

大别—苏鲁超高压地体中面理化含榴花岗岩的成因研究

杨启军, 钟增球

中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 大别—苏鲁超高压地体中的面理化花岗岩因为常含石榴石而被简称为含榴花岗岩, 其岩石类型主要为二长花岗岩、花岗岩和微斜长石花岗岩, 岩石具有花岗结构和片麻状构造。详细的野外地质研究表明, 超高压片麻岩作为超高压榴辉岩的围岩与含榴花岗岩呈渐变过渡关系, 或在含榴花岗岩中呈与面理平行的残留条带, 体现超高压片麻岩通过构造置换和部分熔融向含榴花岗岩转化。含榴花岗岩在常量元素的总体组成上, $w(\text{SiO}_2)$ 为 71.73%~79.15%; A/CNK 为 0.83~1.09, 平均 0.98, 为准铝质; $w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 为 6.15%~9.00%, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 0.16~1.54 (绝大多数集中在 0.9~1.1), 具有相对弱富钠—弱富钾特征。从标准矿物组成上看, 大别含榴花岗岩主要相当于奥长花岗岩; 山东含榴花岗岩主要相当于花岗岩; 东海含榴花岗岩主要相当于钾质花岗岩。在微量元素特征上, 含榴花岗岩的 $\sum\text{REE}$ 、 $\sum\text{LREE}$ 明显富集, δEu 具有明显的负异常, 在原始地幔标准化蛛网图上, 相对亏损 Nb、Ta、P、Zr、Ti 等高场强元素及大离子亲石元素 Sr, 富集 Ba、La、Nd、Y、K 等大离子亲石元素, 结合其贫 $w(\text{Al})$ (平均 11.6%) 富 $w(\text{Ga})$ ($>17\times 10^{-6}$)、 $(\text{Fe}/\text{Mg})_{\text{M}}$ (1.087~20.330) 等特征, 表明其地球化学特征相当于非造山的 A 型花岗岩。结合前人超高压变质作用和构造演化等研究成果, 可以推断含榴花岗岩是超高压地体折返到中下地壳, 在底侵、构造体制转换等因素作用下, 由高压片麻岩的部分熔融形成的。含榴花岗岩在大别—苏鲁不同区域上的规律变化, 表明东海含榴花岗岩的出露相对于大别更低位。

关键词: 含榴花岗岩; 成因; A 型花岗岩; 超高压地体; 大别—苏鲁。

中图分类号: P58

文章编号: 1000-2383(2004)02-0169-08

收稿日期: 2003-08-25

Genesis of Garnet-Bearing Granites in UHP Terrane of Dabie-Sulu Orogenic Belt, Central China

YANG Qi-jun, ZHONG Zeng-qiu

Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Dabie-Sulu UHP terrane, central China, extends from western Tongbai Mountains through the Dabie Mountains to Sulu. The garnet-bearing granites account for more than 85% in volume in the UHP units, with a mineral assemblage of $\text{Or}+\text{Ab}+\text{Q}+\text{Bi}+\text{Mc}+\text{Grt}+\text{Zr}+\text{Ep}+\text{Ae}+\text{Hb}$. In some profiles where larger eclogite bodies occurred, there is a gradual transition from eclogite \rightarrow amphibolite (frequently with symplectites of plagioclase+ amphibole) \rightarrow garnet-bearing gneisses \rightarrow garnet-bearing granite. The gneisses occur as relics or bands of several centimeters to several meters in the garnet-bearing granites. The bands are parallel to the foliation of garnet-bearing granites. All these spatial distributions result from the partial melting and transformation of structural regime. The garnet-bearing granites have $w(\text{SiO}_2)=71.73\%-79.15\%$; $A/\text{CNK}=0.83-1.09$; $w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})=6.15\%-9.00\%$, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})=0.16-1.54$. They are in the range of weakly peralkaline to weakly peraluminous series. In trace elements, the garnet-bearing granites have $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})=20.40\sim 48.99$ (averaging 35.13), $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})=6.93\sim 22.28$ (averaging 13.24), $w(\text{Zr})/w(\text{Nb})=7.42\sim 226.82$ (averaging 37.34), and $w(\sum\text{REE})=56.61\times 10^{-6}\sim 795.58\times 10^{-6}$. All samples of the garnet-bearing granites show obvious Eu nega-

基金项目: 国家重点基础研究规划项目 (No. G1999075506)。

作者简介: 杨启军 (1964—), 男, 2003 年于中国地质大学 (武汉) 获博士学位, 现在中国科学院广州地化所从事博士后研究, 主要从事岩石学和岩石地球化学的研究。

tive anomaly. While in primitive mantle-normalized spider diagram, the garnet-bearing granites are relatively rich in K, Ba, Pb, Nd, Y and La and relatively depleted in Nb, Ta, Sr, Ti, Zr and P. Combined with another characteristics such as high SiO_2 , $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$, Ga and low Al_2O_3 , CaO, MgO, the garnet-bearing foliated granites are similar to A-type granites. From Dabie to Sulu, the content of SiO_2 , $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$, ΣREE , Ga and the ratios of $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$, $(\text{Fe}/\text{Mg})_{\text{M}}$ and $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ increase gradually; the content of Al_2O_3 , CaO, MgO, Sr and the ratio of $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$ decrease gradually. The emplacement level for garnet-bearing granites in Sulu is lower than that in Dabie.

Key words: garnet-bearing granite; genesis; A-type granite; UHP terrane; Dabie-Sulu.

自 20 世纪 90 年代以来,大别—苏鲁超高压变质地质因其良好的地质条件和交通条件而成为全球超高压地质研究最理想的研究地区之一。随着研究的进展,榴辉岩的深俯冲及超高压($>2.7\text{ GPa}$)变质作用已为大多数人接受,但对作为榴辉岩主体围岩的片麻岩、含榴花岗岩是否经历超高压变质还存在不同看法,一种认为片麻岩、含榴花岗岩形成于超高压变质作用之前,并和榴辉岩一起经历了超高压(Carswell *et al.*, 1996; 刘景波等, 1997; Carswell *et al.*, 1997; 刘福来等, 2001; 孙海婷等, 2002; 高山等, 2002); 另一种认为片麻岩、含榴花岗岩没有经历超高压变质,是榴辉岩在折返过程中退变和减压熔融的产物(Zhong *et al.*, 2001; 刘晓春等, 2001), 因此,片麻岩、含榴花岗岩的成因成为超高压地体形成与折返过程争议的焦点之一。

1 区域地质背景

大别—苏鲁高压超高压带位于华北克拉通和扬子克拉通之间,近 20 年来的研究成果表明,它是印支期扬子克拉通向北俯冲并与华北克拉通碰撞的结果(刘景波等, 1997; 索书田等, 2001),但现今观察到的大别—苏鲁构造带的构造样式,则主要是大陆碰撞期后伸展体制及燕山期以来晚造山坍塌构造阶段形成的(索书田等, 2001)。大别—苏鲁高压超高压地体总体具有变质核杂岩构造样式(图 1),以郯庐断裂为界分为两部分:西部桐柏—大别变质核杂岩,东部苏鲁变质核杂岩。苏鲁变质核杂岩基底仅在山东海洋所有少量出露,向东延伸入海,形成不完整的穹隆(威海穹隆)。从基底杂岩(CC)往上依次为超高压单元(UHP)、高压单元(HP)、蓝片岩单元(EB)和未变质的沉积盖层(SC),各单元之间以韧性剪切带式的拆离带分割,构成迭瓦式滑脱构造岩片,超高压地体就挟持在基底核部杂岩与 HP 之间,但在桐柏, HP 直接与 CC 接触,还没有发现确切的 UHP 单元

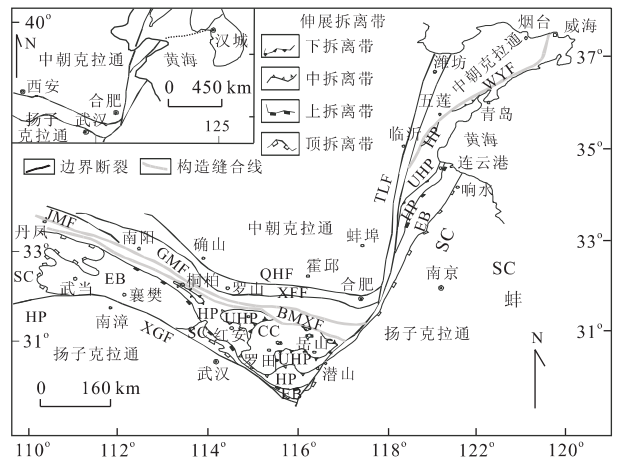


图 1 大别—苏鲁超高压地体地质略图(索书田等, 2000)

Fig. 1 Tectonic sketch map of UHP terrane in Dabie-Sulu
岩石组合(Zhong *et al.*, 2001).

2 地质特征

超高压变质带的岩石组合主要有榴辉岩—硬玉石英岩—大理岩类、斜长角闪岩类、片麻岩类(也称高压片麻岩)、含榴花岗岩类和后印支花岗岩及脉岩类。含榴花岗岩(也称变质花岗岩、花岗片麻岩)(徐树桐等, 1998; 孙海婷等, 2002)占据超高压地体组成的 80% 以上,在大别、山东地区,含榴花岗岩→高压片麻岩→斜长角闪岩→榴辉岩渐变过渡(图 2),而在东海地区,含榴花岗岩常常直接构成榴辉岩的围岩,榴辉岩呈一个个扁平状孤立的残余透镜体沿着含榴花岗岩近水平区域面理垂向堆垛,退变榴辉岩的早期面理与区域面理斜交,表明含榴花岗岩侵位晚于榴辉岩的形成,这与程裕淇等(2000)对碧溪岭含榴花岗岩的研究结果是一致的。含榴花岗岩与片麻岩往往自成一体,与榴辉岩界线清楚,片麻岩与含榴花岗岩渐变过渡或呈沿含榴花岗岩面理和谐分布的条带状残留体,在山东大疃等地与含榴花岗岩渐变过渡的片麻岩往往具有强烈褶皱,褶皱轴与二者

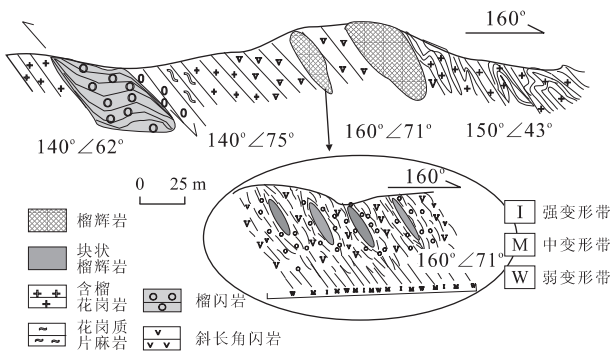


图 2 荣城大埠地质剖面图

Fig. 2 Cross section across Datuan, Rongcheng County

接触面及含榴花岗岩面理平行,体现明显的片麻岩在构造置换条件下,通过部分熔融向面理化花岗岩转化的过程。

3 岩相学特征

岩石种类包括含榴二长花岗岩、含榴微斜长石花岗岩、含霓石(Ac)花岗岩和含角闪石花岗岩,其中含霓石花岗岩在苏鲁地区比较常见,具有片麻状构造。总体矿物组合为 $Or+Pl(An<30)+Q+Bi+Mus+Grt+Zo+Ho+Ep+Ac+Hb(\text{绿色})$ 。从镜下观察,大别含榴花岗岩矿物组成复杂, $w(Ab)$ 为 25%~35%, $w(Or)$ 为 20%~30%, $w(Q)$ 为 25%~30%, 含少量副矿物 Hb, Sp, Ap, Grt 。山东含榴花岗岩主要矿物含量 $w(Ab)$ 为 20%~30%, $w(Or)$ 为 10%~20%, $w(Mc)$ (microcline) 为 20%~30%, $w(Q)$ 为 20%~30%, 含少量 Grt, Hb 等。东海含榴花岗岩主要矿物 $w(Ab)$ 为 20%~30%, $w(Mc)$ 为 30%~40%, $w(Q)$ 为 20%~30%, 含少量 Ac, Grt, Hb 和 Chl 等。主要造岩矿物颗粒大小可以分为 2 群:半自形微斜长石、斜长石为 1.5~3 mm;浑圆状

他形正长石、石英为 0.3~0.5 mm,填充于大颗粒微斜长石、斜长石的孔隙中,构成显微似斑状花岗结构。角闪石为绿色,多色性明显,多为半自形短柱状沿着长石的边界分布,角闪石向绿泥石退变的特征清楚。霓石为柱状、板状颗粒沿着长石边界生长,相对较大的霓石颗粒含有石英包体,表明它与角闪石一样是岩浆结晶晚期的产物。霓石常常与磁铁矿一起构成条带,这与含榴花岗岩相对富铁的特征是一致的。石榴石可以分两类,一类晶形完整,颗粒较小(0.5~1 mm),但比较少见;另一类颗粒较大(1.5~3 mm),比较常见,具有筛状变晶结构或成为孤岛状碎块组成的集合体,石榴石向角闪石退变的特征清楚,可见 Mt, Hb, Bi, Ep 等矿物组成的集合体保留石榴石的晶形轮廓。含榴花岗岩总体矿物特征表现为大别含榴花岗岩富含斜长石、正长石;苏鲁含榴花岗岩富含钠长石、微斜长石,并出现霓石。

4 主量元素特征

大别含榴花岗岩 $w(SiO_2)$ 含量 72.91%~79.61%, $w(Al_2O_3)$ 含量 11.18%~13.79%, $w(CaO)$ 含量 0.12%~0.43%, $A/CNK=0.87\sim0.97$, $w(Al_2O_3), w(TiO_2)$ 与 $w(SiO_2)$ 含量呈线性负相关,属准铝质系列。 $w(K_2O+Na_2O)=6.15\%\sim8.29\%$, $w(K_2O)/w(Na_2O)$ 为 0.16~0.85,全部小于 1。 $w(CaO)=0.41\%\sim2.02\%$, $w(MgO)$ 为 0.3%~0.98%,平均 0.55%。铁镁原子比 $(Fe/Mg)_M$ 为 1.07~3.53,平均 1.74,具有相对富碱富钠特征。标准矿物成分相当于奥长花岗岩,成分点比较集中(图 3a)。

山东含榴花岗岩 $w(SiO_2)$ 含量为 68.29%~78.69%, $w(Al_2O_3)$ 含量 10.81%~14.45%,全碱

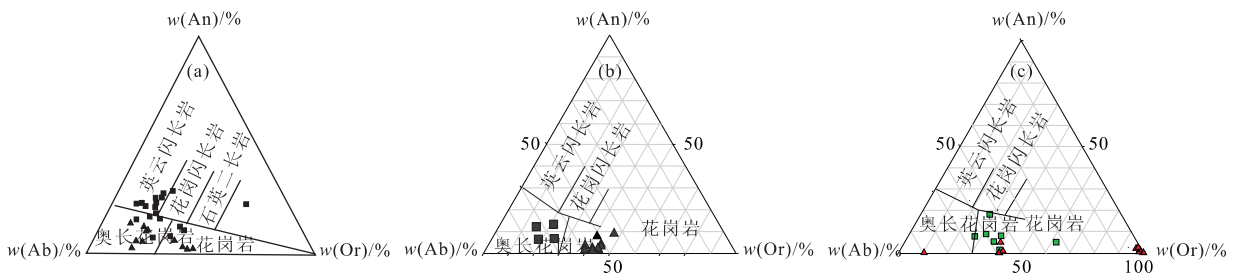


图 3 大别—苏鲁含榴花岗岩及片麻岩 $w(Ab)-w(An)-w(Or)$ 图解

Fig. 3 Diagrams of $w(Ab)-w(An)-w(Or)$ for garnet-bearing granites in Dabie-Sulu

a. 大别地区; b. 山东地区; c. 东海地区; ■片麻岩; ▲含榴花岗岩

含量 $w(K_2O+Na_2O)$ 为 7.75%~8.61%, Rittmann 的组合指数 σ 值为 1.68~2.31, 绝大多数 >2.0 . $w(K_2O)/w(Na_2O)$ 值为 0.94~1.25, 绝大多数大于 1.0, 具有微弱富钾特征. $w(CaO) = 0.18\% \sim 2.49\%$, $w(MgO)$ 为 0.11%~1.40%, 平均 0.35%; $(Fe/Mg)_M$ 为 1.18~4.89, 平均 3.1; A/CNK 值为 0.82~1.05, 绝大多数 >1 , 属弱碱性—弱过铝质系列花岗岩. 标准矿物成分相当于奥长花岗岩—花岗岩, 其碱性程度也较高 (图 3b).

东海含榴花岗岩 $w(SiO_2)$ 含量为 75.13%~79.15%, $w(Al_2O_3)$ 含量 10.38%~11.49%, 平均 12.5%. 全碱含量 $w(K_2O+Na_2O)$ 为 6.97%~8.92%, 平均 8.27. Rittmann 的组合指数 σ 值为 1.67~2.48, 绝大多数大于 1.8. $w(K_2O)/w(Na_2O)$ 值为 0.16~1.21, 只有 R1086 号样品为 0.16, 平均 1.14, 具有微弱富钾特征. $w(CaO)$ 为 0.21%~0.85%, 绝大多数小于 0.5%, $w(MgO)$ 为 0.06%~0.29%, 平均 0.12, $(Fe/Mg)_M$ 为 3.28~20.33, 平均 10.71. A/CNK 值为 0.79~1.05, 平均 0.97, 属准铝质系列. 东海面理化花岗岩成分中标准 An 分子含量低 ($<0.5\%$), 标准矿物成分相当于花岗岩—富钾花岗岩 (图 3c), 碱性程度高, 镜下可见霓石, 标准矿物中出现霓石分子 (Ac).

比较大别、东海、胶东的含榴花岗岩主量元素特征可以看出, 含榴花岗岩的成分是基本一致的, 山东、东海面理化花岗岩成分更加接近, 与大别地区的差别较大, 总体趋势是: 大别的奥长花岗岩—花岗岩 (以奥长花岗岩为主) → 山东的花岗岩 → 东海的花岗岩—钾质花岗岩, $w(CaO)$ 、 $w(MgO)$ 逐渐减少, $(Fe/Mg)_M$ 逐渐增大, 体现出大别明显富钠 → 胶东钾、钠相近 → 东海微弱富钾和相对富铁的演化趋势. 大别片麻岩、面理化含榴花岗岩都具有明显的演化趋势, 而山东、东海花岗岩具有比较集中的富碱成分, 这种趋势的可能含义是超高压地体遭受部分熔融置换程度的逐步提高.

5 微量元素特征

大别含榴花岗岩中, $w(Zr)$ 为 $109 \times 10^{-6} \sim 445 \times 10^{-6}$, $w(Hf)$ 为 $4.1 \times 10^{-6} \sim 15.0 \times 10^{-6}$, $w(Y)$ 为 $9.5 \times 10^{-6} \sim 97.7 \times 10^{-6}$, $w(Nb)$ 为 $4.7 \times 10^{-6} \sim 23.9 \times 10^{-6}$, $w(Ga)$ 为 $12.7 \times 10^{-6} \sim 20.64 \times 10^{-6}$, 平均 17.34×10^{-6} ; $w(Sr)$ 为 $51 \times 10^{-6} \sim 182 \times$

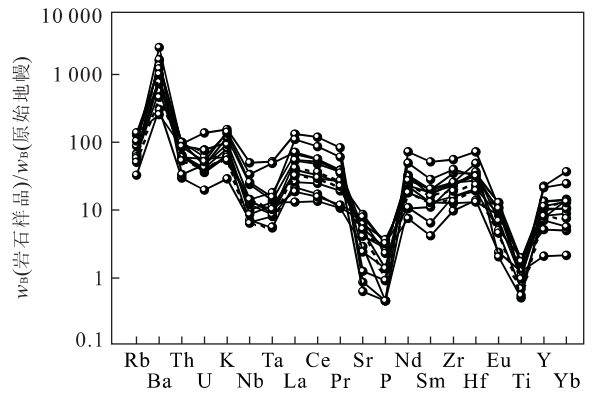


图 4 大别含榴花岗岩原始地幔标准微量元素蛛网图
Fig. 4 Primitive mantle-normalized spider diagram for garnet-bearing granites in Dabie

10^{-6} , 平均 115.06×10^{-6} . 在 McDnough 原始地幔标准微量元素蛛网图上 (图 4), Nb、Ta、P、Zr、Ti 等高场强元素具有明显的负异常, 而 Ba、La、Nd、Y、K 等大离子亲石元素具有明显的正异常. 特征元素比值 $w(Nb)/w(Ta)$ 为 12.92~29.82, 平均 20.54, $w(Zr)/w(Hf)$ 为 22~39, 平均 29. $w(REE)$ 为 $67 \times 10^{-6} \sim 245 \times 10^{-6}$, 平均 148×10^{-6} , 稀土富集. $(La/Nb)_N$ 为 1.24~9.45, 平均为 4.4, 但因样品数量少, 实际比值可能更低. $w(K)/w(Rb)$ 值为 347~597, 平均 427. δEu 为 0.4~0.84, 平均 0.65, Eu 具有明显的负异常.

山东地区含榴花岗岩高场强元素 $w(Zr)$ 为 $135 \times 10^{-6} \sim 403 \times 10^{-6}$, $w(Hf)$ 为 $2.38 \times 10^{-6} \sim 8.22 \times 10^{-6}$, $w(Nb)$ 为 $5.52 \times 10^{-6} \sim 19.86 \times 10^{-6}$, $w(Y)$ 为 $18.7 \times 10^{-6} \sim 87.07 \times 10^{-6}$, $w(Ga)$ 为 $14.5 \times 10^{-6} \sim 22.67 \times 10^{-6}$, 平均 16.85×10^{-6} ; $w(Sr)$ 为 $13.88 \times 10^{-6} \sim 288.33 \times 10^{-6}$, 平均 89.88×10^{-6} . 在原始地幔标准化微量元素蜘蛛网图上 (图 5b), Nb、Ta、P、Eu、Ti 具有明显的负异常, Ba、Th、U、Nd 具有明显的正异常. 特征元素比值 $w(Nb)/w(Ta)$ 为 10.48~15.20, 平均 12.15. $w(Zr)/w(Hf)$ 为 26.87~48.99, 平均 37.12. δEu 为 0.42~1.10, 平均 0.71, 具有明显的 Eu 负异常. $w(REE)$ 为 $62 \times 10^{-6} \sim 795 \times 10^{-6}$, 平均 262×10^{-6} , 稀土元素富集. $(La/Nb)_N$ 为 2.32~20.60, 平均 8.3, 相对富集轻稀土.

东海含榴花岗岩 $w(Zr)$ 为 $153 \times 10^{-6} \sim 895 \times 10^{-6}$, $w(Hf)$ 为 $5.00 \times 10^{-6} \sim 24 \times 10^{-6}$, $w(Nb)$ 为 $2.7 \times 10^{-6} \sim 20.26 \times 10^{-6}$, $w(Y)$ 为 $7.28 \times 10^{-6} \sim 86.73 \times 10^{-6}$, $w(Ga)$ 为 $15.88 \times 10^{-6} \sim 29.65 \times$

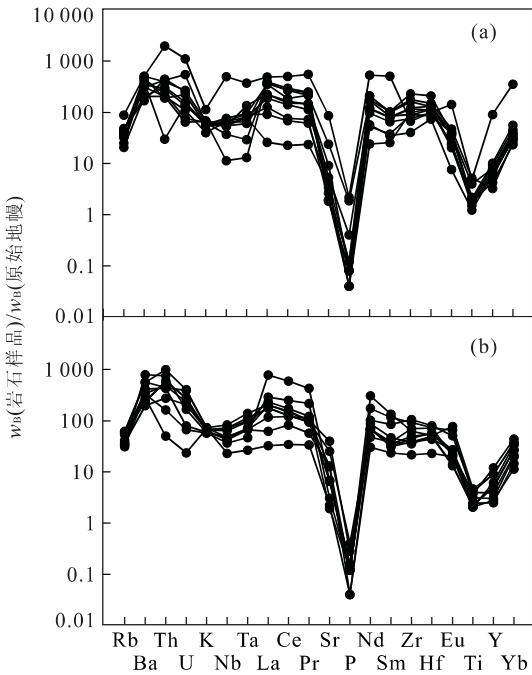


图 5 苏鲁含榴花岗岩原始地幔标准微量元素蛛网图
Fig. 5 Primitive mantle-normalized spider diagram for garnet-bearing granites in Sulu
a. 东海; b. 山东

10^{-6} , 平均 21.80×10^{-6} ; $w(\text{Sr})$ 为 $8.79 \times 10^{-6} \sim 185.72 \times 10^{-6}$, 平均 39.40×10^{-6} . $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$ 为 $6.93 \sim 22.28$, 平均 14.06 , $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 为 $20.4 \sim 46.23$, 平均 37.12 . $w(\text{Eu})$ 为 $0.24 \times 10^{-6} \sim 1.17 \times 10^{-6}$, 平均为 0.59×10^{-6} . $w(\text{REE})$ 为 $56.61 \times 10^{-6} \sim 453 \times 10^{-6}$, 平均 237×10^{-6} , 富集稀土元素. $(\text{La}/\text{Nb})_N$ 为 $1.11 \sim 14.63$, 平均 6.5 . 在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 5a), 表现为高场强元素 Nb、Ta、P、Zr、Ti 的明显负异常和 Th、U、Ba、Nb、Hf 的正异常特征.

总体来说, 大别—苏鲁超高压地体中含榴花岗岩的微量元素特征比值是基本一致的, 和 I 型、S 型花岗岩相比, 富集 Zr、Nb、Ga、Y 元素、贫 Ti、P 等元素及高 $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$ 、 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 值 (Whalen *et al.*, 1987). 在横向对比上, 从大别→山东→东海, δEu 值逐渐减小, $w(\text{Sr})$ 、 $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$ 值减小, $w(\text{Ga})$ 、 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 值增加, 显示苏鲁含榴花岗岩脱离源区时, 部分熔融程度比大别地区含榴花岗岩低; 通过区域纵向对比可以发现, 大别、山东、东海含榴花岗岩与各地区相应的片麻岩相比(片麻岩成因另文讨论), δEu 、 $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$ 值减小, $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 值增加, 扣除个别片麻岩 REE 总量

极高的样品 ($< 1\,000 \times 10^{-6}$), $\sum\text{REE}$ 总量增加, $(\text{La}/\text{Nb})_N$ 值改变不明显, 表明片麻岩部分熔融产生含榴花岗岩是一个高度熔融的过程.

苏鲁地区片麻岩、含榴花岗岩表现出的规律性地球化学特征变化可能与超高压地体出露的深度不同有关.

6 稀土元素特征

大别—苏鲁含榴花岗岩稀土元素特征是基本一致的, 但在小区域上存在细微的差别.

大别面理化花岗岩 $w(\sum\text{REE})$ 为 $67 \times 10^{-6} \sim 245 \times 10^{-6}$, 平均为 148×10^{-6} , 稀土总量弱富集. $w(\text{LREE})$ 为 $55 \times 10^{-6} \sim 211 \times 10^{-6}$, 平均 123×10^{-6} . $w(\text{HREE})$ 为 $6 \times 10^{-6} \sim 36 \times 10^{-6}$, 平均为

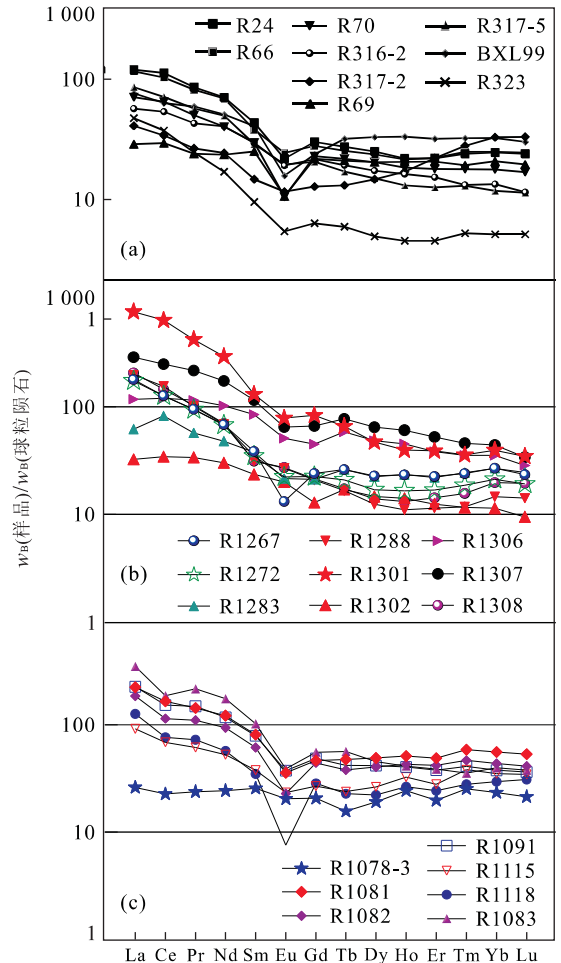


图 6 大别—苏鲁含榴花岗岩球粒陨石标准化稀土模式
Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns for garnet-bearing granites in Dabie-Sulu

表 1 各类典型花岗岩平均成分与大别—苏鲁含榴花岗岩成分

Table 1 Average compositions of various granite types and garnet-bearing granites in Dabie-Sulu

元素	M型	I型	S型	A型平均	范围	大别—苏鲁	元素	M型	I型	S型	A型平均	范围	大别—苏鲁
major elements $w_B/\%$							Th	1	18	18	23	<1~87	10.3
SiO ₂	67.24	69.17	70.27	73.81	60.4~79.8	76.91	U	0.4	4	4	5	<1~23	1.5
TiO ₂	0.49	0.43	0.48	0.26	0.04~1.25	0.21	Zr	108	151	165	528	82~3530	372
Al ₂ O ₃	15.18	14.33	14.10	12.40	7.3~17.5	11.68	Nb	1.3	11	12	37	11~348	12
Fe ₂ O ₃	1.94	1.04	0.56	1.24	0.14~8.7	1.22	Y	22	28	32	75	9~190	45
FeO	2.35	2.29	2.87	1.58	0.33~6.1	0.91	Ce	16	64	64	137	18~560	97
MnO	0.11	0.07	0.06	0.06	0.01~0.24	0.08	Sc	15	13	12	4	<1~22	5.5
MgO	1.73	1.42	1.42	0.2	<0.01~1.6	0.2	V	72	60	56	6	<1~79	17.3
CaO	4.27	3.20	2.03	0.75	0.08~3.7	0.54	Ni	2	7	13	<1	<1~11	5.8
Na ₂ O	3.97	3.13	2.41	4.07	2.8~6.1	4.15	Cu	42	9	11	2	<1~19	14.4
K ₂ O	1.26	3.40	3.96	4.65	2.4~6.5	3.96	Zn	56	49	62	120	11~840	AN
P ₂ O ₅	0.09	0.11	0.15	0.04	<0.01~0.46	0.03	Ga	15	16	17	24.6	14.0~49.5	19.7
trace elements $w_B/10^{-6}$							K/Rb	598	187	151	229		387
Ba	263	538	468	352	2~1530	844	Rb/Sr	0.06	0.61	1.81	3.52		3.42
Rb	17.5	151	217	169	40~475	90	Rb/Ba	0.07	0.28	0.46	0.48		0.12
Sr	182	247	120	48	0.5~250	61	Ga/Al	1.87	2.1	2.28	3.75		3.43
Pb	5	19	27	24	2~141	18.8	A. I.	0.52	0.62	0.59	0.95		0.98

注:典型花岗岩平均成分据 Whalen *et al.* (1987); Ga/Al=10 000* $w(\text{Ga}/\text{Al})$;其他比值为质量比。

24×10^{-6} 。 $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 为 2.2~9.9, 平均 5.40。从球粒陨石标准化稀土模式图上看(图 6a), 除 R317-2 样品之外, 其他样品均表现出具有 Eu 的负异常, 轻稀土富集, 明显右倾, 重稀土平坦, 轻重稀土分异明显。

山东含榴花岗岩 $w(\sum \text{REE})$ 总量为 $62 \times 10^{-6} \sim 795 \times 10^{-6}$, 平均 262×10^{-6} , 大多数 $> 180 \times 10^{-6}$, 属稀土富集型。 $w(\text{LREE})$ 为 $50 \times 10^{-6} \sim 748 \times 10^{-6}$, 平均为 236×10^{-6} , $w(\text{HREE})$ 为 $1.2 \times 10^{-6} \sim 53 \times 10^{-6}$, 平均为 27×10^{-6} 。 $w(\text{LREE})/w(\text{HREE}) = 4.2 \sim 14.3$, 平均 8.7。从球粒陨石标准化模式图可以看出(图 6b), 除 R1288 基本无异常 ($\delta \text{Eu} = 1.07$), 其他样品都具有 Eu 的负异常, 表明熔融过程中的分异作用强烈。稀土类型属于明显右倾型。

东海面理化花岗岩的稀土特征和山东的是一致的。花岗岩 REE 总量为 $56 \times 10^{-6} \sim 453.48 \times 10^{-6}$, 平均为 237×10^{-6} 。 $w(\text{LREE})$ 为 $38 \times 10^{-6} \sim 410 \times 10^{-6}$, 平均 204×10^{-6} , $w(\text{HREE})$ 为 $6 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$, 平均 32×10^{-6} , $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 为 4.2~15.9, 平均 8.85, 属稀土总量富集, 轻重稀土有明显分异特征。从球粒陨石标准化模式图可以看到(图 6c), 轻稀土右倾, 重稀土平坦。

从总体特征上看, 大别、山东、东海面理化花岗岩具有相同或近似一致的微量元素特征, 但存在微弱差别, 即从大别→山东→东海, 稀土富集程度逐步

增高, 铈的负异常程度增强, 体现了岩浆熔融分异程度增强。

与 S 型、I 型花岗岩成分相对比, 大别—苏鲁含榴花岗岩常量、微量元素主要特征可以归结为富集 SiO₂、 $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 、 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 、Zr、Nb、Ga、Y、 $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$ 元素, 贫 Al₂O₃、CaO、MgO、Ti、P 等元素及高 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$, 具有 A 型花岗岩特征(表 1)。

7 形成环境

对含榴花岗岩形成环境的认识取决于对含榴花岗岩是否经历超高压变质的看法, 对应也有 2 种认识: (1) 形成于前碰撞时期, 并经历超高压变质作用(刘景波等, 1997; Carswell *et al.*, 1996; 孙海婷等, 2002; 刘福来等, 2001; Carswell *et al.*, 1997); (2) 形成于后碰撞造山, 由超高压地体减压退变和部分熔融形成(Zhong *et al.*, 2001)。为了探讨含榴花岗岩的成因类型, 在详细地质研究的基础上, 又从地球化学角度对其提出了制约。Ga/Al 值是花岗岩成因的重要地球化学参数, 在 Whalen *et al.* (1987) 的 Ga/Al—Ce, Rb, Y, Zr 图解上(Whalen *et al.*, 1987), 大别含榴花岗岩大多数落于 A 型花岗岩区, 胶东花岗岩绝大多数落于 A 型花岗岩区, 东海含榴花岗岩均落在 A 型花岗岩区(图 7)。这种特征和稀

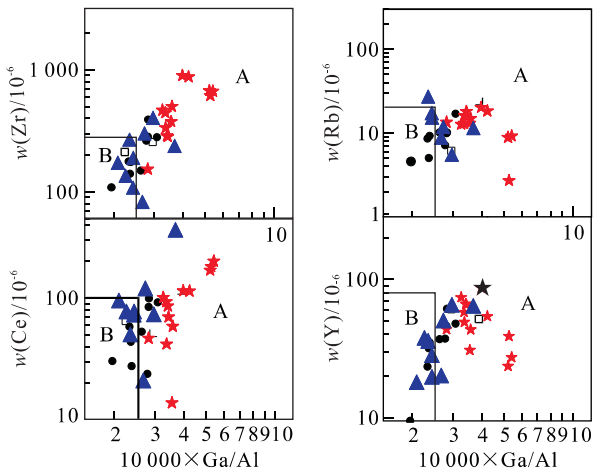


图 7 苏鲁面理化含榴花岗岩 Ga/Al—Ce, Rb, Zr, Y 成因图解(Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 7 Ga/Al vs. Ce, Rb, Zr, Y diagram for garnet-bearing granites in Dabie-Sulu

●大别; ▲山东; ★东海; A. A 型花岗岩; B. I 或 S 型花岗岩

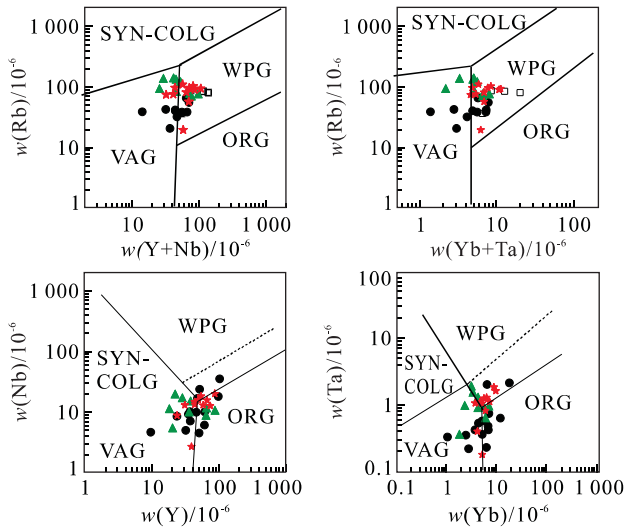


图 8 苏鲁含榴花岗岩 Y—Nb, Yb—Ta, (Y+Nb)—Rb, (Yb+Ta)—Rb 图解(Pearce, 1984)

Fig. 8 Y—Nb, Yb—Ta, (Y+Nb)—Rb, (Yb+Ta)—Rb diagrams for garnet-bearing granites in Dabie-Sulu

●大别; ▲山东; ★东海

土元素特征一样, 勾勒出大别—苏鲁花岗岩片麻岩向 A 型含榴花岗岩逐步演化的过程, 东海含榴花岗岩演化程度最高, 是相对最典型的 A 型花岗岩。

在 Pearce 花岗岩构造位置判别图解(图 8)上, 大别—苏鲁含榴花岗岩主要落于火山岛弧(VGA)和板块内花岗岩(WPG)区, 符合 A 型花岗岩的特征。Eby(1990)研究认为, A 型花岗岩可以产于大陆裂谷、大洋岛弧、后碰撞造山等环境(Eby, 1990), 并

以 $w(Y)/w(Nb)$ 比值把 A 型花岗岩分成两类: A1 型, 起源于板内裂谷, 类似于洋岛玄武岩, $w(Y)/w(Nb) < 1.2$; A2 型, 起源于陆—陆碰撞或岛弧岩浆作用的地壳或板下地壳, $w(Y)/w(Nb) > 1.2$ 。

大别—苏鲁含榴花岗岩 $w(Y)/w(Nb)$ 为 1.11~14.28, 只有一个样品小于 1.2(为 1.11), 因此, 全部属于 A2 型花岗岩。大别—苏鲁面理化花岗岩具有较强的 Ti 负异常, 缺乏同时代的双峰式火山岩及三叉构造等其他典型大陆裂谷特征, 表明它虽然形成于伸展环境, 但还没有达到裂谷阶段。

Loiselle 和 Wones(1979)提出 A 型花岗岩这一术语是从成因的大地构造环境为出发点(Robert, 1991), 根据地球化学特征进行定义的。后来 Collins(1982)、Clemens(1986)通过对澳大利亚、北美等地 A 型花岗岩的研究(Clemens, 1986; Collins, 1996, 1982), 对 A 型花岗岩特征作了一定的补充, 与 S 型、I 型花岗岩对比, A 型花岗岩主要特征为: (1) 富集大离子高场强元素 Nb、Ga、Y、Zn、F、REE, 贫 Mg、Ta、Zr、Ti、Ca、Al、Cr、Ni; (2) 原子比值 Ga/Al、(K+Na)/Al、K/Na、Fe/Mg 较高; (3) 产于非造山环境, 来自下地壳英云闪长岩质~奥长花岗岩石部分熔融。大别—苏鲁含榴花岗岩具有上述相同或相似的特征, 属后碰撞造山 A 型花岗岩(Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1990)。

8 结论与讨论

根据上述大别—苏鲁含榴花岗岩的地质地球化学特征, 可以得出以下几点认识: (1) 地质特征研究表明, 含榴花岗岩的侵位晚于超高压榴辉岩的形成。(2) 大别—苏鲁含榴花岗岩属于后碰撞造山花岗岩, 其成因类型相当于 A 型花岗岩。含榴花岗岩的 $\epsilon Nd(t)$ 为 -8~-16(作者未发表数据), 表明其为壳源成因。(3) 结合大别—苏鲁超高压地体折返过程的地质特征和构造机制的演变(刘晓春等, 2001), 可以推断含榴花岗岩是超高压地体从上地幔折返到中下地壳时, 由超高压地体经过退变和部分熔融作用演化的最终产物。(4) 含榴花岗岩的常量、微量元素特征显示, 从大别→山东→东海, 含榴花岗岩演化程度逐步提高, 表明含榴花岗岩在东海出露是低位的, 剥蚀深度大; 在大别出露是高位的, 剥蚀深度小, 整个大别—苏鲁造山带抬升具有东高西低的特点。

References

- Carswell, D. A., O'Brien, P. J., Wilson, R. N., et al., 1997. Thermobarometry of phengite-bearing eclogites in the Dabie Mountains of central China. *Lithos.*, 15: 239—252.
- Carswell, D. A., Wilson, R. N., Zhai, M., 1996. Ultra-high pressure aluminous titanites in carbonate-bearing eclogites at Shuanghe in the Dabieshan. *Minerl. Mag.*, 60: 781—798.
- Cheng, Y. Q., Liu, D. Y., Williams, I. S., et al., 2000. SHRIMP U-Pb dating of zircon of a dark-coloured eclogite and a garnet-bearing gneissic-granitic rock from Bixiling, eastern Dabie area. *Acta Geologica Sinica*, 74: 193—205 (in Chinese with English abstract).
- Clemens, J. D., 1986. Origin of an A-type granite: Experimental constraints. *American Mineralogist*, 7: 317—324.
- Collins, W. J., 1996. Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: Evidence from the Caelundi complex, eastern Australia. Oxford University Press, London.
- Collins, W. J., 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189—200.
- Eby, G. N., 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos.*, 26: 115—134.
- Gao, S., Qiu, Y. M., Ling, W. L., et al., 2002. SHRIMP signal zircon U-Pb geochronology of eclogite from Yingshan and Xiongshan. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 559—562 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Yang, J. S., et al., 2001. UHP metamorphism of gneisses from the pre-pilot drillhole CCSD-PP2 in the North of Jiangsu Province, China; Evidence from mineral inclusion in zircons. *Chinese Science Bulletin*, 46: 241—245 (in Chinese).
- Liu, J. B., Wu, Y., Guo, L. J., 1997. The relationship between eclogites and their host gneisses; Evidences from the study of microinclusions in accessory minerals from the gneiss. *Chinese Science Bulletin*, 42 (23): 2531—2534 (in Chinese).
- Liu, X. C., Dong, S. W., Qian, C. C., et al., 2001. Gneissic granite did not experience UHP metamorphism from Bixiling, the Dabie Mountains. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20: 21—25 (in Chinese with English abstract).
- Robert, A. C., 1991. A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model. *Geology*, 19: 163—166.
- Sun, H. T., Wang, R. C., Xu, J. S., et al., 2002. Mineral chemistry and geochemical characteristics of metagranitoids from the UHP metamorphic belt, East Dabie Mountains and their geological significance. *Geological Journal of China Universities*, 8: 25—39 (in Chinese with English abstract).
- Suo, S. T., Zhong, Z. Q., Zhang, H. F., et al., 2001. High-pressure metamorphic belt and its tectonic pattern in Tongbai Mountains, central China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(6): 551—558 (in Chinese with English abstract).
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407—419.
- Xu, S. T., Wu, W. P., Su, W., et al., 1998. Meta-granites in eclogite belt and its implication in eastern Dabieshan. *Acta Petrologica Sinica*, 14: 42—59 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, Z., Suo, S., You, Z., et al., 2001. Major constituents of the Dabie collisional orogenic belt and partial melting in the ultra-pressure unit. *International Geology Review*, 43: 226—236.

附中文参考文献

- 程裕淇, 刘敦一, Williams, I. S., 等, 2000. 大别山碧溪岭深色榴辉岩和片麻状花岗质岩石 SHRIMP 分析. *地质学报*, 74: 193—205.
- 高山, Qiu Yumin, 凌文黎, 等, 2002. 大别山英山和熊店榴辉岩单颗粒锆石 SHRIMP U—Pb 年代学研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(5): 559—562.
- 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等, 2001. 中国苏北先导孔 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*, 46: 241—245.
- 刘景波, 吴颖, 国连杰, 1997. 榴辉岩和围岩片麻岩之间的关系. *科学通报*, 42(23): 2531—2534.
- 刘晓春, 董树文, 钱存超, 等, 2001. 大别山碧溪岭未经历超高压变质的片麻状花岗岩. *矿物岩石地球化学通报*, 20: 21—25.
- 孙海婷, 王汝成, 徐进士, 等, 2002. 大别山东段超高压变质中变质花岗岩的矿物化学和地球化学特征. *高校地质学报*, 8: 25—39.
- 索书田, 钟增球, 张宏飞, 等, 2001. 桐柏山高压变质带及其区域构造型式. *地球科学——中国地质大学学报*, 26(6): 551—558.
- 徐树桐, 吴维平, 苏文, 等, 1998. 大别山东部榴辉岩带中的变质花岗岩及其大地构造意义. *岩石学报*, 14: 42—59.