



面向 21 世纪 课程 教材  
Textbook Series for 21st Century

# 岩石学

路凤香 桑隆康 主编

地质出版社

1025075

高等教育面向 21 世纪课程教材项目  
国家理科基地创建名牌课程项目 研究成果

高等教育面向 21 世纪课程教材  
Textbook Series for 21st Century

# 岩 石 学

主编 路凤香 桑隆康

编著 路凤香 桑隆康 邬金华 廖群安

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

## 内 容 简 介

本书为高等教育面向 21 世纪课程教材。本教材具有以下特色：在科学性方面，本教材介绍了近 20 年来岩石学的新进展和新理论，增加了地外星球岩石类型的内容，尽力反映岩石研究的思路和经验，使学习者掌握认识岩石的方法，并逐渐培养提出问题、分析问题和举一反三的能力；在基础性方面，本教材介绍的是本学科目前的基础知识和公认的成熟的理论，重点是岩相学，并以此为切入点，介绍岩石成因；在综合性方面，本教材体现了多学科的综合，加强了火成岩、沉积岩和变质岩的有机联系，统一论述三大岩类以及过渡类型岩石（如火山碎屑岩、埋藏变质岩、混合岩）在自然界的地质分布及岩石构造组合，并与大地构造、地球物理、地球化学、地球动力学和环境地质学等学科做适度的交叉；在适用性方面，本教材提供了系统的中英文对照专业术语及索引。各章均附有思考题，适用于地学和非地学专业的学生或技术人员阅读。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

岩石学/路凤香, 桑隆康主编. -北京: 地质出版社, 2002. 8  
高等教育面向 21 世纪课程教材  
ISBN 7-116-03506-0

I. 岩... II. ①路... ②桑... III. 岩石学-高等学校-教材 IV. P58

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 045819 号

---

责任编辑: 郝杰 王璞  
责任校对: 田建茹  
出版发行: 地质出版社  
社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083  
电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324572 (编辑部)  
网 址: <http://www.gph.com.cn>  
电子邮箱: [zbs@gph.com.cn](mailto:zbs@gph.com.cn)  
传 真: (010) 82310759  
印 刷: 北京朝阳区小红门印刷厂  
开 本: 787 × 960 1/16  
印 张: 25.5  
字 数: 480 千字  
印 数: 1—4000 册  
版 次: 2002 年 8 月北京第一版·第一次印刷  
定 价: 25.00 元

ISBN 7-116-03506-0/P·2242

---

凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行处负责调换)

# 第一篇 绪 论

## 第一章 岩石及其地质分布

### 一、岩石及其成因分类

岩石 (rock) 是由矿物或类似矿物 (mineraloids) 的物质 (如有机质、玻璃、非晶质等) 组成的固体集合体。多数岩石是由不同矿物组成的, 单矿物组成的岩石相对较少。岩石, 一般是指自然界产出的, 人工合成的矿物集合体 (如陶瓷等) 不叫岩石, 称作工业岩石, 不在本教材学习的范围。

岩石不仅是地球物质的重要组成部分, 也是类地行星的组成部分, 目前人类不仅能获得地球一定深度范围的岩石样品而且也获得了月岩和陨石的样品。

自然界的岩石可以划分为三大类: 火成岩、沉积岩和变质岩。

火成岩 (igneous rocks) 是由地幔或地壳的岩石经熔融或部分熔融 (partial melting) 形成岩浆 (magma) 冷却固结的产物。岩浆可以是由全部为液相的熔融物质组成, 称为熔体 (melt); 也可以含有挥发分及部分固体物质, 如晶体及岩石碎块。岩浆从高温炽热的状态降温并伴有结晶作用的过程称为岩浆固结 (solidified) 作用。

沉积岩 (sedimentary rocks) 形成于地表的条件, 常常呈层状, 是由①化学及生物化学溶液及胶体的沉淀作用; ②先存的岩石经剥蚀及机械破碎形成岩石碎屑、矿物碎屑或生物碎屑再经过水、风或冰川的搬运作用, 最后发生的机械沉积作用; ③上述两种作用 (总称为沉积作用) 综合形成的。沉积岩形成过程中也可以有结晶作用发生, 但不同于火成岩的结晶作用。前者结晶于地表或近地表的温度和压力条件下, 而且是在水溶液或胶体溶液中结晶的。多数沉积岩经历过胶结、压实和再结晶作用。

变质岩 (metamorphic rocks) 是由火成岩和沉积岩经过变质作用形成的。它们的矿物成分及结构构造都因为温度和压力的改变以及应力的作用而发生变化, 但它们并未经过熔融的过程, 主要是在固体状态下发生的。变质岩形成的

温、压条件介于地表的沉积作用和岩石的熔融作用之间。

三大类岩石的野外特征对比见表 1-1

表 1-1 三大类岩石野外特征对比简表

野 外 特 征		
火 成 岩	沉 积 岩	变 质 岩
1. 形成火山及各类熔岩流 2. 形成岩脉、岩墙、岩株及岩基等形态并切割围岩 3. 对围岩有热的影响, 致使其重结晶, 发生相互反应及颜色改变 4. 在与围岩接触处火成岩体边缘有细粒的淬火边 5. 除火山碎屑岩外, 岩体中无化石出现 6. 多数火成岩无定向构造, 矿物颗粒成相互交织排列	1. 呈层状产出, 并经历分选作用 2. 岩层表面可以出现波痕、交错层、泥裂等构造 3. 岩层在横向上延续范围很大 4. 沉积岩地质体的形态可能与河流、三角洲、沙洲、沙坝的范围相近 5. 沉积岩的固结程度有差别, 有些甚至是未固结的沉积物	1. 岩石中的砾石、化石或晶体受到了破坏 2. 碎屑或晶体颗粒拉长, 岩石具定向构造, 但也有少数无定向构造的变质岩 3. 多数分布于造山带、前寒武纪地盾中 4. 可以分布于火成岩体与围岩的接触带 5. 岩石的面理方向与区域构造线方向一致 6. 大范围的变质岩分布区矿物的变质程度有逐渐改变的现象

三大类岩石是根据自然界岩石的特征和形成作用的差异而划分的。然而, 由于自然界的许多作用具有连续性和过渡性, 所以三大类之间也具有过渡类型的岩石。例如: 火山作用喷出的火山灰和火山碎屑经冷却固结形成的岩石应属与岩浆喷出作用有关的火成岩, 但当上述物质, 包括玻璃质碎屑、矿物及岩石碎屑在喷发时从空中降落至地表, 甚至经过风力或水力搬运一段距离后沉积在地表, 有时具有明显的层状构造, 所以这类岩石就表现出具有火成岩与沉积岩的过渡类型的特征。又如: 在大洋中脊附近, 在一些部位浅, 规模小的超镁铁质—镁铁质的岩浆房中, 由于周围是富水的沉积物, 因而岩浆在结晶时遭受了水化作用 (hydration), 致使相当部分的橄榄石变为蛇纹石或在水的参与下直接结晶成蛇纹石。一般的蛇纹岩属于变质岩范畴, 但这种成因的蛇纹岩则受控于特殊环境下岩浆的固结作用, 可以看作是岩浆作用与变质作用的过渡类型。此外, 混合岩 (migmatite) 是一种由浅色和暗色两种岩石组成的, 暗色的是先存的变质岩而浅色的是经就地熔融产生的富硅、铝质的火成岩, 它们是两种不同作用形成的过渡类型, 但通常将其列入变质岩类中。沉积岩经历了成岩作用后, 若埋藏深度逐渐变大, 受地温梯度的影响, 温度也随压力加大而增高, 由于条件改变, 沉积岩中的矿物会转变为新的矿物类型, 部分结构构造也相应发生变化。这种作用则与变质作用中的埋藏变质及低度变质呈过渡关系, 而所形成的岩石类型也呈现出过渡的特点。

三大类岩石的特征和形成作用具有明显的差异, 但三种岩石可以相互转化, 三种作用可以相互过渡, 例如: 先存的变质岩、火成岩及埋深较大的沉积

岩可以在高温条件下发生熔融或部分熔融形成岩浆，岩浆固结成火成岩。先存的火成岩、沉积岩和变质岩暴露于地表后经过剥蚀、机械破碎、搬运和沉积可以形成沉积岩。先存的火成岩及沉积岩在温度、压力及应力的作用下可以发生变质形成变质岩。我们将在以下的第二篇、第三篇及第四篇中详细叙述这三类岩石的特征及其形成过程。

## 二、岩石学及学习的目的

岩石学 (Petrology) 一词是由希腊字 “petra” (意思是石头), 及 “logos” (意思是解释), 两个字组成的, 表示岩石学是研究天然岩石的学科。由于岩石是除去大气圈及水圈后地球的主要组成部分, 因此岩石学在地球科学中具有十分重要的位置。

基础岩石学包括了岩相学 (Petrography) 和岩理学 (Petrogenesis) 两部分, 岩相学是以研究岩石分类和描述岩石特征为主, 立足于详细的野外及室内的观察与测试, 如对岩石的颜色、结构构造、矿物成分和野外产状以及它们的化学成分作出研究, 可以对各类岩石作出进一步的分类和命名。岩理学则是将岩相学的知识与实验研究和理论分析结合, 并通过归纳和演绎对有关各类岩石的成因、形成演化及构造背景进行研究。在归纳和演绎的过程中要与相邻学科相互印证以期获得符合实际情况的结论。

对于大学生来说, 首先要掌握岩相学的内容, 然后再对教科书中岩理学的内容作出理解。千万不能丢掉或轻视岩相学基础去空谈岩理学理论。

岩石是地质历史的记录。有关岩石的成因、形成时的物理化学环境、结晶年龄及其时空分布规律的研究, 可以对解决地质历史演化中的不少问题作出贡献。例如:

(1) 现代的沉积物与地质历史上的沉积物的丰度有很大的差别, 其原因何在? 如在前寒武纪, 白云岩是石灰岩的 3 倍, 但是现代白云岩的产地却很少, 仅限于少数特殊的环境如波斯湾等地; 在 25 亿年 (2.5Ga) 之前太古宙的地层中, 硅质岩的体积分数约占 15%, 而现在除了深海盆地外, 硅质岩已经不很重要了; 在前寒武纪蒸发岩十分稀少, 根本无法与现代相比, 是海洋成分发生变化, 或是物源组分发生变化或是气候发生变化? 今后变化的趋势将会如何?

(2) 有些火成岩, 如科马提岩, 多数出现在太古宙, 块状斜长岩、更长环斑花岗岩多数出现在元古宙, 如何根据这些岩石的分布认识地球的演化?

(3) 为什么太古宙麻粒岩、灰色片麻岩、紫苏花岗岩等是研究地壳早期演化和早期大地构造特征的重要内容?

(4) 最老的板块活动、地幔柱活动出现在什么时期? 哪些岩石组合可以作

出限定?

这些问题都需要具有扎实的岩石学知识才能作出科学的回答。

岩石学研究还可以作为地球深部的“探针”。地球主要由岩石组成,科学家可以通过不同的途径直接获得不同深度的岩石样品。已有资料表明,获得的样品最大深度达 200km。此外,还可以应用火成岩的化学成分反演深部岩浆源区,从而揭示地球深部的组成、热状态及流变学特征。21 世纪固体地球科学进入了大陆动力学阶段,“岩石学探针”的研究方向将为岩石学学科发展作出贡献。

### 三、岩石在地球上的分布

除外地核和极少量赋存于地壳或上地幔中的熔体外,地球主要是由固态物质组成的。在陆地,表层沉积岩的体积分数约占 66%,其余的火成岩和变质岩大约各占一半。在大洋下面,沉积物和沉积岩形成薄层状覆盖在下部的火成岩和变质岩之上,后两种岩石组成了大洋地壳的主体。

#### 1. 地球内部结构及其组成

##### 1) 地球的形成与分异作用

地球是太阳系中的一个行星,它与其他行星一起围绕太阳旋转并具有相同的旋转方向和近似相同的轨道面。太阳系的行星可分为两大类,一种是类地行星 (terrestrial planets),它们的个体小,由密度大 ( $4 \sim 5.5\text{g/cm}^3$ ) 的石质物质组成,包括水星、金星、地球、火星和冥王星;另一类是巨型行星 (giant planets),它们个体大,由密度低 ( $0.7 \sim 1.7\text{g/cm}^3$ ) 的气体物质组成,包括木星、土星、天王星和海王星,其特征更近似于太阳,与类地行星有较大的差异。根据对地球、月球及降落于地球的陨石样品的研究,类地行星的组成中 O、Fe、Si、Mg 所占的质量分数为 90%,而巨型行星和太阳的组成中 H 与 He 的质量分数占 99%。

地球是一个演化的行星,从原始物质均一的球体,经分异演化成为具层圈构造的行星,这个过程直接与大气、海洋、大陆、山脉、火山和磁场的作用相联系。大约在 47 亿年 (4.7Ga) 之前,微行星已经发生物质的凝聚、堆积和增生,主要是 Si、Fe、Mg 的氧化物和其他的化学元素。它们在凝聚时是冷的。在地球演化的过程中,由于①增生过程中外界行星物质对地球发生撞击的动能转化为热能和②地球本身重力压导致体积缩小使得内部加热以及③放射性元素衰变产生的热能综合作用导致地球由冷变热。根据 Hanks 和 Anderson 对地球早期温度的模拟计算 (图 1-1),在地球形成 10 亿年 (1Ga) 以后,在地球内部的 400km 至 800km 处,温度已达到铁的熔化温度。由于 Fe 是组成地球主要元素中最重的,当它发生熔化后,则形成大的液滴并向地球的中心下落,同时那里的轻物质上升。据估算 Fe 占地球质量的 1/3, Fe 的熔化和下沉形成了地核,同时释放出了巨大的重力能,这些重力能最终转化成了热能,这与水流的落差转变为电能的原理类似。在铁质的地核形成时,地球的平

均温度上升至 2000℃，导致地球内部大部分物质开始熔融，地球开始了均匀的分异作用阶段。被熔化的低熔点组分即较原始物质密度小者向上浮动，形成了原始的地壳，在地核与地壳之间是以 Si、Mg 质为主的地幔。地球形成了层圈构造，同类的物质大致位于相同的深度。地壳的形成最终发展成为大陆。

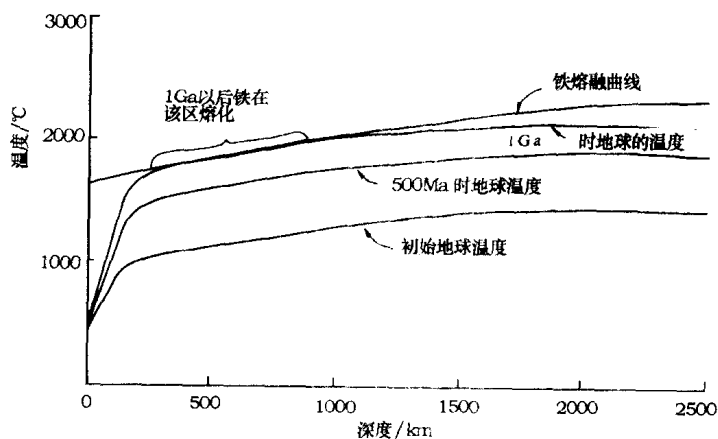


图 1-1 不同地质历史时期，地球内部的温度  
(据 Hanks 和 Anderson, 转引自 Frank and Raymond, 1982)

地球上大洋的形成和去气作用也是地球分异作用的一个重要部分。最初水不是呈自由状态存在的，而是呈 (OH) 根赋存于矿物之中 (如云母类)，当地球内部温度升高并发生熔融时，水从中释放并伴随熔融的岩浆喷出地表，形成蒸气，并逐步降于地表，形成占地球表面积 70% 的大洋。伴随水蒸气逸出的还有其他的气体，它们成为大气圈的组分。

地球的形成与分异是一个复杂的过程，不同学者对阶段的划分、内部温度的变化、原始凝聚等问题还存在有不同的认识。上面介绍的只是一个简单的轮廓，有兴趣者可参阅有关参考书。

## 2) 地球的层圈构造

分异后的地球具有层圈构造。根据地球物理的资料，地球可划分为 3 个一级的层圈：地核、地幔和地壳，其中地核占地球总体积 ( $1.083 \times 10^{21} \text{ m}^3$ ) 的 16.2%，地幔占 83.2%，地壳占 0.6%。在 3 个圈层之间分布有明显的地震波速突变的不连续界面 (或带)，三个层圈化学成分有显著差异，因而上述不连续界面主要是由化学成分差异造成的。各层圈内部还可以再进行分层。地核和地幔内部的分层界面主要是由物理作用，即由温度、压力的变化使矿物发生了相变而造成的。地核进一步分为内核与外核，它们主要由 Fe 元素组成，Si、Ni 为次要组分。其中，外核呈液态存在，因为温度和压力条件使 Fe 呈熔融状态。地核与地幔之间的界面为古登堡不连续面 (Gutenberg discontinuity)。地幔可进一步划分为上地幔、过渡带及下地幔三部分，它们都是由富 Mg 的岩石所组成的。上地幔与过渡带的界面与橄榄石相变为  $\beta$  相尖晶石的深度一致



(400km); 过渡带与下地幔的界面则与矿物转变为具钙钛矿结构的深度一致(640~670km)。地幔与地壳之间的界面称为莫霍洛维奇不连续面(Mohorovicic discontinuity)或简称莫霍面(Moho)。地壳的组成比较复杂,总体上是由长石和其他硅酸盐矿物组成的,但有些部分是富Fe、Mg的硅酸盐,传统上称为硅镁层,大洋地壳是由硅镁质组成的。大陆地壳上部是由富Al的硅酸盐组成的,传统上称为硅铝层,但大陆地壳的下部,成分复杂,可以有硅铝质及硅镁质两种组分为主的火成岩及变质岩同时并存。地球的层圈构造见图1-2。图右为放大的上地幔与地壳。

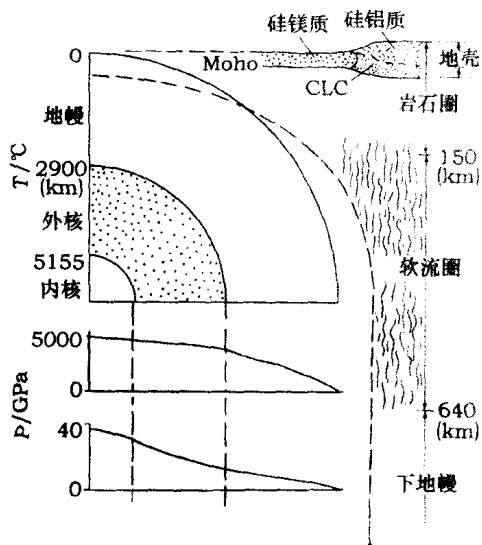


图 1-2 地球的层圈构造示意图  
(引自 L A Raymond, 1995)  
CLC—大陆下地壳

从图 1-2 中可以看到大陆地壳组成复杂,厚度平均为 33km;海洋地壳组成简单,厚度平均为 10km 以下。岩石圈(lithosphere)是近 30 多年来流行的板块学说所划分出来的由地壳及上部地幔组成的构造层,它们具有刚性特征。岩石圈的厚度在图中显示为 150km,但在不同的构造单元有变化,可以由 60km 至 200km 以上。软流层(asthenosphere)为具有高温塑性特征的层圈,它们之中不仅有固态的地幔岩石,而且含有地幔部分熔融的熔体,因此软流层具有低的地震波速。软流层厚

度也有变化,在有些稳定地区如地盾(克拉通)不出现软流层,因而在地震剖面上难以显示。软流层的底界在图中显示为 640km,有些人将其确定为 670km,相当于过渡带与下地幔的界线。图的左下部表示了由地表至地核温度及压力粗略的增长曲线。在近地表处地温随深度增加很快,即地温梯度大;在地幔内部曲线斜率变缓。横向上,不同的构造部位地温梯度有差别,在火山活动带如岛弧火山区为 30~500°C/km 或更高一些,而在大洋海沟处,地温梯度仅为 5~10°C/km。稳定大陆区的地温大体介于上述两者之间。地球内部压力在正常的情况下,可以通过物质的密度来估算:

$$P = \rho gh$$

式中:  $\rho$ ——密度;  $g$ ——重力加速度,  $h$ ——埋深。

在地壳范围内,压力与深度的关系为深度每增加 3.3km 时,压力增高 0.1GPa。

### 2. 三大类岩石在地球表层的分布

本节以板块构造学说为基础来介绍三大类岩石的分布。

板块构造学说是 20 世纪 60 年代初期兴起的构造理论，尽管它在解释大陆构造及地质历史时期的构造作用时尚存在明显的不足，但迄今为止仍不失为是解释全球构造的最佳学说。本节根据板块构造学说最基本的概念来介绍三大类岩石在不同构造部位的类型及组合的概况（图 1-3），目的是使初学者对岩石的分布建立起整体的框架。详细的介绍见本教材的第五篇。

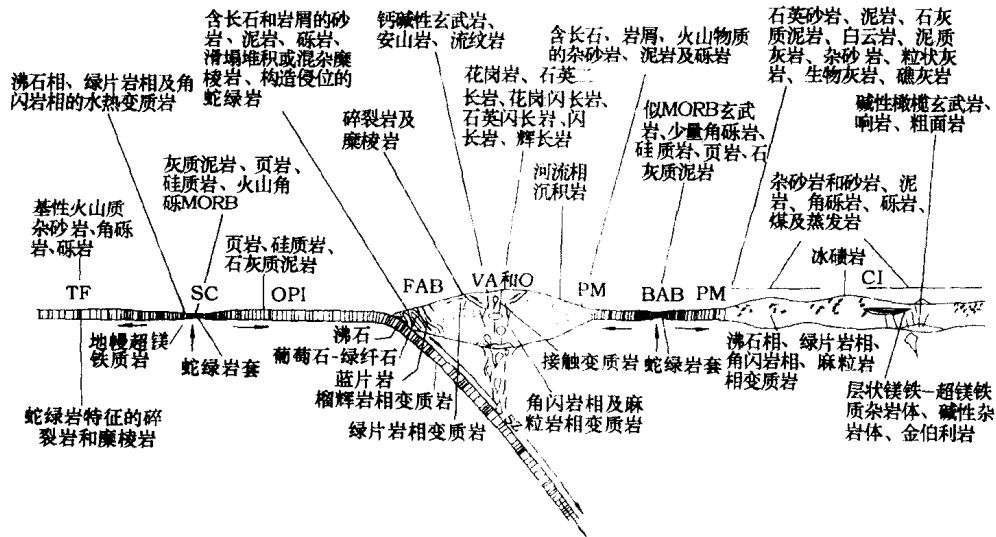


图 1-3 不同板块部位的岩石组合图解

(引自 L. A. Raymond, 1995)

SC—扩张中心；SZ—俯冲带；TF—转换断层；FAB—弧前盆地；PM—被动大陆边缘；OPI—大洋板块内部；BAB—弧后盆地；CI—大陆内部；VA 和 O—火山弧和造山带

## 四、地外星球上的岩石简介

地外的一些星球也是由石质物质组成的，它们的岩石样品的研究也是岩石学研究的内容之一。它为人类带来地外星球物质组成和地球及其他行星早期演化的直接信息，并且记录着太阳系甚至超出太阳系形成与演化的信息。21 世纪，人类将对宇宙空间进行更为深入和广泛的探索，因此地外星球的岩石学研究将会有更大的发展。目前人类研究的地外星球样品主要是陨石以及自 1969 至 1972 年美国及原苏联科学家登月取回的月岩样品。

### 1. 月球岩石

自 1969 年 7 月 20 日美国第一艘载人登月飞船成功地降落在月球 Tranquillitatis 月海之后，至 1972 年共有 6 次阿波罗登月飞行，带回了岩石及土壤样品 382kg。原苏联有 3 次未载人的

登月飞行，带回了 250g 月岩土壤样品。20 世纪 70 年代美国集中了一流的科学家对这些样品进行了全面的深入细致的研究，截止至 1990 年，仅有关月岩的会议摘要就有 0.1t 重。著名的月球研究专家 S.R. Taylor 认为：“目前对月球成因与演化的认识已经超过对地球的认识”。这些研究成果对行星演化（包括对地球的起源和早期演化）、冲击事件、陨石及微陨石流、行星表面同放射粒子流之间的关系以及太阳系的历史都作出了重大的贡献。21 世纪美国将继续实施登月计划，并进行一系列人类生存的实验。NASA (National Aeronautics and Space Administration) 最近已召开了有关 21 世纪月球基地空间活动的学术会议，为计划的实施做准备。

月球和地球一样具有层圈构造。普遍认为，在月球形成的 1 亿年 (0.1Ga) 内由于广泛的熔融造成了月球分异出 60~100km 厚的低密度的月亮及高密度的月幔。但是，不同学者对熔融的规模的估计有不同的认识。简单模型认为在围绕月球的岩浆海中富斜长石的轻物质上浮，高密度的镁铁质矿物下沉。另一些人认为分异过程十分复杂，大范围的部分熔融就可以产生上述的分异，在初始分异之后，在 4 亿年 (0.4Ga) 内又经历过月幔再熔融形成的岩浆侵入、火山熔岩喷出及连续的陨石冲击事件，因此月亮和月幔的分异与地球相似，也经历了复杂的过程。

月球表面已发现的岩石类型多数与火成作用有关，部分属冲击作用成因，没有水成的岩石。月球表面有两类地形，高地 (High land) 及月海 (Mare)。高地的岩石类型反映了月壳的代表性组合。目前所发现的有：①角砾岩 (约占阿波罗登月飞行所取样品的 60%)，多数为与冲击事件有关，是发生冲击熔融事件的综合产物，其中单成分角砾岩的角砾有纯橄岩和斜长岩，双成分角砾岩的角砾为斜长岩以及黑色隐晶质的熔融物，后者有时可以见其侵入到斜长岩中；②复成分长石质角砾岩、碎屑成分有单矿物、玻璃物质以及受熔融的岩石；③冲击熔融角砾岩，由矿物及岩石形成碎屑，被具火成结构的结晶物所胶结，推测其原岩为含岩石及矿物碎屑的碎屑岩经冲击作用发生熔融形成；④玄武岩，数量少，成分与月海玄武岩不同，具有高  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  (11%~14%)、低  $w(\text{FeO})$  的特征，形成年龄为 3.9~4.0Ga (39~40 亿年)，与最后一次月球上大的陨石碰撞事件发生的时间相近。从上述岩石类型可以看出，现在的月亮岩石由于受到了后期的多次冲击事件，与最早分异的月亮岩石有较大的差别，但从所保留的岩石角砾成分及胶结角砾的物质推测，可能有 3 种基本的岩石：①斜长岩，斜长石为富含钙的钙长石 ( $\text{An}_{55} \sim \text{An}_{77}$ )，暗示了母体岩浆规模巨大，致使组分均匀化，斜长岩的 Rb-Sr 等时年龄为 4.13~4.25Ga， $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$  初始值为 0.699；②含 Mg 的深成岩组合，包括苏长岩、橄长岩、纯橄岩、尖晶石橄长岩和辉长斜长岩，它们的 Rb-Sr 等时年龄分别为 4.4~4.49Ga，4.61Ga，4.45Ga，4.61Ga 和 4.48Ga，结晶略早于斜长岩，形成于月球演化的早期阶段，其中纯橄岩的  $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$  初始值为 0.699；③进化岩石，组分与前两类岩石相比，含有高的 Th、U、K、REE 和 P，被称为“KREEP”，最初发现它们多数是角砾岩或玄武岩的填隙物，呈隙间玻璃状产出，最大的范围仅达 150 $\mu\text{m}$ ，这种进化程度高的组分可能是岩浆结晶分离的最终产物，或者是由于陨石的冲击发生了低程度的部分熔融后结晶形成的。以后在 Apollo14 的岩石样品中发现了花岗岩、高 Al 和高 K 的玄武岩以及含较高丰度的 KREEP 的斜长岩和橄长岩，更加证实了月球岩石中存在着进化 (分异) 程度高的残余熔体，有些岩石则是原始熔浆受到它们同化、混染后的产物。

月球上的月海一般低于周围的高地 1~4km, 多数呈环形, 主要是由火山物质组成的。月球上的火山几乎都是平的, 坡度为 (1:500) ~ (1:2000)。这与月海玄武岩流动性大粘度小有关。月海玄武岩的产状有熔岩流、火山渣锥、火山穹丘、同心环状、火山脊、火山隧道等。岩流的范围也十分可观, 最大的面积为  $2 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 相当于美国哥伦比亚高原玄武岩的面积, 但它们的厚度仅十几至几十米, 最厚者为 1000m。火山渣锥的规模比地球小, 喷射火山渣的速度相当于地球喷射速度的  $1/3 \sim 1/10$ , 暗示月球玄武岩挥发分的含量少。

月海玄武岩的形成年龄最早者为 4.2Ga, 最新者为 3.0Ga, 均晚于高地的火成岩形成年龄。多数人认为月海玄武岩是月球内部 (月幔) 物质部分熔融的产物, 且与冲击事件关系密切。与地球玄武岩相比, 它有以下特征:

(1) FeO 含量明显高于地球玄武岩, 地球玄武岩  $w(\text{Mg})/w(\text{Mg} + \text{Fe})$  变化范围为 0.45 ~ 0.75, 而月球玄武岩为 0.35 ~ 0.65, 相应的月球玄武岩中的橄榄石、辉石都属于富铁的种属, 如橄榄石中最富 Mg 者约为 F<sub>75</sub>—F<sub>80</sub>, 而多数橄榄石为铁橄榄石 (图 1-4)。应用岩浆成分反演其源区成分, 地球玄武岩的源区  $w(\text{Mg})/w(\text{Mg} + \text{Fe})$  为 0.91, 而月球玄武岩源区为 0.80 ~ 0.82, 暗示月幔比地幔富 Fe, 这可能与月球未分离出富 Fe 的内核有关。

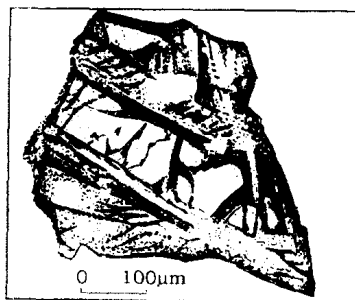


图 1-4 Lunar 24 月壤中的岩屑——富铁石英橄长岩  
(引自路凤香等, 1990)  
由铁橄榄石 (Fa)、钙长石 (An) 及石英 (Q) 组成

(2)  $\text{K}_2\text{O}$  及  $\text{Na}_2\text{O}$  的含量明显低于地球玄武岩。K 的丰度与地球的低 K 大洋拉斑玄武岩相近,  $w(\text{K})$  约为 0.36%,  $w(\text{Na})$  值仅相当地球玄武岩的  $1/5$ 。相应的月球玄武岩中的斜长石均属于高钙的类型, 以钙长石为主, 少量倍长石, 而且基本上不出现钾长石。因为 K、Na 在熔岩中分布均匀, 所以 K、Na 丰度低是由于源区缺乏这两种元素, 而不是因为它们具有挥发性所致。

(3) 月球玄武岩形成于还原的环境, 自然 Fe 及 FeS 普遍出现, 缺乏  $\text{Fe}^{3+}$  (其质量分数仅占 1%)。质量分数占 90% 的 Cr 是以  $\text{Cr}^{2+}$  出现, 70% 的 Eu 为  $\text{Eu}^{2+}$ , 质量分数占 4% 的 Ti 为  $\text{Ti}^{3+}$ , Ce 全部为  $\text{Ce}^{3+}$ , 未见有  $\text{Ce}^{4+}$  出现的证据。月球玄武岩中的气体为 CO, 但数量不大估计为  $(500 \pm 250) \mu\text{g/g}$ , CO 是由岩浆中的 FeO 与 C 反应形成 CO 与自然 Fe 而形成的。这个反应是在岩浆上升到地表的过程中在约 3km 深处发生的。

(4)  $\text{TiO}_2$  的含量有很大的变化范围, 常常作为月球玄武岩进一步分类的依据。在高 Ti 玄武岩中, 钛铁矿为常见的副矿物。

(5) 月球的火山作用产物除了玄武岩之外还有火山玻璃球, 它们广泛分布于月壤中。在火山口附近分布的火山玻璃球其年龄与月海玄武岩相近, 也进一步证实了它与月海的火山作用有密切关系, 排除了与高地月亮有关的可能。玻璃球的直径多数在 0.1 ~ 0.3mm 之间, 颜色多样, 橙色者含 Ti 高 ( $w_{\text{TiO}_2}$  为 9.3%), 成分特点与附近的 Apollo 11 的玄武岩及其隙间的橙色玻璃类似, 但略富 MgO、Zn、Cl、Cu、Pb 和其他挥发性元素。球体表面附着了似飞溅物的滴状体, 成分与主体玻璃球一致, 可能为低速下溅出的物质。Apollo 15 附近的红色及黄

色玻璃球与上述成因相似，它们都缺乏陨石组分，所以与冲击作用无关。

(6) 由于月球表面没有水和氧气因而岩石未遭受风化及蚀变作用，岩石新鲜，没有含水矿物出现。如月球玄武岩的结构保持了岩浆结晶的特征结构，这些都与地球玄武岩中未遭受风化作用者相似（图 1-5）。

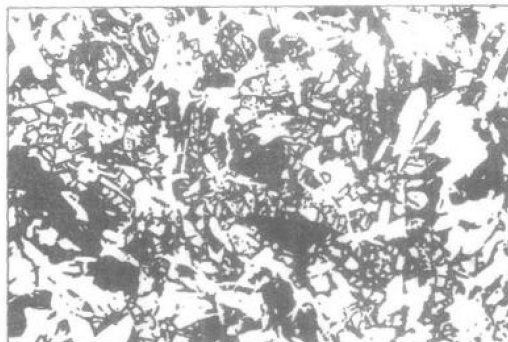


图 1-5 阿波罗 11 低钾玄武岩

（引自 Papike 等，1976）

具辉绿结构，由单斜辉石、橄辉石、斜长石及不透明矿物组成；视域长边 7mm

## 2. 陨石

陨石和流星都来自流星体（meteoroid），当流星体足够大，并在大气层中没有完全消耗尽而落到地面的，即为陨石（meteorite），其大小从显微镜尺度到几吨重。而那些在大气层中就被消耗殆尽者称为流星（meteor）。

最早有关陨石坠落的记载是在公元前 1478 年，在希腊的 Crete 岛。我国最早的陨石记录是公元前 650 年。陨石从天空落下常伴有白炽的火光和轰鸣的响声，景象极其壮观。1976 年 3 月 8 日陨落在中国吉林的陨石中有迄今为止世界上最大的一颗石陨石，重 1,750kg。1986 年 4 月 18 日在湖北随州落下的也是石陨石，我国科学家都对它们作了详细的研究。

研究陨石的意义十分重大，因为它们“宇宙探测器”。著名的美国地质学家 Shand (1947) 说：“岩石学，做为调查地球组成的科学，最大的弱点是只能研究观察地表之下几千英尺，即地球半径的千分之一处的那些已经结晶的岩石。然而，无论是地球物理，还是天文学或从岩石学的观点都有足够的理由假设行星内部的物质在许多方面不同于表面的岩石。由于直接观察行星内部物质是不可能的，这样陨石就成了人类认识行星全貌的最好助手。天文学家借助分光镜证明整个宇宙都是由相同元素组成的，因此，无论对陨石的成因持哪种观点（恒星溅射、行星溅射、星云集结、彗星凝聚、太阳偶而甩出、类地行星火山爆发等），但一个必须承认的重要事实是，太阳系中存在有与地壳中任何岩石都不相同的岩石，这使得陨石研究引起了人们的重视。而这种物质正是天文学、岩石学、地球物理学共同认为的类似地球内部的组成物质。”此外，对地球化学家来说，陨石物质的平均成分为宇宙非挥发性元素的相对丰度提供了最重要的信息。目前元素的宇宙丰度表在很大程度上是基于对陨石的分析结果。这种分析对地球化学家、核物理学家和天文物理学家都十分重要，它们为元素起源以及陨石和太阳系起源、年龄、演化历史研究提供了重要信息。这些信息在宇宙飞船

的设计和重返大气层可能碰到的问题等方面研究上都是不可缺少的。

从目前坠落的陨石来看,可分为3类:铁陨石(iron meteorite)、石陨石(stone meteorite)和石铁陨石(stone-iron meteorite)。

**铁陨石** 外貌类似铁块,主要由铁镍合金组成,还有微量的碳、硫和磷。铁镍合金可分为2个相,低镍的 $\alpha$ 相(又称铁纹石)和高镍的 $\gamma$ 相(又称镍纹石)。铁陨石的进一步分类可以根据结构特征或微量元素Ni、Ga和Ge的含量。Ga和Ge在铁陨石中的含量很低,但由于它们具挥发性,因而对铁陨石形成时太阳星云的温度和压力极为敏感,而对以后发生的岩浆过程很不敏感,这样往往可以反映出铁陨石形成时的最原始状态。详细分类在此不作介绍。目前发现的最大的铁陨石是1928年在纳米比亚的Hoba发现的,总重量(含周围风化物质)为73t。其次是由美国海军军官极地探险家Robert E. Peary于1987年在格陵兰发现的,总重58t。第三大的铁陨石是19世纪末在我国新疆维吾尔自治区发现的,1917年正式载入文献,总重约30t。

**石陨石** 外貌类似地球岩石,主要成分是硅酸盐矿物(橄榄石、辉石等),次要成分有铁、镍等金属物质。石陨石可进一步根据其中是否含有球粒划分为球粒陨石和非球粒陨石两类。球粒陨石根据元素特点和岩石类型可以进一步划分为碳质球粒陨石(carbonaceous chondrite,即C-chondrite)、普通球粒陨石(ordinary chondrite)和顽辉球粒陨石(enstatite chondrite)。上述陨石的化学成分的研究表明,碳质球粒陨石除了H、He、N、O和惰性气体元素外,其他元素的丰度代表了太阳系原始的物质组成。普通球粒陨石中易挥发性元素有不同程度的损失。非球粒陨石(achondrite)的矿物成分和结构构造与地球岩石相似,它们不含球粒,也没有金属相。一般认为如果从陨石物质中减去亲铁元素剩下的相当于地球上的地幔物质,也就是说非球粒陨石相当于镍和铁聚集在母体中心之后剩下下来的物质。这类陨石较稀少。

**石铁陨石** 其中的镍铁合金含量与硅酸盐含量大致相等,可以看作上述两类陨石的中间类型。石铁陨石中铁镁硅酸盐晶体往往镶嵌于金属基质中。

近20年来的研究成果认为,绝大多数陨石来自火星与木星之间的小行星带。应用反射系数分光光度法比较小行星带中小行星表面反射的光和陨石表面反射的光证实,它们的光谱特征反映了具有相同的矿物组成。小行星带中的小行星轨道集中在4个狭窄的区域,区与区之间没有小行星,这些“间隔带”称为Kirkwood gaps,物体位于“间隔带”之中是不稳定的,当进入“间隔带”后会立即以一个偏心轨道迅速远离。“间隔带”大致位于木星离太阳的 $1/3$ 、 $2/5$ 和 $1/2$ 处。

小行星由于重力干扰或撞击被送到“间隔带”之后被强有力的重力加速度甩进一个高度偏心的轨道;当这个轨道与地球轨道相交时,可被地球的重力场捕获,落到地球表面。

除上述3种陨石类型外,还曾报道过在地球南北纬 $55^\circ$ 之间曾发现过一种玻璃陨石(tektite),我国广东、海南和南海海域也曾有出露,俗称“雷公墨”。雷公墨呈黑色,玻璃光泽,非晶质,形态以弹状、水滴状为主,最大者仅10cm,主元素 $w(\text{SiO}_2)$ 为73.89%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为11.94%,与页岩成分相当。推测在0.73~0.75Ma时,有一颗巨大的陨石冲击地表,使地表的岩石(页岩)在短时间内发生熔融并溅射至空中,经冷却降落形成此种陨石。

## 思考题

1. 为什么研究月球岩石可以获得行星形成的早期演化信息?
2. 如何应用铁的熔点及地球内部温度及深度曲线说明外地核具有液态的特点?
3. 计算地壳内部 10km、20km 处的压力值 (假设平均密度为  $2.7\text{g/cm}^3$ ), 并对比应用  $0.1\text{GPa}/3.3\text{km}$  计算的结果。

## 参考文献

1. 路凤香, L A Taylor, 金跃群. Luna 24 号月岩样品中火成岩碎屑的岩石学及其成因探讨. 地球科学, 1990, 15 (6): 617 ~ 627.
2. Raymond L A. *Petrology*. in: *The study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic Rocks*, volume I: *Igneous Petrology*, Wm. C. Brown Communication Inc., 1995, 234.
3. Frank P, Raymond S. *The Earth* (third edition). W H Freeman and Company, New York, 1982. 613.
4. Anthony H. *Igneous Petrology* (second edition). Longman Group Limited, Longman House Burnt Hill, Hallow England, 1996.
5. Anthony R, Philpotts. *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice H, Englewood C, New Jersey, 1996, 498.
6. Blatt H, Tracy R J. *Petrology* (second edition). W H Freeman and Company, New York, 1996.
7. Graham R, Stoesser D B, Marvin U B et al.. Boulder 1, Station 2, Apollo17: Petrology and petrogenesis. in: *The Moon 14*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland, 1975, 327 ~ 357.
8. Papike J J, Hodges F N, Bence A E et al.. Mare basalts: Crystal chemistry, Mineralogy and Petrology. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1976, 14 (4): 475 ~ 540.
9. 李昌年. 海南岛雷公堡及成因探讨. 岩石矿物及测试, 1984, 3, 207 ~ 216.

# 第二篇 火成岩

## 第二章 岩浆与岩浆作用

### 一、岩浆的概念

岩浆是由已存在的地幔或地壳岩石经熔融或部分熔融形成的，它可以全部由液相的熔体组成，也可以含有部分固态物质和挥发分。由于岩浆源区的岩石主要为硅酸盐，因此岩浆的主要组成也为硅酸盐。当岩浆产生后，在通过地幔和/或地壳上升到地表或近地表的途中，发生各种变化的复杂过程称为岩浆作用 (magmatism)。一般理解岩浆的概念是：岩浆是上地幔或地壳部分熔融的产物，绝大多数岩浆成分以硅酸盐为主，含有挥发分，也可以含有少量固体物质，是高温粘稠的熔融体。岩浆喷出地表形成的火成岩称为喷出岩 (extrusive rocks)；侵入于地壳中的称为侵入岩 (intrusive rocks)。

#### 1. 原生岩浆

原生岩浆 (primary magma) 是由地幔或地壳岩石经熔融或部分熔融作用形成的成分未发生变异的岩浆。它不强调源区的岩石是否已经遭受过熔融作用或成分的变异，而强调的是形成的岩浆一定未发生过成分的变化。

#### 2. 母岩浆和派生岩浆

能够通过各种作用 (分异作用、同化作用、混合作用等) 产生派生岩浆的独立的液态岩浆称为母岩浆 (parent magma)。因此原生岩浆可以成为母岩浆，但母岩浆不一定是原生岩浆。母岩浆与派生岩浆 (derivative magma) 具有成因联系，它们是母体与子体的关系，在成分上可形成相互联系的系列。例如玄武岩浆可通过分异作用产生安山岩和英安岩，从而形成了玄武岩—安山岩—英安岩系列。经分异作用产生的派生岩浆又可称为进化岩浆 (evolved magma)，分异作用强的表示其进化程度高。



在地球发展演化的最早期阶段，地幔不断地发生部分熔融，相当部分容易进入液相中的元素随着熔融作用不断地移出地幔源区进入岩浆，从而使地幔亏损了上述组分，形成了化学上的亏损地幔 (barren, depleted 或 infertile mantle)。例如：Si、Al、Ca、Na、K 等元素在熔融作用中容易进入岩浆，相应的地幔则亏损了上述组分变成亏损地幔。一旦亏损程度很高，即使在物理条件适当的情况下发生熔融，岩浆也会因源区地幔亏损 Al、Ca、K、Na 等元素而难以产生富含长石的岩浆类型。但是，如果地幔中加入了上述元素，则形成富集地幔 (fertile mantle)。这种作用通常是通过地幔交代作用或地壳物质重新返回地幔的再循环作用实现的。

自然界的原生岩浆类型较多，主要有玄武岩浆、花岗质岩浆和安山岩浆，其他的则较少。原生岩浆可以直接冷却结晶形成不同的火成岩，或者通过各种作用形成了派生岩浆后再冷却结晶，最终形成多种多样的火成岩。

## 二、岩浆的形成与运移

大量的资料已经证实，在地球内部当物理和化学条件具备时，地幔及地壳的某些部位可以发生熔融。起始熔融时液相熔体仅在固相颗粒的隙间产生，比例也很少，随着熔融作用的继续，熔体的比例增加，并逐渐集中形成岩浆。岩浆上升至地表或近地表处的过程，称为岩浆的运移。本节将对这些内容作出介绍。

### 1. 岩浆的形成

现代地震波速测定表明，不少地区在上地幔 100km 左右的深度和中下地壳的深度存在有地震波速下降的低速带 (low velocity zone, 简称 LVZ)，被解释为在固态的岩石中存在有液态的物质，导致了地震波速的明显下降。这些液态物质主要是初始熔融的岩浆物质，它们分布在岩石的矿物颗粒之间，尽管比例不大，但表明了有熔融作用的发生。地球物理资料为我们提供了岩浆形成的大概深度和部位。在现代火山活动地区，如著名的夏威夷火山群，在火山喷发的间隙阶段，在上地幔深度 (约 60km 处) 发生了深源地震，表明这一位置相当于岩浆的源区。因此，在现代岩浆活动地区，地球物理资料可以提供较准确的现今岩浆起源深度和部位。

岩浆形成的两个最基本的条件是：①要有源区的岩石，即岩浆发生之前已经存在于地幔或地壳的岩石作为熔融岩浆的母岩；②要有足够热能的积累。

#### 1) 源区的岩石

什么类型的源区岩石 (source rocks) 能够产生岩浆，它们之间在成分上存在着什么关系，这是火成岩成因中的一个重要问题。根据目前研究的结果，通