

# 中国大陆科学钻探预先导孔(CCSDB PP2)榴闪岩的地球化学组成及其地质意义

戚学祥, 唐哲民, 闫 玲

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:** 预先导孔(CCSDB PP2)位于苏鲁高压-超高压变质地体南部的北苏鲁超高压变质表壳剪切叠覆岩片中, 岩心主要由榴闪岩(包括角闪岩)、花岗片麻岩、副片麻岩和榴辉岩组成。镜下鉴定和激光拉曼测试结果表明预先导孔(CCSDB PP2)第一段榴闪岩的主要矿物为角闪石、石榴石、黑云母和钠长石, 是榴辉岩退变质作用的产物。地球化学数据显示榴闪岩的化学成分与正常型榴辉岩相对应, 稀土元素组成及配分模式与主孔榴辉岩基本相似, 但微量元素特征及在地球化学判别图解上存在一定差异, 说明该段榴闪岩与主孔榴辉岩的原岩虽然都是形成于板内环境玄武岩类, 但它们并不完全相同, 其差异可能是由原岩性质的多样性及榴辉岩退变质过程中流体组分的加入引起的。榴闪岩及其下部花岗片麻岩内锆石中柯石英、绿辉石等矿物包裹体的发现及岩石学和地球化学特征等与主孔花岗片麻岩相似的性质, 以及在接触面附近榴闪岩中的 $\text{SiO}_2$ 含量具有逐渐增高的趋势等, 说明榴闪岩与花岗片麻岩曾一起俯冲到地下深处, 并在折返过程中经历了强烈的退变质作用, 它们之间可能存在一定程度的物质交换。

**关键词:** 苏鲁高压-超高压变质地体; 预先导孔(CCSDB PP2); 榴闪岩; 退变质作用。

中图分类号: P588.3

文章编号: 1000-2383(2006)04-0539-12

收稿日期: 2006-05-10

## Geochemical Characteristics of Garnet Amphibolite from the Pre Pilot Hole of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD PP2) and Its Geological Significance

QI Xue xiang, TANG Zhe min, YAN Ling

Key Laboratory for Continental Dynamics of MLR, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

**Abstract:** The pre pilot hole of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD PP2) is located at the UHP metamorphic supracrustal slice of northern Sulu. The rock types in CCSD PP2 are garnet amphibolite (amphibolite), orthogneisses, paragneisses and eclogite. The main mineral assemblage of the garnet amphibolite from the first part in CCSD PP2 is amphibole, garnet, biotite and albite, which resulted from retrograde metamorphism. The geochemical data show the chemical compositions of the garnet amphibolite are consistent with so called normal eclogite, the compositions and partition pattern of REE from garnet amphibolite are similar to eclogite from the main hole, and there are some differences in trace element and geochemical discriminating figures between the garnet amphibolite from CCSD PP2 and eclogite from the main hole, which demonstrates that their protoliths are within plate basalts, and the differences are caused by the characteristics of the protolith and fluid introduction during eclogite retrograde metamorphism. Coesite and omphacite inclusions in zircons were discovered both from garnet amphibolite and orthogneiss, closely below the garnet amphibolite. There is similar petrological and geochemical characteristics between PP2 and main hole orthogneiss. The  $\text{SiO}_2$  content in garnet amphibolite increases gradually toward the contacts with orthogneisses. All the lines of evidence show that the garnet amphibolite and orthogneisses experienced subduction into the upper mantle and strong retrogressive metamorphism during exhumation, and there were compositional exchanges, to a certain extent, between them.

基金项目: 国家重点基础发展规划“973”专项项目(No. 2003CB716504); 国家自然科学基金重大项目(No. 40399140)。

作者简介: 戚学祥(1963-), 男, 博士, 研究员, 构造地质学专业, 主要从事变质变形构造等方面的研究。E-mail: qixuexiang@ccsd.cn

**Key words:** HP UHP terrane in Sulu; pre pilot hole of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD PP2); garnet amphibolite; retrograde metamorphism.

## 0 引言

近年来,对苏鲁高压-超高压变质地体内榴辉岩、超基性岩、花岗片麻岩等的变质作用、同位素年代学及构造地质学等方面的研究取得一系列重要进展,在 1/5 万<sup>①</sup>、1/25 万<sup>②</sup>地质填图工作的基础上,确立了该区的基本构造格架,认为苏鲁高压-超高压变质带自南东到北西依次为南苏鲁高压低温变质岩剪切叠覆岩片、南苏鲁高压中温变质岩剪切叠覆岩片、北苏鲁超高压变质表壳岩剪切叠覆岩片和北苏鲁超高压花岗质变质岩剪切叠覆岩片 4 个部分,其间以北东向韧性剪切带为界(许志琴等, 2003); 地体内的超高压变质岩,包括榴辉岩、正片麻岩和副片麻岩等是巨量物质经深俯冲至上地幔后折返至地壳上部的产物(刘福来等, 2004); 超高压变质作用形成于 220~242 Ma (Liu *et al.*, 2003); 变质带内标志性的超高压变质岩-榴辉岩有正常、高硅、高铝、高镁、高钛和高钛铁 6 种类型,其原岩大多数为大陆玄武岩(张泽明等, 2004)或板内玄武岩(赵子福等, 2005). 总体来看,前期的研究工作主要集中在板块俯冲、超高压变质作用及榴辉岩、石榴橄榄岩和片麻岩的岩石学、矿物学、地球化学和同位素年代学等方面(Ames *et al.*, 1996; Cong, 1996; Liou *et al.*, 1996; Zhang *et al.*, 2005a, 2005b; 刘福来等, 2001; Zhang *et al.*, 2002; 杨启军等, 2003; 张泽明等, 2003; Yang, 2004; 游振东等, 2004; 杨经绥等, 2005; 戚学祥等, 2005), 而对区内广泛存在的榴闪岩的研究明显不足. 尽管前人在榴闪岩的锆石中发现了柯石英等超高压标志性矿物(刘福来等, 2001), 证明其经历了深俯冲作用, 但对榴闪岩的地球化学特征、原岩性质及退变质作用的影响等方面的研究相对薄弱. 为此, 本文将从地球化学的角度对中国大陆科学钻探工程预先导孔(CCSD PP2)中的榴闪岩进行研究, 试图通过与主孔新鲜榴辉岩地球化学成分对比, 探讨榴闪岩地球化学特征、原岩性质及其与榴辉岩的关系.

## 1 地质背景

中国大陆科学钻探工程预先导孔(CCSD PP2)位于苏北连云港地区东海县毛北村, 苏鲁高压-超高压变质地体南部的北苏鲁超高压变质表壳岩剪切叠覆岩片中(许志琴等, 2003). 该岩片主要由变质表壳岩、榴辉岩、榴闪岩(包括角闪岩)和超基性岩体组成. 表壳岩是该岩片的主体, 以锆石中含柯石英等超高压矿物包体为特征, 展示其经历过超高压变质作用, 是苏鲁地区巨量物质深俯冲的产物(刘福来等, 2004); 榴辉岩呈透镜状夹于变质表壳岩中, 部分发生退变作用, 形成斜长角闪岩; 超基性岩体主要出露于芝麻坊一带, 呈透镜状分布于变质表壳岩中, 蛇纹石化作用明显. 岩片内发育 3 条近于平行走向北东、向南东-南东东倾斜的逆冲型韧性剪切带(图 1), 剪切带内的面理走向北东-北北东, 向南东-南东东倾斜, 拉伸线理发育, 向北东-北东东倾伏(许志琴等, 2003).

中国大陆科学钻探工程预先导孔(CCSD PP2)终孔深度为 1 028.68 m, 由榴辉岩、榴闪岩(角闪岩)、副片麻岩和片麻岩组成. 榴闪岩主要分布在 182.95~202.94 m, 264.74~288.64 m, 673.56~699.33 m 和 977.67~999.30 m 等几个岩心段内. 其中, 位于岩心 182.95~202.94 m 深度内的榴闪岩岩心较完整, 岩石相对新鲜, 中下部夹有厚度不等的正片麻岩层, 锆石中含有柯石英矿物包体(刘福来等, 2001). 本文将对该段榴闪岩及其下部与其接触的正片麻岩层(191.73~192.98 m)为对象进行岩石学和地球化学研究.

## 2 样品制备及分析方法

取 CCSD PP2 孔深度为 191.73~192.98 m 岩心 B56C153PC5 B56C153P6d 段榴闪岩和正片麻岩. 其中, 榴闪岩长度 99 cm, 花岗片麻岩长度 26 cm. 2 种岩石中的面理发育, 产状一致, 其接触面与面理产状吻合. 岩心取出后, 在中国地质科学院地质研究所磨片室从中线剖开一分为二, 一半放回岩心箱, 一半作为研究样品. 先从研究样品中 2 种岩石接触面切开, 将 99 cm 长榴闪岩分为等长的 15 块样品(每块长约 6.6 cm), 将 26 cm 长花岗片麻岩分为

①江苏省地质矿产调查研究院, 1994. 墩尚幅、连云港镇幅、连云港幅和东辛农场幅 1:50 000 地质图.

②许志琴, 张泽明, 刘福来, 等, 2005. 连云港幅 1:250 000 地质图.

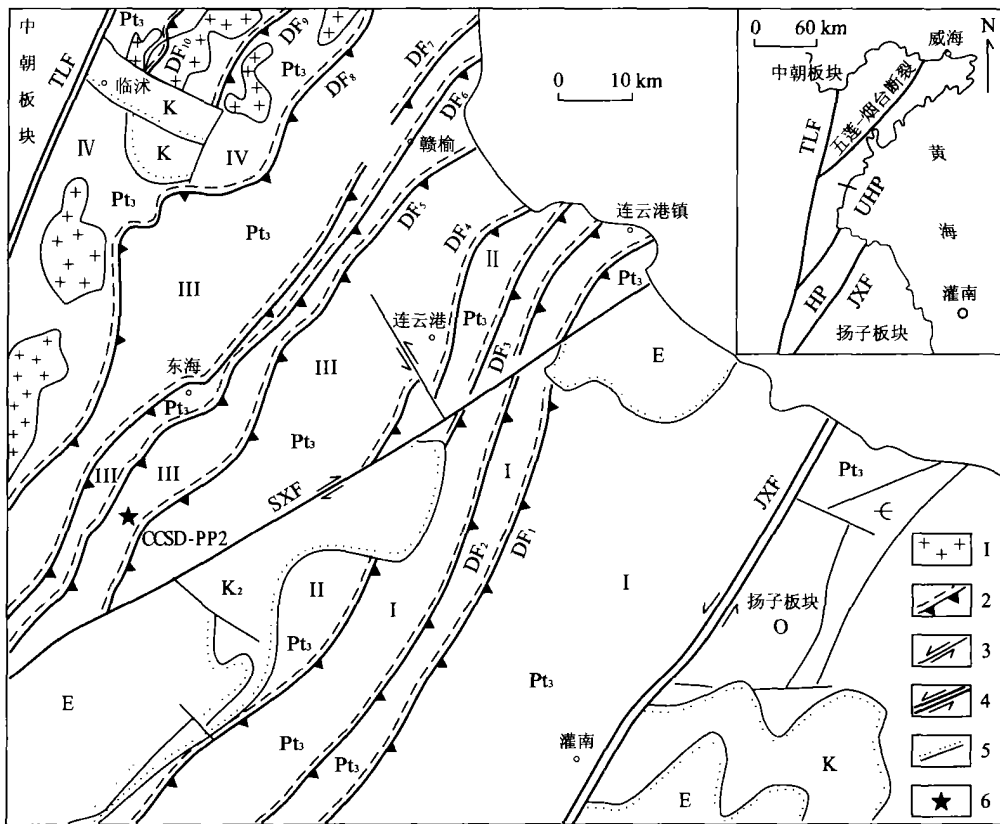


图 1 苏鲁高压-超高压变质地体构造图(许志琴等, 2003 修编)

Fig. 1 Tectonic sketch map of the south Sulu area

1. 中生代花岗岩; 2. 逆冲型韧性剪切带; 3. 走滑断层; 4. 大型走滑断层; 5. 不整合; 6. CCSD PP2 位置; E. 古近系; K. 白垩系; O. 奥陶系; 寒武系; Pt<sub>3</sub>. 晚元古代; I. 南苏鲁高压-低温变质岩剪切构造叠覆岩片; II. 南苏鲁高压-中温变质岩剪切构造叠覆岩片; III. 北苏鲁超高压变质壳岩构造叠覆岩片; IV. 北苏鲁超高压花岗质变质岩剪切叠覆岩片; DF<sub>1</sub> DF<sub>10</sub>. 韧性剪切带编号

3 个样品, 并按从上到下的顺序依次编号(图 2). 然后在每个样品上磨制 2 个垂直于面理、平行于岩心的探针薄片, 余下部分采用无污染玛瑙球磨技术碾磨成小于 200 目化学分析样品.

全岩主量元素和微量元素测试在国家地质测试中心完成. 常量元素是用 X 射线荧光光谱仪法测定(XRF), 仪器为日本理光 3080E, 并用等离子光谱法进行验证, 分析误差小于 0.5%; 微量元素 Th、Rb、Nb、Ta 和稀土元素采用等离子质谱仪测定(TJA-PQ-Excell), 微量元素 Sr、Ba、V、Sc 用等离子光谱测定(IRIS), Zr 采用 X 荧光光谱法完成, 仪器为 Rigaku 2100, 分析误差小于 5%.

### 3 岩石学特征

#### 3.1 榴闪岩

榴闪岩是 CCSD PP2 孔岩心中的主要岩石类

型之一, 约占岩心总量的 8%. 在岩心编录资料中将其定为退变榴辉岩, 但镜下鉴定表明其内不存在绿辉石, 主要暗色矿物成分为角闪石、黑云母和石榴石, 浅色矿物主要有钠长石、多硅白云母、石英和绿帘石, 副矿物有锆石、金红石、榍石、磷灰石、钛铁矿、菱镁矿、磁铁矿等, 因此其岩石类型应该是榴闪岩.

角闪石是榴闪岩中的主要矿物之一, 他形柱状, 粒度: 2 mm × 0.25 mm ~ 0.8 mm × 0.5 mm, 菱形解理发育(图 3a, 3f), 激光拉曼测试结果表明在角闪石中顺菱形解理发育他形细粒钠长石(图 3a), 在颗粒较大的角闪石中部存在透辉石, 可能是绿辉石退变的产物, 即绿辉石 + H<sub>2</sub>O → 角闪石(或透辉石) + 钠长石(游振东等, 2004; Yang, 2004), 含量变化于 25% ~ 58% 之间, 平均 36%, 总体变化趋势是从上部到下部逐渐降低(图 2).

石榴石分布不均匀, 主要集中在 2 2 ~ 5 3 号样品中, 呈他形不规则粒状, 裂纹发育, 粒度 0.1 ~

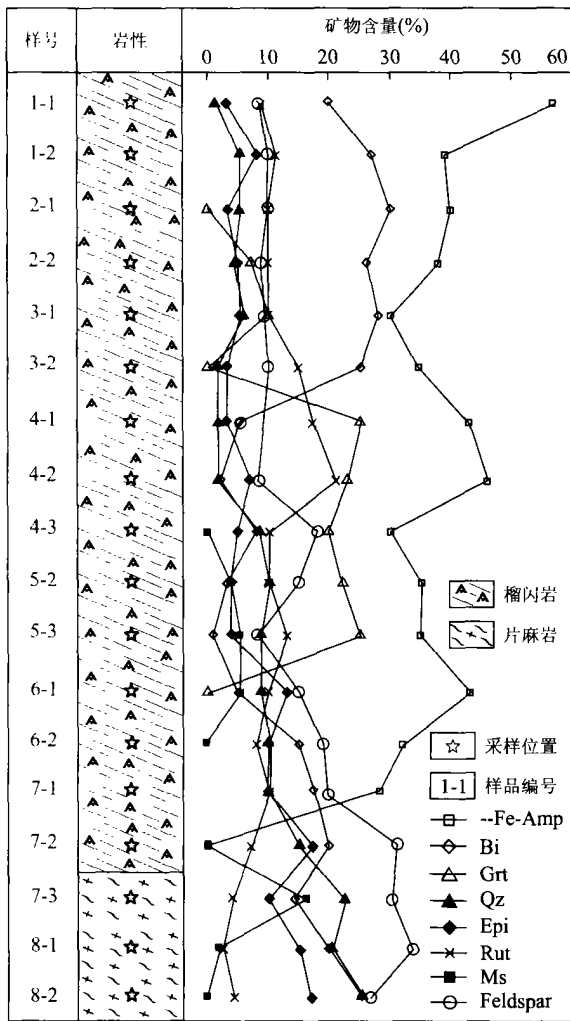


图 2 榴闪岩中主要矿物含量变化图解

Fig. 2 Content changes of main minerals in garnet amphibolite

1.5 mm, 含量 7%~25%, 平均 20.2%(图 2)。在石榴石颗粒边部及裂隙中常出现绿色角闪石边(图 3b), 在绿色角闪石附近出现一些星点状分布的赤铁矿或磁铁矿, 可能是石榴石退变质过程中形成的, 即石榴石+H<sub>2</sub>O→角闪石+钠长石+磁铁矿(赤铁矿), 或斜长石+辉石+石榴石+H<sub>2</sub>O→角闪石+绿帘石(或白云母)+钠长石(游振东等, 2004; Yang, 2004)。

黑云母有 2 种形态, 其一主要分布于 62~72 号样品中, 呈半自形片状, “漂浮”在粒状钠长石中(图 3d)或围绕金红石分布, 粒度较大, 0.02 mm×0.25 mm~0.2 mm×1.0 mm, 含量约为 20%; 其二为分布于 1~61 号样品中, 呈海绵状或指纹状团块, 可能为多硅白云母或角闪石转变形成的黑云母

(图 3b, 3c), 含量 5%~15%(图 2)。

钠长石呈他形粒状, 在岩心上部多分布于角闪石解理中(图 3a), 粒度很小, 含量约为 10%, 在岩心下部, 尤其是接近片麻岩部分呈糖粒状, 粒度 0.05~0.1 mm, 含量 10%~20%(图 2), 与黑云母等共生(图 3d, 3e)。

金红石呈星点状分布于粒间或角闪石、石榴石等矿物内, 他形粒状, 粒度 0.1~0.3 mm, 含量约 3%~5%, 其特点是在其边部出现钛铁矿和放射状榍石环边, 总体顺序为金红石→钛铁矿→榍石(图 3e, 3f), 但有些金红石边部直接为放射状榍石(图 3e), 反映金红石退变质历程。

### 3.2 花岗片麻岩

花岗片麻岩呈灰白色, 片麻状构造, 片麻理产状与上部榴闪岩面理产状一致, 与榴闪岩接触面清楚截然。主要矿物有钾长石、斜长石、石英、黑云母; 次要矿物有多硅白云母、绿帘石; 副矿物有金红石、锆石、磁铁矿、磷灰石和钛铁矿等。

钾长石呈他形粒状, 卡氏双晶发育, 具有不同程度的绢云母化, 局部可见蠕英结构, 含量 15%左右; 斜长石主要为钠长石, 他形板柱状, 可见聚片双晶, 有不同程度的绢云母化, 含量 20%左右; 石英呈他形粒状, 部分呈团块状分布, 含量约为 25%; 黑云母呈他形-半自形片状、鳞片状分布, 含量约 20%; 绿帘石是整个岩心中普遍存在的一种次生矿物, 其内多有黑云母、石英等矿物包体, 是退变质作用的产物, 分布不均匀, 具有局部聚集的特点, 含量总体上具有从上到下逐渐增加的趋势, 在片麻岩中含量在 8%~18%之间变化。金红石在片麻岩中全部转化为放射状榍石, 其边部多为大片状黑云母环绕, 含量 3%左右(图 2)。

## 4 地球化学性质

### 4.1 榴闪岩地球化学性质

榴闪岩地球化学成分中的常量元素相对稳定, SiO<sub>2</sub> 含量变化于 46.39%~54.80%, 平均 49.55%, TFeO 为 9.10%~14.26%, 平均 11.73%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在 14.93%~17.20% 区间内波动, 平均 16.12, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 值较高, 从 3.46%~6.89%, 具有从上到下逐渐增大的趋势, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 比值都大于 1.0, MgO 含量变化于 4.21%~6.76%, 平均 5.92%, CaO 为 5.08%~10.13%, 平均 8.08%(表 1)。总体

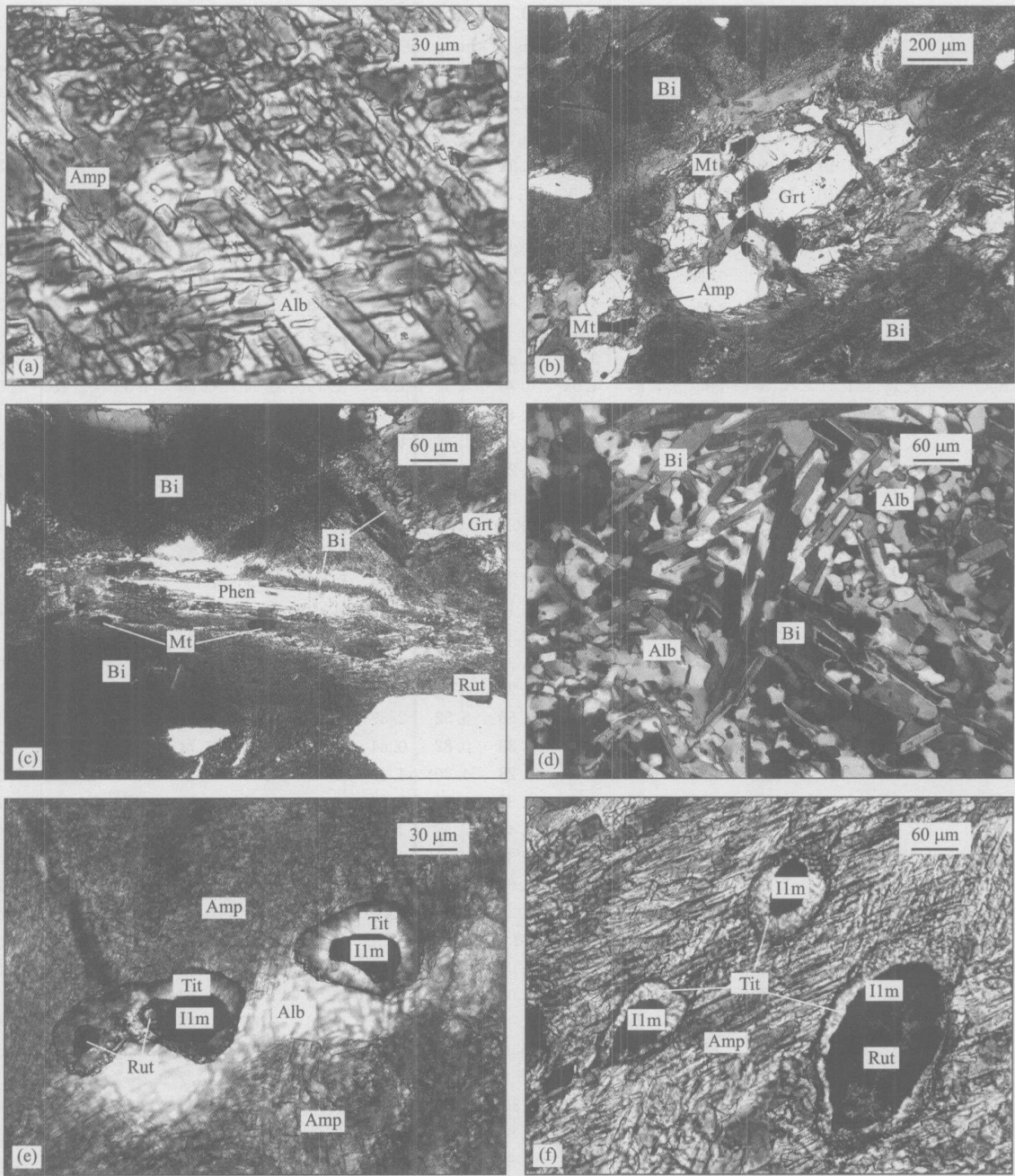


图 3 榴闪岩中主要矿物特征及其转换关系

Fig. 3 Features of main minerals in garnet amphibolite and its exchange relation

Amp. 角闪石; Grt. 石榴石; Bi. 黑云母; Alb. 钠长石; Rut. 金红石; Ilm. 钛铁矿; Mt. 磁铁矿; Tit. 榍石; Phen. 多硅白云母

来看,从岩心上部到下部,常量元素变化较小,没有明显的规律性,与CCSD主孔榴辉岩相近,各元素氧化物的含量在正常型榴辉岩的变化区间(张泽明等,2004)内。在 $(Na_2O + K_2O) / SiO_2$ 图解上位于碱性玄武岩和粗面玄武岩区(图4)。稀土元素中REE变化于 $37.41 \times 10^{-6} \sim 188.54 \times 10^{-6}$ ,LREE/HREE在1.6~10.64之间,展示出轻稀土的相对富集性,与

稀土总量呈正相关关系; $\Sigma Eu$ 为0.95~1.15,平均1.05; $(La/Sm)_N$ 在0.86~3.79之间,平均2.02; $(Gd/Yb)_N$ 为0.86~2.29,平均1.61(表1);在稀土配分模式图上(图5a),所有样品均呈较为平坦的稀土配分样式,说明岩石的稀土总量变化较大,轻稀土富集和分馏程度相对较低,但高于重稀土的富集和分馏程度,无明显的Eu亏损,这些特征与主孔榴辉

表 1 常量元素(%)、稀土元素( $10^{-6}$ )和微量元素( $10^{-6}$ )化学分析结果

Table 1 Whole rock chemical compositions of the garnet amphibolite and orthogneisses

岩性 样品	榴闪岩														
	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2	4-1	4-2	4-3	5-2	5-3	6-1	6-2	7-1	7-2
SiO <sub>2</sub>	48.59	48.99	49.76	49.76	49.94	49.35	46.39	48.34	50.34	50.22	49.73	46.74	49.12	51.20	54.80
TiO <sub>2</sub>	1.45	1.40	1.44	1.42	1.28	1.38	1.38	1.43	1.41	1.35	1.47	1.63	1.49	1.40	1.21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.70	16.01	16.16	16.10	16.63	16.19	17.20	16.38	16.76	16.49	16.28	15.22	14.93	15.40	16.34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.35	5.05	4.67	4.63	4.00	4.36	5.11	4.62	3.95	4.10	3.87	8.03	6.81	5.37	4.99
FeO	7.02	6.86	6.66	7.15	7.04	7.04	7.22	7.10	7.96	7.00	7.24	6.23	6.02	6.38	4.11
MnO	0.17	0.17	0.18	0.21	0.17	0.16	0.20	0.18	0.22	0.18	0.16	0.21	0.19	0.18	0.16
MgO	5.84	5.80	6.03	6.00	6.24	6.76	6.60	6.22	6.32	5.88	5.77	6.02	5.83	5.24	4.21
CaO	8.78	8.13	7.96	7.67	7.01	7.11	10.13	9.95	6.46	8.33	8.82	9.74	8.93	7.07	5.08
Na <sub>2</sub> O	3.69	3.73	3.92	3.52	3.87	3.94	2.89	2.84	2.76	3.26	3.46	3.13	3.40	3.59	3.95
K <sub>2</sub> O	1.13	1.51	1.46	1.60	1.84	1.64	0.78	0.62	1.92	1.15	0.94	0.96	1.32	2.18	2.94
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.35	0.36	0.34	0.37	0.31	0.22	0.40	0.44	0.25	0.38	0.40	0.40	0.41	0.26	0.18
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	1.02	1.22	1.12	1.14	1.13	1.44	1.28	1.26	1.26	1.10	0.70	1.16	0.90	1.28	1.43
CO <sub>2</sub>	0.23	0.12	0.17	0.35	0.16	0.35	0.26	0.31	0.17	0.17	0.21	0.12	0.17	0.26	0.17
LOI	0.78	0.82	0.78	0.72	0.69	0.74	1.04	0.77	0.74	0.67	0.38	0.76	0.66	0.77	1.11
总量	100.1	100.2	100.6	100.6	100.3	100.7	100.9	100.5	100.5	100.3	99.4	100.3	100.2	100.6	100.7
La	8.56	27.00	16.20	11.80	39.80	8.26	30.10	26.20	3.65	37.80	32.30	4.23	8.98	3.91	8.93
Ce	17.30	49.20	33.80	25.00	69.40	16.40	54.80	49.40	7.96	71.10	58.50	10.10	21.00	10.40	18.00
Pr	2.78	7.10	5.43	4.13	9.68	2.58	8.19	7.43	1.43	10.40	8.55	1.85	3.67	2.05	2.73
Nd	12.10	27.50	22.90	17.80	36.10	11.10	32.30	29.90	6.77	40.40	33.30	8.93	16.60	10.30	11.20
Sm	3.39	5.80	5.38	4.55	6.60	2.92	6.94	6.57	2.24	8.30	7.06	3.08	4.55	3.43	3.02
Eu	1.24	1.90	1.76	1.59	2.05	1.13	2.26	2.08	0.98	2.46	2.14	1.11	1.44	1.21	1.00
Gd	3.56	5.01	4.49	4.11	5.31	3.13	5.58	5.52	2.83	6.37	5.75	3.46	4.19	3.87	3.42
Tb	0.69	0.82	0.71	0.72	0.74	0.62	0.83	0.82	0.64	0.89	0.87	0.71	0.75	0.80	0.79
Dy	4.28	4.72	4.08	4.21	3.87	3.89	4.28	4.30	4.39	4.43	4.61	4.55	4.48	5.00	5.38
Ho	0.85	0.93	0.83	0.85	0.75	0.79	0.81	0.86	0.89	0.86	0.91	0.92	0.88	1.00	1.14
Er	2.45	2.79	2.41	2.50	2.27	2.30	2.49	2.57	2.63	2.63	2.77	2.66	2.51	2.97	3.49
Tm	0.33	0.36	0.33	0.33	0.29	0.31	0.32	0.34	0.35	0.34	0.37	0.35	0.33	0.41	0.49
Yb	2.18	2.38	2.10	2.14	1.87	2.05	2.09	2.20	2.31	2.23	2.41	2.21	2.13	2.61	3.20
Lu	0.33	0.36	0.32	0.33	0.28	0.31	0.31	0.34	0.34	0.33	0.37	0.33	0.32	0.40	0.47
∑REE	60.0	135.9	100.7	80.1	179.0	55.8	151.3	138.5	37.4	188.5	159.9	44.5	71.8	48.4	63.3
LREE/HREE	3.09	6.82	5.60	4.27	10.64	3.16	8.05	7.17	1.60	9.43	7.85	1.93	3.61	1.83	2.44
∑Eu	1.08	1.05	1.07	1.10	1.03	1.14	1.08	1.03	1.19	1.00	1.00	1.04	0.99	1.01	0.95
(La/Sm) <sub>N</sub>	1.59	2.93	1.89	1.63	3.79	1.78	2.73	2.51	1.02	2.86	2.88	0.86	1.24	0.72	1.86
Sr	95	115	119	122	151	115	534	549	104	413	479	88.8	85.7	66.2	83.5
Rb	22.5	32.4	29.9	30.6	40.8	35.8	15.8	13.5	40.3	24	19.1	14.7	22.7	37.9	80.1
Ba	288	414	385	410	530	472	180	166	553	346	294	81.1	193	453	906
Th	0.54	1.61	0.5	0.43	1.99	0.45	0.98	1.02	0.25	1.68	1.64	0.31	0.44	0.31	1.14
Nb	6.06	6.61	4.32	4.88	4.95	3.83	6.35	14.1	8.13	4.79	10.6	14	4.68	11.8	14.8
Zr	131	154	146	155	137	131	139	157	171	167	186	98	120	178	231
Sm	3.39	5.8	5.38	4.55	6.6	2.92	6.94	6.57	2.24	8.3	7.06	3.08	4.55	3.43	3.02
Y	25.1	26.8	24.3	24.6	21.8	23.1	24.6	25.4	26	25.5	27.5	27.3	25.9	29.6	34.2
Sc	36.9	34.1	30.6	31.2	31.2	33.7	33.6	32.8	33	31.3	29.9	45.5	38.9	29.1	26.3
U	0.12	0.18	0.12	0.094	0.14	0.053	0.22	0.19	< 0.05	0.23	0.22	0.095	0.16	0.1	0.17
Ta	0.18	0.2	0.22	0.21	0.17	0.19	0.19	0.22	0.24	0.25	0.27	0.2	0.22	0.27	0.47
V	260	203	215	208	212	194	222	235	192	219	216	279	267	180	162
Cr	105	125	123	120	122	128	121	118	122	118	112	89.6	107	108	92.5
Co	40.3	41	37.7	37.8	39.8	43.8	41.7	38.3	43	37.8	36	44.2	40.6	35.4	27.9
Ni	32.7	31.3	35	33.6	43.3	44.2	39.8	34.7	36.8	37	32.3	28.2	30.7	28.7	33
Hf	3.11	3.53	3.32	3.58	3.16	3.06	3.18	3.59	3.95	3.79	4.28	2.43	2.86	4.11	5.66
Ti/V	41.83	51.72	50.23	51.20	45.28	53.35	46.62	45.64	55.08	46.23	51.04	43.82	41.85	58.33	56.02
Y/Nb	4.14	4.05	5.63	5.04	4.40	6.03	3.87	1.80	3.20	5.32	2.59	1.95	5.53	2.51	2.31

续表 1

岩性	花岗片麻岩				主孔榴辉岩								
	7-3	8-1	8-2	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	
SiO <sub>2</sub>	70.01	71.55	63.88	49.12	50.64	46.35	48.69	47.47	49.77	49.62	48.77	48.46	
TiO <sub>2</sub>	0.54	0.46	0.80	1.32	1.85	1.72	1.64	1.27	1.66	1.78	1.86	1.85	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.46	12.84	14.57	16.54	15.84	16.33	16.26	16.59	16.99	15.17	14.75	15.44	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.47	1.98	3.39	2.14	2.19	2.60	2.24	2.33	2.52	2.93	3.99	2.94	
FeO	2.07	1.89	3.07	8.46	9.57	9.32	9.74	9.29	8.68	9.73	9.18	9.88	
MnO	0.11	0.07	0.16	0.20	0.20	0.18	0.21	0.19	0.30	0.27	0.26	0.25	
MgO	1.65	1.38	2.58	7.72	6.57	7.89	6.97	8.40	4.88	5.38	6.01	5.91	
CaO	2.28	2.48	3.72	9.90	9.55	11.33	10.86	11.48	8.44	9.44	10.05	10.53	
Na <sub>2</sub> O	3.44	3.53	3.54	2.86	2.53	2.42	2.47	2.64	5.05	3.06	4.29	3.22	
K <sub>2</sub> O	2.68	2.43	2.78	0.72	0.45	0.62	0.33	0.09	0.48	0.79	0.11	0.34	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.10	0.25	0.22	0.35	0.12	0.16	0.04	0.20	0.31	0.29	0.38	
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.98	0.78	1.08	0.66	0.40	0.58	0.56	0.48	0.78	0.88	0.22	0.44	
CO <sub>2</sub>	0.21	0.19	0.12	0.27	0.18	0.27	0.18	0.18	0.10	0.21	0.09	0.17	
LOI	0.78	0.53	0.67	0.02	0.02	0.05	0.06	0.04	0.03	0.16	0.00	0.06	
总量	100.8	100.2	100.6	100.1	100.3	99.8	100.4	100.5	99.9	99.7	99.9	99.9	
La	68.50	82.10	12.20	15.60	26.60	19.20	5.25	1.36	8.93	18.72	6.40	11.77	
Ce	125.00	149.00	23.90	32.20	57.30	35.80	12.40	3.69	27.36	44.72	20.45	30.15	
Pr	16.80	19.60	3.39	4.35	7.51	4.35	1.79	0.64	4.19	6.04	3.27	4.25	
Nd	58.70	69.30	13.00	19.70	32.00	18.20	8.53	3.73	20.58	26.91	16.72	20.28	
Sm	11.20	13.30	3.22	4.98	7.29	4.34	2.86	2.13	5.74	6.03	4.76	5.27	
Eu	1.77	2.05	0.70	1.92	2.31	1.74	1.33	1.16	2.74	2.46	2.14	1.94	
Gd	8.83	11.00	3.58	5.52	7.37	4.46	4.13	3.43	7.08	6.57	5.56	6.29	
Tb	1.29	1.57	0.85	0.96	1.26	0.69	0.80	0.66	1.25	1.07	0.96	1.02	
Dy	6.87	7.84	6.93	5.82	7.51	4.02	5.16	4.21	7.43	6.58	5.97	6.14	
Ho	1.48	1.43	1.67	1.26	1.54	0.80	1.08	0.86	1.51	1.39	1.28	1.26	
Er	5.15	4.35	5.50	3.52	4.45	2.25	3.02	2.38	4.18	4.07	3.68	3.60	
Tm	0.78	0.60	0.81	0.49	0.64	0.30	0.41	0.33	0.57	0.57	0.52	0.51	
Yb	5.73	4.37	5.56	3.06	3.92	1.84	2.65	2.11	3.68	3.77	3.39	3.33	
Lu	0.92	0.69	0.83	0.47	0.59	0.28	0.41	0.31	0.56	0.57	0.50	0.49	
∑ REE	313.0	367.2	82.1	99.9	160.3	98.3	49.8	27.0	95.8	129.4	75.6	96.3	
LREE/HREE	9.08	10.53	2.19	3.73	4.88	5.71	1.82	0.89	2.65	4.27	2.46	3.25	
∑Eu	0.53	0.50	0.63	1.12	0.95	1.20	1.18	1.31	1.31	1.19	1.27	1.03	
(La/Sm) <sub>N</sub>	3.85	3.88	2.38	1.97	2.30	2.78	1.15	0.40	0.98	1.95	0.85	1.40	
Sr	357	443	74.1	103	202	207	142	72.4	85.6	210	143.8	198.8	
Rb	61.9	49	69.4	11	11.6	13.3	6.94	2.45	10.51	23.565	4.69	9.26	
Ba	987	812	617	111	212	546	100	72.4	190	172.5	56	465	
Th	11.1	10.6	1.88	0.77	2.51	1.04	0.68	0.12	0.7	2.12	0.94	0.96	
Nb	13.5	14	13.2	2.62	7.38	1.65	2.25	1.47	6.07	4.035	3.67	3.53	
Zr	405	401	326	86.4	166	56.4	88	62.4	123.4	208.95	140	126	
Sm	11.2	13.3	3.22	4.98	7.29	4.34	2.86	2.13	5.74	6.03	4.76	5.27	
Y	43.9	41.7	50.1	24.8	32.1	16.4	23.9	19.7	36.76	35.32	31.96	32.2	
Sc	11.4	9.21	15.7	30.8	32.7	37	35.2	39.1	34.48	39.87	44.91	43.61	
U	1.2	1.3	0.27	0.09	0.4	0.28	0.13	0.07	0.34	0.495	0.24	0.34	
Ta	0.82	0.84	0.65	0.16	0.42	0.1	0.18	0.14	0.35	0.29	0.27	0.27	
V	67.9	57.3	105	227	306	323	316	279	226.3	266.2	315.8	281.8	
Cr	40.3	23.9	57.4	127	121	187	146	225	91.89	107.2	71.91	106.5	
Co	10.5	8.15	15.7	43.4	42.5	49.4	48.4	52.4	25.95	36.49	40.08	40.45	
Ni	12.9	9.84	23.4	105	72.1	110	72.7	107	19.74	22.865	24.22	25.29	
Hf	9.93	9.87	7.77	2.72	4.91	1.92	2.73	1.93	3.23	5.07	3.63	3.446	
Ti/V	59.65	60.21	57.14	43.51	45.42	39.89	39.00	34.06	55.02	50.15	44.17	49.24	
Y/Nb	3.25	2.98	3.80	9.47	4.35	9.94	10.62	13.40	6.06	8.75	8.71	9.12	

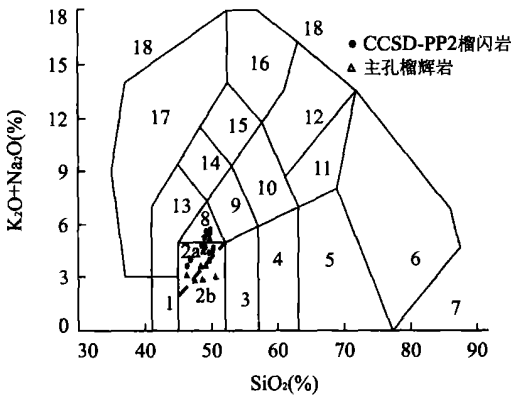


图 4 榴闪岩的 SiO<sub>2</sub> 与 K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O 图

Fig. 4 SiO<sub>2</sub> Vs. K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O diagram of garnet amphibolite

岩非常相似。

榴闪岩微量元素中大离子亲石元素 K、Rb、Ba、Th 及高场强元素 Nb、P、Zr 等含量远高于 MORB 值, Sr、Ti 和 Sm 与 MORB 值相近, Y、Yb 和 Sc 都低于 MORB 值(表 1)。在 MORB 标准化的微量元素蛛网图上(图 5b), 可以看出榴闪岩微量元素异常存在 3 种类型: (1) 1 2、2 1、3 1、4 1、4 2、5 2、5 3 号样品中 Ba、Ce 和 Sm 具有非常明显的正异常、Nb 和 Yb 负异常; (2) 4 3、6 1 和 6 2 号样品中 Ba、Nb 和 P 具有明显的正异常, Th、Ce 和 Yb 负异常; (3) 1 1、

2 2、3 2 和 7 2 号样品中的异常现象不明显。在不到 1 m 长的 15 个榴闪岩样品中出现 3 种异常现象类似于具有不规则微量元素分配形式的陆内型玄武岩, 尤其是第一类型中 Ba、Ce 和 Sm 明显的正异常和 Nb、Yb 负异常特征与这种陆内型玄武岩极为相似(李昌年, 1992), 后 2 种类型微量元素分配形式可能与岩石中主要矿物(石榴石、钠长石、角闪石、磷灰石等)分布不均匀有关。

总体来看, 榴闪岩的常量元素组成除 H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> 和烧失量较高外与主孔榴辉岩基本一致, 稀土元素组成与主孔榴辉岩基本相似, 但微量元素特征存在一定差别, 反映两者之间既存在很大的相似性, 也存在一定程度的差异性。

#### 4.2 片麻岩的地球化学特征

片麻岩中的常量元素含量变化相对较大, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 含量明显偏低, TiO<sub>2</sub> 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量相对较高(表 1)。稀土元素中 ΣREE 变化很大, LREE/HREE 在 2.19~10.53 之间, 展示出轻稀土相对富集, 轻、重稀土分异程度较高;  $\epsilon_{Eu}$  为 0.50~0.63, 显示出中度负异常; Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 在 2.38~3.88 之间, (Gd/Yb)<sub>N</sub> 为 0.52~2.03(表 1); 在稀土配分模式图上(图 5c), 所有样品均呈向右倾斜的稀土配分模式, 说明岩石的稀土总量变化较大, 轻稀土

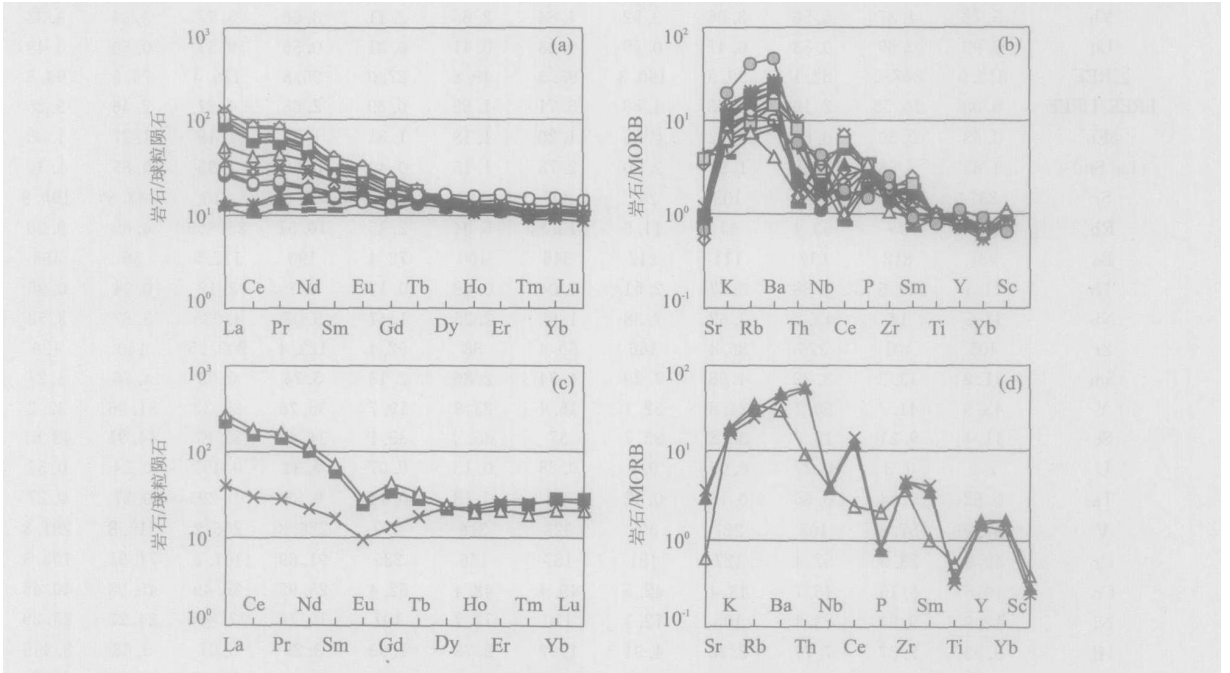


图 5 稀土元素球粒陨石配分模式和微量元素 MORB 蛛网图

Fig. 5 Chondrite normalized REE patterns and MORB normalized trace element spidergrams

a. 榴闪岩稀土配分模式; b. 榴闪岩微量元素蛛网图; c. 花岗片麻岩稀土配分模式; d. 花岗片麻岩微量元素蛛网图



富集和分馏程度较高,重稀土富集和分馏程度较低,并具有中度Eu亏损.微量元素中大离子亲石元素K、Rb、Ba、Th和高场强元素Nb、Zr及Ce、Sm、Y、Yb含量远高于MORB值,P、Ti和Sc低于MORB值(表1).在MORB标准化的微量元素蛛网图上(图5d),可以看出片麻岩具有Th、Ce和Zr正异常,P、Ti和Sc负异常的特点.

综上所述,该片麻岩的岩石化学组成、稀土配分模式、Eu中度负异常及微量元素特征都与主孔中花岗片麻岩的地球化学特征(刘福来等,2001,2004;张泽明等,2003)相吻合,说明其原岩是形成于板内环境的花岗岩(张泽明等,2004).

## 5 榴闪岩的原岩及其构造环境探讨

在大别-苏鲁超高压变质地体中经常发现片麻岩中的透镜状榴辉岩都发生不同程度的退变质作用,从透镜体中心到边缘依次为榴辉岩、榴闪岩至斜长角闪岩.因此,人们常常由此认为角闪岩(刘福来等,2005;赵子福等,2005)甚至部分片麻岩(游振东等,2004)是由榴辉岩退变质而来.但在有些榴闪岩或角闪岩出露地段,却没有这种变化规律,本文研究的CCSD PP2孔第一段榴闪岩岩心即是如此,那么它们是否也是由榴辉岩退变质形成的?

显微镜观察结果表明榴闪岩的主要矿物成分为角闪石、石榴石、钠长石和黑云母.角闪石多呈不规则柱状,粒度较粗,菱形解理发育,顺解理发育他形钠长石(图3a),部分角闪石中部出现透辉石组分,展示出绿辉石退变质痕迹;石榴石在榴闪岩中分布不均匀,边部及裂隙中存在鲜绿色角闪石和星点状磁铁矿(赤铁矿),局部存在绿帘石等矿物,反映石榴石边部及裂隙边缘曾发生明显的退变质作用;金红石边部依次出现的钛铁矿和放射状榍石环带也反映金红石的退变质过程.此外,激光拉曼测试结果表明石榴石晶体内部包裹体的主要成分有绿辉石、金红石、磷灰石、石英、菱镁矿、斜长石、磁铁矿、角闪石、锆石.这些特征说明CCSD PP2孔第一段榴闪岩是榴辉岩退变质产物,退变质作用较彻底,其内部没有榴辉岩残留.

地球化学分析数据表明榴闪岩的化学成分与张泽明等(2004)划分的正常型榴辉岩相对应,其原岩可能为玄武岩类,但它们在地球化学判别图解上却存在一定差异,如在 $\text{SiO}_2$  ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ )图解上

(图4),榴闪岩样品点全部落在碱性玄武岩和粗面玄武岩区,明显不同于分布于亚碱性玄武岩区的主孔榴辉岩,在 $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TFeO}$ 图解上(图6b),榴闪岩全在大陆玄武岩区,主孔榴辉岩主要样品点虽然落在大陆玄武岩区,但有部分样品点落在大洋中脊玄武岩区;在 $\text{TiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}$ 图解上(图6a),所有的榴闪岩样品全落在大陆玄武岩区,榴辉岩除2个样品点位于大陆玄武岩区外,都落在大洋拉斑玄武岩区;在 $\text{TiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{MnO}$ 图解上(图6c),榴闪岩落在岛弧玄武岩区右侧,榴辉岩落在岛弧玄武岩区左侧,并有几个点落在洋中脊玄武岩区;在 $\text{Zr}-\text{Y}-\text{Nb}$ 图解上(图6d),榴闪岩除61号点外都分布于板内玄武岩区,而榴辉岩除部分位于板内玄武岩区外,都落在标准洋中脊玄武岩区.在上述判别图解上,榴闪岩毫无例外地分布于大陆或岛弧玄武岩区,反映其原岩为形成于板内环境的碱性玄武岩类;榴辉岩样品大部分落在大陆玄武岩区外,但也有一部分落入洋中脊和岛弧玄武岩区,结合榴辉岩的Ti/V比值( $>20$ )、Zr/Y比值( $>3$ )和Y/Nb比值( $>4$ )的特点(表1)及前人研究成果(Jahn,1998;Jahn *et al.*,2003;张泽明等,2004)分析认为其原岩亦为大陆玄武岩性质.榴闪岩Ti/V和Zr/Y比值变化范围与榴辉岩一致,但其部分样品的Y/Nb比值( $<4$ )及其判别图解特征等显示出与榴辉岩地球化学特征方面的差异,表明榴闪岩原岩与榴辉岩原岩虽然同属形成于板内环境的玄武岩类,但其原岩特征还是有差别的.造成这种差异的因素可能有2种:(1)原岩来源不同,即榴闪岩与主孔榴辉岩原岩来源于不同的源区或同一源区岩浆不同演化阶段的产物;(2)超高压变质作用过程中,流体组分的加入改变了岩石部分元素组成.CCSD PP2孔与主孔在空间上仅相距几百米,而且又都在同一个岩片上,其围岩都是经历过超高压变质作用的表壳岩,因此其原岩形成环境应该是一样的,但其原岩成分可能不完全相同,与前人认为该区榴辉岩原岩具有多成因性的结论(张泽明等,2004)是一致的,退变质作用过程中外来流体组分的加入对其地球化学组成也有一定的影响,但要具体确定以哪一种因素为主,仍需要补充H、O等同位素示踪资料进行综合分析研究.

## 6 结论

(1)CCSD PP2孔第一段榴闪岩主要由角闪石

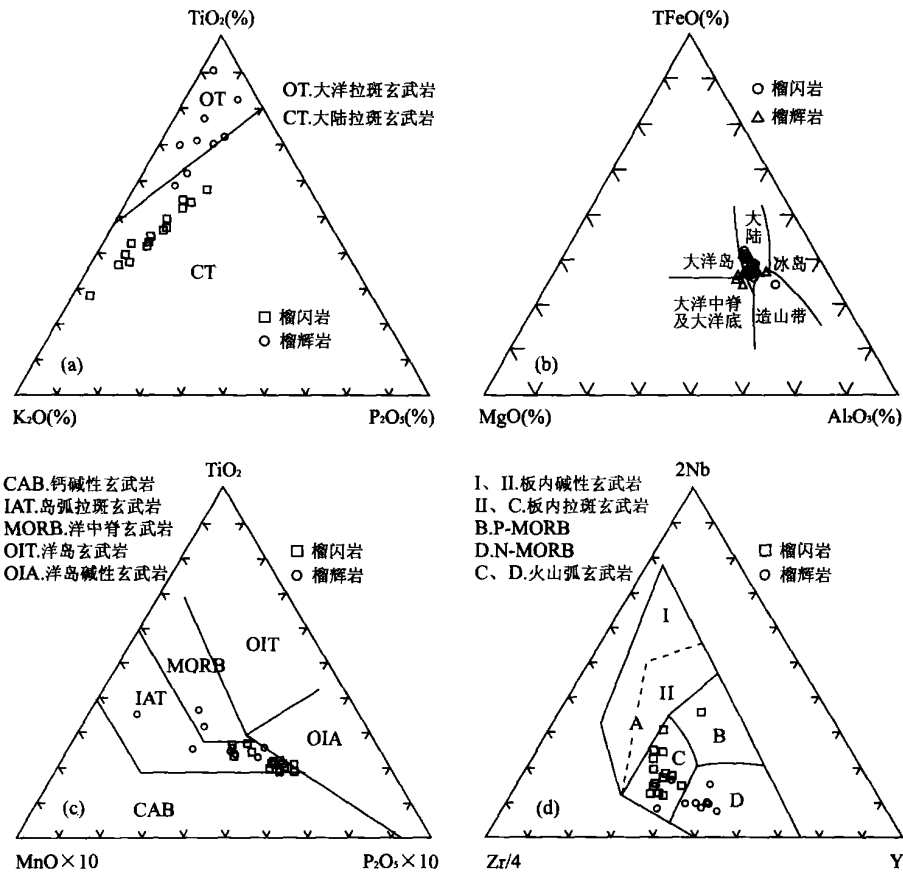


图 6 榴闪岩和主石榴辉岩地球化学成分判别图解

Fig. 6 Geochemical discriminating figures of garnet amphibolite in CCSD PP2 and eclogite in main hole

石榴石、钠长石和黑云母及绿帘石、金红石、石英等矿物组成。角闪石中顺菱形解理发育他形细粒钠长石，在颗粒较大的角闪石中部存在透辉石，展示出绿辉石退变的痕迹，石榴石在其边部或裂隙边缘退变为鲜绿色角闪石（或绿帘石）钠长石和赤铁矿（或磁铁矿），多硅白云母多退变为海绵状黑云母、钠长石和绿帘石，金红石转变为钛铁矿或榍石，说明该段榴闪岩是榴辉岩退变质作用的产物。（2）地球化学分析结果表明榴闪岩的化学成分与正常型榴辉岩相对应，稀土元素组成及配分模式与主石榴辉岩基本相似，在地球化学判别图解上都分布于板内玄武岩区，反映该段榴闪岩的原岩为玄武岩类，形成于板内环境，但它们在微量元素特征和地球化学判别图解上存在一定差异，说明榴闪岩与榴辉岩之间存在一定差别。这种差异可能是由原岩性质的多样性或榴辉岩退变质过程中外来流体组分引起的。（3）CCSD-PP2 花岗片麻岩与主孔花岗片麻岩在岩石学、矿物学和地球化学特征等方面基本相似，应形成于板内

构造环境，片麻岩内锆石中柯石英、绿辉石和多硅白云母的存在（刘福来等，2001），反映其经历了超高压变质作用。花岗片麻岩与榴闪岩接触面清晰，在接触面附近绿帘石化较强，且接触面附近的榴闪岩（72）的SiO<sub>2</sub>含量达到54.80，比临近的（71）号样品高出3.60%，反映它们之间可能存在一定程度的物质交换，同时也说明它们与该段榴闪岩一起俯冲到地下深处，后又经历了强烈的退变质作用。

致谢：本文得到了许志琴院士和杨经绥研究员的大力支持和认真指导，在此表示衷心的感谢！

References

Ames L., Zhou G. Z., Xiong B. L., 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh pressure metamorphism with implications for collision of the Sino Korean and Yangtze cratons central China. *Tectonics*, 15: 472 - 489.  
 Cong, B. L., 1996. Ultrahigh pressure metamorphic rocks in the Dabieshan Sulu region of China. Science Press, Beijing, 220 - 224.

- Jahn, B. M., 1998. Geochemical and isotopic characteristics of UHP eclogites and ultramafic rocks of the Dabie orogen. In: Hacker, B. R., Liu, J. G., eds., *When continents collide: Geochemistry of ultrahigh pressure rocks*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, 203 – 239.
- Jahn, B. M., Rumble, D., Liou, J. G., 2003. Geochemistry and isotope tracer study of UHP metamorphic rocks. In: Carswell, D. A., Compagnoni, R., eds., *Ultrahigh pressure metamorphism. EMU Notes Mineral*, 5: 365 – 414. E t v s Univ. Press, Budapest.
- Li, C. N., 1992. Trace element petrology of igneous rocks. China University of Geosciences Press, Wuhan, 74 – 109 (in Chinese).
- Liou, J. G., Zhang, R. Y., Eide, E. A., et al., 1996. Metamorphism and tectonics of high pressure and ultrahigh pressure belts in the Dabie Sulu region, China. In: Harrison, M. T., Yin, A., eds., *The tectonics of Asia*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 330 – 344.
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Yang, J. S., et al., 2001. Mineral inclusions in zircons from the pre pilot hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSD PP2) and its evidences for ultrahigh pressure metamorphism. *Chinese Science Bulletin*, 241 – 246 (in Chinese).
- Liu, F. L., Zhang, Z. M., Katayama, I., et al., 2003. Ultrahigh pressure metamorphic records hidden in zircons from amphibolite in Sulu terrane, eastern China. *The Island Arc*, 12: 256 – 267.
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Yang, J. S., et al., 2004. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and its adjacent area. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 9 – 26 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Yang, J. S., et al., 2005. Geochemical characteristics and genetic mechanism of orthogneiss and paragneiss in the depth intervals of 2 000 – 3 000 m from main drill hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 305 – 324 (in Chinese with English abstract).
- Qi, X. X., Xu, Z. Q., Qi, J. Z., 2005. Geochemical characteristics of metamorphic rocks in the HPM belt along the south margin of Sulu terrane and its geological significances. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(5): 476 – 484 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Zhang, Z. M., Liu, F. L., et al., 2003. Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt, central China. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 433 – 450 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. S., Chen, S. Z., Zhang, Z. M., et al., 2005. A preliminary study of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) PP3 hole on the Gangshang garnet peridotite body in the Sulu UHPM belt. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 293 – 304 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Q. J., Zhong, Z. Q., Zhou, H. W., 2003. Geochemistry constraints on rock association of UHP terrane during exhumation. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(3): 241 – 249 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T. N., 2004. Retrograde textures and associated mass transfer: Evidence for aqueous fluid action during exhumation of the Qinglongshan eclogite, southern Sulu ultrahigh pressure metamorphic terrane, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 22: 653 – 669.
- You, Z. D., Su, S. G., Liang, F. H., et al., 2004. Petrography and deformational history of the ultrahigh pressure metamorphic rocks from the 100 – 2 000 m core of Chinese Continental Scientific Drilling, China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 43 – 52 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., Shu, J. F., 2002. Hydroxyl rich topaz in high pressure and ultrahigh pressure kyanite quartzites with retrograde woodhouseite, from the Sulu terrane, eastern China. *American Mineralogist*, 87: 445 – 453.
- Zhang, Z. M., Xiao, Y. L., Liu, F., et al., 2005a. Petrogenesis of UHP metamorphic rocks from Qinglongshan, southern Sulu, East Central China. *Lithos*, 81: 189 – 207.
- Zhang, Z. M., Rumble, D., Liou, J., et al., 2005b. Oxygen isotope geochemistry of rocks from the pre pilot hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSD PP1). *Am. Mineral.*, 90: 857 – 863.
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Liu, F. L., et al., 2003. Petrology and petrochemistry of UHP metamorphic rocks from the Sulu orogenic belt, eastern central China. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 478 – 491 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Liu, F. L., et al., 2004. Geochemistry of eclogites from the main hole (100 – 2 050 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 27 – 42 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Chen, B., et al., 2005. A geochemical study of element and Sr Nd isotopes for eclogite and gneiss from CCSD core 734 to 933 m. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 325 – 338 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

李昌年, 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 74 - 109.

刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等, 2001. 中国苏北预先导孔 CCSD PP2 片麻岩中锆石的矿物包裹体及其超高压变质作用的证据. *科学通报*, 241 - 246.

刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等, 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗岩片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别. *岩石学报*, 20(1): 9 - 26.

刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等, 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔 2 000 ~ 3 000 m 正、副片麻岩的地球化学性质及其成因机制. *岩石学报*, 21(2): 305 - 324.

戚学祥, 许志琴, 齐金忠, 2005. 苏鲁地体南部高压变质带岩石地球化学特征及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 24(5): 476 - 484.

许志琴, 张泽明, 刘福来, 等, 2003. 苏鲁高压 - 超高压变质带的折返构造及折返机制. *地质学报*, 77(4): 433 - 450.

杨经绥, 陈世忠, 张仲明, 等, 2005. 苏鲁超高压变质带岗上石榴橄榄岩岩体: 中国大陆科学钻探卫星孔 (CCSD PP3 钻孔) 初步研究. *岩石学报*, 21(2): 239 - 304.

杨启军, 钟增球, 周汉文, 2003. 大别苏鲁超高压地体折返过程中岩石组合演化的地球化学约束. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(3): 241 - 249.

游振东, 苏尚国, 梁凤华, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100 ~ 2 000 m 超高压变质岩岩相学特征与变质变形史. *岩石学报*, 20(1): 43 - 52.

张泽明, 许志琴, 刘福来, 等, 2003. 南苏鲁造山带的超高压变质岩及岩石化学研究. *地质学报*, 77(4): 478 - 491.

张泽明, 许志琴, 刘福来, 等, 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔 (100 ~ 2 050 m) 榴辉岩岩石化学研究. *岩石学报*, 20(1): 27 - 42.

赵子福, 郑永飞, 陈斌, 等, 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔 (734 ~ 933 m) 榴辉岩和片麻岩元素及 Sr Nd 同位素地球化学研究. *岩石学报*, 21(2): 325 - 338.

\*\*\*\*\*

(上接 538 页)

Wang R. C., Wang, S., Qiu J. S., et al., 2005. Rutile in the UHP eclogites from the CCSD main drillhole (Donghai, eastern China): Trace element geochemistry and metallogenetic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 465 - 474 (in Chinese with English abstract).

Xu J., Chen, Y. C., Wang, D. H., et al., 2004. Titanium mineralization in the ultrahigh pressure metamorphic rocks from Chinese Continental Scientific Drilling 100 - 2 000 m main hole. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 19 - 26 (in Chinese with English abstract).

Xu Z. Q., 2004. The scientific goals and investigation progresses of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 1 - 8 (in Chinese with English abstract).

Yang, J. S., Bai W. J., Fang, Q. S., et al., 2003. Silicon rutile - An ultra high pressure (UHP) mineral from an ophiolite. *Progress in Natural Science*, 13(7): 528 - 531.

Zack, T., Kronz, A., Foley, S., et al., 2002. Trace element abundances in rutiles from eclogites and associated garnet mica schists. *Chem. Geol.*, 184: 97 - 122.

Zack, T., Moraes R., Kronz A., 2004a. Temperature dependence of Zr in rutile: Empirical calibration of a rutile thermometer. *Contr. Min. Petrol.*, 148: 471 - 488.

Zack, T., von Eynatten, H., Kronz, A., 2004b. Rutile geo-

chemistry and its potential use in quantitative provenance studies. *Sediment Geol.*, 171: 37 - 58.

附中文参考文献

黄建平, 马东升, 刘聪, 等, 2002. 苏北超高压变质带榴辉岩型金红石矿床及其成因. *南京大学学报(自然科学版)*, 38(4): 514 - 524.

李秋立, 李曙光, 周红英, 等, 2001. 超高压榴辉岩中金红石 U Pb 年龄: 快速冷却的证据. *科学通报*, 46(19): 1655 - 1658.

凌文黎, 程建萍, 1999. Lu Hf 同位素体系对若干基础地质问题的新制约(之一)——地球早期演化. *地质科技情报*, 18(1): 79 - 84.

宋衍茹, 金振民, 2002. 纳米级超高压相金红石——大陆深俯冲深度的示踪. *地学前缘*, 9(4): 267 - 272.

王汝成, 王硕, 邱检生, 等, 2005. CCSD 主孔揭示的东海超高压榴辉岩中金红石: 微量元素地球化学及其成矿意义. *岩石学报*, 21(2): 465 - 474.

徐珏, 陈毓川, 王登红, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100 ~ 2 000 m 超高压变质岩中的钛矿化. *岩石学报*, 20(1): 19 - 26.

许志琴, 2004. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果. *岩石学报*, 20(1): 1 - 8.