

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.267>



华南陆块北缘大陆裂断带高温低压变质作用

贺强, 郑永飞

中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026

摘要: 高温低压变质岩的形成要求高的热梯度($>30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$), 所对应的构造环境一直受到地质学界的关注. 本文总结了我们对华南陆块北缘新元古代 Rodinia 超大陆裂解(breakup)时期形成的变质花岗岩和变质玄武岩所进行的岩石学和地球化学研究成果, 强调大陆裂断(rift)带是形成高温低压变质岩最可能的构造环境. 高温低压变质作用主要记录在含铝硅酸盐矿物的变质花岗岩中, 其中所含的红柱石和夕线石为变质成因, 由白云母脱水反应产生. 根据含铝硅酸盐矿物的峰期矿物组合和视剖面计算, 得到变质温压条件为 $560\sim 660\text{ }^{\circ}\text{C}/1.0\sim 3.5\text{ kbar}$. 变质红柱石具有非常负的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 并且与岩浆锆石处于氧同位素不平衡状态, 进一步证明它是岩浆结晶后变质作用的产物. 变质榴石 U-Pb 定年得到高温低压变质作用的年龄为 $751\pm 11\text{ Ma}$, 与 Rodinia 超大陆裂解峰期年龄一致. 变质玄武岩显示岛弧型微量元素分布特征, 指示其源区为受俯冲大洋地壳来源流体交代的地幔楔, 因此地幔源区形成于格林威尔期 Rodinia 超大陆聚合过程中. 由此可见, 导致超大陆裂解的大陆裂断是在古俯冲带基础上发育的. 通过对比形成变质峰期矿物组合所需的热流值和变质花岗岩中产热元素提供的热流值, 得知大陆裂断带确实存在来自软流圈地幔的异常高热流, 这使得超大陆裂解过程可以发育高温低压变质作用.

关键词: 大陆裂断; 超大陆裂解; 高温低压变质; 高热梯度; 铝硅酸盐矿物; 岩石学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2019)12-4186-09

收稿日期: 2019-09-24

High-Temperature/Low-Pressure Metamorphism in a Continental Rift in the Northern Margin of the South China Block

He Qiang, Zheng Yongfei

CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: The formation of high-temperature (HT)/low-pressure (LP) metamorphic rocks requires high thermal gradients of $>30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$. It is intriguing which tectonic setting is responsible for such geological processes. This paper presents a summary of our petrological and geochemical studies on metagranite and metabasalt from the northern margin of the South China block, which were formed during breakup of Rodinia supercontinent in the middle Neoproterozoic. The results demonstrate that continental rifts are the most plausible setting for the production of HT/LP metamorphic rocks. The HT/LP metamorphism is mainly recorded in aluminosilicates-bearing metagranites, in which metamorphic andalusite and sillimanite were produced by muscovite dehydration reaction. Metamorphic P - T conditions of $1.0\text{--}3.5\text{ kbar}$ and $560\text{--}660\text{ }^{\circ}\text{C}$ were obtained from the petrology of aluminosilicates-bearing peak mineral assemblages in combination with pseudosection calculations. The metamorphic andalusite shows very negative $\delta^{18}\text{O}$ values in O isotope disequilibrium with magmatic zircon, further demonstrating that it is the metamorphic product after magma crystallization. The U-Pb dating of metamorphic titanite yields concordant ages of $751\pm 11\text{ Ma}$ for the HT/LP meta-

基金项目: 科技部“973”计划项目(No. 2015CB856102).

作者简介: 贺强(1988-), 男, 博士后, 地球化学专业, 主要从事变质岩石学研究. ORCID: 0000-0002-3348-5329. E-mail: heq7224@mail.ustc.edu.cn

引用格式: 贺强, 郑永飞, 2019. 华南陆块北缘大陆裂断带高温低压变质作用. 地球科学, 44(12):4186-4194.

morphism, consistent with the peak age of the Rodinia breakup. The metabasalt shows island arc basalts-like trace element distribution patterns, indicating that its source was generated by metasomatic reaction of the mantle wedge peridotite with fluids derived from the subducting oceanic crust. Therefore, the mantle source was formed during the Grenvillian assembly of Rodinia supercontinent. In this regard, the continental rifting that resulted in the supercontinental breakup was developed in the former subduction zone. By comparing heat flow required to form the metamorphic peak mineral assemblages with that provided by heat producing elements in the metagranites, it appears that anomalously high heat flow was indeed delivered from the asthenospheric mantle to the continental rift, leading to the HT/LP metamorphism during the Rodinia breakup.

Key words: continental rift; supercontinent breakup; high-temperature/low-pressure metamorphism; high thermal gradients; aluminosilicate minerals; petrology.

0 引言

大陆地壳演化与岩石圈构造体制转换及其对应的压力-温度(P - T)条件改变密切相关. 变质岩中常常保存有完好的峰期矿物组合, 直接记录了变质 P - T 条件. 在这种情况下, 可以根据变质岩峰期 P - T 信息来探究其形成的构造背景(Brown, 2006; Zheng and Chen, 2017). 相对于变质 P - T 条件的绝对值, 变质热梯度(dT/dP)更能反映变质作用发生时的构造背景(Brown, 2006). 根据变质热梯度, 变质相可分为三个系列, 即阿尔卑斯式相系列、巴罗式相系列和巴肯式相系列(Zheng and Chen, 2017), 其中, 阿尔卑斯式相系列和巴肯式相系列分别对应于两个极端的变质热梯度(图 1). 阿尔卑斯式相系列又称高压低温变质相系列, 主要包括蓝片岩相和榴辉岩相, 对应的热梯度通常为 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 指示冷俯冲构造环境(Zheng and Chen, 2016). 巴肯式相系列又称高温低压变质相系列, 主要包括角闪岩相和麻粒岩相, 对应的热梯度通常为 $30\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 指示热裂断(rifting)构造环境(Zheng and Chen, 2017).

高温低压变质作用最初是用 P - T 的绝对值定义的, 它发生的温度超过 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, 压力低于铝硅酸盐矿物(红柱石、夕线石和蓝晶石)的三相点(de Yoreo *et al.*, 1991). 典型的角闪岩相过铝质高温低压变质岩中通常会出现红柱石, 并且进变质反应产物的矿物组合从红柱石稳定域向夕线石稳定域转变, 在 $>750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温条件下变质成麻粒岩. 在相同的高热梯度条件下, 高温低压变质产物还有 $>900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的超高温麻粒岩(Zheng and Chen, 2017), 因此这个高温低压变质产物与巴肯式相系列相对应. 不过, 红柱石和夕线石是研究角闪岩相高温低压变质岩最重要的特征矿物. 对于麻粒岩相变质岩, 夕线石可以由蓝晶石在降压升温条件下发生同质多像转变产生, 指示了从巴罗式相系列向巴肯式相系列的

转变.

对于高温低压变质岩的成因, 目前提出的构造机制主要包括:(1)大陆裂断(rift)作用, 这个过程可以产生区域性高热梯度(Wickham and Oxburgh, 1985; Zheng and Chen, 2017; He *et al.*, 2018);(2)大陆碰撞造山带大规模花岗质岩浆作用, 可以为地壳变质提供热量(Lux *et al.*, 1986);(3)大陆边缘大规模弧岩浆作用及流体活动, 可以为地壳变质提供热量(Sisson and Hollister, 1988);(4)上地壳岩石中异常高的产热元素, 可以提供放射性热引发变质作用(McLaren *et al.*, 1999). 综上所述, 控制高温低压变质作用的关键因素是高热量的来源(Clark *et al.*, 2011; Zheng and Chen, 2017), 它们与岩浆作用之间的关系可以归纳为以下 3 类:(1)并列关系, 都是大陆裂断带高热流的表现, 本质上是岩石圈伸展减薄导致软流圈地幔向岩石圈地壳热量输送提高的结果;(2)因果关系, 大量岩浆侵位提供足够的热量;(3)没有直接联系, 变质作用的热源来自岩石自身的产热元素.

就热量供应而言, 在伸展构造带, 例如洋中脊、弧后裂谷(rift-valley)和大陆裂断带, 都很容易达到高温低压变质作用所需要的高热梯度(Zheng and Chen, 2017). 海底扩张可形成高于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的高热梯度, 不仅适合产生洋中脊岩浆作用, 也适合发生高温低压变质作用(Manning *et al.*, 1996; Nicolas, 2003; Bosch, 2004). 记录高热梯度的高温-超高温麻粒岩广泛出现在古大陆边缘, 不少研究将其与弧后裂谷相联系(Collins, 2002; Pownall *et al.*, 2014). 在大陆裂断带, 幔源玄武质岩浆侵位、大量花岗质岩浆活动以及岩石圈热边界层上升都可以产生 $>30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的高热梯度(Lux *et al.*, 1986; Sandiford and Powell, 1986; Platt and England, 1994; Zheng and Chen, 2017). 因此, 大陆裂断带是发生高温低压变质作用的合适场所(Wickham and Oxburgh, 1985;

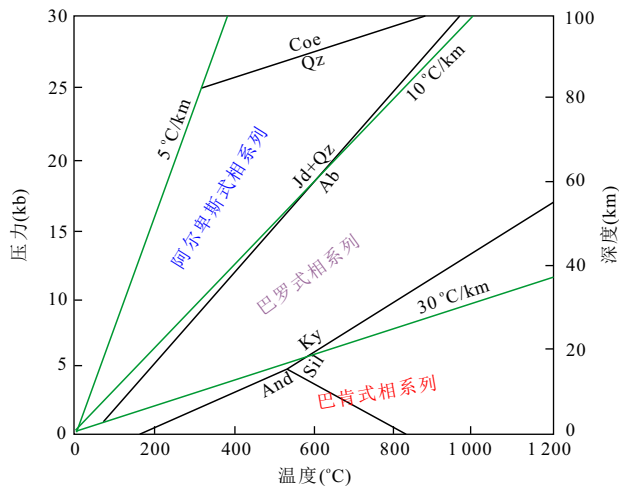


图1 汇聚板块边缘区域变质相系列与变质热梯度关系相图
Fig.1 Phase diagram for regional metamorphic rocks in three facies series at different thermal gradients
修改自 Zheng and Chen (2017)

Zheng and Chen, 2017). 但是, 前人研究的高温低压变质岩主要出露在陆内造山带, 缺乏超大陆裂解 (breakup) 的地质学证据 (Brown, 1993; Bucher and Grapes, 2011), 无法阐明高温低压变质作用与大陆裂断的关系. 因此, 在新元古代中期成功裂解的华南陆块北缘研究高温低压变质岩, 对阐明巴肯式变质相系列在大陆裂断带形成的构造机制具有非常重要的意义.

1 华南陆块北缘

华南陆块在新元古代中期 (780~740 Ma) 沿着现在的北缘从 Rodinia 超大陆裂解出去, 与其他大陆陆块发生分离, 如澳大利亚和印度 (Li, 2003; Li *et al.*, 2008). 因此, 在 Rodinia 超大陆裂解期间, 华南陆块北缘是大陆裂断构造环境. 证据主要来自两个方面: (1) 大别—苏鲁造山带低温高压变质岩的原岩为双峰式火成岩 (Zheng *et al.*, 2004, 2006), 岩浆锆石 U-Pb 年龄与 Rodinia 超大陆裂解的时间 (Li, 2003; Li *et al.*, 2008) 一致; (2) 这些变质岩表现出显著的 ^{18}O 亏损特征 (Zheng *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2007), 范围超过 20 000 km² (Zheng *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2009).

华南陆块北缘的东端部分在三叠纪时期向华北陆块之下俯冲并与之碰撞形成大别—苏鲁造山带 (Ernst *et al.*, 2007; Zheng *et al.*, 2013). 在此期间, 一部分地壳物质在华南陆块俯冲到 <10 km 的浅部深度时就被刮削下来, 形成增生楔, 它仅经历了绿

片岩相变质作用和不同程度的变形作用 (Zheng *et al.*, 2005). 北淮阳地区就是这样一个低级变质单元 (Hacker *et al.*, 1998; Zheng *et al.*, 2005), 它最大程度地保存了新元古代中期超大陆裂解过程形成的岩相结构和矿物成分特征, 是研究大陆裂断带高温低压变质作用的理想对象.

2 北淮阳地区高温低压变质岩

在大别造山带北淮阳地区, 大陆裂断带高温低压变质作用主要记录在含铝硅酸盐矿物 (红柱石和夕线石) 的变质花岗岩中 (He *et al.*, 2018).

2.1 岩相学和矿物成分

在含铝硅酸盐矿物的变质花岗岩中, 白云母呈残斑状, 具有不规则的蚕食状外形 (图 2a 和 2b), 是发生脱水分解的典型特征. 他形红柱石和他形钾长石填充在白云母发生分解的区域 (图 2a). 一些情况下, 还观察到针状夕线石切穿白云母生长 (图 2b). 尽管红柱石、夕线石和钾长石将白云母分隔成不同的部分, 它们具有近乎相同的解理方向, 也指示发生分解的反应物是大颗粒的白云母. 这与经典的白云母脱水反应相符, 即白云母 + 石英 → 钾长石 + 红柱石 / 夕线石 + H₂O (Spear and Kohn, 1996). 此外, 短柱状红柱石与短柱状夕线石密切共生, 并且夕线石围绕红柱石生长, 显示向内侵蚀的不规则边界 (图 2c), 说明变质温压条件从红柱石稳定域转变到夕线石稳定域. 在白云母残留较少的情况下, 红柱石和夕线石的颗粒较大 (图 2d). 以上岩相结构都说明红柱石为变质成因, 由白云母脱水反应形成; 夕线石也为变质成因, 或由白云母脱水反应形成, 或由红柱石转变形成. 红柱石和夕线石的共生非常重要, 它既可以限定变质压力不超过 4 kbar, 也可以说明变质峰期的 *P-T* 条件在红柱石—夕线石转变域附近.

红柱石主要由 SiO₂ (36.04%~36.37%) 和 Al₂O₃ (61.55%~61.30%) 组成, 还含有少量的 Fe₂O₃ (1.75%~2.25%). 夕线石的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量分别为 36.40%~36.65% 和 61.82%~62.18%, Fe₂O₃ 含量较红柱石稍低, 为 0.88%~1.34%.

2.2 矿物氧同位素

在含变质红柱石的变质花岗岩中, 变质红柱石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -11.7‰, 岩浆锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 4.8‰~6.2‰, 加权平均值为 5.5‰±0.1‰, 落在地幔锆石值 5.3‰±0.3‰ 的范围内, 二者之间表现为极度的

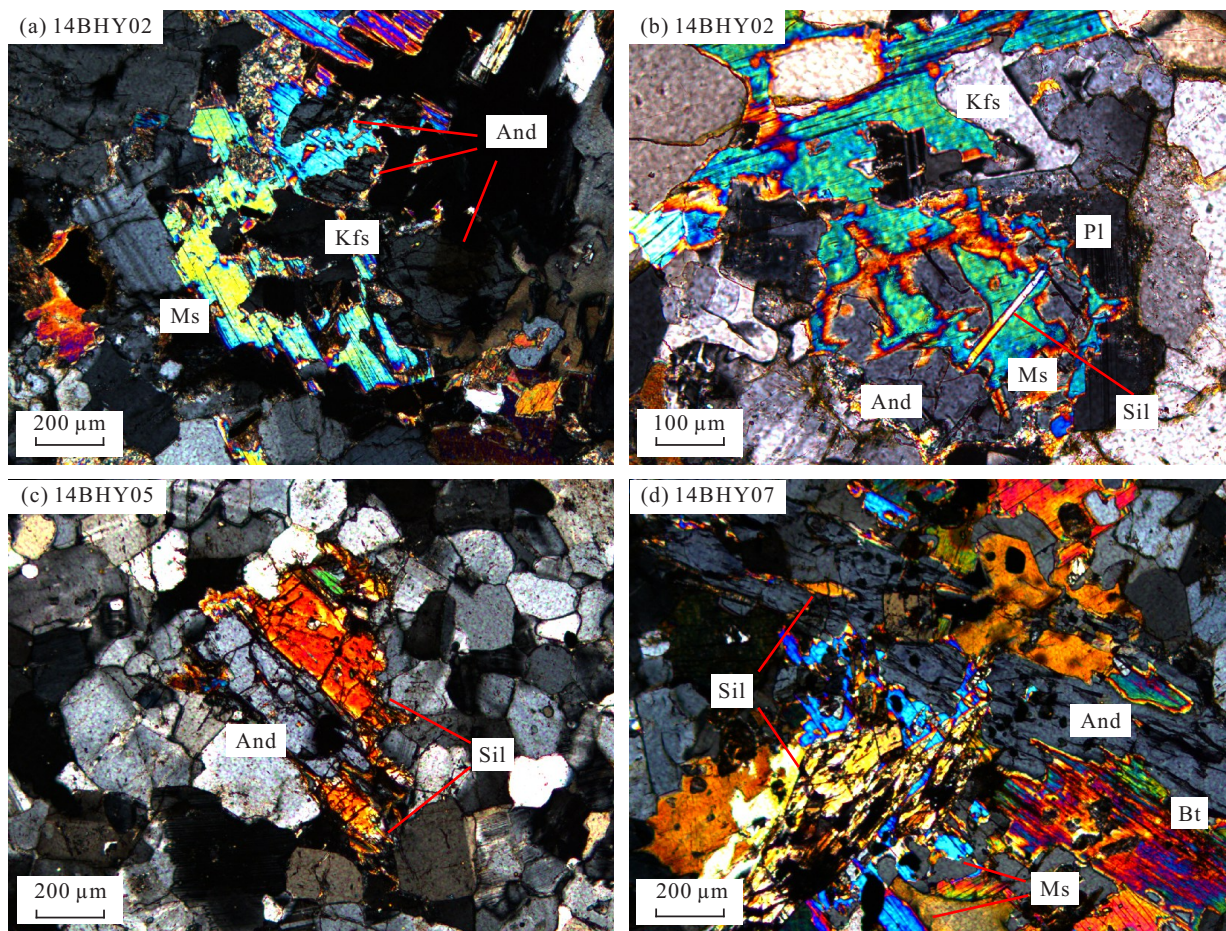


图 2 变质花岗岩 14BHY02、14BHY05 和 14BHY07 的岩相结构

Fig.2 Petrographic textures for metagranites 14BHY02, 14BHY05 and 14BHY08
And. 红柱石; Bt. 黑云母; Kfs. 钾长石; Ms. 白云母; Pl. 斜长石; Sil. 夕线石. 引自 He *et al.* (2018)

氧同位素不平衡.

由于锆石和红柱石的氧扩散速率非常慢 (Zheng and Fu, 1998), 其氧同位素组成在形成后不会受到显著的改造. 因此, 它们的氧同位素组成可以为变质作用提供关键信息. 首先, 岩浆锆石从正常 $\delta^{18}\text{O}$ 岩浆中结晶, 这发生在大陆冰川融水广泛的渗透之前; 否则, 遭受过大陆冰川融水热液蚀变的岩石发生部分熔融会产生负 $\delta^{18}\text{O}$ 岩浆, 从中结晶的锆石具有负 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (Zheng *et al.*, 2004; Tang *et al.*, 2008; He *et al.*, 2016). 其次, 变质红柱石具有非常负的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 必然形成于大陆冰川融水渗透之后. 在热液蚀变过程中, 白云母和黑云母等矿物的氧同位素组成容易受到改造 (Zheng and Fu, 1998). 的确, 在同一采样地点的变质花岗岩中, 白云母的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -13.9‰ 到 -10.2‰ , 黑云母的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -13.7‰ 到 -4.5‰ (Zheng *et al.*, 2007). 在遭受高温热液蚀变作用之后, 白云母在温度升高的条件下发生脱水

反应, 形成变质红柱石, 从而继承了白云母的 ^{18}O 亏损特征.

2.3 变质 $P-T$ 条件

变质 $P-T$ 条件可以根据变质峰期矿物组合通过视剖面计算予以确定. 对于含红柱石和夕线石的变质花岗岩 14BHY07, 岩石薄片观察到的矿物组合为白云母、黑云母、红柱石、夕线石、斜长石、钾长石和石英. 在视剖面计算得到的 $P-T$ 相图中 (图 3), 红柱石稳定域与超固相线区没有重叠. 因此, 当部分熔融发生时, 红柱石会变得极不稳定. 红柱石的普遍存在说明, 岩石并未发生部分熔融, 变质作用发生在铝硅酸盐矿物稳定的亚固相条件, 也就是 $560\sim 660\text{ °C}/1.0\sim 3.5\text{ kbar}$. 这进一步支持红柱石通过变质反应形成的论断. 由于变质作用发生在上地壳深度, 对应非常高的热梯度 ($>60\text{ °C/km}$), 是典型的高温低压变质岩. 并且, 变质作用从红柱石稳定域转变到夕线石稳定域, 对应的进变质作用发生

在近等压升温条件下。

2.4 变质年龄

He *et al.* (2018) 研究得到, 变质花岗岩中的锆石显示清晰的振荡环带, 具有 >0.1 的 Th/U 比值, 是典型的岩浆锆石。锆石 U-Pb 年龄为 750~770 Ma, 与 Rodinia 超大陆裂解时间 (Li, 2003; Li *et al.*, 2008) 一致。因此, 变质原岩花岗岩是 Rodinia 超大陆裂解过程中岩浆作用的产物, 这在华南陆块北缘普遍存在 (Zheng *et al.*, 2004, 2006)。尽管花岗岩经历了高温低压变质作用, 其中的锆石却没有出现变质增生, 说明当时的变质条件并不适合锆石生长。因此, 确定变质年龄还需对其他副矿物进行 U-Pb 定年。

在变质花岗岩中, 少量变质玄武岩呈块状或厚层状出露。变质玄武岩中的榍石呈自形, 具有低 Fe、低 Fe/Al 比值和较高的 Al, 明显区别于变质花岗岩中残留的岩浆榍石, 它呈骸晶状, 具有更高的 Fe, 稍低的 Al, 约为 1 的 Fe/Al 比值。此外, 变质玄武岩中的榍石具有较低的 Th、U、Y、REE 和 HFSE 含量, 无明显 Eu 异常, 并显示显著的 HREE 亏损, 不同于

岩浆榍石的高 Th、U、Y、REE 和 HFSE 含量, 明显 Eu 负异常以及平坦的 MREE-HREE 模式。因此, 变质玄武岩中的榍石为变质成因 (Rasmussen *et al.*, 2013), 是高温低压变质作用的产物。变质榍石与黑云母密切共生, 说明黑云母的分解为榍石生长提供 Ti (Essex and Gromet, 2000), 因而变质榍石也继承了黑云母 HREE 亏损的特征。

He *et al.* (2018) 研究得到, 变质榍石的 U-Pb 年龄为 751 ± 11 Ma, 代表高温低压变质作用发生的时代。约 750 Ma 的年龄还记录在遭受过热液蚀变的锆石以及低 $\delta^{18}\text{O}$ 岩浆锆石中 (Wu *et al.*, 2007; Zheng *et al.*, 2007)。显然, 高温低压变质作用发生在 Rodinia 超大陆裂解峰期阶段 (Li, 2003; Li *et al.*, 2008)。在这个过程中, 大陆裂断作用为高温热液蚀变作用、高温低压变质作用和低 $\delta^{18}\text{O}$ 岩浆作用提供了合适的构造环境。遭受过热液蚀变的锆石、变质榍石和岩浆锆石具有一致的 U-Pb 年龄, 表明引起 Rodinia 超大陆裂解的大陆裂断过程在华南陆块北缘的 750 Ma 时最为活跃。

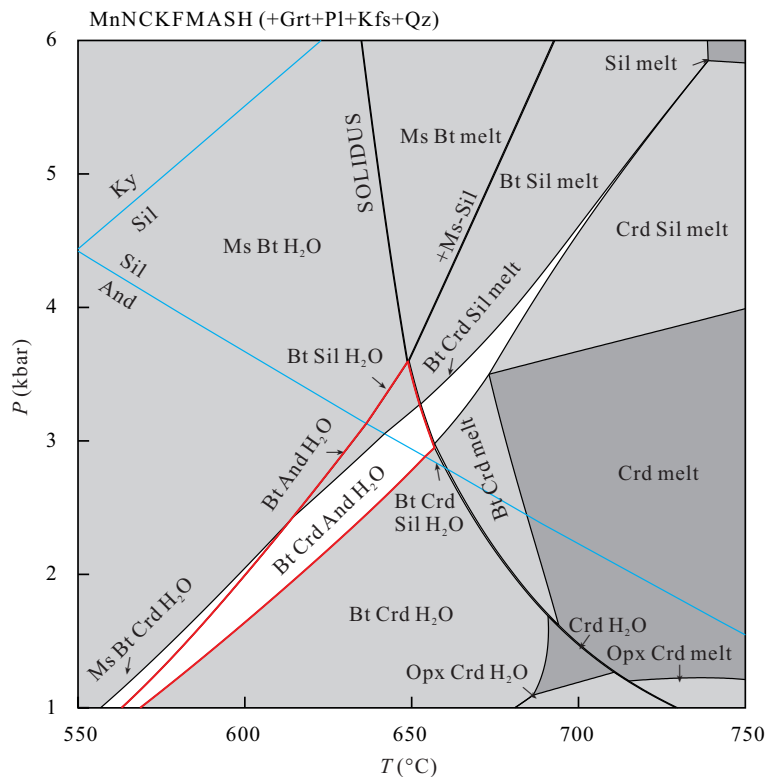


图3 在 MnNCKFMASH 体系中用视剖面计算变质花岗岩 14BHY07 的 P-T 条件

Fig.3 Pseudosection calculations of P-T conditions for metagranites 14BHY07 in the MnNCKFMASH system

And. 红柱石; Bt. 黑云母; Crd. 堇青石; Grt. 石榴石; Kfs. 钾长石; Ky. 蓝晶石; Ms. 白云母; Opx. 斜方辉石; Pl. 斜长石; Qz. 石英; Sil. 夕线石。引自 He *et al.* (2018)

3 对大陆裂断研究的启示

大陆裂断带是大陆岩石圈受到伸展作用发生断裂的狭长构造带(Olsen and Morgan, 2006),一般是沿着古缝合带发育(Wilson, 1966).按照岩石圈裂解程度,大陆裂断分为成功裂断和夭折裂断,前者导致超大陆裂解,后者虽然没有导致超大陆裂解,但是沿古缝合带形成一系列巴肯式变质作用和双峰式岩浆作用产物(Zheng and Chen, 2017).按照地球动力学驱动机制,大陆裂断分为主动裂断和被动裂断(Sengör and Burke, 1978),前者是软流圈地幔上涌的结果,后者是岩石圈经受侧向拉张的结果.这些过程通常都发生在大陆岩石圈内部的构造薄弱带,例如汇聚板块边缘的古缝合带(Zheng and Chen, 2017).由于区域变质作用在热梯度上的差异,结果在汇聚板块边缘形成不同的造山作用产物.因此,区域变质与造山作用在时间和空间上具有对应关系(图 4),其中巴罗式变质作用往往发生在增生造山作用过程中,阿尔卑斯式变质作用总是发生在碰撞造山作用过程中,而巴肯式变质作用则发生在裂断造山作用过程中(Zheng and Zhao, 2017).

由于大陆裂断发生在造山带岩石圈减薄之处,在裂断之前首先需要将俯冲/碰撞加厚的造山带岩石圈减薄.导致岩石圈减薄的构造机制包括(Zheng and Chen, 2016, 2017):(1)榴辉岩化下地壳拆沉,一旦造山带下地壳发生榴辉岩化,其密度显著增加导致重力不稳定,结果密度较大的岩石圈部分向下拆沉;(2)软流圈地幔热侵蚀,造山带根部由于俯冲/

碰撞加厚形成负突起,在下伏地幔对流过程中处于不稳定状态,最终这些岩石圈地幔底部物质受到热侵蚀发生剥离进入软流圈地幔;(3)构造伸展,区域伸展应力导致物质侧向移动,岩石圈因此发生减薄.无论哪种机制,减薄的岩石圈区域都会被密度较小的软流圈物质所填补,如何对减薄后的岩石圈底部进行加热又有两种作用方式.一是软流圈地幔在浮力驱动下直接上涌,二是上涌的软流圈地幔发生降压熔融形成基性岩浆,结果都是加热减薄后的岩石圈底部,使其上覆的下地壳岩石发生巴肯式变质作用.

He *et al.* (2018) 所研究的变质玄武岩具有低 SiO₂ 含量(50.07%)、低 MgO 含量(3.20%)、低 Mg[#] (0.39) 和高 Al₂O₃ 含量(18.16%), 它的原岩为典型的低 MgO 高 Al 玄武岩(Sisson and Grove, 1993).此外,这些变质玄武岩富集 LREE 和 LILE、亏损 HFSE 和 HREE,表现出典型的岛弧型微量元素分布特征,指示其原岩的源区是大洋俯冲带之上受到板片流体交代的地幔楔.这些玄武岩具有大洋俯冲相关的岛弧型微量元素特征,但是岩浆作用发生在超大陆裂解峰期而不是超大陆聚合期间,前者与构造拉张相对应,后者与构造挤压相对应,因此涉及到汇聚板块边缘构造体制的转变(Zheng and Chen, 2017).Rodinia 超大陆聚合发生在中元古代晚期到新元古代早期,通常称为格林威尔造山作用(Li *et al.*, 2002, 2008; Zheng *et al.*, 2013).在此期间,若干大陆块体陆续拼贴到 Rodinia 超大陆;在这个过程中,大洋俯冲作用、弧岩浆作用和弧陆碰撞造山作用在古老的 Columbia 陆核边缘产生了很多格林威尔期增生造山带(Cawood *et al.*, 2009; Zheng *et al.*, 2013).

一部分受到先前大洋俯冲带流体交代作用的地幔楔并没有立即发生部分熔融形成同俯冲弧岩浆作用,很多富集的地幔源区得以保留在这些造山带之下(Zheng and Chen, 2016).由于先前形成的造山带是大陆岩石圈内部的构造薄弱带(Wilson, 1966; Dewey, 1988; Vauchez *et al.*, 1997),大陆裂断发育通常沿这些古缝合带进行(Zheng and Chen, 2017).Rodinia 超大陆裂解发生在新元古代中期(Li *et al.*, 2002, 2008; Zheng *et al.*, 2013).在此期间,软流圈地幔物质上涌或底垫会加热先前受到交代的地幔源区,引发部分熔融,形成具有岛弧型微量元素特征的大陆裂断玄武岩.

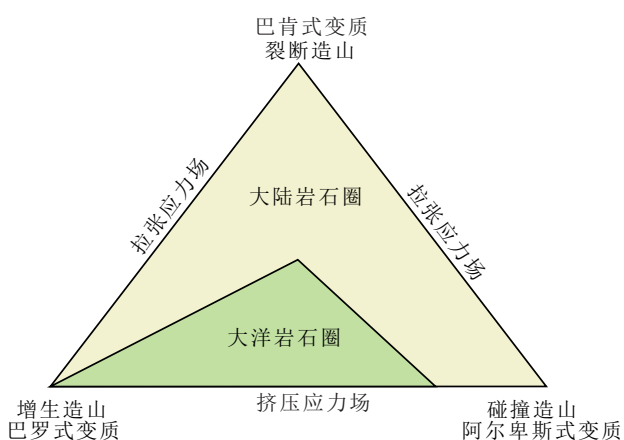


图 4 汇聚板块边缘变质作用类型与造山作用类型之间的对应关系

Fig.4 The relationship between metamorphic and orogenic types at convergent plate boundaries

修改自 Zheng and Zhao(2017)

He *et al.* (2018) 研究得到, 大陆裂断带高温低压变质岩记录了非常高的热梯度 ($>60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$), 这可以用于评估大陆裂断带地幔的热流值. 在地壳深度 10 km 处, 对应于华南陆块北缘北淮阳地区高温低压变质作用的最高压力, 形成变质峰期矿物组合至少需要 $70\sim 120\text{ mW}/\text{m}^2$ 的地壳热流值. 根据变质花岗岩中放射成因产热元素 (Th、U 和 K) 的含量, 计算得到研究区域在 750 Ma 时的热流值为 $35\sim 43\text{ mW}/\text{m}^2$. 这两者的差值 (约 $30\sim 80\text{ mW}/\text{m}^2$) 就是大陆裂断带地幔贡献的热流值, 远高于稳定大陆地壳之下正常地幔的热流值. 因此, 地幔向地壳输送异常高的热量, 是引发大陆裂断带高温低压变质作用的主导因素.

综上所述, 华南陆块北缘的大陆裂断带叠加于格林威尔期形成的增生造山带之上. 结合这些大陆裂断成因的岩石在三叠纪时期经历大陆俯冲带变质作用, 大陆裂断之前的构造残余信息和大陆裂断之后的构造转换信息都会叠置在大陆裂断成因的产物之上. 因此, 在解析造山带演化历史时, 必须根据变质岩记录的热梯度来区分汇聚板块边缘在不同阶段的构造信息.

4 结语

大陆裂断带具有高的热梯度, 能够产生巴肯式变质相系列. 在新元古代中期, 华南陆块从 Rodinia 超大陆裂解出去. 作为裂解位置的华南陆块北缘, 是高温低压变质作用最可能发生的场所. 这个构造过程被记录在大别山北淮阳地区角闪岩相高温低压变质岩中, 以白云母脱水反应形成红柱石和夕线石、红柱石向夕线石转变为典型特征. 这为高温低压变质岩指示大陆裂断构造背景提供了直接证据. 大陆裂断在古俯冲带的基础上发育, 最终沿着古汇聚板块边缘导致超大陆裂解. 在这个过程中, 由于构造体制的转换, 来自软流圈地幔的热流显著提高, 从而引发高温低压变质作用. 因此, 发生在古汇聚板块边缘的大陆裂断作用是形成巴肯式变质相系列岩石的地球动力学机制. 确定变质岩记录的热梯度信息, 对于区分汇聚大陆边缘在不同历史时期的构造体制变化具有重要意义.

References

Bosch, D., 2004. Deep and High-Temperature Hydrothermal Circulation in the Oman Ophiolite: Petrological and Iso-

- topic Evidence. *Journal of Petrology*, 45(6): 1181–1208. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh010>
- Brown, M., 1993. *P-T-t* Evolution of Orogenic Belts and the Causes of Regional Metamorphism. *Journal of the Geological Society*, 150(2): 227–241. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.150.2.0227>
- Brown, M., 2006. Duality of Thermal Regimes is the Distinctive Characteristic of Plate Tectonics since the Neoproterozoic. *Geology*, 34(11): 961. <https://doi.org/10.1130/g22853a.1>
- Bucher, K., Grapes, R., 2011. *Metamorphic Rocks. Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer, Berlin Heidelberg, 21–56.
- Cawood, P.A., Kröner, A., Collins, W.J., et al., 2009. Accretionary Orogens through Earth History. *Geological Society, London, Special Publications*, 318(1): 1–36. <https://doi.org/10.1144/sp318.1>
- Clark, C., Fitzsimons, I.C.W., Healy, D., et al., 2011. How does the Continental Crust Get Really Hot? *Elements*, 7(4): 235–240. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.4.235>
- Collins, W.J., 2002. Hot Orogens, Tectonic Switching, and Creation of Continental Crust. *Geology*, 30(6): 535.
- de Yoreo, J.J., Lux, D.R., Guidotti, C.V., 1991. Thermal Modelling in Low-Pressure/High-Temperature Metamorphic Belts. *Tectonophysics*, 188(3–4): 209–238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90457-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90457-4)
- Dewey, J.F., 1988. Extensional Collapse of Orogens. *Tectonics*, 7(6): 1123–1139. <https://doi.org/10.1029/tc007i006p01123>
- Ernst, W.G., Tsujimori, T., Zhang, R., et al., 2007. Permo-Triassic Collision, Subduction-Zone Metamorphism, and Tectonic Exhumation along the East Asian Continental Margin. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35(1): 73–110. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140146>
- Essex, R.M., Gromet, L.P., 2000. U-Pb Dating of Prograde and Retrograde Titanite Growth during the Scandian Orogeny. *Geology*, 28(5): 419–422.
- Hacker, B.R., Ratschbacher, L., Webb, L., et al., 1998. U/Pb Zircon Ages Constrain the Architecture of the Ultrahigh-Pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1–4): 215–230. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(98\)00152-6](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(98)00152-6)
- He, Q., Zhang, S.B., Zheng, Y.F., 2016. High Temperature Glacial Meltwater-Rock Reaction in the Neoproterozoic: Evidence from Zircon In-Situ Oxygen Isotopes in Granitic Gneiss from the Sulu Orogen. *Precambrian Research*,

- 284: 1—13. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.07.012>
- He, Q., Zhang, S.B., Zheng, Y.F., 2018. Evidence for Regional Metamorphism in a Continental Rift during the Rodinia Breakup. *Precambrian Research*, 314: 414—427. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.06.009>
- Li, Z., 2003. Geochronology of Neoproterozoic Syn-Rift Magmatism in the Yangtze Craton, South China and Correlations with Other Continents: Evidence for a Mantle Superplume that Broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122(1—4): 85—109. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(02\)00208-5](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(02)00208-5)
- Li, Z.X., Bogdanova, S., Collins, A., et al., 2008. Assembly, Configuration, and Break-up History of Rodinia: A Synthesis. *Precambrian Research* 160(1—2): 179—210. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.021>
- Li, Z.X., Li, X.H., Zhou, H.W., et al., 2002. Grenvillian Continental Collision in South China: New SHRIMP U-Pb Zircon Results and Implications for the Configuration of Rodinia. *Geology*, 30(2): 163—166.
- Lux, D.R., de Yoreo, J.J., Guldotti, C.V., et al., 1986. Role of Plutonism in Low-Pressure Metamorphic Belt Formation. *Nature*, 323: 794—797. <https://doi.org/10.1038/323794a0>
- Manning, C.E., Weston, P.E., Mahon, K.I., 1996. Rapid High-Temperature Metamorphism of East Pacific Rise Gabbros from Hess Deep. *Earth and Planetary Science Letters*, 144(1—2): 123—132. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(96\)00153-7](https://doi.org/10.1016/0012-821x(96)00153-7)
- McLaren, S., Sandiford, M., Hand, M., 1999. High Radiogenic Heat-Producing Granites and Metamorphism: An Example from the Western Mount Isa Inlier, Australia. *Geology*, 27(8): 679—682.
- Nicolas, A., 2003. High-Temperature Seawater Circulation Throughout Crust of Oceanic Ridges: A Model Derived from the Oman Ophiolites. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 108(B8): 2371. <https://doi.org/10.1029/2002jb002094>
- Olsen, K.H., Morgan, P., 2006. Chapter 1 Introduction: Progress in Understanding Continental Rifts. *Developments in Geotectonics*, 25: 3—26. [https://doi.org/10.1016/s0419-0254\(06\)80005-4](https://doi.org/10.1016/s0419-0254(06)80005-4)
- Platt, J.P., England, P.C., 1994. Convective Removal of Lithosphere beneath Mountain Belts: Thermal and Mechanical Consequences. *American Journal of Science*, 294(3): 307—336. <https://doi.org/10.2475/ajs.294.3.307>
- Pownall, J.M., Hall, R., Armstrong, R.A., et al., 2014. Earth's Youngest Known Ultrahigh-Temperature Granulites Discovered on Seram, Eastern Indonesia. *Geology*, 42(4): 279—282. <https://doi.org/10.1130/g35230.1>
- Rasmussen, B., Fletcher, I.R., Muhling, J.R., 2013. Dating Deposition and Low-Grade Metamorphism by In Situ U-Pb Geochronology of Titanite in the Paleoproterozoic Timeball Hill Formation, Southern Africa. *Chemical Geology*, 351: 29—39. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.04.015>
- Sandiford, M., Powell, R., 1986. Deep Crustal Metamorphism during Continental Extension: Modern and Ancient Examples. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(1—2): 151—158. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(86\)90048-8](https://doi.org/10.1016/0012-821x(86)90048-8)
- Sengör, A.M.C., Burke, K., 1978. Relative Timing of Rifting and Volcanism on Earth and Its Tectonic Implications. *Geophysical Research Letters*, 5(6): 419—421. <https://doi.org/10.1029/g1005i006p00419>
- Sisson, T.W., Grove, T.L., 1993. Experimental Investigations of the Role of H₂O in Calc-Alkaline Differentiation and Subduction Zone Magmatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(2): 143—166. <https://doi.org/10.1007/bf00283225>
- Sisson, V.B., Hollister, L.S., 1988. Low-Pressure Facies Series Metamorphism in an Accretionary Sedimentary Prism, Southern Alaska. *Geology*, 16(4): 358—361.
- Spear, F.S., Kohn, M.J., 1996. Trace Element Zoning in Garnet as a Monitor of Crustal Melting. *Geology*, 24(12): 1099—1102.
- Tang, J., Zheng, Y.F., Gong, B., et al., 2008. Extreme Oxygen Isotope Signature of Meteoric Water in Magmatic Zircon from Metagranite in the Sulu Orogen, China: Implications for Neoproterozoic Rift Magmatism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(13): 3139—3169. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.04.017>
- Vauchez, A., Barruol, G., Tommasi, A., 1997. Why do Continents Break-up Parallel to Ancient Orogenic Belts? *Terra Nova*, 9(2): 62—66. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1997.tb00003.x>
- Wickham, S.M., Oxburgh, E.R., 1985. Continental Rifts as a Setting for Regional Metamorphism. *Nature*, 318: 330—333. <https://doi.org/10.1038/318330a0>
- Wilson, J.T., 1966. Did the Atlantic Close and then Re-Open? *Nature*, 211: 676—681. <https://doi.org/10.1038/211676a0>
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., Tang, J., et al., 2007. Zircon U-Pb Dating of Water-Rock Interaction during Neoproterozoic Rift Magmatism in South China. *Chemical Geology*, 246(1—2): 65—86. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.04.015>

- geo.2007.09.004
- Zheng, Y. F., Chen, R. X., 2017. Regional Metamorphism at Extreme Conditions: Implications for Orogeny at Convergent Plate Margins. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 46–73. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.03.009>
- Zheng, Y. F., Chen, R. X., Zhao, Z. F., 2009. Chemical Geodynamics of Continental Subduction-Zone Metamorphism: Insights from Studies of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Core Samples. *Tectonophysics*, 475 (2): 327–358. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.09.014>
- Zheng, Y. F., Chen, Y. X., 2016. Continental versus Oceanic Subduction Zones. *National Science Review*, 3(4): 495–519. <https://doi.org/10.1093/nsr/nww049>
- Zheng, Y. F., Fu, B., 1998. Estimation of Oxygen Diffusivity from Anion Porosity in Minerals. *Geochemical Journal*, 32(2): 71–89. <https://doi.org/10.2343/geochemj.32.71>
- Zheng, Y. F., Wu, Y. B., Chen, F. K., et al., 2004. Zircon U-Pb and Oxygen Isotope Evidence for a Large-Scale ^{18}O Depletion Event in Igneous Rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20): 4145–4165. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.01.007>
- Zheng, Y. F., Wu, Y. B., Gong, B., et al., 2007. Tectonic Driving of Neoproterozoic Glaciations: Evidence from Extreme Oxygen Isotope Signature of Meteoric Water in Granite. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(1–2): 196–210. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.01.026>
- Zheng, Y. F., Xiao, W. J., Zhao, G. C., 2013. Introduction to Tectonics of China. *Gondwana Research*, 23(4): 1189–1206. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.10.001>
- Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., 2017. Introduction to the Structures and Processes of Subduction Zones. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.06.034>
- Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., Wu, Y. B., et al., 2006. Zircon U-Pb Age, Hf and O Isotope Constraints on Protolith Origin of Ultrahigh-Pressure Eclogite and Gneiss in the Dabie Orogen. *Chemical Geology*, 231(1–2): 135–158. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.01.005>
- Zheng, Y. F., Zhou, J. B., Wu, Y. B., et al., 2005. Low-Grade Metamorphic Rocks in the Dabie-Sulu Orogenic Belt: A Passive-Margin Accretionary Wedge Deformed during Continent Subduction. *International Geology Review*, 47 (8): 851–871. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.47.8.851>