



科爱传播
KE'AI COMMUNICATIONS
生命科学

· 中文版 ·

Prebiotic Evolution and Astrobiology

生命的来历

前生物进化与太空生物学

王子晖 安东尼奥·拉兹卡诺 编著
陈 珊 译



原版引进



科学出版社





Frontier Evaluation and
Knowledge

生命的来历

前生物进化与太空生物学

王平 编 张松海 编 + 张松海 译 张松海 校
张 松 海



中国科学院出版社



Prebiotic Evolution and Astrobiology

**生命的来历：
前生物进化与太空生物学**

王子晖 安东尼奥·拉兹卡诺 编著

陈 珊 译

科 学 出 版 社

北 京

图字:01-2010-3045 号

内 容 简 介

作为国内第一本前生物进化与天体生物学方面的教材类书籍,本书系统地探讨了生命的本质和特征,详细介绍了太阳系中前生物探索的范围、方式和最新进展,并深入地从分子和细胞水平分析了前生物进化的本质和方式,同时讨论了现存的问题和有关全生物共同祖先的假说。

本书对前生物进化与天体生物学的介绍角度多样、内容详尽、结构严谨。虽然是专业书籍,涉及多方面的相关知识,但是论述深入浅出、便于理解,在适合各相关领域学生学习的同时,也可帮助有兴趣的普通读者了解相关理论、研究和进展。

This is a translation version of Prebiotic Evolution and Astrobiology

J. Tze-Fei Wong and Antonio Lazcano

The original English language work has been published by Landes Bioscience,
Austin, Texas, U. S. A.

Copyright © 2009 by Landes Bioscience. All rights reserved.

ISBN:978-1-58706-330-5

图书在版编目(CIP)数据

生命的来历:前生物进化与太空生物学/王子晖等编著;陈珊译. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-029045-8

I. ①生… II. ①王… ②陈… III. ①生物-进化-研究 ②天体生物学-研究 IV. ①Q11 ②Q693

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 184351 号

责任编辑:孙红梅 李小汀 刘 晶/责任校对:朱光兰

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011年1月第一次印刷 印张:16 插页:6

印数:1—2 000 字数:337 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

编者简介

王子晖 (J. Tze-Fei Wong) 从事基因密码研究工作超过 30 年, 包括遗传密码的诞生、遗传密码与氨基酸合成途径的共进化、遗传密码的突变可以令其解读非自然氨基酸, 以及将遗传密码普遍性的起源追溯至近产甲烷生物的全生命的根。早年在多伦多大学及近年在香港科技大学, 他发展出用 tRNA 及氨酰 tRNA 合成酶作为系统树的探针应用方法。他是《酶机制动力学》(*Kinetics of Enzyme Mechanisms*) 一书的作者, 此书主要探讨了多底物的酶反应。

安东尼奥·拉兹卡诺 (Antonio Lazcano) 是拉丁美洲最杰出的进化学者, 在生命起源及早期生命进化方面是世界领先的权威。他出生在墨西哥, 从事关于生命起源方面的工作超过 30 年, 著作包括《奇迹般的细菌》(*La Bacteria Prodigiosa*)、《生命的火花》(*La Chispa de la Vida*) 及《生命起源》(*El Origen de la Vida*)。他是高等生命起源研究会议中第一位拉丁美洲裔主席, 亦担任美国宇航局等多个国际组织的咨询委员。他曾获米兰大学授予的荣誉博士学位 (2008)、生物学研究金章 (Puebla, 1990)、基多圣弗朗西斯科大学创办人奖章 (2005) 及意大利天文生物学会的弗朗西斯科·雷迪奖 (2008)。

中 文 序

也许是人类出于自己的孤独感，而在漫漫宇宙中尽力呼唤远邻的生命同类；也许是人类出于固有的好奇心，而在渺渺太空中极力寻找地球之外也许存在的生命。人类对天体生物的遐想和探索已持续了几千年。

20 世纪被誉为“物理世纪”，其最大的辉煌是给人类插上了翅膀，高飞而远望；20 世纪更催生了“生物世纪”，其最大的影响也许是核酸作为地球上所有生命的遗传物质的证明、DNA 双螺旋结构的阐明，以及伴随“人类基因组计划”而来的、基于基因组序列的“基因组时代”。我们对生命本质的理解日新月异，对生命起源和进化的认识突飞猛进。太阳系以外的行星的发现、火星上水的证实，一次又一次唤起了人类对太空生物学研究的激情。人类对太空的探索中，地球以外可能的生命的存在已成为最前沿的科学课题。

遗传密码是人类第一个系统破译的宇宙语言。作为一名生物系的学生，我在大学时代便对遗传密码情有独钟。我曾经一度沉醉于那 4 种核苷酸和 20 种氨基酸之间的化学结构关系，唯一的收获是迄今还能倒背如流的遗传密码表。我对本书作者王子晖教授的敬佩就是这样开始的。他在 30 多年前提出了遗传密码同进论，解释了遗传密码和氨基酸的共同进化，并首先试图改写 30 多亿年来亘古不变的遗传密码，被称为“合成生物学”的开拓者之一，被英国《新科学家》杂志誉为书写了“地球生命史的下半集”。这也是我斗胆以晚辈之身份为前辈之巨著作序的唯一原因。

安东尼奥·拉兹卡诺教授是生命起源领域的先驱之一。他曾与最先实现前生命式氨基酸化学合成的斯坦利·米勒教授共同提出了生命异养起源说。这两位大师，更邀请了这一领域的其他出色的研究者们，在本书中撰文介绍了前生物进化和天体生物学的最新研究成果。我特别高兴见到本书的中译本，使我国的年轻学生、学者也能同步受益。

我更加期待有这么一天，有这么一个人，会说这么一句话：我在前生物进化和天体生物学这样一个领域的这一贡献，首先要感谢这么一本书。

此为序，为敬，为荐。

杨焕明
庚寅端午

前 言

随着基因组研究及太空探索的快速发展,前生物进化及天体生物学领域得到前所未有的发展,因此需要有关的教科书。由于内容涵盖多方面,因此需要多位专家合力出版,使本书适合不同领域的学生。这本书源于2006年意大利艾托里马约拉纳基金会与科学文化中心在西西里艾里斯举办的一次关于生命起源的基本问题的会议。在那里,Pier Luigi Luisi对这个主题制订了一个平衡的计划,这本书基本上源于这个计划。

全书共分15章。第1章论述了细胞生物学和分子生物学基础,讨论了生命的本质和生命的确切时刻这个古老命题。第2章以最小细胞的特征带出前生物进化的目标。第3~5章介绍了目前太空生物学探索的范围,主要集中在木卫二、土卫六、土卫二、火星及彗星。由于2008年历史性地火星上发现水,使这个在21世纪最遥远的科学前沿领域变得更特殊。第6~7章集中讨论陨星的化学及左旋性手性氨基酸在陨石中的出现,揭示了令人意外的太空化学和生物化学共享的特征。由于早期地球是前生物进化的舞台,它的条件对于生命的出现是非常重要的,这会在第8章中详述。第9~10章讨论了前生物合成中利用大大小小的生物分子直到RNA的出现。第11章探索RNA世界的内部系统。第12章描述功能性原始细胞的原理及前细胞进化的不同模式。tRNA及蛋白质的断裂基因之谜在第13章进行分析。基因密码的起源、进化及突变在第14章讨论。第15章考查生命之根,即全生命共同祖先的性质与基因组及在这个根上不同的生物域的形成。

安东尼奥·拉兹卡诺尽管在过去的几个月里需要照顾家人的健康,但仍然不懈致力于对本书章节内容的平衡和润色。多位作者创作出他们领域中最富有思想性、权威性和可读性的文章,令读者可以把握这个领域研究主题的背景、目的和进展。我很感谢薛红、宓位建、唐家乐、吴肇坚及陈建欢的研究合作及对整理本书的协助。内子梁绮霞的理解和支持对这本书的完成也至关重要。

王子晖

目 录

编者简介

中文序

前言

1 引言 1

王子晖

1.1 古老的话题，年轻的学科 1

1.2 太空生物学领域 2

1.3 到细胞的途径 5

1.4 异养起源 10

1.5 生命的决定性时刻 14

参考文献 16

2 最小的细胞 18

Markus Pech, Knud H. Nierhaus

2.1 引言 18

2.2 细胞的化学组成 18

2.3 原核和真核细胞 19

2.4 地球上的生命起源和遗传密码 20

2.5 简化现存细菌翻译装置的可能性 23

2.6 对蛋白质合成中能量消耗的优化 26

2.7 结论 28

参考文献 29

3 行星上的太空生物学——外太阳系 30

François Raulin

3.1 行星太空生物学，可居住性及太阳系中的情况 30

3.2 类木行星系统：木卫二（Europa） 31

3.3 土星系统：土卫六（Titan）和土卫二（Enceladus）的情况 35

3.4 结论：从地球到外太阳系 48

参考文献 48

4 火星, 21 世纪太空生物学的目标?	50
Patrice Coll, Fabien Stalport	
4.1 引言	50
4.2 为什么对火星的研究具有太空生物学意义?	51
4.3 一个过去适宜生命的环境?	52
4.4 去哪儿寻找及怎样寻找生命?	60
4.5 正在进行的探索	61
参考文献	62
5 彗星与太空生物学	64
Hervé Cottin, Didier Despois	
5.1 引言	64
5.2 太阳系中的彗星	64
5.3 彗星的化学组成	66
5.4 Rosetta 2014——实验室与彗星的约会	71
5.5 彗星与生命	74
5.6 结论	75
参考文献	76
6 陨星与生命起源前的化学	77
Sandra Pizzarello	
6.1 陨星及其来源	77
6.2 含碳的球粒状陨石及它们所含的有机物	78
6.3 陨石有机物的复杂宇宙历史	82
6.4 太空生物学问题	84
6.5 概要	85
参考文献	86
7 手性、同手型与生物分子相互作用规则	87
Sandra Pizzarello	
7.1 定义与历史背景	87
7.2 有机物的手性不对称与生物学的同手型	88
7.3 对地球上同手型起源的假设	90
7.4 概要	92
参考文献	93

8 早期地球 94

James F. Kasting

- 8.1 引言 94
- 8.2 地球与其大气、海洋的形成 94
- 8.3 前生物大气与环境 98
- 8.4 太古大气与环境 99
- 8.5 结论 105
- 参考文献 105

9 生物分子 107

王子晖

- 9.1 引言 107
- 9.2 氨基酸 107
- 9.3 RNA 的组成成分 111
- 9.4 脂质 115
- 9.5 能量来源 116
- 9.6 能源策略 118
- 9.7 在地球的哪里? 121
- 参考文献 124

10 RNA 世界的黎明：在可能的前生物条件下由单核糖核苷酸进行的 RNA 多聚化 126

Pierre-Alain Monnard

- 10.1 引言 126
- 10.2 前生物代谢中 RNA 是中心分子 126
- 10.3 RNA 单体 130
- 10.4 RNA 多聚化或 RNA 单体的浓缩 132
- 10.5 RNA 世界中的信息传递 137
- 10.6 RNA 单独作为向细胞生命进化的原动力 140
- 10.7 结论及前景 140
- 参考文献 141

11 核酶与代谢的进化 143

Randall A. Hughes, Andrew D. Ellington

- 11.1 引言 143

11.2	复制反应中的核酶	144
11.3	核酶与辅因子	147
11.4	核酶、氨基酸和翻译的出现	148
11.5	结论	152
	参考文献	152
12	前细胞进化：囊泡与原始细胞	153
	Pasquale Stano, Pier Luigi Luisi	
12.1	引言	153
12.2	自生发展和细胞生命的推理	154
12.3	囊泡及其他结构单元	156
12.4	囊泡的活性和转化	159
12.5	结语	168
	参考文献	171
13	断裂基因、始祖基因	173
	Massimo Di Giulio	
13.1	引言：基因的起源	173
13.2	阐释内含子起源的理论	173
13.3	骑行纳古菌的断裂基因和其他特征	174
13.4	有关基因和内含子起源的一种理论	175
13.5	关于 tRNA 分子起源和进化的一个模型	175
13.6	骑行纳古菌的断裂 tRNA 基因是现代 tRNA 基因进化的始祖	176
13.7	tRNA 基因多种系起源法则	177
13.8	一些骑行纳古菌蛋白质的断裂基因可能是始祖基因	178
13.9	蛋白质基因的多种系起源	178
13.10	结论和展望	179
	参考文献	179
14	遗传密码	180
	王子晖	
14.1	引言	180
14.2	密码的诞生	181
14.3	共进化理论	188
14.4	对全生命遗传密码的选择	190

14.5	遗传密码突变	192
14.6	结论	194
	参考文献	195
15	生命之根	197
	王子晖	
15.1	引言	197
15.2	转移核酸	197
15.3	蛋白质	204
15.4	代谢作用	208
15.5	细菌与真核生物的始祖	208
15.6	LUCA 基因组	211
15.7	火热之旅	213
15.8	结论	216
	参考文献	239

1 引言

王子晖

1.1 古老的话题，年轻的学科

绝大多数人类文明都考虑过生命起源的问题并试图找出答案，科学的文明更是如此，而对合理答案的探求已经经历了几个世纪。

直到 17 世纪末期，用自然产生解释非同类繁殖是无可置疑的，其典型例证就是如吸虫等寄生虫在人体内的繁殖。Rene Descartes 的机械原理巩固了这个观点，他将自然科学简化为物质和运动，认为搅动分解的物质就可以产生生命，但是 Francesco Redi 用实验证明，蛆并不会从腐败的肉中产生，而是因为苍蝇产卵。同样，Georges Cuvier 也发现自然产生是不可接受的，并宣称“生命总是由生命而来，它可以被转化，但不能被创造”。最后，当 Louis Pasteur 证明通过加热杀菌可以停止由细菌引起的腐败现象时，自然产生说就偃旗息鼓了。

当然，能够证明蠕虫和细菌在几天或几年内不是自然产生的，并不等于否认生命最初是由自然产生的可能。早期地球上的生命起源显然是另一种意义上的自然产生，它是笛卡儿哲学更合理的表达，将物质具体为原子和分子，而将运动具体为进行化学进化所必需的动能。1828 年，F. Wohler 用氰酸盐和铵盐成功合成了尿素这种人体内含有的成分，打破了无机物和有机物在概念上的屏障。20 世纪初期，Archibald Macallum 提出，生命来源于一种微粒状物质，“当我们试图解释生命起源这个问题的时候，我们不需要假设出一种高度复杂的有机体……来作为所有生命的最原始祖先，而更应该选择由少量分子组成、小到超越了最强显微镜极限的那些”，同时，它会经历无尽的分子结合过程，这样“正确的结构会赋予超显微粒子生命体的化学特性”。

这样，为了产生生命，就有了前生物进化和自然选择。之后，W. Lob 通过将湿润的甲酰胺暴露于静电或紫外线，合成了单种氨基酸，如甘氨酸；而 E. C. Baly 用紫外线作用于二氧化碳和水，合成了甲醛和糖类。1924 年，A. Oparin 明确提出了一个前生物的可能方案，其中来自无机物的有机物首先被组织到聚析液小滴（coazervate droplet）中；“一旦这些小滴与周围介质有了明确边界，它们马上就会具有一定程度的独立性……在增长速度上相互竞争”，最后“就产生了最简单的原始生命体”。JBS Haldane 坚决认为，有机物的前生物合成“必定会一直积累，直到原始海洋达到稀汤的浓度”，这就是传说中“原生汤”（primordial

soup) 的由来^{6~8}。

受 Harold Urey 提出的还原性大气在前生物合成中重要性的启发, 1953 年, 斯坦利·米勒 (Stanley Miller) 设计并进行了前生物合成实验, 用电来击穿由甲烷、氨、氢气和 water 模拟的原始大气, 这些气体触电产生了氨基酸, 他的结果震动了世界⁹。在关于自然产生说的科学辩论出现三个世纪后, 随着生物化学、分子生物学、遗传学和太空探索的发展, 前生物进化成为科学前沿。21 世纪的基础研究中, 可能只有少数的科研领域会像前生物进化和太空生物学一样获得丰硕的研究成果。

1.2 太空生物学领域

1.2.1 对水的需求

在太空生物学探索中, 对水的探求是始终不变的¹⁰。它的重要性体现在许多方面。

第一, 水有非常好的物理性质。它在冰点的异常膨胀及高比热容, 使得水很难完全结冰。而较高的介电常数则令水成为带电离子和氢键的良好溶剂¹¹。若没有离子和氢键, 通过质子梯度产能及模板介导的复制过程将不能进行。蛋白质、核酸和类似的多聚物也需要水作为溶剂, 脱水后, 活细胞会坍缩失活, 并常常立刻死亡。

第二, 大气中的二氧化碳 (CO_2) 溶解于水, 形成碳酸, 它能够将硅酸盐岩石 (主要是 CaSiO_3) 风化为碳酸钙 (CaCO_3 或白垩), 这个过程可以减少 CO_2 , 并将它以不溶的碳酸钙形式储存在海底。在 4 亿年内, 地球大气内的所有 CO_2 都将被去除。最主要的再生过程“碳硅循环”是通过板块构造运动进行的: 海底的碳酸钙沉入地幔, 在那里被加热并分解, 通过火山口将 CO_2 重新释放到大气中。若没有这种依赖于液态水的再生过程, 地球上游离 CO_2 的耗尽将导致所有依赖于 CO_2 的自养活动及大气有机物合成终止, 而后者正是异养养分的主要来源¹²。

第三, 亲水物质易溶于水, 而疏水物质如油、脂肪和石油则易与水分离, 它们的不相溶性是地球上细胞膜构建的基础。当这两类化合物搅到一起时, 它们不会混合, 而会立刻分成两个相态, 例如海上的浮油, 尽管有巨浪搅动, 但仍漂浮在水面上。这两类物质的不相溶性是细胞膜构建的首要条件。膜的主要组分磷脂为两亲化合物, 该结构的头部亲水, 尾部疏水。悬浮在水中时, 它们会自动排列成双层, 两层的尾部都在中间, 远离水, 并使两层间的疏水-疏水接触最大化。两层的亲水头部都露在外面, 被水分子包围。这些双层膜使所有细胞都具有独立性, 这对细胞水平上的自然选择是必需的。没有水就不能形成细胞膜。一些化合

物,如乙醇、二甲基甲酰胺和二甲基砷,即使具有一定的水溶性,但脂溶性太高,不能够形成稳定的膜。没有膜,就没有自然选择,那样怎么产生生命呢?这就是为什么 2008 年 NASA 的凤凰号火星登陆器在火星土壤中确定了水的存在是如此重大的突破的原因。

1.2.2 可居住区

对于任何地外区域是否适合太空生物学的探索,一个基本概念是可居住区(Habitable Zone, HZ),也称为 Goldilock Zone,它不太冷也不太热。组成地球生命体的主要化学元素为氢、碳、氮、氧(H、C、N、O)及磷、硫、铁(P、S、Fe)。H、C、N、O 在元素周期表中都具有较低的原子序数,它们可以与其他原子形成单键(H)或多键(C、N、O),从而形成生物多聚体。用更大的原子构成生物多聚体将会产生大分子,它们的可能构型在空间上受到很大限制。考虑到地球生命体所需的蛋白质、酶、核酸和核糖体构型的适当折叠,在任何行星或卫星上,这些较轻的 H、C、N、O 元素都更有可能构成生物分子的核心。但是,H、C、N、O 构成的多键分子通常不能耐受极高的温度。从另一个角度说,所有化学反应都会在低温下变慢,每降低 10°C ,反应速度会下降为原来的 $1/2\sim 1/3$,这种下降主要是因为反应物分子在低温状态下能量较低,不易跨过能垒使化学反应发生,这对宇宙中的所有行星(及其卫星)都适用。因此,温度太高或太低都是难以产生生命的。水的冰点和沸点将可居住的范围缩小到 $-5\sim 110^{\circ}\text{C}$,这亦是地球上嗜极微生物的耐受极限。

因此,基于可居住性需要行星表面具有液态水这个前提,对于主序星,其具有 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{N}_2$ 大气的主序星类地行星 HZ 的内缘由光解和氢逃逸造成的水分缺失来决定。HZ 的外缘由 CO_2 云的形成决定,通过增加反照率(对太阳/恒星能量的反射)来降低行星表面温度。太阳系中对这两个距离的保守估计分别是 $0.95\sim 1.37\text{ AU}$ (天文单位, $1\text{ AU}=1496\times 10^8\text{ km}$,为地球到太阳的平均距离)。由于太阳光度随年龄增加, HZ 也随时间扩大。对太阳系中一直都是可居住区范围的保守估计为 $0.95\sim 1.15\text{ AU}$,但其他因素也会影响 $\text{HZ}^{10,12,13}$ 。

(1) 对地球来说,一方面,如果太阳不可预料地变暗, CO_2 将浓缩成为 CO_2 云,增加反照率并降低地表温度,这将带来更多的雪和冰,使反照率更高,导致“失控冰川效应”;另一方面,若 CO_2 的极度排放增加温室效应,或太阳辐射强度不可预料地增加,那么地表温度将会升高,向大气中蒸发更多的水并减缓对空间的红外辐射,导致“失控温室效应”。

(2) 恒星影响其行星的潮汐,潮汐阻碍会减缓行星的自转。在一个潮锁半径(tidal lock radius)内,自转会与公转同步。这种情况下,行星的一面会一直对着恒星,并持续不断地加热,另一面则始终是黑暗。由于亮的那面持续加热,水

可能会被完全蒸发，即使这颗行星两面的平均温度并不极端。

(3) 重元素（如 Fe），可以进行与能量生成偶联的可逆氧化还原反应，因此，一颗行星应该需要一些重原子。

(4) 在地球年龄约为 5 亿年时，与一颗大小相当的天体碰撞产生了月球，但从那时起，只发生过与较小行星体的碰撞。要在足够长的时间内都具有可居住性，一颗行星需要处在不会发生频繁大碰撞的星河区域中。

(5) 由于碳硅循环不仅依赖于水，也依赖于板块运动，所以一定的板块构造运动也是必需的，但过度的板块运动也会破坏生命的稳定。

(6) 行星或卫星如果太小，如月球，将没有足够强的引力去维持水或大气；行星表面积如果太大，如木星，就会被广阔的液氢海洋所覆盖。

(7) 主序星的寿命随质量下降。对超过太阳质量 2.2 倍的恒星，其中心氢燃烧的持续时间不会超过 8 亿年，根据地球的经验，这段时间可能足以产生生命，但不能产生智能生命。

根据可居住区的这些必要条件，宇宙中生命的出现应该不会很普遍。但是，对地外生命的探索是如此独特，太空生物学正更加努力，将目标集中于第 3~5 章中提到的太阳系内一些最有可能的位置。最后，随着越来越多的太阳系外行星被发现，它们有很多都落在其主星的 HZ 内，这也增加了发现地外生命的可能性。

1.2.3 泛种论

早期地球是前生物进化起始的合适位置，但并不一定是唯一位置。19 世纪，H. E. Richter 提出了石泛种论，认为陨石将生殖细胞从空间带到地球。20 世纪早期，Svante Arrhenius 提出了辐射泛种论，认为微生物可能被行星喷射出来，在星际中散播。通过恒星的辐射压力，它们可能到达地球，带来了生命的种子。P. Becquerel 研究了高度真空和极低温度下孢子和细菌与紫外线的作用，得出的结论是微生物会在到达地球的途中被毁灭。

近年来，在太空实验室和人造卫星（LDEF、EURECA、FOTON）上进行的实验证实，太阳紫外线是对无遮蔽的孢子最致命的因素，但如果能在岩石内部受到保护，孢子就能在太阳紫外线和大量宇宙射线中存活^{7,14}，虽然受岩石保护可能也意味着会难以从岩石中脱离出来。

由于胚种论似乎不那么可信，科学探索仍应集中在地球的前生物进化上。而且，任何可能是胚种源起的行星都一定和早期地球一样，具有适合于它产生然后送出生命的条件。因此，“那里”的条件不会与早期地球大相径庭，而对早期地球前生物进化研究得到的成果应该也对“那里”的前生物进化适用。

1.3 到细胞的途径

1.3.1 一些基本问题

在描述活细胞产生的基本轮廓之前,前生物进化研究需要设法解决几个基本问题。有些问题在本书的其他章节讨论,本章将关注以下问题。

- (1) 是否在生命刚刚开始的时候催化作用就是必需的?
- (2) 前生物进化需要什么样的能量?
- (3) 膜、复制和新陈代谢,哪个是最先出现的?
- (4) 异养和自养,哪个最先出现?

1.3.2 催化作用

生命行使功能需要水环境和适宜的温度,但这些通常不是有机合成的理想条件,因此,绝大多数生化反应在细胞中需被酶催化,或在较早的时候被核酶及其类似物催化。但是,一个悬而未决的问题是,若没有催化作用,前生物进化能否开始。据估计,一个 RNA 基因组的非催化复制时间约为 4×10^8 年,为核酶催化的 10^{10} 倍。因此,在地球早期的 10^9 年内只能进行 2~3 次非催化复制,以这样的速率是不能进行有意义的生物进化的。而且,只有在 RNA 基因组实际寿命大于其复制时间的条件下,才有可能进行扩增,有关的稳定性定律为¹⁵:

$$kLT < 1$$

式中, k 为 RNA 中磷酸二酯键水解的速率常数; L 为基因组中磷酸二酯键的数量; T 为复制时间。对于一个具有 3 个 50 碱基 RNA 基因的早期核糖有机物而言, L 为 147, 而 pH 为 7 时, k 为 $1.5 \times 10^{-9}/\text{min}$, 这样 T 必须小于 8.6 年。因此,除非在 8.6 年内完成复制,不然核糖有机物随时可能消失。要这么快完成复制,必须一开始就有催化作用。无论在太阳系内或太阳系外,稳定性定律带来的限制对 RNA 基因组外的其他基因组也同样适用。

1.3.3 能量

化学反应的平衡位置由反应的动力学决定:

$$\Delta G^{\circ'} = -RT \ln K$$

式中, $\Delta G^{\circ'}$ 为 pH 7 时的标准自由能; R 为气体常数; T 为温度; K 为平衡常数。若 $\Delta G^{\circ'}$ 为负值, 反应放能, 平衡位置偏向于反应物生成产物的方向。若 $\Delta G^{\circ'}$ 为正值, 反应吸能, 平衡位置不偏向产物的生成, 而是偏向于逆向反应。任何前生物或生物生化系统都依赖于多种吸能反应 (及逆浓度梯度运输)。一种有效进行吸能反应的方法是将它与放能反应偶联, 这样偶联后的反应就具有一个