

新疆西南天山哈布腾苏河高压-超高压变质带中 榴辉岩和蓝片岩的岩石学及变质演化

施建荣, 刘福来, 刘平华, 孟恩, 刘超辉, 杨红, 王舫, 蔡佳

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要:对西南天山哈布腾苏河一带出露的典型榴辉岩和蓝片岩进行了详细的岩相学、矿物化学和温压条件综合研究。榴辉岩可分为蓝闪石榴辉岩、钠云母榴辉岩、绿帘石榴辉岩和蓝闪石榴角闪岩(退变榴辉岩)4类,蓝片岩可分为含蓝闪石榴白云母钠长片岩、石榴白云母蓝闪片岩和石榴白云母蓝闪石英片岩3类。新鲜榴辉岩主要矿物组合为石榴石+绿辉石+钠云母+绿帘石,退变榴辉岩则为石榴石+蓝闪石+角闪石,蓝片岩主要矿物组合为石榴石+蓝闪石+多硅白云母+钠云母+钠长石+石英。榴辉岩和蓝片岩中石榴石变斑晶均保存进变质生长环带,从核部到边部 X_{Mn} 和 X_{Fe} 降低, X_{Mg} 和 X_{Ca} 升高,指示了升温进变质的演化过程。根据榴辉岩矿物共生组合、石榴石内部包体组合分布特征及传统地质温压计估算结果,确定榴辉岩经历了4阶段的变质演化:早期硬柱石蓝片岩相进变质阶段、峰期榴辉岩相变质阶段($t=543\sim 579^{\circ}\text{C}$, $p=1.5\sim 1.6\text{ GPa}$)、峰后绿帘蓝片岩相退变质阶段($t\sim 450^{\circ}\text{C}$, $p<1.0\text{ GPa}$)和晚期蓝闪绿片岩相退变质阶段($t<400^{\circ}\text{C}$, $p<0.5\text{ GPa}$)。利用 $p-T$ 视剖面图计算的榴辉岩、蓝片岩峰期变质温压条件与传统地质温压计估算结果十分相近,其中榴辉岩的峰期变质条件 $t=520\sim 550^{\circ}\text{C}$, $p=1.7\sim 1.9\text{ GPa}$;蓝片岩峰期变质条件 $t=520\sim 620^{\circ}\text{C}$, $p=1.7\sim 2.3\text{ GPa}$ 。本文估算的榴辉岩峰期变质压力条件与前人根据柯石英的发现而认为研究区部分榴辉岩及其围岩曾经历超高压变质作用的认识明显相悖,原因可能如下:①后期退变质作用引起研究区榴辉岩全岩成分、矿物化学成分的调整,在采用Grt-Cpx-Phe温压计和以全岩成分为基础的相平衡模拟方法估算峰期温压条件时受到影响,从而使估算峰期压力条件普遍偏低;②西南天山的榴辉岩可能并非全都经历了超高压变质作用,高压、超高压榴辉岩可能分别代表了不同变基性岩块在不同俯冲深度变质的产物。

关键词:榴辉岩;蓝片岩; $p-T$ 视剖面图;哈布腾苏;西南天山

中图分类号:P588.3

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2014)01-0029-22

Petrologic characteristics and metamorphic evolution of eclogites and blueschists from the high- to ultrahigh-pressure metamorphic belt in Habutengsu Valley, southwestern Tianshan, Xinjiang

SHI Jian-rong, LIU Fu-lai, LIU Ping-hua, MENG En, LIU Chao-hui, YANG Hong, WANG Fang and CAI Jia

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Eclogites and blueschists are exposed mainly as slices or variable tectonic lenses within garnet phengite schists in Habutengsu area, southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang. In this paper, petrography, mineralogical chemistry and $p-T$ conditions of the eclogites and blueschists were studied in detail. The eclogites could

收稿日期:2013-10-20;修订日期:2013-12-13

基金项目:中国地质调查局工作项目(1212011121276);国家杰出青年科学基金(40725007);创新研究群体科学基金项目(40921001);国土资源部公益性行业科研专项项目(201011034)

作者简介:施建荣(1983-),男,博士生,变质岩石学专业,E-mail:shijianrong13@163.com.

be divided into four groups, i. e., glaucophane eclogites, paragonite eclogites, epidote eclogites, and glaucophane-garnet amphibolites (retrograde eclogites), whereas blueschists could be divided into three groups, namely glaucophane-bearing garnet-muscovite-albite schists, garnet-muscovite-glaucophane schists and garnet-muscovite-glaucophane-quartz schists. Major mineral assemblages are Grt + Omp + Pg + Ep for the fresh eclogites, Grt + Gln + Amp for the retrograde eclogites, and Grt + Gln + Phe + Pg + Ab + Qtz for the blueschists. Porphyroblastic garnets show perfect prograde zoning, with X_{Mn} and X_{Fe} decreasing and X_{Mg} and X_{Ca} increasing from the core to the rim, which indicates a process of increasing temperature and prograde metamorphism. According to the paragenetic assemblages of inclusions within garnet as well as in matrix, four stages of metamorphism were recognized, viz., pre-peak lawsonite-blueschist facies metamorphic stage, peak eclogite facies stage ($t = 543 \sim 579^\circ\text{C}$, $p = 1.5 \sim 1.6 \text{ GPa}$), retrograde epidote-blueschist facies stage ($t = \sim 450^\circ\text{C}$, $p < 1.0 \text{ GPa}$), and post-peak retrograde blueschist-greenschist facies stage ($t < 400^\circ\text{C}$, $p < 0.5 \text{ GPa}$). The p - T pseudosection calculation shows that the peak metamorphic conditions were $520 \sim 550^\circ\text{C}$ and $1.7 \sim 1.9 \text{ GPa}$ for the eclogites, and $520 \sim 620^\circ\text{C}$ and $1.7 \sim 2.3 \text{ GPa}$ for the blueschists, similar to the results of traditional geothermobarometer. Previous researchers reported coesites preserved in some eclogites and country rocks, which suggested that partial eclogites and partial country rocks within the southwestern Tianshan metamorphic belt underwent UHP metamorphism, but this conclusion is inconsistent with the results constrained by the eclogites in this study. The possible reasons might be as follows: ① the eclogites were affected by later thermal events, which led to the partial variation of both minerals and whole rock compositions. On the basis of the changed whole-rock compositions, the traditional thermobarometer Grt-Cpx-Phe and phase equilibrium simulations certainly show relatively low pressure results, and ② not all eclogites from the southwestern Tianshan underwent UHP metamorphism, and HP-UHP eclogites may represent the metabasites subducted to different depths.

Key words: eclogite; blueschist; p - T pseudosection; Habutengsu; southwestern Tianshan

高压-超高压变质带是古板块汇聚边界及洋-陆、陆-陆俯冲碰撞的重要标志,记录了洋壳和/或陆壳物质俯冲-折返动力学过程的重要信息(Smith, 1988; Ernst and Liou, 1995; Maruyama *et al.*, 1996; Ernst, 2001, 2006; Song *et al.*, 2006, 2009)。榴辉岩和蓝片岩则是揭示这一动力学演化过程的重要岩石学标志。通过对榴辉岩和共生的蓝片岩不同变质阶段形成温压条件的限定,可以推测板块俯冲折返的深度及其动力学过程,对于深入探索洋壳和/或陆壳俯冲变质过程以及造山带形成演化具有重要的意义。

西南天山造山带出露与洋壳俯冲密切相关的榴辉岩-蓝片岩带,前人已是在哈布腾苏河、科布尔特河、木扎尔特河等河谷发现了大量的榴辉岩和蓝片岩,呈豆荚状、布丁状、透镜状或者夹层状产于区域广泛分布的变沉积岩内,共同构成了西南天山高压-超高压变质带。针对榴辉岩和蓝片岩的产出特征及成因研究,不同学者持有不同观点,如 Gao 和 Klemd (2003)认为西南天山高压-超高压变质带内存在两种不同类型的蓝片岩:含绿辉石石榴石蓝片岩,以

片理不发育及缺少钠长石为特征,形成于进变质阶段;含钠长石蓝片岩,以片理发育及含有大量钠长石为特征,形成于退变质作用阶段;John 等(2008)和 Beinlich 等(2010)认为西南天山进变质作用阶段形成的蓝片岩主要矿物组合为蓝闪石+石榴石±绿辉石+绿帘石/黝帘石+多硅白云母/钠云母+白云石+副矿物;Van der Straaten 等(2008)和 Du 等(2011)认为在退变质阶段,岩石可通过与流体的相互作用形成退变蓝片岩;Li 等(2012)通过岩石学、岩相学以及矿物化学研究认为西南天山的蓝片岩与榴辉岩形成于相同的榴辉岩相峰期变质阶段,可称之为榴辉岩相蓝片岩。由此可见,西南天山蓝片岩成因类型相对复杂,有可能形成于板块俯冲-折返的不同阶段。

本文在前人研究的基础上,针对哈布腾苏河谷内榴辉岩和共生的蓝片岩典型露头开展详细的野外和室内研究,选择代表性的榴辉岩和蓝片岩样品,进行了岩相学、矿物化学和变质作用的综合研究,并利用矿物内部一致性热力学数据库(Holland and Powell, 1998)和 Theriak/Domino 软件(de Capitani and Brown, 1987),计算不同矿物组合的 p - T 视剖面图,

限定哈布腾苏一带榴辉岩和蓝片岩的变质演化 p - T 轨迹,进一步探讨了榴辉岩和蓝片岩的相互关系以及相应的大地构造意义。该项研究对于重新认识西南天山高压-超高压变质带的空间分布及其演化特征具有重要意义。

1 区域地质背景

天山造山带横亘于中亚,近东西向延伸约2 500 km。南天山造山带西起乌兹别克斯坦,东迄中国新疆伊犁,与新疆境内东天山相接,代表了伊犁-中天山板块与塔里木板块间的俯冲、碰撞带(Gao *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2003a, 2003b, 2007; 张立飞等, 2005)。出露于我国新疆伊犁自治州昭苏县以南的西南天山造山带为南天山的中国境内部分,它夹持于伊犁-中天山板块和塔里木板块之间,东西延长超过200 km,向西延与哈萨克斯坦境内含柯石英假像的Atbashy榴辉岩-蓝片岩带相接。该造山带出露一套以榴辉岩、蓝片岩、多硅白云母片岩为代表的高压-超高压岩石组合(Zhang *et al.*, 2002a, 2002b, 2005)(图1),并可进一步划分北部的超高压带和南部的高压带(Lü *et al.*, 2012)。在高压-超高压变质带的北侧木扎尔特河谷出露低压高温变质带,主要由堇青石榴夕线片麻岩、石榴夕线片麻岩、混合岩化片麻岩和混合岩化斜角闪岩等组成,在空间上可能与南侧的高压-超高压变质带组成双变质带(李强等, 2004; 张立飞等, 2005; Zhang *et al.*, 2007; 苟龙等, 2009)。该造山带向北发育一套可能具有岛弧成因的火山岩带(朱永峰等, 2005),向南则为一套早古生代的盖层沉积,主体为奥陶纪灰岩。

2 实验测试方法

首先利用中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室的扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)对代表性的榴辉岩和蓝片岩样品的矿物结构、矿物间的转变关系以及矿物成分的变化特征进行了系统观察和测试。扫描电镜是日本电子公司JSM-561LV型,电子束电压20 kV,焦距20 mm,束斑大小为41 nm,能谱仪是英国牛津公司INCA软件包版本4.4。然后采用电子探针对样品中变质矿物

的化学成分进行测试。榴辉岩矿物化学成分采用北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室的电子探针测得(JEOL JXA 8100),加速电压15 kV,束流 1×10^{-8} A,束斑直径为1 μm (云母类为2 μm),第一元素的扫描时间为10 s,修正方法PRZ,标准样品为美国SPI公司的53种矿物。蓝片岩矿物化学成分采用中国科学院地质与地球物理研究所电子探针测得。所有测试矿物,包括石榴石、普通角闪石、蓝闪石、绿辉石、钠云母、多硅白云母、绿帘石和钠长石等的阳离子系数均采用AX程序计算(Hollan, <http://titan.minpet.unibas.ch/minpet/theriak/theruser.html>)。

3 岩相学特征

3.1 榴辉岩

以往通常将西南天山出露的榴辉岩据其野外地质产状与岩石学特征分为4类:①蓝片岩中呈透镜状的榴辉岩;②大理岩中呈透镜状和夹层状的榴辉岩;③具有枕状玄武岩构造的榴辉岩(Zhang *et al.*, 2002a; 张立飞等, 2000, 2005);④石榴石多硅白云母片岩中呈透镜状的榴辉岩(吕增等, 2007)。哈布腾苏河一带榴辉岩主要属于第4类,呈布丁状、透镜状(图2)或岩片状产于石榴石多硅白云母片岩中,并与蓝片岩相伴产出。本文对其中的蓝闪石榴辉岩、钠云母榴辉岩、绿帘石榴辉岩、蓝闪石榴角闪岩(退变榴辉岩)进行了重点研究,采样位置如图1b所示。

3.1.1 蓝闪石榴辉岩

蓝闪石榴辉岩(ZS06-1)主要由石榴石(25%~30%)、绿辉石(50%~55%)、蓝闪石(15%~20%)和钠云母(3%~4%)组成(图3a),含少量方解石、绿帘石、榍石和金红石。斑状变晶结构,块状构造,变斑晶为绿辉石和蓝闪石。石榴石在岩石中分布不均,粒径差异大,为0.05~0.25 mm,多呈细粒自形-半自形晶,多以集合体出现,粒间常见细小粒状方解石。绿辉石多为粗粒变斑晶,半自形-它形,部分绿辉石看似为大斑晶,实际由众多细粒绿辉石聚集而成。蓝闪石多呈自形-半自形变斑晶,大多包裹有残余状的石榴石和绿辉石。蓝闪石发育典型的环带构造,背散射图像下可见到清晰的核-幔-边结构(图3b)。钠云母呈片状-鳞片状,不具有定向性。

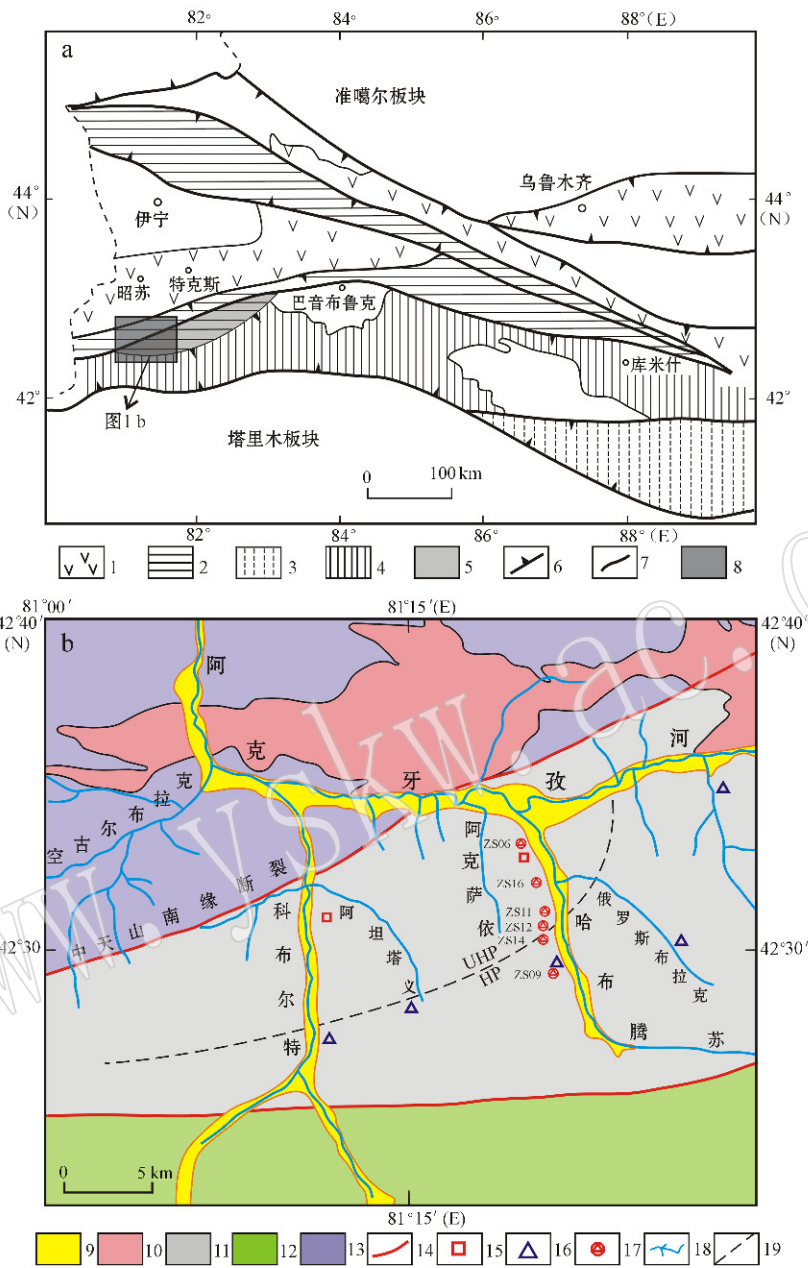


图 1 西南天山哈布腾苏河一带地质简图(a)及采样位置(b)(改自吕增等, 2012)

Fig. 1 Simplified geological map of the Habutengsu area in southwestern Tianshan (a) and the sampling positions (b) (modified after Lü *et al.*, 2012)

a: 1—晚古生代火山岩及火山碎屑岩; 2—前寒武纪基底, 古生代花岗岩及地层(未分); 3—前寒武纪角闪岩相变质岩; 4—古生代地层; 5—高压—超高压变质带; 6—逆断层; 7—断层; 8—研究区; b: 9—第四纪冲积物; 10—花岗岩; 11—高压—超高压变质带; 12—早古生代地层; 13—前寒武纪基底, 古生代地层及火山岩(未分); 14—断层; 15—超高压岩石; 16—蓝片岩; 17—采样点; 18—水系; 19—推测的高压地体(南)和超高压地体(北)的界线

1—Late Paleozoic volcanic and volcanoclastic rocks; 2—Precambrian basement, Paleozoic granites and Paleozoic strata; 3—Precambrian amphibolite facies metamorphic rocks; 4—Paleozoic strata; 5—HP-UHP belt; 6—thrust fault; 7—fault; 8—study area; 9—Quaternary alluvial; 10—granitoid; 11—HP-UHP complex; 12—Early Paleozoic strata; 13—Precambrian basement, Paleozoic strata and volcanics (undifferentiated); 14—fault; 15—UHP rock locality; 16—blueschists; 17—sampling positions; 18—river; 19—inferred boundary of the HP (south) and UHP (north) terrains

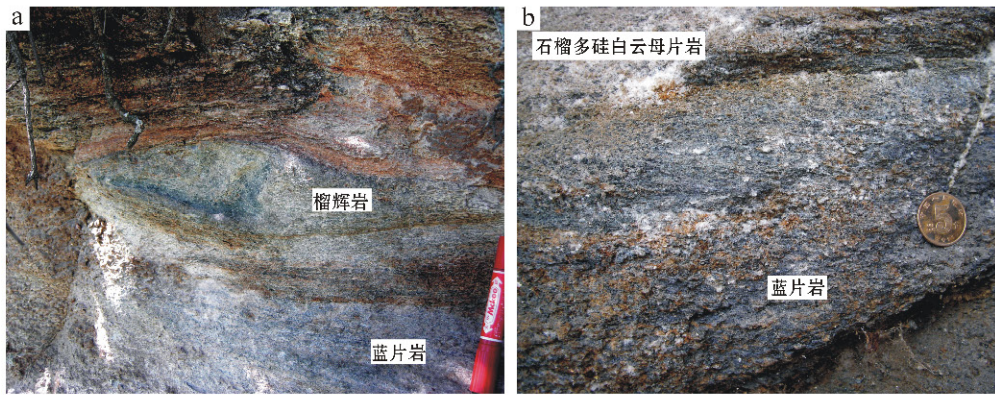


图2 西南天山哈布腾苏河榴辉岩和蓝片岩的野外照片

Fig. 2 Field photographs of the coexisting eclogites and blueschists from Habutengsu area, southwestern Tianshan

3.1.2 钠云母榴辉岩

钠云母榴辉岩(ZS11-1.2)主要由石榴石(15%~20%)、绿辉石(55%~60%)、钠云母(20%~25%)、黝帘石(2%~3%)组成(图3c),含少量绿帘石。斑状变晶结构,块状构造,基质矿物具有弱的定向性。多数石榴石呈变斑晶,自形-半自形,颗粒大小不一,粒径多在为0.3~1.5 mm,内部裂隙发育,包体较少。石榴石主要有两种产状,一种产于基质中,不与钠云母接触;另一种与钠云母直接接触(图3c)或呈包体产于钠云母内部。绿辉石主要呈不规则粒状,少量呈包体产于片状钠云母中(图3d)。钠云母呈片状,片晶约0.6 mm×3 mm,不具定向性。

3.1.3 绿帘石榴辉岩

绿帘石榴辉岩(ZS12-7)主要由绿帘石(20%~25%)、石榴石(15%~20%)、绿辉石(50%~55%)、钠云母(3%~4%)组成,蓝闪石和普通角闪石含量较少(图3e)。斑状变晶结构,块状构造。变斑晶主要为绿帘石和石榴石。绿帘石自形,长柱状,颗粒大小0.5 mm×1 mm~2 mm×5 mm之间,发育环带,包体矿物为石榴石、绿辉石和蓝闪石(图3f)。石榴石呈自形-半自形,分布均匀,内部含有极少量包体。绿辉石呈细粒它形晶,常与石榴石镶嵌共生。钠云母呈细小鳞片状-片状,在基质中均匀分布,定向性不明显。蓝闪石主要为自形-半自形晶包裹于绿帘石变斑晶中。

3.1.4 蓝闪石榴角闪岩(退变榴辉岩)

蓝闪石榴角闪岩(ZS09-16)主要由石榴石(25%~30%)、蓝闪石(15%~20%)、普通角闪石(50%~55%)、榍石(2%~4%)组成(图3g),含少量石英,具

粒状变晶结构,块状构造。石榴石呈自形-半自形,粒径0.25~1.5 mm左右,石榴石内部较干净,包体矿物集中分布于石榴石核部和幔部,主要为绿帘石、钠云母、钠长石、多硅白云母以及钠云母和绿帘石的复合包体(图3h)。蓝闪石呈不规则粒状、残留状,边部多被普通角闪石环绕。普通角闪石单偏光镜下为绿色,多色性明显,属于低温型闪石。岩石中榍石则呈集合体出现于基质中,为金红石转变形成。

3.2 蓝片岩

蓝片岩中的主要矿物为石榴石、蓝闪石、钠长石、多硅白云母、钠云母和石英,根据矿物组成及其含量变化特征,可进一步分为含蓝闪石石榴白云母钠长片岩、石榴白云母蓝闪片岩、石榴白云母蓝闪石英片岩。

3.2.1 含蓝闪石石榴白云母钠长片岩

含蓝闪石石榴白云母钠长片岩(ZS14-1)主要由石榴石(8%~10%)、蓝闪石(3%~5%)、钠云母(10%~15%)、钠长石(45%~50%)、石英(30%~35%)组成(图4a),含少量多硅白云母和榍石。斑状变晶结构,片状构造。石榴石自形,粒径3~5 mm,筛状变晶结构,裂隙发育,内部含有大量不规则石英颗粒和少量钠云母包体。蓝闪石自形-半自形,多呈长柱状(0.5 mm×2 mm~0.5 mm×4 mm),少部分晶体为短柱状-粒状,内部包裹有少量石英颗粒,多色性明显,少量蓝闪石边部发生退变转变为冻蓝闪石(图4b)。钠云母细小鳞片状,多分布于石英颗粒间。钠长石呈不规则粒状,粒径0.5~2 mm,内部含有大量细小石英和钠云母包体。

3.2.2 石榴白云母蓝闪片岩

石榴白云母蓝闪片岩(ZS14-2)主要由石榴石

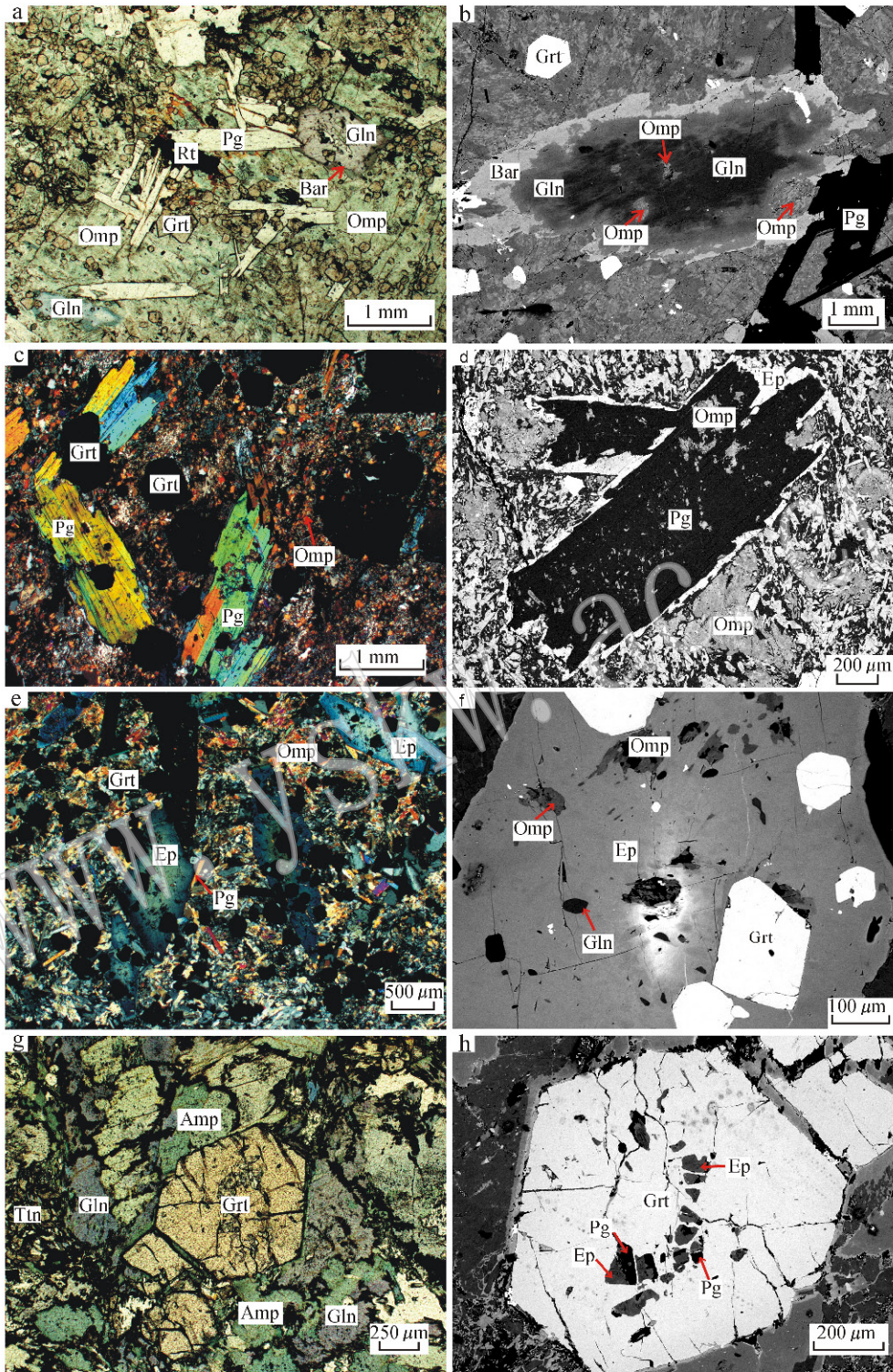


图 3 榴辉岩的显微结构照片和背散射照片

Fig. 3 Representative photomicrographs and back scattered electron (BSE) images of the eclogites

a—蓝闪石榴辉岩, 单偏光; b—蓝闪石榴辉岩中蓝闪石变斑晶, 背散射; c—钠云母榴辉岩, 正交偏光; d—钠云母榴辉岩中钠云母变斑晶, 背散射; e—绿帘石榴辉岩, 正交偏光; f—绿帘石榴辉岩中绿帘石变斑晶, 背散射; g—蓝闪石榴角闪岩(退变榴辉岩), 单偏光; h—蓝闪石榴角闪岩(退变榴辉岩)中石榴石及呈硬柱石假像的包体矿物, 背散射; Grt—石榴石, Omp—绿帘石, Rt—金红石, Pg—钠云母, Gln—蓝闪石, Bar—冻蓝闪石, Ep—绿帘石, Ttn—榍石

a—glaucophane eclogite; b—porphyroblastic glaucophane in the glaucophane eclogite; c—paragonite eclogite; d—porphyroblastic paragonite in the paragonite eclogite; e—epidote eclogite; f—porphyroblastic epidote in the epidote eclogite; g—glaucophane garnet amphibolite (retrograde eclogite); h—garnet and lawsonite pseudomorph inclusions in the glaucophane garnet amphibolite (retrograde eclogite); Grt—garnet; Omp—omphacite; Rt—rutile; Pg—paragonite; Gln—glaucophane; Bar—barroisite; Ep—epidote; Ttn—titanite

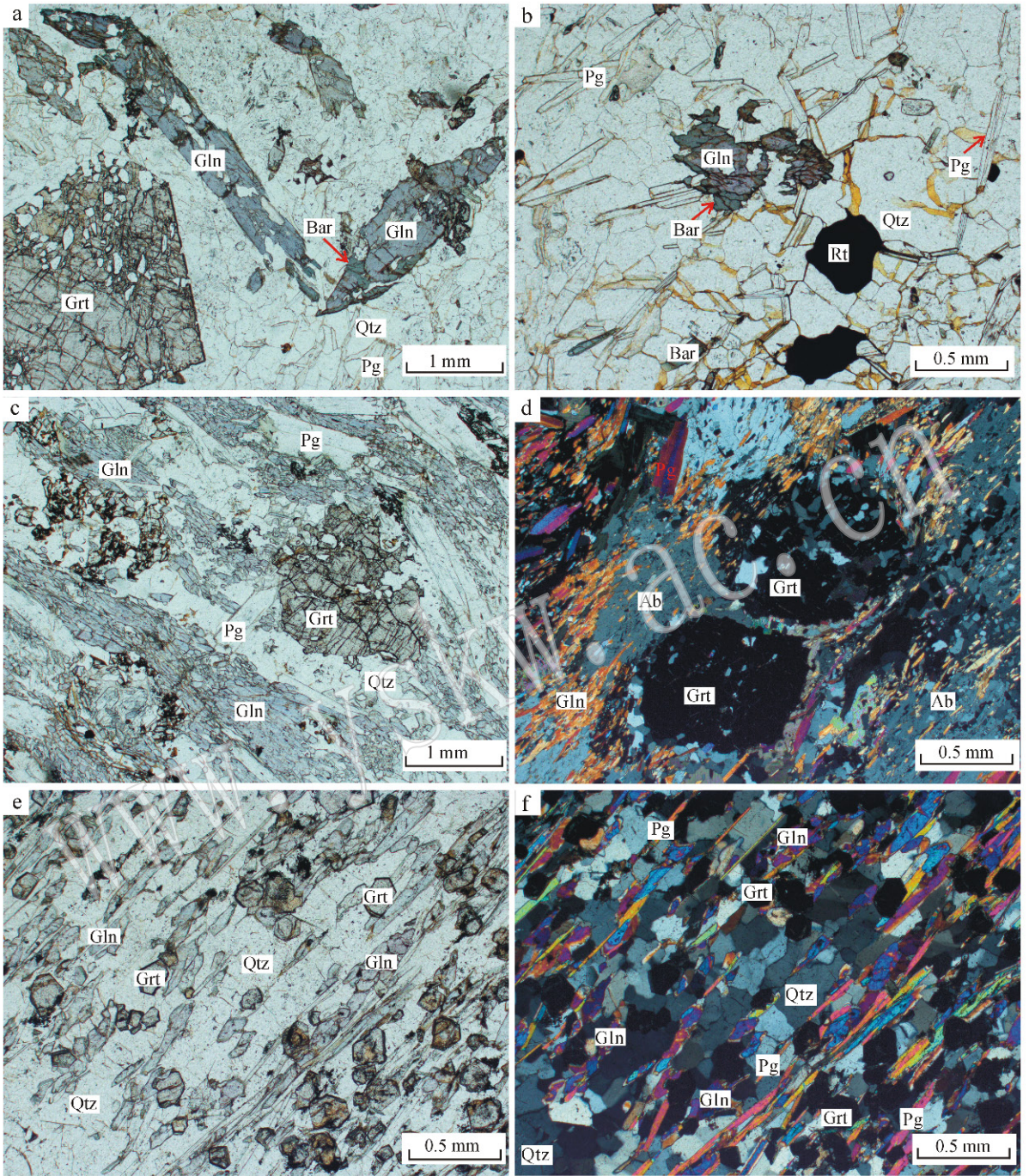


图 4 蓝片岩的显微结构照片

Fig. 4 Representative photomicrographs of the blueschists

a—含蓝闪石榴白云母钠长片岩, 单偏光; b—含蓝闪石榴白云母钠长片岩中粒状蓝闪石边部转变为冻蓝闪石, 单偏光; c—石榴白云母蓝闪片岩中不规则石榴石, 单偏光; d—石榴白云母蓝闪片岩, 正交偏光; e—石榴白云母蓝闪石英片岩, 单偏光; f—石榴白云母蓝闪石英片岩, 正交偏光; 矿物代号: Grt—石榴石, Omp—绿辉石, Rt—金红石, Phe—多硅白云母, Pg—钠云母, Gln—蓝闪石, Bar—冻蓝闪石, Qtz—石英

a—glaucophane-bearing garnet muscovite albite schists; b—granular glaucophane rim transformed into barroisite in the glaucophane-bearing garnet muscovite albite schists; c—irregular garnet in the garnet muscovite glaucophane schists; d—garnet muscovite glaucophane schists; e—garnet muscovite glaucophane quartz schists; f—garnet muscovite glaucophane quartz schists; Grt—garnet; Omp—omphacite; Rt—rutile; Phe—phengite; Pg—paragonite; Gln—glaucophane; Bar—barroisite; Qtz—quartz

(10%~15%) 蓝闪石(45%~55%) 钠云母(10%~15%) 钠长石(15%~20%) 石英(15%~20%) 组成(图4c), 含少量多硅白云母和方解石。斑状变晶结构, 片状构造。石榴石半自形-它形, 多为浑圆状, 粒径1~3 mm, 内部裂隙发育, 且含有大量不规则石英颗粒构成筛状变晶结构。蓝闪石自形-半自形, 多呈长柱状(0.1 mm×0.4 mm)和细小粒状, 横截面具有清晰的两组斜交解理, 蓝闪石多呈带状密集分布并与钠云母颗粒共同构成岩石的片理。钠云母为多为鳞片状, 定向分布。钠长石呈不规则粒状(图4d) 粒径0.5~2 mm, 且含有大量细小石英和蓝闪石包体。

3.2.3 石榴白云母蓝闪石英片岩

石榴白云母蓝闪石英片岩(ZS16-1)主要由石榴石(15%~20%) 蓝闪石(25%~30%) 多硅白云母(5%~10%) 钠长石(5%~10%) 石英(40%~45%) 组成(图4e、4f), 含少量钠云母。粒状片状变晶结构, 片状构造。石榴石半自形-自形, 粒径0.3~1 mm。蓝闪石自形-半自形, 多呈长柱状(0.1 mm×

0.3 mm)和细小粒状, 构成岩石的片理。多硅白云母多呈细小鳞片状, 定向分布。钠长石不规则粒状, 含量较少。石英多为不规则粒状, 具有波状消光。

4 矿物化学特征

4.1 石榴石

榴辉岩中石榴石矿物化学成分如表1、表2、表3、表4所示, 石榴石成分投图见图5。蓝闪石榴辉岩(ZS06-1)基质中的石榴石(粒径0.05~0.3 mm)和蓝闪石变斑晶中的石榴石(粒径约0.1 mm)矿物化学成分变化较小, FeO^{T} 含量30.82%~31.12%, MnO 含量0.95%~1.04%, 相应的 $\text{Alm} + \text{Spes}$ 端员组分为68.95~72.07; MgO 含量3.21%~3.47%, 相应的 Pyr 为12.91~13.62; CaO 含量5.20%~6.18%, 对应的 Gro 端员组分为15.03~17.43。该样品位于北部的超高压变质带, 其成分与发现含柯石英的石榴石(Lü *et al.*, 2008)相比, 其 Gro 稍偏高、 Pyr 稍偏低。钠云母榴辉岩(ZS11-1.2)基质中的石

表1 哈布腾苏蓝闪石榴辉岩(ZS06-1)的代表性矿物电子探针成分

$w_B/\%$

Table 1 Representative microprobe analyses of glaucophane eclogites (Sample ZS06-1) from Habutengsu area

样品号	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.9	1.11	1.12	1.13	1.14
矿物	Grt (I)	Gln (C)	Gln (M)	Bar	Pg	Omp	Grt	Pg	Omp (I)	Omp (I)	Omp (I)	Bar
SiO_2	38.04	58.14	56.19	49.17	47.26	56.26	37.26	46.54	56.18	55.56	56.63	47.76
TiO_2	0.13	0.00	0.04	0.30	0.01	0.09	0.05	0.05	0.09	0.07	0.08	0.32
Al_2O_3	21.22	12.04	11.95	11.83	39.12	10.80	21.13	38.65	9.94	9.40	11.09	12.13
Cr_2O_3	0.03	0.02	0.04	0.05	0.09	0.07	0.02	0.07	0.07	0.31	0.10	0.02
FeO^{T}	30.82	4.76	8.01	13.20	0.18	3.95	31.12	0.23	6.26	6.49	3.50	13.45
MnO	0.95	0.00	0.03	0.12	0.00	0.02	1.04	0.00	0.06	0.00	0.00	0.09
MgO	3.47	12.86	11.58	10.58	0.15	8.38	3.21	0.15	7.45	8.14	8.51	10.86
CaO	6.18	0.70	1.75	6.61	0.41	12.91	5.20	0.35	11.99	12.49	12.77	7.82
Na_2O	0.04	7.67	6.89	5.11	7.45	7.77	0.05	7.36	8.23	8.08	7.78	4.41
K_2O	0.00	0.02	0.04	0.21	0.67	0.00	0.02	0.59	0.01	0.00	0.00	0.32
NiO	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.03	0.00	0.00	0.03	0.00
Total	100.88	96.24	96.51	97.19	95.34	100.25	99.21	94.01	100.28	100.54	100.49	97.20
Si	2.994	7.915	7.761	7.099	3.017	1.979	2.992	3.013	1.985	1.966	1.983	6.936
Ti	0.008	0.000	0.004	0.033	0.000	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.035
Al	1.969	1.932	1.946	2.014	2.945	0.448	2.001	2.95	0.414	0.392	0.458	2.077
Cr	0.002	0.002	0.004	0.006	0.005	0.002	0.001	0.004	0.002	0.009	0.003	0.002
Fe^{3+}	0.031	0.002	0.096	0.129	0.000	0.110	0.017	0.000	0.174	0.182	0.097	0.156
Fe^{2+}	1.998	0.540	0.829	1.465	0.010	0.006	2.073	0.012	0.011	0.01	0.005	1.477
Mn	0.063	0.000	0.004	0.015	0.000	0.001	0.071	0.000	0.002	0.000	0.000	0.011
Mg	0.407	2.609	2.384	2.277	0.014	0.439	0.384	0.014	0.392	0.429	0.444	2.35
Ca	0.521	0.102	0.259	1.023	0.028	0.487	0.447	0.024	0.454	0.474	0.479	1.217
Na	0.006	2.025	1.845	1.431	0.922	0.53	0.008	0.924	0.564	0.555	0.529	1.242
K	0.000	0.003	0.007	0.039	0.055	0.000	0.002	0.049	0.000	0.000	0.000	0.059

C—核部; M—幔部; R—边部; I—包体; 下同。

表 2 哈布腾苏钠云母榴辉岩(ZS11-1.2)的代表性矿物电子探针成分

 $\omega_B/\%$

Table 2 Representative microprobe analyses of paragonite eclogites (Sample ZS11-1.2) from the Habutengsu area

样品号	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.7	4.1	4.2	4.3	4.4	2.1	2.2	2.3
矿物	Grt (C)	Grt (M)	Grt (R)	Amp	Gln	Zo	Grt (I)	Pg	Zo	Omp	Pg (C)	Pg (R)	Ep
SiO ₂	38.00	38.23	38.59	54.16	58.56	39.58	38.54	48.15	39.78	57.41	47.91	47.53	39.63
TiO ₂	0.16	0.11	0.05	0.06	0.03	0.06	0.07	0.07	0.13	0.01	0.11	0.00	0.03
Al ₂ O ₃	21.56	21.85	22.27	5.76	12.05	32.99	21.82	39.59	32.52	11.59	39.12	39.62	29.62
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.02	0.01	0.03	0.07	0.04	0.02	0.04	0.03	0.03	0.02	0.06
FeO ^T	26.22	29.49	27.53	9.76	8.90	1.20	29.56	0.21	1.18	3.42	0.24	0.23	5.03
MnO	7.46	1.23	0.06	0.03	0.01	0.01	1.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02
MgO	1.30	1.98	2.96	15.06	9.80	0.04	1.96	0.17	0.02	7.98	0.29	0.18	0.04
CaO	6.88	8.39	9.73	9.93	0.41	24.13	8.19	0.15	24.18	13.21	0.16	0.21	24.12
Na ₂ O	0.10	0.06	0.03	2.19	7.21	0.02	0.04	7.26	0.00	6.88	7.14	7.12	0.04
K ₂ O	0.01	0.03	0.00	0.11	0.00	0.01	0.00	0.64	0.02	0.03	0.91	0.53	0.00
NiO	0.06	0.00	0.00	0.04	0.06	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00
Total	101.74	101.37	101.24	97.08	97.05	98.12	101.28	96.29	97.85	100.56	95.93	95.48	98.58
Si	2.999	2.998	2.995	7.685	8.017	2.996	3.019	3.036	3.018	2.015	3.037	3.020	3.020
Ti	0.009	0.006	0.003	0.006	0.003	0.003	0.004	0.003	0.007	0.000	0.005	0.000	0.002
Al	2.006	2.020	2.038	0.964	1.945	2.944	2.015	2.943	2.909	0.480	2.924	2.968	2.661
Cr	0.000	0.001	0.001	0.001	0.003	0.004	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.004
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.075	0.000	0.000	0.074	0.000	0.000	0.000	0.317
Fe ²⁺	1.731	1.934	1.787	1.151	1.019	0.001	1.937	0.011	0.001	0.100	0.013	0.012	0.003
Mn	0.499	0.082	0.004	0.004	0.001	0.001	0.070	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001
Mg	0.153	0.231	0.342	3.185	1.999	0.005	0.229	0.016	0.002	0.417	0.027	0.017	0.005
Ca	0.582	0.705	0.809	1.510	0.060	1.957	0.688	0.010	1.966	0.497	0.011	0.014	1.970
Na	0.015	0.009	0.005	0.603	1.916	0.003	0.006	0.888	0.000	0.468	0.878	0.877	0.006
K	0.001	0.003	0.000	0.020	0.000	0.001	0.000	0.052	0.002	0.001	0.074	0.043	0.000
样品号	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.8	
矿物	Omp	Omp	Omp (I)	Omp (I)	Ep (I)	Grt (C)	Grt (R)	Amp (I)	Grt (C)	Grt (R)	Pg	Amp (I)	
SiO ₂	56.70	56.86	56.75	56.84	39.35	38.39	38.65	50.68	37.89	38.85	47.74	51.81	
TiO ₂	0.06	0.06	0.00	0.02	0.05	0.14	0.07	0.06	0.13	0.09	0.03	0.14	
Al ₂ O ₃	12.18	11.98	12.70	13.30	29.34	21.77	22.31	9.22	21.47	22.16	39.54	8.48	
Cr ₂ O ₃	0.05	0.04	0.05	0.00	0.03	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.00	0.04	
FeO ^T	3.92	4.83	3.96	3.95	5.71	29.07	29.27	12.35	26.01	29.57	0.22	11.98	
MnO	0.01	0.00	0.00	0.03	0.03	2.41	0.44	0.04	7.30	0.75	0.00	0.06	
MgO	7.33	6.99	6.97	6.41	0.06	1.62	2.37	12.77	1.28	2.12	0.22	13.03	
CaO	12.34	12.04	11.58	10.95	23.53	7.89	8.70	9.03	7.48	8.34	0.15	9.55	
Na ₂ O	7.32	7.64	7.60	8.18	0.00	0.00	0.00	2.99	0.04	0.02	6.78	2.65	
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.06	0.01	0.01	0.84	0.09	
NiO	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.01	0.04	0.04	0.02	0.02	0.01	
Total	99.93	100.44	99.60	99.68	98.14	101.32	101.84	97.25	101.69	101.94	95.53	97.82	
Si	2.006	2.009	2.009	2.009	3.015	3.016	3.000	7.268	2.993	3.017	3.031	7.379	
Ti	0.002	0.002	0.000	0.001	0.003	0.008	0.004	0.006	0.008	0.005	0.001	0.015	
Al	0.508	0.499	0.530	0.554	2.650	2.017	2.042	1.559	1.999	2.029	2.960	1.424	
Cr	0.001	0.001	0.001	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000	0.005	
Fe ³⁺	0.000	0.003	0.000	0.000	0.362	0.000	0.000	0.174	0.004	0.000	0.000	0.077	
Fe ²⁺	0.116	0.140	0.117	0.117	0.004	1.910	1.900	1.307	1.714	1.921	0.012	1.350	
Mn	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.160	0.029	0.005	0.488	0.049	0.000	0.007	
Mg	0.386	0.368	0.368	0.338	0.007	0.190	0.274	2.729	0.151	0.245	0.021	2.766	
Ca	0.468	0.456	0.439	0.415	1.931	0.665	0.724	1.388	0.633	0.694	0.010	1.457	
Na	0.502	0.524	0.522	0.561	0.000	0.000	0.000	0.831	0.006	0.003	0.835	0.732	
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.011	0.001	0.001	0.068	0.016	

表 3 哈布腾苏绿帘石榴辉岩(ZS12-7)的代表性矿物电子探针成分

 $w_B/\%$

Table 3 Representative microprobe analyses of epidote eclogites (Sample ZS12-7) from the Habutengsu area

样品号	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
矿物	Grt(C)	Pg	Omp(I)	Omp(I)	Gln(I)	Grt(C)	Grt(R)	Amp	Gln	Ep	Pg
SiO ₂	37.51	46.90	54.92	55.80	58.35	37.07	37.76	51.19	58.14	38.52	46.95
TiO ₂	0.05	0.01	0.05	0.00	0.08	0.10	0.10	0.08	0.00	0.18	0.14
Al ₂ O ₃	21.13	39.94	9.70	10.44	11.56	20.66	21.65	7.12	10.63	29.04	38.69
Cr ₂ O ₃	0.01	0.03	0.05	0.06	0.07	0.00	0.00	0.04	0.00	0.04	0.01
FeO ^T	29.69	0.28	7.15	6.95	8.32	30.25	30.55	10.85	9.04	6.12	0.34
MnO	0.78	0.01	0.06	0.07	0.00	3.38	0.54	0.12	0.05	0.02	0.00
MgO	1.27	0.10	6.85	6.60	10.78	0.70	1.15	14.21	11.31	0.12	0.10
CaO	8.83	0.09	11.87	10.95	0.44	7.23	8.29	9.26	0.39	23.13	0.19
Na ₂ O	0.01	7.10	8.39	8.68	7.80	0.00	0.03	3.03	8.04	0.01	7.06
K ₂ O	0.00	0.72	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.11	0.01	0.00	0.89
NiO	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.06
Total	99.27	95.19	99.05	99.57	97.39	99.40	100.15	96.01	97.61	97.18	94.42
Si	3.014	2.994	1.972	1.985	7.969	3.01	3.009	7.412	7.958	2.984	3.027
Ti	0.003	0.000	0.001	0.000	0.008	0.006	0.006	0.009	0.000	0.010	0.007
Al	2.002	3.006	0.411	0.438	1.861	1.978	2.034	1.215	1.715	2.652	2.941
Cr	0.001	0.002	0.001	0.002	0.008	0.000	0.000	0.005	0.000	0.002	0.001
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.204	0.189	0.000	0.000	0.000	0.124	0.075	0.393	0.000
Fe ²⁺	1.995	0.015	0.011	0.018	0.95	2.054	2.036	1.19	0.959	0.004	0.018
Mn	0.053	0.001	0.002	0.002	0.000	0.232	0.036	0.015	0.006	0.001	0.000
Mg	0.152	0.010	0.367	0.350	2.194	0.085	0.137	3.066	2.307	0.014	0.010
Ca	0.760	0.006	0.457	0.417	0.064	0.630	0.708	1.437	0.057	1.920	0.013
Na	0.002	0.879	0.584	0.599	2.068	0.000	0.005	0.851	2.134	0.002	0.883
K	0.000	0.059	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.020	0.002	0.000	0.073

表 4 哈布腾苏蓝闪石榴角闪岩(ZS09-16)的代表性矿物电子探针成分

 $w_B/\%$

Table 4 Representative microprobe analyses of glaucophane garnet amphibolites (Sample ZS09-16) from the Habutengsu area

样品号	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	3.1	3.2	3.3	3.4
矿物	Amp	Gln	Amp	Grt(R)	Grt(C)	Ep(I)	Pg(I)	Ep(I)	Ab(I)	Ab(I)	Phe(I)	Grt(C)	Grt(R)
SiO ₂	52.95	55.61	53.02	36.80	36.62	38.85	46.59	38.57	67.53	68.11	49.66	37.07	37.38
TiO ₂	0.08	0.12	0.09	0.07	0.13	0.06	0.23	0.16	0.04	0.00	0.05	0.16	0.12
Al ₂ O ₃	2.49	9.60	2.55	20.73	20.42	30.62	37.66	29.80	19.20	19.59	29.52	20.76	21.16
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.00	0.05	0.03	0.00
FeO ^T	16.85	16.92	17.46	32.32	32.54	3.34	1.56	5.94	0.64	0.36	3.29	33.53	32.22
MnO	0.04	0.02	0.09	0.26	1.82	0.00	0.04	0.48	0.02	0.00	0.03	0.21	0.31
MgO	13.03	6.97	12.41	1.15	0.60	0.01	0.20	0.05	0.03	0.02	2.02	0.71	1.13
CaO	9.14	0.66	8.86	7.81	7.05	23.41	0.08	21.73	0.76	0.17	0.04	8.04	8.02
Na ₂ O	1.73	7.36	1.99	0.00	0.01	0.03	7.21	0.02	12.17	12.01	0.50	0.00	0.03
K ₂ O	0.21	0.01	0.16	0.01	0.01	0.00	1.40	0.00	0.00	0.05	9.87	0.00	0.03
NiO	0.00	0.01	0.07	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.01	0.00	0.05	0.00
Total	96.53	97.28	96.69	99.17	99.21	96.33	95.01	96.81	100.40	100.32	95.03	100.55	100.40
Si	7.783	7.925	7.798	2.984	2.988	3.012	3.019	2.989	2.959	2.974	3.325	2.978	2.99
Ti	0.009	0.013	0.010	0.004	0.008	0.003	0.011	0.009	0.001	0.000	0.003	0.010	0.007
Al	0.431	1.613	0.442	1.982	1.964	2.798	2.877	2.722	0.992	1.009	2.330	1.966	1.996
Cr	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000	0.003	0.002	0.000
Fe ³⁺	0.264	0.175	0.288	0.041	0.045	0.214	0.000	0.381	0.023	0.013	0.000	0.056	0.017
Fe ²⁺	1.807	1.842	1.860	2.151	2.176	0.002	0.085	0.004	0.000	0.000	0.184	2.196	2.139
Mn	0.005	0.002	0.011	0.018	0.126	0.000	0.002	0.032	0.001	0.000	0.002	0.014	0.021
Mg	2.854	1.480	2.720	0.139	0.073	0.001	0.019	0.006	0.002	0.001	0.202	0.085	0.135
Ca	1.439	0.101	1.396	0.679	0.616	1.944	0.006	1.804	0.036	0.008	0.003	0.693	0.687
Na	0.493	2.034	0.568	0.000	0.002	0.005	0.906	0.003	1.035	1.017	0.065	0.000	0.005
K	0.039	0.002	0.030	0.001	0.001	0.000	0.116	0.000	0.000	0.003	0.844	0.000	0.003

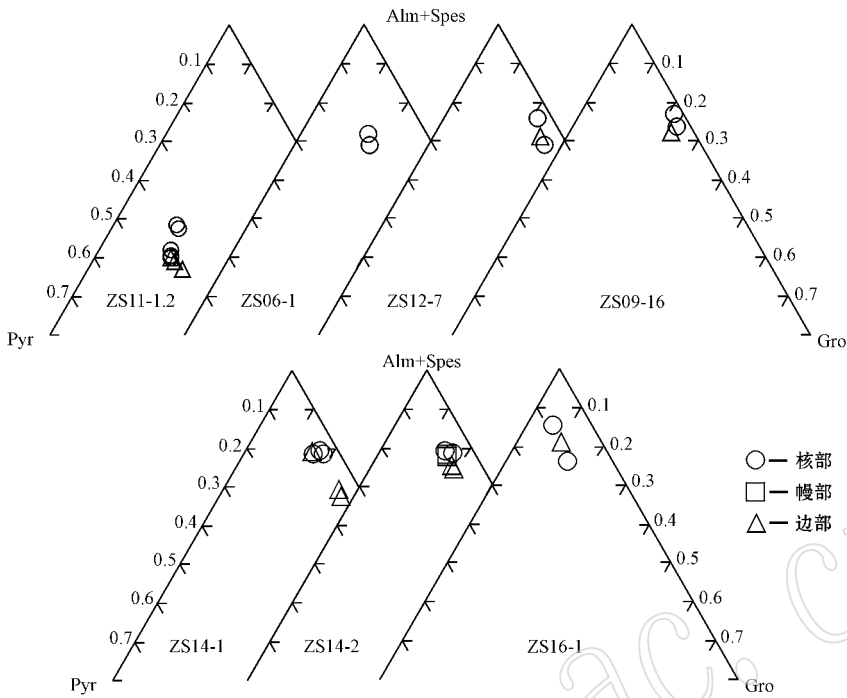


图 5 榴辉岩及蓝片岩中石榴石的 Gro-(Alm+Spes)-Pyr 成分图解

Fig. 5 Gro-(Alm+Spes)-Pyr diagram of garnet from eclogites and blueschists

榴石发育良好的进变质生长环带(O'Brien,1997), FeO^T 含量变化较小,为 26.01%~29.57%,MnO 含量变化明显,部分石榴石从核部 7.46% 降到边部 0.06%,相应的 Alm+Spes 端员组分为 75.2~60.9;从核部到边部 MgO 含量升高,为 1.30%~2.96%,相应的 Pyr 为 5.2~11.6;CaO 含量也升高,为 6.88%~9.73%,对应的 Gro 端员组分为 19.6~27.5。钠云母榴辉岩中 Pyr、Gro 含量升高,表明石榴石的生长经历了升温过程,而 Spes 含量则显著降低,具有典型的进变质生长环带特点,本样品位于 Lü 等(2012)划定的北部超高压变质带的南侧边界。绿帘石榴辉岩(ZS12-7)中的石榴石自形,具有进变质生长环带的特点,从核部到边部 FeO^T 含量变化较小,为 29.69%~0.55%,MnO 含量变化明显,从核部 3.38% 降到边部 0.54%,相应的 Alm+Spes 端员组分为 69.19~76.17;MgO 含量 0.70%~1.27%,相应的 Pyr 为 2.83~4.70;CaO 含量 7.23%~8.83%,对应的 Gro 端员组分为 20.99~25.68。本样品位于南部高压变质带,石榴石中的 Gro、Pyr 含量满足 $X_{Gro} > 0.17$, $X_{Pyr} < 0.10$,符合 Lü 等(2012)统计的南部变质带石榴石的特征。蓝闪石榴角闪岩(ZS09-16)中的石榴石自形,含包体多的石榴石多发育较好的进变质环带(图6),石榴石从核部到边部

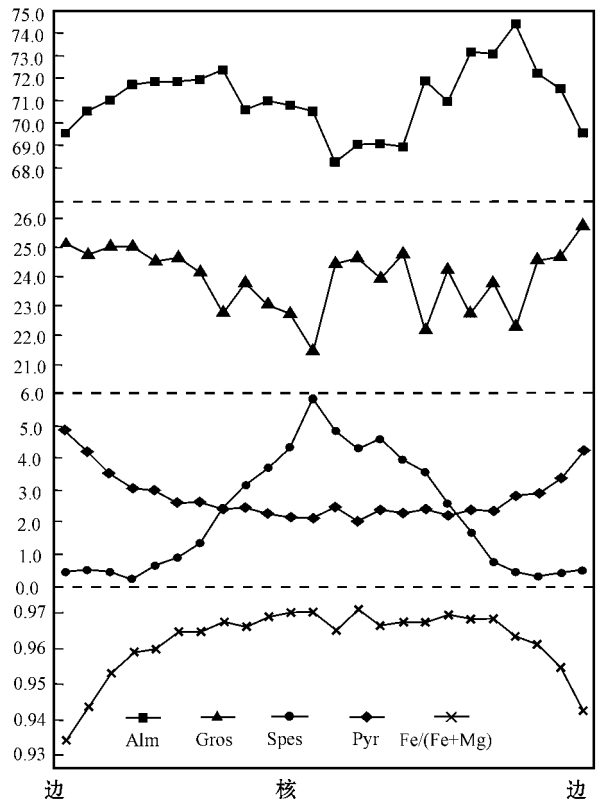


图 6 蓝闪石榴角闪岩(ZS09-16)中石榴石变斑晶成分剖面

Fig. 6 Compositional profiles of garnet in the glaucophane garnet amphibolites(ZS09-16)

FeO^{T} 含量差异性变化,为 32.22%~33.53%, MnO 含量变化明显,从核部 1.82% 降到边部 0.26%,相应的 $\text{Alm} + \text{Spes}$ 端员组分为 76.96~72.61; MgO 含量从核部到边部升高,变化于 0.60%~1.15% 相应的 Pyr 为 2.44~4.65; CaO 含量变化较小,为 7.05%~8.04%,对应的 Gro 端员组分为 20.60~23.19。此退变榴辉岩处于高压变质带的南端,石榴石中的 Gro 、 Pyr 含量满足 $X_{\text{Gro}} > 0.17$, $X_{\text{Pyr}} < 0.10$,符合 Lü 等(2012)统计的南部变质带石榴石的特征。

蓝片岩中石榴石矿物化学成分如表 5、表 6、表 7 所示,石榴石成分投图见图 5。含蓝闪石石榴白云母钠长片岩(ZS14-1)中的石榴石自形,从核部到边部 FeO^{T} 含量总体降低,为 30.46%~26.08%。 MnO 含量明显降低,从核部 2.92% 降到边部 0.87%,相应的 $\text{Alm} + \text{Spes}$ 端员组分为 74.43~59.78; MgO 含量变化于 1.13%~1.83%,相应的 Pyr 为 4.53~7.34;从核部到边部 CaO 含量明显升高,为 6.63%~12.02%,对应的 Gro 端员组分为 18.75~34.13。含蓝闪石石榴白云母钠长片岩中石榴石从核部到边部 Alm 端员含量降低, Pyr 端员含量总体呈升高趋势, Gro 端员含量明显升高,而 Spes 含量则显著降低,具有显著的钟形特征,石榴石发育明显的进变质生长环带。石榴白云母蓝闪片岩(ZS14-2)中的石榴石自形,具有进变质生长环带的特点, FeO^{T} 含量 29.86%~31.09%,从核部到边部 MnO 含量明显降低,从核部 2.29% 降到边部 0.65% 相应的 $\text{Alm} + \text{Spes}$ 端员组分为 74.03~68.30;从核部到边部 MgO 含量轻微升高,为 1.46%~2.10% 相应的 Pyr 为 5.81~8.41; CaO 含量总体升高,为 6.32%~8.20%,对应的 Gro 端员组分为 18.08~23.45。石榴白云母蓝闪石英片岩(ZS16-1)中自形石榴石也具有进变质生长环带的特点, FeO^{T} 含量 32.79%~34.40%,从核部到边部 MnO 含量明显降低,从核部 2.06% 降到边部 1.10% 相应的 $\text{Alm} + \text{Spes}$ 端员组分为 81.94~76.49; MgO 含量 2.63%~2.72% 相应的 Pyr 为 10.48~10.88;从核部到边部 CaO 含量升高,为 2.50%~4.57%,对应的 Gro 端员组分为 7.18~13.03。

总之,榴辉岩中的多数石榴石具有明显的进变质生长环带特点,从核部到边部铁铝榴石和锰铝榴石成分总体降低,而钙铝榴石和镁铝榴石升高。蓝片岩中的石榴石显示稍微不同的成分环带特点,从核部到边部铁铝榴石和锰铝榴石成分降低,而钙铝

榴石成分明显升高,但铁铝榴石和镁铝榴石成分则具有振荡的特点,多数发育进变质生长环带。

4.2 绿辉石

榴辉岩中绿辉石矿物化学成分如表 1、表 2、表 3、表 4 所示。绿辉石主要有两种存在形式:一是以包体出现在蓝闪石变斑晶(图 3b)、钠云母变斑晶(图 3d)和绿帘石变斑晶(图 3f)中;另一类则出现在基质中(图 3a、3c、3e),多呈中细粒,聚集成集合体,其成分投图见图 7。北部超高压变质带蓝闪石榴辉岩,从核部到边部蓝闪石变斑晶绿辉石包体 Jd 含量从 34.79% 升高到 39.19% 摩尔分数,下同),而基质中绿辉石 Jd 含量约 41.99%~43.75%, Fe^{2+}/Mg 约 0.01~0.03,基质中绿辉石相比蓝闪石变斑晶中包体绿辉石具有稍高的 Jd 含量, Fe^{2+}/Mg 值则较低;钠云母榴辉岩中钠云母变斑晶内绿辉石包体 Jd 含量约 52.99%~57.68%, Fe^{2+}/Mg 约 0.30~0.35,基质绿辉石 Jd 含量约 51.30%~51.84%, Fe^{2+}/Mg 约 0.24~0.38,相比基质中绿辉石,包体绿辉石 Jd 含量要明显偏高;绿帘石榴辉岩中绿帘石变斑晶内绿辉石包体 Jd 含量约 36.79%~41.63%, Fe^{2+}/Mg 约 0.03~0.05。榴辉岩不同产状的绿辉石 Jd 含量的差异可能源于原岩全岩成分的不同,同时表明不同岩性的榴辉岩可能形成一个稳定域相对宽的压力条件下。本文研究的蓝片岩中不含有绿辉石。

4.3 闪石类矿物

榴辉岩中闪石类矿物总体属于钠质闪石,含少量普通角闪石,根据 Leake(1997)的分类投点见图 8。榴辉岩中闪石类矿物主要有 3 种产出形式,包括蓝闪石变斑晶、绿帘石变斑晶内的蓝闪石包体以及产于基质中的普通角闪石。蓝闪石榴辉岩中蓝闪石变斑晶发育典型的成分环带(图 3b),具有核-幔-边结构,从核部到边部钠含量逐渐降低,暗的幔部区域相比亮的核部区域含有较高的 MgO 和较低的 FeO ,核部为典型的蓝闪石,幔部逐渐转变为冻蓝闪石,最边部则部分转变成绿色普通角闪石,表明闪石类矿物生长于连续减压降温的条件下。绿帘石榴辉岩中可见绿帘石包裹蓝闪石(图 3f),蓝闪石自形,分布于绿帘石变斑晶核部到幔部,边部较少。细粒普通角闪石在几类榴辉岩中均出现,但保留较好反应结构的角闪石只出现于蓝闪石榴角闪岩(退变榴辉岩)中,蓝闪石边部多被角闪石环绕(图 3g),但仍保留蓝闪石早期的晶形,此类角闪石是晚期蓝闪石发生退变

表 5 哈布腾苏含蓝闪石榴白云母钠长片岩(ZS14-1)的代表性矿物电子探针成分

 $w_B/\%$

Table 5 Representative microprobe analyses of glaucophane-bearing garnet muscovite albite schists (Sample ZS14-1) from the Habutengsu area

样品号	5.1	5.2	5.3	5.4	5.4.1	5.5	5.6	5.7	5.8	3.1	3.3	3.4	3.5
矿物	Gln	Bar	Gln	Bar	Bar	Ab	Gln	Phe	Ab	Grt(C)	Grt(R)	Ab	Pg
SiO ₂	53.46	45.23	53.91	47.87	47.61	68.62	51.24	49.99	68.66	38.43	38.57	69.27	47.76
TiO ₂	0.17	0.21	0.15	0.20	0.17	0.02	0.21	0.29	0.00	0.15	0.08	0.00	0.04
Al ₂ O ₃	12.81	16.92	12.86	11.98	12.95	19.60	13.35	28.38	19.30	21.66	22.00	19.33	39.60
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.06	0.00	0.02	0.04	0.04	0.00
FeO ^T	17.47	17.62	15.71	17.01	17.30	0.00	15.86	2.88	0.02	30.46	26.46	0.04	0.22
MnO	0.02	0.05	0.04	0.06	0.10	0.02	0.05	0.00	0.00	1.92	0.94	0.00	0.01
MgO	5.54	5.95	6.60	8.39	7.99	0.01	6.97	2.58	0.00	1.78	1.45	0.00	0.14
CaO	1.92	7.05	1.98	7.85	7.63	0.04	3.96	0.00	0.04	6.63	11.21	0.08	0.16
Na ₂ O	6.88	4.67	7.13	3.79	4.00	11.57	5.78	0.67	11.98	0.06	0.06	11.62	6.89
K ₂ O	0.14	0.50	0.13	0.34	0.31	0.05	0.23	9.66	0.04	0.02	0.02	0.02	0.62
NiO	0.01	0.02	0.04	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.06
Total	98.40	98.23	98.53	97.50	98.07	99.93	97.69	94.52	100.04	101.12	100.83	100.41	95.49
Si	7.601	6.622	7.606	7.02	6.944	2.996	7.346	3.358	2.999	3.027	3.018	3.009	3.032
Ti	0.018	0.023	0.016	0.022	0.019	0.001	0.023	0.015	0.000	0.009	0.005	0.000	0.002
Al	2.147	2.92	2.139	2.071	2.227	1.009	2.256	2.248	0.994	2.011	2.029	0.99	2.964
Cr	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.003	0.003	0.000	0.001	0.002	0.001	0.000
Fe ³⁺	0.069	0.100	0.028	0.149	0.174	0.000	0.088	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
Fe ²⁺	2.008	2.057	1.826	1.937	1.936	0.000	1.814	0.162	0.000	2.007	1.731	0.000	0.012
Mn	0.002	0.006	0.005	0.007	0.012	0.001	0.006	0.000	0.000	0.128	0.062	0.000	0.001
Mg	1.174	1.298	1.388	1.834	1.737	0.001	1.489	0.258	0.000	0.209	0.169	0.000	0.013
Ca	0.292	1.106	0.299	1.234	1.192	0.002	0.608	0.000	0.002	0.56	0.94	0.004	0.011
Na	1.897	1.326	1.951	1.078	1.131	0.979	1.607	0.087	1.015	0.009	0.009	0.979	0.848
K	0.025	0.093	0.023	0.064	0.058	0.003	0.042	0.829	0.002	0.002	0.002	0.001	0.05
样品号	2.1	2.3	2.4	4.1	4.2	4.4	4.5	4.6	4.7	1.3	1.1		
矿物	Grt(C)	Grt(R)	Ab	Gln	Bar	Bar	Phe	Ab	Ab	Grt(R)	Grt(C)		
SiO ₂	37.81	38.79	68.76	53.91	47.99	47.65	50.04	68.60	68.55	37.96	38.04		
TiO ₂	0.13	0.12	0.04	0.17	0.17	0.18	0.32	0.02	0.02	0.06	0.12		
Al ₂ O ₃	21.61	22.21	19.11	12.77	11.96	12.88	27.75	19.78	19.88	21.67	21.60		
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
FeO ^T	29.63	26.08	0.06	16.97	16.98	17.32	3.23	0.04	0.08	31.36	29.91		
MnO	2.92	0.87	0.04	0.03	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	1.47	2.45		
MgO	1.15	1.54	0.00	5.65	8.70	7.75	2.40	0.02	0.00	1.83	1.13		
CaO	7.13	12.02	0.07	1.51	7.89	7.18	0.02	0.15	0.11	6.51	7.72		
Na ₂ O	0.00	0.03	11.87	7.10	3.64	3.85	0.62	11.46	11.65	0.00	0.01		
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.11	0.35	0.34	9.80	0.03	0.04	0.02	0.00		
NiO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00		
Total	100.38	101.66	99.95	98.25	97.75	97.19	94.23	100.09	100.33	100.87	101.00		
Si	3.012	3.007	3.005	7.648	7.008	6.99	3.381	2.989	2.983	3.006	3.013		
Ti	0.008	0.007	0.001	0.018	0.019	0.02	0.016	0.001	0.001	0.004	0.007		
Al	2.029	2.030	0.984	2.136	2.059	2.227	2.210	1.016	1.020	2.023	2.017		
Cr	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.002	0.061	0.205	0.213	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000		
Fe ²⁺	1.974	1.691	0.000	1.952	1.869	1.911	0.183	0.000	0.000	2.077	1.981		
Mn	0.197	0.057	0.001	0.004	0.005	0.002	0.001	0.000	0.000	0.099	0.164		
Mg	0.137	0.178	0.000	1.195	1.893	1.694	0.242	0.001	0.000	0.216	0.133		
Ca	0.609	0.998	0.003	0.23	1.235	1.129	0.001	0.007	0.005	0.552	0.655		
Na	0.000	0.005	1.006	1.953	1.031	1.095	0.081	0.968	0.983	0.000	0.002		
K	0.000	0.000	0.001	0.02	0.065	0.064	0.846	0.002	0.002	0.002	0.000		

表 6 哈布腾苏石榴白云母蓝闪片岩(ZS14-2)的代表性矿物电子探针成分

 $\omega_B/\%$

Table 6 Representative microprobe analyses of garnet muscovite glaucophane schists (Sample ZS14-2) from the Habutengsu area

样品号	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	3.1	3.2	3.3	3.4
矿物	Ab	Ab	Grt (C)	Grt (M)	Grt (R)	Pg	Gln	Phe	Ab	Grt (C)	Grt (M)	Grt (R)	Phe	Zo (I)	Gln (I)	Gln (I)	Pg	Cal	Pg	Gln
SiO ₂	68.76	68.85	38.14	38.32	38.27	47.10	57.95	50.86	68.26	38.16	38.21	38.32	50.23	39.74	56.87	57.88	47.67	0.04	48.13	58.75
TiO ₂	0.00	0.02	0.12	0.08	0.03	0.03	0.02	0.34	0.00	0.10	0.12	0.04	0.33	0.09	0.04	0.05	0.03	0.02	0.10	0.13
Al ₂ O ₃	19.86	20.02	21.95	22.06	22.12	39.64	12.24	28.20	19.74	21.86	21.99	22.19	28.01	30.55	12.06	10.95	39.50	0.05	39.72	11.49
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.03	0.07	0.00	0.02	0.01	0.03	0.00	0.08	0.05	0.02	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01
FeO ^T	0.14	0.03	31.09	30.25	29.93	0.20	10.61	2.63	0.01	30.54	30.81	29.86	2.40	4.40	14.06	12.44	0.32	0.15	0.34	12.23
MnO	0.02	0.00	2.06	1.99	0.65	0.05	0.01	0.00	0.00	2.29	1.83	0.88	0.02	0.06	0.08	0.05	0.02	0.02	0.00	0.03
MgO	0.00	0.00	1.98	2.04	2.07	0.14	9.07	2.81	0.02	1.46	1.93	2.10	2.82	0.04	7.34	8.64	0.19	0.01	0.12	8.10
CaO	0.08	0.11	6.32	6.79	8.20	0.12	0.36	0.16	0.08	7.24	6.72	7.77	0.00	23.66	0.72	0.34	0.11	53.75	0.12	0.12
Na ₂ O	11.84	11.84	0.06	0.04	0.02	7.28	7.23	0.70	11.57	0.03	0.02	0.00	0.71	0.00	7.13	6.96	6.39	0.00	6.89	7.30
K ₂ O	0.07	0.04	0.02	0.02	0.01	0.64	0.03	9.37	0.03	0.00	0.00	0.00	9.81	0.00	0.03	0.02	0.81	0.00	0.59	0.00
NiO	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.04	0.03	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Total	100.82	100.93	101.78	101.65	101.32	95.22	97.52	95.13	99.71	101.76	101.68	101.22	94.35	98.54	98.36	97.35	95.04	56.22	96.00	98.17
Si	2.982	2.981	2.994	3.001	2.998	3.006	7.961	3.383	2.987	2.999	2.998	3.003	3.376	3.017	7.886	8.035	3.037	0.001	3.037	8.064
Ti	0.000	0.001	0.007	0.005	0.002	0.001	0.002	0.017	0.000	0.006	0.007	0.002	0.017	0.005	0.004	0.005	0.001	0.001	0.005	0.013
Al	1.015	1.022	2.032	2.037	2.043	2.982	1.982	2.212	1.019	2.026	2.034	2.05	2.219	2.735	1.971	1.792	2.967	0.002	2.955	1.859
Cr	0.000	0.000	0.002	0.004	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.005	0.003	0.001	0.001	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001
Fe ³⁺	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.277	0.071	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.000	0.000	2.041	1.982	1.961	0.011	1.212	0.146	0.000	2.008	2.021	1.957	0.135	0.003	1.56	1.444	0.017	0.004	0.018	1.404
Mn	0.001	0.000	0.137	0.132	0.043	0.003	0.001	0.000	0.000	0.152	0.122	0.058	0.001	0.004	0.009	0.006	0.001	0.001	0.000	0.003
Mg	0.000	0.000	0.232	0.238	0.242	0.013	1.857	0.279	0.001	0.171	0.226	0.245	0.282	0.005	1.517	1.788	0.018	0.001	0.011	1.657
Ca	0.004	0.005	0.532	0.57	0.688	0.008	0.053	0.011	0.004	0.61	0.565	0.653	0.000	1.927	0.107	0.051	0.008	1.991	0.008	0.018
Na	0.996	0.994	0.009	0.006	0.003	0.901	1.926	0.09	0.982	0.005	0.003	0.000	0.093	0.000	1.917	1.874	0.789	0.000	0.843	1.945
K	0.004	0.002	0.002	0.002	0.001	0.052	0.005	0.796	0.002	0.000	0.000	0.000	0.842	0.000	0.005	0.004	0.066	0.000	0.048	0.000

表 7 哈布腾苏石榴白云母蓝闪石英片岩(ZS16-1)的代表性矿物电子探针成分

 $\omega_B/\%$

Table 7 Representative microprobe analyses of garnet muscovite glaucophane quartz schists (Sample ZS16-1) from the Habutengsu area

样品号	3.1	3.3	3.4	3.5	3.6	2.4	2.5	2.6	1.1	1.2	1.4	1.5	1.6
矿物	Gr(C)	Gln	Gln	Gln	Gln	Gln	Phe	Phe	Gr(C)	Gr(R)	Phe	Gln	Phe
SiO ₂	38.20	58.30	58.85	58.97	59.17	58.24	50.72	50.95	37.93	38.22	51.55	56.65	51.49
TiO ₂	0.05	0.05	0.02	0.00	0.00	0.04	0.29	0.35	0.10	0.01	0.30	0.04	0.36
Al ₂ O ₃	22.03	12.30	12.42	11.86	11.69	12.55	27.79	27.85	21.87	22.21	27.71	12.31	27.64
Cr ₂ O ₃	0.00	0.04	0.03	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.01
FeO ^T	32.79	10.20	10.13	11.04	10.97	9.78	2.03	1.95	34.40	33.22	1.95	11.84	2.05
MnO	1.02	0.04	0.01	0.06	0.03	0.01	0.01	0.00	2.06	1.10	0.02	0.02	0.00
MgO	2.63	9.17	9.55	8.77	8.95	9.88	3.11	3.20	2.72	2.64	3.23	8.37	3.08
CaO	4.56	0.41	0.45	0.08	0.06	0.63	0.02	0.01	2.50	4.57	0.02	0.68	0.04
Na ₂ O	0.00	7.00	7.21	7.34	7.19	6.93	0.71	0.76	0.09	0.01	0.80	6.81	0.66
K ₂ O	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	9.81	9.68	0.01	0.01	9.74	0.06	9.05
NiO	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02
Total	101.32	97.54	98.68	98.13	98.09	98.11	94.51	94.77	101.67	101.98	95.38	96.81	94.40
Si	3.005	7.984	7.965	8.050	8.072	7.922	3.395	3.397	2.994	2.992	3.414	7.902	3.429
Ti	0.003	0.005	0.002	0.000	0.000	0.004	0.015	0.018	0.006	0.001	0.015	0.004	0.018
Al	2.043	1.986	1.982	1.909	1.880	2.013	2.193	2.189	2.035	2.050	2.164	2.024	2.170
Cr	0.000	0.004	0.003	0.000	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.001
Fe ³⁺	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
Fe ²⁺	2.157	1.168	1.147	1.260	1.252	1.113	0.114	0.109	2.271	2.175	0.108	1.381	0.114
Mn	0.068	0.005	0.001	0.007	0.003	0.001	0.001	0.000	0.138	0.073	0.001	0.002	0.000
Mg	0.308	1.872	1.926	1.784	1.820	2.003	0.310	0.318	0.320	0.308	0.319	1.740	0.306
Ca	0.385	0.060	0.065	0.012	0.009	0.092	0.001	0.001	0.211	0.383	0.001	0.102	0.003
Na	0.000	1.859	1.892	1.943	1.902	1.828	0.092	0.098	0.014	0.002	0.103	1.842	0.085
K	0.000	0.003	0.003	0.002	0.002	0.005	0.838	0.824	0.001	0.001	0.824	0.011	0.770

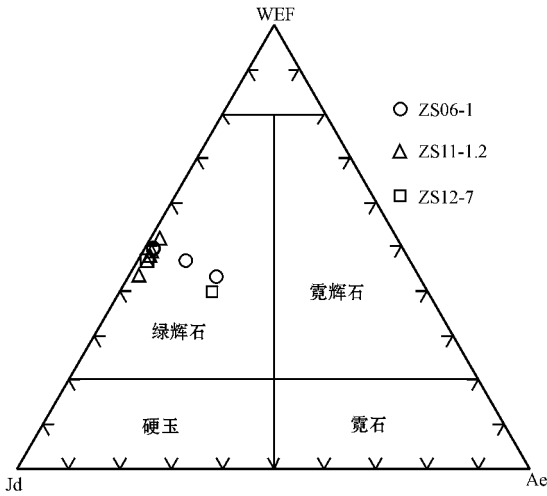


图 7 榴辉岩中单斜辉石成分分类图(据 Morimoto, 1988)

Fig. 7 Compositional classification of clinopyroxene in the eclogite (after Morimoto, 1988)

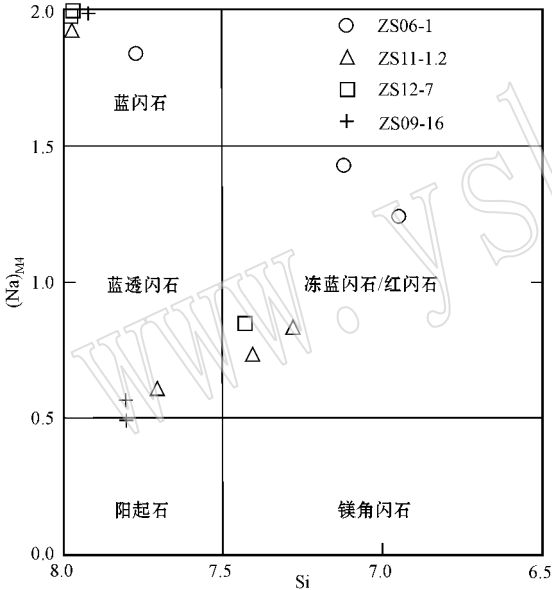


图 8 榴辉岩中角闪石成分投影图

Fig. 8 Compositional plots of amphiboles in the eclogite

质反应的产物。蓝片岩中的角闪石均为典型蓝闪石 除含蓝闪石石榴白云母钠长片岩(ZS14-1)中蓝闪石边部转变为冻蓝闪石外,其它样品的蓝闪石未发生明显的矿物相转变。样品 ZS14-1 中蓝闪石 Na_2O 含量 5.78%~7.13%, 冻蓝闪石 Na_2O 含量相比蓝闪石明显降低,为 3.64%~4.67%;石榴白云母蓝闪片岩(ZS14-2)蓝闪石 Na_2O 含量 6.96%~7.30%;石榴白云母蓝闪石英片岩(ZS16-1)蓝闪石 Na_2O 含量 6.81%~7.34%。

4.4 白云母

榴辉岩中的云母主要为钠云母,一般为片状-鳞

片状,而多硅白云母含量较少但成分均匀。钠云母在 4 类榴辉岩中均有产出,只是产状、粒径和含量有所差别,但 X_{Na} 值 [$Na/(Na+K)$] 变化不大,约 0.9。多硅白云母产于退变榴辉岩中,呈窄条状,其 Si 值约 3.325。蓝片岩中的白云母主要产在基质中,分为多硅白云母和钠云母,含蓝闪石石榴白云母钠长片岩(ZS14-1)多硅白云母 Si 值 3.358~3.381,石榴白云母蓝闪片岩(ZS14-2)多硅白云母 Si 值 3.376~3.383,石榴白云母蓝闪石英片岩(ZS16-1)主要为多硅白云母, Si 值 3.395~3.429,而钠云母含量较少,3 个蓝片岩样品钠云母接近端员组份, X_{Na} 值约 0.9。

4.5 帘石

榴辉岩帘石矿物主要为绿帘石,也有少量黝帘石。绿帘石可细分为 3 类:包体状产于石榴石变斑晶(图 3h)或钠云母变斑晶中的细粒绿帘石、基质中的细粒绿帘石和粗粒变斑晶绿帘石(图 3e)。石榴石变斑晶内产出的绿帘石主要分布在蓝闪石榴角闪岩(退变榴辉岩)中, P_s 值 [$100 \times Fe^{3+}/(Fe^{3+} + Al)$] 约 7~12,钠云母变斑晶中绿帘石包体产于钠云母榴辉岩中, P_s 值变化不大,约 12,该岩石还含有少量黝帘石变斑晶, P_s 值较低。绿帘石变斑晶主要产在绿帘石榴辉岩中,与绿辉石平衡共生,可能形成于峰期榴辉岩相变质阶段,该绿帘石变斑晶自形,纵切面长柱状,横截面多为菱形,粒度 $1\text{ mm} \times 2.5\text{ mm} \sim 2\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,具有完好的化学成分环带,核部到边部 FeO^T 含量逐渐降低, Al_2O_3 含量则逐渐升高, CaO 含量波动较大,但总体升高并且 P_s 值有逐渐降低的趋势(18~9),一般认为由于变质作用温度、压力的增加,导致了绿帘石 P_s 值的减少,并且绿帘石变斑晶含有大量绿辉石和蓝闪石包体,因此绿帘石变斑晶可能为峰期榴辉岩相变质矿物。蓝片岩中的绿帘石含量较少,仅石榴白云母蓝闪片岩中有少量黝帘石产出。

4.6 其它矿物

榴辉岩中斜长石多呈包体产于石榴石中,为富钠端员,主要为钠长石。金红石含量较少,多已转变为榍石。受后期退变质作用的改造,岩石中出现少量绿泥石。蓝片岩中的斜长石为钠长石,多呈不规则粒状,含有白云母、绿帘石、蓝闪石等包体矿物。

5 变质演化及相平衡模拟

5.1 榴辉岩

根据岩相学、成因矿物学和变质反应性质的研

究 哈布腾苏一带榴辉岩经历了 4 个阶段的变质演化:早期硬柱石蓝片岩相进变质阶段、峰期榴辉岩相变质阶段、峰后早期绿帘蓝片岩相退变质阶段和峰后晚期蓝闪绿片岩相退变质阶段。

5.1.1 早期进变质阶段

早期进变质阶段 (M_1) 的矿物组合以蓝闪石榴角闪岩(退变榴辉岩)中石榴石核部包体矿物组合 $Pg + Ep$ (硬柱石假像)(图 3h)为特征,类似的推断见于 Reinecke(1998)。该石榴石发育明显进变质生长环带,核部富 Mn,边部富 Mg。这一阶段代表了榴辉岩峰前可能曾发生了硬柱石蓝片岩相变质作用,在西南天山与蓝片岩共生的榴辉岩中已有报道(张立飞等,2000),可能的变质反应为 $Law + Ab = Pg + Ep$ 。

5.1.2 峰期榴辉岩相变质阶段

峰期榴辉岩相变质阶段 (M_2) 以蓝闪石榴辉岩中石榴石 + 基质绿辉石以及绿帘石榴辉岩中石榴石 + 基质绿辉石矿物组合为代表,其中蓝闪石榴辉岩中蓝闪石变斑晶内绿辉石包体(图 3b)以及绿帘石榴辉岩中绿帘石斑晶内绿辉石包体(图 3f),其 Jd 含量 35%~40% 小于基质中绿辉石的 Jd 值 42%~44%。峰期榴辉岩相阶段的矿物组合为 $Grt + Omp$,文中绿辉石 Fe^{2+} 含量采用 Carswell 等(1997)和 Hoschek(2004)的处理方法来计算,运用 $Fe^{3+} = Na - Al - Cr$ 估算三价铁,照此方法校正二价铁,根据 Ravna(2000) $Grt-Cpx$ 温度计,由石榴石和绿辉石成分得到该阶段的温度为 543~579℃。此外,由于榴辉岩中未发现与石榴石、绿辉石共生的多硅白云母,无法利用 $Grt-Cpx-Phe$ 地质压力计(Ravna and Terry, 2004)定量估算压力条件,只能根据绿辉石中 Jd 值估算峰期榴辉岩相的变质压力,最小压力约为 1.5~1.6 GPa。

5.1.3 峰后早期退变质阶段

峰后早期退变质阶段 (M_3) 以蓝闪石榴辉岩中蓝闪石变斑晶、蓝闪石榴角闪岩(退变榴辉岩)中蓝闪石与不等量帘石矿物组合为代表,该阶段岩石多发育丰富的退变质反应结构,如蓝闪石榴辉岩中蓝闪石变斑晶幔部转变为冻蓝闪石(图 3b),蓝闪石榴角闪岩(退变榴辉岩)中蓝闪石发生退变(图 3g),边部多环绕它形普通角闪石等,并伴随有含量不一的钠云母和榍石出现。因此,该阶段矿物组合为 $Gln + Ep + Pg$,体现峰后早期绿帘蓝片岩相(绿帘角闪岩相)的变质作用特点,由于变质反应在岩石折返过程中是非平衡反应,不能进行温压条件计算,但根据矿物组合推测其温压条件为 $t = \sim 450^\circ C$, $p < 1.0$ GPa。

5.1.4 峰后晚期退变质阶段

峰后晚期退变质阶段 (M_4) 以蓝闪石榴角闪岩中蓝闪石边部转变为钠长石和普通角闪石后成合晶为标志,矿物组合为 $Amp + Ab + Ep + Chl + Qtz$,代表了峰后晚期蓝闪绿片岩相(绿片岩相)变质作用的特点,其中蓝闪石呈残留状,且在矿物的接触部位出现少量绿泥石,变质作用温度 $< 400^\circ C$,压力 < 0.5 GPa。

5.1.5 榴辉岩的相平衡模拟

国内外多位学者陆续开展了榴辉岩的矿物化学及变质作用研究工作(吕增等,2007;张立飞等,2000;Klemd *et al.*, 2002),但由于矿物组合中缺少多硅白云母,难以利用传统地质温压计计算压力,因此吕增等(2007)、吕增(2009)应用 Thermocalc 3.1 和 Theriak/Domino 软件最初对哈布腾苏的榴辉岩进行了视剖面图计算,但由于哈布腾苏一带榴辉岩岩石类型复杂、矿物相转变多样,因此有必要对该地区开展进一步的相平衡模拟研究来限定榴辉岩的变质演化过程。本文应用最新版本(03.01.2012)的 Theriak/Domino 软件(de Capitani and Brown, 1987)通过 $p-T$ 视剖面计算了哈布腾苏一带榴辉岩形成的温压条件,软件的计算原理是对给定的全岩成分进行吉布斯自由能最小化,其计算结果与其它相平衡计算软件,如 Perplex 和 Thermocalc,具有可比性(Hoschek, 2004)。数据库采用 Berman(1988)、Evans(1990)、McMullin 等(1991)及 Maeder 和 Berman(1992)的矿物内部一致性热力学数据库。石榴石和钠质单斜辉石(绿辉石)分别采用 Berman(1990)和 Meyre 等(1997)的热力学模型。选择代表性的榴辉岩(蓝闪石榴辉岩、绿帘石榴辉岩),利用 XRF 方法得到的全岩成分换算成各离子的摩尔分数如表 8 所示。Mn 主要存在于石榴石中,被忽略。Ti 仅存于少量金红石中,且全岩含量较低,所以为了计算简单,没有考虑 Ti 这种组分。因为榴辉岩中含水矿物钠云母、蓝闪石、绿帘石大量存在,表明现存矿物组合是一水过饱和体系,假设 H_2O 含量过量,在 NCFMASH ($Na_2O-CaO-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$) 体系下计算得到的榴辉岩视剖面图如图 9a、9c 所示,温度范围为 400~700℃,压力范围为 0.5~3.0 GPa,其中灰色区域代表不同类型榴辉岩的稳定矿物组合,由于全岩成分的差异性导致 Theriak/Domino 软件在模拟低温榴辉岩 $p-T$ 条件的结果与显微镜下观察的现象有一定的差异,如绿帘石榴辉岩中难以模

表 8 哈布腾苏榴辉岩全岩成分表

Table 8 Average bulk composition of eclogites from Habutengsu area

样品号	氧化物	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	CaO	MgO	K ₂ O	Nb ₂ O ₅	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Total
ZS06-1	w _B /%	49.10	14.37	9.39	10.00	7.38	0.08	5.43	0.16	1.08	0.09	3.25	100.48
	阳离子	Si	Al	Fe*	Ca	Mg	Na	O	H	O			
	x _B /% **	46.20	15.92	7.37	10.09	10.43	0.10	149.12	200	100			
ZS12-7	w _B /%	54.40	16.38	9.52	5.15	6.24	0.82	4.24	0.13	0.76	0.21	1.26	99.63
	阳离子	Si	Al	Fe*	Ca	Mg	Na	O	H	O			
	x _B /% **	51.46	18.22	7.50	5.22	8.85	7.76	155.70	200	100			

注: * 全铁当做二价铁; ** 阳离子的摩尔分数。

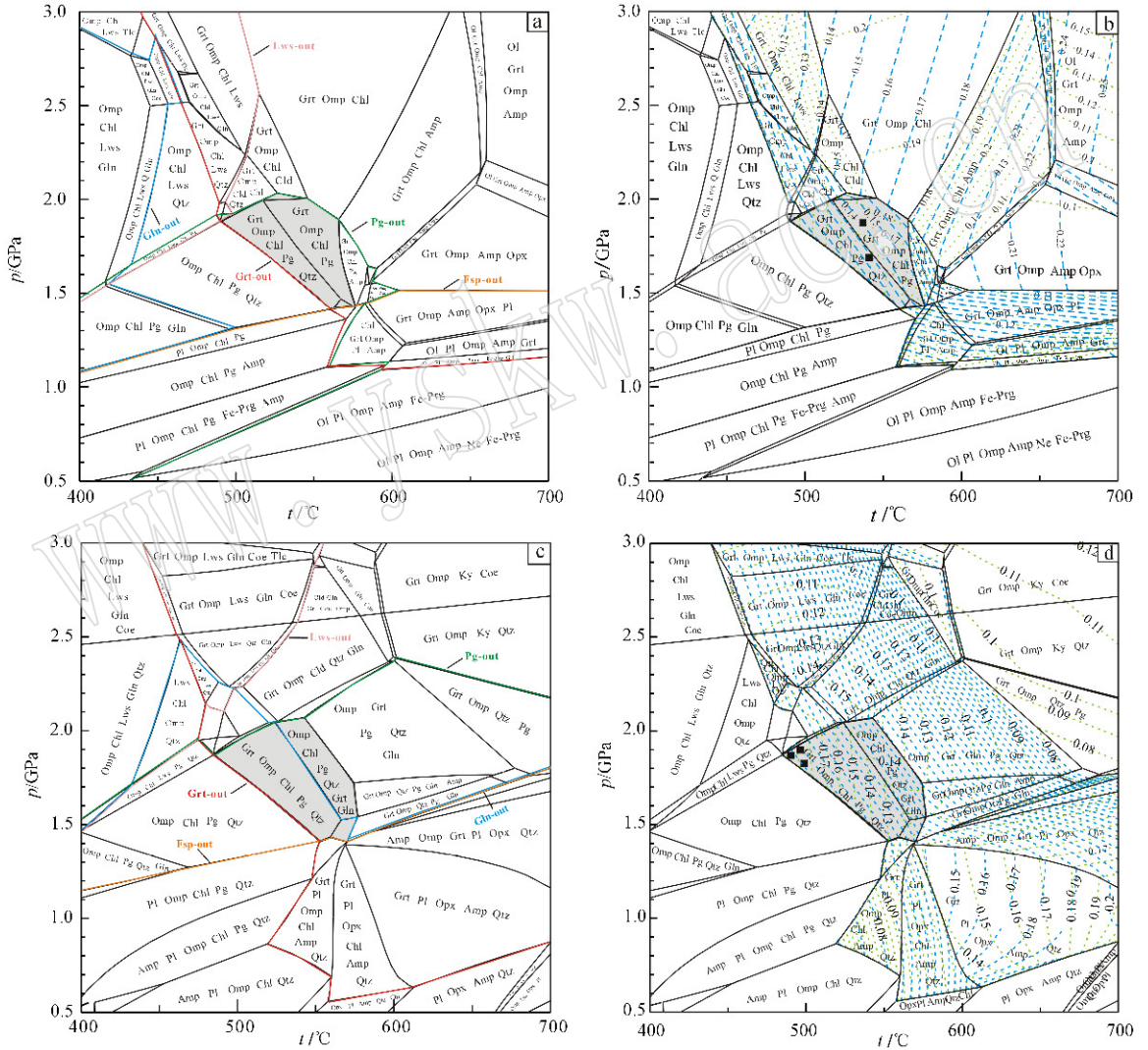


图 9 哈布腾苏一带榴辉岩在 NCFMASH 体系下的 p - T 视剖面图

Fig. 9 p - T pseudosection for eclogites in the NCFMASH from the Habutengsu area

全岩成分如表 8; 其中灰色区域代表其稳定矿物组合, 绿色断点线及蓝色虚线分别为石榴石中钙铝榴石和镁铝榴石含量等值线;

图 a、b 和图 c、d 分别代表蓝闪石榴辉岩、绿帘石榴辉岩, 矿物缩写据 Kretz(1983)

Bulk rock composition is listed in Table 8. The authors calculated the evolution of minerals of different phases in the NCFMASH system; The green field is stable mineral assemblage, and the green dot line and the blue break line are Gr and Py isoline in garnet respectively; Fig. a, b and Fig. c, d show glaucophane eclogites and epidote eclogites respectively

拟出绿帘石的稳定矿物组合,且在两个榴辉岩样品中可能由于铁镁矿物含量的影响使得绿泥石在峰期变质矿物组合中存在,理论上把绿泥石当做压力更高的硬绿泥石来看待更为合理。

本文还利用 Domino 软件计算了哈布腾苏榴辉岩中钙铝榴石(Gro)和镁铝榴石(Pyr)的等值线(图 9b、9d),并选取石榴石和绿辉石的平衡共生矿物组合,利用 Gro 和 Pyr 等值线相交法对变质过程中的温压条件进行限定,得到峰期变质的温压条件较接近: $t = 520 \sim 550^{\circ}\text{C}$, $p = 1.7 \sim 1.9 \text{ GPa}$,该温压条件与传统地质温压计估算结果十分相近。吕增运用石榴石矿物等值线的方法提出西南天山高压变质带可进一步划分为北部的超高压带和南部的高压带两部分(Lü *et al.*, 2012),这提供了一个新的视角来认识西南天山高压-超高压变质带的变质演化过程,但通过野外和室内研究发现即使同一标本的石榴石矿物化学成分都存在一定的差异,因此只有弄清了不同类型岩石中石榴石的成因,并结合矿物组合才能做出更合理的解释。

5.1.6 榴辉岩变质演化的 p - T 轨迹

根据不同类型榴辉岩各阶段温压估算结果并综合考虑相平衡模拟图解,得到哈布腾苏一带榴辉岩的变质演化 p - T 轨迹,如图 10 所示。岩相学、矿物化学表明绿帘蓝片岩相退变阶段的温度与峰期相比有所降低,但幅度较小。通过分析,哈布腾苏一带榴辉岩形成温度较低,属于低温榴辉岩,具有顺时针型近等温降压(ITD)的特点,说明哈布腾苏一带榴辉岩经历了快速抬升折返的过程,折返的过程中经历了蓝片岩相退变质阶段,即绿帘蓝片岩相退变质阶段。

5.2 蓝片岩

对于蓝片岩,由于没有合适的地质温压计,因此很难获得准确的温压条件。本文利用软件 Domino/Theriak,通过计算蓝片岩 p - T 视剖面来确定它们形成的温压条件,表 9 为计算用各样品的全岩成分表。

从岩相学观点看,每个样品中的所有矿物都不能简单归于一个矿物共生组合,因为本文研究的蓝片岩原岩可能为沉积岩,岩石在折返过程中发生大规模重结晶作用,导致早期矿物相呈包裹体仅存于石榴石内部。通过相图模拟结果表明高压-超高压变质条件下岩石中可能存在的矿物有石榴石、硬玉、硬绿泥石、蓝闪石以及硬柱石。

石榴白云母蓝闪片岩(ZS14-2)矿物组成为石榴石+蓝闪石+石英+钠长石+多硅白云母+钠云母,

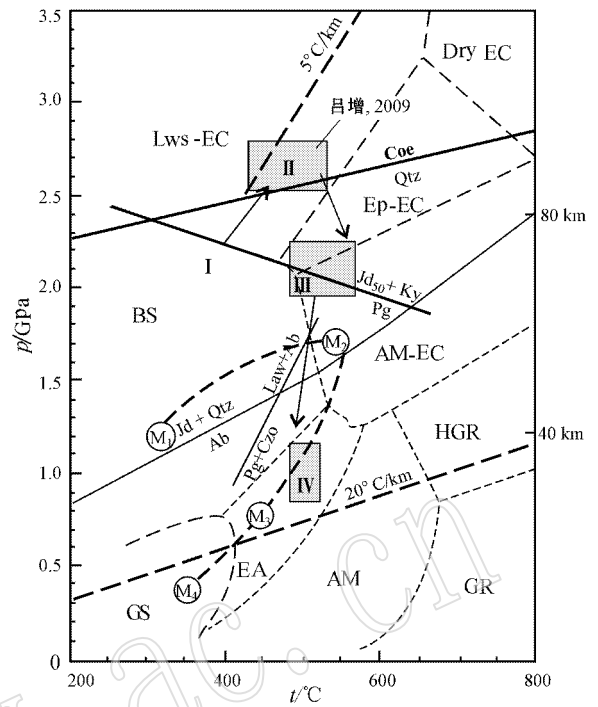


图 10 哈布腾苏一带榴辉岩的 p - T 轨迹
(底图据 Liou *et al.*, 2004)

Fig. 10 p - T path of eclogites from Habutengsu area
(modified after Liou, *et al.*, 2004)

GS—绿片岩相; BS—蓝片岩相; EA—绿帘角闪岩相; AM—角闪岩相; HGR—高压麻粒岩相; AM-EC—角闪榴辉岩相; Ep-EC—绿帘榴辉岩相; Lws-EC—硬柱石榴辉岩相
GS—greenschist facies; BS—blueschist facies; EA—epidote amphibolite facies; AM—amphibolite facies; HGR—high-pressure granulite facies; AM-EC—amphibolite eclogite facies; Ep-EC—epidote eclogite facies; Lws-EC—lawsonite eclogite facies

计算的 p - T 视剖面如图 11a 所示。由前文所描述的岩石学特征可知其峰期稳定矿物组合是 $\text{Grt} + \text{Gln} + \text{Qtz} + \text{Phe} + \text{Pg}$, 在图中位于灰色区域, 其温压范围为 $530 \sim 620^{\circ}\text{C}$, $1.7 \sim 2.3 \text{ GPa}$, 这一温压条件代表了样品中绿帘蓝片岩相区域的峰期温压条件。石榴白云母蓝闪石英片岩(ZS16-1)矿物组成为石榴石+蓝闪石+石英+钠长石+多硅白云母, 计算的 p - T 视剖面如图 11b 所示。由前文所描述的岩石学特征可知其峰期稳定矿物组合是 $\text{Grt} + \text{Gln} + \text{Qtz} + \text{Phe} + \text{Pg}$, 在图中位于灰色区域, 其温压范围为 $520 \sim 610^{\circ}\text{C}$, $1.7 \sim 2.0 \text{ GPa}$, 这一温压条件也代表了样品中绿帘蓝片岩相区域的峰期温压条件。模拟的结果表明硬玉质辉石出现的范围较宽, 可能与原岩化学成分有关, 而钠长石则可能是早期形成的硬玉晚期遭受退变质作用形成的。

本文研究的蓝片岩部分蓝闪石颗粒从核部到边缘部Ca的含量增加表明为进变质生长, 这是由于硬柱

表 9 哈布腾苏蓝片岩全岩成分表

Table 9 The average bulk composition of blueschists from the Habutengsu area

样品号	氧化物	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Total
ZS14-2	w _B /%	61.47	13.12	7.49	3.93	3.79	0.39	4.43	0.16	0.50	0.18	3.95	
	阳离子	Si	Al	Fe*	Ca	Mg	Na	O	H	O			
	x _B /% **	60.20	15.12	6.11	4.12	5.57	8.40	163.31	200	100			
ZS16-1	w _B /%	69.95	11.41	8.13	1.43	3.36	0.56	2.79	0.12	0.36	0.05	2.17	
	阳离子	Si	Al	Fe*	Ca	Mg	Na	O	H	O			
	x _B /% **	68.02	13.05	6.59	1.49	4.90	5.25	171.58	200	100			

注：* 全铁当做二价铁；** 阳离子的摩尔分数。

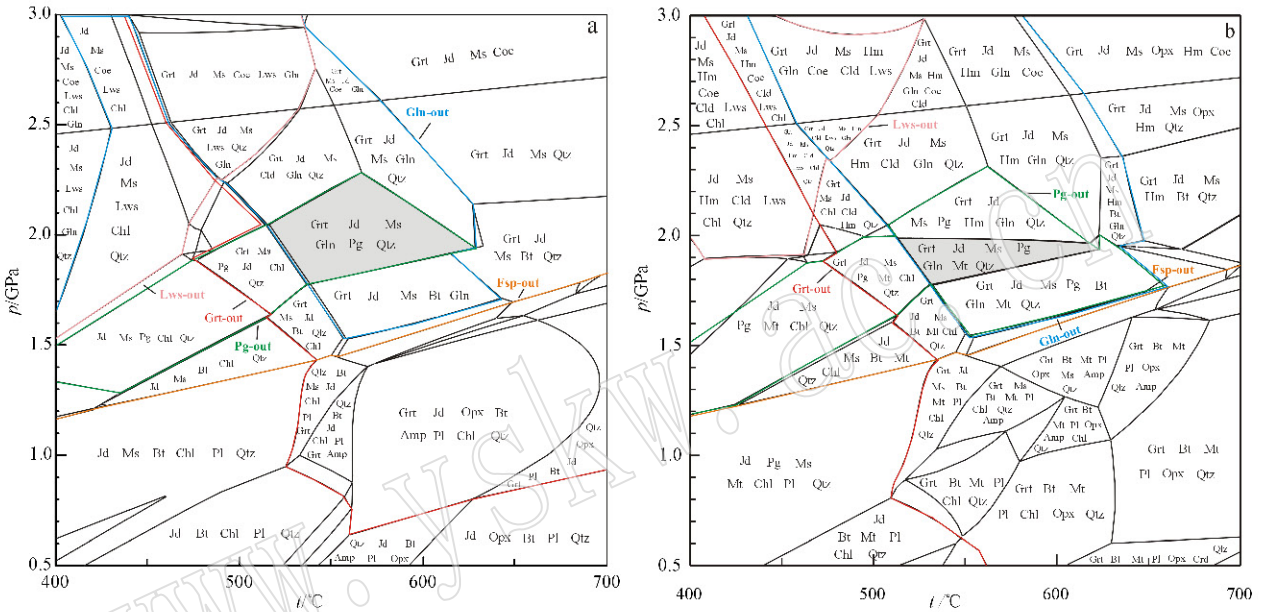


图 11 哈布腾苏一带蓝片岩在 NCFMASH 体系下的 *p-T* 视剖面图

Fig. 11 *p-T* pseudosection for blueschists in the NCFMASH from Habutengsu area

全岩成分如表 9；其中灰色区域代表其稳定矿物组合；图 a、图 b 分别代表石榴白云母蓝闪片岩、石榴白云母蓝闪石英片岩，矿物缩写据 Kretz(1983)

Bulk rock composition is listed in Table 9; The authors calculated the evolution of minerals of different phases in the NCFMASH system;

Fig. a and Fig. b show garnet muscovite glaucophane schists and garnet muscovite glaucophane quartz schists respectively

石的分解反应形成，而石榴石则通过铁镁矿物如硬绿泥石或者绿泥石的分解形成。随着温度的升高，含水矿物如绿泥石、硬绿泥石、蓝闪石逐渐消失，硬柱石和多硅白云母则可以存在于更高的温压条件下，但其稳定域也随着全岩成分的变化而改变。硬绿泥石蓝闪石片岩中硬柱石的发现表明西南天山变质带蓝片岩早期经历了硬柱石蓝片岩相变质作用，峰期地热梯度为 6~8°C/km(Du *et al.*, 2011)，随后经历从硬柱石蓝片岩相到绿帘石蓝片岩相的等温降压过程，并快速抬升到地表。含硬柱石组合稳定于相对低的温度和高压条件下，压力降低，低温下硬柱石被绿帘石取代，高温下则被石榴石取代。硬绿泥石 + 蓝闪石的组合稳定于一个较宽的 *p-T* 域内，压力降低，硬绿泥石低温下分解形成绿泥石，高温下分

解形成石榴石，压力升高，硬绿泥石易于转变为纤锰柱石(Du *et al.*, 2011)。在退变质作用阶段，岩石经历了等温降压过程，导致硬玉消失，形成大量钠长石，因此本文研究的蓝片岩已很难保留早期变质阶段形成的硬玉，仅存硬玉转变成的钠长石颗粒。

6 讨论和结论

6.1 讨论

吕增等(2007)研究了哈布腾苏的角闪榴辉岩和钠云母榴辉岩，确定了两阶段榴辉岩相变质作用，而退变质阶段则经历了绿帘角闪岩相变质作用。前人在哈布腾苏与阿坦塔义一带榴辉岩及围岩片岩中均发现了柯石英(Lü *et al.*, 2008; 吕增, 2009; 吕增

等, 2012) 表明西南天山哈布腾苏河一带榴辉岩及其围岩曾经历了超高压变质作用, 这与本文估算榴辉岩峰期变质压力条件明显相悖, 原因可能如下: ①由于后期退变质作用的影响, 引起研究区榴辉岩全岩成分、矿物化学成分的调整, 在采用 Grt-Cpx-Phe 温压计以及以全岩成分为基础的相平衡模拟方法估算峰期温压条件受到影响, 进而引起估算峰期压力条件普遍偏低; ②西南天山的榴辉岩可能并非全都经历了超高压变质作用, 高压、超高压榴辉岩可能分别代表了不同变基性岩块在不同俯冲深度变质的产物, 因此查明西南天山变质带中高压-超高压岩片的时空分布规律具有重要的意义。Wei 和 Powell(2004, 2006) 在 NCKFMASH 体系下计算了含蓝闪石片岩的峰期温压条件, 与吕增等(2007) 角闪石榴辉岩的温压条件相似, 表明榴辉岩和含蓝闪石的片岩共同经历了榴辉岩相变质作用。本文研究的蓝片岩与榴辉岩密切共生, 相平衡模拟结果表明也经历了与榴辉岩类似的变质温压条件。榴辉岩获得的变质 p - T 轨迹为顺时针型, 记录了等温降压的变质演化过程。

世界各地的榴辉岩和蓝片岩带标志了古俯冲带的位置(Maruyama *et al.*, 1996), 温压条件、全岩成分是控制岩石不同矿物组合的主要因素, 而榴辉岩和蓝片岩的伴生通常认为是在不同温压条件下形成的, 并且受到俯冲过程中流体渗透作用以及抬升过程中叠加的退变质作用的影响最终形成了不同的矿物组合。榴辉岩和蓝片岩最终能出露到地表, 与洋壳俯冲过程中携带大量沉积物进入俯冲带深部关系密切。以往研究表明, 研究区蓝片岩的原岩可能为沉积岩, 沉积岩因密度小, 具有较大的浮力, 构成了洋壳岩石折返的驱动力, 这可能是西南天山高压-超高压地体快速折返的主要原因。折返的地体到达地壳浅部层次后, 在绿帘蓝片岩相条件下发生重结晶作用, 导致榴辉岩和蓝片岩矿物组合发生再次调整。Gomez Pugnare 等(1997) 认为榴辉岩和共生的蓝片岩 $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ 比例控制了绿辉石的形成, 而对钠质闪石影响不大, 低 $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ 比值易于形成榴辉岩岩石组合, 而高 $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ 比值易于形成蓝片岩组合。Vitale Brovarone 等(2011) 认为岩石矿物组合除了受 $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ 影响外, 还受 CaO 含量的影响。 CaO 含量高的原岩易于形成榴辉岩, 而 CaO 含量低原岩易于形成蓝片岩。随着研究的深入, 传统意义的榴辉岩和蓝片岩以及过渡类型岩石的演化主要是由全岩成分控制还是由温压条件控制仍

具有较大的争议。因此, 对西南天山榴辉岩、蓝片岩和过渡类型岩石的产状、地球化学特征, 及其与围岩成因关系的进一步深入研究, 对于揭示西南天山造山带的形成演化具有重要的意义。

6.2 结论

(1) 西南天山哈布腾苏一带出露典型的榴辉岩和蓝片岩, 其中榴辉岩主要由蓝闪石榴辉岩、钠云母榴辉岩、绿帘石榴辉岩、蓝闪石榴角闪岩(退变榴辉岩)组成, 蓝片岩主要由含蓝闪石石榴白云母钠长片岩、石榴白云母蓝闪片岩、石榴白云母蓝闪石英片岩组成。

(2) 西南天山哈布腾苏一带的榴辉岩可能并非全都经历了超高压变质作用, 高压、超高压榴辉岩可能分别代表了不同变基性岩块在不同俯冲深度变质的产物。相平衡模拟表明研究区榴辉岩与蓝片岩一起经历了榴辉岩相变质作用。

(3) 西南天山哈布腾苏一带的榴辉岩变质演化可分为四个阶段: 早期硬柱石蓝片岩相变质阶段、峰期榴辉岩相变质阶段($t = 543 \sim 579^\circ\text{C}$, $p = 1.5 \sim 1.6 \text{ GPa}$) 峰后早期绿帘蓝片岩相退变质阶段($t = \sim 450^\circ\text{C}$, $p < 1.0 \text{ GPa}$) 峰后晚期蓝闪绿片岩相退变质阶段($t < 400^\circ\text{C}$, $p < 0.5 \text{ GPa}$)。利用 Theriak/Domino 相图计算软件模拟不同类型榴辉岩的峰期变质条件较接近: $t = 520 \sim 550^\circ\text{C}$, $p = 1.7 \sim 1.9 \text{ GPa}$; 而蓝片岩的温压条件范围较宽, $t = 520 \sim 620^\circ\text{C}$, $p = 1.7 \sim 2.3 \text{ GPa}$ 。近等温减压顺时针 p - T 轨迹揭示了研究区经历了碰撞造山的动力学演化过程。

致谢 本次野外研究工作得到北大张立飞教授、吕增博士和博士研究生夏彬、陶仁彪、申婷婷、田作林以及西北大学苟龙龙博士的全力帮助; 北京大学电子探针实验室舒桂明高工、中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室毛骞和马玉光高工在实验过程中给予了很大的帮助; 匿名审稿人认真审阅了本文, 并提出了许多宝贵的修改意见, 在此一并致以诚挚的谢意。

References

- Beinlich A, Klemd R, John T, *et al.* 2010. Trace-element mobilization during Ca-metasomatism along a major fluid conduit: Eclogitization of blueschist as a consequence of fluid-rock interaction [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(6): 1892~1922.
- Berman R G. 1988. Internally consistent thermodynamic data for miner-

- als in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ [J]. *Journal of Petrology*, 29 : 445~522.
- Berman R G. 1990. Mixing properties of Ca-Mg-Fe-Mn garnets [J]. *American Mineralogist*, 75 : 328~344.
- Brovarone A V, Groppo C, Hetényi G, *et al.* 2011. Coexistence of lawsonite bearing eclogite and blueschist : phase equilibria modelling of Alpine Corsica metabasalts and petrological evolution of subducting slabs [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(5) : 583~600.
- Carswell D A, O'Brien P J, Wilson R N, *et al.* 1997. Thermobarometry of phengite-bearing eclogites in the Dabie Mountains of central China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 15 : 239~252.
- de Capitani C and Brown T H. 1987. The computation of chemical equilibrium in complex systems containing non-ideal solutions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51 : 2 639~2 652.
- Du Jinxue, Zhang Lifei, Lü Zeng, *et al.* 2011. Lawsonite-bearing chloritoid-glaucophane schist from SW Tianshan, China : Phase equilibria and *p-T* path [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(4) : 684~693.
- Ernst W G. 2001. Subduction, ultrahigh-pressure metamorphism, and regurgitation of buoyant crustal slices : Implications for arcs and continental growth [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 127 : 253~275.
- Ernst W G. 2006. Preservation/exhumation of ultrahigh-pressure subduction complexes [J]. *Lithos*, 92 : 321~335.
- Ernst W G and Liou J G. 1995. Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belts [J]. *Geology*, 23 : 353~356.
- Evans B W. 1990. Phase relations of epidote-blueschists [J]. *Lithos*, 25 : 3~23.
- Gao Jun and Klemd R. 2003. Formation of HP-LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China : geochemical and age constraint [J]. *Lithos*, 66 : 1~22.
- Gao Jun, Li Maosong, Xiao Xuchang, *et al.* 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China [J]. *Tectonophysics*, 287 : 213~231.
- Gomez-Pugnaire M, Karsten L and Sanchez-Vizcaino V L. 1997. Phase relationships and PT conditions of coexisting eclogite-blueschists and their transformation to greenschist-facies rocks in the Nerka Complex (Northern Urals) [J]. *Tectonophysics*, 276(1) : 195~216.
- Gou Longlong and Zhang Lifei. 2009. Petrology and U-Th-Pb chemical monazite dating of the low-*P* metapelitic granulites at the region of Muzhaerte River in southwestern Tianshan, NW China, and their geological implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(09) : 2 271~2 280 (in Chinese with English abstract).
- Holland T J B and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3) : 309~343.
- Hoschek G. 2004. Comparison of calculated *P-T* pseudosections for a kyanite eclogite from the Tauern Window, Eastern Alps, Austria [J]. *European Journal of Mineralogy*, 16 : 59~72.
- John T, Klemd R, Gao Jun, *et al.* 2008. Trace-element mobilization in slabs due to non steady-state fluid-rock interaction : constraints from an eclogite-facies transport vein in blueschist (Tianshan, China) [J]. *Lithos*, 103(1) : 1~24.
- Klemd R, Schröter F C, Will T M, *et al.* 2002. P-T evolution of glaucophane-omphacite bearing HP-LT rocks in the Western Tianshan Orogen, NW China : new evidence for ' Alpine-type ' tectonics [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 20 : 239~254.
- Kretz R. 1983. Symbols of rock-forming minerals [J]. *American Mineralogist*, 68 : 277~279.
- Leake B E, Wooley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles : report of the Subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names [J]. *European Journal of Mineralogy*, 9 : 623~651.
- Li Jilei, Klemd R, Gao Jun, *et al.* 2012. Coexisting carbonate-bearing eclogite and blueschist in SW Tianshan, China Petrology and phase equilibria [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60 : 174~187.
- Li Qiang and Zhang Lifei. 2004. The *P-T* path and geological significance of low-pressure granulite-facies metamorphism in Muzhaerte, Southwest Tianshan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3) : 583~594 (in Chinese with English abstract).
- Liou J G, Tsujimori T, Zhang R Y, *et al.* 2004. Global UHP metamorphism and continental subduction/collision : The Himalayan mode [J]. *International Geology Review*, 46 : 1~27.
- Lü Zeng. 2009. High- to Ultrahigh-Pressure Metamorphism Research from Habutengsu, Southwestern Tianshan, Xinjiang (PhD Dissertation) [D]. Beijing : Peking University (in Chinese).
- Lü Zeng, Bucher K, Zhang Lifei, *et al.* 2012. The Habutengsu metapelites and metagreywackes in western Tianshan, China : metamorphic evolution and tectonic implications [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 30 : 907~926.
- Lü Zeng and Zhang Lifei. 2012. Coesite in the eclogite and schist of the Atantayi Valley, southwestern Tianshan, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(9) : 683~688.
- Lü Zeng, Zhang Lifei, Du Jinxue, *et al.* 2008. Coesite inclusions in garnet from eclogitic rocks in western Tianshan, northwest China : Convincing proof of UHP metamorphism [J]. *American Mineralogist*, 93 : 1 845~1 850.
- Lü Zeng, Zhang Lifei, Qu Junfeng, *et al.* 2007. Petrology and metamorphic *P-T* path of eclogites from Habutengsu, southwestern Tianshan, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7) : 1 617~1 626 (in Chinese with English abstract).
- Maeder U and Berman R G. 1992. Current Research, Part E. Geological Survey of Canada [M]. Paper 92~1E.
- Maruyama S, Liou J G and Terabayashi M. 1996. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation [J]. *International Geology Review*, 38 : 485~594.
- McMullin D W A, Berman R G and Greenwood H J. 1991. Calibration of the SGAM thermobarometer for pelitic rocks using data from phase-equilibrium experiments and natural assemblages [J]. *The Canadian Mineralogist*, 29 : 889~908.
- Meyre C, de Capitani C and Partzsch J H. 1997. A ternary solid solution model for omphacite and its application to geothermobarometry of eclogites from the Middle Adula nappe (Central Alps, Switzerland)

- [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 15 : 687~700.
- Morimoto N. 1988. Nomenclature of pyroxenes[J]. *Mineralogical Magazine*, 52 : 535~550.
- O'Brien P.J. 1997. Garnet zoning and reaction textures in overprinted eclogites, Bohemian Massif, European Variscides: A record of their thermal history during exhumation[J]. *Lithos*, 41 : 119~133.
- Ravna E.K. 2000. The garnet-clinopyroxene Fe^{2+} -Mg geothermometer: an updated calibration[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18 : 211~219.
- Ravna E.J.K and Terry M.P. 2004. Geothermobarometry of UHP and HP eclogites and schists - an evaluation of equilibria among garnet-clinopyroxene-kyanite-phengite-coesite/quartz[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 22 : 579~592.
- Reinecke T. 1998. Prograde high-to ultrahigh-pressure metamorphism and exhumation of oceanic sediments at Lago di Cignana, Zermatt-Saas Zone, western Alps[J]. *Lithos*, 42 : 147~189.
- Smith D.C. 1988. A review of the peculiar mineralogy of the Norwegian coesite-eclogite province, with crystal-chemical, petrological, geochemical and geodynamical notes and an extensive bibliography[A]. Smith D.C. *Eclogites and Eclogite Facies Rocks*[C]. Amsterdam: Elsevier, 1~126.
- Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaoling, et al. 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study from the northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data[J]. *Journal of Petrology*, 47 : 435~455.
- Song Shuguang, Su Li, Niu Yaoling, et al. 2009. Two types of peridotite in North Qaidam UHPM belt and their tectonic implications for oceanic and continental subduction: A review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35 : 285~297.
- van der Straaten F, Schenk V, John T, et al. 2008. Blueschist-facies rehydration of eclogites (Tian Shan, NW-China): implications for fluid-rock interaction in the subduction channel[J]. *Chemical Geology*, 255(1): 195~219.
- Vitale Brovarone A, Groppo C, Hetényi G, et al. 2011. Coexistence of lawsonite-bearing eclogite and blueschist: phase equilibria modelling of Alpine Corsica metabasalts and petrological evolution of subducting slabs[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(5): 583~600.
- Wei Chunjing and Powell R. 2004. Calculated phase relations in high-pressure metapelites in the system NCKFMASH (Na_2O - K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O) [J]. *Journal of Petrology*, 45 : 183~202.
- Wei Chunjing and Powell R. 2006. Calculated phase relations in the system NCKFMASH (Na_2O - CaO - K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O) for high-pressure metapelites[J]. *Journal of Petrology*, 47 : 385~408.
- Zhang Lifei, Ai Yongliang, Li Qiang, et al. 2005. The formation and tectonic evolution of UHP metamorphic belt in southwestern Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1 029~1 038 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lifei, Ai Yongliang, Li Xuping, et al. 2007. Triassic collision of western Tianshan orogenic belt, China: Evidence from SHRIMP U-Pb dating of zircon from HP/UHP eclogitic rocks[J]. *Lithos*, 96 : 266~280.
- Zhang Lifei, Ellis D.J and Jiang W.B. 2002a. Ultrahigh-pressure metamorphism in western Tianshan, China: Part I: Evidence from inclusions of coesite pseudomorphs in garnet and from quartz exsolution lamellae in omphacite in eclogites[J]. *American Mineralogist*, 87 : 853~860.
- Zhang Lifei, Ellis D.J, Arculus R.J, et al. 2003b. Forbidden zone subduction of sediments to 150 kms depth-the reaction of dolomite to magnesite + aragonite in the UHPM metapelites from western Tianshan, China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21 : 523~529.
- Zhang Lifei, Ellis D.J, Williams S, et al. 2002b. Ultrahigh-pressure metamorphism in western Tianshan, China, part II: evidence from magnesite in eclogite[J]. *The American Mineralogist*, 87 : 861~866.
- Zhang Lifei, Ellis D.J, Williams S, et al. 2003a. Ultrahigh pressure metamorphism in eclogites from the Western Tianshan, China-Reply [J]. *American Mineralogist*, 88 : 1 157~1 160.
- Zhang Lifei, Gao Jun, Ekerbair S, et al. 2000. Low temperature eclogite facies metamorphism in Western Tianshan, Xinjiang[J]. *Science in China (Series D)*, 30(4): 345~354 (in Chinese).
- Zhang Lifei, Song Shuguang, Liou J.G, et al. 2005. Relict coesite exsolution in omphacite from Western Tianshan eclogites, China[J]. *American Mineralogist*, 90 : 181~186.
- Zhu Yongfeng, Zhang Lifei, Gu Libing, et al. 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in Western Tianshan Mountains[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(18): 2 004~2 014 (in Chinese).

附中文参考文献

- 苟龙, 张立飞. 2009. 新疆西南天山木扎尔特河一带低压泥质麻粒岩岩石学特征、独居石 U-Th-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 25(9): 2 271~2 280.
- 李强, 张立飞. 2004. 新疆西南天山木扎尔特一带低压麻粒岩相变质作用 p - T 轨迹及其地质意义[J]. *岩石学报*, 20(3): 583~594.
- 吕增. 2009. 中国西南天山哈布腾苏一带的高压-超高压变质作用研究[博士学位论文][D]. 北京大学.
- 吕增, 张立飞. 2012. 西南天山阿坦塔义一带片岩和榴辉岩中的柯石英[J]. *科学通报*, 57(9): 683~688.
- 吕增, 张立飞, 曲军峰, 等. 2007. 新疆西南天山哈布腾苏一带榴辉岩的岩石学特征及变质作用 p - T 轨迹[J]. *岩石学报*, 23(7): 1 617~1 626.
- 张立飞, 高俊, 艾科拜尔, 等. 2000. 新疆西天山低温榴辉岩相变质作用研究[J]. *中国科学(D辑)*, 30(4): 345~354.
- 张立飞, 艾永亮, 李强, 等. 2005. 新疆西南天山超高压变质带的形成与演化[J]. *岩石学报*, 21(4): 1 029~1 038.
- 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 等. 2005. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究[J]. *科学通报*, 50(18): 2 004~2 014.