

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.237>



大别造山带在大陆裂解、地壳的俯冲—折返及山根垮塌期间的多期部分熔融作用

刘贻灿, 杨 阳, 姜为佳, 李 远

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: 大别造山带发育了与大陆俯冲—折返和碰撞造山等相关的不同构造岩石单位. 针对存在的问题, 本研究开展了宿松变质带、中大别超高压带和北大别杂岩带等不同俯冲岩片花岗质岩石的野外地质调查以及岩石学、元素—同位素地球化学和锆石年代学等方面系统研究. 研究结果表明: (1) 宿松变质带花岗片麻岩的原岩时代包括晚太古代(2.5~2.7 Ga)和新元古代(770~830 Ma)两大类, 其中新元古代花岗片麻岩的原岩是由经历了~2.0 Ga变质作用的晚太古代岩石在新元古代大陆裂解过程中发生重熔作用形成的; (2) 首次揭示中大别花岗片麻岩至少包含两种不同的原岩时代(~750 Ma和780~800 Ma)与岩石成因, 并在三叠纪俯冲—折返期间经历了~230 Ma和~220 Ma两期部分熔融作用; (3) 北大别混合岩中发育折返早期(209±2 Ma)因高温减压而引起的黑云母脱水熔融以及山根垮塌期间(110~145 Ma)有水加入的加热熔融(水致熔融)形成的多种浅色体; (4) 发现并限定了北大别变质闪长岩是在燕山期山根垮塌期间, 由三叠纪深俯冲的新元古代镁铁质地壳岩石发生部分熔融作用而形成的. 因此, 这为大别造山带在新元古代大陆裂解、印支期地壳的俯冲—折返及燕山期山根垮塌期间发生的多种部分熔融作用提供了新的制约.

关键词: 大陆裂解; 地壳的俯冲—折返; 山根垮塌; 部分熔融; 大别造山带; 岩石学.

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2019)12-4195-08

收稿日期: 2019-08-05

Diverse Partial Melting during Continental Rifting, Subduction-Exhumation and Mountain-Root Collapse in the Dabie Orogen, Central China

Liu Yican, Yang Yang, Jiang Weijia, Li Yuan

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 Dabie orogenic belt consists of a series of fault-bounded lithotectonic units with various metamorphic grades and evolutionary histories related to continental subduction and exhumation. Based on the existing controversy and problem in the region, this study performed the detailed field investigation, and petrological, element-isotope geochemical and zircon geochronological researches on the granitic rocks from different subducted slices such as the Susong metamorphic zone (SZ), Central Dabie ultrahigh-pressure metamorphic zone (CDZ) and North Dabie complex zone (NDZ). The results suggest that: (1) the precursor ages of the granitic gneisses in the SZ can be divided into two types, i.e. the Late Archean (2.5–2.7 Ga) and the Neoproterozoic (770–830 Ma), and Neoproterozoic protoliths of them were derived from remelting of the Late Archean rocks with ~2.0 Ga metamorphic overprinting during the Neoproterozoic continental rifting; (2) the granitic orthogneisses in the CDZ

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(No.2015CB856104); 国家自然科学基金项目(Nos.41273036, 41773020).

作者简介: 刘贻灿(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事变质地球化学与岩石大地构造学研究. ORCID: 0000-0002-2067-5019. E-mail: liuyc@ustc.edu.cn

引用格式: 刘贻灿, 杨阳, 姜为佳, 等, 2019. 大别造山带在大陆裂解、地壳的俯冲—折返及山根垮塌期间的多期部分熔融作用. 地球科学, 44(12):4195–4202.

least contain two kinds of precursor ages of ~ 750 Ma and 780–800 Ma with different petrogenesis, which underwent two episodes of partial melting at ~ 230 Ma and ~ 220 Ma during the Triassic subduction and exhumation; (3) there are a variety of leucosomes, formed by high- T decompression-induced biotite dehydration melting during the initial stage of exhumation at ~ 209 Ma and water-fluxed heating melting corresponding to the mountain-root collapse at 110–145 Ma, within the migmatites in the NDZ; (4) the meta-diorites from the NDZ were discovered and are documented to be resulted from partial melting of the Triassic deep-subducted mafic lower-crustal rocks during the mountain-root collapse in the Early Cretaceous. Thus, all these provide new constraints on diverse partial melting during the Neoproterozoic continental rifting, the Triassic crustal subduction-exhumation and the Cretaceous mountain-root collapse in the Dabie orogen, Central China.

Key words: continental rifting; crustal subduction-exhumation; mountain-root collapse; partial melting; Dabie orogen; petrology.

板块俯冲带是地壳俯冲和折返以及部分熔融作用的重要场所 (Zheng *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2015; Deng *et al.*, 2018). 其中, 俯冲地壳岩石的原岩性质和成因以及俯冲—折返和山根垮塌期间的部分熔融 (partial melting)/深熔作用 (anatexis) 等又是令人十分关注的重要科学问题, 它涉及一系列不同地壳深度和 P - T 条件下发生的构造过程及元素一同

位素地球化学效应等. 而且, 大别山是大陆碰撞造山带, 但是其俯冲陆壳岩石 (特别是正变质岩) 的原岩性质和成因研究相对薄弱, 不同俯冲岩片花岗质岩石的部分熔融作用条件及机制更缺乏系统研究 (刘贻灿等, 2019). 为此, 本文针对存在的问题、结合所研究的课题, 开展了大别山宿松变质带、中大别超高压带和北大别杂岩带等不同俯冲岩片花岗质

图 1 大别山造山带的地质简图

Fig.1 Schematic geological map of the Dabie orogen

BZ. 北淮阳带; NDZ. 北大别杂岩带; CDZ. 中大别超高压变质带; SDZ. 南大别低温榴辉岩带; SZ. 宿松变质带; HNZ. 潜湾混杂岩带; HZ. 红安低温榴辉岩带; DC. 角闪岩相大别杂岩; XMF. 晓天—磨子潭断裂; WSF. 五河—水吼断裂; HMF. 花凉亭—弥陀断裂; TSF. 太湖—山龙断裂; TLF. 郟庐断裂; SMF. 商城—麻城断裂; DWF. 大悟断裂. 据 Liu *et al.* (2007a) 修改

岩石的岩石学、元素—同位素地球化学和锆石年代学等方面研究. 研究结果为大别造山带在新元古代大陆裂解、印支期地壳的俯冲—折返及燕山期山根垮塌期间发生的多期部分熔融作用提供了新的制约.

1 地质背景

大别山是秦岭—桐柏造山带的东延部分, 东端被郯庐断裂带切割. 郯—庐断裂带以东的苏鲁造山带是大别山东延并位移了的部分. 在地质位置上, 它位于华北和华南两个大陆板块之间, 是三叠纪华南板块向华北板块之下俯冲形成的碰撞型造山带 (Xu *et al.*, 1992). 从南到北, 大别山可分为宿松变质带、南大别低温榴辉岩带 (简称南大别)、中大别超高压变质带 (简称中大别)、北大别杂岩带 (简称北大别) 及北淮阳带等构造岩石单位 (徐树桐等, 2002) (图 1). 其中, 北大别、中大别和南大别是三个含榴辉岩的岩石单位, 而北淮阳带和宿松变质带则是两个相对低级变质的岩石单位 (Li *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2017). 它们之间依次分别被太湖—山龙、花凉亭—弥陀、水吼—五河和磨子潭—晓天等断裂带或韧性剪切带所分割.

2 宿松变质带花岗片麻岩的时代和成因

宿松变质带, 又称宿松杂岩带, 主体属于印支期华南俯冲板块的后缘部分 (Li *et al.*, 2017; 李远等, 2018). 该带主要岩石有石榴石英云母片岩、含石榴子石花岗片麻岩、(石榴)斜长角闪岩、异剥钙榴岩 (含蓝晶石石英岩、变质砂岩)、大理岩、变质磷块岩、石墨片岩、滑石片岩、浅粒岩和变蛇纹岩等. 其中, 花岗片麻岩的时代和岩石成因一直没有得到解决. 而且, 该带变质程度相对较低, 总体表现为绿帘角闪岩相变质作用, 主要矿物组合为石榴子石、绿帘石、角闪石、斜长石、钾长石、多硅白云母和黑云母等 (李远等, 2018). 因此, 研究该带花岗片麻岩的时代和成因将有助于理解和解决大别山深俯冲的花岗质正片麻岩及相关岩石的原岩性质和成因问题. 为此, 本文开展了宿松变质带吴家河、亭子岭和蒲河等不同地点的花岗片麻岩的岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学等方面研究.

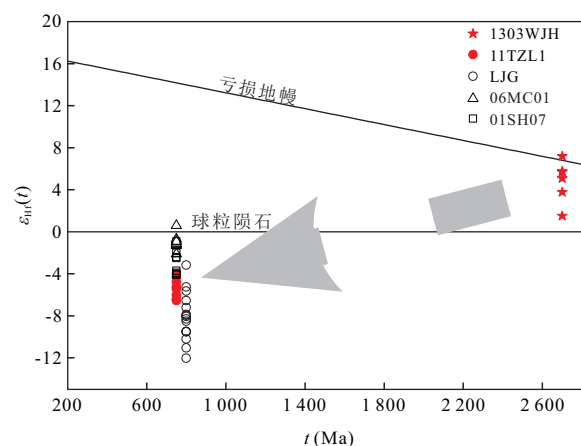


图 2 宿松变质带花岗片麻岩 (样品 11TZL1 和 1303WJH) 的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -U-Pb 年龄

Fig. 2 Zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values and U-Pb ages as identified by the SHRIMP U-Pb dating for the granitic gneisses (samples 11TZL1 and 1303WJH) from the Susong metamorphic zone

红色符号为宿松变质带花岗片麻岩, 黑色符号为中大别超高压带花岗片麻岩; 据李远等 (2018)

锆石阴极发光图像和定年结果显示, 不同地点花岗片麻岩具有不同的特点 (李远等, 2018): (1) 吴家河样品表现为核—边结构即晚太古代岩浆核和古元古代变质增生边, 形成时代为 ~ 2.69 Ga、变质时代为 ~ 2.0 Ga; (2) 亭子岭样品表现为核—幔—边结构即 768 ± 5 Ma 岩浆核、 749 ± 5 Ma 变质幔和少量 ~ 210 Ma 的变质增生边, 指示该片麻岩的原岩形成于 ~ 770 Ma、并经历了 ~ 750 Ma 的热变质和 ~ 210 Ma 的俯冲变质作用; (3) 蒲河样品表现为典型的核—边结构即 834 ± 9 Ma 岩浆核、 751 ± 10 Ma 变质边, 含有少量晚太古代的岩浆继承锆石. 此外, 亭子岭样品 (11TZL1) 的新元古代锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($t=750$ Ma) 值为 $-4.3 \sim -6.8$, 两阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}2}$) 为 $1\,915 \sim 2\,072$ Ma; 吴家河样品 (1303WJH) 的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($t=2\,700$ Ma) 值为 $2.0 \sim 7.5$, 两阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}2}$) 为 $2\,817 \sim 3\,153$ Ma. 因此, 首次发现该带存在晚太古代变质基底岩石; 而且, 根据锆石提供的年龄相和 Hf 同位素成分, 结合中大别超高压变质带花岗质正片麻岩的 Hf 同位素组成 (图 2), 证明宿松变质带新元古代花岗片麻岩的原岩是由经历了 ~ 2.0 Ga 变质作用的晚太古代岩石在新元古代大陆裂解过程中发生重熔作用形成的并构成了扬子前寒武纪陆壳基底的一部分, 从而为华南新元古代大陆裂解与深熔作用机制以及大别山超高压变质的花岗质正片麻岩的原岩性质和

成因提供了新的限定。

3 中大别花岗片麻岩的部分熔融、时代和成因

中大别是大别山最早发现含柯石英和金刚石超高压变质岩的岩石单位(Xu *et al.*, 1992), 国内外同行开展了榴辉岩以及大理岩等副变质岩的岩石学、岩石地球化学、同位素年代学和大地构造学等方面深入研究, 取得了丰硕成果。然而, 关于该带的部分熔融作用, 尤其花岗片麻岩的部分熔融作用方面研究尚显比较缺乏。而且, 研究区花岗片麻岩的原岩时代和成因以及是否经历了深俯冲和超高压变质作用, 更显得比较薄弱和存在分歧(徐树桐等, 2002), 需要更多的证据和数据予以限定和查明。为此, 我们开展了中大别花凉亭、野寨和碧溪岭等地花岗片麻岩的系统研究。

3.1 超高压变质与多阶段变质演化

超高压带中花岗片麻岩是否经历了超高压变质作用, 一直存在争议(Carswell *et al.*, 2000; 徐树桐等, 2002), 主要是因为缺乏超高压变质的标志性矿物。到目前为止, 中大别东北部潜山县野寨地区也未报道有含柯石英等超高压矿物的变质岩, 更缺乏花岗片麻岩的岩石学和年代学研究。经系统的野外调查和室内岩相学观察及锆石的微量元素和矿物包体研究, 首次在研究区两个花岗片麻岩的锆石中发现柯石英、多硅白云母、绿辉石、石榴子石和金红石等超高压榴辉岩相变质矿物组合以及多期变质生长记录。结合锆石 U-Pb 定年、阴极发光图像和微量元素分析, 证明该区花岗片麻岩经历了 227 ± 3 Ma 超高压变质作用以及 237 ± 3 Ma 前进变质和 209 ± 4 Ma 角闪岩相退变质作用(刘贻灿等, 待发表资料)。这为超高压带不同岩石的多阶段变质过程和 P - T - t 轨迹重建以及超高压岩石折返机制等方面研究提供了新的资料和制约。

3.2 多期部分熔融作用

经野外地质调查和室内岩相学观察与锆石学方面系统研究, 证明中大别花凉亭和碧溪岭地区发现花岗片麻岩在俯冲—折返期间经历了两期部分熔融作用:

(1) 形成于 ~ 220 Ma, 表现为花岗片麻岩中的浅色体主要矿物是钾长石+斜长石+石英+电气石等; 而且, 锆石阴极发光图像(图 3)指示部分熔融作用形成的深熔锆石高 U(呈黑色)、并形成于深灰

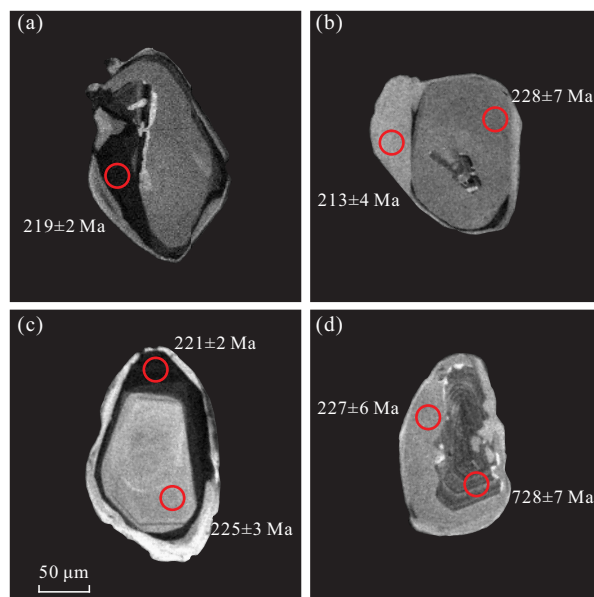


图 3 中大别碧溪岭花岗片麻岩的代表性锆石阴极发光 (CL) 图像及 U-Pb 同位素年龄

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images and U-Pb ages of representative zircons from the Bixiling granitic gneiss in the Central Dabie UHP metamorphic zone

色变质幔与灰白色变质边之间。其中, 深灰色幔的谐和加权平均年龄为 225 ± 3 Ma; 而黑色幔和灰白色边分别为 220 ± 2 Ma 和 213 ± 4 Ma, 这与前文所述的超高压变质和角闪岩相退变质时代一致。因此, 证明该期部分熔融作用发生在峰期之后减压期间。

(2) 形成于 ~ 230 Ma, 表现为花岗片麻岩中浅色体的主要矿物是钾长石+斜长石+石英+金红石+褐帘石等。锆石阴极发光图像指示部分熔融作用形成的锆石高 U ($1\ 854 \sim 3\ 276$ ppm, 呈黑色), 形成时代为 233 ± 2 Ma (未发表资料), 稍年轻于前文所述的前进变质时代 (237 ± 3 Ma)。因此, 证明该期部分熔融作用可能发生在超高压变质条件下或接近峰期变质条件下。

3.3 两类花岗片麻岩的时代和成因

大别山超高压变质的花岗质正片麻岩的原岩时代主要为新元古代, 其成因常被解释为与扬子北缘的大陆裂解有关。然而, 关于这些花岗片麻岩的原岩时代和成因仍缺乏有效限定与制约。中大别花岗片麻岩的锆石 U-Pb 同位素定年和岩石的元素—同位素地球化学方面系统研究表明, 至少包括两类不同原岩形成时代和岩石成因(刘贻灿等, 待发表资料): (1) 花凉亭和碧溪岭花岗片麻岩的原岩时代

分别为 780~800 Ma 和 ~750 Ma; (2) 两类花岗片麻岩都具有 Eu 负异常、但分别表现为严重亏损 ($\delta_{Eu} = 0.11 \sim 0.17$) 和轻微亏损 ($\delta_{Eu} = 0.51 \sim 0.76$), 二者的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 分别为 0.769 907~0.824 067 和 0.704 510~0.728 989, $\epsilon_{Nd}(t)$ 分别为 -14.79~-10.79 和 -4.99~-4.43, 证明它们具有不同的岩石成因, 后者形成过程中明显有较多的幔源物质加入。

4 北大别的多期深熔作用和变质闪长岩

与中大别和南大别相比较, 北大别榴辉岩及花岗片麻岩等经历了多阶段高温 ($>850^\circ\text{C}$) 变质演化过程 (Liu *et al.*, 2015), 特别是经历了麻粒岩相变质叠加以及广泛的深熔作用与大规模混合岩化作用 (Liu *et al.*, 2007a, 2007b; Wu *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2015)。地球物理资料表明, 大别造山带的地壳厚度较薄, 明显低于中国东部以及全球大陆地壳平均厚度; 同时, 大别山下地壳和地壳整体 P 波波速明显低于全球平均值 (高山等, 1999), 证明大别山曾发生强烈的地壳减薄或去根作用。此外, He *et al.* (2011) 发现碰撞后花岗岩类的

化学成分在 ~130 Ma 发生突变, 为山根垮塌提供了地球化学方面证据; 李曙光等 (2013) 结合碰撞后岩浆岩的年代学和地球化学研究, 从讨论北大别混合岩化的发生条件出发, 提出了山根垮塌的两阶段模型。因此, 北大别的部分熔融和山根垮塌方面的证据仍主要来自碰撞后花岗岩和辉石/辉长岩以及超高压岩石的锆石年代学与元素地球化学方面研究。而混合岩及其浅色体和变质闪长岩作为北大别大规模部分熔融作用和镁铁质下地壳拆沉过程的重要产物和见证者, 仍缺乏岩石学、同位素地球化学以及年代学方面的系统研究。为此, 本文对北大别混合岩中不同类型浅色体和最近甄别出的碰撞后变质闪长岩开展了详细的野外调查以及元素—同位素地球化学等方面综合研究 (刘贻灿等, 2019)。

4.1 混合岩中多种浅色体及变质闪长岩

北大别混合岩以及碰撞后花岗岩类等在北大别的广泛分布为该带经历了多期深熔作用提供了宏观上的野外证据 (刘贻灿等, 2019)。

北大别发育多种类型的混合岩 (图 4)。按照矿物组成、结构及穿插关系等, 混合岩中浅色体至少可以分为 4 种: (1) 含转熔石榴子石浅色体 (图 4c、4d); (2) 富转熔角闪石浅色体 (图 4a、4b); (3) 贫角

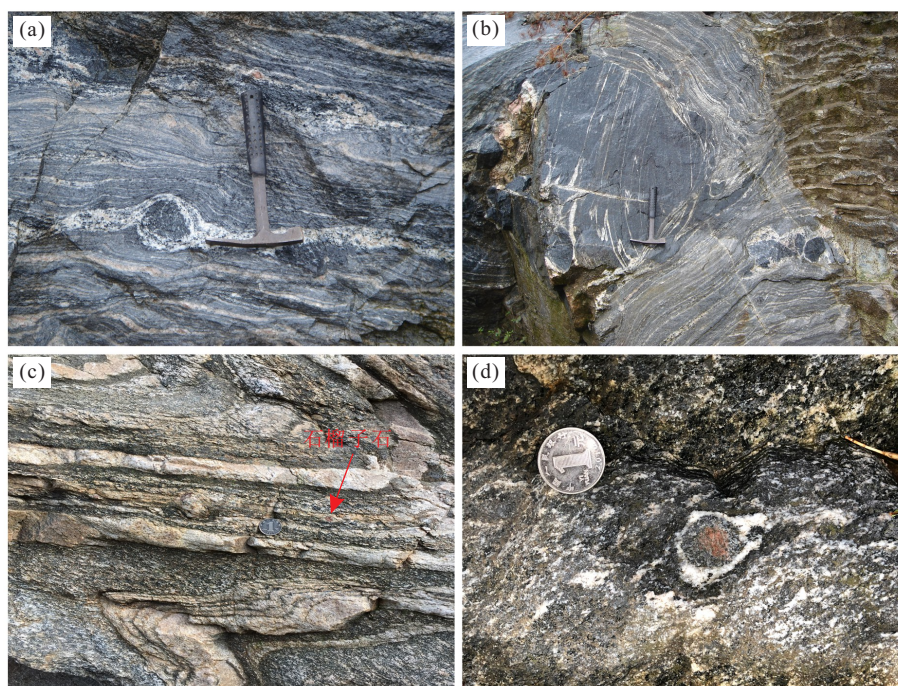


图 4 北大别混合岩中不同类型浅色体的野外照片

Fig.4 Field photographs showing various leucosomes within the migmatites from the North Dabie complex zone

a 和 b. 塔儿河, 发育多种类型浅色体的混合岩; c. 鹿吐石铺, 含转熔石榴子石的浅色体; d. 鹿吐石铺, 转熔石榴子石减压分解为角闪石和斜长石, 外围又被石英+长石环绕; 据刘贻灿等 (2019)

闪石浅色体;(4)富钾长石浅色体(图 4a).其中,第一类浅色体伴随着强烈的褶皱变形;第二类浅色体富含粗粒转熔自形角闪石,而第三类浅色体仅含少量细粒角闪石;第四类浅色体往往穿插前三种浅色体,矿物颗粒粗大,其主要矿物组合为石英、斜长石、钾长石以及少量的黑云母、褐帘石.此外,第一类浅色体中石榴子石常见被石英+长石构成的“白色圈”所环绕(图 4c),指示石榴子石是从熔体中结晶形成的;而且,有时还可以见到石榴子石进一步减压分解成角闪石+斜长石(图 4d),因而证明石榴子石在角闪岩相变质作用之前形成的.因此,这也与“黑云母减压脱水熔融发生在 850~950 °C、1.0 GPa 的下地壳条件下”实验结果(Holyoke and Rushmer, 2002)及北大别折返早期高温减压引起的麻粒岩相变质叠加过程(Liu *et al.*, 2015)相吻合.然而,其他三类浅色体则因含有转熔角闪石及石英、斜长石和钾长石等矿物(图 4a),应属于水致熔融成因(Weinberg and Hasalová, 2015)、并形成于中上地壳的角闪岩相条件下(650~750 °C、0.5~0.7 GPa)(刘贻灿等, 2019).

此外,北大别不同地点发现有碰撞后变质闪长岩产出(刘贻灿等, 2019).而且,变质闪长岩主要在燕子河、道士冲、烂泥坳等地零星出露,并往往伴随着强烈的构造变形,局部含有眼球状钾长石斑晶并发育明显的面理.主要矿物组合为角闪石+斜长石+钾长石+黑云母+石英+褐帘石.

4.2 多期深熔作用和山根垮塌的年代学和地球化学制约

混合岩中四类浅色体的深熔锆石 U-Pb 同位素年代学研究表明,它们保留了超高压岩石折返初期(207~209 Ma)以及燕山期(142~143 Ma、124~134 Ma、108~114 Ma 3 个阶段)深熔作用的年龄记录,加权平均年龄分别为 209±2 Ma、142±2 Ma、128±2 Ma 和 110±2 Ma(刘贻灿等, 2019).

北大别变质闪长岩中锆石表现为明显的核一边结构,即具有岩浆结晶环带的核部和变质增生边,SHRIMP U-Pb 定年结果则表明它们的形成和变质时代分别为 131~133 Ma 和 122~127 Ma(刘贻灿等, 2019).因此,该区变质闪长岩形成于大别山碰撞后期间.

不同类型浅色体,除了矿物组成方面的差异外,含转熔石榴子石浅色体仅局部发育、出露规模

也较小,且表现出与其他三类浅色体明显不同的元素地球化学特征即较高的稀土元素含量和强烈的 Eu 负异常.结合该类浅色体发育强烈变形且保留了转熔石榴子石和之后因减压分解形成的角闪石+斜长石矿物组合(图 4c、4d)以及 209±2 Ma 深熔锆石记录,表明该类浅色体的形成与超高压岩石折返早期在下地壳深度和高温减压条件下因缺乏流体而引起黑云母脱水熔融有关.这与研究区榴辉岩在折返早期(207±4 Ma)的高温减压熔融观测结果(古晓锋等, 2013)以及已报道其他造山带自然样品观察(Braun *et al.*, 1996; Williams *et al.*, 2014)和实验结果(Holyoke and Rushmer, 2002; Auzanneau *et al.*, 2006)一致.

相对于第一类浅色体,其他三类浅色体并未发育明显的变形且分布范围更加广泛.而且,它们具有相似的 Al_2O_3 、 TiO_2 、 CaO 、 K_2O 和 Na_2O 含量,而其 FeO^T 、 MgO 和 MnO 含量从第二到第四类浅色体依次降低,其矿物成分及主微量元素均表现出渐变的关系,表明它们存在一定的成因联系.富角闪石浅色体具有相对较高的总稀土含量、平坦的重稀土分布以及较低的 Sr/Y 值;贫角闪石浅色体相对亏损重稀土元素,表现出较高的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 和 Sr/Y 比值.富钾长石浅色体则具有浅色体中最低的总稀土含量并有明显的 Eu 正异常,这与其富含长石且缺少石榴子石、角闪石等富稀土矿物具有明显的相关性.浅色体中大颗粒的自形角闪石具有嵌晶、斑状结构,应属于转熔角闪石,而且表明部分熔融过程中有外来水的参与(Slagstad *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2013; Weinberg and Hasalová, 2015).不同浅色体常共存于同一露头(图 4a),具有与北大别超高压岩石一致的 Pb 同位素组成(刘贻灿等, 2019),指示它们成因上的相关性及多阶段性.因此,燕山期山根垮塌引发的软流圈上涌带来的巨大热量,并在来自中上地壳的流体参与下,三叠纪深俯冲的下地壳岩石发生大规模部分熔融与混合岩化作用,熔体在迁移过程中分阶段分离结晶,形成了混合岩中三类不同类型浅色体.

变质闪长岩富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,无明显 Eu 异常, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值较低.较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-15.3~-20.4)以及 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值(0.707 6~0.708 1)表明其源区为陆壳岩石.此外,变质闪长岩具有类似于镁铁质下地壳成因榴辉岩的 Pb 同位素组成(刘贻灿等, 2019).因此,证明该变质闪长岩是

三叠纪超高压变质的镁铁质下地壳成因榴辉岩在燕山期(~130 Ma)山根垮塌过程中经历了部分熔融作用产生的熔体侵位上覆岩石中结晶形成的。

5 结论

(1)宿松变质带花岗片麻岩的原岩时代包括晚太古代(2.5~2.7 Ga)和新元古代(770~830 Ma)两大类,而且,新元古代花岗片麻岩的原岩是由经历了~2.0 Ga变质作用的晚太古代岩石在新元古代大陆裂解过程中发生重熔作用形成的。

(2)首次揭示中大别花岗片麻岩至少包含两种不同的原岩时代(~750和780~800 Ma)与岩石成因(与新元古代多期大陆裂解有关),并在三叠纪俯冲—折返期间经历了~230和~220 Ma两期部分熔融作用。

(3)北大别经历了折返早期(209±2 Ma)的黑云母脱水熔融以及山根垮塌期间(110~145 Ma)有水加入的加热熔融,形成了混合岩中多种类型浅色体。

(4)发现并限定了北大别变质闪长岩是在碰撞后山根垮塌期间,由三叠纪深俯冲的新元古代镁铁质下地壳岩石(榴辉岩)发生部分熔融作用而形成的。

致谢:感谢三位审稿人提出了宝贵修改意见!

References

- Auzanneau, E., Vielzeuf, D., Schmidt, M. W., 2006. Experimental Evidence of Decompression Melting during Exhumation of Subducted Continental Crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(2):125—148.
- Braun, I., Raith, M., Kumar, G.R.R., 1996. Dehydration: Melting Phenomena in Leptynitic Gneisses and the Generation of Leucogranites: A Case Study from the Kerala Khondalite Belt, Southern India. *Journal of Petrology*, 37(6): 1285—1305. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.6.1285>
- Carswell, D. A., Wilson, R. N., Zhai, M., 2000. Metamorphic Evolution, Mineral Chemistry and Thermobarometry of Schists and Orthogneisses Hosting Ultra-High Pressure Eclogites in the Dabieshan of Central China. *Lithos*, 52(1—4):121—155.
- Chen, R. X., Ding, B. H., Zheng, Y. F., et al., 2015. Multiple Episodes of Anatexis in a Collisional Orogen: Zircon Evidence from Migmatite in the Dabie Orogen. *Lithos*, 212—215: 247—265. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.11.004>
- Deng, L. P., Liu, Y. C., Gu, X. F., et al., 2018. Partial Melting of Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks at Convergent Continental Margins: Evidences, Melt Compositions and Physical Effects. *Geoscience Frontiers*, 9(4): 1229—1242. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.08.002>
- Gao, S., Zhang, B. R., Jin, Z. M., et al., 1999. Lower Crustal Delamination in the Qinling-Dabie Orogenic Belt. *Science in China (Series D)*, 29(6):532—541(in Chinese).
- Gu, X. F., Liu, Y. C., Deng, L. P., 2013. Geochronology and Petrogenesis of Eclogite from the Luotian Dome, North Dabie Complex Zone (Central China), and Their Element and Isotope Behavior during Exhumation. *Chinese Science Bulletin*, 58(22):2132—2137(in Chinese).
- He, Y. S., Li, S. G., Hoefs, J., et al., 2011. Post-Collisional Granitoids from the Dabie Orogen: New Evidence for Partial Melting of a Thickened Continental Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(13):3815—3838.
- Holyoke, C. W., Rushme, T., 2002. An Experimental Study of Grain Scale Melt Segregation Mechanisms in Two Common Crustal Rock Types. *Journal of Metamorphic Geology*, 20:493—512.
- Li, S. G., He, Y. S., Wang, S. J., 2013. Process and Mechanism of Mountain-Root Removal of the Dabie Orogen: Constraints from Geochronology and Geochemistry of Post-Collisional Igneous Rocks. *Chinese Science Bulletin*, 58(23):2316—2322(in Chinese).
- Li, Y., Liu, Y. C., Yang, Y., et al., 2017. New U-Pb Geochronological Constraints on Formation and Evolution of the Susong Complex Zone in the Dabie Orogen. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(5):1915—1918.
- Li, Y., Liu, Y. C., Yang, Y., et al., 2018. Zircon U-Pb Ages and Hf-Isotope Compositions of Granitic Gneisses from the Susong Metamorphic Zone in the Dabie Orogen, China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 40(1): 61—75(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. C., Deng, L. P., Gu, X. F., et al., 2015. Application of Ti-in-Zircon and Zr-in-Rutile Thermometers to Constrain High-Temperature Metamorphism in Eclogites from the Dabie Orogen, Central China. *Gondwana Research*, 27(1):410—423.
- Liu, Y. C., Li, S. G., Gu, X. F., et al., 2007a. Ultrahigh-Pressure Eclogite Transformed from Mafic Granulite in the Dabie Orogen, East-Central China. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(9):975—989.
- Liu, Y. C., Li, S. G., Xu, S. T., 2007b. Zircon SHRIMP U-Pb Dating for Gneisses in Northern Dabie High T/P Metamorphic Zone, Central China: Implications for Decou-

- pling within Subducted Continental Crust. *Lithos*, 96(1–2):170–185.
- Liu, Y.C., Liu, L.X., Li, Y., et al., 2017. Zircon U-Pb Geochronology and Petrogenesis of Metabasites from the Western Beihuiyang Zone in the Hong'an Orogen, Central China: Implications for Detachment within Subducting Continental Crust at Shallow Depths. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145:74–90.
- Liu, Y.C., Yang, Y., Li, Y., 2019. New Constraints on Multiple Anatexis in the North Dabie Complex Zone and Mountain-Root Collapse in the Dabie Orogen, Central China. *Chinese Journal of Geology*, 54(3): 664–677(in Chinese with English abstract).
- Slagstad, T., Jamieson, R.A., Culshaw, N.G., 2005. Formation, Crystallization, and Migration of Melt in the Mid-Orogenic Crust: Muskoka Domain Migmatites, Grenville Province, Ontario. *Journal of Petrology*, 46(5):893–919. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi004>
- Wang, S.J., Li, S.G., Chen, L.J., et al., 2013. Geochronology and Geochemistry of Leucosomes in the North Dabie Terrane, East China: Implication for Post-UHPM Crustal Melting during Exhumation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165(5):1009–1029.
- Weinberg, R.F., Hasalová, P., 2015. Water-Fluxed Melting of the Continental Crust: A Review. *Lithos*, 212–215:158–188. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.08.021>
- Williams, M.L., Dumond, G., Mahan, K., et al., 2014. Garnet-Forming Reactions in Felsic Orthogneiss: Implications for Densification and Strengthening of the Lower Continental Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 405: 207–219.
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., Zhang, S.B., et al., 2007. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotope Compositions of Migmatite from the North Dabie Terrane in China: Constraints on Partial Melting. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(9): 991–1009.
- Xu, S.T., Liu, Y.C., Jiang, L.L., et al., 2002. Architecture and Kinematics of the Dabie Mountains Orogen. University of Science and Technology of China Press, Hefei(in Chinese).
- Xu, S.T., Su, W., Liu, Y.C., et al., 1992. Diamond from the Dabie Shan Metamorphic Rocks and Its Implication for Tectonic Setting. *Science*, 256(5053):80–82. <https://doi.org/10.1126/science.256.5053.80>
- Zheng, Y.F., Xia, Q.X., Chen, R.X., et al., 2011. Partial Melting, Fluid Supercriticality and Element Mobility in Ultra-high-Pressure Metamorphic Rocks during Continental Collision. *Earth-Science Reviews*, 107(3–4): 342–374. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.04.004>

附中文参考文献

- 高山, 张本仁, 金振民, 等, 1999. 秦岭—大别造山带下地壳折沉作用. *中国科学(D辑)*, 29(6):532–541.
- 古晓锋, 刘贻灿, 邓亮鹏, 2013. 北大别罗田榴辉岩的同位素年代学和岩石成因及其在折返过程中的元素和同位素行为. *科学通报*, 58(22):2132–2137.
- 李曙光, 何永胜, 王水炯, 2013. 大别造山带的去山根过程与机制: 碰撞后岩浆岩的年代学和地球化学制约. *科学通报*, 58(23):2316–2322.
- 李远, 刘贻灿, 杨阳, 等, 2018. 大别山宿松变质带花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素成分. *地球科学与环境学报*, 40(1):61–75.
- 刘贻灿, 杨阳, 李洋, 2019. 北大别的多期深熔作用及山根垮塌的新证据. *地质科学*, 54(3):664–677.
- 徐树桐, 刘贻灿, 江来利, 等, 2002. 大别山造山带的构造几何学和运动学. 合肥: 中国科学技术大学出版社.