

# 东秦岭松树沟高压变质基性岩石 及其退变质作用的 $P-T-t$ 演化轨迹

## High Pressure Metabasites and Their Retrograde Metamorphic $P-T-t$ Path from Songshugou Area, Eastern Qinling Mountain

刘良 周鼎武 董云鹏 张宏发 刘养杰 张泽军  
Liu Liang, Zhou Dingwu, Dong Yunpeng  
Zhang hongfa, Liu Yangjie and Zhang Zejun

(西北大学地质系 西安 710069)

(Department of Geology, Northwest University, Xi'an, 710069)

**摘要** 在北秦岭商南松树沟出露的高压变质基性岩石,包括高压基性麻粒岩和石榴单斜辉石岩,遭受了从中压麻粒岩相、高角闪岩相到绿帘角闪岩相的连续的退变质作用的改造。这些岩石形成的温度为  $826^{\circ}\text{C}\sim 887^{\circ}\text{C}$ , 压力约为  $1.40\sim 1.58\text{GPa}$ , 其不同退变质阶段的温压条件依次分别是  $765^{\circ}\text{C}\sim 825^{\circ}\text{C}$  和约  $1.03\sim 1.14\text{GPa}$ 、 $650^{\circ}\text{C}\sim 750^{\circ}\text{C}$  和约  $0.9\text{GPa}$  以及  $400^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$  和约  $0.5\sim 0.6\text{GPa}$ 。它们共同构成一个早期近等温降压 (ITD) 和晚期降温降压的顺时针  $P-T-t$  演化轨迹。结合高压岩石  $983\pm 140\text{Ma}$  的退变质年龄和松树沟残存的蛇绿岩片考虑,这些高压岩石的形成和抬升与秦岭造山带中、晚元古宙时期洋壳的俯冲、消减和陆块碰撞伴随的快速构造上升作用有关。

**Abstract** The high pressure metabasites, including basic high-pressure granulite and garnet-clinopyroxenite, having undergone successive complicated retrograde metamorphism from median pressure granulite facies through amphibolite facies to epidote-amphibolite facies in Shangnan Songshugou area of the northern Qinling mountain have been recognized with the study results of petrography, mineral chemistry and metamorphic  $P-T$  condition. The high pressure metabasites were estimated to form at temperature  $826^{\circ}\text{C}\sim 887^{\circ}\text{C}$  and pressure  $1.40\sim 1.58\text{GPa}$  and its  $P-T$  conditions of different retrograde metamorphic stages are  $765^{\circ}\text{C}\sim 825^{\circ}\text{C}$  at  $1.03\sim 1.14\text{GPa}$ ,  $650^{\circ}\text{C}\sim 750^{\circ}\text{C}$  at approximately  $0.90\text{GPa}$  and  $400^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$  at  $0.5\sim 0.6\text{GPa}$ , respectively, all of which reconstruct a former stage of near-isothermal decompression (ITD) and a later stage of clockwise  $P-T-t$  path. The facts mentioned above connecting with the retrograde metamorphic

• 本文于1994年7月16日收到,1995年1月24日改回。

本文为国家自然科学基金资助49290100和49172129项目成果之一。

第一作者简介:刘良 男 1956出生 副教授 矿物岩石学专业

dating of  $983 \pm 140$  Ma from the high pressure rocks and the remains of ophiolite sheet in Songshugou area suggest that the formation and uplift of these high pressure metabasites are related to subduction of ocean crust and collision between continental segment as well as associated with rapid uplift especially in Middle to Late Proterozoic in the Qinling orogenic zone.

**主题词** 高压基性变质岩 变质作用 退变质作用  $PTt$  轨迹 东秦岭

**Key words:** High pressure metabasites; Metamorphism; Retrograde metamorphism;  $P-T-t$  path; Eastern Qinling mountain

**分类号:** P588.34

**Classific. code:** P588.34

早在10年前,对北秦岭商南松树沟地区的石榴角闪岩(榴闪岩)的成因问题就展开了争论。黄月华(1984)认为它是超镁铁质岩体引起的高温接触变质作用的结果,安三元等(1985)则认为它是榴辉岩的退变质产物。后来陈能松(1989)依据区岩石中矿物之间的降压反应结构关系也支持退变质的观点。最近,杨勇和陈能松等(1994)虽因怀疑安三元等(1985)所报道的绿辉石是角闪石,而主张该区不存在榴辉岩,但却论证了石榴角闪岩经历了高压变质作用;笔者(1994)在石榴角闪岩的透镜体中发现了高压基性麻粒岩——石榴(斜长)单斜辉石岩及其退变质的石榴二辉麻粒岩,据此提出松树沟高压变质地体的性质;稍后胡能高等(1994)也提出了该区高压变质岩(石榴单斜辉石岩)的存在。由此可见,尽管区内目前尚未准确确定榴辉岩,但却证实了高压变质基性岩石的存在,并提供了该高压岩石经历了从中压麻粒岩、石榴角闪岩到含榴斜长角闪岩的连续的退变质作用过程的信息。本文主要讨论该区高压基性变质岩石(高压基性麻粒岩和石榴单斜辉石岩)及其退变质作用的 $PTt$ 演化历史进而探讨其构造意义。

## 1 地质产状及区域地质背景

区内出露的含石榴石的岩石——“榴闪岩”,呈规模不等的透镜体状断续分布在商南松树沟超镁铁质岩体(主岩体)南北两侧的斜长角闪岩(片岩)之中(图1)。它们的分布与距离超镁铁质岩体远近无关,如上土坳一带的“榴闪岩”透镜体紧邻主岩体北侧分布,而西沟-腰子凹一线的透镜体则分布在距主岩体南侧约200m处。并且在后者与主岩体之间夹有不纯大理岩夹层。在这些透镜体中,按主要组成矿物之不同,通常都可见到石榴单斜辉石岩、石榴角闪岩和含榴斜长角闪岩(片岩)几个岩石类型。但在主岩体南侧的几个透镜体中,笔者还发现了高压基性麻粒岩及其退变质的含榴二辉麻粒岩(刘良等1994)。它们与上述各种含石榴石的岩石共存于同一透镜体中,之间并无严格界线,但石榴单斜辉石岩和高压基性麻粒岩主要残存在透镜体的核部,而含榴斜长角闪岩(片岩)则多分布在边部,中间主要由石榴角闪岩构成。

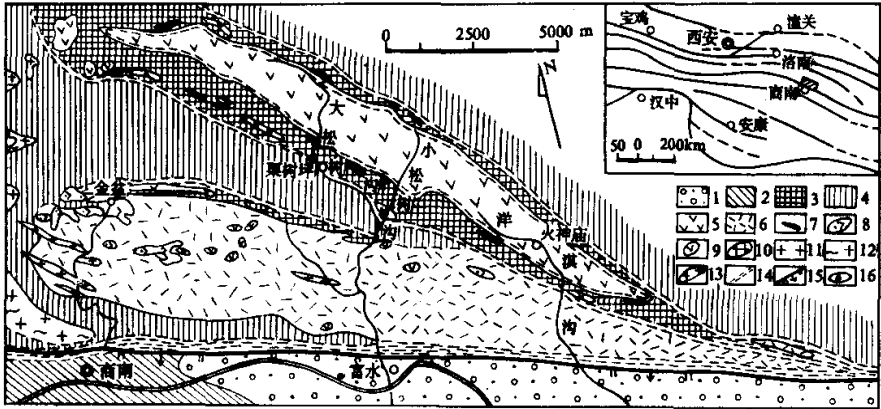


图 1 陕西南南松树沟地区地质略图

1. 白垩系—第三系红色砂砾岩; 2. 泥盆系(?) 变质砂岩、云母片岩夹大理岩; 3. 中、晚古界蛇绿岩片中的斜长角闪岩类; 4. 下元古界表壳杂岩; 5. 蛇绿岩片中的变质超镁铁质岩; 6. 变质浅色辉长-闪长岩; 7. 尚未见高压-二辉麻粒岩的“榴闪岩”透视镜体; 8. 变质暗色辉石岩-辉长岩; 9. 超基性岩包体; 10. 斜长角闪岩包体; 11. 花岗岩; 12. 片麻状花岗岩; 13. 花岗质伟晶岩脉; 14. 韧性剪切带; 15. 正断层; 16. 已见高压-二辉麻粒岩的“榴闪岩”透视镜体

Fig. 1 The geologic sketch map of Songshugou area in Shangnan, Shaanxi Province

许多学者认为, 上述含石榴石的各种岩石和斜长角闪岩(片岩)的原岩具有大洋拉斑玄武岩的特征, 并与超镁铁质岩体共同组成一不完整的呈构造侵位于秦岭群中的外来蛇绿岩片(许志琴 1986; 李曙光等 1991; 张国伟等 1994<sup>①</sup>; 张本仁等 1991; 周鼎武等 1994<sup>②</sup>); 董云鹏 1994<sup>③</sup>) 获得斜长角闪岩和含榴斜长角闪岩(片岩)的全岩 Sm-Nd 等时线年龄为  $1030 \pm 46$  Ma, 五件样品的模式年龄为  $1271 \sim 1440$  Ma。等时线和模式年龄值分别可视为蛇绿岩片形成的上限年龄和下限年龄, 因为这条等时线拟合的线性关系良好。另外李曙光(1991)对石榴角闪岩(榴闪岩)中石榴石-角闪石矿物对测得 Sm-Nd 等时线年龄为  $983 \pm 140$  Ma, 推测它可能代表区内高压基性变质岩石的一次退变质热事件(详见下文), 也可看作松树沟蛇绿岩片构造侵位的近似时代。

## 2 岩相学特征及变质期次

下面主要依据现已明确发现高压基性变质岩和含榴二辉麻粒岩的同一个露头, 从核部到边部的岩石中特征矿物组合的变化, 分四种岩石类型来讨论岩相学特征及变质作用的演化。

① 张国伟, 李曙光等. 1994. 秦岭造山带的蛇绿岩. 见: 镁铁质与超镁铁质岩论文集. 北京: 地质出版社(待刊).  
 ② 周鼎武, 张泽军等. 1994. 东秦岭商南松树沟元古宙蛇绿岩片的地质、地球化学特征(待刊).  
 ③ 董云鹏. 1994. 东秦岭蛇绿岩的性质、特征及构造意义(硕士论文).

### 2.1 石榴单斜辉石岩

呈深灰褐色、块状构造、粒状变晶结构，主要由呈等粒镶嵌结构的石榴石(30~65%)、单斜辉石(35~50%)和少量石英组成，副矿物有金红石和磷灰石等。有些薄片中有少量共生斜长石并构成高压基性麻粒岩(刘良等1994)。部分退变质强烈的薄片中有石榴石变斑晶中包裹有细粒单斜辉石和石英。其特征的变质矿物组合是石榴石(Gt) + 单斜辉石(Cpx<sub>1</sub>) + 石英(Qz) + 金红石(Ru) ± 斜长石(Pl)。分布在单斜辉石边部和石榴子石外围的褐色角闪石(Hb<sub>1</sub>)和部分斜长石显然是其退变质的产物。这种岩石与榴辉岩在组成上的差别是其单斜辉石Na<sub>2</sub>O含量偏低，属透辉石和富钠普通辉石而非绿辉石。事实上，世界许多典型榴辉岩区常出现共生的石榴单斜辉石岩。如我国山东荣城(叶凯等1992)和莒南(杨建军1991)，同时其中单斜辉石含Na<sub>2</sub>O的多寡，除取决于变质程度高低之外，还与寄主岩石Na<sub>2</sub>O含量的多少有关(Carswell 1990)。另外，岩石中的石榴石具成分环带，Gt(核)和Cpx<sub>1</sub>分别含有较高的镁铝榴石(Pyr)组分(26.6~33.98%)和硬玉(Jd)标准分子(15.14~16.75%)，据其估算的温压条件为828℃~887℃和1.40~1.58GPa，符合榴辉岩相的一般特征(详见下文)。因此，这种岩石可以认为是一种榴辉岩相的变质岩。

### 2.2 含榴二辉麻粒岩

仅见于主岩体南侧的少数露头，呈灰色弱片麻理的块状，主要组成矿物有石榴石、透辉石、紫苏辉石、斜长石、少量石英和不等量的角闪石。石榴石多呈残斑状，透辉石和角闪石可分两期，其中晚期透辉石(Di<sub>2</sub>)和斜长石、细粒紫苏辉石(Hy)及褐色角闪石(Hb<sub>1</sub>)呈复杂的交生关系组成石榴石的后成合晶(图2A)，后成合晶的外围常含较多的Hy和Di<sub>2</sub>，

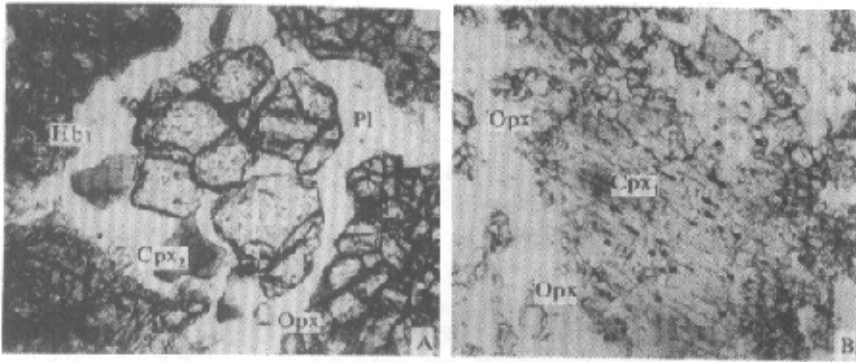


图2 麻粒岩的显微结构

A. 石榴石的后成合晶，单偏光；B. Opx 包绕 Cpx<sub>1</sub>，单偏光

Fig. 2 Microphotographs of typical textures in granulite

有些则完全取代石榴石仅保留其假象, 部分结构域中可见细粒 Hy 包绕早期透辉石 ( $Di_1$ ) (图 2B)。其退变反应是:  $Gt+Di_1 \rightarrow Hy+Pl+Qz+Mt$  (据 Harly 1984)、 $Gt+Di_1+Qz+Pl \rightarrow Hy+Pl+Di_2$  (据 Harly 1989) 和  $Gt \rightarrow Pl+Hy+Hb_1$  (据 Sehenk 1984)。蓝绿色角闪石 ( $Hb_2$ ) 常呈  $Hb_1$  和  $Di_2$  的镶边分布, 有些还与更长石共生在一起, 明显是更晚期退变质的产物。据此, 可识别出残留的早期  $Gt+Di_1+Qz \pm Pl$  和主期  $Hy+Di_2+Pl+Hb_1$  以及更晚期  $Hb_2+Pl$  三期变质矿物组合。其中,  $Di_1$  在成分上与前述岩石中的透辉石类似, 并以含较高的  $Al_2O_3$  和  $Na_2O$  而不同于  $Di_2$ ;  $Gt$  也具环带, 其成分从核部到边部的变化趋势与前述岩石中的  $Gt$  相同。这些特征表明, 这种岩石是石榴单斜辉石岩的退变质产物, 并遭受更低级的退变质作用改造。

### 2.3 石榴角闪岩

是区内最主要的岩石类型, 多呈深绿色片麻状和块状、斑状变晶结构。变斑晶主要为石榴石并被褐色角闪石 ( $Hb_1$ ) 和中长石组成的后成合晶包围, 可能的替代反应是  $Gt+Hy+Qz+H_2O \rightarrow Hb_1+Pl+Mt$ 。少数标本见  $Di_2$  与  $Hb_1$  共生在一起。深绿色角闪石 ( $Hb_2$ ) 也呈  $Hb_1$ 、 $Di_2$  的镶边分布。这里的石榴石的成分环带不甚明显, 总体与前述岩石的  $Gt$  (边) 相当; 透辉石与角闪石在光性和成分上则分别与前述岩石中同世代的同类矿物类似。该岩石与石榴二辉麻粒岩的不同, 是石榴石的后成合晶由褐色角闪石、中长石和石英组成, 无 Hy。显然, 其特征矿物组合为  $Gt+Hb_1+Pl$  (中长石) +  $Qz+Mt \pm Di_2$ , 深绿色角闪石 ( $Hb_2$ ) 和更长石是其退变质的结果。

### 2.4 含榴斜长角闪岩(片岩)

呈灰绿色片麻状或块状, 以具眼球状或眼球压扁拉丝状构造为特征, 单个眼球主要由钠-更长石、绿色角闪石、帘石等矿物的集合体构成, 核心常有石榴石残存或保留其假象。这种眼球状构造及其矿物组成, 应是前述含榴二辉麻粒岩和石榴角闪岩中石榴石的后成合晶再次退变质的结果, 残存  $Gt$  的成分与石榴角闪岩中  $Gt$  的类似也说明了这一点。岩石中眼球以外的主要组成矿物为蓝绿色角闪石、钠-更长石、绿帘石以及石英、榍石、磷灰石等。

上述岩石的产状及岩相学特征表明, 它们之间为退变过渡关系。石榴角闪岩中紫苏辉石和单斜辉石同时出现或仅单斜辉石增多, 岩石分别向含榴二辉麻粒岩或向石榴单斜辉石岩过渡; 而斜长石增加, 岩石则向含榴斜长角闪岩(片岩)过渡。根据岩石组成矿物之间的替代关系及共生组合规律, 区内基性高压岩石及其退变质作用可划分为四个主要演化阶段:

①早期高压变质(榴辉岩相或高压麻粒岩相)阶段: 共生矿物组合为  $Gt+Cpx_1+Qz+Ru$  (金红石), 局部见少量共生斜长石。局部斜长石的出现也许正好表明榴辉岩相岩石向高压麻粒岩的转变, 而这种转变可能主要受控于全岩化学成分的变化 (Carswell 1990)。

②中压麻粒岩相阶段: 以石榴石的后成合晶  $Hy+Pl+Di_2+Hb_1+Mt$  (磁铁矿) 为特征。

③角闪岩相阶段: 也以石榴石的后成合晶为标志, 但后成合晶由  $Pl$  (中长石) +  $Hb_1+Qz+Mt \pm Di_2$  组成, 无斜方辉石。

区内角闪岩相退变质远比中压麻粒岩相退变表现广泛。这可能是由于中压麻粒岩相退变发生稍早于角闪岩相退变并被后者所抹掉而呈现连续退变质的结果, 但不排除其它因素导致它们近同时异地分别发生退变质的可能性。

④绿帘角闪岩相阶段:以蓝绿色角闪石( $Hb_2$ )替代 $Di_2$ 和 $Hb_1$ ,并与绿帘石和钠-更长石的共生为特征,并广泛见于区内各种类型变质岩石之中。显然代表了最晚一期的退变质作用。

### 3 矿物化学和变质条件

表1是区内高压岩石及各阶段退变质组合中代表性矿物的电子探针分析结果。

(1)早期高压变质(榴辉岩相或高压麻粒岩相)阶段的变质作用由石榴单斜辉石岩中的变质矿物组合 $Gt+Cpx_1+Q_2$ 为代表。石榴石的 $MnO$ 、 $MgO$ 和 $Al_2O_3$ 具有成分环带:核部 $MnO$ 含量变化于0.45%~0.64%之间, $MgO$ 为6.8~8.4%, $Al_2O_3$ 为21.36%~23.37%,其端员组分铁铝榴石( $Alm$ )为44.14%~45.7%,钙铝榴石( $Gro$ )为16.4%~22.75,镁铝榴石( $Pyr$ )高达26.6%~33.98%;石榴石边部 $MnO$ 变化于0.72%~0.96%, $MgO$ 约为4%, $Al_2O_3$ 多小于21%,其端员组成 $Alm$ 多大于60%, $Gro$ 多小于17%, $Pyr$ 一般为约15%。该石榴石由核部到边缘 $MnO$ 含量升高而 $MgO$ 含量下降的趋势,符合前人总结的退变质作用过程中石榴石成分变化的一般规律(Hirajima et al 1987)。因此,这些石榴石核部的组成才能代表早期高压变质阶段变质矿物组合中的石榴石,边部成分则可能反映了后期退变质中压麻粒岩相阶段与 $Opx$ 平衡或角闪岩相阶段与褐色角闪石 $Hb_1$ 平衡的石榴石。核部石榴石组成的上述特征,与我国山东威海(翟明国等 1992)、河南大别山(李学燮等 1993)和大别太湖县石马(李曙光等 1994)等地区含柯石英榴辉岩退变质的石榴石完全类似。

$Cpx_1$ 的 $Al_2O_3$ 含量为5.91%~12.8%, $Na_2O$ 为2.07%~2.30%,硬玉标准分子( $Jd$ )为15.14%~16.75%,钙契尔马克分子( $Tsch$ )变化于6.95%~12.09%。其 $Jd/Tsch$ 比值为1.39~2.30,与榴辉岩相单斜辉石 $Jd/CaTs > 0.8$ (从柏林等 1981)的特征吻合。考虑到矿物环带导致的非平衡因素,本文利用 $Gt$ (核)与 $Cpx_1$ 的中部成分或 $Gt$ (核)及其包裹的 $Cpx_1$ 分别配对,应用石榴石-单斜辉石温度计(Ellis and Green 1979)和压力计(Newton and Perkins 1982),估算变质温度为828°C~887°C,压力为1.40~1.58GPa。 $Gt+Cpx+Qz$ 的组合指示出在高的压力条件下 $Opx+Pl$ 的分解,这一反应已由Hensen(1981)、Wood and Hollway(1984)等人描述。根据 $Opx+Pl$ 分解的温度压力曲线,相对于800°C~900°C压力约为1.4~1.5Gpa。这说明计算结果是可信的。区内基性高压岩石的化学成分也符合在这种高压条件下麻粒岩-榴辉岩过渡相的成分特点(Ausrheim 1990)。

(2)中压麻粒岩相阶段变质矿物组合中的紫苏辉石成分均匀,反映后成合晶生长迅速(Harley 1989)。与其共生的 $Di_2$ 的 $Na_2O$ 为0~1.03%, $Al_2O_3$ 为0.13%~2.28%, $Jd$ 为0.0~2.52, $Tsch$ 变化于5.9~9.17之间,其 $Jd/Tsch$ 都小于0.5。利用 $Hy$ 与 $Di_2$ 及 $Gt$ (边)与 $Di_2$ 分别配对,应用二辉石温度计(Wood and Banno 1973; Wells 1977)和石榴石-单斜辉石压力计(Wood 1974),得到温度为765°C~825°C,压力为1.03~1.14GPa。

(3)角闪岩相阶段角闪石的 $Ca$ (阳离子数)多为1.825~1.945, $Na$ 小于0.67, $Si$ 一般小于7.50(以23个氧计算),按Leake(1978)的分类,应属钙质角闪石中的含铁非闪石,少数为镁角闪石或钙镁闪石质角闪石。这种闪石的 $Al_2O_3$ 为12.67%~18.99%, $Al^{IV}$ 变化于0.737~1.325之间,平均大于1。与其共生的斜长石 $An$ 为30~68,主要为中长石,少数为拉长石。利用共存角闪石-斜长石温度计图解(Perchuk 1966)得变质温度为650°C~750°C,平均为

表 1 松树沟高压基性变质岩石及其退变质岩石中矿物的化学成分

Table 1 Chemical compositions of minerals in the high pressure metabasites and their retrograd rocks in Songshugou Area

变质阶段	高压麻粒岩相或榴辉岩相阶段								中压麻粒岩相阶段				角闪岩相阶段						绿帘角闪岩相阶段						
	Gt(边)	Gt(核)	Di <sub>1</sub>	Gt(边)	Gt(核)	Di <sub>1</sub>	Gt(核)	Di <sub>1</sub>	Di <sub>2</sub>	Opx	Di <sub>2</sub>	Opx	Hb <sub>1</sub>	Pl	Hb <sup>①</sup>	Pl <sup>②</sup>	Hb <sup>③</sup>	Pl <sup>②</sup>	Hb <sup>③</sup>	Pl <sup>②</sup>	Hb <sup>③</sup>	Hb <sup>③</sup>	Hb <sup>③</sup>	Hb <sub>2</sub>	
SiO <sub>2</sub>	37.70	37.41	51.91	37.17	33.95	50.94	38.91	50.42	50.89	49.01	51.37	48.06	43.70	49.81	40.12	62.05	40.89	60.16	49.07	46.03	43.04				
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.16	0.86	0.10	0.12	0.79	0.12	0.69	0.01	0.06	0.13	0.07	0.00	0.02	0.51	0.05	0.60	0.05	0.47	0.60	0.60				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.37	21.36	5.91	20.53	23.37	5.68	22.53	8.58	2.28	0.68	1.79	1.00	12.67	31.00	18.99	24.27	15.35	24.62	8.90	10.97	9.49				
ΣFeO	31.33	24.05	7.85	30.30	24.39	8.36	21.13	6.29	13.64	35.71	11.64	34.66	19.40	0.15	17.91	0.03	16.98	0.00	16.47	17.39	14.74				
MnO	0.96	0.64	0.04	0.79	0.72	0.00	0.45	0.07	0.22	0.57	0.11	0.67	0.18	0.00	0.26	0.00	0.14	0.00	0.26	0.32	0.04				
MgO	3.77	6.88	10.18	4.16	7.63	9.71	8.42	9.81	10.89	14.39	11.54	14.29	9.04	0.00	6.21	0.00	7.37	0.00	11.94	9.78	10.58				
CaO	7.67	9.47	20.36	7.51	9.23	20.78	8.52	20.08	22.27	0.53	22.44	0.62	12.06	13.87	11.42	6.24	11.81	7.10	12.77	11.83	14.45				
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.23	2.24	0.00	0.00	2.07	1.11	2.30	0.00	0.00	0.35	0.00	1.67	3.47	2.22	7.94	1.30	6.85	1.35	1.52	1.45				
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52	0.04	0.76	0.08	0.05	0.25	0.00				
总量	100.9	100.19	99.35	100.56	99.39	98.33	101.19	98.06	100.2	100.94	99.36	99.37	98.69	98.32	98.16	100.62	95.2	98.86	101.28	98.69	94.84				
O	12	12	6	15	12	6	12	6	6	6	6	6	23	8	23	8	23	8	23	23	23				
Si	3.002	2.912	1.931	2.950	2.685	1.924	2.932	1.879	1.937	1.938	1.954	1.928	6.512	2.306	5.986	2.733	6.279	2.699	7.064	6.785	6.632				
Al <sup>N</sup>	0.00	0.088	0.069	0.050	0.315	0.076	0.068	0.121	0.063	0.032	0.046	0.047	1.488	1.691	2.014	1.260	1.721	1.302	0.936	1.215	1.368				
Al <sup>M</sup>	1.818	1.871	0.190	0.870	1.863	0.177	1.932	0.257	0.039	0.000	0.034	0.000	0.737		1.325		1.056		0.442	0.691	0.356				
Ti	0.000	0.009	0.024	0.006	0.007	0.022	0.007	0.038	0.000	0.002	0.004	0.002	0.000	0.001	0.001	0.008	0.069	0.001	0.051	0.066	0.070				
Fe <sup>3+</sup>	0.172	0.004	0.000	0.025	0.436	0.000	0.008	0.000	0.001	0.005	0.001	0.002													
Fe <sup>2+</sup>	1.925	1.562	0.244	1.986	1.177	0.264	1.323	0.197	0.433	1.176	0.370	1.161	2.417	0.006	2.235	0.001	2.181	0.200	1.981	2.143	1.899				
Mn	0.065	0.042	0.001	0.053	0.048	0.000	0.029	0.002	0.007	0.019	0.004	0.023	0.022	0.000	0.033	0.000	0.019	0.00	0.003	0.038	0.006				
Mg	0.448	0.798	0.565	0.493	0.899	0.547	0.945	0.547	0.618	0.848	0.655	0.855	2.008	0.000	1.382	0.000	1.687	0.000	2.522	2.148	2.430				
Ca	0.655	0.790	0.811	0.639	0.782	0.841	0.688	0.805	0.908	0.023	0.915	0.027	1.925	0.688	1.825	0.295	1.945	0.341	1.970	1.868	2.386				
Na	0.000	0.034	0.162	0.000	0.000	0.152	0.162	0.167	0.000	0.000	0.026	0.000	0.482	0.311	0.642	0.679	0.387	0.596	0.377	0.380	0.433				
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.002	0.148	0.004	0.009	0.047	0.000				
Alm/Di	63.12	45.70	52.02	61.08	44.49	50.84	44.14	52.67	47.04		54.52														
Gro/Jd	11.47	16.40	16.18	19.79	16.46	15.14	22.75	16.75	0		2.59														
Pyx/Tsch	14.77	26.60	6.95	16.18	33.98	7.61	31.53	12.09	9.17		5.9														

注：①引自 Chen N S et al (1993)，②和③引自黄月华(1984)。

700℃左右。当温度为700℃时,利用角闪石压力计(Blundy et al. 1990)得压力为0.75~1.10GPa,平均约为0.9GPa,相当于高角闪岩相变质条件。

(4) 绿帘角闪岩相阶段的角闪石亦属钙质角闪石,但以镁角闪石和钙镁闪石质角闪石为主。其 $Al_2O_3$ 的含量较低,一般小于11%, $Al^{IV}$ 最高不超过0.691,共生的斜长石为An为12~17的钠-更长石或更长石。应用不同方法估算(Perchuk 1966; Plyusnina 1982)其温度约为400℃~500℃,压力约为0.5~0.6GPa。

#### 4 变质作用 $P-T-t$ 演化轨迹及其构造意义

依据上述讨论,区内高压基性变质岩石的矿物组合及 $P-T$ 条件可以看作该区的峰期变质作用事件。结合其退变质各演化阶段的矿物组合和 $P-T$ 条件,以及已有的同位素年龄数据可作出其 $P-T-t$ 演化途径如图3。图3构成了一个顺时针的 $P-T-t$ 演化轨迹,反映了区内高压基性变质岩石早期近等温减压(ITD)及后期降压降温的变质作用过程。石榴子石周围发育的后成合晶结构则是这种ITD变质过程最特征的结构标志(Harley 1985; 1989)。已有的研究表明,具ITD轨迹的榴辉岩或高压麻粒岩的形成是与板块的俯冲作用、大陆间的碰撞等构造加厚模式有关,并伴随着快速抬升(Harley 1989; Messiga 1991)。

前述岩相学特征研究表明,李曙光等(1991)测年所用的石榴角闪岩中的石榴

石和角闪石,是区内高压基性变质岩石角闪岩相退变质阶段的矿物组合,因此,983±140Ma的年龄值代表了区内高压岩石角闪岩相阶段的退变质热事件,而高压和中压麻粒岩相及绿帘角闪岩相阶段应分别发生在它之前和之后。尽管目前还没有获得该区高压岩石的峰期变质年龄,但松树沟蛇绿岩片形成的下限年龄可能为1271~1440Ma以及高压变质岩石983±140Ma的退变质年龄为此提供了有效的时限约束,并考虑到该高压岩石先期快速抬升的结构标志,可推断该高压变质地体的形成应为中元古宙末期或晚元古宙早期。由此并结合北秦岭区域变形、变质作用(周鼎武 1991)和区域广泛发育的约1000~800Ma(陈能松 1991; 张宗清 1994)以及约450~400Ma(张宗清 1994)的同位素年龄数据综合分析,约在中、晚元古宙期间,本区经历了洋壳的俯冲消减和陆块之间的碰撞作用,在此背景下形成了区内的高压变质地体,随

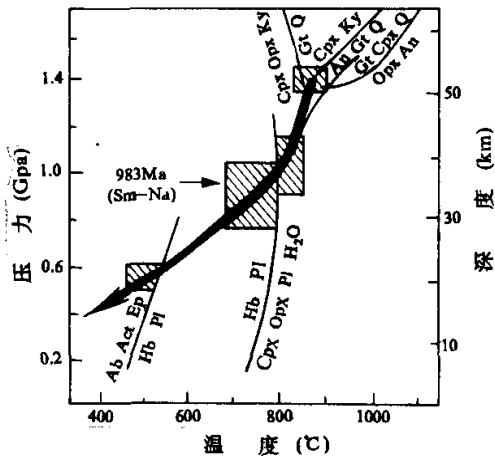


图3 高压变质基性岩石的 $P-T-t$ 轨迹

(据翟明国等 1992; 郭敬辉等 1993 资料修改)

反应曲线  $Hb + Pl \rightarrow Ab + Act + Ep$  和  $Hb + Pl + Q \rightarrow Opx + Cpx + Pl + H_2O$ , 据 Spear (1981);  $Gt + Cpx + Q \rightarrow Opx + Pl$  (An), 据 Hensen (1981) 等;  $Gt + Q \rightarrow Cpx + Opx + Ky$  和  $Cpx + Ky \rightarrow An + Gt + Q$ , 据 Hensen (1976)

Fig. 3  $P-T-t$  path of the high pressure metabasites



后约在  $983 \pm 140\text{Ma}$  左右开始了快速剥蚀抬升及其后可能在  $450 \sim 400\text{Ma}$  期间构造热事件的进一步改造, 造成高压岩石先期特征的 ITD 和后期降温降压的顺时针演化轨迹。这一切表明, 区内在中、晚元古宙期间确曾发生了一次俯冲-碰撞事件。

## 5 结 论

岩相学、矿物化学及变质温、压条件研究表明, 松树沟地区的高压变质基性岩石包括高压基性麻粒岩和石榴单斜辉石岩, 遭受了从中压麻粒岩、高角闪岩相到低角闪岩相的退变质作用的改造。各阶段的变质条件一起构成一个早期近等温降压 (ITD) 和晚期降温、降压顺时针的  $PTt$  轨迹。根据退变质年龄和松树沟蛇绿岩残片, 可以推测北秦岭在中、晚元古宙时期, 曾经历了一次重大构造事件, 它可能代表了中、晚元古宙时期松树沟洋壳的俯冲消减和陆块间的碰撞, 地壳加积增厚, 形成区内高压变质岩石, 随后约在  $983 \pm 140\text{Ma}$  左右开始了快速抬升, 之后可能又受到  $450 \sim 400\text{Ma}$  期间构造热事件的进一步改造。这一变质演化历史过程的揭示, 对认识秦岭造山带的形成与演化有重要意义。

**致谢** 本文承蒙张国伟教授审阅, 并提出了重要的修改意见, 在此深表谢忱。

## 参 考 文 献

- 从柏林, 叶大年. 1981. 岩矿实验工作方法. 北京: 地质出版社, 271~292
- 叶凯, 徐平. 1992. 山东荣城大榭榴辉岩成因岩石学研究. 岩石学报, 8 (1): 27~39
- 安三元, 王当荣, 苏春乾. 1985. 陕西南秦岭群闪岩系的原岩恢复与多期变质作用. 中国区域地质, 13: 159~168
- 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆. 1986. 东秦岭造山带的变形特征及构造演化. 地质学报, 3: 237~247
- 刘良, 周鼎武. 1994. 东秦岭商南松树沟高压基性麻粒岩的发现及初步研究. 科学通报, 9 (17): 1599~1601
- 陈能松. 1989. 降压变质组合和降压变质反应特征及其判别. 地质科技情报, 8 (4): 21~29
- 陈能松, 韩郁青, 游振东. 1991. 豫西东秦岭造山带核部杂岩全岩 Sm-Nd、Rb-Sr 和单晶锆石  $^{207}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}$  计时及其地壳演化. 地球化学, 3: 219~227
- 李曙光, 陈移云, 张国伟等. 1991. 一个距今 10 亿年侵位的阿尔卑斯型微幔岩体: 北秦岭晚元古代板块构造体制的证据. 地质论评, 37 (3): 235~241
- 李曙光, 肖益林. 1994. 大别山杂岩中两类斜长角闪岩的矿物学鉴别标志及对榴辉岩成因的意义. 矿物学报, 14 (2): 115~122
- 李学燮, 康维国, 徐培苍. 1993. 河南大别山区榴辉岩及蓝晶石石英岩中柯石英的发现. 长春地质学院学报, 23 (3): 256~261
- 周鼎武, 张国伟. 1991. “秦岭群”的再解体和秦岭造山带中的晋宁运动. 见: 叶连俊, 钱祥麟, 张国伟主编, 秦岭造山带学术讨论会论文集. 西安: 西北大学出版社, 15~25
- 张本仁, 骆庭川, 高山等. 1991. 秦巴地区地壳的地球化学特征及造山带演化的某些问题. 秦岭造山带学术讨论会论文集. 西安: 西北大学出版社, 200~213
- 张宗清, 刘敦一, 付国民. 1991. 北秦岭变质地层同位素年代研究. 地质出版社
- 胡能高, 杨家喜, 王涛等. 1994. 松树沟地区一种高压变质岩-石榴单辉岩的发现及其意义. 见: 中国矿物学岩石学地球化学研究新进展. 兰州: 兰州大学出版社, 174~175

- 杨勇, 陈能松, 陆琦, 周文元. 1994. 松树沟榴闪岩中的石榴石和角闪石成分环带特征及岩石变质过程. 岩石学报, 10(4): 401~412
- 杨建军. 1991. 苏鲁榴辉岩及有关超基性岩. 地质出版社, 40~98
- 郭敬辉, 翟明国, 张毅刚等. 1993. 怀安蔓菁沟早前寒武纪高压麻粒岩混杂岩带地质特征、岩石学 and 同位素年代学. 岩石学报, 9(4): 329~341
- 翟明国, 郭敬辉等. 1992. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及初步研究. 中国科学(B), (12): 1325~1330
- 翟明国, 从柏林等. 1992. 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, 37(11): 1013~1015
- Ausrheim H. 1990. The granulite-eclogite facies transition: A comparison of experimental work and a natural occurrence in the Bergen Arcs, Western Norway. Lithos. 25: 163~169.
- Blundy J D and Holland T J B. 1990. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole plagioclase geothermometer. Contrib. Mineral Petrol., 104: 208~224
- Carswell D A. 1990. Eclogite facies rocks. New York, 1~200
- Chen N S, Yang Y and Zhou H W. 1993. High pressure metamorphism of garnet-amphibole rocks from Songshugou Area, eastern Qinling mountain and its tectonic implication. Journal of China University of Geosciences, 14(1): 36~45
- Ellis D J and Green DH. 1979. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. Contrib. Mineral Petrol., 71: 13~22
- Harley S L. 1984. The solubility of Alumina in Orthopyroxene coexisting with garnet in FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> and CaO-FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. J. Petrol., 25: 665~696
- Herley S L. 1985. Garnet-orthopyroxene bearing granulites from Enderby Land, Antarctica; metamorphic pressure-temperature evolution of the Archean Napier Complex. J. Petrol., 26: 819~856
- Harley S L. 1989. The origin of granulites; a metamorphic perspective. Geol. Mag., 126: 215~247
- Hensen. B J. 1976. The stability of pyrope-grossular garnet with excess silica. Contrib. Mineral Petrol., 55: 279~292
- Blundy J D and Holland T J B. 1990. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole plagioclase geothermometer. Contrib. Mineral Petrol., 104: 208~224
- Leake B E. 1978. Nomenclature of Amphiboles. Am. Mineral., 63: 1023~1052
- Messiga B. 1991. Retrograde P-T-t path for the Voltri eclogites (Ligurian Alps, Italy); some tectonic implications. J. Metamorphic Geol., 9: 93~109
- Newton R C and Perkins D. 1982. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz. Am. Mineral., 67: 203~222
- Perchuk L L. 1967. An analysis of the thermodynamic conditions of mineral equilibria in amphibole-garnet rocks. Izv An SSSR, Ser. Geol., (3): 57~83
- Plyusnina L P. 1982. Geothermometry and Geobarometry of plagioclase-hornblende bearing assemblages. Contrib. Mineral Petrol., 80: 140~146
- Sehenk V. 1984. Petrology of felsic granulite, metapelites, metabasics, ultramafics, and metacarbonates from southern Calabria (Italy); Prograde metamorphism, uplift and cooling of a former lower crust. J. Petrol., 25: 255~298
- Wells P R A. 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems. Contrib. Mineral Petrol., 62: 129~139
- Wood B J. 1974. The solubility of alumina in Orthopyroxene coexisting with garnet. Contrib. Mineral Petrol., 46: 1~15
- Wood B J and Banno S. 1973. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationship in simple and complex systems. Contrib. Mineral Petrol., 42: 109~124
- Wood B J and Hollway J R. 1984. A thermodynamic model for subsolidus equilibria in the system CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. Geochim. Cosmochim. Acta, 48(1): 159~176