

华北克拉通的形成演化与成矿作用^{*}

翟明国^{1,2}

(1 中国科学院地质与地球物理研究所中国科学院矿产资源重点实验室, 北京 100029;

2 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 华北克拉通具有 38 亿年的漫长历史, 特别是与其他克拉通相比, 它有更为复杂的多阶段的构造演化史, 记录了几乎所有的地壳早期发展与中生代以来的重大构造事件。在太古宙, 华北克拉通经历了 >3.0 Ga 的陆核与微陆块的形成, $2.7\sim 2.9$ Ga 的陆壳增生, 2.5 Ga 的岩浆、变质作用与克拉通化, $2.3\sim 1.9$ Ga 的古元古代活动(造山)带, 1.8 Ga 的基底隆升与裂谷-非造山岩浆事件。在新元古代—古生代, 华北克拉通处于相对稳定的地台状态, 其南、北缘受到秦岭造山带和中亚造山带的影响, 在中生代, 华北克拉通则经历了强烈的中生代构造格局的转变和克拉通的破坏与重建, 在新生代, 华北克拉通的东缘属于环太平洋构造带的一部分。与上述重大构造事件相对应, 华北克拉通出现大规模的成矿作用, 形成了丰富多样的固体矿产资源。华北克拉通的形成与演化及其不同类型的成矿系统, 为深刻理解大地构造背景对成矿作用的制约提供了范例。

关键词 地质学, 华北克拉通, 陆壳演化, 构造背景, 成矿作用

中图分类号: P611

文献标志码: A

Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton

ZHAI MingGuo^{1,2}

(1 Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2 State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract

The North China Craton (NCC) is one of the oldest cratons in the world, with the age of the old crust up to ~ 3.8 Ga. It has a complicated evolution history and has recorded almost all the important geological events of the Earth. The main early Precambrian geological events and key tectonic issues are as follows: Old continental nuclei and main crustal growth in the NCC took place at $2.7\sim 2.9$ Ga; By 2.5 Ga, the micro-blocks had amalgamated to form a coherent craton; the $2300\sim 1950$ Ma Paleoproterozoic mobile belts came into being; the 1800 Ma lower crust uplifted as a whole; and there occurred mafic dyke swarm, continental rifting and intrusion of orogenic magmatic association. In the period of Neoproterozoic and Paleozoic, the NCC was tectonically inactive but was affected by the Central Asian Orogenic Belt. The North China Craton probably experienced disruption and reconstruction in Mesozoic and belonged to the Circling Pacific Orogenic Belt in Cenozoic. The North China Craton has abundant ore deposits corresponding in age to the above important geological events. Mesozoic metallogenesis was closely related to Mesozoic tectonic inversion and lithospheric thinning. The main ore-forming types include porphyry Mo-polymetallic deposits and large-scale metallogenic gold explosion related to partial melting of the basement and granitic intrusion.

Key words: geology, North China Craton, continental crust evolution, geological setting, metallogenesis

^{*} 本文是国家基础研究重点项目(2006CB403504)和国家自然科学基金项目(40672128, 90714003, 40721062)的研究成果

第一作者简介 翟明国, 男, 1947 年生, 研究员, 中国科学院院士, 主要研究前寒武纪地质与变质地质学。Email: mgzhai@mail.igcas.ac.cn

华北克拉通的分布面积约有 300 000 km², 是中国境内保存较好的古陆块。华北克拉通有大于 3.8 Ga 的古老历史遗迹, 构造演化复杂, 岩石类型多样, 极具特点。20 世纪 90 年代以来有关高压麻粒岩、退变榴辉岩、超高温变质地体的发现以及有争议的约 2.5 Ga 蛇绿岩的报道, 使华北克拉通的早前寒武纪的研究受到国际同行的密切关注。程裕祺(1994)、沈其韩等(1992)、赵宗溥等(1993)、白瑾等(1993)、伍家善等(1998)和 Zhai(2004a)都对华北克拉通的前寒武纪地质演化作过系统总结。其主要特点是: 残留有 >3.8 Ga 的冥古宙的岩石与物质残留, 在 >3.0 Ga 形成了若干古陆核或微陆块, 在 2.7~2.9 Ga 经历了广泛的陆壳增生事件, 以基性火山岩的喷发和 TTG 片麻岩的形成特点。2.5 Ga 的构造与变质-岩浆事件是华北最重要的构造事件, 标志着华北微陆块的拼合与克拉通化(Zhai et al., 2000a; 2000b; Geng et al., 2006; Wan, 2009)。元古宙华北克拉通经历的地质演化可以分为古元古代活动(造山)带和基底隆升与裂谷事件, 已经被分别假设与古元古代的超大陆形成与裂解相对应(Zhao et al., 2003; 翟明国, 2004b)。新元古代和古生代华北克拉通的演化进入地台阶段, 克拉通普遍接受了稳定的盖层沉积, 岩浆构造活动较弱。其北缘、南缘与造山带的关系也日益被研究者所重视(倪志耀等, 2004; Zhang et al., 2007)。Kusky 等(2007)提出古陆块从古老的造山作用到克拉通的形成与演化、又到造山作用等问题, 华北克拉通的演化涵盖了大陆演化中几乎所有的科学问题。

华北克拉通内赋存有重要的矿产资源, 而且它们都与重大的构造事件相联系。如太古宙的巨量条带状铁矿、元古宙的稀土元素矿、中生代的金矿等, 对于壳幔演化与金属元素的堆积和成矿作用具有重大意义。张秋生等(1984)、翟裕生等(1999)、沈宝丰等(2006)都对华北的成矿作用进行了全面的论述与总结。

1 华北克拉通的古陆壳与重大构造事件

1.1 最古老陆壳

中国最古老的岩石年龄首先是由 Jahn 等(1983)报道, 他们从冀东曹庄的黄柏峪片麻岩中的角闪岩包体获得了 35 亿年的 Sm-Nd 等时线, 尔后 Huang 等(1986)验证了这个年龄。刘敦一(1991)和刘敦一等(1994)先后得到曹庄的铬云母石英岩中的碎屑锆石 3.35~3.85 Ga 的 U-Pb 年龄, 提出中国有大于 3.8 Ga 的古老大陆存在。Liu 等(1992)、Song 等(1996)和 Wan 等(2005)报道了鞍山地区的花岗片麻岩-奥长花岗岩的 3.35~3.85 Ga 的离子探针锆石微区和 SHRIMP U-Pb 年龄。根据 Hf 同位素的锆石原位分析, Wu 等(2008)认为片麻岩岩浆的侵位年龄是 3.3 Ga, 其锆石指示了曾有更古老的 3.4 Ga、3.6 Ga 和 3.9 Ga 的陆壳物质。近年来, 有更多的有关华北冥古宙和古太古代古老物质的报道, 如辽宁大石桥角闪变粒岩中 3 300~3 330 Ma 的继承锆石年龄(沈其韩等, 2005)、固阳角闪花岗岩的 (3 484 ± 19) Ma 继承锆石年

龄(耿元生, 2009)、太行山南段云台山副片麻岩中 (3 399 ± 8) Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(高林志等, 2005)、嵩山石英岩中的约 3 400 Ma 的碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄(第五春荣等, 2008)、安徽蚌埠和胶东的花岗岩中的继承或捕获的锆石 >3 400~3 450 Ma 的 U-Pb 年龄(靳克等, 2003; Wang et al., 1998); 河南信阳火山角砾岩中的 (3 578 ± 54) Ma 的 SIMS 锆石 U-Pb 年龄(Zheng et al., 2004)、阿拉善东部叠布斯格透辉斜长角闪片麻岩的锆石核部 (3 570 ± 7) Ma 的 U-Pb 年龄(耿元生等, 2007)、华北克拉通西南缘、北秦岭南段的陇山群、宽坪群碎屑锆石 3 010~3 570 Ma U-Pb 年龄和奥陶纪火山岩中 4 100 Ma 的锆石残留年龄(Zhang et al., 2009; Chen et al., 2009; 汪洪亮等, 2007)、鄂尔多斯盆地东南部古生代地层中的约 3.5 Ga 的碎屑锆石年龄(Chen et al., 2009; Zhang et al., 2009)、鄂尔多斯盆地北缘的延长群 5 个长石砂岩岩芯样品中碎屑锆石的 (3 691 ± 25) Ma U-Pb 年龄等(罗静兰等, 2009, 内部交流)。因此, 在华北, 大于 3.3~3.8 Ga 的古老物质出露范围远不止在冀东与鞍山地区, 而是发现于东部、北部、南部、西部以及中部, 指示华北曾存在较为广泛的古老大陆。

1.2 陆壳增生与微陆块

如上所述, 除鞍山与冀东之外, 华北克拉通陆壳有年龄大于 3.0 Ga 的古老岩石被识别出来, 因而假设华北克拉通早期的陆壳增生是围绕着若干古陆核生长的(白瑾等, 1993; 赵宗溥等, 1993; Zhai et al., 2000a; 2000b; Zhai, 2004a)。邓晋福等(1999)提出有 10 个古陆核, 伍家善等(1998)假设有 5 个古陆核。笔者等(Zhai, 2004a; Zhai et al., 2005)认为有 6 个古陆核, 它们的增生是由围绕古陆核的长英质片麻岩周围大量出现, 而到了新太古代则变为绿岩带围绕着高级片麻岩穹窿, 并有大量壳熔花岗岩侵入(图 1)。

根据已有的地质资料, 华北克拉通陆壳的 90% 是在早前寒武纪形成的(翟明国等, 2001a; 2001b), 绝大多数形成在中-晚太古代, 具有 3.0~2.5 Ga 的 Sm-Nd 模式年龄的约占 78%, 其中, > 3.0 Ga 的约占 15%, < 2.5 Ga 约占 7%, 大部分在 2.7~2.9 Ga 之间。

Nd、Hf 同位素和微量元素对前寒武纪陆壳的制约已有人讨论(耿元生等, 1997; 张国辉等, 1998; Jahn, 1990; Liu et al., 2004; Wan et al., 2005; 吴福元等, 2005; Zhai et al., 2007)。Sm-Nd 的模式年龄(t_{DM})通常用于指示陆壳形成的时代。图 2b 是 Nd t_{DM} 年龄的直方图, 两个峰值是 2.7 Ga 和 2.9 Ga。 $\epsilon_{Nd}(t)$ - t/Ga 图解(图 2a)显示了 2 个特征: 所有的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 是正的, 它们随着时间 t 的变化不明显; $\epsilon_{Nd}(t)$ 的演化曲线从亏损地幔的趋势中偏离出来的时间约为 3.0 Ga, 指示了地壳物质的污染以及 3.0 Ga 以来的中-新太古代华北克拉通已经存在较厚的地壳。Hf 同位素模式年龄分布在 3 000~2 600 Ma, 并且有 2 820 Ma 的峰值(图 2c)。长英质片麻岩的锆石 U-Pb 年龄则有几个主要的分布区间, 它们分别是 3 600~3 800 Ma, 3 000~3 200 Ma 和 2 700~2 900 Ma, 并在 2 500~2 600 Ma 出现最大的峰值。

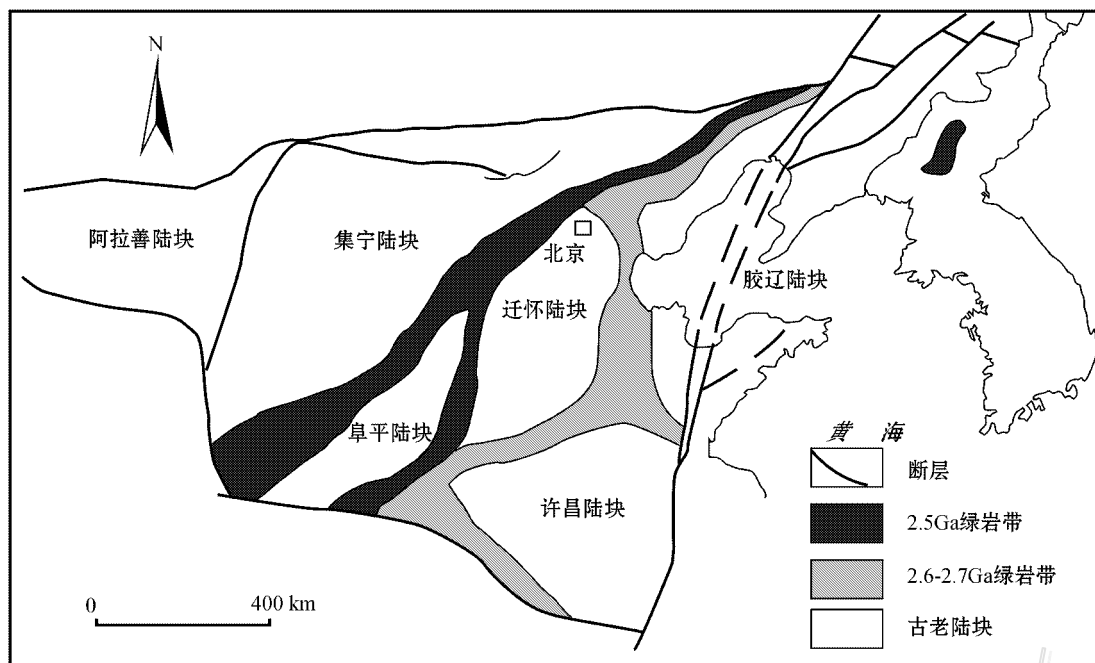


图 1 华北克拉通新太古代晚期的微陆块示意图

Fig. 1 Neoproterozoic microblocks in the Northern China Craton (NCC)

1.3 前寒武纪重大构造事件

在华北克拉通于中-新太古代出现大规模地壳增生后,重大构造事件主要有 2.5 亿年的微陆块拼合、古元古代活动带、1.8 亿年的基底隆升及其随后发生的陆内裂谷事件,上述事件曾被以前的研究者称为“鞍山(五台)运动”、“溥沱中条、吕梁运动”等,解释为新太古代的陆块拼合、古元古代的原地台破裂与再焊接、盖层沉积与裂谷等(马杏垣等,1987;白瑾等,1993;沈其韩等,1992;赵宗溥等,1993;孙大中等,1993;程裕祺,1994;钱祥麟,1994;陆松年等,1996;耿元生等,1997;伍家善等,1998;李江海等,2000)。

1.3.1 新太古代末微陆块拼合

已有多种构造模式讨论新太古代末的微陆块拼贴,如胶辽陆块与迁怀陆块的弧-陆碰撞(伍家善等,1998)以及迁怀陆块与阜平陆块的陆-陆碰撞模式(翟明国等,2004c)。多个微陆块拼合(白瑾等,1993)都引起了人们的重视。Zhai (2004a)划分的 6 个微陆块是胶辽陆块(JL)、集宁陆块(JN)、迁怀陆块(QH)、阜平陆块(FP)、许昌陆块(XCH)和阿拉善陆块(ALS)。后者的构造归属仍然存在争议(耿元生等,2002)。这些陆块的划分是以重要的古老构造边界的识别为依据的,主要是 2.7~2.5 Ga 的古老绿岩带,它们的性质被视为古岛弧(如红透山-山海关,伍家善等,1998)或古蛇绿混杂岩带(李江海等,2000;Kusky et al., 2003)。有些古老陆块的边界被岩石盖层或第四纪沉积物覆盖,无法直接观察到,主要的划分依据综合了地质研究,它们得到古老陆块以及地幔的地球化学边界以及深部地球物理边界研究结果的支持(管志宁等,1987;刘建忠等,1998)。笔者等(Zhai et al., 2000a; 2000b;

Zhai, 2004a)假设在 2 600~2 500 Ma 期间,华北各微陆块以陆-陆、陆-弧以及弧-弧碰撞的形式拼贴在一起,期间可能还有更小的游离于上述微陆块之间的弧或陆的拼贴。不同微陆块的缝合带即为如图 1 所示的新太古代晚期的绿岩带,其变质火山岩大多具有岛弧、弧后盆地或陆内火山岩的地球化学特征。

华北克拉通在 2.5 Ga 的拼合可能不是孤立的事件,而是与瑞芬(西北欧)、北美及其他相邻大陆克拉通相关的更大规模的拼合。如果是这样,2.5 Ga 可能是有记载的古老的超大陆事件(Windley, 1995; Rogers et al., 2004; Condie et al., 2001)。有资料表明,在 2.7~2.5 Ga 期间,上述大陆克拉通都发育有大规模的火山-岩浆活动(Goodwin, 1991; Passchier et al., 1990; 钱祥麟,1994)。2.5 Ga 的大规模花岗岩侵位是太古宙与元古宙分界的主要岩相学和年代学标志。还有资料表明,在新太古代火山-岩浆事件之后,有大面积的基性侵入体和岩墙群在大陆克拉通形成,例如加拿大 Watachewan 基性岩墙群(2 500~2 450 Ma)和苏格兰 Scourie 基性岩墙群(2 418 Ma),以及波罗的东部基性侵入岩和西伯利亚 Aldan 的基性岩墙(2 500~2 440 Ma)。

1.3.2 古元古代活动带

翟明国(2004b)将线状分布、经历了从麻粒岩相-绿帘角闪岩相变质的古元古代岩石构造单元划分为胶辽、晋豫、丰镇 3 个古元古代活动带。它们的形成可能是由以下构造活动引起的:① 2 300~1 950 Ma 期间,华北克拉通经历了一次基底陆块的拉伸-破裂事件,在克拉通内部发育了晋豫、胶辽裂陷盆地和丰镇陆内凹陷盆地。晋豫和胶辽盆地有含火山岩的不稳定沉积。丰镇盆地有从碎屑岩-泥质岩-碳酸盐岩-蒸发岩的

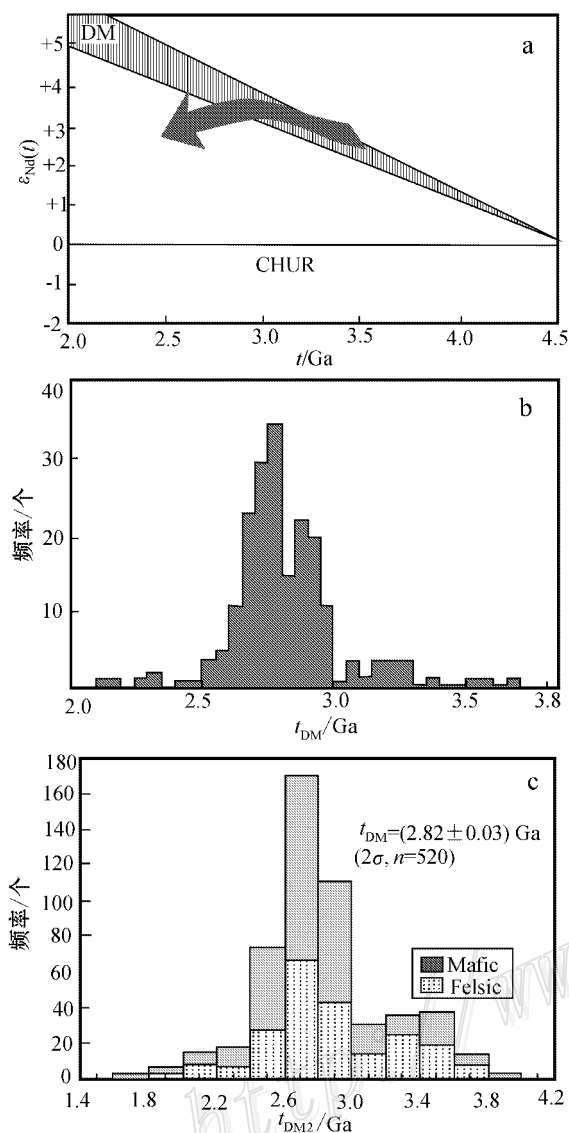


图 2 华北克拉通的镁铁质火成岩的 $\epsilon_{Nd}(t)-t/Ga$ 图解

(a), Nd 模式年龄图 (b) 和 Hf 同位素模式年龄图 (c)

Fig. 2 $\epsilon_{Nd}(t)-t/Ga$ diagram (a), Nd model ages (b) and Hf isotopic model ages (c) of mafic igneous rocks from the NCC

组合的稳定沉积,克拉通基底陆壳没有裂开。② 1 950~1 900 Ma 期间,华北克拉通经历了一次挤压构造事件,导致了裂陷盆地的闭合和焊接,形成晋豫和胶辽两个活动带,或称造山带 (Zhao et al., 1999)。晋豫造山带的组合是滹沱、中条和吕梁变质岩系,胶辽造山带的组合是辽河、粉子山变质岩系。它们的变质程度从绿帘角闪岩相到角闪岩相,吕梁山区、胶东地区的变质泥质岩含矽线石和石榴子石,局部为麻粒岩相。在晋北-冀北-内蒙中部和胶东北出露的高压麻粒岩被解释为在造山过程中的基底掀翻,使下地壳岩石抬升,它们由含高压麻粒岩相(局部榴辉岩相,如恒山白马石的变质岩墙)的变质

杂岩为代表。在华北克拉通的北缘,华北克拉通可能与其北部的另一古老陆块或岛弧拼合,其拼合带应位于白云鄂博以北,现在已残缺不全。丰镇活动带可能代表了平行于北缘造山带的一条构造带,与北部造山带的俯冲碰撞相关的陆内深部逆掩造成了麻粒岩相岩石的形成和抬升。

1.3.3 中元古代基底隆升与陆内裂谷

1 850~1 700 Ma 期间,华北克拉通进入伸展构造体制并且在元古代后进入稳定的地台发展阶段。这个阶段的地质过程主要有 3 个:克拉通基底整体抬升、裂陷槽-陆内裂谷发育、基性岩墙群和非造山岩浆活动。

华北克拉通的基底隆升已经被以往的研究所揭示(沈其韩等, 1992; 赵宗溥等, 1993; Zhai et al., 2003)。其抬升地表事件的年龄推测在 1.8 亿年左右,依据是广泛分布于变质岩中未变形的伟晶岩脉的精确锆石年龄(待发表)以及长城系、熊耳系、白云鄂博系的碎屑锆石及其变质基底的研究(万渝生等, 2000; 2003; 赵太平等, 2004; 范宏瑞等, 2008, 内部交流)。熊耳裂陷槽表现出三叉裂谷的形态,火山熔岩占比例很大。燕山裂陷槽的沉积-火山岩系命名为长城系,之后的蓟县系和青白口系应代表稳定的地台型沉积,分界时代在 1.6 Ga。此外,在华北克拉通还分布有同时代的裂谷盆地,化德、渣尔泰-狼山和白云鄂博等分布在北缘的称为华北北缘边缘盆地,其沉积时代与燕山裂陷槽相同(Li et al., 2007; 胡波等, 2009; 范宏瑞, 2008, 内部交流),是否曾经贯通尚无明确依据。至于华北东部的徐淮、鲁西、胶北、辽吉东部的元古宙沉积盆地由于不太连续,因此有不同的对比方案(江苏省地质志、山东省地质志、辽宁省地质志、吉林省地质志)。总体上看(赵宗溥等, 1993; 白瑾等, 1993; 郝杰等, 2004),大致将辽宁的永宁组、细河群、钓鱼台组、南芬组、桥头组,山东的土门群、蓬莱群划为青白口系、五行山群、金县群和徐淮群,划为相当于南方震旦时期的沉积。

在华北克拉通广泛分布的未经变质的镁铁质岩墙群,其锆石年龄和斜锆石的精确 U-Pb 年龄集中在 1 800~1 750 Ma,峰值约 1 780 Ma。Zhai 等(2000a; 2000b; 2003)和 Peng 等(2006; 2007; 2008)把镁铁质岩墙群与熊耳系火山岩联系起来,推测它们具有相同的成因。Zhai 等(2000a; 2000b)和彭澎等(2002)还讨论了华北元古宙非造山岩浆岩(1 765~1 625 Ma)与岩墙群的关系,认为前寒武纪基底的隆升、岩墙群与非造山岩浆作用、裂谷形成等可能属于同一构造事件,并可能与地幔柱构造有关(Zhai et al., 2003; Peng et al., 2006)。Isley 等(1999)根据镁铁质火山岩的研究、Condie (1992)和 Condie 等(2001)根据黑色页岩的研究,分别提出古-中元古代的地幔柱事件发生在约 1 700 Ma 时或在 1 900 Ma 之前。因此,华北约 1 800 Ma 的裂解很可能是与哥伦比亚超大陆裂解有关的全球构造的一部分。

2 华北克拉通的多期克拉通化

克拉通化是地球圈层演化中非常重要的一环,克拉通化

的实质是形成稳定的上、下地壳圈层,并达到壳幔耦合的地质过程,为显生宙的岩石圈的构造演化提供了基础。克拉通化作用和克拉通的形成都完成于前寒武纪($>1\ 000\text{ Ma}$),而绝大多数克拉通都形成于太古宙,并且 80% 以上的陆壳在 2.5 Ga 前已经形成(Windley, 1995; 李江海等, 1994; Goodwin, 1991; Kusky et al., 1990; Zhai et al., 2000a; 2000b),它们在后来的大陆的拼合与裂解中始终是基本的岩石-构造单元(Rogers, 1996; Rogers et al., 2004)。

在以往的研究中,对华北经历了多期克拉通化过程才最后形成稳定克拉通的意见基本达成共识。程裕祺(1994)将华北的克拉通化大致分为两期,它们都表现为大面积均匀分布的变质作用和相关的花岗岩-混合岩化为特征,分别发生在太古宙末期和新太古代—古元古代过渡阶段。第一期为高级变质作用和强烈的混合岩化,实现了克拉通化。第二期是在已一定程度克拉通化的基底之上的较小的海盆、岛弧和裂谷的形成与再闭合,因此热流相对较小,混合岩化较弱。白瑾等(1993)认为华北克拉通是由太古宙的微陆块拼合而成的,即较小的微陆块(核)的聚集,以绿岩带为活动带的焊接带,形成了华北原地台(古陆块),从而基本完成克拉通化。如恒山陆块和阜平陆块就是被五台山绿岩带焊接的。在古元古代,华北原地台的东段和中段,地壳破裂形成了活动带(裂陷带和岛弧带),而后发生类似于现代板块的俯冲与碰撞,在吕梁(溇沱)运动结束时,各个活动带的闭合使原地台又被焊接重新成为一个整体。赵宗溥等(1993)从克拉通化的壳幔过程与物质分异的角度,将华北的克拉通化总结出 3 期,即古太古代(3.2 Ga)的钠质克拉通化、中太古代(2.8 Ga)的钾-钠质克拉通化和新太古代(2.5~2.4 Ga)的钾质花岗岩化。发生在古元古代的构造运动(溇沱运动)可能造成硅铝质地壳的部分和全部的重熔,使华北克拉通再次稳定,转为地台发展阶段。正是通过钠质和钾质的克拉通化过程,使得原地壳(包括直接由地幔派生的)发展为亏损最低熔组分而富难熔组分的麻粒岩相下地壳和富钾及放射性元素的花岗质上地壳,并最终导致了硅铝化地壳均一化、固结和加厚,把不成熟地壳变为成熟地壳。沈其韩等(1992)注意到高级变质岩石和紫苏花岗岩的大面积分布,而且在时代上是以 2.75~2.5 Ga 和 2.0~1.9 Ga(或 1.9~1.8 Ga)两期为主,因此提出有两期面状的构造抬升。

2.1 新太古代克拉通化

华北的克拉通化基本完成于新太古代末(赵宗溥等, 1993; 程裕祺, 1994; 伍家善等, 1998; 白瑾等, 1993; 陆松年等, 1996; 钱祥麟, 1996; 刘建忠等, 1998; 李江海等, 2000)。主要的地质事件是太古宙的微陆块拼合在一起形成华北古陆,其微陆块间的接合带是 2.7~2.6 Ga 的绿岩带或花岗岩带,具有弧-陆、弧-弧和陆-陆拼合的特点。以全区范围的花岗岩席侵入和混合岩化及基性岩墙的侵入为特征。新太古代,火山事件集中发生在 2.6~2.8 Ga,少量发生在 2.5 Ga。但是各微陆块的表现有重大差异。例如在集宁陆块和阜平陆块,火山岩活动非常微弱。胶辽陆块和太华陆块的变质岩组合虽有

差异,但是火山岩浆喷发强烈,并且基性火山岩都与 BIF 沉积关系密切。阿拉善陆块的基性火山岩几乎不伴生 BIF 沉积,超镁铁质岩和铂镍矿关系密切。这些都指示各微陆块在新太古代有各自不同的大地构造环境。微陆块由新太古代绿岩带围绕,并把它们连接成一个统一的陆块(图 1)。之后,各陆块都发生了 2.5~2.45 Ga 的高级变质、花岗岩侵入以及基性岩墙群的侵入,它们标志着华北各微陆块拼贴完成,基本形成了与现存的华北陆块相当的新太古代克拉通(翟明国, 2008)。太古宙与元古宙火山岩以及沉积岩在同位素、微量元素以及总体化学成分上存在巨大差别,与全球的太古宙与元古宙分界的地球化学指标一致(Condie, 1992; 1993a; 1993b; 卢良兆等, 1996; 万渝生等, 2000; Liu et al., 2004)。笔者最近还在曹庄地区发现了共生的超镁铁质岩与碱性岩墙侵入于冀东 2.53~2.6 Ga 的花岗质和 TTG 质的片麻岩及其条带状铁建造中,并被长城系底砾岩不整合覆盖,它们的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别是 $(2\ 501 \pm 9)\text{ Ma}$ 和 $(2\ 504 \pm 11)\text{ Ma}$ 。超镁铁质岩与碱性岩墙共生是罕见的,指示在太古宙末期,华北克拉通的岩石圈已经相当厚并且稳定,是克拉通化已经基本完成的证据,并很可能为约 2 500 Ma 的 Arctica-Kenorland 超大陆的存在提供了证据(Rogers et al., 2004)。

2.2 古元古代变质-壳熔作用与华北终极克拉通化

程裕祺等(1982)描述了华北两期变质作用和混合岩化作用,即古元古代 19~18 亿年的变质作用叠加于新太古代末的变质作用之上,而后的混合岩化更强。赵宗溥等(1993)强调华北克拉通演化的复杂性,并指出华北太古宙基底在元古宙的强烈活化造成大量的钾质花岗岩和混合岩出现,造成上、下地壳圈层的分异与固化。刘喜山等(1994)提出基底再造杂岩的概念,即古元古代时期对变质基底的叠加变质作用,属于克拉通内硅铝质壳的造山作用。虽然说法有差别,但都表明古元古代的构造事件是对华北太古宙克拉通的改造,并完成了华北的元古宙终极克拉通化。

古元古代构造事件在整个华北都有明确表现。大致可以表现为 2.30~1.90 的造山事件以及随后的基底隆升和变质、花岗岩和混合岩化。图 3 是古元古代活动带的分布图。三个主要的活动带是胶辽活动带、晋豫活动带和丰镇活动带。火山-沉积岩大致发育在 2.30~1.95 Ga,变质作用发生在 1.95~1.90 Ga 期间,并随后又发生了很强的叠加变质,表现为 1.85~1.82 Ga 的麻粒岩相-高角闪岩相的等温(略升温)降压和降温降压叠加变质作用,并且在 ~1.80 Ga 发生角闪岩相退变质。至少在 1.85~1.82 Ga 和 1.80 Ga 的两个时期叠加变质作用是广泛发生在华北克拉通内,如程裕祺等(1982)、沈其韩等(1992)和赵宗溥等(1993)所描述的是面状变质作用,代表克拉通基底的整体隆升。与两期叠加变质作用相对应的是紫苏花岗岩、堇青石-石榴花岗岩、钾质花岗岩的侵入,并以未变形的伟晶岩脉在华北克拉通全区范围内的灌入而告结束。

约 1.78 Ga 的镁铁质岩墙群的侵入,以及古元古代末—中

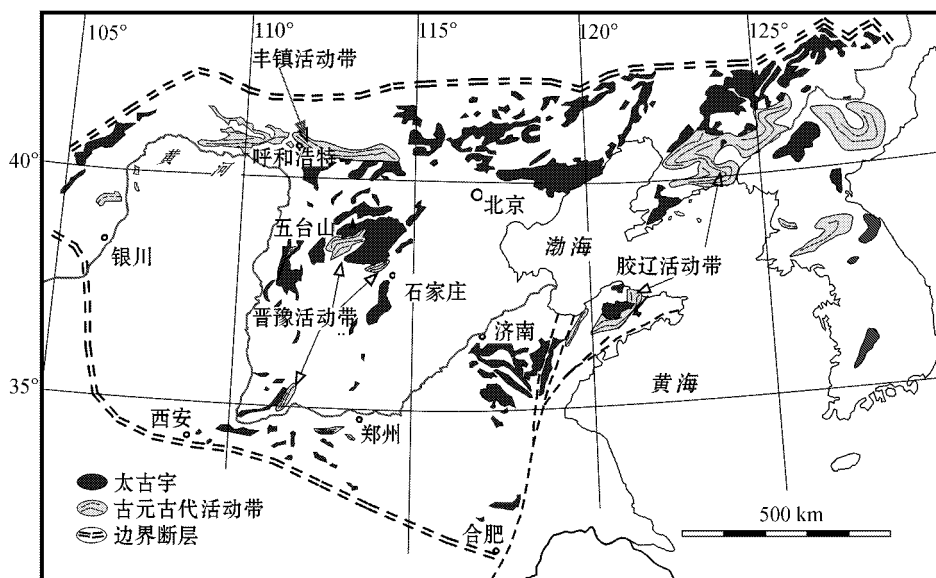


图 3 华北克拉通古元古代活动带示意图

Fig. 3 Paleoproterozoic mobile belts in the NCC

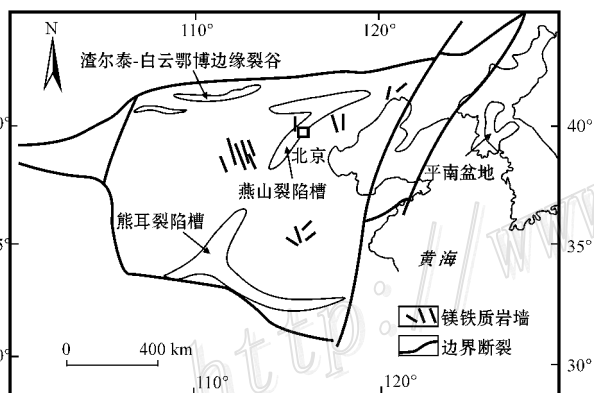


图 4 华北克拉通元古宙镁铁质岩墙群与裂谷系关系示意图

Fig. 4 Proterozoic mafic dykes and rifts in the NCC

元古代的陆内裂谷系的发育和稳定的元古宙—古生代的盖层(图 4)是华北终极克拉通化完成的标志。

3 前寒武纪成矿作用

华北克拉通内分布有丰富的前寒武纪矿产,其中铁矿、稀土元素、铅-锌、菱镁矿等储量巨大、潜力可观,为中国矿产资源的可持续供应做出了巨大的贡献。前寒武纪成矿作用与克拉通的形成演化关系密切,换言之,重大的成矿事件与地壳的演化与增生的关系密切,与重大的构造事件一一对应(表 1)。

华北克拉通前寒武纪矿床具有与地质时代、构造背景密切相关的时空分布规律(张秋生等,1984;翟安民等,1994;裴荣富等,1995;陈毓川等,1998;翟裕生等,1999;沈宝丰等,

2006)①成矿作用与其他克拉通很相似;②矿产类型随地质时代变化有明显的变化;③随时代变新,矿产种类更加丰富;④元古宙的矿产早期以活动带为主(优地槽型),中期变为陆内裂谷为主(冒地槽型);⑤矿床与围岩的变质程度随时代变新而变浅,早期矿床多发生强烈的变质与变形;⑥前寒武纪矿产多与火山岩、沉积岩层序共生,与 TTG 片麻岩和花岗岩演化的关系相对较弱。

总的来说,太古宙以条带状硅铁建造为主,成矿时代从 33 亿年到 25 亿年,以 30~25 亿年为主。虽然它们多产出在高级区域绿岩带中,但都与变质火山岩关系密切。块状硫化物矿床只出现在新太古代晚期的绿岩带中。而金矿在华北克拉通太古宙绿岩带不十分发育,这与华北多期克拉通化和相关的变质作用和混合岩化作用以及中生代的地壳活化可能有关。古元古代的成矿作用与活动带的演化有关,矿产类型丰富多彩,有古火山型、斑岩型铜矿、层状铅-锌矿床和硼-铁(镁)矿床等。古元古代末—中元古代的成矿作用主要受裂陷槽-裂谷的演化控制,其中有与陆内(缘)裂谷有关的 SEDEX 型铅-锌-铜矿床、与非造山岩浆作用有关的钒-钛-铁-磷矿床、与陆缘-浅海沉积有关的沉积型铁矿以及白云鄂博式稀土元素-铌-铁矿床。此外,华北前寒武纪还有较丰富的硼矿、磷矿、石墨矿等,现仅对如下矿种做简单介绍。

3.1 铁矿床

以条带状硅铁建造(BIF)为主,它是早前寒武纪的标志性矿产,其储量特别巨大、矿质优秀,易于选矿、易于勘探、易于开采,在地质和经济上都具有举足轻重的作用。BIF 约占世界铁矿储量的 70%~80% 以上,占中国铁矿储量的 80% 左右。一般认为 BIF 是化学沉积物,并且与生物(细菌)的活动有关,BIF 有多种类型划分方案,最简单的方案是分为阿尔戈

表 1 华北克拉通前寒武纪代表性金属矿产

Table 1 Representative Precambrian metallic ore resource in the North China Craton

构造事件	时代/ Ga	矿产	成矿背景	代表性矿床
陆壳形成与增生	3.2~2.7	条带状铁矿床	绿岩带、高级区	水厂、杏山铁矿
		条带状铁矿床	绿岩带	石人沟铁矿
新太古代微陆块拼合	2.5	块状硫化物铜-锌矿	绿岩带	红透山铜矿
		金矿床	绿岩带、高级区	三道沟金矿
		火山、斑岩型铜矿床	活动带(优地槽)	铜矿峪铜矿
古元古代活动带	2.3~1.9	层状铅-锌矿床	活动带(冒地槽)	青城子铅锌矿
		硼-铁(镁) 矿床	活动带(冒地槽)	后仙峪硼矿
		SEDEX 型铅-锌-铜矿床	裂谷	东升庙铅锌矿
古元古代末期-中元古代	1.8~1.6	钒-钛-铁-磷矿床	非造山岩浆作用	大庙铁矿
		沉积(宣龙式) 铁矿床	陆缘-浅海、裂谷	宣化铁矿
		沉积热液交代型 REE-铈-铁矿床	裂谷	白云鄂博 REE-铈-铁矿

玛型和苏必利尔型 ,前者的 BIF 岩石组合中含火山岩 ,后者的岩石组合中不含火山岩 ;从成矿时代上看 ,前者以太古宙为主 ,后者以元古宙 (主要是古元古代)为主 (Zhai et al. , 1990a ; 1990b)。

BIF 在华北分布广泛 ,在几乎所有早前寒武纪岩石的出露区都有。在冀东地区的铁矿可以分为 33 亿年杏山式铁矿、30~28 亿年水厂式铁矿、27~25 亿年遵化式铁矿。此三类铁矿是以沉积时代来划分的 ,但它们的岩石组合与成矿类型以及矿石与围岩的地球化学特征都相似 ,斜长角闪岩 (基性麻粒岩)是铁矿层的主要围岩与标志层 ,推测其是类似古岛弧的建造 (李铁胜 ,1999 ;Zhai et al. , 2003)。鞍山-本溪的铁矿称为鞍山式 ,河南的铁矿称为舞阳式 ,与冀东的遵化式可以类比 (万渝生 ,1993 ;孙枢等 ,1985)。新太古代末期的 BIF 铁矿还大量产于五台山地区和冀北地区的 (Wilde et al. , 2005 ;翟明国 2008) ,其原岩建造与岛弧或裂谷的组合有相似之处。BIF 沉积与海水的氧化状态有关 ,阿尔戈玛型硅铁建造可以解释为在火山作用以及由此诱发的一些微生物的活动 ,导致成矿 ,而华北的古元古代苏必利尔型 BIF 不发育 ,仅吉林大栗子等少数铁矿被推测为苏必利尔型 (张秋生等 ,1984 ;1988 ;翟安民等 ,1994) ,且以赤铁矿为主。

3.2 块状硫化物矿床

火山块状硫化物矿床是太古宙绿岩带的典型矿床 ,一般赋存在流纹岩-安山岩中 ,容矿母岩富钠 ,属钙碱性岩系。华北代表性的块状硫化物 Cu-Zn 矿床出露于辽北的清源一带。该区出露的太古宙变质岩系中 ,表壳岩约占 25%~30% ,花岗片麻岩类占 60%~70% ,两者构成新太古代花岗-绿岩地体。岩石经历了角闪岩相变质作用 ,局部达麻粒岩相。红透山组变质英安岩与侵入其中的花岗岩年龄在 2.55~2.51 Ga ,指示了成矿在新太古代晚期 (刘宇光 ,1982 ;Zhai et al. , 1985)。表壳岩大致可以分为 3 个组合 :即镁铁质-长英质双峰式火山岩组合、钙碱性火山岩组合和含大理岩的沉积岩组合 ,块状硫化物矿床与钙碱性火山岩 (红透山组上段)关系最密切。该段是玄武岩-安山岩-英安岩-泥质岩薄层状互层带 ,已变质为斜长角闪岩、细粒片麻岩 (变粒岩和浅粒岩)以及含

十字石、蓝晶石、直闪石的变质片岩。矿区集中分布有 100 多个矿床和矿点 ,其中 ,红透山中-大型 Cu-Zn 矿床是规模最大的。矿床可以分为 2 类 :一类是以 Cu 和 Zn 为主的硫化物矿床 ;另一类是含 Zn 和 Cu 的黄铁矿矿床。

五台山绿岩带内也有块状硫化物矿床 ,主要是含铜黄铁矿 ,铜可以综合利用。含矿岩系称为金刚库组 ,由斜长角闪岩、细粒片麻岩 (变粒岩和浅粒岩)片岩和条带状石英磁铁矿组成 ,变质程度为角闪岩相 ,变质矿物有石榴子石、蓝晶石等。

3.3 铜矿床

古元古代的火山型和斑岩型铜矿是华北克拉通的重要矿产类型 ,前者以胶辽活动带的鞍山-草河口铜矿为代表 (张秋生等 ,1984) ,后者以晋豫活动带的中条山铜矿为代表 (沈保丰等 2006)。

辽东半岛鞍山-草河口一带长约 100 多公里的东西向狭长地带 ,分布有许多块状含铜黄铁矿矿床与矿化点。矿化受古元古代富钠质的变质火山-沉积岩系及古火山构造控制 ,在火山穹丘的中心形成了火山喷气-热液矿床 ,属海底火山成因的块状硫化物矿床。含矿火山岩的地球化学特征与大陆边缘或岛弧体系的钙碱性火山岩相似。矿床是火山-沉积作用的产物 ,晚期的变质作用、岩浆作用和构造作用对矿床的改造不明显。

中条山地区的铜矿有部分可以划分为火山型或沉积型 ,斑岩型也是主要的类型。中条群自下而上的主要地层单元是绛县群、中条群和担石山群 ,其间的不整合接触曾被称为绛县运动或中条运动等 ,但它们的时代及含义时有争议和反复。绛县群由砾岩、砂岩和发育沉积韵律及条带的沙-泥-半泥质沉积岩构成 ,含有沉积变质铜矿。上部层位的沉积岩中 ,还有富钾的双峰式火山岩。中条群被公认为是冒地槽型的陆缘-碳酸盐沉积变质建造 (Sun et al. , 1990 ;1992 ;刘新秒等 , 1993)。铜矿峪铜矿的容矿母岩是绛县群的骆驼峰组 ,为一套富 Mg、Fe 的凝灰岩或凝灰质碎屑岩。矿体主要赋存于花岗斑岩、变石英二长斑岩、绢英岩和中-基性岩中 ,硫化物的 Re-Os 等时线年龄为 2 108 Ma (陈文明 ,1996 ;沈保丰等 2006)。

3.4 铅-锌矿床

元古宙铅-锌矿在时代上可分为古元古代和古中元古代 ,

前者以胶辽活动带中的层状铅-锌矿为代表,属浊积岩系层状沉积矿床,后者以狼山-渣尔泰边缘裂谷盆地的沉积喷流矿床为代表。

辽东半岛胶辽活动带中的辽河群中里尔峪组之上至大石桥组的中部以下岩石组合,张秋生等(1984)称之为辽吉岩套,地质构造上认为是属于古元古代坳拉槽内的优、冒地槽交接带上的浊积岩系。其下部为火山岩-碎屑岩-碳酸盐岩组合,上部为碎屑岩-碳酸盐岩组合。锌矿体主要赋存于下部组合,铅矿体则主要赋存于上部组合。矿体层位稳定,延入朝鲜半岛的北部。1.9~1.8 Ga 的变质作用使变质流体以及岩浆侵入对矿床发生一定改造,出现不同规模的脉状矿体。

古元古代末—中元古代的铅-锌矿以内蒙古东升庙的超大型矿床为代表。最近的研究支持化德、渣尔泰和白云鄂博沉积岩系共同构成华北北部的被动大陆边缘盆地,并与长城系为同时代沉积的认识(彭润民等,2004;翟明国等,2007;胡波等,2009)。翟裕生等(内部交流)最近提出华北北缘存在元古宙白云鄂博和渣尔泰双裂谷系。即白云鄂博是北面的裂谷,狼山-渣尔泰是南面的裂谷,两者都有太古宙变质基底和底部的长城系(分别称为都拉哈拉组、尖山组、书记沟组、增隆昌组)均为被动陆缘型沉积,反映由陆相到过渡相(三角洲相)向滨浅海相渐进的岩相特点。之后,在被动大陆边缘沉积(长城系)基础上发育了2个二级裂谷系。狼山-渣尔泰裂谷喷发了薄层双峰式火山岩,主要形成了与被动陆缘裂解过程相关的地底喷流-沉积铅-铜-铁硫化物(SDEX)型矿床。矿床的产出受华北古陆北缘裂陷槽内三级断陷盆地控制,矿体总体呈层产在中元古界的白云石大理岩、碳质千枚岩(或片岩)中,具有细纹层状、条带状构造,喷流沉积成矿特征十分明显。成矿过程中伴有明显的同生断裂活动,它在一定程度上控制了矿体的空间分布及其组合。厚大的Zn-Pb-Cu复合矿体具有明显的分带性,自下至上Cu/(Zn+Pb+Cu)比值由高到低。成矿期间火山活动明显,容矿的狼山群发现具有变余斑状或聚斑状结构、变余杏仁构造的基性火山岩、钠质“双峰式”火山岩和钾质“双峰式”海相火山岩及凝灰岩夹层(彭润民等,2004)。

4 中生代构造转折与爆发式成矿作用

中生代华北克拉通的构造转折和岩石圈的大规模减薄,造成克拉通的破坏与重建,是华北另一个引起国际关注的热点。华北中生代构造体制转折始于150~140 Ma,终于110~100 Ma,高峰期是120 Ma,总体上是由挤压构造体制转化为伸展构造体制,由EW向转变为NNE向的盆岭构造格局。但是转折过程中有复杂的细节和多次挤压与伸展的转变,边缘与克拉通内部和北缘与南(东)缘之间在时间和空间上也有一定的变化。华北东部中-新生代岩浆岩可以划分出2组相互对比的产出环境:克拉通内部(鲁西、南太行、辽东等地)和边缘(北缘(从西往东)阴山、燕辽和北太行山、吉南、南缘(豫陕(东秦岭)、北大别、胶东))。在时间上,华北东部的中-新生代

可大致分为3个大的演化阶段:①三叠纪—侏罗纪,以造山期后壳源岩浆的侵入为主,以深-中深成侵位的花岗质岩基为特征;②早白垩世,幔源+壳源+壳幔混合岩浆,侵入岩和火山岩均发育,既有大岩基又有大量小岩体和次火山岩体;③晚白垩世—第三纪,单一的大陆玄武岩。不同时代的碱性岩石的同位素和微量元素特征显示,古生代的地幔源区是亏损地幔,中生代的地幔源区则是富集地幔,而且从180 Ma到140 Ma和120 Ma,富集程度增加,但是到了新生代,地幔源区有变为轻度亏损的趋势,在 $\epsilon_{\text{Nd}}-\epsilon_{\text{Sr}}$ 图解上大致处于原始地幔和MORB的交叉范围。

与华北岩石圈构造演化与岩浆活动相耦合,中生代两大成矿系统是:①早-中侏罗世造山后成矿体系,花岗岩沿克拉通边缘侵入,火山岩较少,地壳较厚,埃达克质岩较发育,以沿克拉通边缘发育的钼矿化为主;②白垩纪遍及全区的火山-侵入活动,华北东部出现了地质流体的强烈发育和集中排放,与此有关的金属矿床主要有以下2个矿床类型:①与中-酸性岩浆活动有关的斑岩型钼矿床和浅成热液矿床,包括金、银、铅、锌矿床等,成矿主要时代在134~148 Ma;②与基底重熔和深成侵位花岗质岩体有关的爆发式大规模金成矿作用,遍布在华北东部的克拉通边缘以及克拉通内部,主期在(120±10)Ma。

研究表明,胶东矿集区的东界与华北克拉通的东界吻合,金矿以华北克拉通变质岩及其有关的侵入岩为控矿围岩。主成矿期的成矿时代为(120±10)Ma,约在不到10个百万年的短时限内。成矿物质具有多源性,既来自于控矿围岩——花岗片麻岩和变质岩,又来自于幔源的岩浆岩,特别是与中基性脉岩、偏碱的钙碱性花岗岩的侵入关系密切。除胶东金矿集区之外,华北克拉通的边缘和内部普遍含有金矿,而且金矿的物质来源、成矿方式、矿产类型、成矿围岩和成矿年龄都是一致的。这种大规模、短时限、高强度的成矿,被中国地质学家所重视并称为中生代成矿大爆发或金属异常巨量堆积,从而提出了受到中生代构造岩浆热事件与克拉通基底双重控制的陆内非造山带型金成矿作用。

志 谢 本文是国家基础研究重点项目和3个自然科学基金项目的研究成果。作者仅以此文衷心祝贺敬爱的翟裕生老师80寿辰和从事地质工作60周年。

References

- Bai J., Huang X.G., Dai F.Y. and Wu C.H. 1993. The Precambrian evolution of China[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 199-203 (in Chinese).
- Chen L., Sun Y., Diwu C.R. and Wang H.L. 2009. Crust formation in the Ordos block: Constraints from detrital zircons from Ordovician and Permian sandstones[A]. In: Abstract with Program of International Discussion meeting on Continental Geology and Tectonics[C]. Xi'an: Northwest University Press. 17.
- Chen W.M. 1996. Compound metallogenesis of Tongkuangyu, Zhong-

- tiao Mountains, China[A]. In :The records of geological research [C]. Beijing : China Economic Press(in Chinese).
- Chen Y C , Pei R F , Song T R and Qiu X P. 1998. Metallogenic series in China[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 199-203 (in Chinese).
- Cheng Y Q and Zhang S G. 1982. Notes on the metamorphic series and metamorphic belts of various metamorphic epochs of China and related problems[J]. Regional Geology of China , 2 : 1-14 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Y Q , ed. 1994. Geology of China[M]. Beijing : Geol. Pub. House(in Chinese).
- Condie K C. 1992. Evolutionary changes at the Archean-Proterozoic boundary[R]. Geol. Dept. (key center) and Univ. Ext. Unin. W. Austrilia , 22 : 177-189.
- Condie K C. 1993a. Chemical composition and evolution of the upper continental crust : Contrasting results from surface samples and shales [J]. Chem. Geol. , 104 : 1-37.
- Condie K C , Boryta M D , Liu J Z and Qian X L. 1993b. The origin of khondalites : Geochemical evidence from the Archean to Early Proterozoic granulite belt in the North China craton[J]. Precambrian Research , 59 : 207-223.
- Condie K C , Des Marais D J and Abbot D. 2001. Precambrian superplumes and supercontinents : A record in black shales , carbon isotopes and paleoclimates[J]. Precambrian Research , 106 : 239-260.
- Deng J F , Wu Z X , Zhao G C , Zhao H L , Luo Z H and Mo X X. 1999. Precambrian granitic rocks , continental crustal evolution and craton formation of the north China platform[J]. Acta Petrologica Sinica , 15 : 190-198(in Chinese with English abstract).
- Diwu C R , Sun Y , Yuan H L , Wang H L , Zhong X P and Liu X M. 2008. Detrital zircon U-Pb chronology , Hf isotopic compositions and geological significance of Songshan quartzites from Dengfeng , Henan [J]. Chinese Science Bulletin , 53 : 1923-1934(in Chinese).
- Gao L Z , Zhao T , Wang Y S , Zhao X , Ma Y S and Yang S Z. 2005. Zircon U-Pb SHRIMP ages of Precambrian basement in Yuntai Mountains , Jiaozuo , Henan[J]. Geological Bulletin of China , 24 : 1089-1093(in Chinese with English abstract).
- Geng Y S and Liu D Y. 1997. Precambrian geochronology[A]. In : Yu J S , ed. Isotopic geochemistry in China[M]. Beijing : Science Press. 1-35(in Chinese with English abstract).
- Geng Y S , Wang X S , Shen Q H and Wu C M. 2002. The discovery of Neo-proterozoic Jin 'ningian deformed granite in Alex and its significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica , 21 : 412-420(in Chinese with English abstract).
- Geng Y S , Liu F L and Yang C H. 2006. Magmatic event at the end of the Archean in eastern Hebei Province and its geological implication [J]. Acta Geologica Sinica , 80 : 819-833.
- Geng Y S , Yang C H , Wang X R , Ren L D , Du L L and Zhou X W. 2007. Ages of crystallized basement in western margin of the Yangtze platform[J]. Geol. Jour. China Universities , 34 : 251-261 (in Chinese with English abstract).
- Geng Y S. 2009. Introduction of Early Precambrian stratum[A]. Beijing : Precambrian Stratum Conference(in Chinese).
- Goodwin A. 1991. Precambrian geology[M]. London : Academic Press. 666p.
- Guan Z N , An Y L and Wu C J. 1987. Magnetic interface inversion and deducing of deep structure of North China area[A]. In : Wang M J , Cheng J Y , eds. Corpus of investment geophysics and geochemistry , Sixth volume , Regional geophysical research of China[C]. Beijing : Geol. Pub. House. 80-101 (in Chinese).
- Hao J and Zhai M G. 2004. Rodinia supercontinent , Jining Movement and Siniar[J]. Scientia Geologica Sinica , 39 : 139-152 (in Chinese with English abstract).
- Hu B , Zhai M G , Guo J H , Peng P , Liu F and Liu S. 2009. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Huade Group at the northern margin of the North China Craton and its tectonic significance[J]. Acta Petrologica Sinica , 25 : 193-211 (in Chinese with English abstract).
- Huang X , Bi Z and Depaolo D J. 1986. Sm-Nd isotope study of Early Archean rocks , Qian 'an , Hebei Province , China[J]. Geochim. Cosmochim. Acta , 50 : 625-631.
- Isley A E and Abbot D H. 1999. Plume-related mafic volcanism and the deposition of banded iron formation[J]. Journal of Geophysical Research , 104 : 461-477.
- Jahn B M and Bai Y L. 1983. Early Archean (3.5 Ga) metabasic rocks from the Tsao Zhuang Group , E Hebei , China : Sm-Nd common Pb and Rb-Sr isotopic ages[R]. In : Symposium "Precambrian Crustal Evolution " , Beijing.
- Jahn B M. 1990. Early Precambrian basic rocks of China[A]. In : Hall R P , Hughes D J , eds. Early Precambrian Basic magmatism[C]. Blackie- Glasgow , 294-316.
- Jin K , Xu W L , Wang J H , Gao S and Liu X C. 2003. Formation time and sources of the Huaiguang " migamatic granodiorite " in Banbu , Anhui Province : Evidence from SHRIMP Zircon U-Pb geochronology[J]. Acta Geoscientia Sinica , 24 : 331-336(Chinese with English abstract).
- Kusky T M and Polat A. 1990. Growth of granite-greenstone terranes at convergent margins and stabilization of Archean cratons[J]. Tectonophysics , 305 : 43-73.
- Kusky T M and Li J H. 2003. Paleoproterozoic evolution of the North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Science , 22 : 383-397.
- Kusky T M , Windley B F and Zhai M G. 2007. Tectonic evolution of the North China Block : from orogen to craton to orogen[C]. In : Zhai M G , Windley B F , Kusky T , Meng Q R , eds. Mesozoic Sub-Continental Thinning Beneath Eastern North China[M]. London : Geological Society Special Publication. 280 , 1-34.
- Li J H and Qian X L. 1994. Late Archean continental cratonization : Evidence from Hengshan metamorphic terrane , North China Craton [A]. In : Qian X L and Wang R M , eds. Geological Evolution of Granulite Facies Zone in Northern North China[M]. Beijing : Seismological Press. 43-58(in English with Chinese abstract).
- Li J H , Qian X L , Huang C N and Liu S W. 2000. Tectonic framework of North China Block and its cratonization in the Early Precambrian [J]. Acta Petrologica Sinica , 16 : 1-10(in Chinese with English abstract).
- Li Q L , Chen F K , Guo J H , Li X L , Yang Y H and Wolfgang Siebel W. 2007. Zircon ages and Nd-Hf isotopic composition of the Zhaertai

- Group(Inner Mongolia): Evidence for early Proterozoic evolution of the northern North China Craton[J]. *Journal of Asia Earth Sciences* , 30 : 573-590.
- Li T S. 1999. Taipingzhai-Zunhua Neoproterozoic island arc terrain and continental growth in Eastern Hebei , North China(dissertation for Doctor degree [D]. Beijing : Institute of Geology , Chinese Academy of Sciences. 10-129 (in Chinese with English abstract).
- Liu D Y. 1991. Discovery of old continental crust in China[J]. *Geology in China* , (5) 30 (in Chinese with English abstract).
- Liu D Y , Nutman A P W , Compston W , Wu J S and Shen Q H. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton[J]. *Geology* , 20 , 339-342.
- Liu D Y , Nutman A P , Williams J S , Compston W , Wu J S and Shen Q H. 1994. The remnants of ≥ 3800 Ma crust in Sino-Korean Craton : The evidence from ion microprobe U-Pb dating of zircons[J]. *Acta Geoscientia Sinica* , 1-2 : 1-13 (in Chinese with English abstract).
- Liu J Z , Ouyang Z Y and Zhang F Q. 1998. Upper mantle inhomogeneity and origin of North China craton[J]. *Chinese Science Bulletin* , 43 : 20 (in Chinese).
- Liu X M and Mei H L. 1993. PTt path of regional metamorphism[A]. In : Sun D Z , Hu W X , eds. *Precambrian chronological-tectonic framework and chronological crust texture in Zhongtiao Mountains* [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 132-155 (in Chinese).
- Liu X S , Li S X and Jin W. 1994. Metamorphic overprinting of re-worked basement complex in Daqingshan Orogenic Belt[A]. In : Qian X L , Wang R M , eds. *Geological evolution of granulite facies zone in northern North China* [M]. Beijing : Seismological Press. 100-108 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y G. 1982. The archean greenstone formation in northern Liaoning Province , China[J]. *J. Changchun Geology College* , (1) : 47-68 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S , Gao S , Yuan X L , Zhou L , Liu X M , Wang X C and Wang L S. 2004. U-Pb zircon ages and Nd , Sr and Pb isotopic of lower crustal xenoliths from North China : Insights on evolution of the lower continental crust[J]. *Chem. Geol.* , 211 : 87-109.
- Lu L Z , Xu X C and Liu F L. 1996. The Precambrian Khondalite Series in the North of China[M]. Changchun : Changchun Pub. House. 39-58 (in Chinese).
- Lu S N , Yang C L , Jiang M M , Li H K and Li H M. 1996. Tracing of Precambrian continental crust evolution[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 137-140 (in Chinese).
- Ma X Y , Bai J , Su S T , Lao Q Y and Zhang J S. 1987. *Precambrian Geotectonic Framework and Study Method of China* [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 77-93 (in Chinese).
- Ni Z Y , Zhai M G , Wang R M , Tong Y , Shu G M and Han X L. 2004. Discovery of Late Paleozoic retrograded eclogites from the middle part of the northern margin of North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin* , 49 (6) : 600-606 (in Chinese).
- Passchier C W , Myers J S and Kroner A. 1990. *Field geology of high-grade gneiss terrains* [J]. Berlin : Springer-Verlag.
- Pei R F , et al. 1995. *Metallogenic models in China* [M]. Beijing : Geol. Pub. House (in Chinese).
- Peng P and Zhai M G. 2002. Characteristics and nature of two important Precambrian geological events in North China Craton[J]. *Advances in Earth Science* , 17 : 818-825 (in Chinese with English abstract).
- Peng P , Zhai M G and Guo J H. 2006. 1.80-1.75 Ga mafic dyke swarms in the central North China craton : Implications for a plume-related break-up event[A]. In : Hanski E , Mertanen S , Ramo T , Vuollo J , eds. *Dyke swarms - Time markers of crustal evolution* [M]. Taylor & Francis Publisher. 99-112.
- Peng P , Zhai M G , Guo J H , Kusky T and Zhao T P. 2007. Nature of mantle source contributions and crystal differentiation in the petrogenesis of the 1.78 Ga mafic dykes in the central North China craton[J]. *Gondwana Research* , 12 : 29-46.
- Peng P , Zhai M G , Ernst R , Guo J H , Liu F and Hu B. 2008. A 1.78 Ga large igneous province in the North China craton : The Xiong'er volcanic Province and the North China dyke swarm[J]. *Lithos* , 101 (3-4) : 260-280.
- Peng R M and Zhai Y S. 2004. The characteristics of hydrothermal exhalative mineralization of the Langshan-Zhaertai belt , Inner Mongolia , China[J]. *Earth Science Frontiers* , 11 : 257-268 (in Chinese with English abstract).
- Qian X L. 1994. Significance and issues of early continental crust[A]. In : Qian X L , Wang R M , eds. *Geological evolution of granulite facies zone in northern North China* [M]. Beijing : Seismological Press. 1-6 (in Chinese with English abstract).
- Qian X L. 1996. The nature of the early Precambrian continental crust and its tectonic evolution model[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 12 : 169-178 (in Chinese with English abstract).
- Rogers J J W. 1996. A history of continents in the past three billion years[J]. *J. Geol.* , 104 : 91-107.
- Rogers J J W and Santosh M. 2004. *Continents and supercontinents* [M]. USA , Oxford University Press. 289.
- Shen B F , Zhai A M , Chen W L and Yang C L. 2006. The Precambrian mineralization of China[M]. Beijing : Geol. Pub. House (in Chinese).
- Shen Q H , Xu H F , Zhang Z Q , Gao J F , Wu J S and Ji C L. 1992. Granulites of early Precambrian in China[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 389-400 (in Chinese).
- Shen Q H , Geng Y S , Song B and Wan Y S. 2005. New informations of Erath ' surface and deep crust from the North China Block , Yangtze Block and Qinling-Dabie orogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica* , 79 : 616-627 (in Chinese with English abstract).
- Song B , Allen P N , Liu D Y and Wu J S. 1996. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province , northeastern China[J]. *Precambrian Research* , 78 : 79-94.
- Sun D Z , Hu W X , Tang M , Zhao F Q and Condie K C. 1990. Origin of Late Archean and early Proterozoic rocks and associated mineral deposits from the Zhongtiao Mountains , East-central China[J]. *Precambrian Research* , 43 : 287-306.
- Sun D Z , Li H M and Lin Y X. 1992. Precambrian Geochronology , chrono-tectonic structure of the Zhongtiao Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica* , 5 : 23-38.

- Sun D Z and Hu W X. 1993. The tectonic framework of Precambrian in Zhongtiao Mountain [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 165-167 (in Chinese).
- Sun S, Zhang G W and Chen Z M. 1985. Precambrian geological evolution of southern part of North China Fault-Block [M]. Beijing : Metallurgical Industrial Press (in Chinese).
- Wan Y S. 1993. The formation and evolution of the iron-bearing rock series of Gongchangling area, Liaoning Province [M]. Beijing : Beijing Scientific and Technological Press (in Chinese).
- Wan Y S, Geng Y S, Liu F L and Shen Q H. 2000. Age and composition of the khondalite series of the North China Craton and its adjacent area [J]. Progress in Precambrian Research, 23(4) : 221-237 (in Chinese with English abstract).
- Wan Y S, Zhang D Q and Song T R. 2003. Detrital zircon SHRIMP dating for the Changzhonggou Formation in the Changcheng System in Shisanling, Beijing : Constraint to material source of cover of the North China Craton and sedimentation time [J]. Chinese Science Bulletin, 18 : 1970-1975 (in Chinese).
- Wan Y S, Liu D Y and Song B. 2005. Geochemical and Nd isotopic composition of 3.8 Ga meta-quartz dioritic and trondhjemitic rocks from the Archean area and their geological significance [J]. J. Asian Earth Sci., 24 : 563-575.
- Wan Y S, Liu D Y, Wang S J, Yang E X, Wang W, Dong C Y, Zhou H Y, Yang Y H and Diwu C R. 2009. ~2.7 Ga juvenile crust formation in the North China Craton (Taishan-Xintai area, western Shandong Province) : Further evidence of an understand event from zircon U-Pb dating and Hf isotope composition [A]. In : Abstract with program of international discussion meeting on continental geology and tectonics [M]. Xi ' an : Northwest University Press. 54p.
- Wang H L, Chen L, Sun Y, Liu X M, Xu X Y, Chen J L, Zhang H and Diwu C R. 2007. Discovery of ca. 4.1 Ga trapped zircon [J]. Chinese Science Bulletin, 52 : 1685-1693 (in Chinese).
- Wang L Q, Qiu Y M, McNaughton N L, Groves D I, Luo Z K, Huang J Z, Miao L C and Liu Y K. 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the northwestern Jiaodong, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids [J]. Ore Geology Review, 13 : 275-291.
- Wilde S A, Cawood P A, Wang K Y and Nemchin A A. 2005. Granitoid evolution in the Late Archean Wutai complex, North China Craton [J]. J. Asian Earth Sci., 24 : 597-613.
- Windley B F. 1995. The evolving continents (3Ed) [M]. New York : John Willy and Sons.
- Wu F Y, Yang J H, Liu X M, Li T S, Xie L W and Yang Y H. 2005. Hf isotopic characteristics of 3.8 Ga zircon and time of early crust of North China Craton [J]. Chinese Science Bulletin, 50(18) : 1996-2003 (in Chinese).
- Wu F Y, Zhang Y B, Yang J H, Xie L W and Yang Y H. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the Early Archean crustal evolution in Anshan of the North China Craton [J]. Precambrian Research, 167 : 339-362.
- Wu J S, Geng Y S, Shen Q H, Wan Y S, Liu D Y and Song B. 1998. Archean geology characteristics and tectonic evolution of the China-Korea Paleo-continent [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 192-211 (in Chinese).
- Zhai A M and Shen B F. 1994. Proterozoic tectonic evolution and metallogeny in China [A]. In : Zhang Y X and Liu L D, eds. Precambrian ore-deposits and tectonics [M]. Beijing : Seismological Press. 125-146 (in Chinese).
- Zhai M G, Yang R Y, Lu W J and Zhou J W. 1985. Geochemistry and evolution of the Qingyuan Archean granite-greenstone, terrain, NE, China [J]. Precambrian Research, 27 : 37-62.
- Zhai M G and Windley B F. 1990a. The Archean and Early Proterozoic banded iron formations of North China : Their characteristics, geotectonic relations, chemistry and implications for crustal growth [J]. Precambrian Research, 48 : 267-286.
- Zhai M G, Windley B F and Sills J D. 1990b. Archean gneisses, amphibolites, banded iron-formation from Anshan area of Liaoning, NE China : Their geochemistry, metamorphism and petrogenesis [J]. Precambrian Research, 46 : 195-216.
- Zhai M G and Bian A G. 2000a. Amalgamation of the supercontinental of the North China Craton and its break up during late-middle Proterozoic [J]. Science in China (Series D), 43 : 219-232.
- Zhai M G, Bian A G and Zhao T P. 2000b. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of the Neoproterozoic, and its break-up during the late Palaeoproterozoic and Mesoproterozoic [J]. Science in China (Series D), 43 (Supp.) : 219-232.
- Zhai M G and Liu W J. 2001a. The formation and the contribution to evolution on the continent crust of granulite [J]. Acta Petrologica Sinica, 17 : 28-37 (in Chinese with English abstract).
- Zhai M G, Guo J H and Zhao T P. 2001b. Study advances of Neoproterozoic-Palaeoproterozoic tectonic evolution in the North China Craton [J]. Progress in Precambrian Research, 24 : 17-27 (in Chinese with English abstract).
- Zhai M G and Liu W J. 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China Craton : A review [J]. Precambrian Research, 122 : 183-199.
- Zhai M G. 2004a. Precambrian geological events in the North China Craton. In : Malpas J, Fletcher C J N, Ali J R, Aitchison C, eds. Aspects on tectonic evolution of China [M]. London : Geological Society Special Publication. 226, 57-72.
- Zhai M G. 2004b. 2100-1700 Ma geological events of the North China Craton and their geotectonic significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 20 : 1343-1354 (in Chinese with English abstract).
- Zhai M G, Guo J H and Liu W J. 2005. Neoproterozoic to Palaeoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China craton [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 24(5) : 547-561.
- Zhai M G, Guo J H, Li Z, Hou Q L, Peng P, Fan Q C and Li T S. 2007. Linking Sulu orogenic belt to Korean Peninsula : Evidences of metamorphism, Precambrian basement and Paleozoic basins [J]. Gondwana Research, 12 : 388-403.
- Zhai M G and Peng P. 2007. Paleoproterozoic events in North China Craton [J]. Acta Petrologica Sinica, 23 : 2665-2682 (in Chinese with English abstract).
- Zhai M G. 2008. Lower crust and lithosphere beneath the North China

- Craton before the Mesozoic lithospheric disruption[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24: 2185-1604 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Y S, Deng J and Li X B. 1999. Essentials of metallogeny[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 197-207 (in Chinese).
- Zhang C L, Liu L, Wang S J, Liu S and Dai M N. 2009. Detrital zircon provenance for the meta-sedimentary rocks from Kuanping Group, implication for Neo-proterozoic tectonic reconstruction in Qinling Orogeny, central China[A]. In: Abstract with program of international discussion meeting on continental geology and tectonics[M]. Xi'an: Northwest University Press. 64-66.
- Zhang G H, Zhou X H, Sun M, Chen S H and Feng J L. 1998. Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba basalt, Hebei and geological implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2): 190-197 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q S, et al. 1984. Geology and metallogeny of the early Precambrian in China[M]. Changchun: Jilin People's Press (in Chinese).
- Zhang Q S. 1988. Early Proterozoic crustal evolution in Liaodong peninsula [A]. In: Mao C Y and Liu L D, ed. Selected Papers of Zhang Qisheng [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press. 45-51.
- Zhang Z Q. 1998. On main growth epoch of early Precambrian crust of the North China craton based on the Sm-Nd isotopic characteristics [A]. In: Cheng Y Q, ed. Corpus on early Precambrian research of the North China craton[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 133-136 (in Chinese).
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, Yang Z Y, Hu J M and Wu H. 2007. Cratoniferous granitic plutons from the northern margin of the North China Block: Implications for a Late Paleozoic active continental margin[J]. *J. Geol. Soc. London*. 164: 451-463.
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, Sun M and 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]. *Geol. Mag.*, 136: 223-240.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A and Li S Z. 2003. Assembly, accretion and breakup of the Paleo-proterozoic Columbia supercontinent: Records in the North China craton[J]. *Gondwana Research*, 6: 417-434.
- Zhao T P, Zhai M G, Xia B and Jin C W. 2004. Study on the zircon SHRIMP ages of the Xiong'er Group volcanic rocks: Constraint on the starting time of covering strata in the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(23): 2495-2502 (in Chinese).
- Zhao Z P, et al. 1993. Precambrian crustal evolution of the Sino-Korean Paraplatform[M]. Beijing: Science Press. 389-390 (in Chinese).
- Zheng J P, Griffin W L and O'Reilly S Y. 2004. 3.6 Ga lower crust in central China: New evidence on the assembly of the North China Craton[J]. *Geology*, 32: 229-232.
- 358.
- 陈毓川, 裴荣富, 宋天瑞, 邱小平. 1998. 中国矿床成矿系列初论 [M]. 北京: 地质出版社.
- 程裕祺, 张寿广. 1982. 中国变质带、变质幕及其相关问题[J]. *中国区域地质*, 2: 1-14.
- 程裕祺(主编). 1994. 中国地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 邓晋福, 吴宗絮, 赵国春, 赵海玲, 罗照华, 莫宣学. 1999. 华北地台前寒武纪花岗岩类、陆壳演化与克拉通形成[J]. *岩石学报*, 15: 190-198.
- 第五春荣, 孙勇, 袁洪林, 王洪林, 钟兴平, 柳小明. 2008. 河南登封地区嵩山石英岩碎屑锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. *科学通报*, 53: 1923-1934.
- 高林志, 赵汀, 万渝生, 赵逊, 马寅生, 杨守政. 2005. 河南焦作云台山早前寒武纪地质基底锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. *地质通报*, 24: 1089-1093.
- 耿元生, 刘敦一. 1997. 前寒武纪年代学[A]. 见: 于津生, 主编. 中国同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 耿元生, 王新社, 沈其韩, 吴春明. 2002. 阿拉善地区新元古代晋宁期变形花岗岩的发现及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 21: 412-420.
- 耿元生, 杨崇辉, 王新任, 任留东, 杜利林, 周喜文. 2007. 扬子地台北缘结晶基底的时代[J]. *高校地质学报*, 34: 251-261.
- 耿元生. 2009. 早前寒武纪地层说明书[M]. 北京: 前寒武纪地层会议.
- 管志宁, 安玉林, 吴朝均. 1987. 磁性界面反演及华北地区深部构造的推断[A]. 见: 王懋基, 程家印, 主编. 勘查地球物理勘查地球化学文集(第6集), 中国区域地球物理研究[C]. 北京: 地质出版社. 80-101.
- 郝杰, 翟明国. 2004. 罗迪尼亚超大陆与晋宁运动和震旦系[J]. *地质科学*, 39: 139-152.
- 胡波, 翟明国, 郭敬辉, 彭澎, 刘富, 刘爽. 2009. 华北克拉通北缘化德群中碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *岩石学报*, 25: 193-211.
- 靳克, 许文良, 王清海, 高山, 刘晓春. 2003. 蚌埠淮光“混合花岗岩闪长岩”的形成时代及源区: 锆石 SHRIMP U-Pb 地质年代学证据[J]. *地球学报*, 24(4): 331-336.
- 李江海, 钱祥麟. 1994. 晚太古宙大陆德克拉通化作用——以华北克拉通恒山变质区为例[A]. 见: 钱祥麟和王仁民, 主编. 华北北部麻粒岩相带地质演化[M]. 北京: 地震出版社. 43-58.
- 李江海, 钱祥麟, 黄楚南, 刘树文. 2000. 华北陆块基底构造格局及早期大陆克拉通演化过程[J]. *岩石学报*, 16: 1-10.
- 李铁胜. 1999. 华北克拉通冀东地区的太平寨-遵化新太古代岛弧地体与地壳增长(博士论文)[D]. 北京: 中国科学院地质研究所.
- 刘敦一. 1991. 中国 38 亿年古陆壳的发现[J]. *中国地质*, (5): 30.
- 刘敦一, Nutman A P, Williams J S, Compston W, 伍家善, 沈其韩. 1994. 中朝克拉通老于 38 亿年的残余陆壳[J]. *地球学报*, 1-2: 1-13.
- 刘建忠, 欧阳自远, 张福勤. 1998. 华北克拉通上地幔不均一性及其起源: 钆同位素证据[J]. *科学通报*, 43: 20.
- 刘喜山, 李树勋, 金巍. 1994. 大青山造山带内基底再造杂岩叠加变质作用特征[A]. 见: 钱祥麟, 王仁民, 主编. 华北北部麻粒岩相带地质演化[M]. 北京: 地震出版社. 100-108.

附中文参考文献

- 白瑾, 黄学元, 戴凤岩, 吴昌华. 1993. 中国早前寒武纪地壳演化 [M]. 北京: 地质出版社. 36-38.
- 陈文明. 1996. 中国中条山铜矿峪早元古代变斑岩铜矿复合成矿作用 [A]. 地质科学研究论文集 [C]. 北京: 中国经济出版社. 353-

- 刘新秒,梅华林. 1993. 区域变质作用的P-T-t轨迹[A]. 见:孙大中,胡维兴,主编. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构[M]. 北京:地质出版社. 132-155.
- 刘宇光. 1982. 中国辽宁北部太古代绿岩建造[J]. 长春地质学院学报(1): 47-68.
- 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.
- 陆松年,杨春亮,蒋明媚,李怀坤,李惠民. 1996. 前寒武纪大陆地壳演化示踪[M]. 北京:地质出版社. 137-140.
- 马杏垣,白瑾,索书田,劳秋元,张家声. 1987. 中国前寒武纪构造格架及研究方法[M]. 北京:地质出版社. 77-93.
- 倪志耀,翟明国,王仁民,童英,舒桂明,韩秀玲. 2004. 华北古陆块北缘中段发现晚古生代退变榴辉岩[J]. 科学通报, 6: 73-79.
- 裴荣富,等. 1995. 中国矿床模式[M]. 北京:地质出版社.
- 彭澎,翟明国. 2002. 华北陆块前寒武纪两次重大地质事件的特征和性质[J]. 地球科学进展, 17: 818-825.
- 彭润民,翟裕生. 2004. 内蒙古狼山-渣尔泰山中元古代被动陆缘热水喷流成矿特征[J]. 地学前缘, 11: 257-268.
- 钱祥麟. 1994. 早期大陆地壳研究的意义和问题[A]. 见:钱祥麟,王仁民,主编. 华北北部麻粒岩相带地质演化[M]. 北京:地震出版社. 1-6.
- 钱祥麟. 1996. 早前寒武纪大陆地壳的性质与构造演化问题[J]. 岩石学报, 12: 169-178.
- 沈宝丰,翟安民,陈文明,杨春亮. 2006. 中国前寒武纪成矿作用[M]. 北京:地质出版社.
- 沈其韩,许惠芬,张宗清,高吉凤,伍加善,吉成林. 1992. 中国早前寒武纪麻粒岩[M]. 北京:地质出版社. 389-400.
- 沈其韩,耿元生,宋彪,万渝生. 2005. 华北和扬子陆块及秦岭-大别造山带地表和深部太古宙基底的新信息[J]. 地质学报, 79: 616-627.
- 孙大中,胡维兴. 1993. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构[M]. 北京:地质出版社. 165-167.
- 孙枢,张国伟,陈志明. 1985. 华北断块区南部前寒武纪地质演化[M]. 北京:冶金工业出版社.
- 万渝生. 1993. 辽宁弓长岭含铁岩系的形成和演化[M]. 北京:北京科学技术出版社.
- 万渝生,耿元生,刘福来,沈其韩. 2000. 华北克拉通及邻区孔兹岩系的成分与年龄[J]. 前寒武纪研究进展, 23(4): 221-237.
- 万渝生,张巧大,宋天锐. 2003. 北京十三陵长城系常州沟组碎屑锆石SHRIMP年龄:华北克拉通盖层物源区及最大沉积年龄的限制[J]. 科学通报, 48: 1970-1975.
- 王洪亮,陈亮,孙勇,柳小明,徐学义,陈隽璐,张红,第五春荣. 2007. 北秦岭西段奥陶纪火山岩中发现近4.1 Ga的捕虏锆石[J]. 科学通报, 52: 1685-1693.
- 吴福元,杨进辉,柳小明,李铁柱,谢烈文,杨岳衡. 2005. 冀东3.8 Ga锆石Hf同位素特征与华北克拉通早期地壳时代[J]. 科学通报, 50(18): 1996-2003.
- 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[M]. 北京:地质出版社. 192-211.
- 翟安民,沈保丰. 1994. 中国元古宙构造演化与成矿作用[A]. 见:张贻侠,刘连登,主编. 中国前寒武纪矿产和构造[M]. 北京:地震出版社. 125-146.
- 翟明国,刘文军. 2001a. 麻粒岩的形成及其对大陆地壳演化的贡献[J]. 岩石学报, 17: 28-37.
- 翟明国,郭敬辉,赵太平. 2001b. 华北克拉通新太古代-古元古代构造演化[J]. 前寒武纪研究进展, 24: 17-27.
- 翟明国. 2004b. 华北克拉通2100~1700 Ma地质事件群的分解和构造意义探讨[J]. 岩石学报, 20: 1343-1354.
- 翟明国,范宏瑞,杨进辉,苗来成. 2004c. 非造山带型金矿——胶东型金矿的陆内成矿作用[J]. 地学前缘, 11: 86-98.
- 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: 2665-2682.
- 翟明国. 2008. 华北克拉通中生代破坏前的岩石圈地幔与下地壳[J]. 岩石学报, 24: 2185-2604.
- 翟裕生,邓军,李晓波. 1999. 区域成矿学[M]. 北京:地质出版社. 197-207.
- 张国辉,周新华,孙敏,陈绍海,冯家麟. 1998. 河北汉诺坎玄武岩中麻粒岩类和辉石岩捕虏体Sr、Nb、Pb同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 14(2): 190-197.
- 张秋生,等. 1984. 中国早前寒武纪地质及成矿作用[M]. 长春:吉林人民出版社.
- 张秋生. 1988. 辽东半岛早元古宙地壳的演化[A]. 见:毛成云,刘连登,主编. 张秋生论文选集[C]. 长春:吉林科学技术出版社. 45-51.
- 张宗清. 1998. 从华北古陆早前寒武纪变质岩的Sm-Nd同位素特征论其地壳的主要生长时期[A]. 见:程裕祺,主编. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集[C]. 北京:地质出版社. 133-136.
- 赵太平,翟明国,夏斌,金成伟. 2004. 熊耳群火山岩锆石SHRIMP年代学研究:对华北克拉通盖层发育初始时间的制约[J]. 科学通报, 49(22): 2342-2349.
- 赵宗溥,等. 1993. 中朝准地台前寒武纪地壳演化[M]. 北京:科学出版社. 389-390.