

引用格式: 崔润泽, 魏春景, 2023. 华北克拉通辽北清原地体新太古代基性麻粒岩变质作用演化 [J]. 地质力学学报, 29 (5): 736–756. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023049

Citation: CUI R Z, WEI C J, 2023. Evolution of metamorphic processes in the Neoproterozoic mafic granulites of the Qingyuan Terrane in northern Liaoning, North China Craton [J]. Journal of Geomechanics, 29 (5): 736–756. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023049

华北克拉通辽北清原地体新太古代基性麻粒岩变质作用演化

崔润泽, 魏春景

CUI Runze, WEI Chunjing

北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Evolution of metamorphic processes in the Neoproterozoic mafic granulites of the Qingyuan Terrane in northern Liaoning, North China Craton

Abstract: Multiple interpretations exist regarding the tectonic evolution model of the Neoproterozoic North China Craton, requiring a more in-depth study of metamorphic processes. Systematic petrographic observations, mineral chemical analysis, phase equilibrium modeling, and zircon dating were conducted on the basic granulites from Qingyuan in northern Liaoning to elucidate their metamorphic evolution processes and geological significance. The selected samples of mafic granulites were divided into the garnet-bearing domain (19DJ07-GD) and garnet-free domain (19DJ07-NGD), with the garnet-bearing region displaying a banded and inhomogeneous distribution. Both domains exhibit two generations of granulite facies assemblages. In the garnet-bearing domain, the first-generation metamorphic mineral assemblage includes garnet + clinopyroxene + orthopyroxene + hornblende + biotite + plagioclase + quartz. Notably, the first-generation plagioclase (Pl_1) exhibits a complex compositional zoning, with anorthite content (x_{An}) increasing from the core to the mantle and then decreasing towards the rim. Similarly, the titanium component zoning in the first-generation amphibole (Amp_1) follows a pattern of increasing from the core to the mantle and then decreasing towards the rim. Based on mineral assemblages and corresponding component zoning, it is inferred that the first-generation granulite facies metamorphic process followed a counterclockwise $P-T$ path, involving a pre-peak $P-T$ rise stage and a post-peak $P-T$ drop stage. Phase equilibrium modeling constrains the peak conditions at 0.8 ~ 0.9 GPa/900 ~ 950 °C, indicative of high-ultrahigh-temperature (HT-UHT) metamorphism conditions. Zircon dating results yielded a post-peak cooling age of 2498 ± 6.9 Ma (MSWD = 0.39). Considering the regional “dome-and-keel” tectonics, the counterclockwise $P-T$ path, and the metamorphic timing of supracrustal rock nearly synchronous with late-stage TTG magmatic pulses, the UHT metamorphism of the supracrustal rocks is believed to be controlled by the unique Archean vertical tectonics/sagduction system. The second-generation metamorphic assemblage is characterized by locally formed coronas or symplectites of garnet + quartz $\pm$ clinopyroxene, representing high-pressure (HP) granulite facies metamorphism associated with a Paleoproterozoic orogenic event.

Keywords: metamorphism; $P-T$ path; zircon geochronology; Neoproterozoic; sagduction; North China Craton

摘 要: 对华北克拉通新太古代的构造演化模式有多种不同的认识, 需要进行更加深入的变质作用研究。通过对辽北清原地体基性麻粒岩进行系统的岩相学观察、矿物化学分析、相平衡模拟和锆石定年研究, 以阐明其变质演化过程和大地构造意义。研究选择的基性麻粒岩样品分为含石榴石域 (19DJ07-GD) 和不

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41872057, 418930834)

This research is financially supported by the Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grants No. 41872057 and 418930834).

第一作者: 崔润泽 (1996—), 男, 在读博士, 主要从事变质作用与相平衡模拟研究。E-mail: rzcu@pku.edu.cn

收稿日期: 2023-04-07; 修回日期: 2023-05-16; 责任编辑: 王婧

含石榴石域(19DJ07-NGD)两类,含石榴石的区域呈条带状且分布不均匀。两种区域都发育两期麻粒岩相组合。在含石榴石域,第一期变质矿物组合为石榴石+单斜辉石+斜方辉石+角闪石+黑云母+斜长石+石英。其中,第一期斜长石(Pl_1)发育复杂成分环带,钙长石摩尔分数(x_{An})从核部到幔部升高,然后再向边部降低;第一期角闪石(Amp_1)的Ti成分环带同样为从核部到幔部升高再向边部降低。通过矿物组合和相应的成分环带推测第一期麻粒岩相变质作用具有逆时针型 $P-T$ 轨迹,包含峰期前升温升压阶段以及峰后降温降压阶段。通过相平衡模拟约束峰期温压条件为0.8~0.9 GPa/900~950 °C,达到高温—超高温(high-ultrahigh temperature)变质条件。锆石定年结果表明变质作用峰后冷却时间为 2498 ± 6.9 Ma (MSWD=0.39)。综合区域上的“穹隆-龙骨”构造、逆时针的变质轨迹以及和TTG岩浆活动晚期脉冲几乎一致的表壳岩变质时间,表壳岩超高温麻粒岩相变质作用被认为受太古宙特有的垂向构造/沉落(sagduction)构造体制控制。第二期变质组合以局部生长的石榴石+石英±单斜辉石的后成合晶/冠状体为特征,代表一期与古元古代造山事件有关的高压麻粒岩相变质作用。

关键词: 变质作用; $P-T$ 轨迹; 锆石年代学; 新太古代; 沉落构造; 华北克拉通

中图分类号: P583 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 05-0736-21

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023049

0 引言

太古宙克拉通是大陆地壳中的重要构造单元,许多太古宙克拉通具有“穹隆-龙骨(dome-and-keel)”构造,表现为大小不一的表壳岩呈块状/皮筏状产于TTG(tonalite-trondhjemite-granodiorite)穹隆内,或呈带状处在穹隆之间(如:Collins et al., 1998; Hickman, 2004; Lin and Beakhouse, 2013; Anhaeusser, 2014)。这些表壳岩经历了绿片岩相-麻粒岩相变质作用(Condie, 1981)。Brown (2007)和Brown and Johnson (2018)对17个太古宙高级地体的总结表明,麻粒岩相表壳岩的 $P-T$ 条件为0.65~1.40 GPa/800~1100 °C,地热梯度很高,大于775 °C/GPa。这些高温—超高温麻粒岩大多显示逆时针的 $P-T$ 轨迹,但它们的构造体制仍存在争议。例如,Mezger et al. (1990)认为苏必利尔克拉通(Superior Craton)的~2.7 Ga皮奎托内(Pikwitonei)麻粒岩形成于大陆岩浆弧环境;Jayananda et al. (2012)认为东达瓦尔克拉通(Eastern Dharwar Craton)中部的~2.7 Ga泥质麻粒岩可能与洋脊俯冲有关;然而,来自华北克拉通冀东地体的~2.5 Ga麻粒岩被认为形成于垂直的沉落(sagduction)构造体制(Duan et al., 2017; Liu and Wei, 2018; Liu et al., 2020, 2022a)。对太古宙麻粒岩相表壳岩变质演化的研究可以为研究地球早期的构造体制提供新的认识。

同世界上其他克拉通一样,华北克拉通具有

漫长且复杂的演化历史(Zhai and Santosh, 2011; 郑建平, 2020; 万渝生等, 2022)。很多研究表明华北克拉通东部陆块太古宙表壳岩在新太古代晚期(~2.50 Ga)发生了角闪岩相-麻粒岩相变质作用,关于其形成的大地构造环境有三种不同的认识:与微陆块拼贴时发生的俯冲-碰撞有关(Zhai and Santosh, 2013; 翟明国, 2019);与板块俯冲引起的碰撞造山有关(Kusky et al., 2016);与地幔柱有关(Geng et al., 2006; Kwan et al., 2016)。这些表壳岩记录了不同的峰期条件和 $P-T$ 演化轨迹。其中角闪岩相表壳岩记录顺时针:(如Liu et al., 2020)或逆时针型 $P-T$ 轨迹(如:Zhao, 1995; Wu and Wei, 2021);而麻粒岩相表壳岩一般记录逆时针型 $P-T$ 轨迹(如:Duan et al., 2017; Zhang et al., 2019; Lu and Wei, 2020)。因此,需要对太古宙表壳岩进行更多的研究,以明晰其变质作用演化,并进一步探讨华北克拉通太古宙克拉通的构造体制。

清原地体位于华北克拉通北缘东段,其表壳岩在新太古代晚期经历了角闪岩相-麻粒岩相变质作用(万渝生等, 2005a, 2005b; Peng et al., 2015; Wu et al., 2016; Li and Wei, 2017; Wu and Wei, 2021)。大部分表壳岩都经历了角闪岩相变质作用,记录了逆时针型 $P-T$ 轨迹,峰期温压为0.7~1.0 GPa/750~890 °C(Wu et al., 2013; Wu and Wei, 2021; Liu et al., 2022b)。只有东井沟、线金厂、唐力和平岭后地区出露着一些麻粒岩相表壳岩,但尚未对其变质演化进行研究。此外,

清原地体新太古代晚期的构造模式也存在诸多争议,包括和地幔柱有关的垂向构造模型(Zhai et al., 1985; Wu et al., 2013, 2016; Li and Wei, 2017),和洋壳俯冲有关的横向构造模型(万渝生等, 2005a; Peng et al., 2015; Wang et al., 2016a, 2016b; 王康等, 2018; 袁玲玲等, 2020),以及太古宙特有的垂向/沉落构造体制(Wu and Wei, 2021)。沉落过程是指在花岗质岩浆底辟上涌的同时表壳岩下坠,最终形成穹隆-龙骨构造(Collins et al., 1998; François et al., 2014)。为了进一步探讨清原地体新太古代晚期的构造体制,特别是在麻粒岩相变质演化的背景下,需要进行更多的研究。文章通过对清原地体东井沟地区基性麻粒岩的系统岩石学、矿物化学、相平衡模拟和锆石年代学研究,约束了其变质作用和构造演化。

1 地质背景

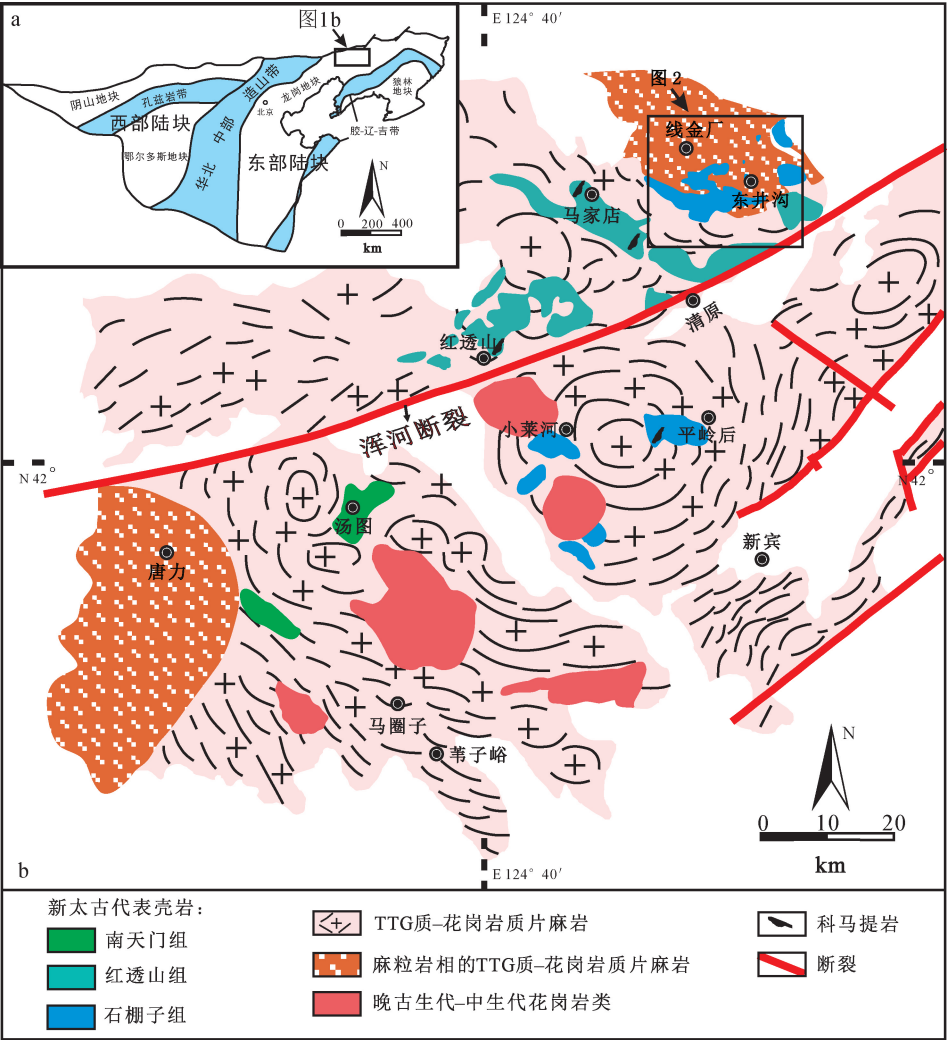
华北克拉通的构造演化是近年来研究的热点,主要有三种不同的构造模型。第一种模型认为,华北克拉通包括四个太古宙地块:阴山、鄂尔多斯、龙岗和狼林地块(图1a)。阴山地块和鄂尔多斯地块在~1.95 Ga 拼合形成了西部陆块和孔兹岩带,龙岗地块和朗林地块在~1.90 Ga 拼合形成了东部陆块和胶-辽-吉带,最后东、西陆块在~1.85 Ga 拼合形成了华北中部造山带(TNCO)和整个华北克拉通(Zhao et al., 2005, 2012)。第二种模型认为,在新太古代末期(~2.5 Ga)微陆块和岛弧拼贴形成了华北克拉通(Zhai et al., 2000, 2005; Zhai and Santosh, 2011),随后在古元古代(约2.0~1.82 Ga)经历了裂谷-俯冲-增生-碰撞等一系列构造过程,形成了丰镇带、晋豫带、胶-辽-吉带。第三种模型认为华北克拉通是由两个太古宙陆块(东部、西部陆块)在2.5~2.4 Ga 发生碰撞形成(Kusky and Li, 2003; Kusky et al., 2016),并且华北克拉通北缘在2.3~1.9 Ga 转变为安第斯型大陆边缘。随后,华北克拉通在1.90~1.85 Ga 与未知大陆发生碰撞,形成华北克拉通北缘的内蒙-冀北造山带(Kusky et al., 2016)。

辽北清原地体地处龙岗陆块的东北部(图1a),具有典型的“穹隆-龙骨”构造。清原地体主要由TTG质(英云闪长质-奥长花岗质-花岗闪长质)-花岗质片麻岩和少量表壳岩组成,TTG

质-花岗质片麻岩呈穹隆状,而表壳岩则以皮筏状或带状处于穹隆内或穹隆之间(图1b)。清原地体TTG质-花岗质片麻岩中岩浆锆石的年龄显示了其侵位时间为2.57~2.49 Ga(万渝生等, 2005b; 白翔等, 2014; Peng et al., 2015; Wang et al., 2016a, 2016b; Wu et al., 2016; 王康等, 2018; Li et al., 2020; 袁玲玲等, 2020),并且它们和表壳岩一样经历了角闪岩相-麻粒岩相变质作用,变质年龄为2.55~2.42 Ga(白翔等, 2014; Wang et al., 2016a, 2016b; Li et al., 2020)。清原地体的表壳岩由下至上可划分为石棚子组、红透山组和南天门组(Zhai et al., 1985)。石棚子组以麻粒岩、斜长角闪岩、辉石角闪岩、黑云母斜长片麻岩、石榴方辉石岩等为主,可能的原岩有科马提岩、拉斑玄武岩、英安岩和富铁沉积物;红透山组主要由斜长角闪岩、黑云母斜长片麻岩等组成,含少量夕线石或蓝晶石片麻岩,其原岩可能为拉斑岩、英安岩、泥质-杂砂质沉积岩;南天门组以黑云斜长片麻岩、二云母片岩、斜长角闪岩、磁铁石英岩和大理岩为主,其原岩可能为凝灰岩、泥质-杂砂质沉积岩、基性火山岩、条带状铁质建造以及碳酸盐岩。锆石年代学显示,表壳岩的变质年龄约为2.55~2.43 Ga(万渝生等, 2005b; 白翔等, 2014; Peng et al., 2015; Wang et al., 2016a, 2016b; Li and Wei, 2017; Wu and Wei, 2021)。Li and Wei (2017)将红透山组的玄武质岩石按照稀土元素特征划分为富集型和亏损型两个系列,并推测其成因与地幔柱活动有关。其中富集型玄武质岩石稀土元素总量高、富集轻稀土元素,具有岛弧型地球化学特征;而亏损型玄武质岩石稀土元素总量较低。

清原地体还有很多古元古代变质基性岩墙(图2),它们侵入了新太古代TTG质片麻岩和表壳岩。Duan et al. (2019)和Wu and Wei (2021)报道称变质基性岩墙经历了角闪岩相-高压麻粒岩相变质作用,具有顺时针型 $P-T$ 轨迹,峰值条件为0.9~1.1 GPa/720~780 °C。岩墙侵位时间为~2.12 Ga,变质时间为~1.85 Ga,其变质作用可能与地壳增厚造山事件有关。

文中研究的基性麻粒岩样品(19DJ07)采自东井沟村公路旁的采石坑(124°57'55.523"N, 42°12'14.957"E;图2)。清原地体高级表壳岩包含三种岩性:基性麻粒岩、中酸性麻粒岩以及变富



a—华北克拉通构造分区 (据 Zhao et al. , 2005 修改); b—清原地体地质简图 (据万渝生等, 2005b; Peng et al. , 2015; Li and Wei, 2017 修改)

图 1 华北克拉通构造分区图及清原地体地质简图

Fig. 1 Tectonic subdivision of the North China Craton and geological sketch map of the Qingyuan Terrane
(a) Tectonic subdivision of the North China Craton (modified from Zhao et al. , 2005); (b) Geological sketch map of the Qingyuan Terrane (modified from Wan et al. , 2005b; Peng et al. , 2015; Li and Wei, 2017)

铁沉积岩, 三种表壳岩互层产出; TTG 质片麻岩侵入表壳岩, 其内可见大小不一的表壳岩捕虏体。基性麻粒岩与变富铁沉积岩互层; 基性麻粒岩部分熔融程度较高, 露头上常见宽度不等的浅色脉体 (图 3a)。部分基性麻粒岩的浅色体中包含石榴石和斜方辉石。基性麻粒岩的部分区域含有石榴石 (图 3a、3b)。

2 岩石学分析

2.1 全岩成分分析

研究样品的全岩主量元素测试分析于中国地

质大学 (北京) 的相关实验室完成, 使用仪器为电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES), 测试结果见表 1。

2.2 岩相学和矿物化学

矿物化学分析使用了北京大学地球与空间科学学院的 JXA-8100 型号的电子探针, 测试条件为: 加速电压 15 kV, 电流 10 nA, 束斑直径为 2 μm (测试黑云母时为 5 μm), 使用 SPI 公司的 53 种矿物作为标准样品。

基性麻粒岩样品 19DJ07 中含石榴石的区域呈条带状分布, 条带宽度 0.4~1.0 cm (图 3b、3c), 因此, 可以划分为含石榴石域 (19DJ07-GD) 和无

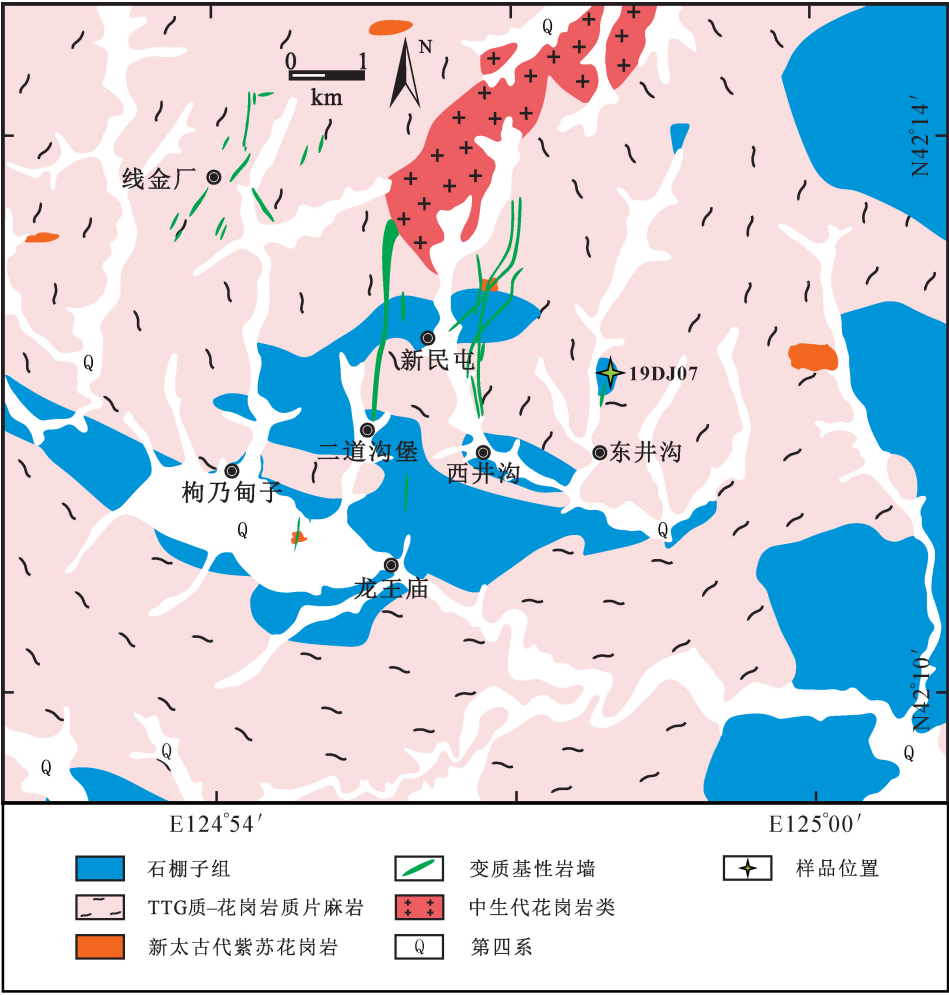


图 2 显示岩性分布和样品采集点的清原地区地质图 (据 Duan et al. , 2019 修改)

Fig. 2 Geological sketch map of the Qingyuan area showing lithological distribution and sample localities (modified from Duan et al. , 2019)

石榴石域 (19DJ07-NGD) 两部分, 分别为石榴二辉麻粒岩和二辉麻粒岩组合。两个结构域的代表性矿物成分见表 2、表 3。

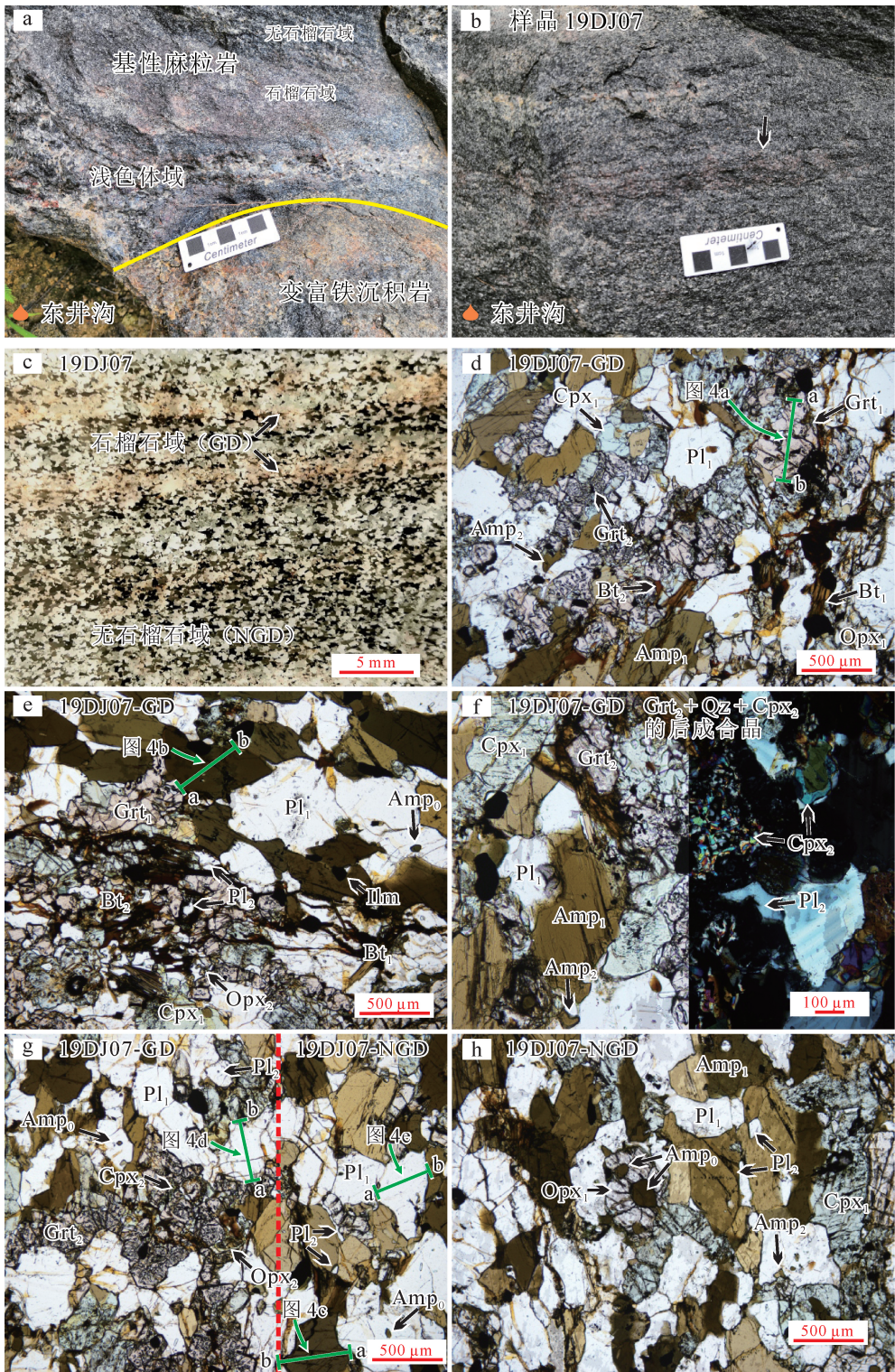
(1) 19DJ07-GD 的矿物组合各成分体积分数 φ 分别为石榴石 (5%)、单斜辉石 (15%)、斜方辉石 (6%)、角闪石 (28%)、黑云母 (1%)、斜长石 (40%)、石英 (3%) 及钛铁矿 + 磁铁矿 (2%)。具有典型等粒粒状变晶结构 (图 3d—3g)。

石榴石分为 Grt_1 和 Grt_2 两类。 Grt_1 为他形—半自形, 粒度 0.1~0.5 mm, 部分颗粒含有极少的包裹体 (石英或黑云母) (图 3d)。 Grt_1 的成分中 $x_{\text{Grs}} = \text{Ca}/(\text{Mg}+\text{Fe}+\text{Ca}+\text{Mn})$, x_{Alm} (铁铝榴石摩尔分数)、 x_{Sps} (锰铝榴石摩尔分数)、 x_{Py} (镁铝榴石摩尔分数) 依此类推, 从核部到边部逐渐降低 (0.26→0.21); x_{Py} 具有与 x_{Grs} 相似的环带 (0.13→0.10); x_{Alm} 表现出与 x_{Py} 相反

的环带, 从核部到边部升高 (0.59→0.65); x_{Sps} 只有 0.02~0.03, 整体较为均匀 (图 4a)。 Grt_2 作为 0.1~0.2 mm 宽的冠状环带生长在其他矿物周围 (图 3d、3g); Grt_2 呈筛状, 常与细粒石英包裹体及 Cpx_2 构成后成合晶结构 (图 3f)。相比于 Grt_1 , Grt_2 的 x_{Grs} 更低, 为 0.19~0.24, 但是 x_{Alm} 更高, 为 0.60~0.68; x_{Py} 为 0.09~0.13, x_{Sps} 为 0.02~0.03。

单斜辉石包含 Cpx_1 和 Cpx_2 两类。 Cpx_1 作为主体矿物之一, 粒度 0.2~0.3 mm, 他形粒状 (图 3d、3f); 而 Cpx_2 则是 0.01~0.02 mm 的他形的颗粒或冠状体, 生长于辉石或角闪石周围 (图 3f、3g)。 Cpx_1 和 Cpx_2 具有相似的透辉石成分: $x_{\text{Wo}} = 0.46\sim0.51$ 、 $x_{\text{En}} = 0.29\sim0.36$ (Morimoto, 1988)。

斜方辉石包含 Opx_1 和 Opx_2 两类。 Opx_1 是粒度 0.1~0.3 mm 的他形—半自形柱状颗粒 (图 3d、3e); Opx_2 常生长于叠加变质结构域的二辉石周



Grt—石榴石；Cpx—单斜辉石；Opx—斜方辉石；Bt—黑云母；Amp—角闪石；Ilm—钛铁矿；Pl—斜长石；Qz—石英
下标数字：0—包裹体状态的第一期矿物；1—第一期矿物；2—第二期矿物

a、b 标记的线条对应图 4 中的矿物成分剖面

a—基性麻粒岩（含石榴石域和无石榴石域）和富铁沉积物互层，露头见部分熔融产生的浅色脉体；b—含石榴石细带的样品 19DJ07 露头照片；c—样品薄片的扫描照片，岩石分为石榴石域（19DJ07-GD）和无石榴石域（19DJ07-NGD）；d、e—两期石榴石显微照片对比，其中 Grt₂ 和 Qz 构成冠状后成合晶，发育两期斜方辉石（Opx₁、Opx₂）、三期角闪石（包裹体 Amp₀、岩石主体矿物之一 Amp₁ 呈变晶结构、Amp₂ 粒度细且生长在辉石周围；f—岩石局部叠加变质组合显微特征，发育 Grt₂+Qz+Cpx₂ 的后成合晶和两期斜长石（Pl₁、Pl₂）；g—两期单斜辉石（Cpx₁、Cpx₂）的显微特征；h—岩石近粒变晶结构显微特征，发育被辉石包裹的 Amp₀ 和两期斜长石（Pl₁、Pl₂）

图 3 表壳岩的露头照片、基性麻粒岩 19DJ07 的野外露头及显微照片

Fig. 3 Outcrop photo of supracrustal rock, and field outcrop photo and microphotographs of mafic granulite 19DJ07

(a) Interbedding of mafic granulite (containing garnet-bearing and non-garnet-bearing domains) with iron-rich metasediments, with outcrops displaying light-colored veins formed by partial melting; (b) Outcrop photo of sample 19DJ07, which contains fine bands of garnet; (c) Scanned photos of sample thin-section, categorizing the rocks into garnet-bearing domain (19DJ07-GD) and non garnet-bearing domain (19DJ07-NGD); (d and e) Comparative microphotographs of two generations of garnet, where Grt₂ and Qz form coronal symplectites, and two generations of orthopyroxene (Opx_{1/2}) and three types of amphibole (Amp_{0/1/2}) are developed; Amp₀ occurs as inclusions, Amp₁ as one of the main minerals of rock exhibits blastic texture, and Amp₂ is fine-grained and grows around pyroxene; (f) Microscopic characteristics of locally superimposed metamorphic combinations in rocks, showing the development of symplectites of Grt₂+Qz+Cpx₂ and two generations of plagioclase (Pl_{1/2}); (g) Microscopic characteristics of two generations of clinopyroxene (Cpx_{1/2}); (h) Homeoblast texture in 19DJ07-NGD, with Amp₀ enclosed by pyroxene and two generations of plagioclase (Pl_{1/2})

The lines labeled with a and b corresponds to the composition zoning profile in Fig. 4; mineral abbreviations are according to Whitney and Evans, 2010; Warr (2021): Grt-garnet; Cpx-clinopyroxene; Opx-orthopyroxene; Bt-biotite; Amp-hornblende; Ilm-ilmenite; Pl-plagioclase; Qz-quartz

表 1 清原地区基性麻粒岩的全岩成分以及相平衡模拟用的有效全岩成分

Table 1 Bulk-rock compositions and effective bulk-rock compositions of samples from Qingyuan terrane												
样品	ICP-OES 分析得到的全岩成分含量/%											Mg [#]
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	
19DJ07	50.20	1.46	12.86	15.15	0.21	5.32	10.41	3.10	0.59	0.18	0.17	0.53
样品	用于相平衡模拟的标准化全岩成分摩尔分数/%											Mg [#]
	H ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	O		
19DJ07-GD	2.07	52.89	8.45	11.38	7.23	12.87	0.38	3.12	1.17	0.44	0.36	0.57
19DJ07-NGD	2.68	51.83	8.79	11.22	9.22	10.64	0.41	3.41	0.99	0.79	0.46	0.58

注: Fe₂O₃ 全铁; LOI 烧失量; Mg[#] = MgO / (MgO + FeO_{total}); A/CNK = Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O)

围, 粒度~0.01 mm (图 3e、3g)。两类斜方辉石都具有斜铁辉石的成分, $x_{En} (= Mg / (Mg + Fe + Ca)) = 0.39 \sim 0.46$ 、 $x_{Wo} (= Ca / (Mg + Fe + Ca)) = 0.01$ (Morimoto, 1988)。

根据岩石结构, 角闪石可以分为 Amp₀、Amp₁ 和 Amp₂ 三类。Amp₀ 粒度约为 0.01~0.10 mm, 作为斜方辉石或斜长石的包裹体存在 (图 3e、3g); Amp₁ 作为主体矿物之一, 粒度为 0.1~0.5 mm, 他形一半自形 (图 3d—3g); Amp₂ 为他形, 粒度为 0.01~0.05 mm, 生长于其他矿物边部 (图 3d—3f)。根据 Hawthorne et al. (2012) 的分类, 三类角闪石都属于韭闪石 ($(Na + K)^A = 0.59 \sim 0.75$, $(Al + Fe^{3+} + 2Ti)^C = 0.87 \sim 1.20$)。Amp₀ 成分中 Ti 含量为 0.19~0.27 p. f. u. (per formula unit)、 $x_{Mg} = 0.41 \sim 0.47$ 。Amp₁ 的 Ti 含量为 0.17~0.25 p. f. u., 且具有从核部到幔部升高再到边部降低的成分环带 (图 4b); $x_{Mg} = 0.39 \sim 0.47$ 。Amp₂ 的 Ti 含量最低, 为 0.14~0.21 p. f. u., $x_{Mg} = 0.44 \sim 0.46$ 。

黑云母也分 Bt₁ 和 Bt₂ 两类, Bt₁ 为他形或半自形, 粒度为 0.01~0.1 mm; Bt₂ 为他形, 粒度为 ~0.01 mm (图 3d、3f); 两类黑云母成分相似, $x_{Mg} = 0.45 \sim 0.46$, Ti 含量为 0.27~0.28 p. f. u.。

斜长石可以分为 Pl₁ 和 Pl₂ 两类。Pl₁ 为他形—半自形, 粒度为 0.1~5.0 mm (图 3d、3e、3g)。Pl₁ 的 x_{An} 从核部到幔部升高再到内边降低 (0.42→0.45→0.40), 部分 Pl₁ 颗粒还生长了 x_{An} 更低的外边部 (0.26~0.36; 图 4d), 可能为熔体局部汇聚结晶形成 (Liu et al., 2020; Zhang et al., 2020, 2021)。部分 Pl₁ 颗粒的核部 x_{An} 较低, 低至 0.36。Pl₂ 一般生长在叠加变质结构域, 其 x_{An} 更低, 且从核部到边部降低 (0.32→0.22), 粒度也较 Pl₁ 更细 (0.01~0.05 mm)。

根据矿物的结构和化学成分, 可以划分出三个阶段的矿物组合, 即第一期变质峰期阶段、第一期变质固相线阶段以及叠加变质阶段。第一期变质峰期阶段的矿物组合为 Grt₁+Cpx₁+Opx₁+Pl₁+Ilm; 第一期变质固相线的矿物组合与峰期阶段相比的差别是峰后阶段伴随熔体结晶生长的角闪石、黑云母和斜长石等; 叠加变质的矿物组合为 Grt₂+Qz±Cpx₂ 的后成合晶以及 Opx₂、Pl₂ 和 Amp₂。

(2) 19DJ07-NGD 的矿物组合中各成分体积分数 φ 分别为单斜辉石 (10%)、斜方辉石 (7%)、角闪石 (37%)、黑云母 (1%)、斜长石 (43%)、石英 (1%) 及钛铁矿+磁铁矿 (1%) (图 3g、3h)。

表 2 清原地体基性麻粒岩 19DJ07-GD 中代表性矿物的探针分析

Table 2 Selected microprobe analyses for mafic granulite 19DJ07-GD from the Qingyuan terrane

矿物	Grt1-C	Grt1-R	Grt2	Cpx1	Cpx2	Opx1	Opx2	Amp0	Amp1-C	Amp1-M	Amp1-R	Amp2	Bt1	Bt2	Pl1-C	Pl1-M	Pl1-R1	Pl1-R2	Pl2
SiO ₂	36.47	38.05	37.48	51.53	52.25	49.84	50.33	41.82	42.17	39.74	41.17	42.18	35.94	35.92	58.93	58.24	60.15	63.24	63.89
TiO ₂	0.10	0.11	-	0.07	0.08	0.02	0.05	2.39	1.83	2.10	1.57	1.66	4.77	4.70	0.02	0.03	-	-	-
Al ₂ O ₃	20.08	19.57	20.46	1.14	1.34	0.43	0.45	11.72	11.01	11.48	11.18	10.77	13.65	13.70	26.37	25.67	25.44	23.85	23.00
Cr ₂ O ₃	0.05	0.02	0.02	0.06	0.03	-	-	-	0.07	0.08	0.07	0.06	0.06	-	-	0.01	0.02	-	-
FeO	29.78	31.34	30.58	13.42	13.58	34.57	33.77	19.44	20.46	20.43	20.92	19.78	22.03	20.70	0.08	0.05	0.04	0.39	0.50
MnO	1.06	1.24	1.28	0.15	0.21	0.44	0.41	0.10	-	-	-	0.10	-	-	-	-	-	-	-
MgO	2.90	2.83	2.95	11.05	11.02	14.08	14.71	7.56	8.03	7.62	7.55	8.30	10.00	9.84	-	-	-	-	-
CaO	8.82	7.48	7.46	22.93	22.81	0.62	0.42	11.73	11.75	11.80	11.68	11.85	-	-	8.90	8.56	7.29	5.44	4.62
Na ₂ O	0.13	0.06	0.16	0.46	0.71	0.05	-	1.75	1.64	1.39	1.60	1.51	0.16	-	6.67	5.77	7.21	8.19	8.80
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	1.34	1.41	1.20	1.30	1.18	9.51	9.37	0.10	0.07	0.14	0.12	0.03
Total	99.47	100.71	100.40	100.81	102.02	100.04	100.16	97.85	98.44	95.92	97.12	97.39	96.14	94.23	101.09	98.40	100.31	101.23	100.87
O	12.000	12.000	12.000	6.000	6.000	6.000	6.000	23.000	23.000	23.000	23.000	23.000	11.000	11.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Si	2.912	3.018	2.969	1.940	1.941	1.966	1.976	6.383	6.412	6.199	6.357	6.452	2.768	2.800	2.609	2.635	2.669	2.765	2.799
Ti	0.006	0.007	-	0.002	0.002	0.001	0.001	0.274	0.209	0.246	0.182	0.191	0.276	0.276	0.001	0.001	-	-	-
Al	1.890	1.830	1.911	0.051	0.059	0.020	0.021	2.109	1.974	2.111	2.035	1.942	1.239	1.259	1.376	1.369	1.331	1.229	1.188
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe ³⁺	0.299	0.130	0.175	0.097	0.106	0.050	0.024	-	0.120	0.360	0.216	0.150	-	-	-	-	-	-	-
Fe ²⁺	1.690	1.949	1.850	0.325	0.316	1.090	1.085	2.481	2.481	2.305	2.485	2.381	1.419	1.350	-	-	-	-	-
Mn	0.072	0.083	0.086	-	-	0.015	0.014	0.013	-	0.011	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	0.345	0.335	0.348	0.620	0.610	0.828	0.861	1.720	1.820	1.771	1.737	1.892	1.148	1.143	-	-	-	-	-
Ca	0.755	0.636	0.633	0.925	0.908	0.026	0.018	1.918	1.914	1.972	1.932	1.942	-	-	0.422	0.415	0.347	0.255	0.217
Na	0.020	-	0.025	0.034	0.051	0.004	-	0.518	0.484	0.420	0.479	0.448	0.024	-	0.573	0.506	0.620	0.694	0.748
K	-	-	-	-	-	-	-	0.261	0.274	0.239	0.256	0.230	0.934	0.932	-	-	-	-	-
x (矿物)	0.26	0.21	0.22	0.66	0.66	0.43	0.44	0.41	0.42	0.43	0.41	0.44	0.45	0.46	0.42	0.45	0.36	0.27	0.22
y (矿物)	0.12	0.11	0.12	-	-	-	-	-	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00

注: $x(\text{Grt}) = x_{\text{Cr}} = \text{Ca} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})$; $y(\text{Grt}) = x_{\text{Fe}} = \text{Mg} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$; $x(\text{Cpx}) = \text{Mg} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$; $x(\text{Opx}) = \text{Mg} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$; $x(\text{Amp}) = \text{Mg} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$; $x(\text{Bt}) = \text{Mg} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Mn})$; $x(\text{Pl}) = x_{\text{An}} = \text{Ca} / (\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$; $y(\text{Pl}) = x_{\text{O}_i} = \text{K} / (\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$ 。后缀含义: -C, 核部; -M, 幔部; -R, 边部; 斜长石, -R1 为内边, -R2 为外边。矿物分子式采用 AX 程序计算。“-” 指示该含量低于检测线。2~12 行的单位为%, 13~24 行的单位为 p. f. u., 25、26 行的单位为%。

表 3 清原地体基性麻粒岩样品 19DJ07-NGD 中代表性矿物的探针分析

Table 3 Selected microprobe analyses for mafic granulite 19DJ07-NGD from the Qingyuan terrane

矿物	Cpx ₁	Opx ₁	Amp ₀	Amp ₁ -C	Amp ₁ -M	Amp ₁ -R	Amp ₂	Bt ₁	Pl ₁ -C	Pl ₁ -M	Pl ₁ -R1	Pl ₁ -R2	Pl ₂
SiO ₂	52.38	50.88	41.82	43.01	42.78	42.28	42.86	36.81	59.73	59.53	59.67	63.35	63.18
TiO ₂	0.07	—	2.39	1.55	2.18	1.63	1.40	4.70	—	—	—	—	—
Al ₂ O ₃	1.23	0.39	11.72	10.57	11.37	11.53	11.48	13.48	25.94	26.61	25.77	23.45	23.67
Cr ₂ O ₃	0.06	0.03	—	0.03	0.07	0.04	0.04	0.06	0.03	0.04	0.03	0.01	0.04
FeO	14.21	35.60	19.44	20.67	20.25	19.18	19.86	22.74	0.08	0.08	0.04	0.06	0.36
MnO	0.20	0.53	0.10	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—
MgO	10.20	13.75	7.56	8.65	8.03	8.71	8.71	9.27	—	—	—	—	—
CaO	22.29	0.47	11.73	11.92	11.65	11.99	11.77	0.13	8.49	9.02	7.50	5.03	5.56
Na ₂ O	0.50	—	1.75	1.37	1.61	1.62	1.46	0.08	6.67	6.01	6.61	8.36	8.11
K ₂ O	—	—	1.34	1.31	1.23	1.25	1.31	9.52	0.14	0.16	0.17	0.19	0.23
Total	101.16	101.67	97.85	99.19	99.24	98.31	98.93	96.84	101.15	101.46	99.81	100.50	101.18
O	6.000	6.000	23.000	23.000	23.000	23.000	23.000	11.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Si	1.976	1.984	6.383	6.451	6.421	6.388	6.422	2.816	2.637	2.619	2.658	2.786	2.766
Ti	—	—	0.274	0.175	0.246	0.185	0.158	0.270	—	—	—	—	—
Al	0.055	0.018	2.109	1.869	2.012	2.054	2.028	1.216	1.350	1.380	1.353	1.216	1.222
Cr	—	—	—	0.004	0.008	0.005	0.005	0.004	—	—	—	—	—
Fe ³⁺	0.024	0.014	—	0.316	0.123	0.142	0.252	—	—	—	—	—	0.013
Fe ²⁺	0.424	1.147	2.481	2.277	2.420	2.282	2.236	1.455	—	—	—	—	—
Mn	—	0.018	0.013	0.014	—	0.010	—	—	—	—	—	—	—
Mg	0.573	0.799	1.720	1.934	1.796	1.961	1.945	1.057	—	—	—	—	—
Ca	0.901	0.020	1.918	1.916	1.874	1.941	1.890	0.011	0.402	0.425	0.358	0.237	0.261
Na	0.037	—	0.518	0.398	0.469	0.475	0.424	0.012	0.571	0.513	0.571	0.713	0.689
K	—	—	0.261	0.251	0.236	0.241	0.250	0.929	—	—	0.010	0.011	0.013
x (矿物)	0.57	0.41	0.41	0.46	0.43	0.46	0.47	0.42	0.41	0.45	0.38	0.25	0.27
y (矿物)									0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

注： $x(\text{Grt}) = x_{\text{Gr}} = \text{Ca} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})$ ； $y(\text{Grt}) = x_{\text{Py}} = \text{Mg} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})$ ； $x(\text{Cpx}) = \text{Mg} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ ； $x(\text{Opx}) = \text{Mg} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ ； $x(\text{Amp}) = \text{Mg} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ ； $x(\text{Bt}) = \text{Mg} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Mn})$ ； $x(\text{Pl}) = x_{\text{An}} = \text{Ca} / (\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$ ； $y(\text{Pl}) = x_{\text{Or}} = \text{K} / (\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$ 。后缀含义：-C，核部；-M，幔部；-R，边部；斜长石，-R1 为内边、-R2 为外边。矿物分子式采用 AX 程序计算。“—”指示该含量低于检测线。2~12 行的单位为%，13~24 行的单位为 p. f. u.，25、26 行的单位为%。

岩石具有麻粒岩典型的等粒变晶结构、三联点结构。

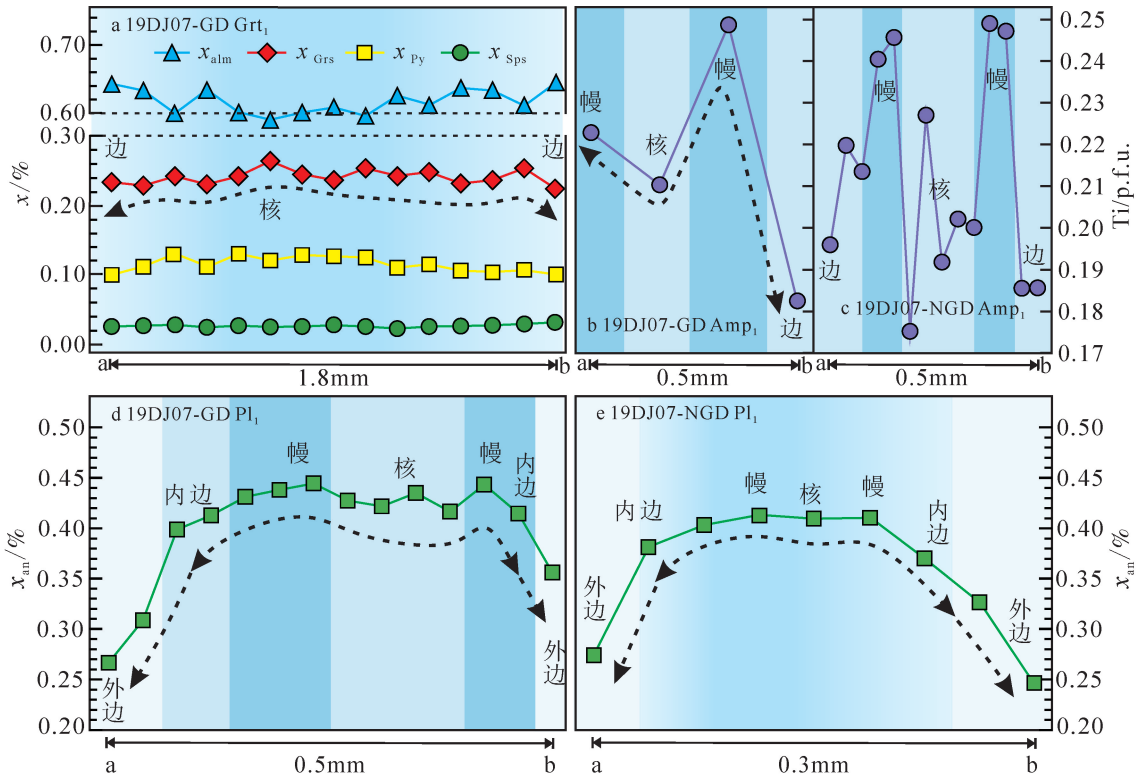
单斜辉石和斜方辉石为他形，粒度 0.1~0.5 mm，内部常含角闪石包裹体（图 3g、3h）。单斜辉石中 $x_{\text{En}} = 0.28 \sim 0.32$ 、 $x_{\text{Wo}} = 0.47 \sim 0.51$ ，斜方辉石中 $x_{\text{En}} = 0.39 \sim 0.41$ 、 $x_{\text{Wo}} = 0.01$ ，根据 Morimoto（1988）的分类，它们分别为透辉石和斜铁辉石。

角闪石可以分为三类（图 3h）：Amp₀、Amp₁ 和 Amp₂。Amp₀ 是斜方辉石或斜长石中的包裹体，Ti 含量为 0.18~0.24 p. f. u.， $x_{\text{Mg}} = 0.38 \sim 0.44$ 。Amp₁ 粒度为 0.1~0.5 mm，他形—半自形，Ti 含量为 0.17~0.29 p. f. u.，且呈现从核部到幔部升高再到边部降低的成分环带（图 4c）； $x_{\text{Mg}} = 0.37 \sim 0.47$ 。Amp₂ 是粒度~0.01 mm 的他形颗粒，生长在辉石周围，Ti 含量为 0.14~0.24 p. f. u.， $x_{\text{Mg}} = 0.42 \sim 0.48$ 。三类角闪石的 $(\text{Na} + \text{K})^{\text{A}} = 0.40 \sim 0.75$ 、 $(\text{Al} + \text{Fe}^{3+} + 2\text{Ti})^{\text{C}} = 0.49 \sim 1.32$ ，根据 Hawthorne et al.（2012）的分类，大部分颗粒属于韭闪石，

少部分颗粒属于透闪石、镁质闪石及钙镁闪石。黑云母为 0.05~0.1 mm 片状， $x_{\text{Mg}} = 0.42$ ，Ti 含量为 0.27 p. f. u.。

斜长石有 Pl₁、Pl₂ 两类。Pl₁ 为他形，粒度 0.1~0.5 mm（图 3g、3h）。Pl₁ 的 x_{An} 从核部到幔部升高再在到边部降低（图 4e）。岩石中 Pl₁ 核部—幔部的 x_{An} 一般集中在 0.42~0.45，内边部 x_{An} 集中在 0.40 左右；但是部分颗粒的核部 x_{An} 可以低至 0.35。大部分 Pl₁ 颗粒外边部的 x_{An} 更低（0.25~0.33），可能代表着局部的熔体汇聚、结晶（如：Liu et al.，2020；Zhang et al.，2020，2021）。Pl₂ 为他形颗粒，粒度~0.1 mm，成分 X_{An} 从核部到边部降低（0.35→0.24）。

根据观察到的岩石结构及矿物成分，可以划分出三个阶段的矿物组合：第一期变质峰期阶段矿物组合 Opx+Cpx+Pl₁+Ilm±Amp、以峰后冷却阶段生长角闪石、斜长石为特征的固相线组合 Opx+Cpx+Pl₁+Amp₁+Bt+Ilm+Qz 以及叠加变质矿物 Pl₂。包裹在二



a—19DJ07-GD 的 Grt_1 的成分剖面 ($x_{\text{Alm}} = \text{Fe}^{2+} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mn} + \text{Mg} + \text{Ca})$, x_{Sps} 、 x_{Py} 、 x_{Grs} 依此类推); b、c—典型角闪石的 Ti 成分环带 (b—19DJ07-GD 的 Amp_1 , c—19DJ07-NGD 的 Amp_1); d、e—典型斜长石的 x_{An} 成分剖面图, $x_{\text{An}} = \text{Ca} / (\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$ (d—19DJ07-GD 的 Pl_1 , e—19DJ07-NGD 的 Pl_1)

图 4 样品 19DJ07 中代表性矿物的成分特征图

Fig. 4 Composition diagrams of representative minerals in Sample 19DJ07

(a) Grt_1 chemical zoning profiles in 19DJ07-GD ($x_{\text{Alm}} = \text{Fe}^{2+} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mn} + \text{Mg} + \text{Ca})$; x_{Sps} , x_{Py} , and x_{Grs} follow this pattern, respectively); (b and c) Typical composition zoning of Ti for Amp_1 in 19DJ07-GD (b) and 19DJ07-NGD (c); (d) Typical composition zoning of $x_{\text{An}} (= \text{Ca} / (\text{Ca} + \text{Na} + \text{K}))$ for Pl_1 in 19DJ07-GD (d) and 19DJ07-NGD (e)

辉石中的 Amp_0 也许代表着进入变质阶段。

3 相平衡模拟

基于上述样品的矿物组合及矿物化学成分, 在 NCKFMASHTO ($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$) 体系中, 利用 THERMOCALC 3.45 (Holland and Powell, 1998) 和热力学数据库 ds62 (Holland and Powell, 2011) 进行了视剖面图计算。所用矿物相活度-成分 (a-x) 模型包括: 石榴石 (White et al., 2007, 2014), 角闪石、单斜辉石、熔体 (Green et al., 2016), 斜方辉石、黑云母 (White et al., 2014), 斜长石 (Holland and Powell, 2003), 钛铁矿 (White et al., 2000), 石英为纯端元组分。模拟中所使用的 H_2O 和 O 值是依据 T-M ($\text{H}_2\text{O}/\text{O}$) 图解来确定的, 以确保模

拟的固相线组合与实际观察的一致 (Korhonen et al., 2013), 并且这样确定的 O 值可避免样品制备过程中潜在的污染或氧化以及在抬升出露过程中可能的流体作用导致的氧逸度的变化 (如: Dos Santos et al., 2011; Cao et al., 2011; Korhonen et al., 2012)。

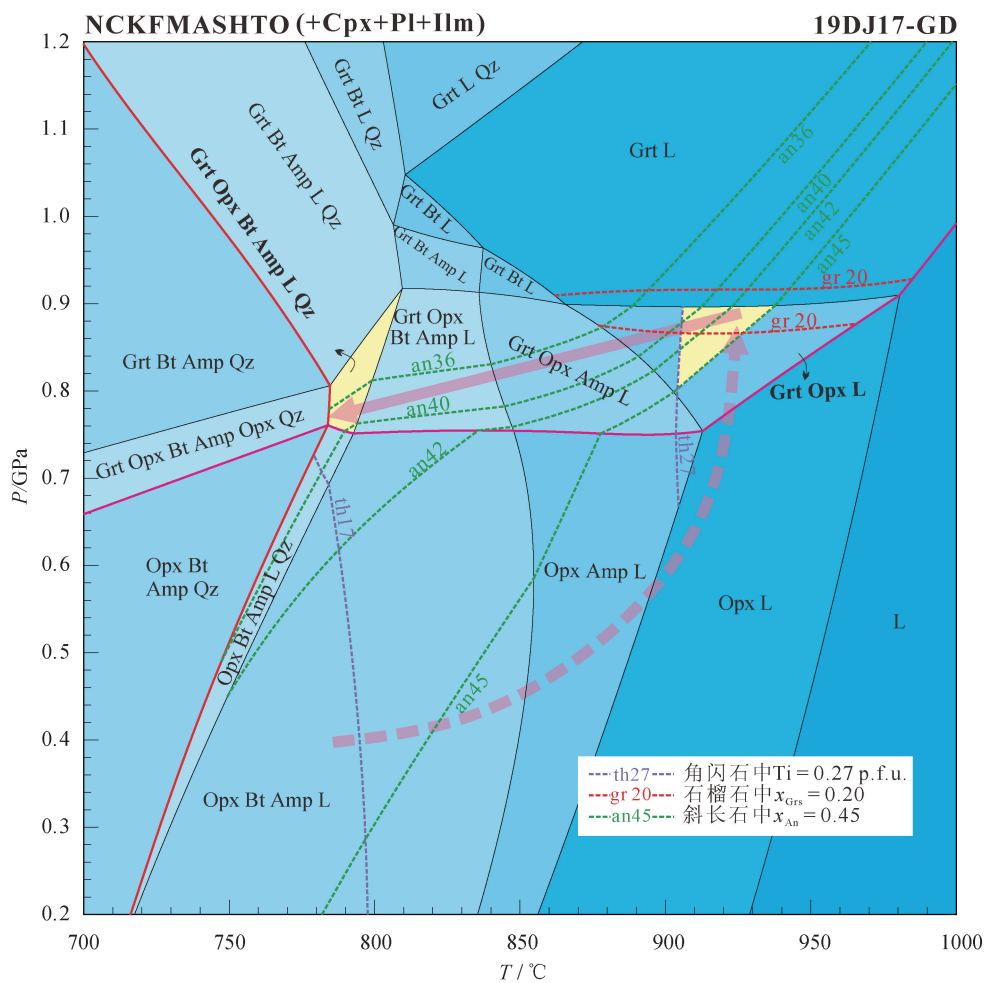
为了使视剖面图更好地反映样品的实际情况, 采用有效全岩成分的摩尔分数进行相平衡模拟。有效全岩是据样品的矿物组合、矿物的体积分数及化学成分进行整合计算得到的。所有样品的有效全岩均列在了表 1 中。

19DJ07-GD 的 $P-T$ 视剖面图 (图 5) 中, $P-T$ 范围是 0.2~1.2 GPa/700~1000 $^{\circ}\text{C}$ 。在相关的矿物组合区域绘制出了石榴石的 x_{Grs} 等值线、斜长石的 x_{An} 等值线以及角闪石的 Ti 含量等值线。固相线组合 $\text{Grt}_1 + \text{Opx}_1 + \text{Cpx}_1 + \text{Amp}_1 + \text{Bt}_1 + \text{Pl}_1 + \text{Qz} \pm \text{Ilm}$ 稳定的

温压范围是 0.75~0.92 GPa/780~810 ℃，推测的峰期组合 Grt₁+Opx₁+Cpx₁+Pl₁+Ilm+Qz 可以给出一个更大的温压范围 0.75~0.9 GPa/860~980 ℃。Amp₀ 中最高的 Ti 含量 (0.27 p. f. u.) 对应着大约 900 ℃ 的温度条件；将实测 Pl₁ 的 x_{An} (核部-幔部: 0.42→0.45→0.36) 投到图中，再结合推测的峰期矿物组合可以确定峰期条件为 0.8~0.9 GPa/900~940 ℃。依据 Pl₁ 的 x_{An} 从核部到幔部再到内边部先升高后降低的成分剖面 (图 4d) 可以给出一条逆时针的变质轨迹，且最小值 0.36 正好和固相线组合预测的等值线数值一致。 x_{An} = 0.25~0.33 的外边部则代表着亚固相线条件下的更低温压条件，可能由局部熔体结晶形成。Amp₁ 从核部到幔部升高再到边部降低的 Ti 成分环带

(0.17~0.25 p. f. u.；图 4b) 同样对应着逆时针的演化轨迹。图中角闪石最高 Ti 含量投影超过了角闪石的最大稳定域，可能原因是角闪石稳定域被低估，如果模拟中考虑 F、Cl 等组分，角闪石的稳定域会扩大 (Sajeev et al., 2009)。所以 19DJ07-GD 的峰期温度一定在 900 ℃ 以上。或许由于受到熔体在某些区域汇聚而产生局部平衡的影响，实测的石榴石的成分并不能投到图 5 中，图中预测的 x_{Grs} 最大值 (0.20) 小于实测的 x_{Grs} 最小值 (0.21)。在逆时针演化的峰后降温降压过程中，斜长石、角闪石、黑云母以及石英都会生长。

19DJ07-NGD 的 P - T 视剖面图 (图 6) 中，在相关的矿物组合区域绘制出了斜长石的 x_{An} 等值线以及角闪石的 Ti 等值线。观察到的固相线组合



计算 P - T 视剖面图所使用的有效全岩成分见表 1

Grt—石榴石；Cpx—单斜辉石；Opx—斜方辉石；Bt—黑云母；Amp—角闪石；Ilm—钛铁矿；Pl—斜长石；Qz—石英；L—熔体

图 5 样品 19DJ07-GD 在 NCKFMASHTO 体系下的 P - T 视剖面图及 P - T 轨迹

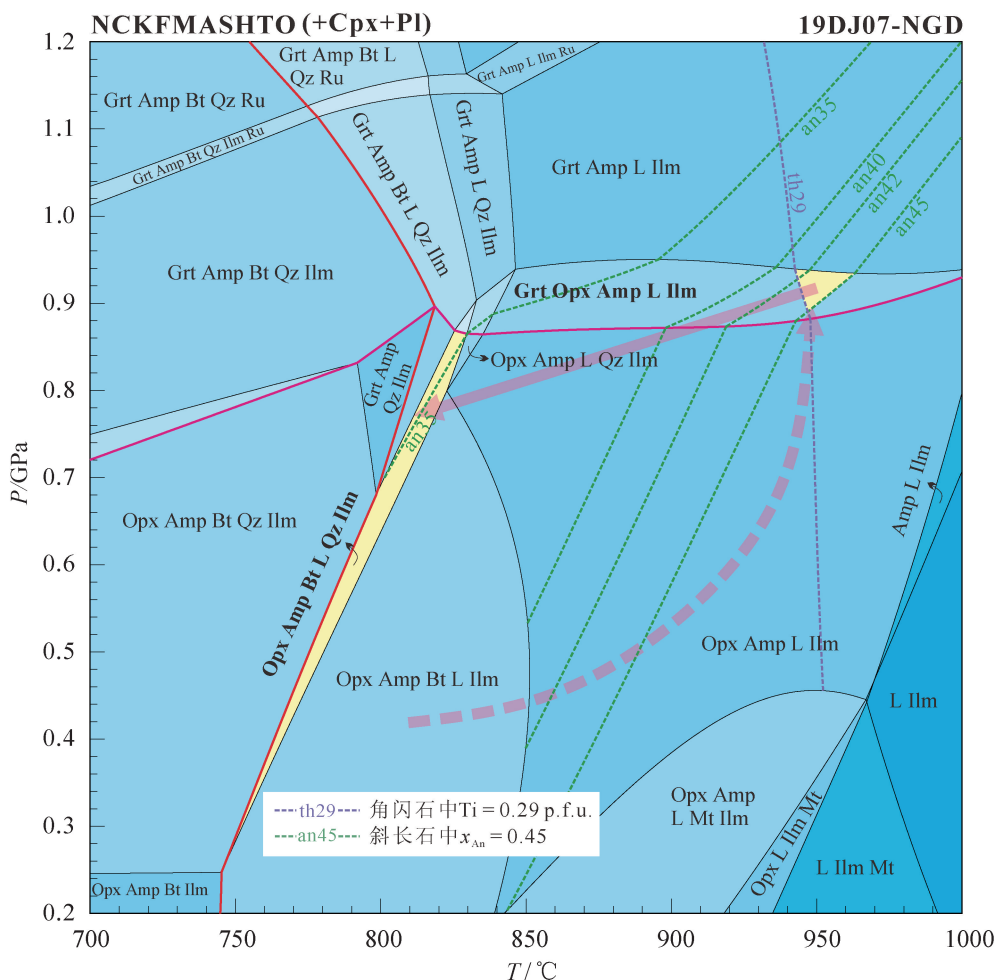
Fig. 5 P - T pseudosection with proposed P - T vectors for 19DJ07-GD in the NCKFMASHTO system

The effective bulk-rock compositions used to calculate the P - T pseudosection are shown in Table 1.

Grt—garnet; Cpx—clinopyroxene; Opx—orthopyroxene; Bt—biotite; Amp—hornblende; Ilm—ilmenite; Pl—plagioclase; Qz—quartz; L—melt

Cpx+Opx+Ampl+Pl₁+Ilm+Bt+Qz 在视剖面图中被预测稳定在一个狭窄的 P - T 区域 0.3~0.9 GPa/740~830 °C, 推测的峰期矿物组合 Opx+Cpx+Pl₁+Ilm±Amp 稳定在<0.9 GPa/>840 °C 的宽泛区域。依据 Pl₁ 幔部的最大 x_{An} (0.45) 和 Ampl 最高 Ti 值以确定峰期温压条件为 ~0.9 GPa/>950 °C, 并位于含石榴石的组合中。Pl₁ 的 x_{An} 从幔部到外边部降低 (0.45→0.40) 对应着峰后降温降压的演化阶段, 岩石中实测的 Pl₁ 最低 x_{An} = 0.35 和固相线区域预测的数值一致。在峰后降温及轻微降压的过程中, 石榴石会通过 Grt+Cpx+Ilm+L = Opx+Amp+Pl 的变

质反应被消耗殆尽（图 6）。沿着这条降压冷却轨迹，相图中的角闪石的 Ti 值、斜长石的 x_{An} 降低。实测中从核部到幔部升高再到内边部降低的 Pl_1 的 x_{An} 成分环带（图 4e）以及从核部到幔部升高再到边部降低的 Amp_1 的 Ti 成分环带（图 4c）都对应着一条逆时针的演化轨迹（图 6）。在图 6 中 $X_{An} < 0.35$ 的等值线将投到亚固相线的条件下（ Pl_1 的外边部 $x_{An} = 0.24 \sim 0.35$ ），反映其可能生长于由熔体汇聚形成的局部区域，并且记录了比图中固相线更低的温度（如：Liu et al., 2020; Zhang et al., 2021）。



计算 $P-T$ 视剖面图所使用的有效全岩成分见表 1

Grt—石榴石; Cpx—单斜辉石; Opx—斜方辉石; Bt—黑云母; Amp—角闪石; Ilm—钛铁矿; Pl—斜长石; Qz—石英; Mt—磁铁矿; L—熔体

图6 样品 19DJ07-NGD 在 NCKFMASHTO 体系下的 P - T 视剖面图及 P - T 轨迹

Fig. 6 P - T pseudosection with proposed P - T vectors for 19DJ07-NGD in the NCKFMASHTO system

The effective bulk-rock compositions used to calculate the P - T pseudosection are shown in Table 1.

Grt-garnet; Cpx-clinopyroxene; Opx-orthopyroxene; Bt-biotite; Amp-hornblende; Ilm-ilmenite; Pl-plagioclase; Qz-quartz; Mt-magnetite; L-melt

4 锆石年代学

19DJ07 的锆石 U-Pb 年代学测试及微量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。测试的 16 个标准锆石 91500 的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为 1066 ± 24 Ma (2SE; MSWD =

0.19), 和参考的 TIMS 年龄 (1065.4 ± 0.3 Ma; 2SE) 几乎一致 (Wiedenbeck et al., 1995), 误差在 2σ 以内。测试的 9 个 Plešovice 锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 336.7 ± 2.3 Ma (2SE; MSWD = 0.76), 和参考的 TIMS 年龄 (337.1 ± 0.4 Ma; 2SE) 几乎一致 (Sláma et al., 2008)。所有 19DJ07 锆石的测试结果详细数据见表 4。

表 4 清原地体基性麻粒岩样品 19DJ07 的锆石 U-Pb 同位素数据

Table 4 U-Pb isotopic data for zircon of mafic granulite 19DJ07 from the Qingyuan terrane

	²³² Th / $\times 10^{-6}$ ²³⁸ U / $\times 10^{-6}$ Th/U			校正后的同位素比值						校正后的年龄/Ma					
				²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ U	1σ
19DJ07-02	101.76	412.86	0.25	10.65807	0.13565	0.47126	0.00469	0.16398	0.00215	2494	12	2489	21	2497	10
19DJ07-03	51.98	196.22	0.26	10.71738	0.13947	0.47578	0.00477	0.16333	0.00219	2499	12	2509	21	2490	10
19DJ07-04	48.30	139.87	0.35	10.99687	0.14640	0.48107	0.00487	0.16575	0.00228	2523	12	2532	21	2515	10
19DJ07-05	53.26	325.75	0.16	10.94539	0.14137	0.48217	0.00482	0.16459	0.00219	2519	12	2537	21	2503	10
19DJ07-06	128.79	844.01	0.15	10.79254	0.13826	0.48447	0.00482	0.16152	0.00213	2505	12	2547	21	2472	10
19DJ07-07	40.22	299.79	0.13	10.02721	0.13068	0.44111	0.00442	0.16482	0.00221	2437	12	2356	20	2506	10
19DJ07-08	65.81	378.36	0.17	10.56486	0.13723	0.46878	0.00469	0.16341	0.00219	2486	12	2478	21	2491	10
19DJ07-09	130.96	600.06	0.22	10.41049	0.13488	0.46489	0.00464	0.16237	0.00217	2472	12	2461	20	2480	10
19DJ07-10	73.42	402.44	0.18	10.73260	0.14078	0.47718	0.00478	0.16308	0.00220	2500	12	2515	21	2488	10
19DJ07-11	66.82	356.87	0.19	9.28255	0.13476	0.41464	0.00432	0.16232	0.00243	2366	13	2236	20	2480	12
19DJ07-12	113.78	578.19	0.20	10.29161	0.13614	0.45722	0.00458	0.16320	0.00222	2461	12	2427	20	2489	10
19DJ07-13	111.41	737.56	0.15	9.23818	0.12275	0.41160	0.00413	0.16274	0.00222	2362	12	2222	19	2484	11
19DJ07-14	203.43	816.71	0.25	9.01265	0.12004	0.41360	0.00415	0.15799	0.00216	2339	12	2231	19	2434	11
19DJ07-15	63.08	385.86	0.16	10.64258	0.14333	0.47371	0.00477	0.16289	0.00225	2492	13	2500	21	2486	11
19DJ07-16	206.75	1201.80	0.17	10.52492	0.14108	0.47749	0.00479	0.15981	0.00220	2482	12	2516	21	2454	11
19DJ07-17	72.53	658.48	0.11	10.17297	0.13737	0.45181	0.00454	0.16325	0.00226	2451	12	2403	20	2490	11
19DJ07-18	64.62	505.23	0.13	9.92018	0.13627	0.43789	0.00443	0.16425	0.00232	2427	13	2341	20	2500	11
19DJ07-19	187.81	605.52	0.31	10.36092	0.14190	0.45673	0.00461	0.16447	0.00231	2468	13	2425	20	2502	11
19DJ07-20	149.38	794.16	0.19	10.48069	0.14522	0.46511	0.00471	0.16338	0.00232	2478	13	2462	21	2491	11
19DJ07-21	84.37	195.32	0.43	11.03961	0.15985	0.48406	0.00497	0.16535	0.00245	2526	13	2545	22	2511	12
19DJ07-22	42.54	105.08	0.40	11.30560	0.16854	0.49434	0.00513	0.16581	0.00253	2549	14	2589	22	2516	12
19DJ07-23	182.24	738.27	0.25	10.49468	0.14943	0.46203	0.00469	0.16468	0.00240	2479	13	2449	21	2504	12
19DJ07-24	244.23	1085.32	0.23	10.65064	0.15172	0.47204	0.00479	0.16358	0.00239	2493	13	2493	21	2493	12
19DJ07-25	64.29	368.52	0.17	11.16502	0.16189	0.49423	0.00505	0.16378	0.00243	2537	14	2589	22	2495	12
19DJ07-26	23.78	90.03	0.26	10.84158	0.16602	0.47499	0.00496	0.16548	0.00260	2510	14	2505	22	2512	13
19DJ07-27	118.49	469.57	0.25	10.82470	0.15872	0.47761	0.00488	0.16431	0.00246	2508	14	2517	21	2501	12
19DJ07-28	189.31	415.74	0.46	10.75754	0.15893	0.47502	0.00486	0.16418	0.00248	2502	14	2506	21	2499	12
19DJ07-30	110.41	481.92	0.23	11.37164	0.16921	0.50097	0.00513	0.16456	0.00250	2554	14	2618	22	2503	12
19DJ07-31	61.79	367.00	0.17	10.98146	0.16769	0.48513	0.00500	0.16410	0.00256	2522	14	2550	22	2498	13
19DJ07-32	67.73	402.17	0.17	10.84644	0.16660	0.47944	0.00495	0.16401	0.00257	2510	14	2525	22	2497	13
19DJ07-33	67.66	392.51	0.17	10.09102	0.15580	0.45204	0.00467	0.16183	0.00255	2443	14	2404	21	2475	13
19DJ07-34	65.52	378.32	0.17	10.81767	0.16843	0.47610	0.00493	0.16472	0.00262	2508	14	2510	22	2505	13
19DJ07-35	84.03	436.80	0.19	10.84746	0.16919	0.47914	0.00496	0.16412	0.00261	2510	15	2524	22	2499	13
19DJ07-36	34.40	165.27	0.21	11.82197	0.18984	0.52046	0.00545	0.16467	0.00270	2590	15	2701	23	2504	14
19DJ07-37	93.49	513.01	0.18	10.45095	0.16536	0.46574	0.00483	0.16267	0.00262	2476	15	2465	21	2484	14
19DJ07-38	236.83	533.72	0.44	11.00081	0.17540	0.48221	0.00501	0.16538	0.00269	2523	15	2537	22	2511	14
19DJ07-39	62.63	397.06	0.16	10.76432	0.17279	0.47288	0.00492	0.16502	0.00270	2503	15	2496	22	2508	14
19DJ07-40	133.93	631.49	0.21	10.78947	0.17337	0.47623	0.00495	0.16424	0.00269	2505	15	2511	22	2500	14
19DJ07-41	119.66	453.45	0.26	9.96767	0.16727	0.43971	0.00462	0.16432	0.00281	2432	15	2349	21	2501	15
19DJ07-42	38.24	322.60	0.12	8.54360	0.15262	0.39138	0.00420	0.15832	0.00330	2291	16	2129	19	2438	36
19DJ07-43	109.38	638.11	0.17	9.70541	0.16596	0.42941	0.00454	0.16384	0.00285	2407	16	2303	20	2496	15

表 4 续

	²³² Th / $\times 10^{-6}$	²³⁸ U / $\times 10^{-6}$	Th/U	校正后的同位素比值						校正后的年龄/Ma					
				²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ Pb	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ U	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ Pb	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ U	1 σ
19DJ07-44	54.78	318.28	0.17	11.09025	0.18957	0.48858	0.00516	0.16454	0.00286	2531	16	2565	22	2503	15
19DJ07-45	166.15	718.67	0.23	10.62991	0.18102	0.47511	0.00499	0.16218	0.00281	2491	16	2506	22	2479	15
19DJ07-46	41.68	224.75	0.19	10.17533	0.17866	0.45097	0.00480	0.16355	0.00292	2451	16	2400	21	2493	16
19DJ07-47	80.44	469.36	0.17	11.09185	0.19323	0.48948	0.00518	0.16426	0.00291	2531	16	2568	22	2500	16
19DJ07-48	59.47	356.07	0.17	10.89295	0.19184	0.47708	0.00507	0.16550	0.00296	2514	16	2515	22	2513	16
19DJ07-49	193.31	1136.34	0.17	11.10746	0.19455	0.48858	0.00516	0.16479	0.00293	2532	16	2565	22	2505	16
19DJ07-50	75.63	196.47	0.38	10.99443	0.19778	0.47885	0.00513	0.16642	0.00304	2523	17	2522	22	2522	16
19DJ07-51	77.89	429.49	0.18	10.69287	0.19419	0.47206	0.00504	0.16418	0.00302	2497	17	2493	22	2499	17
19DJ07-52	217.58	772.49	0.28	10.96441	0.19950	0.48128	0.00513	0.16513	0.00304	2520	17	2533	22	2509	17
19DJ07-53	85.53	491.85	0.17	11.16913	0.20522	0.48972	0.00524	0.16531	0.00308	2537	17	2569	23	2511	17
19DJ07-54	47.44	259.81	0.18	9.94901	0.18611	0.44208	0.00473	0.16322	0.00352	2430	17	2360	21	2489	37
19DJ07-55	70.21	391.66	0.18	10.15480	0.18917	0.45024	0.00479	0.16358	0.00351	2449	17	2396	21	2493	37
19DJ07-56	41.09	112.69	0.36	10.93995	0.21216	0.48010	0.00528	0.16515	0.00325	2518	18	2528	23	2509	18
19DJ07-57	16.18	52.24	0.31	11.38073	0.22959	0.49261	0.00555	0.16745	0.00343	2555	19	2582	24	2532	19
19DJ07-59	94.50	524.18	0.18	10.73346	0.20448	0.47358	0.00511	0.16427	0.00317	2500	18	2499	22	2500	18
19DJ07-60	123.63	631.05	0.20	11.23814	0.21513	0.49341	0.00533	0.16508	0.00320	2543	18	2585	23	2508	18

锆石颗粒大部分为长柱状, 少数为浑圆状, 直径 10~100 μm , 长宽比为 1 : 1~5 : 1。锆石的 CL 图像显示了其内部结构为补丁状、冷杉叶状, 少数具有震荡环带或较均匀, 少数锆石具有核-边结构。锆石的颜色有亮白色、浅灰色、深灰色或黑色 (图 7a)。57 个 U-Pb 同位素分析点位显示 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表观年龄范围为 2508 ± 18 Ma 到 2497 ± 10 Ma, 加权平均年龄为 2494.7 ± 4.4 Ma (MSWD = 1.7), 谐和图上交点年龄为 2498 ± 6.9 Ma (MSWD = 0.39) (图 7b)。锆石 Th/U = 0.11~0.46, (Lu/Gd)_N = 41.4~111.9; 大部分锆石具有负 Eu 异常, 极个别为正 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.29\sim 1.3$); 重稀土元素呈现上升的配分模式 (图 7c)。上述锆石结构和化学特征表明, 锆石可能生长于麻粒岩相变质过程 (Vavra et al., 1999; Rubatto, 2002; Corfu et al., 2003)。

5 讨论

5.1 变质演化过程

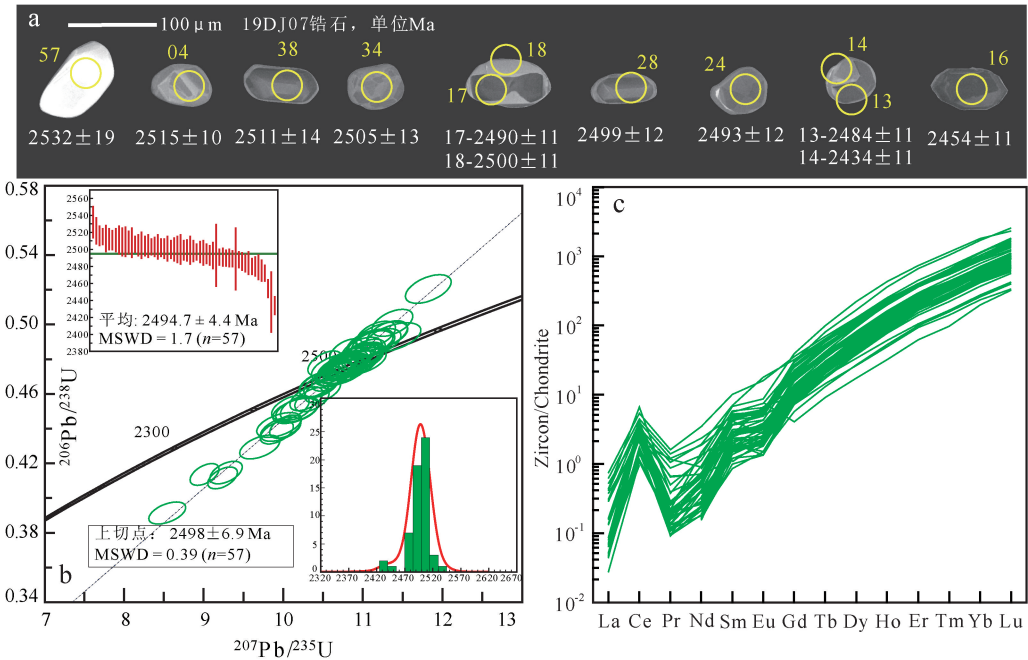
基于清原地体基性麻粒岩的岩相学特征和平衡模拟, 划分了三个变质阶段, 包括峰前升温升压至峰期阶段、峰后减压冷却阶段和后期叠加变质阶段。

峰期前的升温升压阶段主要依据矿物成分的变化趋势确定。如图 4b、4c 所示, 无论 19DJ07-GD 还是 -NGD, Amp₁ 的 Ti 成分环带都呈现出从核

部到幔部升高再到边部降低的成分环带。两个区域 Amp₁ 幔部及 Amp₀ 核部的最高 Ti 值 (0.27~0.29) 指示峰期温度为 900~950 $^{\circ}\text{C}$, 从核部到幔部升高的 Ti 值预示着峰期前的升温过程。同样, 如图 4d、4e 所示, Pl₁ 从核部到幔部升高的 x_{An} 成分环带也对应着升温升压的进变质过程 (图 5, 图 6)。依据所推测的岩石峰期矿物组合 (-GD 和 -NGD 均为 Grt + Cpx + Opx + Pl + Ilm $\pm$ Amp) 及相应的矿物等值线推测岩石峰期的压力为 0.8~0.9 GPa。

19DJ07-GD 和 -NGD 峰后减压冷却过程均以 Grt+Cpx+L = Opx+Pl+Amp 的反应为主。在此过程中石榴石被消耗而斜长石、角闪石生长; 斜长石幔部到边部的 x_{An} 降低 (图 4d、4e), 角闪石幔部到边部的 Ti 含量降低 (图 4b、4c)。图 5、图 6 的模拟结果表明, 类似的演化过程可以使 -NGD 的石榴石被完全消耗, 而 -GD 的石榴石存留下来, 因为后者比前者具有更低的 Mg[#] 值, 更有利于石榴石的稳定。如图 5、图 6 所示, 降温降压过程终止于固相线, 含有黑云母的固相线组合给出了 0.70~0.78 GPa/~800 $^{\circ}\text{C}$ 的 P-T 条件。

19DJ07-GD 和 -NGD 都发育了叠加变质组合, 尤其以 -GD 更为丰富。叠加变质组合以 Grt₂+Qz $\pm$ Cpx₂ 的后成合晶/冠状体及第二期矿物 Opx₂/Pl₂ 为特征 (图 3f—3h), 和岩石主体矿物的细粒变晶结构有明显差别。虽然 19DJ07 没有古元古代的年龄记录, 但是 Grt₂+Qz $\pm$ Cpx₂ 后成合晶和区内经历了古元古代晚期 (~1.85 Ga) 高压麻粒岩相变质的



a—代表性锆石颗粒的阴极发光图像，显示其内部结构和分析位置，编号详情见表 4；b—通过 LA-ICP-MS 分析结果计算的 U-Pb 同位素谱和图、加权平均年龄图和 U-Pb 年龄分布图；c—球粒陨石标准化的稀土配分模式图（根据 Sun and McDonough，1989 进行标准化）

图 7 石榴二辉麻粒岩样品 19DJ07 的锆石分析结果

Fig. 7 Analytical results of zircons from mafic granulite 19DJ07

(a) Cathodoluminescence images of selected zircon grains showing the inner structures and analyzed locations with the identification numbers as in Table 4; (b) U-Pb isotopic concordia, weighted mean age diagram, and U-Pb age distribution diagram showing the LA-ICP-MS analytical results; (c) Chondrite-normalized REE patterns of zircons (normalized according to Sun and McDonough, 1989)

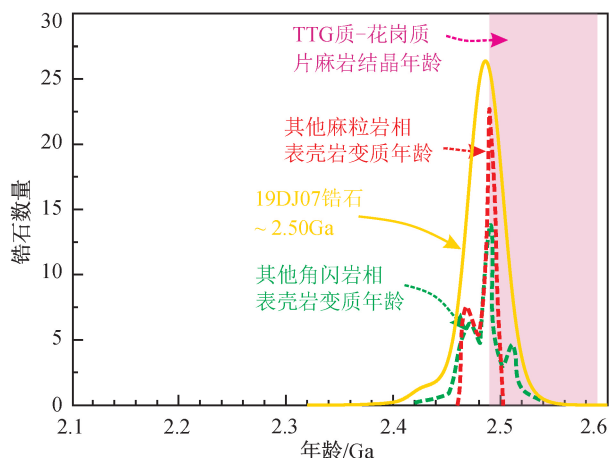
基性岩墙中石榴石+石英 ± 单斜辉石后成合晶一致。Duan et al. (2019) 认为该后成合晶组合记录了顺时针型 $P-T$ 轨迹，可能与古元古代华北克拉通北缘的地壳增厚造山事件有关。在冀东地体诸多记录了新太古代—古元古代两期变质年龄的表壳岩中都发现了类似的后成合晶叠加结构（如：Yang and Wei, 2017; Lu and Wei, 2020）。Yang and Wei (2017) 通过石榴子石-全岩 Lu-Hf 等时线方法得到了基性麻粒岩中和 Qz 构成冠状后成合晶的 Grt₂ 年龄为 1.79~1.77 Ga。在清原地体发育着丰富石榴石+石英后成合晶结构的中酸性麻粒岩中也发现了两期的年龄记录。于是认为基性麻粒岩 19DJ07 同样经历了古元古代高压麻粒岩相变质的叠加，并且保留了形成于缺流体的升温升压阶段的冠状体/后成合晶结构。

5.2 年代学启示

基性麻粒岩 19DJ07 的锆石记录了新太古代末期变质年龄位 2508±18~2497±10 Ma，加权平均年龄 2494.7±4.4 Ma（MSWD=1.7）（图 7）。变质锆石的生长主要受熔体/流体行为控制。Zr 在熔体中

有较高的溶解度（Watson and Harrison, 1984），所以锆石在含有大量熔体的进变质过程中不会生长（Roberts and Finger, 1997），而会在峰后降温冷却过程中随着熔体结晶生长。所以高级变质岩中的变质锆石一般记录峰后冷却过程的时间（Kelsey and Powell, 2011; Zhang et al., 2013; Wei et al., 2014; Yakymchuk et al., 2014, 2017）。如图 8 所示，统计已有研究在该地区的工作，TTG 质-花岗质片麻岩中岩浆锆石的年龄为 2.57~2.49 Ga，代表了其侵位时间；角闪岩相表壳岩的变质年龄为 2.55~2.43 Ga，并且在 2.51 Ga、2.49 Ga、2.47 Ga 出现峰期；麻粒岩相表壳岩的变质年龄为 2.50~2.46 Ga，并且在 2.49 Ga、2.47 Ga 出现峰期。所以 19DJ07 获得的新太古代末期的变质年龄与清原地体其它角闪岩相-麻粒岩相表壳岩变质年龄基本一致，并与区内 TTG 质-花岗质岩浆活动晚期脉冲年龄相同（图 8）。至于岩石并未记录古元古代变质年龄的原因有以下三种：古元古代叠加变质事件发生于缺流体的条件下，不利于锆石生长；第二期叠加变质事件峰期温度较第一期变质事件更

低, 因此无法改造第一期变质事件中形成的锆石; “Oswald 熟化”表明大颗粒的表面能更低, 因此第一期较高温度的变质事件形成的粗粒锆石很难被改造而形成小颗粒锆石 (Nemchin et al., 2001)。



图中展示了其他角闪岩相-麻粒岩相表壳岩的年龄 (万渝生等, 2005b; 白翔等, 2014; Peng et al., 2015; Wang et al., 2016a; Wu et al., 2016; Li and Wei, 2017; Wu and Wei, 2021)、TTG 质-花岗质片麻岩的结晶年龄 (万渝生等, 2005b; Bai et al., 2014; Peng et al., 2015; Wang et al., 2016a, 2016b; Wu et al., 2016; 王康等, 2018; Li et al., 2020; 袁玲玲等, 2020) 以及研究样品 19DJ07 的年龄

图 8 清原地区各类岩石的年龄汇总图

Fig. 8 Age summary chart of different rock types from the Qingyuan Terrane

The ages of other amphibolite-granulite facies supracrustal rocks (Wan et al., 2005b; Bai et al., 2014; Peng et al., 2015; Wang et al., 2016; Wu et al., 2016; Li and Wei, 2017; Wu and Wei, 2021) and the crystallization ages of TTG-granitic gneiss (Wan et al., 2005b; Bai et al., 2014; Peng et al., 2015; Wang et al., 2016a, 2016b; Wu et al., 2016; Wang et al., 2018; Li et al., 2020; Yuan et al., 2020) are shown in the diagram. The age data for the investigated samples 19DJ07 are presented for comparison with other research data

5.3 大地构造意义

基性麻粒岩 19DJ07 记录了逆时针的 P - T 轨迹, 包括峰前升温升压至峰期和峰后降温降压至固相线的变质阶段 (图 9), 峰期变质条件为 $0.8 \sim 0.9$ GPa/ $900 \sim 950$ °C, 对应地温梯度 30 °C/km。清原地体基性麻粒岩的 P - T 轨迹与冀东新太古代麻粒岩相表壳岩几乎一致, 只是峰期温度略低 (图 9; Liu and Wei, 2018, 2020)。清原地体具有典型的太古宙“穹隆-龙骨构造” (图 1; Collins et al., 1998; Hickman, 2004; Lin and Beakhouse, 2013;

Anhaeusser, 2014), 并且表壳岩变质时间与 TTG 质-花岗质岩浆活动的晚期脉冲基本相同 (图 8), 由此推断麻粒岩相表壳岩变质作用演化与太古宙特有的垂向/沉落构造体制有关 (如: Duan et al., 2017; Liu and Wei, 2018, 2020; Liu et al., 2020; Wu and Wei, 2021)。沉落构造体制包括以下过程: 首先地壳浅部表壳岩被侵入的高温 TTG 质-花岗质岩浆加热; 然后受热的表壳岩碎裂成大小不一的块体, 坠入巨大“TTG 岩浆海”的深部, 对应峰前升压过程; 最后 TTG 岩浆/岩石穹窿抬升并冷却, 裹挟其中的表壳岩块体发生峰后降压降温的变质演化 (Duan et al., 2017; Liu and Wei, 2018)。

5 条新太古代晚期表壳岩的变质演化 P - T 轨迹 (19DJ07、LW18、LW20、Wu21a 和 Liu20, 图 9) 显示出虽然其峰前升压加热过程以及峰期温度不同, 但峰期压力却很相似, 都对应大约 $30 \sim 35$ km 地壳深度。这说明表壳岩在峰期前经历了不同的加热过程, 但块体均沉落到了下地壳深度。事实上, 华北克拉通东部陆块的角闪岩相-麻粒岩相表壳岩记录着十分复杂的 P - T 轨迹。以冀东地区为例, 太古宙表壳岩-TTG 片麻岩同样呈“穹隆-龙骨”构造, 其中新太古代角闪岩相表壳岩记录了顺时针型 P - T 轨迹 (Liu et al., 2020), 而新太古代麻粒岩相表壳岩则记录着逆时针型 P - T 轨迹 (Liu and Wei, 2018, 2020)。针对华北克拉通东部陆块新太古代表壳岩具有时间上共存的不同 P - T - t 轨迹的现象, Yu et al. (2022) 进行了一系列数值模拟研究, 认为这很可能是在和地幔柱相关的地球动力学机制下发展起来的。

6 结论

通过对清原地区基性麻粒岩进行的详细的岩石学、地球化学、相平衡模拟以及锆石年代学的研究, 主要得出以下几点认识。

(1) 清原地体基性麻粒岩记录了逆时针的 P - T 轨迹, 峰期温压条件为 $0.8 \sim 0.9$ GPa/ $900 \sim 950$ °C, 峰前以升温升压为主, 峰后为降温降压演化。

(2) 锆石定年结果表明清原地体新太古代晚期高温—超高温麻粒岩相变质作用发生在 ~ 2.50 Ga, 与区域上 TTG 质-花岗质岩浆活动的晚期脉冲时间一致; 结合区域上的穹隆-龙骨构造、基性麻粒岩

- secular change [J]. *International Geology Review*, 49 (3): 193-234.
- BROWN M, JOHNSON T, 2018. Secular change in metamorphism and the onset of global plate tectonics [J]. *American Mineralogist*, 103 (2): 181-196.
- CAO Y, SONG S G, NIU Y L, et al., 2011. Variation of mineral composition, fabric and oxygen fugacity from massive to foliated eclogites during exhumation of subducted ocean crust in the North Qilian suture zone, NW China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 29 (7): 699-720.
- COLLINS W J, VAN KRANENDONK M J, TEYSSIER C, 1998. Partial convective overturn of Archaean crust in the east Pilbara Craton, Western Australia: driving mechanisms and tectonic implications [J]. *Journal of Structural Geology*, 20 (9-10): 1405-1424.
- CONDIE K C, 1981. *Archean greenstone belts* [M]. Amsterdam: Elsevier.
- CORFU F, HANCHAR J M, HOSKIN P W O, et al., 2003. Atlas of zircon textures [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53 (1): 469-500.
- DOS SANTOS T M B, MUNHÁ J M U, TASSINARI C C G, et al., 2011. *P-T*-fluid evolution and graphite deposition during retrograde metamorphism in Ribeira fold belt, SE Brazil: oxygen fugacity, fluid inclusions and C-O-H isotopic evidence [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 31 (1): 93-109.
- DUAN Z Z, WEI C J, REHMAN H U, 2017. Metamorphic evolution and zircon ages of pelitic granulites in eastern Hebei, North China Craton: insights into the regional Archean *P-T-t* history [J]. *Precambrian Research*, 292: 240-257.
- DUAN Z Z, WEI C J, LI Z, 2019. Metamorphic *P-T* paths and zircon *u-pb* ages of Paleoproterozoic metabasic dykes in eastern Hebei and northern Liaoning: Implications for the tectonic evolution of the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 326: 124-141.
- FRANÇOIS C, PHILIPPOT P, REY P, et al., 2014. Burial and exhumation during Archean sagduction in the East Pilbara granite-greenstone terrane [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 396: 235-251.
- GENG Y S, LIU F L, YANG C H, 2006. Magmatic event at the end of the Archean in eastern Hebei Province and its geological implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80 (6): 819-833.
- GREEN E C R, WHITE R W, DIENER J F A, et al., 2016. Activity-composition relations for the calculation of partial melting equilibria in metabasic rocks [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 34 (9): 845-869.
- HAWTHORNE F C, OBERTI R, HARLOW G E, et al., 2012. Nomenclature of the amphibole supergroup [J]. *American Mineralogist*, 97 (11-12): 2031-2048.
- HICKMAN A H, 2004. Two contrasting granite- greenstone terranes in the Pilbara Craton, Australia: evidence for vertical and horizontal tectonic regimes prior to 2900 Ma [J]. *Precambrian Research*, 131 (3-4): 153-172.
- HOLLAND T, POWELL R, 2003. Activity-composition relations for phases in petrological calculations: an asymmetric multicomponent formulation [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145 (4): 492-501.
- HOLLAND T J B, POWELL R, 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16 (3): 309-343.
- HOLLAND T J B, POWELL R, 2011. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 29 (3): 333-383.
- JAYANANDA M, BANERJEE M, PANT NC, et al., 2012. 2.62 Ga high-temperature metamorphism in the central part of the Eastern Dharwar Craton: implications for late Archean tectonothermal history [J]. *Geological Journal*, 47 (2-3): 213-236.
- KELSEY D E, POWELL R, 2011. Progress in linking accessory mineral growth and breakdown to major mineral evolution in metamorphic rocks: A thermodynamic approach in the $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{ZrO}_2$ system [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 29 (1): 151-166.
- KORHONEN F J, POWELL R, STOUT J H, 2012. Stability of sapphirine + quartz in the oxidized rocks of the Wilson Lake terrane, Labrador: calculated equilibria in NCKFMASHTO [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 30 (1): 21-36.
- KORHONEN F J, BROWN M, CLARK C, et al., 2013. Osumilite-melt interactions in ultrahigh temperature granulites: Phase equilibria modelling and implications for the *P-T-t* evolution of the Eastern Ghats Province, India [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 31 (8): 881-907.
- KUSKY T M, LI J H, 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22 (4): 383-397.
- KUSKY T M, POLAT A, WINDLEY B F, et al., 2016. Insights into the tectonic evolution of the North China Craton through comparative tectonic analysis: a record of outward growth of Precambrian continents [J]. *Earth-Science Reviews*, 162: 387-432.
- KWAN L C J, ZHAO G C, YIN C Q, et al., 2016. Metamorphic *P-T* path of mafic granulites from Eastern Hebei: implications for the Neoproterozoic tectonics of the Eastern Block, North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 37: 20-38.
- LAMBERT I B, WYLLIE P J, 1972. Melting of gabbro (quartz eclogite) with excess water to 35 kilobars, with geological applications [J]. *The Journal of Geology*, 80 (6): 693-708.
- LI Z, WEI C J, 2017. Two types of Neoproterozoic basalts from Qingyuan greenstone belt, North China Craton: petrogenesis and tectonic implications [J]. *Precambrian Research*, 292: 175-193.

- LI Z, WEI C J, CHEN B, et al., 2020. Late Neoarchean reworking of the Mesoarchean crustal remnant in northern Liaoning, North China Craton: a U-Pb-Hf-O-Nd perspective [J]. *Gondwana Research*, 80: 350-369.
- LIN S F, BEAKHOUSE G P, 2013. Synchronous vertical and horizontal tectonism at late stages of Archean cratonization and genesis of Hemlo gold deposit, Superior craton, Ontario, Canada [J]. *Geology*, 41 (3): 359-362.
- LIU J, BOHLEN S R, ERNST W G, 1996. Stability of hydrous phases in subducting oceanic crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 143 (1-4): 161-171.
- LIU T, WEI C J, 2018. Metamorphic evolution of Archean ultrahigh-temperature mafic granulites from the western margin of Qian' an gneiss dome, eastern Hebei Province, North China Craton: insights into the Archean tectonic regime [J]. *Precambrian Research*, 318: 170-187.
- LIU T, WEI C J, 2020. Metamorphic *P-T* paths and Zircon U-Pb ages of Archean ultra-high temperature paragneisses from the Qian' an gneiss dome, East Hebei terrane, North China Craton [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 38 (4): 329-356.
- LIU T, WEI C J, KRÖNER A, et al., 2020. Metamorphic *P-T* paths for the Archean Caozhuang supracrustal sequence, eastern Hebei Province, North China Craton: implications for a sagduction regime [J]. *Precambrian Research*, 340: 105346.
- LIU T, WEI C J, JOHNSON T E, et al., 2022a. Newly-discovered ultra-high temperature granulites from the East Hebei terrane, North China Craton [J]. *Science Bulletin*, 67 (7): 670-673.
- LIU T, LI Z, WEI C J, 2022b. Metamorphic evolution of the archaic supracrustal rocks from the Qingyuan Area of the Northern Liaoning Terrane, North China Craton: constrained using phase equilibrium modeling and monazite dating [J]. *Minerals*, 12 (9): 1079.
- LU H S, WEI C J, 2020. Late Neoarchean or late Paleoproterozoic high-pressure granulite facies metamorphism from the East Hebei terrane, North China Craton? [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 190: 104195.
- MEZGER K, BOHLEN S R, HANSON G N, 1990. Metamorphic history of the Archean Pikwitonei granulite domain and the Cross Lake Subprovince, Superior Province, Manitoba, Canada [J]. *Journal of Petrology*, 31 (2): 483-517.
- MORIMOTO N, 1988. Nomenclature of pyroxenes [J]. *Mineralogy and Petrology*, 39 (1): 55-76.
- NEMCHIN A A, GIANNINI L M, BODORKOS S, et al., 2001. Ostwald ripening as a possible mechanism for zircon overgrowth formation during anatexis: theoretical constraints, a numerical model, and its application to pelitic migmatites of the Tickalara Metamorphics, northwestern Australia [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65 (16): 2771-2788.
- PENG P, WANG C, WANG X P, et al., 2015. Qingyuan high-grade granite-greenstone terrain in the eastern North China Craton: root of a Neoarchean arc [J]. *Tectonophysics*, 662: 7-21.
- ROBERTS M P, FINGER F, 1997. Do U-Pb zircon ages from granulites reflect peak metamorphic conditions? [J]. *Geology*, 25 (4): 319-322.
- RUBATTO D, 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism [J]. *Chemical Geology*, 184 (1-2): 123-138.
- SAJEEV K, OSANAI Y, KON Y, et al., 2009. Stability of pargasite during ultrahigh-temperature metamorphism: A consequence of titanium and REE partitioning? [J]. *American Mineralogist*, 94 (4): 535-545.
- SEN C, DUNN T, 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117 (4): 394-409.
- SLÁMA J, KOŠLER J, CONDON D J, et al., 2008. Plešovice zircon—a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. *Chemical Geology*, 249 (1-2): 1-35.
- SUN S S, MCDONOUGH W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42 (1): 313-345.
- VAVRA G, SCHMID R, GEBAUER D, 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134 (4): 380-404.
- WAN Y S, SONG B, GENG Y S, et al., 2005a. Geochemical characteristics of Archaean basement in the Fushun-Qingyuan area, Northern Liaoning Province and its geological significance [J]. *Geological Review*, 51 (2): 128-137. (in Chinese with English abstract)
- WAN Y S, SONG B, YANG C, et al., 2005b. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of Archaean rocks from the Fushun-Qingyuan area, Liaoning Province and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 79 (1): 78-87. (in Chinese with English abstract)
- WAN Y S, DONG C Y, XIE H Q, et al., 2022. Huge growth of the late Mesoarchean-early Neoarchean (2.6~3.0 Ga) continental crust in the North China Craton: a review [J]. *Journal of Geomechanics*, 28 (5): 866-906, doi: 10.12090/j. issn. 1006-6616.20222817. (in Chinese with English abstract)
- WANG K, LIU S W, WANG M J, et al., 2018. Formation ages, petrogenesis and geological implications of the archaic granitoid rocks in the Xinbin-Weiziyu Area, northern Liaoning province [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 54 (1): 61-79. (in Chinese with English abstract)
- WANG M J, LIU S W, WANG W, et al., 2016a. Petrogenesis and

tectonic implications of the Neoproterozoic North Liaoning tonalitic-trondhjemitic gneisses of the North China Craton, North China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 131: 12-39.

WANG W, LIU S W, CAWOOD P A, et al., 2016b. Late Neoproterozoic subduction-related crustal growth in the Northern Liaoning region of the North China Craton: evidence from ~2.55 to 2.50 Ga granitoid gneisses [J]. *Precambrian Research*, 281: 200-223.

WARR L N, 2021. IMA-CNMNC approved mineral symbols [J]. *Mineralogical Magazine*, 85 (3): 291-320.

WATSON E B, HARRISON T M, 1984. Accessory minerals and the geochemical evolution of crustal magmatic systems: a summary and prospectus of experimental approaches [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 35 (1-3): 19-30.

WEI C J, QIAN J H, ZHOU X W, 2014. Paleoproterozoic crustal evolution of the Hengshan-Wutai-Fuping region, North China craton [J]. *Geoscience Frontiers*, 5 (4): 485-497.

WEI C J, GUAN X, DONG J, 2017. HT-UHT metamorphism of metabasites and the petrogenesis of TTGs [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (5): 1381-1404. (in Chinese with English abstract)

WHITE R W, POWELL R, HOLLAND T J B, et al., 2000. The effect of TiO₂ and Fe₂O₃ on metapelitic assemblages at greenschist and amphibolite facies conditions: mineral equilibria calculations in the system K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-Fe₂O₃ [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18 (5): 497-511.

WHITE R W, POWELL R, HOLLAND T J B, 2007. Progress relating to calculation of partial melting equilibria for metapelites [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25 (5): 511-527.

WHITE R W, POWELL R, HOLLAND T J B, et al., 2014. New mineral activity-composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 32 (3): 261-286.

WHITNEY D L, EVANS B W, 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals [J]. *American Mineralogist*, 95 (1): 185-187.

WIEDENBECK M, ALLÉ P, CORFU F, et al., 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses [J]. *Geostandards Newsletter*, 19 (1): 1-23.

WINTHER K T, NEWTON R C, 1991. Experimental melting of hydrous low-K tholeiite: evidence on the origin of Archean cratons [J]. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 39: 213-228.

WU D, WEI C J, 2021. Metamorphic evolution of two types of garnet amphibolite from the Qingyuan terrane, North China Craton: insights from phase equilibria modelling and zircon dating [J]. *Precambrian Research*, 355: 106091.

WU K K, ZHAO G C, SUN M, et al., 2013. Metamorphism of the northern Liaoning Complex: implications for the tectonic evolution of Neoproterozoic basement of the Eastern Block, North China Craton [J]. *Geoscience Frontiers*, 4 (3): 305-320.

WU M L, LIN S F, WAN Y S, et al., 2016. Crustal evolution of the Eastern Block in the North China Craton: constraints from zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes of the northern Liaoning Complex [J]. *Precambrian Research*, 275: 35-47.

WYLLIE P J, WOLF M B, 1993. Amphibolite dehydration-melting: sorting out the solidus [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 76 (1): 405-416.

YANG C, WEI C J, 2017. Two phases of granulite facies metamorphism during Neoproterozoic and Paleoproterozoic in the East Hebei, North China Craton: records from mafic granulites [J]. *Precambrian Research*, 2017 (301).

YAKYMCHUK C, BROWN M, 2014. Behaviour of zircon and monazite during crustal melting [J]. *Journal of the Geological Society*, 171 (4): 465-479.

YAKYMCHUK C, CLARK C, WHITE R W, 2017. Phase relations, reaction sequences and petrochronology [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 83 (1): 13-53.

YU C Y, YANG T, ZHANG J, et al., 2022. Coexisting diverse *P-T-t* paths during Neoproterozoic Sagduction: Insights from numerical modeling and applications to the eastern North China Craton [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 586: 117529.

YUAN L L, LIU J, ZHANG X H, et al., 2020. Late Neoproterozoic magmatism and crustal growth in northern Liaoning: Evidence from zircon U-Pb geochronology and petro-geochemistry of the Qingyuan trondhjemitic [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36 (2): 333-355. (in Chinese with English abstract)

ZHAI M G, YANG R Y, LU W J, et al., 1985. Geochemistry and evolution of the Qingyuan Archean granite-greenstone terrain, NE China [J]. *Precambrian Research*, 27 (1-3): 37-62.

ZHAI M G, BIAN A G, ZHAO T P, 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archean and its breakup during late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 43 (1): 219-232.

ZHAI M G, GUO J H, LIU W J, 2005. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: a review [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24 (5): 547-561.

ZHAI M G, SANTOSH M, 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: a synoptic overview [J]. *Gondwana Research*, 20 (10): 6-25.

ZHAI M G, SANTOSH M, 2013. Metallogeny of the North China Craton: link with secular changes in the evolving Earth [J]. *Gondwana Research*, 24 (1): 275-297.

ZHAI M G, 2019. Tectonic evolution of the north China craton [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (5): 722-745. (in Chinese with English abstract)

ZHANG H C G, LIU J H, CHEN Y C, et al., 2019. Neoproterozoic metamorphic evolution and geochronology of the Miyun metamorphic complex, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 320: 78-92.

ZHANG Y H, WEI C J, TIAN W, et al., 2013. Reinterpretation of metamorphic age of the Hengshan complex, North China Craton [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (34): 4300-4307.

ZHANG Y Y, WEI C, CHU H, 2020. Paleoproterozoic oceanic subduction in the North China Craton: Insights from the metamorphic $P-T-t$ paths of the Chicheng Mélange in the Hongqiyingsi Complex [J]. Precambrian Research, 342: 105671.

ZHANG Y Y, WEI C J, CHU H, 2021. Multi-phase metamorphism in the northern margin of the North China Craton: Records from metapelite in the Hongqiyingsi Complex [J]. Gondwana Research, 98: 289-308.

ZHAO G, 1995. Metamorphic $P-T-t$ paths of the eastern Hebei, western Shandong, Fuping, Wutai and Hengshan domains, North China Craton [J]. Tectonothermal Evolution of the Basement Rocks in the North China Craton, 11-48.

ZHAO G C, SUN M, WILDE S A, et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited [J]. Precambrian Research, 136 (2): 177-202.

ZHAO G C, CAWOOD P A, LI S Z, et al., 2012. Amalgamation of the North China Craton: key issues and discussion [J]. Precambrian Research, 222-223: 55-76.

ZHENG J P, 2020. Internal and external factors in continental lithosphere mantle replacement in eastern China [J]. Journal of Geomechanics, 26 (5): 742-758, doi: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2020. 26. 05. 061. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

白翔, 刘树文, 阎明, 等, 2014. 抚顺南部早前寒武纪变质岩的地质事件序列 [J]. 岩石学报, 30 (10): 2905-2924.

万渝生, 宋彪, 耿元生, 等, 2005a. 辽北抚顺—清原地区太古宙基底地球化学组成特征及其地质意义 [J]. 地质论评, 51 (2): 128-137.

万渝生, 宋彪, 杨淳, 等, 2005b. 辽宁抚顺—清原地区太古宙岩石 SHRIMP 锆石 U—Pb 年代学及其地质意义 [J]. 地质学报, 79 (1): 78-87.

万渝生, 董春艳, 颜炳强, 等, 2022. 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期 (2.6~3.0 Ga) 巨量陆壳增生: 综述 [J]. 地质力学学报, 28 (5): 866-906, doi: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 20222817.

王康, 刘树文, 王茂江, 等, 2018. 辽北新宾—苇子峪地区太古宙花岗质岩石的形成年代、成因及其地质意义 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 54 (1): 61-79.

魏春景, 关晓, 董杰, 2017. 基性岩高温-超高温变质作用与 TTG 质岩成因 [J]. 岩石学报, 33 (5): 1381-1404.

袁玲玲, 刘洁, 张晓晖, 等, 2020. 辽北新太古代晚期岩浆热事件与陆壳生长: 来自清原奥长花岗岩的锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据 [J]. 岩石学报, 36 (2): 333-355.

翟明国, 2019. 华北克拉通构造演化 [J]. 地质力学学报, 25 (5): 722-745.

郑建平, 2020. 中国东部大陆岩石圈地幔置换作用的内外原因 [J]. 地质力学学报, 26 (5): 742-758, doi: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2020. 26. 05. 061.