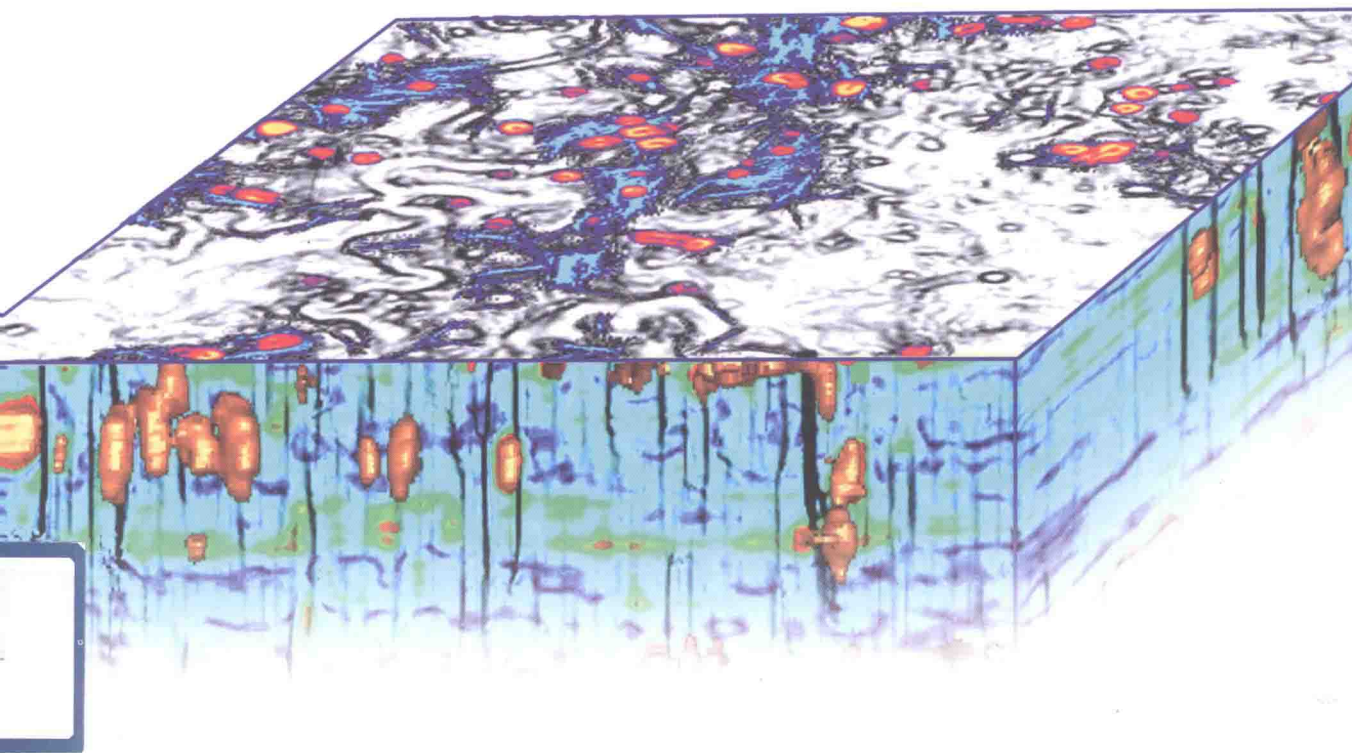


碳酸盐岩岩溶储层描述 关键技术

杜金虎 王招明 杨 平 等著



石油工业出版社

碳酸盐岩岩溶 储层描述关键技术

杜金虎 王招明 杨 平 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了塔里木盆地深埋、非均质岩溶储层研究的地质背景、地震勘探难点、地震技术攻关新成果及其应用效果,重点介绍了全方位高密度采集技术、各向异性偏移和逆时偏移处理技术、岩溶储层定量描述配套技术等前沿技术。依靠新技术所形成的技术路线,较好地解决了构造、储层、裂缝及油气研究的关键问题,加快了塔中、塔北地区勘探整体评价和开发产能建设的进程。

本书适合从事石油勘探、开发工作的科研及管理人员、高等院校相关专业的师生阅读、参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

碳酸盐岩岩溶储层描述关键技术 / 杜金虎, 王招明, 杨平等著.
北京: 石油工业出版社, 2013.6

ISBN 978-7-5021-9359-1

I. 碳…

II. 杜…

III. 碳酸盐岩—储集层—研究

IV. P588.24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 267865 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

编辑部: (010) 64523539 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 10

字数: 208 千字

定价: 70.00 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

塔里木盆地碳酸盐岩地层分布面积达32万平方千米，地层厚度3000~4000米。多轮资源评价结果表明：碳酸盐岩地层油气资源十分丰富、勘探潜力巨大，是增储上产的重要领域。但是由于其地层年代老、埋藏深，储层基质孔隙度不发育、双孔介质非均质性强，加之多期成藏、多期调整，油气分布极为复杂，堪称世界之最。

几十年来，勘探工作历经了寻找构造、潜山岩溶、层间岩溶三个阶段，几度兴奋、几度困惑，艰难曲折。2004—2005年，在塔中地区，礁滩体和层间岩溶的勘探取得重大突破，“羊肉串”再次成为勘探的主要对象。面对碳酸盐岩地震资料信噪比低、内幕成像差、储集单元（羊肉串）聚焦难、归位不准、体积难以定量雕刻、油气预测难度大等世界级难题，中国石油天然气股份有限公司从2006年开始，组织了碳酸盐岩物探技术攻关，并在2009年取得阶段性成果。通过100%高速层激发和叠前时间偏移等关键技术的创新应用，基本解决了碳酸盐岩地层原始资料信噪比低以及串珠状反射聚焦难的难题，取得了较好的勘探效果，组织出版了《碳酸盐岩储层地震关键技术及应用》一书。

近三年来，通过持续攻关，碳酸盐岩地震资料采集、处理、解释配套技术得到跨越式发展。创新应用了全方位高密度采集、各向同性及各向异性叠前深度偏移、单程波偏移及逆时偏移、基于叠前反演的储层预测及油气检测等多项世界前沿技术；自主研发了碳酸盐岩裂缝综合预测及缝洞单元划分、碳酸盐岩缝洞储层定量描述等特色关键技术。资料采集从窄方位到宽方位，资料处理从叠后到叠前、从时间域到深度域、从各向同性到各项异性，资料解释从定性到定量、从储层预测到油气检测、从断裂刻画到裂缝预测、从单个“羊肉串”研究到缝洞单元综合描述，实现了多个重要转变。碳酸盐岩“羊肉串”储层精确成像、偏移准确归位、裂缝预测、油气检测、缝洞单元的准确划分及定量描述等关键技术的攻关取得了重要突破，有效地指导了碳酸盐岩的勘探开发井位部署和储量计算工作，碳酸盐岩储层钻遇率、钻井成功率、钻探高效井比例大幅度提高，大大地加快了塔中、塔北地区勘探的整体评价和开发产能建设的进程。

本专著是近三年物探攻关重要成果的总结，在简要揭示塔里木盆地碳酸盐岩岩溶储层勘探的地质背景与地震勘探技术难点的基础上，重点介绍了针对缝洞型储层的全方位高密度采集技术和拟全三维采集技术、各向异性叠前深度偏移、WEFOX叠前偏移和波动方程偏移技术及融合处理技术、分方位处理裂缝预测油气技术等关键技术及缝洞型储层定量描述特色技术的基本原理、技

术创新点及应用效果。最后，以塔北地区为例系统分析了碳酸盐岩地震资料采集、处理、解释（地球物理）配套技术的应用及其成效。成果来源于科研生产实践，着眼于国际前沿技术的创新应用与针对性特色技术的研发，重点突出关键技术的创新及应用效果，具有较高的理论水准与重要的借鉴意义。特别是碳酸盐岩岩溶储层建模及定量描述技术在国际上处于领先水平，具有很强的推广价值。

全书思路清晰，结构严谨，深入浅出，图文并茂，适用于不同读者对理论研究和经验借鉴的需求。相信本书一定会与2009年出版的《碳酸盐岩储层地震关键技术及应用》成为姊妹篇，受到广大学者与一线科研人员的欢迎，并将对推动中国物探技术的发展以及碳酸盐岩油气勘探进程起到更大的积极作用。

中国石油股份有限公司副总裁

2012年10月

■ 第一章 绪论/001

第一节 地质背景/001

第二节 勘探历程/008

第三节 地震勘探难点/010

第四节 本次攻关新进展/015

■ 第二章 岩溶储层地震采集技术/023

第一节 全方位高密度采集技术/023

第二节 拟全三维地震采集技术/033

■ 第三章 岩溶储层高精度成像处理技术/038

第一节 各向异性叠前深度偏移技术/038

第二节 WEFOX叠前深度偏移技术/045

第三节 逆时偏移技术/048

第四节 分方位保幅处理技术/060

第五节 融合处理技术/067

■ 第四章 缝洞储层定量描述技术/075

第一节 定量描述理论基础/075

第二节 缝洞单元划分及定量雕刻技术/081

第三节 缝洞连通体建模及定量描述技术/096

第四节 油气检测技术/112

第五节 井位优选技术/125

■ 第五章 应用效果/138

第一节 塔北地区勘探概况/138

第二节 技术难点与对策/140

第三节 应用效果/142

■ 结束语/150

■ 参考文献/151

第一章 绪 论

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，地理上位于中国新疆维吾尔自治区南部，是国内最大的内陆盆地，面积约 $56 \times 10^4 \text{km}^2$ ，其中埋深小于 7000m 的有效勘探面积达 $20 \times 10^4 \text{km}^2$ 。新一轮资源评价结果认为碳酸盐岩地层的资源量达 $94.9 \times 10^8 \text{t}$ 油当量，勘探潜力巨大。

岩溶型碳酸盐岩油气藏是塔里木盆地台盆区油气勘探开发的主要目标之一。然而由于储层埋藏深、非均质性强、地震地质条件复杂，储层准确成像、精细预测和烃类检测难度大，导致部分探井与开发井的开井率低、产量递减快，油气高效勘探开发极其困难。地震技术面临巨大挑战，研究难度堪称世界之最。

本章首先对这类油气藏的地质背景及地震勘探条件进行简要介绍，并在此基础上对地震勘探难点进行分析，然后对前期勘探历程及主要技术成果进行简要回顾，最后简要介绍本轮攻关取得的技术进展及成果。

第一节 地 质 背 景

塔里木盆地下古生界碳酸盐岩地层分布广泛，沉积厚度大。储层以非均质性很强的缝洞型岩溶储集体为主。早期油气藏经过多期调整和充注，油气水分布规律复杂。

一、沉积与构造特征

塔里木盆地寒武纪—中晚奥陶世碳酸盐岩沉积厚度达 3000 ~ 4000m。奥陶系自上而下可分为桑塔木组、良里塔格组、吐木休克组、一间房组、鹰山组及蓬莱坝组；寒武系通常分为上白云岩段、膏岩段和下白云岩段。塔中地区缺失吐木休克组和一间房组。烃源岩为寒武系—奥陶系中富含有机质部分的石灰岩地层。主要勘探目的层为奥陶系和寒武系的各期风化壳和沉积间断面。在塔中地区，良里塔格组和鹰山组是主要勘探目的层，寒武系白云岩是正在积极探索的领域。在塔北地区，根据地层出露情况的不同，一间房组、鹰山组和寒武系白云岩均为主要勘探目的层。碳酸盐岩的主要储盖组合见图 1-1。

碳酸盐岩地层的整体构造格局包括塔中、塔北、巴楚、塔东 4 个隆起区，阿瓦提、草湖和满加尔 3 个坳陷区以及麦盖提和哈得—古城两个斜坡带。在隆起区，碳酸盐岩地层都

系	统	组/段	岩性剖面	储盖组合	岩性描述
奥陶系	上统	桑塔木组			灰色泥岩, 泥质粉砂岩, 深灰色灰质泥岩
		良里塔格—吐木休克组		1	灰色泥晶灰岩, 颗粒灰岩及生物灰岩
	下统	一间房—鹰山组		2	砂屑灰岩, 角砾白云岩
		蓬莱坝组		3	白云岩、灰质云岩
寒武系	上统	上白云岩段		4	浅灰色、灰白色白云岩
	下统	膏岩段		5	白色膏岩
		下白云岩段			浅灰色、灰白色白云岩

图 1-1 塔里木盆地碳酸盐岩储盖组合示意图

遭受了不同程度的剥蚀, 导致地层从奥陶系桑塔木组到寒武系盐下白云岩均有出露。但在塔中、塔北的主体区, 仍以良里塔格组—鹰山组为主要出露地层。目前勘探开发的重点集中在塔中、塔北两个继承性隆起及其周缘; 巴楚—玛东、古城台缘带以及塔东地区则是正在积极探索的后备领域 (图 1-2)。

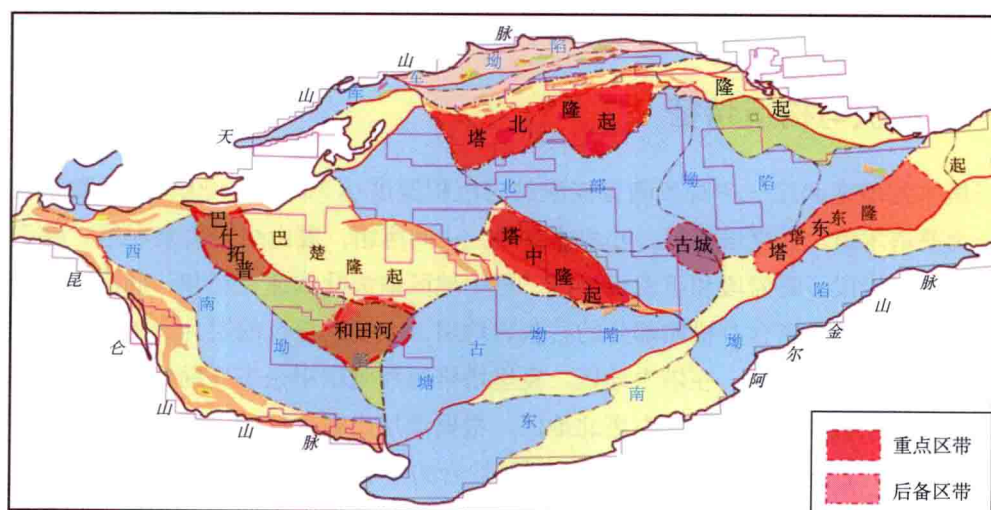


图 1-2 塔里木盆地碳酸盐岩富油气区带分布图

碳酸盐岩地层以开阔台地相的石灰岩及白云岩为主，在台地边缘发育藻类和瓶筐石等造礁生物形成的礁滩相沉积。图 1-3 是塔里木盆地奥陶系地震相平面图，它反映了台地相及礁滩相地层的整体分布特征。由于沉降中心的变迁，整个盆地发育了四期共六条台缘带，它们是碳酸盐岩储层发育的有利区。

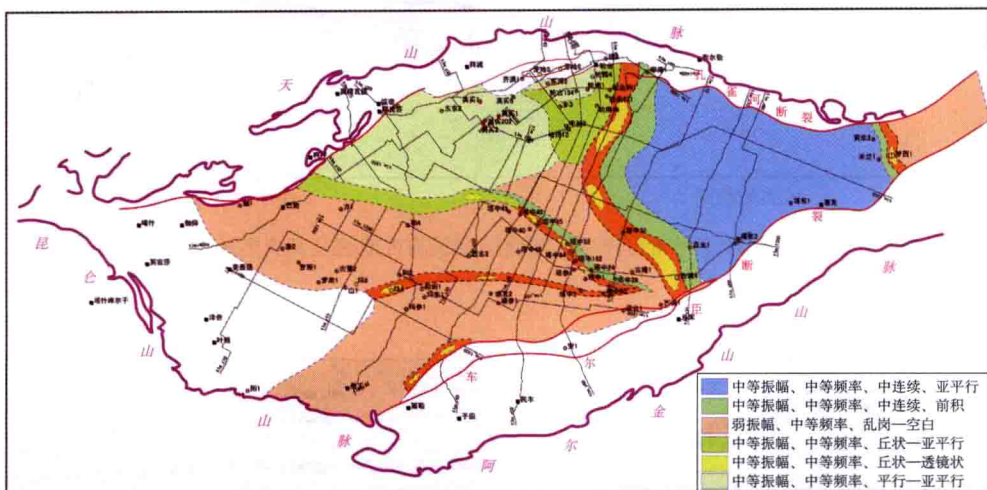


图 1-3 塔里木盆地奥陶系地震相平面图

二、储层特征

按照沉积环境及储层发育位置的不同，通常将岩溶型石灰岩储层分为礁滩型岩溶、层间岩溶及潜山岩溶三类。礁滩型岩溶发育与台地边缘，通常具有典型的丘状反射特征，以塔中 I 号台缘为典型代表（图 1-4）。层间岩溶发育于碳酸盐岩地层之间，储层呈片状或团块状发育，通常认为是由短期的沉积间断和地层暴露造成，河道不发育，塔中西部鹰山组地层及塔北哈拉哈塘一间房—鹰山组都有这种类型的岩溶（图 1-5）。潜山岩溶沿长期暴露的不整合面发育，以剧烈起伏的喀斯特地貌为典型特征，沟壑纵横，以轮古潜山最为典型（图 1-6）。

开阔台地相的石灰岩原生孔隙度很低，加上成岩后期的压实和胶结作用，基质孔隙几乎丧失殆尽（图 1-7）。台地边缘发育藻类和瓶筐石建造的礁滩体，具有相对较高的原生孔隙，有利于后期的储层改造，因而基质孔隙度也相对较高（图 1-8）。但总的来说，各类岩溶储层的基质孔隙度都偏低，储层的储集空间以肉眼可见的次生溶蚀洞、孔、缝为主，称为宏观储集空间。图 1-9、图 1-10 是塔里木盆地塔北地区碳酸盐岩地层及溶洞的露头照片。蓝色虚线分别标注了裂缝发育带和溶洞。图 1-11 是 TZ45 井的岩心照片以及 ZG86 井的 FMI 成像测井资料，由这些图片可以看出不同尺度的宏观储集空间的具体特征。

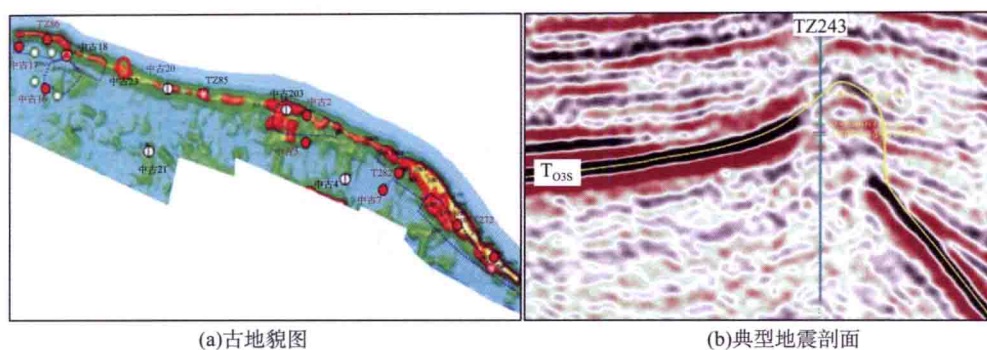


图 1-4 塔中 I 号带礁滩型岩溶储层沉积前古地貌及其典型地震剖面

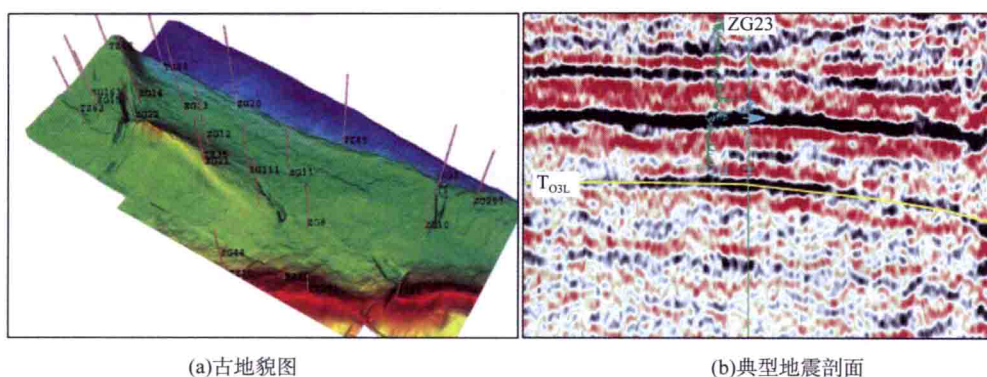


图 1-5 塔中西部鹰山组层间岩溶储层沉积前古地貌及其典型地震剖面

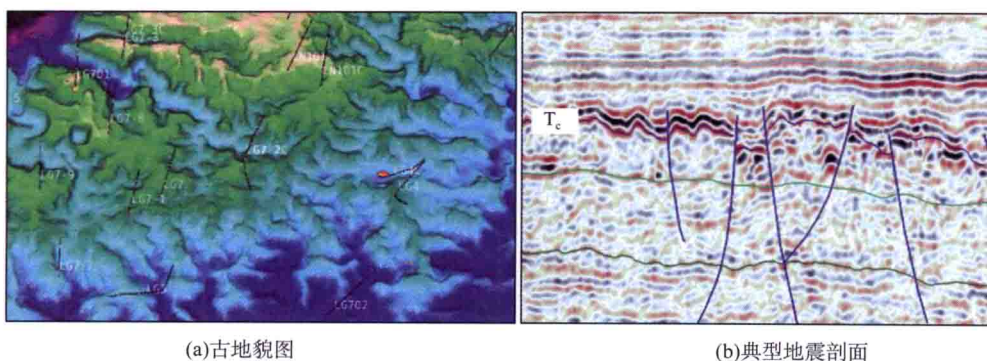


图 1-6 轮古西部潜山岩溶储层沉积前古地貌及其典型地震剖面

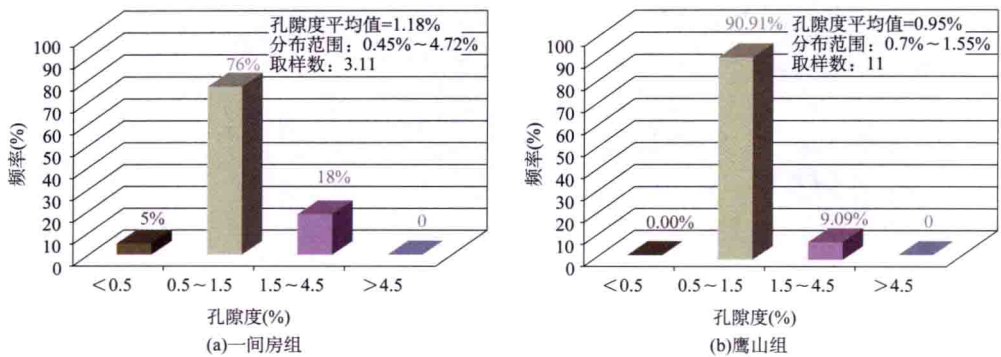


图 1-7 塔北哈拉哈塘地区一间房组与鹰山组孔隙度统计直方图 (岩心取样分析)

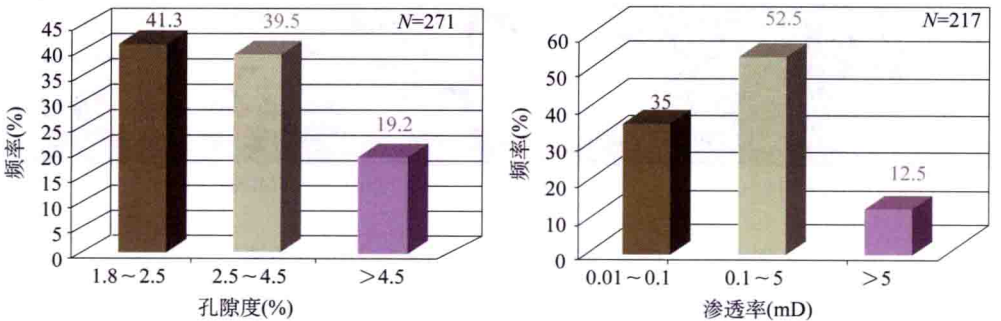


图 1-8 塔中 62 井区良里塔格组礁滩相储层孔隙度与渗透率统计直方图 (岩心取样分析)

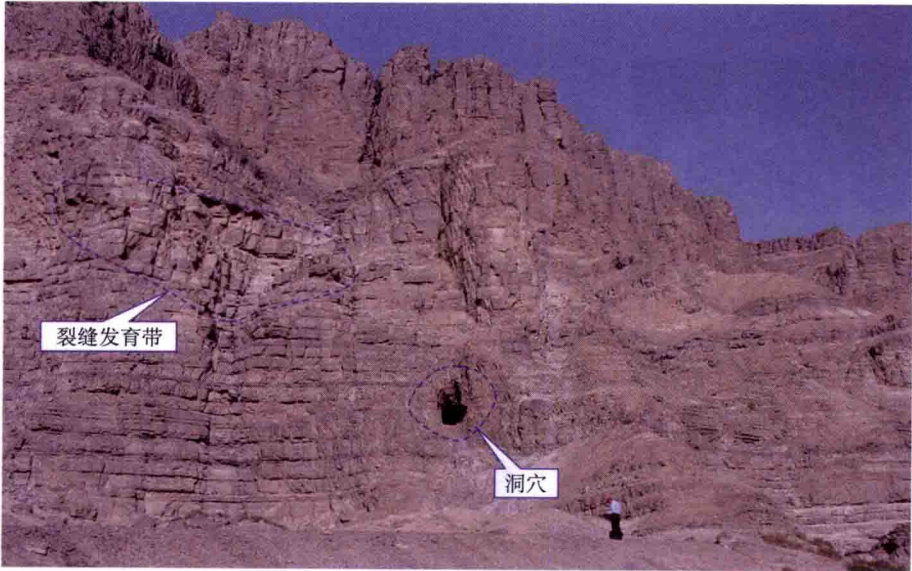


图 1-9 塔里木盆地塔北一间房地区碳酸盐岩露头照片

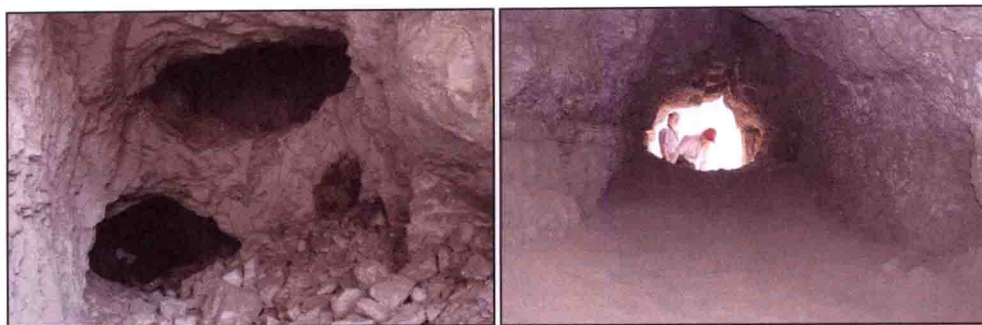
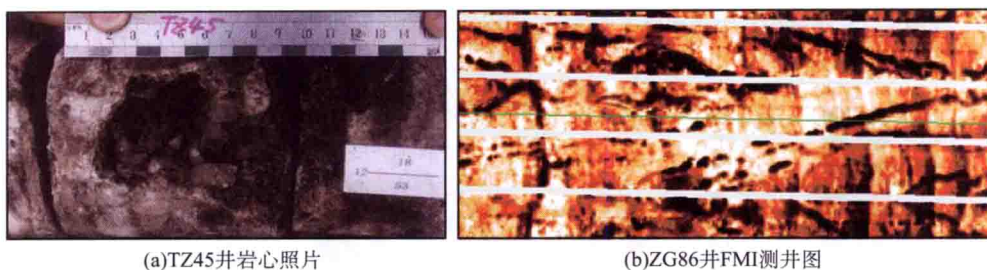


图 1-10 塔北地区露头中的碳酸盐岩溶洞实例

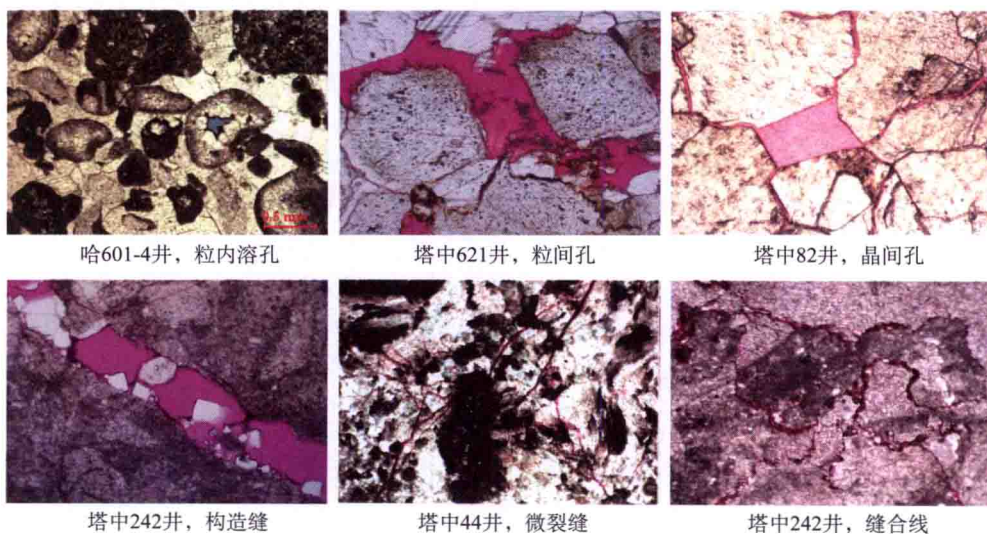


(a)TZ45井岩心照片

(b)ZG86井FMI测井图

图 1-11 TZ45 井岩心照片及 ZG86 井 FMI 测井图

需要在镜下才能观测到的储集空间统称微观储集空间，包括粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔、晶间孔、生物格架孔、微裂缝、构造缝及缝合线等（图 1-12）。这一部分储集空间对储层储量的贡献不大。



哈601-4井，粒内溶孔

塔中621井，粒间孔

塔中82井，晶间孔

塔中242井，构造缝

塔中44井，微裂缝

塔中242井，缝合线

图 1-12 岩溶储层的微观储集空间

研究表明,在构造作用和成岩作用的共同影响下,早期的致密碳酸盐岩地层发生破裂和溶蚀,形成不同尺度的岩溶储集体(邹才能和陶士振,2007),其中规模较大的缝洞储集体被称为“缝洞体”。缝洞体的外部形态、内部结构、充填程度和含油气性均互不相同,在地震资料上表现为形态和振幅各异的各种反射异常体,是油气勘探的主要目标。

三、油气分布规律

在构造和储层的双重控制下,经过多期充注和调整,碳酸盐岩油气分布具有以下特征(杜金虎等,2011)。

(1) 有效烃源岩控制了油气的资源与分布。

寒武系一中上奥陶统的多套烃源岩广泛分布,奠定了丰富的油气资源基础。烃源岩的类型及其差异演化形成了富油也富气的格局。碳酸盐岩油气藏主要位于有效生烃中心周缘。

(2) 古隆起斜坡控制了油气的运聚。

古隆起斜坡紧邻有效生烃中心,为油气长期运聚的指向区。斜坡部位特殊的地貌环境有利于巨厚风化壳的形成与保存,发育大量的洞穴系统,为油气的长期保存提供了有效空间。因此,油气沿古隆起斜坡大面积分布。其中最重要的古隆起斜坡为塔北古隆起南斜坡及塔中古隆起北斜坡。

(3) 优质储层控制了油气的富集。

油气沿层序顶面多层段复式分布,整体表现为“准层状”特征(图1-13)。多类储层叠置连片分布是油气大面积分布的基础。优质储层控制了油气的富集,形成一个个相对独立的油气藏。其中礁滩体油气藏沿台地边缘呈条带状聚集成群,整体分布,形成台缘礁滩型油气田。洞穴系统油气藏沿风化壳聚集成群,大面积块状分布,形成风化壳型油气田。

(4) 多期油气成藏控制了油气相态的有序性。

塔里木盆地碳酸盐岩的油气成藏过程非常复杂。一般认为经历了三期成藏过程(杨海军等,2011):第一期在加里东晚期充注,但在早海西期遭受严重破坏;第二期在晚海西期充注,是最重要的油气充注成藏期;第三期在晚喜马拉雅期充注,对部分油藏进行气洗改造。多期构造运动造成油气成藏的差异性,多期油气成藏与调整造成油气性质的多样性,晚期天然气充注形成“油重气干,下气上油”的分布特征。因此,碳酸盐岩油气田的油气性质、油气水关系极为复杂,横向可对比性差,相邻井的流体特征有时截然不同,常常出现水比油高,气比油低的现象(图1-14)。

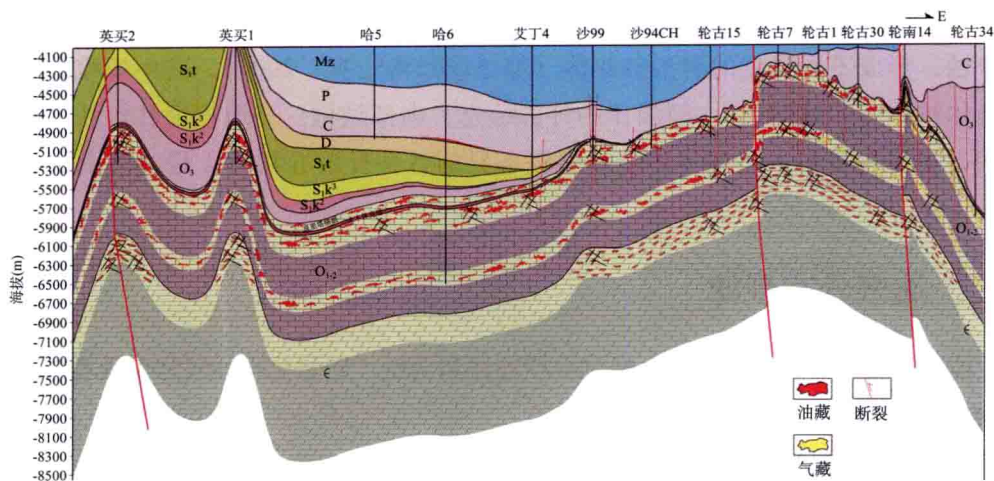


图 1-13 塔北地区碳酸盐岩准层状油藏模式图

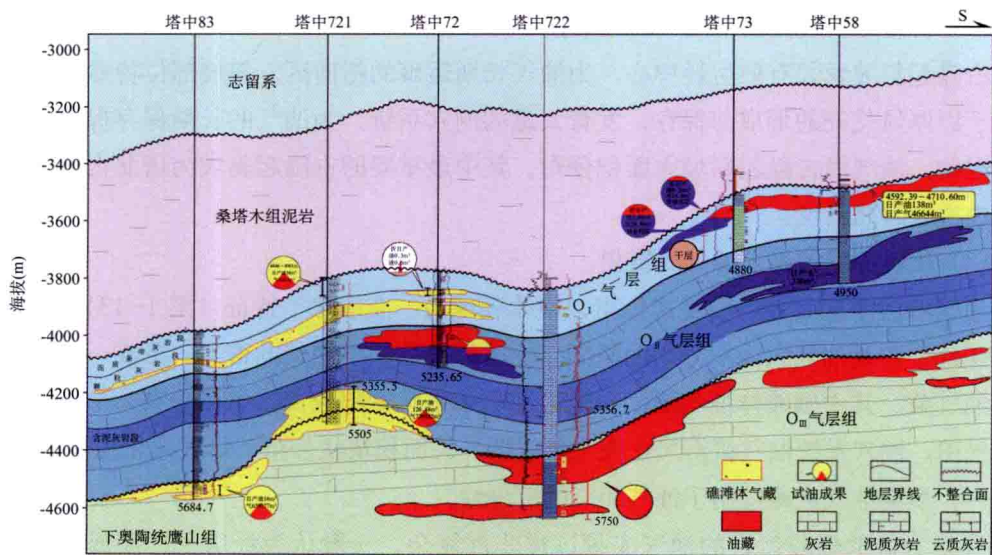


图 1-14 塔中 83 井区连井油气藏剖面

第二节 勘探历程

根据地震新技术的研发应用和勘探形势的发展，一般将碳酸盐岩的勘探技术历程划分为三个主要阶段，即构造勘探阶段、岩溶储层定性描述阶段和岩溶储层定量描述阶段。

一、构造勘探阶段（1986—1995年）

这一阶段的主要标志是三维地震技术大规模应用于构造解释，属于针对构造的勘探阶段。20世纪80—90年代，三维地震采集技术开始普及。受装备能力所限，主要采用浅层激发和小偏移距的线束观测系统。处理上仍然采用叠后偏移技术，资料解释以落实构造和断层为主。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年前后针对轮南大型潜山背斜，相继完成了常规三维地震资料采集1040km²、钻井20余口，约1/3左右的井获得了高产工业油气流，但更多的是低产井或出水井。由此逐步认识到潜山储层极强的非均质性以及油气成藏规律的复杂性。但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（周新源等，2009），处于见“油”不见“田”，更没有储量和产量的困惑阶段。此后几年，勘探工作基本处于停顿状态。

二、岩溶储层定性描述勘探阶段（1996—2005年）

这一阶段的主要标志是开始利用地震属性进行储层预测，并以潜山风化壳为主要勘探目标。其中以1996年相干处理解释技术的应用，和2002年100%高速层激发技术的应用为标志，又可分为前后两个时期。

1996年底，柴桂林、冯许魁等将相干数据体分析技术应用于轮南潜山的碳酸盐岩储层预测中，取得了较好效果。针对“串珠状强反射”，先后在轮古1井、轮古2井获得了高产稳产油气流。在此基础上开展了针对潜山顶面及储层描述的老三维地震资料目标处理及高分辨率地震资料采集技术攻关试验。由于高分辨率三维地震资料采集、三维DMO及三维一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。同时振幅、相干、频率等地震属性以及波阻抗反演、模式识别等解释技术被深入应用，有效提高了储层预测精度，探井成功率显著提高，达到40%左右。这一时期成为推动轮南碳酸岩盐岩勘探突破的转折期。

2002年，随着物探装备的发展，东方地球物理公司推出了100%高速层激发技术，有效提高了地震激发能量，使得深层资料的信噪比大大提高。塔里木油田公司首先针对塔中16井区碳酸盐岩勘探应用了这一技术，取得了突破性进展，发现了塔中台缘礁滩相，从而掀起了全盆地碳酸盐岩勘探的新一轮高潮。在新资料的基础上，处理解释技术的精度大大提高，对碳酸盐岩储层的宏观分布规律有了全新的认识，实现了岩溶储层的定性预测。

由于这一阶段的处理解释技术均以叠后技术为主，资料潜力还没有得到充分发挥，许多地质信息还没有得到充分发掘，虽然钻井成功率提高到60%以上，但又陷入了缺乏可钻探目标的困惑之中。

三、岩溶储层定量描述勘探阶段（2006年至今）

这一阶段的主要标志是叠前（道集）处理及解释技术全方位应用于勘探开发储层研究。针对潜山岩溶、层间岩溶和礁滩相岩溶，地震技术应用于勘探开发的全过程。它始于2006年叠前处理解释技术的应用，直到如今全方位高密度三维勘探的工业化应用。在这一阶段，各种先进的处理、解释技术被不断引进、推广，并取得了很好的效果，推动了塔中、塔北的油气大发现。

其中2006—2009年属于定量勘探的初级阶段。2006年，中国石油天然气股份有限公司开始组织碳酸盐岩叠前处理解释技术攻关，拉开了叠前处理解释技术大发展的序幕（杜金虎，赵邦六等，2011）。在这一时期，处理技术从叠后偏移提升到叠前偏移，从叠前时间偏移提升到叠前深度偏移，从各向同性偏移提升为各向异性偏移，同时应用了克希霍夫积分法偏移、波动方程偏移、逆时偏移等多种方法，使得资料品质产生了质的飞跃。解释技术方面，不但发展出更加丰富的地震属性分析方法，而且在叠前弹性阻抗及AVO反演、叠后裂缝预测、各向异性裂缝预测、油气检测方面实现了从无到有的突破，大大提高了储层预测的精度以及油气检测的可靠性。通过这些技术的应用，针对碳酸盐岩的钻井成功率接近85%，促成了哈拉哈塘及塔中奥陶系的油气大发现。

2009年之后，定量勘探逐步发展到成熟阶段。在这一阶段，研究对象从缝洞体转为缝洞单元，研究重点从以溶洞研究为主转为裂缝、溶洞研究并重，研究内容从以储层预测为主发展为储层预测与油气检测并重，研究性质从定性—半定量预测转变为定量描述。其代表性技术包括全方位高密度三维采集、波动方程叠前深度偏移、缝洞储层定量描述等三项关键技术，是目前进行碳酸盐岩勘探的最有效的技术。本书重点介绍这一阶段的技术攻关成果。

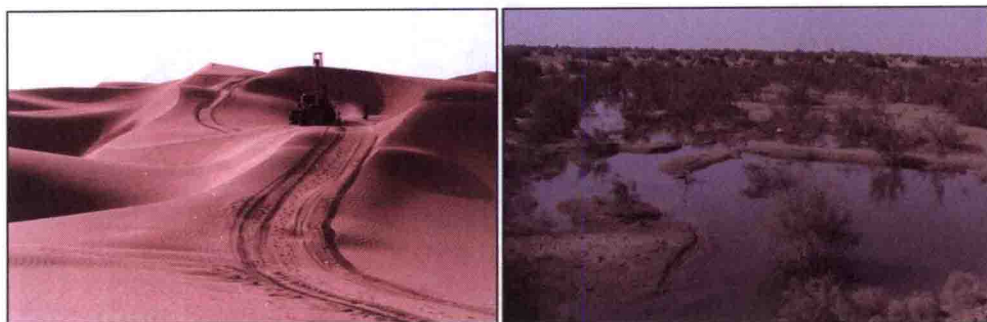
第三节 地震勘探难点

碳酸盐岩地震勘探的主要难点在于地震地质条件复杂、原始地震资料品质差（相对目标要求而言）、研究精度要求高三个方面。

一、地震地质条件

碳酸盐岩探区的地表类型可分为两大类，一类是沙漠腹地，以条带状、新月形、蜂窝状和复合型沙丘覆盖为主，部分低洼地段有红柳、胡杨等植被；另一类是塔北地区，以小沙、浮土、盐碱、红柳胡杨林、农田村镇为主，少量沼泽地表，地势相对平坦，但村庄、铁路、油田设施等地表障碍物非常多（图1-15）。从地表条件看，多数地区不利于地震信号的激发

和接收, 导致地震资料信噪比低, 分辨率低。沙漠腹地的表层地震地质条件尤为恶劣。



(a)塔中沙漠区照片

(b)塔北水网区照片

图 1-15 塔里木盆地塔中沙漠区及塔北水网区的现场照片

台盆区的大部分地区的近地表结构为两层结构。低速层的速度在 $250 \sim 700\text{m/s}$ 之间, 厚度受沙丘高度影响, 变化范围较大: 在沙漠腹地从 5m 到 200m 不等, 塔北地区一般在 10m 以内。低速层会对有效信号进行强烈吸收, 低速层厚度越大, 吸收作用越明显, 从而导致有效信号的能量降低、频带变窄, 造成信噪比和分辨率的降低。高速顶界面为相对平缓的潜水面, 速度一般在 $1600 \sim 1900\text{m/s}$ 之间。

从地下地质条件看, 岩溶储层的储集空间均以不同规模的溶洞、溶孔及裂缝为主, 具有极强的非均质性。地震研究的对象就是这些裂缝、溶洞组成的小尺度的缝洞体(串珠状反射)。这些缝洞体的平均埋深超过 6000m 。巨大的埋深造成目的层高频能量衰减严重, 有效反射能量弱, 尤其是内幕反射的信噪比及分辨率均比较低, 不利于储层精细预测及烃类检测。而串珠状反射的平均直径不超过 300m , 小尺度的目标对地震勘探的精度要求很高, 精细研究难度很大。

二、地震资料品质差

复杂的地表及地下地震地质条件, 使得地震资料信噪比低、分辨率低、静校正问题突出, 进一步加大了精细研究的难度。

(1) 信噪比低。由于复杂地表和巨大埋深的双重影响, 使得目的层的资料信噪比很低。如塔中地区的原始资料信噪比一般为 1 左右, 局部高大沙丘发育区甚至不足 0.2 (图 1-16)。低信噪比问题可以从弱信号和强干扰两方面来解释。弱信号问题源自两个影响, 一是由于地表疏松沙丘对信号的强烈吸收衰减, 二是由于超深目的层带来的超长传播距离。强干扰问题也源自两个方面, 一是由于疏松砂层造成的尾振, 二是由于起伏沙丘造成的散射以及高大沙丘造成的侧面干扰。由于有效信号能量弱, 这些干扰的存在将严重降低资料的信噪比。此外, 由于灰岩顶面强反射界面的屏蔽作用, 灰岩内幕的信噪比会变得更低。低信噪比将会影响有效信号的提取和分析, 不利于储层预测和油气检测。