第69卷 第4期 地 质 学 报 Vol.69, No.4
1995 年 11 月 ACTA GEOLOGICA SINICA Nov., 1995

大别–苏鲁榴辉岩带的岩石学、变质作用过程及成因研究

张泽明 游振东 韩郁菁 桑隆康
(中国地质大学(武汉)地质系)

秦岭–大别–苏鲁高压超高压变质带是华北与扬子板块俯冲碰撞作用的产物。以榴辉岩为代表的高压超压变质岩的研究将为整个造山带形成与演化历史的建立提供重要信息。本文对分布于大别和苏鲁地区的榴辉岩进行了地质学、岩石学、矿物化学及年代学研究，获得了以下认识: (1)榴辉岩可分成低温高压榴辉岩和超高压榴辉岩。超高压榴辉岩分布于前寒武纪的大别、东海、胶东和胶南变质杂岩之中，低温高压榴辉岩分布于中晚元古代的红安群、松宿群和苏家河群变质岩系之中。在大别山地区，超高压榴辉岩、高压榴辉岩，以及绿帘–蓝片岩成带状，从北到南依次平行于造山带展布。(2)大别山地区的高压榴辉岩变质作用的温压条件是: 450—550℃，1.4—1.6GPa。超高压榴辉岩变质条件是: 650—870℃，>2.7—2.9GPa，苏鲁地区的超高压榴辉岩是 820—1 000℃，>2.8—3.1GPa，榴辉岩的形成温度从西向东逐渐升高。(3)榴辉岩经历了绿帘角闪岩相→榴辉岩相→角闪岩相→绿帘–角闪岩相或绿帘–蓝片岩相→绿片岩相5期变质作用。超高压榴辉岩变质作用 *PTt* 轨迹呈顺时针方向旋转，进变质作用为缓慢升温显著增压过程，退变质作用早期为近等温迅速降压过程，中期具近等压降温特征，晚期为近等温降压过程。(4)大别–苏鲁地区至少经历了两期高压变质作用，加里东期夹持于华北与扬子板块之间的大洋板块向华北或大别块体之下深俯冲，形成了高压超高压变质岩；印支期华北与扬子板块对接–碰撞形成了绿帘–蓝片岩相变质带。(5)超高压变质岩是在冷板块的后续俯冲作用过程中，在板底垫托作用下从地幔折返到地壳，并回避热平衡作用的影响得以长期保存。(6)在超高压榴辉岩中具有原生碳酸盐矿物菱镁矿、铁菱镁矿、白云石和文石，以及含水矿物多硅白云母、绿帘石和黝帘石。

关键词 岩石学 矿物化学 地质年代 *PTt* 轨迹 大别–苏鲁榴辉岩带

秦岭–大别–苏鲁高压超高压变质带的研究始于80年代初，在1∶400万中国变质图的编制过程中，湖北和安徽区调队发现并确定了鄂北及皖中蓝片岩带[1,2]。1985年以来，

注: 本文为国家自然科学基金(编号 49290100和49172090)和国家教委博士点基金(编号 9349101)和国家计委、地矿部 96–30–07 资助项目。
本文1993年8月收到，1995年3月改回，郝梓国编辑。

两省区调队与长春地质学院等单位合作，开展了进一步的研究。同时对相关的榴辉岩也给予了应有的重视。1989 年以来，苏鲁和大别山地区含柯石英和金刚石榴辉岩的发现开创了造山带变质岩研究的新阶段[3—9]。目前有关高压变质岩岩石学、地球化学及年代学方面的研究已取得了多项初步成果。但对诸如榴辉岩的形成时代、成因机制、折返模式，及高压变质岩与围岩的关系等重要问题尚存在激烈争论。本文根据大量详实的资料，较全面系统地总结了榴辉岩带的基本地质学和岩石学特征，探讨了变质作用条件，形成年代及 *PTt* 轨迹，成因演化模式。并试图为整个秦岭–大别造山带的研究提供信息。

1　区域地质背景

秦岭–大别造山带夹持于华北与扬子板块之间，横跨我国中部约 2 000km。榴辉岩、绿帘–蓝片岩和其它非基性高压超高压变质岩的发育正是这一大陆碰撞造山带的一大特色。大别–苏鲁榴辉岩带西起湖北大悟、红安、至安徽岳西、太湖被郯庐断裂所截，并延至苏北和胶南(图 1)，两段长约 900km。整个榴辉岩带均分布于造山带核部的前寒武纪变

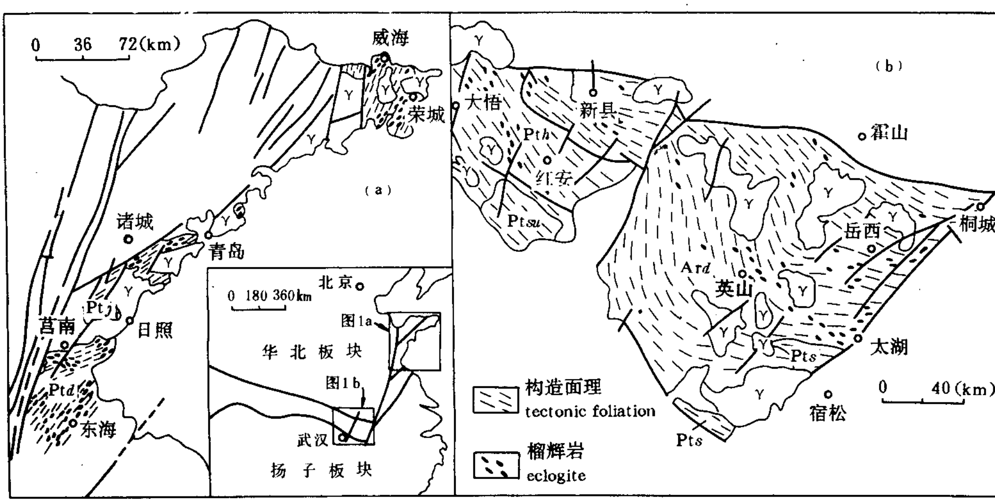

图 1　大别–苏鲁榴辉岩带地质简图

Fig.1　Schematic geological map of the Dabie–Sulu eclogite belt

(a) 苏鲁地区；(b) 大别山地区；Ar*d*　大别群；Pt*d*　东海群；Pt*j*　胶南群；Pt*h*　红安群；Pt*su*　随县群；Pt*s*　宿松群；*v*　中生代花岗岩

(a) Sulu area; (b) Dabieshan area. Ar*d*　Dabie Group; Pt*d*　Donghai Group; Pt*j*　Jiaonan Group; Pt*h*　Hongan Group; Pt*su*　Suixian Group; Pt*s*　Susong Group; *v*　Mesozoic granites

质岩群中。从西向东分别为红安群、苏家河群、大别群、宿松群、东海群，胶南和胶东群。近年来的 1 : 5 万区域地质调查成果表明，大别、东海、胶东和胶南群实际上是由变质的表壳岩系、灰色片麻岩和古老的基性超基性侵入体组成。普遍经历了中压角闪岩相至麻粒岩相区域变质作用和强烈混合岩化改造，并广泛遭受中生代花岗岩侵入。从大别群中发育的条带状含磁铁石英岩建造、TTG 系列岩石及变质作用特征来看，大别变质地体应属于华北板块南缘。可能是于早中元古代从华北板块裂解出来的微古陆[10]。红安群、宿松

群和苏家河群为具有被动大陆边缘特征的沉积–火山沉积岩系，经历了中压绿帘角闪岩相区域变质作用，岩浆活动不发育。以前人们普遍认为这套地层形成于晚太古至早元古界，且近同时发生区域变质作用改造。但近几年来，特别是印支期高压变质岩年代的获得，部分学者对前寒武纪区域变质作用提出了异议。认为大别变质地体整体经历了印支期超高压高压变质作用，后期主体退变质至角闪岩相[11—14]。但这一推论有悖于已经获得的大量年代学资料(1 200—2 000Ma)和大地构造学研究证明的复杂演化历史[10,15—17]。

目前，在高压超高压变质带中还发现了多种非基性高压变质岩，如含柯石英大理岩和片麻岩、铝直闪石片岩、硬玉石英岩、类白片岩等[12,18—21]。在榴辉岩带南侧平行伴生一条绿帘–蓝片岩带，其以出现具有钠质或钠钙质角闪岩、绿帘石、多硅白云母和钠长石等矿物组成的岩石为特征。形成条件为350—450℃，0.5—0.7GPa[1,2]。

2 榴辉岩的产状、岩相学及分类

在大别–苏鲁地区，榴辉岩体多呈透镜状、团块状、条带状或似层状产出。整个榴辉岩带及单个榴辉岩体长轴的展布方向均与区域构造线方向平行(图1)。榴辉岩的片理或条带方向也多与围岩的片理或片麻理平行。分布于大别、东海、胶东和胶南变质杂岩中的榴辉岩，主要分布于黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩和大理岩中，少量分布于超基性岩或蛇纹岩中；分布于红安、宿松和苏家河群中的榴辉岩，围岩主要是白云钠长片麻岩、白云石英片岩或绿帘钠长角闪岩。

超基性岩中的榴辉岩主要产于大别山东段的岳西南山岭，太湖石马，胶南莒南，日照梭罗树，胶东荣城。太湖石马地区的榴辉岩体呈透镜状，团块状或岩脉分布于蛇纹岩化石榴橄榄岩中。超基性岩又呈透镜状分布于黑云斜长片麻岩中，接触界面为糜棱岩化带。榴辉岩主要由石榴石、绿辉石或钠质普通辉石组成，次要矿物是斜方辉石和金红石等。岩石多呈条带状构造，主要由石榴石组成的粉红色条带与主要由绿辉石组成的浅绿色条带相间而成，条带厚约几厘米。榴辉岩和石榴石橄榄岩的原岩很可能是一个层状基性–超基性侵入体。岳西南山岭榴辉岩呈透镜状产于石榴二辉岩中，二者又呈透镜状产于黑云斜长片麻岩中，接触界面为强变形带。榴辉岩有二种类型：一种为灰绿色，条带状构造，主要由石榴石和绿辉石组成，次要矿物仅见金红石；另一种为灰黑色，块状构造，次要矿物有蓝晶石、石英，柯石英、铁菱镁矿和白云石。日照梭罗树一带，数十个超基性岩体呈透镜状、不规则状产于黑云斜长片麻岩中，其中多含榴辉岩体。在水车沟蛇纹岩体内榴辉岩呈脉状，与围岩界线截然，外接触带发育有蛇纹片岩层，榴辉岩的次要矿物为金红石和石英；荣城迟家店，榴辉岩呈透镜状产于石榴橄榄岩中，二者界线截然。典型的矿物组合是石榴石–单斜辉石–金红石。

黑云斜长片麻岩中的榴辉岩分布最广，矿物组成、组构特征变化多样。太湖和潜山一带，榴辉岩多成群产出，常具有条带状构造，中粗粒变晶结构，主要矿物是石榴石和绿辉石，次要矿物为蓝晶石、多硅白云母、绿帘石和黝帘石，多含柯石英。在岳西碧溪岭，灰绿色的石英榴辉岩、灰黑色蓝晶石榴辉岩和黑色榴辉岩复合呈一个椭圆形岩体，产于黑云斜长片麻岩中。东海蒋庄，榴辉岩呈块状、片麻状、条带状或斑杂状构造，主要由石榴石和绿辉石组成，次要矿物为蓝晶石、多硅白云母、石英及柯石英。日照岚山头，同一露头上的榴

辉岩具有不同的组构特征，部分为青灰色条带状构造，含蓝晶石和多硅白云母；另一部分为深红色，块状构造，石榴石和绿辉石中含柯石英和透长石包体。荣城大疃一带，几十个透镜状榴辉岩体分布于二云斜长片麻岩中，二者均受到强烈塑性变形改造，呈糜棱结构。岩体具明显分带现象，中心为块状石榴石岩，边部为条带状辉石岩。岩石中的主要矿物是石榴石和单斜辉石，次要矿物是蓝晶石、石英、柯英和金红石。

斜长角闪岩中的榴辉岩主要分布于英山芭茅街和太湖黄镇等地，密集呈带状的榴辉岩和层状斜长角闪岩构成暗色岩系在黑云斜长片麻岩中稳定产出。榴辉岩体多呈透镜状，其边部多强烈退变质成榴闪岩、石榴角闪岩和斜长角闪岩。榴辉岩与围岩接触边界或渐变过渡，或为强变形带。榴辉岩的主要矿物是石榴石和绿辉石，次要矿物是蓝晶石、多硅白云母、石英、绿(黝)帘石、金红石和锆石等。在芭茅街，榴辉岩的石榴石中含柯石英包体。还应注意的是，在太湖黄镇，有些榴辉岩含次要矿物蓝闪石，石榴石中含大量矿物包体，如钠钙质角闪石、多硅白云母、绿帘石和石英等。而且这些包体矿物分布于石榴石的核部和幔部，边部则没有包体。电子探针分析表明，这种石榴石具有明显的成分环带，核部富 MnO，边部则富 MgO 和 FeO，为典型进变质环带，即由低温、低压向较高温、高压转变。

产于大理岩或钙质片麻岩中的榴辉岩主要分布在太湖石马、潜山双河、五庙等地。榴辉岩呈团块状或透镜状，单体多在 1m 以下，主要矿物是石榴石和绿辉石，次要矿物是石英、绿帘石、方解石、文石、柯石英和金刚石。大理岩及其中的榴辉岩呈透镜状或似层状分布于黑云斜长片麻岩之中，二者之间多为韧性剪切带。

白云钠长片麻岩和绿帘钠长角闪岩中的榴辉岩主要分布大别山西段的大悟、红安、罗山、新县以及东段的宿松地区。在鄂北大悟–红安一带，发育一条长达 80km 的榴辉岩和绿帘角闪岩带。整个带呈北北西–南南东向“S”形状展布于红安群白云钠长片麻岩或片岩之中，还伴生有大量蛇纹岩体，以及石墨片岩、大理岩和浅粒岩。带内榴辉岩体呈透镜状，多达数百个，大多分布于绿帘角闪岩中，并与其呈渐变过渡。在较大榴辉岩体中可见从岩体中心向边部退变质作用逐渐加强，由新鲜榴辉岩转变成绿帘角闪岩的连续退变质过程。榴辉岩的主要矿物是石榴石和绿辉石，次要矿物是多硅白云母、石英、绿(黝)帘石、蓝闪石和金红石。石榴石中含有大量绿帘–角闪岩相矿物包体，如钠钙质角闪石、绿帘石、石英和钠长石等。同时，石榴石还发育明显的成分环带，从中心向边部，MnO 逐渐降低，呈钟形，而 MgO 和 FeO 升高，呈碗形，记录了榴辉岩进变质作用过程的温压条件变化。在河南罗山和新县，榴辉岩呈透镜状分布于白云钠长片麻岩和绿帘角闪岩中。在罗山熊店榴辉岩与榴辉岩质片麻岩、片岩、大理岩共生，造成了一基性和非基性高压变质岩块体。榴辉岩主要由石榴石和绿辉石组成，次要矿物是多硅白云母、绿帘石、蓝闪石、石英和金红石。石榴石中含有大量榴辉岩相前变质作用的矿物包体，且呈规律分布。在核部为钠钙质角闪石、绿帘石、石英；幔部为石英包体，包体周围还有分布规则的放射状裂纹，但尚未发现柯石英或其多晶石英假象；边部为绿辉石、石英和金红石包体。石榴石具典型的进变质作用成分环带。

综上所述，可得出以下几点认识: (1)产于大别、东海、胶东和胶南变质杂岩中的大多数榴辉岩具有相同的围岩、产状、组构和矿物组合特征，并多含有柯石英或金刚石，为超高

压变质作用产物。但也有个别例外，如黄镇的含蓝闪石榴辉岩。(2)分布于红安、苏家河和宿松群中的榴辉岩具有相同的矿物组合和组构，并以多含蓝闪石，石榴石，具进变质成分环带，不含柯石英为特征，为低温高压变质作用产物。(3)根据特征次要矿物，本区的榴辉岩可划分成5个类型，它们是：蓝闪石榴辉岩，次要矿物还有多硅白云母、石英、绿帘石和金红石；蓝晶石榴辉岩，次要矿物还有多硅白云母、石英和金红石；斜方辉石榴辉岩，多不含其它次要矿物，又可称之为石榴辉石岩；柯石英(金刚石)榴辉岩，可含多硅白云母、蓝晶石、绿帘石、菱镁矿、铁菱镁矿、白云石、石英、滑石、金红石和锆石；普通榴辉岩，不含上述特征次要矿物，但可含多硅白云母、绿帘石、石英和金红石。有的仅由石榴石和绿辉石组成，可称双矿物榴辉岩。榴辉岩在次要矿物上的差异是其形成条件和原岩成分不同的反映。(4)多数榴辉岩与围岩之间为韧性剪切带，呈构造接触。榴辉岩是外来的构造块体，与围岩之间为异变质关系。(5)少数榴辉岩中的次要矿物受围岩制约，如含斜方辉石榴辉岩主要产于超基性岩中，含菱镁矿、铁菱镁矿和白云石榴辉岩分布于大理岩或钙质片麻岩中。这些榴辉岩与围岩之间多呈渐变过渡关系，很可能说明二者同变质关系。加上含柯石英大理岩、榴辉岩质片麻或片岩的发现，确实证明有一部分非基性岩石与基性岩一起共同经历了高压超高压变质作用。

3 变质作用过程

岩相学观察表明，本区榴辉岩保留了多期变质作用痕迹。根据矿物组合和替代关系，可将整个变质作用的过程划分成2个系列、5个阶段，即进变质系列，由绿帘角闪岩相到榴辉岩相；退变质系列，由榴辉岩相到角闪岩相→绿帘-角闪岩或绿帘-蓝片岩相→绿片岩相，各阶段的矿物组合及演化关系如表1。

榴辉岩相前的绿帘-角闪岩相变质作用，可根据石榴石中的矿物包体，如钠钙质角闪石、绿帘石、石英、白云母和钠长石，及环带状石榴石的核部成分特征来确定；角闪岩相退变质作用阶段，绿辉石转变成贫钠的单斜辉石-钠长石或角闪石-钠长石合晶。石榴石变成角闪石，或角闪石-斜长石合晶，或黑云母-斜长石合晶。柯石英变成多晶石英或单晶石英。菱镁矿发育白云石或方解石环边。多硅白云母变成黑云母-斜长石合晶。蓝晶石变成斜长石-钠云母；绿帘-角闪岩相退变质阶段，以出现钠钙质角闪石、绿帘石、钠长石为特征。与这个退变质阶段相当，有部分榴辉岩或榴闪岩叠加了绿帘-蓝片岩相变质作用。它是以蓝闪石和绿帘石变斑晶共生为特征，这两个矿物中含有石榴石和绿辉石或其后成合晶包体；绿片岩相退变质阶段以多硅白云母、石榴石、钠钙质角闪石被绿泥石、阳起石、绿帘石、钠长石替代为标志。但需要指出的是，低温高压榴辉岩并没有经历了角闪岩相退变质作用，而是直接退变质到绿帘-角闪岩相或绿帘-蓝片岩相。

4 矿物化学

4.1 石榴石

根据大量电子探针分析结果的统计，本带榴辉岩中的石榴石为铁铝-镁铝-钙铝榴石系列的石榴石，3个端元分子的含量分别是：22%—70%、3%—56%和5%—63%(图2

表1　大别－苏鲁榴辉岩带的榴辉岩的矿物组合及其演化

Table 1　Mineral parageneses and evolution of eclogite in the eclogite belt of Dabie－Sulu

形成阶段	PE	E	A	EA/EBS	GS
石榴石	—	—			
绿辉石		—			
蓝晶石		—	—		
斜方辉石		—			
多硅白云母	—	—	—	—	
柯石英		—			
金刚石		—			
菱镁矿		—			
铁菱镁矿		—			
文石		—			
滑石		—			
橄榄石		—			
绿帘石	—	—	—	—	—
黝帘石	—	—	—	—	—
石英	—	—	—	—	—
锆石		—	—	—	
金红石		—			
榍石		—	—		
蓝闪石		—		—	
青铝闪石	—		—	—	
斜长石			—		
单斜辉石			—		
白云石		—	—		
方解石	—		—	—	—
阳起石					—
白云母	—				—
透长石		—			
绿泥石					—
钠云母	—		—		
黑云母			—		
钠长石	—			—	—

注：PE　榴辉岩前绿帘－角闪岩相；E　榴辉岩相；A　角闪岩相；EA/EBS　绿帘－角闪岩相／绿帘－蓝片岩相；GS　绿片岩相

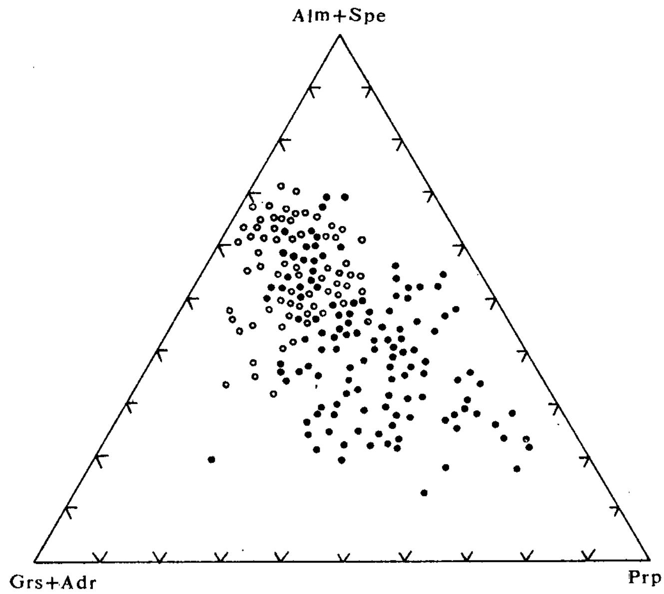

图 2 榴辉岩中的石榴石成分特征

Fig.2 Chemical composition of garnets in the eclogites

○ 高压榴辉岩中的石榴石;● 超高压榴辉岩中的石榴石;Alm 铁铝榴石;Adr 钙铁榴石;Grs 钙铝榴石;Prp 镁铝榴石;Spe 锰铝榴石

○ Garnets from high-pressure eclogites; ● garnet from ultra-high-pressure eclogites; Alm almandine; Adr andradite; Grs grossularite; Prp pyrope; Spe spessartine

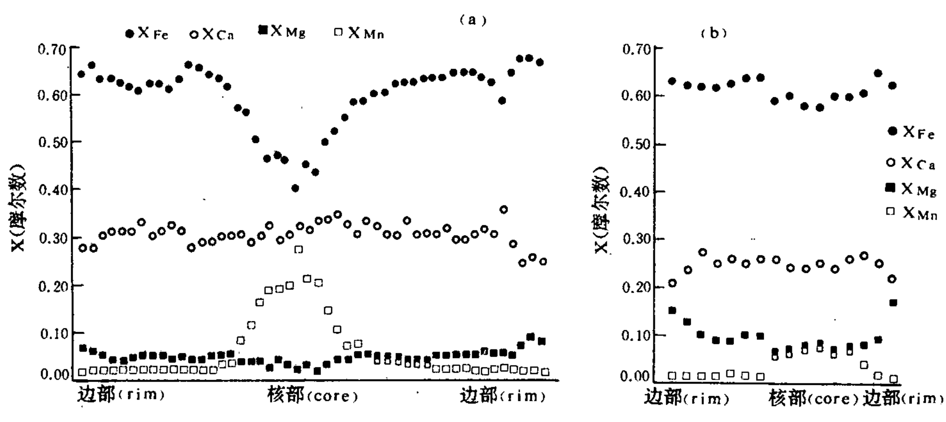

图 3 高压榴辉岩中石榴石成分环带

Fig.3 Compositional zoning of garnets in the high-pressure eclogites

(a) 大悟宣化店; (b) 新县千河棚

(a) Xuhuadian, Dawu County; (b) Qianhepeng, Lushan County

和表 2,3),其它组分<2%,但个别的锰铝榴石分子可高达 12%。高压榴辉岩中的石榴石富铁铝榴石,贫镁铝榴石,普遍具有成分环带。其中镁铝榴石组分<30%,与 Coleman

(1965)的 C 型榴辉岩相当。成分环带特征相同，表现为核部富 MnO，边部富 FeO 和 MgO(图 3 和表 3)。石榴石核部与边部之间存在明显的成分间断，以此为界，核部代表榴辉岩相前变质阶段，边部代表榴辉岩相变质阶段。这种成分间断可与石榴石中矿物包体的分布完好相对，核部为钙质角闪石、绿帘石、白云母和钠长石等绿帘-角闪岩相矿物，边部则是多硅白云母、石英、金红石，甚至是绿辉石等榴辉岩相矿物包体。超高压榴辉岩中的石榴石成分变化较大，而且多比高压榴辉岩中的石榴石富含镁铝榴石组分，其含量多大于 30%，与 Coleman 的 B 型榴辉岩相当。超高压榴辉岩中的石榴石亦不具成分环带，说明变质作用温度较高，成分已发生均匀化。分布于超基性岩中的部分榴辉岩，其石榴石具有很高的镁铝榴石组分，含量可高达 75%，显示出 A 型榴辉岩的特征。

4.2　单斜辉石

高压和超高压榴辉岩中的单斜辉石大多数为绿辉石，硬玉分子含量为 25%—58%(图 4 表 2, 3)。与超基性岩伴生的榴辉岩中的单斜辉石多为钠质普通辉石，硬玉分子小于 10%—20%。角闪岩相退变质阶段形成的单斜辉石为贫钠的透辉石，硬玉分子为 10%—20%(表 2)。高压和超高压榴辉岩中的单斜辉石都不具成分环带。

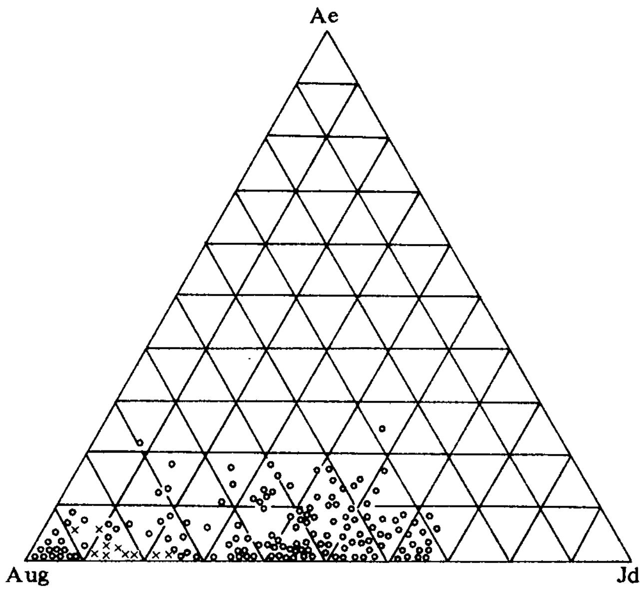

图 4　榴辉岩中单斜辉石的成分特征

Fig.4　Chemical composition of clinopyroxenes in the eclogites

○　榴辉岩中的单斜辉石；×　后成合晶中的单斜辉石；Ae　霓辉石；Aug　普通辉石；Jd　硬玉

○　Clniopyroxenes from eclogites; ×　clinopyroxenes from symplectite. Ae　aegrine; Aug　augite; Jd　jadeite;

4.3　角闪石

角闪石出现在包括高压变质作用在内的各个变质作用阶段，但化学成分不同，反映出形

成条件的变化(表 2, 3)。在前榴辉岩相阶段，角闪石为钠钙质角闪石，如冻蓝闪石和红闪石(图 5)；在高压榴辉岩相阶段为钠质角闪石，如蓝闪石和青铝闪石；在角闪岩相退变质阶段为钙质角闪石(图 6)，如普通角闪石、阳起石质普通角闪石、钙镁角闪石和韭闪石；在绿帘-角闪岩相退变质阶段为钠钙质角闪石，如冻蓝闪石、红闪石和蓝透闪石；在绿帘-蓝片岩相阶段为钠质角闪石，蓝闪石和青铝闪石；在绿片岩相阶段为钙质角闪石(图 6)，如阳起石和透闪石。绿帘-角闪岩相退变质阶段形成的角闪石可具成分环带，核部富钠和铝，而边部富钙和铁，从冻蓝闪石变成阳起石，为绿帘-角闪岩相→绿片岩相的退变质环带。

表 2 超高压榴辉岩中代表性矿物探针分析(%)

Table 2 Microprobe analyses (%) of representative minerals in the ultra-high-pressure eclogites

矿 物	Grt	Omp	Bru	Phe	Tlc	Mag	Cro	Di	Dol	Bi	Pl	Gln
形成阶段	E	E	E	E	E	E	PE	A	A?	A	A	EBS
SiO_2	38.10	55.17	0.00	53.67	61.36	0.00	55.03	52.58	0.12	36.26	56.17	53.88
TiO_2	0.01	0.13	0.00	0.42	0.12	0.00	0.00	0.05	0.00	0.40	0.00	0.03
Al_2O_3	12.04	8.12	0.00	25.64	0.43	0.08	7.68	2.96	0.00	19.19	27.55	10.10
Cr_2O_3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.05	0.00	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00
Fe_2O_3	0.76	4.18					4.71	4.43			0.41	5.81
FeO	28.56	5.50	31.25	3.68	1.68	19.64	4.24	7.03	7.50	14.30		3.21
MnO	0.46	0.00	0.22	0.08	0.04	0.31	0.03	0.14	0.15	0.04	0.02	0.07
MgO	3.67	7.49	26.89	3.68	29.20	35.61	7.74	10.13	20.78	14.98	0.02	14.44
CaO	7.76	13.31	0.84	0.00	0.02	1.02	13.92	20.44	28.41	0.18	10.23	4.15
Na_2O	0.00	6.50	0.02	0.10	0.07	0.38	6.48	2.48	0.21	0.13	5.88	5.44
K_2O	0.00	0.00	0.00	7.27	0.02	0.00	0.00	0.00	0.06	9.09	0.05	0.07
Sum	100.36	100.41	59.24	95.21	93.16	57.32	99.84	100.26	57.54	94.58	100.41	97.20
O	12	6	2	11	22	2	23	6	2	22	8	23
Si	2.992	1.995	0.000	3.541	8.020	0.000	7.658	1.961	0.000	5.408	2.520	7.454
Ti	0.002	0.004	0.000	0.020	0.004	0.000	0.000	0.001	0.000	0.045	0.000	0.003
Al	1.954	0.346	0.000	1.995	0.005	0.000	1.259	0.230	0.000	3.373	1.457	1.646
Cr	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe^{3+}	0.049	0.114	0.000				0.493	0.124			0.014	0.605
Fe^{2+}	2.059	0.116	0.390	0.201	0.120	0.231	0.492	0.219	0.086	1.784		0.371
Mn	0.045	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.004	0.004	0.000	0.004	0.001	0.008
Mg	0.427	0.404	0.601	0.362	5.612	0.738	1.606	0.563	0.452	3.333	0.001	2.978
Ca	0.473	0.516	0.010	0.000	0.000	0.020	2.075	0.817	0.453	0.030	0.496	0.615
Na	0.000	0.456	0.000	0.011	0.005	0.008	1.784	0.179	0.009	0.038	0.511	1.459
K	0.000	0.000	0.000	0.612	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.731	0.003	0.012

注: Bar 青铝闪石；Bi 黑云母；Bru 铁菱镁矿；Cro 蓝透闪石；Di 透辉石；Dol 白云石；Gln 蓝闪石；Grt 石榴石；Mag 菱美矿；Omp 绿辉石；Phe 多硅白云母；Pl 斜长石。
矿物形成阶段见表 1。

表 3　高压榴辉岩中代表性矿物探针分析(%)

Table 3　Microprobe analyses (%) of Representative minerals in the high–pressur eclogites

矿　物	Grt(r)	Grt(m)	Grt(c)	Omp	Gln	Phe	Bar	Bar	Pg	Act	Ab	Ep
形成阶段	E	E	E	E	E	E	PE	EA	EA	GS	GS	Gs
SiO_2	36.81	37.02	36.48	55.35	57.44	51.68	50.06	51.08	46.98	52.99	69.83	39.58
TiO_2	0.11	0.06	0.17	0.02	0.00	0.61	0.09	0.08	0.25	0.14	0.01	0.04
Al_2O_3	21.02	21.13	20.81	10.19	11.44	27.98	9.95	11.18	40.23	5.93	19.19	32.50
Cr_2O_3	0.08	0.01	0.04	0.02	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
Fe_2O_3	0.00	0.00	0.00	4.78	0.12		4.80	4.01		2.50	0.05	1.12
FeO	29.16	25.31	17.63	4.90	5.43	3.31	7.31	5.24	0.04	9.77		
MnO	0.41	3.49	11.66	0.05	0.16	0.01	0.17	0.06	0.16	0.02	0.03	0.00
MgO	1.73	1.05	0.39	6.61	12.75	2.69	12.00	14.05	0.12	14.64	0.00	0.04
CaO	9.91	10.51	10.93	10.94	0.45	0.00	6.59	7.94	0.33	9.44	0.05	24.99
Na_2O				7.64	6.97	0.68	4.11	3.04	5.38	2.22	10.62	0.01
K_2O				0.00	0.06	7.09	0.30	0.12	0.78	0.02	0.06	
Sum	99.23	98.56	98.11	100.51	95.63	95.97	95.01	96.58	94.27	97.42	99.86	95.46
O	12	12	12	6	23	11	23	23	11	23	8	12.5
Si	2.960	2.993	2.978	1.985	7.897	3.341	7.254	7.180	3.011	7.533	3.051	3.007
Ti	0.007	0.004	0.010	0.000	0.000	0.032	0.010	0.008	0.012	0.015	0.000	0.002
Al	1.991	2.013	2.002	0.431	1.853	2.270	1.699	1.852	3.029	0.993	0.989	2.910
Cr	0.005	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe^{3+}	0.046	0.000	0.009	0.129	0.116		0.523	0.424		0.268	0.002	0.071
Fe^{2+}	1.915	1.711	1.194	0.147	0.625	0.138	0.886	0.637	0.022	1.161		
Mn	0.028	0.239	0.806	0.002	0.019	0.011	0.021	0.007	0.008	0.002	0.001	0.000
Mg	0.207	0.127	0.047	0.353	2.613	0.325	2.595	2.944	0.012	3.102	0.000	0.005
Ca	0.854	0.909	0.956	0.420	0.066	0.020	1.023	1.196	0.023	1.438	0.002	2.034
Na				0.531	1.850	0.118	1.155	0.829	0.666	0.612	0.815	0.002
K				0.000	0.011	0.600	0.055	0.022	0.064	0.004	0.002	

注：Ab　钠长石；Act　阳起石；Ep　绿帘石；Grt(r)，(m)和(c)分别代表石榴石边部，幔部和核部；Pg　钠云母；其它见表 1 和 2。

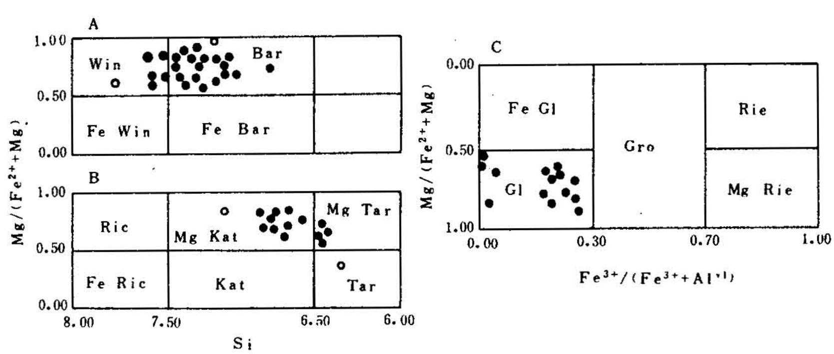

图 5　钠钙质(A，B)和钠质(c)角闪石分类图(据 Leake，1985)

Fig.5　Composition diagram of sodic–calcic (A，B) and alkali(c) amphiboles (after Leake，1985)

○　石榴石中的角闪石包体；●　在绿帘–角闪岩或绿帘–蓝片岩中的角闪石

○　Amphibole inclusion in garnet；●　amphibole from epidote–amphbolite or epidote–blueschist

4.4 碳酸盐矿物

本区榴辉岩中的原生碳酸盐矿物首次在岳西南山岭发现[9]，目前在太湖石马、潜山双河和岳西碧溪岭等地的超高压榴辉岩中找到了菱镁矿、铁菱镁矿和白云石。实验研究表明，菱镁矿是地幔条件下稳定的碳酸盐矿物，它具有在地幔中储存碳的能力，也可以成为俯冲板块中碳的截体。碳酸盐矿物的存在使我们相信在本区的超高压变质岩中有继续找到变质金刚石的可能性，它也说明在超高压变质作用过程中有广泛的流体相存在。在本区超高压榴辉岩中的碳酸盐矿物具有相同的存在形式，菱镁矿和铁菱镁矿与石榴石和绿辉石共生，而白云石呈其环边，有时向外还有方解石环边。菱镁矿-白云石之间的转变反应是一灵敏的压力计，在榴辉岩相变质作用温度下，它所指示的压力与金刚石-石墨的相转变反应相当，这是超高压变质作用的另一个证据。据电子探针分析，太湖石马和潜山双河的碳酸盐矿物具有相似的组成，菱镁矿是 Mg 0.68—0.75, Fe 0.21—0.28。Ca 0.00—0.11，白云石是 Fe / Mg = 1 / 1。岳西南山岭的铁镁菱矿是 Mg 0.49—0.50, Fe 0.46—0.48, Ca 0.03—0.03，白云石是 Ca 0.50—0.51, Mg 0.31—0.33, Fe 0.14—0.16，方解石为 Ca 0.88—0.89, Mg 0.05—0.06, Fe 0.05—0.06（表 2）。

4.5 白色云母

榴辉岩中的白色云母有多硅白云母和钠云母两种，其中以多硅白云母最为常见。在除绿片岩相阶段以外的各个变质过程中都可出现多硅白云母。高压榴辉岩中的多硅白云母硅原子数为 3.34—3.43（表 3），超高压榴辉岩中的硅原子数为 3.45—3.54（表 2）。这表

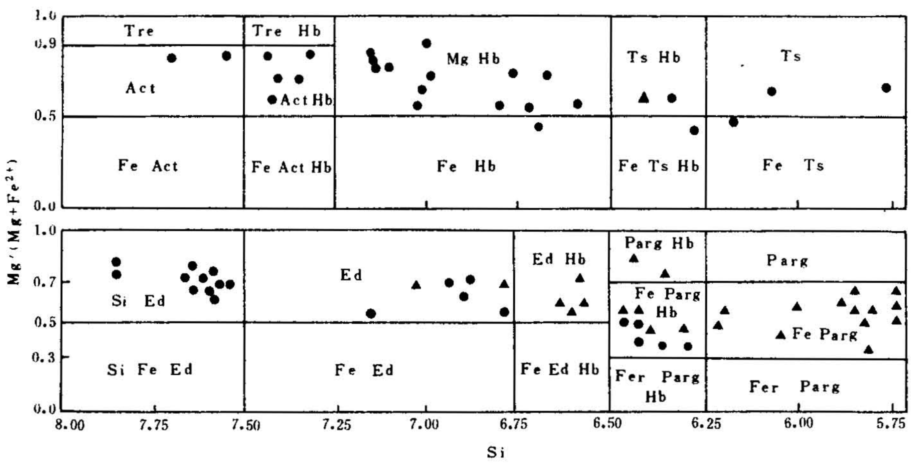

图 6 钙质角闪石分类图（据 Leake, 1985）

Fig.6 Composition diagram of calcic amphibole (after leake, 1985)

▲角闪岩中的角闪石；● 绿片岩相中的角闪石

▲ Amphibole from amphibolite; ● amphibole from greenschist

明高压榴辉岩中的多硅白云母为更高压力下的产物，硅原子数为 3.45 接近柯石英的形成压力，而 3.55 已达到或超过了金刚石的形成压力。钠云母出现在新县田铺和太湖黄镇的榴辉岩中，为石榴石中的早期矿物包体，或为晚期退变质作用产物。

4.6　斜长石

斜长石或钠长石出现除榴辉岩相以外的各个变质阶段。一般情况下，角闪岩相退变质阶段形成的斜长石相对富钙、贫钠，为中长石或更长石；而绿帘–角闪岩相或绿片岩相几乎为纯的钠长石(表 2)。由于退变质反应不平衡作用的存在，斜长石的成分受被交代矿物的成分制约，与角闪石或黑云母呈合晶交代石榴石或多硅白云母的斜长石富钙，钙长石分子可达 40%—60%；而与角闪石或单斜辉石呈合晶交代绿辉石的斜长石为近纯的钠长石。因此，在一个岩石薄片中就可形成多种不同成分的斜长石(图 7)。

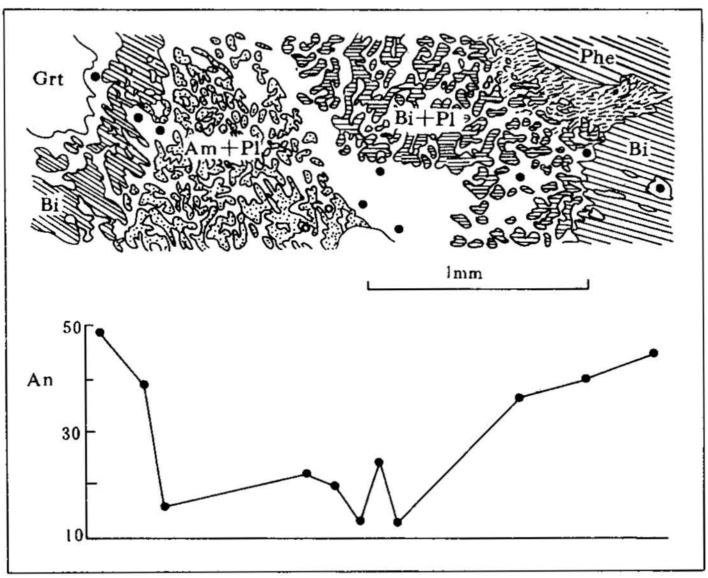

图 7　不同结晶域中斜长石的成分变化

Fig.7　Compositional pattern of plagioclase in different crystal domains

角闪石(Am)+斜长石(Pl)呈绿辉石后成合晶；黑云母(Bi)+斜长石呈多硅白云母(Phe)合晶或石榴石(Grt)冠状体

Amphibole (Am)+plagioclase(Pl) symplectite after omphacite; biotite(Bi)+plagioclase after phengite(Phe) or garnet(Grt)

4.7　绿帘石

绿帘石形成在高压超高压变质和进退变质的各个阶段。绿帘石中柯石英包体的发现，表明含水矿物可以在超高压变质作用下稳定。各个阶段形成的绿帘石成分比较接近，其中绿帘石组分含量 $Ps=Fe^{3+}/(Al+Fe^{3+})$ 为 12%—23%。但榴辉岩相阶段形成的绿帘

具有较低的绿帘石组分。

5　变质作用温压条件及 *PTt* 轨迹

人们对榴辉岩形成条件的认识是一个不断变化的过程。以往，乃至现在，Holland (1980)实验确定的单斜辉石中硬玉分子含量压力计被普遍用来限定榴辉岩的形成压力。这样就由此形成了榴辉岩的形成压力多在 1.5GPa 以下，深度相当于正常大陆下地壳的传统认识。含柯石英和金刚石榴辉岩的发现证明某些榴辉岩的形成压力可达 3.0—4.0GPa，80—130km 以上的地幔深度。在正常温度范围内，既使单斜辉石为纯的硬玉也远得不出这样高的压力。因此，榴辉岩中是否含柯石英是其压力限定的关键。现在，我们仍然可以肯定本区仍有相当一部分榴辉岩是不含柯石英的，或者说目前尚未发现柯石英。如本文所确定的高压榴辉岩，以及太湖黄镇地区的蓝晶石榴辉岩等[1,11,22,23]。胶南莒南、青岛仰口，胶东荣城等地也有不含柯石英榴辉岩[24—26]。

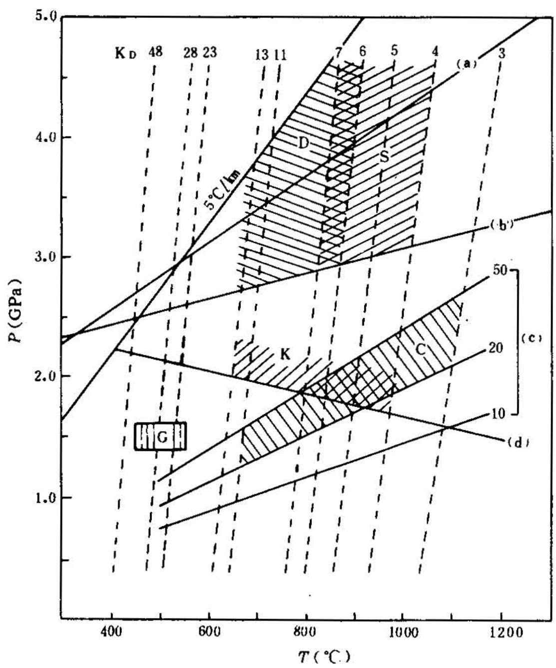

图 8　榴辉岩变质作用温压条件

Fig.8　*P–T* conditions of the eclogites from the Dabie and Sulu areas

D　大别山地区的含柯石英榴辉岩；S　苏鲁地区的含柯石英榴辉岩；G　蓝闪石榴辉岩；K　蓝晶石榴辉岩；C　普通榴辉岩。变质反应：(a)石墨–金刚石[32]；(b)石英–柯石英[33]；(c)钠质单斜辉石–石英组合的下限压力，10，20 和 50 表示辉石中的硬玉分子含量[34]；(d)钠云母+斜黝帘石+石榴石–绿辉石+蓝晶石[35]

D　Coesite eclogite from the Dabieshan area; S　coesite eclogite from the Sulu area; G　glaucophane eclogite; K　kyanite eclogite; C　common eclogite. reaction curves: (a) graphite–diamond[32]; (b) quartz–coesite[33]; (c) omphacite+ quartz– albite[34]; (d) margarite+clinozoisite+garnet–omphacite+kyanite[35]

榴辉岩的形成温度普遍采用 Ellis 和 Green (1979) 实验资料校正的石榴石–单斜辉石

之间的 Fe^{2+}–Mg 分配系数(K_D)温度计，或后来多次校正的温度计来估计。对本区榴辉岩的计算结果表明，除部分与超基性岩共生的榴辉岩外，石榴石–单斜辉石之间的 Fe^{2+}–MgO 分配系数具有空间上的变化规律，大别山西段的为 28—48，东段为 7—29，苏北和胶南地区的为 4—13。这表明榴辉岩的形成温度有从西向东逐渐升高的趋势。若按 $X_{Ca}=0.28$ 和压力 3.0GPa，据 Ellis 和 Green 的温度计计算，上述三个地区的温度变化范围分别是 460—530℃，520—825℃和 705—1000℃ (图 8)。据已知的矿物化学成分，大别山地区柯石英榴辉岩的 K_D＝6—14[9,27,28]，而苏胶地区的 K_D 为 4—7[6,29,30]。据石英–柯石英相界和 Ellis 和 Green 温度计便可得出两地柯石英榴辉岩的形成条件：大别地区是 650—870℃，＞2.7—2.9GPa，苏胶地区是 820—1 000℃，＞2.8—3.1GPa (图 8)。若按石墨–金刚石相界，温度均提高约 20℃，压力分别为＞3.7—3.9 和＞3.8—4.4GPa，形成深度是 120—140km。

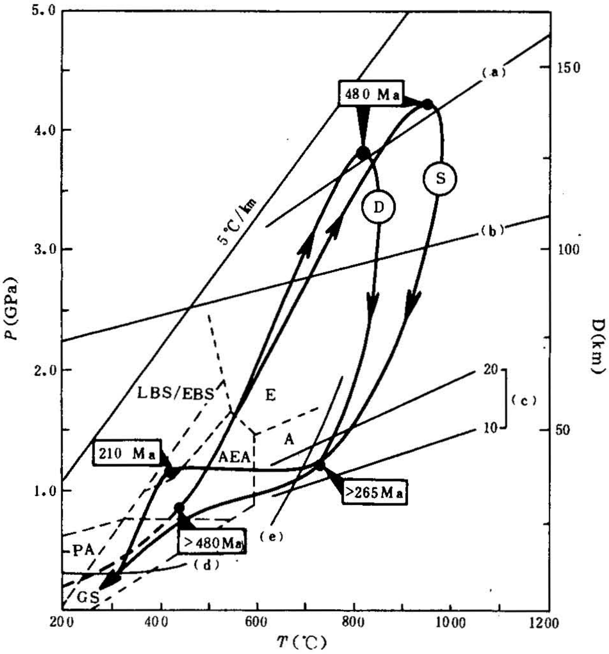

图 9　超高压榴辉岩变质作用 *PTt* 轨迹

Fig.9　Metamorphic *PTt* paths of ultra–high–pressure eclogites

D　大别山地区；S　苏鲁地区。变质反应：(a)，(b)和(c)同图 8；(d)　冻蓝闪石稳定的下限压力[36]；(e)　钠云母+石英–钠长石+蓝晶石+H_2O[29]；变质相界据 Evans[31]：A　角闪岩相；E　榴辉岩相；LBS／EBS　硬柱石–蓝片岩相／绿帘–蓝片岩相；AEA　绿帘–角闪岩相；GS　绿片岩相；PA　绿纤石–阳起石片岩相

D　Coesite eclogite from the Dabieshan area; S　coesite eclogite from the Sulu area. Reaction curves: for (a), (b) and (c), see Fig.8; (d) low limit of barrosite stablity[36]; (e) margarite+qaurtz–albite+kyanite+H_2O[29]. Metamorphic facies after Evans[31]: A　amphibolite facies; E　eclogite facies; LBS／EBS lawsonite–blueschist／epidote–blueschist facies; AEA　albite–epidote–amphibolite facies; GS　greenschist; PA　pumpellyite–actinolite

本带高压榴辉岩以含蓝闪石、绿帘石和多硅白云母为特征，其变质作用条件应与

Evans(1990)定义的绿帘-蓝片岩相的石榴石稳定区相当[31]。据变质相界,形成条件应为500±50℃,1.6±0.2GPa[21]。蓝晶石榴辉岩的形成条件可据图8中的反应(d)和Ellis和Green温度计来限定,结果是650—970℃,>1.7—2.0GPa。由于普通榴辉岩中没有其它对压力反映灵敏的矿物,只能用单斜辉石中的硬玉分子含量压力计来确定下限压力。据实际硬玉分子含量20%—50%和 K_D=3-11,可获得温度为640—1 100℃,压力>1.2-2.1GPa。其中 K_D 较小的,温度较高的是与超基性伴生的榴辉岩。

笔者认为在目前的研究水平上,上述榴辉岩的形成条件确定是客观的。由此看来,本带榴辉岩的形成条件存在很大差异。含柯石英榴辉岩形成在非常低的地热梯度下(6℃/km),接近变质作用的极限条件(5℃/km);而某些与超基性岩伴生的榴辉岩形成在很高的地热梯度下(16℃/km),相当中、高压过渡型变质作用。这说明它们是形成在不同的大地构造环境中,具有不同的成因机制。

岩相研究表明,本带榴辉岩经历了5个变质作用阶段,根据共生矿物相关系和变质反应相界,以及地质温压计,各期变质作用的温压条件可较准确地加以限定。角闪岩相变质作用,可根据绿辉石退变质形成的单斜辉石中的硬玉分子含量(10%—20%),蓝晶石-钠长石稳定,以及角闪石-斜长石温度计等估算,结果是700—750℃,1.1—1.4GPa;绿帘-蓝片岩相应在其角闪石成分所对应的相区和石榴石不稳定区内[31],即380—420℃,1.0—1.3GPa;绿片岩相应在冻蓝闪石稳定的压力以下,即<0.3GPa,温度为250—350℃。绿帘-角闪相进变质作用,可据冻蓝闪石的稳定压力和角闪石与环带状石榴石的核部矿物对温度计,以及变质相界估算,结果是400—500℃,0.7—0.9GPa。

综合上述各期变质作用的温压条件,便可得出含柯石英和金刚石榴辉岩变质作用的*PT*路径(图9),其特点是:呈顺时针方向旋转;进变质作用为缓慢升温显著增压过程;退变质作用早期为近等温降压,中期为近等压降温,晚期为降温降压过程。这样的*PT*路径很可能说明超高压变质作用是在大规模、快速板块俯冲作用下而达到峰值条件,然后快速折返逃避热平衡的叠加,并在冷板块的后续俯冲作用过程中发生近等压冷却,再次高压变质。

6 形成时代

关于秦岭-大别-苏鲁高压超高压变质带的形成时代目前还存在争议。主要有三种观点,即新元古代[1,36],中生代印支期[9,11,12,38—40]和多期高压变质作用[28]。第一种认识有榴辉岩全岩K-Ar稀释法年龄845Ma为证。但研究表明榴辉岩作为一种基性变质岩不适合K-Ar方法定年,而全岩-矿物Sm-Nd和锆石U-Pb法可得出较好的年代[41]。第二种认识正是源于近几年来陆续获得的一批221—265Ma的全岩-矿物Sm-Nd等时线年龄。除此而外,对本高压变质带绿帘-蓝片岩中的多硅白云母和钠钙质角闪石的定年结果也都是印支期。这样,大多数学者都接受印支期是华北与扬子板块最后对接碰撞时代。但值得注意的是,用石榴石和绿辉石获得的年代并不一定代表榴辉岩的峰期变质作用年龄。因为这两种矿物在超高压榴辉岩的抬升过程中很可能发生成分再平衡,而得出较新的年代。事实上用本榴辉岩带中用Sm-Nd法获得的年代并不一致,从330到57Ma都有[30]。很显然,这些年代结果不可能都是榴辉岩峰期变质作用的年代,部分应是

榴辉岩的后期改造年代，有些是否具有地质意义还有待分析。此外，用全岩-石榴石-绿辉石 Sm-Nd 法定年，还应考虑到榴辉岩的形成温度。如果形成温度低于 700℃，矿物之间的 Sm-Nd 体系就可能没有达到平衡，所得出的年龄是无意义的。因此，有些学者特别强调，榴辉岩的定年最好是 Sm-Nd 和锆石 U-Pb 两种方法相结合，互相验证[41]。

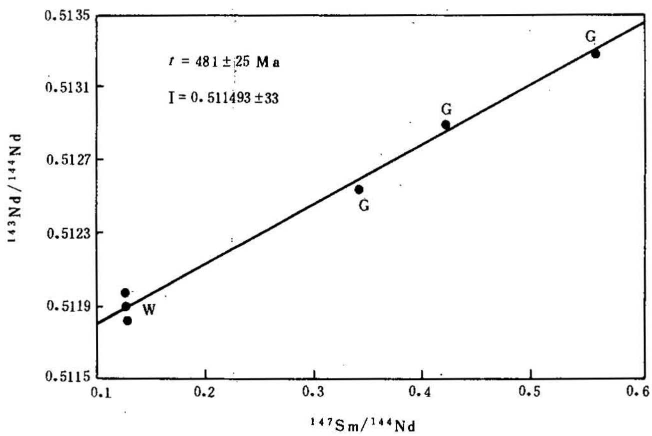

图 10　榴辉岩全岩(W)-石榴石(G) Sm-Nd 等时线

Fig.10　Sm-Nd isochron plot for whole rocks (W)-garnet (G) of eclogite

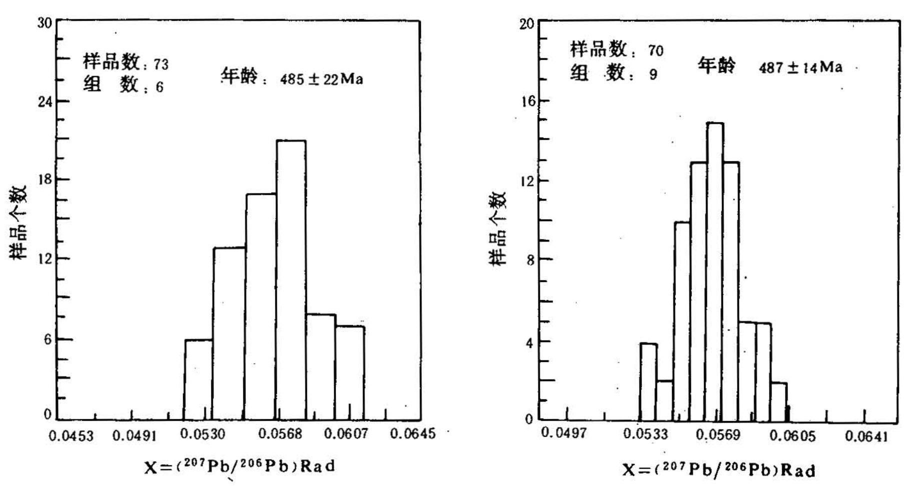

图 11　榴辉岩单颗粒锆石^{207}Pb—^{206}Pb 年龄方框图

Fig.11　Age diagram of single-zircon crystals of eclogite

近年笔者等在英山芭茅街地区的含柯石英假象榴辉岩中获得了 481 ± 25Ma 的全岩-石榴石 Sm-Nd 等时线年龄(图 10)。对同一样品用单颗粒锆石^{207}Pb-^{206}Pb 法获得了几乎相同的 485 ± 22Ma 和 487 ± 14Ma 年代(图 11)。最近又在太湖石马和罗山熊店地区的榴辉岩中获得了 420—480Ma 的单颗粒锆石 U-Pb 年龄。这些年代使我们相信桐柏-大别山地区存在加里东期高压超高压变质带。而海西和印支期限可能是榴辉岩的改造年

龄,或者是后期高压变质作用的时代。据此,我们可以将超高压榴辉岩的变质作用 *PT* 轨迹加上绝对年代限定。榴辉岩相前绿帘-角闪岩相变质作用很可是发生在早古生代,甚至是晚元古代末期。超高压榴辉岩相峰期变质作用是在加里东期;角闪岩相阶段可能大于 265Ma,绿帘-蓝片岩相或高压榴辉岩相则是印支期;绿片岩相退变质作用为燕山期(图 9)。

7 地球动力学模式和几点认识

根据榴辉岩变质作用过程、形成年代、地球化学及其大地构造环境特征,笔者可初步建立大别-苏鲁高压超高压变质带的形成及演化模式如下:元古宙形成在华北与扬子板块之间的大洋壳于早古生代向华北板块或大别块体之下发生大规模、快速俯冲,形成了加里东期超高压变质岩;在冷板块的后续俯冲过程中,含柯石英榴辉岩在板底垫托作用下快速抬升至地壳下部,并叠加角闪岩相变质作用;印支期洋壳闭合,陆-陆俯冲碰撞,绿帘-蓝片岩相高压变质作用形成;燕山期碰撞后陆内逆冲推覆,断块升降,高压超高压变质岩构造运移至地表,并伴随有绿帘-角闪岩相或绿片岩相退变质,以及大量的岩浆活动。基于这一成因模式,和本文的各方面讨论,可得出以下几点认识:

(1) 大别-苏鲁地区的榴辉岩可划为两种类型:低温高压榴辉岩和超高压榴辉岩。高压榴辉岩形成温度 < 550℃,以含蓝闪石,石榴石中含前榴辉岩相的矿物包体和具典型的进变质作用成分环带为特征。超高压榴辉岩形成压力 > 2.8—3.3GPa,以含柯石英或金刚石,石榴石不具成分环带为特征。但有某些榴辉岩形成温度很高(1 000℃),为高温榴辉岩且与超基性岩伴生,很可不是形成在高压或超高压变质作用过程中。或许是岩浆结晶或地幔岩冷侵入的产物。

(2) 华北与扬子板块的最后对接-碰撞发生在印支期,但夹持于其间的大洋壳的俯冲作用很可能于晚元古代或早古生代就已开始,超高压榴辉岩是加里东期大洋板块俯冲作用的产物。较冷的大洋板块的深俯冲作用可以形成极低的地热梯度,更有利于超高压变质作用发生。目前所获得的榴辉岩全岩矿物 Sm-Nd 年龄之所以多为印支期,是因为角闪岩相退变质,以及绿帘蓝片岩相高压变质作用,使榴辉岩中的石榴石和绿辉石 Sm-Nd 体系发生再平衡的结果。但也不能排除有印支期高压榴辉岩相变质作用。

(3) 高压、超高压变质带具空间分布规律。在大别山地区这种分布规律表现的最为明显,以含柯石英榴辉岩为代表的超高压变质带,以蓝闪石榴辉岩为代表的高压变质带,和以绿帘-蓝片岩为代表的高压变质带,从北向南依次展布。而且这三个带又依次出现在大别变质杂岩,红安(宿松)群和随县(耀岭)河群之中。三个带的变质作用温压条件依次降低,形成深度也逐渐变小,形成时代由老到新。

(4) 大别变质杂岩可能并没有全部经历超高压变质作用。目前在大别及苏鲁地区虽已发现了许多非基性高压超高压变质岩,但还有更大面积的角闪岩相或麻粒岩相变质杂岩中没有找到任何高压变质作用的痕迹。高压超高压变质岩与围岩的构造接触关系,说明它们是构造包体,而不是原地变质作用的产物。高温榴辉岩的存在说明榴辉岩本身就是不同构造环境下的产物。

(5) 在榴辉岩中含有原生碳酸盐矿和含水矿物,这说明在高压和超高压变质作用过

程中有流体相存在，修正了有关榴辉岩必须是形成在干的条件下的传统认识。它也表明在超高压岩中有继续找到金刚石的可能性。

(6) 在榴辉岩的退变质作用过程中，由于变质反应域平衡作用的存在，退变质矿物之间常常没有达到化学平衡，矿物成分并不是受控于变质作用的温度和压力条件。因此，矿物形成条件的确定和地质温压计的使用，都要考虑到变质反应动力学因素的影响。

超高压变质岩在世界上的发现距今只有 10 年之久，大别和苏鲁地区超高压变质岩的发现才五、六年时间，由此而引起的许多重大地质问题不可能在这样短的时间内得到全面解决。因此本文所得出的某些认识还有待于进一步探讨，以及构造学，同位素年代学、地球化学和地球物理学等多学科的其同研究加以完善或更新。

本项研究得到了中国地质大学索书田、杨巍然、钟增球、王方正、路凤香和莫宣学教授，陈能松、王林森和沈上越副教授，韦必则、周湖云和刘嵘博士，湖北省区域调查周高志高工，安徽 311 地质队李步民和范良红高工，安徽省地质科学研究所徐树桐教授、张勇和肖桂林高工，以及山东区域地质调查队刘贵章高工等的热情帮助与指导，在此，作者深表感谢!

参　考　文　献

1 周高志，康维国. 鄂北蓝片岩带研究. 北京：地质出版社，1991.
2 荆延仁，梁万通，张树业，张良田. 安徽前寒武纪高压变质带. 北京：地质出版社，1991.
3 Yang J, Smith D C. Evidence for a former sanidine– and coesite– eclogite at Lanshantou east China, and the recognition of the Chinese "Su–Lu coesite– clogite province". 1989, Terra Abstract 1, 3rd Inter. Ecl. Conf., Wuzberg.
4 Okay A L, Xu S T, Sengor A M C.Coesite from the Dabie Shan eclogites, central China. Eur. J. Mineral, 1989, (1): 595—598.
5 Xiaomin W, Liou J G and Mao H K. Coesite–bearing eclogite from Dabie Mountain in central China. Geology, 1989, 17: 1085—1088.
6 Hirajima T, Ishiwatari A, Cong B, Zhang R, Banno S, Mnozaka T.Coesite from Mengzhong eclogite at Donghai country, northeastern Jiangsu Provice, China. Mineralolgical Magazine, 1990, 54: 579—583.
7 徐树桐，苏文，刘贻灿，江来利，季寿元，Okay A I, Sengor A M C.大别山东段高压变质岩中的金刚石. 科学通报，1991, 36(17): 1318—1312.
8 张树业，刘晓春，胡克，常丽华. 大别-苏北-胶南含柯石英榴辉岩中微粒金刚石及自然金的发现. 中国地质，1991, (11): 28—29.
9 张泽明. 安徽岳西地区的含白云石柯石英榴辉岩. 岩石学报，1992, 8(1): 25—39.
10 索书田，桑隆康，韩郁菁，游振东. 大别山前寒武纪变质地体岩石学与构造学. 武汉：中国地质大学出版社，1993.
11 徐树桐，江来利，刘贻灿，张勇. 大别山区(安徽部分)的构造格局和演化过程. 地质学报，1992, 66(1): 1—14.
12 Xiaomin W, Liou J G.Regional ultra–high–pressure coesite–bearing eclogitic terran in central China: Evidence from country rocks, gneiss, marble, and metapelite. Geology, 1991, 19: 933—936.
13 Xiaomin W, Liou J G, Shigenori Maruyama. Coesite–bearing eclogite from the Dabie Mountains, central China: Petrogenesis, P–Tpaths, and implications for regional tectonics. 1992, 100: 231—250.
14 Okay A L, Sengor A M C. Evidence for intracontinental thrust–related exhumation of the ultral–hgih–pressure rocks in China. Geology, 1992, 20: 411—414.
15 张国伟，周鼎武. 秦岭杂岩和秦岭造山带. 秦岭-大巴山地质论文集(一). 北京：北京科学技术出版社，1990, 11—24.
16 杨森楠，吴鉴，杨学忠，陆中旦. 大别山晚前寒武纪的构造发展. 地球科学，1983, (3): 81—90.
17 游振东，索书田，朱宝康，刘武. 大别变质地体的构造样式及变形序列. 地球科学，1988, (4): 341—349.

18 游振东,周汉文,吕学水. 湖北浠水蓝晶石铝直闪石片岩中的冠状体结构的研究. 地球科学,1990,(4):245—356.
19 翟明国,丛柏林,赵中岩,王清晨,李家驹. 大别山榴辉岩带的高压硬玉石英岩块体及其地质意义. 科学通报,1992,(11):1013—1015.
20 刘雅琴,张树业,康维国. 华中高压变质岩中蓝晶黄玉岩的特征及与白片岩的对比. 长春地质学院学报,1992,22(2):144—149.
21 徐树桐,刘贻灿,江来利,苏文. 大别山高压变质带及其中的金刚石. 现代地质文集(上). 南京:南京大学出版社,1992,157—165.
22 张泽明. 大别山榴辉岩带的岩石学研究. 岩石学论文集. 武汉:中国地质大学出版社,1992,197—205.
23 张泽明,桑隆康,谢忠怀. 湖北宣化店榴辉岩的岩石学矿物学及成因研究. 矿物学岩石学论丛,1992,(7):97—106.
24 张希道,陈允福,王桂枝. 鲁东南莒南县一带榴辉岩的特征. 岩石学报,1992,8(1):25—39.
25 韩宗珠,武心绕,姚春明. 青岛榴辉岩相变质古洋壳的特征及成因. 青岛海洋大学学报,1992,22(4):81—89.
26 叶凯,徐平. 山东荣城大疃榴辉岩成因岩石学研究. 岩石学报,1992,8(1):25—39.
27 张勇,江来利,刘始灿. 大别山超高压榴辉岩的特征和变质作用. 岩石学报,1991,(3):1—13.
28 张泽明,游振东. 大别山地区柯石英榴辉岩变质作用的*PTt*轨迹及其地球动力学意义. 地球科学,1992,17(2):141—149.
29 Enami M, Zang Qinjia. Quartz pseudomorphs after coesite in eclogites from Shandong province, east China. American Mineral. 1990,75:381—381.
30 杨建军. 苏鲁榴辉岩及有关超基性岩. 北京:地质出版社,1991.
31 Evans B W. Phase relations of epidote-blueschists. Lithos,1990,25:3—23.
32 Kennedy C S, Kennedy G C. The equilibrium boundary between graphite and diamond. J. Geophys. Res., 1976,81:2467—2470.
33 Bohlen S R, Boettcher A L. Thequartz-coesite transformation: A pressure detemination and the effects of other components. J. Gelphys. Res.,1982,87:7073—7078.
34 Banno S. Stabiligy of diopsite-jadite solid solution. J.Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists. 1986,81:281—288 (in Japannese with English abstract).
35 Barnicoat A C, Fry N. High pressure metamorphism of the Aermatt-Saas ophiolite zone, Switzerland. J. of the Geological Society, London. 1986,143:607—618.
36 Xu S T, Okay A L, Sengor A M C, Su W, Liu Y, Jiang LL. Diamondfrom the Dabie shan metamorphic rock and its implication for tectonic setting. Science,1992,265(3):80—82.
37 张树业,胡克,乔兰勇,刘晓春. 华中高压变质带的岩石组合特征及成因. 秦岭-大巴山地质论文集(一). 北京:北京科学技术出版社,1990,221—228.
38 李曙光,Hart S R,郑双根,郭安林,刘德良,张国伟. 中国华北与华南陆块碰撞时代的钐-钕同位素年龄证据. 中国科学B辑,1989,(3):312—318.
39 李曙光,刘德良,陈移之,葛宁洁,陈秋媛. 大别山南麓含柯石英榴辉岩的Sm-Nd同位素年龄. 科学通报,1992,(4):346—349.
40 丛柏林,张儒瑗,李曙光,王松山,陈秋媛. 中国苏北-胶东南高压变质带的同位素地质年代学初探. 中国科学院地质所《岩石圈构造演化开放实验室年报》(1989—1990). 北京:科技文献出版社,1991,68—72.
41 Vidal P, Hunziker J C. Systematics and problems in isotope work on eclogites. Chem. Geol., 1985, 52: 129—141.

PETROLOGY, METAMORPHIC PROCESS AND GENESIS OF THE DABIE–SULU ECLOGITE BELT, EAST–CENTRAL CHINA

Zhang Zeming, You Zhendong, Han Yujing and Song Longkang

(*Department of Geology, China University Geoscience, Wuhan, Hubei*)

Abstract

The Qinling–Dabie orogenic belt in east–cental China represents the east–west–trending subduction–collision zone between the North China and Yangtze plates. A series of high–pressure and altra–high–pressure metamorphic rocks have been found in the belt. The eelogites are mainly exposed in eastern Shandong, northern Jiangsu, south–western Anhui, southern Henan and northern Hubei. The eclogites occur as lenses and layers in the Early Precambrian crystalline basements such as the Jiaonan, Donghai and Dabie metamorphic complexes or Mid–Late Proterozoic metamorphic series such as the Hongan Group, Susong Group and Sujiahe Group. Based upon the field occurrence and evaluation of *P–T* conditions of eclogites, two types of eclogite can be distinguished: type 1–ultra–high–pressure (UHP) eclogite in the Early Precambrian basement, and type 2–low–temperature high–pressure (LTHP) eclogite in the Mid–Late Proterozoic metamorphic series. On the basis of the field geology, petrolography, mineral chemistry and geochronology, the metamorphic conditions, PTt paths and petrogenetic model of eclogite are understood. The principal conclusions of this work are the following: (1) The eclogites have been subjected to five stages of metamorphism represented by a clockwise *PTt* path. (2) Within the eclogite belt, the formation temperatures of eclogites increased from the Western Dabie through the Eastern Dabie to the Sulu areas. (3) At least two stages of high–pressure metamorphism have occurred in the orogen: the coesite– and diamond–bearing eclogites were formed by northward subduction of oceanic crust beneath the North China plate or the Dabie during the Caledonian, with an age of 481 Ma, and the epidote–blueschist belt were formed by junction–collision between the two continental plates in Triassic time. (4) The high–pressure metamorphic belt consists of eclogites with different ages, *P–T* conditions and origins. This suggests that the eclogites were introducted into wall–rocks by the tectonic transport.

Key words: petrology, mineral chemistry, chronology, *PTt*–path, Dabie–Sulu eclogite belt, east–central China

作　者　简　介

张泽明, 1961 年生。1984 年毕业于武汉地质学院地质系, 1990 年获硕士学位, 现任中国地质大学(武汉)讲师, 博士研究生。1986 年以来从事高压变质岩研究。通讯处: 武汉中国地质大学(武汉)地球科学院岩石教研室, 邮政编码: 430074。