



How and where did life on Earth arise?

地球生命的起源

李一良*, 孙思

香港大学地球科学系, 香港

* 联系人, E-mail: yiliang@hku.hk

2016-04-30 收稿, 2016-07-04 修回, 2016-07-04 接受, 2016-09-22 网络版发表

香港研究局基金(HKU703412P)资助

摘要 宇宙创生于大爆炸, 在其后的恒星形成和星系演化过程中各种生命所需的元素不断合成。45.6亿年前, 太阳系在银河系的宜居带形成并开始演化, 与此同时, 地球在太阳系的宜居带上开始朝宜居行星演化。在地球的前生命演化阶段水的海洋已经形成, 且拥有丰富的简单有机碳化合物、具催化功能的过渡金属化合物及携带能量的氢气、硫化氢和甲烷等。上述各种物质聚集在近地球表面高能、专门化的、封闭的微小地球化学单元中逐渐演化为初步具有生化功能的单元, 最终脱离地球化学反应空间的约束而形成能够独立进行能量代谢和遗传物质合成的生命个体。从能量和地球化学的角度看, 将氢气/甲烷合成为有机质的生化过程在早期和现代地球上均不难发生, 这也是生命自养起源说的基本假设。地球早期还原大气可经由太阳辐射形成简单有机分子, 而陨石和彗星也可将星际有机分子输送到地球, 因此地球早期的海洋可能是充满简单有机分子和营养盐的环境, 此环境支持生命异养起源假说。从前生命有机化学演化到第一个细胞的形成可能只需要很短的时间。虽然目前已知的地球上最古老的微生物化石是35亿年前形成的叠层石, 但在地球的海洋形成之时, 即38.5亿年前, 生命就可能已经存在于地球上了。

关键词 生命起源, 宇宙大爆炸, 恒星内部核合成, 地球演化, 前生命化学演化

人类文明的出现是地球上生命演化的最高层次, 而生命的出现和演化是人类所面临的终极起源问题之一。在近代科学技术出现之前, 人类通过对自身和自然环境的观察和思考, 试图用宗教或朴素的自然哲学思想来解释其起源问题。随着现代科学技术的发展, 人类逐渐认识到自身的起源与其所生存的天地环境有千丝万缕的联系。宏大的宇宙空间不仅为人类和地球上其他生命的出现提供了物质前提, 而且物理世界的漫长演化也是人类的出现以及其意识和知识的形成所必须的。因此探索生命的起源是所有自然科学领域的基本问题, 也是天体生物学学科形成的原因。在此文中, 简要讨论生命在宇宙中起源和演化基本的时间、空间、能量和物质问题, 建立自

然科学领域、空间探索技术和自然哲学研究与天体生物学之间的初步联系。

1 生命发生的基本宇宙化学条件

宇宙在147亿年前的大爆炸中产生, 大爆炸末期100 s左右的绝热膨胀产生了宇宙中最丰富的核素氢(¹H), 紧接着氢的另一个同位素(D)形成, 在之后的几分钟内又形成了氦^[1]。氢占了已知宇宙的70%的质量和90%的原子数量。在经历了一个相对短暂的、大约2亿年的黑暗时期之后, 宇宙开始形成大量巨大恒星(150~500倍太阳质量)。这些恒星的寿命短暂(小于100万年), 难以有效地合成较重的元素。约120亿年前, 星系及其中的恒星(大于1.5倍太阳质量)形成, 这

引用格式: 李一良, 孙思. 地球生命的起源. 科学通报, 2016, 61: 3065–3078

Li Y L, Sun S. The origin of life on Earth (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 3065–3078, doi: 10.1360/N972016-00551

些恒星既有足够长的寿命又有足够高的温度来燃烧氦，并合成碳-氧-硅及其他重元素^[2]。超新星爆发则形成大量重的放射性核素，如²⁶Al、超铁核素(如宇宙成因铅)和放射性核素(如铀)^[3,4]，并且引发附近星云的坍塌和朝向行星系统的演化。那些寿命长于从星云演化到行星形成的放射性核素(如²³⁵U, ²³⁸U, ¹⁸²Hf)分布于行星内部，比如在地球内部的放射性核素。这些放射性核素所产生的热量为地球分层结构的形成和长期的内部动力学循环提供了能量^[5]。

根据目前对已知地球生命的了解，液态水的持续存在是产生生命最基本的也是最重要的前提条件。因此，液态水的存在条件就是星球上(行星如水星、金星、地球、火星等；卫星如木卫二、土卫六)产生生命的基本条件。液态水为生命提供了溶体、温度缓冲环境、代谢环境、生存环境及润滑条件。液态水与其他具有相似质量的元素或分子相比有很大的热容(40.65 kJ/mol)，能在地表常压下很宽的温度范围内保持液体状态(0~100℃)。在0℃时固态水(冰)的密度是0.9167 g/cm³，而液态水的密度是0.9998 g/cm³，这是目前所知的唯一在结晶时会发生体积膨胀的非金属物质^[6]，这种特性使得海洋或湖泊在温度降到冰点以下仍可保持大量液态水的存在。根据水的分子式，它理应和分子质量与其相近的CO₂, SO₂, H₂S一样在常温常压下为气体，但由于1个水分子能形成4个氢键，其中水分子之间的氢键的聚合作用使得常压下水的沸点从40℃提高到100℃。这些氢键之间的相互作用也常见于含-OH, -NH, -SH的有机质中，使得这些有机质能够与水有密切的联系，从而使生命有机化学与非生命有机化学有很大的不同，也使C, H, O, N和S成为生命物质的核心元素。水的电偶极矩比较大，能够解离-NH₂或-COOH等功能团，并形成更多的氢键，增加有关有机分子的溶解度^[7]。土星的第6个卫星泰坦上面有丰富的有机质，目前常被认为是最好的“前生命化学实验室”^[8]，但由于其表面温度很低而没有液态水，导致其有机化学演化走向了与地球的前生命化学完全不同的道路。水的作用之一是将简单有机分子的憎水性和亲水性统一在一个有机分子集团，如磷脂、微脂粒形成的胶囊微泡或显微囊结构等上，这是生命有机化学不同于非生命有机化学的最基本特征^[9]。水的另一个重要的作用是水解有机质或无机质，水-岩或水-矿物之间的相互作用不仅使地球在自身的地球化学条件下能够产生有机质，

也为生命起源和生物圈提供了营养物质^[10]。矿物的表面存在着各种各样的催化位点，促使了前生命时期热液环境中费-托反应的发生，并使海洋中产生了足够的简单有机质。在地球和其他岩石行星上，最初的矿物来自于岩浆的冷却和结晶作用。与巨型的气体行星，如木星或土星相比，这些岩石行星更适合孕育生命，因为它们具有固体的表面，不仅可以为液态水提供一个表面，而且是水-岩相互作用的重要部分。

碳是宇宙中的基本元素之一，也是所有生命分子的基本骨架元素。红巨星阶段恒星内部氦的燃烧是一个 3α 阈值过程，即3个氦核通过碰撞过程合成1个碳核，进而合成氧和其他生命所需的元素(图1)。由于 α 粒子的结合能与 3α 过程的各种能量之间有很强的正相关性，恒星内部的氦燃烧必然产生足够的碳和氧^[11]，为碳基生命在地球上的起源，及其在宇宙中普遍存在的可能性提供了充分条件。碳原子的核外电子结构是其能够作为生命骨架元素的必要条件。碳原子能够进行多种化学反应的特征取决于其独有的L层电子能够形成s-p杂化轨道(图2)，使其不仅能与自己结合，还能与氢、氧、氮和硫等元素结合，从而能够形成具有复杂结构的小分子和大分子。这些复杂的有机分子大量形成于富含碳-氧-氮-硫的恒星内部和经超新星爆发之后的星云之中^[12]，它们会在行星系统形成之后富集于宜居行星上并与水进一步相互作用，开始具有代谢和自组织的前生命化学演化^[13]。

2 宇宙、星系和行星朝向宜居环境的演化

生命是宇宙演化到一定阶段出现的一种远离平

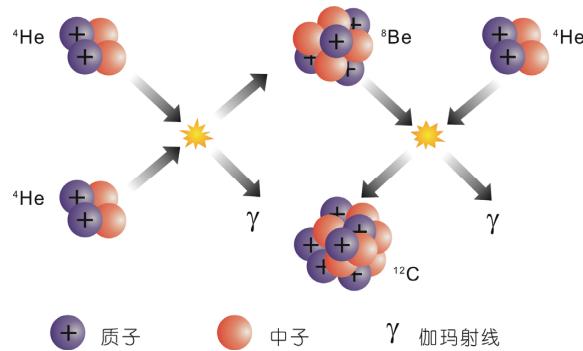


图1 三个氦原子碰撞形成碳原子示意图

Figure 1 Schematic of the synthesis of a carbon atom by the collision of three helium atoms

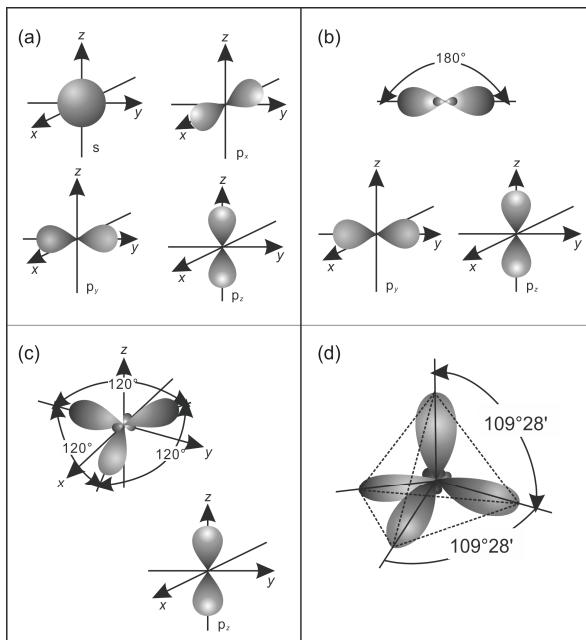


图2 碳原子价电子层电子的s, p轨道杂化示意图. (a) 碳原子处于激发态的s轨道和3个相同的p轨道; (b) s轨道与1个p轨道进行sp轨道杂化, 形成2个相同的sp杂化轨道和2个未参与杂化的p轨道; (c) s轨道与2个p轨道进行 sp^2 轨道杂化, 形成3个 sp^2 杂化轨道和1个未参与杂化的p轨道; (d) s轨道与3个p轨道进行 sp^3 轨道杂化, 形成4个相同的 sp^3 杂化轨道

Figure 2 Schematic of s, p hybridizations of the bonding electrons of carbon. (a) There are two s-orbitals and three p-orbitals; (b) the s-orbital mixing with only one p-orbital to make 2 sp orbitals and two p-orbitals left; (c) the s-orbital mixing with 2 p-orbitals to make 3 sp^2 orbitals with one p-orbital left; (d) mixing of the s-orbital and 3 p-orbitals to make 4 equivalent sp^3 hybrid orbitals

衡的耗散结构^[14,15]. 生命很难定义, 但一般具有如下特征: (1) 具有细胞结构; (2) 能够从环境中获得能量而生长, 并根据自身的遗传密码系统进行繁殖; (3) 能够对环境刺激作出反应; (4) 能够进行新陈代谢(比如: $ATP+H_2O \rightarrow ADP+P_i+能量$)^[16]; (5) 能够组成复杂的结构; (6) 个体能够适应环境, 而其群体则可以进行达尔文演化. 地球是迄今为止唯一确定有生命存在的星球. 现代的宇宙永久膨胀理论模型允许无数复杂体系的出现, 因此生命系统的出现和演化几乎是必然的^[17,18], 而地球上之所以能够产生生命并且演化到智慧文明也正是宇宙不同结构层次物质漫长演化的结果^[14,19]. 分析地球生命存在的各种记录有助于理解早期生命存在的环境, 从而有助于理解并推测生命在地球、太阳系和其他星球或卫星环境中, 乃至宇宙中其他角落的存在和演化.

地球的历史长达45.6亿年^[20], 其漫长的演化大

致可以分为3个主要阶段. 最初的7亿年被称为黑暗时代, 期间的地质过程已全部被极其活跃的地质(如火山活动)和天体过程(如大规模的陨石彗星撞击)一次次地覆盖, 因此目前对此了解甚少^[21,22]. 在这个阶段地球从一个恶劣的完全不适合生命存在的行星演化成了一个适合孕育生命的宜居行星^[23].

从38.5亿年前到大约7亿年前地球的生物圈基本上是一个微生物的世界^[24,25], 直至新元古代晚期出现了后生动物. 从5.4亿年前的寒武纪动物生命大爆发到现在是动物和植物快速演化和繁盛的时期. 生物个体的生长过程不同于无机环境的动力学过程, 各营养元素在不同生物群落构成的生态系统中进行着不同尺度上的生物地球化学循环, 从而被记录在不同的沉积建造中. 生物过程中碳同位素的有效分馏导致生物有机质的碳同位素组成不同于各种非生物物质, 即生物有机碳富集较轻的碳同位素(低 $\delta^{13}C$ 值). 目前, 地球上最古老的关于生命存在的证据来自38.5亿年前形成的变质沉积岩中的石墨的极低 $\delta^{13}C$ 值^[26]. 该碳同位素值曾被认为是典型的生物物质的碳同位素特征, 特别是生物成因甲烷的碳同位素分馏才能形成, 因此推测当时已存在生命. 但后来的研究显示, 这些最古老的沉积岩中的碳及球状含碳结构都可能是后期多次变质作用的产物, 因此, 它们的碳同位素特征并不能有效证明在38.5亿年前地球上就已经有生命存在了^[27,28].

38.5亿年前地球经历了一个可以毁灭任何生命的过程, 即“最后的大轰击”^[29], 这是一个短暂而高频的陨石/陨星轰击地球的过程. 如果生命在此之前就已出现在地球上, 则难以幸免. 但此后地球上的海洋一直延续至今, 为生命的起源和演化提供了保障. 地球之所以被称为蓝色星球是因为它是太阳系中唯一的液态水可以存在于其表面的行星. 在此海洋中沉积的岩石是地球上迄今发现的最古老的沉积岩之一, 如前寒武纪条带状硅铁建造(banded iron formation, BIF)^[30]. 这些中-晚太古代到古元古代的硅铁建造的形成与微生物的作用关系密切, 如其中铁氧化物就是在直接或间接的微生物作用下被氧化而沉淀下来的^[31], 因此, BIF的形成是最早的有生命参与的沉积过程之一.

35亿年前形成的叠层石是目前已知的最古老的生命存在的岩石学证据^[32]. 这些叠层石的特殊纹层结构只能在特定的环境中由微生物参与的有机质胶结的矿物沉淀才可以形成. Schopf^[33]在其早年发表的

著名论文中描述了保存于约34.6亿年前的燧石中的与蓝细菌非常相似的结构，后来Brasier等人^[34]在2002年及此后发表的数篇论文中均指出这一结构及其中所含的碳粒都是热液化学作用和后期成岩及变质作用叠加的产物。Brasier等人^[34]的这些工作看似否定了35亿年前地球已经有生命存在的证据，但本文认为并非如此。Brasier等人的一系列工作只是否定了那些微米尺度的结构是生物成因的，或是产氧光合作用的微生物的化石，但含这些结构的叠层石仍能代表最早的有生物作用参与的沉积岩，即具生物沉积的特征。因此，仍可把35亿年作为生物出现在地球上的时间下限，而在比35亿年更老的岩石中的有关生命存在的证据则需要更多的时间和精力去寻找。

Sagan^[35]认为38~42亿年之间的大轰击使得这一时期内的地球完全不利于生命的开始，而>37亿年前的沉积岩表明生命可能已经开始，因此生命起源的时间窗口是非常窄的——与地球漫长的历史相比几乎是瞬间发生的。Lazcano和Miller^[36]认为早期地球上有机质在海洋中的聚集是个很快的过程，也许只需要几百万年的时间，因为大气、海洋和地质学演化导致了一个友好的有机合成环境(宜居行星)；而蛋白质的合成一旦实现，复杂形式的生命很快就会出现。

Lazcano和Miller^[37]认为地球上生命的出现是一个非常容易的事情，并指出只要条件允许，生命的出现无需上亿年的时间，几千万甚至少于1千万年足矣。从生物学的角度来看，最早的生命应该是最简单的，它只需要具备最简单的遗传功能，且能够进行碳和能量代谢。这些最早的微生物细胞所做的仅仅是将能够产生能量的地球化学反应及其能量过程封闭在一个微小的空间而已。因此，从能量和碳循环(亦即代谢)的角度，这些早期的微生物和现代化能自养菌的代谢与特定地球化学环境中的化学过程并无两样。Fenchel等人^[15]指出，阳光照耀在整个太阳系时会有部分能量被地球这个相对封闭的行星环境所吸收，该过程必然会在地球的局部产生熵减的结构，生命就是这些结构的代表之一(图3)。或许在火星的早期阳光就可以维持一个局部熵减的环境，但这种环境现在可能已经不存在了。作为能量的输入，阳光在金星和木星的大气中也造成了相应的熵减环境，只是这种熵减结构的代表是其大气中形成的耗散结构而非生命，而地球上的耗散结构则刚好可以被以碳为骨架、以水为媒体的生命所代表(图3)。如此，来自行星内部的热源在向外辐射的途中也可以在某些局部形成熵减的环境，那么这种机制是否也可以创造生

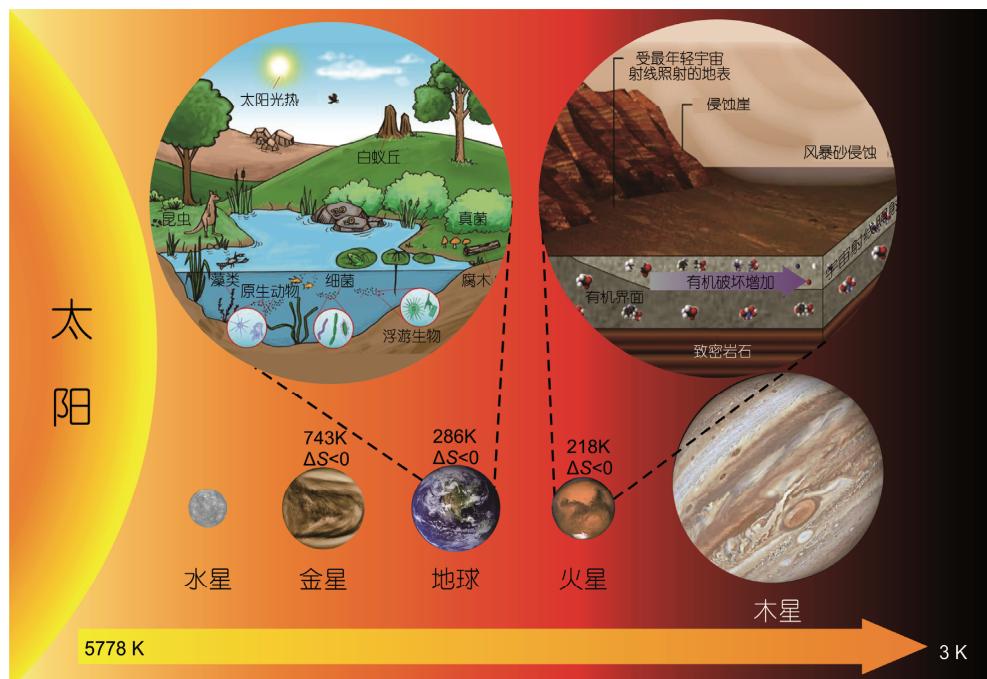


图3 太阳光照射到太阳系的行星上并在这些行星上造成局部熵减的环境

Figure 3 The input of solar radiation to planets results in entropy-reducing structures including life

命？恒星的光芒是否必须是生命的能量来源？火星的深部是否还有生命的延续？整个宇宙中是否存在更多行星内部的生命世界？对这些问题的地球生物学分析就是对生命起源的地点和环境的研究核心。

3 生命的两个最基本特征：代谢和复制，哪个在先？

所有生物的最基本的特征是具有能量和物质代谢，并且能够根据其遗传密码系统进行自我复制。关于能量代谢的起源在先还是基因在先的争论，难点在于二者高度关联。生命代谢的本质是为其生存提供能量。认为代谢在先的学者认为，能量代谢（化学反应）是随机发生的，尽管其可能随地球化学环境而改变，但其反应过程稳定之后则具有原始的、非基因的复制能力。能量代谢在先的优点是可以为有机聚合物复制——为基因的起源提供一个稳定的能量和化学反应环境^[38]。比如，Smith和Morowitz^[39]根据对反向三羧酸循环的反应计量、能量和反应浓度的分析，提出该代谢循环具有普遍意义并且可能是最初代谢的核心过程。认为该反应体系能够驱动其自身出现且具有稳健的演化特征，因此是代谢在先的典型反应和证据。但基因在先的支持者认为达尔文选择应该在生命演化的各个阶段都适用，必须先有基因系统的出现以保证自然过程筛选出来的具有生化意义的反应能够重复出现。他们认为，分子的复制在自然过程中是很常见的，而作为基因的基本元素的核酸可以进行复制、变异和演化^[40,41]。他们据此质疑代谢在先理论，认为迄今为止找不到一种化学反应体系能够自动增加其复杂性进而能够发生达尔文演化^[42]。因此，在FeS/FeS₂表面进行自催化的甲醛聚糖反应所要求的甲醛转换为羟乙醛和反向三羧酸循环无论在溶液还是矿物的表面都难以准确地重复实现^[43]。然而，基因在先的理论也存在一些缺陷，即便是最简单的基因也是极其复杂的，而且其高度专门化的催化和极其准确的复制功能根本无法简化到地球化学反应的水平，甚至连有机化学反应的水平也简化不到。比如在生物体内的生化反应中，DNA复制是最准确的过程，其准确程度达到每个核酸复制的出错率在百万分之一到百亿分之一之间^[44]。因此，从能量和难易程度的角度来讲，由于RNA的合成与其他简单有机合成一样都是吸热过程^[45]，本文认为能够发生能量代谢的过程具有普遍性，应该是容易

实现的^[39]，因而更可能是首先发生的过程。由于除RNA之外的其他具有生化意义的简单有机分子都可以通过地球化学过程合成，因此代谢作为一个能够获取外界能量支持内部化学反应，并输出代谢产物和能量的过程，应该更容易实现，这与非生命的地球化学过程之间没有截然的界限，应该比基因先发生。基因在先理论的最大的优点是，根据基因的功能就可以明确地推知生命的特征。而代谢在先理论所列举的反应过程导致的是热力学稳定的结果，而非以动力学过程为特点的生化过程所产生的特殊产物，更何况大多数的产物是不稳定的^[46]。

4 生命能量代谢的起源：异养在先还是自养在先？

关于地球生命起源环境的本质问题是地球化学环境是否稳定，是否能够提供足够的能量及各种形式的有机碳和生命所需要的各种营养元素的问题。迄今为止，地球生物圈所接受的初始能量来源有两种：太阳辐射和地球深部的热辐射。哪个过程合成了主要的早期能量物质，决定了哪种能量代谢是最早起源的。而这些过程必须要有一个液体水的环境作为保障，因为只有液态水才能保证物理、化学和生物的反应能够在一个均匀的体系中进行。地球的表面和内部都可能提供生命起源的环境，前者有阳光直接输入的能量，而后者可在深部地质过程中获取生命起源所需要物质，因此，有硅酸盐岩与液态水的相互作用，就有可能有生命的产生^[47]。

在生命出现之前，地球经历了一个前生命的化学演化阶段。在该阶段地球自身的化学过程能够积累足够的简单有机质^[48]，这些简单有机质经历一个复杂化的过程后产生生命。在太阳系形成的初期，地球的最早大气应该含有丰富氢气、一氧化碳、甲烷和氨气等还原性气体^[49,50]，这些气体在Miller^[49]以及此后的实验和理论体系中被当作基本物质用来通过模拟的地质或大气过程合成各种简单有机质。然而，行星地质学家们很快认识到，地球在经历剧烈的分异和去气作用之后所形成的是一个相对氧化的大气，即以含二氧化碳、水和氮气为主的大气^[51]。在这样的大气条件下，根据Miller实验就难以获得有机质，特别是对生命来说很重要的氨基酸。除了相对还原的地球化学条件，Miller实验还需要光化学条件，而高温环境并非必需，比如土卫六泰坦的表面温度只有

-175℃，但大气中甲烷和氢氰酸在紫外线的作用下仍可合成大量的有机质并沉降到地表。因此，地球的初始大气可能并不是地球生命有机化学开始的地方。

在地球生命起源时，地球表面有非常高的热流及岩浆和火山活动，区分地表环境和深海环境意义不大。与现代洋中脊广泛分布的黑烟囱相类似的环境在地球早期可能已广泛存在，在浅水环境或火山锥附近也可能有与黑烟囱附近相似的地质环境和地球化学过程。地球上最初形成的海洋里的水可能比现在地球上的水多，且由于板块构造体制尚未形成，当时的陆地环境可能遍布巨大的火山沉积。在火山锥的裙翼结构上会发育很多的热泉，而这些热泉中的水-岩相互作用和所发生的化学反应则可能与生命化学的有机反应有关^[47]。

从生物化学演化的角度来看，厌氧微生物用氢气作为电子供体产生甲烷或甲酸的反应可能是最为古老的核心代谢反应^[52]，因为它们通过还原二氧化碳直接合成ATP。但从地球化学的演化方向来看，热液喷口为氢气/二氧化碳化学反应提供了持续的能量，因为氢气与二氧化碳反应无论生成甲基有机分子还是甲烷都是放热的过程^[52,53]。微生物在还原二氧化碳之前，也可能利用碱性热液环境中的二氧化碳与硫化氢反应所产生的COS，因此，COS也可能参加生化反应^[54]。

处于还原状态的硫(如各种硫化物和硫化氢气体)和各种处于还原态的过渡金属会在高温下与大气中的二氧化碳反应生成前生命化学演化所需的简单有机分子。由于二氧化碳的C=O键非常稳定，无论使用何种还原剂(如 Fe^{2+} , S^{2-} , Mn^{2+} , H_2 , CH_4 等)将 CO_2 中的 C^{4+} 还原成有机碳都需要相对较高的能量。因此，与Miller系列的低温反应不同，此类反应均需要相对较高的温度。约30年前在此基础上建立起来的学派则称之为生命的高温起源学派，以德国的Wächtershäuser为代表。Huber和Wächtershäuser^[55,56]研究了生命的最基本有机分子是如何合成的，如存在于火山或热液环境中的氨基酸可以经镍-铁硫化物的催化作用加载CO形成肽链，在该反应中硫键起了重要的中间体作用，而铁-镍硫化物所存在的碱性地球化学环境则保证了氨基酸的稳定存在，在此类反应基础上起源的微生物就是化学自养型生物^[55,56]。认为这些反应是最早的生化反应的学者认为地球上最早的生命应该是自养型的^[57-59]。但也有许多科学家仍然偏爱前生

命原汤的概念^[60]。最早的微生物靠氧化这个原汤中还原态的碳化合物来维持生命^[54]，即生命代谢的起源以异养为先。异养过程是将简单有机分子氧化成二氧化碳，同时将所释放的电子传输给处于氧化状态的分子或离子，如 Fe^{3+} , Mn^{3+} , Mn^{4+} 或高温下铁硫化物表面或晶格上的三价铁与水反应生成的具有反应活性的氧(OH^- 或 H_2O_2)^[61,62]。由于形成太阳系的星云中可能已经有丰富的有机分子，即使地球的岩浆海过程将全部的有机质燃烧掉，之后的彗星或陨石在撞击地球时仍可提供足够的有机分子。然而，地球早期以超基性岩为主的地壳，它能否提供足够的、处于氧化状态的金属离子或其他的电子受体就成了另一个重要的问题。化学自养微生物可以将氢气、甲烷、氨气等作为电子或能量的来源将大气中的二氧化碳或溶解的碳酸根还原成有机碳。同样，气体形式的电子受体可能会由于其极低的地球化学丰度而不具重要意义。

在这个有机化学演化阶段一些次生矿物会起到非常重要的作用：(1) 碳酸盐矿物能大量地固定大气中的二氧化碳，从而快速地减弱地球早期很强的温室效应；(2) 金属的氧化物和硫化物能催化简单有机物的合成；(3) 在缺乏液态水的环境中形成的氧化物和碳酸盐矿物一旦处于水环境中就会使得该水环境的碱度增加，如在初始形成的海洋中会使其海水呈碱性^[63]。这样的碱性海洋有利于氨基酸的稳定存在^[64,65]。这种碱性的环境只存在于海底的水与超基性岩相互作用的局部环境，而整体的海洋环境由于浓厚的大气与海水之间的相互作用应该呈酸性。Hao和Li^[66]，Hao等人^[67]模拟了在无氧条件下水-二氧化碳的原始大气与超基性岩之间的相互作用。他们发现水蒸气-二氧化碳混合气体与这些岩石之间的相互作用可以将铁、镁和钙等从硅酸盐中提出来形成碳酸盐(图4)，这说明地球甚早期的水蒸气-二氧化碳为主的大气与岩石圈之间的相互作用已达到可以快速地减弱温室效应的作用，不必等到海洋形成之后才开始的水-岩相互作用。这些硅酸盐经高温蚀变之后形成多种具有复杂表面结构的黏土矿物，有助于催化简单有机物的合成。

5 地球上生命起源的环境：深部热液喷口还是近地表环境？

以Wächtershäuser为代表的关于生命起源于高温

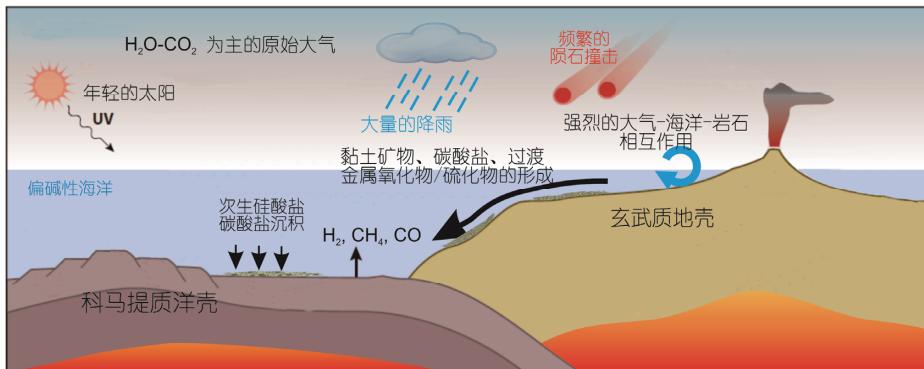


图4 无氧条件下富水-二氧化碳的原始大气与超基性岩之间相互作用示意图(据Hao和Li^[66]修改)

Figure 4 Schematic showing interaction between $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ atmosphere and ultramafic rocky crust under anoxic condition (modified from Hao and Li^[66])

环境的理论很快遭到了以Miller为首的低温学派的挑战。Lazcano和Miller^[68]指出，仅仅根据现代生命的最初始祖先是超级嗜热菌而认为生命起源于高温环境(如Schwartzman和Lineweaver^[69])是不可靠的，高温菌的生存环境不能用来解释其起源及RNA的存在等问题。低温学派指出，前生命的化学要求必须是一个低温的环境，因为许多生物物质在100℃就快速分解(如核糖的半衰期是73 min；胞嘧啶是21 d；腺嘌呤是204 d)，因此高温对于生命世界与无机世界之间的桥梁——RNA世界的存在是极为不利的。Lazcano和Miller^[68]认为，超级嗜热菌出现在生命进化树的底部是因为他们即便在低温下也比嗜中温菌有竞争优势，因为它们在低温时可以产生更多的热激蛋白，而这些热激蛋白还具有紫外线防护功能，因此超级嗜热可能是低温地表环境中的细菌后来适用环境的结果。Bada和Lazcano^[60]又在*Science*杂志上撰文道，也许有人更倾向于热乎的，但那可不是最早的生命分子。他们在坚持Miller^[49]实验的基础上指出低温是有机物质能够长期保存的关键，特别是那些携带遗传信息和有利于稳定催化聚合物的物质。他们举例指出在高寒环境中DNA可以保存大约10万年，而热的低海拔环境中DNA只可以保存1000年~1万年。在早太古代的海洋沉积物中有丰富的碎屑锆石、独居石和磷钇矿等与黏土矿物共生，这些矿物在早期含更多的放射性同位素，从而具有更高的放射性产热，有助于将沉积物的碳氢化合物聚合，形成类蛋白质^[70]。如果最早的生命是从RNA世界进入到DNA/蛋白质生化的世界，低温环境很有必要，因为RNA在高温环境中不稳定。Bada和Lazcano^[60]进一步评论道，这个“代谢

在先”的生命起源学说并不是新概念，此理论中地球上最早的生命系统仅仅是在金属硫化物的催化作用下直接还原二氧化碳或一氧化碳的简单有机反应而已。若如此，这些不需要基因信息的反应不正是那些“我们所不知道的生命”吗^[71]？

尽管如此，生命的高温起源学说也不是毫无道理。所谓的“基因在先”还是“代谢在先”的争论其实仅仅是个逻辑问题而已^[46]。在早期地球环境中总是存在不同的热力学非平衡体系，伴随着能量转换和电子转移的化学反应一直在进行的，只是当这些能量过程与原始的复制机制被固定在相同的空间时生命就开始了，何况任何基因的复制本身也都是能量的过程。因此，高温起源学派所提到的重要过程都与地球内部过程有关，如在40亿年前地球具有更多的地幔对流单元，大量铁-镍硫化物被带到地壳中的钙-碱性岩浆活动，海洋玄武岩的扩张中心或者俯冲/沉降中心等^[48]。虽然当时的太阳亮度不高，但1~10个标准大气压的二氧化碳仍可使地表维持在一定温度，比如海洋的温度可达到近20℃。大洋扩张中心两侧大尺度的水循环可以使海底以下3 km左右>100℃的地球化学环境中的 H_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 H_2S 等在铁-镍硫化物的催化作用下形成少量的有机质，然后再被带到海底的热液喷口。热液喷口的硫化物、铁(氢)氧化物、含镁的黏土矿物和原始的铁氧化-还原材料可以构成一个地球化学膜，在高温下(如，80℃)该膜内部可以进行更有效的有机合成作用，合成甲酸、乙酸和硫代甲醇等分子或中间体。这些简单有机分子可以进一步经聚合作用形成更加复杂的有机分子。Russell等人^[48]认为铁硫化物膜可以形成一个非常有

效的反应界面，在该膜的内部是碱性热液，富含二价铁、镁和钙离子，膜外是溶有大气二氧化碳的酸性的、富含氢离子的海洋。膜内外的氢离子浓度差形成极大的电位差，该电位差的放电作用像大气中的闪电一样电离二氧化碳和氢气而合成单碳有机分子，或者，像微生物细胞进行光合作用或化学自养细菌一样将氢气中的电子转移到二氧化碳上从而合成简单有机分子。

6 从专门化的微观地球化学单元到最早的细胞

无论生命如何起源，无论其最早的代谢是自养的还是异养的，整个生命起源的过程以及整体上的生化过程都必须在热力学上有利化学反应进行。这种能够保持地球化学能量供应和微生物细胞内部能量供应的条件就是存在一个能量梯度^[47]。关于最早的细胞的形成，Koonin和Martin^[38]提出了一个关于基因材料和细胞的地球化学物质的专门化的概念。关于生命起源，最大的问题就是细胞和非细胞之间的鸿沟，有细胞形式的就是有生命的，没有则是非生命的。Koonin和Martin^[38]描述了地球化学环境中形成的一个个很小的封闭空间，这些封闭的空间中存在温度、能量、酸碱度、磷营养、多金属硫化物和各种简单有机质丰富的梯度。从热力学的角度来讲，这些梯度的存在使得该空间内物质朝向复杂化演变，主要的过程包括氨基酸的形成，氨基酸与矿物磷之间的结合等^[72]。在不同梯度上的地球化学封闭空间里的无机和有机化学反应都不同，在演化的末端这些空间就可以被完整的细胞所取代，这些细胞在脱离这些封闭的地球化学空间后仍能维持能量代谢并产生遗传物质(图5)。这个模型的最重意义在于提出存在一个微小的、封闭的但具有专门化功能的地球化学空间。对这个空间就可以进行定量化的模拟计算，而这种计算对于一个完整的、具有生化功能的细胞来讲几乎是难以实现的。从生物学的角度讲，这个阶段可以是RNA世界的阶段^[73,74]，此后微生物生命开始在地球上出现和演化，其生态-生理学和生物学特征完全可以与现在地球上的各种生命比较了。

7 生命的宇宙起源假说

生命的起源假说总体上有起源于地球自身和来

自地球之外两种。星际生命种子假说认为，一旦生命开始，将能够在10~20亿年的时间内传播到整个星系的宜居带^[75]。在太阳系，彗星携带着大量的水、二氧化碳和各种有机碳。彗星数量巨大且运行轨道极扁，可以将所携带的物质送到太阳系的任何角落。作为许多行星系统中携带最多水的天体，彗星在处于液相时期其内部能够提供一个与岩石行星表面类似的宜居环境，生命也可能在此起源。于2005年7月4号发射到Comet Tempel 1的“深度撞击”任务上的谱学结果显示撞击后产生的溅射物质是有机质和黏土矿物的混合物^[76]，而Comet Wild 2的“星尘探索”计划则显示有大量的复杂碳氢化合物分子的存在^[75]。这些有机分子在有水环境中很容易形成复杂的有机结构。Napier等人^[77]估计，大质量的彗星(如直径大于100 km的彗星)早期的放射性产热可以使水维持液体状态长达超过1000万年。据Lazcano和Miller^[36]，从非生物结构到第一个蓝细菌1000万年足矣，因此，大彗星的液态水环境足以支持微生物生命的出现，从而为地球生命的演化提供种子。有趣的是，生命的彗星起源假说能够满足生命的低温起源学派的观点，因为彗星没有一个以放射性产热维持的内部高温。另外，由于没有岩浆海过程的发生，彗星内部气体会富含氢气、甲烷和氨，因此是还原的，也符合低温起源学派所要求的还原的大气环境。

目前火星处于太阳系的宜居带的外缘，但在地球的冥古宙时期它可能正处在宜居带上，因此，其早期的地表环境，或现在的近地表环境可能会存在生命。直接观察表明在大约38亿年前火星仍有液态水^[78,79]，而这个时期地球已经有沉积记录，其中的条带状硅铁建造可能显示生物参与其矿物的沉淀，因此，可以通过对比火星与地球的环境来探讨在火星上是否曾经，甚至现在依然存在生命。目前的生命起源理论认为生命会在合适的物理-化学条件下自然发生，而早期火星液态水的存在，与地球相似的碳和氮循环条件^[80]，以及可能比地球高得多的磷酸盐^[81]，都指示火星的过去甚至现在的近地表环境至少允许地球上一些极端环境微生物的存在^[82]。在火星上找到生命存在的证据对于人类理解宇宙中的生命的普遍性和人类智慧生命在宇宙中的意义和位置具有重大伦理和哲学意义^[83]。虽然地球上生物极具多样性，但所有生命形式的遗传物质全部来自于20种只具左旋手型的氨基酸的组合，表明地球上所有的生命只

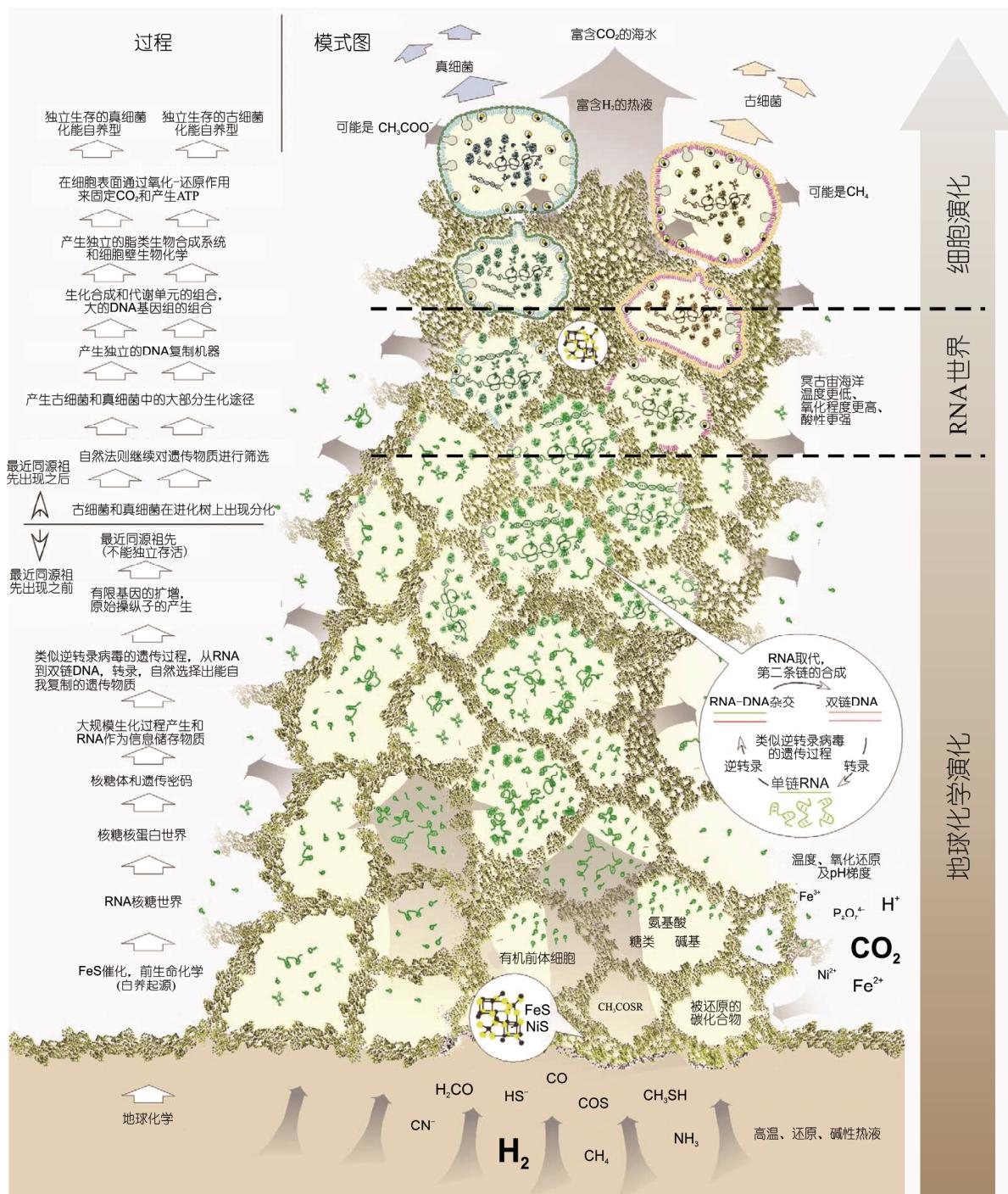


图5 封闭的地球化学微小单元向细胞演化过程示意图(据Koonin和Martin^[38]修改)

Figure 5 Schematic of a compartmentalized geochemical cell (modified from Koonin & Martin^[38])

有一个起源。地球生命究竟起源于其自身环境还是火星？如果地球与火星的生命不同源，说明任何达到宜居行星条件的星体都会自然发生生命；如果同源，则表明生命的种子在一个行星系统如太阳系，甚

至银河系中可以传播^[77]，并且宇宙中的生命形式很可能是因为可知的(*life as we know it*)，因为这些生命形式有着相同的生命化学。木星的卫星欧罗巴有一个深达75~120 km的海洋，表面被10 km左右厚的冰所

覆盖。Chyba^[84]认为,木星磁层的带电粒子可以驱动其冰盖下海洋里的非平衡化学反应,产生有机和含氧分子和微生物的生物圈。木星或土星等行星的卫星也有可能有水圈的存在^[85],并且可能有适合生命发生的环境存在。这些卫星的意义与火星相同,它们的化学组成和生命发生同样都可能受太阳系彗星的影响。

8 结论

地球是一个拥有极高生物多样性和技术文明的宜居行星,是宇宙化学阶段演化的结果。恒星内部通过核合成碳-氧-氮-磷-硫等生命必须元素和从钠到铁的金属营养元素;超新星爆发合成了超重放射性核素,为岩石行星的内部构造运动提供了能量。这些元素及其在星云演化阶段形成的分子富集在处于宜居带的行星上,朝向生命的发生演化。地球自身的宜居性演化与大规模的水-岩相互作用所带来的一系列结果有着直接的联系,包括富二氧化碳大气在短时间内被固定为碳酸盐沉积,大量具有催化有机合成功

能的次生矿物的形成,海洋的形成及有机质的合成和聚集。来自陨石和彗星等地外天体的有机质也可能对前生命的化学演化有直接的贡献。一方面,地球高温水热环境中丰富的金属、碳和其他非金属物质,以及地球化学环境中的能量代谢都支持生命的发生,由此产生了生命的热起源假说,该假说支持代谢起源为先;另一方面,太阳星云中已经有足够的有机质,加上地球早期还原大气中的光合过程也可以形成生命所需有机质,特别是氨基酸,由此产生了生命的冷起源假说,该假说支持遗传起源为先。在有机质,催化剂和能量充分的环境中可能先形成能够与细胞功能相似的地球化学单元,尔后逐渐演化成能够独立组织能量和复制的细胞,这个阶段在生化上相当于RNA世界的演化阶段。虽然地球的无生命阶段占其演化历史的15%,但从复杂有机化学演化到最早的细胞的出现只有一个很短的时间窗口,支持生命在宇宙中的发生只是行星化学环境的问题并具有普遍性的思想。

参考文献

- 1 Kolb E W, Turner M S. *The Early Universe*. Redwood: Academic Press, 1990
- 2 Wallerstein G, Iben I Jr, Parker P, et al. Synthesis of the elements in stars: Forty years of progress. *Rev Mod Phys*, 1997, 69: 995–1054
- 3 Clayton D D. Cosmoradiogenic chronologies of nucleosynthesis. *Astrophys J*, 1963, 139: 637–663
- 4 Qin L, Carlson R W. Nucleosynthetic isotope anomalies and their cosmochemical significance. *Geochem J*, 2016, 50: 43–65
- 5 Turcotte D L, Oxburgh E R. Mantle convection and the new global tectonics. *Ann Rev Fluid Mech*, 1972, 4: 33–66
- 6 Hanelmeier A. Water in the Universe. Amsterdam: Springer Netherlands, 2011. 239
- 7 Brack A. Liquid water and the origin of life. *Origins Life Evol B*, 1993, 23: 3–10
- 8 Lunine J I. Saturn's Titan: A strict test for life's cosmic ubiquity. *Proc Am Philos Soc*, 2009, 153: 403–418
- 9 Deamer D, Dworkin J P, Sandford S A, et al. The first cell membranes. *Astrobiology*, 2004, 2: 371–381
- 10 Cleaves H J II, Scott A M, Hill F C, et al. Mineral-organic interfacial processes: Potential roles in the origin of life. *Chem Soc Rev*, 2012, 41: 5502–5525
- 11 Epelbaum E, Krebs H, Lähde T A, et al. Viability of carbon-based life as a function of the light quark mass. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 112502, doi: 10.1103/PhysRevLett.110.112502
- 12 Henning T, Salama F. Carbon in the Universe. *Science*, 1998, 282: 2204–2210
- 13 Hanczyc M M. Metabolism and motility in prebiotic structures. *Philos Trans R Soc B-Biol Sci*, 2011, 366: 2885–2893
- 14 Carter B. The anthropic principle and its implications for biological evolution. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Sci*, 1983, A310: 347–363
- 15 Fenchel T, King G M, Blackburn T H. *Bacterial Biogeochemistry: The Ecophysiology of Mineral Cycling*. San Diego: Academic Press, 1998
- 16 Cheng C M, Fan C, Wan R, et al. Phosphorylation of adenosine with trimetaphosphate under simulated prebiotic conditions. *Origin Life Evol B*, 2002, 32: 219–224
- 17 Lineweaver C H, Davis T M. Does the rapid appearance of life on Earth suggest that life is common in the Universe? *Astrobiology*, 2002, 2: 293–304
- 18 Koonin E V. The cosmological model of eternal inflation and the transition from chance to biological evolution in the history of life. *Biol Direct*, 2007, 2: 15

-
- 19 Gibson C H, Schild R E, Wickramasinghe N C. The origin of life from primordial planets. *Int J Astrobiol*, 2011, 10: 83–98
- 20 Amelin Y, Krot A N, Hutcheon I D, et al. Lead isotopic ages of chondrules and calcium-aluminum-rich inclusions. *Science*, 2002, 297: 1678–1683
- 21 Williams I S. Old diamonds and the upper crust. *Nature*, 2007, 448: 880–881
- 22 Zahnle K, Arndt N, Cockell C, et al. Emergence of a habitable planet. *Space Sci Rev*, 2007, 129: 35–78
- 23 Martin H, Albarede F, Claeys P, et al. Building of a habitable planet. *Earth Moon Planets*, 2006, 98: 97–151
- 24 Kharecha P, Kasting J, Siefert J. A coupled atmosphere-ecosystem model of the early Archean Earth. *Geobiology*, 2005, 3: 53–76
- 25 David L A, Alm E J. Rapid evolutionary innovation during and Archaean genetic expansion. *Nature*, 2011, 469: 93–96
- 26 Schidlowski M. Application of stable carbon isotopes to early biochemical evolution on Earth. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1987, 15: 47–72
- 27 Van Zuilen M A, Lepland A, Arrhenius G. Reassessing the evidence for the earliest traces of life. *Nature*, 2002, 418: 627–630
- 28 Papineau D, De Gregorio B T, Cody G D, et al. Young poorly crystalline graphite in the >3.8-Gyr-old Nuvvuagittuq banded iron formation. *Nat Geosci*, 2011, 3: 376–379
- 29 Gomes R, Levison H F, Tsiganis K, et al. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, 2005, 435: 466–469
- 30 Moorbat S, O’Nions R K, Pankhurst R J. Early Archean age for the Isua iron formation, West Greenland. *Nature*, 1973, 245: 138–139
- 31 Konhauser K O, Hamade T, Raiswell R, et al. Could bacteria have formed the Precambrian banded iron formation? *Geology*, 2002, 30: 1079–1082
- 32 Schopf J W. Fossil evidence of Archean life. *Philos Trans R Soc B-Biol Sci*, 2006, 361: 869–885
- 33 Schopf J W. Microfossils of the early Archean Apex chert: New evidence of the antiquity of life. *Science*, 1993, 260: 640–646
- 34 Brasier M D, Green O R, Jephcott A P, et al. Questioning the evidence for Earth’s oldest fossils. *Nature*, 2002, 416: 76–81
- 35 Sagan C. The origin of life in a cosmic context. *Origin Life Evol B*, 1974, 5: 497–505
- 36 Lazcano A, Miller S L. How long did it take for life to begin and evolve to cyanobacteria? *J Mol Evol*, 1994, 39: 546–554
- 37 Lazcano A, Miller S L. The origin and early evolution of life: Prebiotic chemistry, the pre-RNA world, and time. *Cell*, 1996, 85: 793–798
- 38 Koonin E V, Martin W. On the origin of genomes and cells within inorganic compartments. *Trends Genet*, 2005, 21: 647–654
- 39 Smith E, Morowitz H J. Universality in intermediary metabolism. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, 101: 13168–13173
- 40 Joyce G F. The antiquity of RNA-based evolution. *Nature*, 2002, 418: 214–221
- 41 Sievers D, von Kiedrowski G. Self-replication of complimentary nucleotide-based oligomers. *Nature*, 1994, 369: 221–224
- 42 Vasas V, Szathmary E, Santos M. Lack of evolvability in self-sustaining autocatalytic networks constrains metabolism-first scenarios for the origin of life. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 1470–1475
- 43 Orgel L E. Self-organizing biochemical cycles. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2000, 97: 12503–12507
- 44 Drake J W. A constant rate of spontaneous mutation in DNA-based microbes. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1991, 88: 7160–7164
- 45 Freier S M, Kierzek R, Jaeger J A, et al. Improved free-energy parameters for predictions of RNA duplex stability. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1986, 83: 9373–9377
- 46 Pross A. Causation and the origin of life. Metabolism or replication first? *Origin Life Evol B*, 2004, 34: 307–321
- 47 Stüeken E E, Anderson R E, Bowman J S, et al. Did life originate from a global chemical reactor? *Geobiology*, 2013, 11: 101–126
- 48 Russell M J, Hall A J, Boyce A J, et al. 100th Anniversary special paper: On hydrothermal convection system and the emergence of life. *Econ Geol*, 2005, 100: 419–438
- 49 Miller S L. A production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science*, 1953, 117: 528–529
- 50 Tian F, Toon O B, Pavlov A A, et al. A hydrogen-rich early Earth atmosphere. *Science*, 2005, 308: 1014–1017
- 51 Hamano Y, Ozima M. Earth-atmosphere evolution model based on Ar isotopic data. In: Alexander Jr, Ozima M, eds. *Terrestrial Rare Gases: Proceedings of the US-Japan Seminar on Rare Gas Abundance and Isotopic Constraints on the Origin and Evolution of the Earth’s Atmosphere (Advances in Earth and Planetary Sciences 3)*. Tokyo: Japan Scientific Societies Press, 1978, 3: 155–171
- 52 Amend J P, Shock E L. Energetic of overall metabolic reactions of thermophilic and hydrothermophilic Archean and Bacteria. *FEMS Microbiol Rev*, 2001, 25: 175–243
- 53 Thauer R K. Biochemistry of methanogenesis: A tribute to Marjory Stephensen. *Microbiology (Amsterdam)*, 1998, 144: 2377–2406
- 54 De Duve C. Blueprint for a Cell: The Nature and Origin of Life. Burlington: Neil Patterson, 1991
- 55 Huber C, Wächtershäuser G. Activated acetic acid by carbon fixation on (Fe,Ni)S under primordial condition. *Science*, 1997, 276: 245–247
- 56 Huber C, Wächtershäuser G. Peptides by activation of amino acids with CO on (Ni, Fe)S surfaces: Implications for the origin of life. *Science*, 1998, 281: 670–672

- 57 Hartman H. Speculation on the origin and evolution of metabolism. *J Mol Evol*, 1975, 4: 359–370
- 58 Fuchs G, Stupperich E. Evolution of autotrophic CO₂ fixation. In: Schleifer K H, Stackebrandt E, eds. *Evolution of Prokaryotes*. FEMS Symposium No. 29. London: Academic Press, 1985. 235–251
- 59 Morowitz H J, Kostelnik J D, Yang J, et al. The origin of intermediary metabolism. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2000, 97: 7704–7708
- 60 Bada J L, Lazcano A. Some like it hot, but not the first biomolecules. *Science*, 2002, 296: 1982–1983
- 61 Borda M J, Elsetinow A R, Strongin D R, et al. A mechanism for the production of hydroxyl radical at surface defect sites on pyrite. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67: 935–939
- 62 Davila A F, Fairén A G, Gago-Dupont L, et al. Subsurface formation of oxidants on Mars and implications for the preservation of organic biosignatures. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 272: 456–463
- 63 Russell M J, Daia D E, Hall A J. The emergence of life from FeS bubbles at alkaline hot springs in an acid ocean. In: Wiegel J, Adams M W W, eds. *Thermophiles: The Keys to Molecular Evolution and the Origin of Life?* London: Taylor & Francis, 1998. 77–126
- 64 Russell M J. The importance of being alkaline. *Science*, 2003, 302: 580–581
- 65 Martin W, Russell M J. On the origin of biochemistry at an alkaline hydrothermal vent. *Philos Trans R Soc B-Biol Sci*, 2007, 362: 1887–1925
- 66 Hao X L, Li Y L. Hexagonal plate-like magnetite nanocrystals produced in komatiite-H₂O-CO₂ reaction system at 450°C. *Int J Astrobiol*, 2015, 14: 547–553
- 67 Hao X L, Norman L, Li Y L. Experimental approach to the direct interaction between the H₂O-CO₂ atmosphere and the crust on the earliest Earth: Implication for the early evolution of minerals and proto-atmosphere. *J Geophys Res*, 2016, doi:
- 68 Lazcano A, Miller S L. The origin of life—Did it occur at high temperatures? *J Mol Evol*, 1995, 41: 689–692
- 69 Schwartzman D W, Lineweaver C H. The hyperthermophilic origin of life revisited. *Biochem Soc Trans*, 2004, 32: 168–171
- 70 Glover J E. Sediments of early Archaean coastal plains: A possible environment for the origin of life. *Precambrian Res*, 1992, 56: 159–166
- 71 Wächtershäuser W. Life as we don't know it. *Science*, 2000, 289: 1307–1308
- 72 Zhao Y F, Cao P S. Phosphoryl amino acids: common origin for nucleic acids and protein. *J Biol Phys*, 1994, 20: 283–287
- 73 Gilbert W. Origin of life: The RNA world. *Nature*, 1986, 319: 618
- 74 Zhao Y F, Cao P S. Basic models of chemical evolution of life: The minimum evolving system. In: Chela-Flores J, Raulin F, eds. *Chemical Evolution: Physics of the Origin and Evolution of Life*. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1996. 279–285
- 75 Sandford S A, Aleon J, Alexander C M O'D, et al. Organics captured from comet 81P/Wild 2 by the Stardust spacecraft. *Science*, 2006, 314: 1720–1724
- 76 Lisse C M, van Cleve J, Adams A C, et al. Spitzer spectral observations of the deep impact ejecta. *Science*, 2006, 313: 635–640
- 77 Napier W M, Wickramasinghe J T, Wickramasinghe N C. The origin of life in comets. *Int J Astrobiol*, 2007, 6: 321–323
- 78 Carr M H. Water on Mars. *Nature*, 1987, 326: 30–35
- 79 Bibring J P, Langevin Y, Mustard J F, et al. OMEGA/Mars express data. *Science*, 2006, 312: 400–404
- 80 Boxe C S, Hand K P, Nealson K H, et al. An active nitrogen cycle on Mars sufficient to support a subsurface biosphere. *Int J Astrobiol*, 2012, 11: 109–115
- 81 Greenwood J P, Blake R E. Evidence for an acidic ocean on Mars from phosphorus geochemistry of Martian soils and rocks. *Geology*, 2006, 34: 953–956
- 82 Rothschild L J, Mancinelli R L. Life in extreme environments. *Nature*, 2001, 409: 1092–1101
- 83 McKay C P. The search for a second genesis of life in our solar system. In: Chela-Flores J, Owen T, Raulin F, eds. *First Steps in the Origin of Life in the Universe*. Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publisher, 2001. 269–277
- 84 Chyba C F. Energy for microbial life on Europa. *Nature*, 2000, 403: 381–382
- 85 Baker V R, Dohm J M, Fairén A G, et al. Extraterrestrial hydrogeology. *Hydrogeol J*, 2005, 13: 51–68

The origin of life on Earth

LI YILiang & SUN Si

Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Hong Kong, China

Origin of life is one of the greatest mysteries for mankind. Life is the most complex outcome of the 13.7 billion years evolution of our Universe. Human has just recently found that life has experienced a long coevolution with its earth environments through the deep geological time. At the beginning of its planetary evolution, Earth lost its highly reduced atmosphere that contained relatively high of hydrogen, ammonia and methane and turned to a secondary atmosphere contained high of carbon dioxide, dinitrogen and water by differentiation. In the first 700 million years with a hot, global climatic temperature, the strong reactions between the water-carbon dioxide atmosphere and the ultramafic crust produced abundant secondary earth materials including clay minerals and carbonates. Those clay minerals might have catalyzed the indigenous synthesis of organic matter for the prebiotic evolution toward life; while the deposition of massive carbonates sequestered the atmospheric carbon dioxide that significantly weakened the greenhouse effect and led to the formation of the earliest oceans only ca. 150 million years after Earth's formation. Though the Earth environments before the Late Heavy Bombardment at ca. 4.1–3.8 billion years was already suitable for life to start, the oldest lithological evidence of life is around 3.71 billion years old. The current controversies on the origin of life include two basic questions: hot or cold, gene first or metabolism first. The Hot Origin theory is supported by the observed interactions between hot water and mafic rocks in producing small organic molecules; the Cold Origin theory insists that the cold temperature is essential for the inorganic synthesis of amino acids and the stability of primary genetic materials. On the other side, astronomers prefer that the exogenous input of organic carbon, water and transition metals by comets and meteorites might be a significant contribution to the prebiotic evolution of life in the early time. Life is a star material. All the cosmic evolutionary stages contributed to the emergence and evolution of life on Earth. The Big Bang produced hydrogen, the main sequence evolution of stars cooked carbon, oxygen, nitrogen, sulfur, phosphorus, silicon and iron, and even supernova, the dramatic ending of massive stars, produced various heavy radioactive isotopes that powers the highly active geodynamic processes of Earth's interior. Hydrogen, nitrogen, sulfur, phosphorus, silicon and some metals find their usefulness in biochemistry by having chemical reactions with water-carbon based chemical systems. The various extreme conditions on Earth, such as high or low temperatures, strong photo or ionic radiations, high or low pH values, lacking of nutrients, etc., provide constraints for life on the other planets/moons of our solar system, or on the increasing numbers of Earth-like exoplanets. In the observable universe, water is the best chemical solvent for life, and only carbon can make the backbone for life. The unique physical properties of water and incomparable biochemical properties of carbon, combined with their high cosmic abundances, strongly suggest life as we can understand should be common in the Universe; and our understanding of extremophiles and the evolutionary pathway of life on Earth suggest that at least microbial life should be common in the Universe.

origin of life, Big Bang, nucleosynthesis in stars, planetary evolution of Earth, prebiotic chemical evolution of life

doi: 10.1360/N972016-00551



李一良

1999 年在中国科学技术大学获得地球化学博士学位。之后在美国密苏里大学博士后研究期间开始接触地质微生物学方面的问题。2002~2007 年，先后在萨凡纳生态实验室和橡树岭国家实验室工作。2007 年至今在香港大学建立天体生物学研究组，主要研究兴趣为地球早期生物圈演化、基本生命化学理论和比较行星学。