http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

大别山南部黄镇—凉亭河一线宿松变质杂岩岩石学和峰期变质温压条件及与高压榴辉岩对比研究

石永红[1)]，林伟[2)]，王清晨[2)]

1）合肥工业大学资源环境工程学院，合肥，230009；

2）中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室，北京，100029

内容提要：通过对宿松变质杂岩的野外地质观测、岩相学和热力学评价及其峰期变质温压条件的空间变化特征的研究，并对比南大别高压单元研究结果，探讨宿松变质杂岩的岩石构成和变质特征。研究表明宿松变质杂岩自北向南可分为I、II和III三个带，主体仅经历了绿帘角闪岩相至角闪岩相的变质作用，温压范围为 $t=398\sim613$℃和 $p=0.61\sim1.53$GPa，平均温压值为 $\bar{t}=517$℃±50℃和 $\bar{p}=1.03\pm0.21$GPa。该变质杂岩未显示任何蓝片岩相的变质特征，其内部也没有温度分带或连续变化的趋势。对比南大别高压单元的峰期变质条件，它们压力差至少可达 $p=0.92$GPa，温度差可能在 $t=45$℃，两者应在构造作用下叠置在一起。

关键词：大别山南部；榴辉岩；石榴云母片岩 宿松变质杂岩；峰期变质温压条件

长期以来，对大别碰撞造山带精细的岩石学研究大多集中在南大别高压-超高压单元（Wang et al.，1992；Okay，1993；Carswell et al.，1997；Tabata et al.，1998；Rolfo et al.，2000，2004；Franze et al.，2001；Schmid et al.，2000，2003；Shi et al.，2006），而对于该造山带重要组成部分之一的宿松变质杂岩研究，人们关注的程度相对较低，研究也仅限于个别点上的岩石学和年代学分析（Liou et al.，1995；翟明国等，1995；魏春景等，1997；王清晨等，1999；Xie et al.，2001；Chen et al.，2003；江来利等，2003；陈燕等，2005；石永红等，2007）（图1），缺乏区域性的变质岩石学研究和分析。目前，对于宿松变质杂岩究竟经历何种级别的变质作用还存在不同认识：①张树业等（1988）、荆延仁等（1991）和刘雅琴等（1991，1999）根据宿松变质杂岩所含的“类白片岩”组合认为其经历了榴辉岩相的高压变质作用；②翟明国等（1995）则依据岩石组合判断其为绿帘角闪岩相变质；③魏春景等（1997）则根据对宿松变质杂岩中石榴角闪岩的 p-t 轨迹研究，认为其形成于蓝片岩和榴辉岩之间的过渡环境；④Liou等（1995）认为宿松变质杂岩主体为绿片岩相和角闪岩相变质，局部夹有蓝片岩相的变质砂岩，并且自北向南可分为500℃、430℃和300℃三个亚带。令人困惑的是其最终将宿松变质杂岩确定为高压蓝片岩带（Liou et al.（1995）的图2）。目前，Liou等（1995）的观点已为人们普遍接受和推崇（Xie et al.，2001；Chen et al.，2003；Zheng et al.，2003）。比较上述观点不难看出，尽管，张树业等（1988）、荆延仁等（1991）、刘雅琴等（1991，1999）、魏春景等（1997）和Liou等（1995）一致认为宿松变质杂岩经历了高压变质作用，但对其是蓝片岩相还是榴辉岩相的认识并不统一，而翟明国等（1995）研究也仅仅限于岩相学的观测。换言之，到目前为止人们对于宿松变质杂岩的变质程度并不十分明朗。此外，宿松变质带与南大别高压单元是何种关系也是十分模糊的。而这些基础地质问题的不确实直接影响到人们对大别碰撞造山带俯冲、折返机制的精细细节的认识。

基于这些问题，本次研究试图通过对黄镇-马庙-麻石沟-缺月岭-趾风乡一线和钓鱼台水库附近的宿松变质杂岩的区域变质岩石学的研究，评价其形成的峰期变质条件，探讨其空间变化规律。研究表明宿松变质杂岩仅经历了绿帘角闪岩相至角闪岩相的变质作用，其与南大别高压单元存在着明显的压力差异。

注：本文为国家自然科学基金项目（编号 40772039、40972051）资助的成果。

收稿日期：2008-12-15；改回日期：2009-05-20；责任编辑：郝梓国。

作者简介：石永红，男，1968年生。博士，副教授。通讯地址：230009，安徽省合肥市合肥工业大学资源环境工程学院；Email：yonghongshi3110@sohu.com。

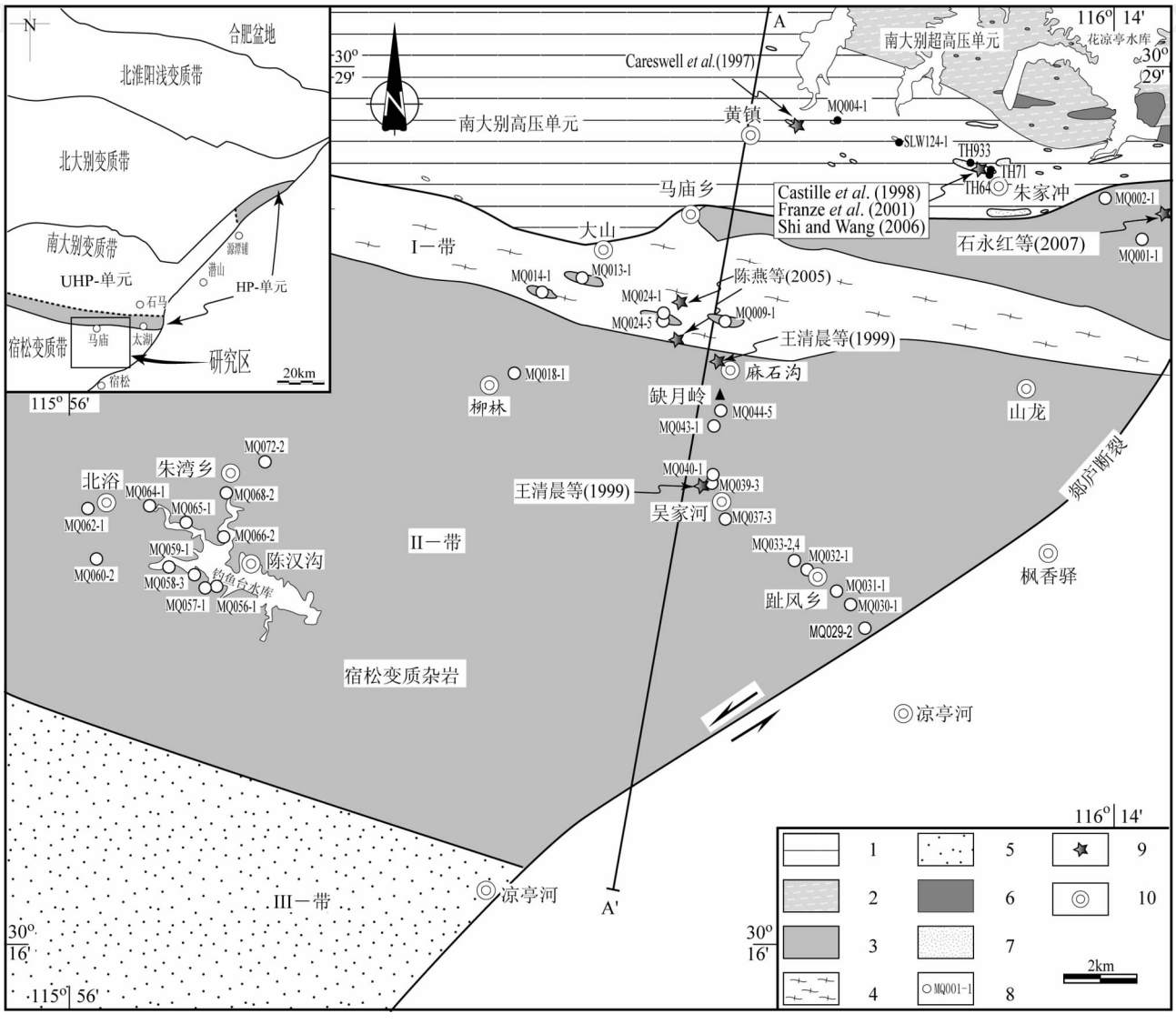


图 1 研究区地质概要图

Fig. 1 The Simplified geological map across the study area

1—黑云母片麻岩、片岩;2—石榴绿帘斜长片麻岩、花岗片麻岩;3—石榴云母片岩、片麻岩;4—花岗片麻岩;5—云母片岩、大理岩;6—超高压榴辉岩;7—高压榴辉岩;8—样品位置及样品号;9—前人分析样品;10—地名

1—Biotite gneisses and schists; 2—garnet-epidote plagioclase and granitic gneisses; 3—garnet mica schists and gneisses; 4—granitic gneisses; 5—mica schists and marble; 6—ultrahigh-pressure eclogites; 7—high-pressure eclogites; 8—location and number for samples; 9—samples from other authors; 10—villages

1 地质背景

本次研究选取大别碰撞造山带南部地区南大别变质单元和宿松变质杂岩的北部和中部块体进行研究(图 1)。野外研究和岩相学分析表明,研究区自北向南,分为三个单元(图 1):① 南大别超高压单元,其位于研究区东北角,花凉亭水库一带,主要为石榴绿帘黑云斜长片麻岩、花岗片麻岩,含超高压榴辉岩。② 南大别高压单元,其位于花凉亭水库以南,太湖-马庙断裂以北,主要为黑云母片麻岩、片岩,含高压榴辉岩。这两个单元前人已进行了大量细致的研究(Wang et al., 1992; Okay, 1993; Carswell et al., 1997; Castillie et al., 1998; 王清晨等, 1999; Franze et al., 2001; Shi and Wang, 2006),在此本文不予详述。③ 宿松变质杂岩,其位于太湖-马庙断裂以南地区,是本次研究的重点。根据岩性差异,该单元可进一步分为三个次级单元:

I-带:位于太湖-马庙断裂以南,缺月岭-山龙一线以北,主要为含磁铁矿-石榴石花岗片麻岩,面理产状为 155°∠45°~220°∠54°,线理变化较大 145°

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

∠31°～265°∠34°。并出露有呈层状产出,宽度在50～200m 的石榴角闪岩和石榴云母片岩(图 1 中 MQ013-1、MQ024-1、MQ024-5 和 MQ009-1 样品)。对于该套片麻岩,Liou 等(1995)曾认为其为“变质石英砂岩”,Xie 等(2001)和 Chen 等(2003)据此对该类岩石进行了锆石 U-Pb 定年。然而,本次研究的岩石学研究表明,所谓的“变质石英砂岩”应为正片麻岩。

II-带:其位于缺月岭-山龙一线以南,凉亭河以北,该带岩性出露复杂,主要有石榴云母片岩、石榴斜长角闪岩和钠长石云母片麻岩,其间也出露含磁铁矿-石榴石花岗片麻岩,并相互交错产出。面理产状变化较大,在麻石沟-缺月岭-吴家河-趾风乡一带面理为 195°∠51°～215°∠50°,细褶纹方位为 120°∠5°～210°∠34°;在北浴-朱湾乡-柳岭一线,面理由南南西倾向变为北倾,构成一个背形褶皱,线理为细褶纹,走向近东西,倾角近水平。

III-带:主体位于凉亭河西南,主要由云母片岩、大理岩和含磷岩系构成,其间夹有超基性岩块,面理倾向南或南南西。

2　岩相学研究

本次分析样品总计 32 块,其中宿松变质杂岩 27 块,样品主要为石榴石云母片岩和石榴角闪岩。同时,为了比较南大别高压单元中与宿松变质杂岩的关系,采集 5 块高压榴辉岩样品。矿物样品代号据据 Kretz(1983)Grt=石榴石;Omp=绿辉石;Coe=柯石英;Qtz=石英;Rt=金红石; Prg=韭闪石;Mg-Hbl=镁-普通角闪石;Ms=白云母;Bt=黑云母;Pl=长石;Ky=蓝晶石。其他矿物代号为:Amp=角闪石;Phn=多硅白云母;Op=不透明矿物。由于本文主要针对榴辉岩和宿松变质杂岩的峰期变质温压条件进行讨论和研究,故对于早期和晚期变质作用本文并未涉及。

2.1　高压榴辉岩

该类榴辉岩主要出露于南大别高压单元中,位于研究区黄镇-朱家冲附近(图 1),是典型的高压榴辉岩,前人对此进行过大量的研究和报导(Wang et al., 1992; Okay, 1993; Carswell et al., 1997; Castillie et al., 1998; Franze et al., 2001; Shi et al.,2006)。峰期矿物组合为石榴石+绿辉石+多硅白云母+蓝晶石+金红石+石英(图 2b),其中石榴石粒径为 0.5～5mm,多为自形-半自形,内部包裹有角闪石+金红石+石英+帘石早期矿物组合,并成环带状排布(图 2a),未见任何柯石英及其假象或超高压矿物,其边缘常形成韭闪石+钠长石+不透明矿物反应边(图 2a)。绿辉石多为他形或碎斑,粒径为 0.3～2mm,易形成透辉石+镁-普通角闪石+钠长石后成合晶(图 2b)。多硅白云母为他形-半自形,粒径为 0.1～3mm,常退变形成黑云母+钠长石后成合晶(图 2b)。蓝晶石较少见,多为他形-半自形,粒径为 0.1～1mm。金红石多为他形,粒径为 0.1～0.5mm,边缘具榍石退化变质边。

2.2　含石榴石花岗片麻岩

此类岩石主要分布于宿松变质岩中 I-带中(图 1)。其最显著的特征是含磁铁矿和石榴石,组成矿物主要为石榴石+白云母(少量)+帘石(极少)+微斜长石+斜长石+石英+磁铁矿(图 2c)。其中石榴石呈不规则形状或呈集合体形式存在,多为细小颗粒集合体,粒径为 0.1～0.5mm,偶见呈骨架状的大颗粒石榴石,其主要成分为钙铝榴石和铁铝榴石,镁铝榴石含量极低。白云母多为多硅白云母,呈半自形-自形,粒径为 0.1～3mm。帘石极少见,呈他形-半自形,粒径为 0.1～0.3mm。微斜长石呈他形,粒径为 0.5～5mm。斜长石多为钠长石,呈他形-半自形,粒径为 0.3～5mm。石英呈他形,粒径为 0.3～2mm。磁铁矿多呈自形-半自形,粒径为 0.3～0.6mm。此类片麻岩在南大别变质单元中也有大量出露,Carswell 等(2000)根据对其中残留的多硅白云母的 Si^{4+} 含量、金红石和石榴石成分变化特征的研究,认为该花岗片麻岩经历了超高压-高压变质作用。然而,根据此次研究结果显示,其并没有超高压-高压矿物出现,相应的温压条件估计也没有证实其经历了超高压-高压变质作用。此外,Liu et al.(2001)在对此类片麻岩中锆石包体的研究时,并没有任何超高压-高压矿物的发现。故本文将其归为宿松变质杂岩。

2.3　石榴云母片岩和石榴斜长角闪岩

这两类岩石常常伴生产出,主要分布于宿松变质杂岩 II-带中。石榴云母片岩主要由石榴石+白云母+黑云母+斜长石+石英+帘石+蓝晶石(极少量),其中石榴石多为自形,粒径为 0.3～8mm,内含石英+云母+磷灰石早期矿物包体,且呈环带状排列(图 2d)。白云母呈自形-半自形,粒径为 0.3～3mm。黑云母为他形-半自形,粒径为 0.5～5mm,常退变形成绿泥石。斜长石多为他形,粒径为 1～3mm,易绢云母化。帘石呈他形-半自形,粒径为0.1～0.8mm。蓝晶石极少见,仅在 MQ024-1 样品中见到(图 2f),呈他形,粒径为 0.5～3mm。这些矿物

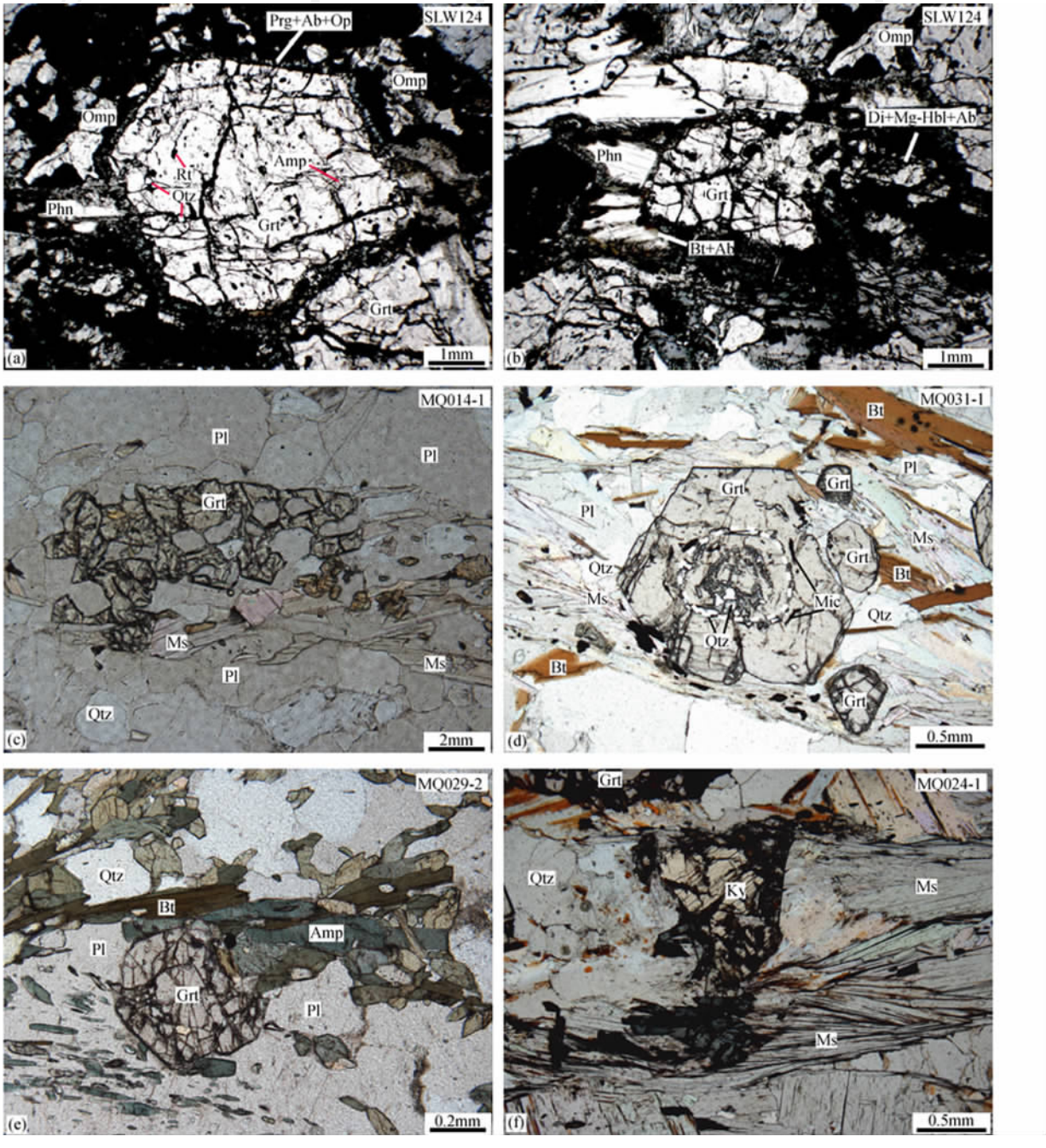


图 2 高压榴辉岩和宿松变质杂岩中含石榴石花岗片麻岩、石榴石云母片岩和石榴角闪岩显微结构图

Fig. 2 Microphotos for high-pressure (HP) eclogites and garnet-bearing granitic gneisses, garnet-mica schists, garnet amphibolite from Susong Group

(a)—高压榴辉岩中自形-半自形石榴石及包含早期矿物包体图，样品 SLW124；(b)—高压榴辉岩中石榴石＋绿辉石＋多硅白云母平衡结构图，样品 SLW124；(c)—含石榴石花岗片麻岩中石榴石＋白云母＋长石＋石英显微结构图，样品 MQ014-1；(d)—石榴石云母片岩中石榴石＋白云母＋黑云母＋长石＋石英平衡结构图，样品 MQ031-1；(e)—石榴石角闪岩中石榴石＋角闪石＋黑云母(少量)＋长石＋石英平衡结构图，样品 MQ029-2；(f)—含蓝晶石石榴石云母片岩中石榴石＋蓝晶石＋白云母＋石英平衡结构图，样品 MQ024-1

(a)—the subhedral-euhedral crystal of garnet with inclusion from earlier metamorphic stage in HP-eclogites, sample SLW124; (b)—the equilibrium texture of garnet＋omphacite＋phengite from HP-eclogite, sample SLW124; (c)—the texture of garnet＋muscovite＋feldspar＋quartz from garnet-bearing granitic gneisses, sample MQ041-1; (d)—the equilibrium texture of garnet＋muscovite＋biotite＋feldsarp＋quartz from garnet-mica schists, sampl MQ031-1; (e)—the equilibrium texture of garnet＋amphibole＋feldsarp＋quartz from garnet amphibolite, sample MQ029-2; (f)—the equilibrium texture of garnet＋muscovite＋kyanite＋quartz from kyanite-bearing garnet schists, sample MQ024-1

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

展示了平衡共生的结构特征。

石榴斜长角闪岩主要由石榴石＋斜长石＋角闪石＋石英＋帘石(少量)＋黑云母构成,并表现为平衡共生之特征(图 2e)。石榴石多为自形,粒径为 0.2～1mm,内含石英＋磷灰石早期矿物包体,且呈环带状分布。角闪石多为切尔马克闪石和铁切尔马克闪石,呈半自形-他形,粒径为 0.2～1mm。斜长石为他形,粒径为 0.2～2mm。石英呈他形粒状充填于矿物粒间,粒径为 0.1～1mm。帘石为半自形,粒径为 0.1～0.5mm。黑云母呈半自形-自形,粒径为 0.1～1mm,且易退变形成绿泥石。

3　主要矿物化学成分分析

本次研究的矿物成分测试分析由中国科学院地质与地球物理研究所电子探针分析实验室完成,仪器型号为 CAMECA SX51,工作条件为加速电压 15kV,电子束流 20nA。对于高压榴辉岩中的石榴石结构式按照 $\Sigma CaMnFe^{tot}MgAlTiCr = 5.00$ 进行计算,其中 $Ca + Mn + Fe^{2+} + Mg = 3.00$,$Al + Ti + Cr + Fe^{3+} = 2.00$,铁的校正是 $Fe^{3+} = 3.00 - (Al + Ti + Cr)$,$Fe^{2+} = Fe^{tot} - Fe^{3+}$。绿辉石的结构式按照 6 个氧和 4 个阳离子进行计算,铁的校正则遵从 Cawthron and Collerson(1974)的端员组分调铁法。多硅白云母的结构式则标准化至 $\Sigma SiAlTiCrFeMnMg = 12.00$。而宿松变质杂岩中石榴石云母片岩和石榴石斜长角闪岩中的石榴石、角闪石、白云母、黑云母和斜长石则根据 12、23、11、11 和 8 个氧计算,其中石榴石的 Fe^{2+} 依据电价平衡方法,角闪石的 Fe^{2+} 依据 Si＋Al＋Ti＋Mg＋Fe＋Mn＝13 进行计算。代表性矿物分析数据见表 1 和表 2。

3.1　高压榴辉岩中主要矿物成分特征

高压榴辉岩中石榴石具核、幔、边结构(图 3a),自核部至边部,X_{Mg} 明显增高,X_{Fe} 和 X_{Ca} 降低,X_{Mn} 则平缓变化,具有进变质环带特征。绿辉石则表现为退变质结构特征(图 3b),自核部至边部 Na^+ 和 Fe^{2+} 降低,Mg^{2+} 升高。多硅白云母同样显示退变结构特征(图 3c),由核部到边部,Si^{4+} 逐渐降低,Al^{3+} 逐渐增高,Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 较为平缓。

3.2　宿松变质杂岩中主要矿物成分特征

此次分析的宿松变质杂岩中的主要矿物为石榴石、白云母、黑云母、角闪石和斜长石,其中石榴石具有明显的环带结构特征(图 3d),可分为核、幔、边三个部分,自核部至边部 X_{Mg} 和 X_{Fe} 增高,X_{Mn} 降低,X_{Ca} 则相对平缓,其与高压榴辉岩中石榴石最明显的不同是锰铝榴石含量较高,镁铝榴石含量极低,但其同样反映了一个进变质环带特征。白云母的成分剖面则相对平缓(图 3e),没有明显的成分变化,只是自核部至边部的 Si^{4+} 离子数轻微降低 3.19→3.11,略具退变环带结构。黑云母中的 X_{Mg}、X_{Fe}、X_{Ti} 和 X_{AlVI} 则较为平滑(图 3f),没有显著的成分的改变,其可能未受到后期热事件的影响。角闪石则具有环带结构特征(图 3g),可分为核、边两个部分,由核至边 Al^{3+} 离子数明显增高,Ca^{2+}、Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 降低。根据角闪石 Al 压力计(Hammarstrom et al.,1986;Hollister et al.,1987;Johnson et al,1989;Schmidt,1992),其边缘应当反映的是一种峰期压力条件。据此,我们有理由认为该角闪石具有进变质环带结构。斜长石中的 X_{Na}、X_K 和 X_{Ca} 则相对平缓,成分较为均匀,表明该矿物未受到后期变质的影响。

4　峰期变质温压条件的估计及空间变化规律

依据岩相学和矿物化学成分的分析,本次研究对南大别高压单元中高压榴辉岩和宿松变质杂岩中石榴云母片岩和石榴斜长角闪岩的峰期变质温压条件进行评价。对于前者,由于高压榴辉岩峰期矿物组合为石榴石＋绿辉石＋多硅白云母＋蓝晶石＋石英。因此,可以应用 Krogh-Ravna & Terry(2004)的 Grt-Cpx-Phn-Ky-Qtz 地质温压计进行评价。同时,根据 Carswell et al.(1997)的建议,本文采用端员组分调铁法对绿辉石的 Fe^{2+} 进行校正(Cawthron & Collerson,1974)。至于宿松变质杂岩,因其具有石榴云母片岩和石榴斜长角闪岩两种,故应用不同的温压计。其中石榴云母片岩的峰期矿物组合为石榴石＋白云母＋黑云母＋斜长石＋石英,故应用了 Holdaway(2000)的 Grt-Bt 和 Wu 等(2006)Grt-Mus 温度计,Wu 等(2004)的 Grt-Bt-Pl-Qtz 和 Wu 等(2006)的 Grt-Mus-Pl-Qtz 压力计。而石榴斜长角闪岩组合为石榴石＋角闪石＋斜长石＋石英,故采用 Krogh(2000)Grt-Amp 温度计和 Kohn & Spear(1990)Grt-Amp-Pl 压力计。

在对各类岩石的峰期变质温压条件评价过程中,峰期矿物成分的正确选取是十分关键的,其选择的正确与否,直接影响到计算结果,进而影响到人们对地质事实的认识和理解。目前对于高压榴辉岩的峰期成分选择较为统一和成熟,根据Krogh-Ravna

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

表 1　高压榴辉岩中石榴石、绿辉石和多硅白云母代表性矿物成分(%)

Table 1　The representative compositions(%) for garnets, omphacites and phengites from high-pressure eclogites

矿物	石榴石							绿辉石							多硅白云母					
样品	MQ004-1	SLW124	SLW128	TH64	TH71	TH933		MQ004-1	SLW124	SLW128	TH64	TH71	TH933		MQ004-1	SLW124	SLW128	TH64	TH71	TH933
SiO_2	38.35	39.11	38.18	40.05	37.85	39.67		56.44	55.69	55.37	54.68	56.87	55.87		-	52.24	50.48	51.60	50.52	50.20
TiO_2	0.03	0.05	0.12	0.08	0.06	0.08		0.12	0.06	0.05	0.00	0.13	0.06		-	0.18	0.21	0.37	0.19	0.25
Al_2O_3	21.93	21.82	21.50	22.13	22.01	22.28		10.87	11.41	10.25	11.64	12.13	12.13		-	26.98	29.44	26.49	27.89	26.13
Cr_2O_3	0.00	0.05	0.00	0.08	0.06	0.00		0.03	0.04	0.02	0.04	0.08	0.02		-	0.06	0.04	0.08	0.04	0.00
FeO	26.89	26.92	28.02	23.12	26.42	24.80		5.21	7.47	6.62	3.44	5.43	4.16		-	2.60	1.66	1.88	1.96	2.42
MnO	0.60	0.35	0.32	0.43	0.29	0.61		0.00	0.04	0.00	0.07	0.05	0.04		-	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	6.20	7.82	5.14	8.86	6.57	9.00		7.65	5.85	7.36	8.74	7.10	7.45		-	4.02	3.36	3.96	3.41	3.62
CaO	6.78	5.25	6.68	6.33	6.88	5.54		11.93	9.02	11.76	12.92	10.66	11.57		-	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00
Na_2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		8.23	9.28	8.10	7.30	8.36	7.97		-	0.65	0.64	0.50	0.86	0.83
K_2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		-	9.69	10.08	10.21	10.29	9.71
总量	100.78	101.37	99.95	101.06	100.13	101.96		100.48	98.86	99.53	98.83	100.81	99.27		-	96.46	95.89	95.09	95.15	93.15
	X = 3, Y = 2							4 个阳离子；6 个氧原子							阳离子-A = 12.00					
Al	1.98	1.95	1.98	1.98	1.98	1.96	Si	1.98	1.99	1.97	1.95	1.99	1.98	Si		6.78	6.60	6.83	6.72	6.80
Ti	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	Al^{IV}	0.02	0.01	0.03	0.05	0.01	0.02	Al^{IV}		1.22	1.40	1.17	1.28	1.20
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Al^{VI}	0.43	0.47	0.40	0.43	0.49	0.49	Al^{VI}		2.91	3.14	2.97	3.08	2.97
Fe^{3+}	0.02	0.04	0.01	0.01	0.01	0.03	Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Ti		0.02	0.02	0.04	0.02	0.03
Sum Y	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	Fe^{3+}	0.14	0.18	0.18	0.12	0.07	0.07	Cr		0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Fe^{2+}	1.70	1.67	1.82	1.46	1.67	1.52	Fe^{2+}	0.02	0.05	0.01	-0.02	0.09	0.05	Fe^{2+}		0.28	0.18	0.21	0.22	0.27
Mn	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.04	Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Mn		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.71	0.88	0.60	1.00	0.75	1.00	Mg	0.40	0.31	0.39	0.46	0.37	0.39	Mg		0.78	0.66	0.78	0.67	0.73
Ca	0.56	0.43	0.56	0.51	0.56	0.44	Ca	0.45	0.35	0.45	0.49	0.40	0.44	Ca		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum X	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	Na	0.56	0.64	0.56	0.50	0.57	0.55	Na		0.16	0.16	0.13	0.22	0.22
							Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	K		1.61	1.68	1.72	1.74	1.68
							离子数	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	离子数		13.77	13.84	13.85	13.97	13.90
							Fe^{3+} = Na-(Al+Cr)	0.11	0.16	0.13	0.01	0.06	0.04							
							Fe^{2+}	0.04	0.06	0.07	0.09	0.09	0.08							

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

表 2　宿松群中石榴-云母片岩和石榴角闪岩中代表性矿物成分(%)

Table 2　Representative mineral compositions(%) for garnet-mica schist and garnet amphibolite from Susong Group

样品	MQ013-1			MQ040-1			MQ009-1		
矿物	石榴石	黑云母	长石	石榴石	白云母	长石	石榴石	角闪石	长石
SiO_2	37.30	36.65	64.20	37.03	47.88	62.67	37.04	41.47	63.15
TiO_2	0.12	2.48	0.00	0.08	0.51	0.02	0.08	0.16	0.00
Al_2O_3	21.11	16.48	23.23	20.31	30.40	23.83	20.89	15.94	24.01
Cr_2O_3	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.04	0.03	0.00
FeO	23.79	18.73	0.01	31.74	3.74	0.00	31.78	20.22	0.10
MnO	8.28	0.25	0.02	0.71	0.01	0.01	1.07	0.38	0.01
MgO	1.02	10.74	0.00	1.37	1.96	0.00	1.82	6.82	0.00
CaO	10.22	0.00	3.23	8.29	0.00	4.28	7.71	11.08	4.95
Na_2O	0.04	0.28	10.01	0.21	0.93	8.73	0.35	2.01	8.71
K_2O	0.00	9.75	0.05	0.00	9.79	0.13	0.00	0.44	0.09
总量	101.88	95.37	100.74	99.76	95.22	99.67	100.79	98.54	101.01
O	12.00	11.00	8.00	12.00	11.00	8.00	12.00	23.00	8.00
Si	2.93	2.79	2.81	2.98	3.22	2.78	2.94	6.14	2.77
Al^{IV}	0.07	1.21	1.20	0.02	0.78	1.24	0.06	1.86	1.24
Al^{VI}	1.89	0.27	0.00	1.90	1.63	0.00	1.89	0.92	0.00
Fe^{3+}	0.16	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.21	0.72	0.00
Ti	0.01	0.14	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	0.02	0.00
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe^{2+}	1.40	1.19	0.00	1.99	0.21	0.00	1.90	1.78	0.00
Mg	0.12	1.22	0.00	0.16	0.20	0.00	0.22	1.51	0.00
Mn	0.55	0.02	0.00	0.05	0.00	0.00	0.07	0.05	0.00
Ca	0.86	0.00	0.15	0.71	0.00	0.20	0.66	1.76	0.23
Na	0.01	0.04	0.85	0.03	0.12	0.75	0.05	0.58	0.74
K	0.00	0.95	0.00	0.00	0.84	0.01	0.00	0.08	0.01
总数	8.00	7.82	5.01	8.00	7.03	4.98	8.00	15.42	4.99

等(2004)的建议,并结合峰期矿物成分剖面的研究(图 3a、b、c),本文选取石榴石边部高 X_{Mg} 部分,绿辉石核部高 Na^+ 部分和多硅白云母核部高 Si^{4+} 部分,这些成分代表了温度压力最高值(Carswell et al.,1997;Holland,1980;Massonne et al.,1987,1989)。而对于宿松变质杂岩中石榴石云母片岩和石榴石斜长角闪岩的峰期成分的选择则较为困难,根据 Holdaway(2000)、Krogh(2000)、Kohn & Spear(1990)和 Wu et al.(2004,2006)的论述,他们在计算峰期温压时并未考虑矿物成分的变化,且假定主要矿物的成分未受到后期热事件的影响。但根据矿物成分剖面的精细研究表明(图 3d、e、f、g、h),石榴石、白云母和角闪石具有不同的环带结构特征,这意味着这些矿物受到了不同期次的热事件影响,从而增加了峰期成分选择的困难。

在此,为确保对这两类岩石峰期矿物成分选择的正确,我们遵循三个原则:(1)矿物对相近原则。即平衡矿物对彼此相邻,保证平衡的相邻矿物成分充分交换;(2)矿物成分与温压的关系。例如,多硅白云母中 Si^{4+} 与压力关系(Massonne et al.,1987,1989),角闪石中 Al 与压力关系(Hammarstrom et al.,1986; Hollister et al.,1987; Johnson et al,1989; Schmidt,1992),石榴石中 X_{Mg} 与温度关系(Carswell et al.,1997)。这里,本文选取代表最高温度压力的成分进行温压条件评价;(3)成分限制原则。根据 Holdaway(2000)和 Wu et al.(2004,2006)对 Grt-Bt 温度计、Grt-Bt-Pl-Qtz 压力计和 Grt-Mus-Pl-Qtz 压力计(Wu et al,2004,2006)的论述,他们认为在应用这些温压计时,石榴石、白云母、黑云母、斜长石都有一定的成分限制。当应用 Grt-Bt 温度计(Holdaway,2000)和 Grt-Bt-Pl-Qtz 压力计(Wu et al,2004)时,石榴石的 $X_{Grs}>3\%$,斜长石的 $X_{An}>17\%$,黑云母的 $^{Bt}_{Al}>3\%$;而应用 Grt-Mus 温度计(Wu et al,2006)和 Grt-Bt-Pl-Qtz 压力计(Wu et al.,2006)时,石榴石的 $X^{Grt}_{Fe}=0.53\sim0.81$,$X^{Grt}_{Mg}=0.05\sim0.24$;$X^{Grt}_{Mg}=0.03\sim0.23$,斜长石的 $X^{Pl}_{Ca}=0.17\sim0.74$,白云母的 $Fe=0.04\sim0.16$,$Mg=0.04\sim0.13$,$Al^{VI}=1.74\sim1.96$。只有在这些矿物成分范围内,计算的温压条件才较为可靠。

据此,本文遵循上述三个原则,选取石榴石边部

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

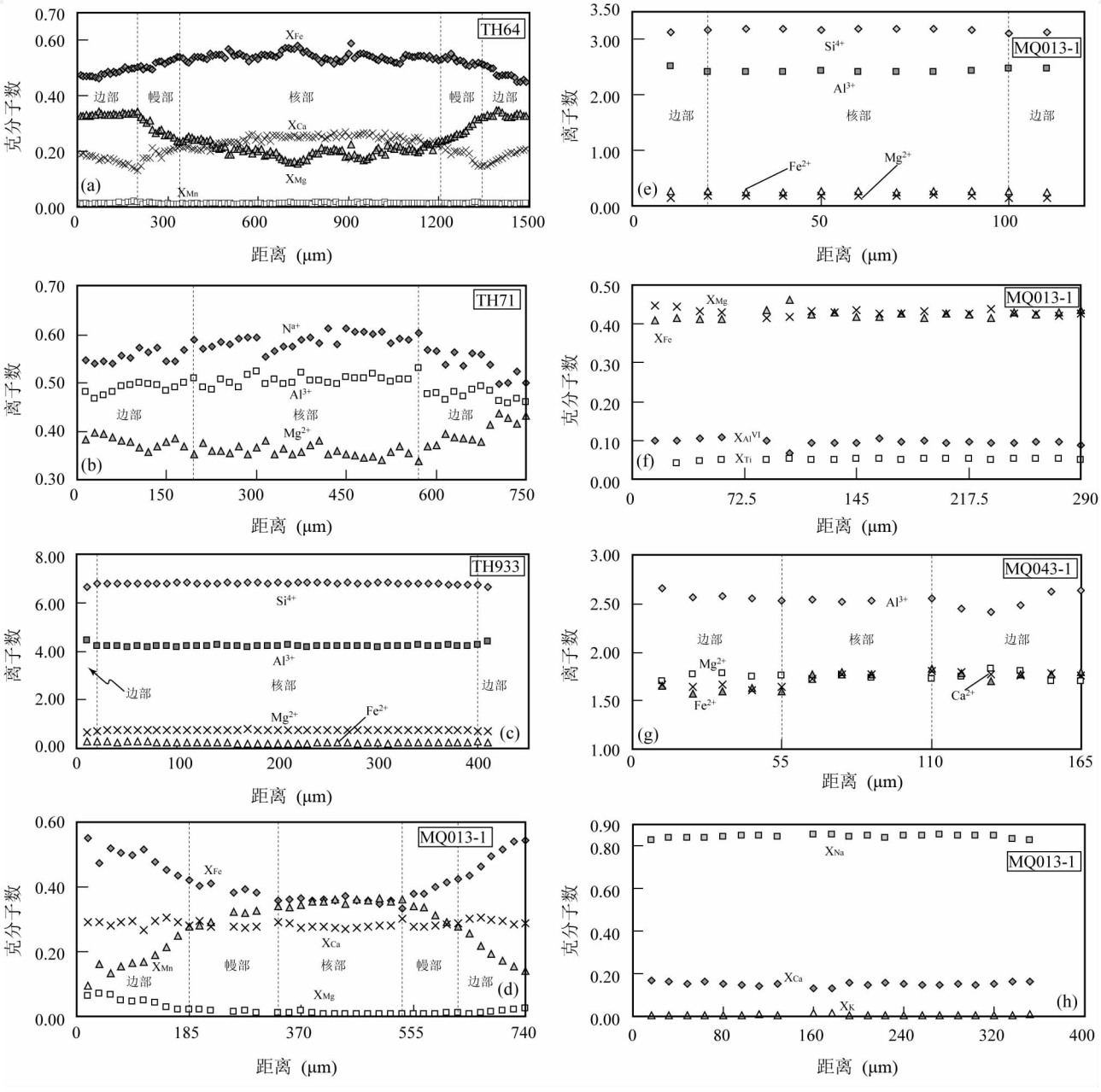


图 3 南大别高压单元高压榴辉岩和宿松变质杂岩中主要矿物成分剖面。(a)、(b)和(c)=南大别高压单元中高压榴辉岩的石榴石、绿辉石和多硅白云母成分剖面;(d)、(e)、(f)、(g)和(h)=宿松变质杂岩中石榴石、白云母、黑云母、角闪石和斜长石成分剖面

Fig. 3 Composition profile of main minerals for high-pressure eclogite from HP unit in the South Dabie terrane and Susong complex rocks. (a), (b) and (c)= composition profiles for garnet, omphacite and phengite in high-pressure eclogites from the HP unit in the South Dabie Terrane respectively; (d), (e), (f), (g) and (h)= composition profiles for garnet, muscovite, biotite, amphibole and feldspar from Susong complex rocks

的高 X_{Mg}^{Grt} 和 $X_{Ga}>3\%$ 作为峰期成分,从图 3d 可以看出,石榴石的 X_{Ga} 较为平缓,没有明显变化,而 X_{Mg}^{Grt} 则显示边部成分增高特征,说明石榴石边部成分应当是在最高温度压力条件下形成。而本次研究的白云母为多硅白云母,从 Si^{4+} 的变化可以看出(图 3e),边部的 Si^{4+} 较低,核部的 Si^{4+} 较高,故依据 Massonne et al. (1987,1989)的多硅白云母压力计,核部成分被选取,该成分反映的是压力最高值。角闪石则显示了边部 Al^{3+} 最高值(图 3g),根据角闪石 Al 压力计(Hammarstrom et al.,1986;Hollister et

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

al.,1987;Johnson et al,1989;Schmidt,1992),其代表了压力最大值,故角闪石边部成分被视为峰期成分。黑云母和斜长石则没有明显的成分变化,因此,根据相邻原则,其边部成分可作为峰期成分。此外,为了保证统计分析上的意义,每个样品选取 3～10 个矿物成分进行温压条件评价(多为 6 个矿物成分对)。峰期变质温压条件计算结果见表 3 和图 4。为了便于比较和讨论,本文将前人对高压榴辉岩和宿松变质杂岩的研究结果也投影到图 4 中。

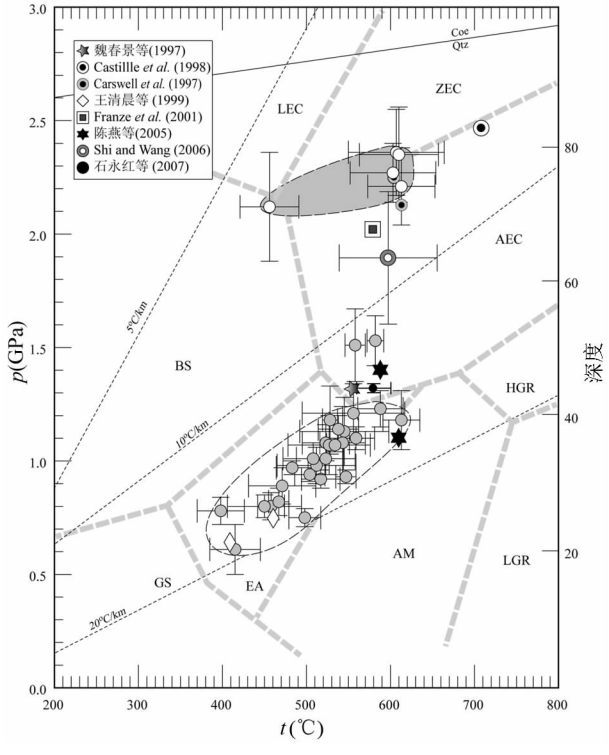


图 4　高压榴辉岩和宿松变质杂岩峰期变质温压条件图(变质相据 Oh et al.(1998)和 Ota et al.(2002),石英-柯石英相变线来自 Therm-ocalc 程序)

Fig. 4 The *p-t* plots for the peak metamorphic *p-t* conditions from high-pressure eclogites and Susong complex rocks. (Metamorphic facies from Oh et al. (1998) and Ota et al. (2002), the Quartz/Coesite transition from Thermocalc)

GS—绿片岩相;EA—绿帘-角山岩相;AM—角山岩相;LGR—低压麻粒岩亚相;HGR—高压麻粒岩亚相;BS—蓝片岩相;AEC—角山榴辉岩亚相;ZEC—黝帘石榴辉岩亚相;LEC—硬柱石榴辉岩亚相;○—高压榴辉岩;●—宿松变质杂岩

GS—Green-schist facies; EA—epidote-amphibolite facies; AM—amphibolite facies; LGR—low-pressure granulite subfacies; HGR—high-pressure granulite subfacies; BS—blueschist facies; AEC—amphibole eclogite subfacies; ZEC—zoisite-eclogite subfacies; LEC—lawsonite-eclogite subfacies; ○—high-pressure ecloites; ●—Susong complex rocks

表 3　南大别单元中高压榴辉岩和宿松群中云母片岩和石榴角闪岩峰期变质温压条件

Table 3　The peak metamorphic pressure (GPa)-temperature (℃) conditions for high-pressure eclogites from the South Dabie Unit and garnet-mica schists and garnet amphibolite from Susong Group

岩石类型	南大别高压榴辉岩				
样品号	T	P	Ts	Ps	方法
MQ004-1	456	2.12	35	0.24	1
SLW124	603	2.27	51	0.13	1
TH64	607	2.36	57	0.19	1
TH71	613	2.21	40	0.17	1
TH933	610	2.35	47	0.21	1
平均值	578	2.26	68	0.10	
岩石类型	宿松群中石榴石云母片岩和石榴角闪岩				
样品号	T	P	Ts	Ps	方法
MQ001-1	415	0.61	30	0.11	2 & 3
MQ002-1	613	1.18	22	0.13	2 & 3
MQ009-1	450	0.80	44	0.05	4 & 5
MQ013-1	545	1.13	53	0.15	2 & 3
MQ018-1	398	0.78	28	0.06	4 & 5
MQ024-5	498	0.75	19	0.04	2 & 3
MQ030-1	504	0.94	18	0.03	2 & 3
MQ031-1	517	0.92	23	0.04	2 & 3
MQ032-1	467	0.82	12	0.06	2 & 3
MQ033-2	458	0.80	16	0.06	2 & 3
MQ033-4	483	0.97	19	0.03	2 & 3
MQ037-3	559	1.10	22	0.05	2 & 3
MQ039-3	547	0.93	12	0.03	2 & 3
MQ040-1	543	1.08	27	0.16	6 & 7
MQ043-1	556	1.21	61	0.13	2 & 3
MQ044-5	523	1.01	35	0.07	2 & 3
MQ056-1	558	1.51	12	0.16	2 & 3
MQ057-1	534	1.07	10	0.03	2 & 3
MQ058-3	538	1.14	24	0.06	2 & 3
MQ059-1	528	1.18	9	0.15	2 & 3
MQ060-2	523	1.08	28	0.08	2 & 3
MQ062-1	588	1.23	27	0.08	2 & 3
MQ064-1	527	1.07	49	0.13	2 & 3
MQ065-1	512	0.98	47	0.08	2 & 3
MQ066-2	508	1.01	36	0.07	2 & 3
MQ068-2	582	1.53	10	0.11	2 & 3
MQ072-2	471	0.89	40	0.08	2 & 3
平均值	517	1.03	50	0.21	

注:1—Krogh-Ravna (2000) 石榴石-单斜辉石-蓝晶石-多硅白云母-SiO_2 温压计;2—Holdaway (2000)石榴石-黑云母温度计;3—Wu et al. (2004)石榴石-黑云母-长石-石英压力计;4—Krogh-Ravna (2004) 石榴石-角闪石温度计;5—Kohn and Spear (1990) 石榴石-角闪石-长石压力计;6—Wu and Zhao (2006)石榴石-白云母温度计;7—Wu and Zhao(2006) 石榴石-白云母-长石-石英压力计;Ts—温度标准偏差;Ps—压力标准偏差。

从表 3 可以看出,高压榴辉岩的峰期变质温压条件为:t=456～613℃和 p=2.12～2.36GPa,平均

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

温压为 $\bar{t}=578℃\pm68℃$ 和 $\bar{p}=2.26\pm0.10$GPa，其基本上落入角闪石榴辉岩亚相和黝帘石榴辉岩亚相范围内(图 4)，均位于石英/柯石英相变线之下，属于高压榴辉岩，地温梯度在 5℃/km 和 10℃/km 之间。石榴石云母片岩和石榴斜长角闪岩的峰期变质温压则为：$t=398℃\sim613℃$ 和 $P=0.61\sim1.53$GPa，平均温压值为 $\bar{t}=517℃\pm50℃$ 和 $\bar{p}=1.03\pm0.21$ GPa。除 MQ056-1 和 MQ068-2 样品外，分析样品均位于绿帘角闪岩相至角闪岩相范围，其地温梯度位于 10℃/km 和 20℃/km 之间(图 4)。不难看出，高压榴辉岩和宿松变质杂岩有明显的压力差异，这意味着南大别高压单元和宿松变质杂岩单元形成于不同的变质环境。

为了更为直观地分析高压榴辉岩和宿松变质杂岩的峰期变质温压条件在空间分布上的变化规律，本文编制了 G-T-P 图(图 5)，其中图 5a 是地质剖面和样品位置图，图 5b 和 5c 分别是峰期温度、压力对地理位置图。同时，根据各单元的平均温度、压力值并结合温压误差值，绘制了南大别高压单元和宿松变质杂岩峰期变质可能的温度和压力的变化范围。由图 5b 可以看出，宿松变质杂岩与南大别高压单元没有明显的温度差异，且其本身也没有温度分带的趋势，温度变化基本处于平均温度线 $\bar{t}=517℃\pm50℃$ 的附近。相反，压力差异在两个单元中表现明显(图 5c)。

5 讨论

尽管，人们对于宿松变质杂岩的形成条件存在多种认识(张树业等，1988；荆延仁等，1991；刘雅琴等，1991；Liou et al.，1995；翟明国等，1995；徐树桐等，2002；魏春景等，1997；王清晨等，1999；徐树桐等，2002)，但归纳起来主要有两种观点，一是翟明国等(1995)认为该杂岩形成于绿帘角闪岩相条件下；二是以 Liou 等(1995)为代表的学者认为宿松变质

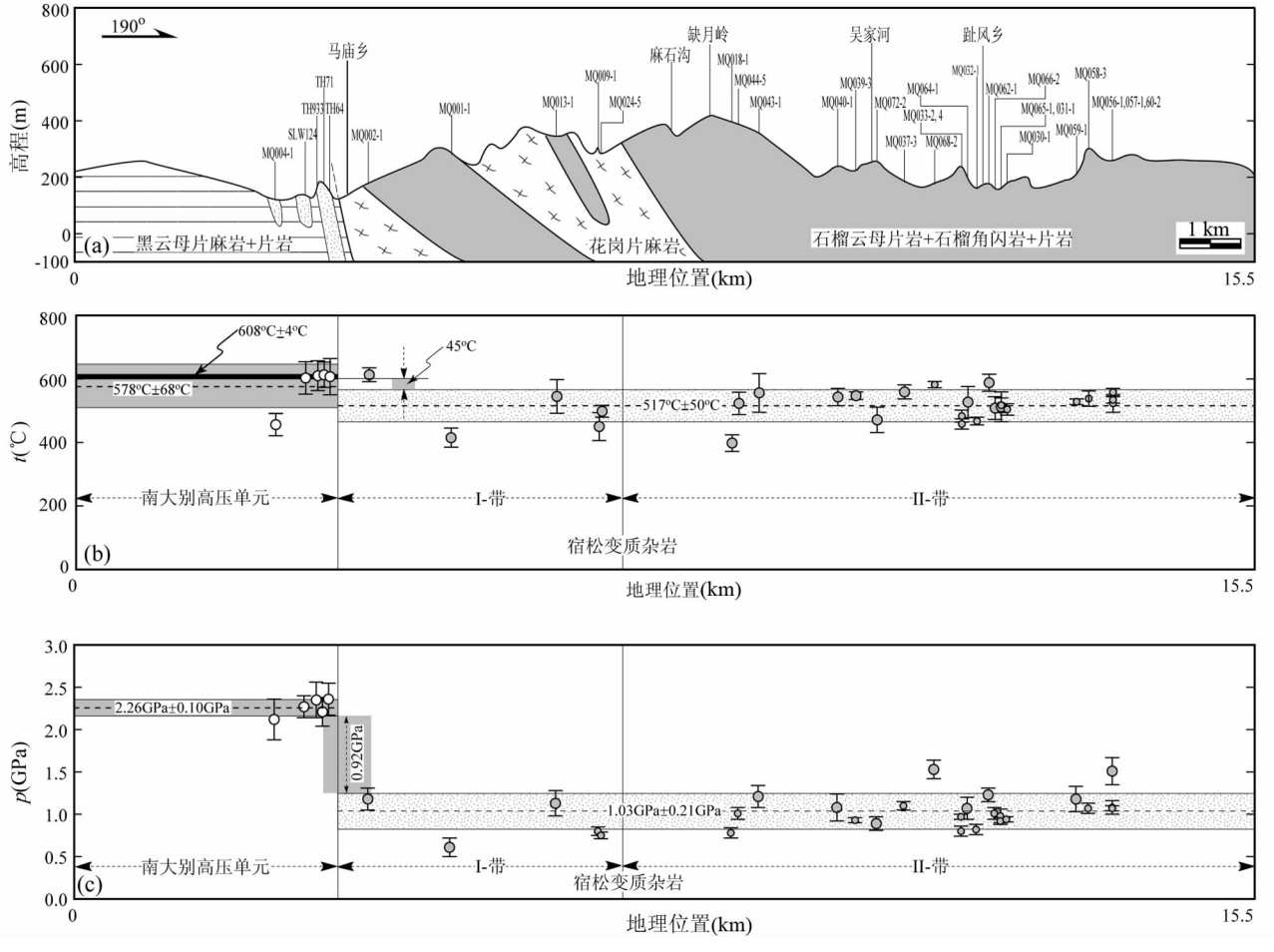


图 5 高压榴辉岩和宿松变质杂岩峰期变质温压条件空间变化图

Fig. 5 The variation plots of the peak *p-t* conditions for high-pressure eclogites and Susong complex rocks

(a)—地质剖面和样品位置图；(b)—峰期温度空间变化剖面；(c)—峰期压力空间变化图

(a)—Profile for geology and samples; (b)—profile for the peak temperature variation; (c)—profile for the peak pressure variation

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

杂岩形成于低温高压变质作用条件下,为蓝片岩相变质。且后一种观点已为人们普遍接受(Hacker et al.,2000;Xie et al.,2001;Chen et al.,2003;Zheng et al.,2003)。但根据 Ernst(1976)变质相在聚敛板片边缘分布的样式来看,作为蓝片岩相变质的宿松变质杂岩其应当位于大别碰撞造山带北缘,并非现今的南缘位置(图 1)。如果从不同变质级别的板片折返机制来看(Faure et al.,1999,2003;林伟等,2003,2005),作为蓝片岩相的宿松变质杂岩(Liou et al.,1995)也许可以在后期折返的构造过程中就位于现今的构造位置,但遗憾的是目前的岩石学研究并没有确证任何蓝片岩相特征矿物,如蓝闪石、硬柱石的存在。与此同时,我们注意到 Liou 等(1995)将宿松变质杂岩划归蓝片岩带时,也缺乏岩石学证据的支持,只是一个初步的探讨。

对照本次研究结果来看,宿松变质杂岩主要经历的是绿帘角闪岩相至角闪岩相的变质(表 3 和图 4),没有任何蓝片岩相变质作用的显示。尽管,样品 MQ056-1 和 MQ068-2 具有较高的压力,但它们也仅处于角闪石榴辉岩亚相范围(图 4),同时,岩相学研究也不支持宿松变质杂岩经历了蓝片岩相的变质作用的观点(Liou et al.,1995)。至于这两个样品为何压力较高,我们推测可能有两种原因:一是宿松变质杂岩可能有部分卷入了榴辉岩相变质作用,在回返过程中得以保留下来,这在魏春景等(1997)、徐树桐等(2002)和陈燕等(2005)的研究中得到证实;二是在峰期变质温压条件评价过程中,斜长石的 $X_{an}<17\%$,其成分超出了限定,可能导致压力偏高,推测实际压力可能略低一些(吴春明,私人交流)。然而,除 MQ056-1 和 MQ068-2 样品之外,宿松变质杂岩的主体部分应当形成于较低的温压环境(图 4),这与岩石学分析相吻合(图 2d、e、f),可能仅有小部分卷入更高一级的变质作用,但无论如何其没有蓝片岩相变质作用的印迹。

在宿松变质杂岩峰期变质温压条件的空间变化方面,其温度变化并没有明显的分带性(图 5b)。Liou 等(1995)曾认为的由北至南宿松变质杂岩分为 500℃、430℃和 300℃三个亚带的现象在我们的研究中并没有体现。从 T-G 图上可以看出(图 5b),由马庙至缺月岭到趾风乡,多数样品的温度变化处于 470～570℃之间,特别是位于南部的缺月岭到趾风乡一线,温度基本上处于 517℃±50℃平均线附近。同样,多数样品的峰期压力位于 1.03GPa±0.21GPa 平均压力线附近(图 5c),也没有压力分带现象。对比前人的研究来看(魏春景等,1997;王清晨等,1999;陈燕等,2005;石永红等,2007),宿松变质杂岩的变质温压范围为 410～610℃和 0.6GPa～1.4GPa,与本次结果基本一致(图 4),也不存在系统的分带现象。

对于宿松变质杂岩与南大别高压单元的关系前人论述的并不多,只是翟明国等(1995)指出两者以太湖-马庙断裂为界,但对它们的温压差异和俯冲状态并未进行细致的岩石学研究。本次研究表明,南大别高压单元中的高压榴辉岩峰期温压范围为 456～613℃和 2.12～2.36GPa(表 3 和图 4),除 MQ04-1 样品具有较低的温压之外,其形成的温压条件基本上在 600℃和 2.3GPa 左右,这与前人确定的 590～700℃和 2.0GPa～2.4GPa 的范围基本一致(Carswell et al.,1997;Castillie et al.,1998;Franze et al.,2001;Shi & Wang,2006)。宿松变质杂岩的温压范围 398℃～613℃和 0.61～1.53GPa(表 3 和图 4)。根据平均温压条件来看,两者的压力差异可达约 1.2GPa,即便排除两者的压力误差,压力差仍可达 0.92GPa(图 5c)。而温度差异则可达约 60℃,但若考虑到温度误差,两者之间并没有太大的温度差(图 5b),温度似乎是逐渐降低的。形成这种温度差异不显著的原因,可能是由于高压榴辉岩 MQ04-1 样品温压条件评价的不精确所致。由于该样品缺乏多硅白云母,故本文只能应用 Krogh-Ravna & Terry(2004)的石榴石-单斜辉石-蓝晶石-石英压力计和石榴石-单斜辉石温度计联合求解,但他们认为由于石榴石-单斜辉石-蓝晶石-石英压力计具有较大的负斜率,因此,其计算的温度和压力偏低,并且有较大的误差。加之榴辉岩分析样品点较少(仅 5 个),样品 MQ04-1 计算的不确定性直接影响到平均的温压值,从而使南大别高压榴辉岩和宿松变质杂岩的温度差不明显。如果将样品 MQ04-1 排除,南大别高压榴辉岩的平均温压值则分别为 $\bar{t}=608$℃±4℃(图 5b 中的粗黑线)和 $\bar{p}=2.30$GPa±0.07GPa。由此不难看出,南大别高压单元与宿松变质杂岩的温度差最低可达 45℃(图 5b)。此外,根据前述南大别高压榴辉岩(5～10℃/km)和宿松变质杂岩(10～20℃/km)形成的地温梯度差异来看,这两个单元明显形成于不同的变质环境,或者说形成于不同的深度环境,没有渐变的过渡关系存在(图 4)。这些证据表明这两个单元应分属于不同的 p-t 单元。然而,从年代学研究(Xie et al.,2001;Chen et al.,2003;陈道功等,2003;江来利等,2003;Li et

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

al.,2004)和构造背景(Faure et al., 1999,2003;林伟等,2003,2005)分析来看,这两个单元基本形成于同一时限和同一构造环境中。对此,我们认为这可能是由于处于同一碰撞事件中的俯冲板片,在折返过程中因不同层次、不同深度的拆离和解耦所致。从构造位置来看,宿松变质杂岩位于扬子俯冲板片的后缘,相应的其俯冲深度较浅,并未如前导板片那样经历深度的俯冲。当俯冲板片开始折返时,拆离、解耦的更深层次的板片向地表回返,并在某一深度与宿松变质杂岩构造并置,从而造成南大别高压单元与宿松变质杂岩之间较大的温压差异和地温梯度的不同。

6 结论

(1) 根据岩相学、矿物成分分析和变质温压条件估计,宿松变质杂岩主体仅经历了绿帘角闪岩相-角闪岩相的变质作用,没有发现任何蓝片岩相存在的印迹。同时,结合野外地质调查和岩石组合研究表明,宿松变质杂岩内部仅存在岩性分带现象,其自北向南可分为 I、II、III-带,其中 I、II-带温度基本一致,并没有温度分带现象。

(2) 根据南大别高压榴辉岩和宿松变质杂岩峰期变质温压条件空间变化规律的研究表明,两者存在有明显的温压差异,压力差可达 0.92GPa,温度也许为 45℃。

致谢:本研究成文过程中得到吴春明教授和陈意博士热忱的帮助和建设性的意见。电子探针分析得到毛骞博士和马玉光工程师的帮助,在此谨向他们表示由衷的感谢。

参 考 文 献

陈燕, 魏春景, 张景森, 初航. 2005. 大别山南部高压-超高压变质地体中云母片岩和片麻岩的相平衡研究. 岩石学报, 21 (6): 1657～1668.

陈道公, Deloule E, 程昊, 夏群科, 吴元保. 2003. 南大别黄镇低温榴辉岩多同位素体系年代学研究. 中国科学 D 辑, 33 (9): 828～840.

江来利, 吴维平, 刘贻灿, 李惠民. 2003. 大别山南部宿松杂岩的 U～Pb 和 Ar～Ar 角闪石年龄及其地质意义. 岩石学报, 19 (3): 497～505.

荆延仁, 张良田, 毕治国, 张树业, 乔兰勇, 梁万通. 1991. 安徽太湖一带白片岩的发现及其地质意义. 地质论评, 37 (2): 131～134.

江来利, 吴维平, 刘贻灿, 李惠民. 2003. 大别山南部宿松杂岩的 U-Pb 和 Ar-Ar 角闪石年龄及其地质意义. 岩石学报, 19 (3): 497～505.

林伟, 王清晨, Faure M, 孙岩, 舒良树, Scharer U. 2003. 大别山变形期次和超高压变质岩折返的动力学. 地质学报, 77 (1): 44～54.

林伟, 王清晨, 石永红. 2005. 大别山-苏鲁碰撞造山带构造几何学、运动学和岩石变形分析. 岩石学报, 21 (4): 1195～1214.

刘雅琴, 张树业, 乔兰勇. 1991. 华中陆壳高压变质带类白片岩的岩石矿物特征. 地质论评, 37 (4): 348～354.

刘娅琴, 胡克. 1999. 中国中部高铝超高压变质岩. 岩石学报, 15 (04): 548～556.

石永红, 林伟, 王清晨. 2007. 大别山太湖地区宿松变质杂岩中石榴斜长角闪岩 *p-t* 轨迹及反映的俯冲过程. 地质科学, 42 (3): 518～531.

王清晨, 从柏林, Massonne H. J. 1999. 大别山太湖-马庙断裂带两侧变质地体的增温变质作用. 岩石学报, 15 (3): 339～349.

魏春景, 单振刚. 1997. 安徽省大别山南部宿松杂岩变质作用研究. 岩石学报, 13 (3): 356～368.

徐树桐, 刘贻灿, 江来利, 吴维平, 陈冠保. 2002 年. 大别山造山带的构造几何学和运动学. 合肥:中国科学技术大学出版社, 48～53.

翟明国, 从柏林, 陈晶, 王清晨. 1995. 大别山区变质岩中蓝晶石的几种退变质及其所指示的动力学过程. 岩石学报, 11 (3): 257～272.

张树业, 胡克, 刘晓春, 乔兰勇. 1988. 中国中部元古代蓝片岩-白片岩-榴辉岩-古陆内板块碰撞带的三位一体特征. 长春地质学院学报 (皖鄂蓝片岩带地质专辑). 152～157.

Carswell D A, Wilson R N, Zhai M. 2000. Metamorphic evolution, mineral chemistry and thermobarometry of schists and orthogneisses hosting ultra-high pressure eclogites in the Dabieshan of central China. Lithos, 52: 121～155.

Carswell D A, O´Brien P J, Wilson R N, Zhai M G. 1997. Thermobarometry of phengite-bearing eclogites in the Dabie Mountains of Central China. J. Metamorphic. Geol., 15: 239～252.

Castelli D, Rolfo F, Compagnoni R, Xu S T. 1998. Metamrophic veins with kyanite and quartz in the Zhu-Jia-Chong, Dabie Shan, China. The Island Arc, 7: 159～173.

Cawthron R G, Collerson K D. 1974. The recalculation of pyroxene end-member parameters and estimation of ferrous and ferric iron content from electron microprobe analyses. American Mineralogist, 59: 1023～1208.

Chen F K, Siebe W, Guo J H, Cong B, Satir M. 2003. Late Proterozoic magmatism and metamorphism recorded in gneisses from the Dabie high-pressure metamorphic zone, eastern China: evidence from zircon U-Pb geochronology. Precambrian Research. 120: 131～148.

Chen Y, Wei C J, Zhang J S, Chu H. 2005. Phase equilibria of mica-schist and gneisses in the HP-UHP belt of southern Dabie Shan. Acta Petologica Sinica, 21 (6): 1657～1668.

Ernst W G. Petrologic Phase Equilibria. W. H. Freeman, San Francisco. 1976.

Faure M, Lin W, Scharer U, Shu L, Sun Y, Arnaud N. 2003. Continental subduction and exhumation of UHP rocks. Structural and geochronological insights from the Dabieshan (East China). Lithos, 70: 21～241.

Faure M, Lin W, Shu, L, Sun Y, Scharer U. 1999. Tectonics of the Dabieshan (eastern China) and possible exhumation mechanism of ultra high-pressure rocks. Terra Nova, 11 (6): 251～258.

Franz L, Romer R L, Klemd R, Schmid R, Oberhanshi R, Wagner T, Dong S. 2001. Eclogite-facies quartz veins within

http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx

metabasites of the Dabie Shan (eastern China): pressure-temperature-time-deformation path, composition of the fluid phase and fluid flow during exhumation of high-pressure rocks. Contribution Minerals Petrology, 141: 322～346.

Hammarstrom J M, Zen E-an. 1986. Aluminum in hornblende: an empirical geobarometer. America Mineralogist, 71: 1297～1313.

Harker B R, Ratschbacher L, Webb L, McWilliams M O, Ireland T, Calvert A, Dong S, Wenk H R, Chateigner D. 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing. Journal of Geophysical research, 105: 13339～13364.

Holdaway M J. 2000. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet biotite geothermometer. Am. Mineral., 85: 881～892.

Holland T J B. 1980. The reaction albite = jadeite + quartz determined experimentally in the range 600～1200℃. American Mineralogist, 65: 125～134.

Hollister L S, Grisson G C, Peters, E K, Stowell, H H, Sisson V B. 1987. Confirmation of the empirical correlation of aluminum in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline pluton. America Mineralogist, 72: 231～239.

Jiang L L, Wu W P, Liu Y C, Li H M. 2003. U-Pb zircon and Ar-Ar hornblend ages of the Susong complex of the southern Dabie orogen and their geological implication. Acta Petrologica Sinica, 19 (3): 497～505.

Jing Y R, Zhang L T, Bi Z G, Zhang S Y, Qiao L Y, Liang W T. 1991. The discovery of whiteschists in Taihu area in Anhui province and its geological significance. Geological Review, 37 (2): 131～134.

Johnson W, Rutherford M J. 1989. Experimental calibration of the aluminum in hornblende geobarometer with application to Long Valley Caldra (California) volcanic rocks. Geology, 17: 837～841.

Kohn M J, Spear F S. 1990. Two new geobarometers for garnet amphibolites, with application to southeastern Vermont. American Mineralogist, 75: 89～96.

Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming minerals. American Mineralogist, 68: 277～279.

Krogh-Ravna E. 2000. Distribution of Fe2 + and Mg between coexisting garnet and hornblende in synthetic and natural systems: an empirical calibration of the garnet－hornblende Fe－Mg geothermometer. Lithos, 53: 265～277.

Krogh-Ravna E J, Terry M P., 2004. Geothermobarometry of UHP and HP eclogites and schists an evaluation of equilibria among garnet clinopyroxene kyanite phengite coesite/quartz. Journal of Metamorphic Geology. 22: 579～592.

Li X P, Zheng Y F, Wu Y B, Chen F U, Gong B, Li Y L. 2004. Low-T eclogite in the Dabie terrane of China: petrological and isotopic constraints on fluid activity and radiometric dating. Contribution Minerals Petrology, 148 (4): 443～470.

Lin W, Wang Q C, Shi Y H. 2005. Architecture, kinematics and deformation analysis in Dabie-Sulu collision. Acta Petrologica Sinica, 21 (4): 1195～1214.

Lin W, Wang Q C, Faure M, Sun Yan, Shu L S, Scharer U. 2003. Different deformation stages of the Dabieshan Mountains and UHP rocks exhumation mechanism. Acta Geologica Sinica, 77 (1): 44～45.

Liou J G, Wang Q, Zhang R Y, Zhai M, Cong B. 1995. Ultrahigh-P metamorphic rocks and their associated lithologies from the Dabie Mountains, Central China: a field trip guide to the 3rd international eclogite field symposium. Chinese Science Bulletin, 40 (supplement): 1～40.

Liu J B, Ye K, Maruyama S. 2001. Mineral inclusions in Zircon from Gneisses in the Ultrahigh－pressure Zone of the Dabie Mountains, China. Journal of Geology, 109: 523～535.

Liu Y Q, Hu K. 1999. Ultra-high-pressure metamorphic rocks of aluminlum-rich in central Chian. Acta Petrologica Sinica, 15 (4): 548～556.

Liu Y Q, Zhang S H, Qiao L Y. 1991. Petrology and mineralogy of quasi-whiteschists in the high-pressure metamorphic belt of the continental crust in central China. Geological Review, 37 (4): 358～354.

Massonne H J, Schreyer W. 1987. Phengite geobarometry based on the limiting assemblage with K-feldspar, phlogopite, and Quartz. Contrib. Mineral. Petrol, 96: 21～224.

Massonne H-J, Schreyer W. 1989. Stability field of the high pressure assemblage talc + phengite and two new phengite barometers. European Journal of Mineralogy, 1: 391～410.

Oh C W, Liou, J G. 1998. A petrogenetic grid for eclogite and related facies under high-pressure metamorphism. Island Arc, 7: 36～51.

Okay A I. 1993. Petrology of a diamond and coesite-bearing metamorphic terrain: Dabie Shan, China. Eur. J. Mineral, 5: 659～675.

Ota T, Maruyama M, Parkinson C D, Masago H. 2002. Thermobaric structure of the Kokchetav massif from a north south transect in the Kulet and Saldat-Kol regions. In: The Diamond-Bearing Kokchetav Massif, Kazakhstan (eds Parkinson C D, Katayama I, Liou J G and Maruyama S.), Universal Academy Press, Inc. Tokyo, Japan. pp: 283～319.

Rolfo F, Compagnoni R, Wu W, Xu S T. 2004. A coherent lithostratigraphic unit in the coestie-eclogite complex of Dabie Shan, China: geologic and petrologic evidence. Lithos, 73: 71～94.

Rolfo F, Compagnoni R, Xu S T, Jiang L. 2000. First report of felsic whiteschist in the ultrahigh-pressure metamorphic belt of Dabie Shan, China. Eur. J. Mineral, 12: 883～898.

Schmid R, Wilke M, Oberhansli R, Janssensb K, Falkenberg G, Franz L, Gaab A. 2003. Micro-XANES determination of ferric iron and its application in thermobarometry. Lithos, 70: 381～392.

Schmid R., Franz L., Oberhansli R, Dong S W., 2000. High-Si phengite, mineral chemistry and *p-t* evolution of ultra-high-pressure eclogites and calc-silicates from the Dabie Shan, eastern China. Geological Journal. 35: 185～207.

Schmidt M W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. Contrib. Mineral. Petrol. 110: 304～310.

Shi Y H, Lin W, Wang Q C. 2007. *p-t* path of garnet amphibolites from the Susong metamorphic complex across Taihu area in the Dabie Mountains, and its implications for seduction. Chinese Journal of Geology, 42 (2): 518～531.

Shi Y H, Wang Q C. 2006. Variation in peak P-T conditions across the upper contact of the UHP terrane, Dabieshan, China:

gradational or abrupt? J Metamorphic Geol, 24: 803～822.

Tabata H, Maruyama S, Shi Z. 1998. Metamorphic zoning and thermal structure of the Dabie ultrahigh-pressure-high-pressure terrane, central China. The Island Arc, 7: 142～158.

Wang Q C, Cong B L, Massonne H J. 1999. Temperature-increase metamorphism along the south boundary of the Dabie eclogite terrain. Acta Petrologica Sinica, 15 (3): 339～349.

Wang X, Liou J G, Shigenori Maruyama. 1992. Coesite-Bearing Eclogites from the Dabie Mountains, Central China: Petrogenesis, *p-t* Paths, and Implication for Regional Tectonics. J. Geol, 100: 231～250.

Wei C J, Shan Z G. 1997. Metamorphism of the Susong complex from the southeren Dabie Mountains, Anhui province. Acta Petrologica Sinica, 13 (3): 356～368.

Wu C M, Zhang J, Ren L D. 2004. Empirical Garnet Biotite Plagioclase Quartz (GBPQ) Geobarometry in Medium-to High-Grade Metapelites. Journal of Petrology, 45 (9): 1907～1921.

Wu C M, Zhao G C. 2006. Recalibration of the Garnet Muscovite (GM) Geothermometer and the Garnet Muscovite Plagioclase Quartz (GMPQ) Geobarometer for Metapelitic Assemblages. Journal of Petrology, 47 (12): 2357～2368.

Xie Z, Chen J E, Zheng Y F, Zhang X, Li H M, Zhou T X. 2001. Physics and Chemistry of the Earth. 20: 685～693.

Xu S T, Liu Y C, Jiang L L, Wu W P, Chen G B. 2002. Architecture and Kinematics of the Dabie Mountains Orogen. University of Science and Technology of China Press, Heifei, China, pp: 48～53.

Zhai M G, Cong B L, Chen J, Wang Q C. 1995. Some retrograde metamorphic reactions in metamorphic rocks in Dabie mountains, central China and their implication for metamorphic kinetics. Acta Petrolgogica Sinica, 11 (3): 257～272.

Zhang S Y, Hu K, Liu X C, Qiao L Y. 1989. The characteristics of proterozoic blueschist-whiteschist-eclogite in central China: a trinity of ancient intercontinental collapsion-collision zone. Journal of Changchun University of earth science (Special issue of blueschist belt in Hubei and Anhui province), 152～157.

Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu Orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. Earth Sci Rev, 62: 105～161.

Petrology and Peak *p-t* Conditions of Susong Metamorphic Complex in the Huangzhen-Liangtinghe Area in the Southern Dabie Mountain and Comparison with high-Pressure Eclogites

SHI Yonghong[1)], LIN Wei[2)], WANG Qingchen[2)]

1) *Hefei University of Technology, School of Resources and Environment Engineering, Hefei, Anhui*, 230009;

2) *State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing*, 100029

Abstract

Based on the field geological survey, lithography and thermodynamics evaluation, and *p-t* condition change of peak metamorphism in the Susong metamorphic complex (SSC), this study discussed the lithological compositions and metamorphic features of the Susong metamorphic complex (SSC). The results indicate that the Susong complex can be divided into three zones from north to south, with epidote-amphibolite to amphibolite facies as the main metamorphism. The temperature and pressure ranged from 398 to 613℃ and 0.61～1.53GPa, respectively, with average *p-t* conditions of 517℃±50℃ and 1.03±0.21GPa. But the metamorphic complex does not show any characteristics of glaucophane facies and temperature zonation or gradual temperature trend within the complex. Compared with the peak *p-t* conditions of the HP-unit from the South Dabie Terrane, differences of time and temperature between the SSC and HP-unit from the South Dabie Terrane is at least 0.92 GPa and 45℃ gap, indicating the SSC and HP-unit from the South Dabie Terrane should be juxtaposed under tectonic activity.

Key words: the southern part of Dabie Mountains; eclogites; garnet-mica schists; Susong metamorophic complex rocks; the peak metamorphic *p-t* conditions