永飞,傅斌,肖益林等. 大别山榴辉岩氢氧同位素组成及其地球动力学意义. 中国科学(D), 1997, 27: 121~126.

- 24 肖益林, 傅斌, 郑永飞等. 大别山碧溪岭榴辉岩变质温压条件计算及氧同位素研究. 地球学报, 1997, 18: 318~323.
- 25 Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry (3rd Edition). Springer-Verlag, Berlin, 1987. 1~241 页.
- 26 Newton R C, Smith J V, Windly B F. Carbonic metamorphism, granulites and crustal growth. Nature, 1980, 288: 45~50.
- 27 Ferry J M. A historical review of metamorphic fluid flow. J. Geophys. Res., 1994, 99: 15487~15498.
- 28 Austrheim H. Eclogitization of lower crustal granulites by fluid migration through shear zones. Earth. Planet. Sci. Lett., 1987, 81: 221~232.
- 29 Jamtveit B K, Bucher-Nurminen K, Austrheim H. Fluid controlled eclogitization of granulites in deep crustal shear zones, Bergen Arc, western Norway. Contrib. Mineral. Petrol., 1990, 104: 184~193.
- 30 Beach A. The interrelations of fluid transport, deformation, geochemistry and heat flow in early Proterozoic shear zones in the Lewisian complex. Philos. Trans. Roy. Soc., London, 1976, 280A: 569~604.

Oxygen Isotope Geochemistry of Granulite Inclusions in the Dabie Mountains

Xiao Yilin, Zheng Yongfei, Fu Bin, Gong Bing and Ge Ningjie

(Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, 230026)

Abstract

Oxygen isotope composition of granulite inclusions from metamorphic complex in the Dabie Mountains was determined. The results show that the $\delta^{18}\text{O}$ values of the granulite inclusions is as low as 3.3‰ to 4.4‰ relative to SMOW. Oxygen isotopic equilibrium has been achieved and preserved among various co-existing mineral pairs in the inclusions under granulite facies metamorphic conditions, and has not been reset significantly during retrograde metamorphism. The peak metamorphic temperatures calculated by the oxygen isotope geothermometry of mineral pairs in the granulite inclusions are 800 to 875 °C, being consistent with the known metamorphic temperatures of granulite facies. The fluid-rock interaction at high temperatures would take place homogeneously in a given range between the protoliths of the granulite inclusions and external fluids with a $\delta^{18}\text{O}$ value as low as 3‰ prior to metamorphism or during peak granulite-facies metamorphism.

Key words: fluid-rock interaction; geothermometry; oxygen isotope; granulite inclusion; Dabie Mountains

作者简介

肖益林,男,1962年生。1992年于中国科学技术大学地球和空间科学系获硕士学位。现为中国科学技术大学地球和空间科学系讲师,博士研究生,主要从事变质岩岩石学和同位素地球化学研究。通讯地址:230026,合肥中国科学技术大学地球和空间科学系。