

高等教育“十二五”规划教材

地球与行星 科学概论

Diqiu Yu Xingxing Kexue Gailun

主 编 陈新跃 戴德求
副主编 高宗军 曹运江 资 锋 田家杰

中国矿业大学出版社



013065998

P-43
06

高等教育“十二五”规划教材

要 要 要

地球与行星科学概论

主 编 陈新跃 戴德求
副主编 高宗军 曹运江
资 锋 田家杰



中国矿业大学出版社



北航

C1673649

内 容 提 要

本教材共分十五章,内容包括地球概况、元素与矿物、岩浆岩、沉积岩、变质岩、地层古生物、构造运动、外动力地质作用、太阳与太阳系、月球、火星、金星和水星、木星和土星、天王星和海王星、小行星、彗星和陨石等。

本书可作为普通高等院校各专业公共选修课的教学用书,亦可供相关专业技术人员、地球科学爱好者参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

地球与行星科学概论/陈新跃,戴德求主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2013.5

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1879 - 7

I. ①地… II. ①陈…②戴… III. ①地球科学—高等教育—教材②行星—高等教育—教材 IV. ①P

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第089125号

书 名 地球与行星科学概论

主 编 陈新跃 戴德求

责任编辑 潘俊成

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 14.5 字数 371 千字

版次印次 2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

“地球与行星科学概论”作为普通高等院校各专业公共选修课,它的任务是说明地球和行星的基本情况,使学生对地球和天体有较为全面的了解,激发学生探索宇宙奥秘的兴趣。

本教材由地球科学和行星科学两大部分组成,全书共分十五章。第一章简单介绍了地球的位置、物理性质、地球的圈层和地球的表面形态;第二章详细介绍了元素、矿物以及常见矿物的特征;第三、四、五章比较系统地介绍了岩浆岩、沉积岩、变质岩三大岩类,详细阐述了各岩类的成岩作用和常见岩石的特征;第六章介绍了地层、古生物和化石、地质年代、生命起源和演化;第七章介绍了构造运动的基本特征、地质构造、板块构造、地震作用;第八章比较系统地介绍了风化作用、河流地质作用、湖泊与沼泽地质作用、风地质作用;第九、十章简单介绍了太阳系、太阳、行星、月球的简况与起源;第十一、十二、十三、十四章简单介绍了各行星的概况、地质特征及其内部结构;第十五章对小行星、彗星和陨石作了简单的介绍。

地质学的发展经历了 200 多年,目前分科很细,内容十分丰富,因此,在一本篇幅有限的教材中不可能包罗万象,面面俱到。在本教材的编写过程中,笔者力求体现教材应具备的科学性、先进性、系统性和趣味性,并注意到以下几方面:

1. 地球与行星科学概论是地质学各门分支学科的基础,因此,凡是作为课程所需要的内容,本教材尽可能予以包含,但是在深度与广度上力求恰如其分,深浅适度。
2. 近几十年来,地球科学各领域发展迅速,新理论、新技术、新发现不断涌现,地学知识不断充实和更新。本教材也介绍了地球和行星科学中的一些新成就和新动向。
3. 力求做到全书结构紧凑,内容系统丰富、详细具体、连贯,防止前后脱节或前后重复,文字严谨精炼、深入浅出。

本教材由湖南科技大学和山东科技大学共同编写完成,具体章节分工为:第一章和第七章由陈新跃编写,第八章由高宗军编写,第二、三、四、五章由资锋编写,第六、十二、十三章由田家杰编写,第九、十、十一章由戴德求编写,第十四、十五章由曹运江编写,最后由陈新跃和曹运江审理定稿。

限于编者水平所限,本书疏漏、不足之处在所难免,敬请广大读者不吝指教,以便改正完善。

编 者

2012 年 12 月

目 录

第一篇 地球科学

第一章 地球概况	3
第一节 地球的位置	3
第二节 地球的物理性质	4
第三节 地球的圈层	7
第四节 地球的表面形态	11
第二章 元素与矿物	16
第一节 元素	16
第二节 矿物	17
第三节 常见矿物	22
第三章 岩浆岩	27
第一节 岩浆及岩浆作用	27
第二节 侵入作用与侵入岩	28
第三节 火山作用与火山岩	31
第四节 常见岩浆岩	37
第四章 沉积岩	40
第一节 沉积作用与沉积岩	40
第二节 沉积岩的一般特征	45
第三节 沉积岩的分类	48
第四节 常见沉积岩	49
第五章 变质岩	51
第一节 变质作用与变质岩	51
第二节 变质岩的一般特征	53
第三节 主要变质作用类型	56
第四节 常见变质岩	59

第六章 地层古生物	61
第一节 地层	61
第二节 古生物和化石	66
第三节 地质年代	70
第四节 生命起源和演化	75
第七章 构造运动	78
第一节 构造运动的基本特征	78
第二节 地质构造	80
第三节 板块构造	92
第四节 地震作用	95
第八章 外动力地质作用	102
第一节 风化作用	102
第二节 河流地质作用	108
第三节 湖泊与沼泽地质作用	115
第四节 风地质作用	121
第五节 块体运动	127
第二篇 行星科学	
第九章 太阳与太阳系	135
第一节 太阳系概况	135
第二节 太阳简况	138
第三节 行星简况	141
第四节 太阳系的起源	143
第十章 月球	149
第一节 月球概况	149
第二节 月球表面物质与地层年代	153
第三节 月球的起源和演化	155
第四节 人类对月球的空间探测活动	157
第十一章 火星	163
第一节 火星概述	163
第二节 火星地质	169
第三节 火星上的生命	171
第四节 火星探测	175

第十二章 金星和水星.....	180
第一节 金星概述.....	180
第二节 金星的地质特征及演化史.....	182
第三节 水星概况.....	184
第四节 水星表面物质、内部结构及演化史	187
第十三章 木星和土星.....	190
第一节 木星概述.....	190
第二节 木星的内部结构.....	192
第三节 土星及其卫星和环系.....	194
第十四章 天王星和海王星.....	199
第一节 天王星.....	199
第二节 海王星.....	202
第十五章 小行星、彗星和陨石	207
第一节 小行星.....	207
第二节 彗星.....	215
第三节 陨石.....	220
参考文献.....	224

第一篇 地球科学

第一章 地球概况

第一节 地球的位置

一、宇宙和天体

“宇宙”一词,最早出自《尸子》这本书:“四方上下曰宇,古往今来曰宙”。“宇”代指的是一切空间,是无边无际的;“宙”代指的是一切时间,是无始无终的。“宇”指空间,“宙”指时间。宇宙就是在空间上无边无际、时间上无始无终的,按客观规律运动的物质世界,是万物的总称,是时间和空间的统一。

宇宙中存在着无数的天体,根据它们各自的特点可归纳为恒星、行星、卫星、流星、彗星和星云等类。

恒星是质量很大、自己能发光、凭肉眼能看到的天体,99%以上都是恒星。从地球上看来,恒星的相对位置似乎是固定不变的,但实际上,一切恒星都在不停地运动。行星自己不发光,质量也远较恒星小,并且绕恒星运动。地球便是绕着太阳运动的行星之一。卫星质量比行星更小,绕行星运动,并随着行星绕恒星运动。流星质量小,也不发光,在星际空间运行,当接近地球,受到地球引力,可以改变轨道,甚至陨落。当它进入地球大气层后,因与大气摩擦,迅速增温至白热化,发生燃烧。绝大部分流星在到达地面以前就已完全烧毁,少数能落到地面上成为陨石。彗星是一种很小的但具有特殊外表和轨道的天体,它由彗核、彗发和彗尾三部分组成。彗核是相对集中的疏松同体物质。彗发是彗核释放的分子和原子,成团气体围绕着彗核。彗尾是由电离的分子和固体小粒子组成。这些分子和小粒子受到太阳光压的作用,形成一条背向太阳的尾巴,即彗尾。

星云是一种云雾状的天体。离地球非常遥远的河外星云为一些恒星系统,而作为银河系组成部分的银河星云则是极端稀薄和高度电离的氢和氦的混合物。

鉴于用普通的长度单位,甚至用地球和太阳的平均距离(1.496×10^8 km,称为天文单位),都难以表示宇宙空间的距离。人们把光在一年中传播的距离 9.46×10^{12} km 即一个光年,作为量度天体距离的单位。

现有的仪器已经能够观察到远离地球 10×10^9 光年的空间。在可以观察到的这部分宇宙中,约有 10^{23} 个恒星。而几十亿到几百亿个恒星的集合体组成一个星系。例如银河系,就是一个包括 1 000 多亿个恒星的星系。银河系是一个旋转着的扁平体,直径约为 10×10^4 光年,中心厚度约 10 000 光年,其余部分厚度约 1 000 光年,绝大多数星体都密集在它的中心平面附近(图 1-1)。

到目前为止,已经发现了十亿多个类似银河系这样的星系。星系表现为成对或成群的

聚集状态,组成星群。例如,银河系和包括比邻星系以及大、小麦哲伦星云在内的近 20 个星系,组成本星系群。本星系群直径约 3.0×10^6 光年。比星系群更大,包括几百个到几千个星系的集团,称为星系团。例如室女座星系团,包含 2 700 个星系,直径可达 8.5×10^6 光年。已知宇宙的总体称为总星系。

银河系包含 1.5×10^{11} 颗恒星,太阳只是其中之一。太阳位于距银河系中心(银心)约 27 000 光年、距边缘 23 000 光年的地方,并以 250 km/s 的速度绕银心运动,大约 2.5 亿年可绕行一周。太阳系为以太阳为中心、所有受到太阳引力约束的天体的集合体,由近及远包括水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星等 8 大行星(图 1-2)。



图 1-1 银河系



图 1-2 太阳系

二、地球的位置

曾经很长时期,人们认为地球是宇宙的中心,一切天体都绕着地球运行。直到 1543 年,哥白尼的《天体运行论》发表,“日心学说”创立,这个错误观念才逐渐被抛弃。但是无限广大的宇宙根本不存在中心,太阳只是太阳系的中心。而太阳在银河系中,又只不过是旋涡臂上的一个点,一颗普通的恒星罢了。地球则只是太阳系中一颗普通的行星(图 1-2)。日地平均距离为 1.496×10^8 km,这个数字被确定为一个天文单位。地球并不是孤立地存在于宇宙空间的,它和其他天体之间有着密切的联系并相互影响。例如,地球表面以太阳辐射能为最主要的能量来源;海、陆、大气和有机体中的许多过程,都以这种辐射能为基本动力。水能、风能都是由太阳能转化来的。当代地球上最重要的能源——煤和石油,则是长期积累的化石化了的太阳能。太阳还把各种带电粒子流传送到地球上,具有极高能量的宇宙线,从宇宙空间侵入地球的大气上层,对地球上的极光、磁暴,以及大气中的某些气体从分子状态转变为离子状态等一系列现象,都产生影响。陨石从星际空间落到地球上,或地球大气外层的气体质点扩散到星际空间,都表明地球与星际空间存在着直接的物质交换。至于地球在月球和太阳引力的作用下形成潮汐,以及大气和地壳的弹性变形,就更为人们所熟知了。

第二节 地球的物理性质

一、地球的形状和大小

有多种术语来描述地球的形状,包括球形、旋转椭球体和倒梨形等。

球形——从太空看到的地球为球形(图 1-3)。

旋转椭球体——一个绕地轴(南北极连线)旋转的椭球体。因赤道半径比两极半径要大,这种描述比球体更为精确。

倒梨形——因北极相对于旋转椭球体凸出约 10 m,而南极凹进约 30 m,而成一倒挂的梨形(图 1-4),为对地球形状更精确的描述。



图 1-3 从太空看到的地球

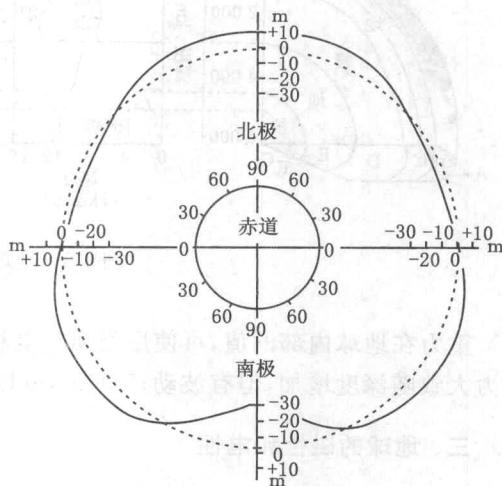


图 1-4 倒梨形的地球

国际大地测量和地球物理学联合会(IUGG)1970 年给出的旋转椭球体的形态参数为:

赤道半径	6 378.14 km
两极半径	6 356.755 km
扁率	1/298.257
表面积	$5.11 \times 10^8 \text{ km}^2$
体积	$1.083 \times 10^{12} \text{ km}^3$

二、地球的重力、密度和压力

重力加速度在地球科学中称为重力,主要由地球内部物质的万有引力引起的,地球表面重力加速度约 9.8 m/s^2 。由于地球内部物质的不均匀性,造成重力在不同位置的值得有所不同。在测量了全球地面的重力值之后,可以在一定精度范围内计算出地球内部的密度分布。

地球的平均密度为 5.517 g/cm^3 (用总质量 $5.974 \times 10^{21} \text{ t}$ 除以总体积得到)。地表岩石密度 $2.7 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$,地表水密度仅为 1 g/cm^3 ,这暗示地球内部的密度比较大。有了地球内部的密度数据后,便可算出相应的静压力值和重力值。

地球内部的密度从地面的 2.6 g/cm^3 向下不均匀增大,大约在 400 km、600 km、2 900 km 和 4 600 km 处有明显的增加,而以 2 900 km 处增幅最大。到地心处密度最大可达 13 g/cm^3 。

地球内部的压力由上覆物质产生,可按静岩压力公式 $p = h\rho g$ (式中, h 为深度; ρ 为岩石密度; g 为重力加速度)计算出(地球内部岩石在上覆物质长期作用下产生的压力类似水中

的静水压力,称静岩压力)。地下 10 km 处约为 3 000 atm(1 atm=101.325 kPa),35 km 处约 1 万 atm,2 900 km 处可达 150 万 atm,地心高达 370 万 atm(图 1-5)。

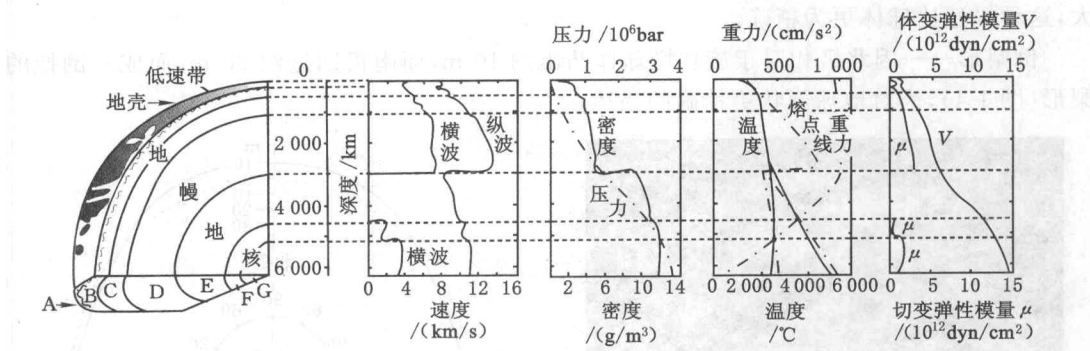


图 1-5 地球内部物理性质

重力在地球内部的值,可使用类似于电场中的高斯定理算出。在 2 900 km 深度以内,重力大致随深度增加,但有波动;2 900 km 以下,重力逐渐变小,地心处重力为零(图 1-5)。

三、地球的磁性和电性

地球及周围存在着一个磁场,称地磁场。地磁场磁力线的分布可近似地等同于把地球当做一条形磁铁的磁力线分布。地磁两极(磁北极和磁南极)与地理上的两极(北极和南极)并不重合,有一定的偏差,即存在磁偏角(磁偏角为地磁场强水平分量与正北方向之间的夹角)。地磁场的原始场源在地球深部(即“条形磁铁”位于深部)。地球浅部的物质受到原始磁场的磁化,磁化物质产生的磁场又叠加在原始磁场上,形成现在复杂的地磁场(图 1-6)。

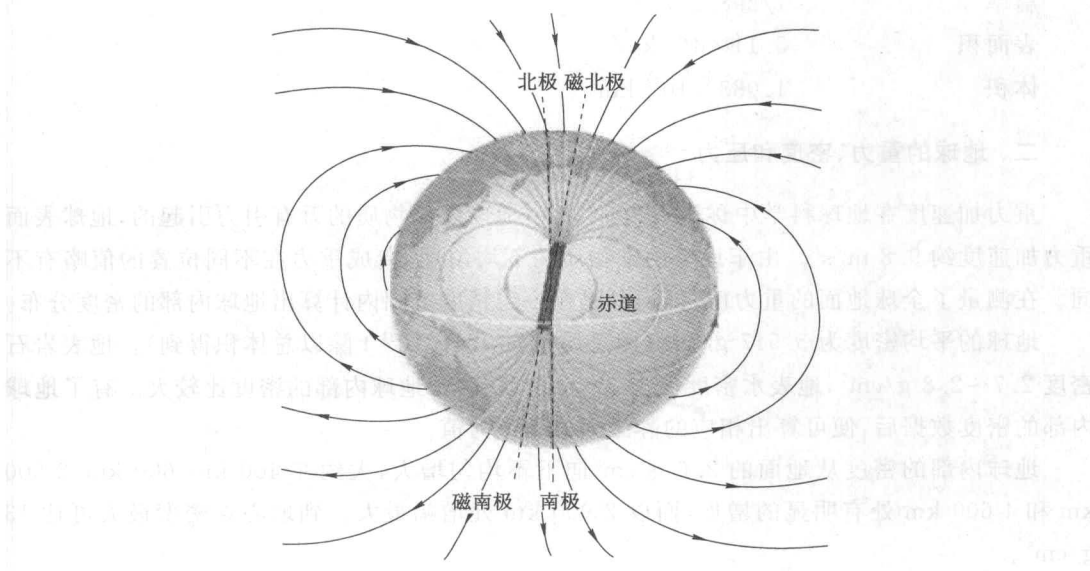


图 1-6 地球磁场

地球内部物质的电学性质一般用电导率或电阻率表示。浅层物质的电性可用人工供应直流电的方式测得,更深物质的电性测量则需要利用天然大地电磁场。大气层雷电活动、太阳活动抛出的等离子流体与地球磁场相互作用将产生大地电磁场,并在地球物质中产生大地电流。测量不同频率磁场与电场的幅度变化,便可计算出地下物质的电阻率变化。

四、地球内部的温度

地面常见的温泉、热水和火山爆发等现象均反映地球内部具有较高的温度。地球内部以固体为主,热能以热传导的方式向外传播。通过测量地表的热流值和浅部的温度梯度(温度梯度为单位深度温度的变化量)以及岩石的热导率,便可计算地下温度随深度的变化值(图 1-5)。地球不同地区地下温度差异较大,高温区有大洋中脊、大陆裂谷、年轻山脉,低温区有地壳非常稳定的平原及高原区。高温区地下 35 km 处温度可达 10 000 °C,而低温区仅为 400 °C。大洋中脊深处由于有岩浆喷发而导致温度异常高。

第三节 地球的圈层

地球不仅地面以下的固体地球部分呈圈层构造,而且地面以上的外部空间都显现出现圈层特征。地表以上空间中的圈层为外圈层,以下固体地球部分为内圈层。每个圈层都有自己的物理化学特征。地球的外圈层一般分为大气圈、水圈和生物圈;内圈层由表及里分为地壳、地幔和地核三个部分。

一、地球的外部圈层

(一) 大气圈

地球大气圈是由包围着地球的大气组成的圈层,厚度超过几万千米,受地球引力作用,大气圈底部的气体最稠密,向上逐渐变得稀薄。大气总质量的 99.9% 以上位于海拔高度 50 km 以内,99% 以上在高度 32 km 内。大气圈虽然只占地球质量的微小部分,但是却跟人类生活息息相关。大气屏蔽致癌的太阳紫外辐射、高能宇宙线粒子,保护地表的生物,又通过气象过程和风化剥蚀改造地表。

大气圈由混合气体组成,地表以上的低空成分主要是氮气(78%,体积分数)、氧气(21%)、氩气(0.9%)、CO₂、水蒸气以及其他气体。除了气体,大气中还有一些悬浮微粒,称为气溶胶,其成分有浓硫酸(火山喷发产物,分布在高度 20~30 km)、硅酸盐、碳酸盐、海盐、有机物及水滴、冰晶,它们主要分布在高度 12 km 以下。此外,还有来自地球外的宇宙尘埃。大气圈由下至上在物理及化学性质上均出现明显的变化而显示出大气圈内部的次级分层,其次级分层有多种方案,一般采用根据温度变化和密度状况而进行的分层方案,自下而上分为对流层、平流层、中间层、热层和散逸层(图 1-7)。

对流层是大气底部发生对流的层位,其厚度在赤道处约 17 km,两极处约 9 km。太阳光照射使地表和底部大气变热,下部暖空气膨胀上升,上部冷空气下沉,形成对流。水汽主要集中在近地表,云、雨等地球上的天气现象均发生在对流层内。由于大气不断地进行上下部分混合的对流作用,其成分比较均一。

平流层是对流层之上大气仅出现水平流动的层位,其高度为 10~50 km。由于该层是

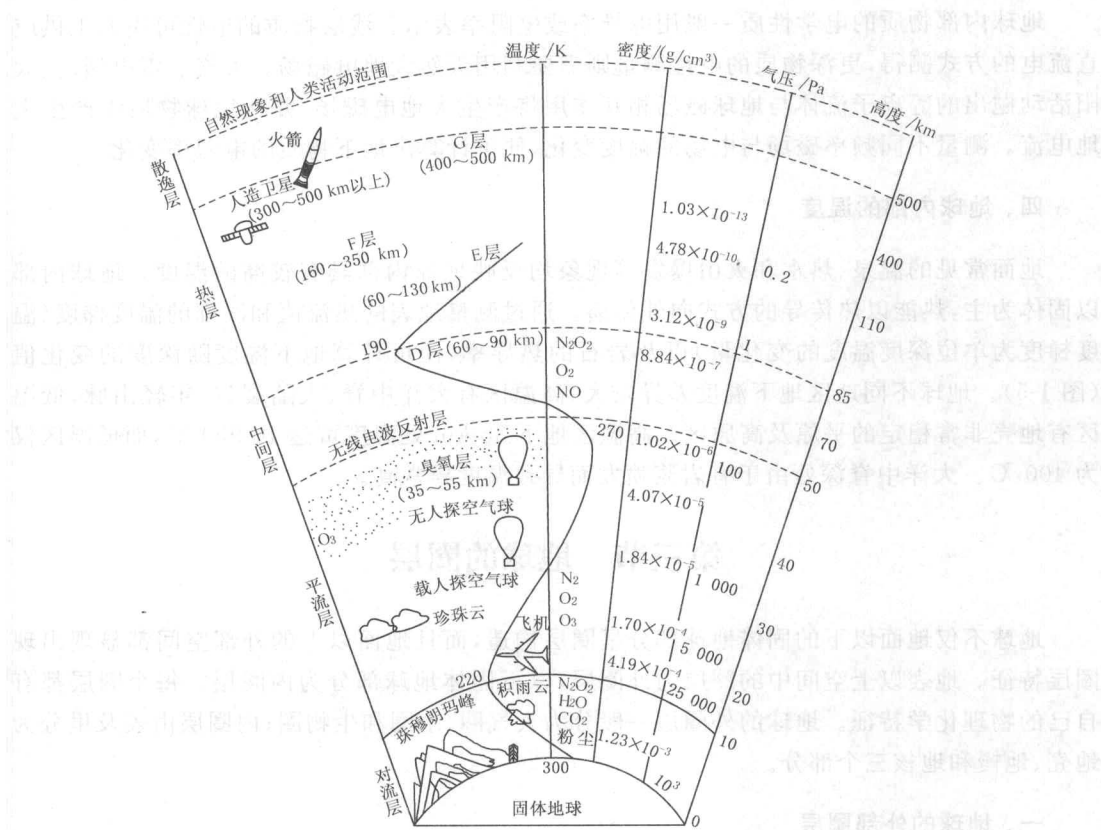


图 1-7 地球大气层结构

臭氧分布的集中带,而臭氧吸取太阳紫外线,使得温度不再减小而随高度增加略有升高,温度由下部 $-83^{\circ}\text{C}\sim-50^{\circ}\text{C}$ 至顶部约 0°C 。上暖下冷的温度结构阻止了大气的对流,没有多变的天气现象,每日均晴空万里。

中间层是平流层以上至约 85 km 处的大气层。由于这里的大气非常稀薄,吸收太阳辐射较少,大气温度再次随高度升高而降低,至中间层顶部时降至约 -90°C 。因此,中间层也有对流现象,但由于空气稀薄且无水蒸气,不能形成对流层多变的天气现象。

热层是大气 $85\sim 500\text{ km}$ 的层位,其主要成分是原子态的氧和电离化的氧,均能强烈吸收太阳紫外线辐射,大气温度向上递增很快,在 100 km 以上,白天温度可达 1000°C 以上。

散逸层是 500 km 以外的大气层位,大气更加稀薄,物质组成以原子态和电离态的氧、氮、氢为主。这些物质强烈吸收太阳紫外辐射,而导致大气具有很高的温度,并向外逃逸,与太空气体连续过渡。大气中的氢受太阳的 La (波长 121.6 nm)辐射激发而有微弱辐射,这一气晕又称为“地冕”。

(二) 水圈

水圈是由地球表层的水体构成的一个圈层,包括地表水、地下水和大气中的水。地表水约覆盖地球表面总面积的 71% ,其中主要是海洋覆盖 70.8% 。在地球的全部水中,

海洋水占 97%，陆地水不到 3%，大气中的水仅占 0.001%。陆地水的 77% 左右在冰盖（格陵兰和南极）和冰川中，不到 1% 在河流和湖泊中，其余的是保存于土壤和岩石中的地下水。从物态上看，水圈中 98% 的水呈液态，约 2% 的水呈固态。水不仅是人类和生物生存所必需的，而且在地质演化中起重要作用。海洋的研究和开发是近年来受重视并迅速发展的领域。

1. 水圈的化学组成

水有很强的溶解能力，大多数物质都可被水溶解。因此，水圈的水体是一种水溶液。盐度是水中溶解物质质量多少的量度，即为 1 kg 水溶解的固体物质的质量分数，以千分率表示。按盐度可将水圈中的水体分为淡水（ $<0.3\text{‰}$ ）、半咸水（ $0.3\text{‰} \sim 24.695\text{‰}$ ）、咸水（ $>24.695\text{‰}$ ）。江河湖泊中的水体一般为淡水，海洋中的水体为咸水（平均盐度 35‰）。

水中溶解的物质从多至少为：① 淡水，阴离子 HCO_3^- ， SO_4^{2-} ， Cl^- ；阳离子 Ca^{2+} ， Na^+ ， Mg^{2+} 。② 海水，阴离子 Cl^- ， SO_4^{2-} ， HCO_3^- ；阳离子 Na^+ ， Mg^{2+} ， Ca^{2+} 。

2. 地球上的水循环

《庄子·秋水》有“天下之水，莫大于海。万川归之，不知何时止而不盈。尾闾泄之，不知何时已而不虚”。水在地表各处不断变动，但为什么能保持上述的各处分配比例呢？这是因为水在各处的不断变动过程中大致保持动态平衡的水循环。

大规模水循环发生在海洋—大气—陆地之间：海水不断蒸发出水汽到大气中，随大气运动到大陆上空，凝结为云而降水落地，一部分经河流回到海洋，一部分渗入地下或被生物吸取，另一部分又蒸发到大气中（图 1-8）。每年进入大气中的水与降水基本保持平衡（505 000 km^3 ）。大洋的海水约每 3 200 年更新一次。同时，还有很多小循环，如地表水和地下水之间、海洋与大气之间的循环等。此外，水圈还与地球内部进行水交换，喷出的岩浆和热液把内部水升到地表，而地表水也会沿断裂渗透到内部，只是这种交换的时间漫长（几十万年以上）。在水循环过程中，其动力对地表的岩石进行溶解、冲刷、磨损等风化破坏作用，再将其搬运并沉积下来，从而改造了地球的外貌。

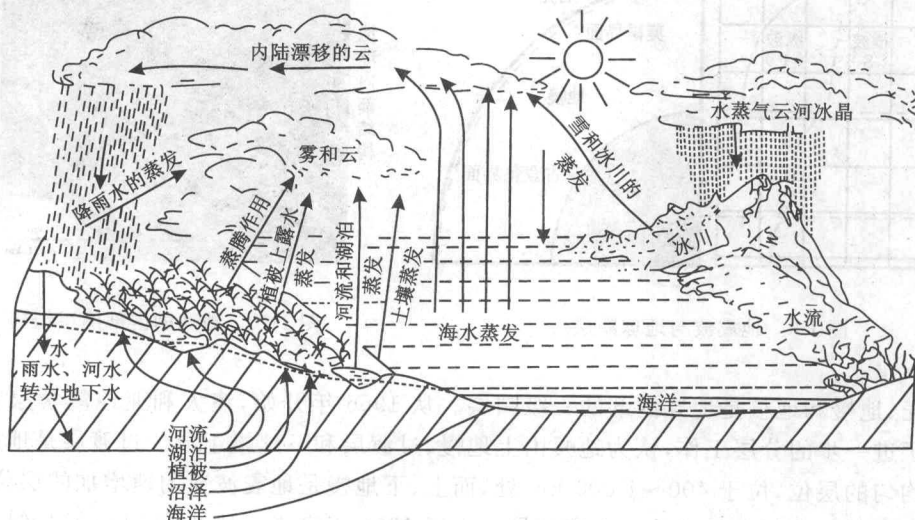


图 1-8 地球水圈中水的循环

三、生物圈

生物圈是地球上生物及其生存和活动的范围。生物活动的范围主要集中在地表附近,但从高达 10 km 的高空至深达 3 km 的地下以及在大洋底部都可能有生物的存在。生物圈总质量约 114 800 t,厚度可达十几千米,构成一个包围地球的完整的封闭圈。

生物圈的组成包括了从低级到高级、从植物到动物的全部生物。按生物的分类原则,包括:① 原核生物界,没有细胞核的单细胞生物;② 真核生物界,有细胞核的单细胞生物;③ 真菌界,低等的真核生物;④ 植物界,能进行光合作用、营养自给的生物;⑤ 动物界。

生物圈的有些生物可以生活在极端环境里,如海笔可以生活在深达 5 000 m 的深海平原上,在 500 多个标准大气压下生活得自由自在;有些真菌孢子在 180 °C 高温下仍可生存,在 -250 °C 的低温下有些孢子也不会马上死亡。

地球不同环境下的生物形成适应局部环境的生态组合,它们与环境一起构成了生态系统。生态系统是构成生物圈的一级单位,按其作用其生物可分为生产者、消费者和分解者三类。它们互相依存,互相配合,促使生态系统健康平衡发展。

二、地球的内部圈层

根据本章第二节提到的地球内部物理性质的变化特征,特别是地震波速的变体特征,可将固体地球的内部划分为若干个圈层。1909 年,南斯拉夫地震学家莫霍洛维契奇发现地震纵波速度在地下 30~60 km 处从 6~7 km/s 跳到 8 km/s 以上,意味着此深度存在一个重要的物性界面,即莫霍面。其上为地壳,其下为地幔。在地幔内,地震波速总体上随深度增大而增大。大约在 2 900 km 深度,地震波速突然从 13 km/s 降到 8 km/s,这是地球内部第二个重要界面,由美国地震学家古登堡在 1914 年首先提出的,被命名为古登堡面。古登堡面以下称作地核。整个地球内部圈层如图 1-9、图 1-10 所示。

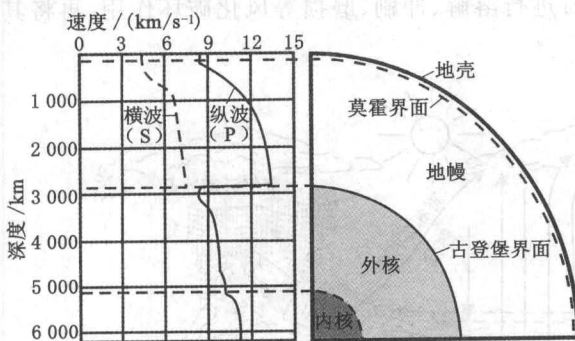


图 1-9 地震波与地球圈层

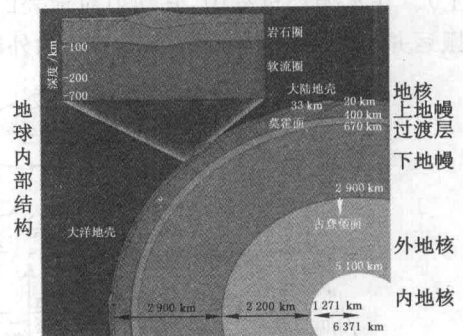


图 1-10 地球的内部圈层结构

地壳、地幔和地核是地球内部的一级圈层。从 1956 年开始,澳大利亚地震学家布伦对地幔做了进一步的分层工作,认为地幔由上地幔、过渡层和下地幔组成。过渡层是地震波速变化不均匀的层位,位于 400~1 000 km 处,而上、下地幔是地震波速匀速增加的层位。

地核内部的分层由丹麦地震学家莱曼女士于 1936 年完成。从 2 900 km 开始纵波速度逐渐回升,但横波为零。直到 5 000 km,横波重新出现,纵波速度也有明显跳跃。这个位于