



冥古宙地球的冷却、分异和构造体制及其比较行星学研究

刘耘^{1,2*}, 章清文¹

1. 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2. 成都理工大学地球科学学院, 行星科学国际研究中心, 成都 610059

* 联系人, E-mail: liuyun@vip.gyig.ac.cn

2022-02-10 收稿, 2022-03-27 修回, 2022-03-28 接受, 2022-03-30 网络版发表

中国科学院战略性先导科技专项(XDB18010100, XDB41000000)和国家自然科学基金(41804092, 42130114)资助

摘要 冥古宙是地球历史的最初阶段, 虽然仅持续不到6亿年, 但在此期间发生巨大的物质运移和重新分布, 地球的地核、地幔、地壳和大气层等主要圈层框架已基本形成, 为地球后续漫长的物质和能量演变奠定了基础. 由于关键地质记录缺失、研究手段匮乏等原因, 当前地球科学界针对冥古宙地球演化的研究仍十分有限, 使其成为地球科学最为薄弱的一环. 鉴于冥古宙地球存在地质记录匮乏这一“痛点”, 以及太阳系类地天体(泛指类地行星、矮行星、卫星和小行星等岩石质天体)在原始物质组成、内部结构、热演化和构造体制演变等方面的相似性, 借助比较行星学手段, 从太阳系内各类地天体(现今或早期)保存完好的地质记录研究类地天体演化的一般规律, 以此弥补早期地球演化认识的空白. 这是一种重要且可行的研究手段, 也是突破现有地学理论框架(如板块构造理论)、开辟新的地学研究格局的重要契机. 本文对早期地球的热演化、内部分异和构造体制等关键领域的研究进展及其存在的问题进行了梳理, 同时探讨了未来可能的突破点.

关键词 冥古宙地球, 热演化, 化学分异, 构造体制, 比较行星学

冥古宙仅占地球最初不到六亿年的历史, 却为地球后续演变奠定了基础. 在此期间, 地球内部的物质分异、构造体制随着地球的冷却发生了剧烈的改变. 一些重大地质过程, 包括岩浆洋的形成及核-幔分异、岩浆洋固化及壳-幔分异等, 都在其间基本完成. 上述过程与地球热收支平衡和内部地温的演变、物质分异的方式(岩浆洋的结晶分异或固态地幔的部分熔融)、分异快慢以及对应的全球构造运动密切相关, 三者之间协同演变、密不可分. 其中, 温度控制着地幔部分熔融程度和分异产物的性质, 也制约着地幔对流的强弱, 而全球尺度的构造运动不仅会影响壳-幔分异的方式和速率, 也制约着地球的整体冷却快慢.

尽管冥古宙地球的动力学状态与演化的研究是固体地球科学研究不可或缺的组成部分, 也是目前研究十分薄弱的一环, 尤其是对冥古宙地球的形成和冷却、全球构造体制的性质及其演变以及早期壳-幔分异(涉及早期富集原始地壳和亏损地幔储库的形成)等关键科学问题, 人们的认识还十分有限. 冥古宙地球科学研究的一个鲜明特点和“痛点”在于地质记录极端匮乏. 现存的冥古宙时期地球的地质记录多为碎屑锆石, 导致人们无法直接获取当时地球自身更为直接和可靠的地质记录(包括岩石学和构造地质学记录等), 也无法采取常规的地球物理手段(如地震层析成像和剪切波分裂测量等)对地球的深部结构和过程开展观测与研

引用格式: 刘耘, 章清文. 冥古宙地球的冷却、分异和构造体制及其比较行星学研究. 科学通报, 2023, 68: 2284–2295

Liu Y, Zhang Q W. Secular cooling, differentiation and tectonic regimes of the Hadean Earth from a comparative planetological perspective (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 2284–2295, doi: 10.1360/TB-2022-0176

究。因此,基于太阳系类地天体(包括类地行星、矮行星、卫星和小行星等)在原始物质组成、内部结构、热演化和构造体制演变等方面的某些相似性,人们可从比较行星学入手,结合实验和理论模拟,对冥古宙地球演化开展研究。本文对冥古宙地球的若干关键科学问题进行了梳理,指出目前面临的一些瓶颈问题和相应的对策。

1 冥古宙地球的后期物质加积与热演化

1.1 冥古宙的后期物质加积

目前普遍认为,地球的增生过程经历了以下几个阶段:从直径小于微米的星尘(dust)凝聚成直径公里级别的星子(planetesimal),再由星子聚集成直径达数十至数百乃至上千公里的星胚(planetary embryo),这些星胚在增生晚期经历了一系列大碰撞事件(Giant Impact)和后期加积(late veneer)过程,最终形成原始地球。

随着研究的不断深入,学界在地球增生的理论模型上已基本达成共识,但在诸多关键问题上仍存在激烈的争论,尤其是在涉及地球增生最晚期的两个关键过程——月球形成大碰撞和后期加积上:(1)目前普遍认为月球形成大碰撞事件是原始地球增生过程中的最后且最重要的一次事件,大碰撞之后原始地球达到了其现今质量的~99.5wt%,也决定了原始地球最初始的物理化学状态^[1,2]。但是,人们目前无法确定这次大碰撞究竟是高能还是低能碰撞,以及这两种碰撞形式的地球化学响应究竟如何,亟须开展相关问题的研究;(2)在月球形成大碰撞之后,后期加积事件可能仅贡献了约占地球总质量0.3wt%~0.8wt%的物质,但却关系到地球上的水等其他重要挥发份(C和N等)的物质来源,是地球宜居性形成的起点。然而,目前针对后期加积的物质质量及其同地球上挥发份物质的来源关系仍存在激烈的争论^[3-7],亟须引入新的研究思路和方法开展相关工作。

1.2 冥古宙的热演化

地球内部物质的相变(如结晶和熔融)、物性(如制约地幔对流的黏度、热膨胀率和热导率等)、地质体中元素的分配、控制化学反应的化学反应速率等均受温度的强烈影响。因此,厘清地球的热演化过程是了解地球内部圈层形成和物质分异的前提。由于早期关键地质记录 and 高温高压条件下物理化学参数的缺失,以

及现有热演化模型对实际地质过程的不合理简化等因素,目前人们对冥古宙地球冷却历史的认识仍远未完善。

一方面,从观测数据来看,目前对于早期地球内部温度演变的研究主要依赖岩石学手段。例如,可利用岩石学温度计对古老岩石(如玄武岩、科马提岩等)形成时的地幔温度(一般用地幔潜能温度 T_p 衡量)进行估算,结合岩石的形成年龄,可大致估算某一地质历史时期内地幔的热状态及其演变。对于缺乏岩石样品的冥古宙和太古宙早期,可根据上述地温演变趋势进行外推,以估算地球的地幔潜能温度^[8,9]。该方法的前提是获取足够多的古老岩石样品并建立可靠的地质温度计。一般而言,早期岩石样品的年龄越老,数量往往越稀少、保存越差,根据其估算的地幔温度越不可靠,而地球现有的热演化实测数据所依赖的岩石样品年龄仅能涵盖中太古代(约35亿年)以来的地质历史^[8]。此外,上述方法获得的冥古宙-始太古代的地幔温度呈现“反常”的下降趋势(图1红色曲线所示),即表明早期地球内部温度较低,其合理性有待进一步检验。这一地温演化趋势与牛顿冷却定律相悖——地球的整体冷却速率应与地球

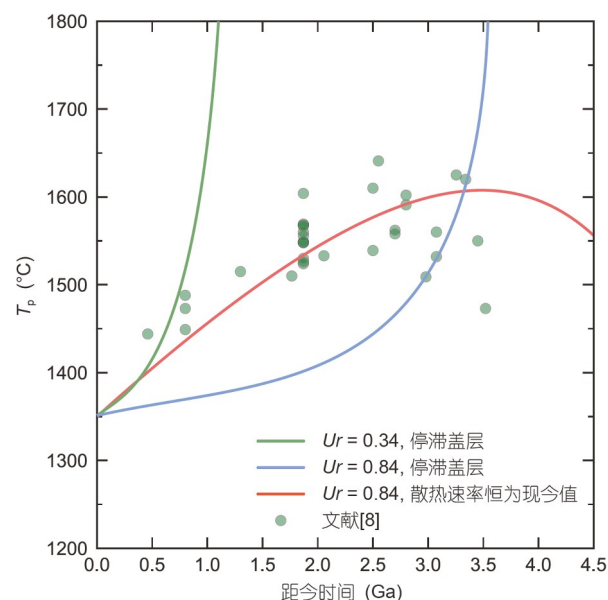


图1 基于岩石学方法和理论估算的地球周围地幔温度(T_p)及其演变。 Ur 为Urey数,是地球整体生热速率与散热速率之比,现今值约为0.34。据文献^[8,10]修改

Figure 1 The evolution of the potential temperature (T_p) of Earth's mantle based on petrologic and theoretical methods. Ur is the Urey number, which refers to the ratio of the rate of heat generation to the rate of surface cooling of Earth with a current value of ca. 0.34. Modified after Refs. ^[8,10]

与外界环境的温度差异成正比, 按现地幔温度($T_p \approx 1350^\circ\text{C}$)为起点反推, 早期地球的内部温度应随地球年龄增加而逐渐递减, 且早期降温速率应显著高于后续时期. 换言之, 地球早期地温演化应具有“早期热且冷却快”而非“早晚冷、中间热”的特征. 因此, 用中太古代实测数据外推的方法可能存在严重问题.

另一方面, 现有的地球热演化理论模型仍有待进一步完善. 例如, 经典热演化模型主要基于“停滞盖层”构造体制, 对于地幔温度较高的早期地球而言, 上述假设会使地表散热速率始终高于生热速率, 从现今地幔温度反推得到的早期地幔温度极高, 超出合理范围, 即出现不合理的所谓“过热危机”(或称为热突变, thermal catastrophe)^[10,11]. 同时, 上述模型往往忽略了一些重要早期的地质作用(如类地天体演化早期普遍存在的剧烈岩浆活动)对地球散热过程的影响, 使其对早期地温演化的估算造成较大偏差^[12-16].

2 冥古宙地球的全球构造体制

板块构造是地球生命宜居性的重要前提, 其提出和完善是20世纪地球科学领域的重要突破. 但在冥古宙时期, 地球可能不具备发育板块构造的条件, 当时地

球构造体制(可统称为前板块构造)的性质及其何时、以何种方式演变为板块构造等关键科学问题, 依然是人类认知的弱项和地球科学界的研究热点. 为方便叙述, 本文将构造体制(tectonic regimes)笼统地定义为地球(或其他类地天体)内部在全球尺度上的物质运动方式, 主要涉及岩石圈及深部地幔对流之间的相互关系. 其中, 岩石圈是否参与地幔对流(以及参与地幔对流的方式)是判断类地天体构造体制性质的主要依据. 从传热学角度看, 全尺度的构造运动方式还涉及这些天体冷却过程中的对外散热机制(如地幔的热对流、岩石圈的热传导和高温地表向外太空的热辐射). 其中, 现今地球特有的板块构造体制以大洋岩石圈发生破裂并通过俯冲作用参与地幔对流为特征, 可使较冷的大洋板块返回地幔并将高温地幔物质揭露于在洋中脊处, 是一种较为高效的散热方式; 而现今的月球、火星和金星等绝大多数类地天体因岩石圈厚度大、流变强度高, 在地幔对流的黏性剪切作用下难以破裂形成板块并参与对流, 其内部热量主要通过岩石圈的热传导进行(图2). 本文主要讨论全球尺度的构造运动, 因此不讨论更小尺度上的局部构造运动, 如古老克拉通内部发现的拗沉作用(sagduction)等.

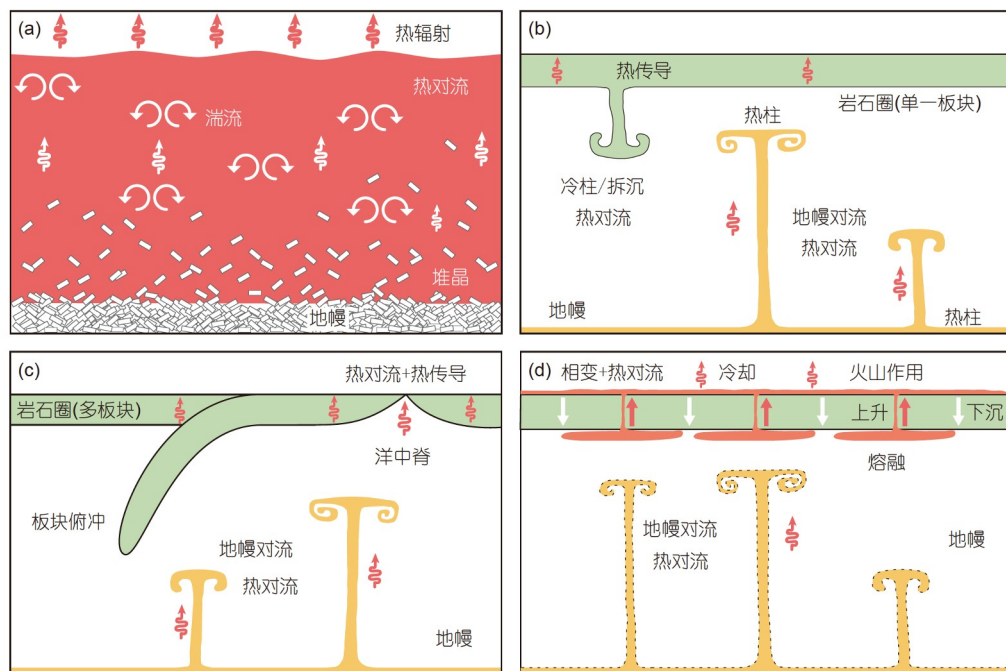


图2 太阳系类地天体主要的全球构造体制示意图(未按实际空间比例绘制). (a) 岩浆洋构造; (b) 停滞盖层和地幔柱构造; (c) 板块构造; (d) 热管构造

Figure 2 Schematic diagrams of typical global tectonic regimes of the terrestrial bodies in the Solar System (not in the actual spatial scale). (a) The magma-ocean tectonics; (b) the stagnant-lid and plume tectonics; (c) the plate tectonics; (d) the heat-pipe tectonics

冥古宙地质记录的缺失使人们对当时地球构造体制的性质知之甚少。一般认为,在冥古宙乃至太古宙时期(如按板块构造始于30亿年前计,这一时期可称为前板块时期,涵盖46~30亿年的年龄范围,约占地球历史的前三分之一),由于地幔的温度较高,具有现今成分、地温和流变学特征的大洋岩石圈难以形成,岩石圈(大洋板块)可能难以持续俯冲,地球发育现代板块构造的可能性较小^[17~20]。因此,早期地球只能发育各种不同于现今板块构造的前板块构造,其可能类型如下。

(1) 岩浆洋构造. 地球在冥古宙初期因吸积碰撞作用(如形成地月系的最后一次大碰撞)、核-幔分异、放射性元素衰变等剧烈的内、外地质作用积累了巨量的内能,足以使整个地球达到极高温度并熔融形成岩浆洋^[21,22]。在岩浆洋内,受核-幔分异过程中金属-硅酸盐相间、硅酸盐矿物相和岩浆之间分离、沉降或上浮以及放射热(尤其是短半衰期元素衰变)导致的成分对流和热对流驱动,物质在全球尺度上发生剧烈的热对流和成分对流;而在温度较高的岩浆洋表面,热量主要以热辐射的方式快速散失(辐射热流值可高达 kW/m^2 量级)^[23,24]。根据前文对全球构造体制的定义,可将地球在这一时期的构造体制称之为岩浆洋构造(图2(a))。由于关键地质记录(如作为月球岩浆洋关键证据的高地斜长岩等)的缺失,目前对于地球岩浆洋的冷却、结晶方式和快慢尚未明确,尤其是对于岩浆洋的存续时间及其能否分异出类似月球斜长岩壳的原始地壳等关键问题争议较大,是冥古宙早期地球演化研究最具挑战性、亟待突破的关键环节。

(2) 停滞盖层构造. 由于内部物质的流变性质具有强烈的温度依赖性,类地天体的外部圈层因散热较充分导致温度较低,容易形成单一的刚性岩石圈,后者难以参与其下方的地幔对流。此时,内部热量仅通过热传导机制传递至地表,相应的构造体制被称为停滞盖层构造(stagnant-lid regime, 图2(b)),是现今太阳系内绝大多数类地天体(包括月球、水星和火星等)的构造体制^[25~28],也是前板块构造的重要潜在形式。前已述及,由于基于该体制下地球的早期热演化趋势并不合理^[10],早期地球可能不能完全受控于这一构造体制,但可作为其他前板块构造间歇期的主要构造体制。

(3) 地幔柱构造. 地幔对流是现今地球内部时空尺度最大的物质、能量迁移过程。从流体力学角度看,地幔对流是类地天体固态地幔的自然对流,其驱动力主要来自地幔内生热(主要是衰变热)、核-幔边界处地核

的加热以及相变(如部分熔融、上地幔410和660 km界面处橄榄石相变和基性岩的榴辉化等)等因素导致的密度差和净浮力,因而既涉及物质受热上升形成的“热柱”和冷却形成的“冷柱”,也会因物质组成和相态变化引发的成分对流(图2(b))。对于早期地球而言,岩浆洋固化后不久的早期地幔温度较高,其较低的黏度使其对流更活跃,而高温也使其更易发生部分熔融并促进壳-幔的分异和镁铁质原始地壳的形成。此外,镁铁质地壳的榴辉岩化可触发拆沉作用和地幔的局部上涌,进一步促进地幔的熔融和分异。因此,在地球早期演化阶段,强烈的地幔对流可能主导了类地天体内部的物质-能量质迁移,相应的构造体制可笼统地称为地幔柱构造^[29~31]。其中,基性地壳及其榴辉岩化产物密度较大,可能充当了驱动地球内部物质循环和热量传递的所谓“榴辉岩引擎”的关键角色^[32]。由于温度是地幔对流的关键控制因素,地球早期热演化过程的不确定使人们对地幔柱构造体制的发生条件、内部物质分异,以及地幔柱活动如何影响地球冷却自身等关键问题仍未明确。

(4) 热管构造. 木卫一的观测表明,类地天体早期强烈的内生热作用可导致大规模火山作用,引发物质的相变和迁移(通过熔融-喷发-凝固-折返),并将其内部大量的热量快速传递至表面,相应的构造体制被称为热管构造^[33~36](图2(d))。由于木卫一与地球在内生热率、岩浆作用活跃程度(包括可能存在超基性岩浆作用)等方面存在相似性,且实际观测表明热管构造的散热速率($\sim 2.5 \text{ W/m}^2$)介于岩浆洋构造和板块构造之间,其热管构造可能是早期地球的一种介于二者之间过渡性的前板块构造体制(图3)。不过,尽管热管构造的提出有来自木卫一长期观测结果(如活跃的火山活动和极高的地表辐射热流等)的充分支持,但对其发生和持续的动力学条件、能否适用于早期地球和其他类地天体等的研究仍处于起步阶段。

3 冥古宙地球的壳-幔分异

与板块构造一样,长英质大陆地壳也是地球内部分异的特有产物。少量残存的矿物和岩石记录的岩石学、同位素特征反映了地球早期在壳-幔分异、内部物质循环和与之密切相关的构造体制方面的关键信息。

首先,地球经历了漫长的壳-幔分异过程,后者使富含长英质的陆壳从超镁铁质地幔中分异出来,而壳-幔分异可能早在冥古宙早期就已开始。例如,年龄为44亿

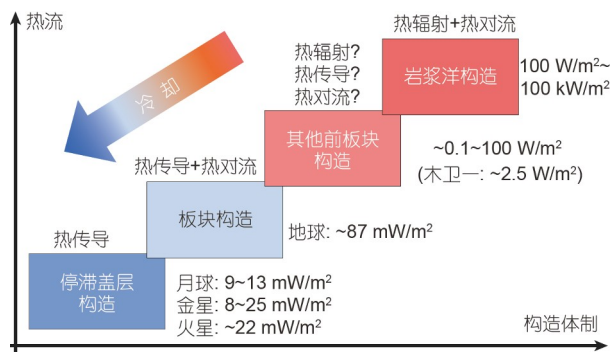


图3 太阳系类地天体的主要构造体制及其散热速率(以地表热流衡量)演变示意图^[23,24,37-41]

Figure 3 Sketch showing the typical rates of surface cooling (shown as the heat fluxes) of the terrestrial bodies with different tectonic regimes in the Solar System^[23,24,37-41]

年的Jack Hills碎屑锆石可能源自长英质岩,后者可能是更早期壳-幔分异事件形成的镁铁质岩在原始地壳内进一步重融、分异的产物^[42-45]。在加拿大东北部的始太古代Nuvvuagittuq绿岩带内保存了年龄为3.66~3.35 Ga的英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩(tonalite-trondhjemite-granodiorite, TTG),其锆石Hf模式年龄约为44亿年且具有较高的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf比值,表明这些长英质岩源自镁铁质“前身”岩石的进一步分异,后者可能早在44亿年以前就已从地幔中分离进入地壳^[46-51]。这与上述TTG的¹⁴²Nd异常亏损特征相吻合:¹⁴²Nd的母体同位素¹⁴⁶Sm半衰期较短(约为103 Ma),产生¹⁴²Nd异常的壳-幔分异事件的发生仅限于冥古宙^[52]。此外,加拿大西北部年龄约为40.2~34亿年的Acasta片麻岩带和格陵兰西南年龄约为38~37亿年的Isua绿岩带等地发现的古老岩石也具有类似同位素的特征。因此,地球早在冥古宙早期就可能形成了镁铁质的地壳^[53-58]。

其次,虽然地球在前TTG时期便从超镁铁质地幔分异出了巨量的镁铁质,但剧烈的构造运动可能使其难以保留。尽管Jack Hills碎屑锆石的发现表明冥古宙地球已分异出长英质,但其大量形成可能发生在距今38亿年以后^[59-61],且孕育TTG的地壳应具备有利于其形成的高地温梯度环境^[61-65]。此外,由于长英质难以直接通过地幔橄榄岩部分熔融大规模形成,需要镁铁质作为中间产物经过漫长、多期次分异逐渐形成,因而陆壳的形成和增长必然要求这些镁铁质成分以更大的规模形成于冥古宙-始太古代时期^[66],组成前TTG镁铁质“原始地壳”(proto-crust)。后者相对长英质而言不易保存(例如镁铁质岩经历榴辉岩化后通过拆沉等形式

返回地幔),这与冥古宙镁铁质地壳保留极少相符。

因此,地球在冥古宙早期可能就已大规模分异出镁铁质地壳,并在此基础上通过壳内再造逐渐分异出长英质陆壳。而在长英质尚未大量形成的冥古宙-始太古代时期,地球可能通过较为彻底的物质循环将大部分早期壳-幔分异产物(主要是镁铁质岩)带回地幔,上述物质循环必然对应某种前板块构造体制,但其具体性质仍未明确。

4 主要问题及瓶颈

根据上文分析,地球早期的热演化、构造体制和壳-幔分异三者之间密切联系,但相关的地质记录极其有限甚至是缺失的(尤其是冥古宙-始太古代),为对其开展系统的研究造成很大困难。对此,我们将对地球的早期冷却过程、原始地壳的形成机制和构造体制的性质等关键问题在未来可能的突破点进行探讨。

4.1 冥古宙地球的地温、热收支关系及其演变仍未明确

前已述及,冥古宙地球热演化史的研究还很不完善。首先,冥古宙地球研究的最大“痛点”在于地球在其演化历史的最初5亿多年内的地质记录十分匮乏,公认最早的地质记录仅有年龄为44亿年的锆石颗粒,而保存的最早岩石年龄迟至40亿年,即冥古宙-太古宙分界期。对于极端缺乏地质记录的冥古宙而言,仅能通过零星的矿物、岩石记录(如年龄为44亿年的Jack Hills锆石)的地球化学信息(如氧同位素等)推测,冥古宙地幔的地温及其演变是不可靠的,只能借助加强地质记录的搜集并完善岩石学温度计等手段予以解决。

其次,整体热演化趋势受控于地球这一热力学体系在各个地质历史时期内的热收支状况,对后者进行准确的量化研究对厘清地球的冷却史(尤其是冥古宙至太古宙早期)尤为重要。对于热收入而言,由于地球内部的主要生热机制是放射性元素(如U、Th和K等)的衰变,可通过放射性衰变定律大致估算地球形成以来衰变热的演变。而地球的热支出及其演变的确定则较为复杂,这种复杂性尤其体现在地球整体散热速率和自身热状态之间存在复杂的非线性关系。例如,一方面,温度是构造体制的类型和性质的主要控制因素,地幔温度升高促进地幔对流或岩浆作用(类似木卫一),从而加快散热;另一方面,构造体制反过来决定了地球的整体散热速率(图2)。总体而言,只有确定地球某个演化

阶段构造体制的性质才能确定地球的热收支。因此,要厘清冥古宙地球在热演化、壳-幔分异和构造体制方面的协同演变,首先需要厘清特定构造体制下类地天体内部温度与构造体制之间、内部温度与热收支之间复杂的反馈关系^[67]。

在岩浆洋阶段,如果大气稀薄或不存在,岩浆洋可能主要通过其炙热表面的热辐射向外散发热量,此时地球的整体辐射总热量与岩浆洋表面温度的4次方成正比;如果原始大气较为浓密,其屏蔽效应可显著抑制岩浆洋的辐射散热,延长岩浆洋冷却的时间尺度;在岩浆洋固化后的漫长地质历史中,地幔的分异程度、流变性质和对流强度,岩石圈的厚度、流变性质及其是否参与地幔对流制约着地球构造体制的性质及其整体散热速率,后者同样受控于地幔整体热状态。另外,根据前文分析,由于现有的经典热演化模型采用不尽合理的散热速率-地幔对流强度标度律,并导致不合理的结果,厘清地幔温度与地幔对流强度之间的依赖关系,重建二者之间的反馈关系是重要的突破点^[68],其中包括加入现有模型中忽略的一些重要地质过程(例如经观测证实的类地天体演化早期乃至现今普遍存在的剧烈岩浆活动和潮汐作用等)对早期地球内部生热、整体散热和地温演化造成的影响^[16,30,34]。

4.2 冥古宙壳-幔分异过程仍待确定

根据前文分析,地球的早期分异(尤其是与原始镁铁质地壳形成密切相关的早期壳-幔分异)是陆壳形成的基础。虽然硅酸盐地幔的分异可追溯至44亿年之前且分异的规模巨大,但形成的镁铁质原始地壳与长英质陆壳相比较难保存。因此,目前对这一早期分异事件性质的认识还十分有限。

一方面,由于固态地幔分异出地壳镁铁质组分主要通过部分熔融和后续的岩浆作用实现,而温度是控制地幔部分熔融程度和分异过程的首要制约因素。冥古宙时期地球内部热状态(尤其是地幔温度)的相关信息缺失,难以确定早期壳-幔分异的具体过程。另一方面,地幔部分熔融产生镁铁质的具体构造背景还未明确。在板块构造阶段,地幔熔融和分异主要通过俯冲带地幔楔的部分熔融(后者因吸收从俯冲板片释放的水而熔点降低),或在洋中脊处软流圈地幔岩因减压发生部分熔融引发,少部分发生于在板内环境并由地幔柱柱头的加热和减压作用引发,因而主要发生于板块边界。而在冥古宙,地球由于缺乏类似现今规模的板块构

造,其地幔熔融和壳-幔分异机制应与大规模地幔柱活动和基性岩榴辉岩化后拆沉等引发的地幔岩石升温、减压等因素有关^[31,32]。

从本质上说,冥古宙地球壳-幔分异的方式和与之密切相关的前板块构造体制性质的确定依然在很大程度上受制于对早期地球内部热状态及其演变这一关键信息的缺失。相关信息的缺失成为制约研究早期地球演化的最大瓶颈,亟须予以足够重视,并统筹岩石学、地球化学、地球动力学和比较行星学等与之密切相关的学科,不遗余力地开展相关研究。

5 冥古宙地球演化的比较行星学研究

鉴于冥古宙地球的直接地质记录极少,比较行星学借助地球与太阳系其他类地天体在初始成分、内部结构和动力学演化规律方面的共性研究早期地球的自身演化是一种重要且可行的研究思路。这些太阳系天体往往保留了地球在冥古宙-太古宙时期珍贵的地质记录。随着人类太空探测技术的进步和太空探测活动的开展,对上述天体开展地基、天基观测乃至环绕探测、取样已成为现实。这些成果有望成为认识地球自身演化的突破口。此处列举若干重要研究方向进行探讨。

5.1 地球的原始组成和早期壳幔分异

(1) 通过陨石、彗星和小行星研究早期地球的物质组成和形成过程。太阳系中陨石、彗星和小行星含有行星与卫星等较大天体的原始组成物质或后期碰撞、吸积过程中形成的残余物质。对陨落地球的丰富陨石样品开展岩石学、元素和同位素地球化学研究是确定原始太阳星云的成分及限定早期太阳系天体吸积、分异过程的重要途径^[69]。此外,对太阳系小天体的就位探测对早期地球原始组成、挥发份(尤其是水)的来源和演变等关键科学问题至关重要,是世界各航天强国深空探测的重要目标天体。近年来已开展或即将开展的探测项目包括欧洲航天局“罗塞塔号”探测器对67P/楚留莫夫彗星的探测、日本“隼鸟1号”“隼鸟2号”探测器分别对“糸川”和“龙宫”小行星的探测与采样,以及中国未来拟发射的“郑和号”探测器对小行星2016HO₃和311P/PANSTARRS的探测^[70]。

(2) 通过月球斜长岩壳研究地球岩浆洋和壳-幔分异。月球保留有十分古老(形成于约4.5~4.3 Ga前)且厚度巨大的高地斜长岩壳及富含K、REE和P元素的克里

普岩(KREEP)等独特的地质记录,后者被认为是月球(以及地球)形成初期存在岩浆洋的直接证据,是美国“阿波罗”登月计划的重要成果之一^[71,72]。由于地球缺失同时期地质记录,对月球样品开展岩石学、元素和同位素地球化学研究,厘清月球岩浆洋的形成、固化、内部分异规律可为冥古宙早期地球岩浆洋演化密切相关的核-幔分异、壳-幔分异、地幔原始不均一性的形成,以及地球初始的热收支和热演化路径等关键早期演化过程提供重要参照。

5.2 地球和其他类地天体的早期热演化、内部分异和构造体制

(1) 通过小行星研究地球在星子、星胚阶段的热演化和内部分异。目前普遍认为,地球由类似现今灶神星大小的星子或星胚经多次吸积而成。根据对灶神星空间探测和陨石的成分分析、定年结果推测,在太阳系形成初期丰度较高的短半衰期元素(^{26}Al 和 ^{60}Fe 等)的衰变及其强烈的生热作用会导致显著的内部分异^[73~77],为研究原始地球形成过程中后者的物质组成、内生热机制和早期分异提供关键线索。

(2) 通过类地天体的构造-岩浆活动观测研究地球早期热演化、构造体制的性质和壳-幔分异。木卫一是现今太阳系内火山作用最为强烈的天体。长期观测表明,由于存在较强的内生热作用(主要是木星体系轨道共振导致的潮汐加热),木卫一的内部熔融程度较高,引发了剧烈的全球性火山活动^[77~79]和快速物质循环与热量传递。岩浆活动因而对木卫一的热演化和物质分异产生了重要影响^[35,80]。广泛存在的构造-岩浆记录表明,水星、金星和地球在演化早期可能经历了类似现今木卫一的热管构造阶段^[16,34,35]。以此为参照,冥古宙地球在较强的内生热作用下可能存在活跃的岩浆作用,后者是研究地球早期冷却过程中不能忽略的重要因素。对此,可以木卫一为研究对象,建立早期地球和其他类地天体演化过程中岩浆作用的活跃程度、岩浆作用散热速率及其与地幔温度(以地幔潜能温度衡量)之间的标度律。而热收支新关系的建立对完善地球早期热演化史将有重要的促进作用。现有研究已初步展示了木卫一的热收支(涉及潮汐生热与浅部大规模岩浆作用的散热)与热状态之间存在复杂的反馈关系(图4)。

(3) 通过金星、火星研究早期地幔动力学。金星和火星长期处于停滞盖层构造体制下。尤为特别的是,尽管金星的大小、整体密度和内部结构等与地球十分接

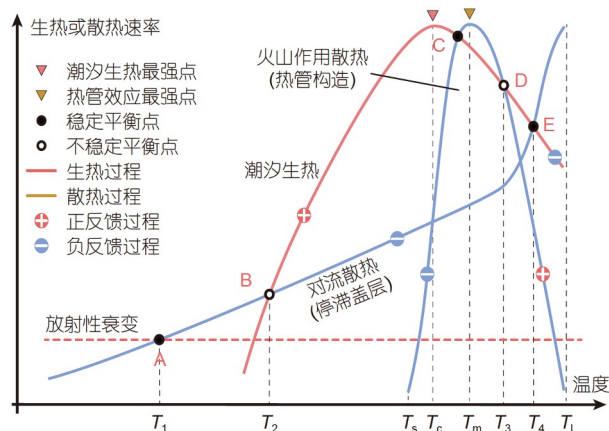


图4 木卫一热收支之间与内部温度之间的反馈关系示意图。 T_s 、 T_l 、 T_c 和 T_m 分别为地幔固相线温度、液相线温度以及潮汐作用和岩浆分离迁移最显著时的地幔温度, T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 分别为木卫一达到生热-散热平衡点时的地幔温度。据文献^[81,82]修改和补充

Figure 4 Schematic diagram showing the feedback between heat budget and internal temperature of Io. T_s , T_l , T_c , and T_m are the solidus, liquidus, and the temperatures of at the climaxes of tidal heating and melt-mantle segregations in Io's interior, respectively, T_1 , T_2 , T_3 , and T_4 are the temperatures at which the equilibriums of Io's heat-generation vs. cooling are reached. Modified after Refs. ^[81,82]

近,但二者的动力学演化路径截然不同,最显著的特征在于地球存在板块构造和宜居的外部圈层,而金星则缺失水圈且演化出了浓密且富含 CO_2 的大气,其地表近期发生过全球性岩浆作用并形了相对年轻的地表^[83~85]。火星以存在巨型盾状火山(如Tharsis隆起处的Olympus火山)为特征,表明岩石圈下方存在大规模的地幔柱活动^[86]。与金星可能因热量收支的波动导致周期性的大规模岩浆活动和地表更新不同,火星则可能缺失上述波动,从而能够长期、稳定地维持地幔柱活动。二者可为地球前板块构造的性质和演变、热演化模型的完善提供重要参照。以金星和火星为参照,可为进一步水、碳等关键物质在类地天体内部的循环、生命演化以及板块构造的发生条件等提供重要契机。

(4) 通过火星、月球研究早期地磁场起源和核-幔热量输运。类地天体磁场的形成依赖地核(或底部岩浆洋)发电机的运转,后者依赖对地核持续的能量供给和地核足够快地对外散热以维持地核物质的活跃对流。早期火星、月球等都存在全球性偶极磁场的剩磁记录。金星虽与地球极为接近,但其地幔可能温度较高,抑制了地核的散热、发电机的运转和地磁场的形成。木卫一与之类似,虽然内部生热率和温度较高,但难以产生磁场。因此,地磁场是早期地球和其他类地天体内部热量收支与热演化的敏感指标,确定古磁场的存续和强

度大小为研究核-幔热量输运提供关键信息。

5.3 早期大气圈、水圈的演化

(1) 通过火星、金星、土卫六的大气研究地球早期大气的成分和演化。与地球不同,目前发现类地天体的大气层(如果存在)成分多以 N_2 、 CO_2 、 CH_4 等为主,大量存在氧气和水的天体极为稀少。研究上述类地天体大气和水的来源、逃逸机制及化学反应(如光化学)可为地球早期大气的演化提供重要参照。例如,火星大气中实测的D/H比值是地球的5倍左右,表明火星曾经拥有大量水并逐渐向太空逃逸^[87]。

(2) 通过冰卫星研究地球水圈的演化和生命起源。地球是目前已知唯一存在生命的天体。地质记录表明,地球在37亿年前便已存在生命,而生命真正出现的时间很可能是在冥古宙^[88-90]。由于存在大量的水且潮汐生热作用较强,木卫二、土卫二可能存在冰下海洋,二者是太阳系中除地球之外潜在的生命摇篮。研究冰质地壳的成分、流变学性质和火山-构造活动(如冰的熔融机制、冰火山的喷发过程、冰质岩石圈的构造运动等),可为揭示地球水圈的形成、演化以及生命起源提供重要的信息^[91]。

6 其他研究手段和可能的突破点

冥古宙地球缺乏地质记录的特殊性使得针对其开展的研究也十分依赖实验、理论等手段的综合运用。

6.1 模拟实验

通过实验模拟冥古宙温压条件下物质的性质和演变规律。例如:使用烟雾箱模拟早期大气成分、生成途径及其同位素组成^[92-94];使用实验岩石学和实验地球化学手段研究早期地球内部温压条件下物质的物理性质(如密度、黏度、电导率和热导率等)、成分和相态变化(如地核Fe-Ni-C-S-P-Si-H-O合金体系相图的编制)、物质的富集-迁移规律(如高温高压下元素在金属相-硅酸盐相之间的分配系数和同位素平衡分馏系数)

等^[95-100]。

6.2 理论计算和数值模拟

理论计算和数值模拟旨在从掌握传热学、流体力学等基础学科的基本原理(包括控制方程、公式等)入手,建立量化类地天物质-热演化规律所需的新理论或完善现有理论。对于缺乏解析解的复杂地质过程的量化,数值方法必不可少,需要重视相应的模拟算法研究和程序开发工作。本文仅从地球动力学和地球化学方面进行说明。

(1) 地球动力学。聚焦冥古宙演化的重大科学问题,从力学、传热学和流变学等物理角度出发,研究早期地质过程的驱动力或能量来源,结合比较行星学研究结果,突破现有板块构造理论的“束缚”,提出适用于冥古宙时期地球演化的新理论、新认识。其中,重视地球动力学模拟算法的研究和程序开发工作显得尤为重要,尤其是热-力-化学场多场耦合的复杂非线性数值算法的开发和大规模并行计算技术的运用,后者将为冥古宙地球复杂地质过程的量化研究奠定坚实的基础。

(2) 地球化学。运用热力学、化学反应动力学和量子化学等学科的基本原理,建立和完善涉及重要地质过程的物化反应(如基性岩的榴辉岩相变、地核铁合金中元素的出溶作用、CO与 CO_2 的光化学反应和有机气溶胶生成等)与同位素分馏(如考虑核场效应、磁效应等)的相关理论,为准确测定早期太阳系重大地质事件的年龄、厘清超高温高压条件下元素分配和同位素分馏规律提供坚实的理论依据。

7 结论和展望

冥古宙地球演化的研究严重受限于地质记录的稀缺,目前对冥古宙地球演化的研究仍然是地球科学最为薄弱的一环,尤其是对地球冷却、内部分异和构造体制演变等问题。通过比较行星学手段,结合实验、理论(包括数值模拟)等多学科研究方法,找准切入点迎难而上,才能破解冥古宙地球演化的众多谜团。

致谢 感谢翟明国院士、赵国春院士邀请撰写此文。

参考文献

- Canup R M. Forming a moon with an Earth-like composition via a giant impact. *Science*, 2012, 338: 1052-1055
- Lock S J, Stewart S T, Petaev M I, et al. The origin of the Moon within a terrestrial synestia. *J Geophys Res Planets*, 2018, 123: 910-951

- 3 Becker H, Horan M F, Walker R J, et al. Highly siderophile element composition of the Earth's primitive upper mantle: Constraints from new data on peridotite massifs and xenoliths. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70: 4528–4550
- 4 Greenwood R C, Barrat J A, Miller M F, et al. Oxygen isotopic evidence for accretion of Earth's water before a high-energy Moon-forming giant impact. *Sci Adv*, 2018, 4: eaao5928
- 5 Marchi S, Canup R M, Walker R J. Heterogeneous delivery of silicate and metal to the Earth by large planetesimals. *Nat Geosci*, 2018, 11: 77–81
- 6 Zhu M H, Artemieva N, Morbidelli A, et al. Reconstructing the late-accretion history of the Moon. *Nature*, 2019, 571: 226–229
- 7 Fischer-Gödde M, Elfers B M, Münker C, et al. Ruthenium isotope vestige of Earth's pre-late-veener mantle preserved in Archaean rocks. *Nature*, 2020, 579: 240–244
- 8 Herzberg C, Condie K, Korenaga J. Thermal history of the Earth and its petrological expression. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 292: 79–88
- 9 Putirka K. Rates and styles of planetary cooling on Earth, Moon, Mars, and Vesta, using new models for oxygen fugacity, ferric-ferrous ratios, olivine-liquid Fe-Mg exchange, and mantle potential temperature. *Am Miner*, 2016, 101: 819–840
- 10 Korenaga J. Initiation and evolution of plate tectonics on Earth: Theories and observations. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2013, 41: 117–151
- 11 Davies G F. Thermal histories of convective Earth models and constraints on radiogenic heat production in the Earth. *J Geophys Res*, 1980, 85: 2517–2530
- 12 Basilevsky A T, Neukum G, Nyquist L. The spatial and temporal distribution of lunar mare basalts as deduced from analysis of data for lunar meteorites. *Planet Space Sci*, 2010, 58: 1900–1905
- 13 Byrne P K, Ostrach L R, Fassett C I, et al. Widespread effusive volcanism on Mercury likely ended by about 3.5 Ga. *Geophys Res Lett*, 2016, 43: 7408–7416
- 14 Head J W, Murchie S L, Prockter L M, et al. Volcanism on Mercury: Evidence from the first MESSENGER flyby for extrusive and explosive activity and the volcanic origin of plains. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 285: 227–242
- 15 McEwen A S, Simonelli D P, Senske D R, et al. High-temperature hot spots on Io as seen by the Galileo solid state imaging (SSI) experiment. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 2443–2446
- 16 Peterson G A, Johnson C L, Jellinek A M. Thermal evolution of Mercury with a volcanic heat-pipe flux: Reconciling early volcanism, tectonism, and magnetism. *Sci Adv*, 2021, 7: eabh2482
- 17 van Hunen J, van den Berg A P. Plate tectonics on the early Earth: Limitations imposed by strength and buoyancy of subducted lithosphere. *Lithos*, 2008, 103: 217–235
- 18 van Hunen J, Moyen J F. Archean subduction: Fact or fiction? *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2012, 40: 195–219
- 19 Johnson T E, Brown M, Kaus B J P, et al. Delamination and recycling of Archaean crust caused by gravitational instabilities. *Nat Geosci*, 2014, 7: 47–52
- 20 Sizova E, Gerya T, Brown M, et al. Subduction styles in the Precambrian: Insight from numerical experiments. *Lithos*, 2010, 116: 209–229
- 21 Stevenson D J. A planetary perspective on the deep Earth. *Nature*, 2008, 451: 261–265
- 22 Elkins-Tanton L T. Magma oceans in the inner Solar System. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2012, 40: 113–139
- 23 Elkins-Tanton L T, Burgess S, Yin Q Z. The lunar magma ocean: Reconciling the solidification process with lunar petrology and geochronology. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 304: 326–336
- 24 Abe Y. Physical state of the very early Earth. *Lithos*, 1993, 30: 223–235
- 25 Ghail R. Rheological and petrological implications for a stagnant lid regime on Venus. *Planet Space Sci*, 2015, 113–114: 2–9
- 26 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
- 27 Solomatov V S, Moresi L N. Stagnant lid convection on Venus. *J Geophys Res*, 1996, 101: 4737–4753
- 28 Reese C C, Solomatov V S, Moresi L N. Heat transport efficiency for stagnant lid convection with dislocation viscosity: Application to Mars and Venus. *J Geophys Res*, 1998, 103: 13643–13657
- 29 Li S Z, Guo L L, Dai L M, et al. Precambrian geodynamics (V): Origin of plate tectonics (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2015, 22: 65–76 [李三忠, 郭玲莉, 戴黎明, 等. 前寒武纪地球动力学(V): 板块构造起源. *地学前缘*, 2015, 22: 65–76]
- 30 van Thienen P, van den Berg A P, Vlaar N J. Production and recycling of oceanic crust in the early Earth. *Tectonophysics*, 2004, 386: 41–65
- 31 Fischer R, Gerya T. Regimes of subduction and lithospheric dynamics in the Precambrian: 3D thermomechanical modelling. *Gondwana Res*, 2016, 37: 53–70
- 32 Anderson D L. *New Theory of the Earth*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 58–61
- 33 Moore W B, Webb A A G. Heat-pipe Earth. *Nature*, 2013, 501: 501–505
- 34 Turcotte D L. A heat pipe mechanism for volcanism and tectonics on Venus. *J Geophys Res*, 1989, 94: 2779–2785
- 35 Moore W B, Simon J I, Webb A A G. Heat-pipe planets. *Earth Planet Sci Lett*, 2017, 474: 13–19
- 36 Zhang Q W, Liu G. Possible heat-pipe tectonics of the early Earth: Insights from Jupiter's moon Io (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2020, 36: 3853–

- 3870 [章清文, 刘耘. 早期地球的热管构造: 来自木卫一的启示. 岩石学报, 2020, 36: 3853–3870]
- 37 Veeder G J, Matson D L, Johnson T V, et al. Io's heat flow from infrared radiometry: 1983–1993. *J Geophys Res*, 1994, 99: 17095
 - 38 Davies J H, Davies D R. Earth's surface heat flux. *Solid Earth*, 2010, 1: 5–24
 - 39 Siegler M A, Smrekar S E. Lunar heat flow: Regional prospective of the Apollo landing sites. *J Geophys Res Planets*, 2014, 119: 47–63
 - 40 Nimmo F, McKenzie D. Volcanism and tectonics on Venus. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1998, 26: 23–51
 - 41 Samuel H, Lognonné P, Panning M, et al. The rheology and thermal history of Mars revealed by the orbital evolution of Phobos. *Nature*, 2019, 569: 523–527
 - 42 Kemp A I S, Wilde S A, Hawkesworth C J, et al. Hadean crustal evolution revisited: New constraints from Pb-Hf isotope systematics of the Jack Hills zircons. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 296: 45–56
 - 43 Boyet M, Blichert-Toft J, Rosing M, et al. ^{142}Nd evidence for early Earth differentiation. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 214: 427–442
 - 44 Caro G, Bourdon B, Birk J L, et al. ^{146}Sm - ^{142}Nd evidence from Isua metamorphosed sediments for early differentiation of the Earth's mantle. *Nature*, 2003, 423: 428–432
 - 45 Boyet M, Carlson R W. ^{142}Nd evidence for early (>4.53 Ga) global differentiation of the silicate Earth. *Science*, 2005, 309: 576–581
 - 46 Cates N L, Ziegler K, Schmitt A K, et al. Reduced, reused and recycled: Detrital zircons define a maximum age for the Eoarchean (ca. 3750–3780 Ma) Nuvvuagittuq Supracrustal Belt, Québec (Canada). *Earth Planet Sci Lett*, 2013, 362: 283–293
 - 47 David J, Godin L, Stevenson R, et al. U-Pb ages (3.8–2.7 Ga) and Nd isotope data from the newly identified Eoarchean Nuvvuagittuq supracrustal belt, Superior Craton, Canada. *GSA Bull*, 2009, 121: 150–163
 - 48 Cates N L, Mojzsis S J. Pre-3750 Ma supracrustal rocks from the Nuvvuagittuq supracrustal belt, northern Québec. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 255: 9–21
 - 49 O'neil J, Carlson R W, Paquette J L, et al. Formation age and metamorphic history of the Nuvvuagittuq Greenstone Belt. *Precambrian Res*, 2012, 220–221: 23–44
 - 50 O'neil J, Carlson R W, Francis D, et al. Neodymium-142 evidence for Hadean mafic crust. *Science*, 2008, 321: 1828–1831
 - 51 O'Neil J, Boyet M, Carlson R W, et al. Half a billion years of reworking of Hadean mafic crust to produce the Nuvvuagittuq Eoarchean felsic crust. *Earth Planet Sci Lett*, 2013, 379: 13–25
 - 52 O'neil J, Rizo H, Boyet M, et al. Geochemistry and Nd isotopic characteristics of Earth's Hadean mantle and primitive crust. *Earth Planet Sci Lett*, 2016, 442: 194–205
 - 53 Stern R A, Bleeker W. Age of the world's oldest rocks refined using Canada's SHRIMP: The Acasta Gneiss Complex, Northwest Territories, Canada. *Geosci Canada*, 1998, 25: 27–31
 - 54 Reimink J R, Davies J H F L, Chacko T, et al. No evidence for Hadean continental crust within Earth's oldest evolved rock unit. *Nat Geosci*, 2016, 9: 777–780
 - 55 Reimink J R, Chacko T, Stern R A, et al. Earth's earliest evolved crust generated in an Iceland-like setting. *Nat Geosci*, 2014, 7: 529–533
 - 56 Boyet M, Carlson R W. A new geochemical model for the Earth's mantle inferred from ^{146}Sm - ^{142}Nd systematics. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 250: 254–268
 - 57 Caro G, Bourdon B, Birk J L, et al. High-precision $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ measurements in terrestrial rocks: Constraints on the early differentiation of the Earth's mantle. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70: 164–191
 - 58 Rizo H, Boyet M, Blichert-Toft J, et al. Combined Nd and Hf isotope evidence for deep-seated source of Isua lavas. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 312: 267–279
 - 59 Harrison T M. The Hadean crust: Evidence from >4 Ga zircons. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2009, 37: 479–505
 - 60 Wang H L, Chen L, Sun Y, et al. Discovery of nearly 4.1 Ga xenolith zircons from the Ordovician volcanic rocks in the western section of the North Qinling (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2007, 52: 1685–1693 [王洪亮, 陈亮, 孙勇, 等. 北秦岭西段奥陶纪火山岩中发现近4.1 Ga的捕虏锆石. 科学通报, 2007, 52: 1685–1693]
 - 61 Ernst W G. Archean plate tectonics, rise of Proterozoic supercontinentality and onset of regional, episodic stagnant-lid behavior. *Gondwana Res*, 2009, 15: 243–253
 - 62 Zhang Q, Zhai M G. What is the Archean TTG (in Chinese)? *Acta Petrol Sin*, 2012, 28: 3446–3456 [张旗, 翟明国. 太古宙TTG岩石是什么含义? 岩石学报, 2012, 28: 3446–3456]
 - 63 Zhai M G. Tectonic evolution of the North China Craton (in Chinese). *J Geomech*, 2019, 25: 722–745 [翟明国. 华北克拉通构造演化. 地质力学学报, 2019, 25: 722–745]
 - 64 Rozel A B, Golabek G J, Jain C, et al. Continental crust formation on early Earth controlled by intrusive magmatism. *Nature*, 2017, 545: 332–335
 - 65 Lourenço D L, Rozel A B, Gerya T, et al. Efficient cooling of rocky planets by intrusive magmatism. *Nat Geosci*, 2018, 11: 322–327
 - 66 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]
 - 67 Moore W B, Lenardic A. The efficiency of plate tectonics and nonequilibrium dynamical evolution of planetary mantles. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 9255–9260

- 68 Korenaga J. Pitfalls in modeling mantle convection with internal heat production. *J Geophys Res Solid Earth*, 2017, 122: 4064–4085
- 69 Carlson R W, Boyet M, O’Neil J, et al. Early Differentiation and its long-term consequences for Earth evolution. In: Badro J, Walter M, eds. *The Early Earth: Accretion and Differentiation*. Hoboken: American Geophysical Union, 2015, 212: 143–172
- 70 Zhang T, Xu K, Ding X. China’s ambitions and challenges for asteroid-comet exploration. *Nat Astron*, 2021, 5: 730–731
- 71 Smith J, Anderson A, Newton R, et al. Petrologic history of the moon inferred from petrography, mineralogy and petrogenesis of Apollo 11 rocks. *Geochim Cosmochim Acta Suppl*, 1970, 1: 897
- 72 Wood J A, Dickey Jr J S, Marvin U B, et al. Lunar anorthosites and a geophysical model of the Moon. *Geochim Cosmochim Acta Suppl*, 1970, 1: 965
- 73 Neumann W, Breuer D, Spohn T. Differentiation of Vesta: Implications for a shallow magma ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 395: 267–280
- 74 Bizzarro M, Baker J A, Haack H, et al. Rapid timescales for accretion and melting of differentiated planetesimals inferred from ^{26}Al - ^{26}Mg chronometry. *Astrophys J*, 2005, 632: L41–L44
- 75 McSween J H Y, Raymond C A, Stolper E M, et al. Differentiation and magmatic history of Vesta: Constraints from HED meteorites and Dawn spacecraft data. *Geochemistry*, 2019, 79: 125526
- 76 Lunning N G, McSween Jr. H Y, Tenner T J, et al. Olivine and pyroxene from the mantle of asteroid 4 Vesta. *Earth Planet Sci Lett*, 2015, 418: 126–135
- 77 De Kleer K, De Pater I, Molter E M, et al. Io’s volcanic activity from time domain adaptive optics observations: 2013–2018. *Astrophys J*, 2019, 158: 29
- 78 McEwen A S. Active volcanism on Io. *Science*, 2002, 297: 2220–2221
- 79 Strom R G, Terrile R J, Masursky H, et al. Volcanic eruption plumes on Io. *Nature*, 1979, 280: 733–736
- 80 Keszthelyi L, Jaeger W, Milazzo M, et al. New estimates for Io eruption temperatures: Implications for the interior. *Icarus*, 2007, 192: 491–502
- 81 Moore W B. Tidal heating and convection in Io. *J Geophys Res*, 2003, 108: 5096
- 82 Moore W B, Schubert G, Anderson J D, et al. The interior of Io. In: Lopes R M C, Spencer, J R, eds. *Io after Galileo: A new View of Jupiter’s Volcanic Moon*. Chichester: Springer and Praxis, 2007. 89–108
- 83 Ivanov M A, Head J W. Volcanically embayed craters on Venus: Testing the catastrophic and equilibrium resurfacing models. *Planet Space Sci*, 2015, 106: 116–121
- 84 Ivanov M A, Head J W. The history of volcanism on Venus. *Planet Space Sci*, 2013, 84: 66–92
- 85 Strom R G, Schaber G G, Dawsow D D. The global resurfacing of Venus. *J Geophys Res*, 1994, 99: 10899–10926
- 86 Zhong S. Migration of Tharsis volcanism on Mars caused by differential rotation of the lithosphere. *Nat Geosci*, 2009, 2: 19–23
- 87 Alday J, Trokhimovskiy A, Irwin P G J, et al. Isotopic fractionation of water and its photolytic products in the atmosphere of Mars. *Nat Astron*, 2021, 5: 943–950
- 88 Tashiro T, Ishida A, Hori M, et al. Early trace of life from 3.95 Ga sedimentary rocks in Labrador, Canada. *Nature*, 2017, 549: 516–518
- 89 Dodd M S, Papineau D, Grenne T, et al. Evidence for early life in Earth’s oldest hydrothermal vent precipitates. *Nature*, 2017, 543: 60–64
- 90 Nutman A P, Bennett V C, Friend C R L, et al. Rapid emergence of life shown by discovery of 3700-million-year-old microbial structures. *Nature*, 2016, 537: 535–538
- 91 Affholder A, Guyot F, Sauterey B, et al. Bayesian analysis of Enceladus’s plume data to assess methanogenesis. *Nat Astron*, 2021, 5: 805–814
- 92 Danielache S O, Hattori S, Johnson M S, et al. Photoabsorption cross-section measurements of ^{32}S , ^{33}S , ^{34}S , and ^{36}S sulfur dioxide for the (BB1)-B-1-X(1)A(1) absorption band. *J Geophys Res Atmos*, 2012, 117: 2546–2557
- 93 Danielache S O, Eskebjerg C, Johnson M S, et al. High-precision spectroscopy of ^{32}S , ^{33}S , and ^{34}S sulfur dioxide: Ultraviolet absorption cross sections and isotope effects. *J Geophys Res Atmos*, 2008, 113: D17314
- 94 Farquhar J, Savarino J, Jackson T L, et al. Evidence of atmospheric sulphur in the martian regolith from sulphur isotopes in meteorites. *Nature*, 2000, 404: 50–52
- 95 Li J, Fei Y W. Experimental constraints on core composition. In: Carlson R W, ed. *Treatise on Geochemistry Volume 3: The Mantle and Core*. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2013. 527–557
- 96 Badro J, Aubert J, Hirose K, et al. Magnesium partitioning between Earth’s mantle and core and its potential to drive an early exsolution geodynamo. *Geophys Res Lett*, 2018, 45: 13
- 97 O’rourke J G, Stevenson D J. Powering Earth’s dynamo with magnesium precipitation from the core. *Nature*, 2016, 529: 387–389
- 98 Badro J, Siebert J, Nimmo F. An early geodynamo driven by exsolution of mantle components from Earth’s core. *Nature*, 2016, 536: 326–328
- 99 Corgne A, Keshav S, Fei Y, et al. How much potassium is in the Earth’s core? New insights from partitioning experiments. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 256: 567–576
- 100 Murthy V R, van Westrenen W, Fei Y. Experimental evidence that potassium is a substantial radioactive heat source in planetary cores. *Nature*, 2003, 423: 163–165

Summary for “冥古宙地球的冷却、分异和构造体制及其比较行星学研究”

Secular cooling, differentiation and tectonic regimes of the Hadean Earth from a comparative planetological perspective

Yun Liu^{1,2*} & Qingwen Zhang¹

¹ State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

² International Center for Planetary Science, College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

* Corresponding author, E-mail: liuyun@vip.gyig.ac.cn

The Hadean Eon, an elusive “dark age” of the Earth, is the earliest period in Earth’s history spanning less than 600 Ma, during which Earth’s magma ocean may have formed and solidified, the primordial core, mantle, crust and atmosphere may have formed, laying the groundwork for the Earth’s subsequent evolution. Among others, the thermal evolution might have massive impact on Hadean Earth’s evolution but remains poorly understood. This is even more true since there are intricate interactions among the secular cooling, evolution of tectonic regimes and crust-mantle differentiations of the early Earth. The types of the tectonics on a global scale (e.g., the plate tectonics and stagnant-lid tectonics), which essentially involve ways of Earth’s cooling and dominate the vigor of interplays between the rigid lithosphere and mantle convection, are strongly temperature-dependent. On the other hand, the tectonic regimes in turn have large impacts on the Earth’s heat output, since the former could determine the mechanisms of heat transfer (i.e., conduction, convection or radiation) between Earth’s surface and the interior, and the resultant cooling rates of these mechanisms could differ by orders of magnitudes. Similarly, the degree of differentiation of Earth’s interior directly relates to its temperature for a given composition and pressure, while the formation of the continents enriches the incompatible elements (esp. the radioactive heat production elements U, Th and K), and lower the heat input in the mantle. Consequently, only if the cooling history of the early stage of Earth is well constrained will the nature of Hadean tectonic regimes and ways of differentiation of the hot early mantle be revealed.

Nevertheless, our understanding of Hadean Earth’s thermal evolution has been sluggish due to the scarcity of geological records of Earth itself. A remedy is to extrapolate the thermal evolution trend of the Hadean mantle from the available data of younger igneous rocks (with ages <3.5 Ga) by means of petrological geothermometers, the results of which show the presence of a counterintuitively cool early state in Earth’s interior before ~3.5 Ga. Furthermore, the conventional theoretical approaches based on the stagnant-lid regime tend to exaggerate the cooling rate of early Earth’s and yield an unrealistically high temperature during the Hadean (i.e., the so-called “thermal catastrophe”). It is likely that we have been misled either by the over-extrapolated results of thermal evolution or by the problematic theoretical estimations based on the improper scaling laws among the geotherm, the rigor of mantle convection and the convective cooling rate.

The issues could be overcome by acquiring the ancient geological records or by observing the ongoing geological activities on other terrestrial bodies (i.e., the rocky bodies such as terrestrial planets, dwarf planets, moons, and asteroids) in the Solar System. The well-preserved records accessible on these terrestrial bodies, such as the presence of 4.4 Ga-old anorthosite of the Moon that is suggestive possibly of its formation in a terrestrial magma ocean common in the early solar system, or the violent volcanism that indicates the prevalence of the heat-pipe tectonics on Jupiter’s moon Io, could provide crucial clues for the composition, heat budget and tectonics during Earth’s “dark age”, and boost our understanding of its early history. The method is feasible since there are clear similarities among Earth and these terrestrial bodies in their primitive compositions, internal structures, and significant generalities in their thermo-tectonic-chemical evolutions at least at certain stages in their geological history.

In this paper, several key questions and their progresses in the thermal evolution, internal differentiation and tectonics of the early Earth are reviewed, with the remaining issues and the potential directions of breakthroughs in the future being discussed.

Hadean Earth, thermal evolution, chemical differentiation, tectonic regime, comparative planetology

doi: [10.1360/TB-2022-0176](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0176)