

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.018



华北东南缘五河杂岩中镁铁质麻粒岩的变质演化

王程程¹, 刘贻灿^{1*}, 杨阳¹, 张品刚^{1,2}, 聂佳珍¹

1. 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
2. 安徽省煤田地质局勘察研究院, 安徽合肥 230088

摘要: 华北东南缘五河杂岩的变质演化过程研究有助于揭示研究区前寒武纪变质基底的形成与演化历史。基于对五河杂岩中镁铁质麻粒岩进行的详细岩相学观察、矿物电子探针及锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和微量元素分析, 识别出古元古代变质演化的 3 个阶段, 重建了峰期后近等温减压及降压冷却的顺时针 $P-T-t$ 轨迹。峰期高压麻粒岩相变质阶段的代表性矿物组合为石榴子石(富 Ca 核部)+单斜辉石(富 Al)+斜长石+石英+金红石±角闪石(富 Ti), 所记录的峰期温压条件为 850~900 °C、1.5 GPa; 峰期后近等温减压麻粒岩相变质阶段, 富 Ti 角闪石分解在周围形成石榴子石+斜方辉石+斜长石±单斜辉石的矿物组合, 所记录的温压条件为 ~900 °C、1.1~1.2 GPa; 晚期角闪岩相退变质阶段, 石榴子石分解产生角闪石+斜长石±石英, 所记录的温压条件为 600~680 °C、0.65~0.75 GPa。锆石 U-Pb 定年结果表明, 高压麻粒岩相、中压麻粒岩相和角闪岩相变质时代分别为 ~1.90 Ga、~1.85 Ga 和 ~1.78 Ga。因此, 研究区镁铁质麻粒岩的变质演化过程与胶北地体可以对比, 结合已有的 2.1 Ga 花岗质岩石的成因和锆石年代学等方面研究成果, 进一步证明五河杂岩属于胶-辽-吉带的西延, 二者共同构成了华北克拉通东部一条古元古代碰撞造山带。

关键词: 镁铁质麻粒岩; 高压麻粒岩相; 前寒武纪变质基底; 古元古代; 五河杂岩; 岩石学。

中图分类号: P588.34; P586

文章编号: 1000-2383(2018)01-0296-21

收稿日期: 2017-09-16

Metamorphic Evolution of Mafic Granulites from the Wuhe Complex at the Southeastern Margin of the North China Craton

Wang Chengcheng¹, Liu Yican^{1*}, Yang Yang¹, Zhang Pingang^{1,2}, Nie Jiazhen¹

1. Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, Chinese Academy of Sciences; School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2. Exploration Institute of Anhui Coalfield Geology Bureau, Hefei 230088, China

Abstract: Investigations on metamorphic processes of the Wuhe complex provide new insights into the formation and evolution of Precambrian metamorphic basement at the southeastern margin of the North China Craton (NCC). In this paper, three Palaeoproterozoic stages of metamorphic assemblages from mafic granulites in the Wuhe complex is recognized and a clockwise $P-T-t$ path characterized by post-peak near-isothermal decompression and subsequent decompression-cooling by conducting detailed petrographic observations, mineral electron microprobe analysis, zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and trace element analysis is reconstructed. The peak HP granulite-facies metamorphism (M_1) is characterized by high-Ca cores in garnet, high-Al cores in clinopyroxene, plagioclase, quartz and rutile, yielding $P-T$ conditions of 850–900 °C and 1.5 GPa. The medium-pressure (MP) granulite facies assemblage (M_2) mainly consists of garnet+orthopyroxene+plagioclase±clinopyroxene surrounding the amphibole porphyroblasts, recording $P-T$ conditions of ~900 °C and 1.1–1.2 GPa. Symplectites or coronas com-

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41773020); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(No.2015CB856104); 高等学校博士学科点专项科研基金(No.20133402130008)。

作者简介: 王程程(1993-), 女, 硕士, 主要从事前寒武纪岩石地球化学研究。ORCID: 0000-0002-1099-6994. E-mail: upecho@outlook.com

* **通讯作者:** 刘贻灿. E-mail: liuyc@ustc.edu.cn

引用格式: 王程程, 刘贻灿, 杨阳, 等. 2018. 华北东南缘五河杂岩中镁铁质麻粒岩的变质演化. 地球科学, 43(1): 296–316.

posed of hornblende + plagioclase (M_3) surrounding the garnet porphyroblasts indicate garnet decompressional reactions occurred at 600–680 °C and 0.65–0.75 GPa. The zircon dating results can be categorized into three groups of ~1.90 Ga, ~1.85 Ga and ~1.78 Ga, corresponding to the time of HP granulite facies, MP granulite facies and amphibolite facies metamorphism. The comparable metamorphic evolution of mafic granulites from the Wuhe complex to Jiaobei terrane, combined with previous studies on petrogenesis and U-Pb ages of 2.1 Ga granitic rocks, suggest that the Wuhe complex is the west extension of the Jiao-Liao-Ji belt (JLJB) and they constitute a Paleoproterozoic collisional orogen as a whole in the eastern block of the NCC.

Key words: mafic granulite; high-pressure granulite facies; Precambrian metamorphic basement; Paleoproterozoic; Wuhe complex; petrology.

目前,有关华北前寒武纪变质基底和造山带形成演化的研究已成为国内外前寒武纪和变质岩石学等研究领域的热点和焦点(Zhao, 2014; Zhai, 2015; 刘贻灿等, 2015b),广泛出露的古元古代高级变质岩(包括高压和高温麻粒岩)为此提供了良好的天然实验室。自 20 世纪 90 年代人们发现高压麻粒岩和退变榴辉岩以来(翟明国等, 1992, 1995), 1.8~1.9 Ga 陆-陆碰撞过程中发生的高压麻粒岩相变质作用在中部造山带和东部陆块胶-辽-吉活动带中被大量报道,在变质演化和年代学等方面的研究不断深化(Zhao *et al.*, 1999, 2000; Guo *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2006; 翟明国, 2009; Tam *et al.*, 2011, 2012a, 2012b; Liu *et al.*, 2013a; Wei *et al.*, 2014; Duan *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2017; Zou *et al.*, 2017),为探讨古元古代造山过程和机制及华北克拉通的形成与演化提供了重要信息。

华北东南缘蚌埠-凤阳一带出露的前寒武纪变质基底(五河杂岩),岩石类型丰富,主要包括 TTG 片麻岩、石榴斜长角闪岩、镁铁质麻粒岩、花岗片麻岩类、云母片岩、大理岩和变质砂岩等,并伴生有古元古代片麻状钾长花岗岩和中生代花岗岩类。关于变基性岩,前人已在岩相学、变质演化过程和同位素地质年代学等方面开展了研究(许文良等, 2006; 郭素淑和李曙光, 2009; Liu *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2013; 王娟等, 2014; 刘贻灿等, 2015a, 2015b; 王娟和宋传中, 2016)。但是,有关前寒武纪基底岩石的变质阶段划分、峰期变质条件等方面研究程度仍然较低并存在较大争议。Liu *et al.* (2009) 在凤阳石榴斜长角闪岩中识别出了麻粒岩相(石榴子石+斜长石+单斜辉石+石英+金红石±富钛角闪石)、角闪岩相(斜长石+绿色角闪石+钛铁矿+榍石)和绿片岩相(绿泥石+方解石+磁铁矿)3 期矿物组合;限定的峰期温压条件为 >800 °C、1.1 GPa,达到高压麻粒岩相变质条件;此外,在古元古代变质锆石中也发现了可以代表高压麻粒岩相变质的石榴子石+单斜辉石+斜长石+石英+金红石的矿物包

体。然而,王娟等(2014)对蒙城钻孔中的石榴斜长角闪岩限定的峰期温压条件为 671~700 °C、0.82~0.95 GPa,并据此认为五河杂岩整体经历了高角闪岩相变质作用。

因此,五河杂岩变基性岩的具体变质演化过程尚不明确,特别是在是否经历了中压麻粒岩相变质叠加方面,尚缺乏岩相学方面的证据和制约,这在一定程度上受限于所研究岩石样品采样点的局限性、种类的片面性以及退变质改造。本文首次报道了含有紫苏辉石的石榴二辉麻粒岩,结合石榴麻粒岩和石榴斜长角闪岩等不同类型变基性岩的岩石学、矿物学和锆石年代学等方面的系统分析,进一步划分了五河杂岩中变基性岩的变质演化阶段并限定了各阶段温压条件和变质时代,重建了古元古代 P - T - t 演化轨迹。在此基础上,结合笔者对五河杂岩分布区 2.1 Ga 花岗质岩石的成因和锆石年代学方面的最新研究成果(Wang *et al.*, 2017),为探讨研究区古元古代地质背景及其与胶-辽-吉带的构造关系提供了新的岩石学方面制约。

1 区域地质背景

本文的华北东南缘,是指距苏鲁造山带西端的郟-庐断裂带以西约 100 km,距大别造山带北界大约 300 km 研究区(图 1)。区内前寒武纪下地壳变质岩主要以高级变质地体(或麻粒岩地体)和(麻粒岩)捕虏体或包体形式存在(Liu *et al.*, 2009, 2013b)。变质基底包括霍邱杂岩和五河杂岩,其中的五河杂岩常被中生代含石榴子石花岗岩侵入。五河杂岩出露于安徽省北部蚌埠、怀远、凤阳及五河一带(图 1),主要含有石榴斜长角闪岩、石榴麻粒岩、石榴斜长角闪片麻岩等变基性岩以及花岗片麻岩/TTG 片麻岩、云母片岩、大理岩和变质砂岩等。最新的锆石年代学数据统计结果表明,五河杂岩中 TTG 片麻岩的最老形成时代为 2.6~2.9 Ga,变基性岩、花岗

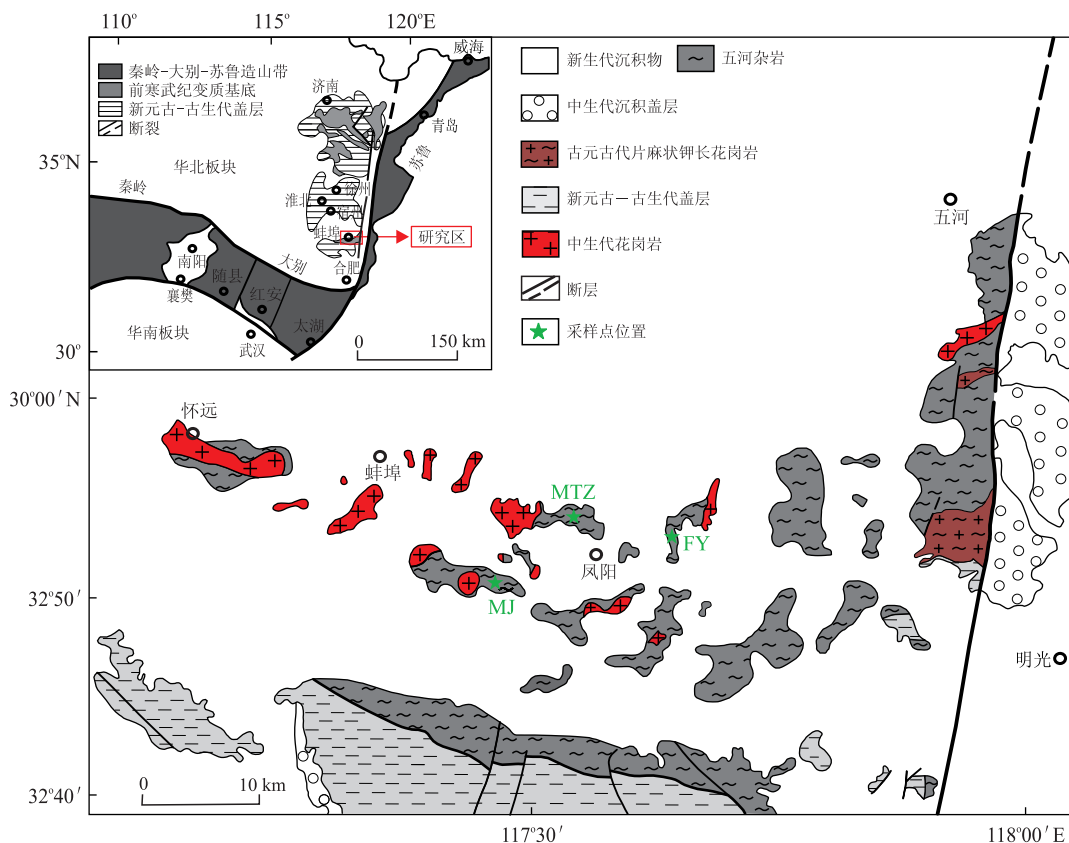


图 1 华北东南缘五河杂岩及相邻地区地质简图

Fig.1 Geological sketch of the Wuhe complex and adjacent parts of the southeastern margin of the North China Craton
MTZ.门台子;MJ.梅家;FY.凤阳;图据刘贻灿等(2015a)

片麻岩和不纯大理岩等不同类型基底岩石都经历了 1.8~1.9 Ga 多阶段麻粒岩相和角闪岩相变质作用, 峰期高压麻粒岩相变质作用时间为~1.91 Ga (Liu *et al.*, 2016, 2017b).此外,在北部徐宿地区中生代闪长斑岩中还存在大量前寒武纪下地壳包体,包括含石榴斜长角闪岩、石榴麻粒岩、含石榴角闪斜长片麻岩和花岗片麻岩等.这些深源包体记录了 2.5~2.6 Ga 和 2.1 Ga 两期可能和俯冲增生有关的岩浆作用 (Liu *et al.*, 2013b),以及~2.5 Ga 和 1.80~1.88 Ga 两期麻粒岩相变质作用 (Liu *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2012).

2 分析方法

所有矿物的电子探针分析均在合肥工业大学资源与环境工程学院电子探针分析室完成,所用仪器型号是 JEOL JXA-8230,加速电压为 15 kV,探针电流为 20 nA,束斑尺寸为 5 μm .标准矿物来自天然矿物和美国 SPI 公司合成的纯氧化物.文中所用矿物缩写:石榴子石-Grt,单斜辉石-Cpx,斜方辉石-Opx,石英-Qtz,

斜长石-Pl,钾长石-Kfs,钠长石-Ab,角闪石-Amp,榴石-Ttn,金红石-Rt,磷灰石-*Ap*.

锆石样品和标准锆石 TEM 制靶,透射、反射光图像和 CL 图像拍照工作在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心完成.锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及微量元素分析在中国科学技术大学中科院壳幔物质与环境重点实验室激光剥蚀等离子体质谱实验室完成.所用 ICP-MS 为 Agilent 7700,激光剥蚀系统为 ArF 准分子激光器(GeoLasPro, 193 nm).载气为高纯 He 气,脉冲频率 10 Hz,束斑尺寸为 32 μm ,单点分析包括空白时间~20 s 和数据采集时间~60 s.锆石 U-Pb 年龄采样国际标准锆石 91500 作为外标,每 4 个样品点测一次标准锆石.微量元素使用²⁹Si 作为内标,NIST610 作为外标,数据处理软件为 ICPMS-DataCal(Liu *et al.*, 2008, 2010).

3 岩石学和矿物学特征

五河杂岩中变基性岩(镁铁质麻粒岩和石榴斜长角闪岩或榴闪岩)常呈岩块或者构造透镜体产于



图 2 华北东南缘五河杂岩中变基性岩的野外照片

Fig.2 Photographs showing the field occurrence of the metabasic rocks from the Wuhe complex in southeastern margin of the North China Craton

a.石榴斜长角闪岩及其围岩大理岩;b,c,d.部分熔融及混合岩化作用;图 2a 和 2b 来自于刘贻灿等(2015b)

不纯大理岩(图 2a)或花岗片麻岩中,发生了一定程度的部分熔融甚至混合岩化作用(图 2b~2d)(刘贻灿等,2015b).本文研究样品的采样位置见图 1.镁铁质麻粒岩外观上呈灰黑色,细—中粒粒状变晶结构,块状构造.此外,石榴单辉麻粒岩发育的典型高压麻粒岩相矿物组合主要为石榴子石、单斜辉石、斜长石和石英,偶尔含有金红石(Liu *et al.*, 2009),镜下各矿物颗粒多呈半自形—他形粒状,平直相接,平衡共生.另外,多数样品中含有一定数量的角闪石(富钛),在部分样品中发现少量钛铁矿、黄铁矿、锆石、磷灰石、榍石等副矿物.石榴二辉麻粒岩主要矿物组合为石榴子石、单斜辉石、紫苏辉石、富钛角闪石、斜长石和石英.

3.1 石榴单辉麻粒岩

门台子石榴单辉麻粒岩(12MTZ6/12MTZ2)中石榴子石呈浅红色,粒径为 0.5~1.0 mm,含量约 25%~30%(图 3a),内部常含有单斜辉石、斜长石和富钛角闪石等矿物包体(图 3b);部分石榴子石边部有角闪石+斜长石蠕虫状后成合晶(图 3b),变质反应可能为:石榴子石+单斜辉石+水→角闪石+斜长石或者石榴子石+单斜辉石+石英+水→角闪石+斜长石(Harley, 1989).两个样品石榴子石化学成分比较均一,主要由铁铝榴石(Alm, 55%~58%,摩尔含量)、钙铝榴石(Gro, 16%~21%,摩尔含量)、镁铝榴石(Pyr, 16%~23%,摩尔含量)和锰铝榴石(Spe, 1%~2%,摩尔含量)端元组成(表 1).单斜辉石含量为 35%~40%,呈基质矿物和石榴子

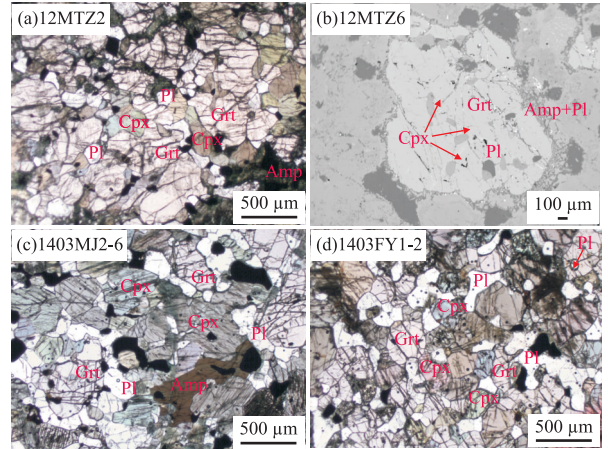


图 3 华北东南缘石榴单辉麻粒岩显微照片(a, c, d)和背散射照片(b)

Fig.3 Micrographs (a, c, d) and back scattered electron (BSE) images (b) of garnet clinopyroxene granulites, southeastern margin of the North China Craton

表 1 五河杂岩石榴单辉麻粒岩中代表性石榴子石的化学成分(%)

Table 1 Chemical composition (%) of representative garnets from garnet clinopyroxene granulites in the Wuhe complex

| 样品 | 12MTZ6 | | 12MTZ2 | | 1403MJ2-6 | | 1403FY1-2 | |
|--------------------------------|--------|-------|--------|-------|-----------|-------|-----------|--------|
| SiO ₂ | 37.86 | 38.12 | 37.64 | 37.16 | 38.38 | 37.94 | 38.91 | 38.76 |
| TiO ₂ | 0.12 | 0.10 | 0.14 | 0.10 | 0.14 | 0.15 | 0.01 | 0.06 |
| Al ₂ O ₃ | 20.80 | 20.99 | 20.56 | 20.80 | 21.10 | 21.14 | 21.66 | 21.64 |
| Cr ₂ O ₃ | — | — | — | — | — | — | 0.04 | 0.06 |
| FeO ^T | 26.55 | 26.77 | 26.85 | 27.41 | 25.10 | 21.95 | 26.17 | 27.04 |
| MnO | 0.61 | 0.68 | 0.60 | 0.55 | 0.60 | 0.61 | 0.26 | 0.23 |
| MgO | 5.91 | 5.97 | 4.60 | 4.08 | 7.24 | 5.52 | 5.97 | 5.71 |
| CaO | 6.80 | 6.80 | 8.85 | 8.75 | 6.85 | 11.77 | 7.46 | 7.20 |
| Total | 98.69 | 99.45 | 99.28 | 98.89 | 99.41 | 99.09 | 100.49 | 100.76 |
| 以 12 个氧为标准计算的阳离子系数 | | | | | | | | |
| Si | 2.99 | 2.99 | 2.98 | 2.96 | 2.98 | 2.96 | 3.01 | 3.00 |
| Ti | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| Al | 1.94 | 1.94 | 1.92 | 1.96 | 1.93 | 1.95 | 1.97 | 1.97 |
| Cr | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Fe ³⁺ | 0.06 | 0.06 | 0.09 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.02 | 0.02 |
| Fe ²⁺ | 1.69 | 1.69 | 1.68 | 1.76 | 1.56 | 1.36 | 1.67 | 1.73 |
| Mn | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.02 | 0.02 |
| Mg | 0.70 | 0.70 | 0.54 | 0.48 | 0.84 | 0.64 | 0.69 | 0.66 |
| Ca | 0.58 | 0.57 | 0.75 | 0.75 | 0.57 | 0.98 | 0.62 | 0.60 |
| Ura | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.13 | 0.19 |
| And | 3.23 | 3.20 | 4.66 | 3.26 | 3.62 | 3.62 | 1.02 | 1.09 |
| Pyr | 23.18 | 23.22 | 17.99 | 15.99 | 27.89 | 21.23 | 22.99 | 21.97 |
| Spe | 1.37 | 1.51 | 1.32 | 1.23 | 1.31 | 1.34 | 0.57 | 0.51 |
| Gro | 15.94 | 15.80 | 20.22 | 21.40 | 15.36 | 28.89 | 19.48 | 18.62 |
| Alm | 56.28 | 56.27 | 55.80 | 58.12 | 51.82 | 44.92 | 55.81 | 57.61 |

石中包裹体产出,均属于透辉石.前人研究表明单斜辉石中 Al₂O₃ 含量随压力增加而升高(Anovitz,

表 2 五河杂岩石榴单辉麻粒岩中代表性单斜辉石的化学成分 (%)

Table 2 Chemical composition (%) of representative clinopyroxenes from garnet clinopyroxene granulite in the Wuhe complex

| 样品 | 12MTZ6 | | 12MTZ2 | | 1403MJ2-6 | | 1403FY1-2 | |
|--------------------------------|--------|-------|--------|-------|-----------|-------|-----------|--------|
| SiO ₂ | 50.91 | 50.13 | 49.92 | 49.32 | 52.07 | 51.40 | 51.71 | 51.65 |
| TiO ₂ | 1.10 | 1.14 | 1.18 | 1.18 | 0.83 | 0.66 | 0.66 | 0.70 |
| Al ₂ O ₃ | 5.43 | 5.22 | 6.54 | 6.52 | 4.03 | 4.14 | 3.27 | 3.70 |
| FeO ^T | 9.82 | 9.61 | 12.15 | 12.89 | 8.49 | 9.76 | 9.41 | 9.79 |
| MnO | 0.04 | 0.02 | 0.09 | 0.09 | 0.04 | 0.11 | 0.01 | 0.03 |
| MgO | 11.70 | 11.34 | 9.06 | 8.54 | 12.21 | 11.69 | 12.63 | 12.17 |
| CaO | 20.29 | 21.11 | 20.26 | 20.66 | 21.52 | 21.40 | 22.61 | 22.05 |
| Na ₂ O | 0.63 | 0.60 | 0.58 | 0.52 | 0.42 | 0.47 | 0.50 | 0.51 |
| K ₂ O | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | — | — |
| Total | 99.96 | 99.20 | 99.80 | 99.72 | 99.68 | 99.72 | 100.81 | 100.63 |
| 以 6 个氧为标准计算的阳离子系数 | | | | | | | | |
| Si | 1.90 | 1.89 | 1.88 | 1.87 | 1.94 | 1.92 | 1.92 | 1.92 |
| Al ^{IV} | 0.10 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.06 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |
| Al ^{VI} | 0.13 | 0.12 | 0.17 | 0.16 | 0.11 | 0.11 | 0.06 | 0.08 |
| Ti | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Fe ³⁺ | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 |
| Fe ²⁺ | 0.31 | 0.30 | 0.39 | 0.41 | 0.27 | 0.31 | 0.27 | 0.30 |
| Mg | 0.65 | 0.64 | 0.51 | 0.48 | 0.68 | 0.65 | 0.70 | 0.67 |
| Ca | 0.81 | 0.85 | 0.82 | 0.84 | 0.86 | 0.86 | 0.90 | 0.88 |
| Na | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.04 |
| En | 44.65 | 46.36 | 46.53 | 47.27 | 46.79 | 46.28 | 46.68 | 46.33 |
| Fs | 35.82 | 34.67 | 28.93 | 27.21 | 36.94 | 35.16 | 36.30 | 35.59 |
| Ac | 17.04 | 16.57 | 22.14 | 23.36 | 14.60 | 16.73 | 15.15 | 16.13 |
| Wo | 2.49 | 2.40 | 2.40 | 2.16 | 1.66 | 1.82 | 1.87 | 1.95 |

表 3 五河杂岩石榴单辉麻粒岩中代表性角闪石的化学成分 (%)

Table 3 Chemical composition (%) of representative amphiboles from garnet clinopyroxene granulite in the Wuhe complex

| 样品 | 12MTZ6 | | | | 12MTZ2 | 1403MJ2-6 | |
|--------------------------------|----------------|-------|----------------|-------|--------|-----------|-------|
| | M ₂ | | M ₃ | | | | |
| SiO ₂ | 40.31 | 41.43 | 40.43 | 40.80 | 40.77 | 41.02 | 42.11 |
| TiO ₂ | 3.41 | 1.31 | 0.12 | 0.12 | 0.19 | 4.90 | 3.88 |
| Al ₂ O ₃ | 13.70 | 15.63 | 16.71 | 16.15 | 15.38 | 13.79 | 12.43 |
| FeO ^T | 17.28 | 15.15 | 17.24 | 19.47 | 20.71 | 14.85 | 13.71 |
| MnO | 0.15 | 0.10 | 0.10 | 0.14 | 0.20 | 0.06 | 0.04 |
| MgO | 7.63 | 9.84 | 8.61 | 7.77 | 6.91 | 8.82 | 11.23 |
| CaO | 10.93 | 10.49 | 10.90 | 11.00 | 11.21 | 11.26 | 11.07 |
| Na ₂ O | 2.06 | 2.33 | 2.05 | 2.09 | 1.64 | 1.31 | 1.33 |
| K ₂ O | 1.32 | 0.66 | 0.35 | 0.35 | 0.48 | 0.51 | 0.97 |
| Total | 97.08 | 97.18 | 96.71 | 98.06 | 97.50 | 96.59 | 96.81 |
| 以 23 个氧为标准计算的阳离子系数 | | | | | | | |
| Si | 6.16 | 6.19 | 6.13 | 6.16 | 6.22 | 6.16 | 6.29 |
| Al ^{IV} | 1.84 | 1.81 | 1.87 | 1.84 | 1.78 | 1.84 | 1.71 |
| Al ^{VI} | 0.63 | 0.95 | 1.11 | 1.03 | 0.99 | 0.61 | 0.47 |
| Ti | 0.39 | 0.15 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.55 | 0.44 |
| Fe ³⁺ | 0.35 | 0.32 | 0.30 | 0.27 | 0.34 | 0.70 | 0.53 |
| Fe ²⁺ | 1.85 | 1.58 | 1.89 | 2.19 | 2.31 | 1.17 | 1.18 |
| Mn | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.01 |
| Mg | 1.74 | 2.19 | 1.94 | 1.75 | 1.57 | 1.97 | 2.50 |
| Ca | 1.79 | 1.68 | 1.77 | 1.78 | 1.83 | 1.81 | 1.77 |
| Na | 0.61 | 0.68 | 0.60 | 0.61 | 0.49 | 0.38 | 0.38 |
| K | 0.26 | 0.13 | 0.07 | 0.07 | 0.09 | 0.10 | 0.19 |

1991), 包裹体和基质单斜辉石有较高的 Al₂O₃ 含

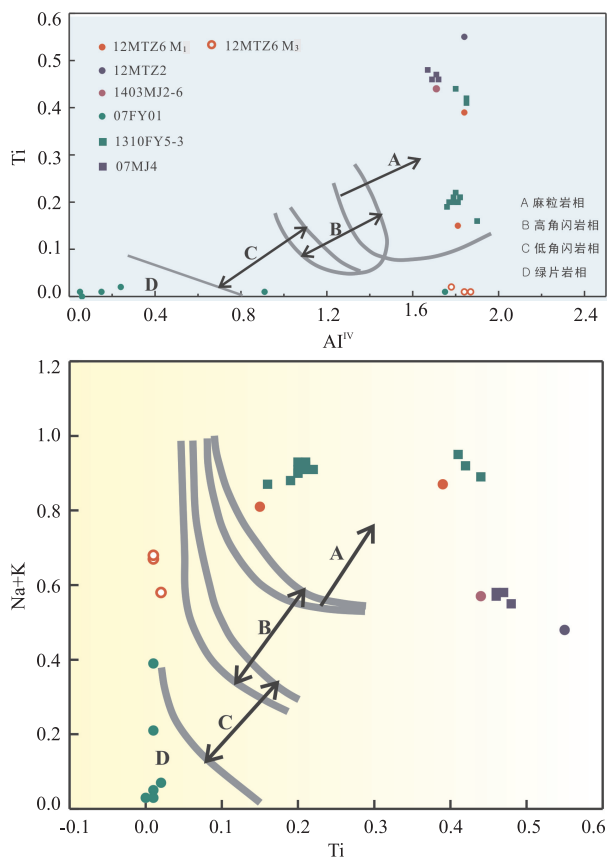


图 4 五河杂岩变基性岩中角闪石 Al^{IV}-Ti 和 Ti-(Na+K) Fig.4 Al^{IV}-Ti and Ti-(Na+K) diagrams of the amphiboles from meta-basic rocks from the Wuhe complex

图据靳是琴(1991)

量(5.22%~6.54%, 表 2), 指示二者形成的压力条件较高. 角闪石含量约 15%, 常呈基质、石榴子石包裹体和后成合晶 3 种形式存在. 基质和包裹体角闪石呈棕褐色, 为非角闪石种属, 显著富集 TiO₂ (最高可达 5%, 表 3), 在 Ti-(Na+K) 和 Al^{IV}-Ti 关系图中落入麻粒岩相区 (图 4); 后成合晶中的角闪石则具有较低的 TiO₂ 含量 (~1%), 落入低角闪岩相区 (图 4). 斜长石含量约 15%, 与角闪石相似, 也常呈基质、石榴子石包裹体和后成合晶 3 种形式出现. 基质和包裹体斜长石的化学特征相似, 但与后成合晶斜长石不同. 前者 CaO 含量为 7.8%~8.8%, Na₂O 为 6% 左右, 钙长石 (An) 端元组分为 40%~44% (摩尔含量); 后者 CaO 含量为 15%~20%, Na₂O 为 2.5% 左右, 钙长石 (An) 端元组分为 75%~80% (摩尔含量). 石英含量较少, 常作为石榴子石和斜长石中的包体存在.

梅家石榴单辉麻粒岩 (1403MJ2-6, 图 3c) 中的绝大多数石榴子石、单斜辉石等矿物成分均一, 各氧化物含量与样品 12MTZ6 相似; 一些石榴子石核部

表 4 五河杂岩石榴单辉麻粒岩中代表性斜长石化学成分(%)

Table 4 Chemical composition (%) of representative plagioclases from garnet clinopyroxene granulite in the Wuhe complex

| 样品 | 12MTZ6 | | | | 12MTZ2 | 1403FY1-2 | 1403MTZ2-6 | | | |
|--------------------------------|----------------|-------|----------------|-------|--------|-----------|------------|--------|-------|-------|
| | M ₂ | | M ₃ | | | | | | | |
| SiO ₂ | 57.51 | 57.46 | 48.84 | 45.02 | 58.14 | 57.00 | 54.85 | 54.55 | 58.29 | 58.51 |
| TiO ₂ | — | — | 0.01 | — | 0.02 | 0.08 | — | 0.05 | 0.04 | 0.04 |
| Al ₂ O ₃ | 27.21 | 27.25 | 33.01 | 35.55 | 27.04 | 26.97 | 28.40 | 28.93 | 26.38 | 26.25 |
| FeO | 0.16 | 0.05 | 0.46 | 0.35 | 0.04 | 0.15 | 0.08 | 0.39 | 0.02 | 0.09 |
| CaO | 8.59 | 8.35 | 15.39 | 18.48 | 8.32 | 8.79 | 11.44 | 11.85 | 8.08 | 7.77 |
| Na ₂ O | 6.25 | 6.58 | 2.51 | 0.44 | 6.36 | 6.15 | 4.96 | 4.84 | 6.72 | 6.45 |
| K ₂ O | 0.04 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | — | 0.12 | 0.06 | 0.19 | 0.18 |
| Total | 99.83 | 99.80 | 100.24 | 99.90 | 99.98 | 99.24 | 99.84 | 100.71 | 99.75 | 99.35 |
| 以 8 个氧为标准计算的阳离子系数 | | | | | | | | | | |
| Si | 2.58 | 2.58 | 2.23 | 2.08 | 2.60 | 2.58 | 2.48 | 2.46 | 2.61 | 2.63 |
| Al | 1.44 | 1.44 | 1.78 | 1.94 | 1.42 | 1.44 | 1.51 | 1.54 | 1.39 | 1.39 |
| Ca | 0.41 | 0.40 | 0.75 | 0.92 | 0.40 | 0.43 | 0.55 | 0.57 | 0.39 | 0.37 |
| Na | 0.54 | 0.57 | 0.22 | 0.04 | 0.55 | 0.54 | 0.43 | 0.42 | 0.58 | 0.56 |
| K | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 |
| An | 43.09 | 41.07 | 77.14 | 95.80 | 41.88 | 44.12 | 55.66 | 57.28 | 39.50 | 39.53 |
| Ab | 56.70 | 58.61 | 22.77 | 4.14 | 58.00 | 55.88 | 43.67 | 42.36 | 59.42 | 59.39 |
| Or | 0.22 | 0.32 | 0.08 | 0.07 | 0.13 | 0.00 | 0.67 | 0.36 | 1.08 | 1.08 |

明显富集 CaO(>11%),而边部 CaO 含量明显降低至~7%(表 1).这说明石榴子石核部保留了(近)峰期条件下的元素特征,而边部则在后期冷却过程中发生了元素再平衡.

风阳石榴单辉麻粒岩(1403FY1-2)中石榴子石、单斜辉石和斜长石形状较为规则,且粒径相似,为 0.2 mm 左右(图 3d),另外还有少量富钛角闪石.石榴子石成分均一,主量元素成分含量与样品 12MTZ6 相似(表 1).与门台子单斜辉石比较,该样品中单斜辉石 Al₂O₃ 含量稍低,为 2.8%~4.4%(表 2);斜长石 CaO 含量较高,在 11%~12%之间,钙长石(An)端元组分在 55%~58%之间(摩尔含量)(表 4).

3.2 石榴二辉麻粒岩

3.2.1 梅家石榴二辉麻粒岩(07MJ4) 石榴子石:含量约 25%~30%,镜下呈浅红色,呈不规则状或筛状,多数粒度小于 0.5 mm,有些含有单斜辉石、斜长石等矿物包裹体. FeO^T 含量为 26.6%~27.5%, CaO 含量为~6%, MgO 含量为~6%, MnO 含量为~1%,相应的铁铝榴石(Alm),钙铝榴石(Gro),镁铝榴石(Pyr)和锰铝榴石(Spe)端元组分分别为 56%~58%, 12%~15%, 22%~24%, ~2%(均为摩尔含量)(表 5).

辉石:包括单斜辉石和斜方辉石.单斜辉石(透辉石)含约 20%~25%, Al₂O₃ 含量在 3.5%~4.5%之间(表 6);斜方辉石(紫苏辉石)含量约 15%~20%, FeO^T 含量高于 28%, MgO 含量在 16%~18%之间,与石榴子石、单斜辉石、富钛角闪石、斜长石等粒度相似,颗粒

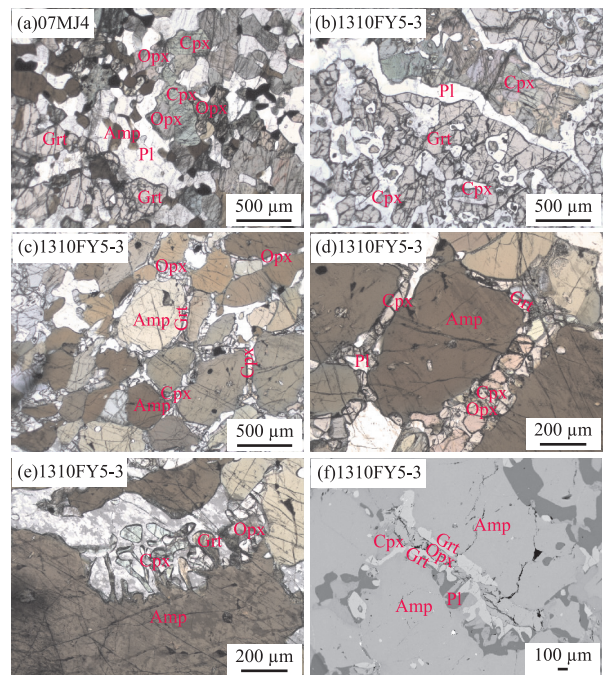


图 5 华北东南缘石榴二辉麻粒岩显微照片(a~e)和背散射照片(f)

Fig.5 Micrographs (a-e) and back scattered electron (BSE) images (f) of garnet two-pyroxene granulite, southeastern margin of the North China Craton

边界直接接触,属于平衡共生矿物组合(图 5a).

角闪石:含量约 10%,镜下呈棕褐色, TiO₂ 含量高于 4%(表 7).在 Ti-(Na+K)和 Al^{IV}-Ti 关系图落入麻粒岩相区域(图 4).

斜长石:含量约 20%~25%, CaO 含量为 7%~

表 5 五河杂岩石榴二辉麻粒岩中代表性石榴子石的化学成分 (%)

Table 5 Chemical composition (%) of representative garnets from garnet two-pyroxene granulite in the Wuhe complex

| 样品 | 1310FY5-3 基质中的石榴子石从核部—一边部—核部 | | | | | | | | | | 1310FY5-3 M ₂ | | | 07MJ4 | | |
|--------------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 37.72 | 37.62 | 37.38 | 38.10 | 38.21 | 38.05 | 38.08 | 38.37 | 38.01 | 37.84 | 38.19 | 38.63 | 38.86 | 39.02 | 38.12 | 37.86 |
| TiO ₂ | 0.09 | 0.04 | 0.09 | 0.12 | 0.09 | 0.07 | 0.11 | 0.11 | — | 0.05 | — | 0.06 | 0.01 | — | 0.10 | 0.08 |
| Al ₂ O ₃ | 21.08 | 20.77 | 20.46 | 20.79 | 20.64 | 20.73 | 20.44 | 20.64 | 20.57 | 20.56 | 21.00 | 20.67 | 21.10 | 21.01 | 20.80 | 20.57 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.04 | 0.04 | — | 0.00 | — | — | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.07 | 0.04 | 0.10 | 0.00 | — | — | — |
| Fe ²⁺ | 26.77 | 24.22 | 23.41 | 21.80 | 21.90 | 23.03 | 23.52 | 22.81 | 22.73 | 27.48 | 26.71 | 27.75 | 26.57 | 25.04 | 26.81 | 27.41 |
| MnO | 0.82 | 0.59 | 0.54 | 0.56 | 0.43 | 0.53 | 0.60 | 0.61 | 0.56 | 0.86 | 0.52 | 0.56 | 0.43 | 0.48 | 0.92 | 0.87 |
| MgO | 5.55 | 4.78 | 4.66 | 4.50 | 4.42 | 4.64 | 4.39 | 4.24 | 4.13 | 4.82 | 6.91 | 6.19 | 6.90 | 7.47 | 6.09 | 6.07 |
| CaO | 6.66 | 10.83 | 12.40 | 13.24 | 13.01 | 11.90 | 12.33 | 12.29 | 12.91 | 7.30 | 5.89 | 5.88 | 6.03 | 6.58 | 6.19 | 6.04 |
| Total | 98.78 | 98.89 | 98.97 | 99.10 | 98.72 | 98.96 | 99.53 | 99.14 | 98.94 | 99.02 | 99.28 | 99.87 | 99.92 | 99.69 | 99.07 | 98.93 |
| 以 12 个氧为标准计算的阳离子系数 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 2.99 | 2.97 | 2.95 | 2.98 | 3.00 | 2.99 | 2.98 | 3.01 | 2.99 | 3.00 | 2.99 | 3.02 | 3.01 | 3.02 | 3.00 | 2.99 |
| Ti | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| Al | 1.97 | 1.93 | 1.90 | 1.92 | 1.91 | 1.92 | 1.89 | 1.91 | 1.91 | 1.92 | 1.94 | 1.90 | 1.93 | 1.91 | 1.93 | 1.91 |
| Cr | 0.00 | 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 | 0.00 |
| Fe ³⁺ | 0.04 | 0.09 | 0.13 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.12 | 0.08 | 0.10 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.09 |
| Fe ²⁺ | 1.74 | 1.51 | 1.41 | 1.34 | 1.35 | 1.43 | 1.42 | 1.42 | 1.40 | 1.75 | 1.68 | 1.73 | 1.66 | 1.55 | 1.70 | 1.72 |
| Mn | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.03 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.06 | 0.06 |
| Mg | 0.65 | 0.56 | 0.55 | 0.52 | 0.52 | 0.54 | 0.51 | 0.50 | 0.48 | 0.57 | 0.81 | 0.72 | 0.80 | 0.86 | 0.71 | 0.71 |
| Ca | 0.56 | 0.92 | 1.05 | 1.11 | 1.09 | 1.00 | 1.03 | 1.03 | 1.09 | 0.62 | 0.49 | 0.49 | 0.50 | 0.54 | 0.52 | 0.51 |
| Ura | 0.13 | 0.11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.12 | 0.10 | 0.20 | 0.11 | 0.31 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| And | 1.85 | 4.28 | 6.37 | 4.43 | 4.26 | 4.26 | 5.85 | 4.01 | 4.83 | 3.62 | 3.45 | 4.00 | 3.17 | 3.70 | 3.37 | 4.44 |
| Pyr | 21.74 | 18.57 | 17.99 | 17.43 | 17.29 | 18.05 | 17.03 | 16.60 | 16.11 | 18.99 | 26.75 | 24.16 | 26.71 | 28.86 | 23.86 | 23.79 |
| Spe | 1.83 | 1.31 | 1.18 | 1.24 | 0.95 | 1.18 | 1.32 | 1.35 | 1.25 | 1.92 | 1.15 | 1.24 | 0.95 | 1.06 | 2.05 | 1.93 |
| Gro | 16.79 | 25.82 | 28.02 | 32.45 | 32.29 | 29.05 | 28.38 | 30.47 | 31.24 | 16.87 | 12.82 | 12.18 | 13.59 | 14.56 | 14.06 | 12.56 |
| Alm | 57.66 | 49.90 | 46.44 | 44.44 | 45.20 | 47.46 | 47.28 | 47.45 | 46.48 | 58.39 | 55.71 | 58.12 | 55.57 | 51.82 | 56.67 | 57.29 |

表 6 五河杂岩石榴二辉麻粒岩中代表性辉石的化学成分 (%)

Table 6 Chemical compositions (%) of representative pyroxenes from garnet two-pyroxene granulite in the Wuhe complex

| 样品 | 单斜辉石 | | | | | | 斜方辉石 | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|----------------|--------|--------|-------|-------|-----------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| | 1310FY5-3 | | | 07MJ4 | | | 1310FY5-3 | | | 07MJ4 | | | |
| | M ₁ | M ₂ | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 49.90 | 50.16 | 51.93 | 51.59 | 51.25 | 51.71 | 51.96 | 52.25 | 51.81 | 51.86 | 52.40 | 51.70 | 51.47 |
| TiO ₂ | 0.48 | 0.54 | 0.27 | 0.22 | 0.59 | 0.59 | 0.52 | — | 0.08 | 0.01 | 0.03 | 0.10 | 0.21 |
| Al ₂ O ₃ | 5.41 | 5.17 | 4.29 | 4.58 | 3.58 | 4.08 | 3.66 | 2.31 | 2.56 | 2.58 | 1.55 | 2.03 | 2.09 |
| FeO ^T | 9.73 | 10.44 | 7.96 | 9.27 | 11.81 | 11.26 | 11.10 | 25.31 | 24.69 | 23.38 | 28.03 | 28.08 | 28.61 |
| MnO | 0.13 | 0.09 | 0.08 | 0.31 | 0.15 | 0.16 | 0.02 | 0.22 | 0.38 | 0.33 | 0.30 | 0.32 | 0.27 |
| MgO | 11.46 | 11.78 | 12.62 | 12.54 | 11.35 | 10.75 | 11.26 | 19.69 | 20.46 | 21.23 | 17.66 | 17.25 | 16.75 |
| CaO | 20.73 | 19.66 | 22.25 | 21.06 | 20.11 | 20.72 | 20.88 | 0.37 | 0.42 | 0.52 | 0.54 | 0.82 | 0.71 |
| Na ₂ O | 1.19 | 1.09 | 0.78 | 0.81 | 0.42 | 0.44 | 0.44 | — | — | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.02 |
| K ₂ O | 0.01 | 0.02 | — | — | — | — | — | — | 0.00 | — | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Total | 99.06 | 98.96 | 100.26 | 100.43 | 99.28 | 99.82 | 99.84 | 100.16 | 100.42 | 99.90 | 100.54 | 100.34 | 100.13 |
| 以 6 个氧为标准计算的阳离子系数 | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 1.89 | 1.90 | 1.92 | 1.91 | 1.94 | 1.94 | 1.95 | 1.96 | 1.94 | 1.94 | 1.99 | 1.97 | 1.97 |
| Al ^{IV} | 0.11 | 0.10 | 0.08 | 0.09 | 0.06 | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.01 | 0.03 | 0.03 |
| Al ^{VI} | 0.13 | 0.13 | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.12 | 0.11 | 0.07 | 0.05 | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Ti | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| Fe ³⁺ | 0.07 | 0.04 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Fe ²⁺ | 0.23 | 0.29 | 0.24 | 0.26 | 0.38 | 0.36 | 0.35 | 0.80 | 0.77 | 0.72 | 0.89 | 0.90 | 0.92 |
| Mn | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Mg | 0.65 | 0.66 | 0.70 | 0.69 | 0.64 | 0.60 | 0.63 | 1.10 | 1.14 | 1.18 | 1.00 | 0.98 | 0.96 |
| Ca | 0.84 | 0.80 | 0.88 | 0.84 | 0.82 | 0.83 | 0.84 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 |
| Na | 0.09 | 0.08 | 0.06 | 0.06 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| En | 44.61 | 42.55 | 46.85 | 44.41 | 43.68 | 45.57 | 45.31 | 0.77 | 0.86 | 1.07 | 1.14 | 1.74 | 1.51 |
| Fs | 34.30 | 35.46 | 36.98 | 36.77 | 34.30 | 32.90 | 33.99 | 57.36 | 58.75 | 60.83 | 51.88 | 50.94 | 49.90 |
| Ac | 16.46 | 17.73 | 13.20 | 15.75 | 20.36 | 19.76 | 18.97 | 41.88 | 40.39 | 38.09 | 46.95 | 47.24 | 48.52 |
| Wo | 4.63 | 4.26 | 2.97 | 3.07 | 1.65 | 1.77 | 1.74 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.08 | 0.06 |

8%, Na₂O 为 7% 左右, 钙长石 (An) 端元组分为 35%~37% (摩尔含量) (表 8)。

3.2.2 凤阳石榴二辉麻粒岩 (1310FY5-3) 根据岩

相学结构及矿物之间的相互关系和矿物成份特点, 石榴子石、单斜辉石和斜长石可以分为两个世代。第一世代的石榴子石为变斑晶, 粒径为 0.5~1.0 mm,

表 7 五河杂岩石榴二辉麻粒岩中代表性角闪石的化学成分 (%)

Table 7 Chemical composition (%) of representative amphiboles from garnet two-pyroxene granulites in the Wuhe complex

| 样品 | 07MJ4 | | | | 1310FY5-3 从核部到边部 | | | | | | | | 1310FY5-3 | | | | |
|--------------------------------|------------------|-------|-------|-------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| | SiO ₂ | 41.48 | 42.22 | 41.61 | 41.59 | 41.07 | 41.02 | 40.95 | 41.05 | 41.05 | 41.37 | 41.29 | 40.93 | 41.02 | 40.83 | 40.52 | 40.49 |
| TiO ₂ | 4.08 | 4.23 | 4.12 | 4.01 | 1.75 | 1.94 | 1.75 | 1.84 | 1.85 | 1.73 | 1.67 | 1.81 | 1.73 | 1.39 | 3.58 | 3.69 | 3.88 |
| Al ₂ O ₃ | 12.40 | 12.20 | 12.14 | 12.11 | 13.66 | 13.52 | 13.36 | 13.32 | 13.57 | 13.34 | 13.58 | 13.53 | 13.86 | 14.44 | 12.63 | 12.79 | 12.28 |
| FeO ^T | 15.23 | 12.03 | 15.94 | 15.92 | 13.49 | 13.05 | 13.17 | 12.95 | 13.21 | 12.98 | 12.87 | 13.15 | 12.63 | 12.25 | 14.30 | 14.56 | 14.01 |
| MnO | 0.09 | 0.06 | 0.05 | 0.09 | 0.04 | 0.12 | 0.05 | 0.09 | 0.10 | 0.16 | 0.11 | | 0.01 | 0.05 | 0.13 | 0.05 | 0.05 |
| MgO | 9.75 | 11.54 | 9.54 | 9.38 | 11.05 | 10.87 | 11.02 | 11.17 | 11.08 | 11.20 | 10.99 | 11.18 | 11.15 | 12.15 | 10.40 | 10.02 | 10.51 |
| CaO | 10.81 | 11.10 | 11.00 | 10.83 | 10.95 | 11.29 | 11.20 | 11.15 | 11.25 | 11.18 | 11.15 | 11.33 | 11.18 | 11.50 | 10.32 | 10.37 | 10.51 |
| Na ₂ O | 1.35 | 1.47 | 1.35 | 1.32 | 1.76 | 1.73 | 1.69 | 1.75 | 1.71 | 1.83 | 1.79 | 1.82 | 1.86 | 1.88 | 1.90 | 1.79 | 1.82 |
| K ₂ O | 0.90 | 0.65 | 0.93 | 0.98 | 2.08 | 2.06 | 2.09 | 2.20 | 2.20 | 2.04 | 1.87 | 1.97 | 1.89 | 1.67 | 2.01 | 2.00 | 1.87 |
| Total | 96.13 | 95.54 | 96.70 | 96.28 | 96.87 | 96.64 | 96.37 | 96.58 | 97.05 | 96.83 | 96.32 | 96.66 | 96.28 | 97.12 | 96.80 | 96.72 | 96.81 |
| 以 23 个氧为标准计算的阳离子系数 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Si | 6.28 | 6.33 | 6.29 | 6.31 | 6.19 | 6.20 | 6.21 | 6.21 | 6.18 | 6.23 | 6.24 | 6.18 | 6.19 | 6.10 | 6.15 | 6.15 | 6.20 |
| Al ^{IV} | 1.72 | 1.67 | 1.71 | 1.69 | 1.81 | 1.80 | 1.79 | 1.79 | 1.82 | 1.77 | 1.76 | 1.82 | 1.81 | 1.90 | 1.85 | 1.85 | 1.80 |
| Al ^{VI} | 0.50 | 0.49 | 0.45 | 0.48 | 0.62 | 0.61 | 0.60 | 0.58 | 0.59 | 0.60 | 0.65 | 0.59 | 0.66 | 0.65 | 0.41 | 0.44 | 0.39 |
| Ti | 0.46 | 0.48 | 0.47 | 0.46 | 0.20 | 0.22 | 0.20 | 0.21 | 0.21 | 0.20 | 0.19 | 0.21 | 0.20 | 0.16 | 0.41 | 0.42 | 0.44 |
| Fe ³⁺ | 0.57 | 0.61 | 0.55 | 0.57 | 0.31 | 0.33 | 0.32 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.35 | 0.29 | 0.33 | 0.24 | 0.37 | 0.41 | 0.43 |
| Fe ²⁺ | 1.36 | 0.90 | 1.46 | 1.46 | 1.39 | 1.32 | 1.35 | 1.34 | 1.36 | 1.33 | 1.27 | 1.37 | 1.27 | 1.29 | 1.44 | 1.44 | 1.34 |
| Mn | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 |
| Mg | 2.20 | 2.58 | 2.15 | 2.12 | 2.48 | 2.45 | 2.49 | 2.52 | 2.49 | 2.52 | 2.47 | 2.52 | 2.51 | 2.71 | 2.35 | 2.27 | 2.37 |
| Ca | 1.75 | 1.78 | 1.78 | 1.76 | 1.77 | 1.83 | 1.82 | 1.81 | 1.81 | 1.80 | 1.80 | 1.83 | 1.81 | 1.84 | 1.68 | 1.69 | 1.70 |
| Na | 0.40 | 0.43 | 0.40 | 0.39 | 0.51 | 0.51 | 0.50 | 0.51 | 0.50 | 0.54 | 0.52 | 0.53 | 0.54 | 0.55 | 0.56 | 0.53 | 0.53 |
| K | 0.17 | 0.12 | 0.18 | 0.19 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.42 | 0.42 | 0.39 | 0.36 | 0.38 | 0.36 | 0.32 | 0.39 | 0.39 | 0.36 |

表 8 五河杂岩石榴二辉麻粒岩中代表性斜长石的化学成分 (%)

Table 8 Chemical composition (%) of representative plagioclases from garnet two-pyroxene granulites in the Wuhe complex

| 样品 | 07MJ4 | | 1310FY5-3 | | | | | | |
|--------------------------------|-------|-------|----------------|-------|--------|-------|----------------|-------|-------|
| | | | M ₁ | | | | M ₂ | | |
| SiO ₂ | 59.37 | 58.84 | 59.51 | 57.82 | 55.63 | 55.27 | 59.58 | 59.40 | 59.05 |
| TiO ₂ | — | 0.03 | 0.06 | 0.02 | 0.04 | — | 0.01 | 0.04 | 0.02 |
| Al ₂ O ₃ | 25.86 | 25.63 | 25.78 | 26.27 | 27.62 | 27.75 | 24.68 | 24.77 | 24.83 |
| FeO | 0.10 | 0.10 | 0.06 | 0.11 | 0.13 | 0.16 | 0.63 | 0.77 | 0.38 |
| CaO | 7.16 | 7.30 | 7.22 | 9.06 | 10.45 | 10.53 | 7.22 | 7.10 | 7.14 |
| Na ₂ O | 7.07 | 6.91 | 7.00 | 6.40 | 5.67 | 5.51 | 7.49 | 7.21 | 7.23 |
| K ₂ O | 0.05 | 0.13 | 0.13 | 0.10 | 0.03 | 0.07 | 0.03 | 0.02 | 0.05 |
| Total | 99.62 | 98.98 | 99.77 | 99.78 | 103.29 | 98.75 | 99.66 | 99.36 | 98.69 |
| 以 8 个氧为标准计算的阳离子系数 | | | | | | | | | |
| Si | 2.65 | 2.65 | 2.66 | 2.60 | 2.52 | 2.51 | 2.68 | 2.68 | 2.67 |
| Al | 1.36 | 1.36 | 1.36 | 1.39 | 1.47 | 1.48 | 1.31 | 1.32 | 1.32 |
| Ca | 0.34 | 0.35 | 0.35 | 0.44 | 0.51 | 0.51 | 0.35 | 0.34 | 0.35 |
| Na | 0.61 | 0.60 | 0.61 | 0.56 | 0.50 | 0.48 | 0.65 | 0.63 | 0.63 |
| K | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| An | 35.78 | 36.56 | 36.03 | 43.65 | 50.38 | 51.17 | 34.70 | 35.20 | 35.19 |
| Ab | 63.93 | 62.65 | 63.21 | 55.80 | 49.44 | 48.42 | 65.15 | 64.67 | 64.54 |
| Or | 0.29 | 0.79 | 0.77 | 0.55 | 0.18 | 0.42 | 0.15 | 0.13 | 0.26 |

多数被斜长石包围(图 5b),少量较自形颗粒的元素含量沿剖面具有明显变化.一些石榴子石从核部、幔部到边部的 FeO、MnO 和 MgO 含量先降低再升高,而 CaO 含量则先升高后降低;一些在较宽的核部元素含量稳定,而从核到边 FeO、MnO 和 MgO

含量明显升高(FeO: 21.80%~27.48%; MnO: 0.43%~0.86%; MgO: 4.4%~5.5%),而 CaO 含量则明显降低(13.2%~6.7%)(表 5, 图 6).与斑晶石榴子石接触的单斜辉石粒径为 0.5 mm 左右,元素含量变化较大,核部 Al₂O₃ 含量较高,可达 5%以

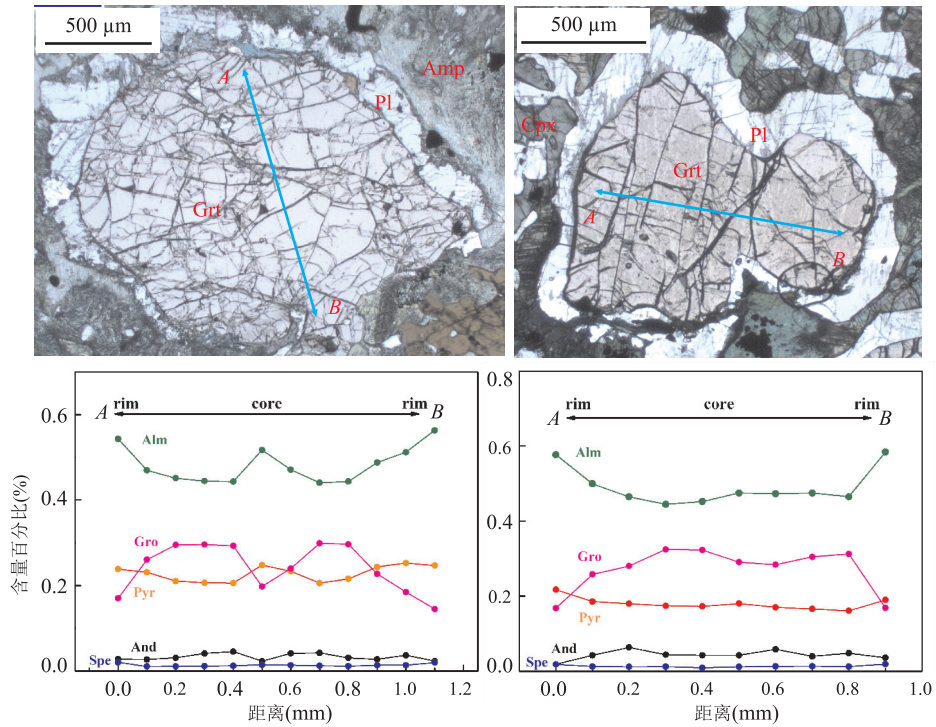


图 6 凤阳石榴二辉麻粒岩中石榴子石成分环带

Fig.6 Compositional zoning of garnets from the Fengyang garnet two-pyroxene granulite

上,而边部较低,为3%~4%。少量与石榴子石和单斜辉石平衡共生的斜长石较为自形,核部CaO含量较高,接近10%。第二代的石榴子石、单斜辉石和斜长石与斜方辉石分布于富钛角闪石周围。石榴子石呈细粒状或长条状,粒径多为100 μm左右,元素组成与基质石榴子石边部一致(表5)。单斜辉石有的呈细粒状,有的与斜长石一起形成蠕虫状共生体(图5c~5f),宽度为50~100 μm,元素组成与第一代单斜辉石相似。斜长石CaO含量与第一代相比普遍偏低(7%),钙长石(An)端元组分为30%~35%(摩尔含量)。斜方辉石(紫苏辉石)含量约15%~20%,在富钛角闪石周围出现(图5c, 5d, 5f),粒度约为200 μm,与石榴子石、单斜辉石和斜长石为平衡共生矿物组合。

角闪石呈棕褐色,与其他矿物相比,粒径较大(0.5~2.0 mm),含量约15%,与第一代的石榴子石、单斜辉石等平衡共生。不同颗粒之间元素含量有一定变化,但单个颗粒元素组成均一,从核到边无明显变化(表7)。富集TiO₂,一些颗粒中TiO₂含量为1%~2%,一些为3%~4%,在Ti-(Na+K)和Al^{IV}-Ti关系图落入麻粒岩相区域(图4)。多数颗粒周围有石榴子石+单斜辉石+斜方辉石+斜长石冠状体(图5d~5f),或者单斜辉石+斜长石蠕虫状后成

合晶(图5c)。

4 变质阶段划分及温压条件

根据上述五河杂岩中变基性岩的矿物成分变化和矿物转变结构等方面的详细研究,可以识别出3个变质阶段:(1)峰期高压麻粒岩相;(2)峰期后近等温减压麻粒岩相变质;(3)晚期角闪岩相变质阶段。利用多种地质温压计计算了不同变质阶段的温压条件,包括4种Grt-Cpx温度公式:

$$T(^{\circ}\text{C}) = [3\ 104X_{\text{Ca}}^{\text{Grt}} + 3\ 030 + 10.86P(\text{kb})] / (\ln K_{\text{D}} + 1.9034) - 273 \text{ (Ellis and Green, 1979)}, \quad (1)$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = [-6\ 173(X_{\text{Ca}})^2 + 6\ 713X_{\text{Ca}} + 1\ 879 + 10P(\text{kb})] / (\ln K_{\text{D}} + 1.393) - 273 \text{ (Krogh, 1988)}, \quad (2)$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = [2\ 790 + 10P(\text{kb}) + 3\ 140X_{\text{Ca}}] / (\ln K_{\text{D}} + 1.735) - 273 \text{ (Powell, 1985)}, \quad (3)$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = [(1\ 939.9 + 3\ 270X_{\text{Ca}}^{\text{Grt}} - 1\ 396(X_{\text{Ca}}^{\text{Grt}})^2 + 3\ 319X_{\text{Mn}}^{\text{Grt}} - 3\ 535(X_{\text{Grt}}^{\text{Mn}})^2 + 1\ 105X_{\text{Grt}}^{\text{Mg}\#} - 3\ 561(X_{\text{Grt}}^{\text{Mg}\#})^2 + 2\ 324(X_{\text{Grt}}^{\text{Mg}\#})^3 + 169.4P(\text{GPa})] / (\ln K_{\text{D}} + 1.223) - 273 \text{ (Ravna, 2000a)}. \quad (4)$$

两种Cpx-Opx温度公式:

$$T(^{\circ}\text{C}) = [7\ 341 / (3.355 + 2.44X_{\text{Fe}}^{\text{Cpx}} - \ln K_{\text{D}}) - 273 \text{ (Wells, 1977)}, \quad (5)$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = [24\ 787 + 678P(\text{GPa})] / [15.67 + 14.37T_{\text{Cpx}} + 3.69F_{\text{Cpx}} - 3.25X_{\text{Is}} + (\ln K_{\text{D}})^2] - 273$$

(Taylor, 1998). (6)

Grt-Cpx-Pl-Qtz 压力公式:

$$P(\text{kbar}) = 2.60 + 0.017\ 18T(\text{K}) + 0.003\ 596\ T(\text{K})\ln K_{\text{D}}$$

(Eckert *et al.*, 1991). (7)

Grt-Opx-Pl-Qtz 压力公式:

$$P(\text{bar}) = 3\ 944 + 13.07 + 3.503\ 8T(\text{K})\ln K_{\text{D}}$$

(Bhattacharya *et al.*, 1991). (8)

Grt-Amp 温度公式:

$$T(^{\circ}\text{C}) = [1\ 504 + 1\ 784X_{\text{Ca}}^{\text{Grt}} + X_{\text{Ca}}^{\text{Grt}}/\ln K_{\text{D}} + 0.720] - 273$$

(Ravna, 2000b). (9)

Amp-Pl 压力公式:

$$P(\text{kbar}) = (8.314\ 4T(\text{K})\ln D_{\text{Al/Si}}^{\text{Pl/Amp}} - 8.7T(\text{K}) + 23\ 377X_{\text{Al}}^{\text{Pl}} + 7\ 579X_{\text{Ab}} - 11\ 302) / (-274)$$

(Molina *et al.*, 2015). (10)

4.1 峰期高压麻粒岩相变质(M₁)

主要矿物组合为石榴子石+单斜辉石+斜长石+石英±角闪石(高 Ti)±金红石.高 Ti 角闪石普遍存在,在多数样品中粒径较大(>0.5 mm),与石榴子石、单斜辉石、斜长石等平衡共生,说明其在(近)峰期条件下稳定存在.采自不同地区的石榴麻粒岩温压计算结果显示,不同样品之间的温压范围有一定差异,从门台子到梅家到凤阳样品温压结果逐渐降低(表 9, 表 10).门台子石榴基性麻粒岩温压条件是 900 °C、1.3~1.4 GPa 和 850 °C、1.3~1.4 GPa,梅家石榴麻粒岩为 800 °C、1.1~1.2 GPa,凤阳石榴麻粒岩为 750 °C、0.9~1.0 GPa.不同地点样品峰期条件的差异,可能代表了一个碰撞造山带岩石地质体的岩性柱,也可能是在峰期之后石榴子石与单斜辉石之间发生了 Fe-Mg 再平衡而没有保留峰期变质条件(Frost and Chacko, 1989; Harley, 1989; Spear and Florence, 1992; Pattison, 2003),相对较低的温压计算结果即为发生再平衡时的温压条件(Liu *et al.*, 2015b).笔者选择凤阳石榴二辉麻粒岩中高 CaO 的石榴子石核部、高 Al₂O₃ 的单斜辉石、基质中的斜长石和石英,利用上述 Grt-Cpx 温度计和 Grt-Cpx-Pl-Qtz 压力计来进行温压计算.计算结果显示,不同温度计计算结果有一定差异,但总体温度多高于 850 °C,部分接近 900 °C,压力为 1.5 GPa(表 11, 表 12, 表 13).

4.2 峰期后近等温减压麻粒岩相变质阶段(M₂)

在 1310FY5-3 样品中,沿峰期矿物棕褐色角闪石周围,分布石榴子石+单斜辉石+紫苏辉石+斜

表 9 石榴麻粒岩中石榴子石-单斜辉石地质温度计数据
Table 9 Calculated results using the garnrt-clinopyroxene geothermometer for the garnet granulite

| 样品号 | 矿物对 | T ₁ (°C) | T ₂ (°C) | T ₃ (°C) | P(GPa) | T ₄ (°C) |
|-----------|-----|---------------------|---------------------|---------------------|--------|---------------------|
| 12MTZ6 | 4 | 913~942 | 874~908 | 886~916 | 1.3 | 881~916 |
| 12MTZ2 | 4 | 845~894 | 807~863 | 817~868 | 1.3 | 800~860 |
| 1403MJ2-6 | 4 | 826~879 | 772~838 | 801~856 | 1.2 | 737~802 |
| 1403FY1-2 | 6 | 755~814 | 692~757 | 724~784 | 1.0 | 670~735 |

注: T₁ 据 Ellis and Green, 1979; T₂ 据 Krogh(1988); T₃ 据 Powell(1985); T₄ 据 Ravna (2000a); 所用压力值来自于表 10 计算结果.

表 10 石榴麻粒岩中石榴子石-单斜辉石-斜长石-石英地质压力计数据
Table 10 Calculated results using the garnrt-clinopyroxene-plagioclase-quartz geobarometer for the garnet granulite

| 样品号 | 变质阶段 | Cpx | | Grt | | Pl | | T(°C) | P(GPa) |
|-----------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----|-------|--------|
| | | a _{Di} | X _{Fe} | X _{Mg} | X _{Ca} | X _{An} | | | |
| 12MTZ6 | M ₁ | 0.46 | 0.55 | 0.23 | 0.21 | 0.43 | 900 | 1.33 | |
| | | 0.49 | 0.55 | 0.23 | 0.23 | 0.41 | 900 | 1.35 | |
| | | 0.46 | 0.55 | 0.23 | 0.22 | 0.42 | 900 | 1.38 | |
| | | 0.42 | 0.56 | 0.22 | 0.22 | 0.41 | 900 | 1.36 | |
| | | 0.44 | 0.56 | 0.25 | 0.19 | 0.44 | 900 | 1.31 | |
| 12MTZ2 | M ₁ | 0.49 | 0.54 | 0.20 | 0.26 | 0.29 | 850 | 1.38 | |
| | | 0.42 | 0.57 | 0.19 | 0.25 | 0.32 | 850 | 1.33 | |
| | | 0.48 | 0.56 | 0.18 | 0.26 | 0.28 | 850 | 1.34 | |
| | | 0.44 | 0.56 | 0.19 | 0.25 | 0.28 | 850 | 1.38 | |
| | | 0.42 | 0.57 | 0.18 | 0.25 | 0.29 | 850 | 1.38 | |
| 1403MJ2-6 | M ₁ | 0.48 | 0.54 | 0.29 | 0.18 | 0.41 | 800 | 1.22 | |
| | | 0.59 | 0.54 | 0.29 | 0.17 | 0.43 | 800 | 1.14 | |
| | | 0.55 | 0.54 | 0.28 | 0.18 | 0.43 | 800 | 1.14 | |
| 1403FY1-2 | M ₁ | 0.55 | 0.57 | 0.23 | 0.21 | 0.57 | 750 | 0.92 | |
| | | 0.51 | 0.58 | 0.22 | 0.20 | 0.58 | 750 | 0.90 | |
| | | 0.56 | 0.57 | 0.23 | 0.21 | 0.56 | 750 | 0.92 | |

注: 所用温度值来自于表 9 计算结果.

长石(图 5d~5f),石榴子石+单斜辉石+斜长石后成合晶(图 5c),这些矿物代表峰期后近等温减压麻粒岩相变质阶段的矿物组合,反应过程可能为 Amp+Qtz→Grt+Cpx+melt 和 Amp+Qtz→Opx+Grt+Pl±melt.对于石榴子石+单斜辉石+紫苏辉石+斜长石矿物组合,Cpx-Opx 温度计结果多高于 900 °C(表 12),Grt-Cpx 温度计结果稍低,但也多介于 850~900 °C(表 11),Grt-Opx-Pl-Qtz 压力计结果为 1.1~1.2 GPa(表 13).对于石榴子石+单斜辉石+斜长石组合,Grt-Cpx 温度计结果多集中在 700~750 °C(表 11),Grt-Cpx-Pl-Qtz 压力计结果为 1.1 GPa 左右(表 13).梅家石榴二辉麻粒岩(07MJ4) Grt-Cpx 和 Cpx-Opx 温度结果多高达 900 °C(表 11, 表 12),Grt-Opx-Pl-Qtz 压力计结果为~1.2 GPa(表 13).

表 11 石榴二辉麻粒岩中石榴子石—单斜辉石地质温度计数据

Table 11 Calculated results using the garnrt-clinopyroxene geothermometer for the garnet two-pyroxene granulite

| 样品号 | 矿物对 | T_1 (°C) | T_2 (°C) | T_3 (°C) | P (GPa) | T_4 (°C) |
|--|------------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| 1310FY5-3 Grt+Cpx+Pl | M ₁ 8 | 845~913 | 820~892 | 831~902 | 1.5 | 773~844 |
| 1310FY5-3 富钛角闪石周围 Grt + Cpx + Opx + Pl 交生体 | M ₂ 5 | 730~776 | 677~728 | 723~771 | 1.2 | 692~712 |
| 07MJ4 | M ₁ 5 | 913~942 | 874~908 | 886~916 | 1.2 | 881~916 |

注: T_1 据 Ellis and Green(1979); T_2 据 Krogh(1988); T_3 据 Powell(1985); T_4 据 Ravna(2000a); 所用压力值来自于表 13 计算结果.

表 12 石榴二辉麻粒岩中单斜辉石—斜方辉石地质温度计数据

Table 12 Calculated results using the clinopyroxene-orthopyroxene geothermometer for the garnet two-pyroxene granulite

| 样品号 | Cpx a_{En} | Opx a_{En} | $\ln K_D$ | T (°C) | Cpx a_{En} | Opx a_{En} | $\ln K_d$ | P (GPa) | T (°C) |
|--|-----------------|-----------------|-----------|----------|-----------------|-----------------|-----------|--------------|-------------|
| 07MJ4 | 0.04 | 0.25 | -1.87 | 878 | 0.11 | 0.91 | -2.13 | 1.2 | 935 |
| | 0.04 | 0.24 | -1.75 | 898 | 0.11 | 0.88 | -2.10 | 1.2 | 937 |
| | 0.04 | 0.25 | -1.89 | 873 | 0.10 | 0.90 | -2.20 | 1.2 | 909 |
| | 0.05 | 0.23 | -1.57 | 926 | 0.13 | 0.87 | -1.89 | 1.2 | 982 |
| | 0.04 | 0.24 | -1.83 | 882 | 0.11 | 0.88 | -2.11 | 1.2 | 935 |
| 1310FY5-3 富钛角闪石周围 Grt + Cpx + Opx + Pl 交生体 | 0.05 | 0.31 | -1.83 | 908 | 0.10 | 0.89 | -2.23 | 1.2 | 930 |
| | 0.04 | 0.33 | -2.21 | 849 | 0.06 | 0.86 | -2.59 | 1.2 | 832 |
| | 0.04 | 0.35 | -2.06 | 887 | 0.08 | 0.86 | -2.32 | 1.2 | 910 |
| | 0.05 | 0.31 | -1.72 | 932 | 0.11 | 0.87 | -2.08 | 1.2 | 957 |
| | 0.05 | 0.33 | -1.93 | 900 | 0.09 | 0.88 | -2.24 | 1.2 | 909 |

注: 所用压力值来自于表 13 计算结果.

表 13 石榴二辉麻粒岩中石榴子石—单斜辉石—斜长石—石英和石榴子石—斜方辉石—斜长石—石英地质压力计数据

Table 13 Calculated results using the garnrt-clinopyroxene-plagioclase-quartz and garnrt-orthopyroxene-plagioclase-quartz geobarometer for the garnet two-pyroxene granulite

| 样品号 | 变质阶段 | Cpx | | Grt | | Pl | | T (°C) | P (GPa) | |
|--|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|----------|-----------|------|
| | | a_{Di} | X_{Fe} | X_{Mg} | X_{Ca} | X_{An} | | | | |
| 1310FY5-3 Grt+Cpx+Pl | M ₁ | 0.48 | 0.47 | 0.18 | 0.35 | 0.44 | 850 | 1.51 | | |
| | | 0.45 | 0.45 | 0.18 | 0.37 | 0.50 | 850 | 1.52 | | |
| | | 0.47 | 0.46 | 0.17 | 0.37 | 0.50 | 850 | 1.49 | | |
| 1310FY5-3 富钛角闪石周围 Grt + Cpx + Pl 交生体 | M ₂ | 0.44 | 0.61 | 0.22 | 0.17 | 0.38 | 750 | 1.13 | | |
| | | 0.45 | 0.59 | 0.24 | 0.17 | 0.39 | 750 | 1.13 | | |
| | | 0.46 | 0.58 | 0.25 | 0.17 | 0.38 | 750 | 1.20 | | |
| 1310FY5-3 富钛角闪石周围 Grt + Cpx + Opx + Pl | M ₂ | Opx | | Grt | | Pl | | T (°C) | P (GPa) | |
| | | a_{Di} | X_{Fe} | X_{Mg} | X_{Ca} | X_{An} | | | | |
| | | 0.65 | 0.56 | 0.27 | 0.16 | 0.39 | 900 | | | 1.20 |
| | | 0.66 | 0.58 | 0.24 | 0.16 | 0.37 | 900 | | | 1.13 |
| | | 0.67 | 0.56 | 0.27 | 0.17 | 0.39 | 900 | | | 1.18 |
| | | 0.65 | 0.58 | 0.25 | 0.16 | 0.36 | 900 | | | 1.17 |
| 07MJ4 | M ₁ | 0.65 | 0.58 | 0.24 | 0.17 | 0.35 | 900 | 1.17 | | |
| | | 0.59 | 0.57 | 0.24 | 0.17 | 0.36 | 900 | 1.23 | | |
| | | 0.58 | 0.57 | 0.24 | 0.17 | 0.37 | 900 | 1.23 | | |
| | | 0.57 | 0.56 | 0.24 | 0.18 | 0.36 | 900 | 1.22 | | |
| | | 0.58 | 0.57 | 0.23 | 0.18 | 0.38 | 900 | 1.25 | | |
| | | 0.57 | 0.58 | 0.23 | 0.17 | 0.37 | 900 | 1.29 | | |

注: 所用温度值来自于表 11 和 12 计算结果.

4.3 晚期角闪岩相变质 (M₃)

石榴麻粒岩部分石榴子石边部退变分解为角闪石和斜长石的蠕虫状后合成晶 (图 3b), 部分角闪石呈单斜辉石的退变边. 反应过程可能为 Grt +

$H_2O \rightarrow Amp + Pl, Grt + Cpx + H_2O \rightarrow Amp + Pl, Grt + Cpx + Qtz + H_2O \rightarrow Amp + Pl$ 和 $Cpx + Pl + H_2O \rightarrow Amp$. 利用 Grt-Amp 温度计 (Ravna, 2000b) 和 Amp-Pl 压力计 (Molina *et al.*, 2015) 计算的温

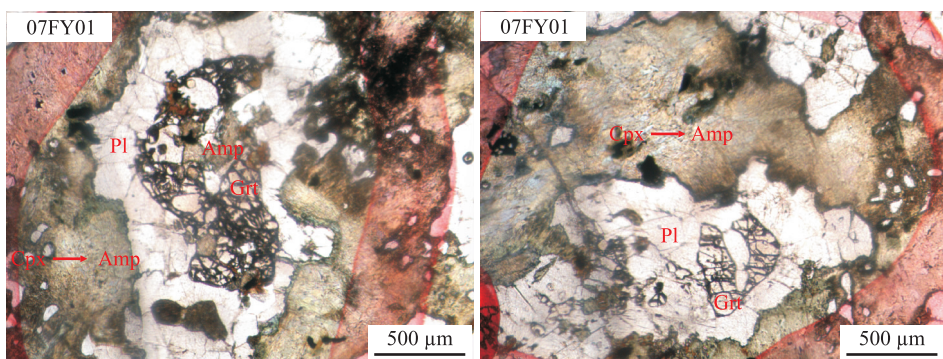


图 7 华北东南缘五河杂岩中石榴斜长角闪岩的显微照片

Fig.7 Micrographs of garnet amphibolites from the Wuhe complex in southeastern margin of the North China Craton

压范围为 $T=600\sim 680\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $P=0.65\sim 0.75\text{ GPa}$ 。

5 锆石 U-Pb 定年

对一个石榴斜长角闪岩和一个石榴二辉麻粒岩样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和微量元素分析,定年结果见表 14,微量元素见表 15。由于锆石定年区域 U 含量较低, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄精度要优于 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,故本文采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。

石榴斜长角闪岩(07FY01) 主要矿物组合为石榴子石、斜长石和绿色角闪石,另含有少量的富钛角闪石、单斜辉石、榭石和金红石。部分石榴子石中含有斜长石和金红石等矿物包体,多数被斜长石和角闪石围绕,有的完全被斜长石和角闪石取代呈石榴子石假象。局部可见单斜辉石被绿色角闪石和极细小的斜长石取代,应为后期角闪岩相退变质产物(图 7)。锆石粒度比较均一,为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 左右,浑圆状,在阴极发光图像中呈淡灰色—白色,发光性较强。多数无明显结构,部分具有面状、扇形和冷杉叶分带特征,少量含有深灰色的核。该样品经历了高压麻粒岩相变质(Liu *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2013),笔者在部分锆石中发现有单斜辉石、金红石和磷灰石等矿物包体(图 8a, 8d)。23 个分析点 Th/U 比值为 $0.11\sim 0.53$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为 $(1\ 828\pm 58)\sim (1\ 974\pm 62)\text{ Ma}$,多数具有明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常以及平坦的 HREE 配分模式(图 10),与麻粒岩相锆石特征一致(吴元保和郑永飞, 2004)。年龄可进一步分为 3 组(图 9a, 9b):第 1 组包括分析点 2.1、3.1、6.1、7.1、8.1、14.1、15.1、16.1、17.1、21.1 和 23.1, ΣREE 为 $33\times 10^{-6}\sim 657\times 10^{-6}$, Th 和 U 含量分别为 $1\times 10^{-6}\sim 24\times 10^{-6}$ 和 $10\times 10^{-6}\sim 93\times 10^{-6}$, Th/U 比值为 $0.13\sim 0.38$, δEu 值多小于 1,

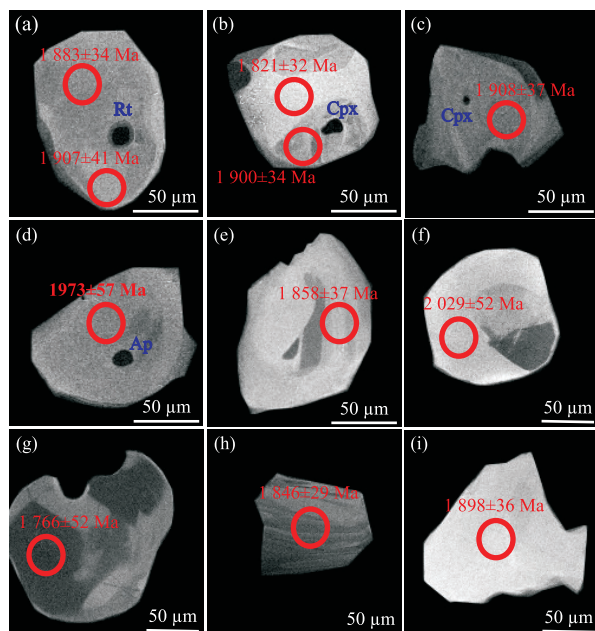


图 8 石榴斜长角闪岩(07FY01, a~e)和石榴二辉麻粒岩(07MJ4, f~i)锆石中矿物包体、阴极发光图像及 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Fig.8 Plane-polarized light images of mineral inclusions, cathodoluminescence (CL) images and LA-ICP-MS U-Pb ages of zircons from garnet amphibolite (07FY01, a~e) and garnet two-pyroxene granulite (07MJ4, f~i)

(Tb/Yb)_N 多为 0.5 左右,加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $1\ 904\pm 23\text{ Ma}$ (MSWD=0.21);第 2 组包括分析点 1.1、4.1、5.1、9.1、10.1、11.1、13.1、18.1、20.1 和 22.1, ΣREE 为 $46\times 10^{-6}\sim 490\times 10^{-6}$, Th 和 U 含量分别为 $2\times 10^{-6}\sim 30\times 10^{-6}$ 和 $12\times 10^{-6}\sim 102\times 10^{-6}$, Th/U 比值为 $0.14\sim 0.53$, δEu 值总体比第一组稍大,为 $0.36\sim 2.73$, (Tb/Yb)_N 值为 $0.29\sim 1.28$, 加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $1\ 849\pm 24\text{ Ma}$ (MSWD=0.22);第 3 组包括分析点 12.1 和 19.1, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$

表 14 石榴斜长角闪岩 (07FY01) 和石榴二辉麻粒岩 (07SMJ4) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 数据
Table 14 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for sample garnet amphibolite (07FY01) and garnet two-pyroxene granulite (07SMJ4)

| 点号 | U (10 ⁻⁶) | Th (10 ⁻⁶) | Th/ U | ²⁰⁶ Pb* (10 ⁻⁶) | ²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb* | ±1σ | ²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U | ±1σ | ²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U | ±1σ | 年龄 (Ma) | | |
|-----------|--------------------------|---------------------------|----------|---|--|-------|--|-------|--|-------|---|-----|-------|
| | | | | | | | | | | | ²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb* | ±1σ | |
| 样品 07FY01 | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1 | 17 | 2 | 0.14 | 6 | 0.124 | 0.010 | 5.683 | 0.462 | 0.332 | 0.011 | 2 016 | 132 | 1 848 |
| 2.1 | 73 | 21 | 0.29 | 25 | 0.107 | 0.006 | 4.990 | 0.272 | 0.339 | 0.008 | 1 742 | 91 | 1 884 |
| 3.1 | 49 | 13 | 0.26 | 17 | 0.123 | 0.007 | 5.906 | 0.348 | 0.349 | 0.008 | 1 997 | 96 | 1 930 |
| 4.1 | 36 | 11 | 0.31 | 12 | 0.106 | 0.007 | 4.888 | 0.323 | 0.336 | 0.008 | 1 725 | 110 | 1 866 |
| 5.1 | 59 | 18 | 0.30 | 20 | 0.107 | 0.006 | 4.915 | 0.299 | 0.334 | 0.008 | 1 744 | 101 | 1 858 |
| 6.1 | 93 | 22 | 0.24 | 32 | 0.114 | 0.006 | 5.406 | 0.283 | 0.345 | 0.007 | 1 860 | 85 | 1 909 |
| 7.1 | 11 | 1 | 0.13 | 4 | 0.108 | 0.009 | 5.072 | 0.450 | 0.340 | 0.012 | 1 770 | 148 | 1 886 |
| 8.1 | 10 | 1 | 0.13 | 3 | 0.126 | 0.011 | 6.010 | 0.526 | 0.346 | 0.012 | 2 044 | 151 | 1 914 |
| 9.1 | 57 | 15 | 0.27 | 19 | 0.112 | 0.006 | 5.158 | 0.283 | 0.335 | 0.007 | 1 825 | 92 | 1 864 |
| 10.1 | 12 | 2 | 0.16 | 4 | 0.114 | 0.009 | 5.152 | 0.431 | 0.328 | 0.012 | 1 864 | 138 | 1 828 |
| 11.1 | 33 | 17 | 0.53 | 11 | 0.112 | 0.007 | 5.188 | 0.324 | 0.336 | 0.008 | 1 830 | 105 | 1 869 |
| 12.1 | 10 | 2 | 0.16 | 3 | 0.098 | 0.009 | 4.828 | 0.454 | 0.358 | 0.013 | 1 581 | 163 | 1 974 |
| 13.1 | 102 | 30 | 0.29 | 33 | 0.109 | 0.005 | 4.918 | 0.247 | 0.326 | 0.007 | 1 787 | 83 | 1 821 |
| 14.1 | 82 | 22 | 0.26 | 28 | 0.105 | 0.005 | 4.925 | 0.256 | 0.339 | 0.007 | 1 719 | 86 | 1 883 |
| 15.1 | 73 | 20 | 0.27 | 25 | 0.113 | 0.006 | 5.316 | 0.287 | 0.343 | 0.007 | 1 840 | 91 | 1 900 |
| 16.1 | 28 | 9 | 0.31 | 9 | 0.120 | 0.007 | 5.679 | 0.357 | 0.344 | 0.009 | 1 951 | 104 | 1 907 |
| 17.1 | 64 | 24 | 0.38 | 22 | 0.108 | 0.006 | 5.138 | 0.282 | 0.344 | 0.008 | 1 770 | 92 | 1 908 |
| 18.1 | 53 | 10 | 0.18 | 17 | 0.101 | 0.006 | 4.666 | 0.269 | 0.334 | 0.008 | 1 651 | 97 | 1 856 |
| 19.1 | 11 | 1 | 0.11 | 4 | 0.110 | 0.011 | 5.412 | 0.501 | 0.358 | 0.012 | 1 793 | 171 | 1 973 |
| 20.1 | 23 | 7 | 0.31 | 8 | 0.124 | 0.008 | 5.700 | 0.363 | 0.333 | 0.009 | 2 017 | 107 | 1 852 |
| 21.1 | 21 | 6 | 0.31 | 7 | 0.120 | 0.008 | 5.634 | 0.391 | 0.341 | 0.009 | 1 953 | 118 | 1 892 |
| 22.1 | 69 | 22 | 0.32 | 22 | 0.110 | 0.006 | 4.953 | 0.288 | 0.327 | 0.008 | 1 795 | 99 | 1 826 |
| 23.1 | 41 | 10 | 0.23 | 15 | 0.109 | 0.007 | 5.284 | 0.333 | 0.351 | 0.008 | 1 788 | 109 | 1 937 |
| 样品 07MJ4 | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1 | 8 | 2 | 0.22 | 3 | 0.129 | 0.009 | 5.761 | 0.560 | 0.324 | 0.011 | 2 082 | 120 | 1 811 |
| 2.1 | 1 | 1 | 0.20 | 2 | 0.107 | 0.010 | 6.823 | 0.707 | 0.327 | 0.014 | 2 362 | 114 | 1 823 |
| 3.1 | 31 | 12 | 0.37 | 10 | 0.111 | 0.005 | 5.246 | 0.346 | 0.343 | 0.008 | 1 817 | 82 | 1 899 |
| 4.1 | 53 | 12 | 0.23 | 17 | 0.110 | 0.005 | 5.043 | 0.309 | 0.332 | 0.007 | 1 804 | 79 | 1 847 |
| 5.1 | 12 | 3 | 0.26 | 4 | 0.116 | 0.007 | 5.311 | 0.440 | 0.333 | 0.010 | 1 891 | 101 | 1 853 |
| 6.1 | 15 | 5 | 0.30 | 5 | 0.112 | 0.006 | 5.699 | 0.462 | 0.370 | 0.011 | 1 828 | 99 | 2 029 |
| 7.1 | 15 | 5 | 0.35 | 5 | 0.118 | 0.006 | 5.531 | 0.437 | 0.340 | 0.010 | 1 923 | 96 | 1 889 |
| 8.1 | 17 | 4 | 0.26 | 6 | 0.115 | 0.006 | 5.349 | 0.386 | 0.337 | 0.009 | 1 883 | 89 | 1 871 |
| 9.1 | 843 | 391 | 0.46 | 265 | 0.108 | 0.004 | 4.728 | 0.248 | 0.318 | 0.005 | 1 764 | 68 | 1 779 |
| 10.1 | 130 | 46 | 0.36 | 42 | 0.110 | 0.004 | 5.008 | 0.282 | 0.330 | 0.006 | 1 802 | 72 | 1 837 |
| 11.1 | 43 | 9 | 0.22 | 14 | 0.112 | 0.005 | 5.044 | 0.306 | 0.326 | 0.007 | 1 834 | 76 | 1 834 |
| 12.1 | 45 | 10 | 0.24 | 15 | 0.114 | 0.005 | 5.579 | 0.349 | 0.356 | 0.008 | 1 859 | 78 | 1 963 |
| 13.1 | 15 | 7 | 0.47 | 5 | 0.122 | 0.007 | 5.315 | 0.421 | 0.316 | 0.009 | 1 984 | 96 | 1 772 |
| 14.1 | 11 | 4 | 0.38 | 4 | 0.110 | 0.006 | 5.139 | 0.418 | 0.338 | 0.011 | 1 804 | 98 | 1 877 |
| 15.1 | 35 | 10 | 0.28 | 11 | 0.118 | 0.005 | 5.406 | 0.341 | 0.332 | 0.007 | 1 930 | 79 | 1 846 |
| 16.1 | 11 | 4 | 0.36 | 3 | 0.119 | 0.009 | 5.155 | 0.533 | 0.315 | 0.011 | 1 936 | 131 | 1 766 |
| 17.1 | 187 | 87 | 0.47 | 61 | 0.109 | 0.004 | 4.985 | 0.271 | 0.331 | 0.006 | 1 789 | 71 | 1 841 |
| 18.1 | 147 | 64 | 0.44 | 48 | 0.106 | 0.004 | 4.823 | 0.264 | 0.330 | 0.006 | 1 733 | 71 | 1 838 |
| 19.1 | 23 | 7 | 0.29 | 8 | 0.111 | 0.005 | 5.044 | 0.329 | 0.328 | 0.007 | 1 823 | 82 | 1 830 |
| 20.1 | 20 | 6 | 0.33 | 6 | 0.109 | 0.006 | 5.087 | 0.384 | 0.337 | 0.009 | 1 790 | 95 | 1 872 |
| 21.1 | 32 | 13 | 0.40 | 11 | 0.114 | 0.006 | 5.279 | 0.356 | 0.337 | 0.008 | 1 857 | 84 | 1 873 |
| 22.1 | 16 | 5 | 0.30 | 5 | 0.113 | 0.006 | 5.227 | 0.400 | 0.336 | 0.010 | 1 843 | 94 | 1 870 |
| 23.1 | 232 | 98 | 0.42 | 75 | 0.105 | 0.004 | 4.794 | 0.261 | 0.332 | 0.006 | 1 712 | 71 | 1 846 |
| 24.1 | 36 | 17 | 0.46 | 12 | 0.115 | 0.005 | 5.411 | 0.352 | 0.342 | 0.008 | 1 873 | 82 | 1 898 |
| 25.1 | 33 | 9 | 0.28 | 11 | 0.119 | 0.005 | 5.553 | 0.363 | 0.338 | 0.008 | 1 943 | 80 | 1 878 |

表 15 石榴斜长角闪岩(07FY01)和石榴二辉麻粒岩(07SMJ4)中锆石 LA-ICP-MS 微量元素(10^{-6})

Table 15 LA-ICP-MS trace element (10^{-6}) analysis for zircon in sample garnet amphibolite (07FY01) and garnet two-pyroxene granulite (07SMJ4)

| 点号 | Ti | Nb | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Hf | Ta | Pb | Th | U | Y | Th/U | δEu |
|--------|--------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-----------|------|--------|--------|--------|--------|------|-------------|
| 07FY01 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1 | 3.02 | 0.12 | 0.00 | 0.49 | 0.00 | 0.08 | 0.07 | 0.11 | 1.02 | 0.30 | 1.76 | 0.65 | 1.32 | 0.21 | 1.36 | 0.27 | 8.019.99 | 0.02 | 6.55 | 2.34 | 17.09 | 15.85 | 0.14 | 1.23 |
| 2.1 | 10.71 | 0.11 | 0.01 | 0.61 | 0.01 | 0.19 | 0.44 | 0.24 | 2.37 | 0.71 | 6.15 | 1.69 | 4.79 | 0.83 | 6.06 | 1.05 | 9.455.11 | 0.02 | 27.20 | 20.60 | 67.99 | 49.28 | 0.30 | 0.72 |
| 3.1 | 5.42 | 0.14 | 0.01 | 0.63 | 0.02 | 0.30 | 0.58 | 0.27 | 2.26 | 0.69 | 3.08 | 1.52 | 5.31 | 0.72 | 5.78 | 0.32 | 8.429.82 | 0.02 | 20.60 | 14.19 | 50.48 | 52.24 | 0.28 | 0.71 |
| 4.1 | 4.23 | 0.15 | 0.01 | 0.47 | 0.00 | 0.06 | 0.06 | 0.11 | 0.70 | 0.28 | 3.08 | 0.61 | 2.30 | 0.37 | 2.26 | 0.78 | 8.787.17 | 0.02 | 13.66 | 10.47 | 33.13 | 23.73 | 0.32 | 1.71 |
| 5.1 | 6.59 | 0.10 | 0.00 | 0.66 | 0.01 | 0.17 | 0.68 | 0.48 | 3.82 | 0.92 | 6.76 | 1.46 | 3.86 | 0.53 | 3.29 | 0.46 | 8.814.61 | 0.00 | 23.44 | 18.18 | 56.67 | 44.03 | 0.32 | 0.92 |
| 6.1 | 7.49 | 0.13 | 0.00 | 0.73 | 0.01 | 0.12 | 0.46 | 0.39 | 2.68 | 0.85 | 7.68 | 1.69 | 5.97 | 0.80 | 6.53 | 1.06 | 8.640.02 | 0.02 | 35.14 | 20.90 | 87.08 | 55.61 | 0.24 | 1.09 |
| 7.1 | 5.46 | 0.21 | 0.00 | 0.25 | 0.00 | 0.08 | 0.18 | 0.02 | 0.36 | 0.09 | 0.98 | 0.27 | 0.70 | 0.13 | 0.78 | 0.10 | 8.380.63 | 0.06 | 4.09 | 1.38 | 10.31 | 8.37 | 0.13 | 2.06 |
| 8.1 | 4.52 | 0.11 | 0.00 | 0.24 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.06 | 0.48 | 0.14 | 1.44 | 0.38 | 1.03 | 0.17 | 1.02 | 0.18 | 8.400.30 | 0.02 | 3.78 | 1.25 | 9.27 | 11.62 | 0.13 | 2.26 |
| 9.1 | 4.69 | 0.13 | 0.01 | 0.39 | 0.00 | 0.08 | 0.27 | 0.25 | 1.42 | 0.51 | 4.03 | 0.94 | 2.71 | 0.36 | 2.14 | 0.32 | 9.450.66 | 0.02 | 19.70 | 13.21 | 48.90 | 30.78 | 0.27 | 1.23 |
| 10.1 | 5.54 | 0.07 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 0.05 | 0.04 | 0.20 | 1.25 | 0.30 | 2.92 | 0.69 | 1.87 | 0.30 | 1.96 | 0.27 | 8.672.59 | 0.04 | 4.01 | 1.62 | 9.97 | 22.48 | 0.16 | 2.73 |
| 11.1 | 4.42 | 0.15 | 0.00 | 0.39 | 0.01 | 0.12 | 0.24 | 0.11 | 1.52 | 0.43 | 4.56 | 1.23 | 4.45 | 0.70 | 5.24 | 0.85 | 9.112.26 | 0.01 | 11.88 | 13.07 | 27.94 | 42.49 | 0.47 | 0.55 |
| 12.1 | 6.01 | 0.17 | 0.00 | 0.24 | 0.00 | 0.07 | 0.30 | 0.24 | 1.20 | 0.37 | 2.71 | 0.69 | 2.02 | 0.26 | 1.98 | 0.29 | 8.948.38 | 0.03 | 4.01 | 1.81 | 9.96 | 23.14 | 0.18 | 1.22 |
| 13.1 | 12.46 | 0.32 | 0.00 | 0.91 | 0.18 | 0.37 | 1.09 | 0.28 | 5.13 | 1.46 | 13.50 | 3.70 | 11.18 | 1.70 | 12.96 | 1.99 | 10.104.76 | 0.19 | 32.51 | 23.37 | 81.40 | 102.36 | 0.29 | 0.36 |
| 14.1 | 6.11 | 0.03 | 0.00 | 0.55 | 0.00 | 0.13 | 0.31 | 0.22 | 3.35 | 0.93 | 7.73 | 2.09 | 6.00 | 1.04 | 6.38 | 1.00 | 9.443.08 | 0.02 | 28.51 | 18.38 | 71.10 | 60.26 | 0.26 | 0.66 |
| 15.1 | 58.74 | 0.31 | 0.10 | 1.12 | 0.05 | 0.50 | 1.12 | 0.30 | 5.71 | 1.47 | 12.70 | 3.78 | 11.64 | 1.79 | 12.63 | 1.90 | 9.788.69 | 0.24 | 36.24 | 26.63 | 89.77 | 104.27 | 0.30 | 0.36 |
| 16.1 | 6.40 | 0.12 | 0.01 | 0.34 | 0.00 | 0.05 | 0.07 | 0.14 | 1.02 | 0.38 | 3.90 | 1.12 | 3.53 | 0.59 | 3.83 | 0.71 | 8.973.97 | 0.03 | 11.15 | 8.39 | 27.05 | 36.63 | 0.31 | 1.58 |
| 17.1 | 109.65 | 0.30 | 0.28 | 1.99 | 0.19 | 1.64 | 1.31 | 0.27 | 7.14 | 1.72 | 15.19 | 4.42 | 14.55 | 2.56 | 18.43 | 3.00 | 9.809.56 | 0.26 | 32.64 | 30.11 | 85.13 | 130.49 | 0.35 | 0.27 |
| 18.1 | 5.38 | 0.13 | 0.01 | 0.69 | 0.02 | 0.09 | 0.16 | 0.15 | 1.79 | 0.46 | 3.35 | 0.72 | 2.55 | 0.31 | 2.15 | 0.29 | 8.509.85 | 0.01 | 18.65 | 8.92 | 48.85 | 23.56 | 0.18 | 0.86 |
| 19.1 | 5.52 | 0.14 | 0.00 | 0.22 | 0.00 | 0.01 | 0.04 | 0.06 | 0.77 | 0.21 | 1.82 | 0.48 | 1.58 | 0.16 | 1.36 | 0.22 | 8.646.36 | 0.03 | 4.16 | 1.09 | 10.01 | 14.42 | 0.11 | 0.97 |
| 20.1 | 6.03 | 0.11 | 0.00 | 0.35 | 0.01 | 0.09 | 0.19 | 0.19 | 1.45 | 0.43 | 5.06 | 1.52 | 5.41 | 0.88 | 6.75 | 1.06 | 9.508.28 | 0.03 | 8.60 | 6.53 | 21.22 | 50.14 | 0.31 | 1.12 |
| 21.1 | 5.70 | 0.12 | 0.00 | 0.32 | 0.01 | 0.10 | 0.16 | 0.20 | 1.28 | 0.54 | 5.14 | 1.50 | 4.62 | 0.66 | 5.40 | 0.80 | 9.524.80 | 0.05 | 8.99 | 7.71 | 21.37 | 46.17 | 0.36 | 1.36 |
| 22.1 | 52.90 | 0.09 | 0.01 | 0.62 | 0.00 | 0.14 | 0.32 | 0.13 | 1.98 | 0.52 | 4.69 | 1.30 | 3.97 | 0.56 | 5.89 | 0.76 | 9.533.47 | 0.02 | 21.69 | 17.49 | 57.64 | 40.44 | 0.30 | 0.49 |
| 23.1 | 4.45 | 0.05 | 0.01 | 0.49 | 0.01 | 0.11 | 0.47 | 0.17 | 1.78 | 0.53 | 4.67 | 1.23 | 3.51 | 0.56 | 3.74 | 0.56 | 8.944.21 | 0.01 | 19.73 | 11.42 | 48.52 | 36.12 | 0.24 | 0.56 |
| Spot | Ti | Nb | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Hf | Ta | Pb | Th | U | Y | Th/U | Eu* |
| 07MJ4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1 | 4.22 | 0.20 | 0.00 | 0.47 | 0.01 | 0.06 | 0.18 | 0.08 | 0.46 | 0.33 | 3.10 | 1.14 | 3.96 | 0.71 | 5.77 | 0.89 | 7.677.69 | 0.04 | 3.06 | 1.78 | 8.00 | 38.30 | 0.22 | 0.81 |
| 2.1 | 6.05 | 0.12 | 0.01 | 0.27 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.03 | 0.38 | 0.14 | 1.60 | 0.59 | 2.10 | 0.36 | 3.00 | 0.44 | 8.028.25 | 0.02 | 2.08 | 1.09 | 5.38 | 18.55 | 0.20 | 0.60 |
| 3.1 | 6.94 | 0.10 | 0.01 | 3.28 | 0.02 | 0.41 | 0.47 | 0.27 | 2.11 | 0.49 | 4.02 | 0.91 | 2.83 | 0.36 | 2.35 | 0.39 | 7.447.86 | 0.05 | 12.52 | 11.44 | 30.80 | 28.69 | 0.37 | 0.83 |
| 4.1 | 8.94 | 0.10 | 0.00 | 2.43 | 0.01 | 0.01 | 0.18 | 0.18 | 1.56 | 0.48 | 5.17 | 1.27 | 3.83 | 0.65 | 3.58 | 0.58 | 8.139.66 | 0.02 | 19.50 | 11.48 | 49.70 | 39.86 | 0.23 | 1.02 |
| 5.1 | 5.83 | 0.15 | 0.00 | 0.49 | 0.00 | 0.02 | 0.25 | 0.21 | 1.58 | 0.58 | 6.70 | 2.01 | 6.92 | 1.14 | 9.28 | 1.55 | 8.672.44 | 0.04 | 4.59 | 3.02 | 11.35 | 68.28 | 0.27 | 1.02 |
| 6.1 | 7.68 | 0.18 | 0.00 | 1.20 | 0.01 | 0.08 | 0.10 | 0.15 | 1.50 | 0.38 | 3.98 | 1.06 | 3.25 | 0.59 | 4.57 | 0.71 | 7.689.97 | 0.04 | 7.04 | 5.19 | 16.90 | 34.33 | 0.31 | 1.23 |
| 7.1 | 9.36 | 0.14 | 0.01 | 0.61 | 0.01 | 0.00 | 0.24 | 0.13 | 1.20 | 0.53 | 6.41 | 2.53 | 9.86 | 1.74 | 14.26 | 2.50 | 8.675.34 | 0.02 | 5.61 | 4.64 | 13.70 | 79.76 | 0.34 | 0.74 |
| 8.1 | 1.92 | 0.17 | 0.00 | 0.48 | 0.00 | 0.01 | 0.06 | 0.08 | 0.39 | 0.20 | 2.51 | 1.06 | 4.08 | 0.71 | 5.99 | 1.10 | 8.828.53 | 0.06 | 6.45 | 4.31 | 16.36 | 34.44 | 0.26 | 1.54 |
| 9.1 | 3.37 | 0.13 | 0.01 | 2.51 | 0.02 | 1.86 | 3.15 | 1.41 | 12.87 | 2.75 | 19.89 | 4.57 | 12.05 | 1.52 | 10.23 | 1.52 | 7.541.33 | 0.08 | 286.32 | 364.60 | 708.35 | 137.35 | 0.51 | 0.68 |
| 10.1 | 7.16 | 0.22 | 0.00 | 1.19 | 0.02 | 1.10 | 1.44 | 1.11 | 2.14 | 0.78 | 8.16 | 3.12 | 12.92 | 2.55 | 23.71 | 4.45 | 7.200.69 | 0.16 | 49.47 | 44.52 | 124.60 | 97.75 | 0.36 | 0.34 |
| 11.1 | 7.85 | 0.07 | 0.00 | 3.07 | 0.01 | 0.08 | 0.49 | 0.28 | 2.29 | 0.71 | 5.81 | 1.22 | 3.66 | 0.49 | 3.29 | 0.45 | 7.790.97 | 0.02 | 15.52 | 9.06 | 40.45 | 38.41 | 0.22 | 0.80 |
| 12.1 | 3.94 | 0.15 | 0.00 | 1.83 | 0.00 | 0.11 | 0.18 | 0.11 | 1.54 | 0.43 | 4.26 | 1.21 | 3.75 | 0.56 | 4.08 | 0.64 | 8.128.50 | 0.03 | 18.57 | 11.09 | 45.84 | 36.93 | 0.24 | 0.61 |
| 13.1 | 9.39 | 0.11 | 0.00 | 1.52 | 0.00 | 0.06 | 0.32 | 0.11 | 0.94 | 0.28 | 2.99 | 0.95 | 3.18 | 0.53 | 3.61 | 0.58 | 8.452.57 | 0.05 | 5.63 | 6.57 | 14.05 | 30.05 | 0.47 | 0.61 |
| 14.1 | 8.39 | 0.13 | 0.01 | 1.26 | 0.01 | 0.11 | 0.17 | 0.11 | 0.97 | 0.36 | 3.70 | 1.18 | 3.94 | 0.64 | 5.33 | 0.88 | 8.611.00 | 0.04 | 4.25 | 3.98 | 10.43 | 37.53 | 0.38 | 0.84 |
| 15.1 | 6.91 | 0.09 | 0.00 | 3.02 | 0.01 | 0.20 | 0.74 | 0.46 | 3.60 | 1.01 | 8.34 | 1.99 | 4.46 | 0.70 | 4.85 | 0.67 | 7.627.96 | 0.02 | 12.90 | 9.52 | 32.59 | 56.54 | 0.29 | 0.86 |
| 16.1 | 10.39 | 0.13 | 0.07 | 0.73 | 0.03 | 0.26 | 0.22 | 0.26 | 1.78 | 0.64 | 6.41 | 2.21 | 7.88 | 1.43 | 11.59 | 1.98 | 8.616.69 | 0.03 | 4.06 | 3.72 | 10.24 | 69.08 | 0.36 | 0.98 |
| 17.1 | 7.48 | 0.35 | 0.00 | 1.43 | 0.01 | 0.36 | 0.47 | 0.28 | 3.11 | 1.07 | 10.80 | 3.46 | 13.23 | 2.44 | 21.12 | 3.97 | 7.267.18 | 0.20 | 73.92 | 86.08 | 181.16 | 108.79 | 0.48 | 0.69 |
| 18.1 | 6.89 | 0.26 | 0.00 | 1.17 | 0.02 | 0.22 | 0.81 | 0.26 | 3.64 | 1.15 | 11.51 | 3.82 | 14.76 | 2.54 | 23.26 | 4.40 | 6.902.06 | 0.15 | 56.26 | 61.94 | 139.87 | 119.11 | 0.44 | 0.47 |
| 19.1 | 8.18 | 0.17 | 0.00 | 1.32 | 0.00 | 0.05 | 0.23 | 0.11 | 1.37 | 0.58 | 6.21 | 1.88 | 7.36 | 1.26 | 9.49 | 1.65 | 8.286.46 | 0.08 | 8.55 | 6.50 | 21.83 | 65.74 | 0.30 | 0.57 |
| 20.1 | 2.45 | 0.20 | 0.02 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.13 | 0.51 | 0.30 | 3.53 | 1.21 | 5.19 | 0.95 | 8.62 | 1.38 | 8.443.06 | 0.07 | 7.50 | 5.98 | 18.48 | 43.87 | 0.32 | 2.07 |

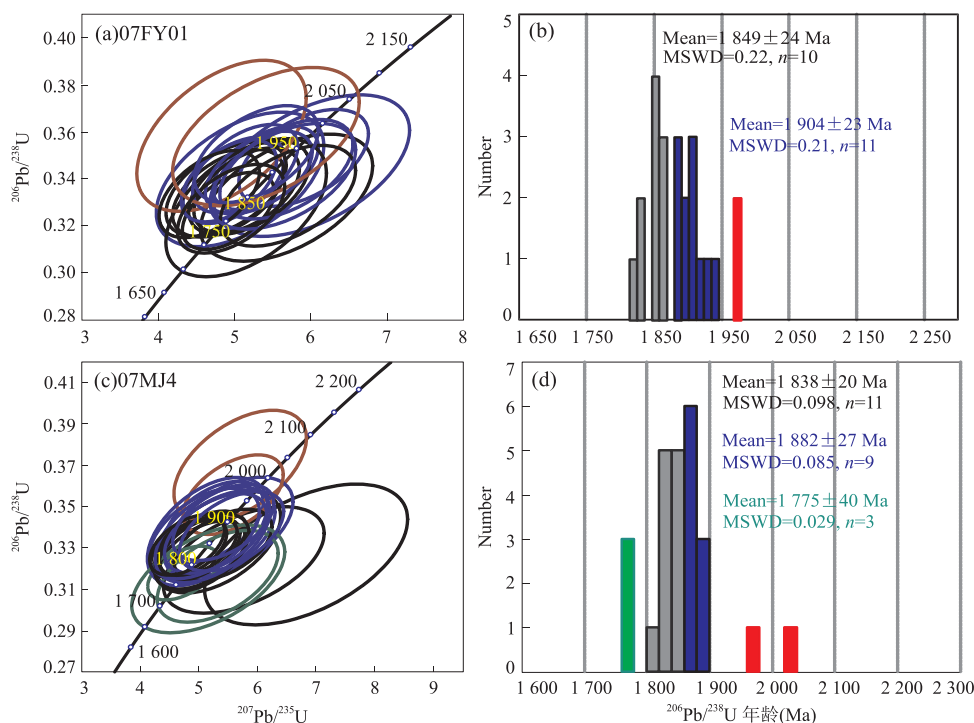


图 9 石榴斜长角闪岩(07FY01)和石榴二辉麻粒岩(07MJ4)锆石 U-Pb 年龄谐和图(a, c)和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄频率图(b, d)
Fig.9 Zircon U-Pb concordia diagrams (a, c) and histograms of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages (b, d) from one garnet amphibolite (07FY01) and garnet two-pyroxene granulite (07MJ4)

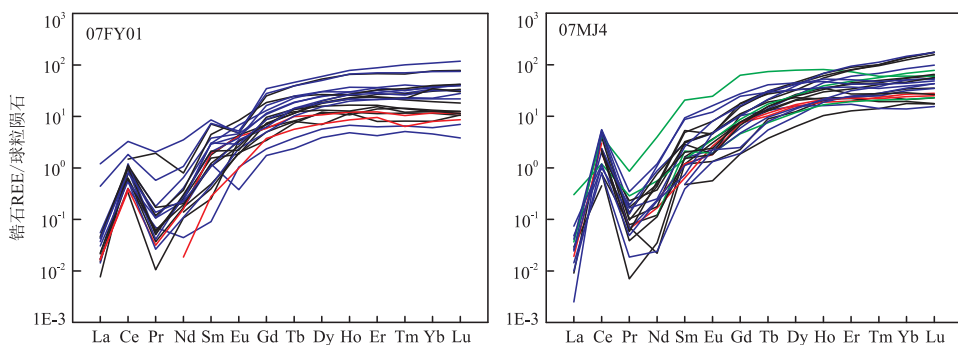


图 10 石榴斜长角闪岩(07FY01)和石榴二辉麻粒岩(07MJ4)锆石中稀土元素球粒陨石标准化配分模式图
Fig.10 Chondrite-normalized zircon trace elements diagrams of garnet amphibolite (07FY01) and garnet two-pyroxene granulite (07MJ4)

图中颜色符号含义见图 9

年龄分别为 1974 ± 62 Ma 和 1973 ± 57 Ma。

石榴二辉麻粒岩(07MJ4)中的锆石粒径变化从几十到几百微米,多呈浑圆状,少量呈不规则一半自形粒状。在阴极发光图像中多数颗粒发光性较强,内部结构均一,部分颗粒为中灰色,具有弱分带、扇形和冷杉叶形分带特征(图 8f~8i)。24 个分析点 Th/U 比值为 $0.22 \sim 0.47$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(1766 \pm 52) \sim (2029 \pm 52)$ Ma,可进一步分为 4 组(图 9, 9c 和 9d):第 1 组包括分析点 6.1 和 12.1, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 2029 ± 52 Ma 和 1963 ± 38 Ma;第 2 组

包括分析点 3.1、7.1、8.1、14.1、20.1、21.1、22.1、24.1 和 25.1, ΣREE 为 $131 \times 10^{-6} \sim 618 \times 10^{-6}$, Th 和 U 含量分别为 $4 \times 10^{-6} \sim 17 \times 10^{-6}$ 和 $11 \times 10^{-6} \sim 36 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 $0.26 \sim 0.46$, δEu 值为 $0.74 \sim 2.07$, $(\text{Tb}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $0.15 \sim 0.94$, 加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 1882 ± 27 Ma (MSWD=0.085);第 3 组包括分析点 1.1、2.1、4.1、5.1、10.1、11.1、15.1、17.1、18.1、19.1 和 23.1, ΣREE 为 $86 \times 10^{-6} \sim 673 \times 10^{-6}$, Th 和 U 含量分别为 $1 \times 10^{-6} \sim 98 \times 10^{-6}$ 和 $6 \times 10^{-6} \sim 232 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 $0.20 \sim$

0.47, δEu 值为 0.34~1.02, $(\text{Tb}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 0.15~0.98, 加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $1\,838 \pm 20$ Ma (MSWD=0.098); 第 4 组包括分析点 9.1、13.1 和 16.1, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 $1\,779 \pm 26$ Ma、 $1\,772 \pm 45$ Ma 和 $1\,766 \pm 52$ Ma, 加权平均年龄为 $1\,775 \pm 40$ Ma (MSWD=0.029)。

上述年龄结果表明,两个分析样品都有类似的年龄记录,特别是都有类似的、在误差范围内一致的两组变质年龄记录即 $1\,904 \pm 23$ Ma/ $1\,882 \pm 27$ Ma 和 $1\,849 \pm 24$ Ma/ $1\,838 \pm 20$ Ma, 它们的锆石都有重稀土元素配分曲线扁平 and 负的 Eu 异常(图 10), 指示形成于与石榴子石和斜长石共生的条件下 (Rubatto, 2002; Liu *et al.*, 2009), 因而代表了两组麻粒岩相变质年龄. 这与以前报道的研究区下地壳包体的锆石年代学分析结果 (Liu *et al.*, 2016) 一致, 分别代表了高压麻粒岩相和低压麻粒岩相变质时代. 而样品 07MJ4 中 $1\,775 \pm 40$ Ma 年龄, 与之前报道的研究区下地壳岩石角闪岩相变质年龄 $1\,754 \pm 11$ Ma (Liu *et al.*, 2016) 一致, 代表了角闪岩相退变质时代。

6 镁铁质麻粒岩的变质演化过程及其地质意义

综上所述,华北东南缘五河杂岩中镁铁质麻粒岩在峰期高压麻粒岩相之后经历了近等温减压(中压麻粒岩相),再降压冷却(角闪岩相)的变质过程,构成了一条顺时针的 P - T - t 轨迹(图 11),反映了研究区从早期地壳增厚到晚期构造抬升的俯冲-碰撞造山过程. 在北部的胶北地体中,经历了古元古代高压麻粒岩相变质作用的岩石类型主要包括基性麻粒岩、泥质麻粒岩和超镁铁岩等,这些岩石在峰期变质之后都经历了近等温降压和近等压冷却的过程,构成了顺时针的 P - T 轨迹(刘平华等, 2015). 其中,不同研究者在基性麻粒岩中都识别出了 4 期矿物组合 (Tam *et al.*, 2012a; Liu *et al.*, 2013a): M_1 为进变质阶段,主要矿物组合为石榴子石核部及其中的单斜辉石、斜长石和石英包体; M_2 阶段为高压麻粒岩相峰期变质阶段,主要矿物组合包括基质中的石榴子石(高 Ca 核部)、单斜辉石(高 Al)、斜长石(高 Na)和石英; M_3 阶段为中低压麻粒岩相退变质阶段,主要矿物组合为在石榴子石斑晶发生减压反应在其周围形成的呈蠕虫状后成晶的斜方辉石、单

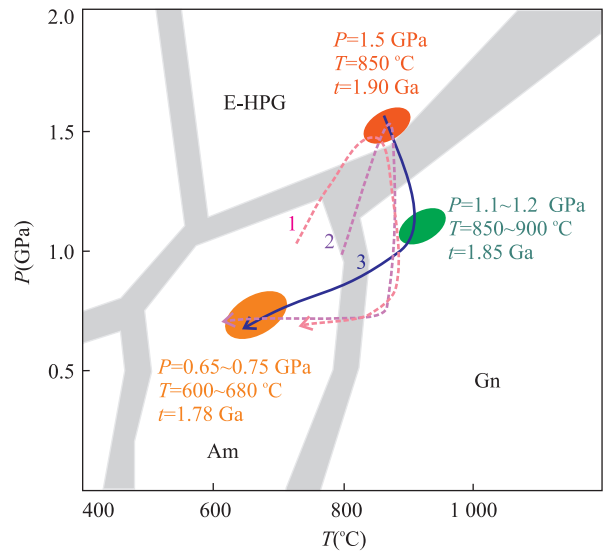


图 11 华北东南缘五河杂岩中镁铁质高压麻粒岩的变质 P - T - t 轨迹

Fig.11 Generalized P - T - t path for the HP mafic granulites in the Wuhe complex, southeastern margin of the North China Craton

Am.角闪岩相;Gn.麻粒岩相;E-HPG.榴辉岩-高压麻粒岩相,据 Brown(2014); P - T 轨迹 1 和 2.胶北地体 1.85~1.90 Ga 镁铁质麻粒岩;线 1 据 Tam *et al.*(2012a);线 2 据 Liu *et al.*(2013a);线 3 为本文结果

斜辉石和斜长石; M_4 阶段为晚期角闪岩相退变质阶段,一些石榴麻粒岩在该阶段完全退变为石榴斜长角闪岩,主要矿物组合为角闪石、斜长石和石英. 用传统地质温压计计算的 4 个阶段的温压条件分别为 $740 \sim 770$ °C、 $0.9 \sim 1.0$ GPa, $850 \sim 880$ °C、 $1.45 \sim 1.65$ GPa, $780 \sim 830$ °C、 $0.65 \sim 0.85$ GPa 和 $590 \sim 650$ °C、 $0.62 \sim 0.82$ GPa (图 11, Liu *et al.*, 2013a); 变质相平衡模拟得到的 4 个阶段的温压结果分别为 $690 \sim 702$ °C、 $0.94 \sim 0.98$ GPa, $780 \sim 890$ °C、 $1.31 \sim 1.51$ GPa, $820 \sim 880$ °C、 $0.78 \sim 0.84$ GPa 和 $690 \sim 760$ °C、 $0.64 \sim 0.72$ GPa (图 11, Tam *et al.*, 2012b), 虽然与地质温压计结果略有差异,但整体演化趋势基本一致. 本文石榴二辉麻粒岩峰期高压麻粒岩相变质条件为 $T = 850 \sim 890$ °C、 $P = 1.45 \sim 1.65$ GPa, 与胶北地区基本一致. 然而,与胶北地体和华北中部带古元古代基性麻粒岩明显不同的是,五河杂岩基性麻粒岩中压麻粒岩相变质阶段主要表现为富钛角闪石分解形成单斜辉石、斜方辉石、石榴子石和长石冠状体,主要反应过程可能为 $\text{Amp} + \text{Qtz} = \text{Grt} + \text{Cpx} + \text{melt}$ 和 $\text{Amp} + \text{Qtz} = \text{Opx} + \text{Grt} + \text{Pl} \pm \text{melt}$, 说明峰期后减压麻粒岩相阶段产生的石榴子石、单斜辉石和斜方辉石可能是转熔矿物.

该阶段计算的温度结果多高于 900 °C, 利用 Grt-Cpx-Pl-Qtz 和 Grt-Opx-Pl-Qtz 压力计计算的结果大致为 1.2 GPa, 说明富钛角闪石在 900 °C、1.2 GPa 发生分解, 形成峰期后麻粒岩相矿物组合和熔体. 这与角闪石脱水熔融的实验结果 (850 ~ 900 °C) (Weinberg and Hasalová, 2015) 一致. 该阶段压力条件略高于胶北地体和中部带由石榴子石减压分解产生的单斜辉石、斜方辉石和斜长石所计算的的压力条件 (<1.0 GPa). 五河杂岩和胶北地体中镁铁质麻粒岩矿物组成 (主要是角闪石) 的差异可能与原岩成分不同有关.

五河杂岩中部分变基性岩发生了较大规模的部分熔融和混合岩化作用, 形成了透镜状和条带状浅色体 (图 3b~3d), 但确定其精确时代还需要进一步工作. 围岩不纯大理岩的岩相学证据如方解石中的钾长石+石英包体说明其至少经历了显微尺度的部分熔融作用 (Liu *et al.*, 2017b). 石榴斜长角闪岩在 (近) 峰期变质过程中也发生了部分熔融, 在石榴子石和斜长石中形成了多相矿物包裹体, 如 (1) 斜长石+钾长石+石英+角闪石 (图 12a); (2) 钾长石+钠长石 (图 12b); (3) 钾长石+斜长石+石英+黑云母 (刘贻灿等, 2015b); (4) 钾长石+石英+钠长石 (图 12c) 等. 一些变基性岩因受到含碳酸盐的钙质熔流体交代作用, 其中的石榴子石被方解石包围呈筛状, 并且显著富集 CaO (>30%, 图 12d). 此外, 凤阳花岗片麻岩中的 ~1.83 Ga 深熔锆石 (Wang *et*

al., 2017) 及在邻近霍邱杂岩中报道的 1.82 ~ 1.91 Ga 的高钾花岗岩 (Liu *et al.*, 2015a) 说明研究区在峰期变质作用之后地壳抬升过程中发生了更大规模的部分熔融作用. 在胶北地体乃至整个胶-辽-吉带中, 1.83~1.86 Ga 峰期后减压阶段发生了大规模部分熔融作用, 在基性和泥质麻粒岩、角闪岩和 TTG 片麻岩中形成了大量浅色体 (Liu *et al.*, 2014, 2017a). 并且, 太古代 TTG 片麻岩在 1.86 Ga 部分熔融形成了高钾和高钠的浅色花岗岩 (Li *et al.*, 2017). 因此, 以五河杂岩为代表的华北东南缘前寒武纪基底的变质演化过程与胶北地体基本一致, 进一步证明五河杂岩属于胶-辽-吉带的西延.

7 结论

(1) 首次在华北东南缘五河杂岩的镁铁质高压麻粒岩中识别出中压麻粒岩相变质叠加的岩相学和矿物学证据, 重建了古元古代变质演化的 3 个阶段及其顺时针的 P - T - t 轨迹: ① 峰期高压麻粒岩相变质阶段, 代表性矿物组合为基质中的石榴子石 (富 Ca 核部)+单斜辉石 (富 Al)+斜长石+石英+金红石±角闪石 (富 Ti), 所记录的温压条件为 850~900 °C、1.5 GPa; ② 峰期后近等温减压 (中压麻粒岩相) 变质阶段, 富 Ti 角闪石分解在周围形成石榴子石+斜方辉石+斜长石±单斜辉石后成合晶, 限定的温压条件为 ~900 °C、1.1~1.2 GPa; ③ 晚期角闪岩相退变质阶段, 主要矿物是角闪石+斜长石, 所记录的温压条件为 600~680 °C、0.65~0.75 GPa.

(2) 锆石 LA-ICP-MS 定年结果表明, 镁铁质麻粒岩的峰期高压麻粒岩相变质时代为 ~1.90 Ga (1.88~1.95 Ga)、中压麻粒岩相变质叠加时代为 ~1.85 Ga, 以及角闪岩相退变质时代为 ~1.78 Ga.

(3) 五河杂岩镁铁质麻粒岩的古元古代变质演化过程类似于胶北地体, 结合 2.1 Ga 花岗质岩石的成因和锆石年代学等方面研究成果, 进一步证明五河杂岩属于胶-辽-吉带的西延, 二者共同构成了华北克拉通东部一条古元古代碰撞造山带.

致谢: 感谢中国科学技术大学地空学院 LA-ICP-MS 实验室侯振辉老师以及合肥工业大学资环学院电子探针实验室石永红老师和王娟同学在实验测试和数据处理过程中的帮助, 对魏春景教授和两位审稿人提出的修改意见和建议表示衷心的感谢!

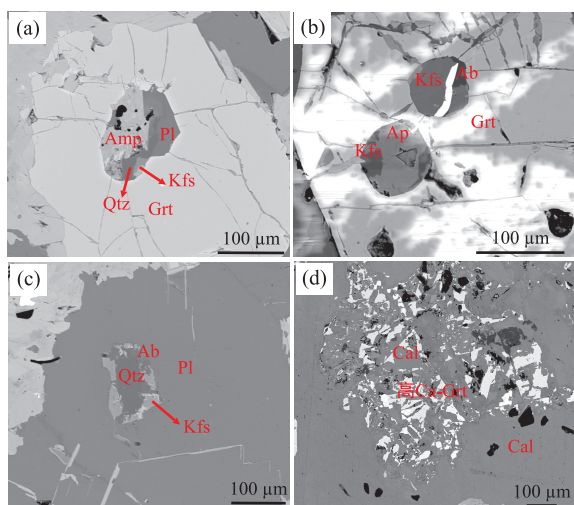


图 12 高压麻粒岩相变基性岩中多相矿物包体 (a~c) 和高钙石榴子石 (d)

Fig.12 Multiphase mineral inclusions in HP granulite facies meta-basalts (a-c) and garnet with high CaO contents (d)

References

- Anovitz, L. M., 1991. Al Zoning in Pyroxene and Plagioclase: Window on Late Prograde to Early Retrograde P - T Paths in Granulite Terranes. *American Mineralogist*, 76 (7-8): 1328-1343.
- Bhattacharya, A., Krishnakumar, K. R., Raith, M., et al., 1991. An Improved Set of A-X Parameters for Fe-Mg-Ca Garnets and Refinements of the Orthopyroxene-Garnet Thermometer and the Orthopyroxene-Garnet-Plagioclase-Quartz Barometer. *Journal of Petrology*, 32 (3): 629-656. <https://doi.org/10.1093/ptrology/32.3.629>
- Brown, M., 2014. The Contribution of Metamorphic Petrology to Understanding Lithosphere Evolution and Geodynamics. *Geoscience Frontiers*, 5 (4): 553-569. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.02.005>
- Duan, Z. Z., Wei, C. J., Qian, J. H., 2015. Metamorphic P - T Paths and Zircon U-Pb Age Data for the Paleoproterozoic Metabasic Dykes of High-Pressure Granulite Facies from Eastern Hebei, North China Craton. *Precambrian Research*, 271: 295-310. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.10.015>
- Eckert, J. O., Newton, R. C., Kleppa, O. J., 1991. The ΔH of Reaction and Recalibration of Garnet-Pyroxene-Plagioclase-Quartz Geobarometers in the CMAS System by Solution Calorimetry. *American Mineralogist*, 76(1-2): 148-160.
- Ellis, D. J., Green, D. H., 1979. An Experimental Study of the Effect of Ca upon Garnet-Clinopyroxene Fe-Mg Exchange Equilibria. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 71 (1): 13-22. <https://doi.org/10.1007/bf00371878>
- Frost, B. R., Chacko, T., 1989. The Granulite Uncertainty Principle: Limitations on Thermobarometry in Granulites. *The Journal of Geology*, 97 (4): 435-450. <https://doi.org/10.1086/629321>
- Guo, J. H., O'Brien, P. J., Zhai, M. G., 2002. High-Pressure Granulites in the Sanggan Area, North China Craton: Metamorphic Evolution, P - T Paths and Geotectonic Significance. *Journal of Metamorphic Geology*, 20(8): 741-756. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2002.00401.x>
- Guo, S. S., Li, S. G., 2009. SHRIMP Zircon U-Pb Ages for the Paleoproterozoic Metamorphic-Magmatic Events in the Southeast Margin of the North China Craton. *Science in China (Series D)*, 39 (6): 694-699 (in Chinese). <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0099-7>
- Harley, S. L., 1989. The Origins of Granulites: A Metamorphic Perspective. *Geological Magazine*, 126 (3): 215. <https://doi.org/10.1017/s0016756800022330>
- Jin, S. Q., 1991. Composition Characteristics of Calc-Amphiboles in Different Regional Metamorphic Facies. *Chinese Science Bulletin*, 36(11): 851-854 (in Chinese).
- Krogh, E. J., 1988. The Garnet-Clinopyroxene Fe-Mg Geothermometer—A Reinterpretation of Existing Experimental Data. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99 (1): 44-48. <https://doi.org/10.1007/bf00399364>
- Li, Y. L., Zhang, H. F., Guo, J. H., et al., 2017. Petrogenesis of the Huili Paleoproterozoic Leucogranite in the Jiaobei Terrane of the North China Craton: A Highly Fractionated Albite Granite Forced by K-Feldspar Fractionation. *Chemical Geology*, 450: 165-182. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.029>
- Liu, F. L., Liu, L. S., Cai, J., et al., 2017a. A Widespread Paleoproterozoic Partial Melting Event within the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Zircon U-Pb Dating of Granitic Leucosomes within Pelitic Granulites and Its Tectonic Implications. *Precambrian Research* (in Press). <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.10.017>
- Liu, Y. C., Zhang, P. G., Wang, C. C., et al., 2017b. Petrology, Geochemistry and Zirconology of Impure Calcite Marbles from the Precambrian Metamorphic Basement at the Southeastern Margin of the North China Craton. *Lithos*, 290-291: 189-209. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.08.011>
- Liu, F. L., Liu, P. H., Wang, F., et al., 2014. U-Pb Dating of Zircons from Granitic Leucosomes in Migmatites of the Jiaobei Terrane, Southwestern Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Constraints on the Timing and Nature of Partial Melting. *Precambrian Research*, 245: 80-99. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.01.001>
- Liu, L., Yang, X. Y., Santosh, M., et al., 2015a. Neoproterozoic to Paleoproterozoic Continental Growth in the Southeastern Margin of the North China Craton: Geochemical, Zircon U-Pb and Hf Isotope Evidence from the Huoqiu Complex. *Gondwana Research*, 28 (3): 1002-1018. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.08.011>
- Liu, Y. C., Deng, L. P., Gu, X. F., et al., 2015b. 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. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.10.011>
- Liu, P. H., Liu, F. L., Liu, C. H., et al., 2013a. Petrogenesis, P - T Path, and Tectonic Significance of High-Pressure

- Mafic Granulites from the Jiaobei Terrane, North China Craton. *Precambrian Research*, 233: 237–258. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.05.003>
- Liu, Y. C., Wang, A. D., Li, S. G., et al., 2013b. Composition and Geochronology of the Deep-Seated Xenoliths from the Southeastern Margin of the North China Craton. *Gondwana Research*, 23(3): 1021–1039. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.06.009>
- Liu, P. H., Liu, F. L., Wang, F., et al., 2015. *P-T-t* Paths of the Multiple Metamorphic Events of the Jiaobei Terrane in the Southeastern Segment of the Jiao-Liao-Ji Belt (JLJB), in the North China Craton: Implication for Formation and Evolution of the JLJB. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2889–2941 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. C., Zhang, P. G., Wang, C. C., et al., 2016. Paleoproterozoic Multistage Metamorphic Ages Registered in the Precambrian Basement Rocks at the Southeastern Margin of the North China Craton and Their Geological Implications. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90(6): 2265–2266. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13038>
- Liu, Y. C., Wang, A. D., Rolfo, F., et al., 2009. Geochronological and Petrological Constraints on Palaeoproterozoic Granulite Facies Metamorphism in Southeastern Margin of the North China Craton. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(2): 125–138. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2008.00810.x>
- Liu, Y. C., Wang, C. C., Zhang, P. G., et al., 2015a. Granulite Facies Metamorphism, Partial Melting and Metasomatism in the Wuhe Complex at the Southeastern Margin of the North China Block. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 37(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. C., Wang, C. C., Zhang, P. G., et al., 2015b. Growth and Metamorphic Evolution of the Precambrian Lower Crust at the Southeastern Margin of the North China Block. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2847–2862 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Zong, K. Q., et al., 2010. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-3052-4>
- Molina, J. F., Moreno, J. A., Castro, A., et al., 2015. Calcic Amphibole Thermobarometry in Metamorphic and Igneous Rocks: New Calibrations Based on Plagioclase/Amphibole Al-Si Partitioning and Amphibole/Liquid Mg Partitioning. *Lithos*, 232: 286–305. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.06.027>
- Pattison, D. R. M., 2003. Temperatures of Granulite-Facies Metamorphism: Constraints from Experimental Phase Equilibria and Thermobarometry Corrected for Retrograde Exchange. *Journal of Petrology*, 44(5): 867–900. <https://doi.org/10.1093/petrology/44.5.867>
- Powell, R., 1985. Regression Diagnostics and Robust Regression in Geothermometer/Geobarometer Calibration: The Garnet-Clinopyroxene Geothermometer Revisited. *Journal of Metamorphic Geology*, 3(3): 231–243. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1985.tb00319.x>
- Ravna, E. K., 2000a. The Garnet-Clinopyroxene Fe²⁺-Mg Geothermometer: An Updated Calibration. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(2): 211–219. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2000.00247.x>
- Ravna, E. K., 2000b. Distribution of Fe²⁺ and Mg between Coexisting Garnet and Hornblende in Synthetic and Natural Systems: An Empirical Calibration of the Garnet-Hornblende Fe-Mg Geothermometer. *Lithos*, 53(3–4): 265–277. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(00\)00029-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(00)00029-3)
- Rubatto, D., 2002. Zircon Trace Element Geochemistry: Partitioning with Garnet and the Link between U-Pb Ages and Metamorphism. *Chemical Geology*, 184(1–2): 123–138. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(01\)00355-2](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(01)00355-2)
- Spear, F. S., Florence, F. P., 1992. Thermobarometry in Granulites: Pitfalls and New Approaches. *Precambrian Research*, 55(1–4): 209–241. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(92\)90025-j](https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90025-j)
- Tam, P. Y., Zhao, G. C., Liu, F. L., et al., 2011. Timing of Metamorphism in the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt: New SHRIMP U-Pb Zircon Dating of Granulites, Gneisses and Marbles of the Jiaobei Massif in the North China Craton. *Gondwana Research*, 19(1): 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.05.007>
- Tam, P. Y., Zhao, G. C., Sun, M., et al., 2012a. Petrology and Metamorphic *P-T* Path of High-Pressure Mafic Granulites from the Jiaobei Massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Lithos*, 155: 94–109. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.018>
- Tam, P. Y., Zhao, G. C., Zhou, X. W., et al., 2012b. Metamorphic *P-T* Path and Implications of High-Pressure Pelit-

- ic Granulites from the Jiaobei Massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Gondwana Research*, 22 (1): 104—117. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.09.006>
- Taylor, W.R., 1998. An Experimental Test of Some Geothermometer and Geobarometer Formulations for Upper Mantle Peridotites with Application to the Thermobarometry of Fertile Lherzolite and Garnet Websterite. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen*, 172 (2): 381—408.
- Wang, A. D., Liu, Y. C., Gu, X. F., et al., 2012. Late-Neoproterozoic Magmatism and Metamorphism at the Southeastern Margin of the North China Craton and Their Tectonic Implications. *Precambrian Research*, 220—221: 65—79. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.07.011>
- Wang, A.D., Liu, Y.C., Santosh, M., et al., 2013. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Pb Isotopes from the Metamorphic Basement in the Wuhe Complex: Implications for Neoproterozoic Active Continental Margin along the Southeastern North China Craton and Constraints on the Petrogenesis of Mesozoic Granitoids. *Geoscience Frontiers*, 4(1): 57—71. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.05.001>
- Wang, C.C., Liu, Y.C., Zhang, P.G., et al., 2017. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of Two Types of Paleoproterozoic Granitoids from the Southeastern Margin of the North China Craton: Constraints on Petrogenesis and Tectonic Significance. *Precambrian Research*, 303: 268—290. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.04.015>
- Wang, J., Sheng, Y., Pu, X.P., et al., 2014. The Investigation on Metamorphic Petrology and *P-T* Conditions of Wuhe Complex Rocks: Evidences from Drill ZK02 in the South of Mengcheng Area. *Chinese Journal of Geology*, 49 (2): 556—575 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.0563-5020.2014.02.015>
- Wang, J., Song, C. Z., 2016. Analysis of Metamorphic *P-T* Conditions and Zircon U-Pb Age for Garnet Pyroxenite in Bengbu Uplift Tectonic. *Chinese Journal of Geology*, 51 (4): 1223—1245 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.12017/dzxx.2016.056>
- Wei, C. J., Qian, J. H., Zhou, X. W., 2014. Paleoproterozoic Crustal Evolution of the Hengshan-Wutai-Fuping Region, North China Craton. *Geoscience Frontiers*, 5 (4): 485—497. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.02.008>
- 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>
- Wells, P. R. A., 1977. Pyroxene Thermometry in Simple and Complex Systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 62 (2): 129—139. <https://doi.org/10.1007/bf00372872>
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589—1604 (in Chinese). <https://doi.org/10.1007/bf03184122>
- Xu, W.L., Yang, D.B., Pei, F.P., et al., 2006. Age of the Wuhe Complex in the Bengbu Uplift: Evidence from LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating. *Geology in China*, 33 (1): 132—137 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., 2009. Two Kinds of Granulites (HT-HP and HT-UHT) in North China Craton: Their Genetic Relation and Geotectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (8): 1753—1771 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., 2015. Precambrian Geology of China. Springer-Verlag, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47885-1>
- Zhai, M.G., Guo, J.H., Li, Y.G., et al., 1995. The Discovery of Archean Retrograde Eclogites in the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 40 (17): 1590—1594 (in Chinese).
- Zhai, M.G., Guo, J.H., Yan, Y.H., et al., 1992. Discovery and Preliminary Study of Archean High-Pressure Basic Granulites in North China. *Science in China (Series B)*, (12): 1325—1330 (in Chinese).
- Zhang, J., Zhao, G. C., Sun, M., et al., 2006. High-Pressure Mafic Granulites in the Trans-North China Orogen: Tectonic Significance and Age. *Gondwana Research*, 9 (3): 349—362. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2005.10.005>
- Zhao, G.C., 2014. Precambrian Evolution of the North China Craton. Elsevier, New York. <https://doi.org/10.1016/c2012-0-02689-0>
- Zhao, G. C., Cawood, P., Lu, L. Z., 1999. Petrology and *P-T* History of the Wutai Amphibolites: Implications for Tectonic Evolution of the Wutai Complex, China. *Precambrian Research*, 93 (2—3): 181—199. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(98\)00090-4](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(98)00090-4)
- Zhao, G.C., Wilde, S.A., Cawood, P.A., et al., 2000. Petrology and *P-T* Path of the Fuping Mafic Granulites: Implications for Tectonic Evolution of the Central Zone of the North China Craton. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 375—391. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2000.00264.x>

- Zhou, L.G., Zhai, M.G., Lu, J.S., et al., 2017. Paleoproterozoic Metamorphism of High-Grade Granulite Facies Rocks in the North China Craton: Study Advances, Questions and New Issues. *Precambrian Research*, in Press. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.06.025>
- Zou, Y., Zhai, M. G., Santosh, M., et al., 2017. High-Pressure Pelitic Granulites from the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: A Complete P - T Path and Its Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 134: 103–121. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2016.10.015>

附中文参考文献

- 郭素淑, 李曙光, 2009. 华北克拉通东南缘古元古代变质和岩浆事件的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. *中国科学(D 辑)*, 39(6): 694–699.
- 靳是琴, 1991. 不同区域变质相中钙质角闪石的成分特征. *科学通报*, 36(11): 851–854.
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 等, 2015. 胶北地体多期变质事件的 P - T - t 轨迹及其对胶—辽—吉带形成与演化的制约. *岩石学报*, 31(10): 2889–2941.
- 刘贻灿, 王程程, 张品刚, 等, 2015a. 华北板块东南缘五河杂岩的麻粒岩相变质、部分熔融与交代作用. *地球科学与环境学报*, 37(1): 1–11.
- 刘贻灿, 王程程, 张品刚, 等, 2015b. 华北东南缘前寒武纪下地壳的生长和变质演化. *岩石学报*, 31(10): 2847–2862.
- 王娟, 盛勇, 卜香萍, 等, 2014. 五河杂岩的变质岩石学及 P - T 条件分析——来自蒙城南 ZK02 钻孔的研究. *地质科学*, 49(2): 556–575.
- 王娟, 宋传中, 2016. 蚌埠隆起区石榴辉石岩变质 PT 轨迹及年代学研究. *地质科学*, 51(4): 1223–1245.
- 吴元保, 郑永飞, 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 49(16): 1589–1604.
- 许文良, 杨德彬, 裴福萍, 等, 2006. 蚌埠隆起区五河杂岩的形成时代: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年证据. *中国地质*, 33(1): 132–137.
- 翟明国, 2009. 华北克拉通两类早前寒武纪麻粒岩 (HT-HP 和 HT-UHT) 及其相关问题. *岩石学报*, 25(8): 1753–1771.
- 翟明国, 郭敬辉, 李永刚, 等, 1995. 华北太古宙退变质榴辉岩的发现及其含义. *科学通报*, 40(17): 1590–1590.
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 等, 1992. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及初步研究. *中国科学(B 辑)*, (12): 1325–1330.