

# 关于地球形成和早期演化问题

杨文采

浙江大学,杭州,310057



www.  
geojournals.cn/georev

**内容提要:** 笔者根据物理学原理,通过对初始太阳和地球形成演化的分析,产生以下几点认识:①在 4.7 Ga 前,氢原子核在高温高压下聚变,释放出巨大能量,包括热能、光能和动能等,导致了恒星太阳的形成。在 4.6~4.2 Ga 前,核聚变导致太阳发生 4 次耀变,向周围空间发送具有极高能量的核裂变物质。②太阳发生的第二次耀变,喷出物高速自旋运动后,进入到初始地球的轨道,绕原太阳运行,这是初始地球演化的第一个阶段,称为云团飞行阶段。以后地球演化分成以下几个环节:吸积扩容、圈层分异、陆核形成和原核生命形成。③吸积作用中的原始地球在重力作用下吸收陨石、冰团和彗星物质,使地球扩容,同时还发生撞击、热熔和去气作用,使原始地球进一步升温。物质向地球核心聚集过程也加剧了地核内粒子相互碰撞,激发地内的核衰变,使原始地球内部升温加速,积累了大量能量。在 4.5~4.2 Ga 前地球岩熔滚滚翻腾,形成大规模的岩浆海。④在 4.2 Ga 后太阳不再发生强烈的耀变,因此地球周围的空间转向平静和散热,随着时间的推移,地球逐渐冷却并稳定下来。冷却使熔体发生冷凝固作用,岩浆地球逐渐向多层次的结构转变,形成地核、地幔、岩石圈和地壳。⑤由于温度降低、分子的动能减少,水蒸汽、CO<sub>2</sub>、硫化氢、甲烷等便在地球外层积累,逐渐形成了有水循环的大气圈。水蒸汽形成了云层,云层的冷却形成水滴和降雨。在 4.1 Ga 前,成洋作用进行,很快形成了地球的水圈。⑥在岩浆球转变为水包球的过程中,熔岩依然在地下涌动。较轻的元素一般具有较低的熔点,在它们冷却的时候首先结晶成为造岩矿物。同时,海洋底部不断有火山爆发,造成岩石组成的火山岛。到了约 4.0 Ga 以前,这些岩石连成一定规模的岩块,成为最早从岛屿形成的大陆核。由于大陆岩石圈的热导率比较低,可以减缓地球内部热量的散发,在 4.0~3.8 Ga 期间,大陆核在快速增长,形成大陆块。⑦比较火星与地球早期演化过程表明,由于火星体积比地球小、距离太阳远,在吸积阶段产生和积蓄的能量少。其次,火星在混沌阶段积蓄了一些能量之后,没有涌现出自组织的机制,来保存内部积蓄的能量。因此,火星的老化过程来得很早,大约在 3.0 Ga 前就开始老化了。地球在 3.8 Ga 以来,涌现出内部物质循环的自组织的机制,使地球系统处于稳定凝聚力和活力平衡发展的阶段,现在还没有出现老化象征。

**关键词:** 太阳系;地球;形成;早期演化;物质运动

人类可贵的好奇心,表现在对“天、地、生”的起源问题特别的关注,出现了许多有争议的“理论”,这是正常的学术讨论 (Tolstikhin and Hofmann, 2005; Condie, 2011; 李三忠等, 2015; 杨文采, 2025)。这些问题属于奠定相关学科存在基础的“永恒的”问题,的确十分重要,但是不可能有最正确的答案,只能在争论中缓慢地接近真理。我们通常说的宏观世界,包括所有人可以感知的宏观存在,主要有以下四大系统:宇宙系统、地球系统、生命系统和社会系统,前三者属于自然系统。宇宙系统包含银河系子系统,银河系又包含太阳系子系统,它们都是天文学研究的对象。地球系统是人类生存的根

基,是地球科学研究的对象。生命系统是生命科学研究的对象,包括动物学、植物学、微生物学和生物链体系研究,等等。地球系统形成于 4.6 Ga 前的太阳系,生命系统是地球早期演化生成的副产品。看来,地球形成要讨论的问题涉及太空科学、地球科学和生命科学的交叉。在笔者最近发表的《地球动力学》讲义中(杨文采, 2025),对这些问题给出了一些回答,但是没有详细分析,综合得也不全面。因此,笔者希望从物理学原理的角度,对于有关的几个问题进行进一步探讨。讨论的问题包括:①初始地球形成前的宇宙和太阳系;②初始太阳系的物质与存在形态;③初始地球演化的多次相变;④初始地

注:本文为浙江大学人才引进资助项目的成果。

收稿日期:2025-07-05;改回日期:2025-07-16;网络首发:2025-07-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.07.005

作者简介:杨文采,男,1942年生,1984年在加拿大 McGill 大学取得地球物理学博士学位;2005年增选为中国科学院院士;现为浙江大学地球科学学院教授,主要从事地球信息学和动力学研究;Email: yang007@zju.edu.cn。

球演化后期的生态形成。由于这个问题的复杂性,笔者先讨论前3个问题。

## 1 初始地球形成前的宇宙和太阳系

根据天文学的认知(胡中为,2003;胡中为和徐伟彪,2003;苏宣,2010;谢树成,2015),宇宙是在14.0 Ga前的一次能量奇点大爆炸后形成的,大爆炸后宇宙通过一系列物理过程形成许多元素。宇宙起源于温度极高和密度极大的原始火球(即奇点),产生了电子与质子、中子。大爆炸后宇宙不断膨胀,辐射温度和物质密度不断降低,当温度降低到某一温度时,中子开始失去自由存在的条件,发生衰变或与质子结合,生成H、He、和少量Li。氢在高温下燃烧并放出热能,每4个氢核聚变为1个氦核。氦在高温下燃烧,由氦核聚变为碳12核和氧16核等。以后 $\alpha$ 粒子与氦20发生反应,生成镁、硅、硫、和钒、铬、锰、铁等。这些元素组成了众多的第一代恒星物质,万有引力又把恒星物质组织出许多星系。大约12.0 Ga前,银河系就这样形成了。

根据宇宙膨胀的理论,人类在太空观测到的宇宙星云的图像,反映了古代的星云活动的情景(胡中为和徐伟彪,2003;Tolstikhin,2005;苏宣,2010)。现今人类对太空的观测精度提高,能够观测到宇宙中许多行星的起源和形态(图1a)。天文学研究表明,恒星由弥漫的星际介质凝聚而成,在其优化的后期又通过爆炸把核素合成产物抛向星际空

间,返回星际介质。因此,新的恒星又从星际介质中诞生。恒星的寿命与其质量相关,质量越大,演化越快,寿命越短。大约在4.8 Ga前,质量比较小的太阳物质凝聚在银河系的外围一个区域,它们是若干代恒星核素合成的产物。太阳生成的第一个阶段称为星云时期。太阳星云是太阳系诞生的摇篮,太阳系的形成是一个复杂而漫长的过程,星云时期只是太阳系形成的开端。

大约在4.7 Ga前,太阳星云是一个巨大的分子云,它主要由氢气和宇宙尘埃组成。分子云中的尘埃还有什么元素?我们可以从两方面来推测。首先,在4.7 Ga前宇宙大爆炸已经发生了90多亿年,现今已经发现了的94种天然元素大多数已经存在于第一代行星系中。其中质量最小氢和氦会弥漫在整个宇宙空间,而质量大的元素会聚集在行星内部,而不会到处漫布。分子云中的尘埃会有各种元素,但是质量越大的元素含量越少。其次,从与太阳共生的行星大气的成分来看,现今大气组成的观测数据是:

水星上只有极微量的大气。

金星有:CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、Ar、CO、H<sub>2</sub>O、HCl、HF、H、He、O。

火星有:CO<sub>2</sub>、CO、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、Kr、Xe、O<sub>2</sub>(微量)。

木星有:CH<sub>4</sub>、NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>、He、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>(微量)、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、PH<sub>3</sub>。

土星有:CH<sub>4</sub>、NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(微量)。

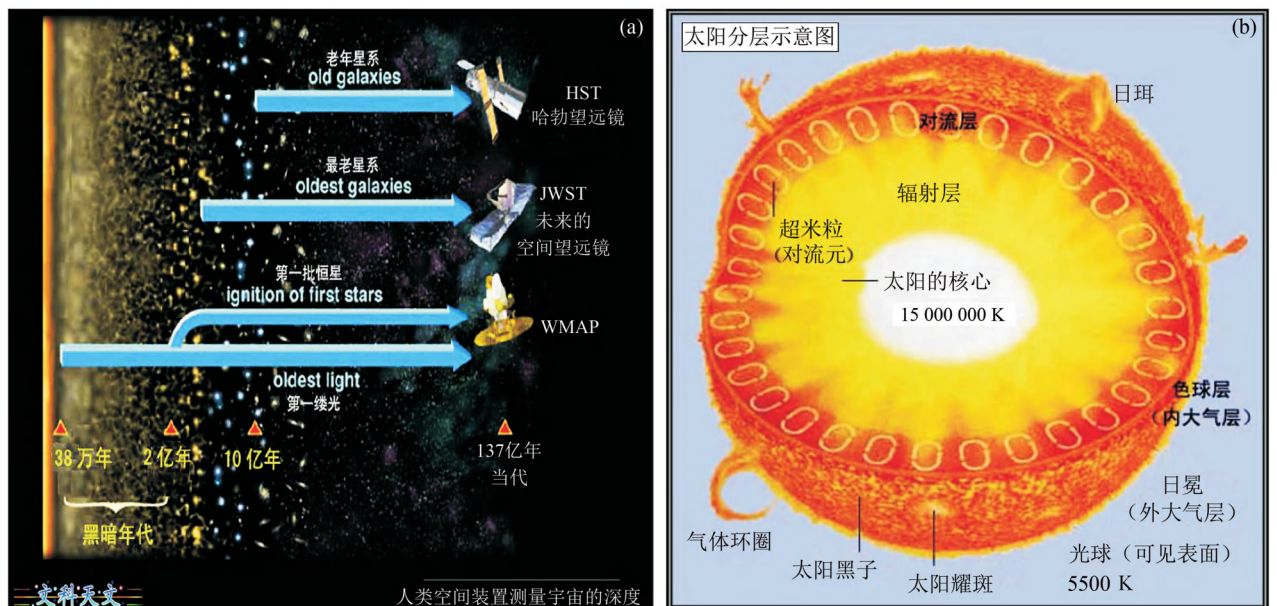


图1 人类观测宇宙的深度示意图(a)和(b)太阳内部分层结构示意图(据苏宣,2010)

Fig.1 Observation depth to the universe (a) and structure of the Sun (b)(from Su Xuan, 2010#)

天王星有:CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>。

海王星有:CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>。

土卫六有:CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>。

可见,太阳系行星的大气主要由氢、碳、氮、氧、氟、氙、氦和磷组成,它们都是质量小和原子量小的元素。由此可以推测,原始太阳分子云中的尘埃主要为原子量小元素及其化合物,如镁、铁和水等等。

随着时间的推移,星云中的物质逐渐聚集在一起,在引力作用下星云会发生分子云坍塌,其中心区域开始形成一个叫做原恒星的物质密集核心。原始太阳中的分子云内部是急剧运动的流体,有许多像台风旋转圈那样的热流体运动中心,它们在旋转中混合造成物质密集的核,使分子云体积缩小,走向坍塌。同时,星云中的物质在聚集过程中围绕核心运动,形成了一个旋转的盘状结构。在这个过程中,星云中心的密度变得越来越大,最终达到了足以点燃核聚变反应的程度。当氢原子核在高温高压下发生聚变,形成氦原子核并释放出大量能量时,太阳就开始了它的生命旅程。

在星云时期之后是成星时期,形成了作为恒星的原始太阳,它在形成过程中不断吸收周围物质,质量迅速增长,内部压力和温度也持续攀升,使核聚变反应被点燃;氢原子核在高温高压下聚变成氦原子核,释放出巨大能量。这一过程产生的辐射压与引力相抗衡,使得原恒星逐渐稳定下来,不再继续坍塌。氢原子核聚变同时释放巨量的能量,包括热能、光能和动能等,这个过程导致了太阳的形成,使太阳成为一颗真正意义上的恒星。

## 2 初始太阳系的物质与存在形态

在成星时期太阳开始核聚变并释放大量的能量,会导致什么样的后果?有多种假说进行了回应。从物理原理上看,主要有以下 3 个大类(Anderson, 1989;胡中为,2003;胡中为和徐伟彪,2003;苏宣,2010;谢树成,2015)。

### 2.1 旋转盘形成说

在 4.7 Ga 前太阳形成之后,核聚变释放的大量的能量为物质运动提供了随机激发的动能,激励了物质旋转运动。原恒星周围的物质在引力和角动量的共同作用下,太阳形成了一个旋转的盘状结构,即原行星盘。原行星盘内物质分布复杂,从靠近原恒星的内侧到外侧,温度、物质成分差异巨大。内侧温度极高,只有熔点高的金属和岩石等物质能够留存;外侧温度较低,水、甲烷、氨等物质可以凝结成冰。

这些不同物质在旋转盘中不断相互作用,它们的运动和碰撞为行星的形成提供了丰富的原料。在太阳原恒星周围形成的旋转气体和尘埃盘,称为原始太阳系盘。这个盘中的物质逐渐聚集,就合并形成有一定规模的天体,通过积累和碰撞最终形成行星。现在太阳系物质运动的星盘结构,就是原始太阳旋转盘形成的最终产物。

旋转盘形成说强调的是早期地球核聚变产生的动能,造成原太阳物质的旋转和扁化。认为行星物质是来源于与太阳一样的太空云团,它们与原太阳物质一起旋转和被扁化。

### 2.2 地球膨裂说

此假说认为,在 4.6 Ga 前,太阳因内部的核聚变的能量积累发热膨胀,后来发生爆炸,从太阳内部飞出许多熔融的火球,这是太阳的耀变作用。这些熔融的火球冷却后形成了行星、月亮、小行星、卫星和彗星,地球就是其中之一。一些大的火球在冷却的过程中,由于受到表面张力的作用,形成了球形。一些小的火球来不及收缩成球形,而冷却成了不规则的形状,形成了火星和木星间的小行星带和小行星。一些小一点的火球由于离大火球较近而被“俘获”,形成了大火球的卫星。一些离太阳较近的行星具有较重的物质;一些离太阳较远的行星,具有较轻的物质。这是因为离太阳较远的行星具有的液态氢等物质,与太阳表面的熔融物质一样,并且较轻,因此它们在太阳爆炸时获得了较大的离心运动初速度,飞离太阳较远。距离太阳较近的行星具有的岩石、金属等物质,与太阳表面下较重的熔融物质一样,因此它们在太阳爆炸时获得了较小的离心运动初速度,飞离太阳较近,成为类地行星。

地球膨裂说强调的是早期地球通过热能积累转换为大爆炸的动能。它认为行星物质是太阳喷射出来的,而不是像旋转盘形成说那样,认为行星物质是来源于与太阳一样的太空云团。现今太阳系行星轨道为同平面上的同心圆,行星轨道距离分布服从 Bode 定律。地球膨裂说的大爆炸的动能,应用太阳旋转喷射出来的物质也呈现同心圆的旋转轨迹,服从 Bode 定律。

### 2.3 耀变喷发说

太阳系的形成是一个复杂而漫长的过程,经过多次的能量释放和物质喷发,才形成太阳系。原太阳的变星时期大约在 4.8~4.5 Ga 期间。当温度达到 800000 K 时,氢被点燃发生核聚变,产生氦核、光子并释放大量的核能。释放的能量产生猛烈地喷发,

星体亮度也就突然增亮好多倍,这就是太阳的耀变过程。在耀变期间太阳内发生过多次猛烈地喷发,释放大量能量和抛射物质,并带走一部分角动量。太阳耀变喷发在太阳系形成时期的规模非常大,比较大的喷发发生过四次。现在太阳耀变也发生在其表面的局部区域,不过规模已经不大了。在图 1b 中,耀斑就是现代小规模耀变的标识。

耀变喷发是从太阳体内部核反应区开始的,那里的物质向外转动非常快,可达每秒数百千米。耀变物质具有极高的能量,含有核裂变的氢气和多种轻元素的物质尘埃,看上去像高温下高速转动的火云团。原太阳第一次喷出的物质量大约是太阳质量的百万分之三,温度一万多度。在飞离原太阳过程中耀变物质边降温边减速,当它到达目前金星轨道处速度刚好与开普勒轨道速度同步,便留在轨道上绕原太阳运转。在几十或者上百年后原太阳又发生第二次耀变,喷出物比前次略多些,仍是高温熔融状态,高速自旋运动,初速度比前次略大,当它进入到初始的地球轨道后绕原太阳运行,形成初始地球。又过数百年,原太阳又发生第三次耀变,这时的星核温度进一步增高,可达 3000000 K,发生氦、锂、铍、硼等核反应,释放的能量更大。但是,喷出物质没有前两次多,但初速度却更大,其中最大的一个团块进入到现今的木星轨道上,更多的碎块遍布在木星和火星轨道之间。经过三次喷发,原太阳处于暂时停顿状态,持续几千年,但星体中心温度仍在继续升高。当达到 7000000 K 时又发生第四次耀变,释放大量光子和能量。这次喷发物飞出更远,形成了天王星和海王星。

耀变喷发作用符合现代物理学和天文学原理,与地球物理观测结果也比较吻合,是笔者赞同的假说。

### 3 初始地球演化的多次相变

接下来根据物理学、天文学与地球物理观测结果,讨论地球的演化(Anderson, 1989; James, 1989; Tolstikhin, 2005; Kump et al., 2010; 苏宣, 2010)。从最早的地球物质来自太阳第二次耀变喷发作用开始,而且第 3~4 次耀变喷发作用会在整个太阳系空间造成大范围的流星雨,也为地球进一步的吸积作用提供物质来源。根据物理作用发生的序列,笔者把初始地球演化分成以下几个环节(杨文采, 2021, 2025):①云团飞行环节,②吸积扩容环节,③圈层分异环节,④陆核形成环节,⑤原核生命形成环节。下面就对前 4 个环节进行比较详细的讨论。

#### 3.1 云团飞行环节

太阳第二次耀变喷发物质含有核裂变的氢气和多种轻元素物质的尘埃,看上去像高温下高速转动的火云团。这个时期地球距离太阳比现在近得多,它虽然离开太阳向外旋转运动,温度在慢慢降低,但是温度还是很高的。随着向外运动与温度降低,它从火云气相态变成高温下的气体—熔体混合相,再凝固形成黏滞系数很大的黏稠熔融相。这个过程发生有分异作用、引力吸引与尘埃浓缩作用;氢气向太空飘零,部分轻元素尘埃化合粘结成为熔浆。到第二次耀变喷出物进入到现今地球轨道,它的表面温度可能降低到 2000℃ 以下,成为表面冒热气的熔融气球,参见笔者归纳的图 2a。

#### 3.2 吸积扩容

在 4.5~4.2 Ga 前,在星尘纷纷的原始地球外太空,不时有星体发生爆炸或燃烧,在向地球周围喷射出爆炸碎片或燃烧气团。太空中还有许多旋转着的陨石、冰团及冰彗星。第 3~4 次耀变喷发作用会在整个太阳系空间造成大范围的流星雨,为地球进一步的吸积作用提供了大量物质来源。吸积作用中原始地球在重力作用下吸收陨石、冰团及彗星物质,使地球扩容,同时还发生撞击、热熔和去气作用。由于在大量的小天体碎片撞击地球的过程中,撞击释放出大量的热能使周围的物质熔化,原始地球进一步升温。物质向地球核心聚集过程也加剧了地核内粒子相互碰撞,激发地内的核衰变,使原始地球内部升温加速。迅速升温熔化了已吸收的陨石和冰团,逐渐使原始地球上层成为灼热的“火锅”。“火锅”里的熔岩滚滚翻腾,形成大规模的岩浆海,于是早期地球表层进入了热熔阶段。这时的地球应该是一个玄武质的岩浆球,撞击熔融作用形成了岩浆海(图 2a)。此后,翻腾的熔岩使水分汽化,气体外逸,硅、钠、铝、钾之类的轻元素上浮,铁、镍等重元素下沉,物质逐渐发生径向分异(图 2b)。大气成分主要为  $H_2$  和  $CO_2$ , 它们可以逐渐合成水。与此同时,原始地球内部的物质单元也会在引力作用下相互吸引并向核心聚集,使其体积逐渐缩小。从表面上看这时的地球是一个岩浆球,但是里面的地核已经开始形成了。

大约在 4.4 Ga 前发生了一次惊心动魄的大碰撞。这时一颗直径有上千千米的较大天体从地球旁边经过,受地球引力的吸引,向原始地球冲了过来,砸在现在太平洋的位置。这次碰撞冲击力巨大,把地球的一大部分熔岩物质撞飞了出去,而地球表面不仅形成了深达 600 km 的大坑,而且地球的旋转方

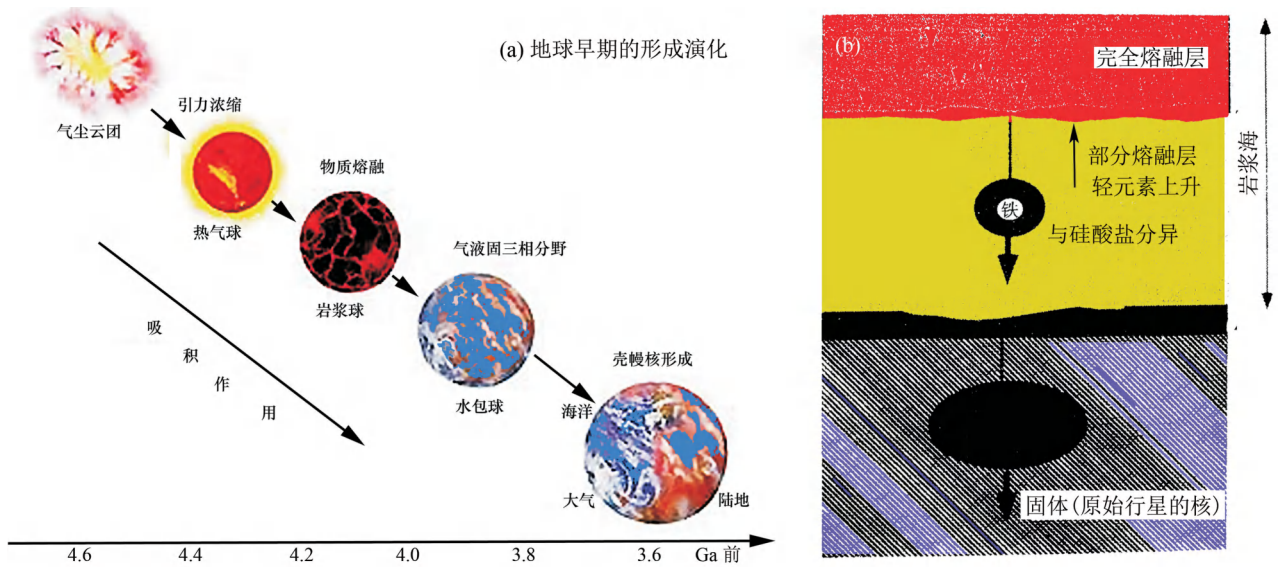


图 2 地球早期演化阶段示意图(a),和地球早期的三相分异示意图(b)

Fig. 2 Early evolution of the Earth (a) and mass separation process (b)

向也发生了偏转。这次大撞击事件弹出了无数熔岩球,它们受地球的引力又撞回地面。但是有一个大熔岩球飞到了 200000 km 以外的地方,受引力牵引开始围绕地球转动,这就是月球。从月球上采回来的岩石标本,其成分与地球地幔岩石基本相同,支持月球形成的星体碰撞假说。月球岩石样品年龄测定,证明了它是 4.3 Ga 的产物。地球和月球赤道平面交角  $5^\circ$ ,也支持月球形成的碰撞假说。月球形成时温度很高,体积比现在大若干倍。由于它质量比现在的地球小很多,因此散热快,很快就冷却固化。接下来,月球的旋转轨道逐步与地球同步,并慢慢地远离地球,现在月球与地球的平均距离已达到  $38 \times 10^4$  km。月球成分相当于地球壳幔平均成分,富集 Al、Ca、Ti 等元素,缺少地球地核的重元素。

### 3.3 圈层分异与成洋作用

在 4.2 Ga 前,太阳基本上完成了成星阶段,以后不再发生强烈的耀变,因此地球周围的空间转向平静;碰撞减少而地温下降,随着时间的推移,地球逐渐冷却并稳定下来。随着地球散热使外层逐渐冷却,岩浆球在向多层次地球转变。重力分异使玄武质岩浆泛起而橄榄岩浆下沉,轻熔体开始发生冷凝结晶作用,岩石圈和地壳就开始形成了。在加拿大东北部哈德逊湾发现的年龄 4.16 Ga 的变质岩,是地球上最古老的岩石。

由于重物质向地球核心聚集过程还在进行,这时形成了热熔的地核。而轻元素和水在向地球表面

聚集。由于温度降低、分子的动能减少,水蒸汽、CO、CO<sub>2</sub>、硫化氢、甲烷等便在地球外层积累,逐渐形成了有水循环的大气圈。水蒸汽形成了云层,云层的冷却形成水滴和降雨。当然,早期地球下的是酸雨,因为大量的 CO 和 CO<sub>2</sub> 被雨滴吸收,CO<sub>2</sub> 与水珠结合生成碳酸。

在温度降低的同时,成洋作用开始进行,很快形成了地球的水圈。岩浆球冷却在地球表面形成湖泊,使大气中水循环变得越来越活跃,雨也下得越来越大,湖泊逐渐连成了海洋。经过大约 100 Ma 的风雨,全球的海洋连成了大洋,几乎覆盖了全部地球表面,岩浆地球变成水包球(图 2a)。不过这时的海洋是十分污浊的,海水为又热又脏的卤水。大洋底发生火山爆发,开始出现岛屿。成洋作用还净化了空气。每次降雨,大气中的碳便从空中落入海洋,并结晶为碳酸盐。

### 3.4 陆核形成

在岩浆球转变为水包球的过程中,熔岩依然在地下涌动。较轻的元素一般具有较低的熔点,当地球表面冷却的时候,它们会首先结晶成为造岩矿物,如 SiO<sub>2</sub> 化合物等。同时,海洋底部不断有火山爆发,造成岩石组成的火山岛。到了约 4.0 Ga 以前,这些固体的岩石连成一定规模的岩块,厚度可达到 1~5 km,尺度达到数万平方千米,这就是最早从岛屿变成的大陆核。由于大陆岩石圈的热导率比较低,可以减缓热量的散发,缓解原始地球的冷却过

程。在4.0~3.8 Ga期间,大陆核在快速增长,地球的多圈层分块结构初步形成,行为转向有序,为地球系统的自组织打下了基础(图2a)。

经过原始地球物质运动相态变化的这四个环节,在创造了内核、月球、大气、岩石圈、大陆和海洋后,地球从混沌相态走向有序,进入相对稳定的能量保守系统。吸收紫外线的大气层和海洋陆地的形成进一步为生命的诞生创造了必需的条件。

## 4 初始地球演化与火星演化的对比

在太阳系中,火星是与地球各方面最为相似的行星。火星的早期演化与地球早期演化处于很相似的环境,演化过程是否也一样呢? 这些问题对希望“火星移民”的人来说是很关键的,因为如果火星与地球早期演化过程一样,火星地下会保留一些和地球相同的生态环境,如水和天然气,甚至一些微生物。如果这样,移民火星的成本就将大大降低。

从物理学的原理上猜测,火星的早期演化与地球早期演化的确会有许多相似之处。例如,早期云团中轻元素的聚集,吸积环节的生热和扩容,圈层在重力作用下分异,海洋与陆核的形成等等(杨文采,1998,2023,2025),都可以发生在火星上。在海洋与陆核形成后,低级的原核单细胞也有可能出现在火星上。火星上广泛出露的玄武质岩石表明,在4.0 Ga前火星上就有大规模火山爆发。在火星表面漫长的“水手谷”图片上,可以看到火星上陆地碰撞和海洋封闭的痕迹。不过,这一切都已经过去了,现今的火星没有海洋,没有地表水和一切生命。

为什么火星与地球早期演化过程相似,而现今的生态却极为不同呢? 从地球物理学的角度看,关键在于以下两点。首先,火星体积比地球小、距离太阳远,在吸积阶段产生和积蓄的能量少。其次,火星在混沌阶段积蓄了一些能量之后,没有涌现出自组织的机制,来保存内部积蓄的能量。因此,火星的老化过程来得很早,大约在3.0 Ga前就开始老化了,今天火星已经成为接近死寂的行星。在地球上到处都有分布的花岗岩,现在还没有在火星上看到,即使将来看到了,也说明它在火星表面很少出露。在地球上,大洋地壳由玄武岩组成,而大陆地壳主要是花岗质岩石,下地壳有40%的玄武质岩石,说明地球花岗岩是地球大陆长期缓慢增生的产物。在火星上花岗岩不发育,表明火星上海洋封闭和陆地增生的进展很快、过程很短,来不及发育大量的花岗岩。从火星与地球早期演化过程的比较可以推测,地球

上适宜动植物发育的生态是地球系统自组织涌现的结果,而像地球这样的能量保守系统的自组织并不是自然界发生的大概率事件(杨文采,2021,2025)。

## 5 小结

通过上述对初始太阳和地球形成演化的评述,可以得到以下几点认识:

(1)在4.7 Ga前,氢原子核在高温高压下聚变,释放出巨大能量,包括热能、光能和动能等,导致了恒星太阳的形成。在4.6~4.2 Ga前,核聚变导致太阳发生4次耀变喷发,向周围空间发送具有极高能量的核裂变物质。

(2)太阳发生的第二次耀变,喷出物高速自旋运动后,进入到初始地球的轨道,绕原太阳运行,这是初始地球演化的第一个阶段,称为云团飞行阶段。以后地球演化分成以下几个阶段:吸积扩容、圈层分异、陆核形成,和原核生命形成。

(3)吸积作用中的原始地球在重力作用下吸集陨石、冰团和彗星物质,使地球扩容,同时还发生撞击、热熔和去气作用,使原始地球进一步升温。物质向地球核心聚集过程也加剧了地核内粒子相互碰撞,激发地内的核衰变,使原始地球内部升温加速,积累了大量能量。在4.5~4.2 Ga前地球熔岩滚滚翻腾,形成大规模的岩浆海,

(4)在4.2 Ga后太阳不再发生强烈的耀变,因此地球周围的空间转向平静和散热,随着时间的推移,地球逐渐冷却并稳定下来。冷却使熔体发生冷凝固作用,岩浆地球逐渐向多层次的结构转变,形成地核、地幔、岩石圈和地壳。

(5)由于温度降低、分子的动能减少,水蒸汽、CO<sub>2</sub>、硫化氢、甲烷等便在地球外层积累,逐渐形成了有水循环的大气圈。水蒸汽形成了云层,云层的冷却形成水滴和降雨。在4.1 Ga前,成洋作用进行,很快形成了地球的水圈。

(6)在岩浆球转变为水包球的过程中,熔岩依然在地下涌动。较轻的元素一般具有较低的熔点,在它们冷却的时候首先结晶成为造岩矿物。同时,海洋底部不断有火山爆发,造成岩石组成的火山岛。到了约4.0 Ga以前,这些岩石连成一定规模的岩块,成为最早从岛屿形成的大陆核。由于大陆岩石圈的热导率比较低,可以减缓地球内部热量的散发,在4.0~3.8 Ga期间,大陆核在快速增长,形成大陆块。

(7)比较火星与地球早期演化过程表明,由于火星体积比地球小、距离太阳远,在吸积阶段产生和

积蓄的能量少。其次,火星在混沌阶段积蓄了一些能量之后,没有涌现出自组织的机制,来保存内部积蓄的能量。因此,火星的老化过程来得很早,大约在 3.0 Ga 前就开始老化了。地球在 3.8 Ga 以来,涌现出内部物质循环的自组织的机制,使地球系统处于稳定凝聚力和活力平衡发展的优化阶段,现在还没有出现老化象征。

**致谢:**感谢已故的中国地质大学邓晋福教授,在与他讨论地球早期的岩浆球的时候,他说这个应该是玄武质的岩浆球,给予了笔者启示。

## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 胡中为. 2003. 普通天文学. 南京: 南京大学出版社.  
 胡中为, 徐伟彪. 2008. 行星科学. 北京: 科学出版社.  
 李三忠, 许立青, 张臻, 孙文军, 戴黎明, 郭玲莉, 曹花花, 张国伟. 2015. 前寒武纪地球动力学(II): 早期地球. 地学前缘, 22(6): 11~26.  
 苏宣. 2010. 文科天文. 北京: 科学出版社.  
 谢树成. 2015. 地球生物学. 北京: 科学出版社.  
 杨文采. 1998. 后板块地球内部物理学导论. 北京: 地质出版社.  
 杨文采. 2008. 复杂性和各态遍历假说. 科技导报, 26(4): 3~4.  
 杨文采. 2021. 谈固体地球动力学系统的自组织. 地质论评, 67(3): 521~529.  
 杨文采. 2023. 东亚大陆地壳上地幔三维属性图集. 北京: 地质出版社.

- 杨文采. 2025. 地球动力学. 北京: 地质出版社.  
 Anderson D L. 1989. Theory of the Earth. Boston: Brackwell Scientific Com.  
 Condie K C. 2011. Earth as an Evolving Planetary System. Amsterdam: Academic Press.  
 Hu Zhongwei. 2003#. General Astronomy. Nanjing: Nanjing Univ. Press.  
 Hu Zhongwei, Xu Weibao. 2008#. Planet Science. Beijing: Science Press.  
 James D E. 1989. Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Newyork: Von Nos. Reinhold Com.  
 Kump L R, Kasting J F, Grane R G. 2010. The Earth System. Prentice Hall: Education Inc.  
 Li Sanzhong, Xu Liqing, Zhang Zhen, Sun Wenjun, Dai Liming, Guo Lingli, Cao Huahua, Zhang Guowei. 2015&. Pre-Cambrian geodynamics (II): the Early Earth. The Earth Frontier, 22(6): 11~26.  
 Su Xian. 2010#. Astronomy of Liberal Arts. Beijing: Science Press.  
 Tolstikhin I, Hofmann A W. 2005. Early crust on the top of the Earth core. Phys. Earth Planetary Int., 148: 109~130  
 Xie Shucheng. 2015&. Geobiology. Beijing: Science Press  
 Yang Wencai. 1998#. Introduction to Interior Solid Earth Geophysics. Beijing: Geological Publishing House; 1~142.  
 Yang Wencai. 2023#. Three-dimensional Images in the Crust and Upper-mantle in East Asia. Beijing: Geological Publishing House.  
 Yang Wencai. 2008#. On complexity and ergodicity. Science and Technology Review, 26(4): 3~4.  
 Yang Wencai. 2021&. On self-organization of the Earth dynamics. Geological Review, 67(3): 521~529.  
 Yang Wencai. 2025&. Earth Dynamics. Beijing: Geological Publishing House.

# On some problems of formation and early evolution of the Earth

YANG Wencai

Zhejiang University, 310057

**Abstract:** Based on principles of physics, by analyzing the formation and evolution of the initial Sun and Earth, the following insights have been derived as follows.

(1) Around 4.7 Ga ago, hydrogen nuclei fused under high temperature and pressure, releasing immense energy, including thermal, light, and kinetic energy, leading to the formation of the star and the Sun. Between 4.6 and 4.2 Ga ago, nuclear fusion caused the Sun to undergo four flares, emitting highly energetic nuclear fission material into space.

(2) The second flare from the Sun ejected materials that rapidly spun and entered the orbit of the primordial Earth, revolving around the original Sun, marking the first stage of Earth's evolution, known as the cloud flight phase. Subsequently, Earth's evolution progressed through several stages: accretion expansion phase, differentiation phase, continental nucleus formation phase, and the formation of primitive life phase.

(3) During the accretion process and under the influence of gravity, the primordial Earth absorbed meteorites, ice clusters, and comet material, causing it to expand. Additionally, collisions, melting, and degassing occurred, further warming the primordial Earth. The process of matter aggregating towards the Earth's core intensified particle collisions within the core, triggering nuclear decay, which accelerated internal warming of the primordial Earth,

accumulating vast amounts of energy. Between 4.5 and 4.2 Ga ago, Earth was covered with molten lava, forming extensive magma oceans.

(4) After 4.2 Ga, the Sun no longer experienced intense flares, leading to a calm and cooling space around the Earth. Over time, Earth gradually cooled and stabilized. This cooling caused molten material to solidify and to crystallize, transforming the magma-covered Earth into a multi-layered structure with a core, mantle, lithosphere, and crust.

(5) As temperatures dropped and molecular kinetic energy decreased, water vapor, CO<sub>2</sub>, hydrogen sulfide, methane, and other gases accumulated in Earth's outer layers, eventually forming an atmosphere with a water cycle. Water vapor forms clouds, which cooled to create water droplets and precipitation. Around 4.1 Ga ago, oceanic processes began, quickly forming Earth's hydrosphere.

(6) During the transition from magma spheres to water-covered spheres, lava continued to flow underground. Lighter elements usually have lower melting points and crystallize first into rock-forming minerals as they cooled. Meanwhile, volcanic eruptions on the ocean floor created volcanic islands of rocks. By about 4.0 Ga ago, these rocks had coalesced into sizable blocks, forming the earliest continental nuclei. Due to the low thermal conductivity of continental lithosphere, it slowed the dissipation of Earth's internal heat. Between 4.0 and 3.8 Ga ago, the continental nuclei grew rapidly, forming larger landmasses.

(7) Comparing the early evolutionary processes of Mars and Earth shows that due to Mars being smaller and farther from the Sun, it generated and accumulated less energy during the accretion phase. Additionally, after accumulating some energy during its chaotic phase, Mars did not develop self-organizing mechanisms to preserve its internal energy. Therefore, Mars began to age quite early, say around 3.0 Ga ago. In contrast, Earth has developed self-organizing mechanisms for internal material circulation over the past 3.8 Ga, keeping the Earth system in an optimized stage of stable cohesion and balance development. Currently, there are no signs of aging on the Earth.

**Keywords:** Solar System; the Earth; formation; early evolution; mass movement

**Acknowledgements:** The author is grateful for the support of the Talent Introduction Project of Zhejiang University. The author also thanks the old Professor DENG Jinfu of China University of Geosciences, when discussing the early Earth's magma ball with him, he said that this should be a basaltic magma ball, which gave the author inspiration

**First and corresponding author:** YANG Wencai, male, born in 1942, obtained his Ph. D. in geophysics from McGill University, Canada, in 1984; elected as an academician of the Chinese Academy of Sciences in 2005; currently a professor at the School of Earth Sciences, Zhejiang University, is mainly engaged in research on geoinformatics and dynamics; Email: yang007@zju.edu.cn

**Manuscript** received on: 2025-07-05; Accepted on: 2025-07-16; Published online on: 2025-07-20

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2025.07.005

**Edited by:** ZHANG Yuxu