

从全球对比探讨华北克拉通早期地质演化与板块构造过程

李江海¹, 牛向龙¹, T. KUSKY², A. POLAT³

(1. 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;

2. Department of Earth and Atmospheric Sciences, Saint Louis University, St. Louis, MO 63103;

3. Department of Earth Sciences, University of Windsor, Windsor, ON, Canada N9B 3P4)

摘要: 板块构造理论为 20 世纪取得的重大科学成就。如何在新世纪发展板块构造、推动大陆动力学研究成为新的挑战。世界古大陆前寒武纪地质研究在花岗岩-绿岩带、高级变质区、新太古代造山作用、早期大洋地质记录与古板块构造, 以及超级大陆等方面取得新进展。在此全球构造背景下, 华北早期地质演化的相关重大问题包括: 新太古代典型造山带地质演化、碰撞过程及其盆山耦合作用。围绕新太古代蛇绿岩的研究, 特别是豆荚状铬铁矿及地幔岩, 将提供早期大洋岩石圈性质、扩张运移过程的重要线索, 并提出早期板块边界划分标志及其洋-陆作用过程。华北中部造山带及蛇绿岩混杂带的洲际对比, 对认识华北与最古老超级大陆聚合过程具有重要意义。

关键词: 古板块; 太古宙; 华北; 碰撞造山; 超大陆

中图分类号: P541 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2321(2004)03-0273-11

0 前言

古大陆地质演化与早期地球历史一直是地质学的研究热点问题。在过去的 20 年中, 早前寒武纪地质学的研究主要涉及两大方面的问题: (1) 古大陆的增生与克拉通化过程; (2) 板块构造起始过程或与前板块构造的交替机制。世界各地(北美、西澳、非洲南部、格陵兰等地)克拉通基底构造的研究不断揭示和积累不同类型古造山带及其板块作用的重要证据, 围绕早期板块边界性质、俯冲碰撞过程、高级区-低级区关系, 典型造山带组成、变质和运动学, 早期大洋地质记录进行研究探索, 证明板块构造过程至少在新太古代(3.0~2.5 Ga 前)以来就成为全球构造的主导机制。

在华北早期构造演化研究中, 如何面对这些挑

战, 从其地质实际和长期研究积累出发, 准确鉴别和恢复早期碰撞造山带格局、几何形态、运动学和古板块演化已非常重要, 特别是蛇绿岩缝合线的研究已成为重要的前缘国际科学问题。与其他古大陆相比, 华北克拉通研究程度较低、陆块规模较小、后期再造强烈、大地构造属性不明、大陆克拉通化事件(2.50 Ga)滞后等。随着华北地区的研究进展及其国际合作的开展, 特别是美国彭罗斯会议(北京, 2002)、华北大陆构造演化中美双边会议(北京, 2004)的召开, 华北早期地质演化正成为国际研究的热点之一。

本文在评述国际早前寒武纪地质研究进展的基础上, 根据华北地区的长期研究积累, 提出华北早期大陆构造演化近期研究的关键科学问题。

1 新太古代造山带构造模式及其造山记录

尽管对古大陆生长的构造模式尚无完全一致的认识, 但普遍认为太古宙为陆壳最重要的生长与稳定时期, 其中新太古代陆壳发生快速生长。目前对克拉通的早期演化可以归结为两类认识: 板内作用

收稿日期: 2004-08-03; 修订日期: 2004-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40172066, 40242014, 49832030); 北京大学 985 项目

作者简介: 李江海(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 构造地质学专业, 从事前寒武纪地质研究。E-mail: jhli@pku.edu.cn

模式与造山模式。前者是传统认识,并不断地受到新的挑战,主张陆壳以垂向增生为主,涉及较长期(3.5~2.6 Ga 期间)的地质演化及太古宙反复多次的克拉通化事件;主要归结为地幔柱活动使陆壳或大洋高原增生,实例有波罗的、阿尔丹、亚马逊、巴西克拉通等。后者以均变模式或修正后板块造山模式解释大陆克拉通生长,陆壳主要快速生长于狭窄的年龄间隔内(如 2.7 Ga, 2.5 Ga)。事实上,在讨论早期地壳演化的一个重要问题是陆壳的保存机制,许多学者都强调 30 亿年前,地球表面以高热流为特点,地壳涉及强烈的再循环作用,地幔对流可能造成古陆壳向地幔内的循环和快速消亡。因此,目前所保留的主要为残余古陆块,其原始的规模和形态尚不清楚。考虑到这些影响因素,早期构造单元或地质记录普遍具有不完整性,成为制约早期陆壳增生过程认识的因素。

早期板块构造的研究首先是围绕古板块边界与造山带的探讨。随着克拉通区构造地质填图和大量高精度同位素年龄数据的积累,原先克拉通可以进一步划分为不同的岩石构造变质单元(如高级区、低级区等)及其边界,并在此基础上识别出新太古代造山带。早先由于研究程度的制约,对高级区与低级区构造关系常有争论,提出它们代表不同构造环境、或者不同构造层次、或者相同单元横向上变质程度的差异的产物等认识。近年来大量的年代学、变质地质、构造地质的研究表明,高级区与低级区主要为以下两种构造关系:(1)高级区代表邻近绿岩带的深部地壳层次,它们形成于相同构造环境,实例如北美 Kapuskasing;(2)高级区为绿岩带叠加后期高级变质的产物,实例如南非林波波带。许多绿岩带及其深层次麻粒岩区的形成主要与活动陆缘及上俯冲带的增生拼合相关。

已提出鉴别新太古代造山带的标志包括:(1)线状展布的岩带组合或构造单元(花岗岩类、TTG、表壳岩、沉积增生楔混杂带等),可以与典型的显生宙造山带(碰撞型、增生型)对比,长度从数百 km 到上千 km,宽度为几十至几百 km。它们处于中太古陆块残留之间或边缘。(2)具有明确的构造边界或广泛的韧性断层系统,可能显示明确的构造极性,大规模平卧褶皱、叠加褶皱、低角度剪切带非常发育,表明大规模水平构造及其地壳缩短变形作用。(3)地球化学指示绿岩带显示活动陆缘、岛弧-弧后、大洋高原的成分属性,花岗岩类形成于俯冲-碰撞过程。

(4)同位素年龄数据库显示地壳生长、变形-变质改造出现于相对狭窄的年龄峰期(100~200 Ma 间隔内)。(5)地球物理勘探证实发育大规模的深层次冲断变形构造,它们可对应于浅层次构造变形。依据变质作用、绿岩带成因环境、大规模逆冲构造等,已在几个古陆区揭示出新太古代碰撞造山带。例如,南非林波波麻粒岩带为地壳碰撞加厚的产物;北美苏必利区为活动陆缘增生并碰撞的产物,保留了大洋板块俯冲的证据——线状展布的沉积增生楔。西澳耶尔冈花岗绿岩带可以解释为活动陆缘地体增生拼贴的产物。上述新太古代碰撞型(林波波带)、增生型(苏比利尔型)、地体拼合型(西澳耶尔冈、西南格陵兰)造山带的典型实例,得到广泛认可^[1~7]。

新太古代造山带构造的研究,可以确定板块聚敛边界及其运动过程,探讨早期板块如何随热流降低,具备足够高的刚性程度,能够支撑碰撞构造加厚地壳,而非重力垮塌^[1]。为此,查明地壳是否发生大规模水平缩短构造变形,特别是薄皮构造对早期板块研究将非常重要。在地质构造分析的基础上^[2,3],北美和西澳新太古代造山带深地震反射研究中,均发现典型薄皮构造。它们在深部保留大规模的莫霍面错动标志、平缓的下地壳冲断构造以及缓倾俯冲构造边界等^[3,4,8,9],证明水平地壳缩短是早期造山带重要的变形机制,深浅层次变形机制完全一致,有力地推动了新太古代板块构造的研究。在苏必利尔造山带还识别出线状展布的沉积增生楔,记录了早期洋壳俯冲的构造位置,对于认识洋陆岩石圈边界及其作用具有重要价值。

绿岩带的研究提出增生型造山是陆壳生长的主要机制,板块边缘或岛弧强烈的火山活动及 TTG 岩浆侵位,形成宽度巨大(达几百 km)的造山带,使陆壳迅速增生,还广泛出现大洋高原,其横向拼合有利于陆壳增生。大洋高原增生、岛弧地壳增生和地体拼合模式在北美、西澳和非洲南部的研究中得到广泛认可^[2],并以此解释这一时期陆壳的迅速增生^[10]。全球新太古代造山带主要出现于 27 亿年前后,而华北和印度的新太古代造山带主要出现于 25 亿年前后,明显滞后于全球构造的演化。它们在造山时间上的差异对认识早期陆壳生长具有重要意义。

由于出露层次较深和后期变形干扰,新太古代造山带研究,多限于岩石单元地球化学成因、构造环境分析及造山带概念和模式探讨。而造山带几何形态、运动模式及造山过程缺乏深入阐释。因此,典型

碰撞造山带的识别, 已成为研究早期板块构造的瓶颈问题。造山带前陆地区保留造山过程、盆山作用的重要线索。如大规模冲断构造、前陆盆地层序等。开展新太古代前陆盆地构造、地层及沉积研究, 将在造山演化上取得新进展。目前在南非及西澳已识别出中、新太古代前陆盆地^[5], 恢复出碰撞造山带的冲断层序、构造扩展及隆升过程。在林波波碰撞造山带南侧还识别出 2.6 Ga 的前陆盆地, 证明麻粒岩带形成与碰撞造山相关^[6]。为此, 寻找完整的前陆地层记录, 将推动早期深浅构造层次耦合及造山过程的研究。中、新生代前陆盆地的研究^[7,11,12], 获得造山过程的丰富信息, 前陆区较好保存碰撞造山带的构造和沉积记录。借鉴上述成功检验, 将从新的视角推动新太古代碰撞造山过程的深入研究。

大量研究表明, 华北中部存在一条近南北向造山带, 以线状构造和强应变为特点, 广泛出现大规模的韧性剪切带、深层次推覆构造, TTG-花岗岩-表壳岩带(2.50~2.60 Ga), 发育丰富的重熔花岗岩(2.50 Ga)。由西向东造山带构造单元依次为(图 1, 2): ①恒山—承德高压麻粒岩带, 长度大于 700 km, 记录了大规模的构造俯冲作用。②五台山弧—弧后岩浆杂岩—绿岩带(2.50 Ga); ③遵化至五台—辽西蛇绿混杂岩带; ④青龙—滦沱前陆盆地及褶皱冲断带; ⑤太行—迁安被动大陆边缘沉积盖层。这

一造山带的形成直接记录了华北克拉通主体的形成与稳定过程。

尽管经历后期改造, 大量证据指示中部造山带早期曾涉及北西—南东向大规模地壳缩短加厚的构造过程。造山带构造明显改造了东西两侧的古老构造单元。中部造山带及其前陆盆地广泛被东冶群(2.40~2.00 Ga)不整合覆盖, 并被非造山花岗岩(2.40 Ga, 2.20~2.00 Ga)、基性岩墙群(2.40 Ga, 1.77 Ga)侵位。中部造山带涉及大量 2.50 Ga 的火山—沉积及花岗岩侵位^[14~20]。尽管对其最终碰撞造山时代尚有争论^[21], 但开始于新太古代的板块俯冲—碰撞相关 TTG-花岗岩侵位(2.50 Ga)已得到广泛证实。另外, 造山带东侧的五台西南部、冀东、南太行、嵩山等地保存新太古宙—古元古代的巨厚地层, 出现浊积岩—磨拉石建造(如高凡群、豆村群、青龙河群等)^[22,23], 它们被西侧造山带内带强烈构造逆掩, 深浅地壳层次耦合关系明显。上述前陆沉积记录对于研究碰撞造山过程及其地质时代具有重要的制约意义。

2 新太古代大洋岩石圈记录与早期板块构造

蛇绿岩缝合线为碰撞造山带的重要标志, 也是

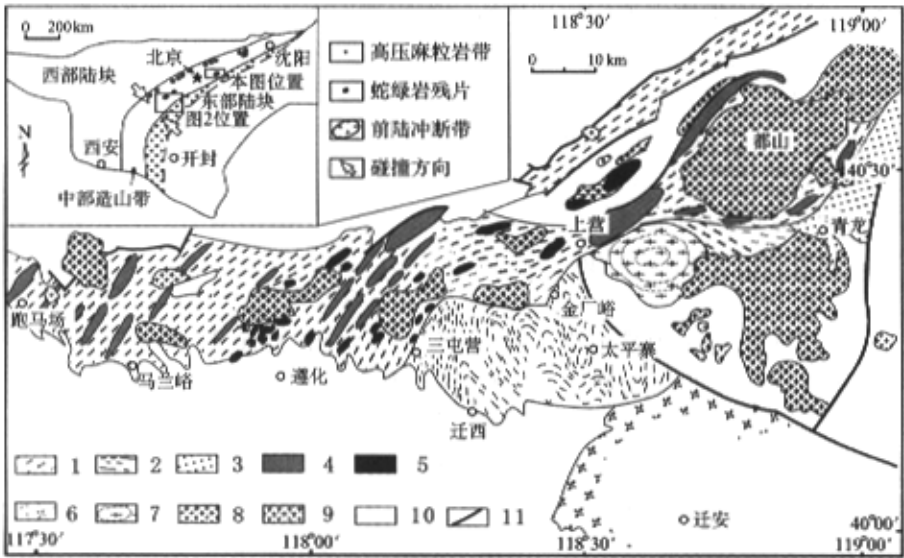


图 1 冀东变质岩区构造区划图
(根据文献 13 及野外工作改绘)

Fig. 1 Neoproterozoic tectonic framework of Eastern Hebei metamorphic terrain

(插图为华北克拉通基底构造区域图。1—遵化构造带; 2—迁西麻粒岩穹隆; 3—青龙前陆冲断带; 4—变质基性侵入体; 5—蛇绿岩残片; 6—迁安片麻岩—麻粒岩穹隆; 7—上营花岗岩闪长岩; 8—中生代花岗岩; 9—中生代闪长岩; 10—长城系以来沉积地层; 11—大断裂)

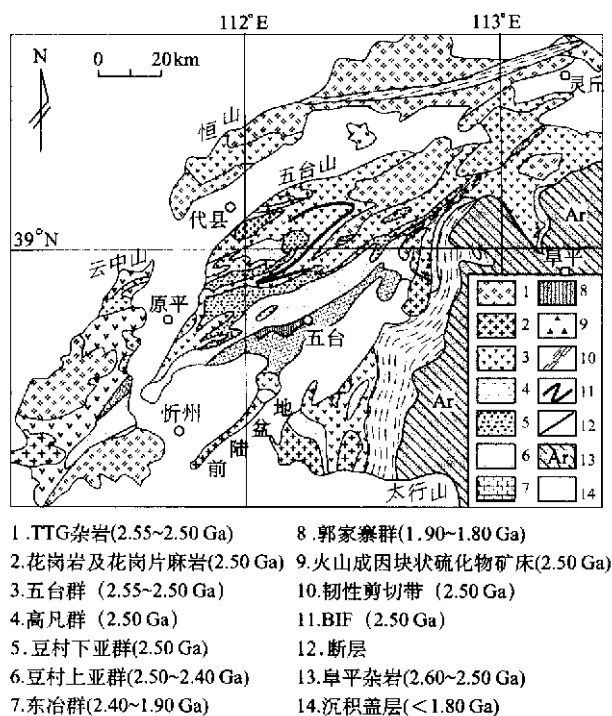


图2 五台山变质岩区地质构造图

Fig.2 Structural and geological map of Wutaishan metamorphic terrain

陆块之间曾存在洋盆的基本证据,证明板块曾大规模水平运动,涉及大洋岩石圈扩张、俯冲破坏及构造侵位等多个阶段。为此,蛇绿岩的研究是认识大洋岩石圈性质、陆壳横向增生、古板块水平运动过程的基本依据,也是揭开早期地球热状态、洋壳俯冲、原始大陆增生及其保存机制的金钥匙。蛇绿岩研究推动了板块构造的发展,并成为恢复不同时期古板块及超大陆的主要依据。为此,早期造山带是否保存古大洋地壳记录,对于检验板块构造过程、板块初始机制、早期板块与现今板块构造异同将非常重要^[2,24,25]。

早期洋壳记录的缺乏和碰撞造山带构造几何学研究不足,造成对早期板块构造的长期争论。多数人认为早期仍以板块构造为主,但与现今板块构造存在一定差异^[26]。而早期大洋岩石记录的研究,将是新太古代板块构造研究的突破口,并直接推动地球早期热状态、陆壳增生机制及地幔对流过程的认识。围绕古元古代碰撞造山带(芬兰和加拿大)板块缝合线的构造填图研究,率先发现了多个20亿年的蛇绿岩,有力地推动了古元古代板块构造研究。

随着地质时代的增加,蛇绿岩保存的难度也在增加,特别是强烈变形变质和深度剥蚀均造成识别

古老蛇绿岩的困难,使其在野外难以区别于普通变质岩系。如何鉴别早期洋盆记录以及认识它们与后期蛇绿岩的异同成为重要问题。对早期洋壳记录的鉴别尚有不同见解:(1)主张早期洋盆分异性较差、地温梯度较高,早期洋壳记录与后期有明显差异;认为俯冲环境的绿岩带即是早期洋壳记录。(2)广泛的地壳再循环造成洋壳已经俯冲消失,保留至今的太古宙洋壳记录主要为大洋高原相关的浅层次火山沉积记录。(3)太古宙洋壳记录与显生宙类似,由于强烈的变形变质等改造而难于识别。在讨论早期洋壳性质之前,首先应严格遵守蛇绿岩原生定义进行相关研究,以判断上述不同观点的合理性,这也是深入探讨早期洋壳记录的基础。

绿岩带常被解释为活动板块边缘的产物,一直是寻找和研究早期洋壳记录的重要基础^[27]。围绕众多新太古代绿岩区造山带相关构造边界,开展了广泛的洋壳寻找和研究,先后在Slave区、苏必利尔区、林波波带、西澳、波罗的海的报道新太古代大洋地质记录及蛇绿岩残片^[2],这些蛇绿岩层序均不完整,主要由玄武岩和基性岩墙杂岩或超基性岩块组成,缺少蛇绿岩其他单元,特别是地幔构造岩、豆荚状铬铁矿以及海底水热蚀变产物(VMS等)及其黑烟囱硫化物记录。另外,北美苏必利尔区首次识别出大规模的沉积增生楔,证实早期大洋板块曾经大规模俯冲^[28]。苏必利尔、波罗的海、巴伯顿等绿岩区造山带内均识别出大洋高原记录,证明它们的增生和拼合对大陆生长具有重要作用^[3,29]。由于新太古代蛇绿岩层序常涉及其上部层次,由此提出早期洋壳较厚,俯冲时大洋岩石圈下部被拆离,下部层次俯冲进入上地幔。为此,如何认识早期蛇绿岩下部层次成为重要问题。

华北中部造山带恒山—承德—辽西高压麻粒岩带的东南侧,发育2000余个大小不等的超镁铁岩块,它们出现于辽西—冀东至北太行—五台至南太行混杂带内,混杂带可以追索长度超过600 km。与东侧的前陆冲断带及前陆盆地相邻。本区太古宙蛇绿岩与洋壳记录探索开始于五台山区^[22,23,30,31]。目前已在这条混杂带的五台山区、遵化北部及辽西地区先后识别出新太古代蛇绿岩残片(2.50 Ga)(图1)^[21,24,31~35],相关的特征岩类包括:枕状熔岩、层状辉长岩、镁铁质—超镁铁质堆积岩、地幔构造岩等,并伴随条带状铁建造、豆荚状铬铁矿、块状硫化物及绿帘斜长角闪岩等,它们形成于上俯冲带构造环境。

因此, 这条构造混杂带记录了古大洋板块消失的位置。其中, 遵化新太古代蛇绿岩以广泛分布的地幔构造岩及其豆荚状铬铁矿为特征^[20,32,33], 对于研究早期大洋地幔具有重要意义。高压麻粒岩带与蛇绿岩混杂带缝合带向辽西延伸有聚合趋势, 主要与造山带构造层次变深有关。

多组准确的同位素定年(锆石 U-Pb, 豆荚铬铁矿 Re-Os), 证明遵化、五台、辽西蛇绿岩形成于 25 亿年前^[21,24,31~33,36], 提供了探索早期大洋岩石圈难得的机会。通过比较它们与年轻蛇绿岩, 可获得早期大洋演化的重要认识^[32,33,35,37,38]。遵化豆荚状铬铁矿发育丰富的结构构造及其相关地幔构造, 记录原始地幔熔体-地幔相互作用及演化过程, 无论对于研究扩张中心地幔熔体上涌, 还是大洋岩石圈横向扩展运移都具有重要价值^[21,32~34]。另外, 由于早期地幔岩合适样品的缺乏, 地幔成分数据相互矛盾^[39~43], 华北大洋地幔岩及豆荚状铬铁矿将提供早期地幔化学演化的新证据。

关于全球新太古代大洋岩石圈的研究主要提出以下新认识:

(1) 早期洋壳地温梯度较高, 洋盆寿命较短^[40], 或者洋脊长度较长^[39], 大洋板块规模较小, 运动速率缓慢, 洋壳以缓倾角俯冲为主, 有利于陆壳加厚及横向生长。

(2) 洋壳超镁铁成分比例较高, 厚度较大, 广泛存在于现今大洋高原类似的地质单元^[29,39], 并在俯冲过程中广泛参与陆壳增生过程。因洋壳厚度较大, 在俯冲过程中易发生拆离, 而保留浅层次洋壳记录。

(3) 上俯冲带环境的洋壳记录与绿岩带难于区分, 俯冲带是陆壳增生的主要构造环境^[2]。

(4) 早期洋盆较浅, 不发育宽广的大陆架。洋陆分异可能不明显, 陆缘以不成熟沉积物为特征, 陆地面积小、高程低, 并且普遍被海水淹没。海水温度普遍较高、pH 值及含氧量较低, 以酸性和还原性为特点。洋壳浅层次火山及其水热活动强烈, 广泛沉积 BIF 以及硫化物矿床, 五台等地新太古代硫化物中保留了黑烟囱残片及绿帘石蚀变岩(补给带记录)。

(5) 早期洋壳厚度、地热梯度在 30 亿年前后明显减小, 洋壳俯冲机制发生重大变化。由早期巨厚大洋岩石圈内拆离变为较薄大洋岩石圈整体俯冲, 石榴斜长角闪岩部分熔融形成 TTG, 造成陆壳迅速生长。

(6) 新太古代末期已形成典型大洋岩石圈, 涉及小洋盆或弧后扩张中心的形成以及大洋板块的横向运移和俯冲, 这在遵化、辽宁等地豆荚状铬铁矿结构构造的深入研究中得到证实^[32,33,35]。

3 新太古代末期超大陆与太古宙/元古宙界线

大量研究证明^[1,36,44], 修正后的板块构造模式仍适于新太古代地质研究。例如, 普遍以上俯冲带模式解释许多绿岩带和 TTG 杂岩的成因^[2,40]; 以碰撞造山或岛弧模式解释麻粒岩相变质^[44]。苏必利尔区的研究提出岛弧增生-碰撞造山模式。因此, 新太古代 (3.0~2.5 Ga) 板块构造特征已经很明显^[45]。板块模式的应用更多是概念层次上探索, 缺乏系统的几何学、运动学分析, 更缺乏全球尺度上的对比研究, 与此相关的重大问题是最新早期超级大陆(新太古代)的探索。

依据北美、波罗的古元古代初期大规模基性岩墙群、大面积溢流玄武岩及基性侵入体分布区 (2.50~2.40 Ga), 以及大陆裂谷系的区域对比, 提出 Kenorland 超级大陆 (25~27 Ga)^[46,47]。后又根据苏必利尔区与西澳耶尔冈地区新太古代造山带的相似性, 提出后者也是这一超级大陆的组成部分。非洲南部卡拉哈里克拉通 (包括卡普瓦尔、津巴布韦、林波波带)、西澳皮尔巴拉克拉通、印度南部等地新太古代地质历史的相似性, 表明它们也可能构成新太古代的另一个超级大陆。因此, 在新太古代至少可能已形成两个超级大陆^[6,45,47~50]。已有资料显示, 新太古代超级大陆涉及众多微陆块和地体的拼合, 主要由新太古代刚形成不久的岛弧、弧后盆地、微陆块等单元组成^[44], 它们未形成明显加厚的地壳及广泛分布的碰撞型造山带, 其原因尚不清楚。

尽管这些超级大陆的构造轮廓、组成陆块、拼合裂解时间, 尚有待深入研究, 它们记录了地球早期构造演化的重大地质事件。一些学者提出, 最早期超级大陆或超级克拉通的形成和出现, 标志着早期陆壳逃避再循环而有效地保存下来, 代表地球动力学体制的重要转折, 涉及超级地幔柱活动事件^[3,46]。超级大陆的出现还在短期内改变地球热状态, 以及海陆表面面积的分布状态、全球海平面变化和沉积作用过程, 对生命进化、大气圈演化也有深远影响。

围绕 Kenorland 超级大陆的构造轮廓、碰撞拼

合-裂解过程及其板块构造体制,已成为新太古代地质研究热点^[45,51]。新太古代也是华北大陆迅速增生与稳定时期(2.70~2.50 Ga)^[14,23,52~54]。与北美、西澳和非洲南部 27 亿年大陆聚合事件不同的是,华北、印度大陆主要记录了 25 亿年左右的碰撞造山事件^[36,45,54],这种构造热事件时间上滞后的构造原因及其大地构造背景尚不很清楚。华北和南印度是否记录超大陆最终拼合过程,还是代表另一个超大陆的组成部分均有待探讨^[36,45,47,55~57]。从华北克拉通基底构造格局分析,其南北向中部造山带向南北两端均被后期构造边界交切,表明其原始长度已远超过克拉通目前范围。华北中部造山带的延伸部分是否保留于其他克拉通上,其他克拉通是否有同时代及性质的造山带,将提供华北与新太古代超大陆构造关系的关键制约条件。

新太古代超级大陆的研究还直接影响到全球太古宙/元古宙地质界线(A/P 界线)的划分方案,包括地质标志的建立、各大陆时空差异性的表现、界线本身性质的限定和认识、以及标准地点的论证等。A/P 界线代表地球演化历史上最重要的地质事件,涉及大地构造、生物、海洋面积、海水成分、大气圈成分、陆壳成分、地球热状态及成矿作用等方面的深刻变化。尽管通过会议投票提出了 25 亿年为界线时代^[58],但并无明确的地质含义和广泛认同的地质界线及其标准地点,这种研究现状成为中国地质研究的新机遇。

从华北地质实际出发,五台山区可能是建立 A/P 界线的理想候选地区(图 2),主要依据包括:(1)该区保留了完整的新太古代—古元古代地层记录(2.60~1.80 Ga),以及多个不整合面(铁堡不整合、洪寺不整合、甘泉不整合等),这些地层构造、沉积环境、同位素年龄、叠层石具有较高的研究程度。(2)五台地区完好地保留了华北中部新太古代造山带的中浅构造层次,代表 25 亿年造山带核部向前陆变化的连续剖面,它们被太古宙末期(2.50~2.40 Ga)基性(包括超基性)岩体或岩墙群侵位。上述地质事件在华北大范围可以对比^[59],为建立太古/元古宙界线理想的构造-岩浆-地层事件的重要标志。(3)25 亿年前地质事件在全球大地构造演化具有重要意义,其典型地质记录保留于华北大陆,涉及丰富的地质内涵,成为中国地质研究的有利条件。

4 华北克拉通基底构造格局及重大地质事件

围绕华北大陆基底构造组成与早期地质历史,10 年来开展了大量区域地质研究和同位素定年。在对整个华北克拉通基底编图研究基础上,重点开展恒山、五台、太行、内蒙古、冀东、冀西北、辽西、吕梁等变质岩区的构造、变质、地球化学及同位素地质年代学综合研究^[15~17],证实华北克拉通基底在构造、组成上具有明显的不均一性,克拉通主体形成于新太古代陆壳增生与碰撞造山过程,并在古元古代经历多次改造作用,克拉通构造演化历史的框架也基本明了。

构造区划研究揭示^[15,16,18,19,60],华北中部南北向新太古代造山带,分隔西部以变质沉积盖层(孔兹岩系)为标志的鄂尔多斯陆块和东部辽东—鲁西花岗岩—绿岩区。该造山带以大规模韧性剪切带、高压变质带、蛇绿岩混杂带、TTG-花岗岩—表壳岩带、前陆冲断带(2.50~2.60 Ga)为特征。

承德—恒山至辽西高压麻粒岩出现于西部陆块东边缘,长度超过 700 km。锆石 U-Pb 同位素年龄测试及地球化学研究表明高压麻粒岩原岩的时代 25~26 亿年,涉及大洋拉斑玄武岩、辉长质岩墙、变质沉积岩等成分,高压变质时代为 25 亿年^[53],在 25 亿年前经历了中压麻粒岩相减压变质,最终出露地表时间为 18~19 亿年前。高压麻粒岩形成过程涉及地壳构造叠置,代表活动陆缘俯冲带根带,出露过程与多期构造变形相关^[61]。

在高压麻粒岩带东侧出现蛇绿岩混杂构造带及前陆冲断带。混杂构造带的长度超过了 600 km,蛇绿岩混杂带包括遵化、辽西、五台—太行等地的蛇绿岩残片、豆荚状铬铁矿及超镁铁岩块^[20,32,33],构成区域上古板块碰撞缝合边界^[20],记录了新太古代末期(2.50 Ga)的板块碰撞作用以及华北东西陆块之间大规模的水平运动。五台—太行交界区出现大规模前陆冲断褶皱带以及被动陆缘沉积地层,前陆盆地沉积(高凡群和豆村群,2.50~2.40 Ga)超覆于被动陆缘地层上,并且由西北向东南的构造迁移,记录造山带地壳水平缩短过程。前陆盆地在区域上平行造山带南北向带状展布,还保留于冀东、嵩山、南太行等地,其地层层序可以对比(下部浊积岩系和上部磨拉石建造),记录新太古代末期碰撞造山隆升过程^[21]。

表 1 华北中部碰撞造山带 25 亿年前后重大地质事件对比
Table 1 The geological correlation of 2.50 Ga events along the central orogenic belt of North China

变质岩区	构造背景	地质事件序列	资料来源
辽西—承德	活动陆缘	表壳岩形成、发育洋壳、TTG 侵位、麻粒岩相变质	李江海等, 2002; Kröner 等, 1998
遵化—青龙	构造混杂带-前陆	洋壳形成并构造侵位、花岗岩侵位、麻粒岩相变质、前陆盆地发育	李江海等, 2003
恒山	活动陆缘(根带)	表壳岩形成、TTG-花岗岩侵位、水平构造叠置、高压麻粒岩相变质、伸展作用	李江海等, 2001
五台山	岛弧、弧后盆地及前陆盆地	表壳岩形成、花岗岩侵位、洋壳构造侵位、前陆盆地发育	田永清等, 1991; 王凯怡等, 1997
太行山	被动大陆边缘及前陆盆地	沉积表壳岩、逆冲剪切变形和构造叠置、花岗岩侵位、前陆冲断及沉积超覆	李继亮等, 1990; 伍家善等, 1998
嵩山	岛弧、弧后盆地及前陆盆地	表壳岩形成、TTG-花岗岩侵位、地壳缩短、前陆盆地发育	白瑾等, 1996

构造区划及同位素定年研究表明^[17,20,36,54,62~64], 华北前寒武纪地质构造演化具有明显的阶段性, 而非简单的陆壳均匀生长与克拉通化。初步可以提出克拉通形成演化过程中涉及以下区域性的重大地质事件: (1) 新太古代晚期华北主体涉及克拉通增生与陆块碰撞事件(2.55~2.50 Ga); (2) 古元古代初期中部碰撞造山带形成后华北中部经历大陆伸展裂解作用(2.50~2.30 Ga); (3) 古元古代晚期华北西北部再造事件(2.20~1.90 Ga), 华北西部孔兹岩区以强烈走滑剪切变形及 S 型花岗岩侵位为特点。在吕梁、五台、太行山区也有非造山花岗岩(2.20~1.90 Ga)侵位及走滑剪切变形; (4) 古元古代末期华北经历大规模裂解事件(1.90~1.70 Ga), 开始发育沉积盖层。

5 华北克拉通早期构造演化特征及其关键问题

与其他古大陆地质研究相比, 尽管华北前寒武纪地质研究, 特别是区域构造研究程度尚不够高, 后期再造作用(reworking)强烈, 但是, 华北克拉通区域地质具有明显特色, 特别是 25 亿年前的重大地质事件对全球古板块研究具有重要意义。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记录(图 2), 遵化蛇绿岩混杂带保留丰富的新太古代豆荚状铬铁矿(图 1), 均成为探索早期板块构造的重要基础和我国科学家研究古板块构造及早期超级大陆的良好机遇。以下问题成为未来研究的关键。

(1)新太古代蛇绿混杂带及其碰撞造山带格局: 25 亿年前地质事件对于华北克拉通的最终形成具

有重要影响, 这一事件的性质、区域构造背景、造山带组成和演化, 将揭示华北早期演化的关键问题。围绕五台、冀东、辽西等新太古代蛇绿岩残片的深入研究, 有助于认识这一时期板块缝合带、碰撞造山带构造格局及演化, 从古洋岩石圈演化研究早期板块作用。华北新太古代蛇绿岩岩类齐全, 保留了豆荚状铬铁矿、地幔橄榄岩类、堆积岩、席状岩墙杂岩、枕状熔岩及其块状硫化物^[20,24,32~34]; 与典型蛇绿岩综合剖面可进行对比, 为系统研究古大洋岩石圈组成及其板块作用创造了条件。

(2)古大洋岩石圈性质及扩张机制: 遵化、辽西等地的豆荚状铬铁矿及地幔构造岩保留丰富的大洋地幔岩结构、构造类型, 记录早期大洋地幔演化的重要信息。作为世界最古老的遵化豆荚状铬铁矿及其地幔构造岩, 可以探讨早期大洋盆地扩张中心原始熔体—上地幔作用以及大洋板块扩张—俯冲过程。另外, 围绕五台、太行等地缝合带内相关的新太古代块状硫化物, 持续开展古海底黑烟囱的深入研究, 可探讨早期海底热水成矿及其生命演化过程。

(3)25 亿年前的前陆盆地与碰撞造山过程: 由于后期剥蚀出露较深层次, 早期造山带研究普遍缺乏比较大地构造学的系统研究, 更多限于造山带概念及模式的探讨。加强五台—太行山深浅层次构造耦合关系分析及造山带单元层次变化研究, 将解决新太古代碰撞造山带构造单元划分、运动学、构造模式等重大问题。恒山、五台、太行等地大量同位素年代学数据积累, 为构造模型完善创造了条件。中浅层次保留了造山带剥蚀沉积及冲断构造, 开展相关前陆盆地沉积及构造运动学分析, 特别是巨厚复理石—磨拉石建造(2.50 Ga)的研究, 将揭示造山—隆升过程。另外, 围绕五台山区沉积地层及构造岩浆事

件的研究,将提出我国太古宙/元古宙地质界线的典型剖面。

(4)最古老超大陆的再造:华北克拉通与其它大陆的地质对比。区域构造对比表明,华北克拉通在新太古代—古元古代,长期与波罗的地盾、东南极克拉通、印度南部克拉通、巴西克拉通等具有构造—岩石—变质的亲缘关系。对于深入再造不同时期超大陆及古板块恢复具有重要意义。

在对华北中部造山带构造格局及其造山作用认识的基础上,应重点分析基底构造格架、蛇绿岩缝合线、构造热事件、前陆沉积地层序列。瞄准 2.50 Ga 造山作用以及随后的裂解事件(2.50~2.40 Ga),在已有地质对比的基础上,重点开展华北与印度南部、波罗的相关造山带的地质对比,极有可能阐明它们之间的亲缘关系,从超大陆的框架中探索华北中部造山带及蛇绿岩缝合线的古板块意义。特别是研究 2.50 Ga 造山事件是否对于 Kenorland 超级大陆的最终拼接具有直接影响。

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)、华北大陆构造演化中美双边研讨会(2004,北京)期间各国代表广泛的学术交流和讨论,特别是 B. Windley, A. Kröner, K. Condie, J. Myers 等教授的建议和评论,对本文成稿也很有帮助。

References[参考文献]:

- [1] BAILEY R C. Gravity-driven continental overflow and Archean tectonics[J]. *Nature*, 1999, 398: 413-415.
- [2] KUSKY T M, POLAT A. Growth of granite-greenstone terranes at convergent margins, and stabilization of Archean cratons[J]. *Tectonophysics*, 1999, 305: 43-73.
- [3] CALVERT A J, LUDDEN J N. Archean continental assembly in the southeastern Superior Province of Canada[J]. *Tectonics*, 1999, 18 (3): 412-429.
- [4] WILDE S A, MIDDLETON M F, EVANS B J. Terrane accretion in the southwestern Yilgarn Craton: Evidence from a deep seismic crustal profile [J]. *Precambrian Research*, 1996, 78: 179-196.
- [5] ERIKSSON K A, KRAPEZ B, FRALICK P W. Sedimentology of Archean greenstone belts: Signatures of tectonic evolution[J]. *Earth Science Reviews*, 1994, 37: 1-88.
- [6] ERIKSSON P G, CONDIE K C, WESTHUIZEN W, et al. Late Archean superplume events: A Kaapvaal-Pilbara perspective[J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, 34: 207-247.
- [7] MIKHAILOV VO, TIMOSHKINA EP, POLINO R. Fore-

- deep basins: The main features and model of formation[J]. *Tectonophysics*, 1999, 307: 345-359.
- [8] COOK F A, VELDEN A J, HALL K W. Frozen subduction in Canada's Northwest Territories: Lithoprobe deep lithospheric reflection profiling of the western Canadian Shield[J]. *Tectonics*, 1998, 18 (1): 1-24.
- [9] JACKSON S L, CRUDEN A R, WHITE D, et al. A seismic-reflection-based regional cross section of the southern Abitibi greenstone belt[J]. *Can J Earth Sci*, 1995, 32: 132-148.
- [10] ABBOTT D, SPARKS D, HERZBERG C, et al. Quantifying Precambrian crustal extraction: The root is the answer [J]. *Tectonophysics*, 2000, 322: 163-190.
- [11] de CELLES P G, GILEST K A. Foreland basin system[J]. *Basin Research*, 1996, 8, 105-123.
- [12] KHAINVE. Structure and Evolution of nappe-fold edifices of the Alpine-Himalayan belt: A comparison[J]. *International Geology Review*, 1996, 38: 374-387.
- [13] ZHANG Qiusheng, YANG Zhensheng, GAO Deyu, et al. *The Archean High-Grade Metamorphic Geology and Golden Deposit in Jinchangyu, Eastern Hebei* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991. 1-5 (in Chinese). [张秋生, 杨振升, 高德玉, 等. 冀东金厂峪地区高级变质区地质与金矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1991. 1-5.]
- [14] WU Jiashan, GENG Yuansheng, SHEN Qihan, et al. *Archean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of Sino-Korea Paleo-Continent* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 105-136 (in Chinese). [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[M]. 北京: 地质出版社, 1998. 105-136.]
- [15] LI Jianghai, QIAN Xianglin, HUANG Xiongnan, et al. Tectonic framework of North China Block and its cratonization in the early Precambrian [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(1): 1-10 (in Chinese). [李江海, 钱祥麟, 黄雄南, 等. 华北基底构造格局及早期大陆克拉通化过程[J]. 岩石学报, 2000, 16(1): 1-10.]
- [16] LI Jianghai, QIAN Xianglin, HOU Guiting. Late Palaeoproterozoic to early Mesoproterozoic tectonic framework and major tectono-thermal episodes of North China: New interpretation of "Lüliang orogeny" [J]. *Earth Sciences—Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(1): 15-20 (in Chinese). [李江海, 钱祥麟, 侯贵廷. "吕梁运动"新认识[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(1): 15-20.]
- [17] WANG Kaiyi, HAO Jie, WILDE S, et al. Recognition to some key geological questions of Wutai-Hengshan from Neo-Archean to Paleoproterozoic areas: Constraints from single-zircon SHRIMP datings [J]. *Geological Sinica*, 2000, 35 (2): 175-184 (in Chinese). [王凯怡, 郝杰, WILDE S, 等. 山西五台山—恒山地区晚太古代—早元古代若干关键地质问题的再认识: 单颗粒锆石离子探针质谱年龄提出的地质制约[J]. 地质科学, 2000, 35(2): 175-184.]
- [18] LI Jianghai, KRÖNER A, HUANG Xiongnan, et al. The

- discovery of the Neoproterozoic mafic dyke swarm in Hengshan and reinterpretation of the previous "Wutai greenstone belt" [J]. *Science in China (Series D)*, 2001 (6): 902-910 (in Chinese). [李江海, KRÖNER A, 黄雄南, 等. 恒山地区变辉长质岩墙群的发现及“五台群”绿岩地层的解体[J]. 中国科学(D辑), 2001 (6): 902-910.]
- [19] LI Jianghai, HUANG Xiongnan, QIAN Xianglin. Current situation in study on the Archean-Proterozoic boundary[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2001, 7(1): 43-49 (in Chinese). [李江海, 黄雄南, 钱祥麟. 太古宙—元古宙界线研究现状[J]. 高校地质学报, 2001, 7(1): 43-49.]
- [20] LI Jianghai, KUSKY T M, HUANG Xiongnan. Archean Podiform chromitites and mantle tectonites in ophiolitic mélange, North China Craton: A record of early oceanic mantle processes[J]. *GSA Today*, 2002, 12(7): 4-11.
- [21] KUSKY T, LI Jianghai. Paleoproterozoic Tectonic Evolution of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 22(4): 383-397.
- [22] LI Jiliang, WANG Kaiyi, WANG Qingchen, et al. Early Proterozoic collision mountain belt in Wutaishan area, China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1990 (1): 1-11 (in Chinese). [李继亮, 王凯怡, 王清晨, 等. 五台山早元古代碰撞造山带初步认识[J]. 地质科学, 1990 (1), 1-11.]
- [23] BAI Jin, HUANG Xueguang, WAGN Huichu, et al. *The Precambrian Crustal Evolution of China* [M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 20-60 (in Chinese). [白瑾, 黄学光, 王惠初, 等. 中国前寒武纪地壳演化[M]. 第二版. 北京: 地质出版社, 1996. 20-60.]
- [24] KUSKY T M, LI Jianghai, TUCKER R D. The Archean Dongwanzi ophiolite complex[J]. *Science*, 2001, 292: 1142-1145.
- [25] GALER S J G, MEZGER K. Metamorphism, denudation and sea level in the Archean and cooling of the Earth[J]. *Precambrian Research*, 1998, 92: 389-412.
- [26] MOORES E M. Pre-1 Ga (pre-Rodinian) ophiolites: Their tectonic and environmental implications[J]. *GSA Bulletin*, 2002, 114 (1): 80-90.
- [27] MARTEN J W. On Archean granites, greenstones, cratons and tectonics: Does the evidence demand a verdict[J]? *Precambrian Research*, 1998, 91: 181-226.
- [28] CARD K D. A review of the superior province of the Canadian shield, a product of Archean accretion[J]. *Precambrian Research*, 1990, 48: 99-156.
- [29] PUCHTEL I S, HOFMANN A W, JOCHUM K P, et al. The Kostomuksha greenstone belt, NW Baltic Shield: Remnant of a late Archaean oceanic plateau[J]? *Terra Nova*, 1997, 9 (2): 87-90.
- [30] BAI Jin. *The Early Precambrian Geology of Wutaishan* [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1986. 1-475 (in Chinese). [白瑾. 五台山早前寒武纪地质[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1986. 1-475.]
- [31] WANG Kaiyi, LI Jiliang, HAO Jie. Late Archean mafic-ultramafic rocks from the Wutaishan, Shanxi Province: A possible ophiolite mélange[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1997, 13(2): 139-151 (in Chinese). [王凯怡, 李继亮, 郝杰. 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[J]. 岩石学报, 1997, 13(2): 139-151.]
- [32] LI Jianghai, NIU Xianglong, HUANG Xiongnan, et al. Podiform chromitites: A key to identify the ancient oceanic lithospheric relics[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(4): 235-246 (in Chinese). [李江海, 牛向龙, 黄雄南, 等. 豆荚状铬铁矿: 古大洋岩石圈残片的重要证据[J]. 地学前缘, 2002, 9(4): 235-246.]
- [33] LI Jianghai, NIU Xianglong, CHEN Zheng, et al. The discovery of podiform chromitite in west Liaoning and its implication for plate tectonics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18 (2): 187-192 (in Chinese). [李江海, 牛向龙, 陈征, 等. 辽西豆荚状铬铁矿的发现及其意义[J]. 岩石学报, 2002, 18(2): 187-192.]
- [34] HUANG Xiongnan, LI Jianghai, NIU Xianglong. Microscopic deformation of the Neoproterozoic oceanic lithospheric mantle: Evidence from the Zunhua Neoproterozoic ophiolitic mélange, North China Craton[J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(5): 495-501 (in Chinese). [黄雄南, 李江海, 牛向龙. 新太古代大洋岩石圈地幔的显微变形探讨——以遵化蛇绿混杂岩带为例[J]. 自然科学进展, 2003, 13(5): 495-501.]
- [35] CHEN Zheng, LI Jianghai, HUANG Xiongnan, et al. Research on the formation mechanism of the nodular texture of Archean podiform chromite: Evidence from podiform chromitite in Zunhua, North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 214-223 (in Chinese). [陈征, 李江海, 黄雄南, 等. 豆荚状铬铁矿豆状结构成因机制探讨——以遵化地区豆荚状铬铁矿为例[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 214-223.]
- [36] KRÖNER A, CUI W Y, WANG S Q, et al. Single zircon ages from high-grade rocks of the Jianping complex, Liaoning Province, NE China[J]. *Journal of Asia Earth Sciences*, 1998, 16(5-6): 519-532.
- [37] ZHOU Meifu, MALPAS J, ROBINSON P T, et al. Crystallization of podiform chromitites from silicate magmas and the formation of nodular textures[J]. *Resource Geology*, 2001, 51: 1-6.
- [38] MISCIA K C. *Understanding Mineral Deposits* [M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000. 238-496.
- [39] de WIT M J. On Archean granites, greenstones, cratons and tectonics: Does the evidence demand a verdict[J]? *Precambrian Research*, 1998, 91: 181-226.
- [40] FOLEY S F, BUHRE S, JACOB D E. Evolution of the Archaean crust by delamination and shallow subduction[J]. *Nature*, 2003, 421: 249-252.
- [41] HOFMANN A W. Early evolution of continents[J]. *Sci-*

- ence, 1997, 275 : 498-499.
- [42] HANDLER M R, BENNETT V C. Constraining continental structure by integrating Os isotopic ages of lithospheric mantle with geophysical and crustal data: An example from southeastern Australia[J]. *Tectonic*, 2001, 20 (2): 177-188.
- [43] ARAI S. Origin of podiform chromitites[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 1997, 15: 303-310.
- [44] MYERS J S, KRÖNER A. Chapter 17 Archean tectonics [A]. HANCOCK P L. *Continental Deformation* [M]. Oxford: Pergamon Press, 1994. 355-368.
- [45] CONDIE K C. Episodic continental growth models: Afterthoughts and extensions [J]. *Tectonophysics*, 2000, 322: 153-162.
- [46] WILLIAMSON H, HOFFMAN P F, LEWRY J F, et al. Anatomy of North America: Thematic portrayals of the continent [J]. *Tectonophysics*, 1991, 187: 117-134.
- [47] HEAMAN LM. Global mafic magmatism at 2.45 Ga: Remnants of an ancient large igneous province [J]. *Geology*, 1997, 25: 299-302.
- [48] CATUNEANU O, ERIKSSON P G. The sequence stratigraphic concept and the Precambrian rock record: An example from the 2.7~2.1Ga Transvaal Supergroup, Kaapvaal craton [J]. *Precambrian Research*, 1999, 97: 215-251.
- [49] ASPLER L B, CHIARENZELLI J R. Two Neoproterozoic supercontinents? Evidence from the Paleoproterozoic [J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 120: 75-104.
- [50] CONDIE K C. *Episodic Growth of Juvenile Crust and Catastrophic Events in the Mantle* [M]. Memoirs of National Institute of Polar Research, Special Issue, 1998, 53: 1-7.
- [51] DALZIEL I W D, LAWVER L A, MURPHY J B. Plumes, orogenesis, and supercontinental fragmentation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 178 : 1-11.
- [52] SHEN Qihan, WU Jiashan, GENG Yuansheng. Evolutionary stages of the Archean continental crust in China [J]. *Geosciences*, 1999, 13(2): 193-194 (in Chinese). [沈其韩, 伍家善, 耿元生. 中国太古宙陆壳演化阶段划分 [J]. *现代地质*, 1999, 13(2), 193-194.]
- [53] LI Jianghai, KRÖNER A, QIAN Xianglin. Tectonic evolution of a early Precambrian high-pressure granulite belt in the North China Craton [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74 (2): 246-258.
- [54] LI Jianghai, HOU Guiting, QIAN Xianglin, et al. The constraint for the supercontinental cycles: Evidence from Precambrian geology of North China Block [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(2): 177-186 (in Chinese). [李江海, 侯贵廷, 钱祥麟, 等. 华北克拉通对前寒武纪超大陆旋回的基本制约 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(2): 177-186.]
- [55] BLEEKER W, DAVIS W J. The 1991-1996 Slave Province Natmap Project: Introduction [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1999, 36: 1033-1042.
- [56] MAZUMDER R, BOSE P K, SARKAR S. A commentary on the tectono-sedimentary record of the pre-2.0 Ga continental growth of India vis-à-vis a possible pre-Gondwana Afro-Indian supercontinent [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2000, 30 (2): 201-217.
- [57] VOGEL D C, VUOLLO J I, ALAPIETI T T, et al. Tectonic, stratigraphic, and geochemical comparisons between ca. 2 500~2 440 Ma mafic igneous events in the Canadian and Fennoscandian Shields [J]. *Precambrian Research*, 1998, 92 : 89-116.
- [58] SUN Dazhong. The division in age of archaean with the relative questions [J]. *Overseas Precambrian Geology*, 1991 (1): 1-6 (in Chinese). [孙大中. 太古宙的时代划分及其有关问题——参加国际前寒武纪地层分会第九次会议纪要 [J]. *国外前寒武纪地质*, 1991 (1): 1-6.]
- [59] LI Jianghai, ZHAI Mingguo, QIAN Xianglin, et al. The geological occurrence, regional tectonic setting and exhumation of late Archean high-pressure granulite within the high-grade metamorphic terrains, north to central portion of North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, 14(2): 176-189 (in Chinese). [李江海, 翟明国, 钱祥麟, 等. 华北中北部晚太古宙高压麻粒岩的地质产状及其出露的区域构造背景 [J]. *岩石学报*, 1998, 14(2): 176-189.]
- [60] SHEN Baofeng, LUO Hui, LI Shuangbao, et al. *Greenstone Geology and Mineralization in North China Craton* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. 1-73 (in Chinese). [沈保丰, 骆辉, 李双保, 等. 华北陆台太古宙绿岩带地质及成矿 [M]. 北京: 地质出版社, 1994. 1-73.]
- [61] HUANG Xiongnan, LI Jianghai, KRÖNER A, et al. Structural analysis on the Neoproterozoic high-pressure granulite-bearing terrain in the central Hengshan Mountain, North China [J]. *Geological Review*, 2003, 49(2): 138-145 (in Chinese). [黄雄南, 李江海, KRÖNER A, 等. 恒山中段新太古代高压麻粒岩区的构造特征 [J]. *地质论评*, 2003, 49(2): 138-145.]
- [62] LIU Shuwen, LI Jianghai, PAN Yuanming, et al. An Archean continental block in the Taihangshan and Hengshan regions: Constraints from geochronology and geochemistry [J]. *Progress in Natural Science*, 2002, 12(8): 826-833 (in Chinese). [刘树文, 李江海, 潘元明, 等. 太行山—恒山太古宙古老陆块: 年代学和地球化学制约 [J]. *自然科学进展*, 2002, 12(8): 826-833.]
- [63] GENG Yuansheng, WAN Yusheng, SHEN Qihan. Early Precambrian basic volcanism and crustal growth in the North China Craton [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(2): 199-208 (in Chinese). [耿元生, 万渝生, 沈其韩. 华北克拉通早前寒武纪基性火山作用与地壳增生 [J]. *地质学报*, 2002, 76(2): 199-208.]
- [64] HALLS H C, LI Jianghai, DAVIS D. The first dated Proterozoic palaeomagnetic pole from the North China Craton, and its relevance to paleocontinental reconstruction [J]. *Geophysical Journal International*, 2000, 143: 185-203.

Neoarchean plate tectonic evolution of North China and its correlation with global cratonic blocks

LI Jiang-hai¹, NIU Xiang-long¹, T. KUSKY², A. POLAT³

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

2. Department of Earth and Atmospheric Sciences, Saint Louis University, St. Louis, MO 63103;

3. Department of Earth Sciences, University of Windsor, Windsor, ON, Canada N9B 3P4)

Abstract: The plate tectonic theory represents a major scientific achievement in the twentieth century. The main question in the new century is how to develop the theory to advance the study of geodynamics. In this paper, we attempt to briefly review the research progress on granite-greenstone terrains, high-grade gneiss terrains, Archean oceanic relicts, orogeny, plate tectonics, and supercontinents. By considering this global research, the outstanding problems in understanding the early geological evolution of North China craton may be summarized as follows: tectonics of Neoarchean orogenic belts, collisional process and coupling of basin and range. Through research on Neoarchean ophiolite complexes, especially podiform chromites and pyrolites, it is now possible to document the oceanic lithosphere, oceanic spreading, and convective processes. Accordingly, the Neoarchean plate boundaries and interaction between oceanic and continent plates can be studied. Furthermore, understanding the correlations of central orogenic belt of North China with other continents may be helpful to recognize the assembly of North China craton with early supercontinent or supercraton.

Key words: plate tectonics; Archean; North China; collisional belt; supercontinent

异常压力封存箱在油气成藏中的作用

田世澄¹, 陈永进¹, 施凤成², 刘传虎²

(1. 中国地质大学 能源地质系, 北京 100083; 2. 中国石油化工股份有限公司 胜利油田新疆勘探公司, 山东 东营 257015)

1 异常压力封存箱的特征

异常压力封存箱(compartment)又叫异常压力封隔体或压力封隔体,也有人译为封存单元。异常压力封存箱的成藏作用有其独特的特征。

作者采用测井、地震速度谱预测压力技术揭示了准噶尔盆地中部孔隙流体压力分布的特征。其总体可分为上部静水压力带、旋回式压力分布带、异常压力封存箱、下部静水压力带4个带。封存箱有以下几个特征:首先,异常压力封存

箱由三部分组成:上部压力过渡带,压力系数由1.3增至1.5(或1.6);中部为异常压力封存箱体,压力系数大于1.5~1.6;下部压力过渡带压力系数由1.5~1.6降至1.3(或1.2)。第二,构成封存箱的上下封闭层和封存箱体的岩性不均一,是大套的泥岩或砂泥页岩层,或者是经成岩作用形成的致密岩石,侧面为矿化的断层或断裂带等,它可以是顺层或者是穿层的。封隔层厚度可达300~500 m。第三,压力不均一。不仅上下封闭层是一个压力梯度带,封存箱体内压