

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.04.020

# 华北克拉通怀安县西洋河地区高压基性麻粒岩锆石 U - Pb 同位素年龄及地球化学特征

侯红星,张蜀冀,胡新茁,张中跃,邵兴坤

(中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心,河北 廊坊 065000)

**摘要:**华北中北部出露的高压麻粒岩对研究华北克拉通新太古代—古元古代构造演化具有重要意义。笔者通过对怀安县西洋河地区怀安杂岩中新发现的高压基性麻粒岩的地质、地球化学特征、变质作用及锆石 U - Pb 同位素年龄研究和讨论,确定研究区高压基性麻粒岩原岩为基性岩浆源(辉长岩或玄武岩),具有 MORB 型玄武岩地球化学特征,形成年龄早于 2 162 Ma;岩石主要经历了峰期高压麻粒岩相变质作用和后期退变质作用的改造;峰期平均变质年龄为 1 925 Ma,后期退变质年龄为 1 865 Ma;反映了新太古代—古元古代碰撞造山过程,为研究华北克拉通构造演化提供了新的证据。

**关键词:**华北克拉通;高压基性麻粒岩;同位素;地球化学;西洋河

中图分类号:P597<sup>+</sup>.3

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)04-0240-15

## Geochemical Characteristics and Zircon U - Pb Isotope Age of the High-pressure Basic Granulite in the Xiyanghe Area of the North China Craton

HOU Hongxing, ZHANG Shuji, HU Xinzhuo, ZHANG Zhongyue, SHAO Xingkun

(Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Langfang, 065000, Hebei, China)

**Abstract:** The high-pressure granulite exposed in the north-central part of north China is of great significance to the study of the Neo-Archaean-Palaeoproterozoic structural evolution of the north China craton. This thesis researched and discussed the geological, geochemical, metamorphic and U - Pb isotope ages of zircon in high pressure basic granulite, which newly discovered in the huaian complex in the xiyanghe area of huaian county. Though it, we concluded that the high pressure basic granulite was determined to be a basic magmatic source(gabbro or basalt), which has the geochemical characteristics of MORB type basalt, and its formation age was earlier than 2 162Ma. The rock has mainly undergone the geological transformation of high-pressure granulite facies metamorphism in the peak period and metamorphism in the later period, and with metamorphic ages of 1 925 Ma and 1865 Ma respectively, which reflected the Neoproterozoic collision orogenic process and provided new evidence for studying the structural evolution of the North China Craton.

收稿日期:2022-04-14;修回日期:2022-05-27;网络发表日期:2022-11-15;责任编辑:李辉

基金项目:中国地质调查局项目“西北沿边及特殊地区地质矿产调查”(DD20160079)资助。

作者简介:侯红星(1975-),男,博士,高级工程师,主要从事区域地质矿产调查和自然资源调查研究。E-mail:wjhhx@163.com。

**Keywords:** North China Craton; high pressure basic granulite; isotope; geochemistry; Xiyanghe

高压麻粒岩一般是指变质压力在 1.0 GPa 以上,变质程度达到麻粒岩相的一套岩石,具“石榴石+单斜辉石+斜长石+石英”矿物组合特征,是在下地壳条件下变质而成的一种特殊的变质岩类型。对华北克拉通早前寒武纪基底研究中,高压麻粒岩因其特殊的地质意义一直是地质学家关注的重点内容(翟明国等,1992;白瑾等,1993;郭敬辉等,1996;伍家善等,1998;Zhai et al.,2000,2005;耿元生,2000;邵济安等,2002;翟明国,2004;Zhao et al.,2005;李江海等,1998,2006;赵国春,2009;耿元生等,2010;Zhai,2011;Zhao et al.,2013;钟焱等,2019;肖玲玲等 2019;张家辉,2019;郝乐燃等,2020),其对探讨新太古代华北克拉通的区域构造格架、深部构造机制具有重要意义(李江海等,1998;党智财等,2015)。前寒武纪高压基性麻粒岩是华北克拉通板块构造或微陆块/地体拼合假说最直接的有力证据记录之一,因而得到了多数学者的广泛关注。20 世纪 90 年代以来,在华北克拉通晋北地区向东,经冀西北、河北内蒙交界地区一直到辽西地区,发现并确定了一条新太古代高压麻粒岩带,长度超过 700km。根据前人研究成果,在新太古代末期,华北克拉通由多个微陆块通过陆-陆或弧-陆碰撞拼合形成,并形成广泛发育的同时期 TTG 片麻岩;通过对发育其中的新太古代-古元古代高压麻粒岩带研究,并在深化古元古代华北克拉通裂解-俯冲-增生-碰撞造山演化过程研究的同时(Zhao et al.,2005;Zhai,2011;Zhao et al.,2013;杨仲杰,2017;张家辉等,2019),识别出多条碰撞造山带。随着其中大量高压(基性)麻粒岩的发现和报道(王仁民等,1991;翟明国等,1992),围绕高压麻粒岩这一主题,前人发表了一系列研究论文(郭敬辉等,1993,1996;马军等,1995;刘树文等,1996;王仁民,1996;翟明国等,1996;李江海等,1998;袁建平,2000;张华峰等,2006;赵国春,2009;张家辉,2019),从变质作用、变质时代、下地壳性质、构造演化过程等多方面进行研究和探讨,形成了一个引人注目的研究热点(袁建平,2000),极大地丰富了华北克拉通早前寒武纪变质作用和地质演化研究的内涵,形成了一些新的概念模型,加深了对华北克拉通早前寒武纪陆壳构造岩石圈构造演化、深部地质作用及造山机制的认识。

笔者近年来参加了河北怀安县西洋河地区开展的 1:5 万区域地质调查工作,在对怀安县西洋河—鹿尾沟地区早前寒武纪变质基底物质组成、变形、变质特征等进行详细调查的基础上,在该区识别出一系列高压基性麻粒岩地质体。并通过详细的岩石学、地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,认为该区高压基性麻粒岩具有 MORB 玄武岩的地球化学性质,对揭示和进一步丰富华北克拉通古元古代造山带早期构造环境及碰撞造山演化过程具有重要意义。同时,试图对华北克拉通发生碰撞拼合时间的确定、华北克拉通北缘高压麻粒岩带展布的争论(袁建平等,2000)及高压麻粒岩围岩是否遭受过高压作用(刘福来等,2002)等问题提供一些证据。

## 1 地质背景

研究区在华北克拉通中部构造带与西部陆块孔兹岩带(赵国春,2009)相邻部位的晋-冀-蒙三省区交界地带,位于张家口市西怀安县西洋河一带(图 1)。晋-冀-蒙交界地区是华北克拉通内典型的高级变质岩区,以大同一兴和一带为界,可大致将早前寒武纪变质基底划分为 2 套高级变质岩系,分别为南东部 TTG 麻粒岩系(桑干新太古代岩浆弧)和北西部孔兹岩系(凉城-集宁古元古代孔兹岩古弧后沉积盆地及古元古代末再造活动带),也即现在常称的怀安杂岩和孔兹岩带;北部大致以尚义-平泉断裂为界,断裂以北为古元古代红旗营子基底杂岩。

研究区位于怀安县城以西西洋河地区。区内早前寒武纪变质结晶基底由变质表壳岩和变质深成岩组成。变质表壳岩为新太古代桑干岩群(马市口岩组、右所堡岩组),古元古代集宁岩群(沙渠村岩组)和红旗营子岩群(太平庄岩组)。新太古代桑干岩群主要岩性为二辉斜长麻粒岩、二辉(紫苏)斜长变粒岩、二辉(紫苏)黑云斜长片麻岩,局部夹斜角闪岩、大理岩、磁铁矿石岩和斜角闪二辉石岩。原岩建造以超基性、基性火山岩为主,少量中性-中酸性火山岩,夹含泥质、砂质碎屑沉积岩、铁硅质沉积岩及碳酸盐岩沉积岩,属活动大陆边缘岛弧构造环境的沉积-火山岩建造类型;集宁岩群沙渠村岩组为一

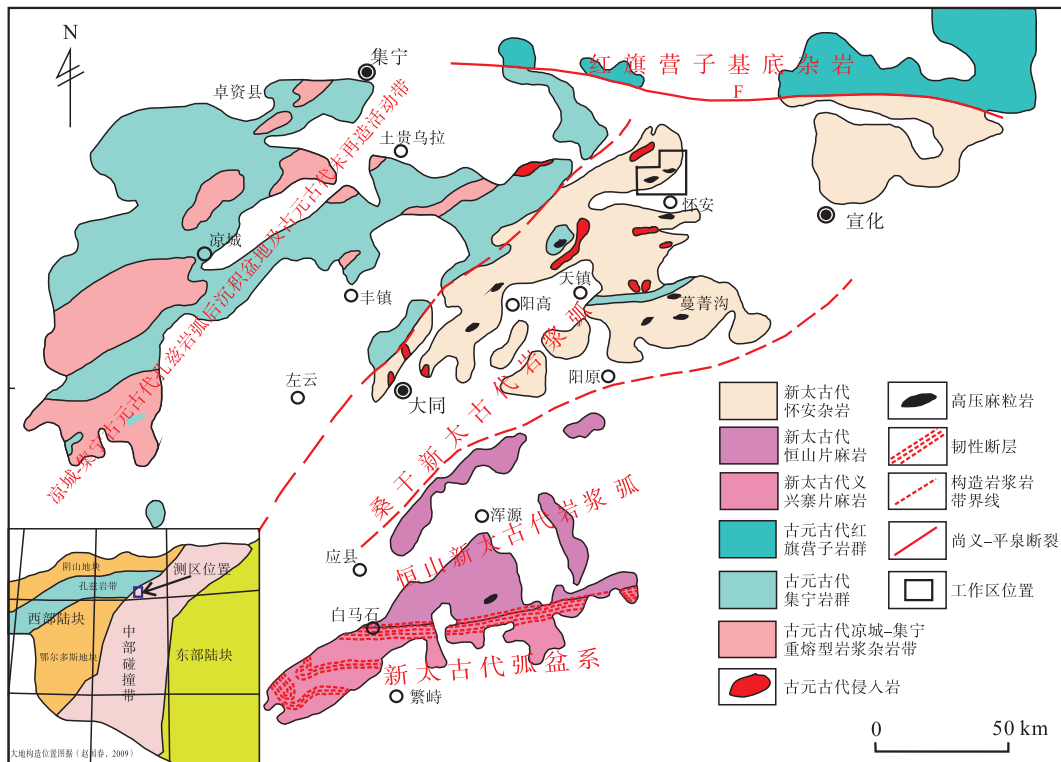


图1 怀安县西洋河地区早前寒武纪地质简图(据1:25万大同区调报告,2014修改)

Fig.1 Tectonic subdivision of the Precambrian in Xiyanghe area, Huai'an county

套孔兹岩系组合,岩性较为简单,包括石榴二长浅粒岩夹石榴石石英岩、砂线石榴斜长片麻岩、含石墨石榴斜长变粒岩、石墨黑云斜长二辉麻粒岩;红旗营子岩群太平庄岩组主要岩性为片麻岩、浅粒岩和变粒岩,岩石中普遍含有黑云母、角闪石和石榴子石,其原岩为一套杂砂岩、粉砂岩、泥质岩(少量硅质岩)夹中基性火山岩(细碧岩)组合的火山-沉积建造,形成于活动陆缘盆地构造环境。研究区新太古代变质深成岩为区内主体岩石,出露面积大于75%,为一套麻粒岩相-高角闪岩相英云闪长质-花岗闪长质-奥长花岗质-二长花岗质片麻岩杂岩组合,与区域内TTG片麻岩系列一起构成怀安杂岩主体岩性,其形成时代介于2.6~2.5 Ga(Zhao et al., 2008; Liu et al., 2009, 2012; Wang et al., 2010; Zhang et al., 2012; 魏颖等, 2013; 张瑞英等, 2013; Su et al., 2014; 路增龙等, 2014; 肖玲玲等, 2015; 张家辉等, 2019),后期经历了2500 Ma、1900~1800 Ma等2期变质改造。新太古代桑干岩群基底杂岩中零星出露少量新太古代-古元古代变质基性火山岩、磁铁石英岩、石榴黑云斜长片麻岩及大理岩等变质表壳岩透镜体或构造岩片。中元古代则发育大量北西向

变质基性岩墙群(侯贵廷等, 1998, 2000; 胡俊良等, 2007),形成时代在1800~1700 Ma(翟明国等, 2007),侵入到新太古代TTG片麻岩杂岩中。对怀安地区基底岩石变质年龄同位素认为研究,该区2.5 Ga经历了麻粒岩相-高角闪岩相主期变质作用,1.85~1.81 Ga的区域变质作用使西部陆块和东部陆块发生碰撞造山(Zhao et al., 2005, 2008, 2010; Liu et al., 2009, 2012; Wang et al., 2010; Zhang et al., 2012; 魏颖等, 2013; Su et al., 2014; 蔡佳等, 2017; 张家辉等, 2019)。到古元古代末期(1795~1806 Ma),随着未发生变质作用的花岗伟晶岩脉的侵入(Wang et al., 2010; Zhang et al., 2014),限定了古元古代造山事件结束的时代,随后构造体制逐渐转变为超大陆的裂解(耿元生等, 2019; 张家辉等, 2019)。

本次调查在怀安县西洋河地区大虎沟-地上村、柳沟村、向阳村北、水闸屯村北、青水山及黄榆沟村西等地均发现了高压基性麻粒岩,整体处于华北克拉通中北部高压基性麻粒岩带内。高压基性麻粒岩主要出露在新太古代桑干岩群和变质深成岩(TTG片麻岩)中(图2),多数高压基性麻粒岩在新太古代桑干岩群中呈岩墙状产出,后遭受构造作用,

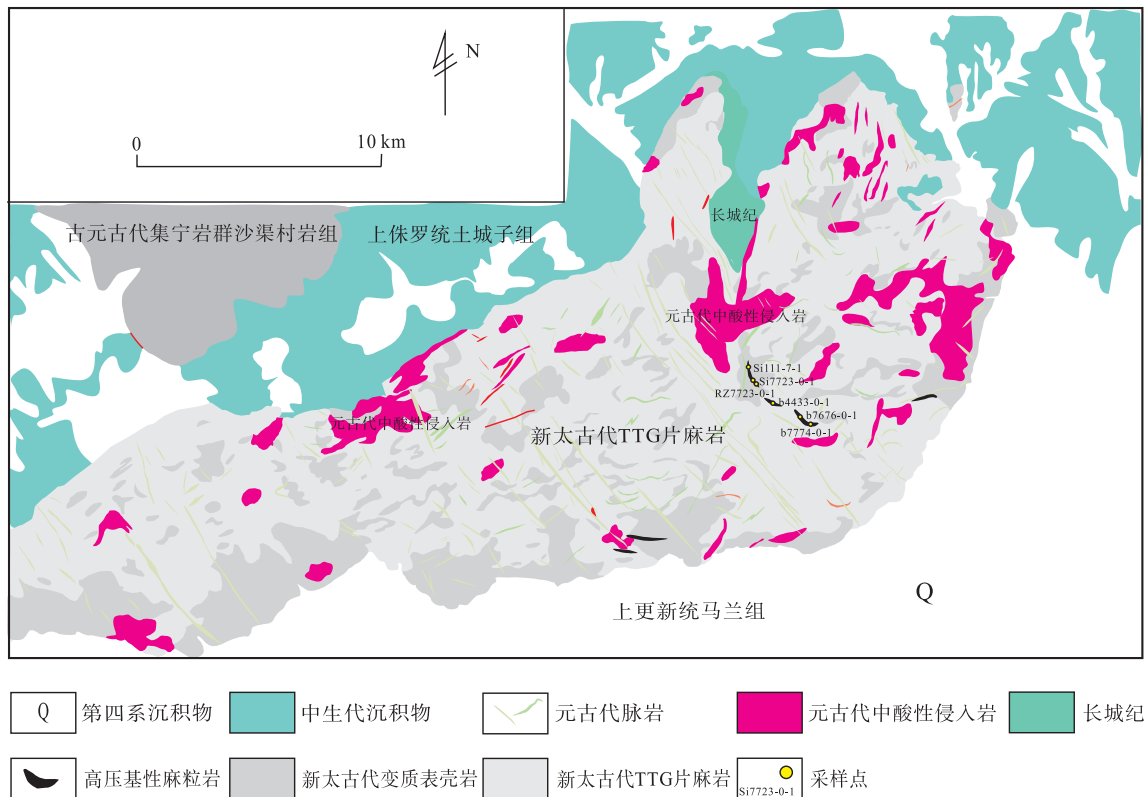


图2 怀安县西洋河地区高压基性麻粒岩地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the high pressure basic granulite in Xiyanghe area, Huai'an county

被挤压、拉断,呈透镜状,局部见高压基性麻粒岩在变质深成岩中呈透镜体产出,形态呈不规则状,大小不一,受后期强变质作用影响,高压基性麻粒岩与围岩等岩石局部呈渐变关系。区域上出露的大量高压基性麻粒岩原岩恢复为古元古代基性小岩体(张华峰等,2005,2006)。

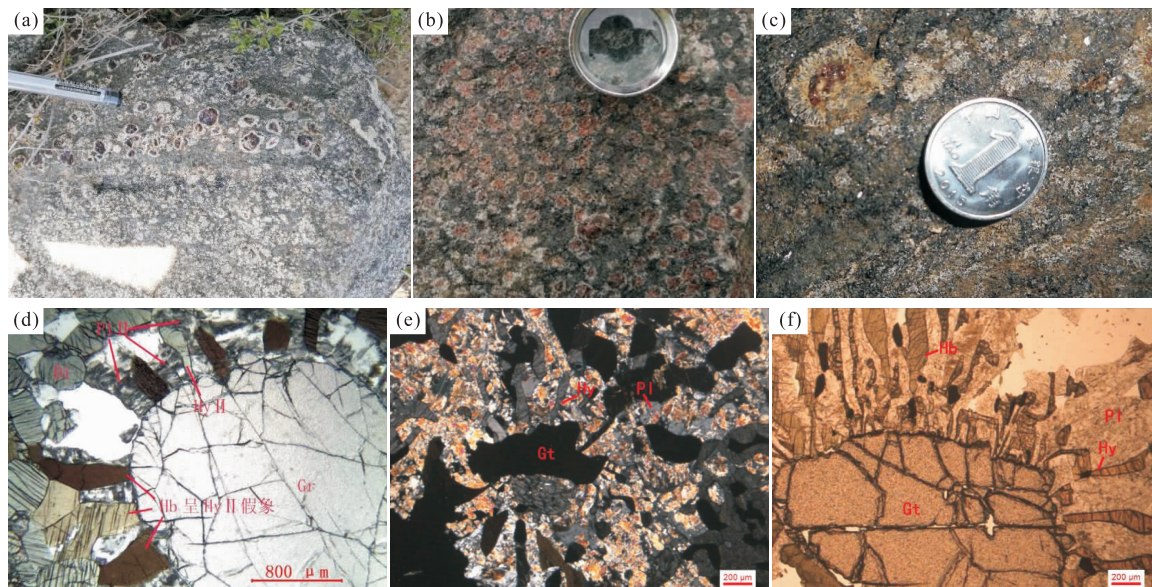
## 2 岩石学及岩相学特征

西洋河地区高压麻粒岩岩性整体比较均匀,多数呈块状,变形较弱,局部发育微弱的片麻状构造;主要岩性为含石榴二辉斜长角闪麻粒岩和石榴角闪斜长二辉麻粒岩;主要特征是早期形成的石榴子石周边形成白色减压边(白眼圈),局部地段形成斜长花岗质浅色体。但由于石榴子石的含量、大小等差异,减压边的宽窄不同(图3a、图3b、图3c),高压基性麻粒岩中的白眼圈和浅色体表明部分熔融(深熔)作用发生于麻粒岩相退变质过程(张家辉等,2019),在退变过程中伴随减压熔融作用(深熔作用)。

含石榴二辉斜长角闪麻粒岩:粒柱状变晶结构,

块状构造;主要由斜长石、角闪石、透辉石、紫苏辉石、石榴子石组成。斜长石(35%~45%)大致分为2个世代:一世代斜长石呈他形粒状,粒径为0.5~1 mm,定向分布,被绢云母、黝帘石交代,局部可见聚片双晶,牌号  $An=48$ ;二世代斜长石常与二世代紫苏辉石文象交生,分布石榴子石边部,重结晶变为他形粒状,粒径为0.2~0.7 mm,少量集合体呈石榴子石假象产出,被绢云母、黝帘石交代,双晶不明显。角闪石(40%)呈他形粒状,粒径为0.5~1 mm,部分1~2 mm,定向分布,常交代透辉石、紫苏辉石,多色性明显,  $Ng'$  = 棕色,  $Np'$  = 浅棕黄色。石榴子石(5%~10%)呈半自形粒状,粒径为0.5~5 mm,星散状分布,以铁铝榴石为主,减压退变明显,部分为假象,局部被不透明矿物交代。透辉石(10%)呈他形柱状,粒径为0.2~2 mm,星散状分布,表面新鲜干净,常被角闪石交代。紫苏辉石(6%)大致分为2个世代:一世代紫苏辉石呈半自形-他形柱状,粒径为0.2~1 mm,星散状分布;二世代紫苏辉石粒径为0.1~0.5 mm,常与二世代斜长石文象交生,分布于石榴子石周围,常被角闪石交代,





d、e. 正交偏光; f. 单偏光; Pl. 斜长石; Gr、Gt. 石榴子石; Opx. 斜长辉石; Cpx. 单斜辉石; Di. 透辉石; Hy. 紫苏辉石; Hb. 角闪石; Kfs. 钾长石

图3 (a、b、c)高压基性麻粒岩野外照片及(d、e、f)镜下显微照片

Fig. 3 (a、b、c) Field work pictures and (d、e、f) microphoto graphs of the high pressure basic granulite

部分为假象,多色性明显:Ng'=浅绿色,Np'=浅粉色;二代的斜长石、紫苏辉石在石榴子石周围呈放射状分布,明显是石榴子石减压变质后的产物(图3d、图3e、图3f);副矿物为磁铁矿、磷灰石。变质矿物共生组合:①Pl+Gr+Hy+Di;②Pl+Hy+Hb;③Hb+Spr+Zo。

石榴角闪斜长二辉麻粒岩:岩石呈灰色、深灰色、灰绿色,柱粒状变晶结构,块状构造;由斜长石、石榴子石、透辉石、紫苏辉石、角闪石组成。斜长石(30%~35%)大致分为2个世代:第一世代斜长石呈他形粒状,粒径为0.1~1mm,定向分布,常被绢云母及黝帘石交代,少量可见聚片双晶、卡钠复合双晶,牌号:An=47;第二世代斜长石与第二世代紫苏辉石文象交生,重结晶明显,呈他形粒状,粒径为0.3~1mm,分布于石榴子石边部,推测由石榴子石退变而成,内可见聚片双晶,牌号:An=47。石榴子石(10%)以铁铝榴石为主,呈半自形粒状,粒径为1~4mm,杂乱分布。透辉石(25%~30%)呈半自形-他形柱状,粒径为0.5~2.5mm,填隙状、定向分布,局部被角闪石及包林皂石交代。紫苏辉石(7%~8%)大致分为2个世代:第一世代紫苏辉石呈半自形-他形柱状,粒径为0.5~3mm,填隙状、定向分布;第二世代紫苏辉石常与第二世代斜长石文象

交生,粒径为0.1~0.5mm,被角闪石、包林皂石交代,部分为假象,多色性明显:Ng'=浅绿色,Np'=浅粉色。角闪石(20%)呈他形柱状,粒径为0.1~1.5mm,定向分布,常交代辉石,多色性明显:Ng'=棕褐色,Np'=浅褐黄色;副矿物为磁铁矿、磷灰石。主要变质矿物共生组合:①Pl+Gr+Di+Hy。②Pl+Hy+Hb。③Spr+Ep+Zo+Hb。岩相学特征显示,研究区高压麻粒岩变质矿物共生组合可分为3个世代:第一世代为麻粒岩相组合(Pl+Gr+Di+Hy),是高压变质的产物;第二世代为角闪岩相(局部麻粒岩相)组合(Pl+Hb±Hy),其中斜长石、紫苏辉石主要分布于石榴子石周边,交代石榴子石,在石榴子石周边形成白眼圈,角闪石交代透辉石,发生于麻粒岩相退变质过程中的减压熔融作用(深熔作用);第三世代为高绿片岩相组合(Spr+Ep+Zo+Hb),角闪石交代二代紫苏辉石,绢云母、绿泥石、绿帘石、黝帘石等交代辉石、角闪石、长石、石榴子石,为后期构造-热事件的产物。

### 3 分析方法及分析结果

#### 3.1 分析方法

本次用于主量、微量元素测试和年龄同位素

测试的样品均取自于西洋河地区高压基性麻粒岩;在采样过程中尽量避开岩石风化部位,全部选择新鲜的高压麻粒岩样品作为分析测试对象;样品粉碎及锆石分选均在河北省区域地质矿产调查研究院实验室加工完成;锆石制靶、阴极发光(CL)及透、反射照相由北京铀年领航科技有限公司完成。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成;锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图和年龄加权平均值计算采用 ISOPLOT 软件(ver3.0, Ludwig, 2003)完成,得出的同位素比值和年龄误差均在  $1\sigma$  水平;主量和微量元素测试由河北省区域地质矿产调查研究院实验室完成。

### 3.2 分析结果

#### 3.2.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

为了研究西洋河地区高压麻粒形成时代,本次工作对西洋河地区石榴角闪斜长二辉麻粒岩的 1 件样品(采样号 RZ7723-0-1)开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,具体分析数据见表 1。根据样品(CL)图像特征(图 4),锆石自形程度差,呈浑圆状、椭圆状,粒径介于  $60\sim 120\ \mu\text{m}$ ,大部分锆石具有核-边结构,多数锆石边部呈灰白色,核部为灰色或灰黑

色,部分锆石为灰白色或灰色;所有锆石无振荡生长环带,呈弱分带、无分带,具有变质锆石晶型特征。

本次在样品中共选择 23 颗无裂隙的干净锆石进行了 29 个年龄点的测定。从锆石测年结果可以看出(表 1),大部分锆石 U 含量为  $11.7\times 10^{-6}\sim 79.9\times 10^{-6}$ ,少部分为  $100\times 10^{-6}\sim 160\times 10^{-6}$ ;Th 含量为  $0.51\times 10^{-6}\sim 47.4\times 10^{-6}$ ,平均约为  $16.14\times 10^{-6}$ 。锆石 Th/U 值为  $0.10\sim 0.80$ ,平均约 0.34;17 颗锆石 Th/U 值小于 0.4,其余 12 颗锆石 Th/U 值为  $0.5\sim 0.8$ ,显示变质锆石特征。29 个锆石 U-Pb 测年点数据结果频率见图 5a,在锆石 U-Pb 谐和图中(图 5b),所有数据点均位于谐和线上及附近。

根据 CL 图像和分析结果表,Th/U 值大于 0.30 的锆石大多可能发生了 Pb 丢失(3、5、15、21 等),指示较强的变质作用改造。根据分析测试结果,多数锆石核部年龄低于边部年龄,可能是核部锆石在形成过程中经历多期变质作用,造成不同程度的 Pb 丢失所致。Th/U 值低于 0.20 的一组锆石测点(4、18、19、20、23、24),其 CL 图像核幔清楚,加权平均年龄为 1 925.5 Ma,代表了峰期变质年龄;边部发育较好的锆石组(1、3、10、17 等),加权平均年龄为 1 865.5 Ma,应为折返过程中减压变质年龄。

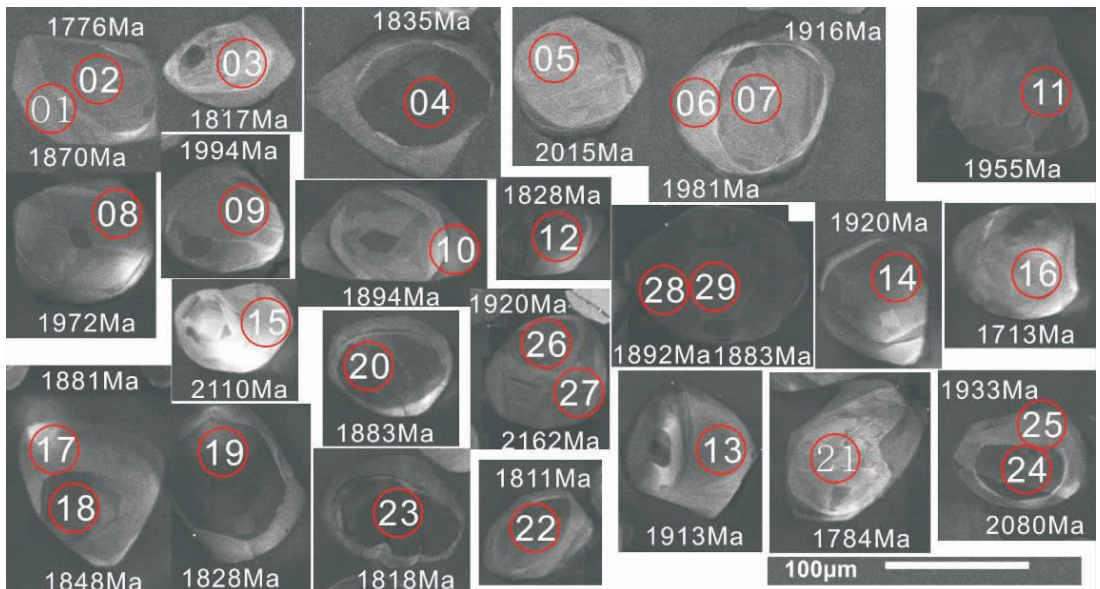


图 4 西洋河地区高压基性麻粒岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 4 Cathodoluminescence(CL) images for zircon grains of the high pressure basic granulite in Xiyanghe area, Huai'an county



## 3.2.2 岩石地球化学

笔者在西洋河地区共采集、分析了5个高压基性麻粒岩样品,开展主量元素和微量元素分析测试,样品编号分别为b4433-0-1、b7676-0-1、Si111-7-1、Si7723-0-1、b7774-0-1。5个样品的岩石地球化学分析结果见表2。鉴于研究区高压基性麻粒岩经历了高级变质作用改造,在样品采集时,尽量选取弱变质-变形的部位,且条带状构造较少或无条带状构造的区域进行分析。根据分析结果,西洋河地区高压基性麻粒岩样品的 $\text{SiO}_2$ 含量介于44.67%~49.89%, $^{\text{T}}\text{FeO}$ 含量介于10.11%~16.17%, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量介于12.68%~16.63%, $\text{CaO}$ 含量介于9.06%~10.91%, $\text{TiO}_2$ 含量不高,介于

0.56%~1.52%, $\text{Na}_2\text{O}$ 含量变化于1.14%~2.67%, $\text{K}_2\text{O}$ 含量变化于0.15%~0.95%, $\text{MgO}$ 含量为6.75%~14.41%,镁指数 $\text{Mg}^{\#}$ 值为34~46。在岩浆岩TAS硅碱图上(图6a),西洋河高压基性麻粒岩样品多数投在亚碱性辉长岩区域;在Y-Zr岩浆系列图解中(图6b),样品处于拉斑玄武岩系列区域,具有拉斑玄武岩的地球化学特征。

西洋河高压基性麻粒岩5件高压基性麻粒岩样品稀土元素总量 $\sum\text{REE}=21\times 10^{-6}\sim 65\times 10^{-6}$ ,低于基性岩类稀土含量平均值; $\text{LREE}/\text{HREE}=2.18\sim 5.24$ ,轻稀土略富集; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于1.03~4.76,一个样品较高,其他样品平均为1.3左右,总体显示轻、重稀土分馏不明显; $\delta\text{Eu}=0.99\sim 1.42$ ,

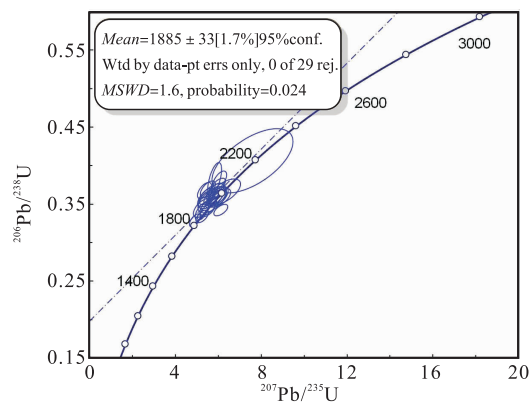
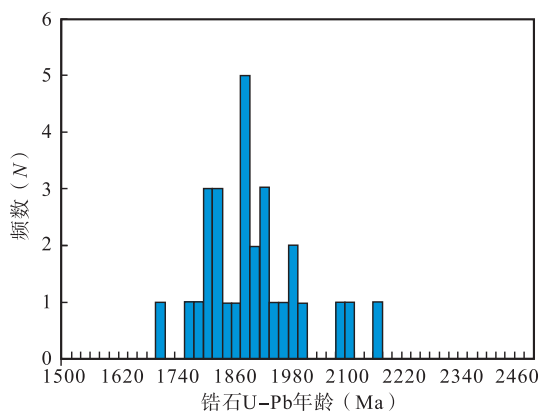
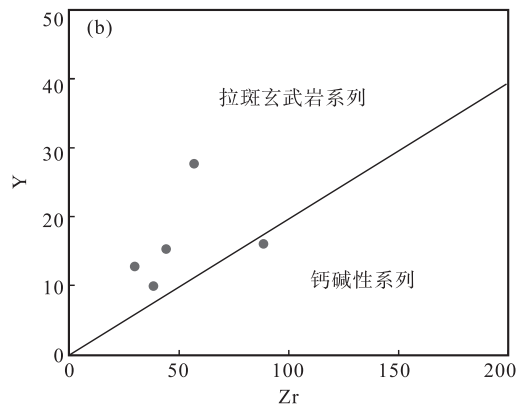
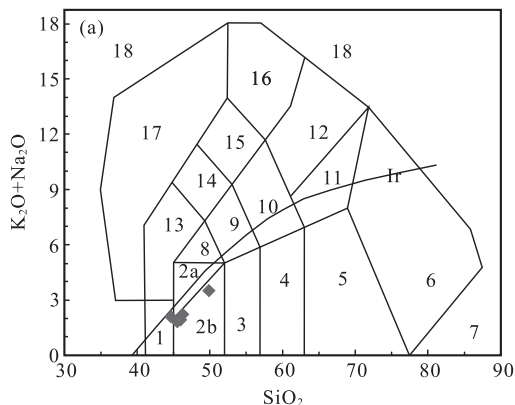


图5 (a)西洋河地区高压基性麻粒岩锆石U-Pb同位素年龄频率图和(b)谐和图

Fig. 5 (a)Histogram and (b)concordia of zircons from the high pressure basic granulite in Xiyanghe area



1. 橄榄辉长岩; 2a. 碱性辉长岩; 2b. 亚碱性辉长岩; 3. 辉长闪长岩; 4. 闪长岩; 5. 花岗闪长岩; 6. 花岗岩; 7. 石英岩; 8. 二长辉长岩; 9. 二长闪长岩; 10. 二长岩; 11. 石英二长岩; 12. 正长岩; 13. 副长石辉长岩; 14. 副长石二长闪长岩; 15. 副长石二长正长岩; 16. 副长正长岩; 17. 副长深长岩; 18. 霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩

图6 (a)西洋河高压基性麻粒岩TAS图解(据Middlemost E A K., 1994)和(b)Y-Zr岩浆系列图解(据Ross and Bedard, 2009修改)

Fig. 6 (a)TAS and (b)Y-Zr diagram of the high pressure mafic granulites in Xiyanghe area

表 1 西洋河地区高压基性麻粒岩 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 测年数据表

Tab. 1 LA - ICP - MS zircon U - Pb isotopic dating for the high pressure basic granulite in Xiyanghe area

测点号	$(10^{-6})$			同位素比值					年龄(Ma)						
	Pb	Th	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$			
TW77230101	24.18	35.1	53.9	0.6	0.334 1	0.005 5	5.247 2	0.195 4	0.004 3	1.858	26	1.860	32	1.870	63
TW77230102	25.66	47.4	57.2	0.8	0.328 8	0.005 6	4.901 4	0.164 0	0.003 6	1.833	27	1.802	28	1.776	61
TW77230103	9.90	12.1	22.9	0.5	0.344 9	0.008 1	5.247 4	0.273 1	0.005 2	1.910	39	1.860	44	1.817	85
TW77230104	62.55	9.74	163	0.1	0.336 0	0.004 2	5.221 5	0.129 5	0.002 6	1.867	20	1.856	21	1.835	43
TW77230105	10.16	9.83	23.2	0.4	0.358 3	0.008 0	6.079 2	0.327 6	0.006 4	1.974	38	1.987	47	2.015	93
TW77230106	12.37	12.2	28.6	0.4	0.359 4	0.008 8	5.961 3	0.327 4	0.006 0	1.979	42	1.970	48	1.981	83
TW77230107	20.96	29.2	48.3	0.6	0.342 1	0.005 6	5.493 2	0.220 7	0.004 7	1.897	27	1.900	35	1.916	72
TW77230108	16.16	21.4	36.0	0.6	0.357 3	0.006 7	5.852 8	0.226 9	0.005 1	1.969	32	1.954	34	1.972	75
TW77230109	19.39	28.1	42.6	0.7	0.359 5	0.006 7	6.006 4	0.232 6	0.004 8	1.980	32	1.977	34	1.994	70
TW77230110	14.58	16.7	32.8	0.5	0.366 0	0.007 5	5.841 2	0.268 7	0.005 0	2.010	36	1.953	40	1.894	78
TW77230111	21.81	9.07	54.1	0.2	0.366 1	0.011 0	6.293 0	0.488 9	0.005 6	2.011	52	2.017	68	1.955	84
TW77230112	14.88	18.3	34.0	0.5	0.358 6	0.007 9	5.444 0	0.255 9	0.005 0	1.976	38	1.892	40	1.828	82
TW77230113	20.71	14.8	52.0	0.3	0.346 9	0.007 5	5.532 9	0.256 9	0.005 6	1.920	36	1.906	40	1.913	85
TW77230114	18.22	20.4	39.5	0.5	0.374 8	0.005 9	6.003 6	0.215 2	0.004 5	2.052	27	1.976	31	1.920	69
TW77230115	5.01	0.51	11.7	0.0	0.404 1	0.012 8	6.816 5	0.411 4	0.007 6	2.188	59	2.088	53	2.110	101
TW77230116	19.26	4.55	47.7	0.1	0.367 7	0.007 0	5.352 8	0.216 0	0.004 0	2.018	33	1.877	35	1.713	70
TW77230117	33.03	9.64	79.9	0.1	0.363 3	0.005 3	5.791 8	0.190 2	0.003 7	1.998	25	1.945	28	1.881	59
TW77230118	41.87	11.9	105	0.1	0.357 9	0.005 8	5.588 4	0.175 3	0.003 5	1.972	28	1.914	27	1.848	55
TW77230119	57.82	7.77	146	0.1	0.382 1	0.014 4	5.826 7	0.213 8	0.003 2	2.086	67	1.950	32	1.828	52
TW77230120	40.46	4.15	101	0.0	0.380 7	0.008 1	6.054 7	0.218 3	0.003 7	2.080	38	1.984	31	1.883	57
TW77230121	13.88	15.0	31.3	0.5	0.369 3	0.007 2	5.508 9	0.232 4	0.004 6	2.026	34	1.902	36	1.784	77
TW77230122	29.26	13.7	72.8	0.2	0.358 5	0.006 1	5.453 6	0.223 6	0.004 3	1.975	29	1.893	35	1.811	70
TW77230123	49.88	12.3	132	0.1	0.340 4	0.007 7	5.226 1	0.203 6	0.004 3	1.889	37	1.857	33	1.818	71
TW77230124	41.60	14.5	104	0.1	0.342 3	0.004 9	6.114 1	0.215 7	0.004 5	1.898	24	1.992	31	2.080	61
TW77230125	18.35	12.4	45.8	0.3	0.355 8	0.011 3	5.716 6	0.441 8	0.007 4	1.962	54	1.934	67	1.933	117
TW77230126	13.56	17.9	30.2	0.6	0.360 3	0.010 7	5.682 3	0.429 8	0.009 0	1.984	51	1.929	65	1.920	137
TW77230127	19.74	23.4	47.3	0.5	0.406 3	0.027 5	7.590 6	1.247 1	0.014 8	2.198	126	2.184	148	2.162	143
TW77230128	38.39	16.2	94.6	0.2	0.352 6	0.004 8	5.663 3	0.168 3	0.003 3	1.947	23	1.926	26	1.892	52
TW77230129	41.31	19.8	100	0.2	0.358 0	0.005 2	5.723 6	0.176 5	0.003 3	1.973	24	1.935	27	1.883	56



表 2 西洋河地区高压基性麻粒岩主量元素(wt%)及微量元素数据表( $10^{-6}$ )

Tab. 2 Major elements(wt%) and trace elements ( $10^{-6}$ ) composition of the high pressure mafic granulites in Xiyanghe area

样品号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	LOI	Total	FeO <sup>T</sup>
b4433-0-1	45.97	0.56	14.82	2.15	11.89	0.26	11.99	9.06	1.76	0.15	0.072	0.40	0.11	1.12	99.79	14.01
b7676-0-1	45.53	0.88	12.68	2.73	10.78	0.20	14.41	9.12	1.23	0.57	0.034	0.67	0.19	1.69	99.87	13.48
Sl11-7-1	49.89	1.09	16.63	1.81	8.35	0.16	6.75	10.36	2.67	0.83	0.12	0.68	0.15	1.20	99.87	10.11
Sl7723-0-1	46.26	0.58	16.12	1.95	9.71	0.19	10.24	10.91	1.53	0.68	0.12	1.10	0.17	1.58	99.89	11.66
b7774-0-1	44.67	1.52	12.68	5.44	10.91	0.27	9.34	10.72	1.14	0.95	0.093	1.60	0.16	2.08	99.82	16.17
样品号	Mg#	Pb	Cr	Ni	Co	Cu	Rb	Sr	Ba	Sc	Nb	Ta	Zr	Hf	Ga	U
b4433-0-1	40	17.7	255	119	62.6	57.1	14.2	290	125	40.7	4.93	0.31	44.1	1.16	13.8	0.18
b7676-0-1	46	5.16	254	303	80.9	51.7	17.1	50.5	159	31.2	2.23	0.26	29.9	0.95	16.4	0.19
Sl11-7-1	34	1.44	122	94.6	42.9	14.3	7.09	368	128	27.0	3.22	0.32	88.3	3.36	20.9	0.25
Sl7723-0-1	41	0.85	242	188	56.4	11.5	5.37	80.8	124	34.5	2.26	0.19	38.4	1.07	11.1	0.093
b7774-0-1	31	2.07	234	129	67.7	40.1	23.8	252	414	46.1	4.78	0.37	56.8	2.13	19.3	0.03
样品号	Th	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
b4433-0-1	0.81	7.83	18.1	2.61	11.4	2.40	0.74	2.19	0.46	2.73	0.58	1.65	0.32	2.08	0.30	15.3
b7676-0-1	2.56	2.73	7.28	1.47	7.93	2.23	0.82	2.22	0.42	2.47	0.49	1.40	0.25	1.55	0.29	12.7
Sl11-7-1	1.38	10.8	22.7	3.15	13.5	3.11	1.02	2.42	0.45	3.20	0.58	1.44	0.32	1.63	0.32	16.1
Sl7723-0-1	0.64	2.10	4.99	0.98	4.96	1.33	0.49	0.83	0.20	1.75	0.35	0.91	0.24	1.46	0.23	9.98
b7774-0-1	0.17	4.47	14.4	1.95	10.1	3.26	1.27	2.84	0.75	5.15	1.02	2.79	0.45	2.83	0.43	27.6
样品号	ΣREE	LREE	HREE	L/H	δEu	δCe	(La/Yb) <sub>N</sub>	(La/Sm) <sub>N</sub>								
b4433-0-1	53	43	10	4.18	0.99	0.98	2.70	2.05								
b7676-0-1	32	22	9	2.47	1.13	0.89	1.26	0.77								
Sl11-7-1	65	54	10	5.24	1.14	0.95	4.76	2.19								
Sl7723-0-1	21	15	6	2.48	1.42	0.85	1.03	1.00								
b7774-0-1	52	35	16	2.18	1.28	1.19	1.13	0.86								

无或具弱的正 Eu 异常;稀土元素配分模式曲线整体相对平坦,与 E - MORB 玄武岩特征较相近,与 OIB 玄武岩差异较明显(图 7a)。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 7b),所有样品相对富集 LILE (Rb、Ba、Sr),相对亏损 HFSE (Nb、Ta、P、Ti);除 b7676 - 0 - 1 样品 Rb/Sr 值高于原始地幔平均值外,其他 4 件样品 Rb/Sr 值

介于 0.019~0.094,平均值为 0.057,与原始地幔值(0.037)接近,显示其具有地幔岩的特征;Ni 含量介于  $94.6.9 \times 10^{-6} \sim 303 \times 10^{-6}$ ,Cr 含量介于  $122 \times 10^{-6} \sim 255 \times 10^{-6}$ ,与基性岩较相近;La/Ta 平均值为 18.53,小于 20;在微量元素比值蜘蛛网图中,所有样品相对富集 LILE (Rb、Ba、Sr),相对亏损 HFSE (Nb、Ta、P、Ti)(图 7b)。

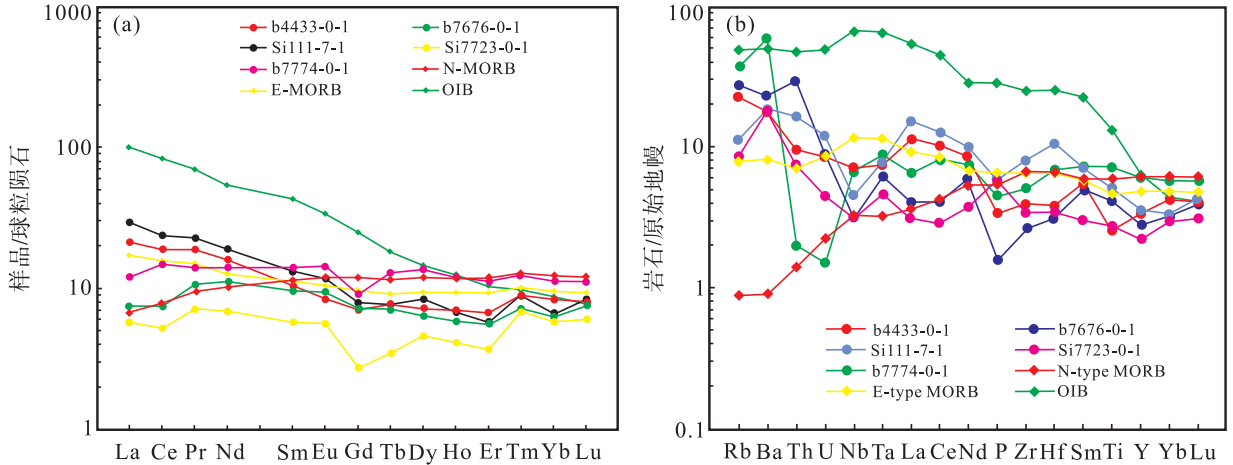


图 7 (a)西洋河地区高压基性麻粒岩球粒陨石标准化稀土元素配分图和(b)原始地幔标准化微量元素蛛网图  
(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 (a)Chondrite-normalized REE patterns and (b)primitive-mantle normalized spider diagrams of the high pressure mafic granulites in Xiyanghe area(Normalization values after Sun and McDonough, 1989)

## 4 讨论

在经历复杂变质作用改造过程中,由于受到交代作用、部分熔融及流体迁移等影响,一些活动性较强的元素含量变化较大。已有研究表明(Rudnick et al., 1985; Rollinson, 1993; Kerich et al., 1999; Polat et al., 2003; Polat et al., 2002, 2009; 刘平华等, 2012; 张家辉等, 2019),大离子亲石元素(K、Rb、Sr、Ba、Cs等)在变质作用过程特别是高级变质作用中往往属于活动元素,而稀土元素和高场强元素(Th、Nb、Ta、Zr、Hf、Y等)及 Ti 元素等活动性相对较弱。在角闪岩相和麻粒岩相的变质条件下,变质岩的稀土元素含量可能会发生一些变化,但其稀土元素的组成模式不会发生变化(张家辉等, 2019)。由于西洋河研究区处于高级变质岩区,岩石普遍发生角闪岩相-麻粒岩相变质作用,因此,笔者主要选择不活泼元素 Th、高场强元素及稀土

元素等在变质作用过程表现不活泼的元素进行岩石分类及成因讨论,它们基本可以反映原岩的成分特征及成因属性。

### 4.1 原岩特征

D. M. Shaw(1965)利用 X 函数区分变质岩的原岩类型,这种方法可不使用活动性较大的 K、Na、Si 等元素,避免交代作用的影响。函数判别式为:

$$X = -2.69 \lg \text{Cr} - 3.18 \lg \text{V} - 1.25 \lg \text{Ni} + 10.57 \lg \text{Co} + 7.73 \lg \text{Sc} + 7.5 \lg \text{Sr} - 1.95 \lg \text{Ba} - 1.99 \lg \text{Zr} - 19.58 \quad (1)$$

对于变质岩来说,当根据岩石微量元素计算的 X 值大于零,指示原岩为正变质岩;X 值小于零,则指示原岩为副变质岩。根据函数判别式计算得出西洋河地区高压基性麻粒岩的 X 值都为正值, X 介于 0.72~6.56,指示研究区高压基性麻粒岩的原岩为火成岩。利用 Tarney(1976)研究北大西洋克拉通太古代强变质片麻岩提出的  $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2$  图解(图 8a)及 Walker 等(1960)研究澳大利亚地区的前寒

武纪碱性火成岩变质作用和交代作用提出的  $MgO - CaO - FeO^*$  图解(图 8b),对西洋河地区高压基性

麻粒岩进行投点,发现研究区高压基性麻粒岩都在火成岩区域。

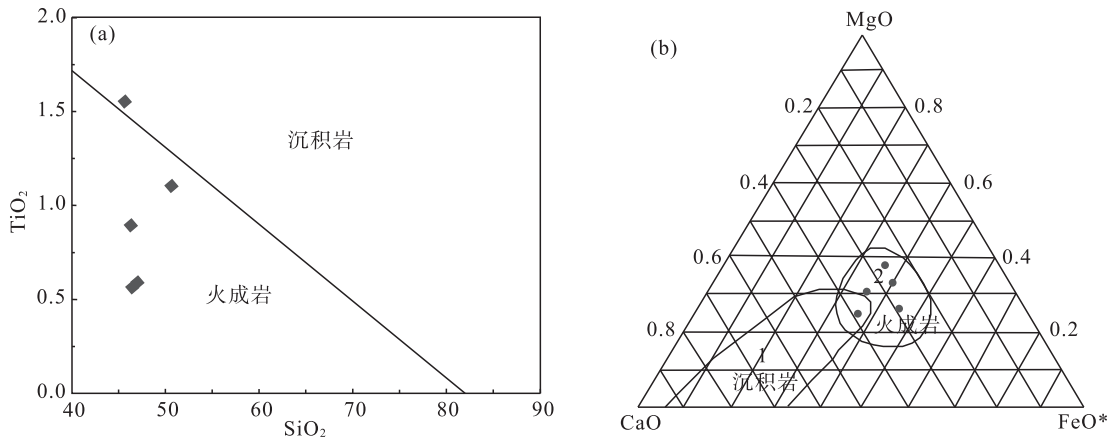


图 8 (a) 西洋河地区高压基性麻粒岩  $TiO_2 - SiO_2$  图解 (Tarney, 1976) 和  
(b)  $MgO - CaO - FeO^*$  图解 (Walker et al., 1960)

Fig. 8 (a)  $TiO_2 - SiO_2$  (After Tarney, 1976) and (b)  $MgO - CaO - FeO^*$  (After Walker et al., 1960) diagram of the high pressure mafic granulites in Xiyanghe area

## 4.2 岩石成因

本次工作在西洋河地区发现的高压基性麻粒岩以含石榴子石为特征,具有典型的高压麻粒岩的矿物组合和白眼圈结构。石榴子石的白眼圈结构记录了麻粒岩相的退变质过程,而岩石基质部分则记录了角闪岩相退变过程。西洋河研究区高压基性麻粒岩与前人在宣化地区(郭敬辉等,1993,1996;张华峰等,2006)、阳原县西北(张华峰等,2006)、怀安蔓菁沟(翟明国等,1992;郭敬辉等,1993;刘福来,1995;Guo et al., 2002, 2005; Zhao et al., 2008, 2010; Wang et al., 2010; Liu et al., 2012b; 曲敏等, 2011; Zhang et al., 2011a, b)、兴和黄土窑(Zhang et al., 2016b)及恒山(王仁民等,1991; Zhao et al., 2001; 魏春景, 2018)等地发现的高压基性麻粒岩类似。高压基性麻粒岩在野外露头尺度多呈岩墙状或构造透视镜体出于 TTG 片麻岩中,其原岩为镁铁质岩墙(赵国春, 2009),岩性相对单一,没有相伴生的其他类型的岩石。由此推断这些高压基性麻粒岩可能具有相同的成因属性。这类高压基性麻粒岩与张家辉等(2019)报道的天镇-怀安地区赵家窑一带的“MORB”型高压麻粒岩成因明显不同,后者为一套“高压基性麻粒岩-大理岩-富铝片麻岩”组合,指示古元古代可能存在洋壳物质。

依据地球化学研究,表明西洋河高压基性麻粒

岩的原岩性质为亚碱性拉斑质基性岩类;具相对平坦的稀土配分模式; Nb、Ta 负异常不明显,稀土元素配分模式和微量元素特征显示其具 E-MORB 型特征。同时,西洋河地区高压基性麻粒岩具有较低的  $TiO_2$ 、MgO、Ni 和 Cr 含量,且具有低的  $Mg^\#$  值(31~46),表明地幔源区可能经历了橄榄石和辉石的分离。西洋河高压基性麻粒岩原岩为辉长岩,其原岩岩浆属拉斑玄武岩系列;推断其可能产生于古汇聚板块边缘附近。因此,西洋河地区高压基性麻粒岩具有 E-MORB 型地球化学属性。

## 4.3 变质时代

自高压麻粒岩发现至今,前人对其形成时代、变质时代认识长期不统一。郭敬辉等(2001)采用  $^{40}Ar - ^{39}Ar$  阶段加热法研究华北桑干地区高压基性麻粒岩的变斑晶石榴子石,获得  $^{40}Ar - ^{39}Ar$  坪年龄(1 852 ± 8)Ma;  $^{40}Ar - ^{39}Ar$  等时线年龄(1 862 ± 37)Ma 代表了高压基性麻粒岩后期折返发生变质作用的年龄。张华锋等(2006)等在桑干地区高压麻粒岩中获得了(1 792 ± 12)Ma 和(1 891 ± 46)Ma 2 组锆石 SHRIMP 年龄,并认为(1 792 ± 12)Ma 可能代表退变质年龄,而(1 891 ± 46)Ma 限定了高压麻粒岩峰期变质年龄的上限。Zhao 等(2008)在怀安蔓菁沟高压基性麻粒岩中获得 2 200~1 960 Ma 的年龄信息,并认为 2 200 Ma 为捕获锆石的年龄。Wang

等(2015a)在大同孤山高压基性麻粒岩中获得 2 200~1 990 Ma 的年龄信息,认为其形成年龄在~2 200 Ma。Zhang 等(2016b)在天镇下阴山和兴和黄土窑高压基性麻粒岩中分别获得了(2 035±66)Ma 和(2 016±11)Ma 的测年结果,并认为其为高压麻粒岩原岩的形成年龄。

总结前人年代学研究结果,怀安地区石榴高压基性麻粒岩均记录有 2 200~2 000 Ma 的年龄信息,其中相对集中的年龄在~2 000 Ga,该年龄与集宁岩群孔兹岩中碎屑锆石峰期年龄一致(蔡佳等,2017;Cai et al.,2017),可能代表了一次强烈的构造热事件(张家辉等,2019)。怀安杂岩中新太古代 TTG 片麻岩、古元古代变泥质岩(孔兹岩)和高压基性麻粒岩均记录了 1 950~1 900 Ma 和~1 850 Ga 2 期重要的变质年龄(Zhao et al.,2005,2010;Liu et al.,2009,2012;Wang et al.,2010;Zhang et al.,2012;魏颖等,2013;Su et al.,2014;蔡佳等,2017;张家辉等,2019;Liao and Wei,2019),分别代表了高压麻粒岩相峰期变质年龄和后期折返的退变质时限(Zhang et al.,2016b;Wang et al.,2015a)。

研究区高压麻粒岩在太古宙桑干岩群中呈岩脉状产出,局部在新太古代变质深成岩(TTG+G 片麻岩)中呈大小不一的包体(捕虏体)形式产出,证明高压麻粒岩的形成时代早于新太古代变质深成岩。区内新太古代 TTG+G 岩系侵入桑干岩群,二者片麻理产状相同,构造样式一致,均发育轴面近水平的小型无根褶皱,说明其经历了相同的变质、变形历程。根据变质矿物共生组合及世代,岩石主要经历了麻粒岩相变质和角闪岩相、绿片岩相退变质作用的改造。本论文依托项目在太古宙桑干岩群变质表壳岩及新太古代变质深成岩中获得了 2 984~2 800 Ma、2 600~2 500 Ma、2 300~2 200 Ma、1 900~1 800 Ma 的多组锆石 U-Pb 同位素年龄数据;在早前寒武纪变质地体中获得了 25 亿 a 左右及 18~19 亿 a 2 个峰值(图 9)。

依据本次西洋河地区高压基性麻粒岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果,共获得了 2 015~2 162 Ma、1 925.5 Ma、1 865.5 Ma 等几组年龄信息,这些年龄信息记录了其复杂的变质作用演化历史。由于高级变质作用下,基性岩中锆石可能发生了 U-Th-Pb 体系的部分重置,最老的一组年龄 2 015~2 162 Ma 误差较大,也不可能代表原岩的形成年龄,

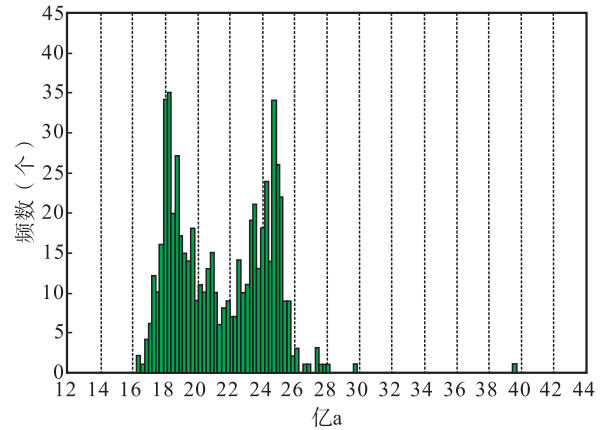


图 9 华北克拉通早前寒武纪地体测年结果统计图

Fig. 9 Relative probability plot of the zircon U-Pb ages from early-Cambrian terrain in North China Craton

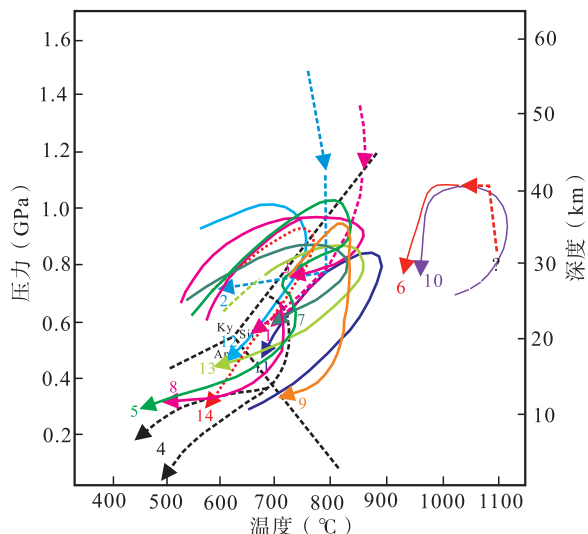
但可以限定原岩年龄下限,即西洋河地区高压基性麻粒岩形成年龄早于 2 162 Ma,其形成年龄可能与大同孤山、怀安蔓菁沟等地区的高压基性麻粒岩形成时代一致;而在西洋河高压基性麻粒岩中获得的另外 2 组变质年龄 1 925.5 Ma、1 865.5 Ma,对应着区域上古元古代 2 期主要的变质年龄,即峰期高压麻粒岩相变质作用时代和后期退变质作用时代。

#### 4.4 构造意义

高压变质岩(带)是指示板块构造的重要标志之一,可以指示曾有地表岩石被俯冲到深部,是俯冲、消减与碰撞的岩石学证据(翟明国,2012;张家辉等,2019)。华北克拉通在约 2 500 Ma 太古宙结束时已基本形成,在 2 300 Ma 之前处于相对稳定的构造环境(翟明国等,2007)。古元古代是华北克拉通重要的构造深化阶段,2 300~1 950 Ma,华北克拉通在古元古代中后期发生了裂解-俯冲-增生-碰撞等一系列连续的造山演化过程。华北克拉通太古宙基底在 2 350~2 000 Ma 发生弧后伸展,形成双峰式岩浆作用和沉积作用(Wei et al.,2014);~1 950 Ma,发生碰撞造山,地壳加厚;在 1 930~1 800 Ma,加厚地壳抬升、缓慢冷却(魏春景,2018)。郭敬辉(2001)研究认为,华北克拉通在 1 870~1 840 Ma 发生高压变质作用,其古陆块在早元古代末期发生碰撞拼合。怀安杂岩和恒山杂岩中的一系列高压基性麻粒岩中不同期次的变质矿物组合和 P-T 演化轨迹(图 10)代表了古元古代大规模的碰撞造山事件。由于在华北克拉通目前尚未发现指示构造缝合带的古元古代残余洋壳物质(或蛇绿岩),大部分地质学



家多以高压变质岩(带)或麻粒岩带划分古元古代碰撞造山带,但造山带的构造边界及演化过程仍存在较大争议。张家辉等(2019)在怀安杂岩西赵家窑地区新识别出具古洋壳性质的“MORB”型高压麻粒岩-大理岩-富铝片麻岩组合,指示华北地区在古元古代可能存在洋壳物质。



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. 集宁杂岩(孔兹岩与麻粒岩)第一期变质事件(2.4Ga)(卢良兆,1991);4. 集宁杂岩(孔兹岩与麻粒岩)第二次变质事件(2.0~1.8Ga)(卢良兆,1991);5. 冀西北孔兹岩系(卢良兆等,1996);6. 土贵乌拉超高温变质岩(Santosh et al., 2007a);6. 集宁杂岩(孔兹岩与麻粒岩)(卢良兆,1992);7. 集宁杂岩(孔兹岩与麻粒岩)(卢良兆,1992);9. 大同杂岩(麻粒岩)(刘福来,1997);10. 土贵乌拉超高温变质岩(刘守偈,2008);11、12为吴昌华据卢良兆(1991)修改的麻粒岩的轨迹;13. 集宁岩群(赵国春, 1999);14. 集宁岩群(王舫,2008)

图 10 华北中北部造山带不同变质岩杂岩区变质作用 P-T 轨迹图

Fig. 10 The P-T path of Metamorphic rocks from the Metamorphic complexes in the Trans-North China Orogeny

笔者新识别出的西洋河地区高压基性麻粒岩也经历了与区域内岩墙型高压基性麻粒岩相同的变质作用,该过程与古元古代深俯冲-碰撞造山事件有关。~2 300 Ma,华北克拉通经历了一次基底陆块的拉伸-破裂事件,有地幔上涌并伴随基性岩浆的底侵作用,在西洋河地区形成古洋壳;之后随着古洋壳的俯冲作用,形成西洋河地区 MORB 型辉长岩;~1 900 Ma,进一步发生深俯冲至上地幔-下地壳,发生岩浆熔离作用和峰期麻粒岩相变

质作用;~1 800 Ma,后期折返发生麻粒岩相温压条件下的减压作用。

## 5 结论

(1)怀安县西洋河地区新识别出的高压基性麻粒岩原岩为亚碱性拉斑质辉长岩,配分曲线整体相对平坦,显示有弱的右倾型; $(La/Yb)_N$  值为 1.03~4.76,  $(La/Sm)_N = 0.77 \sim 2.19$ , 无或具弱的正 Eu 异常( $\delta Eu = 0.99 \sim 1.42$ );相对富集 LILE(Rb、Ba、Sr),相对亏损 HFSE(Nb、Ta、P、Ti),具有 MORB 型玄武岩地球化学特征。

(2)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,西洋河地区高压麻粒岩的形成年龄早于 2 162 Ma,峰期高压麻粒岩相变质作用年龄为 1 925 Ma,麻粒岩相退变质作用和减压熔融时限为 1 865 Ma。

(3)西洋河地区高压基性麻粒岩记录峰期高压麻粒岩相和后期麻粒岩相-角闪岩相退变质过程,代表了古元古代碰撞造山过程;为研究华北克拉通古元古代造山带早期构造环境提供了重要信息。

致谢:本文是区调项目“1:5 万西洋河、套里庄、鹿尾沟、怀安县、水闸屯幅幅区域地质矿产调查”研究成果。野外工作以及论文写作过程中得到天津地质调查中心谷永昌高级工程师与河北省地质矿产调查研究院胡醒民高级工程师的指导与帮助;LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试得到中国地质大学(武汉)实验室的支持;两位匿名审稿专家在审稿中提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

## 参考文献(References):

- 党智财,李俊建,赵泽霖,等. 华北板块北缘中段含铜镍铂镁铁超镁铁岩地球化学特征[J]. 西北地质, 2015, 48(2): 73-83.
- DANG Zhicai, LI Junjian, ZHAO Zelin, et al. Geochemistry of Cu-Ni (PGE) Sulfide-bearing Mafic-ultramafic Rocks on the Middle Segment of the North China Plate [J]. Northwestern Geology, 2015, 48(2): 73-83.
- 耿元生,沈其韩. 冀西北石榴基性麻粒岩中辉石的演化及其地质意义[J]. 岩石学报, 2000, 16(1): 29-38.
- GENG Yuansheng, SHEN Qihan. Mineral evolution of py-

- roxenes of garnet mafic granulites in northwestern Hebei province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(1): 29-38.
- 郭敬辉, 翟明国, 张毅刚, 等. 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*, 1993, 9(4): 329-341.
- GUO Jinghui, ZHAI Mingguo, ZHANG Yigang, et al. 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*, 1993, 9(4): 329-341.
- 郭敬辉, 翟明国, 李江海, 等. 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[J]. *岩石学报*, 1996, 12(2): 193-207.
- GUO Jinghui, ZHAI Mingguo, LI Jianghai, et al. Nature of the Early Precambrian Sanggan structure zone in North China Craton; Evidence from rock association[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1996, 12(2): 193-207.
- 刘树文, 沈其韩. 冀西北两类石榴基性麻粒岩的变质演化及 Gibbs 方法分析[J]. *岩石学报*, 1996, 12(2): 261-275
- LIU Shuwen, SHEN Qihan. Metamorphic Evolution of Two Types of Garnet-Granulites in Northwestern Hebei Province and Analyses by Gibbs Method[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1996, 12(2): 261-275.
- 李江海, 翟明国, 李永刚, 等. 冀北滦平-承德一带晚太古代高压麻粒岩的发现及其构造地质意义[J]. *岩石学报*, 1998, 1(34-41).
- LI Jianghai, ZHAI Mingguo, LI Yonggang, et al. The Discovery of Neoproterozoic High-pressure Granulites in Luoping-Chengde Area, Northern Hebei, and Their Tectono-geological Implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, 1(34-41).
- 马军, 王仁民. 宣化-赤城高压麻粒岩带中蓝晶石-正条纹长石组合的发现及地质意义[J]. *岩石学报*, 1995, 11(3): 273-278
- MA Jun, WANG Renmin. The Discovery of Coexisting Kyanite + Perthite Assemblage in Xuanhua-Chicheng High-Pressure Granulite Belt and its Geological Significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11(3): 273-278.
- 王权, 张兆琪, 张超, 等. 1: 25 万大同市幅 K49C004004 区域地质调查报告[R] 山西省地质调查院, 2010-2012
- 王仁民, 陈珍珍, 陈飞. 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*, 1991, 7(4): 36-45.
- WANG Renmin, CHEN Zhenzhen, CHEN Fei. Grey tonalitic gneiss and high-pressure granulite inclusions in the Hengshan, Shanxi Province, and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1991, 7(4): 36-45.
- 杨仲杰, 宋淑娥, 刘长纯, 等. 辽宁阜新地区太古宙变质岩变质作用及其演化规律[J]. *西北地质*, 2017, 50(4).
- YANG Zhongjie, SONG Shu'e, LIU Changchun, et al. Metamorphism of Archean Metamorphic Rocks from Fuxin Area in Liaoning Province and Their Evolution [J]. *Northwestern Geology* 2017, 50(4).
- 张家辉, 田辉, 王惠初, 等. 华北克拉通怀安杂岩中早寒武纪两期变质壳岩的重新厘定: 岩石学及锆石 U-Pb 年代学证据[J]. *地球科学*, 2019, 44(1): 1-22.
- ZHANG Jiahui, TIAN Hui, WANG Huichu, et al. Re-definition of the two-stage Early-Precambrian meta-supracrustal rocks in the Huai'an Complex, North China Craton; Evidences from petrology and zircon U-Pb geochronology[J]. *Earth Science*, 2019a, 44(1): 1-22.
- 张华锋, 翟明国, 彭澎. 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*, 2006, 13(3): 190-199.
- ZHANG Huafeng, ZHAI Mingguo, PENG Peng. Zircon SHRIMP U-Pb age of the Paleoproterozoic high-pressure granulites from the Sanggan area, the North China Craton and its geologic implications [J]. *Geoscience Frontiers*, 2006, 13(3): 190-199.
- 赵国春. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论[J]. *岩石学报*, 2009, 25(8): 1772-1792.
- ZHAO Guochun. Discussion on metamorphic evolution of main tectonic units in the basement of North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(8): 1772-1792.
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 等. 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)*, 1992, (12): 1325-1330.
- ZHAI Mingguo, GUO Jinghui, YAN Yuehua, et al. Discovery of high-pressure basic granulite terrain in North China Archean Craton and preliminary study[J]. *Science in China(Series B)*, 1992, (12): 1325-1330.
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 等. 太古宙克拉通型下地壳剖面: 华北怀安-丰镇-尚义的麻粒岩-角闪岩系[J]. *岩石学报*, 1996, 12(2): 222-238.
- ZHAI Mingguo, GUO Jinghui, YAN Yuehua, et al. An

- Oblique Cross Section of Archaean Continental Crust in Shanxi Hebei Nei Mongol Jnnctnve Area, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1996, 12(2): 261-275.
- 翟明国, 彭澎. 华北克拉通古元古代构造事件[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2665-2682.
- ZHAI Mingguo, PENG Peng. Paleoproterozoic tectonic events in the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2665-2682.
- Agrawal Salil, Guevara Mirna, Verma Surendra P., Tecnic Discrimination of Basic and Ultrabasic Rocks Though Log-transformed Ratios of Immobile Trace Elements. [J]. *International Geological Review*, 2008, 50(12), 1057-1079.
- Middlemost Eric A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 1994, 37(3-4): 215-224.
- Ross, Pierre Simo. and Bedard Jean H. Magmatic affinity of modern and ancient ubalkaline volcanic rocks determined from trace-element discriminant diagrams[J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 2009, 46, 823-839.
- Sun Shensu and McDonough William F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ(eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- Tarney J. Geochemistry of Archaean high-grade gneisses, with implications as to the origin and evolution of the Precambrian crust[J]. 1976. *The Early History Of The Earth*. 405-417.
- Wang Luojuan, Guo Jinghui, Peng Peng, et al. Lithological units at the boundary zone between the Jining and Huai'an complexes (central-northern margin of the North China Craton): A Paleoproterozoic tectonic mélange? [J]. *Lithos*, 2015a, 227: 205-224.
- Walker K. R., Joplin Germaine A., Lovering J. F. et al. Metamorphic and metasomatic convergence of basic igneous rocks and lime magnesia sediments of the Precambrian of northwestern Queensland[J]. *Journal of the Geological Society of Australia* 1960, 6, 149-78.
- Zhai Mingguo. Cratonization and the Ancient North China-Continent: A summary and review[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2011, 54(8): 1110-1120.
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde Simonv A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. *Journal of Asian sciences*, 2005, 136(2): 177-202.
- Zhao Guochun, Wilde Simonv A, Sun Min, et al. SHRIMP U - Pb zircon geochronology of the Huai'an Complex; Constraints on Late Archean to Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events in the trans-North China Orogen[J]. *American Journal of Science*, 2008, 308(3): 270-303.
- Zhao Guochun and Zhai Mingguo. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1207-1240.
- Zhang Huafeng, Wang Haozheng, Santosh M. et al. Zircon U - Pb ages of Paleoproterozoic mafic granulites from the Huai'an terrane, North China Craton(NCC): Implications for timing of cratonization and crustal evolution history [J]. *Precambrian Research*, 2015, 272: 244-263.