

大陆克拉通早期构造演化历史探讨：以华北为例

李江海, 牛向龙, 程素华, 钱祥麟

教育部造山带与地壳演化重点实验室、北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

摘要: 大陆早期构造演化的研究一直是大陆地质学研究的焦点问题。在华北克拉通基底构造 1:200 万编图研究基础上, 本文开展基底断裂边界、构造样式及后期叠加关系的研究, 借鉴比较大地构造理论, 对华北克拉通基底重新进行了构造区划。结合标志性构造单元及其时代、同位素年龄数据库的综合研究, 提出华北早期构造格局演化及其重大构造热事件。华北克拉通基底主要由大面积的新太古代 TTG 杂岩及表壳岩系组成。新太古代涉及活动陆缘环境的大规模陆壳增生及不同微陆块的碰撞聚合过程, 造成新太古代末期陆壳迅速增生和克拉通化。古元古代初期开始伸展裂解和早期盖层发育阶段, 古元古代晚期发生微陆块碰撞缝合, 形成超级克拉通, 并在克拉通西北边缘发生强烈改造作用。1.84 Ga 前后, 华北克拉通经历最强烈的一次伸展裂解过程, 从超级克拉通裂解, 开始了独立的构造演化。在伸展构造背景下, 克拉通基底被强烈隆升冷却, 经历风化剥蚀, 发育沉积盖层。以上构造格局及其构造热事件提供了早期超级大陆再造研究的构造制约条件。

关键词: 板块构造; 构造区划; 构造热事件; 活动陆缘; 伸展作用; 超级大陆。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2006)03-0285-09

收稿日期: 2005-06-15

The Early Precambrian Tectonic Evolution of Continental Craton: A Case Study from North China

LI Jiang-hai, NIU Xiang-long, CHENG Su-hua, QIAN Xiang-lin

Key Laboratory of Orogenic Belt and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: The early tectonic evolution of craton has been the target topic for continental geology. Based on a preliminary analysis on the tectonic map (1:2000000) of North China craton (NCC) basement, we try to investigate its tectonic boundaries, structural pattern, and late stage reworking. Guided by the framework of modern plate tectonics, the NCC basement is divided into different tectonic units. It is suggested here that some key geological units (KGU), with distinct tectonic setting and geological origin, may well preserve information of its early tectonic history. With the high-precision isotopic age dating of KGU, a new timetable of geological and geochronological events has been defined for the Early Precambrian geology of NCC. In addition, several major tectonothermal episodes can be revealed by the synthesis of available age data with TTG-granite gneiss and mafic volcanics. Therefore, the Early Precambrian tectonic evolution of NCC is documented by a consideration of both regional geological research and age dating. As indicated by widespread geological research and high-precision geochronology, NCC's basement was mainly consisted of Neoproterozoic TTG complex and supracrustal sequences, associated with rapid crustal accretion within the setting of active continental margins and collisions between different blocks. As a result, it became stabilized at the end of the Archean. In the Early Paleoproterozoic, the NCC began to be dominated by an extensional tectonic regime, characterized by the development of early cover. In the Late Paleoproterozoic, the NCC collided with another block in the north, with formation of a supercraton, which caused a strong tectonothermal reworking to its passive margin in the northwestern part of NCC. At about 1.84 Ga, the NCC underwent extension, recorded its dispersal from a supercraton. After that, it began its tectonic evolution independently, its basement was intensely uplifted and eroded, with development of sedimentary cover. The Early Precambrian tectonic framework and geological events documented will provide an important constraint for reconstruction of the NCC within the early supercontinents.

Key words: plate tectonics; tectonic division; tectonothermal episodes; active continental margin; extension; supercontinent.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40472097)

作者简介: 李江海 (1965—), 男, 教授, 主要从事前寒武纪地质和构造地质学的研究教学工作。E-mail: jhli@pku.edu.cn

0 引言

大陆克拉通化过程涉及漫长的地质历史,由于地层记录不完整以及多期构造—岩浆—变质活动叠加改造,对大陆早期构造演化的研究主要围绕重大构造热事件开展,而构造演化过程的研究尚非常有限.华北为我国最古老和最大面积的克拉通陆块,由于基底出露不完整,后期再造强烈,华北克拉通基底构造格局重大事件及构造演化过程等方面的研究非常薄弱.

近十年来,随着华北不同变质岩区地质研究及同位素地质年龄数据迅速积累,早期区域构造演化研究已成为亟待深入探讨的重要问题.为此,作者开展了华北克拉通基底 1:200 万构造图的编制,并进行华北克拉通基底构造区划.结合不同地质单元同位素地质年代数据统计分析,本文探讨了华北克拉通基底构造格局、区域构造演化过程及其重大构造热事件.

1 华北大陆基底构造区划

华北克拉通南北缘被显生宙造山带环绕,以大断裂与周围造山带分界.克拉通西南边缘和北缘还

保留中元古代初伸展裂解边界及其坳拉谷(李江海等,2000).变质基底以中小规模断块或复背形方式出露地表.由于各变质岩区横向上连续性较差,并且变质程度有差异,带来基底构造地质对比的难度.较大面积变质岩区分布于华北克拉通北部、东部及中部地区(沈保丰等,1994).

前人广泛开展了克拉通基底不同变质岩区地质组成、变质作用、岩浆活动等方面的研究(田永清,1991;沈其韩等,1992;赵宗溥,1993;白瑾等,1996;伍家善等,1998;钱祥麟和李江海,1999;张家声等,1999;李江海等,2001,2004a;耿元生等,2004).在此基础上,本文重点开展了不同变质岩区构造关系、构造样式的分析.依据丰富的区域构造填图积累,将基底构造样式划分为以下类型:片麻岩—麻粒岩穹隆、强应变构造带、表壳岩系复向形、走滑改造表壳岩—花岗岩区及表壳岩系叠加褶皱区等.结合相关同位素地质年龄制约,可以分析不同地质单元构造关系及其垂向地壳层次变化等问题,并成为区域构造编图和区域构造单元划分的重要基础,所提出的华北基底构造单元见图 1.

依据地表地质填图及其地球物理(航磁、重力)地质解释,华北克拉通基底识别出多条大规模的区域断裂系(马杏垣等,1979;袁学诚,1995;王惠初等,

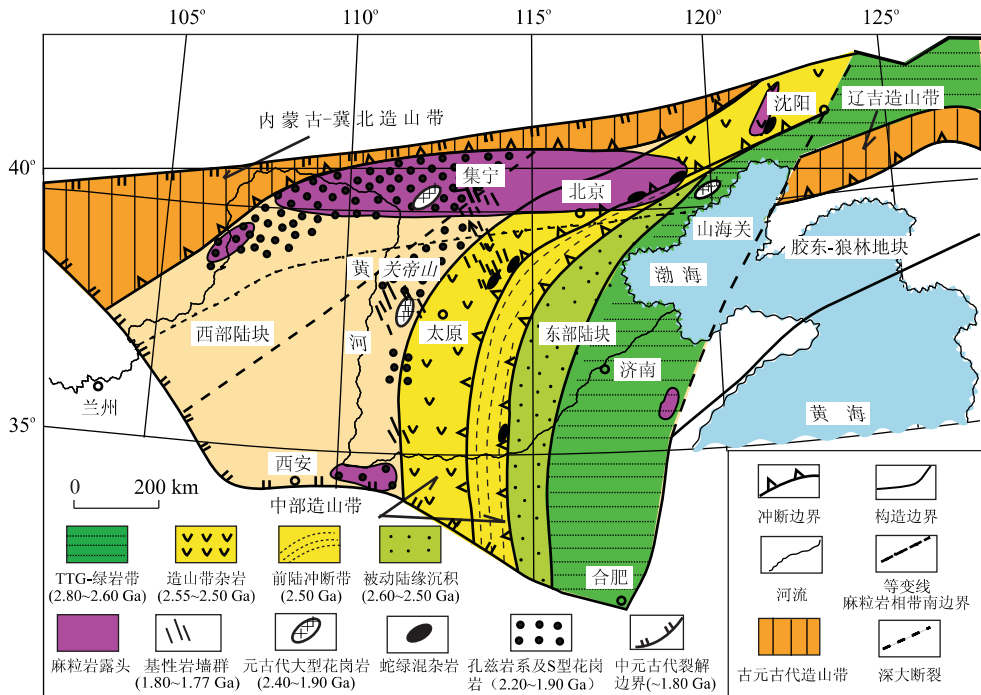


图 1 华北克拉通基底构造区划图

Fig. 1 Sketch map showing tectonic division and major units of North China craton (NCC) basement

1999;朱英,2004):它们包括郟庐断裂、大同一吴旗断裂、固阳断裂、赤峰—张北断裂等,构成克拉通基底重要构造边界。大同一吴旗断裂使克拉通西北部与东南部在构造样式和组成上显示明显差别,东南部保留大量新太古代片麻岩穹隆,而西北部以北东东向古元古代剪切带(孔兹岩系为主)为特征,构造轴迹近平行克拉通北界。克拉通腹地(五台、鲁西、嵩山)主要为低级变质区,相对完整地保留新太古代地质单元,特别是近南北—北北东向展布的新太古代造山带各构造单元(造山杂岩、前陆冲断带、被动边缘等),并显示清楚的区域构造分带,涉及新太古代板块俯冲—碰撞过程(伍家善等,1998;李江海等,2004a)。另外,郟庐断裂元古代以来构造活动强烈改造克拉通东缘构造样式。

华北变质基底被 18 亿年以后沉积盖层不整合覆盖(中元古界以上地层, <1.85 Ga),变质基底被基性岩墙群和非造山花岗岩广泛侵位(环斑花岗岩)(18~17 亿年)(侯贵廷等,2003;李江海等,2000)。为此,克拉通垂向上可以划分为沉积盖层及基底杂岩 2 部分。克拉通基底还残留一套以变质沉积为主的古元古代变质的表壳岩系(2.40~2.00 Ga),它们以复向斜保留,代表已改造的早期沉积盖层,分别以五台山区浅变质东冶群(次绿片岩相—未变质,2.45~2.00 Ga)和内蒙古南部高级变质的丰镇群(麻粒岩相—高角闪岩相的孔兹岩系,2.50~1.90 Ga)为代表。它们的原岩以裂谷—浅海相沉积为主,不整合覆盖于基底杂岩上(西部陆块和中部造山带)(田永清,1991;刘喜山,1994; Zhang *et al.*, 1994;白瑾等,1996;钱祥麟和李江海,1999)。从区域对比看,它们曾大面积出现于克拉通中西部地区(太行山以西),来源于大陆地壳物源,主体沉积于克拉通上或被动陆缘沉积盆地。而东部的鲁西、胶东等地因后期强烈改造剥蚀,未见相关地层保留或未曾发育。华北克拉通基底在横向的构造、地质组成明显不均一,东西部显示有差异的构造样式、岩石单元组成及演化历史。大量研究揭示(伍家善等,1998;李江海等,2002,2004b; Kusky and Li, 2003; Zhao *et al.*, 2005):克拉通中部发育一条巨大规模的碰撞造山带,分隔东西部克拉通陆块。在克拉通北缘分布古元古代造山带,并出露较深地壳层次。

在前期工作积累基础上(李江海等,2002),本文将克拉通基底重新划分以下构造单元(图 1):由北西向东南依次为:(1)内蒙古—冀北古元古代造山带

(2.20~1.90 Ga);(2)集宁—吕梁孔兹岩系—S 型花岗岩区(鄂尔多斯陆块);(3)中部造山带(2.70~2.60 Ga);(4)东部陆块(辽鲁 TTG 杂岩带)(2.80~2.60 Ga);(5)辽吉古元古代造山带(2.20~1.90 Ga);(6)北朝鲜狼林陆块等。以上构造单元伴随差异性的后期岩浆侵位喷发活动(24~18 亿年前),并且早期盖层的保存状态也有明显差异。中太古代以前的古陆块残留于东部陆块的胶辽、冀东等地,西部陆块北缘和东缘也有古老陆壳保存,它们被新太古代 TTG 杂岩所侵入和包围。

鄂尔多斯陆块(西部陆块, >2.50 Ga)主体呈隐伏状态。在古元古代以后的构造演化中长期保持构造稳定,具有古老克拉通的典型特征。陆块核部及周缘出露的表壳岩系以孔兹岩系(2.50~2.00 Ga)为特征,表明孔兹岩系分布具有面状展布的沉积盖层特征(钱祥麟和李江海,1999),原岩以高铝质岩石为主陆源沉积岩系。局部地区(吕梁、中条、大同、怀安)还出露基底杂岩(2.50~2.80 Ga)。陆块北缘以构造带与内蒙古—冀北造山带分隔,并发生大面积掀斜作用,出露麻粒岩相下地壳。东缘以活动陆缘与中部造山带渐变过渡。

中部造山带(2.50~2.60 Ga)近南北纵贯克拉通中部,整体上呈向西突出宽缓弧形。中部造山带以大规模韧性剪切带、中深层次褶皱推覆构造、高压麻粒岩带、蛇绿岩混杂带、前陆冲断带、前陆盆地(~2.50 Ga)为特征,主体由大规模的 TTG—花岗岩—表壳岩带(岛弧杂岩)(2.50~2.60 Ga)及重熔花岗岩(2.50 Ga)组成(李江海等,2002)。五台山—太行山区保留了完整的新太古代造山碰撞带及其前陆盆地构造剖面,遵化蛇绿岩混杂带保留丰富的新太古代豆荚状铬铁矿及大洋地幔构造岩。东缘的南北太行山还残留了被动大陆边缘沉积(李江海等,2004b),发育不同层次的前陆冲断褶皱带。大量同位素年龄及构造研究表明,中部造山碰撞高峰期出现于 2.50~2.52 Ga 前后(李江海等,2004b),而不是 1.80 Ga 前后(Kröner *et al.*, 2005)。

东部陆块总体较好出露,缺乏大面积中元古代沉积盖层,断裂边界发育,明显受到郟庐断裂多期活动的叠加改造。陆块内部残留许多古中太古代记录(3.80~2.90 Ga),主体由大规模的新太古代花岗片麻岩—绿岩带(2.80~2.60 Ga)组成,它们出现于东部陆块西缘,呈向西突出弧形构造,宽度为 50~150 km,长度上千 km,可能为早期活动陆缘岛弧的

残留形态。东部陆块西缘在新太古代发生大规模的增生拼合过程。

华北新太古代陆块被外围古元古代造山带环绕,克拉通北缘及东缘分别出现内蒙古—冀北造山带和胶辽造山带(2.20~1.90 Ga),造成华北克拉通主体与邻近小陆块在古元古代拼合,并对前陆区(或后陆)产生强烈改造作用。

从区域构造样式判断(图 1),华北西北部受内蒙古—冀北古元古代造山活动影响,经历强烈再造活动(2.10~1.90 Ga),早期沉积盖层发生强烈构造变形和高级变质重熔,形成大面积的孔兹岩系及其近东西—北东东向构造,构造样式强烈剪切平行化(刘喜山,1994;张家声等,1999),广泛出现陡立的左旋走滑剪切构造及重熔花岗岩,仅局部弱应变基底杂岩保留新太古代复杂构造样式、变质组合及绿岩带。郟庐断裂以东因后期左旋走滑剪切变形造成基底构造线向断裂带方向偏转。古元古代晚期,内蒙古—冀北造山带与胶辽造山带交汇于辽南瓶颈部位,造成新太古代以来的近南北向构造格局在北缘构造偏转为近东西—北东向,基底构造样式向北东强烈收敛。在古元古代弱应变的冀东、鲁西、五台山—太行山等地,保留新太古代原始的构造格局及其构造样式(张家声等,1999),如冀东、恒山、太行山、冀东等地保留片麻岩穹隆构造,五台山、冀东、鲁西等地保留绿岩带复向形等,它们成为探讨新太古代地质演化的重要记录。

2 早期演化的重大构造热事件及其同位素年龄制约

克拉通基底构造历史恢复主要涉及早期重大构造热事件、区域构造背景及其运动学方式(造山、伸展、走滑)的认识。由于太古宙地层记录的复杂性和局限性,难以开展有效的区域对比和构造环境分析。事实上,构造—岩浆—变质活动不仅是早期地球演化的主线,也是早期地质历史过程最直接的地质记录,它们分布面积巨大、构造关系清楚、可以准确定年,构造环境和背景清楚。特别是重点围绕标志性构造单元及其时代的深入研究,可能带来华北早期区域构造演化的重要进展。

本文提出标志性构造单元的定义为可以明确指示构造背景、成因环境及地质过程的地质单元。由于

对早前寒武纪地质缺乏系统的大地构造、板块构造理论的系统概述,更多简单地依据同位素地质年代学讨论前寒武纪地质事件(Kröner *et al.*, 2005; Wilde *et al.*, 2005),由此建立的构造演化模式缺乏清楚的构造地质基础和系统的大地构造理论解释。

从华北基底构造研究积累和进展分析,重要的标志性构造单元包括:最早古老的陆壳记录(沈其韩和钱祥麟,1995)、绿岩带底部火山岩系(科马提岩、枕状熔岩)(沈保丰等,1994)、蛇绿岩混杂带(地幔构造岩、豆荚状铬铁矿、纯橄岩等)(王凯怡等,1997;李江海等,2002; Li *et al.*, 2002; Kusky and Li, 2003)、大规模 TTG 杂岩带—表壳岩系(活动陆缘—岛弧—弧后杂岩带)(伍家善等,1998; Wang *et al.*, 2004)、高压麻粒岩带(Guo *et al.*, 2005; O'Brien *et al.*, 2005)、同构造花岗岩(Wang *et al.*, 1996)、前陆冲断构造带与前陆盆地(李江海等,2004b)、线性构造带及构造边界(李江海等,2004b)、巨型麻粒岩相带(深层次构造与下地壳)、磨拉石沉积建造(李江海等,2004a)、孔兹岩系(变质沉积盖层)与 S 型花岗岩(钱祥麟和李江海,1999)、大规模基性岩墙群—溢流玄武岩(侯贵廷等,2003)、伸展不整合界面、非造山侵入体(环斑花岗岩、斜长岩、碱性花岗岩)(解广轰,2005)、滨浅海相沉积盖层等。由于标志性单元具有较清楚的成因及构造背景,可以提出较明确的构造热事件解释,有利于筛选和提出对区域格局形成有重要影响的构造热事件。依据上述标志性构造单元构造关系、同位素年龄分析(图 2,3),初步可以提出华北克拉通基底构造格局及其构造演化事件序列。

除标志性构造单元外,对同位素年龄的统计分析,也可以揭示岩石单元的形成时限,并反映构造热事件的区域影响。对华北基底近 500 件高精度的锆石 U-Pb 同位素年龄数据统计表明(图 3),变质基底经历多期次构造热事件。其中,最主要的锆石 U-Pb 年龄峰值为 2 680、2 600、2 520、2 400、2 240 和 1 840 Ma,代表主要的花岗岩侵位—中酸性火山岩喷发事件时代。基性岩系的 Sm-Nd 全岩年龄峰值有(图 2):2 850、2 700、2 600、2 250、1 950 Ma,主要为表壳岩系,特别是绿岩带成岩时间。因此,华北大陆生长演化过程中的重大热事件幕包括 2 700~2 600、2 520、2 400、2 250~2 400、1 950、1 840 Ma 等。其中,2 520、1 840 Ma 分别对应于华北太古宙/元古宙和古元古代/中元古代年代地层界线,是最为显著的构造热事件。

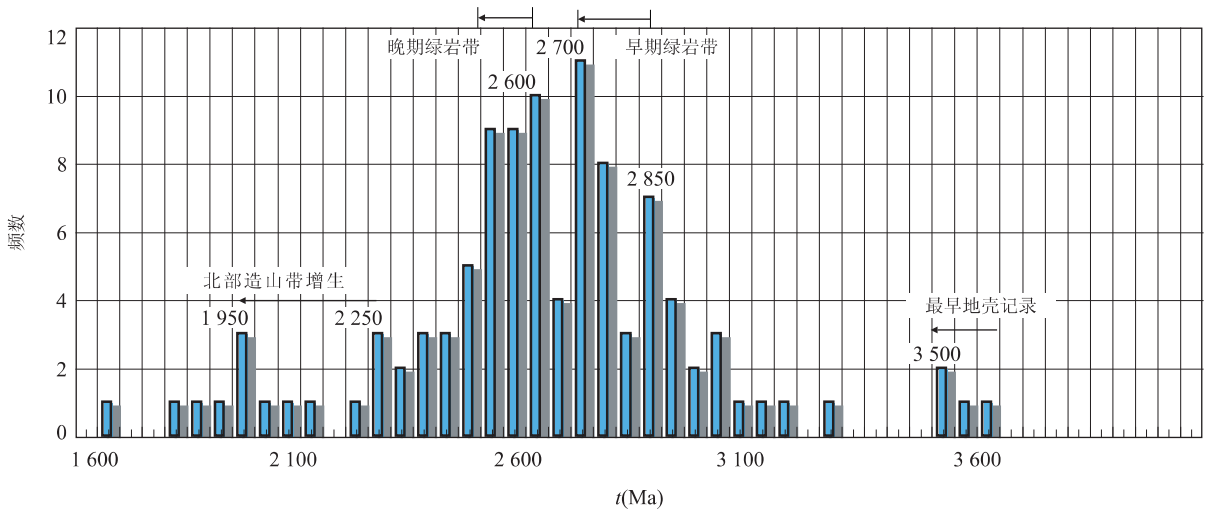


图 2 华北克拉通基底 Sm-Nd 同位素年龄统计直方图

Fig. 2 Histogram with statistics of Sm-Nd age of mafic rock, NCC
总计 106 个 Sm-Nd 年龄值,图中分割区间为 50 Ma

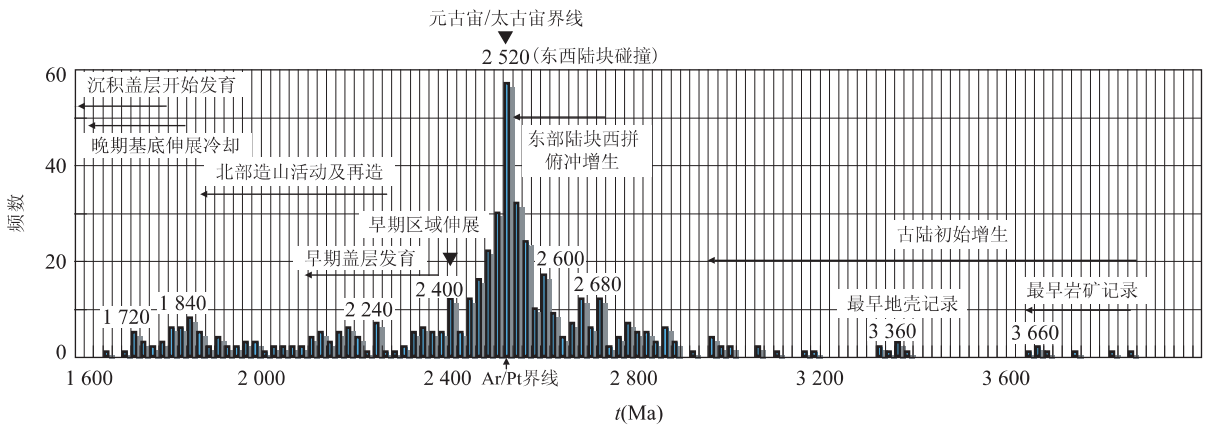


图 3 华北克拉通基底锆石 U-Pb 年龄统计直方图

Fig. 3 Histogram with statistics of U-Pb zircon age of granitic rocks, NCC
总计 476 个年龄值,图中分割区间为 20 Ma

其他学者对华北早前寒武纪基性火山岩 Sm-Nd 同位素年代学及地球化学研究表明(耿元生等, 2002; Wu *et al.*, 2005),新太古代华北主要有 2 次基性火山岩系生成时期(2.65~2.80 Ga 和 2.50 Ga),记录了这一时期地壳的强烈增生。从区域构造格局分析,早期基性岩浆活动主要与东部陆块主体的辽鲁地区绿岩带形成相关,可能形成于活动陆缘环境。晚期事件对应于中部造山带绿岩带形成,主要与岛弧—弧后盆地相关。

较高精度的锆石 U-Pb 年龄统计(误差小于 20 Ma 的数据)资料表明,华北早期 TTG 岩类及花岗岩侵位时代集中于 2.68~2.50 Ga,并在 2.52 Ga 达到最高峰值(图 3),表明这一时期为华北克拉通

最重要的陆壳(活动陆缘、岛弧)增生、克拉通化峰期。在区域构造上,上述花岗岩片麻岩侵位分别与早期的辽鲁 TTG 杂岩及华北中部造山带 TTG—花岗岩形成相关,记录了东西部陆块之间汇聚增生(2.68~2.60 Ga)并最终碰撞的过程(2.52 Ga)(白瑾等, 1996; 伍家善等, 1998; 李江海等, 2000, 2001; 耿元生等, 2002; Kusky and Li, 2003)。此外,变质基底 1.95~1.84 Ga 期间还经历了花岗岩侵位及其热事件改造,对应于陆块边缘造山带活动事件。1.84~1.70 Ga 整个克拉通基底经历大规模伸展冷却抬升。

综合分析可以初步提出华北早期构造演化的重要构造热事件(图 4):(1)2800~2600 Ma,形成鲁西—辽吉绿岩—TTG 带,造成东部陆块西缘大面积

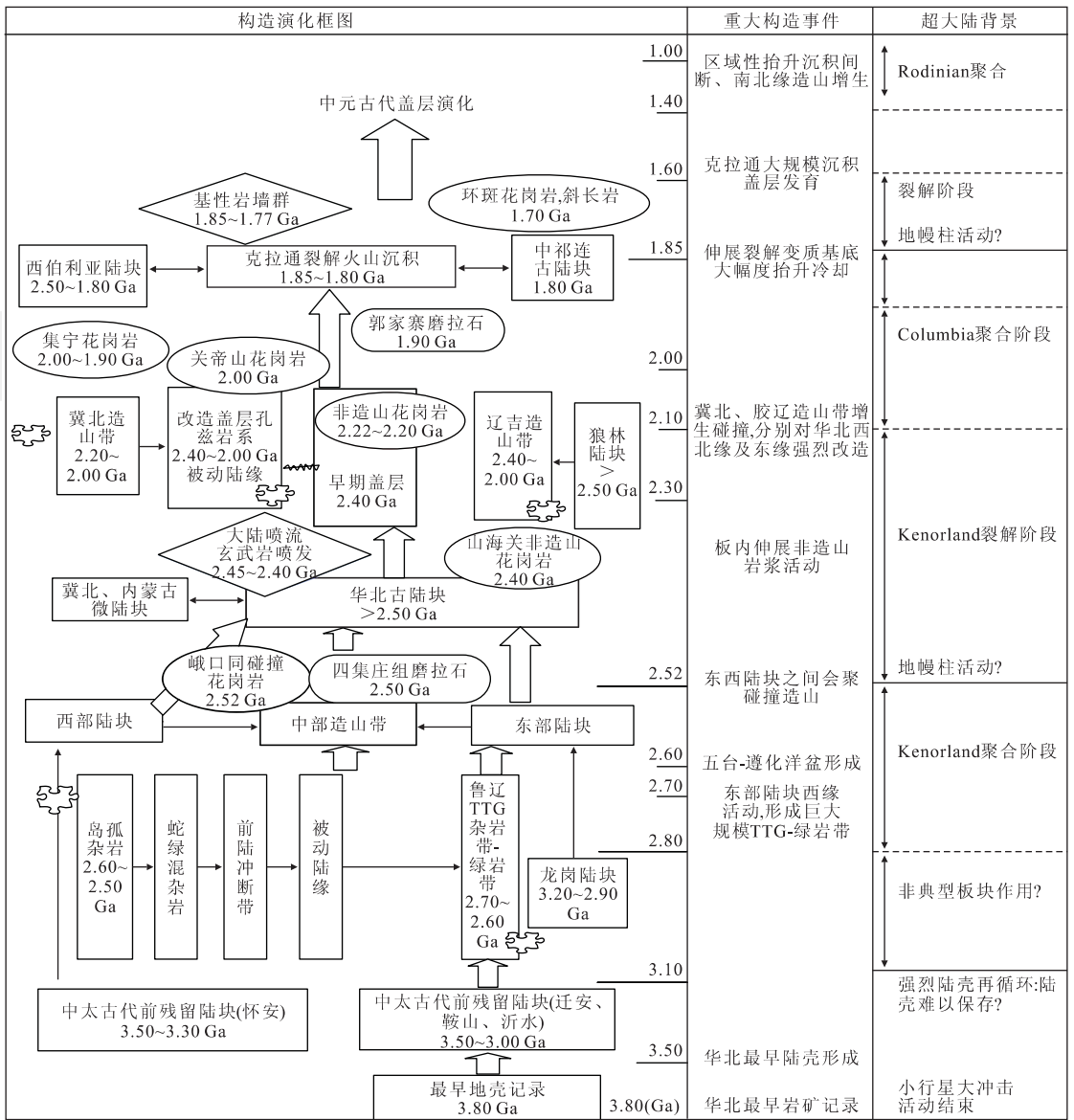


图 4 华北克拉通早期构造演化重大构造热事件

Fig. 4 Major tectonothermal episode and evolution history of NCC

增生, 可能与活动陆缘俯冲相关。(2) 2 600 ~ 2 520 Ma, 西北陆块西侧出现活动陆缘岛弧, 发育辽西—遵化—五台—高山绿岩—TTG 带, 随后洋盆关闭, 与东部陆块最终碰撞, 形成蛇绿混杂岩缝合带 (Li *et al.*, 2002), 五台山区出现同碰撞花岗岩 (2 520 Ma), 在东侧出现前陆盆地及磨拉石建造 (李江海等, 2004a)。新太古代也是华北克拉通最快速生长时期, 形成典型碰撞造山带, 标志着典型板块构造体制的出现。(3) 2 500~2 300 Ma, 华北中部出现若干 NNE 向地堑, 包括吕梁、中条及甘陶河等裂谷, 发生溢流玄武岩喷发及基性—超基性岩体群侵位

(2.50~2.30 Ga), 局部伴随非造山花岗岩侵位, 如冀东等地大面积钾质花岗岩侵位, 标志着克拉通成熟与稳定 (赵宗溥, 1993)。伸展活动可能与碰撞后的区域构造松弛相关。上述地堑系很快演变为克拉通盆地演化, 沉积早期盖层 (以丰镇群孔兹岩系和东冶群为代表) (2.45~2.00 Ga)。(4) 在古元古代末期 (2.0~1.9 Ga), 华北克拉通西北部和东北部被动大陆边缘, 开始俯冲于邻近陆块下 (北部陆块、狼林陆块), 最终增生碰撞, 被动陆缘沉积岩系发生变形、高级变质 (孔兹岩系) 重熔 (S 型花岗岩) (刘喜山, 1994), 陆块面积显著增大, 由于参与碰撞的几个陆

块规模尚不够大,发生板块内部构造活动,在五台、吕梁、内蒙、冀北等形成盆山地貌,出现多个山间盆地,并沉积陆相磨拉石建造(如郭家寨群、黑茶山群、化德群、二道洼群等)(2.00~1.90 Ga)。(5)中元古代初期(1.84~1.60 Ga),华北克拉通开始伸展,变质基底大幅度隆升冷却,伴随非造山岩浆活及大面积基性岩墙群侵位(1.77 Ga),坳拉谷—地堑(1.84~1.60 Ga)呈网格状遍布整个陆块,并从边部向克拉通内发展(由宽变窄),这一时期可能伴随地幔柱活动(翟明国,2004),造成克拉通地壳的大面积裂解和从超级大陆的分裂,并在西南部伸展形成被动大陆边缘和洋盆。上述地堑系发展最终演化成克拉通盆地(1.60~1.40 Ga),沉积大规模浅海碳酸盐盖层。

3 讨论和结论

大陆克拉通的形成演化普遍涉及漫长而复杂的构造历史,由于传统地层对比的制约,更多依据不整合面相关的造山活动揭示陆壳随时间演化,而缺乏清晰的构造格局、时代准确的重大构造事件及其构造背景的制约。开展华北克拉通基底构造编图、标志性构造单元及其时代、同位素年龄数据库及其解释等3方面的综合研究,可以从区域构造格局框架、重大区域构造事件方面揭示克拉通构造演化历史,并以板块构造框架探讨新太古代以来区域地质演化及其可能的超大陆拼合裂解再造等过程,为阐述克拉通亲缘关系提出新线索。

华北克拉通基底主要形成于活动陆缘环境,通过南北向展布的东西两列岛弧或活动陆缘,在新太古代发生大规模俯冲、增生及陆块碰撞拼合过程,造成陆壳迅速增生并保存至今。古元古代初期华北克拉通基底开始伸展裂解和早期盖层发育。古元古代末期,华北与其他陆块碰撞缝合形成更大尺度克拉通陆块,规模超过现今克拉通面积,并使克拉通西北部强烈改造。1.84 Ga 前后华北经历最强烈的一次伸展裂解过程,从超级克拉通裂解开始了独立构造演化,在伸展背景下强烈隆升冷却,经历风化剥蚀,开始克拉通沉积盖层发育。

致谢:研究过程得到钱祥麟教授、沈其韩院士、翟明国、王凯怡、耿元生、张家声、郭敬辉研究员、刘树文教授、侯贵廷副教授等的帮助和指教。Penrose会议(2002,北京)、华北大陆构造中美双边研讨会(2004,北京)期间,B. Windley、A. Kröner、K. Con-

die、J. Myers 等教授的建议和评论,对本文成稿也很有帮助。参加部分野外工作的还有黄雄南、冯军、陈征、张志强、刘志强、彭澎等。另外限于篇幅未对年龄资料文献全部列出,敬请原谅。

References

- Bai, J., Huang, X. G., Wang, H. C., et al., 1996. The Precambrian crustal evolution of China. Second edition. Geological Publishing House, Beijing, 20—60 (in Chinese with English abstract).
- Geng, Y. S., Wan, Y. S., Shen, Q. H., 2002. Early Precambrian basic volcanism and crustal growth in the North China craton. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 199—208 (in Chinese with English abstract).
- Geng, Y. S., Yang, C. H., Song, B., et al., 2004. Post orogenic granites with an age of 1 800 Ma in Lüliang area, North China craton: Constraints from isotopic geochronology and geochemistry. *Geological Journal of China Universities*, 10(4): 477—487 (in Chinese with English abstract).
- Guo, J., Sun, M., Chen, F., et al., 2005. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure granulites in the Sanggan area, North China: Timing of Paleoproterozoic continental collision. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 629—642.
- Hou, G. T., Li, J. H., Halls, H., et al., 2003. The flow structures and mechanics of Late Precambrian mafic dyke swarms in North China craton. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 210—216 (in Chinese with English abstract).
- Kröner, A., Wilde, S., Li, J., et al., 2005. Age and evolution of a Late Archean to Early Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 577—595.
- Kusky, T., Li, J., 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 383—397.
- Li, J. H., Hou, G. T., Huang, X. N., et al., 2001. The constraint for the supercontinental cycles: Evidence from Precambrian geology of North China block. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 177—186 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. H., Niu, X. L., Kusky, T., et al., 2004a. Neoproterozoic plate tectonic evolution of North China and its correlation with global cratonic blocks. *Earth Science Frontiers*, 11(3—4): 273—283 (in Chinese with English ab-

- stract).
- Li, J. H., Niu, X. L., Chen, Z., et al., 2004b. Discovery of deep-level foreland thrust-fold structures in Taihang Mt. and its implication for early tectonic evolution of North China. *Progress in Natural Science*, 14(10): 1118—1127 (in Chinese).
- Li, J. H., Niu, X. L., Huang, X. N., et al., 2002. Podiform chromitites: A key to identify the ancient oceanic lithospheric relics. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 235—246 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. H., Qian, X. L., Hou, G. T., et al., 2000. New interpretation of the “Lüliang movement”. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(1): 15—20 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. H., Kusky, T., Huang, X. N., 2002. Archean podiform chromitites and mantle tectonites in ophiolitic mélange, North China craton: A record of early oceanic mantle processes. *GSA Today*, 12(7): 4—11.
- Liu, X. S., 1994. Characteristics of basement reworked complex and implication for Daqingshan orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 10: 413—425 (in Chinese with English abstract).
- O'Brien, P. J., Walte, N., Li, J. H., 2005. The petrology of two distinct granulite types in the Hengshan Mts, China, and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 615—627.
- Ma, X. Y., Wu, Z. W., Tan, Y. J., et al., 1979. Tectonics of the North China platform basement. *Acta Geologica Sinica*, 53: 293—303 (in Chinese with English abstract).
- Qian, X. L., Li, J. H., 1999. The discovery of Neoproterozoic unconformity and its implication for continental cratonization of North China craton. *Science in China (Series D)*, 42(4): 401—407 (in Chinese).
- Shen, B. F., Luo, H., Li, S. B., et al., 1994. Geology and metallization of Archean greenstone belts in North China platform. Geological Publishing House, Beijing, 1—73 (in Chinese).
- Shen, Q. H., Qian, X. L., 1995. Archean rock, assemblages, episodes and tectonic evolution of China. *Acta Geoscientia Sinica*, (2): 113—120 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Q. H., Xu, H. F., Zhang, Z. Q., 1992. The Early Precambrian granulites in China. Geological Publishing House, Beijing, 134—140 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Y. Q., 1991. Geology and gold mineralization of Wutai-Hengshan greenstone belt. Shanxi Science and Technology Press, Taiyuan, 14—215 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. C., Yuan, G. B., Xin, H. T., et al., 1999. On the tectonic implication for Xiashihao-Jiuguan ductile shear zone in Guyang-Wuchuan area, Inner Mongolia. *Progress in Precambrian Research*, 22: 12—20 (in Chinese with English abstract).
- Wang, K. Y., Li, J. L., Hao, J., et al., 1996. The Wutaishan orogenic belt within the Shanxi Province, Northern China: A record of Late Archean collision tectonics. *Precambrian Research*, 78: 95—103.
- Wang, K. Y., Li, J. L., Hao, J., 1997. Late Archean mafic-ultramafic rocks from the Wutaishan, Shanxi Province: A possible ophiolite mélange. *Acta Petrologica Sinica*, 13(2): 139—151 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. H., Wilde, S. A., Wang, K. Y., et al., 2004. A MORB-arc basalt-adakite association in the 2.5 Ga Wutai greenstone belt: Late Archean magmatism and crustal growth in the North China craton. *Precambrian Research*, 131(3—4): 323—343.
- Wilde, S. A., Cawood, P. A., Wang, K. Y., et al., 2005. Granitoid evolution in the Late Archean Wutai complex, North China craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 597—613.
- Wu, F. Y., Zhao, G. C., Wilde, S. A., et al., 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 523—545.
- Wu, J. S., Geng, Y. S., Shen, Q. H., et al., 1998. Archean geological characteristics and tectonic evolution of Sino-Korea paleo-continent. Geological Publishing House, Beijing, 1—104 (in Chinese with English abstract).
- Xie, G. H., 2005. Petrology and geochemistry of the anorthosite in Damiao and the raporkiwi granite in Miyun: A review on the global distribution and significance of the rock mass type anorthosite and raporkiwi granite on the time and space. Science Press, Beijing, 1—155 (in Chinese).
- Yuan, X. C., 1995. On continental basal structure in China. *Acta Geophysica Sinica*, 38: 448—459 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., 2004. 2.1—1.7 Ga geological event group and its geotectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1343—1354 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. S., Lao, Q. Y., Li, Y., 1999. Tectonic implication of aeromagnetic anomaly and evolution of Huabei-South Tarim-Yangtze superlandmass. *Earth Science Fron-*

- tiers, 6(4): 379—390 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. S., Dirks, P., Passchier, C. W., 1994. Extensional collapse and uplift in a polymetamorphic granulite terrain in the Archean and Paleoproterozoic of North China. *Precambrian Research*, 67: 37—57.
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China craton; Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136: 177—202.
- Zhao, Z. P., 1993. The Precambrian geological evolution of Sino-Korea platform. Science Press, Beijing, 1—83 (in Chinese).
- Zhu, Y., 2004. Framework geotectonic and deep crustal architectural features of China and some peripheral areas interpretation of aeromagnetic map series 1: 1 000 000. Geological Publishing House, Beijing, 1—61 (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 白瑾, 黄学光, 王惠初, 等, 1996. 中国前寒武纪地壳演化(第2版). 北京: 地质出版社, 20—60.
- 耿元生, 万渝生, 沈其韩, 2002. 华北克拉通早前寒武纪基性火山作用与地壳增生. *地质学报*, 76(2): 199—208.
- 耿元生, 杨崇辉, 宋彪, 等, 2004. 吕梁地区 18 亿年的后造山花岗岩: 同位素年代和地球化学制约. *高校地质学报*, 10(4): 477—487.
- 侯贵廷, 李江海, Halls, H., 等, 2003. 华北晚前寒武纪镁铁质岩墙群的流动构造及其侵位机制. *地质学报*, 77(2): 210—216.
- 李江海, 侯贵廷, 黄雄南, 等, 2001. 华北克拉通对前寒武纪超大陆旋回的基本制约. *岩石学报*, 17(2): 177—186.
- 李江海, 牛向龙, Kusky, T., 等, 2004a. 从全球对比探讨华北早期板块构造过程. *地学前缘*, 11(3—4): 273—283.
- 李江海, 牛向龙, 陈征, 等, 2004b. 太行山区深层次逆冲推覆构造的发现及其地质意义. *自然科学进展*, 14(10): 1118—1127.
- 李江海, 牛向龙, 黄雄南, 等, 2002. 豆荚状铬铁矿: 古大洋岩石圈残片的重要证据. *地学前缘*, 9(4): 235—246.
- 李江海, 钱祥麟, 侯贵廷, 等, 2000. “吕梁运动”新认识. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(1): 15—20.
- 刘喜山, 1994. 大青山造山带中基底再造杂岩的特征及其指示意义. *岩石学报*, 10: 413—425.
- 马杏垣, 吴正文, 谭应佳, 等, 1979. 华北地台基底构造. *地质学报*, 53: 293—303.
- 钱祥麟, 李江海, 1999. 华北克拉通新太古代不整合事件的确定及其大陆克拉通构造演化意义. *中国科学(D辑)*, 42(4): 401—407.
- 沈保丰, 骆辉, 李双保, 等, 1994. 华北陆台太古宙绿岩带地质及成矿. 北京: 地质出版社, 1—73.
- 沈其韩, 钱祥麟, 1995. 中国太古宙地质体组成、阶段划分和演化. *地球学报*, (2): 113—120.
- 沈其韩, 徐惠芬, 张宗清, 1992. 中国早前寒武纪麻粒岩. 北京: 地质出版社, 134—140.
- 田永清, 1991. 五台山—恒山绿岩带地质及金的成矿作用. 太原: 山西科学技术出版社, 14—215.
- 王惠初, 袁桂邦, 辛后田, 等, 1999. 内蒙古固阳下湿壕—武川酒馆韧性剪切带的大地构造意义探讨. *前寒武纪研究进展*, 22: 12—20.
- 王凯怡, 李继亮, 郝杰, 1997. 山西省五台山晚太古代镁铁质—超镁铁质岩: 一种可能的古蛇绿混杂岩. *岩石学报*, 13(2): 139—151.
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等, 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社, 1—104.
- 解广轰, 2005. 大庙斜长岩和密云环斑花岗岩的岩石学和地球化学——兼论全球岩体型斜长岩和环斑花岗岩的时空分布及其意义. 北京: 科学出版社, 1—155.
- 袁学诚, 1995. 论中国大陆基底构造. *地球物理学报*, 38: 448—459.
- 翟明国, 2004. 华北克拉通 2.1~1.7 Ga 地质事件群的分解和构造意义探讨. *岩石学报*, 20(6): 1343—1354.
- 张家声, 劳秋元, 李燕, 1999. 航磁异常的构造解释和华北—塔南—扬子超陆块演化. *地学前缘*, 6(4): 379—390.
- 赵宗溥, 1993. 中朝准地台前寒武纪地质演化. 北京: 科学出版社, 1—83.
- 朱英, 2004. 中国及邻区大地构造和深部构造纲要. 北京: 地质出版社, 1—61.