



第一章

宇宙

将宇宙现象（天球及其上面的天象）与实质（科学推理所得的宇宙真相）统一、贯通起来，并用发展变化的眼光来观察宇宙，才能形成完整的科学宇宙观。本章的内容围绕这一主题展开。

【本章学习目标】

- 学习人眼所见的常见天象的基本特点，以及观测天象所需的基本天球坐标知识。
- 把握星空季节变化的基本规律，联系实际观测星空。
- 了解人类从观测现象出发探索宇宙的主要历程，进一步领会宇宙现象和本质的统一。
- 了解宇宙的基本天体——恒星的演化。
- 了解宇宙从大爆炸起源，及其之后的星系、银河系、太阳系，乃至地球起源的总体图像。

【关键词点击】

宇宙 天球 天象 星空 宇宙探索 恒星的演化 大爆炸宇宙学说 起源

第一节 天体和星空

现代科学展示的宇宙真实景象是观测、推理的结果，它与人们直接看到的天象有相当大的差距。本节将讲述常见的基本天象，了解星空随季节变化的基本规律和不同日期观测星空的特点，以便联系实际观测星空，为今后逐步认识宇宙，学会将现象和本质相统一，形成完整的科学宇宙观打下基础。

广袤的宇宙

晴朗的夜晚，举目向天，深邃浩淼的宇宙引起人们无限的遐想和求知愿望。经过长期努力，人们发现，自己生活在一个称为地球的“宇宙航船”上，正在沿着一条比地球直径大两万多三千多倍的近圆轨道，绕太阳运转。在空旷的太阳系空间，还分布着其他行星、小行星和彗星等太阳系天体，它们绕太阳运行的轨道可达几十、甚至几百个地球轨道半径以外。

太阳系以外是更加空旷的星际空间，很远很远才能遇到一颗恒星。离太阳系最近的一颗恒星，同地球的距离约为4.2光年。如此遥远分布着的一千多亿颗恒星，以及恒星间极其稀薄的星际气体和尘埃，共同组成了银河系。在银河系中，半数以上的恒星构成双星、聚星（3~10颗）和星团；星际气体或尘埃在某些地方相对集聚，则表现为星云（图1.1）。如果将银河系比做一个直径10千米的圆盘，那么，地球绕日公转轨道直径仅约0.003毫米，要用显微镜才能看见。

银河系如此庞大，可是，它也只是我们宇宙中数十亿个相互远离



图1.1 猫爪座大星云
极其稀薄，恒星的光将星云照亮。

的星系（图 1.2）中的普通一员。如果将我们的宇宙比做一个直径10千米的圆球，那么，银河系仅一枚铜钱大小。

现代科学证实，宇宙是物质世界，不仅巨大无比，而且宇宙中所有的天体都有着产生、发展和消亡的历史。

以上就是现代科学描绘出的宇宙。可是，这个宇宙景象与人们直接看到的现象，即古人所说的天象，是有很大差距的。事实上，二者之间是理性认识与感性认识的关系。要想将眼前的天象与科学推理的宇宙景象统一、贯通起来，学会联系实际观察星空，必须从基本天象谈起。



图 1.2 位于大熊座的旋涡星系
如果从银河系外观察银河系，大体就是这种形态。



活动

查找有关天体和天体系统尺度的数据，计算它们之间的相对大小。

天球和人眼中的天象

（一）天球

地面观测者眼前的宇宙是一个以观测者为球心、布满天体的半球形天空，称为“天穹”（图 1.3a）。尽管人们只能观察天穹，而且由于白天日光强，看不到天穹上的众多天体，但是，古人早就通过一些现象，判断出天体应该布满整个球形天空，人们把这个假想的圆球称为天球。天体在宇宙空间的分布实际上是立体的，但是由于天体非常遥远，肉眼分辨不出它们的远近，所以看上去分布在同一个天球面上（图 1.3b）。

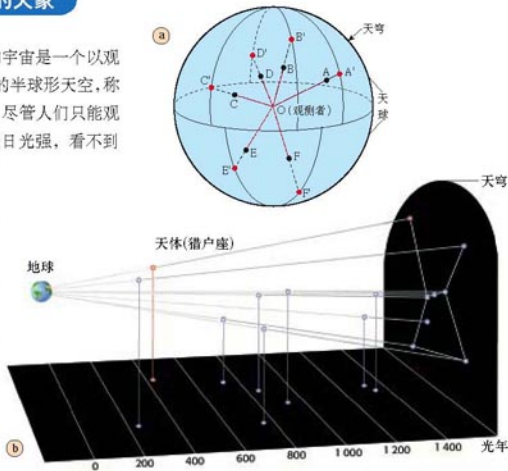


图 1.3 天球和天穹



图 1.4 星空上的“银河”

地球上肉眼可见的天体，绝大部分是银河系中的恒星，约六千颗，其余为日、月、五大行星（水、金、火、木、土）和偶见的彗星、流星体等太阳系天体，以及少数的星云、星团和星系。银河系在天球上的投影呈现为一条跨越星空的光带——“银河”（图 1.4）。

天体有亮有暗，人们用“星等”来表示天体的亮度，越亮的天体，星等值越小。例如，最亮的15颗恒星为1等、0等，甚至为-1.46等（大犬座 α 星，即天狼星）。人眼可见的最暗一批恒星，约为6等星。金星是最亮的行星，星等可达-4.4等。



阅 读

测定天体的距离

即使使用望远镜，人眼也难以直接区分天体的远近。天体距离是通过精密测量、分析和推理而得到的。例如，对较近的恒星，人们相隔半年（即从图 1.5 的 A、B 两位置）测量该恒星空间方向的差异，也就是测量出图 1.5 中的 α 角。已知 α 角和地球公转轨道的直径 AB，就可以利用三角公式算出该恒星的距离。

注意很远的恒星相对位置没有变化。图中夸大了地球公转轨道的半径。

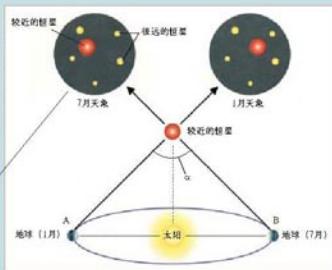


图 1.5 测量较近恒星的距离



思考

1. 你能列举出可观察的现象，说明地平面以下那半个天球的存在吗？白天的天穹上也布满天体吗？
2. 试解释“银河”天象的成因。（提示：银河系呈圆盘状，太阳系位于其中。）

（二）天体在天球上的位置和运动

天体在天球上的位置变化有三个基本特点。

第一，恒星星空图像稳定。古人早就发现，无论何时何地，所见恒星间的相对位置“恒定”（太阳除外），换言之，星空的外貌是相当稳定的，好像一个镶嵌着点点繁星的固体球壳。

恒星星空图像相对稳定，给研究带来了很大的方便。人们按恒星在天球上的分布形态把星空

划分为若干区域,每个区域为一个星座,并予以命名。整个星空统一划分为88个星座。星座内的主要恒星,由亮到暗,依次用希腊字母或数字来标识,例如小熊星座 α 、 β 、 γ 等。



阅 读

十万年前和十万年后的北斗七星

恒星和星系世界的天体都处于永恒的运动中,但由于距离太遥远,它们之间的相对位置变化在不长的时期内很难察觉,要经过多年观测积累才能发现。科学家们推测,北斗七星(大熊星座)在很长的时期内还将呈勺子状,但十万年后,现在的勺子状将不复存在。



图 1.6 北斗七星形状的变化

第二,恒星星空每日绕轴旋转一周,带动所有天体每天呈现东升西落运动。这种运动称为周日运动(图 1.7)。

天轴是地轴的无限延伸,它是星空周日旋转的转轴。对北半球观察者来说,地平面以上的那个天轴端点附近有一颗较亮恒星——小熊星座 α ,它在天球上的投影常被用来作为天轴端点的标志,因而被称为北极星。与天轴垂直的天球大圆称为天赤道(图 1.8a)。天轴与天赤道垂直,与地球的地轴和赤道的关系相似。



图 1.7 周日运动轨迹

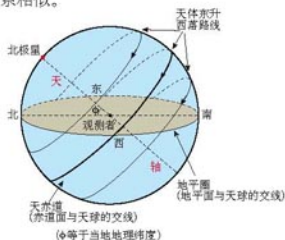


图 1.8a 星空周日旋转与天体的东升西落

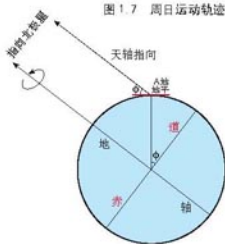


图 1.8b 天轴的地平倾角

星空周日运动是地球自转的反映,星空周日运动的周期就是地球自转周期。地球上的人们感觉不到地球自转,相反,他们感觉星空在绕地轴(及其延伸方向)转动。天轴倾斜度(天轴的地平倾角)等于当地地理纬度(图1.8b),地面上的正南和正北方向即天轴的投影。在不同纬度,人们观察到的天体周日运动状况不尽相同。



思考

1. 图1.7是在夜间用照相机连续曝光数小时后拍摄的,照片清楚地显现较亮恒星的周日运动轨迹。试将当时在地球中心的观测者拍照时对准的方向,在图1.8a中画箭头表示出来,并加以解释。

2. 依据图1.8b说明,天轴倾斜度等于当地地理纬度 ϕ ,天轴投影即地面南北方向。(提示:同宇宙相比,地球大小只相当于一个点;地轴的平行线与地轴一样,都指向极其遥远的北极星。)

3. 图1.9是地球上的观测者在三个纬度(0° 、 40°N 和 90°N)看到的天体周日运动状况。试在图中标明a、b、c分别是哪个纬度的情形?描述不同纬度观测到的天体周日运动轨迹的特征,并回答哪个纬度能够看到的星座最多。

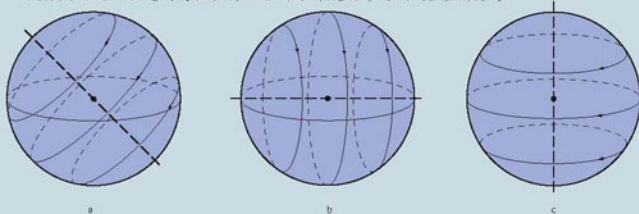


图 1.9

第三,太阳系天体在跟随星空周日旋转的同时,还缓慢或较缓慢地在星空上移动。其中,太阳每年沿着一条称为黄道的轨道,相对星空移动一周。黄道穿过十二个星座,称为黄道十二星座或黄道十二宫。太阳系其他天体相对星空的运行要复杂一些,但绝大多数都在黄道附近。



思考

古代恒星和行星这两种名称是怎么来的?



思考

太阳系天体相对星空移动,是因为地球和太阳系天体皆绕太阳公转。图1.10a中的图面为地球公转轨道面,中央的内、外圆分别表示地球和火星的轨道,四周是位于地球公转轨道面(无限延伸的平面,即黄道面)附近的十二个星座。假定在时刻1,地球和火星分别位于A和A';大约两个多月后,至时刻2,地球和火星分别公转到B和B'。试问:

1. 地球在位置A时,从地球看太阳在哪个星座方向?看火星在哪个星座方向?地球到位置B时,看太阳和火星的方向分别移到哪个星座?

2. 分析地球公转轨道面与赤道平面是什么关系?想一想,黄道面与天赤道面呈多大的交角?

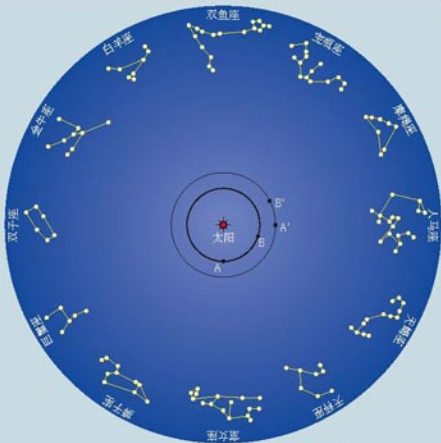


图1.10a 公转运动中从地球看太阳和行星(以火星为例)相对星空位置的变化

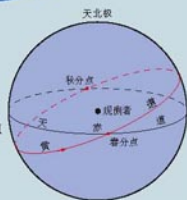


图1.10b 天球上的黄道与天赤道

天球仪和天球坐标系

(一) 天球仪

为了模拟上述三个基本天象特点,古人很早就制作了天球仪(图1.11)。教学用的天球仪如图1.12所示。

图1.11 北京古观象台天球仪



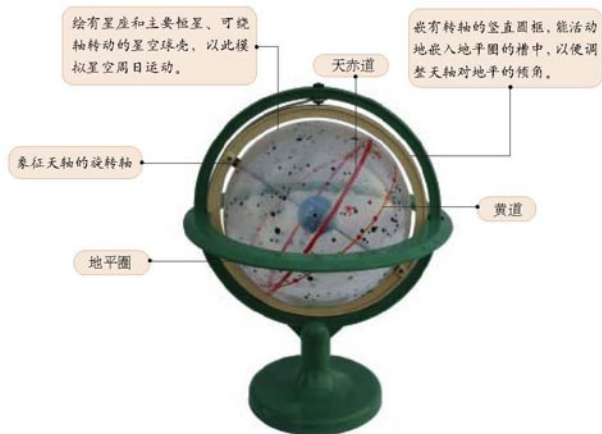


图 1.12 天球仪



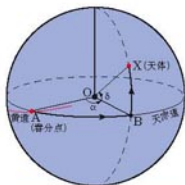
活动

利用天球仪演示以下不同纬度处能够观测到的星空周日运动状况和星座的情况： 0° 、 40°N 、 90°N 、你所在的纬度。

（二）天球坐标系

为了定量描述天体在天球上的位置，人们建立了天球坐标系，就像在地球上建立地理坐标系一样。天球坐标系有多种，我们至少应了解其中的两种，以便在观测星空活动中，掌握“天体位置”的两种基本概念。

一种是赤道坐标系，它依据天轴和天赤道，建立在恒星星空上，因而体现天体在恒星星空上的位置。赤道坐标分为赤经和赤纬（图1.13）。赤经以黄道与天赤道的一个交点（春分点）为起点，逆时针方向（从北极星看）度量，从 0° 量到 360° 。赤纬从天赤道向南、北两极度量，与地理纬度的度量方法类似。在天球仪的星空球壳上，能够明显地看到类似于地球仪上的经纬网，这就是赤道坐标系的经纬网。



- α : 天体的赤经 ($0^{\circ} \sim 360^{\circ}$)
- δ : 天体的赤纬 ($0^{\circ} \sim \pm 90^{\circ}$)

图 1.13 赤道坐标



活动

利用天球仪读恒星的赤道坐标

方法示范:在图1.14的天球仪星空上,天鹅座 α (天津四)赤纬约为 $+44^\circ$,赤经约为 310° (注意,该天球仪星空上每隔 15° 绘一条纬度线和一条经度线)。

依此方法,请你在天球仪上读取织女星、牛郎星的赤经和赤纬。

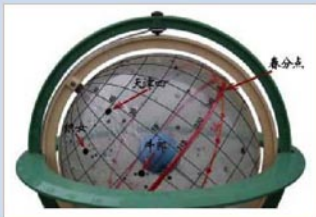


图 1.14 天球仪星空上的经纬网

另一种是地平坐标系,它依据地平圈而建立,因而体现天体相对当地地平的位置。地平坐标分为方位角和地平高度(图1.15),分别体现天体在当地的地理方位和地平线上下的角度。天球仪的地平圈上一般标有方位角的刻度(见图1.14中的地平圈),观测者可以自己估计地平高度。

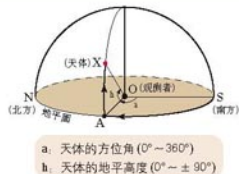


图 1.15 地平坐标



思考

1. 估测图1.14中织女星的方位角和地平高度,方位角在“东北、东南、西北、西南”四项中选择;地平高度在“很高、适中、较低、地平线下”四项中选择。
2. 短期内,恒星的赤道坐标是否变化?太阳系天体的赤道坐标呢?
3. 恒星的地平坐标短期内是否变化?

星空季节变化

星空季节变化是指人们所观测到的某相同时刻的星空,随季节的变换而变化。由于人们多在黄昏后观察星空,星空季节变化的“星空”,常常指黄昏后某时刻的星空。

图1.16~图1.19给出大约北纬 35° 处,有代表性的四季晚9时星空。图中,表示恒星的圆点越大,星等越小,恒星就越亮。

从四季星空图上可清楚地看到“斗转星移,岁月流逝”的现象:在每一个季节交替中,各星座在天空上的位置都发生明

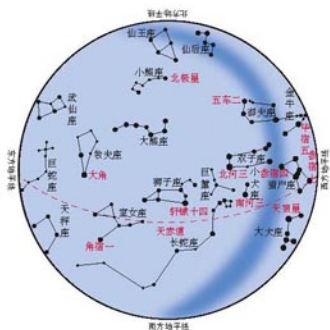


图 1.16 春季星空 (4 月中旬晚 9 时)

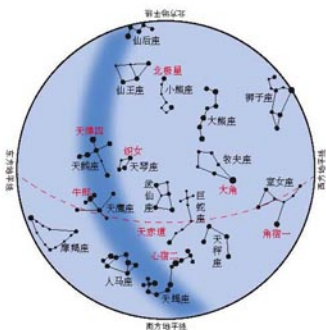


图 1.17 夏季星空 (7 月中旬晚 9 时)

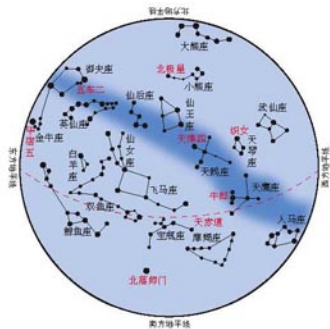


图 1.18 秋季星空 (10 月中旬晚 9 时)

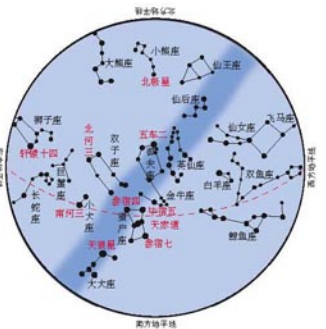


图 1.19 冬季星空 (1 月中旬晚 9 时)

这些图是图面朝下 仰天观测时用的,因此 图上左东右西 左侧是东方升起的星座,右侧地平附近的星座则快落山。东升西落的路线大体上是围绕北极星星的弧线。阴影是银河。

显的变化。以从春到夏为例。春天指向东的北斗七星斗柄,到夏天转向南;在春季星空相继西落的猎户等星座,在夏季星空中已消失(转入地平线以下);高挂春季星空的狮子座到夏季已西落;春季在东方的牧夫等星座到夏季已位于西天;春季在东方刚升起的武仙等星座,到夏季已在高处;而在夏季的东方星空,则出现了春季未见的天琴、天鹰等星座。



活动

按照季节交替顺序,观察各季节交替中星座位置的变化;并制作一张表格,填写黄道十二星座在春、夏、秋、冬四季晚9时天空中的大致方位(例如,南方、东南方、地平面以下等)。

四季星空中,夏、冬星空相对更加璀璨。在夏季的东方高空,牛郎、织女星和天津四组成醒目的亮三角;有较多亮星的天蝎座和东侧的人马座,也在东南低空构成亮丽的长长星链。在冬季,天顶(观测者头顶正上方的天空)和东南星空中,会聚着天狼星、参宿四、南河三等七颗1等或更亮的亮星。此外,夏、秋季银河跨越天空,比较醒目。

星空鲜明的季节变化很早就引起了人类的注意。古人利用星空的季节变化来划分季节,确定农时。



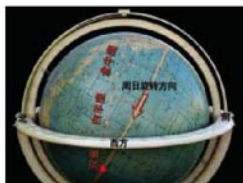
思考

我国古代人民曾用北斗星斗柄指向的变化来划分季节:“斗柄东指,天下皆春,斗柄南指,天下皆夏……”古人看到斗柄东指了,知道播种的春天来临了。

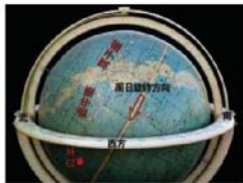
1. 按上述所讲知识,这条著名的古代谚语所默认的星空,大约是晚上几点的星空?
2. 在春季,能否看到斗柄南指?如果能看到,那么,大约在几点钟(按4月中旬计)?

星空季节变化的原因

相同时刻的星空随季节变化,是因为时刻对应于太阳在当地东升西落中的位置,而太阳又相对星空有周年运动。仍以黄昏后的星空为例。由于太阳一年四季依次移行于黄道十二星座,太阳与星空各星座的相对位置不断变化,而黄昏后太阳总是在当地的西方地平线不远处。因此,黄昏后的地面上可见星空会因季节而异(图1.20)。



a 春分日的黄昏后



b 立夏日的黄昏后

图 1.20 太阳相对星空移动导致黄昏后星空的变化

例如，春分日的黄昏后，太阳与它所在的双鱼座一同落入地平面以下，白羊座和金牛座等在西方天空（图 a）。一个半月后立夏时，太阳移到白羊座，黄昏后白羊座与太阳一起落入地平面以下，在西方天空中已是金牛座和双子座（图 b）。



思考

阅读图 1.20，想像星空和太阳在春分日或立夏日继续周日旋转的情形。

1. 到子夜时太阳在什么位置？天球仪或星空会转到什么状态？到第二天凌晨呢？
2. 太阳所在的星座或那一小块星空与太阳一同东升西落，是否可见？
3. 不论何日，在晴朗之夜通宵观测，能否看到大部分星空？为什么？

再进一步，怎样确定星空随具体日期的变化呢？这就需要知道太阳在给定日期位于黄道上什么位置。在图 1.21 中二十四“节气点”就是二十四节气时（或相应阳历日期）太阳在黄道上或黄道十二星座中的具体位置。同理，其他日期的太阳位置也很容易估计。例如，8 月 28 日（处暑后 5 天），太阳在狮子座，在黄道上位于处暑点到白露点之间约 $1/3$ 距离处（如图中的“●”所示）。

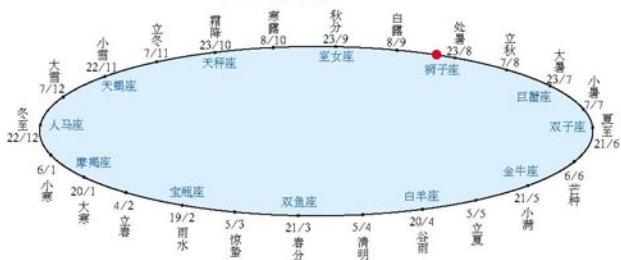


图 1.21 黄道上二十四节气点、阳历日期和黄道十二星座的配置关系



活动

利用天球仪观测任意日期和时刻的星空

基于图1.20、图1.21和前面所学的知识,可以利用天球仪观测任意日期、时刻的星空。

1. 将天轴对着当地的正北方向;调整天轴对地平圈的倾角,让它等于当地地理纬度。

2. 由观测日期确定太阳在黄道上的位置,并做上记号(天球仪星空球壳的黄道上一般都标有二十四节气点)。

3. 将太阳记号转到观测时刻太阳周日运动应当到达的大体位置。这时,天球仪地平圈上的那一半星空,就对应着当时、当地的星空实况。

例如,11月24日黎明前星空状况如图1.22所示。当天太阳位于黄道上小雪节气点稍后;而黎明前太阳离东方地平线不远(图中红点为太阳记号)。

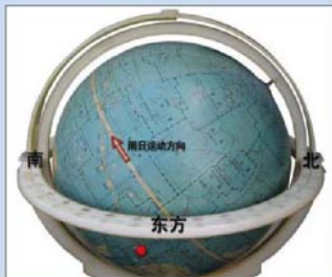


图1.22 11月24日黎明前星空



思考

如果在1月24日观测,要想看到与图1.22同样的星空,大约在本地什么时间?

活动星图

活动星图是天球或星空投影在平面上的结果,它与天球仪的关系,类似地图与地球仪。活动星图带有投影导致的变形,它虽然不如天球仪模拟星空球面那样形象、准确,但它小巧、简明、携带方便,也是一种观测天象或星空的常用工具。

图1.23是一种常见的活动星图,上盘用透明薄膜制作,因而在没有涂色的透明椭圆窗口上,能够绘出很多简易活动星图没有的地平坐标网线。

本教材附录中将给出制作简易活动星图的材料和方法。

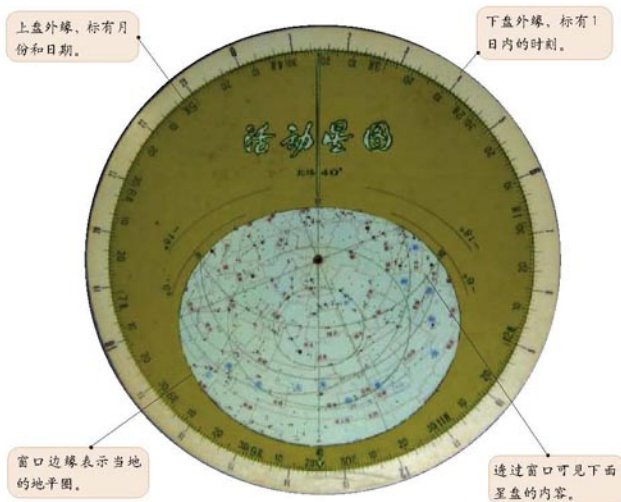


图 1-23 活动星图

活动星图由上、下两圆盘组成，其中心相互套连，使两盘能绕中心相对转动。图中白色下盘又称星盘，绘有星座、主要恒星等，作用相当于天球仪的星空球壳。北极星位于星盘的圆心。上盘又称地盘，开有适用于特定地理纬度的椭圆形窗口。从窗口露出的部分星盘表示地平以上的可见星空。



星空观测站

利用星图观测星空

主要步骤如下：

1. 鼓励自制星图，也可选用内容更详细的商品星图。商品星图的椭圆窗口一般已按某些纬度预先挖好。因此，应注意选用与自己所在地区纬度尽可能接近的星图。
2. 转动地盘，将星盘外缘的观测日期与地盘外缘的观测时间对准。例如5月7日20时观测，那就将星盘的5月7日刻度线，对准地盘的20时刻度线。
3. 举起星图，图面朝下，仰天观察；并调整星图的方向，使星图地盘窗口所标注的东西南北方位与实际方位一致。此时地盘窗口中所显示的星空内容，即为实际星空状况。
4. 如果地盘窗口有地平坐标经纬网，试借助它读取若干亮星的地平坐标，并与这些亮星的实际位置进行对比，以此熟悉主要亮星的位置和分布。

这种观测应在不同季节的同一时间多次进行，以加强对天象和星空季节变化的认识。

第二节 探索宇宙

人类探索宇宙，是一个从表象到本质的科学研究过程的生动范例。本节在逐步展开这个过程的同时，也介绍一些与本章后面讲述宇宙演化有关的天文知识。

根据直观天象，古人建立了原始的宇宙观。他们认为，天体在天球上运转，而大地水平展开，静静地处在宇宙的中央。这种宇宙观持续了几千年。人类为探索宇宙的真相付出了长期不懈的努力，甚至有人为此而献出生命。这个过程大体可分为认识太阳系、探究恒星世界、探索星系世界和航天时代四个阶段。

认识太阳系

人类认识太阳系的第一步是地球球形说。东方先民根据“天体高度南北差异”等现象(图1.24)，很早便推想大地呈球形弯曲。古希腊人则明确提出地球球形说。文艺复兴时期，航海业的发展和地理上的新发现，使得中世纪遭扼制的地球球形说得到重新确立。1519~1522年，麦哲伦船队环球航行成功，从事实上证明了地球是球形的。

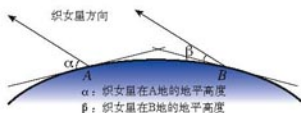


图1.24 南北两地织女星的地平高度



阅读

远见卓识

古希腊、古罗马的学者进行了有关地球球形的更深层次的探讨。例如，为了回答反对者提出的“地球及地球反面的人如何能悬在空中”的难题，亚里士多德认为地球位于宇宙中心，各方重物皆向地球降落；古罗马学者普利尼(23~79)等则指出，地球的另一面也可以住人。



图 1.25 波兰天文学家哥白尼

人类探索太阳系的第二个里程碑是哥白尼(1473~1543)的日心地说。哥白尼并非简单地重申前人的日心地动观点,他创立了日心地动理论,并能较成功地解释、计算和预报日、月、行星在地球上相对星空的位置和运动。



阅读

托起哥白尼的人

日、月以及行星相对于恒星星空的运动,关系到生产和历法,又常被视为命运兴衰的征兆。因此,世界各民族普遍重视日、月、行星运行的正确计算和预报。日心地说之所以能克服阻力而兴起,就是因为它能较好地解决这个问题。

日心地动观点的最早提出者是古希腊学者阿里斯塔克(约公元前310~前230)。他不仅推断出地球在自转的同时绕太阳公转,而且巧妙地证明了太阳比月球大很多。他说,地球绕日公转轨道同恒星间距离相比,小得就像一个点,以致我们看不到恒星相对位置的变动。

与哥白尼日心地说有渊源关系的另一学说,是中世纪长期流行的托勒密(90?~168)地心体系。该体系虽然基于天动地静的观点,但它已不同于原始宇宙观。在该体系中,恒星天作为一个球面周日旋转。日、月、行星在一些圆轨道上相对恒星天运动;行星分布次序与现代符合,行星相对星空的运动分别用两个匀速圆周运动的叠加来计算。哥白尼继承了托勒密体系的正确成分,但是将太阳和地月系的位置相互对调,使问题豁然开朗,进而创立了日心地动说。

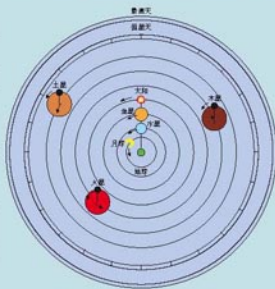


图 1.26 托勒密的地心体系



图 1.27 牛顿

开普勒(1571~1630)在改进哥白尼计算的过程中,发现了行星运动三定律,推断行星绕日公转不是匀速圆周运动,而是非匀速的椭圆轨道运动。牛顿(1642~1727)集开普勒等学者之大成,发现了万有引力定律,不仅解决了“行星为什么作椭圆运动”和“天体为何能悬在空中”,以及天体自转、重力和形状等更深层次的理论问题,而且能更精确地计算和预报天体的运动,成为人类探究太阳系的重要里程碑。



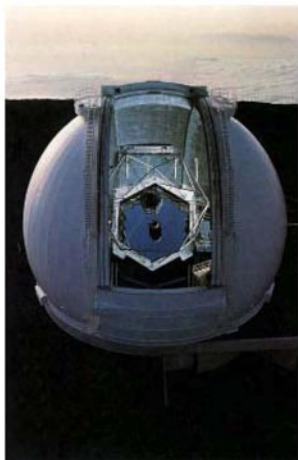
万有引力定律和海王星的发现

1781年,通过望远镜发现天王星后,基于牛顿理论和观测数据,人们计算出天王星的椭圆运动轨道。但是,即使计入了木星、土星等天体的引力影响,天王星位置的计算也总是与观测数据略有偏差。这时,有人怀疑万有引力定律的正确性。但坚持牛顿理论的学者坚信,这些偏差来自一个尚未发现的行星的引力影响。按此思路,1846年,勒威耶计算了未知行星的星空位置;按勒威耶的预测,柏林天文台的伽勒很快找到了这颗未知行星——海王星。冥王星也是通过类似方法发现的。这是理论指导实践的精彩范例。

近代,由于科技新手段不断涌现,人类对太阳系的认识迅速扩展。自伽利略(1564~1642)首创利用天文望远镜发现木星卫星后,人类利用威力越来越大的望远镜(图1.28),不断发现新的行星、卫星、小行星或彗星等太阳系天体。人们不仅通过望远镜收集更多的天体辐射,而且利用仪器研究可见光以外的天体辐射,例如高能辐射、短波、红外线和无线电波等,使天体研究的内容从运动特征扩展到天体的各种物理化学性质的深层次。宇航时代到来后,宇航员或精密仪器陆续被发送到月球、火星等天体,太阳系研究从观测科学迈向了实验科学的领域。

图1.28 光学天文望远镜

凯克天文望远镜,设在夏威夷岛上海拔4 000米的死火山山顶。由36块镜片镶嵌而成,直径10米,是世界最大的光学反射望远镜。



探究恒星世界

近代恒星天文学始于伽利略,他率先用望远镜将银河分解出恒星。从此,人类应用一切可用的科学和技术,从一切可能的角度探究,使认识的触角在恒星世界迅速扩展。



几种研究恒星的经典方法

力学方法适合于研究有关恒星运动的特征。例如观测表明,相互绕转的双星明显受万有引力定律的支配。人们设法测定双星绕转的周期、两星间距离或运动速度等,就可能基于万有引力定律计算恒星的质量。最初一批恒星质量的宝贵数据就是通过这种方法求得的。

光学方法可用于测定恒星的光度(发光总量)和光谱。其中,光谱应用最广。恒星光包括各种波长的辐射,通过特殊仪器将不同波长的光成分展开,就形成恒星光谱(图1.29a)。恒星光谱,特别是其中的光谱线,因恒星物理化学组成等的不同而千差万别,含有大量的信息,被誉为恒星的“指纹”,从中可以探究恒星乃至星云的温度和化学组成等。

通过光谱还可测定恒星的视向速度。我们学过声波的多普勒效应:当声源(如鸣笛的火车)远离或接近我们,即有视向速度时,声调会变低或变高,即声波的频率或波长发生变化。同样道理,如果恒星有远离或靠近我们的视向速度,那么,恒星辐射的波长也会变长(称为红移)或变短(紫移)(图1.29b)。因此,从恒星光谱线的波长位移量可测算恒星的视向速度。

人们还利用各种精密仪器测量恒星的几何数据。除了测定恒星距离外,人们还通过绕转双星相互遮蔽的观测,测算恒星的直径等;通过多平间测量恒星相对于更遥远星空背景的位移量,还可以测定恒星的切向速度(图1.30)。求得大量恒星、星云等的位置和速度后,又可以分析银河系结构及各种天体的分布。

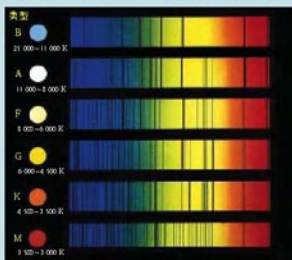


图1.29a 恒星的光谱型

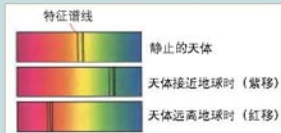


图1.29b 光谱线位移

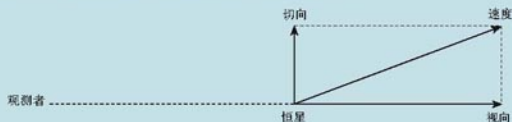


图1.30 恒星速度由视向速度和切向速度两分量合成

已知一批恒星的某些特征以后,人们便探究这些特征量之间的关系。一旦发现规律性的关系,就可以在研究另外的恒星时,基于这些关系,从已知特征推断未知特征。这也是人类拓展认识恒星世界的一条有效途径。



阅读

温度和光度的关系与质光关系

20世纪初,人们测出了一批恒星的距离、光度和温度,发现90%以上的恒星分布在一个光度随温度增加而增加的条带区域内。这样,对另一些光度未知的恒星,如果能从光谱特征判断它们属于此类恒星,就可以由它们的温度估算光度,再反算出距离。有了表面温度和光度,还可基于辐射定律估算恒星的大小。

人们发现,大多数恒星的光度与质量有对应关系,即存在质光关系。因此,如果从光谱特征能够判断出某恒星属于此“大多数”,就可以基于质光关系,从该恒星的光度推算质量,或者由它的质量推算光度。

事实上,人类基于科学和技术对恒星世界的探究是全方位的,从天体发射的基本粒子到天体辐射的各种成分,无不详细地加以研究。



图 1.31 世界最大的射电天文望远镜

射电天文学通过观测天体的无线电波(1微米~30米)研究天文现象。图中的望远镜位于波多黎各。1963年建成,直径305米,相当于三个足球场大小。

探索星系世界

(一) 星系的发现

人们在探索恒星世界的同时,还通过望远镜发现了很多云雾状天体,早期将它们统称为星云。20世纪初,较大望远镜观察到的星云被分为两大类。一类在天球上主要沿银河分布,



图 1.32 比银河系大、约 220 万光年远的仙女座星系

形状松散不定,无规则,光谱显示出气体尘埃特点,它们很快被确认是银河系内的星云。另一类星云全天球分布,即大量分布于银河之外,形状较规则,例如呈椭球状、旋涡状等,光谱显示出恒星的特点。人们很自然地猜想,它们可能是同银河系并驾齐驱的巨大恒星系统,即河外星系。1924 年,美国天文学家哈勃利用最新的大望远镜,将较近的仙女座大星云的边缘分解出单个恒星,进而测定出这些恒星的距离远在银河系以外,首次确认了河外星系(图 1.32)的存在。

迄今为止,人类已观测到的宇宙范围约 150 亿光年,其中能探测到的星系数量估计在 10 亿个以上。有人认为,这部分宇宙大体就是目前最高的天体系统,称为总星系。

(二) 星系谱线的红移和宇宙膨胀

哈勃发现,除少数几个最近的星系外,所有星系的光谱线都红移,而且红移量与距离成正比:星系越远,红移量越大。如果多普勒效应对星系世界仍然成立,那么,上述观测事实就意味着所有星系在远离我们,而且星系越远,远离速度越大。由这个推论又可得出我们这部分宇宙在膨胀的结论(图 1.33),因为在一团膨胀的物质中,所有质点都会相互远离,而且距离越远的质点,相对分离的速度越大。

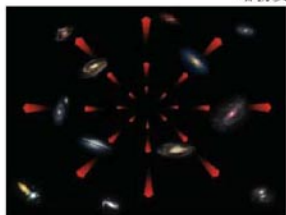


图 1.33 宇宙膨胀示意



思考

如果承认宇宙膨胀,请你猜想膨胀的原因可能是什么?

探讨总星系大尺度结构、性质、起源和演化的学说称为现代宇宙学。除红移外,这门学科还关心总星系的其他大尺度特征。例如,宇宙空间到处存在着3K宇宙背景辐射(相当于绝对温度为3度的物体发出的微波辐射)(图1.34);宇宙间氢元素约占3/4,氦元素约占1/4等。

探索宇宙的新阶段——航天时代

1957年10月,苏联成功发射第一颗人造地球卫星,开创了探索宇宙的新阶段——航天时代。从此,人类可以突破地球及其大气的局限,极大地提高了探索宇宙的能力。

(一) 航天时代的太阳系探索

自20世纪60年代初到2004年,人类发射了数十个月球探测器和近百个、十余种型号的行星探测器。实现了宇航员登月和精密仪器在火星上的软着陆探测(图1.35);对除冥王星以外的其他七颗行星,及其部分卫星、小行星、彗星等展开近距离乃至零距离(至少进入行星大气)的探测,获得了大量研究资料,极大地丰富了对太阳系的认识。

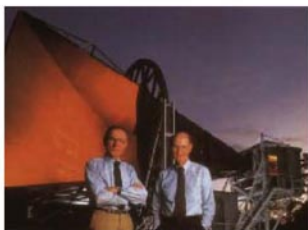


图1.34 3K微波宇宙背景辐射的发现者
1965年,美国贝尔电话实验室的工程师阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊,无意中发现了温度约为3K的微波背景辐射。两位发现者为此获得1978年诺贝尔物理学奖。



图1.35 “勇气号”火星探测器
2003年6月10日从美国发射,2004年1月4日到达火星并成功实现软着陆。

案 1 例

“阿波罗”登月

月球的探测始于20世纪50年代末。从1959年到1976年,苏联发射了24个“月球号”无人探测器。最成功的月球探测活动是美国的“阿波罗”登月计划。在多年探月的基础上,从1969年7月20日到1972年,“阿波罗”登月计划先后6次将12名宇航员送上月球。宇航员驾驶月球车巡游月面、拍摄照片、采集岩石和月壤样品,获取了大量关于月球的第一手资料。

图1.36 宇航员在月球上采集月壤



案 2 例

“旅行者2号”行星际探测器

“旅行者2号”在1977年8月20日发射后，基于巧妙的轨道设计和遥控技术，从1979到1989年的10年间，先后成功地造访了木星、土星、天王星和海王星。目前，“旅行者2号”肩负着联系地外文明的使命和期望，正行进在告别太阳系的旅途中。

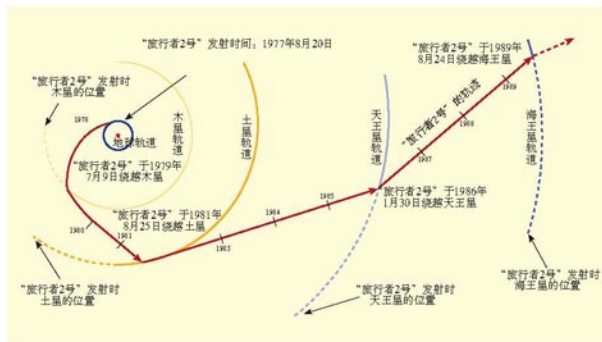


图 1.37 “旅行者2号”飞行路线

(二) 基于绕地轨道探测器对外太空的观测

在航天时代，人类还在环绕地球的轨道上建立了天文台或观测站，在地球大气层以外开展对外太空的观测研究。

案 3 例



图 1.38 哈勃太空望远镜

哈勃太空望远镜是最著名的太空光学望远镜，直径2.4米。

哈勃太空望远镜

哈勃太空望远镜于1990年4月25日被送入环绕地球的轨道，成为第一个大型轨道天文台。由于设计方面的问题，最初3年的应用不够理想。1993年12月，7名宇航员搭乘航天飞机对它进行了大规模的维修和完善。此后的十余年中，哈勃太空望远镜以出色的观测成果，为人类探索宇宙的进程做出了巨大贡献。

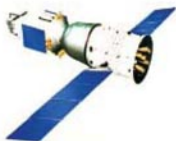
（三）中国的航天宇宙探测

自1970年4月24日“东方红一号”人造卫星发射以来，我国航天事业不断取得举世瞩目的成就（图1.39）。2003年10月15日，“神舟五号”载人飞船发射成功。翌日，宇航员杨利伟顺利返航，我国成为世界上第三个掌握载人航天飞行技术的国家。

在20世纪，我国航天事业主要关注地球自身（资源、环境等）的探测或监测。随着国力的增长，我国航天事业又将目光投向宇宙探索的领域。2004年1月，我国月球探测项目“嫦娥工程”被国务院批准，各项准备工作陆续展开。“嫦娥工程”将开展探测器在月球上软着陆、从月面采样返回等高尖端研究。此外，我国还将开展对火星的探测，以及将望远镜送入环绕地球的轨道，在大气层外观测宇宙等研究工作。



“东方红一号”卫星（1970年）



“神舟号”试验飞船（2003年）

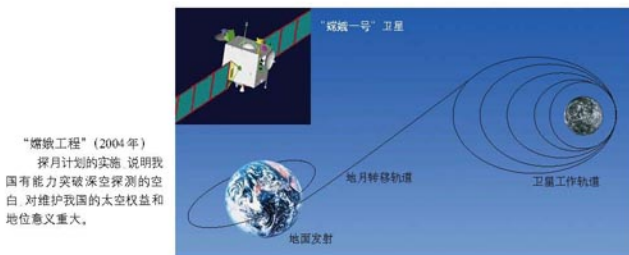


图 1.39 迅速发展的中国航天事业

第三节 恒星的一生和宇宙的演化

通过长期的探索,人类不仅认识了宇宙的本来面目,而且将宇宙大爆炸起源,以及接下来的星系、银河系、太阳系,乃至地球的起源和演化贯通起来,形成合乎逻辑、相互关联,并为科学界较为广泛接受的系列图像。本节将概略地描绘这组图像的主线条,而不注重处于争议中或可能增改的细节。为此,必须先来剖析宇宙的基本天体——恒星,介绍相对成熟的恒星演化理论。

恒星的一生

(一) 赫罗图与恒星分类

谈到恒星演化,首先要了解赫罗图。按电磁辐射理论,恒星表面温度与光度这两个基本特征之间,应当存在着有指示意义的关系。20世纪初,丹麦的赫茨普龙和美国的罗素分别以温度和光度为横、纵坐标,将恒星标注在图上,发现恒星基本上集中于几个区域。后来的大量研究表明,这种分布具有重要的

天体演化意义。恒星温度—光度图后来因此称为赫罗图(图1.40)。

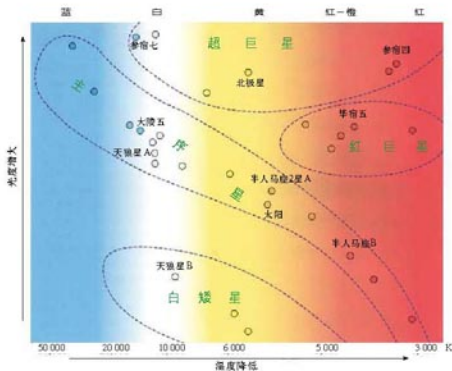


图 1.40 赫罗图

思考

1. 赫罗图中有哪几类恒星?
2. 描述各类恒星的光度和温度特点。



恒星颜色与温度的对应关系

恒星颜色与温度有对应关系。从经验可知,当炉火颜色从红变黄,再变白、变蓝时,温度是越来越高的。同样,恒星颜色的变化也体现表面温度的高低变化。最冷的恒星(约 3 500 K)在天空中呈红色;表面温度约 5 770 K 的太阳,呈橙黄色;高于 10 000 K 的恒星则呈蓝白色。因此,赫罗图也可说是恒星颜色—光度图。

90% 以上的恒星分布在赫罗图左上角到右下角的条带上,这类恒星称为主序星。

赫罗图右上方的恒星温度较低,但光度却较大。按辐射理论,温度低的恒星单位面积的辐射量应当较小,因此光度大就表明表面积或体积明显偏大,因而被称为巨星(红巨星或超巨星)。

分布于赫罗图下方的恒星与巨星类相反,温度不低,而光度却很小,甚至为零。这表明它们的体积很小,而密度会很大,因而被称为致密星(图 1.41)。致密星包括白矮星、中子星和黑洞。一颗太阳质量的白矮星,体积仅相当于地球;中子星和黑洞的密度则更高。

在致密星中,只有白矮星是光学上可见的,中子星、黑洞是非光学观测和理论物理研究的结果。

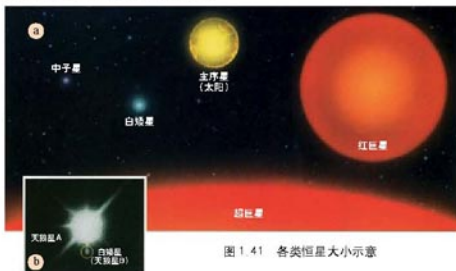


图 1.41 各类恒星大小示意



致密星的特征

致密星是在地球上难以想像的巨大压力下形成的。在白矮星内部,因强大的压力作用,原子中的电子被“挤”出,原子核紧密靠拢,物质密度因此明显增大。在更强大的压力下,原子中的电子被“压”入原子核内,使电子与质子结合形成中子;不带电的中子更加密集,形成了密度高达 $10^{14} \sim 10^{15}$ 克/厘米³ 的中子星。当恒星密度达 10^{18} 克/厘米³ 或更大时,恒星表面的引力场强度将增大到连光子(速度为 30 万千米/秒)都逃逸不出,换言之,外界观测不到该星体任何辐射。因此,这种致密星被称为黑洞。



思考

1. 按辐射定律, 恒星辐射强度 (表面单位面积的辐射量) 与表面温度的4次方成正比。据此分析为什么光度大、表面温度低的巨星体积大, 致密星密度高?
2. 算算看: 当太阳塌缩为地球大小的白矮星时, 密度为多少? 表面引力增大多少倍?

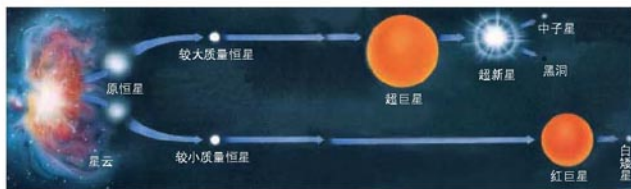


图 1.42 恒星的演化示意

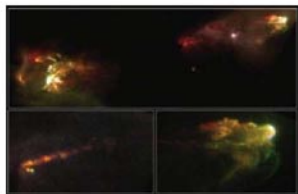


图 1.43 猎户座星云中的赫比格-阿罗天体

星云凝聚成恒星的一个例证是赫比格-阿罗天体。这是一种半星半云状的光学可见的天体, 似恒星, 又不似恒星。常常伴有云雾状的结构环绕在周围或一侧。一般认为, 赫比格-阿罗天体就是原恒星。随着原恒星的成长, 周围残留的星云物质会逐渐被驱散。

现代恒星演化理论表明, 恒星从星云脱胎而出; 主序星、巨星和致密星正是恒星生命中的几个主要阶段 (图 1.42)。

(二) 恒星的诞生

星云是恒星的前身。在我们的宇宙中, 星云物质由大约 $3/4$ 的氢、 $1/4$ 的氦和少量其他元素组成。达到一定质量、密度的星云在自身物质间的万有引力的作用下, 会发生收缩、凝聚。收缩中, 物质向中心降落, 势能减小, 正如地球上重物下落而势能减小一样。这些势能将转化为热能, 使星云内部温度增高。增高到一定程度时, 星云中心区的浓集部分就是恒星的原型, 称为原恒星。

星云凝聚成恒星也得到不少观测事实的辅证 (图 1.43)。



阅读

星云收缩形成原恒星

收缩和膨胀是贯穿于恒星 (乃至星系、宇宙) 一生的一对主要矛盾。导致收缩的力主要是自引力, 其次是外来压力; 导致膨胀的力, 常称为斥力, 包括物质热运动压力 (总体向外)、辐射压力和已有的膨胀动量等。两种力量的此消彼长, 演绎出天体演化的各种阶段。

研究表明, 恒星母星云的早期收缩比较迅速。这是因为, 第一, 越收缩, 密度越大,

因而自引力越强；第二，这时星云密度还不高，对辐射较透明，收缩过程中引力势能转化出的热能还容易散失，以致内部温度升高很慢，向外的斥力不大。然而，随着密度增大和透明度降低，母星云向外散热减缓，越来越多的热能积聚在星云内部，导致内部升温加快，使向外的斥力逐渐接近向内的自引力。这时，星云的收缩将显著放慢，孕育出原恒星。

案 4 例

诞生恒星的温床

已观测到的新生恒星与星云之间普遍存在着关联。例如，相对浓密、容易成为恒星诞生温床的星云常常伴随着新生的恒星。其中一些星云受附近年轻恒星加热，成为发光的星云（图 1.44）。从银河系全局来看也是如此。银河系旋臂是星云物质、星际气体和尘埃相对密集的地带，相应的，一些较年轻的恒星也集中在这里，而且年轻恒星所在处的星云物质密度一般也最高。正是因为有较多的年轻亮星，使得旋臂显得较亮（图 1.45）。



图 1.44 M33 星系中一处巨大的恒星诞生地
星云中心有超过 200 颗炽热的年轻恒星。恒星的辐射将星云的气体加热，使星云轮廓变得明显。

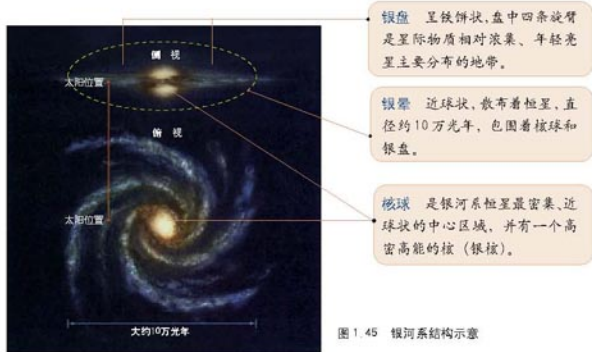


图 1.45 银河系结构示意图

（三）恒星的青壮年时期——主序星阶段

当原恒星中心温度升到700万K时，氢聚变为氦的热核反应在恒星中心点燃，恒星从此转入一生中最稳定、历时最长的主序星阶段。

由于恒星由 $3/4$ 的氢和 $1/4$ 的氦组成，中心区氢聚变为氦的结果，一方面是在恒星中心区留下一个“氦核心”，另一方面使中心温度进一步升高，使700万K以上的氢氦聚变燃烧层不断外延，相应地，氦核心不断增大。



阅 读

主序星长期稳定的原因

在主序星阶段，恒星之所以能长期稳定，是因为核燃料（占 $3/4$ 质量的氢）极其充足，氢氦聚变能长期进行，并使恒星处于稳定平衡的状态：若核燃烧过旺，斥力将超过自引力使恒星略为膨胀；而一旦膨胀，引力势能增加，必然又要以索取热能为代价，于是恒星内部会稍稍降温，核燃烧将有所减弱；但一旦过弱，斥力变小，恒星将收缩；而收缩又将导致内部增温，使核反应加强。可见，引力势能起着氢氦聚变的安全阀作用。

主序星阶段是恒星一生中持续时间最长的阶段。这也有观测事实的佐证，例如已经观测到的恒星约90%是主序星。

（四）恒星的老年期——巨星

当主序星中心区氢氦聚变留下的氦核心增大到一定程度时，恒星就会到达一个转折点：变成一颗巨星。



思考

在自然界的演化过程或生命现象中，也常有某阶段历时长、该阶段观测到的样本多的情形。试列举一二。



阅 读

主序星转变为巨星的原因

主序星中央的氦核心内部没有热核反应，不产生能量，向外的斥力小。研究表明，氦核心质量增长到恒星总质量的10%~15%时，恒星内部的自引力将“压垮”中心区，

使其骤然收缩;收缩释放的能量加强了中心区外仍在燃烧的氦聚变的能量,使中心区外的恒星外层斥力明显加大,恒星因此大幅度膨胀。相应的,恒星的表面温度明显下降。这样,恒星就变成一颗表面温度较低,但体积大、光度大的红巨星或超巨星。

恒星在巨星阶段的时间大约只有主序星阶段的10%。在这一阶段,氦核中心温度将达到1亿K,氦聚变成碳的热核反应又将在恒星中心点燃。在氦—氦燃烧层和氦—碳燃烧层不断向外蔓延的同时,又在中心区留下不断增大的碳核。碳核心的温度还会继续升高,到一定阶段又可能聚变成更重的元素,更重的元素还可能进一步核聚变。可见,恒星演化过程是一个锻造各种重元素的过程。

(五) 恒星的归宿——致密星

巨星内部核燃烧总会有衰退之时。随着向外斥力的减弱,巨星发生内部坍塌,巨大的压力将恒星内部压缩成高密度核心;与此同时,剧烈坍塌导致的引力势能快速释放,又能掀去恒星的外层。这就是恒星临终前,内部坍塌、外部抛射的现象。最后在宇宙间留下的是坍塌压缩形成的高密度核心,即致密星:白矮星、中子星和黑洞。



阅 读

不同质量恒星的演化

由于孕育恒星的原始星云大小不一,形成的恒星质量也不一。研究表明,质量是决定恒星演化途径的首要因素。总的来说,在恒星一生的各个阶段,大质量恒星都比小质量恒星演化剧烈、迅猛,因而寿命也短得多。

首先,在星云收缩阶段,大质量星云由于引力强而收缩快,较快、较多地转化成内部热能,使原恒星中心区快速升温并启动氦聚变。而质量小的原恒星要经历漫长的时间才能点燃核反应并成为主序星(表1-1)。

其次,在主序星阶段,质量越大的恒星内部温度越高,热核反应越剧烈,核燃料将以更高的速率被消耗

表1-1 到达主序星前恒星的演化时间

质量 (太阳质量为1)	到达0龄主序星的时间 (万年)
30	3
10	30
4	100
2	800
1	3 000
0.5	10 000
0.2	100 000

掉。相反,小质量恒星热核反应进行得非常缓慢,在主序星阶段停留的时间反而比大质量恒星长很多(表1-2)。

表1-2 主序星的表面温度、光度、主序星阶段寿命与质量的关系

恒星质量 (太阳质量为1)	表面温度 (K)	光度 (太阳光度为1)	主序星阶段寿命 (百万年)
25	35 000	80 000	3
15	30 000	10 000	15
3	11 000	60	500
1.5	7 000	5	3 000
1.0	6 000	1	10 000
0.75	5 000	0.5	15 000
0.5	4 000	0.03	200 000

第三,恒星质量越大,晚年塌缩和抛射物质过程将越激烈。大质量恒星将发生灾难性的大塌缩,外壳物质被抛向四面八方,表现为新星、超新星爆发。小质量恒星则可能经脉动变星的阶段,相对缓和地发生内层塌缩和外层抛射,在星体外围形成行星状星云(图1.46)。

恒星晚年塌缩和抛射后的最后归宿,也主要取决于它的质量大小。一般认为,小质量恒星抛射物质后,剩余质量小于 $1.4 M_{\odot}$ ($M_{\odot}$ 代表太阳质量)的,将形成白矮星;大质量恒星抛射物质后,剩余质量大于 $3.2 M_{\odot}$ 的,将形成黑洞;介于两者之间的恒星,最终将成为中子星。

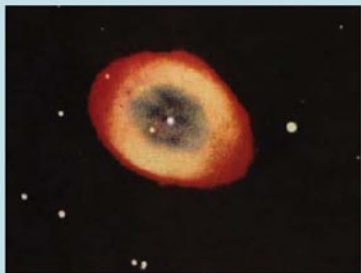


图1.46 行星状星云

案5例

中国超新星与蟹状星云

公元1054年7月4日晨,金牛座 ζ 星附近爆发了一颗非常明亮的超新星。我国古籍对这次爆发做了世界上最详细的记录。《宋会要》载:“昼见如太白,芒角四出,色赤白,凡见二十三日”。在我国史料中,这颗超新星被称为“天关客星”。

1731年,英国人比维斯用望远镜在“天关客星”的位置上观测到一个云雾状亮斑。1771

年，法国天文学家梅西耶把该星云正式收录到《梅西耶星表》中。1844年，英国人罗斯用自制的大型反射望远镜观察到这个星云的纤维状结构，并根据视形象称该星云为蟹状星云（图1.47）。1921年，美国人邓肯将蟹状星云相隔12年的两批照片进行了对比，确认该星云在膨胀。1942年，荷兰天文学家奥尔特根据膨胀速度，反推出蟹状星云是900年前爆发性事件的产物，进而把蟹状星云与中国史料中记录的“天关客星”联系起来，认为它就是1054年超新星爆发的遗迹。这个观点得到普遍认同，国际上称1054年的超新星为“中国超新星”。

1968年，在蟹状星云中心发现一颗发射脉冲辐射的天体，即脉冲星。后来证实，脉冲星是强磁场的快速自转的中子星。发现和研究脉冲星的科学家分别在1974年和1993年获得诺贝尔物理学奖。

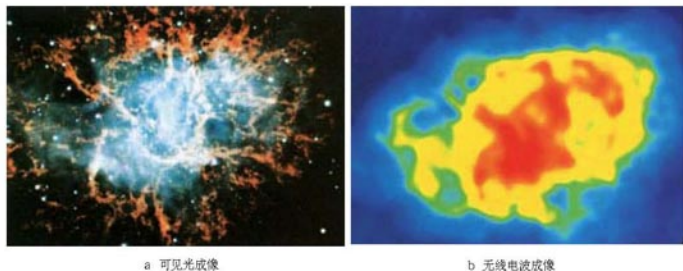


图 1.47 蟹状星云



阅 读

基于观测事实推断天体的寿命或年龄

现代恒星演化理论具有很多观测事实的佐证，并得益于巧妙的科学思维和推理方法。例如，观测计算表明，恒星的分布非常稀疏，两个恒星在空间贴近的机会平均为 10^{12} 年一次。因此，星团（以及双星、聚星）不会由恒星邂逅而成，它们的成员应当具有共同的起源和年龄。观测计算又表明，规模较小、结构松散的疏散星团很容易被银河系中心的引潮力瓦解。因此科学家判断，现有的疏散星团应当形成不久（否则早就瓦解了）。

此外，恒星的光度大体就是恒星挥霍的能量或质量。从表1-2可见，主序星的质量或光度越大，消耗得越快，因此寿命越短。科学家推知，现存主序星中的大质量恒星，必定年轻；而小质量的主序星年龄可能很老。

大爆炸中诞生的宇宙

对宇宙的基本天体——恒星的一生有所认识后,现在可以将目光转向整个宇宙了。在现代宇宙学中,大爆炸宇宙学说占主流地位,同其他宇宙学说或假说相比,它不仅能成功解释更多的有关宇宙大尺度结构和性质的观测事实,而且,大爆炸理论还能较好地衔接星系、恒星、太阳系等的起源和演化理论。



阅 读

大爆炸宇宙学说的产生和发展

1917年,爱因斯坦基于自己的广义相对论,建立了现代宇宙学中的第一个宇宙模型,开创了现代宇宙学。1922年,苏联数学家弗里德曼在求解爱因斯坦引力场方程时,得到了一个均匀的、各向同性的、膨胀的动态宇宙模型。1932年,比利时天文学家勒梅特基于动态宇宙模型,并根据哈勃发现的河外星系光谱线红移的观测事实,提出了大爆炸宇宙学说,他认为我们今天的宇宙是在一场无与伦比的、一个极端高温、极端压缩状态的“原始原子”的爆炸中诞生的。1948年,物理学家伽莫夫继承和发展了大爆炸宇宙学说,并成功预言了1964年发现的3K微波背景辐射。

根据大爆炸宇宙学说,我们观测到的这部分宇宙是大约150亿年前一次大爆炸的产物。爆炸初始,宇宙的一切物质全部以基本粒子的形式被挤压在一个很小的体积中,温度在千亿K以上。爆炸引起体积迅猛膨胀,导致温度和密度迅速降低。爆炸几分钟以后,宇宙冷却到10亿K以下,宇宙中形成了大约占宇宙总质量 $1/4$ 的氦原子核(或氦元素)和总质量 $3/4$ 的氢原子核(或氢元素)。这个过程大约在宇宙冷却到3亿K时结束。



阅 读

宇宙中氢和氦元素的起源

一般认为,爆炸几分钟以后,宇宙中有比例约为87:13的质子和中子、相应数量的自由电子,以及大量与电子共处于热平衡之中的光子(辐射)。由于这时宇宙已冷却

到10亿K以下，中子不能自由存在，占总质量13%的中子将在几十秒钟内全部与质子结合，形成占总质量26%的氦原子核（氦核由2个质子和两个中子组成，中子与质子质量基本相等）；剩余的占总质量74%的质子，就是氢原子核。

宇宙继续膨胀冷却，当温度降至80万K时，早期的元素形成过程结束。这时宇宙的组成，除极少量其他较轻的原子核外，仍然约3/4为氢元素，1/4为氦元素。



思考

宇宙温度从3亿K降至80万K的过程中，氢、氦和某些较轻的原子核可能发生热核聚变反应，因此可能产生某些新的原子核（新元素）。温度降至80万K以下，各种热核反应原则上不会发生。不过，宇宙从3亿K降至80万K的时间很短，包括氢聚变为氦在内的各种核聚变几乎来不及反应。因此，宇宙初期形成的其他轻原子核（除氢、氦以外）是极少量的。

那么，宇宙中众多的化学元素是如何形成的呢？

宇宙爆炸几十万年后，仍然膨胀着的宇宙温度降至3000K及其以下。这时，各种原子核与电子结合起来形成原子。于是，宇宙中出现以氢、氦原子为主的气体。在更低的温度下，它们还将结合成分子。

正是在这一时期，万有引力登上了宇宙演化的历史舞台。在万有引力的作用下，气体相对浓集的区域聚合成一个巨大的原始星云，而且巨星云的整体和内部都不可避免地会发生收缩。整体收缩演化的结果，就是一个个星系，它们整体上仍然保留着大爆炸赋予它们的膨胀速度；巨星云内部大量局部云团的收缩，形成了大批的恒星。

大爆炸宇宙学说除了能解释宇宙膨胀、氢和氦等元素组成，以及3K微波宇宙背景辐射等宇宙大尺度特征外，也得到其他观测事实的证明。例如，按照大爆炸宇宙学说，现今所有

的天体都是大爆炸后形成的。事实上,现代天文学迄今所研究的所有天体的年龄,的确没有超出150亿年的。

大爆炸生成的宇宙环境,也与随之而来的星系、恒星等的起源、演化理论较好地衔接起来。



阅读

不同形态星系的演化

大爆炸后形成的巨大原始星云状态不可能同一,所形成星系的形态也不尽相同。有的原始星云可能由于某些原因,例如初始密度大或者速度杂乱程度较大(有利于碰撞收缩),恒星形成率高,气体几乎全部形成恒星,而且形成后的恒星无碰撞地大体按一定轨道绕星系中心运动。因此,演化出椭球形态、恒星相对密集的星系,即现今观察到的椭圆星系。

但是,旋涡星系形成时,第一代恒星的形成率不高;而且其母星云可能原来有着较大的转动速度。因此,残留下来的气体继续收缩时的旋转加速效应明显(收缩加速自转的道理,如同花样滑冰运动员收缩身体时,自转速度会加大一样),导致最终演变成旋涡星系。

现今观测到的星系,大多数是旋涡星系和椭圆星系,其余是一些不规则星系(图1.48)。



a 椭圆星系



b 不规则星系

图1.48 星系

大爆炸后宇宙中形成的星系,大约一半是包括银河系在内的旋涡星系(图1.2)。一般认为,旋涡星系的母星云在宇宙早期第一批恒星形成后,还有相当部分的气体被保留下来。这些气体继续收缩,并加速自转,在较大自转离心力作用下逐渐“扁缩”,演变形成星云盘及其旋臂结构(图1.45)。星云盘(特别是旋臂中)的气体物质相对密集,因而在那里又不断形成新的恒星。起源于50亿年前的太阳,就是其中之一。

太阳系起源时,在早期形成的银河系恒星中,寿命短的大质量恒星已经走完生命的历程。这些大质量恒星内部热核反应锻造出的各种重元素或金属元素,已经在恒星晚年爆发中被抛射出,加入到形成新一代恒星的星云物质中。因此,形成太阳系的原材料含有重元素或金属元素,也才可能出现由岩石物质组成的行星。



思考

形成宇宙早期第一批恒星的星云主要含有哪些元素?

太阳是一颗“单星”,这是形成现今太阳系的有利条件。太阳有可能与其他恒星一批生成(例如,先形成疏散星团,然后再瓦解),但无论如何,太阳最终没有与其他恒星构成双星和聚星。双星、聚星由于相互绕转,相互影响,在其周围难以形成具有稳定轨道运动的、易于养育生命绿洲的行星系统。



思考

根据恒星和宇宙演化的知识分析:如果想搜索、发现地外文明,那么,哪些恒星或恒星系统及其周围可以排除?(提示:地球大约在46亿年前形成。)



阅 读

宇宙的未来

科学探究无止境。人类对宇宙的探索,大到整个宇宙,小到月球起源,仍然有无尽的谜。

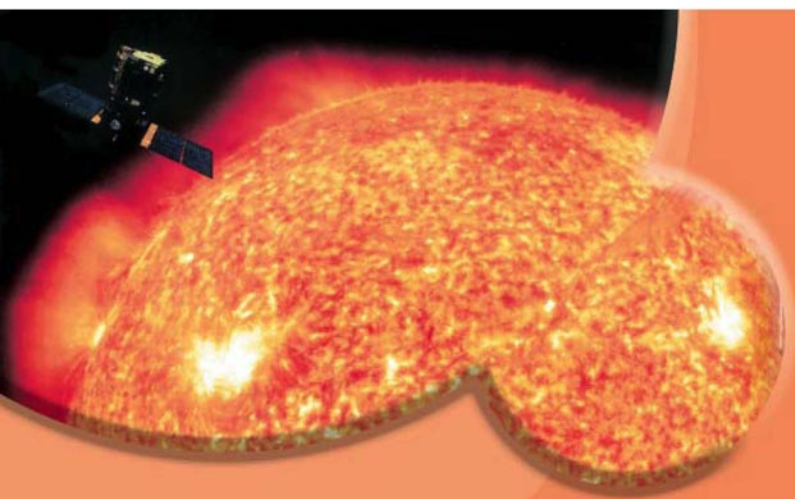
在宇宙未来如何演化的问题上，到20世纪后期，围绕“收缩力和膨胀力（斥力）”这一贯穿宇宙演化的主要矛盾，科学家们研究、讨论了宇宙未来的三种可能命运。

第一种，宇宙的物质总量足够多，以致大爆炸后宇宙膨胀的势头减弱到一定程度时，宇宙自引力将克服四向膨胀的斥力，使宇宙停止膨胀，开始迅猛收缩。宇宙将经历一个大的挤压、塌缩过程，而回到大爆炸的起点。第二种命运是宇宙的物质总量达不到必要的阈值，致使宇宙自引力始终不能超出膨胀的斥力。这时，宇宙将一直膨胀下去，最终将变得虚无缥缈。第三种命运介于前两者之间。宇宙膨胀势头能够被遏制并收缩，但收缩到半途，斥力就超出自引力使宇宙再膨胀。宇宙成为反复胀缩的脉动宇宙。

研究表明，人类直接观测到的整个宇宙质量，离抑制宇宙膨胀的阈值相差很远。20世纪后期，科学家们发现了越来越多的“暗物质”，即直接观测不到、但其存在能通过引力作用表现出来的宇宙质量。除了黑洞和其它恒星系统的行星等不发光天体外，还有很多不清楚的暗物质，而且总量相当大。但是，即使加上暗物质在内，宇宙物质总量仍然比终止宇宙膨胀所需的阈值小很多。按此结果，宇宙将膨胀下去。

1998年，通过哈勃太空望远镜对遥远宇宙的超新星观察，发现宇宙膨胀竟在加速。

2003年，科学家发现（该发现被美国的《科学(Science)》杂志列为当年十大科学进展首位）我们的宇宙中，有占宇宙物质总量73%的暗能量（其余是4%的可见天体，23%的暗物质）。暗能量是什么尚不清楚，但被认为是一个具有斥力性质的物理量，因而它是推动宇宙膨胀的力量，能够大约在至少300亿年内加速宇宙的膨胀。



第二章

太阳系与地月系

太阳、九大行星和太阳系小天体组成稳定的天体系统——太阳系。太阳是太阳系的中心和最重要天体，它的巨大引力和辐射支配着整个太阳系；但在宇宙中，它却是一颗普通的恒星，太阳及其各圈层研究对进一步认识恒星具有普遍意义。在太阳系大家庭中，地球和绕转它的伴侣——月球，组成了地月系。地月系的运动引起日、月、地相对位置的周期变化，导致日月会合运动，以及相应的月相变化和潮汐变化等现象。

【本章学习目标】

- 了解太阳的圈层结构。
- 了解太阳系的组成、结构、运动和演化特点。
- 了解月球的概貌和运动特点。
- 理解月球运动与月相变化、潮汐运动的关系。
- 理解有关太阳系天体的部分天象。

【关键词点击】

太阳 太阳活动 太阳系 九大行星 小天体 演化 月球 日月会合运动 月相 潮汐

第一节 太阳和太阳系

太阳是一颗普通的恒星,但在它的家庭——由九大行星和其它小天体组成的太阳系中,却是处于中心地位的最重要天体。太阳及其各圈层研究,对日地关系和认识恒星等都有重要意义。九大行星稳定的运动和分布,体现着太阳系的基本结构和景象。一般认为,太阳系于50亿年前由星云收缩演化而成。

太阳及其天体系统——太阳系

太阳是银河系中一颗非常普通的单颗恒星。它的各种物理量几乎都可以用“中等”一词来概括。例如,太阳质量 1.989×10^{30} 千克,半径696 000千米,平均密度 1.41 克/厘米^3 ,皆接近恒星的平均值;太阳的表面温度(5 770K)和光度在恒星中也属中等。

在恒星演化方面,太阳作为一个中等质量的恒星,寿命适中,为一百多亿年;目前太阳恰好走到生命的中途。据研究,太阳大约诞生于50亿年前,目前处于主序星阶段。



思考

1. 太阳大约在红巨星阶段持续多少年?
2. 根据恒星演化的一般规律描述太阳的一生。
3. 逐一审视太阳的各种特征,并回答:缺乏哪些特征条件,就不可能养育出地球以及地球上经过数十亿年才进化出来的人类?

太阳研究与恒星研究相辅相成。作为一颗各方面适中的恒星,研究太阳对认识一般恒星具有典型意义。通过对太阳的长期、细致的研究,人们获得了恒星研究难以企及的成果。

● 详细了解了太阳表层及其光谱,认识了太阳的内部圈层结构及相应的活动机制。

● 基本弄清了来自太阳内部氢氦聚变的巨大能量,如何由内部圈层向外传输,最后表现为从太阳表面稳定发射的两种形式的太阳能流——太阳电磁辐射和带电粒子流。

● 确认太阳在总的稳定背景下,也存在局部的不稳定或爆发,并对太阳能流中不稳定或爆发性成分有了较细致的了解。这些认识,已经被引申到一般的恒星。



天体的圈层结构

恒星和很多行星呈球状,具有圈层结构,这是在万有引力作用下,物质积聚、收缩,最终形成的天体平衡稳定形状。只要天体质量足够大,天体收缩形成时由引力势能转化而来的热能,或其他内部热能,可使天体成为炽热的流体(气体或液体)状态;物质进而在重力(自引力)作用下分异、调整,逐渐形成温度、密度和压力随深度而增加的圈层结构。太阳系中有很多小天体,它们内部的热能不足以进行物质调整,形状便多不规则。

同很多恒星一样,太阳拥有自己的“家庭”——太阳系,其成员包括:九大行星及其卫星、众多小行星、彗星和其他小天体。太阳在恒星世界里虽然极其普通,但在太阳系中却是至高无上的家长。一方面,太阳稳坐太阳系中心,质量占整个太阳系质量的99.87%,太阳以其强大引力,约束其他天体按一定轨道绕它运转;另一方面,太阳辐射是太阳系的主要能源,太阳以其强大的太阳辐射以及太阳粒子流,温暖、影响着整个太阳系。

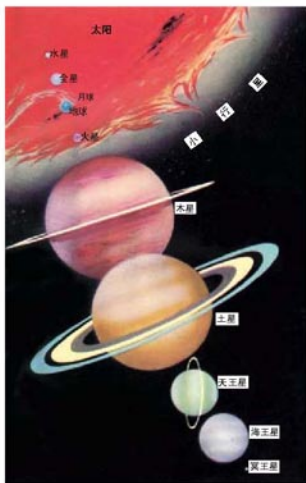


图 2.1 九大行星示意



其他恒星的行星系统

很多恒星的周围具有绕转行星等天体组成的系统。因为行星自身的辐射很微弱,身旁的恒星又非常亮,所以从地球上很难直接观测到这些行星。不过,绕转着的较大行星的引力,会影响中央恒星的运动,使人们可能观测到恒星非常微小的“抖动”。到2004年,据研究报道,已发现具有行星系统的恒星约有140颗。

太阳系的质量,除太阳外,主要就集中在九大行星及其卫星上;而且,行星及其卫星的存在和运动是长期稳定的。正因为如此,太阳系才是一个能长期稳定存在的天体系统,太阳系的基本结构和景象,由九大行星的运动和分布来体现。



阅 读

太阳系小天体的不稳定性

太阳系小天体的存在和运动具有不稳定性。这是因为它们质量小,运动轨道可能受行星等天体的引力或太阳辐射压力等的影响,发生变化;而轨道改变了的小天体,又可能撞入大天体而被吞噬。太阳系早期的很多小天体,就是因此而被“清扫”殆尽的。

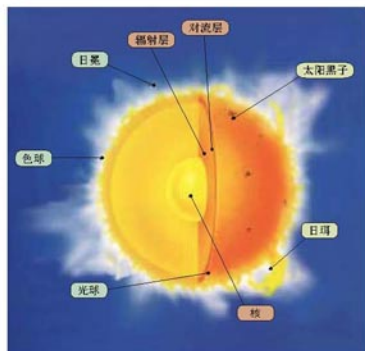


图 2.2 太阳的圈层结构示意图

太阳的圈层结构和太阳能流

(一) 太阳内部圈层

太阳内部的温度、密度和压力随深度而增高。太阳中心温度高达 1 500 万 K, 压力相当于 2 500 亿个大气压。产生巨大太阳能的氢聚变为氦的热核反应, 发生于温度在 700 万 K 以上的太阳核心区域 (图 2.2)。

核心区产生的能量通过辐射层和对流层向外传送。其中辐射层通过辐射机制向外传输太阳能, 速度较慢; 对流层通过对流方式, 较快地向外输送太阳能。

对流层以外就是肉眼能直接观测到的太阳表面。



阅 读

太阳辐射向外的传输

辐射层的温度仍然很高, 粒子间频繁碰撞, 能量要经历反复的吸收、发射、再吸收、再发射的过程。因此, 太阳能流在辐射层向外传输的速度较慢。而在对流层中, 能量通过炽热气体上下翻腾的对流方式, 输送得比较快。对流现象在地球近地面大气中经常发生, 雷雨前尤其明显; 而太阳对流层的温度比地球对流层的温度高得不可比拟。因此, 太阳上的对流是极其剧烈的。



思考

爱因斯坦的质能关系式 $E = mc^2$ 是计算核反应释放能量的依据。其中 E 、 m 和 c 分别为能量、质量和光速。氦氦聚变中, 质量为 $4.029\ 1$ (原子质量单位) 的 4 个氦原子核, 聚变为质量为 $4.001\ 5$ 的一个氦原子核, 质量减少 $0.027\ 6$, 即质量亏损率为 $0.69\ %$ 。由此, 按质能关系式可求得: 当 1 克氦参加反应时, 减少的 $0.006\ 9$ 克质量, 可转化的能量为 6.21×10^{11} 焦, 即 1 克氦参加反应就可释放出 $6\ 200$ 多亿焦的惊人能量。

根据多年观测, 太阳辐射总功率为 3.865×10^{26} 瓦(焦/秒)。请你根据以上数据, 计算太阳自诞生 50 亿年以来, 占太阳总质量百分之几的氦, 已经聚变为氦。

(二) 太阳外部圈层

太阳外部圈层, 也称太阳大气。来自核反应的巨大能量, 经内部圈层传送, 最后表现为从太阳表面向外发射的能流。

● 太阳外部分为三个圈层: 光球、色球和日冕 (图 2.2)

光球层位于对流层之上, 用特殊仪器拍摄的光球照片中的“米粒组织”(图 2.3), 就是对流层气体剧烈对流、翻腾的表现。同 70 万千米的太阳半径相比, 光球和色球都非常薄, 厚度仅分别为 500 和 $2\ 000$ 千米左右; 但日冕可延伸到一至几个太阳半径以远 (图 2.4)。色球和日冕发光极弱, 只有在日全食, 即光球被月球掩蔽时, 或通过特殊仪器才能观测到。因此, 我们平日看到的太阳就是光球。

● 太阳表面

通常所说的太阳表面, 就是指光球。太阳表面平均温度为 $5\ 770\ \text{K}$, 即光球平均温度; 以可见光和近红外光为主体的太阳辐射, 就是光球的辐射。

● 太阳风

太阳表层的密度和压力同太阳内部一样, 向外递减, 但温度在色球层以上反而向外增加, 在日冕中竟达百万 K 以上。日冕中的原子在超高温下高度电离, 并高速运动, 加上远离太阳引力中心, 一部分高能带电粒子, 主要是质子(氢原子核)和电子, 能挣脱太阳引力, 奔向太阳系广阔的行星际空间。这种从日冕“吹”出来的高速带电粒子流, 就是通常所说的太阳风。

从光球发射出的电磁辐射和来自日冕的太阳风, 是太阳能

黑子是光球上的旋涡, 是太阳活动的主要标志。黑子数目的变化对地球上的自然现象和人类活动影响很大。

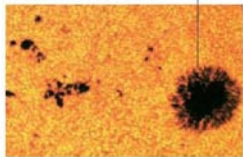


图 2.3 米粒组织



图 2.4a 日冕(无线电波成像)



图 2.4b 日冕(可见光成像)

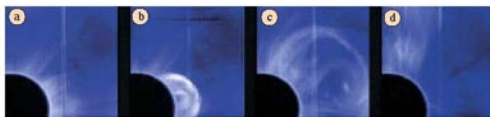


图 2.5 太阳上的风暴

图中显示了太阳表面的一个巨大炽热气泡在几分钟内爆裂的过程。有时，太阳风暴会直接冲地球而来。幸好我们有大气保护，太阳风暴可能破坏人造卫星，或者使高压线超载，造成断电。

流的两种主要形式。太阳总体稳定，但并不平静。太阳表层不断发生着剧烈的局部变动（太阳活动），给太阳能流带来不稳定，甚至爆发的成分（图 2.5）。

九大行星

（一）行星运动基本特征

行星在自转的同时，皆沿各自的椭圆轨道绕太阳公转。行星运动的大势可以概括为三个基本特性。

- 同向性：行星公转的方向相同。从北极上空看，呈逆时针方向运转。

- 共面性：行星公转的轨道平面相互接近。

- 近圆性：行星绕太阳公转的椭圆轨道都比較圆。

上述“三性”也适用于多数小行星和卫星。此外，同向性还适用于太阳和大多数行星的自转。



思考

表 2-1 中， i 为行星轨道面对地球轨道面的倾角， a 为行星椭圆轨道长半径（单位：日地平均距离，即 1 天文单位 = 1.496×10^8 千米）， b/a 为椭圆短半径与长半径之比， T 为行星绕日公转的周期（单位：年）。

表 2-1 九大行星椭圆轨道运动的部分数据

项目	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星	冥王星
i	7.0°	3.4°	0°	1.9°	1.3°	2.5°	0.8°	1.8°	17.1°
a	0.387	0.723	1.0	1.524	5.205	9.576	19.28	30.13	39.87
b/a	0.978 6	0.999 95	0.999 9	0.995 7	0.998 8	0.998 5	0.998 7	0.999 96	0.966 7
T	0.241	0.615	1.00	1.88	11.86	29.46	84.01	164.8	247.7

试问：表中哪些内容能反映行星运动的上述特征？本节节首的彩图符合行星运动特征吗？行星轨道运动的平均速度各为多少“度/年”？各为多少“千米/秒”？

（提示：简化计算，把行星运动近似看作以 a 为半径的圆周运动。）

（二）九大行星的分布特点

行星既然以近圆轨道绕太阳公转，那么，行星分布的大势便可以用它们与太阳的距离来表达。通常用行星椭圆轨道的长

半径 a 表示行星与太阳的平均距离。图2.6是严格按表2-1的 a 值比例绘制的图。图中可见，行星分布的总特点是：里密外疏。里面4颗行星（水、金、地、火）分布在太阳附近很小范围内，而外面几个行星占据了太阳系的大部分范围。

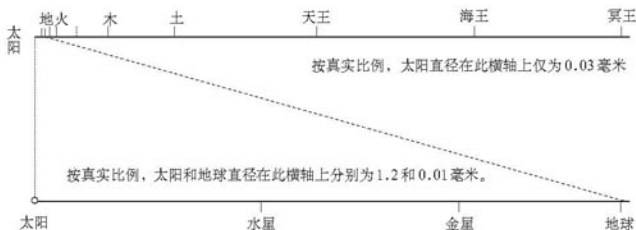


图2.6 行星分布大势。上横轴显示行星总体分布。下横轴是地球以内的放大

由图可知，太阳系内部比图2.1描绘的场景要空旷得多。事实上，行星，甚至太阳本身的大小，在太阳系广阔空间中是极其微小的。这也是行星分布的一个特点。



思考

1772年，德国学者提丢斯和波德发现，行星的分布呈现一定的规则。行星与太阳的平均距离可以表达为： $a = 0.4 + 0.3 \times 2^n$ （提丢斯-波德定则）。

式中，当时已知的水星、金星、地球、火星、木星和土星的 n 值可分别取 $-\infty$ 、0、1、2、4和5。据此，提丢斯预言，在 $n = 3$ ，即 $a = 2.8$ 天文单位处（即图2.6上方横轴上的虚线标志处），应该有一颗行星存在。结果到1781年， $n = 3$ 处没有发现，反而在 $n = 6$ 处发现了天王星。此后，1846年，又在离 $n = 7$ 不远处，发现了海王星（只有冥王星偏离大一些；但它若与海王星合起来算，更适合 $n = 7$ ）。

1. 请你用提丢斯-波德公式计算行星与太阳的平均距离，并与表2-1中的 a 值比较。

2. $n = 3$ 处还有个空白。对此你有什么猜想？

（三）行星物理化学特征

按物理化学特征（表2-2），九大行星可分为不同的类别。天文学中常用的分类之一，是将行星分为类地行星（水、金、地、火）、巨行星（土、木）和远日行星（天王、海王、冥王）。

表 2-2 行星的物理化学特征

行星	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星	冥王星
质量(地球为1)	0.056	0.815	1.000	0.107	317.94	95.18	14.63	17.22	0.002 4
体积(地球为1)	0.056	0.856	1.000	0.150	1316	745	65.2	57.1	0.009
密度(克/厘米 ³)	5.46	5.26	5.52	3.96	1.33	0.70	1.24	1.66	1.50
表面温度 (K)	600	750	300	230	128	105	70	57	50
卫星	0	0	1	2	>16	>23	>15	>8	1
光环	无	无	无	无	有	有	有	有	无
主要化学组成	重物质 ^① (岩石)				气物质 ^②		冰物质 ^③		
					轻物质				
大气状况	无	浓密 CO ₂ 大气	较浓密氮氧大气	稀薄 CO ₂ 大气	十分浓密的氢、氦大气				

注: ①重物质指镁、铁、铝等金属的硅酸盐和氧化物, 以及铁、镍等金属矿物。②气物质主要指氢和氦。③冰物质主要指氧、碳、氮等的氢化物, 如水、甲烷和氨等, 在极低温下呈固态。



思考

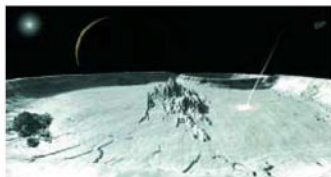
1. 分别按表 2-2 各栏说明类地行星、巨行星和远日行星的不同物理化学特征。
2. 请你根据表 2-2, 从其他角度对九大行星进行分类, 并说明你的主要依据。

(四) 行星的卫星

一般来说, 卫星是绕行星运转的太阳系天体。但美丽的土星环(图 2.1), 以及肉眼难见的木星、天王星和海王星的环, 皆由众多绕行星运转的小石块、小冰块组成, 它们一般不被认为是卫星。近年来, 有关这几颗有环行星的卫星数不断增加的报道, 缺乏确定数据。从表 2-2 中可见, 除水星、金星外, 行星都有绕自己运转的卫星, 其中, 木星、土星的卫星(图 2.7)较多。



a 土卫二



b 土卫五

直径仅 500 千米, 表面冰冻, 可能有冰火山。土星的第二大卫星, 表面镌刻着陨星和彗星撞击的痕迹。

图 2.7 土星的卫星

卫星的大小差异是很大的。最大的一些卫星，如木卫三和土卫六等，体积超过水星和冥王星。而某些较小的卫星，实际上只是一些巨石块或其他固体块。



星空观测站

观测行星

行星数量虽少，但它们是观测星空时比较生动的一部分。行星和地球都在不停地绕日公转，但运转速度不同，距离太阳越远的行星公转角速度越慢（表2-1）。因此，从地球观察，行星不仅在天上相对星空移动（回顾图1.10），而且相对太阳的位置也会不断变化。第一章第一节（图1.20以及相应的说明）分析过，太阳所处的星空部分与太阳一道东升西落，因而不可见。同样，如果行星方向与太阳相同或接近，行星则难以观测。

在行星观测上，地内行星与地外行星有着很大的不同。

地内行星指水星和金星，它们位于地球轨道内侧。因此，从地球观测，地内行星与太阳的方向差异不会超过一定的角度（图2.8中的 α ）。相应的，地内行星在天上总是在太阳附近。当与太阳太接近时，地内行星观测不到；当与太阳有一定距离时，地内行星可能在黄昏后太阳刚落山，而自己尚未落山的一段时间显现；或者黎明前自己刚升起，而太阳尚未升起的一段时间被看见。

运行于地球轨道外的地外行星则不同，它们在地球上与太阳的相对位置变化较大（图2.8）。其中，当地球位于地外行星与太阳之间（称为“冲”），例如，图2.8中地球和地外行星分别位于A和B位置时，是观测地外行星的最佳时机。这时，不仅整夜可见，而且由于它与地球最近，因此能更清楚地观测。

组织用望远镜观测行星（尤其注意人们历来关注的水、金、火、木、土五大行星）。结合观测，在书店、图书馆或网站（例如北京天文馆或美国航空航天局（NASA）的网站）等处收集各行星的有关资料，认识各行星最突出的个性特征，并撰写报告。

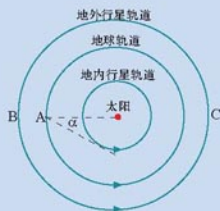


图2.8 观测行星

地内行星与地球无论怎样配置，它与太阳的方向差异不会超过 α 角。地外行星不同：假定地球位于A，地外行星可能与太阳同方向（位置C），不可见；也可能与太阳反方向（位置B），太阳落山它刚升起，整夜可见。

太阳系中的小天体

太阳系的小天体，除较小卫星外，还包括小行星、彗星、流星体和行星际物质。



图 2.9 小行星一例

(一) 小行星

小行星是绕太阳运行、主要由岩石物质组成的小天体(图 2.9)，直径多为几千米至几十千米。根据巡天观测估计，小行星总数在 50 万颗以上，总质量约为地球质量的万分之四。小行星大多分布于火星、木星轨道之间，与太阳的平均距离为 2.8 个天文单位。这恰好是提丢斯—波德定则 $n=3$ 的位置。

(二) 彗星

彗星大多沿扁长轨道绕日运行，平均质量比小行星更低一层次。在远离太阳时，彗星是冰物质和岩石物质的固结体。彗星接近太阳时，通常在木星轨道内，固结体表面的冰物质升华、挥发，形成明亮的气体尘埃“光壳”，即彗发。原来的固结体成为彗发的内核，称为彗核。

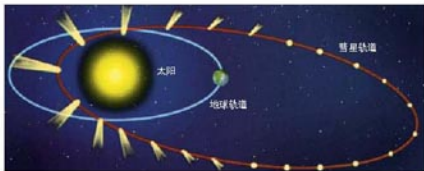


图 2.10 彗星运动示意

当彗星继续趋向太阳时，一般在接近火星轨道处，由于太阳辐射、太阳风的作用，彗发中的气体分子、离子和尘埃被推向反太阳方向，形成一条或数条彗尾。彗星绕过太阳后，在相应的距离上，彗尾和彗发相继消失(图 2.10)。

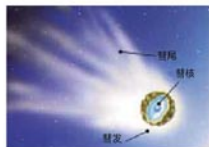


图 2.11 彗星结构示意图



思考

1. 在公转轨道的不同位置上，彗尾的指向和长短有什么变化规律？为什么？
2. 彗星运动过程中，何时观测最佳？在最佳时期，一天中什么时刻观测最佳？

(三) 流星体和行星际物质

流星体通常指绕太阳运行的、比小行星和彗星更小的固体块；行星际物质系指行星际尘埃和气体。当流星体进入地球大气层后，毫米级以上的流星体因与大气摩擦而在高空灼热发光，从而在星空中划出光迹而迅速消失。这就是流星现象。成群的流星体闯入地球大气层时，会形成流星雨(图 2.12)。



图 2.12 流星雨



陨星研究的意义

进入大气层的较大流星体因来不及燃尽而可能降落到地面,成为陨星。研究陨星和小天体对于探讨太阳系、地球及其生命的起源或演化有重要的意义。这主要是因为,小天体内部温度一般不高,很多小天体自形成以来,从未经历过什么高温过程,未经变质或变质很小,因而保存着很多古老的、甚至太阳系形成初期的信息。这些信息通过陨星而为人类所知。



a 世界上最大的石陨石

1976年3月8日 吉林市及其附近地区发生了一次罕见的陨石雨。其中落下的“吉林一号”石陨石重1.77吨。

b 世界上最大的陨铁
重约60吨,保存在非洲原来的陨落处。

图 2.13 陨石和陨铁

太阳系的演化

占主流的太阳系演化理论是星云说。星云说认为,银河系的银盘内以氢、氦为主,并含有足够重元素或金属元素的太阳母星云,在大约 50 亿年前开始收缩、演化(图 2.14)。太阳母星云中央部分演变为太阳,外围演化成星云盘,并在盘中形成各大行星和其他太阳系天体。

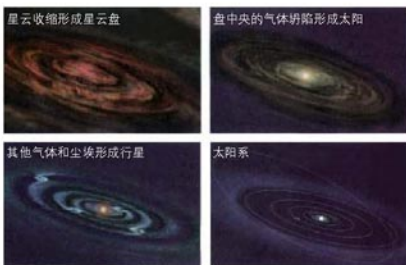


图 2.14 太阳系的形成示意



行星的形成

太阳母星云因收缩而加速旋转,离心力增大而形成星云盘。星云盘在冷却过程中凝聚出各种岩石物质和冰物质尘粒。凝聚物经扰动、碰撞结合等机制,逐渐形成粒子团;粒子团进一步相互碰撞,并吸积周围物质而较快生长。在此过程中,少数大粒子团脱颖而出,成长为行星胎。行星胎进一步吸积,吞没小天体或物质,终于在 46 亿年前形成了各大行星。在行星形成后的数亿年内,太阳系内的残余小天体仍相当多,各大行星都经历了长期剧烈的陨星冲击,直到约 39 亿年前残余小天体被吞并殆尽,大撞击事件才明显稀少下来。

由于距太阳远近不同的区域条件,形成了物理化学特征有明显差异的类地行星、巨行星和远日行星。



阅读

不同特征的行星的形成

一般认为,类地行星区接近太阳,冰物质难以凝聚,形成行星的原材料是星云中含量相对较少的岩石物质,而且可吸积物质的范围较小。因此,那里形成体积质量小,以岩石物质为主的类地行星。木星及其以外区域,因为远离太阳而温度较低,岩石物质和冰物质都能凝聚,可吸积区宽度又大,原材料丰富,行星胚胎较快较大地生长;进而又能吸积大量的氢和氦,保持浓密的大气层。其中,木、土两个巨行星吸积的氢和氦,在内部高压下转化为厚实的液态氢层,这反过来又有利于进一步吸积氢和氦而继续增大。海王星、天王星处于太阳星云的边缘,那里物质密度较低,吸积的物质和气体反而没有巨行星多,导致它们与巨行星的差异很大。

星云说虽然是太阳系演化理论的主流,但人们同时也认可重大撞击事件等灾变因素可能带来的影响。



活动

小天体与行星的撞击

流星体或行星际物质与行星撞击不会造成较大的影响。但是,小行星、彗星和大流星体就不同了。不少学者认为,地质年代中一些重大的气候变迁和生物灭绝现象,很可能同重大撞击事件有关。好在这种事件的概率现在已经非常小。

想一想,假如彗星撞击事件发生在现代或历史上的地球,会出现什么情况?进一步讨论在太阳系演化过程中可能有哪些灾变因素?

综合考虑星云说和灾变说等观点,试就小行星、冥王星和彗星等的形成演化各抒己见。

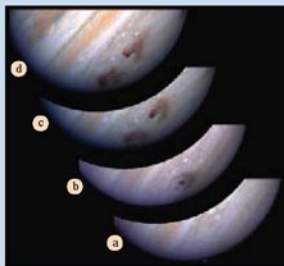


图 2.15 彗星和木星相撞

图片显示1994年木星上因彗星撞击而留下的“痕迹”,当时苏梅克-列维九号彗星以20万千米/小时的速度撞击木星。彗星被木星引力拉碎成一串20块碎片,每一片撞击时都向上抛出一个火球。撞击发生后,木星表面留下几个比地球大几倍的深坑。撞击既改变了木星原来区域的颜色,也改变了木星大气层的气流和成分。

第二节 月球和地月系

地球的唯一天然卫星或姊妹——月球，无论在外部条件还是在内部结构、活动性方面，都与地球有显著的差别。地月系是月球与地球组成的运动系统。由于月球在绕地球转动的同时，还跟随地球公转，日、月、地相对位置周期性地发生变化，从而导致地球上的日月会合运动。

月球是地球惟一的天然卫星。从一定意义上说，它更像地球的小姊妹。在太阳系中，像月球这样相对于自己的行星如此大的卫星，是绝无仅有的。由于月球及其研究对地球具有重要意义，人类一直对它充满兴趣。近几百年来，借助科学手段，人们对月球的研究更加细致入微。宇航时代的到来，特别是“阿波罗”登月后，人们对月球的认识更加深入，改造、利用月球的研究正在越来越多地被列入议事日程。

月球概况

（一）月球的表面形态

月球表面看上去明暗相间，用望远镜即可发现，亮区是高地，而暗区是平原或盆地等低陷地带，分别被称为月陆和月海带，平均高差为2~3千米。其实，月海带也是岩石表面，只是平坦灰暗的低陷地形区看上去似水域，很早就被人们冠以洋、海、湖、湾的名称（图2.16）。月陆和月海带的明暗对比主要是由于岩石基本成分的不同所致。

月球海陆分布的大势是陆多海少，而且陆包围海，这与地球上陆少海多，而且海包围陆的情形正好相反。月海主要分布在面向地球的半个月面上；月球背面月海很少，大多是月陆（图2.17）。

月面最引人注目的形态是到处可见的环形山（即月坑，图2.18），月球背面尤多。这是一种环形隆起的低洼地形。直径



图2.16 月球正面



图2.17 月球背面

月球半径为地球的 $3/11$ ，体积为地球的 $1/49$ ，质量为地球的 $1/81.3$ 。

大于1千米的环形山多达33 000多个,致使整个月球,特别是月球背面呈现千疮百孔之貌。研究表明,环形山主要是早期受小天体频繁冲击的产物,其次是由古老火山爆发形成。



图 2.18 月坑(环形山)

思考

根据太阳系演化的星云说,地球在形成的早期也应当有很多环形山地形,但是从卫星影像上看为什么不明显呢?

(二) 月面环境

月面环境对生命来说十分严酷,迄今为止,月球上没有发现任何形态的生命。月面重力仅及地面重力的 $1/6$,在这种弱重力条件下,月面上包括水汽分子在内的气体分子,容易挣脱月球引力场的束缚而逃逸到宇宙空间。因此,月球上不可能、事实上也没有大气圈和水圈。

因为没有大气圈和水圈的调节,加上月球上一昼夜达一个月之久,月面温差很大,达 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之多。白天可高达 $127\text{ }^{\circ}\text{C}$,夜间可降至 $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

月面磁场很弱,不及地球的10%。由于无大气和磁场的保护,来自太阳或宇宙的高能辐射、粒子流和流星体等,可以长驱直入地冲击月面。

月球的表面非常荒凉,除了岩石及其碎屑——月壤外,几乎什么都没有。月面非常寂静,万籁无声。月球上不见蓝天,即使在白天,天空背景也是暗黑的(图2.19)。



图 2.19 在月球表面看地球

思考

1. 为什么月球是一个寂静的世界?
2. 为什么月球上不见蓝天,白天的天空背景也是暗黑的?



活动

分组讨论月面环境的特殊性

1. 月面哪些条件对生命来说十分严酷? 试一一列出, 并说明。
2. 对生命而言, 月面特殊的条件虽然严酷, 但反过来对人类也会具有特殊的利用价值。逐一讨论上述不利条件反过来对人类可能有什么利用价值。
3. 将各种条件的利弊汇总成一张表, 并就月球的开发前景和改造撰写一份报告。

(三) 月球的“地质”

按理论分析, 月球内部的温度和密度等应明显低于地球, 难以有熔融圈层。阿波罗宇航员安置的月震仪的观测结果与此吻合。月球内部分为三层: 从外至内, 0千米~60千米为月壳, 60千米~1 000千米为月幔, 月幔之下为月核。月核为塑性软流层(类似地球上地幔上部的软流层), 月幔和月壳全部为冷而硬的岩石圈, 比地球岩石圈厚实得多。因此, 现代月球的内力作用表现得相当微弱, 无近代火山活动, 月震次数少, 强度弱。

从阿波罗宇航员采集回的月球岩石样品中, 发现了60种矿物和地球岩石中的全部元素。



阅读

月球的早期活动

现代月球虽然十分宁静, 但研究表明, 早期月球的内外力作用还是相当剧烈的。31亿年前, 月球的岩浆、火山活动或构造运动曾经十分活跃, 后来因月球表层冷却和岩石圈加厚到一定程度, 才平静下来。39亿年前, 月球曾经经历过一系列大陨星的撞击。现代月球的表面形态, 主要是早期这些巨大的内外力作用的遗迹。大陨星的撞击曾使早期月球出现相当大、相当深的凹陷, 在后来的若干亿年里, 月球火山活动连续不断, 从火山口喷出的岩浆逐渐填充凹陷区, 形成灰暗、宽广的熔岩平原, 即前面提到的月海带。



思考

1. 应用地球内力和外力作用的知识, 将现代月球的内力和外力作用与地球的情况做比较, 并回答月球和地球之间有什么相同和不同之处。
2. 为什么早期与地球内外力作用类似的月球, 变成了现今的状态, 而地球至今内外力作用仍然活跃?

月球的运动与地月系

(一) 地月系的运动

月球的运动包括月球的自转和公转。在公转方面,月球与地球组成了一个运动系统,称为地月系。在相互的引力作用下,月球和地球就像两个绕转着的姊妹,相伴着沿地球公转轨道,在太阳系空间运行。

由于月球引力对地球的作用较小,我们可以将地月系运动简化处理为:月球在围绕地球转动的同时,跟随地球绕太阳公转。



阅读

地球和月球绕地月系质心的运动

我们都知道,月球在地球的引力作用下绕地球旋转;但不要忘记,月球也有同样大小的引力,反作用于地球上,也会使地球运动。事实上,地球和月球都绕地月系质量中心(下面简称质心)运转,即常说的“相互绕转”。与此同时,地月系对外作为一个整体绕太阳公转。确切地说,在“地球公转轨道”上运行的,是地月系质心。

不过,地球的质量为月球的81.3倍,地月系质心位于地球内部(地表下1 700千米处);月、地绕转轨道大小相差约80倍。即月球沿一个大椭圆绕质心运转,地球沿一个约为前者1/80的小椭圆运转(按真实比例,在图2.20中,地球小椭圆轨道恰如地球黑点那样大)。由此可见,地月系绕转的总体形象还是月球绕地球旋转。

因此,在一般场合,我们忽略地球运转的小圆圈,将地球中心看作地月系质心,将地月系运动处理为:月球绕地球转,地球绕太阳转。

(二) 月球绕地球的轨道运动

同太阳系大多数卫星一样,月球的运动符合同向性、共面性和近圆性的特点。具体地说,月球绕地球转动的方向与行星相同(从北极上空看,呈逆时针方向运转)。月球绕地球的椭圆轨道比较圆(图2.20)。

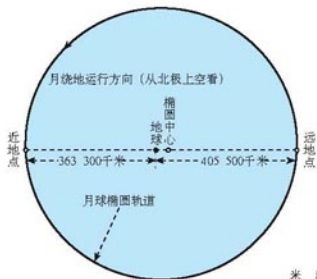


图 2.20 月球椭圆轨道示意

月地距离的最大和最小值分别是405 500千米和363 300千米。月地平均距离是384 400千米。

月球绕地轨道平面与地球公转轨道平面比较接近,倾角为 $5^{\circ}09'$,从图 2.21 可见,这个角度是不大的。月球绕地球运转,周期性地穿行于地球公转轨道面的两侧。

月球绕地球转动的周期为 27.32 日。



图 2.21 月地距离与地、月大小真实比例,及 $5^{\circ}09'$ 交角的真实大小

思考

1. 第一章曾说过,地球上绝大多数太阳系天体都在黄道附近相对星空运行,月球也是这样吗?图 2.21 是否意味着月球总是偏离黄道 $5^{\circ}09'$ 。

2. 试利用上面的数据说明:月球比太阳小很多,为什么月球看上去却几乎与太阳一般大?(提示:日、月看上去的大小,即日轮、月轮直径对地球观测者的张角,称为太阳、月球的“视直径”。)

3. 月球不仅看上去与太阳差不多大,而且由于月地距离的变动,月球视直径有时比太阳视直径大,有时却比太阳小。试计算:在什么情况下月球视直径大于太阳视直径?什么情况下小于太阳?(提示:月球视直径比太阳视直径大时,才可能发生日全食;月球视直径小于太阳视直径时,才可能发生日环食。日全食和日环食都是难得一见的天象,月地距离的变动,恰好使地球观测者既能看到日全食,又能看到日环食,这是大自然巧妙的安排。)

(三) 月球在太阳系中的运动

月球绕地球转动和地球绕太阳公转是同时进行的。因此,月球在太阳系中的运动是这两种运动的叠加(图 2.22),即

月球的运动 = 月球绕地运转 + 地球绕日公转

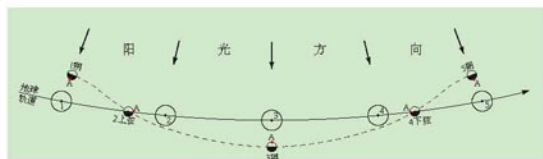


图 2.22 月球运动是绕地运动和绕日运动的叠加(此图系从北极上空观察)

由图2.22可见,地球公转从位置1到位置5,月球逆时针绕地球运转了一周多,但它在太阳系中留下的轨迹是一条在地球绕日公转轨道两侧起伏的线条。



活动

绘制月球在太阳系中运动轨迹的真实图像

为了说明问题,图2.22大大夸张了月球轨迹的波动幅度。事实上,从该图可见,月球运动轨迹起伏波动的幅度,即月地平均距离(或月球绕地球的轨道半径)起伏波动的周期约为一个月。为了感知月球轨迹波动幅度的真实形象,可以按40厘米为半径画圆,表示地球公转轨道(不用全画,只需画地月系一个月的公转行程,即 $1/12$ 圆周或略多)。再算算,在40厘米半径的绕日公转轨道上,月球轨迹波动幅度(月地距离)应为多少毫米?

根据计算结果,按真实比例在公转圆周上画出月球运动轨迹,并说说感想。

(四) 月球的自转

月球在参与上述运动的同时,还不停地自转。月球自转的方向与公转方向相同。

月球自转最有趣的特点是:自转周期恰好等于它绕地球转动的周期,为27.32日。这种自转称为同步自转,它是潮汐摩擦长期作用达到一个相对稳定状态的结果,在宇宙中并不鲜见。由于同步自转,绕转天体始终只将自己的一面对着中心天体。从图2.23可见,绕转天体公转一圈的同时,自身(以A点为标志)也正好在宇宙空间中自转了一周。

因此,直到1959年以前,人类从未见过月球的背面。宇宙飞船绕到月球背面传回照片后,人们才洞悉了月球的全貌。

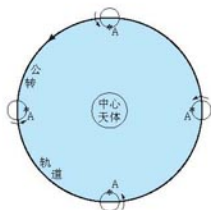


图2.23 同步自转示意



思考

如果图2.23中绕转天体是月球,那么,月球上正对地球的A点位于图2.16中的什么地方?该点位于哪两个大的月海之间?

日月会合运动

在月球绕地球运动,并随地球绕日公转的过程中,日、月、地的相对位置周期性地发生变化。这种变化反映在天象上,就是地球观测者看到日、月在天球上周期性地会合与分离,这种运动称为日月会合运动。下一节要讲的月相与潮汐等现象,就是日月会合运动的结果。

仍用图 2.22 来加以说明,该图给出的正好是日、月、地相对位置周期性变化的一个回合。在位置 1,月球在地球与太阳之间,从地球看月球与太阳同方向,即日、月在天球上“会合”。这种情形也称为“合朔”或“朔”。

从位置 1 到位置 2,月球绕地球(按图上逆时针方向)旋转 $1/4$ 周,地球观测者看天球上日、月逐渐分离,达 90° 。到位置 3,月球转到地球的背向太阳一侧。从地球上看来,月球和太阳在天球上两者对面,因此被称为“日月相望”或“望”。

位置 3 以后,日、月在天球上的投影逐渐靠近。直到位置 5,日、月再次合朔,重现位置 1 时的日、月、地的相对位置。

由此可见,日月会合运动就是日、月“合朔”(会合)与“相望”不断反复的过程。



思考

1. 图 2.22 中从位置 1 到位置 5,月球绕地球转了一圈还是一圈多? 月球自转呢?
(提示:以月球上正对地球的 A 点为标志,判断月球自转了一圈还是一圈多。)
2. 由此判断,是从位置 1 到位置 5 的历时长,还是月球绕地球的周期(或月球自转周期)长?
3. 进一步判断,月球上一昼夜等于多长时间? 月球的一昼夜较长,这对月面温差有什么影响?

日月会合运动的周期称为朔望月。它比月球绕地球运转的周期要长 2.2 日,为 29.5306 日。

对人类来说,朔望月这个周期更重要,因为它是月相和潮汐变化的周期,也是计量我国农历月和其他民族阴历月的依据。我们观测月球的实践活动也少不了它。

第三节 月相和潮汐变化

本节讨论月相和潮汐变化这两种具有生活意义的现象。这些现象都是日、月会合运动的结果。

月相

呈现给人类的月面不仅绰约美丽，而且婀娜多姿。或一弯微露，或半遮面容，或全盘托出（图 2.24）。月球形状的这种“阴晴圆缺”，称为月相。

月球本身不发光，在太阳光照射下，月球同地球一样，一半被照亮，形成了昼半球和肉眼一般看不见的夜半球。从不同角度观察月球的明亮部分——昼半球，就会看到不同的形状。

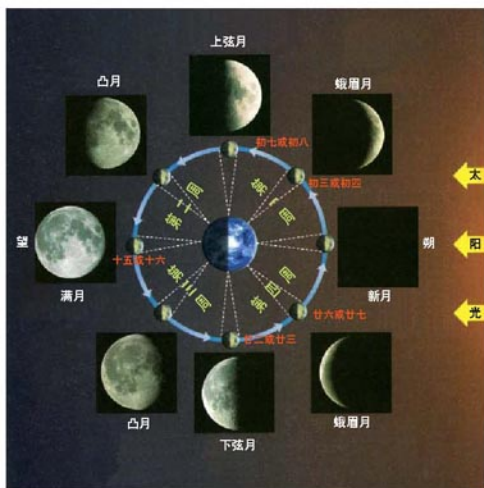


图 2.24 月相

此图表示日月会合运动过程中，不同日月角距所对应的月相。图中的内圈是从北极上空观察。月球昼半球始终朝向太阳。图中外圈相应的照片给出在不同日期看到的月球昼半球的形状，即月相。将“朔”称为“新月”的说法来自西方，我国有将农历上半月的蛾眉月称为“新月”，将下半月的蛾眉月称为“残月”的习俗。



活动

模拟观察月相变化

在暗环境中放置一盏灯或手电筒，观察者手持一深色球，找到距离灯远近合适的位置，使球看上去明暗比较分明。逆时针方向在站立点持球逐步转动身体，依次记录不同的球灯角距时，所看见球的照亮部分的形状。这里，球灯角距为观察者看球与灯方向的夹角（图2.25），逆时针度量。

根据观察结果，讨论月相变化的规律。

白昼无暗室时，可用一个半涂黑、半涂白的球代替演示。

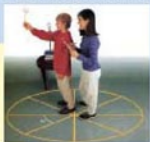
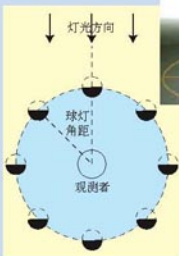


图 2.25 月相成因模拟观测

在日月会合运动的过程中，从地球观察月球昼半球的角度，正是在周期性地变化（图2.24）。在“朔”位置，月球夜半球朝向地球，月球不可见。几天后，从地球可以观察到月球昼半球的一侧边缘，月相表现为一弯蛾眉月。又过了几天，月球昼半球侧对地球，地球观测者看到月球昼半球的一半（上弦月）。接着，月相继续变丰盈，直到“满月（望）”，月球昼半球正对地球，一轮明月呈现。相反，从“望”到“朔”，则是月相逐渐消瘦的过程。



思考

同一时间，地球各地的观测者所见月相是否基本相同，为什么？（提示：回顾图2.21。）

因此，月相变化的周期就是日月会合运动的周期——朔望月，即29.5306日。

月相变化如此鲜明，因此古代的人们利用它来计量时间。我国历法中的农历月（图2.24）和阿拉伯历法中的阴历月，至今仍以朔望月为依据。我国的农历为观测月球及有关天象带来很大的方便。



月球观测

一、采用天球仪或作图法辅助估计月球动态

我国印制的日历既给出公历日期（以及24节气），又包括农历日期。因此，我们可以方便地分析任意日期、时刻的月球行踪。这种练习随时都可以联系实际进行。初学者最好用天球仪辅助，熟练后可画天球图解决问题。业余观测完全可以忽略月球对黄道的小偏离。

● 参见第一章第一节，将天球仪按当地地理纬度和北极星方向调整好。

● 依据公历日期确定太阳在黄道上（相对恒星星空）的位置，将此位置在天球仪星空球壳的黄道上做下记号。

● 依据图2.24，由农历日期估计天球上月球相对太阳的位置。再根据太阳位置，推断月球在天球仪黄道上的大致位置，并做下记号。

● 转动天球仪，将太阳转到与观测时对应的位置上。

例如，公历2004年9月10日，太阳在黄道上的白露点附近。这天农历为七月廿六日，月初相当于图2.24中右下角的弯月。由此可知在天球上，月球大约在太阳顺时针方向的 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ （从北极上空观察）。进而推知，月球在黄道上大暑点前。早上5时，太阳快升出地平线。因此，这时日月位置及月相如图2.26所示。

如果没有天球仪，可采用画图法（图2.27）。

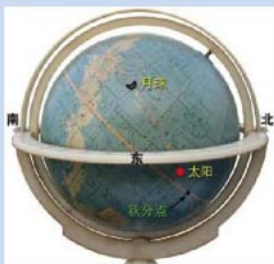


图 2.25 月球实例（纬度 45°N ）

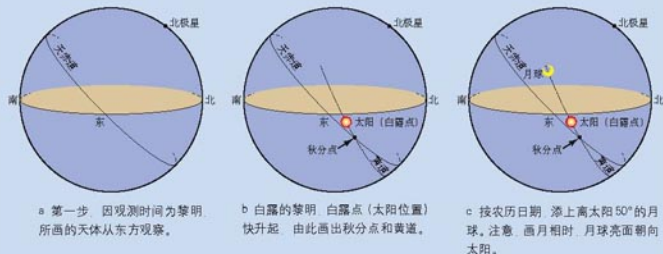


图 2.27 与图 2.25 对应的天球图

二、月球的出没和观测时段

1. 通过实际观测,填写下表(采用黄昏、上半夜、子夜、下半夜和黎明等填写大致时间)。

	上半月峨眉月	上弦月	上半月凸月	望月	下半月凸月	下弦月	下半月峨眉月
可见时段							

讨论:为什么各种月相的出没和观测时段会有这些差异?

2. 将峨眉月与地内行星相比较,看看两者在可见时段有什么共同点?再将望月与“冲”时的地外行星相比较,并加以说明。

三、月球周日运动的周期

前面讲过,日、月、行星在跟随星空东升西落的同时,还各自相对星空缓慢移动。因此,日月行星之间,以及它们与恒星星空之间,周日运动的周期略有差异。月球周日运动的周期称为太阴日,平均为24小时50分,它也是海洋潮汐的日变化周期。

通过观测证实,月球从东方升起或从西方落下的时间,每日推迟约50分钟。



阅 读

历 法

历法是计量年月日的方法。计量所采用的“尺子”,一个是季节变化的周期,即回归年;另一个就是朔望月。由于两个“尺子”之间是非整数倍的关系($1\text{回归年} = 12.368\text{3朔望月}$),因此历法分成三类。一是以公历为代表的阳历。阳历年平均等于回归年,阳历的月虽然最早也来自朔望月,但1年分为12个月,阳历月平均长度只得偏离朔望月,所以阳历日期不能与月相对应。二是阴历,阴历至今仍然是阿拉伯历法的重要成分。阴历月平均等于朔望月,日期与月相对应,但也因1年分为12个月,阴历的年平均就不等于回归年,难以反映季节变化。三是阴阳历。阴阳历不仅月平均等于朔望月,而且部分年份设为13个月(增闰月),从而使年平均也等于回归年。阴阳历是中国传统历法农历的主要成分之一。

潮汐及其变化

(一) 海洋潮汐现象

海洋潮汐是一种周期性的全球海水涨落现象。海水涨至最高时,总是月球在当地升至最高或降至最低之时或稍后。涨落的幅度(潮差),呈现明显的朔望月变化,即与月相变化相呼应:在朔、望或稍后,涨落幅度分别达到最大(大潮);在上弦、下弦或稍后,潮差两次达到最小(小潮)(图2.28)。

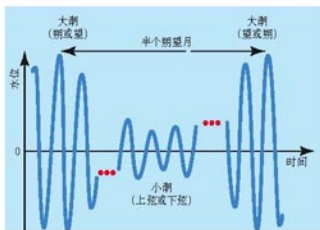


图 2.28 潮汐现象的海水水位变化示意

(二) 引潮力

潮汐现象的动力是引潮力。引潮力是一个天体对另一个天体不同部位的引力差异,这种差异会导致受力天体发生变形。



阅读

引潮力会导致变形

我们在生活中常常见到这样的现象:当物体不同部位受到有差异的力作用时,除整体运动外,物体还会产生变形。例如有两个人,一个向东拉你,另一个向南拖你,你可能不仅向东南移动,而且你的身体或衣服将会变形。

天体间的引力作用也有类似效应。以地球和月球为例(图2.29),由于万有引力与距离的平方成反比,地球不同部位受月球引力作用是有差异的,离月球越近的地球部位受到的月球引力越大;在A、B两点分别达到最大和最小。因此,除整体运动外,地球还会产生变形。

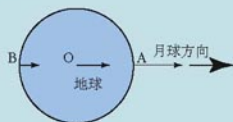


图 2.29 月球的引力差异
在高月球最近的A点引力最大,在高月球最远的B点最小。

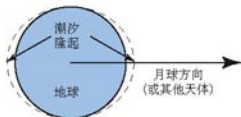


图 2.30 地球的潮汐变形

月球(或其他天体)对地球的引潮力使地球在它和月球连线方向上变长,地球上因此产生两个潮汐隆起(图2.30)。

在所有天体中,月球对地球的引潮力最大;太阳次之,其引潮力为月球引潮力的 $5/11$;其他天



阅读

引潮力是怎样导致天体变形的

引潮力究竟是怎样导致天体变形的呢?让我们参照一个与上述地球受力状况相类似的例子来分析(图2.31)。光滑平面上三个被弹簧相连的木块,受图示三个不同力的作用,必将作为一个整体向右运动,同时,弹簧将被拉伸,三木块整体变长。

同理,月球对地球的引力一方面导致地球整体在地月系中运动,另一方面,月球对地球不同部位的引力差异(即引潮力),还将使地球在月地连线方向上变长。月球如此,其他天体也如此。

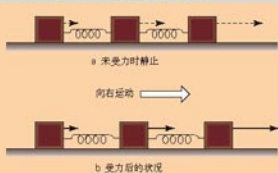


图 2.31 类似的物体受力差异

体对地球的引潮力很小。因此,地球的潮汐变形,是月球和太阳引潮力作用的结果。月、日共同作用导致的潮汐变形幅度,平均为1米的量级。



阅 读

日月引潮力大小的比较

引潮力不是引力本身,而是引力之差。基于万有引力定律,人们推导出任意天体对地球的引潮力的表达式,并证明,某天体对地球的引潮力,与该天体质量和地球半径成正比,与地球到该天体距离的立方成反比。

太阳质量虽然是月球质量的27 060 000倍,但太阳距离的立方却是月球距离立方的58 940 000倍。由于引潮力与距离的立方成反比,所有遥远天体的引潮力都可以忽略,太阳对地球的引潮力也仅是月球引潮力的 $5/11$ 。

(三) 海洋潮汐现象的成因

海洋潮汐现象的成因涉及四个层次。

第一,潮汐变形或隆起发生于月、地和日、地连线上。随着地球自转(或月、日的周日运转),地球上的潮汐变形或隆起总是跟随着月球和太阳相应地在地球上移动。潮汐隆起所到之处,地面或海面升高;潮汐隆起经过之后,地面或海面降低。因此,地球的潮汐变形是一种此起彼伏、移动性的变形。



思考

每天涨潮、落潮的时间一样吗?如果不是,请说明是提早还是推迟?约多少分钟?

第二,虽然整个地球都在引潮力作用下变形,但海洋比固体地球变形明显,而且容易流动(大气变形则难以感觉)。正是在陆地和海岸的衬托下,小幅度的海面(水位)升降才得以成为明显可见的现象(图2.32)。受海陆分布或海岸地形等因素的影响,又使不少沿海地区的海面升降幅度大为提高,有的甚至形成汹涌的怒潮。



图 2.32 潮汐



思考

假如整个地球都被茫茫大海覆盖，能看到海洋潮汐现象吗？为什么？

第三，海洋潮汐是月、日引潮力共同作用的结果，但太阳引潮力仅为月球引潮力的 $\frac{5}{11}$ ，为二者共同作用之和的 $\frac{5}{16}$ 。因此，太阳引起的潮汐变形混迹于总的变形之中，难以单独显现。所以，海水的每日涨落总是追随着月球的周日运动。

第四，太阳引起的潮汐变形虽然难以单独显现，但它能对月球引起的潮汐变形起明显的叠加或削弱作用，从而导致潮汐涨落幅度（潮差）的朔望月变化。



思考

根据已学知识，解释为什么大潮在朔、望或稍后，小潮在上、下弦或稍后。



第三章

地球的演化和地表形态的变化

地球大约在46亿年前形成,因为具有适当的体积、位置和温度,以及具有大气和水分,而成为生命的绿洲。根据距今38亿年前以来的地层和古生物化石分析,地球发展史被编成了“地质年代表”,各地质年代都有不同的地壳运动和生物演化特征,并形成了不同的矿产。地球现代海陆分布和地势起伏的总格局,是近几亿年来地球岩石圈及其板块运动的结果。板块运动使岩层发生变形、变位,形成各种地质构造,提供了地表起伏的“粗毛坯”;而流水、风力、冰川和波浪等外力,则通过风化、侵蚀、搬运、沉积等作用过程,不断雕塑这个粗毛坯,在总体上减缓地表起伏的同时,使地表形态发生各种变化,形成千姿百态的地貌。

【本章学习目标】

- 了解地球的起源和在地质年代中的演变。
- 掌握板块构造学说的基本概念。
- 学会分析各种外力作用对地表形态的影响。
- 把握地表主要地貌类型的基本特征。

【关键词点击】

地球早期演化 地质年代 板块构造学说 地质构造 外力作用 地貌

第一节 地球的早期演化和地质年代

地球大约于46亿年前形成,初期曾经历了一个增温、熔融,内部物质分异的过程,形成地球内部的圈层构造。生命大约在35亿年前出现于原始海洋中,生物进化改造了地球的大气,并在地层(主要是沉积岩)中留下生物的遗体或遗迹,形成化石。根据地层和化石,加上对地球早期演变的推测,地球发展史被编成了“地质年代表”,各个地质年代都有不同的生物和地壳运动特征,并形成了不同的矿产。



图 3.1 新生的地球示意

地球的早期演变

(一) 初生的地球

地球大约形成于46亿年前。由于太阳系母星云含有足够的重元素或金属元素,在靠近太阳的区域,形成了以岩石物质或重物质为主的类地行星。地球就是在类行星区中的适当位置上形成的。

一般认为,地球形成之初,从原始星云中俘获了一定数量的气体,主要是氢和氦。那时候的地球没有水圈,岩石物质没有明显分异,内部也没有明显的圈层结构。

由于内部具有引力收缩带来的热能,加上各种放射性元素发出的热量在内部积聚等因素,新生的地球经历了一个增温的过程,而且增温的幅度足以使地球达到熔融或近于熔融的状态(图3.1)。在熔融状态,物质容易因重力而发生分异现象。较轻的、以硅酸盐类为主的岩石物质往上“浮”,并在那里进一步分异;较重的铁、镍及其伴生元素则“沉”向地内深处。分异的结果是形成了地核、地幔和地壳等圈层构造(图3.2)。

炽热的地球不断向外散热,同时,早期地球的内部热源不断消耗(例如,短寿命放射性元素作用终止),于是地球开始冷却。地球表面及表层以下逐渐固结。接着,构造运动和火山活动不断,至今仍未停止。

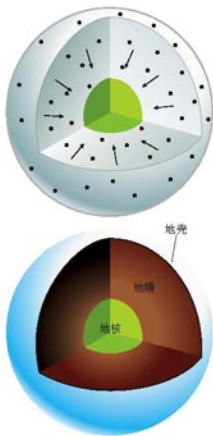


图 3.2 地球内部圈层的形成示意



太阳系天体的早期增温和冷却

一般认为,太阳系其他天体同地球一样,早期也曾经历增温的过程。不过,不同质量天体的增温过程有明显差异。就以岩石物质为主的天体而言,较小的如小行星等,由于内热和聚程度低、热散失快等原因,形成后一般未经历千度以上的热过程,很快冷却固结;而月球、水星、火星、金星和地球,早期都曾达到熔融或近熔融的状态,发生内部物质分异而形成层状构造,以后,表层或者以下逐渐固结,并发生了构造运动和火山活动。

不过,在较小的月球和水星上,火山活动仅延续了若干亿年后便寂静下来,表层固结的层次也较深。地球和金星质量相对较大,内部增温比较强烈,分异过程也更长期、更充分;虽然总趋势是岩石圈加厚和内力作用减弱,但至今构造运动和火山活动不断,仍然充满活力。火星的情况可能介于这两类天体中间,但在内部圈层及活动性方面,更像水星和月球。

(二) 大气圈的早期演化和水圈的形成

有证据表明,地球从原始星云中俘获的大气已经逃逸;地球的原始大气是早期火山活动排出的气体被地球俘获的结果。一般认为,早期火山活动喷出的气体和现代类似,主要包括水汽、二氧化碳、氮、硫化氢和氨,以及少量一氧化碳和甲烷等。如果没有生物圈的作用,地球原始大气自然演变的结果,在大气中留下并不断累积的,将是在化学上和动力学上都比较稳定的成分,例如二氧化碳、氮和少量惰性气体等。



行星的大气

天体能否保持(某种成分的)大气,一方面看火山活动等天体自身补充气体的情况;另一方面,要看天体引力能否保持得住气体分子。一般而言,行星表面温度越高,气体分子,尤其是氢、氦等较轻元素的分子热运动速度就越大,也就越容易挣脱行星引力,逃逸到宇宙空间;而行星质量越大,表面引力就越强。因此,只有木星、土星等这种表面温度较低的大行星才可能保持住氢、氦成分的大气;地球和金星等则保持不住氢和氦,但能够拥有较重气体分子,例如二氧化碳、氮和氧等;火星质量相对较小,大气相对稀薄;不够大的月球和水星(温度也高)则保持不住大气;小行星等就更不可能有大气了。



金星大气圈的演变

金星更靠近太阳，表面温度从未冷却到沸点以下，大气中富含二氧化碳和水汽，产生温室效应，使金星表面温度进一步提高，导致表面岩层中的碳酸盐分解，析出的二氧化碳进一步加强温室效应。如此循环，使金星表面温度和大气中二氧化碳浓度都惊人地高。

当早期地球的表面温度降到沸点以下，大量的水汽通过降雨过程或在地表直接冷凝，逐渐形成水圈。

（三）生命的起源和大气圈的继续演化

水圈的形成是地球演变史上一次重大的转折，它为地球生命的出现提供了必要的条件。一般认为，在地球原始大气中，有不少一氧化碳、氨、甲烷和氢等易氧化气体。这时，臭氧层还没有出现，在强烈的紫外线或闪电等作用下，这些气体的反应物在原始海洋、湖泊中，形成了大量的前生命物质，它们能进一步反应生成生命物质——蛋白质和核酸。这些物质在原始水圈中不断积累，通过一定的浓缩和聚合机制，发展成为能利用外界能量进行代谢、能自我复制的自繁殖单位，并具备了一个独立的原始生命体系不可缺少的界膜。有证据表明，35亿多年前出现了原始生命（图3.3）。



在澳大利亚发现的最古老的丝状细胞结构化石（蓝藻），距今35亿年，它们与现代的蓝菌丝体十分相似。



澳大利亚西海岸鲨鱼湾由蓝藻建造的叠层石。

图3.3 最古老的化石



生命形成机制的模拟

20世纪50年代以来,生物化学家们模拟第二代大气的条件,证明在闪电、紫外线等多种能源的作用下,第二代大气中的气体会生成水、氨与甲醛、氰化氢和丙炔腈等有机分子。这些中间产物在水溶液中混合时又可较快、较大量地产生各种氨基酸、核糖和碱基等。核糖和碱基加上磷酸,可缩合为核苷酸。进而,人们还合成了组成蛋白质和核酸等生命物质的多肽或多核苷酸。

图3.4为著名的米勒—尤里实验示意图,米勒和尤里因此获得1959年的诺贝尔化学奖,指导教师尤里还是1934年诺贝尔化学奖的获得者。



图3.4 模拟实验

生命形成时,大气中富含二氧化碳,氧气还很少。原始生命发展到一定阶段,出现了叶绿素的原始聚合物,以后又发展成为能有效进行光合作用的叶绿体。叶绿体能吸收大气中的二氧化碳,因此在海洋中繁殖很快。它们大量释放氧气,使氧气在大气中出现并累积起来,将以二氧化碳为主的原始大气改造为现今富含氧气的大气。至于现今大气中大量的氮,主要是通过非生物(例如火山等),其次是生物途径不断累积的结果。

大量氧气出现后,大气中出现了臭氧层。臭氧层使到达地面的紫外线大大减弱,为海洋生物后来的登陆准备了条件。



活动

分组讨论,全面梳理、总结形成现今地球环境所需的种种条件,包括太阳作为恒星和地球作为行星的所有条件。

记录地球历史的“书页”——地层和化石

地层和化石犹如地球史册的书页,人类认识生命出现后的地球演变史,主要就是依据对地层和化石的研究。

(一) 岩石和地层

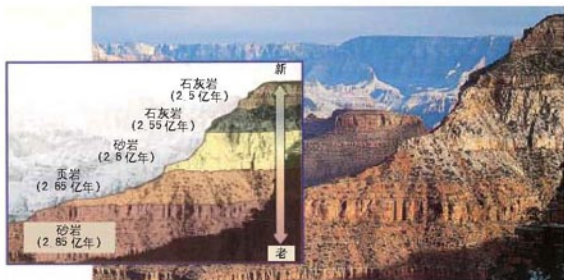


图 3.5a 美国科罗拉多高原的沉积岩



图 3.5b 岩层相互关系示意



思考

图中①、②为侵入岩，其他为沉积岩。根据岩层的相互关系，推测沉积岩、侵入岩①、侵入岩②形成的先后顺序。

地球上的岩石，分为岩浆岩、变质岩和沉积岩三类。由于形成的地质条件各异，不同类型的岩石可以反映出不同的地质作用。例如，玄武岩的分布反映该地曾有火山活动。

岩石多呈层状，具有时间顺序的岩层称为地层。其中，沉积岩的地层具有明显的层理构造(图 3.5a)。在沉积岩地层中，一般先沉积的层在下，后沉积的层在上。这样，不同时期的生物遗迹就会先后埋藏在不同的沉积岩层中。这些生物遗迹及沉积岩本身都会受到当时古地理环境的影响。

沉积岩和岩浆岩、变质岩常常相互穿插(图 3.5b)、交叠，因此，根据地层的相互关系，可以推测一些地质作用的先后顺序。

(二) 化石

在沉积岩的形成过程中，生物的遗体或遗迹会在地层中保存下来，形成化石(图 3.6)。生物总是从低级向高级、从简单向复杂进化的，所以，同一时代的地层往往含有相同或者相似的化石，而不同时代的地层往往含有不同的化石。并且，一般而言，低级物种化石在下，高级物种化石在上。



图 3.6 化石的形成

生物的生长深受地理环境影响,由古生物形成的化石种类及其特点不可避免地打上了当时地理环境的烙印(图3.7)。因此,根据化石,不仅可以确定地质年代,而且还能重建古地理环境。



图 3.7 古生物化石

案 1 例

珊瑚和珊瑚礁

有一种海生圆筒状腔肠动物,叫珊瑚虫,主要在温暖的近岸浅海中生长,对环境条件的要求相当严格,在水温 $23\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间、深度30米左右处生长最旺盛。群体生活的珊瑚虫,骨骼联结在一起,形成珊瑚。随着骨骼的累积,珊瑚越长越大,进而形成形态万千、色彩斑斓的珊瑚礁(图3.8)。因此,如果在地层中发现大量珊瑚化石,那么,可以推测在形成该地层的时代,当地是一个温暖而广阔的浅海环境。



图 3.8 珊瑚化石(a)和珊瑚礁(b)

? 思考

1. 在地质历史时期,蕨类植物曾极为繁盛,大羽羊齿就是其中的代表。如果某地层含有大量大羽羊齿化石,试推测这种植物繁盛时的气候条件。
2. 煤是地质历史上的陆地植物在沼泽中大量沉积而成的。在冰雪覆盖的南极洲,人们发现了丰富的煤藏。请推测煤形成时南极洲的地理环境。

地质年代表

地球科学家对全球各地的地层和古生物化石进行了对比研究,发现地球演化呈现明显的阶段性,据此把地质历史主要分

表 3-1 地质年代表

相 对 年 代			距今百万 年前	主要生物进化	
宙	代 纪			植 物	动 物
显生宙	新生代	第四纪	2.6	被子植物时代	哺乳动物时代
		新近纪			
		古近纪	23.3		
	中生代	白垩纪	65	裸子植物时代	爬行动物、恐龙时代
		侏罗纪	137		
		三叠纪	205		
			250		
	古生代	二叠纪	295	孢子植物时代	两栖动物时代
		石炭纪	354		
		泥盆纪	410		鱼类时代
		志留纪	438		海生无脊椎动物时代
		奥陶纪	490		
		寒武纪	543		
元古宙	新元古代	震旦纪	680	藻类出现	低等无脊椎动物出现
		南华纪	800		
		青白口纪	1 000		
	中元古代	蓟县纪	1 400		
		长城纪	1 800		
	古元古代		2 500		
太古宙	太古代		3 800	原核生物出现	
冥古宙			4 600		

成宙、代、纪、世四级时间单位,进行了系统性的编年。这就是“地质年代表”(表3-1)。在地球发展的每一个阶段,都有一定的地壳运动和生物演化特征,并形成了一定的矿产。

(一) 冥古宙与太古宙

38 亿年前的冥古宙,是地球演变的早期阶段。在距今38亿~25亿年的太古宙,地球已经形成了薄而活动的原始地壳,出现了水圈和大气圈;地表起伏不大,几乎全为海洋覆盖。当时岩浆活动剧烈,火山喷发频繁。原始生命就是在这一时期的海洋环境中逐渐形成的。太古宙是重要的成矿时代,尤以铁矿为主,例如我国的鞍山铁矿。

(二) 元古宙

元古宙距今25亿~5.4亿年。在元古宙,地球表面仍以海洋占绝对优势,地壳运动剧烈,地表起伏增加,导致陆地规模不断扩大,后期形成了若干稳定的陆地。

生物在元古宙得到进一步发展,从原核生物到真核生物,从单细胞到多细胞,出现了藻类、海绵等低级的多细胞生物,后期还出现了褐藻及红藻等高级藻类。

(三) 显生宙

距今5.4亿年以来的显生宙有丰富的地层和化石资料,对其认识

比较细致。显生宙分为古生代、中生代和新生代。

● 古生代 距今5.4亿~2.51亿年前的古生代,海洋仍占绝对优势,直到古生代晚期,发生了规模巨大的地壳运动,陆地面积进一步扩大,形成了南北互相联结的联合古陆。

早古生代是以三叶虫为代表的海生无脊椎动物空前繁盛的时代(图3.9)。晚古生代出现了鱼类,并日趋繁盛(图3.10)。接着,鱼类逐渐演化为两栖类。

在植物方面,早古生代仍然以海生藻类为主,晚古生代则形成了以相当繁盛的蕨类植物为代表的陆生植物群。由于绿色植物大量出现,地球大气已接近现代水平。因为茂密的森林常有一定的地质作用下形成煤层,所以晚古生代成为重要的成煤时代。

● 中生代 距今2.51亿~0.65亿年前的中生代,构造运动剧烈而频繁。由于板块运动,联合古陆分裂(图3.11a)、漂移,逐步接近现代海陆分布的总格局。这一时期爬行动物高度发展,尤以恐龙占优势(图3.11b)。中生代晚期出现了始祖鸟,爬行动物的一支开始向鸟类发展。裸子植物繁盛,成为当时主要的造煤植物,因此中生代也是重要的成煤时代。



图 3.9 寒武纪海洋景观复原



图 3.10 泥盆纪自然景观复原



距今2亿年前



图 3.11a 联合古陆分裂

现在



图 3.11b 侏罗纪自然景观复原



恐龙和恐龙化石

恐龙是中生代称霸地球的爬行动物，种类繁多，体形和习性相差很大（图3.12～图3.15）。近200年来，世界各地发现了数量繁多、类型多样的恐龙化石。中国的第一具恐龙化石骨架于1939年出土于云南省禄丰县沙湾东山坡，命名为许氏禄丰龙。

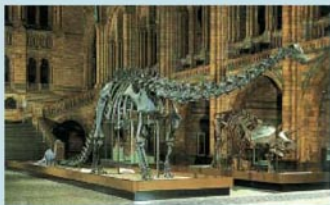


图3.12 晚侏罗纪的梁龙（伦敦自然历史博物馆）
最长的蜥脚类恐龙，体长30～50米，大多以蕨类植物为食。



图3.13 霸王龙（加拿大皇家泰利尔博物馆）
站立者为肉食的霸王龙，卧倒者为素食的有角恐龙。



图3.14 白垩纪的翼龙



图3.15 翼龙的生活景观复原

● 新生代 0.65 亿年前至今的新生代发生了剧烈的地壳运动，形成了现代地势起伏的总格局。联合古陆继续分裂、漂移。在距今二三百万年的第四纪，出现了气候寒冷的时期，称为第四纪冰期。该时期陆地上冰川覆盖面积加大，海面下降一百多米。

出现的被子植物在种类和数量上都迅速增加，爬行动物衰退，哺乳动物迅速发展（图3.16），出现了灵长类。大约在第四纪初期，古代猿类的一支，开始向人类方向发展，地球的历史进入了新阶段。



图 3.16 新生代自然景观复原



思考

1. 用图表概括各地质年代的地壳运动特征、成矿规律和生物演化过程。
2. 化石研究表明，距今 6 500 万年前，统治地球达 1 亿多年的各种恐龙全部灭绝了。试分析恐龙灭绝的原因。（提示：首先从气候变化找原因，然后进一步推测气候变化可能是由什么原因造成的。）
3. 有学者提出，将自 18 世纪晚期开始的“人类世”列为最新的地质时期。这是因为自工业革命以来，人类活动已经成为一种重要的地质营力，需要从新的视角来考察今天的地球系统，也就是“人类世”。说说你的看法。



活动

- 组织一次研究性学习，重塑恐龙时代的地理环境，包括当时的地壳运动、岩浆活动、成矿规律、气候和生物演化等。
1. 分工协作。每个成员负责探究恐龙时代的一个方面，或地壳运动，或岩浆活动，或矿产形成，或气候，或动植物等。
 2. 各成员就负责的子课题，到网上和图书馆等处查阅有关资料，并进行概括总结。
 3. 组织讨论交流，并在此基础上写出有关恐龙时代的地理环境的课题报告。

第二节 板块构造学说

基于大陆漂移和海底扩张学说发展起来的板块构造学说,是目前被普遍接受的大地构造学说。地球现代的海陆分布和地势起伏的总格局,是近几亿年来地球岩石圈及其板块不断运动的结果。板块运动使岩层发生了构造变形,形成了各种地质构造,导致地表起伏增加,构成了地球陆地的基本轮廓。

大陆漂移和海底扩张

(一) 大陆漂移

翻开世界地图,我们会发现大西洋两岸大陆轮廓具有惊人的互补性。例如,如果把南美洲大陆向东移动,几乎可以和非洲大陆拼在一起(图 3.17)。

20 世纪初,德国学者魏格纳从大西洋两岸大陆轮廓的互补性中得到启发,进一步搜集资料,发现大西洋两岸大陆的地质、地质构造、古生物化石等均有密切联系。例如,美国阿巴拉契亚山的褶皱带,它的东北端没入大西洋后,伸展至英国西部和中欧一带复出。再如,中龙是一种营淡水生活的小型水生爬行动物,既见于巴西的石炭/二叠纪地层,也出现在南非的同类地层中。迄今为止,世界上其他地区都未曾找到这种动物化石(图 3.18)。



图 3.17 大西洋两岸轮廓的互补性



中龙



舌羊齿植物

图 3.18 在南美洲和非洲找到的化石(复原示意)

1912年,魏格纳提出了大陆漂移学说。他认为3亿年前地球表面存在一个联合古陆(图3.11)。这个大陆在2亿年前开始分裂,由较轻的花岗岩类组成的大陆在较重的由玄武岩类组成的海底上漂移,直至形成现代的海陆分布。



思考

1. 在图3.11的联合古陆中,辨认各大洲的大致位置。
2. 地处热带、亚热带的南美洲、非洲、澳大利亚、印度等地广泛分布着3亿年前冰川作用的遗迹,而在冰雪覆盖的南极洲则有着丰富的煤藏。请分析原因。



阅读

地球磁极的变化

地球具有磁场。在地质年代里,地球磁场曾多次翻转(南、北极互换)。岩石在形成过程中因受当时古地磁场的磁化而获得磁性,并保存下来。根据各个地质时代岩石保存下来的磁性可以确定当时古磁极的位置。地球科学家发现,按不同地质时代地层磁性推断的古磁极位置有相当大的变化,而且时代越久远,古磁极的位置偏离现代磁极的位置就越远。

(二) 海底扩张

第二次世界大战后,海底地貌与地质调查广泛开展,获得了丰富的资料和成果。

● 洋中脊

通过声纳探测发现,各大洋底都存在以裂谷为中线的带状隆起,称为洋中脊或海岭。洋中脊贯穿于世界各个大洋。大西洋和印度洋的海岭正好位于两大洋的中央(图3.19)。

● 海沟

在大陆边缘,伴随着岛弧或海岸山脉,延伸着深度一般大于6 000米,甚至10 000米以上的深海沟,尤以太平洋西部最为典型。海沟附近的火山、地震等构造活动非常强烈,而且从海沟向着大陆方向,地震的震源越来越深。这说明沿海沟存在着向大陆倾斜的巨大断裂带。



图3.19 大西洋的洋中脊

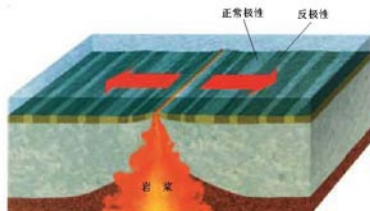


图 3.20 海底磁条带

● 海底磁场

海底古地磁研究表明,洋中脊两侧的海底,大体对称地分布着一系列磁条带,每个条带与相邻条带的磁化方向相反(图 3.20)。

● 海底沉积物

深海钻探证实,由洋中脊向两侧,深海沉积物从无到有,从薄到厚,而且年龄越来越老,但不老于 1.7 亿年。

根据这些资料,地球科学家们提出海底扩张学说。该学说认为,海岭是新的大洋底诞生处。地幔物质从海岭的巨大开裂处涌出,并冷却凝固,形成新的大洋底。这个过程持续进行,海岭处的大洋底以每年几厘米的速度向两侧不断扩张。当扩张中的大洋底遇到大陆边缘时,便俯冲到大洋底中,形成了海沟(图 3.21)。

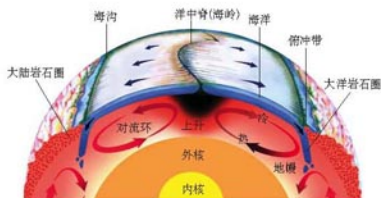


图 3.21 海底扩张模式



思考

1. 海底扩张学说是怎样解释第二次世界大战后海底地质调查工作中四项发现的?

2. 海底扩张学说和大陆漂移学说有什么相互联系?

板块构造学说

20 世纪 60 年代以后,地球科学家在大陆漂移和海底扩张学说的基础上结合对岩石圈和软流层的新认识,提出了板块构造学说。板块构造学说的基本思想体现在以下几个方面。

第一,固体地球上层由性质显著不同的两个圈层组成,上部是刚性的岩石圈,下部是塑性的上地幔软流层。

第二,全球岩石圈被海岭、海沟等构造带分割成六大板块,即太平洋板块、亚欧板块、印度洋板块、非洲板块、美洲板块和南极洲板块(图 3.22)。各大板块又包含许多小的板块,例如印度洋板块分为印度板块和澳大利亚板块。板块浮在塑性较强的软流圈上蠕动。

第三,板块内部相对稳定,边缘由于板块相互作用而成为构造活动强烈的地带。根据相互间作用的不同,板块边界可分为三种类型:分离型板块边界、汇聚型板块边界和平错型板块边界。



图 3.22 六大板块分布示意

● 分离型板块边界

两侧板块相互分离，软流圈物质上涌，冷却凝固形成大洋板块新的部分（图 3.23）。洋中脊和大陆裂谷（例如东非大裂谷）即属此类。这里火山活动比较频繁，浅源地震比较活跃。

● 汇聚型板块边界

两侧板块相向运动而相互挤压、碰撞（图 3.23）。在海沟处，大洋板块俯冲到大陆板块之下，消亡于地幔之中，使大陆板块边缘相对隆起，形成海岸山脉或岛弧。在两个大陆板块碰撞处，往往形成高大绵延的山脉。例如喜马拉雅山脉是印度板块和亚欧板块互相碰撞的结果。大多数汇聚型板块边界处，火山、地震活动频繁。

● 平错型板块边界

两侧的板块相互剪切移动，通常没有板块的生长和消亡（图 3.23）。

板块运动决定了全球地质作用的总格局，形成了地球表面起伏形态的“粗毛坯”。

是什么力量驱使板块运动呢？一般认为是由软流层地幔对流引起（图 3.21）。在对流上升的地方，涌出地幔物质并冷却凝固，推动两侧板块分离。在对流下降的地方，板块俯冲或碰撞，使板块局部消亡。

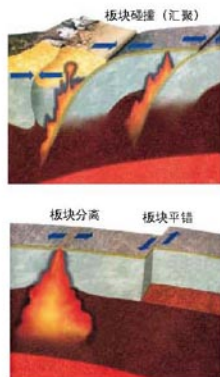


图 3.23 板块边界类型



活动

1. 试用板块构造学说解释大陆漂移和海底扩张现象。
2. 根据图3.24分析世界地震分布的规律。用已学地理知识在图中勾画出世界主要山脉的分布。

要山脉的分布。

3. 通过具体实例,说明板块运动对地表形态影响的总趋势,例如,形成高山、高原、盆地和深谷等。

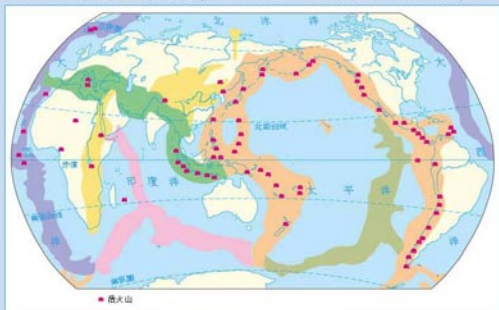


图 3.24 世界主要地震带分布示意图

地质构造

板块运动使岩层变形,形成地质构造。这里,变形是相对于水平层状而言的。现今地质构造及地表起伏的总格局是由板块运动造成的。根据岩层变形情况,地质构造分为褶皱构造(图3.25a)和断裂构造(图3.25b)。

受板块运动产生的强大挤压作用,岩层发生一系列的弯曲

变形(褶皱),即褶皱。褶皱山脉岩层的形态和规模大小,能反映当时板块运动的强度和方式。

如果板块运动产生的强大压力或张力作用超过岩层的强度,会使岩层发生断裂,形成断裂构造。断开的岩层沿断裂面没有明显相对位移的叫做节理,有明显相对位移的叫做断层。



思考

读图3.25的两幅岩层图。分析思考:两地岩层各有什么特点?岩层的变形是如何形成的?



图 3.25 岩层受力产生的变形

大规模的断裂往往发生于一系列密集的破裂面或破碎带,形成断层带或断层破碎带。

在地貌上,有些断层常常形成平直的陡崖。但是,这些断层很难保存下来,因为断层地带岩石破碎,容易受风化和侵蚀。因此,在断层地带常常有沟谷发育,有时出现泉和湖泊。



阅 读

圣·安得列斯断层

位于美国西海岸的圣·安得列斯断层,陆地部分长度在1 500千米以上。这条断层由太平洋板块和美洲板块相对运动而形成,自中生代迄今始终在活动,累计平移幅度已达684.2千米。1906年4月18日严重破坏旧金山市的大地震,就是沿着这条断层发生的。除平移外,该断层也有垂直方向的位移。由于下伏岩性不同,断层两边的植被和地形有明显的差异(图3.26)。

图 3.26 圣·安得列斯断层



在自然界中,断裂构造往往错综复杂。同一地区有多条断层,形成各种复合构造形态。其中,较为典型的是地垒(图3.27)和地堑(图3.28)。我国的庐山、泰山等,是地垒式块状山地。我国的渭河平原、汾河谷地和东非大裂谷等是地堑式凹陷谷地。地堑和地垒常常共生,两个地堑之间形成一个地垒,两个地垒之间形成一个地堑。



地垒是两侧被断层围限,中间上升的断块构造,常形成块状山地。

图 3.27 地垒示意



地堑是两侧被断层围限,中间下降的槽形断块构造,常形成狭长的凹陷地带。

图 3.28 地堑示意



图 3.29 某地地质剖面

思考

读图3.29,如果在甲处和乙处钻井,哪一处有可能钻到煤层?说明理由。



活动

一、图3.30是某地岩层水平分布图。图中,实线为岩层分界线,虚线为等高线;英文符号为地质年代的代码,其中 P_2^1 、 P_2^2 分别表示晚二叠纪早、晚两个时期, T_1^1 、 T_1^2 、 T_1^3 分别表示早三叠纪早、中、晚三个时期,K表示白垩纪。

1. 试画出A—B垂直剖面上的岩层分布情况。
2. 尖峰处是什么地质构造?说出判断依据。
3. 该处形成山峰的原因是什么?

二、组织一次野外地质考察。

1. 观察岩层,描述岩层的倾斜方向和倾角的大小。
2. 观察向斜、背斜和断层等地质构造及其与地表形态的关系。
3. 观察岩石与矿物,采集岩石、矿物标本。
4. 寻找化石。

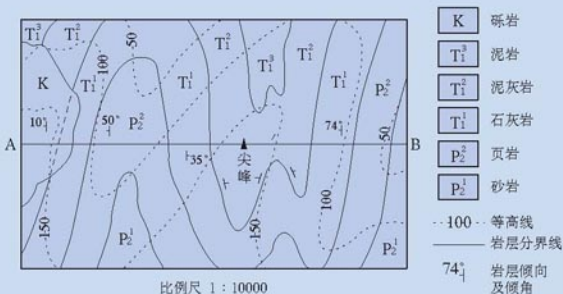


图 3.30 某地岩层水平分布

第三节 地表形态的变化

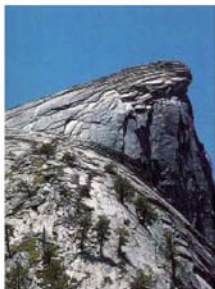
板块运动提供了地表起伏形态的“粗毛坯”，而外力则对这个“粗毛坯”不断地进行雕刻与塑造，减缓地表起伏，形成了各种地貌。

地表形态又称地貌，它是在内力作用的基础上，由流水、风力、冰川和波浪等外力作用雕塑地表的结果。这些外力把风化、侵蚀的产物搬运到低处沉积下来，总体来说将地表削高补低，同时雕塑出千姿百态的地表形态。

风化作用

风化作用是地表岩石，在地面温度变化、水、大气和生物等影响下，发生的机械崩解和化学变化（图 3.31 和图 3.32）。

风化作用的产物有的溶解于水，随水流失。不溶解于水的物质残留在地表，形成风化壳，为侵蚀作用创造条件。



岩石表层和内层热胀冷缩的差异，使岩石产生风化裂隙，或出现片状剥落。

图 3.31 岩石的机械风化和崩解



a 生物使岩石崩解



b 生物使岩石化学分解

图 3.32 生物对风化的影响



思考

1. 裂隙中充满水分的岩石，如果气温反复在 0°C 上下变化，将会发生什么样的结果？
2. 花岗岩主要由石英、长石和云母三种矿物组成，三者的热膨胀系数不同，在频繁的气温变化下将会产生什么结果？

3. 想想看, 图 3.32b 中的地衣为什么能在岩石表面生长? 其营养物质来自哪里? 它在生长过程中对岩石会产生什么影响?

侵蚀作用

流水、风力、冰川和波浪等外力, 不断对风化产物或出露地表的岩石进行破坏, 这种作用称为侵蚀作用。侵蚀作用形成侵蚀地貌。

(一) 流水侵蚀

流水能带走地表松散物, 溶蚀可溶性岩石, 携带的泥沙在流动过程中还能对岩石进行磨蚀。

● 坡面流水侵蚀

坡面流水在沿坡向下流动过程中, 形成许多小股流, 冲刷着坡面, 形成浅而密的沟槽 (图 3.33)。

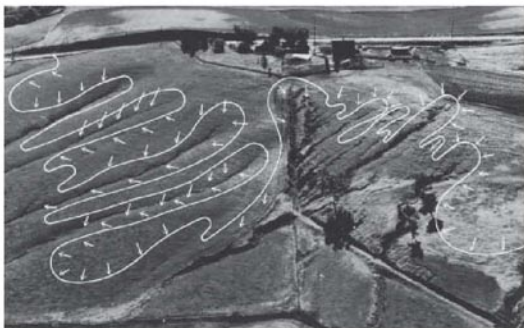


图 3.33 坡面流水侵蚀
图中箭头表示水流方向。



思考

坡面物质组成和结构、植被覆盖度和坡度大小对坡面流水侵蚀作用的强弱有什么影响?

坡面流水侵蚀使沟槽不断下切, 形成沟谷。沟坡还会发生崩塌、滑坡等重力作用, 使沟谷不断加宽、合并, 最终坡面被切割得支离破碎。我国黄土高原地区的坡面流水侵蚀十分典型。

黄土地貌

黄土地貌是典型的坡面侵蚀地貌。我国的黄土高原是世界上黄土分布最广、厚度最大和黄土地貌最为典型的地区。黄土是第四纪形成的一种淡黄色粉砂质土的堆积物。一般认为,如此广而厚的黄土,系由强劲的西北风把亚洲内陆广大干旱区的大量粉砂搬运到黄土高原堆积而成。黄土结构疏松,垂直裂隙多,极易受坡面流水的侵蚀。黄土高原沟谷发育,沟道稠密,地面破碎,千沟万壑。



a 黄土塬 (陕西洛川)

黄土塬为顶面平坦宽阔的黄土高地,其顶面平坦,周围被沟谷深切,为最高的黄土堆积面。



b 黄土梁 (陕西延安)

黄土梁为长条状的黄土丘陵。



c 黄土峁 (陕西安塞)

黄土峁为沟谷分割的穹状或馒头状黄土丘。

图 3-34 几种典型的黄土地貌



思考

黄土高原上的千沟万壑,除了自然因素的影响外,还有人为因素的影响。想想看,有哪些人为因素?应该如何治理黄土高原的水土流失?



活动

观测流水侵蚀过程

选择一个多雨的季节,在空地上用泥土堆成一座坡面平整的模拟山丘。每周观测一次,并做好观测记录。观测一段时间后,看看山丘的高度、底部直径和坡面形态发生了什么变化。

● 河流流水侵蚀

河流流水侵蚀河流的谷底和两岸，形成河流侵蚀地貌。不同河段侵蚀情况不尽相同。在河流的上中游和山区，河流通常狭窄湍急，以对谷底的侵蚀和向源头方向的侵蚀为主。在河流的中下游河段和平原地区的河流，河宽流缓，流水主要侵蚀河流的两岸。

在河流弯曲部位，流水侵蚀尤为明显。河流的凹岸水流深，流速大，冲刷严重；凸岸水流浅，流速慢，多泥沙沉积(图3.35)。结果就是河流越来越弯曲，变成S形，进而演化成一串正相接的Ω形。当曲流的底部两弯太接近时，河水就可能裁弯取直，导致两弯连接。遗留下的废河道，变成了牛轭形的湖泊。



a 黄河龙羊峡(V形谷)

山区河流对谷底的侵蚀强烈，往往形成很深的V形峡谷。



b 钱塘江河谷阶地

在河流侵蚀过程中，可能遭遇构造运动等变动，形成河谷阶地。



c 珠江曲流

图 3.35 几种典型的河流侵蚀地貌

河流越弯曲和裁弯取直，使得河谷越来越宽阔，形成横剖面呈槽形的宽谷。

案 3 例

“九曲回肠”的荆江

长江中游荆江河段，河道弯曲，素有“九曲回肠”之称，河道形状经常变化，当河道弯曲到一定程度，就会发生自然裁弯取直。荆江河床高悬，遇到较大洪水时，容易泛滥成灾。在这里，人工裁弯取直是维护河道的最方便的办法(图3.36)。



图 3.36 荆江河道变迁



思考

荆江河段为什么多洪涝灾害？试根据该河段地貌特征，提出防御洪涝的措施。

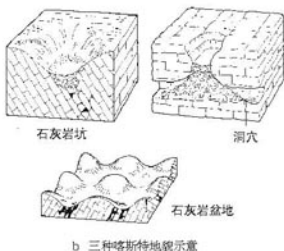
● 流水化学溶蚀

组成地壳的岩石有一部分是可溶性岩石，包括碳酸盐岩类、硫酸盐岩类和卤酸盐岩类等，其中以石灰岩为主的碳酸盐岩类的岩石分布最为普遍。石灰岩中的碳酸钙在水和二氧化碳的作用下可形成碳酸氢钙：



这个反应是可逆的，当反应向右进行，表现为流水的化学溶蚀作用；当水中二氧化碳含量减少，反应向左进行，形成碳酸钙沉淀，表现为流水的化学沉积作用。

在石灰岩广泛分布的地区，经流水化学溶蚀和化学沉淀，以及流水冲刷、搬运和重力崩塌等，形成了一种奇特的地貌类型——喀斯特地貌（图 3.37）。



b 三种喀斯特地貌示意

a 喀斯特溶洞

溶洞由地下岩石经化学溶蚀形成。溶洞内富含碳酸氢钙的水渗出洞顶，在一定条件下生成碳酸钙沉淀下来，形成石笋、石钟乳和石柱等地貌。



图 3.37 喀斯特地貌

案例 4

桂林山水和云南石林

喀斯特地貌风景秀丽，在我国尤以桂林山水和云南石林最为著名（图 3.38 和图 3.39）。

广西东北部，以桂林为代表，素有“山水甲天下”之美誉。境内喀斯特地貌发育，孤峰、峰林环布，溶洞数以千计。云南石林位于昆明东南部，占地总面积 400 平方千米，晚古生代形成的上千米厚的石灰岩和白云岩，受流水溶蚀，形成类型多样的石林地貌景观，石林中的石柱形态各异，奇峰兀立，或如利剑刺空、古塔群立，或如高墙壁立，异常壮观和奇特。



图 3.38 桂林峰林地貌



图 3.39 云南石林



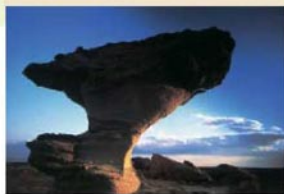
思考

1. 搜集资料, 比较地上和地下喀斯特地貌的特点和成因。
2. 根据化学方程式 $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, 分析溶洞内石笋和石钟乳等的成因。

a 风蚀坑(克拉玛依附近)



b 风力磨蚀作用形成的风蚀蘑菇(克拉玛依附近)



(二) 风力侵蚀

在干旱和半干旱地区, 风不仅能将地表的松散沉积物或风化产物吹走, 而且风携带的物质还能对地面进行磨蚀, 有时磨蚀能力还很强。风力的侵蚀, 加上岩性差异等因素的影响, 可形成风蚀坑、风蚀蘑菇、风蚀柱、风蚀雅丹等风蚀地貌(图 3.40)。

c 风蚀雅丹(罗布泊)

雅丹, 维吾尔语原意为“陡壁的小丘”指土状沉积物形成的地面。经风化作用、间歇性流水冲刷和风蚀作用, 形成与盛行风向平行、相间排列的风蚀土墩和沟槽。



图 3.40 三种典型的风蚀地貌



思考

风蚀蘑菇因形似蘑菇而得名, 想一想为什么下部细, 上部粗?



阅读

甘肃敦煌雅丹国家地质公园

位于甘肃敦煌市西北约180千米处的敦煌雅丹国家地质公园, 是我国雅丹地貌最典型的地区。这里属于甘肃和新疆交界的地方, 靠近罗布泊。公园内连片地分布着各种各样造型奇特的风蚀雅丹地貌, 宛如一座中世纪的古城。夜幕降临之后, 尖厉的劲风发出恐怖的呼啸声, 因此, 又名魔鬼城。

（三）冰川侵蚀

在高山和高纬地区，气候寒冷，地表常被冰雪覆盖。这些冰雪经过挤压和重新结晶，并在重力作用下缓慢地运动，形成冰川。在第四纪冰期，冰川鼎盛时，全球大约有1/3的陆地被冰川覆盖。在运动过程中，巨厚的冰川能像推土机一样，把松动的石块挖起并带走；这些岩石碎屑冻结于冰川的底部，加大了冰川对底部地面的磨蚀。冰川的侵蚀，塑造了多种多样的冰蚀地貌（图3.41）。

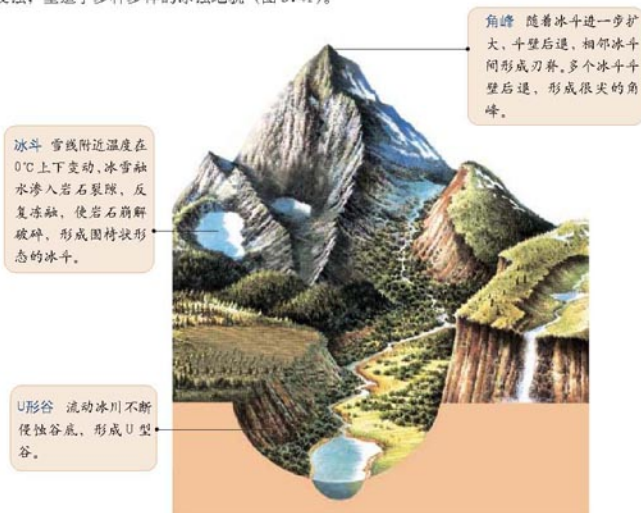


图3.41 冰川侵蚀地貌

（四）波浪侵蚀

在海岸地带，波浪具有很强的侵蚀能力。一方面，波浪本身的巨大冲击力对海岸产生强烈的破坏作用；另一方面，海水携带的岩石碎块也有磨蚀作用，形成了独特的波浪侵蚀地貌（图3.42）。



a 海蚀穴(山东南长山岛)

在海崖坡脚较为脆弱的部位,受波浪冲刷可形成海蚀穴(或洞),海蚀洞不断扩大,引起上方岩石崩塌,形成海蚀崖。



b 海蚀平台

海蚀崖进一步发育后退,则在海岸带留下向海微倾的海蚀平台。



c 海蚀拱桥

突出在海中的岬角,如果两侧发育相向的海蚀洞,经长期侵蚀而相互贯通,就形成海蚀拱桥。



d 海蚀柱

海蚀拱桥进一步遭受侵蚀,拱桥顶发生崩塌,残存的桥墩成为残留于海中的柱状岩体。

图 3.42 海蚀地貌

搬运作用

流水、风力、冰川和波浪等外力,在对风化产物和岩石进行侵蚀的同时,还能把风化、侵蚀的产物搬运到其他地方。

(一) 流水搬运

流水的搬运能力取决于流速。据测定,被搬运的球状颗粒物的重量与起动它的水流流速的6次方成正比。



思考

如果河流流速增加1倍,可以带动的球状颗粒的重量可以增加到几倍?

在一些山区,暴雨发生时,雨水浸透堆积在斜坡或沟谷中的松散碎屑物质,使其稳定性降低。在适当地貌条件下,在自身的重力作用下,这些饱含水分的碎屑物质沿斜坡或沟谷流动,会形成泥石流。

世界上输沙量最大的河流——黄河

黄河是世界上著名的多泥沙河流,平均年输沙量和年含沙量均居世界各大河的首位。黄河总沙量的90%来自中游黄土高原地区的黄河支流;80%以上的泥沙来自汛期。特别是在暴雨期,常常形成高含沙量的洪水。

(二) 风力搬运

在干旱、半干旱地区,缺少植物的保护,风力搬运作用强烈。一般来说,风速越大,搬运的颗粒越粗,移动的距离越远。在风沙流中,被搬运的沙粒主要集中在近地面层,随着高度的增加,含沙量骤减。



阅 读

沙 尘 暴

在植被稀疏的干旱和半干旱地区,每当大风天气,风可将沙尘扬起形成沙尘暴天气,表现出风力强大的搬运作用。我国西北部是沙尘暴较为严重的地区,主要发生在冬春两季。强劲的风沙暴还会向东南方向扩散,影响更多的地区(图3.43)。

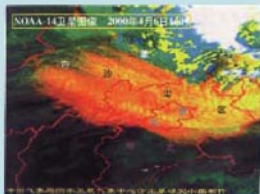


图 3.43 一次源于内蒙古的沙尘暴

思考

根据风力的侵蚀和搬运作用特点,如何采取措施防治沙尘暴?

(三) 冰川和波浪搬运

冰川搬运能力极强,巨石和沙粒均可被冻结在一起搬运。冰川不仅能将冰碛物搬到很远的地方,还能将巨大的岩块逆坡搬运到很高的部位。在第四纪冰期,冰川曾把斯堪的那维亚半岛上的巨砾搬运到千里之遥的英国等地,称为漂砾(图3.44)。

波浪搬运只在近岸浅水带内发生,搬运能力和波浪强弱有关。波浪越强,搬运能力也越强。

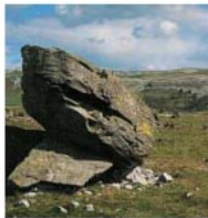


图 3.44 冰川漂砾



思考

1. 风力、流水、冰川和波浪的搬运作用各有什么特点?它们主要分布在什么地区?
2. 如果风速、流速降低,冰川融化,被搬运的物质将会怎样?



a 冲积扇

沟谷流水流出沟谷或山区河流流出山口后,由于流速突然降低,所携带物质在谷口按密度和颗粒大小先后沉积,形成以山麓或谷口为顶点,向开阔低地展布的扇状地形,称为冲积扇。

b 冲积平原

河流携带的泥沙进入低地,因为水流流速减缓,导致泥沙大量堆积而形成的平原,称为冲积平原。



c 三角洲

河流流入海洋或湖泊,流速急剧降低,携带的泥沙在河口附近逐渐沉积,使陆地逐渐外延,形成三角洲。



图 3.45 几种典型的河流堆积地貌



思考

钱塘江自古以清澈而闻名。想想看,钱塘江入海口为什么没有形成三角洲?

(二) 风力沉积

当风速降低或遇到障碍物时,风携带的颗粒物将沉积下来,形成沙丘等风积地貌。沙丘有各种各样的形态,新月形沙丘是其中典型的一种(图 3.46)。

沙丘如果没有植被的固定,就会在风力作用下形成流动沙丘。流动沙丘会侵吞农田,埋设房屋,侵袭道路等,使沙漠扩大,造成很大的危害。



图 3.46 新月形沙丘

思考

根据图 3.47, 分析回答:

1. 移动沙丘迎风面和背风面的坡度有什么不同? 这对确定主导风向有什么作用?
2. 沙丘结构中的层理(图中阴影状斜线)和风向有什么关系?

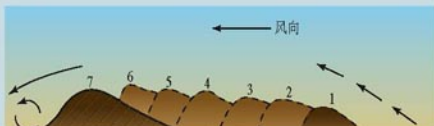


图 3.47

案例 6

塔克拉玛干沙漠

塔里木盆地是我国最大的内陆盆地, 气候极端干燥, 盆地中心为塔克拉玛干沙漠。塔克拉玛干沙漠是世界第二大流动沙漠。塔克拉玛干沙漠中流动沙丘的面积很大, 沙丘高度一般在 100~200 米, 最高达 300 米左右。沙丘类型复杂多样, 呈新月形、鱼鳞状、角锥状等, 变幻莫测(图 3.48)。



a 西部的鱼鳞状沙丘



b 南部的角锥状沙丘



c 东部的复合型新月形沙丘

图 3.48 塔克拉玛干沙漠中的沙丘

（三）冰川沉积

冰川在搬运过程中，由于气温升高而消融，携带的物质就地沉积（图 3.49）。由于这些物质是大小混杂夹在冰川中被搬运，而且相互之间缺少磨擦，因此，冰川沉积物具有大小混杂、棱角分明的特点。



a 蛇形丘

冰川消融后，冰川携带的沉积物显露，形成细长蜿蜒的高地。



b 锅穴

冰川沉积物中挟带的冰块融化后，沉积区域塌陷，形成圆形洼地。

图 3.49 两种冰川沉积地貌



思考

在野外如何判断沉积物是古代冰川的沉积物？

（四）波浪沉积

波浪运动受阻或波浪水流动力减弱，沿岸水流携带的泥沙产生沉积，形成各种海积地貌，例如海滩等。海滩往往是度假娱乐的场所。

每一种地貌都是多种外力、多种过程综合作用的结果，但各种外力作用并不是均衡分布的，在每一种特定的地貌类型的形成过程中，往往是以某一种外力为主，而且侧重于风化、侵蚀、搬运和沉积中的一种或几种作用过程。



阅读

中国的海岸地貌

海岸地貌包括海蚀地貌和海积地貌。海岸地貌的发育，受到波浪、构造运动和陆地河流注入、潮汐作用、生物等因素的影响。例如，珊瑚虫和其他造礁生物形成珊瑚礁海

岸；红树林与沼泽滩涂相伴组合形成红树林海岸。

中国海岸线漫长，海岸地貌多种多样，主要分为三种类型。

一种是平原海岸地貌，主要分布在杭州湾以北地区，主导外力是波浪堆积作用（图 3.50）。平原海岸有多种类型：有河流泥沙堆积的三角洲海岸，例如，黄河三角洲；有缺乏泥沙堆积的三角湾海岸，例如，杭州湾等；有淤泥质平原海岸，例如，渤海湾等。

另一种是山地丘陵海岸地貌，主要分布在杭州湾以南的东南沿海地区，少数分布于北方地区。在这里，波浪侵蚀地貌（图 3.51）和堆积地貌都广泛发育。

第三种是别具一格的生物海岸地貌，大致分布在我国北回归线以南。它是在平原海岸与山地丘陵海岸的基础上，因珊瑚礁发育或红树林丛生而形成的（图 3.52）。



图 3.50 平原海岸（渤海湾）



图 3.51 海蚀海岸（福建）



图 3.52 红树林海岸（深圳）



活动

长江沿线的地貌类型及其变化

形成河流地貌的主导外力是河流，其他外力如波浪和河岸崩塌等，也给河流地貌增添色彩。在这些外力侵蚀、搬运和沉积的综合作用下，形成了河流沿线丰富多彩的地貌。

长江是我国第一大河，发源于唐古拉山的各拉丹冬雪山，源头的沱沱河和通天河河谷较为宽广，水流平缓，河道弯曲，多叉流。从直门达到宜昌的长江上游河段多峡谷。著名的长江三峡河段，谷坡陡峭，河床险滩林立，暗礁密布。长江中游荆江河段，河道“九曲回肠”。长江中下游平原，河谷宽广，地势低平。长江注入东海时，形成了著名的长江三角洲。

到网上和图书馆等处查阅长江沿线有关的地貌资料，分别就长江的源头、上游、中游、下游和入海口讨论：

1. 各河段的主要地貌类型及其主要特征。
2. 各河段的外力作用类型在主次上有什么变化。

后 记

根据教育部制订的普通高中各科课程标准(实验),人民教育出版社课程教材研究所编写的各学科普通高中课程标准实验教科书,得到了诸多教育界前辈和各学科专家学者的热情帮助和大力支持。在各学科教科书终于同课程改革实验区的师生见面时,我们特别感谢担任教科书总顾问的丁石孙、许嘉璐、叶至善、顾明远、吕型伟、王梓坤、梁衡、金冲及、白春礼、陶西平同志,感谢担任教科书编写指导委员会主任委员的柳斌同志和编写指导委员会委员的江蓝生、李吉林、杨焕明、顾泠沅、袁行霈等同志,感谢担任学科顾问并审稿的陈述彭、陈尔寿、王恩涌、赵济、邬翊光、吴履平同志,感谢审图的马宗尧同志,并在此感谢所有对本套教材提出修改意见、提供过帮助和支持的专家、学者、教师和社会各界朋友。

我们还要感谢使用本套教材的实验区的师生们。希望你们在使用本套教材的过程中,能够及时把意见和建议反馈给我们,对此,我们将深表谢意。让我们携起手来,共同完成教材建设工作。我们的联系方式如下:

电话:010-64016109

E-mail: jcfk@pep.com.cn

人民教育出版社 课程教材研究所
地理课程教材研究开发中心

谨向为本书提供照片的单位和人士致谢

海南出版社(图1.1,图1.2,图1.32,图1.38,图1.44); Holt S.&T. (图1.3,图1.5,图1.7,图1.36,图3.7,图3.8,图3.17,图3.25b,图3.26,图3.31,图3.32,图3.37a,图3.45c); 万里书店(图1.4,图1.48,图2.4,图2.5,图2.7,图2.16,图2.17,图2.18,图2.19); 朱京(图1.11); 朱光良(图1.12,图1.14,图1.20,图1.22,图1.29a,图1.34,图1.43,图1.46,图2.12,图2.26); 李立华(图1.23); Seeds, M.A. (图1.28); Space Imaging, Inc. (图1.31); Prentice Hall (图1.33,图1.41,图1.47,图2.3,图2.9,图2.24,图2.32,图3.3,图3.5,图3.9,图3.10,图3.11,图3.16,图3.46); 世界知识画报社(图1.35); 中国大百科全书出版社(图2.13); 冯凭(图2.15); 辽宁教育出版社(图3.12,图3.14); 浙江少儿出版社(图3.13,图3.15); 高维明(图3.25a); Marsh, W.M. (图3.33); 中国画报(图3.34,图3.35,图3.38,图3.39,图3.40b~c,图3.42a,图3.50,图3.51,图3.52); 陕西人民美术出版社(图3.40a); Widdowson, J. (图3.42b~c); Grant, N. (图3.42d); Oxford University Press (图3.44) John Wiley (图3.45a); 吴敏(图3.49)。