

阴山陆块武川石榴基性麻粒岩 P - T 条件及其变质时代: 来自相平衡模拟与锆石 U-Pb 定年的约束^{*}

刘平华¹ 刘福来¹ 蔡佳¹ 杨红¹ 王舫¹ 刘超辉¹ 刘建辉¹ 施建荣²

LIU PingHua¹, LIU FuLai¹, CAI Jia¹, YANG Hong¹, WANG Fang¹, LIU ChaoHui¹, LIU JianHui¹ and SHI JianRong²

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2. 天津地质矿产研究所, 天津 300170

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

2016-03-01 收稿, 2016-06-16 改回.

Liu PH, Liu FL, Cai J, Yang H, Wang F, Liu CH, Liu JH and Shi JR. 2016. Metamorphic P - T conditions and timing of the Wuchuan garnet mafic granulite from the Yinshan Block, North China Craton: Insight from phase equilibria and zircon U-Pb dating. *Acta Petrologica Sinica*, 32(7):1949–1979

Abstract Metamorphism and geochronology of the garnet mafic granulites from the Wuchuan high-grade gneiss terrane are very significant in revealing the Neoproterozoic tectonic evolution of the Yinshan Block. These mafic granulites have been identified mainly as irregular lenses and as a set of deformed dyke/sill swarms within the Late Neoproterozoic tonalitic orthogneisses and supracrustal rocks, and crosscut the regional south to north foliation. On the basis of petrography, mineral transformation and mineral composition, these mafic granulites commonly develop a typical high-pressure (HP) granulite facies mineral assemblage of garnet, clinopyroxene, plagioclase, amphibole, quartz and Fe-Ti oxide. Coarse-grained garnets are weakly diffusion zoned where pyrope contents decrease and almandine increasing with almost unchangeable contents of almandine and spessartine from mantle to rim, which probably is caused by the late cooling. Plagioclases were divided into the fine-grained inclusion-type and coarse-grained matrix-type, and they have similar chemical composition and belong to andesin ($An = 35 \sim 45$). Phase modeling using THERMOCALC3.33 in the NCFMASHTO (Na_2O - CaO - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O - TiO_2 - Fe_2O_3) system for two garnet mafic granulite samples, suggest that the modelled peak assemblage of garnet + hornblende + clinopyroxene + plagioclase + quartz + Fe-Ti oxide, matches well the observed one. The isopleths of the minimum $ca(pl)$ ($Ca/(Ca + Na)$) in plagioclase and minimum $x(g)$ ($Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$) in garnet were used to constrain the peak P - T conditions of 1.31 ~ 1.43 GPa and 770 ~ 840 °C. LA-ICP-MS analyses of metamorphic zircon grains for two garnet mafic granulite samples yield similar mean ages of 2517 ± 6 Ma (BT58-1, MSWD = 0.66, $n = 21$) and 2512 ± 16 Ma (LH66-1, MSWD = 0.26, $n = 42$), which correspond to the ca. 2500 Ma metamorphic ages recorded by the other Neoproterozoic rocks in the Yinshan Block, and are interpreted to represent the timing of the HP granulite facies metamorphism for the Wuchuan garnet mafic granulites. Combined with other new investigations of the Yinshan Block, it is suggested that the Wuchuan garnet mafic granulites were caused by the late Neoproterozoic orogenesis of the Yinshan Block.

Key words Yinshan Block; Garnet mafic granulite; P - T conditions; Metamorphic timing

摘要 武川高级片麻岩地体中石榴基性麻粒岩的变质用与同位素年代学研究对于揭示阴山陆块新太古代构造演化过程具有十分重要的研究意义。它们主要以不规则透镜体或变形岩墙/岩脉群的形式赋存于新太古代晚期英云闪长质片麻岩或变质表壳岩系之中,并切割近南-北向的区域性片麻理。岩相学观察、矿物相转变分析与矿物化学研究表明,武川石榴基性麻粒岩保留了十分典型的高压麻粒岩相矿物:石榴石+单斜辉石+斜长石+角闪石+石英+铁-钛氧化物。其中,粗粒石榴石边

* 本文受国家自然科学基金青年基金项目(41302153)、国家自然科学基金重点基金项目(41430210)、中国地质调查局地质大调查项目(DD20160121、12120114061901、12120114021401)、科技部“973”项目(2012CB416603)和中国地质科学院地质研究所基本科研业务经费(J1514)联合资助。

第一作者简介:刘平华,男,1981年生,博士,岩石学专业,E-mail: lph1213@126.com

部常发育微弱的扩散环带,表现为从幔部至边部,镁铝榴石组分不断减少,相应地铁铝榴石组分不断增加,而钙铝榴石与锰铝榴石组分基本不变,指示晚期冷却降温作用对石榴石成分产生一定影响。斜长石具有细粒包体型与粗粒基质型两种不同的类型,它们具有十分相似化学成分,均为 $An = 35 \sim 45$ 的中长石。在 NCFMASHTO ($Na_2O-CaO-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-TiO_2-Fe_2O_3$) 体系下,利用 THERM OCA LC 3.33 软件,对两件石榴基性麻粒岩样品进行了相平衡模拟,模拟的峰期矿物组合为:石榴石+单斜辉石+斜长石+角闪石+石英+铁-钛氧化物,与岩相学观察十分一致。采用石榴石中最小 $x(g)Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ 与斜长石中最小 $ca(pl)(Ca/(Ca+Na))$ 等值线,将本区石榴基性麻粒岩峰期高压麻粒岩相的温压条件限定在 $P = 1.31 \sim 1.40 GPa, T = 770 \sim 840^\circ C$ 的范围内。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,两件石榴基性麻粒岩麻粒岩中发育的变质锆石分别记录了 $2517 \pm 6 Ma$ (BT58-1, MSWD = 0.66, $n = 21$) 与 $2512 \pm 16 Ma$ (LH66-1, MSWD = 0.26, $n = 42$) 的加权平均年龄,与阴山陆块其它新太古代岩石记录的约 2500Ma 变质年龄一致,被解释为本区石榴基性麻粒岩遭受高压麻粒岩相变质时代。结合本区其它新的研究资料,本文认为武川石榴基性麻粒岩形成可能与区内新太古代晚期造山作用有关。

关键词 阴山陆块;石榴基性麻粒岩; $P-T$ 条件;变质时代

中图法分类号 P588.347; P597.3

1 引言

华北克拉通是全球最古老的克拉通之一,拥有 3800Ma 的古老地质体 (Liu *et al.*, 1992; Song *et al.*, 1996; Wan *et al.*, 2013b), 由于其形成早、演化历史长而复杂并含有丰富的矿产资源(铁、菱镁矿、金与石墨等),而备受国内外地质学家的广泛关注。近年来,前人对其开展了大量构造地质学、变质地质学、地球化学、同位素年代学和地球物理学等方面的研究工作(详见 Zhai and Santosh, 2011, 2013; Zhao *et al.*, 2012; Zhao and Zhai, 2013 的评述),并在上述各项研究领域取得了一系列的重要研究进展。尤其值得指出的是, Zhao *et al.* (1998, 1999a, b, c, 2000a, b, 2001a, b, 2002a, b, 2003, 2004, 2005, 2006a, b, 2008a, b, 2010, 2011, 2012) 及其合作者在系统研究总结华北克拉通变质基底在变质演化特征的基础上,结合区域岩石组合、构造变形、地球化学和同位素年代学等方面的重要差别,先后在华北克拉通变质基底中先后识别出三条古元古代活动带,分别是孔兹岩带、中部碰撞带和胶-辽-吉带 (Zhao *et al.*, 2005, 2012; Zhao and Zhai, 2013), 并提出了华北克拉通古元古代构造演化过程及其在哥伦比亚超大陆中的位置(详见 Zhao *et al.*, 2002b, 2005, 2012 的评述),该项研究无疑将华北克拉通早前寒武纪地质研究推向了新的高度,不仅使华北克拉通成为国际早前寒武纪地质研究的热点地区,而且成为古元古代哥伦比亚超大陆重建中一个不可或缺的“参照点”(Zhao *et al.*, 2012)。

然而值得注意的是,尽管华北克拉通基底变质作用研究曾取得了许多重要的研究进展,如古元古代高压麻粒岩与超高温麻粒岩的发现及其相关研究 (Zhai *et al.*, 1993; Zhao *et al.*, 2001b; Guo *et al.*, 2002, 2012; Jiao and Guo, 2011; Jiao *et al.*, 2011, 2013; Santosh *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013; Duan *et al.*, 2015)。但是,目前有关华北克拉通基底变质作用研究还存在许多争议性地质问题,如华北克拉通新太古代变质基底具有近等压冷却(IBC)逆时针 $P-T-t$ 演化轨迹的变

质动力学过程,华北克拉通是否存在新太古代高压麻粒岩,其成因机制与形成构造环境等等。这些与变质作用有关的地质问题的深入研究,对于进一步深化认识华北克拉通前寒武纪变质基底形成与演化具有十分重要的地质意义。

为了对上述问题提供的新的约束,本文选取华北克拉通阴山陆块武川高级片麻岩地体中广泛出露的石榴基性麻粒岩为重点研究对象,通过对石榴基性麻粒岩的野外地质产状、岩石学、矿物化学与同位素年代学的研究,初步探究阴山陆块在新太古代晚期 2550 ~ 2500 Ma 地质演化过程中,是否经历了高压麻粒岩相变质作用以及其形成的构造环境。

2 地质背景

阴山陆块是华北克拉通西部陆块太古宙变质基底出露面积最大的地区,以余太-酒馆-下湿壕断裂带为界,其南部为孔兹岩带,北部为兴蒙造山带(图1;李树勋等,1987;刘喜山,1996)。根据区内太古宙基底岩石野外地质产状、区域岩石组合、变质变形作用与同位素年代学格架等特征,可进一步划分为固阳花岗岩-绿岩地体与武川高级片麻岩地体(李树勋等,1987)。

武川高级片麻岩地体的岩石类型较多,除了大量的 TTG 片麻岩(以英云闪长质片麻岩为主)和其中的变质表壳岩包体之外,还有紫苏花岗岩、二长花岗质片麻岩、斜长花岗质片麻岩等。它们之间的关系比较复杂,并且都遭受了晚期基性岩脉群的贯入及显生宙闪长质-花岗质岩石的侵入(图1)。

2.1 变质表壳岩系

变质表壳岩系呈大小不等的块体或包体产于英云闪长质片麻岩中。约占武川高级片麻岩地体的 30% 左右(图1)。其中比较大的块体可达 1 ~ 5km。主要分布于阳泰沟、大腮汗、头号及朱拉沟等地,其形态极不规则:中等大小的包体一般几十米至几百米长,数十米宽,形态多为透镜体状;而小型包体可能只有几厘米至几十厘米,形态比较复杂,变质表壳岩系的围岩为英云闪长质片麻岩及显生宙花岗质岩石等。

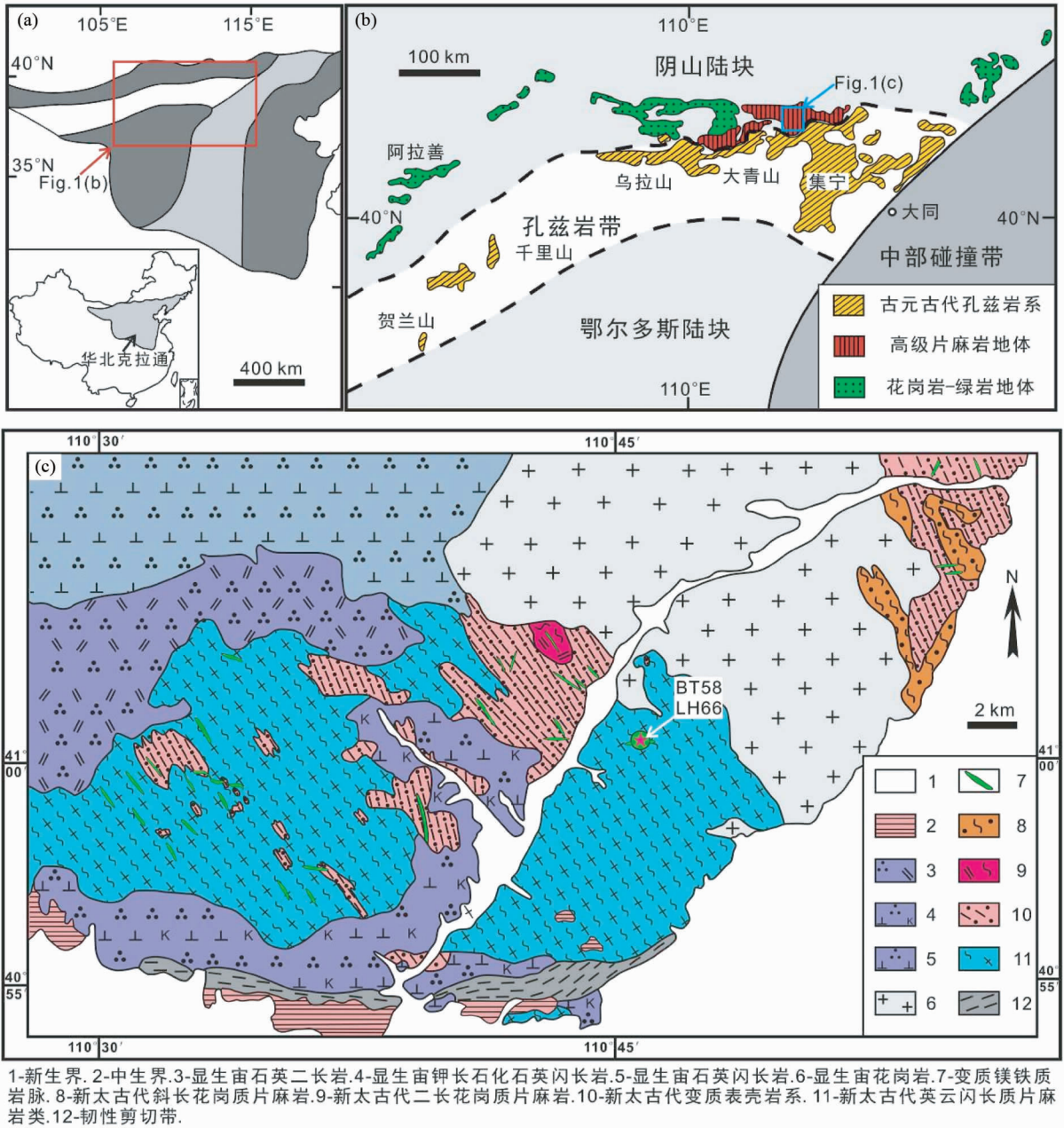


图 1 武川高级片麻岩地体地质简图及采用位置(a,b,据 Zhao *et al.* , 2005;c,据李树勋等,1987)

Fig. 1 Simplified geological map showing geological feature and location of the Wuchuang high-grade gneiss terrane and the locations of the garnet mafic granulite samples (a and b, after Zhao *et al.* , 2005; c, after Li *et al.* , 1987)

变质表壳岩系主要由基性麻粒岩、斜长角闪岩、辉石角闪石岩、中-酸性麻粒岩、磁铁石英岩与英榴岩等组成。在一些比较大的块体中见它们呈层状、似层状产出。

2.1.1 基性麻粒岩、斜长角闪岩及辉石角闪石岩类

变质表壳岩系的镁铁-超镁铁质岩类,其分布比较广泛,但含量不高,约占表壳岩系的 20%。从朱拉沟、阳泰沟到头号一带,其含量有增多的趋势。它们常在表壳岩层中呈透镜状或似层状产出,有时与中-酸性麻粒岩构成条带状构造,从野外地质特征来看,它们多数是构造作用的产物。此外,这

些变质镁铁质-超镁铁质岩石还常作为各种形态的包体存在于紫苏花岗岩及英云闪长质片麻岩中,有时也见于中-酸性麻粒岩中,包体的大小很少超过 1m,多数与围岩的界限清楚,少数是渐变的,包体中的矿物定向常与围岩一致,但有时二者之间明显是斜交的。新近的锆石 U-Pb 定年表明,本区变质镁铁-超镁铁质岩类普遍记录了约 2500Ma 的变质年龄 (Wang *et al.* , 2015)。

2.1.2 中-酸性麻粒岩及片麻岩类

这是变质表壳岩系的主体,约占 70% 以上,多呈层状、似

层状产出,也常作为大小不等的包体产于英云闪长质片麻岩中,有时二者之间的界线经常是渐变的,在有的地段,中-酸性麻粒岩中可见基性麻粒岩的包体,说明中-酸性岩石形成晚于基性岩。

2.1.3 磁铁石英岩及英榴岩类

这类岩石分布较少,约占5%~10%,主要见于朱拉沟及头号等地,呈层状、似层状及透镜状产于其它变质表壳岩、紫苏花岗岩与英云闪长质片麻岩中。在表壳岩系中英榴岩的围岩主要为中-酸性麻粒岩及片麻岩。而磁铁石英岩则有两种类型,在头号一带的磁铁石英岩产于基性麻粒岩中,朱拉沟地区的磁铁石英岩的围岩多为中-酸性麻粒岩及片麻岩,这可能意味着磁铁石英岩发育于变质表壳岩原岩形成的不同阶段。此外,在头号水库一带的石榴石英岩中含有少量大理岩与含石墨与蓝晶石的富铝片麻岩夹层(徐仲元等,2011; Wang *et al.*, 2015)。新近的锆石 U-Pb 定年表明,含蓝晶石的石榴石英岩与富铝片麻岩其碎屑锆石记录的年龄变化于 $2733 \pm 13\text{Ma} \sim 2576 \pm 20\text{Ma}$ 之间,而变质锆石记录的年龄为 $2479 \pm 21\text{Ma}$,无疑表明其原岩形成于新太古代晚期,并遭受了约 2500Ma 的高级变质作用的叠加改造(Wang *et al.*, 2015)。

2.2 TTG 片麻岩

这是区内分布最广泛的岩石,成分上以英云闪长质片麻岩为主。在朱拉沟与阳泰沟一带构成一东西向的卵形体,长约 30km,宽约 15km,面积超过 250km²。在西乌兰不浪头号水库一带也有一定规模的出露。其最大特征是不均匀性。有的 TTG 片麻岩发育条带状构造,其暗色矿物与浅色矿物的分布极不均匀,有些地方暗色矿物含量较高,岩石为灰黑色,相当于闪长质片麻岩。而另外一些地方暗色矿物含量较低,岩石为灰色-灰白色,相当于奥长花岗质片麻岩。不同岩石类型之间界限是渐变过渡的,分布也没有一定的规律性,但从数量上看,前者要超过后者。有的英云闪长质片麻岩还可见混合岩化作用的叠加,其表现有两种形式:其一是出现貌似浸染状的交代钾长石,含量约 20%,使岩石显示浅红色;其二是出现以钾长石和石英为主的条带沿片麻理方向贯入,形成条带状片麻岩,有时这些条带可发生强烈褶皱。总的看来,混合岩化作用只是一些局部现象,它们在空间上是否具有有一定的规律性,目前还不清楚。此外,在 TTG 片麻岩发育不同类型包体,它们几乎包括了变质表壳岩系中的每一种岩石类型。但比较常见的是中-酸性麻粒岩和斜长角闪岩。新近的锆石 U-Pb 定年表明,武川高级片麻岩地体中的 TTG 片麻岩的原岩主要形成于 2550~2500Ma,但在西乌兰不浪一带还出露有一定规模的约 2700Ma 的奥长花岗质片麻岩(董晓杰等,2012;马铭株等,2013)。

2.3 紫苏花岗岩

本区的紫苏花岗岩含量较少,但分布却很广泛。在区内

每一块表壳岩中几乎都有紫苏花岗岩存在,它们常常与表壳岩分布在一起,有时也呈包体存在于英云闪长质片麻岩中。紫苏花岗岩与表壳岩系的关系比较复杂,大致可分为两种类型:第一种是紫苏花岗岩与表壳岩具有侵入接触关系,这种紫苏花岗岩多为暗灰色的,内部常出现大量的基性麻粒岩和磁铁石英岩等包体,其中有些可能为捕虏体;第二种类型是紫苏花岗岩与表壳岩,尤其是其中的中-酸性麻粒岩之间为渐变过渡关系,这种紫苏花岗岩多数是灰红色的,其中常出现中酸性麻粒岩的残留体。有关本区紫苏花岗岩的年代学研究表明,其原岩形成时代均为 2550~2500Ma,变质时代约 2500Ma(董晓杰,2009,2012;Ma *et al.*, 2013b)。

2.4 二长/斜长花岗质片麻岩

二长花岗质片麻岩仅见于阳泰沟一带,呈舌状产出(图 1)。为灰色-灰红色,花岗变晶结构,片麻状构造,主要矿物为斜长石、钾长石、石榴石、角闪石及少量的透辉石、黑云母和石英等。二长花岗质片麻岩产出的构造部位可能相当于一个小型穹隆的核部,其围岩为中酸性麻粒岩,二者之间的界线是渐变过渡的,围岩中的早期褶皱枢纽有围绕它呈环状分布的趋势,二长花岗质片麻岩本身的片麻理产状比较紊乱,可能反映了它在变形过程中处于较高的塑性状态。

斜长花岗质片麻岩,它们都是不出现暗色矿物的浅色岩石。出露较少,常呈岩席或小岩株产于表壳岩系及英云闪长质片麻岩中,其片麻理与围岩一致。二者之间的界线清楚,有时它们与它们与围岩一起遭受褶皱变形。从野外来看,斜长花岗质片麻岩主要见于朱拉沟、阳泰沟与头号一带,与英云闪长质片麻岩没有直接接触(图 1)。

2.5 基性岩脉与小侵入体

如图 1 所示,本区的辉长或辉绿质脉岩或小侵入体非常发育,并且具有多期活动的特点,一般早期脉岩变质程度较深,如在朱拉沟地区见的北西西向脉体,宽 10~20m 不等,长超过 1km。为灰黑色,细粒粒柱状变晶结构,有时见辉绿结构残留,为明显的片麻状构造,并与围岩片麻理一致,常见矿物组合为石榴石+单斜辉石+斜长石+角闪石。在野外这条深变质的脉体切穿了变质表壳岩系、英云闪长质片麻岩及花岗质片麻岩,并且本身受到了构造剪切变形。

晚期的基性脉体或小侵入体变质程度较低,主要为浅变质的辉绿岩与辉绿玢岩,为灰黑色,变余辉绿结构,块状构造。多数辉石均变为蓝绿色角闪石、阳起石或黑云母、绿泥石等,但仍保留了辉石假象,脉体产状与区域贯穿性的片麻理一致或类似,既呈北西向分布,倾角较陡。这些浅变质的基性脉体或小侵入体可能是本区太古宙地壳演化末期的产物。

2.6 显生宙中-酸性侵入岩

显生宙中-酸性侵入岩主要分布于片麻岩地体的南部及

北部边缘(图1),前者为钾长石化的石英闪长岩,其颜色为肉红色-灰白色,花岗结构,多数都发育强烈的交代结构,块状构造及片麻状构造。主要由斜长石、钾长石及数量不等的石英、黑云母等组成。该岩体与围岩为断层接触或侵入接触,由于韧性变形作用的影响,岩体内部发育数条近东西向的糜棱岩化带。此外岩体中也见有一些基性脉岩,其产状有近东西向的,也有北西向的,但这些脉体本身都受到了岩体的切割、热变质及钾质交代作用。说明岩体是本区基性脉岩群活动之后的产物。

3 分析方法

本文共对2件石榴基性麻粒岩样品的探针片进行了岩相学观察与矿物相转变结构分析研究。首先,在显微镜下进行了岩相学特征观察与分析,并选择代表性探针片,进行矿物共生组合与岩石结构构造的照相。然后,利用中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国土资源部重点实验室的扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)对每件样品的矿物结构构造、相互间转变关系以及矿物成分变化特征进行初步测试分析,扫描电镜为日本电子公司JSM-561LV型,电子束电压20kV,焦距20mm,束斑大小为41nm,能谱仪是英国牛津公司INCA软件包版本4.4。最后选择典型的变质矿物进行化学

成分分析,矿物化学成分测试在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国土资源部重点实验室JXA-8230型电子探针上进行,测试条件为加速电压15kV,电子流 1×10^{-8} A,束斑 $1 \sim 5 \mu\text{m}$,标准样品采用美国SPI公司53种标准矿物化学成分。

锆石分选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。首先,将样品(约5kg)进行破碎至适当粒级,经清洗、烘干和筛选后,采用磁选和重液分选出不同粒级的锆石晶体约200粒;然后在双目镜下尽量挑选无裂隙、且晶形完整的锆石颗粒,并放上PVC环;然后将充分混合后的环氧树脂和固化剂注入PVC环中,注意去除气泡;最后待树脂充分固化后将PVC环从载玻片上取下,然后再对粘有锆石的一面进行打磨到锆石大约暴露出一半的晶面,抛光待用。

锆石靶制备完成后,首先,对锆石颗粒进行透射光和反射光显微照片的拍摄,以便了解锆石颗粒含包裹体和表面裂纹发育的情况。然后利用拉曼光谱对锆石颗粒包裹体的种类进行确定,实验分析是在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国土资源部重点实验室激光拉曼光谱仪(RE 1000/激光频率为514nm)与扫描电镜(JSM-561LV型)完成。完成锆石内包裹体分析后,将锆石靶镀金,进行阴极发光图像(CL)采集以便观察锆石内部结构。CL图像拍摄是在北京铀航领航科技有限公司配套的CL阴极发光装置扫

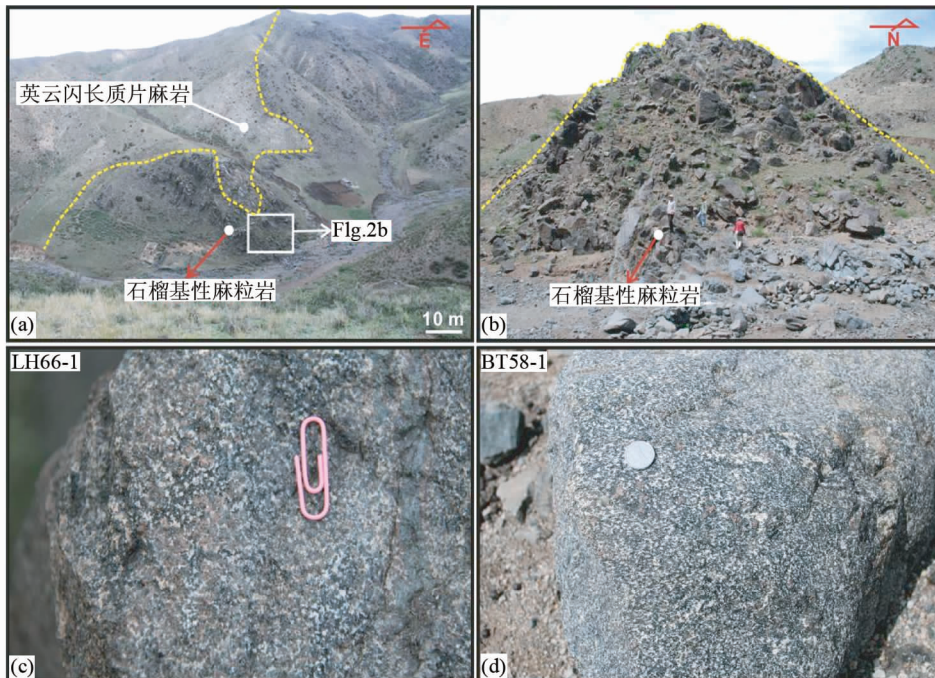


图2 武川石榴基性麻粒岩及其围岩典型地质野外照片

(a, b) 高压基性麻粒岩以不规则透镜体的形式产于英云闪长质片麻岩之中; (c, d) 具有均匀的块状构造的石榴基性麻粒岩

Fig.2 Representative field photographs from the Jiaobei terrane showing the relationships between the garnet mafic granulites and their country rocks

(a, b) field photographs showing garnet mafic granulites as irregular irregular lensess preserved in tonalitic gneisses; (c, d) field photographs showing homogeneous and massive structure of the garnet mafic granulites

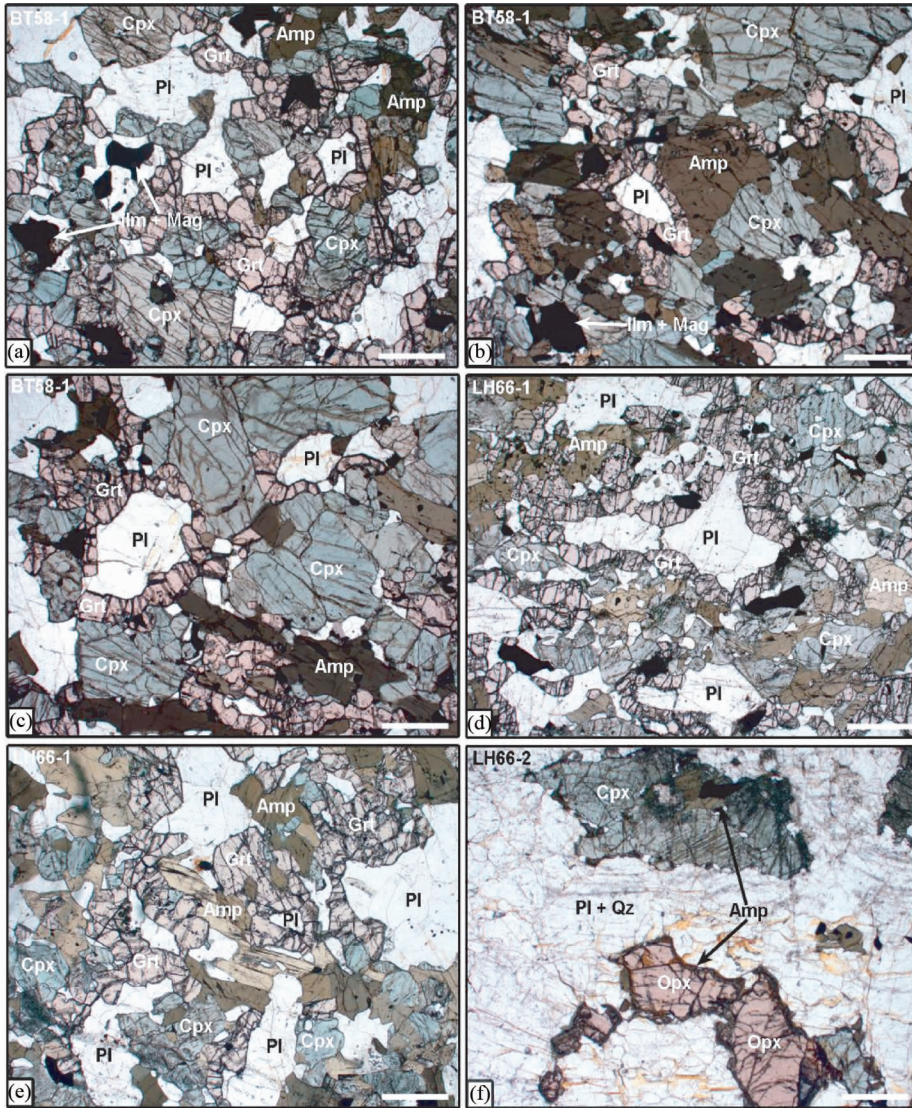


图3 武川石榴基性麻粒岩及其围岩典型矿物组合和结构显微照片(单偏光)

(a-e) 石榴基性麻粒岩中保存的高压麻粒岩相矿物组合:斜方辉石+单斜辉石+斜长石+黑云母+钛铁矿+磁铁矿,石榴石呈链状分布粗粒的单斜辉石与斜长石;(f) 石榴基性麻粒岩的围岩发育典型的麻粒岩相矿物组合:单斜辉石+斜方辉石,斜方辉石具有角闪石反应边;图中比例尺均为800 μm

Fig. 3 Photomicrographs showing the typical minerals and textures of the Wuchuan garnet mafic granulites (plane-polarized light) (a-e) garnet (Grt) + clinopyroxene (Cpx) + amphibole (Amp) + plagioclase (Pl) + quartz (Qz) + magnetite (Mag) + ilmenite (Ilm) as an index HP granulitic mineral assemblage identified in the matrix of the garnet mafic granulites, with Grt chains or coronas around coarse-grained Pl and Cpx; (f) typical granulite-facies mineral assemblage of Cpx + Orthopyroxene (Opx) of the country rocks of the garnet mafic granulites, with Amp rim around the coarse-grained Opx; the scale bar is 800 μm in this figure

描电子显微镜(型号 FEI PHILIPSLX 30 SFEG)完成,实验过程中加速电压为15kV,电流为120 μA ,每2min扫描一次。

锆石 U-Pb 定年的 LA-ICP-MS 测试在天津地质矿产研究所(BT58-1)与西安地质矿产研究所(LH66-1)同位素实验室共同完成。分析仪器采用由 Thermo Fisher 公司制造的 Neptune 多接收器电感耦合等离子体质谱仪和 193nm 激光取样系统。激光剥蚀束斑直径为 35 μm ,激光能量密度为 13 ~ 14J/cm²,频率为 8 ~ 10Hz,激光预剥蚀和剥蚀时间分布为 5s 与 45s。以标准锆石 GJ-1 为标样进行同位素比值校正,每 8

个样品测试点插入 2 个 GJ-1 标准锆石测速点,采用²⁰⁸Pb 对普通铅进行校正,利用 NIST610 作为外标计算锆石样品的 U、Th、Pb 含量,数据处理采用 ICPMSDataCal 8.4 程序及 ISOPLOT3.0(Ludwig, 2001)完成。本文的矿物代号均采用沈其韩(2009)与 Whitney and Evans(2010)的资料。

4 野外产状与岩石学特征

武川高级片麻岩地体中石榴基性麻粒岩主要以变形岩

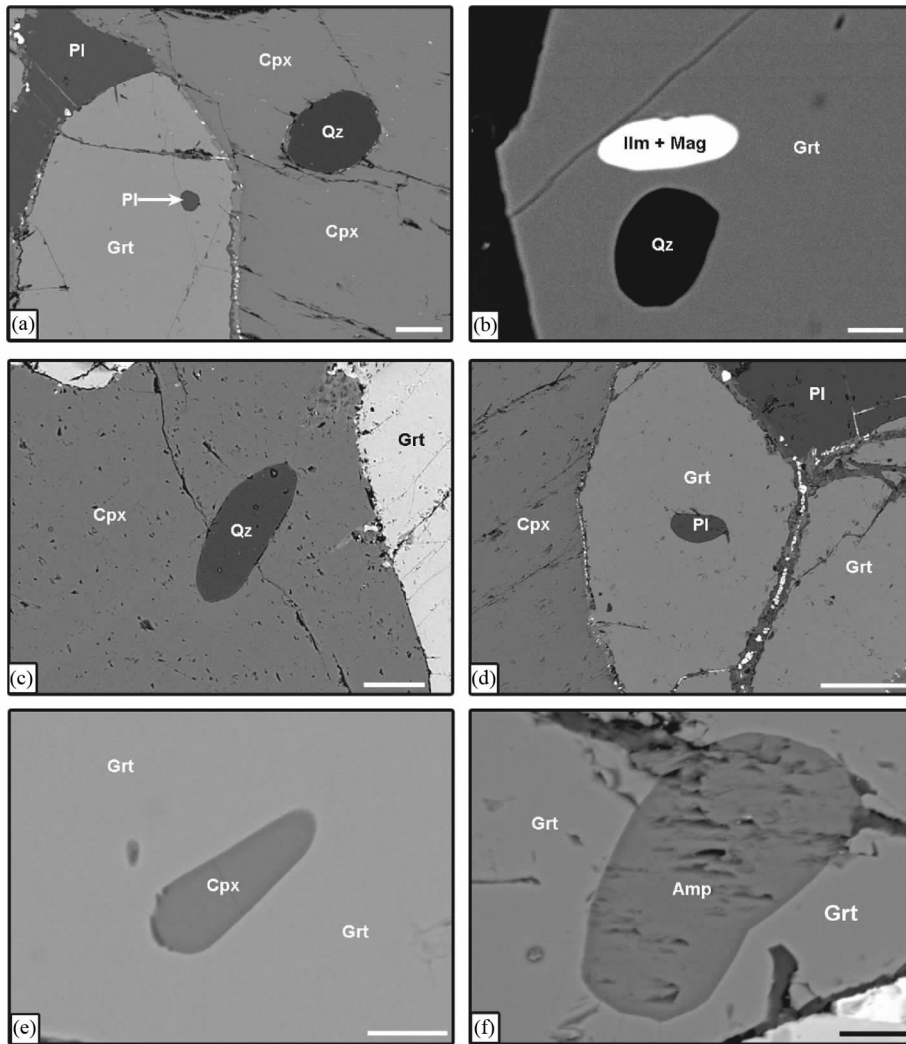


图4 石榴基性麻粒岩(BT58-1)中包体矿物组合的背散射电子图像

(a)斜长石与石英作为细粒包体矿物分别被保存在粗粒的石榴石与单斜辉石中;(b、d-f)石英、铁-钛氧化物、斜长石、单斜辉石与角闪石作为细粒包体矿物被保存在粗粒的石榴石中;(c)粗粒单斜辉石含有细粒浑圆状的石英包体;图4中比例尺大小分别为50 μm (a)、10 μm (b)、50 μm (c)、100 μm (d)、10 μm (e)与10 μm (f)

Fig. 4 Back-scattering images showing the typical inclusion mineral assemblage of the Wuchuan garnet mafic granulite (BT58-1)

(a) Pl and Qz as fine-grained inclusions preserved in coarse-grained Grt and Cpx; (b, d-f) Qz, Fe-Ti oxide, Pl, Cpx and Amp as fine-grained inclusions preserved in coarse-grained Grt; (c) Qz as fine-grained inclusions preserved in coarse-grained Cpx; The scale bar is 20 μm , 10 μm , 50 μm , 100 μm , 10 μm , and 10 μm in Fig. 4a, 4b, 4c, 4d, 4e, and 4f, respectively

墙/岩脉群或不规则透镜体的形式赋存于新太古代晚期英云闪长质片麻岩或变质表壳岩系之中,并切割近南北向的区域性片麻理(图1)。本文研究的样品主要采自武川县西乌兰不浪镇西南刘家窑子村东约2.0km 山坡上,如图2所示,它们以不规则透镜体形式赋存于英云闪长质片麻岩之中,其长轴沿北东-南西方向延伸,出露的宽度约为10~50m不等,长超过500m。在与围岩英云闪长质片麻岩相接触的地方,二者界线截然,具有石榴基性麻粒岩侵入接触关系的基本特征。而其围岩英云闪长质片麻岩在不同露头,其岩性变化较大,局部含紫苏辉石的石英闪长质片麻岩(图2)保存了大量的基性麻粒岩包体,而有的露头则为不含紫苏辉石的英云闪

长质片麻岩。

与围岩截然相反的是,石榴基性麻粒岩在露头约200m范围,成分十分均匀。其新鲜面为灰黑色,夹紫红色石榴石斑点,中细粒粒柱状变晶结构,块状构造或弱片麻状构造(图2)。大量的岩石薄片观察与研究表明,本区石榴基性麻粒岩主要由两类矿物组合所组成,即包体矿物组合和基质矿物组合(图3-图8)。(1)包体矿物组合:在少数样品中可见单斜辉石、斜长石、角闪石、石英与铁-钛氧化物等矿物在相对粗粒石榴石或单斜辉石中以细粒浑圆状包体的形式存在(图3、图4),其颗粒大小一般小于0.5mm,这些包体矿物在石榴石或单斜辉石内部通常不与裂纹或裂隙相连,指示它们不是

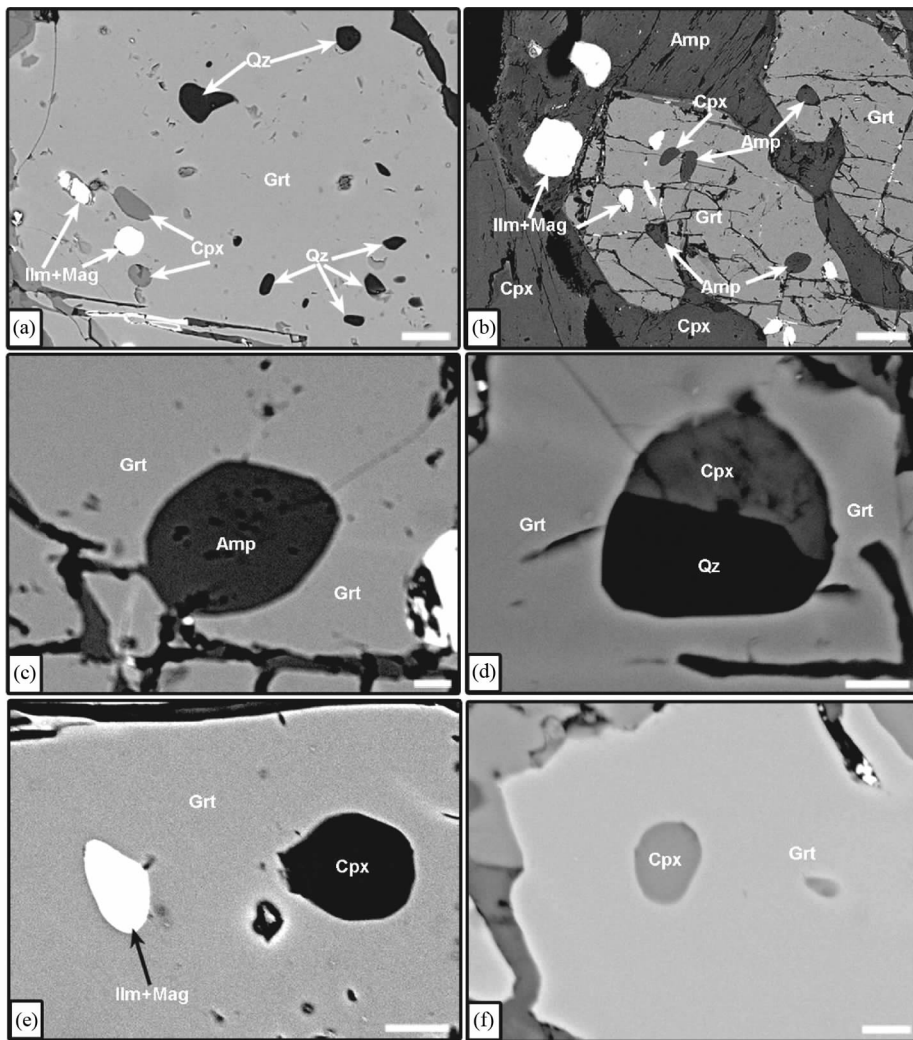


图5 石榴基性麻粒岩(LH66-1)中包体矿物组合的背散射电子图像

(a) 石英、单斜辉石与铁-钛氧化物作为细粒包体矿物被保存在粗粒的石榴石中; (b) 角闪石、单斜辉石与铁-钛氧化物作为细粒包体矿物被保存在粗粒的石榴石中; (c) 角闪石作为细粒包体矿物被保存在粗粒的石榴石中; (d) 石英与单斜辉石作为细粒包体矿物被保存在粗粒的石榴石中; (e) 单斜辉石与铁-钛氧化物作为细粒包体矿物被保存在粗粒的石榴石中; (f) 单斜辉石作为细粒包体矿物被保存在粗粒的石榴石中; 图5中比例尺大小分别为20 μm (a)、100 μm (b)、10 μm (c)、5 μm (d)、10 μm (e)与5 μm (f)

Fig. 5 Back-scattering images showing the typical inclusion mineral assemblage of the Wuchuan garnet mafic granulite (LH66-1)

(a) Qz, Cpx and Fe-Ti oxide as fine-grained inclusions preserved in coarse-grained Grt; (b) Amp, Cpx and Fe-Ti oxide as fine-grained inclusions preserved in coarse-grained Grt; (c) Amp as fine-grained inclusions preserved in coarse-grained Grt; (d) Qz and Cpx as fine-grained inclusions preserved in coarse-grained Grt; (e) Cpx and Fe-Ti oxide as fine-grained inclusions preserved in coarse-grained Grt; (f) Cpx as fine-grained inclusions preserved in coarse-grained Grt; The scale bar is 20 μm , 100 μm , 10 μm , 5 μm , 10 μm , and 5 μm in Fig. 5a, 5b, 5c, 5d, 5e, and 5f, respectively

次生包体矿物。(2) 基质矿物组合: 与包体矿物组合类似, 本区石榴基性麻粒岩所保存的基质矿物组合以不含斜方辉石为特征, 最典型的基质矿物组合为: 石榴石 + 单斜辉石 + 斜长石 + 角闪石 + 石英 + 铁-钛氧化物(图3-图8)。以上六种基质矿物之间的界线平直规整, 为典型的平衡共生结构(图3-图8), 仅在少数结构微域中, 相对细粒(0.5mm以下)的串珠状或链状石榴石, 常围绕相对粗粒的斜长石分布, 少数串珠状石榴石完全封闭, 构成所谓的“封闭型红眼圈结构”, 而多数串珠状石榴石则是不完全封闭, 构成“C型红眼圈结构”

(图3-图7)。

本区石榴基性麻粒岩常见的副矿物为钛铁矿、磁铁矿、磷灰石、锆石与榍石等。其中, 在样品 LH66-1 与 BT58-1 中, 均可将相对粗粒的钛铁矿沿其解理方向, 分布着许多磁铁矿的棒状体, 可能说明它们由钛铁矿转变而来(图8)。此外, 另一个重要的副矿物相转变结构是: 在样品 LH66-1 中, 可观察到钛铁矿与榍石的精细转变结构, 即相对粗粒的钛铁矿发育相榍石窄边, 可能指示其由钛铁矿转变而来(图8)。而细粒自形的磷灰石与浑圆状锆石以细粒包体的形式保存在斜

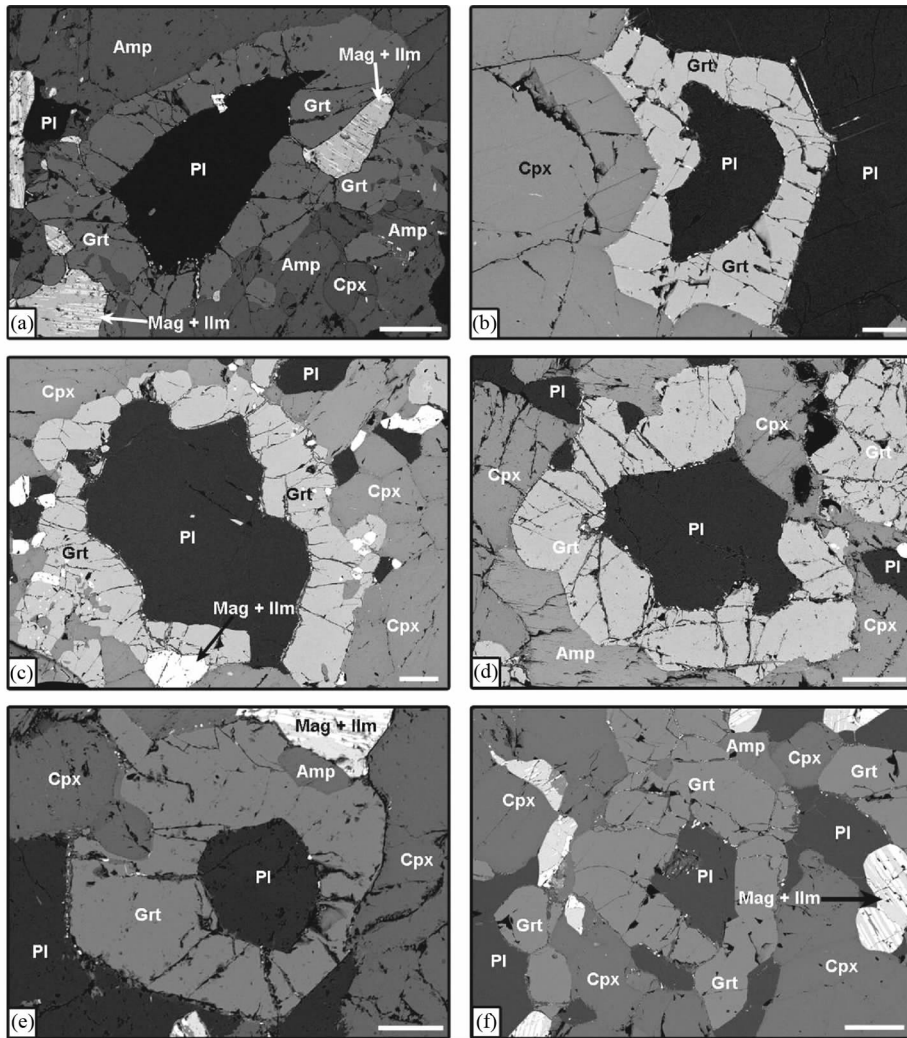


图6 石榴基性麻粒岩(LH66-1)中典型矿物组合与结构背散射电子图像

石榴石呈链状冠状体围岩斜长石周围分布;图6中比例尺大小分别为 $200\mu\text{m}$ (a)、 $100\mu\text{m}$ (b)、 $500\mu\text{m}$ (c)、 $200\mu\text{m}$ (d)、 $100\mu\text{m}$ (e)与 $200\mu\text{m}$ (f)

Fig. 6 Back-scattering images showing the typical minerals and textures of the Wuchuan garnet mafic granulite (LH66-1)

Grt chains or coronas around coarse-grained Pl; The scale bar is $200\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, and $200\mu\text{m}$ in Fig. 6a, 6b, 6c, 6d, 6e and 6f, respectively

长石、单斜辉石和石榴石等基质矿物中(图8)。

5 矿物化学

如上所述,武川石榴基性麻粒岩常见变质矿物有石榴石、单斜辉石、斜长石、角闪石与石英等。下文根据扫描电镜和矿物电子探针分析结果,对其化学成分、成因条件和变化规律进行综合分析,为本区石榴基性麻粒岩的变质作用的深入研究提供依据。

5.1 石榴石

本区石榴基性麻粒岩中的石榴石,在手标本上常为浅红色,而在薄片下则为无色,常呈半自形至他形粒状,不规则状

或串珠状。不同类型的石榴石其粒度变化较大,为 $0.50 \sim 2.0\text{mm}$,在岩石中平均含量约为 15% 。依据其形态、产状及分布特征可进一步划分为三种类型(图3-图8),第一种类型石榴石常以封闭型串珠状集合体形式分布于相对粗粒的斜长石周围,构成典型的“封闭型红眼圈结构”。第二种类型石榴石常以半封闭型串珠状集合体分布于相对粗粒的斜长石周围,构成典型的“C型红眼圈结构”。第三种类型石榴石,其粒度相对较大,常呈它们不规则状或浑圆状不均匀地分布于斜长石和单斜辉石等矿物之间,它们之间界线平直规整,为平衡共生结构。值得指出的是,本区基性麻粒岩中石榴石所发育的红眼圈结构,说明石榴石主要是镁铁矿物与斜长石反应所成,这类岩石的原岩无疑相当于辉长岩或辉绿岩,原来的斜长石应为基性的,但变质后的岩石主要为中长石

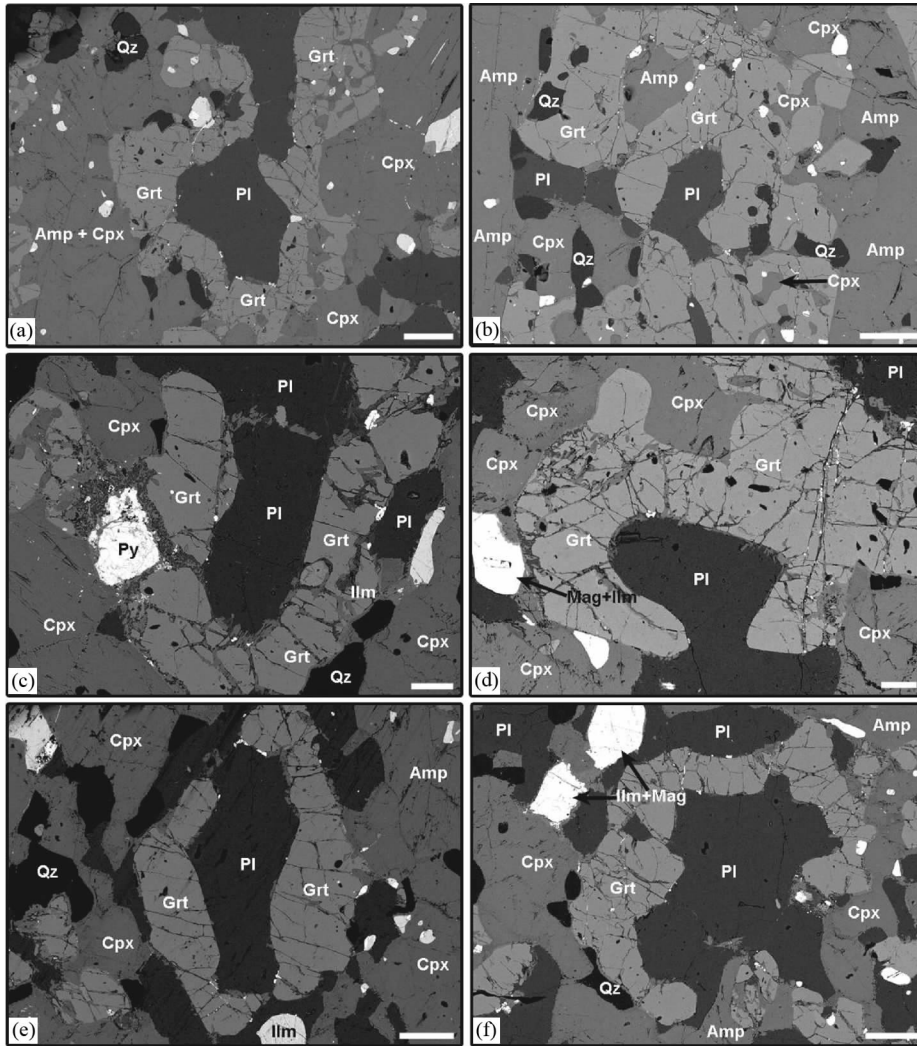


图7 石榴基性麻粒岩(LH66-1)中典型矿物组合与结构背散射电子图像

石榴石呈链状冠状体围岩斜长石周围分布;图7中比例尺大小分别为100 μm (a)、200 μm (b)、100 μm (c)、100 μm (d)、200 μm (e)与200 μm (f)

Fig. 7 Back-scattering images showing the typical minerals and textures of the Wuchuan garnet mafic granulite (LH66-1)

Grt chains or coronas around coarse-grained Pl; The scale bar is 100 μm , 200 μm , 100 μm , 100 μm , 200 μm , and 200 μm in Fig. 7a, 7b, 7c, 7d, 7e and 7f, respectively

(An_{30-50}),说明主要是钙长石分子参与了石榴石生产反应,所以变质过程中斜长石牌号有所降低。

如图9与表1所示,本区2件石榴基性麻粒岩样品中99个不同成因类型的石榴石成分分析结果表明,不同产状的石榴石具有十分相近的化学成分,其化学成分以低MnO为其主要特征,其中MnO含量为0.77%~1.11%,相应的锰铝榴石端元组分(Sps)为1.69~2.44;MgO含量为5.26%~7.81%,相应的镁铝榴石端元组分(Prp)为21~30;FeO^T含量为24.07%~27.01%,相应的铁铝端元组分(Alm)为48~57;CaO含量为6.52%~9.31%,相应的钙铝端元组分(Grs)变化于18%~26%之间。在Prp-(Alm+Sps)-Grs图解中(图9),本区高压基性麻粒岩中石榴石全部被投入至麻粒岩相区,这与利用石榴石中CaO与MgO含量,划分麻粒岩相和

角闪岩相的判别式结果相似(转引自靳是琴和李鸿超,1980),本区所有石榴石均为 Y_1 大于 Y_2 ,属于麻粒岩相,无疑表明它们是在麻粒岩相变质条件下形成(图9)。

如图10所示,与国内外其它地区高压麻粒岩地体所见到的石榴石扩散环带特征十分相似(Liu and Zhong, 1997; Cooke, 2000; Liu *et al.*, 2013),本区石榴基性麻粒岩有的石榴石边部亦发育扩散吸收环带,并具有如下变化趋势:石榴石自中心到幔部,其化学成分基本保持不变,但自幔部到最边部,镁铝榴石分子(Prp)不断降低(图10),相应地铁铝榴石分子(Alm)不断增加,而钙铝榴石组分(Grs)略有降低或基本不变,反映了晚期冷却降温退变质作用对本区石榴基性麻粒岩中石榴石化学成分产生了一定程度的影响。

与华北克拉通古元古代石榴基性麻粒岩中近峰期阶段

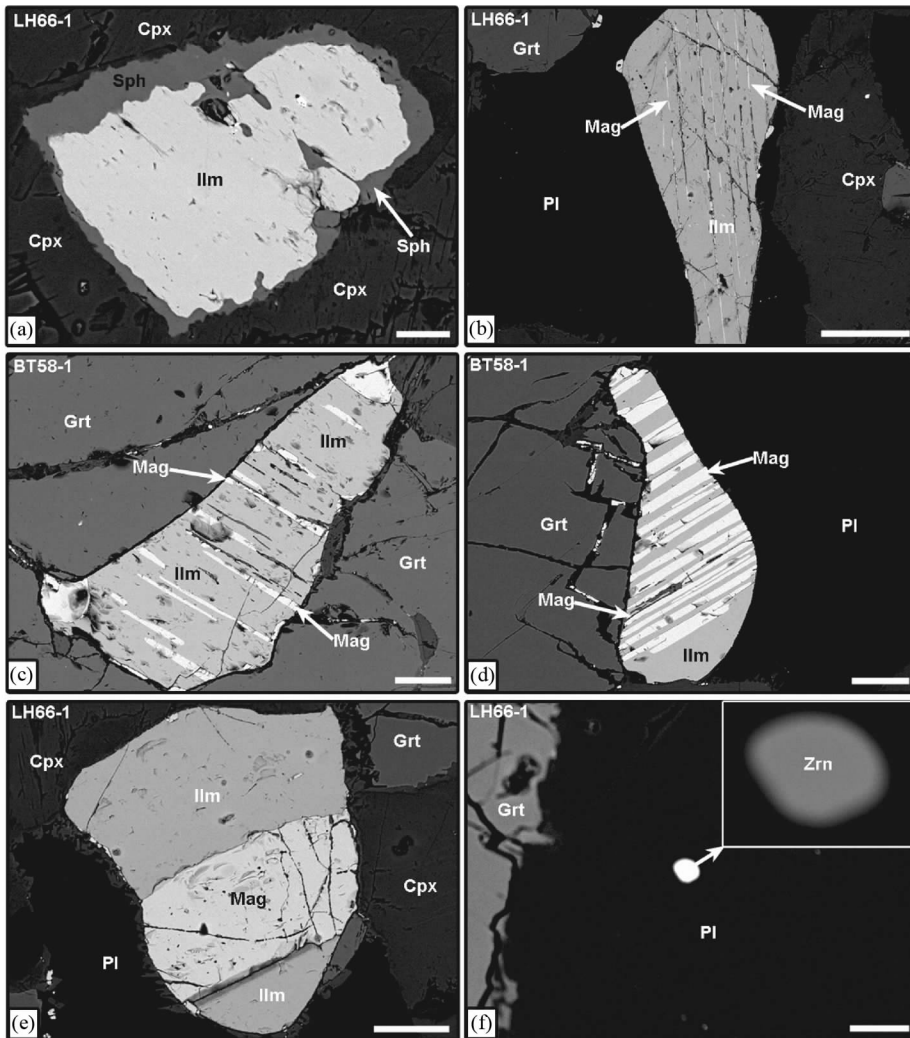


图 8 石榴基性麻粒岩中典型结构背散射电子图像

(a) 钛铁矿 (Ilm) 颗粒边部发育榍石的 (Sph) 反应边结构; (b-d) 钛铁矿 (Ilm) 中定向排列的棒状磁铁矿 (Mag); (e) 石榴基性麻粒岩中由磁铁矿 (Mag) + 钛铁矿 (Ilm) 组成的铁-钛氧化物; (f) 粗粒斜长石中含有细粒锆石包体; 图 8 中比例尺大小分别为 $20\mu\text{m}$ (a)、 $100\mu\text{m}$ (b)、 $50\mu\text{m}$ (c)、 $50\mu\text{m}$ (d)、 $50\mu\text{m}$ (e) 与 $20\mu\text{m}$ (f)

Fig. 8 Back-scattering images showing the typical minerals and textures of the Wuchuan garnet mafic granulite

(a) sphene (Sph) rim around coarse-grained Ilm; (b-d) Mag oriented rods in the coarse-grained Ilm; (e) Fe-Ti-oxides are consist of Mag + Ilm in the garnet mafic granulite; (f) zircon as fine-grained inclusions preserved in coarse-grained Pl; The scale bar is $20\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, and $20\mu\text{m}$ in Fig. 8a, 8b, 8c, 8d, 8e and 8f, respectively

形成的石榴石成分相比, 本区近峰期高压麻粒岩相阶段形成的石榴石的 MgO 平均含量为 6.76%, 略低于桑干地区 ($\text{MgO} = \sim 8.50\%$; Guo *et al.*, 2002) 与胶北地区 ($\text{MgO} = \sim 7.60\%$; Liu *et al.*, 2013), 而略高于恒山地区 ($\text{CaO} = \sim 5.00\%$; Zhao *et al.*, 2001b) 与承德地区 ($\text{CaO} = \sim 6.50\%$; 李江海等, 1998), 说明本区石榴基性麻粒岩近峰期温度比桑干或胶北高压基性麻粒岩略低, 而比恒山与承德高压基性麻粒岩近峰期的略高。

5.2 斜长石

大量岩相学研究结果表明, 本区石榴基性麻粒岩中斜长

石可分为以下三种类型: 第一种类型为包体 I 型斜长石, 主要以细粒浑圆状形式分布于相对粗粒的石榴石内部, 与其它镁铁质矿物如单斜辉石和角闪石等细粒包体矿物共同构成的本区石榴基性麻粒岩的包体矿物组合, 其粒度一般小于 0.50mm 。第二种类型为包体 II 型斜长石, 主要以相对粗粒的浑圆状包体形式分布于链状或串珠状石榴石集合体内部, 其颗粒大小一般大于 0.50mm , 与串珠状石榴石集合体共同构成了本区石榴基性麻粒岩的“红眼圈结构”。第三种类型为基质型斜长石, 广泛分布于基质矿物中, 呈中-粗粒粒状晶变晶结构, 与基质中其它矿物如石榴石、单斜辉石和角闪石等矿物大小相近, 其粒度大小一般大于为 1.0mm 。在局部结

表 1 武川石榴基性麻粒岩中石榴石的代表性化学成分 (wt%)

Table 1 Representative chemical composition (wt%) of garnets from the Wuchuan garnet mafic granulites

点号	BT58-1_2.5	BT58-1_2.7	LH66-1_2.3	LH66-1_2.7	BT58-1_1.3	BT58-1_4.9	LH66-1_2.15	LH66-1_4.12	BT58-1_2.12	BT58-1_4.18	LH66-1_1.11	LH66-1_1.10	LH66-1_6.28
类型	I	I	I	I	II	II	II	II	III	III	III	III	III
位置	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R	C
SiO ₂	37.80	38.09	37.97	38.24	37.38	37.83	38.30	38.69	37.95	37.92	38.30	37.76	38.47
TiO ₂	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01	0.04	0.02	0.04	0.03	0.06	0.04	0.06	0.05
Al ₂ O ₃	20.42	20.70	20.74	21.12	20.50	20.39	20.86	20.72	20.27	20.63	20.77	20.76	20.77
Cr ₂ O ₃	0.02	0.06	0.00	0.06	0.00	0.09	0.00	0.00	0.03	0.04	0.00	0.02	0.00
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	26.32	25.97	25.36	24.75	26.80	26.67	25.12	25.08	26.42	26.11	24.56	25.74	24.07
MnO	0.87	0.96	0.85	0.88	0.90	0.94	0.93	0.89	0.93	0.99	1.00	1.02	0.81
MgO	5.82	5.88	7.66	7.81	5.97	5.41	7.66	7.74	5.26	5.58	7.57	7.07	7.79
CaO	7.73	7.82	7.06	6.68	8.05	8.21	6.86	6.91	8.55	8.56	7.41	7.18	7.16
Total	99.01	99.49	99.65	99.54	99.60	99.57	99.74	100.08	99.43	99.89	99.64	99.63	99.11
以 12 个氧原子为标准计算的阳离子系数													
Si	2.976	2.980	2.938	2.957	2.924	2.968	2.961	2.981	2.981	2.959	2.961	2.935	2.985
Ti	0.002	0.001	0.001	0.000	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002	0.004	0.002	0.004	0.003
Al	1.895	1.909	1.892	1.925	1.891	1.886	1.901	1.882	1.877	1.898	1.893	1.902	1.900
Cr	0.001	0.004	0.000	0.004	0.000	0.006	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.001	0.000
Fe ³⁺	0.148	0.126	0.233	0.161	0.259	0.170	0.174	0.150	0.159	0.177	0.182	0.219	0.126
Fe ²⁺	1.585	1.573	1.408	1.440	1.494	1.580	1.451	1.466	1.577	1.528	1.406	1.454	1.435
Mn	0.058	0.064	0.056	0.058	0.060	0.062	0.061	0.058	0.062	0.065	0.065	0.067	0.053
Mg	0.683	0.686	0.883	0.900	0.696	0.633	0.883	0.889	0.616	0.649	0.872	0.819	0.901
Ca	0.652	0.656	0.585	0.553	0.675	0.690	0.568	0.571	0.720	0.716	0.614	0.598	0.595
x(g)	0.70	0.70	0.61	0.62	0.68	0.71	0.62	0.62	0.72	0.70	0.62	0.64	0.61
Grs	0.22	0.22	0.20	0.19	0.23	0.23	0.19	0.19	0.24	0.24	0.21	0.20	0.20
Prp	0.23	0.23	0.30	0.30	0.24	0.21	0.30	0.30	0.21	0.22	0.29	0.28	0.30
Alm	0.53	0.53	0.48	0.49	0.51	0.53	0.49	0.49	0.53	0.52	0.48	0.49	0.48
Sps	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

注: $FeO^T = FeO + Fe_2O_3$; $x(g) = Fe^{2+} / (Mg + Fe^{2+})$; $Grs = Ca / (Ca + Mg + Mn + Fe^{2+})$; $Prp = Mg / (Ca + Mg + Mn + Fe^{2+})$; $Alm = Fe^{2+} / (Ca + Mg + Mn + Fe^{2+})$; $Sps = Mn / (Ca + Mg + Mn + Fe^{2+})$; I-环绕斜长石自形中粒串珠状封闭型石榴石; II-环绕斜长石自形中粒串珠状半封闭型石榴石; III-中细粒他形-半自形石榴石; C-石榴石核部; R-石榴石边部

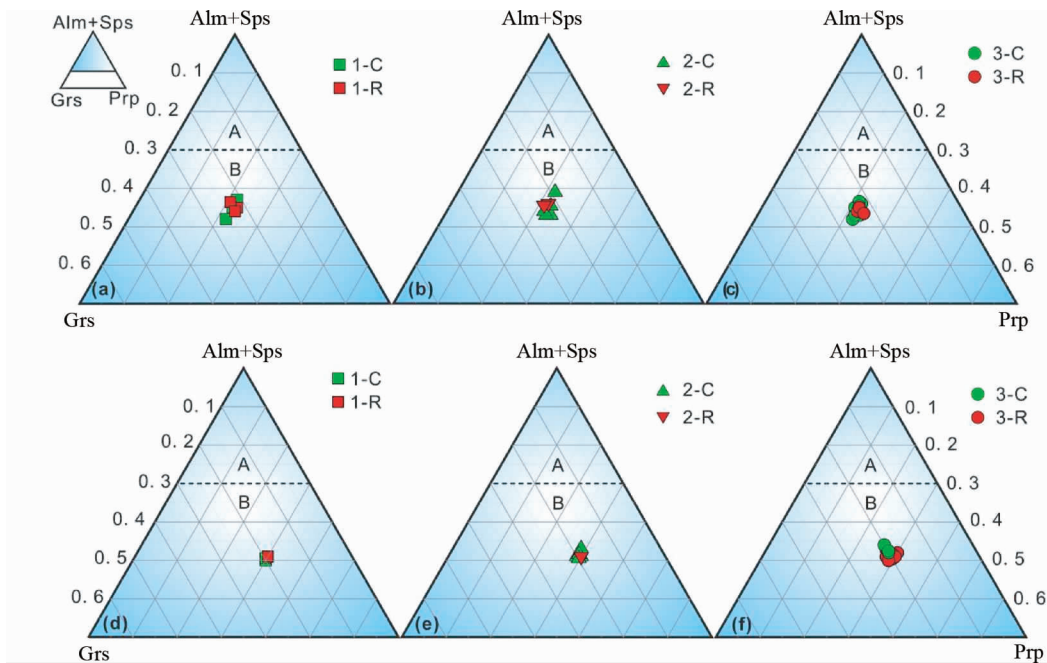


图 9 武川石榴基性麻粒岩石榴石的 Prp-(Alm + Spr)-Grs 三角图 (转引自刘福来, 1995)

(a-c) 为样品 BT58-1; (d-f) 为样品 LH66-1; 1-C: “红眼圈结构”石榴石核部; 1-R: “红眼圈结构”石榴石边部; 2-C: “C”型石榴石核部; 2-R: “C”型石榴石边部; 3-C: 基质型石榴石核部; 3-R: 基质型石榴石边部. A 与 B 分别为角闪岩相与麻粒岩相石榴石分布区

Fig. 9 Prp-(Alm + Spr)-Grs triangular diagram of the garnets from the Wuchuan garnet mafic granulites (second after Liu, 1995) (a-c) sample BT58-1; (d-f) sample LH66-1; 1-C: core of the garnet with ‘red-eye socket’; 1-R: rim of the garnet with ‘red-eye socket’; 2-C: core of ‘C-type’ garnet; 2-R: rim of ‘C-type’ garnet; 3-C: core of matrix-type garnet; 3-R: rim of matrix-type garnet. A and B represent the regions of the garnet formed in granulite-facies and amphibolite-facies, respectively

表 2 武川石榴基性麻粒岩中斜长石的代表性化学成分 (wt%)

Table 2 Representative chemical composition (wt%) of plagioclases from the Wuchuan garnet mafic granulites

点号	BT58-1_5.11	BT58-1_4.14	LH66-1_5.6	BT58-1_2.2a	LH66-1_3.6	BT58-1_4.13	LH66-1_4.4	BT58-1_3.4
类型	I	II	II	II	III	III	III	III
位置	C	C	C	C	C	R	C	C
SiO ₂	59.04	58.85	58.32	58.25	58.06	58.27	58.46	58.84
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	25.51	25.51	26.00	25.92	26.24	26.24	25.89	25.59
FeO ^T	0.17	0.14	0.10	0.05	0.04	0.23	0.10	0.04
MnO	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
MgO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01
CaO	8.64	8.54	8.27	8.10	8.94	8.41	7.92	7.77
Na ₂ O	6.57	6.49	6.70	6.98	6.57	6.44	6.94	7.06
K ₂ O	0.12	0.17	0.04	0.19	0.10	0.15	0.09	0.12
NiO	0.00	0.04	0.00	0.02	0.03	0.04	0.00	0.03
Total	100.08	99.74	99.46	99.52	99.99	99.78	99.45	99.46
以 8 个氧原子为标准计算的阳离子系数								
Si	2.637	2.637	2.619	2.618	2.601	2.610	2.625	2.641
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	1.343	1.348	1.377	1.373	1.386	1.386	1.371	1.354
Fe ³⁺	0.006	0.005	0.004	0.002	0.001	0.009	0.004	0.002
Fe ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001
Ca	0.413	0.410	0.398	0.390	0.429	0.404	0.381	0.374
Na	0.569	0.564	0.583	0.608	0.571	0.559	0.604	0.614
K	0.007	0.010	0.002	0.011	0.006	0.009	0.005	0.007
Sum	5	5	5	5	5	5	5	5
Ca(pl)	0.42	0.42	0.41	0.39	0.43	0.42	0.39	0.38
Or	1	1	0	1	1	1	1	1
An	42	42	40	39	43	42	38	38
Ab	58	57	59	60	57	58	61	62

注: $\text{FeO}^T = \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$; $\text{Or} = 100 \times \text{K} / (\text{K} + \text{Na} + \text{Ca})$; $\text{An} = 100 \times \text{Ca} / (\text{K} + \text{Na} + \text{Ca})$; $\text{Ab} = 100 \times \text{Na} / (\text{K} + \text{Na} + \text{Ca})$; $\text{Ca(pl)} = \text{Ca} / (\text{Na} + \text{Ca})$; I - 石榴石包体中细粒浑圆状斜长石; II - 被串珠状石榴石环绕的斜长石; III - 基质中与单斜辉石、石榴石和角闪石等矿物接触的中-粗粒斜长石; C - 斜长石核部; R - 斜长石边部

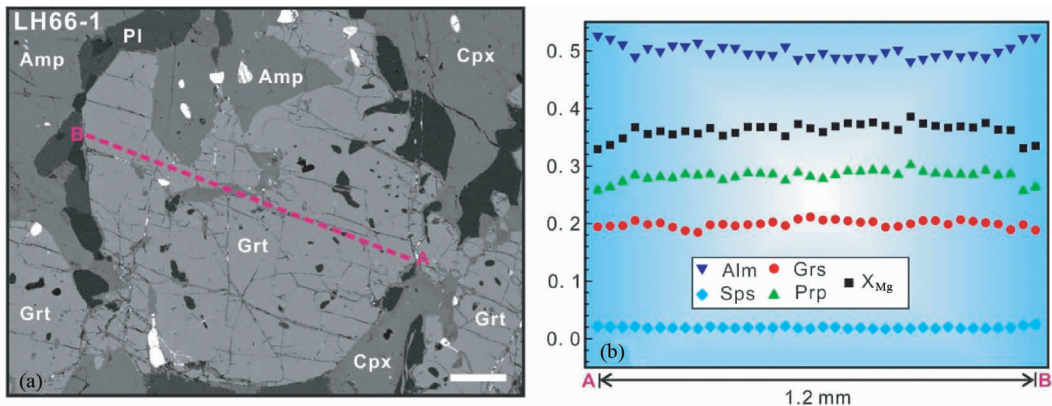


图 10 石榴基性麻粒岩 (LH66-1) 中石榴石背散射电子图像 (a) 与成分环带剖面图 (b)

图 a 中比例尺为 200 μm ; 图 b 中: Alm-铁铝榴石; Grs-钙铝榴石; Prp-镁铝榴石; Sps-锰铝榴石; $X_{\text{Mg}} = \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$

Fig. 10 Back-scattering image (a) and compositional zoning profiles (b) across garnet from garnet mafic granulite sample LH66-1

The scale bar is 200 μm in Fig. 10a. Alm-almandine, Grs-grossular; Prp-pyrope; Sps-spessartine; $X_{\text{Mg}} = \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ in Fig. 10b

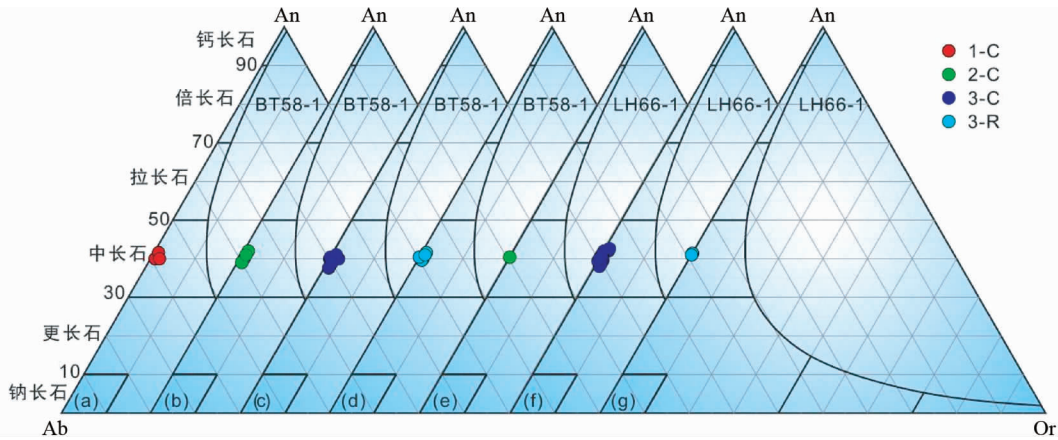


图 11 武川石榴碱性麻粒岩中斜长石的 Ab-Or-An 图解 (据 Deer *et al.*, 1997)

1-C: 包体 I 型斜长石核部; 2-C: 包体 II 型斜长石核部; 3-C: 基质型斜长石核部; 3-R: 基质型斜长石边部

Fig. 11 Ab-Or-An diagram of the plagioclases from the Wuchuan garnet mafic granulites (after Deer *et al.*, 1997)

1-C: core of the inclusion-type I plagioclases; 2-C: core of the inclusion-type II plagioclases; 3-C: core of matrix-type plagioclases; 3-R: rim of matrix-type plagioclases

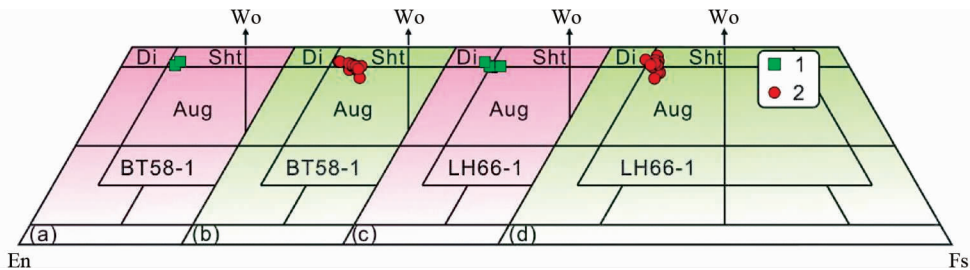


图 12 武川石榴碱性麻粒岩中单斜辉石 Fs-Wo-En 图解 (据 Deer *et al.*, 1997)

1-包体型单斜辉石; 2-基质型单斜辉石

Fig. 12 Fs-Wo-En diagram of the clinopyroxenes from the Wuchuan garnet mafic granulites (after Deer *et al.*, 1997)

1-inclusion-type clinopyroxenes; 2-matrix-type clinopyroxenes

构微域,少数相对粗粒的基质型斜长石残留了辉长岩或辉绿岩中板条状斜长石的外貌形态特征(图略),进一步说明了石榴碱性麻粒岩的原岩可能是辉长岩或辉绿岩。

本区 2 件石榴碱性麻粒岩样品中 61 个斜长石电子探针分析结果如图 11 与表 2 所示,从图 11 与表 2 可以看出,不同成因类型的斜长石的化学成分十分相似,斜长石的 An、Ab 与 Or 组分(值)分别变化于 38~43(中长石)、57~62 与 0~2 之间。其中,包体 I 型斜长石,为 $An_{40-42}Ab_{58-59}Or_{0.2}$ 的中长石,包体 II 型与基质型斜长石,亦分别为 $An_{39-42}Ab_{57-60}Or_{0.1}$ 与 $An_{38-43}Ab_{57-62}Or_{0.2}$ 的中长石。这些特征充分说明,无论是包体型还是基质型斜长石,它们均为中长石,均形成于相近的 $P-T$ 条件(图 11)。

5.3 单斜辉石

依据岩相学观察与研究,并结合其化学成分特征,本区石榴碱性麻粒岩中单斜辉石可进一步分为如下两种类型。第一种类型为包体型单斜辉石,一般呈细粒变晶结构,它们常以细粒浑圆状的形式分布于相对粗粒的石榴石晶体内部,

其粒度一般小于 0.50mm,有的包体型单斜辉石还与细粒浑圆状的石英共生;第二种类型为基质型单斜辉石,它们常呈中-粗粒粒状变晶结构,其粒度一般大于 1.0mm,广泛分布于基质矿物之中,与石榴石、斜长石与角闪石等矿物界线平直规整,为平衡共生结构。

2 件石榴碱性麻粒岩样品中 36 个不同成因类型的单斜辉石的电子探针分析结果如图 12 与表 3 所示。从图 12 与表 3 可以看出,依据 Poldervaart and Hess(1951)的分类原则,它们大部分落在次透辉石区,为次透辉石质单斜辉石,少数者位于次透辉石与普通辉石区的过渡区(图 12),个别者被投入普通辉石区。两类单斜辉石的 FeO^T 与 MgO 含量十分相似(图 12)。其中,包体型单斜辉石的 FeO^T 与 MgO 含量为分别变化于 8.55%~9.87% 与 12.56%~14.07% 之间,相应地 X_{Mg} 值变化于 0.78~0.85 之间;基质型单斜辉石的 FeO^T 与 MgO 含量为分别变化于 9.18%~13.92% 与 10.60%~12.87% 之间,相应地 X_{Mg} 值变化于 0.69~0.83 之间。这些特征反映了不同微区结构部位的单斜辉石 Mg 与 Fe 元素在变质演化过程,并未发生显著的调整。

表 3 武川石榴基性麻粒岩中单斜辉石的代表性化学成分 (wt%)

Table 3 Representative chemical composition (wt%) of clinopyroxenes from the Wuchuan garnet mafic granulites

点号	LH66- 1_1.7	BT58- 1_2.11	BT58- 1_1.15	LH66- 1_2.2	LH66- 1_1.12	BT58- 1_3.2	BT58- 1_2.3a
类型	I	I	II	II	II	II	II
位置	C	C	C	C	C	C	C
SiO ₂	51.48	50.53	50.61	50.36	50.60	48.81	50.19
TiO ₂	0.17	0.38	0.24	0.33	0.35	0.36	0.45
Al ₂ O ₃	2.06	3.12	2.31	3.54	3.73	4.41	4.27
Cr ₂ O ₃	0.07	0.03	0.02	0.00	0.04	0.01	0.03
FeO ^T	8.55	9.66	10.68	9.84	9.18	12.04	10.60
MnO	0.08	0.16	0.09	0.13	0.14	0.12	0.09
MgO	14.07	12.56	12.55	12.64	12.33	10.67	11.16
CaO	22.92	21.94	22.66	22.10	22.65	22.03	21.91
Na ₂ O	0.58	0.80	0.68	0.75	0.81	0.89	1.03
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
Total	99.96	99.19	99.86	99.68	99.82	99.34	99.74
以 6 个氧原子为标准计算的阳离子系数							
Si	1.907	1.898	1.895	1.881	1.886	1.847	1.882
Ti	0.005	0.011	0.007	0.009	0.010	0.010	0.013
Al ^{VI}	0.090	0.102	0.102	0.119	0.114	0.153	0.118
Al ^{IV}	0.000	0.036	0.000	0.037	0.050	0.044	0.071
Cr	0.002	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001
Fe ³⁺	0.126	0.102	0.145	0.118	0.101	0.153	0.095
Fe ²⁺	0.139	0.201	0.190	0.189	0.185	0.228	0.237
Mn	0.003	0.005	0.003	0.004	0.004	0.004	0.003
Mg	0.777	0.703	0.700	0.704	0.685	0.602	0.624
Ca	0.910	0.883	0.909	0.884	0.905	0.893	0.881
Na	0.042	0.058	0.049	0.054	0.059	0.065	0.075
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
X _{Mg}	0.85	0.78	0.79	0.79	0.79	0.73	0.72

注: FeO^T = FeO + Fe₂O₃; X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe²⁺); I - 石榴石包体中细粒浑圆状单斜辉石; II - 基质中与石榴石、角闪石等矿物镶嵌接触的中粗粒单斜辉石; C - 单斜辉石核部

本区两类单斜辉石 Al₂O₃ 与 Na₂O 含量, 分别变化于 2.06% ~ 4.41% 与 0.68% ~ 1.03% 之间, 相应的六次配位铝 (Al^{VI}) 介于 0.002 ~ 0.075 之间, 且 Al₂O₃ 与 Na₂O 含量具有较好的线性相关性 (相关系数 R = 0.50; 图略)。大量研究结果表明 (Anovitz, 1991; Yoshino *et al.*, 1998), 在石榴基性麻粒岩中, 单斜辉石中 Al₂O₃ 与 Na₂O 的含量越高, 代表单斜辉石含有更高硬玉分子含量, 指示其形成于更高的压力条件, 本区石榴基性麻粒岩中不同类型形成的单斜辉石 Al₂O₃ 与 Na₂O 的含量特点 (图 12、表 3), 表明两类单斜辉石形成的压力条件相近, 但包体型单斜辉石形成的压力略偏低。

5.4 角闪石

角闪石亦在本区石榴基性麻粒岩分布十分广泛, 在样品 LH66-1 中含量最高。岩相学研究表明, 本区石榴基性麻粒岩中的角闪石可进一步划分成如下两种类型。第一种类型

表 4 武川石榴基性麻粒岩中角闪石的代表性化学成分 (wt%)

Table 4 Representative chemical composition (wt%) of amphiboles from the Wuchuan garnet mafic granulites

点号	LH66- 1_3.17	LH66- 1_1.2	LH66- 1_4.3	LH66- 1_5.3	BT58- 1_4.2	BT58- 1_2.15	BT58- 1_5.1
类型	I	II	II	II	II	II	II
位置	C	C	C	C	C	C	R
SiO ₂	43.33	41.80	43.09	43.34	40.88	41.68	41.03
TiO ₂	2.25	2.25	1.81	1.77	1.99	1.56	1.85
Al ₂ O ₃	11.05	11.63	11.12	10.83	11.97	11.30	11.84
Cr ₂ O ₃	0.02	0.07	0.05	0.07	0.06	0.08	0.04
FeO ^T	13.73	17.36	15.49	15.51	19.00	18.50	19.84
MnO	0.09	0.09	0.09	0.06	0.10	0.04	0.09
MgO	13.11	10.72	11.63	12.19	9.08	10.23	8.94
CaO	11.77	11.08	11.60	11.49	11.34	11.40	11.17
Na ₂ O	1.51	1.83	1.72	1.67	1.54	1.43	1.55
K ₂ O	0.60	0.71	0.62	0.63	1.35	1.13	1.37
NiO	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.04	0.07
Total	97.46	97.54	97.29	97.56	97.31	97.38	97.79
以 23 个氧原子为标准计算的阳离子系数							
Si	6.352	6.238	6.403	6.395	6.211	6.265	6.215
Ti	0.248	0.253	0.202	0.196	0.227	0.176	0.211
Al	1.910	2.046	1.948	1.884	2.144	2.003	2.114
Cr	0.002	0.008	0.006	0.008	0.007	0.010	0.005
Fe ³⁺	0.508	0.543	0.385	0.524	0.422	0.645	0.509
Fe ²⁺	1.175	1.624	1.540	1.390	1.992	1.680	2.004
Mn	0.011	0.011	0.011	0.007	0.013	0.005	0.012
Mg	2.864	2.384	2.576	2.681	2.056	2.292	2.018
Ca	1.849	1.772	1.847	1.817	1.846	1.836	1.813
Na	0.429	0.530	0.496	0.478	0.454	0.417	0.455
K	0.112	0.135	0.118	0.119	0.262	0.217	0.265
X _{Mg}	0.71	0.59	0.63	0.66	0.51	0.58	0.50

注: FeO^T = FeO + Fe₂O₃; X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe²⁺); I - 石榴石包体中细粒浑圆状角闪石; II - 基质中与石榴石、单斜辉石等矿物镶嵌接触的中粗粒角闪石; C - 角闪石核部; R - 角闪石边部

为包体型角闪石, 它们呈细粒浑圆状包体被石榴石包裹, 具有浅褐色-黄褐色的多色性, 与细粒单斜辉石平衡共生, 呈中粒粒状变晶结构, 其粒度一般小于 0.50mm。第二种类型为基质型角闪石, 它们常呈中-粗粒不规则粒状均匀地分布于基质矿物组合之中, 其粒度大于为 1.0mm, 常具有浅褐色-黄褐色的多色性, 大部分基质型角闪石与基质中其它变质矿物如单斜辉石和石榴石等接触界面平直规整, 显示平衡共生结构特征。

本区 2 件石榴基性麻粒岩样品中 29 个不同成因类型的角闪石的电子探针分析结果如图 13 与表 4 所示。从图 13 与表 4 可以看出, 依据 Leake *et al.* (1997) 分类原则, 不同成因类型的角闪石均为钙质角闪石大类, 它们具有相近的 CaO、SiO₂ 与 Al₂O₃ 含量, 分别变化于 11.07% ~ 11.77%、40.39% ~ 43.42% 与 10.71% ~ 12.81%, 而 MgO 与 FeO^T 含量存在一定的差异, 分别为 8.85% ~ 13.11% 与 16.80% ~

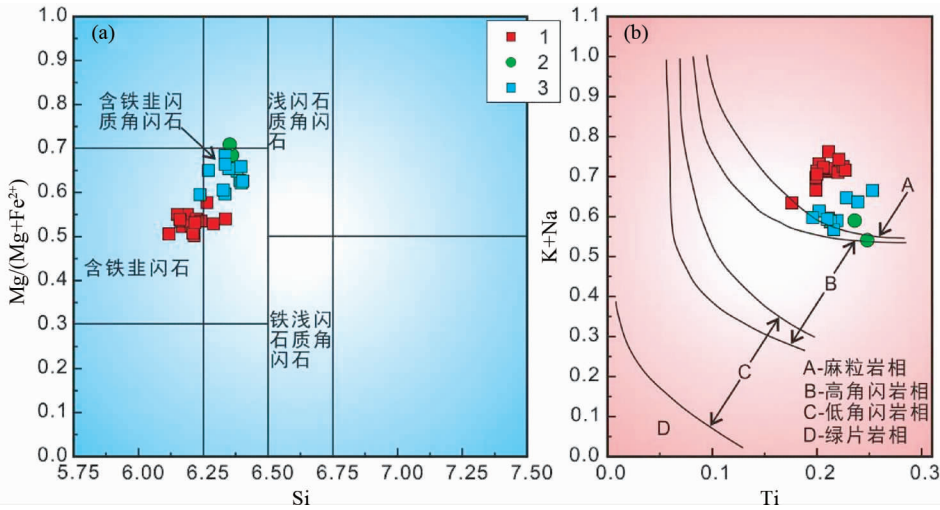


图 13 武川石榴基性麻粒岩中角闪石 Si-Mg/(Mg + Fe²⁺)图解(a, 据 Deer *et al.*, 1997)与 Ti-(Na + K)成分图解(b, 据靳是琴, 1991)

1-样品 BT58-1 中基质型角闪石; 2-样品 LH66-1 中包体型角闪石; 3-样品 LH66-1 中基质型角闪石

Fig. 13 Si vs. Mg/(Mg + Fe²⁺) (a, after Deer *et al.*, 1997) and Ti vs. (Na + K) (b, after Jin, 1991) diagrams of the amphiboles from the Wuchuan garnet mafic granulites

1-matrix-type amphiboles from sample BT58-1; 2-inclusion-type amphiboles from sample LH66-1; 3-matrix-type amphiboles from sample LH66-1

20.08%, 相应的 X_{Mg} 值 (= Mg/(Mg + Fe²⁺)) 为 0.50 ~ 0.71, 其中包体型角闪石的 MgO 含量比基质型的含量略高。故在进一步区分钙质角闪石种属, 它们属于含铁非闪石-含铁非闪石质角闪石亚类(图 13a)。

如图 13b 所示, 本区石榴基性麻粒岩中角闪石 TiO₂、Na₂O 与 K₂O 含量亦十分相近, 分别为 1.56% ~ 2.25%、1.43% ~ 1.83% 与 0.63% ~ 1.46%。因此, 在 Ti-(Na + K) 图解中(图 13b), 它们均被投入了麻粒岩相区。如样品 LH66-1 中, 分布于石榴石内部的细粒浑圆状的角闪石, 具有相对较高的 TiO₂ 含量(2.09% ~ 2.25%), 被投入麻粒岩相区(图 13b), 表明它们是属于麻粒岩相变质作用的产物。

6 相平衡模拟与温压估算

为了模拟武川石榴基性麻粒岩的变质作用 P - T 条件及相应的矿物演化过程, 本文基于模式体系 NCFMASHTO (Na₂O-CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-Fe₂O₃) 计算了上述 2 件石榴基性麻粒岩的 P - T 视剖面图。设流体相为纯水, 在固相线以下的条件时过量。K₂O 与 MnO 因含量太低不予考虑。视剖面图的计算利用 THERMOCALC3.33 (Powell *et al.*, 1998; 2009 年 10 月更新) 和数据库 tcds55.txt (Holland and Powell, 1998; 2009 年 10 月更新) 进行。采用的矿物 a - x 模型如下: 石榴石 (White *et al.*, 2007); 单斜辉石和角闪石 (Diener *et al.*, 2007); 斜方辉石 (White *et al.*, 2002); 斜长石 (Holland and Powell, 2003); 钛铁矿和磁铁矿 (White *et al.*, 2000)。此外还考虑了高温下可能存在的熔体, 其 a - x 模型修

表 5 武川石榴基性麻粒岩在 NCFMASHTO 体系下的有效全岩成分 (mol%)

Table 5 Normalized mole-proportions (mol%) of the Wuchuan garnet mafic granulites

样品号	H ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	Na ₂ O	TiO ₂	O
BT58-1	2.99	48.03	8.89	13.87	9.28	12.73	2.20	1.06	0.95
LH66-1	5.50	46.43	9.14	11.39	11.22	11.30	2.34	1.07	1.63

改自 White *et al.* (2007), 为适用于基性体系中生成的通常铝不饱和的岩浆, 因此过铝端元 SiL(8/5Al₂SiO₅) 被去掉。榍石、金红石和石英为纯端元。

相平衡计算使用的全岩成分直接取自 XRF 分析并换算为模式体系中的 mole 百分比。假设 MnO 仅存在于锰铝榴石中并依化学式 (MnO)₃ · Al₂O₃ · (SiO₂)₃ 扣除, CO₂ 和 P₂O₅ 分别按照碳酸钙 CaO · CO₂ 和磷灰石 (CaO)₅ · (P₂O₅)_{1.5} · (H₂O)_{0.5} 扣除相应的组分。水含量设定为在接近固相线时矿物组合刚好饱和和所需水量 (White *et al.*, 2001)。两个样品经过上述处理的有效全岩成分如表 5 所列。

6.1 样品 BT58-1 的视剖面

石榴基性麻粒岩样品 BT58-1 在 NCFMASHTO 体系下的 P - T 视剖面图如图 14 所示。计算的温压范围为 $P = 0.6 \sim 1.5$ GPa, $T = 650 \sim 950$ °C。主要矿物的相关系为: 高温条件下会出现熔体, 固相线主要受温度控制, 范围为 $T = 660 \sim 840$ °C。金红石和石榴石的相界线主要受控于压力并于低压方向消失, 取而代之的主要为斜长石和钛铁矿。角闪石在高温高压条件下消失, 其消失温度与体系中的 H₂O 含量有一

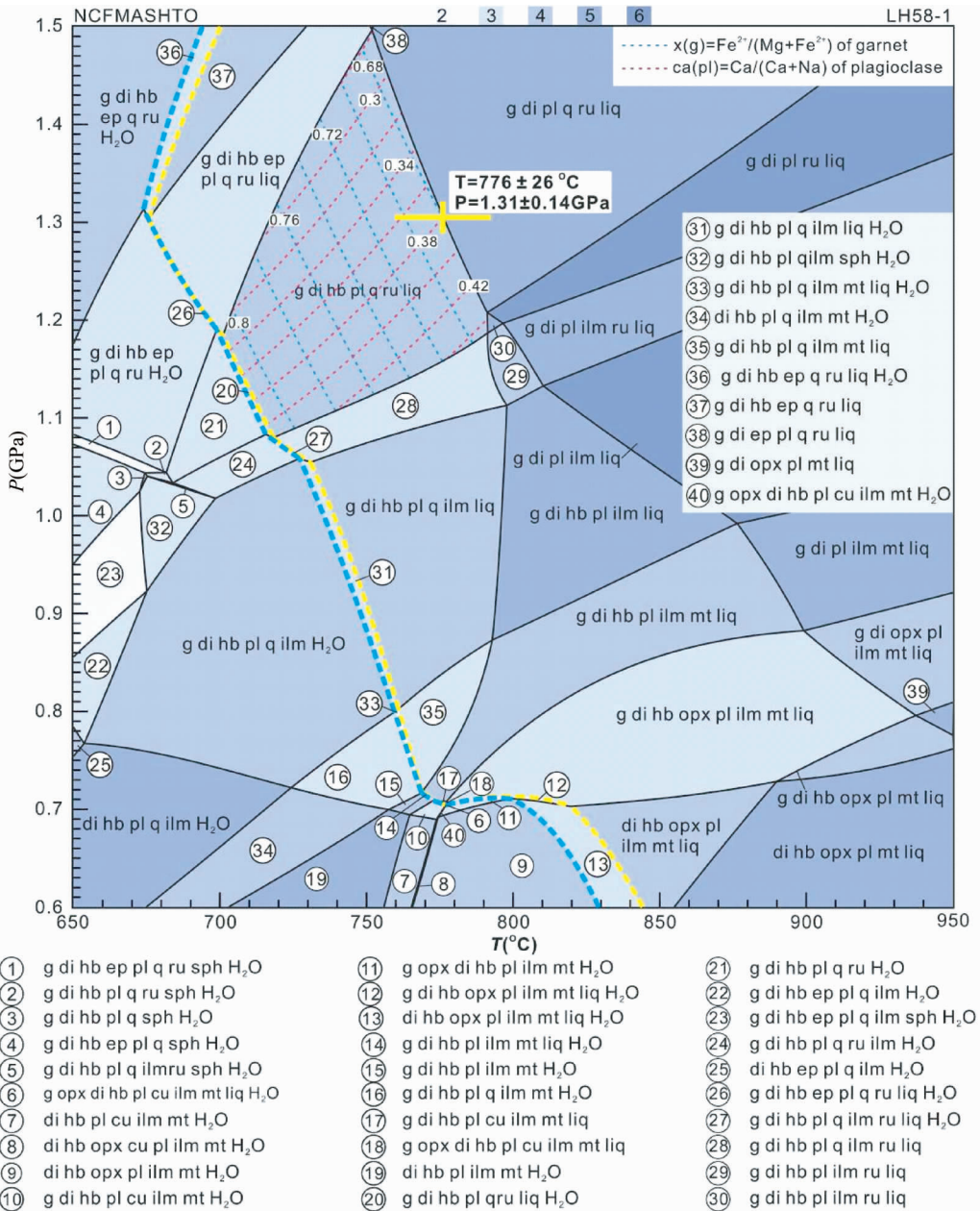


图 14 样品 BT58-1 在 NCFMASHTO 体系下 P - T 视剖面图

g-石榴石; di-单斜辉石; hb-角闪石; opx-斜方辉石; pl-斜长石; q-石英; ilm-钛铁矿; mt-磁铁矿; ru-金红石

Fig. 14 P - T pseudosections for sample BT58-1-1 in the systems NCFMASHTO

g-garnet; di-clinopyroxene; hb-hornblende; opx-orthopyroxene; pl-plagioclase; q-quartz; ilm-ilmenite; mt-magnetite; ru-rutile

定相关性。低压高温区域出现斜方辉石,而石英在高温低压区域方向消失。

详细的矿物化学研究表明,石榴基性麻粒岩样品 BT58-1 中石榴石 $x(g) = \text{Fe}^{2+} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ 变化于 0.68 ~ 0.72 之间,斜长石 $ca(pl)$ 为 0.38 ~ 0.42,它们被投入温压条件为 700 ~ 800°C/1.08 ~ 1.50GPs 的 g-di-hb-pl-q-ru-liq 中,与岩相学观察到的基质矿物组合一致。考虑到在该组合中,石榴石的 $x(g)$ 等值线在相图的 g-di-hb-pl-q-ru-liq 区域内呈负斜率,并主要受控于温度,随着温度的增加而减低,而斜长石中

的钙长石 $ca(pl)$ 含量等值线呈正斜率,并强烈受控于压力,随着压力的增加而降低。因此,本文联合采用斜长石最小的 $ca(pl)$ 等值线和石榴石最小的 $x(g)$ 等值线来确定峰期温压条件,得到的样品 BT58-1 近峰期温压条件为 $P = 1.31 \text{ GPa}$, $T = 776 \text{ } ^\circ\text{C}$ (图 14)。在 g-di-hb-pl-q-ru-liq 区域内, THERMOCALC 对斜长石 $ca(pl)$ 等值线和石榴石 $x(g)$ 等值线计算的压力误差和温度误差分别为 0.14GPa 和 26°C (2σ)。因此,综合以上分析可知,样品 BT58-1 记录的峰期高压麻粒岩相变质作用的温压条件为 $P = 1.31 \pm 0.14 \text{ GPa}$, $T = 776 \pm 26 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

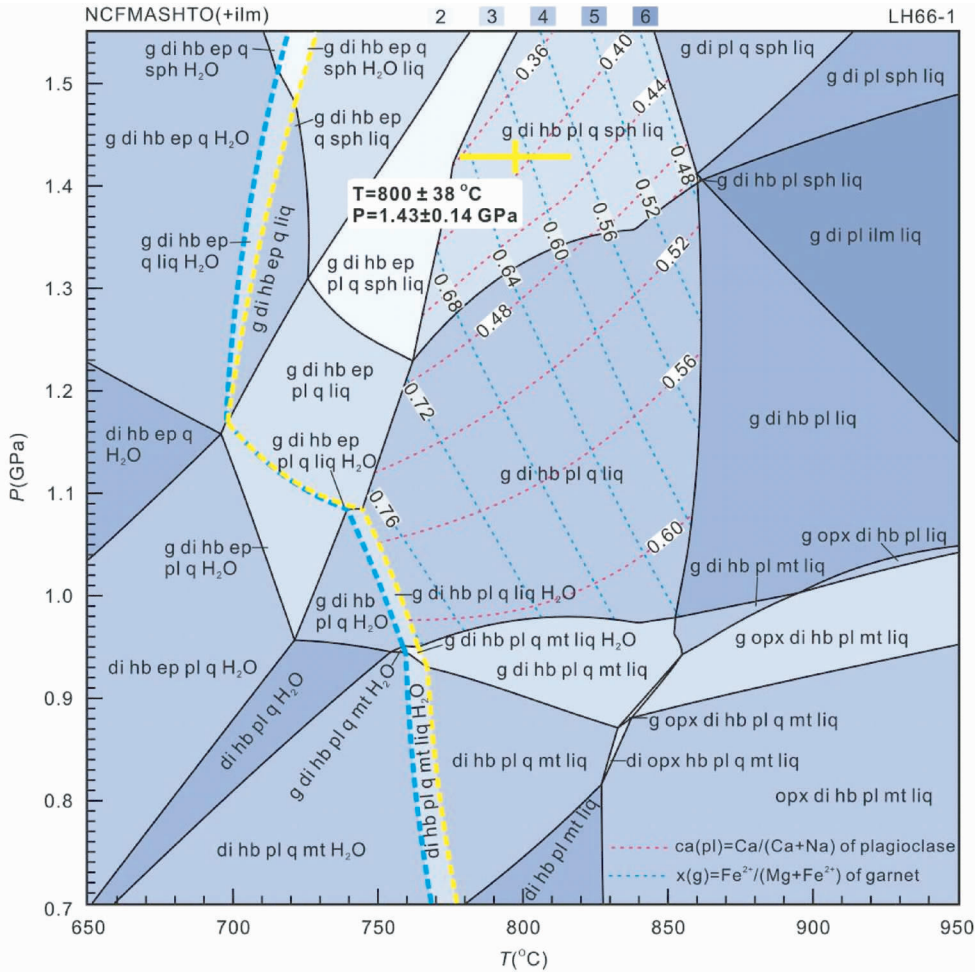


图 15 样品 LH66-1 在 NCFMASHTO 体系下 P - T 视剖面图

g-石榴石; di-单斜辉石; hb-角闪石; opx-斜方辉石; pl-斜长石; q-石英; ilm-钛铁矿; mt-磁铁矿; sph-榍石

Fig. 15 P - T pseudosections for sample LH66-1 in the systems NCFMASHTO

g-garnet; di-clinopyroxene; hb-hornblende; opx-orthopyroxene; pl-plagioclase; q-quartz; ilm-ilmenite; mt-magnetite; sph-sphene

6.2 样品 LH66-1 的视剖面

高压麻粒岩样品 LH66-1 在 NCFMASHTO 体系下的 P - T 视剖面图如图 15。该样品主要矿物相的拓扑关系大体上与样品 BT58-1 类似(图 14), 相界线的具体位置因全岩成分不同而有些差异, 例如该样品相对低的 CaO 含量, 其石榴石出现压力比 BT58-1 中高 0.15GPa 左右。角闪石的稳定温度也相对较高。

详细的矿物化学研究表明, 石榴基性麻粒岩样品 LH66-1 中石榴石 $x(g)$ 变化于 0.61 ~ 0.70 之间, 斜长石 $ca(pl)$ 为 0.39 ~ 0.43, 它们被投入温压条件为 $T = 760 \sim 860^{\circ}\text{C}$, $P > 1.23\text{GPa}$ 的 g-di-hb-pl-q-ilm-sph-liq 区域, 与岩相学观察到的基质矿物组合一致。采用斜长石最小的 $ca(pl)$ 等值线和石榴石最小的 $x(g)$ 等值线来确定峰期温压条件, 得到样品 LH66-1 近峰期温压条件为 $P = 1.43\text{GPa}$, $T = 800^{\circ}\text{C}$ (图 15)。在 g-di-hb-pl-q-ilm-sph-liq 区域, THERMOCALC 对斜长石 ca

(pl) 等值线和石榴石 $x(g)$ 等值线计算的压力误差和温度误差分别为 0.14GPa 和 38°C (2σ)。因此, 综合以上分析可知, 样品 BT58-1 记录的峰期高压麻粒岩相变质作用的温压条件为 $P = 1.43 \pm 0.14\text{GPa}$, $T = 800 \pm 38^{\circ}\text{C}$ 。

7 锆石 CL 图像特征

7.1 样品 BT58-1

石榴基性麻粒岩样品 BT58-1 锆石多数为紫红色, 少数锆石晶体表面裂纹发育, 有的锆石因蜕晶质化作用, 而表面形态模糊不清, 不同成因类型的锆石大小为 $50 \sim 150\mu\text{m}$ 。根据该类岩石中锆石透射光与阴极发光图像、晶体形态和矿物包体等特征, 可将其划分为两种类型(图 16)。第一类锆石大部分具有浑圆状-椭圆状晶形, 在 CL 图像上, 普遍发育核边结构, 核部具有较为均匀的弱阴极发光效应(黑色-灰黑色), 而其边部则相对较窄(小于 $30\mu\text{m}$), 并具有十分均匀的

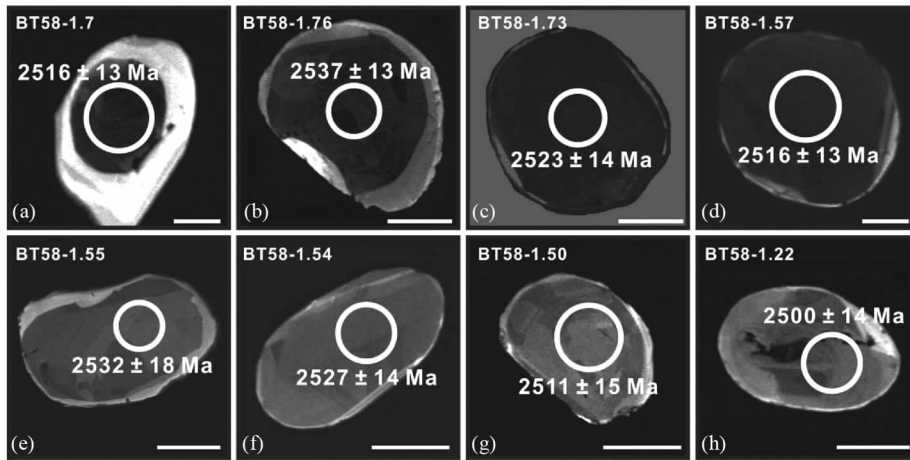


图 16 石榴基性麻粒岩(LH58-1) 锆石阴极发光图像及 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

(a) 第 7 粒锆石具有弱发光效应的变质核和强发光效应的变质边, 以及核部 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; (b) 第 76 粒锆石具有弱发光效应的变质核和中等发光效应的变质窄边, 以及核部 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; (c) 第 73 粒锆石具有弱发光效应的变质锆石, 以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; (d) 第 57 粒锆石具有弱-中等发光效应变质锆石, 以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; (e) 第 55 粒锆石具有弱发光效应的变质核和中等发光效应的变质窄边, 以及核部 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; (f) 第 73 粒锆石具有中等发光效应的变质锆石, 以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; (g) 第 50 粒锆石具有中等发光效应的变质锆石, 以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; (h) 第 22 粒锆石具有中等发光效应的变质锆石, 以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; 图中比例尺均为 $50\mu\text{m}$

Fig. 16 cathodoluminescence (CL) images and LA-ICP-MS U-Pb ages of host zircons from the garnet mafic granulite (LH58-1)

(a) zircon grain BT58-1.7 showing a low-luminescent metamorphic core and high-luminescent metamorphic rim, and a core $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (b) zircon grain BT58-1.76 showing a low-luminescent metamorphic core and middle-luminescent metamorphic rim, and a core $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (c) metamorphic zircon grain BT58-1.73 showing a low-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (d) metamorphic zircon grain BT58-1.57 showing a low-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (e) zircon grain BT58-1.55 showing a middle-luminescent metamorphic core and high-luminescent metamorphic rim, and a core $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (f) metamorphic zircon grain BT58-1.54 showing a middle-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (g) metamorphic zircon grain BT58-1.50 showing a middle-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (h) metamorphic zircon grain BT58-1.22 showing a middle-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; the scale bar is $50\mu\text{m}$ in Fig. 16

强发光效应(白色-灰白色)。扫描电镜与激光拉曼分析表明该类锆石核部与边部均不含特征变质矿物包体。第二类锆石具有浑圆状-椭圆状或短柱状晶形, 在 CL 图像上, 大部分锆石具有较为均匀的中等至弱发光效应(灰黑色-灰白色), 有的锆石内部发育冷杉状分带结构和扇形分带结构(图 16; Vavra *et al.*, 1996), 指示该类锆石是在高级变质条件下形成的新生锆石。扫描电镜与激光拉曼分析表明该类锆石核部与边部均不含特征变质矿物包体, 仅含有少量磷灰石与石英等矿物包体。

第二类锆石具有浑圆状-椭圆状, 在 CL 图像上, 大部分浑圆状锆石具有中等至弱(灰黑色-灰白色)且相对均匀发光效应, 少数锆石内部发育冷杉状分带结构和扇形分带结构(图 17d; Vavra *et al.*, 1996), 指示该类锆石是在高级变质条件下形成的新生锆石。扫描电镜与激光拉曼分析表明该类锆石核部与边部均不含特征变质矿物包体, 仅含有少量磷灰石与石英等矿物包体。

8 锆石 U-Pb 定年结果

7.2 样品 LH66-1

石榴基性麻粒岩样品 LH66-1 锆石多数亦为紫红色, 少数锆石晶体表面裂纹发育, 有的锆石因蛭晶质化作用, 而表面形态模糊不清, 不同成因类型的锆石大小为 $30\sim 150\mu\text{m}$ 。根据该类岩石中锆石透射光与阴极发光图像、晶体形态和矿物包体等特征, 亦可将其划分为两种类型(图 17)。第一类锆石大部分具有浑圆状-椭圆状晶形, 在 CL 图像上, 普遍发育核-边结构, 核部具有较为均匀的弱阴极发光效应(黑色-灰黑色), 而其边部则相对较窄(小于 $20\mu\text{m}$), 并具有较强(白色-灰白色)且相对均匀的发光效应。扫描电镜与激光拉曼分析表明该类锆石核部与边部均不含特征变质矿物包体。

8.1 样品 BT58-1

石榴基性麻粒岩样品 BT58-1 中 21 个变质锆石微区测点分析结果如图 18a 与表 6 所示。从图 18a 与表 6 可以看出, 21 个变质锆石微区的 Th 与 U 含量变化范围较大, 分别介于 $21\times 10^{-6}\sim 469\times 10^{-6}$ 与 $49\times 10^{-6}\sim 615\times 10^{-6}$ 之间, 相应的 Th/U 比值变化于 0.20~1.16 之间(表 6)。21 个测试点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化于 $2537\pm 13\text{Ma}\sim 2498\pm 12\text{Ma}$ 之间, 相应的加权平均年龄为 $2517\pm 6\text{Ma}$ 。在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 关系图解中(图 18a)中, 该类锆石所有测试点皆位于谐和线及其附近, 结合其 CL 图像特征, 该组 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄应代表石榴基性麻粒岩样品 BT58-1 近峰期高压麻粒岩相

表6 武川石榴基性麻粒岩(BT58-1)锆石 LA-ICP-MS 定年结果

Table 6 LA-ICP-MS analyses of zircons from the Wuchuan garnet mafic granulites (BT58-1)

测点号	含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	^{204}Pb	^{232}Th	^{238}U		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ
BT58-1.76	48	40	91	0.44	0.4732	0.0055	10.9554	0.1226	0.1679	0.0013	2498	29	2519	28	2537	13
BT58-1.55	28	26	52	0.50	0.4728	0.0055	10.9152	0.1407	0.1674	0.0018	2496	29	2516	32	2532	18
BT58-1.46	47	42	89	0.48	0.4747	0.0045	10.9568	0.1063	0.1674	0.0013	2504	24	2519	24	2532	13
BT58-1.64	69	42	135	0.31	0.4731	0.0042	10.9078	0.1070	0.1672	0.0014	2497	22	2515	25	2530	14
BT58-1.54	34	29	65	0.45	0.4692	0.0047	10.8004	0.1148	0.1670	0.0014	2480	25	2506	27	2527	14
BT58-1.29	79	61	152	0.40	0.4760	0.0065	10.9325	0.1482	0.1666	0.0014	2510	34	2517	34	2524	14
BT58-1.73	245	469	404	1.16	0.4745	0.0054	10.8958	0.1175	0.1665	0.0013	2503	29	2514	27	2523	14
BT58-1.61	151	102	296	0.35	0.4696	0.0044	10.7766	0.0925	0.1665	0.0011	2482	23	2504	21	2522	11
BT58-1.66	201	178	386	0.46	0.4670	0.0051	10.6849	0.1070	0.1659	0.0012	2470	27	2496	25	2517	12
BT58-1.5	217	85	428	0.20	0.4792	0.0036	10.9640	0.0874	0.1659	0.0016	2524	19	2520	20	2517	16
BT58-1.6	159	134	300	0.45	0.4763	0.0052	10.8976	0.1117	0.1659	0.0015	2511	28	2514	26	2517	15
BT58-1.57	114	70	224	0.31	0.4716	0.0055	10.7825	0.1178	0.1658	0.0013	2491	29	2505	27	2516	13
BT58-1.7	76	54	146	0.37	0.4764	0.0054	10.8903	0.1182	0.1658	0.0013	2512	29	2514	27	2516	13
BT58-1.50	35	32	67	0.49	0.4758	0.0048	10.8497	0.1173	0.1654	0.0015	2509	26	2510	27	2511	15
BT58-1.59	25	21	49	0.42	0.4652	0.0043	10.6044	0.1198	0.1653	0.0016	2463	23	2489	28	2511	16
BT58-1.70	115	144	210	0.68	0.4661	0.0052	10.6085	0.1027	0.1651	0.0015	2466	28	2489	24	2508	16
BT58-1.2	131	74	258	0.29	0.4733	0.0060	10.7714	0.1209	0.1651	0.0012	2498	32	2504	28	2508	12
BT58-1.3	311	213	615	0.35	0.4648	0.0039	10.5455	0.0893	0.1646	0.0016	2461	21	2484	21	2503	16
BT58-1.45	62	58	118	0.49	0.4720	0.0068	10.7044	0.1446	0.1645	0.0013	2492	36	2498	34	2502	13
BT58-1.22	51	45	99	0.45	0.4673	0.0086	10.5825	0.1568	0.1643	0.0014	2472	46	2487	37	2500	14
BT58-1.67	61	61	115	0.53	0.4653	0.0045	10.5276	0.0960	0.1641	0.0012	2463	24	2482	23	2498	12

变质时代。

8.2 样品 LH66-1

石榴基性麻粒岩样品 LH66-1 中 42 个变质锆石微区测点分析结果如图 18b 与表 7 所示。从图 18b 与表 7 可以看出,42 个变质锆石微区的 Th 与 U 含量变化范围较大,分别介于 $1 \times 10^{-6} \sim 408 \times 10^{-6}$ 与 $5 \times 10^{-6} \sim 1198 \times 10^{-6}$ 之间,相应的 Th/U 比值变化于 0.18 ~ 0.72 之间(表 7)。42 个测试点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化于 $2562 \pm 51\text{Ma} \sim 2442 \pm 51\text{Ma}$ 之间,相应的加权平均年龄为 $2512 \pm 16\text{Ma}$ 。在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 关系图解中(图 18b)中,该类锆石所有测试点皆位于谐和线及其附近,结合其 CL 图像特征,该组 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄应代表石榴基性麻粒岩样品 BT58-1 近峰期高压麻粒岩变质时代。

9 讨论与结论

9.1 原岩形成时代与变质时代

9.1.1 原岩形成时代

在 20 世纪 80 年代初,前人曾对本区基性麻粒岩的原岩形成时代开展了一些初步的研究。其中,早期的研究主要根据野外地质关系与区域地质对比。在区域上,包括本文研究在内的深变质基性岩脉岩/岩墙群切穿了区内英云闪长质片

麻岩与花岗质片麻岩,结合对区内朱拉沟英云闪长质片麻岩开展了锆石单颗粒 U-Pb 定年结果(结果显示其上交点年龄为 $2455 \pm 5\text{Ma}$),提出本区深变质的基性脉岩的原岩形成于新太古代晚期的认识(李树勋等,1987)。

然而尽管本文并未在 2 件石榴基性麻粒岩样品发现其原岩形成阶段形成的岩浆锆石(辉长质-闪长质高温板状环带岩浆锆石特征)。但是,野外地质关系同样表明,本文所研究的石榴基性麻粒岩侵入英云闪长质片麻岩(BT58-2)之中,因此,其原岩形成时代应小于英云闪长质片麻岩的原岩形成时代。最近,刘建辉等(2016,未发表数据)对石榴基性麻粒岩相邻的围岩英云闪长质片麻岩(BT58-2)中岩浆锆石定年表明,其原岩时代约为 2550Ma 。因此,结合本文所研究的两件石榴基性麻粒岩样品普遍记录了约 $2520 \sim 2510\text{Ma}$ 的变质年龄,本文初步推测其原岩时代约为 $2550 \sim 2510\text{Ma}$,更准确的原岩形成时代限定还需要开展进一步的详细研究。

上述有关武川石榴基性麻粒岩原岩形成时代的初步认识,得到了西部陆块区域性基性(辉长辉绿质/玄武质)岩浆活动对比研究的进一步支持。近年来,越来越多的同位素年代学研究表明(表 8),无论是在武川高级片麻岩地体还是在固阳花岗岩-绿岩地体中,新太古代晚期基性岩浆作用具有区域性分布的特点,如 Dong *et al.* (2012) 报道了西乌兰不浪镇壕赖村一带原岩时代为 $2545 \pm 10\text{Ma}$ 的黑云二辉麻粒岩。Zhang *et al.* (2014) 在西乌兰不浪镇一带也报道了原岩时代为 $2511 \pm 12\text{Ma}$ 的变辉长岩脉。前人(陈亮,2007;刘利等,

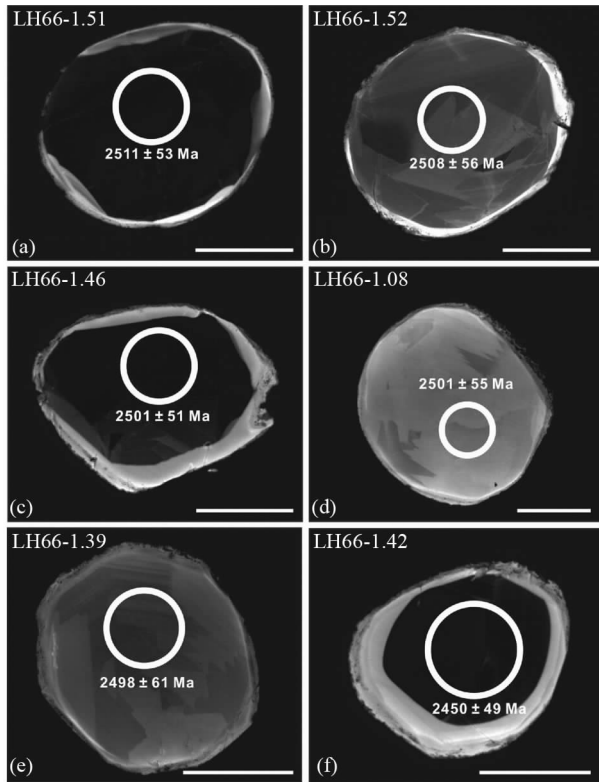


图 17 石榴基性麻粒岩 (LH66-1) 锆石阴极发光图像及 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

(a) 第 51 粒锆石具有弱发光效应的变质核和强发光效应的变质窄边, 以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; (b) 第 52 粒锆石具有中等强度均匀发光效应的变质核和强发光效应的变质窄边, 以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; (c) 第 46 粒锆石具有弱发光效应的变质核和强发光效应的变质边, 以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; (d) 第 08 粒锆石具有中等强度的发光效应变质锆石, 以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; (e) 第 39 粒锆石具有中等强度的发光效应变质锆石, 以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; (f) 第 42 粒锆石具有弱发光效应的变质核和强发光效应的变质边, 以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄; 图中比例尺均为 $50\mu\text{m}$

Fig. 17 cathodoluminescence (CL) images and LA-ICP-MS U-Pb ages of host zircons from the garnet mafic granulite (LH66-1)

(a) zircon grain LH66-1. 51 showing a low-luminescent metamorphic core and high-luminescent metamorphic rim, and a core $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (b) zircon grain LH66-1. 52 showing a middle-luminescent metamorphic core and high-luminescent metamorphic rim, and a core $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (c) zircon grain LH66-1. 46 showing a low-luminescent metamorphic core and high-luminescent metamorphic rim, and a core $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (d) metamorphic zircon grain LH66-1. 08 showing a middle-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (e) metamorphic zircon grain LH66-1. 39 showing a middle-luminescent CL image, and a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; (f) zircon grain LH66-1. 42 showing a low-luminescent metamorphic core and high-luminescent metamorphic rim, and a core $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age; the scale bar is $50\mu\text{m}$ in Fig. 17

2012; Ma *et al.*, 2014, 2016) 还在研究区西部固阳花岗岩-绿岩地体中也发现了许多原岩形成时代为 2550 ~ 2500Ma 的斜

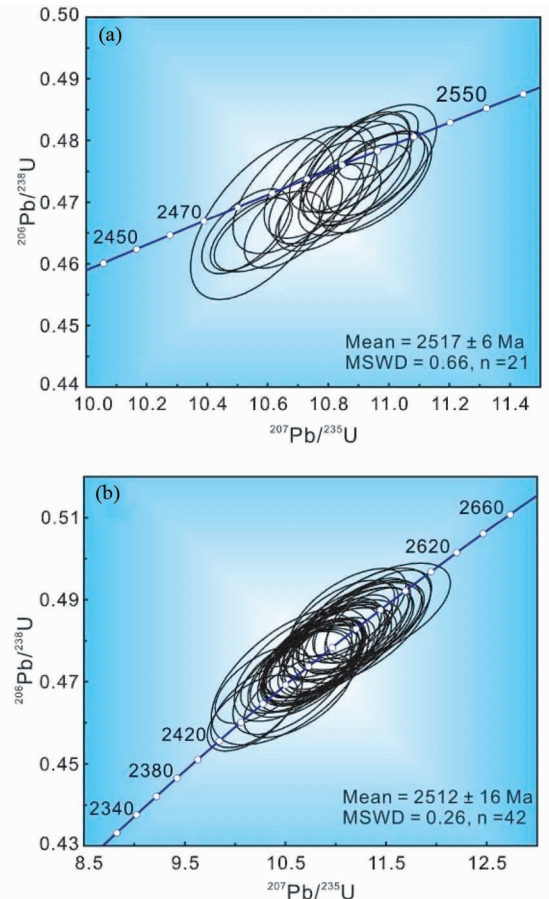


图 18 武川石榴基性麻粒岩锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄关系图

(a) 样品 BT58-1; (b) 样品 LH66-1

Fig. 18 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ diagrams showing U-Pb analyses for zircons from the Wuchuang garnet mafic granulites in the Yinshan Block

(a) sample BT58-1; (b) sample LH66-1

长角闪岩。此外, Wan *et al.* (2013a) 与 Liu *et al.* (2014) 在阴山陆块南部的大青山-乌拉山变质地体中也解析出大量约 2500 Ma 的变基性岩脉或岩墙。

从以上研究资料分析可知, 包括大青山-乌拉山变质地体在内的华北克拉通西部陆块的新太古代晚期 2550 ~ 2500Ma 的基性岩浆活动, 其分布范围较以前认为的更为广泛。目前, 有关它们的区域岩石组合特征、岩石成因及其构造意义还存在不同的认识, 有待更进一步的详细研究加以明确。

9.1.2 变质时代

随着 SIMS/LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 技术的广泛应用, 阴山陆块早前寒武纪基底岩石变质时代已得到较为准确测定。在武川高级片麻岩地体, 无论是变质镁铁-超镁铁质岩类、新太古代变质表壳岩系还是广布的闪长质-花岗质片麻岩类, 它们都不同程度地记录了约 2500Ma 的变质年龄 (表 8), 如

表 7 武川石榴基性麻粒岩(LH66-1)锆石 LA-ICP-MS 定年结果

Table 7 LA-ICP-MS analyses of zircons from the Wuchuan garnet mafic granulites (LH66-1)

测点号	含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	^{204}Pb	^{232}Th	^{238}U		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ
LH66-1.25	21	6.07	20.75	0.29	0.48628	0.00722	0.17042	0.00528	11.42917	0.34455	2555	31	2559	28	2562	51
LH66-1.76	5	22.82	64.38	0.35	0.48674	0.00802	0.16984	0.00737	11.40156	0.48637	2557	35	2557	40	2556	71
LH66-1.03	20	44.63	128.7	0.35	0.48385	0.00598	0.16944	0.00422	11.30734	0.27494	2544	26	2549	23	2552	41
LH66-1.35	15	2.87	8.47	0.34	0.48367	0.00925	0.16877	0.007	11.25761	0.45257	2543	40	2545	37	2545	68
LH66-1.67	6	49.61	162.2	0.31	0.48371	0.00709	0.16855	0.00637	11.24455	0.41791	2543	31	2544	35	2543	62
LH66-1.17	20	12.87	36.99	0.35	0.48497	0.0068	0.16842	0.00482	11.26497	0.31444	2549	30	2545	26	2542	47
LH66-1.58	16	9.86	31.87	0.31	0.48351	0.00748	0.16841	0.00626	11.23045	0.40895	2543	32	2542	34	2542	61
LH66-1.55	18	49.39	112.0	0.44	0.48278	0.00675	0.16814	0.00569	11.19529	0.37194	2539	29	2540	31	2539	56
LH66-1.75	17	26.7	59.09	0.45	0.48228	0.00783	0.16763	0.00718	11.15032	0.46936	2537	34	2536	39	2534	70
LH66-1.65	9	19.76	45.45	0.43	0.48175	0.00744	0.16753	0.00652	11.13074	0.42522	2535	32	2534	36	2533	64
LH66-1.11	15	19.26	43.72	0.44	0.48151	0.00639	0.16745	0.00449	11.12035	0.2909	2534	28	2533	24	2532	44
LH66-1.13	23	32.14	82.57	0.39	0.48494	0.00618	0.1674	0.00429	11.19597	0.28026	2549	27	2540	23	2532	42
LH66-1.18	15	5.74	19.8	0.29	0.47839	0.00716	0.16655	0.00514	10.98874	0.32947	2520	31	2522	28	2523	51
LH66-1.45	14	40.68	114.4	0.36	0.47971	0.00641	0.16639	0.00508	11.00863	0.32964	2526	28	2524	28	2522	50
LH66-1.49	23	56.43	92.05	0.61	0.47849	0.00681	0.16645	0.00548	10.98388	0.35386	2521	30	2522	30	2522	54
LH66-1.71	11	7.85	29.39	0.27	0.47815	0.00781	0.16627	0.00701	10.96521	0.45353	2519	34	2520	38	2521	69
LH66-1.73	20	35.27	194.4	0.18	0.47717	0.00729	0.16622	0.00675	10.93936	0.43685	2515	32	2518	37	2520	67
LH66-1.41	21	50.69	102.7	0.49	0.47606	0.00633	0.16614	0.00495	10.9079	0.31832	2510	28	2515	27	2519	49
LH66-1.54	10	15.02	54.45	0.28	0.4869	0.00706	0.16569	0.00573	11.12634	0.37712	2557	31	2534	32	2515	57
LH66-1.07	10	77.9	108.6	0.72	0.47607	0.00596	0.16567	0.00417	10.87763	0.26736	2510	26	2513	23	2514	42
LH66-1.74	8	93.25	372.1	0.25	0.47714	0.00719	0.16557	0.00668	10.89583	0.43309	2515	31	2514	37	2513	66
LH66-1.43	12	70.63	158.1	0.45	0.48071	0.00638	0.16541	0.00495	10.96617	0.32212	2530	28	2520	27	2512	50
LH66-1.51	13	49.19	170.1	0.29	0.48478	0.00657	0.16534	0.00533	11.05451	0.34974	2548	29	2528	29	2511	53
LH66-1.34	28	4.10	14.49	0.28	0.4766	0.00796	0.16524	0.00598	10.86111	0.38191	2513	35	2511	33	2510	60
LH66-1.40	20	24.77	52.31	0.47	0.47413	0.0066	0.165	0.00511	10.78954	0.32696	2502	29	2505	28	2508	51
LH66-1.52	10	18.5	57.86	0.32	0.46663	0.00673	0.16509	0.00564	10.62435	0.35548	2469	30	2491	31	2508	56
LH66-1.56	28	66.79	367.2	0.18	0.47394	0.00649	0.16504	0.00552	10.78784	0.3542	2501	28	2505	31	2508	55
LH66-1.37	23	42.76	85.98	0.50	0.47571	0.00627	0.16466	0.00473	10.80271	0.30381	2509	27	2506	26	2504	48
LH66-1.38	20	8.30	31.54	0.26	0.47505	0.00693	0.16469	0.00526	10.78959	0.33633	2506	30	2505	29	2504	53
LH66-1.08	16	5.62	15.54	0.36	0.47403	0.0075	0.16434	0.00542	10.74436	0.34396	2501	33	2501	30	2501	55
LH66-1.44	19	24.73	94.16	0.26	0.47428	0.00636	0.16431	0.00499	10.74788	0.32018	2502	28	2502	28	2501	50
LH66-1.46	23	43.21	116.5	0.37	0.47491	0.00642	0.16435	0.00509	10.76469	0.32715	2505	28	2503	28	2501	51
LH66-1.39	26	4.62	16.18	0.29	0.4733	0.00791	0.16404	0.00603	10.70734	0.38313	2498	35	2498	33	2498	61
LH66-1.16	26	18.59	45.19	0.41	0.47553	0.00628	0.16364	0.0044	10.73197	0.28152	2508	27	2500	24	2494	45
LH66-1.48	8	15.35	60.42	0.25	0.47269	0.00659	0.1635	0.00526	10.65879	0.33608	2495	29	2494	29	2492	53
LH66-1.68	19	407.7	1198	0.34	0.47269	0.00683	0.16339	0.00615	10.65174	0.39431	2495	30	2493	34	2491	62
LH66-1.23	26	3.69	9.68	0.38	0.46975	0.0083	0.16306	0.00616	10.56415	0.3867	2483	36	2486	34	2488	62
LH66-1.06	37	1.46	4.85	0.30	0.47131	0.01102	0.16227	0.00825	10.5484	0.51789	2489	48	2484	46	2480	83
LH66-1.21	13	3.25	8.45	0.38	0.47344	0.00863	0.16234	0.00634	10.60013	0.40118	2499	38	2489	35	2480	64
LH66-1.29	28	15.63	32.97	0.47	0.46395	0.00659	0.15962	0.0048	10.21359	0.29992	2457	29	2454	27	2452	50
LH66-1.42	8	63.52	136.2	0.47	0.46236	0.00608	0.15949	0.00472	10.17029	0.29518	2450	27	2450	27	2450	49
LH66-1.47	21	45.98	254.8	0.18	0.46925	0.00621	0.15867	0.00485	10.26855	0.30822	2480	27	2459	28	2442	51

Dong *et al.* (2012)报道了西乌兰不浪一带基性麻粒岩记录了 $2503 \pm 10\text{Ma}$ 的变质年龄。本文 LA-ICP-MS 锆石定年结果表明, 2 件石榴基性麻粒岩中变质锆石均记录了 $2520 \sim 2500\text{Ma}$ 的变质年龄, 它们可能代表了石榴基性麻粒岩近峰期高压麻粒岩相变质时代。这些新近的年代学资料充分表明, 与华北克拉通其它太古宙变质地体类似, 武川高级片麻

岩地体亦经历了约 2500Ma 区域性高级变质作用。此外, 如表 8 所示, 与华北克拉通东部陆块中其它太古宙变质地体类似, 本区约 2500Ma 区域变质作用与区域上广泛分布的基性-中性-酸性岩浆作用在发生时间上非常接近。大体上, 其变质作用发生的时间要比同期岩浆作用发生的时间要晚 $10 \sim 50\text{Myr}$, 有的甚至几乎同时发生, 这些同位素年代学的基本

表 8 阴山陆块锆石 U-Pb 年龄统计表

Table 8 Synthesis of zircon U-Pb ages for the different rocks from the Yinshan Block

岩性	岩浆年龄 (Ma)	碎屑锆石年龄 (Ma)	变质年龄 (Ma)	定年方法	资料来源
奥长花岗岩脉	2502 ± 6			SHRIMP	Jian <i>et al.</i> , 2012
伟晶岩脉	2508 ± 17			SHRIMP	Jian <i>et al.</i> , 2012
安山岩	2510 ± 7			SHRIMP	Jian <i>et al.</i> , 2012
英安岩	2515 ± 10			LA-ICP-MS	陈亮, 2007
玄武岩	2516 ± 10			LA-ICP-MS	陈亮, 2007
高镁安山岩	2533 ± 5			SHRIMP	Jian <i>et al.</i> , 2012
埃达克岩	2556 ± 6			SHRIMP	Jian <i>et al.</i> , 2012
玄武岩	2562 ± 14			Camerca	刘利等, 2012
赞岐岩	2520 ± 6			SHRIMP	简平等, 2005
赞岐岩	2523 ± 7			LA-ICP-MS	Ma <i>et al.</i> , 2013a
赞岐岩	2520 ± 9			SHRIMP	Jian <i>et al.</i> , 2012
TTG	2515 ± 6			SHRIMP	Jian <i>et al.</i> , 2012
TTG	2516 ± 7			SHRIMP	Jian <i>et al.</i> , 2012
TTG	2534 ± 7			SHRIMP	任云伟, 2010
铁镁质麻粒岩	2544 ± 5		2503 ± 12	SHRIMP	Jian <i>et al.</i> , 2012
角闪二辉麻粒岩	2516 ± 16		2472 ± 14	SHRIMP	董晓杰, 2009
浅色二辉麻粒岩	2545 ± 10		2503 ± 10	SHRIMP	董晓杰, 2009
紫苏花岗岩	2533 ± 15		2490 ± 11	LA-ICP-MS	Ma <i>et al.</i> , 2013b
紫苏石英闪长岩	2524 ± 17		2498 ± 3	LA-ICP-MS	Ma <i>et al.</i> , 2013b
紫苏花岗岩	2535 ± 5		2506 ± 9	SHRIMP	董晓杰, 2007
角闪石片麻岩	2526 ± 5			SHRIMP	Jian <i>et al.</i> , 2012
紫苏花岗闪长岩	2525 ± 8			SHRIMP	Jian <i>et al.</i> , 2012
高级变质花岗岩			2483 ± 20	SHRIMP	任云伟, 2010
高级变质花岗岩			2509 ± 7	SHRIMP	任云伟, 2010
高级变质花岗岩			2480 ± 15	LA-ICP-MS	Ma <i>et al.</i> , 2013a
蓝晶石榴二长片麻岩		2479 ± 8		SHRIMP	徐仲元等, 2011
蓝晶石榴二长片麻岩		2576 ~ 2732	2479 ± 21	Camerca	Wang <i>et al.</i> , 2015
花岗质片麻岩	2697 ± 11		2561 ± 18, 2539 ± 34	SHRIMP	Dong <i>et al.</i> , 2012
奥长花岗质片麻岩	2692 ± 17		2528 ± 16	SHRIMP	马铭株等, 2013
花岗质片麻岩	2581 ± 7			Camerca	Wang <i>et al.</i> , 2015
基性麻粒岩	2545 ± 10		2503 ± 10	SHRIMP	Dong <i>et al.</i> , 2012
黑云基性麻粒岩	2516 ± 15		2472 ± 14	SHRIMP	Dong <i>et al.</i> , 2012
紫苏花岗岩	2512 ± 10			Camerca	Zhang <i>et al.</i> , 2014
变质辉长岩	2511 ± 12			Camerca	Zhang <i>et al.</i> , 2014
紫苏石英闪长质片麻岩	2506 ± 9		2498 ± 22	SHRIMP	Dong <i>et al.</i> , 2012
角闪石岩			2502 ± 14	Camerca	Wang <i>et al.</i> , 2015
角闪石岩	2476 ± 8			LA-ICP-MS	Ma <i>et al.</i> , 2016
石榴基性麻粒岩			2517 ± 6	LA-ICP-MS	本文
石榴基性麻粒岩			2512 ± 16		

特征说明, 本区新太古代晚期 ~ 2500Ma 变质作用和 2550 ~ 2500Ma 岩浆作用是同一构造热事件的不同表征。

最近, 依据本区新近的锆石 U-Pb 年龄统计分析, 并结合区内岩浆作用演化序列与基本特征, 部分研究者认为阴山陆块在新太古代晚期经历了两期变质事件(蒙炳儒, 2007; 马旭东等, 2013)。其中, 早期约 2500Ma 为逆时针 $P-T$ 轨迹, 并且多具有等压冷却 (IBC) 演化过程, 这一期变质发生的时间正是大量绿岩带中上层位火山岩、TTG 片麻岩、紫苏花岗岩以及科马提质岩等岩石的形成时代相互叠置, 并推测这一期逆时针的变质作用应与洋脊俯冲作用有关。第二期变质作用

发生在约 2480Ma, 并以顺时针 $P-T$ 轨迹为特征(蒙炳儒, 2007), 发生在所有事件的最晚期, 暗示着板片俯冲结束, 发生碰撞造山, 并在这一时期形成大量的同碰撞花岗岩。然而值得注意的是, 约 2480Ma 的变质年龄, 也完全可能是晚期构造热事件导致早期约 2500Ma 的变质锆石微区记录的年龄失真, 而显得相对年轻。因此, 在新太古代晚期, 本区是否存在两期变质事件, 可能还需要更多有关锆石成因矿物学方面的研究工作加以明确。

9.2 高压麻粒岩相变质作用

长期以来, 许多研究者就华北克拉通阴山陆块变质基底

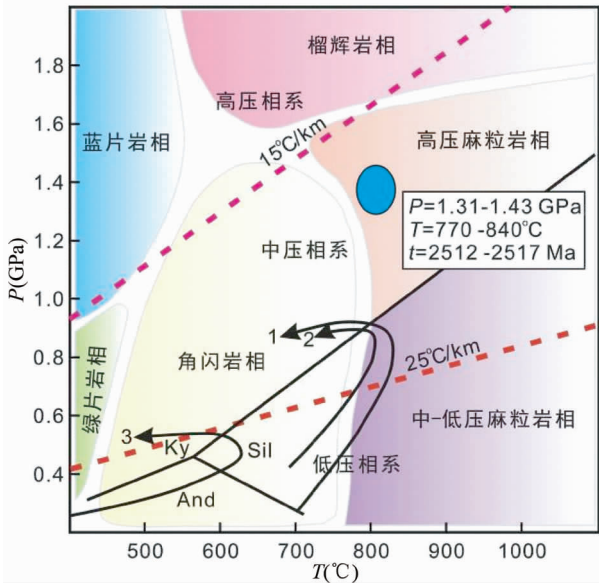


图 19 武川石榴基性麻粒岩变质 P - T 条件相图

1-朱拉沟石榴基性麻粒岩(金巍等,1991);2-大青山-乌拉山太古宙基性麻粒岩(Liu *et al.*, 1993);3-东五分子斜长角闪岩(刘喜山,1996);变质相界线据 Vernon and Clarke (2008);变质相系界线据 Miyashiro (1961);蓝晶石-红柱石-夕线石之间的矿物相转变反应线引自 Salje (1986)

Fig. 19 Metamorphic phase diagram showing the P - T condition of the Wuchuang garnet mafic granulites from the Yinshan Block

1-Zhulagou garnet mafic granulite (Jin *et al.*, 1991); 2-Daqingshan-Wulashan Late Archean mafic granulite (Liu *et al.*, 1993); 3-Dongwufenzi amphibolite (Liu, 1996); The metamorphic facies boundaries are after Vernon and Clarke (2008); The division of the metamorphic facies series is after Miyashiro (1961); The transition lines of Al_2SiO_5 were from Salje (1986)

岩石的变质作用进行了大量有益研究。李树勋等(1987)依据内蒙古中部地区(阴山陆块)前寒武纪区域变质岩石组合特征、变质变形作用与同位素年代学研究,首次提出阴山陆块(内蒙古中部地区)可进一步划分固阳(色尔腾山或东五分子)花岗岩-绿岩地体和武川(朱拉沟)高级片麻岩地体。前人(李树勋等,1987;刘喜山,1996)依据固阳花岗岩-绿岩地体中(石榴/含榴)斜长角闪岩中所保存的反应结构及矿物组合的空间变化规律,提出该区变质级别为绿片岩相-低角闪岩相,自南向北有从低绿片岩相到低角闪岩相顶部的变化趋势,具有逆时针 P - T 轨迹(图 19),建立该轨迹的关键变质反应结构或矿物相转变如下:(1)在南坝一带的斜长角闪岩中观察到近蓝绿色普通角闪石取代阳起石或者二者共存;(2)在北部哈布齐沟,在变基性岩中出现了含石榴石和透辉石的变质矿物组合,石榴石晶体内部含有细粒浑圆状钠质斜长石及褐色普通角闪石的包体;(3)在石榴斜长角闪岩内,普通角闪石颗粒的边上发育无色亚铁闪石的反应边,同时与亚铁闪石相接触的斜长石中钙长石分子含量由原来的 $An = 21$

转变为 $An = 8$,形成了亚铁闪石 + 钠长石的矿物组合(刘喜山,1996)。类似地,前人依据武川高级片麻岩地体(石榴)基性麻粒岩中所保存的变质反应结构和矿物组合特征,并结合温压估算结果,提出了本区高级变质杂岩也经历了逆时针的 P - T 轨迹(图 19),其关键变质反应结构或矿物相转变如下:(1)在阳泰沟及纳令沟地区石榴基性麻粒岩中的斜长角闪岩内柱状褐色普通角闪石颗粒边上生长由细粒紫苏辉石 + 透辉石 + 斜长石组成的高温变质矿物组合;(2)在石榴基性麻粒岩中还发育由细粒的石榴石 + 石英所组成链状集合体分布在中-粗的紫苏辉石、透辉石和斜长石之间(金巍等,1991;刘喜山,1996)。

然而值得指出的是,有关阴山陆块新太古代晚期变质作用的研究,前人曾开展的大量有益研究,并取得了许多十分重要研究进展,这些有关变质作用的研究资料为人们探究西部陆块乃至华北克拉通新太古代晚期地质事件演化序列及其地球动力学过程提供的重要的岩石学和变质作用方面的约束(Zhao *et al.*, 2001a, 2005)。但是,随着研究工作的不断深入,有关阴山陆块及其邻区(大青山-乌拉山变质地体)新太古代晚期高级变质作用研究也出现了新的问题,主要表现为:(1)武川高级片麻岩地体除了中-低压角闪岩相-麻粒岩相变质作用之外,是否存在区域性高压麻粒岩相变质作用;(2)本区“红眼圈结构”是否一定代表寄主岩石曾经历了逆时针的 P - T 轨迹,其产出形式是否具有多样性,其变质动力学解释是否存在多解性。

最近,董晓杰(2009,2012)对武川县西乌兰不浪地区高级变质杂岩进行了变质作用与同位素年代学的研究。结果表明,本区石榴基性麻粒岩可能记录了顺时针的 P - T 轨迹,除了发育“红眼圈结构”之外,还发育了“白眼圈结构”,即石榴石边部常发育了紫苏辉石 + 斜长石的后成合晶,利用传统地质温压计,将峰期变质条件限定在 $P = 1.0 \sim 1.2$ GPa, $T = 800 \sim 850$ °C,其峰期可能经历了高压麻粒岩相变质作用。

本文有关武川刘家窑子一带出露的石榴基性麻粒岩变质作用与同位素年代学的初步研究进一步表明,在新太古代晚期(2550 ~ 2500Ma),阴山陆块武川高级片麻岩地体可能曾经历了一次高压麻粒岩相变质作用。此外,最近前人(徐仲元等,2011;Wang *et al.*, 2015)还在武川高级片麻岩地体中还发现了含蓝晶石的高压泥质麻粒岩。这些特征无疑表明,在新太古代晚期武川高级片麻岩地体可能曾经历了区域性高压麻粒岩相变质作用。

与华北克拉通古元古代石榴基性麻粒岩所普遍发育的“白眼圈结构”不同,而与非洲西部东坦桑尼亚东部泛非带(Appel *et al.*, 1998)、澳大利亚西部 Rudall 杂岩(Smithies and Bagas, 1997)与辽西建平杂岩(魏春景等,2001)、东南极等地区(Liu *et al.*, 2009)与冀东地区(Duan *et al.*, 2015)的石榴基性麻粒岩类似,本文研究的石榴基性麻粒岩以发育高压麻粒岩相矿物组合为特征,即石榴石 + 单斜辉石 + 斜长石 + 角闪石 + 石英 + 铁-钛氧化物(Greed and Ringwood,

1967), 矿物化学分析与相平衡模拟表明, 它们记录的峰期 P - T 条件为 $P = 1.31 \sim 1.43 \text{ GPa}$, $T = 770 \sim 840^\circ\text{C}$ 。

9.3 “红眼圈结构”的变质动力学过程

如上所述, 前人对华北克拉通太古宙麻粒岩变质作用的研究时, 在华北克拉通许多太古宙变质地体, 均发现了一种与发育“白眼圈结构”不同的石榴基性麻粒岩, 一般地石榴石常作为环带、链状体或呈串珠状集合体, 围绕辉石类、斜长石与铁-钛氧化物等矿物呈反应边产出, 通俗称为“红眼圈结构”。许多研究者均对这种反应结构做了较为详细的研究(详见翟明国, 2009 的论述)。其中, 刘喜山(1994)通过对华北克拉通北缘武川高级片麻岩地体与大青山-乌拉山变质地体研究, 并结合其他研究者对冀东与密云变质杂岩的相关研究资料, 认为它们是通过如下特征变质反应形成: 斜方辉石 + 斜长石 = 石榴石 + 单斜辉石 + 石英, 角闪石 + 斜长石 = 石榴石 + 单斜辉石 + 石英, 磁铁矿 + 斜长石 = 石榴石 + 石英, 指示了降温或升压的变质演化过程, 大致对于逆时针 IBC 型 P - T 轨迹(金巍等, 1991; Liu *et al.*, 1993; 刘喜山, 1994)。Zhao *et al.* (1999a, b)总结了 1999 年前华北克拉通已发表的该类石榴基性麻粒岩(A 型基性麻粒岩)的研究资料, 提出了具有“红眼圈结构”的 A 型基性麻粒岩形成地幔柱构造环境下与幔源岩浆的底侵作用有关。与此同时, 也有研究者通过对怀安高级片麻岩地体石榴基性麻粒岩的详细研究, 结果表明, 石榴石与包裹矿物接触内侧边界十分平直, 石榴石或形成完全封闭的“红眼圈结构”或形成半封闭“C 型的红眼圈结构”, 表明石榴石与包裹矿物之间可能并不存在转变关系。并认为未被石榴石包裹的矿物组合在峰期阶段继续重结晶生长, 而包裹在石榴石中的矿物组合保留了峰期初始阶段的形状。石榴石与其包裹的矿物之间并不存在反应关系, 而应当是平衡共生的关系, 形成红眼圈结构是由于矿物结晶生长速度不同及生长空间的限制所致(刘福来, 1995; 卢良兆等, 1996)。

然而值得指出的是, 详细研究华北克拉通有关具有“红眼圈结构”的变质基性岩相关资料(卢良兆等, 1979; 陈曼云, 1989; 贺高品等, 1994; O'Brien *et al.*, 2005; 董晓杰, 2009; Duan *et al.*, 2015), 发现华北克拉通变质基底中许多变质基性岩脉也发育了“红眼圈结构”, 与上述“红眼圈结构”明显不同。首先, 它们普遍残留原岩结构构造-辉长辉绿结构, 如中部碰撞带南衡山朱家房一带与孔兹岩带大青山一带的含石榴石的基性脉岩(O'Brien *et al.*, 2005; 董晓杰, 2009); 其次, 呈串珠状、链状或环礁状细粒石榴石常常围绕岩浆成因的粗粒斜长石与单斜辉石生长。该类“红眼圈结构”可能代表了变质基性岩脉从原岩岩浆矿物组合向峰期麻粒岩相变质矿物的转变过程(贺高品等, 1994; Wei *et al.*, 2014; Duan *et al.*, 2015)。

类似地, 本文所研究的石榴基性麻粒岩岩脉所发育的“红眼圈结构”, 亦可能代表石榴基性麻粒岩的原岩-辉绿岩

或辉长岩在缺失流体的条件下经历进变质作用达到近峰期高压麻粒岩相变质作用, 并未记录逆时针的 P - T 演化轨迹, 其主要证据如下: (1) 野外地质与镜下研究表明, 本文所研究石榴基性麻粒岩的原岩为辉长岩或辉绿岩岩脉或小侵入体, 镜下局部还残留了辉长或辉绿结构所发育自形板状的岩浆成因的斜长石, 现已变质重结晶转变为变质成因的中长石; (2) 被链状或串珠状石榴石包裹的浑圆状斜长石与基质中广泛分布的斜长石具有相似的化学成分, 如图 11 所示, 样品 BT58-1 中, 被链状或串珠状石榴石包裹的浑圆状斜长石, 为 $An = 39 \sim 42$ 的中长石, 而基质型斜长石亦为 $An = 38 \sim 42$ 的中长石, 均与华北克拉通其它地区变基性岩中近峰期高压麻粒岩相变质阶段形成的斜长石的 An 值相近(Zhai *et al.*, 1993; 魏春景等, 2001; Guo *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2001b; Liu *et al.*, 2013; Duan *et al.*, 2015), 说明它们均形成于相近的温压条件; (3) 对本区石榴基性麻粒岩串珠状或链状石榴石与其它类型的石榴石的化学成分综合对比研究表明, 它们亦具有相近的化学成分, 如样品 LH58-1 中, 串珠状或链状石榴石, 其 MgO 含量平均值为 5.71% ($n = 9$), 他形不规则状与单斜辉石等矿物平衡共生的石榴石, 其 MgO 含量平均值为 5.62% ($n = 15$); (4) 利用传统地质温压计与相平衡模拟, 选择串珠状石榴石及其相应的矿物对, 与其它类型的石榴石及其相应的矿物对计算表明(图略), 在误差范围内, 它们均记录了相似的峰期高压麻粒岩相的温压条件, 无疑进一步表明它们都是峰期变质作用的产物; (5) 一般地, 变质作用在流体缺失或流体不饱和条件下不能使变质矿物组合达到平衡状态(Bucher and Grapes, 2009; Wei *et al.*, 2014; Duan *et al.*, 2015)。比如, 在西阿尔皮斯 Zermatt-Saas 蛇绿混杂岩带中, 即使经历了超高压榴辉岩相变质的辉长岩, 辉长结构也被较好地保存下来, 而石榴石和绿辉石常常围绕岩浆成因的斜长石与普通辉石边部生长, 形成典型的“红眼圈结构”(Zhang and Liou, 1997; Bucher and Grapes, 2009)。

9.4 地质意义

长期以来, 人们对华北克拉通阴山陆块新太古代晚期约 2500Ma 的构造热事件及其性质进行了大量的研究与探索(李树勋等, 1987; 刘喜山, 1996; Jian *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2015; Ma *et al.*, 2016)。但目前对于华北克拉通阴山陆块约 2500Ma 的构造热事件的性质与形成构造环境存在不同的认识。其中, 刘建忠等(2001)认为固阳绿岩带变基性岩火山岩形成于类似现代大陆裂谷的构造环境; 陈亮(2007)基于对固阳绿岩带中橄榄质科马提岩-玄武质科马提岩的岩地球化学与同位素年代学的研究, 认为可以用岛弧叠加地幔柱的构造演化模式来解释阴山陆块固阳绿岩带不同性质的镁铁-超镁铁质岩石的构造演化过程。然而岛弧叠加地幔柱的构造模式虽然能解释科马提岩、高镁安山岩、富 Nb 玄武岩等岛弧火山岩的形成, 但这种构造模式仅仅是为了解释这些现象而把两种构造过程直接叠加在一起, 这样的构造背景很不

稳定,在实际中很难出现。Jian *et al.* (2012)通过对阴山陆块固阳绿岩带与武川高级片麻岩地体代表性岩石的同位素年代学与地球化学研究,提出了地壳拆沉模式,并认为新太古代晚期与地幔柱有关的软流圈上涌与地壳部分熔融再造作用,并伴随拆沉作用,是导致阴山陆块幕式岩浆作用的主因。但是,该模式很难解释本区许多变基性岩具有岛弧岩浆的地球化学特征。同时,也很难解释区内分布的高镁闪长岩、TTG 片麻岩与科马提质玄武岩的成因。

最近,基于对本区紫苏花岗岩、变质辉长岩与深变质镁铁-超镁铁质岩的地球化学与同位素年代学研究。从不同研究角度出发,不同学者提出了三种与俯冲带有关构造模式。Zhang *et al.* (2014)提出俯冲作用晚期板片断离作用导致武川高级片麻岩地体约 2510 Ma 高镁玄武质岩浆作用和角闪岩相-麻粒岩相变质作用几乎同时形成的根本原因。Ma *et al.* (2013a, 2014)通过对高镁闪长岩及包体的研究,认为高镁闪长岩是板片熔体与上覆地幔楔的相互作用的结果,并形成于高温低压的环境下。同时,紫苏花岗岩形成于洋脊俯冲相关的环境,两者都共同指示了俯冲背景下洋脊俯冲的过程。Wang *et al.* (2015)通过对武川西乌兰浪头号水库一带变质镁铁-超镁铁质岩的年代学与岩石成因研究,提出了俯冲板片后撤模式,并认为软流圈地幔上涌是诱发俯冲板片后撤的主因(Chung *et al.*, 2005),该模式可以较好地解释区内变质镁铁-超镁铁质岩如下的地球化学与同位素年代学特征:(1)西乌兰不浪一带变辉长岩具有“MORB”地球化学组成与特征,这可能与辉长岩质岩浆形成过程中卷入了软流圈地幔组分有关;(2)高温上涌软流圈可以使得被交代岩石圈发生部分熔融,形成了西乌兰不浪一带高镁角闪石岩浆;(3)与显生宙板块边缘的岩浆作用类似,板片后撤还可以导致区内新太古代晚期短暂的岩浆寂静与幕式岩浆活动(Chung *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2015)。

然而值得指出的是,以上有关阴山陆块新太古代构造演化过程的认识,主要来自对区内代表性岩石的年代学与地球化学的研究而提出,对本区高级片麻岩地体高级变质作用的基本特征考虑相对较少,从而制约人们对阴山陆块新太古代完整的构造演化过程认识。因此,武川高压基性麻粒岩的发现及其相关研究,为进一步约束阴山陆块新太古代晚期的构造演化过程提供了新地质证据,具有重要的研究意义。首先,武川高压基性麻粒岩的确定修正了人们长期以来对武川高级片麻岩地体变质程度的认识,在高压麻粒岩被发现之前,人们普遍认为本区各类岩石曾经历了中-低压角闪岩相-麻粒岩相峰期变质作用与逆时针时 $P-T$ 轨迹。其次,与中-低压基性麻粒岩存在明显不同,本文确定的高压基性麻粒岩峰期矿物组合为石榴石+单斜辉石+斜长石+角闪石+石英+铁-钛氧化物,相平衡模拟计算表明,其最高压力值可达 1.31~1.43 GPa,相当于 45~50 km 地壳深度,如此深的山根,简单地用一般地壳沉降与沉积物掩埋来解释相当困难,而必须承认当时地壳中曾出现一种强烈而迅速的构造增

厚机制,它们可能主要与大型陆块的俯冲-拼贴-碰撞造山过程有关。如前所述,这一认识也已被大量有关显生宙造山带变质作用研究与实验岩石学与热模拟所证实(England and Thompson, 1984; Thompson and England, 1984; Eillis, 1987; Harley, 1989; Brown, 1993, 2006, 2007, 2008, 2014; Carswell and O'Brien, 1993; Zhao *et al.*, 1998, 1999a, b, 2000, 2005; O'Brien and Rötzler, 2003; Jamieson and Beaumont, 2011)。

武川石榴基性麻粒岩所记录 $P-T$ 条件换成变质地热梯度为 18~22°C/km,不等同于 Miyashiro(1961)提出的高压相系,其变质作用类型完全不同于显生宙洋壳消减驱动形成的俯冲带的高压-超高压蓝片岩与榴辉岩(图 19; Rehman *et al.*, 2007; Liou *et al.*, 2009)。因此,武川高压麻粒岩的确定,还不能简单地与太古宙板块俯冲、碰撞等过程联系起来,其原岩地球化学属性与岩石组合特征,也表明它们可能不是太古宙大洋地壳的有机组成部分。

如图 19 所示,武川石榴基性麻粒岩所记录的地热梯度属于典型的中压相系,与显生宙汇聚大陆板块边缘构造环境中出现的变质作用类型相一致,如新生代喜马拉雅造山带中广泛出现的中-高压高温麻粒岩相变质作用与巴罗型变质带(Spear, 1993; Zhang *et al.*, 2015)。因此,武川石榴基性麻粒岩所记录的约 2500 Ma 高压麻粒岩相变质作用更可能与岛弧地体与微陆块间的造山作用有关(Miyashiro, 1961; Thompson, 1989; Loosveld and Etheridge, 1990; 李树勋等, 1987; 刘喜山, 1996)。至于其更为精细的变质-构造演化过程,可能还需要更详细的研究工作加以明确,这也是以后将要开展的研究工作。

9.5 初步结论

综合以上的研究,本文得出如下几点初步认识:

(1)野外地质产状与区域岩石组合研究表明,武川高级片麻岩地体中石榴基性麻粒岩主要以变形岩墙/岩脉群或不规则透镜体的形式赋存于英云闪长质片麻岩或变质表壳岩系之中,并切割近南北向的区域性片麻理。

(2)岩相学观察、矿物相转变分析与矿物化学研究表明,武川石榴基性麻粒岩保留了十分典型的高压麻粒岩相矿物:石榴石+单斜辉石+斜长石+角闪石+石英+铁-钛氧化物。其中,粗粒石榴石边部常发育微弱的扩散环带,表现为从幔部至边部,镁铝榴石组分不断减少,相应地铁铝榴石组分不断增加,指示晚期冷却降温作用对石榴石成分产生一定影响。斜长石具有细粒包体型与粗粒基质型两种不同的类型,它们具有十分相似化学成分,均为 $An = 35 \sim 45$ 的中长石。

(3)利用 THERM OCA LC 3.33 软件,对两件石榴基性麻粒岩样品进行了相平衡模拟,模拟的峰期矿物组合为:石榴石+单斜辉石+斜长石+角闪石+石英+铁-钛氧化物,与岩相学观察十分一致。采用石榴石中最小 $x(g)$ ($Fe^{2+}/$

($\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}$) 与斜长石是最小 $\text{ca}(\text{pl})$ ($\text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Na})$) 等值线, 将本区石榴基性麻粒岩峰期高压麻粒岩相的温压条件限定在 $P = 1.31 \sim 1.40 \text{ GPa}$, $T = 770 \sim 840^\circ\text{C}$ 的范围内。

(4) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明, 两件石榴基性麻粒岩麻粒岩中发育的变质锆石分别记录了 $2517 \pm 6 \text{ Ma}$ (BT58-1, MSWD = 0.66, $n = 21$) 与 $2512 \pm 16 \text{ Ma}$ (LH66-1, MSWD = 0.26, $n = 42$) 的加权平均年龄, 与阴山陆块其它太古宙岩石记录的约 2500 Ma 变质年龄一致, 被解释为石榴基性麻粒岩遭受高压麻粒岩相变质时代。

致谢 感谢中国地质科学院地质研究所陈方远老师与阎玲老师、北京大学地球科学与空间科学学院电子探针室舒桂明与李小平老师、中国科学院地质与地球物理研究所探针室毛騫老师、中国地质科学院地质研究所戎合老师、中国地质调查局天津地质调查中心耿健珍老师在实验测试过程中提供的帮助; 感谢中山大学地球科学与地质工程学院钱加慧博士与中国地质科学院地质研究所张颖慧博士在论文写作过程中的指导与帮助; 感谢审稿专家认真审阅了本文, 并提出了宝贵的修改意见。

References

Anovitz LM. 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

Appel P, Möller A and Schenk V. 1998. High-pressure granulite facies metamorphism in the Pan-African belt of eastern Tanzania: P - T - t evidence against granulite formation by continent collision. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(4): 491-509

Brown M. 1993. P - T - t evolution of orogenic belts and the causes of regional metamorphism. *Journal of the Geological Society*, 150(2): 227-241

Brown M. 2006. A duality of thermal regimes is the distinctive characteristic of plate tectonics since the Neoproterozoic. *Geology*, 34(11): 961-964

Brown M. 2007. Metamorphic conditions in orogenic belts: A record of secular change. *International Geology Review*, 49(3): 193-234

Brown M. 2008. Characteristic thermal regimes of plate tectonics and their metamorphic imprint throughout Earth history: When did Earth first adopt a plate tectonics mode of behavior. In: Condie K and Pease V (eds.). *When Did Plate Tectonics Begin?* Washington: Geological Society of America Special Papers, 440: 97-128

Brown M. 2014. The contribution of metamorphic petrology to understanding lithosphere evolution and geodynamics. *Geoscience Frontiers*, 5(4): 553-569

Bucher K and Grapes R. 2009. The eclogite-facies allanite gabbro of the Zermatt-saas ophiolite, Western Alps: A record of subduction zone hydration. *Journal of Petrology*, 50(8): 1405-1442

Carswell DA and O'Brien PJ. 1993. Thermobarometry and geotectonic significance of high-pressure granulites: Examples from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif in Lower Austria. *Journal of Petrology*, 34(3): 427-459

Chen L. 2007. Geochronology and geochemistry of the Guyang greenstone belt. Post-Doctor Research Report, Beijing: Institute of Geology and Geophysics, CAS, 1-40 (in Chinese with English summary)

Chen MY. 1989. Original study of garnet from the Taipingzhai-Jinchangyu area, in eastern Hebei Province. *Journal of Changchun University of Earth Science*, (4): 375-384 (in Chinese with

English abstract)

Chung SL, Chu MF, Zhang YQ, Xie YW, Lo CH, Lee TY, Lan CY, Li XH, Zhang Q and Wang YZ. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth-Science Reviews*, 68(3-4): 173-196

Cooke RA. 2000. High-pressure/temperature metamorphism in the St. Leonhard granulite Massif, Austria: Evidence from intermediate pyroxene-bearing granulites. *International Journal of Earth Sciences*, 89(3): 631-651

Deer WA, Howie RA and Zussman J. 1997. *Rock-Forming Minerals*. 2nd Edition. London: Geological Society Publishing House, 3-4

Diener JFA, Powell R, White RW and Holland TJB. 2007. A new thermodynamic model for clino- and orthoamphiboles in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{O}$. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(6): 631-656

Dong XJ. 2009. The metamorphism times and tectonic significance of high-grade metamorphic rocks in Xiwulangbulang area, Inner Mongolia. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 16-26 (in Chinese with English summary)

Dong XJ. 2012. Composition and evolution of the Early Precambrian basement in Daqingshan region, Inner Mongolia. Ph. D. Dissertation. Changchun: Jilin University, 1-125 (in Chinese with English summary)

Dong XJ, Xu ZY, Liu ZH and Sha Q. 2012. Zircon U-Pb geochronology of Archean high-grade metamorphic rocks from Xi Ulanbulang area, central Inner Mongolia. *Science China (Earth Science)*, 55(2): 204-212

Dong XJ, Xu ZY, Liu ZH and Sha Q. 2012. 2.7 Ga granitic gneiss in the northern foot of Daqingshan mountain, central Inner Mongolia, and its geological implications. *Earth Science*, 37(Suppl.): 20-27 (in Chinese with English abstract)

Duan ZZ, Wei CJ and Qian JH. 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

Ellis DJ. 1987. Origin and evolution of granulites in normal and thickened crusts. *Geology*, 15(2): 167-170

England PC and Thompson AB. 1984. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism I. Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust. *Journal of Petrology*, 25(4): 894-928

Green DH and Ringwood AE. 1967. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5): 767-833

Guo JH, O'Brien PJ and Zhai MG. 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

Guo JH, Peng P, Chen Y, Jiao SJ and Windley BF. 2012. UHT sapphirine granulite metamorphism at 1.93-1.92 Ga caused by gabbro intrusions: Implications for tectonic evolution of the northern margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 222-223: 124-142

Harley SL. 1989. The origins of granulites: A metamorphic perspective. *Geological Magazine*, 126(3): 215-247

He GP, Ye HW and Xia SL. 1994. The evolution of metamorphism and P - T paths of granulite facies terrane in Miyun, Beijing. *Acta Petrologica Sinica*, 10(1): 14-26 (in Chinese with English abstract)

Holland TJB and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3): 309-343

Holland TJB and Powell R. 2003. Activity-composition relations for phases in petrological calculations: An asymmetric multicomponent formulation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145(4): 492-501

Jamieson RA and Beaumont C. 2011. Coeval thrusting and extension during lower crustal ductile flow: Implications for exhumation of

- high-grade metamorphic rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 29 (1): 33–51
- Jian P, Zhang Q, Liu DY, Jin WJ, Jia XQ and Qian Q. 2005. SHRIMP dating and geological significance of Late Achaean high-Mg diorite (sanukite) and hornblende-granite at Guyang of Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (1): 151–157 (in Chinese with English abstract)
- Jian P, Kröner A, Windley BF, Zhang Q, Zhang W and Zhang LQ. 2012. Episodic mantle melting-crustal reworking in the Late Neoproterozoic of the northwestern North China Craton: Zircon ages of magmatic and metamorphic rocks from the Yinshan Block. *Precambrian Research*, 222–223: 230–254
- Jiao SJ and Guo JH. 2011. Application of the two-feldspar geothermometer to ultrahigh-temperature (UHT) rocks in the Khondalite belt, North China craton and its implications. *American Mineralogist*, 96(2–3): 250–260
- Jiao SJ, Guo JH, Mao Q and Zhao RF. 2011. Application of Zr-in-rutile thermometry: A case study from ultrahigh-temperature granulites of the Khondalite belt, North China Craton. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162(2): 379–393
- Jiao SJ, Guo JH, Harley SL and Windley BF. 2013. New constraints from garnetite on the *P-T* path of the Khondalite belt: Implications for the tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Petrology*, 54(9): 1725–1758
- Jin SQ and Li HC. 1980. *The Instruction of the Genetic Mineralogy*. Changchun: Jilin University Publishing House, 25–50 (in Chinese)
- Jin SQ. 1991. Composition characteristics of calc-amphiboles in different regional metamorphic facies. *Chinese Science Bulletin*, 36 (11): 851–854 (in Chinese)
- Jin W, Li SX and Liu XS. 1991. A study on characteristics of Early Precambrian high-grade metamorphic rock series and their metamorphic dynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 7(4): 27–35 (in Chinese with English abstract)
- Leake BE, Woolley AR, Arps CES, Birch WD, Gilbert MC, Grice JD, Hawthorne FC, Kato A, Kisch HJ, Krivovichev V, Linthout K, Laird J, Mandarino J, Maresch WV, Nickel EH, Rock NMS, Schumacher JC, Smith DC, Stephenson NCN, Ungaretti L, Whittaker EJW and Youzhi G. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineralogical Magazine*, 61(2): 295–321
- Li JH, Zhai MG, Li YG and Zhang YG. 1998. The discovery of Neoproterozoic high-pressure granulites in Luanping-Chengde area, northern Hebei, and their tectono-geological implication. *Acta Petrologica Sinica*, 14 (1): 34–41 (in Chinese with English abstract)
- Li SX, Liu XS and Zhang LQ. 1987. Geological characteristic of granite-greenstone belt in the area of Seerteng Mountains, Inner Mongolia. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 17(Suppl.) 81–102 (in Chinese with English abstract)
- Liou JG, Ernst WG, Song SG and Jahn BM. 2009. Tectonics and HP-UHP metamorphism of northern Tibet-preface. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3–4): 191–198
- Liu DY, Nutman AP, Compston W, Wu JS and Shen QH. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20(4): 339–342
- Liu FL. 1995. Metamorphic minerals and fluid evolution and tectonic environment of granulite facies high-grade terrain in the Huai'an-Datong region. Ph. D. Dissertation. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 1–77 (in Chinese with English summary)
- Liu JZ, Zhang FQ, Ouyang ZY, Li CL, Zou YL and Xu L. 2001. Study on geochemistry and chronology of Seertengshan greenstone. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 31(3): 236–240, 267 (in Chinese with English abstract)
- Liu L, Zhang LC, Dai YP, Wang CL and Li ZQ. 2012. Formation age, geochemical signatures and geological significance of the Sanheming BIF-type iron deposit in the Guyang greenstone belt, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (11): 3623–3637 (in Chinese with English abstract)
- Liu PH, Liu FL, Liu CH, Wang F, Liu JH, Yang H, Cai J and Shi JR. 2013. Petrogenesis, *P-T-t* path, and tectonic significance of high-pressure mafic granulites from the Jiaobei terrane, North China Craton. *Precambrian Research*, 233: 237–258
- Liu PH, Liu FL, Liu CH, Liu JH, Wang F, Xiao LL, Cai J and Shi JR. 2014. Multiple mafic magmatic and high-grade metamorphic events revealed by zircons from meta-mafic rocks in the Daqingshan-Wulashan Complex of the Khondalite Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 246: 334–357
- Liu XC, Hu JM, Zhao Y, Lou YX, Wei CJ and Liu XH. 2009. Late Neoproterozoic/Cambrian high-pressure mafic granulites from the Grove Mountains, East Antarctica: *P-T-t* path, collisional orogeny and implications for assembly of East Gondwana. *Precambrian Research*, 174(1–2): 181–199
- Liu XS, Jin W, Li SX and Xu XC. 1993. Two types of Precambrian high-grade metamorphism, Inner Mongolia, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 11(4): 499–510
- Liu XS. 1994. Characteristics of basement reworked complex and implication for Daqingshan orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 10 (4): 413–426 (in Chinese with English abstract)
- Liu XS. 1996. Progressive Metamorphic genesis of Archaean granulites in central Nei Mongol. *Acta Petrologica Sinica*, 12(2): 287–298 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y and Zhong D. 1997. Petrology of high-pressure granulites from the eastern Himalayan syntaxis. *Journal of Metamorphic Geology*, 15 (4): 451–466
- Loosveldt JRH and Etheridge MA. 1990. A model for low-pressure facies metamorphism during crustal thickening. *Journal of Metamorphic Geology*, 8(3): 257–267
- Lu LZ, Zheng SY and Ye HW. 1979. Discussion of the origin and feature of the clinopyroxene-garnet pair from the granulite-facies rocks in Gaoling area, Miyu. *Journal of Changchun University of Earth Science*, (3): 10–25 (in Chinese)
- Lu LZ, Xu XC and Liu FL. 1996. Early Precambrian Khondalites in North China. Changchun: Changchun Press, 219–230 (in Chinese)
- Ludwig KR. 2001. User's Manual for Isoplot/Ex rev. 2. 49: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 1–55
- Ma MZ, Xu ZY, Zhang LC, Dong CY, Dong XJ, Liu SJ, Liu DY and Wan YS. 2013. SHRIMP dating and Hf isotope analysis of zircons from the Early Precambrian basement in the Xi Ulanbulang area, Wuchuan, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 501–516 (in Chinese with English abstract)
- Ma XD, Guo JH, Liu F, Qian Q and Fan HR. 2013a. Zircon U-Pb ages, trace elements and Nd-Hf isotopic geochemistry of Guyang sanukitoids and related rocks: Implications for the Archean crustal evolution of the Yinshan block, North China Craton. *Precambrian Research*, 230: 61–78
- Ma XD, Fan HR, Santosh M and Guo JH. 2013b. Geochemistry and zircon U-Pb chronology of charnockites in the Yinshan Block, North China Craton: Tectonic evolution involving Neoproterozoic ridge subduction. *International Geology Review*, 55(13): 1688–1704
- Ma XD, Fan HR and Guo JH. 2013. Neoproterozoic magmatism, metamorphism in the Yinshan Block: Implication for the genesis of BIF and crustal evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2329–2339 (in Chinese with English abstract)
- Ma XD, Fan HR, Santosh M, Liu X and Guo JH. 2014. Origin of sanukitoid and hornblende enclaves in the Dajitu pluton from the Yinshan Block, North China Craton: Product of Neoproterozoic ridge subduction? *International Geology Review*, 56(10): 1197–1212
- Ma XD, Fan HR, Santosh M and Guo JH. 2016. Petrology and geochemistry of the Guyang hornblende complex in the Yinshan block, North China Craton: Implications for the melting of subduction-modified mantle. *Precambrian Research*, 273: 38–52

- Meng BR. 2007. Isotopic chronological restriction of granulite facies metamorphism in Daqingshan area, Inner Mongolia. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 1 - 99 (in Chinese with English summary)
- Miyashiro A. 1961. Evolution of metamorphic belts. *Journal of Petrology*, 2(3): 277 - 311
- O'Brien PJ and Rötzler J. 2003. High-pressure granulites: Formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics. *Journal of Metamorphic Geology*, 21(1): 3 - 20
- O'Brien PJ, Walte N and Li JH. 2005. The petrology of two distinct granulite types in the Hengshan Mts, China, and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 615 - 627
- Poldervaart A and Hess HH. 1951. Pyroxenes in the crystallization of basaltic magma. *The Journal of Geology*, 59(5): 472 - 489
- Powell R, Holland T and Worley B. 1998. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(4): 577 - 588
- Rehman HU, Yamamoto H, Kaneko Y, Kausar AB, Murata M and Ozawa H. 2007. Thermobaric structure of the Himalayan metamorphic belt in Kaghan valley, Pakistan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(2-3): 390 - 406
- Ren YW. 2010. The study of granite-greenstone belt in Xihongshan area, Inner Mongolia. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University, 1 - 69 (in Chinese with English summary)
- Salje E. 1986. Heat capacities and entropies of andalusite and sillimanite: The influence of fibrolitization on the phase diagram of the Al_2SiO_5 polymorphs. *American Mineralogist*, 71(11-12): 1366 - 1371
- Santosh M, Liu SJ, Tsunogae T and Li JH. 2012. Paleoproterozoic ultrahigh-temperature granulites in the North China Craton: Implications for tectonic models on extreme crustal metamorphism. *Precambrian Research*, 222 - 223: 70 - 106
- Shen QH. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495 - 500 (in Chinese with English abstract)
- Smithies RH and Bagas L. 1997. High pressure amphibolite-granulite facies metamorphism in the Paleoproterozoic Rudall complex, central Western Australia. *Precambrian Research*, 83(4): 243 - 265
- Song B, Nutman AP, Liu DY and Wu JS. 1996. 3800 to 2500Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. *Precambrian Research*, 78(1-3): 79 - 94
- Spear FS. 1993. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Washington, DC: Mineralogical Society of America, 799
- Thompson AB and England PC. 1984. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism II. Their inference and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 929 - 955
- Thompson PH. 1989. Moderate overthickening of thinned sialic crust and the origin of granitic magmatism and regional metamorphism in low- P -high- T terranes. *Geology*, 17(6): 520 - 523
- Vavra G, Gebauer D, Schmid R and Compston W. 1996. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): An ion microprobe (SHRIMP) study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 122(4): 337 - 358
- Vernon RH and Clarke GL. 2008. *Principles of Metamorphic Petrology*. Cambridge: Cambridge University Press, 446
- Wan YS, Xu ZY, Dong CY, Nutman A, Ma MZ, Xie HQ, Liu SJ, Liu DY, Wang HC and Cu H. 2013a. Episodic Paleoproterozoic (~2.45, ~1.95 and ~1.85Ga) mafic magmatism and associated high temperature metamorphism in the Daqingshan area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry. *Precambrian Research*, 224: 71 - 93
- Wan YS, Zhang YH, Williams IS, Liu DY, Dong CY, Fan RL, Shi YR and Ma MZ. 2013b. Extreme zircon O isotopic compositions from 3.8 to 2.5Ga magmatic rocks from the Anshan area, North China Craton. *Chemical Geology*, 352: 108 - 124
- Wang D, Guo JH, Huang GY and Scheltens M. 2015. The Neoproterozoic ultramafic-mafic complex in the Yinshan Block, North China Craton: Magmatic monitor of development of Archean lithospheric mantle. *Precambrian Research*, 270: 80 - 99
- Wei CJ, Zhang CG, Zhang AL, Wu TH and Li JH. 2001. Metamorphic P - T conditions and geological significance of high-pressure granulite from the Jianping complex, western Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 269 - 282 (in Chinese with English abstract)
- Wei CJ, Qian JH and Zhou XW. 2014. Paleoproterozoic crustal evolution of the Hengshan-Wutai-Fuping region, North China Craton. *Geoscience Frontiers*, 5(4): 485 - 497
- White RW, Powell R, Holland TJB and Worley BA. 2000. The Effect of TiO_2 and Fe_2O_3 on metapelitic assemblages at greenschist and amphibolite facies conditions: Mineral equilibria calculations in the system K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O - TiO_2 - Fe_2O_3 . *Journal of Metamorphic Geology*, 18(5): 497 - 511
- White RW, Powell R and Holland TJB. 2001. Calculation of partial melting equilibria in the system Na_2O - CaO - K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O (NCKFMASH). *Journal of Metamorphic Geology*, 19(2): 139 - 153
- White RW, Powell R and Clarke GL. 2002. The interpretation of reaction textures in Fe-rich metapelitic granulites of the Musgrave Block, central Australia: Constraints from mineral equilibria calculations in the system K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O - TiO_2 - Fe_2O_3 . *Journal of Metamorphic Geology*, 20(1): 41 - 55
- White RW, Powell R and Holland TJB. 2007. Progress relating to calculation of partial melting equilibria for metapelites. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(5): 511 - 527
- Whitney DL and Evans BW. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185 - 187
- Xu ZY, Liu ZH, Dong XJ, Dong CY and Wan YS. 2011. Discovery of kyanite garnet quartz feldspathic gneiss in the north side of Daqing Mts., Inner Mongolia, and its petrography, geochemistry and zircon SHRIMP dating. *Geological Review*, 57(2): 243 - 252 (in Chinese with English abstract)
- Yoshino T, Yamamoto H, Okudaira T and Toriumi M. 1998. Crustal thickening of the lower crust of the Kohistan arc (N. Pakistan) deduced from Al zoning in clinopyroxene and plagioclase. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(6): 729 - 748
- Zhai MG, Guo JH, Yan YH, Li YG and Han XL. 1993. Discovery of high-pressure basic granulite terrain in North China Archean craton and preliminary study. *Science in China Series B*, 36(11): 1402 - 1408
- Zhai MG. 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 MG and Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6 - 25
- Zhai MG and Santosh M. 2013. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving Earth. *Gondwana Research*, 24(1): 275 - 297
- Zhang RY and Liou JG. 1997. Partial transformation of gabbro to coesite-bearing eclogite from Yangkou, the Sulu terrane, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 15(2): 183 - 202
- Zhang XH, Yuan LL, Xue FH and Zhai MG. 2014. Neoproterozoic metagabbro and charnockite in the Yinshan block, western North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications. *Precambrian Research*, 255(2): 563 - 582
- Zhang YH, Wei CJ, Tian W and Zhou XW. 2013. Reinterpretation of metamorphic age of the Hengshan Complex, North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 58(34): 4300 - 4307
- Zhang ZM, Xiang H, Dong X, Ding HX and He ZY. 2015. Long-lived high-temperature granulite-facies metamorphism in the Eastern Himalayan orogen, south Tibet. *Lithos*, 212 - 215: 1 - 15

Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Lu LZ. 1998. Thermal evolution of Archean basement rocks from the eastern part of the North China Craton and its bearing on tectonic setting. *International Geology Review*, 40(8): 706–721

Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Lu LZ. 1999a. Tectonothermal history of the basement rocks in the western zone of the North China Craton and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 310(1–4): 37–53

Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Lu LZ. 1999b. Thermal evolution of two textural types of mafic granulites in the North China craton: Evidence for both mantle plume and collisional tectonics. *Geological Magazine*, 136(3): 223–240

Zhao GC, Cawood PA and Lu LZ. 1999c. 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

Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA, Sun M and Lu LZ. 2000a. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research* 103(1–2): 55–88

Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Lu LZ. 2000b. 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

Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2001a. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107(1–2): 45–73

Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA and Lu LZ. 2001b. High-pressure granulites (retrograded eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: Petrology and tectonic implications. *Journal of Petrology*, 42(6): 1141–1170

Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2002a. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex: Implications for late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton. *American Journal of Science*, 302(3): 191–226

Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA and Sun M. 2002b. Review of global 2.1–1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth-Science Reviews*, 59(1–4): 125–162

Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2003. Assembly, accretion and breakup of the Paleo-Mesoproterozoic Columbia supercontinent: Records in the North China Craton. *Gondwana Research*, 6(3): 417–434

Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2004. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: Assembly, growth and breakup. *Earth-Science Reviews*, 67(1–2): 91–123

Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177–202

Zhao GC, Cao L, Wilde SA, Sun M, Choe WJ and Li SZ. 2006a. Implications based on the first SHRIMP U-Pb zircon dating on Precambrian granitoid rocks in North Korea. *Earth and Planetary Science Letters*, 251(3–4): 365–379

Zhao GC, Sun M, Wilde SA, Li SZ and Zhang J. 2006b. Some key issues in reconstructions of Proterozoic supercontinents. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(1): 3–19

Zhao GC, Wilde SA, Sun M, Guo JH, Kröner A, Li SZ, Li XP and Zhang J. 2008a. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Huai'an Complex: Constraints on Late Archean to Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events in the Trans-North China Orogen. *American Journal of Science*, 308(3): 270–303

Zhao GC, Wilde SA, Sun M, Li SZ, Li XP and Zhang J. 2008b. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the Liliang Complex: Implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 160(3–4): 213–226

Zhao GC, Wilde SA, Guo JH, Cawood PA, Sun M and Li XP. 2010. Single zircon grains record two Paleoproterozoic collisional events in the North China Craton. *Precambrian Research*, 177(3–4): 266–

276

Zhao GC, Li SZ, Sun M and Wilde SA. 2011. Assembly, accretion, and break-up of the Palaeo-Mesoproterozoic Columbia supercontinent: Record in the North China Craton revisited. *International Geology Review*, 53(11–12): 1331–1356

Zhao GC, Cawood PA, Li SZ, Wilde SA, Sun M, Zhang J, He YH and Yin CQ. 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion. *Precambrian Research*, 222–223: 56–76

Zhao GC and Zhai MG. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications. *Gondwana Research*, 23(4): 1207–1240

附中文参考文献

陈亮. 2007. 固阳绿岩带的地球化学和年代学. 博士后出站报告, 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1–40

陈曼云. 1989. 冀东太平寨-金厂峪地区石榴子石成因研究. 长春地质学院学报, (4): 375–384

董晓杰. 2009. 内蒙古西乌兰不浪地区高级变质岩的变质作用特征、时代及其构造意义. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 16–26

董晓杰. 2012. 内蒙古大青山地区早前寒武纪基底组成与演化. 博士学位论文. 长春: 吉林大学, 1–125

董晓杰, 徐仲元, 刘正宏, 沙茜. 2012. 内蒙古大青山北麓 2.7 Ga 花岗质片麻岩的发现及其地质意义. *地球科学*, 37(S): 20–27

贺高品, 叶慧文, 夏胜利. 1994. 北京密云麻粒岩相区变质作用演化及 PTt 轨迹的研究. *岩石学报*, 10(1): 14–26

简平, 张旗, 刘敦一, 金维浚, 贾秀勤, 钱青. 2005. 内蒙古固阳晚太古代赞岐岩 (sanukite)-角闪花岗岩的 SHRIMP 定年及其意义. *岩石学报*, 21(1): 151–157

靳是琴, 李鸿超. 1980. 成因矿物学概论. 长春: 吉林大学出版社, 25–50

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

金巍, 李树勋, 刘喜山. 1991. 内蒙大青山地区早前寒武纪高级变质岩系特征和变质动力学. *岩石学报*, 7(4): 27–35

李江海, 翟明国, 李永刚, 张毅刚. 1998. 冀北滦平-承德一带晚太古代高压麻粒岩的发现及其构造地质意义. *岩石学报*, 14(1): 34–41

李树勋, 刘喜山, 张履桥. 1987. 内蒙古色尔腾山地区花岗岩-绿岩的地质特征. 长春地质学院学报, 17(S): 81–102

刘福来. 1995. 怀安-大同一带麻粒岩相高级区变质矿物-流体演化及其构造环境研究. 博士学位论文. 长春: 长春地质学院, 1–77

刘建忠, 张福勤, 欧阳自远, 李春来, 邹永廖, 徐琳. 2001. 内蒙古色尔腾山绿岩的地球化学、年代学研究. *长春科技大学学报*, 31(3): 236–240, 267

刘利, 张连昌, 代堰镔, 王长乐, 李智泉. 2012. 内蒙古固阳绿岩带三合明 BIF 型铁矿的形成时代、地球化学特征及地质意义. *岩石学报*, 28(11): 3623–3637

刘喜山. 1994. 大青山造山带中基底再造杂岩的特征及其指示意义. *岩石学报*, 10(4): 413–426

刘喜山. 1996. 内蒙古中部太古代麻粒岩递进变质成因. *岩石学报*, 12(2): 287–298

卢良兆, 郑松彦, 叶惠文. 1979. 密云高岭地区麻粒岩相石榴石-单斜辉石矿物对的特征及成因讨论. 长春地质学院学报, (3): 10

- 25

卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 1996. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社, 219-230

马铭株, 徐仲元, 张连昌, 董春艳, 董晓杰, 刘守偈, 刘敦一, 万渝生. 2013. 内蒙古武川西乌兰不浪地区早前寒武纪变质基底锆石 SHRIMP 定年及 Hf 同位素组成. 岩石学报, 29(2): 501-516

马旭东, 范宏瑞, 郭敬辉. 2013. 阴山地块晚太古代岩浆作用、变质作用对地壳演化及 BIF 成因的启示. 岩石学报, 29(7): 2329-2339

蒙炳儒. 2007. 内蒙古西大青山地区麻粒岩系变质作用的同位素年代学制约. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 1-99

任云伟. 2010. 内蒙古西红山地区花岗-绿岩带的研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 1-69

沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495-500

魏春景, 张翠光, 张阿利, 伍天洪, 李江海. 2001. 辽西建平杂岩高压麻粒岩相变质作用的 $P-T$ 条件及其地质意义. 岩石学报, 17(2): 269-282

徐仲元, 刘正宏, 董晓杰, 董春艳, 万渝生. 2011. 内蒙古大青山北麓蓝晶石榴长英质片麻岩的发现: 岩相学、地球化学和锆石 SHRIMP 定年. 地质论评, 57(2): 243-252

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