

物理气候学

陆韵蓉、高国栋 编著

气象出版社

物理气候学

陆渝蓉 高国栋 编著

高等教育出版社

内 容 简 介

本书主要是在一般气候学的基础上,以物理原理和数学分析的方法分析了气候的物理因子和物理过程,进一步阐明了气候形成的物理机制。

本书可供有关专业的科研工作者和高等院校教师、研究生、大学生参考。

物 理 气 候 学

陆渝蓉 高国栋 编著

责任编辑:曾令慧

*

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

常熟市文化印刷厂排版 顺义县兴华印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 20.5 字数: 527 千字

1987年12月第一版 1987年12月第一次印刷

印数: 1—2,000

定价: 4.00 元

ISBN 7-5029-0012-8/P·0008

前 言

这本《物理气候学》，主要是以物理原理及数学分析的方法对气候形成机理进行分析阐述。全书共分七章，大体可以归纳为四个方面：

1. 地-气系统的辐射气候：主要阐述太阳辐射这一总能源在地球大气上界的分布，它通过大气到达地面的过程所发生的物理变化与物理状态以及造成的气候效应和特征。包括天文气候；大气中各种因素对太阳辐射的减弱作用；地理环境对太阳辐射的影响；地面上、大气中及整个地-气系统辐射收支量的计算及时空分布特征和辐射平衡状况。

2. 地-气系统的热量气候：主要阐述由于地球上辐射收支差额而造成的热力效应、热量交换与热量分配。包括地面和大气间的湍流热量交换；地表面和下层土壤(或水体)之间的热量交换传输；以及由于水汽的蒸发(或凝结)释放(或吸收)潜热引起的热量变换与贡献。计算和分析地球大气系统的热量收支与热量平衡状况。

3. 地-气系统的水分气候：阐述海洋和大陆上的热力和动力差异，海洋作为热储存库及水源供给地对于气候的作用与影响，海洋与大气的相互作用，进而计算分析地球(包括地面和地下)与大气中的水分含量、整个地-气系统水汽的转化和输送、水分循环以及水分平衡的特征和变化状况。

4. 地-气系统的能量气候：从地球上的辐射平衡、热量平衡和水分平衡的分布特征和时空变化，进一步计算分析大气中的各种能量种类、能量的来源、能量的转换以及能量的收支平衡状况，以便根据能量场的特征和变化揭示气候形成与变化的根源。

国际上气候科学的突飞猛进，国内生产建设发展和高级人材

培养的紧迫任务,需要我们提供从物理原理出发、能引用近代数学的计算方法和物理量指标表示、能对各个气候物理因子专门分析而又能连串起来综合阐述气候形成和变化特征的气候著作。这本《物理气候学》是我们在长期从事气候教学及科研工作中为了上述目标而不断积累和修改而成的。本书可供广大在职气候工作者和高等学校有关专业研究生和高年级学生使用。在编写过程中,曾得到校内外很多同志的支持、帮助,书中插图均由石宗祥和金仪璐两位同志清绘,在此我们致以衷心的感谢。书中错误缺点和不足之处,敬请读者多多批评指正。

编著者

1984年5月南京大学

目 录

第一章 太阳辐射与天文气候	(1)
§1 太阳与地球	(1)
§2 太阳辐射及辐射场基本知识	(20)
§3 地球上的天文气候	(39)
第二章 大气对太阳辐射的影响	(57)
§1 大气对太阳辐射的折射	(57)
§2 大气对太阳辐射的散射	(72)
§3 大气对太阳辐射的吸收	(92)
§4 大气对太阳辐射的透射	(115)
第三章 地球上的辐射平衡	(134)
§1 到达地面的太阳辐射量	(134)
§2 地球上的反射率	(153)
§3 地面和大气的长波辐射	(174)
§4 地球上的辐射平衡	(198)
第四章 地理环境对太阳辐射的影响	(218)
§1 水面对太阳辐射的影响	(218)
§2 海洋辐射和热量特征	(233)
§3 地形对太阳辐射的影响	(261)
§4 不同类型下垫面的太阳辐射状况	(315)
第五章 地球上的热量平衡	(357)
§1 地表面与大气间的湍流热交换量	(357)
§2 地表面的蒸发耗热量	(372)
§3 地表面与下层土壤(或水层)间的热交换量	(407)
§4 地面上的热源和冷源	(434)
§5 地球上的热量平衡	(442)
第六章 地球上的水分平衡	(453)
§1 地球上的水分含量	(453)

§ 2	地球上的水汽输送	(486)
§ 3	地球上的水分循环	(510)
§ 4	地球上的水分平衡	(518)
第七章	地球大气中的能量平衡	(541)
§ 1	地球大气中的能量	(541)
§ 2	大气能量方程	(552)
§ 3	大气中能量的变换与消耗	(564)
§ 4	大气中能量的计算	(579)
§ 5	辐射和水分因素对地球能量的贡献	(600)
§ 6	地球上的能量平衡	(624)
参考文献		(644)

第一章 太阳辐射与天文气候

太阳是地球之母。太阳辐射是地球上的能源和动力，它是维持地球上一切生命的基础。它是地球上大气环流和天气、气候形成的根源。因此，我们在本章内，首先必须介绍太阳和地球的基本知识。

本章着重介绍太阳和太阳辐射的物理过程；地球和地球运动的特征，太阳和地球之间的关系及其坐标；太阳辐射场的基本物理量；地球上昼夜长短和季节划分，以及天文气候的时空分布特征和变化。

§1 太阳与地球

1.1 太阳和太阳活动

宇宙无限大，银河系是宇宙中的一个恒星系统，太阳是银河系1千多亿颗恒星中的一个。

太阳直径约140万km，等于地球直径的109倍；它的体积为 $1.48 \times 10^{18} \text{km}^3$ ，为地球体积的103万倍；它的质量为 $1.989 \times 10^{27} \text{t}$ ，为地球质量的33万倍。太阳的巨大质量，对它附近的物体具有强大的吸引力，把整个太阳系中的行星、卫星、彗星、流星等维系在自己周围的各个轨道上运动着。

太阳是一个巨大和炽热的气体球。它的外部结构通常分为光球层、反变层、色球层、日冕层四层。如图1.1所示。

1) 光球层：从太阳内核到人们肉眼看到的发光表面称光球层，通常又称“日盘”。它是一个永远汹涌奔腾的火海，绝对温度可达6000 K左右。光球层上，有呈暗黑色的气体旋涡，温度比光球低1000—1500 K，称为太阳黑子(图1.2略，1.3略)；还有比光球

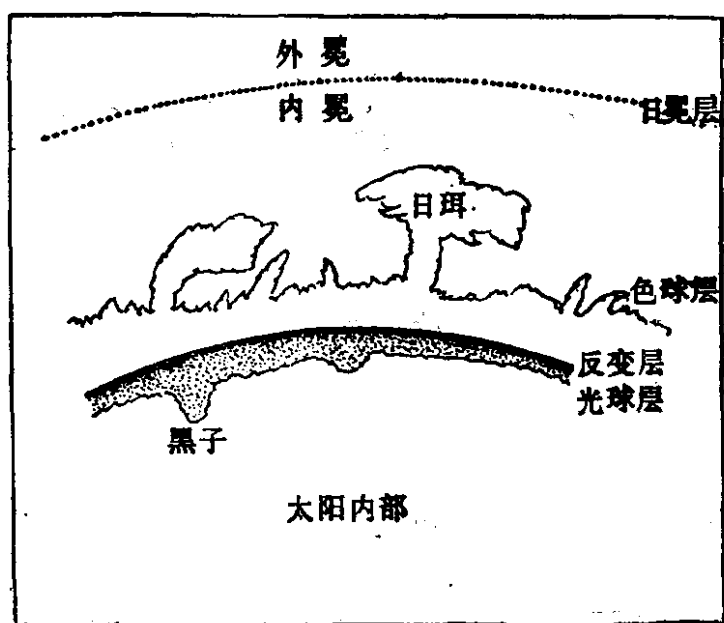


图 1.1 太阳外部结构示意图

更加炽热的光亮线条和斑面，称为光斑；另外还有一些斑斑驳驳的米粒状亮点，称为米粒组织。

2) 反变层：光球层上 600 km 左右的一层叫反变层。反变层对太阳能量的吸收有重要作用。分析迄今发现的太阳连续光谱中两万多条暗线，几乎全是由这层太阳大气对光球发射出来的光谱起着吸收作用而产生的。

3) 色球层：反变层上面 1500—2000 km 厚的一层红色太阳大气圈，是色球层。在色球层的上部气体运动十分猛烈，常有火焰状突出物向上喷射，称为日珥，它们多穿过色球层而延伸到日冕范围内；此层在黑子附近，有时会出现为时不长，强度极大，辉煌夺目的发光云，即色球爆发（见图 1.4 略），称为耀斑。它能使地面短波无线电通讯发生中断，它们的绝对温度可能不低于 1 万度。若用太阳色球所发射的某种谱线光（氢光或钙光）来观测，还可以看到光斑之上分布着谱斑，这是光斑在色球层的继续。

4) 日冕层：太阳最外层的稀薄大气称日冕（图 1.5 略）。平时由于光球的巨大光亮而不易被发现，日全食时月球掩盖光球层就可以观测到这圈银白色柔和的晕状光辉，它是由太阳喷发气流所

形成,温度奇高,可达1 百万度以上,内冕之外还有外冕,可以延伸到离太阳几百万公里甚至几倍的太阳直径处。日冕形状随太阳活动的强弱发生改变,黑子强盛时期,日冕射线朝向各方;黑子微弱时期,日冕射线在两极处较短,在赤道两旁伸展较远。

整个太阳面和太阳大气都处在不停地剧烈运动和强弱变化之中,太阳上的黑子、光斑、谱斑、耀斑、日珥、日冕等也随着太阳的运动变化而生、消、隐、现、聚、合、离、散。我们称太阳的这种变化和运动为太阳活动。反映太阳活动强弱的这些黑子,光斑、谱斑、耀斑、日珥、日冕等叫做太阳活动因子。现在,人们已经发现一些地球物理现象与太阳活动有显著关系。例如地球磁场的变化,极光的出现,无线电通讯的好坏等都与太阳黑子数和色球爆发有着密切的相关(见图1.6)。

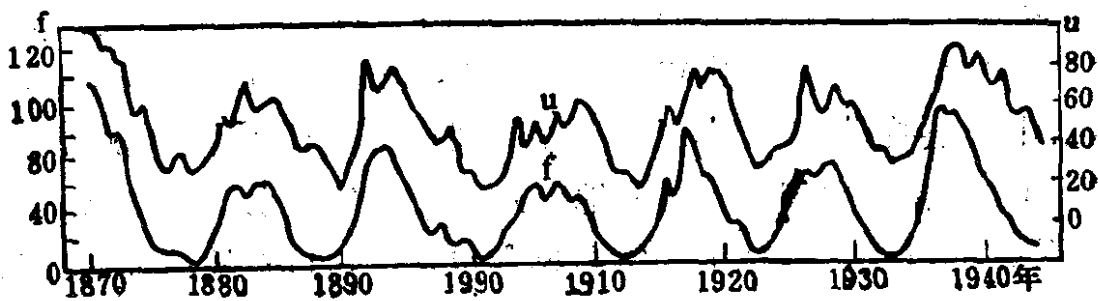


图 1.6 太阳黑子数(f)与地磁活动数(u)的对应关系

根据天文学家的观测证实,太阳也是围绕着它自己的轴在旋转的。因为太阳不象地球一样是固体,而是高温流体性质,所以它的自转速度在各个纬度上是不相同的。太阳的自转速度在太阳的赤道最大,而在其两极最小。在太阳黑子经常出现的区域,即大致在太阳的南北纬度 10° — 30° 左右的范围内,自转一周所需要的时间约为27天上下。一些太阳黑子及耀斑等活动性因子,寿命较长,可以随着太阳旋转一周甚至几周,一次又一次地在太阳面上出现,故太阳活动有27天的周期。同时,天文观测还证实太阳黑子活动区有磁场,在太阳面上的分布呈蝴蝶状,其磁场方向在南北纬度生消交替时,常正好相反。太阳黑子的分布与太阳磁场

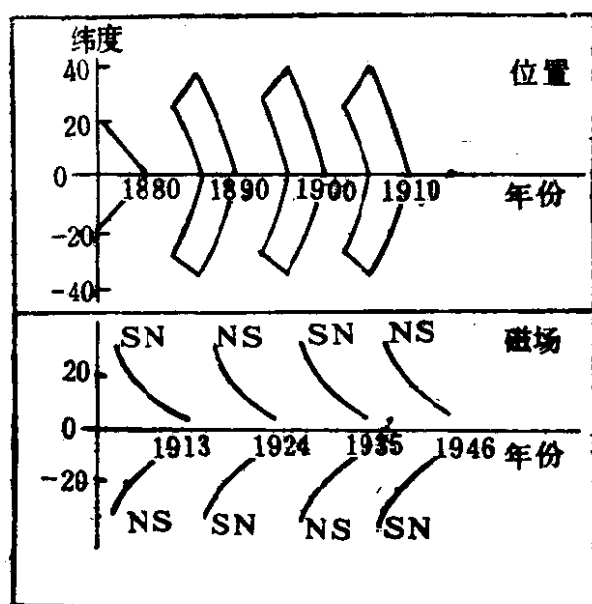


图 1.7 太阳黑子及其磁场的分布

的强弱都有 11 年左右的周期变化(见图 1.7)。

由于太阳活动与太阳辐射密切相关,因此,在地球上的磁暴、磁扰、电离层扰动、极光出现等地球物理现象也有 27 天周期和 11 年周期的变化。太阳活动同样地要对地球大气运动产生影响,太阳黑子多的时候,地球上的雷雨风暴也多。通过对地球上的历史气象资料对照太阳黑子数变化的分析,发现太阳黑子 11 年周期变化与地球上气候变化有明显的对应关系。所以,对于研究气候变迁和长期天气预报,太阳活动的研究也具有很重要的意义。

太阳黑子的表示方法有两种,一是 Wolf 提出的相对黑子数 (W) 又称华尔夫数算法

$$W = k(10m + n)$$

其中 k 为比例常数,随地区而不同, m 是黑子群数, n 是黑子个数。

另一种是 Carrington 提出的太阳黑子面积算法,其计算式为

$$A(\text{太阳黑子面积}) = 16.7 W(\text{相对黑子数})$$

图 1.8 给出了 1700—1973 年的太阳相对黑子数,由图可以清

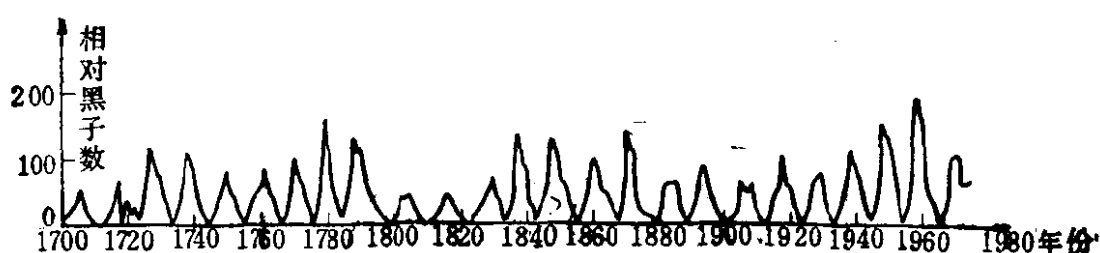


图 1.8 1700 年—1973 年年平均相对黑子数的变化状况

楚看出太阳黑子的周期变化状况。

1.2 天球坐标和天体测量

当我们观察星空时，由于地球的自转，太阳、月亮和所有的星体都有东升西落现象，这称为天体周日视运动。同时又由于地球的公转，天空星球的位置也有一年一周的变化，称为周年运动。分析太阳对地球的影响和日地关系时，我们必须把坐标从地球移向宇宙，使用天球坐标来描述问题和分析问题。

天球坐标的方法是：假定地球不动，处在原点位置，宇宙各个天体(星体)是围绕着地球在一个球面上运动，这个球体称为天球。

若观测者在地球上的位置为原点 O ，通过观测者和地心的铅直线向上与天球相交之点为天顶 Z ，向下与天球相交之点为天底 Z' ， ZOZ' 称作天顶轴。与天顶轴垂直的平面 $ESWN$ 称作地平面，通过 O 点延长地轴与天球相交于 P, P' 两点，与地球北极对应的点 P 为北天极；与地球南极对应的点 P' 为南天极， POP' 称作天轴。天极是不动的，天球绕天轴作周日运动，小熊星座的 α 星非常靠近北天极(约相距 1°)，所以称之为北极星。与天轴垂直的面 $EQ'WQ$ 称作天赤道面。通过天极、天顶在天球上所截的大圆叫子午圈，其平面称天子午面。子午面与地平面互相垂直。天体通过子午面叫做中天。每个天体每天有两次通过子午面，在最高位置时称上中天，在最低位置时称下中天。子午圈与地平面相交于 S 和 N 两点，前者接近于南天极叫南点；后者接近于北天极叫做北点；若观测者面向北方，则其距南 90° 之点叫东点 E ；和东点正相

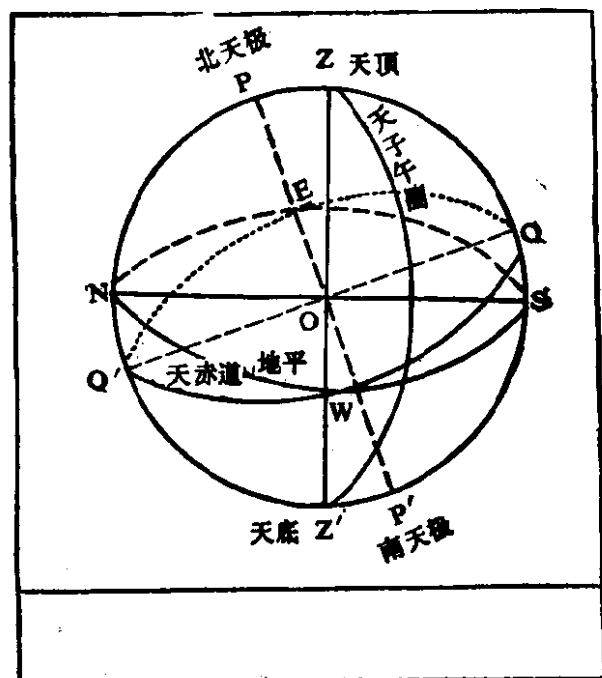


图 1.9 天球坐标示意图

对的点 W 叫西点; E, S, W, N 合称四方点(如图 1.9)。

假如天体位置在天球上 X 处,则天体与地平面的张角 $\angle XOM$,称为高度角 h ,也叫地平纬度。在地平面上 $h=0^\circ$,在天顶时 $h=90^\circ$ 。而天体与天顶的张角 $\angle XOZ$,称为天顶距 Z , $Z=90^\circ-h$,天顶时 $Z=0^\circ$,地平面上 $Z=90^\circ$,到天底时 $Z=180^\circ$ 。以南点为标准,它和天体高度圈与地平面交点的夹角 $\angle SOM$,称为方位角 A ,南点 $A=0^\circ$,向西为正,西点为 $A=90^\circ$;向东为负,东点为 $A=-90^\circ$ 。垂直于天赤道的子午圈 $PXTP'$,称为赤经圈,也叫时圈。天子午圈与天体时圈在天极的张角 $\angle XPZ$,称为时角 t ,时角以和天子午圈与天赤道南面的交点 Q' 为起点,顺时针方向 0° 到 360° ,南点 $t=0^\circ$,西点 $t=90^\circ$,北点 $t=180^\circ$,东点 $t=270^\circ$;有时也分别向两边计算, 0° 到 $\pm 180^\circ$,向西为正,向东为负。时角也有用时间来表示的,一天 24 小时地球移动 360° ,故 1 小时为 15° ,1 分钟为 $15'$,1 秒钟为 $15''$ 。天体与天赤道之间的张角 $\angle XOT$,称为赤纬 δ ,赤纬以天球赤道算起,在天赤道上 $\delta=0^\circ$,到天北极时 $\delta=90^\circ$,到天南极时 $\delta=-90^\circ$ 。而天体到

天极的张角 $\angle XOP$, 称为天极距 P , $P = 90^\circ - \delta$, 天极时 $P = 0$, 天赤道时 $P = 90^\circ$, 天底时 $P = 180^\circ$ (图 1.10)。

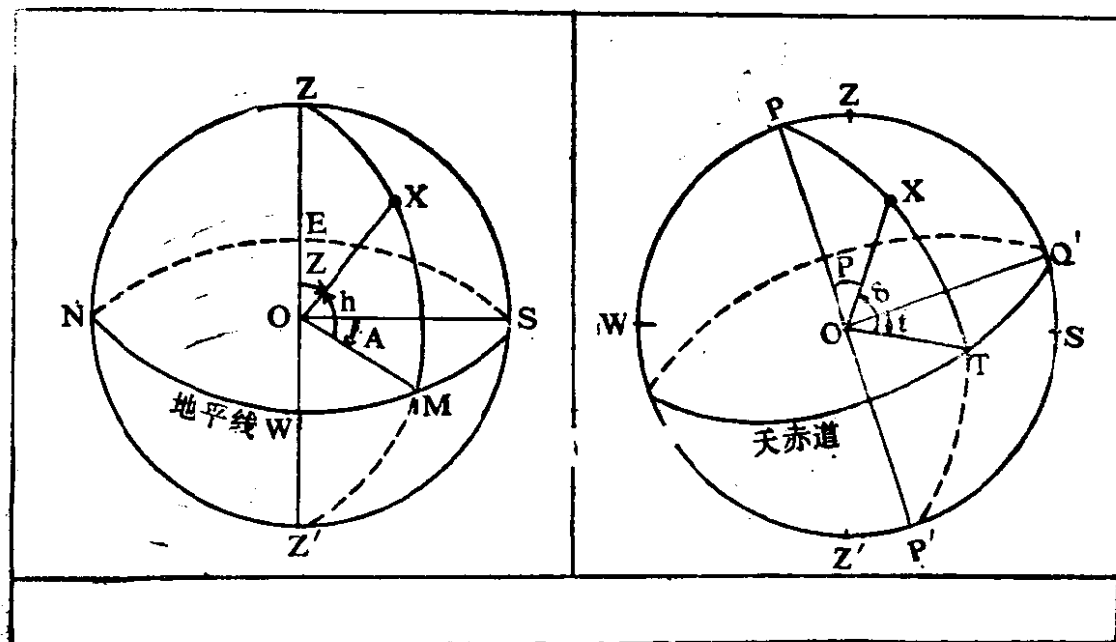


图 1.10 天球位置坐标

地球轨道平面和天球相交而成的大圆称为黄道。黄道面与天赤道面的夹角为 23.5° 。黄道与天赤道相交于两点, 分别叫做春分点和秋分点。从天极按反时钟方向, 黄道从赤道以南穿到赤道以北时的交点为春分点 γ , 黄道从赤道以北穿到赤道以南的交点为秋分点 ω ; 黄道上与春分点相距 90° 处, 太阳赤纬达最大值 ($\delta = 23.5^\circ$), 该点叫做夏至 ϖ ; 和春分点相距 -90° 处, 太阳赤纬达最小值 ($\delta = -23.5^\circ$), 该点叫做冬至 δ 。春分点赤经圈(时圈)和天体赤经圈在天极的张角 $\angle \gamma PT$, 称为赤经 α , 赤经自春分点 γ 起按反时针向计量, 从 0° 到 360° , 或用时间计算 0^h 到 24^h 。赤经量度的方向正好与方位角及时角量度的方向相反。实际上, 赤纬和赤经相当于扩大了地球纬圈和经圈。赤纬和纬度度数也相一致, 仅赤经和经度由于起点不同, 其度数不一致(图 1.11)。

介绍了上述这套天球坐标和天体测量的基本方法以后, 我们就可以运用这套天球坐标系统来分析和描述地球与天体之间相对

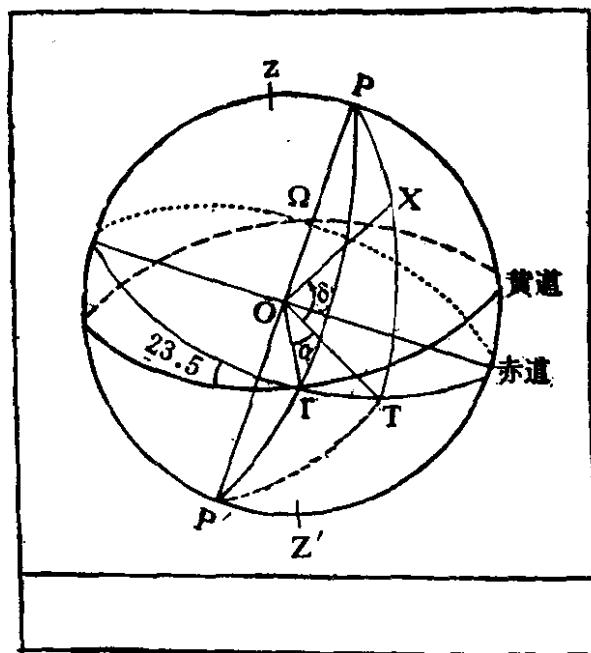


图 1.11 天体时角坐标

运动的特征及其在空间和季节上的变化，从而进一步了解相互之间的关系和影响。

1.3 地球和地球磁场

地球是太阳系的九大行星之一，根据地质学家的推算，地球的年龄已有 50 亿年以上。它是一个近似椭圆形的球体，东西半径（长半轴）为 6378 km，南北半径（短半轴）为 6357 km，由于这个差值比半径要小得多，故通常把地球看作球体，取平均半径为 6368 km。由此可算出地球的面积为 $51.0 \times 10^7 \text{ km}^2$ ，体积为 $108.5 \times 10^{10} \text{ km}^3$ ，其总质量为 $6 \times 10^{27} \text{ g}$ ，平均密度为 5.53 g/cm^3 。

整个地球体系大致可以分为四层，好象几个圆圈套在一起一样(图 1.12)。最外面是大气层，或称大气圈。这是一层变动着的空气，是由氧、氮、氢、氩……等原子和二氧化碳、水汽等分子及一些气溶胶尘埃所组成。大气圈的厚度在 800km 以上，其密度随着离地高度升高而减小。

地球的地壳是岩石层，又称岩石圈。人类和其他生物就是生长在这一层上。地壳不是一个平滑的表面，有的地方高，有的地方低，高的地方露出水面称陆地；低的地方被水面覆盖，形成江河湖

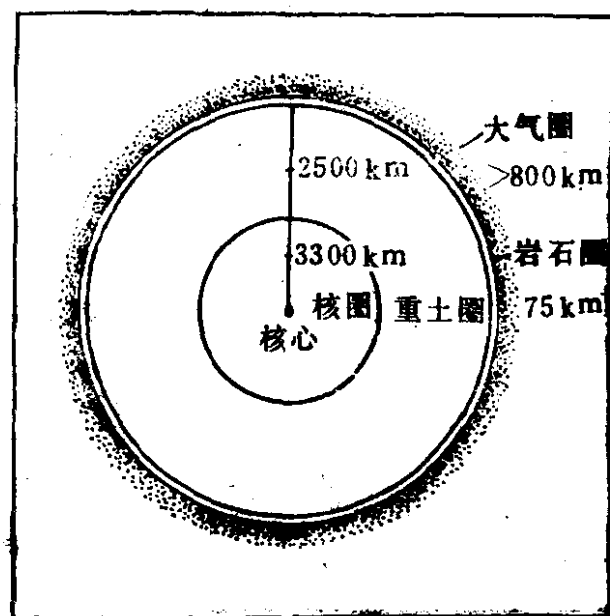


图 1.12 地球构造示意图

海。陆地也因地理环境的差异，分成岛屿、平原、山脉、高原等（图 1.13）。陆地表面被覆着一层疏松的土壤，这是植物生长的基础，土壤是在地球运动发展中长期发育而成，是由一定的矿物质、有机质、空气、水分和沙粒组成。地球的岩石圈大约有 75 km 厚，有火成岩，水成岩和变质岩三类。整个岩层的形成是与地球的形成发展分不开的。根据地质学家的研究，地层的形成可以分为五大时代（图 1.14 表 1.1）。



图 1.13 地壳外层构造示意

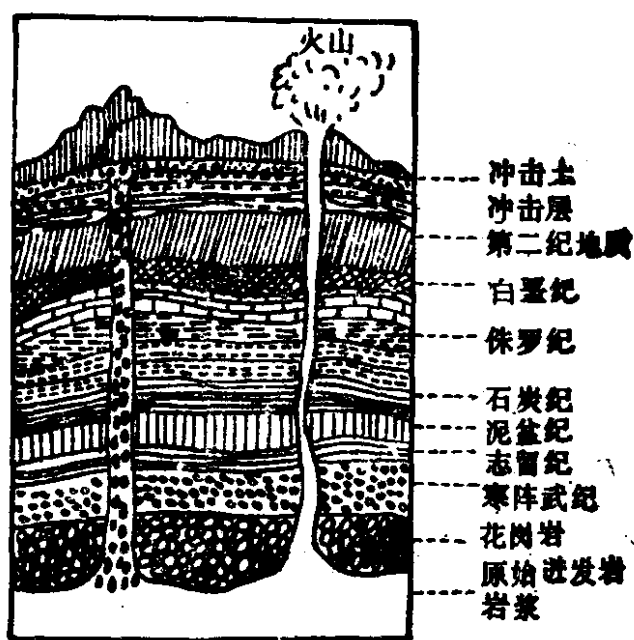


图 1.14 标准地层断面及所处时代

表 1.1 地质时期与地质年代

地 质 时 期	地 质 时 代
1. 新生代 第四纪(现在及冰川时代) 第三纪	现在— 5×10^8 年 5×10^6 — 10^7 1.6×10^8 — 7×10^8
2. 中生代 白垩纪 侏罗纪 三叠纪	7×10^8 — 2×10^9 8×10^8 10^9 2×10^9
3. 古生代 二叠纪 石灰纪 泥盆纪 志留纪 奥陶纪 寒武纪	2×10^9 — 5×10^9 2.2×10^9 2.7×10^9 3.2×10^9 3.5×10^9 4.2×10^9 5×10^9
4. 太古代 5. 元古代	5×10^9 — 2×10^{10} $> 2 \times 10^{10}$