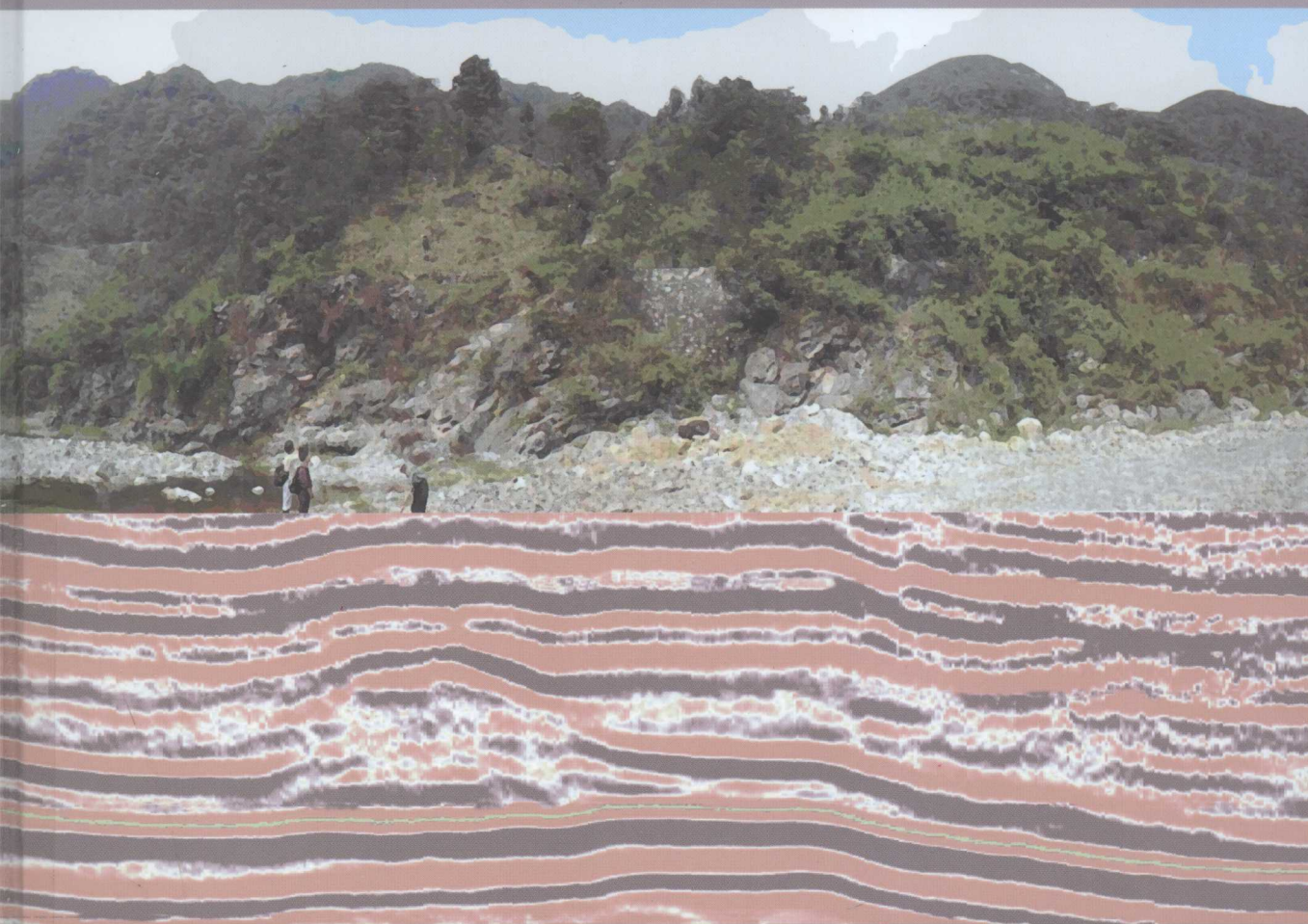


中国典型海相礁滩储层

张永刚 贺振华 等 / 编著
陈洪德 刘树根



科学出版社

P618.13
8

中国典型海相礁滩储层

张永刚 贺振华 等 编著
陈洪德 刘树根

本书研究与出版获得以下项目经费资助：

国家自然科学基金项目(40774064,40739907,40839905)

“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室项目



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍了生物礁的基本特征、生物礁在显生宙的演化及其控制因素、中国生物礁的发育与分布特征、礁滩油气储层地球物理响应特征和礁滩油气藏的勘探实例。所述内容基本上反映了我国海相礁滩储层当前研究的主要进展与成果。本书的编写和取材注意了问题探讨的直观性和典型性,并以图表为主展示碳酸盐岩礁、滩储层及其组合体的沉积特征、礁滩油气藏的勘探潜力、勘探方向、勘探理论和技术方法、勘探成果和存在的问题与对策等多个侧面。

本书适合从事海相碳酸盐岩油气地质与勘探的人员阅读、参考,也可供高等院校地质与地球物理等相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国典型海相礁滩储层/张永刚等编著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-030738-5

I. ①中… II. ①张… III. ①生物礁—地质—油气藏—研究—中国
IV. ①P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 062506 号

责任编辑:彭胜潮/责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬/封面设计:黄华斌

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011年5月第一次印刷 印张:19 3/4

印数:1—1 000

字数:470 000

定价:138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书主要编写人员

张永刚	贺振华	陈洪德	刘树根
吴熙纯	陈本池	王国力	黄德济
侯明才	田景春	文晓涛	熊晓军
陈学华			

前言

20 世纪 50 年代后期,随着认识与勘探技术的突破,世界上碳酸盐岩层系油气勘探获得重大发现,并掀起了在碳酸盐岩中找油气的热潮。碳酸盐岩储层在世界油气生产中占有极其重要的地位。据统计,世界碳酸盐岩储层的油气产量约占世界油气总产量的 60%。因此,研究碳酸盐岩储层特征及其中油气分布规律、碳酸盐岩储层中石油地质特征及成藏组合具有重要的理论意义和实际价值。

一般情况下,碳酸盐岩为低孔隙度和低渗透率的致密岩层,不易形成油气储层。但其中的裂缝、溶蚀孔洞和礁滩复合体则可能成为优质储层。总体上,碳酸盐岩储层可归纳为下列几类:①不整合面之下的石灰岩和白云岩;②潮下带到潮上带的白云岩;③鲕粒、团粒浅滩;④礁(包括与礁有关的储层);⑤泥晶灰岩、白垩内的微孔隙;⑥泥晶灰岩内的微裂缝。这其中的礁、滩和礁、滩中的孔、缝储层是我们研究的重点。

生物礁是由固着生物所建造的原地沉积的碳酸盐生物建隆。从科学角度对生物礁进行研究开始于 18 世纪末到 19 世纪初,至今已有 200 多年的研究历史。20 世纪 20 年代,由于在生物礁中发现了大量的石油天然气,从而更加刺激了人们对生物礁的兴趣,掀起了生物礁研究的热潮,有关成果大量涌现。

20 世纪以来,国际上生物礁的概念和有关理论进展巨大,主要表现在:

(1)生物礁的研究和发展经历了漫长的争论和较多的挫折,其中对概念和定义的理解就有很多不同的认识。20 世纪 50 年代以后,出现了许多描述生物建造的名词术语。70 年代以后生物礁的含义大大扩展,一些有争议的生物建造现在都可以被称为生物礁。

(2)20 世纪 70 年代以前,生物礁的定义非常严格,强调生物建造和内部的生物成分,以及外部的抗浪构造的存在。这些定义生物礁的属性中有些具有学者的主观性,易在其他学者中引起争议,直到现在有些争议也没有完全解决。20 世纪 70 年代以后生物礁的概念得到扩展,生物礁的研究进入了快速发展时期。这一时期生物礁的研究逐渐开始关注生物礁内部组分和成岩作用的研究,由于生物礁基本概念的发展,各种分类方案开始出现,大大推进了生物礁的研究和发展。

(3)20 世纪 90 年代以后,生物礁的分类进一步细化,出现了簇礁、节状礁等新的生物礁类型,而且对以前的骨架生物礁等传统类型又做出了新的解释和扩充。

(4)生物礁的形成过程和成岩机理的研究受到重视,其中生物礁生长过程中的胶结和成岩作用是研究的重点,而且也取得了很大进展。另外,造礁生物对生物礁的形成和成岩作用影响的研究也取得了一定进展。

(5)生物礁的地球化学研究具有重要意义。生物礁作为一种特殊的生物沉积建造,在形成过程中记录了一系列的环境、沉积条件以及造礁生物方面的重要信息。在对生物礁的成分和成岩作用充分理解的基础上,利用成熟的地球化学方法进行研究能够提供关于生物礁生长和

沉积环境以及气候条件变化的重要信息。

(6)近 20 年来,伴随着大型、特大型生物礁滩油气田的发现,以工业应用为目的的碳酸盐岩地球物理学和生物礁滩勘探技术开始形成,并得到快速发展。

与国外的研究相比,我国生物礁储层的研究起步比较晚。随着国外生物礁大油田的不断发现,20 世纪 50 年代,我国黄汲清教授等指出了勘探生物礁的重要意义。20 世纪 60 年代初,石油工业部组织了南方古生界找油勘探队伍,发现了贵州西南部上二叠统生物礁,而与油气勘探相关的生物礁研究首先开始于川东-川西二叠系生物礁。随着 1987 年在南海北部至今仍属我国海上最大油田的流花 11-1 礁型油田的发现,以及西沙群岛永兴岛和南沙群岛永暑礁的现代珊瑚礁上新生界礁岩的钻遇,在南海南部的万安、曾母、文莱-巴盆地也相继发现了一批中新统生物礁油气田,引起了对南海生物礁研究的强烈关注。鄂西建南气田为国内首次发现的生物礁气田(二叠系),它的发现开拓了我国在生物礁中找油、找气田的美好前景。以后,在山东济阳坳陷滨南地区、珠江口盆地新近系、北部湾石炭系以及塔里木、鄂尔多斯、华北、四川盆地等陆续发现了生物礁油气藏。特别是近几年中石化在川东北地区的上二叠统长兴组和下三叠统飞仙关组的生物礁滩储层中发现了普光大气田,中石油也在龙岗地区相应的沉积相带打到日产近 200 万 m^3 的天然气井,进一步确立了四川盆地上二叠统长兴组和下三叠统飞仙关组生物礁、滩气藏的巨大勘探开发潜力。同样,近几年来,塔里木盆地中央隆起区 I 号坡折带油气勘探通过多年多轮次的探井滚动部署,取得重大勘探突破,特别是 2005 年中石油在塔中 68—82 井的奥陶系良里塔格组礁滩相地层中相继获得了日产百吨、超千吨油气当量的高产工业油气流,发现了中国第一个奥陶系坡折带礁滩相灰岩亿吨级整装凝析油气田。中石化在塔中地区卡 1 区块的中 1 井和卡 4 区块的古隆 1 井等地也发现了一批含油气构造,显示了中石化塔中区块较大的勘探潜力和良好的勘探前景。以上事实充分证实了我国生物礁、滩油气藏的广阔勘探潜力。

由于工业性礁滩油气藏在我国的发现只有 20 余年的历史,许多重要突破还是近几年的事情,人们对生物礁本身以及与生物礁有关的油气藏地质理论和勘探方法尚不甚了解。即使是学术造诣较深的相关专家、学者,他们对生物礁和礁滩油气藏的诸多研究方面(概念、定义、术语、分类、演化及分布等)也仍然存在许多不同认识,需要继续深入探讨。他们的不同观点与认识有时直接或间接地影响到生物礁滩油气的勘探方向、勘探部署和勘探效果。

为了使广大科技工作者了解并掌握礁和礁滩储层的基本地质、地球物理理论与特征,推进礁滩油气藏勘探的技术进步,提高勘探效果,中国石油化工股份有限公司设立了“中国典型海相礁滩储层研究”项目,其研究目标为:以中国典型海相礁滩储层地质、地球物理特征研究为重点,结合海相礁滩储层勘探的应用实例剖析,研究礁滩储层的识别理论与方法,进行礁滩油气藏的勘探潜力、勘探方向、有利地区和层位分布分析;提供中国典型海相礁滩储层的研究成果,形成一部具有普及和应用价值的海相礁滩储层研究著作。

此项研究紧密围绕上述目标,以现代岩石学、沉积学、层序地层学、储层地质学、地球物理学、岩石物理测试分析和计算机模拟等多学科理论、技术为指导,在充分利用已有的研究成果基础上,采用宏观研究和微观分析相结合;现代礁的生长环境条件和古代生物礁生长环境的对比研究相结合;我国和世界礁滩油气藏的对比研究相结合;地质和地球物理特征对比研究相结

合;地面露头 and 深部储层特征的对比研究相结合;物理模型、数值模拟与实际观测结果的对比研究相结合;典型实例剖析与面上资料的对比研究相结合的研究方法,以碳酸盐岩礁滩储层的基本属性与地球物理响应特征和典型勘探实例剖析为重点,并以图表为主展示我国海相碳酸盐岩礁滩沉积特征、礁滩油气藏的勘探潜力、勘探方向、勘探成果、勘探理论和技术方法、存在的问题与对策等多个侧面,尽量突出研究成果的直观性和典型性,为促进碳酸盐岩礁滩油气藏勘探理论和技术进步尽绵薄之力。

此项研究得到了国家自然科学基金、国家重点实验室研究基金、中国石油化工股份有限公司科技部、中石化勘探南方分公司和有关油田的大力支持和帮助,在此表示衷心感谢!并对参与研究工作的研究生和有关人员以及参考文献的作者表示敬意和感谢。诚望大家指出书中的错谬。

目 录

前言

第 1 章 生物礁的基本特征	1
1.1 生物礁的概念和组成单元	1
1.1.1 生物礁概念	1
1.1.2 生物礁组成单元	1
1.2 生物礁分类	3
1.2.1 生物礁结构分类	3
1.2.2 生物礁的形态分类	8
1.2.3 生物礁的大小分类	12
1.3 生物礁的建造和破坏因素	12
1.3.1 生物礁的建造因素	12
1.3.2 生物礁的破坏因素	13
1.4 生物礁的形成与发展	14
1.5 生物礁礁岩的分类	15
1.5.1 原地原生碳酸盐岩和异地异化碳酸盐岩	15
1.5.2 礁碳酸盐岩分类	15
1.6 生物礁与有关术语的比较	16
1.6.1 生物丘(bioherm)和生物层(biostrome)	16
1.6.2 礁(reefs)和滩(banks)	17
1.6.3 岩隆(buildup)和地层礁(stratigraphic reef)	18
1.6.4 礁、丘、滩对比	18
第 2 章 生物礁在显生宙的演化及其控制因素	19
2.1 地质历史中控制生物礁特征的因素	20
2.1.1 造礁生物的演化	20
2.1.2 地球历史上出现的 5 次生物绝灭事件	22
2.1.3 生物礁的多样性和造礁生物的多样性	24
2.1.4 生物礁的生态集	25
2.1.5 生物礁的分带或生态演替	27
2.1.6 生物礁的生物侵蚀作用	27
2.1.7 造礁生物骨骼的矿物学	28
2.1.8 生物礁中的微晶灰泥组分	29
2.1.9 生物礁中的亮晶胶结物	29

2.1.10	生物礁中的岩石碎屑产量	31
2.1.11	生物礁储层的质量	31
2.1.12	生物礁的类型	32
2.1.13	生物礁的厚度	33
2.1.14	生物礁的丰度	34
2.2	地质历史中控制生物礁发育演化的环境因素	35
2.2.1	控制全球现代虫黄藻珊瑚礁发育的环境因素	35
2.2.2	显生宙的板块构造运动	36
2.2.3	沉积古地理环境变迁	37
2.2.4	生物礁发育的古纬度	38
2.2.5	影响生物礁发育的古气候因素	41
2.2.6	生物礁发育的水深及海平面升降	43
2.2.7	影响生物礁发育的海洋地球化学因素	44
2.2.8	礁灰岩和台地灰岩营养物质过量的影响	46
2.2.9	热带风暴对生物礁的影响	47
第3章	中国生物礁的发育与分布特征	49
3.1	中国生物礁发育概况及控制因素	50
3.1.1	分布特征	50
3.1.2	生物礁的类型及主控因素	52
3.2	中国南海现代生物礁	54
3.3	鄂尔多斯盆地南缘奥陶系生物礁的发育与分布	55
3.3.1	永寿好峙河生物礁	64
3.3.2	耀县桃曲坡生物礁	66
3.3.3	富平将军山生物礁	69
3.3.4	礼泉东庄生物礁	72
3.3.5	生物礁形成的沉积环境及成礁模式	73
3.4	塔里木盆地奥陶系生物礁的发育与分布	74
3.4.1	塔中地区生物礁	75
3.4.2	塔里木盆地巴楚-柯坪地区生物礁	90
3.5	中国南方泥盆纪生物礁的发育与分布	100
3.5.1	南丹六寨堤礁	100
3.5.2	南丹大厂龙头山珊瑚、层孔虫礁	104
3.5.3	桂林阳朔层孔虫、珊瑚礁	108
3.5.4	横县六景藻礁-泥丘组合	112
3.5.5	环江县北山蓝绿藻-层孔虫礁-滩组合	114
3.5.6	北川甘溪珊瑚、层孔虫礁	117
3.6	川东北地区长兴组-飞仙关组礁滩组合的发育与分布	123

3.6.1	四川通江铁厂河林场生物礁	125
3.6.2	四川宣汉盘龙洞生物礁	126
3.6.3	川东北地区长兴组礁滩储层特征	127
3.6.4	川东北地区飞仙关组鲕粒滩-白云岩储层特征	130
3.6.5	川东北地区长兴组-飞仙关组成岩作用	133
3.6.6	江油二郎庙飞仙关组古油藏特征	139
3.7	川西北晚三叠世卡尼期生物礁的发育与分布	140
3.7.1	川西北晚三叠世卡尼期生物礁-滩组合综述	140
3.7.2	川西北晚三叠世卡尼期典型生物礁-滩组合模式	143
3.7.3	生物礁的生长基底鲕粒滩及生屑滩	145
3.7.4	生物礁特征	145
第4章	礁滩油气储层地球物理响应特征	154
4.1	礁滩储层的地震响应特征	154
4.1.1	生物礁的三维地震特征	154
4.1.2	二维地震剖面上生物礁的一般特征	155
4.1.3	台地边缘礁的地震响应特征	158
4.1.4	鲕粒滩型储层的地震响应特征	159
4.1.5	飞仙关组礁滩储层的地震属性特征	161
4.2	礁滩储层的地震相分析	162
4.2.1	礁滩储层地震相分析原理和实例	162
4.2.2	典型剖面的礁滩地震相特征	165
4.2.3	生物礁的连续追踪	168
4.3	礁滩相地层的地震属性分析	169
4.3.1	叠后地震资料的属性分析	169
4.3.2	叠前地震资料的属性分析	187
4.4	礁滩储层的数值模拟与物理模型实验	191
4.4.1	礁滩储层的地震数值模拟	191
4.4.2	礁滩相地质体的物理模型	203
4.4.3	生物礁的形成条件与古地磁分析	212
4.5	礁滩复合体的测井相特征	212
4.5.1	生物礁的测井相特征	212
4.5.2	鲕粒滩的测井相特征	219
4.5.3	礁滩复合体的测井相特征	224
4.5.4	测井曲线的模拟	227
4.6	礁滩复合体的识别陷阱	228
4.6.1	与火成岩岩隆的差别	228
4.6.2	礁与泥岩刺穿的差别	230

4.6.3	礁与砂体的差别	231
4.6.4	礁与古潜山的差别	232
4.6.5	地表对时间剖面上生物礁特征的影响	232
4.6.6	偏移速度误差产生的地震识别陷阱	234
4.6.7	层位对比不准影响礁滩复合体的形态和空间分布	235
4.6.8	岩性识别误差影响礁滩储层和非储层的识别	236
第5章	川东北地区深层礁滩相气藏的勘探实例	237
5.1	川东北地区二—三叠系生物礁滩气藏的发现与分布概况	237
5.2	川东北地区生物礁滩气藏的勘探概况	238
5.3	川东北地区基本地质特征	238
5.3.1	川东北地区各探区的构造特征	238
5.3.2	川东北地区地层特征	240
5.3.3	川东北地区 Tf-Pch 沉积层序和气藏生储盖的基本特征	243
5.4	长兴—飞仙关组礁滩气藏勘探技术的问题与进展	245
5.4.1	早期勘探存在的主要问题	245
5.4.2	地震资料的优化采集和处理	247
5.5	川东北地区礁滩储层岩石物性参数分析	252
5.5.1	礁滩储层岩石物性参数的统计分析	252
5.5.2	川东北礁滩储层岩石物性参数的测试分析	254
5.5.3	含孔隙流体碳酸盐岩的基本岩石物理特征	260
5.6	川东北礁滩相气藏识别和预测的基本方法	261
5.6.1	生物礁滩储层几何外形的描述	261
5.6.2	有利沉积相带的划分与选择	261
5.6.3	含气储层的测井响应分析	263
5.6.4	成像测井特征	265
5.6.5	地震响应特征的分析与利用	266
5.6.6	减少储层预测多解性的数值模拟	268
5.6.7	基于波形分类的地震相划分与利用	269
5.6.8	波阻抗反演技术	273
5.6.9	地震属性分析	274
5.6.10	地震弹性参数反演与叠前反演	276
5.6.11	利用低频伴影技术识别含气礁滩复合体	278
5.6.12	礁滩储层综合预测	280
5.7	小结	287
参考文献		289

第 1 章 生物礁的基本特征

1.1 生物礁的概念和组成单元

1.1.1 生物礁概念

人们对于碳酸盐沉积中有关“礁”的定义酝酿已久(Nelson et al. , 1962)。该术语的涵义虽未统一,然而在地质学中已广为采用。礁定义至今未统一有两个原因:①生物礁有多种多样,不可能只用一种礁类型概括,礁定义必须考虑到礁的诸多变化(Twenhofel, 1950);②在为礁下定义时曾有趋势纳入诸如礁的抗浪能力等概念,这些概念是主观意见,难以用于古代礁(Ladd, 1944)。

近几年,通过对前人认识的总结和全球生物礁的研究,生物礁的定义有了较大进展,详见表 1-1。

表 1-1 两种生物礁定义及关键因素

编号	定义	关键因素	文献来源
1	生物礁是由固着生物所形成的本质上是原地沉积的碳酸盐建造	生物来源、碳酸盐组分以及原地堆积	Riding(2002)
2	由底栖固着生物生长和活动而形成的侧向受限的生物成因构造,具有地貌突起及(推测的)刚性构造	底栖固着、侧向受限、刚性构造	Kiessling et al. (2002)

目前,有关生物礁定义多数人的共识有:①生物礁是由底栖固着生物在海底、湖底形成的碳酸盐为主的建造;②生物礁是原地形成的;③生物礁在水底具有地貌突起(侧向受限的丘状、块状、脊状或垄层状);④生物礁具有坚固抗浪性(具有刚性构造)[Riding(2002)等反对这一概念]。

1.1.2 生物礁组成单元

生物礁内部及其周围或多或少受到生物礁发育的影响,形成了生物礁本身及其周围具不同特征的单元(分带)。生物礁的分带是生物礁研究的重要内容,通过分带来确定礁组合是从露头、地腹鉴别生物礁的重要途径。

以边缘礁为例(图 1-1),横剖面上生物礁(组合)可划分为礁后、礁坪、礁冠、礁前、前礁等(礁前和礁后合称礁翼)。这些分带在能量大小、沉积环境、生物结构、岩石结构上具有显著的差异。

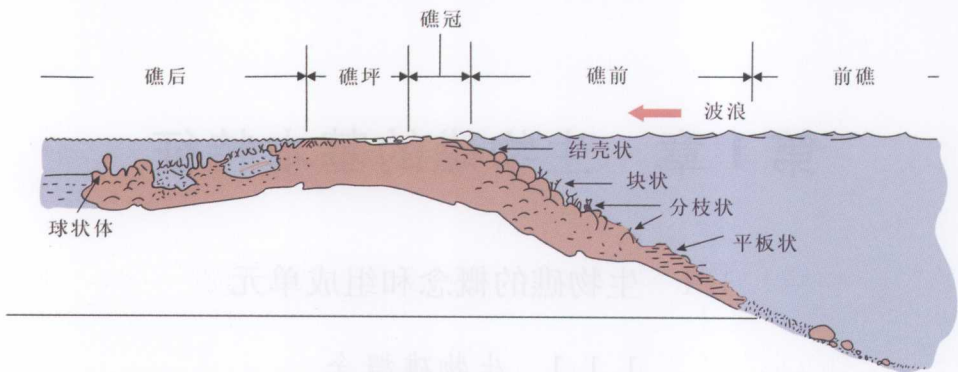


图 1-1 台地边缘礁分带横剖面图(James, 1983)

礁后(back reef):在礁坪背风处,环境比较平静,大量的灰泥从悬浮状态沉淀下来,同时有海百合、钙质绿藻、腕足等海底动物的大量繁殖,常常形成富泥的岩性。

礁坪(reef flat):由礁岩组成的石质平台,在低潮面或之上的礁脊向陆部分。如现代生物礁坪偶尔有活的珊瑚簇及伴生生物,常发育礁碎屑和珊瑚砂。礁坪包括浅水凹地、不规则的冲沟、低的砂岛或碎石(上面常发育植物)和分散状的硬珊瑚。

礁冠(reef crest):位于最低潮面上 0.5m,很容易受到波浪的冲击。由于需要抗浪,其中的珊瑚礁呈现漂砾形状或个体很小很坚固。

礁前(reef front):指生物礁向海斜坡中上部分,如珊瑚礁可以延伸到大量活珊瑚和珊瑚线藻的礁缘之上。

礁间:指两个生物礁之间的沉积。

以点礁(斑点礁)为例(图 1-2),纵剖面上生物礁可分为礁基、礁核和礁盖等。

礁基(reef base):指发育生物礁的基底,通常是海底中相对突起的地方。

礁核(reef core):在生物礁内,位于近原地造礁生物建造的坚固岩块的中央;指严格意义上的礁。

礁盖:披覆于礁核或礁翼之上,可能与生物礁的演化末期环境因素变化有关。

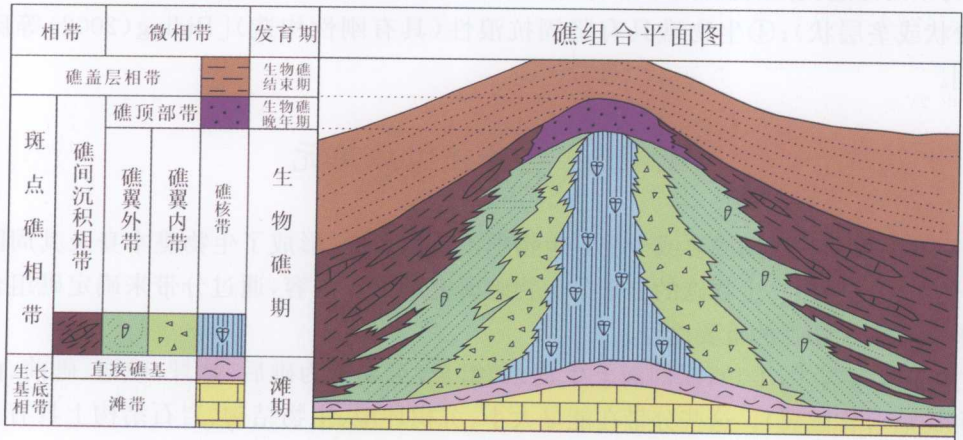


图 1-2 一个假设点礁纵剖面示意图

1.2 生物礁分类

1.2.1 生物礁结构分类

1. 概述

生物礁是由固着生物所形成的原地沉积的碳酸盐建造。生物礁的建设性过程和沉积过程形成了三个基本的沉积组分:基质(M,英文缩写,下同)、原地形成的骨架(S)和孔隙/胶结物(C)。所有这三种组分都可以形成于生物礁外表面或内部孔隙中。

(1) 基质(matrix)

生物礁中的沉积颗粒在结构、分选和成层性上变化很大,而且其来源可能是生物礁内部的碎屑物质和改造过的沉积物,也可以来自于生物礁以外。生物礁外部(表面)的基质在分选和结构上变化很大。内部(仅针对开放的生物骨架礁)基质主要是重力作用和风浪作用(沉积到孔隙中)的结果。

(2) 骨骼(skeleton)

生物礁中的骨骼所包含的范围比较广,包含了钙化的微生物、藻类以及无脊椎动物(化石)。

这些生物礁中矿化的生物根据在礁体建造中的不同作用可以划分为:①主要的造礁生物,通常数量很多,但是个体上并不一定比其他的造礁生物大;②辅助造礁生物;③隐蔽造礁生物。

通常主要和辅助的造礁生物生长在生物礁的表面,而隐蔽造礁生物通常存在于生物礁造礁格架的内部,有时隐蔽造礁生物会和生物礁表面的建造者相混淆。生物礁中的骨架决定了生物骨架礁和簇礁的生长。在这些生物礁中,骨架显示出形态上(如锥状、棒状、枝状、丘状以及层状)延伸方向、黏附和支撑情况、相互间的距离、大小和生长速度的变化。

(3) 胶结物(cement/cavity)

生物礁中早期的胶结作用可以发生在外部和表面,也可以发生在内部(通常是在开放格架生物礁中)。所有的生物礁都从这种早期的胶结作用中得到许多构造上的支持。但是,如果沉淀作用非常强而且量很大,就会将建造生物覆盖起来,从而形成组分上以胶结物为主的生物礁。

Riding(2002)设计出一个 MSC 三角形图表(图 1-3),用以区分礁的

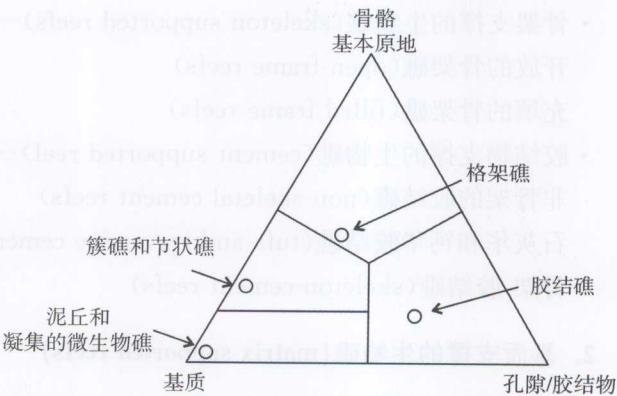


图 1-3 基质、骨骼、孔隙/胶结物 MSC 三角图

(Riding, 2002)

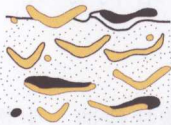
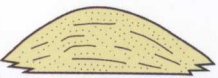
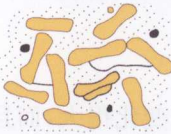
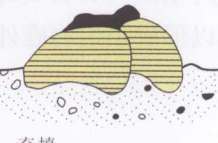
基质支撑		骨架支撑	胶结物支撑
凝集微生物礁 	簇礁 	骨架礁  开放	胶结礁 
碳酸盐岩泥丘 	节状礁 	充填  充填	骨架-胶结礁 
很少或没有骨架		骨架较多但没有发挥支撑作用	生物胶结 (骨架较少或缺失)

图 1-4 生物礁结构分类(Riding, 2002)

类型。据此,生物礁可分为三大类:①基质支撑的生物礁(凝集的微生物礁、簇礁、节状礁);②骨架支撑的生物礁(骨架礁);③胶结物支撑的生物礁(胶结礁)(图 1-3、图 1-4)。

具体可分为:

- 基质支撑的生物礁(matrix supported reefs)
 - A. 凝集的微生物礁(agglutinated microbial reefs)
 - B. 簇礁(cluster reefs)
 - 密集的簇礁(closed cluster reefs)
 - 松散的簇礁(spaced cluster reefs)
 - C. 节状礁(segment reefs)
- 骨架支撑的生物礁(skeleton supported reefs)——骨架礁(frame reefs)
 - 开放的骨架礁(open frame reefs)
 - 充填的骨架礁(filled frame reefs)
- 胶结物支撑的生物礁(cement supported reef)——胶结礁(cement reefs)
 - 非骨架的胶结礁(non-skeletal cement reefs)
 - 石灰华和钙华胶结礁(tufa and travertine cement reefs)
 - 骨架-胶结礁(skeleton-cement reefs)

2. 基质支撑的生物礁(matrix supported reefs)

(1)凝集的微生物礁(agglutinated microbial reefs)

定义: 由微生物捕集和黏结作用形成的生物礁。

特征: 具有层状的(叠层石)、凝结的(凝块叠层石)、隐晶质的(leiolite)组构, 主要由微生

物捕集的颗粒沉积物组成,颗粒范围由细到粗。原地的骨架和大的原生孔隙很少。早期胶结作用提供额外的支撑(图 1-5)。

(2) 簇礁(cluster reefs)

定义: 簇礁是礁内原地的骨架相邻,但并不相接触的
生物礁。

特征: 簇礁内无骨架格架,限制了被保护的骨架内孔隙的发育。渗滤到内部的沉积物和早期骨架间的胶结物很少。礁的稳定性由基质支撑提供。因此,簇礁显示了相对较高的基质/骨架比和很少量的早期胶结物。沉积物捕集是骨架生长的一个必然结果,并且许多簇礁生物能在软的基底和松散沉积物上发育。没有骨架可以使得层理在礁内发育,并且限制了簇礁能达到的硬度和突起(相对的空间高度)(图 1-6)。

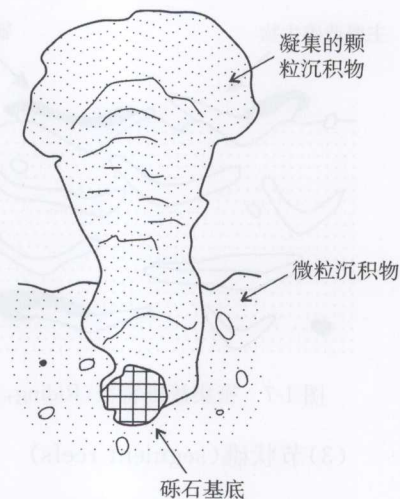


图 1-5 凝集微生物礁特征示意图
(Riding, 2002)

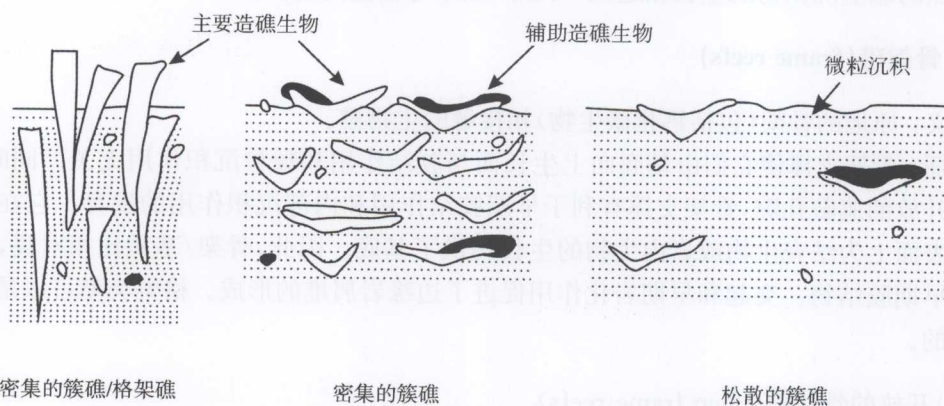


图 1-6 簇礁特征示意图(Riding, 2002)

1) 密集的簇礁(closed cluster reefs)

定义: 簇礁内原地的骨架密集分布,相邻的骨架间距小于或等于 1 个单元距离。

特征: 密集簇礁的骨架生长和基质的稳定性同步进行。这可以使它们生长的较大并且形成中等幅度的起伏(图 1-7)。

2) 松散的簇礁(spaced cluster reefs)

定义: 簇礁内原地的骨架较松散,相邻骨架间的距离为 1~2 个单元距离。

特征: 生物对基底和沉积物的影响比其他任何生物礁都小。基质占主要优势,起伏低,并且水平边缘可能不明显(图 1-8)。

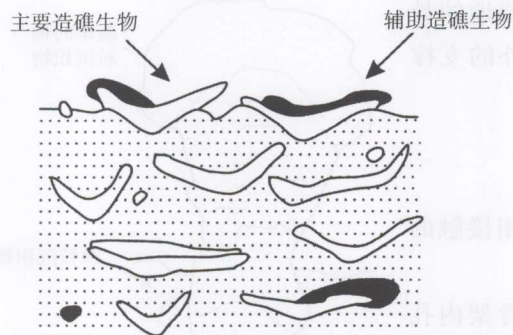


图 1-7 密集簇礁特征(Riding, 2002)

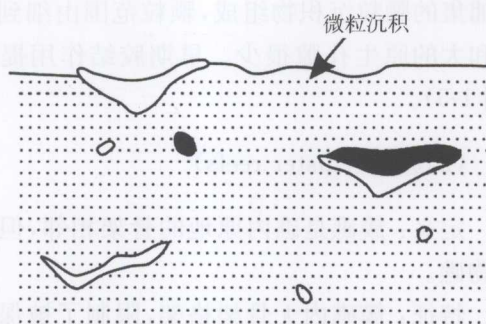


图 1-8 松散簇礁特征示意图(Riding, 2002)

(3) 节状礁(segment reefs)

定义：节状礁是基质支撑的，其中的骨架是相邻的，并且可能是接触的，但大部分是分离的。骨架主要是准原地的。

特征：骨架是分离的并且严格地说不是原始状态，基质丰度高，且早期胶结物相对低。为了与强烈的礁上沉积物的生长相适应，可以产生中等幅度的起伏。

3. 骨架礁(frame reefs)

定义：原地的骨架(包括钙化微生物)相接触的生物礁。

特征：骨架支撑使它们由基底向上生长而与胶结作用和颗粒沉积作用无关。同时，通过生成半开放的遮蔽孔隙，骨架支撑有利于早期胶结作用和内部沉积作用的发育。它在开放或隐蔽的表面上为结壳生物或岩内生物的生长提供了基底。因此，骨架/基质比相对高，并且可能常见早期胶结物。突起和早期岩化作用促进了边缘岩屑堆的形成。格架类型可以是开放的或充填的。

(1) 开放的骨架礁(open frame reefs)

定义：骨架之间的空间主要是遮蔽孔隙的骨架礁。

特点：骨架之间空间仍未被充填，很久后可在生物礁主要的生长面之下成为部分封闭的空间。这些空间不受沉积作用、水流和光照的影响。内部生物(隐蔽的造礁生物)和沉积(内部沉积物，早期胶结物)是开放格架礁的典型特征。如果充填不完全，那么残留孔隙将为沉积形成后的流体流动提供通道，并且可能沉积多期的海相胶结物和形成示底泥质充填构造。这些胶结物经常由孔隙壁的生物侵蚀作用产生。因此，开放格架具有复杂的沉积和成岩史(图 1-9)。

(2) 充填的骨架礁(filled frame reefs)

定义：在生物礁生长的同时骨架间的空间被颗粒沉积物充填的骨架礁。

特征：充填骨架礁中，遮蔽孔隙少，因此孔隙中的隐蔽造礁生物、内部胶结物和渗滤沉积物也少。