

油气田地质工程丛书

计算机勘探技术

王志章 杨金华 吴欣松 张庆春 等著
葛君敏 蔡 毅 王福焕 范贵良

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以计算机技术在油气田勘探中的充分应用为主线，阐明了计算机勘探技术在现代油气田综合勘探中的巨大作用和地位。并以国家“九五”重点攻关课题《塔里木盆地计算机勘探技术》为依托，详细阐述了油气勘探信息管理数据平台的设计、研制、功能和特点；区带数值模拟评价技术、圈闭评价技术、油藏描述技术、粘弹性介质高分辨聚焦成像处理和小波变换技术的基本原理、软件实现、应用效果、相干数据体技术、神经网络技术、地质统计学分析技术、模式识别技术、储层预测技术、变速成图技术、计算机绘图等技术的实现过程和综合应用。

本书可供科研、生产部门的石油地质科技人员及高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

计算机勘探技术/ 王志章，杨金华等著.
北京：石油工业出版社，2000 12
（油气田地质工程丛书）
ISBN 7 - 5021 - 2831 - X

. 计...
. 王... 杨...
. 计算机 - 应用 - 油气勘探
. P618 130 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（1999）第 65722 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
河北省徐水县印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 294 千字印 1—1000 册
2000 年 12 月北京第 1 版 2000 年 12 月河北第 1 次印刷
ISBN 7 - 5021 - 2831 - X / TE·2214
定价：20.00 元

序

地质工程是集油气勘探地质、油气开发地质、油气评价及预测、环境地质、水文地质及工程地质于一体，具有极强的实用性、现场性、实时性的应用地质科学，是现代地质基础科学与应用科学有机结合的典范。

地质工程学科是各类工程学科中较特殊的学科，它除了具有一次性、系统性、严格的约束条件、明确的目标等一般工程学科的特征外，尚具有其特殊性：

(1) 地质工程的工作对象是特定的地质单元，这在各类工程中是绝无仅有的。在地质工程的运行初期，研究人员对地质单元的认识往往是不全面的，甚至是错误的。随着勘探开发工作的进展及研究程度的加深，人们的认识会逐渐接近实际，但认识与实际的完全统一通常是达不到的，这一点，决定了地质工程学科的复杂性。

(2) 地质工程具有极高的风险性。地质工程与其他工程相比，不仅具有较高的作业风险，更具有一般工程不存在的资源风险，其中地质工程立项、勘探开发部署、各类井位的确定是决定资源风险的三大关键环节。

(3) 同其他工程相比，地质工程的作业任务不是构筑新的物质系统，而是采集各种信息的资料，这些信息和资料是否丰富正确，直接制约着地质工程成果的可靠程度。

(4) 由于人们对地质规律的认识是随着勘探开发工作的进展而不断升华。因此，地质工程的计划和设计与其他工程相比具有很大的可变性。

(5) 地质工程作业和研究工作同时或交叉进行，这也是多数工程不存在的。

(6) 地质工程是多学科协同作业的系统工程，各种作业手段都具有成本高、风险高的特点，在工程运作中，各项作业需要紧密衔接，任何环节发生问题或出现脱节，均可能造成巨大的损失。

《油气田地质工程丛书》是石油大学（北京）油藏描述与预测研究所全体研究成员、历届博士、硕士生及其合作单位，十余年来，一直从事油气田地质工程方面研究成果的结晶，包括现代油气田综合勘探、不同勘探开发阶段油藏表征及预测、储层地质学研究及储层建模、测录井地质学研究、油气田勘探开发战略分析及经济评价，油气藏信息处理技术及油气勘探信息超级资料平台研制等。这套丛书共分《油气田地质工程》、《现代油气田综合勘探》、《测井地质学及测井地质工程》、《录井地质学及录井地质工程》、《地质系统工程分析与设计》、《计算机勘探技术》、《油气勘探信息集成技术》、《储层岩石物理相》、《油藏渗流地质学》、《现代油藏管理》十个分册。

相信它的出版，会对指导今后定量、高效地进行油气田勘探、开发起到积极的作用。

前 言

现代油气勘探已进入综合勘探阶段，计算机技术是综合勘探中必不可少的一项关键技术，该技术在油气勘探中的广泛应用，已成为现代勘探的一大特点。在遥感、重磁电、化探、地质、地震、测井、测试、钻录井等方面大量繁多的资料处理中，计算机技术发挥着越来越重要的作用。数据库及其配套应用软件，使多学科相互渗透、协同作业成为可能。各种应用软件的研制成功，实现了油气勘探综合化、程序化、定量化、关键环节自动化及研究成果最大限度可视化。

计算机勘探是一项内容宏大、难度系数高、经济效益好的系统工程，是综合勘探中必不可少的一项关键技术。该项技术在油气勘探中的广泛应用已成为现代勘探的一大特点。油气勘探成效的大小，计算机技术的应用起到了不可忽视的作用。在计算机油气勘探中，涉及的技术方法非常多，通常包括：测井、地震、地化、钻录井等信息的单项处理解释技术及盆地模拟、圈闭评价、油气藏描述、油藏模拟等多学科信息综合处理、解释、集成与显示技术。上述方法无疑在油气勘探开发中起着重要作用。

进行计算机勘探的重要条件就是建立多学科工作组。协同勘探多学科工作组的目的是使各种技术能更好的互相交流，密切配合，以使先进技术发挥更大的效率。Phillips 公司近年来一直把“协同勘探组”作为公司经营战略的重要部分，这种协同工作组，一般由地质、地球物理、油藏工程师、计算机人员等组成，还要吸收一些钻井生产及地面工程和管理人员参加。人员一般从十几名到三十几名不等。这种协同勘探工作组的效益是显而易见的。几年前美国国家石油公司对这种组织进行了试验，其结果协同组油气发现成本 4.13 美元/桶，不到大公司（8.97 美元/桶）的一半，探明储量是大石油公司的 2.8 倍，许多国家和石油公司还成立了多学科研究中心。其中于 1991 年 7 月成立的澳大利亚石油合作研究中心（APCRC）最有代表性。该研究中心的业务人员主要由地质学家、地球物理学家、岩石学家、同位素学家、无机地球化学家、石油工程师、油藏工程师、数学家、电子工程师及计算机人员组成。该研究中心具有多学科联合研究的巨大潜力。

进行计算机勘探的另一个重要条件就是有一批有协作精神的高层次的复合型人才，尽管现代化的计算机网络技术可以使不同的专业人员进行长距离的随时性的广泛交流。但在对复杂对象的研究中，如果一个人能掌握更多的知识则可在自己的大脑中随时完成“交流”，提高驾驭问题的能力。技术进步与革新也要求人的观念发生相应的变化，“小农生产意识”是无法同社会化大生产、大协作相适应的。这是当代科学的一大特点之一。特别是对于那些从事业务管理的人员来说，这种知识的意义就显得更加重要。在这种形势下，对于新型人才的培养也提出了新的挑战。美国 SPE1992～1993 年度 J Bosio 主席说：“将来我们应该拥有与目前我们所有大量的，在工作岗位上的石油工程师相比的，一种新型工程师……他们能领导一个包括地质家、地球物理学家、油藏工程师等组成的研究队，并能做出广泛的解释。每个石油工程师将比过去具有更多的多学科精神，这是我们将来的重点之一”。而这种新型的工程师只有最大限度地应用计算机技术，才可能实现这一目标。

本书以计算机技术在油气田勘探中的充分应用为主线，阐明了计算机勘探技术在现代油气田综合勘探中的巨大作用和地位。并以国家“九五”重点攻关课题《塔里木盆地计算机勘探技术》为依托，详细阐述了油气勘探信息超级数据平台的设计、研制、功能和特点；区带

数值模拟评价技术、圈闭评价技术、油藏描述技术、粘弹性介质高分辨聚焦成像处理和小波变换技术、叠前深度偏移技术、相干数据体技术、神经网络技术、地质统计学分析技术、模式识别技术、储层预测技术、变速成图技术、计算机绘图等技术的应用效果。

全书共分六章，第一章系统阐述了 90 年代以来，油气勘探中计算机在硬件、软件方面的发展和应用，阐述了数据库技术、Internet 技术、盆地模拟、圈闭评价、油藏描述等技术的发展现状及趋势。第二章主要阐述了勘探数据库系统设计、网络系统设计及建立、数据库建立及现代勘探数据库系统主要功能和特点。第三章则在简介区带数值模拟评价软件基础上，详细阐述了地史模拟、热史模拟、生烃史模拟、油气运聚史模拟及油气资源综合评价的基本原理、创新技术和方法。并以塔里木盆地满加尔下古生界含油气系统数值模拟为例，阐明了区带数值模拟用于石油地质定量评价的有效性。第四章则在阐述国内国外圈闭评价技术及软件发展现状基础上，系统阐明了圈闭评价所必须的配套技术，符合油田实际的圈闭评价软件的设计、功能、特点及实验区的应用效果。第五章则重点介绍了粘弹性介质地震波高分辨聚焦成像计算机技术，详细阐明了大地介质对地震波吸收和衰减的机理，粘弹性波动方程逆向外推公式及算法，小波多分辨反演方法及应用效果。第六章则在扼要阐述勘探阶段油藏描述目的、任务、内容及流程基础上，从构造、沉积、储层、油藏诸方面，对实验区油藏进行系统的表征和预测，并重点阐述了计算机技术在各个环节的充分应用。

本书的第一章由王志章编写，第二章由匡祥友、葛君敏编写，第三章由张庆春、石广仁编写，第四章由吴欣松、王福焕编写，第五章由宋守根、范贵良、匡祥友编写，第六章由王志章、杨金华、熊琦华、蔡毅、马晓芬编写。

全书统稿工作由王志章、杨金华、吴欣松完成。

本书是国家“九五”重点攻关课题《塔里木盆地计算机勘探技术》的高度概括与总结。该课题历时 3 年，参加研究工作的人员 50 余名，不能一一列出，甚为抱歉。

在本书的编写过程中，得到石油大学（北京）、塔里木盆石油勘探开发指挥部、北京石油勘探开发研究院等单位和个人的大力支持、帮助和指导，沈阳洋同志打印全文，在此一并致谢。

由于作者学识水平有限，书中不妥之处，敬请批评指正。

作 者

2000 年 12 月

目 录

第一章 总 论.....	1
第一节 计算机在硬件方面的发展和应用.....	1
一、大型机和服务器.....	1
二、工作站和 PC 机	3
三、发展趋势.....	3
第二节 计算机在石油勘探中的应用.....	4
一、油气勘探中的计算机.....	4
二、石油勘探中的应用软件.....	6
三、油气勘探中的数据库技术.....	9
四、Internet/ Intranet 技术及应用	10
五、盆地模拟计算机技术	12
六、圈闭评价计算机技术	13
七、解释性处理与深度成像	13
八、采集、处理、解释一体化及实时地震	14
九、数据集成及早期油藏描述	15
十、地震油藏监测及四维地震	15
十一、智能数据挖掘及人机和谐环境	16
十二、窗口技术	17
十三、计算机图形技术的应用	17
十四、人工智能技术的充分应用	17
十五、多学科协同工作和技术集成	18
参考文献	18
第二章 勘探数据库网络系统建立及应用	19
第一节 勘探数据库系统设计	19
一、勘探数据库系统总体结构	19
二、勘探数据库设计	20
三、勘探数据库管理系统设计	23
第二节 网络系统设计及建立	36
一、勘探数据库对网络建设要求	36
二、网络方案设计	36
三、网络系统建立	37
第三节 勘探数据库建设	38
一、数据整理与校对	38
二、勘探数据库的建立	40
第四节 现代勘探数据库系统主要功能的特点	42

一、有一套完整的勘探数据模型	42
二、有一套完整的勘探数据库管理系统	45
三、系统数据整理、数据录入和维护简单	46
四、有配套的应用软件	47
五、勘探数据库和各种应用软件研制开发是完全独立的	48
六、是一特大型分布式数据库，与 POSC 国际数据库有良好的兼容性，并具有良好 的可扩充性	49
第三章 区带数值模拟技术及应用	51
第一节 概 述	51
第二节 区带数值模拟评价软件	51
一、前处理程序	52
二、后处理程序	52
三、主程序	52
第三节 地史模型	52
一、回剥技术（正常压实带）	53
二、超压技术（欠压实带）	54
三、回剥与超压相结合的技术	55
四、正断层处理	55
五、古水深处理	55
六、平衡地质剖面	55
第四节 热史模型	58
一、R。法	59
二、AFT 法	59
三、古热流的非线性变化	61
四、统计法求今热流	61
第五节 生烃史模型	62
一、烃类成熟度史	63
二、生烃量史	65
第六节 排烃史模型	65
一、排油	66
二、排气	67
第七节 运移聚集史模型	69
一、二维三相（油气水）历史模拟法	69
二、三维二相（油气）历史模拟法	71
三、改进的现今流体势模拟法	73
第八节 综合评价模型	75
第九节 实例分析	75
一、满加尔下古生界成油气系统概况	76
二、地质模型及参数研究	78
三、模拟成果及地质分析	82

四、运移运聚史分析	86
五、成油气系统的配套史分析	89
六、有利区带综合分析评价	89
参考文献	92
第四章 圈闭评价技术及应用	96
第一节 圈闭评价应用现状分析	96
一、国内外圈闭评价技术发展现状	96
二、中国主要圈闭评价软件系统调研	97
第二节 圈闭评价配套技术	98
一、以扎实的地质研究为基础的区带评价技术	98
二、以油气系统理论为指导的圈闭地质评价技术	99
三、以系统论为评价方法的圈闭综合评价技术	99
四、以成藏模式与勘探条件为依据的圈闭评价模式建立技术	99
第三节 圈闭评价软件设计思路.....	104
一、软件开发运行环境设计.....	104
二、软件界面风格设计.....	105
三、软件系统结构与方法设计.....	105
四、软件的结构与功能.....	106
第四节 圈闭评价应用及效果分析.....	108
一、塔中探区圈闭评价.....	108
二、巴楚探区圈闭评价.....	110
三、库车坳陷圈闭评价.....	113
四、应用效果分析.....	115
第五章 粘弹性介质地震波高分辨聚焦成像技术.....	116
第一节 概 述.....	116
第二节 声波方程与地震勘探纵向分辨率.....	116
第三节 大地介质对地震波吸收和衰减的机理.....	118
第四节 粘弹性波动方程逆向外推公式及算法.....	120
第五节 小波多分辨反演 (M R A I)	121
第六节 理论方法的检验分析.....	126
第七节 应用实例.....	131
第六章 油藏描述技术及应用.....	134
第一节 概述.....	134
第二节 构造精细解释及圈闭描述.....	136
一、叠偏后地震资料小波分析.....	136
二、地震地质层位标定.....	138
三、人机联作交互解释.....	138
四、变速成图.....	140
五、圈闭构造描述.....	140
第三节 沉积相研究.....	142

第四节	关键井研究与多井评价.....	143
第五节	储层横向预测.....	145
一、	TZ16 - 161 井区、YTK 断裂构造带下第三系、白垩系储层预测	145
二、	碳酸盐岩储层地震预测.....	153
第六节	储层岩石物理相研究.....	154
一、	储层岩石物理相分类与描述.....	154
二、	储层岩石物理相的研究内容与研究流程.....	155
三、	TZ16 - 161 井区巴楚底砂砾岩段储层岩石物理相.....	155
第七节	储层随机模拟及预测.....	158
一、	储层孔隙度的序贯高斯模拟及预测.....	159
二、	储层渗透率的序贯指示模拟及预测.....	161
三、	储层含油饱和度的模拟退火模拟及预测.....	161
四、	结论及认识.....	162
第八节	油藏三维模型的建立.....	162
第九节	储量计算及油藏地质综合评价.....	163
一、	储量计算.....	163
二、	油藏地质综合评价.....	164
第十节	建 议.....	165
一、	TZ16 - 161 井区.....	165
二、	轮南低凸起奥陶系潜山碳酸盐岩.....	165
参考文献	167

第一章 总 论

第一节 计算机在硬件方面的发展和应用

进入 90 年代, 无论是大型机、服务器, 还是工作站、PC 机在技术上都有不同程度的突破。外围技术如: DRAM、磁盘存储等也都发展到一个新的水平, 其中 $0.5\mu\text{m}$ 半导体加工技术的广泛使用, 是推动各种计算机产品发展的原动力。

一、大型机和服务器

大型通用计算机 (MAINFRAME) 是综合反映一个国家或计算机公司发展水平的产品, 因此各国、各大计算机公司都非常重视它的开发和利用。美国政府在 1993 年制定了 HPC C (High Performance Computer & Communication) 计划, 重点发展大型计算机系统和高速通讯网络。日本的 RWC (Reality World Computer) 计划, 以及欧洲的“万亿次计算机计划”, 都是围绕着万亿次计算机的研制展开的。近几年巨型机的研制实现了以下两个方面的突破:

(1) 在计算机的结构上 MPP (包括 VPP, PVP 等多处理器向量并行机) 已经战胜了单向量处理机 VP 和共享式内存即 SMP 结构的并行机。由于各国的国情不同, 在研制巨型机的过程中所走的技术路线也是不一样的。日本在半导体加工工艺上有独到之处, 所采用的技术路线是 VP (单向量处理机) 方式, 其特点是在一个处理器芯片上作足文章, 尽量提高处理器芯片的处理能力, 目前单处理器计算机的能力可以达到每秒百亿次。就目前的工艺水平而言, 这种技术路线已走到尽头, 要想进一步提高是非常困难的。美国在结构设计上有独到之处, 所采用的技术路线是多处理器方式。目前无论是美国还是日本, 无论是标量处理器还是向量处理器, 都在沿着分布式内存的 MPP 方式 (即用成百以至上千个处理器芯片集成在一起的超大规模并行机) 并行地、协同完成计算任务。这种技术路线获得成功, 1996 年分别有两家美国公司的 MPP 和两家日本公司的 VPP 并行机实现了万亿次机的目标。

(2) CMOS 取代双极性半导体器件。在处理器芯片上也开始从双极性 (bipolar) 半导体器件转向互补型金属氧化物半导体器件 (CMOS)。传统的巨型机为达到最高的运算速度, 往往采用双极性半导体器件, 其开关速度可比普通 CMOS 器件快一至两个数量级, 代价是大电流、大功耗、集成度不高。近几年由于 CMOS 技术的改进, 解决了极间电容的存储效应问题, 使得开关速度大大提高, 工作时钟频率也上升到数百兆赫兹, 具备了逐步淘汰双极性半导体的实力, 加之并行处理技术的发展, 使得大型机对芯片的要求退到次要地位, 因此目前大型机的发展趋势是采用通用 CMOS 芯片。大型通用计算机制造商大多是世界著名的计算机企业, 主要有 IBM, NEC, UNISYS, BULL, 日立、富士通等。在技术上, 各主要的计算机生产厂商都推出了自己的更新换代产品, 为同迅速增长的 UNIX 服务器相竞争, 他们更强调其产品的可伸缩性 (Scalability)、卓越的性能 (extreme performance) 和性能价格比 (price/performance)。在可伸缩性上, 美国克雷公司 (Cray Research) 采用 PE (Processors Element) 阵列技术生产的 CRAY T3E 巨型机, 配置的处理器单元可以从 32 个直到

上千个，其中每一个处理器单元由 4 个处理器组成，其运算速度达到 600 megaflops，相当于每秒 6 亿次浮点运算的能力，而 CRAY T3E 的系统峰值运算速度则可从 5400 megaflops 直到 1800, 000 megaflops，相当于每秒执行 1.8 万亿次数学浮点运算。根据系统配置的大小，机器中的 PE 可执行不同的任务。美国的 INTEL 公司为表明其 PENTIUM PRO 处理器芯片的优越，在 1996 年 10 月为美国圣地亚哥国家实验室研制了一台用 9000 个 PENTIUM PRO 芯片组成的巨型机，其数学运算能力达到每秒 1.4 万次浮点运算。以勘探为中心的石油公司和研究机构是这些巨型机的主要使用者，以美国能源研究中心（NERSC）的机器为例，其主机为 CRAY T3E，机器的基本配置为 136 个 PE，其中 120 个 PE 用于并行处理应用程序，13 个为命令 PE，3 个为操作系统 PE，专门用于系统管理，每一个 PE 配有 256 MB 的内存。可以看出，CRAY T3E 在低配置时的能力只相当于一台高档工作站，而在高配置时，则可以提供上万亿次的运算能力，确实相当的灵活。据报道，莫比尔石油公司的勘探和生产研究中心也安装了一台 CRAY T3E900 巨型机，用于地震资料处理和油藏模拟，其运行速度相当于 3000 台个人计算机或 50 台 SGI 公司生产的 Power Challenge 并行机。

开放性差是 Mainframe 的一个致命的弱点。1996 年首先由 IBM 公司迈出了大型机向 UNIX 开放系统靠拢的步子。IBM 在 1996 年 10 月推出的 OS/390 Release2 中，已把由 X/Open 机构认定的统一的 UNIX 的所有 API 安装上去。这样，面向开放系统的许多先进的应用软件包，诸如 JAVA，Internet，Intranet 等就可以很好地在 IBM 的 SYSTEM390 大型机上运行。此外，IBM 公司还计划将流行的 WINDOWS NT 的 API 安装到 SYSTEM390 机上，使其改善与流行的开放系统的亲和性。据说已有 840 家独立软件生产厂家参与了为 IBM 的 OS/390 移植 UNIX 应用软件工作。

UNIX 服务器是随着 CMOS 技术和对称多处理技术的发展而发展起来的计算机系统。

UNIX 服务器的性能，尤其是运算能力越来越接近大型机，加之其固有的开放性，灵活性，系统价格的低廉，使得自 90 年代以来，在计算机界几乎众口一词地认为其必将最终取代大型机。一般认为，UNIX 机战胜大型机的两件利器中，一是价格便宜，二是开放，但在实际应用中，用户往往会发现，采用客户机/服务器方式在管理上的开销反而比大型机还大，在可靠性，工作效率方面则不如大型机。这就是大型机在近几年起死回生的基本原因。一般认为大型机的可用程度为 99.999%，折算成时间为每年停机 5 min，而最好的 UNIX 系统由于各种各样的原因停机每年至少也要 4h 以上，从中可以看出大型机与 UNIX 之间的水平差距，但对于一般用户来说，每年 4h 的停机是完全可以容忍的。

继美国 DEC 公司之后，SUN MICROSYSTEM 公司、HP 公司也都相继推出了基于 64 位处理器芯片的企业级服务器。这些处理器芯片除了一次处理数据的位数增加到 64 位外，还在并行处理、流水线、分支预测、容错能力和时钟频率等方面比上一代产品有了成倍的增长，这也为 UNIX 系统最终取代 Mainframe 打下基础。目前美国 SGI 公司、SUN 公司、DEC 公司都可提供超过 20 个 CPU 的企业级服务器，其运算速度高达每秒近百亿次，尽管与巨型机还有一定的差距，但对于一般的企业来说是绰绰有余的。

在究竟选择巨型机还是客户机/服务器结构这一问题上，各企业仍然有不同的说法。由美国一家公共调查公司的调查显示，35 个被调查的公司中，在过去的两年中只有 2 家公司完成了用客户机/服务器替代主机的工作，另外有 12 家计划在 3 年内完成这一转变，其余的不考虑转到客户机服务器结构上。在完成转变的公司中有一家叫做 Global Marine 的石油勘探公司已完全转到以 SUN 为服务器的网络上，运行 SYBASE、POWER-BUILDER 等软

件，供每台钻机上的 PC 访问。这一转变估计每月可为公司节省经费 126 万美元，效率提高 5 %。

二、工作站和 PC 机

工作站是介于大型机与 PC 机之间的计算机，其计算能力不如大型机，但比 PC 机强，最大的特点是图形交互能力很强，因此广泛地用在计算机辅助设计 (CAD)、地理信息系统、三维动画制作等领域。目前最流行的工作站大都采用 RISC 芯片，64 位的图形加速单元和大屏幕显示器，操作系统为 UNIX。工作站在技术上的最大进步是在 1996 年 4 月 5 日美国 HP 公司宣布了其新一代 64 位的 RISC 芯片 PA - 8000，它采用了超标量结构，可并行发送 4 条指令，同时还采用了无序执行策略，不按照程序的记述顺序，而是按最合理原则安排执行程序使运算速度达到新水平。该芯片采用比其他的微处理器芯片更多的函数执行单元和域外指令缓冲区，实现了低时钟频率下高运算速度。至此所有 RISC 芯片生产厂家全都开始了 64 位芯片的生产，可以说计算机的 64 位时代正式到来了。

随着 PC 机功能的迅速增强，其与工作站之间的差距正在缩小，尤其是 INTEL 公司新推出的 PENTIUM PRO 芯片，其内部集成了 550 万个半导体器件，运行速度达到 300 MIPS，能力与 80 年代的大型机不相上下。最近 INTEL 又宣布了将在该芯片中集成多媒体功能，这将使 PC 与工作站的功能界线进一步模糊，有的 PC 机生产厂家已提出了 PC 工作站的概念，其目标显然是对准工作站市场。

今后 RISC 工作站的发展方向是：

(1) 进一步扩充超标量基本结构，并将逐渐融入 VLIW (超长指令字) 技术。VLIW 的特点是一条指令 (128 位) 可以并行执行多个操作，使多个处理器可以对同一组寄存器进行操作，因此各处理器之间几乎不存在通讯延迟，从而提高了处理器的速度。估计不久的将来，即可推出能同时发送 68 条指令的处理器芯片。

(2) 提高主频。预计今后 5 年内，CPU 主频将提高 3 倍，达到 800 MHz 以上。

(3) 增大片上高速缓存容量。在目前使用 0.5 μ m CMOS 工艺的情况下，片上指令和数据高速缓存大多为 16 ~ 32 KB，预计到 2000 年，采用 0.18 μ m 工艺，高速缓存可达到 256 KB。

(4) 开发多 CPU 芯片。开发多 CPU 芯片已成为下一代微处理器并行处理结构发展的一个重要趋势。INTEL 公司在其微处理器长期发展规划中规划在 2000 年推出 4CPU 芯片，每个 CPU 中都含有一个专用浮点数值运算部件。

石油工业是工作站的传统市场，在现场数据采集、地震解释等领域有着广泛的应用。1984 年出现的交互地震处理技术和工作站具备了完成实时叠前和叠后处理的能力。工作站最适合现代测井数据处理解释，包括单井处理解释、多井处理解释、油藏描述处理解释、测井地质应用处理解释等。近几年的发展更使原来由大型机完成的工作改由工作站来完成，许多软件厂家也纷纷将大型机上的软件移植到工作站上，使工作站的能力日趋增强。

三、发展趋势

随着计算机网络的发展和上述工作站、大型机的进步，计算机集成油气勘探技术进一步成熟起来。在以网络为中心的计算机时代，地震现场、数据处理中心、专家办公室通过各种高速网络连接在一起，勘探专家、地质专家可以实时对地震数据、测井数据进行综合分析和

评价。由于数据仓库技术的发展，他们可以从成千上万的资料中检索出各种有用的数据进行对比，高性能的交互图形工作站则可实时模拟根据不同模型计算出来的虚拟地质图象，使人们能在更直观、更接近实际的环境中分析油气生成的规律，这将是今后计算机在石油工业应用中的主要发展方向。

第二节 计算机在石油勘探中的应用

近年来油气计算机勘探技术进步突出表现在：微型机和工作站的普及；大规模并行机及工作站网络的发展；存储与数据管理技术的进步；软件集成平台与应用软件互操作性规范的建立。信息集成勘探技术，特别是油气勘探计算机应用中的解释性处理与高精度深度成像技术，采集、处理、解释一体化与实时地震技术；数据集成与早期油藏描述技术，地震油藏监测和四维地震技术，以及数据挖掘与人机和谐界面技术，正在迅速发展之中。

1996 年是世界上第一台现代数字计算机诞生 50 周年，也是发明地震数字处理技术 14 周年。近半个世纪以来，计算机应用技术经历了三次发展浪潮，即：

- (1) 主机中心时代 (50 ~ 70 年代)；
- (2) PC 机及工作站中心时代 (80 ~ 90 年代中)；
- (3) 网络计算中心时代 (90 年代中至目前)。

油气勘探技术，也经历了三次比较大的飞跃：

- (1) 二维地震与测井 (50 ~ 70 年代)；
- (2) 三维地震与油藏描述 (80 ~ 90 年代中)；
- (3) 信息集成勘探 (90 年代中至目前)。

这里的三次发展浪潮和三次技术飞跃的阶段划分，是参考了 IBM 公司和兰德马克公司的提法。不管这种划分是否全面，可以肯定的是：我们正进入技术飞跃的新时期，现代信息技术计算机软件革命，对未来油气勘探将发生难以估量的影响。

一、油气勘探中的计算机

1. 微型机和工作站的普及

近 10 年间，油气勘探应用计算机一个十分突出的特点是微型机和工作站迅猛发展和普及。特别是 1984 年推出商品化交互地震解释系统，1987 年推出交互地震处理系统，1994 年推出交互地质解释系统，标志着以往由大型机垄断时代结束，微型机和工作站已普及到油气勘探各个应用领域。

现代高性能工作站，采用精简指令系统 (RISC) 技术，其运算速度每 5 ~ 6 年上升一个数量级。DEC 公司的 Alpha 芯片，IBM 公司的 Power PC 芯片，SGI 的 MIPS 芯片，SUN 公司的 Sparc 芯片，HP 公司的 PA - RISC 芯片，都在不断大幅度提高性能。目前新一代芯片发展目标是主频 500 MHz，而每个周期可处理 6 ~ 8 条指令。例如，SUN 公司市场策略也有变化，以 Ultra Sparc (US) 芯片为基础，提出高性能计算 (HPC) 策略。1995 年已推出 US1，167 MHz，每秒 3.34 亿次浮点运算，相当于以往石油界用的巨型机 CRAY YMP 1；1996 年 US2，达 250 MHz；1997 年 US3，500 MHz，每秒 10 亿次浮点运算，相当于 CRAY C90 - I。

工作站不仅运算速度高，内存也很大。DEC 推出 64 位的 Unix 操作系统，支持超大型

内存 (VLM) 技术, 内存已达 14GB (即 140 亿字节)。VLM 对于 Oracle 数据库应用, 数据仓库, 联机交互处理已显示出了卓越性能。

2 大规模并行计算机和 workstation 网络的发展

油气勘探需要非常高性能计算机。目前, 多 CPU 超级服务器提供高性能、低成本计算能力。例如, SGI 公司利用 MIPS R10000 超标量数据流技术; 提供如下型号系列:

- (1) L: 2 - 12 R10000CPU, > 46 亿次浮点运算/s;
- (2) GR: 2 - 24 R10000CPU, > 93 亿次浮点运算/s;
- (3) XL: 20 - 36 R10000CPU, > 140 亿次浮点运算/s;
- (4) 阵列: 2 - 288 R10000CPU, > 1120 亿次浮点运算/s。

这里, 值得注意的是, 由高性能 workstation 组成的网络 (称 NOW) 或阵列, 是一个重要发展方向。有人认为, 在 1984 年, 油气勘探主要由大型机和向量机为主, workstation 和微型机崭露头角; 1994 年大型机和向量机已接近消失, 被微处理器芯片组成的大规模并行机发展取而代之; 到 2004 年 workstation 网络可能成为主流。

目前大规模并行机追求的目标是万亿 (Trillion, 10^{12}): 每秒运算速度 1 万亿次以上, 以及 1 万亿字节存储能力和数据通信能力。IBM 公司正在制造世界上最快的计算机, 称为 Option Blue 计划, 每秒 3 万亿次, 由能源部投资 9300 万美元。这是 4096 个 CPU 组成的大规模并行机。

3 存储和数据管理技术的进步

在油气勘探领域, 大规模并行计算机主要用于地震数据处理, 特别是三维叠前深度偏移。对于这种应用领域, 除了计算速度外, 大容量存储技术也十分重要。如机器人磁带库, 24h 自动操作; 磁盘阵列, 高传输率、高可靠性, 简化系统管理等。Ampex 推出低价格机械手磁带库, 改善性能价格 LKIDST110 磁带机支持 25GB 盒式带, 与 DST810 自动磁带库配合。存储与输入输出技术进步使信息传输、存储、利用发生了一系列变革。

石油信息 (PI) 公司宣布了一种多平台数据管理系统 P2000, 具备易于使用的客户/服务器体系结构, 可用于勘探开发数据快速加载、浏览、编辑、作图、报表、输出。Geco - Prakla 推出了 SmartVue, 可以实时地浏览 Geco 的三维仓库, 可以扫描区域网络, 解释感兴趣区域。兰德马克公司和 QC Data 公司合作, 联合开发软件, 提供企业范围内数据存储和存取环境, 有助于对待石油工业数据爆炸问题。IBM 和 PGS 合作, 建立数据银行。PGS 打算在全世界范围拥有和操作石油数据存储技术, 并与科学应用国际公司和 PGS 的 Tigress 系统结合, 把 Sybase 产品连接到勘探开发专门应用软件及数据管理工具。

这里介绍 PGS 的数据银行 GeoBanking。其目标包括:

- (1) 每年加载和存储 6 ~ 10TB (万亿字节) 数据;
- (2) 每天加载和存储 50GB 数据;
- (3) 维护数据完整性和安全性及使用资格;
- (4) 通过高速网络及工业标准介质分布数据。

其数据管理考虑了联机 (On - line), 近机 (Near - line) 和脱机 (Off - line) 存储, 如表 1 - 1 所示。

近年来三维数据管理技术重要突破之一是地震数据压缩, 目前可靠压缩比可达 1 : 100。这使得可能更有效地管理万亿字节级数据体。地震数据压缩对传输、处理、解释具有很大影响。从采集队到处理中心当天可传送整个数据集。在工作站环境下也可以存放三维叠前数

据。技术进步有助于加速从采集到最终解释周期。

表 1 - 1 数据管理表

存储分级	联机 On - line	近机 Near - line	脱机 Off - line
数据类型	工作 站数据	工作 站数据 偏移数据 叠加数据	叠前数据 野外数据 导航数据
存储系统	磁盘	自动带库（机器人）	归档磁带（带架存储）
存储量	10 ~ 1000GB	10 ~ 50TB	100 万盘以上 “ 3480 ” 磁带

4 软件集成平台和应用软件互操作性规范的建立

工业界从 90 年代初就提出共同研究信息集成技术和建立软件集成平台标准。1990 年，由美国、欧洲五大石油公司发起成立“石油开放软件协会”，POSC，目前已有超过 120 个会员单位，包括了世界上主要油气公司和计算机公司，以及许多服务公司、大学、研究机构。

POSC 主要目标是建立、维护并推动石油工业上游信息共享的技术标准。其中第一优先是 Epicentre 数据模型；第二优先是互操作标准。POSC 软件集成平台（SIP）是指应用软件及运行环境（数据，用户，系统软件及通信）之间的接口。经过几年的努力，POSC 已推出勘探开发中心数据模型，Epicentre2.1 版本，数据存取与交换（DAE）规范，应用程序间通信（IAC）规范，以及基础计算机标准。工业界已广泛使用这些标准。

关于应用软件互操作性，工业界基本要求包括：

- (1) 任何时间、任何地点存取信息和应用软件；
- (2) 连接广大机构，促进协同工作，支持动态组织机构；
- (3) 使程序和信息成为有价值资产。

一些主要石油公司对应用软件互操作性级别提出了划分意见，如 Shell 公司分四级：共存、桥接、静态、动态；Chevron 公司四级：桥接、数据共享、事件共享、对象共享。

油气勘探软件集成，可以分四个层次：

- (1) 显示集成——用户界面提供存取应用功能一致的视觉感观；
- (2) 数据集成——共享公共数据模型和信息；
- (3) 控制集成——应用软件相互影响并提供服务；
- (4) 进程集成——可用进程模型或其他方式指导进程间合作；

二、石油勘探中的应用软件

众所周知，在遥感、重磁电、化探、测井、地震、钻录井等方面大量繁多的资料处理中，计算机发挥着越来越重要的作用。各种应用软件应运而生，如 Landmark 公司研制的以 Windows 为基础的综合对比、剖面作图一体化的 Starwork 系统。Stratamodel 公司开发的 SGM，GTM，Stratamap，Stratasm 系统等地层模拟软件。Dynamic 图形公司开发的综合二维、三维空间技术进行复杂地质关系的制图、模拟、图形处理以及分析系统等工作。Earth Vision AMOC 公司研究中心研制的以岩心分析与评价为主的地球科学评价——GEM 软件及完成区块成本分析的 Risk 系统。Platte River Associates 公司开发的一维、二维盆地模拟软

件。

英国威特国际有限公司 (V & T INTERNATIONAL, INC) 推出的目前世界上评价断层封堵性最先进的软件 FAPS (Fault Analysis Projection System), 它综合利用地震、测井和地质资料, 并在软件工作流程的前期对地震资料解释的结果进行校正, 从而保证了后期对断层面封堵性评价的正确性。同时, FAPS 软件将地质 (断层封堵性) 的概念模型和地球物理 (地震, 测井) 数值模型进行了有机的结合, 并以断层两侧地层的接触关系、涂抹因子、断层泥比率、断层两侧地层压力差等为主要评价依据, 建立了对断层面封堵不均一性进行综合定量评价的方法, 为石油的勘探开发提供重要的依据。FAPS 软件的主要特点包括:

- (1) 首创断层面岩性并置接触的三维立体图像;
- (2) 可定量评价断层面封堵的不均一性;
- (3) 操作简单、方便、易掌握。

FAPS 软件从 1989 年 10 月推出 1.0 版本到目前的 3.0 版本, 在不到 10 年的时间里, 使用户迅速发展到 80 多家, 遍布 17 个国家和地区, 世界上大多数著名的石油公司都在使用 FAPS 软件, 其中包括 SHELL, TEXACO, MOBIL, AMOCO 以及 BP 等公司。

美国 GeoGraphix 公司 (Landmark 子公司) 在微机及 Windows 环境下开发的综合数据管理及油藏图形绘制系统 GES (GeoGraphix Exploration System), 可以把地质、地震、测井资料综合在一个平台上统一管理、统一绘制高精度的图形。

GES 由八大模块组成: 人机交互的图形及编辑系统、地质地理信息管理系统、租赁信息管理系统、井数据库管理系统、地震数据库管理系统、绘图及建模系统、数据采集系统以及连井剖面、地质剖面 and 地震剖面。这八大模块基本满足了地质学、地球物理学、地理学、石油工程和土地管理等方面的不同需求。它可以对地理信息、地质数据、地震数据进行分析和处理; 可制作各种类型的等值线图 and 地质剖面图, 还可把地质学家的认识结合到绘图中, 并可通过井数据校正地震解释结果。GES 可进行构造类型和有效圈闭的确定, 同时还可以进行有效圈闭面积、体积和储量计算。GES 软件的主要特点包括:

- (1) GES 是一套功能齐全的石油地质图形数据库管理系统, 可以把勘探与开发信息 (如平面图、井位图、井眼描述图及施工图等) 有机结合, 编制各类复杂的石油地质图件;
- (2) GES 的数据与图形的动态连接, 建立了数据库和图形之间的联系, 使其可以进行快速的数据查询;
- (3) 地质数据库和地震数据库对数据的管理具有极强的针对性, 通过有条件的索引, 使用人员可以方便地提取目标数据;
- (4) GES 对工区的管理灵活方便, 通过鼠标拖拽和数据输入两种方法可以方便的提取研究人员所需要的研究区域;
- (5) GES 系统可以吸收地质学家、地球物理学家和油藏工程师的经验和认识, 进行图形绘制, 使所绘制的图形能更好地反映实际地质情况;
- (6) GES 系统可以利用钻井资料对地震解释结果进行再标定和校正;
- (7) 与 NDS/ MAP (图形数字化软件) 的数字化成果数据全方位兼容。两套软件的有机结合使得油气勘探开发研究工作中的中间成果图件和最终成果图件能做到快速更新与数字化保存。

我国大庆石油管理局、胜利石油管理局、北京石油勘探开发科学研究院和中国海洋石油勘探开发研究中心也都开发了自己的盆地模拟与油气资源评价软件。在地震资料处理解释方

面功能齐全的软件有 Land - mark 的 3DVI, Geoquest 的 IESX 和 Haliburton 的 AIS - 3D 等, 以及我国物探局研制的 GRISYS 等。在测井方面享有声誉的解释程序有斯伦贝谢公司的 EIAN, 哈里伯顿公司的 ULTRA 和阿特拉斯公司的 OPTIMA, 中国各油田及石油大学等在测井解释软件方面也都做了许多研究开发工作。最近原中国石油天然气总公司有计划、有步骤地进行应用软件的建设, 进行 5 个软件平台的规划。目前已开发的有油藏描述、盆地模拟、油气勘探规划计划决策软件、圈闭评价和勘探生产管理系统。石油大学(北京)油藏描述与预测研究所开发的测、录井综合处理解释软件平台、油藏信息数据处理软件平台也已应用于多个油田的勘探与开发生产中。

90 年代的石油工业是个多学科相互渗透、多学科联合攻关的石油工业, 90 年代的计算机硬件功能不断提高, 由于标准化数据模型的应用和开放式的软件平台, 使石油应用软件开发技术及应用水平有了大幅度提高。90 年代的石油应用软件有以下几个特点。

1. 综合集成

就勘探、开发而言, 现在各石油公司竞相研制包括地震、测井、钻录井、油藏描述、油藏数值模拟、经济评价等软件综合集成的应用软件系统, 建立统一的系统开发平台。这种综合性勘探开发软件系统对全面分析油藏及工程资料, 提高勘探开发效益起到了举足轻重的作用。如莫比尔公司的多学科组借助新型的计算机辅助勘探开发软件, 对老油田进行综合研究, 使已开采 80 年的老油田——SVT 至少增寿 20 年。菲娜(FINA)公司使用综合性勘探开发软件系统分析得克萨斯州油田的复杂地层及构造, 配合三维地震, 成功地进行了开发钻井和寻找新储量的工作。

2 各专业软件向纵深发展, 应用日益广泛

石油应用软件在向综合集成方向发展的同时, 各专业的应用软件也在向纵深方向发展。如从二维、三维油藏模拟到细分网格的油藏精细模拟; 从单一井网、单一驱替类型到集多井网、多驱替类型(如对存在水平井、直井和聚合物驱的油田模拟)于一体的油藏模拟软件; 从二维、拟三维、真三维压裂设计软件到目前的三维实时压裂模拟软件等等, 都在向着纵深发展。

3 并行软件是石油软件的一个发展方向

前面已经提到, 并行机的出现为石油工业的大型计算机开创了新的前景。然而, 并行机只是硬件而已, 若没有好的软件, 它无论如何也发挥不了作用。目前一些石油公司和软件开发公司看准这个机会在并行软件的开发方面上大下功夫。目前几乎所有功能强大的计算平台应用的都是并行处理技术。

4 多媒体技术在石油应用软件中得到广泛应用

目前的软件可以对三维物体进行各种制作、平移、缩放、旋转、造影等几何变换, 在石油方面可以把地质、地球物理、岩石物理、钻井、油藏工程等资料同时显示在三维地质模型中, 使多学科的工作人员很方便地进行各种角度的观察与分析。目前三维动态监测、实时动态显示技术都在石油软件中得到应用。

5 人工智能用于油气田勘探软件

专家系统早在 80 年代中期就在油田勘探等软件中得以应用, 近年来神经网络在圈闭描述、油藏表征、地球物理等领域的应用也初见成效, 预计其应用还会越来越广, 智能软件的开发, 也将是石油软件发展的一个新方向。

计算机技术的发展大大推动了石油开发技术的发展, 预计以计算机为中心的信息技术在

石油开发中的应用将越来越广，作用也将越来越大。

三、油气勘探中的数据库技术

几十年来，世界范围内油气勘探工作的发展得益于设备技术和数据采集分析技术两个领域的进步。每一个领域内的进步都导致了新一轮国际油气勘探的热潮。

由于过去 10 年内几乎没有重大的油气发现，这使得数据的采集和分析变得更加紧迫以便从现有的油田中增加产量和储量。其结果是数据的采集量和分析处理工作量剧增。调查表明，即使在现有的技术环境中，石油地质勘探开发研究人员仍要花费 60 % ~ 80 % 的时间收集和用于分析的资料数据。而仅有 20 % 的时间用于他们所专长的分析与解释工作。造成这种现象的原因是由于绝大部分数据不是自动化管理的，或者没有很好地索引，或格式不当而不易被计算机使用。

虽然石油公司在数据的存储和管理上每年都要投入大量的费用，但是他们现在十分清楚，他们的优势在于油气的钻探和生产，而不是数据的存储管理。由于数据存储管理不合理，每个勘探开发项目要为此增加 14 % 的费用支出。

为了降低成本和减轻这种无效的费用支出，出现了一种国家和区域范围的“数据仓库”和数据中心。各个石油公司也已经认识到，与其维持独占的综合数据信息系统，不如将它们的绝大部分数据汇集到公共数据库中，从而分享计算机资源，分摊服务费用。

为了适应不同的市场特点，“数据仓库”的形式各不相同。在北海，各作业公司和政府机构合作建库；在挪威的作业公司开发研究贯穿一个油气田勘探、生产全过程的标准数据模型和相应的信息管理系统；各国家石油公司建立“数据仓库”以满足国内的需要。

以在挪威成立的 DISKOS 集团为例。目前该集团已包括 13 家石油公司，他们组建 PetroBank 系统处理和分享挪威大陆架油气数据。这个方法一方面采用先进的重组加载技术将数据放入一个公共的数据集中管理，另一方面，这种方法必须基于各石油公司自愿放弃在数据占有方面的竞争，而代之以数据分析和解释方面的竞争。

目前 DISKOS 集团以每天 15G 字节的速度向数据库内加载挪威海上 $200 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的三维和 $12.5 \times 10^4 \text{ km}$ 的二维地震数据。总的数量约 6000G 字节，包括地理、导航、经过处理的地震剖面、地层速度和测井曲线等数据。这个系统具有在地理图上显示全部石油数据的图形界面。数据加载完成之后，集团的成员就能通过高速远程通讯线访问 PetroBank 的数据。下一阶段 PetroBank 将加载油气生产、地质和解释方面的数据。

估计 PetroBank 系统完成后，将为它的每个成员节约 50 % 的数据管理开支。由于这个系统中的数据结构与 POSC 标准高度兼容，使得它很易于在其他应用软件和硬件平台上得到应用，也利于其成员公司组建他们自己的数据库。

石油勘探开发生产数据库所面临的最大问题是它的数据模型结构过于庞大和复杂。它包括庞大的属性文件，例如井和生产数据；庞大的矢量文件，如地震数据；庞大的影像文件，如卫星图片；大量的文献、图件和报告等。这导致石油数据模型结构极其复杂，因为它必须满足每个应用领域的需求，这就影响了数据管理的效果。因此，这个问题必须根据数据管理的目标加以均衡。标准化研究可能有助于某些系统的运行，但这是一项十分困难的工作。

目前，石油开放软件公司 (POSC) 和公共石油数据模型协会 (PPDM) 提供标准石油数据模型。POSC 定义了内容广泛的面向对象的逻辑数据模型，并且被用于管理油气田数据。1996 年 8 月 Sybase 公司和 Prigm 技术公司推出了第一个在关系数据库上完全支持 POSC

Epicentre 勘探开发数据模型的应用编程界面 Epicentre Access。但至今这个数据模型还没有得到广泛的应用。PPDM 已经完成了钻井、生产、土地租让和地震等油气勘探开发主要数据领域的物理关系数据模型。由于这一模型易于使用，从而在商业数据库产品和公司数据库系统中得到了广泛的应用。目前在 POSC 和 PPDM 的支持下，一些作业公司和厂商开始了一个称为 Discovery 的项目。该项目采用 POSC 数据模型生成一个能被 PPDM 接受的物理关系模型。预计这两个数据模型的合并将会产生积极的效果。但这仍需要花费大量的时间和投资。

1996 年 12 月，Informix 软件公司在纽约 DB/ Expo 展会上展示了面向对象的关系型数据库 Universal Server。这是各个数据库管理系统厂商计划推出的一系列面向对象关系型数据库管理系统的第一个产品。Informix 介绍 Universal Server 时，指出它可以使客户的应用性能提高 10 ~ 1000 倍，支持时间序列数据，适于处理数据类型多样化且不标准的油田数据（Informix 希望有更多的用户利用 Universal Server 的强大功能，目前该公司正协助北京大学开发中文全文数据库检索的 DataBlade）。

目前为解决数据管理问题的技术大都已经存在，但是在未来数据管理领域中，数据管理的实际操作过程具有更重要的地位。

在过去几年中，国际互联网（Internet）和环球网浏览器技术的飞速发展对石油信息管理学产生了巨大的影响。

受 Web 网发展的影响，各数据库厂商及相关专业软件厂商纷纷推出支持 Internet 的产品，例如 Informix 公司现在提供一个叫做 Web Data Blade 的产品，帮助用户从客户机/服务器体系结构转向 Internet。Oracle 公司也推出了 Oracle Web Server，支持各种浏览器访问 Oracle 数据库。ESRI 公司最新推出在 MapObject 软件上的 Internet Map Server，推出 ArcView 上的 Web Server 产品，使用户能通过浏览器访问服务器上的地理信息图形数据库。

当今，几乎每个公司、大学、组织机构都出现在环球 3W 网上，其中包括许多石油上游的勘探开发公司和服务公司。但是值得注意的是：这些 3W 页中的绝大多数都是定期或不定期发布更新的静态信息。基于 3W 的 JavaScript 和 Java 语言的出现，增加了这种浏览器在科学运算和事务处理方面的功能和利用，增强了它的交互性。例如 Phillips 石油公司已经在公司内部通过 Intranet 运行某些石油工程应用软件。虽然目前这种数据分析运算处理还处在非常低级的阶段，；因为基于 3W 的语言具有更好的可移植性和通用的界面，这一方面将极大地降低软件公司的软件开发费用，另一方面也将大幅度地减少用户培训费用的支出。随着 3W 软件工具的迅速发展，可以期望在不久的将来，石油工业将在 Web 上运行大规模的数据库和三维图像软件。

四、Internet/ Intranet 技术及应用

1995，1996 年，Internet 浪潮席卷全球。从计算机、信息业界人士至一般团体、个人都在谈论 Internet 这个热门话题。Internet（国际互联网）最早是 70 年代由美国军方为科研和国防的需要而研制的。其目的即是为解决各计算机网络（WAN 或 LAN）互联时的不兼容性及各厂家的计算机相互不能通信的问题。

经过研究人员的几年努力，通过互连各个计算机网络及在连到 Internet 上的每台计算机上运行 TCP/ IP 通信协议软件，实现了互联网上任意一台计算机能与另一台计算机通信（不论它们的型号和操作系统是什么）。加之对 Internet 项目研制中所有技术文档资料的公开，

使 Internet 成为一个真正的开放系统，为其后来发展为全世界最大的、最权威的一个计算机网络奠定了基础。

Internet 先是将美国的军事用计算机连到网上，接着又将美国的科研部门、大学里的计算机连上，为美国的科学家、研究人员、大学教授及时地相互进行成果交流、协同工作提供了很大的方便。随着 Internet 步入商业化，它在全球得到了迅速的发展。尤其是近两年来，随着个人计算机的普及应用和以 Navigator 为代表的 W W W 浏览器的出现，Internet 更是呈爆炸式地发展。

到 1996 年底，Internet 上已经连接了 3 万个网络、6000 万台主机、6000 个图书馆和 1 万个联机数据库，进入了 156 个国家，拥有 4000 万个用户，它的用户还以每年增长 39 % 的速度在扩展。尽管 Internet 的规模越来越庞大，但其采用的技术却能使它照样运行得很好。使用 Internet 最大的优点就是为人们提供了非常便宜且功能强大的通信服务平台，打破了时空的界限，缩短了人与人的距离。利用这个平台，人们现在可以进行全球范围内的电子邮件、打电话、发送传真、开视频会议、发布或访问电子信息乃至电子商贸等活动。

在未来，Internet 必将促进整个工业结构、整个社会发生根本的变化。

目前，在 Internet 提供的各种信息服务中，W W W (world wide web) 浏览器服务是最流行且通信量占到最大的一种。它起源于改进 Internet 上庞大信息资源的访问方式。

W W W 建立在客户/服务器模式上，是一种可以把存放于不同地点众多计算机上的信息链接在一起的机制。使用 HTML (超文本标识语言) 组织 W W W 服务器 (也叫 Web 服务器) 上的信息页，建立超文本链接。使用 HTTP (超文本传输协议) 作为 W W W 客户浏览器与 W W W 服务器之间的通信协议。使用 URL (统一资源定位器) 来标识某一特定信息页。

用户浏览 W W W 信息时，只需用鼠标在浏览信息页上被醒目化显示的短语 (超文本特征) 上轻轻一点即可获取相应的参考条目 (或叫文档)，该条目可能是纯文本、图形的显示，也可以是预先录制好的声音、视像的播放，后者需要用户使用多媒体计算机。

W W W 除了它的可视化展现信息的能力，还包括了其他几种信息服务 (如电子邮件、文件传输、远程登录、网络新闻等) 在内，故 W W W 几乎成了 Internet 的代名词。

世界各地的部门、组织纷纷在 Internet 上建立 Web 服务器、制作自己的主页 (Homepage) 或出版内容丰富的 Web 页，供大家访问。除做宣传以外还可提供咨询服务等。

访问者可以通过这些 Web 服务器的网址访问也可通过浏览器提供的其他方式来访问。围绕 Internet 的新技术还在不断涌现，令人目不暇接。例如，现正在成为 Internet 上通用的软件开发语言——Java，以其具有的更好的面向对象性、与操作平台无关、动态性、多线程、可靠性、安全性等特点，而对传统的编程语言 (包括 VB, C++ 在内) 提出了革命性的挑战。用 Java 编写的程序可以通过 Internet 网在不同地方的不同机器上执行，没有移植性问题。故现在全世界转用 Java 编程的人已达到了相当的数量。各个 W W W 浏览器中，也都竞相加上 Java 功能，使得 W W W 功能更强、更具活力。W W W, Java 还有网络计算机 (NC) 的出现，正在使前几年 Wintel 模式的统治地位开始动摇。Internet 互联网技术带给企业的变化也将是巨大的，特别是那些跨国度、区域广、分支多的企业，更可以尽享 Internet 技术的好处。1996 年 Network World 对 500 家企业进行调查得到的有关 Internet 应用状况的数据表明。83 % 将 Internet 用于通信——E-mail 和文件共享 78 % 将 Internet 用于科研——访问电子信息，55 % 每天要多次访问 Internet，大多数情况下每次会话时间为 5 ~ 30 min，

54 % 担心在 Internet 上交换信息的安全性正是出于对 Internet 上安全性的考虑, 近一年来, “Intranet” 一词已成为企业的常用词。所谓 Intranet, 即是采用 Internet 已成熟的技术和设备, 建立企业的内部网。其特点为: 简单易用、见效快、有效保护企业内部信息、维护成本低廉且回报率高 (不久前 IDC 的调查表明, Intranet 的回报率达到 1000 % 以上)。Intranet (企业内联网) 与 Internet (国际互联网) 之间还可以无缝地连接起来, 从而使企业内部信息的发布、交流与外部信息的及时获取有机地结合起来, 为企业的经营决策以及积极参与市场竞争等带来巨大的好处。但在企业内联网与外部之间要建立一个能有效地防止 Internet 上的 “黑客” 窃取本企业的内部信息和破坏企业的数据的安全防火墙 (Firewall)。据 IDC 的报告指出, 美国企业采用 Intranet 的比例已高达 46.6 %, 其他许多企业也都打算在三年内建立自己的 Intranet。又据 Zona 公司的调查和预测, 1996 年 Intranet 市场 (包括硬件、软件及服务) 达 60×10^8 美元, 1997 年达 121×10^8 美元, 1998 年为 198×10^8 美元, 1999 年为 284×10^8 美元。要远远大于 Internet 市场。构建 Intranet 现有两种办法: 一是企业自行购买 TCP/IP, HTTP 通讯协议软件、浏览器软件以及开发平台 (例如 Java) 等构建企业的 Intranet, 这种方案的优点在于价格较为便宜, 系统的安装较为灵活方便; 另外一种办法就是直接购买 Lotus 公司的 Notes。Notes 是世界最先进的软件平台, 且对 Internet 和 Web 标准全面支持。目前世界上很多企业都是 Notes 的客户。

五、盆地模拟计算机技术

盆地模拟经过近二十年的发展取得了长足的进步。如今在西方先进国家, 盆地模拟不仅仅是油气资源评价的工具, 更重要的是已成为油气地质勘探阶段常规地质分析的必备技术。

就世界范围来说, 目前各地利用盆地模拟的水平不同, 有一维、二维乃至三维的, 但是, 大多数模拟是一维的。

一维模拟的主要优点在于用户能用实测数据校正模型, 因而增加了模型假设可行性的可信度。一经校正后, 勘探家就能修改模型用来近似表示其他地区的地质情况。

一维模拟的局限性在于对特定位置来说, 计算是独立的, 井和井之间需内插, 它能进行单井的生烃量与排烃量计算, 但不能进行烃类的运移、聚集及全盆地的模拟。

二维盆地模拟近几年也比较普遍, 其研究重点是排烃史和运聚史。运聚史是盆地模拟的最终目标, 但仍是当前盆地模拟中最薄弱的环节。解决该问题的关键之一是加强油气二次运移的方法研究。

90 年代壳牌石油公司已开发出一项专门进行盆地模拟的计算机系统, 以帮助人们了解和模拟石油与天然气的生成、运移和聚集。该软件包可以用来解决以下问题:

- (1) 模拟研究盆地中的地层;
- (2) 在只有少量钻井和地震资料不足的地区, 预测生、储、盖层的分布与组成;
- (3) 预测地质时期油气的数量和聚集方式。

尽管这只是一个二维模型, 但是实践已经证明, 该模型在模拟油气运移和聚集方式方面是很有用的。由于它提供了验证各种假设的方法。因此这类模拟软件包有可能成为将来进行远景评价的有力工具。

目前三维盆地模拟系统正处在小范围开发研究应用阶段。

90 年代在国际商品系统市场流通的盆地模拟软件主要有三家: 德国尤利希公司有机地化研究所 (IES) 的 Petro mod、法国石油研究院 (IEP) 的 TEMISPACK 及美国 Platte River

公司的 Basin mod。这些软件的主要内容为五史（沉降史、热史、生烃史、排烃史及运聚史）模型和平衡剖面技术。其主要特点是内容全面、技术先进、商品化程度高。而未达到商业性软件市场上的那些盆地软件系统在各个具体点上的发展空前繁荣，几乎涉及地质学的所有领域。

近年来，由于经济和竞争的压力，国外大多数石油公司已不再集中大量人力、物力研究开发大型软件系统，而主要靠购买上述商品化软件，只有少数大石油公司集中少量人员研制有特色的小规模软件，使盆地模拟大型软件系统的研制与开发向专业化和产业化方向发展。

今后盆地模拟面临的任務包括不同模型间的相互综合，对地质年代等地质因素的依赖性分析及与其他数据库和图形软件的交互利用等。

六、圈闭评价计算机技术

圈闭评价是从盆地评价优选出有利的含油气区带进行圈闭准备开始，到圈闭预探获得工业性油气流的整个过程中所采用的综合性勘探评价方法。它是以现代油气成藏理论为理论指导，以勘探数据库为依托，以计算机为主要手段，充分利用各种物化探资料、地质分析资料和综合研究成果，对识别出的和储备的圈闭进行成藏地质条件、圈闭可能的含油气规模和圈闭勘探经济效益进行综合性、定量化的评价工作。

圈闭评价的根本目的在于为圈闭优选提供决策依据，为预探井的部署提出井位部署意见，为提高圈闭预探成功率提供保证。

七、解释性处理与深度成像

80 年代以来，地震交互处理技术有了很大发展。交互处理见图 1 - 1。

图 1 - 1 交互处理示意图

这里，值得注意的是交互处理是在“工作站”上进行的。地震处理系统近年发展趋势是：

(1) 结合地质解释和地球物理解释工具到地震处理；(2) 结合三维可视化工具到地震属性分析；(3) 结合地质技术与物探技术，发展基于模型处理和深度处理。

于是，出现了“解释性处理”技术。解释性处理见图 1 - 2。

这里，特别要注意的是，解释性处理是在“集成化环境”下进行的。地震深度成像是一个典型的解释性处理例子。1994 年，美国能源部要求美国全国石油委员会（NPC）提出油

图 1 - 2 解释性处理示意图

气工业对研究开发技术需求报告。经过一年多调查，其中有几条结论摘要如下：

(1) NPC 首要的石油工业上游技术有 6 项另加 1 项环境控制，其中列第一位是“高精度深度成像”。

(2) NPC 近期（至 1999 年）首要地球物理技术需求 7 项，其中列第一位的是“高精度深度成像”。

(3) NPC 长期（至 2010 年）首要地球物理技术需求 5 项，其中列第一位的是“高精度深度成像”。

可以看出，高精度深度地震成像，或称三维叠前深度偏移，是当前技术研究的热点。这与 1993 年墨西哥湾玛荷甘尼 1 号井钻穿盐底构造，发现多层砂岩，初步估价获得 1 亿桶 ($0.16 \times 10^8 \text{ m}^3$) 储量有关。三维叠前深度偏移突破盐丘体，让勘探工作者看到了盐下。计算机应用软件技术进步，增加了三维叠前深度偏移成像的可靠性，其中有前途工具之一的是相干体技术，有助于识别岩体上部或下部“粘土”或页岩带。目前有关盐下研究还有：

(1) 深度域定量 AVO，预测盐段岩性与纯流体。

(2) 模拟地震射线穿过各种形态盐丘和皱曲界面。

(3) 测定由不同速度引起子波相位扭曲。

(4) 分析由于盐丘固有高热导性引起温度和压力异常，造成盐下岩性变化。

斯坦福大学 SEP 小组和石油工程系联合开展的有关 3D 地震与油藏研究计划。

(1) 3D 地震叠前成像目前正在进行方位角校正试验，开发不规则观测系统 3D 叠前偏移，开发 3D 叠前数据平台。

(2) 3D 速度估算正检验多方位速度计算。

(3) 3D 储层研究包括地质统计，油藏模拟，岩石物理，反射地震学技术，任务有岩性模拟，流体模拟，地震岩性和流体研究，地震模拟与成像。

八、采集、处理、解释一体化及实时地震

众所周知，30 多年前随着地震数据处理计算机中心的出现，使得原来紧密结合在一起的采集、处理、解释三个环节逐渐分开了。在野外采集的数据都记录在磁带上，运送到处理中心。在处理中心处理的结果，输出到纸剖面，送到解释中心进行人工解释。这是“主机中心”时代的工作模式。随着 PC 机/工作站的普及应用，野外地震队有了现场处理机，解释中心配备解释工作站也有了部分叠后处理功能。采集和处理，处理和解释，开始又走向结合。但这仅仅是开端。真正的采集、处理、解释一体化有赖于先进的通信技术和计算机技术，在广域网上实现计算机支持协同工作 (CSCW)。由于石油工业工作地域分散，通过网络，实现计算机支持协同工作尤其意义重大，远程电视会议，共享白板系统，使相隔万里的不同学科技术人员可以协同解释地震剖面，或讨论钻探井位设计。

1994 年阿莫科公司发起一个工业范围先进的协同计算网络研究。后来由美国石油研究院牵头，25 个单位参与该计划。其目的是利用高宽带异步传输 (ATM) 网络技术，实现海洋地震船到岸上处理中心高速通信，真正实现采集—处理—解释一体化，这使得解释人员可以根据分析中间数据处理结果，改进解释与处理质量。今年 1996 年 2 月 26 日，由美国宇航总署制造的一颗新型卫星被启用，把墨西哥湾地震船上采集的数据，以每秒 2 兆字节速度进行传输，送到陆上并行计算机中心。这个信息传输系统由通信技术卫星和异步传输网络组成。美国石油界人士认为，先进技术将使能源勘探得到革新，降低油气勘探成本，提高油气勘探

效率。

九、数据集成及早期油藏描述

地震数据长期以来只被用于帮助构造解释。如今，密集的三维地震数据，加上处理算法的改进，以及高性能低成本计算机，从地震数据中可以提供，供研究油藏特征的信息。也就是说，除了用于确定构造以外，地震数据还有其他用途。已发展的技术允许地质家提取地震属性信息，用于改进岩石物性空间作图。通过对比钻井位置的特性，利用地质统计学，地震数据可以指导空间插值。在只有很少井控制的情形下，通常可以获得好得多的岩石物性图，用于储量计算，地质建模及油藏模拟。以往建立一个油藏模型通常要有许多步骤，每一步由不同专业人员只用其熟悉的本专业数据进行工作。这样无论从数据和知识利用方面，都是不充分的。地震数据结合测井数据，只被用于解释和确定构造，一旦完成了构造作图，地震数据就被束之高阁。高性能计算机交互技术，图形与可视化工作站使三维地震数据广为应用。在集成化方法中，一旦确定了构造，可以提取沿层地震属性，如振幅、速度、相位、频率等等，求取感兴趣层位的地震属性平均值，由用户把某个地震属性或几个地震属性与感兴趣的岩石物性对比，建立起相关关系，用地质统计技术，如克里金方法，作出岩石物性图。例如，西方地球物理公司在北海某油田研究中，发现地震延迟和振幅的线性组合，与孔隙度之间有很好的相关性。用地震约束控制井的孔隙度插值，改进了最终成果。表 1 - 2 是传统方法和集成化方法典型流程。集成化方法最大好处是在于改进早期油藏描述。

表 1 - 2 传统方法和集成化方法对比表

传统方法		集成化方法	
步骤	数据来源	步骤	数据来源
构造解释	地震和井	构造解释	地震和井
岩石物性解释	井	提取地震物性	地震
岩石物性作图	井	井位处地震采样	地震和井
		岩石物性解释	井
		地震和井特征对比	地震和井
		地质统计岩石物性图	地震和井

十、地震油藏监测及四维地震

地震技术用于油藏开发动态研究，还是很新的技术，但已出现许多术语，如：

(1) 地震油藏监督（SR M）。
利用地震技术监视油藏动态；
作为多学科油藏动态监视的一个组成部分。

(2) 时间推移地震（TLS）。
利用重复的地震勘测；
地震油藏监督的子集。

(3) 4D 地震。
利用重复的三维地震监测时间推移地震的子集时间推移的三维地震，或称四维地震，不仅可以用于确定今天和昨天的流体位置，还可以用于预测未来的流体运行，有助于识别漏掉

的油气和水动力学单元，以提高采收率。四维地震是正在发展起来的新技术，已被证明对于油田生产管理是很有用处的，四维地震监测油气流动，是一种集成勘探与开发的技术，它不仅是静态描述油藏几何形态，也是动态描述采油过程中流体与压力变化。为了刻画这些变化，要从勘探开发阶段获取地质、地球物理及石油工程数据。事实上，集成从测井数据中得到的垂向高分辨率及从时间推移地震中得到的空间和时间高分辨率，是四维地震监测的关键。在四维地震监测中，我们从包含岩性、孔隙度及纯流体压力分布的油藏特征模型开始，提供断层静态描述。为把对时间依赖关系建立到描述中去，在野外一次又一次地记录地质、地球物理和工程数据。基于这些数据的变化，利用迭代计算的四维地震差异的反演和正演地震模型，并与油藏模拟相比较。通过这种地震油藏模拟技术，油藏动态变化可以有效地监测和模拟。哥伦比亚大学 Lamont 地学实验室在四维地震数据处理与解释软件开发方面，取得了很大进展，他们发展了数据均衡规格化及油藏“区域生长”新技术，有良好效果。目前，已把四维地震技术推向工业界。

十一、智能数据挖掘及人机和谐环境

在美国一些大学和科研机构中，有两项非常先进的技术探索有可能对油气勘探提供新的工具：其一是智能数据挖掘；其二是虚拟现实人机和谐环境。数据挖掘（Data Mining）或智能挖掘（Intelligent Mining）是人工智能技术发展的副产品，最初用于市场分析，让市场开发经理和数据分析人员获得新洞察力。数据挖掘从庞大的数据库中把消费人口统计、工业数据等自动地转换成有用的信息。现在这个技术可望用于油气勘探。以往数据处理解决了油气勘探中许多复杂的问题。但是，面对计算机生成的大量复杂的数据，有限的人力无法理解和使用这些信息。哥伦比亚大学和伯克利大学开展的研究工作都是把人工智能，神经网络模糊逻辑和遗传算法等技术用于油气勘探开发数据库管理及处理，目前正在选定 oracle 数据库进行模拟软件开发及实验。哥伦比亚大学的 Lamont 地学实验室利用小波变换提取特性，采用基于规则模式进行数据库采掘，该系统包括：一个 SP2 并行计算机；多层次存储查询用的 RDBMS，特性存储与工作存储用的磁盘阵列，检索用的大容量存储器；可视化及查询工作部；以及高速网络支持外部场地可视化及查询接口，远程电视会议及协同工作工具。

虚拟现实提供一种人机和谐的用户界面，已开始走出实验室，用于油藏模型领域，在我们不久前访问劳伦斯—伯克利实验室、SGI 公司和 DEC 公司，均看到了这种技术应用前景。DEC 公司总部大厅内排放着虚拟现实用于驾驶员训练的设备。在 SGI 公司演示厅，表演了一个实际的三维地震数据虚拟现实场景。据介绍这是谢夫隆石油公司提供的数据，不久前该公司主要负责人都来到 SGI 演示厅观看演示。而在劳伦斯—伯克利实验室，我们看到了虚拟油藏开发的一个原型系统。虚拟现实（VR）是一个术语，有如幻觉进入战场驾驶虚拟航天飞船，或与虚拟妖怪搏斗。在好莱坞，已把这个技术用于娱乐。有一个称为“回到未来”的演示，人坐在飞机上，仿佛飞回恐龙时代，虚拟场景非常逼真。这类不可思议的软件与硬件功能，已被用于建立和比较不同油田开发策略用的工具。把虚拟现实技术结合在油藏模拟程序中，最大限度地减少了人机接口的障碍，建立与模拟场景交互作用的和谐局面，这使得什么东西可以最大限度地利用工程师直觉，提出解决油藏问题的各种决策，模拟运行可及早发现输入错误或不良的方案策略，观察模拟运行，还会激发用户变更一个或几个参数的好奇心，使用户注重研究开发策略。VR 的交互能力使地质家可以把定量知识加到油藏模拟描述中去，把取心、测井、三维地震、生产历史数据结合到综合的油藏描述中去。VR 技术提供

一种虚拟论坛把地质家、地球物理家和油藏工程师带到一起，讨论油藏模型，以求最高采收率。

十二、窗口技术

这种技术就是将油藏网格的一部分或一个子域划出来，把它定义为一个窗口。然后，进行局部网格细分或粗化或采用不规则网格。在模拟过程中，可以随时开关窗口，用较小的时间步长计算窗口。利用这种技术可以对油藏的某个局部，如井筒周围的地层、水平井、斜井或裂缝、断层等用特殊的网络和时间步长进行细致的描述。

十三、计算机图形技术的应用

七十年代中期精密静电绘图仪的出现，使计算机的图形显示得到解决。八十年代中期的图形工作站的出现，又使计算机的图形显示技术进入了一个新的革命性阶段，尤其为实现绘图自动化提供了可能。

当今的软件技术已发展到能够对三维物体进行各种制作、平移、缩放、旋转、造影等三维几何变换。无论它是地震资料、测井资料、油藏模拟，还是各种岩石、流体模型，科研人员都可以从全方位观看到三维图像，甚至看到其内部结构。

图形显示技术可以把地质、地球物理、岩石物理、钻井、油藏工程等资料同时显示在三维地质模型中，使多学科的工作人员很方便地进行各种角度的直观观察和分析研究，从而得出全面而正确的认识。另外，图形输入技术、图形用户界面系统（GUI）、实时动态显示近几年来在油田开发及整个石油工业中得到了广泛应用。

十四、人工智能技术的充分应用

人工智能技术主要有：专家系统、模糊逻辑、神经网络和遗传算法。在油田勘探中的应用多为专家系统、神经网络和模糊逻辑。

在勘探方面应用的专家系统主要有钻井、完井、测井、地震、油层保护、试井等专家系统。

由于神经网络具有：

- (1) 学习；
- (2) 联想；
- (3) 实时分析能力；
- (4) 自组织能力；
- (5) 抗干扰能力；
- (6) 归纳总结能力。

近年来神经网络技术在石油工业界已引起普遍关注，并已被用于地质、地球物理、钻井、完井、地层评价、生产设备、油藏工程、市场经济与金融等领域。在地层评价方面已用于孔隙度预测、根据电缆测井曲线预测碳酸盐岩渗透率、试井解释模型的识别、裂缝检测及圈定等；在钻井完井方面有 MWD 数据分析、钻头诊断、钻头与钻井液的选择与监控等。另外由于神经网络技术有很强的模式识别能力，所以在地质、地球物理方面也将发挥越来越大的作用。目前在这方面神经网络的应用有：储量评估、利用测井曲线进行矿物识别、利用地球物理数据进行地下目的层的定位、岩相模式特征识别、地震相态识别、地震模式识别、地

震数据简化、沉积岩石学—层序地层学等。

人工智能在石油工业中的应用日渐广泛，神经网络技术的应用只能算刚刚起步，但前景看好。

十五、多学科协同工作和技术集成

多学科综合管理，集成技术应用是 90 年代油田开发的一大趋势。随着当代世界石油工业竞争日趋激烈，勘探开发环境日益复杂，各大石油公司为谋求发展无论在管理上还是在技术上都进行了一系列革新，90 年代管理与技术最大的变革就是“联合”。在公司间出现了“联盟”，在公司内部出现了“多学科工作组”的管理方法，在技术上则强调多学科技术的综合运用。目前多学科工作组代表了人才资源的有效管理，多学科工作组对各种技术的综合运用（集成技术）则代表了物力资源的最佳利用。对于多学科工作组的形成及发展，其基础是现代计算机技术，多学科工作组的实质是以最现代化的计算机和通讯技术为手段综合运用各种技术有效地解决勘探开发问题，支持多学科工作组的计算机技术主要有巨型计算机，交互式工作站、计算机网络、数据库技术和计算机图形可视化技术等。其中巨型机的应用主要体现在三维地震资料的采集与处理、油藏模拟方面；工作站较强的图形处理技术、接口技术、网络通讯技术及人机交互技术充分促进了多学科的交流与合作，网络技术为多学科合作提供了最快捷的通讯，计算机数据库技术可对数据提供快速、准确的查询和检索、是信息资源共享的最佳途径，计算机图形可视化技术可使地质、地面、地球物理、岩石物理、钻井、油藏工程资料显示在同一三维地质模型中，多学科工作组成员可以直观地观察到油藏情况，图形可视化技术被认为是多学科工作组最有效和最有说服力的交流工具。

多学科工作组在油气田的勘探、开发方面已作出了巨大成绩。但其形成的基础及工作手段均为计算机与通讯技术。

综上所述，计算机勘探技术主要阐述计算机技术在现代油气勘探领域各单项技术如非地震物化探、地质、地震、测井、钻录井、完井测试及综合技术如盆地模拟、圈闭描述、油藏描述、油藏信息集成等方面的充分应用。

参 考 文 献

1. 杨义忠，崔斌．“开发 Internet 网上资源．为我国石油工业服务”．计算机世界，(37) 2
- 3 胡秋平．国外石油地质勘探理论技术新进展，石油信息中心，1998
- 4 王宏林等．计算机在石油工业中的应用，1996
- 5 丁贵明等．油气勘探工程．石油工业出版社，1997

第二章 勘探数据库网络系统建立及应用

第一节 勘探数据库系统设计

一、勘探数据库系统总体结构

1. 勘探数据库系统结构

勘探数据库系统主要由三大部分组成。即由勘探数据库管理系统、综合勘探数据库、勘探数据库应用系统三大部分组成。支持勘探数据库应用系统的应用软件到目前为止有盆地模拟、区带资源评价软件；圈闭评价软件；油藏描述、储层预测软件；变速成图软件；人机联作解释软件；目标精细处理软件；三维彩色可视化软件；计算机“制图”软件等。这些都是综合研究应用软件。勘探数据库系统结构见图 2 - 1。

图 2 - 1 勘探数据库系统结构

2 勘探数据库结构

根据各类数据库的特点，管理工具的性能及使用需求，塔里木石油勘探开发指挥部（以下简称塔指）勘探数据库采用分布式的勘探数据库结构，见图 2 - 2 所示。

SUN2000E 为 4 个 CPU，内存 256 MB，硬盘总容量为 168GB，用于存放地质数据。

SUN20 内存为 128 MB，每台硬盘容量为 80GB，一台存入地震（2D - 3D）剖面数据。另一台存放测井原始磁带和处理后的成果数据。

DELL686 为 PC 机，双 CPU，内存 128 MB，每台硬盘容量为 27GB，一台存放图形数

图 2 - 2 勘探数据库结构图

据，另一台存放文档数据。

3 勘探数据库模型

勘探数据库模型为关系式数据模型，是在 ORACLE 关系式数据库基础上开发建立的，各类数据之间关系见《勘探数据库系统》文档的《需求分析与概念设计文档》。

二、勘探数据库设计

1. 需求分析

(1) 目标：需求分析的目标是由现行系统导出准确严格的数据项定义、数据项间关系及数据操作任务，为概念设计、逻辑设计、物理设计打好基础，为优化逻辑设计和物理设计提供可靠的依据。

(2) 任务：分析现行系统业务流程和数据流程，构造现行系统的逻辑模型；从现行系统的逻辑模型中导出数据库系统所支持的信息范围和应用范围；使数据项定义和数据库的操作任务更为准确严格。

研究现行系统管理和操作规则及策略，预测今后可能的改变和对数据关系及数据库的影响。

(3) 系统支持的范围：确定了数据的录入、数据库维护、数据库查询、数学地质多元统计软件、生油应用、圈闭评价、区带资源评价、储量管理、沉积相研究、油藏描述、储层预测、古生物应用、油气水分析、测井解释、综合地质研究、地震资料特殊处理和解释、变速成图、三维彩色可视化、计算机绘图等等。

(4) 数据项的整理和定义：塔指勘探数据库的数据整理和定义参考了原总公司下发的勘探数据库设计文档中的勘探数据库逻辑结构及填写规定，根据塔指勘探科研生产实际需要进行补充和修改，最后整理出 6742 个数据项，其中勘探为 6000 多个数据项，395 个数据表。

数据项定义是勘探数据库管理系统设计最基本也最重要的工作，数据项定义是以数据库操作任务为基础进行的，其方法是从 DBIPO 图中提取所有原始数据项后，把有联系的数据项加以组合形成数据项组，以组为单位按填写规定填写数据项，形成数据项字典。数据项字

典请见《勘探数据库系统》文档的《逻辑设计文档》。

(5) 数据库操作任务 DBIPO 图：在所列举的应用表中，每个应用完成多个特定功能，每个特定功能以相对独立的操作任务表示。每个操作任务具有特有的输入数据项、处理、输出数据项。

2 概念设计

(1) 目标：准确描述勘探数据库数据模式；既能为用户理解，又易于在计算机上实现，最终的概念模型的实现不依赖任何特定的数据库管理系统。

(2) 任务：概念设计以需求分析中所产生的数据项定义的字典、数据库操作任务、现行系统的管理策略与规则等为基础，建立信息系统内的各个实体及实体与实体之间的联系，并用 E - R 模型表示系统的信息结构和信息模式，建立一个为用户理解，又可独立于各种数据库管理系统高级的概念模型。其任务是：识别勘探领域中的实体；识别实体的属性；识别实体的关键字；识别实体的联系；用局部实体—联系图和全局实体—联系图（E - R 图）表示综合信息系统的概念模式。

3 逻辑设计

逻辑设计的主要任务是根据需求分析和概念设计的结果，设计和产生数据库管理系统可以处理的、规范化的和优化的全局逻辑数据库模式和子模式，定义全局逻辑模式上的完整性约束、安全性约束和函数依赖。逻辑设计的成果直接关系到最终形成的物理数据库的成败，效率和效益。

1) 形成初始全局关系模式

在需求分析和概念设计时，在划分信息的过程中已考虑了信息的组成及结构，因此可直接将概念设计过程中产生的实体一对一地转换为关系，实体属性转换为关系属性，在此关系模式基础上，根据数据项定义字典中的数据项完整性定义，进一步完善初始关系模式的定义。

2) 全局关系模式规范化

在分析初始化关系模式时，其中有不少关系属于第一范式，甚至存在常规设计，若不做规范化处理，应用中必然造成数据更新、删除、插入异常及数据冗余度等问题，为此对低级别范式进行规范化设计，原则上将其划分为若干个第三范式，最终确定一个规范化关系。

3) 关系的优化设计

关系的优化设计是逻辑设计阶段的核心工作，既繁琐又花费大量时间做多次权衡。若全部关系都分为第三范式则会因需大量的联接操作而大大影响数据库的效率，所以需要进一步进行优化设计。优化设计时，考虑信息的集合性与应用要求的多样性，同时也要考虑关系数据库运行的效益等因素。首先将某些关系纵向划分，同时根据应用对数据的要求，将原一个关系中使用频率极高与极低的数据项进行纵向划分。划分的同时检查各关系的无损联接性和函数依赖保持性，这样反复多次，形成初步的现行系统逻辑数据库模式，并再次对该模式中的某些关系进行水平划分定义，从而完成整个逻辑模式优化，优化后仍保持了原来的类别，只是增加了一些关系。

4) 安全性、完整性定义

优化后产生了更多的新关系，对安全性和完整性影响很大，因此需要整理和重新定义最终关系模式上的安全性约束、完整性约束和函数依赖等。

4 物理设计

数据库物理设计是在逻辑设计基础上以关系模型为对象，以操作任务要求为准则，在给定的数据库管理系统、操作系统和硬件环境下，把逻辑结构转为物理结构。其具体任务是：

- 为关系选择存取方法；
- 设计关系、索引和聚集的物理存储结构；
- 确定物理数据库的优化策略；
- 定义表空间，确定关系、聚集和索引在表空间之间的分布；
- 生成建立非聚集关系、聚集关系、索引和表空间的 SQL 过程。

物理设计主要以 ORACLE 数据库管理系统为基本环境，兼顾各种工作站和 Unix 操作系统环境。其设计目标是：

以最优化系统的时间和空间复杂性为目标，进行数据库最优化设计，合理地选择关系的存取方法，科学地为关系、索引和聚集设计物理存储结构，减少 I/O 时间和磁盘竞争，达到提高系统总体性能；

结果物理数据库应该具有较高的适应性，可以在多种硬件和操作系统环境中被使用。

1) 存取方法的确定

根据每个关系上的操作任务的存取要求和使用频率，为每个关系选择存取方法；确定存取方法“多重物理块存取方法”的一次存取块数；选择索引属性或组合索引属性及选择组合索引属性的次序，并确定索引文件的物理存储结构；确定最优聚类中各关系的顺序，并确定聚类的物理存储结构。

2) 关系的物理存储结构设计

设计物理存储空间；设计物理存储块；设计数据库表空间，确定减少磁盘竞争的策略。

以塔里木盆地为例，其勘探数据库设计工作量见表 2 - 1。

表 2 - 1 数据库设计工作量

类别	文档名称	页数	字数
需求分析	系统流程图	20	10000
	应用定义表	12	6000
	信息定义表	7	3500
	DBIPO 图	98	49000
	数据项定义字典	295	147500
概念设计	实体属性定义表	53	26500
	E—R 图	29	14500
逻辑设计	关系定义表	461	230500
	完整性约束与函数依赖定义表	480	240000
	横向划分定义表	1	500
	纵向划分定义表	16	9000
	安全性约束定义表	2	1000
	逻辑结构与填写规则	460	330000
	逻辑结构与填写规则附录	62	13000

续表

类别	文档名称	页数	字数
物理设计	关系存取方法定义表	19	9500
	关系存储结构定义表	150	75000
	索引存储结构定义表	171	85500
	数据库对象与表空间对应表	3	1500
	表空间定义	3	1500
合计		2342	1171000
数据库重构设计	建立表空间：10 个		
	建表：440 多个，6000 多个数据项		
	建回滚段：30 个		
	建视图：279 个		
	建索引：364 个		
	建完整性约束：1648 个		

5 安全设计

建立数据库的目的就是要实现数据共享，让有关人员看得见、摸得着、用得上。但是，数据又是一种资源和财富，数据库中的许多数据属于行业或国家机密，只允许与之有关的工作人员、专家或学者查看相关的数据或图形。另一方面，数据库中的数据需要花费大量的人力、财力、物力，需要精心维护，这其中包含了很多人的心血。一旦数据库所在的物理设备损坏或数据库系统崩溃，数据库中数据将全部或部分丢失，这将造成无法估量的、无法挽回的损失。因此，数据库的安全尤为重要，所以，在数据库设计时考虑了下列安全措施：

- (1) 网络节点访问特权控制。
- (2) 数据库管理员严格把关，在增加数据库用户时，除口令约束外，还要根据用户的类型和特点对每张表附加用户访问特权。
- (3) 数据库定时增量备份到磁盘，备份磁盘与数据库设备存放在不同地方。
- (4) 研制一些数据库的管理工具，以减少因操作引起的失误。
- (5) 必要时，可以关闭一些系统功能。如：拷屏、下载、打印、保存等。

三、勘探数据库管理系统设计

勘探数据库管理系统包括地质数据的录入管理、图形存入管理、数据查询、图形查询、智能制表、数据库重构、数据通用接口等。

1. 地质数据管理程序设计

地质数据管理包括既有单条记录录入，又有批量转入，以批量录入为主。数据录入程序设计重点是数据字典定义、排序、自动生成数据录入窗口界面、检查录入数据的错误，并对数据进行随机修改、插入、删除等。地质数据管理程序逻辑见图 2 - 3。

图 2 - 3 地质数据管理程序逻辑图

2 图形库管理

图形库管理包括图形入库、删除、图元的地质类型分类。图形与图形（父子图）之间的关系连接等。图形库管理逻辑见图 2 - 4。

图 2 - 4 图形库管理逻辑图

一个具体图形有一些图标、点、线、封闭区、矩形、圆等基本图元所组成，这些基本的图元对于地质图形库来说没有任何地质含义，图元地质类型分类的目的就是要对图形上有关的图标、点、线、封闭区、矩形、圆等基本图元无逻辑地指定一个地质属性，例如：井、测线、断层、构造、油气田等。另一方面，图形与图形之间是有关联的，例如：对于一张勘探部署图上的某口井，与之相关的可能有井位设计图、色谱图、测井图等，而这些井位设计图、色谱图、测井图就是有关勘探部署图上对应于某口井的子图。图元地质类型分类和挂接父子图关系的目的是要建立图形库与地质数据库之间的链路和图形与图形之间的链路，这是在做图形信息查询时从图形查图形，从图形查数据的软件接口。图形地质分类逻辑见图 2 - 5。

3 图形信息和基础数据查询程序设计

图形查询和基础数据查询是集图形编辑、绘图、图形库管理，图形查询、数据查询等综合性系统，图形信息和基础数据查询逻辑见图 2 - 6。

4 通用数据接口

塔里木油田勘探至今，勘探研究中心购买和自行开发了许多完整的计算机应用软件，购买的软件基本上只有可执行代码。另一方面，应用程序的开发是一个完整的独立系统，一般情况下，特别是大型应用系统是不会与一个特定数据库系统捆绑在一起的，而是使用自身定义的数据文件或数据库表结构来提供数据支持，整理这些应用系统所需要的数据需要花费专业人员大量的时间和精力。

勘探研究中心地质数据库的建立几乎覆盖了勘探地质方面的所有数据，与之相关的应用系统所需要的基础成果的绝大多数数据在数据库中都有，随着时间的推移，数据库中的数据将会越来越丰富，越来越满足应用系统的需要。为了充分利用数据库中丰富的数据和节约专业应用人员的研究时间、精力，开发了一个通用性比较强的，既能为那些对数据库系统有少量了解而不懂 SQL 语言的人员服务，又能满足那些对数据库系统和 SQL 语言比较精通的人员的使用要求，从数据库中提取需要的数据生成相应的文本文件（即项目数据文件）或数据

图 2 - 5 图形地质分类逻辑图

库（即项目数据库）表数据，供应用软件系统使用。通用数据接口程序设计逻辑图见图 2 - 7 至图 2 - 10。

5 数据库重构程序设计

数据库的建设是一个长期的，不断修改、补充、完善的过程，也就是要根据科研和生产的要求经常的对数据库进行重新构造，此举涉及到数据库表的管理（重建表、主键、外键、约束、数据继承等），表空间、回滚段、视图、触发器等一系列 ORACLE 系统数据字典的管理，人工处理难度相当大，稍有不慎就有可能使整个系统瘫痪。为此开发了一个来协助数据库管理员完成数据库的重构的程序设计。逻辑图见图 2 - 11 至图 2 - 21。

(1) 数据库重构包括以下程序设计。

在 ORACLE 系统已安装的机器上建立一个新数据库。

现有表空间的浏览、修改、删除，新表空间的建立。

现有回滚段的浏览、修改、删除，新回滚段的建立。

现有视图的浏览、修改、删除，新视图的建立。

现有触发器的浏览、修改、删除，新触发器的建立。

现有表信息的浏览，由一个或多个源表中选择数据项或插入新数据项构成一个新表，能自由的选择新表的表空间，根据需要继承或重建新表的主键、外键、约束、触发器、数据项

图 2 - 6 图形信息和基础数据查询逻辑图

图 2 - 7 通用数据接口（交互方式）逻辑图

图 2 - 8 保存到数据文件逻辑图

图 2 - 9 保存到目的数据库表

图 2 - 10 通用数据接口（批处理方式）逻辑图

图 2 - 11 数据库重构总控逻辑图

属性，根据需要继承数据。

- (2) 表空间管理的逻辑图见图 2 - 12。
- (3) 回滚段管理的逻辑图见图 2 - 13。
- (4) 视图管理的逻辑图见图 2 - 14 至图 2 - 15。
- (5) 触发器管理的逻辑图见图 2 - 16 至图 2 - 17。
- (6) 表管理逻辑图见图 2 - 18 至图 2 - 20。
- (7) 索引管理逻辑图见图 2 - 21。

图 2 - 12 表空间管理的逻辑图

图 2 - 13 回滚段管理的逻辑图

图 2 - 14 视图管理的逻辑（浏览、修改、删除）图

图 2 - 15 视图管理的逻辑（建新视图）图

图 2 - 16 触发器管理的逻辑（浏览、删除、修改）图

图 2 - 17 触发器管理的逻辑（建新触发器）图

图 2 - 18 表管理的逻辑（浏览和删除）图

图 2 - 19 表管理的逻辑（修改）图

图 2 - 20 表管理的逻辑图 (建新表)

图 2 - 21 索引管理逻辑图

第二节 网络系统设计及建立

计算机网络是信息系统的重要组成部分，没有计算机网络支持，建立的勘探数据库的数据（图件）就不可能传输到用户终端或客户机上，勘探数据库的应用就难以推广应用。因此在勘探数据库进行总体设计时必须还要考虑到计算机网络设计和建立问题。

一、勘探数据库对网络建设要求

(1) 满足勘探数据库建设与应用的要求，这是对网络建设的直接和间接要求，要满足勘探研究中心各楼层办公室内的计算机或终端之间传送各种数据库的数据（图形）速率要求。

(2) 满足综合信息系统应用要求。除数据库信息及应用外，研究院所还需要大量其他信息的传送需求，比如硬件资源共享，因此计算机网络还要为这些应用提供所需的信息传送条件和计算机入网可能性。

(3) 要满足与广域网连接。研究院所的网络只是广域网中的一部分，通过与广域网的连接。将勘探数据库的数据（图形）传送到其他科研单位。供他们研究、分析和使用。

(4) 研究院所的局域网还要通过广域网与总公司范围内的计算机广域网互联网。保证石油公司勘探数据库数据（图形）通过广域网传送到总公司直属有关单位。

(5) 满足网络的可扩充性。随着勘探数据库和计算机应用的范围提高与扩大。要考虑将来还有更多的计算机或终端加入网络。在网络设计时必须满足这一要求。

二、网络方案设计

1. 网络选型

根据勘探数据库应用的需求，网络的主干部分采用传输速率为 100 MB/s 的 FDDI；网络中的勘探数据库服务器系统和各处室的服务器计算机，以及有图形传输需求的计算机直接连接 FDDI 网。其他计算机对要求传输率高，传输信息实时性很强的计算机也用 FDDI 网络连接。对于其他计算机用以太网连接。

2 勘探数据库服务器计算机系统选型

根据综合需求分析，选择 SUN2000E 计算机作为勘探数据库服务器计算机系统。

其配置如下：

CPU 个数	4 个（可扩充到 20 个）
高速缓存	72 KB
supecCache	2 MB
系统板个数	1 个
串行接口	2 个 RS232
键盘及鼠标器接口	1 个
以太网接口	1 个（双绞线电缆接口）
SCSI	每个系统板 10 Mbpa 单端 SCSI - 2
磁盘容量	168GB 内部 8 5GB 系统磁盘
磁带机	5GB8mm 磁带机
彩色监视器	20in（508mm）彩色监视器

网络：FDDI，快速 SCSI - 2 缓冲型以太网、串行、并行控制器。

(V O) 图形输入设备，图形扫描仪，激光打印机，黑白、彩色静电绘图仪、彩色硬拷贝机。

三、网络系统建立

以塔指为例，网络系统建设已于 1996 年底以前全面完成，在勘探研究中心内部，科研楼与研究中心机房之间由 4 个 HUB 连接组成 FDDI 光缆高速网，传输速率为 100 M B/ s，各楼内部为以太网，传输率为 10 M B/ s (研究中心网络示意图 2 - 22)，勘探研究中心的网络通过网络微处理器与塔指广域网高速互联，在勘探研究中心可以直接访问塔指信息中心、勘探处、试油处、钻井处、开发研究中心等部门的各种信息。

图 2 - 22 研究中心网络示意图

到目前为止，勘探研究中心所有计算机及其外部设备都入了网。据统计已有 80 多台微机，40 台各种不同的工作站其中 2 台 ALPHA3800 用于地震资料目标处理的工作站，11 台 SGI，8 台 SUN20 用地震资料解释的工作站。一台用于彩色透视，地质模型制作的 SUN 工作站。一台用于盆地模拟、区带资源评价的 SUN 工作站。二台用于油藏描述、储层预测的 SUN20 工作站，一台 SUN2000 数据库服务器，一台地震数据库服务器的 SUN 工作站，一台测井数据库服务器的 SUN20 工作站，用于测井资料处理解释的 11 台 SUN 工作站。60 余台各种外设（磁盘、绘图机、激光打印机，宽行打印机，黑白，彩色静电绘图仪，磁带机，硬拷贝机）入网。做到了数据资源，硬件资源，应用软件资源共享。经过近两年的运行，证明网络设计先进合理，具有安全保密控制，运行安全可靠。1998 年 4 月中旬通过在北京勘

探院计算所调试，塔指勘探数据库已通过塔指与原总公司的广域网将数据（图形）传送到北京勘探院塔指网络示意图见图 2 - 23。

图 2 - 23 塔指网络示意图

第三节 勘探数据库建设

勘探数据库主要包括五大数据库，它们是：地震数据库、测井数据库、图形数据库、地质数据库、文档数据库。这五大数据库构成为特大型分布式数据库。以塔里木盆地勘探数据库为例，该数据库内的地震数据库存入共 30 块三维约 12500km^2 的三维地震数据体，占 23GB 硬盘空间，存入 3000 条；共约 $15 \times 10^4\text{km}$ 的二维地震剖面数据，占 8GB 硬盘空间，测井数据库存入约 250 口井的各种测井曲线（测井原始磁带），250 多口井的处理测井曲线；图形数据库存入 1300 余张各种地质图件；地质数据库存入约 9000×10^4 个数据；文档数据库包括科研动态，勘探地质研究报告，全世界 202 个碳酸盐油田的各种报告和论文约 500 余篇及各种地质图件 2500 余幅。

一、数据整理与校对

1. 数据的收集

准确而实用的数据是建立一个好的数据库的基础。如何保证入库的数据准确而实用是一项繁琐而十分重要的工作，地质数据如分析化验数据，各种测试数据，往往由不同单位，不同仪器分析对同一样品得出不同的数据。对于这一类数据的整理和校对必须找一个有经验的、知识面又广的、责任心强的、地质专家来承担这一项工作。如美国的 AGIP 公司将勘探数据库的建设完全承包给了美国的 Geoquest 公司，而 AGIP 公司派去一名很有成就的地质专家常驻该公司，坐阵在那里专门负责收集入库的各种地质资料。

塔指勘探数据库的数据收集工作量相当大。为了保证入库的数据的完整性，准确性和实用性，成立了以勘探中心主任为首的数据收集、整理、校对、录入领导小组。成员由主管各路专业的中心领导，各研究室的正副主任、勘探数据库管理员和数据管理员组成。这个领导机构的每一个成员都要对入库的数据承担责任，把住各专业入库数据的质量。具体做法是由一名工作多年（从事 15 年地质综合研究）的高级地质师专门从事地质数据收集，到各个专业处、室（科）收集由各专业处，室主要领导认可、批准或指定可以入库的数据。对于分歧

较大的数据由中心主任或权威地质家裁决。

2 数据整理

勘探数据库的数据在录入之前必须按照数据库的设计要求进行整理和规范化，但这项工作由人工整理需要投入大量的人力、物力和财力来按照数据库逻辑结构及填写规定填写数据。比如分析化验数据先由专门从事数据收集的人员将某几口井的大量的分析化验数据收集起来，然后由有关专业室的地质人员，按照印好的填写数据的框架，将每一个数据填写在空格里。按照这样的方式整理数据，单就塔北隆起地区 100 多口井的各种数据整理填写一遍，需要 3 人干两年半才能整理完。而且在大量的印好的纸张上进行填写数据时，还会产生出错的几率。这种方式整理数据被地质人员称之为“劳命、伤财、还出错，不值得这样干”。谁也不愿意这样整理数据，即使发布行政命令，甚至采取扣发奖金等措施整整拖了一年时间，几乎就没有什么数据被录入到数据库里。这大概也是国内外在建勘探数据库中所碰到的难题之一。

塔里木盆地勘探数据库入库数据的整理基本上做到了由微机进行整理。当然对于单井的构造单元的归属，井名，样品编号规范化等基础工作还是由地质人员整理确定的，但这项工作量是相当少的。微机代替人工整理数据主要是指对单井的各种数据必须按照数据库逻辑设计的规定由微机进行整理，不需要花费人工将数据填写在规定的空格里。人工填写数据往往还会出错。这样既减少了人工整理数据的劳动强度，加快了整理入库数据的速度，同时也减少了数据出错的几率。微机代替人工整理数据是程序人员按照数据库逻辑设计数据项字典的定义设计一个模仿人工整理数据的程序，录入人员将数据输入微机建立数据文件后，运行该程序，计算机自动按照数据库逻辑设计的规范进行整理，并将非规范的，有明显错误的数据检查打印出来，供数据校对时参考。表 2 - 2 是到目前为止（1998 年 8 月底为止）入库的数据整理工作量。

表 2 - 2 截止到 1998 年 8 月底入库数据的整理及规范化工作量

预处理类型	数 量	内 容
构 造	全 部	对盆地、一级、二级构造带、构造（圈闭）规范化，将 700 余口井落实到各级构造单元上
单 井	700 余口	确定井名的惟一性，可靠性和正确性
地 层	全 部	确定地层标准名称 138 项
工 区	全 部	二、三维工区落实到相应的构造单元上
化验样品	50 多万个	样品深度、编号规范化
数 据	9000 多万个	检查、整理、校对

3 数据的校对

数据入库之前必须经过检查、校对和修改，确保入库数据的准确和实用。具体措施是：

(1) 在微机整理数据中初步筛选出出错数据，并打印出来供检查、校对和修改。

(2) 将初步筛选出错数据进行编辑修改后，将数据文件打印出来，由录入人员交叉校对并修改。先由录入人员自检和修改，然后再由另一个录入人员对照原始数据进行一遍检查、校对和修改。也可以由两个录入人员在屏幕上交叉检查、校对、并进行修改。总而言之，对入库数据一般要经过三次检查校对，尽可能减少入库数据出错的百分比，确保数据的准确性和实用。

二、勘探数据库的建立

勘探数据库是一个集地质数据库、地震数据库、测井数据库、图形库、文档库等多种信息类型的特大型分布式勘探数据库系统。

1. 地质数据库

地质数据库包括井的基础数据，地层分层数据，圈闭管理，储量管理，分析化验中的常规分析数据，生油数据，高压物性数据，古生物性，水分析，油、气分析数据，综合研究，钻井数据，试油数据，测井数据（主要指测井解释结果数据），物探中的速度谱数据，测量成果数据，VSP 数据等共 6000 个数据项。见表 2 - 3。

表 2 - 3 地质数据库数据量表

数据类型	记录数	数据个数
钻井地质	120809	3127476
综合研究	6000	180000
物 探	2350000	70675000
测 井	9230	258100
分析化验	501030	16648000
试 油	3643	105000
储 量	101	1943
圈 闭	5914	84875
合 计	2996727	91080394

2 地震数据库

地震数据库主要指建立油田三维数据、处理成果数据和二维测线处理的地震剖面成果数据，如表 2 - 4，为塔里木盆地到目前为止录入的全盆地三十块约 12500km² 的三维数据体，存放在硬盘上，占磁盘空间约 23GB。另外录入 3000 条二维地震剖面数据，长约 150000km，占磁盘空间 8GB。

表 2 - 4 地震数据库数据录入量表

三维区块	面积 k m ²	主测线条数	主测线长度 k m	面元 L × T	磁盘空间 M B
大 宛 齐	157	384	6194	50 × 25	660
大尤都斯 1 井区	311	831	12465	25 × 25	640
大尤都斯 2 井区	132	303	5351	25 × 25	305
东河塘东	793	1155	31762	25 × 25	974
东河塘西	231	641	9294	25 × 25	437
东河塘中	473	1000	19010	25 × 25	536
红 旗	563	2147	22326	25 × 25	703
克 拉 苏	287	599	17970	25 × 25	956

续表

三维区块	面积 k m ²	主测线条数	主测线长度 k m	面元 L × T	磁盘空间 M B
轮 南	1200	1600	48000	25 × 25	1656
轮 西	1015	2031	41635	25 × 25	1600
TZ1 - 6 井区	641	1036	25712	25 × 25	1250
TZ11 井区	76	247	3162	25 × 25	166
TZ12 井区	116	533	4551	25 × 25	194
TZ16 井东	532	1671	21288	25 × 25	686
TZ16 井西	67	211	2700	25 × 25	110
提 尔 根	346	875	13825	25 × 25	530
牙 哈	954	2891	36718	25 × 25	2024
牙 哈 西	300	803	13045	25 × 25	345
羊塔克东	635	748	9284	25 × 25	694
羊塔克西	655	1415	16697	25 × 25	643
英买 17 井	335	861	13579	25 × 25	553
英买 21 井	377	860	15146	25 × 25	398
英买 2 井	308	911	11843	25 × 25	835
英买 7 - 9 井区	233	639	9384	25 × 25	655
玉 东	187	600	6829	25 × 25	342
TZ4 井区	353	451	14245	25 × 25	650
TZ403 井区	300	451	11997	25 × 25	600
TZ50 井区	297	369	11744	25 × 25	598
鸟 山	315	372	12640	25 × 25	610
台 2 井区	212	639	8564	25 × 25	450
合 计 30 块	12500	27272	476132		21702
二维测线	条数		长度		
	3000 条		150000		8250

3 测井数据库

测井数据库主要录入测井原始磁带和处理后的成果带。包括声波、井径、中子密度、自然电位、伽马、电阻率、微电阻微、倾角、双侧向等。

4 图形库

地质图形库主要包括构造图、地质剖面图、各年的勘探部署图、井位设计图、圈闭管理 T₀ 等值线图和构造图、柱状图、测井解释曲线图、油藏剖面图、三维透视图、综合分析图、色谱、质谱图等共 1300 多张图件。约占磁盘空间 3GB 左右。具体工作量见表 2 - 5。

表 2 - 5 图形库工作量表

图 形 类 别	工 作 量 ， 幅
构 造 图	150
地质剖面图	80
勘探部署图	150
井位设计图	200
圈闭管理图	160
柱 状 图	60
油藏剖面图	50
测井解释曲线图	100
三维透视图	10
综合分析图	10
色、质谱图	280
动 态 图	50
总 计	1300

5 文档库

文档库主要录入各种科研报告，如科研动态、地质研究报告、综合研究报告共 500 篇论文、报告、2500 多幅图件。约占磁盘空间 6 GB。到 1998 年 9 月底止存入科研动态报告 100 多篇。

第四节 现代勘探数据库系统主要功能的特点

一、有一套完整的勘探数据模型

以塔里木盆地勘探数据库系统为例，现代勘探数据库的数据模型规模大，设计比较完整，其主要数据项共分 11 大类，395 张表，6000 多个数据项。

1. 钻井地质类

井位数据、钻井基础数据、钻头程序数据、套管程序数据、套管记录数据、套管外径壁厚数据、气测组分数据、钻时/ 气测录井数据、气测后效数据、钻井液性能全分析数据、钻井液录井数据、岩屑录井数据、井喷井漏数据、钻井取心数据、钻井取心岩性数据、井壁取心数据、井壁取心成果数据、井斜测量数据、井斜校正数据、地层现场分层数据、钻遇断层数据、录井图数据、碎屑岩油气显示综合数据、非碎屑岩油气显示综合数据、钻井大记事数据、综合录井仪钻头数据、综合录井仪化验数据、气测解释数据、荧光录井数据。地层压力梯度数据、地温梯度数据、岩心缝洞发育数据、井号与局部构造对照数据等共 34 张基表。

2 圈闭管理类

圈闭登记数据、圈闭要素数据共 2 张基表。

3 试油测试类

试油成果数据、试油原油分析数据、试油原油分析馏温数据、试油天然气分析数据、试

油水分析数据、酸化数据、压裂数据、地层测试设计数据、地层测试工程数据、测试现场成果数据、地层测试求产数据、测试解释成果数据、射孔数据、射孔井段数据、测试原油分析数据、测试天然气分析数据、测试水分析数据、抽油机示功图、动静液面数据、流静液面数据、不稳定解释成果数据、激动井测试记录数据、反应井测试记录数据、油井系统试井数据、水井分层测试数据、井筒温度压力测试数据、井筒温度压力数据、压裂后测试数据，共 29 张基表。

4 测井类

碎屑岩测井解释、碎屑岩测井解释成果数据、非屑岩测井解释、非碎屑岩测井解释成果数据、地层倾角测井解释成果数据、地球物理测井项目数据、长原距声波 (SLS) 测井数据、重复式电缆地层测试数据、声感应测井曲线数据、中子密度测井曲线数据、能谱测井曲线数据、双侧向测井曲线数据、声波测井曲线数据、岩归位数据、地层倾角测井曲线数据、井斜曲线数据、套管接箍测井曲线数据、阵列声波测井曲线数据、电磁波传播测井曲线数据、测井处理参数数据、碎屑岩测井处理成果数据、碎屑岩测井处理成果、非碎屑岩测井处理成果、非碎屑岩测井处理成果数据，共 25 张基表。

5 物探类

地质调查工作量数据、非地震化探勘探工作量数据、地震层与地质层对比数据、主要大断裂数据、二维地震测线基础数据、二维地震测线工作日报数据、二维测线磁带炮号对应数据、二维观测系统数据、三维地震面积基础数据、三维地震束工作日报数据、三维磁带炮号数据、三维观测系统数据、VSP 测井基础数据、VSP 工作日报数据、VSP 磁带炮号对应数据、VSP 观测系统数据、地质反射层位与色标对应关系数据、工区与构造单元对照数据、二维测线静校正数据、速度谱数据、测量成果数据、地震测线计划数据、浮动基准面数据、VSP 解释成果数据、VSP 静校正数据、物化探数据，共 34 张基表。

6 分析化验类

分析化验送样管理数据、分析化验结果管理数据、送样项目管理数据、结果项目管理数据、原油分析数据、原油分析馏温数据、天然气分析数据、水分析数据、脱气原油粘温曲线数据、胶气原油粘温曲线实验数据、地层凝析气性质、地层原油分离实验、高压物性分析数据、高压物性石油相对密度数据、高压物性石油粘度数据、高压物性石蜡结晶温度数据、常规岩心分析数据、复压下孔隙度渗透率实验、复压下孔隙度渗透率数据、相对渗透率实验数据、粘土矿物分析样品数据、粘土样品分析数据、扫描电镜岩石分析数据、岩石孔隙压缩系数实验、离心法毛管压力实验、压汞法毛管压力实验、压汞法毛管压力分析数据、离心吸入法测定润湿性、驱替吸入法测定润湿性、粘度分析结果数据、古生物化石鉴定样品数据及化石鉴定数据、镜质体反射率分析数据、天然气碳同位素分析数据、天然气氢同位素分析数据、天然气稀有气体同位素分析数据。油、气、水样元素分析、干酪根鉴定数据、同位素分析数据、有机碳分析数据、有机元素分析数据、岩石氯仿沥青“ A ”分析数据、族组分分析数据、饱和烃色谱分析数据、气相色谱轻烃分析数据、热解气相色谱分析数据、热解色谱分析数据、芳烃馏份气相色谱分析数据、萘烷分析成果数据、甾烷分析成果数据、原子吸收光谱分析数据、紫外分析数据、红外分析成果数据、红外分析数据、重矿物鉴定数据、岩样常量元素分析数据、岩样微量元素分析数据、岩石薄片鉴定数据、岩石铸体薄片鉴定数据、岩石荧光薄片鉴定数据、包裹体测温样品、电子探针样品分析数据、酸敏分析数据、碱敏分析数据、水敏分析成果、盐敏分析成果、速敏分析成果、岩石导热系数分析成果、岩石阴极发

光鉴定数据、岩样氦孔隙度分析数据、岩石电阻率分析成果、地层因素和孔隙度数据等，共 100 张基表。

7. 储量管理类

油气田探明储量数据、含油气构造控制储量数据、石油储量分析数据、石油储量计算数据、石油储量动用数据、天然气储量分析数据、天然气储量计算数据、天然气储量动用数据、石油储量经济评价数据、天然气储量经济评价数据、石油储量控制数据、天然气储量控制数据、石油控制储量评价数据、天然气控制储量评价数据、控制储量升级数据、石油储量基础资料登记数据、天然气储量基础资料登记数据等，共 17 张基表。

8 综合研究类

盆地构造单元划分数据、盆地局部构造基础数据、油气田与构造单元数据、地层统层分层数据、盆地油气资源数据、盆地勘探基本数据、盆地勘探钻井统计数据、油气田勘探基础数据、分层系单井岩性统计数据、钻遇储层数据、钻遇生油数据、盆地基础数据、盆地地质评价数据、盆地资源量数据、区带基础数据、区带地质评价数据、区带资源量数据、圈闭基础数据、圈闭地质评价数据、圈闭资源量计算参数、圈闭资源量数据、油藏基本数据、油藏储层性质数据、油藏流体性质数据、油藏构造要素数据、油藏断层要素数据、油藏小层评价数据、烃源岩描述、单井砂层数据、钻遇不整合数据、钻遇断层数据、油层分层数据、单井小层数据、小层对比数据、箍管结构数据等，35 张基表。

9 勘探动态类

年度计划数据、探井钻探动态数据、探井录井动态数据、试油测试动态数据、酸化压裂动态数据、采试井动态数据、二维地震采集动态、三维采集动态、二维处理动态、三维处理动态、非地震物化探动态，共 11 张基表。

10. 原总公司级勘探生产管理动态类

勘探费用数据、勘探各专业队伍管理数据、勘探主要装备管理数据、探井钻井动态数据、探井试油测试动态数据、探井酸化压裂等油层改造措施动态、地震勘探野外采集月完成工作量、二维地震资料处理月完成工作量、三维处理月完成工作量、重磁电化探月完成工作量、探井钻井月完成工作量、探井试油月完成工作量、年度物探工作完成情况、年度探井钻探工作完成情况、年度试油完成情况、圈闭基础数据、盆地构造单元划分数据、盆地油气资源数据、盆地物探工作量数据、盆地钻井工作量、盆地圈闭及储量数据、勘探项目地质成果数据、油田勘探数据、气田勘探数据等 28 张基表。

11. 原总公司标准代码类

企事业单位代码、沉积盆地代码、构造单元代码、局部构造名称、油气田代码、井号代码、层位代码、井代码、井型代码、钻头类型代码、套管类型代码、完井方法代码、取心方法代码、钻井液代码、颜色代码、岩石名称代码、含油级别代码、地层接触关系代码、钻井事故处理方法代码、解释结论代码、试油测试结论代码、求产方法代码、酸化压裂施工方法代码、压裂支撑剂名称代码、测井项目代码、勘探类别代码、物探类别代码、油品分类代码、沉积相代码、连通类别代码、射孔枪型代码、射孔弹型代码、仪器名称及型号代码、泵型号代码、监测代码、示功图解释代码、控制图属性代码、注水方式代码、勘探结果代码、断层性质代码、样品类型代码、粘土矿物类型代码、胶结物类型代码、胶结物名称代码、化石类型代码、薄片鉴定矿物类型代码、薄片鉴定矿物子类型代码、储量类型代码、区带勘探类别代码、水陆代码、胶结类型代码、油藏类型代码、驱动类型代码、油气田抽产方式代

码、构造类型代码、孔隙裂缝类型代码、气藏产状代码、润湿性代码、封隔器类型代码、储集类型代码、施工队代码、圈闭类型代码、圈闭形态代码、地质时代代码、不整合类型代码、分析化验项目代码等共 68 张基表。

塔里木盆地勘探数据库系统的数据模型主要以部颁标准为基础，经过长时间调研，与地质专业人员的共同协商、探讨设计的 6000 多个数据项，基本上覆盖了塔里木油气勘探的各个领域，是比较完整的一套数据模型，该系统的数据模型比目前国际上 IRIS21 数据库系统设计的数据模型规模还要大。

二、有一套完整的勘探数据库管理系统

它把地质数据库、图形数据库和文档数据库各专业的内容集成在同一个数据库平台上。在这个数据库平台上的数据库管理系统用 MAPINFO 地理信息系统和 POWER - BUILDER 软件联合开发的既具有地理系统数据库的特征，同时又具有普通关系数据库的特征。解决了同一个管理系统中能同时存储、查询图形和数据这一难题。该系统集图形编辑、绘图、GIS、图形管理、查询、数据管理和数据查询等综合性系统的超级数据库管理平台。该系统功能有：

1. 图形编辑

图元生成、修改、删除、拷贝、移动、属性修改、平滑、图形合并、分割、漫游、局部缩放等。

2. 图层管理

每张图形可以有 50 个图层组成，在显示过程中，图层可以屏蔽或再显示。

3. 地质对象分类

建立地质图元与数据库表的关系，地质对象可以是井、构造、断层、油气田、测线...等。

4. 挂接父子图

建立图形上的地质对象与图形间的关系。例如，在一个井对象下可能挂有测井曲线图、色质谱图。

5. 查询子图

查询与一个地质对象相关联的图形。例如，点取一个井图形对象，打开与该井有关的测井或柱状图。

6. 查询数据

查询与一个地质对象相关联的数据。通过图形对象查询研究 SUN2000E 中的 ORACLE 数据库中的数据，在查询过程中可以选择查询条件、筛选数据项、重排数据项的排列位置，查询到的数据以表格形式显示，视需要可以打印输出，保存为文本格式的文件等。例如点取一个井图形对象，查询与该井有关的一些数据（钻井地质数据，分析化验数据.....等）。

7. 求地质对象的地质属性

对地质对象求出它在图形上的地质属性值。对于井这样的点对象，求出它在地质图中坐标位置。对于测线或断层这样的折线对象，求出它们的中心坐标、长度。对于构造和油气田等这样的封闭区域对象，求出它们的中心坐标、周长和面积。

8. 选定范围内的地质对象统计

统计图形的一个圆或矩形区域或一个封闭区域内的地质对象和属性值。例如一个构造或油气田内的井数和每口井的坐标位置。

- 9 可根据需要将图形服务器上的图形或数据库服务器上的数据下载到本机上
- 10. 能根据要求分别在网络环境或单机下运行
- 11. 实现了图形和数据共享，保留了原 MAPINFO 的全部功能，包括 GIS 功能和绘图、输出功能
- 12. 地质制图
 - (1) 离散数据转换成图。
 - (2) 断层、剥蚀线、尖灭线标准。
 - (3) 剥蚀面处理。
 - (4) 比例尺、图框、经纬网处理。
 - (5) 投影坐标系管理。

三、系统数据整理、数据录入和维护简单

随着时间推移和勘探数据库系统应用深度及广度的拓展，数据库中的表结构需要做不断的调整，可能需要增加一些新表或删除一些旧表。按照通常的程序设计方法，对数据库中的每一张数据表惟一对应一个数据输入界面，每当表结构发生变化或增加新表后就要修改对应的输入界面程序或编制一个对应于新增的输入界面程序。这对于本来后期维护工作量和维护难度就很大的数据库维护和管理人员来说，无疑是雪上加霜。

我们研制成功的这个通用的原始数据转入和编辑系统，数据库维护人员只须维护二个文本格式的数据字典，无论数据表结构如何改变，或增加新表，系统能根据数据字典的内容自动生成对应某表的全汉化的窗口化的数据输入界面，而不需要修改原程序。在这个界面上，数据录入人员不但可以做通常意义下的记录插入、删除、修改和浏览，更重要的是将文本数据文件或 DBASE 文件中的数据成批的转入到数据库中。对于文本数据文件，在正式转入前能做各种必要的数据库错误检查，保证了入库数据的正确性。

该系统极大地减少了数据库管理人员的维护工作量。使操作人员一看就懂，一试就会。特别是不需要专业地质人员花费宝贵的科研时间去整理原始数据。原始数据录入，编辑系统技术目前国内国际属领先水平。其使用效果和与传统的比较见表 2 - 6 和表 2 - 7。

表 2 - 6 数据录入的两种方式比较表

操 作	传 统 方 式	本 方 式
基础资料处理	在微机上整理；生成文本文件；打印成文档手册	在微机上整理；生成文本文件
原始数据录入	根据文档手册，再一个数据项一个数据项的重新敲入计算机（又多了一次出错几率）	直接从文本文件读入
查 错 功 能	绝大多数关键性错误，如记录约束条件、重复记录，长度超长等只能在提交进库时才能发现，而且只要是发现一个错误，提交进库工作将自动结束（数据不能入库），也不能指出出错的位置和类型	在正式进库前几乎所有的错误都已查出，生成一个错误记录文件，指出某行某列是何种错误便于查找和修改
录 入 功 能	只能单条记录敲入	既有单条记录敲入，又有批量转入
录入人员要熟悉的工作界面	多个。例如，有 400 张表，就须熟悉 400 个界面	只有一个

表 2 - 7 系统维护方面两种方式比较表

操 作	传 统 方 式	本 方 式
修改数据库表结构	修改对应于数据库表的录入界面程序	修改数据字典
新建数据库表	编制表的录入界面程序	修改数据字典
维护工作量	要熟悉所有数据录入界面程序，如果有 400 张表，就得熟悉 400 个程序模块，如果没有原码，就无法进行	不需熟悉录入程序，只需了解数据字典，维护数据字典，而数据字典是文本格式的

四、有配套的应用软件

所研制的塔里木盆地勘探数据库系统除了查询、统计报表等基本应用外，在油气勘探的单项研究和综合研究应用方面都有配套的应用软件。

1. 用于计算机制图的软件有变速成图系统

MAPINFO 主要用于石油工业标准制图；EARTHVISION 系统主要用于建造各种地质模型，绘制透视图和平面图。研制开发绘制带断层的等值线图软件和 INDEPTH 绘图软件。

变速成图软件系统是石油天然气勘探科研生产中用得最频繁的成图软件。它将地震资料解释的 t_0 值从勘探数据库的速度谱数据、测量成果数据及浮动基准面数据提取对应的值，经速度校正，浮动基准面校正后绘制各种平面图、如层速度平面图、平均速度图、 t_0 等值线图、均方根速度图、厚度图等。这些图件还可以存储在勘探数据库的图形库中，供研究人员随时查找。MAPINFO 绘图系统是从美国引进的图形信息软件，它是目前用于计算机制图的最有力的绘图软件，可以绘制石油工业中各种图件。如地理图、地形图、油气分布图、勘探部署图、地质剖面图、综合柱状图等等。

2 盆地模拟、区带资源评价软件。

支持该软件的各种数据文件由勘探数据库中的钻井数据、地层分层数据、分析化验数据、岩性数据、物性数据、生油数据、油、气、水化学参数、地震剖面数据，测井数据等等提供。从油气系统的石油地质机理出发、模拟盆地及区带的构造发展史、油气生成史、运聚史，指出油气有利区带的分布位置。为勘探部署和决策提供科学依据。

3 地震资料目标处理系统软件。

地震资料目标处理系统软件有 PROMAX，GRISYS 地震资料处理软件，还有长波长静校正，短波长静校正软件，用于提高信噪比和分辨率的小波分析、地震波高分辨率聚焦成像软件，叠前深度偏移软件，波阻抗反演软件等等。支持地震资料目标处理软件的数据是从勘探数据库中的地震数据库，测井数据库、速度库。静校正库中提取。例如轮南三叠系滚动勘探目标处理就是从地震数据库中直接提取三维主测线，一条一条地进行地震复合波变焦高精度分离处理，既提高了分辨率，还提高了信噪比，然后在此基础上用测井资料进行约束反演，大大提高了波阻抗反演精度，弄清了轮南三叠系岩性控制的油气分布规律。

4 地震资料交互解释软件

地震资料交互解释系统软件主要有 Geoquest 人机联作解释系统，GNT 微机交互解释系统，Gristation 地震资料交互解释系统等。数据来源主要从地震数据库（三维数据库和二维地震数据库）、测井数据库、测量成果库、速度库，浮动基准面数据中提供。解释成果又可以存储到勘探数据库中，最终解释成图存放到图形库中去，供地质专业人员研究查找、修

改。

5 圈闭评价软件

由勘探数据库的圈闭管理、物性数据、分析化验数据、生油数据、地震数据、测井数据提供数据，对圈闭可靠性定量、圈闭石油地质综合、圈闭的资源量、圈闭的经济效益、风险性勘探等进行评价，为圈闭的优选决策提供量化依据。

6 测井资料处理和解释软件

这套软件包括斯伦贝谢公司的 G 包，P 包处理解释软件，原总公司推广的 FORWARD 处理解释软件等。由测井数据库提供数据。

7 油藏描述、储层预测软件

用于油藏描述、储层预测的软件有 Geoquest 公司的 RM 软件，原总公司勘探局吉思达公司研制开发的油藏综合描述软件，有塔指勘探研究中心开发的相干数据体分析软件，神经网络、模式识别软件。储量计算软件。有石油大学（北京）研制开发的随机模拟软件，岩石物理相研究软件等。由地震数据库，测井数据库，地质数据库提供数据。中间研究成果、最终成果存放到地质数据库中，图件存放到图形数据库中。

8 勘探数据库综合查询和报表制作输出系统

该系统将图形和数据，图形和图形，图形和文字部分有机地结合起来，使地质专业人员在同一软件平台上就能查看到所需要的地质图件，又能查看到与地质对象相关的数据和图件，也能查看到地质对象在图形上的地理位置等属性值，还能查看文档报告中的文字报告和相关的图件。在数据库应用中，最基本的，使用最广泛，最多的就是数据综合查询和报表制作。在石油地质勘探工作中，地质人员需要查找各类有关的基础数据、成果数据、进行归纳、汇总、统计，然后分类成册，这些基础工作如果根据用户最初的需求分析来设计、所要查询的内容、格式用程序设计是固定的。但是在石油地质工作中，对数据的格式的要求，内容也是根据不同要求而千变万化的，每一个地质专业人员工作习惯、工作方式也各不一样，他们对数据格式的要求、内容也不太一样，因此通常意义下预先设计好的数据查询和固定的报表输出系统根本不可能完全满足地质专业人员的使用需求。我们设计的在功能上能适应专业人员随机需要使用的数据综合查询和报表制作输出系统，使用人员能在系统模式的分步引导下，通过直观、有限的操作，查找到需要的数据内容，并以所要求的格式编排制表输出。

五、勘探数据库和各种应用软件研制开发是完全独立的

勘探数据库的数据项愈多、覆盖面越广，支持其应用的软件也应该越多。应用软件的研制开发如果受数据库的约束限制就会受到很大的影响。实现数据库面向对象与应用软件的完全独立一直是数据库工作者追求的目标，也是数据管理的关键技术。美国一些大的石油公司在近十年来努力研制开发 POSC 软件集成平台，这个软件平台一是解决勘探开发数据库系统面向对象问题，另一个是解决勘探数据与各种应用软件之间的数据交换问题，即数据库与应用软件之间的接口问题。到目前为止，大型综合应用软件系统，例如地震资料处理、解释软件，盆地模拟，区带资源评价软件、圈闭评价软件、油藏描述、储层预测软件、开发数值模拟软件、计算机绘图软件等都是比较成熟的、商业化的实用性强的应用软件。这些大的应用软件系统都是由各软件公司使用不同的软件工具独立研制开发的，这些应用软件研制开发时没有考虑与数据库数据如何接口，基本上建立在特定的文本格式文件基础上的。数据来源基本上是靠手工整理的。塔里木盆地勘探数据库最重要的功能就是要支持用于石油地质勘探的

各种大型综合应用软件系统。为了使这些大型综合应用系统与勘探数据库进行数据交换。我们研制开发了一个勘探数据库与应用软件系统之间的通用接口软件。它保证各种应用软件系统开发能独立地进行。同时也能与引进的各种大型综合应用软件进行接口。该软件有下列功能：

(1) 能从勘探数据库中以交互方式和批处理方式提取满足应用软件系统所需要的数据。不论使用哪种处理方式，都不需对数据库结构，数据有效方式作任何了解。

(2) 在交互方式下通过鼠标简单地点击就能对数据库的数据源、数据表、数据项进行选择操作，具有分类、排序、统计（最大值、最小值、求和、求平均值、计数等）等综合功能。查找出的源数据可以进行记录插入、修改、删除、浏览、打印等编辑操作，能根据应用软件要求保存到数据文件或数据库表中。

(3) 当源数据保存到数据文件中时，数据可以按行或按列存放，可以加入解释性的数据行，数据项名可以数据行或解释行写入，数据项之间的分隔符在保证惟一性的条件下可任意。一个数据文件中可以保存任意次查询的结果。可以浏览数据文件中写入的内容，浏览区可以进行修改并保存到指定文件中。

(4) 在交互方式下可以自动记录生成，用于批处理方式的文件，该文件可直接在批处理方式下运行。

(5) 在交互方式下，能将查找到的数据保存到目的数据库表中，提供了建新目的数据库表机制，检查源数据和目的数据库之间的类型匹配，能对目的数据库表进行记录插入、修改、删除、浏览等操作。

(6) 在批处理方式下，根据批处理方式文件的信息自动从地质数据库中查找数据并保存到数据文件中，可以浏览、修改批处理方式文件的内容或数据文件的内容。

数据库与应用软件之间通用接口的广泛应用，大大地促进了勘探数据库信息的共享，多学科综合研究水平的进一步提高。

六、是一特大型分布式数据库，与 POSC 国际数据库有良好的兼容性，并具有良好的可扩充性

所研制的勘探数据库包括地震数据库，测井数据库，地质数据库、图形数据库、文档数据库。其中地质数据库存储在 SUN2000E 服务器上。地震数据库，占用磁盘空间最大，二维、三维地震数据存在 SUN20 服务器上。测井数据库存在另一台 SUN20 服务器上。图形数据库和文档数据库分别存在双 CPU 的 DELL686 服务器上，每台服务器有 27GB 的磁盘空间。这五大数据库虽然分布在不同的服务器上，但通过网络由一个统一的平台进行管理、维护、查询和检索。也可以由本服务器上的管理软件对单个数据库进行管理、维护、查询和检索等。由这五大数据库组成了塔里木盆地特大型分布式数据库。实现了资源共享，数据远程通信，分布式处理三大目标。

该数据库在某些方面与国际标准 POSC 数据库有良好的兼容性。地震数据库、测井数据库是在 FINDER 软件建立起来的。FINDER 软件是参加 POSC 国际石油技术开发软件协会的斯伦贝谢公司研制开发的，数据库结构、数据模型、数据交换，以及软件平台都与 POSC 标准完全一致。事实上塔里木盆地勘探数据库的地震数据库、测井数据库与各种大型应用软件，例如，各种人机联作的解释系统，Geoquest，Land Mark，GNT，国内的地球软件公司的 GRistation 等数据交换格式完全兼容。与各种处理系统，如 PROMAX 处理系统、CSD 处

理系统、地球软件公司的 grisys 处理系统、帕尔代姆公司的叠前深度偏移系统等的数据格式也是兼容的。又如与各种油藏描述、储层预测、圈闭评价、盆地模拟、区带资源评价软件的数据格式都是兼容的。这些应用软件绘制的各种地质图件与图形数据库、文档数据库的图形格式也完全兼容。应用软件得到的中间或最终图件完全可以存入图形库。在 ORACLE 关系数据库和 MAPINFO 地理信息系统基础上建立的地质数据库通过适当的影射就可以与 posc 格式的数据库兼容，应用软件需要的数据可以由通用数据接口软件来实现。而各种应用软件经过各种加工处理得到的中间数据或最终成果数据也可以存入地质数据库。

该勘探数据库还具有良好的可扩充性。用这套数据库管理系统平台可以建立项目数据库或个人使用的专项数据库或项目数据文件区。也可以建立一个油田范围的勘探开发数据库，在硬件设备许可的条件下，还可以建立石油行业的各种数据库，包括勘探开发数据库、经营管理数据库、生产动态数据库、人事劳资数据库等等。而且还可以将分散在各个单位分散的、不标准的、小型项目数据库通过 E—R 图并入到大数据库中。例如，钻井数据库、试油数据库与勘探数据库模型不一致，用勘探数据库管理系统对其数据项字典进行定义，形成规范化的数据模型，并做好 E—R 图联接，通过网络传输批量地录入到勘探数据库、勘探数据库管理系统的通用数据接口和数据库重构软件确保勘探数据库具有良好的可扩充性的实现。

第三章 区带数值模拟技术及应用

第一节 概 述

区带是油气系统中按一定构造要素划分的油气聚集单元，是油气勘探的战略靶区。因此，以区带评价为核心的盆地资源评价，近 20 年来一直是国内外油气盆地分析的热点。目前比较成熟的区带评价方法主要有三种：(1) 数理统计法；(2) 专家系统法；(3) 数值模拟法。以上方法用于区带评价各有所长，视研究目的不同分别具有不同的应用价值。一般而言，数理统计分析法只能给出有利区带规模序列、数量多少，但不能指出有利区带的位置，不适用于勘探部署。而数值模拟法，由于是从成油气系统的石油地质机理出发，模拟盆地及区带的构造发展史、油气生成史、运聚史，因此能够指出油气有利聚集区带的分布位置，是区带分析评价的最有效方法。

第二节 区带数值模拟评价软件

由于石油地质学的多学科性和复杂性，石油地质领域基本上处于定性或局部定量的阶段。目前计算机在石油地质的应用，主要有三大类：模拟技术，统计技术，专家系统。模拟技术基于物理化学的地质机理，已有近 20 年的历史；统计技术基于地质数据的统计分析，已有近 30 年的历史，专家系统基于地质家分析的人工智能，已有近 20 年的历史。这三大类技术，各有所长，各有所短。然而，相比之下，模拟技术比其他两大类更加接近石油地质机理，直接揭示盆地油气规律本质。

所谓盆地模拟 (Basin Modeling)，即：从石油地质的物理化学机理出发，首先建立地质模型，然后建立数学模型，最后编制相应的软件，从而在时空概念下由计算机定量地模拟油气盆地的形成和演化，烃类的生成、运移和聚集。所以，从学科分类来看，可定名为“盆地数值模拟”；从其软件产品来说，可定名为“盆地模拟系统”。这是当今世界石油地质科学领域内的一门新兴课题。

今天，石油地质领域的计算机应用仍然是石油勘探开发计算机应用中最薄弱的环节，这与石油地质在勘探开发中的重要地位极不相称。盆地模拟新技术正在逐步扭转这一落后局面，使石油地质朝着定量化、计算机化和绘图自动化方向前进。多年的实践证明，盆地模拟是实现石油地质定量化的重要途径。

顾名思义，盆地模拟是对整个盆地的演化进行历史模拟。其实不然，只要是一个基本独立的油气生聚单元，就可对之进行模拟，所以模拟区域可以是盆地，也可以是坳陷、凹陷和次凹等。盆地模拟系统输入地质、地理、井、地化甚至油层物理等资料，模拟上述的一个地质单元的沉积史、构造史、古热流史、古地温史、生烃史、排烃史和运移聚集史，从而进行油气资源定量评价，指出有利勘探地带。

一个完整的盆地模拟软件系统应由如下 6 个模型有机组成：

- (1) 地史模型;
- (2) 热史模型;
- (3) 生烃史模型;
- (4) 排烃史模型 (油气初次运移);
- (5) 运移聚集史模型 (油气二次运移);
- (6) 综合评价模型。

中国独立研制的盆地综合模拟系统 BASIMS (Basin Integrated Modeling System), 经过“九五”攻关, 继续保持国际先进水平, 并在较多技术上处于国际领先地位。

BASIMS 是一个完整的大型盆地模拟系统, 包括前处理、主程序、后处理三大部分, 软件全长 50 万语言行。

一、前处理程序

前处理程序为主程序准备数据及绘制参数图。它既可以把参数图件通过数字化桌输入工作站, 又可以把输入参数绘制成参数图件。前处理程序有如下两大类功能:

- (1) 图形输入;
- (2) 参数输入并绘图。

二、后处理程序

后处理程序为主程序的计算结果提供绘图手段。以单井图、平面等值图、剖面等值图、统计直方图、立体图、综合评价图等六种图件形式, 重现油气盆地的沉积史、构造史、古热流史、古地温史、烃类成熟度史、生烃史、排烃史、运移聚集史以及综合评价结果。各种绘图程序均具有断层处理、图形编辑等高技术功能, 并有英文、汉字显示。

三、主 程 序

主程序是由地史、热史、生烃史、排烃史、运移聚集史及综合评价等六大模型有机组成, 既有批量处理软件, 又有交互处理软件。

- (1) 地史模型: 功能是重建油气盆地的沉积史和构造史。
- (2) 热史模型: 功能是重建油气盆地的古热流史和古地温史。
- (3) 生烃史模型: 功能是重建油气盆地的生烃史。有两种子史, 即烃类成熟度 (R_o 、降解率) 史和生烃 (油、气) 量史。
- (4) 排烃史模型: 功能是重建油气盆地的排烃史。有两种子史, 即排烃 (油、气) 量史和排烃 (油、气) 流线史。
- (5) 运移聚集史模型: 功能是重建油气盆地的烃类运移聚集史。
- (6) 综合评价模型: 功能是确定生烃中心、进行区带评价及综合评价, 可指出潜在油藏的位置及资源量。

第三节 地 史 模 型

地史模型的功能是重建油气盆地的沉积史和构造史。

在盆地模拟系统中, 沉积史和构造史的作用在于为以后的热史、生烃史、排烃史和运移

聚集史的模拟提供一个时空模拟范围。

在现代盆地模拟系统中，一般有两种重建地史的技术：回剥技术，超压技术。回剥技术属反演法，适用于正常压实带；超压技术属正演法，适用于欠压实带。回剥技术的优点是精度高，缺点是未考虑超压而不适用于欠压实带。

度低。是否可以发展一种技术，既考虑超压又确保精度高？回答是肯定的，这就是回剥与超压相结合的技术。其主要思路是：从已知的盆地现状出发，先采用回剥技术由今溯古重建各地层的地史。对于欠压实地层，采用超压技术从古到今修正回剥技术所得的地史。这样，既得到古超压史，又确保计算精度。回剥与超压相结合的技术是重建沉积史和构造史的最精确技术。

当今的盆地模拟系统均以垂直沉降的假设为基础，即不考虑盆地的拉张与挤压。将平衡剖面技术引入盆地模拟的地史模型，有机地与原有地史模型中的地质机理结合起来，使盆地模拟具有处理盆地拉张与挤压的能力。

地史模型是盆地模拟的基础，其精度直接影响后面的热史、生烃史、排烃史和运移聚集史四个模型的精度。地史模型应考虑尽可能多的地质事件，如沉积压实、超压、单层剥蚀、多层连续剥蚀、沉积间断、古水深、断层、拉张与挤压等。

模拟油气盆地的沉积史和构造史的方法可分正演和反演两种类型。正演是指从古到今恢复地史，如超压技术；反演是指由今溯古恢复地史，如回剥技术。

BASIMS 首先提出了回剥与超压相结合的技术、与盆地模拟相结合的平衡剖面技术，并改进了回剥技术和超压技术，例如，多达 10 种岩性（砂、泥、灰、煤等）的沉积压实、剥蚀处理、沉积间断、古水深、断层处理、快速回剥迭代、求解超压方程、从地震剖面上选取“人工井”、盆地的拉张与挤压等。

一、回剥技术（正常压实带）

回剥技术适用于正常压实带，即超压为零的情况。它所用的关键参数是孔隙度—深度曲线，应满足如下三个条件：

(1) 由于不同地层的岩性和结构存在差异，各地层应有各自的孔隙度—深度曲线。

(2) 由于我们不知道古代的孔隙度—深度曲线，只得用今天实测的孔隙度—深度曲线来替代，而这种曲线可能受到各种地质事件（如剥蚀、断层等）的影响，不能真实反映正常压实下的孔隙度随深度变化的规律。因此我们必须消除这些影响，获得反映正常压实状况下的孔隙度—深度曲线，供回剥技术使用。

(3) 各地层应有多达 10 种岩性（砂、泥、灰、煤等）各自的孔隙度—深度曲线，其中砂岩假定为除泥、灰、煤等指定岩性外的所有其他岩性之总和。

反演的回剥技术的过程大体如下：根据质量守恒法则，随着埋藏深度的增加，地层厚度变小，但地层的骨架厚度（也称实心厚度）始终不变。所谓骨架厚度是假设地层孔隙度变为零时的地层厚度。回剥的主要思路是：各地层在保持其骨架厚度不变（除剥蚀层和断裂层外）的条件下，从今天盆地分层现状出发，按地质年代逐层剥去，直至全部剥完为止。

回剥技术采用沉积压实原理，即：随着埋藏深度的增加，地层的上覆盖负载也增加，导致孔隙度变小，体积变小。可以假定地层的横向在沉降过程中不变，而仅是纵向变化。因此，地层体积变小就归结为地层厚度变小。再根据骨架密度在沉陷过程中不变的假设，地层的骨架厚度（也称实心厚度）始终不变，除非发生剥蚀和断层等事件。骨架厚度是假设地层孔隙度为零时的地层厚度，它总是小于实际的地层厚度。骨架厚度公式如下：

$$h_s = \int_{z_1}^{z_2} [1 - (z)] dz \quad (3 - 1)$$

式中 h_s ——地层的骨架厚度；

z_1 ——地层的顶界深度；

z_2 ——地层的底界深度；

(z) —— z 深度的地层孔隙度。

二、超压技术（欠压实带）

超压技术适用于欠压实带，即超压不为零的情况。它所用的关键参数是渗透率，更确切地说，是超压地层的顶界和底界的渗透率。有人视渗透率为孔隙度的单一函数，也有人视为孔隙度和骨架颗粒比面的函数。后者是 Kozeny - Carman 公式，作者认为这个公式较好。超压技术属正演（从古到今），即：从地表开始，计算一个地层的古超压史，同时算出相应的古厚度史，一直计算到今天。这个古厚度史可能与实际厚度不一致，这时调整计算该地层的骨架厚度，进行第二次从古到今的计算；直至古厚度史的今天值与实际厚度吻合。

(1) 古超压方程：

$$\frac{p_a}{t} = G \frac{H}{t} + \frac{G}{C} \cdot \frac{1}{h_s} \cdot \frac{(1 - \bar{z})^2}{1} \frac{h}{t} \quad (3 - 2)$$

式中 p_a ——某地层的古超压，MPa；

H_s ——该层的上覆沉积物的厚度，m；

t ——埋藏时间，s；

\bar{C} ——地表至该层顶界的各岩性孔隙度—深度曲线的压缩系数的平均值；

——地层中点的孔隙度；

\bar{z}_1 ——地层顶界的孔隙度；

h ——地层的厚度。

$$G_a = [\bar{\rho}_s (1 - \bar{z}) + \bar{\rho}_f - \rho_f] g \quad (3 - 3)$$

式中 $\bar{\rho}_s$ ——厚度 h 中骨架的平均密度， g/cm^3 ；

$\bar{\rho}_f$ ——厚度 h 中孔隙流体的平均密度， g/cm^3 ；

——厚度 h 的平均孔隙度；

ρ_f ——地层中点的孔隙流体的密度， g/cm^3 ；

g ——重力加速度。

(2) 古地层厚度方程：

$$\frac{h}{t} = - \frac{K_1}{\mu_1} + \frac{K_2}{\mu_2} \frac{p_a}{0.5h} \quad (3 - 4)$$

式中 K_1 ——地层顶界的渗透率；

K_2 ——地层底界的渗透率；

μ_1 ——地层顶界的流体粘度；

μ_2 ——地层底界的流体粘度；

h ——古地层厚度。

三、回剥与超压相结合的技术

超压技术所得的古厚度史不一定与先前的回剥技术所得的古厚度史相符。所以，还需用超压技术所得的某层古厚度史，修正该层的底界及其下面各地层的底界。这称为在回剥技术的地史基础上施行超压技术的地史修正。

四、正断层处理

目前极大多数盆地模拟系统都没有模拟断层发展史的功能，原因不仅在于断层本身的复杂性，而且在于断层处理软件设计的高难度。一般来说，盆地的拉张造成正断层，盆地的挤压造成逆断层。逆断层的处理比正断层的处理更难，尤其是逆断层导致一口井中出现重复层的情况。BASIMS 暂时只考虑正断层发展史的恢复方法，在回剥技术的处理过程中插入断层处理功能。

断层处理过程有如下三点原则：

(1) 当地质年代 $t = 0$ （今天）时。

计算断点的位置。计算断点与所在地层的底界之间的骨架厚度，以此控制断点的位置。

计算断距的骨架厚度。

如果恢复的断距为正，表示地层的底界将垂直向下移动恢复，则断层的骨架厚度的计算起点是地层的底界，终点是底界加上断距。如果恢复的断距为负，表示地层的底界将垂直向上移动恢复，则断距的骨架厚度的计算起点是地层的底界减去断距，终点是底界，并在计算结果上赋予负号。

(2) 当 $t = 0$ 时。

由于断点与所在地层的底界之间的骨架厚度保持不变，故断点在该地层上的位置可按此原则确定。

(3) 当 $t =$ 断层事件发生的年代时。

凡受该断层事件影响的地层，其骨架厚度加上对应的断距骨架厚度，以消除断层事件的影响。断距骨架厚度的正、负分别表示了地层朝着变厚、变薄方向恢复。断点所在地层的骨架厚度恢复后，就可使用上述的第 2 点原则。

五、古水深处理

如果某地层在完成沉积时存在古水深（若是最浅地层则为今水深），那么在该地层完成沉积时它及其下面的所有地层的底界均应加上这个水深。如果最深地层在其沉积开始时存在古水深，这个古水深也应在地史恢复中加以考虑。

六、平衡地质剖面

1. 平衡地质剖面的发展、现状及研究意义

自本世纪初 Chamberlain (1910, 1919) 用平衡剖面的概念估算北美阿巴拉契亚山脉及落基山脉的底部滑脱面深度后，Bacher (1933), Coguel (1962), Loubsober (1962) 等许

多学者都应用了这一概念。1969 年加拿大学者 Dahlstrom 第一次系统地提出了平衡剖面方法，并成功地应用于阿巴拉契亚山前的 Alberta 油田之后，平衡剖面技术不断发展和完善。在伸展构造区，虽然亦有少数成功的范例，但所做的工作要少得多。其较大的难点在于：造山带平衡剖面计算中可以忽略的沉积压实作用在伸展构造区却起着重要作用；铲状断层和生长断层常常发育；剥蚀恢复亦是前人很少问津的课题。直到 1983 年，Gibbs 才首先提出平衡剖面的概念用于张性地区的分析研究，他运用平衡剖面技术编制和复原伸展地区的地质剖面，计算伸展量与滑脱深度，为平衡剖面技术在伸展地区的应用奠定了基础。

近年来，Davison (1986)，G. Williams (1987)，M. G. Roman (1989)，F. D. J. William (1991) 等学者均做了大量的工作，取得了不少新进展。在我国，中国地质大学与中国海洋石油总公司、石油大学、河北地质学院与物探三处等科研单位也在这一领域作了大量有益的工作，同时也取得了不少成果。

模拟盆地的演化史，重现构造的发生、发展与变迁，是地质家长期以来梦寐以求的事。计算机技术的广泛应用，使其成为可能。利用平衡剖面技术和计算机应用技术，研制平衡剖面软件的目的在于：(1) 帮助地质工作者快速地评价和检验地震地质解释剖面，使之得到及时的修正；(2) 确定盆地的构造演化史，认识局部构造的发生发展过程，以便制定有效的勘探策略；(3) 更精确地圈定油气藏的几何形状、范围及其演变，并为确定油气运移和聚集的时间和方向提供基础的地质资料。

2 平衡地质剖面基本原理

平衡剖面法，是指可以把剖面上的变形构造通过几何学原理全部复原成合理的未变形状态。它是为了建立合理的地质模型剖面而提出的一种几何学方法，其基本约束条件是：如果变形前后物质的体积不变，则垂直构造走向的剖面上体现为“面积不变”；如果变形前后岩层厚度保持不变，则可以转化为“层长不变”。建立平衡剖面时，一般要遵守如下原则。

(1) 剖面线要平行于构造运动方向，即一般是垂直于构造带走向。斜切构造带走向的剖面一般不能平衡或存在着不同程度的误差。

(2) 剖面中的变形构造必须是可逆向复原的，并且复原后符合一般的地质准则，如逆冲断层沿运动方向总是向上切割地层，伸展断层总是向下切割地层，地层界面保持连续的变化，同一断层不呈锯齿状等。

(3) 变形前后的物质守恒。物质既不能创造，也不会消灭，这一物理学定律在地质学中的应用便转变成了“体积不变原则”，即变形前后区域地层所占的体积不变，但体积是三维空间，这使体积守恒原则难以应用，在垂直构造走向的剖面上的变形，通常可以假设为平面应变，因此这时的三维体积不变原则可转化为二维的面积不变原则。如果进一步假设变形前后岩层厚度保持不变，当各层间没有不连续的滑脱断层或底板断面时，则面积不变原则可以转化为“层长不变原则”，因此各地层恢复后的原始长度在同一剖面中应当一致。

(4) 断层位移距守恒。一般情况下，对于同一断层应当保持相同的位移量，或者等量的位移量被转移，如断层沿倾向转变为褶皱，使沿断层的位移逐渐转换为褶皱造成的缩短；断层发生分叉，使位移量分散到各小断层之上；出现同生断层，位移量被地层厚度差异弥补等等。

3 构造变形几何模型

1) 几何模型的假设条件

主要的假设包括：

(1) 构造变形只发生在上盘，下盘未发生变形。

(2) 构造变形为平面应变，即质点只在剖面内发生位移，没有物质移出剖面，也没有物质移进剖面。

(3) 上盘变形是由单一的变形机制所引起的，根据地质条件和变形机制的不同，可建立以下 6 种几何模型：水平断距不变模型（垂向剪切模型）、斜向剪切模型、位移距不变模型、层长不变模型、滑移线模型、面积不变模型。

2) 张性地区构造变形几何模型

张性地区的基本构造特点是正断层发育，其中尤以铲状正断层最为常见，它常控制和影响盆地及其中的地层形态。因此以铲状正断层为主，建立张性地区构造变形的几何模型。

水平断距不变模型（Verrall, 1981; Gibbs, 1983），该模型假定断层的水平断距 H 在上盘的构造变形过程中保持恒定。上盘中的质点从原来未变形的位罝水平移动一段距离 H ，然后沿垂直滑动面向下运动充填水平拉伸形成的楔形断层空隙。

斜向剪切模型（White, 1986），该模型假定上盘中的质点先平行于区域倾斜线移动一段距离 H ，然后以剪切角（从区域倾斜线的法线上测量）向下运动充填水平拉伸形成的楔形断层空隙。

位移距不变模型（Coword 和 Gibbs, 1983; Williams 和 Vann, 1987），该模型假定在上盘下降过程中沿断层面测量的位移距 D 保持不变，但位移距的水平分量 H 和垂直分量 T 却沿着横断面是变化的。

层长不变模型（Suppe, 1983），该模型假定上盘的岩层在发生构造变形过程中长度保持不变。上盘的变形是由顺层面滑动的弯滑褶皱作用形成的。层面为活动的滑动面，并假设层内变形很小。

滑移线模型（Williams 和 Vann, 1987），该模型假定上盘中的质点沿平行于主断层绘出的滑移线移动。该模型并不像位移距不变模型那样认为位移路径在上盘给定的垂线上是平行的，它要求在上盘的近似垂线上，单条位移路径的倾角随深度减小，沿滑移线测量的位移矢量只有矩形图板垂直于主断层的倾角稳定段的方向才是平行的。

3) 压性地区构造变形几何模型

压性地区的构造变形往往比张性地区复杂，而且常常伴有不可复原的构造变形——各种塑性变形。因此，在构造变形恢复时常遇到很大困难，甚至是不可解决的问题。在软件设计过程中，我们把复杂的构造变形简化为可操作的各种单一的变形，如层长不变、面积不变等。同时，为了克服单一变形机制的不足，还重点加入了各种人工干预的变形方法，从而达到了很好的实际应用效果。

面积不变模型，又叫等面积模型，是压性地区构造变形复原的主要方法，其基本涵义有两点：其一，一旦把一个波状岩层展平，而其中又表示了合理的断层轨迹，则面积平衡就能证明，在变形和复原的两种情况下岩层的长度（ L ）和厚度（ T ）是彼长此消的；其二，在地震剖面或特别复杂的剖面深部，要确定波状岩层的长度可能是困难的，或者是根本不可能的。假如我们已知位于深部的地层单位厚度（ T ）以及为了填满剖面所需要的面积（ A ），就可以计算出有关的地层长度（ $L = A / T$ ）。也就是说，面积、长度和厚度，三者之中若知其二者之值，便能推算出第三者的值。

4 构造变形的复原

构造变形可根据变形几何模型的逆过程恢复到未变形状态，复原步骤如下：

(1) 建立复原剖面的标志面或线。一般假定标志面在未变形前是一水平面，如果断层上盘、下盘一起曾遭受过整体的区域变形，则该复原的标志面可能为区域倾斜线，这时可用从下盘的地层断开点向上盘引地层的切线建立区域倾斜的复原标志面。

(2) 将断层上盘的变形地层界面上的各点按照不同的几何变形模型恢复到标志面上，同时上盘上的断层面上的各点也作相应的等量恢复，这时断面上、下盘之间将出现同一个楔形空间。

如果采用垂直剪切模型恢复，则将上盘变形层上的各点垂直向上移动到标志面上，而上盘的断层面上各点向上垂直移动一个等于该垂线上变形移动到标志层的距离；如果采用斜向剪切模型则是将上盘变形层上的各点以斜向剪切角倾斜向上移动到标志面上，而上盘的断层面上各点向上以相同的斜向剪切角移动到一个等于剪切面上变形层移动到标志层面上的距离（即断层面上各点的运动矢量与上盘变形层上各点的运动矢量相同）。

(3) 将断层上盘的各地层点及断层点向断层下盘方向整体水平移动一个拉伸量，从而使楔形空间闭合，断层上、下盘叠合在一起，复原到未变形状态。

如果以某一几何模型进行复原后，断层上、下盘的叠合程度将出现较大的差别，这说明所采用的几何模型可能不合适，这时可更换几何模型再进行复原，直到这种差别降低至最小程度，由此检验几何模型的适用性，也可以采用前述的确定几何模型的方法。

(4) 逐层复原演化史剖面。首先将最顶层第一层剥掉，将第 2 层的顶面按前述的变形恢复方法复原到未变形状态，其下的 2，4 等各层的顶层也作相应的等量恢复，于是便可得到第 2 层沉积后的构造剖面；再将第 2 层剥去，将第 3 层的顶面恢复到未变形状态，其下各层做相应的等量恢复，于是得到第 3 层沉积后的构造剖面。依此方法类推，直至得到初始状态的剖面，由此便得到剖面的构造演化史。

第四节 热 史 模 型

热史模型的功能是重建油气盆地的古热流史和古地温史。

在盆地模拟系统中，古热流史和古地温史的作用在于为以后的生烃史的模拟提供温度场。模拟油气盆地的古热流史和古地温史的方法有两种：一种是地球热力学法，另一种是地球热力学与地球化学相结合的方法（以下简称“结合法”）。地球热力学法的缺点是：不同方法算出相互差异较大的结果，但又没有使用某种实际检验手段判别哪个正确哪个错误。例如，在英国北海油田，有的热史模型（如 Mc Kenzie 法）算出的古热流在过去约 90 Ma 内总是高于今热流；而有的热史模型（如 Falvey 法）算出的古热流总是低于今热流。两者结果背道而驰，其中必有一错。如果不通过一种与计算无关的实际资料来检验，就判别不出哪个正确哪个错误。

结合法是反演技术，即根据已知的盆地今地温，反推出该盆地的古热流史和古地温史，并要求其与地球化学资料（如镜质组反射率 R_o 等）相符，可见结合法弥补了地球热力学的上述缺点。所以结合法是重建古热流史和古地温史的最可靠方法。

热史模型是建立在前面的地史模型的计算结果的基础上。它是盆地模拟的关键，因为古地温史是控制成熟度的最重要客观因素，其精度直接影响后面的生烃史模型的精度。

BASIMS 改进了结合法，例如：多达 10 种岩性（砂、泥、灰等）的热导率，今热流的计算，优选尝试法等。

前面提到了地球热力学法的缺点，以及能克服该缺点的地球热力学与地球化学相结合的方法。首先引入到这种“结合法”的地球化学资料是镜质组反射率（ R_o ），后来又引入了一些地球化学资料，如磷灰石裂变径迹（AFT）、甾烷、芳烃等。

一、 R_o 法

下面介绍如何使用 R_o 与热传导相结合来模拟古热流史和古地温史。

第 1 步求今热流 Q_0 ：

$$Q_0 = K_{t0} \cdot \text{grad}T \tag{3 - 5}$$

式中 K_{t0} ——从地表至井底的平均热导率；
 $\text{grad}T$ ——实测井底地温梯度平均值。

第 2 步求古热流 Q ，假设古热流 Q 与今热流 Q_0 有如下关系：

$$Q(t) = Q_0 [1 + (t_m - t)] \tag{3 - 6}$$

式中 Q ——古热流；
 Q_0 ——今热流；
 t_m ——井底今天的地质年龄；
——古热流 Q 与今热流 Q_0 的关系因子，可由尝试法确定。

第 3 步求古地温 T ，根据热传导原理，深度为 z 的某点的古地温为：

$$T(z, t) = T_s + (t) \int_0^z \frac{1}{K_t(z)} dz \tag{3 - 7}$$

式中 T ——古地温；
 T_s ——地表年平均温度；
 z ——该点的古深度；
 K_t ——任一深度 z 的热导率。

二、AFT 法

这里介绍磷灰石裂变径迹（AFT）退火原理及其在热史模拟中的应用。

1. 裂变径迹的形成

矿物中的放射性物质²³⁸U 原子核发生裂变时，对某些矿物晶体如：磷灰石、锆石、榍石等造成的辐射损伤（正电荷富集区），该辐射损伤（损伤痕迹）称为裂变径迹。

2 磷灰石退火裂变径迹的特性

(1) 与热作用相关的唯一性：裂变径迹在热作用下，会发生逐渐愈合、缩短现象。首先从径迹两端开始愈合，然后被断开成若干不连续的小段，直至该径迹全部消失。这一过程称为裂变径迹的退火作用。磷灰石裂变径迹的退火作用只与热作用有关，其他因素（如压力等）几乎不影响径迹的稳定性，因而具有唯一性。

(2) 径迹形成的连续性：由于放射性元素在以相同速率不断发生衰变，因而裂变径迹也在不断地形成。而且，由于径迹形成速率与矿物中铀元素含量成正比，而²³⁸U 的半衰期为 10^{10} （百亿年）数量级，因而可以认为在整个沉积盆地地质历史时期，一定量的铀矿物含量

是稳定不变的。所以同一岩石样品中径迹形成速率是一个稳定的常数。这称为径迹形成的连续性、稳定性。根据这一特性，实验室可以由裂变径迹的数量多少（径迹密度及岩石样品中铀含量）来测定恒定热条件下的裂变径迹开始发生的年代——裂变径迹年龄。比如测定火山喷发物的径迹年龄（火山喷发的地质年代），这在造山带研究中，判断火山喷发、岩浆侵入作用的时间等特别有效。在沉积盆地中，一般最大热事件后往往会叠加后期次级热事件，而且随着沉积盆地的沉降埋藏，本身会存在一个埋藏升温过程，因而会造成不同时期形成的裂迹有着不同程度的退火作用。所以实验室测得的现今的裂变径迹分布是地质历史时期各个不同时间段发生的径迹组的集合体。

(3) 径迹存在的区间性：当温度达到一定程度（一般为 125℃）后，矿物中的径迹会全部退火、消失，因而裂变径迹存在、保留具有一定的温度区间，称为区间性。这也限制了裂变径迹研究具有一定的局限性：只能反映相对较低的热作用过程。对沉积盆地历史而言，则可能只保留了最近地质年代的信息。具体对于塔里木盆地而言，磷灰石裂变径迹一般只能反映二叠纪以后的热历史。

3 利用磷灰石裂变径迹研究热历史的可行性

由于磷灰石裂变径迹的退火具有只与热作用相关的唯一性以及径迹发生具有稳定性、连续性的特点，因而在弄清磷灰石裂变径迹退火作用与热作用（温度）相关规律的基础上，通过实验室测定样品现今的退火情况（径迹密度、平均径迹长度、径迹长度分布），则能定性推断该样品所经受的热事件；进一步根据退火与温度的定量关系，通过定量模拟计算，完全有可能较准确地反演样品的热史路径。因而根据磷灰石裂变径迹分布研究古热史是完全可行的。

4 磷灰石裂变径迹退火机制

地质退火现象及实验室退火数据观测均表明，裂变径迹的退火遵循温度、时间互补原理，具体的模型有：平行线模型，活化能不随温度、退火程度的变化而变化；扇形线模型，活化能随退火程度的增加而增加。经统计检验和退火数据分析，扇形线模型被认为是较好的模型，目前已被广泛采用。其数学表达式如下：

$$\begin{aligned} g(r) &= [\{ (1 - r^{2.7}) / 2.7 \}^{0.35} - 1] / 0.35 \\ &= -4.87 + 0.000168 T [\ln(t) + 28.12] \end{aligned} \tag{3-8}$$

式中 T——绝对温度，K；
t——时间，s；
r——径迹长度/ 初始径迹长度。

该模型描述的是一个恒温的退火过程。而实际的地质热史过程都是变温过程，因而需要根据等价时间原理，将一个变温过程转换成若干有序的恒温过程的集合：热史路径被有限等分为若干个等时间段 t_i 。当 t_i 足够小时， t_i 内温度可视为常数 T_i ，因而在 t_i 内是一个近似的恒温过程。

等价时间原理认为：已退火到一定程度 r_{i-1} (l_{i-1}/ l_0) 的径迹进一步退火时，其退火程度与引起以前退火的温度时间条件无关，仅取决于达到的退火程度 (r_{i-1}) 和当前的温度、时间 (T_i, t_i) 条件。根据这一原理，在计算第 i 个时间段 t_i 、温度 T_i 条件下最后达到的退火程度 r_i 时，只要：

(1) 根据温度、时间互补原理，首先求出在当前 T_i 温度下，要获得 r_{i-1} 的退火程度所

需的等效时间 t_{eq} :

$$\ln(t_{eq}) = A + B(r_i - 1) / T_i \tag{3 - 9}$$

(2) 再考虑加上该段时间 t_i 在温度 T_i 下的退火效应:

$$\ln(t_{ep} + t_i) = A + B(r_i) / T_i \tag{3 - 10}$$

如此依次计算可求得各组径迹的退火史 (r_i 史), 并最终得到各组 (同一时间段内生成的径迹为一组) 径迹今天的 r 值, 从而可得到各组的平均长度 $\bar{l}_i = l_0 \times r_i$ 。据统计分析, $l_0 = 16.3\mu m$ 。更进一步, 根据统计分析有关定律可得到总体径迹长度分布曲线。

5 在地质热史分析中的实际应用

通过实验室测定, 每一个磷灰石径迹样品主要提供以下三个方面的指标: 裂变径迹平均长度、径迹长度分布及径迹发生年龄。平均长度可作为受热程度的直接度量, 推算最大热事件温度 T_{max} (< 125 的条件下)。径迹长度分布是样品受热历史的最直接、最综合的反映, 实测样品的径迹长度分布是由各时期连续生成且记录相同长度时间段生成的若干径迹组叠合而成, 因而不同的热历史具有不同的径迹分布。即使是具有相同最高终点温度的升温过程, 升温速率不同, 也会造成径迹长度分布的宽窄不同, 很好地克服了镜质组反射率 R_o 的热效应累积的缺点。

在盆地模拟系统 BASIMS 中, 磷灰石裂变径迹热史分析模块通过正演模拟方法来研究样品的受热历史。具体作法是: 通过假定温度路径条件, 根据退火模型计算出该路径条件下该样品今天的退火程度 (包括平均径迹长度、径迹长度分布及径迹年龄), 与实际观测结果对比、分析, 从而确定热史路径的正确性。

三、古热流的非线性变化

在前面公式中, 古热流与今热流的关系因子 是一个常数, 导致古热流随地质年代线性变化, 这也是不符合客观规律的。如果将 确定为: 在同一地质时期为常数, 而不同地质时期具有不同值, 则古热流呈非线性变化 (实质为分段线性)。

设一口井有 m 个地层, 各个地层的地质年龄为 t_i ($i = 1, 2, \dots, m$), 则古热流的非线性变化的公式表示如下:

$$Q = Q_i [1 + i_{i+1} (t - t_i)] \quad \text{当 } t_{i+1} \leq t < t_i \\ (i = 0, 1, \dots, m - 1) \tag{3 - 11}$$

式中 Q ——在地质时期 ($t_{i+1} \leq t < t_i$) 内的古热流, HFU , 即 $kcal / (cm^2 \cdot s)$;
 Q_i ——地质年代 t_i 时的古热流, 但 t_0 ($t_0 = 0$, 即今天) 时 Q_0 是今热流, $kcal / (cm^2 \cdot s)$;
 i_{i+1} ——在地质时期 ($t_{i+1} \leq t < t_i$) 内, 古热流 Q 与 Q_i 的关系因子, Ma^{-1} ;
 t ——地质年代, Ma 。

四、统计法求今热流

恢复古热流史的必需参数是今热流。根据地球热力学理论及实测验证:

(1) 在一维 (垂直方向) 情况下, 热流是一个常数, 它不随深度变化而变化;

(2) 在二维 (X, Y) 情况下, 在同一构造内热流基本上是一个常数, 不同构造的热流在平面上稍有变化。

确定今热流的可靠方法至今仍是实测手段。可是不少探区缺乏今热流的实测资料, 不得不使用计算公式。前面提到一种根据今地温梯度和热导率这两个参数求今热流的方法。按理说, 热导率应随深度增加 (孔隙度随之变小) 而增大, 而今地温梯度应随深度增加而变小, 并保证两者乘积 (即今热流) 为一个常数。但在实际计算中, 由于今地温梯度只在局部井段测试, 得不到一个正确反映一口井从井口至井底变化的地温梯度, 而给出的往往是一个常数。这样一来, 两者乘积 (即今热流) 的计算结果势必随深度增加而不断变大。也就是说, 越深, 计算出的今热流就越大, 这显然是错误的。这里给出一个计算今热流的修正方法, 即: 以井底的计算结果作为全井的今热流; 前提是各地层分别有较正确的今地温梯度。根据全球已获得的各地实测的今热流资料, 导出了未知地点的今热流值公式; 只要将未知地点的经纬度代入该公式就可算出今热流, 它不需要今地温梯度参数。

Pollack 等搜集了全球 20201 个地点的 24774 个实测热流值, 其分布均匀度达到地球表面每 5°×5 经纬率的格子, 有实测值的占全部格子的 62%。使用“连带勒让德函数”, 构造了一个给出经纬度就能求出今热流的解析表达式:

$$Q_0(\varphi, \lambda) = \sum_{n=0}^{12} \sum_{m=0}^n [A_{nm} \cos(m\lambda) + B_{nm} \sin(m\lambda)] p_{n,m}(\cos \varphi) \quad (3-12)$$

式中 Q_0 ——今热流 $mW \cdot m^{-2}$;
——纬度, 0°~180°, 在北极为 0°, 在赤道为 90°, 在南极为 180°, (°);
——经度, 0°~360°, 定义与地理上的普通定义一致, (°);
 A_{nm} ——全球热流场的第一调和系数, $mW \cdot m^{-2}$;
 B_{nm} ——全球热流的第二调和系数, $mW \cdot m^{-2}$;
 $p_{n,m}$ ——连带勒让德函数。

第五节 生烃史模型

生烃史模型的功能是重建油气盆地的烃类成熟度史和生烃量史。

在盆地模拟系统中, 烃类成熟度史和生烃量史的作用不仅在于计算生烃量, 而且在于为以后的排烃史的模拟提供烃类演化环境。

模拟油气盆地的烃类成熟度史和生烃量史的方法大体有两大类。第一类方法是 TTI— R_o 或 Easy R_o , 均是用于计算 R_o 作为烃类成熟度指标, 但前者需有 R_o —深度曲线, 后者则不需要。它们需用由化验室做出的热模拟资料, 诸如各种干酪根的降解率— R_o 曲线 (或生油率— R_o 曲线)、生气率— R_o 曲线等。第二类方法是化学动力学方程组, 用于计算降解率作为烃类成熟度指标。它 also 需用热模拟资料, 诸如干酪根的各个活化能, 以及对应于每个活化能的各种干酪根所具有的生烃潜量和频率因子等。可见, 上述两大类方法都是建立在干酪根热降解化验的基础上, 属有机生油理论。

生烃史模型是建立在前面的地史和热史两个模型的计算结果的基础上。它是盆地模拟相当重要的部分, 尤其是生烃量史是油气资源评价的一部分, 其精度又直接影响后面的排烃史模型的精度。

BASIMS 改进了 TTI—R_o 法、Easy R_o 法和化学动力学法，例如：在模拟地区建立实地的 R_o—TTI 回归公式（而不是各地区通用的公式），用 R_o—深度曲线来校正 Easy R_o 法算出的值，化学动力学方程组的快速精确的求解法等。BASIMS 还考虑了 3 种烃源岩（泥岩、石灰岩和煤）。

一、烃类成熟度史

表达烃类成熟度的指标较多，但目前盆地模拟中一般有两种指标：镜质组反射率（R_o），干酪根降解率。它们均可以作为生烃量史计算的重要参数。除这两种指标外，其他指标只能表达烃类成熟度，而不能参与生烃量的计算，故盆地模拟不采用这些指标。重建烃类成熟度史有两种方法：一种是 TTI—R_o 法或 Easy R_o 法，算出 R_o 史；另一种是化学动力学法，算出降解率史。

1. TTI—R_o 法

TTI—R_o 法的过程是：根据地史模型所得的埋藏史以及热史模型所得的古地温史，计算出时间温度指数（TTI）史；根据实测的 R_o 以及 TTI 的今天值，制作 R_o—TTI 回归曲线；根据 TTI 史以及 R—TTI 回归曲线，计算出 R_o 史。

根据热史模型所得的单井各地层底界的古地温史，可以通过下面公式求出该井各层底界的 TTI 史。

$$TTI = \int_0^t 2^{[T(z, t) - 105] / 10} dt \tag{3 - 13}$$

式中 t——埋藏时间；

T（z，t）——古地温。

根据单井各地层底界 TTI 的今天（t = 0）值以及 R_o—深度曲线上对应于各地层底界最大埋深的 R_o 值，可以得到单井的 R_o—TTI 回归曲线。一般来说，假设地层数目为 m，则这种曲线可以由 m 个对数表达式表示如下：

$$\begin{aligned} R_o &= a_1 \lg TTI + b_1 && \text{当 } 0 < TTI < c_1 \\ R_o &= a_2 \lg TTI + b_2 && \text{当 } c_1 < TTI < c_2 \\ &\dots && \dots \\ R_o &= a_{m-1} \lg TTI + b_{m-1} && \text{当 } c_{m-2} < TTI < c_{m-1} \\ R_o &= a_m \lg TTI + b_m && \text{当 } TTI > c_{m-1} \end{aligned} \tag{3 - 14}$$

2 Easy R_o 法

前面的 TTI—R_o 法适用于勘探程度较高阶段，原因是需使用 R_o—深度曲线。现提出另一种求 R_o 史的方法，即 Easy R_o 法，可适用于勘探程度较低阶段，因为它不需要 R_o—深度曲线。

Sweeny 等根据镜质组的组分随时间和温度而变化的现象，使用了大量而广泛的样品，提出了一种求 R_o 的简便方法，即 Easy R_o 法。该法适用于 R_o 处于 0.3% ~ 4.5% 之间的范围。

$$\begin{aligned} R_o &= \exp (-1.6 + 3.7 F_k) \\ (k &= 1, 2, \dots, \text{直至今日}) \end{aligned} \tag{3 - 15}$$

式中 R_o ——镜质组反射率, %;

F_k ——某井某地层底界的第 k 个埋藏点的化学动力学反应程度, 其值范围是 0 ~ 0.85, 故 R_o 的极大值可能达到 4.7%。

$$F_k = \sum_{i=1}^{20} f_i \{1 - \exp[-(I_{ik} - I_{ik-1})(t_k - t_{k-1}) / (T_k - T_{k-1})]\} \quad (3-16)$$

式中 f_i ——化学计量因子, $i = 1, 2, \dots, 20$ (20 是活化能的个数);

I_{ik} ——参见式 (3-17);

t_k ——该井该地层底界的第 k 个埋藏点的埋藏时间, Ma;

T_k ——该井该地层底界的第 k 个埋藏点的古地温, $^{\circ}\text{C}$ 。

$$I_{ik} = T_k A \exp(-E_i / RT_k) \left[1 - \frac{(E_i / RT_k)^2 + a_1 (E_i / RT_k) + a_2}{(E_i / RT_k)^2 + b_1 (E_i / RT_k) + b_2} \right] \quad (3-17)$$

($k = 1, 2, \dots$, 直至今日)

式中 A ——频率因子的预指数, 其值为 $1.0 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$;

E_i ——活化能, $i = 1, 2, \dots, 20$, kcal/mol;

R ——气体常数, 其值为 1.986 cal/(mol·K);

a_1 ——等于 2.334733;

a_2 ——等于 0.250621;

b_1 ——等于 3.330657;

b_2 ——等于 1.681534。

3 化学动力学法

化学动力学法的过程是: 根据地史模型所得的埋藏史以及热史模型所得的古地温史, 借助于求解化学动力学方程组, 计算出干酪根的降解率史。

描述干酪根热降解过程的化学动力学方程组如下式:

$$\frac{dX_i}{dt} = -K_{1i} X_i \quad i = 1, 2, \dots, 6$$

$$\frac{dU_j}{dt} = K_{2j} Y \quad j = 1 \quad (\text{考虑最终产物为一种气体})$$

$$Y = \sum_{i=1}^6 Y_i$$

$$\sum_{i=1}^6 X_{i0} + \sum_{i=1}^6 Y_{i0} + \sum_{j=1}^6 U_{j0} = \sum_{i=1}^6 X_i + \sum_{i=1}^6 Y_i + \sum_{j=1}^6 U_j$$

按阿雷尼厄斯 (Arrhenius) 公式:

$$K_{1i} = A_{1i} \exp \frac{-10^3 E_{1i}}{R (T + 273)}$$

$$K_{2j} = A_{2j} \exp \frac{-10^3 E_{2j}}{R (T + 273)}$$

对于每个埋藏时间 t_{k+1} ，可降解干酪根的降解率为：

$$D(t_{k+1}) = \frac{X_0 - \sum_{i=1}^6 X_i(t_{k+1})}{X_0} \quad (3-18)$$

$k = 0, 1, 2, \dots, \text{直至今天}$

式中 D ——可降解干酪根的降解率；

X_0 ——生烃潜量；

$X_i(t_{k+1})$ ——由上述化学动力学方程组解出的未知数， X_i 。

从上述的化学动力学方程组还可解出单位生烃量、单位生气量和单位生油量。

二、生 烃 量 史

生烃量史是指每个烃源层的生油量史、生气量史。

当烃类成熟度是由 TTI— R_o 法或 Eays R_o 法所得的 R_o 史表示时，可以通过降解率— R_o 或生烃率— R_o 曲线来计算生烃量；当烃类成熟度是由化学动力学法所得的降解率史表示时，可以直接计算生烃量。

1. 基于 R_o 史的生烃量计算

对于生油量计算，干酪根热模拟试验提供的图版有两种形式：降解率— R_o 关系曲线；生烃率— R_o 关系曲线。只需这两种形式图版中任一种即可。故生油量的计算公式有两种形式。对于生气量计算，干酪根热模拟试验仅提供生气率— R_o 关系曲线。故生气量的计算公式只有一种。

2 基于降解率史的生烃量计算

无论是生油量计算还是生气量计算，都不需要像“基于 R_o 史的生烃量计算”所需的热模拟试验图版，只需要上述提到的化学动力学方程组的求解结果。

第六节 排烃史模型

排烃史模型的功能是重建油气盆地的排烃量史和排烃流线史，即油气初次运移史。

在盆地模拟系统中，排烃量史和排烃流线史不仅在于计算排烃量和排烃方向，而且在于为以后的运移聚集史的模拟提供烃类演化环境。排烃又称为油气初次运移，即烃源层中生成的油气向运载层或储集层的运移。排烃机理至今尚未完全解决，尤其是排气机理。不过，目前多数学者认为：油气在初次运移中的主要“运载体”是沉积物中的原生水；液态烃类主要是以自己固有的相态运移，气态烃类绝大部分是以溶解于水中的状态运移；初次运移的动力主要来自于压实作用、水热增压作用、渗流压力作用、粘土矿物脱水作用等。

油气盆地的排烃量史和排烃流线史的模拟方法有多种。BASIMS 采用了三种研究排烃量史的方法。第一种方法是压实法，基于逐次沉积压实排烃的原理，只研究排油，适用于有规律压实的地区，即孔隙度—深度曲线比较正常的地区。第二种方法是压差法，不仅基于沉积压实排烃的原理，还考虑了生油岩与砂岩之间压差排烃的原理，只研究排油，适用于无规律压实的地区，即孔隙度—深度曲线有异常（如变化较小等）的地区。第三种方法是物质平衡法，基于物质平衡方程，只研究排气。

排烃史模型是建立在前面的地史、热史和生烃史三个模型的计算结果的基础上。它是盆地模拟的非常重要的部分，因为排烃量史和排烃流线史是油气资源评价的一部分，其精度又直接影响后面的运移聚集史模型的精度。

BASIMS 改进了压实排油法、压差排油法和物质平衡法等三种排烃量计算技术。例如：多达十种岩性（砂、泥、灰等）的沉积压实，碳酸盐剖面的压差法，油、气两种排出量等。

一、排 油

介绍两种排油量计算方法，即压实法和压差法。

1. 压实排油法

首先求出排油系数，然后求出排油量。

设某井某烃源层在生油开始后的某时刻（压实前）的体积和孔隙度分别为 V_o 和 ϕ_o ，在该时刻后任一时刻（压实后）的体积和孔隙度分别为 V 和 ϕ

根据骨架的不可压缩性假设，有：

$$V_o (1 - \phi_o) = V (1 - \phi)$$
$$V_o = \frac{1 - \phi}{1 - \phi_o} V \text{ 或 } V = \frac{1 - \phi_o}{1 - \phi} V_o$$

根据压实平衡原理，烃源层压实前后的体积之差就是所排出的流体体积，即：

$$V = V_o - V$$
$$V = V_o - \frac{1 - \phi_o}{1 - \phi} V_o = \frac{\phi - \phi_o}{1 - \phi} V_o$$

排油系数是排出的流体体积 V 与压实前的孔隙体积 $V_o \phi_o$ 之比，即

$$C_{ex} = \frac{V}{V_o \phi_o} = \frac{\phi - \phi_o}{(1 - \phi) \phi_o} \tag{3 - 19}$$

式中 C_{ex} ——烃源层的排油系数；
 ϕ_o ——烃源层在生油开始后的某时刻（压实前）的孔隙度；
 V_o ——烃源层在生油开始后的某时刻（压实前）的体积；
 ϕ ——烃源层在上述该时刻后任一时刻（压实后）的孔隙度；
 V ——烃源层在上述该时刻后任一时刻（压实后）的体积。

2 压差排油法

基本假设如下：

- (1) 烃源层进入生油门限之前，全部孔隙为水所充满。
- (2) 生油岩进入生油门限之后，干酪根降解生成的油除少量吸附在干酪根表面外，绝大部分都进入烃源层的孔隙。
- (3) 在沉积埋藏过程中，生油岩孔隙与砂岩孔隙之间存在着动态平衡。计算生油门限之后任一时刻的排油系数时，均假设该时刻以前生油岩与砂岩之间相对封闭，没有发生过排油，到该时刻这种封闭状态才被解除，并发生由生油岩向砂岩方向的排油。也就是说，排油

是一次完成的，而不是多次完成的。

在上述三点假设的基础上，推导出排油系数，然后求出排油量。

二、排 气

这里介绍物质平衡排气法。

有关天然气的运移，目前还存在很多疑难问题，诸如天然气运移的方式、相态以及动力等。根据有机质成气时体积大量膨胀的特点，利用物质平衡方程，避开了目前还不成熟的理论问题，求得天然气的初次运移史。

分子量较小的天然气，在从固态的干酪根分子和液态的重烃分子降解或裂解成气后，其体积比原来状态增加好多倍，烃源岩粘土空间无论如何也容纳不了这么多体积骤然增大的天然气，加上天然气特别是甲烷的压缩性小及天然气易扩散的特点，就必然出现这样一种情况：以气态存在的游离气可能都将运移出去，也就是说，烃源岩中基本上不会有游离气体的存在。因而，根据物质平衡原理，就可以得到以下平衡方程：

$$Q_{\text{排}} = Q_{\text{生}} - (Q_{\text{吸}} + Q_{\text{溶}}) = Q_{\text{生}} - (Q_{\text{吸}} + Q_{\text{油溶}} + Q_{\text{水溶}})$$

式中 $Q_{\text{排}}$ ——烃源层单位面积排出气体量，即排气强度， m^3/km^2 ；

$Q_{\text{生}}$ ——烃源层单位面积生成气体量，即生气强度， m^3/km^2 ；

$Q_{\text{油溶}}$ ——烃源层单位面积内烃源岩残余油溶解气量， m^3/km^2 ；

$Q_{\text{水溶}}$ ——烃源层单位面积内烃源岩残余水溶解气量， m^3/km^2 。

$Q_{\text{吸}}$ ——烃源层单位面积内烃源岩吸附气量， m^3/km^2 。

1. 残留水溶解气量 $Q_{\text{水溶}}$ 计算

(1) 烃源层中残余水量：

$$\begin{aligned} V_{\text{水}} &= V_{\text{岩}} - (Q_{\text{生油}} - Q_{\text{排油}}) / \rho_o \\ &= 10^6 H P_m - (Q_{\text{生油}} - Q_{\text{排油}}) / \rho_o \end{aligned} \quad (3-20)$$

式中 H ——烃源岩厚度， m ；

——烃源岩平均孔隙度；

P_m ——烃源岩泥岩含量；

$V_{\text{岩}}$ ——单位面积内烃源岩的总体积， m^3/km^2 ；

$Q_{\text{生油}}$ ——烃源岩单位面积生油量， t/km^2 ；

$Q_{\text{排油}}$ ——烃源岩单位面积排油量， t/km^2 ；

ρ_o ——烃源岩原油相对密度， t/m^3 ；

$V_{\text{水}}$ ——烃源岩单位面积残余水量， m^3/km^2 。

。随埋深而变化，可根据下式计算：

$$\rho_o = (R_{s_{gs}} + \rho_{os}) / B_o \quad (3-21)$$

式中 R_s ——溶解油气比， m^3/m^3 ；

ρ_{os} ——原油地表相对密度， t/m^3 ；

ρ_{gs} ——天然气地表相对密度， t/m^3 ；

B_o ——原油体积系数， m^3/m^3 和 R_s 一样，可从该烃源岩作为油气源所形成的油藏之实测 B_o-p (p 为地层压力) 及 R_s-p 关系取得。

(2) 天然气在地层水中的溶解度:

天然气在纯水中的溶解度:

$$R_{sw} = 0.1781 [A + B (145.038 p) + C (145.038 p)^{1.96}]$$

$$A = 2.12 + 0.00345 (1.8 T + 32) - 0.0000359 (1.8 T + 32)^2$$

$$B = 0.0107 - 0.0000526 (1.8 T + 32) + 1.48 \times 10^{-7} (1.8 T + 32)^2$$

$$C = -8.75 \times 10^{-7} + 3.9 \times 10^{-9} (1.8 T + 32) - 1.02 \times 10^{-11} (1.8 T + 32)^2$$

式中 R_{sw} ——天然气在纯水中的溶解度;

p ——烃源岩地层压力, MPa;

T ——烃源岩地层水温度, $^{\circ}C$ 。

含盐量校正, 校正系数 S_c :

$$S_c = 1 - [0.0753 - 0.000173 (1.8 T + 32)] r_{\text{盐}}$$

式中 $r_{\text{盐}}$ ——地层水含盐度, %。

天然气在地层水中溶解度 R_{sw} :

$$R_{sw} = R_{sw} S_c$$

上述经验公式用 B. , 1963 年实验资料进行了严格的检验、校正; 还进行了实际的模拟试算, 证明是切实可行的。

(3) 天然气在烃源岩中的水溶解量:

$$Q_{\text{水溶}} = V_{\text{水}} R_{sw} \quad (3-22)$$

式中 $Q_{\text{水溶}}$ ——天然气水溶解量, m^3/km^2 ;

$V_{\text{水}}$ ——水的体积。

2 残余油溶解气量 $Q_{\text{油溶}}$ 计算

$$Q_{\text{油溶}} = R_s [(Q_{\text{生油}} - Q_{\text{排油}}) / \phi]$$

式中 $Q_{\text{油溶}}$ ——残余油溶解气量, m^3/km^2 ;

R_s ——天然气在油中的溶解度 (溶解油气比), 取值方法前已述及。

3 烃源岩吸附气量 $Q_{\text{吸}}$ 计算

岩石吸附天然气量与很多因素有复杂的关系, 有关研究还较为薄弱, 本文采用庞雄奇提出的经验公式:

$$Q_{bg} = 0.12 C (0.836 + 0.68 R_o + 0.498 R_o^2) \frac{p \exp [-n (T - 20)]}{(1 + 5.32 p) [1 + 0.455 \exp (1 - p)]} \quad (3-23)$$

式中 T ——烃源层温度, $^{\circ}C$;

p ——烃源层压力, atm, 1 atm = 0.1013 MPa;

C ——烃源层有机质丰度, %;

R_o ——有机质镜质组反射率, %;

——烃源岩相对密度, t/m^3 ;

Q_{bg} ——烃源层吸附气饱和度, m^3/m^3 。

$$n = 0.02 / (0.993 + 0.0017 p)$$

若已求得岩石吸附气饱和度 Q_{bg} , 再考虑烃源岩体积, 便可求出整个地层的吸附气量:

$$Q_{吸} = 10^6 Q_{bg} H P_m \quad (3-24)$$

式中 $Q_{吸}$ ——吸附气量, m^3/km^2 ;

H ——烃源层厚度, m;

P_m ——烃源层烃源岩含量。

4 天然气运移计算

由以上各步的计算, 可分别得到天然气在某井任一埋藏时期的溶解量、吸附量, 这实际上是岩石本身该时期残留天然气的最大可能量, 结合该埋藏时期天然气在烃源岩中的实际存在量, 就可求出相应的排出量。对所有井在平面网格上积分求和, 便可最终求出该烃源层各时期天然气总排出量。

第七节 运移聚集史模型

运移聚集史模型的功能是重建油气盆地的烃类运移聚集史, 即油气二次运移史。在盆地模拟系统中, 运移聚集史是最重要的部分, 也是迄今技术上最薄弱的环节。烃类运移聚集又称油气二次运移。油气初次运移(排烃)和油气二次运移, 通称为油气运移。油气运移是这样—个过程: 油气从低孔低渗细粒的烃源层运移到相对高孔高渗的运载层/储集层, 最终在储集层中可能形成一个集中的烃类聚集。油气初次运移是指油气从低孔低渗烃源层运移到第一个相对高孔高渗地层(一般是砂岩或破裂的石灰岩), 其最大运移距离可达 1km。油气二次运移是指继初次运移之后油气通过相对高孔高渗运载层的一系列运动, 它包括油气在运载层内部的运移, 油气沿断层、裂缝、不整合面等通道的运移, 以及聚集起来的油气由于外界条件的变化而引起的再次运移。如果在二次运移过程中遇到一个合适的油藏构造, 油气聚集就形成了。其最大运移距离可达 100km。从运动的连续性来看, 初次运移和二次运移这两个阶段是相互衔接的, 不可分割的。

BASIMS 首次提出三种油气二次运移的模拟方法: 二维三相(油气水)历史模拟法, 三维二相(油气)历史模拟法, 改进的现今流体势模拟法。第一种方法虽然看起来完备且符合客观实际, 但其精度严重依赖于所需的参数, 故在实际应用中往往由于参数达不到要求而导致地质效果欠佳; 第二种方法严格地说是 2.5 维(层间未再细分网格), 多数情况能收到很好的地质效果; 第三种方法虽然最简单, 但对于晚近地质时期能收到较好的地质效果。

一、二维三相(油气水)历史模拟法

关于油气运移机理的早期解释是基于油气在孔隙水中的溶解能力以及油气通过亲水岩石的扩散能力。然而, 这两种能力实在太小而远不足以完成如此大量的油气运移。近十年来的研究表明, 油气运移的动力除了生油岩达到必要成熟度时因生烃引起的高势外, 还有因

压实引起的油气排出，以及流动势、浮力、毛细管力等。目前关于油气二次运移的模型大多数基于简化的物理化学的地质过程并配合经验处理，二维二相模拟方法，机理因素考虑不全面。油气初次运移的主要难点是机理问题，而油气二次运移的主要难点是运载层/储集层的构造发育史模拟以及合理的运移模式。关于构造发育史的模拟是地史模型中的难点，有一个逐步解决的过程。本模型讨论的是油气二次运移的模式，力求开辟一个合理的有效的途径。作者提出了新的油气水混相运移模式，即三维三相模型，综合考虑了多种机理因素，主要的驱动力有：沉积压实，排烃，流动势，浮力、毛细管力等。从地下渗流力学出发，根据流体运动的基本方程组（连续方程、流动势、达西定律、状态方程），导出水油气三相流动方程（水运动方程、油运动方程、气运动方程，再加上一个饱和度平衡方程、两个毛细管力方程，总计6个方程，就可以求出6个未知量，即水、油、气的压力和饱和度： p_w ， p_o ， p_g ， S_w ， S_o ， S_g 。因此，我们得到运载层/储集层内烃类（油、气、水）的压力史和饱和度史。由烃类的压力史可推出烃类的势史，再由烃类的热史可推出烃类的运移速度史和运移流线史。

运移聚集史模型是建立在前面的地史、热史、生烃史和排烃史的计算结果的基础上。它是盆地模拟的最重要部分，因为油气运聚量史是油气资源评价的最重要部分。作者首先提出了三维三相渗流力学法研究油气二次运移。虽然该方法在某些方面与油田开发中的油藏数值模拟有相似之处，但两者的渗流环境截然不同：对于油藏数值模拟，油气水的运动是靠人为驱动（油井采油、水井注水）；对于油气二次运移，油气水的运动是靠天然驱动（沉积压实、排烃、流动势、浮力、毛细管力及构造运动等）。由此导致如下很多的特殊处理：单相（水）初始条件，流入/流出边界条件，随沉降压实和构造运动而变化的模拟范围，非常长的模拟时间等。

1. 油气水三相运动方程组

首先假设如下：水与油之间无相位转换；水与气之间无相位转换；气与油之间只有单向转换，即气可以从油中进出，但油不蒸发到气中。

在上述假设下，把前面提到过的4个基本方程合并起来，可以推导出油气水三相运动方程组如下：

(1) 水运动方程：

$$\partial \cdot \frac{[K] K_{rw}}{\mu_w B_w} (\partial p_w - \partial d) \pm Q_w = - \frac{S_w}{t} \quad (3-25)$$

(2) 油运动方程：

$$\partial \cdot \frac{[K] K_{ro}}{\mu_o B_o} (\partial p_o - \partial d) \pm Q_o = - \frac{S_o}{t} \quad (3-26)$$

(3) 气运动方程：

$$\begin{aligned} \partial \cdot \frac{[K] K_{ro} R_s}{\mu_o B_o} (\partial p_o - \partial d) + \partial \cdot \frac{[K] K_{rg}}{\mu_g B_g} (\partial p_g - \partial d) \\ \pm R_s Q_o + Q_g = - \frac{S_g}{t} + \frac{S_o R_s}{B_o} \end{aligned} \quad (3-27)$$

假设1表示任一相位， $1 = w, o, g$ ，其中 w, o, g 分别表示水相、油相、气相。
式中 ∂ —— 矢量微分算子；

[K] ——绝对渗透率张量，即有方向性的绝对渗透率；

K_{r1} ——相位 1 的相对渗透率；

μ_1 ——相位 1 的粘度；

B_1 ——相位 1 的地层体积因子；

p_1 ——相位 1 的压力；

ρ_1 ——相位 1 的比密度；

d ——基准点以上或以下的任意距离；

Q_1 ——相位 1 的体积项（源或汇）；

——孔隙度；

S_1 ——相位 1 的饱和度；

R_s ——溶解气油比；

t ——埋藏时间。

上面方程只有 3 个，而未知数却有 6 个（ p_w ， p_o ， p_g 和 S_w ， S_o ， S_g ）。所以还需要其他 3 个独立的方程是：饱和度平衡方程，油水系统中的毛细管力方程，成油气系统中的毛细管力方程。它们分别表示如下：

$$S_w + S_o + S_g = 1$$

$$p_{cow} = p_o - p_w$$

$$p_{cog} = p_g - p_o$$

式中 p_{cow} ——油水系统中的毛细管力；

p_{cog} ——成油气系统中的毛细管力。

2 全隐式解法

全隐式解法的主要优点是无条件的收敛性。当然，它所花费的计算机时间约等 IMPES 解法的 7 倍。然而，这是完全值得的。作者曾采用 IMPES 解法来求解前面的油气水三相运动方程组及三个辅助方程，但由于油气二次运移数值模拟的特殊性，发现 IMPES 解法的收敛性和稳定性较差。这种特殊性主要是：单相（水）初始条件，流入/流出边界条件，随沉降和构造运动而变化的模拟范围，非常长的模拟时间等。这些特殊性在一般的渗流力学问题中少见，也是必须给予解决的难点。后来改用全隐式解法，收到了较满意的计算效果。

二、三维二相（油气）历史模拟法

目前盆地的运聚史模拟仍多为剖面的二维模拟，虽然对分析油气运聚有一定意义，但不能求出油气聚集量，也难得出油气分布整体概念。从地质应用来说，油气运聚的平面模拟是基础，剖面模拟只是补充。BASIMS 提出的平面运聚史三维（实质是 2.5 维）模拟方法基于浮力驱动原理及达西定律，考虑了断层、不整合面对油气运聚的影响，研究油气在平面（展布在一定区域有一定厚度的地层）的运移、聚集，可称为拟三维二相运聚模型。应用此法，可以获得一个探区各烃源层和运载层在各地质年代的烃（油、气）柱高度和烃聚集强度的平面等值图。

模型的假设为：排烃量指生烃量中可排出部分；只对烃源层及其上、下邻层进行计算；烃源层排烃量的一部分留在本层，其余排出（例如留 30%，排出 70%）；烃源层向上覆邻层

的排烃量大于向下伏邻层的排烃量（例如上覆邻层接受排烃量的 56 %，下伏邻层接受 14 %）。留在烃源层和排出的烃类比例及向上、下相邻层排烃量的比例，由地质家根据实际情况来取值。

对于任一计算层（烃源层及获得排烃量的运载层，其层厚为 z ），将其顶面划分为一定数量的矩形网格（ $x \times y$ ），足以描述可能存在的断层。根据已钻井及地震剖面上“人工井”的烃源层排烃量，用“四个象限最小距离”插值法，确定各网格点的烃“源”量值。

1. 烃源层排烃量分配法则

基本法则是从最浅的烃源层的上覆运载层开始，逐层往下考虑。可以分为 4 种情况。

1) 烃源层上、下邻层为运载层

当烃源层的邻层均为运载层时，按上述分配比例，则其排烃量留在烃源层的与排出的比例为 3 : 7，排出量中排向上运载层与排向下运载层的比例为 8 : 2。

2) 连续烃源层

当连续烃源层有 2 层以上（例如考虑 3 层）时，对于烃源层 1，其排烃量只配给上运载层；对于烃源层 3，其排烃量只分配给下运载层；对于烃源层 2，其排烃量全部留在本层。

3) 运载层上、下均为烃源层

这种情况下，运载层同时接收来自上烃源层和下烃源层的排出烃量，若仍取上述分配比例，上烃源层排烃量的 14 % 与下烃源层排烃量的 56 % 之和为它所接受的总排烃量。

4) 上、下被烃源层所夹的连续运载层

当连续运载层有 2 层以上（例如考虑 3 层）时，对于运载层 1，所接受的排烃量仅为上烃源层排烃量的 14 %；对于运载层 3，所接受的排烃量仅为下烃源层排烃的 56 %；对于运载层 2，因其上、下邻层均非烃源层，接收不到排烃量，不予考虑。

事实上，在 BASIMS 的实际应用中，地质家可以把任一烃源层的排烃量分配到任一运载层中，不受上述分配法则的限制。

2 计算模型

利用以下计算模型，可以得出一个探区的分层油、气聚集强度等值线图 and 油、气柱高度等值线图。

以下公式中，以下标 h 来标示烃的类型： $h = o$ ，表示“油”； $h = g$ ，表示“气”。
每个网格体的烃柱高度（ H_h ）为：

$$H_h = q_{hd} / \quad (3 - 28)$$

每个网格体所含烃类流往其他网格体所需的浮力为：

$$F_1 = H_h (\rho_w - \rho_h) g \sin \theta \quad (3 - 29)$$

其中： $\tan \theta = H / L$

当 $H < 0$ ，则取 $H = 0$ ，得 $\theta = 0$ ， $F_1 = 0$ ，表示没有浮力作用。

根据达西定律，每个网格体所含烃类流往其他网格体的运移速率为：

$$v_h = - K_h \frac{p}{\mu_h L} \quad (3 - 30)$$

其中：

$$A = \frac{1}{2} (z_{\text{本点}} + z_{\text{其他点}}) = \frac{1}{2} (x + y)$$

$$p = -10^{-5} F_1$$

$$L = 100 (V \cos)$$

由此可得油或气在地质时间间隔 t 内由本网格体流向其他网格体的运移量：

$$q_{ha_i} = (365 \times 24 \times 60 \times 60) v_h t \quad (3-31)$$

每个网格体的烃聚集强度为：

$$q_{ha_i} = q_{ha_i} + \frac{1}{S} (Q_{hs_i} + q_{hm}^{in} - q_{hm}^{out}) \quad (3-32)$$

在某一地质时期，计算层全部网格体的聚集量与散失量之和应等于从烃类开始运、聚的时代 (t_1) 至截止 (不再考虑) 的时代 (t_i) 所接受排烃量总和，即

$$\sum_{\text{网络点}} q_{ha_i} + \text{散失量} = \sum_{\text{网格点}}^{t_1} Q_{hs} \quad (3-33)$$

同时有

$$q_{ha_i} = 0$$

三、改进的现今流体势模拟法

本方法需要井点 (包括已钻井和地震剖面上的“人工井”) 的地表海拔、潜水面位置和分层的流体流动压力梯度这 3 项已知参数，提出水势、油势和气势计算公式，求得各井点的分层流体势，即可绘出分层的水、油、气现今势平面等值图，为晚近地质时期油气再次运、聚的分析提供依据。

1. 所需参数说明

本方法所需已知参数为每口井的地表海拔高度、潜水面位置和各层的流体流动压力梯度。

地表海拔高度在海平面以上取正值，在海平面以下取负值。潜水面位置在地表以上取正值，地表以下取负值。非超压层的流体流动压力梯度取值为 0.01 MPa/m (因流体压力即为静水压力)；超压层的流体流动压力梯度 (一般大于 0.01 MPa/m) 根据实测流体压力和实测点的埋深来确定。

2. 计算公式

(1) 水势公式：

$$w = gh + p_w / \rho_w \quad (3-34)$$

其中：

$$h = h_{s1} - z \quad (3-35)$$

对于超压层，水压 (p) 直接用实测流体压力梯度和埋深计算，即：

$$p = C_p z \quad (3-36)$$

由于 $1 \text{ MPa} = 1.01 \times 10^6 \text{ kg/(s}^2 \cdot \text{m)}$ ，所以：

$$p_w = 1.01 \times 10^6 C_p z \quad (3-37)$$

对于非超压层，有两种计算方法：

C_p 取值为固定的 0.01，即：

$$p_w = 1.01 \times 10^6 \times 0.01 z \quad (3-38)$$

从各层 w 之间的匹配看，该方法似乎规律性强，但其 C_p 所取值 (0.01) 是假设值，不能反映静水柱高度变化而导致的静水压力的变化。

使用潜水面位置参数 (h_{wt})。

任一埋深点 z 的水柱高度 ($h_{\text{水柱}}$) 计算公式为：

$$h_{\text{水柱}} = \begin{cases} 0 & z + h_{wt} \leq 0 \\ z + h_{wt} & z + h_{wt} > 0 \end{cases} \quad (3-39)$$

求出 $h_{\text{水柱}}$ 后，便可进一步求出静水压力。

$$p_w = \rho_w g h_{\text{水柱}} \quad (3-40)$$

地史模型中一般使用今水深参数 ($h_{\text{今水深}}$)，其实它可以通过 h_{wt} 求得：

$$h_{\text{今水深}} = \begin{cases} 0 & h_{wt} \leq 0 \\ h_{wt} & h_{wt} > 0 \end{cases} \quad (3-41)$$

(2) 油势公式：

$$\rho_o = \rho_w g h + p_o / \rho_o \quad (3-42)$$

(3) 气势公式：

$$\rho_g = \rho_w g h + p_g / \rho_g \quad (3-43)$$

使用上式，即可求出井点各层的流体现今势。计算一个探区的分层油、气、水势现今分布，得到分层流体势平面分布图，对于分析晚近地质时期的油气运聚十分有用；尤其是那些新第三纪以来构造运动强烈导致古油气藏的油气重新分配的探区，可以根据其分层流体势现今分布来认识其现今油气分布规律。

附注：本节（运移聚集史模型）符号注释：

式中 ρ_w, ρ_o, ρ_g ——水势、油势和气势， m^2/s^2 ；

g ——重力加速度，可取值为 9.81 m/s^2 ；

$h, h_{s1}; H_{sw}, h_{\text{水柱}}$ ——海拔高度、地表海拔高度、潜水面位置和静水柱实际高度， m ；

ρ_w, ρ_o, ρ_g ——水、油和气的密度， kg/m^3 ；

p_w, p_o, p_g ——水压、油压和气压， $\text{kg/(s}^2 \cdot \text{m})$ 。若假设油水系统和油气系统中不存在毛细管力，则 $p_o = p_w, p_g = p_o$ ；

H_h ——油柱或气柱的高度， m ；

q_{hs} ——油或气的聚集强度，图件输出时油的单位为 10^3 t/km^2 ，气的单位为 $10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ，本文公式中的单位为 m^3/m^2 ；

H ——本网格体中点与其他网格体中点的顶面深度之差, m ;
 l ——本网格体中点与其他网格体中点的平面距离, m ;
 L ——本网格体中点与其他网格体中点的顶面之间的距离, m ;
 θ ——本网格体中点与其他网格体中点的顶面之间夹角, ($^{\circ}$);
 K_h ——油或气的渗透率, 以绝对渗透率替代, $10^{-12} m^2$;
 ϕ ——孔隙度;
 μ_h ——油或气的粘度, $mPa \cdot s$;
 z ——以地表为起点的埋深点位置, m ;
 x, y, z ——网格体的长、宽、高, cm ;
 A ——截面积, cm^2 ;
 S ——网格矩形单元面积, m^2 ;
 v_h ——油或气运移速率, cm^3/s ;
 p ——压差, $10^{-1} MPa$;
 q_{hm} ——油或气运移量, m^3 ;
 t ——运移时间, Ma ;
 $q_{ha_i}, q_{ha_{i-1}}$ ——本地质年代 (t_i) 和前一地质年代 (t_{i-1}) 时油或气的聚集强度, m^3/m^2 ;
 Q_{hs_i} ——从 t_{i-1} 至 t_i 期间网格体接受到的排烃量, m^3 ;
 $q_{hm}^{in}, q_{hm}^{out}$ ——从 t_{i-1} 到 t_i 期间, 其他网格体流入本网格体和本网格体流往其他网格体的烃运移量, m^3 ;
 C_p ——流体流动压力梯度, MPa/m ;
 F_l ——浮力, Pa 。

第八节 综合评价模型

综合评价模型的功能是确定潜在的油气藏位置及其资源量。

这种新的综合评价技术的特点是：在盆地模拟的基础上，将传统的石油地质方法结合进去。具体来说，对于一个模拟地区，把“盆地模拟结果”、“对该地区的其它地质认识”、“地质家的经验”三者结合在一起。而图形工作站的人机交互功能使上述的三者结合成为可能，从而既弥补了盆地模拟在石油地质研究上的单一性弱点，又克服了传统石油地质研究的定性或半定量弱点。这种综合评价技术继承了传统石油地质研究的全面分析的长处，吸收了盆地模拟的定量分析优点，使油气资源评价的技术水平出现了一个飞跃。

综合评价模型的图件有：

- (1) 生烃中心图；
- (2) 区带评价图；
- (3) 综合评价图。

第九节 实例分析

由于盆地数值模拟属于成因模拟的范畴，因此，区带数值模拟技术的应用单元必须是一

个包含有油气生成、运移和聚集过程的统一的成因地质构造单元。根据目前的地质认识，符合这一条件的至少应是一个成油气系统。因此， 试验区亦必须选择一个成油气系统。

塔里木盆地是一个大型、多旋回的复合叠合含油气盆地，包含有多个相互间有一定程度复合的成油气系统。“八五”成果根据盆地原油和色谱参数 P_i/P_h 与生标参数 C_{21}/C_{23} 关系图、原油碳同位素分布、天然气的同位素分布等分别总结了塔里木盆地原油的生烃母质及烃源关系，把塔里木盆地划分为四个主要的成油气系统：

- (1) 库车中生界前陆成油气系统；
- (2) 满加尔下古生界克拉通成油气系统；
- (3) 塔西南超级成油气系统；
- (4) 塔东南中生界前陆成油气系统。

研究中，我们选取满加尔下古生界克拉通成油气系统为现场试验区。

一、满加尔下古生界成油气系统概况

满加尔下古生界克拉通成油气系统位于塔里木盆地中部，是在震旦纪裂谷基础上发育起来的早古生代克拉通边缘拗陷，其上覆盖层有上古生界克拉通内台地相层序和中新生界类前陆拗陷沉积层序。沉积岩最大厚度 18000 m，包括了从震旦系到第四系的所有地层，是盆地中地层发育最全、沉积厚度最大的地区（表 3 - 1）。其分布范围是：塔北隆起的轮台—沙雅断裂以南、塔中隆起的中央断垒带以北地区，西起胜利 I 井，东至塔东 I 井，面积近 $15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

表 3 - 1 满加尔凹陷及其周边地层系统表

界	系	主要岩性及厚度	盆地性质	构造运动
新 生 界	第四系	风积沙、洪积、冲积，厚 20 ~ 320 m	复合前陆盆地	—— 喜山晚期运动 ——
	上第三系	灰黄、棕红色砂泥岩，局部夹石膏薄层，厚 1500 ~ 4300 m		
	下第三系	紫红、棕褐色砂泥岩夹膏泥岩，厚 50 ~ 600 m	陆内拗陷盆地	—— 燕山晚期运动 ——
中 生 界	白垩系	棕红色泥岩、粉砂岩夹砂岩，厚 0 ~ 830 m		
	侏罗系	杂色泥岩夹砂岩、粉砂岩，厚 100 ~ 1000 m	前陆盆地	—— 印支运动 ——
	三叠系	杂色砂、泥岩及粉砂岩，厚 0 ~ 800 m		
上 古 生 界	二叠系	灰紫色泥岩、粉砂岩夹砂岩，并含玄武岩和英安质熔岩、凝灰岩，厚 0 ~ 1000 m	克拉通内部拗陷	—— 海西晚期运动 —— —— 海西早期运动 ——
	石炭系	深色灰岩、泥岩及砂岩，夹膏盐层，厚 0 ~ 800 m		
	泥盆系	滨海相—陆相红色碎屑岩，厚 0 ~ 2000 m		
下 古 生 界	志留系	灰绿色砂岩、粉砂岩夹泥岩，厚 0 ~ 2000 m	克拉通边缘拗拉槽	—— 加里东晚期运动 —— —— 艾比湖运动 ——
	奥陶系	满加尔凹陷为浊积相深灰泥岩和砂岩韵律层，南北两侧为台地相灰岩，厚 0 ~ 7000 m		
	寒武系	灰黑色灰岩、泥质灰岩、泥岩及硅质岩，厚 0 ~ 2200 m		
元 古 界	震旦系	灰色砂岩、白云岩夹泥岩及火山岩，厚 2000 m		—— 塔里木运动 ——
	前震旦系	结晶基底变质岩系		

截止 1996 年底，本试验区已完成 $4 \times 4\text{km} \sim 8 \times 8\text{km}$ 地震普查，隆起区地震测网达 $1 \times 1\text{km} \sim 1 \times 2\text{km}$ ，并在主要构造带进行了三维地震勘探。试验区内有探井 100 余口，主要集中在塔北隆起和塔中隆起区，主要探井进行了岩石化学、储层沉积相和有机地球化学分析。

满加尔凹陷具有叠合、复合盆地的特征，其不同时代的盆地类型、构造格局、沉积特征差别很大。下古生界为海相沉积，盆地类型为拗拉槽，隶属库满拗拉槽，沉积了塔里木盆地最厚的下古生界；上古生界以海相沉积为主，局部夹一些陆相沉积，盆地类型为稳定克拉通地台上的陆表海，沉积厚度与塔北、塔中隆起上相当；中生界为陆相沉积，主要为湖相河流相，盆地类型为前缘拗陷，沉积厚度比山前拗（断）陷薄；新生界主要为河流相，构造上属于库车前陆盆地的一部分。盆地现今结构面貌表现为“东陡西缓、北陡南缓”，下古生界“深凹陷”、上古生界和中新生界为“北倾大单斜”。

勘探实践和“八五”研究成果表明，满加尔成油气系统是一个下古生界克拉通成油气系统，主力烃源岩寒武—奥陶系具有成熟期早、后期多次抬升—埋藏的特征。由于克拉通刚性基底构造变形强度弱，导致成油气系统构造圈闭发育较差，圈闭规模较小，并集中发育于隆起断裂背景上。断裂对油气藏的形成与发育起着重要作用。成油气系统具有多次生烃、多期成藏、多期调整破坏的特点，油气藏分布规律十分复杂。

通过“八五”研究和勘探实践，目前认为本试验区内共有 13 个含油气区带，分别是：

1. 塔中隆起

- (1) 中央断垒背斜北部斜坡背斜油气区带。
- (2) 中央断垒背斜油气区带。
- (3) 塔中低隆东部潜山油气区带。

2 塔东低隆

- (1) 古城地层不整合油气区带。
- (2) 塔东潜山背斜油气区带。

3 塔北隆起

- (1) 轮南断垒背斜油气区带。
- (2) 桑塔木断垒背斜油气区带。
- (3) 吉拉克背斜油气区带。
- (4) 东河塘断裂背斜油气区带。
- (5) 英买力背斜油气区带。

4 满东低隆

跃南—胜利十八场断裂背斜油气区带。

5 满北低隆

- (1) 学堂背斜削蚀不整合油气区带。
- (2) 塔河南背斜构造油气区带。

至 1996 年底，塔北隆起已经探明轮南、桑塔木、解放渠东、东河塘 4 个油田和吉拉克、英买 7、牙哈、羊塔克 4 个凝析气田。在构造上，塔北隆起的油气聚集以轮台断裂为界分属南、北两个成油气系统，其南部为满加尔成油气系统，油气源为海相寒武—奥陶系；其北面为库车成油气系统，油气源为陆相三叠—侏罗系。试验区内的满加尔成油气系统的油气分布主要受古隆起、古油藏控制，同时本项研究结果也表明，下古生界烃源岩的二次生烃亦有一定的贡献。

塔中隆起，到 1996 年底，其在石炭系及志留系下砂岩组、中奥陶统潜山及内幕、下奥陶统潜山等 6 个层段获得工业油气流，发现了 TZ1 号，TZ4，TZ10，TZ11，TZ24，TZ161 等 8 个油气田（藏），主要集中在北部斜坡—潜山构造带。

二、地质模型及参数研究

地质模型是地质学家根据对盆地大量地质资料的实际观察和理论研究所作的关于盆地形成、演化及其石油地质过程的概括性描述。这种描述常常是概念性的定性描述，因此也叫概念模型。地质模型是建立数学模型的基础。由于地质过程包含着极为复杂的物理、化学变化，因此，对一个探区或盆地的地质过程描述的准确性，既取决于石油地质有关学科的发展，又取决于该探区或盆地的勘探程度。

试验区满加尔成油气系统的勘探程度很不平衡，总体上还很低，勘探工作量主要集中在南、北隆起上，满加尔凹陷主体近 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的面积，由于目的层埋藏太深，加之地面均为沙漠覆盖，条件较差，因此探井极少，目前只钻探了 7 口区域探井或参数井。尽管这些探井对揭示满加尔凹陷的地质特征提供了宝贵的资料，但仍然不能全面地反映该区的石油地质模型。前人根据探井及大量地震资料提供的信息，对满加尔成油气系统的石油地质过程进行了深入研究，这些都是本章地质模型建立的基础和依据。

在地质概念模型的基础上，建立数学模型，并根据数学模型的要求，进行精细的参数研究和选取，是实现含油气沉积盆地及区带数值模拟和保证模拟结果真实性的关键。我们在认真消化前人成果的基础上，在应用“八五”研究成果的基础上，充分结合“九五”攻关进展，对满加尔成油气系统进行模拟参数的研究和选取。除 50 口探井外，选取人工井 244 口，这些井网较好地控制了全区构造和主要区带的分布。

以下分别介绍区带数值模拟所采集的各类主要参数。

1. 地史模型的参数研究与选取

1) 模拟地层层序划分及其绝对地质年龄

满加尔凹陷发育了从元古界震旦系开始的所有地层，计有 5 大构造层 14 个层系。根据“八五”研究结果，我们将模拟地层底界选为上震旦统底，划分出 14 个模拟地层，其绝对地质年龄如表 3 - 2 所示，年龄值的确定主要参考了王鸿祯等（1990）主编的《国际地层时代对比表》中的《中国地层时代表》。

表 3 - 2 满加尔成油气系统模拟地层划分及其绝对地质年龄

地层	代码	底界年龄，Ma	经历时间，Ma
第四系	Q	2.84	2.48
上第三系	N	23.3	20.82
下第三系	E	65.0	41.7
白垩系	K	145.6	80.6
侏罗系	J	208.0	62.4
三叠系	T	245.0	37.0
二叠系	P	290.0	45.0
石炭系	C	362.5	72.5
泥盆系	D	408.5	118.5

续表

地层	代码	底界年龄, Ma	经历时间, Ma
志留系	S	439. 0	30. 5
中上奥陶统	O ₂₋₃	478. 0	39. 0
下奥陶统	O ₁	510. 0	32. 0
寒武系	H	570. 0	60. 0
上震旦统	Z ₂	700. 0	130. 0

2) 残余地层厚度

关于残余地层厚度，我们采用了“八五”期间由物探局地质研究院高增海等（1994）完成的塔里木盆地上震旦统、寒武系、下奥陶统、中上奥陶统、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、新生界残余厚度图，由计算机根据等值线图读取离散点。其中新生界三套地层的划分参考了“八五”成果《塔里木盆地油气资源评价》的数据。目前这套残余地层厚度图，基本上代表了最新成果。

3) 剥蚀量及其恢复方法

沉积盆地在其发育过程中，由于构造运动等的影响，常常会出现一定时间的沉积间断或地层抬升剥蚀。在盆地沉积间断及剥蚀期内，已埋藏的沉积物的成岩演化、已形成的地温场特征、沉积物的压实及排出作用都将有所变化。所以构造沉降史、埋藏史的恢复中，必须考虑沉积间断及剥蚀作用。前人研究表明，本试验区内塔北、塔中地区地史过程中经历了多期剥蚀事件，其中晚古生代至三叠纪的剥蚀范围及厚度均比较大，对盆地内下古生界油气源岩的热演化及其原生油气的聚集产生了严重影响。

剥蚀事件及其埋藏史处理方法的基本思路是，根据地质分析得出地层被剥蚀的时间及厚度数据，在回剥到剥蚀开始时间时加上剥蚀厚度；在剥蚀时间内，再将这段厚度均匀地减去；被减去的这段地层在以后的埋藏过程中不再起压实作用。

在地史模拟中，剥蚀事件及其剥蚀量恢复是影响模拟结果的关键参数之一。但是剥蚀量的估算又是个十分复杂的问题。剥蚀量的恢复方法很多，如不连续镜质组反射率图解法、声波时差测井法以及构造横剖面法等，各方法均有一定的局限性。由于剥蚀量恢复的工作量十分庞大，本次模拟我们主要采用了“八五”攻关成果提供的各层剥蚀量等值图，部分钻井点用数值模拟法进行校正。

数值模拟法的理论依据是有机质（镜质组反射率 R_o ）演化过程的不可逆性；前提是具有研究区实测的 R_o —深度曲线和相对较稳定的地温场。

通过给定一个假定的剥蚀厚度 h_e 然后用数值模拟方法重建埋藏史和有机质热成熟度史，从而模拟出理论的 R_o —深度关系曲线。对比理论和实测的 R_o —深度关系曲线，如果不符合，则修改 h_e ，再重复以上步骤，直到理论与实测 R_o —深度曲线拟合较好为止，此时的 h_e 就是所要求的剥蚀厚度。

4) 地层中岩性百分含量的确定

主要考虑了三种岩性：砂岩、泥岩和灰岩。由于煤层厚度较小，且在本区生烃十分有限，因此未予考虑。各种岩性的百分含量除探井根据实测数据外，其余均以“八五”已有成果为准。

5) 压实曲线的确定

求取孔隙度—深度曲线最简便的方法，就是直接从探井中取样实测，可以用封蜡法、水银法、真空饱和煤油、气体膨胀法等方法在实验室测定。但在一个盆地的研究工作中，大量地实测孔隙度值是不可能的，须要借助各种井曲线来间接地求取（计算），如声波、中子密度等都对地层岩性和孔隙度十分灵敏，其中最常用的是声波时差法。“八五”期间，陈荷立等研究了本区的泥岩压实规律，但主要限于下古生界的实测数据。

6) 古水深

古水深的恢复直接影响到地史的精确性，同时也关系着地层热历史的准确性。早古生代塔里木盆地长期处于海相克拉通构造环境，因而古水体深度很大。然而古水深的定量恢复是一项涉及多学科综合研究的课题。这里主要引用“九五”攻关研究成果。

2 热史模型的参数研究与选取

热史模型采用了地球热力学与地球化学相结合的方法。用到的参数主要有现今地表温度、古地表温度、今地温梯度、古地温梯度、岩石热导率、 R_o —深度曲线等等。

塔里木盆地年均地表温度为 20℃，根据“八五”研究成果，确定了试验区的主要热学参数。热导率数据，我们取样实测了 40 个样，获得了有关地层的岩石热导率。

镜质组反射率（ R_o ）是表征含油气盆地中烃源岩成熟度的有效参数，也是检验地球热力学法正确性的标准之一；同时， R_o 与有机质产烃率的关系更为直接，因此，盆地模拟中热史模块要求使用标准井的实测 R_o —深度曲线。

试验区内探井 R_o 数据较多，但井段分散，本次模拟分别以轮南 46 井、满西 I 井和 TZ1 井的 R_o —深度数据为基础回归出相应三个小区的曲线，根据数学模型的需要各曲线向深层做了延伸。

3 生烃史模型的参数研究与选取

生烃史的模拟方法有多种，如化学动力学法、有机质热降解模拟实验法等。生烃史的模拟建立在地史、热史模拟的基础之上。生烃史模拟用到的参数主要有烃源层划分、生油岩的厚度、有机质类型百分含量、残余有机碳含量及其原始有机碳恢复系数、生油岩密度、产烃率— R_o 关系图版等。

1) 烃源层分布及烃源岩类型

黄第藩等的“八五”攻关成果表明，满加尔成油气系统的主力烃源岩为寒武—奥陶系的暗色泥岩和泥质灰岩。此外，石炭—二叠系和三叠—侏罗系暗色泥岩亦有一定的生烃能力。

为全面模拟满加尔成油气系统的生烃特征，我们选取了寒武（ C_1 ）、下奥陶（ O_1 ）、中上奥陶（ O_{2-3} ）、石炭（C）、二叠（P）、三叠（T）及侏罗系（J）共七套地层作为源岩层进行模拟。

“九五”攻关研究表明，本区寒武—奥陶系优质烃源岩的形成受板块构造环境及沉积相带控制。寒武—下奥陶统优质烃源岩分布于板块边缘内带大陆裂谷控制下的饥饿盆地有机相，以及板块中央大陆衰退裂谷控制的蒸发泻湖有机相中；中上奥陶统优质烃源岩分布于复合前陆的前缘隆起上的灰泥丘有机相，以及挠曲类前陆盆地的半闭塞—闭塞饥饿陆缘海湾有机相中。寒武—奥陶系优质烃源岩的岩石学特征为富含薄壳底栖、浮游生物化石或大古生物化石的暗色页岩、薄层状具水平纹理之生物泥岩与泥晶灰岩；而厚层、巨厚层具有块状或平行纹理的泥岩，即使颜色很深也难以成为有效烃源岩，这是塔里木盆地烃源岩既区别于中国东部中生代湖沼相，又迥异于其它海相盆地的特征。

根据上述分析，考虑泥岩和灰岩生烃潜力的差别，我们分别模拟了灰岩和泥岩的生烃历史；对中上奥陶统，由于前渊区大套暗色泥岩几乎不生烃，因此只考虑灰岩生烃。需要说明的是，受资料限制中生界煤层的生烃量尚未考虑，但软件系统设计时充分考虑了三种岩性的生烃过程。

2) 烃源岩厚度

烃源岩厚度是模拟资源量至关重要的参数。塔里木盆地下古生界烃源岩埋深较大，因此绝大部分钻井未能揭穿生油岩。前人在“八五”攻关时结合钻井分析数据及沉积相特征编制了一套烃源岩厚度图。本次模拟除中、上奥陶统根据“九五”攻关新认识作了修改外，其余烃源岩厚度图均以“八五”成果为依据。

3) 残余有机碳百分比及其恢复系数

众所周知，分散有机质在地质演化过程中的各个阶段都有质和量的变化，当然其变化程度还要受各种因素的制约。一般地讲，现今检测到的烃源岩有机丰度只是其残余状态，而非原始的总量，因此，要恢复其原始含量，即需要研究有机碳恢复系数。根据热解分析资料可以得到恢复系数。研究表明，不同热演化阶段，不同干酪根的有机碳恢复系数不同，同时，不同类型干酪根在同一演化阶段的恢复系数亦有差别。

4) 烃源岩密度

生油岩的密度，根据前人统计结果，侏罗系泥岩：2 573 t/m^3 ，三叠系及古生界泥岩：2 691 t/m^3 ，石灰岩密度统一取为：2 650 t/m^3 。

5) 产油、产气率— R_o 关系图版

产油、产气率曲线是生烃史计算的关键参数，不同类型的干酪根有不同的烃产率图版。本次计算，受条件限制，未做热解化验分析，仍使用“八五”成果《塔里木盆地油气资源》科研报告中的数据（表 3 - 3）。

表 3 - 3 生油岩气态烃产率（气烃/ 总烃）表

R_o	泥 岩				石灰岩
	I 型	II ₁ 型	II ₂ 型	III 型	I 型
0. 20	0. 000	0. 000	0. 000	0. 000	0. 000
1. 40	0. 070	0. 180	0. 020	0. 000	0. 020
0. 60	0. 100	0. 320	0. 100	0. 100	0. 160
0. 80	0. 135	0. 470	0. 280	0. 105	0. 310
1. 00	0. 170	0. 610	0. 410	0. 187	0. 430
1. 20	0. 215	0. 710	0. 530	0. 307	0. 510
1. 40	0. 270	0. 800	0. 630	0. 480	0. 590
1. 60	0. 340	0. 870	0. 720	0. 580	0. 660
1. 80	0. 415	0. 930	0. 810	0. 670	0. 730
2. 00	0. 510	0. 960	0. 870	0. 760	0. 790
2. 20	0. 745	0. 990	0. 930	0. 830	0. 850
2. 40	0. 905	1. 000	0. 970	0. 905	0. 900
2. 60	0. 985	1. 000	0. 985	0. 955	0. 940
2. 80	0. 995	1. 000	0. 990	0. 992	0. 980
3. 00	1. 000	1. 000	1. 000	1. 000	0. 990
3. 20	1. 000	1. 000	1. 000	1. 000	1. 000
5. 00	1. 000	1. 000	1. 000	1. 000	1. 000

4 排烃史和运聚史模型的参数选取

这部分的参数主要有两类。一类是一些与油层物理、开发实验有关的参数，如各断层的渗透率与其周围介质的渗透率之倍数；PVT 函数曲线（七条）；油水系统及油气系统的相对渗透率曲线、毛细管力曲线；孔隙度—压力曲线；油气水束缚饱和度；地层水矿化度等，大多用于二次运聚史的模拟计算。这些参数取自东河塘油田和塔中油田的实测资料，部分借用 BASIMS 系统中的缺省数据，后者是通过我国部分油田的实验数据获得的。

另一类是用于现今流体势计算的参数，如每口井的地面海拔高度、潜水面位置、各井的地层流体压力梯度以及排烃量在各运载层中的分配系数等。我们根据试验区地形地貌图读取了各井点的海拔高度，其他部分参数要交互调整，此不赘述。

三、模拟成果及地质分析

1. 构造史、埋藏史分析

从地质背景和单井发育历史分析，满加尔成油气系统经历了前震旦纪的基底形成期、早古生代克拉通边缘拗拉槽、晚古生代台内拗陷和中新生代陆内拗陷和复合前陆盆地的发育过程，其原型盆地的分布范围和类型均随地史发展有所不同。寒武纪—早奥陶世时期，为稳定的拗拉槽沉积，自东向西依次为盆地相、斜坡相及台地相，地层西厚东薄。中晚奥陶世及志留纪，沉积巨厚的复理石建造，分布特征为东厚西薄。晚古生代的海西运动使得盆地格局发生变化，结束了早期的槽台格局，发育广阔的陆表海沉积。中新生代受印支、燕山运动的影响，海水退出，发育内陆河湖相沉积，并有多次抬升剥蚀，至喜山期，沉积中心继续北迁，研究区内以河流相为主，同时由于北部库车拗陷的强烈下降，本区上古生界以上的地层发生北倾，成为库车前陆盆地南斜坡的一部分。

从模拟结果看，满参 1 井代表的中部凹陷区具有长期持续沉降的埋藏史，上震旦统最大埋深达到 15000 m，其中构造沉降量为 4800 m，约占总沉降量的 32%，负荷沉降占居主导地位，反映了在克拉通基础上发育的复合盆地的沉降特征。

从沉积速率的变化规律来看，盆地亦具有多旋回复合盆地的沉积特征，即早古生代、克拉通盆地、中生代内陆盆地和新生代前陆盆地的沉积特征。早古生代沉积厚度巨大，平均沉积速率 70 ~ 80 m/ Ma，其中，中晚奥陶世沉积速率最大达到 113 m/ Ma。中生代沉积速率较小，约为 20 ~ 30 m/ Ma，而新生代沉积速率又趋于增大，反映了盆地周边挤压大地构造环境对沉积作用的影响。

塔中地区 NS—475 测线的平衡地质剖面发育历史说明，塔中隆起的主要构造形成期是早海西期（泥盆纪），这次运动对于晚加里东期的原生油气藏产生了破坏作用。

2 源岩受热史分析

沉积岩石中分散有机质的成熟度是烃源岩评价的重要指标之一，有机质成熟度的高低决定着生成物的性质和数量。因此，对于油气生成而言，丰富的有机质堆积是基础，而热成熟程度是关键。从烃源岩的有效性来看，那些未达到成熟阶段或处于热变质阶段的烃源岩，一般都不是有效的烃源岩。

BASIMS 以镜质组反射率（ R_o ）来标定烃源岩中有机质的成熟度，它是根据模拟标准井的 TTI— R_o 关系曲线或 Easy R_o 法求出的。根据我国陆相生油岩的成熟度标准，一般将 $R_o = 0.6\%$ 作为工业油藏的上限，即 R_o 小于 0.6% 为未成熟 0.6% ~ 0.8% 为低成熟；0.8% ~ 1.3% 为成熟；1.3% ~ 2.0% 为高成熟；大于 2.0% 为过成熟。由于满加尔成油气系统的主

力烃源岩为下古生界，因此下边主要介绍下古生界烃源岩的成熟度史。

根据热史模拟结果，满加尔凹陷下古生界生油岩在中晚奥陶世即已达到成熟阶段，并大量生烃，现今凹陷主体中奥陶系生油岩的成熟度 R_o 均在 3.0 % 以上，满参 I 井区已达到 5 % 上。而在南、北隆起的高部位，由于埋深相对较小，下古生界生油岩至今仍处于成熟阶段，有较好的生烃潜力。

按照给定的热史模型，中晚奥陶世时，由于巨厚的中上奥陶统地层的沉积，导致下古生界烃源岩围绕沉降中心广泛成熟，满加尔凹陷自 C1 井—YWI，井—M×2 井以南、以东的大片地区成熟度均在 0.6 % 以上，进入了成烃门限；满东 1 井所处的沉降中心地带成熟度达到 2 % 以上，为干气生成阶段。因此，中晚奥陶世是满加尔成油气系统烃源岩演化史上最为重要的时期。之后，经过多次构造沉积演变，凹陷主体部位仍以持续沉降为主，热演化程度持续增大，现今除南、北构造高部位外，下古生界烃源岩热演化程度 R_o 均在 1.2 % 以上。

3 主力烃源层及其生烃史分析

1) 主力烃源层分析

从模拟结果来看，满加尔成油气系统的主力烃源层为寒武—奥陶系，而石炭—二叠及三叠—侏罗系的生烃潜力相对很小。尽管我们将可能的七套生油岩（ C_1 、 O_1 、 O_{2-3} 、C，P，T，J）都进行了模拟评价，但结果证实，寒武—奥陶系的生烃量巨大。相比之下，其他层系的生烃量很小，似不足以产生规模性的油气聚集，因此，不是主力烃源层。

最主要的烃源层为寒武系—下奥陶统，其生油岩类型为灰岩和泥岩两种。在满加尔凹陷西部和南北两侧的台地相区以石灰岩为主，而在东部盆地相区（库南 1 井、塔东 1 井）为石灰岩与泥岩互层。由于该套生油岩的有机质丰度都很高（有机碳含量平均为泥岩：0.76 %，灰岩：1.2 %），母质类型以Ⅱ型为主，因此，生烃量巨大。

“九五”攻关的最新结果认为，中上奥陶统生油岩以泥质灰岩为主，主要分布在凹陷南北两侧，最大厚度近 100 m。中上奥陶统烃源层的有机碳丰度较低，多小于 0.3 %，大于 4 % 的地区有限。

从有机碳总量分析，下古生界烃源岩的总有机碳为 $21418.56 \times 10^8 \text{ t}$ 其中寒武系为 $16462.95 \times 10^8 \text{ t}$ ，占 76.9 %，下奥陶统为 $4612.77 \times 10^8 \text{ t}$ ，占 21.5 %，而中上奥陶统只有 $342.84 \times 10^8 \text{ t}$ ，仅占 1.6 %。众所周知，丰富的有机质是形成油气的物质基础，由此不难看出，下古生界三套烃源岩的成烃潜力之差异（表 3 - 4）。

表 3 - 4 满加尔成油气系统烃源岩及有机碳重量统计表

源岩层		源岩分布面积， km^2	源岩体积， km^3	有机碳重量， Mt	单位体积源岩 有机碳重量， Mt/km^3
代号	岩性				
	石灰岩	132369	71517.4	1646295	21.16
	泥岩		6288.1		
O_1	石灰岩	135196	53838.2	461277	7.57
	泥岩		7124.8		
O_{2-3}	石灰岩	68628	2681.6	34284	12.79
	泥岩		0		
C	石灰岩	75369	2803.7	76089	8.52
	泥岩		6129.3		

续表

源岩层		源岩分布面积， km ²	源岩体积， km ²	有机碳重量， Mt	单位体积源岩 有机碳重量， Mt/ km ³
代号	岩性				
P	石灰岩	45600	45.2	32246	8.96
	泥岩		3553.1		
T	泥岩	67472	12311.6	239348	19.44
J	泥岩	85517	7310.3	140550	19.23

2) 生烃高峰

烃源岩的生、排烃高峰直接关系着油气的运移和聚集时期，也是成油气系统的关键因素。下古生界生油岩的主体在晚奥陶世末期（439 Ma）即达到了生油高峰，同时也是重要的一次生气高峰。就寒武系生油岩而言，其液态烃的 57.63 % 和气态烃的 42.83 % 都是在中晚奥陶世生成的（图 3 - 1 和图 3 - 2）。下奥陶统生油岩 67.72 % 的油和 26.23 % 的气是此时生成的。如果考虑此期之前累积生成的烃，则对寒武系而言，大约 89 % 的油和 44 % 的气都在这一阶段形成。对下奥陶统而言，则有 79.6 % 的油和 26.3 % 的气形成。不难看出，奥陶纪末这一时期对于下古生界烃源岩的油气尤其是油的生成和运移起着至关重要的作用。

图 3 - 1 满加尔成油气系统生油量直方图

由于气态烃的成烃门限较高，成烃延续的范围较大，因此，气态烃在以后的几次沉降旋回中都有一定的生成。

中上奥陶统生油岩主要分布在台缘斜坡地带，埋藏普遍相对较浅，因而其成烃历史明显不同于下部烃源层。其生油阶段持续很长，主要为奥陶纪末、石炭纪末和第三纪末三个时期；而气态烃则主要是在第三纪末形成的。

研究表明奥陶纪末是满加尔成油气系统的最为重要的油气生烃高峰，第三纪末（2.48 Ma）是二次生烃的高峰期，同时也是中上奥陶统源岩大量生成气态烃的重要时期。

图 3 - 2 寒武系生气量史直方图

3) 生烃强度分布及生烃量

BASIMS 系统的模拟结果，展示了下古生界烃源层在各地质时期的生、排烃强度分布情况，这里主要分三个时期进行简要分析。

(1) 奥陶纪末 (439 Ma)

前已述及，这一时期是下古生界大量生成原油的最重要的时期。此时几乎形成满盆生油的局面，生油中心在库南—满东 1 井一线，最大生油强度近 $6000 \times 10^3 \text{ t/km}^2$ 。生气中心略向南偏移，在满参 1 井—满东 1 井一线，最大生气强度达 $13000 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。满加尔凹陷满西 I 井以西的大部分地区及南北两侧隆起地区生烃强度相对较小。值得提及的是，现今的草湖洼陷一带，当时是重要的生烃中心，这时油气运移的方向无疑是指向东、西例及北侧的古隆起区，对于古原生油藏的形成有重要的意义。

此时，下古生界的总生油量为 $2189.98 \times 10^8 \text{ t}$ ，其中寒武系生油量为 $1714.76 \times 10^8 \text{ t}$ ，占 78 %；下奥陶统生油量为 $468.5 \times 10^8 \text{ t}$ ，占 21.4 %。总生气量为 $3316.85 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，其中寒武系生气量为 $2851.4 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，占 86 %；下奥陶统生气量为 $465.3 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，占 14 %。

(2) 第三纪末 (2.48 Ma)

这一时期的显著特点是满加尔凹陷南、北隆起区在经历多次构造运动的改造后，由于第三纪再次沉降而发生二次生烃。不同源岩层二次生烃的产物不同，对于寒武系—下奥陶统而言，主要是二次生气；对中上奥陶统而言，既有二次生油，亦有二次生气。从统计直方图上可以看出，第三纪沉陷时期二次生烃的量并不太大。例如，寒武系的生油量只有 $12.07 \times 10^8 \text{ t}$ ，只占历史时期总生油量的 0.63 %；而生气量相对大得多，为 $461.2 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，占总生气量的 7.13 %。中上奥陶统此期生油 $3.86 \times 10^8 \text{ t}$ ，占总生油量的 11.56 %，生气量达 $47.88 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，占总生气量的 59.23 %。由此可知，这是重要的一次生气高峰时期，对于形成新生代原生气藏至关重要。

这一时期的累积有效生烃量发生了较大变化。由于凹陷主体地区已达到过成熟的干气阶段，因此大部分下古生界未排出的原油及部分埋藏较深的已排出的原油都已裂解为天然气了。因此，天然气的累积有效生成量达到空前的 $8310 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，最大生气强度达 $17000 \times$

$10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ，试验区内 70 % 以上的地区生气强度都在 $4500 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 以上。有效生油区主要分布在近外围的隆起及斜坡地区，主要是塔中隆起西半部以及塔北、库南至塔东 1 井地区。此时的下古生界累积有效生油量为 $379.46 \times 10^8 \text{ t}$ ，生油强度多在 $400 \sim 1800 \times 10^3 \text{ t}/\text{km}^2$ 之间。

(3) 现今 (0.0 Ma)。

由于自第三纪末以来的构造活动及盆地特征未有重大变化，因此，下古生界的生烃特点总体上继承了晚第三纪末的格局，惟生烃量略有变化。由于关系到现今资源评价，特做详细分析。

现今下古生界有效生油量为 $376.75 \times 10^8 \text{ t}$ ，比 2.48 Ma 时略有减少，这是因为其间有一部分油裂解为气了。现今生油量中以寒武系所占比重最大，为 $249.62 \times 10^8 \text{ t}$ ，占 66.2 %，而下奥陶统生油量为 $108.99 \times 10^8 \text{ t}$ ，占 29 %，中上奥陶统的有效生油量只有 $18.14 \times 10^8 \text{ t}$ ，仅占 4.8 %。生油强度的分布主要集中于凹陷边缘斜坡及隆起地区，尤其是塔北、库南地区，最大强度达到 $2200 \times 10^3 \text{ t}/\text{km}^2$ ，TZ 地区为 $200 \sim 800 \times 10^3 \text{ t}/\text{km}^2$ 。

下古生界现今有效生气量比较大，达 $8318.36 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，最大生气强度未有太大变化，仍为 $17000 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ，凹陷主体部分的生气强度都在 $4500 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 以上。在现今生气量中仍然是寒武系贡献最大，为 $6468.6 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，占 77.8 %；下奥陶统的生气量为 $1768.9 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，占 21.2 %，而中上奥陶统的生气量只有 $80.83 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，只占 0.97 %。

由此可见，寒武—下奥陶统生油岩无论对早期（晚古生代）原生油气藏的形成，还是对晚近时期各类油气藏的形成都是至关重要的。

(4) 现今有效生烃量的特点分析。

这里主要对生烃量的构成及油气比例做以下分析。

前已述及，下古生界现今有效生油量为 $376.75 \times 10^8 \text{ t}$ ，而累积有效生气量为 $8318.36 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，按照 $1 \text{ t 油} = 1000 \text{ m}^3$ 气的油气当量估算，则累积有效生气量约为有效生油量的 22 倍。此外，通过模拟的累积生油强度等值图，我们知道下古生界烃源岩各历史时期总计生油量为 $2910.67 \times 10^8 \text{ t}$ ，而现今有效生油量只有 $376.75 \times 10^8 \text{ t}$ ，这说明有 $2533.9 \times 10^8 \text{ t}$ 的原油裂解为天然气了，即总生气量中有大约 30 % 为裂解气。

四、运移运聚史分析

运移聚集史是成油气系统区带评价的核心问题，也是当今盆地数值模拟的难点。本次攻关，我们在源岩初次排烃模拟的基础上，根据目的层的古构造特点以及储层的物性特征，研究了油气的平面二次运聚规律，初步获得了各时期的可供油气聚集量。下面从两个方面加以分析。

1. 初次排烃高峰和初次排烃量

由生排烃模拟结果可知，初次排烃高峰大致和生烃高峰是一致的（图 3-2）。单井模拟结果亦有类似特点。从压实平衡的角度看，大量生烃必然对应着大量排烃，这是符合石油地质学原理的。因此，下古生界烃源岩初次排烃高峰亦主要有奥陶纪末（439 Ma）、第三纪末（2.48 Ma）两个时期，此外，石炭纪末（290 Ma）对中上奥陶统（ O_2-O_3 ）烃源岩而言也是一次较为重要的生排油时期。

1) 奥陶纪末（439 Ma）

这是下古生界最为重要的一次排烃高峰时期，共有 $1333 \times 10^8 \text{ t}$ 油排出，占总生油量的

61 %。同生烃特点类似，其中主要是寒武系排出的，为 $1022 \times 10^8 \text{t}$ ，占 77 %。排气量为 $2876 \times 10^{11} \text{m}^3$ ，占总生气量的 87 %，其中寒武系排气量最多 $2554.4 \times 10^{11} \text{m}^3$ ，占 89 %。其排烃强度分布与生烃强度有相似的规律，此不详述。

2) 第三纪末 (2.48 Ma)

此时排烃的特点是下古生界尤其是寒武—下奥陶统的二次生气量比较明显，因此是另一次较为重要的排气时期；而对中上奥陶统而言，则是主要的排油和排气时期。总的看来，排烃量不大，例如，寒武系本次排油量只有 $33 \times 10^8 \text{t}$ ，占总排烃量的 2.11 %，而排气量相对较大， $495.7 \times 10^{11} \text{m}^3$ ，占总排气量的 7.86 %。而中上奥陶统则总排油量的 19.47 % (约 $4 \times 10^8 \text{t}$) 和总排气量的 71 % (约 $46 \times 10^{11} \text{m}^3$) 在此时排出。其有效排烃强度分布规律同生烃规律相似。

值得注意的是，虽然第三纪的生烃量不大，但排烃量相对生烃量来说是比较大的。例如，寒武系此期生油 $12.07 \times 10^8 \text{t}$ ，但排油 $33.18 \times 10^8 \text{t}$ ；生气 $461.19 \times 10^{11} \text{m}^3$ ，但排气达 $495.7 \times 10^{11} \text{m}^3$ 。这是因为第三纪的大幅度沉降造成前第三纪已生成的或残留的烃类一并排出。因此，从排烃意义上看，第三纪末的构造事件对烃类的运聚不容小视。

3) 现今累积排烃效率及累积排烃量

各烃源岩的累积排烃效率如表 3-5 所示。由此可知，下古生界烃源岩经过长达数亿年的发展演化，其生油岩的排烃效率已非常高了，即绝大部分烃类都已排出。现今累积排烃量可由下古生界三套源岩的排烃量相加获得，分别是：累积排油量 $2036.06 \times 10^8 \text{t}$ ；累积排气量 $7986.3 \times 10^{11} \text{m}^3$ 。需要指出的是，这些排烃量大部分都在第一次排烃高峰时排出，因此排出的烃类能否得到有效聚集并持续保存是关系到现今工业性油气聚集的大问题。在分析成油气系统的关键时刻时，我们还要对此做深入分析。

表 3-5 下古生界烃源层现今累积排烃效率表

地 层	油	气
寒武系	81.36	97.5
下奥陶统	75.8	91.26
中上奥陶统	60.9	79.4
下古生界总计	79.81	96.0

2 主要目的层的流体势分布与聚集量分析

流体势是表征地下流体流动状态的重要参数。由于势场强度的不同，同一地下环境中的油气水常具有不同的运移方向。一般来说地下流体运移的方向，总是沿着阻力最小的方向、垂直等势面、由高势区指向低势区，既有侧向运移，也有垂向运移。总的来看，二次运移的方向受区域构造背景控制，即受拗陷区与隆起区的相对位置及其发育史控制。BASIMS 根据排烃史的模拟结果和现今构造等值图，并考虑地层流体压力分布特征，计算了主要目的层的现今流体势分布等值图。由于地质历史时期的古地形难以确定，流体势的估算误差较大，因此，这里主要分析现今流体势分布。

在不考虑大气水的向心渗流作用时，现今流体势的分布规律同构造线的分布规律吻合较好，即自凹（洼）陷区向周边隆起或斜坡地带流体势逐渐减小。塔北隆起、塔中隆起以及凹陷周围的斜坡地带长期以来一直是相对低势区，如果有充足的油气源和圈闭条件，完全可以

形成油气聚集。

根据 BASIMS 的二次运聚模型，我们获得了主要目的层的油气聚集量图。由于控制油气聚集的因素很多，模型中尚未考虑聚集后的保存条件，因此，得出的聚集量应理解为可供聚集量，它既包括现今工业油气聚集量，同时也累计了历史时期的部分聚集量，后者一部分可能已经散失掉了。因此，它不同于现今的资源量，也不同于“八五”成果所获得的可供聚集量，后者是指某一层系中分散的及已聚集的总烃量。

在模型设计时，我们主要考虑了以下因素：

(1) 各层流体势分布。BASIMS 模拟了各层的流体势分布规律，它是模拟现今油气聚集的重要数据。

(2) 各层位断裂发育情况及其与下古生界油源的连通情况。断裂是油气运移，尤其是穿层运移的重要通道之一。本区除塔北地区发育一些正断层外，均以逆断层为主，我们认为各类断层在其活动时期都有利于油气的运移。本区大型断层在塔中地区多断至古生界油源层，在塔北地区自第三系到三叠系都有，这些断裂在其发育的不同时期，对油气的运移产生了重要作用。

(3) 地层不整合发育情况。研究区不整合极为发育，其中重要的不整合有奥陶系、泥盆系、二叠系以及三叠系顶部的不整合等。这些不整合面本身由于物性条件的改善，成为油气运移的重要通道。一些连续剥蚀的不整合面，为油气在不同层系间的运移创造了有利条件，同时也促进了油气的长距离运移。

(4) 储盖组合发育情况。

储层与盖层只有良好匹配、有机组合才能有效地聚集油气，因此，储盖组合发育情况是决定油气聚集的重要因素。研究表明，满加尔成油气系统的储集层纵向上分布很广，自下而上有寒武—奥陶系碳酸盐岩、志留—泥盆系砂岩、石炭系东河砂岩以及中新生界碎屑岩等，其中以石炭系、三叠系和奥陶系为主要储层。奥陶系储层分布较广，主要分布在塔中隆起、轮南、英买力地区，系台地相和台地边缘相沉积。石炭系是本区的主力储层之一，以砂岩为主，主要分布在塔中低隆、东河塘、轮南以及哈拉哈塘、草湖次凹地区。本区的区域性盖层主要有石炭—二叠系泥岩、中上奥陶统一志留系下统泥岩以及泥盆系依木干它乌组泥质岩段等。

主要的区域性储盖层组合有石炭—二叠储盖组合、寒武—奥陶—志留系储盖组合等。此外，寒武—奥陶系内幕储盖组合及中生界三叠—侏罗系储盖组合等亦是十分重要的。

根据上述地质条件分析，给定各层系的排烃分配因子，可以模拟主要目的层的油气可供聚集强度。结果表明，长期发育的塔中隆起区以及塔北地区的轮南低凸起、英买力低凸起是各层系油气聚集的主要地区；其他如库南鼻隆和塔东低凸地区也有一定的油气聚集。由表 3 - 6 可知，满加尔成油气系统主要目的层的油可供聚集量为 $61.61 \times 10^8 \text{t}$ ，气可供聚集量为 $139.95 \times 10^{11} \text{m}^3$ 。气的聚集量约为油的 2.3 倍，说明本区是富气的，当然天然气的聚集与后期保存条件更为密切，此数据尚不足以准确标定天然气的聚集量。此外，从表 3 - 6 还可以看出，下古生界和石炭系是本区两个最为重要的含油气层。下古生界的油、气聚集量为 $36.34 \times 10^8 \text{t}$ 油和 $95.63 \times 10^{11} \text{m}^3$ 气，分别占总聚集量的 58% 和 68%，因此下古生界将是今后本区勘探的重要领域。

表 3 - 6 满加尔成油气系统主要储集层的油气可供聚集量表

储集层	油可供聚集量, 10 ⁸ t	气可供聚集量, 10 ¹¹ m ³
寒武系 ()	14. 75	29. 15
下奥陶统 (O ₁)	12. 48	31. 45
中上奥陶统 (O ₂₋₃)	9. 11	35. 03
石炭系 (C)	21. 68	41. 80
三叠系 (T)	3. 59	2. 52
总计	61. 61	139. 95

五、成油气系统的配套史分析

在成油气系统中，油气藏的形成和分布是各个地质要素在地质时期温压环境不断变化的四维空间，即四维时空上动态平衡的结果。在地史时期中，成油气系统中各个地质要素的组合配置优劣，决定了成油气系统的油气富集程度和勘探远景。若配置的条件好，就能形成良好的油气富集区，否则就不能形成工业油气藏。配套史分析的内容应该包括生储盖组合分析、圈闭的有效性分析、有效源岩及有效排烃期分析等。鉴于储盖组合业已在上文分析，因此这里主要就模拟获得的成油气系统的两个关键时刻的配套因素作以下分析。

1. 第一关键时刻—奥陶纪末

此时，主力烃源岩 - O₁ 业已大量成熟，并已生成十分可观的油气，因此，具有充足的油气源。此时的储集层主要是埋深很大、裂缝发育的 - O₁ 灰岩，或南北隆起区埋藏较浅的孔隙灰岩。巨厚的中上奥陶统泥岩其孔隙度已减小到 8 % 以下，因此具有很好的封盖能力。这时的构造圈闭主要分布在洼陷周边的隆起带，即现今的塔中低隆、古城、塔东、孔雀河斜坡、库南以及轮南、哈拉哈塘一带，它们都是当时有利的油气运移指向区，是寻找原生油藏的有利地区。只是这一期油气聚集经历的保存时间达 4 亿多年，受到多次构造运动的改造，因此多不同程度地再次运移转变为次生油气藏。

2 第二关键时刻—第三纪末

晚第三纪末，满加尔成油气系统进入新一次复合前陆盆地演化阶段，巨厚的上第三系前陆盆地沉积物自北而南超覆，下伏满加尔凹陷周边的源岩在新的一轮沉降过程中，由于成熟度增大，而发生二次生烃或持续生烃。同时由于持续下沉和由北而南的构造挤压作用使得源岩排烃作用进一步活跃，此外，也有一定的次生油气藏的形成。

第三纪末的有效生油区同现今情况类似，主要分布在凹陷周边隆起区，而生气源岩分布很广。但正如前节指出的，本次源岩以生、排气为主，生、排油量较小，是中上奥陶统源岩的主要排烃期之一。从成藏事件中可以看出，本次成藏过程，由于储层和源岩都比较广泛，因此，在新生代形成的构造圈闭中原生油气藏应比较丰富。另外，先期形成的油气藏也会发生调整甚至破坏形成各类中小型次生油气藏。

总之，从成藏事件的组合情况来看，这一时期也是较为有利的成藏时期。

六、有利区带综合分析评价

区带的地质评价是一项综合性极强的系统工程，需要对成油气系统的各要素及其配套历

史做深入的系统分析。从以上分析模拟结果来看，满加尔成油气系统的主要储油气层系为下古生界、石炭系及三叠系，因此这里亦就此三个层系进行区带分析评价。

1. 下古生界有利勘探区带

下古生界是一套海相地层，岩性以碳酸盐岩及泥质岩为主，既是主力烃源岩又是主要的储集层。其储集性能主要受控于岩性、构造裂缝以及风化剥蚀程度等。显然这些条件集中体现在凹陷南北隆起以及周缘斜坡地带，这些地带受古隆起的控制多次抬升剥蚀，发育多个不整合面。其中白云岩和灰岩发育的地带有良好的储集性能，其储集空间以裂缝、溶洞为主。下古生界的隆起区长期以来为油气运移的指向地区，又有大断裂及不整合面与油源层连通，因此有极为优越的运聚条件；从储盖组合来看，既有为上覆泥岩层覆盖的风化壳组合，又有寒武—奥陶系自身泥岩封盖的潜山内幕组合，有广阔的找油领域。

从本次模拟结果看，下古生界现今可供聚集量十分可观，其中油为 $36.34 \times 10^8 \text{ t}$ ，气为 $95.63 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。主要的聚集区带在塔中低凸起、轮南低凸起以及英买力低凸起等地。同时从现今有效生油区以及寒武系的聚集区带来看，库南断垒带、塔东低凸起带以及位于凹陷西部的满西坡折地带也是有利的勘探区带，后者随着古生界油源区的不断西移，具有较好的油源条件，也是油气运移的指向区。

总之，根据区带模拟结果，结合上述石油地质特点分析，下古生界构造层共有 4 个最有利的勘探区带和 6 个有利区带（见图 3 - 3）。

图 3 - 3 满加尔成油气系统下古生界有利聚集区带分布图

最有利区带：TZ1号断裂背斜构造带、轮南—桑塔木背斜带、吉拉克—塔河背斜带、英买力背斜带。

有利区带：塔中低凸起北斜坡披覆背斜—地层圈闭带、哈拉哈塘地层圈闭带、轮西—羊屋背斜—地层圈闭带、库南断垒带、塔东1井区构造带、满西坡折带。

2 石炭系有利勘探区带

石炭系是本区另一套重要的储油层系，一般认为是一套海陆交互相沉积，自西向东由海相过渡到陆相沉积。岩性西部以碳酸盐岩为主，东部过渡为一套海相石英砂岩、砂泥岩互层夹石灰岩。其中东河塘组砂岩段是石炭系最为重要的储集层。前人研究认为，东河砂岩是石炭纪海侵初期围绕古隆起分布、以波浪作用为主营力的滨岸海滩沉积，在塔中隆起的围斜部位（TZ4井区）、塔北隆起哈拉哈塘凹陷及草湖凹陷的西侧、满加尔凹陷西部的滨岸滩坝区，是东河砂岩优质储层的发育区。

从储层与油源的连通性看，东河砂岩或者直接覆盖在下伏奥陶系上，或者以大断层与寒武—奥陶系烃源岩相连（如塔中）。其上覆C₁₁层序泥岩、膏泥岩是满加尔成油气系统的优质区域盖层。

模拟结果表明，石炭系的油气主要来自于下古生界，其可供聚集量为油 $21.68 \times 10^8 \text{ t}$ ，气 $41.80 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，因此具有广阔的油气勘探远景。综合模拟分析认为该层系共有3个最有利聚集区和2个有利聚集区（见图3-4）。

图3-4 满加尔成油气系统石炭系有利聚集区带分布图

最有利区带：TZ1 号断裂带、轮南低凸构造带、东河塘断裂构造带。

有利区带：塔中低凸起北斜坡构造—地层圈闭带、库尔勒鼻隆南斜坡构造—地层圈闭带。

3 三叠系有利勘探区带

三叠系地层在本区主要分布在南、北隆起及凹陷的西半部，主要为一套湖相、河流相沉积，岩性以砂岩、砂砾岩为主夹泥岩、煤层。三叠系储集层主要发育在扇三角洲—湖泊沉积体系中水下分流河道、河口坝或扇三角洲前缘席状砂。三叠系埋深适中，孔隙度在 15 % ~ 28 % 之间，储集性能良好，其优质储集层主要分布于轮南低凸起、东河塘、英买力地区。

三叠系在塔北隆起由于断裂切割接受了下古生界源岩的油气聚集。而其上覆的三叠—侏罗系泥岩又成为较好的区域盖层。模拟结果表明，三叠系油气可供聚集量相对不大，其中油为 $3.59 \times 10^8 \text{ t}$ ，气为 $2.52 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。当然这里只是模拟了来自下古生界的油气，其他生油岩的油气尚未考虑。从聚集强度图上看，有利聚集区是比较明显的，分别有 2 个最有利区带和 2 个有利区带（见图 3 - 5）。

最有利区带：轮南低凸起构造带、英买力构造带。

有利区带：东河塘构造带、TZ1 号构造带。

图 3 - 5 满加尔成油气系统三叠系有利聚集区带分布图

参 考 文 献

1. Yüklér A, C Cornford and D H Welte. One - Dimensional Model to Simulate Geologic, Hydrodynamic and Thermodynamic Development of a Sedimentary Basin: Geol Rundschau, 1978 (67): 960 ~ 979
2. Welte D H and M A Yüklér. Petroleum Origin and Accumulation in Basin Evolution - A Quan-

titative Model AAPG Bulletin, 1981 (65): 1387 ~ 1396

3. Tissot B P, and D H Welte Petroleum Formation and Occurrence New York, Springer - Verlag, 1984
4. Ungerer P, F Bessis, P Y Chenet, B Durand, E Nogaret, A Chiarelli, J L Oudin and J F Perrin. Geological and Geochemical Models in Oil Exploration: Principles and Practical Examples in G. Demaison, ed Petroleum Geochemistry and Basin Evaluation AAPG Memoir 35, 1984: 53 ~ 77
5. Ungerer P, J Burrus, B Doligez, P Y Chenet and F. Bessis Basin Evaluation by Integrated Two - Dimensional Modeling of Heat Transfer, Fluid Flow, Hydrocarbon Generation and Migration AAPG Bulletin, 1990, (74): 309 ~ 335
6. Lerche I, R F Yarzab, and C G S C Kendall. Determination of Paleohat Flux from Vitrinite Reflectance Data AAPG Bulletin, 1984, (68): 1704 ~ 1717
7. Lerche I. Inversion of Multiple Thermal Indicators: Quantitative Methods of Determining Paleohat Flux and Geological Parameters I. Theoretical Development for Paleohat Flux Mathematical Geology, 1988, (20): 1 ~ 36
8. Lerche I, Inversion of Multiple Thermal Indicators: Quantitative Methods of Determining Paleohat Flux and Geological Parameters II. Theoretical Development for Chemical, Physical and Geological Parameters Mathematical Geology, 1988, (20): 73 ~ 96
9. England W A, A S Mackenzie, D M Mann and T M Quigley. The Movement and Entrapment of Petroleum Fluids in the Subsurface Journal of the Geological Society. London, 1987, (144): 327 ~ 347
10. Nakayama K and D C V Sclen. Simulation Model for Petroleum Exploration AAPG Bulletin, 1981, (65): 1230 ~ 1255
11. Nakayama K. Hydrocarbon - Expulsion Model and Its Application to Niigata Area, Japan: AAPG Bulletin, 1987, (71): 810 ~ 821
12. Nakayama K and I Lerche Basin Analysis By Model Simulation: Effects of Geologic Parameters on 1 - D and 2 - D Fluid Flow Systems with Application to an Oil Field Gulf Coast Association of Geological Societies Transaction, 1987, (37): 175 ~ 184
13. Nakayama K. Two - Dimensional Simulation Model for Petroleum Basin Evaluation: Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology, 1988, (53): 41 ~ 50
14. McKenzie D. Some Remarks on the Development of Sedimentary Basins Earth and Planetary Sci Letters, 1978, (40): 25 ~ 32
15. Royden L, J G Sclater and R P Vherzen. Continental Margin Subsidence and Heat Flow: Important Parameters in Formation of Petroleum Hydrocarbons AAPG Bulletin, 1980, (64): 173 ~ 187
16. Guidish T M, C G S T C Kendall, I Lerche, D J Toth and R F Yarzab Basin Evaluation Using Burial History Calculations: an Overview, AAPG Bulletin, 1985, (69): 92 ~ 105
17. Thorne J A, A B Watts Quantitative Analysis of North Sea Subsidence AAPG Bulletin, 1989, (73): 88 ~ 116
18. Heasler H P and R C Surdam. Thermal Evolution of Coastal California with Application to

- Hydrocarbon Maturation AAPG Bulletin, 1985, (69): 1386 ~ 1400
19. Nunn J A, N H Sleep and W E Moore Thermal Subsidence and Generation of Hydrocarbons in Michigan Basin Reply. AAPG Bulletin, 1985, (69): 1185 ~ 1187
 20. Edman J D and R C Surdam. Influence of Overthrusting on Maturation of Hydrocarbons in Phosphoria Formation, Wyoming - Idaho - Utah Overthrust Belt AAPG Bulletin, 1984, (68): 1803 ~ 1817
 21. Furlong K P and J D Edman Graphic Approach to Determination of Hydrocarbon Maturation in Overthrust Terrains AAPG Bulletin, 1984, (68): 1818 ~ 1824
 22. England T D J and R M Bustin Thermal Maturation of the Western Canadian Sedimentary Basin, South of the Red Deer River: I) Alberta Plains Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1986, (34): 71 ~ 90
 23. Waples D W. Time and Temperature in Petroleum Formation: Application of Lopatin's Method to Petroleum Exploration AAPG Bulletin, 1980, (64): 916 ~ 926
 24. Tissot B P, R Pelet and P Ungerer. Thermal History of Sedimentary Basins, Maturation Indices and Kinetics of Oil and Gas Generation AAPG Bulletin, 1987, (71): 1445 ~ 1466
 25. Magara K. Compaction and Fluid Migration—Practical Petroleum Geology. Amsterdam - Oxford - New York, Elsevier Scientific Publishing Company, 1978
 26. Thomas C W. Principles of Hydrocarbon Reservoir Simulation Boston, International Human Resources Development Corporation, 1982
 27. Aziz K and A Settari Petroleum Reservoir Simulation London, Applied Science Publishers LTD, 1979
 28. Sweeney J J and A K Burnham. Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics AAPG Bulletin, 1990, (74): 1559 ~ 1570
 29. 石广仁, 郭宗汾. 沉积盆地综合动态模拟系统 (一). 石油物探, 1988 (3)
 30. 石广仁, 郭宗汾. 沉积盆地综合动态模拟系统 (二). 石油物探, 1988 (4)
 31. 石广仁等. 一维盆地模拟系统 BAS1. 石油勘探与开发, 1989 (6)
 32. 张万选, 张厚福. 石油地质学. 北京: 石油工业出版社, 1989
 33. 李泰明. 石油地质过程定量研究概念. 山东: 石油大学出版社, 1989
 34. 中国科学院计算技术研究所. 计算方法讲义. 北京: 科学出版社, 1958
 35. 匡祥友. 电子计算机及其在石油地质研究中的应用. 古潜山, 1984 (2)
 36. 邬立言等. 生油岩热解快速定量评价. 北京: 科学出版社, 1986
 37. 石广仁. 油气盆地数值模拟方法. 北京: 石油工业出版社, 1994
 38. Pollack H N, S J Hurter, J R Johnson. Heat Flow from the Earth's Interior, Analysis of the Global Data Set Reviews of Geophysics, 1993 (31): 267 ~ 280
 39. 王竹溪, 郭敦仁. 特殊函数概论. 北京: 科学出版社, 1965
 40. Sweeney J J and A K Burnham. Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics AAPG Bulletin, 1990, (7): 1559 ~ 1570
 41. 米石云, 石广仁, 李阿梅. 有机质成气膨胀运移模型研究. 石油勘探与开发, 1994 (6)
 42. 戴金星等. 天然气地质学概念. 北京: 石油工业出版社, 1989: 90 ~ 96,
 43. 庞雄奇等. 含油气盆地地史、热史、生留排烃史数值模拟研究与烃源岩定量评价. 北京:

地质出版社, 1993: 88 ~ 90

44. 石广仁等. 盆地综合模拟系统 BASIMS. 石油学报, 1996 (1)
45. 石广仁, 李阿梅, 张庆春. 盆地模拟技术新进展 (一) ——国内外发展状况. 石油勘探与开发, 1997 (3)
46. 石广仁, 李阿梅, 张庆春. 盆地模拟技术新进展 (二) ——油气运移平面分层模拟方法, 石油勘探与开发, 1997 (4)
47. 邸世祥. 油田水文地质学. 西安: 西北大学出版社, 1991: 125 ~ 151
48. 李明诚. 石油与天然气运移. 北京: 石油工业出版社, 1994: 92 ~ 94
49. 沈成喜等. 塔里木盆地油气资源评价, 1994
50. 张建世等. 应用盆地模拟技术评价塔里木盆地油气资源潜力, 1993
51. 陈荷立, 汤锡元等. 塔里木盆地满加尔凹陷及周围地区油气运移研究, 1994
52. 赵建章, 陈红英, 蔡振忠. 塔里木盆地满加尔凹陷油气分布规律与勘探目标评价, 1995
53. 王飞宇, 张宝民, 赵孟军. 塔里木盆地生油岩与油源研究, 1997
54. 田在艺, 张庆春. 中国含油气沉积盆地论. 北京: 石油工业出版社, 1996
55. 程克明主编. 吐哈盆地油气生成. 北京: 石油工业出版社, 1994
56. 顾家裕等. 沉积相与油气. 北京: 石油工业出版社, 1994
57. 高增海等. 塔里木盆地地质构造特征与构造演化史, 1994
58. 李小地等. 塔里木盆地含油气系统与油气分布规律研究新进展, 1997
59. 鲍志东等. 塔里木盆地各层系古水深古气候研究, 1997
60. 周兴熙等. 塔里木盆地天然气形成条件及分布规律. 北京: 石油工业出版社, 1998
61. 顾家裕等. 东河砂岩沉积环境分析. 见: 童晓光等, 塔里木盆地石油地质研究新进展. 北京: 科学出版社, 1996

第四章 圈闭评价技术及应用

第一节 圈闭评价应用现状分析

圈闭评价是从盆地评价优选出有利的含油气区带进行圈闭准备开始，到圈闭预探获得工业性油气流的整个过程中所采用的综合性勘探评价方法。它是以现代油气成藏理论为理论指导，以勘探数据库为依托，以计算机为主要手段，充分利用各种物化探资料、地质分析资料和综合研究成果，对识别出的和储备的圈闭进行成藏地质条件、圈闭可能的含油气规模和圈闭勘探经济效益进行综合性、定量化的评价工作。

圈闭评价的根本目的在于为圈闭优选提供决策依据，为预探井的部署提出井位部署意见，为提高圈闭预探成功率提供保证。

一、国内外圈闭评价技术发展现状

由于圈闭评价在油气勘探中发挥着越来越大的作用，其地位也日益提高，圈闭评价技术也因之得到进一步的发展和提高。现代圈闭评价技术的特点可以概括为如下四个方面：

1. 以油气系统理论为指导，开展圈闭地质评价

油气系统（Petroleum System）理论是由美国石油地质学家 Dow 在 1972 丹佛举行的 AAPG 年会上提出的，并由法国的石油地质学家 Perrodon (1980)、美国的 Magoon (1989)、Smith (1991) 等人进一步发展和完善基础上提出的新理论。油气系统是指介于盆地（Basin）和区带（Play）之间的一种新的构造单元，它既包括成熟的烃源岩和所有已形成的油气藏，也包括油气藏形成时所不可缺少的一切地质要素和作用。油气从生成、运移到聚集成藏，再到后期的调整、破坏、再成藏等一系列过程都在这个系统内发生。

以油气系统理论为指导，从油气藏形成的基本要素（静态）——圈闭、储层、盖层——和成藏过程的作用过程（动态）——油气的生运聚、油气藏形成、油气保存调整与破坏——密不可分的两个方面，来建立圈闭评价的因素集，系统评价圈闭油气赋存的可能性，成为圈闭评价的一个重要发展方向。

2 圈闭评价前期基础研究日益得到重视和加强

为进一步提高圈闭评价结果的正确性，使之能够有效地为勘探工作服务，圈闭评价前期基础研究工作日益得到重视和加强。突出表现在：

第一，采用各种先进的目标处理技术，提高地震资料的信噪比和分辨率，提高圈闭解释的准确性和圈闭落实的可靠性，如小波去噪技术、K—L 变换去噪技术、叠前深度偏移技术、长波长静校正技术等。

第二，充分利用有限的勘探资料，对区带和圈闭的生、储、盖条件开展广泛的储盖层预测工作。如利用地震资料预测盖层的驱替压力，确定烃源岩的成熟度，采用测井约束反演技术开展储层岩性、物性、含油性的预测，采用有限元模拟技术预测碳酸盐岩储层的裂缝发育特征等。

第三，通过区域勘探成果的系统收集、整理和统计分析，建立圈闭评价信息库，为圈闭地质评价、资源量计算提供评分依据和计算参数、数据分布类型等。

3 各种新的数学方法不断引入圈闭评价，圈闭评价的定量化程度日益提高

在 70 年代和 80 年代，圈闭地质风险评价的方法非常单一，往往是采用风险概率加权方法和特尔菲方法，随着时代的发展，各种先进的数学方法开始不同引入到圈闭评价中，如模糊综合评判方法、神经网络方法、灰色数学方法以及基于人工智能的专家系统方法等。

在资源量评价领域，评价方法已经由早期的体积类比方法（相似系数法、圈闭容积法）向蒙特卡罗风险评价、人工智能评价的方向迈进，包世界等将数量化理论引入圈闭资源量评价，利用实分圆域法计算圈闭资源量，不仅提高了计算速度，也进一步提高了计算精度。

4 圈闭评价内容进一步系统化，经济评价工作日益受到重视

早期圈闭评价的内容主要包括地质风险评价和资源量估算两个方面，随着油气勘探难度的增加和勘探思想观念的转变，人们开始逐渐认识到经济评价对于圈闭评价的重要性。圈闭评价的目标不再限于解决圈闭含油气的可能性问题，而且还要解决是否具有商业价值的问题。

在此基础上，圈闭评价工作开始由原来的单层次评价向多层次的综合性评价方向发展。在正确权衡圈闭地质评价成果与经济评价成果的基础上，结合勘探所处的阶段和根本任务，确定圈闭的综合评价系数和排队顺序，为勘探目标的优选决策提供直接的和定量的依据。

二、中国主要圈闭评价软件系统调研

自 1987 年原中国石油天然气总公司将圈闭评价工作纳入勘探决策程序以来，先后制定和颁布了《圈闭管理暂行规定》、《圈闭评价技术规定》、《圈闭描述评价规范》、《圈闭成果管理细则》，极大地促进了圈闭评价工作的开展与评价工作规范化，与此同时，国内圈闭评价的计算机软件研制工作取得了飞速的发展。

“八五”期间，四川石油管理局、北京石油勘探开发研究院早在 1992 年就先后推出了“CY - 85/ 92 评价系统（陈子恩等）”和“圈闭快速评价系统（包世界等）”，紧接着，石油地球物理勘探局勘探处于 1993 年完成“圈闭综合评价系统”并投入使用。“九五”一开始，原中国石油天然气总公司勘探局就开始组织力量，着手进行“圈闭描述评价系统（TrapDES）”的设计和研制工作，并与盆地模拟系统和油藏描述系统接口，形成一个大型的计算机勘探软件平台，目前已基本完成。

统（TES）”和江汉石油学院的“区带勘探项目地质、经济评价与决策软件系统（PTEDSsys）”相继问世。其他单位也正在研制适合自己需要的圈闭评价软件系统。

通过各家软件的比较不难看出，国内圈闭评价软件的研究具有如下几个显著的特点。

第一，这些软件基本上都是基于微机而研制开发的。其原因主要基于三个方面：

（1）PC 系列微机拥有份额巨大的用户；

（2）随着计算机技术的发展，计算机的存贮能力和运算速度越来越高，完全可以满足圈闭评价过程中的数值运算、图示管理与显示的需要；

（3）基于微机进行软件的开发研制可以大大缩短开发周期。

第二，随着开发时间的推移，软件系统具有更加友好的操作界面和数据、图形管理功能。计算机操作系统的更新换代，特别是 Windows 操作系统发展，使基于微机开发的软件系统在操作界面、数据管理、图形功能方面更加灵活，更加方便。较早开发的圈闭评价软件，如物探局的“圈闭综合评价系统”是在 Foxbase 的基础上研制开发的，它以 Foxbase 作

为数据管理系统，基本上不具备图形功能；随后的 PTEDSys 系统（江汉石油学院）则选择了汉化 Windows3. X 开发环境，操作较前者更方便；近来完成的一些圈闭评价软件，基本上都是以 Windows95 为开发平台，以 ODBC 等作为数据通讯接口，使圈闭评价操作更加直观，数据管理更加灵活，图形功能大为增强。

第三，各家软件在系统功能、评价方法设计上，具有各自的特色。较早的“圈闭综合评价系统”方法比较单一，主要利用风险概率评分进行圈闭地质评价，采用圈闭容积法计算圈闭资源量。“CY - 85/ 92 评价系统”则以地质相似性理论、蒙特卡洛模拟、效用函数理论为基础，通过多元统计分析进行圈闭地质评价、资源量评价。“圈闭快速评价系统”则采用数理布点方法取代蒙特卡洛估算圈闭资源量，使计算速度和预测精度有了明显改善。新疆石油管理局开发的“TES 圈闭评价软件系统”采用数理统计拟合，应用灰色系统理论、模糊决策技术、神经网络技术等多种数学方法开展圈闭评价工作，方法较多，功能较全，其最大的特点在于，对地质评价参数的量化非常详细，考虑的因素非常细致，比较适合于高成熟的探区使用。原中国石油天然气总公司勘探局新近推出的“TrapDES 圈闭评价描述软件系统”将专家系统方法和混合专家神经网络方法等引入圈闭评价，是一个非常有益的探索，该软件同盆地模拟系统和油藏描述系统具有良好的接口功能，是一个综合性能强、商业化程度较高的软件平台。

第二节 圈闭评价配套技术

以正确的科学原理和方法论为指导，紧密联系实际，开展扎实的基础研究工作，是搞好一切的根本保证。圈闭评价配套技术主要包括四个方面。

一、以扎实的地质研究为基础的区带评价技术

以油气系统研究和盆地数值模拟成果、已钻探圈闭和已知油气藏解剖为基础，开展区带地质评价，进行成藏关键性因素分析和资源量参数研究。

1. 区带成藏条件分析

油气系统研究与盆地数值模拟成果对于正确、定量地认识区带油源条件、圈闭形成及发育史、成藏配置匹配关系、油气保存条件的优劣等都具有十分重要的意义。通过广泛的资料收集与整理，特别是“八五”以来油气系统的研究成果、盆地数值模拟成果，开展区带评价工作，在确定各二级构造带成油条件的基础上开展局部圈闭评价。

2 已钻圈闭及油气藏解剖技术

圈闭评价在很大程度上带有推测性，这种推测的一个重要的理论基础就是“由已知推测未知”。将待评圈闭与已钻探圈闭以及已知油气藏的合理类比分析，具有三个方面的重要意义。

第一，通过“由此及彼”的地质类比分析，便于准确评价圈闭成藏的各项地质条件，进行圈闭地质打分；

第二，通过油气藏参数的数理统计分析，可以为资源量计算所需的圈闭充满系数、油气层厚度、单储系数等参数的选取提供依据；

第三，通过钻探成果与失利探井的综合分析，确定圈闭成藏的关键因素，为确定评价权系数提供依据。

二、以油气系统理论为指导的圈闭地质评价技术

在圈闭评价过程中，以油气系统理论为指导，从油气藏形成的基本要素和作用过程这两个密不可分的方面，来系统评价圈闭含油气的可能性，将圈闭地质评价因素归结为圈闭、储层、盖层、油源、配置、保存条件等六个方面。

优质的储、盖层的存在及其良好的组合关系是形成油气藏的先决条件，良好的圈闭和油源条件以及相互配置关系是油气藏形成的关键，而较好的油气保存条件是发现油气藏，确保油气藏具有一定经济规模的重要保证。

三、以系统论为评价方法的圈闭综合评价技术

圈闭评价内容涉及面广，具有系统性和层次性的特点，所以它必须遵循系统论的评价思路，有系统、分层次地进行。

第一，圈闭评价的内容必须系统完整，地质评价、资源评价、经济评价从三个不同的角度分别评价圈闭含油气的地质风险性、预测圈闭可能的含油气规模、分析圈闭是否具有商业价值，三者缺一不可，这样才能更加有效服务与勘探决策工作。

第二，圈闭评价要分层次，有序地进行。一般圈闭评价包括三个层次，即基本评价层次(包括圈闭可靠性评价、成藏有效性评价、资源量评价、投资成本分析)、中间评价层次(地质把握评价、圈闭经济评价)和综合评价层次(圈闭综合排序)。这三个层次协调与统一，是确保评价体系的科学性、严密性的重要条件。

四、以成藏模式与勘探条件为依据的圈闭评价模式建立技术

1. 根据塔里木盆地的勘探实际，建立合理的地质评分标准

圈闭评分主要包括圈闭可靠性、烃源条件、圈闭条件、储层条件、盖层条件、成藏配置条件及油气保存条件 7 个方面。由于塔里木盆地整体勘探程度较低，所以选择五级评分的方法来对地质条件加以量化。主要评分标准见（表 4 - 1 至表 4 - 7）。

表 4 - 1 圈闭可靠性评分标准

分级	圈闭控制程度	地震资料品质	钻探资料
0.90 ~ 1.0	有三维地震，或多条二维测线控制，呈“#”型控制	地震资料分辨率高；反射能够连续追踪，断点、尖灭点清晰可辨；基本无闭合差	邻近圈闭有井资料可供进行准确的标定
0.75 ~ 0.90	有两条以上主测线通过，呈“++”型控制		同一个二级构造带上有探井资料可供标定
0.60 ~ 0.75	有两条交叉测线通过，呈“+”型控制	分辨率较高，50%以上可连续追踪，大断层和高角度削截显示清晰；闭合差较小	相邻二级构造带有井资料可供解释时参考
0.40 ~ 0.60	有两条非交叉测线通过，呈“=”型控制	地震反射追踪的可靠性较低，断点和尖灭点显示不清；或闭合性差	(次)一级构造单元内有井资料
< 0.40	测网稀，只有一条测线通过，呈“-”型		基本无钻探资料，或者构造复杂，无法进行层位追踪对比

表 4 - 2 烃源条件评分标准		
分级	油气系统供油能力与区带成油条件	圈闭捕油条件
好	具多套烃源岩，已经发现规模大而且质量好的优质烃源岩； 区带内已经发现工业性油气田或多个含油气构造	邻近油源区，具多种类型的横向和垂向运移通道的组合（即网状通道）
较好	具有多套烃源岩，但是主力源岩还不十分清楚；钻探已经发现工业性含油气构造，或地表见油苗	位于油气运移的有利方向和有效运移距离范围内，具备运移通道条件
中等	油气系统基本得到确认，但没有发现优质烃源岩；经钻探已经获得含油岩心，有油气运聚的证据	位于油气运移的有利方向，也不缺乏运移通道，但距离油源区较远
较差	存在可能的油气系统，已经发现具有一定生烃能力的烃源岩， 区带内已经获得油气显示	位于油气运移的有利方向，距离油源区较远，运移通道条件差
差	油气系统还限于推测，区内还没有揭示烃源岩的存在，经钻探也未获得油气显示	圈闭位置不利或基本无运移通道条件

表 4 - 3 圈闭条件评分标准				
分级	圈闭类型	圈闭规模	圈闭埋深	圈闭完整性
好	批覆背斜、生物礁、潜山	面积 > 50k m ²	< 3000 m	圈闭形态完整，无断层，只有一个构造高点
较好	断背斜、断鼻	面积 = 20 ~ 50km ²	3000 ~ 4000 m	断层少，只有一个高点存在
中等	断垒、断块圈闭	面积 = 10 ~ 20km ²	4000 ~ 5000 m	断层少，具有多个次高点
较差	超覆不整合 剥蚀不整合	面积 = 5 ~ 10k m ²	5000 ~ 6000 m	断层较多，形态不完整
差	岩性上倾尖灭和透镜体圈闭	面积 < 5k m ²	> 6000 m	圈闭破碎严重

表 4 - 4 储层条件评分标准				
分 级	储 层 岩相特征	储集空间 特 征	储集物性	
			碎屑岩储层	碳酸盐岩储层
好	滨浅海（湖）相碎屑岩储层， 碳酸盐岩风化壳储层	原生粒间孔或超大溶孔	高孔中高渗 孔隙度 > 20 %	孔隙度 > 4.5 %，测井解释为一类裂缝
较好	河流—三角洲相砂岩储层； 台地相白云岩、礁滩相灰岩	次生粒间孔，双孔 介质型	中高孔、中高渗 孔隙度 = 15 % ~ 20 %	孔隙度 = 3 % ~ 4.5 %，测井解释为一类或二类裂缝
中等	扇三角洲、冲击扇碎屑岩储层， 介壳灰岩、粒屑灰岩储层	裂缝或溶洞为主	中孔、中低渗 孔隙度 = 10 % ~ 15 %	孔隙度 = 2 % ~ 3 %，测井解释为二类裂缝
较差	洪积相、浊流相碎屑岩储层、 粉晶灰岩储层	粒内溶孔或晶间孔为主	中低孔、低渗；孔隙度 = 5 % ~ 10 %	孔隙度 = 1 % ~ 2 % 测井解释为二类或三类裂缝
差	火山岩、变质岩储层、泥晶 灰岩储层	铸模孔或微孔隙	低孔、低—特低渗；孔隙度 < 5 %	孔隙度 < 1 %；测井解释为三类裂缝

表 4 - 5 盖层条件评分标准

分级	盖层类型	宏观封闭性能	微观封闭性能
好	膏岩、泥膏岩、膏盐岩	区域性盖层，单层厚度大于 30 m	排替压力 > 10 M Pa
较好	纯泥岩、泥质灰岩	区域性盖层，单层厚度 20 ~ 30 m	排替压力 5 ~ 10 M Pa
中等	粉砂质泥岩、钙质泥岩	区域性盖层，单层厚度 10 ~ 20 m	排替压力 3 ~ 5 M Pa
较差	纯灰岩、砂质泥岩	局部性盖层，累计厚度 50m 以上，单层厚度 5 ~ 10 m	排替压力 2 ~ 3 M Pa
差	钙质砂砾岩、泥质粉砂岩	局部性盖层，或累计厚度小于 20 m，单层厚度小于 5 m	排替压力 < 2 M Pa

表 4 - 6 成藏配置条件评价标准

分级	时间匹配	空间配置
好	圈闭形成时间早，位于长期发育继承性古隆起上，可持续接受各个时期生成的油气	自生自储式组合（碳酸盐岩） 自生侧储式组合（碎屑岩）
较好	圈闭形成早于源岩的生排烃高峰时间	古生新储式，无厚层膏岩隔开
中等	圈闭与源岩的生排烃高峰基本上同时发生	古生新储式，有厚层膏岩隔开，必须靠大型断层沟通
较差	圈闭形成时间略滞后于源岩的生排烃高峰时间，但生烃过程持续时间较长	新生古储式，只能靠不整合面沟通
差	圈闭形成时间较晚，生烃过程已经基本结束	不属于同一油气系统

表 4 - 7 保存条件评分标准

分级	构造运动条件	地下水活动条件	其他条件的影响
好	油藏形成后，构造运动的影响极小	地下水基本处于停滞状态，只能矿化度高，地下水富 Cl^-	油藏埋藏较深，具超压封闭，无岩浆侵入等地质事件发生
较好	产生新断裂，断距小，对油气藏保存影响不大	表现为滞流—重力流，地下水富 Cl^- ，有一定的 SO_4^{2-}	
中等	具有一定幅度的构造翘倾，油气藏可能进行一定的调整	重力流为主，矿化度中—高，地下水富 SO_4^{2-}	埋藏较深，压力封闭性较好
较差	后期断裂作用较强，断距大；或者发生大规模的推覆	表现为重力流—压实流，地下水富 $\text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$	油藏埋藏浅，或遭受过剥蚀曾露出地表，或附近有大规模的岩浆侵入发生
差	发生过大幅度的隆升和剥蚀活动	以压实流为主，地下水中富含 HCO_3^- ，或存在水力天窗	

2 通过大量的统计分析，选取合理的资源量计算参数

为使资源量参数的选取有据可依，系统收集了塔里木盆地已经探明的 30 多个油气田的资料，对油气藏的面积充满系数、储层厚度、净毛比、单储系数分探区、分圈闭类型、分层位进行了统计分析（表 4 - 8，图 4 - 1，图 4 - 2，图 4 - 3）。

表 4 - 8 塔里木盆地探明储量参数统计表						
探 区 名 称	层 位	圈闭 类型	面 积 充 满 系 数 %	净 毛 比 , %	石 油 单 储 系 数 10 ⁴ t / (k m ² · m)	天 然 气 单 储 系 数 10 ⁸ m ³ / (k m ² · m)
库 车 拗 陷	N	背 斜			8 7 ~ 12 3 10. 0 (6)	
	N	断 层	0. 28 ~ 0. 75 0. 51 (4)			
哈 拉 哈 塘	E	背 斜	0. 21 ~ 0. 35 0. 28 (2)		5. 3 (1)	
	J	背 斜	0. 26 ~ 0. 74 0. 50 (2)	91 (1)	7. 2 (1)	
	C	背 斜	0. 89 ~ 1. 00 0. 97 (4)	82 ~ 92 87 (3)	6 7 ~ 6. 9 6. 8 (4)	
轮 南 低 凸 起	J	背 斜			8. 0 (1)	
	T	背 斜	0. 29 ~ 1. 00 0. 73 (13)	44 ~ 90 67 (2)	5 3 ~ 9. 8 7. 5 (26)	
	T	断 层	0. 78 ~ 1. 00 0. 91 (7)			
	T	岩 性	0. 81 (1)			
	C	背 斜	0. 77 (1)	52 ~ 52 52 (2)	2 2 (10)	0. 26 (1)
	O	潜 山	0. 42 ~ 0. 97 0. 72 (3)	21 ~ 81 51 (2)	0 8 ~ 2. 0 1. 4 (2)	
轮 台 断 隆	N	背 斜	0. 17 ~ 1. 00 0. 73 (8)	91 ~ 100 97 (7)		0. 17 ~ 0. 32 0. 26 (9)
	E	背 斜	0. 49 ~ 1. 00 0. 84 (9)	62 ~ 100 83 (9)	3 8 ~ 8. 3 6. 0 (3)	0. 21 ~ 0. 38 0. 30 (5)
	K	背 斜	0. 84 ~ 1. 00 0. 94 (3)	78 ~ 82 80 (2)	3. 0 (1)	0. 27 ~ 0. 50 0. 39 (2)
	K	断 层	0 5 (1)	92 (1)		0. 36 (1)
	O	潜 山	0. 40 ~ 0. 59 0. 50 (2)		0 6 ~ 1. 0 0. 8 (2)	
南 喀 英 买 力	N	背 斜	0. 72 (1)			0. 31 (1)
	E	背 斜	0. 64 ~ 1. 00 0. 83 (7)	75 ~ 100 90 (8)	5 3 ~ 8. 8 6. 8 (6)	0. 34 ~ 0. 46 0. 40 (5)
	K		0. 31 ~ 0. 93 0. 62 (2)		11. 0 (1)	0. 37 (1)
	O				0 44 ~ 1. 4 0 93 (2)	
塔 中 低 凸	C		0. 23 ~ 0. 84 0. 59 (4)	41 ~ 100 77 (8)	4 2 ~ 12 8 8 5 (22)	0. 18 (1)

图 4 - 1 不同时代圈闭含油气面积系数对比

图 4 - 2 不同时代地层储层厚度净毛比对照

3 根据不同的勘探程度，选择不同的地质评价方法

圈闭评价的方法很多，不同的方法由于适用于不同的条件，因而也具有各自的优越性和局限性。因此在对勘探程度不同的探区进行圈闭评价的过程中，必须针对探区的勘探特点、资料丰度和地质认识程度有选择性地使用合理的地质风险分析方法、权重评价方法、资源量计算方法等。

图 4 - 3 不同时代地层单储系数对比

一般地，类比方法比较适合于勘探程度低的探区，可以利用灰色关联法进行圈闭风险分析，采用地质条件类比法、容积法计算圈闭资源量。而在高成熟的探区，各种资料比较丰富，能够建立资源量参数的分布函数，也可以直接本区带的勘探成果进行圈闭地质评分，在这种条件下，可以采用统计方法开展圈闭的地质风险评价和资源量评价，如神经网络方法、蒙特卡罗模拟等。综合评价方法和专家系统方法适合于圈闭勘探的各个阶段，这些方法主要包括风险概率评分法、模糊综合评判法、特尔菲方法等。

4 根据不同的圈闭成藏模式，分配合理的权系数

权系数分配主要原则包括：
第一，根据不同的探区，不同的勘探目的层系在成藏模式，尤其是成藏的关键性因素方面的差异性确定一级评价因素权重（表 4 - 9）；

表 4 - 9 圈闭评价一级因素权重分配表

探区	油源	储层	盖层	圈闭	匹配	保存
塔中探区	0. 30	0. 20	0. 10	0. 20	0. 10	0. 10
塔北探区	0. 25	0. 20	0. 10	0. 15	0. 20	0. 10
塔西南探区	0. 35	0. 10	0. 10	0. 10	0. 20	0. 15
库车探区	0. 25	0. 15	0. 15	0. 25	0. 10	0. 10
北部拗陷区	0. 30	0. 20	0. 10	0. 15	0. 15	0. 10

第二，根据不同勘探阶段和资料占有程度的差异，地质认识程度的限制，分配合理的二级评价因素权重（表 4 - 10）；

表 4 - 10 二级因素评价权重分配表

一级因素	二级因素	二级因素权重		一级因素	二级因素	二级因素权重	
		高勘探程度	低勘探程度			高勘探程度	低勘探程度
圈闭可靠程度	控制程度	0. 20 ~ 0. 30	0. 25 ~ 0. 35	盖层条件	盖层类型	0. 40	0. 30
	资料品质	0. 60 ~ 0. 70	0. 45 ~ 0. 55		宏观展布	0. 20	0. 50
	探井资料	0. 10	0. 20		微观特征	0. 40	0. 20
烃源条件	供油条件	0. 30	0. 70	空间配置	时间匹配	0. 40	0. 60
	捕油条件	0. 70	0. 30		空间配置	0. 60	0. 40

续表

一级因素	二级因素	二级因素权重		一级因素	二级因素	二级因素权重	
		高勘探程度	低勘探程度			高勘探程度	低勘探程度
圈闭条件	圈闭类型	0.40	0.50	保存条件	构造条件	0.6~0.8	
	完整程度	0.30	0.30		水力条件	0.1~0.2	
	圈闭规模	0.15	0.10		其他条件	0.1~0.3	
	高点埋深	0.15	0.10	备注： 勘探程度高：塔中低凸起、塔北隆起 勘探程度低：巴楚断隆、库车拗陷、北部拗陷			
储层条件	岩相特征	0.30	0.50				
	储集空间	0.20	0.25				
	储层物性	0.50	0.25				

第三，考虑到圈闭的复杂程度和勘探的难易程度的差别，分配不同的权系数。

5 依据具体的决策思维模式，选择合理的圈闭综合评价方法

不同的圈闭综合排队方法在地质把握系数和经济效益系数的权系数取值上，会因为决策者所在的出发点不同而具有不同的决策思维模式，因此在权系数的和综合排队系数的构筑上就会有较大差别，概括起来不外乎三种。

第一种，以突破探区的出油关为根本目的，因而对成藏地质条件的风险性更加注重，而对圈闭含油气规模和勘探效益不很关注，在优选圈闭的过程中，会加大该因素的权重，从而优选地质把握性高的圈闭，称为保守型决策。

第二种，以获得勘探的大突破为根本目的，期望尽快拿下大油田，所注重的是油气资源量而宁可冒无油的风险。决策者在圈闭综合评价过程中，会加大资源量的权系数，是一种冒险型决策方式。

第三种与上两者不同，在圈闭优选过程中，既要求圈闭成藏可能性大，又要求圈闭勘探效益高，资源量大，属于保险型决策。

第三节 圈闭评价软件设计思路

圈闭评价软件系统的研制主要目的之一是解放生产力，充分利用计算机资源，减轻科研人员的劳动强度；二是缩短圈闭评价周期，使科研成果及时为勘探决策服务；三是综合利用勘探信息，提高圈闭评价的科学性和定量化程度。

本次圈闭评价软件的设计是在圈闭评价技术方法研究的基础上，按照软件工程的要求，采用模块化、结构化设计思路，遵照功能齐全、结构完整、易于安装、便于维护的原则来实施的。

一、软件开发运行环境设计

目前微机使用非常普遍，拥有量相当大，从事圈闭评价与圈闭管理的工作人员都能够熟练使用和进行微机操作。另外，作为“九五”科技攻关课题，时间紧任务重，必须尽可能缩短开发周期，给用户和开发人员更多的测试和反馈、修改时间。本软件的设计本着有利于使用和普及的原则，立足微机进行开发研制；本着方便操作使用、方便数据管理的原则，软件选用 Windows95 和 Win NT 4.0 作为开发环境；本着模块化、图形化的原则，选用 Visul

C++ 作为编程语言。

二、软件界面风格设计

软件界面风格不仅是软件的形象的直观表示，也是软件开发水平和商业化程度的集中体现。本次软件系统界面设计的主要思路包括以下几个方面：

(1) 体现圈闭评价的整体思路和技术流程，实行模块化设计。软件设计基本遵循数据库管理、可靠性评价、成藏有效性评价、资源量估计、成本效益分析、经济评价、圈闭综合评价的具体思路，使操作者能够按部就班，完成圈闭评价的各项内容。

(2) 根据切合实际的需要和方便用户使用的原则，采用形式多样的菜单系统。主菜单采用固定式菜单，使操作者对软件结构和功能一目了然；子菜单使用下拉式，体现出评价内容的系统性和评价方法的可选性；在对话框中，设计了按钮式、弹出式等多种形式菜单，使操作更加灵活和简便易行。另外还采用直观的工具图标快捷方式，使操作者无需逐级选择菜单也可以直接使用本系统功能。

(3) 为便于初学者尽快掌握软件的使用方法，使操作者能够及时发现操作错误，软件设计了良好的使用帮助和错误提示功能。具体包括： 软件系统操作帮助文档，可供随时查阅； 对话框及活动文档的系统提示； 操作过程中错误类型提示； 工具条帮助。

三、软件系统结构与方法设计

在软件设计上，充分考虑了塔里木盆地的基本特点和评价思路的针对性、评价内容的灵活性、评价方法的可选性。

第一，突出圈闭可靠性评价的重要性。塔里木盆地由于地震资料品质造成的圈闭不落实而致使探井失利的情况屡见不鲜。因此，开展圈闭落实的可靠性评价，对于提高塔里木盆地勘探成功率，降低钻探风险具有十分重要的意义。软件设计过程中，充分考虑了这一特点。一是编写了专门模块，进行圈闭可靠性的定量评价；二是采用可靠性系数和成藏有效性系数的乘积形式，计算地质把握系数；三是在圈闭优选决策过程中，首先进行圈闭可靠性级别的分类，为降低决策风险提供了依据。

表 4 - 11 圈闭成藏有效性评价因素构成

一级因素	次级因素	主 要 内 容
油源条件	供油条件 聚油条件	油气系统特征，区带成油条件 圈闭的构造位置、运移通道条件
储层条件	储层岩相特征 储集空间特征 储集物性特征	储层沉积相、岩石类型 储集空间类型及其组合关系 宏观物性和微观孔隙结构特征
盖层条件	盖层岩性类型 宏观封闭性能 微观封闭性能	盖层沉积岩石学特征 盖层纵向厚度分布与平面展布 盖层渗透性，扩散吸附性、排替压力
圈闭条件	圈闭可靠程度 圈闭成因类型 圈闭规模大小 圈闭完整程度 圈闭埋藏深度	测网密度、资料品质、资料拥有程度 背斜、断层、地层、潜山、岩性 圈闭闭合面积、闭合幅度 断层切割程度、次高点的分布 圈闭高点海拔和埋深

一级因素	次级因素	主 要 内 容
配套条件	时间匹配条件 空间配置关系	生排烃高峰与圈闭形成期的关系 生储盖组合关系
保存条件	构造保存条件 水文地质环境 其他保存条件	断层活动、剥蚀作用、翘倾活动 地下水水动力与水化学特征 生物降解作用、岩浆侵入活动等

第二，针对塔里木盆地总体勘探程度低的特点，对圈闭评价二级因素做了适当粗化。因为塔里木盆地勘探程度低，资料拥有程度低，对圈闭成藏地质条件的认识受到很大程度的限制。因此，对于影响圈闭成藏的地质因素不能划分得过细，量化程度也不能要求太高，否则就会因为评分的不确定性因素太多而往往事与愿违。针对这一特点，在软件设计过程中，采取了相应的措施。一是将影响油气藏形成和保存的因素进行了适当的粗化，将影响成藏的地质因素概括为六大类十八个方面（表 4 - 12）；二是在评分方法上，采取“好”、“较好”、“中等”、“较差”、“差”的五级评分办法，来表达对成藏地质条件的相对优劣；三是有针对性地选取风险概率加权、模糊综合评价、和灰色关联方法来计算圈闭成藏有效性系数。

第三，按照不同探区不同层系勘探程度的高低，分别设计了统计法、类比法两种可选的资源量评价方法。对于勘探程度高，油气藏资料较多的探区，可以首先建立参数的分布函数，选用蒙特卡罗方法，计算资源量的概率分布；而对于低成熟的探区可借用邻区的资料，选择圈闭容积方法估算圈闭资源量。

第四，采用储量—成本系数方法进行勘探经济评价。储量—成本系数方法通过分析圈闭勘探效益和投资成本之间的关系来评价圈闭勘探的经济特征，比较适合于圈闭勘探初期阶段，通过圈闭的资源量、投入产出比的归一化计算经济效益系数，能够满足圈闭综合排序的需要。

第五，从定性定量两方面为圈闭优选决策提供依据。根据“保险”的决策原则，采用构建综合函数的方法，计算圈闭的综合评价系数。为了使圈闭优选决策不至于走入纯数据的迷宫，软件可以为决策者提供定性或定量依据，定性依据包括圈闭可靠性分级、圈闭地质把握分级、圈闭资源量分级、圈闭综合排序结果，定量依据包括圈闭可靠性系数、圈闭地质把握系数、圈闭资源量及风险、圈闭综合排队系数等。

四、软件的结构与功能

1. 软件的结构组成

软件系统主要由界面及文档管理、数据及图形管理、评价方法管理等三个主要部分构成。

(1) 界面及文档管理部分主要负责软件的活动窗口、菜单系统、对话框、工具条、操作帮助文档等的管理。

(2) 数据及图形管理部分主要负责数据文件的创建、编辑、存取，图形的绘制、打印等。

(3) 评价方法管理部分是软件系统的核心组成部分，具体包括圈闭可靠性评价方法、成藏有效性评价方法、圈闭资源量估算方法、投资成本分析方法、地质把握性评价方法、圈闭经济评价方法和圈闭综合评价方法的运行。

软件的总体结构如图所示（图 4 - 4）。

图 4 - 4 圈闭评价软件系统结构

2 软件的主要功能

软件按照原中国石油天然气总公司《圈闭评价技术规范》而设计实施，功能齐全。主要包括：“文档管理”、“数据库编辑”、“圈闭基础评价”、“圈闭综合评价”、“圈闭分级与综合排序”、“成果绘图及报表”、“软件帮助”等。

(1) 文档及窗口管理。

(2) 数据库管理：包括可靠性评价数据库、圈闭地质评价数据库、圈闭资源量评价参数库、圈闭经济评价参数库、圈闭评价成果数据库的创建和编辑。

(3) 圈闭基础评价：包括圈闭可靠性评价（采用加权的形式计算圈闭可靠性系数），成藏有效性评价（利用风险概率分析、模糊综合评判、灰色关联分析方法计算圈闭成藏有效性系数），资源量计算（采用圈闭容积法、神经网络预测法、蒙特卡罗模拟方法计算资源量及其概率分布），投资成本分析（计算探明圈闭所需的全部成本和总价值）。

(4) 圈闭综合评价：计算圈闭地质把握系数、圈闭经济效益系数、圈闭综合排队系数。

(5) 圈闭分级与综合排队：通过建立适当的划分标准，对圈闭的可靠程度、地质把握程度、资源量规模、经济性进行分级，并利用圈闭综合排队系数进行圈闭的综合排序。

(6) 成果绘图与报表：绘制圈闭评价成果图（圈闭可靠性系数、成藏有效性系数、地质把握系数和圈闭资源量），并进行圈闭评价成果的报表输出。

(7) 软件帮助：包括系统提示、参数类型与格式说明、系统操作帮助等。

第四节 圈闭评价应用及效果分析

一、塔中探区圈闭评价

1. 区带地质评价

塔中隆起是一个长期发育的继承性的古隆起，其南北分别以斜坡的形式与塘古孜巴斯凹陷和满加尔凹陷相连。主要的勘探目的层系包括石炭系东河砂岩、中上奥陶统潜山及内幕、下奥陶统潜山、寒武系内幕。

1) 寒武系—下奥陶统内幕

寒武系—下奥陶统内幕以碳酸岩盐内幕背斜为主，其圈闭形成时期略早于排烃高峰，并长期接受油气的供给，成藏配置较好，主要为自生自储型油气藏。储层类型主要为白云岩，盖层厚度大质量好，塔参1井钻遇巨厚膏岩层。寒武系—奥陶系内幕背斜形成油气藏的关键因素在于储集条件和油气的保存条件。由于寒武系和下奥陶统地层埋藏深度大，成岩作用强烈，使储层变的非常致密，只有靠近区域性的大断裂附近，由于构造应力的作用可能形成一些裂缝的发育带，对于油气藏的形成较为有利。因此可以认为早期形成的区域性的断裂背斜带，是该层系勘探较为有利的地区，其中又以中央垒带聚油条件最佳，另外古城鼻隆临近满加尔凹陷，是寻找寒武系—下奥陶系原生古油藏的较有利地区。断裂作用的双重性使它既对有效储层的形成有利，又可能对油气的保存起破坏作用。

2) 中上奥陶统潜山及内幕

奥陶系碳酸盐岩内部及古潜山圈闭，油源主要来自寒武—奥陶系碳酸盐岩，储层类型主要为缝洞型碳酸盐岩，以上覆志留系和石炭系泥岩为盖层，储盖组合条件和成藏配置关系较好。最有利的勘探区位于中央垒带的东端，该区一直处于低隆的高部位，是油气的长期有利的指向区。另外靠近 号断裂带的长条形区域，储集条件与油气运移通道相对较好，也是寻找奥陶系古潜山油气藏的有利地区。从目前勘探的成果分析， 号断裂西段以油藏为主，东端以气藏位置，中段聚油条件稍差。

3) 志留系

志留系从目前油气勘探的实践来看，主要为沥青砂岩含油，在塔中北坡发现工业性油气藏并普遍见油气显示，但是存在“处处见油、处处不流”的局面，其成藏的关键因素在于储层物性和油气藏的保存条件。油源对比结果表明其油源主要来自于寒武—下奥陶碳酸盐岩，由于受晚加里东运动的影响较大，形成的大多数油气藏可能都遭到了破坏。从储层孔隙度预测成果分析，在塔中北斜坡的西北部和古城地区物性较好，尤其在北坡的西北部，由于受到海西运动的影响较小，保存条件较好，只要有圈闭条件，很有希望找到原生的古油藏。

4) 石炭系

石炭系是塔中地区主要的勘探层系，主要原因在于：石炭系圈闭以披覆背斜和地层圈闭为主，储层储集性能好，而且具有近源成藏的特点（以北坡中上奥陶系泥灰岩为主要烃源岩）。后期的构造运动对塔中地区的影响不大，保存条件较好。从目前勘探成果和成藏条件的系统分析来看，塔中隆起的东端是寻找石炭系油气藏的最有利地区；塔中北坡和1号断裂带附近油气运移通道好，是勘探的较有利地区；中央垒带西端油源条件稍差；TZ3-5井构造带、塔中南坡油源条件差，对油气勘探较为不利。

2 局部圈闭评价

参与评价的圈闭为截止到 1997 年 8 月塔中地区已经钻探、新发现和复查的圈闭，按层圈闭计算共 44 个，其中前 28 个为已钻探圈闭或正钻圈闭，后 16 个为新发现和复查的圈闭。

评价的基本思路是：第一步，利用区带地质评价成果，对 44 个层圈闭进行了统一标准的地质打分，并在前文分析的基础上，分配合理的权系数，采取模糊综合评价、风险概率评价和灰色关联分析三种方法，分别计算圈闭的地质评价系数；第二步，根据圈闭钻探成果与地质评价系数的对应关系，对圈闭进行地质分级；第三步，根据圈闭地质评价成果，优选有利的钻探目标。

从评价结果可以看出，在 28 个已钻圈闭中，TZ16，TZ24，TZ45 号构造等 8 个已获得工业油气流，其模糊综合评价系数与风险概率评价系数均在 0.85 以上。灰色关联系数在 0.80 以上；8 个圈闭可见不同程度的油气显示，模糊综合评价与风险概率评价系数在 0.80~0.85 之间，灰色关联系数在 0.75~0.80；在未见显示的 12 个圈闭中，圈闭的评价系数基本小于 0.80（表 4 - 12）。

表 4 - 12 塔中探区已钻和正钻探圈闭评价成果表（1997 年 8 月）

序号	圈闭落实程度	模糊评价系数	风险评价系数	灰色关联系数	圈闭分级	圈闭钻探结果
1	较可靠	0.821	0.848	0.786		正钻，见显示
2	较可靠	0.729	0.776	0.700		落空
3	较可靠	0.761	0.794	0.741		落空
4	较可靠	0.684	0.740	0.629		见显示
5	可靠	0.876	0.898	0.842		工业油气
6	可靠	0.883	0.902	0.857		工业油气
7	可靠	0.891	0.906	0.802		工业油气
8	较可靠	0.808	0.844	0.789		见显示
9	可靠	0.891	0.906	0.802		工业油气
10	较可靠	0.832	0.860	0.870		见显示
11	较可靠	0.827	0.856	0.882		落空
12	可靠	0.964	0.968	1.000		工业油气
13	可靠	0.869	0.890	0.796		工业油气
14	较可靠	0.606	0.686	0.668		落空
15	较可靠	0.840	0.868	0.869		落空
16	较可靠	0.860	0.878	0.817		落空
17	较可靠	0.685	0.740	0.787		落空
18	较可靠	0.846	0.868	0.810		见显示
19	较可靠	0.771	0.808	0.848		见显示
20	较可靠	0.734	0.780	0.839		落空
21	较可靠	0.741	0.788	0.689		落空
22	较可靠	0.790	0.820	0.758		见显示
23	较可靠	0.720	0.768	0.689		落空
24	较可靠	0.831	0.850	0.775		见显示
25	可靠	0.879	0.896	0.790		工业油气
26	较可靠	0.758	0.800	0.665		落空
27	较可靠	0.784	0.806	0.785		落空
28	可靠	0.902	0.914	0.822		工业油气

因此，采取以模糊综合评价和风险概率评价结果为主，以灰色关联分析为辅的方法，以评价系数的 0.85 和 0.80 和关联系数的 0.80 和 0.75 为主要圈闭分级的界限值，对未钻圈闭进行地质分级。一类圈闭地质评价系数大于 0.85，关联系数大于 0.80；二类圈闭地质评价系数 0.80~0.85，灰色关联系数 0.70~0.80；三类圈闭地质评价系数小于 0.80 或关联系数低于 0.70。这样，在 16 个未钻探圈闭中，共评价出一类圈闭 0 个，二类圈闭 6 个，三类圈闭 10 个（表 4 - 13）。这 6 个二类圈闭可以作为下一步勘探的主要目标。

表 4 - 13 塔中探区未钻探圈闭评价成果表

圈闭 序号	落实 程度	模糊评价 系数	风险评价系数	灰色关联系数	圈闭 分级	钻探结果
29	可靠	0.813	0.840	0.816		落空
30	较可靠	0.674	0.734	0.738		缺失 C _m 落空
31	较可靠	0.734	0.780	0.710		
32	较可靠	0.738	0.784	0.661		落空低产油气流
33	较可靠	0.797	0.828	0.736		
34	较可靠	0.707	0.756	0.651		(未钻)
35	较可靠	0.809	0.834	0.809		落空
36	较可靠	0.740	0.786	0.746		(未钻)
37	可靠	0.816	0.840	0.866		正钻显示良好
38	较可靠	0.837	0.860	0.773		(未钻)
39	可靠	0.831	0.856	0.759		钻到下盘
40	较可靠	0.714	0.770	0.776		落空
41	可靠	0.765	0.808	0.731		
42	较可靠	0.768	0.806	0.643		(未钻)
43	较可靠	0.738	0.782	0.696		(未钻)
44	较可靠	0.776	0.810	0.748		(未钻)

二、巴楚探区圈闭评价

巴楚探区是塔里木盆地下一步勘探四个重点地区之一，它包括巴楚断隆和麦盖提斜坡两个二级构造单元。目前，该探区内已经发现巴什托普油气田，山 1 井和玛 4 井获得了工业性油气流。

巴楚探区由七个断裂构造带组成，分别是吐木休克断裂构造带、卡拉沙依断裂构造带、古董山断裂构造带、海米—罗斯断裂构造带、玛扎塔格断裂构造带、玛东断裂构造带和色布亚力断裂构造带。

1. 区带地质评价

1) 巴楚北部地区

主要是指吐木休克断裂构造带，该带已经钻探方 1 井、和 4 井、和 1 井、巴东 2 井，钻探结果均未获突破。究其原因，主要是因为：虽然本构造带现今处于巴楚断隆的高部位，但是其圈闭形成时间较晚，与寒武—奥陶系烃源岩排烃期匹配性较差，另外喜山期吐木休克断裂的强烈活动，对油气藏的保存极为不利。但是巴东 2 井钻遇中上奥陶统泥灰岩烃源岩，显

示了该带具有一定的勘探前景，因为在塔中及轮南地区发现了一大批与该源岩有关的油气藏或者油气田。

2) 巴楚断隆西北部

包括古董山断裂构造带、卡拉沙依断裂构造带、康托库木构造带。由于该区一直处于构造的高部位，是油气运移的有利指向区。寒武系白云岩和膏岩组成的储盖组合是最有利的勘探目标，圈闭以背斜和断背斜为主，储层条件比较有利，盖层质量好，是较为有利的勘探地区。该区盐下发育优质烃源岩，可能存在自生自储古油藏。已经钻探的康 1 井已经见到一定的油气显示，充分说明了这一点。

在该带勘探的主要风险是断裂活动对油气藏保存条件的影响。

3) 巴楚断隆的南缘和麦盖提斜坡

主要包括色布亚力断裂构造带、海米—罗斯断裂带和玛扎塔格断裂构造带。该带处于晚加里东—早海西期的前缘，圈闭发育时间较早，现今的构造位置处于隆起与斜坡的结合部，是油气运移的有利指向区和多层系的油气来源，成藏配置良好。

该带勘探主要目的层系为石炭系小海子石灰岩、巴楚组生屑灰岩和东河砂岩、奥陶系风化壳碳酸盐岩，具有多套有利的储盖组合。巴楚组生屑灰岩储层分布稳定，储集空间以粒间孔、粒间溶孔或粒内溶孔为主，受岩性和裂缝的影响较大。据钻井资料分析，该储层自西向东物性有逐渐变差的趋势。群 4 井平均孔隙度 0.8 % ~ 11 %，平均为 2.89，山 1 井在 0.66 % 和 3.14 % 之间，平均值为 1.47 %，而玛参 1 井为致密层。东河砂岩储层物性普遍较差，平均在 5 % ~ 6 % 之间，以特低孔—特低渗的差储层为主。从山 1 井的钻探结果看，奥陶系潜山风化壳储层物性中等—较好，孔隙度在 1.3 % ~ 7.0 % 之间，平均 3.15 %，渗透率最高可达 $350 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

勘探的风险因素主要是油气保存条件。

4) 玛东断裂构造带

该带位于巴楚断隆与塘古孜巴斯凹陷的结合部位，包括玛东断裂构造带和塘北构造带的西部地区。从塘北 2 井和玛参 1 井钻探结果分析，该区最大的风险因素可能是缺乏油源和圈闭形成时间较晚，成藏匹配条件差。

2 局部圈闭评价

本次参评的圈闭为巴楚地区储备和新发现的 25 个圈闭（包括已经钻探的玛 4 号构造、和 4 号构造、卡拉沙依北 1 号构造、康 2 号构造），圈闭类型包括背斜、断背斜、断鼻、潜山等四种类型，层位涉及寒武系、奥陶系、石炭系和泥盆系。圈闭主要分布在巴楚断隆的西北部、南缘及与麦盖提斜坡结合部。

1) 评价权重分配

从前面的分析可知，巴楚断隆由于构造发育历史的特殊性，影响油气藏形成的关键性因素主要是油源条件、成藏配置条件和油气保存条件，加之该探区目前还处于勘探的早期，因此前面的分析赋予相应的权重。

2) 地质评价结果

在对圈闭进行统一标准的地质打分的基础上，对圈闭成藏地质有效性进行评价，其结果如表 4 - 14。评价系数大于 0.9 的圈闭 5 个，0.85 ~ 0.90 的圈闭 5 个。

3) 资源量评价结果

圈闭面积：采用地震解释提供的圈闭闭合面积。

面积充满系数：根据第四章的分析结果，根据油气系统的供油能力、圈闭类型来确定。寒武—奥陶系供油的背斜和断背斜、断鼻圈闭一般取 0.75，靠石炭系供油的圈闭以及潜山圈闭一般取 0.60。

储层厚度与净毛比：对于碎屑岩储层，其厚度可以根据储层横向预测的结果来确定，净毛比泥盆系一般取 0.5，石炭系取 0.4，寒武—奥陶系碳酸盐岩取 0.25，玛扎塔克构造带石炭系和奥陶系储层综合取 0.35 巴楚探区 1998 年度圈闭评价成果见表 4 - 14。

表 4 - 14 巴楚探区 1998 年度圈闭评价成果表

序号	层位	圈闭落实程度	模糊评价系数	风险评价系数	灰色关联系数	圈闭分级	单储系数 10 ⁴ t/km ² ·m	资源当量 10 ⁴ t	钻探结论
1		较可靠	0.852	0.851	0.641		2.0	86400	
2	O ₁	较可靠	0.854	0.860	0.756		2.0	750	
3		较可靠	0.830	0.837	0.761		2.0	546	
4		较可靠	0.846	0.851	0.714		2.0	14250	
5	O	较可靠	0.713	0.748	0.531		2.0	5280	
6	O	较可靠	0.853	0.852	0.765		2.0	9525	(落空)
7	O	可靠	0.712	0.747	0.535		2.0	13596	
8	C/O	可靠	0.905	0.906	0.800		4.0	7200	
9	D	较可靠	0.805	0.817	0.691		7.0	24937	
10	O1	较可靠	0.838	0.837	0.671		2.0	31402	
11	D	较可靠	0.795	0.809	0.729		7.0	13912	
12	O ₁	较可靠	0.823	0.825	0.716		2.0	3180	
13	O ₁	较可靠	0.838	0.837	0.671		2.0	420	
14	D	较可靠	0.808	0.819	0.717		7.0	25725	
15	C	可靠	0.914	0.914	0.839		5.5	2970	
16	C	可靠	0.882	0.886	0.756		5.5	2112	
17	C	较可靠	0.819	0.836	0.827		5.5	1254	
18	C	较可靠	0.827	0.842	0.846		5.5	2838	
19	C	较可靠	0.833	0.846	0.862		5.5	4158	
20	C	可靠	0.858	0.869	0.834		5.5	1650	
21		较可靠	0.868	0.871	0.634		2.0	172	(落空)
22		可靠	0.867	0.867	0.573		2.0	9139	(落空)
23	C, O	可靠	0.914	0.918	1.000		0.2 (气)	1575	工业气流
24	C, O	可靠	0.910	0.914	0.982		0.2 (气)	201.6	
25	C, O	可靠	0.914	0.918	1.000		0.2 (气)	3071.3	(工业气流)

注：钻探结论带括号为评价前已钻探有结论的圈闭

单储系数：石油单储系数分不同层位来确定：泥盆系碎屑岩储层取 $7.0 \times 10^4 \text{ t} / (\text{km}^2 \cdot \text{m})$ ， $^4 \text{ t} / (\text{km}^2 \cdot \text{m})$ ，寒武—奥陶系碳酸盐岩储层一般取 $2.0 \times 10^4 \text{ t} / (\text{km}^2 \cdot \text{m})$ 。天然气单储系数根据柯克亚气田取 $0.2 \times 10^8 \text{ m}^3 / (\text{km}^2 \cdot \text{m})$ 。

从资源量计算结果看，大于 $1 \times 10^8 \text{ t}$ 石油当量的圈闭 9 个， $1000 \times 10^4 \sim 1 \times 10^8 \text{ t}$ 的圈闭

13 个, $1000 \times 10^4 \text{ t}$ 以下 3 个。

4) 圈闭综合评价与优选

巴楚探区圈闭评价结果显示, 海米 1 号构造、海米东构造、玛 2 号构造、玛 3 号构造、玛 4 号构造地质评价系数在 0.9 以上, 灰关联系数大于 0.75, 被评为一类圈闭; 鸟山 3 号构造、海米西断鼻、罗南 4 号断鼻、康 2 号构造等 4 个圈闭地质评价系数大于 0.85, 灰关联系数在 0.75 以上, 被评为二类圈闭。因此, 除玛 4 井在玛 4 号构造获得高产工业气流外, 康 2 井正钻外, 其他 7 个局部圈闭可以作为下一步的钻探目标。(见表 4-14)

三、库车坳陷圈闭评价

1. 区带成藏条件分析

根据买光荣等的研究, 库车前陆型油气系统根据源岩性质和油源对比结果可以细分为两个含油气系统。一个是拜城三叠—侏罗系混源油气系统, 另一个为阳霞侏罗系煤成油系统。

库车前陆盆地以发育变形十分复杂的前陆逆冲带和变形相对简单的塔北张性前缘隆起为特征, 其油气的分布主要受到这两个构造带的控制。由南向北, 库车前陆盆地可以划分为前缘隆起带、秋里塔格背斜带、拜城凹陷、直线背斜带和北部单斜带等几个主要的二级构造单元。目前发现的油气主要位于直线背斜带上, 圈闭类型以背斜、断背斜、断鼻为主, 其次在阳霞凹陷的南坡, 以地层超覆不整合圈闭为主。由于库车坳陷地表条件复杂, 地震施工难度大, 地震资料的质量普遍较差, 特别是对于高陡构造, 圈闭落实程度不高, 地层圈闭的顶底板特征不清。

在前陆逆冲带, 断裂发育, 油气以垂向运移为主, 而在前陆斜坡区, 构造变形较弱, 断裂不发育, 油气主要沿不整合面运移, 另外侏罗系、白垩系—第三系砂岩也可以作为有效的油气疏导层。在塔北前缘隆起部位, 由于发育张性断层, 油气又可以沿断层发生垂向运移。这种独特的油气运移条件, 可形成平面油气分布广、纵向含油层系规律性变化的特点。

库车前陆盆地储盖层发育, 侏罗系、白垩系、下第三系、上第三系、第四系等多套储盖组合, 储集条件优越。区域盖层主要包括侏罗系泥岩、煤岩, 下第三系膏盐、泥岩和上第三系吉迪克组膏泥岩。第三系盐下构造储层主要包括下第三系底部的云质砂岩、砂岩, 白垩系砂岩, 具有厚度大, 物性中—高(孔隙度大于 15%~20%, 渗透率大于 $300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 的特点; 坳陷东部储层以侏罗系底砂岩、白垩系砂岩为主, 具有由南向北逐渐加厚的特点, 白垩系和第三系储层物性好, 侏罗系底砂岩物性较差。

库车前陆盆地油源条件好, 特别是在第三系盐下构造, 一般只要圈闭落实, 保存条件好, 即可有所发现。因为在该带圈闭发育时间早, 又处在三叠—侏罗系沉积中心区一带, 构造位置十分有利。但是, 在该带构造变形复杂, 断层发育, 地表和浅层已经发现油苗和油气, 所以保存条件可能是影响圈闭含油气性的关键因素之一。阳霞凹陷周围地区, 以侏罗系原生油气藏为主要类型, 保存条件在前陆逆冲带较差。成藏的关键是地层油气藏的顶底板条件和储层物性。

2 局部圈闭评价

本次参评的圈闭主要为 1997 年原储备、复查和 1998 年新发现的圈闭 22 个, 其中包括正钻的依南 2 号断鼻和克拉苏 3 号构造。另外, 为了便于对比研究, 将克拉 1 号构造、克拉 2 号构造、喀拉巴赫南构造等三个已钻圈闭也同时进行了评价。

圈闭评价结果表明: 获得工业气流的克拉 2 号构造模糊评价系数和风险评价系数均在

0.85 以上，而未获工业油气的克拉 1 号构造、喀拉巴赫南构造，地质评价系数在 0.80 以下。结合圈闭落实的可靠性和地质评价系数的大小，采用模糊评价系数和风险评价系数的算术平均值为标准，在综合系数大于 0.85 的圈闭中，落实程度可靠的为一类圈闭，落实程度为较可靠的为二类圈闭，综合评价系数小于 0.85 的为三类圈闭。据此在库车前陆，共评出二类圈闭 7 个，三类圈闭 15 个（表 4 - 15）。因此优选 7 个二类圈闭可以作为进一步预探的目标，它们分别是克拉 3 号构造、克拉 4 号构造、克北 1 号断鼻、克北断背斜、克拉苏南 1 号构造、依南 2 号断鼻、吐孜洛克背斜。

库车坳陷资源量参数的取值主要是依据塔里木盆地油气藏的统计结果。油气面积充满系数：第三系 0.75，白垩系 0.75，侏罗系 0.50；净毛比：第三系和白垩系取 0.8，侏罗系 0.9；单储系数第三系 $6.0 \times 10^4 \text{ t} / (\text{km}^2 \cdot \text{m})$ ，白垩系 7.0，侏罗系 8.0，天然气单储系数取 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3 / (\text{km}^2 \cdot \text{m})$ 。

表 4 - 15 库车坳陷圈闭地质评价成果表

序号	圈闭名称	模糊评价系数	风险评价系数	综合评价系数	圈闭分级	石油资源量	天然气资源量	钻探结论
1	克拉 1 号构造	0.834	0.822	0.828				(落空)
2	克拉 1 西构造	0.842	0.832	0.837		1296		
3	克拉 2 号构造	0.897	0.874	0.886				(工业气流)
4	克拉 3 号构造	0.886	0.864	0.875		864		工业气流
5	克拉 4 号构造	0.914	0.890	0.902		1728		
6	吐北 1 号构造	0.793	0.795	0.794		5976		
7	吐北 2 号构造	0.793	0.795	0.794		5760		
8	大宛齐北构造	0.804	0.801	0.803		9720		
9	克北 1 号断鼻	0.858	0.841	0.850			390	
10	克北断背斜	0.869	0.851	0.860			882	
11	克拉苏南 1 号	0.872	0.854	0.863		792		
12	克拉苏南 2 号	0.828	0.821	0.825		1152		
13	克拉苏南 3 号	0.828	0.820	0.824		792		
14	依奇克里克构造	0.848	0.836	0.842			82.7	
15	依西构造	0.811	0.805	0.808			236.3	
16	依南断鼻	0.855	0.836	0.846			338.6	
17	依南 2 号断鼻	0.855	0.846	0.851			66.9	工业气流
18	吐孜洛克背斜	0.883	0.865	0.874			275.6	
19	阳北 1 号构造	0.835	0.826	0.832		1485		
20	阳北 2 号构造	0.840	0.831	0.836		1453.2		
21	阳北 3 号构造	0.829	0.822	0.826		1814.4		
22	阳南 1 号圈闭	0.721	0.736	0.728		1476		少量可动油
23	阳南 2 号圈闭	0.721	0.736	0.728		1296		
24	阳南 3 号圈闭	0.735	0.746	0.741		1944		
25	喀拉巴赫南构造	0.785	0.788	0.787				(落空)

注：钻探结论中加括号的是评价前已钻探有结论的圈闭

四、应用效果分析

1. 钻前圈闭评价

在区带地质再认识的基础上, 1997 年对塔中探区储备圈闭进行了地质评价, 优选了 6 个有利的钻探目标, 分别是 TZ49 (O_{2+3}), TZ42 (O_{2+3}), TZ43 (O_{2+3}), TZ52 (O_1), TZ54 (O_{2+3}), TZ55 (O_{2+3})。除 TZ55 号构造外, 其他 5 个已经钻探有结论: TZ52 号构造在奥陶系获得低产油流, TZ54 井已经见良好显示, 正等待测试, TZ42 和 TZ49 井落空, TZ42 井由于设计层位深度与实钻探深度相差太大, 钻至断层的下盘而落空。

1997 年至 1998 年对巴楚探区、库车拗陷进行了圈闭的跟踪评价, 提交有利和较有利的勘探目标 15 个, 其中巴楚隆起 8 个, 分别是海米 1 号构造、海米东构造、玛 2 号构造、玛 3 号构造、鸟山 3 号构造、海米西断鼻、罗南 4 号断鼻、康 2 号构造; 库车拗陷 7 个, 它们分别是克拉 3 号构造、克拉 4 号构造、克北 1 号断鼻、克北断背斜、克拉苏南 1 号构造、依南 2 号断鼻、吐孜洛克背斜。15 个圈闭中, 玛 2 号构造、康 2 号构造、依南 2 号断鼻、克拉苏 3 号构造已经钻探有结论, 除康 2 井落空外, 其他 3 个圈闭都获得了高产工业气流。

从三个重点目标区圈闭评价效果看, 9 个已钻探, 有三个获得工业油气流, 一个获低产油流, 一个见良好油气显示正待测试, 可望获得高产油气流, 圈闭勘探成功率达到 55 %。

2 钻后反馈评价

为了进一步检验圈闭评价应用效果, 积累经验, 并在为圈闭优选与决策提供依据, 于是开展了塔中、巴楚、库车三个重点勘探目标区 1996 ~ 1997 期间完钻试油的部分圈闭的反馈评价工作, 其中塔中探区 28 个, 巴楚探区 3 个, 库车拗陷 4 个。

在 35 个圈闭中, 评价为一类的圈闭 9 个, 均为获得工业油气流的圈闭; 评价为二类的圈闭 11 个, 其中有 1 个获得工业油气, 6 个在目的层见显示; 评价为三类的圈闭 15 个, 除 1 个获少量可动油 (阳 1 井), 2 个见油气显示外, 其余的 12 个全部落空。

上述圈闭评价成果表明, 通过对研究区油气系统的综合分析和分区带的地质评价, 正确认识探区内各二级构造带的成藏条件和成藏模式, 以圈闭评价模式为依据, 选择合理的评价与决策方法, 分配合理的评价权系数来开展圈闭评价工作, 对于塔里木盆地的油气勘探具有十分重要的指导意义。通过该专题的研究, 对塔里木盆地圈闭评价工作是一个有意的探索, 也积累了宝贵的经验, 使圈闭评价的成功得到进一步的提高, 达到了预期的目的。

第五章 粘弹性介质地震波高分辨 聚焦成像技术

第一节 概 述

常规的地震处理方法是建立在大地介质为完全弹性的假设基础之上的，而实际的大地介质相对于地震波来说是不完全弹性的，这就从理论上说明常规的地震处理方法在提高地震资料的信噪比和分辨率方面存在着不可克服的缺陷，特别是在塔里木地区，地表及地下地层对地震波的吸收和衰减极为严重，“粘弹性效应”（大地吸收和衰减作用使子波延长）非常明显，致使地震剖面的信噪比和分辨率很低，给寻找地层尖灭性油气藏带来很大困难。

本章从粘弹性波动方程出发，将塔里木盆地的大地介质视为粘弹性的，导出和分析了大地对地震波的吸收和衰减机理，推导出了粘弹性波动方程的逆向外推公式，以小波理论为基础，创造性地得出了粘弹性波动方程的解析解。为提高地震剖面的信噪比和分辨率在理论上，方法上奠定了基础。文中指出，聚焦参数是一个地区地质情况的综合反映，合理的聚焦参数不仅可以同时提高地震资料的信噪比和分辨率，而且可以突出强屏蔽下的弱反射，因此对一个地区而言，必须经过反复调焦、反复实验，才能得到该地区的最佳参数。

第二节 声波方程与地震勘探纵向分辨率

经典完全弹性固体理论认为，大地介质为完全弹性介质，地震波在其中传播能量没有损耗，纵波传播满足的波动方程：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{5 - 1}$$

式中 u ——波场；
 v ——纵波波速。

由达朗贝尔公式可知，(5 - 1) 的解（以 1 维为例）为：

$$u(x, t) = F_1(x - vt) + F_2(x + vt)$$

根据地球物理实际意义，只能取

$$u(x, t) = F_1(x - vt) \tag{5 - 2}$$

即只考虑远离震源而传播的波。

设 $F_1(x)$ 与 $F_1(x - vt)$ 的图形如下：

(5 - 2) 式说明了波在传播过程中波形和能量均保持不变。其地球物理含义如下：在地震勘探中如果波是由尖锐爆炸脉冲产生的，则它应以震源子波同样尖锐波形而传播，见图 5 - 1 所示。

如果客观实际真是这样的话，那么地震勘探的垂向分辨率就应该是非常高的。但是实际情况并非如此，经实际观测和模型试验证明，由于大地具有非完全弹性，因而得不到上述基于声波方程所预期的结果，而是得到有一定延时且频率低很多的地震复合波，这严重影响了地震勘探的纵向分辨率。

由于大地的非完全弹性，地震波在其传播过程中高频被吸收，地震波的能量发生衰减，波形发生畸变，所以对于相隔较近的反射地层在地震剖面上将不能完全被分辨，从而相成为地震复合波。如图 5 - 2 所示。这也正是塔里木盆地由于地层粘性较大，对于强屏蔽下弱反射（反射系数相对小），断点、尖灭点、削蚀点、超覆点位置从常规地震剖面上很难区分的原因。

图 5 - 1 地震波理论传播示意图

图 5 - 2 地震波实际传播示意图

上述的分析表明基于声波方程的地震数据处理技术对于提高地震的纵向分辨率是无能为力的。为了克服这一不足，人们通常的做法是利用反褶积技术。但是应该清醒的看到，反褶积有它不足的方面设：

$$X(t) = R(t) \times W(t)$$

式中 $X(t)$ ——观测值；
 $R(t)$ ——反射系数；
 $W(t)$ ——地震子波。

上式中，只有一个已知量 $X(t)$ ，要求两个未知量 $R(t)$ 和 $W(t)$ ，这是一个不确定问题，无论采用什么样的数学计算技术，多解性无法从根本上得到解决。目前结合测井，这一情况得到了一定的改善，但也仅对井附近准确度好。由于地下变化是巨大的，更何况井也是有限的。而且大多数情况下并没有井，因此该方法也十分有限，特别是对于塔里木盆地这样的低勘探程度地区。总之，反褶积主要有两个缺陷：

- (1) 保真性不够；
- (2) 在提高分辨率的同时降低了信噪比。

第三节 大地介质对地震波吸收和衰减的机理

对大地吸收弹性介质中地震波传播可以用斯托克斯 (Stokes) 波动方程进行描述。即用方程:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{1 + \frac{4}{3} \frac{\mu}{c^2}}{c^2} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \quad (x - x_s) \quad (t) \quad (5-3)$$

去描述。

式中 μ , η ——介质中的粘性参数;

ρ ——介质密度;

c ——波速;

x_s ——炮点位置。

将方程 (5-3) 利用 Fourier 变换 (关于时间 t) 转换到频率域, 得:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1 + \frac{4}{3} \frac{\mu}{c^2}}{c^2} i \omega u = \frac{\omega^2}{c^2} u - \quad (x - x_s) \quad (5-4)$$

这里还用 $u(x, x_s, \omega)$ 表示 $u(x, x_s, t)$ 的 Fourier 的变换。

设大地的背景速度为 $c_0(x)$, 那末可设:

$$\frac{1}{c^2(x)} = \frac{1}{c_0^2(x) [1 + \quad (x)]} \quad (5-5)$$

把 (5-5) 代入 (5-4), 得

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1 + \frac{4}{3} \frac{\mu}{c_0^2}}{c_0^2} i \omega u - \frac{1 + \frac{4}{3} \frac{\mu}{c_0^2}}{c_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\omega^2}{c_0^2} u + \frac{\omega^2}{c_0^2} u = \quad (x - x_s) \quad (5-6)$$

引进记号:

$$\mu_0 = \frac{c_0^2}{1 + \frac{4}{3} \frac{\mu}{c_0^2}}, \quad u = 1 - \frac{\mu}{\mu_0} i$$

则 (5-6) 式可化为:

$$\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - (1 - \mu) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\omega^2}{c_0^2} u + \frac{\omega^2}{c_0^2} u = \quad (x - x_s) \quad (5-7)$$

设总场 u 分解为入射场和散射场之和, 即:

$$u(x, x_s, \omega) = u_1(x, x_s, \omega) + u_s(x, x_s, \omega)$$

并设 $u_1(x, x_s, \omega)$ 满足:

$$\mu \epsilon^2 u_1(x, x_s) + \frac{\epsilon^2}{C_0^2} u_1(x, x_s) = - (x - x_s) \quad (5-8)$$

由 (5-7) 至 (5-8) 式, 可得

$$\begin{aligned} & \mu \epsilon^2 u_s(x, x_s) + \frac{\epsilon^2}{C_0^2} u_s(x, x_s) \\ &= (1 - \mu) \epsilon^2 [(x) u(x, x_s)] - \frac{\epsilon^2}{C_0^2} [(x) u(x, x_s)] \end{aligned} \quad (5-9)$$

引进格林函数 $G(x_g, x)$, 使其满足方程:

$$\mu \epsilon^2 G(x_g, x) + \frac{\epsilon^2}{C_0^2} G(x_g, x) = - (x - x_g) \quad (5-10)$$

利用 Green 公式, 由 (5-9) 和 (5-10) 式, 我们得:

$$u_s(x_g, x) = \int_0^x (1 - \mu) \epsilon^2 [(x) u(x, x_s)] G(x_g, x) dx - \frac{\epsilon^2}{C_0^2} [(x) u(x, x_s)] G(x_g, x) \quad (5-11)$$

方程 (5-11) 是一个微分积分方程, 它把观测值 $u_s(x_g, x)$ 与待求的未知量 (x) 紧密联系起来了。

为了理解大地介质对地震波吸收和衰减的机理, 我们还需求出 (5-10) 中的格林函数 $G(x_g, x)$ 。在此为了说明问题的本质, 只给出 1 维常背景的结果:

$$G(x_g, x) = - \frac{1}{2i_1} e^{i_1 |x - x_g|} \quad (5-12)$$

其中 $i_1 = \frac{\epsilon^{1/2}}{C_0 \mu}$ 为复数的一个平方根, 根据地震的实际意义, 应取 i_1 为虚部为正的那一个。

即:

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{\epsilon^{1/2}}{C_0 \mu} = \frac{\epsilon^{1/2}}{C_0} \frac{1}{\mu} = \frac{\epsilon^{1/2}}{C_0} \frac{1}{1 + \frac{\epsilon^2}{C_0^2}} = \frac{\epsilon^{1/2}}{C_0} \frac{1}{1 + \frac{\epsilon^2}{C_0^2}} \cos \frac{\epsilon^2}{2} + i \sin \frac{\epsilon^2}{2} \\ &= \frac{\epsilon^{1/2}}{C_0} \frac{1}{1 + \frac{\epsilon^2}{C_0^2}} \cos \frac{\epsilon^2}{2} + i \sin \frac{\epsilon^2}{2} \\ &= b \cos \frac{\epsilon^2}{2} + i \sin \frac{\epsilon^2}{2} \end{aligned} \quad (5-13)$$

其中:

$$\cos \frac{\epsilon^2}{2} = \frac{\epsilon^2}{\epsilon^2 + \epsilon^2 + \epsilon^2 - 2} \frac{1 + \epsilon^2}{2} \quad (5-14)$$

$$\sin \frac{\epsilon^2}{2} = \frac{\epsilon^2 + 2 - 2}{2 \epsilon^2 + 2 - 2} \frac{1 + \epsilon^2}{1 - \epsilon^2} \quad (5-15)$$

$$b = \frac{1}{1 + \left(\frac{b}{c_0}\right)^2} \frac{1}{1 + \left(\frac{b}{c_0}\right)^2}, \quad = \frac{1}{0} \quad (5-16)$$

此时 (5-11) 式所表示的微分积分方程可重写为:

$$u_s(x_g, x_s, t) = - \frac{1}{2i} \int_0^t O_1(x, x_s, t-\tau) e^{-i(b \sin \frac{\tau}{2})|x-x_g|} e^{i(b \cos \frac{\tau}{2})|x-x_g|} d\tau \quad (5-17)$$

其中:

$$O_1(x, x_s, t) = (1 - \mu) \ddot{u}(x, t) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x, x_s, t) \quad (5-18)$$

对于声波方程, 则对应的式子为:

$$u_s(x_g, x_s, t) = - \frac{c_0}{2i} \int_0^t O_2(x, x_s, t-\tau) e^{i\frac{\tau}{c_0}|x-x_g|} d\tau \quad (5-19)$$

其中:

$$O_2(x, x_s, t) = - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x, x_s, t) \quad (5-20)$$

比较 (5-17) 与 (5-19) 式, 可以发现: 由粘弹性波动方程推出的微积分方程 (5-17) 式具有明显的物理意义, 即由于在 (5-17) 式的积分号下有高频吸收算子 $L = e^{-i(b \sin \frac{\tau}{2})|x-x_g|}$ 的存在, 因此在地表的观测值 $u_s(x_g, x_s, t)$ 中缺少高频成分, 不可能得到分辨率很好的脉冲波形。这就是地表观测得到有一定衰减的低频波形的理论依据。这一点是与声波方程传播理论是不同的。所以 (5-17) 式较符合地球物理实际, 它深刻地体现了地震波的吸收与衰减的机理。

现在来分析 (5-17) 式, $e^{i(b \cos \frac{\tau}{2})|x-x_g|}$ 为偏移算子, 相应于 (5-19) 式中的 $e^{i\frac{\tau}{c_0}|x-x_g|}$, 直接从地震勘探角度出发的偏移成像理论上的原因就是在这个偏移算子的存在。所以, 地震波的向上传播就存在着绕射和干涉现象。波场逆向外推就是使绕射归位, 提高信噪比和横向分辨率, 下一小节中 (5-21) 式偏移算子的作用就体现在 Green 函数。

第四节 粘弹性波动方程逆向外推公式及算法

由 (5-11) 式令:

$$O(x, x_s, t) = (1 - \mu) \ddot{u}(x, t) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x, x_s, t) \quad (5-21)$$

这样 (5-11) 式化为:

$$u_s(x_g, x_s, t) = \int_0^t O(x, x_s, t-\tau) G(x_g, x, t-\tau) d\tau \quad (5-22)$$

式中 $u_s(x_g, x_s, \omega)$ ——观测值；
 ω ——频率；
 $G(x_g, x, \omega)$ ——Green 函数。

$$x = (x_1, x_2, x_3)$$

设检波器在地表即 $x_g = (x_1, x_2, 0)$ ，这里 (5 - 22) 式化为：

$$u_s(x, x_s, \omega) = \int_D \omega^2 O(x, x_s, \omega) G(x, x_s, \omega) dx \quad (5 - 23)$$

从 (5 - 23) 式可以看出，反演的目标函数 $O(x, x_s, \omega)$ 仅与源点 x_s 有关，而与接收点 x_g 无关，接收点 x_g 的作用体现在 Green 函数之中。

因此 (5 - 22) 式与 (5 - 21) 式相结合在一起，当 $x_3 > 0$ 时，得到粘弹性波动方程逆向外推公式。

根据上面的理论推导，并考虑数值计算的收敛性和稳定性，提出计算机实现粘弹性波动方程反演的算法：

第一步，利用地表观测值 $u_s(x, x_s, \omega)$ ($x_3 = 0$) 在 (5 - 23) 式中反演 $O(x, x_s, \omega)$ 。

第二步，利用已得到的 $O(x, x_s, \omega)$ 代入 (5 - 22) 式，在 (5 - 22) 式中取 $x_3 > 0$ ，即地下散射波场值 $u_s(x_g, x, \omega)$ 未知，求出 $u_s(x, x_s, \omega)$ ($x_3 > 0$) 如此达到散射波场外推的目的。

第三步，利用已求得 $u_s(x, x_s, \omega)$ ， $x_3 \in [0, Z]$ 可以求出各个不同点的总场 $u_s(x, x_s, \omega)$ 。

第五节 小波多分辨反演 (MRAI)

观察吸收介质偏移成像公式 (5 - 17) 式，并与 (5 - 23) 式相比较，偏移算子和高频吸收算子的作用体现在 Green 函数 $G(x, x_s, \omega)$ 之中，现在的中心问题是解开 (5 - 23) 式，此过程可分为两步：

- (1) 是偏移，这可以调用前人成熟的偏移成像模块；
- (2) 向下延拓过程中高分辨、高保真、高信噪比反演问题。

设偏移算子为 M ，在 (5 - 17) 式中指 $M = e^{i \frac{b \cos \theta}{2} |x - x_g|}$ ，高频衰减算子为 L ，经综合考虑 L 是一个指数衰减项。(5 - 17) 式中 $L = e^{-\frac{b \sin \theta}{2} |x - x_g|}$ ，则格林函数 $G = LM$ 。

$$u_2(z, x_s, \omega) = O(z, x_s, \omega) \cdot M \quad (5 - 24)$$

则 (5 - 23) 式化为：

$$u_s(z + z, x_s, \omega) = u_2(z, x_s, \omega) L \quad (5 - 25)$$

波场向下延拓中 $z > 0$ ，表明在向上传播 ($z < 0$) 地震波指数衰减项变成了指数增长项，这是一个严重的不稳定问题，传统的数学方法都不能够去求解。因此必须寻找新的方法。

将 (5 - 25) 式化为：

$$u_2(z, x_s, \dots) = u_s(z + z, x_s, \dots) L^{-1} \quad (5-26)$$

做逆 Fourier 变换:

$$u_1(z, x_s, \dots) = u(z + z, x_s, t) \times l(z, t) \quad (5-27)$$

式中 $l(z, t)$ —— L^{-1} 的逆 Fourier 变换。

(5-27) 式是一个卷积方程。

$$f(x) = \int k(x-y) f(y) dy$$

$k(x-y)$ 是指数衰减核。属于第二类 Fredholm 方程。通常这类方程仅就某几种特殊例子可以求得稳定解, 而绝大多数情况下存在着严重的病态矩阵, 其解是极度不稳定的。

我们从小波分析的角度出发, 利用多分辨理论 (MRA) 找到了一种能稳定求解这类卷积型方程的高精度反演方法。

积分方程在数值分析中常展开为矩阵, 速降函数核矩阵对于用数值方法计算, 一般存在着这两个方面的困难。

(1) 是展开的矩阵病态严重, 致使计算结果发散或极不稳定;

(2) 展开的矩阵是一个不稀疏的 $N \times N$ 矩阵, 一般需要 $O(N^2)$ 次运算, 这对于较大的 N 是不能被忍受的。利用小波分析可以将一类病态严重的矩阵化为对角占优的矩阵, 因此可得稳定的解; 同时作用于 $N \times N$ 非稀疏矩阵, 将其化为稀疏矩阵使之运算量达到 $O(N \log N)$, 甚至 $O(N)$, 从而得到一个积分方程的稳定计算方法。

先回顾一下小波的基本理论:

定义 1: 设 $\varphi \in L^2(\mathbb{R})$, 如果 $\varphi(t)$ 的 Fourier 变换 $\hat{\varphi}(\omega)$ 满足条件:

$$C_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{\varphi}(\omega)|^2 d\omega < +\infty \quad (5-28)$$

则称 $\varphi(t)$ 是一个基本小波或小波母函数, 而称:

$$\varphi_{(a,b)}(t) = \frac{1}{|a|} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a \neq 0, b \in \mathbb{R} \quad (5-29)$$

为由小波母函数中生成的依赖于参数 a 和 b 的连续小波。

定义 2: 对 $f \in L^2(\mathbb{R})$ 称

$$\begin{aligned} Wf(a,b) &= \langle f, \varphi_{(a,b)} \rangle \\ &= \frac{1}{|a|} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \end{aligned} \quad (5-30)$$

为信号 $f(t)$ 依赖于参数 a 和 b 的连续小波变换或积分小波变换, 简称为 f 的小波变换。

定理 1: 小波变换的 Parseval 恒等式和反演公式。

若 $f, g \in L^2(\mathbb{R})$, 小波变换的 Parseval 等式为:

$$\langle f, g \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} Wf(a,b) \overline{Wg(a,b)} \frac{da db}{a^2} \quad (5-31)$$

在信号 $f(t)$ 的连续点 t_0 有小波反演公式:

$$f(t_0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(a, b) \psi(a, b)(t_0) \cdot \frac{da db}{a^2} \quad (5-32)$$

定理 1 说明了这样一个基本的事实，即小波变换作为转换信息的工具，在信息转换的处理过程中，不会造成信息的损失，小波变换获得了对信息新的等价描述。由于小波函数极其灵活的可选择性（只要满足条件 (5-28) 式，而这个条件还可适当地放松），所以在进行信号分析时，就可以通过选择不同性质的小波函数，使相应的小波变换能够尽量突出信号中包含我们感兴趣的信息，或使之便于提取，或其数值比较特殊，同时，隐藏或淡化其它信息，使之不被损失，从而保证了反演的保真性和适宜的分辨率。

定义 3: 设 $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 满足如下两条：

$$(1) \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{\psi}(\omega)|^2 / |\omega| d\omega < +\infty \quad (\text{允许条件}) \quad (5-33)$$

$$(2) \text{ 函数 } \{\psi_{j,k}; j, k \in \mathbb{Z}\} \quad (\text{正交化条件}) \quad (5-34)$$

则 $\psi(t)$ 构成 $L^2(\mathbb{R})$ 的标准正交基。

由于标准正交基是 $L^2(\mathbb{R})$ 的最理想的基底，可以想象，在“正交化”条件下， $L^2(\mathbb{R})$ 空间的性质在小波的展开形式下有优美的表现，小波级数定义为定义 4: “ $f \in L^2(\mathbb{R})$ 则：

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{j,k \in \mathbb{Z}} C_{j,k} \psi_{j,k}(t) \\ &= \sum_{j,k \in \mathbb{Z}} \langle f, \psi_{j,k} \rangle \psi_{j,k}(t) \end{aligned} \quad (5-35)$$

此式与前面的 (5-32) 式相比，实际上是小波反演公式和连续小波变换的离散形式，通常离散的方式是尺度参数 a 取 2 的整数幂 2^{-j} ，位移参数 b 取 2^{-j} 的整数倍 $k2^{-j}$ ，即连续小波 $\psi(a, b)(t)$ 取离散形式。

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad j, k \in \mathbb{Z} \quad (5-36)$$

定理 2: 正交多尺度分析 (multiresolution Analysis, MRA)。

$L^2(\mathbb{R})$ 的一个 MRA 指 L^2 的满足如下性质的闭合空间的增加族 $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ ：

$$(1) V_j = \{0\}, \quad \overline{\bigcup V_j} = L^2$$

$$(2) f(x) \in V_j \Rightarrow f(2x) \in V_{j+1}, \quad \forall j$$

$$(3) \text{ 存在 } \phi(x) \in V_0 \text{ 使 } \{\phi(x-k)\}_{k \in \mathbb{Z}} \text{ 构成 } V_0 \text{ 的一个标准正交基。}$$

从上面定理 2 可以看到， L^2 可以进行如下分解。

$$V_{j+1} = V_j \oplus W_j = \bigoplus_{i=j}^{\infty} W_i \quad (5-37)$$

$$L^2 = \bigoplus_{j=-\infty}^{\infty} W_j = V_J \oplus \bigoplus_{j>J} W_j \quad (5-38)$$

对于二维情形：

$$\begin{aligned} \overline{V_j} &= V_j \quad V_j = \text{span} \{ \psi_{j,k}(x) \mid \psi_{j,k}'(x) \} \\ \overline{W_j} &= W_j \quad W_j = W_j \oplus V_j \oplus V_j \oplus W_j \end{aligned} \quad (5-39)$$

现在我们考虑积分方程的多尺度分解积分方程：

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} k(x-y) \phi(y) dy = T(x) \quad (5-40)$$

T 为积分算子。

积分算子化为矩阵算子通常所用“标准”方法，就是选取 $L^2(R)$ 的一个基，考虑 T 在该基下的表示矩阵，则 T 在 φ 上的作用，就是这个表示矩阵对 φ 在该基下的展开系数对这个向量的作用，利用小波的 MRA，就是将积分算子化为矩阵算子的另一种所谓的非标准方法。标准方法与非标准方法的差别是由在乘积空间上展开核 $k(x-y)$ 选取何种积空间的基而定的。当考虑张量积 $\{\varphi_l(x)\varphi_l(y), \varphi_l(x)\varphi_z(y), \varphi_l(x)\varphi_l(y)\}$ ，其中 l, l 是相同长度的二进区间时，我们便得到所谓的非标准方法。现在我们仔细讨论这种方法。

将该函数 $k(x-y)$ 用小波展开：

$$k(x-y) = \sum_{l,l} \varphi_l(x)\varphi_l(y) + \sum_{l,l} \varphi_l(x)\varphi_z(y) + \sum_{l,l} \varphi_l(x)\varphi_l(y) \quad (5-41)$$

其中 $l = (j, k)$, $l = (j, k)$, $j, k \in \mathbb{Z}$

$$\varphi_{ll} = \int_{-\infty}^{+\infty} k(x-y)\varphi_l(x)\varphi_l(y)dx dy \quad (5-42)$$

$$\varphi_{ll} = \int_{-\infty}^{+\infty} k(x-y)\varphi_l(x)\varphi_l(y)dx dy \quad (5-43)$$

$$\varphi_{ll} = \int_{-\infty}^{+\infty} k(x-y)\varphi_l(x)\varphi_l(y)dx dy \quad (5-44)$$

选择小波的离散形式 (5-42) 至 (5-44) 式化为：

$$\varphi_{kk}^j = \int_{-\infty}^{+\infty} k(x-y)2^{-j} (2^{-j}x - k) (2^{-j}y - k) dx dy \quad (5-45)$$

$$\varphi_{kk}^j = \int_{-\infty}^{+\infty} k(x-y)2^{-j} (2^{-j}x - k) (2^{-j}y - k) dx dy \quad (5-46)$$

$$\varphi_{kk}^j = \int_{-\infty}^{+\infty} k(x-y)2^{-j} (2^{-j}x - k) (2^{-j}y - k) dx dy \quad (5-47)$$

将 (5-42) 至 (5-44) 或 (5-45) 至 (5-47) 代入积分方程 (5-41) 得：

$$f(x) = \sum_{j,k} \varphi_{kk}^j \varphi_j(x) \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_j(y) f(y) dy + \sum_{j,k} \varphi_{kk}^j \varphi_j(x) \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_j(y) f(y) dy + \sum_{j,k} \varphi_{kk}^j \varphi_j(x) \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_j(y) f(y) dy \quad (5-48)$$

此式就是化积分算子为矩阵算子的非标准方法。

$$\text{令 } d_k^j = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_j(y) f(y) dy \quad (5-49)$$

$$s_k^j = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_j(y) f(y) dy \quad (5-50)$$

式中 d, s ——遍历 j, k 二进区间的函数。

由 MRA 的性质：

$$D_k^j = \sum_k \varphi_{kk}^j d_k^j + \sum_k \varphi_{kk}^j s_k^j \quad (5-51)$$

$$S_k^j = \sum_k j_{kk} d_k^j \quad (5-52)$$

将 (5-51) 至 (5-52) 代入 (5-48) 式得:

$$f(x) = \sum_{j,k} j_{j,k}(x) D_k^j + \sum_{j,k} j_k(x) S_k^j \quad (5-53)$$

由于 $\langle j_k, j_k \rangle = 0, j, k \neq z$

$$D_k^j = f(x) - j_k(x) \quad (5-54)$$

$$S_k^j = f(x) - j_k(x) \quad (5-55)$$

设 $N = 2^n$, $\{S_k^{(0)}\}$, $k = 1, 2, \dots, N$, 对于观测值 $f(x)$ 的 N 个取样值, 可以得到 $R^{2^{N-2}}$ 内的一个向量。

$$f = d_1^{(1)}, \dots, d_{\frac{N}{2}}^{(1)}, S_1^{(1)}, \dots, S_{\frac{N}{2}}^{(1)}, d_1^{(2)}, \dots, d_{\frac{N}{4}}^{(2)}, S_1^{(2)}, \dots, S_{\frac{N}{4}}^{(2)}, \dots, d_1^{(n)}, S_1^{(n)}$$

对于 (5-51) 和 (5-52) 式可用一个矩阵作用简单表示。

$j = 1$ 时

$$\begin{pmatrix} 1_{11} & 1_{12} \dots & 1_{12^{n-1}} \\ 1_{21} & 1_{22} \dots & 1_{22^{n-1}} \\ \dots & \dots & \dots \\ 1_{n1} & 1_{n2} \dots & 1_{n2^{n-1}} \end{pmatrix}_{2^{n-1} \times 2^{n-1}} \begin{pmatrix} d_1^1 \\ d_2^1 \\ \dots \\ d_{2^{n-1}}^1 \end{pmatrix}_{2^{n-1} \times 1} = \begin{pmatrix} S_1^1 \\ S_2^1 \\ \dots \\ S_{2^{n-1}}^1 \end{pmatrix}_{2^{n-1} \times 1}$$

$j = 2$ 时

$$\begin{pmatrix} 2_{11} & 2_{12} \dots & 2_{12^{n-2}} \\ 2_{21} & 2_{22} \dots & 2_{22^{n-2}} \\ \dots & \dots & \dots \\ 2_{n1} & 2_{n2} \dots & 2_{n2^{n-2}} \end{pmatrix}_{2^{n-2} \times 2^{n-2}} \begin{pmatrix} d_1^2 \\ d_2^2 \\ \dots \\ d_{2^{n-2}}^2 \end{pmatrix}_{2^{n-2} \times 1} = \begin{pmatrix} S_1^2 \\ S_2^2 \\ \dots \\ S_{2^{n-2}}^2 \end{pmatrix}_{2^{n-2} \times 1}$$

...

$j = n - 1$

$$\begin{pmatrix} n-1_{11} & n-1_{12} \\ n-1_{21} & n-1_{22} \end{pmatrix}_{2 \times 2} \begin{pmatrix} d_1^{n-1} \\ d_2^{n-1} \end{pmatrix}_{2 \times 1} = \begin{pmatrix} S_1^{n-1} \\ S_2^{n-1} \end{pmatrix}_{2 \times 1}$$

$j = n$

$$1_{11} d_1^n = S_1^n$$

如此完成不同尺度下的反演计算。

用 (5-53) 式计算积分方程的形式很简单, 但因为矩阵 j , j , j 的元素当远离对角线时的衰减性差, 而且用处不大, 因此, 当且仅当选用具有紧支集的小波集时, 矩阵才会变得非常规则, 见图所示 (见图 5-3 (a) 和图 5-3 (b)) 依次为:

$$N = 2^j \quad j = 3, 4, 5, 6, 7, 8$$

图 5 - 3 理论模型和传统成像图

(a) 理论模型; (b) 传统成像

并且为得到这些数据仅需要 $O(N)$ 次运算, 这种运算时间是可以接受的。

关于这种算法的误差分析, 在此不进一步推导仅给出其误差估计式:

用具有 $M - 1$ 阶消失矩的 Daubechies 小波基展开, 公式 (5 - 45) 至 (5 - 47) 矩阵元素满足:

$$\left| \begin{matrix} j \\ k \end{matrix} \right| + \left| \begin{matrix} j \\ k \end{matrix} \right| + \left| \begin{matrix} j \\ k \end{matrix} \right| = C_m \left(1 + \left| k - k \right| \right)^{-1-M} \quad (5-56)$$

对给定的 B 适当大, 用 $\begin{matrix} j \\ k \end{matrix}, B$, $\begin{matrix} j \\ k \end{matrix}, B$, $\begin{matrix} j \\ k \end{matrix}, B$ 分别代替 $\begin{matrix} j \\ k \end{matrix}$, $\begin{matrix} j \\ k \end{matrix}$, $\begin{matrix} j \\ k \end{matrix}$, 其中指标 B 表示只保留原来矩阵中沿对角线的一个宽为 $2B$ 的带形上的元素不变, 其他元素均取为 0 的新矩阵, 用 $T^{N,B}$ 表示 (5 - 53) 中定义的算子 T^N 的修正, 其中 $D(j)$, $S(j)$ 分别被 $D^{(j,B)}$, $S^{(j,B)}$ 代替, 指标 B 表示它们是由 $\begin{matrix} j \\ k \end{matrix}, B$, $\begin{matrix} j \\ k \end{matrix}, B$, $\begin{matrix} j \\ k \end{matrix}, B$ 作用于 $D^{(j)}$, $S^{(j)}$ 而得到。

$$T^{N,B} = T^N \frac{C}{B^M} \log 2^N$$

当 M 适当大时, B 便可以比较窄, 这样可以得到满足计算精度要求的稀疏矩阵。

第六节 理论方法的检验分析

对于大扰动地层参数, 理论模型如图 5 - 3 (a) 所示, 取 $c = v_0 = 3000 \text{ m/s}$, $v = 2000 \text{ m/s}$, 取频率 $\omega = 100 \text{ Hz}$ 此时 $(x) = 1 - c^2/v^2 = -1.23$ 。图 5 - 3 (b) 是用传统方法反演所得到的成像结果。图 5 - 4 (a) 和图 5 - 5 (a) 的模型参数与图 5 - 3 (a) 相同。图 5 - 4 (b)、和图 5 - 3 (b) 相比较可以看出, 新方法的成像效果较传统的方法成像要好的多。

图 5 - 4 理论模型和聚焦成像图

(a) 理论模型; (b) 聚焦成像

同时, 从图 5 - 4 (b) 和图 5 - 5 (b) 还可以看到一个十分有趣的现象, 在不同的调焦参数下, 成像结果的分辨率不同, 所反映模型的轮廓与细节情况各不相同。对于小扰动地层参数, 理论模型如图 5 - 6 (a) 所示, 取 $c = v_0 = 3000 \text{ m/s}$, $v = 2828 \text{ m/s}$, 此时, $(x) = 1 - c^2/v^2 = -0.12$ 。图 5 - 7 (b) 为传统方法反演所得到的成像结果。图 5 - 7 (a) 和图 5 - 8 (a) 与图 5 - 6 (a) 的模型参数完全一样, 图 5 - 7 (b) 和图 5 - 8 (b) 是用本文所述的新方法用不同焦参数成像的结果。从图 5 - 6 (b)、图 5 - 7 (b) 和图 5 - 8 (b) 可以看出, 两个处理方法效果的差别。由此可以得出对于大扰动地层参数, 用本文所述的方法成像, 效果较用传统方法成像大为改善, 而对于小扰动地层参数, 二者均能正确成像。这也是理论推断意料之中的结论。

理论模型如图 5 - 9 (a) 所示, 一倾斜界面, 分界面倾角为 30° , 在坐标原点处理深 $h = 2000 \text{ m}$, 界面上方波速 $c_0 = 4500 \text{ m/s}$, 下方波速为 $c_1 = 5500 \text{ m/s}$, $[6 \text{ Hz}, 50 \text{ Hz}]$ 图 5 - 9 (b) 为对正演数据加 30 % 的噪声用传统方法处理出来的结果, 相当于用常规地震处理技术进行水平叠加的, 图 5 - 10 为用调焦方法进行处理的结果。可以看出随着参数的变化, 处理结果越来越清晰, 提高分辨率的同时提高了信噪比。这一点对实际地震数据的处理过程中亦明显地看到, 具体见处理成果一节。

模型如图 5 - 11(a)、(b) 为两个经介质高频吸收了的地震子波, 图 5 - 11(c) 为 (a)、(b) 两个子波的复合体 (即叠加), 图 5 - 11(d) 为对图 5 - 11(c) 复合体子波进行一次调焦的处理结果, 图 5 - 11(e) 为二次调焦的处理结果。很明显, 图 5 - 11(e) 已将图 5 - 11(c) 中的子波复合体分离开了, 分辨率得到明显提高, 两个子波非常清楚地分辨出来了, 而且波的到时和波形没有任何改变, 保真度好。该算例和下面实际资料处理效果表明经过调焦进行复合波分离处理, 一张地震记录能够得到如何程度的改善, 而且这种改善是保真的。

图 5 - 5 理论模型和聚焦成像图
(a) 理论模型; (b) 聚焦成像

图 5 - 6 理论模型和聚焦成像
(a) 理论模型; (b) 聚焦成像

图 5 - 7 理论模型和聚焦成像
(a) 理论模型; (b) 聚焦成像

图 5 - 8 理论模型和聚焦成像
(a) 理论模型; (b) 聚焦成像

图 5 - 9 模型和传统方法处理结果图
(a) 模型；(b) 传统方法处理结果

图 5 - 10 模型和调焦处理结果图
(a) 模型；(b) 调焦处理结果

图 5 - 11 两个经介质高频吸收了的地震子波

模型如图 5 - 12 中 (a)、(b)、(c) 为三个地震子波, (d) 为三个子波的复合体, (e)、(f) 分别为对复合体子波 (d) 作一次和二次调焦的结果, 显然, 在图 5 - 12 (f) 中 3 个子波已被分离, 分辨率明显提高且三个子波的到时未改变, 子波个数正好 3 个, 因此, 保真性好。

图 5 - 12 三个经介质高频吸收了的地震子波

通过以上的理论模型的试验可以看出, 本项本技术主要功能与特点为:

- (1) 通过选取恰当的参数 (即调焦) 可以合理的分离复合波, 从而提高分辨率;
- (2) 选取合理调焦参数可以提高分辨同时提高信噪比;
- (3) 突出断裂和反射界面, 特别是强屏蔽下的弱反射界面;
- (4) 确定性和保真性好。

这些技术功能与特点应用于下面实际地震资料的处理可以看到地震反射波剖面得到改善的效果。

第七节 应用实例

轮南 27 井区位于塔北隆起中段, 轮南油田的西部, 该区一直被认为是寻找东河砂岩岩性圈闭的有利区带。目前该区测网密度已达 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 。但由于地震资料品质差, 常规地震处理技术有限, 地震剖面的信噪比和分辨率不高, 使得该区东河砂岩的分布一直悬而未决。

该区在乡 3 井已钻遇了 80 m 厚的石炭系东河砂岩, 在 LN27 井未钻遇东河砂岩。根据这一情况, 我们选择了该区进行攻关试验, 以图搞清楚该区东河砂岩的分布, 为下一步勘探服务。

该试验区包括二维测线 30 条，重处理工作量 1503km。经应用，取得了如下的处理效果：

(1) 剖面的信噪比和分辨率均有提高，东河砂岩尖灭清晰，目的层结构合理。与原始剖面相比，重处理的地震剖面在信噪比和分辨率方面均有明显的提高。例如从测线 S - 90 - 554 的原始剖面（如图 5 - 13）上可以看出由于分辨率不够，东河砂岩的底界反射 T_{g3} 一直被认为是图中箭头所指的反射，其延伸方向很难确定下来；从重处理后的剖面（如图 5 - 14）可以看到，东河砂岩的底界反射 T_{g3} 在尖灭点 A 往东就消失了，而反过来从原剖面上 A 点无任何反应。其他剖面重处理的效果类似。

图 5 - 13 S - 90 - 554 常规处理剖面

图 5 - 14 S - 90 - 554 “复合变焦”处理剖面

(2) 断点清晰、断裂关系明显。

例如在测线 S - 91 - 211 的原始剖面（如图 5 - 15）上解释有 1, 2, 3 三条断裂，但它们的断点（如图中箭头所指的反射层）不是很清晰，影响了断层位置的确定；而在重处理的剖面上（如图 5 - 16）可以看到反射层（如图中箭头所指）在三条断裂的断点处波形骤然变弱，增加了断层位置的可靠性。不仅如此，从重处理的剖面上还可以发现一些次级断裂（如图中所示其它断层）。

(3) 盐下弱反射得到加强。

例如图 5 - 17 为测线 S - 91 - 200 的原始剖面，在图中箭头所指的反射为盐层强反射屏蔽下的一个弱反射，由于反射能量弱，给该弱层的地震解释带来困难；而在重处理的剖面上（如图 5 - 18）所示，箭头所指的弱反射相对得到加强，从而为盐下地层的解释带来便利。

图 5 - 15 S - 91 - 211 常规处理剖面

图 5 - 16 S - 91 - 211 “复合变焦”的处理剖面

图 5 - 17 S - 91 - 200 常规处理剖面

图 5 - 18 S - 91 - 200 “复合变焦”处理剖面

第六章 油藏描述技术及应用

第一节 概 述

油藏描述技术诞生于 70 年代，随着计算机技术的发展而逐步完善的一项服务于油气田勘探和开发的油藏地质综合评价新技术。十几年的油藏描述经验表明：不同勘探、开发阶段，不同油藏类型，资料的积累程度不同，应采用不同的油藏描述技术。勘探阶段油藏描述技术路线为：以地质为主体，多学科一体化综合研究，亦即在统一的地质思路指导下，充分利用地质、地震、测井、测试、分析化验等资料，对研究区油气藏进行构造、沉积、储层、流体、油藏等方面的一体化综合研究。勘探阶段油藏描述是指从圈闭预探获得工业性油气流到探明储量过程中所进行的综合性油藏勘探和评价。该阶段油藏描述的主要任务是描述油气藏的形态和规模，揭示油气藏内部结构和油气分布状况，准确确定油藏概念模型，指导勘探部署，提高勘探程度，以尽可能少的探井控制和探明更多的油气地质储量，并为开发可行性评价提供地质依据。勘探阶段油藏描述可进一步分为两个阶段。

第一阶段：以第一口发现井所取得的各项资料为基础，充分利用地震信息，对油气藏类型、储集体规模、油气层分布等进行概要性的描述，提交控制储量和提出评价井的井位意见，以优化勘探部署，达到以尽可能少的探井控制更多油气储量的目的。

第二阶段：以油气藏评价井所取得的各种资料为基础，充分发挥地震和多井综合评价的优势，对油气藏结构和参数的三维分布进行基本的描述，建立油藏概念模型，提交探明储量，并为开发可行性研究及先导开发试验区的选择提供必要的地质依据。主要研究内容包括：构造精细解释及圈闭描述、沉积相研究、关键井研究及多井评价、地震资料特殊处理及储层横向预测、油气藏内流体性质研究及其分布规律描述、储层岩石物理相研究、储层模拟及预测、油藏三维地质模型建立、储量计算及油藏综合评价。具体内容为：

(1) 圈闭描述：主要包括层位标定，编制油组（或油气层）顶面圈闭形态图，圈闭特征描述与圈闭发育史分析。研究圈闭级别、形态、面积、闭合高度，断层产状、长度、断距、封闭性等。分析圈闭构造发育史，圈闭对油气的控制作用。并根据地震、地质、测井、测试等方面的资料进行综合分析，研究圈闭和断层对油气聚集的控制作用。

(2) 沉积相与沉积模型：进行层序划分与对比，即应用层序地层学方法，利用发现井和评价井的录井、测井和地震资料，进行地层层序划分对比，确定层序的时空展布，并根据描述精度要求划分进行地震相、沉积相分析的层序单元；进行单井相研究，包括岩心相分析、测井相分析及单井划相；进行地震相分析，开展沉积相综合研究，探讨沉积相对储盖层发育和分布的控制。

(3) 储盖层特征描述主要包括储层成岩作用研究，储层储集特征研究，进行测井储层解释，地震储层横向预测及储层综合评价、盖层描述与评价。并利用沉积相、成岩作用、地层岩性组合及各种分析测试资料，深入研究盖层封闭机理、微观封闭能力、宏观封闭能力及储盖组合关系，并对盖层进行综合评价。

(4) 油气藏特征描述：主要进行油气层解释及油气水系统划分，准确标定油气藏类型。主要根据圈闭描述、油气藏形成条件，油、气、水分布特征及主要控制因素，分析确定油气藏类型及油气分布规律，确定含油气边界，油、气、水性质及其分布，油气层压力和温度特征，油、气井产能。并通过试井和试采确定油气井产能（日产量、采油（气）强度和指数），分析产能变化特征和高产条件。

(5) 油藏地质模型建立及油藏综合评价：主要进行油气储量计算，进行油气藏综合评价，经济评价及开发可行性研究，在此基础上，选择先导开发实验区。其研究流程如图 6 - 1 所示。

图 6 - 1 塔里木盆地油藏描述与储层预测流程图

采用的关键技术为：

- (1) 叠偏后地震资料小波分析技术；
- (2) 地震地质层位标定技术；
- (3) 人机联作交互解释技术；
- (4) 变速成图技术；
- (5) 关键井研究及多井评价技术；
- (6) 合成声波测井、宽带约束反演及储层预测技术；
- (7) 分形预测技术；
- (8) 随机模拟技术；
- (9) 储层岩石物理相技术；
- (10) 油气藏体积计算及体积加权平均孔、渗、饱求取技术；
- (11) 油藏三维地质建模技术；
- (12) 油气藏储量计算技术。

第二节 构造精细解释及圈闭描述

一、叠偏后地震资料小波分析

如何提高地震资料的分辨能力一直是地球物理界努力探索的问题，其根本的难点在于，大地对地震波高频信号的吸收，而小波分析就是在处理阶段恢复高频信号的一种新方法。

小波分析（或多分辨分析）是傅立叶分析发展史上里程碑式的进展；小波分析被看成是调和分析这一数学领域半个世纪以来的工作结晶。原则上讲，传统上使用傅立叶分析的地方，现在都可以用小波分析取代。

众所周知，影响地震分辨能力的根本原因是地震波频谱的宽度，在对地震资料的数据处理特别是针对提高分辨率的目标处理中，关键问题就在于如何提高有效地震波的高频信息展宽有效信号的频带的同时，不使噪声干扰的高频成分得到提高，从而达到提高地震分辨率的目的。

由于大地对地震波高频信号的吸收强烈，而对低频成分的吸收相对较弱。因此，在利用小波变换得到的分频剖面上（利用傅立叶变换得不到），将既有低频成分又有高频成分的信号视为有效信号，将没有低频成分只有高频成分信号视为噪声干扰，对具有同相轴影子的频带，通过反褶积或谱白化，尽量将高频有效信号拉平抬升起来，凡是有同相轴的地方把其低频能量延展到高频上去，延展量的大小与同相轴处高频成分的多少有直接联系；而在没有低频成分而只有高频成分的时域，其高频成分（噪音）受到压制从而达到提高信噪比的目的。这样，由于具有低频能量的高频成分得到了加强，从而使分辨率得到了明显提高。在处理时为确保可靠性，在进行处理参数选择试验时，一方面作频谱分析，增强原始资料中有效信号已有的高频成分；另一方面利用测井曲线制作合成记录，使处理后井旁地震道与之相匹配。即合成地震记录上有的同相轴，井旁地震道应该有，合成地震记录上没有的轴，在处理后的地震剖面上也不应该存在。

图 6 - 2 为塔中 16 号构造小波变换处理前、后地震剖面的频谱分析图，从图中可以看出，处理前地震波主频在 15 Hz 左右，高于 20 Hz 的信号能量很低；而在处理后的频谱图上，

图 6 - 2 东河砂岩段小波变换处理前后频谱分析图

20 Hz 以上的信号能量得到明显抬升，频带展宽，主频有所提高，从而使地震资料的分辨率得到明显提高。对处理前后的频谱图比较分析可以发现，处理后能量得到增强的频率成分 (20 ~ 50 Hz) 确实是处理前有效信号范围内的信息，而原始资料几乎没有的频率成分 (大于 50 Hz)，在处理后基本上没有得到加强。

图 6 - 3 为过 TZ163 井地震剖面 (IN LINE25) 处理前、后的剖面对比图。从图中可以看

图 6 - 3 InLine25 小波分析前后剖面对比图

出：与原始地震剖面相比，处理后地震剖面的分辨率得到明显提高。特别是在目的层段—井点位置的 2 75 ~ 2 80s 处，原始剖面上为一个强同相轴，而在处理后剖面上被分成了两个同相轴。显然，通过对塔中 16 - 161 井区小波变换处理。

- (1)
- 东河砂岩顶底界反射分开,从而更加明显细致地反映了东河砂岩内部岩性、电性的纵向差异;
- (2) 处理后的地震剖面对东河砂岩厚度变化趋势的反映与测井资料分析和沉积相研究成果相吻合，与区域地质特征相一致，为东河砂岩储层横向预测提供了有力的证据。
- (3) 处理后东河砂岩上倾尖灭清楚，为寻找岩性圈闭奠定了基础。

二、地震地质层位标定

地震地质层位的标定是地震资料解释及储层横向预测最重要的基础工作，为提高地震地质层位标定的精度，我们从提高合成地震记录的质量入手，在地震地质层位的标定过程采用了如下方法：

- (1) 声波测井的调整；
- (2) 选择与地震剖面处理过程相适应的褶积模型；
- (3) 利用岩性柱子对合成地震记录进行合理解释分析。

羊塔克地区的钻井、测井资料表明：羊塔 1 井、羊塔 101 井、羊塔 2 井、羊塔 5 井钻揭下第三系约 400 m 左右，为一套氧化—蒸发环境下的滨浅湖相，砂岩并不发育，只在下第三系底部膏泥岩层中夹有 2 ~ 4 m 的薄层砂岩。羊塔 1 井为本断裂构造带揭穿主要底砂岩地层的探井，钻揭白垩系 167 m。白垩系以粉砂岩、细砂岩为主，顶部为细砂质中砂岩，下部夹薄层泥岩。通过地质资料在全区范围内的对比追踪，这套地层全区分布稳定。白垩系上覆的下第三系膏泥岩（夹薄层砂岩）速度在 4500 m/ s 左右，而白垩系砂岩地层的速度较低，平均为 3300 m/ s 左右，因此在白垩系砂岩与下第三系膏泥岩之间存在一速度差异较大的物性界面。在这个界面上，地震波速度是由高速到低速，产生负反射系数。在 SEG 正常极性剖面上，这个物性界面对应波峰。经本区各井的合成地震记录动态模拟精细标定表明：YT1，YT101，YT2，YT5 井等处，SEG 正常极性剖面上 T₈ 反射轴波峰正对应于这个岩性界面。利用 strat mod 软件将深度域的岩性柱子通过声波曲线转换时间域的岩性柱子插入连井剖面（图 6 - 4）更能直观地反映 T₈ 反射轴的地质含义。时间域的岩性柱子与井旁地震道匹配良好，其标定结果与以上单井标定结果是吻合的。

图 6 - 4 YT5 - YT101 - YT1 地震地质层位连井标定

三、人机联作交互解释

以羊塔克三维地震资料的解释为例，为了提高解释的精度，我们充分开发 Geoquest 人机联作解释工作站的最新功能，在解释手段上主要采用了以下方法：

(1) 制作水平切片，确定目的层构造层的圈闭面积形态。

(2) 制作连井剖面

(3) 对于复杂断块区的构造解释，采用多条剖面类比，即分屏同时显示，便于追踪极乱的相位及断点。

(4) 对于可疑断点，我们通过制作瞬时相位剖面，使剖面恢复本来面目，如图 6 - 5 为 inline1158 剖面，在常规剖面上 A 号断层由于断距太小，断层不太清楚，为一可疑断点，为此我们制作了 inline1158 测线的瞬时相位剖面，在瞬时相位剖面上 A 号断层明显存在。

图 6 - 5 羊塔克 In Line1158 常规剖面与瞬时相位剖面图

(5) 在复杂断块区的解释中，我们还采取了拖拉时窗对比、椅状剖面对比、纵横测线对比以及不同比例放大和不同显示类型观察断层细节等手段。

通过以上解释手段，保证了 T_8 反射轴全区对比追踪的可靠性，我们便可以得到本区 T_8 反射层高精度的等 T_0 图（见图 6 - 6）。

图 6 - 6 羊塔 5 号构造 T_8 反射层等 T_0 图

四、变速成图

变速成图系统关键技术如下：

- (1) 速度谱的编辑；
- (2) 均方根速度求取；
- (3) 叠加速度误差校正；
- (4) 层速度的求取。

针对塔里木盆地地下地质模型，我们采用了如下技术措施：

广义线性反演法；

模型迭代法等技术措施。

- (5) 速度校正。

主要包括：VSP 速度校正法；构造 + 岩性校正法。

- (6) 混合网格化方法。

混合网络化是利用矩形网稳定的平面插值算法，得出节点的值，然后再利用三角网的优越性解决断层的等值线追踪。

五、圈闭构造描述

通过上述技术处理，即可获得精确反映油藏构造几何形态的构造等值线图：

图 6 - 7 是羊塔克地区 T_8 反射层构造图。从该图上可以看到，羊塔克正断裂整体呈北东东—南西西向展布，东西延伸长约 42km，它由东西向、北东东—南西西向、南东东—北西西向三组方向的正断裂组成，但总走向与区域构造走向平行。工区内断层发育，单条断层延伸较短，各断层在平面上呈“斜列式”展布，局部主断层与分枝断层有交叉合并现象，表明为张性断裂特征，断层间距最小处仅 250m，单条断层最小延伸长度仅 1200m 左右，最大延伸长度 14.75km。每条断层的断距在中部最大，向东西两侧逐渐变小，直至消失。这些断层对圈闭的有效性具控制作用。

三维地震资料精细解释成果表明：本区中、新生界主要圈闭类型以正断层上升盘形成的

图 6 - 7 羊塔 5 号构造 T_8 反射层构造图

反向断背斜为主，整个构造带由 4 个局部构造组成，从西到东分别为：羊塔 5 号断背斜、羊塔 1 号断背斜、羊塔 3 号断背斜、羊塔 2 号断背斜。

图 6 - 8 为 TZ16 - 161 井区巴楚底砂砾岩段顶面构造图，可以看出其特征基本与塔中区域构造特征相一致，具有构造幅度低、构造简单基本没有断层发育的特点。整个地区构造呈南高北低、东高西低的地势特点。分析表明 TZ16 - 161 圈闭为一短轴背斜，长轴为 12km，短轴 3.5km，长短轴之比为 3.43，高点埋深 - 2690m，该圈闭最低闭合线值为 - 2717.5m，闭合高度 27.5m，闭合面积约 27.23km²，是本区的主要勘探目标。

图 6 - 8 TZ16 - 161 井区巴楚底砂砾岩段顶面构造图

轮南低凸起下古生界断裂十分发育，主要断裂有 5 条，分别为轮南 1 号断层、轮南 2 号断层、轮南 3 号断层、桑塔木 1 号断层，桑塔木 2 号断层，它们控制着本区下古生界构造的形成及发育，这 5 条区域性大型逆冲断裂上、下断开地层层位在全区基本一致，向上断至三叠系底，它们控制着奥陶系碳酸盐岩油气藏的形成和分布。本区奥陶系潜山内幕逆冲断层十分发育，单条断层大部分延伸较短，在平面上呈北东向—南西向、东—西向、北西—南东向、南—北向四个方向展布，局部有交叉合并现象，表现为压扭性断裂。每条断层的断距在中部最大，向两侧逐渐变小甚至消失。断层密度在平面上表现为南北分带，东、西分片的特征，在轮南断裂构造带，桑塔木断裂构造带及斜坡区中部断裂密度最大，总体表现为西密东疏的特征，这些断层对本区碳酸盐地层裂缝的发育程度具有控制作用。本区构造呈南北向带构造格局，北为轮南断垒带，南为桑塔木断垒带，中部为斜坡带，构造类型以断背斜为主。由于本区碳酸盐岩储层以裂缝型为主，故分析本区构造及断层展布规律，对预测本区裂缝发育区具有很重要的作用。根据本区构造格局及断裂展布规律，本区主要受南、北向挤压应力场及北西—南东的挤压应力场双重作用。

第三节 沉积相研究

沉积相研究是弄清储层成因、砂体展布规律的基础，是准确建立油藏地质模型的技术关键。

本部分以 TZ16 - 161 井区东河塘组及巴楚组底砂砾岩段（广义的东河砂岩）的沉积相研究为例，阐述沉积相研究的方法原理及工作程序。

研究中，我们从层序划分入手，进行岩石学、痕迹学、测井地质学研究，充分重视沉积特征、古土壤特征、测井曲线特征、痕迹学特征、沉积构造特征的分析，在此基础上，进行沉积相与沉积微相研究，研究沉积砂体时空展布规律，探讨沉积相对油气的控制作用。

研究认为，东河塘组为一套粗碎屑沉积，由砾岩、含砾砂岩及砂岩组成，夹薄层粉砂岩、粉砂质泥岩及泥岩。垂向上可明显区分为三个段，由下向上依次为：底砾岩段，主要为小砾岩、细砾岩和含砾砂岩。其成分、结构成熟度较高，反映出搬运距离远，或经潮汐、波浪作用改造的特征。侧向变化较大，TZ6 井、TZ164 井、TZ162 井最为发育，TZ4 井、TZ421 井最薄（不足 2m）；非均质砂岩段：以中细砂岩为主体，夹含砾砂岩、粉砂岩及泥岩，厚度比较稳定，TZ401 井与 TZ411 井处较薄；均质砂岩段：以细砂岩为主，比较均一，如 TZ4 井。有些井孔显示中、细、粉砂岩互层的特征，如 TZ16 井、TZ161 井、TZ421 井等，侧向上厚度变化较稳定；巴楚组底砂砾岩段：由砾岩、含砾砂岩、砂岩、粉砂岩、泥岩组成。泥岩中含大量钙质团块，砾岩的成分复杂，结构成熟度低，既有陆源碎屑砾，又有对泥岩冲刷形成的泥砾，以及泥岩中的钙质团块转变来的钙质角砾。

通过对塔中低隆东段有关井岩心的观察，首次在东河塘组中发现了多层古土壤。其发育层位因地区不同而不同，在 TZ16 - 161 井区，基本上集中在均质砂岩段的中上部；在 TZ4 井区位于非均质砂岩段中上部；TZ421 - 411 井均质与非均质砂岩段均存在。在东河塘组与巴楚组底砂砾岩段发现了 Skolithos 痕迹相、Glossifungites 痕迹相，前者代表高能的潮汐作用环境如潮汐砂坝、潮汐砂坪等，后者代表河口湾河道与潮汐砂坝、潮坪环境。

研究认为：

(1) 塔中低隆东段东河塘组沉积期总体为一河口湾环境。

(2) 由两套层序组成，分别代表在东河塘组沉积期，出现过两次海平面升降。第一次升降幅度小，层序厚度薄，局部地区反映不明显（如 TZ164）。第二次升降幅度大，波及范围广，层序厚度大。

(3) 此河口湾呈喇叭形，喇叭口朝向北西方向，物源来自北、东、南三个方向，而以来自东北部为主，东西方向发育的是沿河口湾轴向的长距离河流（弯形河流），南北方向发育的则是短轴向的近距离河流（直形河流）。

(4) 此河口湾在初期（东河塘组沉积期）为一潮控河口湾，因此，在东河塘组沉积期，河口湾内发育的河流砂体受潮汐作用的强烈改造；到巴楚组底砂砾岩段沉积期，转变成浪控河口湾，出现河口湾湾头三角洲沉积、中央盆地沉积。

(5) 在海平面下降期，东西方向的长轴河流下切河谷，河道砂由东向西前积，形成了下切谷型储层，此阶段以河流作用为主。在海面上升期，海水由西向东进侵，改造了堆积在河口的砂体，形成超覆型储层，以潮汐砂坝沉积为主。

上述研究成果表明，TZ16 - 161 井区主要含油气层的巴楚底砂砾岩为浪控河口湾三角洲

分流河道砂体（图 6 - 9）。

图 6 - 9 TZ16 - 161 井区巴楚底砂砾岩段沉积相平面图

第四节 关键井研究与多井评价

作为求解地质问题的窗口，关键井研究及多井评价成为油藏描述研究的关键内容。本部分以 TZ16 - 161 井区为例，详细阐述了关键井研究与多井评价的技术思路、工作程序及取得的成果。

关键井研究及多井评价主要包括如下 8 个方面的研究内容，即（1）关键井的选择；（2）储层数据库的建立；（3）储层属性参数基本特征分析；（4）储层属性参数四性关系分析；（5）关键井储层属性参数神经网络模拟及预测；（6）全油田测井资料数据标准化；（7）多井数字处理及参数集总；（8）油水层综合识别与评价。工作过程中，我们建立了 TZ16 - 161 井区及其邻区近 20 余口井岩性、物性、岩电实验、压汞、相渗、X 衍射、动态测试等资料信息库。对 TZ16, 161, 162, 163, 164, 16 - 5, 16 - 6 井测井信息进行编辑整理，岩电归位。研究认为，本区巴楚底砂砾岩段储层以含砾细砂岩为主，储层孔隙度集中分布于 13.077 % ~ 18.145 % 之间，最大值为 20.75 %，特征峰值为 16.5 %，渗透率主要分布区间为 $(50 \sim 220.8) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，均值为 $73.79 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，中值 $110.92 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，特征峰值为 $133.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。属中孔—中渗储层。利用神经网络模拟及预测技术，进行测井数字处理与解释，使测井解释孔隙度平均绝对误差小于 1 %，渗透率分布趋势与岩心分析值一致。利用微分分析技术评价油气水层，油水层判识符合率为 100 %。研究表明，本区油层含油饱和

度下限为 50 %，油水层饱和度介于 45 % ~ 50 % 之间，孔隙度下限为 7 %，渗透率下限为 $2.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。平均油水界面位于 - 2715 m (图 6 - 10)。

图 6 - 10 TZ161 井测井解释成果图

第五节 储层横向预测

常规处理后的地震反射剖面反映的是地层界面的信息，而高分辨率勘探的主要目的在于研究储层，应该用反映储层信息的波阻抗（速度）剖面或道积分剖面（相对波阻抗剖面）作为基础资料，将反映界面信息的反射剖面转化为反映地层信息的层速度或波阻抗剖面。利用地震资料进行储层预测的目的，在于根据井的纵向地质信息弄清楚储层的横向展布及变化，这就要求我们充分地将井的地质信息应用到地震资料中来，把地层的地质含义赋予地震反射波。因此，首先将地震反射波形转换为具有层概念的波阻抗资料，即进行波阻抗反演；在此基础上，将钻井获得的地层变化情况标定在波阻抗剖面上，使反演的地层波阻抗具有明确的地质含义，从而将人们对地下储层的认识从一维扩展到二维和三维空间。

目前，人们已经研究出了许多种地震反演的方法技术，例如，最大似然法波阻抗反演技术（DELOG）、地震岩性模拟（SLIM）、广义线性反演（GLI）、宽带约束反演（BCI）等等，从地震反演的实现思路来看，我们认为众多的反演方法大致可以分为三大类：相对波阻抗反演（道积分）、递归反演和基于模型的反演等。

研究中，我们采用基于模型的测井约束反演方法，利用多种先进软件，对实验区储层进行了预测。

一、TZ16 - 161 井区、YTK 断裂构造带下第三系、白垩系储层预测

1. 三维波阻抗体反演

在 TZ16 - 161 井区，为更可靠和准确地了解该区东河砂岩的横向变化，在对研究区三维地震资料进行小波分析提高分辨率、降低信噪比基础上，在测井资料的约束控制下，利用 STRATA 软件对地震资料进行了三维波阻抗体反演，通过反演大大提高了地震资料的分辨率，从纵向上将东河砂岩清楚地划分为四段，即含砾砂岩段、均质砂岩段、非均质砂岩段和砾岩段，横向上亦更加明显地看到东河砂岩向东、向北变薄的趋势，从而为储层岩性、物性及含油气性的预测打下了扎实的基础。在 YTK 断裂构造带，我们利用 RM 油藏描述软件包对储层进行三维波阻抗体反演。RM 软件包是一个综合性的油藏描述软件包，其主要功能包括地层对比、层位标定、波阻抗反演、储层参数预测、二维、三维模型建立、储量计算以及油藏工程研究等。它可以综合应用油田的地质、测井、地震等多种信息为评价油气藏及计算储量服务。如图 6 - 11 为 YT5 井过井波阻抗剖面，从图中可以看出；白垩系地层平均波阻抗值较低，为黄色或红色色标，其上覆的下第三系膏泥岩层及下伏的侏罗系砂泥岩地层的平均波阻抗值较大，为蓝色或绿色色标，白垩系地层及上覆的下第三系膏泥岩，下伏的侏罗系在本区分布稳定，横向易于追踪对比。

2 储层厚度预测

利用反射地震资料求取储层厚度是勘探阶段油藏描述的主要技术方法。目前，储层厚度的预测方法主要有：时差法、调谐曲线法估算储层厚度、振幅—频率综合求取储层厚度、利用地震反演资料求取储层厚度。当储层厚度大于调谐厚度时，可以直接根据地震波的旅行时计算储层厚度；当储层厚度小于调谐厚度时，地震波的振幅与地层厚度成正比。随着地震反演理论与技术的发展，反演后波阻抗（或层速度）剖面的可靠性和分辨能力越来越高，如果能够通过地震反演获得分辨率较高的反映储层信息的波阻抗或速度剖面，则可在具有较高分

图 6 - 11 Y T5 井 - Y T101 井连井波阻抗剖面图

分辨率的地层波阻抗或层速度剖面上，直接拾取储层的顶、底界面反射时间，进而由时差和层速度求取储层的厚度，这种方法简单易行而且精度较高。TZ16 - 161 井区地震波的主频约为 25 Hz，相应的调谐厚度为 40 m，这对于总厚度在 100 m 左右的东河砂岩能够完全分辨，但东河砂岩的含油部分仅限于上部的巴楚底砂砾岩段，其厚度只有 10 ~ 20 m，因此在反射剖面上是不能将其分辨出来的。但在测井约束反演剖面上，含砾砂岩段是能够与下部的均质砂岩段和非均质砂岩段分开的，因此，我们由井出发，在反演得到的三维波阻抗（或速度）数据体中对本区的含油储层—巴楚底砂砾岩段的顶底界面进行了对比追踪，在目的层的时窗内，对反演数据体采用积分法求取出了巴楚底砂砾岩段的储层厚度。见图 6 - 12。

图 6 - 12 巴楚底砂砾岩段的储层厚度图

从图 6 - 12 中可以看出巴楚底砂砾岩段的最大厚度在 TZ16 井处，向东南方向其厚度呈单调减小趋势。沉积相研究表明，东河砂岩沉积时，本区属河口湾环境，沉积物的堆积与三角洲的发育状况密切相关，骨架相厚度最大的地区通常反映了三角洲沉积的主体位置所在。

根据 YT1 井的标定结果，我们在人机联作解释工作站上，对 YTK 构造带白垩系砂层顶、底界面进行了精细对比解释，根据顶底时差及层速度 v_i ，利用 $dh = v_i \times dt$ 关系式即可求得本区白垩系砂岩等厚图（图 6 - 13）。从图中可以看出：白垩系砂岩地层在本区分布比较稳定，规律性较强，砂层往 YT1 井西北面逐渐减薄，往 YT5 井的西南面、YT2 井的东南面逐渐加厚。本区范围内、白垩系砂岩地层最厚处达 325 m，最薄处达 150 m，YT5 井处砂层厚约 195 m，呈有规律的条带状展布，高孔带呈北东—南西向展布，YT101 井位于这一高孔带上，YT1 井位于高孔带的南翼，本区平均有效孔隙度最高的地方在 YT1 井的北面为 22 % 左右，最低有效孔隙度在 YT1 井的西南为 17 % 左右，YT1 号油气藏范围内平均有效孔隙度呈北高南低趋势。

图 6 - 13 YTK 构造带白垩系砂岩等厚图

3 储层物性参数预测

1) 孔隙度预测

用地震资料预测孔隙度通常有三种主要方法。一种是井控约束反演方法，它同时给出岩性剖面 and 孔隙度剖面，但精度不高；第二种方法是利用波阻抗反演的结果，并根据已知井目的层实测孔隙度建立波阻抗—孔隙度的经验关系，再由波阻抗估算孔隙度。第三种方法是 Wyllie 公式或修正式法，实际上仅仅用层速度估算孔隙度。这些方法要事先知道泥质含量和泥岩的速度，在测井解释中可以精确地给出这两个参数；在地震解释中只能给出一个很粗略的估计，这样计算出的孔隙度精度低；更重要的是影响地震层速度因素除孔隙外，还有岩性、孔隙流体、压力、密度等，因此不可避免地带来多解性。影响波阻抗的因素同样也多而复杂，因此在低分辨率、低信噪比地区基于单个地震参数（如层速度或波阻抗）的孔隙度预测精度肯定不高，满足不了油藏描述的需要。

近年的研究表明，孔隙度不仅影响到地震波速度、岩石密度，而且影响岩石的吸收特性，从而引起地震波能量特征、波形特征和表面率特性等方面变化。因此，用多参数估算孔隙度比上述三种方法更可靠。

要用多参数预测孔隙度，首先必须建立孔隙度与地震特征参数间的函数关系，建立这个

关系的方法是神经网络函数逼近法。即用已知井实测孔隙度及井旁地震道特征参数供神经网络学习，在神经网络中建立孔隙度与地震特征参数间的函数关系。然后根据地震资料逐道提取特征参数，输入训练好的神经网络，其输出便是孔隙度。

图 6 - 14 是对 TZ16 - 161 井区含砾砂岩段的孔隙度预测结果，孔隙度的变化范围在 10 % ~ 18 % 之间。其总体变化趋势与层速度（图 6 - 15）变化趋势相反，总体上沿分流河道主体部位及向源方向，层速度高，孔隙度值低，而河道间细砂岩沉积区及三角洲前缘河口坝沉积区速度低，孔隙度高，原因在于河道主体部位，砾石含量高导致孔隙度低。

图 6 - 14 巴楚底砂砾砂岩段的储层孔隙度等值图

在 YTK 构造带，根据 YTK5 号，YTI，YT101，YT2 等井下第三系底砂岩和白垩系砂岩测井储层参数处理成果，我们对孔隙度与砂岩速度的相互关系进行了统计分析，结果表明：孔隙度的相对变大与层速度的相对变小对应关系明确，符合一般的地质规律，为此，我们分井拟合了声波时差与孔隙度的关系式。分析表明，单井的散点集中，线性关系明确，相关系数高。拟合结果为：

YT5 井区下第三系底砂岩： $AC = 67.13578 + 0.66941 \quad , \quad V = 1/AC$
YT1 井下区第三系底砂岩： $AC = 54.20455 - 1.17145 \quad , \quad V = 1/AC$
YT5 井区白垩系砂岩： $AC = 58.31246 - 0.95332 \quad , \quad V = 1/AC$
YT1 井区白垩系砂岩： $AC = 61.91825 + 0.80903 \quad , \quad V = 1/AC$
YT2 井区白垩系砂岩： $AC = 62.63835 + 0.74429 \quad , \quad V = 1/AC$

其中 AC——声波时差；
——孔隙度；

V——层速度。

图 6 - 16 为 Y T5 号油藏白垩系砂岩有效孔隙度平面变化图，从图上看，高孔区与低

图 6 - 15 巴楚底砂砾砂岩段的储层速度等值图

图 6 - 16 Y T5 号油藏白垩系砂岩孔隙度等值图

孔区呈有规律的条带状分布，YT5 号油藏大致存在三个高孔带，走向分别为南—北向，北西—东东向，西—东向。YT5 井大致位于南—北高孔带和北西—东东高孔带的交汇处，因而，该井白垩系砂岩平均有效孔隙度值较高，平均有效孔隙度最高的地方在 YT5 井的西北面为 16.6% 左右，平均有效孔隙度最低的地方在 YT5 井的东南面为 15.4% 左右，YT5 号油藏范围内平均有效孔隙度呈南低北高的趋势。

如图 6 - 17 为 YT5 号油藏白垩系砂岩地层平均层速度平面变化图，从图中可以看出：高速区及低速区呈有规律的条带状展布，走向为北东—南西向或近东西向。这与白垩系储层物性呈有规律的条带状展布有关。油气藏范围内，平均层速度值呈北低南高的趋势，证明北面的储层物性在油气藏范围内普遍好于南面的储层物性。井点平均速度值均比较低。YT5 井为 3635 m/s 左右，YT1 井为 4000 m/s，YT101 井为 3775 m/s，YT2 井为 3690 m/s。

图 6 - 17 YT5 号油藏白垩系砂岩层速度等值图

2) 渗透率预测

到目前为止，渗透率预测仍然是根据岩性或孔隙度与渗透率的关系来预测，利用其他资料预测渗透率的可靠性缺乏理论依据，因为影响渗透率的因素很多，目前尚没有更有效的方法。

研究中发现，储层渗透率与孔隙度相关性极好，因此，在 TZ16 - 161 井区巴楚底砂砾岩段储层的渗透率预测是根据孔隙度的平面分布得到的，见图 6 - 18。

从图 6 - 18 中可以看到，本区储层渗透率分布在 $(10 \sim 270) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 范围内，其平面变化趋势与孔隙度的变化规律一致，整体呈北东高南西低的特点，受多物源沉积的影响，渗透率的分布自西向东存在三个高值区，即 TZ162 井以东，TZ164 井区及东部地区。

如图 6 - 19 为 YT5 号油藏白垩系砂岩渗透率平面变化图，从图中可以看出：高渗区与低渗区均呈有规律的条带状展布，走向大致为北东—南西向或东西向，油气藏范围内渗透率均较高，均呈北高南低的趋势。YT5 号油藏范围内最高渗透率为 $770 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，最低渗透

率为 $470 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

图 6 - 18 TZ16 - 16 井区巴楚组底砂砾岩段储层渗透率等值图

图 6 - 19 YT5 号油藏白垩系砂岩渗透率等值图

3) 含油饱和度预测

根据油气运移原理，油藏内各点的含油饱和度主要受着油水界面的相对高度与储层孔隙度、渗透率的影响，根据这一原理，我们利用构造解释成果、测井解释成果及储层地震反演

结果通过回归分析方法或神经网络方法预测出储层原始含油饱和度。图 6 - 20 为 TZ16 - 161 井区巴楚底砂砾岩段含油饱和度平面变化图，从图中可以看出油水分界线附近含油饱和度为 50 % ~ 60 % 左右；等值线梯度向油水分界线逐渐增大，说明含油饱和度随着油柱高度的增加，其增加梯度越来越小。

图 6 - 20 TZ16 - 161 井区巴楚底砂砾岩段原始含油饱和度等值图

图 6 - 21 为 YTK 构造带白垩系砂岩油气藏的含油气饱和度图。从图中可以看出油水分界线附近含油饱和度为 60 % 左右（局部为 55 % ~ 50 %）；变化规律与塔中地区雷同。

图 6 - 21 YT5 号油藏白垩系砂岩原始含油饱和度等值图

二、碳酸盐岩储层地震预测

为弄清轮南潜山碳酸盐储层发育区，我们先后采用了波阻抗反演技术，相干数据体处理技术，瞬时振幅提取技术，通过提取其波阻抗层速度，相关性，振幅等参数对本区储层进行预测。

相干数据体切片分析表明，本区的 LN8 井、LG1 井、LG2 井、LN18 井、LN44 井、S18 井、JF123 井、JF128 井、JF126 井等工业油气流井均位于相干性差地区，LN12 井位于相干性好的地区，说明相关性差与碳酸盐岩内幕裂缝比较发育有关，相干性好的地区与碳酸盐岩内幕裂缝不发育有关，储层物性较差。特别值得注意的是在 LN8 井与 LG1 井之间，LG1 井与 LG2 井之间存在一呈南北向展布的相干性很好的岩性致密性带，我们推测这是造成它们之间油气藏性质不一样的主要原因。

波阻抗分析表明，本区的 IN17 井、LN8 井、LH44 井、LG1 井、JF123 井、JF128 井、JF126 井、LN48 井、LN48 井、LN14 井、LN10 井、LN4 井、LN30 井、S18 井、LN1 井、LG2 井、LN11 井等工业油气流井位于低阻抗分布区、LN12 井、LN31 井等空井位于高阻抗分布区，说明高阻抗与储层不发育有关，低阻抗与储层发育有关。LN39 井、LN26、LN18 井的储层发育程度与波阻抗的对应关系较差。

振幅分析表明，本区的 LG2 井、LN8 井、LN17 井、LG1 井及桑塔木断裂构造带上的工业油气流井基本上位于低振幅分布区，在这些区域空井基本上位于高振幅分布区，在工区西部由于石炭系地层的减薄或缺失，三叠系地层直接覆盖在潜山之上，在这个区域振幅与储层发育区的对应关系较差。

如图 6 - 22 为本区通过振幅、波阻抗、相干数据体处理技术、构造应力分析所预测储层发育区叠合图。

图 6 - 22 轮南奥陶系潜山储层综合评价图

从图上可以看出：本区储层发育区主要分布于轮南断垒带、桑塔木断垒带、中部斜坡带 LN8 井、LG1 井、LN18、LG2 井井区，东部斜坡带 LN17 井区，其中轮南断垒带中部 LN1，

LN26, LN2 井区, 由于缺失石炭系地层、盖层不发育, 不属于勘探的有利区带、其他地区由于储盖组合匹配良好, 为勘探的有利区带, 分布面积约 70km^2 。这些储层发育区被呈网状分布的岩性致密带所分割, 成为一个个独立的油气藏单元, 这也是造成本区油气藏性质分布不稳定的原因。根据目前钻探成果及综合评价结果, 本区油气藏类型主要有两种: 一种为岩性裂缝油气藏; 主要分布在中部斜坡带储层发育区, 本区第二种油气藏类型以构造岩性控制的复合油气藏为主, 其 6 个复合型油气藏为 LN1 井区、LN44 井区、JF128 井区、LN4 井区、LN10 井区、LK14 井区, 分别分布于 LN 断垒带、桑塔木断垒带, 在这些地区构造低部位探井全部落空。

第六节 储层岩石物理相研究

储层岩石物理相 (Petrophysical facies) (熊琦华, 1989) 是指具有一定岩石物理特性的储层成因单元, 是沉积作用、成岩作用和后期改造作用的综合效应, 它最终表现为现今的储层孔隙网络特征。

储层岩石物理相是储层沉积岩石微相、成岩储集相和裂缝相从点 (井点或控制点) 到面 (层、组、段) 上的延拓, 即延展到平面上的三种相带。平面上三种相带的有机叠合即形成了现今的孔隙网络特征, 它们分别以不同的岩石物理相表示。

一、储层岩石物理相分类与描述

研究中, 我们将储层岩石物理相按成因、综合及信息进行分类, 不同分类, 其定名原则不同。

成因分类一般按照先沉积后成岩再裂缝的顺序直接定名或编码。如前所述, 储层岩石物理相是储层沉积岩石微相、成岩储集相和裂缝相从点到面上的延拓, 即延展到平面上的三种相带的有机叠合。

综合分类主要利用储层岩石物理相综合系数进行分类与编码。

研究认为, 储层岩石物理相可由一系列反映储层岩石物理特征的参数来表征。这些参数大致分为六大类, 即:

- (1) 反映沉积特征的参数: 粒度中值 (M_d)、分选系数 (S_t)、泥质含量 (V_{cl})。
- (2) 反映储层宏观物性的参数: 孔隙度 (ϕ)、渗透率 (K)。
- (3) 反映孔喉大小的参数, 喉道直径平均值 (D_m)、有效喉道直径平均值 (D_{iny})、喉道半径平均值 (R_m)、有效喉道半径平均值 (R_{my})、主要流动喉道半径平均值 (R_z)、主要流动半径下限值 (R_{95})、最大难流动喉道半径 (R_n)、大于 $0.2\mu\text{m}$ 喉道半径所控制的孔隙体积百分数 ($V_{0.2}$)。
- (4) 反映孔喉均质程度的参数: 喉道分选系数 (S_p)、喉道相对分选系数 (D)。
- (5) 反映孔喉连通性和产液能力的参数: 储层孔隙结构综合评价系数 (B_z , $B_{0.2}$)。
- (6) 反映成岩作用程度的参数: 视压实系数 (α)、视胶结系数 (β)、成岩作用综合系数 (C_D)。

可以看出, 反映储层岩石物理特征的因素很多, 不可能一一评述, 惟有从众多因素之中挑选出主因素进行评价, 才可能屏蔽掉次要因素产生的一些不利影响。R 型因子分析是把具有复杂关系的数量较多的因子归结为数量较少的几个综合因子, 这些综合因子须尽可能多

地保留原有因子信息。而且这些综合因子又是独立的。

主成分判别分析方法就是对一个对象的多种影响因素进行综合评价：最终得到一个综合评判系数，据此进行岩石物理相分类与质量评价。

应用主成分判别方法的关键是选定评判函数的形式，根据岩石物理相的概念，通常选定的综合评判函数形式为：

$$SPF = \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (a_i \geq 0) \tag{6 - 1}$$

式中 SPF——岩石物理相系数；
x_i——表征岩石物理相特性的参数；
a_i——加权系数；
n——参数个数。

利用所选定的参数（实验室分析化验数据）进行 Q 聚类 and 主成分综合判别即可求得岩石物理相系数。

依据所获取信息来源不同，可将其进一步细分为岩心储层岩石物理相、测井储层岩石物理相、地震储层岩石物理相。研究中，利用主因子分析求取岩心储层岩石物理相参数，利用神经网络模拟及预测技术，采取岩心刻度测井，测井刻度地震的工作方法，依次获取测井岩石物理相参数，地震储层岩石物理相参数。并通过关键井研究及多井评价技术，并约束条件下三维地震资料反演技术，地质统计学分析技术，准确确定储层岩石物理相在三维空间的展布。

二、储层岩石物理相的研究内容与研究流程

岩石物理相作为一种新的储层质量评价技术。具体流程可概括为：

- (1) 充分利用研究区实验室分析化验资料、多井评价成果和沉积相、成岩储集相、裂缝相研究成果，进行岩石微相、成岩储集相裂缝相划分与展布。
- (2) 将岩石微相、成岩储集相、裂缝相有机叠加划分出岩心储层岩石物理相类型。
- (3) 充分利用测井信息、地震信息，分别表征出地震、测井储层岩石物理相。
- (4) 以岩心储层岩石物理相，刻度测井岩石物理相，以测井岩石物理相，刻度地震岩石物理相，最终确定油田规模储层岩石物理相，油组规模储层岩石物理相，小层规模储层岩石物理相，单砂体规模储层岩石物理相。
- (5) 对不同规模储层进行质量评价，以指导油田勘探与开发。详细流程见图 6 - 23。

三、TZ16 - 161 井区巴楚底砂砾岩段储层岩石物理相

依据小层沉积岩石微相与成岩—储集相之间对应关系，TZ16 - 161 井区巴楚底砂砾岩段共划分出六种主要类型的岩石物理相。

- PF₁ 相为下三角洲平原水下分流河道含砾细砂岩—DRF₁ 相；
- PF₂ 相为下三角洲平原水下分流河道含砾细砂岩—DRF₂ 相；
- PF₃ 相为下三角洲平原水下分流河道细砂岩—DRF₁ 相；
- PF₄ 相为下三角洲平原水下分流河道细砂岩—DRF₂ 相；
- PF₅ 相为三角洲前缘砂坝含砾细砂岩—DRF₁ 相；

图 6 - 23 储层岩石物理相研究流程

PF₆ 相为上三角洲平原分流河道间细砂岩—DRF₃ 相。

依据所求得的岩石物理相系数，可将 TZ16 - 161 油田巴楚组底砂砾岩（岩心）储层岩石物理相划分为五大类。即：

PF₁ 相：PF > 0.9

PF₂ 相：PF = 0.9 ~ 0.6

PF₃ 相：PF = 0.6 ~ 0.47

PF₄ 相：PF = 0.47 ~ 0.2

PF₅ 相：PF < 0.2

不同的岩石物理相类型，储层的质量不同，分析结果表明：

PF₁ 相与 PF₂ 相是本区内储集性最好的岩石物理相类型，储层以中孔、中渗、中粗喉型含砾细砂岩、细砂岩为主。其孔隙度为 14.6% ~ 20.8%，一般为 17.2%；渗透率为 (192.2 ~ 816.7) × 10⁻³ μm²，一般为 232.4 × 10⁻³ μm²；粒度中值为 0.127 ~ 0.139 mm，平均 0.133 mm。储层受成岩作用影响较小，钙质胶结物含量一般小于 8%，胶结程度较弱，视胶结率一般不超过 20%。成岩综合系数大于 25%。储层含油级别高，为油浸—含油。

PF₃ 相与 PF₄ 相，为本区储集性能较好的岩石物理相类型，为低孔、中低渗中喉细砂岩型储层。其孔隙度为 9.7% ~ 14.6%，一般为 10.9% ~ 11.8%；渗透率为 (73.3 ~ 192.2) × 10⁻³ μm²，一般为 (100 ~ 156) × 10⁻³ μm²；粒度中值较 PF₁ 相与 PF₂ 相低，一般小于 0.131 mm。储层泥质含量较高，平均 11.25%，胶结程度中等，视胶结率一般为 50% 左右，储集性能受成岩作用影响较大，成岩综合系数 13% 左右。储层含油级别较高，为油迹—含油。

PF₅ 相与 PF₆ 相，是本区内储集性能最差的岩石物理相类型，为特低孔、低渗含砾砂岩或细砂岩型储层。储层孔隙度 3.8% ~ 9.7%，平均为 6% 左右；渗透率 (0.5 ~ 76.5) × 10⁻³ μm²，一般小于 20 × 10⁻³ μm²。PF₅ 相细砂岩型储层、粒度中值平均为 0.117 mm，泥质含量高，为 12.31%，钙质胶结程度高，视胶结率平均 72%；PF₆ 相含砾砂岩型储层粒度中值平均值为 0.133 mm，泥质含量低，平均 4.35%，钙质含量高为 20% ~ 35%，视胶结率平均 86.6%，多为连晶式方解石胶结，成岩综合系数小。储层物性极大地受到成岩作用影响，其含油性差，一般为油斑—油迹。

为将储层岩石物理相延展到平面，针对 TZ16 - 161 井区井资料少、地震信息丰富的特点，我们提出了地震储层岩石物理相的基本概念。

如前所述，地震储层岩石物理相是由地震信息所反映出的储层综合响应，在地震预测储层横向变化及储层参数平面展布的基础上，我们进行地震岩石物理相探索性研究。研究认为，最能反映储层储集性能及含油性能的共有 6 个参数，即平均层速度 V_s、地震预测储层孔隙度、地震预测储层渗透率 K、地震预测储层百分比、地震预测储层厚度 H，地震预测储层含水饱和度 S_w。用此 6 个参数即可求取地震储层岩石物理相综合表征系数 S_{PF}。

图 6 - 24 为地震岩石物理相分布图。在图中，地震岩石物理相系数有 4 个较为明显的分区，由于地震信息分辨率远远低于测井信息或岩心信息分辨率，因此，必须通过岩心刻度测井、测井刻度地震，才能赋予地震岩石物理相系数比较明确的地质含义。研究表明，当 S_{PF} > 2.4 时，相当于 PF₁ 相；当 S_{PF} = 2.4 ~ 2.0 时，相当于 PF₂ 相；当 S_{PF} = 2.0 ~ 1.6 时，相当于 PF₃ 相；当 S_{PF} < 1.6，相当于 PF₄ 相。由于地震储层岩石物理相是整个巴楚底砂砾

图 6 - 24 地震岩石物理相分布图

岩段的综合效应，因此，总体上划分不出 PF_5 ， PF_6 相。

在 TZ16 - 161 井区巴楚底砂砾岩段地震储层岩石物理相平面图上，我们可以看到，TZ16 - 5 井及其以南、TZ16 - TZ162 井以北，其地震岩石物理相综合系数大于 2.4，表明其储层综合储集性能最好，属于 PF_1 相；由 PF_1 相带外推至 TZ163 井及 TZ161 井外缘，储层岩石物理相系数介于 2.4~2.0，表明该处储层属于 PF_2 相，储层综合储集性能较好；TZ16 - 6 - TZ167 井区以北储层岩石物理相系数介于 2.0~1.6 之间，储层综合储集性能中等，属于 PF_3 相。 PF_4 相则局限于研究区东北部呈条带状分布，推测为三角洲平原分流河道主流相沉积区。研究认为，一、二类岩石物理相区，是最有利的储集区，在有利的构造区域内，往往是最有利的油气富集区及高产区。

第七节 储层随机模拟及预测

随机模拟方法是以已知的信息为基础，以随机函数为理论，产生多个等概率、高精度的井间储层参数预测结果。随机模拟所要恢复的，主要是变量的非均质性及空间连续性特征。

研究中，我们通过详细总结随机模拟方法的数学原理、理论上的特点、优越性及常用算法分类，根据 TZ16 - 161 井区的地质特点及各个储层岩石物理参数分布的特点，分别探讨了序贯高斯模拟、序贯指示模拟及模拟退火在孔隙度、渗透率、饱和度、孔渗相关关系模拟和预测方面的应用，为该井区的储层参数预测提供了量化模型。同时也对储层厚度和泥质含

量、砂岩百分比进行了预测。

储层随机模拟通常包括数据准备、变差函数模型的建立、模拟方法选取、参数模拟及成果显示等过程。

不同勘探开发阶段，资料的拥有程度及精度不同，因此基础数据的准备不同。

勘探阶段，往往以地震资料为主，岩心分析资料及测井资料较少，因此，在进行储层参数模拟时，不仅要充分利用岩心分析及测井等硬信息，更重要的是应合理利用地震信息。研究中，根据研究区井资料少，不具有统计意义的特点，在进行模拟数据准备时，首先获取经岩心刻度后的多井评价储层参数，其次获取过井或井旁经测井约束反演后获得的储层参数一起参与随机模拟。

数据准备好后，即可建立变差函数模型。选择合理的随机模拟方法，进行模拟运算。

研究中，我们利用序贯高斯模拟进行储层厚度、泥质含量、砂岩百分比模拟；利用序贯指示模拟进行储层渗透率的模拟；利用模拟退火模拟方法进行储层原始含油饱和度的模拟。

一、储层孔隙度的序贯高斯模拟及预测

图 6 - 25 (a) 和图 6 - 25 (b) 为孔隙度原始数据、解串后数据平面分布直方图，图 6 - 25 (c) 为解串前后分布差异的分位数—分位数图，图 6 - 25 (d) 为光滑后的孔隙度数据

图 6 - 25 解串前后孔隙度分布特征

分布直方图，从图中可以看出数据成串分布的影响并不是很大，但为了精确起见，仍然把解串后的直方图作为原始数据的直方图。

图中显示，孔隙度均值为 13.6252，中值为 14.5050，这两个数据相差不大，最小值和最大值分别以 4.0 和 19.3300，相差较小，不存在数量级差，低分位数（累积概率值为 25 % 的分位数）为 11.8525，高分位数（累积概率为 75 % 的分位数）为 16.6380，这些参数给予我们孔隙分布位置的一个精确概念。上述结果说明孔隙度数据分布比较稳定均匀，没有奇异值的出现，这种均衡的分布使得它转为适合运用 sgsm 的模拟方法。

直方图的一个显著优点就在于它描述了变量分布的对称性，而用来描述对称性最常用的参数便是歪度系数。我们并不常用歪度系数的具体大小来判断分布的形态，而是运用它的正负性，如果歪度系数为正，则说明直方图在高值区具有一个长尾，致使中值远远小于均值，反过来，如果歪度系数为负，则说明直方图在低值区具有一尾部分布，则中值大于均值，接近于 0，说明该变量分布近似呈对称状，中值与均值近于相等。此外，由变异系数来看，如果变异系数过大，说明该分布较为分散，数据级差较大或有较多奇异值出现，这时在后面的估计及模拟中都应加以注意，必须采取正确的估计策略。在本例中，变异系数为 0.3006，由此可见孔隙度分布非常稳定，不具有长尾分布特点，可适用于快速稳定的 sgsm 方法。

研究认为，了解研究变量的分散或集中程度也是十分重要的，标准偏差或方差就是提供这种信息的参数，在本例中，孔隙度标准偏差为 4.0953，分位数间隔距 $IQR = Q_u - Q_l = 16.6380 - 11.8525 = 4.7755$ （上、下分位数之差），由此可见，该变量分布比较集中，没有数量级差或奇异值，因此可进一步确定选用稳定的估计算法。为了计算方便，在计算之前首先对于原始井位坐标进行了转换。

空间变量描述就是在考虑变量空间位置的基础上，找出不同位置处变量数值大小的结构性——连续性和变异性；变差函数正是描述这种结构性的一个量化工具。单纯作为衡量空间结构性的参数，还有其他一些参数具有相同的作用，如两两相对半变差函数、对数变差函数、协方差函数、广义相对半变差函数等，但要作为随机模拟中的参数模型来说，传统的半变差函数是独一无二的，变差函数的公式为：

$$\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(u+h) - z(u)]^2 \quad (6-2)$$

式中 $z(u)$ ——位置 u 处变量值的大小；
 $z(u+h)$ ——位置 $u+h$ 处值的大小；
 $N(h)$ ——目的区内所有相距为 h 的点对的数目。

由公式我们可见，变差函数值 $\gamma(h)$ 实质上是一个统计意义下的差的平方的平均值，如果 $N(h)$ 数目很小，则 $\gamma(h)$ 就会变得非常不稳定，不具有统计中均值的意义。

在本次孔隙度模拟中，依据所选取的数据计算各方向上的变差函数。首先依次计算了 145°，50°，0°，90°，25°，10°，35°，135°八个方向上的实验变差函数，根据这八个变差函数图形，确定了最大连续方向 135°及最不连续方向 45°，又由于孔隙度的模拟使用的是 sgsm，这就要求原始数据必须服从正态分布并且必须输入正态得分的变差函数模型，因此我们又计算了主方向上的正态得分变差函数，并确定理论变差函数模型为：

$$\gamma(h) = 0.2 + 0.8sph \frac{h}{3.5}$$

在得到理论变差函数模型的基础上，我们运用 sgsim，在原有测井数据基础上，进行网格间距为 200 m，网格密度为 65 m × 50 m 的模拟，从中提取了四个模拟实现，并作出了每个模拟实现中 3250 个数据点的直方图及灰度图。由直方图可见，这四个模拟实现比较相似，无论在分布的形态、位置及分散程度上都具有较好的一致性，但由灰度图来看，在西南角上则差异较大，这主要是由于除西北—东南一线井点外，其他方向上没有井点控制，因而出现较多种可能性组合，而在井点附近，则是比较稳定的。综合现有地质资料，我们认为模拟实现——最为符合地质规律，并作出了四个实现与光滑后的原始数据分布的分位数—分位数图，在 q - q 图中，如果作出的直线与 45° 直线重合，则说明两个实现完全一致，而在图中我们可以见到，模拟实现基本上在原模型分布左右飘移，低值区模拟结果稍微偏高，但当 $n > 8$ 时，已几乎完全一致，可见就恢复样品直方图（分布）来说，本次模拟实现还是较为理想的。

二、储层渗透率的序贯指示模拟及预测

对于渗透率的模拟，我们采用了序贯指示模拟的方法，即在选定的门槛值处对原有数据进行指示转换，在本次模拟中，我们一共选用了 5 个截断门槛值，它们分别是： $K = 140.9445\mu\text{m}^2$ ， $165.9284\mu\text{m}^2$ ， $191.7676\mu\text{m}^2$ ， $114.50\mu\text{m}^2$ ， $145.10\mu\text{m}^2$ ，对不同的截断值，其对应的渗透率累积分布函数（CDF）为：

$$F(x_i, 140.95) = 0.25;$$

$$F(x_i, 165.93) = 0.50;$$

$$F(x_i, 191.77) = 0.75;$$

$$F(x_i, 114.50) = 0.10;$$

$$F(x_i, 145.10) = 0.30;$$

在这 5 个截止值处分别对原始数据进行指示转换，对这 5 个截止值分别作变差函数分析，即在每个截止值处计算三个方向 90°，0°，50° 上的指示变差函数。分析表明，渗透率的分布服从各向同性模型，并且在不同截止值下，渗透率变化是有所差别的，有的连续性较好，有的连续性较差，但服从一种连续变化的规律。

将上述实验指示变差函数中得到的理论模型输入 SISIM 程序中，从中提取四个模拟实现（精度同孔隙度），并作出了这四个实现的频率直方图、灰度图及与原始渗透率分布的分位数—分位数图。

分析表明，四个渗透率模拟实现的频率直方图较为相似，这说明它们的分布极为接近，在经过光滑的原始数据分布与模拟结果分布的 q—q 图中表现为几乎与 45° 直线重合，可以说这些实现在恢复样品分布方面是成功的。但从灰度图中又可以看出，由于许多模拟区域没有井点控制，模拟图像的收敛性还是不甚理想，具有一些微小的差异，这说明在空间连续性的恢复方面存在一定的不确定性，这也正是由于缺少井数据而造成的。结合地质知识加以综合判别，最终认为实现三是比较符合地质规律的。就整体趋势而言，渗透率呈东高西低的特点，受多物源的影响，渗透率的分布存在几个高值区，即 T Z162 井，T Z164 井区及东部地区，结合沉积相的分析研究，可以看到该区沉积作用对储集物性的控制作用。

三、储层含油饱和度的模拟退火模拟及预测

利用模拟退火模拟对 T Z16 - 161 井区进行了含油饱和度的模拟，模拟结果灰度图，共

提取了四个模拟实现，每一幅图像都比较相似，无论是空间的结构性还是统计参数，这说明在恢复空间连续性和样本统计特征方面还是比较成功的。并且由原始数据和模拟实现的分位数——分位数图来看，几条线几乎都位于 45° 线上，这说明模拟结果很好地恢复了原始变量的样本统计参数特征。由模拟结果图可见，含油饱和度在东南地区较高，西北区饱和度值较低，储层含油气性明显地受构造的控制，这与塔中地区油气分布规律的地质分析和圈闭评价结论基本一致。

四、结论及认识

通过模拟，得到如下几点认识：

(1) 该井区巴楚底砂砾岩段的物源方向主要以东北方向为主，因此在孔隙度的模拟中可见，由东北向西南，孔隙度出现依次降低方向，并且在物源（主河流）两侧即河道间，孔隙度呈现较低的值，渗透率也有相应的趋势，由此可见，就整体而言，随机模拟与地质规律是比较吻合的。

(2) 由含油饱和度的模拟结果图可见，含油饱和度在东南地区较高，西北区饱和度值较低，储层含油气性明显地受构造的控制，同时，也与储层物性相关。这与塔中地区油气分布规律的地质分析和圈闭评价结论基本一致。

(3) 在工区范围内，砂体厚度相对较稳定，最大厚度位于 TZ16 - TZ162 井处，向东南方向呈单调减小趋势，沉积相研究表明，东河砂岩沉积时属河口湾环境，骨架相厚度最大的地区通常反映了三角洲沉积的主题位置所在。因此本区东河砂岩含砾砂岩段沉积时，TZ16 - TZ162 井是三角洲沉积的主要场所。

(4) 泥质含量的结果表明，泥质含量有东北向西南增大的趋势，并且自西向东存在几个低值带，这进一步证明当时的总体物源方向是自东北向西南。

(5) 由于该井区井少，井距大，且井分布方向比较单一，许多地区没有井点控制，致使模拟图像在无井控制区空间分布上变异性较大，收敛性不是很理想，但井附近则非常相似，因此只有在充分结合地质信息的基础上才能选择较为合适的实现结果。

(6) 由于该井区井距很大，因而许多井间信息无法得到，平面砂体的展布难以预测，这就使得随机模拟只能预测大规模的参数分布规律，无法恢复小规模的各向异性。

第八节 油藏三维模型的建立

通过前面分析，我们对油气藏的沉积构造及油藏物性特征的分布有了初步的感性认识，但这些参数都是用独立的方式表达出来，很难形成一个完整的地下构造、储层物性的空间概念。因此，建立一个油藏三维模型，给油藏工程师们一个完整的油藏概念是非常必要的。目前，有这种功能的软件一般有 RM，Earth vision，SGM，STORM 等。以 TZ16 - 161 井区东河砂岩油气藏为例，用 Earth vision 建立油藏三维模型的方法及工作程序如下：

(1) 建立三维数据文件（pdat 文件），文件必须要有 X，Y，Z 值及属性参数值。

(2) 在 modeling 中单击三维最小张性模型。

选择数据文件。

限制文件，（以 2D 文件层顶底面及边界多边形及断层面等进行限制）。

确定运算范围。

计算，生成 *. 3grd 文件。

(3) 计算面文件。

在 modeling 中单击 faces 产生次一级菜单。

在 Files 中选择 *. 3grd 文件。

确定计算范围（限制网格文件等）。

确定油层顶底界面。

给出输出文件名及标题

计算。

计算后得到的 Faces 文件经堆栈即为三维模型。

图 6 - 26 为 LN 低凸起奥陶系碳酸盐岩潜山顶面三维立体模型，由图中可以看出，潜山顶面几何形态展布规律一目了然。

图 6 - 26 LN 低凸起奥陶系碳酸盐岩潜山顶面三维立体模型

第九节 储量计算及油藏地质综合评价

一、储量计算

储量计算是准确评价油藏的基础，传统上，储量参数的计算通常应用算数加权、厚度加权、面积加权等，在井网密度大的开发区，利用上述加权方法进行计算可以保证计算的精度，然而，在勘探阶段，井资料少，且在平面上分布不均，利用上述方法会引起较大的计算误差。因此，为提高求取的精度，部分储量参数如圈闭容积、储层有效厚度、储层有效孔隙度、原始含油饱和度等的求取，我们采用积分方法求取。其技术关键在于：

油气藏体积：
$$V = \int H(x, y) dx dy$$

式中 $H(x, y)$ ——有效厚度平面变化图。

油气藏总孔隙度： $V = \int (x, y) \times H(x, y) dx dy$

式中 (x, y) ——厚度加权孔隙度平面变化图。

体积加权平均孔隙度： $\bar{V} = V / V$

体积加权平均含油饱和度： $S_{o\text{平均}} = \frac{\int S_o(x, y) \times H(x, y) dx dy}{\int H(x, y) dx dy}$

经计算：YTK 构造带：

YT1 号白垩系砂岩气藏总体积为 $551.981 \text{ km}^2 \cdot \text{m}$ ，有效孔隙总体积为 $105.72 \text{ km}^2 \cdot \text{m}$ ，

YT2 号白垩系砂岩气藏总体积为 $15.2541 \text{ km}^2 \cdot \text{m}$ ，有效孔隙度总体积为 $2.49422 \text{ km}^2 \cdot \text{m}$ ，

YT5 号白垩系砂岩油藏总体积为 $23.3202 \text{ km}^2 \cdot \text{m}$ ，有效孔隙总体积为 $3.7393 \text{ km}^2 \cdot \text{m}$ ，

YT1 号白垩系砂岩气藏体积加权平均孔隙度为 19.153%，体积加权平均含油饱和度为 78.67%；

YT2 号白垩系砂岩气藏体积加权平均孔隙度为 16.35%，体积加权平均含油饱和度为 63.76%

YT5 号白垩系砂岩油藏体积加权平均孔隙度为 16.034%，体积加权平均含油饱和度为 68.88%。

总储量为 $3310.4 \times 10^4 \text{ t}$ 。

二、油藏地质综合评价

油藏地质综合评价包括油藏静态特征评价、储量评价、流体特征评价、动态特征评价。以 TZ16 - 161 油藏为例，通过研究，认为：

(1) TZ16 构造 CIII 油藏主要为一非均质块状油藏。由于储层为河流相透镜状砂体相互叠加而成，形成了粒度较细的泥质粉砂岩或粉砂岩夹隔层。加之成岩初期高钙水的淋滤作用，使钙质胶结层成层分布，导致整个油藏具有多油层的层状特征。高渗层与低渗层相间分布，使油藏复杂化。

(2) 油藏含油面积 24.9 km^2 ，含油高度为 25 m，为中等规模油藏。

(3) 储层物性主要受沉积和成岩作用控制。相对来说，在岩性较混杂的层段，如河道边缘沉积或洪水期主河道形成的含砾砂岩等，孔隙度一般在 11% ~ 16% 之间或更低，渗透率为 $(100 \sim 500) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在河心及主河道两边的分选较好的细砂岩中物性最好，孔隙度在 16% ~ 22% 之间，渗透率为 $(500 \sim 1800) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在分流河道间或钙质胶结强烈的层段，由于泥质或钙质含量高，使物性变差，孔隙度一般小于 11%，渗透率小于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

(4) 油藏埋深在 3800 ~ 3850 m 之间，属中等深度油藏（特指在塔里木这一特殊环境）。

(5) 流体在平面及纵向上的分布表现一定的差异性。在平面上，流体的分布主要受构造和油源（或构造活动引起的原油的调整）控制；在纵向上，流体的分布主要受岩性和流体性质控制。

(6) 地层压力属异常高压，压力系数为 1.14 ~ 1.18。地层温度在 115 左右，稍偏低。地温梯度为 $2.8 \sim 3.2 / 100 \text{ m}$ 。

(7) 根据计算结果，TZ16 构造 CIII 油藏储量为 $1041.8 \times 10^4 \text{ t}$ ，可称为一个小型油田。根据计算，该油藏单位面积控制储量为 $41.84 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ ，属低储量丰度油藏。计算结果表明，该区单井采油指数在 $0.51 \sim 16.39 \text{ t/(m} \cdot \text{MPa} \cdot \text{d)}$ 之间，平均 $4.96 \text{ t/(m} \cdot \text{MPa} \cdot \text{d)}$ 。试

油结果流度大于 $61.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2/(\text{MPa}\cdot\text{s})$ ，为高产油藏。

根据 PVT 分析结果，TZ16 构造原油饱和压力仅为 7.09 MPa，地饱压差达 38.42 MPa，故在开采后期，天然能量仍较充足，可充分利用地层的天然能量进行开采。

根据 TZ161 井等试油和目前生产结果分析：TZ161 井在 1996 年 3 月试油时地层中部压力 45.71 MPa，经过一年的开采，压力递减为 44.47 MPa，仅降低 1.3 MPa，表明地层能量较充足，油藏或底水水体较大。

综上所述，TZ16 - 161 油藏为中等储量，低丰度，高产能的高压、块状、底水黑油油藏。

第十节 建 议

一、TZ16 - 161 井区

(1) 该油藏原油地层饱和压差大，弹性能量较充足，但由于属深层油藏，在开发后期很容易产生能量亏空，故应及时注入补充能量。

(2) 由于地层钙质胶结强烈，开发中应配合酸化压裂措施。

(3) 目前采油速度虽然不算小，但控制井网太小，且生产井布局极不合理（基本处于一条线上）。建议在 TZ16 井进行侧钻，侧钻方向为北东向，目的层为 TZ16 号构造次高点。在 TZ161 井与含油边界间，沿南西方向布井一口。目的在于扩边，便于后期注水、剩余油的开采和加深对油藏的正确认识。

(4) 目前采油速度是由于水平井的高产造成的。按水平段计算的单米采油指数是极低的，并未充分利用天然能量进行开采。应考虑在开发后期多利用这种方式开采以提高采收率。

(5) 由于储层非均质性较严重，且具有一定的成层性，在开采后期层间无越流现象将会更加突出，应考虑一定数量的分层开采，以解决层间无越流现象，便于后期注水和提高采油率。

(6) 加大井网密度，完善注采井网，向北东、南东方向部署扩边井，进一步揭示油藏性质。

二、轮南低凸起奥陶系潜山碳酸盐岩

根据目前钻探成果及综合评价结果：本区下步重点勘探区主要有 6 个区域：STM 断垒带东段、LN34 井南、LN18 - LG1 井北面、LN18 井西北部、LG2 井西部、LN17 井区。

根据本区储层分布的不均匀性及油气藏分布复杂性，在探井的布置上遵循以下 5 个原则：(1) 探井均匀分布于不同的油气藏单元内；(2) 充分应用储层综合评价结果，选择各种信息最有利的叠合区选择井点；(3) 离开大断层，靠近小断层；(4) 以寻找黑油为主，寻找气藏为辅；(5) 尽量远离盖层不发育区及干井区。根据以上原则，初步选择 7 口探井。其中 LG3 井位于 LN19 井西北面 3.8km，LC4 井位于 LK44 井西北面 2.3km，LG5 井位于 LN44 井北面 2.3km，LC6 井位于 LN44 井东北面 3.7km，LC7 井位于 LG2 北面 3.4km，LG8 井位于 JF121 井西北面 4.6km，LC9 井位于 LN17 井西南面 2.5km。从振幅平面变化图上分析：LG4 井、LG6 井、LG9 井均位于低振幅分布区，处于最有利区；LG3 井、LG5 井位于

中振幅分布区，处于较有利区。从（0 ~ 40ms）平均波阻抗平面变化图上分析：LG3 井、LG4 井、LG5 井、LG6 井、LG8 井、LG9 井均位于低波阻抗分布区处于最有利位置。从 I 类低阻抗平面变化图分析：LG3 井、LG4 井、LG5 井、LG6 井、LG8 井均位于最有利分布区，从相干数据体切片上分析：LG3 井、LG4 井、LG5 井、LG6 井、LG7 井均处于相干较差区域，处于储层最有利分布区。从构造图上分析：LG3 井、LG4 井、LG5 井、LG6 井、LG7 井、LG8 井、LG9 井均靠近小断层，处于有利的区域。综合以上 6 种信息，LG5 井、LG6 井有 5 种信息表明处于最有利区域。LG3 井、LG4 井、有 4 种信息表明处于最有利区域，LG7 井、LG8 井、LG9 井有 3 种信息表明处于最有利区域。

参 考 文 献

- 1 张一伟, 熊琦华等. 陆相油藏描述. 北京: 石油工业出版社, 1997
- 2 [美] P. A. 迪基, 闵豫译. 石油开发地质学 (第三版). 北京: 石油工业出版社, 1991
- 3 罗蛰潭. 油层物理. 北京: 地质出版社, 1985
- 4 [美] G. 安德森. 取心和岩心分析手册. 北京: 石油工业出版社, 1986
- 5 吴元燕, 陈碧钰. 油矿地质学. 北京: 石油工业出版社, 1996
- 6 顾家裕. 塔里木盆地沉积层序特征及其演化. 北京: 石油工业出版社, 1996
- 7 熊琦华. 现代油藏描述技术与应用. 石油学报, 1994, 12: (增刊) 1~40
- 8 张一伟. 枣园油田油藏精细描述技术与方法. 石油学报, 1994, 12 (15) (增刊): 10~18
- 9 裘亦楠, 薛淑浩等. 油气储层评价技术. 北京: 石油工业出版社, 1994
- 10 胡见义, 赵文智, 钱凯等. 中国西北地区石油天然气地质基本特征. 石油学报, 1996, 7 (3)
- 11 H. H. Haldorsen 等. 张申译. 油藏描述中的挑战. 国外油气勘探, 1996 (2)
- 12 杨通佑, 范尚炯, 陈元千等. 石油及天然气储量计算方法. 北京: 石油工业出版社, 1991
- 13 R. J. 韦默. 三角洲和浅海砂岩的沉积、构造及石油分布. 北京: 石油工业出版社, 1982
- 14 樊家琨. 应用多元分析. 河南: 河南大学出版社, 1993
- 15 郭荣坤, 王贵文, 唐为清. 测井沉积学解释计算机辅助系统. 北京: 石油工业出版社, 1996
- 16 陈立官主编. 油气田地下地质学. 北京: 地质出版社, 1985
- 17 R. P. 莫尼卡德. 测定储集岩性质的岩心分析. 北京: 石油工业出版社, 1987
- 18 刘宝君, 张锦泉主编. 沉积成岩作用. 北京: 科学出版社, 1992
- 19 李克向主编. 保护油气层钻井完井技术. 北京: 石油工业出版社, 1993
- 20 梅博文主译. 储层地球化学. 陕西: 西北大学出版社, 1992
- 21 王铁冠, 张枝焕译. 油藏地球化学. 北京: 石油工业出版社, 1997
- 22 裘亦楠等. 中国油气储层研究论文集. 北京: 石油工业出版社, 1993
- 23 郑俊茂. 碎屑储集岩的成岩作用研究. 北京: 中国地质大学出版社, 1989
- 24 西北大学地质系编译. 碎屑岩的成岩作用. 陕西: 西北大学出版社, 1986
- 25 [美] P. A. 迪基. 闵豫译. 石油开发地质学 (第三版), 北京: 石油工业出版社, 1991
- 26 史乃光. 油气井测试. 北京: 中国地质大学出版社, 1991
- 27 刘能强. 实用现代试井解释方法. 北京: 石油工业出版社, 1992
- 28 罗蛰潭. 油层物理. 北京: 地质出版社, 1985
- 29 刘泽容等. 油藏评价和预测. 北京: 石油工业出版社, 1993
- 30 P Kearey & M Brooks An Introduction to Geophysical Exploration Blackwell Scientific Publication Oxford, 1991.
- 31 A Verruijt Groundwater Flow (Second Edition) . The Macmillan Press LTD, 1982
- 32 杨绪充. 含油气区地下温压环境. 北京: 石油大学出版社, 1993
- 33 [美] G. 安德森. 取心和岩心分析手册. 北京: 石油工业出版社, 1986
- 34 吴元燕, 陈碧钰. 油矿地质学. 北京: 石油工业出版社, 1996

- 35 运华云. 储层综合评价技术在埕岛油田的应用. 测井在油藏描述中的应用. 北京: 石油工业出版社, 1992
- 36 裘亦楠, 薛淑浩等. 油气储层评价技术. 北京: 石油工业出版社, 1994
- 37 胡见义, 赵文智, 钱凯等. 中国西北地区石油天然气地质基本特征. 石油学报, 1996, 7 (3)
- 38 H H Haldorsen 等. 张申译. 油藏描述中的挑战. 国外油气勘探, 1996 (2)
- 39 杨通佑, 范尚炯, 陈元千等. 石油及天然气储量计算方法. 北京: 石油工业出版社, 1991
- 40 R J 韦默. 三角洲和浅海砂岩的沉积、构造及石油分布. 北京: 石油工业出版社, 1982
- 41 樊家琨. 应用多元分析. 河南: 河南大学出版社, 1993
- 42 张一伟. 地质统计学在油藏描述中的应用. 北京: 石油大学出版社, 1992
- 43 王仁铎. 线性地质统计学. 北京: 地质大学出版社, 1992
- 44 Summers D M, Surdam R C. Diagenesis and Preservation of Porosity in Norphlet Formation (Upper Jurassic), Southern Alabama, Dixon S A AAPG, 1989, 73 (6)
- 45 Surdam R C, Crossey L J et al Organic - inorganic interaction and sandstone diagenesis AAPG, 1989, 73 (2): 1 ~ 23
- 46 Surdam R C and L J Crossey. Organic - inorganic reactions during progressive burial: key to porosity/ permeability enhancement and/ or preservation: Philosophical Transactions of the Royal of London, Series A, 1985, (315): 135 ~ 156
- 47 Wood J and T Hewitt. Reservoir diagenesis and convective fluid flow. in D. A. McDonald and, R C Surdam, eds. Clastic diagenesis AAPG Memoir, 1984, (37): 99 ~ 110
- 48 Meshri I D. On the reactivity of carbonic and organic acids and generation of secondary porosity, in D L Gautier, ed. Roles of organic matter in sediment diagenesis SEPM Special Publication, 1986, (38): 123 ~ 128
- 49 Surdam R C and MacGowann D B. Oil field waters and sandstone diagenesis Appl Geochem in press, 1988
- 50 Surdam R C, Roese S J and Crossey L J. The chemistry of secondary porosity. in Clastic Diagenesis (Edit by McDonald and Surdam). Am. Assoc. Pet. Geol. Mem. 1984, (37): 127 ~ 150
- 51 P Kearey & M Brooks An Introduction to Geophysical Exploration, Blackwell Scientific Publication Oxford, 1991
- 52 A Verruijt Groundwater Flow (Second Edition) . The Macmillan Press LTD, 1982
- 53 W F Ebanks, Jr. Flow Unit Concept - Integrated Approach to Reservoir Description for Engineering Projects AAPG, Ann, Mtg, Los Angeles (abs), 1987
- 54 J P Hobson, C C Hearn and M L Fowler. Reservoir Characterization for Simulation, Hartzog Draw Field, Wypming in Reservoir Characterization, Lake, L L H. B. Carroll, Jr, eds Academic Press, 1986
- 55 P M Wong, F X Jian and I J Taggart A Critical Comparison of Neural Networks and Discriminant Analysis in Lithofacies, Porosity and Permeability Predictions Journal of Petroleum Geology, April, 1995, 18 (2): 191 ~ 206

- 56 Rogers S J, Fang J H, Karr C L, and Stanley D A. Determination of Lithology from Well Logs Using a neural Networks. AAPG Bull, 1992, 76: 731 ~ 739
- 57 Rogers S J, Chen H C, Kopaska - Merkel P C and Fang J H. Prediction of permeability from porosity using artificial neural networks. AAPG Bull, 1995 (in review)
- 58 Alabert F G et al. Heterogeneity in a complex turbiditic reservoir: stochastic modeling of facies and petrophysical variability. SPE 20604, 1990
- 59 Arya Atul. Dispersion and reservoir heterogeneity, U. M. I Dissertation information service 1986
- 60 Belfield W C. Simulation of subseismic faults using fractal and multifractal geometry. SPE 24751, 1992
- 61 Crane S D and Tubman K M. Reservoir variability and modeling with fractals. SPE 20606, 1990
- 62 Deutsch C V and Journel A G. The application of simulated annealing to stochastic reservoir modeling. SPE 235565, 1989
- 63 Deutsch C V and Journel A G, GSLIB: Geostatistical software library and user's guide. Oxford University Press, 1992
- 64 Dowd, P A. A Review of recent developments in geostatistics computer & geosciences, 1992, 17 (10): 1481 ~ 1500
- 65 Dubrule O. A Review of Stochastic Models for Petroleum Reservoirs. Geostatistics M. Armstrong (ed), Kluwer Academic Publisher, 1999, (2): 493 ~ 506
- 66 Dykstra H and Parsons R L. The prediction of oil recovery by water flood. API secondary recovery of oil in the United States, 2nd ed. API, 1950, 371 ~ 739
- 67 Haldorsen H H. Stochastic modeling. JPT, 1990, 404 ~ 412
- 68 Hardy H H. The generation of reservoir property distributions in cross section for reservoir simulation based on core and outcrop photos. SPE 23968, 1992
- 69 Hewett T A et al. Conditional simulation of reservoir heterogeneity and performance. SPE 18326, 1988
- 70 Hewett T A et al, Fractal distributions of reservoir heterogeneity and their influence on fluid transport. SPE 15386, 1986
- 71 Journel A G and Alabert F. Stochastic indicator models of reservoir heterogeneities. SPE 18324
- 72 Journel A G. Fundamentals of Geostatistics in five lessons, American Geophysical Union, Washington, D. C, 1990
- 73 Journel A G and Alabert F. Non - Gaussian data expansion in the earth science. Terra Nova, 1989, (1): 123 ~ 134
- 74 Journel A G and Alabert F. New Method for Reservoir Mapping. JPT, 1990
- 75 Journel A G and Juijbregts C J. Mining geostatistics. Academic Press, New York, 1978
- 76 Journel A G. Geostatistics: models and tools for the earth science. Math, Geology, 1986, 18 (1): 119 ~ 140
- 77 Journel A G. Geostatistics for reservoir characterization. SPE 20750, 1990
- 78 Kirkpatrick S, Gelatt et al. Optimization by simulated annealing. SCIENCE. 1983, (220):

- 79 Lake Larry W. A review of heterogeneity measures used in reservoir characterization N M T E C H 890024, 1989
- 80 Matheron G. Principles of geostatistics Economic Geology, 1963, (58): 1246 ~ 1266
- 81 Perez G and Chopra A K. Evaluation of fractal models to describe reservoir heterogeneity and performance SPE 22694, 1991
- 82 Sen M K et al. Stochastic reservoir modeling using simulated annealing and genetic algorithm. SPE 24754, 1992
- 83 Tomutsa L et al, Geostatistical characterization and comparison of outcrop and subsurface facies Shannon Shelf Sand Ridges, SPE 15127, 1986
- 84 Verly G. Sequential gaussian simulation: a monte carlo method for generating models of porosity and permeability, generation, accumulation and production of Europe s hydrocarbon III, A. M. Spencer (Ed), Special publication of the European association of petroleum geoscientists, Springer - Verlag Berlin Heidelberg 1993, 3