

点苍山-哀牢山杂岩带中北段嘎洒地区变沉积岩的成因矿物学与变质演化特征

冀磊, 刘福来, 王舫, 蔡佳, 王伟, 田忠华, 刘利双

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 点苍山-哀牢山变质杂岩带中北段嘎洒地区出露了多种典型的变沉积岩, 其中夕线石榴黑云二长片麻岩和二云母片岩保存多期/多阶段矿物相转变特征, 本文通过岩相学和矿物化学的综合分析, 并结合传统矿物对温压计的估算结果, 限定上述典型变沉积岩峰期角闪-麻粒岩相(M_1)阶段、近等温减压-高温剪切变形阶段(M_2)和晚期退变质(M_3)阶段的矿物组合及变质温压条件。峰期角闪-麻粒岩相(M_1)阶段的矿物组合为: 石榴石(Grt)+板柱状夕线石(Sil_1)+黑云母(Bt_1)+钾长石(Kfs)+斜长石(Pl)+石英(Qtz)+钛铁矿(Ilm), 变质温度压力条件为 $t = 690 \sim 750^\circ\text{C}$, $p = 690 \sim 810 \text{ MPa}$; 近等温减压-高温剪切变形阶段(M_2)阶段, 稳定矿物组合为: Grt + Sil_2 + Bt_2 + Kfs + Pl + Qtz + Ilm, 黑云母在强烈走滑剪切作用下发生脱水熔融反应: $2 Bt \rightarrow Sil + 6 (Mg, Fe)O + K_2O + 5 Qtz + 2 H_2O$, 石榴石、黑云母和夕线石等受到剪切变形影响而发生强烈定向, 形成的温度压力条件为 $t = 650 \sim 720^\circ\text{C}$, $p = 450 \sim 630 \text{ MPa}$; 晚期退变质阶段(M_3)的稳定矿物组合为: Qtz + Bt + Ms + Pl, 退变的温度压力条件为 $t = 580 \sim 640^\circ\text{C}$, $p = 400 \sim 500 \text{ MPa}$ 。其变质演化 p - T 轨迹样式具有近等温减压的顺时针样式, 表明点苍山-哀牢山变质杂岩带曾经历了一次明显的俯冲-碰撞造山事件, 峰期变质可达到角闪-麻粒岩相; 在碰撞后的构造折返过程中, 上述变质岩石发生强烈的高温剪切变形作用, 并伴随着黑云母等含水矿物的脱水熔融。

关键词: 变沉积岩; 成因矿物学; 变质作用; 变质温压计; 变质演化; 嘎洒地区; 点苍山-哀牢山变质杂岩带

中图分类号: P588.2; P571

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)06-1003-22

Genetic mineralogy and metamorphic evolution of metasedimentary rocks in Gasa area, middle-north segment of Ailao Mountain metamorphic complex belt

Ji Lei, Liu Fu-lai, Wang Fang, Cai Jia, Wang Wei, Tian Zhong-hua and Liu Li-shuang

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

Abstract: Meta-sedimentary rocks comprising sillimanite-garnet-biotite gneisses and mica schist are cropped out in the middle-north segment of Ailao Mountain metamorphic complex belt. Petrographic observation reveals that the sillimanite-garnet-biotite gneisses experienced amphibolite-granulite facies metamorphism and subsequent retrogressive superimposition. Traditional thermobarometry (GB-GASP) was applied to constraining p - T conditions of the mineral assemblage at each metamorphic stage. The mineral assemblage of the peak stage (M_1) is characterized by Grt + Sil_1 + Bt_1 + Kfs + Pl + Qtz + Ilm, recording p - T conditions of $690 \sim 750^\circ\text{C}$ and $690 \sim 810 \text{ MPa}$. The near-isothermal decompressional stage (M_2) is distinguished by the directional alignment of all metamorphic minerals, with typical dehydration reaction being $2 Bt \rightarrow Sil + 6 (Mg, Fe)O + K_2O + 5 Qtz + 2 H_2O$, and mineral assemblage is characterized by Grt + Sil_2 + Bt_2 + Kfs + Pl + Qtz + Ilm, formed under p - T conditions

收稿日期: 2016-07-07; 接受日期: 2016-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372069, 41302039); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600310)

作者简介: 冀磊(1988-), 男, 汉族, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: jileicags@126.com。

of 650~720°C and 450~630 MPa. The mineral assemblage of the retrograde stage (M_3) is composed of Bt + Ms + Qtz + Pl, suggesting p - T conditions of 580~640°C and 400~500 MPa. The metamorphic evolution is characterized by an isothermal decompressional clockwise p - T path, revealing a subduction and continent-continent collision process between Indian and Yangtze blocks, following a tectonic exhumation accompanied by high temperature strike-slip shearing and biotite dehydration-melting.

Key words: meta-sedimentary rock; genetic mineralogy; metamorphism; thermobarometry; p - T path; Gasa; Ailao Mountain complex belt

Fund support: National Natural Science Foundation(41372069, 41302039); National Key Research and Development Plan (2016YFC0600310)

点苍山-哀牢山变质杂岩带作为印支陆块与扬子陆块的分界,记录了古特提斯洋闭合、印度-亚欧板块碰撞、红河-哀牢山大型剪切走滑等多期重大地质事件(Tapponnier *et al.*, 1990; Schärer *et al.*, 1990, 1994; Leloup *et al.*, 1993, 1995, 2001; Zhang *et al.*, 1994; Gilley *et al.*, 2003; Searle *et al.*, 2006, 2010; 张进江等, 2006; 李宝龙等, 2008, 2009; 曹淑云等, 2009; Jian *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2013; Lai *et al.*, 2014)。长期以来,点苍山-哀牢山变质杂岩带一直是构造变形、多期岩浆-深熔事件及造山型金矿研究的热点地区(Tapponnier *et al.*, 1990; 钟大赟, 1998; 刘俊来等, 2006, 2008; 王舫等, 2011, 2013; Liu Junlai *et al.*, 2012; 2015; Liu Fulai *et al.*, 2013, 2015; Deng *et al.*, 2014a, 2014b; Liu Huichun, 2015)。该变质杂岩带中出露大量以残片形式产出的变沉积岩,主要为黑云斜长片麻岩、(含蓝晶石)夕线石榴黑云斜长(二长)片麻岩、白云质大理岩、二云母片岩、变质长石石英砂岩、石英岩等(刘发刚, 2005; 王舫等, 2011, 2013; 王冬兵等, 2013; Wang *et al.*, 2016)。对于该杂岩带中变沉积岩的变质演化,前人(Tapponnier *et al.*, 1990; Leloup *et al.*, 1993, 1995, 1999, 2001; Gilley *et al.*, 2003)通过矿物化学分析、矿物对温压计估算和热传导数值模拟等研究认为:杂岩带的变质演化主要受控于红河-哀牢山左行走滑-剪切,即大规模走滑-剪切是引起高温变质作用的一种机制,且变质峰期压力一般不超过 600 MPa。

然而,近年来部分研究者对点苍山-哀牢山变质杂岩带中大理、元江、元阳地区的变沉积岩的变质演化和同位素年代学进行了较深入的研究(王舫等, 2011, 2013; Liu Fulai *et al.*, 2013, 2015; Wang *et al.*, 2016),发现变沉积岩具有近等温减压的顺时针 p - T 演化轨迹,与碰撞造山构造背景存在密切的成

因关系。而区域上的走滑剪切作用则可能发生在构造折返-抬升的近等温减压阶段。同时,利用传统矿物对温压计和相平衡模拟等方法对杂岩带中含蓝晶石夕线石榴黑云斜长(二长)片麻岩进行温压估算,得到峰期变质压力可达 800~930 MPa(王舫等, 2013; Wang *et al.*, 2016)。杂岩带内变沉积岩、斜长角闪岩、石榴辉石岩和浅色深熔脉体的锆石年代学和锆石包裹体研究(Liu Fulai *et al.*, 2013, 2015)发现点苍山-哀牢山杂岩带经历了中、晚三叠世和新生代两期变质作用,其中新生代变沉积岩变质峰期矿物组合为 Grt + Ky + St + Bt + Kfs + Qtz, 近等温降压阶段矿物组合为 Grt + Sil + Bt + Kfs + Qtz + Ap, 指示在红河-哀牢山左行走滑-剪切之前印支陆块与扬子陆块之间存在俯冲-碰撞作用。

与哀牢山南段的元江、元阳、河口和点苍山相似,点苍山-哀牢山杂岩带中北段的嘎洒地区也出露有大量的变沉积岩,记录了多个变质阶段矿物组合,且矿物相转变结构及变质反应十分复杂。截至目前,对嘎洒地区这些典型的变沉积岩的变质演化、矿物相转变关系及每个变质阶段形成的温压条件研究相对薄弱。鉴于此,本文以嘎洒地区典型变沉积岩为重点研究对象,通过岩相学、矿物相转变结构及变质反应性质的综合观察,配合矿物化学和温压计估算的综合研究结果,厘定变质演化不同阶段的稳定矿物组合,限定它们形成的温压条件,进而建立变质演化 p - T 轨迹,为进一步深入探讨点苍山-哀牢山变质杂岩带的构造背景及演化的动力学过程提供可靠的岩相学和变质作用的新证据。

1 地质背景

点苍山-哀牢山变质杂岩带为“三江”地区一条重要的缝合带(图 1a),是古特提斯洋闭合过程中扬

子陆块和印支陆块的碰撞边界(钟大赉, 1998; Cai *et al.*, 2014)。新生代受印度-亚欧板块碰撞影响发育大规模北西-南东向的左行剪切-走滑运动(Schärer *et al.*, 1990, 1994; Leloup *et al.*, 1993, 1995, 2001; Gilley *et al.*, 2003; Searle *et al.*, 2006, 2010; 刘俊来等, 2006; Tang *et al.*, 2013)。点苍山-哀牢山变质杂岩带北东边界为后期右行正断的红河断裂, 并沿其形成狭窄的新生代盆地(图 1b); 南西边界为分割杂岩带与兰坪-思茅中生代沉积盆地的阿墨江断裂(张进江等, 2006)。同时, 以中部哀牢山断裂为界又将杂岩带分为西部的浅变质岩带和东部的深变质带。西部带主要为绿片岩相的浅变质岩系, 1:5 万腰街幅地质图^①中将浅变质岩系统一划归为马邓岩群, 从下向上分为大坪坝、转马路、外麦地 3 个岩组, 岩性主要为绢云板岩、千枚岩、变质粉砂岩、

细晶大理岩、绿泥片岩、石英岩、板状泥质灰岩、变质硅质岩, 马邓岩群上部被中、上三叠系变质砂砾岩不整合覆盖, 沉积时代为早古生代, 其中侵入有早古生代基性岩脉和超基性岩体, 而新平双沟地区发育有典型的蛇绿岩套组合(Zhang *et al.*, 1994; Lai *et al.*, 2014)。深变质岩带岩性以片麻岩、(石榴)云母片岩、变质长石石英岩、大理岩、斜长角闪岩为主局部发育混合岩化, 称为哀牢山群。并侵入有新元古代(Cai *et al.*, 2014; Qi *et al.*, 2014, 2016)、二叠纪-三叠纪、白垩纪以及古近纪的花岗岩(李宝龙等, 2008, 2009; Liu Huichun *et al.*, 2015), 其变质程度可达高角闪岩相局部含麻粒岩透镜体(Liu Junlai *et al.*, 2015)。传统上认为哀牢山群由下向上由小羊街组、阿龙组、凤岗组组成(云南省地质矿产局, 1990), 但由于岩石变质程度较深, 混合岩化强烈,

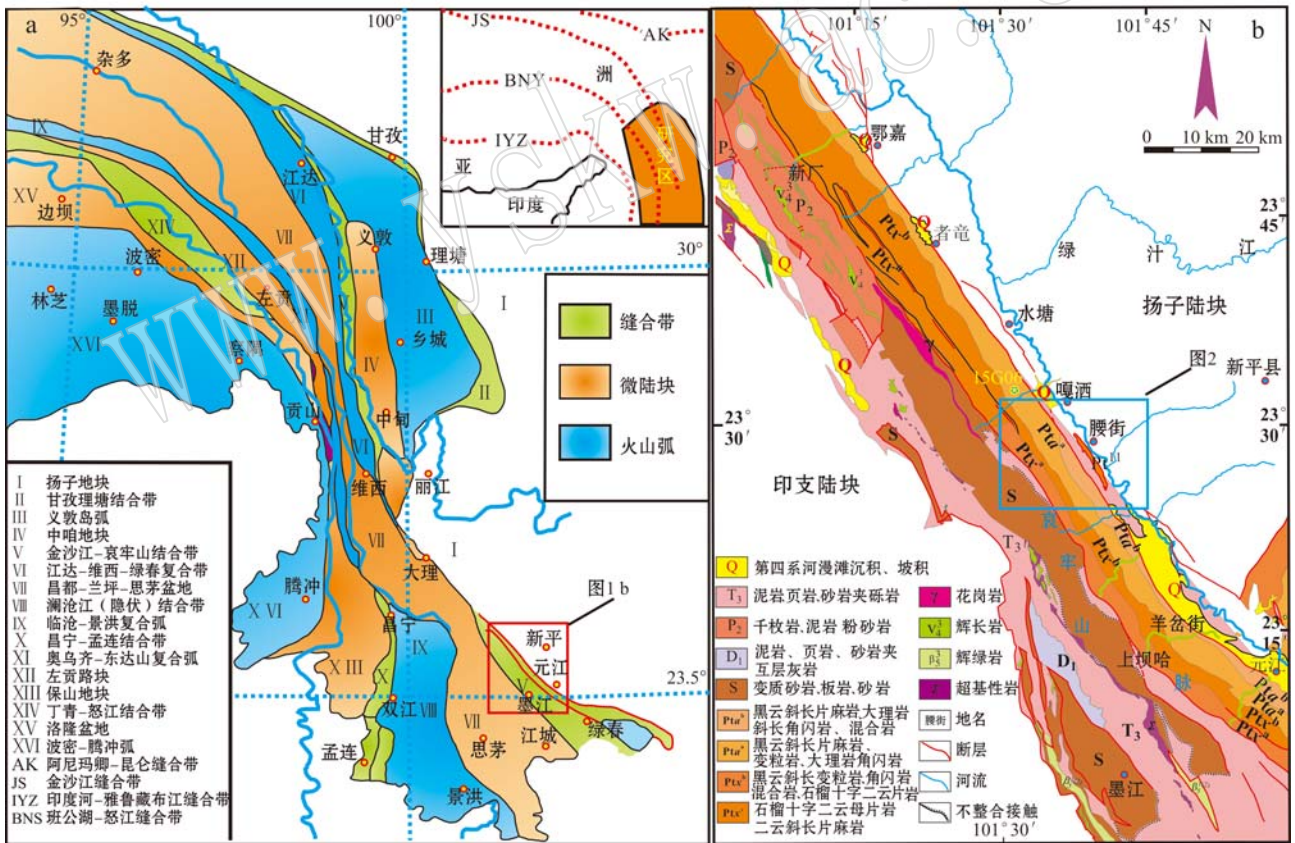


图 1 “三江”地区大地构造划分图(a, 据 Deng *et al.*, 2014a)和哀牢山中北段地质简图(b, 据 1:20 万新平幅和墨江幅地质图^②)

Fig. 1 Tectonic subdivision of Sanjiang region, southeastern Tibetan Plateau (a, after Deng *et al.*, 2014a) and simplified geological map of the middle-north segment of the Ailao Mountain (b, modified after 1:200 000 Geological Map of Xinning and Mojiang Sheet^②)

① 云南省地质矿产局. 1992. 1:5 万腰街幅地质图.

② 云南省地质局第二区域地质测量大队. 1976. 1:20 万新平幅和墨江幅地质图.

原岩面貌改变较大,岩石的结晶片理、片麻理已全面取代原生层理,其间出现不同尺度的韧性剪切带,岩性单元间均被构造分割,已无层序可言。云南省地质矿产局(1990)依据哀牢山群与大红山群下部地层的对比研究,将哀牢山群划归为古元古界地层,其中小羊街组以云南元江县小羊街乡最为典型,主要岩性有黑云斜长片麻岩夹角闪(透辉)变粒岩、斜长角闪岩、二云母石英片岩、石榴红柱二云母片岩,局部发育眼球状混合岩。阿龙组地层分为上、下两个亚

组,以元阳县大迷河地区岩性出露最全,其中下亚组主要岩性有石榴黑云斜长片麻岩、夕线石榴黑云二长片麻岩、石榴角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩、黑云钾长方柱透辉岩,上亚组主要为大理岩夹薄层斜长角闪岩和透辉角闪斜长变粒岩(云南省地质矿产局,1990),而 1:5 万腰街幅地质图^①中将阿龙组分成了 4 个岩段(图 2),具体岩性与云南省区域地质志中大体相同,但将小羊街组地层置于阿龙组之上。本文研究样品主要位于哀牢山群阿龙组地层中。

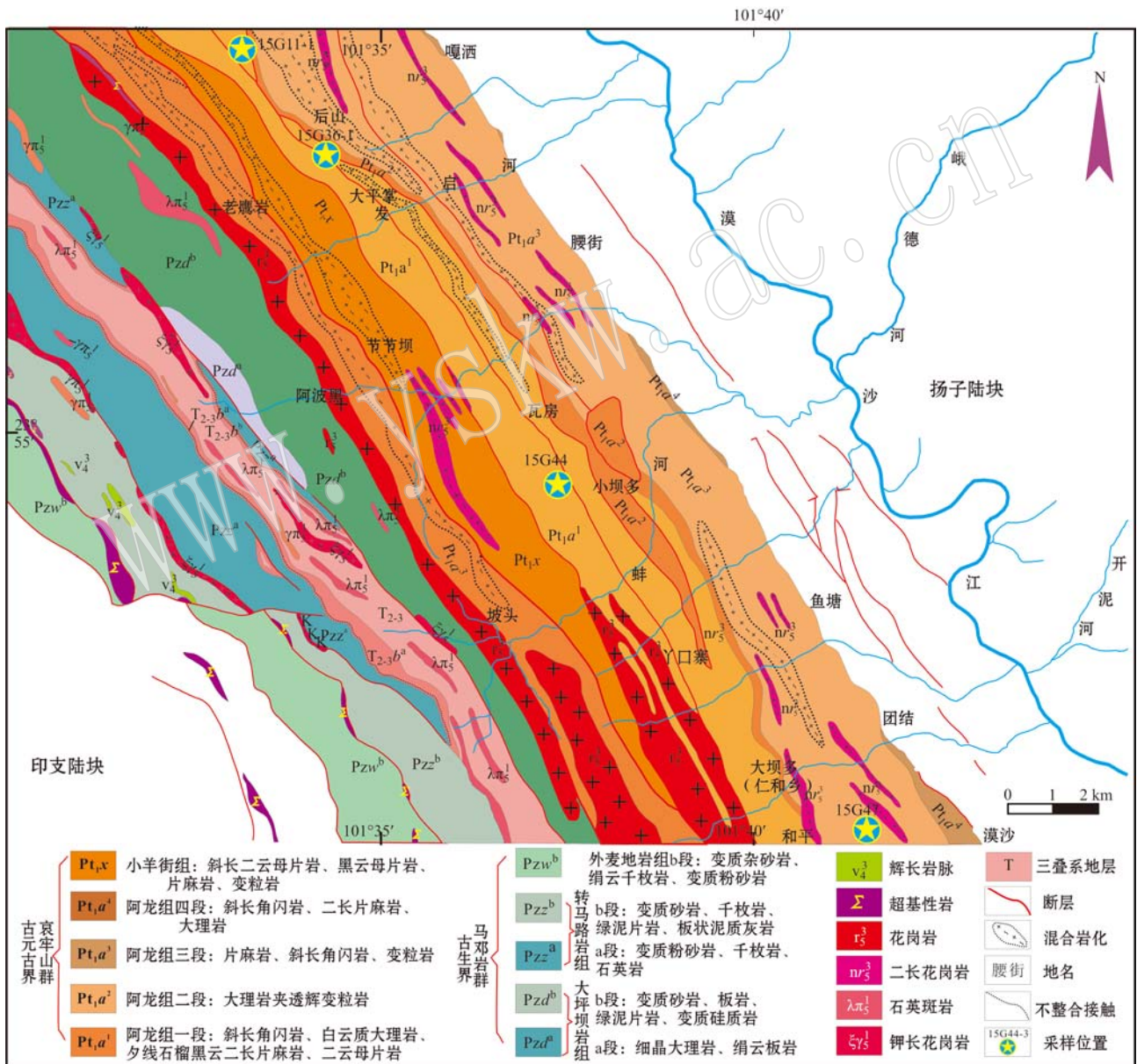


图 2 嘎洒地区地质简图及采样位置(据 1:5 万腰街幅地质图^①修改)

Fig. 2 Simplified geological map of Gasa area, indicating sampling locations (modified after 1:50 000 Geological Map of Yaojie^①)

① 云南省地质矿产局, 1992. 1:5 万腰街幅地质图。

2 采样位置及分析方法

本文研究的夕线石榴黑云二长片麻岩(15G44-2、15G44-5)采自哀牢山北段新平县漠沙镇小坝多村西约 400 m, 强剪切夕线石榴黑云二长片麻岩(15G47-6、15G47-8)采自仁和乡大新寨村西 1.5 km, 15G06 采自棉花河山庄西南约 500 m 的 S307 公路旁(图 1b), 二云母片岩(15G36-1、15G11-1)分别采自嘎洒镇大平掌村东北约 1 km 和 S307 公路旁南恩瀑布北 50 m(图 2), 所有样品皆位于哀牢山杂岩带中的哀牢山群最下部的阿龙组地层中, 其中样品 15G11-1 距离 15G06 约 5 km。初步矿物化学成分分析和背散射(BSE)显微结构特征的观察在中国地质科学院大陆动力学实验室进行。采用 JSM-5610LV 型扫描电镜(SEM)(日本电子公司 JEOL 生产)观察样品的显微结构特征, 扫描电镜实验条件为: 电子束的电压为 20 kV, 焦距 20 mm, 束斑大小为 41 nm。采用英国牛津公司生产的能谱仪(EDS)对样品中矿物化学成分进行半定量测试, 同时运用英国牛津公司的 INCA 软件包进行数据处理(版本 4.4)。在中国科学院地质与地球物理研究所国家重点实验室采用 JXA-8100 型电子探针仪对上述样品内各矿物的化学成分进行定量分析, 仪器测试条件为: 加速电压 15 kV, 束流 10 nA, 电子束斑为 1 μm , 修正方法为 PRZ, 标样为美国 SPI 公司的 53 种标准矿物。本文所有矿物代号均采用沈其韩(2009)所推荐资料。

3 岩相学及矿物化学

本文在详细的野外观察的基础上对夕线石榴黑云二长片麻岩(15G44-2、15G44-5)和二云母片岩(15G11-1、15G36-1)的岩石学和岩相学展开研究, 并对岩石中不同产出状态的石榴石、黑云母、白云母、斜长石进行了矿物化学分析。

3.1 岩相学

3.1.1 夕线石榴黑云二长片麻岩

夕线石榴黑云二长片麻岩主要分布在哀牢山变质杂岩带北东侧的嘎洒-漠沙一带, 岩石呈透镜状或夹层状产出, 新鲜面为灰黑色, 风化后呈灰黄色。由于受后期岩浆作用和构造剪切作用的叠加, 岩石结构极不均匀, 常发育不规则的无根勾状浅色脉体。岩石为中粗粒变晶结构, 大多数因后期剪切作用叠

加出现长石定向排列、石英呈拔丝状而呈片麻状构造, 本文重点对受后期叠加改造较弱的岩石类型开展岩相学研究(图 3a)。

夕线石榴黑云二长片麻岩中主要组成矿物为石榴石、黑云母、夕线石、钾长石、斜长石和石英, 副矿物主要为钛铁矿、金红石、磷灰石、独居石和锆石等。其中夕线石含量在岩石中占 15% 左右, 主要有 3 种产出形式: ① 包裹在石榴石变斑晶的边缘呈毛发状产出; ② 基质中呈板柱状产出(图 4a、4b, 图 5a), 且边缘发育有毛发状夕线石; ③ 于黑云母中沿解理缝呈针柱状产出(图 4b)。部分板柱状夕线石保留了蓝晶石假像。夕线石榴黑云二长片麻岩中黑云母含量约 15%, 粒径 0.05~1 mm, 棕红色, 部分黑云母沿解理方向脱水形成夕线石(图 4b)。另外, 部分岩石由于后期强烈的剪切作用叠加长石多发生明显的细粒化和边界迁移, 石榴石变斑晶含量可达 15%~20%, 粒径 0.4~1.5 mm, 且较为自形。石榴石中矿物包裹体主要为石英、长石、黑云母、钛铁矿、磷灰石、独居石等, 包裹体主要集中在石榴石的核部。发育典型的核幔构造(图 5b、5c、5d)。

3.1.2 强变形夕线石榴黑云二长片麻岩

研究区内强变形夕线石榴黑云二长片麻岩主要分布在漠沙镇的团结-和平一带, 岩石呈片麻状构造, 中粗粒变晶结构, 岩石中常发育平行剪切方向的浅色细脉, 手标本中可见大量透镜状石榴石定向排列或发生旋转(图 3b), 亦可见大量浅白色夕线石呈束状产出。

强变形夕线石榴黑云二长片麻岩显微岩相学最主要特点是: 针柱状夕线石定向排列, 粒间残留有细粒黑云母, (图 4c、4d, 图 5e、5f), 并与透镜状石榴石相伴生。副矿物主要为独居石、锆石、钛铁矿和磷灰石等。岩石中石榴石含量约 25%, 粒径约 1.5~3 mm, 具有明显的塑性变形, 长轴方向平行剪切方向, 并发育近垂直剪切方向的裂理(图 4c、4d)。石榴石裂理中发育有退变的绿泥石充填和少量的小颗粒岛状石榴石属于亚临界条件下产生的裂理(David, 1993)。岩石中黑云母产出形式有 3 种: ① 聚集在石榴石两端的弱变形域中, 粒径约 0.3~0.5 mm; ② 产于针柱状夕线石粒间, 多呈不规则状残留, 红褐色, 粒径相对较小, 一般小于 0.2 mm; ③ 包裹在石榴石变斑晶之中, 多呈椭圆状。其中, 存在于石榴石两端的黑云母粒径最大, 浅黄绿色, 与夕线石榴黑云斜长片麻岩中黑云母(Bt_1)(图 4b)相比强剪切作

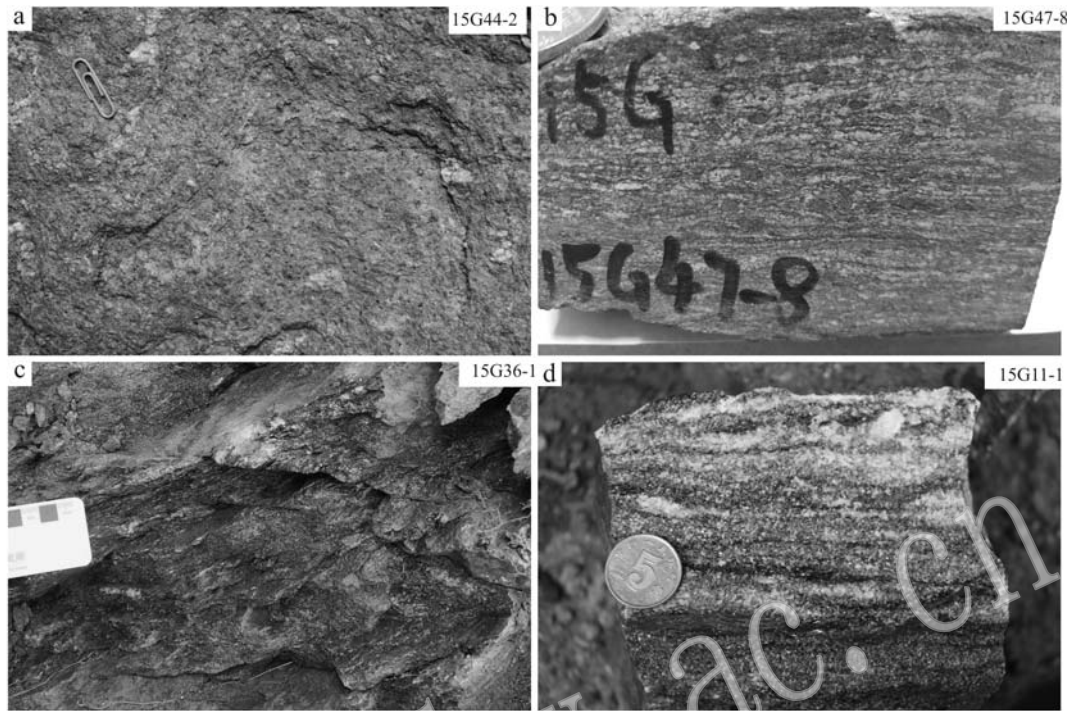


图 3 嘎洒地区典型变沉积岩野外照片

Fig. 3 Field outcrop photographs of meta-sedimentary rocks in Gasa area

a—夕线石榴黑云二长片麻岩中自形石榴石均匀分布; b—强变形夕线石榴黑云二长片麻岩中石榴石呈透镜状定向排列; c—二云母片岩中发育褶劈理; d—二云母片岩发育浅色脉体

a—euhedral garnet uniformly distributed in the sillimanite-garnet-biotite gneiss; b—oriented lenticular garnet in the strongly deformed sillimanite-garnet-biotite gneiss; c—crenulation cleavage developed in two-mica schist; d—many leucosomes developed in the two-mica schist

用中的黑云母(Bt₂)(图 4c、4d)多与夕线石紧密伴生,指示高温剪切引起黑云母脱水,该阶段的变质反应为 $2 \text{ Bt} \rightarrow \text{Sil} + 6 (\text{Mg}, \text{Fe})\text{O} + \text{K}_2\text{O} + 5 \text{ Qtz} + 2 \text{ H}_2\text{O}$ 。

3.1.3 二云母片岩

研究区内二云母片岩主要分布在哀牢山杂岩带核部的嘎洒-腰街一带,与夕线石榴黑云二长片麻岩同属阿龙组地层,岩石一般呈夹层状产于石英岩之中,或呈透镜状产于浅色花岗质岩石中。呈片状构造,鳞片状变晶结构(图 3c、3d),部分岩石中发育浅色条带或褶劈理。

二云母片岩中主要矿物组合为黑云母+白云母+石英+斜长石,黑云母和白云母相互交生在一起(图 4e、4f),两者都具有明显的定向或同时发生弯折,岩石中白云母含量可达 15%,粒径一般小于 1.5 mm,黑云母含量可达 20%,粒径 1 mm 左右。岩石中发育云母鱼、石英波状消光、斜长石呈透镜状碎斑存在指示云母片岩也经历了强烈的韧性剪切作用,哀牢山变质杂岩带大量的云母片岩的 Ar-Ar 定年显

示(Liu Fulai *et al.*, 2015)云母片岩形成于构造折返的地壳物质抬升过程中,此阶段岩石发生明显的退变质作用并伴随着剪切变形,部分强剪切的夕线石榴黑云二长片麻岩中出现退变的白云母也证实这一点。

岩相学观察表明嘎洒地区变沉积岩经历了复杂的变质演化过程,矿物相转变较为复杂,其中夕线石具有多阶段的演化特点(图 4a~4d,图 5a、5e、5f),早期阶段夕线石呈板柱状,粒径一般大于 1 mm,部分岩石中夕线石明显受到后期剪切作用改造,板柱状夕线石被拉断呈布丁构造,横断面处退变成绿泥石或白云母(图 4a),部分夕线石受剪切作用改造较弱仍保持板柱状晶型(图 4b),或在板状夕线石边缘有次生毛发状夕线石发育。另一类夕线石呈针柱状产出,完全沿剪切方向排列,长宽比较第一类夕线石更大且在夕线石之间残存有未完全脱水的细粒黑云母,并与透镜状石榴石相伴产出。

综上所述,研究区不同类型的变沉积岩记录了变质演化不同阶段的矿物组合及矿物相转变结构。

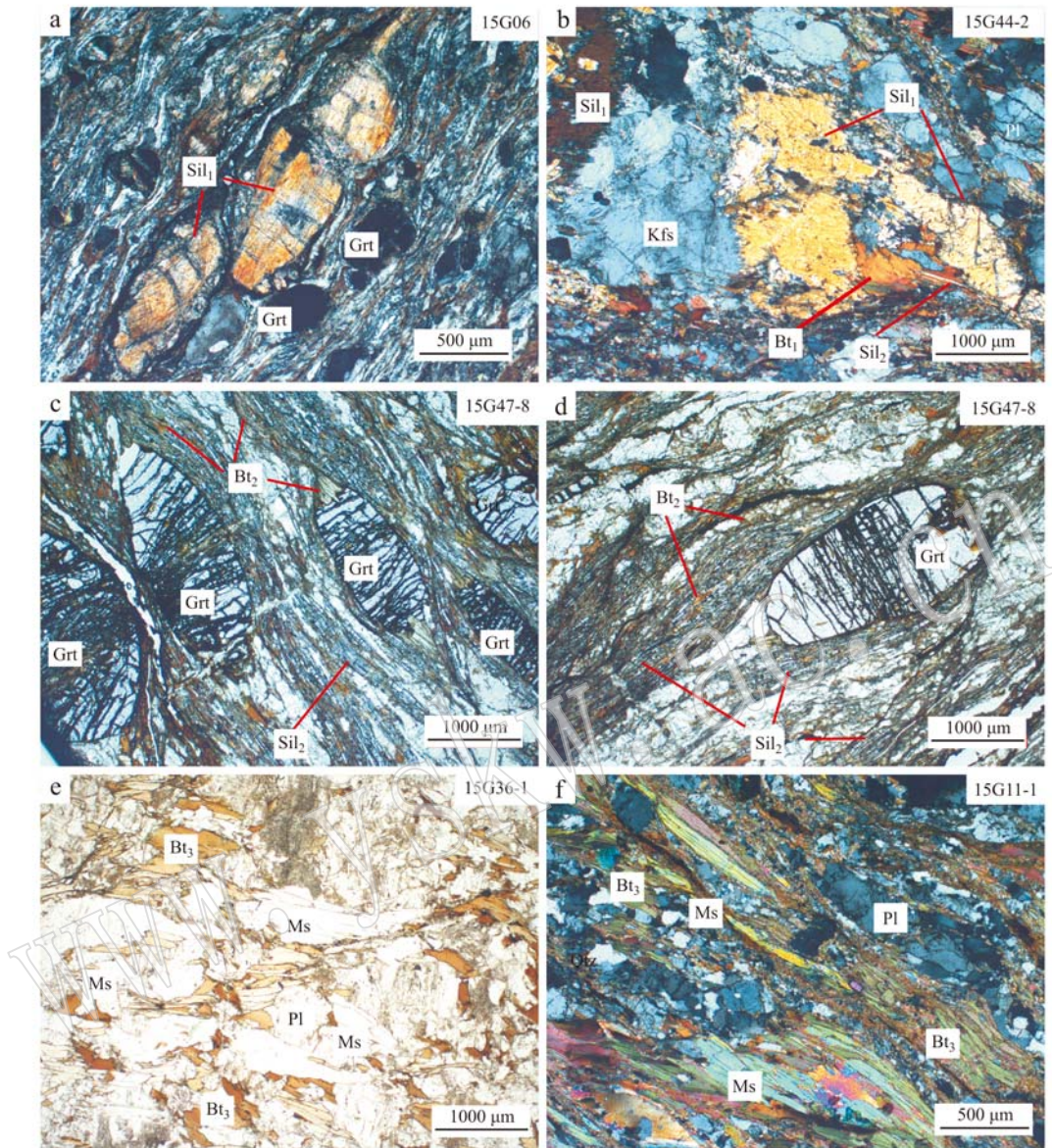


图 4 嘎洒地区变沉积岩中典型矿物组合和显微结构照片

Fig. 4 Microphotographs showing typical mineral assemblages and micro-textures of the meta-sedimentary rocks in Gasa area
 a—夕线石榴黑云二长片麻岩中原板柱状夕线石被后期剪切作用拉断呈布丁状(+)；b—夕线石榴黑云二长片麻岩中板柱状夕线石边缘发育毛发状夕线石(+)；c、d—强变形夕线石榴黑云二长片麻岩中透镜状石榴石、黑云母、针柱状夕线石定向排列(-)；e、f—二云母片岩中黑云母与白云母交生并定向排列(e单偏光, f正交偏光)；Grt—石榴石；Sil—夕线石；Bt—黑云母；Qtz—石英；Pl—斜长石；Kfs—钾长石；Ms—白云母

a—sillimanite budinages related to shearing in sillimanite-garnet-biotite gneiss, crossed nicols; b—columnar sillimanite surrounded by hairy sillimanite, crossed nicols; c, d—lenticular garnets surrounded by needle cylindrical sillimanite in strongly deformed sillimanite-garnet-biotite gneiss, plainlight; e, f—oriented muscovites and biotites intergrowth together in two-mica schist, plainlight and crossed nicols respectively; Grt—garnet; Sil—sillimanite; Bt—biotite; Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Ms—muscovite

其中夕线石榴黑云二长片麻岩中保存的典型矿物组合为：板柱状夕线石(Sil₁) + 石榴石 + 黑云母(Bt₁) + 斜长石 + 钾长石 + 石英 + 钛铁矿, 应代表峰期变质(M₁)阶段的矿物组合; 强变形夕线石榴黑云二长

片麻岩中矿物组合为：针柱状夕线石(Sil₂) + 石榴石 + 黑云母(Bt₂) + 斜长石 + 钾长石 + 石英 + 钛铁矿, 多数变质矿物发生强烈的剪切高温剪切变形, 云母发生脱水熔融反应、石榴石剪切拉长形成扁豆体, 为

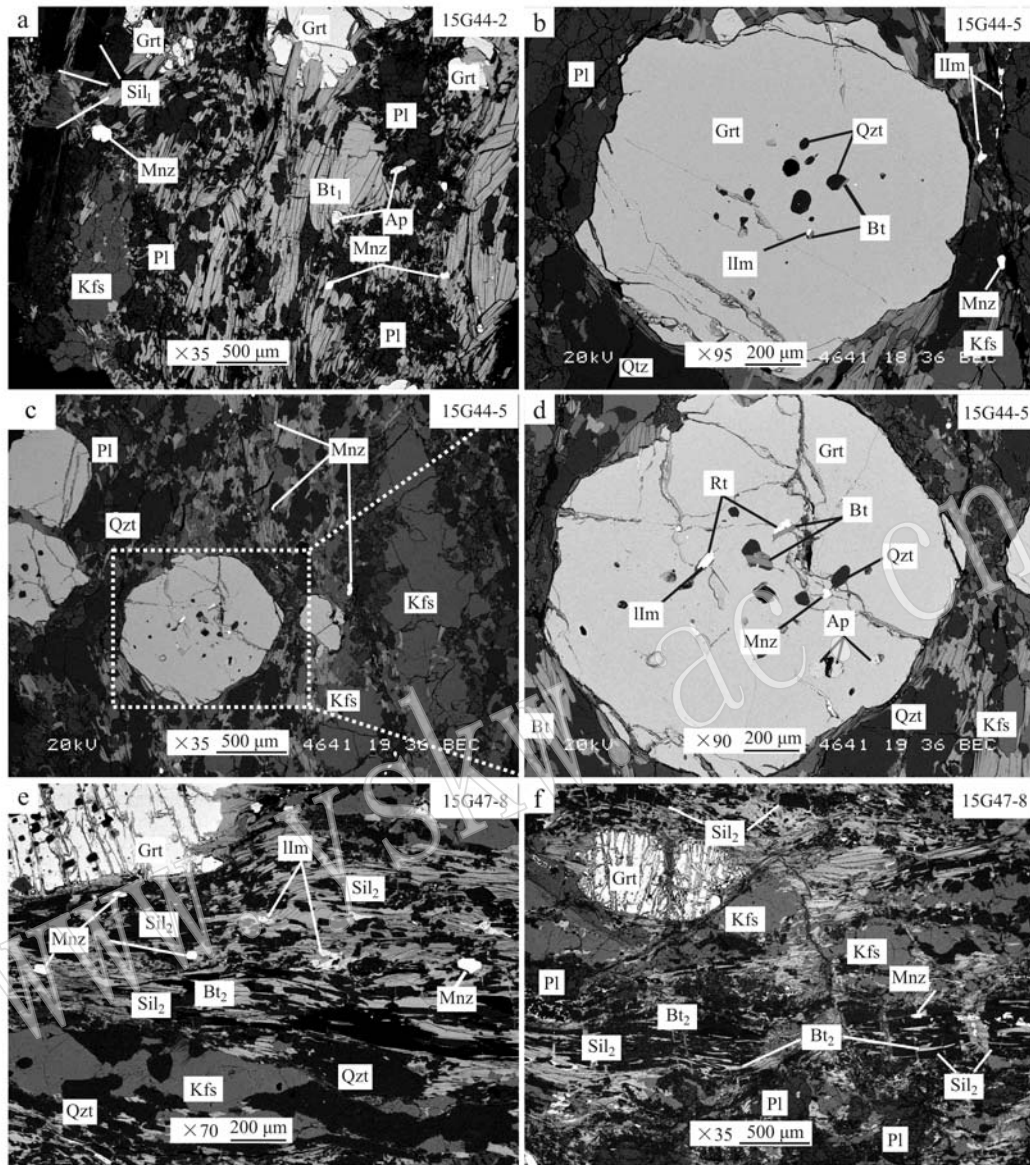


图 5 嘎洒地区变沉积岩中典型矿物组合和石榴石中包裹体背散射照片

Fig. 5 Back-scattered electric images of typical meta-sediment samples in Gasa area, showing typical mineral assemblages, and inclusions in garnet

a—夕线石榴黑云二长片麻岩中短柱状夕线石和细粒石榴石；b—自形石榴石中石英、黑云母和钛铁矿包裹体；c—自形石榴石中包裹有多种矿物包裹体；d—石英、黑云母、金红石、独居石、磷灰石和钛铁矿多种矿物被包裹在自形石榴石中(图 c 中虚线框放大)；e、f—强变形夕线石榴黑云二长片麻岩中针柱状夕线石和透镜状石榴石；Mnz—独居石；Ap—磷灰石；Rt—金红石
a—columnar sillimanites and fine grained garnets in gneiss；b—quartz, biotite and ilmenite as inclusions preserved in euhedral garnet；c—many minerals included in euhedral garnet；d—quartz + biotite + rutile + monazite + apatite + ilmenite as inclusions preserved in euhedral garnet (an enlarged image of dotted line box in Fig. c)；e, f—needle sillimanite and subhedral garnet developed in strongly deformed sillimanite-garnet-biotite gneisses；Mnz—monazite；Ap—apatite；Rt—rutile

峰后近等温减压-高温剪切变形阶段(M₂)矿物组合；而在部分二云母片岩中，保存细粒的黑云母(Bt₃) + 白云母 + 石英 + 斜长石等矿物组合，是晚期退变质阶段(M₃)的产物。

3.2 矿物化学

3.2.1 石榴石

本文对夕线石榴黑云二长片麻岩中石榴石不同微区的化学成分进行了测试，代表性成分列入表 1、表 2。

表 1 嘎洒地区夕线石榴黑云二长片麻岩(15G44-2)中代表性石榴石化学成分

$w_B/\%$

Table 1 Representative chemical composition of the garnets of Sil-Grt-Bt monzogneiss in Gasa area

成分	g-c	g-c	g-c	g-c	g-c	g-c	g-c	g-c	g-c	g-c	g-r	g-r	g-r	g-r	g-r	g-r	g-r	g-r	
SiO ₂	38.10	38.66	38.22	38.47	37.93	37.83	38.26	38.15	38.21	38.33	38.7	37.97	38.49	38.1	37.72	38.51	38.57	37.95	38.51
TiO ₂	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.00	0.06	0.03	0.01	0.04	0.04	0.06	0.02	0.00	0.03	0.03
Al ₂ O ₃	21.70	21.34	21.62	21.39	21.68	21.46	21.55	21.66	21.39	21.57	21.48	21.75	21.54	21.36	21.45	21.81	21.55	21.36	21.28
Cr ₂ O ₃	0.03	0.00	0.03	0.03	0.00	0.03	0.01	0.06	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.00	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01
Fe ₂ O ₃	1.30	0.12	0.78	0.53	1.75	1.66	1.46	1.36	0.83	1.03	0.33	1.35	0.48	0.61	1.16	0.16	0.14	1.49	0.04
FeO	30.40	31.60	30.63	30.71	30.68	30.71	29.62	29.95	30.18	30.22	30.49	29.18	31.35	31.79	31.32	32.47	32.29	30.52	31.69
FeO ^T	31.70	31.72	31.41	31.24	32.43	32.37	31.08	31.31	31.01	31.25	30.82	30.53	31.83	32.40	32.48	32.63	32.43	32.01	31.73
MnO	1.02	1.06	1.02	1.05	1.08	1.12	0.97	0.94	0.91	1.00	0.98	0.84	1.01	1.16	1.11	1.10	1.14	1.11	1.07
MgO	6.82	6.65	6.96	6.83	6.57	6.48	6.97	7.03	7.20	7.27	6.95	7.21	6.70	5.94	6.21	6.18	6.15	6.63	6.26
CaO	1.57	1.34	1.28	1.62	1.44	1.34	1.56	1.68	1.37	1.32	1.90	1.93	1.33	1.49	1.24	1.11	1.34	1.48	1.60
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.15	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.00	100.78	100.47	100.61	100.98	100.52	100.45	100.71	100.04	100.74	100.84	100.14	100.92	100.46	100.18	101.38	101.18	100.46	100.51
以 12 个氧原子为标准计算的阳离子系数																			
Si	2.96	3.01	2.98	3.00	2.95	2.96	2.98	2.97	2.99	2.98	3.01	2.96	3.00	2.99	2.97	2.99	3.01	2.97	3.02
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	2.00	1.96	1.99	1.97	1.99	1.98	1.98	1.99	1.97	1.98	1.97	2.00	1.98	1.98	1.99	2.00	1.98	1.97	1.97
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.08	0.01	0.05	0.03	0.10	0.10	0.09	0.08	0.05	0.06	0.02	0.08	0.03	0.04	0.07	0.01	0.01	0.09	0.00
Fe ²⁺	1.98	2.06	2.00	2.00	2.00	2.01	1.93	1.95	1.97	1.96	1.98	1.90	2.04	2.09	2.06	2.11	2.10	2.00	2.08
Mn	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07
Mg	0.79	0.77	0.81	0.79	0.76	0.76	0.81	0.82	0.84	0.84	0.8	0.84	0.78	0.70	0.73	0.72	0.71	0.77	0.73
Ca	0.13	0.11	0.11	0.14	0.12	0.11	0.13	0.14	0.12	0.11	0.16	0.16	0.11	0.13	0.11	0.09	0.11	0.12	0.13
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Alm	67	68	67	67	68	68	66	66	66	66	66	64	68	70	69	71	70	67	69
Pyr	27	26	27	26	26	26	28	27	28	28	27	28	26	23	25	24	24	26	24
Gro	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	5	5	4	4	4	3	4	4	4
Spes	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2

注: Alm(铁铝榴石) = $100 \times Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Ca + Mn + Mg)$, Pyr(镁铝榴石) = $100 \times Mg / (Fe^{2+} + Ca + Mn + Mg)$, Gro(钙铝榴石) = $100 \times Mg / (Fe^{2+} + Ca + Mn + Mg)$, Spes(锰铝榴石) = $100 \times Mn / (Fe^{2+} + Ca + Mn + Mg)$, g-c 为石榴石核部, g-r 为石榴石边部。

表 2 嘎洒地区夕线石榴黑云二长片麻岩中代表性石榴石化学成分

Table 2 Representative chemical composition of the garnets of Sil-Grt-Bt monzonites in Gasa area

成分	15G44-5			15G47-8(强变形)			15G47-6(强变形)			w _B /%
	g-c	g-r	g-r	g-c	g-r	g-r	g-c	g-r	g-r	
SiO ₂	38.14	37.84	38.38	38.34	37.52	37.44	38.22	38.19	38.31	37.94
TiO ₂	0.04	0.04	0.03	0.01	0.02	0.05	0.04	0.02	0.04	0.02
Al ₂ O ₃	21.48	21.52	21.57	20.99	21.31	21.04	20.95	20.85	20.98	20.94
Cr ₂ O ₃	0.00	0.02	0.00	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.01
Fe ₂ O ₃	1.58	1.63	0.00	0.00	1.28	0.12	0.33	0.25	0.26	0.05
FeO	29.68	28.97	30.70	33.23	31.74	33.78	31.56	31.67	32.93	32.36
FeO ^T	31.26	30.60	30.70	33.23	33.02	33.90	31.89	31.92	33.19	32.41
MnO	0.96	0.88	0.87	1.01	1.09	1.32	1.54	1.55	2.75	4.67
MgO	6.96	7.19	6.69	5.06	5.94	4.24	4.79	4.72	4.46	3.42
CaO	1.85	1.89	1.71	2.01	1.13	1.59	3.04	3.04	1.56	1.49
Na ₂ O	0.04	0.04	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.03	0.04	0.03
K ₂ O	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.05
Total	100.58	99.86	99.97	100.67	99.92	99.62	100.52	100.32	101.32	100.97
以 12 个氧原子为标准计算的阳离子系数										
Si	2.97	2.96	3.01	3.02	2.97	3.00	3.02	3.02	3.02	3.02
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.97	1.98	1.99	1.95	1.99	1.99	1.95	1.94	1.95	1.97
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.09	0.10	0.00	0.00	0.08	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00
Fe ²⁺	1.93	1.90	2.01	2.19	2.10	2.26	2.08	2.10	2.17	2.15
Mn	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.09	0.10	0.10	0.18	0.32
Mg	0.81	0.84	0.78	0.60	0.70	0.51	0.56	0.56	0.52	0.41
Ca	0.15	0.16	0.14	0.17	0.10	0.14	0.26	0.26	0.13	0.13
Na	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Sum	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Alm	65	64	67	72	71	76	69	70	72	72
Pyr	27	28	26	20	24	17	19	18	17	14
Gro	5	5	5	6	3	5	9	9	4	4
Spes	2	2	2	2	2	3	3	3	6	10

注: Alm(铁铝榴石) = 100 × Fe²⁺ / (Fe²⁺ + Ca + Mn + Mg), Pyr(镁铝榴石) = 100 × Mg / (Fe²⁺ + Ca + Mn + Mg), Gro(钙铝榴石) = 100 × Mg / (Fe²⁺ + Ca + Mn + Mg), Spes(锰铝榴石) = 100 × Mn / (Fe²⁺ + Ca + Mn + Mg), g-c 为石榴石核部, g-r 为石榴石边部。

夕线石榴黑云二长片麻岩(15G44-2)中石榴石核部 FeO^T ($FeO + Fe_2O_3$) 含量(质量分数)为 30.53%~32.43%, MgO 含量为 6.48%~7.27%, CaO 含量为 1.28%~1.93%, MnO 含量为 0.84%~1.12%。石榴石边部 FeO^T 含量为 31.73%~32.63%, MgO 含量为 5.94%~6.63%, CaO 含量为 1.11%~1.60%, MnO 含量为 1.07%~1.16%。石榴石核部成分中铁铝榴石端员组分(摩尔分数)为 64%~68%, 镁铝榴石为 26%~28%, 石榴石边部成分中铁铝榴石端员组分为 67%~73%, 镁铝榴石为 23%~26%, 钙铝榴石成分核部与边部差别较小, 为 3%~5%, 锰铝榴石为 2%~3%。

强变形夕线石榴黑云二长片麻岩(15G47-8、15G47-6)中石榴石核部的 FeO^T 含量为 31.89%~33.46%, MgO 含量为 4.72%~5.06%, 石榴石边部的 FeO^T 含量变化略小为 32.41%~33.90%, MgO 含量为 3.42%~4.79%。石榴石成分剖面研究发现从石榴石核部到边部钙铝榴石组分逐渐降低, 而石榴石边部镁铝榴石组分明显下降, 锰铝榴石组分明显上升(图 6), $X(Fe)$ 值 [$Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg^{2+}) \times 100$] 上升, 指示石榴石在峰后退变质过程中发生了净转换反应, 重吸收作用导致石榴石边部铁、锰含量上升。石榴石的 $Grs - (Alm + Spes) - Prp$ 图解(图 7)研究发现强变形片麻岩中石榴石边部铁铝榴石

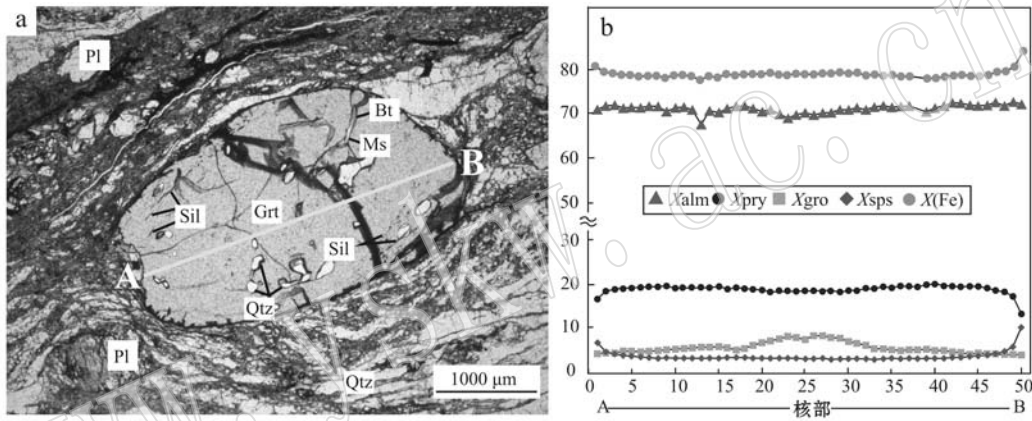


图 6 强变形夕线石榴黑云二长片麻岩 15G47-6 中石榴石显微照片与成分剖面
Fig. 6 Composition zoning of the garnet from Grt-Sil-Bt gneiss 15G47-6 in Gasa area

a—石榴石显微照片(单偏光), 线 AB 代表图 6b 中剖面位置; plainlight; b—石榴石成分剖面
a—microphotograph of garnet, the solid line AB representing the profile position, plainlight; b—composition profile of garnet in mole fractions % corresponding to (a) $X(Fe) = Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg^{2+})$ in %

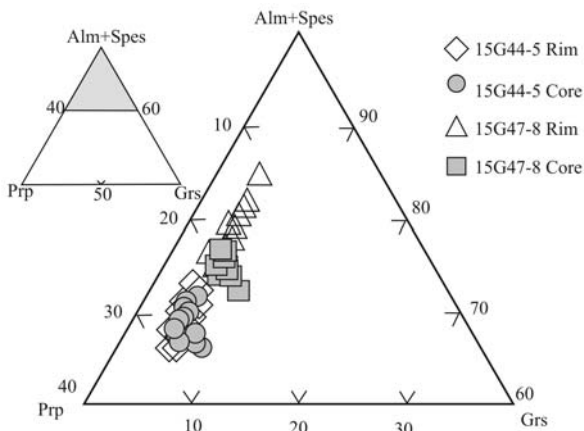


图 7 嘎洒地区夕线石榴黑云二长片麻岩中石榴石的 $Prp - (Alm + Spes) - Grs$ 图解

Fig. 7 $Prp - (Alm + Spes) - Grs$ diagram of garnet from Sil-Grt-Bt gneiss in Gasa area

(Alm) + 锰铝榴石(Spes)端员组分变化较大为 76%~82%, 而核部相对较小为 72%~74%, 钙铝榴石组分为 4%~9%。

3.2.2 云母

根据黑云母和石榴石的关系可以将黑云母的产出状态分为 3 类: ① 基质中远离石榴石, ② 基质中与石榴石相接触, ③ 石榴石中作为矿物包裹体, 部分代表性数据见表 3。

夕线石榴黑云二长片麻岩(15G44-2、15G44-5)基质中远离石榴石的黑云母的 FeO^T 含量为 15.90%~17.04%, MgO 含量为 11.01%~11.75%, TiO_2 含量为 4.65%~5.76%; 而黑云母的 $Mg^{\#}$ 值整体变化较小为 0.54~0.57。

强变形夕线石榴黑云二长片麻岩(15G47-6、15G47-8)石榴石中黑云母的 FeO^T 含量介于 15.0%~

$w_B/\%$

表 3 嘎洒地区夕线石榴黑云二长片麻岩和二云母片岩中代表性黑云母化学成分

Table 3 Representative chemical composition of the biotites of Sil-Grt-Bt monzogneiss and two-mica schist in Gasa area

成分	15G47-6			15G11-1			15G47-8			15G44-5			15G44-2		
	Bt-c	Bt-mu	Bt-i	Bt-mu	Bt-mu	Bt-i	Bt-mu	Bt-mu	Bt-c	Bt-m	Bt-m	Bt-m	Bt-m	Bt-m	Bt-m
SiO ₂	35.62	36.23	35.84	35.85	36.30	35.61	36.00	35.90	35.08	35.48	35.33	36.38	36.74	35.25	36.35
TiO ₂	3.28	2.41	4.15	2.24	3.80	1.58	2.42	3.11	1.83	2.04	5.76	4.92	5.11	5.30	5.40
Al ₂ O ₃	19.26	21.24	19.06	22.07	19.40	20.17	19.55	19.67	19.76	19.35	17.15	17.49	17.18	17.24	17.13
C ₂ O ₃	0.05	0.03	0.07	0.08	0.09	0.11	0.02	0.11	0.06	0.06	0.10	0.09	0.09	0.10	0.09
FeO ^T	18.69	17.10	19.91	15.00	17.08	15.17	18.06	19.93	19.54	19.59	16.53	15.96	15.90	16.83	17.04
MnO	0.17	0.13	0.16	0.04	0.07	0.03	0.40	0.44	0.05	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03
MgO	8.77	9.06	8.01	10.53	9.92	12.63	8.78	9.08	9.20	9.00	11.20	11.75	11.37	11.01	11.17
CaO	0.06	0.04	0.03	0.02	0.04	0.18	0.01	0.08	0.03	0.06	0.12	0.10	0.11	0.07	0.01
Na ₂ O	0.19	0.21	0.18	0.23	0.37	0.29	0.19	0.18	0.18	0.14	0.12	0.15	0.15	0.14	0.11
K ₂ O	9.42	9.47	9.51	9.70	8.99	8.21	9.57	9.68	9.32	9.24	9.05	9.57	9.20	9.43	9.66
Total	95.52	95.93	96.93	95.77	95.38	94.67	97.07	96.55	95.06	95.01	95.40	96.46	95.91	95.42	97.00
以 11 个氧原子为标准计算的阳离子系数															
Si	2.70	2.70	2.69	2.65	2.67	2.67	2.68	2.69	2.68	2.71	2.66	2.70	2.73	2.66	2.69
Ti	0.19	0.14	0.23	0.12	0.21	0.09	0.18	0.19	0.11	0.12	0.33	0.27	0.29	0.30	0.29
Al	1.72	1.86	1.69	1.92	1.72	1.77	1.73	1.71	1.78	1.74	1.52	1.53	1.51	1.53	1.53
Cr	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	1.18	1.06	1.25	0.93	1.07	0.93	1.14	1.09	1.25	1.25	1.04	0.99	0.99	1.06	1.04
Mn	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.99	1.00	0.90	1.16	1.11	1.40	0.99	1.02	1.05	1.02	1.26	1.30	1.26	1.24	1.25
Ca	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Na	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
K	0.91	0.90	0.91	0.91	0.86	0.78	0.92	0.95	0.91	0.90	0.87	0.91	0.87	0.91	0.91
X _{Mg}	0.46	0.49	0.42	0.56	0.51	0.60	0.46	0.50	0.46	0.45	0.55	0.57	0.56	0.54	0.55

注: Bt-c 为与石榴石接触的黑云母, Bt-m 为基质中的黑云母, Bt-mu 为与白云母接触的黑云母, Bt-i 为包裹在石榴石之中的黑云母; X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe²⁺)。

17.08%, MgO 含量为 9.92% ~ 12.63%, TiO₂ 含量为 1.58% ~ 3.80%; 而与石榴石相接处的黑云母的 FeO^T 含量为 17.10% ~ 19.59%, MgO 含量为 8.77% ~ 9.20%, TiO₂ 含量为 1.83% ~ 3.28%。测点一个与白云母接触的黑云母的 FeO^T 含量为 19.91%, MgO 含量为 9.06%, TiO₂ 含量为 4.15%。

二云母片岩(15G11-1)中黑云母产出形式较为简单, 多与白云母交生在一起, 其中黑云母的 Mg[#] 变化较小为 0.46 ~ 0.50, FeO^T 含量介于 17.34% ~ 19.93%, MgO 含量为 8.78% ~ 9.61%, TiO₂ 含量为 1.92% ~ 3.36%。

而对于白云母(表 4), 强变形夕线石榴黑云二长片麻岩中于石榴石裂理中测得 2 个白云母成分其 SiO₂ 含量介于 45.87% ~ 45.99%, Al₂O₃ 含量为 34.33% ~ 36.05%, K₂O 含量为 10.20% ~ 10.61%; 二云母片岩中白云母主要分为与黑云母接触和与斜长石接触的白云母, 与黑云母接触白云母的 SiO₂ 含量介于 45.04% ~ 46.31%, Al₂O₃ 含量为 33.98% ~ 35.38% 之间, K₂O 含量为 9.88% ~ 10.54%, 与斜长石接触的白云母 SiO₂ 含量介于 44.82% ~ 46.14%, Al₂O₃ 含量为 33.58% ~ 35.39% 之间, K₂O 含量为 9.89% ~ 10.62%。

黑云母 Ti-Fe/(Fe+Mg) 以及 TiO₂-Mg[#](图 8a、8b)图解显示, 夕线石榴黑云二长片麻岩基质中黑云母与强变形夕线石榴黑云二长片麻岩中黑云母相比具有更高的 Ti 含量。黑云母的 Ti-Fe/(Fe+Mg) 图解研究表明与变质反应过程中钛铁矿的出溶有关, 这与背散射图像中观察到黑云母解理缝中发育有钛铁矿相一致。对强剪切作用过程中形成的夕线石榴黑云二长片麻岩(15G47-8)中 44 个黑云母 TiO₂-Mg[#] 图解研究发现包裹在石榴石内部、基质中以及和石榴石接触的黑云母的 TiO₂ 含量依次降低, 其平均值分别为 3.65、3.33 和 2.04。

3.2.3 长石

夕线石榴黑云斜长片麻岩(15G44-2)中斜长石为更长石-中长石(表 5), 其中基质中斜长石 An 值介于 28~30, Ab 值在 68~70 之间, 被石榴石包裹和与石榴石相接触的斜长石较少, 测得一颗包裹在石榴石之中的斜长石的 An 值为 39, Ab 值为 60, 一颗与石榴石接触的斜长石的 An 值为 28, Ab 值为 71。

强剪切变形夕线石榴黑云斜长片麻岩中斜长石多属于更长石-中长石, 其中基质中远离石榴石的斜长石的 An 值较为均一, 为 28~30, Ab 值为 69~70,

被包裹在石榴石中的斜长石的 An 值为 41~49, Ab 值为 49~56(图 9)。

二云母片岩中斜长石 An 值较低为 16~20, Ab 值为 79~83。(强变形)夕线石榴黑云二长片麻岩中钾长石矿物化学成分差异较小, 其中 SiO₂ 含量为 62.46% ~ 63.79%, Al₂O₃ 含量为 22.03% ~ 23.12%。

4 变质温压计算及变质演化

4.1 变质温压计算

本文的研究对象主要为(强变形)夕线石榴黑云二长片麻岩, 其原岩主要为粘土岩或泥质岩类, 能够灵敏反映较大变质温压范围内的矿物相转变关系。夕线石榴黑云二长片麻岩中稳定矿物组合主要为石榴石+夕线石+黑云母+石英+斜长石+钾长石。岩石中各矿物间最主要的离子交换为石榴石-黑云母的 Fe²⁺-Mg²⁺ 交换, 且颗粒较大的石榴石(>1 mm)和基质中粒度较大的黑云母在流体缺乏的条件下可以保留角闪-麻粒岩相条件下的矿物成分, 因此选取适合变沉积岩的石榴石-黑云母变质温度计(GB)(Holdaway, 2000)和与岩石中主要矿物组合适应的石榴石-夕线石-斜长石-石英压力计(GASP), 并根据吴春明等(2007)对现有适用于变泥质岩的温度计和压力计的详细评述, 以及各温度计、压力计误差的分析, 选择内洽性热力学数据库 Model 6AV(Holdaway, 2000)进行温度和压力的估算。

4.1.1 峰期变质阶段(M₁)

峰期变质阶段(M₁)主要矿物组合为板柱状夕线石(Sil₁)+石榴石+黑云母+斜长石+钾长石+钛铁矿。特征变质矿物为板柱状夕线石和自形石榴石。部分夕线石保存板柱状蓝晶石假象而边缘发育毛发状夕线石, 应用未变形的夕线石榴黑云二长片麻岩中石榴石核部和基质中远离石榴石的棕红色大颗粒黑云母的核部进行温压估算, 部分粒度相对较小的矿物颗粒由于后期剪切作用的叠加改造使矿物成分发生重置, 其温压已进入到强剪切作用(M₂)的叠加改造的范围(图 10), 这部分温压值不应归属到变质峰期阶段。剔除后获得 M₁ 阶段的变质温度和压力分别为 690~750℃、690~810 MPa。

4.1.2 近等温减压-高温剪切变形阶段(M₂)

对于发生石榴石塑性变形的夕线石榴黑云二长片麻岩, Divde(1993)在对剪切作用下石榴石中裂理

$w_B/\%$

表 4 嘎洒地区二云母片岩(15G11-1)和强变形夕线石榴黑云二长片麻岩(15G47-8)中代表性白云母化学成分

Table 4 Representative chemical composition of the muscovites from two-mica schist (15G11-1) and strongly deformed Sil-Grt-Bt monzogneiss (15G47-8) in Gasa area

成分	15G11-1											15G47-8									
	M _s -Bt	M _s -Bt	M _s -Bt	M _s -Bt	M _s -Bt	M _s -Bt	M _s -Bt	M _s -Bt	M _s -Bt	M _s -Bt	M _s -Bt	M _s -Pl	M _s -Pl	M _s -Pl	M _s -c	M _s -c					
SiO ₂	45.58	45.82	45.58	45.63	45.41	45.88	46.05	45.52	45.04	45.58	46.31	45.85	46.20	44.82	45.72	45.39	45.68	46.14	45.51	45.87	45.99
TiO ₂	0.81	0.86	0.97	0.86	0.84	0.88	0.79	0.89	0.76	0.85	0.85	0.84	0.63	0.87	0.90	0.84	0.78	0.73	0.82	0.07	0.08
Al ₂ O ₃	35.27	35.11	35.14	34.74	35.13	35.38	34.96	34.96	34.60	35.09	35.06	33.98	35.25	35.18	35.36	35.01	34.57	35.39	33.58	36.05	34.33
Cr ₂ O ₃	0.01	0.05	0.07	0.05	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.02	0.03	0.04	0.00	0.02	0.01	0.05	0.02	0.05
FeO ^T	1.49	1.56	1.55	1.40	1.49	1.49	1.52	1.49	1.34	1.55	1.63	1.48	1.54	1.28	1.34	1.54	1.46	1.36	1.44	1.30	2.65
MnO	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.02	0.04	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.01	0.02	0.04
MgO	0.89	0.89	0.86	0.79	0.83	0.85	0.94	0.83	0.76	0.91	0.97	0.84	0.93	0.78	0.71	0.89	0.88	0.91	0.84	0.62	1.47
CaO	0.01	0.01	0.01	0.00	0.04	0.03	0.02	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.05	0.02	0.05	0.01	0.01	0.06	0.06
Na ₂ O	0.48	0.51	0.57	0.53	0.53	0.56	0.58	0.56	0.60	0.50	0.52	0.55	0.52	0.44	0.56	0.54	0.50	0.53	0.52	0.43	0.33
K ₂ O	10.09	10.24	10.28	10.41	10.54	10.39	10.35	10.27	10.41	10.16	9.88	10.27	10.44	10.62	10.37	10.41	10.19	9.89	10.35	10.22	10.20
Total	94.65	95.06	95.05	94.42	94.84	95.50	95.26	94.58	93.60	94.73	95.31	93.90	95.59	94.04	95.09	94.65	94.18	94.98	93.14	94.67	95.20
Si	3.05	3.06	3.05	3.07	3.05	3.05	3.07	3.06	3.06	3.05	3.07	3.10	3.07	3.03	3.05	3.05	3.08	3.07	3.10	3.07	3.07
Ti	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00
Al	2.78	2.76	2.77	2.76	2.78	2.77	2.75	2.78	2.77	2.77	2.74	2.71	2.76	2.81	2.78	2.77	2.75	2.78	2.70	2.84	2.70
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
Fe ²⁺	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.09	0.07	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.04
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.09	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.09	0.09	0.09	0.09	0.06	0.15
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.04
K	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.88	0.88	0.88	0.90	0.87	0.84	0.89	0.89	0.92	0.88	0.89	0.88	0.84	0.90	0.87	0.87
X _{Mg}	0.53	0.51	0.50	0.50	0.50	0.50	0.52	0.50	0.50	0.51	0.56	0.50	0.52	0.52	0.49	0.50	0.52	0.54	0.51	0.46	0.78

以 11 个氧原子为标准计算的阳离子系数

注: M_s-Bt 为与黑云母接触的白云母, M_s-Pl 为与斜长石接触的白云母, M_s-c 为与石榴石接触的白云母, $X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe^{2+})$ 。

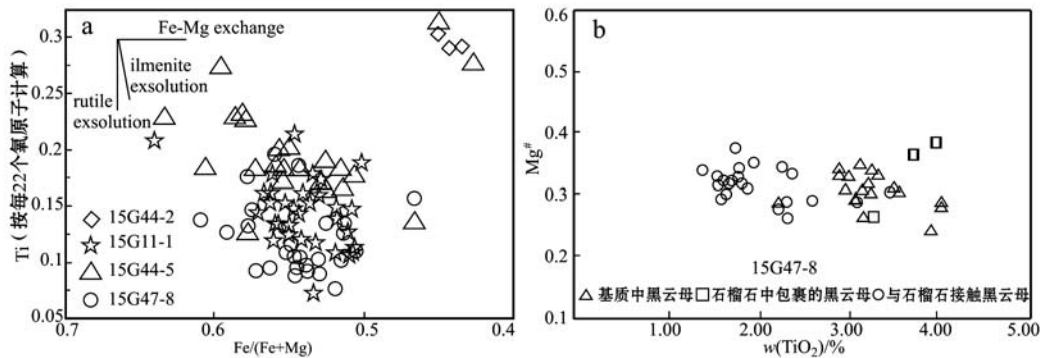


图8 嘎洒地区变沉积岩中黑云母成分投图

Fig. 8 Chemical characteristics of biotite from meta-sediment rocks in Gasa area

形成的机制研究时指出:剪切作用下石榴石表面存在压力差,近垂直剪切方向的高压区域具有更高的化学势,石榴石会发生溶解,并在石榴石两端低化学势的弱应力区沉积下来,从而形成透镜状。Storey等(2005)指出:石榴石在强剪切作用下以扩散蠕变的机制发生塑性变形,在强剪切过程中石榴石斑晶与基质中矿物摩擦会产生表面高温,其变形温度可达700℃左右。Wheeler(2014)针对变泥质岩剪切作用下(存在差应力)的实验岩石学研究指出,压力敏感反应 $Mu + Qtz \rightarrow Kfs + Sil + Liq$ 的变质温度会明显降低,即在强剪切作用下实际计算的温度可能要比反应温度高。综上所述,结合 M_2 阶段矿物组合:针柱状夕线石(Si_2) + 石榴石 + 黑云母 + 斜长石 + 钾长石 + 石英 + 钛铁矿。主要应用强剪切变形的夕线石-石榴石-斜长石-石英(GASP)压力计(Holdaway, 2001)进行压力估算,计算获得的温压条件为650~720℃、450~630 MPa,岩石具有近等温降压的演化特征。指示中地壳脆韧性转换带深度为岩石剪切变形变质发生的温压环境。

4.1.3 晚期退变质阶段(M_3)

晚期退变质阶段(M_3)矿物组合为细粒黑云母 + 白云母 + 斜长石 + 石英,通过二云母温度计(Hoisch, 1989)获得二云母片岩的形成温度为580~640℃,计算结果见表6。指示随着剪切作用对变沉积岩的进一步抬升(翟云峰, 2008),云母片岩形成于饱和水固相线温度之下。

4.1.4 黑云母钛温度计计算

另外,通过应用变沉积岩黑云母 Ti 温度计

$\ln z(^\circ C) = 6.313 + 0.224 \ln(X_{Ti}) - 0.288 \ln(X_{Fe}) - 0.449 \ln(X_{Mg}) + 0.15 p(\text{GPa})$ 进行计算(Wu and Chen, 2015)[其中 $X_j = j / (Fe + Mg + Al^{VI} + Ti)$, j 代表黑云母中的 Ti、Fe、Mg、 Al^{VI} 的离子数]。获得夕线石-石榴石-黑云母二长片麻岩(15G44-2)基质中16个黑云母的形成温度为710~770℃,而与石榴石接触的20个黑云母的形成温度为670~740℃。强剪切变形的夕线石-石榴石-黑云母二长片麻岩(15G47-8)17个基质中远离石榴石的黑云母的形成温度为700~750℃;而与石榴石接触的24个黑云母所计算的平均形成温度为730℃,且强剪切样品中位于石榴石两端的黑云母的钛含量较基质中黑云母钛含量明显更低,另外,二云母片岩(15G11-1)中19个黑云母所计算的温度为590~660℃平均为620℃。因此上述黑云母钛温度计计算出的温度结果与GB-GASP和二云母温度计计算结果较为吻合。

4.2 变质演化

综上所述,哀牢山中北段变沉积岩经历了近等温减压的顺时针变质演化轨迹(图10):峰期阶段(M_1)变质程度可达角闪-麻粒岩相,峰期变质温度和压力分别为690~750℃,690~810 MPa。表明点苍山-哀牢山变质杂岩带存在着陆壳物质的俯冲,而之后的红河-哀牢山大型走滑断层所导致的高温剪切并伴随强烈抬升使得岩石发生近等温减压-高温剪切变形(M_2),对早期变质的岩石进行了强烈的叠加改造,石榴石在高温剪切过程中发生变形,沿剪切方向呈透镜状排列并产生近垂直剪切方向的裂理。同时,黑云母发生脱水反应: $2 Bt \rightarrow Sil + 6 (Mg, Fe)O + K_2O + 5 Qtz + 2 H_2O$ 形成定向排列的针柱状夕线石,其中夹杂残留的黑云母,变质温压条件为650~

w_B/%

表 5 嘎洒地区夕线石榴黑云二长片麻岩及二云母片岩中代表性斜长石化学成分

Table 5 Representative chemical composition of the plagioclases of Sil-Crt-Bt monzonites and two-mica schist in Gasa area

成分	15G11-1(二云母片岩)			15G44-2(夕线石榴黑云二长片麻岩)			15G47-8(夕线石榴黑云二长片麻岩)			15G47-6(强变形)				
	Pl-m	Pl-m	Pl-m	Pl-m	Pl-m	Pl-c	Pl-i	Pl-m	Pl-i	Pl-m	Pl-i	Pl-i		
SiO ₂	63.04	63.30	62.46	63.79	60.16	59.72	60.24	59.37	57.74	59.62	59.41	55.63	56.99	54.44
TiO ₂	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04	0.03	0.02	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	22.97	22.03	23.12	22.32	24.81	24.45	24.48	24.44	26.05	24.37	24.36	26.36	26.56	28.42
Cr ₂ O ₃	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00
FeO ^T	0.00	0.03	0.02	0.04	0.03	0.14	0.04	0.22	0.69	0.06	0.09	0.36	0.67	0.70
MnO	0.00	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00
MgO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
CaO	3.85	3.12	4.09	3.41	5.97	5.79	5.80	5.69	7.78	5.77	5.89	8.54	8.33	10.01
Na ₂ O	8.93	9.51	8.87	9.41	7.59	7.80	7.63	7.89	6.65	7.92	7.60	6.04	6.29	5.45
K ₂ O	0.44	0.27	0.23	0.35	0.39	0.36	0.27	0.20	0.14	0.26	0.26	0.36	0.38	0.29
Total	99.26	98.27	98.84	99.37	98.98	98.32	98.48	97.81	99.09	98.07	97.64	97.35	99.26	99.34
Si	2.81	2.84	2.79	2.83	2.70	2.70	2.71	2.70	2.61	2.70	2.70	2.56	2.58	2.47
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.21	1.17	1.22	1.17	1.31	1.30	1.30	1.31	1.39	1.30	1.31	1.43	1.42	1.52
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02
Fe ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.18	0.15	0.20	0.16	0.29	0.28	0.28	0.28	0.38	0.28	0.29	0.42	0.40	0.49
Na	0.77	0.83	0.77	0.81	0.66	0.68	0.67	0.70	0.58	0.70	0.67	0.54	0.55	0.48
K	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Sum	4.99	5.00	4.99	5.00	4.98	5.00	4.98	5.01	4.98	5.00	4.98	4.99	4.99	5.00
An	19	15	20	16	30	28	29	28	39	28	30	43	41	49
Ab	79	83	79	82	68	69	69	71	60	70	69	55	56	49
Or	3	2	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2

注: An=Ca/(Ca+Na+K), Ab=Na/(Ca+Na+K), Or=K/(Ca+Na+K), Pl-m 为基质中的斜长石, Pl-i 为被石榴石包裹的斜长石, Pl-c 与石榴石接触斜长石。

以 8 个氧原子为标准计算的阳离子系数

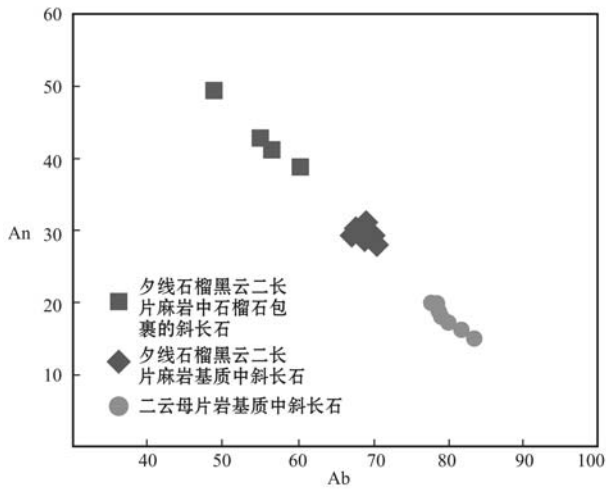


图 9 嘎洒地区变沉积岩中斜长石 An - Ab 图解
Fig. 9 An versus Ab diagram of plagioclase in meta-sedimentary rocks from Gasa area

720°C、450~630 MPa。之后在浅层次地壳流体作用下变沉积岩记录了水饱和固相线之下的退变质阶段 (M₃)，形成交生的白云母和黑云母，变质温压条件为

580~640°C、400~500 MPa。

5 讨论

以往众多研究表明，点苍山-哀牢山变质杂岩的变质作用性质及其演化动力学过程与红河-哀牢山大规模走滑-剪切存在密切的成因关系 (Tapponnier *et al.*, 1990; 张进江等, 2006; 刘俊来等, 2006, 2008; Tang *et al.*, 2013)。然而，以往研究多数集中在点苍山-哀牢山变质杂岩带的构造变形研究，而对于变质演化与剪切作用的关系的研究相对较为薄弱，且在观点上存在明显分歧。部分学者通过变质作用和数值模拟研究 (Leloup *et al.*, 1993, 1999, 2001; Gilley *et al.*, 2003)，认为变质作用完全受控于红河-哀牢山大规模剪切作用，即从进变质阶段到峰期变质再到晚期的退变质阶段都处于剪切-走滑过程中，剪切具有大走滑 (距离大于 500 km)、深剪切 (下切到上地幔) 的特点。其中，Leloup 等 (1993, 2001) 认为陆内大型走滑断层剪切运动是一种新的

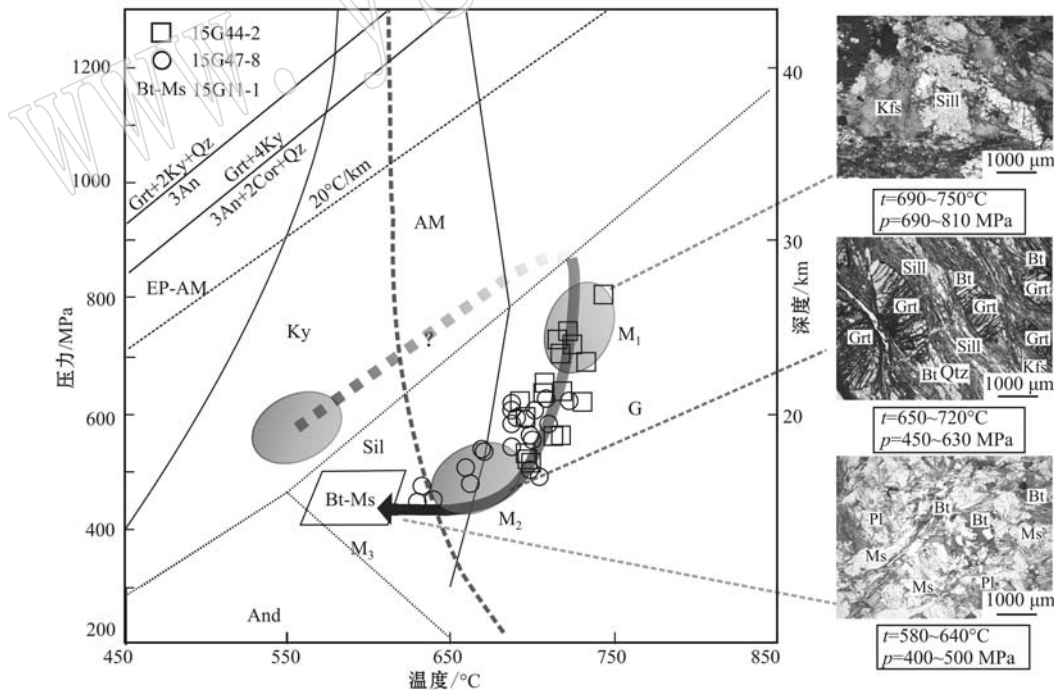


图 10 嘎洒地区变沉积岩变质演化 $p-T$ 轨迹 (变质相划分根据 Liou *et al.*, 1998, 2004; Okamoto and Maruyama, 1999)

Fig. 10 Metamorphic $p-T$ conditions and evolutionary path of meta-sedimentary rocks in Gasa area (classification of metamorphic facies after Liou *et al.*, 1998, 2004; Okamoto and Maruyama, 1999)

EP-AM—绿帘角闪岩相；AM—角闪岩相；G—麻粒岩相

EP-AM—epidote-amphibolite facies; AM—amphibolite facies; G—granulite facies

表 6 二云母温度计计算结果
Table 6 *p-T* estimations by muscovite-biotite geothermometer

岩性	矿物编号	压力(假设)/GPa	温度/°C	平均温度/°C	压力(假设)/GPa	温度/°C	平均温度/°C
	11-1.2		630			600	
	11-1.4		630			614	
	11-1.6		619			602	
	11-1.8		598			580	
	11-1.10		596			579	
	11-1.12		602			585	
	11-1.14		603			586	
	11-1.18		606			589	
	11-1.20		611			594	
二云母片岩	11-1.22	0.5	633	615	0.4	616	596
	11-1.24		580			562	
	11-1.28		618			601	
	11-1.32		621			604	
	11-1.34		614			597	
	11-1.37		623			606	
	11-1.39		626			609	
	11-1.42		603			586	
	11-1.45		639			623	
	11-1.48		637			590	

变质机制,即岩石圈规模的大型走滑断裂会导致下地壳部分熔融,剪切带内的岩浆和/或流体对流导致剪切带周边中、上地壳升温从而控制变质-深熔作用。并通过杂岩带中两个变沉积岩的传统矿物对温压计估算获得的变质峰期压力为 500 MPa 左右,峰后在近等压的条件下从峰期的 750°C 左右发生快速降温(图 11a)。即岩石的变质深度始终未突破韧性

剪切带的尺度,变质演化主要受控于大规模的陆内剪切走滑,而不存在地壳的加厚和俯冲过程。对于单纯剪切增温不足以提供峰期角闪-麻粒岩相 750°C 的变质条件的问题,Leloup 等(1999)认为变质温度除和剪切带的剪切速率关系密切外,深剪切会导致上地幔部分熔融而产生少量的流体并导致岩浆或热液沿剪切带上升可以作为热量补充使围岩发生角闪-

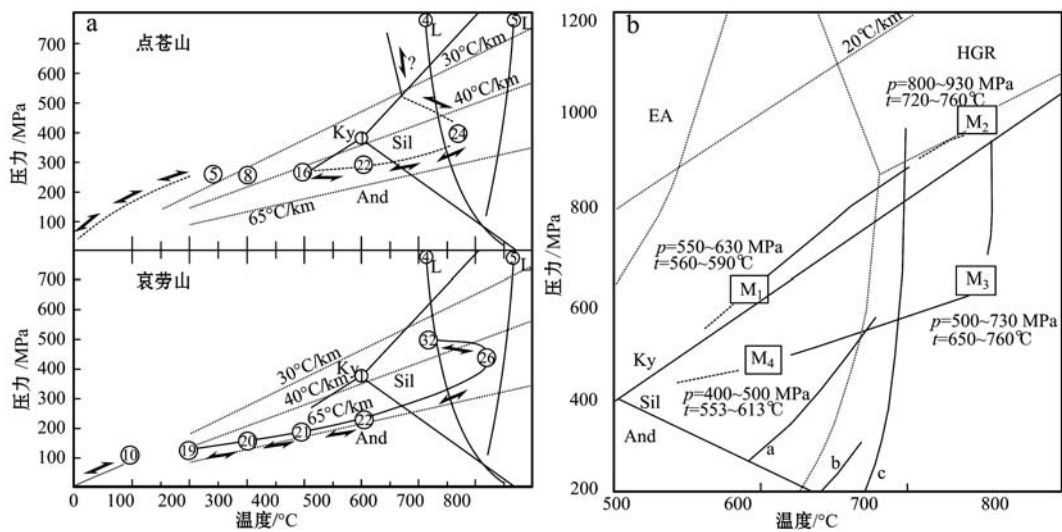
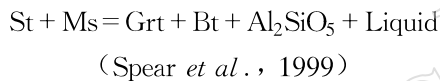
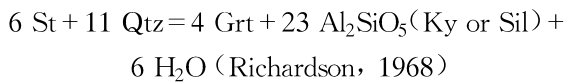


图 11 点苍山-哀牢山变质杂岩带变沉积岩变质演化 *p-T* 轨迹(a 据 Leloup *et al.*, 2001, b 据 Wang *et al.*, 2016)

Fig. 11 Metamorphic *p-T* paths of meta-sedimentary rocks from Diancang Mountain-Ailao Mountain metamorphic complex belt (a after Leloup *et al.*, 2001; b after Wang *et al.*, 2016)

麻粒岩相变质。Gilley 等(2003)虽然通过对夕线石榴片麻岩的 GASP 压力计计算得到哀牢山的峰期变质压力为 550~810 MPa, 但认为存在于基质中的 74~16 Ma 的独居石为先存独居石部分重置的结果, 同时认为基质中 34~21 Ma 的独居石年龄代表变质年龄, 即哀牢山的变质作用完全发生在剪切走滑时期。

近年来, 部分学者对点苍山-哀牢山变质杂岩带中变质作用性质及其演化的 p - T - t 轨迹进行了重点研究(Liu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2016)。其中, 对大理点苍山地区和哀牢山南段的元江地区含蓝晶石的夕线十字石榴黑云二长片麻岩岩相学研究发现(Wang *et al.*, 2016): 岩石中石榴石存在明显的进变质环带, 而峰期阶段以基质中出现大量石榴石、蓝晶石和夕线石为特点, 其变质反应为:



变质峰期(图 11b 中 M_2)温压条件可达 720~750°C、800~930 MPa, 峰后存在明显的近等温降压的过程(图 11a 中 M_2 - M_3 阶段), 并通过石榴石变斑晶不同区域的矿物包裹体组合研究认为俯冲-碰撞过程早于区域上的剪切作用, 且剪切作用发生于变质演化的近等温减压阶段。Liu 等(2013)通过对点苍山-哀牢山杂岩带中变沉积岩、斜长角闪岩、石榴辉石岩中锆石包裹体和年代学研究获得 44~36 Ma 的变质峰期年龄, 明显早于区域性走滑-剪切的启动年龄(Leloup *et al.*, 1993; Schärer *et al.*, 1994; Gilley *et al.*, 2003; Searle, 2006), 同时获得近等温减压过程时限为 32~25 Ma, 即角闪-麻粒岩相变质作用发生于剪切作用之前。此外, Wang 等(2001)认为点苍山-哀牢山杂岩带内不同阶段的火山岩的高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 和 Sr-Nd-Pb 同位素存在明显的差异。对早期(42~24 Ma)岩浆岩中深部包体的矿物对温压计算得到 780~830°C 和 600~1 000 MPa 温压条件与晚期(16~0 Ma)岩浆岩中包体存在明显差异。进而提出早期(42~24 Ma)存在印支陆块向扬子陆块俯冲过程和晚期(16~0 Ma)的伸展作用降压引起的深熔作用。

由此可见, 点苍山-哀牢山杂岩带在大规模走滑-剪切变形之前, 是否经历了陆壳物质的俯冲-折返的造山过程, 是解决上述争议的关键所在。本文对

点苍山-哀牢山变质杂岩带中北段各类变沉积岩的变质演化进行了深入研究, 研究结果揭示嘎洒地区变沉积岩经历了 690~750°C、690~810 MPa 的峰期变质(M_1); 峰后近等温降压-高温走滑变形(M_2)阶段和后期退变质(M_3)的连续演化过程。前人认为这种近等温减压的顺时针 p - T 演化轨迹反映碰撞造山过程中加厚的下地壳折返至地表的动力学过程(Condie *et al.*, 1992; Brown, 1993)。碰撞造山过程使地壳表层沉积岩俯冲至中-下地壳经历角闪-麻粒岩相变质作用, 之后在重力均衡作用下发生快速折返并穿过脆-韧性转换带, 压力快速降低而温度变化较小, 岩石记录近等温减压的变质演化过程。韧性剪切过程的岩相学特征为岩石中黑云母脱水熔融形成夕线石和石榴石发生透镜状变形。进一步构造抬升使岩石发生水化作用和脆性变形。这种变质演化特点与哀牢山南段和大理点苍山地区的变质演化(Wang *et al.*, 2016)十分相似, 标志着点苍山-哀牢山杂岩带在区域大型走滑-剪切-高温变形之前, 确实经历了陆壳物质的俯冲-折返的演化过程, 指示在印度板块和欧亚板块碰撞的过程中在其东南缘的印支陆块和扬子陆块边界存在陆-陆碰撞的造山过程。

6 结论

(1) 嘎洒地区的变沉积岩经历了 3 个变质演化阶段, 其中峰期阶段(M_1)矿物组合为: Sil_1 (板柱状夕线石) + $\text{Grt} + \text{Bt}_1 + \text{Pl} + \text{Kfs} + \text{Qtz} + \text{Ilm}$; 峰后近等温减压-高温剪切变形阶段(M_2)矿物组合为: Sil_2 (针柱状夕线石) + $\text{Grt} + \text{Bt}_2 + \text{Pl} + \text{Kfs} + \text{Qtz} + \text{Ilm}$; 近等温减压-高温剪切变形阶段变质反应为 $2 \text{ Bt} \rightarrow \text{Sil} + 6 (\text{Mg, Fe})\text{O} + \text{K}_2\text{O} + 5 \text{ Qtz} + 2 \text{ H}_2\text{O}$, 其中石榴石发生强烈变形; 后期退变质阶段(M_3)矿物组合为: $\text{Bt}_3 + \text{Ms} + \text{Qtz} + \text{Pl}$ 。

(2) 嘎洒地区变沉积岩峰期阶段(M_1)温压条件为 690~750°C、690~810 MPa; 峰后近等温减压-高温剪切变形阶段(M_2)的温压条件为 650~720°C、450~630 MPa; 后期退变质阶段(M_3)温压条件为 580~640°C、400~500 MPa, 表明点苍山-哀牢山中北段嘎洒地区变沉积岩的变质演化为近等温减压的顺时针 p - T 轨迹, 具有典型的碰撞造山带变质演化特点。

(3) 点苍山-哀牢山变质杂岩带, 在红河-哀牢山大规模走滑-高温剪切变形之前, 经历了印支陆块与

扬子陆块碰撞-造山作用, 峰期变质可达到角闪-麻粒岩相; 在此之后的构造折返过程中, 岩石发生高温剪切变形作用, 石榴石发育强烈塑性变形, 同时黑云母等含水矿物发生脱水熔融, 形成区域上呈带状分布的糜棱岩、糜棱岩化岩石及深熔脉体。

致谢 本文在实验和撰文的过程中, 得到了中国科学院地质与地球物理所电子探针实验室毛騫老师、张迪同学、国土资源部大陆动力学重点实验室扫描电镜室陈方远老师、李广旭同学的无私指导和帮助; 两位匿名审稿人对本文提出了宝贵的修改意见, 对文章的规范和学术理论的提升有极大的帮助, 在此一并表示感谢。

References

- Brown M. 1993. *p-T-t* evolution of orogenic belts and the causes of regional metamorphism[J]. *Journal of the Geological Society of London*, 150: 227~241.
- Cai Yongfeng, Wang Yuejun, Peter A C, *et al.* 2014. Neoproterozoic crustal growth of the Southern Yangtze Block: Geochemical and zircon U-Pb geochronological and Lu-Hf isotopic evidence of Neoproterozoic diorite from the Ailao Shan zone[J]. *Precambrian Research*, 266: 37~149.
- Cao Shuyun, Liu Junlai, Bernd Leiss, *et al.* 2009. Timing of initiation of Left-Lateral slip along the Ailao Shan-Red river shear zone: microstructural, texture and thermochronological evidence from high temperature mylonite in Diancang Shan, SW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1 388~1 400(in Chinese with English abstract).
- Condie K C, Boryta M D, Liu Jinzhong, *et al.* 1992. The origin of khondalites: Geochemical evidence from the Archean to Early Proterozoic granulite belt in the North China craton[J]. *Precambrian Research*, 59(3~4): 207~223.
- David J. 1993. Sub-critical fracture and associated retrogression of garnet during mylonitic deformation[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113: 545~556.
- Deng Jun, Wang Qingfei, Li Gongjian, *et al.* 2014a. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China[J]. *Earth Science Reviews*, 136: 1~27.
- Deng Jun, Wang Qingfei, Li Gongjian, *et al.* 2014b. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China[J]. *Gondwana Research*, 26: 419~437.
- Gilley L D, Harrison T M, Leloup P H, *et al.* 2003. Direct dating of left-lateral deformation along the Red River shear zone, China and Vietnam[J]. *Journal of Geophysical Research*, 108(B2): 14~21.
- Hoisch T D. 1989. A muscovite-biotite geothermometer[J]. *American Mineralogist*, 74: 565~572.
- Holdaway M J. 2000. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer[J]. *American Mineralogist*, 85(7~8): 881~892.
- Holdaway M J. 2001. Recalibration of the GASP geobarometer in light of recent garnet and plagioclase activity models and versions of the garnet-biotite geothermometer [J]. *American Mineralogist*, 86(10): 1 117~1 129.
- Jian Ping, Liu Dunyi, Kröner A, *et al.* 2009. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (II): Insights from zircon ages of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province[J]. *Lithos*, 113(3~4): 767~784.
- Lai Chun-Kit, Sebastien M, Anthony J C, *et al.* 2014. The Central Ailao Shan ophiolite and modern analogs[J]. *Gondwana Research*, 26: 74~88.
- Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, *et al.* 2001. New constraints on the structure, thermochronology and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE Asia[J]. *Geophysical Research*, 106: 6 683~6 732.
- Leloup P H and Kienast J R. 1993. High-temperature metamorphism in a major strike-slip shear zone: the Ailao Shan-Red River, People's Republic of China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 118(1~4): 213~234.
- Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, *et al.* 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 251(1~4): 3~10.
- Leloup P H, Ricard Y, Battaglia J, *et al.* 1999. Shear heating in continental strike-slip shear zones: model and field examples[J]. *Geophysical Journal International*, 136(1): 9~40.
- Li Baolong, Ji Jianqing, Fu Xiaoyue, *et al.* 2008. Zircon SHRIMP dating and its geological implications of the metamorphic rocks in Ailao Shan-Diancang mountain ranges, west Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2 322~2 330(in Chinese with English abstract).
- Li Baolong, Ji Jianqing, Fu Xiaoyue, *et al.* 2009. Metamorphic times limits, study on the metamorphic rocks series of Ailao Shan-Diancang Mountain Ranges, west Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 595~608(in Chinese with English abstract).
- Liou J G, Tsujimori T, Zhang Ruyuan, *et al.* 2004. Global UHP metamorphism and continental subduction/collision: The Himalayan model[J]. *International Geology Review*, 46(1): 1~27.
- Liou J G, Zhang Ruyuan, Ernst W G, *et al.* 1998. High-pressure min-

- erals from deeply subducted metamorphic rocks[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 37(1): 33~96.
- Liu Fagang. 2005. Metamorphic feature research of South segment of Ailao Shan group and Yao Shan group[D]. Yunnan: Kunming University of Science and Technology, 1~46(in Chinese with English abstract).
- Liu Fulai, Wang Fang, Liu Pinghua, *et al.* 2013. Multiple metamorphic events revealed by zircons from the Diancang Shan-Ailao Shan metamorphic complex, southeastern Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 24: 429~450.
- Liu Fulai, Wang Fang, Liu Pinghua, *et al.* 2015. Multiple partial melting events in the Ailao Shan-Red River and Gaoligong Shan complex belts, SE Tibetan Plateau: Zircon U-Pb dating of granitic leucosomes within migmatites[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 110: 151~169.
- Liu Huichun, Wang Yuejun, Peter A C, *et al.* 2015. Record of Tethyan ocean closure and Indosinian collision along the Ailao Shan suture zone (SW China)[J]. *Gondwana Research*, 27: 1292~1306.
- Liu Junlai, Chen Xiaoyue, Wu Wenbin, *et al.* 2015. New tectonochronological constraints on timing of shearing along the Ailao Shan-Red River shear zone: Implications for genesis of Ailao Shan gold mineralization[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 70~86.
- Liu Junlai, Song Zhijie, Cao Shuyun, *et al.* 2006. The dynamic setting and processes of tectonic and magmatic evolution of the oblique collision zone between Indian and Eurasian plates: Exemplified by the tectonic evolution of the Three River Region, eastern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 775~786(in Chinese with English abstract).
- Liu Junlai, Tang Yuang, Tran M D, *et al.* 2012. The nature of the Ailao Shan-Red River (ASRR) shear zone: Constraints from structural, microstructural and fabric analyses of metamorphic rocks from the Diancang Shan, Ailao Shan and Day Nui Con Voi massifs[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 231~251.
- Liu Junlai, Wang Anjian, Cao Shuyun, *et al.* 2008. Geochronology and tectonic implication of migmatites from Diancang Shan, western Yunnan, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 413~420(in Chinese with English abstract).
- Okamoto K and Maruyama S. 1999. The high-pressure synthesis of lawsonite in the MORB + H₂O system[J]. *American Mineralogist*, 84(3): 362~373.
- Qi Xunxiang, Santosh M, Zhao Yuhao, *et al.* 2016. Mid-Neoproterozoic ridge subduction and magmatic evolution in the northeastern margin of the Indochina block: Evidence from geochronology and geochemistry of calc-alkaline plutons[J]. *Lithos*, 248~251: 138~152.
- Qi Xunxiang, Santosh M, Zhu Luhua, *et al.* 2014. Mid-Neoproterozoic arc magmatism in the northeastern margin of the Indochina block, SW China: Geochronological and petrogenetic constraints and implications for Gondwana assembly[J]. *Precambrian Research*, 245: 207~224.
- Richardson S W. 1968. Staurolite stability in a part of the system Fe-Al-Si-OH[J]. *Journal of Petrology*, 9(3): 467~489.
- Schärer U and Tapponnier P. 1990. Intraplate tectonics in Asia: a precise age for large-scale Miocene movement along the Ailao Shan-Red River shear zone, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 97(1~2): 65~77.
- Schärer U, Zhang Liansheng and Tapponnier P. 1994. Duration of strike-slip movements in large shear zones: The Red River belt, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 126: 379~397.
- Searle M P. 2006. Role of the Red River shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia[J]. *Journal of the Geological Society (London)*, 163: 1025~1036.
- Searle M P, Yeh M W, Lin T H, *et al.* 2010. Structural constraints on the timing of left-lateral shear along the Red River shear zone in the Ailao Shan and Diancang Shan Ranges, Yunnan, SW China[J]. *Geosphere*, 6: 316~338.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495~500(in Chinese with English abstract).
- Spear F S, Kohn M and Cheney J. 1999. P-T paths from anatectic pelites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 17~32.
- Storey D J and Prior Plastic. 2005. Deformation and Recrystallization of Garnet: A Mechanism to Facilitate Diffusion Creep[J]. *Journal of Petrology*, 46(12): 2593~2613.
- Tang Yuan, Liu Junlai, My-Dung Tran, *et al.* 2013. Timing of left-lateral shearing along the Ailao Shan-Red River shear zone: constraints from zircon U-Pb ages from granitic rocks in the shear zone along the Ailao Shan Range, Western Yunnan, China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 102(3): 605~626.
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, *et al.* 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and south China[J]. *Nature*, 343(1): 431~437.
- Wang Dongbing, Tang Yuan, Liao Shiyong, *et al.* 2013. Zircon U-Pb dating and its geological implications of the metamorphic rock series in Ailao Shan Ranges, western Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1261~1278(in Chinese with English abstract).
- Wang Fang, Liu Fulai and Liu Pinghua. 2011. Metamorphic evolution and anatexis of gneissic rocks in the Diancangshan-Ailaoshan metamorphic

- complex belt, southeastern Tibet Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3 280~3 294(in Chinese with English abstract).
- Wang Fang, Liu Fulai and Liu Pinghua. 2013. Metamorphic evolution of meta-sedimentary rocks within the Diancang Shan-Ailao Shan metamorphic complex belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 630~640(in Chinese with English abstract).
- Wang Fang, Liu Fulai, Liu Pinghua, *et al.* 2016. Petrology, geochemistry and metamorphic evolution of meta-sedimentary rocks in the Diancang Shan-Ailao Shan metamorphic complex, Southeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 124: 68~93.
- Wang Jianghai, Yin An, Harrison T M, *et al.* 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 188: 123~133.
- Wheeler J. 2014. Dramatic effects of stress on metamorphic reactions[J]. *Geology*, 42(8): 647~650.
- Wu Chunming and Chen Hongxu. 2015. Revised Ti-in-biotite geothermometer for ilmenite or rutile-bearing crustal metapelites[J]. *Science. Bull.*, 60(1): 116~121.
- Wu Chunming, Xiao Lingling and Ni Shanqin. 2007. Main geothermometers and geobarometers in metapelites[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 144~150(in Chinese with English abstract).
- Yunnan Bureau Geological Mineral Resource. 1990. Regional Geology of Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~729(in Chinese).
- Zhai Yunfeng. 2008. Structural characteristics and geological implication of the middle to Northern segment of Ailao Shan metamorphic belt[D]. Beijing: China university of geosciences, Master's thesis(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinjiang, Zhong Dalai, Sang Haiqing, *et al.* 2006. Structural and geochronological evidence for multiple episodes of deformation since Paleocene along the Ailao Shan-Red river shear zone, southeastern Asia[J]. *Chinese Journal of Geology*, 41(2): 291~310(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Zhou Dejin, Zhao Dasheng, *et al.* 1994. Ophiolites of the Hengduan Mountains, China: Characteristics and tectonic settings[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(4): 335~344.
- Zhong Dalai. 1998. Paleotethysides in Western Yunnan and Sichuan, China[M]. Beijing: Science Press, 1~235(in Chinese).
- 曹淑云, 刘俊来, Bernd Leiss, 等. 2009. 哀牢山-红河剪切带左行走滑作用起始时间约束-点苍山高温糜棱岩的显微构造与热年代学证据[J]. *地质学报*, 83(10): 1 388~1 400.
- 李宝龙, 季建清, 付孝悦, 等. 2008. 滇西点苍山-哀牢山变质岩系锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 24(10): 2 322~2 330.
- 李宝龙, 季建清, 付孝悦, 等. 2009. 滇西点苍山-哀牢山变质岩系变质时限研究[J]. *岩石学报*, 25(3): 595~608.
- 刘发刚. 2005. 云南哀牢山南段哀牢山岩群、瑶山岩群变质特征研究[D]. 云南: 昆明理工大学.
- 刘俊来, 宋志杰, 曹淑云, 等. 2006. 印度-欧亚侧向碰撞带构造-岩浆演化的动力学背景与过程-以藏东三江地区构造演化为例[J]. *岩石学报*, 22(4): 775~786.
- 刘俊来, 王安建, 曹淑云, 等. 2008. 滇西点苍山杂岩中混合岩的地质年代学分析及其区域构造内涵[J]. *岩石学报*, 24(3): 413~420.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 495~500.
- 王冬兵, 唐 渊, 廖世勇, 等. 2013. 滇西哀牢山变质岩系锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 29(4): 1 261~1 278.
- 王 筋, 刘福来, 刘平华. 2011. 青藏高原东南缘点苍山-哀牢山杂岩带中片麻岩的变质演化及深熔作用特征[J]. *岩石学报*, 27(11): 3 280~3 294.
- 王 筋, 刘福来, 刘平华. 2013. 点苍山-哀牢山杂岩带变沉积岩的变质演化[J]. *岩石学报*, 29(2): 630~640.
- 吴春明, 肖玲玲, 倪善芹. 2007. 泥质变质岩系主要的矿物温度计与压力计[J]. *地学前缘*, 14(1): 144~150.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1~729.
- 翟云峰. 2008. 哀牢山变质带中北段构造特征及其地质意义[D]. 北京: 中国地质大学.
- 张进江, 钟大赉, 桑海清, 等. 2006. 哀牢山-红河构造带古新世以来多期活动的构造和年代学证据[J]. *地质科学*, 41(2): 291~310.
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1~235.

附中文参考文献