



高等学校精品规划教材

水利工程地质学原理

(第二版)

左建 郭成久 等 主编

2-43
5



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



高等学校精品规划教材

水利工程地质学原理

(第二版)

左建 郭成久 等主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共 13 章, 主要内容有: 地球系统概论, 岩石及其工程地质性质研究, 地质构造研究, 自然地质作用, 岩体的工程地质性质研究, 坝基岩体稳定性研究, 岩质边坡稳定性的工程地质研究, 地下工程围岩稳定性工程地质条件的研究, 地基稳定性问题的工程地质研究, 水库的工程地质研究, 环境地质问题研究, 工程地质勘察, “数字地球”产生的时代背景及其应用示范。

本书注重吸收最新的前沿科学成果(新理论、新观念、新方法、新措施), 内容丰富, 选题新颖, 通俗易懂, 图文并茂, 应用广泛。可作为农业水利工程、水利水电工程、水文与水资源工程、土木建筑工程的专业教材, 也可供相关工程技术人员、管理人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

水利工程地质学原理/左建等主编. —2 版. —北京: 中国水利水电出版社, 2009

21 世纪高等学校精品规划教材

ISBN 978-7-5084-6494-7

I. 水… II. 左… III. 水利工程-工程地质-高等学校-教材 IV. P642

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 064716 号

书 名	21 世纪高等学校精品规划教材 水利工程地质学原理 (第二版)
作 者	左建 郭成久 等 主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 14.75 印张 350 千字
版 次	2004 年 8 月第 1 版 2009 年 7 月第 2 版 2009 年 7 月第 3 次印刷
印 数	5701—8700 册
定 价	27.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

编写人员名单

- 主 编** 左 建 (沈阳农业大学)
郭成久 (沈阳农业大学)
温庆博 (清华大学)
靳轶群 (沈阳农业大学)
孔庆瑞 (沈阳农业大学)
高贵全 (云南农业大学)
- 副主编** 钮旭光 (沈阳农业大学)
陈 利 (辽宁省农业技术学校)
葛维德 (辽宁省农业科学院)
周林飞 (沈阳农业大学)
杨武成 (沈阳农业大学)
赵秀玲 (沈阳农业大学)
张 勇 (华北水利水电学院)
龙云程 (义县农业技术推广中心)
- 参 编** (按姓氏笔画为序)
左 莎 (沈阳石油化工厂)
张剑波 (辽宁省农业技术学校)
赵秀玲 (沈阳农业大学)
王 鹿 (北京工业大学)

第二版前言

根据教育部 1998 年颁布的普通高等学校专业目录,《水利工程地质学原理》是为水利水电、农业水利工程、水文与水资源工程、土木建筑工程等专业的主要课程而编写的。同时,它反映了本学科新的成就和发展方向。

地球科学自 20 世纪 50~60 年代以来发生了重大变化;水利工程地质的任务也从较简单地保障社会生存和发展对各种资源的需求,转变到为社会可持续发展的更多方面服务的轨道上来。地球科学本身和任务的变化,决定工程地质教学内容必须更新和调整。

为了满足 21 世纪人才培养的需要,本教材在内容上也作了较大的改动。

(1) 以往在内外动力地质作用教学中一般遵循三段式:即现象—机理—实例的模式,侧重于知识本身的传授。本教材在此基础上加强了资源与环境、地质灾害与防护等与人类可持续发展密切相关的内容。

(2) 地球系统的未来,很大程度上取决于人类活动作为一种地质因素对地球系统的叠加效应。所以本教材从地球的变迁,人类与地球系统的关系,人类在地球系统中的作用等方面介绍人—地关系,使读者认识到人类只有一个地球,从而树立环境意识,并肩负起保护地球、保护环境的任务。

(3) 本教材另一个特点即大量使用国内外典型地质现象和工程实例,为读者阅读国内外教材提供方便;更重要的是用四维空间思维研究地质特征和工程特征,便于学生对理论的理解,提高实际应用能力。

本教材在编写过程中,曾广泛征求兄弟院校有关专家、教授的意见,许多单位,如北京大学、清华大学、中国地质大学、吉林大学、石家庄经济学院、郑州大学、河海大学、中国矿业大学等都提出了许多宝贵意见和建议。全书由左建统稿,又经多次反复修改后定稿出版。在此,谨向有关的老师表示衷心的感谢!

鉴于编写者水平有限,时间仓促,书中不当之处,恳请读者批评指正。

编者

2009 年 2 月

第一版前言

《水利工程地质》是根据教育部1998年颁布的普通高等学校专业目录中《水利工程地质》为水利水电工程专业、农业水利工程专业、土木建筑工程专业的主要课程而编写的。

本教材可作农水、水电、水工、施工、土木、水资源的必修教材，也可供工程地质、水利水电等专业师生、工程技术人员及管理干部使用和参考。

参加本教材编写的单位有：沈阳农业大学、清华大学、北京工业大学、云南农业大学、东北农业大学、华北水利水电学院、辽宁省水电科学研究院、沈阳石油化工厂、辽宁省义县农业技术推广中心、辽宁省农业技术学校。

参加编写的人员有：左建、郭成久、温庆博、王鹿、高贵全、张忠学、张勇、周林飞、韩春兰、白义奎、李玉清、孔庆瑞、李秀玉、杨丽萍、左莎、龙云程、赵秀玲、徐悦、靳轶群。

本教材编写过程中，曾广泛征求兄弟院校有关专家、教授的意见，许多单位，如：北京大学、清华大学、中国地质大学、吉林大学、石家庄经济学院、郑州大学、河海大学、中国矿业大学等都提出许多宝贵意见和建议。全书由左建统稿，又经多次反复修改后定稿出版。在此，谨向有关的老师表示衷心的感谢！

鉴于编写者水平有限，时间仓促，书中不当之处，恳请读者批评指正。

编者

2004年4月

目录

第二版前言

第一版前言

绪论	1
第一章 地球系统概论	3
第一节 地球的主要特征	4
第二节 地球的结构	7
第三节 地壳及地质作用	10
第二章 岩石及其工程地质性质研究	16
第一节 造岩矿物	16
第二节 岩浆岩	19
第三节 沉积岩	23
第四节 变质岩	29
第五节 岩石的物理力学性质指标	34
第三章 地质构造研究	36
第一节 地壳运动	36
第二节 板块构造学说简介	38
第三节 地层年代	41
第四节 水平构造、倾斜构造、褶皱构造和断裂构造的研究	44
第五节 区域地壳稳定性研究的发展方向	49
第四章 自然地质作用	51
第一节 风化作用	51
第二节 地面流水的概念	57
第三节 片状流水的地质作用	58
第四节 河流的地质作用与河谷地貌	59
第五节 自然界的水循环	65
第六节 地下水的主要类型与特征	66
第七节 岩溶及岩溶水	74
第八节 地下水水质评价	79

第九节	地震	87
第五章	岩体的工程地质性质研究	95
第一节	岩体的结构特征	95
第二节	岩体的力学特性	106
第六章	坝基岩体稳定性的工程地质研究	111
第一节	坝基岩体的压缩变形与承载力	111
第二节	坝基(肩)岩体的抗滑稳定分析	113
第三节	坝基渗漏与渗透变形	118
第四节	工程实例分析(黄河小浪底枢纽工程)	120
第七章	岩质边坡稳定性的工程地质研究	124
第一节	边坡岩体应力分布的特征	125
第二节	边坡变形破坏的类型	126
第三节	影响边坡稳定性的因素	131
第四节	边坡稳定性的评价方法	133
第五节	不稳定边坡的防治措施	140
第八章	地下工程围岩稳定的工程地质条件的研究	145
第一节	洞室围岩应力的重分布及变形特征	145
第二节	地下洞室规划、设计中的有关问题	152
第三节	保障洞室围岩稳定的措施	160
第九章	地基稳定性问题的工程地质研究	163
第一节	地基的压缩与沉降量计算	163
第二节	地基的临塑荷载和极限荷载	171
第十章	水库的工程地质研究	178
第一节	水库渗漏	178
第二节	水库地震	183
第十一章	环境地质问题的研究	186
第一节	自然环境与地质灾害	186
第二节	地面沉降	188
第三节	地面裂缝	191
第四节	地面塌陷	193
第五节	海水入侵	193
第六节	地下水污染	194
第七节	固体垃圾	195
第八节	人类活动导致重金属元素的富集	196
第九节	人类活动对土壤环境的影响	197
第十节	人类活动对大气环境的影响	199

第十一节 依法保护地质环境, 国际合作防灾、减灾	201
第十二章 工程地质勘察	204
第一节 地质勘察工作的目的及任务	204
第二节 勘察的基本手段和方法	205
第三节 工程地质勘察成果报告	209
第十三章 “数字地球”产生的时代背景及其应用示范	212
第一节 信息时代与数字地球	212
第二节 数字地球的基本概念	213
第三节 高空间分辨率的遥感卫星数据	214
第四节 遥感小卫星	215
第五节 全球定位系统 (GPS)	215
第六节 数字地球应用	216
主要参考文献	222

绪 论

一、工程地质学原理及其研究目的和主要内容

工程地质学是调查、研究、解决与各种工程活动有关的地质问题的科学。它是地质学的一个分支。研究工程地质学的目的是为了查明各类工程建筑场区的地质条件；分析、预测在工程建筑物作用下，地质条件可能出现的变化；对工程建筑地区的各种地质问题进行综合评价，并提出解决不良地质问题的措施，以保证对工程建筑物进行正确合理的选址、设计、施工和运营。水利工程地质则主要是研究水利水电工程建设中的工程地质问题。

所谓工程地质问题，即与工程活动有关的地质问题，包括以下两个方面：

(1) 自然环境地质因素对工程活动的制约和影响而产生的问题。这种环境地质因素通常称为工程地质条件，它们是自然历史发展演变的产物，主要有：地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质条件、物理地质现象（滑坡、崩塌、泥石流、风化、侵蚀、岩溶、地震等）及天然建筑材料等六个方面。

(2) 由工程活动而引起环境地质条件的变化，从而形成不利于工程建设的新的地质作用，通常称为工程地质作用。主要有：建筑物荷载引起地基岩土体的沉陷变形和剪切滑动，人工开挖造成边坡或地下洞室岩土体的变形和失稳破坏，水库诱发地震、渗漏、坍岸和浸没，砂土振动液化，以及潜蚀、流砂等。

这些工程地质问题都可关系到建筑物的安全稳定和经济效益，所以都是工程地质学的主要研究内容。除此以外，工程地质勘察、试验及计算方法等，也都是工程地质学的主要研究内容。

二、工程地质学原理的任务和在工程建设中的意义

水利水电工程建设是人类利用自然、改造自然为经济建设服务的活动，为此，必须首先了解自然。环境地质条件是与水利水电工程关系最密切、最重要的自然条件。任何工程都必须首先详细查明建筑地区的工程地质条件和可能出现的工程地质作用，然后结合其特征才能作出正确的规划、设计和施工，才能保证工程的安全可靠和经济合理。许多事例说明：凡是重视工程地质工作，事先了解和掌握了环境地质条件的规律性，则修建的工程将会是成功的；反之，忽视工程地质工作，则必然要出现这样或那样的问题，甚至导致整个工程发生灾难性的毁坏。

在我国大中型水利水电工程建设中，十分重视工程地质勘察工作，所以尚未发生过因地质问题而引起重大的溃坝事故。但也有多起因忽视地质工作或限于某种原因未查明不良地质条件而造成各种隐患和事故的情况，个别小型水库因忽视地质工作也有垮坝事故发生。例如，四川陈食水库，因坝基岩体受到渗透水流的潜蚀冲刷，形成空洞，造成 15.9m 高的砌石连拱坝坍塌毁坏。浙江黄坛口水电站在大坝施工开挖后，才发现左岸坝肩是个大

滑坡体，岩石松碎，坝头不能与坚硬完整的岩石相接，不得不停工进行补充勘探，修改设计，才保证了大坝的安全。安徽佛子岭水库，为一混凝土连拱坝，坝高 75.9m，长 510m，1954 年建成，是治理淮河水患的第一座大型工程。由于清基不彻底，坝基下有缓倾角软弱岩层，断层节理及风化严重的岩石（全、强风化）未被清除，致使坝基发生不均匀沉陷变形，坝体发生多条裂缝。后虽经两次大规模加固补强处理，但 1996 年仍被定为“病坝”，仍需彻底处理。梅山水库是治淮工程中的第二座大型水利工程，与佛子岭工程相似，也是由于对右岸坝肩风化严重的花岗岩清除得不彻底，防渗工作做得不严格，结果发生渗漏，右坝肩岩体发生轻微滑动，导致连拱坝拱座发生位移、拱圈发生裂缝。广东新丰江水电站因发生 6.1 级水库诱发地震，致使大坝发生裂缝。此外，尚有江西上犹江、四川狮子滩及长江葛洲坝水电站坝基泥化夹层问题，湖南柘溪水电站及云南漫湾水电站坝址区滑坡问题等，都延误了工期，造成了较大的经济损失。

工程地质学原理在水利水电工程建设中的主要任务如下：

(1) 选择工程地质条件最优良的建筑地址。在规划设计阶段，大型工程的选址、选线，工程地质条件是一个重要因素，工程地质条件良好的地址，可以节省投资，缩短工期，并保证安全施工和运营。

(2) 查明建筑地区的工程地质条件和可能发生的不良工程地质作用。工程建筑地址的选定不完全决定于地质条件，而首先考虑的是整体经济建设的发展和需要。即便是根据地质条件选择的地址，也不会是完美无缺的，总会有这样那样的工程地质问题。不良的工程地质条件并不可怕，可怕的是没有查明或认识不足、不够重视。早在 20 世纪 50 年代，我国在总结水利水电工程建设经验教训的基础上，就曾提出过“没有足够的工程地质勘察资料，就不能进行设计；没有设计，就不能施工”的规定。只要查明并给以足够的重视，绝大多数工程地质问题都是可以通过工程措施得到妥善解决的。

(3) 据选定地址的工程地质条件，提出枢纽布置、建筑物结构类型、施工方法及运营使用中应注意的事项。

(4) 提出改善和防治不良地质条件的方案措施。

三、本课程的特点和学习要求

本课程是一门实践性很强的课程，所以除课堂教学外，室内试验，野外教学实习及电化教学（幻灯、录像）等，都是本课程的重要教学环节。尤其是野外教学实习，在本课程中占有特殊重要的地位，与其说是野外教学实习，不如称其为“现场教学”更为恰当。因为它不只是印证、巩固、加深课堂教学内容的问题，而是还有相当多的内容是课堂无法讲授或学生在课堂上无法掌握的知识 and 内容，而这些知识又是必须由教师在野外现场讲解，引导学生亲自观察、分析和实际操作才能学到手的。野外教学实习是培养学生独立观察、思考、分析和实际操作能力的一个重要环节。如果缺少和削弱了这个重要的实践性教学环节，那么工程地质教学是不完整的。所以在教与学的过程中，以及在制定教学计划、教学大纲时，对野外教学实习均应给予足够的重视。

第一章 地球系统概论

在广阔无垠的宇宙中，地球属于太阳系的一颗行星，而太阳又是银河系中无数恒星之一，宇宙则由很多个像银河系甚至更庞大的恒星集团所组成。

太阳系以太阳为中心，周围有八个大行星携带着绕行自己旋转的卫星环绕着太阳旋转，此外还有许多小行星、彗星、流星等小天体环绕太阳转动，由这些天体组成太阳系（图 1-1）。太阳系的范围很大，直径约 120 亿 km，光从这一端到达另一端需 11h。

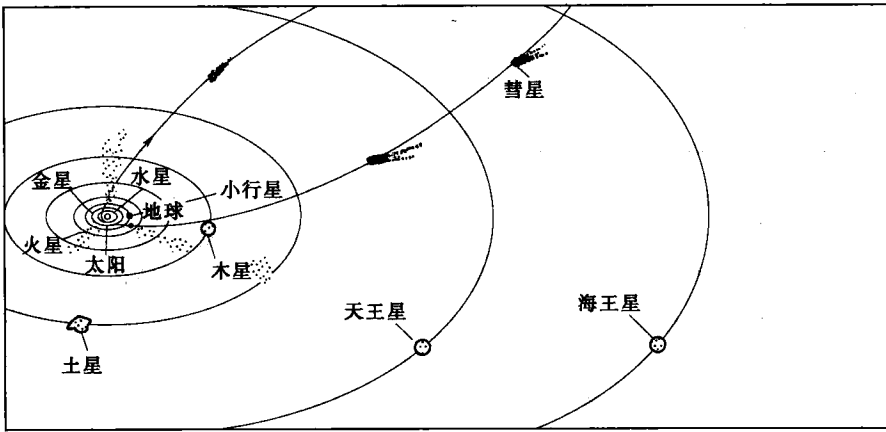


图 1-1 太阳系（行星轨道位置按比例表示）

八大行星体积大小相差很大，最大的木星比最小的水星大 73500 倍（图 1-2）。按特征把八大行星分两类：离太阳较近的四个行星（水星、金星、地球、火星），物理特征近似地球，叫类地行星，它们的体积较小，密度较大，卫星少，为固体表面，重元素较多；离太阳较远的四个行星（木星、土星、天王星、海王星），物理特征近似木星，叫类木行星，它们体积较大，密度较小，卫星多，没有固体表面，轻元素特别是气体多。太阳系的运动数据和物理要素见表 1-1。

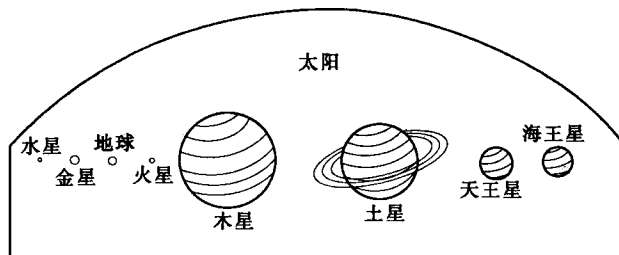


图 1-2 太阳系行星大小比较

表 1-1 太阳系的运行数据和物理要素

星体	距日平均距离		轨道面与黄道面交角	运转周期		运转速度 (km/s)		逃逸速度 (km/s)	平均半径		扁率 $\frac{a-c}{a}$
	10 ⁶ km	天文单位		公转	自转	公转	自转 (赤道)		km	与地球比	
太阳	—	—	—	2 亿年	25d (赤道)	250.0	2.060	617.23	695990	109.23	0.002
水星	57.9	0.39	7°0'17"	88d	59d	47.9	0.003	4.17	2433	0.38	0.029
金星	108.2	0.72	3°24'0"	224.7d	224d 8h (逆转)	35.0	0.002	10.36	6053	0.95	0.000
地球	149.6	1.00	—	365.25d	23h56min	29.8	0.465	11.18	6371	1.00	0.0034
月球	距地球 0.384	距地球 0.0026	5°9'0"	27.32d	27.32d	1.0	0.005	2.37	1738	0.27	0.006
火星	227.9	1.52	1°51'0"	1.88 年	24h37min	24.1	0.240	5.03	3380	0.53	0.005
木星	778.3	5.20	1°18'54"	11.86 年	9h50min	13.1	12.660	60.24	69758	10.95	0.066
土星	1427.0	9.54	2°29'58"	29.46 年	10h14min	9.6	10.300	36.06	58219	9.14	0.103
天王星	2869.6	19.18	0°46'38"	84.0 年	10h49min	6.8	3.890	22.19	23470	3.68	0.070
海王星	4496.6	30.06	1°47'14"	164.8 年	15h48min	5.4	2.520	24.54	22716	3.57	0.079

太阳是离地球最近的一颗恒星，它离地球平均约为 14960 万 km（这个距离叫 1 个天文单位），光从太阳出发只需 8min 16s 就可到达地球。太阳并不是宇宙的中心。在晴朗的夜空，可以看到一条斜贯整个天空的白色条带，俗称“天河”，这就是银河系。银河系是一个庞大的恒星集团，它包括太阳，估计有 1300 亿颗以上的恒星，此外还有许多由气体、星际物质组成的星云。银河系里的恒星都绕银河系中心转动，但各部分运动速度是不同的，太阳及其附近的恒星绕银河系中心运动的速度约 230km/s，太阳绕银心运行一周约需 2 亿年。银河系里的恒星绕银心转动就相当于银河系的自转。银河系不但自转，还携带着集团的成员以 200km/s 以上的速度朝着麒麟星座的方向运行着。

宇宙中的天体都在不停地运动着。月球自转同时又绕地球公转，地球自转同时又绕太阳公转，太阳自转同时又绕银河中心公转，银河系自转同时又绕总星系公转，等等。宇宙间的天体运动情况是错综复杂的，但有一定的规律性，它们之间相互制约、相互联系地运动着和发展着。

第一节 地球的主要特征

一、地球的形状和大小

地球是一个绕着地轴高速旋转的球体，它的表面形态并不是理想的球形，而是椭球形，即为赤道部分略为膨大，两极略为收缩的扁球形。它的数据如下：

赤道半径 (a): 6378.137km;

极半径 (b): 6356.752km;

平均半径 $\left[\frac{(2a+b)}{3}\right]$: 6371km;

地球扁度 $\left(\frac{a-b}{a}\right)$: $\frac{1}{298.3}$;

赤道圆周长: 40076.6km;

表面积: 5.1 亿 km^2 ;

质量: $5.98 \times 10^{19} \text{t}$;

平均密度: 5.517g/cm^3 ;

体积: $108 \times 10^{10} \text{km}^3$ 。

二、地球的物理性质

地球的主要物理性质包括: 地球的密度、压力、重力、地热、磁性、电性、放射性和弹性等。现将地球的主要物理性质简述如下。

(一) 地球的密度和压力

据计算, 地球的平均密度为 5.517g/cm^3 , 而实际测得地壳物质的平均密度为 $2.7 \sim 2.9 \text{g/cm}^3$ 。因此, 可以推测地球内部深处物质的密度是随深度递增的。根据地震资料可知, 地球内部物质的密度确实是随着深度的增加而逐渐增加的, 并且分别在深度 984km、2898km 和 5125km 的地方作跳跃式增加。这表明地球内部物质是不均匀的, 而地核的物质可能处于高密度状态。

地球内部的压力受上覆物质质量的影响, 随着深度的增加而递增。它的变化情况为: 自地表到地深处约 33km 处是随深度增加而均匀增加的; 从 33km 到 984km 深度范围内压力从 $9000 \times 10^5 \text{Pa}$ 很快增加到 $38.2 \times 10^9 \text{Pa}$; 然后随着深度的增加又缓慢地增加, 在 2898km 深度可增加到 $136 \times 10^9 \text{Pa}$; 最后向着地心缓慢地递增, 地心压力可达 $360 \times 10^9 \text{Pa}$ 。

(二) 地球的重力

地球表面的重力是指地面处所受的地球引力和该处的地球自转离心力的合力 (图 1-3)。地心引力与物体质量成正比, 与距地心距离的平方成反比。地球赤道半径大于两极半径, 引力在两极比赤道大, 离心力在两极接近于零, 而赤道最大。但离心力值在重力值中所占的比例极小 (仅为 $1/300$), 因此, 地球的重力随纬度增加而增大。根据重力与纬度关系所计算出的各地重力值, 叫做正常重力值。由于各地岩石种类与构造不一样, 用重力仪测定的重力值与正常重力值常不符合, 这种偏差称为重力异常。重力异常表明: 地下有密度较大的金属矿物或者有密度较小的石油、岩盐等物质分布, 通过重力异常调查, 可以研究地壳构造与寻找地下矿产。

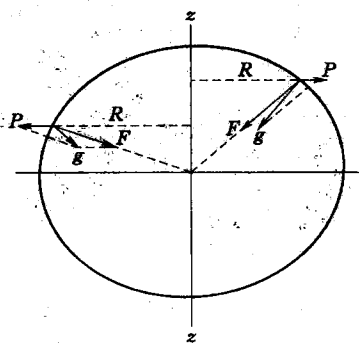


图 1-3 重力与地心引力和离心力关系 (示意图)
zz—地球自转轴; g—重力; F—地心引力; P—离心力; R—纬度圆半径

(三) 地球的磁性和电性

地球具有磁性, 好像是一个巨大的磁体, 也有两极 (图 1-4), 但地磁场的南北极与地理的南北极的位置不重合。同时地磁极的位置也在不断改变, 1970 年测出磁北极在北纬 76° 、西经 101° , 磁南极在南纬 66° 、东经 140° 。而地磁子午线与地理指午线间有一夹角, 叫做磁偏角。磁针只有在磁赤道附近才是水平的, 磁针越移向磁两极, 倾斜程度越

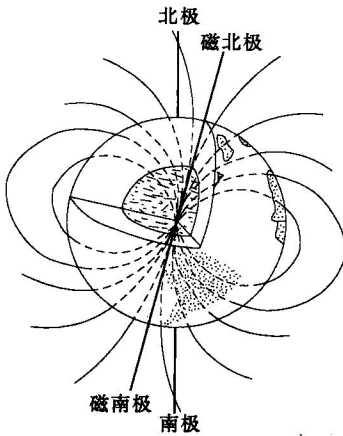


图 1-4 地磁场及其成因

大。在磁极区，磁针直立，磁针与水平面的夹角称磁倾角，地球某一点所受的磁力大小称为该点磁场强度。磁偏角、磁倾角、磁场强度叫地磁三要素。根据地磁在地球上的分布规律，可以计算出某地地磁三要素的正常值，实测数值与正常值不一致的现象叫地磁异常。地磁异常是地下有磁性矿床或地质构造发生变化的标志。因此，可以利用地磁异常勘测磁性矿床和地质构造情况。

地球既然存在磁场，则必然存在电场。大面积的地磁场感应，就可以形成大地电流，大地电流的平均密度约为 $2A/km^2$ 。大地电流的强度是不稳定的，其变化和磁场的变化有密切的关系，也可能和岩石所受的应力变化有关。利用大地电流的异常特征也可用于各种地质、地球物理的研究。

地球的电磁场构成了地球的第一个保护层，可以有效地保护地球生命免受太阳风和外太空的各种电磁辐射的威胁（图 1-5）。极光的形成就是太阳风沿地球两极磁场的薄弱处进入地球所引起的现象（图 1-6）。

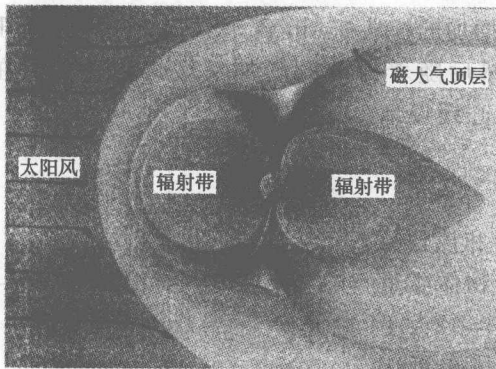


图 1-5 电磁层保护了地球生命免受电磁辐射的威胁



图 1-6 神秘的北极光

地球磁场会对居里面之上的地壳上层岩石产生影响，使岩石获得磁性，并使岩石的磁化方向与岩石形成时的地磁场方向一致。通过对岩石剩余磁场及岩石形成历史的研究发现，地球的磁场曾经不止一次地发生重大的改变，甚至是南极变成了北极，北极变成了南极，也就是发生了地磁场的磁极反转。

(四) 地热

地球表面受太阳辐射热的影响而温度变化很大，在 $-70\sim 70^{\circ}C$ 之间。温度随季节、纬度高低和海陆分布情况而有所差异。这种温度变化只影响地表不深的地方，平均约为 15m。再往深处 20~25m 的地段，由于太阳辐射热影响不到，且保持当地常年平均温度，因此叫常温层。

钻探资料表明：常温层以下地层温度随深度的增加而有规律地增加，增加情况各地不

同。地温每升高 1℃ 而往下增加的深度叫地温增加级。地温增加级一般平均为 33m，例如在亚洲大致为 40m（我国大庆为 20m，房山为 50m）。但地温也并非每加深 33m 就升高 1℃，因为地内深处的物质密度、压力和状态各不相同，故温度增加到一定深度时，越深升温越慢，推测地心温度不会超过 2000~5000℃。

地热的来源，除地表来自太阳辐射外，主要来自地球内部。地球内部热源，主要是由放射性元素蜕变释放出来的，其次是重力能、化学反应能、结晶能和地球转动能等。

地球是一个庞大的热库，地热能是最廉价的能源之一，对它的开发利用已成为地质科学和综合科学技术之间的一个新领域。

(五) 地球的弹性

据对地震及人工地震的研究，得知地球能够传播地震波（弹性波），说明地球具有弹性。根据地震波的传播方式可分为纵波和横波。

纵波（P）：又称疏密波，它的传播方向与介质质点摆动方向相同，在固体、液体和气体介质中均能传播。传播速度较快，约为横波的 1.7 倍。

横波（S）：又称扭动波，它的传播方向与介质质点摆动方向互相垂直，它不能在液体和气体介质中传播而只能穿过固体介质。传播速度较慢。

地震波在地下任一点的传播速度和该点介质的性质（密度、弹性、状态等）有关，公式为

$$V_p^2 = \frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}; V_s^2 = \frac{\mu}{\rho}$$

式中： V_p 、 V_s 分别为纵波、横波的传播速度； k 为介质的容积弹性模量； μ 为刚性系数（或切变模量）， ρ 为介质的密度。

从关系式中可知， V_p 总是大于 V_s ，由于流体介质的刚性系数为零，故横波在液体、气体介质中不能传播（图 1-7）。

由于地震波在地下传播的特点，故可利用人工地震来了解地下的地质情况。物探中的地震法就是利用这个原理来进行工作的。

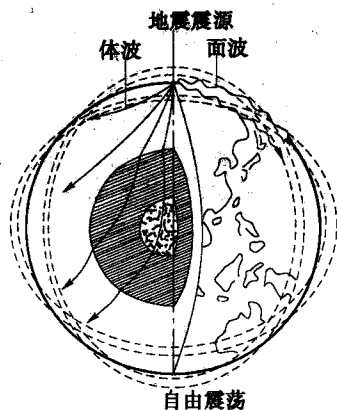


图 1-7 地震波在内地传播情况（示意图）

第二节 地球的结构

地球的结构是指地球的组成物质在空间分布和彼此间的关系。地球物质的成分和分布是不均匀的，具有层圈结构。地球固体表面以上的各层圈为外部结构，地球固体表面以下的各层圈为内部结构。

一、地球的外部结构

地球的外部结构包括自地表以上的大气圈、水圈和生物圈。现将各圈的特征简述如下。

(一) 大气圈

大气圈是由包围在地球最外面的气态物质所组成的层圈。这一层圈的分布在地面以上

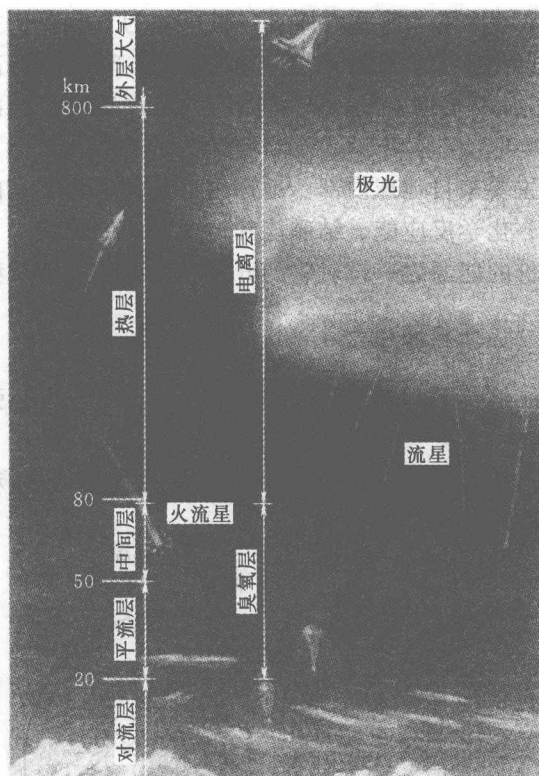


图 1-8 大气的垂直分层

至少高达 2000~3000km 的范围。此圈自下向上又分为对流层、平流层、电离层和扩散层，大气圈中的主要成分为氮、氧、氩、碳、氦和氢等元素。大气的总质量约为 $513 \times 10^3 \text{t}$ ，虽然约为地球的百万分之一，但对地面的物理情况和生活环境却有决定性的影响。大气的结构、成分和性质主要随着高度而变化。起初不同的分子渐渐地分解成原子，以后这些原子又受到太阳辐射粒子的作用而发生电离，变成离子和电子，所以大气可分为中性大气和电离大气。在约 500km 以上的高空，中性大气已经很少，主要是离子和电子，它们的运动由地球空间的磁场和太阳风决定。大气分布极不均匀，受地球引力作用，约有 79% 的质量集中在平均厚度 11km 范围内的对流层中。在对流层中，温度、湿度和压力等分布很不均匀，故气体常发生强烈的对流，产生风、云、雨、雪等，从而调节和促进水圈的循环（图 1-8）。

(二) 水圈

水圈由地球表层分布于海洋和陆地上的水和冰所构成。水的总体积约为 14 亿 km^3 ，其中海洋水占总体积的 98.1%，陆地水只占 1.9%。可见，水在地表分布是很不均匀的，主要集中在海洋。水圈中各部分水的成分和物理性质有所不同，其成分除作为主体的水外，尚含有各种盐类。例如：海水含盐度高，平均为 3.5%，以氯化物（如 NaCl 、 MgCl_2 等）为主；陆地水含盐度低，平均小于 0.1%，以碳酸盐 [如 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$] 为主。水受太阳热的影响，可不停地循环。由于水的循环，形成了外力地质作用的动力，它们在运动过程中可不断产生动能，对地球表面进行改造。

(三) 生物圈

生物圈是由地表各种生物构成的。它们在生活中、新陈代谢及死后遗体分解出各种气体和有机酸等过程中，可与地表的物质直接或间接地发生各种物理、化学的作用，从而改造地表物质。

二、地球的内部结构

地球内部也具有层圈结构，包括地壳、地幔和地核三个主要层圈（图 1-9）。

对于地球内部，目前人们能够直接获得资料进

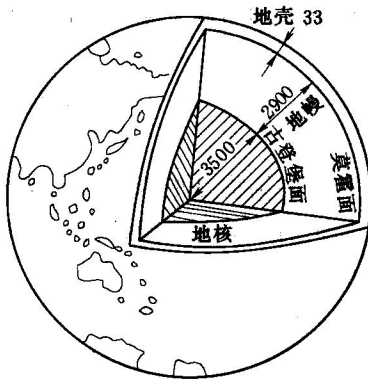


图 1-9 地球的内部结构 (单位: km)