

克莱德 H. 莫尔 著

姚根顺 沈安江 潘文庆 郑剑锋 罗宪婴 韩剑发 译

碳酸盐岩储层

——层序地层格架中的
成岩作用和孔隙演化



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

碳酸盐岩储层

——层序地层格架中的成岩作用和孔隙演化

克莱德 H. 莫尔 著

姚根顺 沈安江 潘文庆 郑剑锋 罗宪婴 韩剑发 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了碳酸盐岩储层的性质和碳酸盐岩储层的孔隙及其成岩作用和成岩环境。内容涵盖了当前碳酸盐岩储层研究领域的主要问题，对国内碳酸盐岩储层油气勘探具有重要的指导意义。

本书可供从事碳酸盐岩储层研究的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

碳酸盐岩储层——层序地层格架中的成岩作用和孔隙演化 / (美)
克莱德 H. 莫尔 (Clyde H. Moore) 著; 姚根顺等译.
北京: 石油工业出版社, 2008.8

书名原文: Carbonate Reservoirs: Porosity Evolution and Diagenesis
in a Sequence Stratigraphic Framework

ISBN 978-7-5021-6403-4

I. 碳…

II. ①克… ②姚…

III. ①碳酸盐岩 - 储集层 - 成岩作用

②碳酸盐岩 - 地层层序 - 成岩作用

IV. P588.24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 195906 号

著作权合同登记号: 图字 01-2008-2795

Copyright © 2001 by Elsevier BV. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise without the prior written permission of the publisher.

本书经 Elsevier BV. 授权翻译出版, 中文版权归石油工业出版社所有, 侵权必究。

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) 64523544 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

2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

889 × 1194 毫米 开本: 1/16 印张: 25.5

字数: 570 千字 印数: 1—2000 册

定价: 128.00 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

中文版序


我国海相碳酸盐岩层系油气资源量占全国油气总资源量的40%以上，但探明程度较低，是21世纪油气资源战略接替的主要领域。近期，塔中、轮南—塔河、普光、龙岗等海相碳酸盐岩大型、特大型油气田的相继发现与突破，预示着我国海相碳酸盐岩油气勘探进入大发现期。但与国外20世纪50—70年代全球碳酸盐岩油气田的发现高峰期相比，我国海相碳酸盐岩油气藏发现要晚近40年。因此，国外的海相地层油气勘探理论基本成熟，值得我们去认真学习与借鉴。

碳酸盐岩储层预测是海相地层油气勘探面临的主要科学问题之一，也是制约海相碳酸盐岩地层油气勘探的“瓶颈”技术之一，而储层成因机理认识是储层预测的基础。国内在碳酸盐岩储层成因机理、层序格架中的储层分布规律及储层地质建模方面的研究与国际水平相比有很大的差距。

基于勘探需求和国内研究现状之间的差距，尤其是针对海相碳酸盐岩油气勘探中急需解决的储层成因机理和预测问题，杭州地质研究所组织有关专家翻译了克莱德 H. 莫尔教授的专著。该译著是作者在《碳酸盐岩成岩作用和孔隙》(1989)一书基础上的第二版，在保留第一版的碳酸盐岩成岩作用和孔隙这一主题的基础上增加了层序格架中储层的发育和分布规律方面的内容，进一步完善了碳酸盐岩储层成因机理和预测研究领域的理论体系。希望该译著的出版能达到两个目的：一是把国外在碳酸盐岩储层成因机理和预测研究领域的理论体系介绍给国内同行，以提升国内在该领域的研究水平；二是满足国内海相碳酸盐岩油气勘探对储层成因机理和预测研究提出的更高需求，解决好碳酸盐岩油气勘探中的储层预测问题。

我国海相油气勘探需要不断发展与创新石油地质理论，及时了解学科前缘。该译著的出版从一个侧面阐述了国际上碳酸盐岩沉积储层的研究动态，为我们今后的发展奠定了基础。

杭州地质研究所长期以来以海相研究为特色，该译著的出版将对该所建院后海相碳酸盐岩研究特色和优势的进一步发展起到推动作用，在此表示祝贺。



2007年7月

前 言

自《碳酸盐岩成岩作用和孔隙 (Carbonate Diagenesis and Porosity)》一书出版后的 10 多年来,在国际油气咨询中心 (OGCI) 的主办及赞助下,我参加过无数次学术界的或石油工业界内部的研讨会,这些研讨会主要以碳酸盐岩的成岩作用和孔隙为主题。在此期间,受石油工业界的需求所驱动和碳酸盐岩学术界新的研究方向所指引,研讨会的重点开始随参与者的兴趣发生改变。最终,其主题由偏重于碳酸盐岩储层的成岩作用转移到基于海平面变化的层序地层格架中的碳酸盐岩储层的孔隙演化上来。研讨会的主题简称为碳酸盐岩储层,我本人也开始构思第一本书的修订本。

斟酌于著作的最终内容和方向,我清晰地意识到第一本书必须保留成岩作用和孔隙这一主题,这是因为成岩作用和孔隙是密切关联的。因此,本书的相关内容得到了更新,并涵盖了当前研究的重要主题,比如,与海水和大气淡水成岩作用有关的微生物的调节作用,深海灰泥丘的成岩作用,受气候驱动的成岩作用,重点强调了岩溶喀斯特、构造运动和盆地的水文地质条件、温水碳酸盐岩成岩作用,当然,还有新的白云化模型。参考 Lucia 的基于岩石物理的碳酸盐岩孔隙分类,本书关于碳酸盐岩孔隙实质的引言部分有了明显的提升和加强。

然而,本书最显著的变化是考虑了气候和海平面周期性变化对相的发育、成岩作用和孔隙演化的影响。层序地层学理论在碳酸盐岩储层成岩作用和孔隙演化研究中的应用,促进了碳酸盐岩储层预测方法的建立,构建了一套基本的成岩作用和孔隙演化模式,而这些对勘探和开发领域的地质学家都是非常有用的。

此外,该书还加强了埋藏成岩作用的讨论,增加了盆地水文地质条件、区域和全球构造运动对埋藏后的碳酸盐岩地层或储层成岩作用和孔隙演化所起控制作用等方面的内容。最后一章详细介绍了三个不同的案例,目的在于进一步加深本书所介绍的概念和技术。

最后,本书及基于此举办的研讨会的目的在于为地质工作者和研究生更好地了解这门复杂、重要而又奇妙的学科——受成岩作用驱动的碳酸盐岩孔隙演化,提供一本概要性的参考文献。

得克萨斯州米德兰市的 Emily Stoudt 通读了原稿,提出了极有价值的评述和建议,作者对此非常感谢,并对原稿作了进一步的修正。Clifford (Dupe) Duplechain 为本书绘制了所有美观的图片。Lani Vigil 多次阅读原稿,修正了其中的标点错误。她的耐心、不懈的支持和鼓励使得这本书得以完稿和出版。本书的核心内容是作者本人在路易斯安那州立大学任职 30 年间逐渐形成的。感谢科罗拉多矿业大学地质和地球物理系为我提供了办公室、大学的学术氛围和后勤的支持,同时感谢阿姆斯特丹的 Femke Wallien 主编的耐心

和鼓励。

谨以此书对 Robin Bathurst、Bob Folk 和 Bob Ginsburg 三位教授表示感谢。他们的科学理论、洞察力、学识和教学已经影响并指引着所有从事碳酸盐岩研究的工作者们。

克莱德 H. 莫尔
Golden 科罗拉多
2001 年 2 月 22 日

目 录

1 碳酸盐岩沉积体系的性质	1
1.1 引言	1
1.2 碳酸盐沉积物和沉积作用的基本特征	1
1.2.1 概述	1
1.2.2 碳酸盐沉积物的起源	1
1.2.3 生物礁——独特的沉积环境	3
1.2.4 碳酸盐沉积物的结构和组构受独特的生物控制	4
1.2.5 碳酸盐岩颗粒组分	5
1.2.6 碳酸盐岩分类	6
1.2.7 碳酸盐产率及对沉积样式的影响	6
1.2.8 碳酸盐岩台地类型和相模式	12
1.3 小结	15
2 层序地层在碳酸盐岩沉积体系中的应用	17
2.1 引言	17
2.2 层序地层学	17
2.2.1 海平面升降、构造和沉积作用——基本可容纳空间模型	17
2.2.2 地层旋回的级次	21
2.2.3 碳酸盐岩层序地层模式介绍	21
2.2.4 缓坡型层序地层模式	22
2.2.5 镶边陆棚层序地层模式	24
2.2.6 陡坡边缘层序地层模式	25
2.2.7 孤立台地层序地层模式	26
2.2.8 碳酸盐岩台地高频旋回——碳酸盐岩准层序	28
2.3 暴露期层序边界碳酸盐沉积物和岩石高化学活动性	28
2.3.1 碳酸盐矿物及其相对稳定性	28
2.3.2 现今和古代控制碳酸盐沉积物矿物相的因素	29
2.3.3 古代石灰岩矿物组——早期渐进的矿物稳定和孔隙演化	31
2.4 小结	31
3 碳酸盐岩孔隙的实质和分类	32
3.1 引言	32
3.2 碳酸盐岩孔隙的分类	33
3.2.1 概述	33

3.2.2	Choquette 和 Pray 的孔隙分类	34
3.2.3	Lucia 的岩石组构——岩石物理法碳酸盐岩孔隙分类	37
3.3	现代碳酸盐沉积物中原生孔隙的实质	42
3.3.1	粒间孔	42
3.3.2	粒内孔	42
3.3.3	含灰泥沉积物的沉积孔隙	43
3.3.4	格架孔和窗格孔	44
3.4	次生孔隙	46
3.4.1	概述	46
3.4.2	溶解作用和次生孔隙的形成	46
3.4.3	白云化作用和次生孔隙的形成	48
3.4.4	角砾岩化和次生孔隙的形成	51
3.4.5	裂隙作用与次生孔隙的形成	52
3.5	小结	52
4	孔隙改造的成岩环境和识别手段	54
4.1	引言	54
4.2	孔隙改造的成岩环境	54
4.2.1	概述	54
4.2.2	海水成岩环境	54
4.2.3	大气淡水成岩环境	55
4.2.4	埋藏成岩环境	56
4.3	地质记录中孔隙改造的成岩环境的识别手段	56
4.3.1	概述	56
4.3.2	岩石组构——胶结物形态	57
4.3.3	岩石组构——胶结物分布样式	60
4.3.4	岩石组构——颗粒—胶结物与压实作用之间的关系	62
4.3.5	方解石胶结物和白云石的微量元素地球化学特征	63
4.3.6	稳定同位素	68
4.3.7	锶同位素	73
4.3.8	流体包裹体	77
4.4	小结	78
5	正常海水成岩环境	80
5.1	引言	80
5.2	正常浅海成岩环境	81
5.2.1	非生物浅海碳酸盐胶结作用	81
5.2.2	古代浅海非生物胶结物的识别	83
5.2.3	生物参与的海水碳酸盐胶结作用和成岩作用	86

5.2.4	潮间带成岩作用背景	87
5.2.5	现代浅海海底硬地	89
5.2.6	古代海底硬地的识别和意义	90
5.2.7	现代生物礁环境的成岩作用背景	91
5.2.8	地质记录中与生物礁相关的海水成岩作用的识别	93
5.2.9	美国新墨西哥州和得克萨斯州西部二叠纪 Capitan 组礁复合体的 早期海水岩化作用	96
5.2.10	墨西哥湾黄金巷和得克萨斯州南部的 Stuart City 地区与礁有关 的早—中白垩世陆棚边缘地层序列的孔隙演化	97
5.2.11	中泥盆世礁复合体的孔隙演化：西加拿大沉积盆地的 Leduc、 Rainbow、“Presquile”和 Swan Hills 礁体	105
5.3	斜坡到深海成岩环境	110
5.3.1	斜坡到深海成岩环境成岩作用概述	110
5.3.2	与缓坡到斜坡灰泥丘有关的碳酸盐岩成岩作用	110
5.3.3	与海底热液和冷烃火山口毗邻的灰泥丘的成岩作用	114
5.3.4	陡坡陆棚边缘碳酸盐岩成岩作用：太平洋 Enewetak 环礁的研究 说明溶解作用、胶结作用和白云化作用是受地热对流驱动的	117
5.3.5	陡坡陆棚边缘碳酸盐岩成岩作用：巴哈马台地由地热对流或地形 驱动的水流引起的海水白云化	122
5.4	小结	126
6	蒸发海水成岩环境	127
6.1	引言	127
6.2	蒸发海水成岩环境成岩作用概述	127
6.3	边缘海萨布哈成岩环境	130
6.3.1	现代边缘海萨布哈	130
6.3.2	古代边缘海萨布哈的成岩作用样式	133
6.3.3	美国 Williston 盆地奥陶系 Red River 组边缘海萨布哈储层	135
6.3.4	美国 Williston 盆地密西西比系 Mission Canyon 组边缘海萨布哈储层	139
6.3.5	美国得克萨斯州西部奥陶系 Ellenburger 组边缘海萨布哈白云岩储层	140
6.3.6	古代边缘海萨布哈白云石的识别标志	142
6.4	边缘海蒸发潟湖和盐湖渗透回流白云化作用	145
6.4.1	边缘海蒸发潟湖成岩环境	145
6.4.2	美国西得克萨斯州上二叠统 Guadalupian 组：古代边缘海蒸发潟 湖复合体	148
6.4.3	美国西得克萨斯 South Cowden 油田二叠纪白云化储层：陆棚潟 湖的渗透回流白云化	150
6.4.4	美国东得克萨斯州上侏罗统 Smackover 组台地白云化作用：渗透	

回流白云化事件·····	155
6.4.5 古代渗透回流白云岩的识别标志·····	158
6.4.6 区域性蒸发盆地及海岸盐碱滩的背景和成岩环境·····	160
6.4.7 麦克劳德盐湖盆地·····	161
6.4.8 加拿大 Elk Point 盆地 ·····	163
6.4.9 美国密歇根盆地·····	165
6.4.10 中东侏罗纪 Hith 蒸发岩和 Arab 组 ·····	165
6.5 小结 ·····	168
7 大气淡水成岩环境及成岩作用 ·····	169
7.1 引言 ·····	169
7.2 地球化学和矿物学特征 ·····	169
7.2.1 孔隙中的大气淡水流体和沉淀物的地球化学特征·····	169
7.2.2 大气淡水及从中沉淀的碳酸盐矿物的同位素组分·····	171
7.2.3 大气淡水成岩环境下受矿物相驱动的成岩作用·····	174
7.2.4 大气淡水成岩环境中 $\text{CaCO}_3\text{—H}_2\text{O—CO}_2$ 体系的动力特征对颗粒 稳定化和孔隙演化的影响·····	174
7.2.5 气候的影响·····	177
7.2.6 大气淡水成岩环境的水文地质背景·····	177
7.3 大气淡水渗流带成岩环境 ·····	180
7.3.1 概述·····	180
7.3.2 上部渗流土壤带或钙质结壳带·····	180
7.3.3 下部大气淡水渗流带·····	182
7.3.4 大气淡水渗流带成岩环境中孔隙的发育·····	182
7.4 大气淡水潜流带成岩环境 ·····	182
7.4.1 概述·····	182
7.4.2 不成熟水文地质相：在不成熟矿物相沉积物中发育的孤立台地和 与陆相连的漂浮大气淡水透镜体·····	182
7.4.3 百慕大具长期性漂浮大气淡水透镜体岛屿的案例研究·····	184
7.4.4 墨西哥 Quintana Roo 地区滨海平原的大气淡水成岩作用 ·····	187
7.4.5 美国北路易斯安那州 Oaks 油田侏罗纪高水位期进积海岸线附近 的大气淡水成岩作用 ·····	188
7.4.6 成熟水文地质相：海平面低水位期发育的区域大气淡水体系·····	192
7.4.7 成熟的水文地质体系：海平面低水位期在大巴哈马滩孤立碳酸盐 岩台地上发育的区域大气淡水体系·····	192
7.4.8 成熟的水文地质体系：海平面低水位期在与陆相连的碳酸盐岩陆 棚上发育的区域重力驱动的大气淡水体系·····	195
7.4.9 区域大气淡水含水层环境中孔隙的发育和预测·····	198

7.4.10	区域大气淡水含水层体系的地球化学趋势特征	198
7.4.11	美国新墨西哥西南部密西西比系颗粒灰岩：区域大气淡水含水层体系中孔隙被破坏的典型案例分析	200
7.5	喀斯特作用、产物及与其相关的孔隙	204
7.5.1	概述	204
7.5.2	在成岩作用成熟的喀斯特体系中的溶解作用、胶结作用和孔隙演化	205
7.5.3	美国西得克萨斯州 Yates 油田：与不整合面相关的喀斯特储层复合体的典型案例	207
7.6	与大气淡水及混合水有关的白云化作用	214
7.6.1	概述	214
7.6.2	大气淡水—海水混合或 Dorag 白云化模式	214
7.6.3	混合水白云化模式有效性的讨论	215
7.6.4	现代大气淡水—海水混合区的白云化作用	216
7.6.5	更新世到中新世大气淡水—海水混合带的白云化作用	217
7.6.6	美国伊利诺伊盆地密西西比纪 North Bridgeport 油田：混合水白云岩储层	219
7.6.7	混合水白云化面临的挑战	223
7.7	小结	224
8	层序格架和气候格架中碳酸盐岩储层早期成岩作用和孔隙改造总结	226
8.1	引言	226
8.2	三级海平面低水位期储层的成岩作用和孔隙演化	226
8.2.1	概述	226
8.2.2	海平面低水位期碳酸盐岩缓坡的成岩作用—孔隙模式	227
8.2.3	海平面低水位期陡坡镶边碳酸盐岩陆棚的成岩作用—孔隙模式	229
8.2.4	海平面低水位期镶边孤立碳酸盐岩台地的成岩作用—孔隙模式	231
8.3	三级海平面上升期储层的成岩作用和孔隙演化	232
8.3.1	概述	232
8.3.2	海平面上升期缓坡的成岩作用—孔隙模式	232
8.3.3	海平面上升期镶边陆棚的成岩作用—孔隙模式	234
8.3.4	海平面上升期镶边孤立碳酸盐岩台地的成岩作用—孔隙模式	236
8.4	三级海平面高水位期储层成岩作用和孔隙演化	237
8.4.1	概述	237
8.4.2	海平面高水位期缓坡的成岩作用—孔隙模式	237
8.4.3	海平面高水位期镶边陆棚的成岩作用—孔隙模式	239
8.4.4	海平面高水位期孤立碳酸盐岩台地的成岩作用—孔隙模式	240
8.5	准层序级别的成岩作用和孔隙改造	241
8.5.1	概述	241

8.5.2	三级层序中与准层序叠置模式有关的成岩作用·····	242
8.6	超层序(二级)级别的成岩作用和孔隙改造:层序叠置样式·····	243
8.6.1	概述·····	243
8.6.2	进积层序组及其成岩作用·····	244
8.6.3	加积层序组及其成岩作用·····	245
8.6.4	退积层序组及其成岩作用·····	245
8.7	一级层序级别的成岩作用和孔隙改造:冰期和间冰期·····	246
8.7.1	概述·····	246
8.7.2	碳酸盐矿物相长周期的变化:对成岩作用和孔隙演化的影响·····	246
8.7.3	长周期气候旋回(冰期和间冰期)影响下的沉积层序格架及其成 岩作用—孔隙演化·····	248
8.8	典型案例介绍·····	249
8.8.1	概述·····	249
8.8.2	美国西南部 Andrews 地区二叠盆地中央台盆区晚古生代陆棚石灰 岩孔隙演化的控制因素:冰期地表暴露对孔隙发育的影响·····	250
8.8.3	非洲安哥拉滨外 Albian 组缓坡层序中地层对孔隙发育的控制:间 冰期硅质碎屑岩—碳酸盐岩—蒸发岩混积陆棚背景下的孔隙演化·····	255
8.9	小结·····	263
9	埋藏成岩环境 ·····	265
9.1	引言·····	265
9.2	埋藏背景·····	265
9.2.1	概述·····	265
9.2.2	压力·····	266
9.2.3	温度·····	267
9.2.4	深埋孔隙流体·····	268
9.2.5	构造和盆地水文地质·····	269
9.3	被动大陆边缘埋藏成岩域·····	271
9.3.1	概述·····	271
9.3.2	机械压实—脱水作用·····	271
9.3.3	化学压实作用·····	273
9.3.4	影响化学压实作用效率的因素·····	275
9.3.5	被动大陆边缘背景下的埋藏胶结物·····	279
9.3.6	埋藏胶结物的岩相特征·····	279
9.3.7	埋藏胶结物的地球化学特征·····	281
9.3.8	晚期埋藏胶结作用对储层孔隙的影响·····	282
9.3.9	被动大陆边缘背景下的埋藏溶解作用·····	283
9.3.10	北海 Ekofisk 油田白垩储层中孔隙保存的典型实例·····	284

9.4	碰撞或活动大陆边缘埋藏成岩域	288
9.4.1	概述	288
9.4.2	美国阿巴拉契亚南部下奥陶统上 Knox 群白云岩	289
9.4.3	西加拿大沉积盆地泥盆纪碳酸盐岩的白云化作用	293
9.5	构造后埋藏成岩域	298
9.5.1	概述	298
9.5.2	美国中部大陆密西西比系 Madison 群含水层	299
9.5.3	美国二叠盆地古生代碳酸盐岩构造后含水层体系	302
9.6	孔隙度随深度变化预测	304
9.7	小结	308
10	从沉积物到储层孔隙演化的典型案例	310
10.1	概述	310
10.2	美国怀俄明州 Wind River 盆地 Madden 油田密西西比系 Madison 组	310
10.2.1	概述	310
10.2.2	地质背景概述	310
10.2.3	地层和沉积背景	311
10.2.4	Madden 地区露头区和覆盖区储层对比	315
10.2.5	Madison 组的埋藏历史	317
10.2.6	Madison 组储层和露头白云岩储层的孔隙度—渗透率	319
10.2.7	Wind River 盆地 Madison 组的成岩史	319
10.2.8	从怀俄明州 Madden 油田 Madison 组的研究中得到的启示	322
10.3	美国海湾沿岸中部上侏罗统 Smackover 组及相关的组：成熟的含 油气区	323
10.3.1	概述	323
10.3.2	地质背景概述	323
10.3.3	晚侏罗世的层序地层和沉积格架	325
10.3.4	与沉积层序和海平面相关的早期成岩作用和孔隙改造	333
10.3.5	墨西哥湾中部牛津期储层的埋藏成岩作用和孔隙演化	334
10.3.6	墨西哥湾中部上侏罗统勘探和生产的制约因素及策略	336
10.3.7	从墨西哥湾中部 Smackover 组的研究中得到的启示	338
10.4	菲律宾巴拉望岛滨外古近—新近纪 Malampaya 和 Camago 碳酸盐岩建隆： 三维储层建模	338
10.4.1	概述	338
10.4.2	地质背景概述	339
10.4.3	岩相和沉积模式	339
10.4.4	成岩历史	341
10.4.5	作为储层模型参数的储集岩类型	343

10.4.6	三维储层建模	344
10.4.7	从古近—新近纪 Malampaya 和 Camago 碳酸盐岩建隆的三维储层 建模研究中得到的启示	348
结语	349
参考文献	353

1 碳酸盐岩沉积体系的性质

1.1 引言

鉴于本书主要关注碳酸盐岩储层的孔隙演化和成岩作用，读者和作者都必须对碳酸盐岩的基本特征有一个共识。因此，本章作为入门，突出了碳酸盐岩领域几个特有的基本概念，例如：①绝大多数碳酸盐沉积物是生物成因的；②碳酸盐岩分类的复杂性；③不同海水深度域内的碳酸盐岩沉积相和沉积环境；④随相对海平面的升降变化，碳酸盐岩沉积体系的响应，即应用于碳酸盐岩研究的层序地层理论；⑤碳酸盐高化学活动性所导致的成岩作用后果。

希望进一步深入了解碳酸盐岩沉积环境的读者可阅读 James (1979) 主编的《The Review of Carbonate Facies》，Scholle 等 (1983) 在该书的基础上对内容重新作了全面的补充和修正，Tucker 和 Wright (1990) 出版了最新版本的著作《Carbonate Sedimentology》，Emery 和 Myers (1996) 主编了题为《Sequence Stratigraphy》的著作。这些著作作为读者提供了很好的关于层序地层学的基本概念及其在碳酸盐岩研究中的应用等方面的参考书。

1.2 碳酸盐沉积物和沉积作用的基本特征

1.2.1 概述

碳酸盐沉积物的基本特征可以追溯到碳酸盐沉积物的生物起源及其对沉积结构、构造和沉积作用（如特定的生物构建坚固的碳酸盐岩格架的能力）的影响上。以下内容概述了生物作用对碳酸盐沉积物和沉积作用的影响。

1.2.2 碳酸盐沉积物的起源

现代环境中所见的超过 90% 的碳酸盐沉积物被认为是生物起源的，并形成于海水环境 (Milliman, 1974; Wilson, 1975; Sellwood, 1978; Tucker and Wright, 1990)。绝大多数碳酸盐沉积物的分布直接受有利于产生碳酸钙的生物生长环境参数的控制。这些参数包括温度、盐度、基底和硅质碎屑的注入 (Lees, 1975)。Schlager (1981) 深入研究了纬度对生产碳酸钙生物分布的控制和对总的碳酸盐生产量的影响。碳酸盐的生产速率在热带水域比在温带水域快得多，因为热带和温暖干净的水域更适合“高碳酸盐生产者”（如造礁珊瑚）的繁盛（图 1.1）。

既然很多造礁珊瑚和其他造礁生物对海水深度和光照是很敏感的，最高的碳酸盐生产率出现在水深 10m 以上的海洋环境（图 1.2）(Schlager, 1992)，因此，绝大部分碳酸

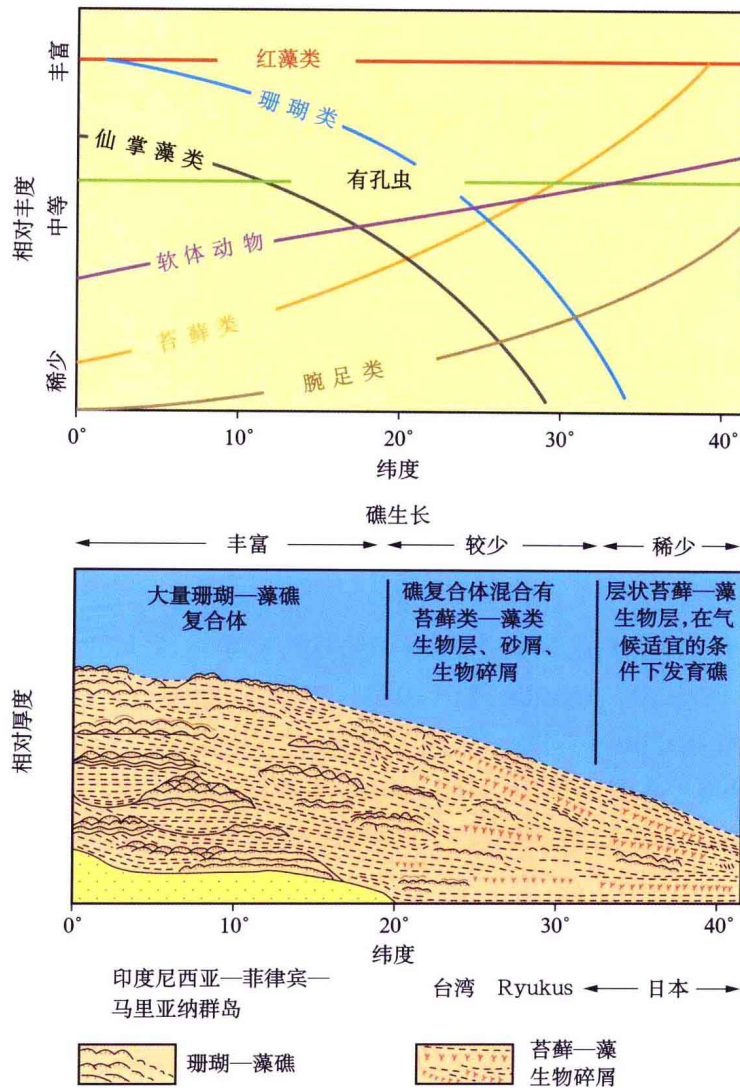


图 1.1 北太平洋地区由热带到温带，碳酸盐岩相随纬度的变化 (Schlager, 1981)

盐沉积物最初沉积或形成在浅海环境。较大碳酸盐颗粒的成因（或起源）是比较容易确定的，研究者可以很容易地从颗粒的超微结构和整体形状上确定颗粒的来源，如源于牡蛎、完整的有孔虫或化学沉淀鲕粒的碎片。但要确定碳酸盐泥屑的成因是十分困难的。碳酸盐泥屑是由较大的生物碎屑受侵蚀而破碎形成细小的颗粒还是源于化学沉淀作用（如热带碳酸盐环境中常见的白色雾团）(Shinn 等, 1989; Macintyre 和 Reid, 1992)？碳酸盐泥屑还有一种可能的成因是源于死亡绿藻的文石针晶体 (Perkins 等, 1971; Neumann 和 Land, 1975)，那么，细菌对碳酸盐泥屑的形成是否也起作用呢 (Drew, 1914; Berner, 1971; Chafetz, 1986; Folk, 1993)？今天，绝大多数碳酸盐岩学者倾向于碳酸盐泥屑可以形成于上述各种作用，但它们相对的重要程度还不能确定。后文将会提到的碳酸盐沉积物矿物组分，特别是细菌对海水成岩作用的影响时，将再来回顾这些问题。最后，需要强调的是绝大多数碳酸盐沉积物是原地沉积的，这与硅质碎屑岩形成鲜明的对比。硅

质碎屑岩通常是盆外成因的，经搬运至盆地内沉积，同时，其分布受控于物理过程。对硅质碎屑岩而言，它不受气候限制，这是因为硅质碎屑岩可以见于全球任何深度的淡水和海水环境中。

1.2.3 生物礁——独特的沉积环境

某些产生碳酸盐的生物具有明显的改变周围环境的能力，它们通过包壳、造架和粘结作用形成碳酸盐独特的沉积环境——生物礁（图 1.3）。在这部分讨论中，将引用生物礁的成因含义——坚固和抗浪的生物格架（James, 1983）。在现代生物礁中，生物—沉积物的相互镶嵌决定了生物格架礁序列的样式。有四种组分单元：①格架生物，包括包壳生物、附礁生物、块状和枝状的后生动物；②内沉积物，充填原生的生长格架孔及生物钻孔；③钻孔生物，通过钻孔、锉磨或咬啃破坏生物礁组分，为礁缘及礁内沉积提供碎屑物源；④胶结物，加速沉积物的固化，甚至可以提供内沉积物（图 1.3）。虽然生物礁岩的具体情况很复杂，但具有很多的共性。第 5 章将综合分析生物礁沉积环境有关的海水胶结作用。

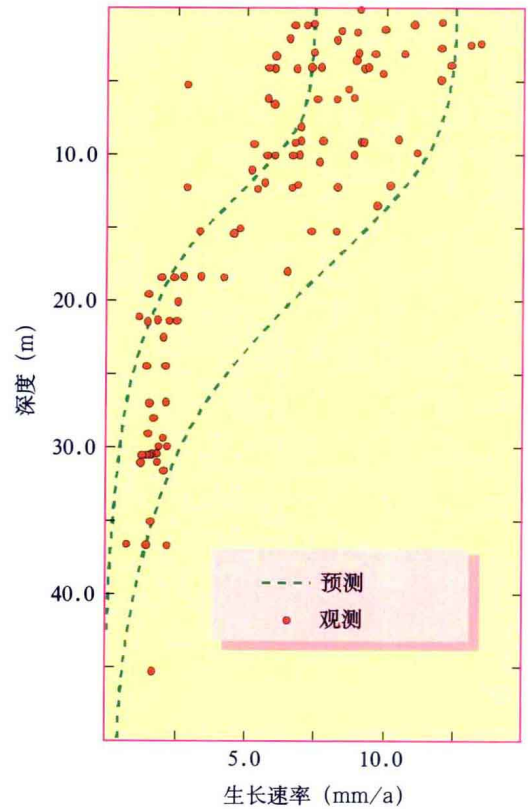


图 1.2 加勒比海造礁珊瑚 *Montastrea annularis* 预测及观察的生长速率图 (Schlager, 1992) 预测的生长速率(虚线)来自“光强度—生长速率”方程式，与观测到的值(圆圈)非常吻合，这说明光强度对珊瑚生产碳酸钙起重要的控制作用



图 1.3 礁格架示意图，强调了格架、充填碎屑和胶结物之间的相互作用 (Ginsburg 和 Lowenstam, 1958)

现今，珊瑚和红藻构建了生物礁格架，辅助生物（如绿藻）向生物礁沉积体系提供沉积物。地质历史时期的造礁生物经历了渐进的演变过程，以至于古生代的造礁生物（如拟层孔虫）与中生代的造礁生物（厚壳蛤类和珊瑚）有明显的不同，和现今观察到的造礁生物也不一致（James, 1983）。事实上，在某些时代，如晚寒武世、密西西比纪和