

# 剩余油描述与预测

SHENGYUYOU  
MIAOSHU  
YU YUCE

谢俊 张金亮 编著

石油工业出版社



## 内 容 提 要

本书从油藏剩余油的形成机理研究出发,运用多种技术手段研究了剩余油的微观、宏观分布特征,介绍了多种实用的定量确定剩余油饱和度的技术和各种方法对应的应用实例,总结了剩余油分布规律和影响剩余油分布的地质、开发因素,最后给出了常规的、非常规的挖掘剩余油潜力的方法技术,对高含水期油藏认识剩余油、开采剩余油具有重要的指导作用。

本书可供从事油田开发方面的管理人员、工程技术人员、开发地质人员、科研人员以及有关院校石油、地质专业的师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

剩余油描述与预测/谢俊,张金亮编著.

北京:石油工业出版社,2003.10

ISBN 7-5021-4394-7

I. 剩…

II. ①谢…②张…

III. 残余油饱和度-研究

IV. TE327

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第084483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)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092毫米16开本10.75印张270千字印1—1000

2003年10月北京第1版 2003年10月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-4394-7/TE·3076

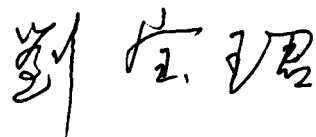
定价:26.00元

## 序

我国已开发油田经过长期的注水开发，目前大部分油田已进入高含水期，搞清剩余油的形成机理，认识剩余油的分布规律，采取有针对性的技术政策和调整挖潜措施，合理有效开发好剩余油、提高油田采收率是我国已开发油田最紧迫的任务。近年来，对于剩余油分布规律的研究，国内外油藏工作者做了大量的工作，也取得了很多很好的成果，但毕竟确定剩余油分布是一项十分复杂和困难的系统工程，涉及各种不同的技术和多个学科领域，仍有不少问题需要油藏地质和油田开发人员进一步努力解决。山东省油气勘探开发工程技术研究中心在油藏剩余油的微观形成机理和宏观分布规律以及有针对性的调整挖潜措施方面取得了很大进展，我的学生和助手谢俊博士、张金亮教授所著《剩余油描述与预测》一书为部分研究成果的综合和总结。

作者在研究思路做到了油田地质、油藏开发及采油工艺的密切结合，油藏描述、油藏工程及油藏数值模拟技术的密切结合，剩余油宏观、微观的定性描述及剩余油饱和度定量描述的密切结合，认识油层和改善油层的密切结合；在研究方法上采用了多项先进的研究方法和技术，如：油藏精细描述技术、精细油藏数值模拟技术、动静态描述相结合技术、多学科结合研究技术、系统分析技术等；在研究内容上进行了剩余油的微观形成机理研究、剩余油的微观分布规律和宏观分布规律研究，运用了多种实用的定量确定剩余油饱和度技术，并结合油田的生产实践对各种技术方法进行了实例分析，从地质、地震、测井、油藏工程和生产动态等多个方面综合揭示了剩余油分布特征和分布规律，对影响剩余油分布规律的地质、开发因素进行了分析，最后提出了针对不同油藏类型及不同开采条件下应采取的相应调整挖潜措施。

该书是关于剩余油分布规律研究与调整挖潜方面的一部综合性著作，内容丰富、资料准确可靠、论据充分、观点明确，无论从油田开发实践的意义还是从油藏剩余油描述理论来看，都具有较高的实用价值和学术水平，对同行有重要参考意义。值此著作付梓出版之际为序，以表祝贺之忱。



中国科学院院士、教授

2003年6月30日

# 前 言

国内外许多油田已进入高含水开采期，开采难度日益增大。加强剩余油分布规律和调整挖潜措施的研究对于搞好油田的后续开发、稳定和提高采收率具有重要的现实意义。从 20 世纪 80 年代开始，研究剩余油分布、提高采收率已成为世界各国石油生产中普遍关注的问题。国内外许多大的石油公司和石油科技工作者都在积极探索应用不同方法研究水驱油田特高含水期的剩余油分布和调整挖潜。将剩余油分布的主要研究手段：测井、地震、油藏工程、岩心分析、油藏数值模拟和试井等方法应用于剩余油宏观分布研究、微观分布研究和饱和度研究中，并对这些方法进行了分析比较，做出了比较全面的评价。

山东省油气勘探开发工程技术研究中心经过多年的努力攻关，开拓了一条把多学科、多方法综合应用于研究油藏剩余油的行之有效的途径，得到了现场的广泛认可，经辽河、华北和胜利等油田的实际应用，获得了一大批研究成果，取得了可观的经济效益和明显的社会效益。作者结合多年从事油田开发的工作实践，在前人研究的基础上，广泛收集了国内外已有论著和最新研究成果，综合应用沉积学、测井地质学、地球物理学、地震地层学、油藏工程学等多学科的理论、方法和技术，进一步系统研究了剩余油的形成机理、剩余油的微观和宏观分布特征以及多种实用的定量确定剩余油饱和度的技术，并应用油田实际生产资料对每种研究方法和技术进行了应用实例分析，总结了剩余油的分布规律和影响剩余油分布的地质、开发因素，最后给出了常规的、非常规的挖掘剩余油潜力的方法技术，对高含水期油藏认识剩余油、开采剩余油具有重要意义。

全书共分七章，第一章主要介绍了剩余油研究的目的意义、国内外研究现状以及主要的研究方法和技术；第二章介绍了砂岩油藏和碳酸盐岩油藏剩余油的形成机理；第三章介绍了剩余油的微观分布研究技术；第四章介绍了剩余油的宏观分布研究技术；第五章介绍了目前国内常用的定量确定剩余油饱和度的实用技术；第六章总结了剩余油的分布规律以及影响剩余油的因素；第七章分析了针对不同油藏剩余油分布特征所应采取的有针对性的调整挖潜措施并介绍了实际应用效果。

本书主要由谢俊博士和张金亮教授编写，梁会珍也参加了部分章节的编写工作。在本书的完成过程中，得到了辽河、华北、胜利、大庆等油田和山东省油气勘探开发工程技术研究中心、山东科技大学的大力支持，中国科学院院士刘宝珺教授还在百忙之中为本书作序，谨在此向为本书的出版给予支持和关心帮助的单位和朋友表示衷心的感谢。

由于剩余油分布规律和调整挖潜措施研究涉及多个学科领域，研究难度大，加之作者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请读者批评、指正。

作 者

2003 年 6 月

# 目 录

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 第一章 概论                 | (1)   |
| 第一节 研究剩余油的目的和意义        | (1)   |
| 第二节 国内外研究现状与进展         | (2)   |
| 第三节 主要研究方法和技术          | (3)   |
| 第二章 剩余油形成机理研究          | (13)  |
| 第一节 砂岩油藏剩余油形成机理        | (13)  |
| 第二节 碳酸盐岩油藏剩余油形成机理及分布规律 | (16)  |
| 第三章 剩余油微观分布研究技术        | (23)  |
| 第一节 微观物理模拟技术           | (23)  |
| 第二节 物理化学性质及组分分析技术      | (29)  |
| 第三节 孔隙结构及微观驱替特征分析技术    | (31)  |
| 第四节 计算机随机网络模拟技术        | (35)  |
| 第四章 剩余油宏观分布研究技术        | (38)  |
| 第一节 地震技术法              | (38)  |
| 第二节 沉积相分析法             | (50)  |
| 第三节 油藏动态分析法            | (57)  |
| 第四节 油藏数值模拟法            | (67)  |
| 第五节 储层流动单元研究法          | (75)  |
| 第五章 剩余油饱和度确定技术         | (84)  |
| 第一节 岩心分析法              | (84)  |
| 第二节 示踪剂测试法             | (90)  |
| 第三节 测井技术分析             | (103) |
| 第四节 物质平衡法              | (110) |
| 第五节 水驱特征曲线法            | (111) |
| 第六节 综合分析法              | (114) |
| 第六章 剩余油分布规律及影响因素分析     | (139) |
| 第一节 剩余油宏观分布模式          | (139) |
| 第二节 剩余油分布规律研究          | (142) |
| 第三节 剩余油影响因素分析          | (145) |
| 第七章 剩余油调整挖潜措施研究        | (149) |
| 第一节 剩余油常规调整挖潜措施        | (149) |
| 第二节 剩余油非常规调整挖潜措施       | (154) |
| 参考文献                   | (161) |

# 第一章 概 论

20 世纪,我国石油工业经历了 50 年代恢复和探索、60—70 年代高速发展和 80 年代以后稳定发展的三大历史阶段。1959 年大庆油田的发现,从根本上改变了我国石油工业的面貌,1965 年结束了对进口石油的依赖,实现了自给;在 60—70 年代,胜利、辽河、长庆、华北等油气田的相继发现和开发使全国原油产量迅速增长,1978 年产量突破  $1 \times 10^8 \text{t}$  大关,从此我国跨入了世界产油大国的行列。到目前为止,全国 25 个省、市、自治区和近海海域发现了 688 个油气田,形成了六大油气区,建成了大庆、胜利、辽河、新疆、四川、长庆、渤海和南海等 24 个油气生产基地。全国原油产量从 1949 年的  $12.1 \times 10^4 \text{t}$  增至 2000 年的  $1.6 \times 10^8 \text{t}$ ,列世界第 5 位;2000 年天然气产量  $277 \times 10^8 \text{m}^3$ ,列世界第 15 位。全国第二轮油气资源评价结果表明,我国石油地质资源量为  $940 \times 10^8 \text{t}$ ,结合目前技术经济条件分析,最终石油可采资源量为  $140 \times 10^8 \text{t}$  左右。

自 20 世纪 80 年代以来,由于国民经济的快速增长和对环境保护要求的提高,对石油天然气的需求逐步加大,我国从 1993 年起成为石油净进口国,天然气供求矛盾也进一步突出。因此,加强剩余油分布规律研究、认识已开发油田的生产潜力,对国民经济的发展起着重要作用。

## 第一节 研究剩余油的目的和意义

我国东部注水开发的许多主力油田已进入中高含水期。一方面新增储量日益困难,勘探程度高,新发现油田规模总体呈变小趋势,而且新增探明储量中的低渗透与稠油储量所占比例逐年加大,储量品质变差,新增及剩余储量可动用性较差;另一方面,我国注水开发油田“三高二低”的开发矛盾突出,即综合含水率高、采出程度高、采油速度高、储采比低、采收率低,还有大量石油采不出来。这种开采程度高、采收率低的严峻局面对石油开发领域的研究提出了更高要求。

我国油田地质情况复杂,原油性质差异大,水驱油过程不均匀,到了勘探开发的后期,尤其是在那些勘探程度较高的老油田,经过一次、二次采油后仅能采出地下总储量的 30% 左右,这意味着有 60%~70% 的剩余石油仍然残留在地下成为剩余油,这些残留在地下的剩余石油储量对于增加可采储量和提高采收率是一个巨大的潜力。据估计,如果世界上所有油田的采收率提高 1%,就相当于增加全世界 2 至 3 年的石油消费量,因此,加强剩余油分布规律研究、提高石油采收率一直是油田开发地质工作者和油藏工程师研究的主题。

我国油田多为陆相沉积多油层储层,层间、层内和平面上渗透率变化大,而我国近 90% 油田均采用注水开发方式,由于非均质性严重,各层吸水量差异大,注入水往往沿高渗透带推进,使纵向上和平面上水推进不均匀,造成水驱波及体积小,注入水过早向油井突进,油水分布犬牙交错,剩余油分布既零散又有相对富集部位。由于大量注入水的影响,地层情况变得异常复杂,尤其是剩余油以什么状态、什么方式、具体分布在什么地方,剩余油饱和度高的地区在哪里等,这些定量描述剩余油分布的问题正是确定和实施三次采油方案以

及有效提高采收率的关键。因此,开发后期的主要任务就是要以剩余油饱和度为主要内容,进行精细化、量化、动态化、预测化的油藏描述,同时要把工作重点逐渐转向井间和整个油藏的剩余油分布研究上。

根据我国主要产油区已处于开发成熟度较高的特点,如何认识剩余油、提高剩余油采收率对于我国石油工业的发展具有重要的战略意义。

## 第二节 国内外研究现状与进展

剩余油分布规律研究是一项世界性难题,也是地质、地球物理、油藏工程等不同领域的前沿性研究课题。很久以前国内外就已认识到了这一课题的重要,曾经开展过岩心水驱油实验、平面乃至立体物理模型实验、油藏模拟、矿场检查井取心、分层找水等工作,为剩余油分布提供了宝贵的资料。注水开发油田的剩余油量是油田开发方案调整和提高采收率的物质基础,各个国家都非常重视剩余油分布的研究。美国于1975年成立了剩余油饱和度委员会,M.M.Chang(1988)从宏观上将剩余油饱和度度量分为单井、井间和物质平衡法三种。前苏联在杜玛兹油田专门打了24口评价井来研究油田水淹后期的剩余油分布的方法。现代地质技术、测井技术和油藏工程技术,特别是现代测井测量技术和处理解释技术的迅猛发展,为剩余油分布研究提供了更为有利的条件。国外一些公司如Schlumberger、Shell公司近年推出了测井数据处理软件、地层评价软件和地层测试数据处理软件,为剩余油预测和油气评价提供了新的思路和技术。国外研究剩余油主要包括岩心分析、示踪剂测试、数值模拟、测井、试井、电阻率等多种方法,近年来提出了“以定时、定位、定量计算剩余油饱和度为依据,设计加密井位置”的新设想。目前,国际上确定储层中剩余油的分布仍然是石油上游工业迄今尚未得到完善解决的重大课题,描述宏观及微观非均质性储层中驱替后剩余油分布已成为各种国际会议讨论的主题。20世纪90年代以来,主要产油国重视了密闭取心的分析和第一手资料的收集,完善了动态监测系统,加强了油藏经营管理,使剩余油饱和度分布的研究精度有较大提高。在油田开发过程中,特别当油田进入中后期开发时,了解和掌握油藏中剩余油饱和度的宏观和微观的时空分布,是油藏开发调整和改善油藏开采现状的直观再现,是油藏经营管理决策的重要依据。因此,剩余油饱和度的空间分布研究备受国内外各大石油生产国的重视。

我国的剩余油分布研究工作早在“六五”期间就已开始,相继开展了油藏、油田、区块、单井以及岩心等不同地质规模下的剩余油的空间位置、形态、数量以及剩余油随时间变化的研究工作,主要采用了油藏数值模拟、井间示踪剂、神经网络、沉积相、测井、灰色理论及数理统计等技术研究剩余油分布规律,为油田方案调整提供了依据。我国石油科技工作者经过二十多年的摸索探讨,形成了一套陆相地层的剩余油研究方法。剩余油地质研究已由单学科分析向多学科综合研究方向发展,除常规的沉积相细分等地质研究外,还加强了油层物理学、油气渗流力学和油藏工程学等有关原理的应用。现在主要采用小层沉积相分析法、动态分析法、油藏数值模拟法、油藏工程法、C/O比测井法和钻井取心等研究剩余油分布。目前,我国研究剩余油分布的技术和手段基本具备,同国外主要产油国的技术水平接近,但在油藏管理方面和动态监测系统的重视程度方面存在一定差距。

在认识剩余油的分布规律后,如何高效合理开采剩余油仍是当前面临的难题。我国石油科技工作者根据各种油田类型的地质特点,研究出了多种有效的改善油藏开采技术,例如辽

河兴隆台油田的改变液流方向技术、吉林扶余油田的周期注水技术、胜利胜坨油田的封堵大孔道技术、大庆喇嘛甸油田的综合调整技术、江汉王场油田的单井吞吐技术、华北莫州油田的降压开采技术等，均取得了良好的社会经济效益。辽河油田牛 12 断块的东营组油层属河道砂沉积，注入水沿河道内油层底部高渗透带窜流，形成了强烈的水洗带，在河道上的油井几乎全部水淹，形成了一个强水淹区，上部剩余油动用程度差，针对油田开发暴露出的矛盾，该油田积极加强剩余油精细描述和下步挖潜对策研究工作，在此基础上，筛选经济有效的堵剂，采取了区块整体封堵大孔道控水稳油技术。生产实施 1 年后，该油藏油水井产吸剖面均有明显改善，累计增油超过  $3.5 \times 10^4 \text{t}$ ，投入产出比达 1:9，这是我国东部油田采取堵水措施取得成功的典型实例。

国内外多数油田经过多年的开发已进入高含水采油期，如何正确认识油层、改善油层开采状况仍是今后石油开采领域的主要研究方向。我国各类油藏性质差异较大，今后需要针对不同类型油藏的地质特征和开采特点，做到机理研究与现场试验结合，室内物理模拟与油藏数值模拟相结合，单项方法与优化配套技术相结合，油田地质、油藏工程与采油工艺技术相结合，油藏描述、油藏工程与油藏数值模拟技术相结合，剩余油宏观、微观的定性描述与剩余油饱和度定量描述相结合，认识油层和改善油层的密切结合，以形成我国油田高含水期改善开发效果的方法和理论，为老油田挖潜提高新方法、新技术。

### 第三节 主要研究方法和技术

从 20 世纪 80 年代开始，研究剩余油分布、提高采收率问题已引起世界各国石油生产者的普遍关注。经多年的研究，剩余油饱和度测定方法及技术得到了很大发展和改进。在钻井取心方面，除了普通取心外，目前还采用海绵取心、保持压力取心等；在开发测井方面，除了提高常规测井技术外，还补充了碳氧比测井、介电测井、核磁测井，并结合采用测—注—测技术、时间推移技术等；另外，我国许多油田对单井示踪剂方法进行了研究和试验，并在实际生产中得到了应用。中国石油勘探开发研究院、华北油田等单位还开展了利用油水井注、采剖面测井资料求油层剩余油饱和度的研究。所有这些方法和技术为人们提供了较为准确的剩余油饱和度估计，但是它们提供的都是井点周围局部范围内的平均剩余油饱和度，而未能反映出剩余油在井间或整个油藏的分布情况。

目前已有不少学者把井点附近剩余油垂向分布与反映油藏动态变化的基本规律相联系，采用动态模拟方法、流管方法和插值方法（如克里金方法）计算井间剩余油分布，并取得了一定成效。但是，这些方法对地层都作了许多理想的假设，而实际中地层是非均质性的，仅靠井点有限的数数据很难准确反映地层的真实情况，因此在应用上受到了限制。井间示踪法是将放射性示踪剂或化学示踪剂从注入井注入，在生产井或观察井对其流出物进行监测。通过分析产出曲线定性描述井间储层的连通性，定量地确定井间油藏剩余油饱和度。由于示踪剂在地层中的流动直接反映地层和流体的性质以及流动的真实情况，若能有效地结合其他资料进行正确解释，便可真实地反映层间和层内不同流管间的非均质性，能够比较准确地确定井间的剩余油饱和度分布。因此，目前国内外许多油田都在进行这方面的研究工作。

#### 一、剩余油的主要研究方法

1996 年，张昌民、樊中海等把剩余油的研究方法归结为三大类：一维纵向剩余油分布研究、二维平面剩余油分布研究和三维空间剩余油分布研究，并将这些方法进一步细分为七



小类（图 1-1）。

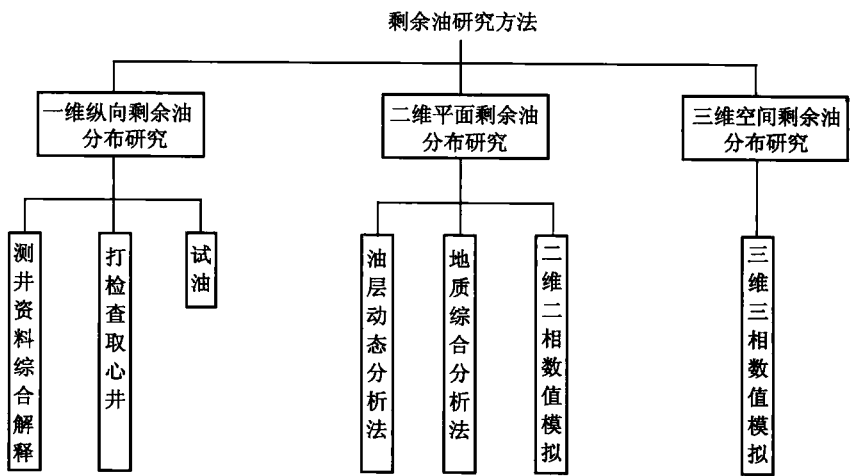


图 1-1 剩余油研究方法分类（张昌民等，1996）

1997 年，俞启泰教授认为不同地质规模（剩余油研究的地质规模即为油藏描述的不同“体积规模”，图 1-2）的剩余油所包含的内容和研究方法是不同的。因此，需要研究剩余油在不同地质规模存在的空间位置、形态、数量及其随时间的变化（剩余油的时空变化规律），从而提出了剩余油研究的对象应与不同油层体积规模相对应，即分为四个级别：微规模（microscopic scale）、小规模（macroscopic scale）、大规模（megascopic scale）、宏规模（gigascopic scale），各级规模研究的内容和方法也不同（表 1-1）。

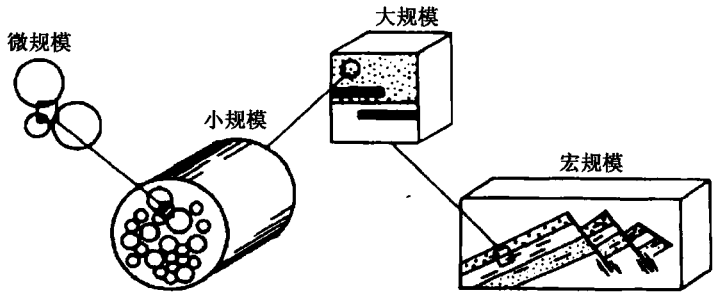


图 1-2 与多孔介质平均体积相联系的油藏描述规模（俞启泰，1997）

表 1-1 剩余油研究的体积规模特征

| 体积规模 | 油藏描述内容                                                                 | 剩余油研究             | 主要研究方法                 |
|------|------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------|
| 微规模  | 包括颗粒的研究、孔隙尺寸的分布、孔壁的粗糙度、充填的结构、孔喉的粘土衬、孔隙类型、矿物特征、胶结影响以及在扫描电镜和薄片中可以识别的其他特点 | 剩余油在孔隙内部的分布、数量和性质 | 扫描电镜、薄片、光刻微物理模型、原油性质分析 |

续表

| 体积规模 | 油藏描述内容                                                              | 剩余油研究           | 主要研究方法                     |
|------|---------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------|
| 小规模  | 这是与典型的岩心有关的规模, 在这个规模上, 通常确定油藏岩石特性: 孔隙度、渗透率、分散性、压缩性、相对渗透率、毛细管力与饱和度关系 | 剩余油饱和度          | 实验室中的各种岩心试验, 包括驱替试验和饱和度测量等 |
| 大规模  | 描述水力单元和流体流动的主要障碍, 建立单元油藏的大小、形状、方向、空间布局和划分间隔                         | 剩余油分布状况和平均含油饱和度 | 一些油藏工程测量, 如压力测试、示踪剂测试、测井研究 |
| 宏规模  | 油藏规模                                                                | 油藏级规模的平均        | 物质平衡方法等                    |

注: 据 1997 年俞启泰资料整理

显然, 剩余油研究的目标应和不同级别的规模相对应。例如, 岩心测量的饱和度、测井方法解释的饱和度、物质平衡法计算的饱和度, 它们的意义不同, 不能互相取代。

剩余油研究的内容及相应的规模级别见图 1-3。根据国内外研究状况, 可把剩余油研究分为三大部分。第一部分是剩余油宏观分布研究。它们对应的体积规模是宏、大或小规模, 主要研究剩余油在平面上和纵向上的宏观分布状况, 为提高注入剂的波及状况服务。第二部分是剩余油微观分布研究。它们对应的体积规模是微规模, 主要是在几微米到几毫米的数量级上研究剩余油的分布状况与组分变化。第三部分是剩余油饱和度研究, 即定量地确定剩余油饱和度, 确定剩余油的开采动态, 对提高采收率方法进行经济分析与效果评价。

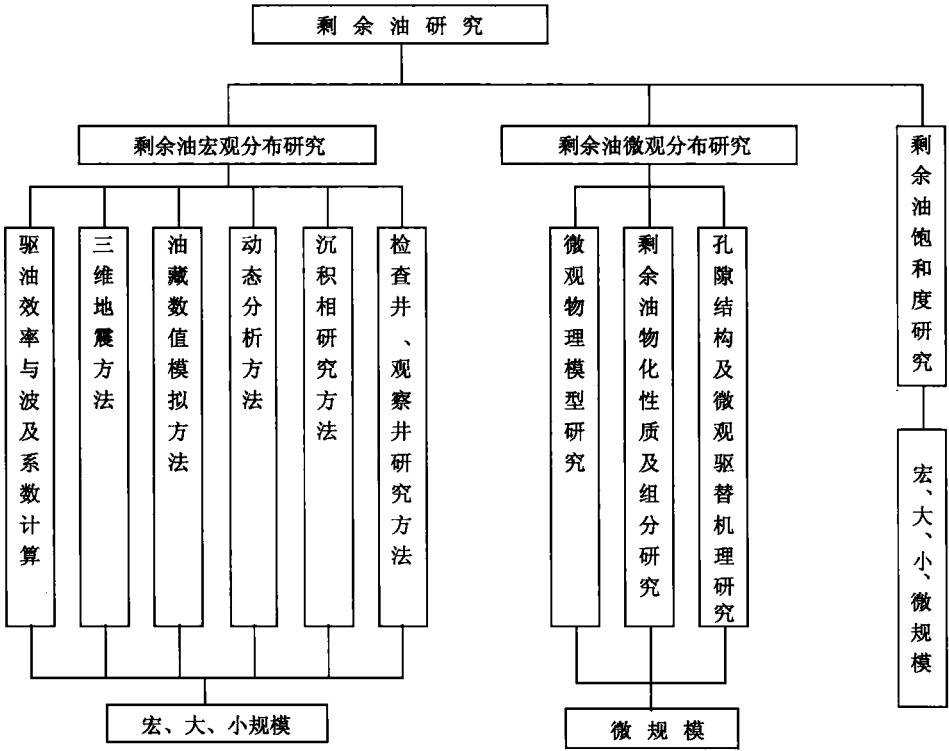


图 1-3 剩余油的研究方法及内容 (俞启泰, 1997)

对剩余油饱和度确定方法的研究，国内外给予了高度重视。根据现有资料，提出的剩余油饱和度确定方法包括 11 大类：取心法、示踪剂试井法、测井法、试井方法、井间测量法、驱油计算法、压缩系数计算法、水油比计算法、物质平衡法、生产拟合法和数值模拟法（图 1-4）。这些方法测量的范围不同，从地层中的岩心到井筒周围一定距离的平均值到整个油藏的平均值，它们对应着不同的体积规模。图 1-4 中还列出了它们测量对应的体积规模。

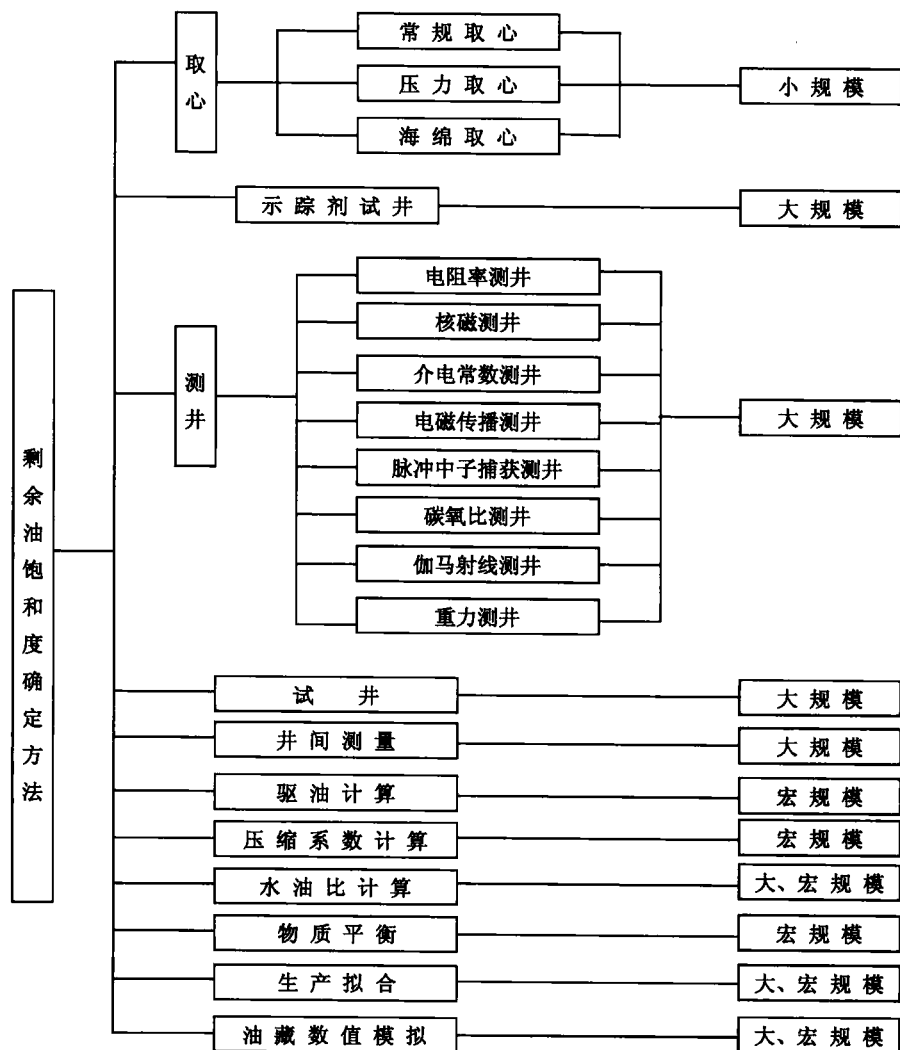


图 1-4 剩余油饱和度确定方法（俞启泰，1997）

由于它们对应不同的体积规模，因而各方法的应用对象也是不同的。从应用角度看，取心法测得的地层岩心规模的剩余油饱和度，用于经济评价和动态计算，代表性较低，精度较低，但可用来研究剩余油的变化特点。示踪剂试井和测井方法主要是确定井筒周围一定距离的平均剩余油饱和度，它的计量范围比较适中，用于油田经济评价和动态计算比较合适，因此使用价值较大。其他方法主要是确定油藏平均的剩余油饱和度，可进行宏观的经济评价与动态计算，但作为提高采收率方法其方案设计显得太粗，仅能供参考，使用价值较小，这类方法需进一步研究，但其重要性远不如取心、示踪剂试井和测井方法。

## 二、剩余油饱和度测定方法评价

### 1. 各种剩余油饱和度确定方法的比较

现有的技术被分成单井、井间和物质平衡剩余油饱和度测量三种。每种技术的优缺点列于表 1-2。根据这一评述和判断，在表中列出了在一定井眼或储层条件下，确定最佳剩余油饱和度技术的筛选准则。

表 1-2 各种剩余油饱和度确定方法的优点和缺点

| 测量方法  |          | 探测深度          | 优点                                 | 缺点                                               |                       |
|-------|----------|---------------|------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|
| 取心    | 常规       | 小于 25cm       | 使用广泛                               | 难以得到原始剩余油饱和度和                                    |                       |
|       | 压力       | 小于 25cm       | 精度极高                               | 需要钻新井，岩心收获率为低到中等                                 |                       |
|       | 海绵       | 小于 25cm       | 精度高，成本不大                           | 难以得到气饱和度                                         |                       |
| 示踪剂测试 |          | 7.5~12m       | 1. 精度高<br>2. 测量油藏体积大<br>3. 可控制测量体积 | 1. 需要应用程序解释结果<br>2. 适合较均匀地层<br>3. 只能得到剩余油饱和度的平均值 |                       |
| 测井    | 电阻率测井    | 常规            | 0.6~15m                            | 使用广泛，探测半径大                                       | 精度低                   |
|       |          | 测—注—测         | 0.6~15m                            | 精度极高                                             |                       |
|       | 核磁测井     | 常规            | 小于 0.6m                            |                                                  | 仅适合于重油                |
|       |          | 注入测井          | 小于 0.6m                            | 直接测量剩余油饱和度                                       |                       |
|       | 介电测井     | 常规            | 0.3~0.6m                           | 能在各种地层矿化度下测井                                     | 精度低                   |
|       | 电磁测井     | 常规            | 小于 5cm                             | 能在各种地层矿化度下测井，垂直分辨率高                              | 探测深度浅                 |
|       | 脉冲中子捕获测井 | 常规            | 17.5~60cm                          |                                                  | 精度低                   |
|       |          | 测—注—测（水）      | 17.5~60cm                          | 精度高                                              |                       |
|       |          | 测—注—测（化学剂）    | 17.5~60cm                          | 不需要孔隙度数据                                         | 需要三次注入                |
|       |          | 测—注—测（含氟化物的油） | 17.5~60cm                          | 能测量可动油饱和度                                        | 需要四次注入                |
|       | 碳氧比测井    | 常规            | 小于 23cm                            | 能在各种地层矿化度下测井                                     | 精度低，性能不稳定             |
|       |          | 测—注—测（水）      | 小于 23cm                            | 能在各种地层矿化度下测井，精度较高                                |                       |
|       |          | 测—注—测（化学剂）    | 小于 23cm                            | 适合各种地层矿化度，不需要孔隙度数据                               |                       |
|       | 伽马射线测井   | 测—注—测（水/化学剂）  | 5~10cm                             | 垂直分辨率高，广泛适用                                      | 精度较低，在二次测井前很难消除井中的放射性 |
|       | 重力测井     | 常规            | 小于 15m                             | 不受各种井眼条件的限制，测量体积大                                | 垂直分辨率低，注入/生产时间长       |
|       |          | 测—注—测         | 小于 15m                             |                                                  |                       |



续表

| 测量方法       |       | 探测深度   | 优点              | 缺点                |
|------------|-------|--------|-----------------|-------------------|
| 试井         | 有效渗透率 | 井的泄油面积 |                 | 精度较低              |
| 井间测量       |       | 井间距离   | 井间剩余油饱和度        | 测量时间长             |
| 驱油计算       |       | 井间距离   | 井间剩余油饱和度        | 测量时间长             |
| 总压缩率压缩系数计算 |       | 井间距离   |                 | 精度低               |
| 水油比计算      |       | 井间距离   | 计算简单            | 精度低               |
| 物质平衡       |       | 整个油藏   | 计算简单            | 精度低               |
| 生产拟合       |       | 整个油藏   | 提供区域剩余油饱和度      | 精度低               |
| 油藏数值模拟     |       | 整个油藏   | 提供二维、三维剩余油饱和度分布 | 精度取决于地质模型和地层参数的选取 |

通过以上对比,可以看出确定剩余油分布涉及各种不同的技术,是一项十分复杂和困难的工程,这是因为剩余油分布和地层的非均质性及驱替效率的不均匀性有关。每种剩余油饱和度确定方法都有其优点和限制,因而选择测定剩余油饱和度有效方法都要以地层条件和试验井的井筒条件为基础。根据井筒条件,至少可以选择两种不同的方法来测定剩余油饱和度。确定剩余油饱和度的核心是精度,所使用方法、工程项目及费用均和精度直接有关。通常高于5个饱和度单位的误差对三次采油在经济上都可能不被接受。因此,要求各项参数要尽可能精确地确定,例如一个孔隙度单位的误差可能导致几个饱和度单位的变化。筛选确定剩余油饱和度的方法是要根据随机误差和系统误差的大小。通常优先选用的方法为压力取心、脉冲中子测井和单井示踪剂测试。具体选用应根据储层条件和对精度的要求。一般认为测—注—测技术是最有希望的,此技术消除了某些地层参数的影响。目前,许多油田一般采用多种测量、计算方法综合分析、相互验证。

## 2. 剩余油分布研究中的几个问题

尽管人们已经从不同角度、基于不同原理提出了各种剩余油分布的研究方法,但在实际应用中这些方法与人们的期望还相差一定距离。如室内物理模拟与油田实际有一定差距;检查井虽然真实,但却是一孔之见;地球物理方法虽然应用范围较大,但测得的饱和度只反映井筒周围剩余油分布状况;生产井测试受到了仪器应用条件的限制和精度的约束;一些油藏工程方法往往带有较浓的经验色彩;油藏数值模拟从模型本身看是完美无缺的,但难以建立准确描述地层的地质模型。现实中,人们自觉或不自觉地采用了系统分析方法,在精细地质解剖的基础上;广泛采用各种方法所能提供的信息,进行综合研究、判断,给出了剩余油宏观分布的多种模式。实践表明,这种研究结果对于指导油田的调整与挖潜是比较有效的。尽管如此,人们仍然希望有一种普遍适用的、准确可靠的方法替代复杂的系统分析方法,直接将剩余油的空间分布定量描述出来。

剩余油分布研究的核心是预测、对比,国内外许多学者认为精细油藏描述和精细油藏数值模拟技术是认识剩余油分布最有效的途径,这里有必要阐明这些技术预测剩余油空间分布时应特别考虑的因素和预测的有效性问题,以引起关注。

### 1) 油藏系统不确定性的类型

油藏系统很复杂,具有很强的不确定性,然而人们却忽视了对油藏系统不确定性内涵的

深入研究，一律视之为概率不确定性。事实上，油藏系统的不确定性含有两个概念，一是表征储层性质参数的不确定性，这类参数主要指储层分布面积、延伸长度、厚度、孔隙度、渗透率的高低等等；二是表征渗流特征参数的不确定性，这类参数主要指产油、含水的高低、剩余可采储量的大小等。对油藏系统的不确定性深入研究认为，表征渗流特征参数的不确定性属于“概率型不确定性”，其特征是具有频率的稳产性和渐近性，与决策者主观偏好无关，对于概率型不确定属于“模糊型不确定性”，这是一种基于主观复杂性的不确定性。系统所具有的基本规律只能由模糊数学定性方法来研究和认识；对发生的结果也只能进行模糊解释和描述。

## 2) 储层三维地质模型的可靠性

储层三维地质模型研究的重点是解决储层的空间分布形态，其次才是储层内部的物性参数分布问题。对此，实践中人们已经认识到限于沉积环境、沉积条件和沉积层位的不确定性，应用露头研究成果作为储层表征的类比资料仍然存在很大的缺陷。对于物性参数分布规律的研究，目前较为流行的随机插值方法，即分形地质统计学，它是在各种光滑内插的基础上，叠加分形变化特征，不同方法（R/S 分析、变异函数分析、频谱分析、克里格方法）获得的分形指数本身就具有统计性，并不完全一致甚至差别很大，最终只能是在经验的控制下给出所谓的储层三维地质模型。

随机模拟所产生的实现并不完全代表现实的油藏，因而过分依赖随机模型会影响精确地预测不连续砂体或高渗透带的位置。显然，利用随机模拟方法所建立的三维地质模型仍然是储层一种可能性的、虚拟的空间分布，并不能达到人们预期的代表真实油藏的三维定量地质模型。

## 3) 油藏数值模拟的有效性

数值模拟的结果不理想不完全是由地质模型的不准确所造成的。在油藏数值模拟中，除地质参数外，相渗曲线、毛细管曲线等等都具有不确定性。显然，数值模拟给出的结果只具有参考价值，很难用矿场资料来严格检验。因此，单纯用数值模拟结果来指导油田调整挖潜，显然是不够的。此外，限于计算机的存贮量的有限性，所能模拟的区块是有限的。总之，油藏数值模拟模型本身的特性说明了保证模拟预测结果的有效性仍然是较困难的，加之三维地质目前还不能较好地体现出储层的本来面貌，因此，在此基础上油藏数值模拟所给出的剩余油的空间分布也只能是具有一定参考价值，在应用时，往往需要同其他方法来进行综合分析和研究。看来，对于具有模糊型不确定性和概率不确定性的油藏系统来说，不适当地要求准确和明确解是不现实的，只能追求模糊可靠性和概率可靠性，因此，在剩余油分布研究中，建议进一步发展和完善系统分析的方法，可能是一条比较坚实、可靠而有效的途径。

# 三、剩余油分布研究技术

## 1. 油藏精细描述技术

油藏描述就是对油藏进行综合研究和评价，它是以沉积学、构造地质学、储层地质学和石油地质学的理论为指导，综合运用地质、地震、测井和试油试采等信息，最大限度地应用计算机手段，对油藏进行定性、定量描述和评价的一项综合研究方法和技术。其任务在于阐明油藏的构造面貌、沉积相和微相的类型和展布、储集体的几何形态和大小、储层参数分布和非均质性及其微观特征、油藏内流体性质和分布，乃至建立油藏地质模型，计算石油储量和进行油藏综合评价。

油藏描述技术的综合性、定量化和广泛使用计算机手段是其最突出的特色，它涉及多种

学科的专业知识。从科研和生产实践来看,笔者认为,油藏描述是以多学科的理论为指导,综合应用多种信息,最大限度地应用计算机手段,对油气藏进行综合研究和描述。它是综合应用地质、地震、测井和油藏工程等资料,研究全油田的构造面貌、储层的几何形态和岩性岩相、储层微观特征、流体性质和分布规律,定量描述储层参数的空间分布规律、储层非均质性,计算油气地质储量,建立油藏地质模型,进行油藏评价,研究油田开发过程中油藏基本参数的变化,从而实现对全油田油气藏进行静态和动态的详细描述。

从长期的科研实践来看,特别是对那些复杂的油气藏,要正确揭示地下油藏的规律,必须利用多种手段和多种信息,以多学科的理论为指导,才能做好油藏的综合研究和描述,达到预期的目的。故油藏描述的方法和技术涉及的内容很广,概括起来说,可分为油藏描述的地质技术、油藏描述的地震技术、油藏描述的测井技术和油藏描述的计算机技术等四个方面。上述四个方面的技术目的是相同的,即对油藏进行整体或局部、宏观或微观、静态或动态的研究,去揭示复杂油藏的地质问题。由于各个技术属于不同的学科,故各自应用的原理、方法、手段和信息各不相同,所以,它们揭示油藏问题的侧面也是不同的。

油藏描述技术发展至今已日趋完善,实现了从宏观到微观、从定性到定量、从二维到三维、从静态到动态的油藏描述,标志着油藏研究进入了一个新阶段——精细油藏描述。

精细油藏描述就是以挖潜难度大的开发单元为研究对象,以建立精细三维地质模型为基础,以揭示剩余油的空间分布规律为重点,以确定挖潜、提高采收率措施为最终目标所进行的油藏多学科综合研究,是集地质、测井、数值模拟、油藏工程等多学科为一体的系统工程。精细油藏描述技术通过大面积的推广和应用,已形成系列配套技术:

(1) 建立了适合于多种油藏类型的精细油藏描述及剩余油分布研究的基本程序、技术和方法。

(2) 总结出了不同类型油藏精细油藏描述及剩余油分布研究的关键技术和研究侧重点。

(3) 初步形成了精细油藏描述及剩余油分布研究的一体化软硬件系统。

精细油藏描述技术现已得到我国东西部油田的广泛应用,其中储层描述技术、储层岩石物理相技术、河流相砂岩储层建模及测井约束反演储层预测技术、微构造研究技术、沉积微相定量描述技术、水淹层测井精细解释技术、剩余油描述及潜力评价技术等已迅速得到发展,并在高含水、特高含水期整装、断块、低渗透等油藏进行调整挖潜中发挥越来越重要的作用。

## 2. 精细油藏数值模拟技术

油藏数值模拟技术从 20 世纪 50 年代开始研究至今,已发展成为一项较为成熟的技术。在油田开发方案的编制和确定,油田开采中生产措施的调整和优化,以及提高油藏采收率方面,已逐渐成为一种不可欠缺的主要研究手段。油藏数值模拟技术经过几十年的研究有了很大的改进,越来越接近油田开发和生产的实际情况,随着在油田开发和生产中的不断应用,并根据油藏工程研究和油藏工程师的需求,不断向高层次和多学科结合发展。

近年来,油藏数值模拟技术在各个方面得到了不断的完善:

(1) 模拟类型。油藏数值模拟中研究的问题大部分为常规的开采过程,所用模型以黑油模型为主,组分模型和化学驱模型的使用增加较快。大多数油藏数值模拟向全油田的方向发展,水平井模拟的研究也有较大的发展。

(2) 模型网格与网格粗化处理。多数油藏数值模拟软件可根据油藏的规模由用户确定网格大小,自动产生油藏数值模拟网格系统。油藏数值模拟研究中采用正交或近似正交的网格

较普遍。局部网格加密仍然是当今油藏数值模拟网格设置中的主要网格处理技术，混合网格也越来越多地被采用。

(3) 模型大小。10 万节点以上的全油田模型已很常见，组分模型的节点数已达 3 万至 5 万，含有水平井的模型已有几万节点，典型井的水平锥模型也有上千节点。

(4) 工作平台。大部分油藏数值模拟器是在 UNIX 工作站或服务器上运行。此外在微机和巨型计算机上运行的也很常见。并行机和并行计算并不多见，但从目前的发展预测，并行计算将有较快的发展。

(5) 历史拟合。在目前的油藏数值模拟研究中历史拟合仍以人工为主。在某些软件中，历史拟合可对一些模型参数进行自动修改，如自动进行局部渗透率修改倍数的优化。完全自动的历史拟合目前还未实现，这是今后的发展方向。

(6) 预测阶段井的管理。在油田生产预测方面，油藏数值模拟发挥了极大的作用。采用油藏数值模拟技术不但可以模拟新井投产、老井重新射孔或补孔的效果，而且还可根据生产设施能力进行产量控制、集输中心管理等模拟，同时也可根据用户的要求进行油井管理。在目前的油藏数值模拟研究中对油管 and 地面生产网络的模拟还不够成熟，对生产网络的模拟计算仅基于物质平衡原理，对流体流出井口后的物理变化一般未予以考虑，仅有部分软件考虑到原油在地面的物理变化。

(7) 模拟结果的应用。油藏数值模拟的计算结果通常用于油田开发决策中，从开发方案的制定到提高油田采收率、打加密井的整个过程，都离不开油藏数值模拟研究。日常生产中并不是每天都进行油藏数值模拟，但开发生产中阶段性的决策需要油藏数值模拟的结果。在现代油藏研究中，油藏地质模型是用所建立的数值模型来表达的，地质模型的地质特征以模型参数的形式表示在数值模型中。这些模型参数是地质工程师对油藏沉积环境、地震解释、测井和岩性分析结果等的综合认识。对地质不确定性参数进行油藏模拟研究，能定量确定模拟结果的变化范围，从而对模拟结果进行风险分析。

我国大庆油田立足于现代数值模拟技术的前沿领域，开展了适合百万节点模型的油藏数值模拟技术研究。运用国际上最新推出的并行计算机和并行模拟软件，探索出做百万节点模拟的 4 项实用技术，即数值模型的自动化建模技术、精细建模与模拟计算中时间步精确控制技术、模拟参数场的交互更新技术以及工艺措施拟合的数字化技术，并据此技术实现了大庆油田实际油藏区块  $124 \times 104$  个节点的数值模拟，给出了层状砂岩油藏高含水阶段薄油层中的剩余油分布及调整挖潜的开发指标预测结果。通过百万节点油藏数值模拟技术的研究和应用，实现了对薄、差油层剩余油的精确描述，为大庆油田的调整挖潜提供了更多有价值的依据，总体上将油藏数值模拟技术提高到了一个新的水平。

### 3. 动、静态描述相结合技术

国内过去开展的油藏描述侧重于静态描述，它主要利用原状地层参数，建立概念模型和静态模型。而开发后期的剩余油分布研究则必须开展动、静态相结合的精细油藏描述，在研究工作中充分利用动、静态资料，考虑储层及流体参数在注水开发过程中的动态变化。大庆、胜利等油田每年都新钻一些检查井，这为搞清油藏中的参数变化提供了依据。动、静态相结合的油藏描述要求地质模型和数值模拟进行一体化研究，动、静结合揭示剩余油分布。在油层描述和油井动态分析基础上，研究宏观剩余油分布。

为了适应当前学科发展的需要，适应复杂油田勘探和开发的需要，提高油藏描述成果的使用价值，今后需开展油藏三维静、动态描述新技术，提高薄储层横向预测的精度，研究和

提高井间储层参数和剩余油的预测技术,探讨水平井油藏描述的方法技术等,从而使油藏描述方法和技术在石油工业中发挥更大的作用,取得更好的经济效益和社会效益。

#### 4. 多学科结合技术

特高含水期油藏油水关系十分复杂,剩余油分布研究难度很大,仅凭单一学科预测剩余油分布存在很大局限性,只有应用多学科理论、方法和技术才有可能准确地预测剩余油分布。多学科综合研究要求最大限度地采用综合信息,地质、地球物理、油藏工程等不同专业的专家共享一个数据库,以统一的地质模型为媒介,以预测剩余油分布为目的,紧密配合,协同攻关。要求每一学科从其他学科不可替代的侧面为预测剩余油分布提供依据,而且允许各学科从自身角度出发来评价本学科和其他学科对剩余油分布进行预测的结果是否一致。

#### 5. 系统分析技术

在油田生产开发中,可以将油田看作一个大系统,在此系统中,油水井生产动态是系统内各种因素作用的宏观表现;构造因素、沉积相、储层物性、流体性质及开采中的水驱状况则是控制系统变化规律的微观因素。微观因素发生变化,必然会在井的宏观动态上反映出来;反之,井的生产动态发生变化时,则反映系统内的微观因素发生了变化。要解决非均质砂岩油藏进入高含水阶段的油田改造难题,必须按照“系统工程”的原则,从油藏描述弄清沉积要素与剩余油分布关系着手,建立包括油藏地质分析—油藏工程研究—油藏数值模拟—水驱历史拟合—油藏精细综合描述—剩余油的四维分布(时空分布关系)—适宜的调整措施—三次采油等在内的配套技术,才能正确认识油藏的生产潜力,提高油藏的采收率。

利用系统论观点研究油藏剩余油分布规律时,主要解决途径有以下几点:①多学科协同,综合研究;动静态结合,描述与模拟结合;多种先进测试方法和手段的应用,重视分布规律和精度的研究。②研究内容的有机结合,包括储层沉积学研究、储层物性及非均质性研究、井间储层预测、剩余油形成机理和剩余油分布的影响因素研究等,对剩余油分布进行精细化和定量化研究,从地质、测井、油藏工程和生产动态等多个方面综合揭示剩余油分布特征和规律。③将研究重点放在空间参数场定量确定的方向上,抓住主要矛盾,把薄、多、碎、杂的含油砂体空间参数场定量搞清楚,这一类油层在开发中、后期的作用远高于自身储量数字,开发后期许多原油便滞留于此。④在研究思路做到油田地质、油藏开发及采油工艺的密切结合,油藏描述、油藏工程及油藏数值模拟技术的密切结合,剩余油宏观、微观的定性描述及剩余油饱和度定量描述的密切结合,认识油层和改善油层的密切结合。只有这样,才能真正达到“认识剩余油、改造剩余油”的目的,才能为提高油田的开发效果提供科学有效的地质依据。