



评述

克拉通化与华北陆块的形成

翟明国

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

E-mail: mgzhai@mail.igcas.ac.cn

收稿日期: 2010-12-10; 接受日期: 2011-04-07

国家自然科学基金重点项目(批准号: 41030316)、国家自然科学基金重大研究计划项目(批准号: 90714003)和中国科学院方向项目(编号: KZCX2-YW-Q04-04)资助

摘要 克拉通化是稳定的大陆形成的重要事件, 在地球演化历史上未见重复. 华北克拉通的形成经历了两期克拉通化事件, 为理解早期陆壳的形成与演化提供了难得的实例. 第一期克拉通化发生在新太古代末期, 很可能是在 2.53~2.60 Ga 的微陆块拼合之后很短的时间内, 以陆壳岩石和初生地壳岩石(基性岩浆岩)的部分熔融形成广泛分布的花岗质岩石的侵入、岩墙群和裂谷型火山-沉积盖层为标志. 古元古代华北克拉通出现了裂谷-俯冲-增生-碰撞的陆内造山事件, 以三条古元古代的活动带为代表. 第二期克拉通化即克拉通再造发生在古元古代末的陆内造山之后约 1.95~1.82 Ga 期间, 出现麻粒岩相-高级角闪岩相的克拉通基底岩石的整体抬升, 伴随壳熔花岗岩形成和强烈的混合岩化, 而后有镁铁质岩墙群侵入、裂陷槽和裂谷形成, 以及奥长环斑花岗岩-斜长岩-碱性花岗岩-碱性火山岩的非造山岩浆活动(在 18~16.5 亿年). 中元古代后华北进入地台演化阶段.

关键词克拉通化
华北
陆块形成

1 克拉通化及其意义

虽然迄今为止地球上最老的物质或岩石记录都是来自陆壳岩石的, 但多数研究者仍然认为地幔是难以直接熔融出陆壳岩石(平均成分)的. 岩浆海模式假设首先通过岩浆分异或二次熔融形成陆核, 而后经过巨量陆壳增生, 形成了微陆块或小陆块. 早期形成并且长期未经构造活动(变形)具有一定规模的地壳部分, 称为克拉通, 大多数克拉通都是在太古宙形成的^[1-3]. 这些克拉通在太古宙末一个特定的地质时期, 即~25 亿年(2.5 Ga), 形成全球规模的超级克拉通(陆块)^[3-6], 才有了与现今相类似的洋陆格局.

克拉通化就是形成克拉通的过程, 包括了固体

圈层中的岩石、地球化学、构造地质、地球物理场等等的诸多演化和剧变. 笔者在经典定义的基础上将克拉通化概括为: 形成稳定的上下大陆地壳圈层, 并与地幔耦合的地质过程^[6]. 可见, 克拉通化是地球、特别是大陆发展历史上最重要的地质事件之一. 全球大多数古陆的克拉通化完成在太古宙末的一个特定时期, 即 2.65~2.5 Ga, 少数完成于古元古代末, ~2.0~1.9 Ga^[1,3], 并在以后的地质演化中未见重复. 克拉通化的结果是在地球上形成与现今规模相似的稳定大陆. 克拉通的标志即是陆壳克拉通化的地质表现和必然结果, 它们主要是: (1) 没有造山带活动, 而代之以有稳定的地台型盖层沉积; (2) 岩墙群侵入; (3) 大量的壳熔花岗岩; (4) 地幔岩与地壳中火成岩在时

代上以及物质成分上的一致性和对偶性, 后者体现了深部与浅部的关系。

~25 亿年的全球克拉通化的意义可以简单地归纳为三点: (1) 在地球上形成了与现今规模大致相当 (>80%~90%) 的陆壳; (2) 假设世界上的克拉通聚合成超级克拉通(大陆)^[4,5]; (3) 上下地壳分层、壳幔圈层耦合, 支持有大陆岩石圈形成, 并与古大气圈和古水圈达到平衡^[3]。

2 华北的克拉通化与陆块形成

华北克拉通是世界上著名的古老陆块, 它具有 ~38 亿年(3.8 Ga) 的漫长历史, 与其它克拉通相比, 有更为复杂的多阶段的构造演化^[5,6], 记录了几乎所有的地球早期发展的重大构造事件, 并在中生代又发生了减薄与改造(破坏)。

2.1 陆核与巨量陆壳形成

华北有若干古老的陆核, 它们由花岗质片麻岩和变质的沉积砂岩中的 ~3.0~3.8 Ga 亿年的古老锆石来作为指示标志^[7-12]。最近, 华北中部、南部和西部的元古宙变质沉积岩和显生宙沉积岩中不断有 3.7~3.8 Ga 的碎屑锆石被报道, 因此推测冥古宙晚期-太古宙早期的古老陆壳岩石在华北可能比原来想象的分布更广。在华北南缘的古生代火山碎屑岩中还发现有 ~4.1 Ga 的锆石, 带有 ~3.9 Ga 的变质环带^[13], 是目前在中国发现的最古老的锆石之一。

根据已有的地质资料, 陆壳的 80%~90% 是在早寒武纪形成的, 绝大多数形成在中-新太古代^[14-19]。具有 3.0~2.5 Ga Sm-Nd 的模式年龄的陆壳岩石约占华北陆壳的 78%, 其中 >3.0 Ga 的约占 ~15%, <2.5 Ga 约占 7%, 大部分陆壳(~55%) 的形成应在 2.7~2.9 Ga 之间, 称为陆壳的巨量生长期^[20]。Hf 同位素模式年龄最主要的分布区间在 2.6~3.0 Ga, 并且有 2.82 Ga 的峰值, 与 Nb 同位素的地质意义相似。通过长英质片麻岩和火山岩的研究, 全球陆壳的巨量增生在 2.7~2.8 Ga 期间, 主要的岩石类型是高钠的长英质片麻岩(TTG), 其次是镁铁质-超镁铁质火山岩^[21-24]。此次陆壳增生大多被推测与超级地幔柱事件相关^[15,25,26]。华北陆壳的增生与全球一致。太古宙的陆壳增生一般认为是围绕着古老陆核形成微陆块。华北的太古宙微陆块根据不同的研究者的划分约有 10~5 个^[1,27-31], 比

较明确的 7 个太古宙微陆块是胶辽(JL)、许昌(XCH)、迁怀(QH)、鄂尔多斯(ER)、徐淮(XH)、集宁(JN)、和阿拉善微陆块(ALS)^[20]。

2.2 新太古代末的克拉通化过程与标志

继 2.7~2.9 Ga 的巨量陆壳增生后, 新太古代晚期华北经历了微陆块拼合和随后由变质作用和壳熔花岗岩、盖层沉积为标志的克拉通化。

2.2.1 新太古代晚期微陆块拼合

新太古代晚期(2.5~2.6 Ga) 是华北陆块演化最重要的时期。这个时期有较多的火山作用与沉积作用, 形成新太古代绿岩带; 有大量的壳熔的花岗岩和 TTC 片麻岩形成; 有广泛的麻粒岩相-角闪岩相变质作用; 有镁铁质岩墙和花岗岩脉群侵入。新太古代绿岩带大多形成在 ~2.5 Ga, 代表性的有红透山、东五分子、登封和五台山绿岩带, 少数 ~2.6~2.7 Ga 的绿岩带, 如雁翎关绿岩带。最近的研究雁翎关绿岩带有明确的 ~2.5 亿年的变质以及大量 ~2.5 Ga 的花岗岩体和岩席, 表明该绿岩带在 ~2.5 Ga 仍有明确的构造活动^[32,33]。

图 1 是华北太古宙末期的微陆块与绿岩带的分布示意图。绿岩带作为线性的褶皱带围绕古老的微陆块分布, 像世界上其他克拉通一样, 很像是由绿岩带焊接了微陆块。已经有不同的模式描述新太古代末(2.53~2.6 Ga) 绿岩带围绕高级区的克拉通构造格局和机制^[6,28,30]。2.52~2.50 Ga 的钾质花岗岩侵入到绿岩带和相邻的不同微陆块, 并且有部分花岗岩经历了变质作用, 表明微陆块已拼合成一体, 并形成现今规模的华北克拉通陆块。

2.2.2 新太古代末华北克拉通化

以往的研究多认为华北经历了两期或更多期的克拉通化, 在 ~2.5 Ga 新太古代末华北已经形成现今规模的古陆^[1,30,34-36]。最近的研究^[37-77]提供了更多与克拉通化有关的 ~2.5 Ga 变质作用和壳熔花岗岩事件的证据。主要包括: 太古宙的岩石经历了 ~2.6 和 2.52~2.50 Ga 的变质作用; 各微陆块有大量的基底岩石的部分熔融和混合岩化; 壳熔的花岗岩包括由中酸性岩石和沉积岩部分熔融形成的钾长花岗质-花岗质-二长花岗质岩石和基性岩石部分熔融形成的 TTG 质-二长花岗质岩石作为岩体、岩株和岩席侵入到古老的岩石中并切穿不同微陆块以及绿岩带和高级区

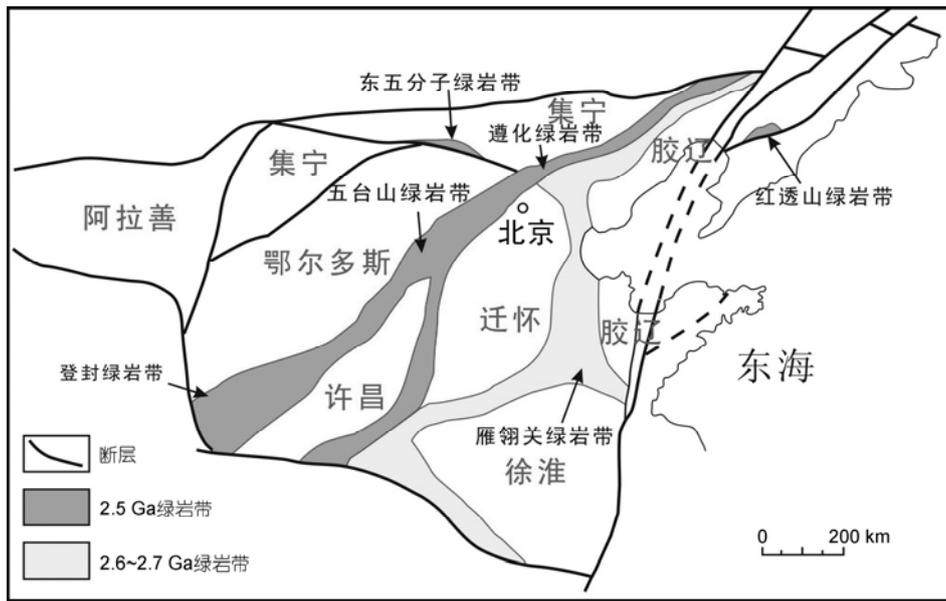


图1 华北克拉通古太古代末的微陆块与绿岩带

据文献[28, 33]修改

地体的界限、25 亿年的基性岩墙以及碱性-超镁铁质岩墙侵入到古老的岩石以及新太古代末的花岗岩中。

大量的壳熔花岗岩是克拉通化过程中达到上下地壳稳定分层的重要过程。这个过程导致上地壳总体成分更趋于花岗质，而含有熔融残留物质的下地壳，并且有底侵的辉长岩加入使其更趋于镁铁质。上下地壳的变质程度也有很大的差别。上地壳层为绿片岩相、未变质相。下地壳层的变质相从下而上分别是：麻粒岩相、混合岩化麻粒岩相、混合岩化角闪岩相、角闪岩相^[78]。这种物质成分与变质相的分层使得初始陆壳的密度增大和在其它物理-化学状态变得稳定。地幔为地壳的分层提供能量并有适量的物质加入，软流圈地幔经过岩浆萃取后形成岩石圈地幔，因此稳定的陆壳分层也导致壳幔达到耦合。陆壳与陆壳下地幔的耦合应该标志着大陆岩石圈的形成，并与大气圈和水圈达到新的平衡。微陆壳的拼合暗示在新太古代末已经开始从早期的垂向构造为主向横向构造转化，表现出洋陆相互作用，有限的和小规模的弧-陆或陆-陆的俯冲与碰撞，与板块构造的体制仍有较大差别^[79]。

新太古代末的全球克拉通化之后，地球的演化历史上出现了长达 0.15~0.2 Ga 的静寂期，没有火山活动，没有构造活动^[15]，使得 2.5 Ga 作为太古宙与元

古宙的分界年龄具有划时代的意义。

2.2.3 新太古代末克拉通化的标志

新太古代末的华北花岗岩大致有三期，即 2.55~2.53, 2.51~2.50 和 2.50~2.45 Ga。三期的花岗岩都可以大致分为三类，即高钠质的 TTG、二长花岗岩和高钾质的花岗岩。它们的源岩可能分别是：镁铁质岩石、镁铁质岩石与沉积岩/长英质岩石、长英质岩石。根据镁铁质岩石代表洋壳、长英质岩石代表陆壳的设想引发了不同的与板块构造相似或相左的成因模式。总之，有足够的热(地幔活动)就可导致已有的地壳部分熔融形成花岗质岩石，地壳源岩的不同就可以分别形成高钠或高钾质的花岗岩。

壳幔相互作用的结束以岩墙群的侵入为特征。~2.5~2.45 Ga 的岩墙群以斜长角闪岩/基性麻粒岩为代表，它们多经历了强烈的变形与变质，最近在冀东识别的橄榄辉长岩-碱性岩共生的岩墙，其锆石离子探针 U-Pb 年龄为 2.504 和 2.516 Ga^[80]。共生的超镁铁质与碱性岩墙是罕见的，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。

最近的研究证实在华北核部的冀东出露的浅变质的火山-沉积岩(青龙群)^[81]和在华北北部广泛分布的浅变质的火山-沉积岩(红旗营子群和单塔子群)的

形成年龄是 2.50~2.51 Ga(翟明国数据, 待发表), 它们的火山岩显示陆内裂谷的双峰式特征, 形成时代应在区域的高级变质作用之后, 应代表华北新太古代末克拉通化之后的盖层沉积.

3 古元古代活动带与克拉通再造

华北克拉通在新太古代末克拉通化之后, 又在古元古代经历了很强的变质事件, 与世界上多数克拉通不同, 但与西伯利亚和波罗的(瑞芬)克拉通相似, 成为国际关注的研究地区.

3.1 活动带、高温高压变质与板块构造的雏形

像世界上其他克拉通一样, 华北经历了约 2.5(2.45)~2.35(2.3)Ga 的构造静寂期(第一次雪球事件假说)^[25]. 此后, 华北克拉通经历了一次基底残留洋盆与陆内的拉伸-裂谷事件(2.3~1.95 Ga). 值得指出的是, 2.3~1.95 Ga 时期在地球演化中具有重要意义, 称为地球大氧化事件(Great Oxidation Event)或 Lomagundi, Jatulian 事件^[82-86]. 该事件是指~2.35~2.3 Ga 之前的地球大气圈中甲烷(CH₄)降低、出现了 O₂ 的连续升高, 这是地球上的一个重大转折点, 标志着地球经历了一系列从未经过的重要的化学和地质环境变化包括

大陆的氧化风化阶段和海洋的地球化学变化及(多细胞)生物事件. 地化特征呈现 C 同位素明显正漂移等, 全球出现苏必利尔型沉积 BIF 铁建造巨量沉积. 我国同期也有重要表现, 虽然缺失 BIF 沉积, 却有大量碳酸盐和蒸发盐岩, 并记录了 C 同位素明显正漂移和其他地化特征^[87,88]. 代表性的岩石组合如辽宁-吉林地区的辽河群, 下部为含电气石的中酸性火山岩和基性火山岩上部为沉积岩系, 由上段碎屑岩-碳酸盐组合和下段火山岩-碎屑岩-碳酸盐组合, 碳酸盐富镁, 形成巨大菱镁矿床.

随后在~2.0~1.97 Ga, 经历了一次挤压构造事件, 导致了陆内盆地的闭合, 主要的火山-沉积岩系分布克拉通的东部、西北部和中部, 分别被称为辽河群/粉子山群, 集宁群/二道凹群, 溇沱群/吕梁群/中条群, 形成晋豫、胶辽和丰镇三个活动带(图 2), 它们在分布状态、变形与变质方面, 类似于现代陆-陆碰撞型的造山带^[89,90], 造成克拉通西部、中部、北部和东部的陆块在以活动带为边界的碰撞以及碰撞后的伸展, 造成陆块边缘基底掀翻, 部分出露地表的中-下地壳岩石达到高压麻粒岩-榴辉岩相和含假蓝宝石的超高温麻粒岩相^[91-98], 这使得研究者热烈讨论它们的形成是否与现代板块构造有相同的机制. 主要的构造模式有: 1) 华北的西部陆块与东部陆块在古元古代

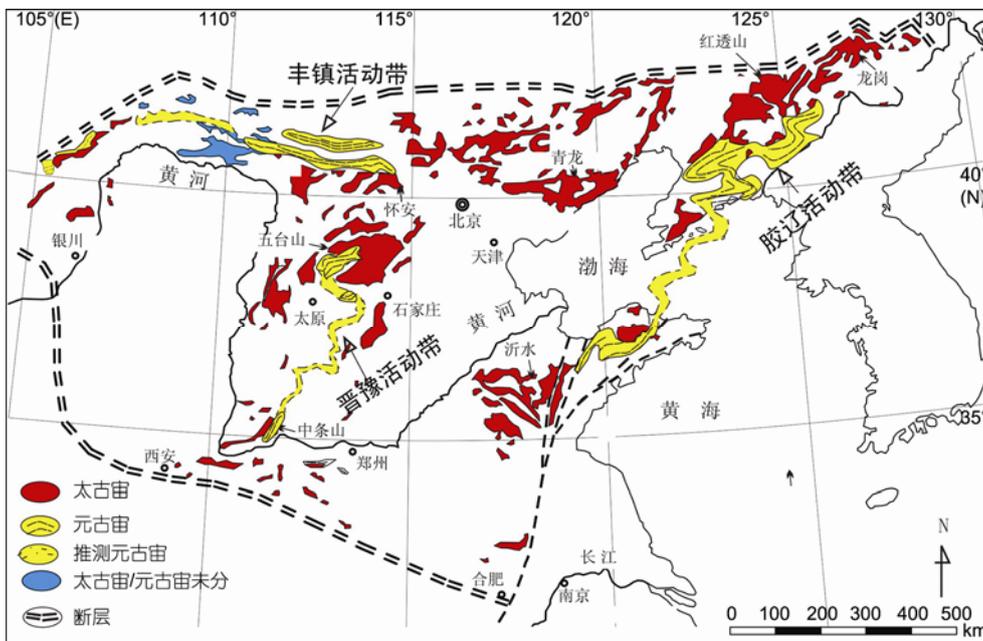


图 2 华北克拉通古元古代活动带

末期沿中部的造山带拼合模式^[99-101]. 认为五台杂岩、溥沱杂岩和吕梁杂岩等的演化与古老洋盆的闭合以及岛弧的形成演化有关, 中部造山带与喜马拉雅造山带同样宏伟^[102]; 2) 一个古元古代的造山带出露在华北克拉通的北缘, 称为内蒙-冀北造山带^[103,104]或华北北缘构造带^[105], 它们的碰撞作用造成沿华北北缘不同古老构造单元的高级变质基底都抬升到地表; 3) 华北克拉通在古元古代曾有裂谷活动, 之后有裂谷盆地以及新太古代的残留盆地闭合的活动带^[70,79,89,90]. 最近一些研究者根据华北东部、北部和南缘的变质作用和年代学数据, 提出古元古代的高压麻粒岩相变质作用的分布可能在华北的很多地区都有记录^[106-111], 还有研究者提出“中部造山带”可能没有延到华北南部^[36]. 已有的数据还表明高温高压的岩石仍然属于中压相系, 它们的变质温压梯度和抬升速率, 与现代碰撞造山带仍有较大差别, 表明岩石圈的温度偏高和刚性程度偏低^[112]. 作者根据变质条件和变质历史的研究, 提出在古元古代的造山过程中, 俯冲的岩片的深度有限, 它们大致达到绿片岩相与低级角闪岩相的形成深度, 如溥沱群、吕梁群、中条群、二道凹群和下辽河群所记录的变质程度, 变质时代大概在~2.0~1.97 Ga 之前, 完成了一个裂解-俯冲-碰撞的造山旋回. 变质泥质岩石(俗称孔兹岩, 如丰镇群, 粉子山群等)记录的高温-超高温麻粒岩相变质或高压麻粒岩相^[108], 以及附近基底岩石中基性岩墙的高压麻粒岩相变质, 很可能是在碰撞作用结束之后在1.95~1.82 Ga 期间, 由于伸展体制下地幔隆升造成的高级叠加变质. 造山过程和伸展过程可能分别对应于古元古代超大陆的拼合与裂解. 超大陆的拼合与裂解对太古宙华北克拉通的影响和改造, 是华北克拉通古元古代再造的本质, 其结果是终极克拉通化, 并使其基本的构造格局大致保持至今.

总之, 古元古代活动带以及变质作用已经显示了板块构造雏形的特点, 同时也显示出很多差别, 在机理上可能类似, 在规模上则不同, 是早前寒武纪垂直为主的构造机制向板块构造转变的重要阶段. 一些科学问题还需要继续加强研究.

3.2 华北克拉通再造及其标志

古元古代大陆的拼合(造山作用)与裂解事件之后, 华北克拉通在~1.82~1.6 Ga, 经历了一系列相关联的地质事件, 主要有: ~1.82~1.8 Ga 的全区范围的

麻粒岩相-高级角闪岩相的结晶基底岩石抬升到地表, 经历了约 1.8 Ga 角闪岩相退变质并伴随有部分熔融和混合岩化, 被~1.8~1.6 Ga 的古元古代熊耳群和长城系地层不整合覆盖; ~1.78 Ga 的放射状分布的镁铁质岩墙群, 未经历变形与变质作用; ~1.8~1.6 Ga 的陆内裂谷盆地、裂隙槽(图 3)以及伴生的斜长岩-奥长环斑花岗岩等非造山岩浆组合^[113-116]. 这些都是华北克拉通再造以及终极克拉通化的标志. 对于该期克拉通再造的构造机制仍然是不清楚的. 国内学者对该事件的称呼也不同, 如溥沱运动、吕梁运动或中条运动, 以及后吕梁运动等, 但对它们是伸展构造体制下的地质活动近年来已基本达到共识^[89-91,113]. 在古元古代活动带事件之后, 华北总体处于伸展环境. 结合基底隆升和地壳部分熔融/混合岩化、岩墙群侵入以及随后的陆内裂谷, 与地幔柱有关的模式是可能的选择^[73,116,117]. 因此, 也有一些学者将华北克拉通的再造(终极克拉通化)解释为古-中元古代可能的超级大陆的裂解事件的地质结果^[118,119].

中元古代(1.6 Ga)开始, 华北进入地台的演化阶段^[1,6,11,30], 并保持了长达 10 多亿年的稳定. 直至中生代, 华北克拉通才发生活化或“破坏”.

4 前寒武纪成矿作用

华北克拉通有丰富的前寒武纪矿产, 形成了一批超大型-大型矿床, 铁矿、稀土、铅-锌、菱镁矿等储量巨大、潜力可观, 为我国的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), 其中大多属矿产品种或类型, 在地质演化历史上没有重复, 为研究大规模金属元素的堆积与富集规律和成矿的大地构造背景, 提供了难得的研究实例.

华北克拉通前寒武纪成矿很有特点, 有与地质时代、构造背景密切相关的时空分布规律^[120-126]: 1) 成矿类型与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, 随时代变新, 矿产类型更加丰富; 3) 元古宙的矿产早期为活动带型, 中期变为陆内裂谷型; 4) 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; 5) 前寒武纪矿产多与火山与沉积岩层序共生,

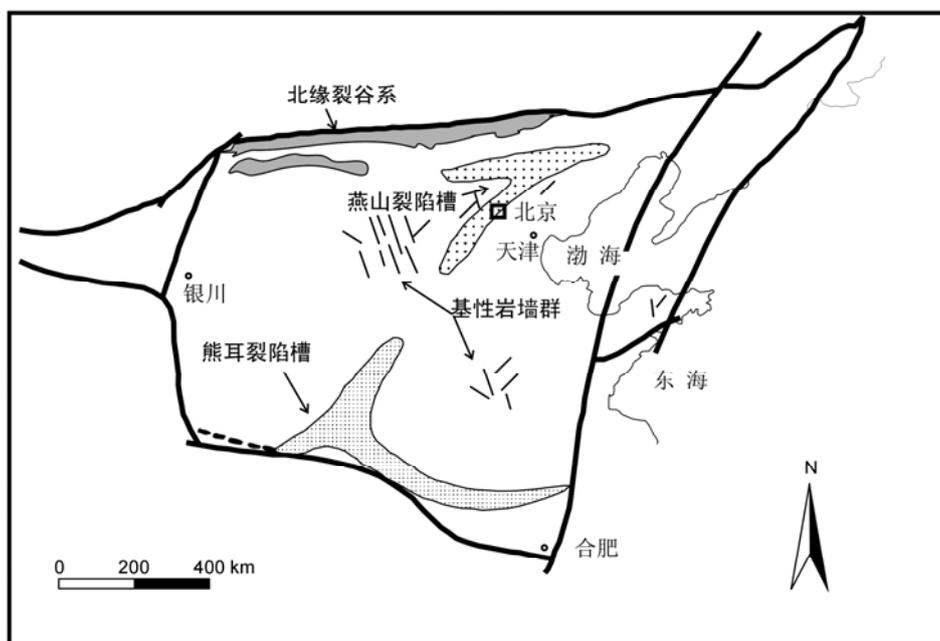


图3 华北克拉通古-中元古代岩墙与裂谷分布图

表1 华北克拉通前寒武纪代表性金属矿产

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	绿岩带、高级区	水厂、杏山铁矿
新太古代微陆块拼合	2.5	条带状铁矿	绿岩带	弓长岭铁矿
		块状硫化物铜-锌矿	绿岩带	红透山铜锌矿
		金矿	绿岩带、高级区	三道沟金矿
古元古代活动带	2.3~1.9	火山、斑岩型铜矿	活动带(优地槽)	铜矿峪铜矿
		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
古元古代末期-中元古代	1.8~1.6	SEDEX型铅-锌-铜矿床	裂谷	东升庙铅锌矿
裂谷系	1.4	钒-钛-铁-磷矿床	非造山岩浆作用	大庙铁矿
		沉积(宣龙式)铁矿	陆缘-浅海、裂谷	宣化铁矿
		沉积热液交代型	裂谷	白云鄂博稀土-铌-铁矿床
		稀土-铌-铁矿床		

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。虽然它们在高级区和绿岩带中都有分布,但是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。太古宙与镁铁质侵入岩有关的铜-镍-铬矿床较少。太古宙绿岩带金矿在华北克拉通不发育,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和改造有关。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、斑岩型铜矿、层状铅-锌矿床

和硼-铁(镁)矿床等。在古元古代末-中元古代的成矿作用受裂陷槽-裂谷的演化控制,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,以及与陆缘-浅海沉积有关的铁矿,尤其以沉积热液交代型稀土-铌-铁矿床,受到全世界的关注。此外,华北前寒武纪还有较丰富的硼矿、磷矿、石墨矿等,也有与超镁铁质岩体有关的镍矿等^[127]。同时由于华北克拉通的多起克拉通化(前寒武纪变质作用与岩浆作用)以及中生代的克拉通破坏与重建,使得在太古宙形成的金矿被叠加、改造或者贫化、再富集^[128]。

致谢 作者感谢同事、学生以及中外同行的讨论、帮助和合作, 感谢审稿人提出的修改建议。

参考文献

- 1 赵宗溥, 等. 中朝准地台前寒武纪地壳演化. 北京: 科学出版社, 1993. 366–388
- 2 Goodwin A. Precambrian Geology. London: Academic Press, 1991. 666
- 3 Windley B F. The Evolving Continents. Chichester: John Wiley and Sons, 1978. 330–340
- 4 Rogers J J W, Santosh M. Supercontinents in Earth history. *Gondwana Res*, 2003, 6: 357–368
- 5 Kusky T M, Windley B F, Zhai M G. Tectonic evolution of the North China Block: From orogen to craton to orogen. In: Zhai M G, Windley B F, Kusky T, et al, eds. *Mesozoic Sub-continental Thinning Beneath Eastern North China*. *Geol Soc Spec Publ London*, 2007, 280: 1–34
- 6 翟明国. 华北克拉通中生代破坏前的岩石圈地幔与下地壳. *岩石学报*, 2008, 24: 2185–2204
- 7 Liu D Y, Nutman A P W, Compston W, et al. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 1992, 20: 339–342
- 8 Liu D Y, Wan Y S, Wu J S, et al. Eoarchean rocks and zircons in the North China Craton. In: *Developments in Precambrian Geology: 'Earth's Oldest Rocks'*. Amsterdam: Elsevier, 2007. 251–273
- 9 万渝生, 宋彪, 刘敦一, 等. 鞍山风景区 3.8~2.5 Ga 古老岩带的同位素地质年代学和地球化学. *地质学报*, 2001, 75: 363–370
- 10 Wu F Y, Zhang Y B, Yang J H, et al. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the Early Archean crustal evolution in Anshan of the North China Craton. *Precambrian Res*, 2008, 167: 339–362
- 11 翟明国. 新太古代全球克拉通事件与太古宙-元古宙分界的地质涵义. *大地构造与成矿*, 2006, 30: 419–421
- 12 万渝生, 刘敦一, 董春艳, 等. 中国最老岩石和锆石. *岩石学报*, 2009, 25: 1973–1807
- 13 第五春荣, 孙勇, 董增产, 等. 北秦岭西段冥古宙锆石(4.1~3.9 Ga)年代学新进展. *岩石学报*, 2010, 26: 1171–1174
- 14 Rogers J J W. A history of continents in the past three billion years. *J Geol*, 1996, 104: 91–107
- 15 Condie K C, Des Marais D J, Abbot D. Precambrian superplumes and supercontinents: A record in black shales, carbon isotopes and paleoclimates. *Precambrian Res*, 2001, 106: 239–260
- 16 McLennan S M, Taylor S R. Geochemical constraints on the growth of the continental crust. *J Geol*, 1982, 90: 347–361
- 17 McLennan S M, Taylor S. R. Continental freeboard sedimentation rates and growth of continental crust. *Nature*, 1983, 306: 169–172
- 18 Brown G C. The changing pattern of batholith emplacement during earth history. In: Atherton M P, Tarney J, eds. *Origin of Granite Batholiths*. Natwich: Siva, 1979. 106–115
- 19 Dewey J F, Windley B F. Growth and differentiation of the continental crust. *Phil Trans Soc Lond*, 1981, A301: 189–206
- 20 Zhai M G. Precambrian Geological Events in the North China Craton. In: Malpas J, Fletcher C J N, Ali J R, et al, eds. *Tectonic Evolution of China*. *Geol Soc Spe Pub London*, 2004, 226: 57–72
- 21 Zhang Z Q. On main growth epoch of early Precambrian crust of the North China craton based on the Sm-Nd isotopic characteristics (in Chinese with English abstract). In: Cheng Y Q, ed. *Corpus on Early Precambrian Research of the North China Craton*. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 133–136
- 22 Jahn B M, Zhang Z Q. Radiometric ages (Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb) and REE geochemistry of Archean granulite gneisses from eastern Hebei province, China. In: Kröner A, Hanson G N, Goodwin A M, eds. *Archean Geochemistry*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1984. 183–204
- 23 Jahn B M. Early Precambrian basic rocks of China. In: Hall R P, Hughes D J, eds. *Early Precambrian Basic Magmatism*. Glasgow: Blackie, 1990. 294–316
- 24 吴福元, 杨进辉, 柳小明, 等. 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. *科学通报*, 2005, 50: 1996–2003
- 25 Condie K C, Kröner A. When did plate tectonics begin? Evidence from the geologic record. *Geol Soc Am Spec Pap*, 2008, 440: 281–294
- 26 Windley B F. The evolving continents. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1995. 377–385, 459–462
- 27 邓晋福, 吴宗絮, 赵国春, 等. 华北地台前寒武纪花岗岩类、陆壳演化与克拉通形成. *岩石学报*, 1999, 15: 190–198
- 28 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社, 1998. 192–211
- 29 Zhai M G, Guo J H, Liu W J. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China craton. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24: 547–561
- 30 白瑾, 黄学光, 戴凤岩, 等. 中国早前寒武纪地壳演化. 北京: 地质出版社, 1993. 36–38
- 31 管志宁, 安玉林, 吴朝均. 磁性界面反演及华北地区深部构造的推断. 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. 北京: 地质出版社, 1987. 80–101

- 32 Wan Y S, Liu D Y, Wang S J, et al. ~2.7 Ga juvenile crust formation in the North China Craton (Taishan-Xintai area, western Shandong Province): Further evidence of an understated event from zircon U-Pb dating and Hf isotope composition. *Precam Res*, in press
- 33 张福勤, 刘建忠, 欧阳自远. 华北克拉通基底绿岩的岩石大地构造学研究. *地球物理学报*, 1998, 41: 99-107
- 34 程裕祺, 主编. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社, 1994. 432-436
- 35 沈其韩, 徐惠芬, 张宗清, 等. 中国早前寒武纪麻粒岩. 北京: 地质出版社, 1992. 389-400
- 36 程裕祺, 张寿广. 略论我国不同变质期的变质岩系、变质带和若干有关问题. *中国区域地质*, 1980, 2: 1-14
- 37 Liu DY, Wilde S A, Wan Y S, et al. Combined U-Pb, hafnium and oxygen isotope analysis of zircons from meta-igneous rocks in the southern North China Craton reveal multiple events in the Late Mesoarchean-Early Neoproterozoic. *Chem Geol*, 2009, 261: 140-154
- 38 Wang Y J, Zhang Y Z, Zhao G C, et al. Zircon U-Pb geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Taishan sanukitoids (Shandong): Implications for Neoproterozoic subduction in the Eastern Block, North China Craton. *Precambrian Res*, 2009, 174: 273-286
- 39 Yang J-H, Wu F Y, Wilde S A, et al. Petrogenesis and geodynamics of Late Archean magmatism in eastern Hebei, eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Hf isotopic evidence. *Precambrian Res*, 2008, 167: 125-149
- 40 Geng Y S, Liu F L, Yang C H. Magmatic event at the end of the Archean in eastern Hebei Province and its geological implication (in Chinese with English abstract). *Acta Geol Sin*, 2006, 80: 819-833
- 41 路孝平, 吴福元, 林景任, 等. 辽东半岛南部早前寒武纪花岗岩浆作用的年代学格架. *地质科学*, 2004, 39: 123-138
- 42 Zhao G C, Eilde S A, Cawood P, et al. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping complex: Implications for Late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton. *Amer J Sci*, 2002, 302: 191-226
- 43 Liu S W, Pan Y M, Li J H, et al. Geological and isotopic geochemical constraint on the evolution of the Fuping complex, North China Craton. *Precambrian Res*, 2002, 117: 41-56
- 44 Jiang N, Guo J H, Zhai M G, et al. ~2.7 Ga crust growth in the North China craton. *Precambrian Res*, 2010, 139: 37-49
- 45 Wan Y S, Zhang Y Z, Zhao G C, et al. Zircon U-Pb geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Taishan sanukitoids (Shandong): Implications for Neoproterozoic subduction in the Eastern Block, North China Craton. *Precambrian Res*, 2009, 174: 273-286
- 46 Yu S H, Liu S W, Tian W, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Chronology and Geochemistry of the Henglingguan and Beiyü Granitoids in the Zhongtiao Mountains, Shanxi Province. *Acta Geol Sin*, 2006, 80: 912-924
- 47 Tan J, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating, C and O isotopes for impure marbles from the Jiaobei terrane in the Sulu orogen: Implication for tectonic affinity. *Precambrian Res*, 2006, 144: 1-18
- 48 第五春荣, 孙勇, 袁洪林, 等. 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. *科学通报*, 2008, 53: 1923-1934
- 49 周艳艳, 赵太平, 薛良伟, 等. 河南嵩山地区新太古代 TTG 质片麻岩的成因及其地质意义: 来自岩石学、地球化学及同位素年代学的制约. *岩石学报*, 2009, 25: 331-347
- 50 薛良伟, 原振雷, 赵太平, 等. 河南箕山登封群变质中-基性火山岩的地球化学及年代学研究. *地球化学*, 2005, 34: 57-65
- 51 第五春荣, 孙勇, 林慈奎, 等. 豫西益阳地区 TTG 片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学. *岩石学报*, 2007, 23: 253-262
- 52 高林志, 赵汀, 万渝生, 等. 河南焦作云台山早前寒武纪变质基底锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. *地质通报*, 2005, 24: 1089-1093
- 53 杨恩秀, 陶有兵, 张新平, 等. 鲁西地球新太古界雁翎关组中花岗岩“砾石”SHRIMP 锆石 U-Pb 定年即地质意义. *地球化学*, 2008, 37: 481-487
- 54 田伟, 刘树文, 刘超辉, 等. 中条山涑水杂岩 TTG 系列岩石的锆石 SHRIMP 年代学及其地质意义. *自然科学进展*, 2005, 15: 1476-1484
- 55 郭丽爽, 刘树文, 刘玉琳, 等. 中条山涑水杂岩 TTG 片麻岩的锆石 Hf 同位素特征及其形成环境. *岩石学报*, 2008, 24: 139-148
- 56 刘树文, 吕勇军, 凤永刚, 等. 冀北单塔子杂岩的地质学和锆石 U-Pb 年代学. *高校地质学报*, 2002, 13: 484-497
- 57 沈其韩, 赵子然, 宋彪, 等. 山东沂水新太古代马山和雪山岩体的地质、岩石化学特征和 SHRIMP 锆石年代学研究. *地质论评*, 2007, 53: 180-186
- 58 刘富, 郭敬辉, 路孝平, 等. 华北克拉通 2.5 Ga 地壳生长事件的 Nd-Hf 同位素证据: 以怀安片麻岩为例. *科学通报*, 2009, 54: 2517-2526
- 59 万渝生, 宋彪, 杨淳, 等. 辽宁清原地区太古宙岩石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. *地质学报*, 2005, 79: 78-87
- 60 Jahn B M, Liu D Y, Wan Y S, et al. Archean crustal evolution of the Jiaodong peninsula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology, elemental and Nd-isotope geochemistry. *Amer J Sci*, 2008, 308: 232-269
- 61 Wang Z H. Tectonic evolution of the Hengshan-Wutai-Fuping complexes and its implication for the Trans-North China Orogen. *Precambrian Res*, 2009, 170: 73-87
- 62 Zhao G C, Wilde S A, Sun M, 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. *Amer J Sci*, 2008, 308: 270–303
- 63 Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, et al. Petrogenesis and geodynamics of Late Archean magmatism in eastern Hebei, eastern North China Craton: Geochronological and Nd-Hf isotopic evidence. *Precambrian Res*, 2008, 167: 125–149
- 64 简平, 张旗, 刘敦一, 等. 内蒙固阳晚太古代赞歧岩(sanukite)-角闪花岗岩的 SHRIMP 定年及其意义. *岩石学报*, 2005, 21: 151–157
- 65 高山, 周炼, 凌文黎, 等. 华北克拉通南缘太古-元古宙界线安沟群火山岩的年龄及其地质意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 2005, 30: 259–263
- 66 杨崇辉, 杜利林, 万渝生, 等. 河北平山英云闪长质片麻岩锆石 SHRIMP 年代学. *高校地质学报*, 2004, 10: 514–522
- 67 王泽九, 沈其韩, 万渝生. 河南登封石牌河组“变闪长岩体”的锆石 SHRIMP 年代学研究. *地球学报*, 2004, 25: 295–298
- 68 Wilde S A, Carwood P, Wang K Y, et al. Granitoid evolution in the Late Archean Wutai complex, North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24: 597–613
- 69 Kröner A, Wilde S A, Li J H, et al. Age and evolution of a late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrains of northern China. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24: 577–595
- 70 Guan H, Sun M, Wilde S A, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: Implications for formation and assembly of the North China Craton. *Precambrian Res*, 2002, 113: 1–18
- 71 沈其韩, 宋彪, 徐惠芬, 等. 山东沂水太古宙蔡峪和大山岩体 SHRIMP 锆石年代学. *地质论评*, 2004, 50: 275–284
- 72 郑培玺. 冀东-辽西太古代花岗岩质岩石成因与地壳演化. 博士论文. 长春: 吉林大学, 2009
- 73 Zhai M G, Liu W J. Paleoproterozoic tectonic history of the North China craton: A review. *Precambrian Res*, 2003, 122: 183–199
- 74 Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archaean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issue revised. *Precambrian Res*, 2005, 136: 177–202
- 75 王伟, 王世进, 刘敦一, 等. 鲁西新太古代济宁群含铁岩系形成时代——SHRIMP U-Pb 锆石定年. *岩石学报*, 2010, 26: 1175–1181
- 76 陆松年, 陈志宏, 相振群. 泰山世界地质公园: 古老侵入岩系年代格架. 北京: 地质出版社, 2008. 5–80
- 77 耿元生, 沈其韩, 任留东. 华北克拉通晚太古代末-古元古代初的岩浆事件及构造热体制. *岩石学报*, 2010, 26: 1945–1966
- 78 Weaver B L, Tarney J. Elemental depletion in Archaean granulite facies rocks. In: Atherton M P, Gribble C D, eds. *Migmatite, Melting and Metamorphism*. Nantwich: Shiva, 1983. 250–263
- 79 Zhai M G, Li T S, Peng P, et al. Precambrian key tectonic events and evolution of the North China Craton. In: Kusky T, Zhai M G, Xiao W J, eds. *The Evolving Continents*. Geol Soc Spe Pub London, 2010, 338: 235–262
- 80 Li T S, Zhai M G, Peng P, et al. Ca. 2.5 billion year old coeval ultramafic-mafic and syenitic dykes in Eastern Hebei: Implications for cratonization of the North China Craton. *Precambrian Res*, 2010, 180: 143–155
- 81 孙会一, 董春艳, 颀颀强, 等. 冀东青龙地区新太古代朱杖子群和单塔子群形成时代: 锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *地质论评*, 2010, 56: 890–898
- 82 赵振华. 条带状铁建造(BIF)与地球大演化事件. *地学前缘*, 2010, 17: 1–12
- 83 Zahnle K J, Claire M W, Catling D C. The loss of mass-independent fractionation of sulfur due to a Paleoproterozoic collapse of atmosphere methane. *Geobiology*, 2006, 4: 271–283
- 84 Sato M A. Less nickel for more oxygen. *Nature*, 2009, 458: 714–715
- 85 Konhauser K O, Pecoits E, Lalonde S V, et al. Oceanic nickel depletion and a methanogen famine before the Great Oxidation Event. *Nature*, 2009, 458: 750–752
- 86 Konhauser K O. Deepening the early oxygen debate. *Nat Geosci*, 2009, 2: 241–242
- 87 陈衍景, 刘丛强, 陈华勇, 等. 中国北方石墨矿床及赋存孔达岩系碳同位素特征及有关问题讨论. *岩石学报*, 2000, 16: 233–244
- 88 汤好书, 陈衍景, 武广, 等. 辽北辽河群碳酸盐岩碳氧同位素特征及其地质意义. *岩石学报*, 2008, 24: 129–138
- 89 翟明国, 彭澎. 华北克拉通古元古代构造事件. *岩石学报*, 2007, 23: 2665–2687
- 90 翟明国. 华北克拉通 21–17 亿年地质事件群的分解和构造意义探讨. *岩石学报*, 2004, 20: 1343–1354
- 91 Zhai M G, Liu W J. Paleoproterozoic tectonic history of the North China craton: A review. *Precambrian Res*, 2003, 122: 183–199
- 92 翟明国, 郭敬辉, 闫月华, 等. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及其初步研究. *中国科学(B)*, 1992, 12: 1325–1330
- 93 翟明国, 郭敬辉, 李江海, 等. 华北克拉通发现退变榴辉岩. *科学通报*, 1995, 40: 1590–1594
- 94 郭敬辉, 陈意, 彭澎, 等. 内蒙古大青山假蓝宝石麻粒岩——1.8 Ga 的超高温(UHT)变质作用. 2006 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文集摘要集, 南京, 2006. 215–218
- 95 Santosh M, Wilde S A, Li J H. Timing of Paleoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism in the North China Craton: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon geochronology. *Precambrian Res*, 2007, 159: 178–196
- 96 Santosh M, Tsunogaeb T, Li J H, et al. Discovery of sapphirine-bearing Mg-Al granulites in the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic ultrahigh temperature metamorphism. *Gondwana Res*, 2007, 11: 263–285

- 97 刘平华, 刘福来, 王舫, 等. 山东半岛基性高压麻粒岩的成因矿物学即变质演化. 岩石学报, 2010, 26: 2039–2056
- 98 王舫, 刘福来, 刘平华, 等. 胶北地区早前寒武纪孔兹岩系的变质演化. 岩石学报, 2010, 26: 2057–2072
- 99 Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Thermal evolution of two textural types of mafic granulites in the North China Craton: Evidence for both mantle plume and collisional tectonics. *Geol Mag*, 1999, 136: 223–240
- 100 Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Assembly, Accretion and breakup of the Paleoproterozoic Columbia supercontinent: Records in the North China Craton. *Gondwana Res*, 2003, 6: 417–434
- 101 Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Res*, 2005, 136: 177–202
- 102 Zhao G C, Wilde S A, Guo J H, et al. Single zircon grains record two Paleoproterozoic collisional events in the North China Craton. *Precambrian Res*, 2009, 177: 266–276
- 103 Kusky T M, Li J H, Santosh M. The Paleoproterozoic North Hebei Orogen: North China Craton's collisional suture with Columbia supercontinent. *Gondwana Res*, 2007, 12: 4–28
- 104 Kusky T M, Windley B F, Zhai M G. Tectonic evolution of the North China Block: From orogen to craton to orogen. In: Zhai M G, Windley B F, Kusky T, et al, eds. *Mesozoic Sub-continental Thinning Beneath Eastern North China*. *Geol Soc Spec Publ London*, 2007, 280: 1–34
- 105 Wang H C. The Paleoproterozoic granite belts along the northern NCC and its geotectonic significance. *Gondwana Res*, in press
- 106 李江海, 钱祥麟, 黄雄南. 华北陆块基底构造格局及早期大陆克拉通化过程. 岩石学报, 2000, 16: 1–10
- 107 李江海, 钱祥麟, 刘树文. 华北克拉通中部孔兹岩系的地球化学特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1999, 29: 193–203
- 108 周喜文, 魏春景, 耿元生, 张立飞. 胶北栖霞地区泥质高压麻粒岩的发现及其地质意义. 科学通报, 2004, 49: 1424–1430
- 109 刘贻灿, 王安东, 李曙光, 等. 华北克拉通东南缘 1.8 Ga 高压麻粒岩相变质作用: 岩石学和锆石 U-Pb 年代学证据. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(增刊): 172
- 110 董春艳, 王世进, 刘敦一, 等. 胶东地区变质中-基性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年——华北克拉通元古代晚期地壳演化和荆山群形成时代制约. 岩石学报, 2011, 出版中
- 111 张华峰, 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. 地学前缘, 2006, 13: 190–199
- 112 翟明国. 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. 岩石学报, 2009, 25: 1753–1771
- 113 李江海, 钱祥麟, 侯贵廷, 等. “吕梁运动”新认识. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25: 15–20
- 114 Zhai M G, Shao J A, Hao J, et al. Geological signature and possible position of the North China block in the Supercontinent Rodinia. *Gondwana Res*, 2003, 6: 171–183
- 115 赵太平, 翟明国, 夏斌, 等. 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. 科学通报, 2004, 49: 2342–2349
- 116 赵太平, 陈福坤, 翟明国, 等. 河北大庙斜长岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 2004, 20: 685–690
- 117 Peng P, Zhai M G, Guo J H. 1.80–1.75 Ga mafic dyke swarms in the central North China Craton: Implications for a plume-related break-up event. In: Hanski E, Mertanen S, Rämö T, et al, eds. *Dyke Swarms-Time Markers of Crustal Evolution*. London: Taylor & Francis, 2006. 99–112
- 118 Peng P, Zhai M G, Ernst R, et al. A 1.78 Ga large igneous province in the North China Craton: The Xiong'er Volcanic Province and the North China dyke swarm. *Lithos*, 2008, 101: 260–280
- 119 Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Review of Global 2.1–1.8 Ga orogenics: Implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth-Sci Rev*, 2002, 59: 125–162
- 120 张秋生, 等. 中国早前寒武纪地质及成矿作用. 长春: 吉林人民出版社, 1984. 100–335
- 121 Zhai M G, Windley B F. The Archean and Early Proterozoic banded iron formations of North China: Their characteristics, geotectonic relations, chemistry and implications for crustal growth. *Precambrian Res*, 1990, 48: 267–286
- 122 翟安民, 沈保丰. 中国元古宙构造演化与成矿作用. 见: 张贻侠, 刘连登, 主编. 中国前寒武纪矿产和构造. 北京: 地震出版社, 1994. 125–146
- 123 裴荣富, 等. 中国矿床模式. 北京: 地质出版社, 1995
- 124 陈毓川, 裴荣富, 宋天瑞, 等. 中国矿床成矿系列初论. 北京: 地质出版社, 1998
- 125 沈宝丰, 翟安民, 陈文明, 等. 中国前寒武纪成矿作用. 北京: 地质出版社, 2006. 25–39
- 126 翟裕生, 邓军, 李晓波. 区域成矿学. 北京: 地质出版社, 1999. 197–207
- 127 翟明国. 华北克拉通的形成演化与成矿. 矿产地质, 2010, 29: 24–36
- 128 Zhai M G, Yang J H, Fan H R, et al. A large-scale cluster of gold deposits and metallogenesis in the Eastern North China Craton. *Int Geol Rev*, 2002, 44: 458–476