

Committee on Grand Research Questions in the Solid-Earth Sciences, National Research Council

美国国家研究委员会固体地球科学重大研究问题委员会

ORIGIN AND EVOLUTION OF EARTH

RESEARCH QUESTIONS FOR A CHANGING PLANET

张志强 郑军卫 王天送 等 译

地球的 起源和演化

变化行星的研究问题



科学出版社

www.sciencep.com

地球的起源和演化

变化行星的研究问题

美国国家科学院国家研究委员会
地球科学与资源委员会
地球与生命科学部
固体地球科学重大研究问题委员会

张志强 郑军卫 王天送 等 译

科学出版社

北 京

图字：01-2009-4626

内 容 简 介

美国国家研究委员会（NRC）固体地球科学重大研究问题委员会，在广泛研究和征求专家意见的基础上，归纳总结出 21 世纪固体地球科学研究的十大科学问题，并将其归结为四大类主题进行阐述：“起源”——地球与太阳系其他行星的起源，地球的早期历史，生命起源；“内部地球”——地球内部的运行与地表的现状，包括地球的物质特性及其对地球过程的基础作用；“宜居星球”——气候与气候变化，地球-生命相互作用；“灾害与资源”——地震、火山，以及与地球内、地球上的水和其他流体相关的现代环境问题。

本书对科学问题的论述深入浅出，适合地球科学领域的科研、教育和管理工作者以及研究生阅读。

This is a translation of *Origin and Evolution of Earth: Research Questions for A Changing Planet* by Committee on Grand Research Questions in the Solid-Earth Sciences, National Research Council © 2008. First published in English by the National Academies Press. All rights reserved. This edition published under agreement with the National Academy of Sciences.

图书在版编目（CIP）数据

地球的起源和演化：变化行星的研究问题/美国国家研究委员会固体地球科学重大研究问题委员会；张志强，郑军卫，王天送等译．—北京：科学出版社，2010

ISBN 978-7-03-028818-9

I. ①地… II. ①美…②张…③郑…④王… III. ①地球起源假说②地球演化
IV. ①P311

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 168322 号

责任编辑：罗 吉 沈晓晶/责任校对：邹慧卿

责任印制：钱玉芬/封面设计：王 浩

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>

北京天时彩色印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 9 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2010 年 9 月第一次印刷 印张：11 3/4

印数：1—3 000 字数：286 000

定价：49.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

译者序

地球科学是一门人类认识行星地球和利用所获得的行星地球知识为人类服务的最重要的历史悠久的基础性自然学科。随着地球科学自身的不断发展和完善,以及人类社会对地球科学的需求越来越迫切,地球科学与其他学科之间以及地球科学各分支学科之间的交叉融合研究越来越普遍,地球科学研究正朝着系统化、组织化、规模化、技术化、平台化方向发展。开展地球科学的发展战略研究,促进地球科学在人类认识自然和社会发展中发挥更大的作用,已成为国际地学界促进地球科学发展的重要途径。国际科学理事会(International Council for Science, ICSU)、美国国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)、美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、英国自然环境研究委员会(Natural Environment Research Council, NERC)、德国研究基金会(Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG)等有关组织或机构均以超前的理念、超前的规划、超前的部署积极开展地球科学发展战略研究,规划地球科学的未来,推动地球科学学科的发展。

应美国能源部(Department of Energy, DOE)、美国国家科学基金会、美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)和美国国家航空航天局等的共同要求,美国国家研究委员会(National Research Council, NRC)成立了一个专门委员会——固体地球科学重大研究问题委员会(Committee on Grand Research Questions in the Solid-Earth Sciences),来独立地提出和探讨当今需要研究的地球科学重大问题。该委员会历尽数年时间从地球科学研究的需求和问题出发,经过广泛征求科学署的意见和多次研讨以及专家咨询,最终遴选确定出地质学和行星科学(也称为“固体地球科学”)的10个重大科学研究问题,并根据问题所研究的主题划分为“起源”、“内部地球”、“宜居星球”、“灾害与资源”4个方面,完成《地球的起源和演化:变化行星的研究问题》(*Origin and Evolution of Earth: Research Questions for a Changing Planet*)研究报告。这些问题基本反映了地球科学在21世纪面临的重要科学挑战,是地球和行星科学研究方面所面临的前沿性重大基础科学问题,对我国开展地球科学研究具有重要的指导和借鉴意义。

本书的翻译是在国家自然科学基金项目(编号:40841015)的资助下,由中国科学院资源环境科学信息中心(中国科学院国家科学图书馆兰州分馆)张志强研究员、郑军卫副研究员负责,由张志强、郑军卫、王天送、韩健、孙德强、杨春、张春雷、位云生、王大成等多位同志一起完成的,最后由张志强、郑军卫负责统稿和审校。在本书的翻译过程中,我们坚持与原文一致,在不影响理解的情况下普遍采用直译的方式,希望

尽可能多地向我国研究人员转述原作者的思想。但限于译者水平有限，书中难免有疏漏和错误，敬请读者指正。

美国国家研究委员会固体地球科学重大研究问题委员会主席 Donald J. DePaolo 先生，专门为本书中文版撰写了序，向中国读者介绍本书的内容。

谨对上述在本书的翻译、校对、出版过程中做出贡献的各位先生和女士表示衷心感谢。



2009 年 10 月 28 日

前 言

过去四十多年，地球科学家在了解我们的行星运行与历史方面迈出了巨大的步伐。与以前大不相同，我们了解了板块构造如何塑造我们的行星表面，生命如何可以维持数十亿年，以及地质、生物、大气和海洋过程如何相互作用产生气候和气候变化。然而，从最基本的层面而言，这些进展主要用于揭示有关地球的更加基础的问题。不断扩展的知识正在产生新的问题，但是革新的技术以及与其他科学建立的新伙伴关系为问题的解决提供了新的途径。

应美国能源部、美国国家科学基金会、美国地质调查局和美国国家航空航天局等的共同要求，成立了固体地球科学重大研究问题委员会，以适应地球和其他行星科学研究固有的对智力的巨大挑战。虽然许多报告都提出了地球科学的优先研究领域，但是很少有将它们归结为引人注意的、基础性的科学问题。如此“巨大图景”的问题可能需要众多机构和组织花费数十年来回答和研究支撑。对这些问题的回答将深深影响我们对我们所赖以生存的行星的认识。

委员会通过提出“稻草人”问题并将其发布在 *Eos, Transactions of the American Geophysical Union* (Linn, 2006)，国家科学院网站以及美国地质研究所和女地球物理学家协会的电子快报上供专家进行评论。写好的材料同样也是从同行那里收集而来的。委员会召开了四次会议收集材料、讨论公众反馈和撰写本报告。

不可能期望一个小的委员会可以涵盖本报告所讨论的广泛主题领域所需的所有专业知识。因此，委员会向同行业研究人员征求意见。其中一些详细的评论是来自 Greg Beroza、Katharine Cashman 和 Kevin Zahnle 提供的短文。另外一些同行业研究人员投入了许多时间帮助委员会筛选各种观点，包括 Alan Anderson、Richard Bambach、Katherine Freeman、James Kasting、Barbara Romanowicz、Sean Solomon 和 Mary Lou Zoback。委员会同样感谢其他许多个人，他们就这些问题提供了材料或进行了反馈：Richard Allen、Paul Barton、Steven Benner、David Bercovici、Robert Berner、Robert Blair Jr.、Gudmundur Bodvarsson、Alan Boss、Gabriel Bowen、Susan Brantley、Douglas Burbank、Frank Burke、Kenneth Caldeira、Richard Carlson、John Chambers、Frederick Colwell、Kevin Crowley、Gedeon Dagan、Andrew Davis、William Dickinson、William Dietrich、David Diodato、Bruce Doe、Robert Dott Jr.、Benjamin Edwards、Peter Eichhubl、Michael Ellis、W. Gary Ernst、Douglas Erwin、Rodney Ewing、Fredrick Frey、Arthur Goldstein、Linda Gundersen、David Halpern、Wayne Hamilton、T. Mark Harrison、John Hayes、James Head、Michael Hochella Jr.、Vance Holliday、Richard Iverson、A. Hope Jahren、Raymond Jeanloz、Gerald Joyce、Joseph Kirschvink、John LaBrecque、Thorne Lay、Antonio Lazcano、Cin-Ty Lee、

William Leeman、Jonathan Lunine、Ernest Majer、Michael Manga、Anthony Mannucci、William McDonough、Dan McKenzie、Marcia McNutt、H. Jay Melosh、Peter Molnar、Isabel Montanez、Alexandra Navrotsky、Shlomo Neuman、Gary Olhoeft、Carolyn Olson、Peter Olson、Minoru Ozima、Nazario Pavoni、Donald Porcelli、Jonathan Price、Steven Pride、George Redden、Paul Renne、Robin Reichlin、Mark Richards、Daniel Schrag、Norman Sleep、D. Kip Solomon、Gerilyn Soreghan、Frank Spear、Gary Sposito、Steven Stanley、Ross Stein、Robert Stern、David Stevenson、Lynn Sykes、Jack Szostak、Thomas Tharp、Leon Thomsen、Oliver Tschauner、Terry Tullis、Greg Valentine、Richard Von Herzen、Joseph Wang、James Whitcomb、Raymond Willemann、M. Gordon Wolman、Nicholas Woodward、Eva Zanzerkia、Xiaobing Zhou 和 Herman Zimmerman。

委员会主席：Donald J. DePaolo

目 录

中文版序

Preface for Chinese Edition

译者序

前言

致谢

摘要

第一篇 起 源

问题 1：地球和其他行星是如何形成的？	3
行星怎样在恒星周围形成？	3
太阳系行星如何形成？	6
陨石就地球的起源显示了些什么？	8
地球的化学组成是什么？	11
月球是经大撞击形成的吗？	14
小结	16
问题 2：地球“黑暗时期”（地球诞生后的最初 5 亿年）究竟发生了什么？	17
地球向目前环境的转变如何发生？	17
地球如何形成海洋和大气？	19
地球金属核何时和如何形成？	20
最早的地壳如何形成和由什么形成？	22
小结	27
问题 3：生命是如何起源的？	29
自上而下与自下而上的方法	29
实验室线索	30
生命如何出现？	31
生命何时出现？	32
生命起源不止一次？	33
什么是生命，而什么又不是生命？	34
是否存在地外生命？	35
小结	36

第二篇 内部地球

问题 4：地球内部如何运动及其如何影响地表？	39
对流和热流	39
地幔对流和地球热演化之间有何关系？	41
关于地幔对流和热传递，地幔柱告诉了我们什么？	43
地幔是整体对流还是分层流动？	44
地球的内核何时形成？	48
地球磁场随时间如何演化？	49
地幔对流的化学结果是什么？	51
小结	54
问题 5：地球为何拥有板块构造和大陆？	55
何为板块构造？	55
为何存在板块构造？	58
板块构造何时开始？	59
什么造成了新板块边界的形成？	59
大陆如何形成？	60
下伏地幔如何影响大陆形成？	61
大陆在漫长的历史中是如何演化的？	62
气候、构造和剥蚀是如何造就地貌景观的？	63
小结	65
问题 6：物质特征如何控制地球演化过程？	67
行星内部由什么矿物构成？	67
固体地球内有多少水？	72
矿物和流体如何反应？	72
能够预测大范围、多尺度和极端缓慢的地质过程吗？	75
小结	77

第三篇 宜居星球

问题 7：什么原因引起气候变化，气候变化幅度能有多大？	81
什么过程控制了气候变化？	81
气候因何保持在宜人的范围之内？	84
是什么造成了地质年代中异常温暖和异常寒冷时期？	86
是什么触发了气候突变？	90
可以确定地球过去的 CO ₂ 历史吗？	91
小结	94
问题 8：生命如何改变地球，地球又如何塑造生命？	96
生命是如何影响地质过程的？	96

生命在这个可居住的地表环境寄养了多长时间?	99
生物体如何影响大气和海洋中的充氧作用?	99
生命和地球之间的其他互相作用.....	103
是什么造成生物大灭绝?	104
什么主宰着生物多样性的历史?	105
小结.....	106

第四篇 灾害与资源

问题 9: 能够预测地震、火山喷发及其后果吗?	109
地震灾害.....	109
地震预测: 何地、何时与多大?	109
预测地震何地发生.....	110
预测地震何时发生?	112
长期预测.....	112
短期预测可能吗?	114
复杂性.....	115
地震前能够发出多少预警?	116
强地面运动预测.....	116
慢地震的作用是什么?	118
海啸.....	118
火山灾害.....	120
是什么控制了火山喷发的大小、频率和方式?	121
火山喷发的哪些方面可以预测?	124
小结.....	125
问题 10: 流体流动和搬运如何影响人类环境?	127
流体在地质介质中如何流动?	127
流体-岩石化学和生物学相互作用如何影响流体的流动?	128
热反应和机械反应如何影响流体的流动?	130
地下流体的行为可以预测吗?	132
多时间和多长度尺度对流体-岩石体系的影响是什么?	133
地球过程中水的作用可以预测吗?	135
可以通过管理地形来维持人口和生态系统吗?	136
小结.....	138
参考文献.....	140
附录 A 委员会成员简介.....	156
附录 B 缩写词和缩略语.....	159

第一篇 起源

现代地球研究根本起因于人类认识地球起源的欲望。尽管一度认定只有在地球上才存在智慧生命，然而我们现在得出的判断是，即使地球可能不是唯一的，高级生命在星球的存在也不可能很普遍。目前太阳系的其他行星对存在于地球的复杂生命形式而言都不适合，但我们还需判断具有颇像地球的行星的其他恒星系统。虽然我们的星系很可能存在其他生命，但是这种推论还没有被证实。

考虑到类地生命十分稀少，自然而然就想弄明白是什么使得地球适合于生命存在和生命是怎样出现的。对这些问题的追索，将我们引向关于恒星和行星如何形成和演化的根本问题，以及关于现代地球从最里面的地核到大气、海洋和陆地表面如何运行的问题。这一篇提出3个与起源明确相关的问题——一个是关于地球和其他行星的起源，一个是关于生命的起源，在这两个问题之间插入了第三个问题，讨论地球最早期的历史：从太阳系起源时到地球上保存的最古老岩石记录期间的5亿~7亿年。在地球的早期阶段，虽然仍然缺乏认识，但一定发生了巨大的变化，伴随着无数次灾难性事件，最终共同产生了生命可以发展并最终繁茂的环境。

问题 1：地球和其他行星是如何形成的？

有关地球形成的最具挑战性和最相关问题之一是，为何我们的星球是太阳系中唯一具有丰富的液态水存在于表面和具有丰富的可以形成有机质形式的碳存在的行星。这一问题是一组更加宽泛的问题的一部分：为什么太阳系内行星是岩石的而外行星却是气态的；外行星的增大和轨道演化如何影响内太阳系；所有最大的行星为何彼此之间如此不同；我们的太阳系在银河系中有多大的代表性。尽管这些问题已经存在很久了，但是现在才从天文学、同位素化学、太阳系探索和先进计算模拟提供的新见解中浮现出答案。而且，虽然总的来说我们知道如何形成一颗像地球一样的星球——从某些星云开始并使得重力、辐射和热力学都起到各自的作用，然而我们的答案通常仅能精炼我们的问题。例如，地球化学组成的细节（如地球含有多少可生热的元素铀、钍和钾，含有多少氧和碳以及形成其特殊的稀有气体和其他微量组分份额的原因）对建立地球地质过程模型，以及最终了解地球为何在其绝大部分历史中适合生命生存非常重要。

行星怎样在恒星周围形成？

我们不知道太阳系如何独特或不寻常，但是，对其他星系的观察为行星如何形成与演化提供了新的观念。对恒星形成区域和年轻恒星的观察，与恒星形成的水动力学模型一道，支持了这样的结论，即恒星——包括太阳——是由一个分子云核的引力坍缩所形成的，云核的组成物质是在早先许多代恒星中形成并经多次改造。因为坍缩时典型的分子云正处在旋转之中，所以发展中的恒星就被旋转着的盘状气体和尘埃所包围。例如，通过望远镜所看到的，年轻恒星周围的大多数拱星盘大约 99% 是气体，1% 是尘埃；然而就是这么小份额的尘埃使得拱星盘在可见光范围不透明（图 1.1 和图 1.2）。相信像我们星系中的木星和土星这类巨型气体行星，就是在这样的拱星盘中形成的，但是还无法做到对行星的形成进行直接的天文观测。

对质量与太阳相似的临近恒星的周围行星的观察表明，行星形成是恒星形成的常见结果，但是还没有观察到带有看起来完全像太阳系的行星系的恒星。通过数种间接技术（如主星的径向速度、星体经纬仪和微透镜）已经发现了逾 200 颗太阳系外行星（Butler et al., 2006; www.exoplanets.org），已知大概有 24 颗恒星有多颗行星绕行。根据它们的质量和密度，认为这些行星绝大多数是气态巨星。据推测，观察到的大多是气态巨星是因为它们大，而探测到大的行星要容易得多，这就留下了在遥远的星系中还有多少颗从地球上无法发现的类地行星这一悬而未决的问题。质量为地球数倍到十倍的数颗“超级地球”可能是类地行星，但是还没有得到对这些天体半径或者密度的测量结果来

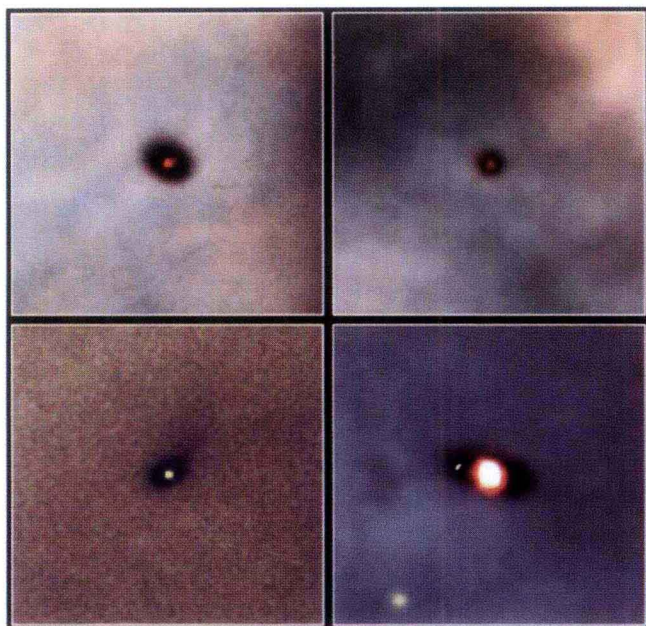


图 1.1 距太阳 1500 光年的猎户座星云中年轻恒星周围 4 个原行星盘的哈勃太空望远镜影像。每个盘中心的红光是一颗新形成大约 1Ma 的恒星。恒星的质量是太阳的 0.3~1.5 倍。每个影像区域的直径是 $2.6 \times 10^{11} \text{ km}$ (400ua)，是 1995 年利用哈勃第二代广角行星摄影机 (WFPC2)，通过允许粒子氧（蓝色所代表的）、氢（绿色）和氮（红色）的发射光线进入的滤波器后拍摄的 3 个影像最终合成的（来源：Mark McCaughrean，马克斯-普朗克天文研究所；C. Robert O'Dell，莱斯大学；美国国家航空航天局，http://hubblesite.org/gallery/album/nebula_collection/pr1995045b/）

证实。具有与太阳一样高比例的较重元素（比 H、He 和 Li 重）的恒星更可能带有巨型气态行星（Fischer and Valenti, 2005），说明拱星盘中重元素的浓度影响行星形成的速率或者效率。

太阳系外行星的质量、轨道间距和轨道偏心率（图 1.3）的测定，提供了可能有助于确定最后的行星系外观过程的线索。有一类特别有趣的、轨道（小于 0.1ua）非常靠近其主星的巨型气体行星——有时叫做“炽热木星”，非常有意义，因为目前的模型还不能解释它们为何在如此靠近恒星之处形成（Huttlér et al., 2006）。科学家认为这些“炽热木星”告诉我们，大的行星形成时可以朝着它们的恒星发生内向漂移。模型也表明在某些环境下，行星可以漂移离开恒星，所以行星的最终位置可能与其初始形成时的地方没有什么关系。与其主星的距离大于一个天文单位的十分之几的太阳系外行星的轨道偏心率常常颇高，与之相反，除了水星之外，太阳系所有行星的轨道都是接近圆形。

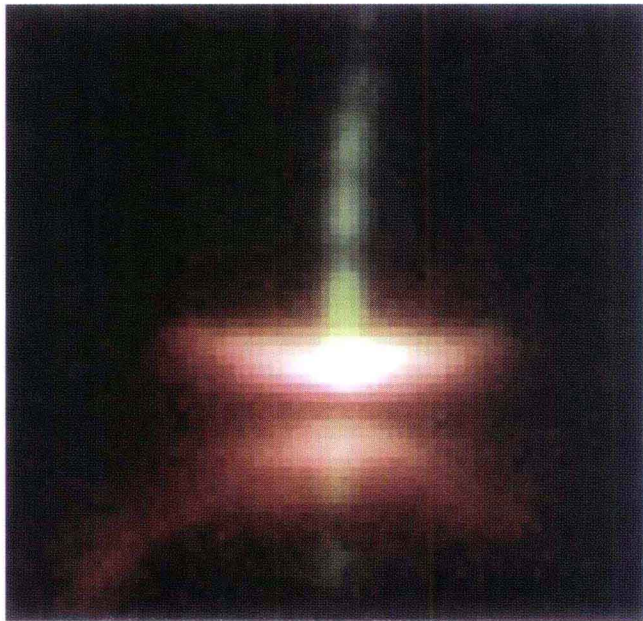


图 1.2 赫比格-阿罗 30 星的哈勃太空望远镜 WFPC2 影像。赫比格-阿罗 30 星是一颗年轻（大约 1Ma）恒星的雏形，环绕有一个薄的暗色拱星盘，两极喷射出强大的气流。影像中拱星盘从左到右延伸了 6×10^{10} km，将侧翼星云一分为二。不能直接看到恒星的中部，但是其光亮映射出了这个喇叭状拱星盘的上下表面，产生了一对红色星云。绿色气体喷射流是由于星体增大而激发的（来源：Chris Burrows，空间望远镜研究所；John Krist，空间望远镜研究所；Kare Stapelfeldt，喷气推进实验室；同事：WFPC2 科学团队；美国国家航空航天局，http://hubblesite.org/gallery/album/entire_collection/pr1999005c/）

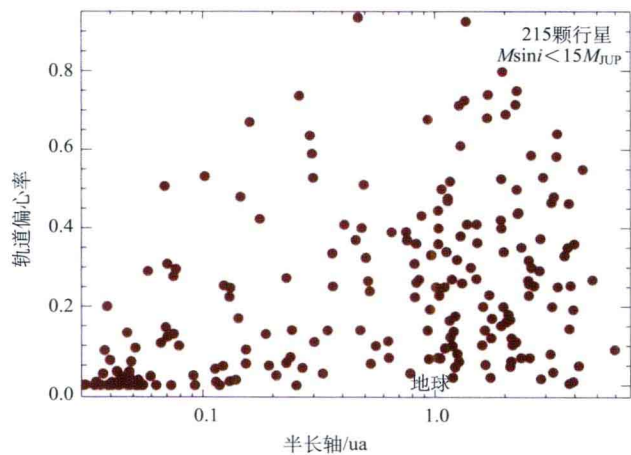


图 1.3 按与主星距离和轨道偏心率分类的已知太阳系外行星一览。太阳系所有行星的偏心率都不大于 0.2 [$M \sin i < 15 M_{\text{JUP}}$ 表示行星质量 (M) 与行星轨道平面的法线与视线的夹角 (i) 正弦值的乘积小于木星的质量 (M_{JUP}) 的 15 倍，译者注]（来源：由加利福尼亚大学伯克利分校 Geoffrey Marcy 提供）

太阳系行星如何形成？

太阳系由完全不同类型的行星组成。外行星（木星、土星、天王星和海王星）以其大尺寸和低密度区别于内行星。外行星是行星形成过程的原始产物，几乎包含了星系持有的全部质量。它们也是最容易辨认的绕行其他恒星的星系类型。内行星（水星、金星、地球和火星）主要由岩石和金属组成，只有微量的气态物质。对于两种类型行星的形成都有“标准模型”，但是模型都有严重的缺陷和极大的不确定性。

依据外行星形成标准模型，巨型行星的形成开始于岩石质和冰质物质凝缩和聚结成质量数倍于地球的物体，而后这些固态物体从拱星盘吸收和聚集气体（Pollack et al., 1996）。两个最大的外行星木星和土星似乎与这个模型吻合得相当好，它们主要由氢和氦组成，其比例与太阳大体相同，但是它们还含有数倍于地球质量的较重元素，其所占比例大于太阳中相应元素的比例，可能存在于密实的内核。然而，天王星和海王星的氢和氦丰度比木星和土星小得多，而且密度和大气成分与外太阳系冰体的主要组成一致。

标准模型的一个替代模型是，不需要由岩石质和冰质星体去诱发巨型气态行星的形成，它们可以直接形成于拱星盘中的气体和尘埃，这些气体和尘埃在其自身的重力（像太阳的微型模型）下可以坍缩（Boss, 2002）。在这一模型中，木星和土星超量的重元素可能是后来捕获较小的石质的和冰性的物体而获得的。但是，这个模型没有很好地解释天王星和海王星的成分，它们没有很多的气体。关于外行星的其他重要问题是，它们何时形成；形成期间及形成以后，它们漂离或者漂向太阳的幅度多大；外行星以前位于何处和在什么时候对于认识内行星的形成过程是重要的。

我们认为内行星与外行星之间的根本差别（岩石相对于气体和冰）反映了太阳星云的温度梯度。靠近膨胀的太阳的地方，温度比较高（ $>1000\text{K}$ ），随距离增加，温度逐步下降。临近太阳的地方，大部分硅酸盐和金属从气体中凝结下来（所谓的耐火材料）；而小行星带之外，温度很低，含有较多挥发性元素的冰体（即水、甲烷和氨）以及固态硅酸盐凝结下来。我们一度认为固态物质是随着星云的冷却，在一个简单的单向凝结过程中形成的。但是我们现在知道，随着物质通过不同温度状况的循环以及受到星云冲击波和固态物体之间撞击的不同影响，固态物质一般反复再熔化、再蒸发和再凝结。然而，关于太阳星云温度的重要细节资料仍然不确定，这些细节资料包括诸如峰值温度及其保持了多长时间、温度如何随着与太阳的距离和与拱星盘中平面的距离变化而变动等重要问题。界定这些条件是认识行星和陨石化学成分如何形成的一个重要部分。

内行星形成的标准模型比外行星模型略微复杂，它主要基于理论，并以来自陨石的信息和对其他恒星周围的拱星盘的观察为支撑（Chambers, 2003）。模型力求解释只有少量尘埃的分散分子云如何能够演化成几乎没有介入气体的固体行星，以及在演化期间分子云原先的化学元素混合比如何改变。重要的疑问是这个过程进行了多久、固态物质如何能够逐渐凝结成越来越大的物体以及剩余气体何时、如何散失。根据标准模型，在地球与太阳这一距离上形成厘米级的固态物体的时间可能仅为 10 000 年。这些小固态物体很容易移动；在现在仍然存在的由 H-He 气体拖动作用所产生的太阳引力下，它们

向太阳方向移动了很长距离。亚米级的物体还受到气体湍流的影响。

标准模型存在的一个明显不足是，其不能描述从较小碎片到千米级物体的形成过程。目前最好的假说是，起先尘埃颗粒缓慢聚集，随着小物体嵌入较大物体，物体增大且增长速度也加快（Weidenschilling, 1997）。尺寸大于 1km 的物体的聚集行为较好理解：它们受到气体存在的影响要小于较小的物体，而且它们随后的演化受到相互之间引力的控制。从这些千米级物体增长为更大的物体，或者星子，应该更加快速，特别是开始的时候。相互作用的引力使得最大的星子具有近乎圆形且共平面的轨道——清扫较小物体的最有利条件。这导致了从月亮到火星大小的行星胚的快速增长与形成。当小行星体无法再得到补充时，增长就慢了下来，行星胚演化成倾斜的椭圆轨道。基于统计方法和专门的电脑编码的动态模拟发现，一些间距很近的行星胚可能是星子大量出现之后 100 000 年内形成的（Chambers, 2003）。

行星形成的后期阶段要长得多，逐步演化成越来越少的物体，因而较难预测（图 1.4）。类地行星形成的主要阶段大概持续几千万年（Chambers, 2004）。最后阶段以行星胚的偶然碰撞和合并为标志，一直持续到所形成的行星的轨道分离到足够大的距离——能免受更大的撞击为止。

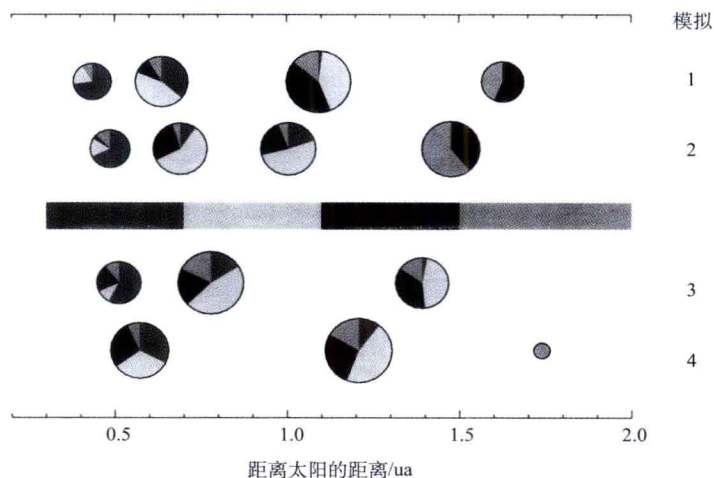


图 1.4 类地行星增大最后阶段的 4 个具有代表性的数值模拟的结果。每个饼图的不同部分表示起源于太阳星云 4 个带（不同灰度所示）的物质的份额，饼图大小与每个行星的体积成正比。在每个模拟中，最大行星的大小与地球相似，但是还会有 2 或 3 个其他行星，大小不同。行星一般从这 4 个带接受物质，特别倾向于与其最终轨道位置最近的带的物质（来源：Chambers, 2004）

尽管类地行星只有 4 颗，但是模型暗示起初很可能是 3 颗或者 5 颗，它们处在距太阳不同的距离上（图 1.4）。与星云气体的潮汐相互作用可能致使早期形成的内行星在形成时向内大幅移动，可能有数颗行星在气体散失前就落入太阳而消失（McNeil et al., 2005）。火星之外没有石质行星，可能是由于巨型行星，特别是木星的存在。木星的巨大质量和强大引力大概阻碍了在现在小行星带占据的区域形成另外的石质行星，因