

大陆动力学的物质演化研究方向与思路

翟 明 国^{1,2}

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

2. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘 要:大陆动力学是在当代板块构造新的发展基础上提出的重要科学问题和研究领域。它从大陆尺度研究大陆形成演化和动力学机制等基本问题,其核心是把大陆作为一个独立的动力学系统来研究,通过研究大陆形成过程和演化历史等各种基本问题来阐明大陆与整个地球系统的相互作用。这里强调的是把大陆的研究放到演化的视野上来观察和认识。地球最早的物质以及之后的演化都记录在大陆岩石上,因此,大陆的物质演化无疑是解开大陆动力学之谜的基础。在国家自然科学基金委员会-中国科学院学部联合专项基金项目“板块构造与大陆动力学发展战略研究”的支持下,提出了大陆动力学的物质演化研究方向与思路。

关键词:大陆动力学;板块构造;岩石学;演化;地壳;花岗岩;地热梯度;洋陆转换带

中图分类号:P311.2

文献标志码:A

New Research Interests and Concept of Material Evolution for Continental Dynamics

ZHAI Ming-guo^{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 Continental Dynamics, Northwest University,

Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: Continental dynamics is presented and defined on basis of research advances of modern plate tectonics. It emphasizes that continent is going in an independent dynamic system. Continental dynamics focuses on fundamental issues of continental formation and evolution and its dynamic mechanism in continent scale, and further clarifies relation between continent and whole earth's system. Here we insist a research field of vision that continent is evolving. Continental rocks record materials on the earth from earliest up to now, and hereafter tectonic imprints on them. Therefore, the study on continental material evolution is a key to understand continental dynamics. This paper is a part of results of “slab structure and continental dynamics strategic research” project supported by National Natural Science Foundation of China and Academic Division of Chinese Academy of Sciences.

Key words: continental dynamics; slab structure; petrology; evolution; crust; granite; geothermal gradient; ocean-continental transition zone

0 引 言

板块构造是 20 世纪人类最重要的自然科学理

论贡献之一,并迅速成为地球科学的主流理论。板块构造很好地解释了大洋问题,较合理地解释了洋陆过渡带,但是在解释大陆问题时遇到困难,有人称

收稿日期:2015-05-28

基金项目:国家自然科学基金委员会-中国科学院学部联合专项基金项目(L1222034)

作者简介:翟明国(1947-),男,河南济源人,中国科学院地质与地球物理研究所研究员,博士研究生导师,中国科学院院士,理学博士,
E-mail:mgzhai@mail.iggcas.ac.cn.

之为“板块难以登陆”。大陆动力学(Continental Dynamics)是 1989 年在美国地质文献中出现的新名词,是在当代板块构造新的发展基础上提出的重要科学问题 and 研究领域。大陆动力学从大陆尺度研究大陆形成演化和动力学机制等基本问题,其核心是把大陆作为一个独立的动力学系统来研究,它通过研究大陆形成过程和演化历史等各种基本问题,阐明大陆与整个地球系统是如何相互作用的。

为了更好地研究大陆动力学,2012 年中国科学院学部与国家自然科学基金委员会联合设立了由张国伟院士和杨文采院士负责的“板块构造与大陆动力学”学科发展战略研究项目。翟明国院士是该项目岩石与地球化学组的负责人,本文即是该项目的一部分研究成果。

1 总体描述

(1)岩石是大陆演化的物质记录,记录了大陆的起源、过程、变化和现状。地球化学和同位素年代学是大陆物质演化研究的重要手段,是现代分析测试技术与地球科学融合交叉的范例之一。岩石学以及地球化学与构造地质学、地史学(含地层古生物)、地球物理学的结合,使得地球科学家们从成分、状态、时间、空间等多维尺度进行大陆演化的动态变化体系研究成为可能。

(2)固体地球圈层的物质演化研究明确地显示出大陆演化的时控性与不可逆性。经典地质律条“将今论古”的“论”字将不再是简单的“类比”,而应强调比较学的科学内涵,现在的比较学研究虽然是初步的,但已经前瞻性地观察到大陆和地球从“生”到“死”的演化特征及其不可逆转的发展规律。

(3)现代地球观指导下的大陆物质演化研究有可能进一步揭示大陆自身的演化以及和海洋协同演化的奥秘。以花岗岩类的物质演化和变质温压体系的差异入手,探寻大陆从古到今演化的动力学历程,探讨大陆内部的运动以及陆壳物质/结构的变化是否受控(继承)于大陆形成以来的固体大陆岩石圈体系,分析发生在现代板块边缘或洋陆转换带的构造作用对大陆的影响与改造的方式。这些研究是破解“板块登陆”难题的钥匙。

(4)固体地球科学(特别是大陆地质科学)研究的是人类居住和赖以生存的地球大陆圈层,它的实践性和综合性是其他任何自然科学都不能比拟的。大数据时代给大陆地质的研究带来巨大冲击、挑战和空前机遇。

2 重要研究方向

2.1 大陆物质成分演化

虽然一直存在“先有洋,还是先有陆”的争论,但是目前地球上发现的最古老地壳物质和岩石都是陆壳的。大陆的物质成分有从富钠质到富钾质陆壳的鲜明运动轨迹和发展历史,显示了陆壳成熟化的多阶段过程。很明显,陆壳的形成、生长、稳定化和后来的洋陆相互作用记录的海陆变迁是大陆演化乃至地球演化的核心内容。

2.2 大陆热体制演化

地球早期是炽热的星球已经没有大的争议,地球随着放射性物质的衰变必将成为冷却的类月星球。地球热体制的演变伴随着地球固体圈层的物质分异状态、大陆岩石类型-组合的变化。地球热状态决定了不同深度地壳蠕变和刚性特征,必然决定了它们的运动方式和运动规律。现代岩石学已经能够利用岩浆岩和深俯冲捕获的深部岩石探针,以及利用变质岩的变质历史来解读不同地质时期、不同深度地壳和岩石圈地幔的热状态。

2.3 大陆构造演化

大陆物质成分以及热体制的演化无疑为解开大陆构造机制演化难题奠定了根基。从陆核形成到巨量陆壳生长和克拉通化,再到现代刚性洋陆体制,大陆经历了前板块构造、初始板块构造、现代板块构造,也必将在未来走向后板块构造。地质历史上不同构造体制的动力学机制、板块构造的起始时间、板块构造对原有构造体制(大陆内部)的影响、是否存在大洋和大陆各自的支配性构造体制以及洋陆转换带的构造模型,都是大陆构造演化的重要课题。

3 关键科学问题

3.1 陆壳起源问题

(1)初始陆壳与古陆核:地球上最古老的岩石;初始地壳的形成时代;先有洋,还是先有陆;早期大洋的成分与状态。

(2)早期陆壳的物质成分:月球斜长岩与早期岩浆分异事件的启示;英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩(Tonalite-trondhjemite-granodiorite,简称 TTG)岩浆与成因;TTG 片麻岩随时代的成分差异与原因;晚太古代巨量陆壳增生事件。

(3)早期陆壳的生长方式与稳定化:多期幕式陆壳生长;绿岩带与高级区;克拉通化与大陆岩石圈形成;太古宙/元古宙界限的地质意义;由钠质到钾质

的陆壳成熟化。

(4)大陆地幔演化及壳幔相互作用:硅酸盐地球与岩浆海;前寒武纪大陆地幔地球化学;大陆地幔与大洋地幔的成分差异;克拉通型地幔与下地壳耦合;大陆地幔随地质时代的差异与演化。

3.2 大陆热状态与热体制

(1)地热梯度与地壳厚度:早期热状态;地热梯度随时代的变化规律;早期地壳厚度与结构;克拉通岩石圈的不稳定和减薄机制。

(2)麻粒岩问题:地体麻粒岩的成因与构造样式;麻粒岩地体的折返模式与稳定克拉通的下地壳圈层;晚新太古代—古元古代热状态与高温高压变质带;刚性岩石圈的圈层与热体制。

(3)地壳与岩石圈地幔的热状态:早期地壳的黏滞度与应变;现代板块边界的岩石热结构;超深陆壳俯冲的变质记录;超高压岩石的折返与地质意义;超高压变质岩是否只发育在小尺度陆-陆造山带及其原因;俯冲陆壳和洋壳的循环;岩石圈地幔与地壳热状态的差异与相互作用。

(4)地球中年期——承前启后的关键地质过程:地球中年期新概念;地球环境构造稳定期;板内岩浆与壳幔作用;非造山岩浆与矿产;地球化学参数与中年期大洋;超过 1 000 Ma 的特殊地质过程;承前启后的地球演化。

3.3 地球历史上的构造机制转变

(1)科马提岩成因与地幔柱:科马提岩的成因与时代特征;大陆裂谷与元古宙非造山岩浆组合;科马提岩-TTG 岩石组合与钙碱性火山岩-钾质花岗岩组合的演化与控制因素。

(2)地壳层内逆掩与板块俯冲的差异和机制:早期地壳层内逆掩构造;镁铁质—超镁铁质火山岩的二次熔融;高级区穹窿;绿岩带与蛇绿岩问题;高压高温麻粒岩与超高温麻粒岩的温压梯度与抬升速率。

(3)构造机制转变:早期板块构造的起始时代与识别特征;前板块构造与初始板块构造的转变;大氧化事件与条带状铁建造(BIF)的时代性;是否在地质历史上曾有多個超大陆旋回及其界定。

3.4 花岗岩与地学思维革命

大陆物质的核心问题是花岗岩问题,但是花岗岩不能直接从地幔结晶出来,也难以用岩浆分异结晶来解释巨量花岗岩地壳的形成。花岗岩所凝聚的科学问题是对板块构造最大的挑战。将花岗岩从岩浆岩范畴跳跃到陆壳结构的范畴是地学思维的

革命。

(1)非板块边界的花岗岩成因:花岗岩产状及其与地壳深度的关系;混合岩与陆壳活化;地质时代与花岗岩系列演化的成因联系与控制因素;大火成岩省与花岗岩省的非同步性。

(2)与板块边界相关的花岗岩成因:壳幔过程与花岗岩浆;花岗岩元素丰度与地质构造环境的非耦合性;火成岩研究方法对花岗岩研究的局限性及其原因;洋壳的部分熔融及其相图;超临界流体的地质作用。

3.5 大陆与大洋的差异演化与洋陆过渡带

洋陆板块的相互作用是板块构造的经典,是将大陆与大洋联系的纽带。大洋板块对大陆板块的俯冲以及俯冲地壳的拆沉是洋陆物质和壳幔物质循环的证据。洋陆过渡带(转换带)的研究(特别是摆脱目前简单的弧-沟-盆体系的概念,深入探索在俯冲带大陆一侧的系统地质过程)是理解板块构造的切入点。

(1)洋陆边界的岩浆活动:洋壳俯冲-岛弧-弧后盆地系统;俯冲带大陆侧远程效应;陆-陆俯冲带岩石相变与下沉、抬升问题。

(2)洋陆转换带的物质循环:显生宙造山带的地壳结构;俯冲大洋岩石圈对数百千米之上大陆岩石圈的影响及其方式;拆沉作用以及陆壳循环的证据。

(3)远洋沉积物的物质演化与洋陆变迁的关系:BIF 沉积的地球环境;黑色页岩的起始时代和地质意义;孔兹岩系的时代与变质特征。

3.6 矿产资源与大陆同步演化

矿产资源作为特殊的岩石,不仅对国民经济意义重大,也敏感地记录着地球系统的演化,是最具代表性的见证者。

(1)成矿作用的时代专属性。

(2)重大前寒武纪地质事件与成矿:3.8 Ga 至古元古代的 BIF 沉积及其构造意义;地球环境探针-地质演化中的铁成矿系统;大氧化事件和石墨、铁、硼成矿系统;裂谷与特殊成矿;地壳(水)参与循环和铅爆发成矿。

(3)板块构造启动后的斑岩矿床:斑岩矿床形成的最早地质时代;Mo-Cu 斑岩成矿的核心科学问题;古生代中亚(兴蒙)和秦岭造山带 Mo-Cu 斑岩成矿与 Cu 斑岩成矿的安第斯型大洋俯冲带的物质循环差异。

3.7 研究中国大陆的先导性课题

特殊的中国大陆处于三大造山带的围限下,地

质问题很多,先导性研究有可能对全球大陆研究起到示范作用。

(1) 华北克拉通多期陆壳演化:多期大陆增生的机制以及 TTG 片麻岩区与绿岩带的关系;华北克拉通 2.5 Ga 克拉通化过程以及与超级克拉通的联系;古元古代高压-超高温变质岩的构造背景以及板块构造的启动;中—新元古代的持续伸展与多期裂谷事件的构造意义以及超大陆旋回;华北克拉通中生代构造转折与壳幔交换。

(2) 华南陆内造山:江南古陆与华夏问题;古生代陆内造山带;南岭花岗岩区与陆壳改造;太平洋板块对东南沿海的影响。

(3) 中央造山系多阶段大陆深俯冲:多阶段大陆造山;小陆块与深俯冲;超高压岩石的折返难题;陆壳循环与底垫、拆沉。

(4) 兴蒙增生型造山:陆壳双向增生;具地幔同位素特征的钾质花岗岩成因;特殊斑岩型成矿作用及其与安第斯成矿带的比较。

(5) 青藏高原——正在碰撞的大陆。

(6) 峨眉山与塔里木地幔柱。

4 研究热点描述

4.1 大陆地壳形成、生长和再造

大陆地壳形成、生长和再造是大陆岩石圈研究中最受重视的前沿领域之一。大陆地壳生长的理论和研究内容主要包括陆壳起源和成因、生长和演化过程、生长速率和机制以及形成和演化模式。近年来,国外通过精确的年代学和地球化学研究在地球早期历史、陆壳物质来源、陆壳增长期次和主要增生方式、物质的再循环和地球化学动力学等方面都取得明显进展,并向着地壳生长的半定量和定量模式化研究方向发展。

根据地球上原始地幔样品以及月球和太阳系其他星球陨石的定年,推测地球的年龄约为 4.57 Ga。目前,地球上发现的最古老岩石不是斜长岩,而是 TTG 片麻岩^[1]。显生宙以来,类似 TTG 的岩浆虽然可在大陆岩浆弧的根部带产生(如埃达克岩岩浆),但它们与太古宙 TTG 岩石在地球化学方面有明显差别,数量也较少。由此也就产生了“先有洋壳,还是先有陆壳”的争论,然而地球上至今没有公认的大于 1.0 Ga 的典型洋壳被发现。

太古宙 TTG 岩石的成因问题是最前沿也是最困难的科学问题。科马提岩浆的结晶分异晚期虽然可以产生 TTG 质岩浆,但要分异出如此大规模的

TTG 岩石是很困难的。目前,较为流行的模式有:以地幔柱为基本模型,造成大火山岩省镁铁质—超镁铁质岩石的部分熔融;以板块构造为基本模型,洋壳俯冲导致地幔楔部分熔融产生玄武质岩浆,所形成的玄武质岩石在相对高压条件下经历二次重熔形成 TTG 岩石,或俯冲洋壳直接发生分布熔融形成类似于埃达克质的岩浆。然而,板块构造体系下的岩浆弧模式不能很好地解释太古宙 TTG 岩石的巨量产出规模和缺少现代岩浆弧增生的特征。最早的陆壳岩石应该形成在 4.0 Ga 之前,而后约 3.8 Ga、约 3.3 Ga、约 3.0 Ga、约 2.8 Ga 至 2.7 Ga、约 2.6 Ga 至 2.5 Ga 可能是陆壳增生的几个峰期。

太古宙绿岩带常见的火山岩组合是超基性科马提质岩石、玄武岩及英安岩和流纹岩构成的双峰式火山岩组合,而现代岩浆弧的特征火山岩组合——安山岩在太古宙绿岩带火山岩组合中所占比例却很少,这是板块构造理论在解释太古宙地壳形成方面所面临的一个挑战。此外,现代板块构造也不能圆满解释太古宙绿岩带中科马提岩的成因。科马提岩特征与现代洋岛玄武岩(OIB)相似,其较高的 MgO 质量分数(高于 18%)要求其地幔熔融程度至少达到 40%,形成温度在 1 600 °C 之上。这么高的形成温度在俯冲带环境很难达到。

值得指出的是,古老的 3.8 Ga 西格陵兰 TTG 片麻岩伴生有 3.7~3.8 Ga 的沉积岩和基性火成岩^[2]。沉积岩中代表性的岩石组合是条带状铁建造,它们是在有生物参与氧化的环境下形成的化学沉积岩,说明在 3.8 Ga 之前已有水的存在,并在地质过程中发挥着重要作用。尽管一些科学家坚信能够找到大于 2.5 Ga 的洋壳,但大洋的证据至今还没有确定。也有一些科学家提出古老的大洋组成和现在大洋可能存在很大的差别,而且大陆是在初始陆壳、陆块之间的小型海盆间完成大陆岩石圈的建立,因此,可能与现代洋壳很难从岩石学和地球化学角度进行比对。

将 2.5 Ga 作为太古宙与元古宙的界限,其中的含义还远远没有揭示。此后的地球在 2.2~2.4 Ga 期间曾有一个 200~300 Ma 的静止期,然后进入氧化的地球环境,并且开始进入类似于显生宙的洋陆相互作用的板块构造体制。

中国对该项研究刚刚起步,还在跟踪和模仿阶段。以往的研究主要是从古老年龄或同位素地球化学和年代学示踪角度探讨地壳增长期次。由于种种原因,不少年龄数据所代表的地质意义存在较多疑

问。华北克拉通是世界上前寒武纪事件记录最全的古老克拉通之一,中国学者有条件在该领域做出一定贡献。

4.2 TTG 片麻岩与早期陆壳增生

TTG 片麻岩组合是指主要由英云闪长岩、奥长花岗岩和花岗闪长岩类岩石经过变质变形后形成的片麻岩。

TTG 片麻岩主要由富钠的斜长石(钠长石/奥长石)和石英组成,含有少量角闪石、黑云母和钾长石等。其岩石化学特征是:SiO₂ 含量(质量分数,下同)为 64%~75%;CaO 含量变化较大,为 1.5%~4.5%;Na₂O 含量为 3%~7%;K₂O 含量小于 2.5%,但通常小于 2%; $w(K_2O)/w(Na_2O)$ 值小于 0.5; $w(FeOT)+w(MgO)$ 值小于 3.4%, $w(FeOT)/w(MgO)$ 值为 2~3, Mg[#] 值小于 45。据 Al₂O₃、SiO₂ 含量将 TTG 片麻岩分为高铝和低铝两类。TTG 片麻岩具有微量元素高 $w(La)_N/w(Yb)_N$ 值(大于 15)和 $w(Sr)/w(Y)$ 值(大于 20)、高 Sr 含量(大于 300×10^{-6})、低重稀土元素含量(Yb 含量小于 2×10^{-6})的特征;Eu 和 Sr 无异常或正异常;TTG 片麻岩还具有富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Sr)和亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Ti)、低相容元素含量(Ni 含量低于 18×10^{-6} , Cr 含量低于 40×10^{-6})的特征。绝大多数太古宙 TTG 片麻岩都具有正 ϵ_{Nd} 、 ϵ_{Hf} 值以及略高于地幔的氧同位素比值($\delta(^{18}O)$)特征。太古宙 TTG 片麻岩成分不仅有一定的变化范围,而且随着时间演化有一定的演变趋势。从太古宙早期到晚期,TTG 片麻岩 SiO₂ 含量有降低的趋势,但 $w(CaO)+w(Na_2O)$ 值、 $w(MgO)$ 值、Mg[#] 值、 $w(Sr)$ 值、 $w(Ni)$ 值、 $w(Cr)$ 值和稀土元素含量都有升高的趋势。其中, $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量, $w(\cdot)_N$ 表示元素含量球粒陨石标准化后的值。

全球出露的太古宙克拉通主要由长英质片麻岩组成。平均来看,长英质片麻岩超过太古宙地壳面积的 2/3^[3-4]。同位素地球化学资料证明,许多 TTG 片麻岩代表由地幔新生长出来的陆壳。因此,大陆地壳生长问题在很大程度上是 TTG 片麻岩地体的成因问题。从某个角度讲,大陆形成之谜可以简化为 TTG 片麻岩形成之谜。

玄武岩岩浆的分离结晶不可能形成巨量的 TTG 片麻岩而没有相对应数量的其他类型岩石(如闪长质岩石);如果是简单的分离结晶,那么会有比 TTG 片麻岩更多的超镁铁质残留相。地幔橄榄岩部分熔融则被证明只能形成玄武岩或者玄武安山质

岩石,即使是极低的部分熔融产生少量长英质熔体,也很难获得与 TTG 片麻岩一样的微量元素特征。虽然 TTG 片麻岩氧同位素以及流体活泼元素显示出 TTG 片麻岩曾经经过低温热水过程,但是仅仅是沉积物硬砂岩的部分熔融,很难产生 TTG 片麻岩这么富钠的岩石类型。因此,镁铁质岩石在高压条件下部分熔融形成 TTG 片麻岩是目前最为流行的成因解释,其难点是早前寒武纪主要火山岩是科马提岩-玄武岩组合,成分与目前建模的玄武岩不同,当时的地热梯度、流体状态等也不相同。特别令人难解的是,在 TTG 岩石中至今没有发现过任何镁铁质岩石熔融残留相的保留。到目前为止,关于 TTG 岩石的形成条件和构造背景一直都在探讨和争辩当中,很难确定哪一种模式能够完全合理地解释 TTG 岩石的成因以及早期地球的动力学过程^[5-7]。

今后需要进一步研究的方向和内容包括:①华北克拉通多期 TTG 片麻岩的形成机制;②增加 TTG 岩石系统的地球化学研究,对比晚太古代两期 TTG 岩石的特征、物质来源以及形成的构造背景;③将太古宙高级区-绿岩带以及镁铁质—超镁铁质岩(科马提岩)的岩石组合与 TTG 岩石的形成作为陆壳演化的基本物质组成统一起来,理解大陆形成中的元素迁移和重组规律;④依据地球早期的热状态及动力学过程,通过实验岩石学以及数值模拟试验,探讨太古宙 TTG 岩石的形成条件及背景。

4.3 麻粒岩与早前寒武纪地壳热体制

前寒武纪地壳要比现今热,地热梯度可能为每千米 26℃~30℃。太古宙古陆的主要岩石构造样式是穹隆状麻粒岩-片麻岩地体(高级区)被向斜状低级变质—未变质绿岩带围绕。这与显生宙造山带-克拉通的构造格局完全不同。太古宙麻粒岩的变质压力大多在中压变质的范围内(低于 10.0 GPa),温度大多在(800±50)℃,位于矽线石稳定区。即使如此,太古宙麻粒岩形成的深度也在 25~30 km 之间。太古宙高级区的岩石大致有 3 类,即 TTG 片麻岩、辉长岩以及变质表壳岩。表壳岩需要有从地表进入地壳深部的构造机制,但是作为可能是造山带的绿岩带变质很浅,说明岩石没有进入深部地壳,因此,穹隆状、面状分布的太古宙麻粒岩地体俯冲模式很难建立。目前已有重力反转、地幔柱加逆掩断层等多种假说。麻粒岩地体的成因与 TTG 片麻岩的形成并称为陆壳早期演化的两大难题。

翟明国等率先发现华北克拉通存在高温高压

(HT-HP)麻粒岩和高温—超高温(HT-UHT)麻粒岩,并将它们视为探讨早前寒武纪大陆演化和早期板块构造的关键课题^[8-14]。它们的变质大致可以分为峰期和中压麻粒岩(角闪岩)退变质期,变质年龄分别为 1.92~1.98 Ga 和 1.4~1.7 Ga。HT-HP 麻粒岩主要是含石榴石的基性麻粒岩,以透镜体或强烈变形的岩墙状出露于片麻岩中。HT-UHT 麻粒岩主要是富铝变质沉积岩系,俗称孔兹岩系,其中有含假蓝宝石和尖晶石等矿物组合,指示部分岩石的变质温度超过 900 °C。研究表明:①两类麻粒岩在变质的峰期温度和压力上有很大的重叠区间,都经历了一个近等温—略升温的降压变质;②两类麻粒岩很有可能在峰期和随后的降压变质阶段是同时的或有关联的;③HT-HP 和 HT-UHT 麻粒岩的分布特征是线状或面状分布,仍有待进一步查明;④高级变质的麻粒岩代表了华北克拉通的最下部地壳,其变质的温压体系以及岩石的刚性程度、分布特征、岩石组合以及抬升速率等具有与显生宙明显的不同。即使是高压麻粒岩,也属于中压变质相系。两种麻粒岩的地温梯度为每千米 16 °C~22 °C,孔兹岩、假蓝宝石麻粒岩的地热梯度均为每千米 20 °C~28 °C,远高于显生宙造山带的每千米 6 °C~16 °C,其抬升速率为 0.33~0.5 km·Ma⁻¹(每年 0.33~0.5 mm),远低于喜马拉雅造山带的抬升速率(每年 3~50 mm)和大别山含柯石英榴辉岩的抬升速率(每年 3~5 mm)。

研究高级区 and 高压麻粒岩的核心问题仍然是高级区 and 高压麻粒岩的出露机制及其构造背景。从地球化学研究角度,可能有两个方面比较重要:

(1)高级区侵入岩和变质表壳岩的岩石成因与构造背景。岩石成因的揭示是认识这些岩石形成构造背景的重要方面。近二三十年来,将高级区侵入体及变质表壳岩与现今板块构造体制下形成的岛弧或者大陆边缘弧岩浆岩系列进行对比,取得了突出的进展。然而,这些研究仍然没有很好地揭示为什么高级区的岩石单元与现今板块构造体制下的岩石系列存在差异。实际上,这些差异一方面可能与早期热流体制有关,另一方面也可能受控于早期不同于现今的构造体制。因此,一方面需要加强早期热流体制下岩浆岩成因和实验岩石学模拟研究,另一方面需要通过解析高级区与低级区以及高级区不同岩石单元之间的成因联系,解析早期构造背景。

(2)高压麻粒岩变质 P-T-t 轨迹的重建与抬升机制。高级区岩石 P-T-t 轨迹的恢复是揭示抬升过

程的关键。存在的问题包括:①变质峰期条件的限定;②峰期前变质过程的反演;③不同变质阶段时代的确定;④温压计校准与热力学参数的更新;⑤变质岩的蠕变强度与应变研究。这些课题都是多学科交叉研究的重要研究方向。

基于大量的岩石学、地球化学和构造地质学研究,一些研究者认为板块构造或地幔柱构造,或者两种构造共同作用是控制高级区 and 高压麻粒岩的动力学背景,相关的地球化学工作非常多。然而,另有研究表明,高级区的整体抬升很难通过现今陆-陆碰撞的模式得到解决,而可能与重力均衡、地幔上涌或者其他过程有关。两类麻粒岩是否有成因联系是今后研究中非常值得注意的问题,深入研究将会对华北克拉通早期地壳演化和构造、动力学机制提供丰富的资料和证据。此外,麻粒岩地体的蠕变强度与应力状态研究是地壳俯冲与抬升机制的重要限制因素,而中国目前对此基本没有系统展开研究。

4.4 大陆地幔演化及其地球化学特征

大陆岩石圈的形成与保存过程一直是固体地球科学重要的前沿科学问题。根据地球早期分异理论^[15-19],初始地壳(玄武岩壳)是原始地幔经过高程度部分熔融形成的,其易熔组分(硅、铝、钙、铁、全碱)喷出地表形成了地壳,而其难熔的橄榄岩部分就构成了岩石圈地幔。因此,前寒武纪大陆克拉通型岩石圈地幔应具有如下特征:①岩石圈年龄老,厚度大,通常大于 200 km;②岩石圈主要由难熔的金刚石-石榴石-尖晶石相方辉橄榄岩和贫单斜辉石的二辉橄榄岩组成,其中橄榄石具有高的镁橄榄石分子,故岩石圈地幔(密度约为 3.0 g·cm⁻³)相对于下伏软流圈(密度约为 3.35 g·cm⁻³)轻,这就是古老克拉通型岩石圈能够长期稳定存在的根本原因;③地温梯度低,即具有典型的前寒武纪地盾区地温曲线;④在地球物理特征上岩石圈具有高的纵波速度;⑤在同位素组成上岩石圈具有相对富集的 Sr-Nd 同位素组成。南非 Kaapvaal 克拉通金伯利岩中橄榄岩捕虏体的矿物学、地球化学和 Re-Os 同位素研究进一步证明了这一理论^[20-21]。前寒武纪大陆岩石圈地幔通常都遭受过多期不同来源熔体交代作用的影响,这就是其同位素组成相对富集的主要原因。地幔交代作用主要发生在 80~100 km 深度,交代矿物主要为金云母、钾碱镁闪石和富含不相容元素的铁钛氧化物,如阿玛科矿、锆钛铁矿族(LIMA)和磁铁铅矿族(YIHA)。这些矿物经常与典型地幔交代组合,如云母-角闪石-金红石-钛铁矿-透辉石组合

(MARID)或钛铁矿-金红石-金云母-硫化物组合(IRPS)共生,反映了富K、Ba、Ti、Zr、Nb、稀土元素等不相容元素的小体积熔/流体对先前亏损的以方辉橄榄岩为主的岩石圈地幔的交代作用。而这些富含不相容元素的铁钛氧化物(尤其是LIMA和YI-HA族矿物)在玄武岩携带的地幔橄榄岩捕虏体中不存在。相反,典型大洋岩石圈地幔则具有完全不同的地质地球物理特征:①岩石圈年龄轻,厚度小,通常小于80 km;②岩石圈主要由饱满的尖晶石相二辉橄榄岩组成,其中橄榄石具有低的镁橄榄石分子;③地温梯度高;④在地球物理特征上岩石圈具有低的纵波速度;⑤在同位素组成上岩石圈具有亏损的Sr-Nd同位素组成。

然而,地幔在演化过程中或许不需要在洋陆相互作用的转换带上发生。具有古老前寒武纪结晶基底的华北克拉通地幔橄榄岩捕虏体系统研究发现^[22-24]:①华北岩石圈减薄前的确具有太古代克拉通型大陆岩石圈地幔;②华北岩石圈中生代时期通过与来自大陆和大洋深俯冲作用形成的壳源熔体的相互作用转变成富集的岩石圈地幔;③华北岩石圈减薄后的晚白垩纪—新生代时期又通过与软流圈来源的熔体相互作用转变成主量元素饱满、同位素亏损的“大洋型”岩石圈地幔。这说明典型前寒武纪大陆克拉通型岩石圈地幔是能够通过橄榄岩-熔体反复交代反应逐步转变成具有“大洋型”岩石圈地幔特征的相对饱满的地幔,该发现改变了地幔交代作用的传统认识。地幔堆晶岩和熔体包裹体结合Li、Fe、Mg非传统稳定同位素研究证明,参与反应的熔体是多来源的,不仅有大陆地壳物质、大洋地壳物质,而且有软流圈来源的硅酸盐熔体和碳酸盐熔体。华北岩石圈地幔从古生代难熔富集的克拉通型岩石圈地幔转变成新生代饱满亏损的“大洋型”地幔。

不仅华北岩石圈地幔存在这种组成上随时间的变化造成现今岩石圈地幔上老下新的特征,而且下地壳亦存在类似的情况。现有研究证明:华北下地壳主体形成于太古代,但显生宙存在多期以基性岩浆底侵作用为代表的下地壳改造事件,造成华北下地壳亦存在上部以长英质麻粒岩为代表的古老地壳,下部以镁铁质麻粒岩为代表的年轻下地壳的现象。同时,岩浆底侵作用导致的下地壳熔融亦是形成华北东部中生代大面积花岗岩的重要原因^[25-28]。

以上描述的地幔成分、演化机制以及与下地壳的相互作用和耦合所提出的重大科学问题是大陆地质研究新的切入点。

4.5 大陆与花岗岩问题

花岗岩是大陆地壳的重要组成部分,是地球区别于太阳系内其他行星的重要标志。从地质学中的火成论与变成论的争论开始,学术界在花岗岩研究方面获得如下基本共识:①尽管不同层次大陆地壳成分会有一定程度的变化,但大陆地壳的总体成分是花岗质的,这就决定了花岗岩是大陆地壳形成演化研究最重要的对象;②花岗岩在以地幔过程为主的大洋地壳中较少存在,表明其形成与地幔并不直接相关,因此,花岗岩主要是大陆地壳来源的,也就是目前花岗岩陆壳深熔论的由来;③花岗岩的形成主要是一种岩浆过程。尽管在很多情况下可以观察到花岗岩与超变质作用或混合岩化作用存在某种关联,但深部物理化学条件的急剧变化是形成花岗岩浆的重要因素。

尽管对花岗岩的研究有百余年的历史,但下面的问题严重影响花岗岩研究的进程:①花岗岩浆在其物理性质上与玄武岩浆相差甚大,特别是其较高的黏度严重制约相关理论研究或模拟的进行,同时导致对花岗岩成分多样性的原因存在激烈争论;②花岗岩侵位机制众说纷纭,学术界至今仍未提出广为接受的理论模型来解释花岗岩侵位所需要的空间;③以源岩为主要指标的成因类型划分研究进展不大,相反以热源为代表的岩浆形成物理化学条件研究受到重视。

由于上述原因,花岗岩研究在21世纪以来呈现几个显著的变化或态势:①研究手段多样化,除经典的地质学调查方法外,地球化学已广泛应用于成因研究,地球物理方法经常被用以确定岩体的形态及大小,数值模拟被用来反演花岗岩可能形成的地质过程等;②强调花岗岩更主要是大陆地壳演化的产物,而不仅仅是将花岗岩作为大地构造演化的产物对待;③强调花岗岩与其他类型岩石共生的区域岩石学研究,而不仅仅是局限于岩体本身的解剖学研究,因而更重视通过岩浆形成的物理化学条件研究来建立花岗岩与区域重大地质事件的联系。

中国是花岗岩极其发育的国家,也是花岗岩研究的大国。未来中国花岗岩的研究应在下述方面有所作为:①更加重视花岗岩基本问题的研究,特别是在构建花岗岩源区性质及物理化学条件研究框架的基础上,探讨不同类型花岗岩形成的基本条件与形成过程;②研究不同构造背景下或重要地质过程中花岗岩形成的基本机制,如克拉通破坏(华北)、大洋俯冲(冈底斯与东昆仑)、大陆碰撞(喜马拉雅)和地

幔柱(峨眉山)等;③加强花岗岩与大陆地壳生长关系的研究,特别是要重视地幔在热和物质两个方面对大陆地壳生长的贡献,研究花岗岩形成与地壳物质回返地幔的关系;④以时代为线索,探讨大陆形成演化过程中花岗岩成分及性质的演变,如鞍山地球早期不同时代花岗岩的成分及其演变、华南不同时代花岗岩成分与地壳成熟度研究等。

4.6 地热梯度随地质时代的演变以及地壳的刚性程度、蠕变强度

地球的热状态随着地球的演化而变迁着,其冷却与其他星球不同,表现为表壳部分(岩石圈)可以俯冲并返回到星体内部。早期炽热的地热增温率可能高于现今 2~3 倍^[29-32]。太古代时期发育有迄今保存的最热的熔岩科马提质岩浆,温度可以达到 1 600 °C,可能代表着地幔熔融程度为 30%~50%。广泛发育于低级区(花岗-绿岩带)与高级区(灰色片麻岩区)的 TTG 岩系占据着太古代—古元古代早期地壳成分超过 85% 的体积,为这一时期地球内部的高热流值提供了依据,但其广泛发育可以是俯冲岩片熔融所致或者与板块构造无关。TTG 片麻岩卵形穹窿构造区及环绕的表壳岩带边缘向斜构造为太古代地壳发育区的基本宏观构造轮廓,而古元古代以来 HT-UHT 麻粒岩的广泛出现、裂隙槽与线性褶皱造山带的发育展现出地球表层岩石圈向现代板块构造体制演变的结果。

部分由于受地球热状态的影响,地球历史发展的不同阶段表层(岩石圈,包括陆壳和洋壳)的组成、厚度、黏度、强度及岩石圈有效弹性厚度等都有着显著的变化,并直接影响着岩石圈的形成与演化。太古代早期地球内部的成分分异也同样影响着地壳(洋壳)厚度、洋-陆格局以及地壳(洋壳)在地幔(软流圈)上的浮力,并可能阻止着板块构造的发育和开启,同时也可能直接或间接地影响着地球浅部物质运动的型式。尽管对于现代板块构造体制中公认的以水平运动主导着岩石圈甚至地幔物质的流动,但在地球早期表层物质的状态和运动方式却依然存在争议。地球的热状态直接制约着地球表层物质的力学与流变学表现,控制着岩石圈的有限弹性厚度、岩石圈板块的俯冲深度,并且可能直接影响着岩石圈板块构造几何学与动力学^[33-39]。

迄今尚存争议的包括了许多地球早期构造格局及其成因机制等诸多话题。诸如地球表层何时出现板块构造;在地球早期热状态条件下板块构造的内涵;早期板块构造的发育特点与现今板块构造之间

的异同;板块大小、早期板块运动速率、板块俯冲角度、俯冲深度以及俯冲带几何学(对称俯冲、不对称俯冲、平板俯冲);板块构造出现前后,地球表层物质运动的方式及其变化;早期地幔的性质及其对流格局;什么因素决定了地球演化的进程中最终会出现板块构造,使地球成为迄今唯一具有板块构造格局的行星。

4.7 洋陆过渡带的物质循环

洋-陆转换/耦合带(也称洋陆过渡带)是地球系统的重要一环,是全球物质、能量交换和传输最为激烈的地带^[40-41]。该地带物质、能量从源到汇的传输、运移、交换是地球深、浅部环境改变的重要方面,特别是海洋生物对 C、N、P、S、O、H 等元素在水体中的运聚与不同深度层次的循环具有重要作用。洋陆转换带位于被动陆缘,也是将大陆与大洋联系的纽带,是地球上物质成分急剧变化的地带之一,是物质循环的重要场所^[42]。洋陆俯冲带位于活动大陆边缘,大洋板块对大陆板块的俯冲或大陆板块向大洋板块的俯冲类型的复杂性、大陆边缘的分段性以及深部地质过程的多样性决定了洋陆俯冲带物质循环过程的复杂性。因此,有人提出“俯冲工厂”^[43-44],但“俯冲工厂”并没有概括大陆边缘物质循环过程的全部内涵,比如被动陆缘的洋陆转换带也存在不同圈层之间的物质循环。因此,应当加强“裂解工厂”的原始创新研究,如热液、冷泉等相关的物质转换与循环。此外,对活动陆缘的洋陆转换带物质循环的研究依然是国际地学前缘课题,特别是摆脱目前简单的弧-沟-盆体系的概念,深入探索在俯冲带大陆一侧的系统地质过程是发展板块构造的切入点。当前,洋-洋俯冲带的研究也是探索大陆起源的关键。为此,根据洋陆过渡带的深、浅部地质过程类型和从表及里的深度层次,有必要开展物质循环相关的研究。

4.7.1 洋陆过渡带的岩浆工厂、变质工厂与成矿工厂

洋内弧形成与初始陆壳生成、岩浆工厂、变质工厂是洋陆过渡带物质循环研究的热点^[43,45-46],对探索陆壳起源、大规模金属成矿过程、大灾害成因等具有重要价值^[47-49]。洋-陆转换/耦合地带的岩浆作用是复杂的,环境多变,种类复杂^[50]。喷发过程与地史时期全球变化密切相关,侵入过程是金属矿产资源形成的主控因素,具有重要的研究意义。主动板块边缘的岩浆工厂不仅与俯冲深度相关,而且与上覆板片的物质属性关联,洋内弧以玻安岩为主,陆缘弧以安山岩为主^[51]。而被动陆缘的岩浆过程与裂解对应,浅表以双峰式火山喷发为特征^[40],岩浆量

多少也与伸展程度相关,出现贫岩浆和富岩浆两类被动陆缘^[40];深部为底侵作用相关的侵入体,导致洋陆转换带出现高热流;上、下地壳伸展量差异较大时,也可能出现陆幔直接出露海底的无地壳带(狭义的洋陆转换带),此时该带无岩浆作用,开展这方面研究对于海洋国土划界非常重要。地幔柱则因时空分布的随机性也可能作用于洋-陆转换/耦合地带^[40,52],与核幔边界相关。不论何种环境,所有新生物质都是源自地幔,可见深部对应的洋幔和陆幔的不同;除俯冲带之外,这也是物质跨圈层交换的重要型式之一,这个过程也是一个单向不可逆过程。

洋-陆转换/耦合地带的陆地一侧也有强烈体现^[53]。例如,亚洲东部陆缘自显生宙以来先后受到了古亚洲、(古)太平洋、鄂霍茨克洋以及特提斯洋俯冲的叠加、复合、改造、转换等过程,经历了多板块、多期次、多方向的构造作用,导致亚洲东部经历了复杂的构造-岩浆-成矿热事件^[54-55]。其中,中生代花岗岩的类型、空间分布、形成年龄与年龄分带、成因及其形成地球动力学背景的研究是了解亚洲东部及其陆缘中生代构造体制转换、构造迁移和多期洋-陆转换/耦合的关键所在。

与俯冲过程相关的典型变质作用产物是双变质带^[40,56],靠近海沟为高压低温变质的蓝片岩,岛弧地带为低压高温变质带。尽管榴辉岩主要是陆-陆碰撞才常见的产物,但现今个别俯冲带也出现榴辉岩剥露,而且地史期间陆缘增生造山带更可能是榴辉岩形成的主要环境^[57],如新英格兰(New England)造山带、祁连造山带和大别造山带。对俯冲带温压结构及其时空变化的精细研究非常必要,地史时期洋-陆转换/耦合过程可从造山带的变质带和变质岩的时空分布来揭示,因为变质过程(包括退变质)通常是不可逆的单向化学过程。此外,现今正在发生的俯冲带热结构可有效结合层析成像技术等开展,通过耦合相变等过程和P-T-t轨迹的动力学数值模拟可有效揭示其准确的深部变质动力学历程^[58-59]。

对变质流体的研究已打破了变质反应为固相反应的传统认识^[40],洋-陆转换/耦合地带富集载有重要溶解物质的变质流体,其在变质交代作用、变质矿物反应、变质组分迁移和变质成矿作用中都起着重要作用。变质流体成分的含盐度、流动性、渗透率和流体化学反应动力学是变质流体研究中的关键问题,在俯冲带不同深度界面上,流体的释放和渗透作用驱动的变质作用受俯冲系统的地热体系和断裂体系控制^[60]。

4.7.2 洋陆过渡带的壳-幔物质循环与地质流体

地质流体是洋陆转换带多圈层相互作用的纽带,不同深度俯冲脱水-脱碳-脱硫-相变产生流体的类型、过程、通量是揭示多圈层相互作用的关键^[61-62];被动陆缘洋陆转换带地质流体更是油、气、天然气水合物成藏的重要物质基础^[63],其形成、运聚与分布是近海底多层次岩层与水圈相互作用的关键研究对象,而且其分布也与大型海底滑坡、海底热液或冷泉密切相关。平面上,俯冲的大洋岩石圈对数百千米之上的大陆岩石圈物质成分的影响方式和贡献可揭示洋陆转换带影响的时空范围;被动陆缘洋陆转换带陆幔出露机制及其水岩相互作用与效应、洋幔增厚过程与新生洋壳组成都是前沿科学问题。在深度层次上,底侵或拆沉作用是洋陆转换带壳-幔循环的显著深部过程,其地球化学示踪和地球物理探测的交叉和综合研究成为前沿领域。在浅部层次上,俯冲侵蚀与增生是物质浅部机械循环的过程,其对陆壳生长贡献量的评估还有待深化研究^[49]。

4.7.3 洋陆过渡带的跨陆架源-汇过程

跨陆架物质输运含有重要的全球变化信息和油气勘探价值^[64]。传统的沉积学、层序地层学主要侧重盆地内部沉积环境研究或盆-山小系统的源-汇过程揭示。现今沉积动力过程的研究也都是区域尺度,特别是以河口海岸研究为主,因而现代沉积动力学模拟也主要集中在浅水区源-汇过程的构建和模拟,且侧重水介质为主的源-汇过程研究。近期,随着锆石定年技术发展和碎屑锆石年龄谱的运用,古源-汇过程研究得到发展,也被用于陆块—微陆块亲缘性建立和超大陆重建、板块重建^[40,65]。但是,深水或跨陆架的源-汇过程依然处于发展阶段,需要物理海洋等多学科大交叉,涉及各种边界流、海水分层运动、环流、内波、浊流、深海底流等动力过程^[66]。此外,全球除水介质之外的源-汇过程还未被重视,如火山物质通过大气环流向深海的搬运、沙尘暴引发的细小颗粒物向深海的搬运。这些动力学模拟需要结合深海高精度地层、深海古生物地层学、地震海洋学、深海物理海洋环境、古环流、古气候、古大气循环研究,并迫切需要开展多学科(如地球化学示踪)证据约束下的全球尺度数值模拟。

4.7.4 地史时期的洋陆过渡带物质循环的差异

洋-陆转换/耦合地带的大气圈、岩石圈、软流圈到生物圈两两之间的界面无疑都是全球尺度物质变异的分划性界面,是物质输运、转换需要跨越的一个地带,可提供给相关研究一个良好场所。显生宙造

山带中洋陆转换带的识别与物质循环随时间变化特征的研究有助于认识和对比现今洋陆过渡带的物质循环过程和壳-幔演化历史^[67], 丰富板块构造和大陆构造内涵, 特别是分析地史期间特定的物质循环事件对探讨陆壳增生具有重要理论意义。此外, 强烈的物质循环伴随着重要的矿产形成^[41], 因而也具有具有重要的经济价值, 如 BIF 沉积的地球环境, 黑色页岩的起始时代和地质意义, 变质泥质岩(孔兹岩)系的时代、变质与相关成矿特征等。

4.8 地球中年期的地质过程与意义

从 1.8 Ga(古元古代 Statherian 纪)直至约 700 Ma(新元古代 Cryogenian 纪), 甚至更年轻到 Ediacaran 纪末的显生宙界限, 长达至少 1.0 Ga 的历史时代被称为地球中年期^[68]。地球从形成到现在大约有 4.6 Ga, 推测还有 4.5~4.6 Ga 的生命期(数据源自欧阳自远院士 2010 年学术报告), 大约总共有 10.0 Ga 的生命期。地球到 1.8 Ga 时已经有约 2.8 Ga 的年龄, 进入地球中年期。地球中年期的含义远不至于此, 它在地球演化史上具有重要的转折意义。前寒武纪地质的研究已经将 2.5 Ga 作为太古宙与元古宙的界限, 之前是被厘定陆壳的巨量增长期和稳定(克拉通化)期, 此后的 1.8~2.5 Ga 早元古代是一个充满神秘的时期, 大致可能有的 250~300 Ma 的构造静止期(雪球事件?), 然后被大氧化事件跟随, 并且全球可能发育了类似于显生宙造山带的活动带事件, 推测是初始板块构造的启动期, 称为 Nuna 或 Columbia 超大陆。然而, 从 Nuna 或 Columbia 超大陆形成后, 直至约 750 Ma 的全球性裂谷事件, 使得 Rodinia 超大陆裂解, 从而使地球处于一个独特的演化历史阶段。

华北克拉通经历了古元古代晚期的变质事件(吕梁运动或中条运动)之后, 开始进入地台演化阶段, 从此时起开始了裂古系的发育与演化^[69-74]。裂谷系可大致分为南、北两个在地表没有完全连接的裂陷槽和北缘、东缘各一个裂谷带。在华北南部的裂陷槽称为熊耳裂陷槽, 熊耳群双峰式火山岩最古老的岩浆年龄在 1.78 Ga 至约 1.8 Ga 之间, 向上的中一新元古代地层有汝阳群、洛峪群等。华北北部的裂陷槽称为燕辽裂陷槽, 主要由长城系、蓟县系和青白口系组成。中一新元古代(1.8~5.4 Ga)的岩浆作用可以分为 4 期: ①1 780 Ma 至约 1 800 Ma 的熊耳群火山岩和广泛侵入古老变质基底的约 1 780 Ma 基性岩墙群; ②非造山侵入岩(斜长岩-奥长环斑花岗岩-斑状花岗岩)的同位素年龄在 1 670 Ma 至

约 1 700 Ma 之间, 以及分布在长城系团山子组和大红峪组的锆石 U-Pb 年龄为 1 620~1 680 Ma, 晚于熊耳群火山岩; ③在原青白口系下马岭组的斑脱岩以及侵入下马岭组的基性岩席中, 得到 130~1 320 Ma 的锆石和斜锆石 U-Pb 同位素年龄, 在东缘裂谷的沉积岩中也有年龄为 1 400 Ma 和 1 000~1 300 Ma 的碎屑锆石; ④在中国华北以及朝鲜中一新元古代地层中, 已经识别出年龄约 900 Ma 的基性岩墙。此外, 对华北北缘的白云鄂博群、狼山-渣尔泰群和化德群的研究证实, 在华北北缘的裂谷系与燕辽裂陷槽具有相同的层序与沉积历史, 其中在渣尔泰群中识别出年龄约 820 Ma 的火山岩。值得注意的是, 华北克拉通自古元古代末至新元古代经历了多期裂谷事件, 但是期间没有块体拼合的构造事件记录, 没有造山带型矿床, 反之大量发育与斜长岩、辉长岩有关的钛铁矿和与裂谷有关的喷流-沉积(SEDEX)型矿床, 说明华北在这个地质时期处于“一拉到底”的多期裂谷过程。这对于理解华北中一晚元古代的演化历史以及该时期全球构造具有重要意义。

一些新的研究进展证实, 华北在地球中年期的特征与全球其他大陆具有相似性。可以将这些地质特征归纳如下^[75-78]: ①在漫长的地质时代缺乏被动大陆边缘的形成, 这与 Nuna 和 Rodinia 超大陆的形成过程一致; ②全球性的 BIF 沉积缺失, 直至新元古代的雪球事件; ③古海水中没有记录有意义的 Sr 异常, 碎屑锆石也没有 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值异常; ④在这个时期缺乏磷矿沉积, 而在 1.8 Ga 之前和 750 Ma 之后磷矿沉积以及与之密切相关的黑色页岩沉积都很普遍也很重要, 这明确指示了海洋和大气圈层的化学条件在地球中年期是更稳定的; ⑤与 800 Ma 之后的蒸发盆地发育以及海水盐度相对降低而言, 这个时期的海水盐度相对较高; ⑥地体型斜长岩及其相关岩体(包括 A 型花岗岩、斜长花岗岩、斜长-纹长-紫苏花岗岩套、低价铁含长石花岗岩、钛铁矿花岗岩, 奥长环斑花岗岩等元古宙特有的岩体)在该期(1.0~1.8 Ga)大量发育; ⑦造山带型矿产和火山块状硫化物矿床分布十分有限, 沉积型锰矿和层状沉积型铜矿缺失。所有这些都表明, 在地球中年期长达 1.0 Ga 或更长的时间里, 地球以稳定的环境和演化为特点, 稳定的岩石圈表现出与前、后地质时代不同的引人注目的巨大变化。一系列地质现象的时间分布似乎与地幔的长期冷却有关, 大量的侵入体进入地壳并使上覆大陆岩石圈加厚, 下伏地幔仍旧是热的并足以引发加厚地壳下部的广泛熔融。

地球中年期的地质过程和机制都还有待于进一步研究。如果年龄约 7.5 Ga 的地幔柱与超大陆裂解事件直接与此后的冈瓦纳大陆以及 Pangea 大陆的形成有关,是否标志着地球中年期的结束以及现代板块构造的正式启动^[79],这无疑是大陆构造的关键研究课题之一。

5 结 语

本文强调的是把大陆的研究放到演化的视野上来观察和认识。地球最早的物质以及之后的演化都记录在大陆岩石上,因此,大陆的物质演化无疑是解开大陆动力学之谜的基础。这个新的研究思路是在丰富的研究资料基础之上提出的,有待于更多专家学者的积极讨论、批评、指正和补充,甚至推倒重来,为中国在大陆动力学领域做出积极贡献而努力。

李献华、张宏福、吴福元、赵国春、刘俊来、李三忠等参与了论文的撰写。本文的发表以期得到同行专家的批评与讨论,以便能够更好地凝练大陆动力学的发展方向和前导性课题。论文以个人名义署名是想表明,对于大陆物质演化的研究是新的研究思路和新的研究方向,并不成熟,还需要进一步调研和完善,如果论文有错误的地方,应由署名者个人负责。

参考文献:

References:

- [1] WILDE S A, VALLEY J W, PECK W H. Evidence from Detrital Zircons for the Existence of Continental Crust and Oceans on the Earth 4.4 Gyr Ago[J]. *Nature*, 2001, 409: 175-178.
- [2] NUTMAN A P, FRIEND C R L, HORIE K, et al. The Itsaq Gneiss Complex of Southern West Greenland and the Construction of Eoarchean Crust at Convergent Plate Boundaries[J]. *Developments in Precambrian Geology*, 2007, 15: 187-218.
- [3] MARTIN H. The Archean Grey Gneisses and the Genesis of the Continental Crust[M]//CONDIE K C. *Archean Crustal Evolution*. Amsterdam: Elsevier, 1994: 205-259.
- [4] WINDLEY B F. *The Evolving Continents*[M]. 3rd ed. London: John Wiley and Sons, 1995.
- [5] JAHN B M, GLIKSON A Y, PEUCAT J J, et al. REE Geochemistry and Isotopic Data of Archean Silicic Volcanics and Granitoids from the Pilbara Block, Western Australia: Implications for the Early Crustal Evolution [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(9): 1633-1652.
- [6] MARTIN H. Petrogenesis of Archean Trondhjemites, Tonalites and Granodiorites from Eastern Finland: Major and Trace Element Geochemistry[J]. *Journal of Petrology*, 1987, 28(5): 921-953.
- [7] MOYEN J F, MARTIN H. Forty Years of TTG Research[J]. *Lithos*, 2012, 148: 312-336.
- [8] 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 等. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及初步研究[J]. *中国科学: B 辑*, 1992, 22(12): 1325-1330.
ZHAI Ming-guo, GUO Jing-hui, YAN Yue-hua, et al. Discovery of Archean High-pressure Basic Granulite in North China and Its Preliminary Study[J]. *Science in China: Series B*, 1992, 22(12): 1325-1330.
- [9] CARSWELL D A, O'BRIEN P J. Thermobarometry and Geotectonic Significance of High-pressure Granulites: Examples from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif in Lower Austria[J]. *Journal of Petrology*, 1993, 34(3): 427-459.
- [10] ZHAO G C, WILDE S A, CAWOOD P A, et al. Thermal Evolution of the Archean Basement Rocks from the Eastern Part of the North China Craton and Its Bearing on Tectonic Setting[J]. *International Geology Review*, 1998, 40(8): 706-721.
- [11] APPEL P, MOLLER A, SCHENK V. High-pressure Granulite Facies Metamorphism in the Pan-African Belt of Eastern Tanzania: P-T-t Evidence Against Granulite Formation by Continent Collision[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1998, 16: 491-509.
- [12] 郭敬辉, 翟明国, 李永刚, 等. 恒山西段石榴石角闪岩和麻粒岩的变质作用、P-T 轨迹及构造意义[J]. *地质科学*, 1999, 34(3): 311-325.
GUO Jing-hui, ZHAI Ming-guo, LI Yong-gang, et al. Metamorphism, P-T Paths and Tectonic Significance of Garnet Amphibolite and Granulite from Hengshan, North China Craton [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1999, 34(3): 311-325.
- [13] 魏春景, 张翠光, 张阿利, 等. 辽西建平杂岩高压麻粒岩相变质作用的 P-T 条件及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(2): 269-282.
WEI Chun-jing, ZHANG Cui-guang, ZHANG A-li, et al. Metamorphic P-T Conditions and Geological Significance of High-pressure Granulite from the Jianping Complex, Western Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(2): 269-282.
- [14] O'BRIEN P J, ROTZLER J. High-pressure Granulites: Formation, Recovery of Peak Conditions and Implications for Tectonics[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2003, 21(1): 3-20.

- [15] JORDAN T H. The Continental Tectosphere[J]. *Reviews of Geophysics*, 1975, 13(3): 1-12.
- [16] BOYD F R, GURNEY J J, RICHARDSON S H. Evidence for a 150-200 km Thick Archaean Lithosphere from Diamond Inclusion Thermobarometry[J]. *Nature*, 1985, 315: 387-389.
- [17] POLLACK H N. Cratonization and Thermal Evolution of the Mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 80(1/2): 175-182.
- [18] RUDNICK R L, FOUNTAIN D M. Nature and Composition of the Continental Crust: A Lower Crustal Perspective[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(3): 267-309.
- [19] KING S D. Archean Cratons and Mantle Dynamics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 234(1/2): 1-14.
- [20] PEARSON D G. The Age of Continental Roots[J]. *Lithos*, 1999, 48(1/2/3/4): 171-194.
- [21] PEARSON N J, ALARD O, GRIFFIN W L, et al. In Situ Measurement of Re-Os Isotopes in Mantle Sulfides by Laser Ablation Multicollector-inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: Analytical Methods and Preliminary Results[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(6): 1037-1050.
- [22] ZHANG H F, GOLDSTEIN S L, ZHOU X H, et al. Evolution of Subcontinental Lithospheric Mantle Beneath Eastern China: Re-Os Isotopic Evidence from Mantle Xenoliths in Paleozoic Kimberlites and Mesozoic Basalts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2008, 155(3): 271-293.
- [23] ZHANG H F, GOLDSTEIN S L, ZHOU X H, et al. Comprehensive Refertilization of Lithospheric Mantle Beneath the North China Craton: Further Os-Sr-Nd Isotopic Constraints[J]. *Journal of the Geological Society*, 2009, 166(2): 249-259.
- [24] TANG Y J, ZHANG H F, YING J F, et al. Widespread Refertilization of Cratonic and Circum-cratonic Lithospheric Mantle[J]. *Earth-science Reviews*, 2013, 118: 45-68.
- [25] 樊祺诚, 刘若新, 李惠民, 等. 汉诺坝捕虏体麻粒岩锆石年代学与稀土元素地球化学[J]. *科学通报*, 1998, 43(2): 133-137.
- FAN Qi-cheng, LIU Ruo-xin, LI Hui-min, et al. Zircon Chronology and REE Geochemistry of Xenolith Granulites in Hannuoba[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(2): 133-137.
- [26] ZHAI M G, FAN Q C, ZHANG H F, et al. Lower Crustal Processes Leading to Mesozoic Lithospheric Thinning Beneath Eastern North China: Underplating, Replacement and Delamination[J]. *Lithos*, 2007, 96(1/2): 36-54.
- [27] ZHANG H F, YING J F, SANTOSH M, et al. Episodic Growth of Precambrian Lower Crust Beneath the North China Craton: A Synthesis[J]. *Precambrian Research*, 2012, 222/223: 255-264.
- [28] ZHANG H F, ZHU R X, SANTOSH M, et al. Episodic Widespread Magma Underplating Beneath the North China Craton in the Phanerozoic: Implications for Craton Destruction[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(1): 95-107.
- [29] AGARD P, VITALE-BROVARONE A. Thermal Regime of Continental Subduction: The Record from Exhumed HP-LT Terranes (New Caledonia, Oman, Corsica) [J]. *Tectonophysics*, 2013, 601: 206-215.
- [30] ARMSTRONG R L. The Persistent Myth of Crustal Growth[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1991, 38: 613-630.
- [31] BUROV E B. The Equivalent Elastic Thickness (T_e), Seismicity and the Long-term Rheology of Continental Lithosphere: Time to Burn-out “Crème brûlée”? Insights from Large-scale Geodynamic Modeling [J]. *Tectonophysics*, 2010, 484: 4-26.
- [32] BUROV E B. Rheology and Strength of the Lithosphere [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(8): 1402-1443.
- [33] CAWOOD P, HAWKESWORTH C J, DHUIME B. The Continental Record and the Generation of Continental Crust[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2013, 125: 14-32.
- [34] CONDIE K C, KROENER A. When Did Plate Tectonics Begin? Evidence from Geologic Record[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 2008, 440: 281-294.
- [35] DRUMMOND M S, DEFANT M J. A Model for Trondhjemite-tonalite-dacite Genesis and Crustal Growth via Slab Melting: Archean to Modern Comparisons [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95: 503-521.
- [36] GAIT A D, LOWMAN J P. Time-dependence in Mantle Convection Models Featuring Dynamically Evolving Plates[J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 171(1): 463-477.
- [37] MOLE D R, FIORENTINI M L, THEBAUD N, et al. Archean Komatiite Volcanism Controlled by the Evolution of Early Continents[J]. *PNAS*, 2014, 111(28): 10083-10088.
- [38] 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[J]. 岩石学报, 2009, 25(8):1753-1771.
- ZHAI Ming-guo. Two Kinds of Granulites (HT-HP and HT-UHT) in North China Craton: Their Genetic Relation and Geotectonic Implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(8):1753-1771.
- [39] PROKOPH A, ERNST R E, BUCHAN K L. Time-series Analysis of Large Igneous Provinces: 3 500 Ma to Present[J]. *The Journal of Geology*, 2004, 112(1):1-22.
- [40] 李三忠, 赵淑娟, 刘 鑫, 等. 洋-陆转换与耦合过程[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(10):113-133.
- LI San-zhong, ZHAO Shu-juan, LIU Xin, et al. Processes of Ocean-continent Transition and Coupling[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(10):113-133.
- [41] SUN W D, HUANG R F, LI H, et al. Porphyry Deposits and Oxidized Magmas [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65(1):97-131.
- [42] STRACKE A. Earth's Heterogeneous Mantle: A Product of Convection-driven Interaction Between Crust and Mantle[J]. *Chemical Geology*, 2012, 330/331:274-299.
- [43] MARUYAMA S, HASEGAWA A, SANTOSH M, et al. The Dynamics of Big Mantle Wedge, Magma Factory, and Metamorphic-metasomatic Factory in Subduction Zones[J]. *Gondwana Research*, 2009, 16(3/4):414-430.
- [44] SUN W D, TENG F Z, NIU Y L, et al. The Subduction Factory: Geochemical Perspectives[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 143:1-7.
- [45] BAITSCH-GHIRARDELLO B, GERYA T V, BURG J P. Geodynamic Regimes of Intra-oceanic Subduction: Implications for Arc Extension vs. Shortening Processes[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(2):546-560.
- [46] DUESTERHOEFT E, QUINTEROS J, OBERHANSLI R, et al. Relative Impact of Mantle Densification and Eclogitization of Slabs on Subduction Dynamics: A Numerical Thermodynamic/Thermokinematic Investigation of Metamorphic Density Evolution [J]. *Tectonophysics*, 2014, 637:20-29.
- [47] KESLER S E. Metallogenic Evolution of Convergent Margins: Selected Ore Deposit Models[J]. *Ore Geology Reviews*, 1997, 12(3):153-171.
- [48] GUILLAUME B, MORONI M, FUNICIELLO F, et al. Mantle Flow and Dynamic Topography Associated with Slab Window Opening: Insights from Laboratory Models[J]. *Tectonophysics*, 2010, 496(1/2/3/4):83-98.
- [49] KEPPIE D F, CURRIE C A, WARREN C. Subduction Erosion Modes: Comparing Finite Element Numerical Models with the Geological Record[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 287(1/2):241-254.
- [50] D'ORAZIO M, AGOSTINI S, INNOCENTI F, et al. Slab Window-related Magmatism from Southernmost South America: The Late Miocene Mafic Volcanics from the Estancia Glencross Area ($\sim 52^{\circ}\text{S}$, Argentina-Chile)[J]. *Lithos*, 2001, 57(2/3):67-89.
- [51] THORKELOSON D J, BREITSPRECHER K. Partial Melting of Slab Window Margins: Genesis of Adakitic and Non-adakitic Magmas[J]. *Lithos*, 2005, 79(1/2):25-41.
- [52] 李三忠, 侯方辉, 吕海青, 等. 洋中脊-地幔柱、地幔柱-海沟与海沟-洋中脊相互作用[J]. 海洋地质动态, 2004, 20(11):1-5.
- LI San-zhong, HOU Fang-hui, LU Hai-qing, et al. Interactions of Ridge-plume, Plume-trench and Trenchridge [J]. *Marine Geology Letters*, 2004, 20(11):1-5.
- [53] MCCRORY P A, WILSON D S, STANLEY R G. Continuing Evolution of the Pacific-Juan de Fuca-North America Slab Window System: A Trench-ridge-transform Example from the Pacific Rim[J]. *Tectonophysics*, 2009, 464(1/2/3/4):30-42.
- [54] GOLDFARB R J, PHILLIPS G N, NOKLEBERG W J. Tectonic Setting of Synorogenic Gold Deposits of the Pacific Rim [J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13(1/2/3/4/5):185-218.
- [55] LAZNICKA P. Giant Metallic Deposits: A Century of Progress[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 62:259-314.
- [56] 李三忠, 郭晓玉, 侯方辉, 等. 活动大陆边缘的板片窗构造[J]. 海洋地质动态, 2004, 20(11):6-18.
- LI San-zhong, GUO Xiao-yu, HOU Fang-hui, et al. Slab Window in the Active Continental Margin [J]. *Marine Geology Letters*, 2004, 20(11):6-18.
- [57] COOK-KOLLARS J, BEBOUT G E, COLLINS N C, et al. Subduction Zone Metamorphic Pathway for Deep Carbon Cycling: I. Evidence from HP/UHP Metasedimentary Rocks, Italian Alps [J]. *Chemical Geology*, 2014, 386:31-48.
- [58] GROOME W G, THORKELOSON D J. The Three-dimensional Thermo-mechanical Signature of Ridge Subduction and Slab Window Migration[J]. *Tectonophysics*, 2009, 464(1/2/3/4):70-83.
- [59] RODRIGUEZ-GONZALEZ J, BILLEN M I, NEGREDO A M. Non-steady-state Subduction and Trench-parallel Flow Induced by Overriding Plate Structure [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 401:227-235.
- [60] KIM Y H, CLAYTON R W, ASIMOW P D, et al.

- Generation of Talc in the Mantle Wedge and Its Role in Subduction Dynamics in Central Mexico[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 384: 81-87.
- [61] DESCHAMPS F, GODARD M, GUILLOT S, et al. Geochemistry of Subduction Zone Serpentinites: A Review[J]. *Lithos*, 2013, 178: 96-127.
- [62] WILSON C R, SPIEGELMAN M, VAN KEKEN P E, et al. Fluid Flow in Subduction Zones: The Role of Solid Rheology and Compaction Pressure[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 401: 261-274.
- [63] MAKOGON Y F. Natural Gas Hydrates: A Promising Source of Energy[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2010, 2(1): 49-59.
- [64] BALSINHA M, FERNANDES C, OLIVEIRA A, et al. Sediment Transport Patterns on the Estremadura Spur Continental Shelf: Insights from Grain-size Trend Analysis[J]. *Journal of Sea Research*, 2014, 93: 28-32.
- [65] 李三忠, 余 珊, 赵淑娟, 等. 东亚大陆边缘的板块重建与构造转换[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(3): 65-94.
- LI San-zhong, YU Shan, ZHAO Shu-juan, et al. Tectonic Transition and Plate Reconstructions of the East Asian Continental Margin[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2013, 33(3): 65-94.
- [66] SUGAWARA D, GOTO K, JAFFE B E. Numerical Models of Tsunami Sediment Transport: Current Understanding and Future Directions[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 295-320.
- [67] TANG G J, WYMAN D A, WANG Q, et al. Asthenosphere-lithosphere Interaction Triggered by a Slab Window During Ridge Subduction: Trace Element and Sr-Nd-Hf-Os Isotopic Evidence from Late Carboniferous Tholeiites in the Western Junggar Area (NW China) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 329/330: 84-96.
- [68] CAWOOD P A, HAWKESWORTH C J. Earth's Middle Age[J]. *Geology*, 2014, 42(6): 503-506.
- [69] 翟明国, 胡 波, 彭 澎, 等. 华北中—新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件[J]. *地学前缘*, 2014, 21(1): 100-119.
- ZHAI Ming-guo, HU Bo, PENG Peng, et al. Mesoproterozoic Magmatic Events and Multi-stage Rifting in the North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(1): 100-119.
- [70] 翟明国. 华北前寒武纪成矿系统与重大地质事件的联系[J]. *岩石学报*, 2013, 29(5): 1759-1773.
- ZHAI Ming-guo. Secular Changes of Metallogenic Systems Link with Continental Evolving of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(5): 1759-1773.
- [71] 翟明国. 中国主要古陆与联合大陆的形成: 综述与展望[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1583-1606.
- ZHAI Ming-guo. The Main Old Lands in China and Assembly of Chinese Unified Continent[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(10): 1583-1606.
- [72] 翟明国. 华北克拉通的形成以及早期板块构造[J]. *地质学报*, 2012, 86(9): 1335-1349.
- ZHAI Ming-guo. Evolution of the North China Craton and Early Plate Tectonics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(9): 1335-1349.
- [73] 李三忠, 余 珊, 赵淑娟, 等. 超大陆旋回与全球板块重建趋势[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(1): 51-60.
- LI San-zhong, YU Shan, ZHAO Shu-juan, et al. Perspectives of Supercontinent Cycle and Global Plate Reconstruction[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2015, 35(1): 51-60.
- [74] 赵太平, 邓小芹, 胡国辉, 等. 华北克拉通古/中元古代界线和相关地质问题讨论[J]. *岩石学报*, 2015, 31(6): 1495-1508.
- ZHAO Tai-ping, DENG Xiao-qin, HU Guo-hui, et al. The Paleoproterozoic-Mesoproterozoic Boundary of the North China Craton and the Related Geological Issues: A Review[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(6): 1495-1508.
- [75] BRADLEY D C. Passive Margins Through Earth History[J]. *Earth-science Reviews*, 2008, 91(1/2/3/4): 1-26.
- [76] BEKKER A, SLACK J F, PLANAVSKY N, et al. Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay Among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Process[J]. *Economic Geology*, 2010, 105(3): 467-508.
- [77] SHIELDS G A. A Normalised Seawater Strontium Isotope Curve: Possible Implications for Neoproterozoic-Cambrian Weathering Rates and the Further Oxygenation of the Earth[J]. *eEarth*, 2007, 2(2): 35-42.
- [78] RICHARDS J P, MUMIN A H. Magmatic-hydrothermal Processes Within an Evolving Earth: Iron Oxide-copper-gold and Porphyry Cu ± Mo ± Au Deposits[J]. *Geology*, 2013, 41(7): 767-770.
- [79] ZHAI M G, HU B, ZHAO T P, et al. Late Paleoproterozoic-Neoproterozoic Multi-rifting Events in the North China Craton and Their Geological Significance: A Study Advance and Review[J]. *Tectonophysics*, 2015, doi:10.1016/j.tecto.2015.01.019.