

天体生物学概要

李一良

香港大学地球科学系, 中国香港特别行政区

摘要 天体生物学研究生命在宇宙中的起源、演化、分布和未来。天体生物学在 20 世纪 90 年代初正式形成,是人类对地球上生命起源、演化的追问,对人类文明未来的思考,对环境变迁的忧虑,以及对空间和宇宙探索的结果。天体生物学整合了天文学、行星科学、地球科学、生命科学和空间探索技术等领域,并且一出现就成为这些学科的前沿。在天文学的时间和空间尺度上,天体生物学探讨对生命至关重要的非金属元素氢-碳-氮-氧-磷-硫,以及金属元素例如镁、铁等在宇宙创生、星系和恒星演化过程的核合成和分布,以及这些过程对宜居行星在恒星系中的密度和分布的制约。在行星系统尺度上,天体生物学比较太阳系各行星的物理、化学和地质特征,并试图据此建立太阳系和其他行星系统的宜居住带的模型。地球上生态系统的起源和演化是天体生物学最重要的研究内容。地球从一个炙热的无生命世界逐渐演变成一个适宜生命产生和演化的宜居行星,是了解宇宙中生命的产生和演化的唯一例子。天体生物学比较现在地球上的极端环境、极端环境中的生命,并结合对地球历史上地质和生物事件的重建,试图建立宇宙中生命在类似地球的行星上起源和演化的普适模型。寻找地球以外的生命世界是人类空间探索的终极使命。天体生物学根据对地球上生命的认识,确定了液态水、水-岩石相互作用化学是微生物生命存在的基本条件和证据,并据此确定了最近行星探索技术的发展方向。

关键词 天体生物学;生命起源;元素;地球;生态系统;宜居行星

中图分类号 Q693

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.01.09

Outline of Astrobiology

LI Yiliang

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

Abstract Are we alone? Is our Earth, the tiny blue planet in this infinite Universe, the only harbor for life? Astrobiology concerns the study of the origin, evolution and destiny of life in the Universe and touches almost all the fundamental questions asked by mankind. The emergence of this science is the natural outcome of the great advances in astronomy, biology, and geology. The development of molecular biology has revealed the unitary origin and DNA-coding of all life on Earth in despite of the great diversity after a long Darwinian evolution. Geologists dated the origin of life back to almost 3.8 billion years ago. Planetary explorations in our solar system have indicated abundant life materials being stored in the planetesimal zone and beyond. Furthermore, the detection of exoplanets has practically extended life exploration into the deep Universe. The astrobiological studies can be classified into cosmic, planetary, ecosystematic scales on a space dimension and stellar and interstellar evolution, chemical evolution of prelife on Earth, and modern ecosystem on a time dimension. Stellar nucleosynthesis and the evolution of galactic chemistry tell us about the formation of life-essential elements, such as H-C-O-N-S-P and Fe-peaked transition metals. The breakthrough in exoplanet detection is a great step in searching a second life and scientists began to develop techniques to examine the atmosphere composition of Earth-like exoplanets. Based on our understanding of life origin on Earth, a body of liquid water, enough carbon and a silicate crust on a planet with a right distance to its sun are sufficient premises to make a planet habitable. When those conditions are met, life might start in hundred million years or even shorter time period. It is understood now that life deeply changes the surface spheres of Earth and our current atmosphere is pretty much the result of biological respiration. It is also wondered that the great events happened on Earth, such as the appearance of free oxygen, the starting of plate tectonics, the appearance of ice ages, planet-wide formation of banded iron may have either stimulated the evolution of life, or on the contrary, resulted in mass extinction. Now mankind is on a fast lane going forward but has a quite unpredictable future. How long can our Gaia last? Can our offspring find another oasis in the Universe? Astrobiology can not answer these questions now but they remain for exploration.

Keywords astrobiology; origin of life; evolution; elements; ecosystem; habitable planet

收稿日期: 2010-03-30;修回日期:2010-12-14

基金项目: 香港研究基金委员会面上基金项目(HKU703008P)

作者简介: 李一良, 研究助理教授, 研究方向为天体生物学, 电子邮箱:yiliang@hkucc.hku.hk

0 前言

人类和地球上的其他生命的起源一直是最大的,悬而未决的自然之谜。由于我们对宇宙中生命的了解完全依赖于对地球生命的了解,在对宇宙中的生命进行探索时只能强调“据我们所知的生命”^[1-3],即以地球上的生命作为参照。我们所知的地球上,生命是以碳基化学作为其生物化学基础,以液态水作为其生存的最基本的溶液条件,远离热力学平衡的自组织耗散结构。因此从现象上来讲,生命是一个能够自我维持的,可以进行达尔文演化的化学系统。宇宙的形成已经超过 137 亿年,银河系的形成大概超过 110 亿年,太阳系的年龄已超过 45 亿年^[4]。而作为生命演化的巅峰,现代人类的出现只有 20 万年^[5],而人类技术文明的出现只有 200 多年的时间。生命和技术文明出现的各个阶段都与宇宙演化有关。比如宇宙大爆炸所产生的氦是人体的重要组分,宇宙创生时产生的氦元素液化可以实现超导,恒星的演化提供了生命所需的基本化学元素 C-O-N-S-P^[6],即使超新星爆发这个非常极端的核物理过程也提供了人类技术文明的主要标志——核裂变武器和核能技术所需超重元素^[7]。而地球上活跃的地质学过程更是直接提供了一个生命起源和演化的舞台。因此有学者认为,宇宙演化的各个环节都是经过精细的调节而朝现代人类文明的出现发展的^[8]。那么生命在宇宙中的出现,乃至人类的出现在宇宙中到底具有什么意义呢?这正是天体生物学研究的主题。天体生物学研究生命在宇宙中的起源、演化、分布及其未来。美国国家航空航天局(NASA)发布的一个宇宙演化图景高度地概括该领域(图 1)。天体生物学关注人类追寻的 3 个终极问题:(1) 生命是怎样起源和演化的?(2) 宇宙中的其他地方也有生命存在吗?(3) 地球上及宇宙中其他角落的生命的未来是什么?



图 1 天体生物学研究宇宙中生命的起源、演化和未来
(根据 NASA)

Fig. 1 Astrobiology concerns the origin, evolution and destiny of life (image credit: NASA)

相应地,天体生物学考查的领域包括寻找太阳系以外的宜居行星,火星和其他外行星(以及其卫星)上是否有生命,在实验室和自然环境中生命起源和演化,生命对环境变化的应变策略等^[9]。天体生物学围绕生命在宇宙中的产生和演化这个最大的起源之谜,借助于基础科学领域和高科技领域的前沿理论和方法去探索以生命的起源为核心的诸多起源问题,因而它也成为许多学科的前缘领域。到 2009 年,美

国已有 700 余名科学家在做有关天体生物学研究所资助的项目,150 所大学提供有关天体生物学的课程^[10]。现在有两个主要的天体生物学专业杂志:欧洲的 *International Journal of Astrobiology* (2002 年创刊)和美国的 *Astrobiology* (2001 年创刊)。

天体生物学这个专有名词最早于 1941 年出现在布鲁克林学院的 L. J. Lafleur 在太平洋天文学学会的报告。Tikhov^[11]在 1949 年莫斯科出版的 *Astrobiotany* 中使用了 *astrobiotany* 一词,而后他在 1953 年的出版物中则正式使用天体生物学 (*astrobiologii*) 名词。美国天文学家 Otto Struve 在 1955 年也提到 *astrobiology* 一词。由于 NASA 对生命的起源及其在宇宙中的分布的持续关注,在 20 世纪 70 年代开展地外生物学研究项目。在早期(20 世纪 60 年代),美国的空间探索项目中常用“地外生物学”一词,而该词迄今还经常出现在欧洲空间署的文献中。实际上,天体生物学的英文词 *astrobiology* 的意思是“天体的生物学性质研究”,正如 *astrochemistry* 的意思是“天体的化学性质研究”,因而并不确切。但显然现在科学家们对 *astrobiology* 的理解是“天体上的生物研究”。虽然早在 1960 年由 J. Lederberg^[12]提出的“宇宙生物学”是一个更适合的词汇,但现在人们也很少使用这个词。国际天文学联盟提议的正式名词是“生物天文学 (*bioastronomy*)”,但这个词大家也很少用。不过天体生物学基本包含了所有以上提到的词汇所表达的内容。

1976 年“海盗”一号和二号分别在火星登陆,它们在火星的现场实验发现火星的表面或近地表都没有生命的存在。经过 20 世纪 80 年代的沉寂,在 1995 年 Huntress 提议 NASA 启动天体生物学研究项目。1995 年人类第一次观测到太阳系以外的行星^[13],1996 年木卫二欧罗巴上液态水海洋的发现^[14],火星陨石 ALH84001 中可能与生物成因有关的磁铁矿(问题迄今还没有解决)的报道^[15],以及在 38.5 亿年的岩石中可能的生命标志物(后来证明可能是错误的认识)的报道^[16]都极大地推动了天体生物学学科的正式建立。自 2000 年天体生物学科学会议 (AbSciCo) 在 NASA Ames 研究中心召开以来,已经成为每两年一次固定的国际会议。

1 国际天体生物学研究现状

美国是天体生物学的发源地,其相关的研究基本由 NASA 主导。以包括火星和整个太阳系探索为主的空间探索项目是 NASA 天体生物学研究的主要部分。1998—2013 年, NASA 资助了 5 个大型天体生物学攻关项目,共有 31 个/次美国最好的科研机构参与。2001 年,欧洲天体生物学网络协会建立,协调 17 个欧洲国家的有关天体生物学的活动。与天体生物学有关的欧洲空间发射计划包括以行星探索为主题的 Aurora 项目(2001);卡西尼-惠更斯发射(1997,欧洲设计了测量泰坦地地质流体的探针);Mars Express(2003,加载 Beagle-2,探测火星上的水和生命);Rosetta(2004,探测彗星和星际间物质),COROT 发射计划(2006,太阳系外行星);达尔文计划

(2014,类地行星)和在地球轨道上的有关有机或生物样品的实验。澳大利亚天体生物学中心成立于2001年,是NASA天体生物学研究所的协作成员,与欧洲空间局和其他空间科学研究机构均有协作关系。

2 天体生物学研究路线图

NASA 分别于 1998、2003 和 2008 年公布其天体生物学研究的路线图^[17-19]。其中关于天体生物学的定义,该学科要回答的最基本的问题,该学科的最基本原理和当前的目标完全可以作为在中国发展天体生物学的参考纲要。中国的科学家应根据中国的科研现状决定优先发展领域并鼓励相关领域的科学家在天体生物学的框架下进行研究。本文旨在简要地论述天体生物学的基本内容,以便国内同仁能够结合自己的研究领域发现与天体生物学的联系。本文的基本框架参照 Des Marais 等^[19]和 NASA 网站上发布的 2003 年、1998 年路线图,以及 Morrison^[17]关于 NASA 的天体生物学项目编写。关于天体生物学的目标及其子目标的内容则是根据笔者对这些目标和天体生物学的认识,以及最近几年在香港大学和中国科学院研究生院讲授天体生物学的体会全部重新撰写的,力图符合中国当前的科研状况。

2.1 宇宙中宜居环境的特征和分布及其探测

2.1.1 宜居行星的形成和演化

行星系统的形成基本过程是①分子云的核心坍塌导致一个小的中心天体的形成,它的周围是一个为 100AU 尺度的盘状星云;②持续约 100 万年之后,盘上的气体和灰尘开始向中心流动,逐渐形成一个主序星的前身;③由于质量和角动量的再分配,剩余的太阳星云物质逐渐形成行星。行星的大小及其与恒星的距离与行星状星云的一些参数,比如中心恒星的质量、星云的密度、颗粒的分布等有关。一个行星系统研究的最有趣的部分是关于一个类似太阳系行星系统的形成^[20]。形成一个宜居行星,比如类地行星的几率有多大?地球化学和宇宙化学领域关于重金属同位素分析技术的最新突破非常有利于太阳系和行星地球早期演化研究^[21]。太阳的质量,类地行星与恒星的距离、数量以及巨行星的重要性等都是天体生物学所要考虑的问题。

2.1.2 对太阳系以外宜居行星的直接和间接观察

在 1995 年对太阳系以外的行星的观察取得突破性进展^[13]以后,已经发现了超过 500 颗太阳系外的行星,并且新的发现以每年 20~30 颗的速率增长。当前对太阳系以外行星的观察主要有天体测量法、径向速度法、脉冲星计时法、穿过法、重力微透镜法等,以及这些方法在近地轨道上的应用^[20,22-23],如 2009 年刚发射的开普勒空间计划和计划中的空间干涉仪。由于方法的限制,目前所观察到的行星大多是处于巨行星的质量范围。尽管科学家们仍致力于寻找质量更接近地球的行星,但现在对于这些与地球质量接近的行星上可能的动力学过程一无所知。比如任意取 0.25~10 倍地球质量的行星,

如果它们处于一个行星系统的类似地球的宜居带(图 2),其上面向生命起源的地质演化是如何进行的?其初始行星条件,如硅酸盐的形成,初始岩浆的活动,初始海洋、大气的形成会有什么特征?它上面会有海、陆的差异,花岗岩的形成和广泛的、活跃的板块构造运动吗?所有这些问题都需要行星科学家和地质学家的合作研究。自 2007 年以来发现的几颗“超级地球”^[24-25]可能发生的地质圈、水圈和大气圈之间的相互作用以及与地球的比较对于探讨其上可能存在的生命具有重要意义。

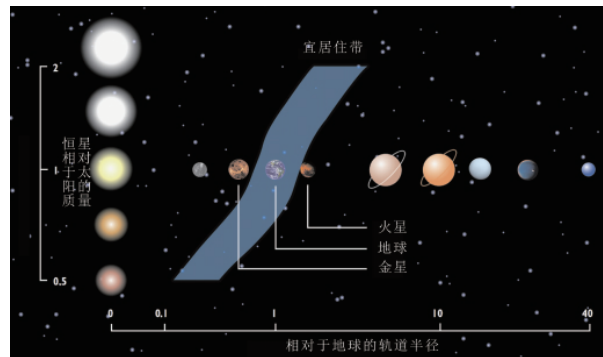


图 2 行星系统的宜居带和宜居行星
(修改自 Kasting 等, 1993)

Fig. 2 Habitable planet and habitable zone in a planetary system (modified from Kasting *et al*, 1993)

2.2 确定太阳系过去或现在的宜居环境、生命的化学演化和生命存在记录

2.2.1 火星探索

火星是太阳系离地球最近的行星。以 NASA 为主的火星探索在不久的将来就会达到在其表面或近地表钻取样品进行分子生物学分析的目的。从早期的旅行者掠过海盜号的登录,再到火星登陆车和最近的凤凰号,包括用于不同目的的火星探测卫星,人类对火星的大气、磁场、水文、地质、地貌都有了空前的了解^[26-27]。火星在 40 亿年前就有地表径流,在 30 亿年前仍有地表水^[28]。最近的火星探索显示其近地表有冰的存在,而其深部则有液态水的存在^[29]。火星最有可能给我们提供第 2 种,即不同于地球的生命起源模式^[30]。它将告诉我们关于生命起源的几个重大问题,比如碳基生命化学、从氨基酸作为基本单元的基因结构、生命有机分子的旋光性等是由地球上独有的环境因素导致的自然选择的结果,还是具有宇宙学上的普遍意义?现在比较引起关注的问题有:火星上面的奥林巴斯以及其他火山系统在过去或现在的深部热液循环是怎样进行的?它与地球的火山热液驱动机制有什么差异?该研究的天体生物学意义在于,通过对地球上热液驱动的热、物质、能量和生物循环可以了解火星上的类似情况。比如,随火山热液的循环而产生的能量,化学物质,简单有机分子和微生物代谢的分带,以及由此产生的生物标志化合物、矿物的特征和分带等。

2.2.2 对太阳系外部行星及其卫星的探索

关于地球上生命起源的研究,经历了从达尔文的“热的,充满了磷和碱的温暖池塘”到奥巴林(1924)、豪尔敦(1929)的还原的原始大气假说、米勒-尤里的原汤实验^[31]、硫化物催化假说^[32]和 RNA 世界的假说^[33]和实验。现在的化学实验已经可以在 CH_4 、 CO_2 、 N_2 、 HCN 和 H_2O 这些化学物质的基础上合成包括脂肪酸、糖类、氨基酸等重要的生化小分子^[34]。而这些化学反应,根据科学家推测,不仅能够 在欧罗巴、泰坦上进行,也应该在早期地球上发生过^[35]。

木卫二欧罗巴和土卫六泰坦是太阳系中除火星以外最具天体生物学研究意义的天体。欧罗巴的冰壳下可能存在巨大的海洋,支持其上有生命存在的可能性。虽然泰坦上有生命的可能性比较低,但有与地球非常相似的大气结构和动力学,以及其上非常复杂的有机化学合成机制使我们可以直接观察地球上前生命化学演化^[35]。

关于欧罗巴上可能生命的假说自从旅行者的观察就开始了。其海洋的温度在具有较大的盐度时可达 4°C 左右^[36]。能量的模式计算表明,它的海洋应该有 $10^{23}\sim 10^{24}$ 个单细胞生命,与地球上的 $1\sim 10\text{kg}/\text{m}^2$ 比起来要低很多,因此 Chyba 和 Phillips^[2]估计欧罗巴的总生物量应该在 $10^{13}\sim 10^{15}\text{g}$ 。欧罗巴上的部分有机质可能来自陨石。由于所有伽利略卫星的组成接近于碳质陨石,含有约 7% 质量的水,其行星组成可能有 1% 的碳,并且一半的碳可能是不溶于水的有机物。这些有机质与水、岩石之间的高温相互作用在生命起源上有一定意义^[37]。在这种情况下,生命有机化学的开始也许不一定是从简单到复杂,也许可以是 从复杂到简单,再到复杂。对欧罗巴的热液-岩石相互作用可以完全参照我们对地球上深海热液、火山热液与岩石的相互作用方面的研究。关于其对生命的探测的意义可以参考现在或将来对南极 Vostok 湖的研究^[38]。欧罗巴上生命过程可能与地球上具有可比性,比如自养和异养的产甲烷微生物;嗜热古菌通过自养和异养作用对还原硫的能量的利用,以及光合作用对 CO_2 的利用等^[2]。另外,由于现在所知欧罗巴的海洋温度与地球上广袤的海底温度非常接近,对地球上海底的嗜冷的生态系统,即所谓的寒冷生物圈的形成、演化、金属-碳-能量循环的研究^[39]对建立欧罗巴的生态模型具有重要意义。

据现有研究的了解,泰坦拥有生命起源所需的所有要素,是前生命化学的自然实验室^[40],也是太阳系唯一的拥有浓厚的大气的卫星。其大气组成主要是 N_2 ,少量的 CH_4 和其他繁多简单到复杂的有机物。泰坦的有机质的形成是 N_2 和 CH_4 之间经放电和光的作用而合成简单的有机物。在形成复杂的有机物时 C_2H_2 和 HCN 起很重要的作用。泰坦的有机化学已经有很好的实验室模拟^[41]。最近的理论研究倾向于认为地球上的前生命有机化学过程可能是在高温、高压和有水的条件下进行^[42]。但我们可以把星云中、泰坦上和地球早期前生命化学反应看作整个生命演化的几个不同的阶段。一些比较重要

的问题,比如在泰坦的大气条件下合成氨基酸,泰坦上的大气有机质(实验合成)是否可以作为营养物质或碳源等都值得研究。

2.3 生命如何从行星系统的形成和演化中产生以及生命起源的一般物理化学原理

2.3.1 前生命演化材料和催化物质的来源

地球上前生命有机分子的起源基本上有 3 种假说:由还原的大气合成;经由陨石和彗星输入;深海热泉中硫化物的催化而合成。现在还不能确定哪一种说法是正确的,或者这三种来源兼而有之。近些年在厘米波长上的观察发现了超过 140 种复杂的有机分子分布在星际空间^[43-44]。这些有机分子的发现将地球上生命起源的化学演化历史提前到原始行星状星云的演化;而碳的起源和丰度则要追溯到可以形成高碳丰度的恒星的核合成。

地球已有超过 45 亿年的历史^[4]。由于地球自其形成到现在一直拥有活跃的动力学过程,其早期,特别是最初的 7 亿年历史留下的记录很少^[45],因此我们对它的了解也相当少。最近关于最早锆石年龄已经可以追溯到 44 亿年,而锆石比较大的氧同位素变化范围则表明地球的海洋可能在地-月系统形成不久就形成了^[46]。这也暗示很可能海洋形成不久后生命就可能形成了。最近,关于年龄超过 40 亿年的轻碳同位素石墨的发现则暗示地球上的早期生命可能会随着数次足以完全蒸发地球海洋的陨石的撞击而产生和毁灭多次^[45]。这样的话,地球生命的化学演化,甚至细胞演化可能开始于更早而不是在 39 亿年之后。

2.3.2 功能生命分子的起源与演化

在有液态水和没有液态水的地球或行星表面进行的化学演化是非常不同的。39 亿年之前,特别是地-月系统形成之后的 2 亿年,以及在地球海洋最终形成之前,应该有不同于海洋形成之后的表面地球化学过程。比如,在岩浆海过程结束后不久,地球应有一个以 CO_2 、 H_2O 、 N_2 为主,含有少量 NH_3 、 CH_4 等气体的大气。由于大气中没有 O_2 ,地球表面的岩石可能会经历一个完全不同的风化作用。由于大气中水蒸气的作用,富含铁、镁、镍、钼等金属的硅酸盐可能会被 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 超临界流体提取而导致大量的风化矿物形成。这些金属的氧化物、硫化物、氢氧化物和富含这些金属的黏土矿物在地球表面的大量产生,即积累了大量的类似古土壤的风化矿物物质。它们的颗粒大小基本上处于次微米至纳米尺度,具有非常高的表面化学活性。其重要意义在于,在当时较高的温度下,促使大量的 CO_2 被还原成 CO ,从而使以 CO 为基础的大量的生命有机化学反应能够进行^[47]。那么,在最初的以 CO_2 为主的次原始大气与光合作用盛行之后形成的氧化的大气之间是否有一个 CO 大气呢? 大气中足够的 CO 的存在,可以保证在海洋形成之后,甚至最初的生命形成之后,大气中仍有足够的碳源存在。根据现在的大气-水相互作用计算,早期的大气 CO_2 应该很快被固定到碳酸盐中而长期沉

积于海洋的底部^[48]。而在还原 CO 基础上的有机化学反应和生物自养过程更具有能量的优势。在产生足够的有机分子的基础上,可能会有一个 RNA 世界连接化学演化和细胞演化^[33,49]。

2.3.3 细胞或初始生命系统的起源

细胞的起源,从生物化学的角度看,是怎样从一个 RNA 世界演变为 DNA 为遗传机制的世界;从系统发育的角度看,是地球上所有生命的最早的共同祖先的问题;而从生命起源的环境看,则是一个地球化学问题。最近,欧洲的生物地球化学家们,比如 Martin 和 Russell^[42],Wächtershäuser^[32]及其同事提出,

在热的环境中金属硫化物表面催化形成简单有机分子、催化功能基团甚至生物信息复制功能,这与最近对早期地球的物理、化学和地质环境的理解一致。这些新的理论观点要求重新考查早期地球表面的矿物学和地球化学组成。而根据最新的观念,最初的生命,或者那些介于生命与自组织功能团之间的物质,不是像现在所看到的微生物是完全独立存在于含水的环境中,而是存在于一个稳定的矿物或沉积物的结构空隙中(图 3),从而具有与外界有物质和能量的交换的结构^[50-51]。这些观念的提出,使地球化学家能够从地球化学热力学的角度出发,建立最初原始细胞的代谢模型。

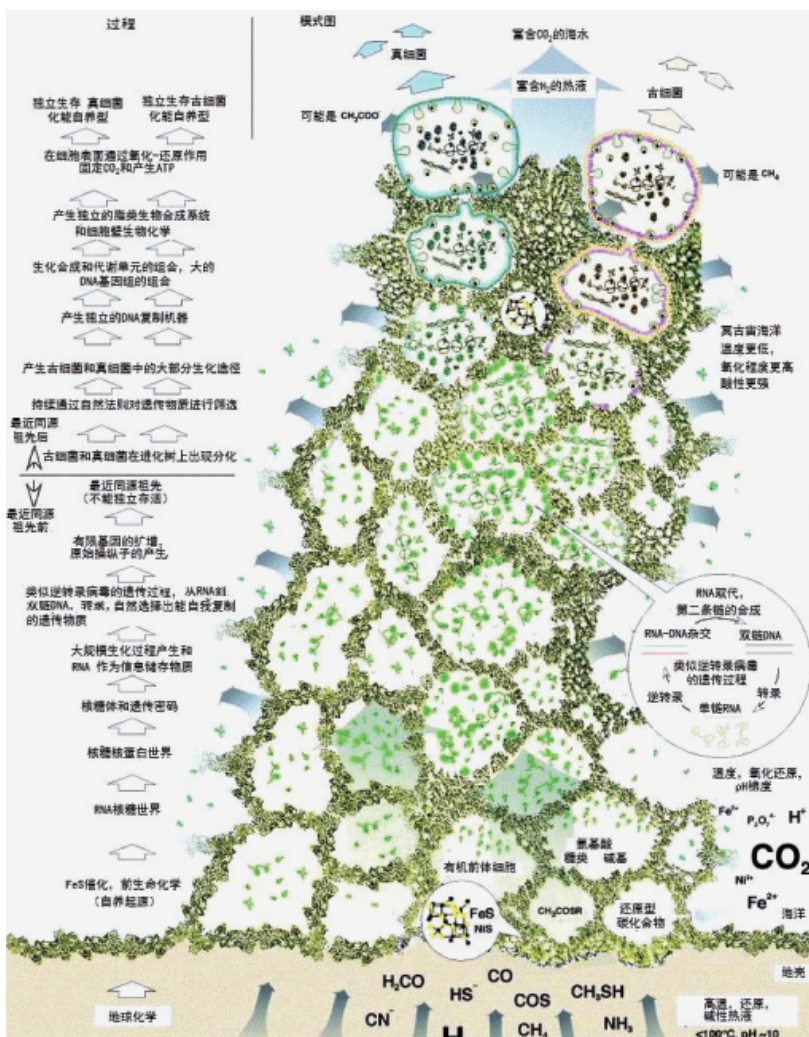


图 3 地球最原始细胞、细胞膜的形成、能量的代谢与地球化学环境的关系 (修改自 Koonin 和 Martin,2007)

Fig. 3 Geochemistry of the proto-cell, its membrane and energy metabolism on Earth (modified from Koonin and Martin, 2007)

2.4 地球环境与生命的协同演化

2.4.1 地球的早期生物圈

最早的变沉积岩的年龄大约是 39 亿年^[16],这表明现在的海洋年龄是 39 亿年。在澳大利亚保存完好的叠层石年龄是 35 亿年^[52],表明此时已有第一阶段的厌氧光合作用,而能够

进行其他形式的能量代谢的生命则可能会出现得更早。也许生命在 37 亿年甚至在海洋形成不久即 39 亿年前就出现在海洋中了。海洋中的微生物代谢化学能量逐渐改变了地球表面的化学和矿物学特征和海洋的组成。微生物对海洋中溶解的二价铁的氧化持续了 15 亿年以上, 导致迄今全球最大规

模的铁矿的形成^[53]。而后 Fe(III), Mn(IV), SO₄²⁻ 的呼吸作用也相继出现。而能进行光合作用的微生物的持续繁盛使海洋在距今 18 亿年时完全变氧化^[54], 导致有氧呼吸的出现, 随后多细胞生物如藻类等原始动物出现在晚元古代, 最终在寒武纪出现动物和植物生命的大爆发。在这段历史中最具天体生物学意义的是生物圈与地质圈的相互作用完全改变了地球的大气组成, 如大气氧(和臭氧)的产生^[55]是光合作用的标志并可能在遥远的行星系统中观察到^[18]。而微生物代谢导致大规模地形成铁建造改变了行星地球的表生地球化学和矿物学。地球科学在现有地质学、地球化学和矿物学研究基础上重建这段历史中古海洋环境的演化, 海洋中元素和营养物质的循环和微生物生态及其演化将会是对天体生物学的贡献。铁是最后一个可以经由核合成过程产生的元素, 具有较高的宇宙丰度、地球丰度, 并且它在含水体系中具有非常复杂的物理、化学和生物化学变化。它在宇宙中其他生命的演化道路上是否也具有同样的意义是个值得思考的问题。

2.4.2 复杂生命的产生

关于地球上生命的起源和演化, 现在的理论和实验可以被分为明显的两个阶段: 化学演化和细胞演化。前者包括简单有机分子的来源、合成和形成简单的能量、物质和循环; 后者包括生命的自我复制、变异、竞争和演化。复杂生物功能的出现是随机编译和自然选择的不断积累的结果。根据 DNA 基因和蛋白质酶的分析结果, 地球上所有的生命都是同源的^[56]。生物的复杂性起源于化学演化晚期阶段的化学自组织从中产生的以 RNA 催化为主的生命物质的复制, 以及可能产生的物质和能量代谢。RNA 世界, 如果仍然属于化学演化的话, 在其中演化出来的一些分子则可能完成大部分的催化功能^[33, 57]。它的出现标志着真正的细胞演化的开始。关于早期生命演化的一个重要的新概念是早期不同生命体种群之间的横向基因交换^[58]。这种生命过程与早期生命所处的地球化学环境有什么关系? 它是否可以由热力学驱动的不均一地球化学反应制约?

2.4.3 地球以外事件对生物圈的影响

科学家们越来越多地认识到来自地球以外的灾害性事件对于塑造现在的地球生态系统和生命的演化道路所起的重要作用。地球自形成以来不断经历不同大小和组成的天体撞击。在 45.5 亿年前形成的地-月系统使地球之后免受更多的来自彗星和陨石的撞击^[59]。而地球形成之后的 7 亿年的频繁撞击可能给地球带来相当量的水和包括有机质在内的碳。在星际空间发现的 140 余种复杂有机分子暗示地球上生命的化学演化也许没有必要从简单有机分子开始^[44, 60]。天体的撞击可能同时给地表带来丰富的过渡金属^[61], 而这些金属可能在催化简单有机物的合成中起重要作用, 如细胞中酶的形成。其他原因, 如生物的周期性灭绝可能与天文周期(太阳系内或太阳系外的原因)有关。最近有研究发现, 原来根据地层学和生物演化证据看到的许多生物渐变所导致的生物量、种群的大规模减少都可能是由于灾变性地外事件引起的^[62-63]。

这就要求有更加准确的生物地层学定位, 从地质生物学和古生物学的角度对生物的演化环境有更加深入的研究。其他天文学原因, 如伽玛射线爆和宇宙射线都有可能短时间内改变地球的大气环境进而破坏生态系统的稳定性^[64]。在地质演化时间尺度上了解生物演化事件对估计宇宙中宜居行星和技术文明世界的数量都是重要的参数。

2.5 生命演化机制和环境限制

2.5.1 微生物的环境依赖性和分子演化

微生物的一个非常显著的特征是对环境的适应性。由于环境条件的差异, 具有相同系统发育结构的微生物可能具有非常不同的生态生理学特征。在地球上不同的地质环境包括高温, 比如火山和深海热泉; 低温, 比如广袤的海底, 高纬度地区; 高 pH 值如碱湖, 低 pH 值如酸矿水; 高盐度, 比如苦卤水; 高放射性环境等等。处在这些环境中的微生物会很快调整其生存策略以适应这些环境。如许多属于完全不同的种属微生物都可以呼吸三价铁; 而属于同一种属的 *Shewanella* 由于处于完全不同的环境则可以使用超过 20 种电子受体^[65]。被滞留到沉积物中的微生物则可随地温的增长而逐渐变成嗜热菌^[66]。微生物的这种特性可以用来研究生物个体、群落、生态系统, 甚至整个生物圈与地质圈的协同演化。地质微生物学与天体生物学关系密切, 很多研究涉及微生物调控的或诱导的矿化作用, 而生物成因矿物由于能在地质环境中长期保存而可以用来追溯参与成矿作用的微生物, 其代谢特征甚至用于重建当时的微生物生态结构^[67]。

2.5.2 微生物群体的协同演化

微生物种系之间的协同演化的化学基础是一种微生物产生的化合物可以被另一种所用, 这可造成基因的侧向交换^[68]。这些过程在生命演化历史上可能具有重要意义, 比如真核生命的起源以及其中叶绿体和线粒体的成因等^[68]。最近观察到的例子, 比如厌氧环境中甲烷的氧化作用, 它在全球碳循环和全球气候变化中具有重要意义。一些新的生命形式的出现可能会明显地改造其环境, 另一些则由于其地质环境的改变而产生适应性的改变。这两种过程都有可能留下地质记录而被认识。因此在地质历史上大的生物学事件往往同时也是重要的地质学事件。比如硫酸盐还原细菌的出现伴随着海洋沉积物中硫同位素值范围的放大^[69]; 大气氧的出现伴随着地表硫酸根中氧同位素的非质量分馏等^[55]。在这些方面需要地质学家和微生物学家的合作将生命演化树上重要的微生物类型确定在地球和生命演化的时间轴上。

2.5.3 微生物对极端环境的生化适应性

人们将不适合人类和动物生存的环境, 称为极端环境, 而其中生存的微生物则被称为极端微生物。地球上的各种极端条件如高温、低温、高压、极高或低的 pH 值、高盐度、高碱度等。地球的数千米的深部和高放射性环境都有微生物的存在。微生物学家希望通过生理学和分子生物学方面的研究了解生命生存和适应环境策略^[70-71]。对极端微生物的认识极大地丰富了对宇宙中生命的认识, 因为这些所谓的极端环境在

其他太阳系天体如行星或卫星上都能找到。比如火星的 2~3km 的深部可能有液态水、碳源和其他能量物质以维持生态系统; 卫星如欧罗巴和泰坦的内部都有类似地球的海洋深部。相信这样的环境在整体银河系甚至宇宙中应该具有一定普遍意义^[72]。它使我们认识到宇宙中以微生物形式存在的生命可能比想像的要多。这也加强了我们对探索火星或其他天体如欧罗巴的近地表生命的信心, 使我们对生命在星际空间的传播有了新的认识^[73]。

2.6 地球上和地球以外生命存在和演化的自然原理

2.6.1 环境变化的微生物生态学效应

局部环境的快速变化会引起生物的迁徙甚至灭绝, 如海底黑烟囱附近的复杂生态系统在黑烟囱活动停止后很快就会消失^[74]。而全球性的环境变迁, 如最近引起世界性关注的气候变暖的影响则更广泛, 更深远^[75]。这种变化从动物到植物, 从个体到生态系统都可以观察到。更长期的环境变迁, 如海进—海退, 冰期的出现, 以致地球大气中 CO₂ 的长期减少趋势、地球表面温度随太阳光度的变化等肯定会引起生物演化路线的变化。从地球演化的尺度上讲, 最大的变化是由地球表面温度决定的。比如太古代的海洋是热的, 所有生活在海洋中的微生物当然都是嗜热的, 而现在广袤的洋底温度在 4℃ 以下, 微生物则都变成嗜冷的了。环境的变化可能会引起微生物的快速生态响应, 比如排放高浓度重金属或放射性物质的池塘或黑烟囱会很快充满能够忍受重金属和放射性的微生物, 它们会产生一些在基因层次上可测的变化, 比如产生快速修复被辐射破坏的蛋白质等。

2.6.2 地球以外生命的适应性和演化

地球以外宜居行星以及宜居行星上生命的可能形式和演化都是天体生物学研究的内容。关于生命的起源、演化以及与其所驻星球之间的协同演化, 目前只有以地球作为唯一的例子。我们现在寻找地球以外生命的最基本条件是有液态水的存在^[76]。其他不同天体上可能出现的生命特点则可以参照我们对极端微生物的认识。比如, 火星在其形成之后的最初 10 亿年是有地表水的, 其早期生命所产生的生物标志物会不会保存至今? 现在火星的近地表可能也会有生命存在。这些微生物可能利用火星内部的 CO₂、H₂ 和矿物质能量维持其生态系统。这些微生物可能是嗜冷, 也能产甲烷等^[77]。再如欧罗巴的液态水的海洋中应该有足够的有机和无机碳、矿物质能量以支持某些特定的代谢^[2]。与之对照的是地球深海或寒冷生物圈的微生物群落。至于太阳系以外的宜居行星天体, 有意义的是考虑其大小以及在不同行星系统中的宜居带的特征。并以此为基础模拟早期的大气、海洋和岩石圈之间的相互作用, 可能的能量、物质的代谢模型等, 甚至可能的演化道路。

2.7 识别生命在地球以外环境或早期地球上存在的特征

2.7.1 近邻行星的生命标志信息

在太阳系中火星和泰坦都可能存在生命, 因为前者的近地表比如 2~3km 的深部甚至更浅的近地表可能会有液

态水的存在^[29], 而后者有一个比地球更大的海洋^[14]。虽然我们可以用遥感技术对它们的大气进行详细的研究, 但由于它们的表面并不适合生命生存, 必须使用特殊的探测方法。根据我们对地球生物, 特别是微生物代谢的认识, 它们的代谢会产生一些可能被作为生物标志物的产物, 这些生物标志物可能是矿物、有机分子或气体。比如最近观察到的火星大气中的甲烷有可能是产甲烷微生物产生的, 当然也有可能是深部甲烷水合物的分解造成的。这要求我们更加了解火星近地表的、仍在起作用的动力学机制。另外, 火星陨石 ALH84001 中磁铁矿的成因的争论还在继续^[77]。对这个问题的持续的、深入的争论将最终有助于解决生物标志物的保存及可靠性问题。另外关于欧罗巴的海洋中的生命现在只能根据其海洋的物理—化学条件, 模拟其海洋与深部岩石的相互作用, 营养物质在海洋中的循环等了解^[78]。

2.7.2 寻找太阳系中的生命特征信息物质

自从 1995 年发现第一颗太阳系以外的行星以来^[13], 已经发现了超过 500 余颗太阳系以外的行星。而要寻找太阳系以外的生命, 最重要地是寻找类似地球的行星, 因为行星的重力可以维持一个合适的大气和一个对生命至关重要的海洋。2007 年以来已经发现了数颗类地行星^[24-25]。类地行星围绕主序星或太阳系外巨行星所需的宜居带已有许多计算模型发表^[79-80]。那么, 下一步就是探测这些类地行星上是否存在生命栖息。在人类现阶段的观测水平下, 最实际的方法就是类地行星的遥感探测^[81]。我们已经可以通过空间探测器和遥感技术比较详尽地探测太阳系行星的大气组成。根据现在对地球生命的认识, 探测大气中的 O₂ 或它的光解产物 O₃、CH₄ 在大气中的红外吸收可能会直接地探测与这些气体产生有关的生物。比如光合作用产生 O₂ (或 O₃), 而产甲烷古菌则向大气中释放 CH₄^[18,82]。另外, 也可以根据地表不同的地貌, 如海洋、云、沙漠、草原和森林等的热吸收特征进行分析, 计算相应的热吸收的综合模式^[18]。

3 结论与展望

(1) 天体生物学研究宇宙中生命的起源、演化和未来。天体生物学的特征是跨越众多科学、技术领域的综合学科, 是许多学科的前沿领域。

(2) 本文概览了天体生物学在宇宙学和天文学、行星探索和行星科学、地球科学和生命科学等领域的一些问题, 希望相关科学或技术领域的科研人员能够找到自己的研究与天体生物学之间的联系, 促进天体生物学在中国的建立和发展。

(3) 在美国和其他西方发达国家已经开展有关天体生物学的系统的科研和教学。在中国乃至整个亚洲仍没有系统的天体生物学研究, 中国需要考虑建立相关的科研领域和教学计划。

参考文献 (References)

[1] Bada J L. State-of-the-art instruments for detecting extraterrestrial life

- [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 2001, 98 (3): 797–800.
- [2] Chyba C F, Phillips C B. Europa as an abode of life [J]. *Origins of Life and the Evolution of Biosphere*, 2002, 32(1): 47–67.
- [3] López-García P. Habitability: The point of view of a biologist [C]// Gargaud M, et al. ed. *Lectures in Astrobiology. Vol. II. Advances in Astrobiology and Biogeophysics*, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007: 221–237.
- [4] Allègre C J, Manhès G, Göpel C. The age of the Earth [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(8): 1445–1456.
- [5] Carroll S B. Genetics and the making of *Homo sapiens* [J]. *Nature*, 2003, 422(6934): 849–857.
- [6] Chen Y Q, Zhao G, Nissen P E, et al. Chemical abundances of old metal-rich stars in the solar neighborhood [J]. *The Astrophysical Journal*, 2003, 591(2): 925–935.
- [7] Sneden C, Cowan J J. Genesis of the heaviest elements in the Milk Way Galaxy [J]. *Nature*, 2003, 299(5603): 70–75.
- [8] Barrow J D, Tipler F J, Wheeler J A. *The anthropic cosmological principle* [M]. New York: Oxford University Press, 1988: 736.
- [9] Chyba C F, Hand K P. Astrobiology: The study of the living Universe [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2005, 43(1): 31–74.
- [10] Sullivan W T, Morrison D. Teaching astrobiology to undergraduate and graduate students [J]. *Astrobiology*, 2008, 8(2): 456–460.
- [11] Tikhov G A. *Astrobiology* [M]. Moscow: Molodaya gvardia Publishing House, 1953.
- [12] Lederberg J. Exobiology: Approaches to life beyond the Earth [J]. *Science*, 1960, 132(3424): 393–395.
- [13] Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star [J]. *Nature*, 1995, 378(6555): 355–359.
- [14] Anderson J D, Schubert G, Jacobson R A, et al. Europa's differentiated internal structure: Inferences from four Galileo encounters [J]. *Science*, 1998, 281(5385): 2019–2022.
- [15] McKay D S, Gibson E K, Thomas-Kepner K L, et al. Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001 [J]. *Science*, 1996, 273(5277): 924–930.
- [16] Mojzsis S J, Arrhenius G, McKeegan K D, et al. Evidence for life on Earth before 3800 million years ago [J]. *Nature*, 1996, 384: 55–59.
- [17] Morrison D. The NASA astrobiology program [J]. *Astrobiology*, 2001, 1 (1): 3–13.
- [18] Des Marais D J, Harwit M O, Jucks K W, et al. Remote sensing of planetary properties and biosignatures on extrasolar terrestrial planets [J]. *Astrobiology*, 2002, 2(2): 153–183.
- [19] Des Marais D J, Nuth III J A, Allamandola L J, et al. The NASA astrobiology roadmap [J]. *Astrobiology*, 2008, 4(2): 715–730.
- [20] Ollivier M. What about exoplanets? [C]// Gargaud M, et al. eds. *Lectures in Astrobiology. Vol. II. Advances in Astrobiology and Biogeophysics* Heidelberg: Springer-Verlag, 2007: 157–198.
- [21] Chaussidon M. Formation of the solar system: A chronology based on meteorite [C]// Gargaud M, et al. ed. *Lectures in Astrobiology. Vol. II. Advances of Astrobiology and Biogeophysics*. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 45–74.
- [22] Ulmschneider P. The search for extrasolar planet [C]// *Intelligent life in the Universe, Advances in Astrobiology and Biogeophysics*. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 73–85.
- [23] Nelson R P. Extrasolar planets: A review of current observations and theory [C]// Williams I P, Thomas N. ed. *Lecture Notes in Physics*, Berlin: Springer-Verlag, 2001.
- [24] Valencia D, Sasselov D, O'Connell R J. Radius and structure models of the first super-Earth planet [J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, 656(1): 545–551.
- [25] Forveille T, Bonfils X, Delfosse X, et al. The HARPS search for southern extra-solar planets. XIV. G1 176b, a super-Earth rather than a Neptune, and at a different period [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2009, 493(2): 645–650.
- [26] Phillips R J, Zuber M T, Solomon S C, et al. Ancient geodynamics and global-scale hydrology on Mars [J]. *Science*, 2001, 291 (5513): 2587–2591.
- [27] Formisano V, Atreya S, Encrenaz T, et al. Detection of methane in the atmosphere of Mars [J]. *Science*, 2004, 306(5702): 1758–1761.
- [28] Dickinson W W, Rosen M R. Antarctic permafrost: An analogue for water and diagenetic minerals on Mars [J]. *Geology*, 2003, 31 (3): 199–202.
- [29] Smith P H, Tamppari L K, Arvidson R E, et al. H₂O at the Phoenix landing site [J]. *Science*, 2009, 325(5936): 58–61.
- [30] Smith H D, McKay C P. Drilling in ancient permafrost on Mars for evidence of a second genesis of life [J]. *Planetary and Space Science*, 2005, 53(12): 1302–1308.
- [31] Miller S L, Schopf J W, Lazcano A. Oparin's "origin of life": Sixty years later [J]. *Journal of Molecular Evolution*, 1997, 44(4): 351–353.
- [32] Wächtershäuser G. Before enzymes and templates: Theory of surface metabolism [J]. *Microbiological Reviews*, 1988, 52(4): 452–484.
- [33] Gilbert W. Origin of life: The RNA world [J]. *Nature*, 1986, 319: 618.
- [34] Simoneit B R T. Prebiotic organic synthesis under hydrothermal conditions: An overview [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33(1): 88–94.
- [35] Raulin F. Exo-astrobiological aspects of Europa and Titan: From observations to speculations [J]. *Space Science Reviews*, 2005, 116(1–2): 471–487.
- [36] Melosh H J, Ekholm A G, Showman A P, et al. The temperature of Europa's subsurface water ocean [J]. *Icarus*, 2003, 168(2): 498–502.
- [37] Deamer D W. The first living systems: A bioenergetic perspective [J]. *Microbiology and Molecular Biology Review*, 1997, 61(2): 239–261.
- [38] Karl D M, Bird D F, Björkman K, et al. Microorganisms in the accreted ice of lake Vostok [J]. *Antarctica. Science*, 1999, 286 (5447): 2144–2147.
- [39] Rivkin R B, Anderson M R, Lajzerowicz C. Microbial processes in cold oceans. I. Relationship between temperature and bacterial growth rate [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1996, 10(3): 243–254.
- [40] Raulin F. Astrobiology and habitability of Titan [J]. *Space Science Reviews*, 2008, 135(1): 37–48.
- [41] Raulin F, Owen T. Organic chemistry and exobiology on Titan [J]. *Space Science Reviews*, 2002, 104(1): 377–394.
- [42] Martin W, Russell M J. On the origin of biochemistry at an alkaline hydrothermal vent [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2007, B362(1486): 1887–1926.
- [43] Kwok S. The synthesis of organic and inorganic compounds in evolved stars [J]. *Nature*, 2004, 430(7003): 985–991.
- [44] Kwok S. Organic matter in space: From star dust to the solar system [J]. *Astrophysics and Space Sciences*, 2009, 319(1): 5–21.
- [45] Ryder G. Bombardment of the Hadean Earth: Wholesome or deleterious? [J]. *Astrobiology*, 2003, 3(1): 3–6.
- [46] Wilde S A, Valley J W, Peck W H, et al. Evidence from detrital zircons

- for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago[J]. *Nature*, 2001, 409(6817): 175-178.
- [47] Miyakawa S, Yamanashi H, Kobayashi K, *et al.* Prebiotic synthesis from CO atmosphere: Implications for the origin of life [J]. *Proceedings of National Academy of Sciences of USA*, 2002, 99(23): 14628-14631.
- [48] Morse J W, MacKenzie F T. Hadean ocean carbonate geochemistry[J]. *Aquatic Geochemistry*, 1998, 4(3): 301-319.
- [49] Joyce G F. The antiquity of RNA-based evolution[J]. *Nature*, 2002, 418 (6984): 214-221.
- [50] Russell M J, Hall A J, Mellersh A R. On the dissipation of thermal and chemical energies on the early Earth: The onsets of hydrothermal convection, chemiosmosis, genetically regulated metabolism and oxygenic photosynthesis [C]//Ikan R. *Natural and Laboratory-Simulated Thermal Geochemical Processes*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003: 325-388.
- [51] Koonin E V, Martin W. On the origin of genomes and cells within inorganic compartments[J]. *Trends Genetics*, 2005, 21(12): 647-654.
- [52] Schopf J W, Packer B M. Early Archean (3.3-billion to 3.5-billion-year-old) microfossils from Warrawoona Group, Australia [J]. *Science*, 1987, 237(4810): 70-73.
- [53] Klein C. Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geological setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origins [J]. *American Mineralogist*, 2005, 90 (10): 1473-1499.
- [54] Holland H D. The oxygenation of the atmosphere and oceans[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2006, B361 (1470): 903-915.
- [55] Farquhar J, Bao H, Thiemens M. Atmospheric influence of Earth's earliest sulfur cycle[J]. *Science*, 2000, 289(5480): 756-758.
- [56] Dyson F J. Origin of life[J]. *Lecture Notes in Physics*, 1985, 746: 97.
- [57] Jeffares D C, Poole A M, Penny D. Relics from the RNA world[J]. *Journal of Molecular Evolution*, 1998, 46(1): 18-36.
- [58] Gogarten J P, Townsend J P. Horizontal gene transfer, genome innovation and evolution [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2005, 3(9): 679-687.
- [59] Agnor C B, Canup R M, Levison H. On the character and consequence of large impacts in the late stage of terrestrial planet formation [J]. *Icarus*, 1999, 142(1): 219-237.
- [60] Whittet D C B. Is extraterrestrial organic matter relevant to the origin of life on Earth?[J]. *Origins of Life and Evolution of Biosphere*, 1997, 27 (1): 249-262.
- [61] Cockell C S. The origin and emergence of life under impact bombardment[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2006, B361(1474): 1845-1856.
- [62] Sepkoski Jr J J. Periodicity in extinction and the problem of catastrophism in the history of life[J]. *Journal of the Geological Society*, 1989, 146(1): 7-19.
- [63] Gillman M, Erenler H. The galactic cycle of extinction [J]. *International Journal of Astrobiology*, 2008, 7(1): 17-26.
- [64] Cockell C S. Crises and extinction in the fossil record—A role for ultraviolet radiation?[J]. *Paleobiology*, 1999, 25(2): 212-225.
- [65] Nealson K H, Scott J. Ecophysiology of the genus *Shewanella* [J]. *The Prokaryotes*, 2006, 6: 1133-1151.
- [66] Liu S V, Zhou J, Zhang C, *et al.* Thermophilic Fe(III)-reducing bacteria from the deep subsurface: The evolutionary implications [J]. *Science*, 1997, 277(5329): 1106-1109.
- [67] Kopp R E, Kirschvink J L. The identification and biogeochemical interpretation of fossil magnetotactic bacteria [J]. *Earth-Science Reviews*, 2008, 86(1-4): 42-61.
- [68] Brown J R. Ancient horizontal gene transfer [J]. *Nature Reviews Genetics*, 2003, 4(2): 121-132.
- [69] Shen Y, Buick R, Canfield D E. Isotopic evidence for microbial sulphate reduction in the early Archean era [J]. *Nature*, 2001, 410 (6824): 77-81.
- [70] Ma Y, Zhang W, Xue Y, *et al.* Bacterial diversity of the Inner Mongolian Baer Soda Lake as revealed by 16S rRNA gene sequence analyses[J]. *Extremophiles*, 2004, 8(1): 45-51.
- [71] Wang J, Zhao C, Meng B, *et al.* The proteomic alterations of *Thermoanaerobacter tengcongensis* cultured at different temperatures[J]. *Proteomics*, 2007, 7(9): 1409-1419.
- [72] Lineweaver C H, Fenner Y, Gibson B K. The galactic habitable zone and the age distribution of complex life in the milk way [J]. *Science*, 2004, 303(5654): 59-62.
- [73] Cavicchioli R. Extremophiles and the search for extraterrestrial life[J]. *Astrobiology*, 2002, 2(3): 282-292.
- [74] Lutz R A, Shank T M, Evans R. Life after death in the deep sea[J]. *American Scientist*, 2001, 89(5): 422-431.
- [75] Walther G R, Post E, Convey P, *et al.* Ecological responses to recent climate change[J]. *Nature*, 2002, 416(6879): 389-395.
- [76] Motti M J, Glazer B T, Kaiser R I, *et al.* Water and astrobiology [J]. *Chemie de Erde Geochemistry*, 2007, 67(4): 253-282.
- [77] Thomas-Keprta K L, Clemett S J, McKay D S, *et al.* Origins of magnetite nanocrystals in Martian meteorite ALH84001 [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(21): 6631-6677.
- [78] Des Marais D J, Allamandola L J, Benner S A, *et al.* The NASA astrobiology roadmap[J]. *Astrobiology*, 2003, 3(2): 219-235.
- [79] Kasting J F. Habitable zones around low mass stars and the search for extraterrestrial life [J]. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 1997, 27(1): 291-307.
- [80] Williams D M, Kasting J F, Wade R A. Habitable moons around extrasolar giant planets[J]. *Nature*, 1997, 385(6613): 234-236.
- [81] Cockell C S, Leger A, Fridlund M, *et al.* Darwin—A mission to detect and search for life on exosolar planets[J]. *Astrobiology*, 2009, 9(1): 1-22.
- [82] Schulze-Makuch D, Irwin L N, Guan H. Search parameters for the remote detection of extraterrestrial life[J]. *Planetary and Space Science*, 2002, 50(7-8): 675-683.

(责任编辑 吴晓丽)

《科技导报》“科技工作大家谈”栏目征稿

“科技工作大家谈”栏目专门刊登科技工作者近期提出的、与科学技术相关的工作意见、建议和看法。该栏目内容着眼于科技研究、发展、应用、政策等领域的实际问题,要求有明确、具体的内容,方法上尽量具有可操作性。文字应简洁明了,全文不超过 2200 字。欢迎国内外科技工作者及各级科协、学会投稿。栏目责任编辑:王芷,电子邮箱:wangzhi@cast.org.cn;在线投稿:www.kjdb.org。

中国酿酒葡萄气候区划指标体系

李华, 兰玉芳, 王华

西北农林科技大学葡萄酒学院, 陕西杨凌 712100

摘要 对中国各酿酒葡萄气候区划指标体系总结的基础上, 从指标体系产生的气候背景、区划范围、区划手段以及区划结果方面, 对目前中国各气候区划指标体系进行了比较和分析, 并就如何建立一个系统全面的气候区划指标体系提出建议。研究表明, 目前中国所应用的主要国外区划指标如水热系数、积温、纬度-温度指数、光热系数、光热指数等并不能对全国范围进行全面有效区划。只有首先建立了基于中国自身地理气候特点的区域指标体系, 其他分析手段才能充分发挥其优势。李华等所建立的无霜期-干燥度-埋土防寒线区划指标体系是首个以国内自身气候特点提出的新指标体系。中国气候区划目前存在三大问题: 首先是区划指标的选择没能考虑到中国自身的自然气候地理特点, 单一引用国外区划指标; 其次区划一直在理论到理论的圈中转, 没能全面深入到实际对其实用性进行验证; 再次, 没有一个基于全国的并细致到各产区的完整区划指标体系。国内酿酒葡萄气候区划正在向更科学全面的方向发展。通过对目前中国各气候区划指标体系的比较分析, 为中国酿酒葡萄气候区划指标体系的完善和统一提供理论依据。

关键词 酿酒葡萄; 气候区划; 区划指标; 热量指标; 水分指标

中图分类号 S663.1

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.01.10

Index System of Viticultural Climatic Zoning in China

LI Hua, LAN Yufang, WANG Hua

College of Enology, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China

Abstract On the basis of summarizing all of main index systems of viticultural climatic zoning in China, all of current internal index systems of grapevine climatic cultivation are compared and analyzed from the climatic background, climatic zoning areas, means, and results. It deems that the major external indexes in grapevine cultivation, hydrothermal coefficient, accumulated temperature, level division-temperature index, heliothermal index, hypothermal coefficient, etc, referred by internal experts are not suitable for all zoning of China. It also believes that only when establishing the new index system which has considered Chinese own geography and climate, the other analysis methods could embody their potential. It still reckons that the new cultivation system (frost-free period, dryness index, and bury line), founded by Li Hua et al is the first one regarding Chinese own climate features at present. Moreover, there are three problems: Firstly, the choice of indexes could not consider Chinese climate; Secondly, all the climatic zoning of viticulture are always from one theory to another theory, never go deep into the practice in order to verify their reliability; Thirdly, there is never a integral viticulture zoning which not only reaches entire country, but also goes into details on every areas. While the problems existing in the climatic zoning system for viticulture are indicated, the development trend of grapevine climatic zoning in China is also predicted. At last, some suggestions on climatic zoning in China are proposed. Based on the comparative analysis, a theoretical foundation of improvement and unity of indexes system of viticulture zoning in China is provided.

Keywords grapevine; climatic zoning; zoning index; moisture contents index; thermal index

0 引言

葡萄是世界上栽培面积最大、产量最高的果树之一^[1], 而葡萄酒是世界葡萄消费的主要形式^[2-3]。葡萄酒的一切质量因

素都完全在葡萄原料之中^[4], 只有在一些特定的区域内才能生产出品质优良、独具风格的葡萄酒^[5]。

随着人们对食品安全的关注及对高质量葡萄酒需求的

收稿日期: 2010-04-20; 修回日期: 2010-11-15

作者简介: 李华, 教授, 研究方向为葡萄与葡萄酒, 电子信箱: lihuawine@nwsuaf.edu.cn; 王华 (通信作者), 教授, 研究方向为葡萄与葡萄酒研究, 电子信箱: wanghua@nwsuaf.edu.cn