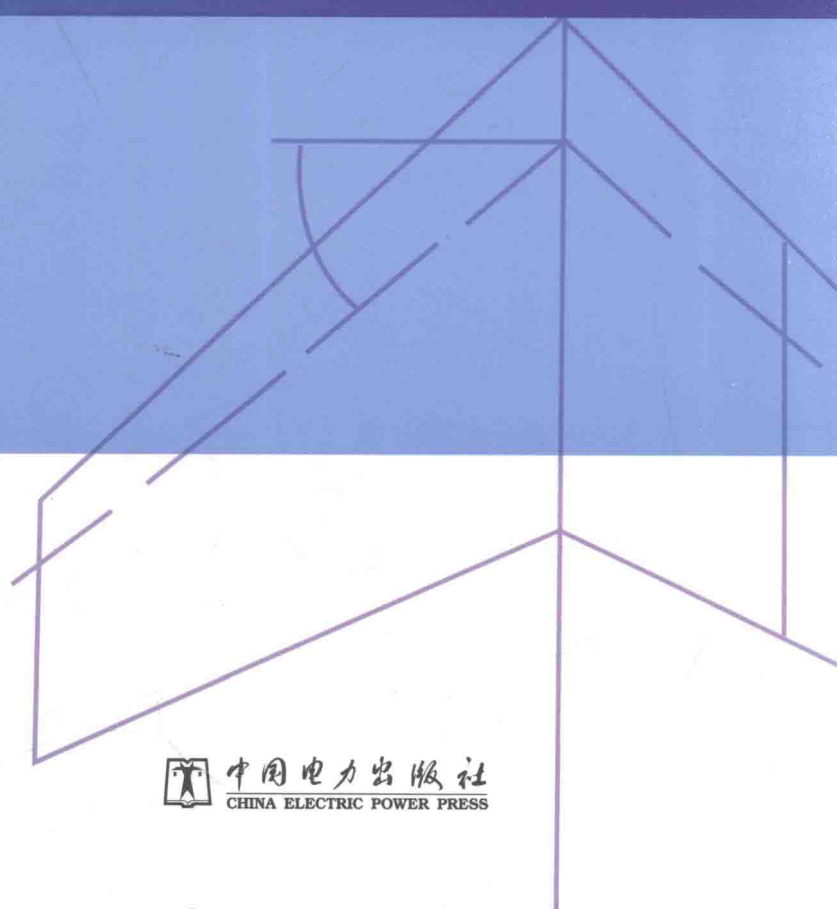




TULIXUE

土力学

姜晨光 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TULIXUE

土力学

主 编	姜晨光		
副主编	宋 艳	崔清洋	王 伟
	陈伟清	张协奎	
参 编	李红英	王 璐	武秀文
	李 艳	刘金忠	



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书较系统、全面地介绍了现代土力学的基本理论、方法和技术,涵盖了土力学的学科体系、地球土的基本结构与特性、地球土中的水及其渗流特性、地球土中的有效应力、地球土的抗剪强度、地球土中的应力和土体位移、地球土体中的侧向压力、地球土的固结理论、地球土体的承载力、边坡稳定问题、地球土体探查技术、土力学问题的高阶分析、地球土体特征参数的确定等基本教学内容和教学环节,在土力学基本理论的阐述上贯彻“简明扼要、深浅适中,以实用为目的”的原则,强化了对工程应用环节的介绍。本书采用我国现行的各种规范、标准,尽可能多地借鉴了发达国家的标准、技术和经验,全面介绍了目前国际最新的、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、大众化的语言来提高教材的可读性与吸引力,以期满足读者的自学需求。

本书是大土木工程行业的专业基础课教材,适用于本科和高职高专的土木工程、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。本书不仅适用于普通全日制高等教育,也适用于网络高等教育、电视大学、夜大学及高等教育自学考试,还可作为国家执业资格考试用书。

本书除了教材功能外,也是土木工程勘察、设计、施工领域业内人士案头必备的简明工具书。

图书在版编目(CIP)数据

土力学/姜晨光主编. —北京:中国电力出版社,2017.1

ISBN 978-7-5123-9745-3

I. ①土… II. ①姜… III. ①土力学—高等学校—教材 IV. ①TU43

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第211015号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:未翠霞 柳璐 联系电话:010—63412611

责任印制:蔺义舟 责任校对:王开云

三河市航远印刷有限公司印刷·各地新华书店经售

2017年1月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·23.25印张·555千字

定价:58.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

土力学是运用数学力学方法研究土体应力与应变、强度与稳定性的学科，是力学的一个分支。但由于土是一种特殊的变形体材料，其应力应变关系不同于一般的变形体材料，因此土力学还要着重研究土的物理、力学性质的试验方法和工程特性的变化规律。土力学在发展过程中形成了许多分支并从不同的研究角度形成不同的分支学科，例如，以土类不同划分为冻土、非饱和土、特殊土等；以研究方法不同划分为计算或试验等；以所研究土的特性的不同划分动力性、随机性等。近 30 年来，在土力学领域中形成了土动力学、计算土力学、实验土力学、非饱和土力学、冻土力学、随机土力学等分支学科。

土力学是一门历史悠久的学科，其起源可追溯到人类的古代文明时期，因为，人类在土基上或土体中建造房屋和挡土建筑物以及用土作为工程材料建造堤和坝已经有非常悠久的历史了，然而，当时人类只有认识却没有构建其相应的理论，所以，这一时期可以被认为是土力学的萌芽期。近代文明以来，18 世纪 60 年代的欧洲工业革命和 19 世纪中叶的第二次工业革命推动了生产力的发展，出现了水库、铁路和码头等现代工程，形成了许多有待解决的土力学问题，如地基承载力、边坡稳定、支挡结构的稳定性等；工程中出现的故事和难题促使人们进行土力学理论探索和岩土工程的技术创新，开始出现土力学的许多经典理论，这个过程延续了大约 160 年，为 20 世纪泰萨基土力学体系的形成准备了条件。1913 年是土力学发生转折的时候，也是泰萨基对土力学进行探索研究并在认识上形成飞跃的时期。泰萨基在所从事的结构工程和水电站工程中看到许多地基工程的意外失败事故，发现当时对于土的力学性质的认识远未能解决实际工程问题，于是对土的力学性质进行长期的试验研究，在 1921~1923 年间形成了土力学的有效应力概念和土的固结理论。1925 年泰萨基出版了他的经典著作《土力学》，此书是用德文发表的，书名为 *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*，尔后，又在 *Engineering News Record* 期刊上以“土力学原理”为标题发表系列文章扼要介绍他所研究和发现的成果，这些成果奠定了他作为现代土力学创始人的地位，并使他被公认为土力学和基础工程方面的权威。因此，有人将 1925 年看成是现代土力学诞生的里程碑。当然，在现代土力学发展过程中有无数的科学家和工程师提出了许多具有开拓性的见解，使土力学的理论体系逐渐丰满、渐入佳境。但由于岩土条件的特殊复杂性和岩土工程类型的极其多样性，人们对于岩土特性的认识还远不能满足工程实践的要求，岩土工程设计仍然是在很大的不确定性条件下进行着，随着工程规模和难度的增大，岩土工程中新的技术问题不断出现，工程事故仍时有发生。土力学仍需要在充满矛盾和挑战中不断完善自身。

土力学在大土木工程领域具有举足轻重的作用，如何普及土力学知识是作者几十年孜孜以求的目标，在长期的教学、科研、生产实践中作者逐步梳理出了土力学的脉络，不揣浅陋编写出了这本教材。本书的撰写借鉴了当今国内外的最新研究成果和大量实际资料，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土力学知识的普及，对从事各类工程建设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，广西大学张协奎、陈伟清；无锡太湖学院崔清洋；青岛黄海学院宋艳、李红英、王璐、武秀文、李艳、刘金忠（排名不分先后）参与了相关章节的撰写工作。

初稿完成后，全国勘察设计大师严伯铎老先生不顾耄耋之躯审阅全书提出了不少改进意见，为本书的最终定稿做出了重大贡献，谨此致谢！

限于水平、学识和时间关系，文中难免存在不足之处，敬请读者多多提出批评与宝贵意见。

姜晨光

2016年12月于江南大学

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 土力学的特点与任务	1
1.2 地球土的成因	3
1.3 土力学的历史与发展	21
思考题与习题	26
第 2 章 地球土的基本结构与特性	27
2.1 地球土的性质	27
2.2 地球土的粒度分析	35
2.3 地球土的可塑性	37
2.4 地球土的结构与分类体系	39
2.5 地球土的物相关系	54
2.6 地球土的压实机理	61
2.7 土的核心物理性质及简约化工程分类	70
思考题与习题	73
第 3 章 地球土中的水及其渗流特性	74
3.1 地球土中水的赋存规律	74
3.2 地球土中水的渗透性	74
3.3 描述地球土中水渗流规律的基本理论	78
3.4 地球土中水渗流的轨迹——流网	80
3.5 地球土渗流的各向异性特征	84
3.6 地球土渗流的不均匀性特征	85
3.7 地球土渗流方向改变的基本条件	86
3.8 堤坝土中水的渗流	87
3.9 勘探钻孔中泥浆的作用机理	92
3.10 地球土的冻胀特性	93
思考题与习题	93
第 4 章 地球土中的有效应力	94
4.1 地球土中有效应力的来源	94
4.2 地球土体的有效应力分析方法	94
4.3 总应力变化时的土体有效应力反应	95
4.4 部分饱和土的基本特性	98

4.5	渗流对土体有效应力的影响	99
4.6	工程建设中土中应力的简约化计算	104
	思考题与习题	109
第5章	地球土的抗剪强度	110
5.1	地球土的剪切破坏	110
5.2	地球土的抗剪强度评估	112
5.3	砂土的抗剪强度	116
5.4	饱和黏土的抗剪强度	118
5.5	地球土剪切破坏的临界状态	126
5.6	地球土体的残余抗剪强度	130
5.7	地球土体中的孔隙水压力系数	131
5.8	土体抗剪强度对土木工程建设的影响	135
5.9	土体在动荷载作用下的特征	142
	思考题与习题	146
第6章	地球土中的应力和土体位移	147
6.1	地球土的弹性与可塑性	147
6.2	基于弹性理论的土体应力计算	152
6.3	基于弹性理论的土体位移分析	157
	思考题与习题	160
第7章	地球土体中的侧向压力	161
7.1	地球土体侧向压力的来源	161
7.2	朗肯土压力理论	162
7.3	库伦土压力理论	170
7.4	土压力理论在挡土墙中的应用	174
7.5	挡土墙结构的设计原理与基本要求	175
7.6	重力式挡土墙的特点及设计方法	177
7.7	嵌入式挡土墙的特点及设计方法	181
7.8	土体开挖中的支护问题及相关设计方法	193
7.9	隔膜式挡土墙的特点及设计方法	194
7.10	加筋土支护结构的特点及设计方法	196
7.11	土压力的工程应用	198
	思考题与习题	204
第8章	地球土的固结理论	205
8.1	地球土的固结机理及研究方法	205
8.2	地球土的固结仪实验	205
8.3	地球土固结沉降的一维分析方法	209
8.4	地球土固结沉降的斯开普顿-比耶鲁姆分析法	211
8.5	地球土固结沉降的应力路径分析法	214

8.6	地球土的固结度	215
8.7	泰萨基的一维固结理论	215
8.8	地球土固结系数的确定方法	218
8.9	施工过程中土体固结系数的修正	223
8.10	一维固结方程的有限差分解	225
8.11	地球土的竖向排水固结法	227
8.12	土的压缩性和地基沉降计算的工程意义	230
	思考题与习题	240
第9章	地球土体的承载力	241
9.1	土木工程基础设计的特点及基本要求	241
9.2	地球土的极限承载力	244
9.3	黏土的容许承载力	251
9.4	砂土的容许承载力	252
9.5	桩的承载力	262
9.6	地基改良技术	275
9.7	基坑开挖方法	278
9.8	土体锚杆锚固技术	280
9.9	浅基础的特点及设计基本要求	282
9.10	桩基础和深基础的特点及设计基本要求	289
9.11	地基处理的特点及相关要求	299
	思考题与习题	300
第10章	边坡稳定问题	301
10.1	边坡稳定的基本特征	301
10.2	不排水条件下的边坡稳定分析	302
10.3	边坡稳定分析中的条分法	303
10.4	边坡的平面平移滑动分析	307
10.5	边坡稳定分析的一般方法	308
10.6	边坡竣工稳定和工后长期稳定问题	309
10.7	堤坝的稳定问题	311
10.8	工程建设中的边坡稳定问题	314
	思考题与习题	316
第11章	地球土体探查技术	317
11.1	地表土体探查的基本要求	317
11.2	土体探查的基本方法	318
11.3	土样采集	323
11.4	钻孔测井表	326
11.5	地球物理探查	328
11.6	地球土体污染探查	330

11.7 案例研究在土力学中的地位与作用.....	331
11.8 现场检测仪表的类型及使用要求.....	332
11.9 现场检测中的观察方法及相关要求.....	339
11.10 岩土工程中的典型土力学问题的解释	340
11.11 工程建设岩土工程勘察应注意的问题	357
思考题与习题.....	361
参考文献.....	362

第 1 章

概 述

1.1 土力学的特点与任务

土力学是研究土的形成、构造以及各种作用条件下土结构及性能变化规律的科学。狭义上讲,土力学主要是解决土体的变形和稳定两大基本问题的(对土木工程而言)。土是指岩石风化颗粒的堆积物,地球土是指地球表面的整体岩石在大气中经受长期的风化作用而形成的、覆盖在地表上碎散的、没有胶结或胶结很弱的颗粒堆积物。土是岩石风化的产物,具有碎散性,强度低,受力以后易变形,为非连续介质。其体积变化主要是孔隙变化,其剪切变形主要由颗粒相对位移引起。

土为三相体系,包括由土骨架组成的固相主体、以水为主的液相部分、以空气为主的气相部分。土体受力后由土骨架、孔隙介质等多相介质共同承担并存在复杂的相互作用过程且伴有孔隙流体的流动。土是自然界的产物,具有自然变异性,即非均匀性、各向异性、结构性、时空变异性。土为三相体系且具有碎散性和自然变异性,故其力学特性复杂,并会表现出独特的变形特性、强度特性和渗透特性,这决定了土力学的独特学科特征。理论力学的研究对象是质点或刚体;材料力学、结构力学、弹性力学研究的是连续固体,其中材料力学的研究对象是单个弹性杆件,如杆、轴、梁等,结构力学的研究对象是由若干弹性杆件组成的杆件结构,弹性力学的研究对象是弹性实体结构或板壳结构;水力学研究的是不可压缩的连续流体,如水、石油等液体;而土力学的研究对象则是碎散材料,即天然的三相碎散堆积物。土力学研究的核心问题是土体的应力、变形、强度、渗流和长期稳定性,属于工程力学的一个分支。狭义上讲,连续介质力学的基本知识以及描述碎散体特性的理论是土力学的支撑。

1.1.1 土力学在土木工程中的作用

对土木工程而言,土力学主要用来解决与土的强度、变形、稳定性和渗透特性等有关实际工程问题,因为土的工程应用非常广泛,且存在大量与土有关的工程问题。土的工程应用主要表现在三个方面,即用作土工建筑材料、用作土木工程结构物基础的地基、用于建筑环境建设。土力学与岩土工程和地下工程等密切相关,与土有关的工程事故比比皆是、触目惊心。土工结构物或地基有强度、变形、渗透三大问题,土具有相应的强度、变形、渗透特性,因此,土力学可以解决许多工程实践问题,这也是土力学存在的价值。土力学的基础是土的物理性质,核心是土的渗透特性、变形特性、强度特性,通过三大特性研究可以探究渗

流、流土和湿化问题；地基沉降问题；土的抗剪强度及参数确定问题。导致土的特性发生变化的诱因是土中应力，土力学的具体应用领域非常广泛，最典型的应用是土压力计算、地基承载力计算、边坡稳定性分析。土力学理论可以为建筑工程、岩土工程和地下工程等的安全、经济和使用正常保驾护航。

1.1.2 土力学的主要学科分支

宏观上讲，土力学有四大分支学科，即理论土力学、实验土力学、应用土力学和计算土力学，四大分支学科相互联系、互相促进、相互补充。

(1) 理论土力学是土力学学科发展的龙头。理论土力学研究的主要对象有三个，即饱和土土力学、非饱和土土力学和土动力学，本构理论是其核心，因时间因素而出现的流变特性是理论土力学的重要研究课题。非饱和土土力学是一个带有普遍性和较大覆盖面的重要科学问题，建立在对非饱和土力学特性和土中水、气运动规律充分揭示的基础上。土动力学的作用是揭示土在其动力特性方面的特殊规律性，涉及地震动载、液化评判、动本构关系或动力反应和土体动力稳定性分析等诸多内容，原位测试、原型观测与土工动力离心模型试验的成果是土动力学研究的根基。

(2) 实验土力学是土力学学科发展的基础。随着工程建设逐渐向高、大、深、重发展，以往基于低压力的土工试验设备和技术受到很大限制，适应于高应力、粗粒径、大位移、多因素和复杂应力组合的设备和方法得到发展。原位测试的作用更加明显。对以重力为主的细粒土土工建筑物来讲，土工离心模型试验已成为验证计算方法和解决土工问题的一种强有力的手段。微观结构分析试验与宏观力学特性试验结合为岩土结构性指标的确定及结构性模型的构建提供了有利的技术支撑。数值分析和多因素多环节影响下的计算机仿真分析可以在一定程度上缓解复杂条件下土性参数测试的困难和缺陷。土在应力增长下应变的发展被视为土材料受荷损伤的反映，声波法、射线法、CT识别法等材料损伤研究法为土工实验增添了“双翼”。

(3) 应用土力学是土力学学科发展的动力。大量的岩土工程活动拓展了土力学的应用领域，土力学应用的过程也是检验土力学理论和发展土力学理论的必要步骤。人工智能成了应用土力学的重要工具，20世纪专家和广大岩土工作者积累的丰富经验和对它的进一步总结为建立专家系统的知识库提供了大量的资料，并会继续丰富，目前人工智能已经由初级的模拟思维发展到思维与知识的结合并进一步发展到了用人工神经网络构造专家系统，即能够通过实例集的自学习和自组织发挥专家的作用，应用土力学的人工智能技术已经可以在一定程度上解决许多土质的地基工程、边坡工程、洞室工程、支护工程以及环境工程中各种实际问题。

土体整治技术也是应用土力学的另一个重要方面，包括增强性整治、托换性整治和环保性整治，目的为减灾、耐久和保护环境。增强性整治包括增密（挤密、振密、夯密、压密）、置换（层状置换、柱状置换）、加筋（均匀加筋、局部加筋）、锚喷、胶固、挖填、排水、防渗等各种地基处理措施，对这些措施的加强机理、设计施工、质量控制、效果检验、经济效益以及经验总结都已成为应用土力学的长久性工作内容。托换性整治主要解决建筑物的增层加高、改型换貌或事故处理以满足其连续服役要求。环保性整治主要面对的是废渣、废液、尾矿、污水、粪便、化肥、生活及建筑垃圾等对土体和水体的浸入和污染而形成的污染土介质，需了解其生物、化学、物理、力学特性以解决各种问题，如土介质中污染水的治理；固

体废物深埋处置工程中岩土介质、固体废料和地下水的相互作用,多孔介质中渗流与污染物的运移规律以及工程应用与工程措施等。另外,环保性整治还包括由于大气降水、灌溉、地震、开挖等引起的边坡失稳问题,以及由于煤矿开采、盐矿开采、油气开采、地下水抽汲、黄土浸湿、疏松土湿化、喀斯特发展以及振动等引起的各类地面下沉问题。

应用土力学的第三个方向是人工合成材料的应用,目前人工合成材料已在排水、防渗、滤层、加筋等各个方面取得了良好效果,但对它的设计理论和应用技术的研究还非常欠缺,大量的潜力尚待发掘,大量的经验有待总结,问题的核心是土体与其中各类复合体或结构体之间的相互作用问题,包括力的传递机理、合理布置方式以及材料与结构类型等,于是人们借助智能监控测试使设计与施工相互反馈、全面优化。古文物保护也涉及应用土力学问题和岩石力学问题。

(4) 计算土力学是土力学学科发展的翅膀。计算土力学使理论土力学、实验土力学和应用土力学得以融合互通,并提供土力学的精确度和效率(计算土力学离不开建模、建模离不开理论、理论离不开实践),计算土力学的发展为复杂土工问题的数值计算或模拟试验提供了可能,计算土力学是计算机技术、数值方法和土性规律正确而有机的结合。当然,因土力学研究对象本身和所处环境条件的复杂性以及理论建立中各种假定的简化性,任何计算都不可能囊括一切情况。因此,土力学的计算应该建立针对不同类型问题的理论、方法和软件并成为完整系列且其计算结果还应与专家的综合判断相结合,这才是土力学解决问题的正确途径。

1.2 地球土的成因

要研究地球土的问题就必须知道地球土是怎么形成的,即必须知道地球的形成、结构及其时空变化。

1.2.1 太阳系与地球形成的各种假说

太阳系是人类生存的星系,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)。围绕太阳旋转的是八大行星、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。行星地球是宇宙中的尘埃在引力的作用下逐渐形成的。关于地球起源问题已有相当长的探讨历史,古代人们就曾无数次地探讨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。1543年波兰天文学家哥白尼提出了日心说后使天体演化的讨论突破了宗教神学桎梏,开始了对地球和太阳系起源问题的真正科学探讨。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被认为是在康德-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就是在这种曲折发展过程中跌宕前进的。

人们认为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。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。人们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测得地球已经存在46亿年了。即利用放射性元素蜕变的特点来计算出岩石的年龄，放射性元素蜕变时速度很稳定且不受外界条件影响，一定时间内、一定量放射性元素分裂多少份量、生成多少新的物质都有确切数字，如，1g铀在一年中有七十四亿分之一克裂变为铅和氦，则可以根据岩石中铀和铅的含量来推算岩石的年龄，不同的地质年代有不同的特征。

长期以来，地球的起源与演化问题一直是哲学家和自然科学家长期探讨和争论的问题，科学技术的飞速发展使人们的眼界越来越开阔、掌握的证据越来越多，对地球的认识也就越来越深刻，当代科学家喜欢用天文地质学方法的观测资料和成果来研究地球以外天体的组分、结构、起源和演化历史，并运用这些研究成果探讨和解释地球上各种地质现象的成因和演化规律。

太阳绕银河系核心（银心）旋转一周的时间为2.74亿年，太阳绕银心转一周的时间间隔称为一个银河年。多数地质学家认为，银河年（约3亿年）与大冰期的重复出现密切相关，古生物的三大重要门类的出现与银河系有关，比如陆地植物最早出现在志留纪（4.2亿~4.3亿年），裸子植物出现于石炭、二叠界线附近（约2.8亿年），被子植物出现于侏罗和白垩纪分界附近。太阳系在银道面两侧往返运动的周期约为8000万年，在银道面一侧的时间约4000万年。在地质旋回记录中也有相应的4000万年和8000万年左右的周期。在显生宙以来存在着以下构造活动全球性加强期，即早寒武世（5.8亿年）、中寒武世（5.4亿年）、晚奥陶世（4.6亿年）等，这些构造活动的主要间隔为4000万年。在约4亿年的古生代中有近10次大的岩浆侵入活动，平均也是4000万年周期。显生宙以来出现过7次剧烈的生物灭绝时期，平均约8000万年一次。

太阳活动是指太阳大气中所进行的激烈扰动的物理过程，很多事实证明，太阳上的突发事件可以影响地球上的天气变化，具有90、180、22、11左右的周期。宇宙中有一种星体，它们在极短的时间内在厚度上发生突然的变化并释放出极高的能量，致使星体本身发生爆炸，抛射出大量物质，这一类天体称为超新星。超新星的最大特点是突然爆发并释放出巨大能量，因此，很多人开始注意到超新星爆发可能在地质历史上的古生物大灭绝中起重要作用。

当代科学家也喜欢用地球系统科学（即整体论观点）研究地球这个大系统内各个子系统（即各圈层内部以及圈层之间）运动变化的全过程、形成机制以及可能发生的变化趋势。地球系统科学把地球当做一个行星，从整体上进行认识并进行各种时间尺度的演化研究（摆脱了地球各原有分支学科的局限），认为地球是一个动力系统，所有物质都在运动并有一定的规律，坚实无比、十分稳定的地球处在不断地变化中，地球自诞生以来，整个系统与周围环

境之间一直发生着质量、能量与动量的交换。地球各圈层的强相互作用意味着各圈层之间发生着耦合与解耦作用。耦合作用是指通过相互作用,彼此影响以致联合起来的现象;解耦作用则是指通过相互作用之后,两体系解除耦合关系,仍分别各具特色,自成体系的现象。壳-幔边界、大气圈与岩石圈、水圈与岩石圈、大气圈与水圈间均是如此,相隔甚远的圈层也可能以某种形式互相影响,如重力场受深部密度不同物质分布的影响,磁场主要是因为内核转速较快使外核与地幔间发生差异运动而致等。地震之前的各种异常特征证明了岩石圈深部的变化,应力释放对大气圈、水圈和生物圈产生明显的影响。厄尔尼诺现象和拉尼娜现象只有从圈层相互作用和按照地球是一个开放的动力系统的观点去认识。

地球的演化并不是匀速、线性发展的,而是进行着变速的演化,且表现为相对均匀变化与突变(灾变)交错相间的特征,地球上许多运动变化常可存在一定的周期性(周期有长有短且都是非线性变化)。我国科技工作者统计过人类有史以来的自然地震记录,发现约70%的地震发生在月地引力最小或最大的时间段,即我国阴历每月初一、十五前后三天内,另外30%则发生在日地引力最小或最大的时间段,上述地震发生时间的统计特征与地球系统科学的某些研究成果是基本吻合的。比如,2004年12月26日印尼有史以来的最大海啸就是出现在日地引力、月地引力最大的时刻。

我国科学工作者还从地球系统科学的角度出发提出了地球旋转震颤的观点即地球旋转震颤说,地球旋转震颤说的基本思想是地球内部为软流体,由于地球内部物质密度的不均匀性,包括横向密度不均匀、竖向密度不均匀,导致地球上各点的引力线(重力线)不是相交于一点(即地球是一个没有重心点的球体,这也是地球的自转轴会发生偏转的原因),而是相交于一个空间区域(地球上各点的引力线交点构成的空间区域可看作是地球的重心域)。地球在日、月引力的作用下是一边旋转、一边颤动的,这种颤动势必会造成地球自转轴的移位同时也会引起地球内部软流体的激荡(就像颤动洗脸盆时盆里水的激荡一样),地球内部软流体的激荡必然会产生激荡能,地球激荡能随地球颤动的激烈程度变化,当地球颤动激烈时激荡能就会变得非常强大,进而需要寻找能量释放的通道(宣泄能量)从而引发地震,发生地震的条件是激荡能大于地球软流体上覆岩体的变形能,同时,我国科学工作者还认为激荡能也是导致海洋潮汐的主因。

1.2.2 地球的结构及外部环境

地球是一个三轴椭球,其长半径 $a=6\,378\,137\text{m}$ 、短半径 $b=6\,356\,752.3142\text{m}$ 、扁率 $\alpha=(a-b)/a=1/298.257\,223\,563$ 、平均半径 $R=6371\text{km}$ 。在地下33km和2900km处存在两个一级界面,即莫霍面和古登堡面,这两个界面把地球内部分为地壳、地幔和地核等3个主要圈层。莫霍面也叫莫霍洛维奇面或M面,是南斯拉夫学者A.莫霍洛维奇1909年首先发现的,在此界面附近的地震纵波速 V_p 由7.6km/s突然增至8.1km/s。古登堡面是美国学者B.古登堡1914年发现的,在此界面处S波(横波)消失,P波(纵波)速度则突然由13.64km/s下降到8.1km/s。地壳是莫霍面以上部分,由固体岩石组成,厚度变化很大。大洋地壳较薄,仅有5~10km;大陆地壳平均厚度35km,在造山带和西藏高原处厚度达50~70km;整个地壳平均厚度为16km。地壳分上、下两层,上层为花岗岩层,又称硅铝层,是富含硅的岩浆岩;下层为玄武岩层,又称硅镁层,是富含铁、镁的岩浆岩,因此大洋地壳玄武岩物质广泛分布。地壳是地球表层极薄的一层硬壳,其厚度仅为地球半径的1/400,体积

只有地球体积的 0.8%。地幔是介于莫霍面与古登堡面之间的部分,厚度约 2800km,人们根据地震波的变化情况,以地下 1000km 激增带为界面把地幔分为上、下两层。上地幔从莫霍面至地下 1000km,厚度 900km 左右,主要由超基性岩组成,平均密度 3.5g/cm^3 、温度 $1200\sim 2000^\circ\text{C}$ 、压力 0.4GPa 即 4000 个大气压。下地幔从地下 1000km 至古登堡面,厚度 1900km,主要成分为硅酸盐、金属氧化物和硫化物,铁、镍量增加,平均密度 5.1g/cm^3 、温度 $2000\sim 2700^\circ\text{C}$ 、压力 150GPa 即 150 万个大气压。自古登堡面至地心部分称为地核(厚 3471km),地核又分内核、过渡层和外核。地核主要是由含铁、镍量很高且成分很复杂的液体和固体物质组成,密度约 13.0g/cm^3 ,温度达 $3500\sim 4000^\circ\text{C}$,中心压力达 360GPa 即 360 万个大气压。

人们还根据次一级界面将上地幔又划分出来软流圈等几个层圈,在上地幔中 60~400km 处的地震波波速不仅不随深度增加,反而迅速降低,尤其在 100~150km 处最明显,该波速降低的地带称为低速带。波速降低的原因是地温,按地热增温率估计在 60~400km 深度区间温度可达 $700\sim 1300^\circ\text{C}$,已接近岩石熔点,因而会发生物质部分熔融并使波速下降且会导致岩石塑性增大、变软,这个与低速带一致的软弱层圈称为软流圈。软流圈是上地幔中一个十分重要而又发现较晚的圈层,是在 1960 年智利大地震后才被确认普遍存在的一个圈层。软流圈的存在给其上岩石圈板块的运动创造了条件,软流圈也是玄武岩岩浆重要的源区。软流圈以上的上地幔地震波波速比地壳大,表明其具有比地壳更大的刚性,软流圈以下的上地幔称过渡带或相变带,该深度内有一些因相变而引起波速梯度增大的地带,地壳及软流圈以上的上地幔合称岩石圈,岩石圈才是固体地球真正的外壳。岩石圈、软流圈、过渡带、下地幔、外核和内核是地球内部十分重要的六个主要层圈,尤其是岩石圈和软流圈,不了解它们就很难理解板块构造理论。

地球的外圈层是指大气圈、水圈和生物圈。大气圈是地球的最外圈层,其上界可达 1800km 或更高的空间。自地表到 10~17km 为高空对流层,所有的风、云、雨等天气现象均发生在大气层,它对地球上生物生长、发育和地貌的变化具有极大的影响,大气圈的主要成分是 N_2 (78%)、 O_2 (21%)、Ar (0.93%)、 CO_2 (0.03%) 和水蒸气、臭氧等,大气圈提供生物需要的 CO_2 和 O_2 等,可在适宜于生命活动的温度、湿度条件下保护生物免受宇宙射线和陨石的伤害,高空的臭氧层约形成于 4 亿多年前,其遮挡了对生物有害的大量紫外线,为陆生植物生长创造了有利条件。水圈主要由海水构成,其次分别为陆地河流、湖泊及地下水等,地球表面水圈的存在对生命起源、生物界演化与发展起过十分重要的作用,水与大气及地表岩石中的各种物质相互作用可产生各种沉积物、矿物及可溶性盐。水还是最活跃的地质营力之一,促进了各种地质地貌的发育,并对土和岩石的工程性质产生极为重要的影响。地球生物存在于水圈、大气圈下层和地壳表层范围内,生物圈质量很小,约相当于大气圈的 $1/300$ 、水圈的 $1/7000$ 或上部岩石圈的 $1/1\,000\,000$,但在地球地理环境改变中扮演着重要角色,生物所生产的物质是人类的重要财富,生物富集的化学元素主要是 H、O、C、N、Ca、K、Si、Mg、P、S、Al 等,有机界在地表相互作用形成了独特的土壤层。

1.2.3 地球的地层与地质年代

地球的物质是在不同的地层和地质年代形成的,所谓地层和地质年代是为了方便说明问题而人为划分的。各级地层单位对比见表 1.2-1,地层与地质年代表见表 1.2-2,地质年代的划分

续表

界 (代)		系 (纪)	统 (世)
元古界 (代) P_1	上元古界 (晚元古代) P_{12}	震旦系 (纪) Z	上 (晚) 震旦统 (世) Z_3 或 Z_h
			中震旦统 (世) Z_2
	下元古界 (早元古代) P_{11}		下 (早) 震旦统 (世) Z_1 或 Z_a
太古代 (代) A_1			
远太古代 (代)			

表 1.2-3

地质年代表

地质时代			距今年数 (百万年)		中国地史特征	生物
			中国	世界		
新生代 K_z	第四纪	Q	3	2	地球发展成现代形势, 冰川广泛, 岩层多为疏松砂、砾、黄土	人类
	第三纪 R	新第三纪	70	67	地球表面具现代轮廓, 喜马拉雅山系形成, 岩层多为陆相沉积和火山岩, 常见砂砾、红土、砂页岩、褐煤、玄武岩、流纹岩等	高等哺乳动物, 如马、象、类人猿等, 显花植物繁盛
		老第三纪				
中生代 M_z	白垩纪	K	140	137	岩浆活动强烈, 岩层为火山喷出岩及砂砾岩	恐龙, 植物茂盛
	侏罗纪	J	195	195	除西藏等地外, 其他地区上升为陆地, 以砂、页岩、煤层为主	
	三叠纪	T	250	250	华北为陆地, 沉积砂页岩, 华南为浅海、沉积石灰岩	
古生代 P_z	晚古生代	二叠纪	P	285	285	植物, 两栖动物
		石炭纪	C	330	350	
		泥盆纪	D	400	405	
	早古生代	志留纪	S	440	440	无脊椎动物
		奥陶纪	O	520	500	
		寒武纪	Є	615	570	
元古代 P_1	晚元古代	震旦纪	Z	1700±50	开始有沉积岩覆盖。下部为砂砾岩、中部有冰碛层、上部为海相石灰岩, 后期地壳运动强烈, 岩石轻微变质	低等植物
	早元古代	P_{11}	2050±10			
太古代		A_1	>2500		地壳运动普遍强烈, 变质作用显著	无生物
远太古代						