



前板块构造与大陆起源

赵国春^{1,2*}, 张健³, 尹常青³, 王潮¹, 张国伟²

1. 香港大学地球科学系, 香港;

2. 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;

3. 中山大学地球科学与地质工程学院, 珠海 510275

* 联系人, E-mail: gzhao@hku.hk

2022-03-05 收稿, 2022-05-02 修回, 2022-05-05 接受, 2022-05-05 网络版发表

国家自然科学基金重大项目(41890831)资助

摘要 建立于20世纪60年代并被誉为地球科学史上一场革命的板块构造理论能圆满地解释显生宙至元古宙几乎所有地质现象、过程和事件, 但却无法解释太古宙大陆克拉通基本特征, 包括绿岩带内高温(~1600°C)科马提岩的成因和缺乏岩浆弧安山岩的双峰式火山岩组合, 占太古宙陆壳总面积70%以上、几乎同时侵位的英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩岩石成因, 反映垂向运动的片麻岩穹窿构造样式, 缺失典型的蛇绿岩、蓝片岩、榴辉岩和双变质带等板块构造特征标志。所有这些都说明, 太古宙大陆可能不是起源于板块构造体制, 而是起源于某种前板块构造体制, 但目前已提出的前板块构造模式(如地幔柱构造、重力下沉构造、热管构造、滞留盖构造等)同样皆不能圆满解释太古宙大陆的岩石组合、构造样式和变质作用演化等特征。正因如此, 目前世界各国若有若干研究团队正在攻克这一科学难题。我国学者虽无缘参与20世纪60年代板块构造理论的创立, 但在过去40年里, 在早期地球动力学体制和大陆起源与演化方面开展了大量工作, 并取得令人瞩目的研究成果, 积累了大量资料数据, 有望在构建前板块构造理论方面率先取得突破。

关键词 大陆, 板块构造, 前板块构造, 太古宙, 地幔柱

众所周知, 太阳系所有固体星球在其形成初期都经历类似的早期加积增生和随后的核-幔-壳分异稳固过程, 但只有我们人类居住的地球后来演化出板块构造和长英质大陆, 并从最初荒凉无寂的行星演变成当今生机勃勃的宜居星球。因此, 要研究地球宜居环境的形成与演化, 就必须研究板块构造与大陆起源的关系。其中最关键的科学问题是: 板块构造与大陆的起源是否存在因果关系? 即大陆是否起源于板块构造体制? 如果不是, 大陆是起源于何种前板块构造环境? 大陆的存在是否为板块构造启动的前提条件? 由于这些科学问题与地球宜居环境形成的初始状态密切相关, 因而已成为当今世界各国政府组织和科学界广泛关注的重

大科学命题。如美国国家研究理事会相继完成了多部国家科学发展战略咨询报告, 包括《地球科学发展机遇》《板块科学研究发展的新航程》《地球的起源和演化》等, 皆将早期地球动力学体制与大陆起源和演化列为重大科学问题, 其中2008年3月发布的《地球的起源和演化》研究报告提出了21世纪固体地球科学研究的10个重大科学问题, 其中就有地球黑暗时期究竟发生了什么和地球如何拥有板块构造和大陆等科学命题^[1]。2020年5月, 美国国家研究理事会发布的《地球科学十年愿景(2020~2030)》所列的未来10年内有可能取得重大进展的12个问题中, “板块构造开始的时间、原因和方式”被列为第二大科学问题^[2]。英国、法国、德

引用格式: 赵国春, 张健, 尹常青, 等. 前板块构造与大陆起源. 科学通报, 2023, 68: 2312-2323

Zhao G C, Zhang J, Yin C Q, et al. Pre-plate tectonics and origin of continents (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 2312-2323, doi: 10.1360/TB-2022-0249

国、澳大利亚等发达国家科研资助机构也同样将早期地球动力学体制与大陆起源问题列为未来地球科学领域的重点研究方向。我国国家自然科学基金委员会和相关部委也于“十三五”开始,将板块构造启动时间和启动机制、前板块构造与大陆起源等与早期地球相关的科学问题列为优先和前沿研究领域。如国家自然科学基金委员会2016年发布的《国家自然科学基金“十三五”发展规划》将早期地球的构造体制和组成作为地球科学部优先发展领域之一,并在其《地质学科十三五规划》中明确将前板块构造阶段大陆的形成和演化机制与构造体系、地幔柱在太古宙地壳形成中的作用、板块构造在地球上何时启动等重大科学问题列为地质科学未来10年重点发展方向。2017年,由国家自然科学基金委员会和中国科学院学部编著的《中国科学发展战略——板块构造与大陆动力学》明确将前板块构造与大陆起源作为地球科学未来优先的发展方向。2021年,国家自然科学基金委员会委托西北大学董云鹏教授牵头,组织国内相关单位150余人参与完成的《国家自然科学基金地质学科“十四五”战略规划》也将前板块构造与大陆起源作为地球科学未来所面对的重大挑战和优先发展方向^[3]。世界各国政府组织和科学界之所以如此重视前板块构造与大陆的起源,是因为越来越多的地质证据显示建立于20世纪60年代并被誉为地球科学史上一场革命的板块构造理论在解释当今人类居住的古老大陆起源方面遇到严重挑战,太古宙大陆很可能出现于板块构造启动之前,在某种前板块构造(pre-plate tectonics)体制下形成的。构建前板块构造理论与建立和发展板块构造理论同等重要,它不仅有助于认知我们人类居住大陆的起源和演化、初始大洋的形成、早期大气圈组成以及原核生命如何出现,也有助于我们了解地球是怎样从最初荒凉无寂的行星演变成当今生机勃勃的宜居星球。

1 板块构造在解释大陆起源所遇到的挑战

地球是太阳系唯一具板块构造和有含长英质组分大陆的星球。因此,研究大陆壳的起源对认识地球的形成和演化历史至关重要。板块构造理论能很好地解释显生宙乃至元古宙大陆地壳的生长和再造机制与过程,即俯冲带是大陆壳生长的主要场所,大洋板片俯冲脱水导致上覆地幔楔熔融形成铁镁质陆壳,铁镁质陆壳再次熔融形成长英质陆壳;大洋最终消失导致陆-陆碰撞和大陆深俯冲,陆壳发生深融再造,俯冲板片拆沉致

使地幔岩浆上涌也可以引起陆壳深融再造。然而,板块构造理论在解释太古宙大陆起源和演化却遇到巨大挑战,因为板块构造体制下的岛弧模式不能合理地解释太古宙大陆岩石学、地球化学、构造和变质作用等诸多特征,其中包括如下内容。

(1) 太古宙大陆因其构造上相对稳定也称之为太古宙克拉通。太古宙大陆克拉通主要由英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩(tonalite-trondhjemite-granodiorite, TTG)为主的深成侵入体变质而成的正片麻岩和由火山岩及少量沉积岩变质而成的高级表壳岩(supracrustals)或低级绿岩(greenstones)组成^[4]。在太古宙表壳岩或绿岩中,最常见的火山岩组合是超基性的科马提岩、基性的玄武岩和酸性的英安岩、流纹岩所构成的双峰式火山岩组合,而现代岩浆弧特征火山岩组合——安山岩却很少或缺失^[5-10]。

(2) 以富镁($MgO > 18\%$)为特征的科马提岩是太古宙火山岩(绿岩)的重要组成部分,其形成要求地幔部分熔融温度高达 $1600^{\circ}C$ 以上,这样高温的地幔岩浆很难形成于现代样式板块构造的俯冲带的环境^[11-14]。

(3) 许多太古宙克拉通60%~70%出露基底为TTG侵入体^[7,8,11,14],这些深成侵入体在形成时间上不显示任何系统变化,难以用现代岩浆弧增生模式加以解释,并且在许多太古宙克拉通陆块上,广泛分布的TTG岩套是在很短的时间内几乎同时侵入^[9]。

(4) 尽管岛弧俯冲板片榴辉岩和石榴石斜长角闪岩部分熔融可以形成类似太古宙TTG这样高La/Yb比值的岩石,但熔融程度不能超过30%,否则石榴石会进入熔体相,导致TTG熔浆不会具有很高的La/Yb比值^[4,14-17]。这意味着每形成1份的TTG需要3份的榴辉岩和石榴石斜长角闪岩^[9]。如果考虑太古宙大陆克拉通分布规模及TTG侵入体占据克拉通60%~70%出露面积,而且这些深成侵入体通常是在很短时间内侵入并在形成时间上不显示任何系统变化特征,太古宙TTG就不可能形成于俯冲带环境,因为俯冲带短时间内不可能同时提供如此巨量的榴辉岩和石榴石斜长角闪岩^[9]。

(5) 与显生宙大陆边缘弧或岛弧根部带TTG岩石相比,太古宙TTG随着 SiO_2 的增加趋向富Na,呈现奥长花岗质演化趋势,并具有极高的La/Yb比值(即极富轻稀土),而岛弧花岗质岩石随着 SiO_2 的增加趋向富K,呈现钙碱性演化趋势,并具有相对低的La/Yb(< 5)和Sr/Y(< 10)比值和非常低的Sr和轻稀土(LREE),这与太古宙TTG形成鲜明的对比(图1)^[4,14,16]。

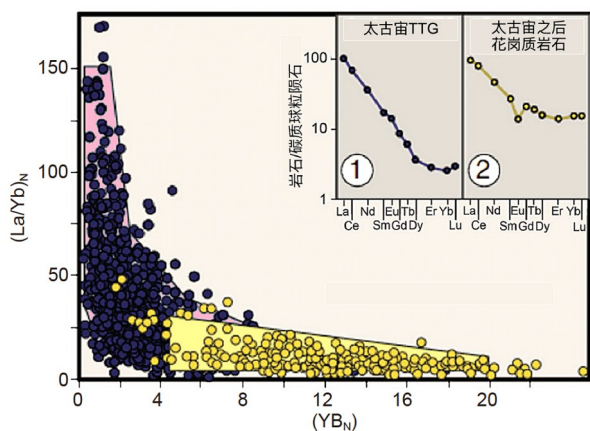


图1 太古宙TTG与太古宙之后花岗质岩石的La/Yb-Yb差异图。修改自文献[4,16,18]

Figure 1 The La/Yb-Yb diagram to distinguish Archean TTG from post-Archean granitoids. Revised after Refs. [4,16,18]

(6) 全球太古宙大陆克拉通内部典型的花岗-绿岩带的构造解析表明, 其早期的陆壳内部构造样式以片麻岩穹窿为特征。尽管部分学者认为, 太古宙片麻岩穹窿构造成因与美国西部盆岭构造成因一致, 是板块构造体制下水平运动叠加的结果^[19], 但详细的野外和室内构造解析表明, 太古宙克拉通主体构造是由TTG岩浆以底辟形式上涌形成的不同规模片麻岩穹窿(dome)和周缘密度较大的绿岩沉降下凹形成的向形或龙骨构造(keel), 即所谓的dome-and-keel构造(图2)^[20-29]。这种反映垂向构造的片麻岩穹窿构造样式与显生宙反映水

平运动为特征的板块构造体制所具有的大规模逆冲带、线性构造带、韧性剪切带、鞘褶皱、矿物拉伸线理、构造混杂岩带等构造样式具有明显差异^[9]。

(7) 太古宙克拉通在变质作用方面具有以下特征:

(i) 变质作用都是克拉通规模大面积发生, 与元古宙和显生宙的变质作用大多局限在线性构造带(造山带)内形成鲜明对比; (ii) 变质作用温压条件在正常地热梯度范围内(10~30°C/km), 即以低压-中压绿片岩相、角闪岩相和麻粒岩相为主; (iii) 缺少高压蓝片岩相和高压-超高压榴辉岩相变质作用; (iv) 一般不出现反映俯冲带环境的双变质带, Brown^[32]认为, 双变质带是确定俯冲带存在的重要标记(earmark), 但目前还没有发现典型的太古宙双变质带^[33]; (v) 绝大多数太古宙克拉通地体以具有等压冷却逆时针P-T轨迹演化为特征^[34-51]。导致岩石发生近等压冷却型逆时针P-T演化变质作用一般认为与大量地幔岩浆底侵(underplating)有关^[52]。大量地幔岩浆底侵通常发生在大陆裂谷、弧后盆地和地幔柱热点环境中, 但与板块构造环境有关的大陆裂谷和弧后盆地环境无法解释太古宙克拉通变质基底面状分布以及俯冲带特征地质要素(如高压-超高压蓝片岩、榴辉岩、高镁安山岩等)的缺乏。

由于板块构造无法解释上述太古宙大陆克拉通岩石组合、构造样式和变质作用演化特征, 越来越多的学者们认为, 长英质大陆在板块构造启动之前就已经形成, 是某种前板块构造体制下的产物^[5-8,11-14,32,33], 并

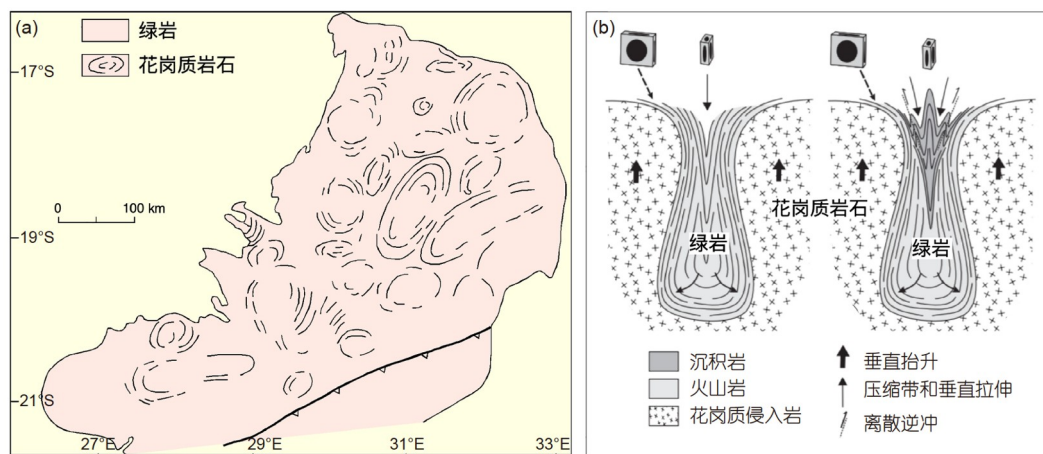


图2 太古宙克拉通片麻岩穹窿构造样式和剖面解析。(a) 津巴布韦克拉通晚古代穹隆群, 修改自文献[30]; (b) TTG岩浆以底辟形式上涌形成不同规模的片麻岩穹窿(dome structure)和周缘的相对密度较大的超基性-基性-变质表壳岩沉降下凹形成向形或龙骨构造(keel structure), 修改自文献[26,28,31]

Figure 2 Dome-and-keel structures of Archean cratons. (a) Neoproterozoic domes in the Zimbabwe Craton, revised after Ref. [30]; (b) dome-and-keel structures of which the domes formed by vertical diapirism of low-density TTG magmas and the keels formed by vertical sagduction of high-density greenstones, revised after Refs. [26,28,31]

认为正是因为密度较轻的长英质大陆的存在,才诱发密度较大的大洋岩石圈向密度较小的大陆岩石圈下面俯冲,板块构造才得以启动。所以,地球上长英质大陆的出现是板块构造启动的前提。

2 现有的前板块构造模式能否解释太古宙大陆起源

目前已提出的比较有影响力的前板块构造模式有地幔柱构造(mantle plume tectonics)、重力下沉构造(sagduction/drip tectonics)、热管构造(heat-pipe tectonics)和滞留盖构造(stagnant lid tectonics)模式。尽管这些模式能够解释太古宙大陆克拉通某些特征,但没有一个模式能够圆满地解释太古宙长英质大陆的岩石组合、地球化学、构造样式和变质作用的所有特征。

2.1 地幔柱构造

在目前所有用来解释早期地壳形成与演化的前板块构造模式中,地幔柱构造模式是最有影响力的。地幔柱最早是由Morgan^[53]于1971年基于夏威夷热点的概念并结合流体力学模型提出来的,是指地球深部核-幔边界附近的高温低黏度层(D''层)熔融所产生的呈柱状上升的巨量地幔熔浆。地幔柱通常是由一个细长的尾柱和一个巨大的头部组成(图3(a))。细长尾柱下端连至地幔底部,而头部则呈蘑菇状并随上升挟带周围的软流圈物质而膨胀(图3(a))。当地幔柱蘑菇状头部抵达相对冷的岩石圈底部,就会开始摊平并因减压而大规模熔融形成玄武岩浆(图3(b))。这些岩浆可能会于短时间内大量喷发至地表(短于一百万年),于大陆地表喷发就形成大陆溢流玄武岩,于洋底喷发则形成直径长达1000~2000 km的玄武质洋底高原(图3(b))。

越来越多的学者认为,洋底高原的形成与演化能够很好地解释太古宙克拉通以绿岩为代表的火山岩和以TTG为代表的侵入岩的成因^[11~13,54]。由于太古宙绿岩中科马提岩~1600°C的形成温度和拉斑玄武岩的形成温度(1400~1200°C)分别与来自核-幔边界(CMB)D''层地幔柱的尾柱和柱头的温度相近,而且地球化学成分也可对比,这导致Campbell等人^[11]提出,太古宙绿岩带中科马提岩来自地幔柱尾柱通道的熔融物,而玄武质岩石则是地幔柱巨大球状顶冠在岩石圈底部发生减压熔融后喷发于地表所成。

目前,太古宙绿岩带中科马提岩和拉斑玄武岩的地幔柱成因解释已得到越来越多学者的接

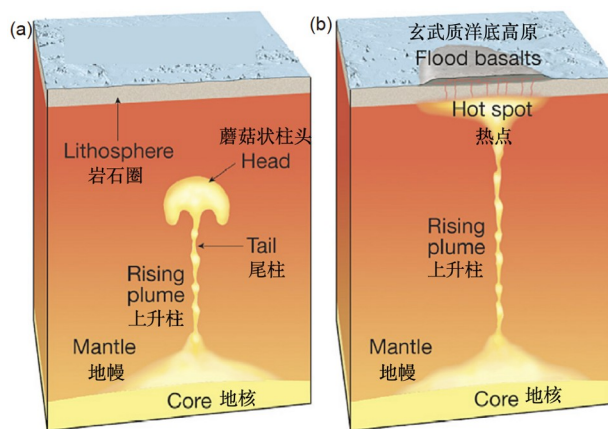


图3 地幔柱上升形成洋底高原示意图, 参照©2010 Tasa Graphic Arts, Inc. 修改。(a) 地幔柱通常是由一个细长的尾柱和一个巨大的头部组成;(b) 当地幔柱球状头部抵达相对冷的岩石圈底部, 就会开始摊平呈蘑菇头状, 并因减压而熔融形成玄武岩浆, 于洋底喷发则形成洋底高原

Figure 3 Schematic diagrams showing the rising of a mantle plume to form an ocean plateau, revised after ©2010 Tasa Graphic Arts, Inc. (a) The architecture of a mantle plume includes a long tail and a huge head; (b) when the head of a mantle plume rises to the base of a lithosphere, it becomes flattening and experiences decompressive melting to form basaltic magmas that erupt on the ocean floor to form a basaltic ocean plateau

受^[8,9,11~13,33,55,56]。多数学者认为,太古宙TTG岩浆是由地幔柱洋底高原底部玄武质地壳的部分熔融而成,这样能够合理地解释为什么太古宙TTG能够在短时间内巨量产出并在形成时间上没有任何系统变化。图4是Van Kranendonk^[23]应用地幔柱洋底高原模型来解释西澳东皮尔帕拉(East Pilbara)克拉通古太古代3.6~3.2 Ga 花岗-绿岩地体的成因。在该模型中,巨大的地幔柱头部抵达岩石圈底部发生减压部分熔融,熔体喷发于洋底形成巨厚的玄武质洋底高原,地幔柱尾柱部分熔融形成科马提质玄武质岩浆,较高的温度导致先前的铁镁质地壳和新形成的洋底高原下部玄武质地壳发生多期次部分熔融形成3.53~3.24 Ga TTG花岗岩体,导致长英质大陆克拉通的形成(图4)。Bédard^[8]、赵国春和张国伟^[9]及Zhu等人^[10]也提出类似的太古宙长英质大陆的成因模式。一些学者甚至提出地幔柱构造引发板块构造启动的观点,即地幔柱洋底高原底部玄武质地壳部分熔融导致密度较轻的长英质大陆的出现,进而诱发密度较大的大洋岩石圈向密度较小的大陆岩石圈下面俯冲,触发板块构造启动^[33,57]。然而,地幔柱洋底高原模式解释太古宙长英质大陆成因的一个最大问题是源区玄武质岩石如何水化(hydration),因为玄武质岩石只有在体系里含有一定量水的条件下才能发生水质部分

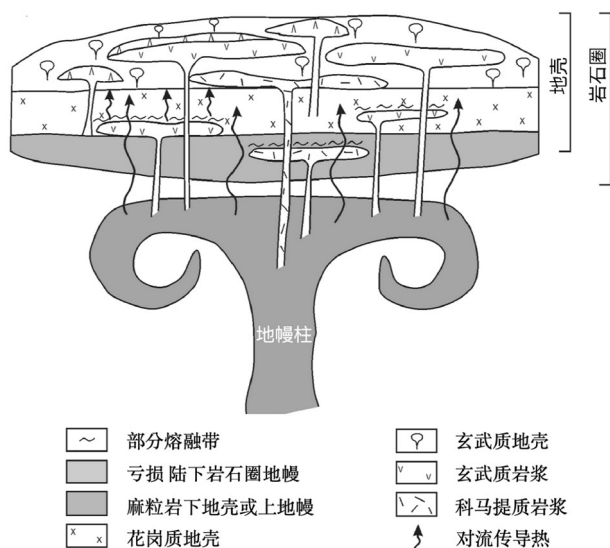


图4 西澳东皮尔帕拉(East Pilbara)克拉通古太古代3.6~3.2 Ga花岗-绿岩地体的地幔柱洋底高原成因模型图. 修改自文献[23]
Figure 4 A schematic model showing the development of the East Pilbara granite-greenstone terrane from a thick oceanic plateau that formed by mantle plumes. Revised after Ref. [23]

熔融形成TTG熔浆, 而像地幔柱洋底高原这样干环境中玄武质岩石的部分熔融很难进行. Arndt^[4]认为这是古老大陆起源的地幔柱洋底高原模式的致命缺陷. 另外, 地幔柱洋底高原模式在解释太古宙克拉通片麻岩穹窿方面也存在缺欠.

2.2 重力凹陷构造

重力凹陷构造(sagduction tectonics) 是南非著名地质学家Macgregor^[58]于1951年首次提出, 是指在太古宙花岗-绿岩地体中, 上覆密度较大的铁镁质绿岩层在重力作用下向下凹陷与下伏密度较轻的花岗质岩石向上底辟的耦合作用. Gorman等人^[59]用重力凹陷构造模式来解释西澳、北美和南非太古宙克拉通花岗-绿岩地体的片麻岩穹窿的形成机制和钙碱性岩浆岩的成因. 该模式假设太古宙绿岩的原岩基性-超基性火山岩呈直径大于100 km、厚度5~7 km的岩盾喷发在硅铝壳上(图5(a)). 由于密度差和重力作用, 基性-超基性火山岩盾中心和边缘开始向下凹陷(图5(b)). 随着凹陷的继续, 火山岩层缩短, 中心凹陷幅度增加形成盆地, 并接受火山沉积物(图5(c)). 随着凹陷深度不断加大, 沉积物加厚, 基性-超基性火山岩盾中心部位发生绿片岩相变质, 形成绿岩(图5(d)). 绿岩呈倒立蘑菇状向下凹陷(图5(e)), 局部变质级别可到高角闪岩相至麻粒岩相,

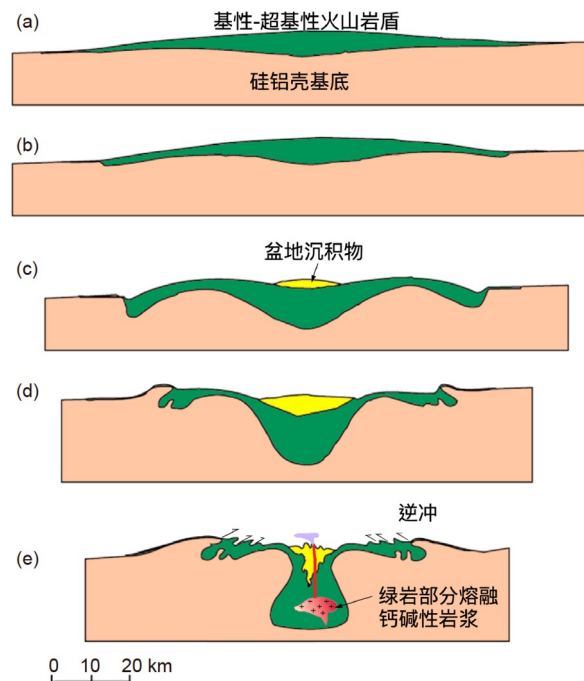


图5 重力凹陷(sagduction/drip)构造模式图. 修改自文献[59]
Figure 5 Cartoons show sagduction/drip models. Revised after Ref. [59]

导致部分熔融的发生, 形成钙碱性岩浆火山岩和花岗质侵入体. 绿岩在垂向凹陷过程中其下部可形成垂向拉伸线理或L型构造岩^[27], 而顶部可发生向中心部位的逆冲推覆(图5(e)), 而不同绿岩地体之间的花岗质硅铝壳会发生向上底辟作用, 形成片麻岩穹窿构造. 然而, 重力凹陷构造存在的前提是, 假设有一个花岗质硅铝壳的存在, 因而该模式不适合解释长英质大陆的起源问题.

2.3 热管构造

热管(heat pipe)构造模式最初是O'Reilly和Davies^[60]用来解释木卫一(Io)内部大量热量释放和表层巨厚岩石圈的形成过程. 木卫一(Io)是一个月球大小的硅酸岩固体星球. 1979年美国宇航局发射的旅行者号1在木卫一(Io)表面拍摄到强烈的火山喷发活动和高达10 km的山脉存在, 说明木卫一(Io)应该有一个巨厚的岩石圈. O'Reilly和Davies^[60]认为, 木卫一(Io)如此巨厚的岩石圈是大量岩浆沿垂向热管通道(vents)上升地表喷发所致. 随着巨厚火山岩熔岩层在木卫一(Io)表面不断地堆积, 热管通道之间岩石圈发生重力凹陷, 凹陷的岩石圈底部返回地幔, 从而实现热和物资对流循环. 后

来, Turcotte^[61]用热管构造模式来解释金星表面巨厚岩石圈的形成和热释放. Moore和Webb^[62]认为地球早期也经历过热管(Heat Pipe)构造阶段. Moore等人^[63]认为, 固体星球在其早期都经历过热管构造阶段, 以形成单一巨厚的岩石圈. 最近, Webb等人^[64]应用热管构造解释格陵兰始太古代Isua表壳岩的形成过程. 典型的热管构造如图6所示^[65]. 然而, 与地幔柱构造一样, 热管构造不能合理地解释铁镁质地壳如何水化而发生水质部分熔融产生长英质大陆地壳. 此外, 热管构造对太古宙克拉通的穹窿构造也没有给出合理的解释.

2.4 滞留盖构造

太阳系所有固体星球(行星和卫星)表层都有一个相对刚性的岩石圈(lithosphere)和其下的低黏度甚至可以对流(convection)的软流圈. 刚性的岩石圈(lithosphere)英文也称为lid, 与下面的软流圈相互作用称为滞留盖构造^[66~68]. 对于大多数固体星球(如水星、金星、火星、月亮、木卫一等), 其岩石圈比其下面的软流圈温度要低, 但黏度和强度要大, 因而不会参与其下软流圈的对流, 岩石圈也不会因滞留于软流圈的对流而被破坏, 致使这些星球表面始终被单一岩石圈所覆盖, 星球内部热量是通过局部热管构造或地幔柱(mantle plume)构造向外释放, 这就是所谓的滞留盖(stagnant lid)构造(图7^[68]).

与滞留盖构造对应的是活动盖构造(mobile lid tectonics), 它是在软流圈对流应力大于岩石圈强度时, 导致岩石圈破碎成若干刚性板块并在水平方向上发生离散或汇聚运动, 即板块构造运动. 因此, 活动盖构造即是板块构造(plate tectonics). 如Stern等人^[68]所述, 板块构造发生的条件是软流圈对流应力超过岩石圈强度,

致使岩石圈破碎, 但软流圈对流应力又不能过大而导致岩石圈上、下层脱耦. 这样的条件非常苛刻, 目前只有人类居住的地球软流圈应力和岩石圈强度关系符合出现板块构造的条件, 而其他星球(如水星、金星、火星、月亮、木卫一等)都是滞留盖构造(图8), 其内部热量的释放主要通过岩石圈的热传导和局部热管和地幔柱向外释放, 而局部热管构造和地幔柱构造无法直接熔出大量长英质岩浆, 形成长英质大陆地壳. 因此, 滞留盖构造不能用于解释长英质大陆的起源.

3 讨论与结语

综上所述, 建立于20世纪60年代并被誉为地球科学史上一场革命的板块构造理论虽然能圆满地解释显生宙至元古宙几乎各种地质现象和事件及其所发生的过程, 但在解释太古宙大陆克拉通基本特征方面却遇到巨大挑战. 例如, 板块构造不能圆满地解释绿岩带内高温(~1600°C)科马提岩的成因以及缺乏显生宙岩浆弧安山岩的双峰式火山岩组合. 板块构造也不能令人满意地解释为什么占太古宙陆壳总面积70%以上的TTG岩套克拉通规模地几乎同时侵位. 此外, 板块构造难以解释太古宙克拉通反映垂向运动的片麻岩穹窿构造样式, 缺失蛇绿岩、蓝片岩、榴辉岩和双变质带等板块构造特征标志. 所有这些都说明太古宙大陆可能不是起源于板块构造体制, 而是起源于某种前板块构造体制.

如前所述, 目前地质学家已提出若干个前板块构造模式, 包括地幔柱(mantle-plumes)、重力下沉(sagduction/drip)、热管(heat-pipes)、滞留盖(stagnant-lid)构造等, 但这些前板块构造中没有一个模式能圆满解释太古宙大陆的起源与演化. 建立一个能圆满地解释太古宙大陆起源与演化的前板块构造体系已成为当前

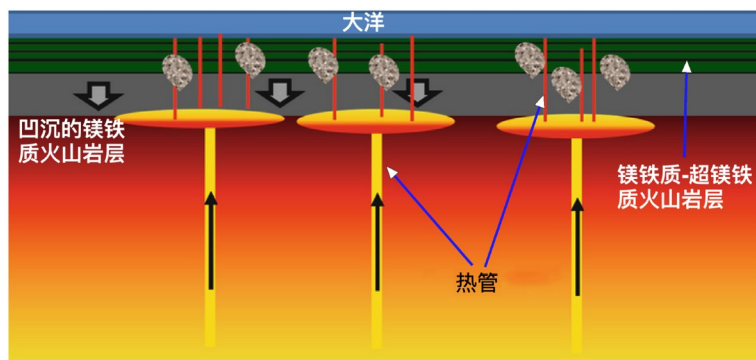


图6 热管(heat pipe)构造模式图. 修改自文献^[65]

Figure 6 A diagram showing heat pipe models. Revised after Ref. ^[65]

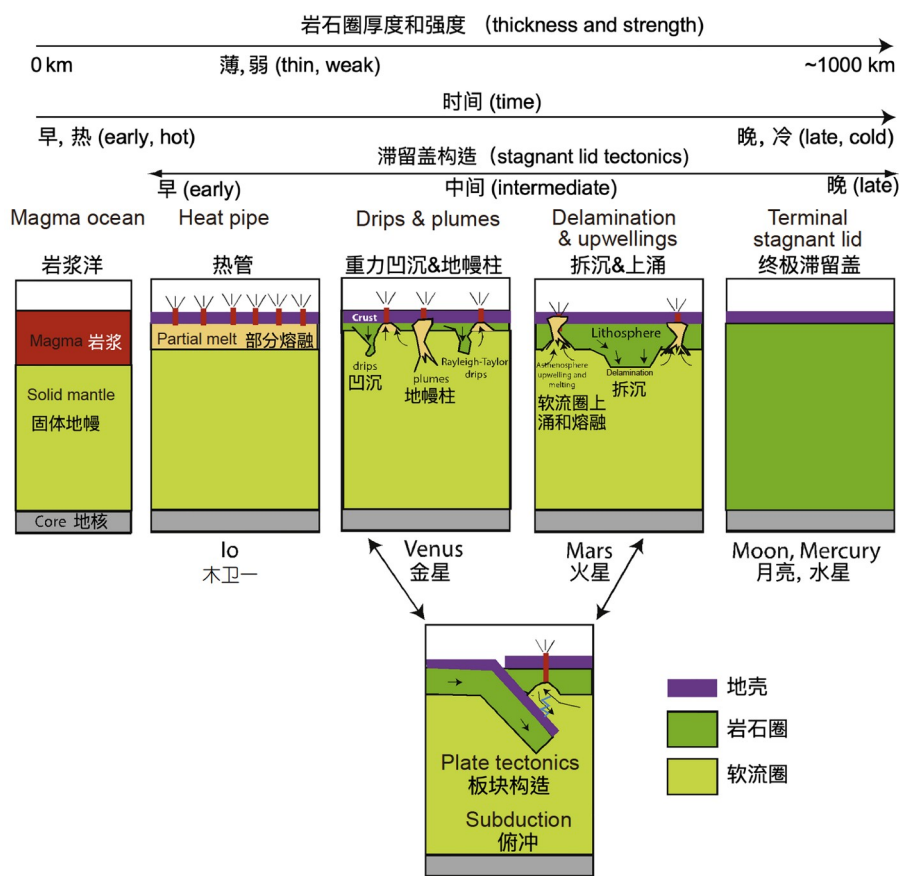


图7 类地行星可能的构造系统演化(修改自文献[68]). 板块构造发生的条件是软流圈对流应力超过岩石圈强度, 致使岩石圈破碎, 但软流圈对流应力又不能过大而导致岩石圈上、下层脱耦. 目前只有地球软流圈应力和岩石圈强度关系符合出现板块构造的条件, 而太阳系水星、金星、火星、月亮、木卫一等都是滞留盖构造

Figure 7 Possible evolution of magmatotectonic styles for a large silicate body, like the Earth (revised after Ref. [68]). Plate tectonics requires certain conditions of lithospheric density and strength where stresses associated with mantle convection must exceed the strength of the lithosphere sufficiently to allow plate rupture but not so much stronger that the plate breaks up into drips or so that the bottom of the lithosphere separates from the top of the lithosphere. Such conditions are so sufficiently restrictive that plate tectonics currently operates only on Earth, whereas other terrestrial planets and moons in the Solar system, like Mercury, Venus, Mars, Moon, Io, etc. have a stagnant lid tectonics

地球科学领域研究的重中之重. 目前国外已有若干科研团队, 包括加拿大地质调查所Bedard团队, 澳大利亚新南威尔士大学Van Kranendonk团队、Monash大学Cawood团队和Curitn大学Johnson团队, 美国得克萨斯州大学Stern团队、威斯康星大学Valley团队和马里兰大学Brown团队, 英国圣安德鲁大学Hawkesworth团队, 法国国家科学研究中心Martin & Moyen团队, 瑞士联邦理工大学Gerya团队等, 正在主攻这一地球科学的重大难题. 预计在不久的将来, 一个与板块构造理论地位同等重要的前板块构造理论体系将会诞生.

在过去30年里, 中国地质工作者在国家自然科学基金委员会、科技部和其他相关部委的资助下, 对华北、扬子、华夏、塔里木等前寒武纪克拉通陆块开展

了广泛的野外地质调查和详细的岩石学、地球化学、同位素年代学、构造变形、变质作用以及地球物理等研究, 取得一系列国际水准的研究成果, 得到国际同行的高度关注和评价, 如Zheng和Zhao^[69]提出的地球历史上存在两种不同样式的板块构造. 尤其是华北克拉通早元古代高压铁镁质和泥质麻粒岩^[70~74]、退变榴辉岩^[44,75,76]、超高压(UHP)榴辉岩^[77]、超高温(UHT)岩石^[78]的发现和两条早元古代喜马拉雅型陆-陆碰撞造山带(华北中部带和孔兹岩带)的识别^[43~46,79~81], 引起国际前寒武地质学界的广泛关注. 国际各种地球科学组织先后多次在华北克拉通举行野外现场讨论会, 使华北克拉通成为国际前寒武纪地质研究一个热点地区. 据ESI基本科学指标数据库2016年4月统计, “华北克拉

通前寒武纪地质”研究在全球地球科学领域504个研究前沿中排名第3,在我国所有自然科学基础研究领域44个研究前沿中排名第1。2017年中国科学院科技战略咨询研究院和国际科睿唯安公司共同发布“科学结构图谱”和“2017年中国科学前沿”,华北克拉通前寒武纪地质演化的研究被评为国际地球科学领域十大进展之一,位列全球地球科学前沿领域第二和中国最活跃研究领域。中国的科研院所和高校也因此拥有一大批优秀的前寒武纪地质专业人才,形成了一支年龄结构合理的人才队伍。所有这些都为我们研究前板块构造与大陆起源和演化这一当今国际地球科学领域重大前沿科学命题奠定了坚实基础。我们要抓住当前这个有利时机,凝聚国内前寒武纪研究领域的骨干力量,在综合集成国内外已有的研究基础上,对世界典型太古宙克拉通开展综合地质、地球动力学数字模拟和行星对比研究,力争构建一个能够圆满解释太古宙大陆和生命起源与演化的前板块构造理论体系。

诚然,目前开展前板块构造与大陆起源研究难度很大,存在诸多不利因素。例如,由于后期板块构造运动的改造与破坏,反映地球早期状态的岩石组合、构造样式和变质作用演化的地质记录非常有限;一些反

映大地构造环境的地球化学数据缺少唯一解,常常具有多解性;地球动力学数字热模拟是研究前板块构造与大陆和生命起源的重要手段之一,但我国在这方面研究起步较晚;研究前板块构造的另一重要手段是行星对比,但目前我国掌握的太阳系其他固态星球的样品非常有限。然而,我们不应该因为这些不利因素的存在而对这项重大科学问题的研究止步不前。随着国家对基础科学研究和技术发展的加大投入,一些不利因素会得以克服。例如,行星对比研究在一定程度上可以弥补地球早期地质记录的不足。随着国家探月工程的进展和火星探测提上日程,我们应抓住这有利机遇,通过比较行星学研究,多学科合作,力争在地球与行星早期动力学研究方面取得突破。地球动力学数字热模拟研究尽管在我国起步较晚,但近年来涌现一批从事这方面研究的青年学者,他们将成为此重大科学问题研究的骨干力量。此外,地球科学大数据的发展,也势必增强我国在本领域研究的优势。总之,该项研究尽管存在某些风险和不利因素,但高风险才有高回报,一旦该项重大研究在前板块构造理论体系方面取得突破,必将同20世纪60年代板块构造理论体系创立一样,在地球科学研究领域引起一场新的革命。

参考文献

- 1 National Research Council. Origin and Evolution of Earth: Research Questions for a Changing Planet. Washington DC: The National Academies Press, 2008
- 2 Institute of Science and Development, Chinese Academy of Sciences. A vision for NSF Earth sciences 2020–2030 (in Chinese). Bull Front Sci Tech, 2020, 7: 1–7 [中国科学院科学战略咨询研究院. 美国NRC发布《地球科学未来十年愿景(2020–2030)》. 科技前沿快报, 2020, 7: 1–7]
- 3 Dong Y P, Ren J G, Zhang Z F, et al. Development strategy of geology in next 5–10 years: Trends and countermeasures (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 2708–2718 [董云鹏, 任建国, 张志飞, 等. 地质学科未来5–10年发展战略: 趋势与对策. 科学通报, 2022, 67: 2708–2718]
- 4 Arndt N. The formation and evolution of the continental crust. *Geochem Persp*, 2013, 2: 405–533
- 5 Hamilton W B. Archean magmatism and deformation were not products of plate tectonics. *Precambrian Res*, 1998, 91: 143–179
- 6 Hamilton W B. Plate tectonics began in Neoproterozoic time, and plumes from deep mantle have never operated. *Lithos*, 2011, 123: 1–20
- 7 Hamilton W B. Toward a myth-free geodynamic history of Earth and its neighbors. *Earth Sci Rev*, 2020, 198: 102905
- 8 Bédard J H. A catalytic delamination-driven model for coupled genesis of Archaean crust and sub-continental lithospheric mantle. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70: 1188–1214
- 9 Zhao G C, Zhang G W. Origin of continents (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2021, 95: 1–19 [赵国春, 张国伟. 大陆的起源. 地质学报, 2021, 95: 1–19]
- 10 Zhu R, Zhao G C, Xiao W, et al. Origin, accretion, and reworking of continents. *Rev Geophys*, 2021, 59: e2019RG000689
- 11 Campbell I H, Griffiths R W, Hill R I. Melting in an Archaean mantle plume: Heads it's basalts, tails it's komatiites. *Nature*, 1989, 339: 697–699
- 12 Larson R L. Geological consequences of super-plumes. *Geology*, 1991, 19: 963–966
- 13 Hill R I. Mantle plumes and continental tectonics. *Lithos*, 1993, 3: 193–206
- 14 Condie K C. TTGs and adakites: Are they both slab melts? *Lithos*, 2006, 80: 33–44
- 15 Martin H. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 1999, 46: 411–429
- 16 Martin H, Moyen J F. Secular changes in tonalite-trondhjemite-granodiorite composition as markers of the progressive cooling of Earth. *Geology*, 2002, 30: 319–322

- 17 Martin H, Moyen J F, Guitreau M, et al. Why Archaean TTG cannot be generated by MORB melting in subduction zones? *Lithos*, 2004, 198: 1–13
- 18 Moyen J F, Martin H. Forty years of TTG research. *Lithos*, 2012, 148: 312–336
- 19 Kusky T, Windley B F, Polat A, et al. Archaean dome-and-basin style structures form during growth and death of intraoceanic and continental margin arcs in accretionary orogens. *Earth-Sci Rev*, 2021, 220: 103725
- 20 Hallberg J A, Glikson A Y. Archaean granite-greenstone terranes of Western Australia. In: Hunter D R, ed. *Precambrian of the Southern Hemisphere*. Amsterdam: Elsevier, 1981. 33–104
- 21 Collins W J, Van Kranendonk M J, Teyssier C. Partial convective overturn of Archaean crust in the east Pilbara Craton, Western Australia: Driving mechanisms and tectonic implications. *J Struct Geol*, 1998, 20: 1405–1424
- 22 Van Kranendonk M J, Collins W J, Hickman A, et al. Critical tests of vertical vs. horizontal tectonic models for the Archaean East Pilbara Granite-Greenstone Terrane, Pilbara Craton, Western Australia. *Precambrian Res*, 2004, 131: 173–211
- 23 Van Kranendonk M J. Two types of Archaean continental crust: Plume and plate tectonics on early Earth. *Am J Sci*, 2010, 310: 1187–1209
- 24 Van Kranendonk M J. Cool greenstone drips and the role of partial convective overturn in Barberton greenstone belt evolution. *J African Earth Sci*, 2011, 60: 346–352
- 25 Parmenter A C, Lin S, Corkery M T. Structural evolution of the Cross Lake greenstone belt in the northwestern Superior Province, Manitoba: Implications for relationship between vertical and horizontal tectonism. *Can J Earth Sci*, 2006, 43: 767–787
- 26 Lin S F. Synchronous vertical and horizontal tectonism in the Neoproterozoic: Kinematic evidence from a synclinal keel in the northwestern Superior craton, Canada. *Precambrian Res*, 2005, 139: 181–194
- 27 Lin S, Beakhouse G P. Synchronous vertical and horizontal tectonism at late stages of Archaean cratonization and genesis of Hemlo gold deposit, Superior craton, Ontario, Canada. *Geology*, 2013, 41: 359–362
- 28 Zhang J, Lin S, Linnen R, et al. Structural setting of the Young-Davidson syenite-hosted gold deposit in the Western Cadillac-Larder Lake deformation zone, Abitibi greenstone belt, Superior Province, Ontario. *Precambrian Res*, 2014, 248: 39–59
- 29 Zhao C, Zhang J, Zhao G, et al. Kinematics and structural evolution of the Anziling dome-and-keel architecture in east China: Evidence of Neoproterozoic vertical tectonism in the North China Craton. *GSA Bull*, 2022, 134: 2115–2129
- 30 Anhaeusser C R, Wilson J F. The granitic-gneiss greenstone shield. In: Hunter D R, ed. *Precambrian of the Southern Hemisphere*. Amsterdam: Elsevier, 1981. 423–499
- 31 Van Kranendonk M J, Kröner A, Hoffmann J E, et al. Just another drip: Re-analysis of a proposed Mesoproterozoic suture from the Barberton Mountain Land, South Africa. *Precambrian Res*, 2014, 254: 19–35
- 32 Brown M. Duality of thermal regimes is the distinctive characteristic of plate tectonics since the Neoproterozoic. *Geology*, 2006, 34: 961–964
- 33 Brown M, Johnson T, Gardiner N J. Plate tectonics and the Archaean Earth. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2020, 48: 291–320
- 34 Sandiford M, Powell R. Deep crustal metamorphism during continental extension: Modern and ancient examples. *Earth Planet Sci Lett*, 1986, 79: 151–158
- 35 Rollinson H R. Garnet—Orthopyroxene thermobarometry of granulites from the north marginal zone of the Limpopo belt, Zimbabwe. *Geol Soc London Spec Publ*, 1989, 43: 331–335
- 36 Raith M, Srikanthappa C, Ashamanjari K G, et al. The granulite terrane of the Nilgiri Hills (southern India): Characterization of high-grade metamorphism. In: Vielzeuf D, Viadad P, eds. *Granulites And Crustal Evolution*. Dordrecht: Kluwer, 1990. 339–365
- 37 Raith M M, Srikanthappa C, Buhl D, et al. The Nilgiri enderbites, South India: Nature and age constraints on protolith formation, high-grade metamorphism and cooling history. *Precambrian Res*, 1999, 98: 129–150
- 38 Tsunogae T, Miyano T, Ridley J. Metamorphic P-T profiles from the Zimbabwe Craton to the Limpopo Belt, Zimbabwe. *Precambrian Res*, 1992, 55: 259–277
- 39 Tsunogae T, Osanai Y, Toyoshima T, et al. Metamorphic reactions and preliminary PT estimates of ultrahigh-temperature mafic granulite from Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica. *Polar Geosci*, 1999, 12: 71–78
- 40 Percival J A. Archaean high-grade metamorphism. *Dev Precambrian Geol*, 1994, 11: 357–410
- 41 Kamber B S, Biino G G, Wijbrans J R, et al. Archaean granulites of the Limpopo belt, Zimbabwe: One slow exhumation or two rapid events? *Tectonics*, 1996, 15: 1414–1430
- 42 Jayananda M, Moyen J F, Martin H, et al. Late Archaean (2550–2520 Ma) juvenile magmatism in the Eastern Dharwar craton, southern India: Constraints from geochronology, Nd-Sr isotopes and whole rock geochemistry. *Precambrian Res*, 2000, 99: 225–254
- 43 Zhao G, Wilde S A, Cawood P A, et al. Thermal evolution of Archaean basement rocks from the eastern part of the North China Craton and its bearing on tectonic setting. *Int Geol Rev*, 1998, 40: 706–721
- 44 Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. High-pressure granulites (retrograded eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: Petrology and Tectonic implications. *J Petrol*, 2001, 42: 1141–1170
- 45 Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Archaean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and

- P-T path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Res*, 2001, 107: 45–73
- 46 Zhao G, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Res*, 2005, 136: 177–202
 - 47 Kramers J D, Kreissig K, Jones M Q W. Crustal heat production and style of metamorphism: A comparison between two Archean high grade provinces in the Limpopo Belt, southern Africa. *Precambrian Res*, 2001, 112: 149–163
 - 48 Maas A T, Henry D J. Heterogeneous growth and dissolution of sillimanite in migmatites: Evidence from cathodoluminescence imaging. *GSA Abstr Progr*, 2002, 189: 17
 - 49 Zulbati F, Harley S L. Late Archaean granulite facies metamorphism in the Vestfold Hills, East Antarctica. *Lithos*, 2007, 93: 39–67
 - 50 Halpin J A, Reid A J. Earliest Paleoproterozoic high-grade metamorphism and orogenesis in the Gawler Craton, South Australia: The southern cousin in the Rae family? *Precambrian Res*, 2016, 276: 123–144
 - 51 Mvondo H, Lentz D, Bardoux M. Metamorphism in Neoproterozoic granite-greenstone belts: Insights from the link between Elu and Hope Bay Belts (~2.7 Ga), Northeastern Slave Craton. *J Geol*, 2017, 125: 203–221
 - 52 Bohlen S R. On the formation of granulites. *J Metamorph Geol*, 1991, 9: 223–229
 - 53 Morgan W J. Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 1971, 230: 42–43
 - 54 Kent R W, Hardarson B S, Saunders A D, et al. Plateaux ancient and modern: Geochemical and sedimentological perspectives on Archean oceanic magmatism. *Lithos*, 1996, 37: 129–142
 - 55 Abbott D, Mooney W. The structural and geochemical evolution of the continental crust: Support for the oceanic plateau model of continental growth. *Rev Geophys*, 1995, 33: 231–242
 - 56 Abbott D H. Plumes and hotspots as sources of greenstone belts. *Lithos*, 1996, 37: 113–127
 - 57 Rey P F, Coltice N, Flament N. Spreading continents kick-started plate tectonics. *Nature*, 2014, 513: 405–408
 - 58 Macgregor A M. Some milestones in the Precambrian of Southern Rhodesia. *Proc Geol Soc South Afr*, 1951, 54: 27–71
 - 59 Gorman B E, Pearce T H, Birkett T C. On the structure of Archean greenstone belts. *Precambrian Res*, 1978, 6: 23–41
 - 60 O'Reilly T C, Davies G. Magma transport of heat on Io: A mechanism allowing a thick lithosphere. *Geophys Res Lett*, 1981, 8: 313–316
 - 61 Turcotte D L. A heat pipe mechanism for volcanism and tectonics on Venus. *J Geophys Res*, 1989, 94: 2779–2785
 - 62 Moore W B, Webb A A G. Heat-pipe earth. *Nature*, 2013, 501: 501–505
 - 63 Moore W B, Simon J I, Webb A A G. Heat-pipe planets. *Earth Planet Sci Lett*, 2017, 474: 13–19
 - 64 Webb A A G, Müller T, Zuo J, et al. A non-plate tectonic model for the Eoarchean Isua supracrustal belt. *Lithosphere*, 2020, 12: 166–179
 - 65 Stevenson D S. The formation of granites & plate tectonics. In: Stevenson D S, ed. *Granite Skyscrapers*, Springer Praxis Books. Berlin: Springer, 2018. 32–82
 - 66 Beall A P, Moresi L, Cooper C M. Formation of cratonic lithosphere during the initiation of plate tectonics. *Geology*, 2018, 46: 487–490
 - 67 Bedard J H. Stagnant lids and mantle overturns: Implications for Archean tectonics, magmatogenesis, crustal growth, mantle evolution, and the start of plate tectonics. *Geosci Front*, 2018, 9: 19–49
 - 68 Stern R J, Gerya T, Tackley P J. Stagnant lid tectonics: Perspectives from silicate planets, dwarf planets, large moons, and large asteroids. *Geosci Front*, 2018, 9: 103–119
 - 69 Zheng Y F, Zhao G. Two styles of plate tectonics in Earth's history. *Sci Bull*, 2020, 65: 329–334
 - 70 Zhai M G, Guo J H, Yan Y H. Discovery and preliminary study of the Archean high-pressure granulites in the North China (in Chinese). *Sci China B*, 1992, 12: 1325–1330 [翟明国, 郭敬辉, 阎月华. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及其初步研究. *中国科学B 辑*, 1992, 12: 1325–1330]
 - 71 Guo J H, Zhai M G, Zhang Y G, et al. Early Precambrian Manjinggou high-pressure granulites melange belt on the southern edge of the Huaian Complex, North China Craton: Geological features, petrology and isotopic geochronology (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 1993, 9: 329–341 [郭敬辉, 翟明国, 张毅刚, 等. 怀安蔓菁沟早前寒武纪高压麻粒岩混杂岩带地质特征、岩石学和同位素年代学. *岩石学报*, 1993, 9: 329–341]
 - 72 Zhai M G. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China Craton: A review. *Precambrian Res*, 2003, 122: 183–199
 - 73 Zhou X W, Zhao G C, Geng Y S. Helanshan high-pressure pelitic granulites: Petrological evidence for collision event in the western block of the North China Craton (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2010, 26: 2113–2121 [周喜文, 赵国春, 耿元生. 贺兰山高压泥质麻粒岩——华北克拉通西部陆块拼合的岩石学证据. *岩石学报*, 2010, 26: 2113–2121]
 - 74 Yin C, Zhao G, Wei C, et al. Metamorphism and partial melting of high-pressure pelitic granulites from the Qianlishan Complex: Constraints on the tectonic evolution of the Khondalite Belt in the North China Craton. *Precambrian Res*, 2014, 242: 172–186
 - 75 Zhai M G, Guo J H, Li J H, et al. Discovery of retrograded eclogites in the Archean North China Craton (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1995, 40: 1590–1594 [翟明国, 郭敬辉, 李江海, 等. 华北太古宙退变质榴辉岩的发现及其含义. *科学通报*, 1995, 40: 1590–1594]
 - 76 Guo J H, O'Brien P J, Zhai M. High-pressure granulites in the Sanggan area, North China craton: Metamorphic evolution, P-T paths and geotectonic significance. *J Metamorph Geol*, 2002, 20: 741–756

- 77 Xu C, Kynický J, Song W, et al. Cold deep subduction recorded by remnants of a Paleoproterozoic carbonated slab. *Nat Commun*, 2018, 9: 2790
- 78 Guo J H, Peng P, Chen Y, et al. UHT sapphirine granulite metamorphism at 1.93–1.92 Ga caused by gabbro-norite intrusions: Implications for tectonic evolution of the northern margin of the North China Craton. *Precambrian Res*, 2012, 222–223: 124–142
- 79 Zhao G C, Sun M, Wilde S A. Major tectonic units of the North China Craton and their Paleoproterozoic assembly (in Chinese). *Sci China Ser D Earth Sci*, 2002, 32: 538–549 [赵国春, 孙敏, Wilde S A. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32: 538–549]
- 80 Zhao G C. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2009, 25: 1772–1792 [赵国春. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论. *岩石学报*, 2009, 25: 1772–1792]
- 81 Zhao G C. *Precambrian Evolution of the North China Craton*. Amsterdam: Elsevier, 2014. 194

Summary for “前板块构造与大陆起源”

Pre-plate tectonics and origin of continents

Guochun Zhao^{1,2*}, Jian Zhang³, Changqing Yin³, Chao Wang¹ & Guowei Zhang²

¹ Department of Earth Sciences, University of Hong Kong, Hong Kong, China;

² State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

³ School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 510275, China

* Corresponding author, E-mail: gzhao@hku.hk

Established in the mid-1960s and regarded as a revolution in Earth sciences, the plate tectonics theory can reasonably interpret nearly all geological phenomena, processes, and events that happened during post-Archean time (from 2.5 billion years ago to the present), and has also been applied to explain the formation and evolution of continents. According to the plate tectonics theory, the mafic lower crust and the felsic upper crust of continents can develop from an island arc that formed by subduction of one oceanic crust beneath another, where the mafic lower crust of continents can be extracted from the mantle through the partial melting of the mantle wedge in the subduction zone, whereas the felsic upper crust of continents can form by the partial melting of the already-formed mafic lower crust. However, such an island arc model under a plate tectonic regime cannot well explain the magmatic, metamorphic and structural features of Archean (>2.5 billion years) continents. For example, island arc models fail to explain the presence of ~1600°C komatiites, absence of andesites that is dominant in post-Archean arcs, nearly coeval and craton-scale emplacement of tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) rocks, dominance of dome-and-keel structures, and lack of ultrahigh-pressure rocks, paired metamorphic belts and ophiolites, etc. All of these imply that Archean continents may not have been formed under plate tectonic regimes, but were originated from some pre-plate tectonics (non-plate tectonics). So far, researchers have proposed a number of pre-plate tectonics models, of which the most representative ones are mantle plumes, sagduction, heat-pipes and stagnant lids. Although each of these pre-plate tectonics models can satisfactorily interpret some features of Archean cratons, none of them is successful in explaining all lithological, structural and metamorphic features of Archean cratons. For example, although the mantle plume-derived oceanic plateau models can well explain many features of Archean cratons, oceanic plateaus formed by mantle plumes may not provide enough water (H₂O) for aqueous partial melting of basaltic rocks to create TTG magmas. It is the same case with heat-pipe models. As the sagduction models assume the existence of an old felsic continental crust, they are not suitable for discussing the origin of Archean continents. As for stagnant lids, they just describe the state of a single lithosphere plate which itself cannot provide any geodynamic mechanisms for making a mafic crust be partially melt to form TTG magmas. Therefore, none of available pre-plate tectonics models proposed so far has been successfully applied to interpret the origins of Archean continents. Thus, a number of research groups in the world are conducting extensive and comprehensive investigations on this important scientific conundrum. Although Chinese geologists missed a chance to have made contributions to establishing plate tectonic theory in the 1960s, they have a great potential for breakthroughs in establishing a pre-plate tectonics theory since they have done tremendous work on the early geodynamic mechanisms for the formation and evolution of Archean continents and produced large amounts of new data and competing interpretations in the past four decades.

continents, plate tectonics, pre-plate tectonics, Archean, mantle plume

doi: [10.1360/TB-2022-0249](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0249)