1000-0569/2009/025(08)-1772-92 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

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*

赵国春
ZHAO GuoChun

香港大学地球科学系,香港
Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Hong Kong, China
2009-01-01 收稿,2009-05-01 改回.

Zhao GC. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8):1772 – 1792

Abstract The basement of the North China Craton consists of three micro-continental blocks (Eastern Block, Yinshan Block and Ordos Block) and three Paleoproterozoic mobile belts (Khondalite Belt, Trans-North China Orogen and Jiao-Liao-Ji Belt). These tectonic units are distinctly different in metamorphic time and *P-T* evolution. Metamorphism of the Late Archean basement rocks in the Eastern and Yinshan Blocks occurred at ~2.5Ga, characterized by anticlockwise *P-T* paths involving isobaric cooling, suggesting the origin of the metamorphism related to the underplating of numerous mantle-derived magmas. The major metamorphic event of the Khondalite Belt occurred at ~1.95Ga, and its metamorphic evolution is characterized by clockwise *P-T* paths involving near-isothermal decompression, which is interpreted as a result of collision between the Yinshan and Ordos Block to form the Western Block. The metamorphism of the Trans-North China Orogen occurred at ~1.85Ga, and is also characterized by clockwise *P-T* paths involving near-isothermal decompression, reflecting the final amalgamation of the united Western Block and the Eastern Block to form the coherent basement of the North China Craton. The metamorphism of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt is featured by paired metamorphic zones of which the northwestern zone consists of the North Liaohe, Laoling and Fenzishan groups, metamorphism of which is characterized by medium-pressure-type clockwise *P-T* paths, whereas the southeastern zone consists of the South Liaohe, Ji'an and Jingshan groups, metamorphism of which is characterized by low-pressure-type anticlockwise *P-T* paths. Compared with the traditional 1∶4,000,000 metamorphic map of China published in 1986, the newly compiled metamorphic evolution map of the North China Craton can be better used to reflect metamorphic histories of different tectonic units in the craton. Although magmatic arc, continental rifting and mantle plume models can all be applied to interpretations of the metamorphism of the Eastern Block with IBC-type anticlockwise *P-T* paths, a mantle plume model is favored because it can reasonably explain the presence of an 800km wide igneous province in which all rocks were nearly simultaneously emplaced at 2.60 ~ 2.50Ga, numerous komatiites or komatiitic rocks, biomodal volcanic rocks, domiform structures, etc. In the North China Craton, the exposures of typical high-pressure basic granulites with garnet-clinopyroxen-plagioclase-quartz assemblage and high-pressure pelitic granulites with kyanite-Kf-feldspar assemblage are only restricted to the northern segment of the Trans-North China Orogen and the southern segment of the Jiao-Liao-Ji Belt, and their formation was related to subduction and collision operative in these Paleoproterozoic mobile belts. The local ultrahigh temperature (UHT) metamorphism with anticlockwise *P-T* paths in the Khondalite Belt, represented by sapphirine granulites in the Daqingshan and Jining Complexes, most likely resulted from underplating of mantle-derived magmas during the post-collisional extension at ~1.92Ga, as indicated by the sapphirine granulites which are always in direct contact with ~1.92Ga basic dykes.

Key words Archean; Paleoproterozoic; North China Craton; Metamorphism; *P-T* paths; Mantle plumes; Continent-continent collision

摘 要 华北克拉通基底可分为三个太古宙微陆块(东部陆块、阴山陆块和鄂尔多斯陆块)和三个早元古宙活动带(孔兹岩带、华北中部带和胶-辽-吉带)。这些构造单元具有不同的变质作用时间和 *P-T* 演化特征。东部陆块和阴山陆块晚太古宙基

* 本文为973项目(2007CB411307)、国家自然科学基金项目(40730315 和 40872123)和香港 RGC GRF 项目(7063/06P, 7066/07P,7053/08P)联合资助成果.
作者简介: 赵国春,男,副教授,从事前寒武纪地质和变质岩石学研究工作,E-mail:gzhao@hkucc.hku.hk

底岩系的变质作用发生在～2.5Ga，变质演化以等压冷却（IBC）逆时针 *P-T* 轨迹为特征，反映变质作用的成因与大规模地幔岩浆底侵有关。孔兹岩带主期变质作用发生在～1.95Ga，变质演化以近等温减压（ITD）顺时针 *P-T* 轨迹为特征，反映阴山陆块与鄂尔多斯陆块碰撞形成西部陆块的热构造过程。华北中部带变质作用发生在～1.85Ga，变质演化同样以近等温减压（ITD）顺时针 *P-T* 轨迹为特征，反映了西部陆块和东部陆块最终碰撞形成统一的华北克拉通基底的构造过程。早元古宙胶-辽-吉带变质作用表现‘双变质带’特征：西北带的北辽河群、老岭群和粉子山群的变质作用以中压顺时针 *P-T* 轨迹为特征，而东南带的南辽河群、吉安群和荆山群的变质作用以低压逆时针 *P-T* 演化为特征。华北克拉通基底变质作用演化地质图能更好地反映上述不同构造单元的变质作用演化特征。尽管岩浆弧、大陆裂谷和地幔柱模式都能解释东部陆块晚太古宙基底变质作用所具有的近等压冷却（IBC）逆时针 *P-T* 演化特征，地幔柱模式能够更合理解释东部陆块所存在的宽达 800 千米而时代近于相同的晚太古代火成岩带、大量科马提质超镁铁质岩石和双峰式火山岩、广泛发育的穹窿构造等。华北克拉通变质基底中具有石榴石-单斜辉石-斜长石-石英组合的高压基性麻粒岩和具有蓝晶石-钾长石组合的高压泥质麻粒岩的出露只局限在早元古宙华北中部带的北段和胶-辽-吉带的南端；这些高压麻粒岩形成在俯冲和陆-陆碰撞的构造环境中。西部陆块孔兹岩带含假蓝宝石麻粒岩是碰撞后（～1.92Ga）拉伸引发地幔岩浆底侵导致局部地带发生超高温（UHT）变质作用的产物。

关键词 太古宙；早元古宙；华北克拉通；变质作用；*P-T* 轨迹；地幔柱；陆-陆碰撞

中图法分类号 P588.34；P542.5

1 引言

1984 年，England PC 和 Thompson AB 在《Journal of Petrology》合作发表有关变质作用 *P-T-t* 轨迹的热模拟和岩石学研究两篇重要论文（England and Thompson，1984；Thompson and England，1984），标志着变质作用研究已从传统的成因岩石学转向变质岩石学与大地构造环境和大地构造演化紧密结合（即变质地质学）研究的新阶段。在过去 25 年里，世界各国变质地质工作者对全球主要变质地体开展了详细的变质作用 *P-T*（*-t*）轨迹演化研究，对不同大地构造环境下地质体的变质作用演化过程及其相应的 *P-T*（*-t*）轨迹特征及样式取得某些一致性的认识。例如，等温降压（ITD）顺时针 *P-T*（*-t*）演化轨迹一般反映俯冲带板片或陆-陆碰撞构造环境（England and Thompson，1984；Thompson and England，1984；Harley，1989；Brown，1993），而近等压冷却（IBC）逆时针 *P-T*（*-t*）演化轨迹一般反映变质作用与岛弧根部、大陆裂谷或地幔柱环境中大量地幔岩浆上侵和底板垫托有关（Sandiford and Powell，1986；Bohlen，1987，1991）。这样，结合岩石学、地球化学、构造地质学和同位素年龄资料，变质作用 *P-T*（*-t*）轨迹可有效地用来划分变质地体、识别俯冲和碰撞型造山带以及探讨变质地体形成的大地构造环境和构造演化过程。这方面研究一个成功实例是华北克拉通基底东部陆块和西部陆块的划分以及中部带和西部孔兹岩带两个陆-陆碰撞型造山带的识别（Zhao *et al.*，2001a，2003，2005）。有关华北克拉通基底东、西陆块和中部碰撞带以及西部孔兹岩带在变质作用演化特征以及岩石组成、构造变形、地球化学和同位素年龄等方面的重要差别，作者及其合作者以前已做过详细阐述（Zhao *et al.*，1998，1999a，2000a），这里不再赘述。另一方面，尽管华北克拉通基底变质作用研究在过去十余年里取得一些重大研究进展，目前该方面研究还存在许多争议性地质问题，如华北克拉通太古宙基底具有近等压冷却（IBC）逆时针 *P-T*（*-t*）演化轨迹变质作用的构造机制（是岛弧根部幔源岩浆底侵还是地幔柱？）、华北克拉通早元古宙高压（HP）麻粒岩产出状况与成因、西部陆块早元古宙孔兹岩带超高温（UHT）作用发生的构造环境等问题。这些与变质作用有关的地质问题的研究对认识华北克拉通基底形成和演化具有及其重要地质意义。本文旨在讨论华北克拉通不同构造单元变质作用演化特征以及对相关争议性问题阐述初步看法。

2 华北克拉通基底构造单元划分

华北克拉通基底是由不同微陆块拼合而成已为大家所共识。然而，对于华北克拉通基底微陆块划分一直存在争论（伍家善等，1998；张福勤等，1998；Zhao *et al.*，1998，2001a，2005；翟明国等，2000；Kusky and Li，2003）。例如，张福勤等（1998）将华北克拉通基底划分为 15 微陆块；伍家善等（1998）将华北克拉通基地划分为胶辽陆块、迁怀陆块、晋冀陆块、豫皖陆块和蒙陕陆块 5 个微陆块（图 1a）；翟明国等（2000）将华北克拉通基地划分为胶辽陆块、迁怀陆块、阜平陆块、许昌陆块、集宁陆块和阿拉善陆块 6 个微陆块（图 1b）。笔者认为，这些微陆块是否确实存在主要取决于这些微陆块之间是否存在碰撞型造山带。一般而言，同一陆块可以存在岩石组成不同的构造单元或构造域（domains）。相反，如果两个地质体之间存在碰撞型造山带，即使它们具有相同的岩石组成和其它相似地质特征，他们也应该分属两个不同陆块。因此，划分微陆块不应该只考虑地质体之间的差别，最重要是要识别出地体之间的碰撞型边界，因为两个陆块碰撞与拼合必然在其边界部位形成有别于块体内部的线性构造带，即碰撞型造山带。碰撞型造山带一般具有如下特征：（1）碰撞造山带总是呈线性构造带展布；（2）碰撞造山带内岩石单元往往经历强烈多期变形，伴有大规模推覆作用和韧性剪切，导致紧闭同斜褶皱、鞘褶皱、矿物拉伸线理、大规

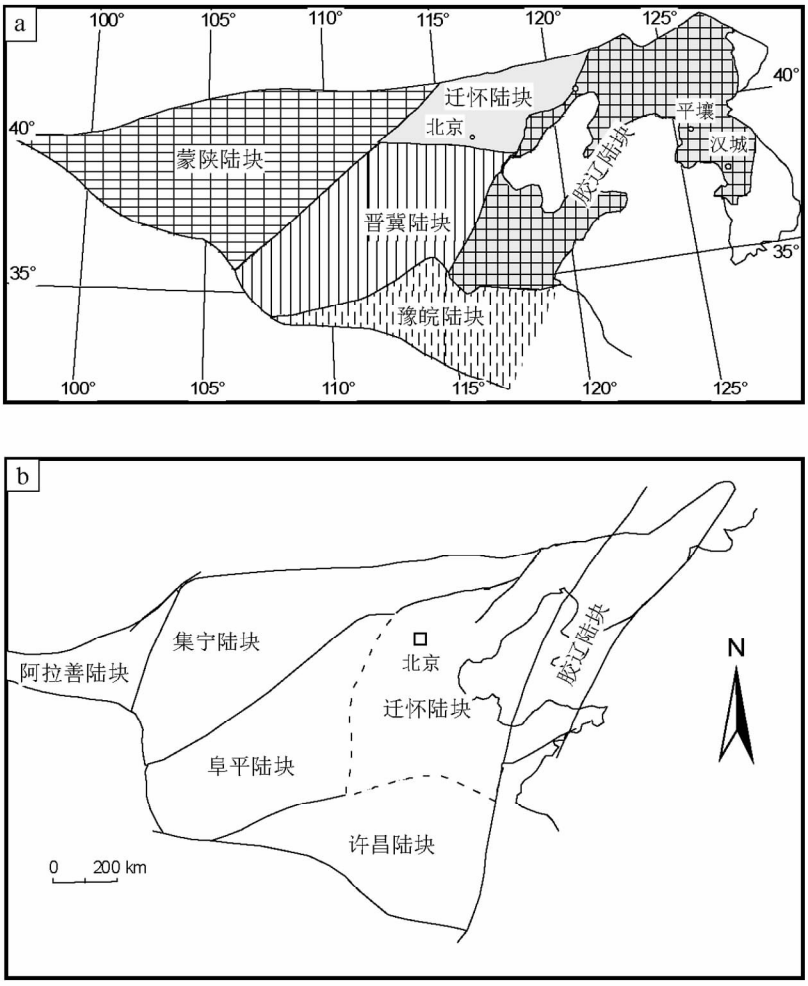


图 1 华北克拉通基底构造单元划分方案（a 据伍家善等,1998;b 据翟明国等,2000a）

Fig. 1 Tectonic subdivision of the North China Craton proposed by Wu *et al.* (1998) (Fig. a) and by Zhai *et al.* (2000a) (Fig. b)

模韧性剪切带的形成;(3)某些碰撞造山带含有残余洋壳和混杂岩;(4)多数碰撞造山带含有高压、超高压岩石-蓝片岩、高压麻粒岩、榴辉岩等;(5)碰撞造山带内岩石变质作用 *P-T*(-*t*)轨迹具有顺时针演化特征,尤其以等温降压型(ITD)顺时针演化更常见;(6)与碰撞同期或稍晚的前陆盆地发育;(7)通常存在后碰撞花岗岩和铁镁质岩墙群。一些学者在划分华北克拉通基底微陆块时将太古宙绿岩带做为陆块之间的缝合带,这显然是不合适的,因为太古宙绿岩带一般不具有上述的碰撞造山带特征。

笔者及其合作者首先将华北克拉通基底划分为东部陆块和西部陆块(Zhao *et al.*, 1998, 1999a, 2000a, 2001a),主要是根据在该克拉通中部识别出一条近南北向、长达1500km 的造山带,即华北中部造山带(Trans-North China Orogen; 图 2)。该造山带显示上述陆-陆碰撞带的主要特征,包括带内沿恒山-怀安-宣化-承德一线所出露的高压麻粒岩和退变榴辉岩(翟明国等,1992,1995;郭敬辉等,1993;马军和王仁民,1995;李江海等,1998;Zhao *et al.*, 2001b; Guo *et al.*, 2002, 2005; 魏春景等,2001);以五台群金刚库组基性-超基性岩为代表的可能的残余洋壳和混杂岩(白谨等,1992; Wang *et al.*, 1996; Polat *et al.*, 2005);带内构造岩片显示多期变形、紧闭同斜褶皱、鞘褶皱、矿物拉伸线理、大规模推覆体和模韧性剪切带(李江海和钱祥麟, 1991; Zhang *et al.*, 1994; 吴昌华和钟长汀, 1998; Wang *et al.*, 2003; Trap *et al.*, 2007, 2008; Zhang *et al.*, 2007, 2009);大量岩浆弧岩石组合 (Liu *et al.*, 2002, 2004, 2005);带内所有变质杂岩变质作用 *P-T*(-*t*)轨迹具有等温降压型(ITD)顺时针演化特征(Zhao *et al.*, 1999b, c, 2000a, b);以滹沱群、野鸡山群、吕梁群、嵩山群所代表的前陆盆地存在 (Li and Kusky, 2007; Trap *et al.*, 2007, 2008);等等。据此,我们认为华北中部造山带是一条典型的陆-陆碰撞带,是华北克拉通东部陆块和西部陆块于 18.5 亿年前后碰撞拼合而成。吴昌华和钟长汀(1998)得出相似的结论。Kusky and Li (2003)提出

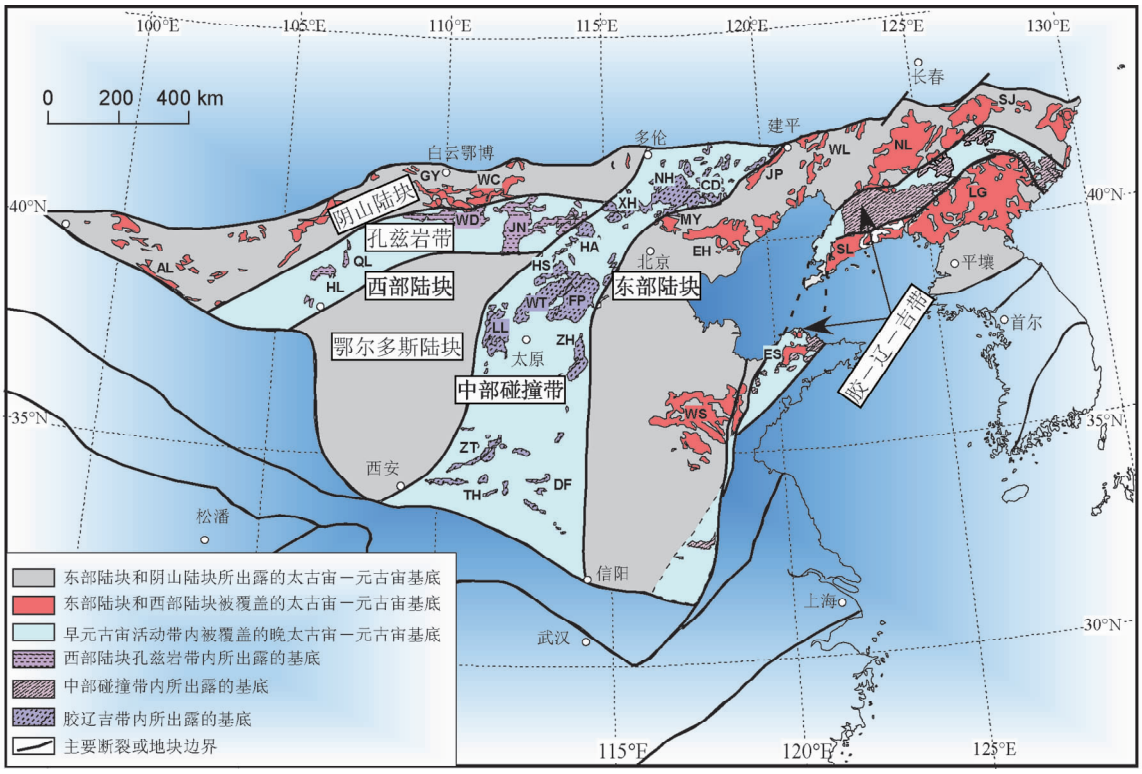


图 2 华北克拉通基底构造单元划分(Zhao *et al.*, 2001a, 2005)

AL-阿拉善;CD-承德; DF-登封; EH-冀东; ES-胶东; GY-固阳; HA-怀安; HL-贺兰山; JN-集宁; JP-建平; LG-狼林;LL-吕梁; MY-密云; NH-冀北; NL-辽北; QL-千里山; SJ-吉南; SL-辽南; TH-太华; WD-乌拉山-大青山; WL-辽西; WS-鲁西; WT-五台; XH-宣化; ZH-赞皇; ZT-中条

Fig. 2 Tectonic subdivision of the North China Craton (Zhao *et al.*, 2001a, 2005)

AL-Alashan; CD-Chengde; DF-Dengfeng; EH-Eastern Hebei; ES-Eastern Shandong; GY-Guyang; HA-Huai'an; HL-Helanshan; JN-Jining; LG-Langrim; LL-L liang; MY-Miyun; NH-Northern Hebei; NL-Northern Liaoning; QL-Qianlishan; SJ-Southern Jilin; ; SL-Southern Liaoning; TH-Taihua; WD-Wulashan-Daqingshan; WL-Western Liaoning; WS-Western Shandong; WT-Wutai; XH-Xuanhua; ZH-Zanhuang; ZT-Zhongtiao

类似的华北克拉通基底构造单元三分方案,所不同的是他们认为东部陆块和西部陆块是在晚太古宙末沿中部带拼合而形成华北克拉通统一结晶基底。

后来,我们在华北克拉通西部陆块内部又识别出一条近东西向展布、长达 1000km 的早元古宙碰撞型造山带,因其主要组成为孔兹岩系而称之为孔兹岩带(图 2;Zhao *et al.*, 2005)。这样,西部陆块被进一步划分北部的阴山陆块、南部的鄂尔多斯陆块以及位于二者之间的孔兹岩带(图 2)。北部阴山陆块主要由晚太古宙阿拉善和固阳(色尔腾)花岗-绿岩地体和武川高级片麻岩地体组成。这些地体在 25 亿年左右经历绿片岩相至麻粒岩相区域变质作用和变形作用,同时形成大量同构造花岗岩和紫苏花岗岩,而且无论在麻粒岩相的高级区还是在绿片岩相-角闪岩相的花岗-绿岩地体,其变质作用演化都表现为型逆时针 *P-T* 演化特征(李树勋等,1987;金巍,1989;Liu *et al.*, 1993; Zhao *et al.*, 1999b)。南部鄂尔多斯陆块由于中-新生代盆地沉积所覆盖而无古老基底出露,但零星钻孔资料证实鄂尔多斯盆地之下有麻粒岩相基底存在(吴昌华等,1986);航磁资料也推测陆块中部东胜一带深部应有大量麻粒岩基底存在(吴家善等,1998)。早元古代孔兹岩带主要由孔兹岩系、S 型花岗岩和少量英云闪长质-奥长花岗质-花岗闪长质(TTG)片麻岩夹铁镁质麻粒岩组成。孔兹岩系包括高级变质的含石墨石富铝片麻岩、长英质变粒岩(细粒片麻岩)、浅粒岩、长石石英岩、磁铁石英岩、钙硅酸盐岩、大理岩和少量斜长角闪岩,它们一般被认为代表稳定的大陆边缘沉积产物。与华北中部造山带相似,孔兹岩带内构造岩片显示多期变形、紧闭同斜褶皱、鞘褶皱、矿物拉伸线理、大规模推覆体和模韧性剪切带(吴昌华和钟长汀,1998; 吴昌华, 2007),其变质作用显示具有近等温减压型(ITD)顺时针 *P-T* 演化特征,且带内伴有大量同构造或构造后 S-型花岗岩产出。这些都是陆-陆碰撞带所具有的典型特征。而且,由于孔兹岩系的沉积原岩形成于稳定的大陆边缘环境,只有俯冲和陆-陆碰撞构造机制才能合理地解释形成孔兹岩系的沉积原岩被带到下地壳深度遭受麻粒岩相变质作用。因此,我们提出孔兹岩带是华北克拉通内部另一条陆-陆碰撞造山带,沿此碰撞带,北部的阴山陆块和南部的鄂尔多斯陆块在早元古宙发生碰撞形成西部陆块,随后西部陆块再与东部陆块沿中部带拼合形成统一的华北克拉通基底(图 3;Zhao *et al.*, 2003,2005)。按照这一构造模式,孔兹岩

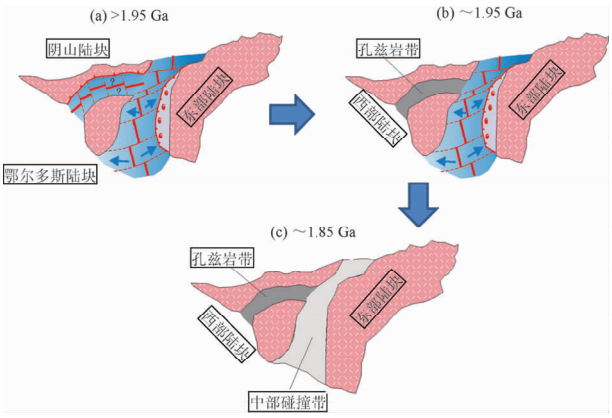


图 3 华北克拉通基底早元古宙拼合模式图

Fig. 3 Cartoons showing the Paleoproterozoic amalgamation of the North China Craton

带变质作用时间(即阴山陆块与鄂尔多斯陆块碰撞时间)一定早于华北克拉通中部带变质作用时间(即西部陆块与东部陆块碰撞时间),即早于 18.5 亿年。这已得到新的同位素年龄资料的证实。例如,SHRIMP 和 LA-ICP-MS 变质锆石测年结果表明,大青山、乌拉山、千里山和贺兰山地区的孔兹岩系的峰期变质作用发生于 ~19.5 亿年(Wan *et al.*, 2006; 董春燕等,2007; Yin *et al.*, 2009),而伴生的后造山 S 型花岗岩形成于 18.7 亿年(Yin *et al.*, 2009)。应用 SHRIMP 变质锆石和电子探针独居石测年技术,Santosh *et al.* (2006, 2007a)确定形成集宁土贵乌拉含假蓝宝石岩石的超高温变质事件发生于 19.2 亿年,但我们认为该超高温变质事件与造山后地幔铁镁质岩浆底侵有关,而主期碰撞时间应该早于 19.2 亿年(详见后面讨论)。

位于孔兹岩带与华北中部带交汇部位的集宁杂岩和怀安杂岩所显示两期麻粒岩相变质作用的叠加为华北克拉通基底形成的两次陆-陆碰撞事件存在提供了有力证据。例如,Lu and Jin (1993)证实集宁地区的孔兹岩系曾经历过两期高级变质作用,并且两期变质作用之间有过一个降温期,表现为由第一期变质石榴子石所退变的黑云母在第二期变质过程中转变为毛发状夕线石。这暗示两期变质作用可能为两次独立的构造热事件。变质矿物转变关系和地质温压计算结果表明两期变质作用都具有近等温降压顺时针 *P-T* 演化特征,反映该地区孔兹岩系遭受了两次构造碰撞事件,而远离中部带的孔兹岩系(如大青山、乌拉山、千里山、贺兰山等地的孔兹岩)却仅经历过一期高级变质事件。刘福来(1995)证实怀安杂岩中少量孔兹岩系也遭受两期麻粒岩相变质事件。由于缺少可靠的变质年龄资料,Lu and Jin (1993)当时认为前一期麻粒岩相变质事件发生在 ~2.5Ga,而后一期麻粒岩相变质事件发生在 ~1.8Ga。最近我们对怀安杂岩少量孔兹岩系锆石研究发现,大多数锆石都具有变质成因的核-边结构(图 4a),变质锆石核给出的 Pb-Pb 年龄为 ~1.95Ga,而变质锆石再生边给出的 Pb-Pb 年龄为 ~1.85Ga (Zhao *et al.*, 2009)。少量碎屑锆石核显示'双再生边'结构(图 4b),其内部再生边(inner rim)的 Pb-Pb 年龄为 ~1.95Ga,而外部再生边(outer rim)的 Pb-Pb 年龄为 ~1.85Ga(Zhao *et al.*, 2009)。显然,变质锆石核和内部再生边的 ~1.95Ga 年龄与大青山、乌拉山、千里山和贺兰山地区的孔兹岩系的峰期变质作用时间一致,纪录了阴山陆块和鄂尔多斯陆块碰撞对接形成西部陆块和孔兹岩带的时间,而变质锆石边和外部再生边的的 ~1.85Ga 年龄与从华北中部带岩石中所获得的大量变质年龄一致,纪录了西部陆块与东部陆块碰撞对接形成统一的华北克拉通基底的时间(图 3; Zhao *et al.*, 2009)。

除上述两条新近发现的早元古宙碰撞型造山带之外,华北克拉通东部陆块内部还存在一条早元古宙活动带,即胶-辽-吉活动带(图 2)。该活动带呈北东-南西向展布于东部陆块东南缘,主要由大量的早元古宙花岗质岩石、铁镁质侵入体和绿片岩相至麻粒岩相变质的火山-沉积岩系组成(张秋生等,1988; 贺高品和叶慧文,1998; 李三忠等,2004; Li *et*

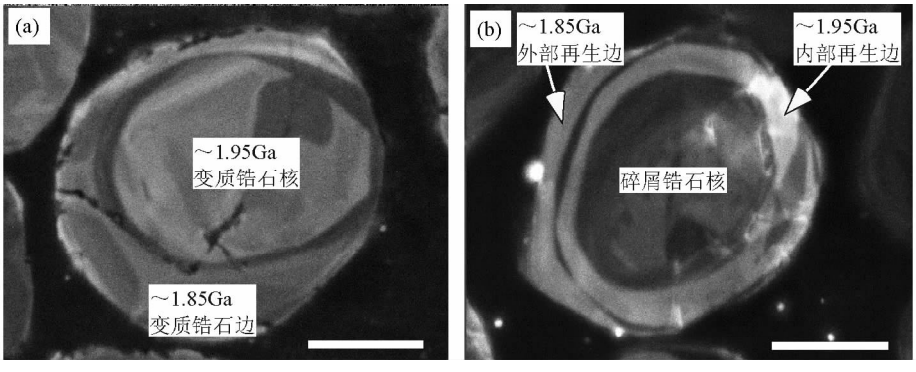


图 4 怀安杂岩孔兹岩中变质锆石 CL 图像(Zhao *et al.*, 2009)

图中标尺为 30 微米

Fig. 4 CL images of metamorphic zircons from the khondalite rocks of the Huai'an complex (Zhao *et al.*, 2009)

All scale bars are 30μm

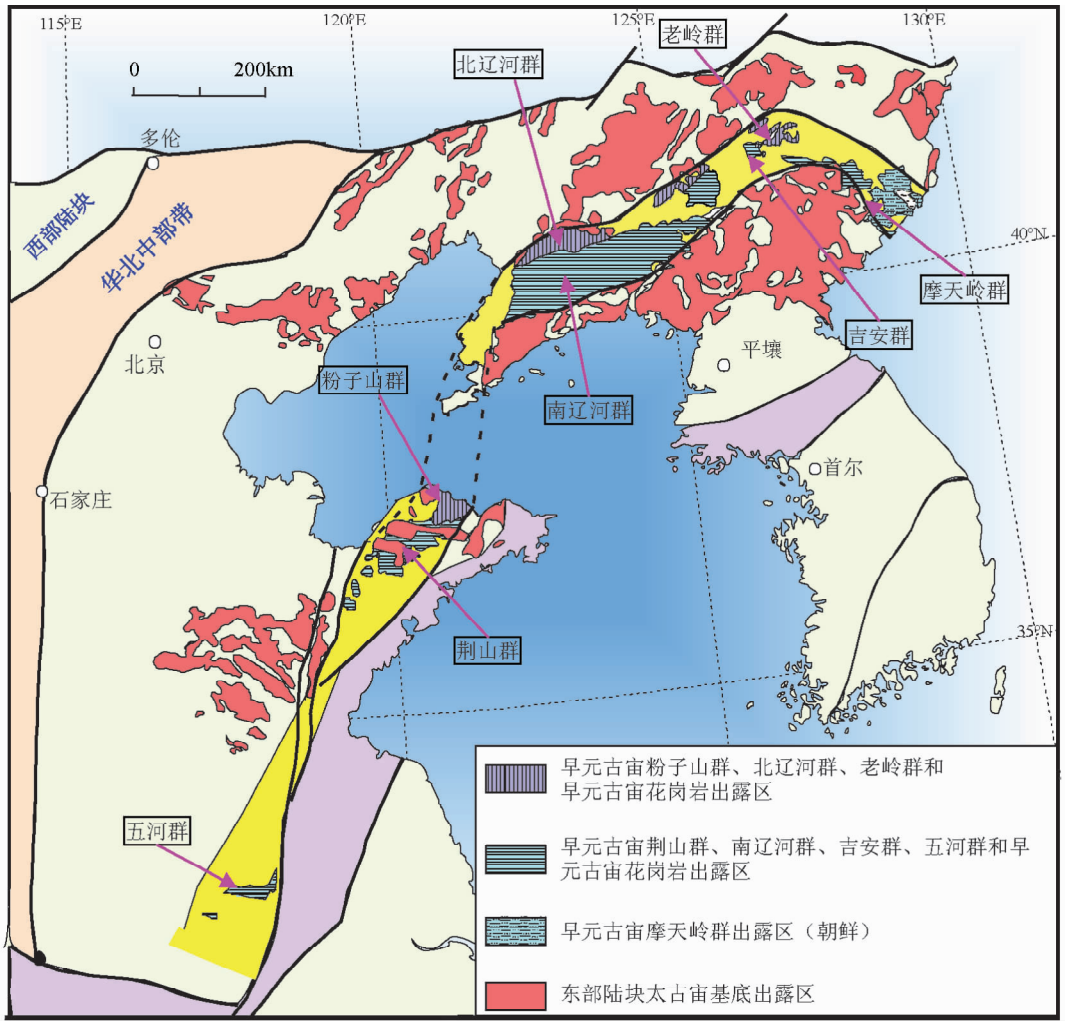


图 5 早元古宙胶-辽-吉带岩石构造单元组成及其在东部陆块空间分布(Zhao *et al.*, 2005)

Fig. 5 Lithologies of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt and their distribution in the Eastern Block (Zhao *et al.*, 2005)

al., 2004b, 2005, 2006; Li and Zhao, 2007; Zhou *et al.*, 2008)。带内早花岗质岩石传统上统称为'辽吉花岗岩'(张秋生等,1988),包括 2.2 ~ 2.1Ga 期间侵位的构造前条纹状花岗岩(A 型花岗岩)和 1.88 ~ 1.85Ga 期间侵位的构造后或非造山斑状二长花岗岩和碱性正长岩(Li and Zhao, 2007)。带内变质火山-沉积岩系包括胶东地区的荆山群和粉子山群,辽东地区的南、北辽河群,吉南地区的吉安群和老岭群,北朝鲜的摩天岭群(图 5),其原岩为一套玄武岩和英安岩-流纹岩所构成的双峰式火山岩、灰岩、白云岩和陆源碎屑沉积岩(砾岩、砂岩和页岩)。其中,变质陆源碎屑沉积岩中最年轻的火成碎屑锆石年龄为 2.05Ga,而变质锆石年龄多分布为 1.90 ~ 1.85Ga(Luo *et al.*, 2004, 2008; Lu *et al.*, 2006; Zhou *et al.*, 2008),尽管胶北地区早元古宙变质岩系有 1.76Ga 变质锆石的报道(Tang *et al.*, 2007)。最近,郭素淑和李曙光(2009)根据新获得的同位素年龄资料提出安徽蚌埠隆起区早元古宙五河群可能是胶-辽-吉活动带的西南部延伸(图 5)。这样,胶-辽-吉活动带横跨整个东部陆块,长达 2000 千米(图 5)。胶-辽-吉活动带虽有悠久的研究历史,有关它的大地构造性质和演化过程一直存在争论(张秋生等,1988; Bai and Dai, 1998; 贺高品和叶慧文, 1998; Li *et al.*, 2005, 2006; Li and Zhao, 2007)。已提出的两种主要构造模式是陆内裂谷闭合模式(张秋生等,1988; Li *et al.*, 2005, 2006; Li and Zhao, 2007)和陆-弧-陆碰撞模式(Bai and Dai, 1998; Faure *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2006)。陆内裂谷闭合模式的主要证据包括:(1)双峰式火山岩石组合的存在;(2)胶-辽-吉活动带两侧具有相似的太古宙基底;(3)带内出露大量 A 型花岗岩;(4)南辽河群、吉安群和荆山群的变质作用以低压逆时针 *P-T* 演化为特征(贺高品和叶慧文,1998; Lu *et al.*, 1997),不支持碰撞构造;(5)胶-辽-吉活动带第一幕变形表现为拉张性,而非挤压性变形(Li *et al.*, 2005)。陆-弧-陆碰撞模式主要证据包括:(1)紧闭同斜褶皱、矿物拉伸线理、大规模推覆构造和韧性剪切存在;(2)胶-辽-吉活动带南端荆山群中发现高压泥质麻粒岩(Zhou *et al.*, 2008);(3)带内一些火山岩显示岩浆弧型地球化学特征(Bai and Dai,

1998);(4)少量超基性岩-基性岩被认为是洋壳残余(Bai and Dai,1998);(5)北辽河群、老岭群和粉子山群的变质作用以中压顺时针 *P-T* 演化为特征,支持碰撞构造。由于笔者对胶-辽-吉活动带没有做过大量工作,这里对上述两种模式不做进一步讨论。

3 华北克拉通基底不同构造单元变质作用演化特征——变质作用演化地质图

1986 年出版的《1∶400 万中国变质地质图》凝结了上世纪 80 年代中期之前我国变质地质工作者在变质岩石学领域所取得的主要研究成果,并已成为我们从事变质作用研究的重要基础资料。然而,传统的变质地质图主要反映变质作用峰期信息,并没有反映变质作用演化过程,因而已不能满足当代变质地质学研究的需要。例如,在传统的《1∶400 万中国变质地质图》上,具有'红眼圈结构(石榴石 + 石英合晶围绕辉石和斜长石生长)'的麻粒岩地体(如冀东地区)和具有'白眼圈结构(斜长石 + 辉石合晶围绕石榴石生长)'的麻粒岩地体(如怀安地区)的表示图案完全相同,但实际上两种麻粒岩所经历的变质演化过程截然不同,传统的变质地质图无法体现这种变质演化上的差异。自从上世纪 80 年代中期开始,即当我国 1∶400 万变质地质图的编图工作即将结束之时,变质作用研究开始从传统的成因岩石学研究转变为变质岩石学与大地构造演化紧密结合研究的新阶段,并由此诞生了'变质地质学'这门新的学科。变质作用 *P-T*(-*t*)轨迹研究工作的广泛开展是这一转变的重要标志之一。在过去三十多年里,变质地质工作者已对全球主要变质地体开展了详细的变质作用 *P-T*(-*t*)演化研究,积累了大量变质作用 *P-T*(-*t*)演化数据资料。这些数据资料的不断积累使我们能够在一些变质研究程度较高的地区开展变质作用演化地质图的编制。变质作用演化地质图是在传统的变质地质图基础上通过一些特定图案来反映变质地体的变质作用演化过程。显然,与传统变质地质图相比,变质作用演化地质图能够更好地反映变质峰期之前的进变过程和峰期之后的退变过程,这有助于我们了解变质作用所发生的大地构造环境和演化历史。尽管目前国内外还没有开展这方面编图工作的尝试,笔者认为变质作用演化地质图的编制对当代变质地质学研究是十分必要的,希望这方面研究设想能够在我国新一轮变质地质图编制过程中有所体现,确保新一代变质地质图比上一代变质地质图具有质的飞跃,以满足我国变质地质学研究的需要。

华北克拉通基底变质岩石出露区应该是我国尝试变质作用演化地质图编制的首选地区。自从上世纪 80 年代末变质作用 *P-T*(-*t*)轨迹概念及其研究方法引入我国以来,我国变质地质工作者对华北克拉通基底变质岩系开展了广泛的变质作用 *P-T*(-*t*)轨迹研究工作并积累了大量变质作用 *P-T* 演化资料(金巍,1989;卢良兆,1991;金巍等,1991;崔文元等,1991;卢良兆等,1992,1996;翟明国等,1992, 1995;郭敬辉等,1993, 1996, 1998, 1999;厉子龙,1993;Liu *et al.*,1993;Lu and Jin, 1993; 孙德育等,1993;陈能松等,1994;梅华林,1994;刘福来,1996,1997;金巍和李树勋,1996;刘树文,1996;贺高品和叶慧文,1998;卢良兆和董永胜,1998;刘福来和沈其韩,1999;Zhao *et al.*, 1999a, 2000a, 2001b;魏春景等,2001;Guo *et al.*, 2002; Ge *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2006)。这些资料不仅对于华北克拉通基底构造单元划分起了至关重要的作用(Zhao *et al.*, 2001a, 2005),同时也为华北克拉通基底变质作用演化地质图的编制奠定了基础。依据这些资料,笔者及其合作者目前正在尝试编制 1∶25万华北克拉通基底变质作用演化地质图。作为这项编图工作的初步阶段成果,图 6 展示了华北克拉通基底不同构造单元变质作用 *P-T* 轨迹特征。尽管该变质作用演化地质图并没有完全体现出变质地体在变质作用峰期之前的进变过程和峰期之后的退变质过程,它却能很好地反映华北克拉通基底不同构造单元在变质作用演化方面的一些重要差异,其中几点重要特征归纳如下:

(1)华北克拉通东部陆块和阴山陆块晚太古宙基底岩系,不论是低级花岗-绿岩带还是高级麻粒岩相地体,其变质作用演化均以逆时针 *P-T* 轨迹为特征,并且多具有等压冷却(IBC)演化过程。这些特征表明东部陆块和阴山陆块晚太古代基底不是形成在陆-陆碰撞的构造环境。导致岩石发生近等压冷却型(IBC)逆时针 *P-T* 演化的变质作用一般认为与岩浆弧,大陆裂谷或地幔柱(热点)环境中的大量地幔岩浆底侵作用有关。现有的同位素年龄资料表明东部陆块和阴山陆块晚太古宙基底岩系变质作用时间为 ~2.5Ga(Pidgeon, 1980; Jahn and Zhang, 1984; 李树勋等,1987;金巍,1989;Kröner *et al.*, 1998; Geng *et al.*, 2006; Grant *et al.*, 2009)。

(2)早元古宙华北中部造山带(Trans-North China Orogen)变质岩系,不论是低级花岗-绿岩带还是高级麻粒岩相地体,其变质作用演化均以顺时针 *P-T* 轨迹为特征,并且多具有等温降压(ITD)演化过程,反映了西部陆块和东部陆块于 ~1.85Ga 发生陆-陆碰撞、拼合形成华北克拉通统一基底的构造演化过程。

(3)早元古宙孔兹岩带的主体变质岩系变质作用的 *P-T* 轨迹显示等温降压(ITD)型顺时针演化特征,反映阴山陆块与鄂尔多斯陆块于 ~1.95Ga 发生陆-陆碰撞、拼合形成西部陆块的构造演化过程;而孔兹岩带东段(大青山东坡和集宁土贵乌拉)少量超高温变质岩系变质作用的 *P-T* 轨迹显示逆时针演化特征,其构造意义后面详细讨论。

(4)早元古宙胶-辽-吉带变质作用表现'双变质带(paired metamorphic zone)'特征:位于西北侧的北辽河群、老岭群和粉子山群的变质作用以中压顺时针 *P-T* 演化为特征(图 6),而位于东南侧的南辽河群、吉安群和荆山群的变质作用以低压逆时针 *P-T* 演化为特征(图 6)。此外,该带南端出露少量高压泥质麻粒岩和铁镁质麻粒岩,并具有等温减压

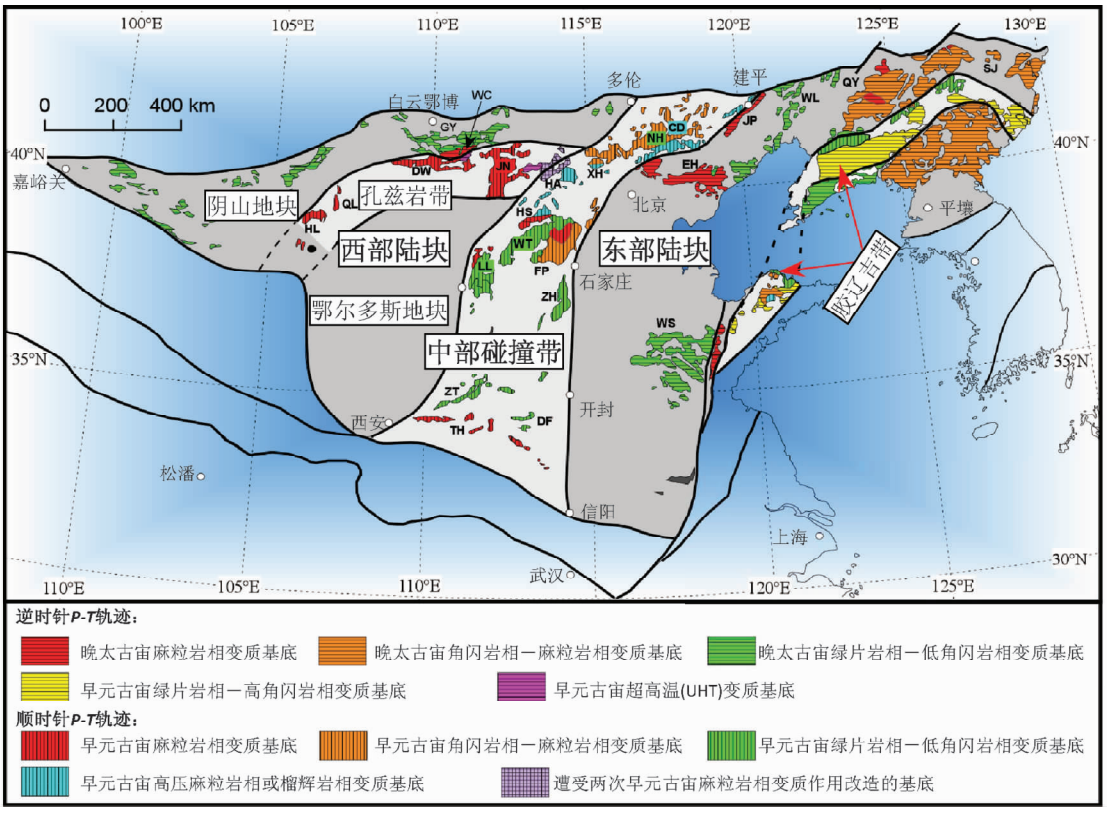


图 6 华北克拉通基底变质作用演化地质图

Fig. 6 Metamorphic evolution map of the basement of the North China Craton

(ITD)型顺时针 *P-T* 演化特征(Zhai *et al.*, 2000b; 周喜文等,2004),表明胶-辽-吉带的形成和演化涉及俯冲和/或碰撞构造过程(Zhou *et al.*, 2008)。

(5)地处孔兹岩带和华北中部带交汇部位的集宁杂岩和怀安杂岩的孔兹岩系显示两期麻粒岩相变质作用的叠加,并且两期麻粒岩相变质作用都具有近等温降压(ITD)顺时针 *P-T* 演化特征,反映该地区孔兹岩系遭受了两次碰撞造山事件。

(6)华北克拉通麻粒岩相高级地体主要出露其北缘,通常称之为华北克拉通北缘麻粒岩相带(沈其韩等,1992;沈其韩和钱祥林,1995;李江海等,1997)。然而,如图 5 所示,该麻粒岩相带在不同地段显示不同的变质作用 *P-T* 轨迹演化特征,而且变质作用时间也不同,它们分别是东部陆块、阴山陆块、孔兹岩带和华北中部带不同变质事件的产物。

4 华北克拉通基底变质作用若干问题讨论

4.1 华北克拉通 ~2.5Ga 变质事件发生的构造环境

孔兹岩带(Khondalite Belt)和华北中部带(Trans-North China Orogen)的存在表明华北克拉通基底的形成至少经历两次早元古宙陆-陆碰撞事件:前一次碰撞事件发生在 ~1.95Ga,导致阴山陆块和鄂尔多斯陆块沿东-西向展布的孔兹岩带拼合形成西部陆块(图 3b);后一次碰撞事件发生在 ~1.85Ga,导致西部陆块与东部陆块拼合形成华北克拉通统一结晶基底(图 3c)。这一构造模式很好地解释了早元古宙孔兹岩带和华北中部带变质作用所显示的等温降压(ITD)型顺时针 *P-T* 演化特征。然而,该模式本身并没有涉及华北克拉通东部陆块和阴山陆块 ~2.5Ga 变质事件所发生的构造环境和机制问题。如前所述,华北克拉通东部陆块和阴山陆块 ~2.5Ga 变质事件的最显著特征是变质岩石普遍经历等压冷却(IBC)逆时针 *P-T* 演化的变质过程。导致岩石发生近等压冷却型(IBC)逆时针 *P-T* 演化的变质作用一般认为与岩浆弧(Bohlen, 1987, 1991)、大陆裂谷(Sandiford and Powell, 1986)、或地幔柱(热点)(Zhao *et al.*, 1998; Jayananda *et al.*, 2000)环境中的大量地幔岩浆底侵作用有关。目前还不清楚华北克拉通 ~2.5Ga 变质事件是发生在这三种可能的环境中的哪一种。笔者及其合作者以前曾在有关文章中对此问题进行过初步探讨(Zhao *et al.*, 1998, 2001a),但迄今并没有得到令人满意的解释。由于此问题涉及太古宙地壳形成和演化的构造机制以及板块构造在太古宙地壳演化过程中所起的作用等重要地质问题,笔者这里以华北克拉通东部陆块为例对该问题做进一步讨论。

东部陆块基底岩石主要以高级地体或中-低级花岗绿岩地体形式出露于胶东、鲁西、密云、冀东、辽西、辽南、辽北、鞍本、吉南等地(图 2),时代上以晚太古代岩石组合为主,早-

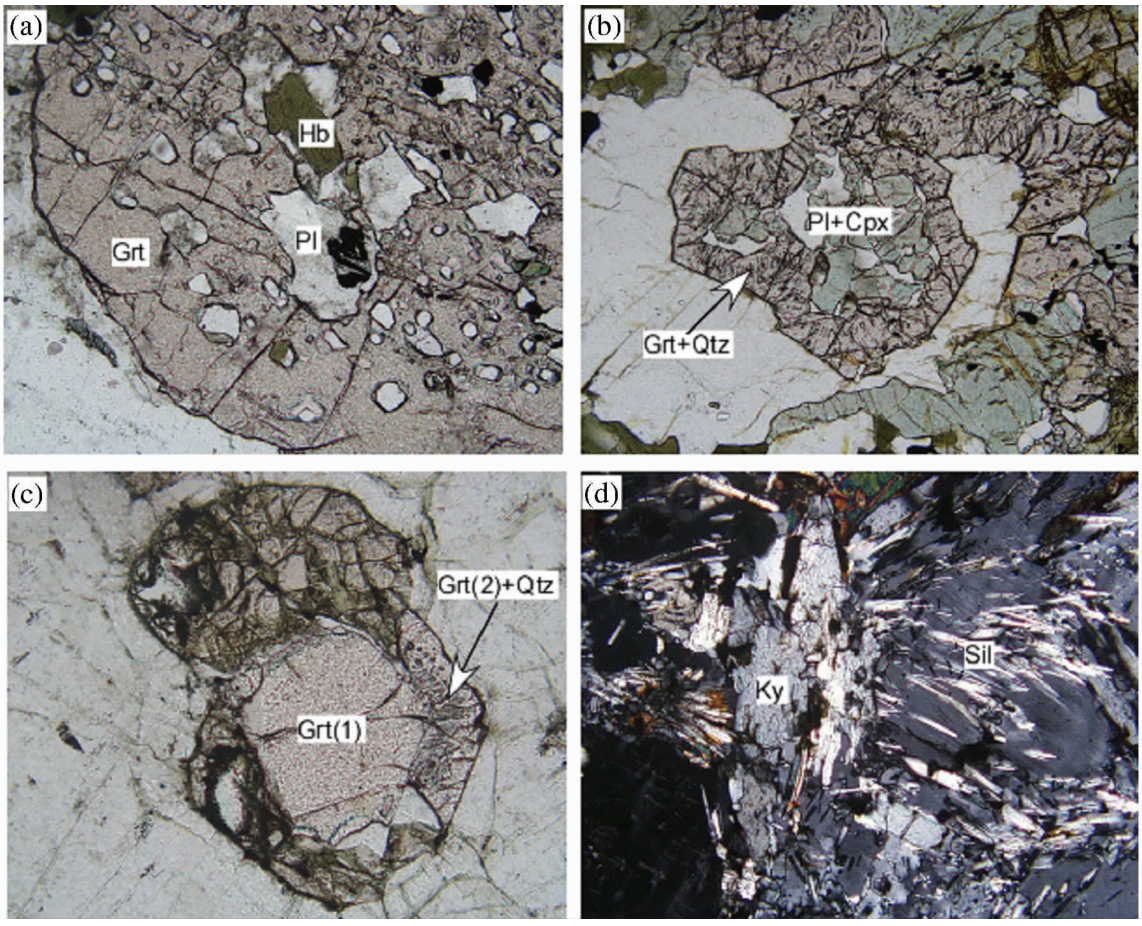


图 7 东部陆块镁铁质和泥质麻粒岩代表性变质反应结构

具体描述见正文。矿物代号:Cpx-单斜辉石;Grt-石榴石;Ky-蓝晶石;Pl-斜长石;Sil-夕线石;Qtz-石英

Fig. 7 Photomicrographs illustrating representative metamorphic reaction textures of the mafic granulites and pelitic gneisses in the Eastern Block

Descriptions see the text. Mineral abbreviations: Cpx-clinopyroxene; Grt-garnet; Ky-kyanite; Pl-plagioclase; Sil-sillimanite; Qtz-quartz

中太古代和早元古代岩石组合仅在局部出露,包括冀东曹庄地区的含 3.6 ~ 3.9Ga 碎屑锆石的铬云母石英岩及 ~ 3.5Ga 斜长角闪岩,鞍本地区的 3.3 ~ 3.8Ga 花岗质片麻岩及变质沉积岩等(Liu *et al.*, 1992,2008; Song *et al.*, 1996)。这些早-中太古代岩石可能遭受过多期变质变形,但由于后期热构造事件的强烈改造,岩石中反映早期热事件的岩相信息和同位素年龄信息已大部分被破坏,因而这些岩石的形成环境,存在规模及其演化历史目前还不完全清楚。晚太古代岩石组合主要包括 2.8 ~ 2.6Ga 绿岩组合和 2.6 ~ 2.5Ga TTG 片麻岩、镁铁质-超镁铁质层状侵入岩和少量表壳岩(Zhao *et al.*, 1998)。其中,TTG 片麻岩约占整个基底出露面积的 80% 以上;绿岩组合组合中的超镁铁质岩石含有大量科马提质岩石组分(张贻侠等,1980;陈光远,1983;程裕祺和徐惠芬,1991;Polat *et al.*, 2006;刘劲鸿,2001);表壳岩包括绿片岩相至麻粒岩相变质的沉积岩和双峰式火山岩(伍家善等,1998; Zhao *et al.*, 1998)。这些岩石在 ~ 2.5Ga 经历了绿片岩相至麻粒岩相区域变质作用和透入性变形作用(Pidgeon, 1980; Jahn and Zhang, 1984; Kröner *et al.*, 1998; Geng *et al.*, 2006; Grant *et al.*, 2009),同时形成大量同构造钾质花岗岩和少量紫苏花岗岩(Yang *et al.*, 2008)。在构造样式上,东部陆块太古宙基底岩石以 TTG 片麻岩穹窿构造为主要特征,如在冀东地区的迁安穹窿、崔杖子穹窿、太平寨-三屯营穹窿群,辽北地区的清原穹窿,吉南地区的华甸穹窿,辽南地区的金州穹窿等。这些片麻岩穹窿或穹窿群的形成可能与花岗质岩浆底劈上升有关(Zhao *et al.*, 1998, 2001a)。在变质作用演化上,东部陆块镁铁质麻粒岩和泥质片麻岩常保存早期进变质、峰期和峰期后退变质阶段矿物组合。早期进变质矿物组合主要以矿物包裹体形式存在于峰期阶段矿物中,如在镁铁质麻粒岩中,斜方辉石或石榴子石常包裹早期组合角闪石 + 斜长石 ± 石英 ± 黑云母(图 7a);在泥质片麻岩中,早期组合黑云母 + 斜长石 + 石英 ± 红柱石包裹于石榴子石和夕线石之中,如冀东曹庄和娄子山地区泥质片麻岩夕线石内部可见红柱石残晶(Zhao *et al.*, 1998)。峰期组合主要以变斑晶和基质形式存在,如镁铁质麻粒岩中

的斜方辉石 + 单斜辉石 + 斜长石 + 石榴子石组合；泥质片麻岩或片岩中的石榴子石 + 夕线石 + 斜长石 + 石英 + 黑云母组合。峰期后退变质组合主要以后成合晶或退变边形式存在，如在镁铁质麻粒岩中可见石榴子石 + 石英呈后成合晶围绕斜长石和紫苏辉石生长（即通常所说的“红眼圈结构”；图 7b）或围绕峰期阶段形成的石榴石生长（图 7c）；在泥质片麻岩中可见蓝晶石交代并切割夕线石线理现象（图 7d；Ge *et al.*，2003）。结合温压计算结果，这些矿物组合转变很好地限定了具有近等压冷却（IBC）特征的逆时针 *P-T* 演化轨迹（崔文元等，1991；刘树文等，1991；厉子龙，1993；孙德育等，1993；陈能松等，1994；Zhao *et al.*，1998，2001a；Ge *et al.*，2003）。

华北克拉通东部陆块晚太古宙基底形成和演化的一个特别重要的现象是变质作用与形成区域上广泛分布的 TTG 片麻岩的原岩（英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩）和铁镁质麻粒岩的原岩（基性火山岩或辉长岩）的岩浆作用在发生时间上非常相近。Jahn and Zhang（1984）首先在冀东地区注意到这一现象。根据 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素全岩年龄以及传统的 U-Pb 锆石测年结果，Jahn and Zhang（1984）发现该区 TTG 岩套侵位发生在 ~2.6Ga，而区域麻粒岩相变质作用发生在 ~2.5Ga，即麻粒岩相变质事件在 TTG 侵位后不到 100Ma 的时间间隔就已发生。这一结论后来被 Geng *et al.*（2006）的研究进一步证实。利用 SHRIMP U-Pb 锆石定年技术，Geng *et al.*（2006）确定冀东地区 TTG 岩套侵位时间在 2550 ~ 2492Ma，表明最早的 TTG 岩浆侵位与 ~2.5Ga 麻粒岩相变质作用的时间间隔不超过 50Ma。东部陆块其它地区的情况也是如此（Peucat and Jahn，1986；Kröner *et al.*，1998；Zheng *et al.*，2004；Geng *et al.*，2006；Grant *et al.*，2009）。例如，在辽西建平地区，Kröner *et al.*（1998）利用锆石 Pb-Pb 蒸发法和 SHRIMP 测年技术确定区内广泛分布的 TTG 岩套的侵位时间是在 2522 ~ 2500Ma，而区域麻粒岩相变质作用发生在 2490 ~ 2485Ma，二者的时间间隔也不到 50Ma。在辽南地区，Zheng *et al.*（2004）发现产于古生代金伯利岩中的晚太古宙麻粒岩包体的岩浆锆石核和变质锆石再生边的年龄差不多于 50Ma（图 8a）。最近，利用 SHRIMP U-Pb 锆石定年技术，Grant *et al.*（2009）确定吉林南部的 TTG 岩石的准确侵位时间在 2559 ~ 2553Ma，随后在 2517 ~ 2490Ma 遭受角闪-麻粒岩相变质（图 8b），二者的时间间隔也是在 50Ma 左右。所有这些事实说明华北克拉通东部陆块晚太古宙基底变质作用和形成 TTG 和铁镁质岩石的岩浆作用是同一热构造事件产物。因此，任何用来解释华北克拉通东部陆块晚太古宙基底演化的构造模式必须同时能够解释这种变质作用和岩浆作用之间的密切关系。

笔者及其合作者最早考虑用地幔柱来解释华北克拉通东部陆块晚太古宙基底的形成和演化（Zhao *et al.*，1998，1999b，2001a），因为相对比较而言，该模式能更合理地解释东部陆块晚太古宙基底的岩石组合、变质作用演化、构造样式等特征。例如，东部陆块晚太古宙基底的岩石组合，包括 2.55 ~ 2.50Ga TTG 片麻岩、铁镁质和超铁镁质岩石（部分科马提岩）和 ~2.50Ga 同构造深融成因的紫苏花岗岩和钾质花岗岩，与典型大陆裂谷成因的岩石组合大相径庭。而且，裂谷模式也无法解释东部陆块基底片麻岩的穹窿群构造样式。所以东部陆块晚太古宙基底岩石的形成及其随后的变质作用和变形作用不可能发生在大陆裂谷环境中。尽管岩浆弧和地幔柱模式都可以解释东部陆块晚太古宙基底中大量的 TTG 片麻岩的成因、具有 IBC 型逆时针 *P-T* 轨迹的变质作用演化、广泛分别的穹窿群构造样式等特征，我们更偏爱地幔柱模式，其理由阐述如下：

（1）地幔柱模式能够更合理地解释东部陆块晚太古宙科马提岩或科马提质岩石的成因。晚太古宙科马提岩在东部陆块鞍本地区（陈光远，1983）、冀东地区（张贻侠等，1980）；山东鲁西蒙阴（程裕祺和徐惠芬，1991；Polat *et al.*，2006）；吉南和龙（刘劲鸿，2001）等地都所报道。其中山东鲁西蒙阴和吉南和龙的科马提岩具有典型的鬣刺结构。形成科马提

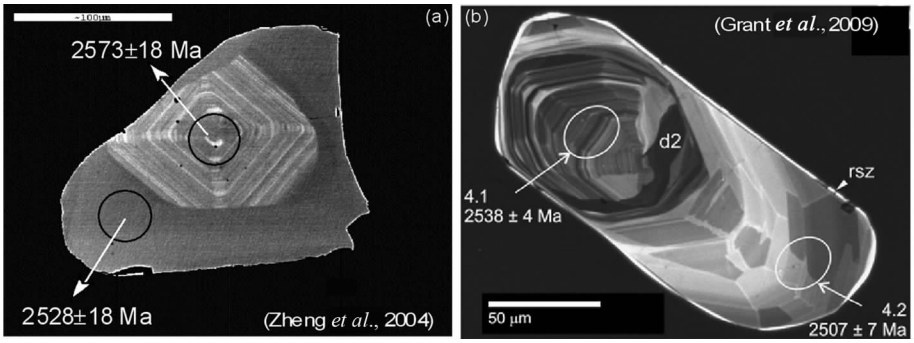


图 8 华北克拉通东部陆块（a）麻粒岩（Zheng *et al.*，2004）和（b）高级变质 TTG 片麻岩（Grant *et al.*，2009）中变质锆石和岩浆锆石 CL 图像，显示岩浆作用和区域变质作用时间间隔很短

Fig. 8 CL images of igneous zircon cores and metamorphic rims from (a) granulites (Zheng *et al.*, 2004) and high-grade TTG gneisses (Grant *et al.*, 2009) in the Eastern Block of the North China Craton, which show a short time interval between initial magmatism and high-grade regional metamorphism

岩的地幔岩浆温度一般高达1600℃,这样高温的地幔岩浆很难在板块俯冲带附近的上地幔环境中产生,而只有通过地幔柱来源于下地幔(Campbell *et al.*, 1989)。根据太古宙绿岩带中科马提岩和玄武质绿岩的地球化学特征和实验岩石学研究,Campbell *et al.* (1989)提出太古宙科马提岩来源于地幔柱核部热的、低粘度物质,而构成绿岩的玄武岩来源与地幔柱冷的头部物质的部分熔融。

(2)与世界其它克拉通晚太古宙岩石组合相似,华北克拉通东部陆块晚太古宙基底尽管含有大量钙碱性TTG深成侵入体,但缺少现代岩浆弧的火山岩组合-安山岩组合。在晚太古宙绿岩组合中,常见的火山岩组合是超基性的苦橄岩、基性的玄武岩和酸性的英安岩、流纹质英安岩和流纹岩构成的双峰式火山岩组合。这种双峰式火山岩组合完全可以用地幔柱模式加以解释。超基性的苦橄和基性的玄武岩可以直接来源与地幔柱物质,而酸性的英安岩、流纹质英安岩和流纹岩是地幔柱热异常导致的地壳底部物质的部分熔融物。

(3)如前所述,东部陆块晚太古宙基底的80%出露面积为TTG深成侵入体,从西至东宽达800余千米,但这些深成侵入体在形成时间上却没有显示任何系统地递减或递增变化,侵位时间均在2.60~2.50Ga之间。这显然难以用现代岩浆弧增生模式加以解释,但却符合地幔柱活动通常是在很短的时间内完成的特征。

(4)相对于岩浆弧的横向挤压环境,地幔柱岩浆上涌引发的垂向作用能更合理地解释东部陆块晚太古宙基底所出现的穹窿构造。

基于上述理由,笔者认为地幔柱是目前用来解释华北克拉通东部陆块晚太古宙基底形成和演化的最佳构造模式,因为它不仅能合理地解释东部陆块晚太古宙基底变质作用所呈现的近等压冷却型(IBC)逆时针*P-T*演化特征,而且比岩浆弧模式能够更合理解释东部陆块所存在的宽达800千米而时代近于相同的晚太古代火成岩带、大量科马提质超镁铁质岩石和双峰式火山岩、广泛发育的穹窿构造等。笔者及其合作者曾对华北克拉通东部陆块晚太古宙地幔柱作用过程及其所导致的岩浆作用、变质作用和变形作用做过详细描述和讨论(Zhao *et al.*, 2001a)。值得指出的是,尽管如此,目前我们仍不能完全排除华北克拉通东部陆块晚太古宙基底形成于岩浆弧环境的可能性。华北克拉通东部陆块晚太古宙岩浆作用、变质作用和变形作用发生的构造环境问题还有待进一步深入研究。

4.2 华北克拉通高压麻粒岩出露状况和成因问题

华北克拉通基底中高压麻粒岩的发现对于重新认识该克拉通形成和演化起了关键性作用。然而,目前有关高压麻粒岩在华北克拉通基底上是面状产出还是局限在早元古宙活动带以及它们的形成构造机制还存在争论。这方面的争论在一定程度上源自不同学者对高压麻粒岩所赋予的不同定义。在本专辑中,翟明国(2009)专门讨论了目前有关高压麻粒岩定义所存在的一些分歧。在注意到目前有关高压麻粒岩的两种不同定义,翟明国(2009)似乎更强调在(石英拉斑玄武岩成分)基性麻粒岩中的石榴石出现与否来定义高压麻粒岩,将高压麻粒岩的*P-T*界限定位在石榴石出现在石英拉斑玄武岩成分的矿物反应线之上和斜长石消失于石英拉斑玄武岩成分的矿物反应线之下的温压范围。按照这一定义,高压基性麻粒岩基本与石榴石基性麻粒岩同义,这样华北克拉通基底中绝大多数基性麻粒岩都应该归为高压麻粒岩,因为华北克拉通基底的基性麻粒岩大多含有石榴石。因此,高压基性麻粒岩在华北克拉通基底中更可能呈面状产出,不是只局限在早元古宙碰撞造山带内。其形成机制更可能与华北克拉通基底总体抬升(exhumation)有关,而不指示俯冲带或陆-陆碰撞边界。

笔者更倾向O'Brien and Rötzler (2003)为高压麻粒岩所下的定义:"High-pressure granulites are characterised by the key associations garnet-clinopyroxene-plagioclase-quartz (in basic rocks) and kyanite-K-feldspar (metapelites and felsic rocks) and are typically orthopyroxene-free in both basic and felsic bulk compositions.",即高压麻粒岩的主要特征是基性岩石中出现石榴石-单斜辉石-斜长石-石英组合和泥质岩石和长英质岩石中出现蓝晶石-钾长石组合,而斜方辉石不出现在基性和长英质成分岩石中,但在泥质高压麻粒岩中,斜方辉石仍可存在,如北大别黄土岭超高温高压麻粒岩(Chen *et al.*, 2006, 2008)。这个定义也是目前国外一般变质岩石学教材中所采用的高压麻粒岩定义,如目前国外很多大学地球科学系所使用的Yardley (1989)所编的变质岩石学教科书"An Introduction to Metamorphic Petrology (Longman, Essex)是这样定义低压基性麻粒岩、中压基性麻粒岩和高压基性麻粒岩主要矿物组合:

(1)低压基性麻粒岩:斜方辉石-单斜辉石-斜长石±石英

(2)中压基性麻粒岩:石榴石-斜方辉石-单斜辉石-斜长石±石英

(3)高压基性麻粒岩:石榴石-单斜辉石-斜长石-石英

按照这一定义,低压基性麻粒岩在矿物组合上以斜方辉石的出现和石榴石不出现为特征,而含有石榴石的二辉麻粒岩是典型的中压基性麻粒岩,不是高压基性麻粒岩。在高压(>10kbar)变质条件下,中压基性麻粒岩矿物组合会发生变质反应 $Opx_{(MP)} + Pl_{(MP)} + Cpx_{(MP)} + Grt_{(MP)} \pm Qtz_{(MP)} = Grt_{(HP)} + Cpx_{(HP)} + Qtz_{(HP)} + Pl_{(HP)}$(翟明国,2009)形成典型高压基性麻粒岩组合石榴石-单斜辉石-斜长石-石英。这与O'Brien and Rötzler (2003)定义的高压基性麻粒岩矿物组合一致。因此,高压基性麻粒岩是以斜方辉石的消失为特征,而不是以石榴石出现为特征,后者是中压基性麻粒岩的标志。随着压力的升高,高压基性麻粒岩中斜长石将会最终消失而转变成榴辉岩。

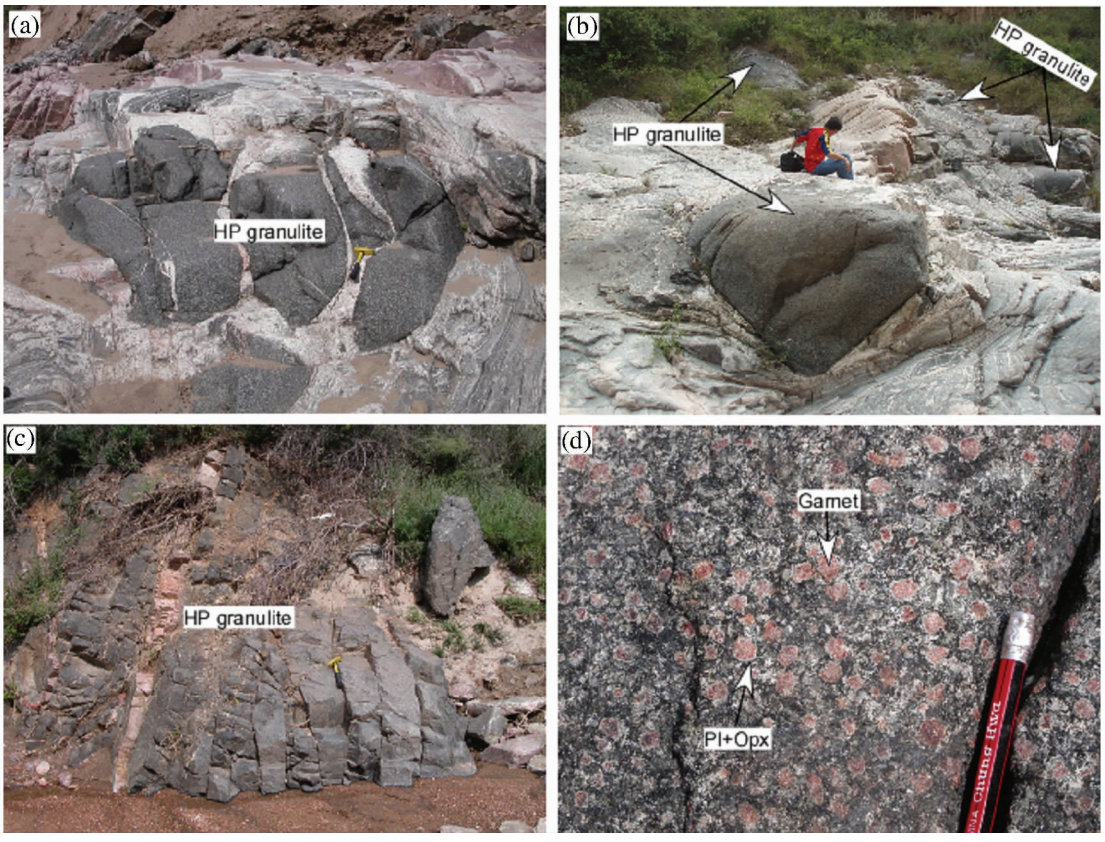


图 9 华北中部带恒山高压基性麻粒岩野外产状

(a)-TTG 片麻岩中高压基性麻粒岩布丁;(b)-高压基性麻粒岩透镜体沿着片麻理走向断续分布;(c)-高压麻粒岩呈变质基性岩墙产出;(d)-高压麻粒岩的'具白眼圈'结构

Fig. 9 Occurrences of high-pressure basic granulites from the Hengshan Complex in the Trans-North China Orogen

(a)-High-pressure basic granulite boudins in TTG gneisses; (b)-Discontinuous distribution of high-pressure basic granulite lenses along foliations; (c)-Gabbroic dykes of high-pressure basic granulite; (d)-'White-eye-socket' textures in high-pressure basic granulite

如果按照 O'Brien and Rötzler (2003) 的高压麻粒岩定义,华北克拉通变质基底中真正的高压基性和泥质麻粒岩只发现在早元古宙华北中部带(Trans-North China Orogen)的北段和胶-辽-吉带(Jiao-Liao-Ji Belt)的南端(图 6)。有关胶-辽-吉带南端的高压麻粒岩笔者在以后讨论辽吉带时再介绍,这里主要讨论华北中部带的高压麻粒岩。在华北中部带, 王仁民等(1991)首先在恒山杂岩中发现具有石榴石-单斜辉石-斜长石-石英组合的高压基性麻粒岩,但当时他们将其解释为 TTG 岩石从深部携带上来的深源包体。一年后,翟明国等(1992)在恒山以北的怀安杂岩中发现具有石榴石-单斜辉石-斜长石-石英组合的高压基性麻粒岩。翟明国等(1992)首次应用板块构造的陆-陆碰撞模式来解释这些高压基性麻粒岩的成因,提出这些高压基性麻粒岩与周围的钾质花岗岩共生代表迁怀与阜平小陆块的陆-陆碰撞带(郭敬辉等,1993,1996,1998;翟明国等,1994,1996;Zhai *et al.*, 2003; Guo *et al.*, 2002, 2005)。后来,翟明国等(1995)又在怀安杂岩中发现退变榴辉岩;Zhao *et al.* (2001b) 在恒山杂岩中也发现具有绿辉石假像的退变榴辉岩;马军和王仁民(1995)在河北宣化-赤诚一带发现具有蓝晶石-钾长石组合的高压泥质麻粒岩;李江海等(1998)在冀北承德发现高压基性麻粒岩;魏春景等(2001)在华北中部带最北端辽西建平也发现具有石榴石-单斜辉石-斜长石-石英组合的高压基性麻粒岩。这样,高压基性麻粒岩在华北中部带的北段都有出露,构成一条巨型北东-南西向展布的高压麻粒岩相带,南起恒山杂岩,中间穿过怀安杂岩、宣化杂岩和承德杂岩,北止建平杂岩西部,长达 800 余千米(图 6)。华北中部带南部出露有 10 ~ 12kbar 高压石榴斜长角闪岩和 10 ~ 14kbar 蓝晶石十字石直闪石片岩(Zhao *et al.*, 1999c;王凯怡等,1997), 它们可能是北部高压麻粒岩相带的构造等同物, 并与高压麻粒岩相带一起构成一条贯穿整个中部带的高压变质带, 代表一条重要地体构造边界。

在野外产状上,高压基性麻粒岩常呈构造岩片或透镜体布丁产在 TTG 片麻岩中(图 9a)。透镜体布丁的长轴与片麻理走向一致。在一些强变形域,高压基性麻粒岩常沿着片麻理走向呈串珠状透镜体断续产出(图 9b)。在一些弱变形域,高压麻粒岩呈变质基性岩墙产出(图 9c)。利用 SHRIMP

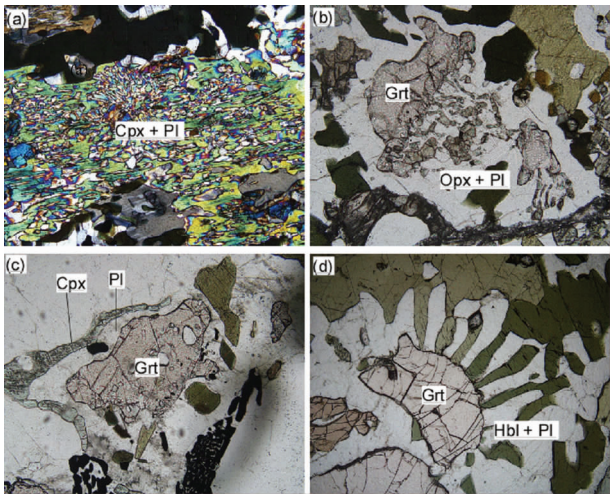


图 10 华北中部带高压基性麻粒岩代表性变质反应结构

具体描述见正文。矿物代号:Cpx-单斜辉石;Grt-石榴石;Pl-斜长石;Opx-斜方辉石; Hbl-角闪石

Fig. 10 Photomicrographs illustrating representative metamorphic reaction textures of high-pressure basic granulites in the Trans-North China Orogen

Descriptions see the text. Mineral abbreviations: Cpx-clinopyroxene; Grt-garnet; Pl-plagioclase; Opx-orthopyroxene; Hbl-hornblende

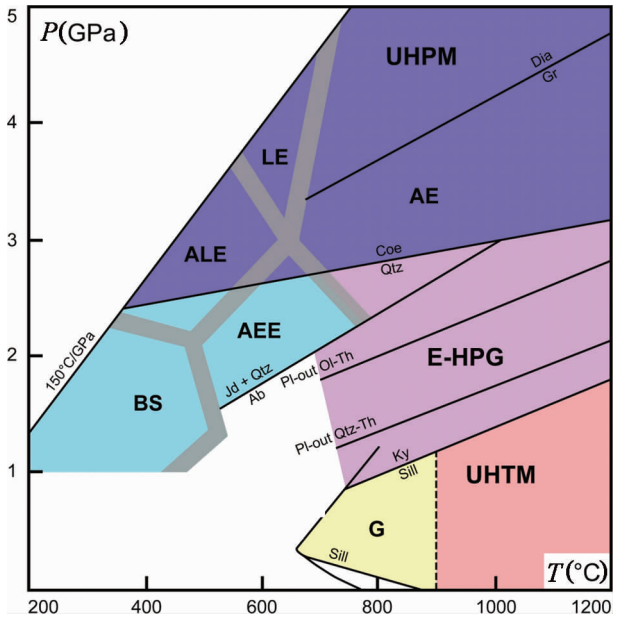


图 11 主要变质相的 *P-T* 空间以及不同类型的极端变质主要的 *P-T* 范围(据 Brown, 2009)

高压-超高压变质主要包括:BS-蓝片岩相, AEE-角闪石-绿帘石榴辉岩相, ALE-角闪石-硬柱石榴辉岩相, LE-硬柱石榴辉岩相, AE-角闪石辉岩相, UHPM-超高压变质作用;GS-绿片岩相;A-角闪岩相;E-HPG-中温榴辉岩-高压麻粒岩变质作用;G-麻粒岩相;UHTM-超高温变质作用;Pl-out Qtz-Th-石英拉斑玄武岩斜长石消失反应线;Pl-out Ol-Th-橄榄石拉斑玄武岩斜长石消失反应线

Fig. 11 *P-T* diagram to show the principal metamorphic facies in *P-T* space and the *P-T* ranges of different types of extreme metamorphism (after Brown, 2009)

HP-UHP metamorphism includes the following: BS-blueschist, AEE-amphibole-epidote eclogite facies, ALE-amphibole lawsonite eclogite facies, LE-lawsonite eclogite facies, AE-amphibole eclogite facies, UHPM-ultrahigh-pressure metamorphism; GS-greenschist facies and A-amphibolite facies; E-HPG-medium temperature eclogite-high pressure granulite metamorphism; G-granulite facies; UHTM-ultrahigh-temperature metamorphism

U-Pb 锆石定年技术,Kröner *et al.* (2006) 测定两条恒山高压基性麻粒岩相变质的基性岩墙的岩浆侵位年龄为 1915 ± 4Ma 和 1914 ± 2Ma,其高压变质年龄为 1850 ± 3Ma 和 1867 ± 23Ma。在野外露头上,高压麻粒岩以含有'具白眼圈'结构的粗大石榴石为特征(图 9d)。

高压基性麻粒岩峰期矿物组合为单斜辉石 + 石榴子石 + 斜长石 ± 石英 ± 金红石,有些高压基性麻粒岩中的单斜辉石与富钠斜长石组成文像合晶结构呈绿辉石假象(图 10a),表明它们可能是退变的榴辉岩。峰期后减压矿物组合以围绕石榴子石或或单斜斜辉石周边生长的后成合晶或冠状体形式出现,通常是斜方辉石 + 斜长石后成合晶(图 10b)或斜方辉石 + 斜长石 + 单斜辉石冠状体(图 10c). 晚期冷却矿物组合为围绕石榴子石周边生长的的角闪石 + 斜长石后成合晶(图 10d)。这些矿物组合和它们的温压计算结果所建立的变质作用 *P-T* 演化轨迹都具有在变质峰期过后经历近等温减压(ITD)的顺时针 *P-T* 演化特征(翟明国等,1992,1995,1996;郭敬辉等,1993,1996;李江海等,1998;Zhao *et al.*, 2001a; 魏春景等,2001; Guo *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2006)。笔者认为华北中部带高压麻粒岩所具有的近等温减压(ITD)顺时针 *P-T* 演化特征反映了东部陆块和西部陆块在 ~1.85Ga 发生陆-陆碰撞形成华北克拉通基底的构造过程,因为高压麻粒岩相和榴辉岩相变质作用的 *P-T* 条件和地热梯度范围超出一般正常地壳厚度范围(图 11),只能形成在成倍加厚的地壳环境中。东部陆块和西部陆块碰撞引起的地壳褶皱和推覆能够导致地壳成倍地加厚, 从而发生高压麻粒岩相或榴辉岩相变质作用。随后, 由于俯冲板片转变榴辉岩而拆沉致使加厚地壳发生快速折返, 导致近等温减压变质作用过程的出现, 在高压麻粒岩中形成广泛的辉石 + 斜长石后成合晶和冠状体结构。最后, 变质岩石被抬升到地壳浅部层次而发生角闪岩相退化变质作用,形成角闪石 + 斜长石后成合晶。这一系列构造过程导致东部陆块和西部陆块在 ~1.85Ga 最终拼合而形成华北克拉通统一结晶基底。另一方面,一些学者认为高压基性麻粒岩就是石榴石基性麻粒岩,这些麻粒岩在华北克拉通基底中呈面状产出,其形成机制更可能与华北克拉通基底总体抬升(exhumation)有关,而不指示俯冲带或陆-陆碰撞边界。然而,这一模式无法解释泥质麻粒岩(孔兹岩)的成因,尤其不能解释河北宣化-赤诚一带发现具有蓝晶石-钾长石组合的高压泥质麻粒岩的形成过程(马军和王仁民,1995)。

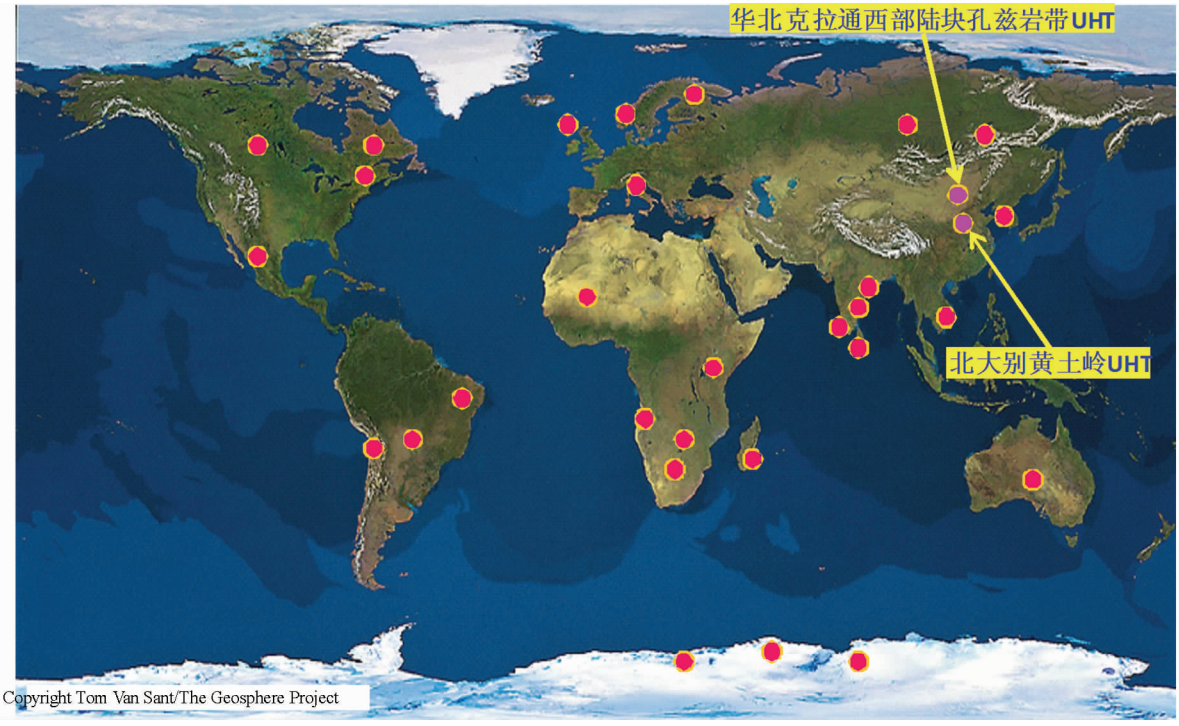


图 12 明确所发现的超高温变质岩在全球上的分布

除中国两处超高温变质岩位置外，其它超高温变质岩的位置资料依据 S. L. Harley 2008 年北京演讲报告

Fig. 12 Distribution of ultra-high temperature (UHT) metamorphic rocks in the world

Except two localities in China, all other UHT locations are sourced from S. L. Harley's oral presentation in Beijing in 2008

4.3 华北克拉通西部陆块孔兹岩带超高温变质作用机制问题

超高温变质作用是在地壳温度高达 900～1100℃的极端条件下发生的，但其压力并不高，一般在 7～13kbar（图 11；Harley, 2008；Brown, 2009）。因此，超高温变质作用是在异常高的地热梯度（20～40℃/km）环境下发生的，一般在夕线石稳定区域（图 11）。由于正常造山带加厚地壳很难达到这样高的地热梯度，超高温变质作用形成的构造环境和机制还是一个没有得到满意解释的地质问题。此外，能够记录超高温变质作用矿物组合的岩石类型并不多，主要是富 Mg-Al 的泥质岩，其典型矿物组合包括（1）假蓝宝石＋石英，（2）紫苏辉石＋夕线石，（3）含大隅石的矿物组合，（4）尖晶石＋石英，（5）刚玉＋石英和其它含刚玉矿物组合，（6）三相长石和四相辉石（Harley, 2008）。正因如此，目前全球范围内所发现的典型超高温（UHT）变质岩石地点只有 30 多处（图 12）。在我国，超高温变质岩石仅见于北大别黄土岭和华北克拉通西部陆块孔兹岩带两处（图 12）。笔者这里介绍和讨论华北克拉通西部陆块孔兹岩带超高温变质作用的构造环境和机制。

华北克拉通西部陆块孔兹岩带含假蓝宝石泥质片麻岩最早是金巍（1989）在大青山地区首次发现。随后刘喜山在国家自然基金面上项目资助下对该区假蓝宝石泥质片麻岩继续开展工作，但当时并没有提出这种岩石是超高温变质作用的产物（如刘建忠等，2000）。刘福来等（1996）在集宁红赐堡-黄土窑一带所发现的含紫苏辉石＋夕线石＋堇青石组合的泥质片麻岩可能为一种超高温变质岩石，但所用的温压计没有给出 900℃以上的温度。后来郭敬辉（2006）在大青山地区东坡村东南 1.5km 处的小山上发现假蓝宝石泥质片麻岩的原地露头，并首次明确提出该区假蓝宝石泥质片麻岩是超高温变质作用的产物。同年，Santosh *et al.* （2006）在集宁土贵乌拉地区发现含假蓝宝石＋紫苏辉石＋夕线石组合的超高温孔兹岩，表明华北克拉通西部孔兹岩带的超高温变质岩石不只出露在大青山东坡一处。然而，两地的超高温变质岩石在岩石化学成分、矿物组合、变质温压条件等方面存在显著差异。例如，大青山东坡含假蓝宝石的超高温变质岩是一种 SiO_2 极度不饱和（＜39%）岩石，并相对高 Al_2O_3 低 MgO，主要变质矿物为假蓝宝石、石榴石、尖晶石、夕线石、黑云母、斜长石和金红石/钛铁矿，无石英和紫苏辉石（Guo *et al.*，2009）；而集宁土贵乌拉超高温变质岩为 SiO_2 饱和岩石，相对富 MgO，主要变质矿物除假蓝宝石、尖晶石、石榴石、夕线石、黑云母、斜长石外，还含有石英、紫苏辉石和堇青石（Santosh *et al.*，2006，2007a，b）。集宁土贵乌拉超高温变质岩的变质温度明显高于大青山东坡超超高温变质岩的变质温度，前者高达 1030℃（Santosh *et al.*，2007b），而后者只有 910～980℃（Guo *et al.*，2009）。

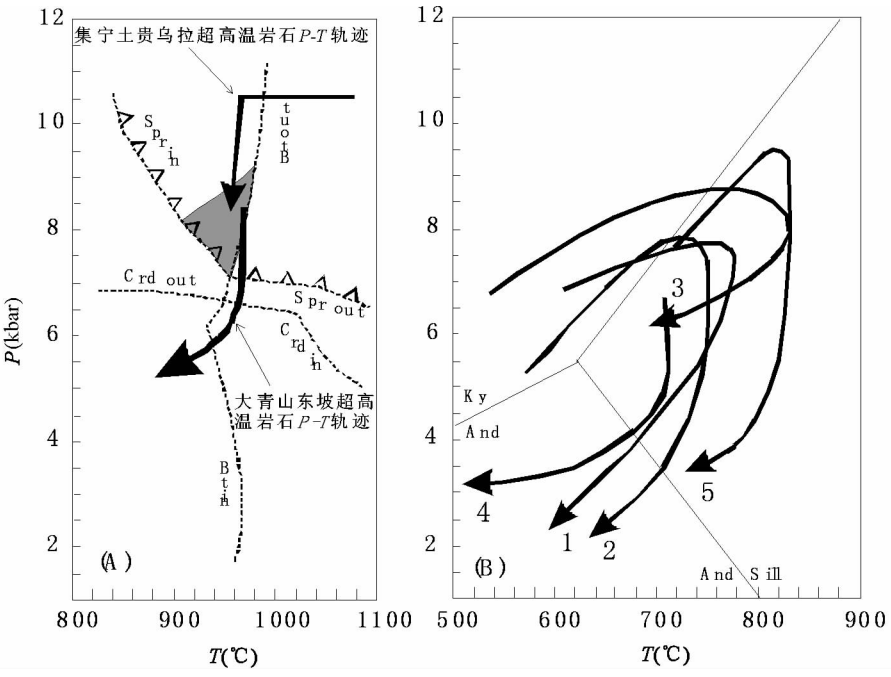


图 13 (A)集宁土贵乌拉超高温变质岩 *P-T* 轨迹(Santosh *et al.*,2006,2007b)和大青山东坡超高温变质岩 *P-T* 轨迹(Guo *et al.*, 2006,2009)及(B)西部陆块孔兹岩带孔兹岩系岩石变质作用 *P-T* 轨迹

图(B)中:(1)-贺兰山-千里山杂岩(Zhao *et al.*, 1999b);(2)-大青山-乌拉山杂岩(金巍等,1991;卢良兆等,1992);(3)-集宁杂岩(第一期变质事件;卢良兆等,1992);(4)-集宁杂岩(第二期变质事件;卢良兆等,1992; Lu and Jin,1993);(5)-大同杂岩(刘福来,1997)

Fig. 13 (A) Metamorphic *P-T* paths of ultra-high temperature rocks in the Tuguiwula area, Jining (Santosh *et al.*,2006,2007b) and the Dongpo area, Daqingshan (Guo *et al.*, 2006, 2009) and (B) metamorphic *P-T* paths of the khondalite series rocks in the Khondalite Belt

In Fig. 13(B): (1)-Helanshan-Qianlishan Complex (Zhao *et al.*, 1999b); (2)-Daqingshan-Wulashan Complex (Jin *et al.*, 1991; Liu *et al.*, 1992); (3)-Jining Complex (First metamorphic event; Lu *et al.*, 1992); (4)-Jining Complex (Second metamorphic event; Lu *et al.*, 1992; Lu and Jin,1993); (5)-Datong Complex (Liu, 1997)

在变质作用演化上,集宁土贵乌拉超高温变质岩主要经历三个变质阶段(Santosh *et al.*,2007b):(M1)紫苏辉石 + 假蓝宝石 + 夕线石 + 石榴石 + 石英 + 黑云母 + 尖晶石(T > 1030℃);(M2) 紫苏辉石 + 夕线石 + 石榴石 + 石英(P > 10kbar; T > 950℃);(M3) 紫苏辉石 + 堇青石 + 石榴石 + 石英(P < 10kbar; T ~ 950℃)。三个阶段的温-压估计显示逆时针 *P-T* 轨迹演化,主要反映超高温变质岩在地壳深部早期阶段的等压冷却和随后的等温快速抬升过程(图 13a),但整个超高温岩石仍处中-下地壳层次。大青山东坡超高温变质岩可划分出 5 个阶段的矿物组合(M0-M4)(Guo *et al.*,2006, 2009):(1)M0 矿物为石榴石内部的矿物包裹体,典型矿物组合为石榴石(核) + 夕线石 + 尖晶石 + 黑云母 + 斜长石 + 金红石/钛铁矿;(2)M1 为峰期变质阶段组合,由石榴石和基质矿物构成,典型组合为石榴石(边或幔) + 假蓝宝石 + 尖晶石 + 夕线石 + 黑云母 + 斜长石;(3)M2 为峰后减压阶段产物,形成假蓝宝石 + 斜长石后成合晶;(4)M3 为进一步减压产物,形成尖晶石 + 斜长石后成合晶;(5)M4 为晚期退变质产物,主要形成退变质黑云母。在这 5 个矿物组合中,M0 组合不是超高温变质事件的产物,而是孔兹岩在发生超高温变质作用之前的矿物组合。根据其余 4 个矿物组合所重建的 *P-T* 轨迹主要反映超高温岩石后期抬升到地壳较浅层次的过程(图 13a;Guo *et al.*, 2009),祢补了集宁土贵乌拉超高温岩石矿物组合没有反映出来的晚期抬升过程。如果把两条 *P-T* 轨迹结合起来考虑,华北克拉通西部陆块孔兹岩带超高温变质作用总体显示逆时针 *P-T* 演化特征。这与孔兹岩带主体变质岩石所具有的顺时针 *P-T* 轨迹明显不一致(图 13b),说明超高温事件与形成孔兹岩带主体岩石(孔兹岩系)的麻粒岩相变质事件并非是同一构造热事件,后者的顺时针 *P-T* 轨迹则是被认为反映阴山陆块与鄂尔多斯陆块早元古宙碰撞拼合形成西部陆块的构造过程(Zhao *et al.*, 2005)。这一推断得到从孔兹岩系中所获得的变质年龄 Wan *et al.*, 2006; 董春艳等,2007; Yin *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2009)和从超高温变质岩石所获得的变质年龄数据(Santosh *et al.*, 2007a) 以及超高温岩石的野外地质产状的支持。

应用 SHRIMP U-Pb 锆石和电子探针独居石测年技术,Santosh *et al.* (2007a)精确确定集宁土贵乌拉超高温变质作用发生在 ~ 1.92Ga。他们认为这个年龄代表阴山陆块与鄂尔多斯陆块碰撞拼合形成西部陆块的时间,因为他们认为孔

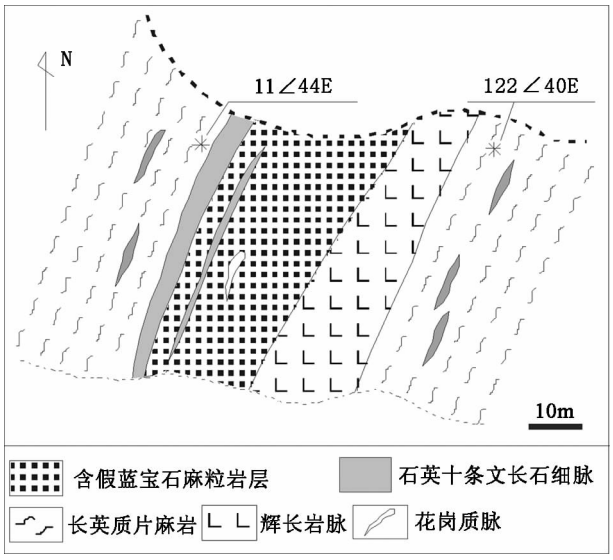


图 14 大青山东坡含假蓝宝石超高温岩石与基性岩墙直接接触(Guo *et al.*, 2009)

Fig. 14 A sapphirine-bearing granulite layer in the Dongpo area (Daqingshan) is in direct contact with a basic sill (Guo *et al.*, 2009)

兹岩带超高温变质作用是两陆块碰撞导致的地壳增厚的结果。显然,这一解释不能很好地解释孔兹岩带超高温变质岩石所具有的逆时针 *P-T* 轨迹演化特征(图 13a)。另一方面,最近不同学者从贺兰山、千里山、大青山、乌拉山、和怀安杂岩中的孔兹岩系岩石获得一系列 ~1.95Ga 的变质年龄数据(Wan *et al.*, 2006; 董春艳等,2007; Yin *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2009)。据此,笔者认为阴山陆块与鄂尔多斯陆块碰撞拼合的时间形成西部陆块的时间在 ~1.95Ga,导致孔兹岩带的形成和具近等温降压顺时针 *P-T* 轨迹特征的麻粒岩相变质作用的发生,而 ~1.92Ga 超高温变质事件可能是碰撞造山后拉伸所引起的地幔岩浆上涌的结果,这样能合理地解释孔兹岩带超高温变质作用发生时间稍晚和所具有的逆时针 *P-T* 演化特征。这一解释与大青山东坡地区含假蓝宝石超高温岩石的野外产出状态相符(Guo *et al.*, 2009)。如图 14 所示,与东坡含假蓝宝石麻粒岩层东侧直接接触的是一条苏长辉长岩墙。基性岩墙主要矿物是斜长石、单斜辉石和少量斜方辉石和黑云母。镜下观察矿物呈板柱状和辉长结构,很难确定是否经历变质作用。这种野外关系预示形成苏长辉长岩墙的地幔岩浆很可能是超高温变质作用的热源(Guo *et al.*, 2009)。集宁土贵乌拉地区也有大量基性岩墙产出,其中一条岩墙的岩浆锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 1927 ± 12Ma(郭敬辉,未发表数据),与超高温变质事件时间一致。这进一步支持孔兹岩带超高温变质事件可能是碰撞造山后拉伸所引起的地幔岩浆上涌所致。

最近,刘守偈和李江海(2009)提出集宁土贵乌拉超高温变质岩石带与比邻的怀安-宣化高压麻粒岩带构成一条早元古宙'双变质带'(paired zone)。然而,如前所述,集宁土贵乌拉超高温变质岩石变质作用事件发生在 ~1.92Ga,而华北中部带北段怀安-宣化高压麻粒岩变质主要发生在 1.85Ga。两变质带形成于不同时间,不符合'双变质带'的原始含义。而且,大青山东坡地区含假蓝宝石超高温岩石出露位置与怀安-宣化高压麻粒岩带距离甚远,很难用双变质带模式来解释。

5 几点结语

(1)华北克拉通基底可分为三个太古宙-早元古宙微陆块(东部陆块、阴山陆块和鄂尔多斯陆块)和三个早元古宙活动带(孔兹岩带、华北中部带和胶-辽-吉带)。其中鄂尔多斯陆块和北阴山陆块在 ~1.95Ga 沿东-西向孔兹岩带碰撞对接形成西部陆块,然后西部陆块与东部陆块在 ~1.85Ga 沿南-北向华北中部带碰撞拼合形成华北克拉通统一的结晶基底。

(2)华北克拉通基底构造单元在变质作用时间上和 *P-T* 演化特征上存在明显差别。东部陆块和阴山陆块晚太古宙基底岩系的变质作用发生在 ~2.5Ga,变质演化以等压冷却(IBC)逆时针 *P-T* 轨迹为特征,反映变质作用的成因与大规模地幔岩浆底侵有关。孔兹岩带主期变质作用发生在 ~1.95Ga,变质演化以近等温减压(ITD)顺时针 *P-T* 轨迹为特征,反映阴山陆块与鄂尔多斯陆块碰撞形成西部陆块的热构造过程。华北中部带变质作用发生在 ~1.85Ga,变质演化同样以近等温减压(ITD)顺时针 *P-T* 轨迹为特征,反映了西部陆块和东部陆块最终碰撞形成统一的华北克拉通基底的构造过程。早元古宙胶-辽-吉带变质作用表现'双变质带'特征:西北带的北辽河群、老岭群和粉子山群的变质作用以中压顺时针 *P-T* 轨迹为特征,而东南带的南辽河群、吉安群和荆山群的变质作用以低压逆时针 *P-T* 演化为特征;这种'双变质带'是形成于大陆裂谷环境还是陆-弧-陆碰撞的结果有待进一步研究。

(3)与传统变质地质图相比,变质作用演化地质图能更好地反映不同构造单元的变质作用演化特征。因此,我国新一轮变质地质图的编制应该采用变质作用演化地质图,以便体现变质地体的变质作用演化历史。

(4)尽管岩浆弧、大陆裂谷和地幔柱模式都能解释东部陆块晚太古宙基底变质作用所具有的近等压冷却(IBC)逆时针 *P-T* 演化特征,地幔柱模式能够更合理解释东部陆块所存在的宽达 800 千米而时代近于相同的晚太古代火成岩带、大量科马提质超镁铁质岩石和双峰式火山岩、广泛发育的穹窿构造等。

(5)华北克拉通变质基底中具有石榴石-单斜辉石-斜长石-石英组合的典型高压基性麻粒岩和具有蓝晶石-钾长石组合的典型高压泥质麻粒岩的出露只局限在早元古宙华北中部带(Trans-North China Orogen)的北段和胶-辽-吉带的南端;前者所具有的近等温减压(ITD)顺时针 *P-T* 演化特征反映了

东部陆块和西部陆块在~1.85Ga发生陆-陆碰撞形成华北克拉通基底的构造过程,后者的存在表明胶-辽-吉带的形成和演化也涉及俯冲和/或碰撞构造过程。

(6)西部陆块孔兹岩带形成假蓝宝石麻粒岩的超高温变质作用总体显示逆时针 *P-T* 演化特征,与孔兹岩带主期变质作用所具有的顺时针 *P-T* 轨迹明显不一致,说明孔兹岩带主期变质事件与局部超高温事件并非是同一构造热事件。前者发生在~1.95Ga,是阴山陆块与鄂尔多斯陆块早元古宙碰撞的结果,而后者发生在~1.92Ga,是碰撞后拉伸所引起的地幔岩浆底侵的结果。

致谢 感谢沈其韩院士、翟明国研究员、陆松年研究员、吴昌华研究员、耿元生研究员、金巍研究员、万渝生研究员的批评指教,同时也感谢我的合作者 Simon Wilde 教授、孙敏教授、郭敬辉研究员、刘树文教授、刘福来研究员、吴福元研究员、李三忠教授、Alfred Kröner 教授、李旭平教授、吴春明研究员、周喜文博士、王岳军研究员等的帮助和讨论。特别感谢翟明国研究员让我提前阅读他在本专辑所发表的"华北克拉通早前寒武纪高温高压麻粒岩及其相关问题"一文。审稿人魏春景教授和另一位匿名审稿人提出一些宝贵修改意见,在此深表感谢。

谨以此文敬贺恩师卢良兆教授八十寿诞,感谢先生多年来对我的启迪与教诲,并祝愿先生健康长寿!

References

Bai J, Wang RZ and Guo JJ. 1992. The Major Geologic Events of Early Precambrian and Their Dating in Wutaishan Region. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)

Bai J and Dai FY. 1998. Early Proterozoic crust of China. In: Ma XY and Bai J (eds.). Precambrian Crust Evolution of China. Beijing: Springer Geological Publishing House, 87 – 159

Bohlen SR 1987. Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites. J. Geol., 95:617 – 632

Bohlen SR. 1991. On the formation of granulites. J. Metamorph. Geol., 9: 223 – 229

Brown M. 1993. *P-T-t* evolution of mountain belts and the causes of regional metamorphism. J. Geol. Soc. London, 150: 227 – 241

Brown M. 2009. Metamorphic Patterns in Orogens. Geol. Soc. Spec. Publ. (London), in press.

Campbell IH, Griffiths RW and Hill RI. 1989. Melting in an Archaean mantle plumes: Heads it's basalts, tail its komatiites. Nature, 339: 697 – 699

Chen GY. 1983. Komattites in the second mining area of the Gongchangling region. Chengdu J. Earth Sci., 10: 20 – 25 (in Chinese with English abstract)

Chen NS, Wang RJ, Shan WY and Zhong ZQ. 1994. Isobaric cooling *P-T-t* path of the western section of the Miyun Complex and its tectonic implications. Sci. Geol. Sin., 29: 354 – 364 (in Chinese with English abstract)

Chen Y, Ye K, Liu JB and Sun M. 2006. Multistage metamorphism of the Huangtuling granulite, Northern Dabie Orogen, eastern China: Implications for the tectonometamorphic evolution of subduction lower continental crust. J. Metamorph. Geol., 24: 633 – 654

Chen Y, Ye K, Liu JB and Sun M. 2008. Quanititave *P-T-X* constraints on orthopyroxene-bearing high-pressure granulites in felsic-metapelitic rocks: Evidence from the Huangtuling granulite, Dabieshan Orogen. J. Metamorph. Geol., 26: 1 – 15

Cheng YQ and Xu HF. 1991. Komattites from the Late Archean Yanlingguan Formation, Shandong: Some new findings. Chin. Geol., 135: 31 – 32 (in Chinese with English abstract)

Cui WY, Wang CQ and Wang SL. 1991. Geochemistry and metamorphic *P-T-t* path of the Jianping Complex in the western Liaoning Province. Acta Petrologica Sinica, 7: 13 – 26 (in Chinese with English abstract)

Dong CY, Liu DY, Li JJ, Wan YS, Zhou HY, Li CD, Yang YH and Xie LW. 2007. Palaeoproterozoic Khondalite Belt in the western North China Craton: New evidence from SHRIMP dating and Hf isotope composition of zircons from metamorphic rocks in the Bayan Ul-Helan Mountains area. Chinese Sci. Bull., 52: 2984 – 2994 (in Chinese)

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. J. Petrol., 25: 894 – 928

Faure M, Lin W, Monie P and Bruguier O. 2004. Palaeoproterozoic arc magmatism and collision in Liaodong Peninsula (North-East China). Terra Nova, 16: 75 – 80

Ge WC, Zhao GC, Sun DY, Wu FY and Lin Q. 2003. Metamorphic *P-T* path of the Southern Jilin complex: Implications for tectonic evolution of the Eastern Block of the North China craton. Inter. Geol. Rev., 45: 1029 – 1043

Geng YS, Liu FL and Yang CH. 2006. Magmatic event at the end of the Archean in the eastern Hebei Province and its geological implications. Acta Geol. Sin., 80: 819 – 833

Grant ML, Wilde SA, Wu FY and Yang JH. 2009. The application of zircon cathodoluminescence imaging, Th-U-Pb chemistry and U-Pb ages in interpreting discrete magmatic and high-grade metamorphic events in the North China Craton at the Archean/Proterozoic boundary. Chem. Geol., 261: 155 – 171

Guo JH, Zhai MG, Zhang YG, Li YG, Yan YH and Zhang WH. 1993. Huaian-Manjinggou early Precambrian high-pressure granulite m lange: Geological characteristics, petrology and isotopic chronology. Acta Petrologica Sinica, 9: 1 – 13 (in Chinese with English abstract)

Guo JH, Zhai MG, Li JH and Li YG. 1996. Nature of the Early Precambrian Sanggan structure zone in North China Craton: Evidence from rock association. Acta Petrologica Sinica, 12: 193 – 207 (in Chinese with English abstract)

Guo JH, Zhai MG, Li YG and Yan YH. 1998. Contrasting metamorphic *P-T* paths of Archaean high pressure granulites from the North China Craton: Metamorphism and tectonic significance. Acta Petrologica Sinica, 14: 430 – 448 (in Chinese with English abstract)

Guo JH, Zhai MG, Li YG and Li JH. 1999. Metamorphic *P-T* path and tectonic significance of garnet amphibolites and granulite from Hengshan, North China Craton. Sci. Geol. Sin., 34: 311 – 325 (in Chinese with English abstract)

Guo JH, O'Brien PJ and Zhai MG. 2002. High-pressure granulites in the Sangan area, North China Craton: Metamorphic evolution, *P-T* paths and geotectonic significance. J. Metamorph. Geol., 20: 741 – 756

Guo JH, Sun M and Zhai MG. 2005. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: Timing of Paleoproterozoic continental collision. J. Asian Earth Sci., 24: 629 – 642

Guo JH, Chen Y, Peng P, Liu F, Chen L and Zhang LQ. 2006. Sapphirine granulite from Daqingshan area, Inner Modolia-1.85Ga ultrahigh- temperature (UHT) metamorphism. In: Proceedings of National Conference on Petrology and Geodynamics in China (Nanjing) (in Chinese with English abstract)

Guo JH, Zhao GC, Chen Y, Peng P, Windley BF and Sun M. 2009. Highly silica-undersaturated sapphirine granulites from the Daqingshan area of the Western Block, North China Craton: Palaeoproterozoic UHT metamorphism and tectonic implications. J. Petrol., in revision

Guo SS and Li SG. 2009. Metamorphic and magmatic events in the southeastern margin of the North China Craton: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages. Sci. China (Series D), in press

Harley SL. 1989. The origins of granulites: A metamorphic perspective. Geol. Mag., 126: 215-247

Harley SL. 2008. Refining the *P-T* records of UHT crustal metamorphism. J. Metamorph. Geol., 26: 125 – 154

He GP and Ye HW. 1998. Two type of Early Proterozoic metamorphism in the eastern Liaoning to southern Jilin and their tectonic implication. Acta Petrologica Sinica, 14: 152 – 162 (in Chinese with English abstract).

Jahn BM and Zhang ZQ. 1984. Archean granulite gneisses from eastern Hebei Province, China: Rare earth geochemistry and tectonic implications. Contri. Mineral. Petrol., 85: 224 – 243

Jayananda M, Moyen JF, Martin H, Peucat JJ, Auvray B and Mahabaleswar B. 2000. Late Archean (2550 ~ 2520Ma) juvenile magmatism in the Eastern Dharwar craton, southern India: Constraints from geochronology, Nd-Sr isotopes and whole rock geochemistry. Precambrian Res., 99: 225 – 254

Jin W. 1989. Geological evolution and metamorphic dynamics of Early Precambrian basement rocks along the northern margin (central section) of the North China Craton. Ph. D. Thesis. Changchun: Changchun University of Science and Technology (in Chinese)

Jin W, Li SX and Liu XS. 1991. The Metamorphic dynamics of Early Precambrian high-grade metamorphic rocks series in Daqing-Ulashan area, Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 7: 27 – 35 (in Chinese with English abstract)

Jin W and Li SX. 1996. *P-T-t* path and crustal thermodynamic model of Late Archaean-Early Proterozoic high grade metamorphic terrain in North China. Acta Petrologica Sinica, 12: 209 – 221 (in Chinese with English abstract)

Kröner A, Cui WY, Wang WY, Wang CQ and Nemchin AA. 1998. Single zircon ages from high-grade rocks of the Jianping Complex, Liaoning Province, NE China. J. Asian Earth Sci., 16: 519 – 532

Kröner A, Wilde SA, Zhao GC, O'Brien PJ, Sun M, Liu DY, Wan YS, Liu SW and Guo JH. 2006. Zircon geochronology of mafic dykes in the Hengshan Complex of northern China: Evidence for Late Palaeoproterozoic rifting and subsequent high-pressure event in the North China Craton. Precambrian Res., 146: 45 – 67

Kusky TM and Li JH. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. J. Asian Earth Sci., 22: 383 – 397

Li JH and Qian QL. 1991. A study on the Longquanguan shear zone in the northern part of the Taihang Mountains. Shanxi Geol., 6: 17 – 29 (in Chinese)

Li JH and Kusky TM. 2007. A Late Archean foreland fold and thrust belt in the North China Craton: Implications for early collisional tectonics. Gondwana Res., 12: 47 – 66

Li JH, Qian XL and Zhai MG. 1997. The tectonic division of North China granulite facies belt and its Early Precambrian tectonic evolution. Scientia Geol. Sin., 32: 254 – 266 (in Chinese with English abstract)

Li JH, Zhai MG and Li YG. 1998. Discovery of Archean high-pressure granulite in Luanping-Chengde, northern Hebei Province: Geological implication. Acta Petrologica Sinica, 14: 34 – 41 (in Chinese with English abstract)

Li SX, Liu XS and Zhang LQ. 1987. Granite greenstone belt in Sheerteng area, Inner Mongolia, China. J. Changchun Univ. Sci. Tech., 17: 81 – 102 (in Chinese)

Li SZ, Hao DF, Zhao GC, Sun M, Han ZZ and Guo XY. 2004a. Geochemical features and origin of Dandong granite. Acta Petrologica Sinica, 20: 1417 – 1423 (in Chinese with English abstract)

Li SZ, Zhao GC, Sun M, Wu FY, Liu JZ, Hao DF, Han ZZ and Luo Y. 2004b. Mesozoic, not Paleoproterozoic SHRIMP U-Pb zircon ages of two Liaoji granites, Eastern Block, North China Craton. Inter. Geol. Rev., 46: 162 – 176

Li SZ, Zhao GC, Sun M, Wu FY, Liu JZ, Hao DF, Han ZZ, Luo Y and Xia XP. 2005. Deformational history of the Paleoproterozoic Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton. J. Asian Earth Sci., 24: 654 – 669

Li SZ, Zhao GC, Sun M, Han ZZ, Zhao GT and Hao DF. 2006. Are the South and North Liaohe Groups of the North China Craton different exotic terranes? Nd isotope constraints. Gondwana Res., 9: 198 – 208

Li SZ and Zhao GC. 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the Eastern Block of the North China Craton. Precambrian Res., 158: 1 – 16

Li ZL. 1993. Metamorphic *P-T-t* path of the Archean rocks in the eastern Shandong Province and its implications. Shandong Geol., 9: 31 – 41 (in Chinese)

Liu DY, Nutman AP, Compston W, Wu JS and Shen QH. 1992. Remnants of 3800 crust in the Chinese Part of the Sino-Korean craton. Geology, 20: 339 – 342

Liu DY, Wilde SA, Wan YS, Wu JS, Zhou HY, Dong CY and Yin XY. 2008. New U-Pb and Hf isotopic data confirm Anshan as the oldest preserved segment of the North China Craton. Am. J. Sci., 308: 200 – 231

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. Thesis. Changchun: Changchun University of Science and Technology (in Chinese)

Liu FL. 1996. Mineral evolution and the significance of garnet of khondalite series in the area of Hongsipu-Huangtuyao. J. Changchun Earth Sci., 26: 278 – 284 (in Chinese with English abstract)

Liu FL. 1997. The metamorphic reaction and water activity of basic granulite in the Datong-Huaian region. Acta Petrologica Sinica, 13: 27 – 43 (in Chinese with English abstract)

Liu FL and Shen QH. 1999. Retrogressive textures and metamorphic reaction features of Al-rich gneisses in the granulite facies belt from northwestern Hebei Province. Acta Petrologica Sinica, 15: 505 – 517 (in Chinese with English abstract)

Liu JH. 2001. Discovery and features of the Helong komatiites in the eastern segment of the North China Craton. Geol. Rev., 47: 420 – 425 (in Chinese with English abstract)

Liu JZ, Qiang XK, Liu XS and Ouyang ZY. 2000. Dynamics and genetic grids of sapphirine-bearing spinel gneiss in Daqing Mountain orogen zone, Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 16: 245 – 255 (in Chinese with English abstract)

Liu SJ and Li JH. 2009. Paleoproterozoic high temperature paired metamorphic belt in central part of southern Inner Mongolia and its tectonic implication. Geol. J. China Univ., 15: 48 – 56 (in Chinese with English abstract)

Liu SW. 1996. *P-T* path of granulites in the Fuping area. Geol. J. Univ., 2: 75 – 84 (in Chinese)

Liu SW, Lin Q and Cao L. 1991. The *P-T-t* trajectory recorded by the compositional zones of amphiboles from the Eastern Hebei. Changchun J. Earth Sci., 21: 129 – 142 (in Chinese with English abstract)

Liu SW, Pan PM, Li JH, Li QG and Zhang J. 2002. Geological and isotopic geochemical constraints on the evolution of the Fuping Complex, North China Craton. Precambrian Res., 117: 41 – 56

Liu SW, Pan PM, Xie QL, Zhang J and Li QG. 2004. Archean geodynamics in the Central Zone, North China Craton: Constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutai Complexes. Precambrian Res., 130: 229 – 249

Liu SW, Pan PM, Xie QL, Zhang J and Li QG. 2005. Geochemistry of the Paleoproterozoic Nanying granitoid gneisses: Constraints on the tectonic setting of the Central Zone, North China Craton. J. Asian Earth Sci., 24: 643 – 658

Liu SW, Zhao GC, Wilde SA, Shu GM, Sun M, Li QG, Tian W and Zhang J. 2006. Th-U-Pb monazite geochronology of the Lü liang and Wutai Complexes: Constraints on the tectonothermal evolution of the Trans-North China Orogen. Precambrian Res., 148: 205 – 222

Liu XS, Jin W, Li SX and Xu XC. 1993. Two types of Precambrian high-grade metamorphism, Inner Mongolia, China. J. Metamorph. Geol., 11: 499 – 510

Lu LZ. 1991. Metamorphic *P-T-t* path of the Archean granulite-facies terrains in Jining area, Inner Mongolia and its tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 8: 1 – 12 (in Chinese with English abstract)

Lu LZ and Jin SQ. 1993. *P-T-t* paths and tectonic history of an Early Precambrian granulite facies terrane, Jining district, southeastern Inner Mongolia, China. J. Metamorph. Geol., 11: 483 – 498

Lu LZ, Jin SQ, Xu XC, Liu FL. 1992. Petrogenesis and Mineralization of Khondalite Series in Southeastern Inner Mongolia. Changchun: Jilin Science & Technology Press (in Chinese with English abstract)

Lu LZ, Xu XC, Liu FL. 1996. Early Precambrian Khondalite Series in

North China. Changchun: Changchun Publishing House (in Chinese)
Lu LZ, Jin SQ, Hu DQ and Dong YS. 1997. The microarea composition of garnet and biotite from the Ji'an Group in Tonghua district and its significance as an indicator of metamorphic *P-T-t* path. Chin. J. Geochem., 16: 304 – 317
Lu LZ and Dong YS. 1998. The *P-T-X* phase relations and their evolution for the equilibrium assemblages of Al-rich gneisses from Early Proterozoic Jingshan Group in East Shandong. Acta Petrologica Sinica, 14: 140 – 151 (in Chinese with English abstract)
Lu XP, Wu FY, Guo JH, Wilde SA, Yang JH, Liu XM and Zhang XO. 2006. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern block in the North China Craton. Precambrian Res., 146: 138 – 164
Luo Y, Sun M, Zhao GC, Li SZ, Xu P, Ye K and Xia XP. 2004. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt. Precambrian Res., 134: 349 – 371
Luo Y, Sun M, Zhao GC, Ayers JC, Li SZ, Xia XP and Zhang JH. 2008. A comparison of U-Pb and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the North and South Liaohe Group: Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. Precambrian Res., 163: 279 – 306
Ma J and Wang RM. 1995. The discovery of coexisting kyanite + perthite assemblage in Xuanhua-Chicheng high-pressure granulite belt and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 11: 273 – 278 (in Chinese with English abstract)
Mei HL. 1994. Metamorphic *P-T-t* paths and tectonic evolution of Early Proterozoic rocks from the Zhongtiao Mountains, southern Shanxi. Geological Review, 40 (1): 36 – 47 (in Chinese with English abstract)
O'Brien PJ and Rötzler J. 2003. High-pressure granulites: Formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics. J. Metamorphic Geol., 21: 3 – 20
Peucat JJ and Jahn BM. 1986. A precise zircon U-Pb age of tonalite from the Archaean granite-greenstone belt in Qingyuan area, Northeast China. International Conference of Precambrian crustal evolution, Paper Collection, 3: 222 – 229
Pidgeon RT. 1980. Isotopic ages of the zircons from the Archean granulite facies rocks, Eastern Hebei, China. Geol. Rev., 26: 198 – 207
Polat A, Kusky T, Li JH, Fryer B, Kerrich R and Patrick K. 2005. Geochemistry of Neoarchean (ca. 2.55 ~ 2.50Ga) volcanic and ophiolitic rocks in the Wutaishan greenstone belt, central orogenic belt, North China craton: Implications for geodynamic setting and continental growth. Geol. Soc. Am. Bull., 117: 1387 – 1399
Polat A, Li JH, Fryer B, Kusky T, Kerrich R, Gagnon J and Zhang S. 2006. Geochemical characteristics of the Neoarchean (2800 ~ 2700Ma) Taishan greenstone belt, North China Craton: Evidence for plume-craton interaction. Chem. Geol., 230: 60 – 87
Sandiford M and Powell R. 1986. Deep crustal metamorphism during continental extension: Ancient and modern examples. Earth Planet. Sci. Lett. 79: 151 – 158
Santosh M, Sajeev K and Li JH. 2006. Extreme crustal metamorphism during Columbia supercontinent assembly: Evidence from North China Craton. Gondwana Res., 10: 256 – 266
Santosh M, Wilde SA and Li JH. 2007a. Timing of Paleoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism in the North China Craton: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon geochronology. Precambrian Res., 159: 178 – 196
Santosh M, Tsunogae T and Li JH. 2007b. Discovery of sapphirine-bearing Mg-Al granulites in the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic ultrahigh temperature metamorphism. Gondwana Res., 11: 263 – 285
Shen QH, Xu HF, Zhang ZQ, Gao JF, Wu JS and Ji CL. 1992. Early Precambrian Granulites in China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
Shen QH and Qian XL. 1995. Archean rock assemblages, episodes and tectonic evolution of China. Acta Petrologica Sinica, 2: 113 – 120 (in Chinese with English abstract)
Song B, Nutman AP, Liu DY and Wu JS. 1996. 3800 to 2500Ma crustal evolution in Anshan area of Liaoning Province, Northeastern China. Precambrian Res., 78: 79 – 94
Sun DY, Liu ZH, Ling XC and Zheng CQ. 1993. Metamorphism and Tectonic Evolution of Early Precambrian Rocks in Fushun Area, the Northern Liaoning Province. Beijing: Seismological Press (in Chinese)
Tang J, Zheng YF, Wu YB, Gong B and Liu XM. 2007. Geochronology and geochemistry of metamorphic rocks in the Jiaobei terrane: Constraints on its tectonic affinity in the Sulu orogen. Precambrian Res., 152, 48 – 82
Thompson AB and England PC. 1984. Pressure-temperature-time paths of the regional metamorphism II: Their inference and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks. J. Petrol., 25: 929 – 955
Trap P, Faure M, Lin W, Bruguier O and Monie P. 2007. Late Paleoproterozoic (1900 ~ 1800Ma) nappe stacking and polyphase deformation in the Hengshan-utaishan area: Implications for the understanding of the Trans-North-China Belt, North China Craton. Precambrian Res., 156: 85 – 106
Trap P, Faure M, Lin W, Bruguier O and Monie P. 2008. Contrasted tectonic styles for the Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Evidence for a similar to 2.1Ga thermal and tectonic event in the Fuping Massif. J. Struct. Geol., 30: 1109 – 1125
Wan YS, Song B, Liu DY, Wilde SA, Wu JS, Shi YR, Yin XY and Zhou HY. 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event. Precambrian Res., 149: 249 – 271
Wang KY, Li JL, Hao J, Li JH and Zhou SP. 1996. The Wutaishan mountain belt within the Shanxi Province, Northern China: A record of late Archean collision tectonics. Precambrian Res., 78: 95 – 103
Wang KY, Li JL, Hao J, Li JH, Zhou SP. 1997. Late Archean mafic-ultramafic rocks from the Wuatishan, Shanxi Province: A possible ophiolite melange. Acta Petrologica Sinica, 13: 139 – 151 (in Chinese with English abstract)
Wang RM, Chen ZZ and Chen F. 1991. Grey gneisses and high-pressure granulites in the Hengshan complex and their geological implications. Acta Petrologica Sinica, 7: 119 – 131 (in Chinese with English abstract)
Wang YJ, Fan WM, Zhang Y and Guo F. 2003. Structural evolution and $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of the Zanhuang metamorphic domain in the North China Craton: Constraints on Paleoproterozoic tectonothermal overprinting. Precambrian Res., 122: 159 – 182
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: 269 – 282 (in Chinese with English abstract)
Wu CH and Zhong CT. 1998. The Paleoproterozoic SW-NE collision model for the central North China Craton. Progr. Precambrian Res., 21: 28 – 50 (in Chinese)
Wu CH, Li SX, Gao JF and Xu XC. 1986. Archean and Paleoproterozoic metamorphic regions in the North China Craton. In: Dong SB (ed.). Metamorphism and Crustal Evolution of China. Beijing: Geological Publishing House, 53 – 89 (in Chinese)
Wu CH. 2007. Metasedimentary rocks and tectonic division of North China Craton. Geol. J. China Univ., 13: 442 – 457 (in Chinese with English abstract)
Wu JS, Geng YS, Shen QH, Wan YS, Liu DY and Song B. 1998. Archean Geological Characteristics and Tectonic Evolution of China-Korea Paleo-Continent. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
Yang JH, Wu FY, Wilde SA and Zhao GC. 2008. Petrogenesis and geodynamics of Late Archean magmatism in the eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Hf isotopic evidence. Precambrian Res., 167: 125 – 149
Yardley BWD. 1989. Introduction to Metamorphic Petrology. Essex: Longman
Yin CQ, Zhao GC, Sun M, Xia XP, Wei CJ and Leung WH. 2009. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Qianlishan Complex: Constrains on the evolution of the Khondalite Belt in the Western Block of the North China Craton. Precambrian Res., in press
Zhai MG, Guo JH, Yan YH, Li YG and Zhang WH. 1992. Discovery

and preliminary study of Archaean high-pressure basic granulites in North China. Science in China (Series B), 12: 1325 – 1330 (in Chinese)

Zhai MG, Guo JH, Li JH, Yan YH, Li YG and Zhang WH. 1995. The discovery of Archaean retrograde eclogites in the North China craton. Chin. Sci. Bull., 40: 1590 – 1594 (in Chinese)

Zhai MG, Guo JH, Yan YH, Li YG, Li JH, Zhang WH. 1996. An oblique cross section of Archean continental crust in Shanxi-Hebei-Nei Mogol junction area, North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 12: 222 – 238 (in Chinese with English abstract)

Zhai MG, Bian AG and Zhao TP. 2000a. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archaean and its breakup during Late Palaeoproterozoic and Mesoproterozoic. Sci. China (Series D), 43: 219 – 232

Zhai MG, Gong BL, Guo JH, Liu WJ, Li YG and Wang QC. 2000b. Sm-Nd geochronology and petrography of garnet pyroxene granulites in the northern Sulu region of China and their geotectonic implication. Lithos, 52: 23 – 33

Zhai MG, Guo JH, Li YG, Liu WJ, Peng P and Shi X. 2003. Two linear granite belts in the central western North China Craton and their implication for Late Neoarchaean Palaeoproterozoic continental evolution. Precambrian Res., 127: 267 – 283

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)

Zhang FQ, Liu JZ and Ouyang ZY. 1998. Tectonic framework of greenstones in the basement of the North China Craton. Acta Geophys. Sin., 41: 99 – 107 (in Chinese with English abstract)

Zhang J, Zhao GC, Sun M, Wilde SA, Li SZ and Liu SW. 2006. High-pressure mafic granulites in the Trans-North China Orogen: Tectonic significance and age. Gondwana Res., 9: 349 – 362

Zhang J, Zhao GC, Li SZ, Sun M, Liu SW, Wilde SA, Kröner A and Yin CQ. 2007. Deformation history of the Hengshan Complex: Implications for the tectonic evolution of the Trans-North China Orogen. J. Struct. Geol., 29: 933 – 949

Zhang J, Zhao GC, Li SZ, Sun M, Liu SW and Yin CQ. 2009. Deformational history of the Fuping Complex and new U-Th-Pb geochronological constraints: Implications for the tectonic evolution of the Trans-North China Orogen. J. Struct. Geol., 31: 177 – 193

Zhang JS, Dirks HGM and Passchier CW. 1994. Extensional collapse and uplift in a polymetamorphic granulite terrain in the Archean and Paleoproterozoic of north China. Precambrian Res., 67: 37 – 57

Zhang QS, Yang ZS and Liu LD. 1988. Early crust and ore deposits in the Eastern Liaoning Peninsula. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)

Zhang YX, Yan HQ, Wang KD, Li FY. 1980. Komatiites from the Qianxi Group in the eastern Hebei Province, China. J. Changchun Univ. Sci. Tech., 10: 1 – 8 (in Chinese)

Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Lu LZ. 1998. Thermal evolution of the Archaean basement rocks from the eastern part of the North China Craton and its bearing on tectonic setting. Inter. Geol. Rev., 40: 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: 37 – 53

Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA, Sun M 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. Geol. Mag., 136: 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 Res. 93: 181 – 199

Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Lu LZ. 2000a. Petrology and *P-T* path of the Fuping mafic granulites: Implications for tectonic evolution of the central zone of the North China Craton. J. Metamorph. Geol., 18: 375 – 391

Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Lu LZ. 2000b. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. Precambrian Res., 103: 55 – 88

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 Res., 107: 45 – 73

Zhao GC, Cawood PA and Wilde SA. 2001b. High-pressure granulite (retrograded eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: Petrology and tectonic implications. J. Petrol., 42: 1141 – 1170

Zhao GC, Sun M and Wilde SA. 2003. Major tectonic units of the North China Craton and their Paleoproterozoic assembly. Sci. China (Series D), 46: 23 – 38

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

Zhao GC, Wilde SA, Guo JH, Sun M and Li XP. 2009. Single zircon grains record two continental collisional events in the North China craton. Submission to Precambrian Research

Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Lu FX, Yu CM, Zhang M and Li HM. 2004. U-Pb and Hf-isotope analysis of zircons in mafic xenoliths from Fuxian kimberlites: Evolution of the lower crust beneath the North China craton. Contrib. Mineral. Petrol., 148: 79 – 103

Zhou XW, Wei CJ, Geng YS and Zhang LF. 2004. Discovery and implications of high pressure pelitic granulite from the north Jiaodong, China. Chinese Science Bulletin, 49(18): 1942 – 1948

Zhou XW, Zhao, GC, Wei CJ, Geng YS and Sun M. 2008. Metamorphic evolution and Th-U-Pb zircon and monazite geochronology of high-pressure pelitic granulites in the Jiaobei massif of the North China Craton. Am. J. Sci., 308: 328 – 350

附中文参考文献

白瑾,王汝铮,郭进京. 1992. 五台山早前寒武纪最大地质事件及其年代. 北京:地质出版社

陈光远. 1983. 弓长岭二矿区科马提岩. 成都地质学院学报,10: 20 – 25

陈能松,王人镜,草文瑯,钟增球. 1994. 密云杂岩西段等压冷却 *P-T-t* 轨迹确定及地球动力学成因. 地质科学, 29: 354 – 364

程裕祺,徐惠芬. 1991. 对山东新泰晚太古代雁翎关组中科马提岩的一些新认识. 中国地质,135: 31 – 32

崔文元, 王长秋, 王时麒. 1991. 辽西太古代建平变质杂岩的地球化学和变质作用的 *P-T-t* 轨迹. 岩石学报, 8: 13 – 26

董春艳, 刘敦一, 李俊建, 万渝生, 周红英, 李承东, 杨岳衡, 谢烈文. 2007. 华北克拉通西部孔兹岩带形成时代新证据:巴彦乌拉-贺兰山地区锆石 SHRIMP 定年和 Hf 同位素组成. 科学通报, 52:1913 – 1922

郭敬辉, 翟明国, 张毅刚, 李永刚, 阎月华, 张雯华. 1993. 怀安蔓菁沟早前寒武纪高压麻粒岩混杂岩带地质特征、岩石学和同位素年代学. 岩石学报, 9: 1 – 13

郭敬辉, 翟明国, 李江海, 李永刚. 1996. 华北克拉通早前寒武纪桑干构造带的岩石组合特征和构造性质. 岩石学报, 12: 193 – 207

郭敬辉, 翟明国, 李永刚, 阎月华. 1998. 华北太古宙高压基性麻粒岩的两类 *P-T* 轨迹及其构造意义:矿物化学和变质作用研究. 岩石学报, 14: 430 – 448

郭敬辉, 翟明国, 李永刚, 李江海. 1999. 恒山西段石榴石角闪岩和麻粒岩的变质作用、*P-T* 轨迹及构造意义. 地质科学,34:311 – 325

郭敬辉,陈毅,彭彭,刘富,陈亮. 2006. 内蒙大青山假蓝宝石麻粒岩-1.85Ga 超高温变质作用. 南京:全国岩石学与地球动力学会议

摘要
郭素淑, 李曙光. 2009. 华北克拉通东南缘古元古代变质和岩浆事件的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. 中国科学(D 辑), 出版中
贺高品, 叶慧文. 1998. 辽东-吉南地区早元古代两种类型变质作用及其构造意义. 岩石学报, 14:152 – 162.
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: 27 – 35
金巍,李树勋. 1996. 华北晚太古代-早元古代高级变质区的变质 *P-T-t* 轨迹及其地壳热动力学演化模式. 岩石学报,12: 209 – 221
金巍. 1989. 华北陆台北缘(中段)早前寒武纪地质演化及其变质动力学研究. 博士学位论文. 长春: 长春地质学院
李江海, 钱祥麟. 1991. 太行山北段龙泉关剪切带研究. 山西地质, 6: 17 – 29
李江海, 钱祥麟, 翟明国. 1997. 华北北部麻粒岩相带构造区划及其早前寒武纪构造演化地质科学,32:254 – 266
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: 34 – 41
李树勋,刘喜山,张履桥. 1987. 内蒙古色耳腾绿岩带. 长春地质学院学报,17: 81 – 102
李三忠,郝德峰,赵国春,孙敏,韩宗珠,郭晓玉. 2004. 丹东花岗岩的地球化学特征及其成因. 岩石学报, 20(6): 1417 – 1423
厉子龙. 1993. 胶东太古宙岩石变质作用 *P-T-t* 轨迹及其意义. 山东地质,9: 31 – 41
刘福来, 沈其韩. 1999. 冀西北麻粒岩相带富铝片麻岩的退变结构及其变质反应性质. 岩石学报, 15: 505 – 517
刘福来. 1995. 怀安-大同一带麻粒岩相高级区变质矿物-流体演化及构造环境研究. 博士学位论文. 长春:长春地质学院
刘福来. 1996. 红赐堡—黄土窑一带孔兹岩系中石榴石的演化史及其地质意义. 长春科技大学学报,26: 278 – 284
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. 岩石学报, 13: 27 – 43
刘建忠, 强小科, 刘喜山, 欧阳自远. 2000. 内蒙古大青山造山带含假蓝宝石尖晶石片麻岩的成因网格及动力学. 岩石学报,16: 245 – 255
刘劲鸿. 2001. 华北地块东段和龙超镁铁质科马提岩的发现及特征. 地质论评,47: 420 – 425
刘守偈,李江海. 2009. 内蒙古中南部古元古代高温型双变质带及其构造意义. 高校地质学报, 15: 48 – 56
刘树文,林强,曹林. 1991. 冀东角闪石成分环带记录的 *P-T-t* 轨迹. 长春科技大学学报. 21: 129 – 142
刘树文. 1996. 阜平地区麻粒岩的 *P-T* 路径研究. 高校地质学报, 2: 75 – 84
卢良兆, 董永胜. 1998. 胶东早元古代荆山群富铝片麻岩中矿物共生的 *P-T-X* 关系及其演化. 岩石学报, 14: 140 – 151
卢良兆,靳是琴,徐学纯,刘福来. 1992. 内蒙古南部早前寒武纪孔兹岩系成因和含矿性. 长春:吉林科学技术出版社
卢良兆,徐学纯,刘福来. 1996. 中国北方孔兹岩系成因. 长春:吉林科学技术出版社
卢良兆. 1991. 内蒙集宁地区太古宙麻粒岩相变质作用的 *P-T-t* 轨迹及其大地构造意义. 岩石学报, 7: 1 – 12
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. 岩石学报,11:273 – 278
梅华林. 1994. 中条山早元古代变质岩石的 *P-T-t* 轨迹和构造演化. 地质论评, 40(1): 36 – 47
沈其韩,徐惠芬,张宗清,高吉凤,伍家善,吉成林. 1992. 中国早前寒武纪麻粒岩. 北京:地质出版社
沈其韩, 钱祥麟. 1995. 中国太古宙地质体组成、阶段划分和演化. 地球学报,2: 113 – 120
孙德育,刘正宏,凌贤长,郑长青. 1993. 辽北抚顺东部地区前寒武纪地质及构造演化. 北京:地震出版社
王凯怡, 李继亮, 郝杰. 1997. 山西五台山区晚太古代镁铁质-超镁铁质岩: 一种可能的古蛇绿杂岩. 岩石学报, 13: 139 – 151
王仁民,陈珍珍,陈飞. 1991. 恒山灰色片麻岩和高压麻粒岩及其地质意义,岩石学报,8:119 – 131
魏春景,张翠光,张阿利,伍天洪,李江海. 2001. 辽西建平高压麻粒岩变质作用的 *P-T* 条件及其地质意义. 岩石学报,17:269 – 282
吴昌华, 李树勋, 高吉凤, 徐学纯. 1986. 华北克拉通太古代和早元古代变质区. 见: 董申保主编. 中国变质作用及其与地壳演化的关系. 北京: 地质出版社, 53 – 89
吴昌华,钟长汀. 1998. 华北陆台中段吕梁期的 SW-NE 向碰撞. 前寒武纪研究进展,21: 28 – 50
吴昌华. 2007. 华北克拉通的变质沉积岩及其克拉通的构造划分. 高校地质学报,13: 442 – 457
伍家善,耿元生,沈其韩,万渝生,刘敦一,宋彪. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京:地质出版社
翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 李永刚, 张雯华. 1992. 中国华北高压麻粒岩的发现及初步研究. 中国科学(B 辑), 12: 1325 – 1330
翟明国, 郭敬辉,阎月华,李永刚,李江海,张雯华. 1996. 太古宙克拉通型下地壳剖面: 华北怀安-丰镇-尚义的麻粒岩系-角闪岩系. 岩石学报, 12: 222 – 238
翟明国,卞爱国,赵太平. 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. 中国科学(D 辑),30:129 – 137
翟明国,郭敬辉,李江海,阎月华,李永刚,张雯华. 1995. 华北克拉通发现退变榴辉岩. 科学通报,40: 1590 – 1594
翟明国. 2009. 华北克拉通早前寒武纪高温高压麻粒岩及其相关问题. 岩石学报,25(8):1753 – 1771
张福勤,刘建忠,欧阳自远. 1998. 华北克拉通基底绿岩的岩石大地构造研究. 地球物理学报, 41: 99 – 107
张秋生,杨振生,刘连登. 1988. 辽东半岛早期地壳演化与矿产. 北京:地质出版社
张贻侠,阎鸿铨,王宽德,李复元. 1980. 冀东迁西群内科马提岩的讨论. 长春地质学院学报,11:1 – 8
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. 科学通报,49: 1424 – 1430