

◎第1章

圈层地球的诞生

由于深藏地下,我们对脚下的地球的了解可以说是知之甚少。但是,圈层结构的地球——固体内核、液态的内核外层、熔融态地幔的岩浆层和板块结构的外壳,就像是“千层饼”,又像是面点师傅费力揉制出来的酥麻烧饼,各具内容,各具特色。

地球的锻造恰似面点师揉面的过程。从细微颗粒的面粉,到加水之后的小团颗粒,再到一个个面团……它们相当于形成地球的“星际介质”,气体、尘埃颗粒,再到一个个“星子”。刚刚揉合在一起的面团,从内部到表面都是粗糙的,需要面点师不断地揉制,加水、加力、加(能)热量,才能使面团整体均匀、有层次,表面成型。“星子”碰撞初期的地球,从内部到表面比现在粗糙得多,锻造的手段也要“霸气”得多,从外部小行星的“轰炸”,到内部的岩浆喷涌,火山爆发……所以,地球的锻造不是出自于面点师,而是来自于太阳辐射、陨石撞击和火山喷发。岩浆的熔化、冷却,再熔化、再冷却,塑造了整体成型的、圈层的地球。

这样的一切,一定是惊心动魄的。似乎我们的祖先也意识到了什么,所以才有了夸父逐日,后羿射日的故事……

“夸父与日逐走,入日;渴,欲得饮,饮于河、渭,河、渭不足,北饮大泽。未至,道渴而死。弃其杖,化为邓林。”

夸父逐日(见图 1.1),无论他是想把太阳摘下来,还是不想让太阳落入西方的大海里,都是感觉到了人类生存、地球锻造需要太阳的存在。他喝干了河水,弃杖为林,造福后代。这个故事也暗示了我们地球上河流、大山、大川的形成过程。



◎图 1.1 夸父逐日、后羿射日的故事说明,早期地球的诞生是多么的惊天动地

后羿射日，传说中的 10 个太阳被他射下来 9 个。我们设想，并不一定天上就真的是有 10 个太阳，漫天蔽日的小天体轰击造成的效果也和 10 个太阳差不多。这也说明，早期地球的变化是多么的“惊天动地”。

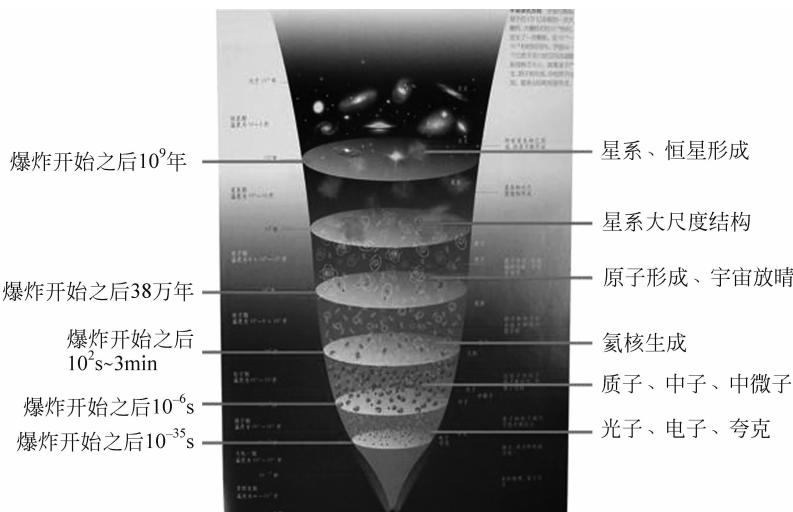
1.1 太阳“出来”啦！

1.1.1 当前的宇宙被称为“物质宇宙”，起源于 150 亿年前的宇宙大爆炸

那么，锻造地球的原始物质是从哪里来的呢？这个故事我们还是要从宇宙的开端——宇宙大爆炸讲起……

据认为，我们目前的宇宙应该是起源于 150 亿年前的一次宇宙大爆炸（膨胀）——BIG BANG。最新的探测数据表明爆炸具体发生在 137 亿年前。在爆炸之前，宇宙是一个广阔无垠的“能量海”，充满了以能量形式存在的基本粒子。不知什么原因，在宇宙的能量海里被激起了一朵“浪花”（被称为“奇点”）之后，这朵“浪花”就开始像波浪一样传播开来，在宇宙中不断地膨胀、膨胀……直到目前，膨胀还在进行中。

随着宇宙的不断膨胀，其密度和温度都开始降低，大约在爆炸开始之后的 3min，最早的宇宙物质开始形成（见图 1.2）。这些物质主要是氦和氢，它们是产生恒星的基本物质。

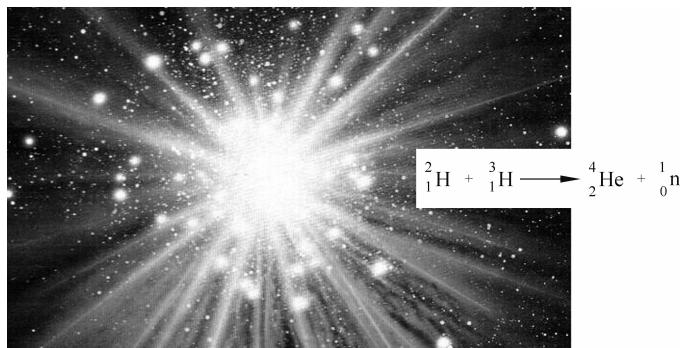


◎图 1.2 宇宙开始冷却后，宇宙物质以光子、电子、夸克开始，逐渐形成了质子、中子、原子核等物质，从而构成星际物质的大尺度结构，直到恒星的诞生

1.1.2 太阳是恒星中的“第二代”

组成恒星的物质,来源于宇宙冷却之后形成的原初元素(氢和氦)。它们构成了第一代恒星,其特点是元素中最轻的氢和氦占了恒星物质的绝大部分。

我们知道,恒星是经由热核反应而产生能量的。能量释放的同时,也会形成新的物质(元素)。总体来说,这是一些不断地由“轻”元素合成为“重”元素(见图1.3)的过程。这些过程发生在恒星体的内部,合成出的“最重”的元素是铁(相对原子质量52)和镍(相对原子质量56)。比它们更重的元素,由于合成时需要更高的温度和压力,所以只能在恒星的爆炸过程中合成产生,比如新星和超新星爆炸时就会产生金、铂等重元素,还有就是中子、质子数较多的放射性元素铀、钍和钴,等等。



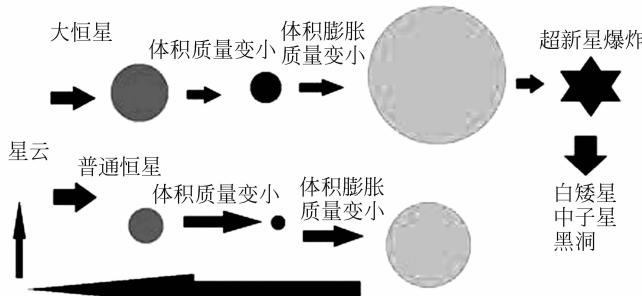
◎图1.3 宇宙大爆炸时,产生了宇宙中的氢和氦。其他的“重”物质来源于恒星的热核反应,“更重”的物质来源于超新星爆发

恒星的产生来源于宇宙中的“星际物质”。它们凝聚、合成、压缩,不断地旋转汇聚在一起,汇聚、物质塌缩产生的重力势能转化为热能,当中心的温度达到热核反应所需要的温度时(一般是400万K以上),恒星就会被点燃,开始发光、发热。

第一代的恒星产生于大爆炸时期,据观测,目前宇宙中存在着年龄超过120亿年以上的恒星。它们就是由宇宙的初级产物氢和氦构成的。太阳的物质组成比起第一代恒星来多了许多的重物质,这就说明,太阳是第一代恒星经历超新星爆炸之后的产物。而正是这些爆炸之后再聚合的物质,构造了我们的地球!

1.1.3 太阳是太阳系家族的主宰

在整个太阳系中,太阳的质量占到了太阳系整体质量的99.865%。这也可以说为,在太阳系中几乎就是太阳决定了一切。所以,谈论地球、行星、太阳系的演化,都需要先了解太阳,也就是恒星的演化过程(见图1.4)。



◎图 1.4 恒星的演化基本上是一个从星云再回到星云的循环过程：星云—原恒星—主序星—红巨星—(白矮星、中子星、黑洞)—星云

恒星的演化过程和它的质量有很大的关系，特别是在恒星演化的最后阶段，也就是死亡阶段。一般认为，恒星的一生会经历四个典型的过程：引力收缩阶段、主序星阶段、红巨星阶段和晚期阶段。

4

1. 引力收缩(原恒星)阶段

此阶段分为两个过程进行。

(1) 星云坍缩为原恒星。这是由星际物质形成原恒星(胎星)的过程，可以称之为恒星的婴儿期。星际物质的成分主要是氢，质量百分比占到 70%，其次是氦，不足 27%，还有极少量的氧、碳、氮等，其密度极小，但体积和质量巨大。此过程中引力起支配作用，表现为物质处于自由下落状态的快收缩过程。星云的密度增大，温度升高，当核区温度升高到 2000K 时，氢分子开始分解成氢原子，同时吸收大量的热量，促使中心区域坍缩为一个体积更小、密度更大的新内核，也就是原恒星。

(2) 原恒星进而坍缩为恒星(相当于恒星的幼儿期)。这是一个慢的收缩过程。当所有分子氢都离解完时，吸热机制消失，但收缩仍在持续进行，而原恒星物质所受到的引力(向内)与辐射压力(向外)近乎势均力敌。收缩使热量增加，其中一部分辐射逸出原恒星外，其余部分使原恒星物质的温度进一步上升。当温度升高到 700 万 K 或更高时，核区开始出现氢聚变为氦的热核反应，此时慢收缩过程结束，而原恒星便演变为一颗真正的恒星——主序星。

2. 主序星阶段

主序星阶段的恒星相对稳定，时间周期也很长。此过程是恒星内部以氢聚变成氦为主要能源的发展阶段，是恒星的“青年时代”，也是恒星一生中最长的黄金阶段，占据了它整个寿命的 90%。这段时间，恒星整体稳定，向外膨胀和向内收缩的两种力大致平衡，恒星基本上不收缩也不膨胀，并且以几乎不变的恒定光度(所谓“光度”就是指从恒星表面以光的形式辐射出的功率)发光发热，照亮周围的宇宙空间。但在其内部进行着剧烈的氢核聚变为氦核的反应，核反应产生的热能全部用

于热辐射和电磁辐射及微粒子辐射。在恒星中心的氢耗尽时会逐渐形成一个不再产能的氦核，其温度不再改变，被称为同温氦核。当同温氦核的质量达到恒星质量的10%~15%时，同温氦核开始顶不住星体的自吸引，氦核会猛烈坍缩，释放出巨大的引力能。能量的一部分用于氦核加热，另一部分辐射到外部使恒星外壳急剧膨胀。此时的恒星表面温度虽有下降，但由于表面积急增，恒星光度仍在增大，于是恒星开始从主序星向着红巨星方向发展。不同的恒星停留在主序星阶段的时间随着质量的不同而相差很多。质量越大，光度越大，能量消耗也越快，停留在主序星阶段的时间就越短。

3. 红巨星阶段

红巨星阶段相当于恒星的中年期。由于热核反应中氢的燃烧消耗极快，恒星中心形成氦核并且不断增大。随着时间的延长，氦核周围的氢越来越少，当氢消耗殆尽时，热核反应就开始减弱了，相应的向外辐射也会减弱。辐射和引力间的平衡被打破，作为失去平衡的直接结果，是星核由于引力作用开始收缩，收缩的星核温度又迅速升高。高温的星核又加热了恒星外层的大气，使得恒星外层向外膨胀，恒星的体积变大。恒星膨胀后，它的大气的温度迅速降低到4000K左右，由于处在这样低温的恒星发出的光是偏红的，所以这时的恒星演变成了一颗红巨星。红巨星的外层大气虽然在膨胀和冷却，但它的星核却由于引力而在收缩形成镜像反应，核的密度和温度在不断升高。

当星核温度超过1亿K时，星核中的氦元素被点燃，发生以氦为原料的核聚变。这种氦核聚变为碳核的反应进行得很快，放热更多，致使氦核停止坍缩，红巨星也因此能稳定一个短时期，例如太阳能在红巨星阶段停留几亿年。由于氦核的聚变反应历时较短，燃烧产能不足以维持巨大的辐射，红巨星又开始收缩，表面温度虽有升高，但总的光度变小，标志着恒星演化进入了生命的最后阶段。

4. 晚期(白矮星、中子星、黑洞)阶段

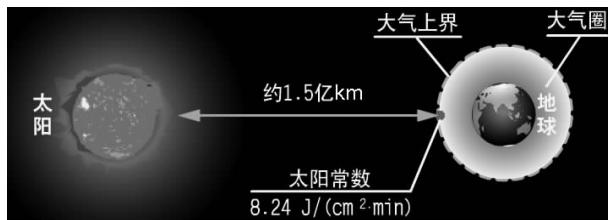
红巨星阶段后，恒星进入“晚年”。此时的恒星是很不稳定的，直至某一天它会猛烈地爆发。到那时，整个恒星将以一次极为壮观的爆炸来结束自己的生命，把自己的大部分物质抛射向太空中，重新变为星云，同时释放出巨大的能量。这样在短短几天内，它的光度有可能会增加几十万倍，我们称之为“新星”。如果恒星的爆发再猛烈些，它的光度增加甚至能超过1千万倍以至1万万倍，这样的恒星叫做“超新星”。这就是著名的“超新星爆发”。恒星经过抛射大量物质后所留下的致密核心可演化成三种不同形态的新星体。理论计算表明，如果核心质量小于1.4倍的太阳质量(称为钱德拉塞卡极限)，它可能演化为白矮星；如果核心质量小于2.3倍的太阳质量(奥本海默极限)，它可能演化为中子星；而核心质量大于3.2倍的太阳质量时，它就有可能演化为黑洞。就这样，恒星来之于星云，又归之于星云，走完了它辉煌的一生。

1.1.4 太阳带给了我们什么？

如果只需要用简单的一句话来回答这个问题，那就是——太阳带给了我们（地球）一切！

第一，太阳系的形成是以太阳为核心的。太阳最初形成时产生的巨大的吸引力形成了太阳系的核心部分，然后再形成星盘和行星环。据理论推测，大行星等太阳系天体就是行星环破裂、碰撞、凝聚的结果。

第二，太阳系的形成、地球的形成和演化都需要太阳持续地提供能量。比如，地球早期形成时期的火山喷发、早期海洋和大气的形成，都需要太阳持续不断地作用。即使是目前在太阳和地球都处于稳定演化的阶段，太阳的能量也是维持地球和人类存在的根本（见图 1.5）。



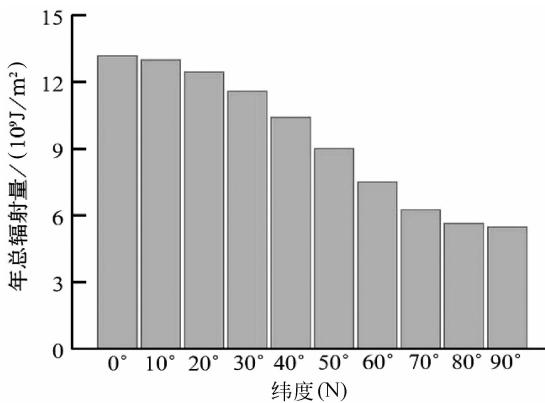
◎图 1.5 太阳为地球提供了巨大的能量。在地球大气的上界面上，太阳每分钟为每平方厘米的大气界面提供 8.24J 的能量，这称为太阳常数

第三，地球演变的进程中，对地球影响最大的事件可以认为是地质年表中所说的冰期和间冰期。研究表明影响它们的形成和演变的多种因素中，天文学的因素占了主导地位，具体来说应该是太阳和地球之间的轨道变化造成了冰期和间冰期的周期性变化，而它们大大地影响了地球的演化进程。你只需要简单地看一下下面这张图表，就能体会到太阳的“威力”（见图 1.6）。

第四，地球上能被我们察觉到的最明显的变化，莫过于气候和气象的变化。风雨雷电、洋流、气流的形成归根结底都是太阳的影响。对人类生活影响越来越大的厄尔尼诺现象，据研究就与太阳的周期性活动密切相关。

最后，我们不要说太阳在她的晚年会变成红巨星，体积会膨胀到“吞没”地球，我们只需注意一下太阳黑子的周期，太阳耀斑对地球大气、海洋的影响等。即便最近获得人们更多关注的全球变暖现象，也和太阳的活动有着极大的关系。

所以，这本书在谈论地球的演变之前让大家先重视太阳，是极其必要的。这就像饮水思源一样，地球的演化、地球上发生的各种各样的事件，根源都是太阳。太阳带给了我们一切！



◎图 1.6 地球上不同纬度接收太阳能的情况

1.2 球体地球的形成

地球是一个球体,这似乎在很早的远古时代就被人所知,教科书中还出现了类似“海面上远方的来船”等现象的证明。但是,最初的地球胚胎并不是标准的球体,而是类似现在的小行星那样的无规则形状。最后,经历了长久的演变之后,质量和体积都明显增大(动力学知识告诉我们,自然的球体形状需要达到一定的质量和体积才能形成),地球才会具备目前的“标准”的球体形态。

1.2.1 类地行星 类木行星 “星子理论”

太阳系中有八大行星,它们按照属性被分为了两大类:类地行星和类木行星。

类地行星:体积小,质量小,公转速度快,离太阳近,彼此间距小,卫星数量少,有岩石表面,密度大。

类木行星:体积大,质量大,公转速度慢,离太阳远,彼此间距大,卫星数量多,无岩石表面,密度小。

在最远的类地行星火星和最近的类木行星木星之间,存在着众多形状不规则,质量和体积都很小的小行星,总体称为小行星带。这些小行星实际上就是我们下面要谈到的,组成大行星,尤其是类地行星的最初物质——星子。

太阳系的演化被称为“星云假说”,而我们称大行星形成的过程为“星子理论”。

由星云假说来看,形成太阳系的最初的原始星云团(见图 1.7(1))经过旋转、收缩之后,核心的温度升高,压力增大,最终形成了太阳。星云团在自转的过程中,赤道部分的自转速度更大,也就更能够吸引星云物质。当参与自转物质的离心力等于核心对它们的吸引力时,这些物质就会留下来形成星云盘(见图 1.7(2))。早

期形成的星云盘有着巨大的半径,物质分布也由于自转线速度的不同而呈现出越靠近星云团中心(太阳)密度越大的趋势,这样就构成了沿星云盘半径分布,密度逐渐减小的星云物质(盘)。随着太阳的不断演化,太阳辐射(太阳风)的逐渐加强,这些沿太阳系半径分布的物质逐渐被“规划”分解为一个个星环带。星环带中存在的就是一些我们称为“星子”的小天体,它们类似于目前存在于“火木小行星带”的那些小行星。随着星云团半径的增加,每个星环带中的星子的大小和质量以及物质成分是不太相同的。比如地球所在的环带,星子最大的直径不会超过1000km。沿着星云盘半径向外的方向星子的密度逐渐减小,总体数量也逐渐减小,但它们依然围绕着太阳公转(见图1.7(3))。

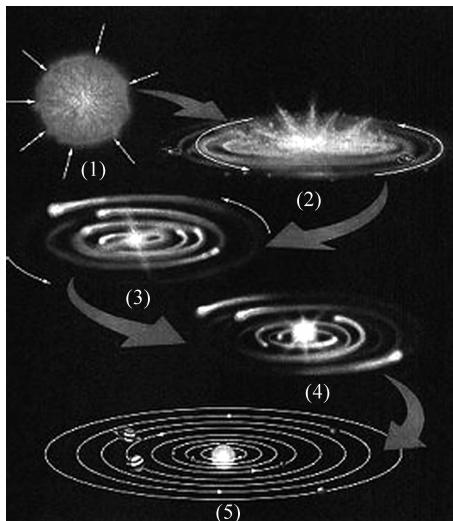


图1.7 大行星形成星子理论简图

- (1) 星云团开始收缩; (2) 星云团中心形成太阳,其他物质构成星云盘; (3) 星云盘中的物质按密度分布形成星云环; (4) 星云环中的“星子”在环绕太阳公转的同时相互碰撞; (5) 碰撞使得星子汇聚形成大行星

处在各个星云环中的星子会相互吸引、碰撞(见图1.7(4)),最终的“胜者”形成大行星(见图1.7(5))。

这一理论是符合目前太阳系天体的属性的,也就是符合太阳系天体的三大共性:共面、同向、近圆。大行星轨道共面(因为它们都产生于星云盘之中);相对太阳的公转同向(它们属于同一个星云团);轨道近圆是因为太阳引力和自转离心力共同作用的结果。

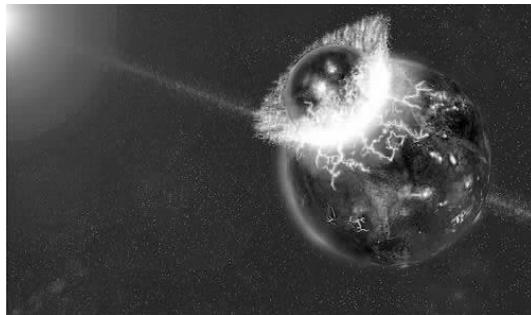
而星子理论最有力的证据,就是火木小行星带的存在。在小行星带之内,靠近太阳的类地行星质量较大、密度较高,相互碰撞之后比较容易聚合成一个整体——固体大行星。在它之外的类木行星由于物质密度低,星子的质量小,所以只有它们

的核心形成了固体的结构,而核心之外则吸引了大量的星际气体和尘埃,构成了基本是气体的类木行星。火木小行星带中的星子,质量和体积都不足以产生能够将它们凝聚在一起的引力,所以至今依旧漂浮在它们的轨道带上……

1.2.2 弱肉强食 大鱼吃小鱼

我们所重点关心的,当然是地球所处的星云环中所发生的故事。据分析,在星云环开始形成时,处于环中的星子应该有上百万之多,它们的大小、形状都有很大的不同,而且由于环带的范围较大,在环带内边缘更靠近太阳的地方,星子物质的密度、质量应该更大些。在共同环绕太阳运转的过程中,星子之间相互吸引、碰撞的现象密集发生,不断地呈现出“大鱼吃小鱼”“弱肉强食”的激烈场面。最终的结果就是,作为强者的地球诞生了!

在这些密集发生的碰撞中,有一次碰撞被认为对地球的形成和演化起到了决定性的作用,那就是一颗被称为 Theia 的天体与地球之间的碰撞(见图 1.8)。据报道,科学家已经找到了这次碰撞曾经发生过的证据。

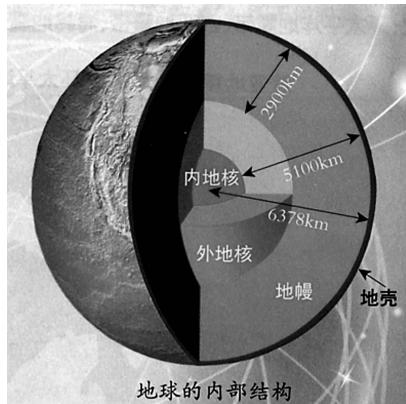


◎图 1.8 大约 45 亿年之前,一颗差不多有火星大小的小天体(星子)与地球剧烈相撞

据推算,这颗小天体应该和目前的火星差不多大小。所以,也有一些人把这次碰撞形容成“火星撞地球”。事件应该是发生在地球形成的初期,距现在 45 亿年左右。那时的地球虽然已经初具球形,但是不论是形状、由里及外的物质构成以及自转、公转速度等都极其不稳定。Theia 小天体可以说是“劈头盖脸”地迎面撞击上了地球,撞击的结果是,地球几乎被一分为二,而 Theia 则是真正地被一分为二了。

Theia 小天体的一分为二,关系到了地球的形成和演化中的两个关键性问题。第一,地球内核(见图 1.9)强大的磁场的产生;第二,我们的卫星——月球的产生。

太阳的年龄是 50 亿年左右,在太阳诞生之后的 3 亿~4 亿年,地球开始形



◎图 1.9 各种迹象显示,地球核心存在固体的内核和液体的外核两部分

成,也就是距今 46 亿~47 亿年的时候。最初形成的地球的胚胎,物质是比较严格地沿深度分层的,温度和压力也是梯度分布的。这些现象从太阳系现有的类地行星金星和火星上也能推测出来。但是,像地球现在这样具有固态的内核心和包围内核心的液态圈层,而且两者的自转速度不一样现象,应该是“非自然”形成的结果。也就是说,就像某些研究者所认为的,Theia 星(子)在与地球相撞后,的确是被一分为二了,而且它核心的大部分密度高的物质是直达原来地球的内核心的。而由于碰撞速度极快,压力极大,产生的温度也很高,所以才形成了原有的地球核心变为液态物质围绕 Theia 星形成的固态内核分布的状态。当然,这些还只是推测。可是,巨大的地球磁场的产生却是来源于地球内外核心的相互耦合作用的。

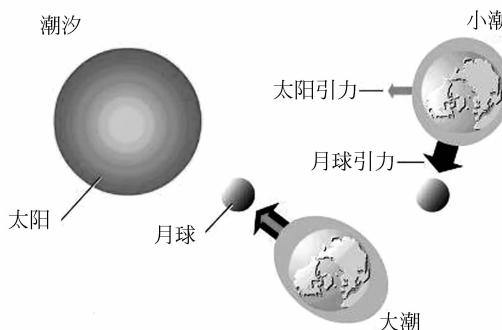
碰撞的第二个重大的影响,就是月球的产生。月球的诞生被认为有三大类说法,而其中的“分裂说”(月球原来是地球的一部分,而且正好是地球上太平洋那里的一部分,某一天,这一部分飞出去了,形成月球;留下来的“大坑”形成太平洋)和“姐妹说”(地球和月球是在一起孕育生成的)都被事实否定了。更多的证据支持“母女说”,也就是地球“俘获”了月球,获得月球的芳心之后,使得月球围绕着地球公转。现在,一些学者认为,俘获说还是正确的,只不过这一次的“俘获”并不是那么的“脉脉含情”“温文尔雅”,而是真正的“惊天动地”“改头换面”。也就是说,“俘获”是以激烈碰撞的形式发生的(就像是抢亲),碰撞之后,Theia 星(子)一分为二,或者是一分为很多!但其中密度大的核心部分形成了地球核心的固体部分,而撞碎的,或者说密度小、质量轻的部分组合成了现在的月球,这也就能够解释,为什么地球的平均密度($5.5\text{g}/\text{cm}^3$)要高于月球的平均密度($3.8\text{g}/\text{cm}^3$)的现象。

1.2.3 月亮露面了

月亮，洁白圆润，是地球的伴侣、地球的卫星。世界上的许多民族都有月亮崇拜，特别是中国人对月亮的情结尤为深重，因为没有了月亮，我们很难想象李白、杜甫等大诗人怎么能够构想出那么美的诗句。当然，许多人都知道，月亮的作用比这个可要大得多。你会说潮汐、月亮周期、月亮照明……玩笑了，实际上我们真的可以说，没有月亮就没有地球，也就没有生命！

那么，月亮的产生和存在对地球有些什么影响呢？

你肯定首先想到的就是潮汐。是的，潮涨潮落就是来自于月球产生的引潮力（见图 1.10）。



◎图 1.10 月亮和太阳的万有引力作用对地球产生引潮力，它们三者之间的相互位置决定了海潮是大潮还是小潮

不过，月亮最初形成时地球上的海洋还没有出现。月亮对地球的引力作用主要体现在使地球的自转变慢和地球的自转轴变稳定这两个方面。而它们对地球早期的演化都起到了决定性的作用。

据推算，早期地球的自转速度很快，自转一周需要 10 小时左右，这样的速度不仅不可能产生海洋、大气、生命，而且过快的自转速度会使得地球自身很不稳定，随时存在着分裂的可能。月亮的出现使地球自转变慢，整体变得更加稳定。

我们知道金星和天王星都是“躺着”绕太阳公转的，其原因就是它们身边没有足够的天体（卫星）引力的“牵引”，以抵消其他大行星对它们自转轴的引力。你可能会说，金星没有卫星，可是天王星有卫星呀。但是相对于天王星的大质量，它的卫星的作用还是太小了。而我们的月亮相对地球来说足够大，完全可以抵消其他大行星对地球赤道处物质的引力所可能产生的地轴偏转。但是，由于太阳和木星有着太大的质量，地轴在它们的引力下还是会摆动，而月球和地球一起构成了很稳定的地月系体系，这就使得地球自转轴的摆动幅度很小（只有 1.3° 的摆幅）。这种摆动体现在火星上面是 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 的变化，原因就是火卫一和火卫二太小了。

由于有了月球的引力作用,地球的自转速度明显降低,地球本身的引力也就有所加强。地表的温度也得以逐渐下降,这样,火山喷发和小天体撞击产生的气体和液体就可能被存留在地球表面,最终形成海洋和大气。

图 1.10 展示了月亮的引潮力会产生潮汐的“大、小潮”,这样就会造成地球表面明显的海水流动。而海水的大范围流动是产生洋流、海流的必然原因,它们左右了地球上的能量交流和气候的变化,比如我们后面要提到的大气的“西风带”和“墨西哥暖流”等。

更加重要而且很少为人所知的是,海水的潮涨潮落会产生巨大的摩擦力,这种海水对地壳,再加上地壳对地幔的摩擦力,是促使地幔保持一定的温度,使其始终处于熔融态的原因之一。而如果没有这样的摩擦生热,地幔的温度降低,岩浆就可能凝固变为固体,还可能带动地核的温度降低,这样地球的自转就可能会停下来,最起码产生地球磁场的地球内外核的转动会变慢或者会停下来,那么地球磁场将会消失,地球的电磁屏障就会消失……太阳风、小行星等就会呼啸而来!

这样看来,早期的地球就像一个血气方刚的小伙子,体力充沛、活力无穷,但是缺少了自我控制和调配的能力。而月亮的出现,就像是在小伙子身边多了一位知情达理、善良体贴的少女,使得小伙子安稳了下来。而他们组成家庭更是体现了地月系体系的和谐。近期,有人声称月球受到的地球引力变小了,月球正在慢慢地远离地球。地球会失去月亮吗?我们大可放心,天体的运行都遵循着一定的规律,在现在的时间周期,月亮是在远离地球,而下一个时间周期,它就会靠近地球,就像是小夫妻吵嘴……

1.3 地球像鸡蛋?

地球和月亮可以说是“先结婚、后恋爱”。因为一次偶然的机会它们相遇(撞)了,相撞的结果构成了地月系,也就是组成了一个家庭。但是地球也好、月亮也好,都要在今后的日子里经历考验。

1.3.1 地球经历了“月球灾难”

看到这个题目,你可不要理解为“嫁给”地球的月亮对地球发脾气、使小性子啦。之所以称之为“月球灾难”,是因为这一事件首先是从月亮开始的。看看下面(见图 1.11)这张月球的“身份照”,你能察觉出月亮的正面和背面有什么样的差异吗?当然,首先要提醒你,由于地球的引力使得月亮的自转周期等于她的公转周期。也就是说她的自转、公转的周期都是 29.5 天,或者说——月亮很害羞,总是将她的正面给地球。

同样是月球表面,为什么有这样大的差异呢?我们知道,月亮上的那些“麻子



◎图 1.11 月亮的正面就像是一幅画——《吴刚伐桂》？而月亮的背面就是一张标准的“麻子脸”，怪不得月娘娘总是以正面示人……

坑”实际上多是陨石坑，而据考察，它们大多数都是在距今 38 亿~41 亿年期间产生的，是小行星（星子）撞击的结果。也就是说，在地月系刚刚形成时，月亮就遭遇了一场天文学家称之为“后期重轰炸”的密集的小行星撞击。事件发生在距今 38 亿~41 亿年之间，这是美国人的“阿波罗计划”采集的陨石样品的放射性同位素测定得出的结论。这一事件只损伤了月球吗？实际上，包括地球在内的所有类地行星都遭遇了这场空前规模的“大轰炸”，而地球上的“证据”早就被海洋和大气所抹杀了，近似真空环境的月球则保留下了这些陨石坑。

“大轰炸”发生的原因是类木行星在那一时间段还没有形成，不能产生足够的引力吸引住众多的星子。这些距离太阳比较远的类木行星，由于组成它们的物质较轻（密度较小）、受太阳的引力相对较小，所以它们的形成要晚于类地行星。而在类地行星和类木行星之间的“小行星带”，由于太阳引力、本身质量和木星牵引的关系，不能聚合形成大行星。而大行星，尤其是天王星、海王星形成时，对太阳系引力的结构产生了一定的影响，使得一些接近它们（主要是木星）的小行星被“踢走”，许多是被踢向了太阳，去“轰炸”火星、地球、金星、水星这些早期形成的类地行星了，当然也包括月亮。

那么，这次“大轰炸”与我们早期地球的形成有什么关系吗？我们要说关系很大！前面提到，月亮的出现使得地球的物质发生了“重组”，尤其是使得地球的自转速度明显变慢了，这就使得地球表面的温度下降，据推测应该是从之前的 1000K 降低到了 400K 左右。这样，最初的地壳就得以形成。但是此时被地壳包裹起来的地球物质，分布还是很不均匀的，没有目前所具有的很明显的“圈层”结构。而“大轰炸”不仅为地球带来了进一步物质重组所需要的能量，还把地球表面炸出了一个个直通地球内部的坑（洞），促进了圈层地球的构建。

有人做过测算，“大轰炸”应该持续了 10 亿年左右，从月球陨石坑形成的频率来看，“大轰炸”在刚刚形成的地球表面可以形成：

直径超过 20km 的撞击坑 $\geqslant 22\,000$ 个；

直径约 1000km 的撞击盆地 ≥ 240 个；
直径约 5000km 的撞击盆地 ≤ 10 个。

一般假设地球在约 38 亿年前是处于熔融态的。全球所有已知的最古老的岩石都可以追溯至此年代,未能发现更早期的岩石,仿佛这个年代就是一个“分水岭”。利用不同方法测得的岩石的“年龄”大致上都只能追溯到这个年代,包括最为准确及受干扰最少的锆石铀铅测年法。所以,我们估计“大轰炸”应该是给地球表面做了一次彻底的“整容”,在 38 亿年以前形成的岩石都被重新熔化了,当然在现在的地球表面就找不到它了。

1.3.2 火山爆发造就了均衡的地球

火山爆发(见图 1.12)我们理解为是地球发脾气了,火山爆发造成的灾难有目共睹。可是,很少有人知道,最早期的火山爆发造就了均衡的地球圈层结构;接下来的火山爆发产生了最早的地球大气层;再接下来的火山爆发为地球生命的起源带来了能量和适宜的环境。甚至有的理论认为生命是在火山喷发的岩浆中产生的。



◎图 1.12 许多人认为火山喷发是地球巨人发脾气了,是恶魔的“喘息”。实际上,火山是地球演变的“大功臣”,地球的每一个时期,都有火山的贡献

我们知道,火山爆发会把地幔,甚至地心的热量带到地球表面。而最初形成的地球是急需这些热量的。第一,太阳刚刚形成时,她的发光能力要比现在低了大约 30%,而地壳(表)是需要足够的热量来维持它的动态的,否则就会像土卫五一样是一个冰冻的星球;第二,持续、顺畅的热量交换,使得刚刚形成的地球不仅仅是能保持地壳(表)不会太冷,还能够通过热能的输出使得地心不至于过热,这样容易保持地球形态和运动的稳定性;第三,热能的传输是自下而上的,而由于早期地球表面很薄、很不稳定,也会有物质随着热流再返回到地下甚至地心,这样就形成了一个热流的循环过程,同时也是一个地球物质流的循环过程。循环的结果就是使地球

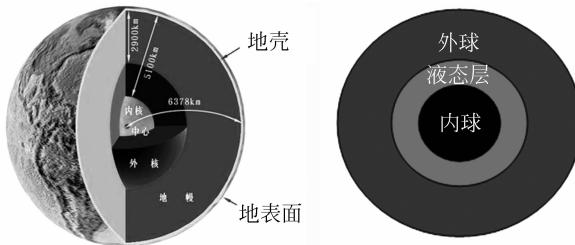
的物质分布变得越来越均匀,力学结构也变得越来越合理,使地球从其结构和运动的角度来说越来越稳定,最终形成了目前这种稳定的圈层地球。

那么,这么多的热量是从哪里来的呢?刚刚说了,是从地心而来。那地心的热量又是从哪里来的呢?一般认为来源于地球本体的有两个,一个是球体地球形成时,引力势能的收缩转化为热能;另一个我们前面提到过,太阳属于第二代恒星,包含了足够多的重元素,其中就有许多的放射性同位素,它们的质量很大,在地球形成时被沉降到了地心周围,而它们放射性衰变所释放的热能就是地心热量的第二个来源。

小行星频繁的撞击使动能转化为热能,也为早期的地球带来一定的热量。当然,最重要的热量来源依然是太阳。

1.3.3 地心(核) 地幔 地壳

地球包括地心(核)、地幔、地壳。地球的结构(见图 1.13)真的就像一个鸡蛋吗?



◎图 1.13 地球的结构和形态还真的很像一个鸡蛋,不过应该更像是一个还没有完全煮熟的鸡蛋。他有坚固的固体外壳、熔融态的地幔、固态(外面包裹着一层液态磁流层)的地核,他要比鸡蛋更圆,他有自转,还会绕着太阳公转,还有着对我们非常重要的生物圈、水圈、大气圈

《地心漫游》是伟大的科普作家凡尔纳的经典作品,它是作家的幻想和猜测。实际上,对于神秘的、距离我们可以说是比天外的恒星要近得多的地心,我们对它的了解和认识要比恒星还少。大概也只能是靠幻想和猜测了,因为遥远的恒星还会带给我们它发出的电磁波,而研究地球内部的结构,目前最多的办法就是依靠地震波。

1. 地心(核)

由地球的总体密度来推测,地核的密度应该很大。我们知道地球的平均密度大约是 $5.5\text{g}/\text{cm}^3$,而我们能测量、接触到的地壳的密度也就是 $3.8\text{g}/\text{cm}^3$ 左右,这样来说,地核的密度要很大才是。

据推测,地核可分为内核和外核,其物质组成以铁、镍为主。内核是由在极高压力(最少 350 万 atm($1\text{atm}=101\ 325\text{Pa}$))下结晶的固态铁镍合金组成,温度很高

(约为 6000°C),密度为 $10.5\sim15.5\text{g}/\text{cm}^3$ 。外核可能由液态铁组成,其密度为 $9\sim11\text{g}/\text{cm}^3$ 。

地核的存在为地球的运转持续地提供着热能,而输送热能所携带的电子流正是产生地球磁场的重要原因。

2. 地幔

地幔和地核之间的分界靠的是对地震波的测速,而且我们通过这种方法也把厚度才不到 2900km 的地幔分成了下地幔和上地幔两个部分。它们之间的分界线位于地下 1000km 左右。大部分“深源地震”的震源就是位于这样的深度上,而“浅源地震”的震源多是在 $70\sim100\text{km}$ 深处,基本上是上地幔和地壳的交界处。

岩浆是地幔的主要组成,由火山爆发时喷出的岩浆冷却后就变成了岩石,比如火成岩等。岩浆的形态在接近地壳时是一种类似流体的熔融态,所以在给地球分层时,也会有一个“软流圈”存在,而大部分的岩浆物质呈现出一种可塑性很强的固态。

整个地幔的温度都很高,范围在 $1000\sim3000^{\circ}\text{C}$ 之间,相对温度更高的则是接近地壳的“软流圈”的部分,因为除去地心,这里被认为聚集了更多的放射性物质。整个地幔的压强约为 $50\text{万}\sim150\text{万 atm}$ 。在这样大的压力下物质的熔点会升高,所以地幔物质呈现为可塑性固态或者是熔融态。地幔物质的密度为 $3.4\sim4.7\text{g}/\text{cm}^3$,一直到 $9.0\text{g}/\text{cm}^3$ 之间,基本上是梯次变化的,体现了圈层地球物质分布的均衡性。

3. 地壳

相对地心、地幔来说,对地壳我们可以说是很熟悉了。如果说地心的构成和形态我们需要依靠理论推测,地幔的情况我们主要依赖于地震波,那么对地壳的研究方法就丰富得多了。也可以这样比喻,了解地心的信息我们基本上是靠传说;知道地幔的情况我们可以通过其他人或媒介的介绍;而认识地壳的知识我们就可以亲身考察,或者说就像是去了解一个经常走动的邻居的情况一样,能做到比较切实可行。

地壳就是地球表面,是地球的一个固体外壳,平均厚度约为 17km 。依据厚度和组成成分的差异,我们把地壳分为大陆地壳和海洋地壳两大类。前者的平均厚度约 33km ,高原地区可达 60km 以上;后者的平均厚度不到 10km 。

构成地壳的物质就是岩石了,它们主要有花岗岩、玄武岩、沉积岩3种。花岗岩的密度较小,玄武岩的密度较大,而沉积岩的密度依赖于组成它的沉积物。较重的玄武岩构成了海洋地壳的主要部分,由于它们主要由硅一镁氧化物构成,也称为硅镁层。较轻的花岗岩叠加在玄武岩之上,构成了大陆地壳的主要部分,由于它们主要由硅一铝氧化物构成,也称为硅铝层。沉积岩一般附着在花岗岩之上,不过海洋地壳几乎很少有这样的分布,基本上都是沉积岩直接附着在玄武岩之上,而且厚度比大陆地壳要大。

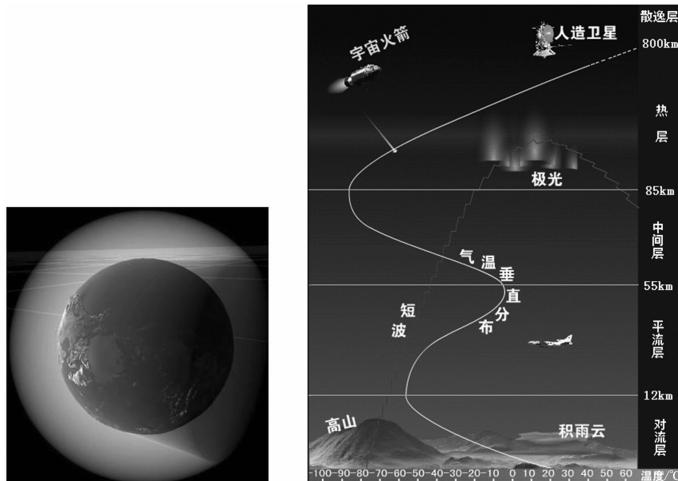
地壳的温度一般随深度的增加而逐步升高,平均深度每增加1km,温度就升高30℃。

1.3.4 水圈 大气圈 生物圈

一般我们把地球分为七个圈层:地心内核、地心外核、地幔、地壳、生物圈、水圈和大气圈,而只有生物圈、水圈和大气圈三者之间是连续分布而无明显分界的。

1. 大气圈

如果我们把地壳看成是地球的固体的外衣(壳),那么大气圈就像是给地球披上的一层薄薄的婚纱(见图1.14(左)),只是它被披在了“新郎”而不是“新娘”的身上(月球没有大气层)。



◎图1.14 披着婚纱的地球(左)和大气圈的结构(右)

我们这里只是从圈层地球结构的角度来介绍大气层,至于地球大气层的来历、演变、组成、作用我们将在下一章中详细介绍。

大气层(见图1.14(右))的厚度一般认为是500~800km,如果考虑到逃逸的大气成分也可以说这个数据会延伸到6400km。不过,大质量的80%聚集在离地面12km左右的范围内,所以一般意义上的大气层也就是指存在于这个范围的对流层。

对流层之上延伸到约55km的高度是平流层,那里的大气相对稀薄,气流以“平流”运动为主。由于有比较稳定的大气环境,所以飞机多在平流层飞行。

55~85km段被称为中间层,它基本上是一个大气层的过渡带。在这里大气的密度和温度都是随高度而逐渐降低的。

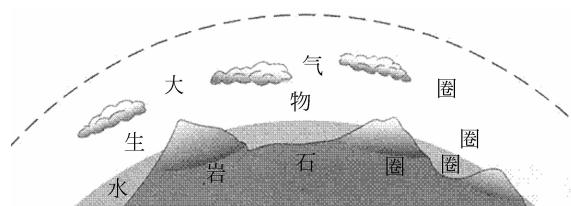
从 85km 到约 800km 称为热层。这一层的温度随高度增加而迅速增加, 层内温度很高, 昼夜变化很大, 热层下部尚有少量的水分存在, 因此偶尔会出现银白并微带青色的夜光云, 在卫星拍摄的地球大气层照片中清晰可见(见彩图 2.1 和彩图 2.2)。

热层以上的大气层称为散逸层。这层空气在太阳紫外线和宇宙射线的作用下, 大部分分子发生了电离, 使质子的含量大大超过中性氢原子的含量。散逸层的空气极为稀薄, 其密度几乎与太空密度相同, 故又常称为外大气层。由于空气受地心引力极小, 气体及微粒可以从这层飞出地球引力场进入太空。散逸层是地球大气的最外层, 对于该层的上界在哪里还没有一致的看法。实际上地球大气与星际空间并没有截然的界限。散逸层的温度随高度增加而略有增加。

2. 水圈

说到水圈, 你一定会想到浩瀚的大海, 那样的深、那样的一望无际; 你可能也会说, “七大洲四大洋”, 地球表面虽说海洋占了 71%, 但是还有陆地呀?

你的理解有误, 我们说的是水圈(见图 1.15), 是在讨论地球的圈层结构, 并不是在讨论海洋。在前面我们说大气圈时估计你就不会产生误解, 因为地球的外表有着一层明显连续的气体圈层存在。而对于地球上的水, 海水是很多, 它占了地球总水量的 97%, 但它毕竟不是全部, 还有河流、湖泊、沼泽, 还有地下水, 还有以各种不同形态存在的水。水, 可以说是无孔不入, 连续地覆盖着地球表面, 构成了宇宙中可能是独一无二的水圈。



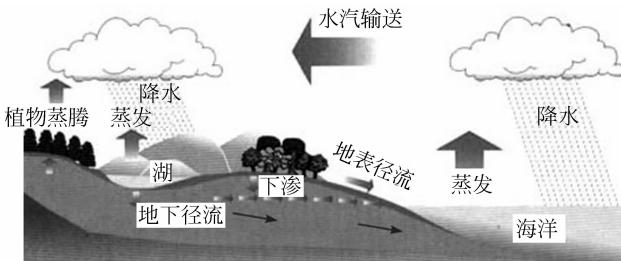
◎图 1.15 大量的水存在于海洋中, 但是水也会存在于大气的云雾中, 也会存在于地下, 也会存在于植物、动物的身体里, 它是一个覆盖地球表面的连续的圈层

水圈中的水大部分是以液态的形式存在的。水的总体积约为 13.86 亿 km³。其中, 淡水占了 2.53%, 咸水占了 97.47%。咸水主要存在于海洋中, 淡水则主要存在于冰川、冰盖和永久性积雪中, 如果它们全部融化的话, 海平面将升高 70m。如果我们能把地球“抹平”成为一个表面平坦的球体, 那它将被 2718m 深的水所覆盖, 那时的水圈是不是就明显啦?

洋流、河流、大气流是水圈中水分交换最活跃的水体(见图 1.16), 可以说它们主宰了地球的气候、气象和环境, 也是地球演化的重要影响因素。

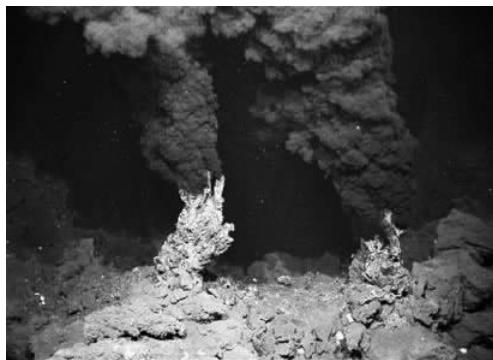
3. 生物圈

生物作为地球的一个圈层应该是最晚形成的。也许有人会问, 地球上所有的



◎图 1.16 自然界中水的主要循环过程,它很容易受到人类的影响

地方都存在生物吗？它们能够构成一个完整的圈层吗？20世纪80年代，海底扩张理论处于争论的高峰期，研究者为了探测海底扩张的情况，对科学家称之为“海底黑烟囱”（见图1.17）的海底热源进行了有组织的探测。在研究采集回来的样本时，采样器中充满了管状蠕虫类生物，甚至还有蛤、蚌类等众多的动物。你要知道，在水深超过4000m的洋底，阳光不可能达到，氧气极其稀少，也就是说，它们不可能是通过光合作用来生存的，它们的能量来源主要是甲烷和硫化氢！这让科学家，也让整个世界大吃一惊，它不仅仅说明地球上生物无处不在，更重要的是，它为生命起源的研究开辟了新的思路。



◎图 1.17 “海底黑烟囱”。这里的水深超过2500m,周围的温度达到了300K,我们依然发现了红蛤、海蟹、血红色的管虫、牡蛎、贻贝、螃蟹、小虾,还有一些形状类似蒲公英的水螅生物

生物圈是一个地球上所有生态系统的整体，是地球的一个完整圈层，其范围大约为海平面上下垂直10km。生物圈不仅仅包含各种生命体本身，它还是结合所有生物以及它们之间的关系的全球性的生态系统，包括生物与岩石圈、水圈和空气的相互作用。生物圈是一个封闭且能自我调控的系统。地球是整个宇宙中唯一已知的有生物生存的地方。一般认为，生物圈是从35亿年前生命起源后演化而来的。

1.4 地质年代

前面的讨论,许多内容涉及了时间,而且是长周期的时间。而这样的讨论,我们一般是以地质年代来叙述的。地质年代,不懂的人会说那是地质学家的事情。稍许懂一些的人会说,地质年代图(表)里的什么“宙、代、纪、世、期、时;宇、界、系、统、阶、带”很让人觉得麻烦。但是,为了认识和彻底了解我们地球的演化,地质年代是我们必须使用而且也很容易使用的一种得力的“工具”。

1.4.1 似乎难懂,但我们一定要搞懂的地质年代

地质年代是用来描述地球历史事件的一种特殊的时间单位,地球物理学、地学、考古学、生物学都经常采用,通常被分为相对地质年代和绝对地质年代两种。研究地壳中岩石的层位叠加和岩石里的古生物化石而指明岩石生成的先后顺序的方法(见图 1.18),被称为相对地质年代;按岩石里放射性同位素蜕变产物含量指明岩石生成年代的方法,被称为绝对地质年代,也可按其方法特点称其为同位素年龄(年代)。



◎图 1.18 地壳中的岩石是按照它们形成的先后顺序叠加在一起的,越在上层的时间离我们越近,埋藏在岩石中的化石就是那个年代的生物代表

最早使用地质年代这一概念的应该是英国人 W. 史密斯,他首先提出了化石顺序律。他指出:①地层越老,所含生物越简单,反之亦然;②不同时代的地层有不同的化石组合。化石就是埋藏在沉积物中的古代生物的遗体和遗迹,例如动、植物的骨、牙、根、茎、叶等,动物的足迹、粪便、蛋,等等。

在他之前,丹麦的地质学家,被誉为“地层学之父”的尼古拉斯·斯坦诺发现了地层分布的 3 大规律。

(1) 地层层序律

- ①叠置原理:下老上新;
- ②原始水平原理:原始的沉积均为水平或近于水平;
- ③原始侧向连续原理:沿水平方向逐渐消失或过渡到其他成分。