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

杨启军,钟增球,周汉文

(中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074)

摘要:大别一苏鲁超高压地体现今的岩石组合是超高压变质岩石经历快速折返过程中各种 地质作用叠加改造的最终产物,其中拆沉、底侵、构造体制转换是改造的动力;退变质作用、构 造置换、深熔作用是改造的主要方式.超高压地体的主要岩石组合有榴辉岩、大理岩、硬玉石 英岩、斜长角闪岩、片麻岩和面理化花岗岩.地质、常量、微量、同位素地球化学研究表明,斜长 角闪岩是榴辉岩退变的产物,片麻岩、面理化花岗岩是榴辉岩退变的斜长角闪岩递进深熔的 产物,即退变榴辉岩折返到中下地壳,初次熔融产生相当于片麻岩成分的半原地英云闪长质 一花岗闪长质一花岗质岩浆,片麻岩再次熔融产生成分相当于面理化花岗岩的 A 型花岗岩 岩浆. 关键词:折返;递进深熔:岩石组合;演化;大别一苏鲁.

中图分类号: P588.3;P597 文献标识码: A 文章编号: 1000-2383(2003)03-0241-09 作者简介: 杨启军(1964-),男,讲师,在读博士研究生,从事变质流变学研究.

多学科综合研究超高压地体中各岩石组合之间 的时空关系对于建立合理的超高压地体深俯冲—折 返模型是十分必要的. 当前大别—苏鲁超高压地体 的构造样式是扬子克拉通与华北克拉通在印支期 (210~245 Ma)碰撞作用后,经历了深俯冲一折返 过程中不同构造体制改造和自组织流变过程形成 的[1,2];其岩石组合也是前印支地壳岩石,经历深俯 冲超高压变质作用和折返过程中退变质、部分熔融 改造的最终产物. 大别—苏鲁超高压地体的主要岩 石组合为榴辉岩、斜长角闪岩、片麻岩、面理化花岗 岩(亦称变质花岗岩、花岗质片麻岩).目前,对于榴 辉岩、斜长角闪岩、片麻岩、面理化花岗岩之间的关 系主要有4种认识(1)共进一共退说,即碰撞前各 类岩石已就位,共同经历超高压作用后折返到中下 地壳,超高压榴辉岩、硬玉石英岩、超高压大理岩保 留原来岩性,斜长角闪岩、片麻岩、面理化花岗岩是 超高压岩石退变的产物(亦称榴辉岩质片麻 岩)^[3,4]:(2)构造并置说,即超高压榴辉岩、硬玉石 英岩、超高压大理岩与片麻岩共同经历超高压变质,

在折返到中下地壳后与已经就位的面理化花岗岩构 造并置^[5];(3)退变一减压熔融说,即目前的岩石组 合是原超高压岩板经过退变、减压熔融形成斜长角 闪岩、片麻岩、面理化花岗岩^[2,6];(4)冷侵位说,认 为榴辉岩是在折返过程中冷侵位挤入到片麻岩中. 随着研究的进展,片麻岩锆石中的特征超高压矿物 柯石英、金刚石包体被大量发现^[3,7],第1种认识趋 于被更多的人接受,但它与地质事实仍有不符之处, 要揭示深俯冲过程,必须进行同碰撞挤压构造的寻 找与复位及超高压地体折返前初始岩石组合及其特 征的厘定.本文从地质、地球化学角度讨论超高压地 体从形成至折返到地表过程中岩石组合的演化,并 结合构造演化,建立超高压地体的折返模式.

1 区域地质概况

随着超高压变质带研究的不断深入和拓展,地 质工作者相继在阿尔金、柴北缘、秦岭、西天山发现 含柯石英的超高压榴辉岩,并在北秦岭发现含金刚 石榴辉岩^[8],天山—阿尔金—柴北缘—秦岭和大别 —苏鲁2条横穿中国的巨型高压、超高压变质带的

收稿日期: 2002-11-25 基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G1999075506).

轮廓逐渐显露.

大别—苏鲁超高压带被郯庐断裂分割成 2 部 分^[1],西部桐柏—大别地区总体上呈 SEE 向,具有 由罗田穹隆和桐柏穹隆构成的变质核杂岩构造样 式.核部基底杂岩出露于罗田和桐柏山.东部呈 NE 向,也是一个核部出露于仰口的不完整的变质核杂 岩构造样式.从基底杂岩(CC)向上依次为超高压单 元(UHP)、高压单元(HP)、绿片岩单元(EB)和盖层 (SC)组成的 5 个构造岩片,各单元之间以拆离带分 隔.UHP 单元与 CC 和 HP 单元以拆离带相分 隔^[9].

2 超高压单元岩石组合及其地质关系

超高压地体岩石组合主要有以下几类: 榴辉岩 一硬玉石英岩一大理岩类; 斜长角闪岩类; 角闪斜长 片麻岩一角闪黑云斜长片麻岩一黑云斜长片麻岩 类; 面理化花岗岩类; 镁铁质一超镁铁质岩石; 后印 支花岗岩及脉岩类. 本文重点讨论前 4 种岩石组合.

2.1 岩石组合之间的关系

在大别—苏鲁地区,占超高压单元不到 10%的 榴辉岩、硬玉石英岩、大理岩呈各种形态的透镜体 "漂浮"在由各种片麻岩、面理化花岗岩构成的花岗 质岩石的海洋中. 榴辉岩、硬玉石英岩、大理岩只在 局部地方保存. 榴辉岩的直接围岩是片麻岩、面理化 含榴花岗岩. 榴辉岩与片麻岩、含榴花岗岩的接触关 系是多种多样的,包括构造互层、构造接触、侵入接 触、渐变过渡等,这些接触关系都是超高压地体折返 过程中,构造置换、退化变质和部分熔融共同作用下 不同演化阶段的表现.

(1)榴辉岩与片麻岩的关系.片麻岩一般出露于 面理化花岗岩与榴辉岩的接触带.接触关系比较清 楚的剖面出露在麻城四道河、太湖石马、花凉亭和山 东荣城等地.从剖面可以看出,榴辉岩及其退变质产 物斜长角闪岩自成一体,与片麻岩、含榴花岗岩界线 清晰,而面理化花岗岩与榴辉岩则具有明显的侵位 特征.从榴辉岩→榴闪岩→斜长角闪岩的退变质渐 变过渡特征清楚,而片麻岩与榴辉岩则多为韧性剪 切带或面理化带接触.在东海碱场、青龙山等地与块 状榴辉岩渐变过渡的退变榴辉岩的早期面理中,出 现长英质条带,这些条带是无根的,属高角闪岩相条 件下剪切部分熔融的产物,是区域英云闪长质熔体 深熔作用的开始,并通过构造置换和部分熔融的共 同作用而被面理化花岗岩逐渐替代,因此,片麻岩到 面理化花岗岩是一个剪切、构造置换、部分熔融共同 作用的过程,其接触关系是渐变而和谐的.不管是在 地表,还是在钻孔中,所见与片麻岩直接接触的总是 强烈退变的榴辉岩质斜长角闪岩,片麻岩的剪切韧 性变形特征明显.

(2)片麻岩与含榴花岗岩的关系.在大别—苏 鲁,片麻岩与含榴花岗岩的接触关系表现为"渐变过 渡"和残留包裹2种,不管是哪种关系都与构造作用 关系密切,"渐变过渡"(如四道河剖面、大疃剖面等) 和残留包裹(如日照虎山、双河燕窝等),都是构造置 换和部分熔融的结果,其过程如图1.早期英云闪长 质片麻岩在剪应力的作用下,首先产生紧闭褶皱,出 现初始熔融的长英质条带,逐步发育为互层和渐变 过渡,进一步熔融成为含榴花岗岩,最终片麻岩成为 含榴花岗岩中的条痕状残留体.这种花岗岩最大的 特点是各种构造面理高度和谐一致.片麻岩、榴辉岩 的各种残留体在面理化花岗岩中普遍存在,表明了 面理化花岗岩与两者之间的内在联系.

(3)榴辉岩与含榴花岗岩的关系分为直接接触和间接接触,在苏鲁超高压带,榴辉岩常直接成为含榴花岗岩大小不等的包体,或含榴花岗岩侵位于退变榴辉岩中;而在大别,含榴花岗岩与榴辉岩之间常常有片麻岩过渡层,表明面理化含榴花岗岩的形成晚于榴辉岩.此外,石榴石在片麻岩、面理化花岗岩中的产状对于我们认识榴辉岩的解体过程具有重要意义(图 2).原生榴辉岩具有块状构造(东海碱场、青龙山等),石榴石与绿辉石构成粒状变晶结构,榴辉岩→强变形弱退变条带状榴辉岩→面理化退变榴 闪岩→(含榴)斜长角闪岩.在部分熔融作用下,榴辉岩的分解过程为:榴辉岩→初步变形分解的退变榴 辉岩(太湖长田岸)→片麻岩、面理化花岗岩中的条带状残留体.石榴石在片麻岩的产状也由团块状→



- 图 1 压剪性条件下片麻岩向面理化花岗岩的转变过程
- Fig. 1 Transformation from gneiss to foliated granite in press-shear strain



图 2 石榴石产状的转变过程

Fig. 2 Transition of garnet in Dabie-Sulu UHP terrane 1. 块状榴辉岩; 2. 条带状榴辉岩; 3. 变形分解的退变榴辉岩透镜 体; 4. 片麻岩; 5. 面理化花岗岩

沿着片麻理暗色条带和面理化花岗岩的面理成层分 布→在面理化花岗岩中随机分布,说明了超高压岩 板在退变质、部分熔融作用下的分解过程,也从另一 个角度说明,面理化花岗岩中可能存在榴辉岩的残 余石榴石.

2.2 矿物组合及其退变质作用

2.2.1 榴辉岩类 榴辉岩中的矿物主要有石榴石 (Grt)、绿辉石(Omp)、多硅白云母(Phe)、柯石英 (Coe)、合晶(Sym)、角闪石(Hb)、斜长石(Pl)、石英 (Q)、金红石(Ru)、榍石(Sph)等.目前所见能够代 表原始榴辉岩组合的是块状榴辉岩,其矿物组成较 简单且一致,主要由石榴石+绿辉石+石英(或柯石 英)+金红石组成.大多数榴辉岩在折返过程中都发 生退变质作用,矿物组合随之发生变化.在面理化弱 退变榴辉岩中,除上述矿物外,还出现了多硅白云 母、蓝闪石、绿帘石和黝帘石等.而在面理化强退变 榴辉岩(榴闪岩)中,主要矿物组合为:Grt+Am+Q +Bi±Ti+Ep.退变质作用在微观上和宏观上都是 十分深刻的,根据后成合晶的拓扑结构,推导变质反 应方程式:

Omp+Q=Cpx+Ab; $Omp+Q+H_2O=Am+Pl+Mt;$ $Omp+Q+H_2O=Am+Ab;$ $Grt+Omp+H_2O=Am;$ Ru+Grt=Sph; Phe+Grt+Q=Bi+Pl.

2.2.2 斜长角闪岩类 超高压带的斜长角闪岩矿 物成分复杂,Omp+Grt+Hb+PL+Q+Sp±Mt± Ep, Omp、Grt 的退变合晶结构清楚,片麻理构造不 明显,大多是块状构造,榴辉岩相向角闪岩相退变的 特征清楚.

2.2.3 片麻岩系 超高压地体中片麻岩的主要类 型为:(含榴)角闪斜长片麻岩(靠近斜长角闪岩、榴 闪岩,其矿物组合为 Hb +Pl+Q \pm Grt \pm Di \pm Jd \pm Ru \pm Ep)和(含榴)黑云斜长片麻岩(远离榴辉岩体, 其矿物组合为 Bi+Pl+Q \pm Grt \pm Di \pm Ep).从镜下 观察,可见特征变质矿物硬玉(Jd)、石榴石(Grt)向 黑云母(Bi)、绿帘石(Ep)的退变过渡.

2.2.4 含榴花岗岩系 面理化含榴花岗岩因为矿 物组成变化较大,面理比较发育,因此,又被称为片 麻状花岗岩或花岗质片麻岩,岩石种属较多.大别地 区主要是二长花岗岩、微斜长石花岗岩,其矿物组合 为:Ab+Mf+Q+Bi+Mus+Hb+Mt±Grt;在苏 鲁地区主要为片麻状绿帘黑云二长花岗岩、绿帘二 云二长花岗岩、微斜长石花岗岩、含榴微斜长石花岗 岩和含霓石微斜长石花岗岩,代表性矿物组合为: Ab+Mf+Q+Bi+Mus+Hb+Mt±Grt±Ae.研究 表明,这些花岗岩同属于部分熔融程度(另文论述).

从矿物组合、矿物结构可以看出,榴辉岩、斜长 角闪岩退变关系清楚,片麻岩、面理化花岗岩与斜长 角闪岩在矿物组合上,不是表现为简单的退变关系, 而是体现了部分熔融作用的影响.

3 主量元素地球化学

3.1 榴辉岩及斜长角闪岩类

榴辉岩中 $w(SiO_2)$ 为 42. 77% ~ 53. 33%, $w(TiO_2)$ 为 0. 2%~3. 16%, $w(Al_2O_3)$ 为12. 41%~ 18. 88%, $w(K_2O+Na_2O)$ 为 1. 46%~8. 61%,总体 含量很低. $w(K_2O) < < w(Na_2O)$, A/CNK 值为 0. 42~0. 89,属准铝质. 从岩性上看,蚀变强则 $w(Al_2O_3)$ 相对偏高. w(MgO)为 4. 92% ~ 11. 66%,w(CaO)为 8. 33%~12. 9%,w(CaO)> w(MgO),以富 FeO、CaO、MgO 及相对富钠含钾为 特征,属亚碱性系列.

在英山的东冲河、麻城的四道河,榴辉岩→榴闪 岩→斜长角闪岩的逐渐退变关系清楚,在常量元素 组成上,榴辉岩、榴闪岩、斜长角闪岩的 $w(SiO_2)$ + 分接近,为 $45\% \sim 50\%, w(Al_2O_3)$ 、铝质指数 $A/CNK, w(K_2O)/w(Na_2O)$ 等参数基本一致,表明在 榴辉岩向榴闪岩、斜长角闪岩退变过程中,其主量元 素表现为等化学系列.

将斜长角闪岩的常量元素特征与镜下矿物结构 相对照,可以看出,退变质越强烈,SiO。含量相对越 高,表明退变过程中有富含 SiO₂ 流体的参与. 从榴 辉岩中有石英脉及石榴石呈孤岛状漂浮在石英脉中 也说明了这一点.

3.2 片麻岩类

片麻岩从主要元素上看, $w(SiO_2)$ 为 62.3%~ 77.07%, $w(Al_2O_3)$ 为12.2%~15.43%,高于含榴 花岗岩(10.8%~13.24%),而远低于榴辉岩 (>16%), $w(K_2O + Na_2O)$ 为 3. 72%~9. 86%. A/CNK为 0.8~1.09,绝大多数>1,为准铝质一 弱过铝质,w(K,O)/w(Na,O)值为0.5~2.28,大多 <1,相对富钠, $w(TiO_2)$ 为 0.15%~0.52%,明显 低于榴辉岩.从区域对比来看,从大别→山东→东 海, $w(Al_2O_3)$ %逐渐减低,由弱过铝质过渡到准铝 质,碱性元素 $w(K_2O+Na_2O)$ 逐渐增加, $w(K_2O)/$ w(Na,O)逐渐增加,表明逐渐相对富钾.

根据常量元素计算得出的标准矿物进行分类, 可以看出大别—苏鲁片麻岩的总体规律为,大别片 麻岩以英云闪长质为主→山东片麻岩以英云闪长 质、花岗闪长质为主→东海片麻岩以花岗闪长质、花 岗质为主.

3.3 面理化花岗岩

面理化花岗岩 $w(SiO_2)$ 为 72.91%~79.15%, $w(Al_2O_3)$ 为 10. 38%~13. 79%, A/CNK=0. 83~ 1.07, Al_2O_3 、 TiO_2 与 SiO_2 含量呈线性负相关, 属准 铝质一弱过铝质系列. $w(K_2O+Na_2O)$ 为 6.15%~ 9.00%, $w(K_2O)/w(Na_2O)$ 为 0.16~1.54,绝大多 数集中在 0.9~1.1. 和大别燕山期花岗岩相比 $w(K_2O)/w(Na_2O)$ 为1.14~1.36,具有相对富碱富 钠特征[10].

利用主量元素进行标准矿物计算,得出的岩石 类型为:大别地区奥长花岗质 - 花岗质→山东地区 的碱性二长花岗质→东海地区的富钾碱性二长花岗 质.

在不同区域上,主量元素是有差别的,从大别→ 山东→东海, $w(Al_2O_3)$ 逐渐减少, $w(K_2O+Na_2O)$ 逐渐增加, $w(K_2O)/w(Na_2O)$ 逐渐增加,岩性为奥 长花岗岩-花岗岩(以奥长花岗岩为主)→碱性二长 花岗岩→二长花岗岩-钾质花岗岩,体现大别明显富 钠→山东钾、钠相近→东海微弱富钾的演化趋势,这 种趋势表明了超高压地体部分熔融程度的逐步提高.

微量元素 4

4.1 榴辉岩及斜长角闪岩类

从由 20 种元素组成的特征微量元素原始地幔 标准化蛛网图上看(图 3),大别—苏鲁榴辉岩总体 特征 Pb、Sr、Eu、Ba、K、U 等元素的正异常和 Ti、 Th、Nb、Zr、Hf、Lu、Ta、Yb、Sc 等元素的负异常,具 有大陆年轻裂谷玄武岩特征,但 Th 的明显负异常 又与典型大陆玄武岩稍有不同. 斜长角闪岩的微量 元素特征与榴辉岩相似(图 3),具有明显的 Ba、K、 Sr、Pb、Sm、Eu 正异常,U、Nb、Ta、Zr、Hf 负异常.

4.2 片麻岩

不同区域的片麻岩具有近于一致的微量元素丰 度特征(图 4). 强烈富集 Cs、K、Rb、Ba 等大离子亲 石元素及 U、Th、K 等其他不相容元素, K、Ba、Pb、 Nd、Th 具有明显的正异常,U、Nb、Ta、Sr、Ti、Sc 具 有明显的负异常,P具有强烈的亏损,结合不明显的 或弱的 Eu 负异常特征,表明它们来源于地壳的变 质火成岩.

对比片麻岩的蛛网图模式,山东片麻岩强烈亏 损 P、Nb、Ta、Sm、Ti、Zr,而东海片麻岩 Nb、Ta、P、 Zr、Ti、Y 亏损更为明显,都显示了与陆壳岩石的亲 合性特征.



榴辉岩及斜长角闪岩原始地幔标准化微量元素模式

Fig. 3 Primary-mantle normalized spider patterns of ecologites and amphibolites in Dabie-Sulu



图 4 大别—苏鲁面理化花岗岩球粒陨石标准化稀土模式 Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of foliated granites in Dabie-Sulu

4.3 面理化花岗岩

面理化花岗岩亏损 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、 Nd 等大离子亲石元素(图 5). 在东海花岗岩中,Y 具有微弱的正异常,Ce 具有微弱的负异常,元素 w(Ga)为(14.5~29.5)×10⁻⁶,结合面理化花岗岩 的 $w(Al_2O_3)$ <13.7%及稀土总量较高的特点,显 示了 A 型花岗岩的特征. 对比片麻岩和面理化花岗 岩的元素富集、亏损特征,可以看出二者具有十分相 似的特点和演化关系.

5 稀土元素特征

现将超高压地体各岩石类型的稀土参数列于表 1,利用球粒陨石标准化作出的稀土分配模式如图 6,7,8. 从表 2 和稀土分配模式图可以看出超高压地 体各岩石单元的总体规律明显,即从榴辉岩→斜长 角闪岩→片麻岩→面理化花岗岩,稀土总量逐渐增 加,轻稀土含量逐渐增加,轻重稀土分馏逐渐增强, 尤其是作为重要特征参数的异常铕δ(Eu)逐渐变小 的规律明显. 从群组上考虑,斜长角闪岩与榴辉岩、 片麻岩与花岗岩关系相对密切,这与常量元素、地质 特征体现的部分熔融递变过程完全一致.

从区域来看,各个小区域之间的稀土特征存在 差别.从大别→山东→东海,榴辉岩的稀土模式从平 坦型→平坦和为弱右倾→明显右倾(出现轻稀土亏 损的R1103样品为毛北硬玉石榴子石岩),轻稀土



Fig. 5 Primary-mantle normalized spider patterns of granite in Dabie-Sulu

表 1 大别—苏鲁超高压地体各岩石单元稀土参数

Table 1 REE parameters of UHP rocks in Dabie-Sulu

参数	数值	面理化花岗岩	片麻岩	斜长角闪岩	榴辉岩
δ(Eu)	最大值	1.17	1.53	1.11	2.17
	最小值	0.24	0.37	1.01	0.84
	平均值	0.69	0.70	1.07	1.29
REE	最大值	795.58	720.59	148.27	159.43
	最小值	56.61	87.57	52.54	6.78
	平均值	247.89	298.07	101.72	48.59
LREE	最大值	748.60	684.92	134.51	134.07
	最小值	38.25	76.22	31.13	3.51
	平均值	217.78	272.18	86.23	38.74
HREE	最大值	52.66	37.54	21.40	25.36
	最小值	6.09	10.98	11.30	2.22
	平均值	30.12	25.88	15.49	9.84
LREE/ HREE	最大值	15.93	19.21	9.77	10.72
	最小值	2.04	4.88	1.45	0.45
	平均值	7.25	10.09	6.49	4.00
La _n /Yb _n	最大值	20.60	48.24	11.04	20.60
	最小值	1.11	3.50	0.53	0.16
	平均值	7.27	13.49	6.72	3.75

大别榴辉岩数据引自文献[11],稀土元素的单位为 10^{-6} ,比值 为质量分数之比.

逐渐富集,轻重稀土分馏及 Eu 的正异常逐渐加大,

21DB19-5

21DB23-1

R1328

 \bigcirc R1331

· R906-2

- R906-3

Gd 的负异常以山东榴辉岩最强. 斜长角闪岩主要采 自大别,它的特征介于大别榴辉岩和大别片麻岩之 间,片麻岩从大别→山东→东海体现轻稀土逐渐富 集,轻重稀土分镏及 Eu 的负异常逐渐加大, 面理化花 岗岩与片麻岩在3个区域具有相同的递变规律.

同位素特征 6

从野外地质特征和常量、微量元素特征都可以 看出,超高压地体中榴辉岩一斜长角闪岩系与片麻 岩一面理化花岗岩系构成 2 个关系相对密切的系 列,这种关系在同位素方面同样具有明显表现(表 2).

张宏飞等[10]对大别造山带的钐钕同位素特征进 行了归纳总结,得出在 $\varepsilon_{Nd,r} - \omega(^{147} \text{Sm}) / \omega(^{144} \text{Nd})$ 图 $\mathbf{W}_{(\mathbf{S}_{9})}$,大别超高压榴辉岩的范围如图 9 的 D 区,把大别—苏鲁花岗岩、片麻岩按照含榴花岗岩的 形成年龄 230 Ma 换算,投干该图中 $(A \boxtimes)$,可以看 出,它们绝大多数都落在 D 区, 与燕山花岗岩(K 区)可明显分开,表明它可能来源于超高压榴辉岩.

从表 2 可以看出,超高压地体中的片麻岩、面理



图 8 面理化花岗岩球粒陨石标准化稀土模式



- R1309

🕀 R1316

- R904-1

R901-8

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of foliated granites in Dabie-Sulu

1 0 0 0

100

10

1 000

100

10

1 0 0 0

100

10

图 7

La Ce

wa(岩石)/wa(球粒陨石)

wa(岩石)/wa(球粒陨石)

va(岩石)/wa(球粒陨石)