

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](http://www.sciencep.com)

# 地球的起源和演化： 变化行星的研究问题

固体地球科学重大研究问题委员会著

张志强 郑军卫 王天送 等译

科学出版社

北京

## 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。该委员会历尽数年从地球科学研究的需求和问题出发,经过广泛征求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,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,敬请指正。

(签名) 张志强

2009年10月28日

## 固体地球科学重大研究问题委员会

DONALD J. DEPAOLO 主席，加利福尼亚大学伯克利分校

THURE E. CERLING 犹他大学盐湖城分校

SIDNEY R. HEMMING 哥伦比亚大学纽约州帕利塞德分校

ANDREW H. KNOLL 哈佛大学马萨诸塞州剑桥分校

FRANK M. RICHTER 芝加哥大学

LEIGH H. ROYDEN 麻省理工学院剑桥分校

ROBERTA L. RUDNICK 马里兰大学学院公园分校

LARS STIXRUDE 密歇根大学安阿伯分校

JAMES S. TREFIL 乔治梅森大学弗吉尼亚州费尔法克斯分校

### 美国国家研究委员会（NRC）工作人员

ANNE M. LINN 研究主任

JARED P. ENO 研究助理

## 地球科学与资源部委员会

GEORGE M. HORNBERGER 主席，弗吉尼亚大学夏洛茨维尔分校  
GREGORY B. BAECHEER 马里兰大学学院公园分校  
KEITH C. CLARKE 加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校  
DAVID J. COWEN 南卡罗来纳大学哥伦比亚分校  
WILLIAM E. DIETRICH 加利福尼亚大学伯克利分校  
ROGER M. DOWNS 宾夕法尼亚州立大学大学公园分校  
JEFF DOZIER 加利福尼亚大学圣芭芭拉分校  
KATHERINE H. FREEMAN 宾夕法尼亚州立大学大学公园分校  
RUSSELL J. HEMLEY 华盛顿卡耐基研究院，华盛顿特区  
MURRAY W. HITZMAN 科罗拉多矿业学院，戈尔登市  
LOUISE H. KELLOGG 加利福尼亚大学戴维斯分校  
CLAUDIA INÉS MORA 洛斯阿拉莫斯国家实验室，新墨西哥州  
BRIJ M. MOUDGIL 佛罗里达大学，甘斯威尔市  
V. RAMA MURTHY 明尼苏达大学（退休），明尼阿波利斯市  
CLAYTON R. NICHOLS 爱达荷国家工程与环境实验室（退休），斯坦德波特  
RAYMOND A. PRICE 女王大学，加拿大安大略省金斯顿市  
BARBARA A. ROMANOWICZ 加利福尼亚大学伯克利分校  
JOAQUIN RUIZ 亚利桑那大学，图森市  
WILLIAM W. SHILTS 伊利诺伊州地质调查局，尚佩恩市  
RUSSELL E. STANDS-OVER-BULL 阿纳达科石油公司，蒙大拿州比灵斯市  
TERRY C. WALLACE JR. 洛斯阿拉莫斯国家实验室，新墨西哥州  
HENRY B. ZIMMERMAN 美国国家科学基金会（退休），弗吉尼亚州阿灵顿市

## 美国国家研究委员会工作人员

ANTHONY R. DE SOUZA 主任  
ELIZABETH A. EIDE 高级项目主管  
DAVID A. FEARY 高级项目主管  
ANNE M. LINN 高级项目主管  
SAMMANTHA L. MAGSINO 项目主管  
CAETLIN M. OFIESH 项目主管助理  
VERNA J. BOWEN 行政和财务副主管

JENNIFER T. ESTEP 财务副主管

JARED P. ENO 副研究员

NICHOLAS D. ROGERS 副研究员

TONYA E. FONG YEE 项目助理

# 前 言

在过去 40 多年，地球科学家在理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，我们理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 (DOE)、美国国家科学基金会 (NSF)、美国地质调查局 (USGS) 和美国国家航空航天局 (NASA) 等的共同要求，成立了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)，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目的、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。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 Tschauer、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



## 摘 要

现代科学根源于一些与地球和生命起源有关的基本问题。在古希腊学者的一些著作中对这些重大问题早就有记录，对地球科学的产生奠定了基础，并且许多地学术语都来源于这些著作。解答这些问题的分析方法可以追溯到 16 世纪的行星科学和 18 世纪的地质科学。近代地质学中的第一个重大研究问题也是最具争议性的一个问题，可能来自于人们对沉积岩石的观测。James Hutton 根据沉积岩层的厚度、变化特征、结构以及岩层内的化石推断，地球应该非常古老 (Hutton, 1788)。地球的年龄成为当时最重大的问题。但是直到约 200 年以后，人类认识到物质是由包含原子核的原子构成并且部分原子核不稳定会发生衰变，这才使得地质年代表的建立成为可能。对地球年龄 (45.5 亿年) 的首次准确测量是在 20 世纪 50 年代中期 (Patterson, 1956)，这是建立地球、生命和宇宙年代表的重要一步。

直到 20 世纪 60 年代，地质科学几乎完全建立在对大陆上岩石和地形的研究上，对海底几乎没有了解。这种以大陆为中心的观点，以及在矿产与水资源和古生物发现方面的关注，对 20 世纪早期的重大研究问题产生了深远的影响。当时的重大研究问题是：火山、山脉和沉积盆地是如何形成的？矿床和油藏为何形成于其所在的特定地点以及是何时形成的？山脉的隆起和侵蚀的速率有多快？为什么 5 亿年前化石首先变得丰富？以及是什么引发冰期和地震？另一个迫切需要回答的问题是：为什么南美洲和非洲的大西洋海岸线看起来像可能是曾经连接在一起的两部分？

这些在 20 世纪中期表面上看起来毫无联系的重大问题，随着板块构造理论的提出被很好地组织和联系在一起了。在 1963~1968 年仅仅 5 年时间里，在海底地磁和海底深度的首次观测结果的巨大激发下，一幅巨大的行星地球的动力学特征图得以显现。由此推测，地球表面是由十多个非规则的刚性板块构成的，这些板块每年移动几个厘米，地震、火山和山脉位于板块的边界。将板块运动与地球深部全球尺度的固态对流联系到了一起，这种观点是 10 年前大多数地质学家不敢想像的。

板块构造模型，包括与其相应的地幔对流、海底扩张以及大陆漂移，不仅可以解释地震、火山和山脉的格局，而且最终可以提供关于大陆和海洋的产生、地球气候在地质历史上的演化、对生物进化过程的影响等的可能机理。到 20 世纪 60 年代这一分界性时代的末期，美国宇航员首次登上月球，他们带回了与地球有很大不同的其他行星的岩石样品，这提供了认识其他星体的机会。这种新的视角将地球科学研究引入当代时期，科学家们将地球作为一个行星来认识，并将其结构、历史和特征与其他行星进行比较。

在 1980 年，另外一个突破来自 6500 万年以前地球被一个大的陨星撞击的证据，这次撞击可能导致当时地球上恐龙和其他生物的灭绝 (Alvarez et al., 1980)。在随后的

几年时间中，在地球上发现了一些来自火星的陨石（Bogard and Johnson, 1983）。起始于地球和月球上的撞击坑研究的这两项进展，强调了这样一个观点，即科学家必须将地球放在其天文学范畴来进行认识，例如，生命演化可能会被地球外的不速之客或来自太阳系其他行星的输入物体中断。

在过去二十多年，地球科学发生持续变化。技术方面的重大进步使得科学家可以在大和小两个尺度上更好地对地球进行观测，同时对行星的持续探测和先进计算方面也有贡献。现在我们可以看到矿物内部并区分出单个的原子，测量极端温压条件下地球内部岩石的性质，实时观测大陆漂移和山脉隆升，理解有机体如何进化以及有机体如何基于它们的 DNA 与地球相互作用。我们也能从陨石获取新的信息，并由此获知行星是如何形成的，甚至星体内部是如何运动变化的。在新工具的武装下，地球科学已转向更深度的基本问题：地球起源；生命起源；行星的结构与动力学；生命、气候与地球内部的联系；未来地球将如何承载人类。

## 本报告的研究范围和目标

应美国能源部（DOE）、美国国家科学基金会（NSF）、美国地质调查局（USGS）和美国国家航空航天局（NASA）等的共同要求，美国国家科学院成立了一个委员会提出和探讨当今地球科学研究的重大科学问题。对该委员会的要求（见下文叙述），给予了委员会很大的选择研究主题的自由，不必考虑机构需要特别注意的问题，诸如任务的适中性和可执行性。

委员会将提出一个经过精简的推动固体地球科学发展的重大科学问题清单。研究问题将涵盖多种时空尺度，从亚原子到行星以及从过去（数十亿年）到现在和未来；将简洁但醒目的方式表述这些问题，并且要有能概括当前进展和未来研究挑战的文字和图件的支持。该报告将不会讨论实施性问题（如仪器设备、向某机构提供建议）或规律性研究兴趣。

我们响应这一要求并试图抓住最能反映地质和行星科学（对固体地球科学的另一种提法）的研究领域和热点。在这一领域的研究涉及几乎每一个科学学科。然而，与固体地球科学相关研究问题的讨论范围，主要是在地球科学的其他子学科，如海洋学、大气科学或空间科学。

该委员会从一开始就制定了有关大问题由什么构成的原则。我们对大问题定义的确切一方面基于问题数量小的要求，因此我们的目标是 7~10 个问题，另一方面基于问题能至少满足下面所提到原则中的两条期望：

- （1）超越地质学和行星科学各自学科领域的界限；
- （2）涉及永恒性的问题（如地球和生命起源）；
- （3）与对人类福祉具有重要影响的现象存在联系。

我们的最终目标是抓住构成 21 世纪初地球科学前沿的一系列本质性科学问题。我们希望这些问题以及我们对它们的描述与我们认为的地球科学一样具有同样的吸引力，同时我们希望这份短报告对那些想了解更多的有关地球科学的当前现状、研究方式以及

未来方向的人能有用。我们试图使该报告的描述更适合科学计划管理人员、研究生以及具有理解所讨论问题学科背景的姊妹学科的同事。

我们在遴选重大问题中最困难的难题是从大量的主题和问题中精选出“最有价值”的候选问题。为此，委员会建立了具有广泛代表性的地质委员会并召开会议和电话会议进行商讨。在形成 10 个重大问题之后，委员会开始着手撰写，并收集其他科学已撰写的成果。我们所提到的一些问题确实具有严峻的挑战性，其可能在几十年内不会得到完全的认识。其他一些看似比较容易处理，大概在数年内就会有重大进展。总之，我们已包括了绝大多数委员会认定为重要问题的科学问题以及绝大多数我们的调查问卷反馈后提出的问题。事实上，关于什么构成重大问题以及哪个应该纳入重大问题，绝大多数人的意见是一致的。

## 21 世纪重大研究问题

尽管我们从简单地确定我们认为将推动现在地球科学的交叉问题开始，但我们发现这些问题可以归结为 4 个主题。这些主题构成本报告的 4 个篇章，在每个篇章中描述了一些重大科学问题。第一篇涉及起源的问题——地球与太阳系其他行星的起源，地球的早期历史以及生命起源；第二篇讨论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；第三篇谈地表环境的可居住性——气候与气候变化，地球-生命相互作用；第四篇重点是地质灾害与地球资源——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。

以下是研究委员会确定的十大研究问题的概要介绍：

### (1) 地球和其他行星是如何形成的？

太阳系具有奇特的几何形态，拥有各种各样的行星和卫星。随着人类利用太空船获得新的观测资料和对陨星更精确的测量，太阳系呈现出一些更加精细的迷人问题。尽管科学家普遍认为，太阳和行星都来自于同一片星云，但对地球如何获得其独特的化学组成却知之甚少，尚不能完全理解地球形成后的演变以及地球与其他行星和其他行星之间演化的不同。例如，地球在演化过程中保留了一些允许生命出现的挥发性物质（包括水），就这点来说，地球与其他行星完全不同。虽然先进的计算能力能为科学家提供更可靠的早期太阳系的模型，但只有对太阳系的其他星体和太阳系外天体作进一步观测，才是人类进一步了解地球和太阳系起源的主要途径。

### (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？

科学家们认为，在地球形成的后期，一颗火星大小的行星与地球发生了碰撞，撞出一大块星云碎片，其后来形成了月球，同时碰撞过程中产生的巨大热量使整个地球发生融化。但对这些岩浆是如何分异出现在的地核、地幔和岩石圈，或地球是如何形成其大气层和海洋，科学家们却了解不多。这个被称作冥古宙的时期对我们解开行星演变之谜至关重要，但科学家对此却知之甚少，因为来自这个时期的岩石在地球上几乎没有保存下来。可是，随着对陨星和其他行星认识的不断深入，以及从地球上古老的锆石晶体获得新的信息，来自这个时期的线索在不断增多。

### (3) 生命是如何起源的？

生命起源是科学史上最令人好奇、最难也是最持久的问题之一。因为太阳系中生命形成于数十亿年以前，因此，有关生命起源的一些最根本性问题属于地质学研究领域。有关生命起源以及生命最早形成的地点、时间和生命形式的现有唯一证据，来自于对岩石和矿物质的地质研究。当生命首次在地球上出现时，地球表面的环境可能与现在差别很大，准确弄清楚适合早期生命的地球物理环境和化学形成背景是当前研究中的一项重大挑战。对生命起源的探索本身就是一个多学科的问题，涉及有机化学、分子生物学、天文学、行星科学以及地质学和地球化学等学科。由于火星上有关行星早期历史的沉积物记录早于地球上年代最久远的岩石以及其他拥有行星的恒星系统，科学家对火星探测的兴趣与日俱增。

### (4) 地球内部如何运动及其如何影响地表？

随行星形成时间的增加，行星逐渐冷却，这引起它们的内部过程、大气和地表过程也进入逐步变化的阶段。热量从行星内部传递到地表的最基本方式是行星尺度的固态和液态对流。尽管科学家们知道地幔和地核处于不断的对流运动中，但科学家既不能精确描述这些运动的目前状态，也无法自信地计算它们在过去的不同之处。地核对流产生地球磁场，其可能对地表状况产生重要影响。而地幔对流则是火山作用、海底扩张和造山运动的原因，诸如水和碳等物质不断在地表和地球深部之间交换。因此，缺乏对地球内部作用过程的详细了解，科学家们既无法推断过去的地表环境，也无法预测将来的地表环境。

### (5) 地球为何拥有板块构造和大陆？

尽管板块构造学说已经相当成熟，但地球什么会有板块构造，以及板块构造与地球的其他独特特征——丰富的水、大陆和海洋的存在和生命的存在等——联系有多么密切等问题仍存在。我们无从知道地球是否可能仅具有一种特征而不具备其他特征，也无法知道这些特征是如何相互依赖的。大陆地壳的存在和长期稳定问题与板块构造问题都是基础性的问题。大陆地壳使地球对非海洋生命来说具有可居住性，并通过其表面的风化作用扮演着调节地球气候的角色。但科学家们仍然不知道大陆最初形成的时间，以及大陆如何能存在数十亿年，或者准确地说明大陆是如何演化到目前的状态的。新的数据和观测资料表明，气候和侵蚀作用在山脉的形成和演化中扮演着重要的角色，因而也是大陆地壳形成和破坏的基本作用。

### (6) 物质特征如何控制地球演化过程？

对地球和其他行星上岩石记录的秘密的破解始于科学家们对大规模地质过程的了解。行星物质的基本物理和化学属性是了解这些过程的关键。地球内部的高压和高温、地球及其结构的巨大体积、地质时间的超长范围，以及地球组成物质及其性质的巨大差异，所有这一切都呈现出特殊挑战。科学家们可以借助同步加速器辐射、对大尺度和非均质材料的最新测量和模拟结果、以及对极端条件下材料性能的量子力学计算结果来应对这些挑战。围绕天然纳米粒子研究、微生物对化学过程调解的一些新研究领域将得到发展。

### (7) 什么原因引起气候变化，气候变化幅度能有多大？

虽然在过去一万年中全球气候条件保持相对适宜和稳定，但科学家们从地质证据得知在数十年或数百年的时间尺度上地球气候也可以发生重大变化。尽管可以改变气候的因素众多，从太阳光照强度的缓慢变化到新的山脉的形成和大气成分的变化等，但在过去 40 亿年中，地表温度一直保持在较小的变化范围之内。地表温度变化是如何长期保持良好的调控的，即使其变化可能非常剧烈？最近的发现揭示出地球上气候非常冷、非常热或变化特别快的历史时期。了解这些特殊条件可以对地球的气候进行重新认识，以及对古老沉积岩的新的地球化学观测结果和改进的气候系统模型，最终将使科学家们能预测气候变化的程度和后果。

### (8) 生命如何改变地球，地球又如何塑造生命？

地球科学家们倾向于将地球的地质演化过程看成是一个基本无机过程。同样地，生命科学家们则倾向于将生命演化看成是一个基本生物学问题。但是，生命的演化明显受地表环境的影响，同时地表环境也受生命活动的影响。如果不是为了生命，大气中将不包含氧气，正是氧气的存在激发了其他生命形式的进化。虽然科学家们知道地质事件和陨石撞击导致过去生物的大灭绝并影响生物的进化过程，但地质与生物进化间的准确联系仍然是个谜。对现在的地球来说，科学家们的兴趣在于生命在地质作用过程（如风化和剥蚀）中所扮演的角色。科学家们致力于理解生命是如何出现的，以及如何在其他行星的地质记录中留下遗迹。

### (9) 能够预测地震、火山喷发及其后果吗？

由于灵敏的新检测仪器和对火山成因的更好认识，地质学家对火山喷发的预测能力正在提高。就地震而言，虽然科学家们在长期预测方面取得了进展，但也许永远不能预测出地震发生的准确时间和地点。深入了解断层破裂如何启动和停止、改进对大地震附近震动预测的模拟，以及增加对危险性地震开始的预警时间，是科学家们面临的持续挑战。由于对地下活动过程的实时地震、大地测量和电磁探测的测量成果，火山活动研究已进入一个新的时代，但是，仍然存在着将这些实时数据与火山野外调查和火山物质的实验室研究资料相统一的挑战。火山研究的最终目标是描绘出一幅能清楚描述岩浆从上地幔（岩浆来源地）运动到地壳（岩浆临时存储并最终从火山口喷出地表的地方）的图像。

### (10) 流体流动和搬运如何影响人类环境？

对自然资源和环境的有效的管理要求管理人员拥有地下和地表流体特性的相关知识。主要的科学目标是了解流体如何流动、输送物质和热量、以及与周围环境相互作用并对其进行改变。虽然新的实验工具和野外测量技术，加之航空和航天测量，为地表和地下过程的研究提供了史无前例的视角，但是，在确定以下问题方面仍存在困难：地下流体是如何分布在非均质岩石和地层中？它们流动究竟有多快？它们如何有效传输溶解的和悬浮的物质？以及与宿主地层的化学和热交换如何影响它们？如果要准确评价人类活动和气候变化是如何影响地表景观演化的，以及如何管理这些影响以维持生态系统和重要的流域特征，就需要有更好的流量和相关的侵蚀与运输的模型。研究的最终目标是建立可以预测未来自然系统行为的数学模型，虽然仍未实现，但该模型对人类就支撑其生存和发展的土地和资源的未来做出有科学依据的决策非常重要。

# 目 录

译者序

固体地球科学重大研究问题委员会

地球科学与资源委员会

前言

致谢

摘要

## 第一篇 起 源

第一章 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
第二章 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
第三章 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

<b>第四章 问题 4：地球内部如何运动及其如何影响地表？</b> .....	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
<b>第五章 问题 5：地球为何拥有板块构造和大陆？</b> .....	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
<b>第六章 问题 6：物质特征如何控制地球演化过程？</b> .....	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

<b>第七章 问题 7：什么原因引起气候变化，气候变化幅度能有多大？</b> .....	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 <sub>2</sub> 历史吗？ .....	91
小结 .....	94
<b>第八章 问题 8：生命如何改变地球，地球又如何塑造生命？</b> .....	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
<b>第九章 问题 9: 能够预测地震、火山喷发及其后果吗? .....</b>	<b>109</b>
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
<b>第十章 问题 10: 流体流动和搬运如何影响人类环境? .....</b>	<b>127</b>
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
<b>参考文献 .....</b>	<b>140</b>
<b>附录 A 委员会成员简介 .....</b>	<b>156</b>
<b>附录 B 缩写词和缩略语 .....</b>	<b>159</b>



# 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——一个关于地球和其他行星的起源，一个关于生命的起源，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。