

朱而勤 著
王琦

海 洋 出 版 社

海洋自生矿物

海 洋 自 生 矿 物

朱 而 勤

王 琦

海 洋 出 版 社

1988年·北京

内 容 简 介

本书是一部全面介绍现代海底自生矿物的著作。全书共分十章。前两章讨论自生矿物的类型、形成作用及形成条件等基本问题；第三章至第九章阐述各种自生矿物的种属、晶体化学、地球化学及成因问题，还对中国近海的主要自生矿物作了专题总结；第十章对自生矿物在海洋中的分布与组合规律作了综合。

本书适合矿物学、地球化学、沉积岩石学、海洋地质学的专业工作者、教师、研究生以及大学生阅读。

责任编辑 盖广生

责任校对 刘兴昌

海 洋 自 生 矿 物

朱而勤

王 琦

海洋出版社出版（北京市复兴门外大街1号）

新华书店北京发行所发行 妙峰山印刷厂印刷

开本：1/16 787×1092 印张：16.625 字数：300千字

1988年12月第一版 1988年12月第一次印刷，

印数：1—900

ISBN 7-5027-0025-0/P.4

统一书号：13193·0956×；7.80元

序 言

矿物学是地质科学的基础学科。新中国成立以来，矿物学随着地质事业的发展而发展，不断开拓新的研究领域，并在引用新技术、新方法，和借鉴相邻学科的基础上，大大提高了矿物学的研究程度和理论水平。因此，矿物学当前已形成多种新的分支学科，例如天体矿物学、月球矿物学、波谱矿物学、成因矿物学等等。

海洋矿物学就是在新形势下发展起来的一门分支学科。近二十年来海底石油勘探工作的开展，以及对远洋矿产的调查考察，促使人们认识到研究海洋矿物的重要性和迫切性，使以往局限于研究大陆上的矿物迅速扩展到研究海洋中的矿物。根据现有的实践经验，海洋矿物已可根据成因分成碎屑矿物、自生矿物、砂矿矿物、生物矿物、热液矿物等多种门类。

本书是论述海洋自生矿物的专著。海洋自生矿物是海洋矿物的主体和中心内容，国内外研究的程度也较深。自生矿物是指那些在海洋中原地生成的矿物，凡是在大陆上、地壳中、天空中生成的矿物，经过不同营力被迁入海洋的矿物都是他生矿物而不属于自生矿物。自生矿物的生成机理可以概括地归纳为三类：一类是由海水中溶解的物质成分，不论它们来源于何处，在海水物理化学条件发生改变的情况下，例如温度、压力的改变导致水溶液产生蒸发和过饱和，或因水溶液氧化还原电位、pH值的改变等，促使各种溶质产生胶凝、结晶或化学沉淀作用而生成；一类是由海底已有的矿物，特别是粘土矿物和火山物质，通过海水中某些离子的固定作用、交换作用和吸附作用，使它转变成成为另外的一些新矿物；一类是由上述已生成的自生矿物，沉积于海洋的底部，进而被埋藏到几十至百米以下的深度，这里压力增大，温度升高，Eh值降低，pH值升高，除产生压实脱水和胶结作用外，还使某些不稳定的“短暂自生矿物”转变成成为稳定的自生矿物。此外这里也包括一些由交代作用、重结晶作用和次生长大作用生成的矿物。所谓海洋自生矿物学就是以研究自生矿物的性态、成因、产状、共生组合以及分布规律为对象的一门学科。现已发现的自生矿物有硫化物、氧化物、氢氧化物、碳酸盐、硫酸盐、磷酸盐、草酸盐、硅酸盐等门类，共达数十种之多。我国对海洋矿物学的研究虽然开展较晚，但近年来也已作了不少调查研究，取得了可喜的成绩。例如莓状黄铁矿、锰结核、铁结核、钙结核、菱铁矿、菱锰矿、自生海绿石、自生方解石等矿物，都分别在黄海、东海、南海等近海陆架区、大陆坡和海盆冲绳海槽或远洋中有所发现，并作了较详细的报道。

从本书的论述中不难看出，研究海洋自生矿物有其特别重要的理论意义和实际意义。这是因为：一、自生矿物是海底矿产资源的重要组成部分。例如锰结核、铁结核、磷结核等都是铁、锰、镍、钴、铜、金、银、磷等矿产规模巨大的潜在资源，查清它们的矿物性态特征、化学元素和伴生元素含量、生成的过程和条件、矿物的共生组合、富集的条件和在海洋各单元中的分布规律，对于今后寻找和开发海洋矿产资源有很大帮助。二、现代的陆缘滨海区、大陆架、大陆坡、海盆、海槽和大洋，都是当前大规模的沉积区，其中包含

有各种形式的沉积作用，例如碎屑物质的堆积作用、海水的冲刷、溶解、搬运和化学沉淀作用、生物沉积作用和成岩作用等。当前的海洋实际上可以看作是海洋各种沉积作用的大自然实验室。因此，研究海洋中各种沉积作用的实际情况，查清它们的机理及其相互制约关系，可以为解释沉积岩和沉积矿产的形成机理提供可信的依据。在各种沉积作用中自生矿物往往是重要的角色，一般都可作为能标志成因的矿物看待。

本书以介绍海洋中各种自生矿物的性状、成因、产状和分布为主，涉及的面很广，内容相当丰富，叙述清晰，系统性强。是当前海洋矿物学中的一本不可多得的专著。希望能够早日出版，以供广大地质工作者参阅。并希望通过本书的出版和交流，能使广大地质工作者重视海洋矿物学这一颇有发展前途的学科，有更多的地质工作者从事这一工作。使这一学科得到应有的发展，以便更好地为社会主义建设服务。

陈 正

1985年3月于北京

前 言

由于海底石油勘探和开发的需要,使海洋沉积的研究工作迅速发展。自1963年开展深海钻探以来,钻孔已遍及三大洋,在对地表下层的岩石及自生矿物的研究中又有很多新发现。由于人类对海底矿物资源的兴趣日益增长,有关锰结核的论文纷至沓来,因而关于铁、锰氧化物的矿物学研究也不断深入。海滨砂矿的勘探和开发推动了砂矿矿物学。总之,海洋调查和开发事业促进和发展了一门新兴学科——海洋矿物学。

海洋矿物学既是矿物的一个重要分支,又是海洋地质学中海洋沉积学的下属学科。就其研究内容来说应属于成因矿物学的一部分,是矿物学的二级分支,它主要包括以下几方面的内容:

1. 海洋沉积物的碎屑矿物学,研究海水悬浮体、海洋上空气溶胶及海底沉积物中轻、重碎屑矿物及粘土矿物的组合、标型特征、分布规律,为解释海底沉积物的来源、堆积过程及机制提供重要信息。苏联学者在五十年代将石油地质学中利用重矿物追索物源的方法引进到海洋沉积学中来,从而在海洋沉积矿物研究中推行了一套划分矿物区的方法。虽然这在发展海洋沉积学方面起了一定作用,但对广大海区种类繁多的沉积物而言,容易出现将复杂情况简单化的倾向。

2. 海洋砂矿矿物学,世界海滨砂矿的产值在海洋矿产总产值中占有重要地位,仅次于石油和煤。砂矿矿物学主要研究砂矿中 useful 矿物的特征、有益有害组分、矿物组合和富集规律等,其结果对勘探和开发砂矿具有重要意义。

3. 生物矿物学,海洋中的生物及微生物在成岩成矿过程中起着重要作用,其遗体所造成的微环境也促进了一定类型的自生矿物的形成。已查明海洋动物壳体和骨骼以及海洋植物的硬组织中存在着30多种矿物。生物遗骸的矿物组分及化学成分是生物形成环境的重要标志。研究生物矿物的特征、转变、形成条件及生物在成岩成矿过程中的作用对阐明沉积物的演变是十分必要的。

4. 自生矿物学,研究海洋沉积物中自生矿物的特征、形成条件和其在海洋沉积中的组合规律。这是本书所要论述的主要方面。

此外,海洋矿物学还应讨论海底热液矿物、宇宙尘矿物和底成矿物(edaphogenic mineral)等方面的问题。

近年来在我国沿岸海域发现了多种自生矿物,研究它的人员也日益增多,每年可发表数篇有关内容的论文。我国近年来开展的远洋考察活动必将促进对远洋自生矿物的研究。显然,一本较全面地介绍海洋自生矿物的专门书籍是迫切需要的。

高等学校和研究所都在培养海洋地质学的研究生,而矿物学特别是自生矿物的内容是这些人员所必备的知识。作者期望本书将对他们的学习和研究有所帮助。

六十年代山东海洋学院地质系就确定由作者编写海洋矿物学讲义,并为学生开设选修课程。当时虽收集了相当的资料,但授课计划未能实现。七十年代以来,作者对我国沿海

海底的自生矿物进行了一些研究，为本书的写作提供了基础。然岁月蹉跎，延至今日方草成本书，作者恳请读者对本书缺点错误多加指正，以便日后修订。

本书承蒙陈光远和张兆瑾两位教授在百忙中抽暇作了全面系统的审阅，并提供了许多宝贵意见，在此谨致深切的谢忱。在本书写作、出版过程中，山东海洋学院，中科院海洋研究所，国家海洋局第一、第二海洋研究所，同济大学及地质矿产部海洋地质研究所的很多同志给予了热情的帮助，张增辉、黄际遂绘制了图件，一并致谢。

作 者

1984年6月于青岛

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 自生作用的概念	(2)
第二节 自生作用的阶段及自生矿物类型	(3)
一、沉积物的组分类型	(3)
二、自生作用的发展阶段	(3)
三、自生矿物的类型	(7)
四、自生矿物的判别标志	(7)
第二章 自生矿物的形成作用	(12)
第一节 自生矿物形成时的介质环境	(12)
一、海水的化学特征	(12)
二、孔隙水的类型	(16)
第二节 形成作用	(17)
一、矿物的沉淀	(17)
二、矿物的溶解效应	(19)
三、成岩再分配与矿物形成	(20)
四、重结晶作用	(21)
五、吸附和离子交换反应	(24)
六、交代作用	(26)
七、形衍反应	(28)
八、结核的形成	(28)
第三章 铁硫化物	(32)
第一节 主要矿物类型	(32)
一、陨硫铁族	(32)
二、等轴硫铁矿族	(34)
三、黄铁矿—白铁矿族	(35)
四、四方硫铁矿族	(38)
五、菱硫铁矿族	(40)
六、其他硫化物	(40)
第二节 铁硫化物的成因	(41)
一、铁硫化物的稳定条件	(41)
二、合成实验	(44)
三、形成过程	(46)
四、黄铁矿莓球的成因	(46)
五、微生物在铁硫化物形成中的作用	(47)
第四章 铁、锰氧化物和氢氧化物	(50)

第一节 矿物类型	(50)
一、铁氧化物	(50)
二、锰氧化物	(53)
第二节 晶体结构	(60)
一、金属阳离子在氧的最密堆积中的分布	(60)
二、以金属离子八面体为基干的结构型式	(62)
第三节 鉴定方法	(75)
第四节 成因	(83)
一、物质来源	(83)
二、晶体化学特征的控制作用	(84)
三、铁氧化物的形成	(86)
四、锰氧化物的形成机制	(88)
第五节 中国沿岸海域的铁锰结核	(89)
一、分布	(89)
二、类型	(91)
三、生成环境	(93)
第五章 自生二氧化硅	(100)
第一节 矿物相	(100)
第二节 自生二氧化硅矿物	(103)
第三节 地球化学特征	(105)
一、痕量元素	(105)
二、氧同位素	(106)
第四节 深海沉积中瓷状岩和燧石的分布	(107)
第五节 形成过程	(108)
一、海洋中的二氧化硅	(108)
二、成岩变化	(110)
第六章 自生碳酸盐	(116)
第一节 矿物类型	(116)
第二节 晶体结构	(118)
第三节 成分鉴定	(122)
第四节 相平衡及同质多象转变	(124)
一、相平衡	(124)
二、同质多象转变	(125)
第五节 成因问题	(127)
一、 $\text{CaCO}_3\text{—H}_2\text{O—CO}_2$ 体系	(127)
二、 CaCO_3 沉淀的机制	(128)
三、白云石的形成	(129)
四、矿物结构与形成环境的关系	(130)
第六节 钙镁碳酸盐结核	(134)
第七节 铁锰碳酸盐	(135)
一、世界各海域的铁锰碳酸盐	(135)

第八节 我国近海的铁锰碳酸盐	(139)
一、矿物学特征	(139)
二、分布及富集条件	(141)
第七章 磷酸盐	(148)
第一节 磷钙石的矿物成分	(148)
第二节 磷灰石中的微量元素	(156)
第三节 鸟粪及生物磷酸盐矿物	(159)
第四节 磷钙石的分布及年龄	(160)
一、分布	(160)
二、年龄问题	(161)
第五节 磷酸盐的成因	(163)
一、磷酸钙的溶解度	(163)
二、上升流区磷酸盐的形成	(164)
三、现代磷钙石的成因	(165)
四、成岩磷灰石的形成	(165)
五、磷酸盐的交代作用	(166)
第八章 硫酸盐	(171)
第一节 重晶石族矿物	(171)
第二节 重晶石中阳离子的类质同象代替	(172)
第三节 重晶石中的微量元素	(175)
一、稀土元素	(175)
二、放射性元素	(175)
三、稳定同位素	(176)
第四节 重晶石的分布	(177)
一、悬浮重晶石	(177)
二、深海表层沉积中的重晶石	(178)
三、沉积柱中的重晶石	(180)
四、海洋重晶石通量	(181)
五、其他成因重晶石	(182)
第五节 自生和热液重晶石的区别	(182)
第六节 重晶石的成因	(183)
一、海水中重晶石的饱和度	(183)
二、成因问题	(183)
第七节 其他硫酸盐	(185)
第九章 自生硅酸盐	(189)
第一节 粘土矿物	(189)
一、主要类型	(190)
二、海绿石	(192)
三、中国近海的海绿石	(196)
四、鲕绿泥石	(205)
五、蒙皂石族	(206)

六、坡缕石(山软木)和海泡石	(208)
第二节 沸石族矿物	(209)
一、一般特征	(210)
二、钙十字沸石亚族	(212)
三、斜发沸石亚族	(219)
四、成因	(223)
第三节 自生长石	(227)
第十章 自生矿物的组合规律	(233)
第一节 组合及分区	(233)
一、近陆自生矿物区	(234)
二、远洋自生矿物区	(236)
三、过渡区	(236)
第二节 硫的循环与含硫矿物的形成	(236)
一、海洋沉积物中的硫体系	(237)
二、硫的生物地球化学循环	(238)
三、硫在间隙水中的迁移	(240)
四、硫的同位素	(242)
五、现代海洋沉积物中有机碳和硫的分布	(244)
第三节 铁矿物的组合	(247)
一、铁矿物的稳定条件	(247)
二、海洋沉积物中的铁矿物组合	(248)
三、铁矿物与地球化学相	(250)

第一章 绪 论

占地球表面71%的海底被各种沉积物所覆盖,自生矿物即广泛赋存其中,并可构成独立的一类(自生)沉积。有些自生沉积类型具有重要的潜在经济价值,是极有前途的海底矿产,如大洋锰结核不仅因其储量大,还因其中含有大量的镍、铜、钴等多种重要金属而闻名于世。又如磷钙石结核,现已发现它广泛分布于三大洋的陆架和陆坡区,对解决陆地磷矿分布不平衡的状况有重要潜在意义。总之,海底自生矿物的研究对阐明与之有关的沉积物、矿床及古代类似物质的组成、沉积成岩环境、成矿过程、成矿条件等方面均具有重要的意义。

1872年12月至1876年5月英国的“挑战者”号进行全球考察时,就在大洋底的一些站位上采集到了锰结核、磷酸盐结核、海绿石和钙十字沸石等自生形成物。1891年默里(Murray)和雷纳德(Renard)发表了有关这次考察的海洋沉积研究成果,在“洋底原地形成的化学产物”的标题下用77页的篇幅对所发现的自生矿物作了论述,开创了海底自生矿物研究的新纪元,具有划时代的意义。

以后对海洋的调查、考察逐渐增多,除在综合航次中,对这些自生形成物进行研究外,还有专门考察与研究锰结核或磷酸盐结核的航次,总之,自生矿物的研究日益扩大、发展。但六十年代以前,以自生形成物为主题的论文或专门的章节仅有屈指可数的几篇。以后,随着研究工作的不断深入,论述自生矿物的文章逐渐增多。1972年,为纪念发现锰结核一百周年举行了“洋底铁、锰沉积”的会议,并出版了专著论述大洋锰结核,其中有些内容涉及到铁、锰氧化物类型的自生矿物。

六十年代以来,在海洋自生矿物的研究方面取得了一些突破,对于正确认识和了解这类物质的特征和成因有重要意义。六十年代末至七十年代初,有关硫化物合成的研究加深了对铁硫化物的形成条件和形成过程的理解。无机合成莓球的成功,以及在安山岩中发现了莓球,结束了莓球生物成因说的垄断地位。六十年代前,海底磷钙石的成因多以上升流理论为基础,七十年代初,研究了磷灰石中的铀同位素并进行了年代测定,确定现代海底磷钙石大部分是在前更新世形成的,现有上升流的地区只有两处产出现代形成的磷钙石,这说明上升流只是磷灰石沉淀的必要条件,并非充分条件。

近年来,对锰结核的矿物学、晶体化学的研究日益深入,虽然有些问题尚未搞清,但较以前前进了一大步。

美国1979年出版了《海洋矿物》(Marine Minerals)一书,是美国矿物学协会资助的短训班教材中的第6卷。近年来,由于对海水中溶解组分及颗粒物、沉积物中的成岩反应、扩张中心海底火山活动和水与下伏岩浆岩的相互反应诸方面的地球化学研究活动大量增长,因而迫切需要有关自生矿物的矿物学知识。该短训班就是为满足这种日益增长的需要而开设的。此书对海洋中常见的自生矿物作了综合评述,且各章多是由该方面有一定造诣的学者撰写的,因此,在一定程度上代表了西方的当前研究水平。然而,该书未将海洋

中重要的两类自生矿物——碳酸盐和硫化物包括在内。

巨著《海洋》(The Sea)多卷集(现已出版七卷)记载着海洋学的发展历史,当然也包括自生矿物的研究历史。其中的第三卷于1963年出版,内容分物理勘探、地形和构造以及沉积作用三部分,该卷在“远洋沉积物”一章中阐述了氧化物、硫酸盐、碳酸盐和硅酸盐等自生组分。第五卷(1974)以化学海洋学为主要内容,单独列出一章(深海沉积物中的自生矿物)来讨论此问题。1981年出版的第七卷,主要论述“大洋岩石圈”,并以三章(氧化物、硅酸盐、磷酸盐)的篇幅讨论自生矿物。这些章节基本反映了海洋自生矿物的现代研究水平,也说明自生矿物在海洋沉积学领域中的地位日益提高。

另外,在七卷集的《化学海洋学》及《水下矿物》(Underwater Minerals)、《海洋锰沉积》等书中也有一些涉及自生矿物的章节,但都只从各自的角度对自生矿物的某个侧面进行较详细的讨论。

总之,海洋自生矿物的研究水平已进入了一个新的阶段,在深度和广度上均较以前有较大的进展,然而到目前为止,国内尚没有一本专门讨论自生矿物的著作来总结这方面的资料。本书是一种尝试,综合现有研究成果,为对此问题感兴趣的学人,提供一个较系统完整的材料。

我国对海洋自生矿物的研究虽然开展较晚,但也作了一些工作,主要是关于中国海的海绿石、铁锰氧化物、碳酸盐和黄铁矿的调研工作。为使我国海洋自生矿物的研究提高到一个新水平,今后应加强以下几方面的工作:

1. 广泛采用新技术新手段以提高分析鉴定自生矿物的精度,如各种谱学分析法(红外谱、穆斯堡尔谱、核磁和顺磁共振谱等)、高能微量X射线衍射分析、高倍电镜结合电子衍射分析等。
2. 深入开展自生矿物特征的研究并与实验合成相结合,借此进一步解决这些矿物的成因问题。
3. 应尽可能与其形成环境的研究相结合,以便从环境的物理-化学条件、物质成分及地球化学演变等方面来说明自生矿物的形成,并为“将今论古”地利用自生矿物的研究成果创造条件。

第一节 自生作用的概念

自生作用(authigenesis)一词源于希腊文,表示原地形成之意,是1880年由Kalkowsky引入到地质学中来的,用以表达任何新形成或次生成矿物的成因。苏联出版的地质词典(Геологический Словарь, 1960)认为,自生矿物是通过沉淀或重结晶作用在原地形成的沉积矿物。另一本美国出版的地质学词典(Glossary of Geology, 1973)中对自生作用所下的定义是:“沉积时或以后在沉积物或沉积岩原地进行的新矿物形成作用,包括交代、重结晶或石英的次生长大等称自生作用”。

自生作用的反义词是它生作用(allothigenesis)它生作用形成的矿物是指大陆或沉积盆地以外的已存矿物(多由岩石破碎分解而成)经各种营力搬运到沉积盆地中来的。由此看来,自生作用的现代概念是指沉积过程同时或以后在该沉积物或沉积岩原地生成矿物的各种作用。新形成的矿物和它们栖身的沉积物或沉积岩同时形成或较晚形成。因此,自生作

用是包括沉积物在海洋环境¹⁾中或以后转变成沉积岩过程中直至遭受变质作用前的新矿物形成作用。自生作用形成的矿物，即称自生矿物。

本书所讨论的对象主要限于现代海水覆盖下的岩石圈内的自生矿物，即一般所谓的海洋自生矿物。虽然也涉及已上升到陆地上的海相沉积岩中的自生矿物，但只是为了对比，它们不是本书的重点。所以本书提到的海洋是指现代海洋。

业已发现现代海底广泛存在着热液活动，从而使海底矿物形成机制中增加了新因素。但纯粹由于海底火山、热泉及热液作用产生的矿物不属本书论述的范围。但对部分受热液活动影响的自生成矿作用，或未证实完全属热液作用的产物，或成因尚有争议的新生矿物则仍将讨论。

近年来，在深海进行了大量的钻探取样，这样，有关自生矿物的研究已不仅限于海底表层，而且深入到海底下几百米。从沉积物形成时代来看，不仅是第四纪，第三纪、白垩纪及侏罗纪中的自生矿物也已得到较深入的研究，因而大大提高了对海洋自生矿物的形成机理及赋存规律的了解。

海洋自生矿物是多相的自然体系，在一定物理化学条件下向热力学平衡方向转化的产物。它能灵敏地指示出自然体系的物理化学参数——pH、Eh及溶液组分的浓度；因此，通过自生矿物的研究可了解沉积作用及成岩作用的条件，从而有助于恢复和重现沉积岩的地球化学历史。另外，自生作用对某些元素的富集有着重要意义，如大洋锰结核主要是自生作用的产物；因此，自生矿物的研究有助于阐明层控矿床的成矿条件及富集规律，为找寻和开发各类沉积矿床提供重要信息。

第二节 自生作用的阶段及自生矿物类型

一、沉积物的组分类型

海洋沉积物的组分按成因可分为陆源、火山、宇源、生物及自生等类型。谢帕德(Shpard)在其《海底地质学》(Submarine Geology, 1973)一书中曾将海洋沉积物的组分按其来源和在大洋中的形成机制划分为不同类型(表1-1)。他所提到的“水成组分”系指因无机作用而自海水中沉淀的产物，即相当于自生组分；然而，此种看法与表中所列的大部分矿物成因的现代概念是有出入的。

苏联学者佩捷林(Петелин, 1971)曾对海洋沉积物的组分进行了较详细的分类(表1-2)。他首先按成因将组分划分为原地和异地两大类；在大类之下又分成类和亚类。佩捷林的分类提出了一种新的类型，即“底成组分”；此分类在苏联有一定影响，但比较繁琐。另外，他称之为自生组分者，实际上仅指成岩组分。

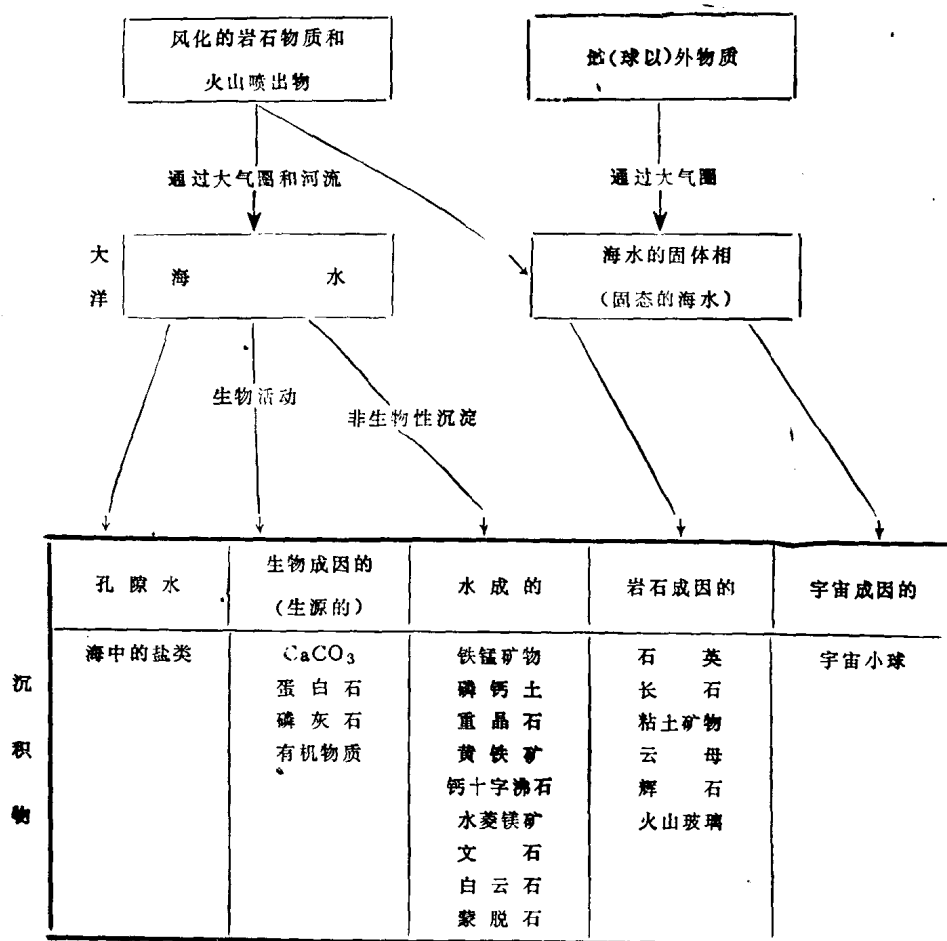
二、自生作用的发展阶段

自生矿物形成作用开始于沉积物沉积的同时并贯穿于堆积后发生的成岩过程中。

海水中因经无机化学作用而发生的直接沉淀过程是自生作用的最早阶段，或称水生阶

¹⁾在海洋环境中发生的自生作用称为海洋自生作用；在大陆环境如湖泊、三角洲、冲积平原内也可发生自生作用，形成自生矿物，本书重点讨论前者。

表 1-1 海洋沉积物的组分类型 (Shepard, 1973)



段(hydrogenic stage), 或称沉淀阶段。当海水中某种组分离子的活度积大于该物质与海水相平衡的活度积(过饱和)时即发生此物质的自发沉淀过程, 这不包括诸如海水与固相间发生吸附、解吸、阳离子交换等已属于“海解阶段”的作用。引起物质过饱和的主要因素有蒸发(形成硬石膏, 石膏、文石等)和氧化还原反应(形成铁的氧化物、硫化物等)。水生阶段的产物是沉积阶段物理化学环境的重要标志。

成岩作用是指沉积物堆积后所遭受的各种化学、物理和生物变化及改造的总和, 主要作用有压固、胶结、交代、溶解、沉淀、重结晶、氧化、还原、淋滤、水化、脱水、聚合、吸附、解吸、细菌活动和结核形成等。显然, 自生作用只涉及成岩过程中新矿物的形成作用, 主要是各种化学作用。成岩作用(diagenesis)一词自1868年引入到地质文献中以来, 各家对它的解释和范围的划分有不同见解, 但大多认为这种作用发生在沉积物堆积之始, 并一直延续到遭受变质作用前, 或因地壳运动及剥蚀作用重新进入到风化带之前。这就包括了一般所谓的海解、成岩(狭义的, 即早期成岩)及后生等阶段。

海解作用(halmyrolysis)与海底风化作用属同义语, 指沉积质点与海水间所发生的各种化学反应。关于海解作用所包括的范围有两种看法。一种含义较宽(Elderfield, 1976), 是指河流悬移质、火山喷发物或其他成因的颗粒进入海洋后, 在搬运过程中以及到达沉积

表 1-2 海洋沉积物组分的成因类型 (佩捷林, 1971)

异 地 组 分				原 地 组 分				
字 源 组 分								
				水 成 组 分				
异 地 生 源 组 分				生 源 组 分				
它 生 岩 成 组 分	内 生 组 分	火 山 组 分		海 洋 岩 成 组 分	内 力 生 成 组 分	海洋火山组分		
						海洋火山后组分		
						构造底成组分 ^①		
	外 生 组 分	火山-陆源组分			外 力 生 成 组 分	特殊底成组分		
							火山后-陆源组分	
							化学岩组分	
生物陆源组分		生物底成组分						
				自 生 组 分	海 解 成 岩 组 分			
					成 岩 组 分			

①Элафогенный系佩捷林提出的名称, Элафо源于希腊字edaphos, 作“土壤, 基础, 底部”解, 此处为“底部” (дно)之意, 全词表示“海底形成的”故译作“底成的”。

位置后与海水相互之间所发生的化学变化, 因此, 这种定义下的海解作用与搬运、沉积作用的界限就难于分清。另一种含义较狭(Fairbridge, 1967), 是指质点停积在海底表面时, 与海洋底层水之间所发生的各种化学反应。实际上, 进行海解作用需较长的时间, 搬运过程中发生的变化与质点停积后和底层水长期作用所发生的变化相比是微小的, 因此, 应以后者为主。按狭义的观点看, 海解作用是沉积作用和早期成岩作用之间的一个过渡环节。

海解作用主要表现在粘土矿物和火山物质的改造方面, 如粘土矿物在海水中发生的某些离子(K^+ , Rb^+ , Cs^+)的固定、阳离子交换(八面体层内阳离子的交换如 Mg^{2+} , $Na^{2+} \rightarrow Ca^{2+}$, Fe^{2+})及吸附、解吸反应, 火山物质与海水反应转变成沸石和蒙脱石等矿物。因海解作用进行速率较慢, 需要有较长的作用时间, 所以较强烈的海解作用多发生在沉积速率极低的区域, 如南太平洋。

沉积物被埋藏后所经历的成岩变化可划分为三个阶段(Fairbridge, 1967):

1. 早期成岩作用¹⁾ (syndiagenesis), 是成岩的第一阶段, 当沉积物被掩埋而一旦与海洋环境隔绝后即开始此过程, 其下限大致在上覆沉积柱达到约100m厚时。早期成岩作用又可分为两个时期——初始时期和早期埋藏时期。

1) 有的研究者建议将早期成岩作用称为同生成岩作用, 后生成岩作用则叫做再生成岩作用。

在初始时期, 沉积物内存在着由有机质组成的营养物, 间隙水中富含氧, 因而有利于喜氧细菌的活动。喜氧菌活动的结果产生了 CO_2 , 使孔隙水的pH值降低, 也促进沉积物中以介壳形式存在的 CaCO_3 的溶解。随着此过程的进行, 氧量逐渐减少, 并在沉积物-水界面以下一定深度消失殆尽。 $E_h = 0$ 的界面即为成岩的初始时期与早期埋藏时期的界限。但滞水盆地中底水缺氧, 初始时期不存在。

早期埋藏时期以还原环境为主, 厌氧菌大量发育, pH值随细菌活动性加强而增大。经过初始时期得以保存的碳酸钙物质不再发生进一步的溶解。早期埋藏时期形成的特征产物是 FeS_2 。厌氧细菌活动的下界即为早期成岩作用与后生成岩作用之间的界限(表1-3)。

表 1-3 成岩作用各阶段的特征①

标志 阶段	地质环境			地球化学环境			有机地化环境		自生矿物 类型
	埋深	温度	压力	pH	E_h	水的类型	细菌种类	活跃程度	
海解	沉积物和海水界面上	25°C以下	盆地水柱静压力	中性至弱碱性	氧化	底层海水	喜氧菌	活跃至基本消失	海解矿物
早期成岩	<100m	常温	盆地水柱静压力	中性至酸性	氧化至还原	孔隙水	喜氧菌及厌氧菌	活跃至基本消失	早期成岩矿物
晚期(后生)成岩	100—10 000m	较高至300°C	较大至很大	碱性	还原	渗流水及地下水	细菌作用不明显	不明显	后生成岩矿物
表生成岩	<100m	地表常温	常压	酸性	氧化	裂隙水	细菌作用不明显	不明显	表生成岩矿物

①主要根据叶连俊(1973)。

早期成岩阶段最主要的特征是细菌活动。细菌对沉积物所产生的影响, 主要是在沉积物内造成了由于细菌活动而产生的特定化学环境。

2. 后生成岩作用(anadiagenesis)是成岩作用的成熟阶段。早期成岩作用只局限在较短的地质时间和100m深度内; 而后生成岩则在更大的深度(可达10km)和更长的时期(可达 10^8 年)中进行。此时期的环境特征是压力增大、温度增高、 E_h 为负值及中至高的pH值。由于压力的作用使孔隙水被排挤出, 并在沉积层中发生大规模的迁移。移动的溶液与沉积物发生化学反应而使一些矿物溶解或沉淀。此阶段在沉积物中发生的主要作用是压实、脱水和胶结。粘土是压力的灵敏指示物, 而有机质则对温度最敏感。温度主要影响碳质岩和烃的成熟, 而压力则影响烃的迁移。

后生成岩作用是发生在盆地的下沉阶段。然而, 下沉亦可被抬升所代替; 当沉积物重新升高到淡水影响的环境下, 则发生表生成岩作用(epidiagenesis)。此阶段的特征是有大量 O_2 和 CO_2 的参加。在后生成岩中形成的组分将受到侵蚀, 使成岩早期的痕迹变得模糊或被破坏。表生成岩阶段与风化作用的界限是地下水面, 在水面以上, 风化作用将取代成岩作用(图1-1)。