

专题27: 早期地球的形成与演化

早期地球的“热管”构造

章清文, 刘耘*

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

地球的板块构造(Plate tectonics)和其他行星(水星、金星、火星)及其卫星上常见的停滞盖层构造(Stagnant lid tectonics)主导了现今类地行星主要构造模式(O'Neill 等, 2014; Stern, 2018)。而在地球形成初期, 内、外地质作用十分活跃, 大碰撞、岩浆洋过程、核-幔分异和强烈的地幔对流等为地球各圈层结构的形成奠定了基础(Stevenson, 2008)。但因早期地质记录保存极少, 人们对占 46 亿年历史近 1/2 的地球早期阶段的演化知之甚少, 尤其是当时的构造模式。

20 世纪 50 年代以来, 对地球早期演化的突破性认识来自太阳系探索成果的启示, 以及相关比较行星学研究的进展。其中最引人瞩目的发现来自 1979 年发射的“旅行者一号”探测器和 1989 年升空的“伽利略号”探测器, 它们靠近木星后, 近距离观测到其卫星木卫一上存在太阳系内迄今发现的最活跃的火山作用。尽管木卫一的大小接近月球, 其地表热流极高(据红外光谱资料推测高达 $1.5\sim 4.0\text{W}/\text{m}^2$)(Moore 等, 2007), 构造活动极其活跃(其表面存在约 400 处活跃的热点, 其喷发物可使其表面形态每 1000 年更新一次), 表明木卫一内部有极高的生热量。这些热量来自木星及其卫星之间的轨道共振所致的潮汐加热作用(Peale 等, 1979; Lainey 等, 2009), 表面散热总量高达 $1\times 10^{14}\text{W}$, 为月球的 140 倍或地球的两倍以上(Veeder 等, 1994; Davies 等, 2007, 2015)。强烈的潮汐加热作用使木卫一的上地幔发生大范围熔融, 形成厚度超过 50km、部分熔融程度超过 20%的浅部“岩浆洋”(Schubert 等, 1981, 1986; Keszthelyi 等, 1999; Tackley, 2001; Khurana 等, 2011), 并且可能喷发高温的超基性岩浆(喷发温度可达 1800K)(McEwen, 1998, 2002; Williams, 2000)。

木卫一的高地表热流、高内生热率、地幔大规模熔融、超基性岩浆作用活跃等特征是目目前太阳系内独一无二的, 类似于地球在冥古宙或太古宙时期的状态(McEwen, 2002), 因而是研究类地行星早期演化的天然实验室, 可为地球早期地质和动力学过程提供关键线索。一般而言, 地球早期内部热量主要来自行星增生阶段星子/星胚的动能和核-幔分异过程中重力势能转化而来的内能, 以及富集的放射性元素(如 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 和 ^{26}Al 等)的衰变热(总生热量达地球现值的四倍以上)。如此巨大的生热量需要一种比板块构造和停滞盖层构造更高效的表面散热机制, 以避免内部发生“过热危机”(Korenaga 等, 2006)。尽管地球生热机制与木卫一存在显著差异, 但在前板块构造阶段, 地球可能经历了类似目前木卫一上观测到的大规模岩浆作用(喷发为主, 伴随侵入作用), 使地球内部热量快速散发到外太空, 亦即“热管”构造(O'Reilly 等, 1981; Moore 等, 2013; Rozel 等, 2017)。

目前, 人们对这种以岩浆作用主导的“热管”构造模式的相关研究仍较少。本研究结合木卫一太空观测资料(如红外成像)、实验手段提供的关键物性参数(如热导率等), 开展地球动力学理论分析和数值模拟工作, 对“热管”构造的发生条件、方式, 对壳-幔分异过程、内部结构形成的影响, 以及转换为其他构造模式(如板块构造模式、停滞盖层模式)的时机等关键

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(批准号: XDB18000000), 国家青年科学基金项目(批准号: 41804092)

第一作者简介: 章清文(1987-), 男, 博士后, 研究方向: 地球动力学. E-mail: zhangqingwen@live.cn

*通信作者简介: 刘耘(1968-), 男, 研究员, 研究方向: 理论及计算地球化学研究

问题进行初步探索。如果早期地球处于“热管”构造模式，表面冷却过程受控于喷发和侵入作用，那么壳、幔物质将会快速熔融、迁移、固结并折返，该过程涉及的气(挥发分)—液(熔体)—固(岩石)相变将伴随快速的潜热交换。因此，相对于现今地球和其他类地行星在板块构造和停滞盖层构造模式下壳、幔间以单纯的热传导+热对流主导的热传递机制而言，“热管”构造可更高效地传递和散发内部热量(Incropera 等, 2007; Moore 等, 2013)。这也对类地行星的物质演化和圈层形成造成十分显著的影响：活跃的岩浆作用造成地球内、外圈层间的快速物质交换(部分熔融、岩浆迁移和结晶分异等过程更快)，可能加速了早期地球的圈层形成(如“原始地幔”向地幔+地壳的转变)。