

# 中国大陆科学钻探主孔榴辉岩 Sm-Nd 年龄 及其地质意义

刘福来 薛怀民 孟繁聪 许志琴 李天福 陈世忠

(中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037)

**摘要:**南苏鲁中国大陆科学钻探主孔 CCSD-MH 及地表的榴辉岩 Sm-Nd 同位素年龄测试结果显示, 每件样品中全岩 (Wr) 与石榴石 (Grt) 和绿辉石 (Omp) 点均在一条直线上。除样品 B210R186 以外, 其余 5 件榴辉岩均给出十分相近的 Sm-Nd 等时线年龄, 位于 202.6~219 Ma 之间, 这与榴辉岩围岩——片麻岩锆石边缘记录的近等温减压退变质年龄 (200~220 Ma) 十分接近, 表明测试的榴辉岩中石榴石的 Sm-Nd 同位素体系有可能在近等温减压退变质时重置, 并在向角闪岩相退变质过渡时封闭。因此, 笔者测定的 202.6~219 Ma 的 Sm-Nd 全岩-矿物等时线年龄, 应代表了南苏鲁榴辉岩在构造折返过程中近等温减压阶段的退变质年龄, 而不能代表苏鲁地体的超高压变质年龄。

**关键词:**榴辉岩; Sm-Nd 同位素年龄; 近等温减压退变质作用; 南苏鲁

**中图分类号:** P597.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2005)02-0195-10

## 1 引言

苏鲁—大别地体是世界上规模最大的超高压变质带。Sm-Nd 同位素测试则是厘定苏鲁—大别榴辉岩超高压变质时代最为常规的研究方法, 有关榴辉岩 Sm-Nd 同位素年代学研究和测试过程中应注意的问题, Li 等<sup>[1]</sup>已进行了精辟而详细的阐述。近年来, 随着锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年技术的不断应用, 在苏鲁地区榴辉岩围岩片麻岩含柯石英锆石微区已准确测定了超高压变质时代为 (227±2) Ma 左右<sup>[2,3]</sup>, 指示其峰期超高压变质时代应为印支期。然而, 苏鲁—大别超高压变质带在构造折返的过程中, 经历了近等温减压的 *PT* 演化过程以及相应的角闪岩相退变质作用的改造<sup>[4,5]</sup>, 这一动力学过程就有可能造成榴辉岩 Sm-Nd 同位素体系封闭时间推迟。因此, 它们的 Sm-Nd 同位素特征如何? 近等温减压退变质阶段年龄又如何? 怎样合理解释榴辉岩所记录的 Sm-Nd 同位素年龄? 这些问题的解决将对正确认识苏鲁—大别超高压变质带的构造背景与折返机制以

及苏鲁—大别造山带的构造格局和演化等具有重要科学意义。本文以中国大陆科学钻探工程主孔 CCSD-MH 以及南苏鲁东海地区地表榴辉岩样品 (图 1) 为重点研究对象, 在详细岩相学研究的基础上, 选择具有代表性的榴辉岩岩心样品进行系统的 Sm-Nd 同位素年龄测试, 并对其年龄数据进行合理解释, 阐明其代表的地质意义。

## 2 Sm-Nd 同位素年龄测试样品的岩相学特征

在对南苏鲁东海地表露头以及中国大陆科学钻探工程主孔 CCSD-MH 榴辉岩的产状、宏观和微观特征详细研究的基础上, 精选了 6 件榴辉岩样品进行 Sm-Nd 同位素年龄测试, 其中地表样品 1 件 (图 1), CCSD-MH 中的岩心样品 5 件 (图 2)。岩石类型包括石英榴辉岩、金红石榴辉岩、多硅白云母榴辉岩和含金红石榴辉岩。

### 2.1 石英榴辉岩

石英榴辉岩样品 (B50R48, 采样深度: 189.4 m)

收稿日期: 2005-02-18; 改回日期: 2005-03-01

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2003CB716502)、国家自然科学基金重大项目 (40399143)、中国地质调查局地质大调查项目 (121201056606) 和国土资源部百名优秀青年科技人才计划项目联合资助。

作者简介: 刘福来, 男, 1963 年生, 研究员, 主要从事岩石学研究; E-mail: liufulai@ccsd.org.cn.

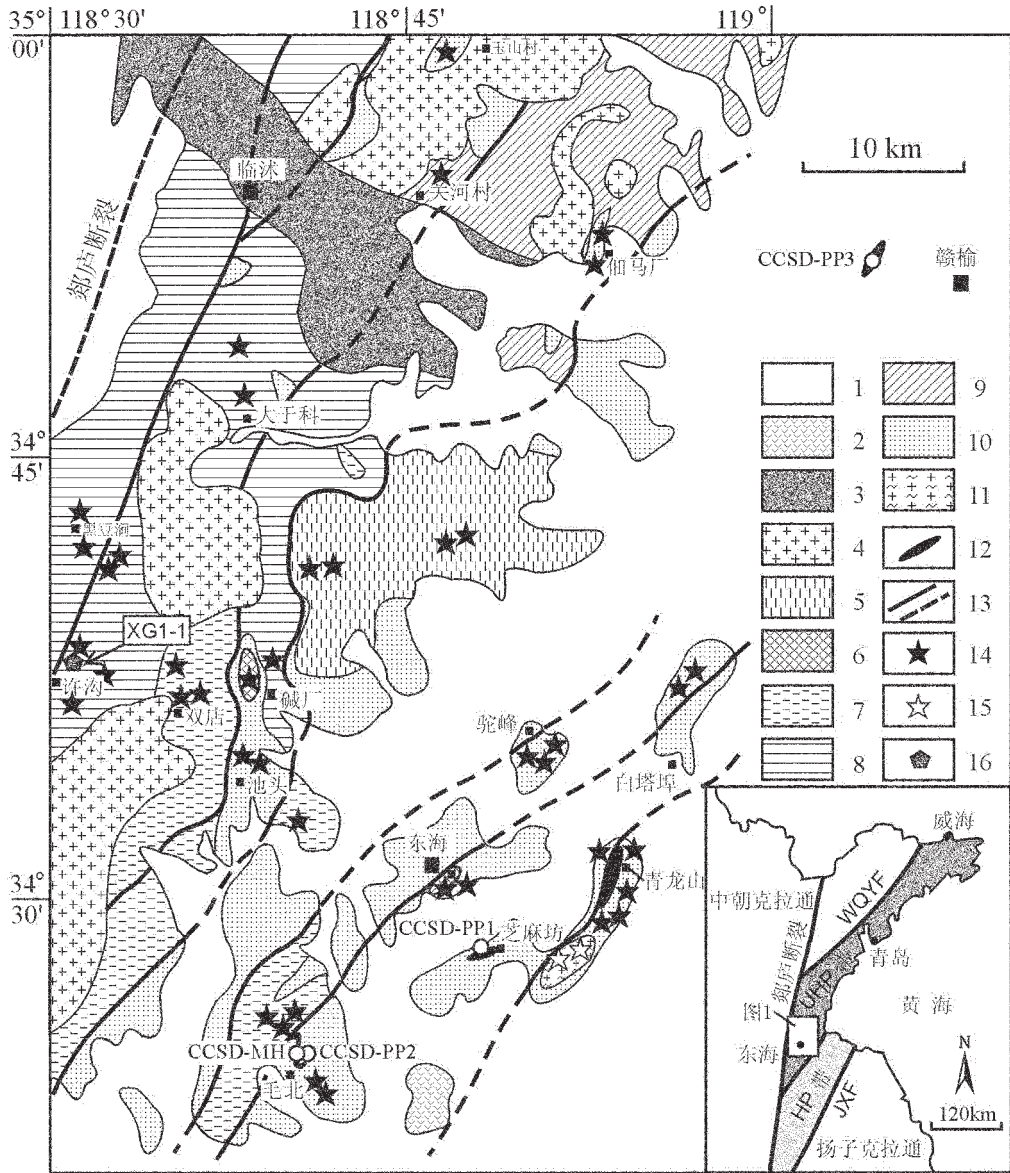


图1 南苏鲁东海地区地质简图及钻孔和采样位置

- 1—第四系; 2—古近纪—新近纪玄武岩; 3—白垩纪盆地沉积; 4—造山后未变质花岗岩; 5—含绿帘石和角闪石的二长花岗质片麻岩;
  - 6—角闪黑云斜长花岗质片麻岩; 7—含石榴石和黑云母的斜长(二长)花岗质片麻岩; 8—含黑云母二长花岗质片麻岩;
  - 9—钾长花岗质片麻岩; 10—表壳岩系; 11—含黄铁矿绿帘黑云二长花岗质片麻岩; 12—榴辉岩和超基性岩;
  - 13—剪切带或断层; 14—含柯石英; 15—不含柯石英; 16—Sm-Nd 同位素样品位置;
- WQYF—五莲—青岛—烟台断裂; JXF—嘉山—响水断裂

Fig. 1 Simplified geological map of the Donghai area in the southwestern Sulu terrane, showing the drilling hole and sample locations

- 1—Quaternary; 2—Paleocene—Neogene basalt; 3—Cretaceous basin; 4—Cretaceous granite; 5—Aegirine-bearing granitic gneiss;
- 6—Amphibole-bearing granitic gneiss; 7—Garnet-bearing granitic gneiss; 8—Biotite-bearing granitic gneiss; 9—Potash feldspar granitic gneiss;
- 10—Supracrustal rocks, including paragneisses, kyanite- and jadeite-bearing quartzite, marble; 11— Pyrite-bearing granitic gneiss;
- 12—Eclogite and ultramafic rocks; 13— Ductile shear zone or fault; 14—Coesite-bearing zircon; 15—Coesite-free zircon;
- 16—Sample location for Sm-Nd isotopic analysis; YQWF— Yantai—Qingdao—Wulan fault; JXF—Jiashan—Xiangshui fault

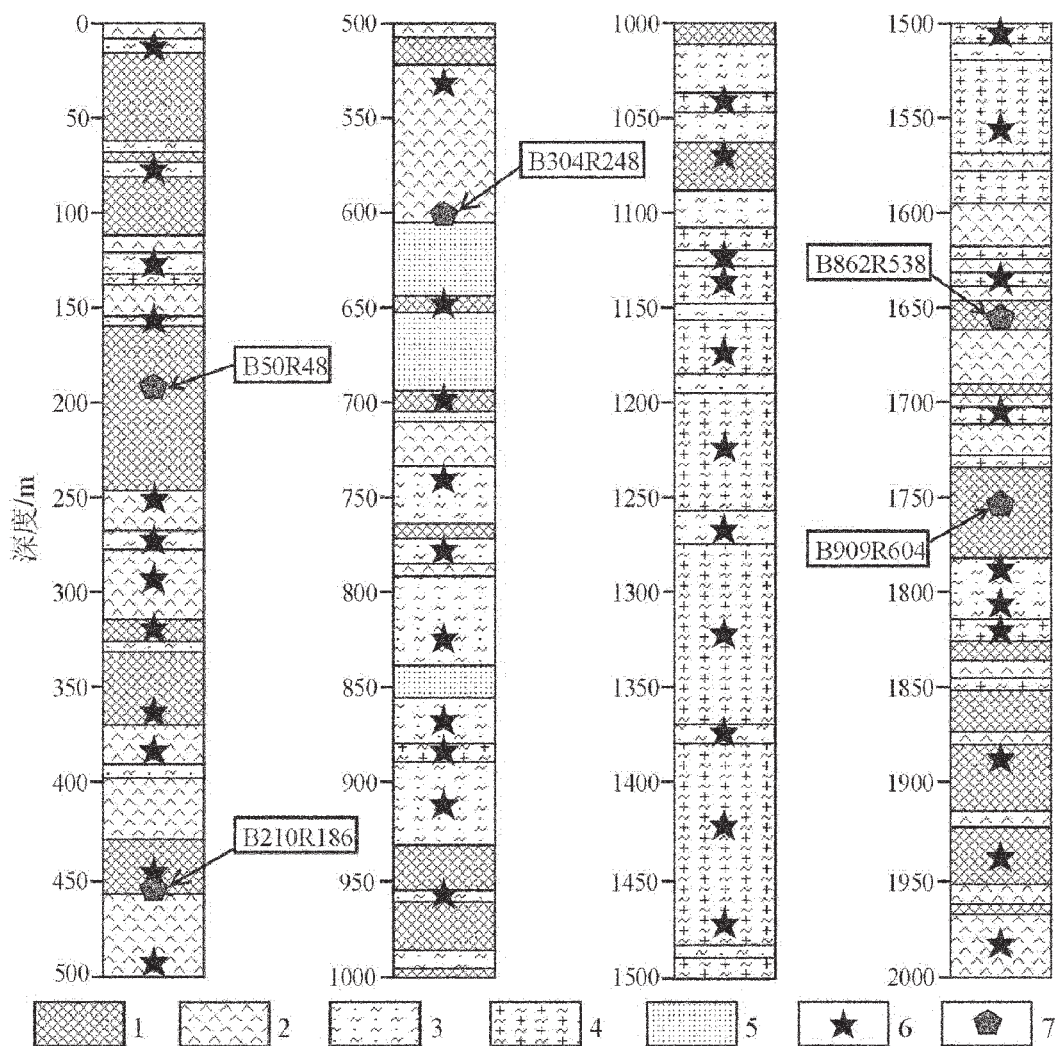


图 2 中国大陆科学钻探工程主孔 (CCSD-MH) 0-2000 m 岩性简化剖面及采样位置图

1—榴辉岩; 2—斜长角闪岩和退变榴辉岩; 3—副片麻岩; 4—花岗质片麻岩 (正片麻岩);  
5—超基性岩; 6—锆石中含柯石英包体; 7—Sm-Nd 同位素样品位置

Fig. 2 Simplified lithological section of 0-2000 m

in the main drilling hole CCSD-MH, Chinese Continental Scientific Drilling Project and sample location (star representing coesite as an inclusion preserved in zircon)

1—Eclogite; 2—Amphibolite and retrograde eclogite; 3—Paragneiss; 4—Orthogneiss (granitic gneiss);  
5—Ultramafic rock; 6—Coesite-bearing zircon; 7—Sample location for Sm-Nd isotopic analysis



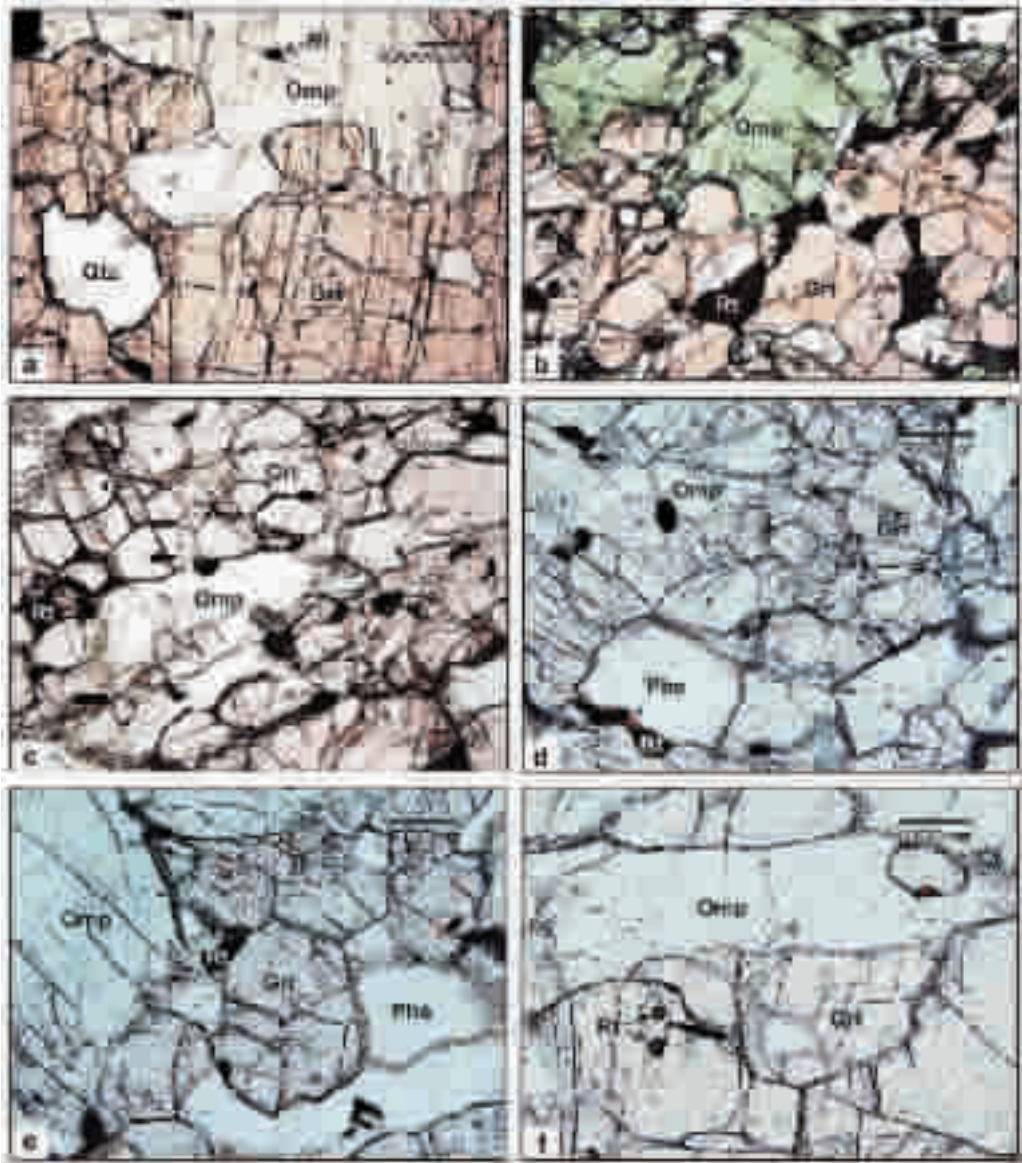


图 3 榴辉岩的显微结构照片

a—石英榴辉岩 (B50R48, 采样位置:CCSD-MH;采样深度:189.4 m), 矿物组成:石榴石(Grt) + 绿辉石 (Omp) + 石英 (Qtz);b—金红石榴辉岩 (B210R186, 采样位置:CCSD-MH;采样深度:451.4 m), 矿物组成:石榴石(Grt) + 绿辉石 (Omp) + 金红石 (Rt);c—金红石榴辉岩 (B304R248, 采样位置:CCSD-MH;采样深度:602.6 m), 矿物组成:石榴石(Grt) + 绿辉石 (Omp)+金红石 (Rt);d—多硅白云母榴辉岩 (B862R538, 采样位置:CCSD-MH;采样深度:1655.9 m), 矿物组成:石榴石(Grt) + 绿辉石 (Omp)+多硅白云母 (Phe) 以及少量的金红石 (Rt);e—多硅白云母榴辉岩 (B909R604, 采样位置:CCSD-MH;采样深度:1751.4 m), 矿物组成:石榴石(Grt)+绿辉石 (Omp)+多硅白云母 (Phe) 以及少量的金红石 (Rt);f—含金红石榴辉岩 (XG1-1, 采样位置:东海西北许沟地区), 矿物组成:石榴石(Grt)+绿辉石 (Omp)+多硅白云母 (Phe) 以及少量的金红石 (Rt)

Fig. 3 Photomicrographs of mineral assemblages in the matrix of eclogite

a—Quartz eclogite (B50R48, location:CCSD-MH;189.4 m in depth), the mineral assemblage consists mainly of garnet (Grt)+ omphacite (Omp)+ quartz (Qtz);b—Rutile eclogite (B210R186, location: CCSD-MH;451.4 m in depth), the mineral assemblage is comprised of garnet (Grt)+omphacite (Omp)+rutile (Rt);c—Rutile eclogite (B304R248, location: CCSD-MH;602.6 m in depth), the mineral assemblage is characterized by garnet (Grt)+ omphacite (Omp)+rutile (Rt);d—Phengite eclogite (B862R538, location:CCSD-MH;1655.9 m in depth), the mineral assemblage consists mainly of garnet (Grt)+omphacite (Omp)+phengite (Phe) with minor rutile (Rt);e— Phengite eclogite (B909R604, location: CCSD-MH;1751.4 m in depth), the mineral assemblage consists mainly of garnet (Grt)+ omphacite (Omp)+phengite (Phe) with minor rutile (Rt);f—Rutile-bearing eclogite (XG1-1, location:Xugou area, northwestern Donghai), the mineral assemblage is comprised of garnet (Grt)+omphacite (Omp)+phengite (Phe) with minor (Rt)

采自中国大陆科学钻探工程主孔 CCSD-MH 中(图 2)。岩心表面非常新鲜,呈粒状变晶结构,块状构造。矿物组成为:石榴石 (Grt)+绿辉石 (Omp) 以及少量的石英 (Qtz) 和金红石 (Rt) (图 3-a)。其中石榴石呈他形粒状,在岩心中均匀分布,局部聚集呈多晶集合体,粒度为 0.5~1.5 mm,含量约 50%左右。绿辉石呈他形粒状,在岩心中均匀分布,粒度为 0.5~1.5 mm,含量约 43%。石英呈他形粒状,分布于多晶石榴石粒间(图 3-a)以及石榴石和绿辉石粒间,粒度为 0.5~1.0mm,含量约 5%。岩心中含有少量的细粒金红石,常分布于石榴石和绿辉石的粒间,或以包体的形式赋存于石榴石和绿辉石中(图 3-a),含量约 2%左右。此外,在薄片尺度范围内,未发现石榴石和绿辉石退变为其他低压矿物的现象。

## 2.2 金红石榴辉岩

在中国大陆科学钻探工程主孔 CCSD-MH 中共采集 2 件金红石榴辉岩样品 (B210R186, 采样深度: 451.4 m; B304R248, 采样深度: 602.6 m), 采样位置如图 2 所示。2 件金红石榴辉岩样品均十分新鲜。岩心表

面呈暗红色,他形粒状变晶结构,块状构造。矿物组成:石榴石 (Grt)+绿辉石 (Omp)+金红石 (Rt)。在上述矿物晶体边缘均未发现退变质现象(图 3-b-c)。其中石榴石呈暗红色,他形粒状,在岩心中分布均匀,多数石榴石晶体的粒度为 0.5~1.5 mm,含量 55%左右。绿辉石呈暗绿色,他形粒状,在岩心中均匀分布,绝大多数绿辉石晶体的粒度约 0.5~1.5 mm,个别达 2.0 mm,含量 40%左右。金红石呈他形粒状,主要分布于石榴石粒间或石榴石和绿辉石粒间,有的则以包体的形式赋存于石榴石和绿辉石晶内(图 3-b-c),粒度为 0.3~0.5 mm,个别可达 1.0 mm 以上,含量 5%左右。

## 2.3 多硅白云母榴辉岩

2 件多硅白云母榴辉岩样品 (B862R538, B909R604) 分别采自中国大陆科学钻探工程主孔 CCSD-MH 的 1655.9 m 和 1751.4 m 的深度(图 2)。2 件岩心样品均十分新鲜,岩心表面呈灰绿色,他形片状粒状变晶结构,块状构造,局部为弱片麻状构造。矿物组成为:石榴石 (Grt)+绿辉石 (Omp)+多硅白云母 (Phe) 以及少量的金红石 (Rt) (图 3-d-e)。

表 1 南苏鲁超高压变质带中的 Sm、Nd 含量及其同位素组成  
Table 1 Whole-rock and mineral Sm and Nd data for eclogites  
from southwestern Sulu UHP terrane

样品号	名称	Sm /10 <sup>-6</sup>	Nd /10 <sup>-6</sup>	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd (???)	?Nd
B50R48	全岩	5.590	19.642	0.1722	0.512543 ? 8	
	石榴石	3.555	1.848	1.1640	0.513915 ? 10	? 1.4
	绿辉石	1.079	3.257	0.2004	0.512558 ? 8	
B210R186	全岩	12.216	46.495	0.1589	0.512505 ? 8	
	石榴石	0.2405	0.3734	0.3896	0.512898 ? 7	? 1.5
	绿辉石	0.6048	1.498	0.2442	0.512619 ? 10	
B304R248	全岩	1.321	3.905	0.2046	0.512507 ? 5	
	石榴石	0.9544	0.521	1.1080	0.513783 ? 10	? 2.9
	绿辉石	0.4440	1.289	0.2084	0.512494 ? 6	
B862R538	全岩	6.925	33.879	0.1236	0.511967 ? 5	
	石榴石	2.266	1.313	1.0440	0.513193 ? 10	? 11.0
	绿辉石	0.7205	1.814	0.2402	0.512136 ? 8	
B909R604	全岩	4.649	17.624	0.1596	0.512037 ? 9	
	石榴石	2.278	1.174	1.1740	0.513435 ? 12	? 10.7
	绿辉石	1.154	3.564	0.1959	0.512089 ? 10	
XG1-1	全岩	1.821	4.987	0.2209	0.512434 ? 9	
	石榴石	1.061	0.4455	1.4410	0.512395 ? 8	? 10.6
	绿辉石	2.452	7.685	0.1930	0.514186 ? 12	

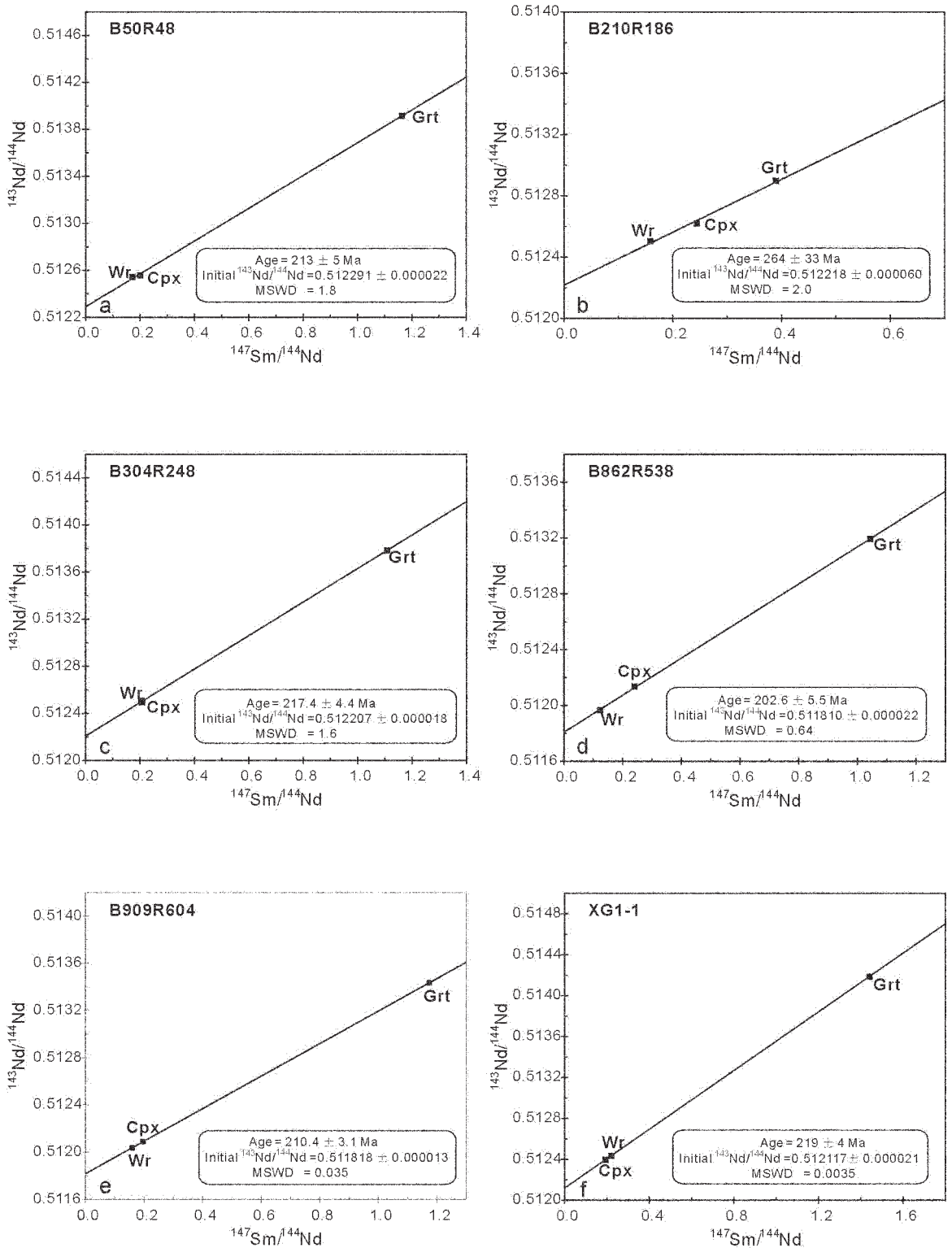


图4 南苏鲁超高压变质带中榴辉岩的Sm-Nd等时线年龄

a—B50R48; b—B210R186; c—B304R248; d—B862R538; e—B909R604; f—XG1-1; Wr—全岩; Grt—石榴石; Omp—绿辉石

Fig. 4 Sm-Nd mineral isochrone ages of eclogites from the southwestern Sulu UHP terrane

a—B50R48; b—B210R186; c—B304R248; d—B862R538; e—B909R604; f—XG1-1; Wr—whole-rock; Grt—garnet; Omp—omphacite



其中石榴石呈浅粉红色,他形粒状,在岩心中均匀分布,粒度为 0.5~1.5 mm,含量 47%左右。绿辉石呈浅绿色,他形粒状,在岩心中均匀分布,粒度为 0.5~1.8 mm,个别可达 2.0 mm 以上,含量约 45%。多硅白云母呈片状,在岩心中均匀分布,部分多硅白云母晶体边缘已发生明显的水化和暗化的现象(图 3-d-e),粒度为 0.5~1.8 mm,含量 8%左右。此外,岩心中含有极少量的细粒金红石,多数沿石榴石、绿辉石和多硅白云母的粒间分布(图 3-d-e)。

#### 2.4 含金石榴辉岩

含金石榴辉岩与金石榴辉岩的最大区别在于,岩心中的金红石含量极少,含量小于 1.0%。样品(XG1-1)采自东海西北许沟地区(图 1)。该榴辉岩主要以包体的形式存在于蛇纹石化超基性岩中。岩石表面十分新鲜,呈灰绿色,他形粒状变晶结构,块状构造。矿物组成为:石榴石(Grt)+绿辉石(Omp)以及极少量的金红石(Rt)(图 3-f)。其中石榴石呈粉红色,他形粒状,在岩石中均匀分布,粒度 0.5~2.0 mm,含量约 50%左右。绿辉石呈浅绿色,他形粒状,分布均匀,局部见有晶体拉长现象(图 3-f),粒度 0.5~2.0 mm,含量 50%左右。此外,极细粒的金红石通常以包体的形式存在于石榴石和绿辉石晶体中(图 3-f)。

### 3 榴辉岩 Sm-Nd 同位素年龄的测试方法

Sm-Nd 同位素分析的化学处理和测试工作均在国土资源部同位素开放实验室完成。其中 Sm、Nd 含量测定用同位素稀释法完成,分析方法见张宗清等<sup>[6]</sup>的文献资料;元素分离采用 AG500W × 8 (H<sup>+</sup>) 阳离子交换柱。质谱分析使用的是 MAT-261 固体同位素质谱仪。质谱测定时同位素分馏校正正常化值  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ , 标准测定结果:J.M.Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511125 \pm 8 (2\sigma)$ , Sm-Nd 化学流程空白为  $5 \times 10^{-11}\text{g}$ 。

### 4 榴辉岩 Sm-Nd 同位素定年结果

中国大陆科学钻探主孔 CCSD-MH 和南苏鲁地表榴辉岩的 Sm-Nd 同位素测试结果列入表 1 中。样品 B50R48、B210R186、B304R248、B862R583、B909R604 和 XG1-1 等时线及年龄示于图 4 中。从图中可以明显看出,每件榴辉岩样品中全岩(Wr)与石榴石(Grt)和绿辉石(Omp)点均在一条直线上(图 4)。除样品 B210R186 以外,其余 5 件榴辉岩均给

出十分相近的 Sm-Nd 等时线年龄(图 4)。其中主孔 CCSD-MH 中的石英榴辉岩(B50R48) Sm-Nd 等时年龄为  $(213 \pm 5)\text{Ma}$ ;金石榴辉岩 Sm-Nd 等时年龄为  $(217.4 \pm 4.4)\text{Ma}$ ;两件多硅白云母榴辉岩(B862R538 和 B909R604) Sm-Nd 等时年龄分别为  $(202.6 \pm 5.5)\text{Ma}$  和  $(210.4 \pm 3.1)\text{Ma}$ 。在地表超基性岩中的含金石榴辉岩 Sm-Nd 等时年龄为  $(219 \pm 4)\text{Ma}$ ,与主孔 CCSD-MH 中的榴辉岩 Sm-Nd 等时年龄十分接近。值得注意的是,主孔 CCSD-MH 中的一件金石榴辉岩(B210R186)却给出了偏高的 Sm-Nd 等时年龄  $(264 \pm 33)\text{Ma}$ (图 4-b)。从表 1 样品榴辉岩的 Sm 和 Nd 的同位素组成来看,样品 B210R186 中石榴石具有异常低的  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  比值(0.3896),而其他 5 个样品的  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  比值均较高,位于  $1.044 \pm 1.441$  之间(表 1)。从柏林等<sup>[7]</sup>曾报道了荣城迟家店 E87Y-4 榴辉岩样品给出 294 Ma 的老年龄,该样品的石榴石具有反常的 REE 模型,其  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  比值  $< 0.18$ 。与该样品产于同一超镁铁岩体的 E87Y-3 样品的石榴石,就具有特征的 HREE 的富集模型, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  比值明显偏高  $> 0.64$ ,并给出相对较新的年龄值 232 Ma<sup>[7]</sup>。从柏林等<sup>[7]</sup>认为,这两个榴辉岩样品之所以给出两个不同的年龄值,可能是由于它们经历了不同的演化历史。笔者认为,苏鲁地体部分榴辉岩(体)在经历超高压变质作用以后,局部可能受到深部流体作用而显著降低了石榴石  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  比值,从而给出异常高的年龄值。因此,这样的异常年龄绝不能代表榴辉岩的超高压变质年龄。此外,6 件榴辉岩样品 Nd 同位素初始比  $\epsilon_{\text{Nd}}$  均为负值(表 1),变化于  $-1.4 \sim -11.0$  之间,表明这些榴辉岩的原岩可能是较古老的俯冲陆壳岩石。

### 5 讨论和结论

有关苏鲁—大别地体榴辉岩及其围岩的超高压变质时代一直是地学家研究的重点问题,也是目前争论的焦点。而全岩和单矿物的 Sm-Nd 同位素定年则是限定榴辉岩超高压变质时代最为常规的测试研究方法。到目前为止,已发表了大量有关苏鲁—大别超高压变质带榴辉岩的 Sm-Nd 年代学数据<sup>[1,8]</sup>,绝大多数集中于 210~230 Ma 之间<sup>[1,8]</sup>。最近,部分研究者<sup>[2,3]</sup>采用激光拉曼技术,对苏鲁超高压变质带榴辉岩围岩——片麻岩锆石微区矿物包体进行了系统鉴定,并配备阴极发光图像,运用 SHRIMP U-Pb

定年方法,对锆石不同性质微区进行年龄测试,结果发现,含柯石英锆石微区记录了 220~235 Ma 的超高压变质年龄,而含低压矿物包体的锆石边缘则记录了 200~220 Ma 的构造折返年龄<sup>[2,3]</sup>。上述有关榴辉岩所获得的 Sm-Nd 等时线年龄范围,与片麻岩含柯石英锆石微区记录的超高压变质年龄以及锆石边缘记录的构造折返年龄均有所重叠,由此可以推断,以往发表的所有榴辉岩的 Sm-Nd 等时线年龄并非都能够代表超高压变质年龄。

在榴辉岩的全岩-单矿物 Sm-Nd 等时线年龄的测试以及对所获得的年龄进行合理的解释过程中,应该注意以下问题:

(1)超高压变质条件下可能存在矿物间的 Nd 同位素不平衡的现象。部分研究者在研究榴辉岩和石榴橄榄岩的地球化学性质时,观察到在石榴石和单斜辉石之间存在 Nd 同位素不平衡现象<sup>[9,10]</sup>。他们发现在大多数情况下,石榴石-单斜辉石年龄比真实年龄偏新。不过这些 Nd 同位素不平衡现象都是在粗粒、低温榴辉岩以及金伯利岩中的榴辉岩包体中观察到的<sup>[17,18]</sup>。笔者测试的所有榴辉岩样品中的石榴石和绿辉石的晶体粒度均相对较小(0.5~1.5 mm),相应的超高压峰期变质的温度为 700~850 °C,属于高温榴辉岩<sup>[2,4]</sup>。因此,本文多数榴辉岩样品记录的 Sm-Nd 等时线年龄(202.6~219 Ma)普遍低于苏鲁地体的超高压变质年龄(220~235 Ma),不大可能是由矿物间的 Nd 同位素不平衡所引起的。

(2)构造折返过程中伴随的退变质作用对 Sm-Nd 定年的可能影响。退变质过程中形成的各种含水矿物,可能引起 Sm-Nd 体系的重置。为了避免退变质对 Sm-Nd 定年的影响,样品的质量至关重要。用于测试的单矿物样品必须是在双目镜下逐粒挑选的完全新鲜、没有任何蚀变的颗粒<sup>[8]</sup>。而笔者用于 Sm-Nd 年龄测试的所有榴辉岩样品均十分新鲜,石榴石和绿辉石单晶中的包体矿物也十分少见,石榴石和绿辉石的周边均没有退变为其他低压的含水矿物相(图 3)。因此,榴辉岩样品 Sm-Nd 体系的重置与研究区超高压变质岩构造折返过程中晚期角闪岩相退变质阶段形成的各种含水矿物无关。

(3)石榴石 Nd 同位素封闭温度对榴辉岩 Sm-Nd 年龄的影响。石榴石 Sm-Nd 体系的封闭温度是一个有争议的问题。有无变质流体的存在可能是导致封闭温度变化的主要原因。在实验研究的基础上,

通过计算确定石榴石 Sm-Nd 体系的封闭温度在 600~700 °C<sup>[11,12]</sup>,根据 Dodson<sup>[13]</sup>封闭温度方程的基本假设条件,即矿物颗粒表面放射性子体浓度在扩散过程中始终为零,这种依据扩散系数计算的封闭温度要求矿物粒间必须存在流体,从而具有很快的扩散速率。有的研究者认为,在缓慢冷却条件下,石榴石封闭温度在 600±30 °C<sup>[14]</sup>;而另一部分研究者则认为,石榴石在干体系条件下具有较高的封闭温度(≥750 °C)<sup>[10,15]</sup>。岩相学研究结果表明<sup>[2,4]</sup>,本区榴辉岩的超高压峰期变质温度为 700~850 °C,之后经历了近等温减压的退变质过程,在此过程中已有许多证据表明存在变质流体作用<sup>[16]</sup>。因此,石榴石的 Sm-Nd 同位素体系有可能在近等温减压退变质时重置,并在向角闪岩相退变质过渡时封闭。本区多数榴辉岩样品记录的 Sm-Nd 等时线年龄(202.6~219 Ma)与片麻岩锆石边部记录的近等温减压退变质阶段的年龄(200~220 Ma)十分相近也证明了这一点。因此,本文测定的 202.6~219 Ma 的 Sm-Nd 全岩-矿物等时线年龄,应代表了南苏鲁榴辉岩在构造折返过程中近等温减压阶段的退变质年龄,而不能代表苏鲁地体的超高压变质年龄。

**致谢:**承蒙张建新研究员审阅初稿,并提出有益的建议和修改意见,在此致以诚挚谢意。

#### 参考文献 (References):

- [1] Li S, Jagoutz E, Lo C H, et al. Sm/Nd, Rb/Sr, and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar isotopic systematics of ultrahigh-pressure metamorphic rock in the Dabie-Sulu belt, central China: a retrospective view [J]. *International Geology Review*, 1999, 41: 1114~1124.
- [2] Liu F L, Xu Z Q, Liou J G, et al. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh-pressure and retrograde metamorphism of gneiss, south-western Sulu terrane, eastern China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2004, 22: 315~326.
- [3] Liu F L, Xu Z Q, Xue H M. Tracing the protolith, UHP metamorphism, and exhumation ages of orthogneiss from the SW Sulu terrane-eastern China); SHRIMP U-Pb dating of mineral inclusion-bearing zircons [J]. *Lithos*, 2004, 78: 411~429.
- [4] Zhang R Y, Hirajima T, Banno S, et al. Petrology of ultrahigh-pressure rocks from the southern Su-Lu region, eastern China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1995, 13: 659~675.
- [5] Liu F L, Xu Z Q, Liou J G, et al. Ultrahigh-pressure mineral inclusions in zircons from gneissic core samples of the Chinese Continental Scientific Drilling Site in eastern China [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2002, 14: 499~512.
- [6] 张宗清,刘敦一,付国民. 北秦岭变质地层同位素年代研究 [M].



- 北京:地质出版社, 1994. 5~7.
- Zhang Zongqing, Liu Duniyi, Fu Guomin. Isotopic Chronology of Metamorphic Rocks in North Qinling [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994, 5~7 (in Chinese).
- [7] 从柏林, 张儒媛, 李曙光, 等. 中国苏北—胶东南高压变质带的同位素地质年代学初探 [A]. 见: 中国科学院地质研究所岩石圈构造演化开放实验室年报 (1989—1990) [C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. 68~72.
- Cong Bailin, Zhang Ruyuan, Li Shuguang, et al. Isotopic geochronology of high-pressure metamorphic belt in north Jiangsu-southeastern Shandong Province, China [A]. In: Annual Report of Lithosphere and Tectonic Evolution Laboratory of Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences (1989—1990) [C]. Beijing: Chinese Scientific and Technological Press, 1991. 68~72 (in Chinese).
- [8] 李曙光, Jagoutz E, 肖益林, 等. 大别山—苏鲁地体超高压变质年代学—I. Sm-Nd 同位素体系 [J]. 中国科学 (D 辑), 1996, 26: 249~257.
- Li Shuguang, Jagoutz E, Xiao Yilin, et al. Geochronology of Dabieshan-Sulu ultrahigh-pressure metamorphic terrane—I. Sm-Nd isotopic systematics [J]. Science in China (Series D), 1996, 26: 249~257 (in Chinese).
- [9] Jagoutz E. Nd and Sr systematics in an eclogite xenolith from Tanzania: evidence for frozen mineral equilibria in the continental lithosphere [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1988, 52: 1285~1293.
- [10] Thoni M, Jagoutz E. Some new aspects of dating eclogites in orogenic belts: Sm-Nd, Rb-Sr and Pb-Pb isotopic results from the Austroalpine Saualpe and Koralpe type-locality [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56: 347~368.
- [11] Harrison WJ, Wood BJ. An experimental investigation of the partitioning of REE between garnet and liquid with reference to the role of defect equilibration [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 1980, 72: 145~155.
- [12] Humphries FJ, Cliff RA. Sm-Nd dating and cooling history of Scourian granulites, Sutherland, NW Scotland [J]. Nature, 1982, 295: 515~517.
- [13] Dodson MH. Closure temperatures in cooling geochronological and petrological systems [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1973, 40: 259~274.
- [14] Mezger K, Essene E J, Halliday A N. Closure temperatures of the Sm-Nd system in metamorphic garnet [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1992, 113: 397~409.
- [15] Hensen B J, Zhou B. Retention of isotopic memory in garnets partially broken down during an overprinting granulite-facies metamorphism: Implications for the Sm-Nd closure temperature [J]. Geology, 1995, 23: 225~228.
- [16] Zheng YF, Fu B, Gong B, et al. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime [J]. Earth Science Reviews, 2003, 62: 105~161.

## Sm–Nd dating of eclogites from the main drill hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project and outcrops in the southwestern Sulu terrane, eastern China

LIU Fu-lai, XUE Huai-min, MENG Fan-cong, XU Zhi-qin, LI Tian-fu, CHEN Shi-zhong

*(Key Laboratory for Continental Dynamics of the Ministry of land and Resources of China, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)*

**Abstract:** Sm–Nd ages of from eclogites in the mainhole of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project and outcrops in the southern ultrahigh–pressure terrane were determined. The data points of whole rock, garnet and omphacite of each sample all plot on a line. Except for sample B210R186, the other five samples eclogites give very close Sm–Nd isochron ages, ranging between 202.6 and 219 Ma. These Sm–Nd ages are similar to those (SHRIMP U–Pb ages 200 – 220 Ma) of zircon retrogressive rims from the country rock——gneisses, suggesting that the Sm–Nd isotope system of garnet in eclogites analyzed in the study might be reset during the isothermal decompressional retrogressive stage and close during the retrograde transition to amphibolite facies. Therefore the Sm–Nd whole rock–mineral isochron ages of 202.6–219 Ma determined in this paper should be interpreted as representing the retrograde ages of the isothermal decompressional retrogressive stage during exhumation of the South Sulu eclogite, rather than the ultrahigh–pressure metamorphic ages of the Sulu terrane.

**Key words:** eclogite; Sm–Nd age; isothermal decompressional retrogression; southwestern Sulu terrane

---

**About the first author:** LIU Fu-lai, male, born in 1963, engaging in petrological study; E-mail: liufulai@ccsd.org.cn.