综述

前寒武纪俯冲和板块构造的渐进式演变

王孝磊^{1*}, 刘福来², 李军勇¹, 王迪¹

1. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

* 通讯作者, E-mail: wxl@nju.edu.cn

收稿日期: 2020-03-06; 收修改稿日期: 2020-10-31; 接受日期: 2020-11-04; 网络版发表日期: 2020-11-12

国家自然科学基金项目(批准号: 42025202、41890833、41430210)资助

摘要 早期板块构造体制是地球科学领域的重大科学问题之一。前寒武纪占地球历史的88%以上, 板块构造何时形成以及前寒武纪俯冲带的形成机制、分布特征和过程是解决这一问题的关键。文章系统回顾了前寒武纪时期不同阶段有关俯冲作用和俯冲带的研究进展, 梳理了关键科学问题和需深化研究的重要方向。指出从太古宙到元古宙俯冲作用和板块构造体制变化具有渐进的过程, 强调对太古宙时期俯冲机制、变质类型、板块构造体制、陆壳成分演变以及不同类型花岗质岩石的形成机制等方面深入研究的重要性, 提出新的分析测试方法和大数据、实验、数值模拟等是未来开展前寒武纪俯冲带研究的重要手段。

关键词 前寒武纪, 俯冲作用, 板块构造, 大陆形成, 渐进式演变

1 引言

板块俯冲是一个岩石圈沿着汇聚板块边缘下插到另外一个岩石圈之下进入软流圈的过程(Zheng, 2020a)。板块俯冲带最早由地震观测而发现, 在组成上包括了下插板块、海沟、弧前增生楔、地幔楔、火山弧、双变质带等(Stern, 2002; Zheng和Chen, 2016)。俯冲带是壳幔物质循环的重要“通道”, 也是现今大陆地壳形成的重要场所(Davidson和Arculus, 2006; Jagoutz和Kelemen, 2015; Zheng, 2020b), 并且是成矿的主要区域(Bierlein等, 2009)和地震、火山等地质灾害发生的主要部位, 故而是地球科学界长期关注的重要研究对象。无论洋-洋俯冲、洋-陆俯冲抑或陆-陆俯冲, 俯冲带的形成在本质上都与板块构造有关(Zheng, 2020b),

俯冲作用甚至被称为是板块构造运动的“发动机”(Forsyth和Uyeda, 1975)。

值得注意的是, 俯冲作用和俯冲带的定义主要是基于显生宙俯冲带的观察而给出的, 现今有关俯冲带岩浆作用、变质作用、成矿作用、物质循环等诸多方面的研究也大多基于显生宙俯冲带而进行。这一方面源于前寒武纪俯冲带大多经历了较长地质历史而无法较完整地保存, 另一方面受限于对前寒武纪俯冲和俯冲带的表现形式、产生机制和形成过程的认识还不甚清楚。此外, 板块构造显然并非与生俱来, 而可能是受制于地球热状态的变化; 至于“冷却”到何时开始出现俯冲, 本身就是一个未解之谜。受这些因素制约, 板块构造在地球历史上究竟何时开始启动以及如何启动成为了前寒武纪研究的关键问题, 甚至对于俯冲作用和

中文引用格式: 王孝磊, 刘福来, 李军勇, 王迪. 2020. 前寒武纪俯冲和板块构造的渐进式演变. 中国科学: 地球科学, 50(12): 1947–1968, doi: 10.1360/SSTe-2020-0053

英文引用格式: Wang X, Liu F, Li J, Wang D. 2020. The progressive onset and evolution of Precambrian subduction and plate tectonics. Science China Earth Sciences, 63(12): 2068–2086, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9698-0>

板块构造定义的解读都存在较大争议。围绕这一问题,近五年在国际上产生了新一轮关于地球早期板块构造体制的研究热潮(例如, Tang等, 2016; Greber等, 2017; Bédard, 2018; Hawkesworth和Brown, 2018; Stern, 2018; André等, 2019; Deng等, 2019; Holder等, 2019; Liu等, 2019; Sobolev和Brown, 2019; Brown等, 2020; Cawood, 2020a; Turner等, 2020; 翟明国等, 2020; Wan等, 2020)。基于对全球汇聚板块边缘区域变质作用的分析, Zheng和Zhao(2020)提出热张裂和冷俯冲在地球早期和晚期的不同热体制下引发全球岩石圈活动和壳幔相互作用性质的差异, 在此基础上区分出古代和现代板块构造。这个模型整合了地球不同时期的板块俯冲行为, 引发了对地球早期演化的新思考(Cawood, 2020b; Kusky, 2020; Zhai和Peng, 2020)。

深入探讨板块构造启动机制这一问题, 有必要对占地球历史88%以上的前寒武纪俯冲带进行系统分析和梳理。这一工作也将有助于我们深入了解大陆的形成和演化历史, 揭示地球圈层演化的动力学机制, 探究生命演化的驱动机制和地球宜居性。本文将按时代由老至新的顺序介绍前寒武纪俯冲作用和俯冲带的演变特征, 归纳存在的重要科学问题, 强调俯冲作用和板块构造体制的演变有渐进式的特征, 且存在全球和区域上的差异。

2 冥古宙-太古宙时期

2.1 冥古宙-始太古代($\geq 3.6\text{Ga}$)

由于历史久远, 地球上冥古宙-始太古代的地壳物质在后期的陨石撞击和构造运动中已被改造殆尽。目前发现的最古老岩石为来自加拿大西北Acasta约4.02Ga的花岗-闪长质片麻岩(Bowring和Williams, 1999; Mojzsis等, 2014; Reimink等, 2016), 稍年轻的也仅有少量约3.8~3.6Ga的岩石零星出露(Kinny, 1986; Liu等, 1992; Shimoyama和Matsubaya, 1992; Mojzsis等, 1996; Wan等, 2005; 万渝生等, 2009; Condie, 2019)。加拿大魁北克北部的Nuvvuagittuq表壳岩曾报道有约4.4~4.3Ga的超基性-基性岩(O'Neil等, 2012), 但其 ^{142}Nd 同位素的变化可能继承于地幔初始的分异, 这些岩石更可能形成于约3.8Ga(Roth等, 2013)。对于冥古宙-始太古代的俯冲作用和板块构造的了解主要基于碎屑锆石和零星发现的上述地壳物质来进行。

关于冥古宙(2018年的国际地层年代表把冥古宙和太古宙的界限划在4.0Ga)的地质过程, 主要的信息都来自于西澳Jack Hills变石英岩中的冥古宙碎屑锆石。这些锆石最初来源于岩浆体系(锆石 $\text{Th}/\text{U}>0.1$, 且岩浆环带发育), 大多数结晶温度在 $\sim 700^\circ\text{C}$ (Watson和Harrison, 2005)。然而, 其母岩浆的性质还存在极大争议, 可归纳为四种: 一是来自低温的含水花岗岩(Mojzsis等, 2001; Trail等, 2011); 二是类似现今俯冲条件下的安山质岩浆(Turner等, 2020); 三是板内玄武质岩浆(Kemp等, 2010; Dhuime等, 2015); 四是撞击成因的熔体(Darling等, 2009; Marchi等, 2014; Kenny等, 2016)。第一种解释与冥古宙时期水圈和地壳的相互作用有关, 第二种解释要求冥古宙存在板块构造过程, 而后两种母岩浆的产生则不需要板块构造的参与。但从锆石的结构特征和 $\text{Hf}-\text{O}$ 同位素来看, 后两种机制即使有可能产生, 也不是这些Jack Hills古老锆石形成的主要机制。另外, 有学者利用Jack Hills锆石包裹体中的矿物组合, 推断早期存在低热流岩浆体系, 暗示板块俯冲作用在冥古宙时就开始(Hopkins等, 2008; Harrison, 2009)。但是这些锆石的微量成分表明其并非来源于S-型花岗岩, 而是与太古宙TTG岩石(太古宙奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩套的统称)在源区(镁铁质地壳岩石)上极为相似(Martin等, 2014; Moyen等, 2019), 但在岩性上也未必相同(Burnham和Berry, 2017; Turner等, 2020)。总体上, 锆石地球化学成分存在多解性, 缺乏同期其他矿物或岩石的相互印证, 且由于露头极少而缺乏可靠的地质证据。因此, 基于冥古宙锆石所得到的早期俯冲和板块构造的信息还是极为模糊的。

对少量存在的冥古宙-始太古代岩石的成因研究也有助于探索早期板块构造过程。加拿大4.02Ga的Acasta片麻岩的地球化学和短半衰期 ^{142}Nd 和 ^{182}W 同位素研究表明, 这些岩石形成于含水镁铁质地壳的部分熔融, 熔融深度浅于石榴石稳定域(Reimink等, 2018)。华北鞍山地区白家坟和深沟寺两个露头发现的约3.8Ga的奥长花岗岩中, 有些样品的轻重稀土分馏程度不如典型TTG的那么明显(Wan等, 2005; 万渝生等, 1999; 张家辉等, 2018; 温德娟, 2019), 有些则分馏较强(Song等, 1996; Wang等, 2015), 表明该时期岩浆作用的复杂性。这些成分多样的冥古宙-始太古代岩石指示了不同的地壳熔融条件, 但这一差异尚无法与俯冲过程明确联系起来, 它们的产生可能与不同区域不同条件

的地温梯度、地壳加厚程度和熔融过程有关。一些学者寻求用基性岩的岩石地球化学和岩石学模拟计算来深化对这一问题的讨论。例如, Shirey等(2008)根据超基性-基性岩的Nb/Th和Th/U比值的变化,并结合岩石弧地球化学特征和短半衰期 ^{142}Nd 同位素分析,指出板块构造在3.9Ga就已发生。Turner等(2014)认为,加拿大魁北克北部Nuvvuagittuq表壳岩带中的低Ti钙碱性玄武岩、高Ti拉斑玄武岩以及玻安岩岩石组合可与当今Izu-Bonin-Mariana的弧岩石进行对比,指出该区域至少在3.8Ga时俯冲就已经开始。Ge等(2018)最近提出,塔里木克拉通内~3.7Ga的高压TTG岩石是俯冲的古老弧物质部分熔融的结果。然而,需要指出的是,全岩元素地球化学的解释可能也存在多解性,其是否能反映构造过程还需要有更多工作来证实。不过,地球早期的一些火成岩的确含有部分“弧”地球化学信息;如果这个“弧”信息具有俯冲带唯一成因的话,即使继承自源区也说明早期板块构造的运作。此外,对于早期岩浆过程,尤其是“晶粥”中熔体和晶体的不同程度分离(Laurent等, 2020),在引起早期花岗质岩浆成分多样性上(尤其是不同类型的TTG上)的作用也需有更多的了解。

2.2 古太古代(3.6~3.2Ga)

Cawood(2020b)把>3.2Ga的地球历史统一归为“前板块构造”时期,而在这个时期已经有古代板块构造的运行(Zheng, 2020a)。地球上现存大量绿岩-TTG岩石形成于3.6~3.2Ga,主要分布在南非Kaapvaal克拉通、西澳大利亚Pilbara克拉通、华北克拉通、印度北部的Bundelkhand克拉通和其东南侧的Singhbhum克拉通等,这些古老克拉通的形成蕴含了早期大陆抬升、风化、增生和成分演变等的多重信息。克拉通的出现,意味着洋壳与陆壳成分或局部或大范围地出现明显变化,为俯冲的启动提供了要素。因此,该时期是俯冲作用和板块构造初始活动最可能的时期。

该时期被用来讨论俯冲作用和板块构造的地质资料开始增多。南非Kaapvaal克拉通是早前寒武纪研究的典型地区之一,该区太古宙绿岩-TTG带记录了一期主要的变质变形事件,角闪岩相变质作用发生在3.23Ga左右(Dziggel等, 2003),被认为代表了两个大洋高原地体沿着Inyoka断裂的拼合(de Ronde和de Wit, 1994),但对于该时期是否存在高压变质和板块深俯冲

还存在争议(Moyen等, 2006; Peng等, 2019)。更甚之,因地球化学与现今的玻安岩极其类似, Kaapvaal克拉通巴伯顿地区约3.5Ga的玄武质科马提岩被认为来源于俯冲带中水化地幔的部分熔融(Parmar等, 2001, 2004),意味着该区俯冲作用可能在3.5Ga前就已出现。此外, Manikyamba等(2015)根据印度北部Bundelkhand克拉通和其东南侧Singhbhum克拉通内玻安岩与伴生岛弧拉斑玄武岩的微量元素和铂族元素特征,认为该区在3.5~3.3Ga期间发生了大洋板块的俯冲。van Kranendonk等(2007)则详细研究了Pilbara克拉通的岩石组合,提出在三期地幔柱事件(3.53~3.43、3.35~3.29、3.27~3.24Ga)之后,横向的构造应力超过了垂向的构造应力,在西Pilbara产生了具有现代岛弧特征的岩石和岩浆作用(玻安岩和水致熔融特征),指示了该区在3.12Ga时已开始俯冲。这也与该区大约3.2Ga时TTG岩石中升高的锆石氧同位素值一致,指示了在板块构造体制下的地壳循环(van Kranendonk等, 2015)。

以上地质学、岩石学、地球化学工作尽管仍存在着一定的多解性,但相较前期明显增加的地质证据暗示着至少局部的板块构造过程可能在3.2Ga之前已在地球上启动。但是,板块构造模式目前还未在我们太阳系中的类地行星中观察到,这驱使人们去思考是否有其他构造模式来解释早期地球动力学过程。Moore和Webb(2013)通过数值模拟和对比,提出“热管模型”(heat-pipe mode)(图1a),认为早期地球具有与现在的木卫一(Jupiter's Moon Io)类似的动力学过程,表现为新生深源熔体通过狭窄管道上升喷出、岩石圈向下对流,完成地球内外圈层之间热和物质的传输。之后,从“热管模型”过渡到“单板块模型”(图1b、1c),全球岩石圈可视为一个单一的板块,如同现在的火星(Lenardic, 2018)。Tang C A等(2020)模拟了地球岩石圈的破裂过程,假设早期地球的岩浆海在冷却过程中形成坚硬岩石圈,阻碍了地球内部热能的有效释放,结果引起地球回暖膨胀,最终导致岩石圈快速破裂成多个板块。

2.3 中-晚太古代(3.2~2.5Ga)

该时期被Cawood(2020a)称为“停滞层盖”向“活动层盖”(即板块构造)的过渡时期,但是在这个时期古代板块构造证据更为丰富(Zheng, 2020a)。这在岩浆、变质和沉积作用上都有体现,一系列具有岛弧地球化学

图1 地球早期停滞层盖体制下岩浆作用产生和岩石圈-软流圈物质循环过程

据Stern等(2018)修改. 几个固体星球所处的板块体制也已标出

特征且指示俯冲板片熔融的岩浆岩出现, 与同期的构造磨拉石等一起, 为该时期板块构造的启动提供了证据.

在岩浆岩成因上, 该时期绿岩带中的岩石组合从科马提岩夹少量长英质火山岩的双峰式组合显示出向钙碱性岩石组合转变的趋势, 如华北克拉通在2.7Ga之后钙碱性岩石的比例开始增大(翟明国等, 2020). TTG中的花岗岩浆活动也从钠质居绝对主导地位转变为大量钾质花岗岩产生, 这在Pilbara、Kaapvaal、Amazonian、Dharwar等克拉通都有出现, 可能意味着全球范围内更加广泛的板块构造启动(Moyen等, 2003; Laurent等, 2014). 钾质花岗岩的广泛出现, 意味着大陆表壳物质的再循环和大陆的成熟化. 华北克拉通2.6~2.5Ga期间大量非TTG的壳源花岗闪长岩出现, 也指示陆壳已经相当成熟, 板块构造可能已开始启动(万渝生等, 2017); 这些钾质花岗岩的大量出现表明, 华北克拉通化在2.5~2.45Ga基本完成(翟明国等, 2020). Zhao等(2007)通过华北克拉通中部带新生地壳来源的五台花岗岩的研究, 限定华北克拉通板块构造的启动在约

2.56Ga. 甚至在华北克拉通内, 一些来自表壳物质再循环而产生的花岗岩在3.02~2.91Ga就已出现(Dong等, 2017), 意味着某种构造过程使得再循环的表壳物质进入到地壳深部熔融的源区. 然而, 也有学者指出, 华北克拉通在晚太古代的块体汇聚过程可能仅仅是小范围的俯冲和碰撞而已, 与显生宙的大规模板块构造不同(Zhai和Santosh, 2011; Zhao和Zhai, 2013). 此外, 尽管有不少地区(如印度Bundelkhand、华北克拉通等)晚太古代TTG岩石被认为与俯冲环境下弧下玄武质源区的部分熔融有关(Mohan等, 2012; Peng等, 2015; Wang等, 2016), 但仍然缺乏足够的证据来支持俯冲板片的熔融. 该时期TTG与古-中太古代那些普遍认为由大洋高原底部玄武质岩石熔融产生的TTG之间究竟有何区别, 尚需更多工作.

基性-超基性岩的地球化学与其他岩石和构造特征相结合, 被用来论证该时期板块构造的存在. 如北美苏必利尔省Wawa绿岩带中约2.7Ga的镁质安山岩、富Nb玄武岩以及埃达克质岩石均与年轻的或者热的大洋岩石圈浅俯冲有关; 这些岩石与不同时代和地化特

征的火山岩-沉积岩及构造磨拉石等构造接触,可能代表了沿着太古宙汇聚板块边缘而形成的陆壳俯冲增生带的一部分,指示了该地区在太古代晚期发生了俯冲作用(Polat和Kerrick, 2001). 此外, Richardson等(2001)还对Kaapvaal克拉通内金伯利岩的金刚石中硫化物包裹体进行了细致的Re-Os同位素地球化学研究,发现这些硫化物经历了2.89Ga高压变质作用,为该时期Kaapvaal克拉通周缘俯冲有关的洋壳再循环提供了有力证据。

总的来看,除了前述岩浆岩方面的研究之外,一系列地质和地球化学证据支持板块构造在中-晚太古代时期就已启动。这些证据主要包括: (1) 全球变质作用资料统计表明,汇聚板块边缘的双变质带在晚太古代(2.7~2.5Ga)时就已逐渐出现(Brown和Johnson, 2018; Holder等, 2019); (2) 陆壳的成分如Rb/Sr、Ni/Co、Cr/Zn比值在约3.0~2.5Ga期间发生明显改变(Dhuime等, 2015; Tang等, 2016); (3) 金刚石中榴辉岩包裹体在约3.0Ga开始出现,指示深俯冲(Shirey和Richardson, 2011); (4) 对Pilbara克拉通最新的古地磁研究表明,在>3.18Ga就有类似现代板块构造的岩石圈移动速度(Brenner等, 2020)。

3 古元古代时期

3.1 古元古代全球构造演化背景

从太古宙进入古元古代,全球构造进入到一个新的阶段,陆壳成分趋于稳定(Tang等, 2016),花岗岩在地球化学上也开始表现出与TTG明显不同的特征(Moyen和Martin, 2012)。根据锆石定年资料,全球地壳和岩浆活动似乎在这一时期趋于相对平静;但在该时期,地表环境却发生了重要变化,最为显著的是大氧化事件、全球S同位素分馏、大规模条带状铁矿的形成、海水成分的巨变等(Condie等, 2009)。在古元古代早期,全球火山作用的广泛关闭减少了CO₂向大气圈-水圈的输出,同时海平面下降导致更多大陆暴露剥蚀而加剧CO₂消耗,这两个因素共同导致了2.4~2.3Ga的全球变冷和冰封(Rasmussen等, 2013; Tang和Chen, 2013)。约2.2Ga之后,伴随哥伦比亚(Columbia)超大陆(又称为“Nuna”超大陆)的聚合,全球范围的构造运动重启,发生了广泛的俯冲-增生-碰撞过程。之后(约1.75Ga),全球开始逐步进入裂解相关的伸展活动。总

的来看,在古元古代时期,全球主要的陆地已形成,洋陆之间可能经历了一个从早期不完全稳定到逐渐稳定的状态,俯冲作用和板块构造很显然在该时期构造演化中发挥了重要的作用。

3.2 古元古代早期超大陆聚合前的岩浆事件与俯冲作用

在哥伦比亚超大陆开始聚合之前的古元古代早期,全球可能仍处于垂向构造体制,以2.5~2.4Ga超级地幔柱引发的全球裂谷系统开始为标志,在波罗地地盾、加拿大地盾、西澳和南极洲形成了大量的大火成岩省,包括地幔来源的基性-超基性层状侵入体和火山岩(Puchtel等, 1997; Bayanova等, 2009)。之后,不同大陆的洋弧和陆弧在约2.45Ga开始发育,表明进入了一个新的构造阶段。

根据新的研究资料,在2.45~2.22Ga全球构造-岩浆作用并不完全“平静”,在局部地区表现为汇聚板块边缘的构造作用和新生地壳产生,产生了一些增生造山带,在加拿大西部、中国、印度、非洲、澳大利亚和格陵兰岛都有记录(Partin等, 2014)。位于北美大陆Rae克拉通西缘的Arrowsmith造山带是较为突出的一个,其形成于2.54~2.28Ga,延展约1500km。其初始阶段以安第斯型增生造山为主,发育一系列弧相关的侵入岩(Berman et al., 2013);碰撞造山阶段具有穿时性,北部早(在2.34Ga之前)而南部晚(在2.28Ga之后)(Berman等, 2013),且发育中-高级变质作用和同碰撞-碰撞后的花岗岩(Hartlaub等, 2007)及沉积岩(Ashton等, 2012)。在南美大陆São Francisco克拉通也记录有该时期的俯冲-增生带,其岩石以Minas增生造山带中2.35~2.30Ga岛弧背景下的石英闪长岩、奥长花岗岩和角闪岩为代表,该过程最终形成稳定的São Francisco古大陆(Teixeira等, 2015)。稍晚,在印度东部的Singhbhum克拉通中发育有约2.25Ga的火山岩,包括弧玄武岩、玻安岩、高Mg安山岩和富Nb玄武岩等岩石组合,其形成与板片物质加入的地幔楔部分熔融有关,记录了古元古代早期的俯冲作用(Singh等, 2017)。

3.3 古元古代超大陆聚合期的俯冲作用

在2.22~1.75Ga时期,全球构造进入持续且波动的俯冲-增生-碰撞活动,其顶峰发育在2.05~1.80Ga,主要与哥伦比亚超大陆聚合有关(Hartlaub等, 2007; Wan等,

2020). 其中, 增生造山的早期阶段(2.2~2.0Ga)仅仅有几个克拉通地块参与(包括西非、亚马逊、刚果和圣弗朗西斯科克拉通等), 它们主要分布在哥伦比亚超大陆的南部, 构成了早期超大陆的主体. 随着全球汇聚作用的持续进行, 波罗地、西伯利亚、劳伦和格陵兰也开始发育2.00~1.95Ga的增生和碰撞作用(Pehrsson等, 2015). 西非Leoman地盾2.15~1.98Ga的Eburnean造山带是该阶段俯冲-增生造山作用的代表, 发育有钙碱性火山-沉积序列, 表现为强烈的褶皱作用, 其后由俯冲洋壳或者镁铁质下地壳熔融产生花岗岩(Baratoux等, 2011). 分布于原始劳伦大陆多个克拉通之间的俯冲-增生-碰撞带也见证了这一过程(Hoffman, 2014); 围绕Rae和Slave克拉通产生了1.99~1.96Ga的I-型花岗岩及同期弧后的沉积盆地, 还有1.94~1.93Ga的同碰撞S-型花岗岩和伴生高级变质作用(McDonough等, 2000). 分布于扬子克拉通的约2.0Ga陆陆碰撞有关的麻粒岩相变质作用(Yin等, 2013; Han等, 2017)以及在华夏地块的1.91~1.87Ga的造山过程(Yu等, 2012)可能也是该时期俯冲和造山过程的产物. 格陵兰岛东海岸连绵超过250km的Nagssugtoqidian造山带记录了古元古代(1.88~1.84Ga)北美Rae克拉通和North Atlantic克拉通之间的俯冲-增生-碰撞过程(Kolb, 2014), 该造山带甚至可能与加拿大的Trans Hudson造山带相连, 代表了该区域一系列地体的俯冲-增生过程(St-Onge等, 2009; Garde和Hollis, 2010). 1.88~1.78Ga期间, 劳伦、西伯利亚和波罗地克拉通内部大洋的关闭及伴随的强烈构造变质作用标志着哥伦比亚超大陆完成了聚合.

华北克拉通东、西两个地块的聚合一般也被认为发生在这个时期(即通常所说的吕梁运动), 表现为早阶段局部存在的2.10~1.97Ga的俯冲-碰撞作用和晚阶段广泛发育的1.95~1.82Ga高压和高温-超高温变质作用(翟明国等, 1992; Zhai和Santosh, 2011; Santosh等, 2012; Tang和Santosh, 2018). 与华北克拉通聚合有关的古元古代造山带还有胶辽吉带和孔兹岩带(Zhao和Zhai, 2013). Santosh(2010)甚至提出了一个双俯冲的模式来解释整个华北克拉通的形成及在哥伦比亚超大陆中的聚合过程. Trap等(2012)根据构造、变形和年代学研究, 认为中部带是一个陆-陆俯冲/碰撞带, 造山发生在1.88~1.80Ga. Zhao等(2012)根据变质作用、地层、构造、岩石地球化学、同位素年代等方面的系统分析, 认为东部地块和西部地块的拼接发生在~1.85Ga;

而孔兹岩带高温/中压变质作用与阴山和鄂尔多斯地块碰撞在~1.95Ga形成西部地块有关; 胶辽吉带的形成则经历了与东部地块形成有关的复杂过程. 这些微陆块的拼合在构造、沉积、变质、变形和岩石上都表现出了与现代板块构造类似的特征, 但变质作用表现出高的地温梯度(翟明国等, 2020). 特别是对于高温-超高温麻粒岩相变质岩, 由于变质压力较低(在夕线石稳定域), 要在低压条件下获得如此高的温度必须有软流圈地幔热源的加入, 所对应的构造背景是拉张而不是挤压(Zheng和Chen, 2017), 因此标志的是超大陆聚合之后的大陆张裂(或夭折或成功)(Zheng和Zhao, 2020). 另外, 它们在尺度上还无法与现代板块构造对比, 可能代表了华北地块古元古代时期的古代板块构造的痕迹(Zhai和Santosh, 2011), 也可能是超大陆边缘的大陆增生过程.

3.4 古元古代时期的蛇绿岩套

古元古代时期的俯冲/碰撞造山作用也为蛇绿岩所记录. 蛇绿岩套作为板块缝合线的重要标志之一, 目前最早仅报道于古元古代. 冥古宙-太古宙并无蛇绿岩报道, 这可能与早期俯冲作用的性质和启动机制、地幔温度变化、早期大洋岩石圈性质及蛇绿岩的保存有关. 古元古代蛇绿岩主要见于格陵兰、加拿大、印度及波罗地地盾的芬兰等地. 其中, 加拿大东部Purtuniqu蛇绿岩套(2.00Ga)(Scott等, 1992)和芬兰Jormua蛇绿岩套(1.99Ga)(Peltonen等, 1998)均受到后期构造肢解作用的影响而不完整, 但仍具有典型蛇绿岩套组合所有端元组分. 近年, 扬子克拉通核部的崆岭地区也报道有约2.0Ga的蛇绿岩套(Han等, 2017), 对该蛇绿岩套的详细物质组成和构造环境还需要更多的研究. 曾有学者报道过华北克拉通在2.5Ga也存在有蛇绿岩套(Wang等, 1997; Kusky等, 2001), 但是缺乏足够的证据来证实(Zhao等, 2007).

已报道的古元古代蛇绿岩套在物质组成上与现今的并无太大区别. 根据已有的资料, 它们也包含有构造橄榄岩(辉长岩侵入的蛇纹岩)、堆晶辉长岩、席状岩墙、枕状熔岩(变质玄武质枕状熔岩流及角砾岩)以及薄层状变质碳酸盐岩、变质硅质岩、黑色片岩、层状凝灰岩、燧石及上覆盖的变质浊积岩等(Scott等, 1992; Peltonen等, 1998). 这些蛇绿岩套的存在为古元古代的俯冲/碰撞造山提供了可靠的岩石学证据. 这也

是不少学者认为全球性板块构造在古元古代已开始启动的一个重要依据。

4 中元古代时期

4.1 中元古代全球构造演化背景

相较于古元古代, 中元古代(1.6~1.0Ga)全球构造和岩浆活动更为平静, 无论是板块活动、生物演化抑或是气候变化均不剧烈(Holland, 2006; Piper, 2013a; Young, 2013; Cawood和Hawkesworth, 2014). 该时期主要为从古元古代哥伦比亚超大陆向新元古代罗迪尼亚超大陆过渡的转换阶段, 也有一定规模的俯冲增生带发育. 这些俯冲增生带主要形成于中元古代的早-中期(约1.2Ga以前), 沿着哥伦比亚超大陆的边缘发育(图2), 可能导致了哥伦比亚超大陆在聚合后进一步的增大, 并终止于格林威尔碰撞造山作用. 但需指出的是, 该期增生同时伴随有哥伦比亚超大陆内部裂解有关的岩浆作用, 但该过程并没有产生显著的大陆裂解和被动大陆边缘的增大(Cawood和Hawkesworth, 2014).

全球主要的板块中都保存有这一时期的线状俯冲增生带, 尤其是劳伦板块、波罗地板块以及亚马逊板块都经历了长期的俯冲增生作用, 在澳大利亚、印度等板块也有该期俯冲增生作用存在(图2; Betts和Giles, 2006; Dharma Rao等, 2013).

4.2 中元古代早-中期的俯冲带的分布和特征

沿超大陆边缘分布的上述中元古代早-中期俯冲带还具有明显的带状分布特征(图2). 劳伦板块的东南缘(现今方位)的格林威尔造山带可能在中元古代早期(约1.60Ga和1.52~1.45Ga)经历了与大陆边缘弧有关的增生造山作用, 产生了持续时间长、分布范围广的钙碱性岩浆岩(McLelland等, 2010). 此后, 该区域安第斯型岩浆作用只在少数地方出现, 持续到约1.30Ga, 并伴随着地体增生和新生地壳形成(Hynes和Rivers, 2010). 在波罗地板块的最南端发育的Hallandian造山带形成于1.47~1.38Ga, 与造山有关的岩浆岩以花岗岩-石英二长闪长岩为主, 具有安第斯型造山带的特征(Roberts和Slagstad, 2015; Ulmius等, 2015). 亚马逊板块西缘在中元古代早期也有该期的俯冲增生作用, 一直持续到1.3Ga前后, 形成了主要由表壳岩石和新生岛弧岩浆岩组成的1.80~1.45Ga的Rio Negro-Juruena带和

1.45~1.30Ga的Rondonian-San Ignacio带(Tassinari和Macambira, 1999; Geraldies等, 2001). 另外, 在北澳大利亚克拉通的南缘和东缘, 也保存有从古元古代晚期(约1.8Ga)到中元古代早期(约1.5Ga)的增生带, 呈构造窗的形式出露(Myers等, 1996). 处于华北板块南缘的熊耳群火山岩也被一些学者认为是古-中元古代的增生带(He等, 2009), 但该解释还存在争议.

到中元古代晚期, 增生造山作用在全球许多地区都有记录(包括印度、澳大利亚、南极洲东部、Laur-entia、Amazonia、Baltica、刚果和Kalahari板块). 例如, 格林威尔造山带的西南部记录了包括1.24~1.22Ga的Elzevirian 和1.20~1.14Ga的Shawinigan增生造山作用, 导致了外来地体拼贴到劳伦大陆边缘(Marsh和Culshaw, 2014). 而到了1.09Ga, 大陆碰撞作用导致格林威尔造山带广泛的构造变形和高级变质, 标志着中元古代主要的造山事件结束. 赞比亚东部的南Irumide带发育大量的钙碱性片麻岩序列和丰富的变质火山岩-沉积岩系, 记录了1.09~1.00Ga的陆弧和伴随的1.02~1.00Ga的陆内伸展作用(Karmakar和Schenk, 2016).

在上述超大陆边缘俯冲增生作用发育的过程中, 超大陆内部也在发生大陆张裂作用, 有的导致大陆裂解. 如西伯利亚、北澳大利亚、劳伦、波罗地等多个陆块产生的ca. 1.38Ga的大火成岩省事件(Zhang等, 2018), 在华北克拉通北部产生的1.33~1.30Ga的大火成岩省(Zhang S H等, 2017), 以及劳伦大陆ca. 1.10Ga的Midcontinent裂解(Stern等, 2018)等. 在扬子克拉通西南缘发现的中元古代的岩浆作用也被认为具有双峰式的特征(Chen等, 2014, 2018), 在构造背景上与大陆张裂更为一致.

4.3 中元古代的变质作用和蛇绿岩套

除了与陆-陆碰撞有关的格林威尔地区以外, 全球中元古代变质作用的特点主要表现为高温-超高温变质作用为主, 记录于澳大利亚板块内部、北美板块东南部、印度中部构造域和非洲南部地区. 如澳大利亚Gawler克拉通北部地区发育有两套约1.59Ga的超高温变质麻粒岩, 对应的变质温压条件分别为925℃/6.5kbar和850℃/9kbar(Cutts等, 2011).

中元古代晚期, 在哥伦比亚超大陆裂解向罗迪尼亚超大陆汇聚的过渡大背景下, 产生了一系列的蛇绿

图2 约1.27Ga哥伦比亚超大陆的复原模型及沿超大陆边部发育的俯冲增生带
据Condie(2013)修改

岩套。其中包括非洲Kibaran带中出露的约1.39Ga的Chewore蛇绿岩套(Johnson和Oliver, 2000)、印度南部Nellore-Khamman带中出露的约1.33Ga的Kanigiri蛇绿混杂岩(Dharma Rao等, 2011)、扬子克拉通北部崆岭地区报道的约1.10Ga庙湾蛇绿岩套(Deng等, 2017)、扬子克拉通西缘约1.06Ga石棉蛇绿岩套(Hu等, 2017)、北秦岭造山带约1.03Ga松树沟蛇绿岩套(Dong等, 2008, 2014)、西伯利亚克拉通约1.02Ga的Dunzhugur蛇绿岩套(Khain等, 2002)等。单就扬子克拉通出露的多处1.10~1.00Ga蛇绿岩套来看, 尽管其形成的构造背景存在较大争议, 但它们普遍与新元古代早期的洋内岛弧岩浆体系的形成具有密切的空间联系, 可能反

映了它们的形成与罗迪尼亚超大陆的汇聚过程有密切关系。

5 新元古代时期

现代板块构造在新元古代就已启动的观点已成为地学界的共识(Stern, 2008; Zheng和Zhao, 2020)。该时期保存有与现代板块构造特征一致的构造和岩石记录, 表现为岛弧岩浆岩及造山有关的盆地、增生楔、低温/高压变质岩、双变质带、蛇绿岩套以及造山带的坍塌、拆沉等。尤其是, 代表低地温梯度的超高压变质岩的出现为该时期的大陆深俯冲提供了关键证据。

对该时期俯冲的争议则主要存在于对局部地区构造过程的解释上, 并可能联系到从罗迪尼亚到冈瓦纳超大陆的演化, 但对全球范围俯冲带的机制和性质的争议并不大. 因此, 对该时期俯冲带仅做简要介绍.

5.1 新元古代俯冲带的分布

新元古代早-中期的俯冲带在全球分布并不多, 主要位于那些在哥伦比亚超大陆中未起主要作用的块体上, 这些块体在罗迪尼亚超大陆中也曾处于其边缘位置. 新元古代早-中期的俯冲带及相关的岩浆作用主要发育在环扬子克拉通的东南缘、西缘和北缘(Zhou等, 2002; Wang等, 2006, 2014; Zhao等, 2008, 2011; Li等, 2009; Zhang F F等, 2017), 西华夏地块的局部(Wang Y J等, 2014; Xia等, 2015), 塔里木地块(Shu等, 2011; Zong等, 2017), 以及斯里兰卡、马达加斯加、塞舌尔等地(Ashwal等, 2002, 2013). 上述这些新元古代早-中期俯冲和造山作用主要表现为新生地壳物质的产生与快速再造, 具有增生造山带的特征. 在全岩Sr-Nd同位素、锆石Hf同位素等方面都有新生地壳物质再循环的显著体现(Wu等, 2006; Zheng等, 2007, 2008, 2009; Wang X L等, 2014), 锆石的O同位素上还显示出新生地壳物质经历了强烈的表壳过程(Zheng等, 2007, 2009; Zhao等, 2013; Wang等, 2013; Qi和Zhao, 2020). 对于该时期的俯冲带, 已有较多的文献论述, 对于岩浆作用的具体性质和构造背景也有较大争议, 在此不再赘述.

新元古代中-晚期, 伴随着罗迪尼亚超大陆自约0.80Ga开始的裂解(Huang等, 2019), 与冈瓦纳大陆汇聚有关的俯冲和造山过程也同时进行, 在非洲、印度南部和南极等地块产生了规模宏大的泛非期造山作用. 该造山作用的序幕甚至从0.80Ga就已开始(Rino等, 2008), 主要发生在0.60~0.50Ga, 最终使得非洲多个克拉通焊接在一起, 以及东、西冈瓦纳的相接. 与新元古代早-中期相似, 该期造山作用也记录了强烈的新生地壳生长和快速再造, 并伴随有高级变质作用(Santosh和Yoshida, 2001; Kröner和Stern, 2004).

5.2 与超大陆演化的联系

总体上, 新元古代早-中期俯冲相关的岩浆作用在罗迪尼亚超大陆的主要块体上并不显著, 相应地, 1.0~0.8Ga地壳生长在全球锆石U-Pb年龄谱上也不明

显(Condie, 2008). 这表明, 该期的增生造山作用很可能是超大陆外围的局部地壳生长事件. 部分新元古代早期的碰撞造山作用甚至是格林威尔期造山作用进一步持续的结果, 与罗迪尼亚超大陆外围块体的聚合有关(Cawood和Pisarevsky, 2017).

而在新元古代中-晚期, 泛非期的增生造山作用产生于罗迪尼亚超大陆裂解之后. 前期尚未完全裂解的区域成为夭折的张裂, 而内部裂解开来的区域则转化为新的板块边缘, 并沿着这些边缘产生了新的俯冲、增生和碰撞事件(Rino等, 2008). 这说明了在全球地质演化过程中, 不同地区间存在俯冲-裂解的差异性与耦合性. 在此基础上, 结合全球对比, 进一步深入阐释从格林威尔期造山作用向泛非造山作用之间的超大陆演化过程, 探索新元古代俯冲带随超大陆边缘转换的演变, 对于揭示现代板块构造和俯冲带的形成具有重要意义.

6 地球前寒武纪俯冲作用的渐进式演变

从以上不同地质时期俯冲带的分布和特征上看, 地球早期俯冲作用是争议的核心问题, 尤其是古-太古代甚至更早时期的俯冲形式是争论的焦点所在. 根据对金星的观察研究, 局部的构造汇聚、侧向剪切或汇聚可以在早期的固体地球上存在(Lenardic, 2018). 此时, 俯冲作用与板块构造的概念不同, 不需要有全球范围内的板块边界网络的产生和维持. 因此, 俯冲作用与板块构造之间并不是完全对等的关系.

一般认为, 固体地球表层的大规模运动从根本上取决于水平方向上的密度差异. 板块运动的驱动力包括洋脊推动力(ridge push, 占总驱动力的10%)和俯冲带大洋板片下沉产生的拖曳力(slab pull, 占总驱动力的90%); 其中, 起主要作用的拖曳力包括直接给下沉板块施加的牵引力和夹带周围地幔与之一起下沉的吸力(Forsyth和Uyeda, 1975; Conrad和Lithgow-Bertelloni, 2002; Faccenna等, 2013). 而阻止俯冲发生的力(阻力)来源于拖拽过程中的摩擦力和俯冲板片的浮力(Davies, 1999; Billen, 2008). 由于太古宙时期的地幔具有高温、低黏度的特性, 俯冲板片的硬度和浮力都会受到较大的影响. 鉴于此, 目前对于太古宙存在俯冲的争议不大, 只是在俯冲带地温梯度高于显生宙(Zheng和Zhao, 2020). 对于古太古代及以前是否存在俯冲作

用,则主要有两种截然不同的观点:(1) 太古宙时期地幔温度高、对流强,因而作为地幔对流的一部分,板片俯冲发生得很快,且形式可能不同(Christensen, 1985; Korenaga, 2006, 2013);(2) 由于太古宙时期浮力强,不可能发生俯冲(Nisbet和Fowler, 1983). 然而,板块俯冲的驱动力主要来自俯冲板片的重力而不是地幔对流的摩擦力. 由于太古宙时期软流圈温度显著高于显生宙,岩石圈的刚性程度相应较低,因此其地壳在太古宙更易于部分熔融产生TTG岩浆作用(Zheng, 2020b).

引起这个争论的原因还在于不同学者对于“俯冲”定义的理解,因为太古宙时期俯冲作用的构造样式可能与现今有较大不同. 如果我们遵循本文开始对“俯冲”给出的定义,即“一个岩石圈板块沿着汇聚板块边缘下插到另外一个岩石圈板块之下软流圈的行为或过程”(Zheng, 2020a),首先就得明确另外一个关键科学问题,即: 板块构造何时产生,或者早期板块构造的范式如何. 这样,问题就显得更加复杂. 如果从这个定义中去掉“板块构造”环境的限制,一个块体向另外一个块体之下的下插行为在太古宙时期是完全可能发生的,这也为一系列的数值模拟所证实(van Hunen和van den Berg, 2008; Sizova等, 2010; Gerya, 2014; Fischer和Gerya, 2016). 数值模拟结果表明,地球早期上地幔的温度决定了俯冲产生与否,以及产生的样式与性质. 一般来说,早期较高的地幔温度导致汇聚板块边缘的岩石圈热梯度较高,使得俯冲板片很容易发生断离,不易产生持续的俯冲(van Hunen和van den Berg, 2008). 因而早期的俯冲很可能是间歇性的,且每次维持的时间都不长. 进一步的数值模拟表明,当地球早期的上地幔温度比现今值高250℃时,那些小的变形的板块碎片的水平移动可为内部的应变所消耗,不会发生明显的俯冲;而当温度相差在175~250℃时,板块被岩石圈地幔来源的熔体强烈渗透而弱化,可产生双向的岩石圈沉降和大洋板块的俯冲;而在温度差小于175℃时,熔体通量减小,岩石圈破坏小,板块更强,最终稳定为现代的俯冲形式(Sizova等, 2010). 显然,数值模拟所揭示的这种板片下插行为虽然在结果上符合俯冲的定义,但却与地球物理学家最初观察而提出的俯冲是不同的,典型显生宙俯冲带所具备的那些物质组成在地球早期也难以找到. Zheng和Zhao(2020)指出,在太古宙由于高的地幔温度导致产生韧性的板块边缘,因而可以出现暖俯冲并产生广泛的热张裂作用,促进板

块边界的活化和镁铁质地壳的部分熔融,形成TTG(Zheng, 2020b). 从数值模拟的结果来看,从太古宙早期的特殊“俯冲”发展到板块构造体制的俯冲,其最初的转变可能发生在中太古代到晚太古代(大约3.2~2.5Ga)(Gerya, 2014; Cawood, 2020b),甚至可能持续到更晚(如古元古代; Zhai和Peng, 2020).

正是由于早期地球的上地幔温度和黏度与现今相比有较大不同,学界对太古宙的俯冲样式提出了与显生宙俯冲不同的术语,形成了“沉陷俯冲(sagduction)”(Francois等, 2014; Brown, 2015)和“原始俯冲(proto-subduction)”(Kisters等, 2010)等提法. 不论何种形式的俯冲,都还须解决地球早期“陆壳成分的改变”这一科学问题. 在地球早期冥古宙“岩浆海”事件之后,太古宙地壳的成分都是镁铁质的,且可能较厚(Tang M等, 2016, 2020); 镁铁质地壳发生部分熔融可以产生早期的TTG及源区中达到石榴子石稳定域的残留体. 由于当时上地幔温度较高,这些具有较大比重的残留体易于拆沉进入到软流圈地幔中,代表了初始的壳幔物质循环,引发了局部地区的古代板块活动和陆壳成分变化,可能在始太古代时期就产生了暖的俯冲(Moyen等, 2019). 而在冥古宙时期,整个地球还基本上处于单一块体体制下,地球被一个镁铁质的表层覆盖(图1),具有停滞层盖属性(Richter, 1985; Solomatov和Moresi, 1997, 2000; Ernst, 2009; Sleep, 2000; van Thienen等, 2005; Debaille等, 2013; Piper, 2013b; O'Neill和Debaille, 2014). 在停滞层盖构造向活动层盖构造转变的始太古代时期,由于不同地区热状态的差异,关于岩浆的产生和岩石圈-软流圈之间的物质交换,既有热管模型和地幔柱,也有沉陷俯冲(Francois等, 2014; Brown, 2015)、热张裂(Zheng和Zhao, 2020)、拆沉(delamination)和滴坠(Sizova等, 2015; Fischer和Gerya, 2016; Stern, 2018; Bédard, 2018)等形式的出现. 另外,在冥古宙时期地球的水圈尚未形成,地球上出露的地壳具有洋壳属性. 在进入始太古代之后,停滞层盖构造转变成活动层盖构造,地球水圈开始形成,发散板块边缘地幔熔融所形成的新生镁铁质地壳部分出露到水面之上,结果地球上大面积出露的地壳仍然具有洋壳属性.

随着TTG岩石的不断形成和下地壳残留体的拆沉,平均地壳成分逐渐向中酸性演化,且由于浮力作用,部分地区的地壳相对隆起,露出水面,产生最早期

的陆壳, 表壳的碎屑沉积物也在此过程中开始形成. 在古太古代岩石出露区常可以看到垂向穹脊构造, 在TTG穹窿的边部可以看到垂向构造印迹, 表现为围岩绿岩具有相对TTG向下运动的痕迹(Marshak等, 1992; Sandiford等, 2004). 总之, 早期的这些特殊构造过程, 使得表壳物质被带入下地壳底部或更深部位; 这一过程可以在局部产生, 也可能在一些早期的陆核内具有一致性, 代表了最早期的地表物质在深部的再循环, 这在TTG的锆石氧同位素上也有轻微的体现(Vezinet等, 2019), 并在Hf同位素上有所体现(Bauer等, 2020). 锆石氧同位素比值的增加在不同陆块出现的时间并不完全一致, 指示新生地壳再造引起Hf同位素比值升高的时间也并不一致. 这印证了在地球演化过程中, 俯冲作用的启动很可能是一个渐进的过程, 而非是在某个时间节点突然出现俯冲和板块构造. 这一渐进的过程主要受控于地幔温度和流变学的变化(Zheng和Zhao, 2020), 并在岩石成分上也体现出逐渐的变化(Condie, 2018). 该渐进可能并非以固定的速率而进行, 在某个时间段可能表现得速率明显加快或变慢, 如在3.8~3.6Ga有一个明显的升高(Bauer等, 2020), 3.2Ga(van Kranendonk等, 2015)或3.0Ga(Dhuime等, 2018)左右可能也有一个明显的变化. 从这个角度上来看, 该渐进的表现与一些学者所认为阶段性的构造体制演化(Zhai和Peng, 2020)并不矛盾. Debaille等(2013)通过数值模拟计算指出, 从停滞层盖模型到活动层盖逐渐活跃(图1), 最终产生古代板块构造, 其转变可能发生在4.0~3.8Ga左右(Zheng, 2020a). 但是转变的具体时间可能随着不同陆块成熟化(克拉通化)的早晚而不相同, 未必可以用大数据来约束全球变化规律, 有可能某几个块体具有相近的时间, 代表了一种早期“类全球性”的古代板块构造. 当然, 这还需要更多确切的同位素年代学和岩石地球化学资料来制约.

7 地球早期板块构造的渐进式演变

从前述讨论来看, 关于地球早期板块构造启动时间的争论在某种程度上也取决于不同人对于板块构造定义的理解, 这在2006年怀俄明州召开的彭罗斯会议上的争论可见一斑. *Nature*主编Alexandra Witze当时撰文总结了参会人员普遍认可的三条关键识别标志: 一是必须有刚性的板块; 二是这些板块必须通过大洋

扩张而有相对移动, 且产生新的地壳; 三是必须间或有板块间的俯冲作用(Witze, 2006). 三条之中, 只有最后一条可以有产物保存并有望为我们所检验; 这其中包括俯冲产生的特殊火成岩石组合、高压变质岩和变质作用、陆陆碰撞等(Zhao等, 2007). Lenardic(2018)回顾了这一争议, 并明确板块构造初始定义为刚性的板块内部和窄的活动变形带(即板块边缘), 其理论符合欧拉定理, 且可以检验. 对于板块构造起始时间的争论, 还来自于不同学者对上述不同类型证据的地质观察、解释和所分配的权重. 例如, Stern(2008, 2018)根据早期缺乏低温/压比的超高压和蓝片岩相变质作用, 坚持现代板块构造起始于新元古代(大约1.0Ga). 与此不同的是, 有一些地质学家根据造山带、增生楔、双变质带的出现, 强调这些判别因素的分量并认为古代板块构造至少在新太古代就已启动(Korenaga, 2013; Holder等, 2019).

正如超大陆的聚合通常并非是一蹴而就, 板块构造在地球早期不同陆块(或克拉通)上的启动可能也是穿时的(Condie和Kröner, 2008). 因而, 从逻辑上来看, 当“全球性的板块构造何时开始”这一命题成立时, 隐含的一个基本前提就是板块构造有“全球性”和“非全球性”的区别, 而从“非全球性”向“全球性”的转变不会是一蹴而就的, 因而板块构造也必然有一个渐进的过程. 如前节所述, 在这个渐进演化过程中, 阶段性的变化(Zhai和Peng, 2020)可能也是存在的. 在早期地球的局部地区, 局部的板块构造完全有可能很早就已出现, 只是由于当时的热体制和块体的刚性程度, 产生的范围和持续的时间均有限. 即, 很可能在地球早期的局部地区, 由于俯冲作用和局部板块构造的启动而使得陆壳演化发生得较早, 较早就出现较多长英质陆壳成分(如格陵兰; Nutman等, 1993). 而从全球尺度来看, 系统的地球化学分析则表明, 陆壳成分改变为长英质可能发生在晚太古代, 大约在3.0Ga(Dhuime等, 2015; Tang等, 2016). 但是, 基于全球大数据的统计往往是一系列数据平均的结果, 这可能由于大数据取样的偏差导致一些局部的特殊过程被掩盖. 简单的理论计算也表明, 板块构造的启动在过去应该比现在更可能发生, 只是早期的板块构造范式与现今的可能有较大不同, 或有保存的偏差(Korenaga, 2013; Zheng和Zhao, 2020).

通过岩石学和地球化学得到的地球早期就已出现

俯冲作用和板块构造的认识也许正确, 但证据还不够充分. 一些学者指出, 尽管在停滞层盖(简称为“滞盖”)模型中, 滞盖下面的地幔对流可能早已存在, 但当时地幔的高温度和低黏度会使得对流产生的应力较低, 无法克服滞盖的强度. 一旦地球岩石圈发生破裂(Tang C A等, 2020), 地球就从停滞层盖体制向活动层盖体制转变(O'Neill等, 2007; Rey等, 2014). 在这种情况下, 早期榴辉岩质下地壳的拆沉和大陆的坍塌产生类似沉陷俯冲、地壳循环和古代俯冲的过程, 水化地壳也可能通过下沉作用进入到深部导致水的循环和大量岩浆作用出现. 这种古代板块构造的行为, 逐渐形成了各种板块边缘并重塑了地球表面(Sobolev和Brown, 2019), 并可能在太古宙地球动力学过程中起到了关键作用. 在这一时期, 古代板块构造的启动被形象地与人们“脚踏式”(kick-started)启动摩托车的动作(Rey等, 2014)或者汽车的“启停模式”(stop-start mode)(Turner等, 2020)相类比. Zhai和Peng(2020)通过对华北克拉通长期的研究, 也认为早期板块构造的启动是阶段性的. 这种间歇性的启动, 最终使得板块构造通过不断增加的大陆面积和降低的大洋板块浮力来逐渐变得能持续性地自我维持下去, 并从局部到大范围, 到“类全球”, 再最终到全球. 因此, 讨论古代板块构造何时启动的核心其实是停滞层盖体制何时向活动层盖体制演变的问题. 从全球资料来看, 现代板块构造毫无疑问在新元古代已全面启动; 在古元古代中期也产生了全球性的板块边缘、刚性块体和俯冲作用, 只是地温梯度与现今不同. 在太古宙和元古宙地幔温度较高, 一方面在汇聚板块边缘出现暖俯冲作用, 另一方面在古缝合带出现热张裂作用(Zheng和Zhao, 2020); 这两类过程不是仅仅发生在局部地区, 而是可能连成全球性的网络. 随着地幔温度的逐渐降低, 板块构造体制的演变显然具有渐进式的特征, 从暖俯冲变成冷俯冲. 该渐进过程可能并非线性的, 不排除有阶段性的变化; 而板块构造体制演变的根本则取决于板块边缘热状态的演化(翟明国等, 2020; Zheng和Zhao, 2020).

全球陆壳变质条件的分布和随时间的变化也可反映构造过程的长期演化(Brown和Johnson, 2019; Holder等, 2019; Zheng和Zhao, 2020). 从变质作用的性质上来看, 受地幔温度变化的影响, 俯冲带的地温梯度随时间发生变化, 古元古代俯冲带较之显生宙俯冲带更温暖, 但比晚太古代俯冲带更冷一些. 目前较早

的榴辉岩相变质作用发现于坦桑尼亚的Usagaran造山带(约2.0Ga; Möller等, 1995; Collins等, 2004)和科拉半岛Salma榴辉岩(约1.87Ga)(Imayama等, 2017). 目前报道的最老的高压麻粒岩则产生于晚太古代(2.5Ga), 出现在华北克拉通东部的建平杂岩中(魏春景等, 2001; O'Brien和Rötzler, 2003; Liu等, 2011; Lu等, 2017). 而目前发现的最老蓝片岩为新元古代(Stern, 2008). 因此, 晚太古代、古元古代和新元古代分别主要出现高压麻粒岩、榴辉岩和蓝片岩相高压变质作用这一现象, 如果没有保存的偏差(Baldwin等, 2004), 可能恰恰反映了由于地球的冷却和从晚太古代到新元古代俯冲带的地温梯度下降. 这也与地球早期的暖俯冲的认识(Zheng和Zhao, 2020)是一致的.

从变质作用的时代上来看, 根据已发表的汇聚板块边缘变质作用的温压条件资料(Brown和Johnson, 2019), 低温/压比和高温/压比的双变质带在太古宙就开始出现, 从约2.5Ga到甚至更早的3.7Ga(Capitanio等, 2019)并逐渐明晰, 尤其是低温/压比的峰所对应的低地温梯度随着年龄年轻而越来越强(图3), 表明板块深俯冲作用的加剧(Holder等, 2019). 蓝片岩相变质作用出现在新元古代以来的俯冲带中, 中元古代是否存在还需要更多可靠资料; 超高压变质作用也在新元古代才开始出现, 在中元古代和古元古代以及太古宙尚未发现; 在中-晚太古代出现高压麻粒岩相变质, 而在古太古代则主要为角闪岩相变质; 这些都表明了地球历史上变质条件的逐渐演变. 对于始太古代来说, 总体上也处于高温/压比的条件, 但可能由于局部特征而显得比较复杂(图3), 这可能反映早期地球各块体间在进入活动层盖构造后的差异. 对于早期变质作用的研究还需注意两点: 一方面, 地球早期由于与现今热状态的差异可能俯冲本身不会产生蓝片岩相条件(Imayama等, 2017); 另一方面, 对于太古宙所获得的变质作用资料, 可能由于岩石保存的原因而积累数据较少, 使得无法对早期变质作用的特征进行充分评估. 少量存在的早期低温/压变质作用条件(图3), 不排除早期可能局部就有冷俯冲(尽管未必有现代的那么冷)和板块构造(Brown和Johnson, 2018; Capitanio等, 2019). 这与古地磁所揭示的古太古代-中太古代时期的古代板块构造的块体位移(Brenner等, 2020)、地球物理勘测获得的地震接收函数数据揭示的Pilbara克拉通地壳成分的改变(Yuan, 2015)、金刚石中榴辉岩包裹体(Shirey和Ri-

图3 地球不同时期变质作用条件在压力-温度图上的分布
据Imayama等(2017)修改. 变质作用数据来自Brown和Johnson(2019)

chardson, 2011)以及太古宙花岗质岩石的多样性(Martin, 1993; Martin等, 2010; Moyen, 2011; Laurent等, 2014)的出现都是一致的. 但是, 对于早期大范围古代板块构造启动的具体时间, 显然还需对不同的古老块体做更多的工作.

8 关键问题和未来研究方向

综上所述, 前寒武纪不同时期俯冲作用的范围、性质和机制都不尽相同, 在不同陆块的表现可能也有差异. 目前, 较多研究都支持古元古代存在古代板块构造和俯冲作用, 对现代板块构造在新元古代就已启动更无大的争议. 从岩石组成上来看, 古元古代时期的岩石组成与太古宙相比有较大的区别, 而与之后的岩石有更多相似之处, 且古老地壳的再造在该时期也有较为明显的体现. 如前文所述, 太古宙时期的俯冲作用与现今俯冲带的特征和判别标志不尽相同. 结合已有的工作, 大陆地壳成分的系统变化、变质作用和数值模拟工作表明, 在4.0Ga之后可能已存在了俯冲作用. 但不同克拉通演化历史的差异以及同一克拉通内记录的俯冲作用的穿时性都需引起注意.

对地球早期俯冲作用和板块构造的研究需要多学科多角度的工作联合攻关. 重点要解决以下几个关键

问题: (1) 地球在太古宙时期的俯冲作用和板块构造范式如何演变? 包括从地壳尺度、地幔尺度、岩石圈尺度以及俯冲的方式(洋-洋、洋-陆、陆-陆)和性质(冷俯冲和暖俯冲)在不同地区间差异的机制如何? (2) 从始太古代到新元古代大陆地壳的形成和陆壳成分改变的机制是什么? (3) TTG岩石的弧地球化学属性从何而来? (4) 太古宙花岗质岩石成分多样性的根本机制是什么? 太古宙非TTG花岗质岩石和火山岩的形成和机制如何? 火山-沉积组合随时代如何演变? (5) 从太古宙到古元古代岩浆成分和构造样式的转变机制是什么? (6) 超大陆演化过程中的外部俯冲与内部裂解如何耦合?

瞄准上述科学问题, 对前寒武纪典型地区开展详细的岩石学、同位素年代学和地球化学研究仍非常必要, 有以下几个领域的工作有待进一步深化: (1) 基于大数据的分析、对比和模拟计算, 研究岩石成分变化和变质作用与大陆演化、俯冲作用乃至板块构造之间的联系; (2) 基于原位微尺度成分变化的现代测试技术手段, 研究典型岩石(如早期TTG、非TTG岩石、酸性火山岩、紫苏花岗岩等)的成因和成岩的过程; (3) 结合热力学、数值模拟和高温高压实验工作, 进一步约束不同岩石形成的物理化学条件和源区特征; (4) 前寒武纪岩浆作用、大陆演化、古俯冲带和古大洋识别及与环境变迁之间的联系; (5) 太古宙地幔的属性与古代板块构造过程中的物质循环过程; (6) 元古宙时期构造-岩浆-变质-沉积作用与超大陆演化之间的联系与衔接. 围绕上述几个方面开展工作, 加强国际对比研究, 对典型地区开展国际联合地质考察和研究, 将有助于在前寒武纪大陆形成和超大陆演化研究上取得重要的突破.

9 结语

地质历史漫长的前寒武纪记录了地球复杂的演化史, 尤其是地球的热演化造成不同时期板块边缘岩石圈热梯度和流变学的演变, 进而决定了俯冲作用的特征和范围. 地球早期俯冲作用和板块构造的启动具有渐进式的特征, 从始太古代启动的古代板块构造逐渐演化成新元古代开始的现代板块构造. 汇聚板块边缘不断降低的地温梯度不仅促进了现代板块构造的启动, 还促进了俯冲带壳幔物质循环, 更推动了地壳物质

成分和海水成分的改变. 对前寒武纪俯冲带的研究, 目前更多是对于俯冲作用的启动、分布、样式的综合研究, 对于俯冲带岩浆作用和化学地球动力学过程的具体细节还有较大的研究空间. 中国有多个前寒武纪地体, 具有不同的演化历史, 在不同超大陆中都扮演了各自的角色, 具备得天独厚的条件, 有望在国际前寒武纪研究的前沿科学问题上产生有特色有影响力的研究成果.

致谢 感谢翟明国院士、郑永飞院士、赵国春院士以及两位匿名评审人对论文初稿提出的宝贵意见, 这些意见对论文质量提升有非常大的帮助. 感谢与张少兵教授的讨论. 李林森参与了变质作用数据搜集工作.

参考文献

- Kusky T. 2020. 板块构造与地幔温度和变质属性之间的关系. 中国科学: 地球科学, 50: 635–644
- 万渝生, 董春艳, 任鹏, 白文倩, 颜炳强, 刘守偆, 谢士稳, 刘敦一. 2017. 华北克拉通太古宙TTG岩石的时空分布、组成特征及形成演化: 综述. 岩石学报, 33: 1405–1419
- 万渝生, 宋彪, 伍家善, 刘敦一, 张宗清. 1999. 鞍山3.8Ga奥长花岗岩岩石的地球化学和Nd、Sr同位素组成及其意义. 地质学报, 73: 25–36
- 万渝生, 刘敦一, 董春艳, Nutman A, Wilde S A, 王伟, 颜炳强, 殷小艳, 周红英. 2009. 中国最老岩石和锆石. 岩石学报, 25: 1793–1807
- 魏春景, 张翠光, 张阿利, 伍天洪, 李江海. 2001. 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. 岩石学报, 17: 269–282
- 温德娟. 2019. 华北地台北缘鞍山白家坟奥长花岗岩地球化学特征、锆石U-Pb年龄及意义. 地质通报, 38: 1711–1717
- 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 韩秀伶, 李永刚. 1992. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及初步研究. 中国科学B辑, 12: 1325–1330
- 翟明国, 赵磊, 祝禧艳, 焦淑娟, 周艳艳, 周李岗. 2020. 早期大陆与板块构造启动——前沿热点介绍与展望. 岩石学报, 36: 2249–2275
- 张家辉, 金巍, 王亚飞, 李斌, 蔡丽斌. 2018. 鞍山地区始-古太古代花岗岩质地壳的形成及演化——深沟寺杂岩的岩石学、年代学及地球化学证据. 地质学报, 92: 887–907
- André L, Abraham K, Hofmann A, Monin L, Kleinhanns I C, Foley S. 2019. Early continental crust generated by reworking of basalts variably silicified by seawater. *Nat Geosci*, 12: 769–773
- Ashton K E, Hartlaub R P, Bethune K M, Heaman L M, Rayner N, Niebergall G R. 2012. New depositional age constraints for the Murmac Bay group of the southern Rae craton, Canada. *Precam-*

- brian Res*, 232: 70–88
- Ashwal L D, Demaiffe D, Torsvik T H. 2002. Petrogenesis of Neoproterozoic granitoids and related rocks from the Seychelles: The case for an Andean-type arc origin. *J Petrol*, 43: 45–83
- Ashwal L D, Solanki A M, Pandit M K, Corfu F, Hendriks B W H, Burke K, Torsvik T H. 2013. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic Mt. Abu granitoids, NW India: Regional correlation and implications for Rodinia paleogeography. *Precambrian Res*, 236: 265–281
- Baldwin J A, Bowring S A, Williams M L, Williams I S. 2004. Eclogites of the Snowbird tectonic zone: Petrological and U-Pb geochronological evidence for Paleoproterozoic high-pressure metamorphism in the western Canadian Shield. *Contrib Mineral Petrol*, 147: 528–548
- Baratoux L, Metelka V, Naba S, Jessell M W, Grégoire M, Ganne J. 2011. Juvenile Paleoproterozoic crust evolution during the Eburnean orogeny (~2.2–2.0 Ga), western Burkina Faso. *Precambrian Res*, 191: 18–45
- Bauer A B, Reimink J R, Chacko T, Foley B J, Shirey S B, Pearson D G. 2020. Hafnium isotopes in zircons document the gradual onset of mobile-lid tectonics. *Geochem Persp Lett*, 14: 1–6
- Bayanova T, Ludden J, Mitrofanov F. 2009. Timing and duration of Palaeoproterozoic events producing ore-bearing layered intrusions of the Baltic Shield: Metallogenic, petrological and geodynamic implications. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 323: 165–198
- Bédard J H. 2018. Stagnant lids and mantle overturns: Implications for Archean tectonics, magmagenesis, crustal growth, mantle evolution, and the start of plate tectonics. *Geosci Front*, 9: 19–49
- Berman R G, Pehrsson S, Davis W J, Ryan J J, Qui H, Ashton K E. 2013. The Arrowsmith orogeny: Geochronological and thermobarometric constraints on its extent and tectonic setting in the Rae craton, with implications for pre-Nuna supercontinent reconstruction. *Precambrian Res*, 232: 44–69
- Betts P, Giles D. 2006. The 1800–1100 Ma tectonic evolution of Australia. *Precambrian Res*, 144: 92–125
- Bierlein F P, Groves D I, Cawood P A. 2009. Metallogeny of accretionary orogens—The connection between lithospheric processes and metal endowment. *Ore Geol Rev*, 36: 282–292
- Billen M I. 2008. Modeling the dynamics of subducting slabs. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 36: 325–356
- Bowring S A, Williams I S. 1999. Priscoan (4.00–4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada. *Contrib Mineral Petrol*, 134: 3–16
- Brenner A R, Fu R R, Evans D A D, Smirnov A V, Trubko R, Rose I R. 2020. Paleomagnetic evidence for modern-like plate motion velocities at 3.2 Ga. *Sci Adv*, 6: eaaz8670

- Brown M. 2015. Paleo- to Mesoarchean polymetamorphism in the Barberton Granite-Greenstone Belt, South Africa: Constraints from U-Pb monazite and Lu-Hf garnet geochronology on the tectonic processes that shaped the belt: Discussion. *Geol Soc Am Bull*, 127: 1550–1557
- Brown M, Johnson T. 2018. Secular change in metamorphism and the onset of global plate tectonics. *Am Miner*, 103: 181–196
- Brown M, Johnson T. 2019. Time's arrow, time's cycle: Granulite metamorphism and geodynamics. *Minral Mag*, 83: 323–338
- Brown M, Kirkland C L, Johnson T E. 2020. Evolution of geodynamics since the Archean: Significant change at the dawn of the Phanerozoic. *Geology*, 48: 488–492
- Burnham A D, Berry A J. 2017. Formation of Hadean granites by melting of igneous crust. *Nat Geosci*, 10: 457–461
- Capitanio F A, Nebel O, Cawood P A, Weinberg R F, Chowdhury P. 2019. Reconciling thermal regimes and tectonics of the early Earth. *Geology*, 47: 923–927
- Cawood P A. 2020a. Metamorphic rocks and plate tectonics. *Sci Bull*, 65: 968–969
- Cawood P A. 2020b. Earth Matters: A tempo to our planet's evolution. *Geology*, 48: 525–526
- Cawood P A, Hawkesworth C J. 2014. Earth's middle age. *Geology*, 42: 503–506
- Cawood P A, Pisarevsky S A. 2017. Laurentia-Baltica-Azononia relations during Rodinia assembly. *Precambrian Res*, 292: 386–397
- Chen W T, Sun W H, Wang W, Zhao J H, Zhou M F. 2014. "Grenvillian" intra-plate mafic magmatism in the southwestern Yangtze Block, SW China. *Precambrian Res*, 242: 138–153
- Chen W T, Sun W H, Zhou M F, Wang W. 2018. Ca. 1050 Ma intra-continental rift-related A-type felsic rocks in the southwestern Yangtze Block, South China. *Precambrian Res*, 309: 22–44
- Christensen U R. 1985. Thermal evolution models for the earth. *J Geophys Res*, 90: 2995–3007
- Collins A S, Reddy S M, Buchan C, Mruma A. 2004. Temporal constraints on Palaeoproterozoic eclogite formation and exhumation (Usagaran Orogen, Tanzania). *Earth Planet Sci Lett*, 224: 175–192
- Condie K C. 2008. Did the character of subduction change at the end of the Archean? Constraints from convergent-margin granitoids. *Geology*, 36: 611–614
- Condie K. 2013. Preservation and recycling of crust during accretionary and collisional phases of Proterozoic orogens: A bumpy road from Nuna to Rodinia. *Geosciences*, 3: 240–261
- Condie K C. 2018. A planet in transition: The onset of plate tectonics on Earth between 3 and 2 Ga? *Geosci Front*, 9: 51–60
- Condie K C. 2019. Earth's oldest rocks and minerals. In: Van Kranendonk M J, Bennett V C, Hoffmann J E, eds. *Earth's Oldest Rocks*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier. 239–254
- Condie K C, Kröner A. 2008. When did plate tectonics begin? Evidence from the geologic record. *Spec Paper Geol Soc Am*, 440: 281–294
- Condie K C, O'Neill C, Aster R C. 2009. Evidence and implications for a widespread magmatic shutdown for 250 Myr on Earth. *Earth Planet Sci Lett*, 282: 294–298
- Conrad C P, Lithgow-Bertelloni C. 2002. How mantle slabs drive plate tectonics. *Science*, 298: 207–209
- Cutts K, Hand M, Kelsey D E. 2011. Evidence for early Mesoproterozoic (ca. 1590 Ma) ultrahigh-temperature metamorphism in southern Australia. *Lithos*, 124: 1–16
- Darling J, Storey C, Hawkesworth C. 2009. Impact melt sheet zircons and their implications for the Hadean crust. *Geology*, 37: 927–930
- Davidson J P, Arculus R J. 2006. The significance of Phanerozoic arc magmatism in generating continental crust. In: Brown M, Rushmer T, eds. *Evolution and Differentiation of the Continental Crust*. Cambridge UK: Cambridge University Press. 135–172
- Davies J H. 1999. Simple analytic model for subduction zone thermal structure. *Geophys J Int*, 139: 823–828
- de Ronde C E J, de Wit M J. 1994. tectonic history of the Barberton greenstone belt, South Africa: 490 million years of Archean crustal evolution. *Tectonics*, 13: 983–1005
- Debaille V, O'Neill C, Brandon A D, Haenecour P, Yin Q Z, Mattielli N, Treiman A H. 2013. Stagnant-lid tectonics in early Earth revealed by ^{142}Nd variations in late Archean rocks. *Earth Planet Sci Lett*, 373: 83–92
- Deng H, Peng S B, Polat A, Kusky T, Jiang X F, Han Q S, Wang L, Huang Y, Wang J P, Zeng W, Hu Z X. 2017. Neoproterozoic IAT intrusion into Mesoproterozoic MOR Miaowan Ophiolite, Yangtze Craton: Evidence for evolving tectonic settings. *Precambrian Res*, 289: 75–94
- Deng Z, Chaussidon M, Guitreau M, Puchtel I S, Dauphas N, Moynier F. 2019. An oceanic subduction origin for Archaean granitoids revealed by silicon isotopes. *Nat Geosci*, 12: 774–778
- Dharma Rao C V, Santosh M, Wu Y B. 2011. Mesoproterozoic ophiolitic mélange from the SE periphery of the Indian plate: U-Pb zircon ages and tectonic implications. *Gondwana Res*, 19: 384–401
- Dharma Rao C V, Santosh M, Zhang Z, Tsunogae T. 2013. Mesoproterozoic arc magmatism in SE India: Petrology, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of the Bopudi felsic suite from Eastern Ghats Belt. *J Asian Earth Sci*, 75: 183–201
- Dhuime B, Wuestefeld A, Hawkesworth C J. 2015. Emergence of modern continental crust about 3 billion years ago. *Nat Geosci*, 8: 552–555
- Dhuime B, Hawkesworth C J, Delavault H, Cawood P A. 2018. Rates of generation and destruction of the continental crust: Implications for

- continental growth. *Phil Trans R Soc A*, 376: 20170403
- Dong C, Wan Y, Xie H, Nutman A P, Xie S, Liu S, Ma M, Liu D. 2017. The Mesoproterozoic Tiejiaoshan-Gongchangling potassic granite in the Anshan-Benxi area, North China Craton: Origin by recycling of Paleoproterozoic to Eoproterozoic crust from U-Pb-Nd-Hf-O isotopic studies. *Lithos*, 290-291: 116–135
- Dong Y P, Yang Z, Liu X M, Zhang X N, He D F, Li W, Zhang F F, Sun S S, Zhang H F, Zhang G W. 2014. Neoproterozoic amalgamation of the Northern Qinling Terrain to the North China Craton: Constraints from geochronology and geochemistry of the Kuanping ophiolite. *Precambrian Res*, 255: 77–95
- Dong Y P, Zhou M F, Zhang G W, Zhou D W, Liu L, Zhang Q. 2008. The Grenvillian Songshugou ophiolite in the Qinling Mountains, Central China: Implications for the tectonic evolution of the Qinling orogenic belt. *J Asian Earth Sci*, 32: 325–335
- Dziggel A, Armstrong R A, Stevens G, Anhaeusser C R. 2003. Timing of mid-to lower-crustal metamorphism in the granitoid-gneiss terrain south of the Barberton greenstone belt, South Africa. *Geophy Res Abstract*, 5: 05252
- Ernst W G. 2009. Archean plate tectonics, rise of Proterozoic supercontinentality and onset of regional, episodic stagnant-lid behavior. *Gondwana Res*, 15: 243–253
- Faccenna C, Becker T W, Conrad C P, Husson L. 2013. Mountain building and mantle dynamics. *Tectonics*, 32: 80–93
- Fischer R, Gerya T. 2016. Regimes of subduction and lithospheric dynamics in the Precambrian: 3D thermomechanical modelling. *Gondwana Res*, 37: 53–70
- Forsyth D, Uyeda S. 1975. On the relative importance of the driving forces of plate motion. *Geophys J Int*, 43: 163–200
- Francois C, Philippot P, Rey P, Rubatto D. 2014. Burial and exhumation during Archean sagduction in the East Pilbara Granite-Greenstone Terrane. *Earth Planet Sci Lett*, 396: 235–251
- Garde A A, Hollis J A. 2010. A buried Palaeoproterozoic spreading ridge in the northern Nagssugtoqidian orogen, West Greenland. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 338: 213–234
- Ge R, Zhu W, Wilde S A, Wu H. 2018. Remnants of Eoproterozoic continental crust derived from a subducted proto-arc. *Sci Adv*, 4: eaao3159
- Geraldes M C, Van Schmus W R, Condie K C, Bell S, Teixeira W, Babinski M. 2001. Proterozoic geologic evolution of the SW part of the Amazonian Craton in Mato Grosso state, Brazil. *Precambrian Res*, 111: 91–128
- Gerya T. 2014. Precambrian geodynamics: Concepts and models. *Gondwana Res*, 25: 442–463
- Greber N D, Dauphas N, Bekker A, Ptáček M P, Bindeman I N, Hofmann A. 2017. Titanium isotopic evidence for felsic crust and plate tectonics 3.5 billion years ago. *Science*, 357: 1271–1274
- Han Q S, Peng S B, Kusky T, Polat A, Jiang X F, Cen Y, Liu S F, Deng H. 2017. A Paleoproterozoic ophiolitic mélange, Yangtze craton, South China: Evidence for Paleoproterozoic suturing and micro-continent amalgamation. *Precambrian Res*, 293: 13–38
- Harrison T M. 2009. The Hadean Crust: Evidence from >4 Ga Zircons. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 37: 479–505
- Hartlaub R P, Heaman L M, Chacko T, Ashton K E. 2007. Circa 2.3 Ga magmatism of the Arrowsmith Orogeny, Uranium City region, western Churchill Craton, Canada. *J Geol*, 115: 181–195
- Hawkesworth C J, Brown M. 2018. Earth dynamics and the development of plate tectonics. *Phil Trans R Soc A*, 376: 20180228
- He Y H, Zhao G C, Sun M, Xia X P. 2009. SHRIMP and LA-ICP-MS zircon geochronology of the Xiong'er volcanic rocks: Implications for the Paleoproterozoic evolution of the southern margin of the North China Craton. *Precambrian Res*, 168: 213–222
- Hoffman P F. 2014. The origin of Laurentia: Rae Craton as the backstop for proto-Laurentian amalgamation by slab suction. *Geosci Can*, 41: 313–320
- Holder R M, Viete D R, Brown M, Johnson T E. 2019. Metamorphism and the evolution of plate tectonics. *Nature*, 572: 378–381
- Holland H D. 2006. The oxygenation of the atmosphere and oceans. *Phil Trans R Soc B*, 361: 903–915
- Hopkins M, Harrison T M, Manning C E. 2008. Low heat flow inferred from >4 Gyr zircons suggests Hadean plate boundary interactions. *Nature*, 456: 493–496
- Hu P Y, Zhai Q G, Wang J, Tang Y, Ren G M. 2017. The Shimian ophiolite in the western Yangtze Block, SW China: Zircon SHRIMP U-Pb ages, geochemical and Hf-O isotopic characteristics, and tectonic implications. *Precambrian Res*, 298: 107–122
- Huang D L, Wang X L, Xia X P, Wan Y S, Zhang F F, Li J Y, Du D H. 2019. Neoproterozoic low- $\delta^{18}\text{O}$ zircons revisited: Implications for Rodinia configuration. *Geophy Res Lett*, 46: 678–688
- Hynes A, Rivers T. 2010. Protracted continental collision—Evidence from the Grenville Orogen. *Can J Earth Sci*, 47: 591–620
- Imayama T, Oh C W, Baltybaev S K, Park C S, Yi K, Jung H. 2017. Paleoproterozoic high-pressure metamorphic history of the Salma eclogite on the Kola Peninsula, Russia. *Lithosphere*, 9: 855–873
- Jagoutz O, Kelemen P B. 2015. Role of Arc Processes in the formation of continental crust. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 43: 363–404
- Johnson S P, Oliver G J H. 2000. Mesoproterozoic oceanic subduction, island-arc formation and the initiation of back-arc spreading in the Kibaran Belt of central, Southern Africa: Evidence from the ophiolite terrane, Chewore Inliers, northern Zimbabwe. *Precambrian Res*, 103: 125–146
- Karmakar S, Schenk V. 2016. Mesoproterozoic UHT metamorphism in

- the Southern Irumide Belt, Chipata, Zambia: Petrology and in situ monazite dating. *Precambrian Res*, 275: 332–356
- Kemp A I S, Wilde S A, Hawkesworth C J, Coath C D, Nemchin A, Pidgeon R T, Vervoort J D, DuFrane S A. 2010. Hadean crustal evolution revisited: New constraints from Pb-Hf isotope systematics of the Jack Hills zircons. *Earth Planet Sci Lett*, 296: 45–56
- Kenny G G, Whitehouse M J, Kamber B S. 2016. Differentiated impact melt sheets may be a potential source of Hadean detrital zircon. *Geology*, 44: 435–438
- Khain E V, Bibikova E V, Kröner A, Zhuravlev D Z, Sklyarov E V, Fedotova A A, Kravchenko-Berezhnoy I R. 2002. The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt: U-Pb and Pb-Pb zircon ages for the Dunzhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 199: 311–325
- Kinny P D. 1986. 3820 Ma zircons from a tonalitic Armisnoq gneiss in the Godthåb district of Southern West Greenland. *Earth Planet Sci Lett*, 79: 337–347
- Kisters A F M, Belcher R W, Poujol M, Dziggel A. 2010. Continental growth and convergence-related arc plutonism in the Mesoarchean: Evidence from the Barberton granitoid-greenstone terrain, South Africa. *Precambrian Res*, 178: 15–26
- Kolb J. 2014. Structure of the Palaeoproterozoic Nagssugtoqidian Orogen, South-East Greenland: Model for the tectonic evolution. *Precambrian Res*, 255: 809–822
- Korenaga J. 2006. Archean geodynamics and the thermal evolution of Earth. *AGU Geophys Monogr Ser*, 164: 7–32
- Korenaga J. 2013. Initiation and evolution of plate tectonics on Earth: Theories and observations. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 41: 117–151
- Kröner A, Stern R J. 2004. Pan-African Orogeny. *Encyclopedia Geol*, 1: 1–12
- Kusky T M, Li J H, Tucker R D. 2001. The Archean Dongwanzi ophiolite complex, North China Craton: 2.505-billion-year-old oceanic crust and mantle. *Science*, 292: 1142–1145
- Laurent O, Björnson J, Wotzlaw J F, Bretscher S, Pimenta Silva M, Moyen J F, Ulmer P, Bachmann O. 2020. Earth's earliest granitoids are crystal-rich magma reservoirs tapped by silicic eruptions. *Nat Geosci*, 13: 163–169
- Laurent O, Martin H, Moyen J F, Doucelance R. 2014. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: Evidence for the onset of “modern-style” plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga. *Lithos*, 205: 208–235
- Lenardic A. 2018. The diversity of volcanic-tectonic modes and thoughts about transitions between them. *Phil Trans Royal Soc A-Math Phys Engin Sci*, 376: 20170416
- Li X H, Li W X, Li Z X, Lo C H, Wang J, Ye M F, Yang Y H. 2009. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks. *Precambrian Res*, 174: 117–128
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, Wu J S, Shen Q H. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20: 339–342
- Liu H, Sun W D, Zartman R, Tang M. 2019. Continuous plate subduction marked by the rise of alkali magmatism 2.1 billion years ago. *Nat Commun*, 10: 3408
- Liu S, Santosh M, Wang W, Bai X, Yang P. 2011. Zircon U-Pb chronology of the Jianping Complex: Implications for the Precambrian crustal evolution history of the northern margin of North China Craton. *Gondwana Res*, 20: 48–63
- Lu J S, Zhai M G, Lu L S, Zhao L. 2017. P-T-t evolution of Neoproterozoic to Paleoproterozoic pelitic granulites from the Jidong terrane, eastern North China Craton. *Precambrian Res*, 290: 1–15
- Manikyamba C, Ray J, Ganguly S, Singh M R, Santosh M, Saha A, Satyanarayanan M. 2015. Boninitic metavolcanic rocks and island arc tholeiites from the Older Metamorphic Group (OMG) of Singhbhum Craton, eastern India: Geochemical evidence for Archean subduction processes. *Precambrian Res*, 271: 138–159
- Marchi S, Bottke W F, Elkins-Tanton L T, Bierhaus M, Wünnemann K, Morbidelli A, Kring D A. 2014. Widespread mixing and burial of Earth's Hadean crust by asteroid impacts. *Nature*, 511: 578–582
- Marsh J H, Culshaw N G. 2014. Timing and conditions of high-pressure metamorphism in the western Grenville Province: Constraints from accessory mineral composition and phase equilibrium modeling. *Lithos*, 200–201: 402–417
- Marshak S, Alkmim F F, Jordt-Evangelista H. 1992. Proterozoic crustal extension and the generation of dome-and-keel structure in an Archean granite-greenstone terrane. *Nature*, 357: 491–493
- Martin H. 1993. The mechanisms of petrogenesis of the Archean continental crust—Comparison with modern processes. *Lithos*, 30: 373–388
- Martin E, Martin H, Sigmarsson O. 2010. Comment on “Continental geochemical signatures in dacites from Iceland and implications for models of early Archean crust formation” by Willbold, M., Hegner, E., Stracke A. and Rocholl A. *Earth Planet Sci Lett*, 293: 218–219
- Martin H, Moyen J F, Guitreau M, Blichert-Toft J, Le Pennec J L. 2014. Why Archean TTG cannot be generated by MORB melting in subduction zones. *Lithos*, 198–199: 1–13
- McDonough M R, McNicoll V J, Schetselaar E M, Grover T W. 2000. Geochronological and kinematic constraints on crustal shortening and escape in a two-sided oblique-slip collisional and magmatic orogen, Paleoproterozoic Taltson magmatic zone, northeastern Alberta. *Can J Earth Sci*, 37: 1549–1573

- McLelland J M, Selleck B W, Bickford M E. 2010. Review of the Proterozoic evolution of the Grenville Province, its Adirondack outlier, and the Mesoproterozoic inliers of the Appalachians. *Geol Society Am*, 206: 1–29
- Mohan M R, Singh S P, Santosh M, Siddiqui M A, Balaram V. 2012. TTG suite from the Bundelkhand Craton, Central India: Geochemistry, petrogenesis and implications for Archean crustal evolution. *J Asian Earth Sci*, 58: 38–50
- Mojzsis S J, Arrhenius G, McKeegan K D, Harrison T M, Nutman A P, Friend C R L. 1996. Evidence for life on Earth before 3800 million years ago. *Nature*, 384: 55–59
- Mojzsis S J, Cates N L, Caro G, Trail D, Abramov O, Guitreau M, Blichert-Toft J, Hopkins M D, Bleeker W. 2014. Component geochronology in the polyphase ca. 3920 Ma Acasta Gneiss. *Geochim Cosmochim Acta*, 133: 68–96
- Mojzsis S J, Harrison T M, Pidgeon R T. 2001. Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4300 Myr ago. *Nature*, 409: 178–181
- Moore W B, Webb A A G. 2013. Heat-pipe Earth. *Nature*, 501: 501–505
- Moyen J F. 2011. The composite Archean grey gneisses: Petrological significance, and evidence for a non-unique tectonic setting for Archean crustal growth. *Lithos*, 123: 21–36
- Moyen J F, Martin H, Jayananda M, Auvray B. 2003. Late Archean granites: A typology based on the Dharwar Craton (India). *Precambrian Res*, 127: 103–123
- Moyen J F, Martin H. 2012. Forty years of TTG research. *Lithos*, 148: 312–336
- Moyen J F, Stevens G, Kisters A F M, Belcher R W, Lemirre B. 2019. TTG plutons of the Barberton granitoid-greenstone terrain, South Africa. In: Van Kranendonk M J, Bennett V C, Hoffmann J E, eds. *Earth's oldest rocks*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier. 615–653
- Moyen J F, Stevens G, Kisters A. 2006. Record of mid-Archean subduction from metamorphism in the Barberton terrain, South Africa. *Nature*, 442: 559–562
- Möller A, Appel P, Mezger K, Schenk V. 1995. Evidence for a 2 Ga subduction zone: Eclogites in the Usagaran belt of Tanzania. *Geology*, 23: 1067–1070
- Myers J S, Shaw R D, Tyler I M. 1996. Tectonic evolution of Proterozoic Australia. *Tectonics*, 15: 1431–1446
- Nisbet E G, Fowler C M R. 1983. Model for Archean plate tectonics. *Geology*, 11: 376–379
- Nutman A P, Friend C R L, Kinny P D, McGregor V R. 1993. Anatomy of an Early Archean gneiss complex: 3900 to 3600 Ma crustal evolution in southern West Greenland. *Geology*, 21: 415–418
- O'Neill C, Debaille V. 2014. The evolution of Hadean-Eoarchean geodynamics. *Earth Planet Sci Lett*, 406: 49–58
- O'Neill C, Jellinek A M, Lenardic A. 2007. Conditions for the onset of plate tectonics on terrestrial planets and moons. *Earth Planet Sci Lett*, 261: 20–32
- O'Neil J, Carlson R W, Paquette J L, Francis D. 2012. Formation age and metamorphic history of the Nuvvuagittuq Greenstone Belt. *Precambrian Res*, 220–221: 23–44
- O'Brien P J, Rötzler J. 2003. High-pressure granulites: Formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics. *J Metamorph Geol*, 21: 3–20
- Parman S W, Grove T L, Dann J C, de Wit M J. 2004. A subduction origin for komatiites and cratonic lithospheric mantle. *S Afr J Geol*, 107: 107–118
- Parman S W, Grove T L, Dann J C. 2001. The production of Barberton komatiites in an Archean subduction zone. *Geophys Res Lett*, 28: 2513–2516
- Partin C A, Bekker A, Sylvester P J, Wodicka N, Stern R A, Chacko T, Heaman L M. 2014. Filling in the juvenile magmatic gap: Evidence for uninterrupted Paleoproterozoic plate tectonics. *Earth Planet Sci Lett*, 388: 123–133
- Pehrsson S J, Eglington B M, Evans D A D, Huston D, Reddy S M. 2015. Metallogeny and its link to orogenic style during the Nuna supercontinent cycle. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 424: 83–94
- Peltonen P, Kontinen A, Huhma H. 1998. Petrogenesis of the mantle sequence of the Jormua ophiolite (Finland): Melt migration in the upper mantle during Palaeoproterozoic continental break-up. *J Petrol*, 39: 297–329
- Peng P, Wang C, Wang X, Yang S. 2015. Qingyuan high-grade granite-greenstone terrain in the Eastern North China Craton: Root of a Neoproterozoic arc. *Tectonophysics*, 662: 7–21
- Peng T, Wang G D, Wang H Y C, Liu J H, Zhang H C G, Chen H X, Wu C M. 2019. Metamorphic *P-T* path and geochronology of garnet-bearing amphibolite of the Inyoni Shear Zone, southwestern Barberton Greenstone Belt, South Africa. *Precambrian Res*, 321: 261–276
- Piper J D A. 2013a. Continental velocity through Precambrian times: The link to magmatism, crustal accretion and episodes of global cooling. *Geosci Front*, 4: 7–36
- Piper J D A. 2013b. A planetary perspective on Earth evolution: Lid tectonics before plate tectonics. *Tectonophysics*, 589: 44–56
- Polat A, Kerrich R. 2001. Magnesian andesites, Nb-enriched basalt-andesites, and adakites from late-Archean 2.7 Ga Wawa greenstone belts, Superior Province, Canada: Implications for late Archean subduction zone petrogenetic processes. *Contrib Mineral Petrol*, 141: 36–52
- Puchtel I S, Haase K M, Hofmann A W, Chauvel C, Kulikov V S,

- Garbe-Schönberg C D, Nemchin A A. 1997. Petrology and geochemistry of crustally contaminated komatiitic basalts from the Vetryny belt, southeastern Baltic Shield: Evidence for an early Proterozoic mantle plume beneath rifted Archean continental lithosphere. *Geochim Cosmochim Acta*, 61: 1205–1222
- Qi H, Zhao J H. 2020. Petrogenesis of the Neoproterozoic low- $\delta^{18}\text{O}$ granitoids at the western margin of the Yangtze Block in South China. *Precambrian Res*, doi: 10.1016/j.precamres.2020.105953
- Rasmussen B, Bekker A, Fletcher I R. 2013. Correlation of Paleoproterozoic glaciations based on U-Pb zircon ages for tuff beds in the Transvaal and Huronian Supergroups. *Earth Planet Sci Lett*, 382: 173–180
- Reimink J R, Chacko T, Carlson R W, Shirey S B, Liu J, Stern R A, Bauer A M, Pearson D G, Heaman L M. 2018. Petrogenesis and tectonics of the Acasta Gneiss complex derived from integrated petrology and ^{142}Nd and ^{182}W extinct nuclide-geochemistry. *Earth Planet Sci Lett*, 494: 12–22
- Reimink J R, Davies J H F L, Chacko T, Stern R A, Heaman L M, Sarkar C, Schaltegger U, Creaser R A, Pearson D G. 2016. No evidence for Hadean continental crust within Earth's oldest evolved rock unit. *Nat Geosci*, 9: 777–780
- Rey P F, Coltice N, Flament N. 2014. Spreading continents kick-started plate tectonics. *Nature*, 513: 405–408
- Richardson S H, Shirey S B, Harris J W, Carlson R W. 2001. Archean subduction recorded by Re-Os isotopes in eclogitic sulfide inclusions in Kimberley diamonds. *Earth Planet Sci Lett*, 191: 257–266
- Richter F M. 1985. Models for the Archean thermal regime. *Earth Planet Sci Lett*, 73: 350–360
- Rino S, Kon Y, Sato W, Maruyama S, Santosh M, Zhao D. 2008. The Grenvillian and Pan-African orogens: World's largest orogenies through geologic time, and their implications on the origin of superplume. *Gondwana Res*, 14: 51–72
- Roberts N M W, Slagstad T. 2015. Continental growth and reworking on the edge of the Columbia and Rodinia supercontinents; 1.86–0.9 Ga accretionary orogeny in southwest Fennoscandia. *Int Geol Rev*, 57: 1582–1606
- Roth A S G, Bourdon B, Mojzsis S J, Touboul M, Sprung P, Guitreau M, Blichert-Toft J. 2013. Inherited ^{142}Nd anomalies in Eoarchean protoliths. *Earth Planet Sci Lett*, 361: 50–57
- Sandiford M, van Kranendonk M J, Bodorkos S. 2004. Conductive incubation and the origin of dome-and-keel structure in Archean granite-greenstone terrains: A model based on the eastern Pilbara Craton, Western Australia. *Tectonics*, 23: TC1009
- Santosh M. 2010. Assembling North China Craton within the Columbia supercontinent: The role of double-sided subduction. *Precambrian Res*, 178: 149–167
- Santosh M, Yoshida M. 2001. Pan-African extensional collapse along the Gondwana suture. *Gondwana Res*, 4: 188–191
- Santosh M, Liu S J, Tsunogae T, Li J H. 2012. Paleoproterozoic ultrahigh-temperature granulites in the North China Craton: Implications for tectonic models on extreme crustal metamorphism. *Precambrian Res*, 222–223: 77–106
- Scott D J, Helmstaedt H, Bickle M J. 1992. Purtuniq ophiolite, Cape Smith belt, northern Quebec, Canada: A reconstructed section of Early Proterozoic oceanic crust. *Geology*, 20: 173–176
- Shimoyama A, Matsubaya O. 1992. Carbon isotope compositions of graphite and carbonate in 3.8×10^9 years old Isua rocks. *Chem Lett*, 21: 1205–1208
- Shirey S B, Kamber B S, Whitehouse M J, Mueller P A, Basu A R. 2008. A review of the isotopic and trace element evidence for mantle and crustal processes in the Hadean and Archean: Implications for the onset of plate tectonic subduction When did plate tectonics begin on planet Earth? *Geol Soc Am Spec Papers*, 440: 1–29
- Shirey S B, Richardson S H. 2011. Start of the Wilson cycle at 3 Ga shown by diamonds from subcontinental mantle. *Science*, 333: 434–436
- Shu L S, Deng X L, Zhu W B, Ma D S, Xiao W J. 2011. Precambrian tectonic evolution of the Tarim Block, NW China: New geochronological insights from the Quruqtagh domain. *J Asian Earth Sci*, 42: 774–790
- Singh M R, Manikyamba C, Ganguly S, Ray J, Santosh M, Dhanakumar Singh T, Chandan Kumar B. 2017. Paleoproterozoic arc basalt-boninite-high magnesian andesite-Nb enriched basalt association from the Malangtoli volcanic suite, Singhbhum Craton, eastern India: Geochemical record for subduction initiation to arc maturation continuum. *J Asian Earth Sci*, 134: 191–206
- Sizova E, Gerya T, Brown M, Perchuk L L. 2010. Subduction styles in the Precambrian: Insight from numerical experiments. *Lithos*, 116: 209–229
- Sizova E, Gerya T, Stüwe K, Brown M. 2015. Generation of felsic crust in the Archean: A geodynamic modeling perspective. *Precambrian Res*, 271: 198–224
- Sleep N H. 2000. Evolution of the mode of convection within terrestrial planets. *J Geophys Res*, 105: 17563–17578
- Sobolev S V, Brown M. 2019. Surface erosion events controlled the evolution of plate tectonics on Earth. *Nature*, 570: 52–57
- Solomatov V S, Moresi L N. 1997. Three regimes of mantle convection with non-Newtonian viscosity and stagnant lid convection on the terrestrial planets. *Geophys Res Lett*, 24: 1907–1910
- Solomatov V S, Moresi L N. 2000. Scaling of time-dependent stagnant

- lid convection: Application to small-scale convection on Earth and other terrestrial planets. *J Geophys Res*, 105: 21795–21817
- Song B, Nutman A P, Liu D, Wu J. 1996. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, Northeastern China. *Precambrian Res*, 78: 79–94
- Stern R J. 2002. Subduction zones. *Rev Geophys*, 40: 1012
- Stern R J. 2018. The evolution of plate tectonics. *Phil Trans R Soc A*, 376: 20170406
- Stern R J. 2008. Neoproterozoic crustal growth: The solid Earth system during a critical episode of Earth history. *Gondwana Res*, 14: 33–50
- Stern R J, Gerya T, Tackley P J. 2018. Stagnant lid tectonics: Perspectives from silicate planets, dwarf planets, large moons, and large asteroids. *Geosci Front*, 9: 103–119
- St-Onge M R, Van Gool J A M, Garde A A, Scott D J. 2009. Correlation of Archean and Palaeoproterozoic units between northeastern Canada and western Greenland: Constraining the pre-collisional upper plate accretionary history of the Trans-Hudson orogen. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 318: 193–235
- Tang C A, Webb A A G, Moore W B, Wang Y Y, Ma T H, Chen T T. 2020. Breaking Earth's shell into a global plate network. *Nat Commun*, 11: 3621
- Tang H S, Chen Y J. 2013. Global glaciations and atmospheric change at ca. 2.3 Ga. *Geosci Front*, 4: 583–596
- Tang M, Chen K, Rudnick R L. 2016. Archean upper crust transition from mafic to felsic marks the onset of plate tectonics. *Science*, 351: 372–375
- Tang L, Santosh M. 2018. Neoproterozoic-Palaeoproterozoic terrane assembly and Wilson cycle in the North China Craton: An overview from the central segment of the Trans-North China Orogen. *Earth-Sci Rev*, 182: 1–27
- Tang M, Lee C T A, Rudnick R L, Condie K C. 2020. Rapid mantle convection drove massive crustal thickening in the late Archean. *Geochim Cosmochim Acta*, 278: 6–15
- Tassinari C C G, Macambira M J B. 1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, 22: 174–182
- Teixeira W, Ávila C A, Dussin I A, Corrêa Neto A V, Bongiolo E M, Santos J O, Barbosa N S. 2015. A juvenile accretion episode (2.35–2.32 Ga) in the Mineiro belt and its role to the Minas accretionary orogeny: Zircon U-Pb-Hf and geochemical evidences. *Precambrian Res*, 256: 148–169
- Trail D, Watson E B, Tailby N D. 2011. The oxidation state of Hadean magmas and implications for early Earth's atmosphere. *Nature*, 480: 79–82
- Trap P, Faure M, Lin W, Le Breton N, Monié P. 2012. Paleoproterozoic tectonic evolution of the Trans-North China Orogen: Toward a comprehensive model. *Precambrian Res*, 222–223: 191–211
- Turner S, Rushmer T, Reagan M, Moyan J F. 2014. Heading down early on? Start of subduction on Earth. *Geology*, 42: 139–142
- Turner S, Wilde S, Wörner G, Schaefer B, Lai Y J. 2020. An andesitic source for Jack Hills zircon supports onset of plate tectonics in the Hadean. *Nat Commun*, 11: 1241
- Ulmus J, Andersson J, Möller C. 2015. Hallandian 1.45 Ga high-temperature metamorphism in Baltica: *P-T* evolution and SIMS U-Pb zircon ages of aluminous gneisses, SW Sweden. *Precambrian Res*, 265: 10–39
- van Hunen J, van den Berg A P. 2008. Plate tectonics on the early Earth: Limitations imposed by strength and buoyancy of subducted lithosphere. *Lithos*, 103: 217–235
- van Kranendonk M J, Smithies R H, Griffin W L, Huston D L, Hickman A H, Champion D C, Anhaeusser C R, Pirajno F. 2015. Making it thick: A volcanic plateau origin of Palaeoarchean continental lithosphere of the Pilbara and Kaapvaal cratons. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 389: 83–111
- van Kranendonk M J, Hugh Smithies R, Hickman A H, Champion D C. 2007. Review: Secular tectonic evolution of Archean continental crust: Interplay between horizontal and vertical processes in the formation of the Pilbara Craton, Australia. *Terra Nova*, 19: 1–38
- van Thienen P, Vlaar N J, van den Berg A P. 2005. Assessment of the cooling capacity of plate tectonics and flood volcanism in the evolution of Earth, Mars and Venus. *Phys Earth Planet Inter*, 150: 287–315
- Vezinet A, Thomassot E, Pearson D G, Stern R A, Luo Y, Sarkar C. 2019. Extreme $\delta^{18}\text{O}$ signatures in zircon from the Saglek Block (North Atlantic Craton) document reworking of mature supracrustal rocks as early as 3.5 Ga. *Geology*, 47: 605–608
- Wan B, Yang X S, Tian X B, Yuan H Y, Kirscher U, Mitchell R N. 2020. Seismological evidence for the earliest global subduction network at 2 Ga ago. *Sci Adv*, 6: eabc5491
- Wan Y S, Liu D Y, Song B, Wu J S, Yang C H, Zhang Z Q, Geng Y S. 2005. Geochemical and Nd isotopic compositions of 3.8 Ga meta-quartz dioritic and trondhjemitic rocks from the Anshan area and their geological significance. *J Asian Earth Sci*, 24: 563–575
- Wang K Y, Li J L, Hao J, Li J H, Zhou S P. 1997. Late Archean mafic-ultramafic rocks from the Wuataishan, Shanxi Province: A possible ophiolite mélange. *Acta Petrol Sin*, 13: 139–151
- Wang W, Liu S W, Cawood P A, Bai X, Guo R R, Guo B R, Wang K. 2016. Late Neoproterozoic subduction-related crustal growth in the Northern Liaoning region of the North China Craton: Evidence from ~2.55 to 2.50 Ga granitoid gneisses. *Precambrian Res*, 281: 200–223
- Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, Zhao G, Yu J H, Qiu J S, Zhang Y J, Xing G F. 2014. Geochemical zonation across a Neoproterozoic orogenic belt: Isotopic evidence from granitoids and metasedimen-

- tary rocks of the Jiangnan orogen, China. *Precambrian Res*, 242: 154–171
- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, Zhang W L, Liu X M, Zhang G L. 2006. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution. *Precambrian Res*, 145: 111–130
- Wang X L, Zhou J C, Wan Y S, Kitajima K, Wang D, Bonamici C, Qiu J S, Sun T. 2013. Magmatic evolution and crustal recycling for Neoproterozoic strongly peraluminous granitoids from southern China: Hf and O isotopes in zircon. *Earth Planet Sci Lett*, 366: 71–82
- Wang Y F, Li X H, Jin W, Zhang J H. 2015. Eoarchean ultra-depleted mantle domains inferred from ca. 3.81 Ga Anshan trondhjemitic gneisses, North China Craton. *Precambrian Res*, 263: 88–107
- Wang Y J, Zhang Y Z, Fan W M, Geng H Y, Zou H P, Bi X W. 2014. Early Neoproterozoic accretionary assemblage in the Cathaysia Block: Geochronological, Lu-Hf isotopic and geochemical evidence from granitoid gneisses. *Precambrian Res*, 249: 144–161
- Watson E B, Harrison T M. 2005. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth. *Science*, 308: 841–844
- Witze A. 2006. The start of the world as we know it. *Nature*, 442: 128–131
- Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, Zhao Z F, Zhang S B, Liu X, Wu F Y. 2006. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. *Precambrian Res*, 146: 179–212
- Xia Y, Xu X S, Zhao G C, Liu L. 2015. Neoproterozoic active continental margin of the Cathaysia block: Evidence from geochronology, geochemistry, and Nd-Hf isotopes of igneous complexes. *Precambrian Res*, 269: 195–216
- Yin C Q, Lin S F, Davis D W, Zhao G C, Xiao W J, Li L M, He Y H. 2013. 2.1–1.85 Ga tectonic events in the Yangtze Block, South China: Petrological and geochronological evidence from the Kongling Complex and implications for the reconstruction of supercontinent Columbia. *Lithos*, 182–183: 200–210
- Young G M. 2013. Precambrian supercontinents, glaciations, atmospheric oxygenation, metazoan evolution and an impact that may have changed the second half of Earth history. *Geosci Front*, 4: 247–261
- Yu J H, O'Reilly S Y, Zhou M F, Griffin W L, Wang L. 2012. U-Pb geochronology and Hf-Nd isotopic geochemistry of the Badu Complex, Southeastern China: Implications for the Precambrian crustal evolution and paleogeography of the Cathaysia Block. *Precambrian Res*, 222–223: 424–449
- Yuan H. 2015. Secular change in Archaean crust formation recorded in Western Australia. *Nat Geosci*, 8: 808–813
- Zhai M G, Peng P. 2020. Origin of early continents and beginning of plate tectonics. *Sci Bull*, 65: 970–973
- Zhai M G, Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Res*, 20: 6–25
- Zhang F F, Wang X L, Wang D, Yu J H, Zhou X H, Sun Z M. 2017. Neoproterozoic backarc basin on the southeastern margin of the Yangtze block during Rodinia assembly: New evidence from provenance of detrital zircons and geochemistry of mafic rocks. *Geol Soc Am Bull*, 129: 904–919
- Zhang S H, Ernst R E, Pei J L, Zhao Y, Zhou M F, Hu G H. 2018. A temporal and causal link between ca. 1380 Ma large igneous provinces and black shales: Implications for the Mesoproterozoic time scale and paleoenvironment. *Geology*, 46: 963–966
- Zhang S H, Zhao Y, Li X H, Ernst R E, Yang Z Y. 2017. The 1.33–1.30 Ga Yanliao large igneous province in the North China Craton: Implications for reconstruction of the Nuna (Columbia) supercontinent, and specifically with the North Australian Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 465: 112–125
- Zhao G C, Cawood P A, Li S, Wilde S A, Sun M, Zhang J, He Y, Yin C. 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion. *Precambrian Res*, 222–223: 55–76
- Zhao G C, Wilde S A, Li S Z, Sun M, Grant M L, Li X P. 2007. U-Pb zircon age constraints on the Dongwanzi ultramafic-mafic body, North China, confirm it is not an Archean ophiolite. *Earth Planet Sci Lett*, 255: 85–93
- Zhao G C, Zhai M G. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications. *Gondwana Res*, 23: 1207–1240
- Zhao J H, Zhou M F, Yan D P, Yang Y H, Sun M. 2008. Zircon Lu-Hf isotopic constraints on Neoproterozoic subduction-related crustal growth along the western margin of the Yangtze Block, South China. *Precambrian Res*, 163: 189–209
- Zhao J H, Zhou M F, Yan D P, Zheng J P, Li J W. 2011. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: No connection with the Grenvillian orogeny. *Geology*, 39: 299–302
- Zhao J H, Zhou M F, Zheng J P. 2013. Constraints from zircon U-Pb ages, O and Hf isotopic compositions on the origin of Neoproterozoic peraluminous granitoids from the Jiangnan Fold Belt, South China. *Contrib Mineral Petrol*, 166: 1505–1519
- Zheng Y F. 2020a. Plate Tectonics. Encyclopedia of Geology. 2nd ed. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00058-8>
- Zheng Y F. 2020b. Convergent Plate Boundaries and Accretionary Wedges. Encyclopedia of Geology. 2nd ed. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00042-4>
- Zheng Y F, Chen Y X. 2016. Continental versus oceanic subduction

- zones. *Natl Sci Rev*, 3: 495–519
- Zheng Y F, Chen R X. 2017. Regional metamorphism at extreme conditions: Implications for orogeny at convergent plate margins. *J Asian Earth Sci*, 145: 46–73
- Zheng Y F, Zhao G. 2020. Two styles of plate tectonics in Earth's history. *Sci Bull*, 65: 329–334
- Zheng Y F, Zhang S B, Zhao Z F, Wu Y B, Li X, Li Z, Wu F Y. 2007. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: Implications for growth and reworking of continental crust. *Lithos*, 96: 127–150
- Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, Zhang S B, Yuan H, Wu F Y. 2008. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China. *Precambrian Res*, 163: 351–383
- Zheng Y F, Chen R X, Zhao Z F. 2009. Chemical geodynamics of continental subduction-zone metamorphism: Insights from studies of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) core samples. *Tectonophysics*, 475: 327–358
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, Li Y, Ding J. 2002. SHRIMP U–Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China. *Earth Planet Sci Lett*, 196: 51–67
- Zong K Q, Klemm R, Yuan Y, He Z Y, Guo J L, Shi X L, Liu Y S, Hu Z C, Zhang Z M. 2017. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). *Precambrian Res*, 290: 32–48

(责任编辑: 郑永飞)