

华南晚古生代末超高温变质作用：以十万大山花岗岩中麻粒岩包体为例^{*}

赵亮^{1,2} 郭锋^{2**} 范蔚茗² 李超文² 覃小锋³ 李红霞²

ZHAO Liang^{1,2}, GUO Feng^{2**}, FAN WeiMing², LI ChaoWen², QIN XiaoFeng³ and LI HongXia²

1. 中国科学院南海海洋研究所边缘海重点实验室, 广州 510301

2. 中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

2. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2010-12-22 收稿, 2011-05-10 改回.

Zhao L, Guo F, Fan WM, Li CW, Qin XF and Li HX. 2011. Late Paleozoic ultrahigh-temperature metamorphism in South China: A case study of granulite enclaves in the Shiwandashan granites. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6):1707–1720

Abstract The Darongshan-Shiwandashan Indo-Sinian S-type granites from SE Guangxi Province contain abundant metasedimentary granulite enclaves. The mineral assemblages of spinel + quartz and orthopyroxene + sillimanite ± quartz in some granulites indicated ultrahigh-temperature metamorphism in the region. Using garnet-orthopyroxene geothermobarometry, the estimated P - T conditions for peak metamorphism are: $P = 7.5 \sim 8.0$ kbar and $T = 950 \sim 1000^\circ\text{C}$, and $P = 3.2 \sim 3.7$ kbar and $T = 790 \sim 820^\circ\text{C}$ for retrograde stage. Combined mineral assemblages and metamorphic reaction textures with P - T calculation, the granulite enclaves in the Shiwandashan area experienced a three-stage metamorphic history. The early prograde metamorphism extended into the stable field of sillimanite; The peak stage of the ultrahigh-temperature metamorphism was characterized by the mineral assemblages of spinel + quartz and orthopyroxene + sillimanite ± quartz, and the retrograde metamorphism was marked by formation of orthopyroxene + cordierite and/or orthopyroxene + plagioclase symplectites and coronas around garnet, suggesting a near-isothermal decompression path. This clockwise P - T path in granulites was consistent with the Late Paleozoic to Early Mesozoic crustal evolution, including initial crustal thickening, subsequent rapid exhumation and cooling and remelting.

Key words Ultrahigh-temperature metamorphism; Granulite enclaves; Shiwandashan area; South China

摘要 广西东南部大容山-十万大山地区过铝质(S型)花岗岩中包含丰富的副变质麻粒岩包体。部分麻粒岩包体保留了尖晶石+石英、斜方辉石+夕线石±石英等超高温变质矿物组合,指示这些麻粒岩包体曾经历了超高温变质作用。矿物温压估算结果显示:峰期温压条件为7.5~8.0kbar,950~1000℃,峰后退变质温压条件为3.2~3.7kbar,790~820℃。矿物共生组合、变质反应结构以及温压条件估算表明,大容山-十万大山花岗岩中的麻粒岩包体经历了从单相夕线石的稳定域,到尖晶石+石英和紫苏辉石+夕线石±石英的矿物共生组合的稳定域,最后发生了近等温降压退变质作用,形成了紫苏辉石+斜长石和紫苏辉石+堇青石冠状体后成合晶,构成了典型的顺时针 P - T 演化轨迹,反映区域当时经历了造山过程中地壳增厚,而后折返快速抬升到地表的动力学过程。

关键词 超高温变质作用;麻粒岩包体;十万大山;华南

中图法分类号 P588.34

* 本文受中国科学院知识创新工程方向性项目(KZCX2-YW-Q08-3-7、KZCX1-YW-15-2)资助。

第一作者简介:赵亮,男,1981年生,博士后,主要从事岩石矿物学研究

** 通讯作者:郭锋,男,1971年生,博士,研究员,主要从事岩石大地构造研究,E-mail: guofeng@263.net

1 引言

超高温变质作用的最早报道来自于东南极 Enderby Land 地区泥质岩石中出现的假蓝宝石 + 石英矿物组合 (Dallwitz, 1968)。随后,其他学者对该地区此类变质岩开展了进一步的研究 (Ellis, 1980; Ellis *et al.*, 1980; Grew, 1980, 1982)。但是,超高温变质作用作为一种重要的变质作用类型,直到二十世纪九十年代才开始被岩石学家们所广泛接受 (Kelsey, 2008)。通常,超高温变质作用指在压力为 7 ~ 13kbar、峰期温度为 > 900°C 发生的麻粒岩相变质作用 (Harley, 1998, 2004; Kelsey, 2008),或者地温梯度远大于 20°C · km⁻¹ 的变质作用 (Brown, 2006, 2007)。

超高温变质作用最常发生在富镁铝的变泥质岩中 (Kelsey, 2008),其最重要的标志就是含有指示超高温的矿物组合。典型的超高温矿物组合包括假蓝宝石 + 石英 (Dallwitz, 1968; Ellis, 1980; Ellis *et al.*, 1980; Grew, 1980; Kelsey *et al.*, 2004; Tsunogae and Santosh, 2006; Bose and Das, 2007; Santosh *et al.*, 2007a; Sato *et al.*, 2009; Nishimiya *et al.*, 2010)、尖晶石 + 石英 (Morimoto *et al.*, 2004; Sajeve and Osanai, 2004a; Santosh *et al.*, 2006b; Tsunogae and Santosh, 2006; Sato *et al.*, 2009; Shimizu *et al.*, 2009)、斜方辉石 + 夕线石 ± 石英 (Harley, 1998; Kelsey *et al.*, 2003; Sajeve and Osanai, 2004b)、大隅石 + 石榴子石 (Ellis, 1980; Ellis *et al.*, 1980; Grew, 1982; Arima and Gower, 1991; Sajeve and Osanai, 2004a)。此外,刚玉 + 石英 (Guiraud *et al.*, 1996; Mouri *et al.*, 2003, 2004; Tsunogae and van Reenen, 2006)、高氟的黑云母和钙镁闪石 (Motoyoshi and Hensen, 2001; Tsunogae *et al.*, 2003)等,也可作为超高温指示矿物组合。

到目前为止,世界上已发现的超高温变质作用已经超过 40 处,分布于各个主要大陆,并且多发生在古老克拉通内以及较年轻的活动带内 (Kelsey, 2008),从时代上看,超高温变质作用多发生在前寒武纪,主要分布在新太古代、古元古代、中元古代及晚新元古代,与地质历史时期几个主要超大陆的形成时代一致 (Brown, 2006, 2007; Kelsey, 2008),暗示超高温变质作用发生所需的热源可能与超大陆的形成有关 (Kelsey, 2008);对于显生宙以来尤其是晚古生代的超高温变质作用,目前的报道还比较少,仅在越南 Kontum 杂岩带和广西十万大山地区有发现 (Osanai *et al.*, 2004; Nakano *et al.*, 2004; Owada *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2010)。

近年来,在我国也陆续报道了一些超高温变质岩的出露,主要有华北克拉通北部孔兹岩带超高温麻粒岩 (刘建忠等, 2000; Santosh *et al.*, 2006, 2007a, b, 2008, 2009; 郭敬辉等, 2006; 刘守偈等, 2008; 刘守偈和李江海, 2007, 2009; Liu *et al.*, 2010)、新疆阿尔泰造山带超高温麻粒岩 (Li *et al.*, 2004, 2009)、南阿尔金变质带含假蓝宝石高压麻粒岩 (Zhang

and Meng, 2005)以及华南十万大山花岗岩带中超高温麻粒岩包体 (彭松柏, 2006; Zhao *et al.*, 2010; 赵亮, 2010)。其中,对华南十万大山花岗岩中的超高温麻粒岩包体变质反应的温压估算结果显示,其峰期变质反应温度可达到 1000°C (彭松柏, 2006; Zhao *et al.*, 2010; 赵亮, 2010)。本文在前人工作的基础上,对华南十万大山花岗岩中的麻粒岩包体进行了详细的岩石学、矿物学研究,根据典型的变质反应结构和矿物组合,结合矿物温压计算,探讨了其形成的变质反应历史,并重建了变质 *P-T* 演化轨迹。

2 区域地质背景

大容山-十万大山花岗岩带是华南著名的 S 型花岗岩分布区,位于桂东南和桂南一带,北起梧州附近,西南延伸至东兴,并进入越南境内,整体呈北东-南西向展布,长 400km,宽 20 ~ 75km,面积约 10000km²。岩带位于扬子地块与华夏地块的结合部位的钦州海西-印支褶皱带内 (图 1),其东部为云开地块,西部为十万大山盆地,基本上受控于岑溪-博白断裂和灵山-藤县两大断裂及其分支断裂。岩带内出露的地层包括寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、第三系和第四系。大容山-十万大山花岗岩侵入到古生代到早三叠世的沉积地层中,围岩主要是板岩、硅质岩、砂页岩及碳酸盐岩。

岩带主要包括大容山岩体 (北体和浦北岩体)、旧州岩体和台马岩体。大容山岩体位于大容山-十万大山花岗岩带的东北部,主要由堇青石黑云母花岗岩组成;台马岩体位于大容山-十万大山花岗岩带的西南部,主要由紫苏辉石花岗斑岩组成;旧州岩体位于大容山-十万大山花岗岩带的中部,主要由堇青石黑云母二长花岗岩组成。这些花岗岩中普遍含有丰富的包体。邓希光等 (2004) 对大容山、旧州岩体和台马岩体进行的 U-Pb 定年显示,3 个岩体的形成年龄分别为 233 ± 5Ma, 230 ± 4Ma 和 236 ± 4Ma。彭松柏等 (2004) 曾对钦州地区紫苏花岗岩中的麻粒岩包体进行的锆石 U-Pb 定年结果显示其内核变质结晶年龄集中分布于 950 ~ 1100Ma,外壳岩浆结晶年龄为 248Ma。

本文研究的麻粒岩包体产出于旧州岩体含堇青石紫苏花岗岩中。岩体呈北东向长条状岩基产出,与围岩均为侵入接触,侵入底层有志留系、泥盆系和上二叠统。岩体可分为边缘相和过渡相两个相带,过渡相发育,由中粒或中粗粒斑状花岗岩组成,边缘相见于岩体西侧和南端,由细粒花岗岩组成。花岗岩中含有丰富的包体,包体类型主要有麻粒岩、片麻岩、富云包体、变质砂岩、石英岩等,其中尤以麻粒岩和片麻岩居多,可占全部包体的 90% 以上。对麻粒岩包体进行的锆石 U-Pb 年代学结果显示,麻粒岩包体发生超高温变质反应的时间约为 253 ± 3Ma,原岩沉积物主要来自于新-中元古代 (564 ~ 1061Ma);锆石 Hf 同位素结果指示麻粒岩包体的原岩沉积物既有再循环的古老地壳物质的参与,也有新生幔

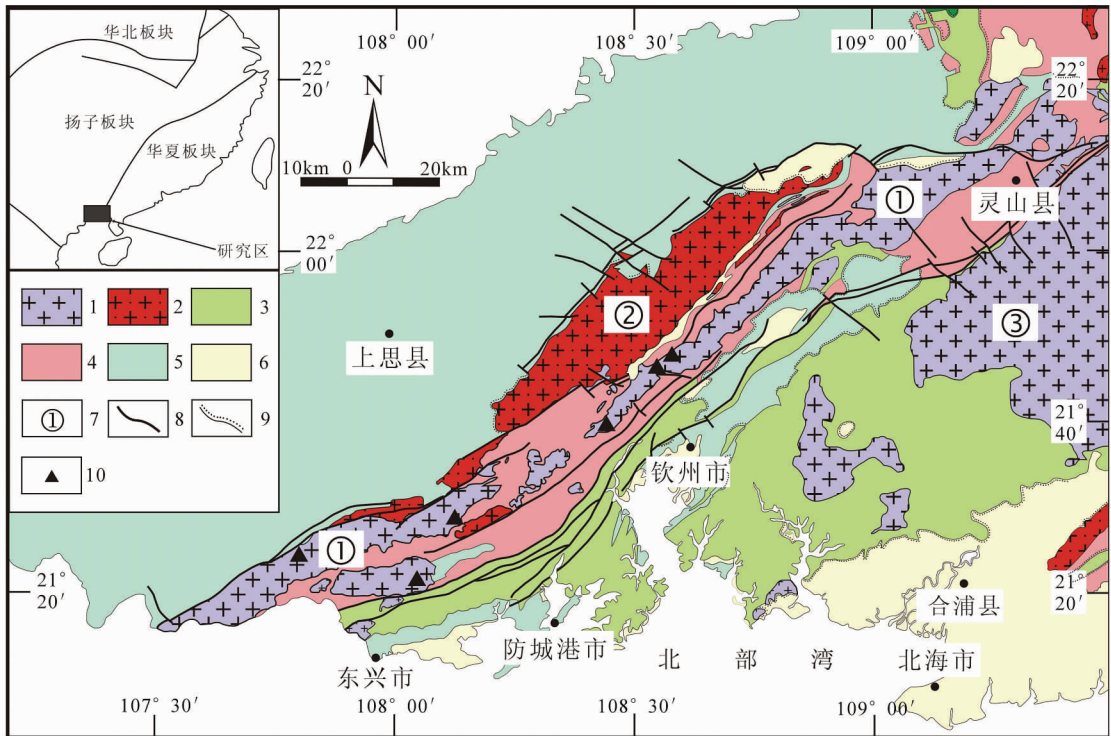


图1 大容山-十万大山花岗岩带地质简图及采样点位置

1-花岗岩;2-花岗斑岩;3-下古生界;4-上古生界;5-中生界;6-新生界;7-岩体编号:①-旧州岩体,②-台马岩体,③-浦北岩体;8-断裂带;9-不整合接触;10-采样点

Fig. 1 A simplified geological map of the Darongshan-Shiwandashan granite belt and sampling locations

1-granite; 2-granite porphyry; 3-Lower Palaeozoic; 4-Upper Palaeozoic; 5-Mesozoic; 6-Cenozoic; 7-number of granite: ①-Jiuzhou granite, ②-Taima granite, ③-Pubei granite; 8-fault; 9-unconformity; 10-sampling location

源岩浆的贡献 (Zhao *et al.*, 2010)。

3 岩石学特征

麻粒岩包体为灰-灰黑色,大小不等,直径几厘米到数十厘米,形态各异,主要呈椭圆状、透镜状、棱角状等,局部见石榴子石堆晶。包体在岩体的各个部位均有出现,在岩体的内部相、过渡相或是边缘相出现的概率相差不大。部分较大包体与花岗岩相互包裹,密切共生(图2)。

麻粒岩包体具花岗变晶结构,块状、片麻状构造。矿物粒度一般0.1~0.2cm,少数石榴子石斑晶较大,个别可达到1~2cm,局部见石榴子石堆晶。包体主要矿物为紫苏辉石(15%~30%)、石榴子石(10%~30%)、斜长石(20%~30%)、钾长石(15%~20%)、尖晶石(~5%)、堇青石(10%~30%)、黑云母(5%~30%)、石英(5%~15%)、夕线石(0~10%)、Fe-Ti氧化物(~5%),副矿物主要有锆石、磷灰石、水铝石、硅硼镁铝矿等,属于典型的副变质麻粒岩。根据矿物共生组合和变质反应结构,麻粒岩包体中矿物组合可分为3个阶段:早期矿物组合比较少见,仅在个别样品中有发现(样品07QZ-1),由大颗粒石榴子石核部的细小

包裹体矿物黑云母+石英+斜长石+夕线石组成。第二阶段矿物组合为石榴子石+紫苏辉石+斜长石+钾长石+石英+黑云母+尖晶石+堇青石+夕线石,部分麻粒岩包体保留了斜方辉石+夕线石±石英(图3a, b)、尖晶石+石英(图3c, d)等典型的超高温变质矿物组合,指示这些麻粒岩包体经历了超高温变质作用;第三阶段矿物为后成合晶中的紫苏辉石+堇青石+斜长石+尖晶石组合。麻粒岩包体中普遍发育堇青石+紫苏辉石冠状体后成合晶(图3e),局部可见斜长石+紫苏辉石冠状体后生成合晶(图3f),这些冠状体后成合晶为典型的退变质过程中形成的矿物组合。

4 变质反应结构

大容山-十万大山麻粒岩包体中丰富的矿物组合和变质反应结构反映其经历了复杂的变质作用历史。根据特征矿物组合和反应结构,可将变质作用过程划分为3个阶段:峰前进变质反应阶段,峰期超高温变质反应阶段和峰后退变质反应阶段。

4.1 峰前进变质反应阶段

麻粒岩包体经历了高温-超高温变质作用,其早期变质

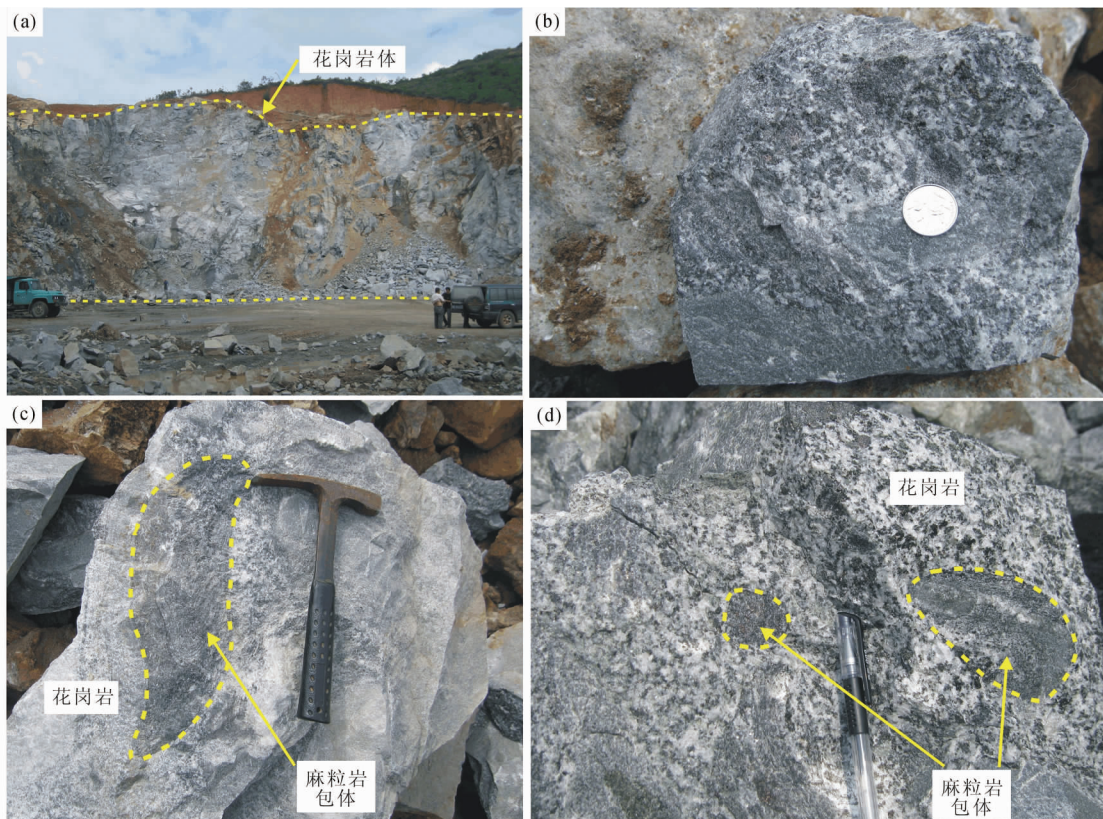


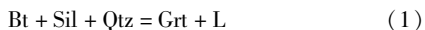
图2 麻粒岩包体与寄主花岗岩野外照片

(a)-花岗岩体; (b)-麻粒岩包体手标本; (c)、(d)-麻粒岩包体与寄主花岗岩野外产状,显示两者密切共生

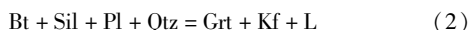
Fig.2 Field characteristics of the granulite enclaves and host granites

(a)-granite; (b)-granulite enclave sample; (c), (d)-occurrences of the granulite enclaves and host granites showing that they are closely associated with each other

作用阶段的绝大部分矿物组合和变质反应结构都已经被改造,因此很难保留下来 (Santosh *et al.*, 2007a)。但在局部位置,如在样品 07QZ-1 中的一颗粗粒石榴子石斑晶内部发现有黑云母、石英、斜长石和夕线石细小颗粒 (图 3g),暗示在早期进变质阶段发生了脱水反应 (Brandt *et al.*, 2003; Oh *et al.*, 2006):



或

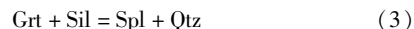


夕线石是所有矿物中唯一在所有反应结构中富铝的硅酸盐矿物,表明进变质反应条件位于夕线石稳定域 (Brandt *et al.*, 2003; Santosh *et al.*, 2007a)。上述两类变质反应通常发生在流体相对贫乏的环境 (Brandt *et al.*, 2003),暗示在麻粒岩相峰期变质阶段流体活动相对匮乏;同时还导致原岩中大量的石英被消耗,体系中自由态硅处于相对不饱和状态。

4.2 峰期超高温变质反应阶段

样品 07QZ-1 中石榴子石富集,并且可见大量的毛发状

夕线石与其共生。该样品中黑云母含量极少,表明黑云母在麻粒岩相超高温变质作用峰期发生大量消耗,暗示麻粒岩相峰期变质温度应超出了黑云母稳定域。在石榴子石与夕线石之间可见尖晶石与石英的共生组合 (图 3d),类似的超高温组合也在样品 06QZ-24 中见到 (图 3c),表明石榴子石在峰期变质条件下变得不再稳定,与夕线石发生反应形成尖晶石 + 石英矿物组合:

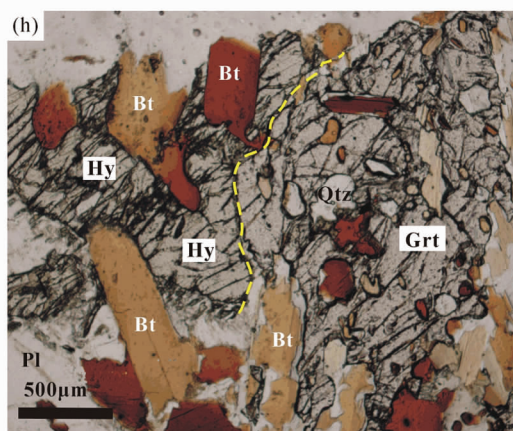
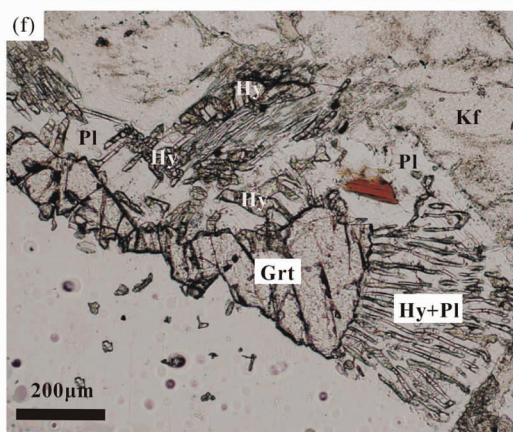
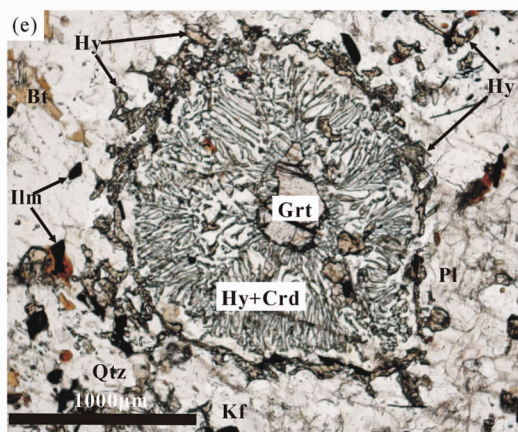
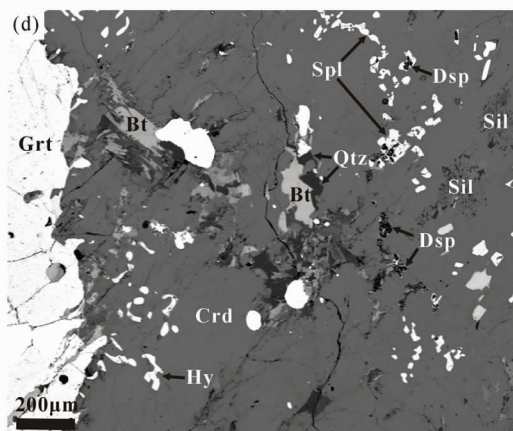
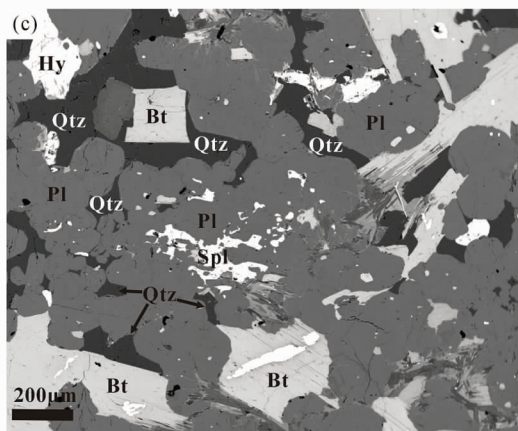
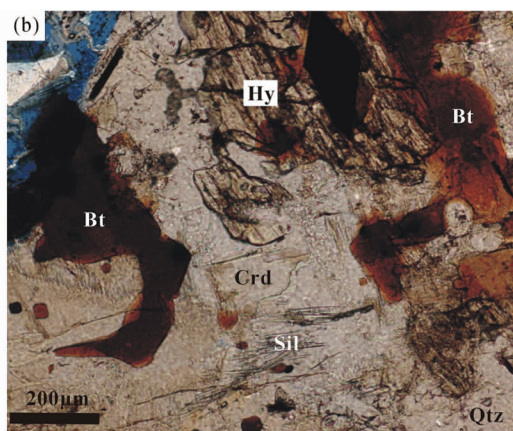
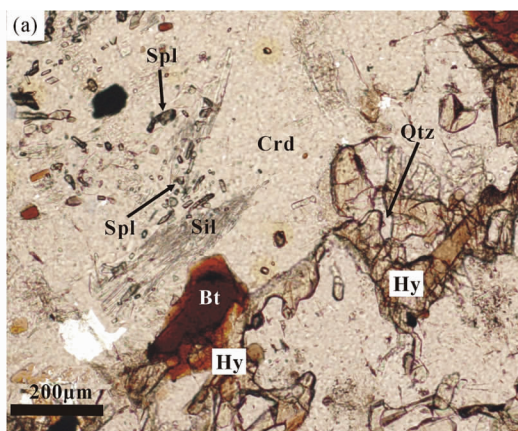


该反应表明变质条件已达到尖晶石与石英共生的稳定域,指示峰期温度高于 900℃。

我们还观察到在超高温峰期变质作用形成的紫苏辉石 + 夕线石 ± 石英的矿物组合 (图 3a, b),指示变质峰期温度可能达到 1000℃。尖晶石 + 石英与紫苏辉石 + 夕线石 + 石英的共生组合的存在,暗示了大容山-十万大山地区花岗岩中麻粒岩包体经历了超高温变质作用,其峰期变质温度至少高于 900℃。

4.3 峰后退变质反应阶段

麻粒岩包体经历了峰期超高温变质作用后,由于后期的



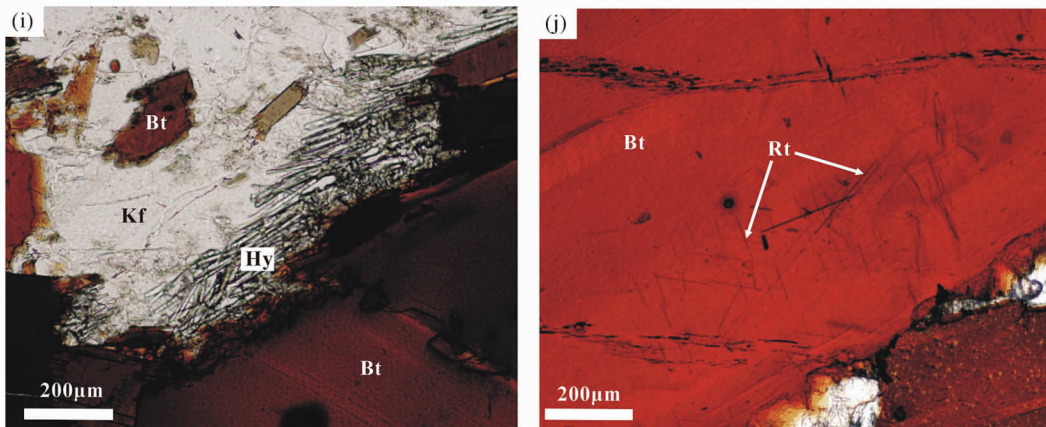


图3 麻粒岩包体代表性变质反应结构

(a), (b)-超高温矿物组合斜方辉石 + 夕线石 ± 石英(-); (c)-超高温矿物组合尖晶石 + 石英(背散射图像); (d)-石榴子石被堇青石包围,附近可见超高温矿物组合尖晶石 + 石英,还可见尖晶石与水铝石共生(背散射图像); (e)-石榴子石外围生长堇青石 + 紫苏辉石冠状体后成合晶(-); (f)-石榴子石外围生长斜长石 + 紫苏辉石冠状体后成合晶(-); (g)-石榴子石内部包裹石英、黑云母、斜长石以及少量的夕线石,外围生长堇青石 + 紫苏辉石冠状体后成合晶(-),可能代表反应 $Bt + Sil + Qtz = Grt + L$ 或 $Bt + Sil + Pl + Qtz = Grt + Kf + L$; (h)-石榴子石 + 紫苏辉石 + 斜长石 + 石英矿物共生,可能代表了峰期的矿物组合(-); (i)-黑云母边缘生长的针状紫苏辉石(-),可能代表反应式 $Bt + Qtz = Hy + Kf$; (j)-黑云母中析出针状金红石(-)。矿物缩写:Grt-石榴子石;Hy-紫苏辉石;Qtz-石英;Bt-黑云母;Pl-斜长石;Kf-钾长石;Crd-堇青石;Spl-尖晶石;Sil-夕线石;Ilm-钛铁矿;Rt-金红石;Dsp-水铝石

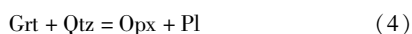
Fig. 3 Photomicrographs illustrating representative metamorphic reaction textures of the granulite enclaves in the Darongshan-Shiwandashan area

(a), (b)-ultrahigh-temperature mineral assemblage of orthopyroxene + sillimanite ± quartz(-); (c)-ultrahigh-temperature mineral assemblage of spinel + quartz (BSE); (d)-garnet porphyroblast surrounded by cordierite, with the ultrahigh-temperature mineral assemblage of spinel + quartz, and coexisting spinel and diasporite in the cordierite (BSE); (e)-garnet mantled by symplectic coronae of orthopyroxene + cordierite (-), indicating the retrograde reaction $Grt + Qtz = Opx + Crd$; (f)-garnet mantled by symplectic coronae of orthopyroxene + cordierite (-), indicating the retrograde reaction $Grt + Qtz = Opx + Pl$; (g)-quartz, biotite, plagioclase and sillimanite inclusions in garnet porphyroblast mantled by symplectic coronae of orthopyroxene + cordierite, indicating the prograde reaction $Bt + Sil + Qtz = Grt + L$ or/and $Bt + Sil + Pl + Qtz = Grt + Kf + L$; (h)-peak stage mineral assemblage of garnet + orthopyroxene + plagioclase + quartz (-); (i)-biotite surrounded by finger-like orthopyroxene (-), indicating the retrograde reaction $Bt + Qtz = Hy + Kf + H_2O$; (j)-biotite with exsolved needle-like rutile (-). Abbreviations: Grt-garnet; Hy-hypersthene; Qtz-quartz; Bt-biotite; Pl-plagioclase; Kf-K-feldspar; Crd-cordierite; Spl-spinel; Sil-sillimanite; Ilm-ilmenite; Rt-rutile; Dsp-diasporite

抬升和冷却过程,使得先前形成的矿物组合和反应结构不再稳定,从而形成许多退变质反应结构,最典型的结构是石榴子石周围形成的紫苏辉石 + 堇青石/斜长石冠状体后成合晶以及各种反应边结构。

4.3.1 紫苏辉石 + 斜长石冠状体后成合晶

在包体中观察到的石榴子石外围生长紫苏辉石 + 斜长石冠状体后成合晶(图3f),表明在退变质过程中发生了反应:



暗示麻粒岩包体经历了近等温降压(ITD)反应过程(Harley, 1989)。

4.3.2 紫苏辉石 + 堇青石冠状体后成合晶

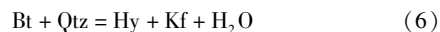
麻粒岩包体中石榴子石边缘普遍发育紫苏辉石 + 堇青石冠状体后成合晶(图3e),其退变质反应为:



这也是一个近等温降压(ITD)反应(Harley, 1989)。

两类冠状体后成合晶都属于典型的近等温降压退变质反应结构,表明麻粒岩包体形成后经历了快速抬升作用。

此外,还有一类紫苏辉石呈长柱状集合体生长在黑云母的边缘(图3i),这些紫苏辉石可能是由黑云母发生脱水反应形成:



5 矿物化学成分特征

利用中国科学院广州地球化学研究所 JEOL JXA-8100 型电子探针仪(EPMA)对麻粒岩中主要矿物化学成分进行了分析,主要的矿物成分变化结果如下:

石榴子石 石榴子石在多数麻粒岩包体中可见,镜下观察石榴子石裂纹发育,多有石英、长石、黑云母以及少量夕线石等矿物包裹体。化学成分特征表明,石榴子石主要为铁铝榴石(表1)。根据矿物共生关系,石榴子石主要分为2类:

表 1 麻粒岩包体中石榴子石电子探针成分分析结果 (wt%)

Table 1 Representative analyses of garnet in granulite enclaves (wt%)

样品号	06QZ-26		06QZ-27				07QZ-1			
	有冠状体		无冠状体,与紫苏辉石共生				有冠状体			
位置	核	边	核	核	边	边	核	核	边	边
SiO ₂	36.98	36.68	37.68	38.19	37.07	37.59	37.50	37.40	37.86	37.35
TiO ₂		0.01	0.07	0.02		0.10			0.11	0.00
Al ₂ O ₃	21.31	21.39	22.41	22.27	22.06	22.37	21.45	21.67	21.26	21.55
Cr ₂ O ₃		0.02	0.06	0.09		0.04		0.03	0.03	0.03
FeO	34.08	34.20	28.60	28.06	29.72	30.07	29.52	30.56	28.55	33.69
MnO	1.37	1.66	0.83	0.81	1.30	1.12	4.29	2.31	3.71	1.55
MgO	5.46	4.76	7.80	8.01	6.69	6.65	4.09	5.65	4.70	4.15
CaO	0.79	0.74	1.58	1.65	1.53	1.48	2.77	1.28	3.23	1.52
Na ₂ O	0.02	0.05	0.37	0.15	0.34	0.15	0.00	0.08	0.04	0.02
K ₂ O		0.02	0.03	0.01	0.05	0.01				
Total	99.99	99.52	99.51	99.27	98.80	99.65	99.76	98.98	99.58	100.02

基于 12 个氧原子

Na ⁺	0.00	0.01	0.06	0.02	0.05	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00
K ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg ²⁺	0.65	0.57	0.90	0.93	0.79	0.78	0.49	0.67	0.56	0.49
Si ⁴⁺	2.94	2.94	2.93	2.98	2.93	2.95	3.00	2.98	3.01	2.98
Ca ²⁺	0.07	0.06	0.13	0.14	0.13	0.12	0.24	0.11	0.27	0.13
Al ³⁺	1.99	2.02	2.05	2.04	2.05	2.07	2.02	2.03	1.99	2.03
Fe ²⁺	2.13	2.17	1.73	1.81	1.81	1.93	1.98	2.02	1.92	2.25
Fe ³⁺	0.14	0.12	0.13	0.02	0.15	0.04		0.02		0.00
Ti ⁴⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
Mn ²⁺	0.09	0.11	0.05	0.05	0.09	0.07	0.29	0.16	0.25	0.11
Cr ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

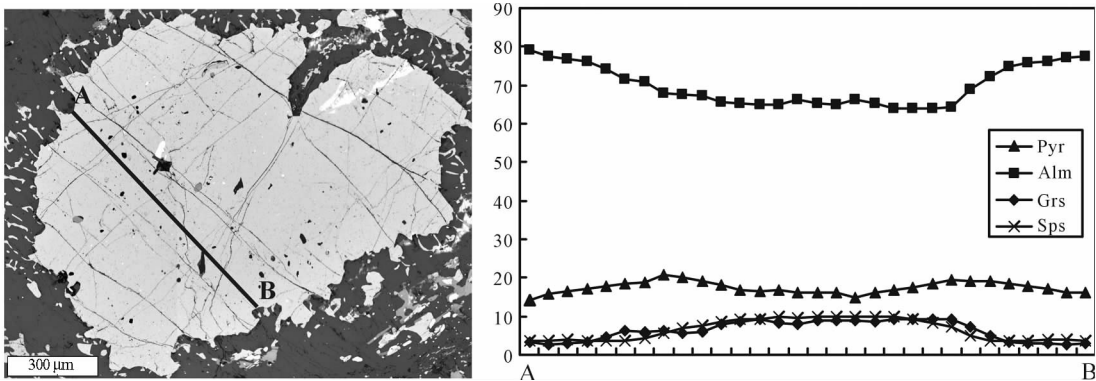


图 4 麻粒岩包体中石榴子石成分环带图(样品 07QZ-1)

Fig. 4 Composition profile of the garnet in the granulite enclaves (Sample 07QZ-1)

第一类石榴子石与紫苏辉石、长石、石英以及黑云母平衡共生,周围无冠状体后成合晶发育(图 3h),代表了变质峰期残留的石榴子石,其核部的成分特征反映峰期变质的温压条件。这类石榴子石的成分为:镁铝榴石 26.75% ~ 32.10%,铁铝榴石 61.28% ~ 66.41%,钙铝榴石 4.13% ~ 5.18%,锰铝榴石 1.83% ~ 3.09%。该类石榴子石成分环带不明显,但从核部向边部化学成分仍有变化:MgO 含量降低,FeO 含量则增加。另一类石榴子石周围发育紫苏辉石 + 堇青石或斜长石 + 堇青石冠状体后成合晶(图 3e-g),电子探针分析结

果显示,石榴子石中镁铝榴石 12.99% ~ 22.90%,铁铝榴石 64.00% ~ 79.31%,钙铝榴石 1.89% ~ 9.74%,锰铝榴石 2.57% ~ 9.97%。这类石榴子石具有明显的成分环带(图 4):MgO、FeO、MnO 和 CaO 的含量经过石榴子石中心呈对称分布,其中 MgO 含量由石榴子石核部向边部降低,FeO 含量则增加,反映了退变质环带的特征。

紫苏辉石 麻粒岩包体中紫苏辉石(表 2)可分为 2 个世代:第一世代为自形-半自形粒状,粒径一般为 0.05 ~ 0.15cm,少量自形颗粒粒径达 0.2cm 以上,最大者可达 1cm

表2 麻粒岩包体中斜方辉石电子探针成分分析结果(wt%)

Table 2 Representative analyses of orthopyroxene in granulite enclaves (wt%)

样品号	06QZ-24		06QZ-26		06QZ-27		07QZ-1	
	黑云母边缘部 针状生长		后成合晶		与 Grt 共生 大颗粒		后成合晶	
SiO ₂	48.74	48.29	47.42	47.80	48.41	48.35	46.95	47.75
TiO ₂	0.23	0.25	0.22	0.25	0.12	0.01	0.14	0.20
Al ₂ O ₃	2.44	2.86	3.41	3.25	4.58	4.58	3.28	2.85
Cr ₂ O ₃	0.05	0.02	0.14	0.22	0.04		0.25	0.09
FeO	34.18	32.95	35.95	34.58	29.65	29.84	37.27	36.61
MnO	0.77	0.95	0.49	0.68	0.37	0.36	0.49	0.48
MgO	13.88	13.53	11.97	12.47	15.81	15.71	11.65	11.81
CaO	0.19	0.21	0.16	0.12	0.11	0.15	0.12	0.18
Na ₂ O		0.01	0.05	0.01	0.25	0.25	0.06	0.04
K ₂ O	0.02	0.01	0.02		0.03	0.03	0.02	0.02
Total	100.51	99.08	99.83	99.37	99.37	99.28	100.21	100.04
基于6个氧原子								
Si	1.97	1.99	1.97	1.98	1.99	1.99	1.95	1.97
Ti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
Al ^{IV}	0.03	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.05	0.03
Al ^{VI}	0.08	0.12	0.14	0.14	0.21	0.21	0.11	0.11
Cr	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
Fe ³⁺	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01	0.02	0.08	0.04
Fe ²⁺	1.10	1.12	1.21	1.19	1.01	1.01	1.21	1.23
Mn	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
Mg	0.84	0.83	0.74	0.77	0.97	0.96	0.72	0.73
Ca	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

左右。多色性明显,Ng-淡红色,Np-淡绿色。这类紫苏辉石在所有麻粒岩样品中均有出现,多与石榴子石、斜长石、黑云母等平衡共生(图3h),其化学成分为:Wo=0.18~0.92,En=40.89~53.32,Fs=45.96~58.80。第二世代紫苏辉石可分为2种类型:第一种为极细小的长柱状集合体,主要生长在黑云母的边缘(图3i),可能是黑云母脱水熔融形成,其化学成分为:Wo=0.41~0.45,En=41.27~41.37,Fs=58.17~58.32。第二种类型为蠕虫状,与堇青石或斜长石共同构成冠状体后成合晶围绕石榴子石外围生长(图3e-g),其化学成分为:Wo=0.17~0.68,En=32.71~51.29,Fs=48.04~67.00。

黑云母 黑云母在麻粒岩中广泛出现,且出现形式不一:或以残留体形式环绕紫苏辉石生长,或以自形-半自形形态与紫苏辉石、石榴子石、长石、石英等矿物共生,或以包裹体形式出现于石榴子石和紫苏辉石内部,其化学成分见表3。黑云母的Mg[#]一般在0.35~0.66之间,TiO₂含量普遍较高,变化在3.25%~6.72%之间,局部还可见黑云母发生分解析出针状金红石(图3j),说明当时变质体系中Ti达到了饱和状态。已有的实验表明,Ti饱和状态下,黑云母中Ti含量与

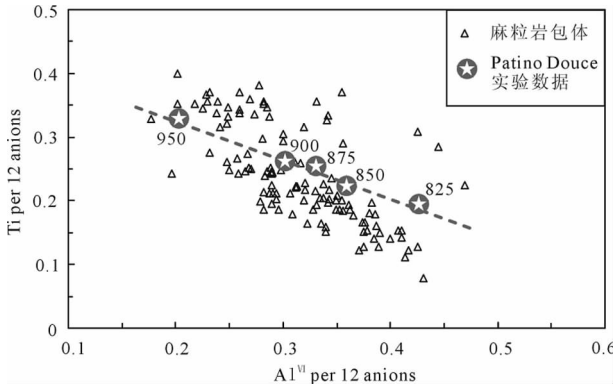
表3 麻粒岩包体中黑云母电子探针成分分析结果(wt%)

Table 3 Representative analyses of biotite in granulite enclaves (wt%)

样品号	06QZ-24			06QZ-27	
	结构	有针状 Rt 析出	边缘生长 针状 Hy	与 Grt,Hy 共生	
SiO ₂	35.14	35.65	34.74	36.26	35.56
TiO ₂	6.08	6.36	5.81	3.41	3.30
Al ₂ O ₃	14.91	15.23	14.82	14.92	15.62
Cr ₂ O ₃	0.08	0.06	0.17	0.07	0.05
FeO	18.49	20.13	20.43	18.09	17.11
MnO	0.04	0.12	0.13	0.04	0.04
MgO	9.51	9.22	9.14	10.84	11.75
BaO	0.11	0.26	0.35		
CaO		0.00			0.00
Na ₂ O	0.28	0.26	0.20	0.35	0.53
K ₂ O	10.01	8.09	10.20	10.17	9.91
Total	94.64	95.37	95.98	94.14	93.87
基于24个氧原子					
Si	5.68	5.69	5.62	5.86	5.74
Al ^{IV}	2.32	2.31	2.38	2.14	2.26
Al ^{VI}	0.52	0.56	0.44	0.70	0.71
Ti	0.74	0.76	0.71	0.42	0.40
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	2.50	2.69	2.76	2.45	2.31
Cr	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
Mn	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
Mg	2.29	2.19	2.20	2.61	2.83
Ba	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.09	0.08	0.06	0.11	0.17
K	2.07	1.65	2.10	2.10	2.04

温度呈正相关关系,而Al^{VI}与温度呈负相关关系(Patiño Douce,1993;Patiño Douce *et al.*,1993)。对比麻粒岩包体与实验岩石学资料可以看出,部分麻粒岩包体的黑云母曾经历了超过950℃的温度条件(图5)。

堇青石 堇青石在麻粒岩包体中广泛存在,可以区分出2个世代:第一世代堇青石为不规则粒状,其内部有时生长毛发状夕线石,或包裹尖晶石、绿帘石、锆石等矿物,其化学成分见表4。在锆石、磷灰石的周围形成黄色的放射晕,这是堇青石的鉴定标志之一。第二世代堇青石与紫苏辉石构成冠状体后成合晶,围绕石榴子石生长。两类堇青石都显示低Si、Mg而富Fe的特点,但两者Fe、Mg含量有较明显的差异(图6):第一世代FeO含量为6.33%~8.98%,MgO含量为7.31%~9.04%,Mg[#]较高,为0.62~0.70;第二世代FeO含量为7.78%~11.16%,MgO含量为6.10%~8.59%,Mg[#]较低,为0.51~0.66,普遍小于0.60。堇青石中Fe、Mg含量的变化一般和压力的变化有关,随着压力升高,镁含量升高,铁含量降低;反之,镁含量降低,铁含量升高(Holdaway and Lee,1977)。2个世代堇青石的成分变化也暗示麻粒岩包体可能经历了后期的抬升降压过程。

图5 黑云母 Ti 和 Al^{VI} 与温度的相关图

图显示随黑云母中 Ti 含量与温度呈正相关关系, 而 Al^{VI} 含量与温度呈负相关关系, 图中数字为实验温度 (单位 °C), 实验数据据 Patiño Douce (1993) 和 Patiño Douce *et al.* (1993)

Fig. 5 Correlation between temperature and content of Ti and Al^{VI} in biotite

The figure showing that the Ti content is positively correlated with temperature, whereas the Al^{VI} content is negative related to temperature. The numbers on the line refer to experimental temperature (after Patiño Douce, 1993; Patiño Douce *et al.*, 1993)

表4 麻粒岩包体中堇青石电子探针成分分析结果 (wt%)

Table 4 Representative analyses of cordierite in granulite enclaves (wt%)

样品号	06QZ-21	06QZ-26		06QZ-27	07QZ-1
位置	基质	后成合晶	后成合晶	基质	后成合晶
SiO ₂	48.87	47.67	48.20	47.52	47.21
TiO ₂	0.05	0.02		0.01	0.00
Al ₂ O ₃	32.16	32.50	32.24	32.48	32.45
FeO	6.71	10.43	9.70	7.45	10.89
MnO	0.17	0.12	0.26	0.10	0.16
MgO	8.80	7.41	7.24	8.51	6.88
CaO	0.03	0.03	0.03	0.10	0.02
Na ₂ O	0.15	0.15	0.10	0.41	0.13
K ₂ O	0.00	0.00	0.02	0.06	0.00
Total	96.95	98.32	97.77	96.62	97.74
基于 18 个氧原子					
Si	5.09	4.96	5.04	4.99	4.95
Al ^{IV}	0.91	1.05	0.96	1.01	1.05
Al ^{VI}	3.03	2.93	3.00	3.01	2.96
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.59	0.91	0.85	0.65	0.96
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01
Mg	1.37	1.15	1.13	1.33	1.08
Ca	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Na	0.03	0.03	0.02	0.08	0.03
K	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00

尖晶石 根据矿物共生关系, 可将尖晶石分为 2 种类型: 第一种类型与大量毛发状夕线石共生, 生长于堇青石内部,

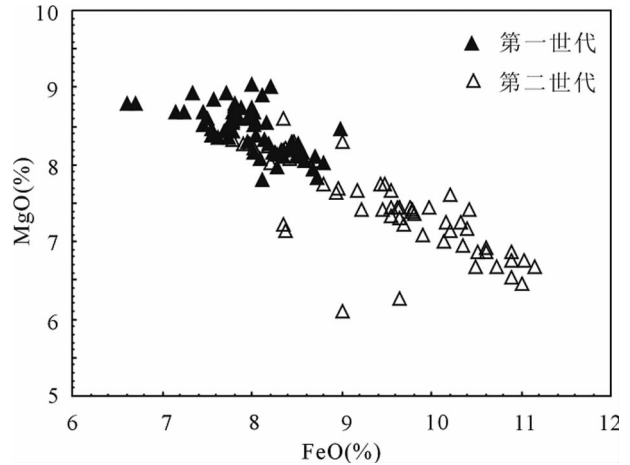


图6 麻粒岩包体中堇青石 MgO 与 FeO 成分变化

Fig. 6 MgO versus FeO diagram showing the composition of the cordierite in the granulite enclaves

表5 麻粒岩包体中尖晶石电子探针成分分析结果 (wt%)

Table 5 Representative analyses of spinel in granulite enclaves (wt%)

样品号	06QZ-21	06QZ-24	06QZ-26	06QZ-27	07QZ-1
结构	第一类	第二类	第二类	第二类	第一类
SiO ₂	0.08	0.17	0.02	0.06	0.04
TiO ₂	0.12	0.12	0.06	0.10	0.11
Al ₂ O ₃	60.02	58.72	60.35	58.91	58.07
Cr ₂ O ₃	0.16	0.39	0.07	0.31	0.03
FeO	31.80	32.74	31.32	31.97	36.77
MnO	0.22	0.22	0.21	0.23	0.23
MgO	6.31	3.63	5.77	4.86	3.32
CaO	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O		0.12	0.08	0.11	0.03
K ₂ O	0.01	0.01	0.01		
ZnO	0.63	3.04	1.81	2.10	0.51
Total	99.35	99.17	99.69	98.65	99.10
基于 32 个氧原子					
Si ⁴⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti ⁴⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ³⁺	1.97	1.30	1.99	1.98	1.97
Cr ³⁺	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Fe ²⁺	0.74	0.52	0.73	0.76	0.88
Mn ²⁺	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
Mg ²⁺	0.26	0.10	0.24	0.21	0.14
Ca ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ⁺	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
K ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zn ²⁺	0.01	1.38	0.04	0.04	0.01

少量尖晶石与石英或水铝石共生 (图 3d); 第二种尖晶石无毛发状夕线石共生, 常与黑云母、长石以及石英共生 (图 3c)。尖晶石化学成分见表 5, 2 种类型的尖晶石都属于铁尖晶石, FeO 含量为 31.32% ~ 37.37%, MgO 含量为 3.03% ~ 6.31%。

表 6 各阶段变质反应温压条件估算

Table 6 *P-T* estimation for the peak and retrograde metamorphic stages for the granulite enclaves

变质阶段	利用矿物成分	石榴子石			紫苏辉石			斜长石		<i>P</i> (kbar)	<i>T</i> (°C)
		X _{Mg}	a (Pyr)	a (Grs)	X _{Fe}	XMg	aEn	X _{An}	aAn		
超高温变质 反应峰期	残留矿物 对核部	0.32	0.41	0.06	0.51	0.49	0.55	0.44	0.41	7.9	970
		0.32	0.42	0.06	0.52	0.48	0.55	0.44	0.41	8.0	997
		0.31	0.41	0.05	0.52	0.48	0.55	0.44	0.41	7.5	953
冠状体后成 合晶阶段	残留石榴子石 边部和后成合 晶紫苏辉石	0.19	0.29	0.03	0.62	0.38	0.45	0.42	0.40	3.6	792
		0.19	0.30	0.02	0.63	0.37	0.45	0.42	0.40	3.2	818
		0.19	0.29	0.03	0.63	0.37	0.45	0.42	0.40	3.7	813

两者 ZnO 含量有明显差异,第一类为 ZnO 含量较低,为 0.38% ~ 0.76%,第二类 ZnO 含量为 1.05% ~ 3.04%,明显偏高。Tajcmanová *et al.* (2009) 认为,尖晶石中锌含量的变化与体系的压力有关,压力升高,锌含量增加,压力降低,则锌含量降低。尖晶石与石英的矿物组合反映了麻粒岩包体曾经历了超高温变质作用。

长石 包体中长石多为自形、半自形,发育聚片双晶,其中斜长石主要是中长石,约占长石总量的 80% 左右,其 An = 32% ~ 49%, Ab = 50% ~ 66%;其次是拉长石,其 An = 50% ~ 68%, Ab = 31% ~ 50%。此外,还有少量钙长石、培长石、更长石和钠长石。斜长石普遍不显环带结构。碱性长石主要为透长石,Or = 75% ~ 94%。

夕线石 部分麻粒岩包体中大量发育针状、毛发状夕线石,呈集合体生长于堇青石内部,常与尖晶石伴生,或与紫苏辉石共生(图 3a, b)。在个别较大颗粒石榴子石内部还可见夕线石包裹体(图 3g),可能为早期变质残留矿物,暗示麻粒岩包体在峰前进变质反应阶段曾经历了夕线石单相矿物稳定域。

Fe-Ti 氧化物 麻粒岩包体中普遍含有丰富的 Fe-Ti 氧化物,主要为钛铁矿和磁铁矿。钛铁矿 MnO 含量为 0.49% ~ 2.57%, MgO 含量为 0.01% ~ 0.78%;磁铁矿 TiO₂ 含量小于 0.045%, Cr₂O₃ 含量小于 0.021%。

6 温压估算

大容山-十万大山地区麻粒岩包体中包含丰富的矿物共生组合和变质反应结构,从而为获得麻粒岩包体变质反应温压条件提供了最直接的证据。结合矿物温压计的计算,我们获得了麻粒岩包体各阶段变质反应的温度压力。

6.1 峰期超高温变质反应阶段

麻粒岩包体中局部见石榴子石、紫苏辉石、斜长石和石英等矿物共生组合,这些石榴子石周围未发育冠状体后成合晶等退变质反应结构,代表了峰期变质反应阶段的矿物组合,其核部成分可以用来估算超高温麻粒岩峰期变质反应阶段的温压条件。利用 Bhattacharya *et al.* (1991) 的改进的 Grt-Opx-Pl-Q 地质温压计,采用迭代方法计算,得到峰期变质

P-T 条件为:7.5 ~ 8.0kbar, 950 ~ 1000°C (表 6)。这与尖晶石 + 石英与紫苏辉石 + 夕线石 + 石英的共生组合的稳定域相当。

6.2 峰后超高温变质反应阶段(冠状体后成合晶阶段)

麻粒岩包体中大多数石榴子石周围出现了紫苏辉石 + 堇青石和斜长石 + 堇青石冠状体后成合晶,后成合晶中紫苏辉石和残留的石榴子石边部成分应反映了退变质反应阶段的温压条件。同样利用 Bhattacharya *et al.* (1991) 的改进的 Grt-Opx-Pl-Q 地质温压计,计算得到冠状体后成合晶退变质反应阶段的 *P-T* 条件为 3.2 ~ 3.7kbar, 790 ~ 820°C (表 6)。

7 *P-T* 轨迹与区域地壳演化

根据矿物共生组合、变质反应结构、以及温压条件估算,我们恢复了大容山-十万大山超高温麻粒岩变质作用演化历史。在前期的进变质反应阶段,黑云母、石英、斜长石和夕线石等矿物以包裹体的形式同时出现在一个石榴子石变斑晶中,这些矿物都是早期发生反应生成石榴子石后残留下的矿物,表明麻粒岩包体经历了夕线石的稳定域。麻粒岩包体中锆石 U-Pb 定年结果显示 (Zhao *et al.*, 2010),麻粒岩包体中最年轻的继承锆石来自于晚新元古代(约 564Ma),根据十万大山地区现今出露的地层格架和沉积厚度资料,十万大山地区寒武系到二叠系的总沉积厚度大约在 21 ~ 25km 之间,反映区域上在古生代接受了巨厚的沉积,同时暗示麻粒岩包体变质反应初始压力相当于 6.0 ~ 7.0kbar。此后,温度压力进一步升高,达到峰期变质作用阶段,变质条件从单相夕线石的稳定域进入到尖晶石 + 石英与紫苏辉石 + 夕线石 ± 石英的矿物共生组合的稳定域,指示峰期变质温度达到了 900°C 以上;而黑云母中 Ti 和 Al 的含量也指示,麻粒岩包体的峰期变质温度超过了 950°C。同时,利用矿物温压计计算得到峰期的温压条件为 7.5 ~ 8.0kbar, 950 ~ 1000°C,表明麻粒岩包体经历了超高温变质反应。随后,由于地壳的快速抬升,使得麻粒岩包体发生了近等温降压的退变质反应,这个过程中石榴子石发生分解形成了紫苏辉石 + 斜长石以及紫苏辉石 + 堇青石冠状体后成合晶,温压条件也随之降至 3.2 ~ 3.7kbar, 790 ~ 820°C。

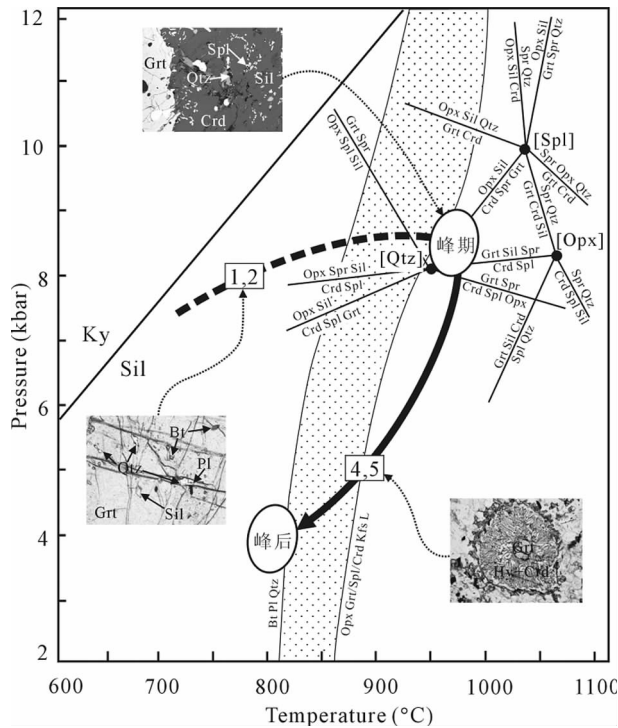


图7 麻粒岩包体变质 P - T 演化轨迹

成岩格子修改自 Hensen and Green (1973)、Hensen (1987)、Hensen and Harley (1990)、Bertrand *et al.* (1991) 以及 Carrington and Harley (1995)。图中阴影部分代表脱水熔融反应 $Bt + Pl + Qtz = Opx + Crd/Spl/Grt + Kfs + L$ (据 Vielzeuf and Montel, 1994), 数字代表反应式。在初始的压力估计中, 同时参考了区域寒武系-二叠系的总沉积厚度 (21 ~ 25 km), 相当于 6.0 ~ 7.0 kbar (广西壮族自治区地质矿产局, 1985)。

Fig. 7 P - T path of the ultrahigh-temperature granulite enclaves

Petrogenetic grids as deduced from the mineral assemblages and reaction textures combined with the results of geothermobarometric calculations. The relevant partial petrogenetic grid in the KFMASH and FMAS systems is based on Hensen and Green (1973), Hensen (1987), Hensen and Harley (1990), Bertrand *et al.* (1991) and Carrington and Harley (1995). The inset photomicrographs show the typical mineral assemblages and reaction textures corresponding to each metamorphic stage. Also shown is the fluid-absent melting reaction $Bt + Pl + Qtz = Opx + Grt/Spl/Crd + Kfs + L$ (after Vielzeuf and Montel, 1994). The numbers on the P - T path refer to the reactions discussed in the text. The initial pressure of P - T path is also based on the thickness of the Cambrian-Permian sediments that is about 21 ~ 25 km, i. e. 6.0 ~ 7.0 kbar (after BGMRG, 1985)

因此, 大容山-十万大山花岗岩中的麻粒岩包体经历了从单相夕线石的稳定域, 到尖晶石 + 石英和紫苏辉石 + 夕线石 ± 石英的矿物共生组合的稳定域, 最后发生近等温降压退变质生成冠状体后成合晶的变质演化历史, 构成了典型的顺时针 P - T 轨迹 (图7), 指示区域当时经历了地壳增厚, 而后

快速折返、抬升到地表的动力学过程。相关资料也表明, 由于印支地块和华南地块在印支期发生碰撞 (Chung, *et al.*, 1999; Carter *et al.*, 2001; Nam *et al.*, 2001; Lepvrier *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2007), 十万大山地区发生褶皱隆起, 地壳开始加厚, 成为华南印支期碰撞挤压造山的序幕 (张岳桥, 1999; 许效松等, 2001; 梁新权等, 2005; 丘元禧和梁新权, 2006), 并于早中生代由挤压构造向伸展构造转换 (许效松等, 2001; 梁新权等, 2005; 丘元禧和梁新权, 2006)。这与十万大山花岗岩中麻粒岩包体 P - T 轨迹所指示的构造演化历史是一致的。

大容山-十万大山花岗岩中的超高温麻粒岩包体的发现暗示区域上经历过一次强烈的热事件, 但超高温变质作用所需要的异常热源目前尚不明确。Zhao *et al.* (2010) 根据麻粒岩包体峰期变质作用时间 (~ 253 Ma) 略晚于峨眉山地幔柱的喷发时间 (~ 260 Ma, e. g., Xu *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2004), 认为超高温变质作用可能与峨眉山地幔柱导致的区域性热冲击有关。对于十万大山花岗岩中的麻粒岩包体与其寄主花岗岩在成因上的联系, 目前普遍的观点是花岗岩是由麻粒岩包体的原岩发生脱水熔融形成的, 而麻粒岩包体则为部分熔融残留体 (杜杨松等, 1999; 庞保成, 2001; Zhao *et al.*, 2010)。利用锆石 Ti 温度计和全岩 Zr 饱和温度计获得的寄主花岗岩岩浆的熔融温度为 760 ~ 840°C, 压力位 3.5 ~ 4.5 kbar, 这相当于麻粒岩包体抬升的晚期阶段 (赵亮, 2010)。同时, 已有的年龄数据则显示, 大容山-十万大山花岗岩的形成年龄约为 230 Ma (邓希光等, 2004; Zhao *et al.*, 2010)。因此, 区域变质沉积岩在进变质以及超高温变质反应阶段并未发生大规模的脱水和部分熔融作用, 麻粒岩包体原岩的大规模脱水和重熔主要发生在区域地壳由挤压向伸展转换、深部地壳折返快速抬升阶段。

8 结论

(1) 大容山-十万大山花岗岩中的麻粒岩包体保留了尖晶石 + 石英、斜方辉石 + 夕线石 ± 石英等超高温变质矿物组合, 指示这些麻粒岩包体经历了超高温变质作用, 温度超过了 900°C。

(2) 矿物组合、变质反应结构以及矿物温压估算表明, 麻粒岩包体经历了从单相夕线石的稳定域, 到尖晶石 + 石英和紫苏辉石 + 夕线石 ± 石英的矿物共生组合的稳定域, 最后发生近等温降压退变质反应生成斜长石 + 堇青石和斜方辉石 + 堇青石冠状体后成合晶的顺时针 P - T 演化过程, 代表了造山过程中地壳逆掩增厚, 而后折返快速抬升到地表的动力学过程。

(3) 区域变质沉积岩在进变质以及超高温变质反应阶段并未发生大规模的脱水和部分熔融作用, 麻粒岩包体原岩的大规模脱水和重熔主要发生在区域地壳由挤压向伸展转换、深部地壳折返快速抬升阶段。

致谢 成文过程中得到了中国科学院广州地球化学研究所全来喜研究员、中国科学院研究生院吴春明研究员、北京大学魏春景教授、中国科学院地质与地球物理研究所郭敬辉研究员以及中国地质科学院任留东研究员给予的热心指导和帮助;两位审稿人提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢。

References

- Arima M and Gower CF. 1991. Osumilite-bearing granulites in the eastern Grenville Province, eastern Labrador, Canada: Mineral parageneses and metamorphic conditions. *J. Petrol.*, 32(1): 29–61
- Bertrand P, Ellis DJ and Green DH. 1991. The stability of sapphirine-quartz and hypersthene-sillimanite-quartz assemblages: An experimental investigation in the system $\text{FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ under H_2O and CO_2 conditions. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 108: 55–71
- Bhattachaya A, Krishnapur KR, Raith M and Sen SK. 1991. An improved set of $a\text{-X}$ parameters for Fe-Mg-Ca garnet and refinements of the orthopyroxene-garnet thermometer and the orthopyroxene-garnet-plagioclase-quartz barometer. *J. Petrol.*, 32: 629–656
- Bose S and Das K. 2007. Sapphirine + quartz assemblage in contrasting textural modes from the Eastern Ghats Belt, India: Implications for stability relations in UHT metamorphism and retrograde processes. *Gondwana Research*, 11: 492–503
- Brandt S, Klemd R and Okrusch M. 2003. Ultrahigh-temperature metamorphism and multistage evolution of garnet-orthopyroxene granulite from the Proterozoic Epupa Complex, NW Namibia. *J. Petrol.*, 44(6): 1121–1144
- Brown M. 2006. Duality of thermal regimes is the distinctive characteristic of plate tectonics since the Neoproterozoic. *Geology*, 34(11): 961–964
- Brown M. 2007. Metamorphic conditions in orogenic belts: A record of secular change. *Inter. Geol. Rev.*, 49: 193–234
- Bureau of Geology and Mineral Resource of Guangxi Zhuang Autonomous Region (BGMRC). 1985. *Regional Geology of Guangxi Zhuang Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House, 1–853 (in Chinese)
- Carrington DP and Harley SL. 1995. Partial melting and phase relations in high-grade metapelites: An experimental petrogenetic grid in the KFMASH system. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 120: 270–291
- Carter A, Roques D, Bristow C and Kinn P. 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogen) in Vietnam. *Geology*, 29(3): 211–214
- Chung SL, Lo CH, Lan CY, Wang PL, Lee TY, Hoa TT, Thanh HH and Anh TT. 1999. Collision between the Indochina and South China blocks in the Early Triassic: Implications for the Indosinian orogeny and closure of eastern Paleo-Tethys. In: AGU 1999 fall meeting. Washington DC: Eos Transaction, American Geophysical Union, 80: 1043
- Dallwitz WB. 1968. Co-existing sapphirine and quartz in granulites from Enderby Land, Antarctica. *Nature*, 219: 476–477
- Deng XG, Chen ZG, Li XH and Liu DY. 2004. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Darongshan-Shiwandashan granitoid belt in southeastern Guangxi, China. *Geological Review*, 50(4): 426–432 (in Chinese with English abstract)
- Du YS, Collerson KD, Zhao JX and Pang BC. 1999. Characteristics and petrogenesis of granulite enclaves in S-Type granites in the junction of Guangdong and Guangxi provinces. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 309–314 (in Chinese with English abstract)
- Ellis DJ. 1980. Osumilite-sapphirine-quartz granulites from Enderby Land, Antarctica: $P\text{-}T$ conditions of metamorphism, implications for garnet-cordierite equilibria and the evolution of the deep crust. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 74: 201–210
- Ellis DJ, Sheraton JW, England RN and Dallwitz WB. 1980. Osumilite-sapphirine-quartz granulites from Enderby Land, Antarctica: Mineral assemblages and reactions. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 72: 123–143
- Grew ES. 1980. Sapphirine + quartz association from Archean rocks in Enderby Land, Antarctica. *Am. Mineral.*, 65(9–10): 821–836
- Grew ES. 1982. Osumilite in the sapphirine quartz terrane of Enderby Land, Antarctica: Implications for osumilite petrogenesis in the granulite facies. *Am. Mineral.*, 67(7–8): 762–787
- Guiraud M, Kienast JR and Ouzegane K. 1996. Corundum-quartz-bearing assemblages in the Ihouhouene area (In Ouzal, Algeria). *Journal of Metamorphic Geology*, 14: 755–761
- Guo F, Fan WM, Wang YJ and Li CW. 2004. When Did the Emeishan mantle plume activity start? Geochronological and geochemical evidence from ultramafic-mafic dikes in southwestern China. *Inter. Geol. Rev.*, 46: 226–234
- Guo JH, Chen Y, Peng P, Liu F, Chen L and Zhang LQ. 2006. Sapphirine-bearing granulite in Daqingshan, Inner Mongolia: 1.8 Ga UHT metamorphism. In: Abstract Volume of 2006 Petrology and Earth Dynamics in China. Nanjing: Nanjing University, 215–218 (in Chinese)
- Harley SL. 1989. The origins of granulites: A metamorphic perspective. *Geol. Mag.*, 126(3): 215–247
- Harley SL. 1998. On the occurrence and characterization of ultrahigh-temperature crustal metamorphism. Special Publications. Geological Society, London, 138: 81–107
- Harley SL. 2004. Extending our understanding of ultrahigh-temperature crustal metamorphism. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 99: 140–158
- Hensen BJ and Green DH. 1973. Experimental study of the stability of cordierite and garnet in pelitic compositions at high pressure and temperatures. III: Synthesis of experimental data and geological applications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 38: 151–166
- Hensen BJ. 1987. $P\text{-}T$ grids for silica-undersaturated granulites in the system MAS ($n+4$) and FMAS ($n+3$)-tools for the derivation of $P\text{-}T$ paths of metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology*, 5: 255–271
- Hensen BJ and Harley SL. 1990. Graphical analysis of $P\text{-}T\text{-}X$ relations in granulite facies metapelites. In: Brown M and Ashworth JR (eds.). *High-grade Metamorphism and Crustal Anatexis*. London: Allen and Unwin, 19–55
- Holdaway MJ and Lee SM. 1977. Fe-Mg Cordierite stability in high-grade pelitic rocks based on experimental, theoretical, and natural observations. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 63: 175–198
- Kelsey DE, White RW and Powell R. 2003. Orthopyroxene-sillimanite-quartz assemblages: Distribution, petrology, quantitative $P\text{-}T\text{-}X$ constraints and $P\text{-}T$ paths. *Journal of Metamorphic Geology*, 21(5): 439–453
- Kelsey DE, White RW, Holland TJB and Powell R. 2004. Calculated phase equilibria in $\text{K}_2\text{O-FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ for sapphirine-bearing mineral assemblages. *Journal of Metamorphic Geology*, 22(6): 217–239
- Kelsey DE. 2008. On ultrahigh-temperature crustal metamorphism. *Gondwana Research*, 13: 1–29
- Liang XQ, Li XH, Qiu YX and Yang DS. 2005. Indosinian collisional orogeny: Evidence from structural and sedimentary geology in Shiwandashan basin, South China. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(1): 99–112 (in Chinese with English abstract)
- Lepvrier C, Maluski H, Tich VV, Leyreloup A, Thi PT and Vuong NV. 2004. The Early Triassic Indosinian Orogeny in Vietnam (Trung Son Belt and Kontum Massif): Implications for the geodynamic evolution of Indochina. *Tectonophysics*, 393(1–4): 87–118
- Li ZL, Chen HL, Santosh M and Yang SF. 2004. Discovery of ultrahigh- T spinel-garnet granulite with pure CO_2 fluid inclusions from the Altay orogenic belt, NW China. *Journal of Zhejiang University Science*, 5(10): 1180–1182
- Li ZL, Chen HL and Yang SF. 2009. Implication for ca. 470 Ma zircon SHRIMP U-Pb age from ultrahigh temperature granulite in the China south Altay orogenic belt. In: Abstract Volume of 2009's National

- Symposium on Petrology and Geodynamics. Changchun: Jilin University, 451
- Liu JZ, Qiang XK, Liu XS and Ouyang ZY. 2000. Dynamics and genetic grids of sapphirine-bearing spinel gneiss in Daqing Mountain orogen zone, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 245–255 (in Chinese with English abstract)
- Liu SJ and Li JH. 2007. Review of ultrahigh-temperature (UHT) metamorphism study: A case from North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 131–137 (in Chinese with English abstract)
- Liu SJ, Li JH and Santosh M. 2008. Ultrahigh temperature metamorphism of Tuguiwula khondalite belt, Inner Mongolia: Metamorphic reaction texture and P - T indication. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1185–1192 (in Chinese with English abstract)
- Liu SJ and Li JH. 2009. Paleoproterozoic high temperature paired metamorphic belt in central part of southern Inner Mongolia and its tectonic implication. *Geological Journal of China Universities*, 15(1): 48–56 (in Chinese with English abstract)
- Liu SJ, Li JH and Santosh M. 2010. First application of the revised Ti-in-zircon geothermometer to Paleoproterozoic ultrahigh-temperature granulites of Tuguiwula, Inner Mongolia, North China Craton. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 159: 225–235
- Morimoto T, Santosh M, Tsunogae T and Yoshimura Y. 2004. Spinel + quartz association from the Kerala khondalites, southern India: Evidence for ultrahigh-temperature metamorphism. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 99: 257–278
- Motoyoshi Y and Hensen BJ. 2001. F-rich phlogopite stability in ultrahigh-temperature metapelites from the Napier Complex, East Antarctica. *Am. Mineral.*, 86: 1404–1413
- Mouri H, Andreoli MAG, Kienast JR, Guiraud M and de Waal SA. 2003. First occurrence of the rare “corundum + quartz” assemblages in the high-grade zone from the Namaqualand Metamorphic Complex, South Africa: Evidence for higher- P , T metamorphism? *Mineral. Mag.*, 67: 1015–1021
- Mouri H, Guiraud M and Osanai Y. 2004. Review on “corundum + quartz” assemblage in nature: Possible indicator of ultra-high temperature conditions? *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 99(4): 159–163
- Nakano N, Osanai Y, Owada M, Nam TN, Tsunogae T, Toyoshima T and Binh P. 2004. Decompression process of mafic granulite from eclogite to granulite facies under ultrahigh-temperature condition in the Kontum massif, central Vietnam. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 99: 242–256
- Nam TN, Sano YI, Terada K, Toriumi M, Ouyang PV and Dung LT. 2001. First SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites from the Kontum massif (Vietnam) and tectono-thermal implications. *J. Asian Earth Sci.*, 19: 77–84
- Nishimiya Y, Tsunogae T and Santosh M. 2010. Sapphirine + quartz corona around magnesian ($X_{Mg} \sim 0.58$) staurolite from the Palghat-Cauvery Suture Zone, southern India: Evidence for high-pressure and ultrahigh-temperature metamorphism within the Gondwana suture. *Lithos*, 114: 490–502
- Oh CW, Kim SW and Williams IS. 2006. Spinel granulite in Odesan area, South Korea: Tectonic implications for the collision between the North and South China blocks. *Lithos*, 92: 557–575
- Osanai Y, Nakano N, Owada M, Nam TN, Toyoshima T, Tsunogae T and Binh P. 2004. Permo-Triassic ultrahigh-temperature metamorphism in the Kontum massif, central Vietnam. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 99: 225–241
- Owada M, Osanai Y, Hokada T and Nakano N. 2006. Timing of metamorphism and formation of garnet granite in the Kontum Massif, central Vietnam: Evidence from monazite EMP dating. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 101: 324–328
- Pang BC. 2001. The types, features and genesis of enclaves in granitoids in the junction of Guangdong and Guangxi. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 21(1): 8–13 (in Chinese with English abstract)
- Patiño Douce AE. 1993. Titanium substitution in biotite: An empirical model with applications to thermometry, O_2 and H_2O barometries, and consequences for biotite stability. *Chemical Geology*, 108: 133–162
- Patiño Douce AE, Johnston AD and Rice JM. 1993. Octahedral excess mixing properties in biotite: A working model with applications to geobarometry and geothermometry. *Am. Mineral.*, 78: 113–131
- Peng SB, Fu JM and Liu YH. 2004. The discovery and significance of A-type charnockite in Southeast Guangxi Province, China. *Science Technology and Engineering*, 4: 832–834 (in Chinese with English abstract)
- Peng SB. 2006. Discovery and significance of the ultrahigh temperature granulite enclaves from Shiwandashan granites in southeast Guangxi Province, China. In: Abstract Volume of 2006 Petrology and Earth Dynamics in China. Nanjing: Nanjing University, 402–403 (in Chinese)
- Qiu YX and Liang XQ. 2006. Evolution of basin-range coupling in the Yunkai Dashan-Shiwan Dashan area, Guangdong and Guangxi: With a discussion of several tectonic problems of South China. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 341–347 (in Chinese with English abstract)
- Sajeev K and Osanai Y. 2004a. Osumilite and spinel + quartz from Sri Lanka; Implication for UHT conditions and retrograde P - T path. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 99: 320–327
- Sajeev K and Osanai Y. 2004b. Ultrahigh-temperature metamorphism (1150°C, 12kbar) and multistage evolution of Mg-, Al-rich granulites from the central Highland Complex, Sri Lanka. *J. Petrol.*, 45(9): 1821–1844
- Santosh M, Sajeev K and Li JH. 2006. Extreme crustal metamorphism during Columbia supercontinent assembly: Evidence from North China Craton. *Gondwana Research*, 10(3–4): 256–266
- Santosh M, Tsunogae T, Li JH and Liu SJ. 2007a. Discovery of sapphirine-bearing Mg-Al granulites in the North China Craton: Implication for Paleoproterozoic ultrahigh temperature metamorphism. *Gondwana Research*, 11(3): 263–285
- Santosh M, Wilde SA and Li JH. 2007b. Timing of Paleoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism in the North China Craton: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon geochronology. *Precam. Res.*, 159: 178–196
- Santosh M, Tsunogae T, Ohyama H, Sato K, Li JH and Liu SJ. 2008. Carbonic metamorphism at ultrahigh-temperatures: Evidence from North China Craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 266: 149–165
- Santosh M, Sajeev K, Li JH, Liu SJ and Itaya T. 2009. Counterclockwise exhumation of a hot orogen: The Paleoproterozoic ultrahigh-temperature granulites in the North China Craton. *Lithos*, 110: 140–152
- Sato K, Santosh M and Tsunogae T. 2009. A petrologic and laser Raman spectroscopic study of sapphirine-spinel-quartz-Mg-staurolite inclusions in garnet from Kumilothu, southern India: Implications for extreme metamorphism in a collisional orogen. *Journal of Geodynamics*, 47: 107–118
- Shimizu H, Tsunogae T and Santosh M. 2009. Spinel + quartz assemblage in granulites from the Achankovil Shear Zone, southern India: Implications for ultrahigh-temperature metamorphism. *J. Asian Earth Sci.*, 36: 209–222
- Tajčmanová L, Konopásek J and Košler J. 2009. Distribution of zinc and its role in the stabilization of spinel in high-grade felsic rocks of the Moldanubian domain (Bohemian Massif). *Europ. J. Mineral.*, 21: 407–418
- Tsunogae T, Osanai Y, Owada M, Toyoshima T, Hokada T and Crowe WA. 2003. High fluorine pargasites in ultrahigh temperature granulites from Tonagh Island in the Archean Napier Complex, East Antarctica. *Lithos*, 70(1–2): 21–38
- Tsunogae T and Santosh M. 2006. Spinel-sapphirine-quartz bearing composite inclusion within garnet from an ultrahigh-temperature pelitic granulite: Implications for metamorphic history and P - T path. *Lithos*, 92: 524–536
- Tsunogae T and van Reenen DD. 2006. Corundum + quartz and Mg-staurolite bearing granulite from the Limpopo Belt, southern Africa: Implications for a P - T path. *Lithos*, 92: 576–587

- Vielzeuf D and Montel JM. 1994. Partial melting of metagreywacks. Part I. Fluid-absent experiments and phase relationships. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 117: 375 – 393
- Wang YJ, Fan WM, Cawood PA, Ji SC, Peng TP and Chen XY. 2007. Indosinian high-strain deformation for the Yunkaidashan tectonic belt, south China; Kinematics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints. *Tectonics*, 26, TC6008, doi:10.1029/2007TC002099
- Xu XS, Yin FG, Wan F, Liang ZH, Wei BD and Zhang JD. 2001. The migration of the Qinzhou-Fangcheng trough in Guangxi and associated sedimentary-tectonic transform surfaces. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 21: 1 – 10 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG, Chung SL, Jahn BM and Wu CY. 2001. Petrological and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos*, 58: 145 – 168
- Zhang JX and Meng FC. 2005. Sapphirine-bearing high-pressure mafic granulite and its implications in the South Altyn Tagh. *Chinese Science Bulletin*, 50: 265 – 269
- Zhang YQ. 1999. Foreland thrust and nappe tectonics of Shiwandashan, Guangxi. *Geoscience*, 13: 150 – 156 (in Chinese with English abstract)
- Zhao L. 2010. Petrogenesis of the ultrahigh-temperature granulite enclaves in Indo-Sinian granites from Shiwandashan area in South China; Implications for crustal evolution. Ph. D. Dissertation. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English summary)
- Zhao L, Guo F, Fan WM, Li CW, Qin XF and Li HX. 2010. Crustal evolution of the Shiwandashan area in South China: Zircon U-Pb-Hf isotopic records from granulite enclaves in Indo-Sinian granites. *Chinese Science Bulletin*, 55(19): 2028 – 2038
- Zhou MF, Malpas J, Song XY, Robinson PT, Sun M, Kennedy AK, Leshner CM and Keays RR. 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 196: 113 – 122
- 附中文参考文献**
- 邓希光, 陈志刚, 李献华, 刘敦一. 2004. 桂东南地区大容山-十万大山花岗岩带 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年. *地质评论*, 50: 426 – 432
- 杜杨松, Collerson KD, 赵建新, 庞保成. 1999. 两广交界地区 S 型花岗岩中麻粒岩包体的特征与成因. *岩石学报*, 15 (2): 309 – 314
- 广西壮族自治区地质矿产局. 1985. 广西壮族自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 – 853
- 郭敬辉, 陈意, 彭澎, 刘富, 陈亮, 张履桥. 2006. 内蒙古大青山假蓝宝石麻粒岩——1.8 Ga 的超高温变质作用. 2006 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要. 南京: 南京大学, 215 – 218
- 梁新权, 李献华, 丘元禧, 杨东生. 2005. 华南印支期碰撞造山——十万大山盆地构造和沉积学证据. *大地构造与成矿学*, 29(1): 99 – 112
- 刘建忠, 强小科, 刘喜山, 欧阳自远. 2000. 内蒙古大青山造山带含假蓝宝石尖晶石片麻岩的成因网格及动力学. *岩石学报*, 16 (2): 245 – 255
- 刘守倜, 李江海. 2007. 超高温变质作用: 以华北内蒙古土贵乌拉地区为例. *地质前缘*, 14(3): 131 – 137
- 刘守倜, 李江海, Santosh M. 2008. 内蒙古土贵乌拉孔兹岩带超高温变质作用: 变质反应结构及 *P-T* 指示. *岩石学报*, 24(6): 1185 – 1192
- 刘守倜, 李江海. 2009. 内蒙古中南部古元古代高温型双变质带及其构造意义. *高校地质学报*, 15(1): 48 – 56
- 庞保成. 2001. 两广交界地区花岗岩中包体的类型、特征与成因. *矿物岩石*, 21 (1): 8 – 13
- 彭松柏, 付建明, 刘云华. 2004. 大容山-十万大山花岗岩带中 A 型紫苏花岗岩、麻粒岩包体的发现及意义. *科学技术与工程*, 4: 832 – 834
- 彭松柏. 2006. 大容山-十万大山花岗岩带中超高温麻粒岩包体的发现及其地质意义. 2006 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要. 南京: 南京大学, 402 – 403
- 丘元禧, 梁新权. 2006. 两广云开大山-十万大山地区盆地耦合构造演化——兼论华南若干区域构造问题. *地质通报*, 25(3): 341 – 347
- 许效松, 尹福光, 万方, 梁宗华, 韦宝东, 张金瑞. 2001. 广西钦防海槽迁移与沉积-构造转换面. *沉积与特提斯地质*, 21: 1 – 10
- 张岳桥. 1999. 广西十万大山前陆冲断推覆构造. *现代地质*, 13: 150 – 156
- 赵亮. 2010. 桂东南印支期花岗岩中超高温麻粒岩包体成因及其对区域地壳演化的指示意义. 博士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所