

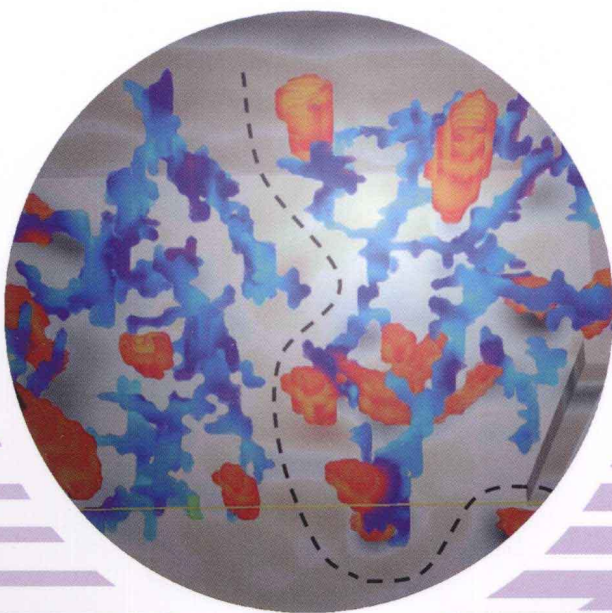


中国石油勘探工程技术攻关丛书

ZHONGGUO SHIYOU KANTAN GONGCHENG JISHU GONGGUAN CONGSHU

碳酸盐岩储层地震勘探 关键技术及应用

○ 中国石油勘探与生产分公司 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书以中国石油天然气股份有限公司物探技术攻关项目成果为主,围绕我国中西部地区碳酸盐岩储层的勘探问题,从地震资料的采集、处理及有效储层预测三个方面,详尽地阐述了碳酸盐岩储层地震勘探的关键技术,并从实践上系统展示了地震勘探技术在碳酸盐岩储层勘探中的应用效果。

可作为油气勘探开发管理者、物探和地质科研人员及有关院校师生学习参考的资料。

图书在版编目(CIP)数据

碳酸盐岩储层地震勘探关键技术及应用 / 中国石油勘探与生产分公司著 .
北京 : 石油工业出版社, 2009.11

(中国石油勘探工程技术攻关丛书)

ISBN 978-7-5021-7481-1

I . 碳…

II . 中…

III . 碳酸盐岩—储集层—地震勘探

IV . P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 198139 号

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

发行部 : (010) 64523620

经 销 : 全国新华书店

印 刷 : 石油工业出版社印刷厂

2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本 : 1/16 印张 : 12.25

字数 : 300 千字 印数 : 1—1200 册

定价 : 65.00 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

前 言

碳酸盐岩是世界上重要的油气勘探开发领域，蕴藏着巨大的油气资源。我国含油气盆地中广泛发育古生界碳酸盐岩。20 世纪 70 年代以来，相继发现了四川威远大气田、华北任丘潜山等油田。但随着勘探程度的提高，碳酸盐岩勘探目的层不断加深，储层和油藏类型更加复杂，勘探难度不断增大，物探技术难以清楚刻画碳酸盐岩有利储层的空间展布，难以提供有利勘探目标。碳酸盐岩油气藏地球物理勘探存在三个方面挑战：一是地表地震地质条件复杂，造成地震资料信噪比普遍较低；二是目的层埋藏深，吸收衰减强，储层非均质性强，地震资料成像精度和分辨率低，难以识别和描述这种非均质储层；三是构造演化和成藏规律复杂，造成油气水关系及其平面分布规律难以预测。这些难题长期制约着我国碳酸盐岩油气藏的勘探开发进程。突破这些技术瓶颈，对碳酸盐岩油气藏的勘探具有十分重要的现实意义。

2005 年，中国石油提出“油气勘探必须走技术发展之路”，决定从 2006 年开始全面开展碳酸盐岩物探技术攻关。通过三年的技术攻关，关键技术上取得了重大突破，形成了子波一致性地震采集、观测系统优化设计、保持振幅处理、叠前噪声压制、叠前偏移成像、岩溶缝洞系统定量雕刻、礁滩孔隙型储层定量预测等一系列采集、处理、解释配套关键技术，基本解决了如塔里木盆地潜山缝洞型和热液岩溶型储层、四川盆地礁滩孔隙型和裂缝型储层的分布规律预测和描述问题，预测储层的钻遇率均达到了 90% 以上，有效地指导了勘探开发生产，推动了碳酸盐岩勘探的一系列重大突破，在塔北哈拉哈唐、塔中 I 号坡折带、四川盆地龙岗大型礁滩气藏的发现过程中发挥了重要的作用，开创了碳酸盐岩勘探的新局面。

为了更好地推广应用几年来物探技术攻关取得的成果，促进碳酸盐岩物探技术进步，进一步推动我国碳酸盐岩勘探大发现，勘探与生产分公司组织专家对三年来碳酸盐岩的攻关成果进行了深入分析、系统研究和全面总结，专门成立编写组编写此书。本书系统分析对比了我国碳酸盐岩储层不同勘探区域的地震地质条件特征，提出了针对性的技术方案和关键技术措施，不仅对关键技术问题进行了理论分析，更有大量的实践数据和案例分析，实现了理论与实践的有机结合，基本反映了目前中国石油碳酸盐岩油气藏地震技术发展的最高水平，是一部广大勘探工作者学习、交流和工作的重要参考资料。

本书的编写由中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司统一组织，参加

单位有：东方地球物理勘探有限责任公司、川庆地球物理勘探公司、塔里木油田分公司、西南油气田分公司、北京石油勘探开发研究院，历时一年完成。

本书第一章由冯许魁、孙建库、徐春春、王喜双等执笔；第二章由陈学强、冯许魁、严峰、曾忠等执笔；第三章由戴晓云、冯许魁、罗文山、李淑君、张健等执笔；第四章由杨平、冯许魁等执笔；第五章由冯许魁、杨平、巫芙蓉、皮学军等执笔。最后由赵政璋、杜金虎、张国珍负责统稿。

本书在编写过程中，得到了中国石油天然气股份有限公司贾承造院士的大力支持。赵化昆、钱荣钧、徐礼贵等专家对书稿提出了具体修改意见，石油工业出版社相关人员对出版样稿进行了详细的审查与修改。值此本书正式出版之际，谨向他们表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

目 录

序

前言

第一章 概述	1
第一节 碳酸盐岩储层发育区地震地质概况	1
第二节 碳酸盐岩储层油气勘探概况	10
第二章 高精度三维地震采集关键技术	15
第一节 子波一致性地震采集激发技术	15
第二节 观测系统优化设计技术	30
第三章 地震资料成像处理关键技术	52
第一节 振幅处理技术	53
第二节 叠前噪声压制技术	60
第三节 叠前偏移成像技术	68
第四章 碳酸盐岩储层地震解释关键技术	80
第一节 岩溶缝洞系统定量雕刻技术	80
第二节 礁滩孔隙型储层定量预测技术	102
第三节 碳酸盐岩含油气性检测技术	114
第五章 典型勘探实例	123
第一节 塔中地区碳酸盐岩勘探实例	123
第二节 龙岗地区碳酸盐岩勘探实例	151
参考文献	181

第一章 概述

碳酸盐岩一直是世界上重要的石油天然气产层,约占全球储产量的一半。中国幅员辽阔,碳酸盐岩地层分布广泛、油气资源丰富,勘探潜力巨大。据初步统计,中国有 28 个盆地发育分布海相碳酸盐岩地层。其中陆上盆地 10 个,海域盆地 18 个。本书重点以陆上碳酸盐岩油气资源潜力大、勘探程度较高的塔里木盆地和四川盆地的勘探实践为例,讨论相关地震技术在勘探中的作用及其效果,以启发其他盆地的碳酸盐岩勘探。

第一节 碳酸盐岩储层发育区地震地质概况

一、碳酸盐岩分布及勘探潜力

大地构造研究认为,中国陆上碳酸盐地层的分布主要受古生代大型克拉通地块的控制。寒武—奥陶纪以及二叠纪是全球碳酸盐岩沉积建造的鼎盛时期,中国所处的塔里木—华北—中朝以及南方扬子等地块之上也在这些沉积期广泛发育了碳酸盐岩沉积建造(图 1-1)。从目前地层的保存情况看主要分在西北、华北和南方三个区,分布面积近 $300 \times 10^4 \text{km}^2$ 。但由于南方地区碳酸盐岩大面积剥蚀或出露,中国陆上具有工业油气勘探价值的碳酸盐岩分布区面积约 $140 \times 10^4 \text{km}^2$ 。最有利的勘探区域为西北的塔里木盆地、华北的鄂尔多斯和渤海湾盆地、南方地区的四川盆地等。其他地区虽有碳酸盐岩油气藏的零星发现,但勘探程度和认识程度都很低,资源潜力有待进一步落实。

(1) 塔里木盆地:是位于中朝地块西部的一个大型克拉通含油气盆地,面积约 $56 \times 10^4 \text{km}^2$,碳酸盐岩的有效勘探面积达 $30 \times 10^4 \text{km}^2$,全国第三次资源评价的资源量达 $94.9 \times 10^8 \text{t}$ 油当量。塔里木地台具有前寒武系褶皱基底,其上广泛发育了以海相碳酸盐岩沉积为主的下古生界(图 1-2),寒武纪—早奥陶世碳酸盐岩沉积厚度达 $3000 \sim 4000 \text{m}$ 。晚奥陶世之后盆地以碎屑岩沉积为主,只在盆地西北部发育部分碳酸盐岩沉积。

1989—2002 年,针对寒武、奥陶系碳酸盐岩开展了规模勘探。主要集中在塔北、塔中及巴楚等主要古隆起及周缘,已证实的有利二级构造带总面积近 $6 \times 10^4 \text{km}^2$,地质资源量近 $50 \times 10^8 \text{t}$ 油当量。完钻各类探井 300 余口,近 70% 的井见到良好的油气显示,约 30% 的井获得工业油气流,日产量最高的井达到 600t/d ,但稳产的井极少,总体效果不理想。这既证实了碳酸盐岩地层巨大的勘探潜力,也表明了其极强的非均质性和复杂性。近几年由于勘探思路和技术的进步,油气勘探取得了显著成效。勘探与研究范围从潜山高部位拓展到围斜、从风化壳拓展到内幕、从风化岩溶型储层拓展到受沉积控制的礁滩体储层和热液作用控制的热液岩溶或白云岩储层等;勘探上形成了轮南潜山连片含油、塔中大面积多层系连片含油、哈得—英买力大面积连片含油的硕果,开辟了麦盖提斜坡、塔东等勘探新区。

(2) 四川盆地：属于扬子地台上的一个次级构造单元，面积约 $18 \times 10^4 \text{km}^2$ ，地质总资源量：石油 $4.26 \times 10^8 \text{t}$ ，天然气 $5.45 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，其中天然气主要集中在深层碳酸盐岩地层中。它是在晋宁运动结束和地槽演化期形成的结晶杂岩—变质岩基底上，由震旦纪—中三叠世碳酸盐岩台地层序、晚三叠世前陆层序和侏罗纪—始新世内陆凹陷层序组成的复合盆地（图 1-3），沉积岩总厚 6000 ~ 12000m。其中震旦系到中三叠统以海相碳酸盐岩沉积为主，全盆地广泛分布，厚 4000 ~ 7000m。

四川盆地是中国开展油气勘探活动最早的盆地之一，经历了较为复杂的勘探研究历程。先后在震旦系、寒武系、石炭系、二叠系、三叠系等层系的碳酸盐岩中见到并已发现和开发了一批中小规模工业气田。近年来围绕开江—梁平海槽周缘的二叠、三叠系礁滩储层勘探，

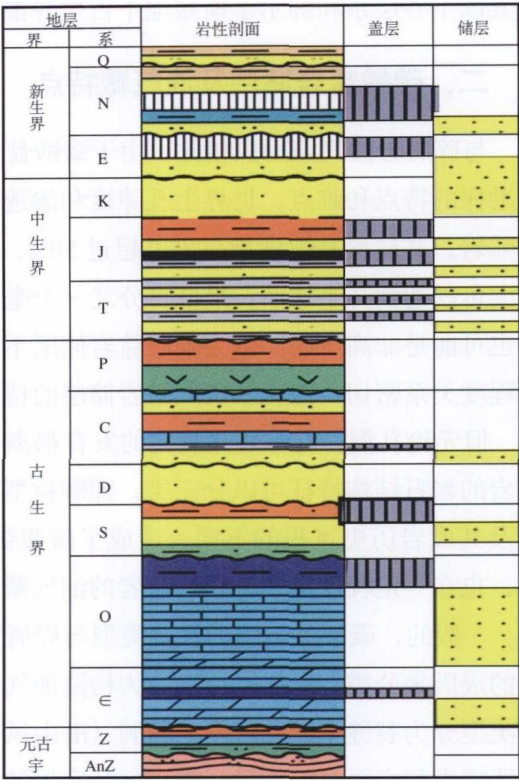


图 1-2 塔里木盆地地层综合柱状图

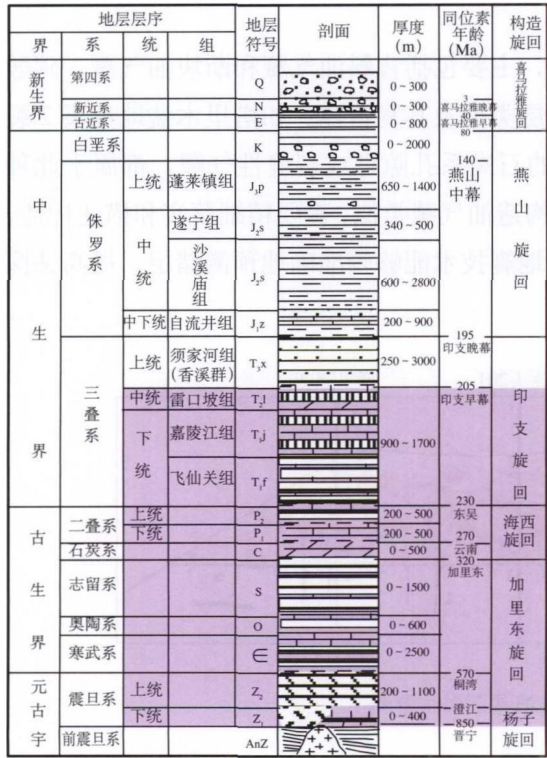


图 1-3 四川盆地地层综合柱状图

取得了一系列天然气重大发现，包括普光气田、罗家寨气田及龙岗气田以及最近在中三叠统雷口坡组的油气发现等等，开启了四川盆地油气勘探的新篇章，预示着其油气勘探潜力的大幅增长，已经成为中国天然气勘探开发极其重要的基地。

总之，勘探研究表明中国海相碳酸盐岩勘探领域拥有巨大潜力。至 2007 年底，已探明石油 $17.8 \times 10^8 \text{t}$ ，探明率只有 7.5%；探明天然气 $1.79 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，探明率为 34.54%，均处于较低水平。因此，从海相碳酸盐岩层系的剩余油气资源潜力及近几年的勘探实践看，我国陆上海相碳酸盐岩正处于大油气田发现高峰期，勘探潜力很大，将是近期油气勘探开发和增储上产的重要领域之一。尤其是塔里木盆地的台盆地区、四川盆地的中三叠统

及其以下各层系和鄂尔多斯盆地地下古生界都有发现大油气田的巨大潜力和良好前景。

二、碳酸盐岩储层及油气藏特点

与碎屑岩油气藏勘探相比，由于碳酸盐岩沉积与成岩机理的不同，决定了碳酸盐岩油气藏勘探的特点和难点。世界上孔隙度和渗透率最好的储层是碳酸盐岩，但最低最差的也是碳酸盐岩。其储层孔隙度最高可以超过 50%，基质孔隙最低 1% 也可以获得较高产量；渗透率最大可以达到几个达西，最低百分之一一个毫达西也能生产高产油气。相反，孔隙度超过 30% 时也可能是非高产层。因为碳酸盐岩储层不仅与孔隙、孔洞有关，而且与孔隙结构和裂缝发育程度关系密切，这就是碳酸盐岩储层的特殊性。

但无论孔洞、孔隙还是裂缝的发育都离不开组成碳酸盐岩岩石本身的结构。一般按碳酸盐岩的岩石结构特征可以分三类，即颗粒型灰岩、骨架灰岩、结晶灰岩。随着岩石成分、含量及其成岩历史过程的不同，造成了碳酸盐岩储层储渗特征及岩石物理等方面的差异和特点，也在一定程度决定了碳酸盐岩的油气藏类型。

一般的，碳酸盐岩的油气藏类型与碎屑岩油气藏类型的分类依据基本相似，主要根据圈闭的成因来分类，大体上可以分为构造油气藏、潜山油气藏和岩性油气藏三类。也有人按储层类型分为裂缝型、孔隙型、缝洞（潜山风化壳）型等等。根据国内碳酸盐岩油气藏的勘探实践需求和主要目标类型，本书仅从实用的角度介绍以下六种类型。

1. 构造油气藏

构造油气藏指主要受控于构造圈闭的油气藏，主要包括背斜油气藏和断块油气藏。碳酸盐岩构造油气藏中，储层可以是任何碳酸盐岩储层类型及其复合体。如塔里木盆地英买 2 裂缝型储层的背斜油藏（图 1-4），以及川东地区的石炭系孔隙型或裂缝性气藏，都属于此种类型。这种类型油气藏的勘探，一方面与碎屑岩构造油气藏类似，需要精细落实和描述构造；另一方面，针对碳酸盐岩储层的非均质性，要求地震技术能够较准确地预测储层，提高钻探成功率。

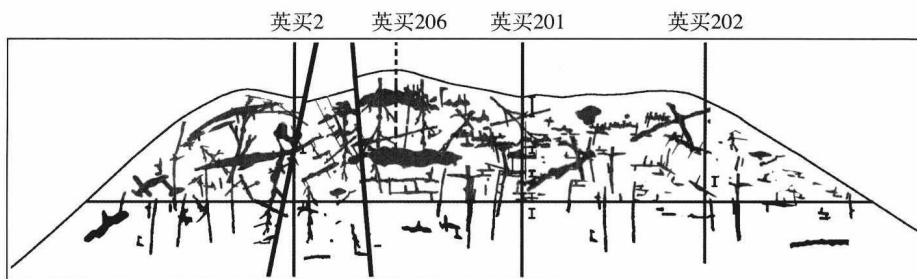


图 1-4 英买 2 号构造油气藏剖面示意图

2. 潜山油气藏

这类油气藏主要受潜山地貌圈闭控制，储层以碳酸盐岩潜山风化溶蚀孔洞和缝隙为储集空间，多形成块状油气藏。一般与差异剥蚀、古隆起及较大规模断层形成的断块山有关。如任丘潜山油气藏、英买力潜山油气藏、轮南潜山油气藏等（图 1-5）。地震勘探的重点是潜山构造及地貌形态的描述与缝洞储层的预测，需要应用高精度三维地震技术及其资料完成勘探开发任务。

3. 裂隙型油气藏

我国碳酸盐岩油气藏的高产往往与裂缝有关，单独的基质孔隙储层相对少见。但裂隙型油气藏特指油气成藏主要受裂缝储层发育分布控制（与构造、岩性等关系不大）。裂隙型气

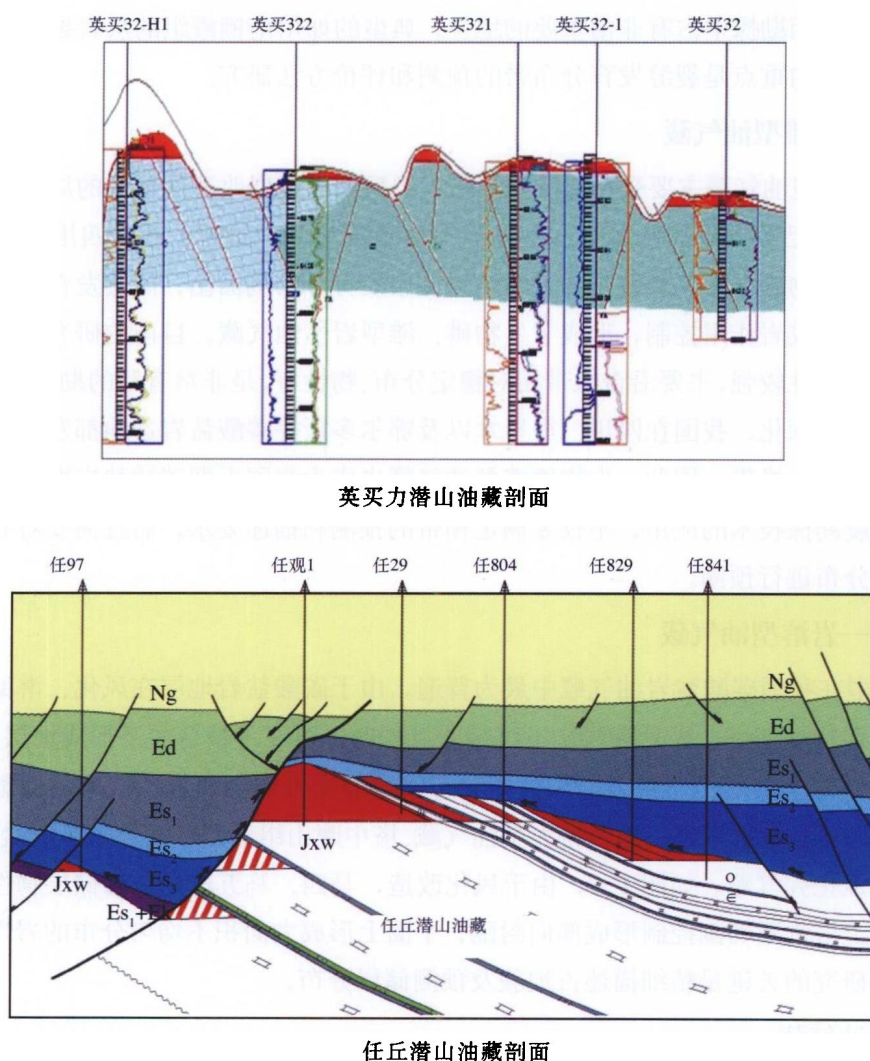


图 1-5 典型潜山油气藏剖面示意图

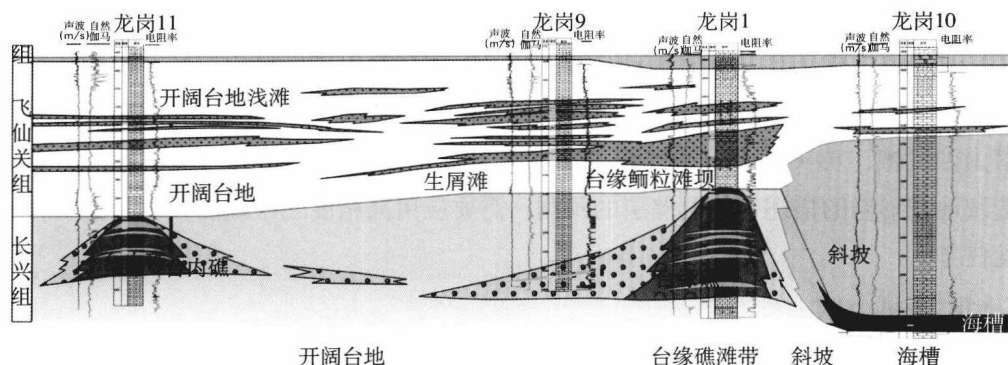


图 1-6 龙岗地区礁、滩储层发育分布模式示意图

藏在四川盆地早期勘探中占有非常重要的地位，典型的如川南栖霞组的灰岩裂缝性气藏。地震勘探技术研究的重点是裂缝发育分布带的预测和评价方法研究。

4. 生物礁、滩型油气藏

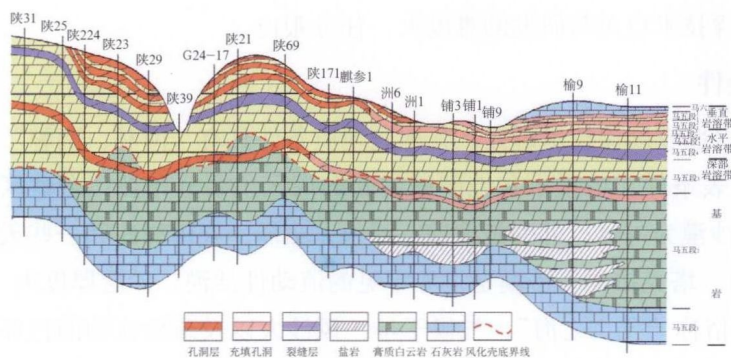
生物礁、滩型油气藏主要受台缘沉积相带以及后期受成岩改造而形成的局部优质储层控制。如四川盆地已经发现的罗家寨、普光等大型礁滩气藏。如图 1-6 为四川盆地龙岗地区二叠系长兴组生物礁与下三叠统飞仙关组鲕滩储层发育分布剖面图，储层发育分布受生物礁滩的沉积相带及成岩作用控制，形成了生物礁、滩型岩性油气藏。目前的研究认为这类储层发育分布的规律性较强，主要沿台缘带相对稳定分布、物性好，是非常有利的勘探目标。近期，随着地质认识的深化，我国在四川、塔里木以及鄂尔多斯等碳酸盐岩盆地都发现或预测了大规模的碳酸盐岩台缘带。因此，生物礁滩型油气藏也成为我国近期碳酸盐岩勘探的重要油气藏类型。地震勘探技术的应用，不仅要满足相带的预测和描述要求，而且需要对有利相带中的有效储层分布进行预测。

5. 地层—岩溶型油气藏

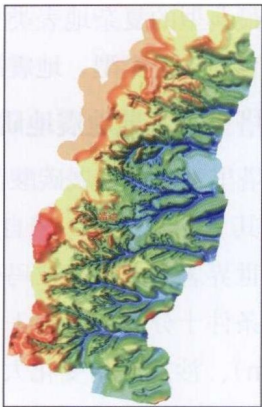
这种类型在我国碳酸盐岩油气藏中最为普遍。由于碳酸盐岩地层在风化、淋滤条件下易受改造使储层物性变好，当后期再次下沉接受沉积时，可在不整合面下形成地层型油气藏。其典型特征是缝洞储层沿不整合面大面积分布，局部受古地形和岩性抗风化性影响而不均质变化。如塔里木盆地塔河—轮古特大型油气藏、塔中鹰山组油藏以及鄂尔多斯盆地苏里格、靖边奥陶系风化壳气藏。如图 1-7，由于风化改造，马四、马五段白云岩储层物性变好，且受岩溶斜坡上古水系切割控制形成侧向封隔，平面上形成大面积不均匀分布的岩性气藏。地震勘探技术研究的关键是精细描述古地貌及预测储层分布。

6. 复合油气藏

碳酸盐岩油气藏往往受多种因素的控制，当某种因素起主导作用时，可以归类为某一类油气藏。但是当多种因素共同起作用时，称为复合油气藏。图 1-8 为塔中东部复合油藏储



盆地东部奥陶系风化壳岩溶剖面



靖边气田岩溶古地貌图

图 1-7 鄂尔多斯盆地风化壳岩溶气藏特征

层模式示意图，由图可见该区碳酸盐岩储层包括受大气淡水风化淋滤控制的潜山型、沉积环境控制的相控型、热液岩溶控制的埋藏岩溶型及白云岩化作用控制的内幕白云岩型等，形成复合油气藏。

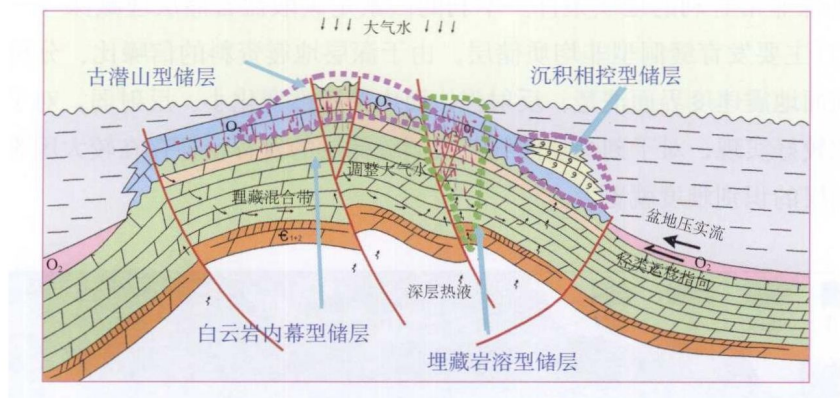


图 1-8 塔中下古生界碳酸盐岩储层类型分布结构剖面

碳酸盐岩油气藏类型多样，即使是同一地区、同一层系也会有多种类型油气藏共同存在。确定油气藏类型是快速准确探明油气藏的关键。对于我国时代老、埋藏深、基质孔隙低的碳酸盐岩储层来说，地层一岩溶型、礁滩型、潜山缝洞型最为普遍，是勘探开发研究的主要对象。无论哪一种类型，地震勘探的关键是在高精度三维地震基础上，精细描述储层顶面形态、预测储层的发育分布规律，最终达到提高钻探成功率的目的。

三、碳酸盐岩储层勘探区地震地质条件

中国陆上碳酸盐岩含油气盆地共同的特点是地层时代老、埋藏深、储层非均质性强。对于地震勘探来说，地表地震地质条件也极其复杂。不仅涵盖了沙漠、山地、黄土塬等中国西

部三种最典型的复杂地表类型，也涉及潜山缝洞、礁滩相及地层—岩溶型等三种碳酸盐岩油气藏发育的主要类型，地震勘探技术攻关与研发的难度大、任务艰巨。

1. 塔里木盆地地震地质条件

在塔里木盆地开展碳酸盐岩地震勘探技术研究，其地震地质条件具有“两利、两弊”的特点。其“一利一弊”来自地表条件。塔里木盆地碳酸盐岩勘探区主要分布在“台盆区”，地表以世界著名的塔克拉玛干沙漠为主体，外围是戈壁、浮土、沼泽、农田村庄和一些天然牧场，条件十分复杂（图 1-9）。塔克拉玛干沙漠是世界罕见的流动性沙漠，沙层厚度大（0 ~ 300m）、沙丘起伏变化大，俗称“死亡之海”。气候干旱、风沙大以及疏松流动的巨厚沙层造成地震波激发接收条件极差，这是不利因素之一。但塔里木盆地存在一个平缓、稳定的潜水面，潜水面之下沙层速度稳定在 1600 ~ 1800m/s，这为地震勘探提供了一定的有利条件和机遇。另“一利一弊”来自地下地质条件。塔里木盆地是一个相对稳定的克拉通盆地，在下古生界碳酸盐岩沉积后，台盆区的构造活动主要表现为整体升降并伴随一定的翘倾，断裂和褶皱不太强烈，长期保持“三隆四坳”的构造格局。因此，在局部范围的勘探区域内，碳酸盐岩上覆地层可以近似为水平层状，基本符合目前地震勘探理论中的主要假设条件，这是开展地震勘探非常有利的地质条件。不利的因素是碳酸盐岩储层埋藏深（一般目的层超过 6000m），且主要发育缝洞型非均质储层。由于深层地震资料的信噪比、分辨率低，尤其是碳酸盐岩顶面地震速度界面清楚、反射强，而内幕速度变化小、反射弱，对于刻画潜山顶面的包络面比较好实现，对于刻画顶面细节及洞缝储层的发育特征存在较大困难，对于内幕溶洞及裂缝储层的识别难度就更大。

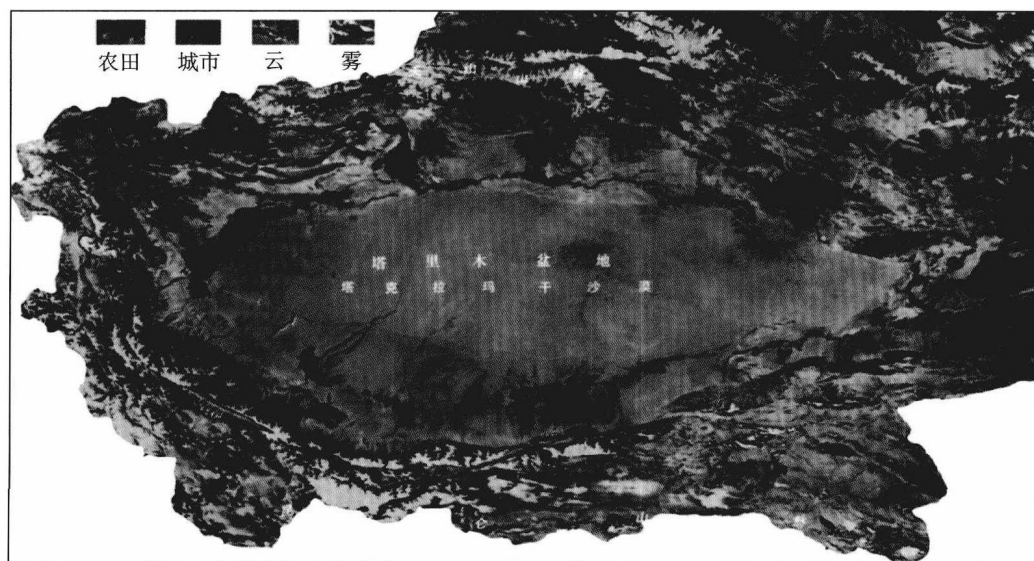


图 1-9 塔里木盆地卫星遥感图片

2. 四川盆地地震地质条件

四川盆地气候潮湿、山高水长，盆地内地表整体以丘陵、平原、山地三种地貌为主（图 1-10），广大地表主要出露侏罗、白垩系成岩性好、地层速度高，是非常好的地震激发层。尽管部分平缓区地表分布第四纪的砾岩堆积，激发接收条件相对较差，能量衰减快，但基本上都能实现潜水面下高速层激发。主要问题是低降速层的横向剧烈变化，使得该地区的资料次生干扰突出、信噪比相对偏低，单炮资料横向差异大。尤其局部地区，山势陡峭、沟壑纵横、出露的地层较老、倾角大，激发接收条件频繁变化，且由山体产生的侧面反射、山坡临空面或地面起伏造成的散射等使记录的波场复杂化，导致了所获原始地震记录品质横向变化大、局部存在严重干扰。但是总体上对地震勘探来说，四川盆地的地表地震地质条件较西部其他盆地好，相对容易得到较高品质的地震资料。

四川盆地地下地质条件较为复杂。碳酸盐岩埋藏相对较深，如龙岗可达 7500m。且上覆地层变形复杂，地腹构造高陡，产状变化剧烈，断层发育，使地震波传播路径复杂化，深层碳酸盐岩的地震成像较为困难。在盆地周缘的高陡构造区这一问题更为突出，在盆地中部地区也由于须家河组构造层的强烈变形及嘉陵江组膏盐层的不均一活动而带来深层成像的问题。

除了以上两大盆地，我国还有鄂尔多斯、渤海湾、羌塘盆地以及南方其他中小盆地也发育碳酸盐岩地层。其中，鄂尔多斯盆地地表地震条件特殊而复杂（主要被巨厚黄土塬和沙漠覆盖），地震勘探极其困难。其他盆地的地表及地下条件基本可以上述两大盆地为代表。

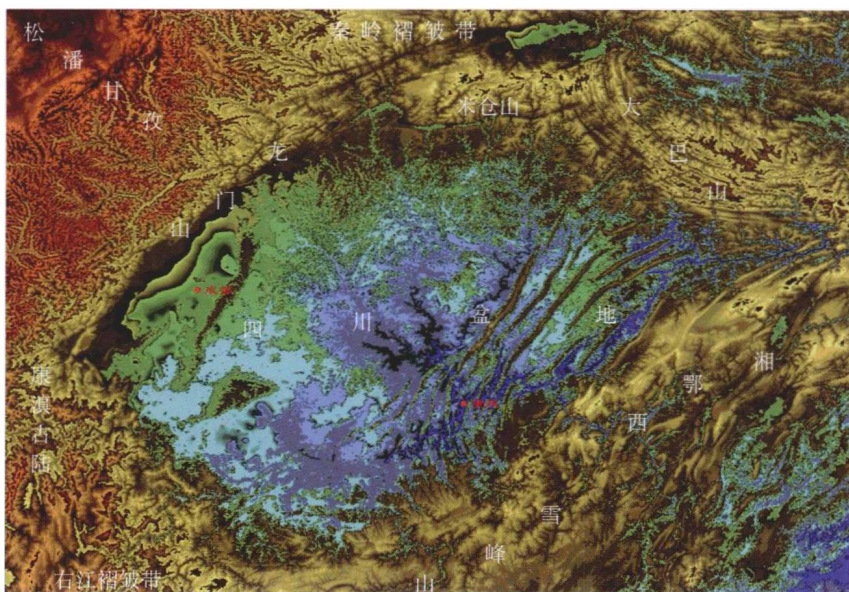


图 1-10 四川盆地卫星遥感图片

中国主要碳酸盐岩含油气盆地的地表及地下条件较为复杂多变，给油气勘探带来诸多难题。尽管碳酸盐岩油气藏勘探的历程较长（如四川盆地有近百年的历史），但勘探进展和步伐一直相对迟缓。只有通过物探技术的不断进步和地质认识的不断深化，油气勘探才能获得全面突破、储量得到快速增长。

第二节 碳酸盐岩储层油气勘探概况

一、碳酸盐岩油气藏勘探历程

长期以来,碳酸盐岩一直是我国油气勘探的重要层系。勘探区域主要集中在四川、塔里木、鄂尔多斯和渤海湾等盆地。碳酸盐岩勘探大致可以划分为三个阶段,第一阶段,在 20 世纪 50—70 年代,以地表地质调查和重磁物探为主,在大型基底构造上,通过参数井钻探与井筒资料地质解释等,发现了如四川威远、相国寺石炭系、华北任丘等油气藏,其中部分油气田的发现具有一定的偶然性。第二阶段,20 世纪 80—90 年代,地震勘探技术在落实构造、发现碳酸盐岩油气藏的勘探中发挥了重要作用,发现了如塔里木盆地轮古、英买力潜山及塔中等含油气构造。但由于地震技术精度较低,无法有效探明和开发利用资源。第三阶段,即进入 21 世纪以来,高精度三维地震技术的发展,深化了对碳酸盐岩非均质储层油气藏的认识,全面推动了碳酸盐岩油气藏的勘探开发进程,先后发现并探明了罗家寨、普光、塔河—轮古潜山、塔中 1 号带、龙岗等等一批大中型油气藏。每一项勘探认识和成果的取得,都是一部地震勘探技术进步与攻关史。以塔里木盆地轮古潜山的勘探过程为例,可以充分说明地震勘探技术在碳酸盐岩油气藏勘探开发中的重要作用。根据地震新技术的应用和勘探形势发展,轮古潜山的勘探可进一步细分为三个阶段。

第一阶段称为构造勘探阶段。80 年代应用二维地震发现潜山构造,1987 年轮南 1 在奥陶系碳酸盐岩潜山获得高产油气流,揭开了塔里木盆地碳酸盐岩会战的序幕。1990 年前后针对轮南 2400km² 的大型潜山背斜开展“整体解剖勘探”,相继完成了常规三维地震 1040km²、钻井 20 余口,大部分井见到良好油气显示,三分之一的井获得了高产工业油气流。如轮南 8、轮南 54 等井都是日产超过百吨的高产井,但更多的是低产井或出水井。由此逐步认识到由于埋深大,岩溶改造作用强,使得潜山储层具有极强的非均质性,成藏规律复杂。受当时地震资料信噪比和成像精度的限制,无法描述潜山顶面形态和储层的空间变化,从而导致勘探难以取得实质性进展(冯许魁、刘兴晓等,2002)(图 1-11),大部分出油井只能作为单个出油点,处于见“油”不见“田”,更没有储量和产量的困惑阶段。此后几年间,勘探工作基本处于停顿状态。

第二阶段称为常规储层勘探阶段。1996 年底,国内第一例相干数据体分析技术成功应用于轮南潜山的碳酸盐岩储层预测中,取得了较好效果,先后在轮古 1 井、轮古 2 井获得了高产稳产油气流;在此基础上提出了针对潜山顶面及储层描述进行老三维资料目标处理及高分辨率采集的技术攻关试验。由于高分辨率三维地震采集、三维地震 DMO 及三步法偏移等一批新技术的应用,潜山顶面成像得到极大改善,探井成功率显著提高到 50% ~ 60% 左右,成为推动轮南碳酸盐岩勘探突破的转折期(赵建勋、冯许魁等,2002)。

第三阶段为 2004 年以来的精细储层勘探阶段。2000 年之后，先后针对轮南潜山开展了多轮次的提高分辨率三维地震勘探技术攻关，使原始资料品质大幅度提升。在此基础上，为提高成像精度和整体认识的程度，2004 年对 1100km² 的高分辨率三维资料进行了大面积三维连片叠前时间偏移处理技术攻关，使潜山顶面地震成像精度大幅度提升，基本实现了从宏观上描述岩溶系统及其储层空间发育分布规律的目的，钻井成功率大幅度提高，特别是对储层的预测成功率达到到了 90%。至此，轮南地区碳酸盐岩勘探基本步入缝洞储层勘探的良性循环（冯许魁、王鹏等，2004；冯许魁、罗文山等，2005）。目前勘探领域已经远远突破了鼻状背斜的限制，向东扩展到草湖凹陷的轮深 1 井区，向西扩展到哈拉哈塘及英买力地区。并在区域勘探中全面推广应用该技术，推动了塔中、巴楚地区的碳酸盐岩勘探，都取得了显著勘探效果。

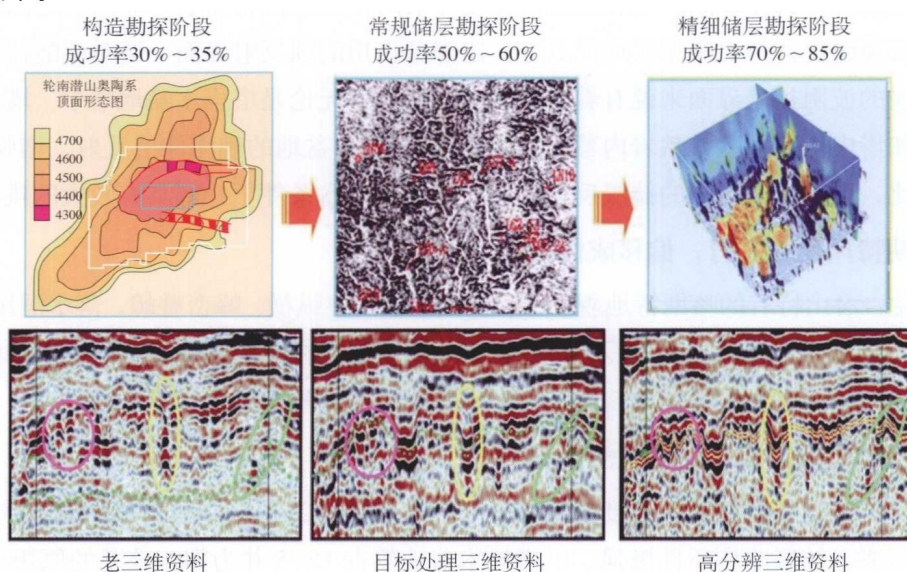


图 1-11 塔北隆起轮南低凸起奥陶系碳酸盐岩潜山勘探历程

由此可见，轮南潜山碳酸盐岩勘探不仅代表了近 20 年地震勘探技术的进步史，也是我国陆上碳酸盐岩油气勘探的一部技术攻关史，全面推动了我国陆上海相碳酸盐岩油气勘探开发高峰期的到来，为我国油气勘探开发技术发展做出了积极贡献。

二、碳酸盐岩地震勘探难点及面临的技术问题

我国碳酸盐岩与世界其他盆地的碳酸盐岩油气藏不同，不仅地表地震地质条件极其复杂，而且地质年代老、埋藏深、非均质性强、成藏规律复杂，导致单井产量差异大、开发井网难以设计等矛盾。尽管各个盆地面临的技术问题和应用的技术对策各有区别，但主要矛盾和技术问题可以概括为以下六个方面：

1. 地表地震地质条件复杂，提高信噪比难

无论塔里木盆地的沙丘造成强烈吸收衰减和散射等干扰，使资料信噪比、分辨率降低，还是四川盆地高大山区形成的低信噪比空白反射或杂乱反射带，地表复杂都是地震勘探必须首先要研究和解决的问题。

2. 储层埋藏深度大，提高分辨率难

国内碳酸盐岩目的层的埋深一般都在 5000m 以下，有些地区，如塔里木轮东地区、四川盆地龙岗西部地区更是达到了 7500m。由于大地本身的滤波作用和表层衰减，高频能量吸收衰减严重，制约了分辨率的提高，也降低了储层识别的精度。

3. 内幕反射弱，成像难度大

由于勘探目的层埋藏深，地层的压实程度都很高，碳酸盐岩储层与非储层之间速度差异小，且灰岩顶面往往与上覆泥岩形成具有一定屏蔽作用的强反射界面，这对碳酸盐岩地层内部相对微弱的波阻抗差界面来说有着非常不利的影响。无论是塔里木盆地塔中、塔北潜山内幕反射（如塔中奥陶系碳酸盐岩内幕反射等）、还是四川盆地的礁滩储层反射，增强弱信号、提高信噪比，得到真实可靠的储层反射响应，在目前技术条件下，都具有较大的挑战性。

4. 喀斯特风化壳发育，偏移成像难

碳酸盐岩潜山特有的喀斯特地貌，潜山顶面往往沟壑纵横、峰峦叠嶂，落水洞星罗棋布，内部发育大量的溶蚀孔洞和裂缝，所有这些岩溶现象都会在地震勘探中产生复杂的绕射或散射波，准确地偏移成像成为碳酸盐岩资料处理必须攻克的技术难点之一。

5. 储层非均质性强，地震预测困难

由于国内碳酸盐岩基质孔隙度普遍很低（一般 1% ~ 2%），次生的溶蚀缝洞为主要的储集空间，造成了储层非均质性极强。以塔里木盆地轮古 15-5 井为例，该井的原靶点 A 在经过酸压改造后依然未能获得油气产量，但在重选靶点 B 进行侧钻后，A 点与 B 点的水平位移仅 16.5m 就获得高产油气流。即使是四川盆地礁滩体，由于沉积相带变化快、成岩作用及其变化过程更为复杂，非均质问题也是我们在勘探开发中面临的主要问题。如何利用高精度的三维地震资料，有效开展碳酸盐岩非均质储层的预测和发育分布规律的描述是碳酸盐岩地震勘探技术研究的关键。

6. 油气水关系复杂，烃类检测难

碳酸盐岩油气藏不仅存在储层发育的非均质性问题，而且都属于盆地的中下组合。在长期的地质历史演化中，由于构造变形、翘倾、风化等活动极其复杂，造成了现今碳酸盐岩油气藏的运聚、成藏规律复杂，油气水关系错综复杂，难以用明确的规律描述。常常相邻的缝洞系统储集体可能充填稠油、正常油、凝析油、气、水等不同相态的流体。以塔中 83 井区凝析气藏为例，呈现出油在气上、水在油上的异常现象，油气水的分异关系不明显（图 1-12）。