

# 内蒙古中南部古元古代高温型双变质带及其构造意义

刘守偈, 李江海

(造山带与地壳演化教育部重点实验室(北京大学), 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

**摘要:** 内蒙古中南部集宁—丰镇—土贵乌拉地区发育了一条超高温变质岩带。通过对土贵乌拉地区超高温变质岩的矿物组合研究,发现其中包含了尖晶石+石英、假蓝宝石+石英、斜方辉石+夕线石+石英的超高温标型矿物组合,并且在超高温变质作用区域内,经历了初始近等压冷却,随后近等温降压的逆时针退变质过程。已有的年代学数据表明,超高温变质作用峰期变质时代为1 920 Ma左右,降压退变质时代为1 850 Ma左右。在超高温变质岩带的东南地区,包括怀安—宣化一带,还出露了高压麻粒岩带。高压麻粒岩经历了近等温降压的顺时针退变质过程。年龄数据表明高压麻粒岩峰期变质时代为~1 900 Ma,退变质时代为1 850 Ma左右。内蒙古中南部超高温变质岩带和高压麻粒岩带相邻分布、产状相似且变质时代接近,共同构成了类似都城秋穗提出的双变质带;由于其温度偏高,故称为高温型双变质带,为世界上最古老的双变质带之一。该高温型双变质带可能反映了内蒙古中南部不同层次地壳物质在早前寒武纪碰撞作用中经历了P-T演化截然不同的变质作用,两条变质带在经历了各自的峰期变质作用后,作为一个共同的地体抬升。对内蒙古中南部古元古代高温型双变质带开展进一步研究,为认识华北克拉通早期构造背景、地壳热演化,特别是板块构造、不同地壳层次的构造作用提供了难得的科学机遇。

**关键词:** 华北克拉通; 超高温变质作用; 高压麻粒岩; 双变质带

**中图分类号:** P588.34

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-7493(2009)01-0048-09

## Paleoproterozoic High Temperature Paired Metamorphic Belt in Central Part of Southern Inner Mongolia and Its Tectonic Implication

LIU Shou-jie, LI Jiang-hai

(The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, China; School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** An ultra-high temperature (UHT) metamorphic rock belt occurs in Jining-Fengzhen-Tuguwula, central part of southern Inner Mongolia. Detailed study on the mineral assemblages shows UHT indicators such as Spl+Qtz, Spr+Qtz and Opx+Sil+Qtz. UHT rocks underwent initial isobaric cooling followed by isothermal decompression in the field of UHT metamorphism. Available age data suggest peak metamorphism at 1 920 Ma followed by retrogressive metamorphism at 1 850 Ma of the UHT rocks. To the southeast, including Huai'an-Xuanhua area, outcropped a high pressure granulite, which has a isothermal decompression retrograde metamorphic history along a clockwise P-T path. Most of the ages show a peak metamorphism at ~1 900 Ma followed by a ca. 1 850 Ma retrograde metamorphism. Both the UHT rocks and high pressure granulite have a foliation striking NEE and dipping to NNW at ca. 70°. UHT rock belt and high pressure granulite formed a paired metamorphic belt due to the coincidence of distribution, attitude and metamorphic age. Since the metamorphic temperature is relatively higher than the traditional paired metamorphic belt, it could be defined as high temperature paired metamorphic belt, which is one of the oldest paired metamorphic belts. This high temperature paired metamorphic belt indicates that the crustal material at different levels in mid-southern Inner Mongolia underwent metamorphisms with entirely different P-T paths during a collision event at ca. 1 900 Ma, then the UHT rocks and high pressure granulite were uplifted as a whole block. Further research on the high temperature paired metamorphic belt provides a chance to study the early structural framework and crustal thermal evolution of North China Craton, especially the plate

收稿日期: 2008-06-06; 修回日期: 2008-10-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40472097)

作者简介: 刘守偈, 男, 1983年生, 构造地质学博士研究生; E-mail: sjliu\_pku@163.com

tectonics and structural process at different crustal levels.

**Key words:** North China Craton; UHT; HP granulite; paired metamorphic belt

## 1 引言

超高温变质作用被认为是新世纪变质岩石学的重要前缘领域之一，对于认识地壳构造-热演化具有重要意义，许多学者指出应当把超高温变质作用与超高压变质作用放到同等重要的位置看待（张立飞，2007；Brown，2007；Santosh et al，2006，2007a；Harley，1998a，b；Kelsey，2007）。我国超高温变质岩的研究刚起步，所发现的超高温变质露头尚很有限（Santosh et al，2006，2007a；郭敬辉等，2006；刘守偈等，2007），亟待开展系统深入科学研究和典型实例的解剖。在超高温变质岩出露的东南地区，包括怀安—宣化一带，还出露了高压麻粒岩，大致呈NEE向展布，且在高压麻粒岩北部，有孔兹岩的构造岩性层状体和透镜体（翟明国等，1994）。尽管全球发现众多的高温变质带与高压或超高压变质岩带，但两者时代接近、在相同地区共同出现的实例尚不多见，仅在巴西、越南空土省以及西阿尔卑斯地区可能存在。

古元古代（19~17.6亿年）是华北克拉通稳定固结的关键时期（Guo et al，2005；Zhai et al，2005），也是全球板块构造特征趋于明显的关键时期，同时还是一个超大陆演化时期（Rogers et al，2002）。大量研究表明（Brown，2007；Santosh et al，2006，2007a，b；Kelsey，2007），超高温变质普遍与超大陆演化具有对应关系。进一步开展古元古代末期超高温变质作用、高压麻粒岩变质作用及其相关构造热事件（岩墙群事件和裂谷事件等）、对研究华北克拉通北缘区域构造格局转变以及古元古代超大陆（如哥伦比亚超大陆）再造具有重要的意义。

本文从内蒙古中南部超高温变质作用入手，总结了超高温变质岩的分布、产状、变质演化以及变质年代，并将其与相邻分布的高压麻粒岩作了对比研究，认为二者相邻分布且产状平行、变质时代相当，变质作用演化类型截然不同，构成了类似都城秋穗

（1968）提出的双变质带，由于总体变质温度偏高，故称其为“高温型双变质带”；并进一步结合相关构造热事件讨论了其构造意义。

## 2 内蒙古中南部古元古代超高温变质岩和高压麻粒岩构造区划

内蒙古中南部主要发育三个早前寒武纪岩石构造单元，包括西北部固阳附近的TTG-绿岩带、中部的孔兹岩-S型花岗岩-超高温变质岩分布区以及东南部TTG-高压麻粒岩区（图1A）。固阳地区主要为紫苏花岗岩和麻粒岩杂岩，变表壳岩系通常呈包体的形式产于紫苏花岗岩中，且由于所处的地壳层次不同，变质程度也不同（李江海等，1997），高级变质岩区和低级变质岩区均显示相似的逆时针P-T-t轨迹。集宁孔兹岩区在北侧以赤城-尚义剪切带与早元古代角闪岩相-绿片岩相分开，南侧与高压麻粒岩之间由一条韧性剪切带隔开。孔兹岩系于高压麻粒岩之间的构造关系，曾提出不整合、构造接触、构造叠置等认识（钱祥麟等，1999；Zhang et al，1994；吴昌华等，1998；张家声等，1997，1999，2007）。

典型的超高温变质岩出露于内蒙古集宁—丰镇—土贵乌拉以及武川地区孔兹岩中（Santosh et al，2006，2007a；郭敬辉等，2006；刘守偈等，2007）（图1A）。集宁超高温变质岩处于华北巨型麻粒岩相带中段，岩石变质温度普遍较高，岩石类型丰富，包括孔兹岩、S型花岗岩、变质辉长岩、TTG杂岩、大理岩等。通过矿物组合的标型特征，推断其峰期变质温度条件达到1 000℃，压力为10<sup>8</sup>Pa左右。土贵乌拉地区主要岩石组合为夕线石榴片麻岩、S型花岗岩以及二者以不同比例互层的片麻岩，三者之间没有明显的界线，呈渐变关系接触。三者片麻理产状一致，均为40°左右走向，以70°左右高倾角，倾向北西（图1B）。孔兹岩岩性为灰色夕线石榴黑云片麻岩，石榴石花岗质片麻岩岩性主要为灰白—灰红色石榴石二长—钾长花岗质片麻岩，超高温变质岩以条带状

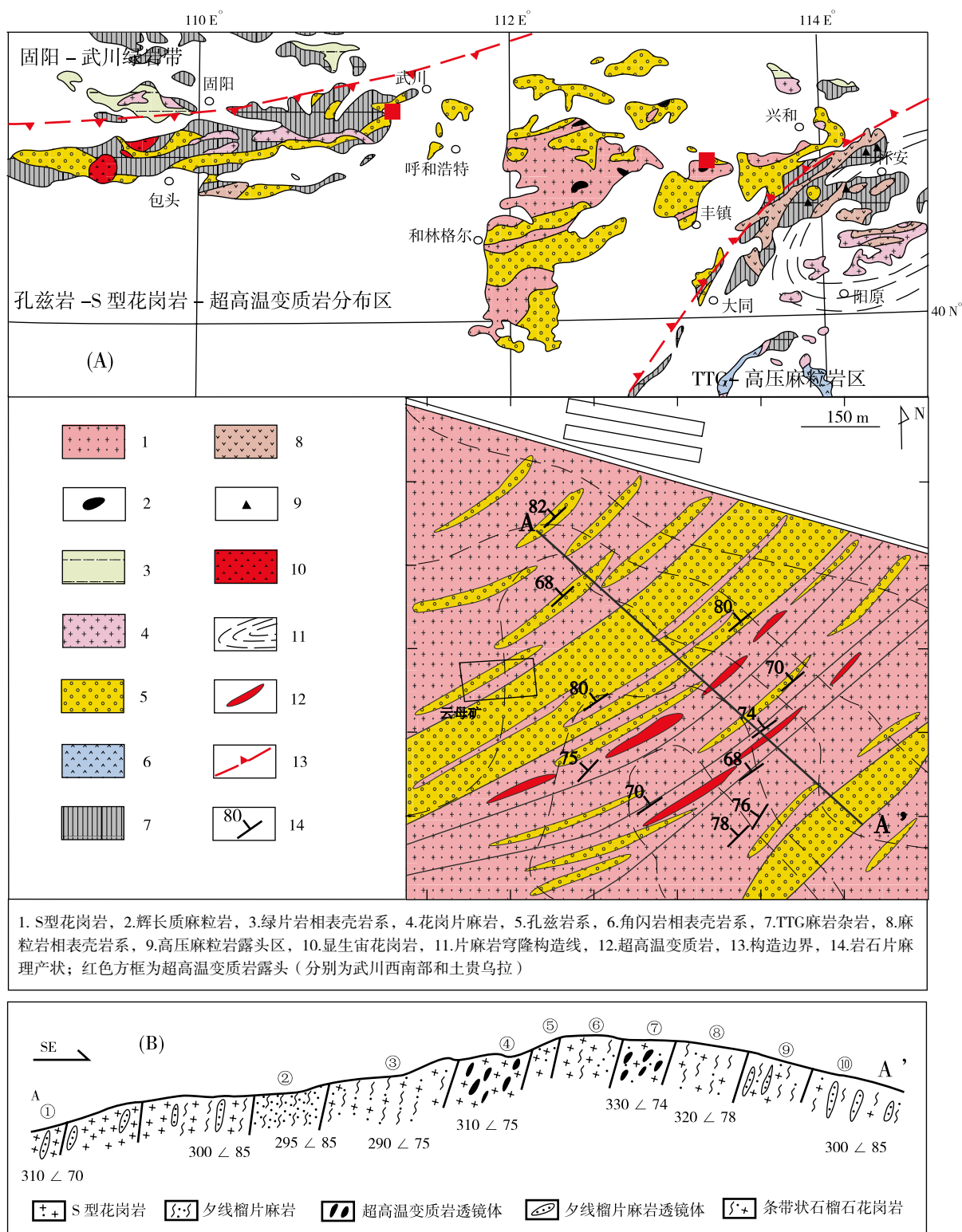


图1 内蒙古中南部麻粒岩相带地质简图 (A) (据刘守偈等, 2008修改) 及土贵乌拉超高温变质岩露头剖面 (B)

Fig. 1 A: Simplified geological map of granulite in the central part of southern Inner Mongolia (after Liu, et al, 2008);

B: Profile of UHT rocks in Tuguiwula. Symbol of red rectangle for UHT outcrops and black triangle for highpressure granulites

或透镜状产于孔兹岩与石榴石花岗质片麻岩中，岩性为青灰色—灰黑色含夕线石、石榴石、黑云母、堇青石、尖晶石、假蓝宝石、斜方辉石片麻岩（图2A）。孔兹岩及S型花岗质片麻岩均发生强烈变形（图2B），在石榴石花岗质片麻岩中孔兹岩包体呈无根勾状褶皱产出。已有研究表明，S型花岗岩为孔兹岩就地深熔作用产物（Zhai et al, 2003；郭敬辉等，1999）。在集宁保安公社以及朝号沟等地区也发现有超高温变质作用的痕迹，薄片显示了超高温变质矿物组合尖晶石+石英的退变结构。此外，内蒙古武川县东坡村东南分布着含假蓝宝石麻粒岩，地理位置在大青山东段。构造位置为华北克拉通西部陆块北部孔兹岩北缘中段。假蓝宝石麻粒岩产于孔兹岩系麻粒岩相变质沉积岩背景中，是一个宽20~30 m的扁长透镜体，走向NEE（郭敬辉等，2006）。同时S型花岗岩—孔兹岩—超高温变质岩分布区还发育了后期伟晶岩脉和辉长质岩墙的侵入（图2C、D）。

高压麻粒岩产在怀安杂岩南北边缘与花岗岩和孔兹岩系的构造接触部位（图1A）。本文更关注与孔兹岩带相邻的怀安—宣化高压麻粒岩带。怀安蔓菁沟一带是目前发现的高压基性麻粒岩发育最好的剖面，向东在宣化西望山至水地庄一带也有高压麻粒岩产出（王仁民等，1991），向西也存在高压麻粒岩，它们构成一条近EW走向延伸稳定的高压麻粒岩混杂带（郭敬辉等，1993）。

由此可见，在内蒙古中南部地区，超高温变质岩带与高压麻粒岩带相邻出现，产状相似，中间由剪切带隔开。

### 3 内蒙古中南部古元古代超高温变质岩与高压麻粒岩P-T轨迹及变质演化

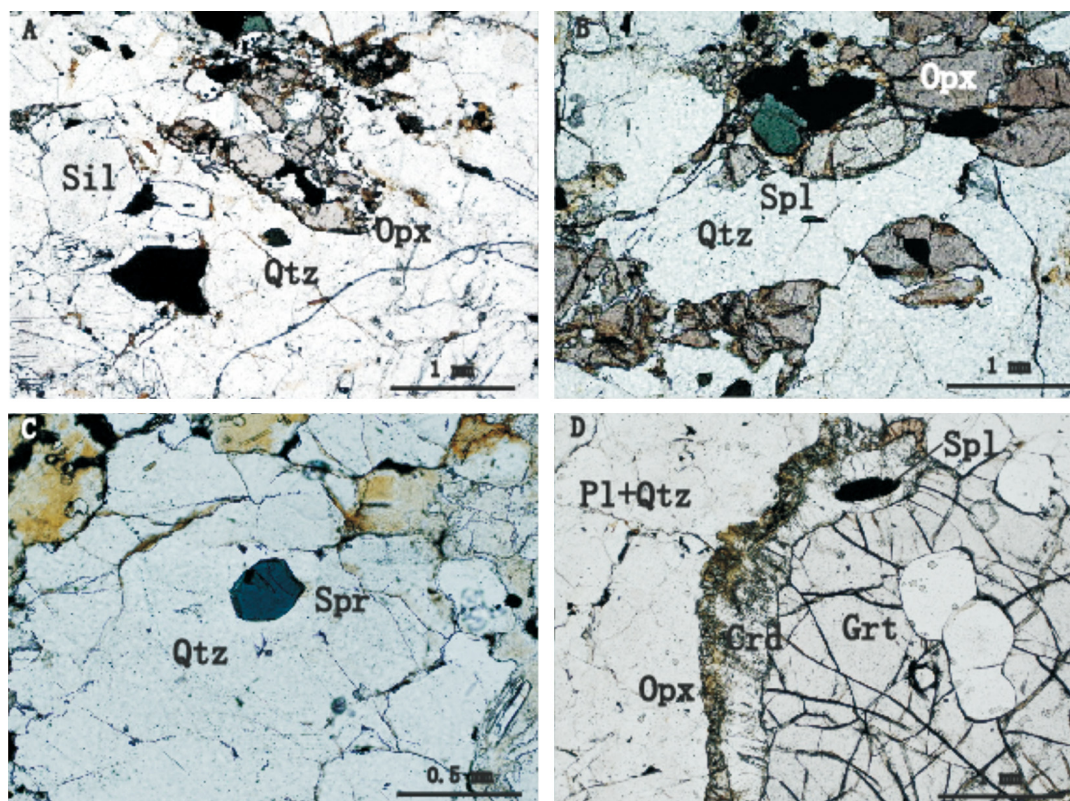
通过对土贵乌拉超高温变质岩详细的薄片研究，将其变质演化划分为三个阶段（图3）：在早期变质作用阶段中，石英尖晶石以单相矿物包体同时出现在一个石榴石颗粒中，说明变质条



A. 超高温变质岩；B. S型花岗岩中残留体复杂褶皱；C. 花岗质伟晶岩脉侵入到夕线石榴片麻岩中；D. 辉长质岩墙  
A. UHT rocks; B. complicated fold of remained khondalite in S-type granite; C. granitic pegmatite intruding into sillimanite-garnet gneisses; D. gabbroic dykes  
Spr-假蓝宝石；Spl-尖晶石；Sil-夕线石；Opx-斜方辉石；Kfs-钾长石；Pl-斜长石；Grt-石榴石；Qtz：石英  
照片拍摄地点：A-C：土贵乌拉大井村北；D：丰镇北采石场

图2 孔兹岩-S型花岗岩-超高温变质岩分布区野外露头

Fig. 2 Outcrops of khondalite-S-type granite-UHT rocks



A. 超高温变质矿物组合：斜方辉石(Opx)+夕线石(Sil)+石英(Qtz); B. 超高温变质矿物组合：尖晶石(Spl)与石英(Qtz)直接接触;  
C. 假蓝宝石与石英直接接触; D. 降压反应结构：石榴石周围的斜方辉石(Opx)+堇青石(Crd)反应边  
A. UHT metamorphic mineral assemblage: Opx+Sil+Qtz; B. UHT metamorphic mineral assemblage of Spl+Qtz;  
C. UHT metamorphic mineral assemblage of Spr+Qtz; D. textures showing depressuring: Opx+Crd corona surrounding garnet

图3 超高温变质岩变质反应结构(均为单偏光显微照片)

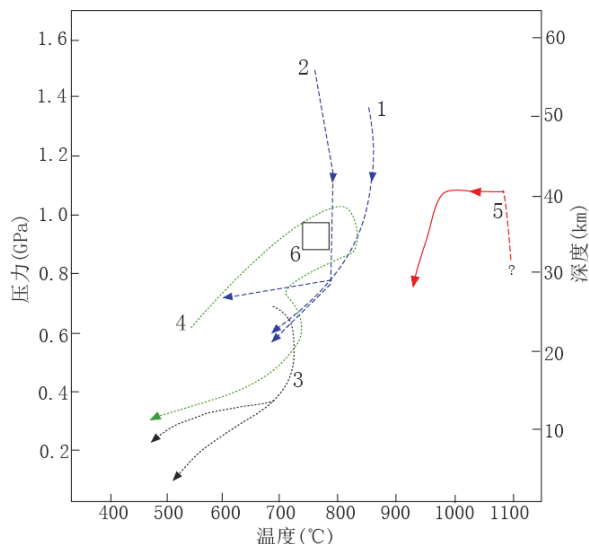
Fig. 3 Typical reaction textures of UHT rocks (polarized light)

件已经达到了尖晶石+石英的稳定域。然后温度压力进一步升高,达到峰期变质条件,变质相从尖晶石+石英(Spl+Qtz)的稳定域跨越到假蓝宝石+石英(Spr+Qtz)、斜方辉石+夕线石+石英(Opx+Sil+Qtz)的稳定域,并在此时生成了尖晶石与石英直接接触(图3B)、假蓝宝石与石英直接接触(图3C)以及斜方辉石+夕线石+石英(图3A)的超高温标型矿物组合,指示了温度高于1000℃,压力为10<sup>8</sup>Pa左右的峰期变质条件。随后发生了近等压冷却退变质过程,使得斜方辉石中Al的含量重新平衡,温度降到950~970℃。然后由于快速抬升,发生了近等温降压退变质过程,该过程中分别形成了斜方辉石与夕线石之间的堇青石反应边、假蓝宝石以及尖晶石与石英之间的堇青石反应边、石榴石外围尖晶石与堇青石、斜方辉石与堇青石的后成合晶(图3D),最后石榴石和斜方辉石等矿物分解成黑云母标志着高级变

质作用的结束。由此,土贵乌拉地区超高温变质作用经历了从尖晶石+石英稳定域到假蓝宝石+石英、斜方辉石+夕线石+石英稳定域,然后发生近等压冷却和近等温降压的演化过程。通过峰期变质条件的温度压力之比计算得出其代表的地温梯度为28~29℃/km(图4:5)。

前人研究表明,怀安蔓菁沟地区高压麻粒岩原岩为基性岩墙群或小岩体(郭敬辉等,1993,1999;李江海等,1998;Kroner,2005)主要经历了三期变质作用:早期的高压麻粒岩相变质作用、中期的中压麻粒岩相变质作用以及晚期角闪岩相退变质作用。早期高压矿物组合为Grt+Cpx+Qtz±Pl,变质温度为800℃±,压力>1.4 GPa(翟明国等,1992);中期中压矿物组合以后成合晶为代表,主要有Opx+Pl+Mt±Cpx, Opx+Hb+Pl+Mt±Cpx和Hb+Pl+Mt,变质温度为820℃,压力为0.7~0.9 GPa(翟明国等,1992);后期退变过程

中温度降到约700℃，压力为0.5~0.6 GPa。整个演化显示了近等温降压的顺时针P-T-t轨迹(郭敬辉等, 1993; 翟明国等, 1992)，但是几乎所有的样品都未识别出高压麻粒岩相之前的平衡矿物相(翟明国等, 2007)。根据高压麻粒岩相变质作用的温度压力条件计算得出其代表的地温梯度为16℃/km(图4: 1和2; 翟明国等, 2007)。



1. 冀西北高压麻粒岩(郭敬辉等, 1993; 翟明国等, 1992); 2. 恒山基性麻粒岩(O'brien, 2005); 3. 集宁孔兹岩(卢良兆, 1991); 4. 冀西北孔兹岩系(卢良兆等, 1996); 5. 土贵乌拉超高温变质岩(Santosh et al, 2007a); 6. S型花岗岩重熔温度压力范围(陶继雄等, 2002)

图4 华北中北部不同变质岩P-T轨迹

Fig. 4 P-T path of different metamorphic rocks in northern part of central North China Craton

由此可见，超高温变质岩与高压麻粒岩经历了性质完全不同的变质演化过程。尽管还没有发现超高温变质作用前的稳定矿物组合，但是在超高温变质作用区域内显示了从近等温冷却—近等温降压的逆时针P-T演化轨迹，指示了地体在经历了超高温变质作用后经过了原地的热松弛后迅速抬升的过程。而高压麻粒岩则经历了近等温降压的顺时针P-T演化轨迹，指示了地体经历了快速抬升过程。

从整个区域上来看，高压麻粒岩、超高温变质岩以及孔兹岩系P-T轨迹都具有一段非常明显的降压曲线(图4)。结合退变质年代数据来看，三者的降压过程极有可能是同一次抬升事件的结果。所不同的是，高压麻粒岩和超高温变质岩在开始共同抬升时具有各自特殊的初始条件：高压

麻粒岩位于更深层次的地壳，而超高温变质岩处于中层次而热流值异常高的地壳。

#### 4 内蒙古中南部超高温变质岩和高压麻粒岩构造热事件序列

内蒙古中南部超高温变质岩年代学研究尚处于起步阶段。Santosh等(2006)从含尖晶石+石英超高温变质矿物组合的岩石中，采用独居石原位定年的方法得到 $1\,927 \pm 11$  Ma和 $1\,819 \pm 11$  Ma的年龄，前者被解释为进变质作用阶段或者峰期的变质年龄，后者为退变质年龄。在与假蓝宝石+石英、斜方辉石+夕线石+石英超高温变质矿物相关的岩石中，独居石年代学显示为 $1\,917 \pm 48$  Ma的年龄(Santosh et al, 2007a)。同样品的锆石U-Pb年代学研究给出了 $2\,090 \sim 1\,970$  Ma和 $1\,919 \pm 10$  Ma的年龄，前者指示了物源年龄，而后者则指示了超高温变质作用峰期年龄(Santosh et al, 2007b)。此外，郭敬辉等(2006)在大青山含假蓝宝石超高温变质岩中分离出锆石获得了1 850 Ma的超高温变质年龄。尽管目前获得超高温变质岩变质年龄数据有限，但是都统一指示了1 900 Ma左右的峰期变质年龄。

高压麻粒岩的年代学也一直是一个具有争议的问题。锆石的SHRIMP年龄可以分出三个组： $2\,000 \sim 1\,900$  和  $1\,860 \sim 1\,830$ ， $1\,800 \sim 1\,760$  Ma，分别被解释为高压麻粒岩的变质年龄、中压麻粒岩的降压变质年龄和角闪岩相的退变年龄(翟明国等, 2007)。

超高温变质作用和高压麻粒岩变质作用峰期时代大致相同，均为~1 900 Ma。而且其退变质时代也大致相同，为1 850 Ma左右。通过上文中对其P-T演化轨迹来看，二者都是以一系列降压变质反应结构为标志的退变质过程，是作为同一地体共同抬升的结果。在二者发生退变质作用的同时及其以后，发育了伟晶岩脉、花岗岩以及基性岩墙群的侵入(图2)，标志着华北克拉通的基底开始广泛抬升并冷却(图5)。

#### 5 讨论与结论

1) 尽管全球发现众多的高温变质带与高压或超高压变质岩带，但两者时代接近、在相同地区共同出现的实例尚不多见，仅在巴西、越南空土省以及西阿

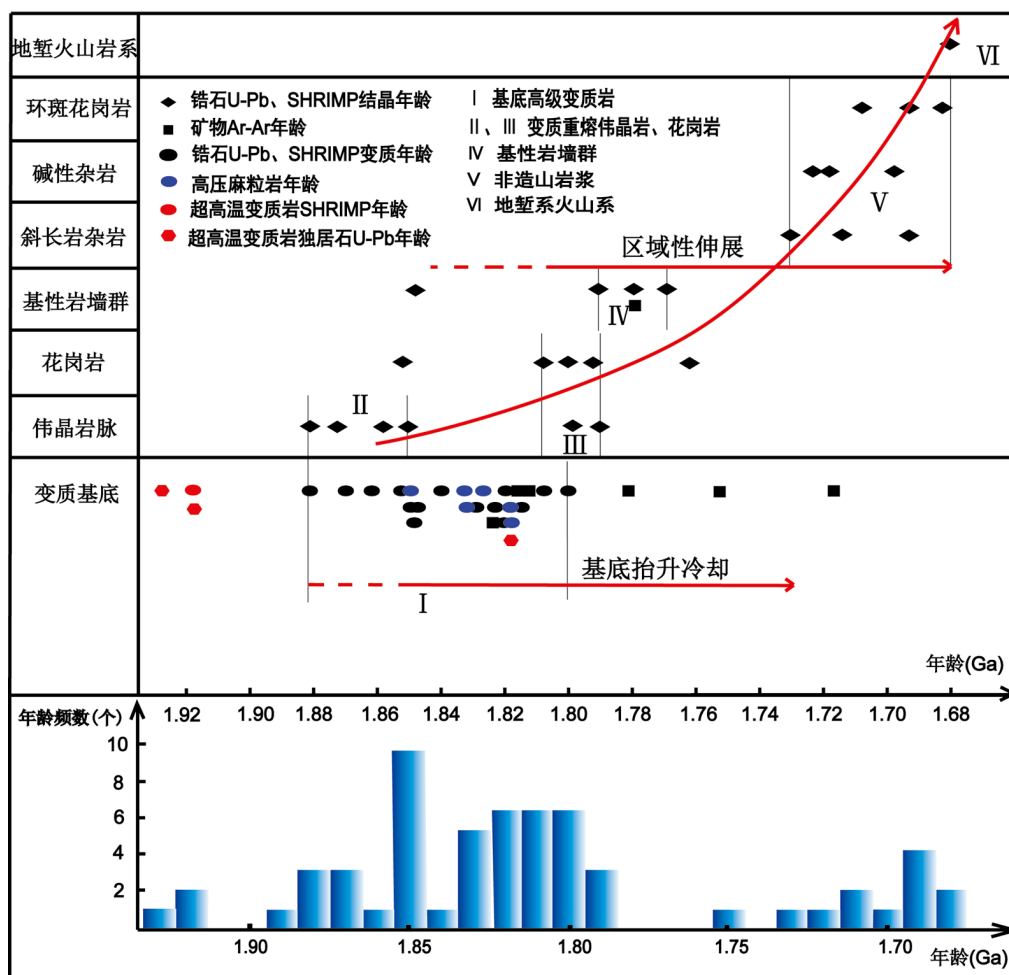


图5 华北北部基底构造热事件序列 (据李江海等, 2006修改)

Fig. 5 Thermo-tectonic events series of North China Craton basement

尔卑斯地区可能存在。已发现的超高温麻粒岩与高压-超高压变质岩地质年代的分布上具有不同趋势,前者主要发育于泛非期及其之前的时代,后者发育于古元古代以来的时代,且集中发育在显生宙,两者分布在古元古代末期有交叠演化趋势。内蒙古中南部超高温变质岩带和高压麻粒岩带相邻分布且产状相似、峰期变质作用年代一致,变质地温梯度截然不同,组成了高温型双变质带。

2) 内蒙古中南部高温型双变质带可能反映了不同层次地壳物质在早前寒武纪碰撞作用中经历了P-T演化截然不同的变质作用。两条变质带在经历了各自的峰期变质作用后,作为一个共同的地体抬升。从其组合和变质时代来看,内蒙古中南部高温型双变质带中的两个截然不同的变质带更有可能是同一次构造事件的结果。超高温变质作用被解释为华北克拉通沿其北缘经历了一次古元

古代深俯冲和大陆碰撞造山事件的结果,之后广泛分布的1.80 Ga及其之后的岩墙群侵位表明了地壳的拉伸和造山带的垮塌,并指示造成超高温变质作用的热异常可能与幔源岩浆作用有关。也有观点强调大约在1 900 Ma,有地幔上涌并伴随辉长岩浆的底侵作用,引起大青山-丰镇的超高温变质作用(翟明国, 2007)。从超高温变质岩和高压麻粒岩各自峰期的P-T条件来看,高压麻粒岩位于地壳更深层次,但是峰期地温梯度却不及超高温变质岩。根据现今板块构造理论,能造成类似这样地温梯度异常的构造环境主要为俯冲-碰撞带。因此,可以认为内蒙古中南部高温型双变质带的形成与古元古代华北克拉通沿其北缘的一次陆陆碰撞造山作用有关,在碰撞下盘由于俯冲导致了高压麻粒岩变质作用,在其上盘则由于软流圈上涌导致了超高温变质作用。

但是关于内蒙古中南部高温型双变质带仍然还有许多问题亟待解决, 其具体的成因以及演化过程尚不清楚。开展超高温变质带与高压麻粒岩带的对比研究, 为认识早期构造背景、地壳热演化, 特别是板块构造、不同地壳层次的构造作用提供了难得的科学机遇。

## Reference:

- Brown M. 2007. Metamorphism, plate tectonics, and the supercontinent cycle [J]. *Earth Science Frontiers*, 14 (1): 1–18.
- Guo Jinghui, Chen Yi, Peng Peng, et al. 2006. Sapphirine bearing granulite from Daqingshan, Inner Mongolia: 1.8 Ga Ultrahigh-temperature metamorphism [C]. Abstract of Petrological Conference, Nanjing University, 215–218.
- Guo J H, Sun M, Chen F K, et al. 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]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24 (5): 629–642.
- Guo Jinghui, Shi Xin, Bian Aiguo, et al. 1999. Pb isotopic composition of feldspar and U–Pb age of zircon from early Proterozoic granite in Sanggan area, North China craton: Metamorphism, crustal melting and tectono-thermal event [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15 (2): 199–207. (in Chinese with English abstract)
- Guo Jinghui, Zhai Mingguo, Zhang Yigang, et al. 1993. Early Precambrian Manjinggou highpressure granulite melange belt on the south edge of the Huaian complex, North China Craton: geological features, petrology and isotopic geochronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9 (4): 329–341. (in Chinese with English abstract)
- Harley S L. 1998a. On the occurrence and characterization of ultrahigh-temperature crustal metamorphism [J]. *Spec. Publ. Geol. Soc. London*, 138: 81–107.
- Harley S L. 1998b. Ultrahigh temperature granulite metamorphism (1050 Ma, 12 kbar) and decompression in garnet (Mg70)-orthopyroxene-sillimanite gneisses from the Rauer Group, East Antarctica [J]. *J. Metamorphic Geol.*, 16: 541–562.
- Kelsey D E. 2007. On ultrahigh-temperature crustal metamorphism [J]. *Gondwana Research*, in press.
- Kroner A, Wilde S, Li Jianghai, et al. 2005. Age and evolution of a late Archean to early Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 577–595.
- Li Jianghai, Liu Shoujie, Hou Guiting. 2006. Properties and tectonic genesis model of late Paleoproterozoic tectono-thermal events in central North China [J]. *Geology in China*, 33 (6): 1256–1266. (in Chinese with English abstract)
- Li Jianghai, Qian Xianglin, Zhai Mingguo. 1997. The tectonic division of North China granulite facies belt and its early Precambrian tectonic evolution [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 32 (3): 254–266. (in Chinese with English abstract)
- Li Jianghai, Zhai Mingguo, Qian Xianglin, et al. 1998. The geological occurrence, regional tectonic setting and exhumation of Late Archean high pressure granulite within the high grade metamorphic terrains, north to central portion of North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14 (2): 176–189. (in Chinese with English abstract)
- Liu Shoujie, Li Jianghai. 2007. Review of ultrahigh temperature (UHT) metamorphism study: a case from North China Craton [J]. *Earth Science Frontiers*, 14 (3): 131–137. (in Chinese with English abstract)
- Liu Shoujie, Li Jianghai, Santosh M. 2008. Ultrahigh temperature metamorphism of Tuguiwula khondalite belt, Inner Mongolia: metamorphic reaction texture and P–T indication. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (6): 1185–1192. (in Chinese with English abstract)
- Lu Liangzhao, Xu Xuechun, Liu Fulai. 1996. The Precambrian Khondalite Series in the North of China [M]. Changchun: Changchun Publishing House, 39–58. (in Chinese with English abstract)
- Lu Liangzhao. 1991. Metamorphic PTt path of the Archean granulite-facies terrane in Jining district, Nei Mongol, and its tectonic significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 7 (4): 1–12. (in Chinese with English abstract)
- O'Brien P J, Walte N and Li J H. 2005. The petrology of two distinct granulite types in the Hengshan Mts, China, and tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 615–627.
- Qian Xianglin, Li Jianghai. 1999. Discovery of Neoproterozoic unconformity and its implication for continental cratonization of North China craton [J]. *Science in China, Ser. D*, 29 (1): 1–8. (in Chinese)
- Rogers J J W, Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent [J]. *Gondwana Res.*, 5: 5–22.
- Santosh M, Wilde S A and Li J H. 2007b. Timing of Paleoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism in the North China Craton: Evidence from SHRIMP U–Pb zircon geochronology [J]. *Precambrian Research*, in press.
- Santosh M, Tsunogae T, Li J H, et al. 2007a. Discovery of sapphirine-bearing Mg–Al granulites in the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic ultrahigh temperature metamorphism [J]. *Gondwana Research*, 11 (3): 263–285.
- Santosh M, Sajeev K and Li J H. 2006. Extreme crustal metamorphism during Columbia supercontinent assembly: evidence from North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 10 (3–4): 256–266.
- Tao Jixiong and Hu Fengxiang. 2002. The formation of the garnet-bearing migmatitic granite in Zhuozishan area, Inner Mongolia, China [J]. *Progress in Precambrian Research*, 25 (1): 59–64. (in Chinese with English abstract)
- Wang Renmin, Chen Zhenzhen and Chen Fei. 1991. Grey tonalitic gneiss and high-pressure granulite inclusions in Hengshan, Shanxi province, and their geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 7 (4) 36–45. (in Chinese with English abstract)
- Wu Changhua and Zhong Changting. 1998. Early Proterozoic SW→NE collision model for the central part of the North China craton: implications for tectonic regime of the khondalite downward into lower crust in Jin–Meng high-grade region [J]. *Progress in Precambrian Research*, 21 (3), 28–50. (in Chinese with English abstract)
- Zhai M G. 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China craton: a review [J]. *Precambrian Research*, 122: 183–199.
- Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Li Yonggang. 1994. Rock units of the Archean granulite terrain in joining region of Shanxi–Hebei–Nei Mongol of North China: their properties, mutual relations and evolution [M] // Qian Xianglin and Wang Renmin. *Geologic Evolution of Granulite Belt in Northern North China*. Seismic Press, 1994, 21–31. (in Chinese with English abstract)

- Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Yan Yuehua, et al. 1992. The discovery of high-pressure basic granulite in the Archaean North China Craton and preliminary study [J]. *Science in China, Ser. B*, 12: 1325–1300. (in Chinese)
- Zhai Mingguo, Peng Peng. 2007. Paleoproterozoic events in the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (11): 2665–2682. (in Chinese with English abstract)
- Zhai M G, Guo J H, Liu W J. 2005. Neoarchean to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: a review [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 547–561.
- Zhang Jiasheng, Lao Qiuyuan and Li Yan. 1999. Tectonic implication of aeromagnetic anomaly and evolution of Huabei–south Tarim–Yangtze superlandmass [J]. *Earth Science Frontiers*, 6 (4): 379–390. (in Chinese with English abstract)
- Zhang Jiasheng, Li Yan, Huang Xiongnan. 2007. Paleoproterozoic crust–scale transtensional shear, detachment and insialic mobile belts in North China: geologic and tectonic implications for the NE-striking linear aeromagnetic anomaly [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 42 (2): 267–302. (in Chinese with English abstract)
- Zhang Jiasheng. 1997. Extension and uplift of the Datong–Huaian granulite terrain [J]. *Geological Review*, 43 (5): 503–514. (in Chinese with English abstract)
- Zhang Lifei. 2007. Extreme metamorphism: the frontier of metamorphic geology [J]. *Earth Science Frontiers*, 14 (1): 33–42. (in Chinese with English abstract)
- Zhang J S, Dirks P, Passchier C W. 1994. Extensional collapse and uplift in a polymetamorphic granulite terrain in the Archean and Paleoproterozoic of north China [J]. *Precambrian Research*, 67: 37–57.
- 郭敬辉, 陈意, 彭彭, 等. 2006. 内蒙古大青山假蓝宝石麻粒岩——1.8 Ga 的超高温变质作用[C]. 2006年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要. 中国南京, 215–218.
- 郭敬辉, 石昕, 卞爱国, 等. 1999. 桑干地区早元古代花岗岩Pb同位素组成和锆石U–Pb年龄: 变质与地壳熔融作用及构造热事件演化 [J]. *岩石学报*, 15 (2): 199–207.
- 郭敬辉, 翟明国, 张毅刚, 等. 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[J]. *岩石学报*, 9 (4): 329–341.
- 李江海, 刘守偈, 侯贵廷. 2006. 华北中部古元古代末期构造–热事件性质及其构造成因模式[J]. *中国地质*, 33 (6): 1256–1266.
- 李江海, 翟明国, 钱祥麟, 等. 1998. 华北中北部晚太古代高压麻粒岩的地质产状及其出露的区域构造背景[J]. *岩石学报*, 14 (2): 176–189.
- 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[J]. *地质科学*, 32 (3): 254–266.
- 刘守偈, 李江海. 2007. 超高温变质作用: 以华北内蒙古土贵乌拉地区为例[J]. *地学前缘*, 14 (3): 131–137.
- 刘守偈, 李江海, M. Santosh. 2008. 内蒙古土贵乌拉孔兹岩带超高温变质作用: 变质反应结构及P–T指示[J]. *岩石学报*, 24 (6): 1185–1192.
- 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, 39–58.
- 卢良兆. 1991. 内蒙集宁地区太古宙麻粒岩相变质作用的PTn轨迹及其大地构造意义[J]. *岩石学报*, 7 (4): 1–12.
- 钱祥麟, 李江海. 1999. 华北克拉通新太古代不整合事件的确定及其大陆克拉通构造演化意义[J]. *中国科学D辑*, 29 (1): 1–8.
- 陶继雄, 胡凤翔. 2002. 内蒙卓资山地区深熔作用形成的石榴混合花岗岩[J]. *前寒武纪研究进展*, 25 (1): 59–64.
- 王仁民, 陈珍珍, 陈飞. 1991. 恒山灰色片麻岩和高压麻粒岩包体及其地质意义[J]. *岩石学报*, 7 (4): 36–45.
- 吴昌华, 钟长汀. 1998. 华北陆台中段吕梁期的SW–NE向碰撞——晋蒙高级区孔兹岩系进入下地壳的构造机制[J]. *前寒武纪研究进展*, 21 (3): 28–50.
- 翟明国, 郭敬辉, 李永刚. 1994. 晋冀蒙交界地区高压基性麻粒岩带及其相邻岩石组合的性质[M] // 钱祥麟, 王仁民. 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 21–31.
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 等. 1992. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及其初步研究[J]. *中国科学B辑*, 12: 1325–1300.
- 翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件[J]. *岩石学报*, 23 (11): 2665–2682.
- 张家声, 劳秋元, 李燕. 1999. 航磁异常的构造解释和华北–塔南–扬子超陆块演化[J]. *地学前缘*, 6 (4): 379–390.
- 张家声, 李燕, 黄雄南. 2007. 中国北部古元古代地壳尺度的伸展拆离和硅铝壳内活动带: 北东向线性航磁异常的地质构造解释[J]. *地质科学*, 42 (2): 267–302.
- 张家声. 1997. 大同–怀安麻粒岩地体的伸展抬升[J]. *地质论评*, 43 (5): 503–514.
- 张立飞. 2007. 极端条件下的变质作用–变质地质学研究的前沿[J]. *地学前缘*, 14 (1): 33–42.

## 参考文献: