

# 浙江龙游石榴石角闪岩(退变榴辉岩): 华夏加里东期碰撞造山事件的新证据

陈相艳<sup>①②</sup>, 仝来喜<sup>③</sup>, 张传林<sup>②\*</sup>, 朱清波<sup>②</sup>, 李亚楠<sup>②</sup>

① 中国地质科学院研究生部, 北京 100037;

② 南京地质调查中心, 南京 210016;

③ 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

\* 联系人, E-mail: zchuanlin1968@gmail.com

2015-01-29 收稿, 2015-03-23 接受, 2015-04-22 网络版发表

中国地质调查局地质调查项目(1212011121098)资助

**摘要** 在华夏地块浙江龙游地区发现了榴辉岩退变形成的石榴石角闪岩, 其变质演化可分为 3 个阶段, 分别为峰期榴辉岩相阶段(M1), 矿物组合为绿辉石+石榴子石变斑晶(核部)+石英; 峰后成合晶阶段(M2), 矿物组合为石榴子石变斑晶(边部)+单斜辉石变斑晶+斜长石, 峰期榴辉岩相绿辉石在该阶段形成榴辉岩典型的降压分解结构; 退变质角闪岩相阶段(M3), 矿物组合为角闪石+斜长石, 并在石榴子石边部形成角闪石和斜长石的反应边、后成合晶以及斜长石冠状体. 由于强烈的退变质过程的影响, 传统矿物温压计方法只能得到退变质角闪岩相的温压条件, 获得  $T=664\sim 691\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=0.68\sim 0.73\text{ GPa}$ . 石榴子石成分环带表明该退变榴辉岩在峰后经历了一近等温降压过程. 因此, 结合岩相学分析、石榴子石成分剖面 and 退变质角闪岩相温压数据, 可作出退变质过程的顺时针 P-T 轨迹, 与碰撞造山过程一致. 故该退变榴辉岩是华夏地块加里东期碰撞造山过程的产物, 是华夏地块加里东期碰撞造山事件的新证据.

## 关键词

石榴石角闪岩  
退变榴辉岩  
P-T 轨迹  
华夏地块  
碰撞造山

中国华南板块由扬子和华夏 2 个地块组成(图 1(a))<sup>[1]</sup>. 大多数地质学家认为, 扬子和华夏在新元古代早中期沿江绍断裂发生拼合, 形成了统一的华南板块<sup>[2-10]</sup>. 此后又经历了南华纪的裂解及加里东的陆内造山的改造<sup>[11-15]</sup>. 然而, 对于华夏地区加里东期大规模的岩浆事件以及绿片岩-角闪岩相乃至麻粒岩相的变质作用所反映的大陆动力学背景, 迄今仍存在很大的争议.

近年来的研究表明, 华南在早古生代的构造演化, 与冈瓦纳汇聚事件有重要的联系, 并认为华南在冈瓦纳超大陆中, 可能通过羌塘地块与印度联接<sup>[2,16]</sup>. 在对华夏加里东期的变质岩研究中, 多处发

现了泥质麻粒岩, 如云开大山云炉地区的低压泥质麻粒岩<sup>[17-19]</sup>; 南武夷桃溪地区的高压泥质麻粒岩<sup>[20,21]</sup>(图 1(b))<sup>[1]</sup>. 而对于华夏地块是否有榴辉岩, 迄今没有相关报道.

最近, 汪建国等人<sup>[22]</sup>在龙游灵山-溪口附近发现了两处石榴石角闪岩露头. 该石榴石角闪岩作为一种特殊的高级基性变质岩可以很好地记录其变质过程中的温压信息. 我们对溪口镇白石山头的石榴石角闪岩进行了详细的岩相学、矿物化学分析. 研究表明, 该石榴石角闪岩为退变榴辉岩相变质岩, 结合岩相学、石榴子石成分剖面和传统矿物温压计建立了 P-T 轨迹, 这对于研究华夏加里东期构造事件的地球

**引用格式:** 陈相艳, 仝来喜, 张传林, 等. 浙江龙游石榴石角闪岩(退变榴辉岩): 华夏加里东期碰撞造山事件的新证据. 科学通报, 2015, 60: 1207-1217  
Chen X Y, Tong L X, Zhang C L, et al. Retrograde garnet amphibolite from eclogite of the Zhejiang Longyou area: New evidence of the Caledonian orogenic event in the Cathaysia block (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 1207-1217, doi: 10.1360/N972015-00094

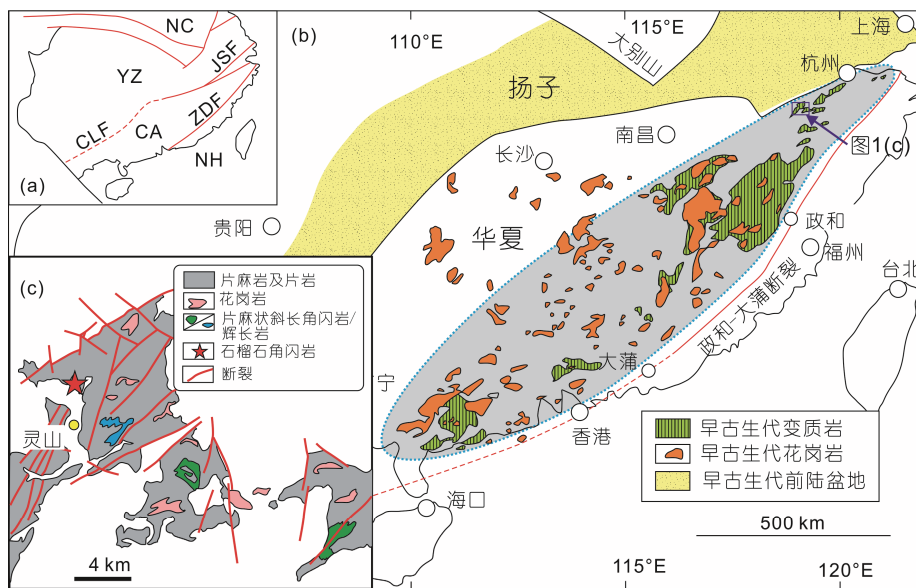


图1 华南板块基本构造单元(a)、华夏地块加里东期变质岩分布(b)及研究区区域地质图(c)<sup>[1]</sup> (YZ, 扬子地块; CA, 华夏地块; NC, 华北板块; NH, 南海地体; JSF, 江绍断裂; CLF, 郴州-林武断裂; ZDF, 政和-大浦断裂)

Figure 1 The tectonic framework of the South China(a), the distribution of the Caledonian metamorphic rocks (b) and the simplified geological map the Zhejiang area (c)<sup>[1]</sup>. (YZ, Yangtze block; CA, Cathaysian block; NC, North China block; NH, Nanhai block; JSF, Jiangshao fault; CLF, Chenzhou-Linwu fault; ZDF, Zhenghe-Dapu fault)

动力学背景以及华南向冈瓦纳超大陆汇聚的过程, 提供了重要的科学依据。

## 1 区域地质背景

华夏地块沿着北东-南西向延伸达2000多公里, 向北东延伸至朝鲜半岛, 南西延伸至印支块体(图1(b))。华夏地块在早古生代(470~400 Ma)经历了一期重要的构造热事件, 从而在志留纪后的盖层和泥盆纪前的变质基底之间形成区域性角度不整合, 并伴有大量的花岗岩侵入体。对于加里东期构造运动的性质主要有两种认识: (1) 陆内造山模式<sup>[8,18,23,24]</sup>, 如舒良树<sup>[25]</sup>认为该加里东期造山带是震旦-早古生代巨厚沉积物褶皱造山形成; Li等人<sup>[7]</sup>认为造山前的南华纪盆地及部分前陆盆地沉积经板内逆冲作用, 将这些盆地沉积单元埋深到中地壳, 并引发一系列岩浆和变质作用; (2) 陆-陆碰撞造山模式<sup>[26-28]</sup>, Zhao和Cawood<sup>[10]</sup>提出华夏属于加里东期陆-陆碰撞造山带, 认为在440~430 Ma期间, 由扬子和华夏构成的华南陆块与位于冈瓦纳北缘的一个未知陆块碰撞, 导致整个华夏俯冲到另一个未知大陆之下, 随后沿着政和-大浦断裂与未知大陆裂开。在这一认识基础上, Zhang等人<sup>[1]</sup>进一步提出存在一个南海地块(地体), 这一地块使华南和印度、羌塘联接。

浙江龙游地区位于武夷—云开早古生代造山带的北东段(图1(b))。该地区变质岩被命名为龙游群, 时代归属于古元古代, 和八都群相当。最近的研究表明, 部分龙游群实质上是一套新元古代火山-沉积岩系, 在加里东期发生角闪岩相变质, 和其北东侧的陈蔡群相当<sup>[8]</sup>, 并在后期叠加印支期的变质事件<sup>[29]</sup>。龙游群主要由一套黑云(斜长)片岩、片麻岩组成, 多处见有斜长角闪岩条带, 并有425 Ma左右的辉长岩侵入<sup>[8]</sup>。石榴石角闪岩呈透镜状产于浙江龙游县灵山河口一带的片麻岩中(图1(c))。出露面积约30 m<sup>2</sup>。在露头上, 有印支期的淡色岩脉(独居石U-Pb年龄为230 Ma, 未发表资料, 图2(a))侵入到石榴石角闪岩。

## 2 岩相学及变质期次划分

岩石露头新鲜, 呈灰(黑)绿色, 粒状变晶结构, 块状构造。露头可见红褐色的石榴子石与灰黑色的角闪石相间分布, 两者含量大致相当(图2(b))。主要组成矿物为石榴子石(40%~45%)、角闪石(40%~45%)、单斜辉石(2%~10%)、斜长石(3%~5%)和石英(3%~5%), 副矿物主要为钛铁矿, 另有少量钾长石、磷灰石、榍石、黄铁矿等, 含量不超过2%。由岩相学观察可知, 石榴子石、角闪石、单斜辉石多构成斑晶, 斜长石、石英和钛铁矿等副矿物构成基质。

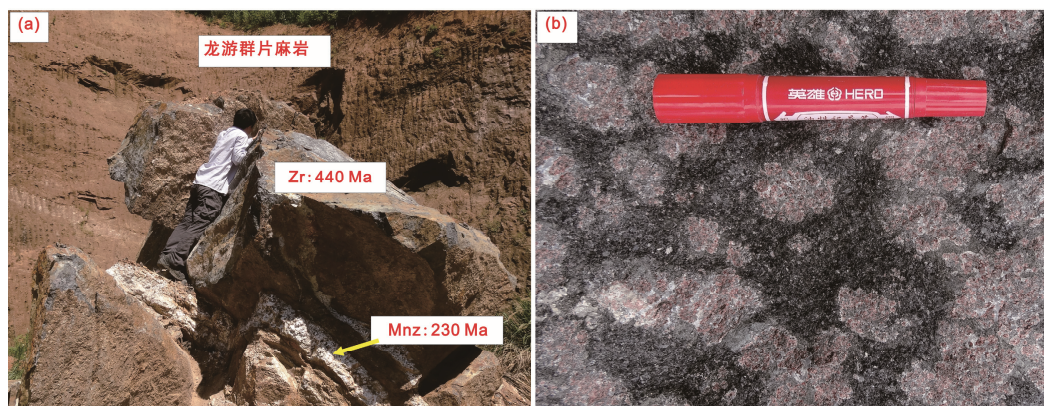


图2 石榴石角闪岩(退变榴辉岩)露头照片。(a) 石榴石角闪岩以透镜体产出在龙游群片麻岩中, 锆石 U-Pb 年龄分析获得变质年龄 440 Ma<sup>[1]</sup>对后期侵入其中的浅色脉体获得 230 Ma 的独居石 U-Pb 年龄; (b) 粗粒石榴子石与角闪石相间分布, 石榴子石退变成较小的颗粒, 并在边部形成斜长石冠状体

Figure 2 Field photo of the garnet amphibolites (retrograded eclogite). (a) The garnet amphibolites occur as lens-shaped bodies in the gneiss of Longyou group and yield the zircon U-Pb age of 440 Ma<sup>[1]</sup>. The felsic veins intruded in the garnet amphibolites yield the monazite U-Pb age of 230 Ma; (b) The coarse-grained garnets and hornblendes show alternative distribution and the coarse-grained garnets have retrograded into fine-grained garnets which are surrounded by the plagioclase corona

根据系统的岩相学和变质反应结构的分析, 本文将石榴石角闪岩的变质演化分为3个阶段, 分别为: 峰期榴辉岩相阶段(M1)、峰后后成合晶阶段(M2)、退变质角闪岩相阶段(M3), 现将各不同阶段矿物组合和对应的变质反应描述如下:

(i) 峰期榴辉岩相阶段(M1). 由于退变质很强烈, 没有发现绿辉石, 但该石榴石角闪岩具有绿辉石典型的减压分解结构, 即透辉石(Na<sub>2</sub>O含量为0.21%~0.55%)和斜长石(Ab<sub>53-60</sub>)构成的蠕虫状后成合晶(图3(c), (d), (e)). 斜长石体积约为25%~30%, 这种结构被认为是榴辉岩经历完全的高压麻粒岩相退变的典型结构, 是绿辉石在榴辉岩相退变至高压麻粒岩相过程中形成的<sup>[30,31]</sup>, 从而可以作为榴辉岩相变质的直接证据<sup>[32-34]</sup>, 变质反应为Omp+Qtz=Ab+Cpx. 同时, 岩相学分析表明, 不存在与单斜辉石、石榴子石变斑晶同期的斜长石<sup>[32,33]</sup>, 表明在该期斜长石全部消失.

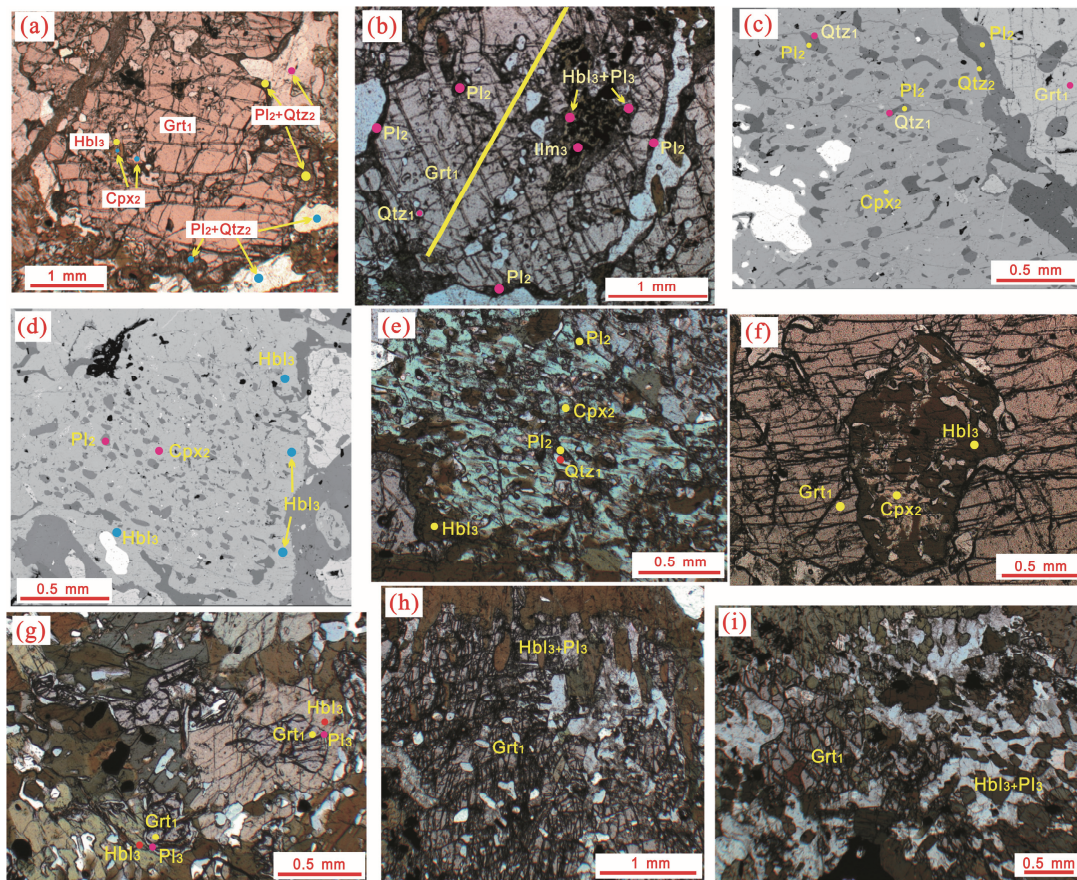
因此, 峰期榴辉岩相矿物组合为石榴子石变斑晶(核部)+绿辉石+石英, 绿辉石一部分为变斑晶(现已退变为Cpx<sub>2</sub>+Pl<sub>2</sub>的后成合晶), 一部分包裹在石榴子石中, 但都已退变为透辉石, 部分已退变为角闪石Hbl<sub>3</sub>(图3(f)), 且Hbl<sub>3</sub>保留有Cpx<sub>2</sub>的残晶(图3(a)).

从图3c-e可见, 斜长石面积约为25%~30%, 斜长石中Ab含量计为0.55, 计算得单斜辉石中硬玉分子数为13.8~16.6 mol%. 根据图3(e)可知, 约有1/2~1/3的Cpx退变为Hbl, 在该退变过程中Cpx+Pl+H<sub>2</sub>O=Hbl

也消耗了部分Pl, 因此退变前的硬玉分子数可达25~30 mol%. 因此, 虽然没有绿辉石, 仍可根据以上3个岩相学特征得该石榴石角闪岩早期经历了榴辉岩相变质作用, 矿物组合为绿辉石、石榴子石变斑晶和石英.

(ii) 峰后后成合晶阶段(M2). 如前所述, 该石榴石角闪岩具有榴辉岩相退变的典型结构, 即绿辉石分解为透辉石和斜长石(Ab<sub>53-60</sub>)的后成合晶<sup>[30,31]</sup>. 此外, 石榴子石变斑晶边部多具有斜长石冠状体或斜长石和石英构成的白眼圈(图3(a), (b)), 这表明石榴石角闪岩经历了高压变质峰期之后的降压过程. 因此, 峰后降压的后成合晶阶段矿物组合为石榴子石变斑晶(边部)+单斜辉石变斑晶+斜长石, 斜长石一部分以后成合晶的形式存在于单斜辉石中(图3(c), (d), (e)), 另一部分为石榴子石边部的冠状体以及单斜辉石、石榴子石之间的反应边(图3(a), (b), (c)). 此外, 石榴子石变斑晶中也包裹有一些斜长石, 如图3(b)石榴子石变斑晶中包裹的Pl<sub>2</sub>, 其形成主要与受石榴子石局部成分域控制的减压有关<sup>[36]</sup>.

(iii) 退变质角闪岩相阶段(M3). 该阶段的矿物组合为角闪石+斜长石. 角闪石主要为单斜辉石变斑晶退变的产物, 退变完全者单斜辉石完全退变为角闪石变斑晶(图3(g)), 少数角闪石中仍残余有单斜辉石; 退变不完全者仅形成角闪石环边, 核部仍保留单斜辉石和斜长石的后成合晶(图3(d), (e)). 石榴子石中也包裹有由绿辉石在峰后高压麻粒岩相(M2)退变



**图3** 石榴石角闪岩显微结构照片(单偏光)和 BSE 照片。(a) 峰期榴辉岩相(M1)石榴子石变斑晶 Grt<sub>1</sub> 中发育近于平行的裂理, 并包裹有绿辉石在峰后高压麻粒岩相(M2)退变形成的 Cpx<sub>2</sub>, 边部具有 Pl<sub>2</sub>+Qtz<sub>2</sub> 构成的“白眼圈”; 部分 Cpx<sub>2</sub> 在角闪岩相(M3)退变为角闪石 Hbl<sub>3</sub>, 且 Hbl<sub>3</sub> 中含有 Cpx<sub>2</sub> 残晶; 斜长石 Pl<sub>2</sub> 发生强烈泥化, 单偏光, 2013SC12-1; (b) 石榴子石变斑晶 Grt<sub>1</sub> 中包裹有 M1 期石英 Qtz<sub>1</sub> 和峰后石榴子石降压分解形成的 Pl<sub>2</sub>, 边部在峰后高压麻粒岩相(M2)阶段形成 Pl<sub>2</sub>+Qtz<sub>2</sub> 构成的“白眼圈”; 角闪岩相阶段(M3)Grt<sub>1</sub> 分解形成 Hbl<sub>3</sub>+Pl<sub>3</sub>+Ilm<sub>3</sub>, 斜长石 Pl<sub>2</sub> 发生强烈泥化, 单偏光, 黄线所示为图 4 剖面位置, 2013SC12-1; (c) 绿辉石退变质形成的单斜辉石变斑晶 Cpx<sub>2</sub> 与峰期榴辉岩相石榴子石 Grt<sub>1</sub> 呈嵌晶结构, 并在 Grt<sub>1</sub> 和 Cpx<sub>2</sub> 之间形成 Pl<sub>2</sub> 和 Qtz<sub>2</sub> 的反应边, 反应式为 Grt<sub>1</sub>+Omp<sub>1</sub>=Cpx<sub>2</sub>+Pl<sub>2</sub>+Qtz<sub>2</sub>; Cpx<sub>2</sub> 和其中包裹的 Pl<sub>2</sub> 共同构成绿辉石假象, 根据反应式 Omp<sub>1</sub>+Qtz<sub>1</sub>=Cpx<sub>2</sub>+Pl<sub>2</sub> 可知, Cpx<sub>2</sub> 变斑晶中的石英 Qtz<sub>1</sub> 为峰期榴辉岩相残余; 多处见有 Pl<sub>2</sub> 和 Qtz<sub>1</sub> 共生, Pl<sub>2</sub> 多强烈泥化, BSE 图像, 2013SC12-4; (d)和(e)单斜辉石变斑晶 Cpx<sub>2</sub> 中绿辉石退变质降压分解形成的 Pl<sub>2</sub> 和峰期榴辉岩相残余的石英 Qtz<sub>1</sub>, 单斜辉石边部和核部退变为 Hbl<sub>3</sub>, 单偏光, d-2013SC12-4, e-2013SC12-1; (f) 石榴子石 Grt<sub>1</sub> 变斑晶中绿辉石退变成的单斜辉石 Cpx<sub>2</sub>, Cpx<sub>2</sub> 大部分退变为角闪石 Hbl<sub>3</sub>, 单偏光, 2013SC12-4; (g) 角闪石变斑晶(Hbl<sub>3</sub>)环绕的石榴子石 Grt<sub>1</sub>, 并在石榴子石和角闪石之间形成斜长石 Pl<sub>3</sub> 冠状体, 单偏光, 2013SC12-2; (h) 石榴子石 Grt<sub>1</sub> 边部在退变质角闪岩相过程分解形成 Hbl<sub>3</sub>+Pl<sub>3</sub> 反应边, 单偏光, 2013SC12; (i) 石榴子石 Grt<sub>1</sub> 在角闪岩相退变质中分解形成 Hbl<sub>3</sub>+Pl<sub>3</sub> 后成合晶, 并保留有石榴子石假象, 单偏光, 2013SC12-2

**Figure 3** Photomicrographs of plane-polarized light and backscattered electron images showing the textural relationships of garnet amphibolites. (a) A garnet porphyroblast containing inclusions of hornblende and clinopyroxene and surrounded by coronas of plagioclase and quartz from the sample 2013SC12-1. (b) A garnet porphyroblast containing inclusions of hornblende+plagioclase+ilmenite+quartz and surrounded by corona of plagioclase from the sample 2013SC12-1. The yellow line shows the position of the compositional profile in Fig.4. (c) Omphacite pseudomorph indicated by the clinopyroxene+plagioclase symplectites from the sample 2013SC12-4. (d) and (e) Omphacite pseudomorph indicated by the clinopyroxene+plagioclase symplectites from the sample 2013SC12-4 and 2013SC12-1 respectively with the hornblende replaced the rim of the pseudomorph. (f) Clinopyroxene occurs as inclusion in the garnet porphyroblast with the hornblende replacing part of it. (g) Fine-grained garnet porphyroblasts mantled by the plagioclase coronas in the hornblende porphyroblasts from the sample 2013SC12-2. (h) Hornblende and plagioclase symplectite on garnet from the sample 2013SC12. (i) Garnet pseudomorph indicated by the hornblende +plagioclase symplectite from the sample 2013SC12-2

形成单斜辉石 Cpx<sub>2</sub>(图3(a), (f)). 在角闪岩相阶段, 这些 Cpx<sub>2</sub> 进一步退变为角闪石 Hbl<sub>3</sub>. 另一部分角闪石与斜长石共同构成石榴子石边部的反应边(图3(h)), 为石榴子石退变质分解的产物, 部分石榴子石已完

全被角闪石和斜长石取代, 并保留石榴子石假象(图3(i)). 斜长石一部分与角闪石共同构成石榴子石边部或内部的后成合晶(图3(b), (h), (i)), 另一部分为石榴子石边部的冠状体(图3(g)).

### 3 全岩地球化学和矿物化学

全岩地球化学数据如表1所示, 该石榴石角闪岩 SiO<sub>2</sub> 含量为 40.3%~50.3%, 为基性岩. 但其 FeO 为 17.8%~20.7%, 高于正常 MORB 中 FeO 的含量<sup>[35]</sup>, MgO 含量为 4.6%~6.7%, 低于正常 MORB 中 MgO 的含量<sup>[35]</sup>. Zhang 等人<sup>[1]</sup> 对其进行了地球化学分析, 认为该石榴石角闪岩原岩类型与 OIB 类似, 而非一般的 MORB.

矿物化学成分分析在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的 JXA-8100 电子探针完成. 分析条件为: 加速电压 15 Kv, 束流 2.000 ± 0.002 E-0.8(A), 束斑大小为 2 μm, 大部分元素的分析时间为 10 s, 采用 ZAF 校正法. 电子探针分析代表性结果见表 2. 详细的分析结果见表 S1~S4.

(i) 石榴子石. 如前所述, 石榴石中具有近于平行的裂理, 表明石榴子石形成的压力条件很高. 石榴子石仅稳定存在于峰期榴辉岩相和峰后高压麻粒岩相阶段. 由表 1 可知岩石 FeO 含量较高, 而 MgO 含量较低, 因此石榴子石均为含钙铝榴石和镁铝榴石的铁铝榴石. 石榴子石端元组分计算采用 Rickwood 计算方法. 从表 2 和图 4 可以看出, Alm 含量为 58.1~63.5%, Grs 为 19.3%~26.0%, Prp 为 11.34%~15.3%, 另有少量的 Sps(1.7%~2.75%). 从图 4 的石榴子石成分剖面可以看出, 石榴子石变斑晶具有显著的成分环带. 从核部到边部, 钙铝榴石、镁铝榴石含量降低, 铁铝榴石含量增加, 可能反映了变质压力从高到低的演化过程<sup>[36~40]</sup>.

(ii) 单斜辉石. 单斜辉石仅稳定存在于峰期榴辉岩相和峰后高压麻粒岩相阶段, 除与斜长石共同构成绿辉石假象(type1)外, 也以退变质残余矿物(type2)的形式存在于角闪石变斑晶中, 石榴子石变斑晶中也包裹有少量退变残余的单斜辉石(type3, 图 3(a), (f)). 如表 2 所示, 各种形式的单斜辉石具有基本一致的化学成分, 均为透辉石, 从核部到边部无明显

成分变化. 仅有两个点含有少量的硬玉分子, 分别为 0.3% 和 0.36%, 其余硬玉分子均为 0.

(iii) 角闪石. 角闪石可分为 2 种类型. 第 1 种类型(type1)为单斜辉石退变成的角闪石, 退变完全者形成角闪石变斑晶, 与石榴子石变斑晶呈嵌晶结构; 退变不完全者仅在单斜辉石的核部和边部形成角闪石, 第 2 种(type2)为石榴子石降压分解形成的角闪石, 主要为石榴子石边部的反应边或以角闪石+斜长石的后成合晶形式出现. 如图 5<sup>[41]</sup> 所示, 单斜辉石退变成的角闪石(type1)主要为浅闪石、普通角闪石和韭闪石和部分钙镁闪石, 石榴子石降压分解形成的角闪石

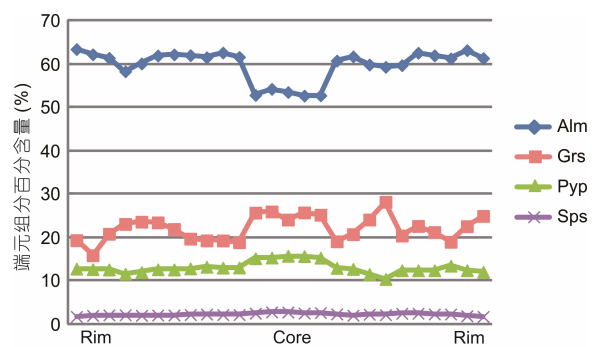


图 4 图 3(b)中石榴子石的成分剖面  
Figure 4 Core-rim compositional profile for the garnet porphyroblast depicted in Figure 3(b)

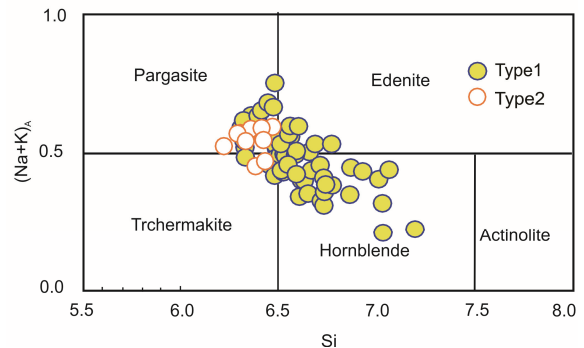


图 5 Si-(Na+K)<sub>A</sub> 角闪石分类图<sup>[41]</sup>  
Figure 5 Si-(Na+K)<sub>A</sub> diagram showing classification of amphibole from samples<sup>[41]</sup>

表 1 全岩地球化学数据

Table 1 Whole-rock compositions (wt%) of the garnet amphibolite

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	L.O.I	合计
2013SC12	43.91	2.72	13.89	18.68	0.33	4.99	11.04	0.62	0.94	0.21	0.25	99.65
2013SC12-1	50.26	2.48	11.82	16.03	0.28	4.57	10.60	1.29	0.42	0.22	0.09	99.65
2013SC12-2	43.88	3.44	12.41	18.06	0.30	6.10	10.62	1.99	0.68	0.32	0.33	100.14
2013SC12-3	40.26	3.40	15.92	16.09	0.19	6.74	11.38	1.37	1.45	0.37	0.68	99.64
2013SC12-4	47.2	2.51	12.27	16.87	0.30	5.49	9.94	2.13	0.54	0.24	0.28	99.65

表2 各矿物探针分析结果<sup>a)</sup>  
Table 2 Selected microprobe analyses for the minerals of the garnet amphibolite<sup>a)</sup>

矿物	gt-R	gt-C	gt-R	Hbl-t1	Hbl-t1	Hbl-t1	Hbl-t1	Hbl-t2	Hbl-t2	Cpx-t1	Cpx-t1	Cpx-t1	Cpx-t2	Cpx-t3	Cpx-t3	Pl-P1-1	Pl-P1-1	Pl-P1-2	Pl-P2
SiO <sub>2</sub>	37.46	37.45	37.36	41.79	44.68	41.82	41.76	41.30	41.30	51.49	51.34	51.27	51.41	51.53	51.27	55.42	56.99	65.59	57.82
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.02	0.03	1.10	0.81	1.13	1.45	1.03	1.45	0.05	0.07	0.09	0.15	0.00	0.09	0.01	0.01	0.00	0.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.85	21.79	21.45	13.80	10.53	12.37	13.56	13.68	13.56	1.09	1.16	0.89	0.68	0.34	0.89	27.08	26.17	22.46	26.92
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03	0.04	0.00	0.05	0.02	0.00	0.06	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02
FeO	29.20	28.31	28.18	18.76	17.45	18.79	18.28	19.47	18.28	13.28	12.95	11.64	11.64	11.78	12.19	0.14	0.27	0.17	0.01
MnO	0.75	1.00	0.95	0.08	0.14	0.07	0.08	0.05	0.05	0.11	0.11	0.11	0.11	0.09	0.15	0.00	0.00	0.01	0.00
MgO	3.20	3.17	3.18	7.82	10.11	8.15	8.10	7.37	8.10	10.37	10.60	11.13	11.21	11.13	11.30	0.00	0.01	0.00	0.00
CaO	7.72	8.12	8.51	12.34	11.54	12.14	12.19	12.12	12.12	23.28	22.98	23.68	23.98	25.38	23.68	9.97	8.38	2.30	8.48
Na <sub>2</sub> O	0.03	0.03	0.02	1.32	1.40	1.65	1.27	1.24	1.27	0.35	0.40	0.49	0.21	0.24	0.49	6.58	6.90	10.51	7.12
K <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.00	1.12	0.62	0.85	1.22	1.19	1.19	0.01	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.15	0.16	0.10	0.23
Total	100.26	99.91	99.70	98.12	97.26	96.96	97.94	97.47	97.94	100.03	99.68	100.08	99.42	100.55	100.08	99.33	98.89	101.14	100.68
O	12	12	12	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	32.00	32.00	32.00	32.00
Si	2.96	2.97	2.95	6.30	6.64	6.38	6.29	6.28	6.29	1.96	1.96	1.94	1.96	1.94	1.94	10.08	10.35	11.42	10.31
Ti	0.00	0.00	0.01	0.13	0.09	0.13	0.16	0.12	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Al	1.99	2.00	1.96	1.70	1.36	1.62	1.71	1.72	1.72	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.04	5.80	5.66	4.61	5.65
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.05	0.03	0.09	0.12	0.50	0.13	0.14	0.21	0.14	0.06	0.06	0.12	0.06	0.12	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>2+</sup>	1.87	1.87	1.70	2.24	1.67	2.27	2.17	2.27	2.17	0.37	0.35	0.27	0.31	0.25	0.27	0.02	0.02	0.03	0.00
Mg	0.38	0.37	0.33	1.76	2.24	1.85	1.82	1.67	1.67	0.59	0.60	0.64	0.64	0.63	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.05	0.07	0.08	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.65	0.67	0.82	1.99	1.84	1.99	1.97	1.97	1.97	0.95	0.94	0.96	0.98	1.03	0.96	1.94	1.89	0.43	1.62
Na	0.01	0.00	0.02	0.38	0.24	0.47	0.34	0.34	0.34	0.03	0.03	0.04	0.02	0.02	0.04	2.32	2.24	3.55	2.46
K	0.00	0.00	0.00	0.22	0.12	0.17	0.23	0.23	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.02	0.05
A(phase)	63.46	54.25	58.13	6.30	6.64	6.38	6.29	6.28	6.29	48.34	47.94	49.18	49.18	50.63	48.30	54.00	53.80	88.70	59.50
B(phase)	19.33	25.95	23.60	0.59	0.36	0.64	0.57	0.57	0.57	29.96	30.78	32.00	32.00	30.88	32.05	45.20	45.40	10.70	39.20
C(phase)	12.75	15.30	11.34							21.70	21.27	18.82	18.82	18.49	19.65	0.80	0.80	0.60	1.30
D(phase)	1.70	2.75	2.55							0.30	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00				

a) gt, 石榴子石; Hbl, 角闪石; Cpx, 单斜辉石; Pl, 斜长石; A(gt) = XAlm = Fe/(Fe+Mn+Mg+Ca); B(gt) = XGrs = Ca/(Fe+Mn+Mg+Ca); C(gt) = XPrp = Mg/(Fe+Mn+Mg+Ca); D(gt) = XSps = Mn/(Fe+Mn+Mg+Ca); A(Hbl) = Si, B(Hbl) = (Na+K)<sub>A</sub>, A(Cpx) = Wo, B(Cpx) = Fs, D(Cpx) = Id; A(Pl) = Ab, B(Pl) = An, C(Pl) = Or; -C, Core; -R, Rim; t1, type1; Pl-1, Phase1-1, 矿物成分计算使用 minpet2.02. gt, garnet, Hbl, hornblende; Cpx, clinopyroxene; Pl, plagioclase; A(gt) = XAlm = Fe/(Fe+Mn+Mg+Ca); B(gt) = XGrs = Ca/(Fe+Mn+Mg+Ca); C(gt) = XPrp = Mg/(Fe+Mn+Mg+Ca); D(gt) = XSps = Mn/(Fe+Mn+Mg+Ca); A(Hbl) = Si, B(Hbl) = (Na+K)<sub>A</sub>, A(Cpx) = Wo, B(Cpx) = Fs, D(Cpx) = Id; A(Pl) = Ab, B(Pl) = An, C(Pl) = Or; -C, Core; -R, Rim; t1, type1; Pl-1, Phase1-1; The mineral formulae were calculated with program minpet2.02

(type2)主要为非闪石,少数为钙镁闪石。

(iv) 斜长石. 峰后后成合晶阶段(M2)的斜长石可分为2种,一种与单斜辉石共同构成绿辉石假象(Phase1-1),为榴辉岩相峰后降压过程中绿辉石分解形成的,成分为 $Ab_{53.1-60.1}An_{38.5-46.1}Or_{0.8-1.4}$ ;另有一部分为石榴子石边部的冠状体和石榴子石变斑晶中的包体(Phase1-2),成分变化较大,An含量为10.9-88.7,主要与受石榴石局部成分域控制的减压有关<sup>[36]</sup>.退变质角闪岩相阶段的斜长石主要为石榴子石分解的产物(Phase2),与角闪石共同构成石榴子石边部(图3(g), (h), (i))或内部(图3(b))的反应边或后成结晶.该类斜长石成分变化很大,从中长石-拉长石-培长石均有,成分为 $Ab_{13.6-65.5}An_{33.7-86.2}Or_{0.2-1.4}$ ,一方面与石榴子石局部成分变化较大有关,也表明在快速退变质过程中局部变质反应没有达到平衡.

#### 4 温压计算

根据上述岩相学特征和变质阶段划分,结合矿物化学数据,共划分出3个不同的变质阶段,峰期榴辉岩相阶段(M1)、峰后后成合晶阶段(M2)和退变质角闪岩相阶段(M3).根据不同变质阶段的矿物组合,本文使用与之对应的传统矿物温压计对不同阶段的P-T条件进行估算,所用的传统矿物温压计有:Grt-Cpx温度计<sup>[42]</sup>和Grt-Cpx-Pl压力计<sup>[43]</sup>、Grt-Hbl地质温度计<sup>[44]</sup>、Hbl-Pl地质温度计<sup>[45]</sup>和Grt-Hbl-Pl地质压力计<sup>[46,47]</sup>.

由于峰期榴辉岩相(M1)的绿辉石已经全部退变质为单斜辉石和斜长石构成的后成合晶,所以峰期的温度压力无法定量计算得到,只能根据变质相图中稳定域进行大致推测该阶段穿过榴辉岩相稳定域,在P-T轨迹中以虚线表示.峰后后成合晶阶段(M2)的温度压力使用邻近的单斜辉石、斜长石和石榴子石变斑晶进行计算,但算得的温压都较低,均位于角闪岩相范围内,表明岩石退变质较为强烈,矿物成分在退变质过程中重新平衡,因此在P-T轨迹中以虚线表示.退变质角闪岩相阶段(M3)单斜辉石变斑晶退变为角闪石变斑晶,与石榴子石变斑晶呈嵌晶结构,并在两者之间形成斜长石冠状体(图3(g));另有部分石榴子石边部退变形成角闪石和斜长石的反应边(图3(h)).上述两种结构中相互接触的角闪石、石榴子石和斜长石达到局部平衡,可用来计算该阶段的温压条件.算得的温压条件为:  $T = 664\sim 691\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 0.68\sim 0.73\text{ GPa}$ .

因此,结合石榴子石成分剖面所反映的降压生长过程<sup>[36,38]</sup>和上述分析,作出图6<sup>[37,48,49]</sup>所示的P-T轨迹.

#### 5 构造意义

石榴石角闪岩的岩相学特征及矿物化学分析表明其峰期变质达到榴辉岩相,与华北衡山地区古元古代退变榴辉岩<sup>[31]</sup>、北秦岭松树沟退变榴辉岩<sup>[50]</sup>(榴闪岩)以及东喜马拉雅不丹西北部“麻粒岩化”榴辉岩中退变结构完全相符<sup>[32,33]</sup>.Zhang等人<sup>[1]</sup>对石榴石角闪岩变质锆石U-Pb定年表明,变质锆石结晶年龄为440 Ma,很可能代表了高压-超高压变质的时间.另外,我们还获得了侵入于石榴石角闪岩的淡色脉体的独居石U-Pb年龄为230 Ma以及龙游群中片麻岩存在230 Ma左右的独居石年龄(未发表数据),代表了最晚期的退变质发生的时间.

如前所述,对于华夏地区加里东期的构造事件有两种完全不同的认识.本文报道的退变质榴辉岩,为确定华夏是一个加里东期的碰撞造山带提供了最可靠的新证据.大多数地质学家认为,在华夏地区迄今没有发现加里东期的蛇绿岩以及典型的岛弧岩浆

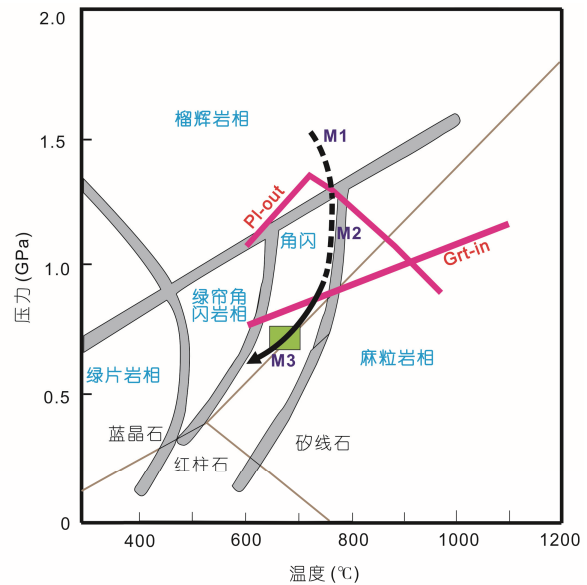


图6 浙江龙游石榴石角闪岩(退变榴辉岩)变质 P-T 轨迹. 方框为传统矿物温压计算的退变质角闪岩相的温压范围, P-T 格子中各变质相引自文献[48]; 石榴石消失线和斜长石消失线引自文献[37];  $Al_2SiO_5$  三相点引自文献[49]

Figure 6 P-T path for the garnet amphibolite (retrograded eclogite) from Zhengjiang Longyou area. The box shows the P-T range of the third metamorphic stage (M3). Fields of metamorphic facies and subfacies come from the Spear [48]; the grt-in and pl-out [37]; the aluminosilicate stability fields [49]

岩组合,因此认为华夏是典型的陆内造山带,与中新生的天山和澳大利亚中部的泥盆-石炭纪 Alice Springs造山带一致.然而,无论是在中新生的天山还是在泥盆-石炭纪的Alice Springs<sup>[51,52]</sup>,都缺乏这一时期的大规模岩浆活动和广泛的中深变质作用,这与华夏是完全不能对比的.众所周知,缺乏蛇绿岩和弧火山岩并不是板内造山的直接证据,如在大别山造山带和西阿尔卑斯造山带,同样也没有发现蛇绿岩和岛弧岩浆岩组合<sup>[10]</sup>.

研究表明,超大陆汇聚可能是一个长期的过程,如Rodinia超大陆汇聚从1.1 Ga开始,一直持续到0.85 Ga<sup>[10,53]</sup>.尽管冈瓦纳的汇聚主要发生在新元古代晚期到寒武纪<sup>[54-56]</sup>,一些位于冈瓦纳大陆边缘的微小的陆块向冈瓦纳汇聚可能持续到志留纪.这可以合理地解释为什么在华南地区存在大量的泛非期的碎屑锆石,但没有这一时期的岩浆岩记录<sup>[2-7]</sup>.

## 6 结论

综合上述,我们得出以下结论:

(1) 华夏地块存在有加里东期榴辉岩,并以透视镜体产出于周围的片麻岩中.该退变榴辉岩的变质演化可分3个阶段,即峰期榴辉岩相阶段(M1),矿物组合为绿辉石变斑晶、石榴子石变斑晶(核部)和石英;峰后后成晶阶段(M2),矿物组合为石榴子石变斑晶(边部)+单斜辉石变斑晶+斜长石,峰期绿辉石在该阶段形成榴辉岩典型的降压分解结构;退变质角闪岩相阶段(M3),矿物组合为角闪石+斜长石,并在石榴子石边部形成角闪石和斜长石的反应边和后成晶以及斜长石冠状体.由于强烈的退变质作用,传统矿物温压计的方法只能获得退变质角闪岩相的温压条件,即 $T = 664\sim 691\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 0.68\sim 0.73\text{ GPa}$ .石榴子石的成分环带反映了一个降压生长过程.因此,根据岩相学特征、矿物温压计数据和石榴子石成分环带获得的P-T演化轨迹具有顺时针特征,与碰撞造山过程相一致.

(2) 该石榴石角闪岩(退变榴辉岩)是华夏地块加里东期碰撞造山过程中的产物,这也是华夏地块加里东期碰撞造山的一个新证据.

**致谢** 感谢南京地质矿产研究所高天山老师、叶现韬博士、中国科学院大学张开均老师给予的建议和指导,感谢中国科学院广州地球化学研究所陈林丽老师在实验测试过程中给予的帮助.

## 参考文献

- Zhang C L, Santosh M, Zhu Q B, et al. The Gondwana connection of the South China: Evidence from monazite and zircon geochronology from Cathaysia Block. *Gondwana Res*, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2014.09.007>
- Zhou X M, Zhu Y H. The magmatic mixing of the Jiangshao fault and the Precambrian geology (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 1992, 3: 296-304 [周新民, 朱云鹤. 江绍断裂带的岩浆混合作用及其两侧的前寒武纪地质. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1992, 3: 296-304]
- Shi Y S, Shu L S, Guo L Z, et al. On plate collision kinematics: Talking the Jiangnan and the eastern Tianshan orogenic belts as examples (in Chinese). *Geol J China Univ*, 1995, 1: 11-21 [施央申, 舒良树, 郭令智, 等. 论板块碰撞运动学研究——以江南和东天山造山带为例. *高校地质学报*, 1995, 1: 11-21]
- Gao L Z, Yang M G, Ding X Z, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of tuff in the Shuangqiaoshan and Heshangzhen groups in South China—constraints on the evolution of the Jiangnan Neoproterozoic orogenic belt (in Chinese). *Geol Bull Chin*, 2008, 27: 1744-1751 [高林志, 杨明桂, 丁孝忠, 等. 华南双桥山群和河上镇群凝灰岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄——对江南新元古代造山带演化的制约. *地质通报*, 2008, 27: 1744-1751]
- Hong D W, Xie X L, Zhang J S. Geological significance of the Hangzhou-Zhuguangshan-Huashan high- $\epsilon$ Nd granite belt (in Chinese). *Geol Bull Chin*, 2002, 21: 348-354 [洪大卫, 谢锡林, 张季生. 试析杭州-诸广山-花山高 $\epsilon$ Nd值花岗岩带的地质意义. *地质通报*, 2002, 21: 348-354]
- Yao W H, Li Z X, Li W X, et al. From Rodinia to Gondwana Land: A tale of detrital zircon provenance analyses from the southern Nanhua basin South China. *Am J Sci*, 2014, 314: 278-313
- Li X H, Li Z X, Li W X. Detrital zircon U-Pb age and Hf isotope constrains on the generation and reworking of Precambrian continental crust in the Cathaysia Block, South China: A synthesis. *Gondwana Res*, 2014, 25: 1202-1215
- Li Z X, Li X H, Wartho J A, et al. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions. *GSA Bull*, 2010, 122: 772-793



- 9 Li X H, Li W X, Li Z X, et al. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks. *Precam Res*, 2009, 174: 117–128
- 10 Zhao G C, Cawood P A. Precambrian geology of China. *Precambrian Res*, 2012, 222-223: 13–54
- 11 Ren J S. On the geotectonics of southern China (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 1990, 4: 275–289 [任纪舜. 论中国南部的大地构造. *地质学报*, 1990, 4: 275–289]
- 12 Shui T. The geotectonics evolution of the basement in southern China (in Chinese). *Bull Sci Technol*, 1987, 3: 32–35 [水涛. 中国东南边缘大陆古基底构造演化. *科技通报*, 1987, 3: 32–35]
- 13 Zhao G C, Cawood P A. Tectonothermal evolution of the Mayuan assemblage in the Cathaysia block: Implications for Neoproterozoic collision-related assembly of the South China Craton. *Am J Sci*, 1999, 299: 309–339
- 14 Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. *Precambrian Res*, 2008, 160: 179–210
- 15 Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G C. Introduction to tectonics of China. *Gondwana Res*, 2013, 23: 1189–1206
- 16 Cawood P A, Wang Y J, Xu Y J, et al. Locating South China in Rodinia and Gondwana: A fragment of Greater Indian Lithosphere? *Geology*, 2013, 41: 903–906
- 17 Du Y S, Collerson K D, Zhao J X, et al. Characteristics and petrogenesis of granulite enclaves in S-type granites in the junction of Guangdong and Guangxi provinces (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 1999, 15: 309–314 [杜杨松, Collerson K D, 赵建新, 等. 两广交界地区 S 型花岗岩中麻粒岩包体的特征和成因. *岩石学报*, 1999, 15: 309–314]
- 18 Wang Y J, Fan W M, Zhao G C, et al. Zircon U-Pb geochronology of gneissic rocks in the Yunkai massif and its implications on the Caledonian event in the South China Block. *Gondwana Res*, 2007, 12: 404–416
- 19 Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, et al. Kwangian crustal anatexis within the eastern South China Block: Geochemical, zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic fingerprints from the gneissoid granites of Wugong and Wuyi-Yunkai Domains. *Lithos*, 2011, 127: 239–260
- 20 Yu J H, Zhou X M, O'Reilly Y S, et al. The age and protolith of the basement granulite in the eastern Nanling: the zircon U-Th-Pb isotopes (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2005, 50: 1758–1767 [于津海, 周新民, Y.S.O'Reilly, 等. 南岭东段基底麻粒岩相变质岩的形成时代和原岩性质: 锆石的 U-Pb-Hf 同位素研究. *科学通报*, 2005, 50: 1758–1767]
- 21 Yu J H, Wang L J, Wei Z Y, et al. Phanerozoic metamorphic episodes and characteristics of Cathaysia block (in Chinese). *Geol J China Univ*, 2007, 13: 474–483 [于津海, 王丽娟, 魏震洋, 等. 华夏地块显生宙的变质作用期次和特征. *高校地质学报*, 2007, 13: 474–483]
- 22 Wang J G, Yu S Q, Hu Y H, et al. The discovery, petrology and geochronology of the retrograded eclogite in the Jiangshan-Shaoxing suture zone (in Chinese). *Geol Chin*, 2014, 41: 1356–1363 [汪建国, 余盛强, 胡艳华, 等. 江山-绍兴结合带榴闪岩的发现及岩石学、年代学特征. *中国地质*, 2014, 41: 1356–1363]
- 23 Shu L S, Yu J H, Jia D, et al. Early Paleozoic orogenic belt in the eastern segment of South China (in Chinese). *Geo Bull Chin*, 2008, 27: 1581–1593 [舒良树, 于津海, 贾东, 等. 华南东段早古生代造山带研究. *地质通报*, 2008, 27: 1581–1593]
- 24 Faure M, Shu L S, Wang B, et al. Intracontinental subduction: A possible mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China. *Terra Nova*, 2009, 21: 360–368
- 25 Shu L S. Predevonian tectonic evolution of South China: From Cathaysian block to caledonian period folded orogenic belt (in Chinese). *Geol J China Univ*, 2006, 12: 418–431 [舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带. *高校地质学报*, 2006, 12: 418–431]
- 26 Guo L Z, Shi Y S, Lu H F, et al. The pre-Devonian tectonic patterns and evolution of South China. *J Asian Earth Sci*, 1989, 3: 87–93
- 27 Hsü K J, Li J L, Chen H H, et al. Tectonics of South China: Key to understanding west Pacific geology. *Tectonophysics*, 1990, 183: 9–39
- 28 Ma R S. New Thought about the tectonic evolution of the South China: With discussion on several problems of the Cathaysian old land (in Chinese). *Geol J China Univ*, 2006, 12: 448–456 [马瑞士. 华南构造演化新思考——兼论“华夏古陆”说中的几个问题. *高校地质学报*, 2006, 12: 448–456]
- 29 Yu J H, Wang L J, O'Reilly S Y, Yu J, et al. A Paleoproterozoic orogeny recorded in a long-lived cratonic remnant (Wuyishan terrane), eastern Cathaysia block, China. *Precambrian Res*, 2009, 174: 347–363
- 30 Moller C. Decompressed eclogites in the Sveconorwegian (-Grenvillian) orogen of SW Sweden: Petrology and tectonic implications. *J Metamorph Geol*, 1998, 16: 641–656
- 31 Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. High-pressure granulites (retrograded eclogites) from the Hengshan complex, north China craton: Petrology and tectonic implications. *J Petrol*, 2001, 42: 1141–1170
- 32 Warren C J, Grujic D, Kellett D A, et al. Probing the depths of the India-Asia collision: U-Th-Pb monazite chronology of granulites from NW Bhutan. *Tectonics*, 2011, 30: 1–24

- 33 Djordje G, Warren C J, Joseph L W. Rapid synconvergent exhumation of Miocene-aged lower orogenic crust in the eastern Himalaya. *Lithosphere*, 2011, 3: 346–366
- 34 O'Brien P J, Rotzler J. High-pressure granulites: Formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics. *J Metamorph Geol*, 2003, 21: 3–20
- 35 Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geol Soc*, 1989, 42: 313–345
- 36 Lou Y X, Wei C J, Liu X C, et al. Metamorphic evolution of garnet amphibolite in the western Dabieshan eclogite belt, Central China: Evidence from petrography and phase equilibria modeling. *J Asian Earth Sci*, 2013, 63: 130–138
- 37 Liu J, Bohlen S R, Ernst W G. Stability of hydrous phases in subducting oceanic crust. *Earth Planet Sci Lett*, 1996, 143: 161–171
- 38 Wei C J, Su X L, Lou Y X, et al. A new interpretation of the conventional thermobarometry in eclogite: Evidence from the calculated PT pseudosections (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2009, 25: 2078–2088 [魏春景, 苏秀丽, 娄玉行, 等. 榴辉岩中传统地质温压计新解: 来自PT视剖面图的证据. *岩石学报*, 2009, 25: 2078–2088]
- 39 Wei C J, Clarke G L. Calculated phase equilibria for MORB compositions: Areappraisal of the metamorphic evolution of lawsonite eclogite. *J Metamorph Geol*, 2011, 29: 939–952
- 40 Wei C J, Qian J H, Tian Z L. Metamorphic evolution of medium-temperature ultra-high pressure (MT-UHP) eclogites from the South Dabie orogen, Central China: an insight from phase equilibria modelling. *J Metamorph Geol*, 2013, 31: 755–774
- 41 Leake B E, Woolley A R, Brich W D, et al. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. *Am Mineral*, 1997, 82: 1019–1037
- 42 Ravna E K. The garnet-clinopyroxene geothermometer—an updated calibration. *J Metamorph Geol*, 2000, 18: 211–219
- 43 Newton R C, Perkins D. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet -orthopyroxene (clinopyroxene)-plagioclase-quartz. *Am Mineral*, 1982, 67: 203–222
- 44 Ravna E K. Distribution of  $Fe^{2+}$  and Mg between coexisting garnet and hornblende in synthetic and natural systems: An empirical calibration of the garnet-hornblende Fe-Mg geothermometer. *Lithos*, 2000, 53: 265–277
- 45 Holland T, Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contrib Mineral Petrol*, 1994, 116: 433–447
- 46 Kohn M J, Spear F S. Two new barometers for garnet amphibolites with applications to southeastern Vermont. *Am Mineral*, 1990, 75: 89–96
- 47 Dale J, Holland T, Powell R. Hornblende-garnet-plagioclase thermobarometry: A natural assemblage calibration of the thermodynamics of hornblende. *Contrib Mineral Petrol*, 2000, 140: 353–362
- 48 Spear F S. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Washington DC: Mineralogical Society of America, 1993
- 49 Holdaway M J. Stability of andalusite and the aluminum silicate phase diagram. *Am J Sci*, 1971, 271: 97–131
- 50 Qian J H, Yang X Q, Liu L, et al. Zircon U-Pb dating, mineral inclusions, Lu-Hf isotopic data and their geological significance of garnet amphibolite from Songshugou, North Qinling (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2013, 29: 3087–3098 [钱加慧, 杨秀清, 刘良, 等. 北秦岭松树沟榴辉岩锆石 U-Pb 定年、矿物包裹体和 Lu-Hf 同位素特征及其地质意义. *岩石学报*, 2013, 29: 3087–3098]
- 51 Yin A, Nie S, Craig P. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan. *Tectonics*, 1998, 17: 1–27
- 52 Shaw R D, Zeitler P K, McDougall I, et al. The Palaeozoic history of an unusual intracratonic thrust belt in Central Australia based on  $^{40}Ar-^{39}Ar$ , K-Ar and fission track dating. *J Geol Soc Lond*, 1992, 149: 937–954
- 53 Berry R F, Holm O H, Steele D A. Chemical U-Th-Pb monazite dating and the Proterozoic history of King Island, southeast Australia. *Aust J Earth Sci*, 2005, 52: 461–471
- 54 Meert J G, Liebermann B S. The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran-Cambrian radiation. *Gondwana Res*, 2008, 14: 5–21
- 55 Nance R D, Murphy J B, Santosh M. The supercontinent cycle: A retrospective essay. *Gondwana Res*, 2014, 25: 4–29
- 56 Santosh M, Maruyama S, Sawaki Y, et al. The Cambrian explosion: Plumedriven birth of the second ecosystem on Earth. *Gondwana Res*, 2014, 25: 945–965

# Retrograde garnet amphibolite from eclogite of the Zhejiang Longyou area: New evidence of the Caledonian orogenic event in the Cathaysia block

CHEN XiangYan<sup>1,2</sup>, TONG LaiXi<sup>3</sup>, ZHANG ChuanLin<sup>2</sup>, ZHU QingBo<sup>2</sup> & LI YaNan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

<sup>2</sup> Nanjing Center of China Geological Survey, Nanjing 210016, China;

<sup>3</sup> Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Eclogites are commonly regarded as one of the key indicators of plate convergence and associated orogenesis. In this study we report the discovery of retrograde garnet amphibolite from eclogite of the Longyou area of Zhejiang Province. Detailed petrology reveals a three-stage metamorphic history based on mineral inclusions, reaction textures and pseudomorphs. Peak metamorphism (M1) is defined by high-Ca garnet cores and the presence of omphacite, as indicated by clinopyroxene + plagioclase symplectites. Symplectites of clinopyroxene + plagioclase that pseudomorph omphacite are indicative of the decompression stage (M2). Symplectites of hornblende + plagioclase and the presence of plagioclase coronas around garnet are indicative of formation during cooling (M3), under P-T conditions of  $P=0.68-0.73$  GPa and  $T=664-691^{\circ}\text{C}$ . As a result of the intense retrograde metamorphism, only precise P-T conditions of the third stage were determined through conventional thermobarometry while garnet compositional profiles reveal decompression process during its growth. Based on the petrographic textures, garnet compositional profiles and thermobarometry, a clockwise P-T path has been defined, consistent with the occurrence of an orogenic event. Therefore, we suggest that the retrograde garnet amphibolite from eclogite of the Longyou area formed during the the Caledonian collisional orogenic event between the South China Block (amalgamation between Yangtze and Cathaysia in early Neoproterozoic) and an unknown block in the process of these blocks assemblage to eastern Gondwana.

**garnet amphibolite, retrograde eclogite, P-T path, Cathaysian block, collisional orogenic belt**

doi: 10.1360/N972015-00094

## 补充材料

表 S1 石榴子石探针分析结果

表 S2 角闪石探针分析结果

表 S3 单斜辉石探针分析结果

表 S4 斜长石探针分析结果

本文以上补充材料见网络版 [csb.scichina.com](http://csb.scichina.com). 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

表 S1 石榴子石探针分析结果

Grt	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
SiO <sub>2</sub>	37.46	36.95	37.32	37.12	37.41	38.59	37.39	37.35	37.39	37.25	37.23	37.27	37.40	37.12	37.41	37.36
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.01	0.05	0.03	0.02	0.04	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.06	0.03	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.85	21.61	21.58	21.96	21.88	21.43	21.61	21.53	21.83	21.55	21.76	21.76	21.62	21.48	21.47	21.45
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02
FeO	29.20	29.48	28.25	27.24	27.50	27.82	28.15	28.53	28.61	28.69	28.63	27.88	28.52	28.18	28.19	28.18
MnO	0.75	0.84	0.91	0.91	0.86	0.90	0.90	0.94	0.99	0.94	0.94	0.91	0.99	0.99	0.91	0.95
MgO	3.20	3.11	3.13	2.87	2.99	3.17	3.14	3.19	3.30	3.23	3.24	3.19	3.13	3.26	3.24	3.18
CaO	7.72	7.95	8.32	9.68	9.03	8.21	8.08	7.99	8.03	7.71	8.04	8.66	7.88	8.10	8.41	8.51
Na <sub>2</sub> O	0.03	0.08	0.06	0.06	0.06	0.01	0.04	0.07	0.03	0.05	0.05	0.01	0.01	0.03	0.00	0.02
Total	100.27	100.07	99.66	99.89	99.78	100.17	99.32	99.68	100.23	99.43	99.96	99.70	99.58	99.27	99.72	99.76
O	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Si	2.96	2.92	2.96	2.93	2.96	3.04	2.97	2.96	2.95	2.96	2.94	2.95	2.97	2.96	2.97	2.96
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
AlIV	0.04	0.08	0.04	0.07	0.04	0.00	0.03	0.04	0.05	0.04	0.06	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04
AlVI	1.99	1.94	1.98	1.97	2.00	1.99	2.00	1.97	1.98	1.98	1.97	1.98	2.00	1.97	1.97	1.96
Fe <sup>3+</sup>	0.05	0.14	0.06	0.10	0.05	0.00	0.03	0.06	0.07	0.06	0.08	0.06	0.03	0.07	0.05	0.07
Fe <sup>2+</sup>	1.87	1.81	1.81	1.70	1.77	1.84	1.85	1.83	1.81	1.85	1.81	1.78	1.87	1.81	1.82	1.80
Mg	0.38	0.37	0.37	0.34	0.35	0.37	0.37	0.38	0.39	0.38	0.38	0.38	0.37	0.39	0.38	0.38
Mn	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06
Ca	0.65	0.67	0.71	0.82	0.77	0.69	0.69	0.68	0.68	0.66	0.68	0.74	0.67	0.69	0.71	0.72
Na	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Sum_cat	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Alm	63.46	62.24	61.42	58.31	60.13	61.96	62.22	62.03	61.55	62.64	61.65	62.85	64.25	53.52	52.70	52.76
Grs	19.33	15.86	20.80	23.09	23.59	23.43	21.90	19.67	19.27	19.25	18.84	25.67	25.95	24.08	25.72	25.20
Prp	12.75	12.63	12.54	11.57	11.96	12.59	12.54	12.79	13.17	12.97	13.01	15.15	15.30	15.71	15.64	15.27
Sps	1.70	1.94	2.07	2.08	1.95	2.03	2.04	2.14	2.25	2.14	2.14	2.46	2.75	2.71	2.50	2.59

表 S2 角闪石探针分析结果

type 1	12-0-58	12-2-016	12-0-54	12-2-004	12-2-027	12-4-031	12-2-007	12-4-003	12-0-18	12-4-007	12-2-024	12-0-44	12-4-022	12-4-005	12-4-70
SiO <sub>2</sub>	41.79	40.10	41.97	42.04	42.45	43.01	43.31	43.73	42.76	43.62	43.52	43.63	44.39	43.55	44.61
TiO <sub>2</sub>	1.10	1.05	1.38	1.26	1.39	1.19	1.28	1.16	1.16	1.40	1.31	1.11	0.41	0.81	1.17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.80	12.52	13.44	12.73	11.72	11.44	11.38	12.11	11.38	11.07	10.88	11.06	11.14	10.40	10.81
FeO	18.76	17.08	18.50	18.30	18.56	18.69	17.11	17.91	18.26	18.61	17.55	18.52	19.18	19.10	18.72
MnO	0.08	0.06	0.10	0.15	0.11	0.09	0.09	0.10	0.11	0.10	0.05	0.09	0.13	0.12	0.11
MgO	7.82	7.47	8.09	8.78	8.62	8.92	9.80	8.93	8.63	9.09	9.39	8.82	9.07	8.84	9.11
CaO	12.34	11.24	12.23	11.74	12.12	12.02	11.74	12.22	12.02	12.04	12.19	12.55	11.78	11.50	12.29
Na <sub>2</sub> O	1.32	1.73	1.19	1.57	1.39	1.44	1.49	1.26	1.09	1.50	1.21	1.11	1.31	1.42	1.17
K <sub>2</sub> O	1.12	0.99	1.22	0.73	1.11	0.65	0.92	0.64	1.11	0.67	0.88	0.97	0.50	0.61	0.60
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	1.93	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05
Cl	0.04	0.28	0.04	0.04	0.07	0.03	0.04	0.02	0.13	0.04	0.05	0.05	0.04	0.10	0.03
Total	98.15	94.44	98.15	97.35	97.55	97.57	97.20	98.17	96.66	98.24	97.12	97.89	97.99	96.54	98.73
O	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00
TSi	6.30	6.31	6.31	6.32	6.43	6.47	6.50	6.51	6.52	6.52	6.58	6.58	6.60	6.61	6.62
TAI	1.70	1.69	1.69	1.68	1.57	1.53	1.50	1.49	1.48	1.48	1.42	1.42	1.40	1.39	1.38
CAI	0.75	0.63	0.69	0.57	0.53	0.50	0.51	0.64	0.56	0.48	0.51	0.54	0.55	0.46	0.51
CCr	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
CFe <sup>3+</sup>	0.12	0.06	0.17	0.45	0.16	0.34	0.32	0.20	0.19	0.27	0.14	0.06	0.55	0.47	0.24
CTi	0.13	0.12	0.16	0.14	0.16	0.14	0.15	0.13	0.13	0.16	0.15	0.13	0.05	0.09	0.13
CMg	1.76	1.75	1.81	1.97	1.95	2.00	2.19	1.98	1.96	2.03	2.12	1.98	2.01	2.00	2.02
CFe <sup>2+</sup>	2.24	2.19	2.16	1.85	2.19	2.02	1.82	2.03	2.14	2.06	2.07	2.28	1.84	1.96	2.08
CMn	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
BCa	1.99	1.90	1.97	1.89	1.97	1.94	1.89	1.95	1.96	1.93	1.97	2.00	1.88	1.87	1.95
BNa	0.01	0.11	0.03	0.11	0.03	0.06	0.11	0.05	0.04	0.07	0.03	0.00	0.13	0.13	0.05
ANa	0.38	0.42	0.32	0.35	0.38	0.36	0.32	0.31	0.29	0.36	0.33	0.33	0.25	0.29	0.29
AK	0.22	0.20	0.23	0.14	0.21	0.13	0.18	0.12	0.22	0.13	0.17	0.19	0.09	0.12	0.11
Sum_A	0.60	0.62	0.55	0.49	0.59	0.48	0.50	0.43	0.50	0.49	0.50	0.54	0.35	0.41	0.40
Sum_cat	15.60	15.62	15.55	15.49	15.59	15.48	15.50	15.43	15.50	15.49	15.50	15.54	15.35	15.41	15.40

续表 S2

type 1	12-2-011	12-4-67	12-1-002	12-4-023	12-4-66	12-4-012	12-4-034	12-4-006	12-1-021	12-2-32	12-1-45	12-1-48	12-1-44	12-4-041	12-4-51
SiO <sub>2</sub>	44.68	44.73	44.62	45.25	45.23	45.27	44.86	47.35	41.82	41.64	42.46	42.85	42.84	43.11	43.15
TiO <sub>2</sub>	0.81	1.35	0.39	0.64	0.36	0.41	0.58	0.32	1.13	1.46	1.78	1.15	1.60	1.25	1.06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.53	9.97	10.04	9.69	10.28	10.12	9.85	7.48	12.37	11.96	11.74	12.14	11.69	11.88	11.92
FeO	17.45	17.60	18.57	18.14	19.61	19.82	17.55	18.52	18.79	18.49	18.70	18.84	18.35	18.32	19.93
MnO	0.14	0.13	0.07	0.13	0.15	0.15	0.07	0.11	0.07	0.05	0.08	0.12	0.10	0.03	0.04
MgO	10.11	10.06	9.54	10.25	8.93	8.94	9.78	10.50	8.15	8.20	8.34	8.26	8.62	8.78	7.76
CaO	11.54	12.29	12.05	11.92	12.02	12.11	12.12	12.10	12.14	12.25	12.28	12.20	12.34	12.20	12.35
Na <sub>2</sub> O	1.40	1.28	1.34	1.18	1.07	1.20	1.13	0.80	1.65	1.46	1.70	1.79	1.85	1.55	1.46
K <sub>2</sub> O	0.62	0.58	0.67	0.52	0.49	0.49	0.51	0.32	0.85	1.13	0.99	0.91	1.13	0.73	0.60
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.06	0.00	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.05
Total	97.35	98.10	97.34	97.77	98.25	98.57	96.64	97.58	97.00	96.78	98.11	98.31	98.61	97.97	98.37
O	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00
TSi	6.64	6.66	6.70	6.71	6.72	6.72	6.76	7.02	6.38	6.40	6.44	6.46	6.47	6.48	6.50
TAI	1.36	1.34	1.30	1.29	1.28	1.28	1.24	0.98	1.62	1.60	1.57	1.54	1.53	1.52	1.50
CAI	0.48	0.40	0.48	0.40	0.52	0.50	0.51	0.33	0.61	0.57	0.53	0.62	0.55	0.58	0.62
CCr	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
CFe <sup>3+</sup>	0.50	0.23	0.33	0.53	0.44	0.40	0.24	0.44	0.13	0.00	0.00	0.02	0.00	0.13	0.11
CTi	0.09	0.15	0.04	0.07	0.04	0.05	0.07	0.04	0.13	0.17	0.20	0.13	0.18	0.14	0.12
CMg	2.24	2.23	2.14	2.27	1.98	1.98	2.20	2.32	1.85	1.88	1.89	1.86	1.94	1.97	1.74
CFe <sup>2+</sup>	1.67	1.96	2.00	1.72	1.99	2.06	1.97	1.86	2.27	2.38	2.37	2.36	2.32	2.18	2.40
CMn	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01
BCa	1.84	1.96	1.94	1.89	1.91	1.93	1.96	1.92	1.99	2.00	1.99	1.97	2.00	1.97	1.99
BNa	0.16	0.04	0.06	0.11	0.09	0.07	0.04	0.08	0.02	0.00	0.01	0.03	0.00	0.03	0.01
ANa	0.24	0.33	0.33	0.23	0.22	0.27	0.29	0.15	0.47	0.44	0.49	0.49	0.54	0.42	0.42
AK	0.12	0.11	0.13	0.10	0.09	0.09	0.10	0.06	0.17	0.22	0.19	0.18	0.22	0.14	0.12
Sum_A	0.36	0.44	0.46	0.33	0.31	0.36	0.39	0.21	0.64	0.67	0.69	0.67	0.76	0.56	0.54
Sum_cat	15.36	15.44	15.46	15.33	15.31	15.36	15.39	15.21	15.64	15.67	15.69	15.67	15.76	15.56	15.54

续表 S2

type 1	12-4-74	12-1-34	12-1-36	12-1-61	12-4-026	12-1-56	12-1-018	12-1-032	12-0-46	12-4-035	12-4-55	12-1-60	12-1-004	12-4-027
SiO <sub>2</sub>	43.76	43.82	43.40	43.06	44.21	43.41	44.38	45.26	44.86	45.32	45.74	45.47	45.57	46.07
TiO <sub>2</sub>	1.19	0.83	1.47	1.52	0.73	1.01	1.16	0.56	1.08	1.04	0.76	0.85	0.32	0.86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.50	11.10	11.69	10.98	11.19	11.07	10.47	9.77	10.06	9.60	9.36	8.89	8.56	8.50
FeO	19.08	19.41	18.13	17.50	18.38	17.73	17.24	18.98	17.65	17.81	19.82	17.06	19.33	16.13
MnO	0.09	0.07	0.04	0.08	0.08	0.06	0.05	0.09	0.05	0.10	0.06	0.07	0.11	0.05
MgO	8.88	8.94	8.55	9.16	9.37	9.08	9.61	9.68	9.61	9.87	8.57	10.24	9.02	10.24
CaO	12.08	11.99	12.03	12.22	12.26	12.22	12.43	12.21	12.63	12.59	12.51	12.98	12.37	14.20
Na <sub>2</sub> O	1.37	1.38	1.58	1.51	1.32	1.59	1.33	1.26	0.81	1.61	0.90	1.21	1.12	1.09
K <sub>2</sub> O	0.65	0.77	0.87	0.85	0.48	0.74	0.76	0.58	0.81	0.38	0.48	0.50	0.56	0.46
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.05	0.00	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.02
Cl	0.05	0.04	0.12	0.03	0.04	0.06	0.03	0.03	0.05	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04
Total	98.68	98.34	97.90	96.91	98.06	96.97	97.51	98.41	97.60	98.40	98.37	97.30	97.01	97.67
O	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00
TSi	6.50	6.54	6.54	6.55	6.58	6.59	6.68	6.72	6.73	6.76	6.85	6.86	6.92	7.00
TAI	1.50	1.46	1.46	1.45	1.42	1.41	1.32	1.28	1.27	1.24	1.15	1.14	1.08	1.00
CAI	0.52	0.49	0.62	0.51	0.54	0.57	0.53	0.43	0.51	0.45	0.51	0.44	0.45	0.52
CCr	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	0.00
CFe <sup>3+</sup>	0.35	0.41	0.00	0.00	0.33	0.02	0.00	0.37	0.07	0.00	0.10	0.00	0.09	0.00
CTi	0.13	0.09	0.17	0.17	0.08	0.12	0.13	0.06	0.12	0.12	0.09	0.10	0.04	0.10
CMg	1.97	1.99	1.92	2.08	2.08	2.06	2.16	2.14	2.15	2.20	1.91	2.30	2.04	2.32
CFe <sup>2+</sup>	2.02	2.01	2.29	2.23	1.96	2.23	2.17	1.99	2.15	2.22	2.39	2.15	2.36	2.05
CMn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
BCa	1.92	1.92	1.94	1.99	1.96	1.99	2.00	1.94	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
BNa	0.08	0.08	0.06	0.01	0.05	0.01	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ANa	0.32	0.32	0.40	0.44	0.34	0.46	0.39	0.30	0.24	0.46	0.26	0.36	0.33	0.32
AK	0.12	0.15	0.17	0.16	0.09	0.14	0.15	0.11	0.15	0.07	0.09	0.10	0.11	0.09
Sum_A	0.44	0.46	0.57	0.60	0.43	0.60	0.54	0.41	0.42	0.55	0.36	0.55	0.45	0.72
Sum_cat	15.44	15.46	15.57	15.60	15.43	15.60	15.54	15.41	15.42	15.55	15.36	15.55	15.45	15.72

续表 S2

type 1	12-0-48	12-2-31	12-4-029	type 2	12-0-2	12-0-3	12-0-11	12-0-12	12-0-23	12-0-33	12-0-35	12-0-36	12-0-40	12-0-42	12-2-037
SiO <sub>2</sub>	46.65	45.76	48.40	SiO <sub>2</sub>	41.76	41.75	42.46	42.91	42.31	41.30	40.96	42.69	41.71	42.07	42.43
TiO <sub>2</sub>	0.94	0.84	0.27	TiO <sub>2</sub>	1.45	1.37	1.22	1.15	1.49	1.03	1.30	1.16	1.33	0.96	1.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.10	6.82	6.29	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.56	13.09	12.90	12.98	12.79	13.68	14.05	12.76	13.44	13.04	12.14
FeO	17.84	17.02	17.10	FeO	18.28	18.05	18.81	17.34	18.30	19.47	19.42	18.36	19.44	18.79	19.12
MnO	0.09	0.07	0.03	MnO	0.08	0.10	0.06	0.11	0.09	0.05	0.08	0.06	0.14	0.09	0.24
MgO	9.72	10.47	11.53	MgO	8.10	8.37	8.25	8.54	8.58	7.37	7.36	8.36	7.30	7.70	8.13
CaO	12.89	12.65	12.23	CaO	12.19	12.22	12.08	12.17	12.16	12.12	12.02	12.05	12.12	12.20	12.06
Na <sub>2</sub> O	0.67	1.13	0.80	Na <sub>2</sub> O	1.27	1.14	1.05	1.41	1.42	1.24	1.25	1.13	1.28	1.35	1.34
K <sub>2</sub> O	0.65	0.53	0.27	K <sub>2</sub> O	1.22	1.21	1.09	1.15	1.15	1.19	1.07	1.04	1.04	1.05	1.05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02
Cl	0.04	0.06	0.03	Cl	0.06	0.06	0.03	0.07	0.10	0.04	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04
Total	97.59	95.42	97.03	Total	97.99	97.35	97.93	97.82	98.38	97.50	97.55	97.68	97.84	97.30	97.92
O	23.00	23.00	23.00	O	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00
TSi	7.02	7.06	7.19	TSi	6.29	6.32	6.37	6.46	6.35	6.28	6.21	6.42	6.32	6.40	6.41
TAI	0.98	0.95	0.81	TAI	1.71	1.68	1.63	1.54	1.65	1.72	1.79	1.58	1.68	1.60	1.59
CAI	0.46	0.29	0.29	CAI	0.70	0.66	0.65	0.76	0.61	0.73	0.72	0.68	0.72	0.74	0.57
CCr	0.00	0.00	0.00	CCr	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CFe <sup>3+</sup>	0.00	0.00	0.29	CFe <sup>3+</sup>	0.14	0.17	0.31	0.00	0.17	0.21	0.30	0.23	0.15	0.06	0.22
CTi	0.11	0.10	0.03	CTi	0.16	0.16	0.14	0.13	0.17	0.12	0.15	0.13	0.15	0.11	0.15
CMg	2.18	2.41	2.55	CMg	1.82	1.89	1.85	1.92	1.92	1.67	1.66	1.87	1.65	1.75	1.83
CFe <sup>2+</sup>	2.25	2.19	1.83	CFe <sup>2+</sup>	2.17	2.11	2.05	2.18	2.13	2.27	2.16	2.08	2.32	2.33	2.20
CMn	0.01	0.01	0.00	CMn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03
BCa	2.00	2.00	1.95	BCa	1.97	1.98	1.94	1.96	1.95	1.97	1.95	1.94	1.97	1.99	1.95
BNa	0.00	0.00	0.06	BNa	0.03	0.02	0.06	0.04	0.05	0.03	0.05	0.06	0.03	0.01	0.05
ANa	0.20	0.34	0.18	ANa	0.34	0.32	0.25	0.37	0.37	0.34	0.32	0.27	0.34	0.39	0.35
AK	0.13	0.10	0.05	AK	0.23	0.24	0.21	0.22	0.22	0.23	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20
Sum_A	0.40	0.53	0.23	Sum_A	0.57	0.55	0.45	0.60	0.59	0.57	0.53	0.47	0.54	0.59	0.55
Sum_cat	15.40	15.53	15.23	Sum_cat	15.57	15.55	15.45	15.60	15.59	15.57	15.53	15.47	15.54	15.59	15.55





表 S4 斜长石探针分析结果

Pl	Phase1-1	Phase1-1	Phase1-1	Phase1-1	Phase1-1	Phase1-1	Phase1-1	Phase1-1	Phase1-1	Phase1-1	Phase1-1	Phase1-1	Phase1-2	Phase1-2	Phase1-2	Phase1-2	Phase1-2	Phase1-2
SiO <sub>2</sub>	57.41	56.65	55.42	56.24	57.23	57.42	57.08	56.99	55.90	46.50	45.90	45.60	44.82	65.59				
TiO <sub>2</sub>	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.05	0.02	0.00	0.05	0.00				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.32	26.16	27.08	26.75	26.10	26.64	26.18	26.17	26.82	33.88	33.75	34.38	34.80	22.46				
FeO	0.16	0.06	0.14	0.20	0.15	0.26	0.22	0.27	0.12	0.20	0.20	0.16	0.36	0.17				
MnO	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00	0.03	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01				
MgO	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				
CaO	8.87	8.75	9.97	9.53	8.44	9.09	8.69	8.38	9.84	18.11	17.93	18.81	19.09	2.30				
Na <sub>2</sub> O	7.12	7.44	6.58	6.62	7.28	7.00	7.17	6.90	6.44	2.07	1.74	1.58	1.29	10.51				
K <sub>2</sub> O	0.26	0.26	0.15	0.14	0.26	0.17	0.16	0.16	0.15	0.10	0.11	0.08	0.06	0.10				
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.01				
Cl	0.05	0.05	0.03	0.03	0.05	0.02	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.01	0.02	0.03				
CoO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.00	0.01	0.03	0.04	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Total	101.24	99.40	99.36	99.56	99.71	100.48	99.92	99.06	100.50	100.98	99.71	100.60	100.48	101.16				
O	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00				
Si	10.21	10.28	10.08	10.18	10.26	10.34	10.35	10.22	10.11	8.52	8.51	8.39	8.28	11.42				
Al	5.72	5.59	5.80	5.70	5.62	5.55	5.59	5.66	5.77	7.31	7.37	7.45	7.57	4.61				
Ti	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00				
Fe <sup>2+</sup>	0.02	0.01	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.03				
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00				
Mg	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				
Ca	1.69	1.70	1.94	1.85	1.75	1.68	1.63	1.89	1.94	3.56	3.56	3.71	3.78	0.43				
Na	2.45	2.62	2.32	2.33	2.43	2.50	2.42	2.24	2.23	0.73	0.63	0.57	0.46	3.55				
K	0.06	0.06	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02				
Cations	20.17	20.25	20.19	20.13	20.14	20.14	20.07	20.07	20.11	20.18	20.12	20.16	20.16	20.05				
Ab	58.40	59.80	54.00	55.30	57.70	59.40	59.30	53.80	53.10	17.00	14.80	13.20	10.90	88.70				
An	40.20	38.80	45.20	44.00	41.40	39.80	39.80	45.40	46.10	82.40	84.50	86.40	88.80	10.70				
Or	1.40	1.40	0.80	0.80	0.90	0.90	0.90	0.80	0.80	0.60	0.60	0.40	0.30	0.60				

