

序

该书是一部关于海底地质与构造的教科书，若简要回顾地质科学的研究发展历程，就会深有感知地认识到，这是一本综合海洋地质与地质科学的跨学科教材。

人类社会的自然科学，以宇宙客观存在的自然规律为研究对象。人类自诞生以来，历经发现认知自然的人类社会历程长期实践与探索研究，满足人类社会发展的实际需求与追求的同时，观察、体验、实验、检验、论证、应用，不断发展深化扩展，才逐渐构成既密切相关统一而又各自相对独立的科学规律系统，形成现今的自然科学与技术体系，统称为自然科学。现今它通常又分为数学、物理、化学、生物、地球科学等自然科学门类。显然，地球科学是自然科学中一门主要的基本科学门类，是以地球为主要研究对象的系统科学。地球科学是一门内涵复杂的综合科学体系，现今通常又有地质（地球化学）、地理、大气、海洋、地球物理等五个学科的划分。其中，海洋科学又分为海洋地质、物理海洋、海洋化学、海洋生物等多个分支学科。海洋地质是海洋科学的主要基础学科，它与地质科学密不可分，可以说它就是对海洋科学中关于海洋底部固体及其周边的地质科学问题以及与海洋水体关系的探索研究，所以可简称为海底科学。相对于以水为主体的流体海洋学而言，它是关于固体海洋学的研究，因此它又是海洋与地质两学科的交叉学科的分支学科。海洋地质与地质科学密不可分，它实际亦即地质科学不可或缺的基本组成部分。自然，它首先是海洋科学最基本的学科。海洋地质包括了海洋底部固体的组成、结构、形成演化与动力学及各种效应等科学内涵系统。这部《海底构造原理》就是侧重海底组成、结构构造及其形成演化基本内容与理论的一部最新著作，是一部在前人成果基础上集最新研究的一部最新教科书。

纵观地质科学作为地球科学的主要基础学科，其形成发展已经历了漫长的历程，从远古的启蒙、地质知识积累、学科及其分支学科建立发展到近代和现代地质科学的形成。随着人类社会的发展，源远流长，即使是近代与现代地质科学的发展也已有 200 多年的历史。历经人类远古和古代有关地球与宇宙的实际感知与需求、早期相关哲学思辨与猜想，从初始的启蒙到初期的认知积累，人类有了一定的地质学发现与认识，尤其随着欧洲中世纪后期文艺复兴的社会重大发展，自然科学，包括

地质科学，都从宗教神学禁锢下解放出来，有了新的大发展。这时的地质科学已有一些先贤的重要学术思想与观点阐述发表，但总体还未形成系统独立的学科。直到 18 世纪中后叶开始，以瑞士德吕克 (J. A. Deluc) 1793 年首次提出 Geology 一词，把地质学正式从原先的博物学中独立出来为标志，地质学才较快地发展，兴起野外地质的直接观察研究，地质理论、方法和学科及其分支学科才逐步建立。到 18 世纪中期，欧洲已建立起比较完善的近代地质学理论与方法体系，系列古典代表性论著出版，诸如布丰 (G. L. Buffon) 的《地球的理论》(1749)，罗蒙诺索夫 (M. B. Lomonosov) 的《论地层》(1763)，维尔纳 (A. G. Werner) 的《岩层的简明分类和描述》(1787)，赫顿 (J. Hutton) 的《地球学说：证据和说明》，尤其是莱伊尔 (C. Lyell) 的《地质学原理》(1831~1833) 和丹纳 (J. D. Dana) 的《系统矿物学》(1837) (中国 1871 年以《金石识别》翻译出版) 以及《地球冷缩的某些结果——兼论山脉起源及地球内部的性质》(1873) 提出“地壳均衡”原理与地槽说 [霍尔 (J. Hall) 先曾于 1859 年提出沉积区转化为造山带，后又为丹纳命名为地槽]，休斯 (E. Suess) 的《地球的面貌》(1865~1909)》，直到魏格纳 (A. Wegener) 的《大陆和海洋的形成》(1915) 提出大陆漂移说等。在这个时期，地质科学发展中突出而重要的是持续发生了几次关于地球科学的学术大论争。如果说前期曾有“宇宙神创论”与“宇宙起源论”“日心说”与“地心说”“地平说”与“地球(圆)说”等的激烈带有宗教和社会政治色彩斗争的话，这一时期则主要是“水成论”与“火成论”“突(灾)变说”与“渐变说”和“固定论”与“活动论”激烈的学术争论。直到 20 世纪初，以魏格纳为代表的地壳水平运动活动论提出大陆漂移说，更激起了世界地学界的强烈论战，当时受到地球物理学界的激烈质疑与反对，由于魏格纳本人因灾难突然逝世和他的假说本身的不完善性，活动论的大陆漂移说随之沉寂下去，固定论与地槽说仍在地学界占主导。但在 20 世纪 40~50 年代，第二次世界大战以后，国际海洋的竞争和军事需求，全球范围的海洋地质和海洋地球物理调查研究得以广泛开展，先后发现了海洋地貌系统、大洋中脊系统、海底磁异常条带、转换断层等。基于系列海底科学的重要新发现新发展，以及 20 世纪 50 年代后期古地磁学进展，赫斯 (H. H. Hess) 和迪茨 (R. S. Dietz) 首先于 1961~1962 年提出了海底扩张说，威尔逊 (J. T. Wilson) 于 1963 年提出了转换断层与威尔逊演化旋回。因之，大陆漂移说再度兴起，并由勒皮雄 (X. Lepichon)、摩根 (W. J. Morgan) 和麦肯齐 (R. P. McKenzie) 于 1968 年提出了板块构造理论，引起了 20 世纪一场深刻的地学革命，引领和改变了地球科学几乎每一个分支学科新的发展，使地质科学发展进入到以活动论板块构造说为主导的现代地质科学发展阶段。

在地质科学发展历史中，中国地质科学同样经历了上述与西方相似而又不同的历程。我国在远古和古代时期，先人活动路径上的生物和矿产资源分布的认识在

《山海经》中就有了记录，到春秋战国时代（公元前5~3世纪），地学蒙发与认识毫不逊色于西方的希腊、罗马，11~12世纪到16~17世纪中期中国的沈括、朱熹、李时珍、徐霞客等关于地学的认知与论述，与之同时代的西方欧美国家也同等并有过之。但是自17世纪中叶中国明朝闭关自守，已无大作为，逐渐落后于西方。直到19世纪（1884年后），被迫开放，外国学者开始进入中国调查，主要学者如李希霍芬（F. Richthofen）、维理士（B. Willis）、奥布鲁契夫（V. A. Obrutchev）、马高温（Mcgowan）、慕威廉（Muirhead，他编著的“地理全志”中首次使用中文“地质”一词）、葛利普（A. W. Grabau）等。到20世纪早期章鸿钊、丁文江、翁文灏三位作为中国地质事业的奠基者，开始组建发展中国地质学及研究机构。中国人自己撰写地质文献的第一人是周树人（鲁迅，1903，1906）。后来李四光的《中国地质》（1939）、黄汲清的《中国主要构造单元》（1945）等先后发表，在国内外都有广泛的影响。中华人民共和国成立后，地质事业蓬勃全面发展，建立了完整的地质建制和科研、教育等系统，为国家做出了突出卓越贡献。其中，以20世纪五六十年代李四光、黄汲清、张文佑、张伯声、陈国达等中国大地构造的五大学派的活跃发展为代表，显示了中国地质科学的巨大发展，但这时地质科学学术思想仍以固定论的台槽说占主导。而板块构造最早是由尹赞勋、傅承义引入中国，国内李春昱等先后运用板块构造学说、地体学说解释了中国大地构造演化。随后，经历追踪引入和根据中国实际的探索创造，进入并行与创新发展的过程，板块构造被广泛应用并逐渐占据主导，极大地推动深化发展了中国地质科学。

但是，板块构造主要是植根于大洋海底构造研究基础上的，而且主要论述地球固体外壳的物理运动问题，其深层动力学问题只是借助了霍姆斯（A. Holmes）于1928~1931年提出的地幔对流说，但该假说至今仍有争论。20世纪中晚期，随着板块构造“登陆”，其对大陆的研究与验证，一方面推动深化发展了大陆问题，另一方面也暴露出板块构造原理的局限性：它不能完全认知和解释大陆问题，大陆地质具有复杂独特性，大陆不同于大洋，两者虽同是地球外壳统一的两个组成单元，两者从组成、结构、演化形成历史，从地壳到地幔虽有共同相似性，但更有本质差异，故大陆地质与大陆构造独具的多样复杂性不完全符合经典板块构造理论模式。因此，国际地学界开始涌现构造地质学和大地构造学未来发展方向的新思维，提出发展乃至超越板块构造（Beyond Plate Tectonics）的新观点，并提出将大陆流变学作为发展板块构造探索大陆地质和大陆构造与动力学研究的新起点。以1990年美国自然科学基金委发表的《大陆动力学》为代表，提出了大陆动力学问题，成为当代地球科学前沿主要研究领域之一。然而，20多年的探索，大陆动力学研究尚无根本性突破，目前仍处于整合集中统一更深入综合的研究进程之中。

当代大地构造学正面临板块构造发展的三大难题：板块起源、板块动力和板块

上陆问题，现正以统一整体地球系统科学思想，上天、入地、下海，深化发展当代占主导的板块构造，创建包括板块构造在内的新的地球构造观与理论。因之表明，当前地球科学正处于创建新的地学理论、构建地球系统科学、建立新的地学知识体系与技术方法的重要发展时期。显然，新的地球科学发展，需要从宇宙天体地球系统整体出发，从其内核到外层空间，多学科综合研究，自然当代首先是面对人类社会重大需求与科学发展的需求，即全球变化、资源环境问题，社会可持续发展问题和深化发展当代地学占主导的板块构造理论问题，例如上述提出的探索大陆动力学问题。我们在研究大陆问题的同时，还要通过陆地的最新研究来重新审视大洋，并从大洋最新的进展来认识研究大陆，因此，我们这里需要特别强调并提出建立洋底动力学学科体系，加强相关教学系列课程与实验室建设问题，这是非常必要而且十分重要的。

海洋科学正处于迅速发展时期，从 DSDP 到 IODP，再到海底观测网络、监测系统，世界正在更加全面地加速深入探索认知海洋，我们必须及时意识到未来海洋科学的发展。前文我们用不少笔墨回顾了地质科学的发展历史，目的是温故知新，为了更好地认识现今，瞻望和发展未来。特别是我国现正处在前所未有的海洋大发展时代，面临从海洋大国走向海洋强国。因此，除了国家海洋事业发展的各个方面外，加强海洋科技、发展海洋教育、培育海洋人才已是急需，其中，加强海洋地质科学研究与高等教育尤为重要，这也是海洋科学发展基础研究和培育基础人才之急需。基于现代地球科学，包括大陆地质和海洋地质科学的快速发展，我们可以预见大陆动力学和洋底动力学必将会成为创建地球系统科学新理论的核心内容，并会从时空尺度上超越仅涉及地壳或岩石圈层次的板块构造理论，进入深刻揭示岩石圈乃至整个地球从内核到外层空间、从早期地球到雪球地球和板块地球或海洋地球的各圈层的相互作用及其几何学、运动学和动力学，必将围绕宇宙天体地球系统多个圈层间物质的运动和运动的物质这两大主题开展源头创新性研究，引领地球科学重大发展。

该书是李三忠教授团队为适应海洋地质科学新发展的需求，近多年来潜心编著的系列教材第一本，其余计划尽快完成的还有《海底构造系统（上下册）》《区域海底构造》《洋底动力学》等。这本《海底构造原理》侧重洋底动力学入门的基本概念、基本知识、基本原理的介绍，它主要是阐述海底构造的基本内容，从易到难，揭示其深层科学本质，为海洋地质学习奠定系统扎实的基础知识，建立基本思维。

海洋占地球总面积的 70.8%，而深海大洋占据海洋约 92.4%，它拥有极其丰富的自然资源和突出的战略地位。深海大洋是海底构造和洋底动力学研究的主要对象，按照动力系统的不同，可以进一步分为洋脊增生系统、深海盆地系统和俯冲消减系统。因此，这一系列教材以地球系统科学为指导，针对洋底动力系统，由表及

里，遵循读者的认知规律，循序渐进地讲授海底构造学，是既有基础知识，又有研究前沿成果的教科书，所以既适合初学者入门，也适合各层次研究人员的需求参考。

海洋意识是人类生存与文化的意识，更需要有全球意识。海洋科学是宇宙与全球视野的科学。世界拥有一个不同多样而又沟通统一的海洋，一直为人类所需求、所重视，中国新的快速发展，愈益高度重视海洋科学的发展，从国家发展战略需求，由国家层面提出了海洋强国、“一带一路”等发展战略，体现了国家意志，而这就是海洋科学发展的强大动力。在新的形势下，近年来很多大学响应国家战略需求，纷纷成立海洋学院或相关研究机构，开展富有成效的科学和技术研究，培养人才，推动国民经济主战场的发展。同时也凸显出海洋人才的匮乏和需求，既要发展，但也不可一拥而上。在现今新学校新学科的快速发展增长时期，急需新的教材，因已有培育人才的教材已显陈旧。所以新教材的编写就是应时代新发展需求，成为当今负责任的教师的一个迫切而重要的任务。我希望在这种情况下，上述的系列教材能够为中国新的海洋地质科学的发展带来新的力量与贡献。

中国科学院院士



2017年7月22日

前言

撰写本书的初衷最早始于1998年，我刚从西北大学地质学博士后出站来到中国海洋大学任教，教授的第一门课就是《海洋地质学》本科生课程。由于该课程涉及面极广，如海底地形地貌、沉积动力、海底岩石、海底构造与现代海底成矿作用等，故当时该课程由4位教授承担。10多年来，我始终承担其中的海底构造部分教学。当时全国也仅有4本正式教材，即1997年李学伦主编的《海洋地质学》、1991年朱而勤主编的《近代海洋地质学》、1982年同济大学海洋地质系主编的《海洋地质学概论》和1992年翻译的肯尼特主编的《海洋地质学》。

进入21世纪后，各大专院校也认识到海洋地质学领域教材的匮乏，并先后编写了多个版本的与海底构造相关的教材，如马宗晋等（2003）编著的《地球构造与动力学》、吴时国和喻普之（2006）编著的《海底构造学导论》、周祖翼和李春峰（2008）撰写的《大陆边缘构造与地球动力学》、任建业（2008）主编的《海洋底构造导论》、吕炳全（2008）编著的《海洋地质学概论》、张训华（2008）编著的《中国海域构造地质学》、徐茂泉和陈友飞（2010）编著的《海洋地质学》等。由于海底构造内涵丰富，这些教材虽然各有侧重，但依然不能全面反映海底构造的基本内容和前沿进展。2009年教学改革时，我曾提议将海底构造内容单独分列成系列深浅不一的四个层次来教授，建议分别称为海底构造原理、海底构造系统、区域海底构造、洋底动力学，依次侧重海底构造相关基本理论、海底构造基本知识、区域洋盆演化、洋底构造成因和机理，并由浅入深、由表及里分别向本科生、硕士生和博士生讲授。

通过18年的不断积累和讲授，本书综合国际最新科学动态和前沿进展，尽可能给读者选择和展示一些当下较美的图件、最前沿的成果和最新的理念，以响应“一带一路”倡议以及适应当代中国走向深海大洋、建设海洋强国的国家战略需求。本书强调基本概念、基础知识、基本事实、基本原理，但也在不同的章节为高层次读者展示了当前研究中的前沿问题和历史争论，期望能从中体现一些地质思想，并让读者从地质思想的形成演变中训练形成自己独有的地质思维模式。本书力求完整，在讲授时宜针对不同层次的学生有所选择，循序渐进地讲授。为了便于阅读或学科交叉，插入了一些与其他学科密切相关的基本知识。为了加强专业外语，本书中的

与海底构造相关的基本概念首次出现时，附注了英文。同时，为了贯穿地球系统理念，本书也节选了一些海洋环境要素的内容，便于致力于将海洋环流系统与海底壳-幔系统耦合起来研究的专家参考，如海洋生物地球化学、沉积动力学专家。

海底构造是专门介绍海底物质组成、结构和构造特征及其演化机制的学科，是针对掌握了一定普通地质学、沉积岩石学、岩浆岩石学、变质岩石学、构造地质学、地球化学和地球物理学基础理论知识的高年级本科生而设立的，部分高深知识是针对研究生而撰写的，需要掌握一些地震层析成像、地震学、岩石成因和成矿理论等知识。本书力求系统，读者在阅读时，可跳跃看，涉及不懂的概念，在本书中都可查询到，因而也可以将本书当作工具书。

因为传统的板块构造理论只解决岩石圈层次构造，地幔柱理论只解决比岩石圈更深的深部地幔构造，前板块构造只解决板块构造出现之前的早期地球构造演化问题，因此，为了突破这些理论上的局限性，并实现融合，本书以地球系统科学为指导，遵循“起源到过程、机制，现象到本质、趋势”的主线，编排了各种零散信息。后续几部教材也将按照基本原理、系统构成、区域解剖、动力探索的顺序进行编排。

在本书即将付梓之时，编者之一的索艳慧博士重绘了所有图件，并做了最后编辑整理，付出了巨大辛劳。郭玲莉博士整理了参考文献等。此外，编者感谢为本书做了大量内容整理和图件清绘工作的青年教师和研究生团队，他们分别是戴黎明、刘鑫、赵淑娟、曹花花、李玺瑶、王永明、许立青、王倩、兰浩圆、张剑、胡梦颖、李少俊、郭润华、惠格格、张臻、张勇、臧艺博、郑祺亮、孙文军等。同时，感谢专家和编辑的仔细校改及提出的许多建设性修改建议。感谢编者家人的支持，没有他们的鼓励和帮助，我们不可能全身心投入到教材的建设中。为了全面反映学科内容，本书有部分内容引用了前人的成果和书籍，涉及内容庞大，编辑时非常难统一风格，难免有未能标注清楚的地方，有些为了阅读的连续性，删除了一些繁杂的引用，请多多谅解。

特别感谢带我走入《海洋地质学》之门的李学伦教授等，是他们的积累孕育了这一系列教材；也特别感谢中国海洋大学海洋地球科学学院很多同事和领导长期的支持和鼓励，我们也是本着为学生提供一本好教材的本意、初心，整理编辑了这一系列教材，也以此奉献给学校、学院和各位同仁，因为这里面也有他们的默默支持、大量辛劳、历史沉淀和学术结晶。由于我们知识水平有限，疏漏在所难免，引用遗漏也不可能避免，敬请读者及时指正、谅解，我们将不断提升和修改。

本书是在前辈教材与基础上编写的，也学习吸收了他们的成果并纳入到该系列教材中，所以该系列教材也应前辈教学事业的继续，也因为他们长期的积累，才有了现在教材的系统性、持续性与创新性，在此，我们应向长期做出贡献的老一辈

科学家和教师们表示诚挚感谢和敬意。

最后，要感谢以下项目对本书出版给予的联合资助：国家自然科学基金委员会国家杰出青年基金项目（41325009）、山东省泰山学者特聘教授计划、青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山卓越科学家计划（2015ASTP-0S10）、国家海洋局重大专项（GASI-GEOGE-01）、国家重点研发计划项目（2016YFC0601002，2017YFC0601401）、国家自然科学基金委员会-山东海洋科学中心联合项目（U1606401）和国家科技重大专项项目（2016ZX05004001-003）等。



2017年2月20日

目 录

第 1 章 地球的起源、结构和组成	1
1.1 地球的起源	1
1.1.1 从宇宙环境到原始地球	1
1.1.2 原始地壳和原始地核	7
1.2 地球的结构与组成	8
1.2.1 地壳	12
1.2.2 地幔	18
1.2.3 地核	23
1.2.4 低速层与软流层	27
1.2.5 岩石圈	29
1.3 海洋和海水的起源	32
1.3.1 海洋和海水的成因	32
1.3.2 海洋环境要素	35
1.4 洋壳的起源	78
1.4.1 洋壳与陆壳的起源	78
1.4.2 洋壳起源论争	80
第 2 章 海底的地形和地貌	89
2.1 海底地貌特征与划分	91
2.2 大陆边缘地貌	94
2.2.1 大陆架	94
2.2.2 大陆坡	97
2.2.3 大陆隆	98
2.2.4 海沟	98
2.2.5 岛弧	100
2.2.6 弧后盆地	102

2.2.7 大陆边缘类型·····	102
2.3 深海盆地地貌·····	104
2.3.1 海山·····	104
2.3.2 环礁·····	105
2.3.3 岛链·····	106
2.3.4 深海平原·····	107
2.3.5 深海丘陵·····	108
2.3.6 平顶海山·····	108
2.3.7 无震海岭·····	109
2.4 洋中脊地貌·····	110
2.4.1 平面展布·····	110
2.4.2 剖面特征·····	113
2.4.3 四大洋差异·····	114
第3章 洋壳演化的基本原理 ·····	123
3.1 大陆漂移学说·····	123
3.1.1 发展历史与基本内容·····	123
3.1.2 主要依据·····	125
3.1.3 大陆漂移机制·····	139
3.1.4 大陆漂移效应·····	140
3.1.5 大陆漂移学说的缺陷·····	140
3.1.6 联合古陆的重建与大陆漂移过程·····	141
3.2 海底扩张学说·····	146
3.2.1 产生背景·····	146
3.2.2 基本内容·····	147
3.2.3 事实论证·····	148
3.3 板块构造理论·····	155
3.3.1 基本内容·····	156
3.3.2 板块划分与边界类型·····	157
3.3.3 板块运动学·····	165
3.3.4 板块动力学·····	172
3.3.5 板块构造起源·····	185
3.4 地体学说·····	198

3.4.1	基本概念·····	199
3.4.2	地体类型·····	200
3.4.3	地体演化·····	203
3.4.4	地体研究方法·····	206
3.5	地幔柱学说·····	211
3.5.1	思想溯源·····	212
3.5.2	热幔柱·····	214
3.5.3	冷幔柱·····	220
3.5.4	地球全局性物质对流·····	223
3.6	前板块构造·····	232
3.6.1	早前寒武纪独特的构造样式·····	233
3.6.2	前板块构造过程与体制·····	239
主要参考文献·····		258
索引·····		279
后记·····		281

1.1 地球的起源

1.1.1 从宇宙环境到原始地球

地球是宇宙演化到一定时期的产物，为此，必须认识宇宙起源才能更好地理解地球的起源。宇宙起源于“空”或“无”的思想可以追溯到 2500 多年前的圣人老子。《道德经》中第四章所言的“道冲而用之或不盈，渊兮，似万物之宗”，“冲”就是虚空（即现代物理学中的真空场涨落，平均值为 0），“不盈”是无穷尽之意，刻画了“道”的本质：空洞或空无。宇宙演化就如其第四十二章所言“道生一，一生二，二生三，三生万物。万物负阴而抱阳，冲气以为和”，可见，“道”为空，是万物之宗，万物包含有我们可见的“明物质”（阳）和不可见的“暗物质”（阴），它们在宇宙中和谐共存。四方上下曰宇，古往今来曰宙，因而古人认为宇宙的本质就是时间与空间，但现今的宇宙本质中还包括物质和能量（李三忠等，2015a）。

早在牛顿提出力学第三定律的年代，人们认为宇宙中一切天体运行都是遵循牛顿第三定律的，宇宙是稳态发展的、可预测和计算的，这个理论被称为宇宙的稳恒态理论。但自 1927 年，勒梅特（Georges Henri Joseph Édouard Lemaître）提出宇宙灾变起源后，许多学者认为宇宙源于大爆炸（big bang），而并非是稳态发展的。20 世纪 20 年代发现的遥远星系中的光谱红移现象（图 1-1）和 1929 年美国天文学家哈勃（Hubble）提出星系谱线红移和星系与地球之间的距离成正比的规律，证实了现在宇宙依然在膨胀的事实。之后，天体物理学家伽莫夫（George Gamow）于 1946 年将爱因斯坦的广义相对论融入宇宙理论中，提出了宇宙大爆炸模型。再后来，宇宙背景辐射被发现，再次证实了宇宙大爆炸理论。美国麻省理工学院的艾伦·古思（Alan Guth）于 1980 年首次提出了暴胀理论。直到 20 世纪 90 年代，宇宙学界、离子物理学界认为，宇宙起源于 137 亿年前的大爆炸，一切物质、能量、时间和空间都由此产生。大爆炸理论认为，现在的宇宙曾有一段温度从高到低、物质密度从大到小的演化史；但也有不同观点，认为宇宙一诞生就是均一的，密度保持不变。

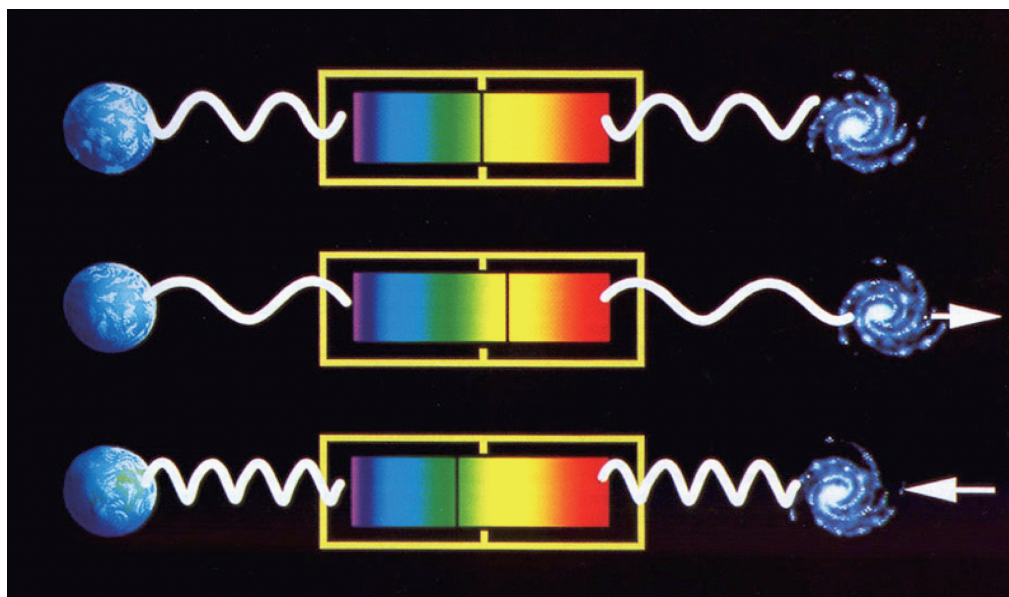
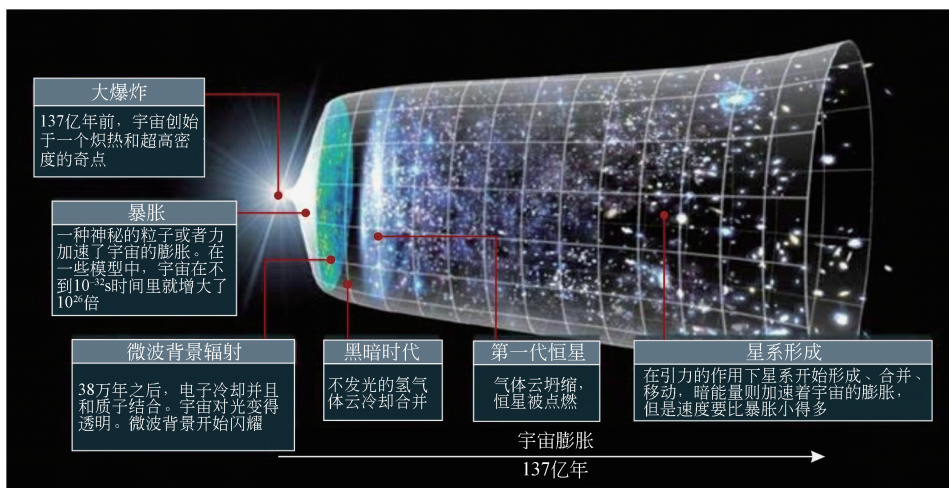


图 1-1 遥远星系的光谱红移现象

上部图像表明物体（如星系）没有运动时的光谱状态，黄线为谱线黑色位置；中间图像表明物体远离时，引起光谱中黑线向红色一段偏移，叫红移；下部图像表明物体向观察者移动，引起谱线向蓝色迁移，叫蓝移

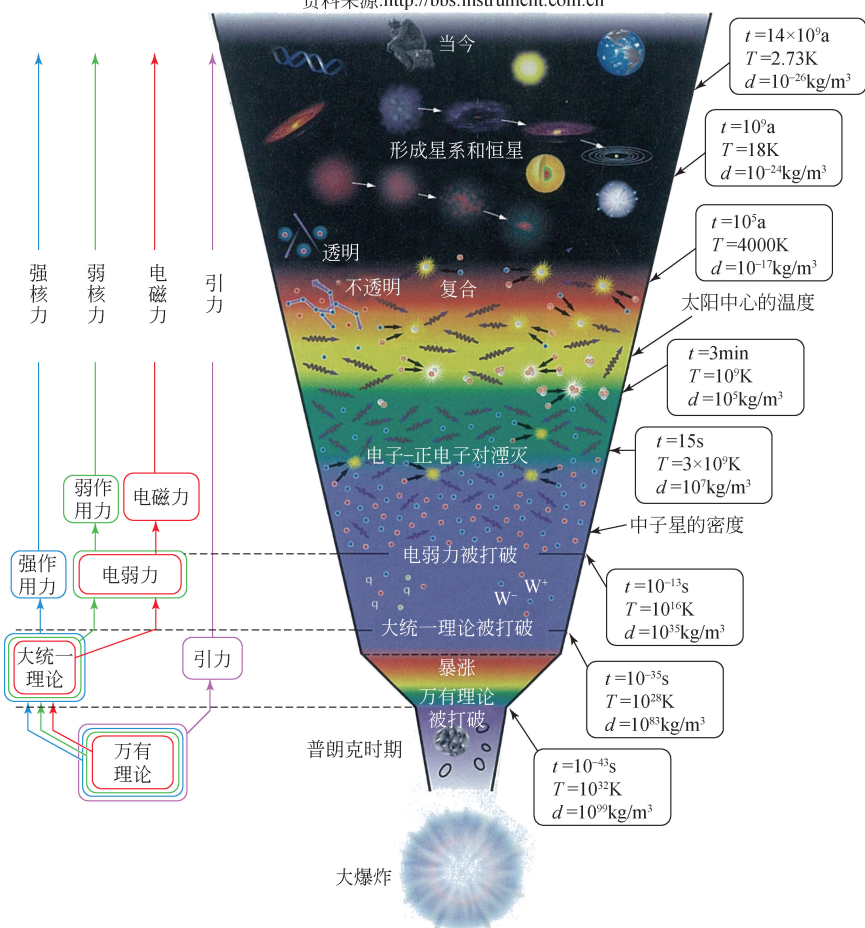
资料来源：<http://astronomyonline.org/exoplanets/Exoplanets.asp>

爆炸前，宇宙所有的能量和物质都浓缩为一个质点（奇点）。2006 年，诺贝尔物理学奖获得者约翰·马瑟（John Mather）提出，大爆炸前整个宇宙只有数十立方厘米，原始物质的约 10cm^3 可能构成了现在的整个宇宙。这似乎不可理解。约翰·马瑟通过一系列计算指出，这是因为现今宇宙是由空洞构成的，正如原子核相对原子来说，原子核的体积非常渺小，宏观宇宙和其微观构成都是大大可压缩的。20 世纪最伟大的天文学家霍金（Hawking）对宇宙大爆炸 10^{-43}s 后的演化图景作出了清晰阐释。在宇宙大爆炸的瞬间，大爆炸 10^{-43}s 后宇宙从量子背景出现，称普朗克时代，温度高达 10^{32}K （图 1-2）。大爆炸 10^{-35}s 后称大统一时代，温度高达 10^{28}K ，可能因自发性破缺，原始“超力”开始破裂，出现强核力、电弱力和引力，同时氘（ T 或 ^3H ）、氦（ He ）类稳定原子出现。大爆炸 10^{-6}s 后为强子时代，温度高达 10^{14}K 。大爆炸 10^{-5}s 后质子和中子形成。大爆炸后约 0.01s 为轻子时代，宇宙的温度是 1000 亿 $^{\circ}\text{C}$ 或 10^{12}K ，物质以光子、电子和中微子为主，质子、中子仅占 $1/10$ ，大爆炸后的 1s 宇宙温度是 100 亿 $^{\circ}\text{C}$ ，大爆炸后 $1\sim 10\text{s}$ 称为辐射时代，温度是 $10^{10}\sim 5\times 10^9\text{K}$ ，基本粒子开始合成原子核，能量以光子辐射形式出现。大爆炸后 3min ，温度降至 10^9K ，进入氦形成时代，宇宙直径膨胀到约 1 光年。大爆炸后 $1000\sim 2000$ 年，进入物质时代，温度降至 10^5K ，物质密度大于辐射密度，物质从辐射背景中透明出来，物质温度低于辐射温度（图 1-2）。



(a) 暴胀宇宙的时间线(NASA/WMAP SCIENCE TEAM)

资料来源: <http://bbs.instrument.com.cn>



(b) 宇宙演化纪元(佩林等, 2015)

随着宇宙大爆炸后不断膨胀冷却，根据在不同温度下可以形成的粒子类型，宇宙经历了一系列不同阶段。随后，通过发生物质引力塌缩形成星系和恒星及恒星内部形成的元素可能发生的化学反应，宇宙最终形成了目前的结构

图 1-2 暴胀宇宙的时间线和宇宙演化纪元

1957 年伯比奇 (Burbidge) 夫妇、福勒 (Fowler) 和霍伊尔 (Hoyle) 等提出元素是在宇宙早期形成过程中合成的假说, 认为元素是在难以置信的高温环境下熔合形成, 经历了 8 个生成阶段: ①氢 (H) 燃烧形成 He; ②He 燃烧形成碳 (C) 核; ③粒子与氦 (Ne) 反应相继形成镁 (Mg)、硅 (Si)、硫 (S)、氩 (Ar) 等过程; ④钒 (V)、铬 (Cr)、锰 (Mn)、铁 (Fe)、钴 (Co)、镍 (Ni) 等形成 (e 过程); ⑤慢中子俘获过程 (s 过程); ⑥快中子俘获过程 (r 过程); ⑦质子俘获过程 (p 过程); ⑧氚 (T 或 ^3H)、锂 (Li)、铍 (Be)、硼 (B) 等低丰度轻元素生成过程 (x 过程)。化学元素生成后, 宇宙空间介质主要由质子、电子、光子和一些较轻的原子核构成。大爆炸 30 万年 (李轩, 2011) 或 38 万年 (Kaku, 2014) 后, 宇宙温度降到 3000°C , 电子可固定在核子的周围, 不被高温撕开, 原子诞生, 光不被吸收且可以自由传播, 宇宙中的主要气态物质成分逐渐在自引力作用下凝聚成高密度的气体云核, 模糊的宇宙变得透明。大爆炸 1 亿年后, 宇宙温度降至 100K, 类星体形成。大爆炸 10 亿年后, 宇宙开始冷却进入恒星浓缩阶段, 温度降至 $12 \sim 18\text{K}$, 出现第一个星系和恒星, 星系内云雾状的尘埃和气体、星云开始聚集并形成恒星。大爆炸 100 亿年后, 宇宙温度降至 3K, 期间经历了上百代恒星的生死演化, 一些恒星以超新星爆发的形式死亡。

太阳系中的重元素起源于其中某个阶段的超新星爆发, 其中, 一些短寿命同位素 (灭绝核素), 如 ^{26}Al 、 ^{53}Mn 、 ^{244}Pu 、 ^{182}Hf 、 ^{60}Fe 和 ^{129}I , 全部衰变为子体产物 ^{26}Mg 、 ^{53}Cr 、 ^{136}Xe 、 ^{182}W 、 ^{60}Ni 和 ^{129}Xe , 据此可以揭示太阳系最初几百万年的事件序列。而长寿命的铀 (U) 同位素可以被用来确定太阳系的绝对时间。太阳就是位于螺旋状银河系中的一个恒星 (图 1-3), 通过 U 同位素确定的太阳形成时期相对较晚。

U-Pb 法最新测得太阳系的“时间零点”为 $4567\text{Ma} \pm 1\text{Ma}$ (张志强等, 2010), 被普遍接受。此时, 太阳系星云形成一个圆盘状旋转的云团, 正如滑冰运动员的胳膊, 当旋转越快, 其胳膊旋转也越快, 太阳系星云如同该运动并逐渐被压缩, 开始集中进入恒星演化的第一个阶段——引力收缩阶段, 并且太阳系星云物质向其旋转中心聚集, 形成原始太阳 (protosun)。这种思想早期来源于 18 世纪伟大的德国哲学家康德 (Kant) 提出的星云假说。历史上第一次科学地解释地球和太阳系起源问题的正是康德和法国数学家拉普拉斯 (Laplace) 两位著名学者。康德-拉普拉斯星云说认为, 太阳系最初是由气体和固体微粒组成并旋转着的一个庞大原始星云, 原始星云在自身引力作用下不断收缩, 其物质的大部分聚集成成了质量很大的原始太阳。与此同时, 环绕在原始太阳周围的稀疏物质微粒旋转速度加快, 便集中到原始太阳的赤道面, 且密度逐渐增大, 在物质微粒间的相互碰撞和吸引作用下, 渐渐形成团块, 大团块再吸引小团块就形成了行星; 行星周围的物质按同样的过程形成了卫星 (图 1-3)。

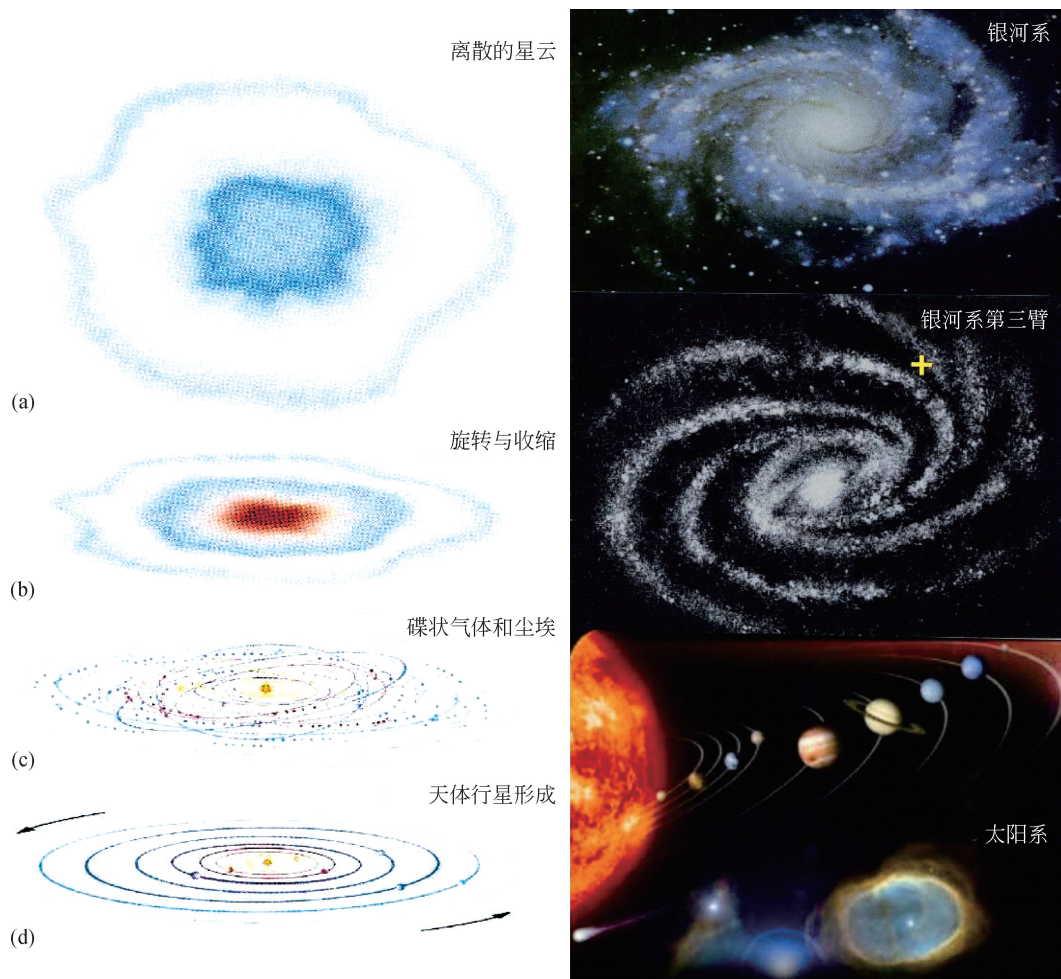


图 1-3 太阳系形成过程

原始太阳周围形成了一片薄圆盘状星云，星云中含有大量固体粒子，一些逐渐集聚在星云赤道面上，形成了一片稀薄的固体粒子层。随着时间推移，粒子层的密度越来越大，形成气体和尘埃，气体和尘埃自身的引力也越来越大，而且起先尘埃颗粒聚集缓慢，随着小物体镶嵌成较大物体后，物体增大的速度也加快（Weidenschilling, 1997）。一定程度后，随后的演化就受到相互之间的引力控制，它的稳定性就遭到了破坏，开始坍缩并分裂成许多小天体，小天体的直径在 10km 左右，这就是小行星。最初的太阳系约有 1 兆个小行星，这些小行星在星云气体中围绕太阳旋转，相互作用的引力使得最大的小行星具有近乎圆形且共平面的轨道，这有利于清扫该平面上较小的物体，相互碰撞使得小行星逐渐凝聚成长。但是，当小行星体无法得到物质补充时，增长速度就慢了下来。这样原始太阳外围的物质就逐渐形成大小不同的行星（图 1-3）。原始地球就是这样形成的，在约 4550Ma，早期

地球的体积大约是现在的 $1/2$ ，且在 4530Ma 左右早期地核就已经出现（图 1-4）（张有学，2002）。早期地球（Early Earth）是指冥古宙 [或称黑暗时代（dark ages）] 的地球，也称为“Hadean Earth”，即是 45.6 亿 ~ 40 亿年的地球。太阳和它的行星统称为太阳系，位于银河系中心外围的第三臂（猎户旋臂）上。目前太阳系由完全不同类型的行星组成，木星、土星、天王星和海王星具有大尺寸、低密度特征，是行星形成过程中的原始产物，几乎包括了整个星系的全部质量，由于它们远离太阳，称为外行星。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，相对外行星靠近太阳，称为内行星。内行星和外行星的根本区别（岩石相对于气体和冰）反映了太阳星云的温度梯度。邻近太阳的地方，大部分硅酸盐和金属从气体中凝结下来（所谓的耐火材料），而远离太阳的小行星带之外，温度较低，含有较多挥发分元素的冰体（即水、甲烷和氨）及固体硅酸盐凝结下来。这个过程是单向的。还有证据显示，在太阳系形成后的约 1 亿年（也有学者认为 5 亿 ~ 6 亿年）（张志强等，2010），一块不知重量的大岩石碎块被抛入太阳系 [图 1-4（c）]，这带来了最后一波大撞击，完成了内行星的主要建造过程。

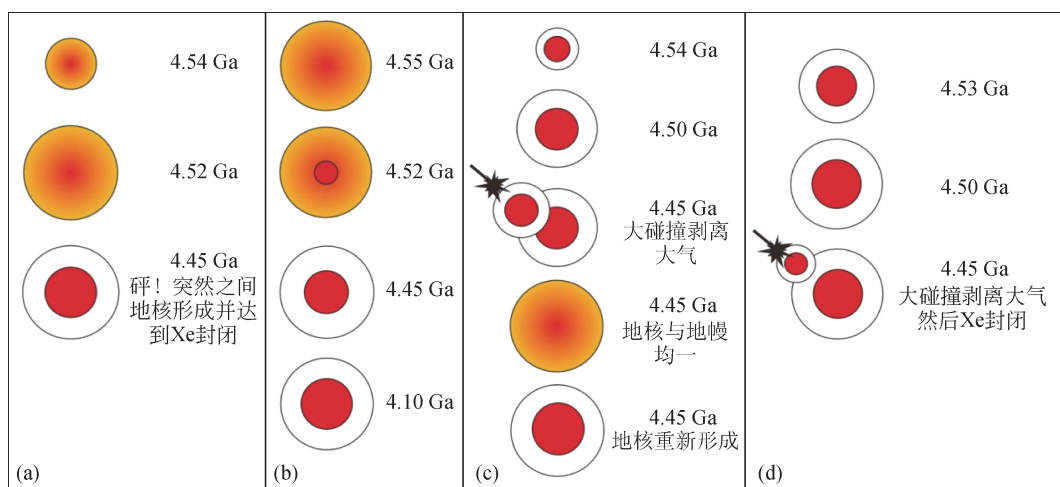


图 1-4 早期地球形成模式（张有学，2002）

(a) 关于地球成长、地核形成和 Xe 封闭的一种不大可能的演化模式：红黄渐变色表示均一的古地球（即地核还没有分离出来，地球内部到浅表有温度差异），分异之后的地核用均一的红色表示，地核外部圈层用白色表示。在此模式下，在 4.50Ga 或者更早的时候地球已经大致达到了它现在的质量。在 4.45Ga 时，核突然形成，Xe 开始保留。

(b) 另外一种不大可能的演化模式：地球迅速成长，然后地核连续缓慢地形成，Xe 逐渐保留，在此模型中，早在 4.55Ga 时，地球就生长达到了现在的大小。然后是持续约 1 亿年的连续成核过程。

(c) 地球成长、地核形成和 Xe 保留的一种可能演化模式：在 4.45Ga 之前（这个时间可能是在 4.50Ga 甚至更早，在随后 $4.50 \sim 4.45\text{Ga}$ 的时期内可能只有很少的增长），古地球大致达到了现在质量的 $70\% \sim 80\%$ 。然后，在 4.45Ga 的时候，一颗火星大小的微星体与地球猛烈相撞，使地球质量增加了 $>10\%$ ，将地球大气的绝大部分剥离，并使地球重新均一化。随后，地核迅速再生，地球的另外约 10% 的质量可能是后来以晚期薄层的形式加入的。

(d) 地球生长、地核形成演化和 Xe 保留的一种可能的演化模式：地球连续生长的同时地核形成增长。由此模型所得到的地球生长和地核形成的平均年龄是 4.53Ga 。古地球在约 4.49Ga 时达到现在质量的 90% 。在 4.45Ga 时，月球大小的天体碰撞剥离了地球的原始大气，然后 Xe 可以存留。因此 Xe 封闭时间反映了碰撞的时间

然而，这“最后的大撞击”是不可能添加足够多的物质而影响地球的总体组成，但在 4000 ~ 3900Ma，地球发生了一次短期的再度增大事件（增大约 10%），初步形成了现今大小的体积。

1.1.2 原始地壳和原始地核

前人曾一度认为，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。地球被认为是由冷的颗粒增生形成的，最初相对均匀。现在认为，原始地核在地球形成之初的几个百万年内就形成了，有学者提出了均匀和非均匀吸积成核两种模式，但它是如何随着地球增长而增生长大依然不清楚，特别是地核内部轻元素的存在原因依然是一个谜。原始地核如何冷却也不清楚，但总体可能是由内向外冷却，不管过程如何，4450Ma 之后的地核大小与现今的地核大小基本一致（Zhang, 2002），只是液态外核在不断冷却缩小，而固态内核在不断增大。

研究表明，随着物质通过不同温度状态的循环及受到星云波和固态物体之间撞击的不同影响，固态物质一般经历反复再熔化、再蒸发和再凝结。地球最初也是这样，在约 4450Ma（张有学，2002），地球遭受了一颗“火星大小”的行星（Theia）撞击 [图 1-4 (c)]，地球发生了最后一次大规模熔融事件，地球再次均一化，原始地核可能消失了。也有人认为与月球形成相关的撞击发生时间是 4530Ma 左右（张志强等，2010），张有学（2002）认为它们可能是同一次撞击事件。之后，地球再次冷却。以往认为在后期增生过程中，地球不断受到陨石的冲击，地球表面逐渐升温变热。但对比月球上大量的陨石坑可知，陨石冲击也未能使月球变热。因此，陨石撞击不是导致地球升温的热来源，而地球增温主要来自最后一次 4450Ma 的大撞击后，冷却期间的重力压缩和在初生地球内部的放射性元素生热，导致地球内部发生部分熔融，广泛的岩浆作用形成了早期地球的岩浆海，岩浆海持续了 2Myr^①。随后，重力作用使得 Fe 向地球内部聚集成新的地核。下沉的 Fe 释放出巨大的重力能，通过摩擦产生更多的热量。同时，轻的 Si、Mg、Al 和氧化物向地表运移，形成原始地壳（primordial crust）。至此，地球的分层结构形成。这个过程就是密度分层作用（density stratification），持续了约 1 亿年。目前，利用锆石定年得出的最早地壳大于 4408Ma（Wilde et al., 2001），利用⁹²Nb-⁹²Zr 体系得出的最早地壳年龄小于 4496Ma，而利用 Sm-Nd 体系获得的最早地壳年龄为 4470Ma，因而得出在两阶段模式下最早地壳形成的年龄为 4450Ma，这与 Xe 封闭年龄及瞬时成核年龄接近（张有学，2002）。这也证明最早地壳和地幔此

^① 本书中，Myr 代表时间段，与 Ma 区分。

时已近分离,而直接获得的最老岩石年龄达 4000Ma (Bowring and Williams, 1999),可进一步确定地球分层结构出现的时间为 4450Ma。在原始地核分离后、原始地壳出现前的初始地幔 (preliminary mantle) 也称为整体硅酸盐地球 (Bulk Silicate Earth, 不含原始大气圈和水圈), 且 Nd、Hf 和 Os 同位素没有参与地核的形成演化。这次撞击也导致了地球旋转轴的倾斜和摆动, 增大了地球围绕太阳的椭圆轨道的偏心率, 这些因素决定了春夏秋冬的长短及温度变化。

然而, 对于原始地壳成因, 地质学家又有了新的认识, 认为原始地壳厚度至少为 50 ~ 100km, 而且原始地壳和莫霍 (Moho) 面的可能起始时间在 45 亿年前 (Hamilton, 2013)。根据冥古宙锆石的¹⁴⁶Sm-¹⁴²Nd 同位素系统研究表明, 太阳系形成之后的 1 亿年 (或可能 30Myr) 地球地幔发生了亏损, 主要原因是富含不相容元素的早期地壳 (early crust) 的抽吸作用 (Bourdon and Caro, 2007); 整体地球 (Bulk Earth) 的¹⁴²Nd 丰度模式研究揭示, 早期地壳可能存储在深部地幔中, 或可能在地幔中经历了大约 1 亿年的再混合 (Bourdon and Caro, 2007), 且早期地壳可能 45 亿年来始终还孤立保存在核幔边界。假如原始地壳是玄武质成分, 那么富集储库夹带并孤立 45 亿年就不可能, 而且本应起源于这个富集储库中的热点熔岩也没有迹象表明存在这个储库; 相反, 假如整体地球具有球粒陨石的 Nd 同位素成分, 那么就没有必要想象存在这样一个隐秘的储库, 则早期地壳必然在现代陆壳形成前经历了地幔对流 (mantle convection) 的再混合 (Bourdon and Caro, 2007)。现今的克拉通地壳并不是原始地壳, 其厚度普遍在 34 ~ 40km, 其 Moho 面比较平坦, Hamilton (2013) 解释在 29 亿至 27 亿年或至 25 亿年期间的 tonalite-trondhjemite-granite (TTG) 大规模陆壳形成后, 富含石榴石的残留下地壳拆沉 (delamination) 导致 Moho 面稳定并保持到现今的厚度, 因此, 多数原始的 Moho 面至少 25 亿年来没有经受拆沉、移离、改造, 但现今的克拉通厚度不能代表原始地壳厚度。

最新的研究进展 (Rizo et al., 2012) 认为, 45.8 亿 ~ 45.4 亿年是地球均匀的增生阶段, 45.4 亿 ~ 45.3 亿年是金属地核与硅酸盐地幔形成阶段, 45.3 亿 ~ 44.7 亿年分馏出现早期亏损和富集地幔储库, 44.7 亿年以后出现基性的冥古宙地壳。这些可能是大撞击后残留的大撞击前的原始地球演化信息。距今 44.7 亿 ~ 40 亿年的地球原始地壳没有陆壳和洋壳之分, 其成分迄今仍存在巨大争论。

1.2 地球的结构与组成

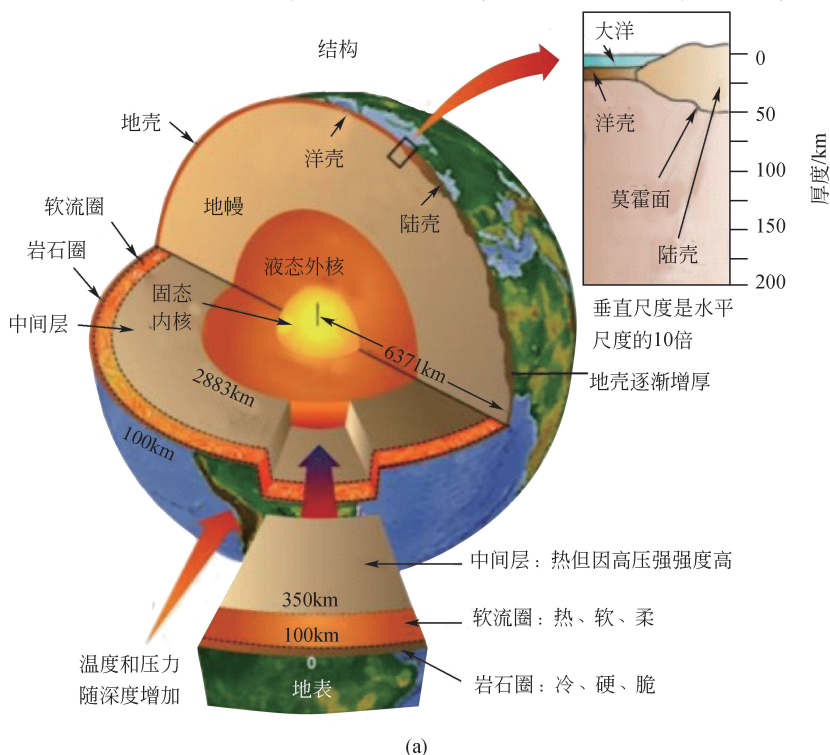
目前已知, 地球上获得的最老年龄纪录的为一颗约 44 亿年锆石的年龄 (Cavosie et al., 2005), 仅有约 0.0001% 的地壳是由 36 亿年前的岩石构成 (Nutman et al., 2006), 绝大多数古老地壳都消失了。如前文所述, 早期地球的分层结构可

能也是三层，但迄今对各圈层的厚度和组成并不明了。

现今的地球在垂向上也分成地壳、地幔、地核三个一级层圈（图 1-5），现代研究表明，其显然不是早期地球的三层结构；三个圈层进一步可以划分为地壳 A 层，地幔的 B、C、D（包括 D' 和 D''）层，以及地核的 E、F、G 层 7 个二级圈层（图 1-6）。地壳和地幔之间为莫霍面，地壳在平面上可分为陆壳和洋壳；地幔垂向上可进一步分为上地幔和下地幔，地幔和地核之间为核幔边界（core-mantle boundary, CMB），称为古登堡面（Gutenberg discontinuity）；地核垂向上也可进一步分为液态外核和固态内核（图 1-5）。

这种圈层结构的内部分层知识来自人类的地震观测技术，浅层结构可利用地震波接收器（地震检波器）的局部排列来获得，而深部结构可采用全球地震监测台网接收穿过地球内部的天然地震信号并对其进行研究获得。

通过地震观测技术发现，洋壳的平均厚度为 6 ~ 7km，陆壳厚度为 25 ~ 70km。在地壳和上地幔处的莫霍面，地震波速度急剧增大。在地壳内向上返回地面的 P 波叫 P_g ，而在莫霍面回返或反射的射线叫做 P_mP 。然而，莫霍面也可能只是有简单的强速度梯度，使走时曲线出现 3 次回转，这 3 次回转酷似较简单的反射。最后， P_n 是沿莫霍面以下、地幔最顶部传播的射线 [图 1-7 (a)]。在交叉点，初至波突然从 P_g 变为 P_n [图 1-7 (b)]。交叉点是地壳厚度的强函数，在大洋地壳，交叉点出现在 $X=30\text{km}$ 左右的地方；而在大陆地壳，交叉点则在 $X=50\text{km}$ 左右的地方出现。当然，有类似的 S 波震相的名称（如 S_mS 、 S_n 等）和转换震相（如 S_mP ）。



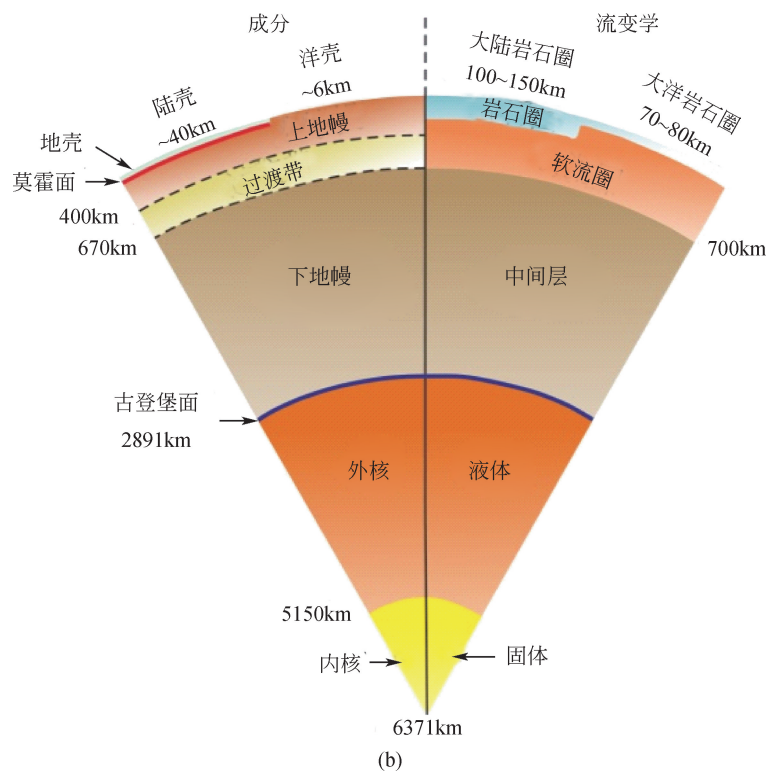


图 1-5 地球的结构、成分和流变学分层 (Condie, 2001)

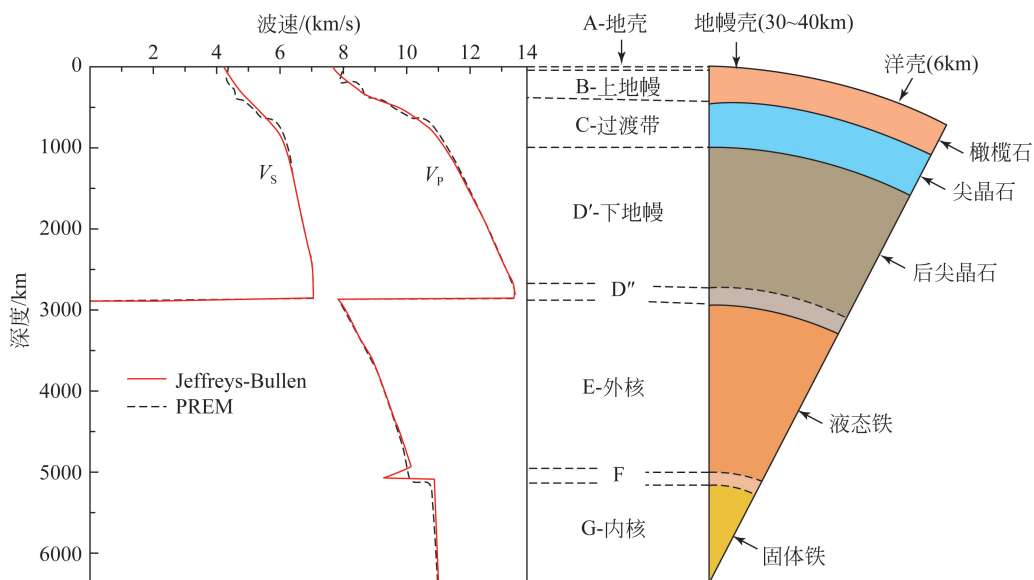


图 1-6 整个地球的地震纵、横波速度随深度的变化及地球结构分层 (Condie, 2001)

Jeffreys-Bullen-Jeffreys 速度模型; PREM-地球初始参考模型 (preliminary reference earth model)