

普通高等教育“十二五”规划教材

工程地质学教程

姜晨光 主 编
范 千 副主编

唐平英 方绪华

Lectures for
Engineering Geology

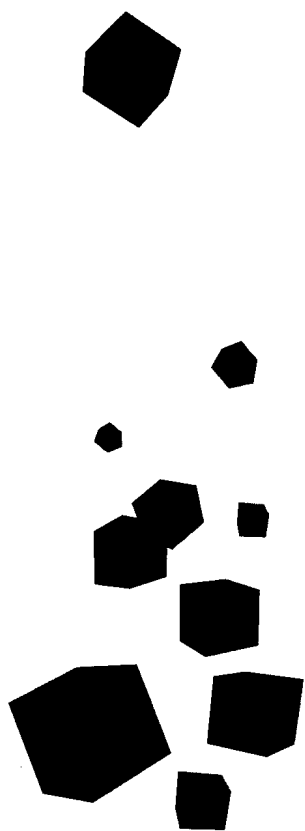


化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

工程地质学教程

姜晨光 主 编
唐平英 方绪华 范 千 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书从教学和科普的角度出发,系统地阐述了地质学和地球科学的概貌、基本理论、基本思想和发展历程,比较全面地介绍了工程地质学的学科特点、科学体系、应用领域、方式方法,为读者打开了一扇了解地球科学、地质科学、工程地质科学的窗口,为高校学生步入工程技术领域后解决各种工程地质、环境地质问题提供了最基本的知识储备,是一把帮助读者解决相关工程地质、环境地质问题的金钥匙。

本书是大土木工程行业的专业基础课教材,适用于本科的土木工程、工程管理、交通运输工程、铁道工程、水利工程、水利水电工程、矿业工程、建筑学、城市规划、环境工程等专业,也可作为本科土建类、水利类、地矿类、交通运输类、地理科学类、环境科学类、测绘类、环境与安全类、农业工程类及其他相关专业的选修课教材。

本书为高等学校非地质类专业“工程地质学”专门教材,也可以用作高等学校“地球概论”类课程的教材。本书除了教材功能外,还可作为非地质行业人员以及对地质科学(地球科学)感兴趣的读者朋友了解地质学、地球科学相关科学问题的科普读物,也可作为涉地各行业专业人士解决各类工程地质问题的一本简明的、工具型的手册。

图书在版编目(CIP)数据

工程地质学教程/姜晨光主编. —北京:化学工业出版社, 2012.5
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-13675-6

I. 工… II. 姜… III. 工程地质-高等学校-教材
IV. P642

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 032526 号

责任编辑:满悦芝

文字编辑:张绪瑞

责任校对:徐贞珍

装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京市振南印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张17 $\frac{3}{4}$ 字数459千字 2012年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:39.80元

版权所有 违者必究

前言

人类的生产和生活、工程及经济活动都位于地壳的浅层，地壳在养育人类的同时，各类浅表地质灾害（比如地震、滑坡、崩塌、泥石流、地面沉降、地面塌陷、地裂缝、不稳定斜坡等）也给人类的生存和生活带来一定程度的威胁，甚至给人类带来巨大灾难（它们不仅吞食着人类创造的财富、甚至也吞噬人类的生命），因此，弄清地壳各类浅表地质灾害形成的地质背景、成因机制、发育过程、分布规律对于规避地壳上各类浅表地质灾害的伤害、实现人与自然最大限度的和谐具有重要的现实意义和实际价值。只有了解与掌握地壳上各类浅表地质灾害的特性才能及时、有效地进行预警与防御，工程地质学恰恰可以为上述问题的应对提供理论和技术上的支持。工程地质学（engineering geology）是研究与人类工程建设等活动有关的地质问题的学科，是地质学的一个分支。工程地质学研究的目的在于查明建设地区或建筑场地的工程地质条件，分析、预测和评价可能存在和发生的工程地质问题以及对建筑物和地质环境产生的影响和危害，提出防治各种不良地质现象的措施，为最大限度地确保工程建设规划的合理性以及建筑物的正确设计、顺利施工和正常使用提供可靠的地质科学依据。工程地质学产生于地质学的发展和人类工程活动经验的积累中，具有悠久的历史（其萌芽可追溯到公元前1000年左右）。17世纪前许多国家虽然成功地建成了许多至今仍享有盛名的伟大建筑，但人们在建筑实践中对地质环境的考虑仍完全依赖建筑者个人的感性认识，17世纪后产业革命兴起、建设事业繁荣使得地质环境对建筑物影响的文献资料逐渐得以积累，第一次世界大战结束后整个世界进入了大规模建设时期催生了现代工程地质学的萌芽。1929年奥地利科学家泰萨基（Karl Terzaghi, 1883—1963，美籍奥地利土力学家，现代土力学的创始人）与其他几位学者共同编撰出版的世界第一部与工程地质学有关的专著《工程师应用地质学》（泰萨基最有名的著作是1925年出版的德文版土力学专著《Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage》）和1937年苏联科学家萨瓦连斯基（X. Л. Саваренский, 1881—1946，英文译名 Savarenski Fiodor Petrovich）出版的《工程地质学》为现代工程地质学做了奠基。20世纪50年代以来工程地质学逐渐吸收了土力学、岩石力学和计算数学中的某些理论和方法使工程地质学的内容和体系得以不断完善与发展。工程地质学主要研究内容包括建设地区和建筑场地中的岩体、土体的空间分布规律和工程地质性质（包括控制这些性质的岩石和土的成分和结构以及在自然条件和工程作用下这些性质的变化趋向）并对岩石和土的工程地质进行分类；建设地区和建筑场地范围内在自然条件下和工程建设活动中发生和可能发生的各种地质作用和工程地质问题的分析和预测（例如：地震、滑坡、泥石流，以及诱发地震、地基沉陷、人工边坡和地下洞室围岩的变形和破坏、开采地下水引起的大面积地面沉降、地下采矿引起的地表塌陷，及其发生的条件、过程、规模和机制，评价它们对工程建设和地质环境造成的危害程度）；防治不良地质作用的有效措施；等等。各类工程建筑物的结构、作用、所在空间范围内的环境不同因此可能发生的地质作用和工程地质问题也不同，故工程地质学往往又被进一步细分为水利水电工程地质学、道路工程地质学、采矿工程地质学、海港和海洋工程地质学、环境工程地质学、城市工程地质学、工程地震学等。工程地质学的研究方法多种多样，有运用地质学理论和方法查明工程地质条件和地质现象空间分布、发展趋向的地质学方法；有测定岩、土体物理及化学特性和测试地应力等的实验测试方法；有利用测试数据定量分析评价工程地质问题的计算方法；也有利用相似材料和各种数理方法再现和预测地质作用的发生、发展过程的模拟方法。随着计

算机技术应用的普及和发展工程地质专家系统（即将专家们的智慧存储在计算机中以备咨询和处理疑难问题）也在逐步建立。

为适应我国高等教育对工程地质学教学的需要，编者从地球的起源入手，以宏观地球论为抓手渐进性地揭开工程地质学的神秘面纱，使学生能对工程地质学的科学体系有一个全面的、整体性的认识，从而为学生能够以更开阔的思路来解决遇到的各种工程地质问题奠定必要的基础、对“天、地、人”的良好和谐有所帮助。本教材在工程地质学基本理论的阐述上以“简明扼要、深浅适中，以实用化为目的”为准则，强化了对工程应用环节的介绍。本教材完全采用国家现行的各种规范、标准，大量删减与归纳落伍的、国内尚用的知识、理论和技术，彻底淘汰过时的、国内也已不用的知识、理论和技术，全面介绍目前国际最新的、最流行的、最具普及性的知识、理论和技术，将“学以致用”原则贯穿教材始终，努力借助通俗的、大众化的语言满足读者的自学要求。

本书是编者在江南大学从事教学、科研和工程实践活动的经验积累之一，也是编者 30 余年工程生涯中不断追踪科技发展脚步的部分收获，本书的撰写借鉴了当今国内外的最新研究成果和大量的实际资料，吸收了许多前人及当代人的宝贵经验和认识，也尽最大可能地包含了当今最新的科技成就，希望本书的出版能有助于工程地质科学知识的普及、对从事各类工程活动的人们有所帮助、对人与自然的和谐共处及协调发展有所贡献。

全书由江南大学姜晨光主笔完成，福州大学方绪华、范千；长沙理工大学唐平英；中国有色金属工业长沙勘察设计院尹建章；莱阳市国土资源局姜春妍；山东盛隆集团有限公司于平波；莱阳市住房和城乡建设管理局纪少林、于蕾、孙有国、王世周、时永宝；莱阳市房产管理处王辉、姜子明、宫树本、修金荣；无锡市轨道交通发展有限公司段永强、刘祥勇；江南大学谢爱阳、王培清、时俊成、顾建荣、王风芹等同志（排名不分先后）参与了部分章节的撰写工作。

初稿完成后，苏文馨、徐至善、李锦铭、王浩闻、黄建文等五位教授级高工提出了不少改进意见，为本书的最终定稿做出了重大的贡献，谨此致谢！

限于水平、学识和时间关系，书中内容难免粗陋，谬误与欠妥之处敬请读者多多提出批评与宝贵意见。

主编：姜晨光

2012 年 5 月于江南大学

目 录

第 1 章 地球科学的起源	1
1.1 地球科学的特点与作用	1
1.2 宇宙与地球	2
1.3 地球的起源及演化	7
1.3.1 地球起源与演化问题的历史探索	7
1.3.2 地球起源与演化的求证	9
1.3.3 地球起源与演化的传统主流观点	11
1.3.4 地球起源与演化的当代主流观点	11
1.3.5 地球的基本数据	12
思考题	15
第 2 章 地球的构造	16
2.1 地球的外部圈层	16
2.1.1 地球大气圈	16
2.1.2 地球生物圈	17
2.1.3 地球水圈	17
2.2 地球的内部圈层	18
2.2.1 地球内部的主要物理性质	18
2.2.2 地球内部圈层的划分	19
2.2.3 地球内部圈层的物质组成	20
2.2.4 地核运动	20
2.2.5 矿物	20
思考题	22
第 3 章 地球的地质年代与地质作用	23
3.1 地球的地质年代	23
3.2 地球地质作用的特点	24
3.3 地球的风化作用与剥蚀作用	25
3.3.1 地球的风化作用	25
3.3.2 地球的剥蚀作用	28
3.4 搬运作用与沉积作用	35
3.4.1 搬运作用	35
3.4.2 沉积作用	39
3.4.3 成岩作用	44
3.5 地球的岩浆作用与变质作用	44
3.5.1 地球的岩浆作用	44
3.5.2 地球的变质作用	47
思考题	50
第 4 章 地球的构造运动	52
4.1 地球构造运动的特点	52
4.1.1 地球构造运动的表现	52
4.1.2 岩层的产状	54
4.1.3 褶皱构造	54
4.1.4 断裂构造	56
4.1.5 地震	57
4.2 地球的动力系统	61
4.2.1 大陆漂移说	61
4.2.2 海底扩张说	61
4.2.3 板块构造学说	62
4.2.4 中国近现代的主要地质构造学说	65
思考题	71
第 5 章 地球的资源与环境	72
5.1 地球的资源	72
5.1.1 矿产资源	72
5.1.2 地球的能源	74
5.1.3 土地资源	77
5.2 地球的环境	78
思考题	83
第 6 章 岩石及土的形成与鉴别	84
6.1 主要的造岩矿物	84
6.1.1 矿物的形态	84

6.1.2 矿物的主要物理性质	87	6.5.4 岩石的抗风化性质	103
6.1.3 主要造岩矿物的识别	91	6.5.5 岩石治理的基本措施	105
6.2 岩浆岩的基本特点	92	6.6 特殊土的工程性质	105
6.3 沉积岩的基本特点	94	6.6.1 黄土	105
6.4 变质岩的基本特点	98	6.6.2 膨胀土	107
6.5 岩石的工程性质及工程分类	100	6.6.3 软土	108
6.5.1 岩石的物理性质	100	6.6.4 冻土	109
6.5.2 岩石的水理性质	100	思考题	111
6.5.3 岩石的力学性质	101		
第7章 地质构造的基本特征	112		
7.1 地壳运动及地质作用	112	7.4.1 节理	118
7.2 岩层与岩层的产状	112	7.4.2 断层	118
7.2.1 岩层的产状要素及测定方法	113	7.5 地质构造对土木工程结构稳定性的影响	120
7.2.2 倾斜岩层的厚度与深度	114	7.6 地质年代的鉴别与地质图阅读	120
7.2.3 倾斜岩层的露头形态和露头宽度	115	7.7 水的地质作用	121
7.2.4 地层的接触关系	115	7.7.1 地表流水的地质作用	121
7.3 褶皱构造	116	7.7.2 地下水的地质作用	124
7.4 断裂构造	117	思考题	130
第8章 常见地质灾害的类型与特点	132		
8.1 滑坡	132	8.3.3 泥石流地区道路位置的选择原则	138
8.1.1 滑坡的形成条件及影响因素	133	8.3.4 泥石流的防治	138
8.1.2 滑坡的分类	134	8.4 岩溶	138
8.1.3 滑坡的防治	134	8.5 地震	140
8.2 崩塌、落石与岩堆	135	8.6 潜蚀与流砂	142
8.2.1 崩塌与落石	135	8.6.1 潜蚀产生的原因	142
8.2.2 岩堆	136	8.6.2 潜蚀的防治	143
8.3 泥石流	136	8.6.3 流砂及其防治	143
8.3.1 泥石流的形成条件	136	思考题	144
8.3.2 泥石流的分类	137		
第9章 地质勘察的基本方法	145		
9.1 概述	145	9.3.3 地下坑探工程编录	149
9.2 工程地质调查测绘	146	9.3.4 钻探施工与编录	151
9.3 工程地质勘探	147	9.4 遥感地质勘察	156
9.3.1 原始地质编录	148	9.5 测试及长期观测	156
9.3.2 地下坑探工程	148	思考题	157
第10章 活断层工程地质问题	158		
10.1 概述	158	10.5 活断层研究的基本方法	163
10.2 活断层的基本特点	159	10.6 活断层地区的建筑设计原则	164
10.3 活断层的鉴别标志	161	思考题	165
10.4 我国的活断层分布特点	162		

第 11 章 砂土地震液化灾害	166
11.1 概述	166
11.2 砂土地震液化的机理	166
11.3 影响砂土地震液化的因素	168
11.4 砂土地震液化的判别方法	170
11.5 砂土地震液化的防护措施	171
思考题	173
第 12 章 天然地震及避灾	174
12.1 概述	174
12.2 地震与地震波的基本特征	174
12.2.1 地震产生的条件	175
12.2.2 地震波的特点	176
12.2.3 地震的震源机制与震源参数	177
12.3 我国的地震分布及地震地质特征	178
12.4 地震强度的衡量标准与意义	179
12.5 地震的效应	181
12.5.1 地震的振动破坏效应	181
12.5.2 地面的破坏效应	185
12.5.3 斜坡的破坏效应	186
12.6 场地工程地质条件对宏观震害的影响 特征	187
12.7 地震区抗震设计原则和土木工程结构 抗震措施	188
思考题	189
第 13 章 诱发性地震及防治	190
13.1 概述	190
13.2 诱发型地震的成因分类与特征	190
13.2.1 内动力地质作用诱发型地震	190
13.2.2 外动力地质作用诱发型地震	191
13.3 水库诱发型地震的基本特征	192
13.3.1 水库诱发型地震活动的空间分布 特征	192
13.3.2 水库诱发型地震活动与水库水 位的相关性	193
13.3.3 水库诱发型地震的序列特征	193
13.3.4 内生成因水库诱发型地震的震源 机制	193
13.4 诱发型地震的地质背景	194
13.4.1 诱发型地震的区域地质背景	194
13.4.2 诱发型地震发震区的地质条件	194
13.5 与水有关的诱发型地震机制	195
13.5.1 水对岩体的各种作用	195
13.5.2 水库诱发型地震的两种诱发 机制	196
13.5.3 不同天然构造应力场条件下水 库诱发型地震的诱发机制	196
思考题	197
第 14 章 斜坡稳定问题	199
14.1 概述	199
14.2 斜坡的应力分布特征	199
14.2.1 斜坡应力的分布特点	199
14.2.2 影响斜坡应力分布的主要因素	200
14.3 斜坡变形破坏的基本形式及特征	201
14.3.1 斜坡的变形	202
14.3.2 斜坡的破坏	204
14.3.3 斜坡变形破坏的地质模型	204
14.4 崩塌灾害	205
14.5 滑坡灾害	206
14.5.1 滑坡的形态要素	206
14.5.2 滑坡的识别方法	207
14.5.3 滑动面(带)的研究方法	209
14.5.4 滑坡的分类	210
14.6 影响斜坡稳定的主要因素	212
14.6.1 地质结构影响	213
14.6.2 地表水与地下水的影响	213
14.6.3 地震影响	214
14.6.4 人类活动影响	214
14.7 斜坡稳定性的评价方法	214
14.7.1 定性评价法	214
14.7.2 定量评价法	216
14.8 斜坡变形破坏的防治措施	217
思考题	220
第 15 章 岩溶问题	222
15.1 概述	222
15.2 碳酸盐岩的溶蚀机理	223
15.2.1 碳酸盐岩的溶蚀过程	223
15.2.2 混合溶蚀效应	224

15.2.3 其他离子的作用	225	15.4.4 水库岩溶渗漏的防治措施	235
15.3 影响岩溶发育的因素	226	15.5 岩溶区的地基稳定问题	237
15.3.1 碳酸盐岩岩性的影响	226	15.5.1 岩溶区地基变形破坏的主要形式	237
15.3.2 气候对岩溶发育的影响	227	15.5.2 岩溶区土洞及地表塌陷的成因	238
15.3.3 地形地貌对岩溶发育的影响	228	15.5.3 岩溶地基稳定性的定性评价方法	239
15.3.4 地质构造对岩溶发育的影响	229	15.5.4 岩溶地基稳定性的定量评价方法	239
15.3.5 新构造运动对岩溶发育的影响	230	15.5.5 岩溶地基的处理措施	241
15.4 岩溶的渗漏问题	232	思考题	241
15.4.1 岩溶地区水库渗漏的形式	232		
15.4.2 影响水库渗漏的因素	233		
15.4.3 岩溶区库坝位置选择时的注意事项	235		
第 16 章 岩石的风化问题	242		
16.1 概述	242	16.4 岩石风化的防治措施	248
16.2 岩石风化的主要影响因素	243	思考题	249
16.3 岩层风化壳的垂直分带	245		
第 17 章 渗透变形问题	250		
17.1 概述	250	17.3.1 渗透变形的可能性与类型判定	255
17.2 渗透变形产生的条件	251	17.3.2 坝基各点实际水力梯度的确定	255
17.2.1 土与渗透变形有关的结构特征指标	253	17.3.3 临界水力梯度和允许水力梯度的确定	256
17.2.2 渗透变形产生的充分条件	254	17.4 渗透变形的防治措施	258
17.3 渗透变形的预测方法	255	思考题	260
第 18 章 地面沉降问题	261		
18.1 概述	261	18.4 地面沉降的预测方法	265
18.2 地面沉降的诱发因素与地质环境	261	18.4.1 地面沉降预测的主要形式	265
18.2.1 地面沉降的诱发因素	261	18.4.2 地面沉降预测的基本方法	266
18.2.2 地面沉降的地质环境	262	18.4.3 地面沉降的变形计算	267
18.3 地面沉降的机理	263	18.4.4 地面沉降的危险性评估	268
18.3.1 多层含水系统中承压水位下降引起的应力变化	263	18.5 地面沉降的控制与治理	269
18.3.2 黏性土层的变形机理	263	18.5.1 地面沉降的治理	269
18.3.3 黏性土层的固结历史	264	18.5.2 地下水的人工回灌	269
18.3.4 黏性土的固结状态	265	思考题	271
参考文献	272		

第 1 章 地球科学的起源

1.1 地球科学的特点与作用

地球科学 (Geoscience, 简称地学) 是系统研究地球的物质组成、运动、时空演化及其形成机制的科学体系, “将今论古” 是地质学思维的重要方法。地球科学的研究对象就是地球 (包括大气圈、水圈、生物圈、地壳、地幔、地核等), 研究内容包括地球的物质组成、相对运动规律和形成机制。其主要学科包括地质学 (Geology)、地理学 (Geography)、地球物理学 (Geophysics)、气象学 (Meteorology)、水文学 (Hydrology)、土壤学 (Soilscience)、测绘学 (Geodesy)。地质学的研究重点是地壳和岩石圈, 已涉及地幔。当今世界上最深钻孔位于俄罗斯西北部的科拉半岛、深度为 12.261km [中国第一口大陆科学钻探工程钻孔位于江苏省连云港市东海县城西南 17km 处, 属东海县安峰乡毛北村, 地理坐标为东经 $118^{\circ}39'57'' \sim 118^{\circ}40'42''$, 北纬 $34^{\circ}23'34'' \sim 34^{\circ}25'05''$, 孔深 5km, 已于 2005 年 5 月完成。2011 年 10 月 23 日在海拔 4400m 的喜马拉雅山罗布莎地区国家深部探测专项罗布莎科学钻探实验的启动标志着中国地球深部探测计划全面展开, 这是中国有史以来最大的地质勘探计划, 除罗布莎之外, 山东莱阳、云南腾冲等地的 6 个钻探项目也在进行中, 国家将从这 7 个钻探点中选择一处进行超越 1 万米的科学钻探 (与此同时, 深部探测计划的另一个实验项目深地震反射剖面探测也在西藏阿里进行。这种探测是用地下爆破的方法, 通过追踪反射信号, 探明数十千米地下的结构, 用科学家的话说就是给地球深层做一个 CT。科学钻探和深地震剖面探测只是中国地球深部探测计划的两个组成部分, 这一计划集合了上千名科研人员, 共实施大地电磁探测、地壳全元素探测等九个实验项目, 将在 2012 年底前完成。在深部探测计划基础上, 中国科学家正在筹划详细揭示中国地壳结构的“地壳探测工程”, 为保障资源供应、防灾减灾和发展地球科学提供全面的深部数据和信息)。另外, 日本制定有塔塔鲁斯计划 (Tartarus Project), 最终目标是钻进到地下 15km 深处]。地质学有很多分支学科, 专门研究地壳物质组成的学科有结晶学、矿物学、岩石学、矿床学等, 专门研究地壳运动、地壳形成与演化的学科有构造地质学、古生物地史学等, 还有一些集成性的学科 (或叫边缘学科, 比如数学地质、地球化学、遥感地质等)。地球科学的研究特点是注重宏观与微观的结合、整体性与特异性的关系、时间漫长性与瞬间性的关系以及自然过程的复杂性和规律性。研究方法主要包括野外地质调查、仪器观测、3S 技术 (GPS、GIS、RS)、实验室分析测试、历史比较 (以观察研究现代地质作用过程和结果为基础, 再将地史时期地质作用结果与之比较, 从而推断昔日的地质作用, 如珊瑚、海陆变迁、山脉形成等)、电子计算机智能分析与模拟、综合分析等。当代自然科学一些重大理论问题的最终解决是离不开地球科学研究成果的 (比如天体演化、生命起源等), 地球科学在寻找、开发、利用自然资源中具有重要的不可替代的重大作用, 地球科学是预测和预报各类自然灾害 (比如地震、地裂缝、滑坡、沙漠化、厄尔尼诺现象、拉尼娜现象等) 的基础, 也是改善自然环境 (比如温室效应、大气污染、水资源污染等) 的重要依托技术。图 1-1-1 和图 1-1-2 显示了厄尔尼诺现象和拉尼娜现象发生时的遥感图像 (“厄尔尼诺” 是西班牙文 “圣婴” 的译音, 是指热带太平洋东部和中部海温异常和持续地变暖。“拉尼娜” 是西班牙文 “小女孩” 的译音。“拉尼娜” 与 “厄尔尼诺” 相反, 指的是热带太平洋

中部和东部的海温异常和持续地变冷), 图 1-1-1 显示当“厄尔尼诺”达成成熟期时, 热带太平洋暖水区从秘鲁西岸向西伸延至太平洋中部; 图 1-1-2 显示太平洋冷水区从秘鲁西岸向外伸延, 显示“拉尼娜”现象正在发展。

有史以来到 17 世纪以前是地质学的萌芽期, 人们对地质学的认识散见于各类历史典籍, 像中国的《禹贡》、《山海经》、《管子》、《水经注》[南北朝地学家酈道元(约 470—527)著]、《梦溪笔谈》[宋朝沈括(1031—1095)著, 比莱伊尔早了 700 年]、《徐霞客游记》[明朝徐宏祖(1586—1641)著]、《天工开物》[明朝宋应星(1587—1666)著]等。在地质学领域卓有建树的科学家不胜枚举, 像古希腊学者毕达哥拉斯(公元前 571—公元前 497)、亚里士多德(公元前 384—公元前 322); 古罗马的斯特拉波(公元前 63—公元 23 年); 中国科学家张衡(东汉, 公元 132 年发明了地震仪); 15 世纪到 16 世纪的哥伦布、麦哲伦; 意大利的达·芬奇(1452—1519); 法国的阿格里柯拉(1494—1555)等。

17~19 世纪是地质学的创立与初步发展时期, 对这一时期作出过重大贡献的科学家有意大利物理学家和天文学家伽利略, 物理学家和数学家托里拆利; 德国的魏尔纳(A. G. Werher, 水成论的代表); 美国的郝屯(Hutton, 火成论的代表); 法国的居维叶(D. G. Cuvier, 灾变论的代表); 法国的拉马克(Lamarck)与英国的莱伊尔(Lyell)(均变论的代表)等。

20 世纪至今为地质学的繁荣和全面发展时期, 新的理论不断涌现(比如固定论与活动论、竖直运动与水平运动学说、槽台说、大陆漂移说、海底扩张说、板块构造说等), 各大构造地质学派争奇斗妍(陈国达的“地洼学说”、李四光的“地质力学”、黄汲清的“多旋回说”、张伯声的“波浪状镶嵌说”、张文佑的“断块说”等), 新技术与新方法层出不穷[比如高温高压实验、同位素地质学、电子计算机应用、电子显微镜(TEM、SEM、EPA)等], 环境地质蓬勃发展, 相关学科(比如地理学、气象学)协同快进。地球科学的发展也逐渐由资源型拓宽到社会型, 从定性转变为定量, 为人类上天、入地、下海、入微奠定科学的基础依据。其他学科的发展也在不断地推动地球科学的发展(比如航空、航天、遥感、显微、超显微、超深钻、人工地震、达尔文进化论、莱伊尔现实主义原理、地球系统科学等), 促进了地球科学新思维的产生与形成, 使地球科学由单一化走向整体化和系统化(比如从整体上认识地球, 用圈层的观点研究地球, 用运动学、动力学观点预测未来)。

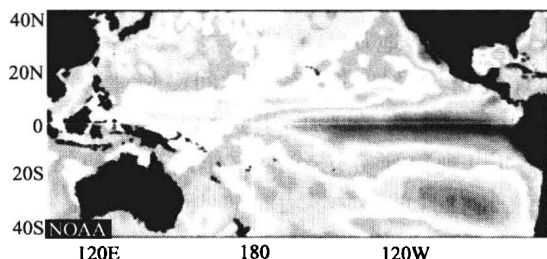


图 1-1-1 厄尔尼诺现象发生时的遥感图像

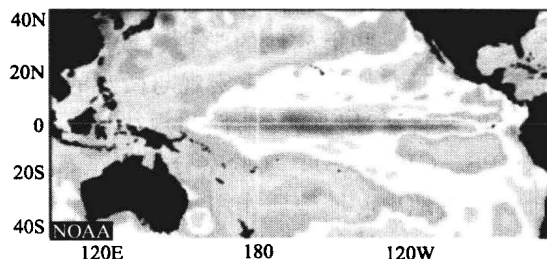


图 1-1-2 拉尼娜现象发生时的遥感图像

1.2 宇宙与地球

古人云“四方上下曰宇, 古往今来曰宙”。宇宙(Universe)是无限、永恒、不断运动变化的客观物质世界。“宇”是空间的概念, 代表无边无际; “宙”是时间的概念, 代表无始无

终。目前的主流观点认为宇宙是无限的，其产生于150亿年前的大爆炸，气体与宇宙尘埃组成的星云逐渐形成太阳系，地球是太阳系一员、是宇宙中的尘埃在引力作用下逐渐形成的，地球形状是梨形，地表形态复杂多样，大陆型地壳与大洋型地壳明显不同，地壳物质总是力求同下部物质达到平衡状态（这种均衡总是暂时的和相对的）。

通常认为宇宙中的天体和物质包括恒星（Star）、星际物质、星际云、星云（Nebula）、天体系统（Sphere Systems）等。恒星是由炽热气体组成的、自身能够发光的球形或类似球形的天体，其主要特征可概括为以下7点〔即：它是宇宙中最重要的天体，集中了宇宙中相当大的能量；构成恒星的主要气体为氢、其次为氦，其他元素很少；拥有巨大的质量是恒星能发光的基本原因；体积相差悬殊，小的直径在1000km左右、大的可为太阳的2000倍；平均密度相差悬殊；距离地球都非常遥远，最近的半人马座 α 星4.3（Ly）；恒星不恒，一直在运动〕。星际物质是弥漫于星际空间内极其稀薄的物质，包括星际气体和星际尘埃。星际云是星际物质的密集形式。星云（Nebula）则是星际物质更加庞大和更加密集的形式。宇宙中物质是运动的，并有一定的系统和规律，它们相互吸引和旋转，这种系统称为天体系统。

20世纪初天文学家斯里弗尔（V. M. Slipher）发现星系以每秒数十万米的高速在退行；1929年哈勃（E. P. Hubble）观测到河外星系的退行资料，发现星系离我们愈远退得愈快；1916年爱因斯坦（A. Einstein）提出了广义相对论，演绎出宇宙在膨胀的理论；后来，天文学家们继续观测证明宇宙在膨胀。宇宙为何膨胀，人们认为是宇宙大爆炸的结果（多种事实证明，大爆炸的发生距今约150亿年左右）。

太阳系（Solar System）是人类生存的星系，与人类息息相关，太阳是其中唯一的一颗恒星（占太阳系的99.87%、并发出强光和热）。围绕太阳旋转的是8大行星，小行星带及卫星、陨星和彗星等。太阳系天体以太阳为中心作高速旋转，自转和公转方向相同。太阳系行星分布及运转几乎都在一个共同平面内，该平面叫赤道面。太阳系的起源有很多假说，比较典型的是康德~拉普拉斯星云假说。1775年哲学家康德（I. Kant）认为，在万有引力作用下，原始弥漫物质逐渐分别凝聚，形成了太阳系内的各天体。1796年法国科学院院士拉普拉斯（P. S. Laplace）对此从数学和力学角度进行了阐述，他认为太阳系本是一团旋转的炽热气体，由于冷却收缩、越转越快、离心力加大、变得扁如圆盘，当外缘离心力大于引力时一部分物质被抛出成为圆环，抛出物分离凝结成行星（行星周围的卫星也有类似形成过程），星云的中心就成为太阳。拉普拉斯设想太阳系是炽热气体冷凝而成，星云物质冷却收缩的过程就是地球的形成过程。但天文探测和地质研究结果不支持这种假设，认为形成太阳系的星云不是热的，而是冷的气体和尘埃。目前较为一致的看法是：冷星云里微粒互相吸引形成星子；星子互相吸引，大吃小，不断吸引堆积，逐渐增大，形成尘埃集合体；温度高、轻者（气体）跑掉，重者（尘埃）以固体为主，留在地球表面，受万有引力作用向中心聚积、体积缩小、物质密度越来越大；收缩并非无限会由于惯性离心力作用达到平衡；尘埃向中心集中，体积收缩、压力加大、会放出热，放射性元素蜕变和陨石撞击会放出热，因此，局部或一个时期的地球是高温熔融状态（尤其在太古宙，460Ma）；收缩停止，热者上升，又发生膨胀，轻者上升，重者下沉，形成了地核、地幔、地壳和水圈、大气圈等内部、外部圈层构造。总之，行星地球是宇宙中的尘埃在引力的作用下逐渐形成的。

人们通常习惯将大地水准面所封闭的地球形状作为地球形状，用参考椭球作为其数学形状〔其长半轴 $A=6378137\text{m}$ 、短半轴 $B=6356752\text{m}$ 、扁率 $\alpha=(A-B)/A=1/298.257$ ，平均半径 $R=(A+A+B)/3=6371\text{km}$ 〕。大地水准面（Geoid）可理解为由平均海平面构成并延伸通过陆地的封闭曲面。地球的真实形状略呈梨形，南极向内下凹30m、北极向上凸出约10m。

地球的表面分陆地（占 29%）和海洋（占 71%）两部分，陆地多分布在北半球、海洋则多分布在南半球，地球陆地和海底的表面是起伏不平（世界屋脊、号称地球第三极的珠穆朗玛峰海拔 8844.43m，太平洋西侧的马里亚纳深海沟海拔 -11034m）。2009 年 7 月 1 日消息，英国《每日邮报》报道，美国宇航局 Terra 卫星绘制了一张令人吃惊的新地球地图（全球数字高程模型，见图 1-2-1），展示了地球上几乎每一个地区的高程，“全球数字高程模型”在细节上展现了地球的大陆块 [美国宇航局科学家伍迪·特纳（Woody Turner）表示：“这是迄今为止向全世界开放的最为完整的全球数字高程数据。借助于这张独一无二的地图，很多领域的用户和研究人员均可获取他们需要的高程与地形信息。全球数字高程模型地图可以应用于工程学、能源探测、自然资源保护、环境管理、消防、地质勘探以及城市规划等多个领域”]。2011 年 3 月 31 日，欧洲空间局（ESA）在德国慕尼黑市举行的一次科学家研讨会上公布的欧空局卫星绘制的重力场地球（即大地水准面图）（见图 1-2-2），新的大地水准面史无前例的精度将使科学家对洋流的速度和路径有更好的了解，同时还将改进对于它们如何散播污染物的评估结果 [该研究能够帮助他们进一步了解自然灾害，更好地应对类似日本大地震和海啸这样的灾难。大地水准面也将提供关于发生在地球深处的地质学进程的新的认识，其中包括被挤压到另一个地壳构造板块之下的板块运动情况，以及在结合了其他数据后将有助于增进对极地冰原厚度与质量的评估。完成这项观测任务的 GOCE（地球重力场和海洋环流探测卫星）于 2009 年 3 月从俄罗斯西北部的普列谢茨克发射场发射升空，其所运行的极地轨道距地面只有 254km（是所有在轨科研卫星中最低的），其发回的最新数据有望让科学家对海洋活动有新的了解，同时构建一个通用系统，用以测量世界任何一个角落的海拔高度。这些数据还会有助于科学家对地震和火山等地质进程的研究。其所携的重力梯度仪灵敏度极高，能够探测到 10 万亿分之一的引力变化，从而使其能够对从山脉到海底的引力差异进行测绘。GOCE 能够为我们提供品质和解析度空前的海洋动力地形学特征和环流型图像，GOCE 重力梯度仪可以以三个方位感受重力场，虽然构造板块移动无法从太空直接观测，但引力数据能够帮助我们了解与自然灾害有关的过程，并最终进行预测。GOCE 揭示地球不同地区引力差异明显（见图 1-2-3），两张图说明了“引力变化曲线”（地球远非一个表面平坦的球体，赤道半径就比两极长出约 20km。这个椭圆形遍布高高的山脉和深深的海沟。此外，地球内层并不包括完美的同质岩石外壳——有些区域密度或高或低。这种因素会造成重力加速度在不同地方会有微小但却重要的差异）。重力梯度仪即便对极为微小的加速度也极为敏感，要想获得地球引力场的三维视角，只要测量 GOCE 卫星所有三个轴的加速度即可。地球物理学家所称的“大地水准面”（geoid）是一种特殊类型的地球模型，可追踪理想的“水平”表面（在这个平面上的任何点，引力都与其呈直角。如果你将一个皮球放在这个假设的平面上，它不会滚动，即便看上去有坡度）。对于从事海面“高山”和“山谷”成因研究的海洋学家来说，大地水准面的重要性高于一切，如果当地的引力差不会驱使海水形成这些特征，那么诸如水流、大风和潮汐等其他因素应该就是它们的成因。在当前学校所使用的教材中都无不例外地认为在地球上的任何一个地方物体的重力加速度都是 9.8m/s^2 ，然而事实上这样的结论并不全面，地球的地形结构以及高山、海洋深处的沟壑等因素都无不例外地影响着重力场，因此重力加速度的数值不能一概而论。科学家们所进行重力测量研究的辅助仪器名叫“倾斜计”（gradiometer），倾斜计实际上是由三对重力加速计仪器所共同构成的，当卫星探测装置围绕着地球在运行轨道上观测时重力加速计则会在不同的位置以及运行点上对当时的重力数值进行测量]。

为了合理描述地球的陆地地形特征，人们将地球的陆地形态分为山地（Mountains）、丘陵（Hills）、平原（Plain）、高原（Plateau）、盆地（Basin）、大陆裂谷（Continental Rift）等。山地是指海拔高程大于 500m、相对高差大于 200m 的地形，海拔高程 500~1000m 为低

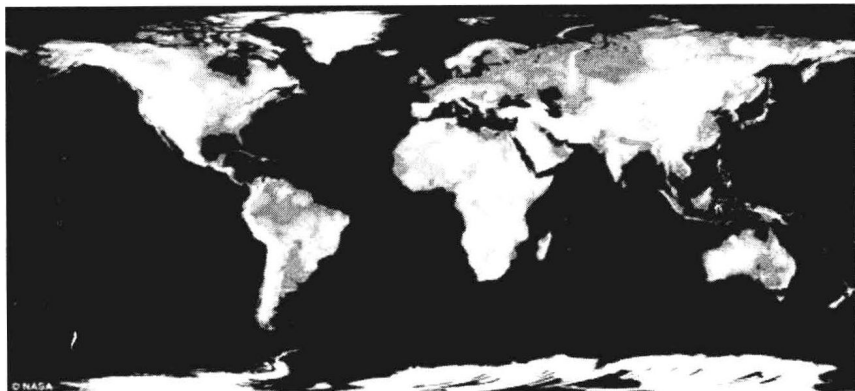


图 1-2-1 美国宇航局“全球数字高程模型”

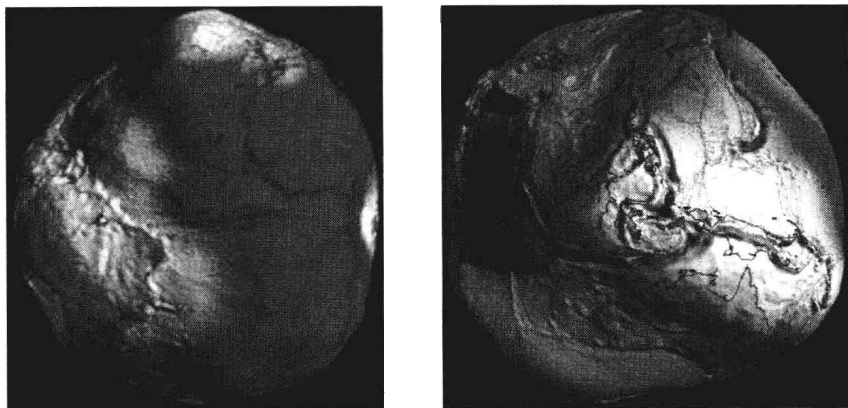


图 1-2-2 欧空局卫星绘制的地球重力场图谱

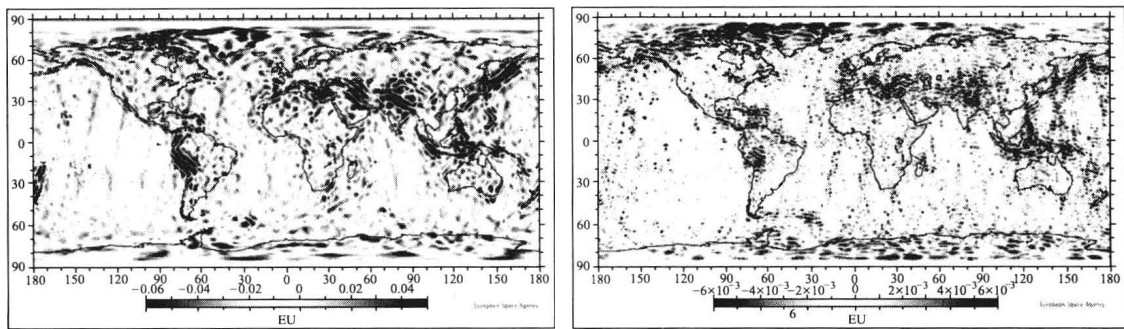


图 1-2-3 欧洲卫星揭示地球不同地区引力差异明显

山、1000~3500m 为中山、3500m 以上为高山，线状延伸的山体称为山脉，成因上相联系的若干相邻的山脉称山系（比如大陆上最宏伟、最重要的阿尔卑斯-喜马拉雅山系和环太平洋山系）。丘陵是指海拔小于 500m、相对高差数十米的低矮浑圆的地形。平原是指海拔小于 200m、相对高差数不超过数十米的地形。高原是指海拔大于 500m、表面比较平坦的地形。盆地则是指周围高、中央低的地形。大陆裂谷指宏伟的线状洼地，是地壳上拉张的结果，呈“之”字型（见图 1-2-4），东非裂谷是典型的大陆裂谷。

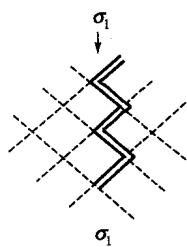


图 1-2-4 呈“之”字型的拉张裂谷

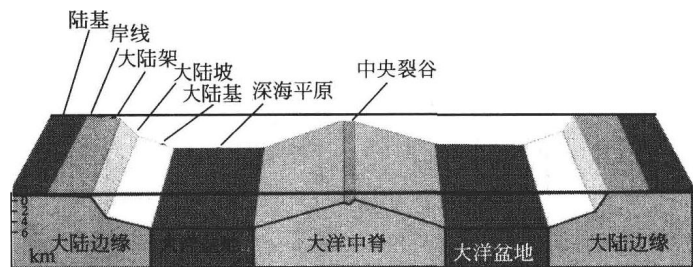


图 1-2-5 海底地形的主要单元示意

人们习惯将地球的海底分为大陆边缘 (Continental Margin)、大洋盆地 (Oceanic Basins) 和大洋中脊 (Mid-Oceanic Ridge) 三个地形单元, 见图 1-2-5。大洋盆地是指介于大陆边缘与大洋中脊之间的较平坦地带, 平均水深 4000~5000m。大洋中脊是指绵延在大洋中部 (或内部) 的巨型海底山脉, 常发生地震和火山, 大洋中脊轴常有一条纵向延伸的裂隙状深谷 (称中央裂谷)。大陆边缘是指大陆与大洋盆地间的过渡带, 包括大陆架 (Continental Shelf)、大陆坡 (Continental Slope) 和大陆基 (Continental Rise)。大陆边缘分两类, 一类由大陆架、大陆坡和大陆基组成, 主要分布于大西洋, 故称大西洋型大陆边缘; 另一类由大陆架、大陆坡和岛弧 (Island Arc)、海沟 (Trench) 组成, 主要分布于太平洋, 故称太平洋型大陆边缘。大陆架是指海与陆地接壤的、坡度小于 0.3° 的浅海平台。大陆坡是指大陆架外侧坡度明显变陡的部分, 其平均坡度约为 4.3°。大陆基是指大陆坡与大洋盆地间的缓倾斜坡地, 坡度约为 5'~35'。岛弧是指大洋边缘延伸距离很长、呈弧形展布的群岛, 比如阿留申、千岛、日本、琉球、菲律宾、马里亚纳等群岛。海沟是指大洋边缘的巨型带状深渊, 长度达 1000km 以上、宽度大于 100km。岛弧与海沟二者常组成岛弧-海沟系。大陆地壳与大洋地壳的区别见表 1-2-1。

表 1-2-1 大陆地壳与大洋地壳的区别

项 目	大陆地壳	大洋地壳
比例	占地壳体积的 79%、面积的 40%、质量的 63%	占地壳体积的 21%、面积的 60%、质量的 37%
平均厚度	33km	6km
平均密度	2.7g/cm ³	3.0g/cm ³
成分	沉积岩、岩浆岩、变质岩均有; SiO ₂ 含量 > 60%; 低价铁和镁的氧化物百分含量低, 分别为 3.8% 与 3.1%, 但铁的总含量高	几乎全部由火山岩组成; SiO ₂ < 50%; 低价铁和镁的氧化物百分含量高, 分别为 6.2% 与 6.8%, 但铁的总含量低
岩石时代	各地质历史时期形成的岩石均有, 最老岩石年龄可达 3800Ma	岩石大部分生成于最近 50Ma 中, 最老岩石不超过 200Ma
地质作用和地质构造	岩石受到强烈挤压, 形成褶皱、断裂和由它们构成的高大山脉, 区域变质作用较普遍	没有强烈挤压褶皱形成的大山, 海底大山主要为火山作用形成的。没有区域变质作用。引张性大断裂发育
重力异常	以负异常为主	以正异常为主
结构	上部为花岗质层 (硅铝层), 下部为玄武质层 (硅镁层), 最表层有不连续分布的松散沉积物	底部为玄武质层 (硅镁层), 上部为松散沉积物层, 两层之间为玄武岩夹已固结的沉积岩透镜体

地壳的重力通常呈均衡状态, 地壳厚度则各处不同, 一般地壳厚度较大的地方地势较高, 地壳越薄的地方地势越低 (见图 1-2-6)。地壳的重力均衡论的典型学说是艾利的山根说 (Theory of Mountain Root), 美国天文学家艾利 (G. B. Aity) 1855 提出, 厚度大的地壳有较大重

量、其下沉深、所获的浮力大，厚度小的地壳具有较小重量、其下沉浅、所获的浮力小，故两者都能达到均衡。艾利看法的重点是高山之下有“根”，故称山根说。目前人们的主流观点是：均衡现象是存在的，但是引起均衡的动力不是岩块的浮力而是重力，在地球内部任一深度均可以找寻一个水平面（称为补偿基面，Compensation Level），在此面单位面积上承受的上覆岩块的总重量都相同，以此补偿基面为准，高山地区地势虽高、地壳厚度大，但其下部地幔厚度小，大洋地区地势虽低、但其拥有的地幔厚度大，故两处岩块的总重量相等，从而可保持重力均衡。

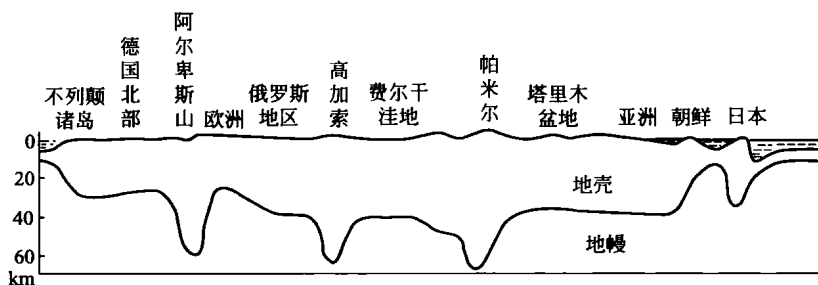


图 1-2-6 不同地理单元地壳厚度的差异

1.3 地球的起源及演化

1.3.1 地球起源与演化问题的历史探索

地球起源问题是同太阳系的起源紧密相联系的，因此探讨地球起源问题首先应了解目前太阳系的三个主要特征，即：太阳系天体运动的同向性（太阳系中的八大行星都按反时针方向绕太阳公转，太阳本身也以同一方向自转）、行星轨道运动的共面性（上述行星绕太阳公转的轨道面非常接近于同一平面且这个平面与太阳自转赤道面的夹角不到 6° ）、行星轨道运动的近圆性（除水星外，其他所有行星的绕日公转轨道都很接近于圆轨道）。

关于地球的起源问题已有相当长的探讨历史了，古代人们就曾探讨了包括地球在内的天地万物的形成问题，在此期间逐渐形成了关于天地万物起源的“创世说”[其中流传最广的要算是《圣经》中的创世说。在人类历史上，创世说曾在相当长的一段时期内占据统治地位]。自1543年波兰天文学家哥白尼提出了日心说后，天体演化的讨论突破了宗教神学的桎梏，开始了对地球和太阳系起源问题的真正科学探讨。1644年笛卡儿（R. Descartes）在他的《哲学原理》中提出了第一个太阳系起源的学说，他认为太阳、行星和卫星是在宇宙物质涡流式的运动中形成的大小不同的旋涡里形成的。一个世纪之后的1745年布封（G. L. L. de Buffon）在《一般和特殊的自然史》中提出了第二个学说，他认为有一个巨量物体（假定是彗星）曾与太阳碰撞使太阳的物质分裂为碎块而飞散到太空中形成了地球和行星[事实上由于彗星质量一般都很小，不可能从太阳上撞出足以形成地球和行星的大量物质的]。在布封之后的200年间人们又提出了许多学说，这些学说基本倾向于笛卡儿的“一元论”（即太阳和行星由同一原始气体云凝缩而成）；当然，也有“二元论”观点（即认为行星物质是从太阳中分离出来的）。1755年德国著名古典哲学创始人康德（I. Kant）提出“星云假说”。1796年，法国著名数学家和天文学家拉普拉斯（P. S. Laplace）在他的《宇宙体系论》中独立地提出了另一种太阳系起源的星云假说（由于拉普拉斯和康德的学说在基本论点上是一致的，因此，后人称两者的学说为“康德-拉普拉斯学说”。整个19世纪，这种学说在天文学中一直占有统治的地位）。到20世纪

初, 由于康德-拉普拉斯学说不能对太阳系的越来越多的观测事实作出令人满意的解释, 致使“二元论”学说再度流行起来。1900 年美国地质学家张伯伦 (T. C. Chamberlain) 提出了一种太阳系起源的学说称为“星子学说”, 同年, 摩耳顿 (F. R. Moulton) 发展了这个学说 (他认为曾经有一颗恒星运动到离太阳很近的距离, 使太阳的正面和背面产生了巨大的潮汐, 从而抛出大量物质, 逐渐凝聚成了许多固体团块或质点, 称为星子, 进一步聚合成为行星和卫星)。

现代研究表明, 由于宇宙中恒星间相距甚远, 相互碰撞的可能性极小, 因此, 摩耳顿的学说不能使人信服。由于所有灾变说的共同特点是把太阳系的起源问题归因于某种极其偶然的事件, 因此缺少充分的科学依据。著名天文学家戴文赛先生 (中国) 于 1979 年提出了一种新的太阳系起源学说, 他认为整个太阳系是由同一原始星云形成的, 这个星云的主要成分是气体及少量固体尘埃, 原始星云一开始就有自转并同时因自引力而收缩形成星云盘, 星云盘中间部分演化为太阳, 星云盘边缘部分形成星云并进一步吸积演化为行星。

截至今日, 已知的关于太阳系起源的学说已有 40 多种。20 世纪初期迅速流行起来的灾变说是对康德-拉普拉斯星云说的挑战, 20 世纪中期兴起的新的星云说是在康德-拉普拉斯学说基础上建立起来的更加完善的解释太阳系起源的学说。人们对地球和太阳系起源的认识也是在这种曲折的发展过程中得以深化的。

至此, 我们可以对形成原始地球的物质和方式给出如下可能的结论: 形成原始地球的物质主要是上述星云盘的原始物质 (其组成主要是氢和氦, 它们约占总质量的 98%。此外, 还有固体尘埃和太阳早期收缩演化阶段抛出的物质), 在地球形成过程中由于物质的分化作用而不断有轻物质随氢和氦等挥发性物质分离出来并被太阳光压和太阳抛出的物质带到太阳系的外部, 因此, 只有重物质或土物质凝聚起来逐渐形成了原始的地球并演化为今天的地球。水星、金星和火星与地球一样, 由于距离太阳较近, 可能有类似的形成方式, 它们保留了较多的重物质。木星、土星等外行星, 由于离太阳较远, 至今还保留着较多的轻物质。关于形成原始地球的方式尽管还存在很大的推测性, 但大部分研究者的看法与戴文赛先生的结论一致 [即在上述星云盘形成之后, 由于引力的作用和引力的不稳定性, 星云盘内的物质 (包括尘埃层) 因碰撞吸积而形成许多原小行星 (或称为星子), 再经过逐渐演化聚成行星, 地球亦就在其中诞生了]。根据估计, 地球形成所需的时间应约在 1 千万年至 1 亿年之间, 离太阳较近的行星 (类地行星) 形成时间较短, 离太阳越远的行星形成时间越长 (甚至可达数亿年)。

至于原始地球到底是高温的还是低温的, 科学家们也有不同的说法。从古老的地球起源学说出发, 大多数人曾相信地球起初是一个熔融体, 经过几十亿年的地质演化历程, 至今地球仍保持着它的热量。现代研究的结果比较倾向地球低温起源的学说。地球的早期状态究竟是高温的还是低温的, 目前还存在着争论。然而无论是高温起源说还是低温起源说, 地球总体上经历了一个由热变冷的阶段, 由于地球内部又含有热源, 因此这种变冷过程是极其缓慢的, 直到今天地球仍处于继续变冷的过程中。

每过一年, 大家都要长大一岁。一年, 对我们大家来说是个比较长的时间, 可是这在地球的历史上简直是微不足道的一瞬。地质学家发现, 覆盖在原始地壳上的层层叠叠的岩层是一部地球几十亿年演变发展留下的“石头大书” (地质学上叫做地层。地层从最古老的地质年代开始, 层层叠叠地到达地表。一般来说, 先形成的地层在下, 后形成的地层在上, 越靠近地层上部的岩层形成的年代越短。地层好比是记录地球历史的一本书, 地层中的岩石和化石就像这本书中的文字。用现代科学的方法通过对古老岩石的测定, 人们得知地球已经存在 46 亿年了)。人们用什么科学方法来推算地球的年龄呢? 目前, 科学上是用测定岩石中放射性元素和它们蜕变生成的同位素含量的方法, 作为测定地球年龄“计时器”的 [人们利用放射性元素蜕变的特