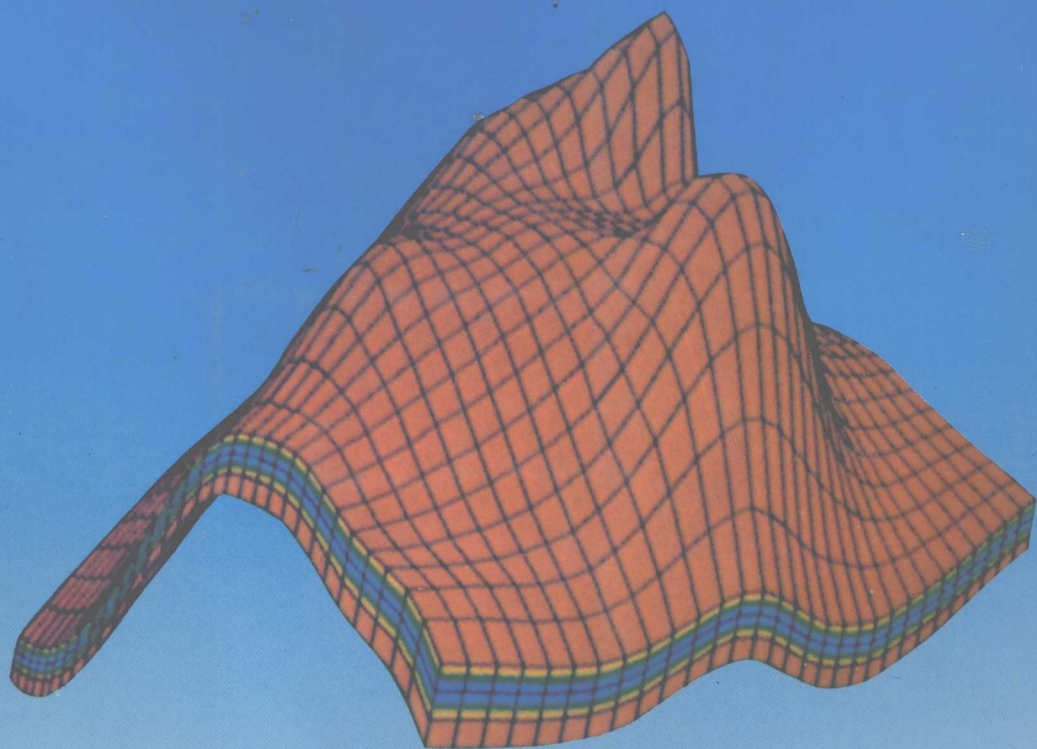


国家“八五”重点科技攻关项目  
国家自然科学基金 资助

# 碎屑岩系储层 地质建模及计算机模拟

于兴河 李剑峰 著

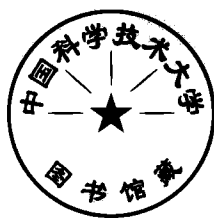


地质出版社

国家“八五”重点科技攻关项目  
国家自然科学基金 资助

# 碎屑岩系储层 地质建模及计算机模拟

于兴河 李剑峰 著



地质出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书以沉积学、储层地质学及地质统计学为理论基础,系统地介绍了碎屑岩系储层的地质研究方法、思路、建模技术及计算机模拟,重点是通过实际的油气田储层研究来论述定性描述与研究转化为定量分析与预测的过程,从储层的概念模型和静态模型到定量的数学模型与计算机模拟;通过两种实践而成功的具体算法来阐述储层随机建模技术的系统实现步骤及解决不同地质问题所采用的不同建模和模拟方法。本书共分六章,前三章为储层地质建模及其研究动态,后三章为计算机的预测模拟。

本书可供从事油气田地质、储层沉积学、储层地质学、油藏描述、油气资源评价、盆地模拟及数学地质的科研工作者、大专院校师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

碎屑岩系储层地质建模及计算机模拟/于兴河,李剑峰著. —北京:地质出版社,1996.10  
ISBN 7-116-02276-7

I. 碎… II. ①于… ②李… III. ①碎屑岩-储集层模型-建立模型②碎屑岩-储集层-计算机模拟 IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 18434 号

## 地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:周继荣 张新元

\*

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销  
开本: 787×1092 1/16 印张: 7.75 彩页: 4 页 字数: 173000

1996 年 10 月北京第一版·1996 年 10 月北京第一次印刷

印数: 1—600 册 定价: 20.00 元

ISBN 7-116-02276-7  
P·1708

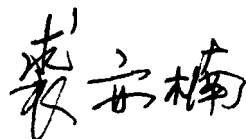
# 序

石油储层地质模型的随机建模技术，是 80 年代中期兴起的、以地质学为基础、计算机为手段的一门应用技术。它适应于提高油田采收率对储层地质模型在精度上和描述尺寸上日益苛刻的要求，直接为充分利用石油资源服务；它也为发展定量储层地质学走出了突破性的一步。同时，它本身又是地质与数学、计算机技术结合的产物。因此，它一出现，就迅速受到石油工业界学者的热衷关注。在短短的十年中，各种算法和模拟模型不断涌现；在油田早期评价、二次采油和三次采油实践中得到成功的应用。可以预见，在不久的将来，它将与测井、开发地震等技术进一步结合，成为油藏管理中节约资源，提高石油采收率和改善经济效益的强有力的、无可替代的工具。

新兴的技术需要新一代科技人才来驾驭和推进。储层随机建模技术，作为定量地质学中的一个分支，发展它的历史重任理所当然地落在了既掌握地质学理论、又掌握现代计算机技术的年轻一代的储层地质家身上了。本书的作者，两位年轻的地质学博士，勇敢地闯入了这一科学的殿堂，不仅在科研实践中取得了可喜的成功，而且以科学的敏锐和只争朝夕的精神，把他们的所得所悟以著述的形式很快面世，以飨同行。这无疑是一件为储层建模技术推波助澜的壮举，值得大声叫好！

正如作者在前言中自述那样，出版这本书的目的只是作为一种学术参与。确实，随机建模技术涉及学科专业很广，也有一些成熟的模拟算法已在石油工业界流传，一本文字有限的专著难以包罗万象，作者只是把自己已经实践成功的方法介绍给大家。但是，全书在内容安排上仍然是论述有序，从基础的储层沉积学开始，一直到解决不同地质问题的具体模拟算法，都作了系统连贯的介绍，而且大部分是他们自己成功的经验，不仅可供从事这一科研工作的同行参考，而且对于初次涉足这一领域的地质科研人员，也是一本很好的较为系统的教材。更为难能可贵的是，作者把他们开发的算法软件原码程序，毫无保留地奉献给大家，也说明了作者为推动这一学科发展的拳拳之心。

本书的出版让我们领略到青年储层地质学家的光灿风华，也看到了储层地质学欣欣向荣的明天。愿更多的年轻地质工作者献身到这一造福人类的科学事业中来！



1996年7月22日

# 前 言

“居之无倦，行之以忠”，在完成本书的过程中，在与老师和同行们讨论有关的学术问题时，我们总是想起《论语·颜渊第十二》中孔子的这句话。两千多年来中国的知识分子或许正是遵从圣人的教诲，以恒、诚、忠、敬之心致力于中国文化的发展，才使得中国文化能够在漫长历史长河中的许多危亡之秋，存亡继绝、流传不衰。我们有幸生活在这样一个文化氛围醇正深厚、渊源流长的国度，有幸置身于飞船上天、核艇入海的科技时代；尽管个人所学有限，但在修身与治学的态度上也是诚惶诚恐，不敢后人的。本书的作者正是抱着这样一种敬业敬人的态度，才使这本在很多方面都尚显幼稚与粗糙的小册子最终付印。自知管窥蠡测，聊作抛砖引玉。“闭门推出窗前月，吩咐梅花自主张”的消极态度，从来就为富有历史责任感的中国真正的知识分子所不取。我们把本书的出版当作一次学术参与，一次学业上的求教、交流与进取。如果您偶尔拿到了本书，或者您已耐心地阅读了前言里的这几行文字，那么就请您接受作者真诚的谢意！如果您能进一步阅读下面的内容并予作者以热心的批评指正，您将是作者永铭于心的良师益友！

正如书名所表明的一样，本书讨论的内容总体上包括碎屑岩系储层地质建模与计算机预测模拟两大部分，前一部分包括了本书的第一章到第三章，由于兴河博士执笔；从第四章到第六章是后一部分，执笔人是李剑峰博士。虽然分由两人撰写，但在内容上本书的第六章是上承下合、密不可分的整体。以下是各章内容的一句话介绍，可以使您方便快捷地找到感兴趣的部分，以便节省您宝贵的时间。

第一章：储层研究领域的国内外动态及我国碎屑岩系储层的特点，简要介绍了作为目标工区的我国某气田的地质概况。

第二章：影响储层物性变化的因素是多种多样的，这里既讨论了对这些影响因素进行分析的原则，又进一步用这些原则对孔隙度、渗透率的变化及预测进行了研究与探讨。

第三章：以陆相三角洲为典型例子，揭示了作用沉积学与非均质响应的内在规律，探讨了三角洲沉积砂体的构形特征及储层模型的特点，并用实例的形式，简介了建立储层地质模型的过程与方法。

第四章：把复杂的储层模型用数学语言予以描述，并转化为计算机能够接受的形式。这里既介绍了一些基本的数学方法，探讨了储层物性的数值表达方式，又揭示了用数字方法描述储层所要求的内在合理性。

第五章：用 C++ 语言在 Windows 环境下编写了一个计算机程序，使前几章中有关抽象的讨论变成了现实。

第六章：用一批取自国内某气田的实际数据进行运算，既检验了第五章中的程序设计，又检验了前几章中的地质学及数学理论。

在本书的附录中您能找到计算机程序核心部分的原码以及用以检验程序的原始数据，

有兴趣的读者可以容易地检验我们的工作。书后的参考文献罗列了当前储层研究领域很多有价值的文献及一些出版物，它们既展示了当前储层研究的现状，也为今后的深入研究奠定了基础。

承蒙石油勘探与开发研究院总地质师、教授级高工裘亦楠先生百忙中为本书写序，其中的许多溢美之词使作为裘先生晚辈的我们倍增汗颜，字里行间体现出的鼓励后进、虚怀若谷的治学精神也将使我们在今后的学术生涯中受益无穷。在本书的撰写过程中，作者得到了地矿部石油地质研究所所长、教授级高工王庭斌先生，以及教授级高工张士亚，高工张洪年先生的多方面指导和关怀。王德发和郑浚茂两位教授在本书的撰写与研究过程中，提出了一些有益的建议。吉林石油指挥所张鸣主任，张玉明、肖海燕高工为作者提供了大量宝贵的实际资料，石油地质所王文敏同志帮助清绘了部分图件，在此一并向他们表示衷心的感谢。特别值得一提的是两位作者的夫人于胡忆虹和李陈丽杰女士，她们在本书漫长繁忙的撰写过程中，表现了极大的耐心和全身心的支持，作者对他们的歉疚之情已不是感激两字所能包容的。

作者热诚地欢迎就本书所涉及的内容与老师或同行们进行深入的讨论和广泛的交流，文下给予的本书两位作者的通讯地址，是两扇始终敞开的友谊之门。

作者

1995年5月25日于北京

---

于兴河：中国地质大学（北京）能源系石油研究室，通讯地址：北京市海淀区学院路29号，邮编100083。

李剑峰：地质矿产部计算中心，通讯地址：北京市海淀区学院路31号，邮编100083。

# 目 录

序

前言

<b>第一章 储层表征动态及我国油气储层特点</b> .....	( 1 )
第一节 国内外研究现状及存在问题 .....	( 1 )
第二节 我国油气储层的主要分布规律和特色 .....	( 7 )
第三节 松辽盆地某气田区域地质简介 .....	(10)
<b>第二章 影响碎屑岩系储层物性的主要因素分析</b> .....	(13)
第一节 影响物性因素的分析原则 .....	(13)
第二节 影响孔隙度的主要因素分析及其预测 .....	(13)
第三节 碎屑岩渗透率影响因素分析 .....	(22)
第四节 孔隙度与渗透率的相关性 .....	(24)
<b>第三章 碎屑岩系储层地质模型的建立</b> .....	(27)
第一节 建立储层地质模型的步骤和内涵 .....	(27)
第二节 陆相三角洲沉积砂体的构形特征 .....	(28)
第三节 陆相沉积砂体作用沉积学与非均质性响应 .....	(33)
第四节 陆相三角洲砂体储层模型特点 .....	(39)
<b>第四章 储层计算机模拟概述及模型量化原理</b> .....	(44)
第一节 储层研究的理想与现实 .....	(44)
第二节 储层建模方法原理概论 .....	(46)
第三节 模型算法简介 .....	(57)
<b>第五章 DSC 软件主体模块的功能及结构</b> .....	(61)
第一节 概述 .....	(61)
第二节 软件主体结构及功能简介 .....	(61)
第三节 数据的准备及文件格式 .....	(66)
<b>第六章 模型测试——在松辽盆地某气田的初步应用</b> .....	(70)
第一节 概况 .....	(70)
第二节 增强高斯截断法的初步测试 .....	(71)
第三节 指示条件概率模拟 .....	(73)
第四节 小结 .....	(73)

结语 .....	(74)
参考文献 .....	(76)
英文摘要 .....	(79)
附录一 原始数据 .....	(81)
附录二 程序原码 .....	(87)
图版说明及图版.....	(114)



# CONTENTS

## PREFACE

## INTRODUCTION

<b>CHAPTER 1</b>	<b>Developments of International Reservoir Characterization and Features of Hydrocarbon Reservoir in China</b> .....	( 1 )
1	Status and Problems in Present Hydrocarbon Reservoir Study .....	( 1 )
2	The Main Features of Hydrocarbon Reservoir and It's Distribution in China .....	( 7 )
3	Geological Overview of a Gas Field in Sung Liao Basin .....	(10)
<b>CHAPTER 2</b>	<b>Analysis of Main Influencing Factors on Physical Properties of Clastic Reservoir</b> .....	(13)
1	Analyzing Principles of Main Influencing Factors on Reservoir Physical Properties .....	(13)
2	Analysis of Influencing Factors on Porosity and Porosity Prediction .....	(13)
3	Analysis of Influencing Factors on Permeability of Clastics Reservoir .....	(22)
4	Coherence of Porosity and Permeability .....	(24)
<b>CHAPTER 3</b>	<b>Building of Reservoir Geological Models</b> .....	(27)
1	Steps and Purposes of Reservoir Geological Model Building .....	(27)
2	Architectural Features of Deltaic Depositional Sandbodies of Terrestrial Facies .....	(28)
3	Process Sedimentology and Heterogeneity Responds of Depositional Sandbodies of Terrestrial Facies .....	(33)
4	Features of Reservoir Geological Model of Deltaic Depositional Sandbodies of Terrestrial Facies .....	(39)
<b>CHAPTER 4</b>	<b>Overview of Reservoir Computer Modelling and Modelling Algorithms</b> .....	(44)
1	Ideality and Reality of Reservoir Research .....	(44)
2	Principles and Methods of Reservoir Modelling .....	(46)
3	Brief Introduction to Modelling Algorithms .....	(57)
<b>CHAPTER 5</b>	<b>Main Functions and Flow Diagram of DSC Software</b> .....	(61)

1	Introduction .....	(61)
2	Main Functions and Structure of DSC Software .....	(61)
3	Data Preparation and Data File Formats .....	(66)
<b>CHAPTER 6 Model Test: Primary Application in a Gas Field in Sung Liao Basin</b>		
	.....	(70)
1	Application Overview .....	(70)
2	Primary Test of Enhanced Truncated Guassian Model .....	(71)
3	Indicator Conditional Probability Model .....	(73)
4	Summary .....	(73)
<b>CONCLUSION</b> .....		(74)
<b>REFERENCES</b> .....		(76)
<b>ABSTRACT</b> .....		(79)
<b>APPENDIX 1 Data</b> .....		(81)
<b>APPENDIX 2 Program Code</b> .....		(87)
<b>PLATE CAPTION &amp; PLATES</b> .....		(114)

# 第一章 储层表征动态及我国 油气储层特点

自 20 世纪 60 年代至 70 年代早期的大油田发现后, 尽管人们在世界各地进行了深入广泛的勘探工作, 但至今仍没有发现像北海和阿拉斯加那样的大油区。虽然已发现了相当数量的油气储量, 但也仅限于少数几个可采储量在 5 亿桶以上的大油田。在过去的十多年中, 由于全球油气田开发的不断深入, 大多数含油气盆地已接近或达到了成年期。石油地质学家已开始从勘探方法研究转向油田勘探与开发技术的革新与集中应用。二十多年来, 随着石油工业的不断前进, 储层地质学已成为一门重要而涉及面很广的学科领域, 其理论和方法也愈来愈多, 除了像采用 CT 层析技术等新手段之外, 储层地质学已将石油地球物理测井、地震、试井、油层保护以及常规石油地质理论紧密联系在一起, 单纯的沉积学手段已经落后于时代的步伐, 储层地质学也逐渐从原来的储层描述向预测储层特征(物理特性和空间特征)方向发展。为了提高采收率(EOR)、加密钻井(infill drilling)的布置、外延井的确定以及解决高含水率的问题和区别传统的储层地质学, 储层表征(reservoir characterization)这一新术语已经被提出。1985 年, 在美国达拉斯举办的第一届国际储层表征会议上, 它被定义为“定量地确定储层性质、识别地质信息及空间变化的方法”(Lake 等, 1986), 而建立储层地质模型则是其最高阶段。随着计算机技术革命的突飞猛进, 储层模拟或建模(reservoir modelling)已从理论研究发展成为一门最广泛应用的油藏工程或储层表征新兴技术。

## 第一节 国内外研究现状及存在问题

目前国际上油气地质勘探与开发的研究发展十分迅速, 新方法、新理论不断出现, 使得这一领域的研究从单一性向多学科协同并进方向发展, 其中, 最为突出的三大理论或研究方法的出现与形成, 已成为石油地质学的三大研究方向或三大组成部分: ①盆地分析/模拟; ②地震/层序地层学研究; ③储层表征或储层模拟。我国的石油地质工作者在处理好了引进与吸收的关系后, 在此三方面也有了长足性的进展。可以说它们是今后一个时期石油地质研究的关键领域, 也是今后一个时期全球石油工业上游的重点投入对象及学科建设中心。

### 一、当前油气储层研究所面临的挑战

1986 年的世界石油价格暴跌刺激了整个石油工业想方设法降低成本。大多数有远景的低勘探成熟区含油气盆地都处于勘探费用较高的边远地区, 油气勘探成本大幅度提高, 致使世界上主要产油国把研究重点转向勘探成熟区中对已开发油田的增储上产上。据美国经济地质局的最新估计, 除阿拉斯加州以外, 美国陆上已开发的储量中, 通过加密钻井、

油田的扩边或油井的重新完井可以得到增补的石油可采储量约 800 亿桶 (约 114 亿吨), 天然气约 5.1 万亿  $m^3$ 。然而, 挖掘这部分储量遇到两个新的挑战:

一是必须更精确地描述储层特征, 按砂体描述其连续性、岩石物性的空间分布、内部微观特征等。

二是改善提高认识储层的手段, 包括静态和动态。而解决这些问题的方法就是开展储层表征及其地质建模与模拟研究。

同样全世界各大石油公司的状况也是如此, 例如: 在 1981—1990 年间, 除北美以外, 壳牌石油公司经营的油田可采储量已增长到 36 亿标准桶, 在油田的扩大后, 还将增加 10 亿标准桶的可采石油储量<sup>①</sup>。这是由于进行了以下三个方面的研究的结果:

- (1) 储层表征 (50%);
- (2) 地质学、地球物理学及岩石物理学资料的修正 (30%);
- (3) 钻井结果的评价与发展 (20%)。

目前, 我国 70% 以上的油田与世界上许多油气田一样, 都已进入了高含水期的开采阶段, 地下油气水的分布极为复杂; 各种非均质性隔档使剩余油呈分散状分布。进行精细的定量储层描述或储层表征研究, 是解决这一问题的重要途径, 因而建立准确的储层地质模型 (概念、静态和预测模型) 便是储层研究中极为重要的一个新课题。

## 二、当前国外油气储层研究的五大趋势

### (一) 对储层沉积学的研究日益从宏观向微观方向发展<sup>②</sup>

1. 近年来, 随着碎屑岩系油气藏开发的深入与岩性油气藏的勘探的开展, 要求人们必须掌握各种不同环境下形成的砂体在时空上的展布规律及几何学特征 (C. Ravenne 等, 1989; T. Dreyer, 1993), 同时为了更好地进行油气的勘探与开发要求储层的研究必须掌握单个砂体的几何学特征及三维空间的连续性与配置关系, 即宏观非均质性或各向异性的研究, 为此, 开展储层沉积学的研究和建立地质模型越来越受到人们的重视。

2. 随着各类油藏注水开发技术的不断革新, 发现层内 (储层内部) 非均质性极大地影响体积波及系数与油层内驱油的效率, 然而储层内部渗透率的差异程度、渗透率的韵律类型、层内连续泥质夹层的分布是影响层内波及系数的主要因素; 国外油田开发和储层研究人员对此产生了极大的兴趣, 并开始以露头 and 成熟油田研究为基础来建立层内储层非均质性的概念及静态地质模型, 但至今没有形成一个规律性的认识和更全面的研究方法。

3. 不同沉积盆地次生孔隙随深度变化的分布规律成为现今油气田勘探与开发的主要研究内容, 它为深层寻找油气储量增添了极大的活力, 促进了成岩作用/演化研究的完善与深入, 尤其是次生孔隙的研究在储层评价中的比重和地位日益提高, 各种次生孔隙形成的成因机理也不断地有了新的见解和模式 (G. Schmmugan, 1985; I. O. Meshri, 1986; M. Scherer, 1987; R. C. Sardam, 1989), 这为储层地质建模和准确的计算机模拟提供了理论依据。

① Pink, M. J.. 1993. Exploration and Appraisal Technology——Maximising Rewards by Integration (Shell Company).

② 中国石油天然气总公司科技发展部. 1989. 中国油气储层研究大纲.

## **(二) 对储层的描述和预测日益从定性向定量方向发展**

1. 为了对地下储集砂体的孔、渗进行计算和预测，以解决实际生产中的需要，不少人对此进行了大量的研究工作 (M. Scherer, 1987; E. Robert, 1991; D. P. Edward, 1992; S. P. Dutton, 1992)，并提出了一些经验公式或数学模型，但往往公式中的一些参数在实际应用中很难或根本无法确定。这就给这些公式或定量模型的推广及验证带来了许多困难或局限。

2. 定量描述储层物性参数的三维展布是近年来油藏数字模拟技术对储层研究提出的更高层次上的新要求。大量三次采油现场实验结果远不如室内试验那么理想，主要问题和原因是室内模拟研究的储层模型与实际差别太大。目前的动向是：一方面通过现代沉积观察和露头研究建立储层地质知识库和原型地质模型，并采用地质统计方法，得出多种经验公式；利用一维剖面上所获得的实际参数预测二维或三维空间上砂体的展布，在露头和成熟油田取得有效的经验公式与方法并经验证后，再应用于新区和井下；到目前为止，尽管有了一些成功的经验，但仍处于攻关阶段。另一方面是利用高分辨地震技术对储层进行横向追踪和特征反演，达到预测砂体空间展布之目的。

3. 随着油田勘探与开发的不断深入，人们越来越期望对地下碎屑岩储集体的物理特性——孔隙度、渗透率、饱和含油性做到定量而准确的预测，目前人们已经认识到对这些物理特性的预测应充分考虑到其形成的沉积环境、盆地的演化及成岩机理等重大地质条件的制约，只有在对第一手资料研究时就进行细致的定量研究，找出其形成机理并进行详细的数理统计分析，才能尽可能地做到有效的预测。

## **(三) 理论沉积学向应用沉积学发展**

1. 1990 在英国伦敦召开的第十三届国际沉积学大会的第一个技术讨论题目 (A1) 就是“储层沉积学和建立地质模型” (Reservoir Sedimentology and Geological Modelling)。它标志着这届大会比过去历届大会出现了一个重大的改变：这就是把应用沉积学放在首位，放在理论沉积学的前面；在应用领域中又把储层沉积学列为第一，并且直接讨论建立储层地质模型的问题。建立储层地质模型已属于石油开发地质学的研究范畴，是当前“油藏描述” (reservoir description) 的热门和重点。

2. 1991 年召开的第十三届世界石油大会也把它专设为一个小组讨论会，其重点同样是如何建立定量的地质模型。两个不同学术领域的世界性最高级学术会议都将这一问题列为技术讨论的重点题目，尤其是一向偏重于沉积学本身理论发展的沉积大会，也一反常态地出现这么大的转变，足见开展油气储层表征及模拟的重要性，以及它已引起了多么广泛的重视。

3. 近年来召开的一些国际性和地区性沉积学和石油会议均将储层沉积学的研究放在了较为显著的位置，并且发表的有关论文与专著逐年增加。80 年代后期储层地质学、开发地质学的迅速复苏和再度崛起，是造成这一形势的前提。就连一直以勘探地质为其主要报道内容的 AAPG 学术刊物，也从 1988 年开始每年出一期开发地质论文专刊，并提出“给储层地质学应有地位”的口号。自 1987 年起，由美国能源部研究院发起的储层表征国际研讨会已召开三届，出版了三本论文集并在储层地质学的基础上形成了储层表征技术。

## **(四) 储层描述 (表征) 从单学科向多学科协同研究发展**

目前储层地质学的研究已不是过去的只研究储层的岩石物理学特点，而是从多学科

(地质、地球物理——测井和地震、数理统计及计算机等)的角度来开展储层的各种特性研究,因而也就促进了其它地质学科的迅猛发展。从目前国际上对储层的研究来看,主要有三个研究内容或研究角度,其目的是从不同的侧面对油气储层的物理特性和空间特性进行研究。

1. 露头储层和井下地质研究:为建立储层地质模型而大力开展露头储层和井下地质研究,已成为储层地质学新的研究范畴;其出发点是以储层沉积学为理论,以作用沉积学与非均质性响应为重点,结合成岩作用的演变规律或多样性来描述储层的物理特性。然而,对空间特性的定量描述还局限于典型砂体的原型模型(prototype)内,其规律性或数字化还不够理想。另外,储层地质学近几年来有了很大的突破,尤其是层次或沉积规模(scale)概念的引入。通过划分成因单元(genetic unit)和界面分级系列(bounding-surface hierarchy)(A. D. Miall, 1985, 1989)来分层次或单元研究储层,得出了不少有益而又可借鉴的认识。同样,也存在着一些问题,主要是在井下或测井曲线中如何认识与识别这些界面系列,这是今后一个时期的攻关内容。目前国外十分热衷于从事野外露头的研究工作,原因之一是用野外露头研究所获得的地质模型来用于井间砂体储层特征预测,掌握储层非均质性的分布规律。其基本思路是在野外露头上,进行密集采样,实测孔、渗等岩石物理参数,把所研究的某种沉积体系砂体内部物性变化的原型揭示出来;然后用各种地质统计方法来模拟,抽稀控制点,用某种数理统计方法把控制点间的参数模拟得与实际逼近,最后应用于地下地质的实际工作之中。这种用各种概率统计模型来进行储层物性变化模拟的方法称为条件模拟(conditional simulation),它是在已知点间产生物性参数分布的一种统计技术。

2. 高分辨率三维地震采集处理解释技术<sup>①</sup>:随着计算机技术的迅猛发展,地震勘探和处理技术的不断革新,三维地震勘探和各种提高地震分辨率的采集处理解释技术的不断出现,人们开始把地震勘探,尤其是高分辨地震对比技术引入到解决油气田开发问题的油藏描述和动态监测中。这就形成了开发地球物理(development geophysics)和储层地球物理(reservoir geophysics)等新技术。实质上是将垂向上分辨率很高的测井技术与横向上覆盖面很大的地震技术结合起来,达到在三维空间定量描述和预测储层的目的,特别是实现井间规模的储层/油藏描述与预测(inter-well scale),即高分辨率油藏描述技术。由于在常规地震与测井方法之间,存在着一个明显的技术“空当”,即缺少能够在井间范围内准确成像的地球物理勘探技术。而井间地震则正好填补了这一“空当”,其主要特点是兼有地震与声波测井技术两者的特长。近年来,随着新型井下震源系统和井下信号接收系统的不断涌现,井间地震技术已开始从研究阶段走向实用阶段。目前,国外已先后报道过若干井间地震技术应用的实例,如法国地球物理总公司(简称CGG)所从事的工作,井间地震与多道地震波反演模拟(ROUIM)、西方地球物理公司所从事的地震岩性模拟(SLIM)以及地球物理服务公司(简称GSI)进行的多参数约束反演模拟(LCI)。从这些实例的使用效果可以看出,井间地震技术在解决油气勘探与开发领域中的地质难题,尤其是定量预测井间有效含油层(net pay)的能力较强,效果十分明显。因此,可以预言,在今后的十至二十年中,井间地震技术将作为开发地震技术和开发地质的重要组成部分或首要研究内

① 裘亦楠,陈继新等. 1993. 国外储层描述技术.

容，广泛用于储层特征描述和生产动态监测等领域。

3. 数字测井新技术：测井资料数字处理技术的发展为精细油藏描述和储层模拟与验证提供了基础。随着油气勘探与开发的需要，测井分析从一个井眼走向一个区块全面分析和评价，已成为油藏描述中一项新兴的综合技术。它是以测井资料为主，并把地质、钻井、地震、测试等资料综合在一起，采用一套大型的软件系统，来分析储层的岩性、物性参数、油气水以及构造形态的平面与空间分布规律。这就使油藏描述走向数字化、自动化和科学化。新的测井和试井方法的出现为此研究起到了极大的推动作用。①近年来国外出现了一套成像技术，包括微电阻扫描（FMS）、阵列感应测井（0.25—2.25m 探测范围的 5 条感应曲线）、三维声波井筒成像技术，这些技术的特点是具有直观性，可以直接观察井下地质体的基本特征，这就使油藏描述中的地质解释更为准确。②地球化学测井以诱发的自然伽马能谱（IGRS）测井可以测得 10 种以上的化学元素成分（钾、钍、铀、硅、铁、钙、钛、钒、铬等），借此可进一步判别矿物粘土类型和岩石物理特性。③核磁共振测井（NMR）的出现可以直接评价油层的孔隙度、渗透率、束缚水和残余油饱和度，这就提高了油层物理参数的定量可靠性。④随钻测井（MWD）工艺的革新，使各种测井资料的质量和准确性大大提高，这就为高分辨率测井信息的数字处理和解释提供了更为优质的第一手资料。

总而言之，要为油田开发中、后期和提高采收率阶段服务所开展储层表征研究和/或精细油藏描述，就必须是综合各学科和各专业之最新发展，并在实际工作中依据其研究目的和要解决的关键问题，以某一项技术为主线来开展工作。

万流归海，殊途同归，人们通过不同的侧面所获得的关于储层空间特性和物理特性的定性，尤其是定量的认识，最终通过建模这一最新的技术手段得到融合与升华，并把人们对储层的完整认识在定量储层模型之上体现出来。可以说这种通过对储层各侧面的逐步认识以达到成功的建模思路已是当今全球储层地质学界的共识。

### （五）各种储层模拟方法和软件的不断涌现

由于 90 年代计算机技术的迅速发展，尤其是图形工作站的出现和计算机容量的扩大，加之油田开发对井间砂体的预测和确定砂体规模的要求日益迫切。因而，为油田开发服务的各种储层模拟方法和软件不断涌现。

1. 常见的储层模拟与随机建模方法主要有：①转带法（Turning Bands Method）；②协同克里格法/泛克里格法（Cokriging / Universal Kriging）；③指示克里格法（Indicator Kriging Method）；④条件概率模拟（Conditional Probability Simulation）；⑤蒙特卡洛法（Monte Carlo）；⑥分形几何法（Fractal Geometry）；⑦高斯截断法（Truncated Gaussian）；⑧序贯高斯模拟（Sequential Gaussian Simulation）。

2. 模拟软件的种类繁多，比较好的软件有：①美国新墨西哥矿业技术学院开发的 TUBA 软件，它是以转带法和指标克里格法相结合所设计的用于储层的垂向和横向对比的软件系统，其数学基础是贝塞尔函数（Bessel Function）和指数相关函数。②美国地层模型公司（Strata Model）研制的主要用在 SGI 图型工作站上运行的一个地质模型计算机系统软件——SGM。该软件的特色是可以采用任意切片法来展现孔、渗及砂体在连续断面或切片上的展布特征，其数理基础是随机模拟。③荷兰皇家/壳牌集团公司推出的“君主”（MONARCH）软件，它是以条件概率法为基础设计的，主要用于模拟砂岩油藏中的三维

连通性和构形。④荷兰 Jason 公司推出的 Stat Mod, 它是应用 BP 的技术而开发出的依据地质统计学和地震特征进行随机建模的软件, 着重分析储层物理特性的空间变化——非均质性及储层岩性特征的空间分布规律——各向异性, 其关键的方法是分析并拟合储层物理特性和岩石属性的直方及变差函数分布, 求出它的特征值, 以建立数学模型, 随后用三维克里金和协克里金、三维序贯高斯条件模拟以及三维序贯指标模拟来针对不同变量类型, 如连续变量——孔隙度、渗透率, 离散变量——岩性, 进行随机建模和反演, 以提供既遵循地质统计的变量函数特征值分布、地质模式, 又符合地震反射特征的储层空间模型, 因而可帮助解决油田开发阶段所遇到的各种地质问题, 同时也可在勘探阶段提高储量的计算精度。⑤加拿大 GEOSTAT 系统国际公司和 McGill 大学联合推出的智能模拟系统软件 GEOSTAT, 该系统将地质统计和智能模拟技术相结合, 组成了这一智能计算机系统, 它不仅包含了数值运算、多元统计, 还包含可引导、承担、评价和推断地质统计运行的知识和专家经验。因此该系统具有两大特色: A 是储层地质特性模拟及立体化定量显示; B 是具有地质解释中的专家经验和知识。

纵观这些软件的功能和效果, 可以发现它们各有所长, 其共同而突出的特点是: 将储层岩性的空间展布特性和物理特性(孔隙度、渗透率)结合起来, 实现在三维空间的立体显示和任意切片。它们所要求的计算机内存容量大, 速度快, 正是由于储层模拟数据量大, 加上高分辨率彩色图形显示, 需要图形卡配置, 故这些软件均是在图形工作站上实现的。这些软件对我国目前的经济状况来说十分昂贵, 但它们在模拟非均质性不太严重的海相地层中效果较为理想。而对我国以陆相断陷含油气盆地为主的非均质严重的储层来说, 则需要开发适合我国实际状况的储层模拟软件, 这也是历史赋予我们这一代储层地质工作者的使命。

### 三、国内油气储层研究现状及问题

近十年来, 由于油气勘探开发的需要, 我国各油田及地矿部所属各石油局也越来越重视储层沉积学的研究工作, 建立了一些专业队伍, 全面开展了油区沉积相研究, 建立了湖盆各常规沉积体系及储集体的沉积相模式, 对认识陆相盆地油气分布规律, 特别是勘探成熟区寻找各类隐蔽油藏奠定了储层沉积学的基础; 围绕油田开发开展了各类碎屑岩的微相和储层非均质性研究, 建立了一些正常沉积体系的非均质模式, 探索了各半定量的预测方法, 但对储层不同沉积规模内的非均质性, 尤其是微观及层内非均质性研究方面, 则起步较晚, 认识还不够系统和深入, 而且多限于宏观非均质性的几何形态及剖面特征方面; 加上钻井和剖面的限制, 很少做到三维空间的探讨及定量分析研究。自 1985 年开始, 中国石油天然气总公司将“油气储层评价研究”列入部级重点攻关科研课题。1990 年以前基本上为准备阶段, 随着储层评价研究协调领导小组编辑的《储层研究评价进展》一书的出版, 正式拉开了全国储层研究与评价的全面会战及大规模研究的序幕。“八五”期间, 国家重点攻关项目设立了不少储层评价和非均质性研究的课题, 现已取得了一些进展, 如: 新的储层评价分类标准(以孔隙度、渗透率、喉道配置关系为基准的分类)、作用沉积学与层内非均质响应的模式、不同成岩作用下的次生孔隙形成机理或演化模式、不同盆地碎屑岩充填沉积体系的模式和非均质特征、构造与沉积和成岩的综合一体化模式、储层模拟方法及随机建模软件等方面都取得了新的进展。



从目前来看, 尽管储层地质学, 尤其是地质模型的研究在某些方法上已达到国际水平, 但我国储层研究总体上还存在着一些差距或不足之处: ①在手段上还比较落后, 包括在地震和测井解释的精度方面, 与国际水平相比还相差甚远, 而且我国陆相盆地储层的特点为地球物理开发工作提出了更高的要求。在沉积地质方面, 一些测试手段虽已比较完备, 但像露头调查的一些手段还比较落后, 在计算机的图形显示方面还有一定的差距。②虽然大家已经明确了地质、地震、测井、测试及计算机相结合的优越之处和必要性, 但各学科联合作战方面尚很不足, 特别是综合研究还相当薄弱, 主要问题是科研人员的知识面较窄, 长期单学科独立作战的习惯和观念难以扭转。③在用计算机进行储层模拟和预测方面, 地质统计学进行储层地质模型建立中的内插和外推技术, 尽管在“七五”期间的油藏描述中已经应用, 但随着近年来分形几何学、混沌学等新学科的出现, 一些新方法的涌现, 为建立储层预测模型提供了多种思路, 而国内的研究力量仍相当薄弱, 特别是在地质和统计学结合方面还存在着一定的差距, 主要的问题是在储层模拟或随机建模中如何将定性的地质描述转换为定量模型的研究还不够深入, 这势必影响建立预测模型的进度。④在建立地质模型方面, 近几年已经引起了高度的重视, 但还没有普及, 许多储层地质工作者停留在原来的模式之中, 对各类模型的概念和建模思想了解得不够透彻, 储层表征和储层建模 (reservoir characterization 和 modelling) 尚未完全为人们所接受。⑤在地质知识库的建立方面刚刚起步, 这种以露头调查和现代地质调查工作为主的研究方法, 与传统的纯粹沉积学有很大区别, 又具有相当的自然条件和技术上的困难, 还需要进一步开展工作。⑥部分储层地质学工作者对油层损害和保护、二次采油和三次采油、数值模拟还知道不多, 阻碍了储层沉积学和成岩作用理论在指导开发中发挥更大的作用。

为了缩短我国与世界先进国家的差距, 提高现今油气勘探与开发的质量, 尤其是为进行二次或三次采油服务, 我国在“八五”期间投入了大量的研究工作。中国石油天然气总公司从“七五”开始便设立了“中国油气储层研究”这样一个涉及面十分广的大课题, 年投入资金数百万元。而“八五”期间这一课题已纳入国家“八五”计划, 编号为 85-103。由此可见储层研究在我国石油地质与开发地质中的重要性。地矿部系统在“八五”期间也设立了许多油气储层研究的子课题, 看来, 总结具有我国特色的油气储层规律和地质模型将是“九五”国家攻关计划的一个主要内容。

## 第二节 我国油气储层的主要分布规律和特色

我国油气储层类型众多, 从海相碳酸盐岩到陆相碎屑岩, 从火山岩到变质岩, 无所不有, 丰富多彩。但以陆相碎屑岩油气储层为主, 占现已探明总储量的 90% 以上, 这是我国构造、沉积及油气地质条件中的重要特色之一。我国陆相含油气盆地的性质、构造演化、储层类型及油气的生、运、聚、排、散各方面都具有其独特的一面, 它在世界石油地质中占有极为重要并不可忽视的地位。而我国中东部中、新生代盆地则以河流、三角洲沉积为主力油层, 这一最大特色是我们研究的实体和中心内容, 它们是碎屑岩中储层非均质性最严重的沉积环境, 故开展其储层沉积学和储层表征的研究具有十分重要的意义。因此河流、三角洲储层的描述是当前油藏描述不可回避的问题和中心内容。