



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

沉积学

(第二版)

姜在兴 主编

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油工业出版社“十一五”国家级规划教材

沉 积 学

(第二版)

姜在兴 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本教材以沉积过程为主线,以沉积特征为标记,以沉积岩(物)类型为对象,系统介绍了沉积学的概念、原理、特征和应用,重点阐述了沉积物和沉积岩的形成过程、陆源碎屑岩沉积学、碳酸盐岩沉积学、其他岩类沉积学及其与油气的关系。

本书可作为本科生和研究生“沉积学”、“沉积岩石学”、“沉积相”、“沉积学原理”等课程的教材或教学参考书,还可作为石油勘探开发和地质研究工作者的培训教材或工具书。

图书在版编目(CIP)数据

沉积学/姜在兴主编—2版.

北京:石油工业出版社,2010.9

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-5021-7909-0

I. 沉…

II. 姜…

III. 沉积学—高等学校—教材

IV. P588.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第138659号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523694 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:中国石油报社印刷厂

2010年9月第2版 2010年9月第6次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:27

字数:690千字

定价:40.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

当代沉积学研究进展

(代序)

当代沉积学在许多方面已经取得了一系列重大进展,主要表现在大地构造沉积学、层序地层学、事件沉积学、储层沉积学、全球变化沉积学与环境沉积学、资源沉积学等方面。在此基础上,本文展望了未来沉积学的发展趋势。

一、当代沉积学研究重大进展

(一) 大地构造沉积学

沉积盆地的形成是内外动力地质作用的综合结果。在这些地质营力中,最基本的是重力、热力与应力。由于盆地形成不但受控于周围构造环境与岩石圈深部构造背景,而且也受控于周围边界条件与岩石圈性质等的变化,因此成盆作用体现了盆地环境的时空演化。沉积盆地动力学分析已取得许多新的进展,主要表现在深部作用、热动力、动力学模拟、盆山耦合、层序充填动力学、流体成矿动力学、成藏动力学及成煤动力学等方面。探讨大陆动力学过程和岩石圈演化的时空细节,特别是对 Rodinia 超大陆的研究成为大陆动力学方面的前沿。国际地学界有关沉积盆地的研究动向,已由传统的构造沉积分析逐步转向地球动力学及热力学研究。

大地构造沉积学是大地构造学与沉积学相结合的产物。作为沉积盆地分析的一个重要方面,它以大陆动力学和沉积学的基本理论为基础,从宏观和整体的角度,对沉积盆地的大地构造背景、形成条件、成因、机制、演化历史以及沉积作用过程进行研究,从而恢复其古动力学条件和古构造环境。它以各种大地构造背景的沉积岩为主要研究对象,研究内容主要包括:盆地所处的大地构造背景及其对盆地形成、演化的控制作用,不同大地构造背景下沉积盆地古地理、沉积环境和相、沉积过程、地层格架、层序及海平面变化;编制体现大陆变形和地体运动不同级别的活动论岩相古地理图;重建基于板块理论的沉积岩石学方法和标准等。

(二) 层序地层学

层序地层学是从 20 世纪 80 年代以来在地震地层学基础上发展起来的一门新兴边缘学科。层序地层学及精确定年技术(高分辨古生物学和同位素定年技术)不仅提出了建立等时地层格架、确定盆地中沉积体系三维配置的理论与方法,而且大大推动了沉积充填动力学的研究。层序地层学、事件地层学和构造—地层学等相关分支学科的密切结合,将使得盆地充填的动力学过程研究产生飞跃,并将有效地用于能源和矿产资源勘探。层序地层学的重要突破在于建立了盆地、区域乃至全球的等时地层格架,并将沉积相和沉积体系的研究放在统一的等时地层格架中进行,因而能有效地揭示沉积体系的三维配置关系。

层序地层学自 20 世纪 80 年代兴起以来得到了迅猛发展。通过在全球范围内的层序地层对比,层序沉积模式、矿产资源评价以及油气勘探等方面取得了显著进展,同时,其自身理论学科也得到了进一步完善和发展,形成了生物层序地层学、高分辨率层序地层学、高频层序地层学、层序充填动力学及应用层序地层学等一些新的发展方向。

目 录

第一章 概论	1
第一节 沉积学与沉积岩	1
第二节 沉积学研究意义和方法	4
第二章 沉积岩的形成过程	7
第一节 沉积岩原始物质的形成	7
第二节 机械搬运与沉积作用	16
第三节 化学和生物的搬运和沉积作用	23
第四节 沉积分异作用	29
第五节 沉积后作用	30
第六节 沉积岩的分类	31
第三章 陆源碎屑岩的特征	34
第一节 陆源碎屑岩的组成	34
第二节 陆源碎屑岩的结构	41
第三节 沉积构造和颜色	55
第四章 陆源碎屑岩各论	79
第一节 砾岩	79
第二节 砂岩及粉砂岩	83
第三节 粘土岩	93
第四节 陆源碎屑成岩作用与储层	102
第五章 陆源碎屑岩沉积相模式	124
第一节 概述	124
第二节 风成相和冰川相	127
第三节 冲积扇相	130
第四节 河流相	138
第五节 湖泊相	153
第六节 三角洲相	170
第七节 扇三角洲相和辫状河三角洲相	188
第八节 无障壁滨岸相	196
第九节 障壁海岸相	203
第十节 河口湾相	209
第十一节 浅海陆架相	212
第十二节 半深海及深海相	219
第六章 陆源碎屑岩岩相古地理研究	236
第一节 相标志	236
第二节 相分析和古地理条件分析	260

第一章 概 论

第一节 沉积学与沉积岩

一、基本概念

沉积学 (sedimentology) 是研究沉积岩 (sedimentary rock)、沉积物 (sediment) 及其形成过程的科学。它比沉积岩石学 (sedimentary petrology) 研究的范围更广, 后者主要研究沉积岩 (沉积物) 的自身特征和成因。

沉积岩是组成岩石圈的三大类岩石之一, 它是在地壳表层 (大气圈的下部、岩石圈的上部, 称为沉积圈) 条件下由母岩 (parent rock, mother rock) (岩浆岩、变质岩、先成的沉积岩) 的风化产物、生物来源的物质、火山物质、宇宙物质等原始物质, 经过搬运作用 (transportation)、沉积作用 (deposition) 和沉积后作用 (postdeposition) 而形成的岩石 (图 1-1)。

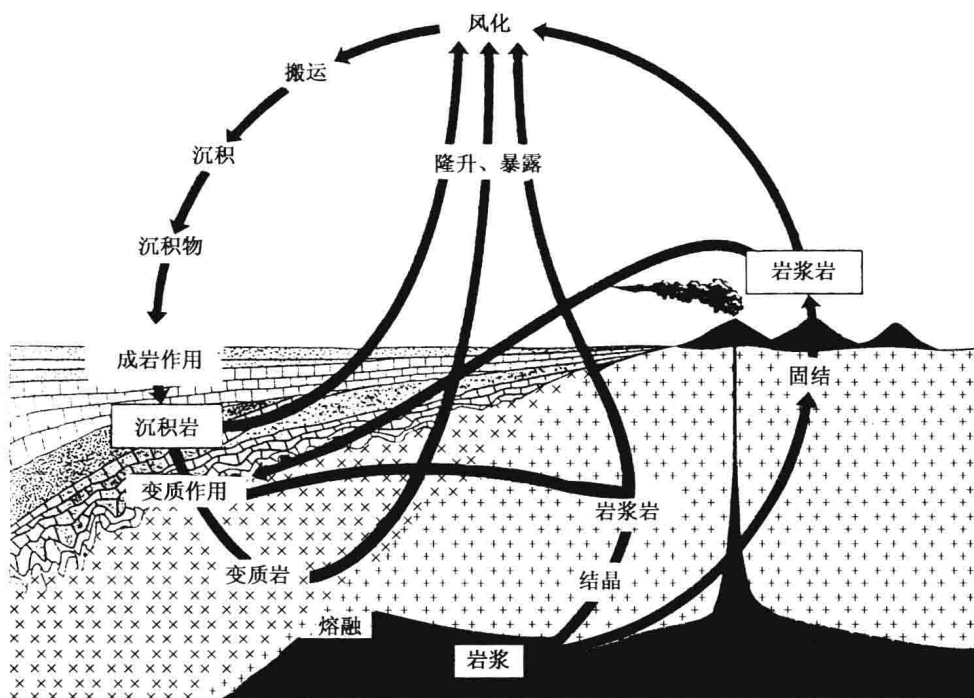


图 1-1 沉积岩、岩浆岩、变质岩三大类岩石在成因上的关系

沉积岩形成的地壳表层, 称之为沉积圈, 有如下特点。

（一）温度和压力

与形成岩浆岩的高温、高压相比，沉积岩形成于常温、常压之下。地壳表层温度变化范围不大，根据地理学的资料，地表的最高温度在非洲中部可达 85°C ，最低温度在北极圈维尔霍扬斯克附近为 -70°C 。所以就整个地球而言，每年最大温度差在 $50 \sim 160^{\circ}\text{C}$ 左右，一般在 $40 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 之间。现代沉积物一般形成于上述的温度范围之内。由沉积物到沉积岩的转变可位于地球的不同深度，成岩时的温度一般不会超过 200°C ，否则沉积岩将逐渐变为变质岩。

沉积物形成带的压力一般在 $1.01 \times 10^5 \sim 2.02 \times 10^6 \text{Pa}$ 之间，高山地区不到 $1.01 \times 10^5 \text{Pa}$ ，海平面是 $1.01 \times 10^5 \text{Pa}$ 。由海平面向下压力逐渐增加，按海深每增加 10m 压力增加 $1.01 \times 10^5 \text{Pa}$ 计算，最深的洋底压力可达 $11.11 \times 10^7 \text{Pa}$ 。压力的大小影响水中气体的含量，也影响沉积物的形成和变化。

（二）水和大气的作用

绝大多数沉积作用是在水中进行的，大多数沉积物和沉积岩也是在水中形成的。水是母岩风化的主要地质营力，也是风化产物、火山物质、宇宙物质等搬运和沉积的主要介质。因此，在沉积学发展的早期曾认为沉积岩都是“水成岩”。大气中的二氧化碳和氧也是沉积物、沉积岩形成的主要因素，它们对于母岩的破坏和沉积作用的进行都起着重要的作用。

（三）生物和生物化学作用

生物和生物化学作用对于沉积物和沉积岩的形成具有特殊的意义。有的沉积物和沉积岩本身就是由生物遗体形成的，如煤和石油、生物礁灰岩等。生物和生物化学作用也可促进沉积物和沉积岩的形成，如在煤的形成过程中细菌起了重要的作用。自地球上生命发生以来，时代越新，生物对沉积物、沉积岩形成所起的作用就越大。

二、沉积岩的一般特点

（一）沉积岩的化学成分

将沉积岩同岩浆岩的平均化学成分相比较可以看出（表 1-1），沉积岩的化学成分和岩浆岩是相近的，但由于沉积岩形成条件的不同，其在化学成分上和岩浆岩仍然有很大的差别，现归纳如下。

1. Fe_2O_3 和 FeO 的含量

沉积岩和岩浆岩中铁的总量是接近的，而在岩浆岩中 FeO 的含量多于 Fe_2O_3 ，沉积岩中 Fe_2O_3 的含量多于 FeO 。岩浆岩（特别是侵入岩）是在地下深处缺氧的条件下形成的，铁多以亚铁的形式出现；相反，沉积岩是在地表条件下形成的，一般来说自由氧充足，多形成高价铁。

2. K_2O 和 Na_2O 的含量

在岩浆岩中，钠的含量比钾高，而在沉积岩中则相反。这是因为在沉积岩中富钾的白云母、绢云母相对稳定；岩浆岩风化后生成的胶体分散物（粘土矿物）易吸附钾，就导致沉积岩中钾含量的相对增高；岩浆岩风化后，其中的钠以氧化物、硫酸盐等可溶性盐的形式集聚于海水中，使沉积岩中钠的含量相对减少。

3. Al_2O_3 含量

岩浆岩中的铝多以铝硅酸盐的形式出现，而在沉积岩中 Al_2O_3 通常剩余而游离，这是沉积

岩的主要化学特征之一。在大多数沉积岩中， Al_2O_3 含量大于 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}$ 含量之和。

4. H_2O 和 CO_2 的含量

沉积岩形成于地表条件下，其中富含 H_2O 和 CO_2 ；岩浆岩形成于高温高压的环境，这两种成分极少或者几乎没有。

表 1-1 岩浆岩和沉积岩的平均化学成分（百分含量）（据冯增昭，1993）

氧 化 物	沉积岩 (按克拉克, 1924)	沉积岩 (按舒科夫斯基, 1952)	岩浆岩 (按克拉克, 1924)
SiO_2	57.95	59.17	59.14
TiO_2	0.57	0.77	1.05
Al_2O_3	13.39	14.47	15.34
Fe_2O_3	3.47	6.32	3.08
FeO	3.08	0.99	3.80
MnO	—	0.80	—
MgO	2.65	1.85	3.49
CaO	5.89	9.99	5.08
Na_2O	1.13	1.76	3.84
K_2O	2.86	2.77	3.13
P_2O_5	0.13	0.22	0.30
CO_2	5.38	—	0.10
H_2O	3.23	—	1.15
总和	99.73	99.11	99.50

(二) 沉积岩的矿物成分

地壳中的已知矿物在 3000 种以上。赋存于沉积岩中的矿物超过 160 种，但常见的不过 20 种。在一种沉积岩石中，常见的矿物只有 5~6 种（表 1-2）。由于成因、形成条件的不同，沉积岩的矿物有与岩浆岩不同的特点：

表 1-2 沉积岩和岩浆岩的平均矿物成分（百分含量）（据曾允孚等，1986）

矿 物	沉积岩 (按利思与米德, 1915)	沉积岩 (按克里宁, 1948)	岩浆岩 (65% 花岗岩 + 35% 玄武岩)
橄榄石	—	—	2.65
普通角闪石	—	—	1.60
普通辉石	—	—	12.90
长石	15.57	7.5	49.29
石英	34.80	31.50	20.40
云母 + 绿泥石	20.40	19.00	7.76
氧化铁矿物	4.10	3.00	4.6
玉髓	—	9.00	—
粘土矿物	9.22	7.50	—
碳酸盐矿物	13.63	20.50	—
石膏	0.97	—	—
炭质	0.73	—	—
其他	0.58	3.0	0.88

(1) 高温矿物少见。岩浆岩中主要造岩矿物中的铁、镁暗色矿物，如橄榄石、普通辉石等，都是在高温条件下形成的。这些成分复杂的硅酸盐矿物，一旦转入地表，极易分解，在极少的情况下，可以重矿物的形式保存于沉积岩中。

(2) 低温矿物富集。低温矿物，如石英和长石，这两种矿物在岩浆岩和沉积岩中的含量都很高。但长石中的钙长石、中长石等生成于岩浆结晶的早期和中期，形成时的压力、温度都较高，这些矿物处于地表条件下容易遭受破坏，难以矿物碎屑的形式保存于沉积岩中；长石中的钾长石、钠长石形成于岩浆结晶的晚期，在地壳中易于呈碎屑保存下来，所以是沉积岩中常见的长石种属。石英的化学性质十分稳定，不仅在岩浆结晶晚期形成的能够保存下来，而且在地表条件下也可以自生成蛋白石、玉髓和沉积石英，因此在沉积岩中石英的平均含量超过岩浆岩中的平均含量。

(3) 自生矿物。自生矿物是在沉积和成岩过程中产生的，这类矿物的特点是成分一般比较简单，如各种盐类、氧化物、氢氧化物、粘土矿物、碳酸盐矿物等。岩浆岩中一般不存在这些矿物。

岩浆岩和沉积岩在矿物成分上存在的上述差异，是两者的形成条件不同所决定的。岩浆岩中的主要造岩矿物是在高温、高压条件下形成的，这些矿物稳定于这样的环境，在常温常压下易分解，这是这些矿物在沉积岩中少见的原因。沉积岩中的自生矿物，是在地表常温常压环境下形成的，稳定于地表的条件，所以在沉积岩中十分丰富。

(三) 结构、构造的特点

沉积岩的结构要比岩浆岩更为多样，其中碎屑结构、粒屑（颗粒）结构、生物结构都是沉积岩所特有的；晶粒结构虽与岩浆岩的结构相似，但它们形成的热力学条件迥然不同。

极大部分沉积物是在流体（空气、水）中进行搬运和沉积的，因此在沉积岩中常常具有成层构造、层内构造以及层面构造。尤其是层理构造，在岩浆岩中除少数情况（层状火成岩）外很少见到，所以层理构造是沉积岩的基本构造特征。此外，各种层面构造、缝合线、叠锥、结核、叠层构造等也都是沉积岩所特有的。

由于沉积岩是在地表或接近地表的压力条件下形成的，因而沉积岩可具有各种各样的孔隙，而结晶岩一般均缺乏原生孔隙（曾允孚等，1986）。

第二节 沉积学研究意义和方法

一、研究意义

虽然沉积岩只占岩石圈体积的 5%，但在地壳表层出露最多的是沉积岩。陆地表面的 75% 为沉积岩或沉积物所覆盖，平均厚度 1.8km，其余的 25% 是岩浆岩和变质岩；已探明的海底、洋底几乎全部由沉积岩（物）所组成，平均厚度 1km。因此，沉积岩主要集中分布于地表，然而在地表它不是均匀分布的，各处厚度也很不均一。地槽区厚度大，有的地方沉积岩厚度可达 30km，而在地台区则较薄，在岩浆岩、变质岩出露的地方则没有沉积岩的分布。

从整个地壳发展历史来看，目前已经确定的地壳最老岩石的年龄为 46 亿年，而沉积圈岩石最老的年龄竟达 36 亿年（前苏联科拉半岛），其中有生命记载的岩石年龄为 31 亿年。

所以沉积岩是研究地球发展和演化历史不可缺少的宝贵资料。

岩石圈中沉积岩（物）总体积约达 $4.4 \times 10^8 \text{ km}^3$ （Pettijohn, 1975）。这其中蕴藏着丰富的矿产和能源资源。可燃性矿产（石油、天然气、煤层气、水合甲烷、煤和油页岩）、铝土矿、锰矿、盐矿以及钾盐矿等几乎全为沉积类型；极大部分铁矿、磷矿也属于沉积或沉积变质类型；在放射性原料、有色金属（铜、铅、锌）、稀有和分散元素、非金属（重晶石、萤石）等矿产中，沉积类型也占很大的比重；不少金、铂、钨、锡、金刚石等矿产也来源于沉积的砂矿。据估计，沉积和沉积变质型矿床可占世界矿产资源总储量的 80%。

除了上述沉积矿产外，有些沉积岩本身就是多种工业的主要原料或辅助原料。如石灰岩及白云岩不仅可作为建筑材料而且是冶金工业中常用的熔剂，石灰岩又是制造水泥和人造纤维的主要原料，白云岩则可作为镁质耐火材料；纯净的粘土岩按性质不同可作为耐火材料、陶瓷原料、钻井液原料、吸收剂、填充剂和净化剂；沉积石英岩及石英砂可作为玻璃原料。

通过沉积学的研究，可寻找地下蓄水层，解决水库、港口和河流的冲淤及土壤的侵蚀问题。此外，在国防上，如军港的设计、潜艇和海底导弹基地的建设等，均与沉积岩（物）的研究密切相关。

进入 21 世纪，随着油气勘探领域由中浅层向深层、由构造圈闭向地层—岩性圈闭、由盆地边缘向盆地腹地、由海岸浅海向半深海—深海的转移，随着石油工程领域由二次采油向三次采油、减少地层伤害、开采剩余油、提高采收率、以效益为中心的转移，沉积学正发挥着越来越大的作用。

同时，沉积学也是与人类生存和可持续发展密不可分的，目前它在地质灾害预测研究和环境保护中正发挥着越来越大的作用，并产生了新的分支学科——环境沉积学（environmental sedimentology）。

二、基本研究方法

沉积学的研究方法可以分为野外和室内两个方面。沉积学是地质学的一个组成部分，沉积岩分布于地壳中成为一种地质体。因此，在野外对沉积岩进行研究时，首先要使用地质学的方法，即在野外研究沉积岩（物）的物质组分、结构构造、岩体产状、岩层间的接触关系、岩层厚度、各种成因标志和岩性组合在纵向和横向上的变化；并收集古流向资料，从而查明沉积岩体在时间和空间上的分布和演化特点。获得这些资料最基本的方法是系统测制沉积岩相剖面，并进行区域相剖面的分析与对比。

近年来，除了这种常规方法外，在沉积学研究中还引进了大量新技术新方法。在油气勘探中，地震技术和测井技术的应用产生了地震沉积学和测井沉积学，另外，如遥感技术、钻探技术、深海钻探及采取长岩心、测视雷达以及探测水下地形的声呐也在逐渐应用。

在室内研究中，显微镜薄片法仍是研究沉积岩最基本的方法，作为一个沉积学工作者必须熟练掌握。此外，常用的其他室内方法还有粒度（机械）分析、重矿物分析、不溶残渣分析、热分析、化学分析、光谱分析等。近年来，室内研究中亦引进了不少新的测试手段，如阴极发光显微镜、同位素分析（碳、氧、硫）、扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、图像分析仪、电子探针、原子吸收光谱、红外光谱、气相色谱以及激光拉曼光谱和古地磁的研究等。同时，计算机技术已广泛应用于沉积学研究中，包括沉积过程和沉积体系的展布及储层分布的模拟和预测等。

这些新技术新方法的应用是促进沉积学发展的重要原因之一，使得沉积学在宏观领域和

微观领域的研究深度、广度和成效大为提高，更使得对于沉积岩形成和分布的客观规律的研究与认识达到了一个新的水平。应该强调的是，必须将野外（或岩心）和室内研究密切结合起来，室内研究是野外（或岩心）研究的继续，野外（或岩心）研究是室内研究的基础。此外，在对沉积岩进行研究时，必须要注意沉积形成作用和其他地质作用，特别是与构造作用的关系。要将其他有关地质学科的资料、知识恰当地运用到沉积学的研究上来，这样才能获得有关沉积岩（物）成因的全面的认识。

三、文献学习和调研

文献学习和调研也是沉积学研究的重要方面。沉积学自 1850 年诞生以来，经过 160 年的发展，目前已成为一门较为成熟的学科，出版了大量的专著和论文。关于沉积学的文献可以追溯到 19 世纪，但是事实上，最先进的沉积学理念主要产生于最近的 50 年，这段时间出版了大量的专著。

一些关于沉积学专题的论文集具有很好的借鉴意义，比如沉积地质学会 SEPM (Society of Sedimentary Geologists)、国际沉积学家协会 IAS (International Association of Sedimentologists)、美国石油地质家协会 AAPG (American Association of Petroleum Geologists) 的出版物和会议纪要都是不错的选择。然而，更多的研究论文发表于一些学术刊物，有兴趣的读者应该尤为关注目前最新的学术信息和观点。SEPM 出版的《沉积学研究杂志》(Journal of Sedimentary Research)、IAS 出版的《沉积学》杂志 (Sedimentology) 和 Elsevier 出版的《沉积地质学》杂志 (Journal of Sedimentary Geology)，是目前最受关注的三个主要国际沉积学期刊。相关的期刊还有《地质学》(Geology)、《美国地质学会会刊》(Bulletin of the Geological Society of America)、《美国石油地质家协会会刊》(Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists)、《地质学杂志》(Journal of Geology)、《海洋地质学》(Marine Geology)、《古地理学、古生态和古气候学》(Palaeogeography, Palaeoecology and Palaeoclimatology) 等。国内的沉积学专业杂志有《沉积学报》、《古地学报》等。也可以到图书馆找到详尽的期刊列表。

最后，科学文摘、索引和书刊评述也是获取沉积学研究进展的重要来源，而且大部分期刊、书籍和学报都建立了在线数据库。此外，还有一些著名的学术搜索引擎，如 Web of Science (Science Citation Index)、GeoRef、GEOBASE、CNKI、CSCD 等。读者可以方便地进行查询，从中可以获得关于沉积学特定专题的参考文献和资料。

第二章 沉积岩的形成过程

沉积岩的形成一般要经过三个阶段，即原始物质的形成、原始物质的搬运和沉积作用（或沉积物的形成）、沉积物的沉积后作用（或成岩作用）。

第一节 沉积岩原始物质的形成

沉积岩原始物质是形成沉积岩的物质基础，其来源有四种，即陆源物质、生物源物质、深源物质及宇宙源物质。陆源物质是陆源碎屑岩的直接来源，生物源物质构成部分内源岩，深部来源的火山碎屑物质构成火山碎屑岩，而宇宙来源的物质因数量少似乎不可能构成沉积岩层。

一、陆源物质的形成

地壳上先形成的出露（或曾出露）的岩石叫做母岩，可以是岩浆岩、变质岩或沉积岩；母岩分布的地区叫做母岩区（source area）。陆源物质是母岩风化作用的产物，因此陆源碎屑岩的形成是从母岩的风化作用开始的（图1-1）。

（一）母岩风化过程中元素的转移顺序

母岩在化学风化过程中表现为某些元素的淋滤分散和另外一些元素的残积富集两个方面。各种元素在特定的风化条件下迁移能力是不一样的，即各种元素从母岩中析出的难易程度不同，因而造成各种元素按一定顺序从母岩中分离出来，即元素的风化分异。

前苏联波雷诺夫（1934）首先根据河水中元素的含量与该河流域的岩石中相应元素的含量相比较的办法，了解各种元素迁移的相对活动性，并得出了元素迁移序列。彼列尔曼（1955）在他的研究基础上，提出用“水迁移系数—— K_x ”来衡量元素在风化带中的迁移能力。此系数为河水干渣中的元素含量与在该河流域岩石中相应元素含量的比值。 K_x 值愈大，表明该元素从岩石淋溶进入水中的量愈多，即迁移能力愈强。计算公式如下：

$$K_x = \frac{m_x \cdot 100}{an_x}$$

式中 K_x —— X 元素的水迁移系数；

m_x —— X 元素在河水中的含量，mg/L；

a ——河水中矿物质残渣总量，mg/L；

n_x —— X 元素在该河流域岩石中的平均含量，%。

彼列尔曼利用前苏联许多地区河水中的元素含量和各元素在岩石圈中的平均含量，计算了不同景观条件下元素的水迁移系数，得出了各元素在表生条件下的迁移能力顺序。他将风化带中的元素分为以下五类：

- (1) 最易迁移元素 ($K_x = n \cdot 10 \sim n \cdot 10^2$): Cl、Br、I、S;
- (2) 易迁移元素 ($K_x = n \sim n \cdot 10$): Ca、Mg、Na、F、Sr、K、Zn;
- (3) 迁移元素 ($K_x = n \cdot 10^{-1} \sim n$): Cu、Ni、Co、Mo、V、Mn、Si (硅酸盐中)、P;
- (4) 惰性 (微弱迁移) 元素 ($K_x < n \cdot 10^{-1}$): Fe、Al、Ti、Sc、Y、Tc (稀土元素) 等;
- (5) 几乎不迁移的元素 ($K_x \approx n \cdot 10^{-10}$): Si (石英)。

上述每一类元素又是按水迁移系数降低的顺序而排列的。从迁移序列中可看出, 各种元素的迁移能力相差很大。最易迁移的元素 Cl、S 是 Si、Fe 元素迁移能力的上百倍到上千倍, 这就形成了原来共生的元素在风化过程中因迁移能力不同而发生分异。迁移能力最强的 Cl、S 最先从风化带中流失; 其次是 Ca、Mg、Na、F 等; 而 K、Mn、Si、P 等元素迁移能力较弱; Al、Fe、Ti 等迁移能力很弱, 往往残留原地形成红土和铝土矿。

元素的迁移能力与它们的物理化学性质不完全一致。例如, Na、K 的简单盐类的溶解度大致相同, 但在风化带中 Na 的迁移能力比 K 要大; 钙盐和镁盐 (CaCO_3 、 CaSO_4 、 MgCO_3) 比钠盐和钾盐 (NaCl、KCl) 难溶得多, 但 Ca、Mg 的迁移能力要大于 Na、K。这是由于风化过程中元素的迁移能力不单取决于离子特性, 而且受到各种元素的影响。

一般影响元素迁移能力的因素有: (1) 元素自身的原子和离子特性 (离子半径、原子价、极化能力等), 这在很多情况下决定了离子由固体转变为溶液或由溶液转变为固体的难易性; (2) 含有该元素的矿物特征和它对于风化作用的抵抗能力, 例如钙长石要比钠长石易风化, 所以在相同条件下钙要比钠易于析出, 而同样的钙在石灰岩中要比钙长石中更易于析出; (3) 介质的 pH 和 Eh 值, 例如铁在氧化环境中迁移能力很小, 但在还原环境中则显著增加, 而铀则相反; (4) 生物及气候条件的影响, 如潮湿炎热地区的 SiO_2 迁移能力要大大增加, 几乎与钙一样。

需要指出的是, 上述迁移序列是最一般性的, 主要是根据温湿气候条件下, 硅酸盐岩石在氧化环境中发生风化计算所得。但在其他气候条件下及还原性强的环境中, 元素的迁移顺序并不一定与上述相同 (曾允孚等, 1986)。

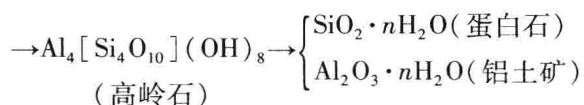
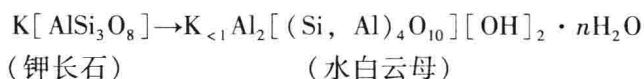
(二) 造岩矿物的风化及其产物

各种造岩矿物抵抗风化作用的能力, 即它们在风化条件下的稳定性是很不相同的, 这是由其元素构成等因素决定的。

石英是岩石的主要造岩矿物。石英在风化作用中稳定性极高, 它几乎不发生化学溶解作用, 一般只发生机械破碎作用。在长期的风化作用以及搬运和沉积作用的过程中, 风化稳定性较低的一些矿物就逐渐破坏从而相对地减少了, 而风化稳定性高的石英却逐渐地相对富集起来。因此, 石英就成了碎屑沉积岩的最主要的造岩矿物。

长石的风化稳定性次于石英。在长石中, 钾长石的稳定性较高, 多钠的酸性斜长石次之, 中性斜长石又次之, 多钙的基性斜长石最低。因此, 在沉积岩中钾长石多于斜长石。

钾长石的风化过程及其产物如下:



在钾长石的风化过程中，最先析出的成分是钾，其次是硅，最后才是铝。与此同时， OH^- 或 H_2O 也参加到矿物的晶格中来。随着钾、硅、铝的逐渐析出和水的加入，原来的钾长石就逐步地转变为水白云母、高岭石、蛋白石和铝土矿。钾长石是富钾的无水的铝硅酸盐矿物，架状构造，铝位于硅酸根的结晶格架中。水白云母中的钾已经比钾长石中的钾少了，硅也有所减少，部分的铝已从硅酸根的晶格中释放出来变为一般的阳离子，其结晶构造已不是架状而是层状的了，但仍然还是铝硅酸盐。高岭石与水白云母相比，又有了进一步的变化，钾已完全没有了，铝已完全从硅酸根中释放出来变为一般的阳离子，但高岭石仍然还是层状构造的硅酸盐矿物。蛋白石和铝土矿不是硅酸盐矿物，而是含水的氧化物矿物。由此可知，由原来的钾长石，到水白云母、高岭石，以至最后的蛋白石和铝土矿，是一个由量变到质变的、逐步的、有阶段性的风化过程。这一过程的总趋势是原来的钾长石不断地遭受破坏，最终变为在风化带中最为稳定的新矿物。铝土矿是风化带中很稳定的矿物，它是钾长石风化的最终产物。但是，只有在十分有利的条件下，钾长石才能完全风化成铝土矿；在一般情况下，钾长石大都转变为水白云母和高岭石。

斜长石的风化情况与钾长石类似。斜长石风化时，除一些成分（如钙、钠、硅等）从矿物中转移出去以外，常形成一些在风化带中相对较稳定的新矿物，如各种沸石、绿帘石、黝帘石、蒙脱石、蛋白石、方解石等；当然，这些新矿物在风化带中也不是十分稳定，也还会继续发生变化。基性斜长石的风化稳定性比酸性斜长石低，因此在沉积岩中，基性斜长石很少见到。

在云母类中，白云母的抗风化能力较强，所以它在沉积岩中相当常见。白云母在风化过程中，主要是析出钾和加入水，先变为水白云母，最后可变为高岭石。

黑云母的抗风化能力比白云母差得多。黑云母遭受风化后，钾、镁等成分首先析出，同时加入水，常转变为蛭石、绿泥石、褐铁矿等。

橄榄石、辉石、角闪石等铁镁硅酸盐矿物的抗风化能力比石英、长石、云母都低得多。其中以橄榄石最易风化，辉石次之，角闪石又次之。这些矿物在风化产物中保留较少，故在沉积岩中较少见。这些矿物在遭受风化时，铁、镁、钙等易溶元素首先析出，硅也部分地或全部地析出，大部分元素呈溶液状态流失走，一部分元素在风化带中形成褐铁矿、蛋白石等。

粘土矿物如高岭石、蒙脱石、水云母等，本来就是在风化条件下或者沉积环境中生成的，在风化带中相当稳定；但是，在一定的条件下，它们也还要发生变化，转变为更加稳定的矿物，如铝土矿、蛋白石等。

碳酸盐矿物，如方解石、白云石等，风化稳定性甚小，很易溶于水并顺水转移，因此在碎屑沉积岩中很难看到它们；只有在干旱的气候条件下，在距母岩很近的快速搬运和堆积中，才可能看到由它们组成的岩屑。

硫酸盐矿物（如石膏、硬石膏）、卤化物矿物（如石盐）等的风化稳定性最低，最易溶于水，呈溶液状流失走。

最后，在岩浆岩及变质岩中常见的一些次要矿物或副矿物，其风化稳定性的差别是很大的。风化稳定性较大的一些，如石榴子石、锆石、刚玉、电气石、锡石、金红石、磁铁矿、榍石、十字石、蓝晶石、独居石、红柱石等，在沉积岩中常作为重矿物出现。

用矿物的化学成分及其晶体构造的特征去寻求它们在风化作用过程中的相对稳定性，已经取得了一定的成果。例如，有人已经定量地计算出鲍文反应系列中的各种矿物的氧和阳离

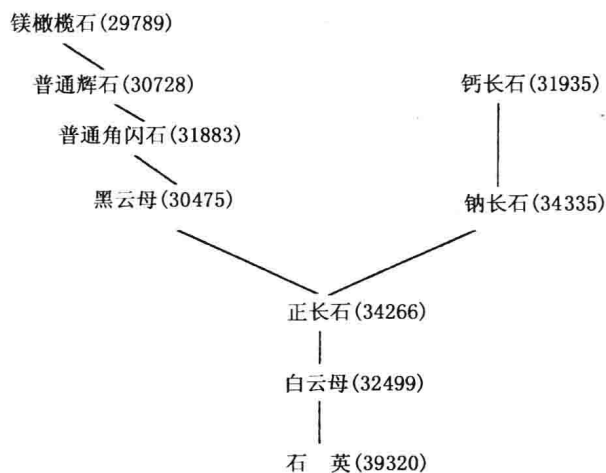


图 2-1 鲍文反应系列及矿物风化作用相对稳定性
(据冯增昭, 1993)
图中数字是键强度, 单位为 cal/mol

子之间的键强度的总数, 见图 2-1。

从数字可以看出, 鲍文反应系列下端的矿物, 其键强度总数较大, 所以其风化稳定性较高。当然, 在这些数字中也有一定的矛盾现象, 即白云母的键强度总数与序列中的顺序不符, 这可能是由于氢氧根的存在, 因为氢氧根的能量效应还是未知的。

(三) 岩石的风化及其产物

岩石是矿物的集合体, 因此岩石的风化及其产物主要是由组成它的矿物的风化情况决定的。

花岗质的岩浆岩 (包括花岗岩、花岗闪长岩等) 及变质岩 (如花岗片麻岩等) 是分布最广的岩浆岩及变质岩, 它们的风化是具有代表性的 (表 2-1)。

表 2-1 花岗岩的风化作用 (据冯增昭, 1993)

矿物成分	化学组分	所发生的变化	风化产物
石英	SiO_2	残留不变	砂粒
钾长石 KAlSi_3O_8	K_2O	成为碳酸盐、氧化物进入溶液	溶解物质
	Al_2O_3	水化后成为含水铝硅酸盐	粘土
	6SiO_2	少部分 SiO_2 游离出来, 溶于水中	溶解物质
斜长石 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	$3\text{Na}_2\text{O}$	成为碳酸盐、氯化物进入溶液	溶解物质
	CaO	成为碳酸盐, 溶于含 CO_2 的水中	溶解物质
	$4\text{Al}_2\text{O}_3$	同钾长石	粘土
	20SiO_2		溶解物质
白云母 $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$	$2\text{H}_2\text{O}$	残留不变	云母碎片
	K_2O		
	$3\text{Al}_2\text{O}_3$		
	20SiO_2		
黑云母 $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3$ $[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$	H_2O	水溶液	水溶液
	K_2O	成为碳酸盐、氯化物进入溶液	溶解物质
	Al_2O_3	生成含水铝硅酸盐	粘土
	$2(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$	成为碳酸盐、氯化物进入溶液, 碳酸盐 氧化为赤铁矿、褐铁矿等	溶解物质及色素
	3SiO_2	部分 SiO_2 游离出来溶于水中	溶解物质
锆石 ZrSiO_4	ZrO_2	残留不变	砂粒 (重矿物)
	SiO_2		
磷灰石 $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3\text{F}$ $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3\text{Cl}$	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$ (F, Cl, OH)	溶解或残留不变	溶解物质或砂粒 (重矿物)

中性和碱性侵入岩的风化情况与花岗质岩石相似。

基性和超基性侵入岩主要由较易风化的橄榄石、辉石、基性斜长石组成，远较花岗质岩石易风化。风化后，除部分易溶元素转移流失外，常在原地形成一些化学残余矿物，如蛇纹石、滑石、绿泥石、褐铁矿等。

火山岩及火山碎屑岩由于含有相当的甚至大量的玻璃质或火山灰，故其风化速度大都相当快。如玄武岩在遭受风化时，除一部分易溶元素流失外，常形成蒙脱石、高岭石、铝土矿、褐铁矿等化学残余矿物；如风化较彻底，可形成风化残余的富铁的红土层。

沉积岩的风化情况比较简单，因为它们本身就主要是由母岩的风化产物组成的。其中，以蒸发岩（主要由卤化物及硫酸盐矿物组成）最易溶解、最易风化，碳酸盐岩次之，粘土岩、石英砂岩、硅岩等最难风化。

由于母岩的各种化学成分在风化作用中的转移性质的差异，因此母岩的风化作用过程就呈现出了阶段性。

与上述元素从风化壳中淋滤出的顺序相应，波雷诺夫将结晶岩的风化过程分为四个阶段，各阶段有其独特的风化产物。现以玄武岩为例（表 2-2）加以说明。

表 2-2 玄武岩的分解作用（据曾允孚等，1986）

玄武岩 机械破碎成小块 $\text{Ca}[\text{Mg, Fe, Al}][(\text{Si, Al})_2\text{O}_3]$ (辉石) $(100-n)\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] \cdot n\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ (斜长石) (其中往往含微量 K) $[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ $(\text{Na, Ca})_{<1}(\text{Al, Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (蒙脱石) $(\text{K})_1\text{Al}_2[(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ (水云母) $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ (高岭石) $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot p\text{H}_2\text{O}$ (含水氧化铁) $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (蛋白石) $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ (铝土矿)	带出物质	带入物质	介质性质	阶段
	无	无		(1)
	大部分 Ca、Na、Mg、K 及部分 SiO_2	H_2O , O	碱性或中性	(2)
	几乎全部 Ca、Na、Mg、K 及大部分 SiO_2	H_2O , O	酸性	(3)
	全部 Na、Ca、Mg、K 及极大部分 SiO_2	H_2O , O	酸性	(4)

这四个阶段为：

(1) 机械破碎阶段：以物理风化为主，形成岩石或矿物的碎屑。

(2) 饱和硅铝阶段：其特点是岩石中的氯化物和硫酸盐将全部被溶解，首先带出 Cl^- 和 SO_4^{2-} 。然后在 CO_2 和 H_2O 的共同作用下，铝硅酸盐的硅酸盐矿物开始分解，游离出碱金属和碱土金属 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) 盐基，其中 Ca^{2+} 和 Na^+ 的流失比 K^+ 和 Mg^{2+} 要快些。这些析出的阳离子组成弱酸盐，使溶液呈碱性或中性，并使一部分 SiO_2 转入溶液。此阶段中形成胶体粘土矿物——蒙脱石、水云母、拜来石、脱石等。同时，溶解性较差的碳酸钙开始堆积。

(3) 酸性硅铝阶段：几乎全部盐基继续被溶滤掉， SiO_2 进一步游离出来。因此，碱性条件逐渐为酸性条件所代替。 Mg^{2+} 和 K^+ 的再次淋出使上个阶段所形成的矿物（蒙脱石、水云母）又被破坏而形成在酸性条件下稳定的，不含 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 盐基的粘土矿物——高岭石、变埃洛石等。通常，将达到此阶段的风化作用称为粘土型风化作用。

(4) 铝铁土阶段：这是风化的最后阶段。在此阶段，铝硅酸盐矿物被彻底地分解，全部可移动的元素都被带走，主要剩下铁和铝的氧化物及一部分二氧化硅。它们呈胶体状态在酸

性介质中聚集起来，在原地形成铝土矿、褐铁矿及蛋白石的堆积。由于它是一种红色疏松的铁质或铝质土壤，所以也称为红土。达到此阶段的风化作用通常称为红土型风化作用。

上述四个阶段是一般的完整的风化过程，但在同一地区不一定都进行到底。风化作用的阶段常受母岩岩性、气候、地形等因素所控制。

（四）母岩风化产物的类型

由上所述可知，地壳表层岩石的风化作用是一个十分复杂的地质过程。地壳表层岩石风化的结果形成了三种性质不同的风化产物。

（1）碎屑残留物质：这主要是指母岩的岩石碎屑或矿物碎屑。在风化作用的第一阶段，这种碎屑残留物质最发育；到第四阶段，这种物质就很少了，只有那些风化稳定性最高、极难风化的石英才可能留下来。这种物质在初始阶段大都残留在母岩区，后来就可能被各种营力搬运走。

（2）新生成的矿物：这主要是指在化学风化作用过程中新生成的一些矿物，如水白云母、高岭石、蒙脱石、蛋白石、铝土矿、褐铁矿等。这些物质在初始阶段也大都存在于母岩的风化带中，所以也常称为“化学残余物质”，后来它们也将被各种营力搬运走。

（3）溶解物质：这主要是指母岩在化学风化作用过程中被溶解的那些成分，如 Cl、S、Ca、Na、Mg、K、Si、Fe、Al、P 等。这些物质大都呈真溶液或胶体溶液状态顺水流走，转移至远离母岩区的湖泊或海洋中去。

碎屑残留物质是陆源碎屑沉积岩主要的原始物质成分。

在化学风化作用中新生成的一些矿物成分是粘土岩以及其他沉积岩的主要原始物质成分。

碎屑残留物质和化学风化矿物可合称为碎屑物质或陆源碎屑物质，它们的搬运和沉积作用主要受水动力学定律支配。这些碎屑物质被各种地质营力搬运以后，在一定的条件下沉积下来，再经过成岩作用，就形成了碎屑岩（包括粘土岩）。

与碎屑物质相对立的是溶解物质，它们的搬运和沉积作用主要受或首先受化学定律支配。这些溶解物质转移到海洋或湖泊后，在一定的条件（首先是各种化学条件，有时生物作用条件和水动力作用条件也很重要）下沉积下来，再经过成岩作用就形成了各种类型的化学岩、生物化学岩或生物岩。

由此可知，从母岩的风化作用开始，其物质成分的分异作用或沉积岩的形成作用就开始了。

风化彻底的岩石所提供的沉积物为成熟的沉积物，这类物质几乎全是由风化最终产物组成，即主要是粘土矿物和稳定的矿物碎屑、岩石碎屑。这些物质在搬运过程中进一步分选，成为分别由粘土矿物或碎屑物质组成的成分单一的沉积物，其中重矿物含量很少。相反，风化不彻底的岩石所提供的沉积物质则形成不成熟的沉积物。所谓风化不彻底，是指母岩在风化过程中，不仅所含的稳定矿物没有风化分解，就是稳定性较差的矿物也未风化或略风化。因而，风化不彻底的岩石所提供的沉积物成分复杂，稳定和不稳定的矿物碎屑都有，还有较多的各种岩石碎屑和重矿物，经搬运、堆积形成成分复杂的不成熟的沉积物。由此可见，陆源沉积岩的成分除了反映沉积物在搬运过程中所发生的变化外，在一定程度上也能反映母岩的风化程度。

（五）风化壳

地壳表层岩石风化的结果是，除一部分溶解物质流失以外，其碎屑残余物质和新生成的