

# 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

初航<sup>1)</sup>, 王惠初<sup>1)</sup>, 魏春景<sup>2)</sup>, 刘欢<sup>1)</sup>, 张阔<sup>1)</sup>

1)中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170;

2)北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

**摘要:**冀北承德一带的高压麻粒岩多呈弱应变域构造透镜体, 出现于由花岗片麻岩组成的宽阔的复式剪切带内, 其代表的深部地壳热运动及相应的折返机制对华北克拉通的碰撞造山模式和克拉通构造演化模式研究有着重要的制约作用。冀北承德高压麻粒岩及其围岩的锆石 U-Pb 同位素定年结果显示, 围岩原岩年龄约 2500 Ma, 大约在 2297 Ma 基性岩侵入花岗片麻岩, 在大约 2381 Ma 后开始俯冲, 经历高压麻粒岩相变质, 经历俯冲及长期地壳加厚过程, 于 2001 Ma 之后某个时间开始折返, 在此过程中 1896 Ma 还有另外一期基性岩墙侵入, 在 1885 Ma 经历了抬升过程与麻粒岩相退变质, 而在 1850 Ma 经历了华北大面积高角闪岩相事件, 甚至有部分熔融出现, 此事件抹杀了大部分古元古代变质演化过程。由此可见, 承德地区甚至整个华北北部古元古代地质演化历史并不是不同地点的一两期不同事件, 而是一个复杂连续的演化过程, 以往的研究只揭示了一期或两期事件, 而承德地区高压麻粒岩的证据则记录了更多信息。

**关键词:** 锆石微区微量元素; 年代学; 高压基性麻粒岩; 承德; 华北

中图分类号: P588.347; P597.1 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.06.18

## The Metamorphic Evolution History of High Pressure Granulites in Chengde Area, Northern Margin of North China: Zircon Chronology and Geochemical Evidence

CHU Hang<sup>1)</sup>, WANG Hui-chu<sup>1)</sup>, WEI Chun-jing<sup>2)</sup>, LIU Huan<sup>1)</sup>, ZHANG Kuo<sup>1)</sup>

1) *Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170;*

2) *School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871*

**Abstract:** High pressure granulites in Chengde area of northern Hebei province occur as tectonic lenses with weak deformation in a wide composite shear zone composed dominantly of granitic gneiss. The deep crust thermal dynamics and exhumation mechanism demonstrated by these granulites play a critical role in the study of the collisional orogenic model of North China craton and the tectonic evolution model of North China craton as a whole. According to the result of U-Pb isotopic dating for these high pressure granulites and their surrounding rocks, the age of the surrounding protolith is ca. 2500 Ma. At around 2297 Ma, basic rock intruded granitic gneiss. At around 2381 Ma, subduction started, and then there occurred high-pressure-granulite-phase metamorphism. Following the subduction and a long-term crust thickening process, the exhumation at a certain point began after 2001 Ma. During the exhumation process, another basic dike invaded at around 1896 Ma. At 1885 Ma, the uplifting process and granulite-phase retrograde metamorphism took place. At 1850 Ma, a large part of North China experienced high-amphibolite phase metamorphic event including even partial melt. This event destroyed

本文由国家青年自然科学基金项目(编号: 40902021)、国家自然科学基金项目(编号: 40772120)和中国地质调查局地质大调查项目(编号: 1212011121077)联合资助。

收稿日期: 2012-08-29; 改回日期: 2012-10-12。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 初航, 男, 1982年生。助理研究员。主要从事前寒武纪地质学和变质地质学研究。E-mail: chuhangjal@sina.com。

most part of the Paleoproterozoic metamorphic evolution. It can thus be seen that Paleoproterozoic geological evolution history in Chengde area or even the whole northern part of North China was not one or two phases of independent events that happened in different places. Instead, it was a complex and continuous process. Previous studies only revealed events of a few stages, whereas the high pressure granulites in Chengde area have recorded much more information.

**Key words:** trace element in zircons; chronology; high pressure basic granulite; Chengde; North China

早在 20 世纪 60 年代, Green 等(1967)就提出了高压麻粒岩的概念,但一直并没有得到足够的重视。直到 80 年代末至 90 年代以来,在世界许多地区不断有高压麻粒岩的报道。例如:南非林波波带(Droop, 1989)、坦桑尼亚的泛非造山带以及津巴布韦造山带(Carney et al., 1991)、西北欧—格陵兰加里东造山带(Dallmeyer et al., 1992)、西伯利亚阿尔丹地盾南部(Moskovchendo et al., 1993)、北美加拿大地盾(Snoeyenbos et al., 1995)、北美格林威尔造山带(Indares, 1996)、中欧波希米亚地块(O'Brien, 1997)、东南极(DI Vincenzo et al., 1997)、欧洲瑞芬造山带(Möller, 1998)等。近年来一些地质学家针对各类高压麻粒岩的研究进行了细致的归纳总结(Bohlen, 1987; Harley, 1989; O'Brien et al., 2003)。2002 年,在北京召开了彭罗斯会议,专题讨论高压麻粒岩的研究进展。高压麻粒岩本身和其所代表的深部地壳热运动及相应的折返机制一直是岩石学研究领域的热点问题。

与国外研究同步,中国学者在华北克拉通中也发现了很多高压麻粒岩,如恒山(王仁民等, 1991)、怀安(翟明国等, 1992, 1995; 耿元生等, 1994; 钟长汀, 1999)、桑干构造带(郭敬辉等, 1993, 1998)、豫南(翟淳等, 1995)、滦平—承德(李江海等, 1998)、莱西(刘文军等, 1998)、恒山西段(郭敬辉等, 1999)、建平(魏春景等, 2001)、栖霞(周喜文等, 2004)等。华北克拉通高压基性麻粒岩的发现对研究华北地区早前寒武纪大陆演化具有重要意义(王仁民等, 1991; 翟明国, 1991; 翟明国等, 1992; 郭敬辉等, 1993), Zhao 等(1999)将出露于恒山、迁怀、承德、辽西等地的麻粒岩相岩石归结为中央构造带。在国内外的广泛关注下,很多学者对华北地区很多出露高压麻粒岩的地点进行大量的研究,取得了重要的进展。在众多研究成果的推动下,翟明国(2009)总结了华北克拉通早前寒武纪高温高压麻粒岩及其相关问题,对近年来的研究成果进行了细致的总结和评论,并提出需要进一步研究的关键问题,认为有关华北北部麻粒岩的变质作用、变质时代、产状与分布、变形历史等问题都还需要进一步探索。

很多学者对承德地区的高压基性麻粒岩进行了研究。毛德宝等(1999)认为该区高压基性麻粒岩至少包含三期变质矿物组合。早期矿物组合为  $\text{Grt}+\text{Cpx}+\text{Qtz}$ , 温度为  $710 \sim 750^\circ\text{C}$ , 由于没有斜长石而未能估算变质压力; 第二期矿物组合为  $\text{Grt}+\text{Cpx} \pm \text{Opx} \pm \text{Hb} + \text{Pl}$ , 温度为  $750 \sim 800^\circ\text{C}$ , 压力为  $1.0 \sim 1.2 \text{ GPa}$ ; 第三期矿物组合为  $\text{Hb} + \text{Pl} \pm \text{Zr} \pm \text{Qtz}$ , 温度压力为  $630 \sim 680^\circ\text{C}$ ,  $0.5 \sim 0.7 \text{ GPa}$ 。从年代学数据看,显示了复杂的变质历史,承德高压麻粒岩原岩年龄为  $(2550 \pm 21) \text{ Ma}$ (Sm-Nd), 高压变质于  $(2439.1 \pm 0.3) \text{ Ma}$ (锆石 U-Pb), 被围岩花岗片麻岩侵入、支解、改造并携带上升的年龄为  $(1817 \pm 17) \text{ Ma}$ (锆石 U-Pb)(毛德宝等, 1999; 李江海等, 2000)。但是还有很多重要地质问题并不清楚,比如麻粒岩与围岩的关系问题以及峰期变质条件和时代问题等。

本文的目的在于: 1) 阐述华北北部承德地区出露的高压基性麻粒岩的岩相学和矿物学特征; 2) 利用锆石同位素年代学和微量元素地球化学的方法, 对高压基性麻粒岩及其围岩的锆石进行微区原位分析, 结合岩相学和变质 PT 轨迹, 说明高压基性麻粒岩变质作用的演化特点; 3) 对华北北部承德地区地质演化提出新的认识和看法。

## 1 区域地质概况及高压麻粒岩野外特征

华北克拉通北缘中段的早前寒武纪地体可划分为北部红旗营子古元古代代表壳岩带和南部桑干—单塔子新太古代杂岩带, 以及沿构造带分布的高压麻粒岩带三个构造岩石单元(钟长汀等, 2001)。其中冀北承德地区高压麻粒岩带, 介于丰宁—隆化断裂和承德—滦平断裂之间, 宽约  $20 \sim 40 \text{ km}$ , 可分两个亚带: 北亚带主要由花岗闪长岩、石英二长花岗岩、钾长花岗岩等同(后)构造花岗岩和红旗营子群表壳岩岩片组成。南亚带主要由出现于花岗片麻岩-TTG 片麻岩内的高压麻粒岩透镜体、改造的单塔子—桑干杂岩、强烈韧性变形的花岗质片麻岩和钾长花岗岩组成。

承德高压基性麻粒岩一般呈透镜体产于大面积分布的花岗质片麻岩中。透镜体大小不一, 最大的

有几十米长。麻粒岩呈灰黑色和黑红色, 主要由石榴石、单斜辉石以及少量斜长石或石英组成, 具明显的斑状变晶结构, 变斑晶为大小不等的红色石榴石, 石榴石具白色冠状后生合晶边(白眼圈结构)。由于在更晚期的退变质作用中, 斜长石和角闪石部分或全部取代了早期变质矿物, 部分高压基性麻粒岩, 尤其是透镜体边部的岩石已变成了石榴斜长角闪岩。围岩主要是花岗质片麻岩, 遭受强烈糜棱岩化, 且围岩与麻粒岩接触部位的片麻理围绕透镜体生长。样品采集地如图 1 所示。

## 2 岩相学特征

08JB01-1 和 D0416 为高压基性麻粒岩样品, 均采自承德北双滦至隆化公路西侧, 单塔子南, 铁厂后侧尾矿堆旁(坐标: 北纬 40°59'52.79", 东经 117°49'14.64"), 岩石为柱粒状变晶结构, 块状构造。主要由角闪石、透辉石、斜长石、石英和石榴石组成。其中石榴石含量 10%~15%, 呈肉红色等轴粒状, 沿裂隙被绿泥石交代, 粒径为 0.8~3.6 mm。角闪石含量 20%~25%, 呈绿色、黄绿色柱状, 局部绿泥石化、被黑云母交代, 粒径为 0.04~3.4 mm。透辉石 20%~25%, 呈淡绿色短柱状,

有的成堆分布, 0.2~3 mm。斜长石 20%~25%, 呈它形粒状, 具土化、绢云母化, 粒径大约为 0.6 mm。石英 15%~20%, 呈它形粒状, 粒内具波状消光和亚颗粒, 粒径为 0.4~12 mm。另外含有少量楣石、锆石, 并有次生褐铁矿存在。

09JB34-1 定名为含透辉石榴二长角闪岩, 采自承德北双滦至隆化公路西侧, 单塔子南, (坐标: 北纬 40°59'53.17", 东经 117°49'8.24")。岩石为变余半自形粒状结构, 块状构造。岩石由斜长石、钾长石、角闪石、石榴石、石英、透辉石组成。含斜长石 15%、钾长石 15%: 呈它形粒状, 镶嵌状分布, 粒径 0.15~0.8 mm, 斜长石局部绢云母化、黝帘石化。石英 20%: 呈它形粒状, 多拉长定向排列, 大小 0.2~4.5 mm, 粒内波状消光。角闪石 30%: 呈它形柱状, 粒径 0.15~2 mm, 杂乱或似条纹状分布。透辉石 5%: 它形柱粒状, 杂乱分布, 大小 0.1~0.6 mm。石榴石 15%: 呈它形粒状, 杂乱分布, 大小 0.7~8 mm, 内嵌布它形粒状石英。还有少量黝帘石和黑云母。

08JB01-2 和 D0416-1 是高压麻粒岩的围岩, 采样位置同 08JB01-1。定名为糜棱岩化片麻岩, 鳞片粒状变晶结构, 片麻状构造。岩石主要由钾长石、斜长石、石英和少量黑云母组成。其中含钾长石约

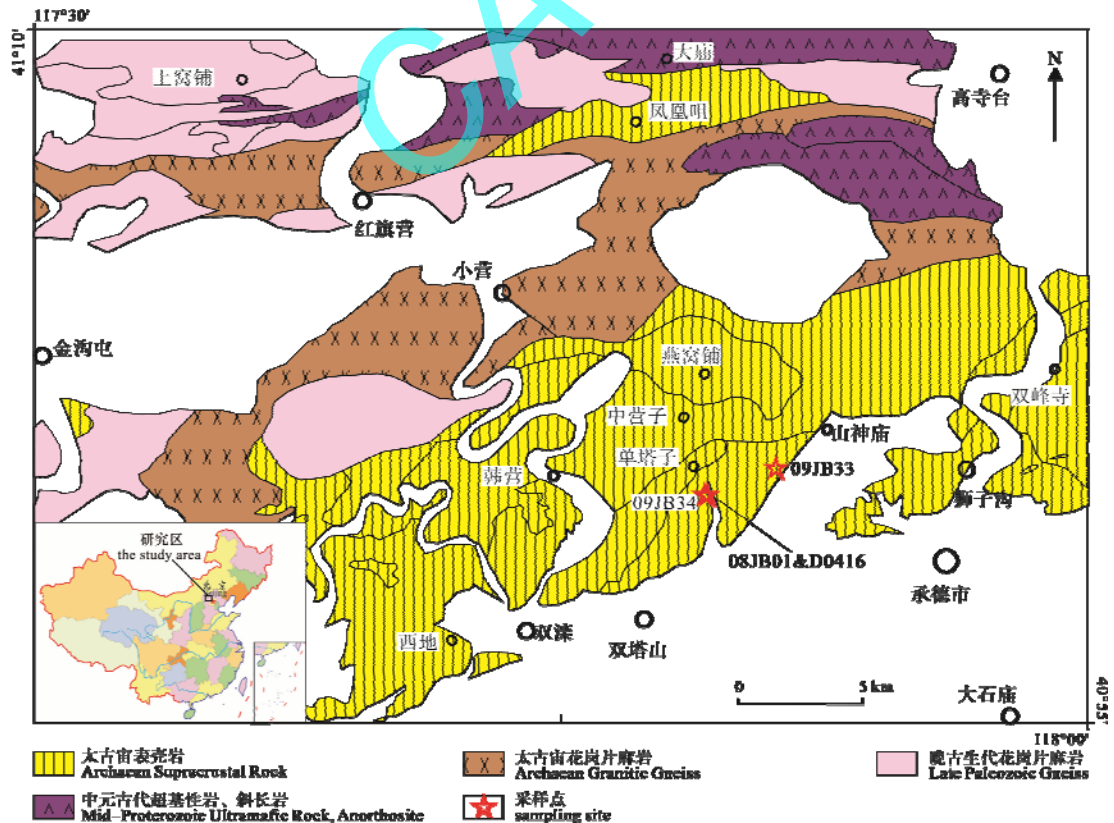


图 1 冀北承德地区前寒武纪地质简图

Fig. 1 Precambrian geological sketch map of Chengde area in northern Hebei Province

40%，为微斜微纹长石，呈它形-半自形粒状，高岭土化，粒径为 0.2~1.4 mm。斜长石 30%~35%，呈它形粒状，具绢云母化、高岭土化，与钾长石接触边部常见交代蠕英石，粒径约为 0.08~2.4 mm。石英 25%~30%，呈它形粒状，粒内具波状消光和亚颗粒，粒径为 0.2~5 mm。还有少量黑云母呈褐色片状。

09JB33-1 为含石榴透辉斜长角闪岩，采自承德北山神庙到单塔子公路旁的一个基性岩墙中(坐标:北纬 41°0'30.68", 东经 117°51'6.86")。岩石细粒，均匀未变形，或变形弱，柱粒状变晶结构，块状构造。岩石由斜长石、角闪石、透辉石、少量石榴石、石英组成。斜长石 35%、石英 5%，呈它形粒状-近等轴粒状，镶嵌状分布，粒径 0.2~0.5 mm。角闪石 40%，呈它形粒柱状，粒径 0.15~0.6 mm，均匀分布。透辉石 15%，呈它形粒状，杂乱分布，粒径 0.1~0.3 mm。石榴石 5%，呈等轴粒状，星散分布，粒径 0.07~0.2 mm。另外含有少量不透明矿物。

样品 09JB33-2 是含石榴透辉斜长角闪岩脉(09JB33-1)周围的黑云钾长浅粒岩，为含鳞片粒状变晶结构，似片麻状构造。由斜长石、微斜长石、石英、少量黑云母组成。斜长石 25%，呈它形粒状，杂乱分布，粒径 0.3~0.8 mm，具绢云母化，有些被微斜长石蠕虫状交代。微斜长石 50%：呈它形粒状，略显拉长定向排列，粒径 0.3~1.5 mm。石英 15%：呈它形粒状，单晶集合体呈豆荚状分布，大小 0.2~2 mm，粒内波状消光。黑云母 10%：呈鳞片-叶片状，粒径 0.1~0.6 mm，为断续线痕状分布，长轴定向排列，局部绿泥石化。

### 3 锆石原位微区U-Pb同位素定年

#### 3.1 锆石处理及测试分析方法

锆石分选工作在河北省廊坊市区域地质矿产调查研究所实验室完成。新鲜的全岩标本经过破碎后通过人工重砂法从样品中分选出锆石颗粒，按照宋彪等(2002)描述的方法，首先将这些锆石和标样贴在用环氧树脂做成的样品靶上。再经过抛光、超声波处理，然后进行反射光和透射光照相，并进行 CL 图像分析以研究锆石的内部结构。

采用离子探针和激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱两种方法进行了锆石定年研究。锆石的 SHRIMP U-Pb 分析在中国地质科学院北京离子探针中心的 SHRIMP II 上完成。样品分析过程见 Compston 等(1992)的文章。测试标样为 TEMORA1，

年龄为 417 Ma,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}=0.6688$ 。测试数据处理采用 Kenneth R. Ludwig 编写的 Squid(1.03 版本)和 Isoplot 3 程序(Ludwig, 2003)。

激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)锆石微区原位 U-Pb 同位素测定在中国地质调查局天津地质矿产研究所实验室进行，实验步骤见李怀坤等(2009)。利用 NIST610 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。采用 GJ-1 作为外部锆石年龄标准进行 U、Pb 同位素分馏校正(Black et al., 2003; Jackson et al., 2004)。数据处理采用中国地质大学刘勇胜博士研发的 ICP-MSDataCal 程序(Liu et al., 2009)和 Ludwig 的 Isoplot 程序(Ludwig, 2003)进行数据处理。

锆石微区原位 U-Pb 同位素及微量元素测定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行，利用激光烧蚀等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)，实验步骤见 Liu 等(2008)文章。采用 91500 作为外部锆石年龄标准进行 U、Pb 同位素分馏校正，采用 GJ-1 作为检测标样。数据处理采用中国地质大学刘勇胜博士研发的 ICP-MSDataCal 程序(Liu et al., 2009)和 Ludwig 的 Isoplot 程序(Ludwig, 2003)。

#### 3.2 锆石U-Pb定年结果及其稀土元素特征

##### 3.2.1 基性高压麻粒岩(石榴斜长角闪岩):

08JB01-1(图 2)锆石较大，从阴极发光图像看，全部为变质锆石，大小均匀，U、Pb 含量较低，共分析了 11 颗锆石(SHRIMP)，其中 3、4、8 号点分析了核边，从年龄结果看，核部比边部稍老， $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄加权平均值核部为(1868±33) Ma，边部为(1826±18) Ma，Th/U=0.01~0.25，也显示了变质锆石特征。锆石原位微量元素(见图 7a)测定显示核部(21、23 号点)存在 Eu 正异常特征，而边部(22、24 号点)存在 Eu 负异常特征。如果这代表变质过程的两个阶段，则说明此变质过程第二阶段有长石生长，从变质矿物演化规律来看，这是一期退变质过程。

D0416(图 3)，锆石较大，大小不一，阴极发光图像显示锆石结构分成几种：黑色核部的锆石，白色核部的锆石，整体灰色的锆石，灰色的锆石边部。同位素年龄结果显示(部分为 SHRIMP 测试点，部分为 LA-ICP-MS 测试点)，黑色或白色的核部，年龄较大(2398±13) Ma，可能不是变质锆石(Th/U 都大于 0.4，甚至到 0.5 以上)，灰色的分几种情况(Th/U 都小于 0.1 或 0.1 左右)，一种年龄平均为(1878±12) Ma，比较集中，而其它的从 2001 Ma 到

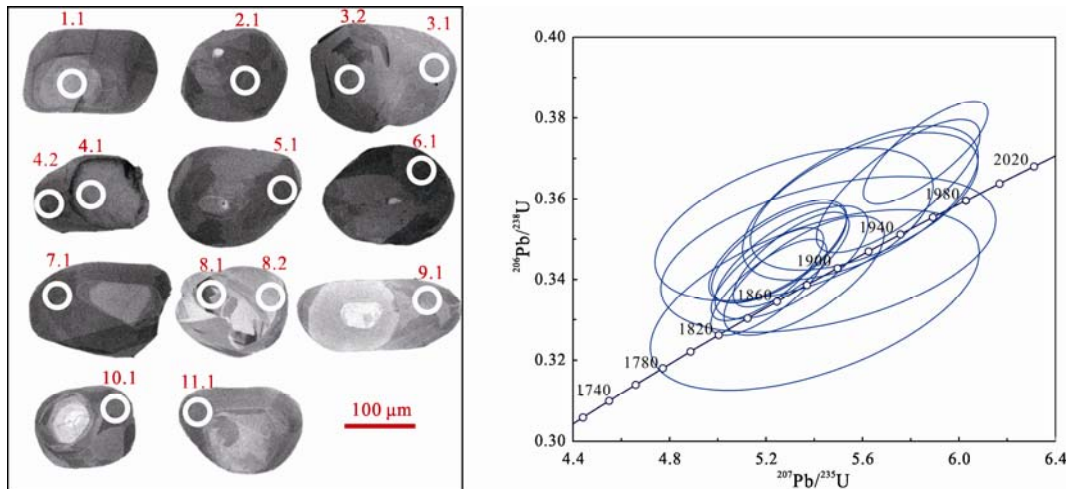


图 2 08JB01-1 锆石阴极发光图像、U-Pb 年龄谐和图

Fig. 2 Cathodoluminescence images and U-Pb concordia diagram of zircons (08JB01-1)

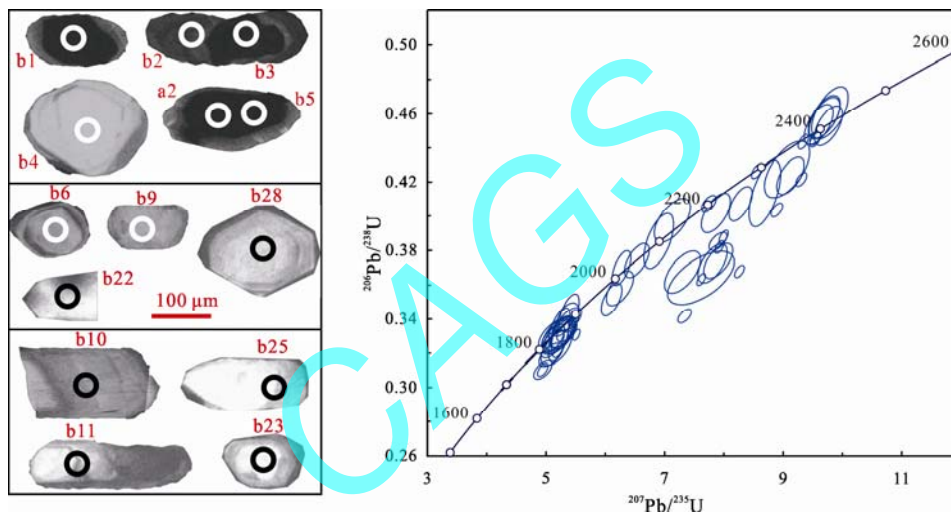


图 3 D0416 锆石阴极发光图像、U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 Cathodoluminescence images and U-Pb concordia diagram of zircons (D0416)

2381 Ma 都有(不包含铅丢失的样品, 铅丢失的样品上交点年龄大约为 $(2425 \pm 44)$  Ma)。锆石原位微量元素测定(见图 7b)显示核部重稀土相对边部要高一些, 这说明锆石核部生长时岩石体系内重稀土富集的矿物并没有大量生成(比如石榴石等), 结合 Th/U 特征, 表明核部锆石代表了原岩特征, 高压麻粒岩原岩年龄应该为 $(2398 \pm 13)$  Ma。边部的 $(1878 \pm 12)$  Ma 为退变质年龄, 即高压麻粒岩抬升年龄, 所有中间年龄 2001 Ma 到 2381 Ma 则代表了真正高压麻粒岩相变质的年龄, 虽然时间较长, 也正说明了此时的高压麻粒岩在较深处停留时间较长, 不算太高的温度条件使得结晶的锆石得以保存。也可能 $(1878 \pm 12)$  Ma 代表变质年龄, 而其他的较老的年龄数据(包括 $(2398 \pm 13)$  Ma), 则反映原岩年龄遭受不同的程度变质作用改造后的结果。

09JB34-1(图 4)锆石较大, 从阴极发光图象来看, 锆石结构复杂, 大部分具有黑色的核, 浅色的幔部, 深色的边, 或者具备其中的一两种结构。从 29 颗锆石 50 个点的测定结果(LA-ICP-MS)来看, 核部数据不太和谐, 可能是由于 U、Pb 含量太高而造成仪器偏差, 年龄谐和度不高, 不是变质成因(Th/U 都大于 0.4, 甚至到 5 以上)。锆石核部原位微量元素(见图 7c)测定显示核部重稀土相对较高, 说明锆石核部生长时岩石体系内重稀土富集的矿物并没有大量生成, 特征同 D0416 核部锆石, 另外 Eu 负异常的特征也说明了原岩斜长石大量存在。幔部跟边部数据谐和度较好, 幔部 $(1896 \pm 9)$  Ma(Th/U 都小于 0.1 或 0.1 左右), 而且 Eu 负异常特征显示了此阶段斜长石含量增加, 应该归属退变质期次。黑色的边部 $(1877 \pm 14)$  Ma 也是变质年龄(Th/U 都小于 0.1 或 0.1 左右), 但边部

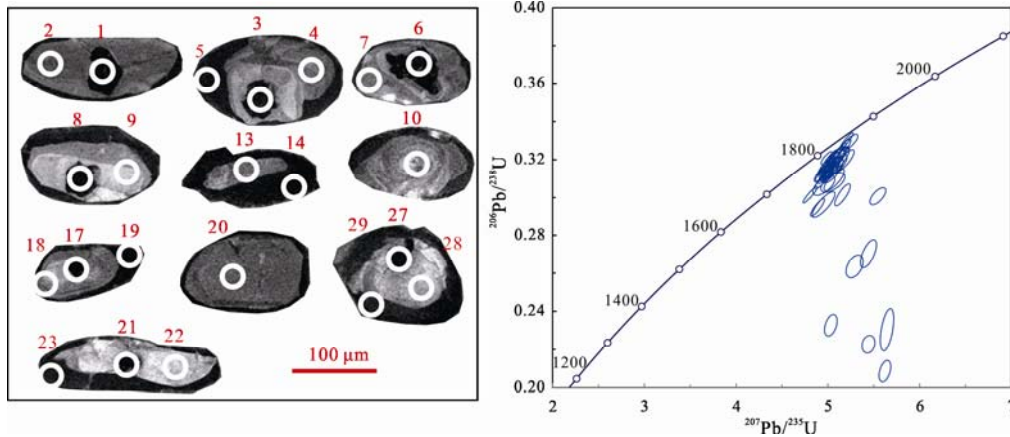


图 4 09JB34-1 锆石阴极发光图像、U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Cathodoluminescence images and U-Pb concordia diagram of zircons (09JB34-1)

Eu 并无负异常特征, 加上岩石出熔浅色条带, 证明了此期变质有熔体生成, 斜长石减少或消失, 使得岩石体系内 Eu 含量正常。

### 3.2.2 基性岩墙

09JB33-1(图 5)(斜长角闪岩, 基性岩墙), 锆石大小不一, 形态各异, 从阴极发光图象看, 较大的锆石很多具有颜色较浅的核部(LA-ICP-MS), 平均年龄( $1894 \pm 10$ ) Ma, 无负 Eu 异常(见图 7d), 长石并没有结晶。而颜色较深的锆石年龄( $1852 \pm 4$ ) Ma(此类锆石结构与 08JB01-1 的锆石类似), Eu 的负异常(见图 7d)说明了锆石结晶时存在斜长石。另外还有两颗有环带的锆石, 年龄 2517 Ma 和 2746 Ma, Th/U 基本不小于 0.1, 看来不像变质锆石, 也没有变质边, 可能是捕获锆石。

### 3.2.3 围岩

如图 6 所示, 花岗质片麻岩: 二长花岗岩的锆石自形较好, 大小均匀, 椭圆状, 粉红色, 阴极发光显示具有核边结构, 三批次锆石结果(LA-ICP-MS)比较一致。

08JB01-2, 09JB33-2, D0416-1 三个样品, 都是岩浆锆石(Th/U 都大于 0.1, 最大 2.15), 锆石粉红色较大, 阴极发光图像具有岩浆振荡环带结构, 以及变质的边部, 年龄结果较为接近, 09JB33-2 年龄核部( $2519 \pm 7$ ) Ma, 边部( $2501 \pm 21$ ) Ma 年龄差异并不大, 熔蚀的核部可能是原岩形成时一次岩浆注入造成的, 两个年龄都是原岩年龄。锆石原位微量元素(见图 7e)测定显示了负 Eu 异常, 说明了锆石结晶时存在斜长石。D0416-1 上交点( $2493 \pm 9$ ) Ma, 08JB01-2 上交点( $2485 \pm 10$ ) Ma。

由于花岗质岩石形成时 Zr 元素大部分存在于锆石中, 之后在变质时体系内流体不够发育并没有游离 Zr 存在, 变质温压条件又不能改变老锆石状态, 所以围岩中并没有 1850 Ma 左右锆石记录。

## 4 讨论与结论

1) 从以上结果来看, 首先得到了承德地区高压基性麻粒岩及其围岩的原岩年龄, 糜棱岩化(二长)花岗岩年龄约为 2500 Ma, 同以往研究结果一致(张

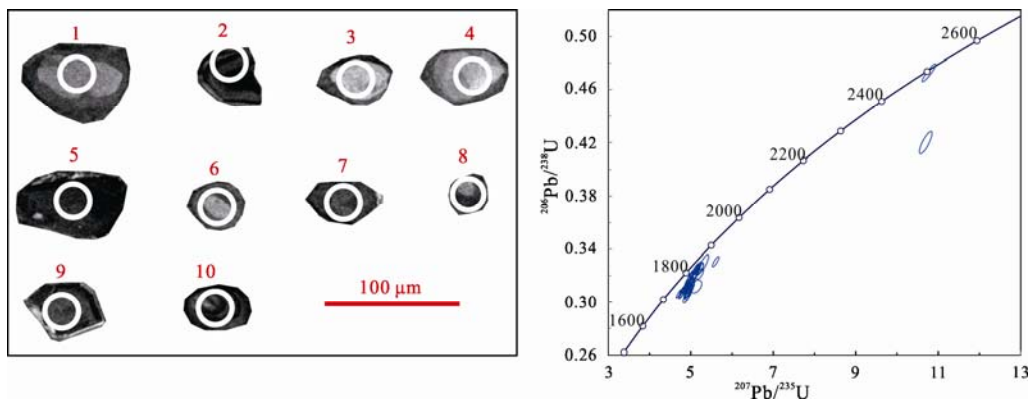


图 5 09JB33-1 锆石阴极发光图像、U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Cathodoluminescence images and U-Pb concordia diagram of zircons (09JB33-1)

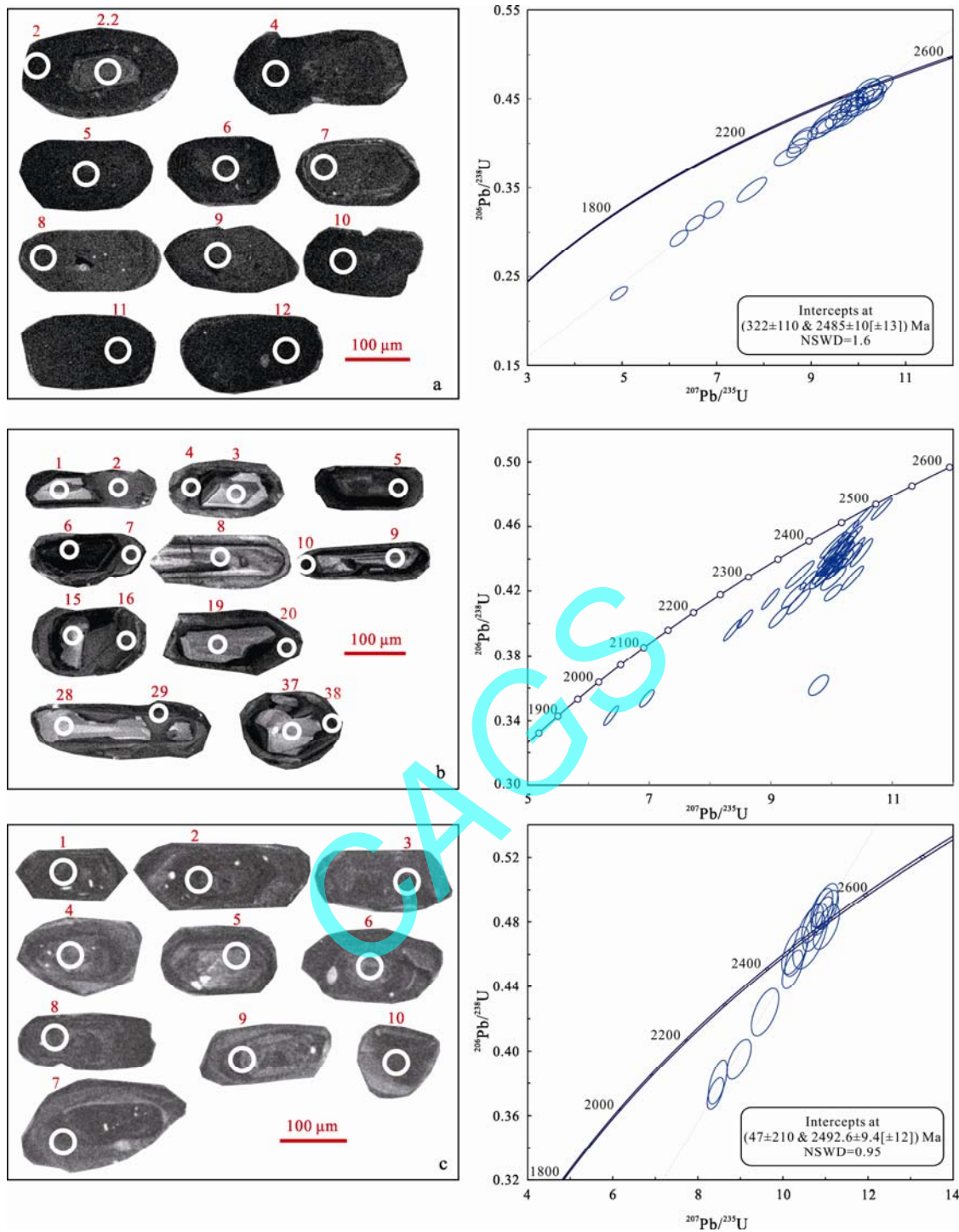


图 6 花岗片麻岩锆石阴极发光图像、U-Pb 年龄谐和图  
 Fig. 6 Cathodoluminescence images and U-Pb concordia diagram of zircons  
 a-08JB01-2; b-09JB33-2; c-D0416-1

华峰等, 2006), 当然, 某些锆石(09JB33-2)增生边还记录了较短时间内多期岩浆事件, 这也表明了 2500 Ma 左右的太古代末期, 华北陆块演化经历了较多火山作用、壳熔的花岗岩和 TTG 片麻岩、广泛的麻粒岩相-高角闪岩相变质作用以及基性岩墙和花岗质脉群的侵入(翟明国, 2011)。在华北克拉通化之后经历了高压麻粒岩相变质, 张华峰等(2006)在

研究恒山地区的高压麻粒岩时也提出围岩花岗片麻岩同基性麻粒岩经历了同样的变质作用。

2) 高压麻粒岩原岩年龄 2398 Ma 代表了基性侵入岩的成岩年龄, 而大量在 2297~2001 Ma 的变质锆石可能代表了麻粒岩相变质的年龄, 当然可能不只是一次变质事件的结果, 但至少记录了岩石高压麻粒岩相变质的时间范围, 这也许表明岩石经历俯冲,

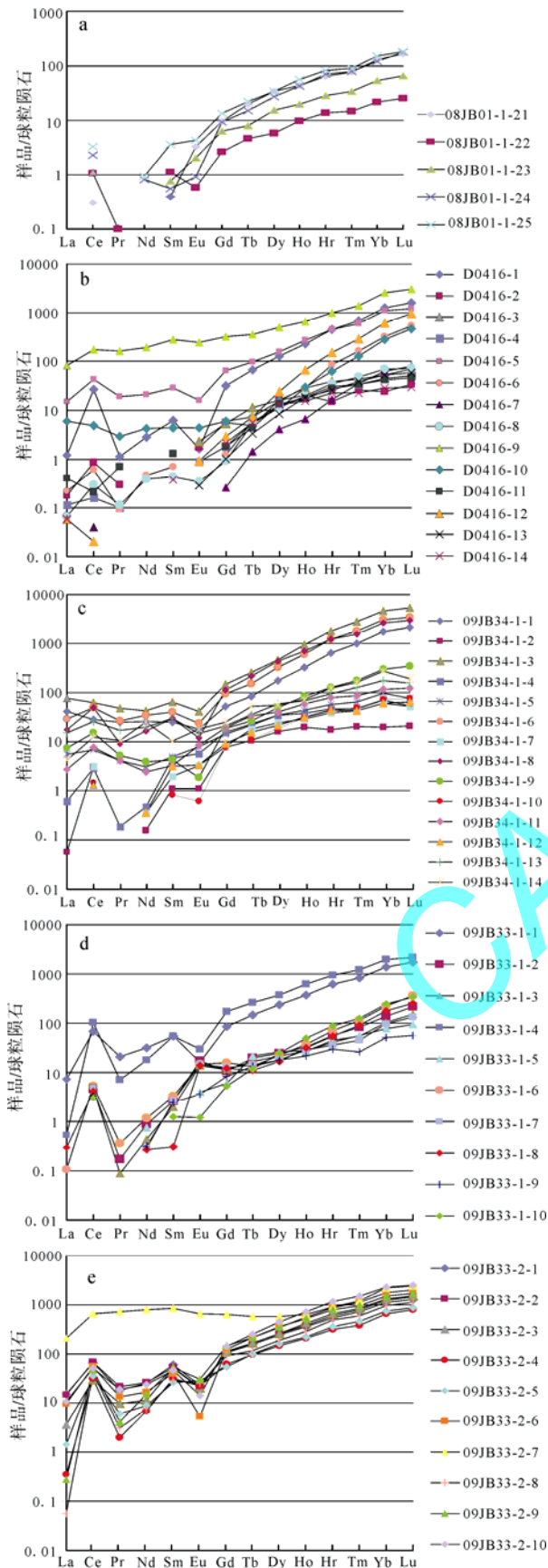


图 7 锆石原位微区稀土元素球粒陨石标准化图解  
(标准化数据自 Sun et al., 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of zircons  
(normalization value after Sun et al., 1989)

以及之后长期处于较深层次的地壳加厚过程。张华峰等(2006)通过对恒山等地野外观察将花岗片麻岩分类,并分别做了年龄测定,认为淡色正长花岗岩侵位于 2493 Ma,黑云母二长花岗岩侵位于 2443 Ma,石榴石正长花岗岩侵位于 1977 Ma 和 2003 Ma,包括恒山地区的一些区域岩浆事件,比如王家会 2117 Ma(王月然, 2005),道仁沟 2041 Ma(于津海等, 2004),野鸡山 2120 Ma(刘树文等, 2009)等都与之对应。所以在 2300 ~ 2000 Ma 的时间范围内,可能存在一期或几期地质事件,只是高压麻粒岩又经历了后期(1850 Ma 左右)区域变质事件,至今获得的信息都很少。

3)Kröner 等(2006)曾报道了恒山 1915 Ma 的基性岩墙,他认为这是高压麻粒岩的原岩年龄,但这只代表了其中一次基性岩墙侵入事件,承德地区也有相同期次的基性岩墙侵入事件,基性岩墙年龄 1896 Ma。另外从野外露头及结构构造来看,本期岩墙边界平直,片理化较弱,并没有经历高压麻粒岩相事件。

4)与以往报道的华北北部地区的高压麻粒岩年龄大多数在 1900 ~ 1850 Ma 的范围内的年龄结果不同,本次得到的锆石原位微量元素的结果说明了,这期事件应该代表了抬升过程与麻粒岩相-角闪岩相退变质,大量的 1850 Ma 左右的年龄信息记录的都是华北大面积麻粒岩-高角闪岩相事件,甚至有部分熔融出现,这期事件影响范围相当大,华北北部大部分地区都能找到相关证据,此事件抹杀了大部分古元古代变质演化过程。

5)由此可见,承德地区甚至华北北部古元古代地质演化历史并不是不同地点的一两期不同事件,而是一个复杂连续的演化过程,以往的研究只揭示了一期或两期事件,而承德地区高压麻粒岩的证据则记录了更多信息。

致谢: 中国地质调查局天津地质矿产研究所李怀坤研究员、李惠民研究员、耿建珍工程师、郝爽工程师、张永清工程师等对锆石测年和数据处理工作给予了大力支持,河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室在单矿物分选、薄片磨制、薄片鉴定工作中给予了大力支持,作者在此一并致以诚挚的谢意。

参考文献:

耿元生, 吉成林. 1994. 河北怀安东洋河地区石榴基性麻粒岩的变质演化[M]//钱祥林, 王仁民. 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地质出版社: 89-99.



- 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、PT 轨迹及构造意义[J]. 地质科学, 34(3): 311-325.
- 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 PT 轨迹及其构造意义: 矿物化学和变质作用研究[J]. 岩石学报, 14(4): 430-448.
- 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 and 同位素年代学[J]. 岩石学报, 9(4): 329-341.
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. 矿物学报, 29(S1): 600-601.
- 李江海, KRONER A, 钱祥林, O'BRIEN P. 2000. 华北克拉通恒山-承德新太古代高压麻粒岩带构造演化[J]. 安徽地质, 10(3): 218-220.
- 李江海, 翟明国, 钱祥麟, 郭敬辉, 王关玉, 阎月华, 李永刚. 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.
- 刘树文, 李秋根, 张立飞. 2009. 吕梁山前寒武纪野鸡山群火山岩的地质学、地球化学及其构造意义[J]. 岩石学报, 25(3): 547-560.
- 刘文军, 翟明国, 李永刚. 1998. 胶东莱西地区高压基性麻粒岩的变质作用[J]. 岩石学报, 14(4): 449-459.
- 毛德宝, 钟长汀, 陈志宏, 林源贤, 李惠民, 胡小蝶. 1999. 承德北部高压基性麻粒岩的同位素年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 15(4): 524-531.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 48(增刊): 26-30.
- 王仁民, 陈珍珍, 陈飞. 1991. 恒山灰色片麻岩和高压麻粒岩体及其地质意义[J]. 岩石学报, 7(4): 36-45.
- 王月然, 刘树文, 李秋根, 党青宁, 刘超辉, 杨斌, 古丽冰, 赵凤三. 2005. 五台山古元古代晚期的动力学背景: 王家会花岗岩地球化学的制约[J]. 北京大学学报(自然科学版), 41(6): 840-850.
- 魏春景, 张翠光, 张阿利, 伍天洪, 李江海. 2001. 辽西建平杂岩高压麻粒岩相变质作用的 P-T 条件及其地质意义[J]. 岩石学报, 17(2): 269-282.
- 于津海, 王德滋, 王赐银, 王丽娟. 2004. 山西吕梁山中段元古代花岗岩浆活动和变质作用[J]. 高校地质学报, 10(4): 500-512.
- 翟淳, 张清华, 王奖臻, 王国芝. 1995. 初论豫南高压麻粒岩的物质组成及其形成的构造环境[J]. 矿物岩石地球化学通讯, (3): 166-168.
- 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[J]. 科学通报, 40(17): 1590-1594.
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 李永刚, 张雯华. 1992. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及初步研究[J]. 中国科学(B 辑), (12): 1325-1330.
- 翟明国. 1991. 华北麻粒岩相岩石的主要特征及今后研究中值得注意的几个问题[J]. 岩石学报, (4): 239-246.
- 翟明国. 2009. 华北克拉通两类早前寒武纪麻粒岩(HT-HP 和 HT-UHT)及其相关问题[J]. 岩石学报, 25(8): 1753-1771.
- 翟明国. 2011. 克拉通化与华北陆块的形成[J]. 中国科学: 地球科学, 41(8): 1037-1046.
- 张华峰, 翟明国, 彭澎. 2006. 华北克拉通桑干地区高压麻粒岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质含义[J]. 地学前缘, 13(3): 190-199.
- 钟长汀, 毛德宝, 赵凤清, 陈志宏, 胡小蝶. 2001. 冀北高压麻粒岩带岩石组合性质、同位素特征及其演化[J]. 前寒武纪研究进展, 24(3): 175-183.
- 钟长汀. 1999. 晋冀蒙高级区二期高压麻粒岩的地质特征及成因[J]. 前寒武纪研究进展, 22(2): 53-58.
- 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.

## References:

- BLACK L P, KAMO S L, ALLEN C M, ALEINIKOFF J N, DAVIS D W, KOSCH R J, FOU DOULIS C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. Chemical Geology, 200(1-2): 155-170.
- BOHLEN S R. 1987. Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites[J]. Journal of Petrology, 95(5): 617-632.
- CARNEY J N, TRELOAR P J, BARTON C M, CROW M J, EVANS J A, SIMANGO S. 1991. Deep-crustal granulites with migmatitic and mylonitic fabrics from the Zambezi Belt, northeastern Zimbabwe[J]. Journal of Metamorphic Geology, 9(4): 461-479.
- COMPSTON W, WILLIAMS I S, KIRSCHVINK J L, ZICHAO Z, GUOGAN M A. 1992. Zircon U-Pb ages for the early Cambrian time-scale[J]. Journal of the Geological Society, 149(2): 171-184.
- DALLMEYER R D, JOHANSSON L, MOELLER C. 1992. Chronology of Caledonian high-pressure granulite-facies metamorphism, uplift, and deformation within northern parts of the Western Gneiss Region, Norway[J]. Geological Society of America Bulletin, 104(4): 444-455.
- DROOP G T R. 1989. Reaction history of garnet-sapphirine granulites and conditions of Archaean high-pressure granulite-facies metamorphism in the central Limpopo mobile belt, Zimbabwe[J]. Journal of Metamorphic Geology, 7(3): 383-403.
- GENG Yuan-sheng, JI Cheng-lin. Metamorphic evolution of garnet mafic granulite in the Tongyanghe region of Huai'an County, Hebei Province[M]//QIAN Xiang-lin, WANG Ren-min. Geo-

- logical Evolution of the Granulite Terrain in North Part of the North China Craton. Beijing: Seismological Press: 89-99(in Chinese).
- GREEN D H, RINGWOOD A E. 1967. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5): 767-833.
- GUO Jing-hui, ZHAI Ming-guo, LI Yong-gang, LI Jiang-hai. 1999. Metamorphism, PT paths and tectonic significance of garnet amphibolite and granulite from Hengshan, North China Craton[J]. *Chinese Journal of Geology*, 34(3): 311-325(in Chinese with English abstract).
- GUO Jing-hui, ZHAI Ming-guo, LI Yong-gang, YAN Yue-hua. 1998. Contrasting metamorphic P-T paths of Archaean high-pressure granulites from the North China craton: Metamorphism and tectonic Significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 430-448(in Chinese with English abstract).
- GUO Jing-hui, ZHAI Ming-guo, ZHANG Yi-gang, LI Yong-gang, YAN Yue-hua, ZHANG Wen-hua. 1993. Early Precambrian Manjingou 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. 1989. The origins of granulites: a metamorphic perspective[J]. *Geological Magazine*, 126(3): 215-247.
- INDARES A. 1996. Metamorphic interpretation of high-pressure-temperature metapelites with preserved growth zoning in garnet, eastern Grenville province, Canadian shield[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 13(4): 474-486.
- JACKSON S E, PEARSON N J, GRIFFIN W L, BELOUSOVA E A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 211(1-2): 47-69.
- KRÖNER A, WILDE S A, ZHAO G C, O'BRIEN P J, SUN M, LIU D Y, WAN Y S, LIU S W, GUO J H. 2006. Zircon geochronology and metamorphic evolution of mafic dykes in the Hengshan Complex of northern China: Evidence for late Palaeoproterozoic extension and subsequent high-pressure metamorphism in the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 146(1-2): 45-67.
- LI Huai-kun, GENG Jian-zhen, HAO Shuang, ZHANG Yong-qing, LI Hui-min. 2009. The study of determination of zircon ages using LA-MC-ICP-MS. *Bulletin of Mineralogy*[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(S1): 600-601(in Chinese with English abstract).
- LI Jiang-hai, KRONER A, QIAN Xiang-lin, O'BRIEN P. 2000. Tectonic evolution of late archean high-pressure granulite belt in Hengshan-Chengde in North-China Craton[J]. *Geology of Anhui*, 10(3): 218-220(in Chinese).
- LI Jiang-hai, ZHAI Ming-guo, QIAN Xiang-lin, GUO Jing-hui, WANG Guan-yu, YAN Yue-hua, LI Yong-gang. 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 Shu-wen, LI Qiu-gen, ZHANG Li-fei. 2009. Geology, geochemistry of metamorphic volcanic rock suite in Precambrian Yejishan Group, Luliang mountains and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 547-560(in Chinese with English abstract).
- LIU Wen-jun, ZHAI Ming-guo, LI Yong-gang. 1998. Metamorphism of the high-pressure basic granulites from Laixi, Eastern Shandong, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 449-459(in Chinese with English abstract).
- LIU Y S, GAO S, HU Z C, GAO C G, ZONG K Q, WANG D B. 2009. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571.
- LIU Y S, HU Z C, GAO S, GÜNTHER D, XU J, GAO C J, CHEN H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43.
- LUDWIG K R. 2003. User's manual for Isoplot/Ex, version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel: Berkeley Geochronology Center Special Publication No.4[M]. Berkeley, California, USA: Berkeley Geochronology Center.
- MAO De-bao, ZHONG Chang-ting, CHEN Zhi-hong, LIN Yu-an-xian, LI Hui-min, HU Xiao-die. 1999. The isotope ages and their geological implications of high-pressure basic granulites in north region to Chengde, Hebei province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4): 524-531(in Chinese with English abstract).
- MÖLLER C. 1998. Decompressed eclogites in the Sveconorwegian (-Grenvillian) orogen of SW Sweden: petrology and tectonic implications[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(5): 641-656.
- MOSKOVCHENDO N I, OVCHINNIKOVA G V, KASTRYKINA V M. 1993. High-pressure granulites of east Siberia in terms of Archaean and Proterozoic evolution[J]. *Precambrian Research*, 62(4): 473-491.

- O'BRIEN P J, RÖTZLER J. 2003. High-pressure granulites: formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21(1): 3-20.
- O'BRIEN P J. 1997. Granulite facies overprints of eclogites: short-lived events deduced from diffusion modeling[C]// QIAN X, YOU Z, JAHN B M, HALLS H C, eds. *Precambrian Geology and Metamorphic Petrology. Proc. 30th Inter. Geol. Conge. vol. 17, part 2: 157-171.*
- SNOEYENBOS D R, WILLIAMS M L, HANMER S. 1995. Archean high-pressure metamorphism in the western Canadian Shield[J]. *European Journal of Mineral*, 7(6): 1251-1272.
- SONG Biao, ZHANG Yu-hai, WAN Yu-sheng, JIAN Ping. 2002. Mount Making and Procedure of the SHRIMP Dating[J]. *Geological Review*, 48(S1): 26-30(in Chinese).
- SUN S S, MCDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotope systematics of ocean basalts: Implications for mantle composition and processes[M]//SAUNDERS A D, NORRIS M J. *Magma-tism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publications*, 42(1): 313-345.
- DI VINCENZO G, PALMERI R, TALARICO F, ANDRIESEN P A M, RICCI G A. 1997. Petrology and geochronology of eclogites from the Lanterman Range, Antarctica[J]. *Journal of Petrology*, 38(10): 1391-1417.
- WANG Ren-min, CHEN Zhen-zhen, 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).
- WANG Yue-ran, LIU Shu-wen, LI Qiu-gen, DANG Qing-ning, LIU Chao-hui, YANG Bin, GU Li-bing, ZHAN Feng-san. 2005. Late Paleoproterozoic Geodynamic Setting in Wutai Mountains: Constraints from Geochemistry of Wangjiahui Granitoids[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 41(6): 840-850(in Chinese with English abstract).
- WEI Chun-jing, ZHANG Cui-guang, ZHANG A-li, WU Tian-hong, LI Jiang-hai. 2001. Metamorphic P-T conditions and geological significance of high-pressure granulite from the Jianping complex, western Liaoning province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 269-282(in Chinese with English abstract).
- YU Jin-hai, WANG De-zi, WANG Ci-yin, WANG Li-juan. 2004. Paleoproterozoic Granitic Magmatism and Metamorphism in Middle Part of Lüliang Range, Shanxi Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(4): 500-512(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Chun, ZHANG Qing-hua, WANG Jiang-zhen, WANG Guo-zhi. 1995. Discussion on composition and geotectonic of high-pressure granulites in southern Henan Province[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, (3): 166-168(in Chinese).
- ZHAI Ming-guo, GUO Jing-hui, LI Jiang-hai, YAN Yue-hua, LI Yong-gang, ZHANG Wen-hua. 1995. The discovery of Archean retrograde eclogites in the North China craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 40(17): 1590-1594(in Chinese).
- ZHAI Ming-guo, GUO Jing-hui, YAN Yue-hua, LI Yong-gang, ZHANG Wen-hua. 1992. Discovery and preliminary study of Archean high-pressure basic granulites in North China[J]. *Science in China (Series B)*, (12): 1325-1330(in Chinese).
- ZHAI Ming-guo. 1991. The Main Characteristics of Granulites in North China and the Orientation of Further Research on Them[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (4): 239-246(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Ming-guo. 2009. Two kinds of granulites (HT-HP and HT-UHT) in North China Craton: Their genetic relation and geotectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1753-1771(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Ming-guo. 2011. Cratonization and ancient North China continent land: A summary and review[J]. *Science China (Earth Science)*, 41(8): 1037-1046(in Chinese).
- ZHANG Hua-feng, ZHAI Ming-guo, PENG Peng. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb age of the Paleoproterozoic high-pressure granulites from the Sanggan area, the North China Craton and its geologic implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(3): 190-199(in Chinese with English abstract).
- ZHAO G C, WILDE S A, CAWOOD P A, LU L Z. 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(3): 223-240.
- ZHONG Chang-ting, MAO De-bao, ZHAO Feng-qing, CHEN Zhi-hong, HU Xiao-die. 2001. Rock Units of the High-Pressure Granulite Belt in the Northern Hebei Province, North China: Their Properties, Isotopic and Evolution[J]. *Progress in Precambrian Research*, 24(3): 175-183(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Chang-ting. 1999. The geological features and origin of two-stage-high-pressure basic granulite from the shanxi-hebei-inner mongolia terra in North China Craton[J]. *Progress in Precambrian Research*, 22(2): 53-58(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Xi-wen, WEI Chun-jing, GENG Yuan-sheng, ZHANG Li-fei. 2004. Discovery and geological significance of meta-pelite of high-pressure granulite facies in Qixia, northern Shandong[J]. *Scientific Bulletin*, 49(14): 1424-1430(in Chinese).