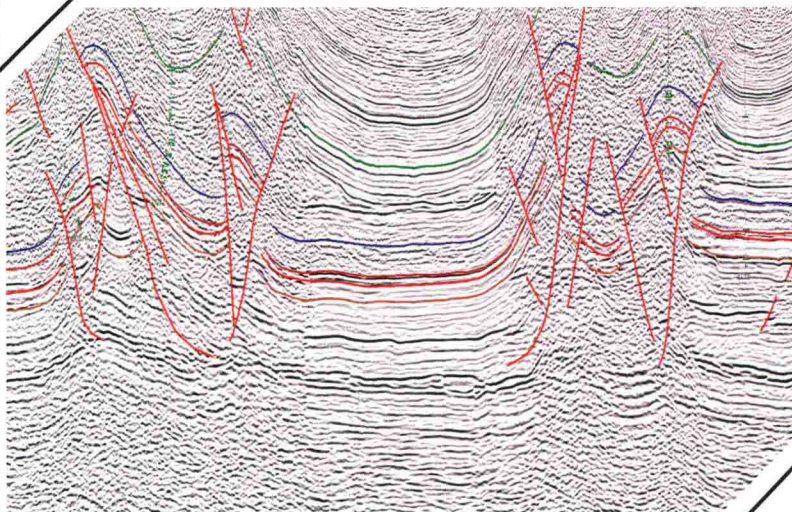


复杂构造带

深层碳酸盐岩礁滩气藏高效勘探开发技术
——以川东北龙会场地区为例

曾汇川 何 骁 赵 松 等 / 著
黄雪松 王 刚 刘 钧



科学出版社

复杂构造带深层碳酸盐岩礁滩气藏 高效勘探开发技术 ——以川东北龙会场地区为例

曾汇川 何 骁 赵 松 等 著
黄雪松 王 刚 刘 钧

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书针对制约复杂构造带深层碳酸盐岩生物礁及鲕粒滩油气勘探开发的关键问题,将理论与生产实践紧密结合,以川东北龙会场地区二叠系长兴组、三叠系飞仙关组为例,结合国内外相关领域的研究现状及进展,深入探索深层碳酸盐岩礁滩气藏的高效勘探开发技术,主要包括高质量地震采集及精细构造解释研究、沉积特征及分布规律研究、储层特征识别及预测研究、储层流体识别研究以及钻井、试油、试采等开发技术研究等。旨在通过研究,形成复杂构造带礁滩岩性气区地质-地球物理-钻井试油开发工程的一体化勘探开发综合配套技术,为邻区及类似含油气盆地中生物礁滩油气的有序勘探开发提供借鉴。

本书可供从事油气勘探开发的高校、科研院所以及生产单位参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

复杂构造带深层碳酸盐岩礁滩气藏高效勘探开发技术:以川东北龙会场地区为例/曾汇川等著. —北京:科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-052960-2

I. ①复… II. ①曾… III. ①碳酸盐岩油气藏-油气勘探-川东地区
②碳酸盐岩油气藏-油田开发-川东地区 IV. ①TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 116456 号

责任编辑:张 展 罗 莉/责任校对:刘 勇

责任印制:罗 科/封面设计:陈 敬

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

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:296 400

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《复杂构造带深层碳酸盐岩礁滩气藏高效勘探开发技术
——以川东北龙会场地区为例》

作 者 名 单

曾汇川	何 骁	赵 松
黄雪松	王 刚	刘 均
曹 刚	张 航	葛 枫
汪 洋	任 阳	任洪明
蒋 东	罗 韧	宋 勇
蒲军宏	曹脊翔	曾令平

前 言

自 20 世纪五六十年代以来, 随着对碳酸盐岩生物礁的认识不断深化以及国际上碳酸盐岩油气勘探的突破, 碳酸盐岩储层成为寻找油气的重点。生物礁滩储层是一种重要的碳酸盐岩储层, 世界上可采储量达 8000 万 t 以上的大型生物礁油田多达十余个, 总的可采储量超 50 亿 t, 主要分布在伊拉克、利比亚、墨西哥、加拿大和美国。我国海相生物礁分布广泛, 有利勘探区域众多, 自 1987 年在南海北部珠江口盆地发现第一个大型生物礁油田(流花 11-1)以来, 目前已发现了相当数量的生物礁滩油气田。特别是近年来在塔里木盆地以及四川盆地的巨大发现和突破, 展示出生物礁滩油气藏的巨大勘探潜力。

生物礁滩油气勘探是世界性的研究难题, 主要有以下两点原因: 首先, 生物礁的生成和演化受比较苛刻的地质、沉积、地理环境和古气候等多种条件控制, 空间分布区域是特定的; 其次, 生物礁储层属于隐蔽性岩性储层, 岩性变化大, 空间分布不规则, 埋藏深、勘探难度大。如何利用地球物理资料, 开展研究生物礁滩储层的内部特征与外部形态、地球物理响应特征以及分布规律等, 形成有针对性的生物礁滩储层预测与流体识别方法系列, 是生物礁滩油气勘探急需解决的难题。此外, 生物礁储层发育区域往往构造条件复杂, 钻井难度大, 如何优选钻井、试油、储层改造、试采等开发技术, 也会严重影响生物礁滩气藏的开发。因此, 从生物礁滩储层特征、富集规律等地质条件着手, 优选钻井、试油、试采等开发方案, 形成礁滩岩性气区地质-地球物理-钻井试油开发工程一体化勘探开发综合配套技术, 对生物礁滩气藏的有序勘探开发有重要的现实意义。

龙会场复杂构造区地理位置位于四川省达州市达川区、渠县、大竹县和重庆市梁平县境内, 泛指位于开江-梁平海槽西侧, 包含龙会场、铁山(铁山南、铁山北)、铁东、蒲西和双家坝五个区块的龙会场-双家坝地区。该区的油气勘探早在 20 世纪 90 年代就已开发, 一直是四川盆地海相天然气勘探的重点领域和开发建产区。目前已发现普光、元坝、龙岗、铁山坡、渡口河等多个气藏, 获三级储量达数千亿立方米, 证明该区生物礁滩气藏勘探潜力巨大。然而在前期的油气勘探开发过程中也暴露出不少问题, 严重制约着该区油气的勘探开发效果。

(1) 构造解释质量有待提高。研究区属高陡复杂构造区, 地表条件复杂, 断层组系多。经过多轮地震构造解释在构造细节上仍不一致, 圈闭规模不落实。

(2) 储层分布规律不清楚。由于区内前期主要研究层系为石炭系, 对二叠系生物礁储层发育演化特征研究欠缺, 对飞仙关组鲕滩研究也仅集中在局部构造, 对长兴组生物礁滩及飞仙关组鲕滩分布规律缺乏整体认识。

(3) 岩性气藏的成藏富集条件有待深化, 井位部署困难。早期对铁山气田长兴组及飞仙关组礁滩气藏类型、气水分布有基本认识, 认为气藏受不规则礁滩储渗体及构造控制, 但该观点指导下的邻区钻井失利较多。

(4) 龙会场地区构造条件复杂, 给钻井工程及其配套技术带来较大困难, 因此寻找先进的、经济有效的钻井、试油、开发技术非常重要。

针对制约龙会场复杂构造区生物礁滩气藏勘探开发的关键问题,本书将理论研究与生产实践紧密结合,结合国内外相关领域的研究现状及进展,深入探索深层碳酸盐岩礁滩气藏的高效勘探开发技术。旨在通过研究,形成复杂构造带礁滩岩性气区地质-地球物理-钻井试油开发工程的一体化勘探开发综合配套技术,为邻区及类似含油气盆地中生物礁滩油气的有序勘探开发提供借鉴。

本书在编写过程中得到西南石油大学地球科学与技术学院蒋裕强教授、罗仁泽教授、陶艳忠教授等的大力支持,同时也得到了中国石油集团川庆钻探工程有限公司地球物理勘探公司、四川仁捷石油技术有限公司、中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院等单位的领导、专家及科研人员的帮助。此外,本书在编写过程中参考、借鉴了国内外部分学者的研究成果,在此一并表示感谢。

本书的出版还得到了中国石油西南油气田分公司川东北气矿的领导、专家的大力支持,在此表示感谢。

由于笔者水平有限以及时间仓促,本书难免存在错误及不足之处,恳请广大读者不吝赐教,批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 全球生物礁滩油气藏勘探进展	1
1.2 生物礁滩油气藏勘探开发现状	2
1.2.1 国外研究现状	2
1.2.2 国内研究现状	3
1.3 生物礁滩油气藏勘探技术进展	4
第2章 生物礁基础研究	9
2.1 生物礁的定义	9
2.2 生物礁的基本特征	10
2.2.1 造礁生物	10
2.2.2 礁的内部结构	11
2.2.3 礁的空间地质结构	11
2.3 生物礁的分类	12
2.3.1 代表性学者分类	12
2.3.2 按生长环境分类	13
2.3.3 按时代分类	13
2.3.4 按礁的形成地点分类	14
2.4 生物礁的发育规律	14
2.5 生物礁储层的测井响应特征	15
2.6 生物礁储层的地震响应特征	15
第3章 龙会场地区地质概况	18
3.1 区域构造特征	18
3.2 区域地层特征	18
3.2.1 飞仙关组地层特征	18
3.2.2 长兴组地层特征	21
3.2.3 石炭系地层特征	23
3.3 区域沉积特征	23
3.4 油气勘探开发现状	24
3.4.1 勘探开发历程	24
3.4.2 勘探开发现状	25
3.5 地震勘探简况	28
3.5.1 龙会场区块	28
3.5.2 铁山—双家坝区块	29

3.5.3 双家坝区块	30
第4章 复杂构造区地震采集及精细构造解释	31
4.1 复杂构造区地震采集难点	31
4.1.1 地震地质条件复杂	31
4.1.2 多轮地震勘探探索有效技术	33
4.2 复杂构造区地震采集技术	38
4.2.1 观测系统宽方位优化设计	38
4.2.2 激发井深、岩性及药量的优选匹配组合	39
4.3 复杂构造区地震快速处理技术	42
4.3.1 三维层析建模及静校正技术	43
4.3.2 相对保真、保幅处理技术	46
4.3.3 精细叠加速度分析技术	48
4.3.4 叠前时间偏移技术	53
4.3.5 叠前深度偏移技术	53
4.3.6 处理效果评价	62
4.4 构造精细解释	69
4.4.1 大地构造特征	69
4.4.2 川东褶皱带特征	70
4.4.3 川东褶皱带形成机制	71
4.4.4 复杂构造解释模式	71
第5章 龙会场地区生物礁滩沉积特征及分布规律	73
5.1 生物礁滩沉积特征	73
5.1.1 长兴组沉积特征与分布	73
5.1.2 飞仙关组沉积特征与分布	80
5.2 礁滩体识别及分布预测	84
5.2.1 长兴组礁滩体识别及分布预测	84
5.2.2 飞仙关组礁滩体识别及分布预测	91
第6章 生物礁滩储层特征及综合预测	96
6.1 生物礁滩储层特征	96
6.1.1 长兴组储层特征	96
6.1.2 飞仙关组储层特征	108
6.2 生物礁滩储层综合预测	120
6.2.1 长兴组储层预测	120
6.2.2 飞仙关组储层预测	124
第7章 生物礁滩储层流体识别	131
7.1 生物礁滩气藏成因	131
7.1.1 生物礁气藏成因探讨	131

7.1.2 鲇滩气藏成因探讨	132
7.2 多属性联合流体识别技术	134
第8章 深层碳酸盐岩礁滩气藏开发技术	138
8.1 气藏试采方案设计	138
8.1.1 试采区	138
8.1.2 试采区井位部署	140
8.1.3 试采规模	150
8.2 钻井工程及其配套技术	151
8.2.1 龙会场地区大斜度钻井技术难点	151
8.2.2 大斜度钻井及其配套技术	155
8.2.3 钻井工程设计	157
8.3 完井工程设计	174
8.3.1 完井方案	174
8.3.2 生产管柱设计	174
8.3.3 油层套管控制参数	175
8.3.4 采气井口	176
8.3.5 射孔工艺	177
8.4 储层改造设计	177
8.4.1 储层保护	177
8.4.2 储层改造工艺	177
8.4.3 酸液体系	179
8.4.4 施工参数优化	180
第9章 经验与总结	182
主要参考文献	183

第1章 绪 论

1.1 全球生物礁滩油气藏勘探进展

20 世纪 50 年代末, 随着对碳酸盐岩生物礁认识的不断更新, 以及国际上碳酸盐岩油气勘探的突破, 人们掀起了一阵在碳酸盐岩地层中寻找油气资源的热潮, 碳酸盐岩成为人们寻找油气的重点对象。碳酸盐岩约占世界上沉积岩总量的 20%, 而在碳酸盐岩中的油气资源量约占 50%, 产量约占 60%, 因而碳酸盐岩是一类重要的油气储集类型。此外, 由碳酸盐岩储集层构成的油气田常常储量大、产量高, 容易形成大型油气田。

因此, 开展碳酸盐岩特征以及油气在碳酸盐岩中的产出位置、运移、成藏组合和产状等性质的研究就显得格外重要且具有实际的生产价值意义。一般情况下, 碳酸盐岩为低孔、低渗的致密岩层, 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有可能成为优质储层。总体上, 碳酸盐岩储层可归纳为以下几大类: 处于不整合面以下的石灰岩和白云岩、潮下带到潮上带的白云岩, 以及鲕粒、团粒浅滩和礁、泥晶灰岩、白云岩内的微孔隙、泥晶灰岩内的微裂缝。而其中的礁、滩和礁、滩中的孔、洞、缝储层则是如今的研究重点。世界上碳酸盐岩储层类型主要有生物礁、颗粒滩、白云岩和古岩溶四种(图 1-1), 其中生物礁储层类型占有数量最多, 说明生物礁研究对油气勘探具有重要意义。国际上, 从科学的角度对生物礁进行研究已有近 200 年的历史, 主要着重于生物礁成因研究。

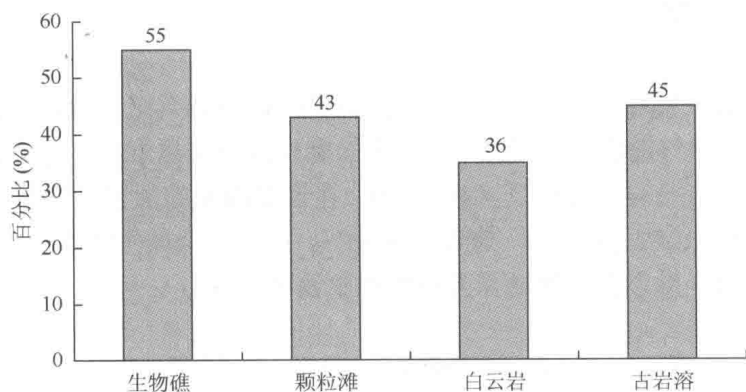


图 1-1 全球大型碳酸盐岩油气田储层类型统计特征 (张兵, 2010)

20 世纪 20 年代在生物礁中发现了大量的油气, 此后人们开始重视生物礁的研究。目前, 世界上可采储量达 8000 万 t 以上的大型生物礁油田就有十几个, 总的可采储量超过 50 亿 t, 主要分布在伊拉克、利比亚、墨西哥、加拿大和美国等。其中最著名的油田有: 墨西哥的黄金巷油田、美国的二叠系生物礁油田、加拿大西部的泥盆系生物礁油田等。

总体而言, 自 20 世纪以来, 国际上生物礁的概念和相关理论发展较快, 主要有以下几点:

(1) 生物礁的复杂性，导致在对其研究的漫漫历史长河中存在很多的争议和挫折，尤其对生物礁的定义方面就出现过很多的分歧，百家争鸣，直至今日，也未能有一个统一的定义。20 世纪 70 年代之前，人们对生物礁的定义主要集中于区分其建造、内部组分和外部抗浪结构，学者们的主观意识在很大程度上制约了对生物礁概念的发展，并且还引发了很大的争议。这些争议也在某种程度上促进了人们对生物礁认识的发展，所以在 70 年代以后，国际上才统一将那些有很大争议的生物建造称为生物礁。此后，对生物礁的认识和发展突飞猛进，生物礁的定义已不再局限于其建造、内部组分和外部抗浪结构，而是区分其内部组分和成岩作用。随着概念的不断发展，依据不同，导致分类也有很大的变化，这从侧面说明了人们对生物礁研究的重视，对生物礁的发展起到了推动作用。

(2) 20 世纪 90 年代之后，国际权威学者对生物礁进行了更为细致的分类，如簇礁、节状礁等一系列新型生物礁类型出现，与此同时，也对传统概念的骨架生物礁做了充分的补充。在这一阶段中，人们逐渐将研究重心放在生物礁的形成过程以及其成岩机理上，并在生物礁生长过程中的胶结作用和造礁生物这两个方面的研究上取得了较大的突破。

(3) 在近 30 年来，人们对生物礁的认识变得更加透彻和深刻，已经发展到开始用生物地球化学的知识对生物礁进行研究，并取得了很好的效果，为生物礁的认识和研究提供了坚实的理论依据。随着生物礁勘探技术的发展和成熟，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，很多大型生物礁油气田也相继被发现，然后很快地投入到生产应用中。

1.2 生物礁滩油气藏勘探开发现状

1.2.1 国外研究现状

全球生物礁油气资源丰富。据统计，目前世界上礁型油气田总的可采储量达 $50 \times 10^8 \text{t}$ 以上，随着生物礁油气勘探的不断深入，更多的礁型油气田被发现，其储量值可能远超此数。生物礁油气藏在全球分布广泛（表 1-1），在许多国家的油气产量中，礁型油气藏占有较大的份额，如加拿大占 60%，墨西哥占 70%。因此，全球生物礁油气资源潜力巨大，勘探前景良好，为今后世界油气勘探开发的重要领域。

表 1-1 世界部分生物礁大型油气田（甘玉青等，2009）

油田名称	所在盆地	地层	可采储量（ $\times 10^8 \text{t}$ ）
伊拉克基尔库克	波斯湾	始新统一渐新统	20.50
阿布扎比默斑·布哈沙	波斯湾	始新统一渐新统	4.10
墨西哥波扎·里卡	墨西哥湾	白垩系	3.80
墨西哥老黄金巷	墨西哥湾	白垩系	1.92
利比亚迪法	锡尔特	白垩系—古新统	2.74
利比亚茵蒂萨尔 D	锡尔特	古新统	2.06
利比亚茵蒂萨尔 A	锡尔特	古新统	1.64

续表

油田名称	所在盆地	地层	可采储量 (×10 ⁸ t)
利比亚拉赫拉·霍夫纳	锡尔特	古新统	0.96
美国马蹄礁	二叠盆地	上古生界	3.50
美国斯库瑞·斯奈德	二叠盆地	宾夕法尼亚系—下二叠统	2.64
加拿大天鹅丘	艾伯塔	泥盆系	1.33
加拿大彩虹	艾伯塔	泥盆系	1.00
加拿大红水	艾伯塔	泥盆系	1.00
加拿大斯杜克·乌德宾	艾伯塔	泥盆系	0.70

注：斯库瑞·斯奈德油田是美国马蹄礁油田的一个组成部分

国外生物礁油气勘探开发经历了一个由单纯地注重生物礁类型、成因、礁相带划分的地质学研究到对礁的发现及含油气性预测研究的发展过程。从科学的角度对生物礁进行研究始于 18 世纪末到 19 世纪初。20 世纪初至 20 年代的一段时间里，在墨西哥等地方发现了一批生物礁高产油井和大型生物礁油气田，如圣地亚哥·特·拉玛多斯波卡斯井、彼特雷罗·德·拉诺塞罗·阿苏耳 4 井以及茵蒂萨尔 D 油田 D-1 井，对这些井和油气田的钻探及开发，刺激了人们对生物礁的兴趣，掀起了全球生物礁研究的热潮，有关成果大量涌现。

20 世纪 40 年代，在墨西哥发现了波扎·里卡礁型油田。据统计，该油田的油气产量占墨西哥当年油气总产量的 65%，1948 年，美国的二叠盆地发现了斯库瑞礁型油田，可采储量 $2.636 \times 10^8 \text{t}$ 。20 世纪 50~70 年代，随着世界经济的复苏，生物礁油气勘探开发迅速发展，许多国家由于礁油气藏的开采而一跃成为重要的产油国。1967 年，在利比亚的锡尔特盆地发现了茵蒂萨尔 A 和茵蒂萨尔 D 两个大型生物礁油田，可采储量分别为 $1.644 \times 10^8 \text{t}$ 和 $2.055 \times 10^8 \text{t}$ 。其中，在茵蒂萨尔 D 油田钻探的 D-1 井是世界上至今发现的四口日产万吨以上的油井之一，初产量为 $1.005 \times 10^4 \text{t/d}$ 。1968 年在伊拉克的波斯湾地区发现的基尔库克油田，可采储量高达 $20.5 \times 10^8 \text{t}$ ，当年的产量为 $5375 \times 10^4 \text{t}$ 。1971 年，印度尼西亚西部的苏门答腊岛发现了阿伦气田，可采储量 $3.126 \times 10^8 \text{t}$ 。1972 年发现的墨西哥西美奥和卡西图斯礁型油田储量规模也相当大，投产仅两年产量就达 $1370 \times 10^4 \text{t}$ 。俄罗斯滨里海盆地是一个有巨大油气资源的含油气盆地，油气储集于上古生界碳酸盐岩中。在 20 世纪 70 年代以后，采用地震共深度点法，改善了对盐下地质、构造的了解和认识，油气发现出现高峰期，先后发现了肯基亚克油田、阿斯特拉罕气田、扎纳若尔油田、田吉兹油气田、卡拉恰干纳克气田，这些碳酸盐岩油气田均与生物礁圈闭有关。

20 世纪 80 年代以来，随着技术的进步和能源需求的增长，生物礁油气勘探更是不断升温，人们更加重视对生物礁油气的研究。20 世纪 90 年代，在里海北部发现了超大型卡萨冈礁型油田，石油地质储量达 $70 \times 10^8 \text{t}$ 。

1.2.2 国内研究现状

与国外相比，我国生物礁研究起步较晚。20 世纪 70 年代以前，我国在生物礁的研究方面与国外先进国家差距较大。20 世纪 50 年代，我国著名地质学家黄汲清等（1950）指

出在我国勘探生物礁油气藏具有重要的意义,于是地质部组织了全国的石油普查,随后60年代初,石油工业部组织队伍勘探中国南方古生界石油,于1973年贵州石油勘探指挥部证实了二叠系生物礁的存在。

经过几十年不懈的努力,尤其是近20多年来地球物理勘探技术的突飞猛进,进一步加强对礁油气资源的关注力度,随着地下生物礁识别技术日趋成熟,在陆区和海域礁油气藏的勘探也都获得了巨大突破,不断发现新的礁型油气藏。

我国首先在川东地区发现二叠系具有丰富的生物礁油气资源,1974年建16井钻获本区第一个礁型气藏,由此开拓了我国寻找礁型油气田的美好前景。1984年南海北部珠江口盆地首次在南海海域钻遇礁型油气田,1987年在该盆地发现了第一个大型礁油田(流花11-1)、南沙群岛以及西沙群岛永兴岛钻遇古近-新近系珊瑚礁,随后陆续在南海南部盆地发现了一批中新统生物礁油气田。

近年来在塔里木盆地以及四川盆地中发现了一些高产生物礁油气田。如2005年在塔里木盆地塔中地区发现了我国第一个奥陶系超亿吨级生物礁型大油气田。近年来四川盆地长兴组生物礁油气勘探也取得了重大突破,2006年发现了普光气田,为一特大型整装海相气田,长兴组礁滩相白云岩为主要含气层段之一,随后相继发现了龙岗大型生物礁气田和亿吨级探明储量的元坝礁大型气田。

目前,我国生物礁研究成果较多,颇为丰富,主要集中在南方古生代生物礁的研究,而西部地区生物礁研究相对落后。对生物礁的研究主要包括以下几个方面:造礁生物、附礁生物、生物群落,礁类型、形态、规模以及时空展布,礁岩石类型、孔隙类型、成岩作用与油气演化,礁结构、构造和相带划分,礁生长演化规律、控制因素及其分布规律,礁储层特征及展布规律,礁的地震相特征和测井相特征,礁地球化学特征以及成礁环境分析等。

1.3 生物礁滩油气藏勘探技术进展

生物礁滩储层的识别与预测难度极大,目前钻探成功率仍然很低,主要有以下两点原因:首先,生物礁的生成和演化受比较苛刻的地质、沉积、地理环境和古气候等多种条件控制,空间分布区域是特定的;其次,生物礁储层属于隐蔽性岩性储层,岩性变化大,空间分布不规则,埋藏深,勘探难度大。因此,如何利用地球物理资料,进行深层生物礁油气勘探是世界性的研究难题,目前国内外仍处于探索研究阶段。就目前而言,生物礁滩油气藏的勘探技术主要包括以下内容。

1. 古地貌分析技术

对于碳酸盐岩而言,地层厚度与沉积相带以及古地貌有着比较好的对应关系,不同的水深和不同的沉积地貌形成不同的沉积环境及不同的碳酸盐岩沉积建造,因此不同的碳酸盐岩沉积建造其地层沉积厚度有明显差异。对于碳酸盐岩镶边台地来说,台地边缘相一般水体能量强,有利于生物礁滩体和碳酸盐岩沉积建造的发育,因此其地层沉积厚度最大;海槽相碳酸盐岩沉积速率最慢,因此其地层沉积厚度最薄;而碳酸盐岩开阔台地相的地层

沉积厚度一般介于二者之间。因此通过研究地层沉积厚度变化,可以快速地再现地层沉积时的古地形、古地貌以及岩相古地理等重要信息,从而确定生物礁滩体发育的有利沉积相带,在此基础上对生物礁滩体的发育分布做出预测。

地震层拉平技术是分析古地貌、古地形的一种比较有效的手段,在地震剖面上沿目的层附近的标志层进行层拉平,可以快速地恢复古地形、古地貌。在地震剖面上,地层厚度的变化主要是通过反射时差和相位数的变化来反映。那么对地震剖面运用层拉平分析技术,可以很直观地反映反射时差和相位数的变化,从而发现古地形高地和异常厚度沉积区,以确定生物礁滩体的有利发育位置。如菲律宾马兰帕亚油田中的 Nido 组,剖面上生物礁体地震反射时间明显加大且相位数较多,而其两侧地层地震反射时间则很小,相位数也很少。因此,可以快速地确定异常厚度沉积区即生物礁的发育位置,并且通过属性计算可以确定生物礁的内部结构。

2. 地震反射结构和地震相分析技术

地震反射结构和地震相分析技术是对地震资料进行地质解译的一种方法,通过地质现象与地震反射结构相结合,从而有效地将地震资料与地质资料结合在一起,实现地震资料地质化,从而利用地震反射结构和地震相来分析其沉积环境和沉积背景,预测地震反射结构和地震相的岩相和岩性等地质意义。

生物礁的形成与分布和沉积环境密切相关,具有独特的沉积环境和成岩过程,因此生物礁具有独特的地貌、结构、构造和岩石学特征,这决定了生物礁的各种地震参数诸如振幅、频率、连续性等与围岩不同,因此生物礁的地震反射结构具有一些特殊性,具体归纳为以下七种类型。

(1) 反射外形呈丘状或透镜状:生物礁的厚度一般较围岩明显增大,因此,在地震剖面上生物礁外形多表现为丘状或透镜状凸起反射特征。

(2) 顶面出现强反射:生物礁体与围岩的速度和密度具有明显差异,从而生物礁与围岩的波阻抗也具有明显的差异,因此礁的顶面一般具有强反射特征。

(3) 生物礁内部为杂乱、断续或无反射的空白区:生物礁是由具有丰富的造礁生物和附礁生物形成的块状格架地质体,沉积层理不明显,因此在地震反射特征上,生物礁的内部多表现为杂乱、断续或无反射空白区等特征。

(4) 底部出现上凸、下凹或平直特征:因地质条件不同,生物礁的底部常可出现上凸、下凹或平直三种不同的反射结构特征。当礁体速度高于围岩速度时,生物礁底部反射界面上凸,形如弯月形,当礁体速度低于围岩速度时,其底部反射界面下凹,形如杏仁状,当礁体速度与围岩速度相似时,其底部反射界面则近于平直。

(5) 礁体顶部出现披覆构造:一方面生物礁沉积厚度远大于周缘同期沉积物,另一方面礁灰岩抗压强度也远远大于围岩而产生差异压实作用,因此在生物礁体顶部往往会产生披覆构造,其披覆程度向上递减。

(6) 礁体翼部上超:由于生物礁的生长速率远高于周缘同期沉积物,且两者沉积厚度差异很大,因此常见礁翼沉积物向礁体周缘上超现象,在地震剖面上则可根据上超点的位置判定礁体边缘的位置。

(7) 绕射波: 岩性突变点或陡崖带边缘常使礁体的边界内部及基底出现绕射波, 这种绕射波在一般常规地震处理过程中很难消除, 可用作识别礁体的佐证。

3. 地震属性分析法

地震属性分析技术常指对地震数据经过各种数学计算与变换而得到与地震波相关的各种测量值, 包括地震波的振幅、能量、频谱、相位以及统计特征等。不同的地质体由于速度、密度等方面的差异, 对其采集的地震具有不同的振幅、能量、相位等, 因此不同的地质体往往具有不同的地震属性。目前地震属性分析已广泛应用于油气勘探中, 特别是沉积相带划分、岩性预测、储层物性预测以及含油气概率预测等方面。

生物礁体与围岩之间常常存在速度和密度等方面的差异, 从而生物礁与围岩常具有不同的地震属性, 因此可以应用地震属性来识别礁滩体。通过地震属性的提取与优化处理, 可以识别出生物礁滩的平面分布与变化规律。

4. 三维可视化技术

近年来, 随着地震资料采集、处理和可视化等技术的发展, 用于沉积体系展布特征和结构研究的成像技术的分辨率明显提高。尤其是三维地震资料采集力度的增加和处理技术的进步, 促进了这些新技术的发展, 产生了沉积体系研究的高精度成像技术。另外, 发展中的地震属性分析方法是定量研究沉积体岩性、体积的一个有力工具。三维可视化技术是利用三维数据体显示地质现象和特征的图像显示工具, 是全新的地震预测和描述技术, 能够快速显示反映地质体的动态和内部结构变化特征。

5. 储层地震响应特征的数值模拟

首先根据实际地区生物礁滩地层的地质特征建立速度模型, 然后利用二维或三维波动方程地震波正演和偏移方法原理对速度模型进行地震数值模拟及偏移成像, 建立生物礁滩地层的地震响应模式, 最后总结生物礁滩储层及含油气性的地震反射波场特征, 为生物礁滩储层预测及流体识别奠定基础。

6. 叠后地震反演分析

叠后地震反演自 20 世纪 80 年代初出现以来, 就成为半定量的储层预测及流体识别的核心技术之一。从实现方法上, 叠后地震反演可分为基于褶积模型和基于波动方程两大类。目前常用的是基于褶积模型的反演方法, 其类别也很多, 如地震直接反演、测井约束反演、测井地震联合反演、模型反演等, 各种反演方法各有特点和适用性, 应根据实际地震资料的特点来进行选择, 最常见的反演软件有 DELOG、PARM、ROVIM、Jason、Strata 等。

7. 时频分析法

地震信号时频谱分析是储层预测及流体识别中的研究热点, 主要研究储层含流体时地震频率变化的差异, 主要方法有短时傅里叶变换 (STFT)、小波分析、S 变换等。1946 年 Gabor 将量子理论引入到信号分析领域; 1947 年, Potter 等人首次提出了短时傅里叶变换

(STFT); Wigner (1932) 和 Vine (1984) 提出了 Wigner-Ville 分布 (WVD); 1966 年 Cohen 利用特征函数得出了 Cohen 类时频分布; 1982 年 Morlet 和 Grossman 等人提出了小波变换; 1996 年 Stockwell 等首次提出了 S 变换; 高静怀等 (2003) 构造了一种新的广义 S 变换, 用于薄互层的地震响应研究; 贺振华、陈兴华等 (2005) 采用尺度可以变化的局部高斯函数, 提高了 S 变换的灵活性和适应能力; 而分数阶时频分析最早是由 Namias (1980) 从纯数学的角度提出并定义的, 主要用在单分量、多分量 Chirp 信号的检测、雷达信号的目标检测和识别、SAR 和 ISAR 成像、宽带干扰抑制、运动目标检测和识别、数字水印、图像复原、图像配准等方面, 而在地震资料处理和应用中相对较少。

8. 地震波吸收衰减分析

1995 年 Eastwood 和 Dilay 研究了注气井周围部分饱和气时所引起地震波衰减现象, 在油气生产期和注气期, 产气层及下方井周围的地震资料 (1996) 提出一种高频衰减分析方法 (EEA 技术), 即假定地层之间的背景衰减变化是缓慢的, 通过一定处理方法消除缓慢变化的背景值, 突出衰减的异常部分, 可能就是有利的含油气区。

9. 基于 Gassman 方程、岩石物理模型的流体替换分析

主要以测井数据和岩石物理实验为依据, 对储层含不同流体时地震响应特征进行研究, 建立流体识别模式, 为后续的流体识别提供实验模型。

岩石物理研究的主要内容包括岩石物理参数的计算、横波速度的估算、弹性敏感性参数的实验分析。例如, Castagna 在墨西哥湾地区, 建立了碎屑岩的纵波速度 (V_p) 和横波速度 (V_s) 的关系式 ($V_p=1.16 \cdot V_s+1.36$), 用于估算横波速度; Ezequiel F.Gonzalez 等通过交会分析, 研究了 λ 与 μ 、 $\lambda\rho$ 与 $\mu\rho$ 、 I_p 与 EI 、 EI 与 $PSEI$ 四组弹性参数对气层和含气水层的敏感性, 得出 EI 与 $PSEI$ 对气层最敏感, Roderick w.Van Koughnet 等研究不同岩性和流体对密度的敏感性。但碳酸盐岩的岩石物理实验研究相对较少, 近几年, 贺振华研究团队对碳酸盐岩进行了大量的岩石物理实验, 取得较好研究成果。

10. 叠前弹性参数反演

叠前弹性参数反演是根据 Zoeppritz 方程或其近似式, 利用叠前数据或部分叠加数据 (角度叠加数据) 及井资料进行叠前反演得到各种弹性参数。Debski 等 (1995) 和 ArildBuland 等 (1996) 利用 AVO 属性反演了 V_p/V_s 等弹性参数; Buland Arild 应用全波形反演算法在 z - p 域转换的 CMP 道集数据上进行反演, 成功地对挪威海上气藏进行了预测。

弹性阻抗 (elastic impedance, EI) 的概念最初由 Connolly 提出, 相较于声阻抗 (AI), EI 包含的岩性及流体信息更加丰富。Whitcombe 等修正了 Connolly 公式, 并推导出扩展弹性阻抗 (Extended EI) 方程, 以解决反演结果随入射角剧烈变化的问题, 并通过对北海油田实际资料的计算, 得到了能清晰反映河道系统的阻抗图。

针对 P-SV 转换波反演问题, Duffaut, Kenneth 等提出了横波弹性阻抗 (SEI) 的概念; Ezequiel (2003) 等推导了转换波弹性阻抗 ($PSEI$) 公式, 此公式适用于任意角度, 并可直接用于储层工业气流与含微气的预测。

自 2003 年以来,在国内也有大量的地球物理学者如甘利灯、马劲风、王宝丽等进行了相关的研究,并相继提出了广义弹性阻抗 (GEI)、射线弹性阻抗 (SEI), Zoeppritz 弹性阻抗 (ZEI) 等概念。

11. 流体识别因子分析

自 1987 年 Smith 和 Gidlow 引入流体因子概念以来,国外不少学者提出了许多流体识别因子,如 Goodway 等提出的 LMR 法, Russell 等提出的 Russell 法, Dillon 等提出的直接油气指示 (DHI) 的波阻抗差分析法,国内学者王西文、陈遵德、于建国、刘文玲、杨文采、贺振华等也发表了不少相关论文,取得了一定的应用效果,但由于各种流体识别因子特征和应用条件不同,在不同地区其应用效果差别较大,因此,需根据实际情况具体选择流体识别因子。