



航天科技图书出版基金资助出版

宇宙生物学

ASTROBIOLOGY

[德] 格尔达·霍内克 (Gerda Horneck) [中] 庄逢源 编著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

宇宙生物学 ASTROBIOLOGY

[德]格尔达·霍内克(Gerda Horneck) [中]庄逢源 编著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

宇宙生物学/(德)霍内克,庄逢源编著. —北京:中国宇航出版社,2010.5

ISBN 978-7-80218-721-4

I. ①宇… II. ①霍… ②庄… III. ①航天生物学
IV. ①Q693

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 063555 号

责任编辑 曹晓勇 责任校对 陈琳 封面设计 宇航数码

出版 中国宇航出版社
发行
社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)68768548
网 址 www.caphbook.com / www.caphbook.com.cn
经 销 新华书店
发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)
零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336
承 印 北京国中印印刷有限公司
版 次 2010 年 5 月第 1 版 2010 年 5 月第 1 次印刷
规 格 880×1230 开 本 1/32
印 张 7 彩插 16 面 字 数 209 千字
书 号 ISBN 978-7-80218-721-4
定 价 50.00 元

本书如有印装质量问题,可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登陆中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205，68768904

作者简介



格尔达·霍内克 (Gerda Horneck)，国际宇航科学院院士，前德国航天医学研究所常务副所长，前辐射生物学部主任，现任欧洲宇宙生物学联盟主席。长期从事辐射生物学和宇宙生物学研究工作，长期担任与空间科学相关的德国及国际组织的顾问。曾获得欧洲空间局 (ESA)、美国航空航天局 (NASA) 和德国航天局 (DLR) 的多个奖项及国际宇宙生物学会和国际宇航科学院的多次奖励。



庄逢源，国际宇航科学院院士，北京航空航天大学生物工程系首任系主任。主要研究方向为生物力学与空间生命科学。现任国际宇航科学院理事，国际宇航科学院出版与交流常设委员会副主席，国际宇航科学院中国地区秘书。任中国空间科学学会常务理事，空间生命专业委员会副主任，空间生命起源与进化专业委员会副主任，享受政府特殊津贴。2009 年获国际宇航科学院生命科学奖。

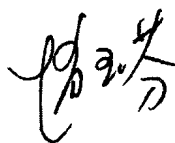
序

随着载人航天事业的飞速发展，空间生命科学的研究受到越来越多的关注，其重要性也日益显现出来。空间科学的进步在带给我们更多挑战的同时，也为空间生命科学研究带来许多机遇。

宇宙生物学（Astrobiology）主要致力于在整个宇宙大环境中探求生命的起源、生命起源前的化学进化、地外环境对生命体的影响以及如何有效保护太空环境。宇宙生物学是一门新兴学科，它的发展得益于航天事业的飞速进步。特别是近年来我国载人航天工程和月球探测工程的进展，大大促进了空间生命科学和宇宙生物学在我国的发展。2008年，我国建立了隶属于中国空间科学学会的空间生命起源与进化专业委员会，以进一步促进宇宙生物学的发展。

本书的第一作者格尔达·霍内克博士是德国航天医学研究所资深研究员，国际宇航科学院院士，曾任国际宇航科学院空间生命学术委员会主席，从事宇宙生物学研究30余年，是国际知名的宇宙生物学家。2005年6月19日~24日由国际生命起源学会（International Society on Study of Origin of Life）主办的第十四届生命起源国际大会（The 14th International Conference on the Origin of Life）在北京清华大学举行，时任国际生命起源学会理事的格尔达·霍内克博士参加了大会的工作，与中国学者开展了很好的交流和合作。本书另一位作者庄逢源教授是国际宇航科学院院士，北京航空航天大学生物工程系首任系主任。霍内克博士从2005年起曾3次到北京航空航天大学进行学术交流活动，并在2008年应我的邀请到郑州大

学，为相关领域的研究者及青年学生讲述宇宙生物学。此书正是基于上述交流活动，由霍内克博士与庄逢源教授共同著述出版的。希望此书的出版能对从事空间生命科学研究的专业人员提供一些线索与帮助，同时希望对空间探索有浓厚兴趣的青年学生能够从此书中获得启迪。



中国科学院院士

空间生命起源与进化专业委员会主任

2010年3月于厦门

前 言

本书的编写初衷是作为对宇宙生物学感兴趣的、在不同学科领域中工作的科研人员和学生们的教科书和参考书。2007年5~6月和2008年5~6月,我两次应庄逢源教授的邀请,在北京航空航天大学生物与医学工程学院讲授“宇宙生物学”专题课程,本书就是在这两次授课的基础上整理完成的。我十分感谢北京航空航天大学师生的热情与友好,也非常钦佩听课学生的勤奋与机敏。本书的初稿由我和庄逢源教授共同用英文编著,庄教授同时负责将书稿翻译成中文。

宇宙生物学是一门新兴学科,它涉及到从空间物理到分子生物学的多种不同学科内容。宇宙生物学的研究范围很宽,包括:

- 1) 在星际介质中,以及在太阳系中的行星和小天体上研究生命前体的化学进化;
- 2) 追溯地球上生命的历史,直至可能的共同祖先;
- 3) 从历史变迁、特别是可居住性的角度来研究太阳系中的行星及其卫星的环境;
- 4) 在银河系中寻找其他具有可居住性的行星系统。

因此,宇宙生物学可以为我们了解在地球上的生命起源进化与分布状态、生命与环境的相互作用,乃至将这些内容推广到宇宙空间而提供支撑。

2005年6月,赵玉芬院士在清华大学主持召开了第十四届生命起源国际大会,也正是那时我第一次和对生命起源及宇宙生物学感

兴趣的中国学者有所接触。五年来，我们的学术交流不断加强，其中一个重要标志就是中国空间科学学会空间生命起源与进化专业委员会和欧洲宇宙生物学联盟进行了广泛联络和密切合作，正是庄逢源教授负责这两个组织间的联络协调。我也期待能在更广泛的多学科融合和国际合作基础上进一步加强在宇宙生物学方面的研究。

格尔达·霍内克

欧洲宇宙生物学联盟主席

2010年3月于德国

Foreword

This book is intended as a textbook in astrobiology for students and teachers from various fields of science that are interested in astrobiology. It is based on a series of lectures (May — June 2007, and May — June 2008) I have given at the School of Biological Science and Medical Engineering at the Beihang University in Beijing, following the kind invitation by Professor Fengyuan Zhuang. I have enjoyed the warm hospitality of the people at the university and have admired the brightness and the readiness of mind of the students. This book has been prepared together with Professor Fengyuan Zhuang, who also took care of the Chinese translation of the text.

Astrobiology is a newly emerging field of science that involves many different disciplines, from astrophysics to molecular biology. The scope of astrobiology is wide. It comprises

(i) the study of the overall pattern of chemical evolution of potential precursors of life, in the interstellar medium, and on the planets and small bodies of our solar system;

(ii) tracing the history of life on Earth back to its roots;

(iii) deciphering the environments of the planets in our solar system and of their satellites, throughout their history, with regard to their habitability; and

(iv) searching for other planetary systems in our Galaxy.

Hereby, astrobiology provides clues to the understanding of the origin, evolution and distribution of life and its interaction with the environment on Earth and possibly elsewhere in the universe.

My first contacts to Chinese scientists interested in the field of the origins of life and astrobiology started in June 2005 during the 14th International Conference on the Origin of Life, which was organized by Professor Yufen Zhao and took place at the Tsinghua University in Beijing. Now, nearly five years later, the scientific contacts have intensified. One of the results is the association of the Commission of Astrobiology, Space Life Origin and Evolution of the Chinese Society of Space Research to the European Astrobiology Network Association (EANA) with Prof. Fengyuan Zhuang being the liaison officer for the commission to EANA. I am looking forward to continuing and amending these astrobiology contacts on a wide multidisciplinary and international foundation.

Gerda Horneck

President of EANA

Mar. 2010, Germany

目 录

第 1 章 生命的历程	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 宇宙生物学导论	(1)
1.3 生命形式的共同特点	(2)
1.4 在宇宙进化的框架下生命发展的历程	(14)
1.4.1 元素在宇宙中和生命体中的分布	(15)
1.4.2 生命元素的形成	(17)
1.4.3 生物分子的形成	(22)
1.5 小结	(30)
参考文献	(31)
第 2 章 地球上的生命历史	(32)
2.1 概述	(32)
2.2 地球的最初 10 亿年	(32)
2.3 前生物有机分子的来源	(33)
2.3.1 前生物有机分子的外源性来源	(33)
2.3.2 前生物有机分子的内源性来源	(37)
2.3.3 重要生物分子的非生物合成	(41)
2.4 地球上的生命起源	(43)
2.5 地球上生命历史的记录	(44)
2.5.1 生命历史的化石记录	(44)
2.5.2 生命历史的分子生物学记录	(48)
2.6 生命的物理化学极限	(50)
2.6.1 生命生长和新陈代谢的极限	(50)
2.6.2 生命存活的极限	(53)
参考文献	(56)

第3章 辐射与生命	(58)
3.1 概述	(58)
3.2 空间和行星上的辐射场	(58)
3.2.1 太阳宇宙辐射	(59)
3.2.2 银河宇宙辐射	(61)
3.2.3 俘获带辐射	(61)
3.2.4 地球表面的辐射	(64)
3.2.5 火星表面的辐射	(64)
3.2.6 木卫二表面的辐射	(66)
3.3 基础辐射生物学损伤机理	(66)
3.3.1 直接辐射损伤效应	(67)
3.3.2 间接辐射损伤效应	(68)
3.3.3 剂量学考量	(71)
3.3.4 DNA 的修复途径	(73)
3.4 空间辐射实验	(74)
3.4.1 空间辐射剂量	(74)
3.4.2 银河宇宙辐射 HZE 粒子的生物学效应	(76)
参考文献	(82)
 第4章 寻找生命：内太阳系的探索	(84)
4.1 概述	(84)
4.2 内太阳系	(84)
4.3 可居住性	(85)
4.3.1 可居住性的基本条件	(87)
4.3.2 太阳系中的可居住区	(90)
4.4 太阳系可居住区中的类地行星	(91)
4.4.1 金星	(91)
4.4.2 地球	(94)
4.4.3 火星	(94)
参考文献	(110)
 第5章 在外太阳系和更遥远处探索生命	(112)
5.1 概述	(112)

5.2	外太阳系	(112)
5.3	环绕木星的可居住带	(114)
5.3.1	伽利略卫星	(114)
5.3.2	木卫二	(116)
5.4	土星系统的宇宙生物学	(120)
5.4.1	土卫六	(121)
5.4.2	土卫二	(128)
5.5	太阳系外的可居住区	(131)
5.6	小结	(138)
	参考文献	(139)
第 6 章	太阳系内和太阳系外生命的自然传输	(141)
6.1	概述	(141)
6.2	有生原说	(141)
6.2.1	最早的有生原说假说	(141)
6.2.2	辐射有生原说的实验验证	(142)
6.3	陨石有生原说	(145)
6.3.1	火星陨石的发现	(145)
6.3.2	陨石物质对太阳紫外辐射的防护作用	(147)
6.3.3	陨石有生原说的不同阶段	(149)
6.4	陨石有生原说不同阶段的实验验证	(151)
6.4.1	逃逸过程	(151)
6.4.2	漫游过程	(153)
6.4.3	在行星上着陆	(159)
6.5	有生原说的结论	(161)
	参考文献	(162)
第 7 章	宇宙探索过程中的行星保护	(164)
7.1	概述	(164)
7.2	行星保护的历史和基本概念	(164)
7.2.1	去向污染的防止	(164)
7.2.2	返回污染的防止	(164)
7.2.3	联合国公约	(165)

7.3 行星保护指导方针	(166)
7.3.1 第一类任务和目标天体	(168)
7.3.2 第二类任务和目标天体	(168)
7.3.3 第三类任务和目标天体	(171)
7.3.4 第四类任务和目标天体	(171)
7.3.5 第五类任务和目标天体	(177)
7.4 行星保护指导方针	(179)
7.4.1 生物载荷测量	(179)
7.4.2 减少生物载荷	(184)
7.5 载人行星任务的保护	(184)
参考文献	(185)
第8章 人类对宇宙的探索和宇宙生物学	(186)
8.1 概述	(186)
8.2 人类的探索历程	(186)
8.2.1 地球上的探索	(186)
8.2.2 对空间的探索	(188)
8.3 载人航天飞行对宇宙生物学的促进	(191)
8.3.1 空间探索的驱动者	(191)
8.3.2 载人空间探索对于发展宇宙生物学的有利因素	(191)
8.3.3 载人空间探索对于发展宇宙生物学的不利因素	(192)
8.4 载人航天面对的环境应激	(192)
8.4.1 微重力和人体健康	(193)
8.4.2 宇宙辐射和人体健康	(197)
8.4.3 载人火星探索涉及航天员健康的关键问题	(201)
8.5 载人航天深空探测生命保障系统	(201)
8.6 人类空间探索路线图	(205)
参考文献	(207)
后记	(209)

第 1 章 生命的历程

1.1 概述

宇宙生物学的研究领域包括在宇宙进化的框架下了解导致生命起源、进化及分布的过程，对空间生命及空间的可居住性进行探索，并以地球上的生命——迄今为止我们所知道的唯一生命形式——为例研究讨论我们生物圈内的所有生命的共同特点。

我们还将讨论以下问题：生物的生成元素位于何处及怎样形成，即形成生命所需要的元素，如碳、氢、氧、氮、硫和磷，以及其他原子量更大的元素是怎样形成的。所有生物的生成元素是在恒星中通过核合成（nucleosynthesis），以及在恒星的超新星爆发过程中形成的。氰化氢、蚁酸、甲醛和氨等化学分子，以及核酸、氨基酸、糖和脂类等更为复杂的主要生物分子前体，是在星际物质、前太阳星云以及太阳系中的一些行星和卫星的大气中形成的。

1.2 宇宙生物学导论

宇宙生物学（Astrobiology）由两个词所组成：宇宙（astro）和生物学（biology）。宇宙是指行星、恒星、银河系乃至整个宇宙，生物学指包括整个生物圈在内的生命研究。宇宙生物学这一名词将这两个原来看起来完全不同领域的词汇结合起来，宇宙的研究范围主要包括天文学、空间物理学、空间化学和行星学，生物学的研究范围则主要包括生命科学、生物化学和古生物学。宇宙生物学是一门将这两个领域成功地结合起来研究生命的起源与进化的新兴学科。

假如我们考虑宇宙中哪些地方可能存在生命，那么首先要注意的是在我们的银河系中共有 2 000 亿颗恒星，而在整个宇宙中有

1 000亿个银河系，每一个银河系都有几十亿颗恒星。这意味着在宇宙中可能有 10^{20} 个地方为生命的形成提供了条件，但并不意味着这些地方一定有生命存在。因为形成生命对行星有很多要求，它必须具备合适的化学和物理条件，迄今为止我们只知道地球上存在生命。

从宇宙生物学的角度，下列环节在引发生命起源和进化的过程中值得关注：

- 生物生成元素的宇宙化学；
- 有机分子生物前期的化学进化；
- 生命的起源；
- 生命早期形式的进化；
- 高等生物的进化；
- 生命在宇宙中的分布。

因此，宇宙生物学的研究范围不仅局限于地球上的生命起源、进化与分布，更强调在宇宙进化的框架中研究这些问题。在本章下面的内容中，我们将讨论生命起源的最初两个阶段——生物生成元素的宇宙化学和有机分子生物前期的化学进化。普适的生命概念只能在多学科的交叉过程中进行定义。1960年，诺贝尔奖获得者乔舒亚·莱德伯格（Joshua Lederberg）对空间探索曾进行过如下表述：

- 空间探索将扩大我们对物理世界的了解——质量和能量的概念在整个宇宙中间是有效的；

- 空间探索过程中验证了化学概念的普适性——行星的光谱学确认了化学概念在整个宇宙中间的普适性；

- 空间探索大大促进了生物学的发展——空间探索为构建生物学公理，支持生命理论提供坚实的基础。

首先以我们生物圈中间的生命为例，寻找所有生命形式的共同点。

1.3 生命形式的共同特点

我们的生物圈是一个含有大量多样性的不同基因型和表型的生