

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

大别山超高压变质榴辉岩的氦同位素组成 及其形成环境的制约

李善芳¹⁾, 李延河^{2,3)}, 丁悌平^{2,3)}, 伍宗华⁴⁾, 古平等⁴⁾

1) 中国地质调查局发展研究中心, 北京, 100037

2) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037; 3) 国土资源部同位素地质重点实验室, 北京, 100037

4) 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊, 065000

内容提要: 大别山地区榴辉岩全岩的³He/⁴He值分布在 $0.013 \times 10^{-6} \sim 0.760 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 0.200×10^{-6} , 榴辉岩中石榴子石单矿物的³He/⁴He值与其全岩的³He/⁴He值基本一致。在³He—⁴He分布图上榴辉岩的氦同位素数据点远离地幔氦的分布范围, 而位于大气氦与地壳氦的过渡部位。采用真空压碎方法对榴辉岩中石榴子石和绿辉石的氦同位素组成进行了分析, 也未找到地幔氦的明显踪迹。结合大别—苏鲁地区榴辉岩中极低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值、 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值等地球化学特征, 提出大别—苏鲁地区超高压变质榴辉岩可能是在地壳中形成的, 并未曾俯冲至100多千米的地幔深度。榴辉岩的³He/⁴He值与围岩类型密切相关, 榴辉岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与围岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值同步变化, 以及含柯石英大理岩、片麻岩和硬玉石英岩等非基性超高压变质岩和脉状榴辉岩的发现, 均证明榴辉岩与其围岩一起经历了超高压变质过程, 榴辉岩及其围岩在变质过程中未发生明显的位移, 即榴辉岩是原地成因的。

关键词: 榴辉岩; 超高压变质; 氦同位素; 大别山

大别—苏鲁超高压变质岩是目前世界上已发现的出露面积最广, 类型最全的超高压变质岩地体, 因而成为各国地质学家研究超高压变质作用的热点。自从在大别山榴辉岩中发现柯石英和金刚石以来, 人们已经对大别山超高压变质岩进行了广泛的研究, 取得了一系列引人注目的研究成果(Wang et al., 1989; Xu et al., 1992; Okay et al., 1992; Yui et al., 1995; Zheng et al., 1996; Chavagnac et al., 1996)。有些问题已经研究清楚, 有些问题还存在激烈的争论, 如超高压变质岩的形成深度, 变质过程中地壳、地幔物质的相互作用及其程度, 超高压变质岩的俯冲和折返机制等。

地幔与地壳物质的氦同位素组成差别巨大, 而且氦又是活动性极强的组分。所以氦同位素已成为区分地壳、地幔物质, 研究壳幔相互作用最灵敏的示踪剂。为了寻找超高压变质岩中可能存在的幔源信息, 笔者对大别山地区各种类型的榴辉岩、超基性岩、硬玉石英岩、片麻岩、花岗岩、砂岩等岩石的氦同位素组成进行了系统的研究, 探讨了该地区榴辉岩的形成环境。

1 地质背景

大别山超高压变质杂岩位于华北板块与扬子板块的碰撞接触带, 东侧被郯庐断裂切割, 向北东位移了500多千米至山东半岛, 形成苏鲁地体。Xu等(1992)在该变质岩带的榴辉岩中发现了金刚石, 据此推测榴辉岩曾俯冲至100多千米的地幔深度。大别山变质杂岩主要由花岗质片麻岩和少量榴辉岩、大理岩及零星分布的超镁铁质岩石组成。榴辉岩宏观上具有群体产出、分布不均的特点, 其群体展布方向与区域构造线方向基本一致, 单体长轴方向与围岩的片麻理平行, 主要呈透镜状、扁豆状和团块状产出, 部分呈条带状出露。其围岩类型主要有三类: 花岗质片麻岩、大理岩和超基性岩。榴辉岩体边部常退变质成榴闪岩, 甚至角闪质岩石, 且片理化增强, 从而与围岩的变质—变形程度相协调。

2 样品的采集和氦同位素分析

用于氦同位素分析的榴辉岩样品分别采自大别山地体的碧溪岭、饶钹寨、新店、双河、花凉亭水库、

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号49794044)的成果。

收稿日期: 2004-01-04; 改回日期: 2004-12-22; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 李善芳, 女, 教授级高级工程师, 主要从事地球化学勘查研究。通讯地址: 100037, 北京西城区阜外大街45号, 中国地质调查局发展研究中心; Email: shanfang@x263.net。

石马、新店等地。碧溪岭和饶钹寨榴辉岩均产于超镁铁岩中；双河、花凉亭和石马榴辉岩均产于片麻岩中；新店榴辉岩产于大理岩中。为了便于对比，笔者等还对榴辉岩的主要围岩——片麻岩及该地区其他类型的岩石，如石英岩、硬玉石英岩、花岗岩、砂岩和各种蚀变岩的氦同位素组成进行了测定。样品的地

质特征和具体的采样位置详见表1。

用于氦同位素分析的榴辉岩样品绝大部分为全岩，少部分为石榴子石单矿物；其他类型的岩石均为全岩。分析方法为真空加热融样法(Li et al., 2000)。每件样品重约500mg。样品首先于105℃烘干，200℃加热去气30min，1500℃熔样40min。释放

表1 大别山地区变质杂岩的氦同位素分析结果

Table 1 The Helium isotope compositions of eclogite from the Dabie Mts. region

样品号	采样地点及地质特征	样品名称	$^3\text{He}^{\text{①}}$	$^4\text{He}^{\text{②}}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$ ($\times 10^{-6}$)	R/Ra	$^3\text{He}/^4\text{He}$ (平均) ($\times 10^{-6}$)
ZZ01-1G ^④	碧溪岭超镁铁岩中	榴辉岩岩中石榴子石	0.04	0.24	0.173±0.049	0.12	
04-G ^④	碧溪岭岩体接触带	榴辉岩岩中石榴子石	0.06	0.15	0.420±0.059	0.30	0.202
11-G ^④	双河片麻岩中	榴辉岩岩中石榴子石	0.12	9.68	0.012±0.004	0.01	
HC05-2 ^⑤	大别横冲片麻岩中含柯石英榴辉岩	绿辉石	未测出 ^③	0.00781			
HC05-2 ^⑤	大别横冲片麻岩中含柯石英榴辉岩	石榴子石	未测出 ^③	0.00542			
06	碧溪岭超镁铁质岩相	石榴橄榄岩	0.34	0.76	0.445±0.018	0.32	0.470
6	碧溪岭超镁铁质岩相	石榴橄榄岩	0.52	1.05	0.494±0.019	0.35	
32	六安—黄石剖面1245号桩	黄铁矿化辉石岩	24.99	21.94	1.139±0.011	0.81	1.140
33	六安—黄石剖面1300号桩	绿帘石化辉石岩	3.02	2.65	1.140±0.013	0.81	
011	双河，呈层状产于片麻岩中	含柯石英榴辉岩	0.22	17.18	0.013±0.008	0.01	
3	碧溪岭岩体与片麻岩接触面附近	多硅白云母榴辉岩	0.41	0.94	0.436±0.026	0.31	
4	碧溪岭岩体与片麻岩接触面附近	榴辉岩	0.47	1.61	0.293±0.018	0.21	
5	碧溪岭岩体与片麻岩接触带	榴辉岩	0.36	1.85	0.196±0.012	0.14	
7	碧溪岭超镁铁质岩石中	榴辉岩	0.20	1.53	0.132±0.006	0.09	
10	双河，与片麻岩呈互层产出	层状榴辉岩	0.43	2.84	0.150±0.010	0.11	
11	双河，呈层状产于片麻岩中	含柯石英榴辉岩	0.16	4.41	0.037±0.001	0.03	0.200
16	花凉亭水库，呈层状产于片麻岩中，接触带附近	榴辉岩	0.62	2.7	0.228±0.008	0.16	
17	花凉亭水库，呈层状产于片麻岩中，离接触带较远	多硅白云母榴辉岩	0.24	3.66	0.064±0.002	0.05	
19	石马，透镜状产于片麻岩中	榴辉岩	0.11	0.85	0.130±0.005	0.09	
20	石马，榴辉岩的接触带附近	榴辉岩	0.23	4.35	0.052±0.002	0.04	
21	饶钹寨，产于橄榄岩中	榴辉岩	3.61	4.75	0.760±0.016	0.54	
22	洪庙，产于片麻岩中	榴辉岩	0.43	3.82	0.113±0.002	0.08	
1	碧溪岭	叶理化多硅白云母榴辉岩	0.15	2.45	0.062±0.004	0.04	
2	碧溪岭岩体与片麻岩接触面	黄铁矿化榴辉岩	0.20	5.52	0.037±0.001	0.03	
8	五庙，呈层状产于片麻岩中	强黄铁矿化榴辉岩	0.72	6.08	0.118±0.005	0.09	0.093
9	新店，呈透镜状赋存于大理岩中	强黄铁矿化榴辉岩	0.30	4.24	0.071±0.003	0.05	
35	六安—黄石剖面1168号桩	黄铁矿化层状榴辉岩	4.07	23.02	0.177±0.005	0.13	
12	双河，呈透镜状产出	硬玉石英岩	0.15	10.88	0.014±0.001	0.01	
24	六安—黄石剖面469号桩	石英岩	0.1	27.93	0.003±0.000	0.002	0.010
43	花凉亭水库	石英岩	0.14	55.55	0.002±0.000	0.001	
47	六安—黄石剖面3328号桩	石英岩	0.42	19.57	0.022±0.001	0.02	
13	双河	片麻岩	0.08	20.43	0.004±0.000	0.003	
14	花凉亭水库，榴辉岩的围岩	片麻岩	0.28	22.42	0.012±0.007	0.01	
15	花凉亭水库，与榴辉岩的接触界面附近	片麻岩	0.23	17.39	0.019±0.001	0.01	
18	石马，榴辉岩围岩	片麻岩	0.08	17.38	0.005±0.001	0.004	
31	六安—黄石剖面1112号桩	片麻岩	3.09	21.02	0.147±0.003	0.10	0.027
34	杨氏祠，六安—黄石剖面1478号桩	片麻岩	0.11	27.31	0.004±0.000	0.003	
36	六安—黄石剖面1965号桩	片麻岩	0.13	20.91	0.006±0.001	0.004	
38	六安—黄石剖面2060号桩	片麻岩	0.13	16.21	0.008±0.001	0.006	
40	六安—黄石剖面3516号桩	片麻岩	0.12	3.29	0.036±0.003	0.03	
42	花凉亭水库	钾长石化片麻岩	0.16	40.37	0.004±0.000	0.003	0.087
48	六安—黄石剖面3403号桩	黄铁矿化片麻岩	0.06	0.36	0.170±0.007	0.12	

续表 1

样品号	采样地点及地质特征	样品名称	³ He ^①	⁴ He ^②	³ He/ ⁴ He (×10 ⁻⁶)	R/Ra	³ He/ ⁴ He (平均) (×10 ⁻⁶)
23	七里岗,六安—黄石剖面60号桩	红色砂岩	0.21	27.76	0.007±0.001	0.005	0.008
27	六安—黄石剖面879号桩	粗砂岩	0.04	5.09	0.009±0.001	0.01	
25	六安—黄石剖面693号桩	蚀变砂岩	0.14	7.17	0.020±0.001	0.01	0.085
26	张家湾,六安—黄石剖面783号桩	蚀变砂砾岩	0.05	2.96	0.019±0.001	0.01	
28	六安—黄石剖面948号桩	黄铁矿化砂岩	0.14	4.92	0.029±0.002	0.02	
29	六安—黄石剖面966号桩	绿帘石化砂岩	1.57	5.75	0.273±0.006	0.19	
37	六安—黄石剖面2043号桩	花岗岩	0.1	24.24	0.004±0.000	0.003	0.004
41	六安—黄石剖面3460号桩	黄铁矿化花岗岩	0.14	33.36	0.004±0.000	0.003	
30	六安—黄石剖面1044号桩	绢云母化蚀变岩	0.06	6.06	0.011±0.000	0.01	0.045
39	张家嘴水库北端,六安—黄石剖面2069号桩	蚀变岩	0.05	0.55	0.098±0.007	0.07	
44	石桥铺,六安—黄石剖面2091号桩	蚀变岩	1.53	28.69	0.053±0.001	0.04	
45	六安—黄石剖面2943号桩	黄铁矿化蚀变岩	0.19	3.99	0.048±0.002	0.03	
46	六安—黄石剖面3018号桩	蚀变岩	0.06	3.59	0.014±0.001	0.01	

注: ① 单位为 ×10⁻¹² cm³ STP/g; ② 单位为 ×10⁻⁶ cm³ STP/g; ③ ³He 的检出限为 5×10⁻¹⁴ cm³ STP; ④ 在中国地质科学院矿产资源研究所分析; ⑤ 在日本大阪大学分析,其余均在石油勘探开发科学研究院分析。

出的气体经海绵钛泵、铅铝泵和活性炭液氮冷阱4次纯化, H₂、N₂、O₂、CO₂、CH₄、H₂O、有机质等活性气体被冷冻、吸附。纯净的 He 进入分析系统。榴辉岩全岩的 He 同位素组成是在石油勘探开发科学研究院用英国生产的 VG-5400 惰性气体同位素质谱计测量的; 通过重复样品和密码样品的检验, ³He/⁴He 值的相对误差在 10% 以下。为了保证分析结果的可靠性, 对其中两件样品在中国地质科学院矿产资源研究所进行了检验, 二次分析结果在允许误差范围之内。石榴子石单矿物的氦同位素组成是在中国地质科学院矿产资源研究所用乌克兰生产的 MI-1201IG 惰性气体同位素质谱计测量的。石榴子石和绿辉石单矿物流体包裹体的氦同位素组成是在日本大阪大学采用真空压碎法分析的。工作标准为大气, 其 ³He/⁴He 值为 1.40×10⁻⁶。

3 分析结果

大别山地区榴辉岩及其围岩的 He 同位素分析结果列于表 1。从表 1 中可以看出, 橄榄岩和辉石岩等超镁铁质岩石的 ³He/⁴He 值最高, 为 0.445×10⁻⁶~1.140×10⁻⁶, 平均 0.805×10⁻⁶。榴辉岩的 ³He/⁴He 值次之, 为 0.013×10⁻⁶~0.760×10⁻⁶, 平均 0.200×10⁻⁶。片麻岩的 ³He/⁴He 值为 0.004×10⁻⁶~0.147×10⁻⁶, 平均 0.027×10⁻⁶。石英岩的 ³He/⁴He 值为 0.002×10⁻⁶~0.022×10⁻⁶, 平均 0.010×10⁻⁶。花岗岩和砂岩的 ³He/⁴He 值最低, 为 0.004×10⁻⁶~0.009×10⁻⁶, 平均 0.006×10⁻⁶。后期蚀变作用往往使榴辉岩的 ³He/⁴He 值降低, 使片麻岩、花岗岩和砂

岩的 ³He/⁴He 值升高(表 1)。

大别—苏鲁地区榴辉岩的 ³He/⁴He 值与其围岩类型关系密切; 产在碧溪岭和饶钹寨超镁铁质岩石中的榴辉岩的 ³He/⁴He 值最高, 为 0.132×10⁻⁶~0.760×10⁻⁶, 平均 0.446×10⁻⁶; 产在碧溪岭超镁铁岩和片麻岩接触带中的榴辉岩的 ³He/⁴He 值居中,

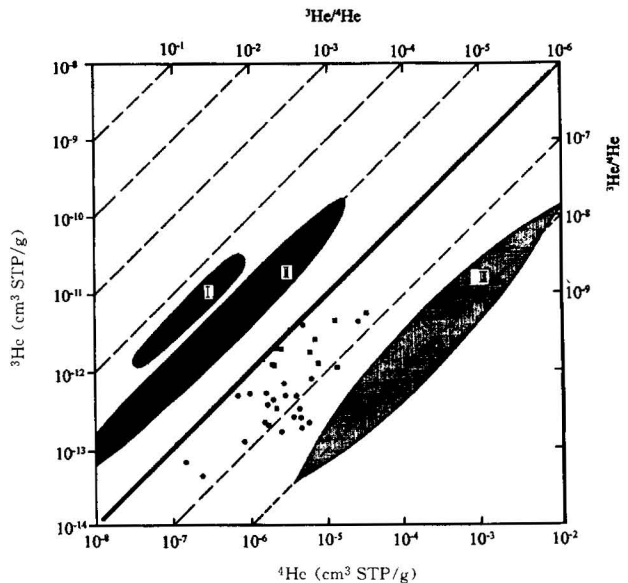


图 1 大别—苏鲁地区榴辉岩的氦同位素分布图

Fig. 1 Helium isotope compositions of eclogites from Dabie Mts. and Su—Lu region

I—地幔热点; II—洋中脊玄武岩; III—古老陆壳;
●—本文; ■—据 Li 等(2000)

I—Hot spot of the Mantle; II—MORB; III—ancient continental crust; ●—this paper; ■—data from Li et al. (2000)

$0.196 \times 10^{-6} \sim 0.436 \times 10^{-6}$, 平均 0.308×10^{-6} ; 产在片麻岩和大理岩中的榴辉岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值最低, $0.013 \times 10^{-6} \sim 0.228 \times 10^{-6}$, 平均 0.098×10^{-6} ; 这与李延河等的研究结果(Li et al., 2000)是一致的。

在 $^3\text{He}-^4\text{He}$ 分布图(图1)上, 橄榄岩、辉石岩和大部分榴辉岩的氦同位素数据点均分布于大气氦与陆壳氦的过渡部位, 一件榴辉岩样品的数据点则直接落在了陆壳氦的范围之内, 远离地幔氦的分布范围。片麻岩、石英岩、花岗岩和砂岩的氦同位素数据点则位于典型的陆壳岩石的氦同位素分布区。

4 结果讨论

氦同位素在自然界中的变化范围很大, 不同成因和来源的氦, 其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值明显不同。陆壳岩石的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值很低, 典型陆壳岩石的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 0.02×10^{-6} (0.014 Ra) (Ozima et al., 1983); 地幔物质的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值较高, 其中洋中脊玄武岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值平均为 12×10^{-6} (8.5 Ra) (Fisher, 1986); 地幔热点的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值均在 20×10^{-6} (14 Ra) (Hilton et al., 1998) 以上。大气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值很稳定, 为 1.4×10^{-6} 。

地球岩石的氦同位素组成主要取决于它的来源, 矿物岩石中的 U、Th 含量和形成年龄。U、Th 衰变产生 ^4He , 随着时间的推移, 放射性成因 ^4He 的积累, 富含 U、Th 的矿物岩石的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值将逐渐降低。所以现在测定的某些富含 U、Th 的矿物岩石的氦同位素组成并不能完全代表其形成时的氦同位素特征, 应扣除后期放射性成因 ^4He 的影响。实际上大别山地区榴辉岩的 U、Th 含量并不高, U 平均 0.54×10^{-6} , Th 平均 1.7×10^{-6} , 大约只有中国陆壳平均值 (U = 5.6×10^{-6} , Th = 17×10^{-6}) 的十分之一。但为了尽量消除放射性成因 ^4He 的影响, 从榴辉岩中挑出 U、Th 含量较低的石榴子石单矿物, 采用真空加热熔样方法分析了3件石榴子石单矿物的氦同位素组成(表1), 其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.012 \times 10^{-6} \sim 0.420 \times 10^{-6}$, 平均 0.202×10^{-6} , 与榴辉岩全岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值基本一致, ^3He 、 ^4He 含量相对较低, 这说明该地区放射性成因 ^4He 对榴辉岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值影响不大。

矿物流体包裹体中的氦较矿物晶格中的放射性成因

氦扩散系数更低, 更能保持矿物形成时流体的氦同位素特征。真空压碎提取方法是测定矿物流体包裹体氦同位素组成的理想方法, 可将放射性成因 ^4He 的影响降到最低 (Stuart et al., 1994)。为了进一步减少放射性成因 ^4He 对榴辉岩形成时初始氦同位素比值的影响, 特地从含柯石英榴辉岩中挑选出石榴子石和绿辉石单矿物送到日本大阪大学采用真空压碎法分析其氦同位素组成。2件样品的 ^3He 均低于质谱仪的检出限, ^4He 含量分别为 0.00542×10^{-6} 和 $0.00781 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$ (表1)。即在石榴子石和绿辉石中没有发现明显的地幔氦的踪迹。

氦是自然界中扩散迁移能力最强的元素。不同温度下氦的扩散系数差异极大, 0°C 和 700°C 深海沉积物中磁性颗粒的扩散系数 (D/a^2) 分别为 1.68×10^{-17} 和 1.65×10^{-6} 。 700°C 样品中的氦全部丢失只需 8 ka, 在 0°C 则需要 800Ma 年 (Hiyagon, 1994)。另外, 氦在矿物颗粒之间的扩散速度大大高于在矿物内部的扩散速度。氦的上述特征决定了其对构造热事件极为敏感。在高温条件下很容易与周围环境中氦同位素达到平衡; 而在较低温度下很多矿物可以很好地保持氦同位素封闭体系, 特别是流体包裹体, 保存时间可达 104Ma 以上 (Stuart et al., 1994)。

用于氦同位素分析的含柯石英榴辉岩样品非常新鲜, 未受退变质和后期蚀变的影响, 其氦同位素组成应反映了超高压变质时的特征。大别山超高压变质榴辉岩的形成条件是: $650 \sim 870^\circ\text{C}$, $> 2.7 \sim 2.9 \text{ GPa}$ (张泽明等, 1995); 如果超高压变质榴辉岩是在 100 多千米深的地幔中形成的, 则在这些岩石中应不可避免地留有地幔氦的同位素特征。但上述结果表明, 大别山地区超高压变质榴辉岩中不存在明显的幔源氦组分, 而具有明显的地壳氦的特征, 从而

表 2 大别山地区榴辉岩中石榴子石和绿辉石的硅氧同位素分析结果
Table 2 The silicon and oxygen isotope compositions of garnet and omphacite in eclogite from the Dabie Mts. region

样品号	$\delta^{18}\text{O}$ (SMOW, ‰)		$\delta^{30}\text{Si}$ (NBS-28, ‰)		地质背景
	石榴子石	绿辉石	石榴子石	绿辉石	
HC09-1	8.3		-0.3	●	横冲大理岩中含柯石英榴辉岩
HC10-4	8.6		-0.3		横冲大理岩中榴辉岩
HC05-2	6.7	6.2	0.2	-0.3	横冲片麻岩中含柯石英榴辉岩
ZZ01-1	6.3		0.1		碧溪岭超镁铁岩中蓝晶石榴辉岩
04	6.3	4.9	0.2	0.0	碧溪岭岩体与片麻岩接触面附近榴辉岩
10	6.3		-0.1		双河榴辉岩与片麻岩呈互层产出
11	5.9	7.9	-0.2	-0.1	双河榴辉岩呈层状产于片麻岩中
17		7.0		0.5	花凉亭水库榴辉岩呈层状产于片麻岩中

暗示大别山地区超高压变质榴辉岩可能是在地壳中形成的,未曾俯冲到100多千米的地幔。早期来自地幔的镁铁质和超镁铁质岩石的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值相对较高,在变质过程中所含的氦大量丢失,同时周围地壳岩石中的氦不断加入,结果造成镁铁质和超镁铁质岩石的氦含量和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值大幅度降低;大别山地区橄榄岩和辉石岩等超镁铁质岩石的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值明显偏低,就是这些岩石在地壳环境中遭受超高压变质作用的有力证据。

笔者还对大别山地区榴辉岩中石榴石、绿辉石的硅氧同位素进行了分析(表2)。大部分样品的 $\delta^{30}\text{Si}$ 分布在 $-0.3\% \sim 0.2\%$ 之间,平均 -0.03% ,与陆壳岩石的硅同位素组成十分接近,也与上述氦同位素的结果是一致的。榴辉岩中6件石榴子石的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $5.9\% \sim 8.6\%$,平均 7.1% ,4件绿辉石的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $4.9\% \sim 7.9\%$,平均 6.5% ;同一样品中石榴子石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值普遍高于绿辉石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,符合二者之间的氧同位素平衡分馏规律。榴辉岩全岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值应较单矿物的值更高一些,该值与典型地幔的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(5.5%)有一定差别。

大别—苏鲁地区有些超高压变质榴辉岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值很高(刘晓春,1994); $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值很低(Chavagnac et al.,1996), $-20 \sim -6$; $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围很大,有些样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值异常低,最低可达 -10% (Yui et al.,1995;Zheng et al.,1996;傅斌等,1997,1998;郑永飞,1997;肖益林等,1997)。而这些均为陆壳岩石的典型特征,表明这些岩石的原岩在变质之前曾在地壳的浅部,在较高温度下,以较大的W/R比与古大气降水发生过强烈的水岩反应,使其原岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值大大降低。另外榴辉岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 ^4He 含量成明显的反相关关系(Li et al.,2000),说明其 $\delta^{18}\text{O}$ 值的降低与 ^4He 含量的升高是由同一种地质作用造成的。结合榴辉岩的矿物成分、化学成分和地质分布特征推测,大别—苏鲁地区榴辉岩的原岩可能主要为早期侵入陆壳的基性—超基性岩体或岩脉,部分为玄武质火山岩或火山凝灰岩。在基性—超基性岩体(脉)的侵入过程中与陆壳物质和古大气降水发生了强烈的元素和同位素交换,基性—超基性岩体(脉)的化学成分和同位素组成被强烈改造,从而具有明显的陆壳岩石的特征,而超镁铁质岩体(脉)所具有的地幔特征基本消失。基性—超基性岩体(脉)在其侵入过程中与陆壳物质和大气降水发生强烈的元素和同位素交换是一种非常普遍的地质现象。不同岩体(脉)在侵入过程中遭受蚀变和混染的程度是

不一样的,有些岩体(脉)遭受强烈改造,原岩特征基本没有保存下来;而有些大的超基性岩体(如碧溪岭,饶拔寨,毛屋等)遭受改造的程度相对较弱,还保留了部分超基性岩体的特征。但由于氦的扩散和迁移能力很强,超镁铁质岩体所具有的地幔氦同位素特征基本丧失殆尽。随后在地壳环境中发生的超高压变质作用使大别—苏鲁地区超镁铁质岩石的地幔特征进一步削弱,而地壳特征更加显著。

大别—苏鲁地区榴辉岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值与围岩类型密切相关,围岩类型由超基性岩到片麻岩,再到大理岩,榴辉岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值逐步降低,表明榴辉岩是原地成因的,而非异地成因的(Li et al.,2000)。含柯石英大理岩、片麻岩和硬玉石英岩等非基性超高压变质岩的发现(张泽明等,1995),证明榴辉岩与其围岩一起经历了超高压变质过程。脉状榴辉岩(高天山等,1997)的发现及特征反映了榴辉岩及其围岩在变质过程中未发生明显的位移。

多种同位素地球化学研究表明大别—苏鲁地区大部分超高压变质岩具有表壳岩石的典型特征。对超高压变质岩的这种同位素特征,过去有人认为由于大别造山带俯冲和折返的速度太快了,在经受超高压变质时未来得及与地幔物质发生交换,故没有留下地幔物质参与的信息。现在不少人开始认识到大别—苏鲁地区超高压变质岩可能是在地壳中形成的,并未俯冲至100多千米的地幔深度;形成含柯石英和金刚石的超高压变质岩所需的压力不一定全由岩石静压力所引起,构造压力可能作出了重要贡献(吕古贤等,1998;董树文等,2002)。如果大别—苏鲁地区超高压变质岩是在地壳中形成的,未曾俯冲至地幔,则大别—苏鲁地区超高压变质岩的同位素特征就容易解释了。

5 主要结论

大别—苏鲁地区超高压变质榴辉岩的氦同位素数据点均位于大气氦和陆壳氦的过渡部位。利用真空压碎方法对榴辉岩中主要矿物石榴子石和绿辉石矿物流体包裹体的氦同位素组成进行了分析,也未发现明显地幔氦的存在。这些都说明大别—苏鲁地区超高压变质榴辉岩可能是在地壳中形成的,未曾俯冲至100多千米的地幔深度。含柯石英大理岩、片麻岩和硬玉石英岩等非基性超高压变质岩和脉状榴辉岩的发现、榴辉岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值与围岩类型密切相关、榴辉岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与围岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值同步变化,均证明榴辉岩与其围岩一起经历了超高压变质过程,榴

辉岩及其围岩在变质过程中未发生明显的位移,表明榴辉岩是原地成因的。

参 考 文 献

- 董树文,武红岭,刘晓春,等. 2002. 陆—陆点碰撞与超高压变质作用. 地质学报, 76(6): 69~80.
- 傅斌,郑永飞,龚冰,等. 1998. 苏北东海榴辉岩氢氧同位素地球化学研究. 地球化学, 27(1): 35~48.
- 傅斌,郑永飞,王峥嵘,等. 1997. 大别山双河超高压变质岩的稳定同位素研究. 地球学报, 18(增刊): 83~85.
- 高天山,汤家富,周存亭,等. 1997. 大别山区低绿片岩相火山碎屑岩中榴辉岩脉的发现. 科学通报, 42(16): 1758~1761.
- 刘晓春. 1994. 大别山榴辉岩—片麻杂岩的成因. 地球化学, 23(4): 366~376.
- 吕古贤,陈晶,李晓波,等. 1998. 构造附加静水压力研究与含柯石英榴辉岩成岩深度测算. 科学通报, 43(24): 2590~2602.
- 肖益林,傅斌,李曙光,等. 1997. 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, 18(3): 318~323.
- 张泽明,游振东,韩郁菁,桑隆康. 1995. 大别—苏鲁榴辉岩带的岩石学、变质作用过程及成因研究. 地质学报, 69(4): 306~325.
- 郑永飞,傅斌,肖益林,等. 1997. 大别山榴辉岩中大气降水同位素信息的保存及其地球动力学意义. 中国科学(D辑), 27: 121~126.
- Hilton D R, McMurtry G M, Goff F. 1998. Large variations in vent fluid $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$ ratios signal rapid changes in magma chemistry at Loihi seamount, Hawaii. *Nature*, 396: 359~362.
- Li Yanhe, Li Jincheng, Song Hebin. 2000. Helium isotope geochemistry of ultrahigh-pressure metamorphic eclogites from the Dabie Mts. and Sulu terrane in east China. *Acta Geologica Sinica* (English edition), 74(1): 14~18.
- Liu Xiaochun. 1994. Origin of eclogite-gneiss complexes from Dabie Mountains. *Geochimica*, 23(4): 366~376 (in Chinese with English abstract).
- Lu Guxian, Chen Jing, Li Xiaobo, et al. 1999. The formation depth of coesite-bearing eclogite, Dabie UHPM zone, China, modified by tectono-original additional hydrostatic pressure. *Chinese Science Bulletin* (English edition), 44(5): 398~411.
- Okay A, Sengor A M C. 1992. Evidence for intracontinental thrust-related exhumation of the ultra-high-pressure rocks in China. *Geology*, 20: 411~414.
- Ozima M, Podosek F A. 1983. *Noble Gas Geochemistry*. New York: Cambridge Univ. Press.
- Stuart F, Turner G, Taylor R. 1994. He-Ar isotope systematics of fluid inclusion: resolving mantle and crustal contributions to hydrothermal fluids. In: Matsuda J, ed. *Noble Gas Geochemistry and Cosmochemistry*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company.
- Wang, Xiaomin, Liou J G, Mao H K. 1989. Coesite-bearing eclogite from Dabie Mountain in central China. *Geology*, 17: 1085~1088.
- Xiao Yilin, Fu Bin, Li Shuguang, Zheng Yongfei. 1997. Metamorphic $P-T$ and oxygen isotope studies of eclogite from Bixiling in Dabie Mountains. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(3): 318~323 (in Chinese with English abstract).
- Xu S T, Okay A L, Ji S Y, et al. 1992. Diamond from the Dabieshan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 256: 80~82.
- Yui T F, Rumble D, Lo C H. 1995. Unusually low $\delta^{18}\text{O}$ ultra-high-pressure metamorphic rocks from the Su-Lu Terrain, eastern China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 2859~2864.
- Zhang Zeming, You Zhendong, Han Yujing, Song Longkan. 1996. Petrology, metamorphic process and genesis of the Dabie—Sulu eclogite belt, East—Central China. *Acta Geologica Sinica*, 9(2): 134~156 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F, Fu B, Li S G, et al. 1996. Extreme ${}^{18}\text{O}$ depletion in eclogite from the Su-Lu terrane in East China. *Eur. J. Mineral.*, 8: 317~323.
- Zheng Yongfei, Fu Bin, Xiao Yilin, Gong Bin, Ge Ningjie, Li Suguang. 1997. Hydrogen and oxygen isotope composition of eclogite from Dabie Mountain and its geodynamic implications. *Science in China(D)*, 27: 121~126 (in Chinese).

References

- Chavagnac V, Jahn Bor-Ming. 1996. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling Complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications. *Chemical Geology*, 133: 29~51.
- Dong Shuwen, Wu Hongling, Liu Xiaochun, Xue Huamin. 2002. On continent—continent point-collision and ultrahigh-pressure metamorphism, *Acta Geologica Sinica* (English edition), 76(2): 163~172.
- Fisher D E. 1986. Rare gases in MORB. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 50: 2531~2541.
- Fu Bin, Zheng Yongfei, Gong Bin, Li Yiliang, Li Shuguang. 1998. Hydrogen and oxygen isotope geochemistry of eclogite from the Donghai district in the Su-Lu terrane. *Geochimica*, 27(1): 35~48 (in Chinese with English abstract).
- Fu Bin, Zheng Yongfei, Wang Zhenrong, Gong Bin. 1997. Stable isotope of ultrahigh-pressure metamorphic rocks at Shuanghe in Dabie Mountains. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(Supp.): 83~85 (in Chinese with English abstract).
- Gao Tianshan, Tang Jiafu, Zhou Cunting, et al. 1997. Discover of eclogite vein in pyroclastic rock on greenschist facies of Dabie Mountains, East—Central, China. *Chinese Science Bulletin*, 42(16): 1758~1761 (in Chinese).

Helium Isotope Compositions and Forming Conditions of UHP Metamorphic Eclogites from the Dabie Mts. Terrane in East China

LI Shanfang¹⁾, LI Yanhe^{2,3)}, DING Tiping^{2,3)}, WU Zonghua⁴⁾, GU Pingdeng⁴⁾

1) *Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing, 100037*

2) *Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Science, Beijing, 100037*

3) *Laboratory of Isotope Geology, MLR, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

4) *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Science, Langfang, Hebei, 065000*

Abstract

The $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios of eclogites from the Dabie Mts. terrane range from 0.013×10^{-6} to 0.76×10^{-6} , with an average of 0.200×10^{-6} ; the $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios of garnets of eclogites are generally consistent with those of whole rock. The data points of helium isotope of eclogites fall into the mixing part of the crust and the atmosphere, and far from the mantle area in the $^3\text{He}-^4\text{He}$ diagram. The helium isotope compositions of fluid inclusion in garnets and omphacite from eclogites were measured by vacuum crusher method, but mantle information was not found in them. With the extremely lower $\delta^{18}\text{O}$ values, $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ values and other geochemical character, we suggest that the UHP metamorphic eclogites from the Dabie Mts. and Sulu area maybe formed in the crust and subduction into the mantle more 100 km may not have occurred. The $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios of eclogites are obviously correlated with the types of their surrounding rocks, the changes of $\delta^{18}\text{O}$ of eclogites and wall rocks are synchronous, and silicic coesite-bearing rocks were widely found, for example marble, gneiss, jadeite quartzite and so on. Those results suggest that the eclogites and their country rocks all underwent ultrahigh-pressure metamorphism, offsets between them during the metamorphic process were inconspicuous and the eclogites were formed in-situ.

Key words: eclogites; ultrahigh-pressure metamorphism; helium isotope; Dabie—Sulu