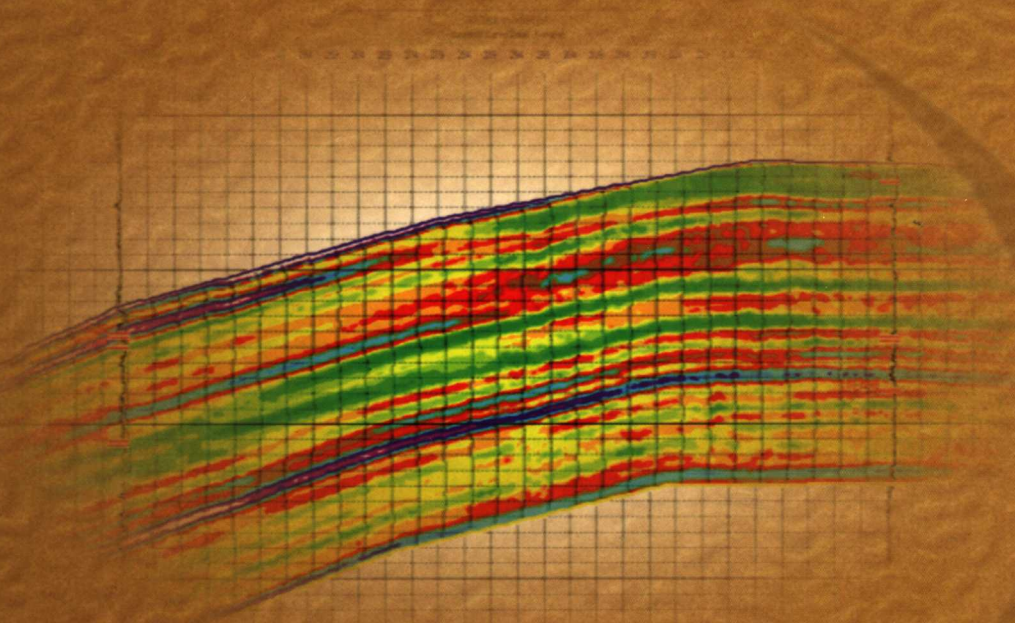


复杂储层识别及预测

郭旭升 施泽进 李国雄 等著



地 质 出 版 社

复杂储层识别及预测

郭旭升 施泽进 李国雄 等著

地质出版社

· 北京 ·

内 容 提 要

本书以多学科理论为指导,以沉积学、层序地层学和储层地质学研究为基础,针对复杂储层类型多样且非均质性较强的特点,对复杂储层识别、预测理论、方法及技术进行了系统和全面的论述。从地震地层分析和相控技术出发,运用地震地层及地震相分析方法直接识别典型储集体,应用相控技术研究有利沉积相的空间展布,间接预测储层。同时,有机地与地震属性分析、地震反演以及 AVO 分析技术等相结合,多方法综合识别预测储层,取得了良好的效果。研究思路和方法技术具有广泛的适用性。

本书思路清晰、内容充实、层次分明,论述简明扼要,具有广泛的参考价值,可供石油勘探、开发和地质类专业科研和生产技术人员阅读,也可作为有关专业研究生的学习参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂储层识别及预测 / 郭旭升等著. —北京:地质出版社, 2006.6

ISBN 7-116-04867-7

I. 复... II. 郭... III. ①油气聚集—复杂地层:
储集层—识别②油气聚集—复杂地层:储集层—预测
IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 056092 号

FUZA CHUCENG SHIBIE JI YUCE

责任编辑:刘亚军 祁向雷

责任校对:郑淑艳

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010)82324508 (邮购部); (010)82324578 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@ gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787mm × 1092mm 1/16

印 张:10

字 数:240 千字

印 数:1—800 册

版 次:2006 年 6 月北京第一版·第一次印刷

定 价:40.00 元

ISBN 7-116-04867-7/P·2691

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

序

复杂油气藏是石油地质发展到现阶段的一个主要研究及勘探方向，尤其是近10多年来，随着社会发展和科技进步，复杂油气藏的探明储量已超过了构造圈闭的探明储量，成为主要的油气勘探类型，成为当今石油地质最为活跃的领域。

复杂油气藏研究的核心是复杂储层的识别及预测，如何将多学科理论和方法应用于石油地质，特别是应用于复杂储层的识别、预测和复杂油气藏的勘探开发，是当今石油地质研究的重大课题，不仅具有深远的理论意义，同时也具有指导勘探和开发的实际意义。郭旭升、施泽进、李国雄等最近完成的《复杂储层识别及预测》一书，是我所见到的一部较系统论述复杂油气藏勘探方法与技术的研究专著。该专著结合我国能源短缺的实际情况，以现代科学理论和方法为指导，开展复杂储层识别及预测的方法和技术研究，属于地质勘探领域前沿研究课题，具有重要的理论意义和重大的应用前景。

该专著以多学科理论为指导，以沉积学、层序地层学和储层地质学研究为基础，以地震方法为手段，辅以相控技术，针对研究区储层类型多样且非均质性较强的特点，从基础地质研究入手，广泛收集了野外第一手资料 and 汇总了前人成果，充分应用现代化测试分析手段和计算处理技术，对储层识别、预测及油气检测方法进行了全面的研究，形成了一套系统的具有普适性的储层识别预测方法和技术，从而可以更为精细地描述沉积相的空间展布规律，剖析复杂储集体的特殊地震现象。这些方法、技术将对复杂储层的识别、预测起到进一步的完善作用，并在实际工作中有着广泛的应用前景，从而进一步促进我国油气勘探事业的发展。以上这些成果均是作者长期知识积累的结晶，我对作者能完成这项重要的研究工作表示衷心的感谢。

应该指出，复杂储层有其特殊性，非均质性较强，研究复杂储层的理论、方法及技术手段还不够完善，而多学科、多方法的有机交叉和结合是

复杂油气藏勘探发展的必然趋势。鉴于此,本专著的出版具有重要的意义,其成果经进一步系统研究和推广应用,将会有力地促进我国地质勘探事业的发展。这一研究成果表明,发挥多学科科研优势,在地质勘探问题研究中一定会有更大突破。在此,我愿将此书郑重推荐给广大石油地质工作者,希望年轻的一代能在这一领域进一步开展开拓性和创新性的工作,并取得更加杰出的成果。

中国科学院院士 刘宝琛

2006年4月

目 录

0 引言	1
1 复杂储层识别及预测的地质基础	5
1.1 沉积模式与沉积相	5
1.1.1 海相沉积模式与沉积相	5
1.1.2 陆相沉积模式与沉积相	8
1.1.3 海陆过渡相沉积模式与沉积相	9
1.2 沉积模式、沉积相对储层发育的影响	9
1.2.1 海相沉积模式、沉积相对储层发育的影响	10
1.2.2 陆相沉积模式、沉积相对储层发育的影响	11
1.2.3 海陆过渡相沉积模式、沉积相对储层发育的影响	12
1.3 层序地层、沉积体系域特征对储层发育的影响	14
1.3.1 海相层序地层及沉积体系域	16
1.3.2 陆相高分辨层序地层及沉积体系域	20
1.3.3 海相层序地层及沉积体系域与储层发育的关系	23
1.3.4 陆相高分辨层序地层及沉积体系域划分及其对储层的影响因素分析	23
1.4 储层发育的构造控制因素	24
1.4.1 区域构造	24
1.4.2 原生构造	27
1.4.3 次生构造	28
2 复杂储层地质特征研究	30
2.1 储集空间发育控制因素	30
2.1.1 碳酸盐岩储集空间发育控制因素	30
2.1.2 碎屑岩储集空间发育控制因素	31
2.2 储层孔隙结构特征及分类评价	32
2.2.1 储层孔隙结构特征研究	32
2.2.2 储层分类评价方法	33

2.3	川东南地区储层地质特征	37
2.3.1	储层物性特征	37
2.3.2	储层孔隙结构特征及喉道下限确定	38
2.3.3	储层分类评价	39
3	沉积相相控技术研究及应用	45
3.1	相控技术的理论基础	45
3.1.1	沉积相研究	45
3.1.2	沉积相的划分标志和依据	47
3.1.3	沉积微相参数与深度的关系	48
3.1.4	沉积相预测的地球物理基础	51
3.2	相控技术的方法原理	53
3.2.1	相控处理的目的是和作用	53
3.2.2	主特征参数计算	53
3.2.3	测井相特征分析	55
3.2.4	曲线拟合	57
3.2.5	倾斜叠加模型道	59
3.3	相控技术的实现方法	60
3.3.1	单井相划分与曲线拟合	60
3.3.2	沉积微相初始模型的建立	61
3.3.3	沉积微相相控处理	61
3.3.4	相控处理的基本结构	62
3.4	相控技术理论模型试算	64
3.5	相控技术在川东南地区的应用	68
3.5.1	川东南地区相控研究技术思路	68
3.5.2	川东南地区单井相的划分与对比	68
3.5.3	统计分析	70
3.5.4	相控井的标定和分析	71
3.5.5	相控资料的处理及效果分析	72
3.6	相控技术应用条件及控制因素分析	74
3.6.1	应用条件	74
3.6.2	控制因素分析	75

4 复杂储层识别及预测的地震地层分析方法	76
4.1 地震地层分析研究现状	76
4.2 地震地层分析	77
4.2.1 地震层序划分的理论基础	77
4.2.2 地震地层分析流程	77
4.3 川东南地区地震地层分析	78
4.3.1 典型地震波组接触关系特征	78
4.3.2 地震层序划分	79
4.3.3 地震相分析与沉积相研究	79
4.3.4 典型储集体沉积体系地震相分析	83
4.4 结果与认识	87
4.4.1 川东南地区地震地层研究结果分析	87
4.4.2 地震地层学研究的新认识	89
5 复杂储层的地震反演研究	90
5.1 地震反演的发展历程	90
5.2 地震反演方法	90
5.2.1 波阻抗反演方法	90
5.2.2 物性参数反演	93
5.3 波阻抗反演流程	94
5.3.1 地震资料叠后处理	94
5.3.2 储层层位标定	94
5.3.3 低频模型的建立	98
5.3.4 子波提取	99
5.3.5 波阻抗反演结果分析	100
5.4 川东北地区物性参数反演	104
6 复杂储层识别及预测的地震属性分析技术	107
6.1 概述	107
6.2 地震属性分析原理及方法	107
6.2.1 地震属性分类	107
6.2.2 单属性分析	108
6.2.3 多属性分析	108

6.3	川东北地区飞仙关组鲕粒滩储层属性分析	109
6.4	地震属性与岩石特征及物性关系	111
6.4.1	均方根振幅	112
6.4.2	反射强度梯度	113
6.4.3	反射波能量半衰时	113
6.5	特殊属性分析	114
6.5.1	相干分析技术	114
6.5.2	RS(反射强度属性)技术	117
7	AVO 分析	119
7.1	AVO 分析概述	119
7.2	含气储层与非含气储层 AVO 正演特征	119
7.2.1	含气储层的 AVO 正演特征	120
7.2.2	非含气储层的 AVO 正演特征	123
7.2.3	正演结果分析	126
7.3	AVO 模型模拟及属性参数剖面	126
7.3.1	AVO 正演模拟	127
7.3.2	AVO 叠加及属性参数剖面	129
7.3.3	结果分析	132
7.4	预处理	133
7.5	AVO 属性处理	133
7.5.1	角道集处理分析	133
7.5.2	AVO 属性剖面处理	133
7.6	属性剖面交会图及道集 AVO 响应特征	135
7.7	川东南地区 AVO 交会结果分析	138
8	复杂储层识别及预测技术的综合应用	139
8.1	储层综合识别的原则	139
8.2	川东南地区储层综合识别及预测	140
	结束语	146
	参考文献	147

0 引言

复杂油气藏通常也叫隐蔽油气藏 (subtle trap), 其概念最早是由卡尔 (1880) 提出的。莱复生 (A.L.Levorsen) 1966 年发表的《隐蔽圈闭》(《Obscure and Subtle Traps》) 以及后来哈尔布特 (Halbouty, 1982) 等的进一步研究, 指出复杂油气藏是指在油气勘探中难以识别和发现的油气藏, 不是单指非背斜油气藏。朱夏院士 1983 年发表的《对隐蔽油气圈闭的浅见》一文也对复杂油气藏的定义提出了相似的观点。现阶段一般认同的复杂油气藏是指“在现有勘探方法与技术水平条件下, 较难识别和描述的油气藏”(王焕弟等, 2004), 1995 年, 在伦敦召开的地质协会每半年一次的隐蔽圈闭会议上, Bramford (英国 BP 公司) 将复杂油气藏定义为“必须依赖人的创造性思维和技术的感性应用所确定的任何钻探目标”。由此可见, 复杂油气藏包括了各种岩性油气藏、深部油气藏、复杂断块油气藏、裂缝油气藏等。

随着油气勘探的进一步深入, 复杂油气藏在油气储量中所占比重越来越大 (陆光辉等, 2004)。据统计, 至 1985 年, 美国非构造油气藏的油气储量占总原始地质储量的 42.7%, 采油量占总产量的 44.8% (胡文海等, 1995); 在俄罗斯西西伯利亚地区, 有一半的油藏都具有岩性遮挡特点, 背斜构造油气藏的面积只占全盆地的 14%; 加拿大阿尔伯达省, 隐蔽圈闭占 65% (Halboutly, 刘中民译, 1988)。中国虽大部分盆地勘探程度还处在中低水平, 但从 20 世纪 90 年代开始, 整体上已进入寻找隐蔽油气藏为主的油气勘探阶段。例如在渤海湾盆地内, 复杂油气藏占探明石油地质储量的 30%~40%, 随着勘探的深入与发展, 预计在一些富油气凹陷内, 特别是在深层领域, 将有可能占到 60%~70% (高瑞祺等, 2001)。在鄂尔多斯盆地已发现油气储量的 90% 赋存于地层岩性圈闭中, 复杂油气藏占探明储量的比例, 准噶尔盆地为 70%~80%, 辽河拗陷为 50%~60%, 松辽盆地约在 30% 以上 (李祥权等, 2005)。特别是近 10 多年来, 地层岩性圈闭的探明油气储量渐渐超过构造圈闭的探明油气储量, 成为主要的油气勘探类型。

随着世界经济的发展, 油气需求与日俱增, 而复杂油气藏在油气储量中的重要位置使得其勘探变得越来越重要和迫切。复杂油气藏研究的核心是复杂储层的识别及预测, 复杂储层就是指隐蔽油气藏中的特殊储集体, 目前针对以隐蔽油气藏为主体的复杂储层识别和预测技术已经进入一个新的阶段。随着地震勘探技术的发展, 越来越多的新技术被引入到油气勘探和储层识别及预测中来, 比如高分辨率波阻抗反演技术、三维可视化技术、地震属性分析、相控技术等。这些方法、技术比最开始的以“亮点”为核心技术的相面法有了很大的进展, 并在勘探实践中取得了一定的成效。储层识别及预测逐渐发展成为地质、地震、测井、计算机等多学科综合并互相渗透的一门新兴学科, 储层预测

已经成为油气勘探的一个必经流程。

国内外已经有很多关于储层识别及预测的成果发表,概括起来主要有以下几个方面的进展。

1) 综合应用地质、地震、测井、数学、计算机等多学科、多系统、多信息进行全方位研究,在理论上达成一致,并逐渐形成一门新的学科。

2) 以地震反射波组的外部形态及内部结构为基础,与层序地层学相结合而发展起来的地震层序方法,近年来卓有成效地解决了一批非背斜油气藏的勘探问题(王永刚等,1997)。层序地震方法以层序体作为勘探目标,既可研究层序的旋回特性,也可以研究层序内部结构及物质特性等地质特征,多年以来一直是储层识别及预测的基石。

3) 大量最新的数学成果被引入到地震处理及储层识别及预测中,各种非线性方法,如神经网络(朱广生等,1994)、分形几何学(何光明等,1997;陈遵德等,1996)及模式识别(Maher et al.,1993)等直接识别油气的方法,在各大油田实践中也得到应用并有许多成果发表。

4) 高分辨率叠后反演技术是储层识别和预测的基本流程,波阻抗反演从方法上大致可分为基于波动理论的波动方程反演和基于褶积模型的反演两大类。以波动方程为基础的地震反演方法,由于算法复杂、对地震噪声敏感等因素,要得到稳定的解比较困难,因此,这类方法还难以广泛应用于实际;以褶积模型为基础的反演,由于算法简单,对地震噪声不敏感,因而在生产实际中得到了广泛应用。近年来反演技术理论成果丰富,并推出了很多适用的反演软件,在勘探生产中发挥了积极的作用。

5) 三维可视化技术为地震解释提供了直观的参考。传统的地震数据分析方法是从点、线、剖面资料入手进行解释(马仁安等,2003);在体可视化中,地下的地震反射数据在三维空间与构造的、地层的、振幅的信息结合,使解释人员能够对3D数据体进行交互解释,并使解释结果在三维立体空间内显示。

6) 地震属性技术是石油勘探中使用得比较早和比较成熟的技术,在20世纪70年代和80年代,石油勘探中使用得最多的地震属性是以振幅为基础的瞬时属性(Quincy Chen et al.,王忠译,1997)。地震属性由过去从地震道中提出单一的地震属性进行储层预测演变为多属性分析,并且将这些属性与储层物性及电性进行统计分析,用数学的方法找出其相互之间的关系并将这些属性用于储层物性的反演。

7) 解决复杂油气藏勘探多波多分量勘探技术是最近兴起的、被认为是极有价值及发展前景的地球物理勘探方法。利用多波多分量的走时、振幅、波场特性、速度场以及它们之间的时差、振幅比、纵横波速度比、泊松比、品质因子 Q 和各向异性系数等参数,就可以对油气储集体几何形态、岩石物性、流体性质等进行全面的成像与刻画(田晓红等,2005)。

储层识别技术取得的进展是全面的、多方位的,储层识别方法、技术种类繁多,以至于石油勘探工作者常常在储层识别及预测研究中觉得无所适从,除了反演外,每一种新技术在储层识别应用中都没有得到全面的应用和发展,主要是存在以下几个方面

的问题。

1) 在研究工作中储层识别方法的适应性问题常被忽略。影响储层识别的因素有多个方面,与研究区域的地质构造背景、储层特征、测井资料、地震资料的信噪比与分辨率、设备水平甚至人员配备等都有密切的关系。而在研究工作中常不顾实际情况及方法的适应性,使得储层识别及预测精度下降。比如,当测井中储层与围岩的波阻抗值无法分开的时候,用波阻抗反演技术显然难以达到储层预测的目的,但是我们看到几乎每一个研究区域的储层识别工作都有波阻抗反演流程。

2) 在研究方法上迷失于最新数学成果的应用。许多复杂的数学计算方法让地质人员难以理解,如神经网络、灰色系统等,即使处理人员也无法了解其计算的全过程。由于这些数学方法的复杂性,使得人工介入变得困难,而地震资料解释必须带着地质思维进行,这样才能使得地质与地震有机结合起来。当越来越多的新的储层识别及预测新技术被引入的时候,那些成熟的方法却没有得到很好的应用。更多的地质研究人员花了大量精力去理解这些新成果的时候,在应用中却发现这些方法并不具有普遍意义,阻碍了成熟储层识别技术的应用及其实际效果的体现。

3) 储层识别及预测研究是一个多学科综合研究系统,然而目前储层识别技术往往局限于某一个方面的应用,在每一个勘探区域,一个单一的技术往往只能解决局部的和一时的问题,多轮研究之后仍然很难找到某一个单方面的因素可以用来表征储层的特点,浪费了人力物力之后效果也并不显著。企图找到一个简单的地震特征来响应特定储层往往是很困难的。

4) 在多学科综合研究中各种研究成果如何有机结合,也是目前亟待解决的问题。近年来兴起的利用多参数、多条件约束进行数理统计的方法,已证明无法解决复杂储层综合识别预测这个难题,因为储层识别必须带着地质模式的眼光去判断,以目前的数学方法无法完成这样复杂的研究。

川东区块位于四川盆地东北及东南部,多年的勘探开发表明川东地区具有多套良好的生储盖组合,已经在铁山坡、渡口河、宣汉—达县等多个构造区获得重大突破,并证实在川东南等地具有良好的勘探前景。川东地区油气勘探已经由以构造油气藏勘探为主转为以复杂油气藏勘探为重点,复杂储层的研究及识别预测是川东地区油气勘探的核心。研究区储集层具有较强的非均质性,储集体主要包括碎屑岩中的各种河道砂体、三角洲沉积体系,碳酸盐岩中的各种颗粒滩、生物礁、岩隆、溶蚀孔洞,碎屑岩和碳酸盐岩都有的裂缝储集体。这些复杂储集体的识别及预测很难用一般的常规方法解决,同时在川东南地区许多区块研究程度尚浅、地震资料以二维为主,给储层识别及预测研究带来很大困难。在这种研究程度较浅、井位分布不均、缺少三维地震资料的地区开展储层识别及预测方法研究及应用,不仅可以为川东地区下一步勘探提供清晰的思路、进一步缩小勘探靶区有着重要的现实意义,对于其他类似区块的油气勘探也有重要的参考和借鉴价值。本专著的思路和方法对于研究程度较高及有三维地震资料的地区也同样具有理论指导意义和实用参考价值。

综上所述,目前复杂储层识别方法研究成果虽然丰硕,但也存在很多难点和问题。本专著以多学科理论为指导,以沉积学、层序地层学及储层地质学研究为基础,以地震方法为手段,辅以相控技术,以适合川东地区特点的特殊处理方法为途径,对储层识别、预测及油气检测方法进行全面的,以期能形成一套系统的具有普适性的储层预测方法和技术,特别是针对勘探程度不高、缺少三维地震资料的地区,在充分利用二维地震资料进行地震地层及地震相研究的基础上,再结合相控技术,更为精细地描述了沉积相的空间展布规律,对复杂储集体的特殊地震现象进行了深入的剖析,这些方法技术将对复杂储层识别预测技术起到进一步的完善作用,并在实际工作中有着广泛的应用前景。

该专著是笔者在多个科研项目的基础上,汇总精炼而成。韩小俊、赵宪生、王长城、时志强等同志参加了具体研究工作,韩小俊、赵宪生、王长城等同志撰写了专著的部分内容。在此要特别感谢所有研究人员的通力合作、相互理解和支持,感谢他们为本专著的完成所付出的艰辛劳动和不懈努力。

在本专著撰写过程中,自始至终得到了中石化南方勘探开发公司杨方之、马永生教授的热情关怀和悉心指导,实际研究中还得到了郭彤楼、苏树按、蔡勋育、付小月、王良军等同志的热情支持和帮助,与他们的讨论使笔者受益匪浅,谨此一并诚挚致谢!

研究期间,承蒙中国科学院刘宝珺院士、成都理工大学贺振华教授、彭大钧教授等的关心和鼓励,并充分肯定笔者的思路和成果,使笔者备受鼓舞,谨表谢意。

衷心感谢那些关心、帮助、理解和支持本项工作的人们!

1 复杂储层识别及预测的地质基础

对于任何一个油气储层研究区域,系统地研究沉积相、层序地层、构造发育及演化,并分析其与储层分布及演化规律之间的关系,是储层识别及预测的基础及前提。

此外,地震储层识别的首要问题是地质与地震有机结合的问题。事实上,地质因素已经成为储层识别过程中的一个重要的约束因素,对于克服地震储层识别预测的多解性有重要意义。地质因素在储层识别及预测研究过程中的作用主要体现在两个方面:一是通过沉积相、层序地层及构造作用研究储层发育的主控因素,研究储层在平面上的展布规律,确定储层精细识别的重点区域,为储层识别指明方向;另一方面,在储层地震识别过程中,以地质特征研究作为直接约束条件,对地震反演、地震相、地震属性等过程进行约束,从而减小储层预测的多解性,达到提高储层识别及预测精度的目的。

1.1 沉积模式与沉积相

20世纪以来,相的概念随着沉积岩石学和古地理学的发展而广为流行,对相的理解也随之形成了不同的观点(刘宝珺等,1990)。一种观点认为,相是“地层的横向变化”;另一种观点则把相理解为环境;还有人认为,相是岩石特征和古生物特征的总和。

油气勘探及其他沉积矿产勘探事业的飞速发展促进了相的研究。目前,对相的概念理解更加深入,相定义为沉积环境及在该环境中形成的沉积岩(物)特征的综合(姜再兴,2003)。与相的概念同时存在的还有沉积相、岩相等术语。在沉积学中,相就是沉积相,两者是同义语;岩相是在一定沉积环境中形成的岩石或岩石组合,它是沉积相的主要组成部分。

沉积模式或相模式则是以图解、文字或数学的方法表现的一种理想的和概念性的沉积相,它有助于了解复杂的自然现象和作用过程。沉积模式还具有广泛的概括性和代表性模式,也有仅代表区域性特征的地方性模式。可根据现代沉积环境及古代沉积环境相研究,对古代沉积作用机理做出一种成因解释模型。

海相和陆相的划分是依据自然地理条件或地貌特征及沉积物综合特征来进行的,二者之间存在海陆过渡相。由于沉积环境、沉积机理不同,沉积模式或相模式也不尽相同。

1.1.1 海相沉积模式与沉积相

海相包括滨岸相、浅海陆棚相、半深海相、深海相。

滨岸相位于海水涨潮线和退潮线之间的狭长海岸带,岩石类型以碎屑岩为主,主要为砂岩和砾岩,偶见粘土岩及生物碎屑灰岩。由于海水时进时退,波浪作用强,所以砂岩和砾岩的磨圆度和分选度较好。

浅海相指退潮线至水深200m的地带，其范围与大陆架相当，沉积物以细碎屑沉积物、化学沉积物和生物化学沉积物为主，该相带波浪作用力减小，阳光充足，底栖生物丰盛，岩石中富含生物化石。

半深海相是指海平面以下200~2000m的海域，深海相指2000m以下的地区，这些地区海水深度大，水动力条件弱，主要沉积物是由具有灰质和硅质硬体的微小浮游生物遗体堆积而成的生物软泥，如半深海相的蓝色软泥、红色软泥、绿色软泥等；深海相的含抱球虫石灰质软泥，含硅藻和放射虫的硅质软泥和红色软泥等。化石以浮游生物为主，缺少底栖动物和植物。

海相沉积模式与沉积相在国内外引用较广的是威尔逊碳酸盐岩综合模式（Wilson, 1975；转引自赵澄林等，2001），他归纳了陆棚上碳酸盐岩台地和边缘温暖浅水环境中碳酸盐岩沉积类型的地理分布规律，把碳酸盐岩划分为三大沉积区（I.宽相带沉积区；II.窄相带沉积区；III.宽相带沉积区）、九个相带（①盆地相；②开阔陆棚（或开阔浅海）相；③碳酸盐岩斜坡脚相；④前斜坡相；⑤生物（生态）礁相；⑥簸选的台地边缘砂（或台地边缘浅滩）相；⑦开阔台地（或陆棚潟湖）相；⑧局限台地相；⑨台地蒸发岩台地相）及24个标准微相（图1.1）。九个相带的沉积特征概述如下。

1) 盆地相。位于浪底（或波基面）和氧化界面以下，水深几十米至几百米，为静水还原环境。沉积物主要是从外带注入的细粒泥质物质和硅质物质。

2) 开阔陆棚（或开阔浅海）相。水深几十米至百米，一般为氧化环境。沉积作用相当均匀，为典型的较深的浅海沉积环境，主要岩石类型为富含化石的石灰岩和泥灰岩，颜色较杂，视氧化和还原条件而异，普遍见生物扰动构造。层理薄到中层，呈波状到结核状，陆源物质有石英粉砂岩、页岩等，与灰岩互层。

3) 碳酸盐岩斜坡脚相。位于碳酸盐岩台地的斜坡末端，沉积物由远洋浮游生物及来自相邻的碳酸盐岩台地的细碎屑组成，水体深度与开阔陆棚相相似，位于波基面以下，但高于氧化界面，由层理完好的薄层碳酸盐岩组成，夹少量粘土质及硅质层，厚度较大，某些类似复理石层理的薄层灰岩可达数百米，有滑塌现象。

4) 碳酸盐岩台地前斜坡相。此相带为深水陆棚和浅水碳酸盐岩台地的过渡带沉积，可从波基面之上延续到波基面以下，但又位于含氧海水下限之上。斜坡的角度可达30°，沉积物极不稳定，有细粒层，也有巨大的滑塌构造或前积层及楔形体岩层。主要由灰质砂组成或由细粒碳酸盐岩组成，堆积在向海的斜坡上。

5) 台地生物（生态）礁相。块状灰岩和白云岩中几乎全由生物组成，也有许多生物碎屑。生态特征取决于水体的能量、斜坡陡峻程度、生物繁殖能力、造架生物的数量、粘土作用、捕集作用、出露水面的频率以及后来的胶结作用。生物建造的礁可分三种：灰泥丘或生物碎屑丘、圆丘礁台或斜坡及格架建筑的环礁。

6) 簸选的台地边缘砂（或台地边缘浅滩）相。一般位于海平面之上5~10m水深范围内，主要呈沙洲、海滩、滨外坝或潮汐坝。组成的颗粒受波浪、潮汐或沿岸海流的簸选，比较洁净。因底砂经常变动，故不适于海洋生物繁殖。

宽相带		窄相带		宽相带					
图示									
相号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
相	盆地(带)缺氧的或蒸发的) a. 细碎屑岩; b. 碳酸盐岩; c. 蒸发岩	开阔陆盆开阔浅海 a. 碳酸盐岩; b. 页岩	碳酸盐岩斜坡脚	前斜坡 a. 层状细粒沉积岩、有滑塌现象; b. 前积层碎屑岩及灰砂岩; c. 灰泥岩块体	生物(生态)礁 a. 粘结岩块体; b. 生物碎屑上的壳和灰泥粘结岩; c. 障积岩	太地边缘砂 a. 浅滩灰岩; b. 具砂丘砂的岛屿	开阔台地(正常海洋, 有限的动物群) a. 灰砂岩; b. 颗粒泥质岩—泥岩地区, 生物丘; c. 碎屑岩地区	局限台地 a. 生物碎屑颗粒泥岩, 潟湖及海湾; b. 潮汐水道中的岩屑—生物碎屑砂岩; c. 灰泥潮沙坪; d. 细碎屑岩	台地蒸发岩 a. 盐坪上的结核状硬石膏和白云石; b. 湖沼中的纹理状蒸发岩
岩性	暗色页岩和粉砂岩层石灰岩(欠补偿盆地); 蒸发岩, 含盐	富含化石的石灰岩与泥灰岩互层, 分异良好的岩层	细粒石灰岩, 在某些情况下有燧石	多变化, 取决于斜坡的水能量; 沉积砾岩和灰砂岩	块状石灰岩—白云岩	砂屑石灰岩, 颗粒或白云岩灰砂	各种碳酸盐岩和碎屑岩	一般为白云岩和白云质石灰岩	不规则的纹理状白云岩和硬石膏可过渡为红层
颜色	暗褐、黑、红	灰、绿、红、褐	暗到浅	暗到浅	浅	浅	暗到浅	浅	红、黄、褐
颗粒类型及沉积结构	泥岩, 细粉屑石灰岩韵律层	生物碎屑和完整化石颗粒泥岩, 一些粉屑石灰岩	大多数是泥岩, 也有一些粉屑石灰岩	灰粉砂和生物碎屑颗粒泥岩—泥质的颗粒岩, 不同大小的岩屑	黏结岩和颗粒岩的囊状体, 泥质颗粒岩	颗粒岩, 分选良好, 圆度也好	结构变化大, 颗粒岩到泥岩	凝块的, 球粒泥质和颗粒岩; 纹理状泥岩, 水道中的粗岩屑颗粒泥岩	
层埋及沉积构造	极平坦的毫米级的纹理, 韵律层埋, 波状交错层理	完全被虫穿孔, 薄到中层, 波状的结核状岩层; 层面呈现间断层	纹理少见, 常为块状岩层, 递变沉积物的透镜体; 岩屑及外来岩块, 韵律层	软沉积物中的滑塌, 前积层理, 斜坡生物丘, 外来岩块	块状生物构造或开阔格架, 具盖顶洞穴; 与重力相反的纹理	中到大型交错层理	虫孔迹很多	鸟眼, 叠层石, 毫米级纹理; 递变层理; 白云石壳, 水道中的交错层砂	石膏硬石膏; 结核状玫瑰花状; 羽状; 不规则纹理, 碳酸钙结岩
陆源碎屑物或互层	石英粉砂岩和页岩, 细颗粒粉砂岩, 燧石	石英粉砂岩, 粉砂岩和页岩; 分异良好的岩层	一些页岩, 粉砂岩和细粒粉砂岩	一些页岩, 粉砂岩和细粒粉砂岩	无	只有一些石英砂泥岩人物	分异良好的岩层中的碎屑岩和碳酸盐岩		风刮来的, 来自陆地的混入物, 碎屑可以是重要的
生物群	只要浮游—远洋动物, 在层面上局部富集	极其多样的贝壳动物	生物碎屑, 主要来自斜坡	完整化石及生物碎屑	主要为造架生物, 在囊状体中呈枝状, 在某些隐蔽处有原地生群落	破坏的磨蚀的介壳, 此介壳生物生活在斜坡上, 很少有当地的生物	缺乏开阔海动物群(如棘皮类、头足类、腕足类); 软体动物, 有孔虫、藻类丰富的斑礁	很多有限的动物群, 主要为腹足类、藻类, 某些有孔虫介形虫	几乎无原地动物, 叠层藻除外

图 1.1 碳酸盐岩沉积综合模式图 (据 Wilson, 1975; 转引自赵澄林等, 2001)

7) 开阔台地(或陆棚潟湖)相。位于台地边缘之后的海峡、潟湖及海湾中。水较浅, 数米至数十米, 盐度正常到略偏高, 适合各种生物生长。沉积物结构变化大, 但含有相当数量的灰泥。

8) 局限台地(半封闭—封闭的台地)相。这是一个真正的潟湖, 海水循环受到很大限制, 盐度显著提高。主要沉积物为灰泥, 粗粒沉积物见于潮汐沟及局部海滩内, 海水盐度变化较大, 有的地区可暴露水面以上, 氧化和还原环境均有。

9) 台地蒸发岩(或蒸发岩台地)相。从相划分严格意义上, 此相带应为海陆过渡相带, 沉积物经常位于海平面之上, 仅在特大高潮或特大风暴时才被水淹没。主要岩石为白云岩及石膏或硬石膏。

另外, 阿姆斯特朗(Armstrong, 1974; 转引自赵澄林等, 2001)的碳酸盐岩沉积相模式也是众多学者引用较多的沉积相模式, 该模式共分九个相带: ①停滞缺氧盆地; ②潮汐陆棚; ③斜坡脚; ④前斜坡; ⑤开阔海陆棚; ⑥浅滩水; ⑦开阔台地(或陆棚潟湖)相; ⑧局限台地相; ⑨潮间—潮上带。威尔逊和阿姆斯特朗两人的碳酸盐岩沉积相模式十分相似, 威尔逊的模式是一个理想化的碳酸盐岩综合相模式, 而阿姆斯特朗的模式是一个综合性的碳酸盐岩台地模式。

1.1.2 陆相沉积模式与沉积相

陆相组包括: ①残积相; ②坡积—坠积相; ③山麓—洪积相; ④河流相; ⑤湖泊相; ⑥沼泽相; ⑦沙漠相; ⑧冰川相。一般陆相常见的沉积相主要有山麓—洪积扇、河流相、湖泊相。

1.1.2.1 山麓—洪积相(又称为冲积扇)

出现在气候干热、地壳升降运动较强烈、风化、剥蚀作用剧烈的大陆地区山前带, 常环绕山脉沿山麓大面积分布, 是由大大小小的冲积扇和充填其间的山麓坡积、坠积物组合而成。根据所处的气候条件不同, 可将冲积扇划分为湿润型和干旱型两种类型。

1) 干旱型冲积扇沉积相模式。主要由泥石流、筛滤、片流、辫状河道沉积组成。泥石流成因的沉积物是干旱型冲积扇的重要组成部分, 在扇根处沉积厚度大, 向下游方向急剧减薄; 筛滤沉积占的比例较小, 但砾石丰富, 粉砂与粘土很少, 扇体主要由筛滤组成; 片流沉积分布于远端扇, 由平行纹层砂组成。

2) 湿润型冲积扇沉积相模式。湿润型冲积扇自近端到远端的沉积特征具有较明显变化。扇近端到远端, 河流能量降低, 河道深度变浅, 碎屑粒径变小, 砂坝类型有席状经过渡带变化为远端的纵向砂坝, 格架砾岩的体积迅速减小, 而交错层状含砾砂岩的体积则相应增加, 交错层规模向远端减小, 由板状层组过渡到槽状层组。

1.1.2.2 河流相

按照地形及坡降, 可将河流分为山区河流和平原河流。前者地形高差和坡降大, 向源侵蚀作用强烈, 河道直而支流少, 水流急沉积物粗, 多发育顺直河; 后者地形高差和坡降小, 侧向侵蚀强烈, 河道弯曲而支流多, 多发育曲流河、辫状河、网状河。