



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校石油天然气类规划教材

沉积岩与沉积相

何幼斌 王文广 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校石油天然气类规划教材

沉积岩与沉积相

何幼斌 王文广 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了沉积岩与沉积相的基础知识、基本原理及其在石油地质中的应用,同时简要介绍了近20年来沉积学的进展。本书主要作为石油高校勘查技术与工程、地球化学、地球物理学等专业学生阅读教材,也可供其他高校、科研院所的有关专业教学及油气、煤田、矿山地质工作者以及有关地质人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

沉积岩与沉积相/何幼斌,王文广主编.

北京:石油工业出版社,2007.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材.

高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 978-7-5021-5818-7

I. 沉…

II. ①何…②王…

III. ①沉积岩—高等学校—教材

②沉积相—高等学校—教材

IV. P588.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第135188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

发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2007年1月第1版 2007年1月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:18.5

字数:472千字 印数:1—3000册

ISBN 978-7-5021-5818-7/TE·4396(课)

定价:27.00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

前 言

为适应石油工业和石油高等教育发展的形势,中国石油教育学会和石油工业出版社于2004年10月13~15日在北京怀柔联合举行了石油地质与勘探专业教学与教材规划研讨会,与会的石油高校有关领导和教师就当前石油高等教育教材问题进行了研讨,并制定了一系列教材出版计划。本教材就是其中的一本,主要是针对勘查技术与工程、地球化学、地球物理学等本科专业的教学要求而编写的,约50学时。

根据这些专业的特点,本教材主要介绍了沉积岩与沉积相的基本概念、特点、成因、模式及其在石油地质中的应用,重点是主要岩类的岩石学及主要相类型的相模式,同时简要介绍了20世纪80年代以来的沉积学进展。教材的编写是以参编教师的授课讲义为基础并参考了国内外代表性的沉积岩石学教材,同时参阅了国内外有关的沉积学研究成果。

本教材由长江大学、大庆石油学院、西安石油大学三所高校教师共同编写,由何幼斌和王文广担任主编。参加各章节编写的教师分别是:第一章、第三章、第八章、第九章、第十章由何幼斌编写,第二章由罗顺社编写,第四章由柳成志编写,第五章、第七章由吴少波编写,第六章由王文广编写,第十一章由罗顺社和何幼斌共同编写,第十二章、第十三章由李建明编写。全书由何幼斌和王文广统稿。

中国石油大学(北京)朱筱敏教授和中国地质大学(北京)姜在兴教授对本教材进行了评审,他们十分认真地审阅了全部稿件,并提出了详细具体的修正意见。根据他们的意见,各位编者和主编又对稿件进行了修改和加工。

在教材的编写过程中,得到了石油工业出版社及其教材出版中心有关领导的支持和指导,三所高校的教务处和相关院系领导给予了大力支持和具体指导,李维锋教授对本教材的编写提纲和部分章节提出了有益的建议,研究生彭寿昌、董桂玉、徐徽、辛长静、罗进雄、李娴静、马鸣、黄正良、朱洁琼、崔建、刘肖霞、刘菲、曾婷、陈静等参加了资料的收集、整理与校对工作,在此一并表示衷心感谢!

本教材的编写还得到了高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助。

由于编者水平有限,书中不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

2006年10月15日

目 录

第一章 绪论	1
第一节 沉积岩的概念及基本特征.....	1
第二节 沉积岩石学的研究意义和研究方法.....	3
第二章 沉积岩的形成及演化	6
第一节 沉积物的来源.....	6
第二节 沉积物的搬运和沉积作用	13
第三节 沉积后作用	27
第四节 沉积岩的分类	28
第三章 沉积岩的构造与颜色	30
第一节 概述	30
第二节 物理成因的构造	30
第三节 化学成因的构造	44
第四节 生物成因的构造	48
第五节 沉积岩的颜色	51
第四章 陆源碎屑岩	54
第一节 概述	54
第二节 碎屑岩的成分	54
第三节 碎屑岩的结构	60
第四节 砾岩和角砾岩	70
第五节 砂岩	74
第六节 粉砂岩	83
第七节 粘土岩	84
第八节 碎屑岩的成岩后生变化	91
第五章 火山碎屑岩	97
第一节 火山碎屑岩的成分	97
第二节 火山碎屑岩的结构、构造和颜色.....	99
第三节 火山碎屑岩的分类及命名.....	100
第四节 火山碎屑岩的主要类型及特征.....	101
第五节 火山碎屑岩与油气.....	103
第六章 碳酸盐岩	104
第一节 概述.....	104
第二节 碳酸盐岩的物质组成及成分分类.....	104
第三节 碳酸盐岩的结构组分.....	107
第四节 石灰岩.....	119

第五节	白云岩	126
第六节	中国湖泊碳酸盐岩	132
第七节	碳酸盐沉积物的成岩作用	135
第七章	其他沉积岩	143
第一节	硅岩	143
第二节	蒸发岩	146
第三节	铁、铝、锰、磷沉积岩	150
第四节	煤和油页岩	153
第八章	沉积相的概念及分类	157
第一节	沉积相的概念	157
第二节	沉积相的分类	160
第九章	陆相组	162
第一节	冲积扇相	162
第二节	河流相	169
第三节	湖泊相	181
第十章	三角洲相	193
第一节	概述	193
第二节	三角洲沉积特征及其相模式	198
第三节	三角洲相的鉴别标志及其与油气的关系	210
第十一章	海洋碎屑沉积相	213
第一节	海洋环境的一般特征	213
第二节	无障碍海岸相	217
第三节	障壁型海岸相	221
第四节	浅海陆棚相	227
第五节	半深海相及深海相	230
第六节	重力流沉积及沉积相	232
第七节	深水牵引流沉积	238
第十二章	海洋碳酸盐沉积环境及相模式	246
第一节	海洋碳酸盐沉积环境特点	246
第二节	海洋碳酸盐沉积相模式	247
第三节	礁和礁相	257
第十三章	岩相古地理研究	264
第一节	相标志	264
第二节	岩相古地理分析的基本原理	274
第三节	沉积盆地的岩相古地理条件分析	276
第四节	沉积盆地岩相古地理图的编制	284
参考文献		287

第一章 绪 论

第一节 沉积岩的概念及基本特征

一、沉积岩的概念

沉积岩 (sedimentary rocks) 是组成岩石圈的三大类岩石 (岩浆岩、变质岩、沉积岩) 之一。它是在地壳表层的条件下, 由母岩的风化产物、火山物质、有机物质、宇宙物质等沉积岩的原始物质成分, 经过搬运作用、沉积作用以及沉积后作用而形成的一类岩石。

地壳表层是指大气圈的下层、水圈和生物圈的全部以及岩石圈的上层, 称“沉积岩生成圈”或“沉积圈”。与岩浆作用和变质作用的条件相比, 其特点是常温、常压, 同时受水、大气、生物和重力的作用明显。

母岩是指早于该沉积岩而存在的岩浆岩、变质岩和较老的沉积岩。从最根本的意义上说, 从地球发展历史的角度来看, 沉积岩的母岩应该是岩浆岩。

从整个地壳发展历史来看, 目前已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为 36 亿年 (俄罗斯科拉半岛), 其中有生命记载的岩石年龄为 31 亿年 (南非)。所以, 沉积岩是研究地球发展和演变历史不可缺少的宝贵资料。

二、沉积岩的分布

沉积岩的分布面积很广。大陆表面约有 75% 的面积为沉积岩或沉积物所覆盖, 最大厚度达 13km, 平均厚度约为 1.8km; 已探明的海底、洋底几乎全部为沉积物和沉积岩所覆盖, 其厚度为 0.2~3km, 平均厚度约 1km。从整个岩石圈来看, 沉积岩只占其体积的 5%, 约为 $4.4 \times 10^8 \text{ km}^3$ (Pettijohn, 1975), 即平均厚度约为 735m (Pettijohn, 1975)。

沉积岩的种类繁多, 但自然界分布最多的是粘土岩 (页岩、泥岩), 其次是砂岩和石灰岩, 它们约占沉积岩总量的 95% 以上。

三、沉积岩的基本特征

与岩浆岩、变质岩相比, 沉积岩有其自己的特点。

1. 矿物成分

沉积岩中已发现的矿物达 160 种以上, 但常见的只有 20 余种。而在一种岩石中主要 (造岩) 矿物只有 1~3 种, 通常不超过 5~6 种 (表 1-1)。由于成因、形成条件的不同, 沉积岩的矿物具有与岩浆岩不同的特点。

(1) 高温矿物少见。在岩浆岩中大量存在的矿物, 如橄榄石、普通辉石、普通角闪石等铁镁矿物以及基性斜长石, 在沉积岩中则很少。这些矿物是在高温、高压下由岩浆结晶形成的, 而转入地表的常温、常压条件后则不稳定。

(2) 在岩浆岩中数量甚多的矿物, 如钾长石、酸性斜长石及石英, 在沉积岩中也广泛存

在。这些矿物形成于岩浆结晶晚期，因而在地表环境中比较稳定，其中尤以石英最为稳定，在沉积岩中的相对含量甚至可超过在岩浆岩中的含量。由于中、基性斜长石在地表均不稳定，所以在沉积岩中少见。

(3) 在沉积作用过程中新生成的自生矿物，如某些氧化物和氢氧化物、粘土矿物、盐类矿物、碳酸盐矿物，是沉积岩的主要矿物成分之一，但在岩浆岩中极少或缺乏。

由此可见，沉积岩和岩浆岩在矿物成分上既存在继承性，又有差异性。继承性反映了两者的历史渊源，岩浆岩的风化产物是沉积岩的主要来源；明显的差异是由两者的生成条件不同决定的。

表 1-1 沉积岩与岩浆岩的平均矿物成分 (单位:%)

矿物	沉积岩 (利思与米德, 1915)	沉积岩 (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	7.50	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	—	—
碳质	0.73	—	—
其他	0.58	3.00	0.08

2. 化学成分

沉积岩和岩浆岩的平均化学成分数据十分接近(表 1-2)，这是因为沉积岩基本上是由岩浆岩的风化产物所组成。但由于二者形成条件不同，其化学成分上仍有若干差别。

表 1-2 沉积岩与岩浆岩的平均化学成分 (单位:%)

氧化物	沉积岩			岩浆岩 (克拉克, 1924)
	克拉克 (1924)	克里宁 (1941)	舒科夫斯基 (1952)	
SiO ₂	57.95	58.16	59.17	59.12
TiO ₂	0.57	0.94	0.77	1.05
Al ₂ O ₃	13.39	15.93	14.47	15.34
Fe ₂ O ₃	3.47	8.54	6.32	3.08
FeO	2.08		0.99	3.80
MnO	—	0.64	0.80	0.12
MgO	2.65	3.58	1.85	3.49
CaO	5.89	6.26	9.90	5.08

续表

氧化物	沉积岩			岩浆岩 (克拉克, 1924)
	克拉克 (1924)	克里宁 (1941)	舒科夫斯基 (1952)	
Na ₂ O	1.13	1.85	1.76	3.84
K ₂ O	2.86	2.85	2.77	3.13
P ₂ O ₅	0.13	0.26	0.22	0.30
ZrO ₂	—	—	—	0.039
Cr ₂ O ₃	—	—	—	0.055
CO ₂	5.38	—	—	0.102
H ₂ O	3.23	—	—	1.15
其他	—	—	—	0.304
总计	98.73	99.01	99.02	100.00

(1) Fe₂O₃ 和 FeO 的含量：沉积岩与岩浆岩中铁的总量大体相当，但在岩浆岩中 FeO 略高于 Fe₂O₃，而在沉积岩中 Fe₂O₃ 要高于 FeO。这是由于地表比地下深处有更多的自由氧，使沉积岩中的高价铁居多。

(2) K₂O 和 Na₂O 的含量：沉积岩中碱金属的含量远低于岩浆岩，尤其是 Na 的含量，且岩浆岩 Na₂O 高于 K₂O，而沉积岩中则相反。这是由于它们在地表条件下易于从母岩中析出，大量流失并进入到海水中。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。因此，导致沉积岩中 K₂O 含量高于 Na₂O。

(3) H₂O 和 CO₂ 的含量：沉积岩形成于地表条件下，其中富含 H₂O 和 CO₂；岩浆岩形成于高温高压环境，这两种成分几乎没有。

(4) 沉积岩中常常富含有机质。

3. 结构构造

沉积岩的结构比岩浆岩更为多样，其中碎屑结构、粒屑结构和生物结构都是沉积岩所特有的，晶粒结构虽然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（水、空气）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特征构造。此外，各种层面构造、缝合线、叠锥、叠层构造等也是沉积岩所特有的。

第二节 沉积岩石学的研究意义和研究方法

一、研究意义

沉积岩石学 (sedimentary petrology) 是研究沉积岩 (物) 的物质成分、结构、构造、分类及其形成作用，以及沉积环境和分布规律的一门科学。沉积岩石学不仅要全面研究沉积岩 (物) 的物质组分、结构、构造、分类命名、岩体产状和岩层之间的接触关系，而且还要研究沉积岩的形成机理和沉积环境，即包括岩石学和沉积相两方面内容。沉积岩石学不仅研

究地层记录中的岩石，还大量研究现代沉积；除了研究沉积岩（物）的特点外，还进行模拟实验，深入地探讨沉积作用的机理；不仅全面系统地进行沉积环境分析，而且还要研究其时空演化和分布规律以及与大地构造之间的关系。

沉积圈蕴藏着丰富的矿产和能量资源。可燃性矿产（石油、天然气、煤、油页岩）、铝土矿、锰矿、盐矿及钾盐矿等几乎全为沉积类型，极大部分铁矿、磷矿亦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，沉积类型也占很大比重，不少金、铂、钨、锡、金刚石等矿产也来源于沉积的砂矿。据统计，沉积和沉积变质型矿床占世界资源总储量的80%。

除了上述沉积矿床外，有些沉积岩本身就是多种工业的主要原料或辅助原料。如石灰岩及白云岩为冶金工业中常用的熔剂，石灰岩又为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。纯净的粘土岩按其性质不同可作为耐火材料、陶瓷原料、钻井液原料、吸收剂、填充剂和净化剂等，石英岩及石英砂可作为玻璃原料。

沉积物和沉积岩还是重要的地下蓄水层。通过沉积岩石学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、潜艇和海底导道基地的建设等，均与沉积岩（物）的研究密切相关。

沉积岩的研究不仅具有上述重大的实际意义，而且也具有重大的理论意义。它在地表分布广泛，在地质历史时期中延续的时间极长，成为研究地球发展和演化历史的重要资料。

二、研究方法

沉积岩的研究方法可分为野外和室内两个方面。

沉积岩石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）的物质成分、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。获得这些资料的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。

野外观察和描述可以初步鉴定沉积岩的岩性、描述原生沉积构造、测量岩层产状和厚度、确定岩层之间的接触关系及其成因标志，并对所观察到的内容做详细的记录，尽可能的素描、照相和编制相应的图件。根据所获的资料，对沉积岩层的成因、形成条件和含矿性做出初步判断，查明沉积岩体在时间上和空间上的分布和演化特点。

在覆盖区的沉积岩研究中，最直接的是岩心观察和描述，对重要沉积现象和成矿标志要进行素描，并选重点层段进行照相和取样。由于取心段有限，要充分利用测井资料、录井资料、地震资料进行岩性、电性、物性和含油气性分析，综合观察和解释，编制岩性—电性关系综合剖面。常用的测井曲线包括自然电位、微电极、感应、自然伽马、密度、声波以及地层倾角测井等。

除了这种常规的方法外，在沉积岩石学研究中还引进了大量新技术和新方法。如地震勘探技术（地震地层学等）、遥感技术、钻探技术、深海钻探及取长岩心和各种测井技术，航空摄影或地面摄影用的测视雷达以及探测水下地形的测视声呐，也已逐渐应用。

在室内研究中，显微镜薄片法仍是研究沉积岩的最基本的方法，作为一个沉积岩石学工作者必须熟练掌握。此外，常用的其他室内研究方法还有粒度（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、阴极发光分析、图像分析、同位素（碳、

氧、硫等)分析、扫描电子显微镜、电子探针分析、X射线衍射分析、气相色谱分析以及古地磁研究等。

新技术和新方法的应用,是促进沉积岩石学研究不断向前发展的重要原因之一,使沉积岩在宏观领域和微观领域的研究深度、广度和成效大为提高,更使得对于沉积岩的客观规律的研究与认识达到了一个新的水平。应该指出,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,必须要注意沉积岩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岩石学的研究上来,这样才能使我们获得有关沉积岩(物)成因的全面认识。

第二章 沉积岩的形成及演化

沉积岩的形成及其形成后的演化的全部历史过程大致可分3个阶段，即沉积岩原始物质（主要是母岩的风化产物）的形成阶段、沉积岩原始物质的搬运和沉积阶段（即沉积物的形成阶段）、沉积后作用阶段（其中又包括沉积物的同生作用和准同生作用阶段、沉积物的成岩作用阶段以及沉积岩的后生作用阶段）。

第一节 沉积物的来源

组成沉积岩的沉积物质来源有：

- (1) 陆源物质——母岩的风化产物；
- (2) 生物源物质——生物残骸和有机物质；
- (3) 深源物质——火山碎屑物质和深部卤水；
- (4) 宇宙源物质——陨石。

地表先成岩石的风化作用的产物是沉积物最主要的来源，这种先成岩石即称母岩（source rock）。母岩可以是岩浆岩或变质岩，也可以是先成的沉积岩。供给这类沉积物的地区，即母岩存在的地区，称作物源区（也称为供给区或陆源区）。

此外，由生物的生命活动所产生的沉积物以及来自地壳深部物质组成的沉积物（尤其是火山碎屑沉积物）也占有一定的比例，而宇宙来源的沉积物则数量甚微。

一、沉积物的主要来源——母岩的风化产物

1. 风化作用的概念

所谓风化作用（weathering）就是指地壳最表层的岩石在温度变化、大气、水、生物等因素作用下，发生机械破碎和化学变化的一种作用。风化作用按其性质可分为物理风化作用、化学风化作用和生物风化作用。

1) 物理风化作用

岩石主要发生机械破碎，而化学成分不改变的风化作用，称为物理风化作用。

引起物理风化作用的主要因素有：温度的变化，晶体生长，重力作用，生物的生活活动，水、冰及风的破坏作用。

物理风化的总趋势是使母岩崩解，产生碎屑物质，其中包括岩石碎屑和矿物碎屑等。

2) 化学风化作用

在氧、水和溶于水中的各种酸的作用下，母岩遭受氧化、水解和溶滤等化学变化，使其分解而产生新矿物的过程称为化学风化作用。

化学风化作用不仅使母岩破碎，而且使其矿物成分和化学成分发生本质的改变。它们在适当的条件下就形成粘土物质和化学沉淀物质（真溶液及胶体溶液物质）。

3) 生物风化作用

在岩石圈的上部、大气圈的下部和水圈的全部，几乎到处都有生物的存在。故生物，特

别是微生物在风化作用中能起到巨大的作用。生物对岩石的破坏方式既有机械作用，又有化学作用和生物化学作用；既有直接的作用，也有间接的作用。

生物的作用越来越受到重视，生物风化作用也随着地质历史发展而越来越显著。

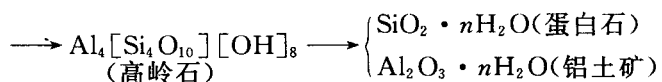
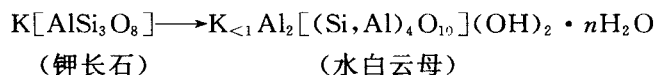
2. 各种造岩矿物的风化及其产物

各种造岩矿物抵抗风化作用的能力，亦即它们在风化作用条件下的稳定性大不相同。

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。因此，石英就成了碎屑沉积岩中最主要的造岩矿物。

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：



斜长石的风化情况与钾长石类似。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、蒙皂石、蛋白石、方解石等；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，它们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。

各种粘土矿物如高岭石、蒙皂石、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。

各种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。

各种硫酸盐矿物（如石膏、硬石膏）、硫化物矿物（如黄铁矿）、卤化物矿物（如石盐）等，它们的风化稳定性最低，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，如石榴石、锆英石、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，在沉积岩中常作为碎屑重矿物而出现。

为什么各种造岩矿物的风化稳定性差别这么大呢？

研究表明，各种矿物的风化稳定性，不仅取决于它们的化学成分，还取决于它们的晶体构造，矿物的键强度总数越大，其风化稳定性越高。有人已经定量地计算出鲍文反应系列中的各种矿物氧和阳离子之间的键强度的总数（cal/mol），如图 2-1 所示。

从数字中可以看出，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

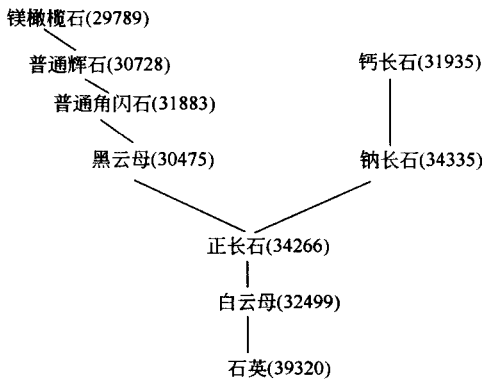


图 2-1 鲍文反应系列及其矿物风化作用的相对稳定性

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存在的原因，因为氢氧根的能量效应还是未知的。另外，也还存在着许多未知或疑难的问题。

3. 各种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其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 为花岗质的岩浆岩的风化作用。

表 2-1 花岗岩的风化作用

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 K[AlSi ₃ O ₈]	K ₂ O	成分为碳酸盐、氧化物进入溶液	溶解物质
	Al ₂ O 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 Na[Al Si ₃ O ₈] Ca[Al ₂ Si ₂ O ₈]	3Na ₂ 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
	4Al ₂ O ₃	水化后成为含水铝硅酸盐	粘土
	20SiO ₂	少部分 SiO ₂ 游离出来，溶于水中	溶解物质
白云母 KAl ₂ [AlSi ₃ O ₁₀](OH) ₂	2H ₂ O K ₂ O Al ₂ O ₃ 20SiO ₂	残留不变	云母碎片
黑云母 K(Mg, Fe) ₃ [AlSi ₃ O ₁₀](OH) ₂	H ₂ O	水溶液	水溶液
	K ₂ O	成为碳酸盐、氯化物进入溶液	溶解物质
	Al ₂ O ₃	生成含水铝硅酸盐	粘土
	2(Mg, Fe)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
锆英石 ZrSiO ₄	ZrO ₂ SiO ₂	残留不变	砂粒（重矿物）
磷灰石 Ca ₅ (PO ₄) ₃ F Ca ₅ (PO ₄) ₃ Cl	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F, Cl, OH)	溶液 或残留不变	溶解物质或砂粒 (重矿物)

图 2-2 为美国科罗拉多州鲍尔德附近的一个花岗闪长岩体的风化情况。由图中可以明显地看出，在风化带中，角闪石大部分消失；黑云母变化也很强烈，主要变为蛭石；奥长石变化也很大以至基本消失；相反，微斜长石和石英则基本上没有发生什么变化，因此在机械

残余的碎屑矿物中，它们的相对含量就增高了；氧化铁及粘土矿物是新生成的化学残余矿物；白云石可能是成岩作用的产物，因为上覆的土壤中没有发现白云石；各种副矿物未发现，原因尚不很清楚。

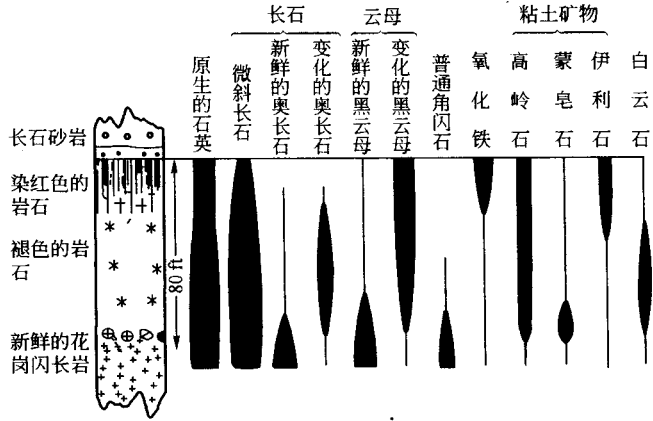


图 2-2 美国科罗拉多州鲍尔德附近密西西比纪花岗闪长岩的风化剖面

(据瓦尔斯特龙, 1948; 转引自冯增昭, 1993)

1 ft=0.3048m

中性和碱性侵入岩的风化情况大体与花岗质岩石相似。

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，常形成蒙皂石、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。

4. 母岩风化过程中元素的转移顺序及母岩风化的阶段性

波雷诺夫（1934, 1952）在对比岩浆岩的平均化学成分和流经该岩石分布地区的河流流水溶解物质的平均化学成分以后，得出十分重要的数据（表 2-2）。

表 2-2 岩浆岩平均化学成分与流经该地区的河流流水溶解物质平均化学成分的对比

(据波雷诺夫, 1934, 1952; 转引自冯增昭, 1993)

化学成分	岩浆岩 平均化学成分, %	流经岩浆岩地区的河流流水 溶解物质的平均成分, %	元素及化合物的相对转移性
SiO ₂	59.09	12.80	0.20
Al ₂ O ₃	15.35	0.90	0.02
Fe ₂ O ₃	7.29	0.40	0.04
Ca	3.00	14.70	3.00
Mg	2.11	4.90	1.30

续表

化学成分	岩浆岩 平均化学成分, %	流经岩浆岩地区的河流流水 溶解物质的平均成分, %	元素及化合物的相对转移性
Na	2.97	9.50	2.40
K	2.57	4.40	1.25
Cl ⁻	0.05	6.75	100.00
SO ₄ ²⁻	0.15	11.60	57.00
CO ₃ ²⁻	—	38.50	—

由表 2-2 可见, 母岩的各种化学成分在风化作用过程中转移性的差别是很大的。

以后, 波雷诺夫又根据其他一些事实, 作了一定的修正和补充, 拟定出母岩的元素或化合物在风化作用过程中的转移顺序及其数量级别, 参看表 2-3。

表 2-3 母岩的主要造岩元素或化合物在风化作用过程中的转移顺序及其数量级别
(据波雷诺夫, 1948; 转引自冯增昭, 1993)

转移顺序	元素或化合物	数量级别
1. 最易转移的	Cl, (Br, I), S	$n \cdot 10$
2. 易转移的	Ca, Na, Mg, K	n
3. 可转移的	SiO ₂ (硅酸盐), P, Mn	$n \cdot 10^{-1}$
4. 略可转移的	Fe, Al, Ti	$n \cdot 10^{-2}$
5. 基本上不转移的	SiO ₂ (石英)	$n \cdot 10^{-\infty}$

由于母岩的各种化学成分在风化作用中转移性质的差异, 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 4 个阶段, 在各阶段中, 各有其独特的风化产物。兹以玄武岩为例 (表 2-4) 对这 4 个阶段加以说明。

表 2-4 玄武岩的风化作用

玄武岩 机械破碎成小块	带出物质	带入物质	介质性质	阶段
辉石 $\text{Ca}[\text{Mg, Fe, Al}] \cdot [(\text{Si, Al})_2\text{O}_6]^+$ 斜长石 $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ (其中往往含微量 K) $[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	无	无		I
蒙皂石 $m[\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2]$ $p[(\text{Al, Fe}^{3+})_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2]$ $n\text{H}_2\text{O}$ 水云母 $\text{K}_{x-1}\text{Al}_2[(\text{Si, Al})\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	大部 Ca, Na, Mg, K 及部分 SiO ₂	H ₂ O、O	碱性及中性	II
高岭石 $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$	几乎全部 Ca, Na, Mg, K 及大部分 SiO ₂	H ₂ O、O	酸性	III
含水氧化铁 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot p\text{H}_2\text{O}$ + 蛋白石 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ + 铝土矿 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$	全部 Na, Ca, Mg, K 及极大部分 SiO ₂	H ₂ O、O	酸性	IV

(1) 破碎阶段 (I): 以物理风化为主, 形成岩石或矿物的碎屑。

(2) 饱和硅铝阶段 (II): 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, 铝硅酸盐和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 和 Na 的流失比 K 和 Mg 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反应, 并使一部分 SiO_2 转入溶液。此阶段中形成胶体粘土矿物——蒙皂石、水云母、拜来石、绿脱石等。同时, 溶解性较差的碳酸钙开始堆积。

(3) 酸性硅铝阶段 (III): 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^+ 的再次淋滤出使上个阶段所形成的矿物 (蒙皂石、水云母) 又被破坏而形成在酸性条件下稳定的、不含 K、Na、Ca、Mg 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 (IV): 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 SiO_2 。它们呈胶体状态在酸性介质中聚集起来, 在原地形成水铝矿、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 4 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。由于风化过程中风化强度变化, 或者风化时间长短变化, 所形成的各种类型粘土矿物的顺序如图 2-3 所示。

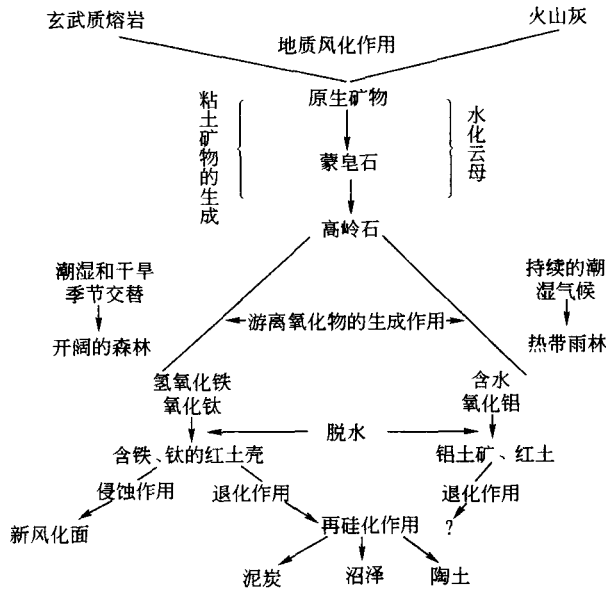


图 2-3 夏威夷岛土壤风化作用图解

(据谢维尔, 1952; 转引自赵澄林, 1993)

表示土壤风化作用的初期、中期和末期的产物

5. 母岩风化产物的类型

从上所述, 可知地壳表层岩石的风化作用是一个十分复杂的地质作用。地壳表层岩石风化的结果, 形成了 3 种不同性质的风化产物。

(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,