

华北克拉通的组成及其变质演化

沈其韩, 耿元生, 宋会侠

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘 要: 华北克拉通早前寒武纪变质基底主要由五套不同类型的变质岩系组成。克拉通在形成过程中经历了多期构造活动、多期岩浆侵位、多期变质作用以及不同程度的混合岩化和深熔作用, 岩石已遭受多次不同地质作用的叠加改造, 因此华北克拉通具有复杂的演化历史。从太古宙到古元古代末的克拉通形成, 华北克拉通主要经历了五期区域变质作用。鞍山地区的古一中太古代经历了角闪岩相变质作用改造, 尚未获得变质年龄数据。但在 TTG 岩系中已获得 3 560 Ma 和 3 000~3 300 Ma 早期的变质年龄。河南鲁山太华杂岩的中太古代斜长角闪岩中获得 2 776~2 792 Ma 和 2 671~2 651 Ma 两期变质作用年龄信息, 代表了新太古代早期的变质作用。新太古代麻粒岩-TTG 岩系和新太古代花岗-绿岩系都经历了新太古代晚期—古元古代初的变质作用改造。在古元古代阶段, 在华北克拉通北缘在 1 965~1 900 Ma 期间发生了中低压/高压麻粒岩相变质, 局部发生超高温变质, 这期变质作用与陆块间的俯冲碰撞及其后的地幔上涌有关。在古元古代晚期 (1 890~1 800 Ma) 在华北克拉通的中部及东部的胶—辽—吉带发生了高压麻粒岩相-角闪岩相的区域变质, 代表了陆块间的碰撞拼合过程。不同变质岩系类型经历的变质作用反映了不同的构造背景。太古宙晚期大量的 TTG 岩系及呈面状分布的中/低压麻粒岩主要出露在华北克拉通的中北部, 普遍具有逆时针的 p - T 轨迹, 反映了地幔柱底板垫托的构造环境。新太古代的花岗-绿岩系在新太古代晚期—古元古代早期经历的变质作用多为顺时针的 p - T 演化轨迹, 反映其发生可能与弧后+地幔柱联合作用的构造背景。古元古代晚期的两期变质作用多表现为高压麻粒岩相的顺时针 p - T 演化轨迹, 反映了不同陆块(地块)之间碰撞拼合的过程, 意味着类似显生宙的板块构造体制已经出现。

关键词: 华北克拉通; 中低压/高压/超高温变质作用; 地幔柱底板垫托; 顺时针/逆时针 p - T 轨迹; 碰撞拼合
中图分类号: P544.1; P542.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2016.04.02

Constituents and Evolution of the Metamorphic Basement of the North China Craton

SHEN Qi-han, GENG Yuan-sheng, SONG Hui-xia

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: Precambrian metamorphic basement of North China Craton (NCC) is composed of five sets of different types of metamorphic rocks. In the formation process, the NCC experienced multiple tectonic activities, multiple magma emplacement, multiple metamorphism, different degrees of migmatization and anatexis. The rocks suffered multiple superposition of different geological processes and, therefore, the NCC has a complicated evolution history. From Archean to Late Paleoproterozoic, the NCC mainly underwent five stages of regional metamorphism. Anshan area experienced amphibolite facies metamorphism in Paleo/Meso-Archean. However, no metamorphic ages have been obtained except 3 560 Ma and 3 000~3 300 Ma metamorphic ages obtained from TTG series. In Lushan Taihua complex of Henan, 2 776~2 792 Ma and 2 671~2 651 Ma metamorphic ages are obtained from Mesoarchean amphibolites, which represent metamorphism in early Neoproterozoic. Granulites-TTG

本文由中国地质调查局工作项目(编号: 1212010811048)资助。

收稿日期: 2016-03-04; 改回日期: 2016-05-12。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 沈其韩, 男, 1922 年生。研究员, 中国科学院院士。主要从事变质岩和前寒武纪地质研究。电话: 010-68999660。

E-mail: huixiasong@cags.ac.cn。

series and granite-greenstone belt of Neoarchean both experienced metamorphic transformation in late Neoarchean and early Paleoproterozoic. In Paleoproterozoic, on the northern margin of the NCC, L-MP/HP granulite facies metamorphism occurred between 1 965~1 900 Ma and UHT metamorphism appeared locally. This metamorphism is considered to be related to the continental collision and subsequent mantle upwelling. In Late Paleoproterozoic (1 890~1 800 Ma), in the central and eastern NCC, high-pressure granulite facies to amphibolite facies metamorphism occurred in Jiao-Liao-Ji belt, which indicates the collision and collage of continental blocks. Different types of metamorphic rock series experienced different kinds of metamorphism, which reflect different tectonic settings. A large number of late Archean TTG rock series and planar distribution M-LP granulites are mainly located in the central-northern part of NCC. They generally have counterclockwise p - T paths, which reflect mantle plume underplating tectonic setting. Granite-greenstone series of Neoarchean experienced a metamorphism in late Neoarchean and early Paleoproterozoic with clockwise p - T paths, reflecting a compound tectonic setting of back-arc and mantle plume. Two metamorphic events that occurred in the Late Paleoproterozoic formed high-pressure granulite facies with clockwise p - T paths, reflecting the collision and collage of continental blocks, which means that plate tectonics system similar to Phanerozoic had appeared.

Key words: North China Craton; M-LP/HP/UHT metamorphism; mantle plume underplating; p - T paths; collision and collage

华北克拉通在 1:500 万变质地质图上称为华北变质地区, 它是我国最古老和最大的前寒武纪克拉通之一, 具有早前寒武纪变质结晶基底和中新元古代沉积盖层的二元结构格局。

华北克拉通早前寒武纪的变质结晶基底主要由以下五大部分组成, 它们是: (1)由始太古代—古—中太古代 TDG 岩系为主和少许古—中太古代壳岩组成的最古老变质岩系, 它们仅在鞍山等地局部出露; (2)以新太古代 TTG 岩系为主伴生新太古代的变质表壳岩系的变质岩系, 它们多经历了麻粒岩相—角闪岩相的中高级变质, 主要在华北克拉通北部分布; (3)新太古代变质表壳岩与 TTG 岩系组成的花岗—绿岩系, 它们一般经历了中低级变质改造, 主要分布在阴山、吉南—辽北、五台、鲁西、登封等地; (4)已经历高压—中压麻粒岩相变质的古元古代沉积或火山沉积岩系, 主要分布在华北西北部(孔兹岩带)及胶东地区; (5)没有麻粒岩相变质的古元古代中深—中浅变质的沉积或火山沉积变质岩系, 主要分布在溥沱、吕梁、中条、辽河及胶东等地(图 1)。

克拉通在形成过程中经历了多期构造变动, 伴生多期岩浆活动和多期变质作用以及不同程度混合岩化和深熔作用的影响, 岩石已遭受强烈叠加改造, 因此具有复杂的构造—岩浆—变质演化历史。研究华北克拉通的变质演化涉及同位素年龄数据的应用, 以往所测定的 Sm-Nd、Rb-Sr 和 K-Ar 年龄数据由于测试精度不高、误差较大, 因此本文主要以锆石的原位定年数据为依据。

1 华北克拉通始太古代—中太古代的变质岩系

始太古代—中太古代的 TDG 岩系主要由奥长花岗

质片麻岩、石英闪长质片麻岩和花岗岩等组成, 其最大年龄达 3.8 Ga(Liu et al., 1992; Song et al., 1996; Wan et al., 2005; Liu et al., 2008), 变质岩系的主体出

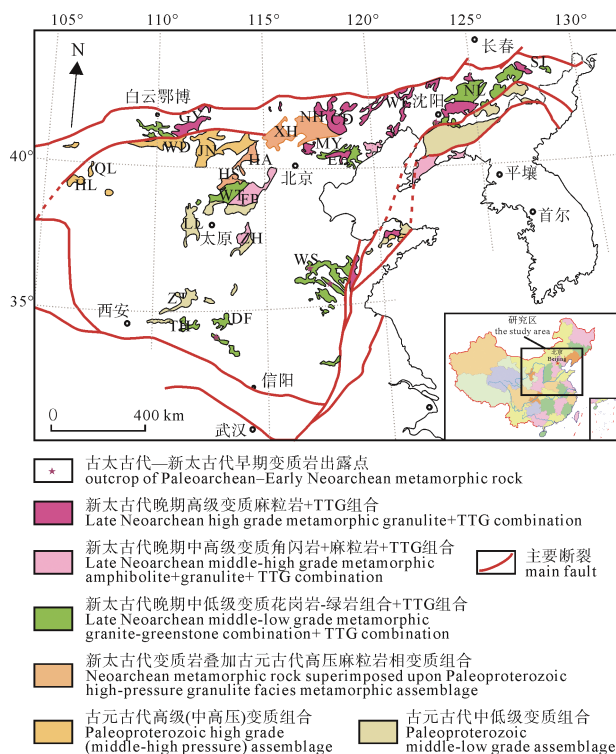


图 1 华北克拉通变质岩系分布简图

Fig. 1 Sketch metamorphic map of the North Chian Craton
CD-承德; DF-登封; EH-冀东; FP-阜平; GY-固阳; HA-怀安; HL-贺兰山; HS-恒山; JN-集宁; LL-吕梁; MY-密云; NH-冀北; NL-辽北; QL-千里山; SJ-吉南; TH-太华; WD-乌拉山—大青山; XH-宣化; WL-辽宁西部; WS-鲁西; WT-五台; ZH-赞皇; ZT-中条
CD-Chengde; DF-Dengfeng; EH-eastern Hebei; FP-Fuping; GY-Guyang; HA-Huai'an; HL-Helanshan; HS-Hengshan; JN-Jining; LL-Lüliang; MY-Miyun; NH-northern Hebei; NL-northern Liaoning; QL-Qianlishan; SJ-southern Jiling; TH-Taihua; WD-Wulashan-Daqingshan; XH-Xuanhua; WL-western Liaoning; WS-western Shandong; WT-Wutaishan; ZH-Zanhuang; ZT-Zhongtiao

露于辽宁鞍山一带, 其中残留有古太古代变质表壳岩, 称为陈台沟表壳岩, 由斜长角闪岩、黑云变粒岩、黑云斜长片麻岩、直闪石铁英岩、直闪石石英岩等组成, 原岩主要是一套玄武质和酸性火山岩以及不纯硅铁质化学沉积岩组成, 岩层的主体变质已达角闪岩相, 部分已退变为绿片岩相, 原岩时代为 3 300 Ma, 属古太古代, 但变质时代尚无确切数据。这些岩石经历了漫长的演化历史, 早期变质的变质演化史已经很难确定, 但在 3.77 Ga 的条带状奥长花岗岩中获得有 3.56 Ga 的变质年龄, 在一些古太古代片麻岩中获得有 3.0~3.3 Ga 的变质年龄(Wan et al., 2012a; 董春艳等, 2013)。这些年龄数据说明在古太古代期间鞍山地区的 TTG 岩系及陈台沟表壳岩曾经历过不止一期的变质改造, 尽管早期变质的矿物组合、变质的温度压力条件、变质作用发生的构造背景已很难追溯, 但是锆石原位定年的结果揭示了鞍本地区古太古代的岩系在古太古代期间曾发生过变质改造。一些作者根据 TTG 片麻岩的地球化学特征, 推断鞍本地区 3.5~3.6 Ga 的 TTG 片麻岩形成时的地热梯度 $>30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Wan et al., 2005); 有的作者推断鞍山地区古太古代的奥长花岗质片麻岩的岩浆源区的温度条件为 950~1 000 $^{\circ}\text{C}$, 压力可以达到 1.3~1.4 GPa(Wang et al., 2015)。这样的地壳地热梯度和岩浆源区的温度压力条件, 说明古太古代期间鞍本地区已经具有相当的地壳厚度, 具有了发生区域变质作用的条件。

2 华北克拉通中太古代的变质岩系

中太古代中深变质表壳岩和 TTG 变质岩系, 以中太古代铁架山变质表壳岩、中太古代迁西曹庄岩组和河南鲁山地区中太古代太华杂岩为代表。

铁架山变质表壳岩呈包体状产于辽宁鞍山 3.0 Ga 的铁架山花岗岩中, 包体规模很小, 岩石主要是黑云石英片岩、BIF 和石英岩等, 已遭受角闪岩相变质。包体的形成时代不会晚于中太古代, 但变质时代尚不清楚。

分布于河北迁西曹庄—黄白峪地区的中太古代变质表壳岩称曹庄岩组, 组成岩石包括夕线黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、石榴透辉斜长岩、石榴石英岩、铬云母石英岩、角闪黑云片岩、条带状铁英岩和钙硅酸盐岩等, 原岩相当于基性火山岩-沉积建造, 变质程度已达麻粒岩相至高角闪岩相。角闪片麻岩中碎屑锆石年龄为 3 684~3 354 Ma, 强烈重结晶锆石的边部叠加了约 2.5 Ga 的变质年龄(Liu et al., 2013), 它与年龄为 3 284~3 129 Ma 的英云闪长质片麻岩一起分布于大面积的 2.5~2.6 Ga 的花岗质片麻岩中(Nutman et al., 2011)。毕建成(1989)曾获得

本区主期麻粒岩相变质温度为 750~870 $^{\circ}\text{C}$, 压力为 0.45~0.66 GPa, 属中温中压型变质作用, 伍家善等(1998)和闫月华等(1991)曾测得曹庄组变质作用温压条件为 730~830 $^{\circ}\text{C}$, 0.5~1.0 GPa 和温度 $>738^{\circ}\text{C}$, 压力 >0.5 GPa, 属中压麻粒岩相变质作用。在曹庄铁矿所夹的变基性火山岩(斜长角闪岩)中获得了(2859 $\pm$ 22) Ma 的不一致线上交点年龄(郑梦天等, 2015), 可能代表曹庄岩组的形成时代, 之后经历了新太古代末—古元古代初的变质改造(Nutman et al., 2011; 郑梦天等, 2015)。

分布于河南鲁山地区的太华杂岩(以往称为下太华岩群), 主要由斜长角闪岩和 TTG 岩系组成, 已遭受高角闪岩相变质。利用离子探针测得斜长角闪岩中锆石的原岩年龄为 2 845~2 838 Ma, 变质锆石年龄第一期为 2 776~2 792 Ma, 第二期为 2 671~2 651 Ma, TTG 的形成年龄为 2 832~2 829 Ma, 变质年龄为 2 772 Ma(Liu et al., 2009), 第五春荣等(2010)应用 LA-ICP-MS 测得锆石原岩年龄基本一致。

3 华北克拉通的新太古代变质岩系

新太古代变质岩系可进一步区分出三个系列: 第一个系列为麻粒岩-TTG-变质岩系, 第二个系列为新太古代麻粒岩-角闪岩相+TTG 变质岩系, 第三个系列为新太古代绿岩花岗岩组合。

3.1 麻粒岩-TTG-变质岩系

第一个变质岩系列主要分布于阴山西乌兰不浪和大青山地区、辽西建平、辽北清原、冀东、沂水、抚顺等地。麻粒岩一般呈东西向面状分布于大片深变质的 TTG 岩石之中, 变质程度达中低压高温麻粒岩相, 有的局部退变为高角闪岩相, 峰期变质一般达 800~850 $^{\circ}\text{C}$ 或更高, 压力达 0.5~0.9 GPa, p - T 轨迹为逆时针型, 原岩形成时代为 2 560~2 540 Ma, 变质年龄为 2 519~2 480 Ma, 但不同地区有所差异, 如沂水地区麻粒岩的原岩形成于 2 695~2 562 Ma, 变质作用发生在 2 522~2 509 Ma 期间, 2 488 Ma 经历了流体改造(赵子然等, 2009)。在麻粒岩中见有变质年龄为 2 719 Ma 的残余变质锆石(赵子然等, 2009), 表明可能存在新太古代早期的变质作用。辽西建平杂岩中麻粒岩形成于 2 522~2 520 Ma 之间, 麻粒岩相变质作用发生于 2 490~2 485 Ma(Kröner et al., 1998); 原岩为表壳岩的角闪斜长片麻岩和黑云斜长片麻岩的结晶年龄为 2 555~2 550 Ma, 闪长质片麻岩的结晶年龄为(2512 $\pm$ 15) Ma, 紫苏斜长质片麻岩的结晶年龄为(2510 $\pm$ 2) Ma, 它们都经历了新太古代末—古元古代初(2 512~2 471 Ma)的变质改造(Liu et al., 2011)。这一系列变质岩的麻粒岩相 p - T 轨迹均为逆时针型, 其代表性的 p - T 轨迹如图 2 所

示。这一系列大量的 TTG 片麻岩和逆时针的中低压麻粒岩相变质特点表明其形成与大规模的地幔上涌有关, 标志着克拉通的形成。

3.2 麻粒岩-角闪岩相+TTG 变质岩系

新太古代第二个系列为角闪岩相为主夹麻粒岩相变质表壳岩和 TTG 岩系, 主要见于太行山阜平和赞皇等地区。阜平地区的阜平杂岩原岩为火山-沉积岩系, 变质程度达高角闪岩相至麻粒岩相, Zhao 等(1999)和刘树文(1996)分别对岩系中的基性麻粒岩做过峰前、峰期、峰期后的矿物共生组合和温度条件的研究, 均得出一条顺时针轨迹(图 3c, e)。据刘树文(1996)研究, 其峰期阶段的矿物共生组合为 $\text{Grt}+\text{Cpx}+\text{Pl}+\text{Hy}$, 形成温度为 $670\sim 740^\circ\text{C}$, 压力为 $0.55\sim 0.7\text{ Ga}$ 。TTG 岩系的形成年龄最大的达 $(2708\pm 8)\text{ Ma}$, 大部分在 $2\,513\sim 2\,543\text{ Ma}$ 之间, 变质年龄在 $1\,875\sim 1\,717\text{ Ma}$ 之间。新太古代赞皇群主要

由(石榴子石)黑云斜长片麻岩、石榴蓝晶黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩等组成, 其中斜长角闪片岩具有三阶段的变质演化, 组成一条顺时针轨迹(肖玲玲等, 2011; 图 3f)。

3.3 花岗-绿岩组合中的绿岩变质岩系

新太古代第三个系列变质岩系为花岗岩-绿岩组合, 又可分为两个亚大类。第一亚类绿岩为由绿片岩相至角闪岩相的沉积和火山沉积+BIF 组成的变质岩系; 第二亚类的变质岩系由麻粒岩相至高角闪岩相的沉积和火山沉积+BIF 组成的深变质岩系。

第一亚类绿岩主要分布于吉南板石沟、辽北清原、辽宁鞍山、鲁西、河北滦县—青龙、山西五台、内蒙固阳色尔腾山、河南登封等地; 另一亚类由深变质的麻粒岩相至角闪岩相的沉积和火山沉积岩加 BIF 的变质岩系, 以往许多学者将其归入中太古代, 但最近的测年结果都属新太古代, 它们主要分布于

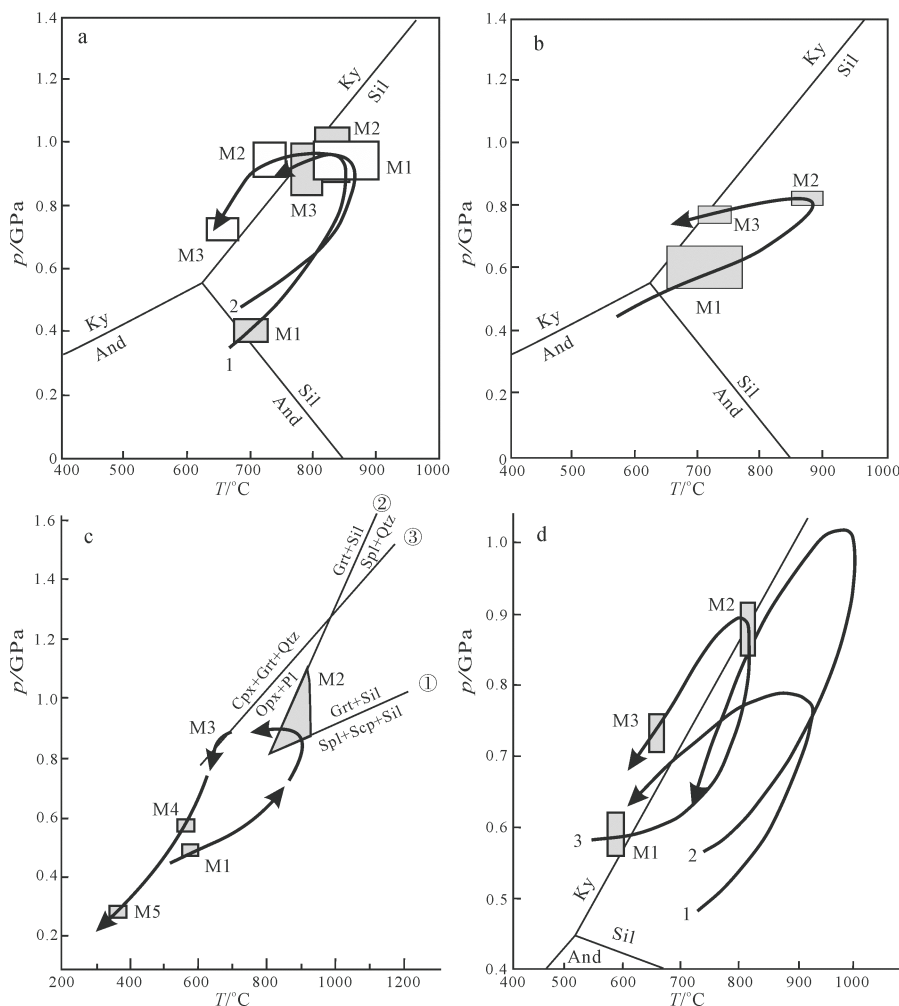


图 2 华北克拉通基底太古宙麻粒岩的代表性 p - T 轨迹

Fig. 2 The p - T paths of Archean granulite in North China Craton basement

a-1-大青山—乌拉山地区, 引自 Zhao et al., 1999; a-2-固阳—武川地区, 引自 Zhao et al., 1999; b-冀东—辽西地区, 引自卢良兆等, 1998; c-山东沂水地区, 引自苏尚国等, 1997; d-吉南—辽北地区, 1 和 2 引自孙德育等, 1993, 3 引自葛文春等, 1994

a-1-Daqingshan-Wulashan region, after Zhao et al., 1999; a-2-Guyang-Wuchuan region, after Zhao et al., 1999; b-eastern Hebei-western Liaoning region, after LU et al., 1998; c-Yishui region, Shandong Province, after SU et al., 1997; d-southern Jilin-northern Liaoning region, 1 and 2 after SUN et al., 1993, 3 after GE et al., 1994

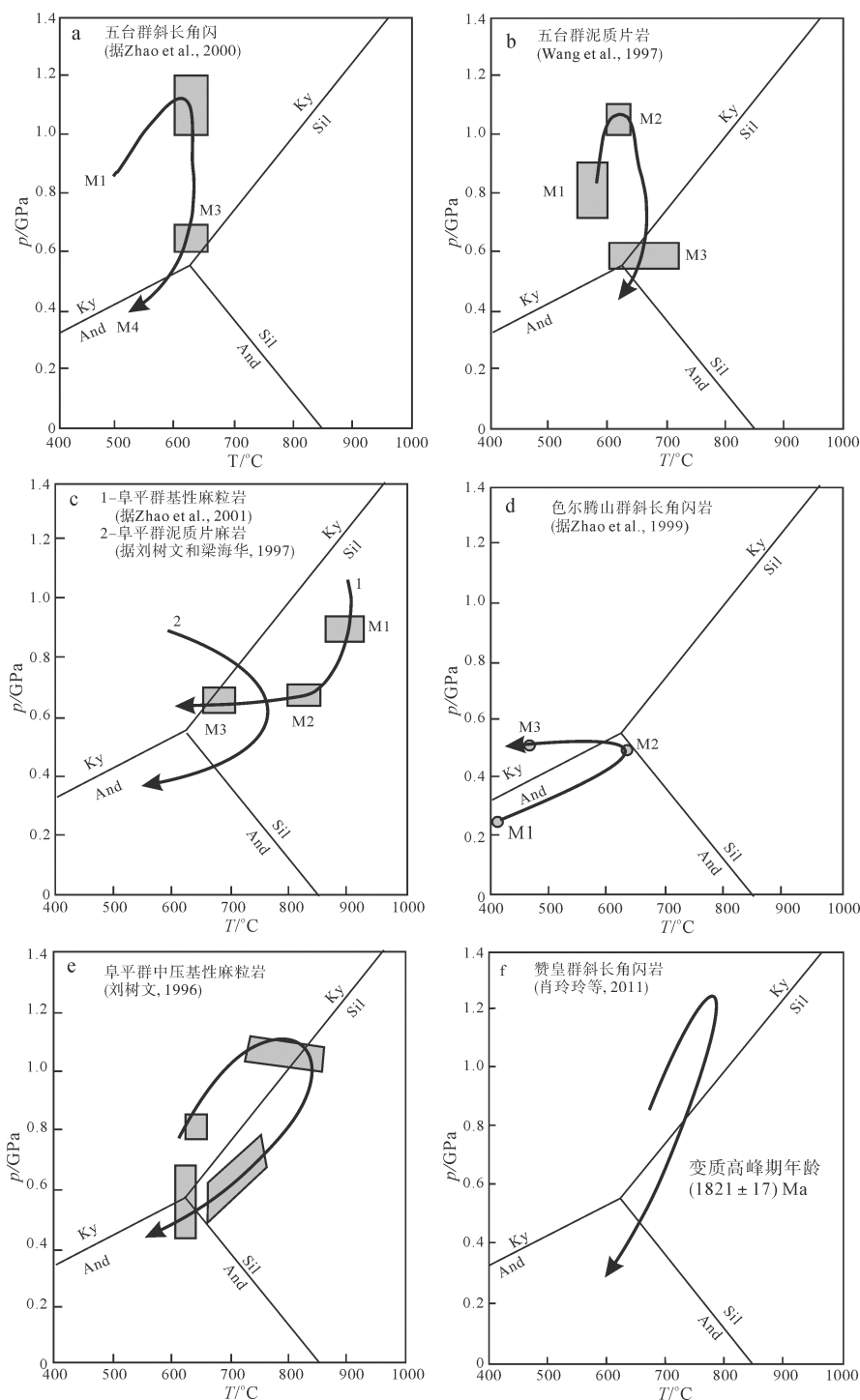


图3 新太古代五台群(a, b)、阜平群(c, e)、色尔腾山群(d)和赞皇群(f)中基性麻粒岩、斜长角闪岩和泥质片麻岩的 p - T 轨迹

Fig. 3 The p - T paths of amphibolite and pelitic gneiss in Wutai Group (a and b), basic granulite and pelitic gneiss in Fuping Group (c and e), amphibolite in Sertengshan Group (d) and Zanzhuang Group (f)

河北迁安—迁西和遵化以及北京密云等地。

现以山西五台、内蒙古色尔腾山、鲁西、辽宁鞍山、辽北清原、河南登封几个地区为例介绍其变质演化特征。

山西五台绿岩由下而上分为繁峙亚群、石嘴亚群和台怀(高凡)亚群,属变质的火山沉积岩系,总体变质程度达绿片岩相-角闪岩相,下部繁峙群以铁铝榴石带和十字石+蓝晶石带为主,缺少绿泥石

带,中上部主要为绿泥石带,五台山北坡石榴云母片岩经历了4个阶段的变质演化,早期阶段为进变质阶段,为低压相系,峰期阶段 $T=630^{\circ}\text{C}$, $p=0.9\text{ GPa}$,峰后阶段温度略有升高,压力下降 $T=660^{\circ}\text{C}$, $p=0.75\text{ GPa}$ 。退变阶段为降温降压,整体构成一条顺时针轨迹。原岩形成年龄为 $2\,530\sim 2\,520\text{ Ma}$,认识比较一致。变质年龄则争论较大, Liu 等(1985)认为石咀亚群黑云变粒岩(2508 ± 2) Ma 的单颗粒锆

石 U-Pb 年龄代表了五台群的区域变质时代; Zhao 等(2000)认为五台地区不存在新太古代的变质事件; Liu 等(2006)根据金岗库组蓝晶石石榴石片岩中独居石的测年结果认为 1 887~1 822 Ma 是五台群的变质作用时代; Qian 等(2013)认为五台群变质年龄为 1.95 Ga; 杨崇辉等(2015)根据五台群上覆的滹沱群底部砾岩中含有与五台群片岩和 BIF 砾石等地质特征认为五台群的变质应在滹沱群沉积之前, 很可能在新太古代末期。

内蒙古固阳县尔腾山花岗绿岩带由超过 1 000 km² 的低级变质的 TTG 岩系和部分绿岩层序所组成, 绿岩岩层包括超镁铁质(科马提岩质)、基性-长英质碱性火山岩, 底部基性岩中含有 BIF, 岩石已变质为绿片岩相至低角闪岩相, 原岩形成于裂谷环境, 绿片岩相的温度下限为 400℃ 左右(李树勋等, 1994), 绿岩带底部石榴斜长角闪岩已变质为角闪岩相, 据李树勋等(1987)和金巍(1989)的研究(转引自 Zhao et al., 1999)其变质过程为: M₁ 变质阶段的矿物共生组合为 Chl+Ep+富钠 Pl, 多为包裹体包于石榴子石颗粒中, 是基性岩的典型绿片岩相矿物组合, 形成温度为 400℃, 压力平均为 0.25 GPa; M₂ 阶段为峰期阶段, 矿物共生组合为 Hbl(核)+Pl(核 An₃₀)+Qtz±Grt, 形成温度为 635℃, 压力为 0.5 GPa; M₃ 阶段为退变质阶段, 矿物共生组合为 Act+Ep+Pl(边 An₂₆)+Qtz, 形成温度为 450℃, 压力为 0.5 GPa, 显示近等压冷却, 总体为一条逆时针 *p-T* 轨迹(图 3d), 但有争论。色尔腾山绿岩的原岩时代为 2 560~2 570 Ma(刘利等, 2012), 奥长花岗岩的年龄为 (2 520±9) Ma, 埃达克质闪长岩的年龄为 (2 559±14) Ma(简平等, 2005), 英云闪长岩的年龄为 (2 516±7) Ma, 变质年龄大体在 2 489~2 455 Ma 之间。

鲁西花岗岩-绿岩带中的绿岩主要由新太古代的泰山岩群和济宁岩群组成, 泰山岩群呈北北西向带状分布于泰山西南峪、新泰雁翎关、柳桥等地; 济宁岩群分布于北东向滋阳山一带, 被覆盖于盖层之下, 地表未见出露。泰山岩群主要由斜长角闪岩、黑云变粒岩、透闪阳起片岩、变质砾岩、石榴黑云石英岩及超镁铁质科马提岩等组成, 原岩为一套超镁铁质和基性火山岩夹科马提岩, 有变余枕状构造、杏仁构造和鬃刺结构, 变质作用达角闪岩相。泰山岩群可分为晚太古代早期的孟家庄岩组、雁翎关岩组和柳杭组下部, 岩石形成年龄为 2 750~2 700 Ma, 变质年龄为 2 690~2 640 Ma(杜利林等, 2003, 2005; 陆松年等, 2008), 这期变质作用是鲁西地区重要的构造热事件(万渝生等, 2012)。太古代晚期的山草峪组、柳杭组上部, 岩群中富含 BIF, 其变质程度已达

角闪岩相, 原岩形成年龄 2 540~2 530 Ma, 区域变质作用和深熔年龄为 2 500 Ma(Wang et al., 2014)。济宁岩群亦含 BIF, 变质程度为绿片岩相, 形成年龄为 2 561~2 520 Ma, 变质年龄为 2 500~2 490 Ma(王伟等, 2010; Wan et al., 2012b)。据山东省区域地质志(2013 送审稿)报道, 泰山群雁翎关组斜长角闪岩的变质演化可分为 3 个阶段: 峰期变质阶段, 变质程度达高角闪岩相, 矿物共生组合为 Hbl₁+Pl+Qtz+Bt, 形成的温度为 532~600℃, 压力为 0.6 GPa, 峰后近等压降温, 矿物共生组合为 Hbl₂+Pl±Qtz±Bt, Act+Bt+Pl±Qtz, 变质温度为 443~550℃, 压力为 0.4~0.5 GPa, 后期韧性剪切叠加, 变质达绿片岩相, 矿物共生组合为 Chl+Ab+Qtz, Act+Ab+Chl+Qtz, Ep+Chl+Ab, 温度为 450℃, 压力为 0.15 GPa。

辽宁鞍山一本溪花岗-绿岩带的绿岩, 主要指狭义的鞍山群, 暂未包括其下部的深变质岩系, 岩石包括黑云变粒岩、斜长角闪岩、条带状铁英岩、阳起铁英岩夹少量各种片岩(例如石榴石英黑云片岩、绢云绿泥石英片岩、二云石英片岩等), 是一套以英安质火山凝灰岩、基性火山岩、泥质-粉砂质沉积岩以及硅铁质化学沉积岩等组成的火山-沉积建造, Zhai 等(1990)对绿岩带中的斜长角闪岩、条带状铁矿的地球化学、变质作用和岩石成因做过较详细研究。岩石已变质为绿片岩相至低角闪岩相, 局部达高角闪岩相, 不同的地区变质相有些差别, 如在鞍山地区的东西鞍山、大孤山、齐大山至眼前山一带, 岩石的变质程度达绿片岩相, 辽阳弓长岭、本溪歪头山、南芬等地的岩石变质程度一般达低角闪岩相, 局部达高角闪岩相, 变质温度一般为 550~650℃, 压力为 0.3~0.6 GPa, 相当于低-中压, 变质岩系的原岩形成时代为 2 540~2 530 Ma, 变质时代为 2 481~2 409 Ma(Cui et al., 2013; 代堰锴等, 2013)。

冀东地区的花岗岩-绿岩带分布于滦县、滦南、卢龙、青龙一带, 绿岩主要以滦县群和朱杖子群/双山子群为代表, 以富含 BIF 为特征, 滦县群的变质岩主要包括黑云变粒岩(为主), 斜长角闪岩、黑云长石石英岩、条带状铁英岩、镁铁闪石或铁闪石石英岩、阳起石英岩和次透闪石岩, 原岩为一套中酸性凝灰岩、凝灰质黏土半黏土岩及粉砂岩和化学沉积的铁硅质建造, 变质相以低角闪岩相为主, 局部出现高角闪岩相或高绿片岩相, 原岩的形成年龄为 (2 543±8) Ma(Nutman, 2011), 其变质年龄为 2 500 Ma 左右。朱杖子/双山子群的变质岩主要为绢云母石英片岩、黑云母类片岩、石榴云母石英片岩夹角闪石

英片岩、条带状铁英岩, 原岩为一套陆源的黏土半黏土质和粉砂质沉积岩, 夹少量中基性火山岩和中基性凝灰岩, 变质程度为低角闪岩相-高绿片岩相, 原岩的形成年龄朱杖子群为 $(2\ 511\pm12)$ Ma, 双山子群为 $(2\ 503\pm13)$ Ma, 扎兰杖子 BIF 夹层黑云斜长变粒岩的形成年龄为 $(2\ 572\pm8)$ Ma。变质作用时间约为 2 500 Ma, 可能与华北克拉通东部陆块发生的岩浆底侵作用有关(陈靖等, 2015)。

辽北清原新太古代花岗-绿岩带出露面积约 8 000 km², 70%为花岗质岩石, 绿岩仅占 30%(Zhai et al., 1985)。绿岩带由下而上可分为三个岩组: 下部石榴子岩组主要由斜长角闪岩、辉石角闪岩, 少量层状黑云斜长片麻岩、浅色含黑云母片麻岩组成, 下部原岩为超基性-基性火山岩夹数层科马提岩, 中部原岩为一系列海相拉斑玄武岩夹薄层和透镜状科马提岩, 上部原岩为双峰式火山岩。变质程度达角闪岩相, 局部麻粒岩相。中部红透山组主要有互层状薄层斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩和含夕线石、蓝晶石的石英片麻岩组成, 夹块状硫化物铜矿。其原岩为钙碱性火山岩, 底部为拉斑玄武岩-安山岩-流纹岩, 上部夹有拉斑玄武岩、安山岩、英安岩和少量泥质岩, 含铜矿。上部南天门组主要由黑云斜长片麻岩、白云-黑云石英片岩、细粒角闪斜长片麻岩、磁铁石英岩、大理岩和石英岩等组成。岩石变质程度近于角闪岩相。整个绿岩带变形强烈, 构造复杂, 原岩时代相当于新太古代, 尚缺少变质年龄数据。

河南登封地区的花岗岩-绿岩带中绿岩主要以登封群为代表, 呈不规则体分布于花岗质片麻岩中, 它由斜长角闪岩、角闪变粒岩、黑云变粒岩及各种片岩, 局部有少量铁英岩组成, 是一套泥质中酸性-基性火山-沉积建造, 变质程度高峰期达中压角闪岩相, 部分为绿片岩相, 游振东和韩玉菁(1981)曾测定斜长角闪岩变质温度为 550~600℃, 压力为 0.45 ~ -0.75 GPa, 变质岩的形成时代为 2 530~2 520 Ma, 变质时代可能为 2 508 Ma(万渝生等, 2009)。

第一亚类花岗-绿岩系中变质绿岩的 p - T 轨迹多为顺时针轨迹, 个别为逆时针轨迹(图 2)。至于这类花岗-绿岩带的形成构造环境一直存在争议, 主要有两种观点: 岛弧岩浆作用和地幔柱作用。

第二亚类为深变质的新太古代的变质岩系, 主要分布于河北迁安、迁西遵化和北京的密云等地区, 有的学者将其归入深变质绿岩系列, 变质岩石主要包括中-基性麻粒岩、斜长角闪岩、辉石岩、铁英岩、黑云斜长片麻岩等, 分布于 TTG 岩系和花岗质片麻岩中, 北京密云、河北迁西、迁安等地的变质岩已变质达中低压麻粒岩相, 局部出现退变的高角闪

岩相, 遵化地区的遵化群变质程度已达高角闪岩相, 部分达麻粒岩相。迁安水厂与 BIF 呈互层的斜长角闪岩的形成年龄为 $(2\ 547\pm7)$ Ma, 变质年龄为 $(2\ 513\pm4)$ Ma(Zhang et al., 2011), 遵化石人沟的同类岩石原岩的形成年龄为 $(2\ 553\pm41)$ ~ $(2\ 541\pm21)$ Ma, 变质年龄为 $(2\ 512\pm13)$ ~ $(2\ 516\pm21)$ Ma (Zhang et al., 2012)。密云地区密云群的形成年龄为 2 540 Ma, 变质年龄为 2 449 Ma(Shi et al., 2012)。总体上, 三地变质岩石原岩形成年龄为 2 540 Ma 左右, 变质作用年龄为 2 512~2 490 Ma。

以上两个亚类的新太古代花岗-绿岩系中变质岩系在原岩建造、形成时代和变质所用时间等方面都非常相近, 可能属同一大地构造环境下的产物, 只是所处的深度不同而已。

4 古元古代的高压麻粒岩和 TTG 组合

古元古代高压麻粒岩相变质的火山-沉积岩系和 TTG 组合, 高压麻粒岩大致沿两条构造带出现(李江海等, 1998), 北亚带高压麻粒岩主要见于西部孔兹岩带东段集宁地区东南侧的 TTG 杂岩基底中, 大致沿赤城沃麻坑、宣化二道岭、水地庄、西葛峪、西望山、万全柳沟, 尚义地上、大虎沟、天镇四方墩、兴和黄土窑等地分布。在赤城沃麻坑地区除见有高压基性麻粒岩, 尚见有高压泥质麻粒岩(马军等, 1995), 围岩以 TTG 片麻岩为主。南亚带高压麻粒岩出现于恒山—五台山绿岩带北侧的片麻岩基底中, 从怀安蔓菁沟经浑源东部到恒山长城沟、黄土坡、张崖、山岔、天京等地, 围岩以花岗片麻岩为主, 在恒山白马石北部还发现退变榴辉岩(翟明国等, 1995), 除高压泥质麻粒岩呈薄层状夹于高压基性麻粒岩中外, 高压基性麻粒岩成透镜状、布丁状、或似层状、岩墙状分布于 TTG 岩系或花岗质片麻岩之中, 基性麻粒岩大部分为岩浆成因。许多高压基性麻粒岩保存了 Grt(高 Ca 核部)+Pl+Cpx+Qtz 的高压麻粒岩相矿物组合(M1), Grt+Pl+Cpx+Opx+Qtz 的中压麻粒岩相矿物组合(M2), Opx+Cpx+Pl+Qtz 的低压麻粒岩相组合(M3)和 Hbl+Pl 的角闪岩相矿物组合。另外, 在恒山和蔓菁沟产出的高压麻粒岩保存了早期榴辉岩相的 Grt+Qtz+Omp(假象)的矿物组合。高压基性麻粒岩的峰期温度一般在 780~850℃, 压力达 1.3~1.5 GPa。变质过程组成的 p - T 轨迹显示为顺时针轨迹, 峰期起显示近等温降压, 之后为降温降压, 图 4 为这些轨迹的代表。

高压泥质麻粒岩典型的矿物组合为蓝晶石+三元长石和蓝晶石+石榴石+金红石(马军等, 1995)。

高压麻粒岩的形成时代过去一直认为是新太古代, 近来更多的学者趋向于它们形成于古元古代

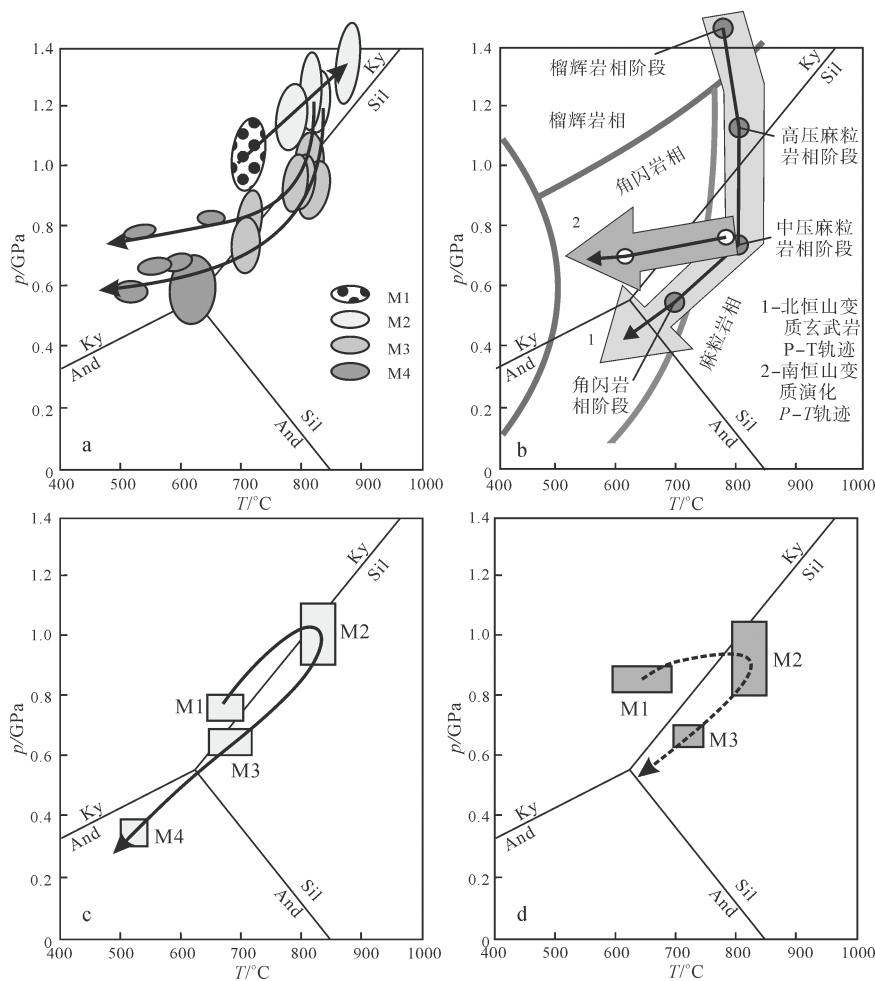


图 4 恒山—怀安高压麻粒岩带代表性变质演化 p - T 轨迹

(a-怀安地区, 据 Guo et al., 2012; b-恒山地区, 据 O'Brien et al., 2005; c-怀安地区基性麻粒岩, 转引自 Zhao, 2000; d-怀安地区富铝片麻岩, 据刘福来, 1995)

Fig. 4 The p - T paths of high-pressure granulites of basic granulite in Huai'an area (a, after Guo et al., 2012), of basic granulite in Hengshan area (b, after O'Brien et al., 2005), of basic granulite in Huai'an area (c, after Zhao, 2000); and of rich-Al gneiss in Huai'an area (d, after LIU, 1995)

(约 1 915 Ma 左右), 变质时代在 1 850 Ma 左右。也有的学者认为高压基性麻粒岩形成和变质的时代更老, 1 850 Ma 经历的是大面积的高角闪岩相变质事件(初航等, 2012)。多数学者认为高压基性麻粒岩形成于俯冲碰撞的大地构造环境。

第二种类型是含有中低压/高压麻粒岩、超高温麻粒岩或只含高压麻粒岩的古元古代变质孔兹岩系。前者主要分布于华北克拉通北部孔兹岩带的贺兰山—千里山、乌拉山—大青山和集宁及其相邻地区, 后者主要见于胶北莱西—平度一带的荆山岩群分布区和河南嵩山的孔兹岩系中。

华北北缘变质孔兹岩系在西段的贺兰山—千里山地区见有中低压麻粒岩(Zhao et al., 1999)和高压泥质麻粒岩(周喜文和耿元生, 2009; Yin, 2010; 周喜文等, 2010; Yin et al., 2011), 在中-东段的大青山和集宁及其相邻地区见有高压基性麻粒岩, 而在大青山东坡和集宁的土贵乌拉和林格尔地区见有具假蓝宝石+石英组合和尖晶石+石英组合, 变质温

度达到 950~1 000℃的超高温泥质麻粒岩(Santosh et al., 2006, 2007a, 2007b, 2009a, 2009b, 2012, 2013; Santosh and Kusky, 2010; Tsunogae et al., 2011; Liu et al., 2012; Guo et al., 2012)。现有的同位素年代学数据显示, 华北北缘孔兹岩带在 1 950 Ma 前后经历了高压/中低压的麻粒岩相变质, 在 1 920 Ma 左右大青山东坡和集宁地区孔兹岩系中富铝的泥质岩石遭受到超高温麻粒岩相改造。1 920 Ma 的年龄向西可以延伸到千里山地区, 但是该地区未发现超高温的泥质麻粒岩。

中低压/高压麻粒岩的变质演化轨迹均显示出等温降压的顺时针轨迹, 超高温泥质麻粒岩则显示出逆时针的变质演化轨迹(图 5), 它们是在不同变质条件下连续发展过程中形成的。赵国春提出, 华北克拉通北缘孔兹岩带是由阴山陆块与鄂尔多斯陆块在 1 950 Ma 左右相互碰撞、地壳加厚, 导致了高压麻粒岩相变质作用; 在地壳回返过程中, 1 920 Ma 左右地幔上涌带来的热源导致超高温麻粒岩相的变

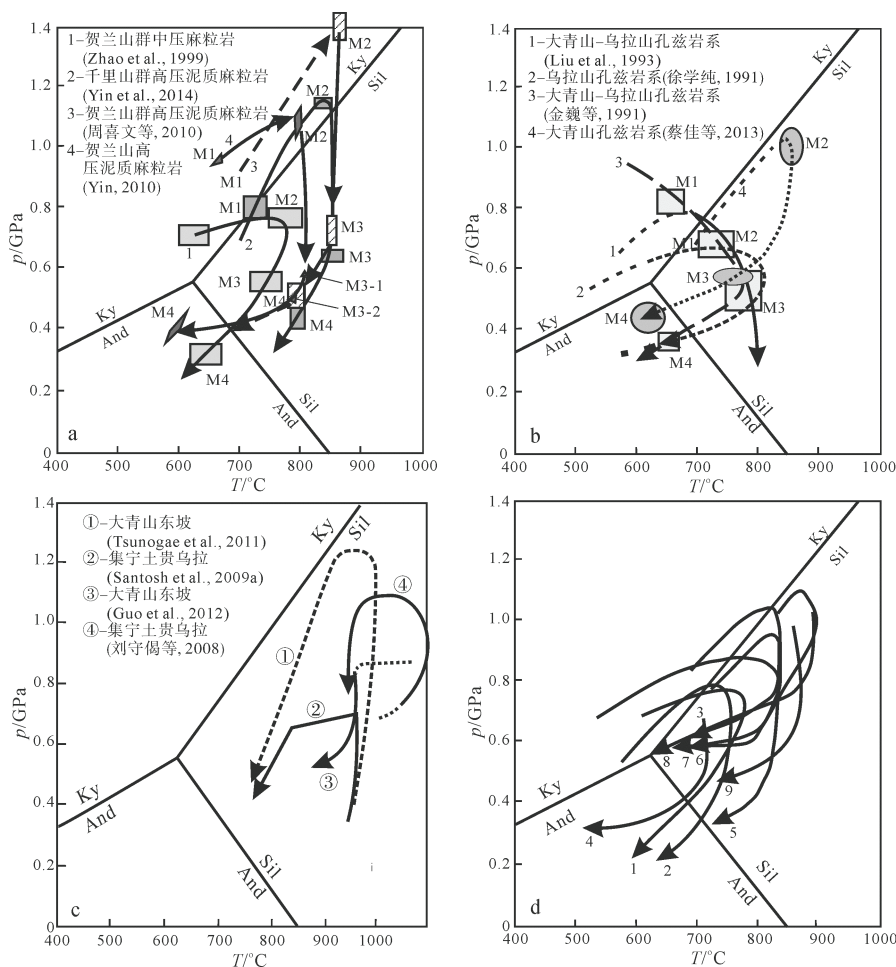


图 5 华北克拉通西部孔兹岩带高级变质岩的 p - T 轨迹

Fig. 5 The p - T paths of high-grade metamorphic rocks of western khondalite belt, North China Craton

a-贺兰山—千里山地区; b-大青山—乌拉山地区; c-集宁和大青山东坡超高温麻粒岩; d-集宁—大同地区(1-集宁孔兹岩系(Zhao et al., 1999); 2-集宁基性麻粒岩(Zhao et al., 1999); 3-集宁孔兹岩系第一次变质事件的 p - T 轨迹(卢良兆等, 1992); 4-集宁孔兹岩系第二次变质事件的 p - T 轨迹(卢良兆等, 1992); 5-大同以东孔兹岩系的 p - T 轨迹(刘福来, 1997); 6-集宁孔兹岩系中高压泥质麻粒岩(Wang et al., 2011); 7-大同孤山高压石榴基性麻粒岩的 p - T 轨迹(王洛娟等, 2011); 8-集宁孔兹岩系中石榴石岩的 p - T 轨迹(Jiao et al., 2013); 9-集宁三岔口孔兹岩的 p - T 轨迹(蔡佳等, 2014))

a-Helanshan-Qianlishan region; b-Daqingshan-Wulashan region; c-eastern slope of Jining and Daqingshan: HT granulites; d-Jining-Datong region(1-Jining khondalite(Zhao et al., 1999); 2-Jining basic granulite(Zhao et al., 1999); 3- p - T path of first metamorphic epoch(LU et al., 1992); 4- p - T of second metamorphic epoch(LU et al., 1992); 5- p - T path of khondalite in eastern Datong(LIU, 1997); 6-HP pelitic granulite in Jining khondalite(Wang et al., 2011); 7- p - T of HP garnet basic granulite in Gushan, Datong(WANG et al., 2011); 8- p - T path of granulite in Jining khondalite(Jiao et al., 2013); 9- p - T path of khondalite in Sanchakou, Jining(CAI et al., 2014))

质。但最近的研究资料显示, 鄂尔多斯盆地深部出露的岩石与贺兰山—千里山出露的古元古代孔兹岩系基本一致(Wan et al., 2013), 它们总体呈面状分布。只是贺兰山—千里山的岩石出露地表, 而鄂尔多斯地区的孔兹岩系被深埋地下, 其上被寒武—奥陶纪和中生代地层所覆盖。阴山陆块与鄂尔多斯陆块碰撞之说成了疑问, 需要进一步深入研究。

胶北莱西—平度一带的荆山群属古元古代变质岩系, 与其北侧出露的粉子山群为同时异相沉积, 但粉子山群不含高压泥质麻粒岩, 变质作用仅达角闪岩相, 赵国春(未刊资料)曾认为其变质 p - T 轨迹为顺时针型。荆山群变质岩系主要是一套变泥砂质沉积岩系, 变质程度为角闪岩相—麻粒岩相, 高压基性麻粒岩和泥质麻粒岩呈透镜状产出。最初, 卢良

兆等(1996)曾测得其变质岩具有逆时针的变质演化轨迹。周喜文等(2004)首次在荆山群中发现高压泥质麻粒岩, 并具有顺时针 p - T 轨迹。Tam等(2012a, b)也对荆山群的高压泥质麻粒岩进行了研究, 认为其具有顺时针的 p - T 演化轨迹, 但与周喜文等(2004)所确定的 p - T 演化轨迹形态有较大差异(图 6)。同位素年龄资料表明, 荆山群的变质作用发生在 1 901~1 838 Ma 期间, 属于古元古代末期(刘平华等, 2011)。早期的研究认为荆山群的形成与变质发生在裂谷环境, 后来的研究多认为其形成与碰撞环境有关(Zhao and Zhai, 2013)。

河南鲁山一带的古元古代鲁山岩群(原称为上太华群)是含麻粒岩的变质岩系。岩石主要包括石墨石榴夕线片麻岩、二云母石英片岩、斜长角闪岩、

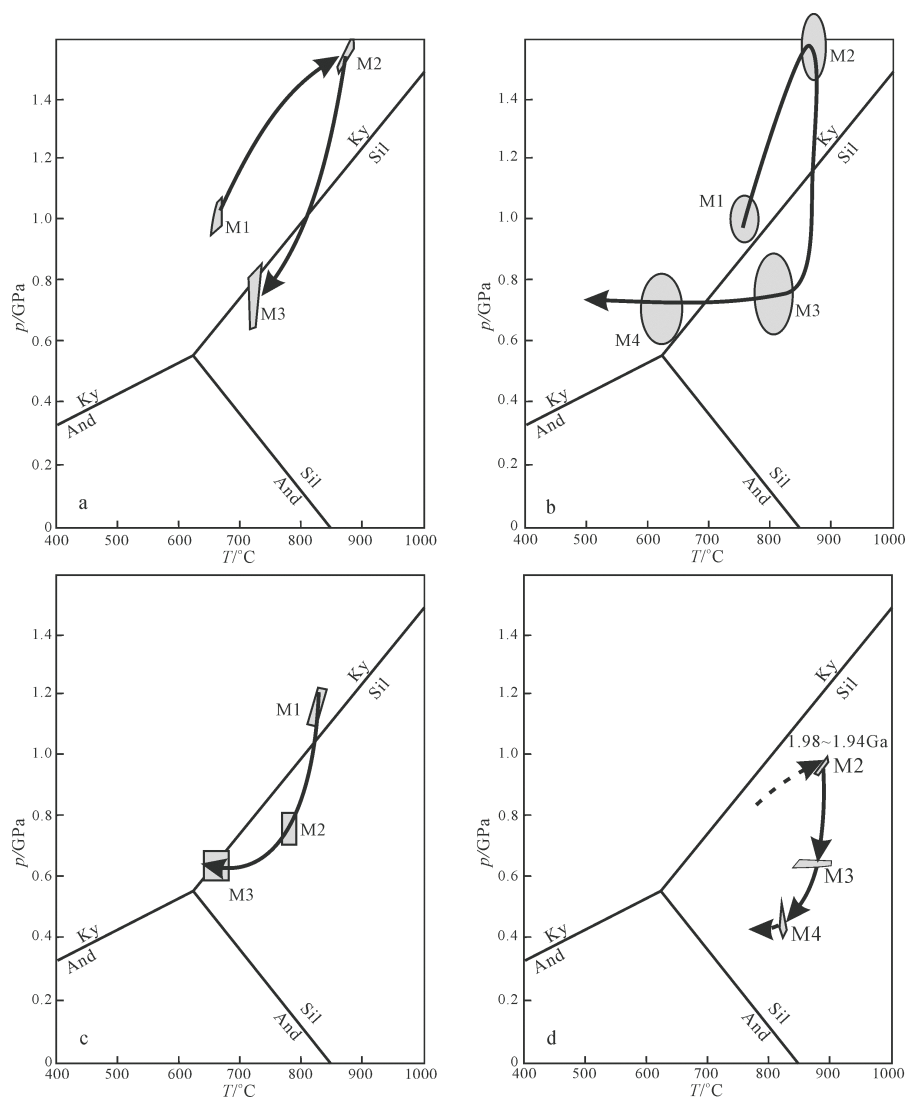


图 6 胶北地体中高压基性麻粒岩、高压泥质麻粒岩的变质演化 p - T 轨迹

Fig. 6 The metamorphic p - T paths of M-HP basic granulites and HP pelitic granulites in Jiaobei terrain

a-胶北地体中高压泥质麻粒岩(Tam et al., 2012a); b-胶北地区 TTG 片麻岩中高压基性麻粒岩(刘平华等, 2010);

c-胶北地体中荆山群高压泥质麻粒岩(周喜文等, 2004); d-荆山群中压泥质麻粒岩(Tam et al., 2012b)

a-M-HP pelitic granulite(Tam et al., 2012a); b-M-HP basic granulite in TTG gneiss(LIU et al., 2010);

c-HP pelitic granulite of Jingshan Group(ZHOU et al., 2004); d-pelitic granulite of Jingshan Group(Tam et al., 2012b)

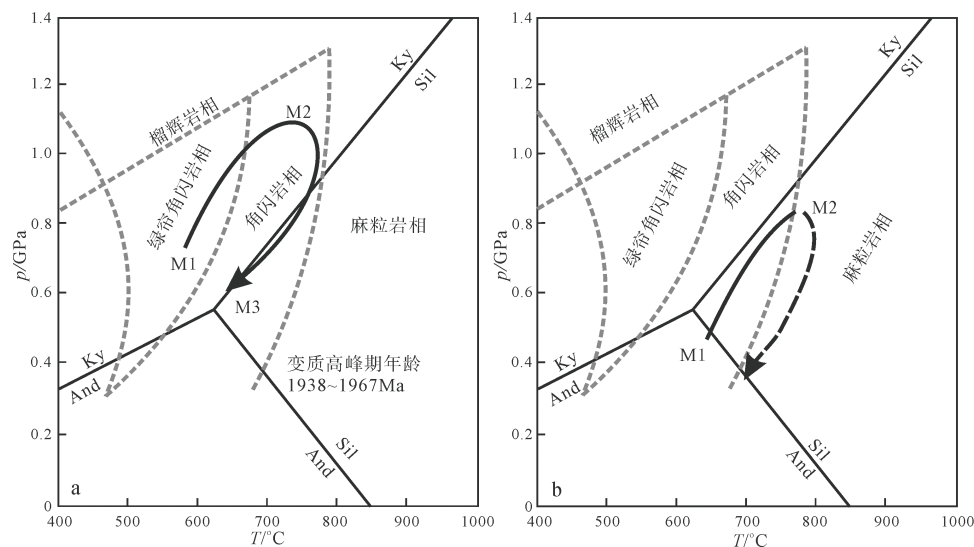


图 7 河南洛宁地区古元古代鲁山群斜长角闪岩(a)和泥质片麻岩(b)变质演化 p - T 轨迹(据蒋宗胜等, 2011)

Fig. 7 The p - T paths of amphibolite (a) and pelitic gneiss (b) from Paleoproterozoic Lushan Group complex, Henan Province (after JIANG et al., 2011)

大理岩、石榴斜长角闪岩等, 并夹有石榴二辉麻粒岩(孙勇, 1983)。在河南洛宁地区的时代岩系, 不论是石榴斜长角闪岩还是泥质麻粒岩都记录了顺时针的近等温降压型 p - T 轨迹(蒋宗胜等, 2011; 详见图 7)。斜长角闪岩峰期变质年龄在 1 938~1 967 Ma 间(蒋宗胜等, 2011), 石墨石榴夕线片麻岩的变质锆石年龄为(1 844±66) Ma, 片麻状石榴花岗岩中变质锆石年龄为(1 871±14) Ma(Wan et al., 2006)。不同岩石测定的变质年龄结果有一些差别, 但基本可以确定其变质时代为古元古代晚期, 比中央造山带的碰撞年龄 1 850 Ma 更早一些。

5 不含高压麻粒岩的古元古代变质岩系

主要分布于阜平—赞皇、五台滹沱、中条吕梁、吉南、辽宁辽河等地区。不同地区的变质岩系变质程度有较大差异, 总体变质较浅, 一般为绿片岩相, 局部达低角闪岩相至高角闪岩相。

阜平地区从原阜平杂岩中分出的古元古代的湾子群主要由泥质片岩组成。刘树文和梁海华(1997)通过对平山西柏坡出露的石榴十字片岩、石榴铝直闪石片麻岩和夕线二云钾长片麻岩的研究, 将其变质演化分为三个阶段, 早期矿物组合为 Grt+Tau+Pl+Mus+Bt+Rut+Qtz+Kfs, 形成的温压条件为 $T=680^{\circ}\text{C}$ 左右, $p=0.82$ GPa; 中期的矿物组合为 Grt+铝直闪石+Bt+Pl+钛铁矿+刚玉+Sil(毛发状)+Qtz+Kfs+Mus, 形成的温度在 $690\sim 800^{\circ}\text{C}$ 区间, 压力在 $0.65\sim 0.80$ GPa 区间; 晚期矿物组合为铁尖

晶石+Kfs+Sil(针柱状), 形成温度 $T=650\sim 750^{\circ}\text{C}$, 压力 $p<0.65$ GPa; 组成一条顺时针的 p - T 轨迹。

赞皇地区的古元古代官都群和甘陶河群为一套浅变质沉积岩系, 变质程度仅为绿片岩相。

中条地区的绛县群是一套变质的中基性火山沉积建造, 总体经历了高绿片岩相-低角闪岩相的变质改造, 角闪岩相变质的温压条件为 $T=510^{\circ}\text{C}$, $p=0.38$ GPa(孙大中和胡维兴, 1993)。中条群原岩为泥砂质-碳酸盐岩沉积建造, 经历了与绛县群相似的变质作用, 但变质程度更低, 主体为绿片岩相。梅华林(1994)曾对绛县群横岭关组和中条群篦子沟组的泥质岩石进行了变质作用研究, 变质演化具有顺时针 p - T 轨迹型式(图 8)。

吕梁地区的界河口群以碎屑岩-碳酸盐岩为主, 夹少量基性火山岩, 总体经历了角闪岩相的变质改造。吕梁群为一套含条带状铁硅质建造的滨海-浅海陆源碎屑-火山岩建造。据卢保奇等(2003)研究, 在山西娄烦存在由低绿片岩相到低角闪岩相的递增变质带, 由北向南依次为绿泥石带、黑云母带、铁铝榴石带、十字石-蓝晶石带和红柱石-夕线石带, 该变质带的北部和南部分处于不同的变质条件, 北部以中压变质作用为主($p=0.3\sim 0.7$ GPa), 而南部以高温低压变质为主($T=600^{\circ}\text{C}$)。递增变质带的形成和发展受西川河韧性剪切断裂带控制。于津海等(1999)在该地区研究时, 也证实了蓝晶石的存在, 并认为红柱石最早形成, 而后形成了十字石、蓝晶石和石榴石等矿物组合, 而夕线石形成最晚, 所以不应将红柱石(假象)单独划分出一个与夕线石并列的变质带, 红柱石的特征属于接触变质成因。于津海等(1999)还指出, 吕梁群曾遭受两期区域变质, 早期为动力变质为主, 呈南北向分布, 变质程度仅为低绿片岩相。第二次区域变质形成南北向分布的递增变质带。现将吕梁群和阜平地区湾子群的富铝片麻岩的变质演化 p - T 轨迹列于图 9。中条山前寒武纪的变质岩的变质时代为 1 885~1 850 Ma(刘树文等, 2007), 吕梁山变质岩的变质时代为 1 890~1 870 Ma(Trap et al., 2009)。

吕梁地区还分布有较吕梁群更新的一些古元古代地层, 如岚县群、野鸡山群和黑茶山群等。岚县群是一套陆源碎屑岩-碳酸盐岩建造, 野鸡山群为一套陆源碎屑岩-火山岩建造。这两个群均已遭受低绿片岩相-高绿片岩相变质改造。黑茶山群为磨拉石建造, 分布局限, 仅受到低绿片岩相变质改造。河南嵩山地区的嵩山群为一套泥砂质碎屑岩组合, 变质程度仅为低绿片岩相。五台山地区的滹沱群分布于五台群南侧, 不整合于五台群之上, 主要变质岩石类型有变质砾岩、变质砂岩、变质砂板岩、千枚岩、结晶碳酸盐岩和变质基性火山岩。典型的变

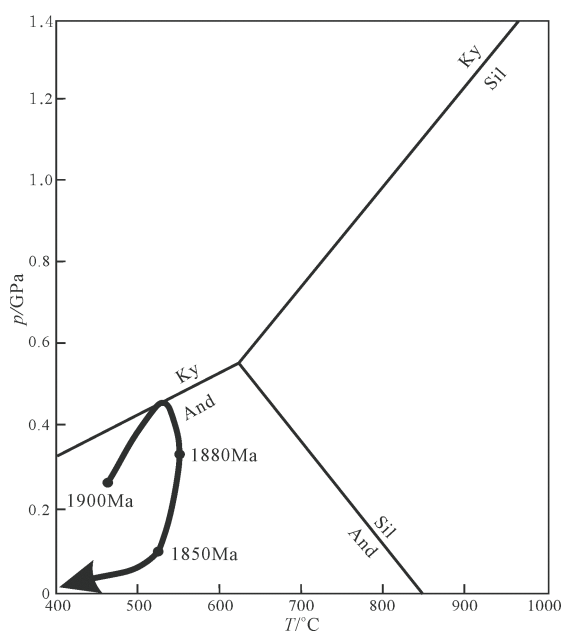


图 8 中条地区古元古代绛县群和中条群变泥质岩石的变质演化 p - T 轨迹(据梅华林, 1994)

Fig. 8 The metamorphic p - T path of pelitic rocks in Paleoproterozoic Jiangxian Group and Zhongtiao Group, Zhongtiao region (after MEI et al., 1994)

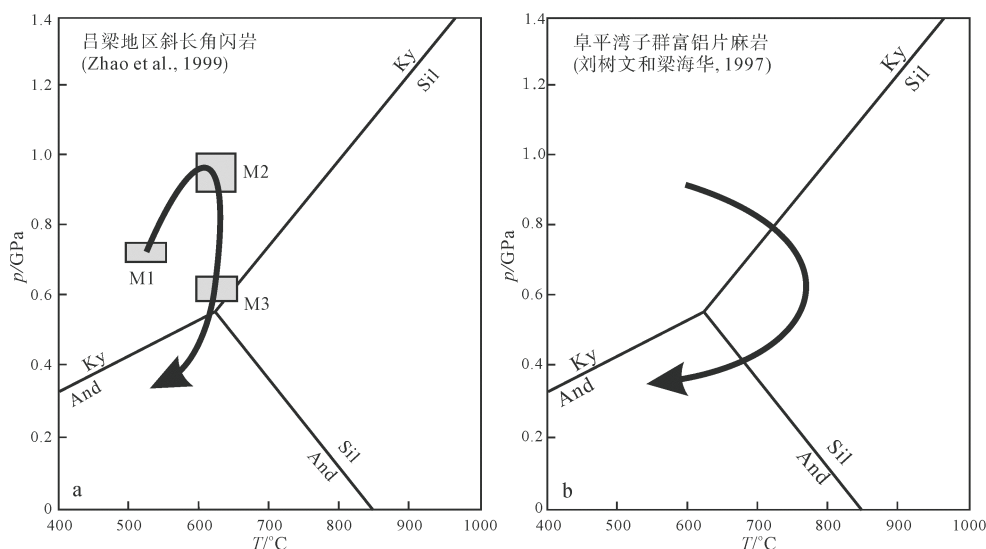


图 9 吕梁地区古元古代斜长角闪岩(a)及阜平地区湾子群富铝片麻岩(b)的 p - T 轨迹

Fig. 9 The p - T paths of Paleoproterozoic amphibolite from Lüliang region (a) and rich-Al gneiss from Wanzi group, Fuping region (b)

质矿物组合有: Ser+Chl+Qtz+Pl(富钠)、Pl(富钠)+Act+Ep±Qtz。根据 Ser-Chl 矿物对计算的变质温度为 270~370°C, 根据白云母 b_0 值计算的变质压力为 0.51~0.81 GPa, 属于高压型绿片岩相变质(党修鹏, 1993)。

吉南地区的老岭群和集安群以及辽宁地区的辽河群是古元古代浅变质岩系的重要代表。

邵建波等(1995)利用石榴子石成分环带反演构建了集安群泥质变质岩的变质演化轨迹。认为轨迹反映了两个阶段的变质演化过程, 早期是逆时针的演化轨迹, 晚期是顺时针的演化轨迹, 说明两个阶段的变质作用发生于不同的构造演化阶段。

贺高品和叶慧文(1998a, b)对辽宁的辽河群和吉南的老岭群、集安群研究后提出: 北辽河群和老岭群可合称为辽北变质地体, 变质程度达中压低角闪岩相, 变质演化的 p - T 轨迹为顺时针型, 其形成与推覆构造产生的构造增压有关; 南辽河群和集安群可合称为辽南变质地体, 变质程度为低压高角闪岩相, 变质演化的 p - T 轨迹属逆时针型, 与岩浆增温作用有关。

郭伟静和郭洪芳(2006)应用 p - T - t 理论再认识辽河群的变质作用。他们根据红柱石、堇青石和夕线石的空间分布特征, 将辽河群划分为中压相系和低压相系两部分, 北侧为中压相系具有递增变质带, 南侧为低压相系。北侧中压相系分布区自北而南划分出黑云母带、石榴子石带、十字石带和蓝晶石带, 呈现递增变质带的特点。

黑云母带位于中压相系的北部地区, 分布于下达河—田师傅—木孟子一带, 主要变质矿物组合为 Mus+Qta+Bt±Chl, Pl+Bt+Qtz+Mus;

石榴子石带分布于海城市—草河掌—八里甸子一带, 主要变质矿物组合为 Bt+Mus+Alm+Qtz, Bt+Mus+Alm+Pl+Qtz, Bt+Alm+Pl+Qtz, Alm+Bt+Pl+Mic+Qtz 和 Mus+Bt+Chl+Alm+Pl+Qtz;

十字石带分布于吉洞峪—赛马一带, 主要变质矿物组合为 Bt+Mus+Pl+St+Alm+Qtz, Bt+Pl+St+Alm+Qtz 和 Bt+St+Qtz+Alm;

蓝晶石带分布于青石岭—青城子一带, 主要变质矿物组合为 St+Ky+Bt+Alm+Qtz±Pl 和 St+Ky+Bt+Qtz±Alm±Mus。

郭伟静和郭洪芳(2006)认为不同级别的矿物组合均为变质作用峰期的产物, 因而不同意贺高品等(1998a, b)在划分变质阶段的基础上计算出的每个变质阶段矿物组合形成的温度压力数据。并且认为变质作用是一个连续演化的过程, 不宜划分阶段, 矿物组合反映的变质级别差异可能代表变质时不同部位的埋深不同。总之, 他们认为辽河群北部中压相系的矿物组合是大陆碰撞造山带变质作用常见的情况, 南部出现低压相系的矿物组合则与大陆碰撞造山带中产生的熔融体的加热作用有关。据 Li 等(2006)的研究, 辽吉花岗岩和南北辽河群具有相同的 ε_{Nd} 值, 严格限于 0 到 2, 说明它们具有相似的物源, 并且辽吉花岗岩与伴生的南北辽河群具有相似的 Nd 模式年龄(T_{Dm} 从 2.4 Ga 到 2.6 Ga), 说明二者基本同时形成, 它们形成于同一个大陆块体在古元古代形成的裂谷环境。赵国春(2009)根据粉子山群(Zhao 未刊资料)、北辽河群(贺高品等, 1998b; 李三忠等, 2001)、老岭群(贺高品等, 1998b)所测得的顺时针 p - T 轨迹以及荆山群(卢良兆等, 1996)、南辽河群和集安群(贺高品等, 1998b; 李三忠等, 2001)

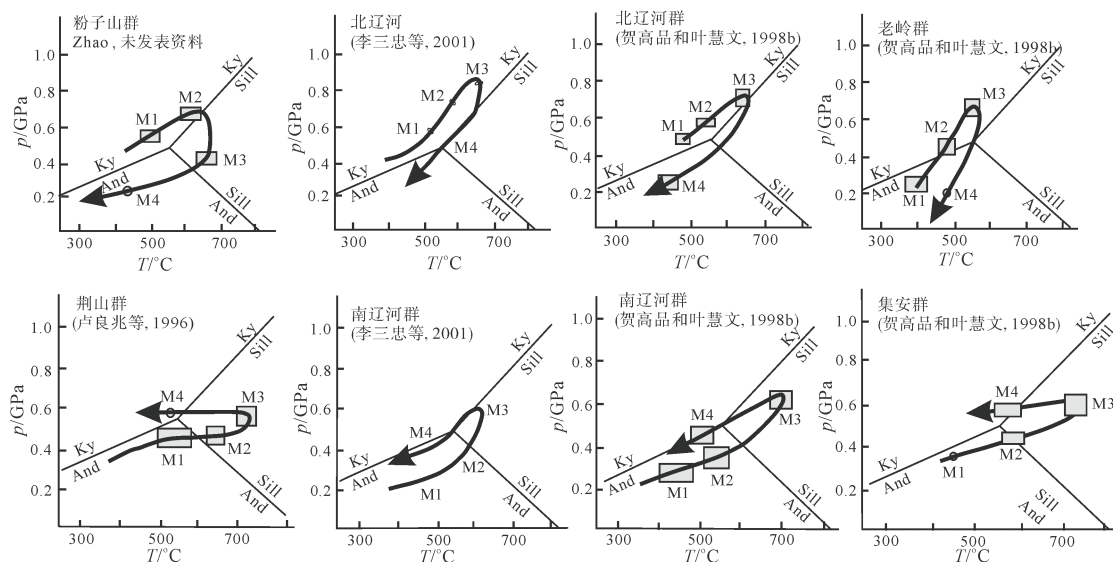


图 10 胶—辽—吉元古代变质岩带中变质作用演化的 p - T 轨迹(据 Zhao et al., 2012)

Fig. 10 The p - T paths of metamorphic evolution of Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji metamorphic belt (after Zhao et al., 2012)

所测得的逆时针变质演化轨迹(详见图 10), 认为两种形式的 p - T 轨迹构成了双变质带。从上可知, 该区变质演化 p - T 轨迹和形成的地构造环境尚存在不同认识, 需进一步加以研究。

这些古元古代岩群的沉积时代大致在 2 100 Ma 左右, 变质时代大体发生在 1.85 Ga 左右。

6 华北克拉通变质作用演化

总的看来, 华北克拉通的变质作用演化可以从时间尺度和空间分布尺度理出以下脉络。

就时间尺度而言, 分布于鞍山—本溪地区的古—中太古代壳岩已遭受角闪岩相变质改造, 由于分布局限, 加之研究程度不够, 尚缺乏变质年龄数据。但在鞍山地区 3.77 Ga 条带状奥长花岗岩中获得了 3 560 Ma 的变质年龄, 在中太古代片麻岩中获得了 3.0~3.3 Ga 的变质年龄。这些数据表明华北克拉通曾在古—中太古代期间发生过区域变质作用, 这对于认识华北克拉通的早期演化具有重要的意义。

在河南鲁山的太华杂岩中形成于 2 845~2 838 Ma 的斜长角闪岩中获得第一期为 2 776~2 792 Ma、第二期为 2 671~2 651 Ma 的变质年龄, 在形成于 2 832~2 829 Ma 的 TTG 岩系中获得了 2 772 Ma 的变质年龄(Liu et al., 2009)。在山东沂水地区新太古代麻粒岩-TTG 组合的麻粒岩中碎屑变质锆石获得了 2 715 Ma 的变质年龄(赵子然等, 2009)。这些数据表明至少在河南鲁山、鲁西等地的中太古代末期—新太古代早期形成的岩系经历了新太古代早期的变质改造。

新太古代中晚期及末期, 各微陆块都共同经历

了 2.5 Ga 左右的变质-构造-热事件(翟明国和卞爱国, 2000; Zhai and Liu, 2003)。此期间, 华北克拉通普遍经历了大规模的 TTG 岩系侵入, 在 2 530~2 450 Ma 期间, 以中低压麻粒岩相变质为代表的基底区域变质作用发生, 呈面状分布和逆时针的 p - T 轨迹特征与克拉通基底的板底垫托或地幔柱上隆有关, 标志克拉通的形成。

华北克拉通形成之后在内部和边缘形成了三个古元古代活动带(翟明国, 2010), 火山-沉积岩大致发育在 2.3~1.95 Ga, 随着活动带的闭合在 1.95~1.90 Ga 发生了区域变质改造, 之后又发生了强烈的叠加变质, 表现为 1.85~1.80 Ga 的麻粒岩相-高角闪岩相的等温降压或降温降压的叠加变质, 并在 1.80 Ga 发生角闪岩相退变质。至少在 1.85~1.82 Ga 和 1.80 Ga 的叠加变质广泛发生于华北克拉通内(翟明国, 2010)。

在古元古代的晚期至少发生两次区域变质作用, 第一次在 1 965~1 900 Ma 期间, 由于陆块之间开始发生俯冲碰撞或逆冲增压, 形成中低压/高压麻粒岩相变质和局部高角闪岩相变质, 变质高峰约在 1 950 Ma 左右。在 1 926~1 900 Ma 期间局部发生超高温麻粒岩相变质, 其高峰期在 1 923~1 920 Ma 间, 与地壳回返、地幔上涌导致的热流增加有关。这一阶段的变质与 1 965~1 950 Ma 期高峰期变质属同一大变质旋回的不同发展阶段。

第二次区域变质作用发生于 1 890~1 800 Ma 期间, 代表另一次的大陆俯冲碰撞, 其高峰期在 1 860~1 850 Ma 之间, 再次发生中高压麻粒岩相和角闪岩相变质, 同时伴随有深熔作用和不同程度的重结晶作用。

我们对古元古代晚期变质事件划分的认识与 Peng 等(2014)总结的华北克拉通 1 950~1 850 Ma 变质事件的时间分布基本一致, Peng 等(2014)进一步将该时间段的变质事件划分为四期: ~1 955 Ma(M1), ~1 920 Ma(M2), ~1 885 Ma(M3)和~1 850 Ma(M4), 并与西部陆块的形成、东部陆块的形成以及东西两陆块的碰撞连接相联系。

演化到中元古代, 变质作用已很微弱, 仅见于华北克拉通北缘的裂谷盆地, 变质作用很低, 仅为低绿片岩相。

从空间尺度看, 面状分布的中低压麻粒岩相变质作用主要分布于华北克拉通北中部太古宙晚期的基底岩系中, 与大面积的 TTG 岩系伴生, 由于大量岩浆的侵位, 区域热流值高呈面状分布。只古元古代中晚期在不同的造山带, 变质岩系呈带状分布, 在靠近岛弧外侧可以出现中高压的变质岩系, 变质程度可以达到麻粒岩相-高角闪岩相, 在靠近大陆一侧变质程度较浅, 多为绿片岩相-角闪岩相, 如果有大量花岗质岩石伴生, 可以出现递增变质带, 变质级别可以达到高角闪岩相。在靠近俯冲带由于板片拆沉导致地幔上涌, 局部可以出现超高温变质作用。由于高压麻粒岩和超高温麻粒岩一般位于俯冲带附近, 因此它们一般呈带状分布。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. 1212010811048).

参考文献:

- 毕建成. 1989. 冀东迁安水厂-杏山地区早前寒武纪变质作用及实验地质研究[J]. 吉林地质, (3): 55-67.
- 蔡佳, 刘平华, 刘福来, 刘建辉, 王舫, 施建荣. 2013. 大青山-乌拉山变质杂岩带石拐地区富铝片麻岩成因矿物学与变质演化[J]. 岩石学报, 29(2): 437-461.
- 蔡佳, 刘福来, 刘平华, 施建荣. 2014. 内蒙古集宁三岔口地区夕线堇青石榴二长片麻岩变质作用及年代学研究[J]. 岩石学报, 30(2): 472-490.
- 陈靖, 李厚民, 罗迪柯, 李立兴, 杨秀清, 刘明军, 姚通, 胡彬. 2015. 冀东柞栏杖子 BIF 地球化学特征、形成时代及其地质意义[J]. 地质通报, 34(5): 919-929.
- 初航, 王惠初, 魏春景, 刘欢, 张阔. 2012. 华北北缘承德地区高压麻粒岩的变质演化历史—锆石年代学和地球化学证据[J]. 地球学报, 33(6): 977-987.
- 代堰铭, 张连昌, 朱明田, 王长乐, 刘利. 2013. 鞍山陈台沟 BIF 铁矿与太古代地壳增生: 锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 29(7): 2537-2550.
- 党修鹏. 1993. 五台山变质地体的区域变质相带和变质期次[J]. 岩石学报, 9(1): 55-69.
- 第五春荣, 孙勇, 林慈鑫, 王洪亮. 2010. 河南鲁山地区太华杂岩 LA-(MC)-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成[J]. 科学通报, 55(21): 2112-2123.
- 董春艳, 万渝生, 张玉海, 杨之青, 刘敦一. 2013. 鞍山地区东山杂岩 3.3~3.1 Ga 岩浆作用: 地球化学和锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 29(2): 414-420.
- 杜利林, 庄育勋, 杨崇辉, 万渝生, 王新社, 王世进, 张连峰. 2003. 山东新泰孟家屯岩组锆石特征及其年代学意义[J]. 地质学报, 77(3): 359-366.
- 杜利林, 庄育勋, 杨崇辉, 万渝生, 王新社. 2005. 鲁西孟家屯一种细粒斜长角闪岩的锆石 SHRIMP 年代学[J]. 地球学报, 26(5): 429-434.
- 葛文春, 孙德有, 吴福元, 林强. 1994. 吉林桦甸地区太古宙麻粒岩变质作用的 pTt 轨迹[J]. 岩石矿物学杂志, 13(4): 309-318.
- 郭伟静, 郭洪芳. 2006. 应用 $P-T-t$ 理论再认识辽河群变质作用[J]. 地质与资源, 15(3): 230-237.
- 贺高品, 叶惠文. 1998a. 辽东-吉南地区早元古代变质地体的组成及主要特征[J]. 长春科技大学学报, 28(2): 121-126.
- 贺高品, 叶惠文. 1998b. 辽东-吉南地区早元古代两种类型变质作用及其构造意义[J]. 岩石学报, 14(2): 152-162.
- 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[J]. 岩石学报, 21(1): 151-157.
- 蒋宗胜, 王国栋, 肖玲玲, 第五春荣, 卢俊生, 吴春明. 2011. 河南洛宁太华变质杂岩区早元古代变质作用 $P-T-t$ 轨迹及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 27(12): 3701-3717.
- 金巍. 1989. 华北陆台北缘(中段)早前寒武纪地质演化及变质动力学研究[D]. 长春: 长春地质学院.
- 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[J]. 岩石学报, (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[J]. 岩石学报, 14(1): 34-41.
- 李三忠, 韩宗珠, 刘永江, 杨振升, 马瑞. 2001. 辽河群区域变质特征及其大陆动力学意义[J]. 地质论评, 47(1): 9-18.
- 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[J]. 长春地质学院学报(变质地质学专辑): 81-102.
- 李树勋, 徐学纯, 刘喜山, 孙德育. 1994. 内蒙古乌拉山区早前寒武纪地质[M]. 北京: 地质出版社: 1-122.
- 刘福来. 1995. 怀安-大同一带麻粒岩相高级区变质矿物-流体演化动力学及其构造环境研究[D]. 长春: 长春科技大学.
- 刘福来. 1997. 怀安-大同一带基性麻粒岩变质反应序列与水活度[J]. 岩石学报, 13(1): 27-43.
- 刘利, 张连昌, 戴堰铭, 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[J]. 岩石学报, 28(11): 3623-3637.
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 刘建辉. 2010. 山东半岛基性高压麻粒岩的成因矿物学及变质演化[J]. 岩石学报, 26(7): 2039-2056.
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 刘建辉. 2011. 山东半岛荆山群富铝片麻岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 30(5): 829-843.

- 刘树文, 张臣, 刘超辉, 李秋根, 吕勇军, 余盛强, 田伟, 凤永刚. 2007. 中条山-吕梁山前寒武纪变质杂岩的独居石电子探针定年研究[J]. 地学前缘, 14(1): 64-74.
- 刘树文, 梁海华. 1997. 太行山太古宙变质杂岩中富铝片麻岩的变质作用[J]. 岩石学报, 13(3): 303-312.
- 刘树文. 1996. 阜平地区麻粒岩的 $P-T$ 路径研究[J]. 高校地质学报, 2(1): 75-84.
- 卢保奇, 王赐银. 2003. 晋北娄烦吕梁群变质相带的划分及其成因研究[J]. 地球学报, 24(4): 325-329.
- 卢良兆, 靳是琴, 徐学纯, 刘福来. 1992. 内蒙古东南部早前寒武纪孔兹岩系成因及其含矿性[M]. 长春: 吉林科学技术出版社: 1-121.
- 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 1996. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系[M]. 长春: 长春出版社: 1-227.
- 卢良兆, 徐学纯, 董永胜. 1998. 中朝克拉通北部早前寒武纪变质作用演化的三种主要样式及其地质动力学[J]. 高校地质学报, 4(1): 1-10.
- 陆松年, 陈志宏, 相振群. 2008. 泰山世界地质公园古老侵入岩系年代格架[M]. 北京: 地质出版社: 1-90.
- 马军, 王仁民. 1995. 宣化-赤城高压麻粒岩带中蓝晶石-正条纹长石组合的发现及地质意义[J]. 岩石学报, 11(3): 273-278.
- 梅华林. 1994. 中条山早元古代变质岩石的 PTt 轨迹和构造演化[J]. 地质论评, 40(1): 36-47.
- 邵建波, 毕守业, 关灵芝. 1995. 吉南古元古代集安群泥质变质岩 $P-T-t$ 轨迹及其地质意义[J]. 吉林地质, 14(1): 50-56.
- 苏尚国, 顾德林, 朱更新. 1997. 山东省沂水地区麻粒岩相变质作用演化及大地构造意义[J]. 岩石学报, 13(3): 331-345.
- 孙大中, 胡维兴. 1993. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构[M]. 北京: 地质出版社: 1-180.
- 孙德育, 刘正宏, 凌贤长, 郑常青. 1993. 辽宁抚顺东部地区前寒武纪地质及构造演化[M]. 北京: 地震出版社: 1-142.
- 孙勇. 1983. 河南鲁山太华群的麻粒岩相变质岩[J]. 西北大学学报, (1): 92-98.
- 万渝生, 刘敦一, 王世炎, 赵逊, 董春艳, 周红英, 殷小艳, 杨长秀, 高林志. 2009. 登封地区早前寒武纪地壳演化—地球化学和锆石 SHRIMP U-Pb 年代学制约[J]. 地质学报, 83(7): 982-999.
- 万渝生, 刘敦一, 王世进, 焦秀美, 王伟, 董春艳, 颀颀强, 马铭株. 2012. 华北克拉通鲁西地区早前寒武纪表壳岩系重新划分和 BIF 形成时代[J]. 岩石学报, 28(11): 3457-3475.
- 王洛娟, 郭敬辉, 彭澎, 刘富. 2011. 华北克拉通孔兹岩带东端孤山剖面石榴石基性麻粒岩的变质作用及年代学研究[J]. 岩石学报, 27(12): 3689-3700.
- 王伟, 王世进, 刘敦一, 李培远, 董春艳, 颀颀强, 马铭株, 万渝生. 2010. 鲁西新太古代济宁群含铁岩系形成时代—SHRIMP U-Pb 锆石定年[J]. 岩石学报, 26(4): 1175-1181.
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 刘敦一, 厉子龙, 赵敦敏. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化[M]. 北京: 地质出版社: 1-212.
- 肖玲玲, 蒋宗胜, 王国栋, 万渝生, 王涛, 吴春明. 2011. 赞皇前寒武纪变质杂岩区变质反应结构与变质作用 $P-T-t$ 轨迹[J]. 岩石学报, 27(4): 980-1002.
- 徐学纯. 1991. 内蒙古乌拉山地区变质作用演化及其动力学研究[J]. 长春地质学院学报, 21(1): 25-32.
- 闫月华, 李万兵, SILLS J D. 1991. 曹庄群中几种少见岩石及其地质意义[J]. 岩石学报, (2): 19-27.
- 杨崇辉, 杜利林, 任留东, 宋会侠, 万渝生. 2015. 华北克拉通早前寒武纪地层划分对比及岩浆演化[M]. 北京: 科学出版社: 1-277.
- 游振东, 韩玉菁. 1981. 河南嵩山区登封群区域变质作用[J]. 地球科学, (2): 99-110.
- 于津海, 王赐银, 赖鸣远, 陈树祥, 卢保奇. 1999. 山西古元古代吕梁群变质带的重新划分及地质意义[J]. 高校地质学报, 5(1): 66-75.
- 翟明国, 郭敬辉, 李永刚, 闫月华, 张雯华, 李江海. 1995. 太古代退变榴辉岩的发现及其地质意义[J]. 科学通报, (17): 1590-1594.
- 翟明国, 卞爱国. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末—中元古代裂解[J]. 中国科学(D), 30(增刊): 129-137.
- 翟明国. 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. 矿床地质, 29(1): 24-36.
- 赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论[J]. 岩石学报, 25(8): 1772-1792.
- 赵子然, 宋会侠, 沈其韩, 宋彪. 2009. 山东沂水杂岩中变基性岩的岩石地球化学特征及锆石 SHRIMP-U-Pb 定年[J]. 地质论评, 55(2): 286-299.
- 郑梦天, 张连昌, 王长乐, 朱明田, 李智泉, 王亚婷. 2015. 冀东杏山 BIF 铁矿形成时代及成因探讨[J]. 岩石学报, 31(6): 1636-1652.
- 周喜文, 耿元生. 2009. 贺兰山孔兹岩系的变质时代及其对华北克拉通西部陆块演化的制约[J]. 岩石学报, 25(8): 1843-1852.
- 周喜文, 魏春景, 耿元生, 张立飞. 2004. 胶北栖霞地区泥质高压麻粒岩的发现及其地质意义[J]. 科学通报, 49(14): 1424-1430.
- 周喜文, 赵国春, 耿元生. 2010. 贺兰山高压泥质麻粒岩—华北克拉通西部陆块拼合的岩石学证据[J]. 岩石学报, 26(7): 2113-2121.

References:

- BI Jian-cheng. 1989. The study of the Early Precambrian metamorphism and experimental geology in the Shuichang – Xingshan area, Qian'an, eastern Hebei[J]. Jilin Geology, (3): 55-67(in Chinese with English abstract).
- CAI Jia, LIU Ping-hua, LIU Fu-lai, LIU Jian-hui, WANG Fang, SHI Jian-rong. 2013. Genetic mineralogy and metamorphic evolution of Al-rich gneisses in the Shiguai area, Daqingshan-Wulashan metamorphic complex belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(2): 437-461.
- CAI Jia, LIU Fu-lai, LIU Ping-hua, SHI Jian-rong. 2014. Metamorphic P-T conditions and U-Pb dating of the sillimanite-cordierite-garnet paragneisses in Sanchakou, Jining area, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(2): 472-490(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jing, LI Hou-min, LUO Di-ke, LI Li-xing, YANG Xiu-qing,

- LIU Ming-jun, YAO Tong, HU Bin. 2015. Formation age, geochemical characteristics and geological significance of the Zhalan Zhangzi BIF in eastern Hebei Province[J]. Geological Bulletin of China, 34(5): 919-929(in Chinese with English abstract).
- CHU Hang, WANG Hui-chu, WEI Chun-jing, LIU Huan, ZHANG Kuo. 2012. The Metamorphic Evolution History of High-pressure Granulites in Chengde Area, Northern Margin of North China: Zircon Chronology and Geochemical Evidence[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(6): 977-987(in Chinese with English abstract).
- CUI Pei-long, SUN Jing-gui, SHA De-ming, WANG Xi-jing, ZHANG Peng, GU A-lei, WANG Zhong-yu. 2013. Oldest zircon xenocryst (4.17 Ga) from the North China Craton[J]. International Geology Review, 55: 1902-1908.
- DAI Yan-pei, ZHANG Lian-chang, ZHU Ming-tian, WANG Chang-le, LIU Li. 2013. Chentaigou BIF-type iron deposit, Anshan area associated with Archean crustal growth: Constraints from zircon U-Pb dating and Hf isotope[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(7): 2537-2550 (in Chinese with English abstract).
- DANG Xiu-peng. 1993. Regional metamorphic zone and stages of the metamorphic terrane at Wutai Mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 9(1): 55-69(in Chinese with English abstract).
- DIWU Chun-rong, SUN Yong, LIN Ci-luan, WANG Hong-liang. 2010. LA-(MC)-ICPMS U-Pb zircon geochronology and Lu-Hf isotope compositions of the Taihua Complex on the southern margin of the North China Craton[J]. Chinese Science Bulletin, 55, doi: 10.1007/s11431-010-3273-6.
- DONG Chun-yan, WAN Yu-sheng, ZHANG Yu-hai, YANG Zhi-qing, LIU Dun-yi. 2013. 3.3~3.1 Ga magmatism recorded in an outcrop of the Dongshan complex in the Anshan area, North China Craton: Evidence from geochemistry and SHRIMP zircon dating[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(2): 414-420(in Chinese with English abstract).
- DU Li-lin, ZHUANG Yu-xun, YANG Chong-hui, WAN Yu-sheng, WANG Xin-she, WANG Shi-jin, ZHANG Lian-feng. 2003. Characters of zircons in the Mengjiatun Formation in Xintai of Shandong and their chronological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 77(3): 359-366(in Chinese with English abstract).
- DU Li-lin, ZHUANG Yu-xun, YANG Chong-hui, WAN Yu-sheng, WANG Xin-she. 2005. SHRIMP U-Pb Zircon Chronology of Fine-grained Amphibolite in the Mengjiatun Area, Western Shandong[J]. Acta Geoscientica Sinica, 26(5): 429-434(in Chinese with English abstract).
- GE Wen-chun, SUN De-you, WU Fu-yuan, LIN Qiang. 1994. The metamorphic $P-T$ path of Archean granulites in Huadian area, Jilin Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 13(4): 309-318(in Chinese with English abstract).
- GUO Jing-hui, PENG Peng, CHEN Yi, JIAO Shu-juan, WINDLEY B F. 2012. UHT sapphirine granulite metamorphism at 1.93~1.92 Ga caused by gabbro-norite intrusions: Implications for tectonic evolution of the northern margin of the North China Craton[J]. Precambrian Research, 222-223: 124-142.
- GUO Wei-jing, GUO Hong-fang. 2006. A new understanding of the metamorphism of Liaohe Group with the theory of $P-T-t$ trace[J]. Geology and Resources, 15(3): 230-237(in Chinese with English abstract).
- HE Gao-pin, YE Hui-wen. 1998a. Composition and main characteristics of Early Proterozoic metamorphic terranes in eastern Liaoning and southern Jilin areas[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 28(2): 121-126(in Chinese with English abstract).
- HE Gao-pin, YE Hui-wen. 1998b. Two types of early Proterozoic metamorphism and its tectonic significance in Eastern Liaoning and Southern Jilin areas[J]. Acta Petrologica Sinica, 14(2): 152-162(in Chinese with English abstract).
- JIAN Ping, ZHANG Qi, LIU Dun-yi, JIN Wei-jun, JIA Xiu-qun, QIAN Qing. 2005. SHRIMP dating and geological significance of Late Achaean high-Mg diorite (sanukite) and hornblende-granite at Guyang of Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 151-157(in Chinese with English abstract).
- JIANG Zong-sheng, WANG Guo-dong, XIAO Ling-ling, DIWU Chun-rong, LU Jun-sheng, WU Chun-ming. 2011. Paleoproterozoic metamorphic $P-T-t$ path and tectonic significance of the Luoning metamorphic complex at the southern terminal of the Trans-North China Orogen, Henan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(12): 3701-3717(in Chinese with English abstract).
- JIAO Shu-juan, GUO Jing-hui, HARLEY S L, WINDLEY B F. 2013. New constraints from garnetite on the $P-T$ path of the Khondalite Belt: implications for the tectonic evolution of the North China Craton[J]. Journal of Petrology, 54: 1725-1758.
- JIN Wei, LI Shu-Xun, LIU Xi-shan. 1991. A study on characteristics of early Precambrian high-grade metamorphic rock series and their metamorphic dynamics[J]. Acta Petrologica Sinica, (4): 27-35(in Chinese with English abstract).
- KRÖNER A, CUI Wen-yuan, WANG Shi-qi, WANG Chang-qiu, NEMCHIN A A. 1998. Single zircon ages from high - grade rocks of the Jianping Complex, Liaoning Province, NE China[J]. Journal Asian Earth Science, 16: 519-53.
- LI Jiang-hai, ZHAI Ming-guo, LI Yong-gang, ZHANG Yi-gang. 1998. The discovery of Neoproterozoic high-pressure granulites in Luanping-Chengde area, northern Hebei, and their tectono-geological implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 14(1): 34-41(in Chinese with English abstract).
- LI San-zhong, HAN Zong-zhu, LIU Yong-jiang, YANG Zhen-sheng, MA Rui. 2001. Continental dynamics and regional metamorphism of the Liaohe Group[J]. Geological Review, 47(1): 9-18(in Chinese with English abstract).
- LI San-zhong, ZHAO Guo-chun, SUN Min, HAN Zong-zhu, ZHAO Guang-tao, HAO De-feng. 2006. Are the South and North Liaohe groups of North China craton different exotic

- terranes? Nd isotope constraints[J]. *Gondwana Research*, 9(1-2): 198-208.
- LI Shu-Xun, XU Xue-chun, LIU Xi-shan, SUN De-yu. 1994. Early Precambrian Geology in Wulashan region of the Inner Mongolia[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LIU Dun-yi, NUTMAN A P, COMPSTON W, WU Jia-shan, SHEN Qi-han. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton[J]. *Geology*, 20: 339-342.
- LIU Dun-yi, PAGE R W, COMPSTON W, WU Jia-shan. 1985. U-Pb zircon geochronology of late Archaean metamorphic rocks in the Taihangshan-Wutaishan area, North China[J]. *Precambrian Research*, 27: 85-109.
- LIU Dun-yi, WILDE S A, WAN Yu-sheng, WANG Shi-yuan, VALLEY J W, KITA N, DONG Chun-yan, XIE Hang-qiang, ZHANG Yi-xin, GAO Lin-zhi. 2009. Combined U-Pb, hafnium and oxygen isotope analysis of zircons from meta-igneous rocks in the southern North China Craton: reveal multiple events in the Late Mesoproterozoic-Early Neoproterozoic[J]. *Chemical Geology*, 261: 140-154.
- LIU Dun-yi, WILDE S A, WAN Yu-sheng, WU Jia-shan, ZHOU Hong-ying, DONG Chun-yan, YIN Xiao-yan. 2008. New U-Pb and Hf isotopic data confirm Anshan as the oldest preserved segment of the North China Craton[J]. *American Journal of Science*, 308: 200-231.
- LIU Fu-lai. 1995. Metamorphic mineral-fluid evolution and tectonic environments of the granulite-facies terrane in the Huai'an - Datong area[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- LIU Fu-lai. 1997. The Metamorphic Reaction and Water Activity of Basic Granulite in the Datong-Huai'an Region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 13(1): 27-43(in Chinese with English abstract).
- LIU Li, ZHANG Lian-chang, DAI Yan-pei, WANG Chang-le, LI Zhi-quan. 2012. Formation age, geochemical signatures and geological significance of the Sanheming BIF-type iron deposit in the Guyang greenstone belt, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3623-3637(in Chinese with English abstract).
- LIU Ping-hua, LIU Fu-lai, WANG Fang, LIU Jian-hui. 2010. Genetic mineralogy and metamorphic evolution of mafic high-pressure (HP) granulites from the Shandong Peninsula, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2039-2056(in Chinese with English abstract).
- LIU Ping-hua, LIU Fu-lai, WANG Fang, LIU Jian-hui. 2011. U-Pb dating of zircons from Al rich paragneisses of Jingshan Group in Shandong peninsula and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(5): 829-843(in Chinese with English abstract).
- LIU Shou-jie, TSUNOGAE T, LI Wen-shan, SHIMIZU H, SANTOSH M, WAN Yu-sheng, LI Jiang-hai. 2012. Paleoproterozoic granulites from Heling'er: Implications for regional ultrahigh-temperature metamorphism in the North China Craton[J]. *Lithos*, 48: 54-70.
- LIU Shou-jie, WAN Yu-sheng, SUN Hui-yi, NUTMAN A P, XIE Hang-qiang, DONG Chun-yan, MA Ming-zhu, LIU Dun-yi, JAHN B M. 2013. Paleo-to Eoarchean crustal evolution in eastern Hebei, North China Craton: New evidence from SHRIMP U-Pb dating and in-situ Hf isotopic study of detrital zircons from paragneisses[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 4-17.
- LIU Shu-wen, LIANG Hai-hua. 1997. Metamorphism of Al-rich gneisses in Taihang Mountain Archean metamorphic complex[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 13(3): 303-312(in Chinese with English abstract).
- LIU Shu-wen, SANTOSH M, WANG Wei, BAI Xiang, YANG Peng-tao. 2011. Zircon U-Pb chronology of the Jianping Complex: implications for the Precambrian crustal evolution history of the northern margin of North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 20: 48-63.
- LIU Shu-wen, ZHANG Chen, LIU Chao-hui, LI Qiu-gen, LÜ Yong-jun, YU Sheng-qiang, TIAN Wei, FENG Yong-gang. 2007. EPMA Th-U-Pb dating of monazite for Zhongtiao and Lüliang Precambrian metamorphic complexes[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 64-74(in Chinese with English abstract).
- LIU Shu-wen, ZHAO Guo-chun, WILDE S A, SHU Gui-ming, SUN Min, LIU Qiu-gen, TIAN Wei, ZHANG Jian. 2006. Th-U-Pb monazite geochronology of the Lüliang and Wutai Complexes: constraints on the tectonothermal evolution of the Trans-North China Orogen[J]. *Precambrian Research*, 148: 205-225.
- LIU Shu-wen. 1996. Study on the *P-T* path of granulites in Fuping area, Hebei Province[J]. *Geological Journal of Universities*, 2(1): 75-84(in Chinese with English abstract).
- LIU Xi-shan, JIN Wei, LI Shu-xun, XU Xue-chun. 1993. Two types of Precambrian high-grade metamorphism, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 11: 499-510.
- LU Bao-qi, WANG Ci-yin. 2003. The study on the designation of the metamorphic belts and their genesis in Lüliang Groups in Loufan districts, Shanxi Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(4): 325-329(in Chinese with English abstract).
- LU Liang-zhao, JIN Shi-qin, XU Xue-chun, LIU Fu-lai. 1992. The Petrogenesis and Orebearing Potential of Precambrian Khondalite Series in Southeast Inner Mongolia[M]. Changchun: Jilin Science Technology Press: 1-121(in Chinese).
- LU Liang-zhao, XU Xue-chun, LIU Fu-lai. 1996. The Early Precambrian Khondalite Series in the North China[M]. Changchun: Changchun Publishing House: 1-227(in Chinese).
- LU Liang-zhao, XU Xue-chun, DONG Yong-sheng. 1998. Three main styles of early Precambrian metamorphic evolution in northern sino-korea craton and their geodynamics[J]. *Geological Journal of China Universities*, 4(1): 1-10(in Chinese with English abstract).
- LU Song-nian, CHEN Zhi-hong, XIANG Zhen-qun. 2008. The World Geopark of Taishan: Geochronological Framework of Ancient Intrusives[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-90(in Chinese).
- MA Jun, WANG Ren-min. 1995. The discovery of coexisting

- Kyanite +Perthite assemblage in Xuanhua –Chicheng high-pressure granulite belt and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(3): 273-278(in Chinese with English abstract).
- MEI Hua-lin. 1994. Metamorphic *PTt* paths and tectonic evolution of early Proterozoic rocks from the Zhongtiao mountains, southern Shanxi[J]. *Geological Review*, 40(1): 36-47(in Chinese with English abstract).
- NUTMAN A P, WAN Yu-sheng, DU Li-lin, FRIEND C R L, DONG Chun-yan, XIE Hang-qiang, WANG Wei, SUN Hui-yi, LIU Dun-yi. 2011. Multistage late Neoarchean crustal evolution of the North China Craton, Eastern Hebei[J]. *Precambrian Research*, 189: 43-65.
- O'BRIEN P J, WALTEB N, LI Jiang-hai. 2005. The petrology of two distinct granulite types in the Hengshan Mts., China, and tectonic implication[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 615-627.
- PENG Peng, WANG Xin-ping, WINDLEY B F, GUO Jing-hui, ZHAI Ming-guo, LI Yun. 2014. Spatial distribution of ~1950 - 1800 Ma metamorphic events in the North China Craton: Implications for tectonic subdivision of the craton[J]. *Lithos*, 202-203: 250-266.
- QIAN Jia-hui, WEI Chun-jing, ZHOU Xi-wen, ZHANG Ying-hui. 2013. Metamorphic *P-T* paths and new zircon U-Pb age data for garnet-mica schist from the Wutai group, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 233: 282-296.
- SANTOSH M, SAJEEV K, LI Jiang-hai. 2006. Extreme crustal metamorphism during Columbia supercontinent assembly: Evidence from North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 10(3-4): 256-266.
- SANTOSH M, TSUNOGAEB T, LI Jiang-hai, LIU Shou-jie. 2007a. Discovery of sapphirine-bearing Mg-Al granulites in the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic ultrahigh temperature metamorphism[J]. *Gondwana Research*, 11: 263-285.
- SANTOSH M, WILDE S A, LI Jiang-hai. 2007b. Timing of Paleoproterozoic ultrahigh temperature metamorphism in the North China Craton: evidence from SHRIMP U-Pb zircon geochronology[J]. *Precambrian Research*, 159: 178-196.
- SANTOSH M, SAJEEV K, LI Jiang-hai, LIU Shou-jie, ITAYA T. 2009a. Counterclockwise exhumation of a hot orogen: The Paleoproterozoic ultrahigh-temperature granulites in the North China Craton[J]. *Lithos*, 110: 140-152.
- SANTOSH M, WAN Yu-sheng, LIU Dun-yi, DONG Chun-yan, LI Jiang-hai. 2009b. Anatomy of zircons from an ultrahot orogen: The amalgamation of the North China craton within the supercontinent Columbia[J]. *Journal of Geology*, 117: 429-443.
- SANTOSH M, KUSKY T. 2010. Origin of paired high pressure-ultrahigh-temperature orogens: a ridge subduction and slab window model[J]. *Terra Nova*, 22: 35-42.
- SANTOSH M, LIU Shou-jie, TSUNOGAE T, LI Jiang-hai. 2012. Paleoproterozoic ultrahigh-temperature granulites in the North China Craton: implications for tectonic models on extreme crustal metamorphism[J]. *Precambrian Research*, 222-223: 77-106.
- SANTOSH M, LIU Dun-yi, SHI Yu-ruo, LIU Shou-jie. 2013. Paleoproterozoic accretionary orogenesis in the North China Craton: A SHRIMP zircon study[J]. *Precambrian Research*, 227: 29-54.
- SHAO Jian-bo, BI Shou-ye, GUAN Ling-zhi. 1995. On the *P-T-t* path pelitic metamorphic rocks of Pleaoproterozoic, Ji'an Group in the southern part of Jilin Province and its geological significance[J]. *Jilin Geology*, 14(1): 50-56(in Chinese with English abstract).
- SHI Yu-ruo, WILDE S A, ZHAO Xi-tao, MA Yin-sheng, DU Li-lin, LIU Dun-yi. 2012. Late Neoarchean magmatic and subsequent metamorphic events in the northern North China Craton: SHRIMP zircon dating and Hf isotopes of Archean rocks from Yunmengshan Geopark, Miyun, Beijing[J]. *Gondwana Research*, 21: 785-800.
- SONG Biao, NUTMAN A P, LIU Dun-yi, WU Jia-shan. 1996. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning province, northeastern China[J]. *Precambrian Research*, 78: 79-94.
- SU Shang-guo, GU De-lin, ZHU Geng-xin. 1997. The *P-T* trajectory and its tectonic significance of granulite facies metamorphism in the Yishui Area, Shandong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 13(3): 331-345(in Chinese with English abstract).
- SUN Da-zhong, HU Wei-xing. 1993. Precambrian Chronotectonic Framework and Model of Chronocrustal Structure of the Zhongtiao Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-180(in Chinese).
- SUN De-yu, LIU Zheng-hong, LING Xian-chang, ZHENG Chang-qing. 1993. Precambrian and Tectonic Evolution in Eastern Part of Fushun, Liaoning Province[M]. Beijing: Seismological Press: 1-142(in Chinese).
- SUN Yong. 1983. Rocks in the granulite facies of the Taihua Group at Lushan, Henan[J]. *Journal of Northwest University*, (1): 92-98(in Chinese with English abstract).
- TAM P Y, ZHAO Guo-chun, SUN Min, LI San-zhong, IIZUKA Y Y, MA G S K, YIN Chang-qing, HE Yan-hong, WU Mei-ling. 2012a. Metamorphic *PT* path and tectonic implications of medium pressure pelitic granulites from the Jiaobei massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 220-221: 177-191.
- TAM P Y, ZHAO Guo-chun, ZHOU Xi-wen, SUN Min, GUO Jing-hui, LI San-zhong, YIN Chang-qing, WU Mei-ling, HE Yan-hong. 2012b. Metamorphic *P-T* path and implications of high-pressure pelitic granulites from the Jiaobei massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 22(1): 104-117.
- TRAP P, FAUREA M, LINB W, MONIÉC P, MEFFRED S, MELLETON J. 2009. The Zhanhuang Massif, the second and eastern suture zone of the Paleoproterozoic Trans-North China Orogen[J]. *Precambrian Research*, 172: 80-98.

- TSUNOGAE T, LIU Shou-jie, SANTOSH M, SHIMIZU H, LI Jiang-hai. 2011. Ultrahigh-temperature metamorphism in Daqingshan, Inner+ Mongolia Suture Zone North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 20: 36-47.
- WAN Yu-sheng, LIU Dun-yi, SONG Biao, WU Jia-shan, YANG Chong-hui, ZHANG Zong-qing, GENG Yuan-sheng. 2005. Geochemical and Nd isotopic composition of 3.8 Ga meta-quartz dioritic and trondhjemitic rocks from the Anshan area and their geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 563-575.
- WAN Yu-sheng, WILDE S A, LIU Dun-yi, YANG Chong-hui, SONG Biao, YIN Xiao-yan. 2006. Further evidence for ~1.85Ga metamorphism in the Central Zone of the North China Craton: SHRIMP U-Pb dating of zircon from metamorphic rocks in the Lushan area, Henan Province[J]. *Gondwana Research*, 9: 189-197.
- WAN Yu-sheng, LIU Dun-yi, WANG Shi-yan, ZHAO Xun, DONG Chun-yan, ZHOU Hong-ying, YIN Xiao-yan, YANG Chang-xiu, GAO Lin-zhi. 2009. Early Precambrian Crustal Evolution in the Dengfeng Area, Henan Province (eastern China): Constraints from Geochemistry and SHRIMP U-Pb Zircon Dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(7): 982-999(in Chinese with English abstract).
- WAN Yu-sheng, LIU Dun-yi, NUTMAN A, ZHOU Hong-ying, DONG Chun-yan, YIN Xiao-yan, MA Ming-zhu. 2012a. Multiple 3.8~3.1 Ga tectono-magmatic events in a newly discovered area of ancient rocks (the Shengousi Complex), Anshan, North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 54-55: 18-30.
- WAN Yu-sheng, LIU Dun-yi, WANG Shi-jin, JIAO Xiu-mei, WANG Wei, DONG Chun-yan, XIE Hang-qiang, MA Ming-zhu. 2012. Redefinition of Early Precambrian supracrustal rocks and formation age of BIF in western Shandong, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3457-3475(in Chinese with English abstract).
- WAN Yu-sheng, WANG Shi-jin, LIU Dun-yi, WANG Wei, KRÖNER A, DONG Chun-yan, YANG En-xiu, ZHOU Hong-ying, XIE Hang-qiang, MA Ming-zhu. 2012b. Redefinition of depositional ages of neoproterozoic supracrustal rocks in western Shandong Province, China: SHRIMP U-Pb zircon dating[J]. *Gondwana Research*, 21(4): 768-784.
- WAN Yu-sheng, XIE Hang-qiang, YANG Hua, WANG Ze-jiu, LIU Dun-yi, KRÖNER A, WILDE S A, GENG Yuan-sheng, SUN Liu-yi, MA Ming-zhu, LIU Shou-jie, DONG Chun-yan, DU Li-lin. 2013. Is the Ordos Block Archean or Paleoproterozoic in age? Implications for the Precambrian evolution of the North China Craton[J]. *American Journal of Science*, 313: 683-711.
- WANG Fang, LI Xu-ping, CHU Hang, ZHAO Guo-chun. 2011. Petrology and metamorphism of khondalites from the Jining complex, North China Craton[J]. *International Geology Review*, 53: 212-229.
- WANG Kai-Yi, HAO Jie, CAWOOD P, WILDE S A. 1997. High-pressure metamorphism in kyanite-bearing schists from the original Jinganku, Formation of the Wutaishan. Proceedings of the 30th IGC. *Precambrian Geology*[J]. *Metamorphic Petrology*, 17: 213-220.
- WANG Luo-juan, GUO Jing-hui, PENG Peng, LIU Fu. 2011. Metamorphic and geochronological study of garnet-bearing basic granulites from Gushan, the eastern end of the Khondalite Belt in the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3689-3700(in Chinese with English abstract).
- WANG Wei, WANG Shi-jin, LIU Dun-yi, LI Pei-yuan, DONG Chun-yan, XIE Hang-qiang, MA Ming-zhu, WAN Yu-sheng. 2010. Formation age of the Neoproterozoic Jining Group (banded iron formation) in the western Shandong Province: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1175-1181(in Chinese with English abstract).
- WANG Wei, ZHAI Ming-guo, TAO You-bing, SANTOSH M, LÜ Bin, ZHAO Lei, WANG Shi-jin. 2014. Late Neoproterozoic crustal evolution of the eastern North China Craton: A study on the provenance and metamorphism of paragneiss from the western Shandong Province[J]. *Precambrian Research*, 255(Part 2): 583-602.
- WANG Ya-fei, LI Xian-hua, JIN Wei, ZHANG Jia-hui. 2015. Eoarchean ultra-depleted mantle domains inferred from ca. 3.81 Ga Anshan trondhjemitic gneisses, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 263: 88-10.
- WU Jia-shan, GENG Yuan-sheng, SHEN Qi-han, LIU Dun-yi, LI Zi-long, ZHAO Dun-min. 1998. Archean Geological Characteristics and Tectonic Evolution of China-Korea Paleoproterozoic Continent[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-212(in Chinese).
- XIAO Ling-ling, JIANG Zong-sheng, WANG Guo-dong, WAN Yu-sheng, WANG Tao, WU Chun-ming. 2011. Metamorphic reaction textures and metamorphic *P-T-t* loops of the Precambrian Zhanhuang metamorphic complex, Hebei, North China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 980-1002(in Chinese with English abstract).
- XU Xue-chun. 1991. Evolution of metamorphism and its dynamics in Wulashan region, Inner Mongolia[J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 21(1): 25-32(in Chinese with English abstract).
- YAN Yue-hua, LI Wan-bing, SILLS J D. 1991. Some rare rocks in Archean Caozhuang Group and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (2): 19-27(in Chinese with English abstract).
- YANG Chong-hui, DU Li-lin, REN Liu-dong, SONG Hui-xia, WAN Yu-sheng. 2015. The Stratigraphic Division and Magmatic Evolution of the Early Precambrian in the North China Craton[M]. Beijing: Science Press: 1-277(in Chinese).
- YIN Chang-qing, ZHAO Guo-chun, GUO Jing-hui, SUN Min, XIA Xiao-ping, ZHOU Xi-wen, LIU Chao-hui. 2011. U-Pb and Hf isotopic study of zircons of the Helanshan Complex: Constraints on the evolution of the Khondalite Belt in the Western Block of the North China Craton[J]. *Lithos*, 122(1-2): 25-38.

- YIN Chang-qing. 2010. Metamorphism of the Helan-shan-Qianlishan Complex and its implications for tectonic evolution of the khondalite belt in the western block, North China Craton[D]. Hong Kong: The University of Hong Kong.
- YIN Chang-qing, ZHAO Guo-chun, WEI Chun-jing, SUN Min, GUO Jing-hui, ZHOU Xi-wen. 2014. Metamorphism and partial melting of high-pressure pelitic granulites from the Qianlishan Complex: Constraints on the tectonic evolution of the Khondalite Belt in the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 242: 172-186.
- YOU Zhen-dong, HAN Yu-qing. 1981. Regional metamorphism of the Dengfeng Group in Songshan area, Henan Province[J]. *Earth Science*, (2): 99-110(in Chinese with English abstract).
- YU Jin-hai, WANG Ci-yin, LAI Ming-yuan, CHEN Shu-xiang, LU Bao-qi. 1999. Re-division of the metamorphic facies zonation of Lüliang Group in Shaanxi province and its significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 5(1): 66-75(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Ming-guo, YANG Rui-ying, LU Wen-Jiang, ZHOU Jiu-ei. 1985. Geochemistry and evolution of the Qingyuan Archaean granite-greenstone terrain, NE China[J]. *Precambrian Research*, 27: 37-62.
- ZHAI Ming-guo, WINDLEY B F, SILLS J D. 1990. Archaean Gneisses, Amphibolites and Banded Iron-Formations from the Anshan Area[J]. *Precambrian Research*, 46: 195-216.
- ZHAI Ming-guo, GUO Jing-hui, LI Yong-gang, YAN Yue-hua, ZHANG Wen-hua, LI Jiang-hai. 1995. The discoveries of retrograde eclogites in North China craton in Archaean[J]. *Chinese Science Bulletin*, 40: 1590-1594(in Chinese).
- ZHAI Ming-guo, BIAN Ai-guo. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China craton at the end of the Neoproterozoic, and its break-up during the late Palaeoproterozoic and Mesoproterozoic[J]. *Science in China (D)*, 43(Supplement): 129-137(in Chinese).
- ZHAI Ming-guo, LIU Wen-jun. 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China craton: a review[J]. *Precambrian Research*, 122: 183-199.
- ZHAI Ming-guo. 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton[J]. *Mineral Deposits*, 29(1): 24-36(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xiao-jing, ZHANG Lian-chang, XIANG Peng, WAN Bo, PIRAJNO F. 2011. Zircon U-Pb age, Hf isotopes and geochemistry of Shuichang Algoma-type banded iron-formation, North China Craton: constraints on the ore-forming age and tectonic setting[J]. *Gondwana Research*, 20: 137-148.
- ZHANG Lian-chang, ZHAI Ming-guo, ZHANG Xiao-jing, XIANG Peng, DAI Yan-pei, WANG Chang-le, PIRAJNO F. 2012. Formation age and tectonic setting of the Shirengou Neoproterozoic banded iron deposit in eastern Hebei Province: Constraints from geochemistry and SIMS zircon U-Pb dating[J]. *Precambrian Research*, 222-223: 325-338.
- ZHAO Guo-chun, CAWOOD P A, WILDE S A, SUN Min, LU Liang-zhao. 1999. Thermal evolution of two textural types of mafic granulites in the North China craton: evidence for both mantle plume and collisional tectonics[J]. *Geological Magazine*, 136: 223-240.
- ZHAO Guo-chun, CAWOOD P A, WILDE S A, SUN Min, LU Liang-zhao. 2000. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: implications for Palaeoproterozoic tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 103: 55-88.
- ZHAO Guo-chun, WILDE S A, CAWOOD P A, SUN Min. 2001. Achean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 107: 45-73.
- ZHAO Guo-chun. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1772-1792(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Guo-chun, CAWOOD P A, LI San-zhong, WILDE S A, SUN Min, ZHANG Jian, HE Yan-hong, YIN Chang-qing. 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. *Precambrian Research*, 222-223: 55-76.
- ZHAO Guo-chun, ZHAI Ming-guo. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 23: 1207-1240.
- ZHAO Zi-ran, SONG Hui-xia, SHEN Qi-han, SONG Biao. 2009. The petro-geochemical characters and SHRIMP U-Pb zircon ages of meta-mafic rocks from the Yishui Complex, in Yishui County, Shandong Province[J]. *Geological Review*, 55(2): 286-299(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Meng-tian, ZHANG Lian-chang, WANG Chang-le, ZHU Ming-tian, LI Zhi-quan, WANG Ya-ting. 2015. Formation age and origin of the Xingshan BIF – type iron deposit in eastern Hebei Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1636-1652(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Xi-wen, WEI Chun-jing, GENG Yuan-sheng, ZHANG Li-fei. 2004. Discovery and implications of high pressure pelitic granulite from the north Jiaodong, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1942-1948.
- ZHOU Xi-wen, GENG Yuan-sheng. 2009. Metamorphic age of the khondalite series in the Helashan region: Constraints on the evolution of the western block in the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1843-1852(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Xi-wen, ZHAO Guo-chun, GENG Yuan-sheng. 2010. Helan-shan high pressure pelitic granulite: Petrologic evidence for collision event in the western block of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2113-2121(in Chinese with English abstract).