

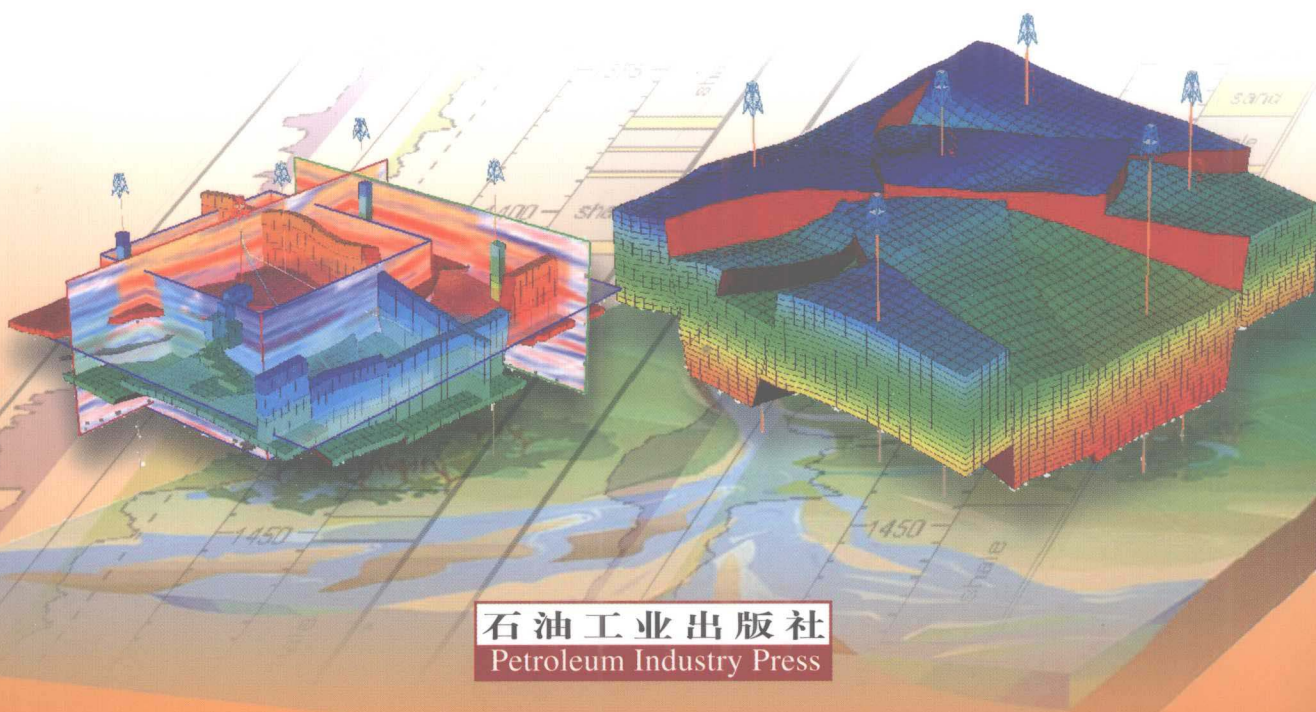


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校石油天然气类规划教材

油气储层地质学基础

于兴河 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校石油天然气类规划教材

油气储层地质学基础

于兴河 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要阐述了储层地质学的基本理论知识和研究方法, 涵盖油气储层的基本特征、形成与分布孔隙结构、成岩作用、非均质性、敏感性、地质建模及其综合评价等内容, 同时补充了 20 世纪 90 年代以来储层地质学的新进展和研究成果, 并加入了各参编人员的科研成果与多年来的教学经验总结。

本书为石油地质、油气田开发、石油工程等相关专业本科生的教材, 也可作为这些专业研究生的参考用书, 同时可供广大从事储层研究、油气勘探与开发的人员以及高等院校相关专业师生使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气储层地质学基础 / 于兴河主编.

北京: 石油工业出版社, 2009.4

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 978-7-5021-6710-3

I. 油…

II. 于…

III. 储集层 - 石油天然气地质 - 高等学校 - 教材

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 113822 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523694 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 25 插页: 2

字数: 638 千字

定价: 38.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

油气储层地质学是石油地质学领域中一个十分重要的分支学科，由于储层是构成油气藏的核心要素，因而，储层地质学的基础理论与方法对油气勘探与开发具有重要的指导作用。油气储层地质学是高等院校地质专业，尤其是石油地质与油藏工程专业本科教育的必修课程，相关高校均开设了此课程。在多年的教学与科研中，各位参编者均感到相关专业的学生对此课程学习的积极性较高，同时在科研与生产实践中该课程的内容也使用较广，许多科研工作者认为油气储层地质学是进行油气勘探与开发研究的基础课程。本书的各位参编者也都曾使用过此类参考书，并且均认为经过这些年的教学与科研积累，应编写一本更具有综合性的油气储层地质学教材，它应该既有基本油气储层地质学理论，又涵盖相关基本研究方法；既包括传统储层地质学内容，又应采纳一些新的研究方法与成果。在收集整理一些相关教学笔记、科研成果及同仁提出的一些问题的基础上，编者一直酝酿编写这样的一本教材，但苦于一个人的精力有限，同时也深感一家之言难含众家之所长，故迟迟未能动笔。本教材的编写契机最初源于中国地质大学（北京）于兴河教授申请并获准的教育部高等教育司教材编写课题，即普通高等教育“十一五”国家级规划教材《油气储层地质学基础》。与此同时，相关高校的许多同仁也正准备编写这样一部本科教材，为了避免重复，融合各家所长，统编《油气储层地质学基础》变得十分必要。

2007年6月，由石油工业出版社组织，中国地质大学（北京）、中国石油大学（北京）、中国石油大学（华东）、西南石油大学、西安石油大学、长江大学、大庆石油学院等院校在北京召开了储层地质学教材编写研讨会。与会专家一致认为应对该教材进行统编，并由于兴河教授任主编，拟定了本教材编写的指导思想：“建立扎实基础，拓展专业知识，了解学科前缘，提高理论水平，增强实际能力，强化素质教育。”该教材编委会的组成人员如下：于兴河、吴胜和、林承焰、王兴志、马世忠、侯加根、陈恭洋、李胜利、王宝清、廖明光、李红南、曹青等。

本书内容涉及（油气）储层地质研究的多个方面，各院校的教授与专家分别编写各章节内容初稿，以初稿为蓝本，于兴河教授结合国内外该学科的研究前缘、实际教学与科研成果对蓝本进行统修统编，几经修改，最终确定了本书的主要内容，包括：储层地质学的形成与发展历程概况、储层的基本物理特性与岩石学特征、储层地质的研究思路与方法、不同类型储层的形成与分布、储层孔隙结构与评价、成岩作用的分析方法与孔隙演化、不同层次储层的非均质性与流动单元划分、储层敏感性的机理与评价、储层地质建模方法原理与建模步骤、勘探与开发不同阶段储层的综合评价。各章节编写安排如下：第一章 储层地质学的形成、发展与趋势（于兴河）；第二章 油气储层的基本特征（于兴河第一、二节，李胜利第三节）；第三章 油气储层地质研究方法（陈恭洋第一、二节，于兴河第三节）；第四章 储集体的形成与分布（于兴河第一、二节，王兴志第三节，李胜利第四节）；第五章 储层孔隙结构（马世忠、廖明光）；第六章 储层成岩作用（于兴河，王宝清，曹青）；第七章 储层非均质性（于兴河第一、二、三、六节，林承焰与李红南第四、五节）；第八章 储层敏感性分析（侯加根，吴胜和）；第九章 储层地质建模（于兴河第一、二节，吴胜和第九节）。

三、四、五节)；第十章 储层综合评价 (李胜利、于兴河)；全书最后由于兴河教授全面统编定稿，建议课时为 60 学时。

本教材从统编开始就进行了广泛的学术交流，并一直得到参编人员的大力支持，在编写过程中，一些博士生与硕士生协助进行了相关章节的资料查寻、文字修改与查错等工作，主要人员有杨帆 (第六章、第七章、第八章)，邹德江 (第四章、第十章)，刘玉梅 (第二章)，李东梅 (第三章)，陈建阳、邓燕、高栋臣、苑坤 (第九章)，詹路峰 (第一章、第五章) 等，在此一并表示感谢。

特别值得一提的是参加本书编写的全体人员的家属，在本书漫长而繁忙的编写和修改的过程中，表现出极大的耐心、热情及全身心的支持，在此由衷地表示感谢！

鉴于国内外的相关书籍很多，加上知识更新又十分迅速，并且由于篇幅与时间关系，难免挂一漏万，错误与纰漏也在所难免，望各位专家与同仁不吝批评和指正。

编 者

2008 年 11 月 30 日

目 录

第一章 储层地质学的形成、发展与趋势	(1)
第一节 储层地质学的概念与研究内容.....	(1)
第二节 储层地质学研究的动态与趋势.....	(4)
第三节 国内外油气储层研究方向.....	(9)
思考题.....	(15)
第二章 油气储层的基本特征	(16)
第一节 储层的物理特性.....	(16)
第二节 储层的几何特性.....	(26)
第三节 储层的岩石学特征.....	(33)
思考题.....	(45)
第三章 油气储层地质研究方法	(46)
第一节 沉积相的地质研究方法.....	(46)
第二节 储层的测井研究方法.....	(62)
第三节 储层的地震研究方法.....	(85)
思考题.....	(102)
第四章 储集体的形成与分布	(103)
第一节 储层形成的沉积作用.....	(103)
第二节 碎屑岩储层特征及其分布规律.....	(108)
第三节 碳酸盐岩储层特征及分布规律.....	(141)
第四节 其他岩类储层特征及其分布.....	(158)
思考题.....	(167)
第五章 储层孔隙结构	(168)
第一节 储集岩的孔隙和喉道类型.....	(168)
第二节 孔隙结构的研究方法.....	(181)
第三节 孔隙结构参数的定量表征.....	(191)
第四节 孔隙结构的分类与评价.....	(197)
第五节 孔隙结构的应用.....	(205)
思考题.....	(209)
第六章 储层成岩作用	(210)
第一节 成岩作用分析测试方法与内容.....	(210)
第二节 碎屑岩成岩作用和孔隙演化.....	(218)
第三节 碳酸盐岩成岩作用及孔隙演化.....	(237)
第四节 成岩序列与演化模式.....	(242)
思考题.....	(257)

第七章 储层非均质性	(258)
第一节 概念与主要影响因素.....	(258)
第二节 储层非均质性的分类.....	(260)
第三节 宏观非均质性的研究.....	(265)
第四节 微观非均质性的研究.....	(275)
第五节 储层流动单元.....	(278)
第六节 储层非均质性与油气采收率.....	(289)
思考题.....	(293)
第八章 储层敏感性分析	(294)
第一节 储层敏感性机理.....	(294)
第二节 储层敏感性评价.....	(303)
第三节 开发过程中储层性质的动态变化.....	(314)
思考题.....	(324)
第九章 储层地质建模	(325)
第一节 基本概念与模型类别.....	(325)
第二节 储层建模的数理基础.....	(332)
第三节 储层建模方法.....	(344)
第四节 储层建模的程序与具体步骤.....	(354)
第五节 储层建模的策略.....	(359)
思考题.....	(361)
第十章 储层综合评价	(362)
第一节 不同勘探与开发阶段储层综合评价的内容.....	(362)
第二节 储层综合评价的资料基础与方法.....	(375)
思考题.....	(382)
参考文献	(383)

第一章 储层地质学的形成、发展与趋势

储层地质学是一门从地质学角度对油气储层的主要特征（几何特性和物理特征）进行描述、评价及预测的综合性学科。它从20世纪中期形成以来，经历了快速的发展，最初以油藏描述为基础，运用地质统计学随机建模技术进行储层非均质性研究，随后发展起来的储层表征技术，运用定量的方法和随机建模技术建立储层的预测模型，使储层地质学成为石油地质工作的热门研究领域。目前，随着国内外油气勘探和开发的不断深入，储层地质学的研究正日益从宏观向微观、定性向定量、单学科向多学科方向发展，同时也面临储层内部结构分析、井间储层物性预测、储层连续性确定等科学难题。

第一节 储层地质学的概念与研究内容

现代石油工业从形成至今，已经历一个半世纪的风风雨雨，此间石油地质学不仅从无到有，而且已发展成为地学中一个十分重要、蒸蒸日上的分支科学。储层地质学作为石油地质学中的一个核心分支学科，在石油工业的迅速发展中有举足轻重的地位。当前油气勘探与开发的需求与瓶颈问题已为其发展提出了许多科学问题与挑战，这也成为新一代石油地质学家与油藏工程师为之奋斗的目标。

一、储层地质学的兴起

现代石油工业形成之始，人们就有了“油藏（储层）”的初步概念，其标志是1859年Edwin Drake在美国宾夕法尼亚所钻的第一口工业油井。20世纪之前，西方国家刚经历了第一次产业革命，对能源的需求有明显增长，那时对油气藏还没有形成一个十分明确的认识。20世纪之初，人们对油气分布规律的认识仅限于背斜说，这个时期的石油工业以勘探为主体，油气田发现后交由石油工程技术人员管理开采，地质学家并不参与石油的开采活动。1917年美国石油地质学家协会（AAPG）成立和AAPG Bull的出版，为石油地质学的诞生起到了重要的促进作用。1921年，第一本《石油地质学》（Emmons）问世，这时已对油气藏（储层）有了一个初步的认识。20世纪30年代之前，石油勘探的核心主要是寻找含油构造，油田发现后，石油公司抢占油区，进行盲目性开采，并没有对储层进行详细而系统的研究。20世纪30~40年代，当时的主要石油输出国美国、苏联、墨西哥及委内瑞拉等采用较为保守的开采方法，限制井距与单井产量以保护油田的生产，地质学家对造成井间干扰的油层物理、渗流力学、油藏工程等问题，以及对制约油田开发的开发地质问题已有初步认识，但没有进行系统地研究。

20世纪40年代，主要产油国已开始采用污水回注开发方法，这是油田开发的一次历史性革命，即二次采油。1949年美国成立了石油工程师协会（SPE），这可以说是地质学进入油藏工程研究阶段的开始，也标志着开发地质学开始形成。20世纪50年代，二次采油成为油田开发的主体，这为开发地质走向成熟及全面发展创造了契机，人们从这个时期开始认识到小层对比和测井参数解释图版是研究含油砂体连续性的核心，其结果直接影响油田开发的井网布置。

1946年苏联专家M. Ф. 钦克出版了《油矿地质学》，1949年美国的J. D. Haun和L. W.

Leroy 编著了《石油勘探地下地质学》，这两本书在当时具有明显的代表性。前者可以说是创立开发地质学的代表作，着重从注水开发的角度论述了油田开发早期的一系列基础地质问题；后者更多地侧重于录取和建立钻井地质剖面的方法。这些研究成果代表储层地质学已初见端倪。

20 世纪 50 年代，随着我国大庆油田的发现，我国学者裘亦楠先生就开始深入研究油层的基本单元——油砂体，并在 1964 年发表的《油田地质研究的几个基本问题》中，明确提出了油砂体的概念及研究方法，这是我国最早提及“开发地质”概念的文章。油砂体的描述实际上就是后期油藏描述的初级阶段。另外，由于此时沉积学已基本成熟，加上沉积学理论的不断提高与深化，国内外学者已将沉积相的概念引入储层的研究之中。20 世纪 60 年代后期，随着油田生产实际的需要，运用沉积学的理论和方法来解决石油勘探开发中的储层特征描述及分布问题，引起石油地质学家和油藏工程师们的高度重视。他们将油层物理与油矿地质学相结合，尤其是将储层沉积学的研究方法融汇到油矿地质学中，这就形成了储层地质学。

二、定义及相关概念

（一）储层地质学

储层地质学又名开发地质学，指油气田投入开发后，地质工作者应用地质、地球物理、油层物理、分析化验等资料，以储层沉积学为指导，利用计算机等先进的技术和设备对储层和地下流体特性进行详细描述和预测的一门学科。

石油的生成与储集是石油地质学中的两大核心问题，因此，储层地质学是石油地质学的一个重要分支，是在油气田勘探与开发长期实践中逐渐兴起和完善的一门综合性、实践性较强的边缘学科。

（二）油藏描述

油藏描述的概念是 20 世纪 70 年代由斯伦贝谢公司提出的，当时该公司以测井为主推出了一个油藏描述服务系统软件（Reservoir Description Services—RDS）。20 世纪 80 年代以来，各石油公司与研究者将其扩展为利用地震、测井、地质等多学科来研究油气藏的特征，目前已形成一套综合的油气藏研究方法。

油藏描述是以沉积学、构造地质学和石油地质学的理论为指导，用地质、地震、测井及计算机手段，定性分析和定量描述油藏在三维空间中特征的一种综合研究方法。其内容包括油藏的类型、储层内部结构、外部几何形态、沉积与油藏规模大小、储层参数变化和流体分布状况，储层沉积学与储层地质学是其研究的核心内容。油藏描述的目的是对油藏各种特征（圈闭、储层、流体）进行三维定量描述和预测。由于油气藏的勘探与开发具有明显的阶段性，因而，油藏描述在不同的勘探开发阶段也具有不同的研究目的与内容（表 1-1）。

（三）储层表征

1986 年，L. W. Lake 将储层表征定义为：“定量地确定储层的性质、识别地质信息及空间变化的不确定过程”。其地质信息应包含两个要素或内容（表 1-2）：（1）储层的物理特性，主要是指某一储集体内部物理特征（孔隙度、渗透率、含油饱和度）的不均一性——非均质性；（2）储层的空间特性，即储层在空间上的外观形体特征——三维空间上岩性的变化或延伸范围，故也称构型，在进行储层建模过程中多是指其各向异性。前者的核心主要是分析其内部物性，尤其是孔隙度、渗透率、饱和度在储层内部、层间及平面上的分布特点，而后者重点是研究储层的岩性特征（沉积微相）及其在空间上的展布。就沉积储层而言，控

制和影响储层这两大特性的因素，首先是形成时的沉积作用，其次是成岩作用，即沉积格局或沉积作用的多样性与成岩作用的复杂性是影响储层的重要因素 (Mojtaba et al., 1986)。

表 1-1 不同阶段油藏描述的目的与研究内容 (据于兴河, 2002)

阶段	勘探阶段		开发阶段	
	勘探早期	勘探中后期	开发早期	开发中后期
资料状况	一口发现井	评价井为基础	第一批开发井网	生产动态
研究目的	探明油气藏	评价油气藏	优化开发方案, 提高开发效率	调整开发方案、加密钻井、提高采收率
研究内容	利用地震信息, 研究油气藏类型、储集体规模、油气层分布等	发挥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描述	利用已有的开发井网开展油层的精细划分与对比, 沉积微相研究, 进行综合测井解释与评价, 分析储层的渗流地质特征	结合动态资料开展井间储层表征, 分析流体属性参数变化的规律, 预测剩余油的分布
最终成果	提交控制储量和提出评价井位, 优化勘探部署	建立油藏概念模型, 提交探明储量	建立静态地质模型	建立储层预测模型, 提交加密钻井的井位与层位

表 1-2 油气储层地质信息的内涵

储层地质信息	物理特性 即非均质性
	空间特性 即各向异性

因此, 储层表征的目的是提供一个储层构型格架, 即具有上述两大信息的储层地质模型。从某种意义上讲, 储层地质模型是决定油藏模拟或储层建模结果的主要因素。

(四) 异同点

从定义上来看, 油藏描述与储层表征两者之间具有明显的差异, 但是在实际工作中, 人们有时又将它们作为同义语来使用。大多数人认为油藏描述的重点是使用地球物理的方法对实际油藏各种特征的具体描述, 其描述内容除了储层本身外, 还包括流体的特征与油藏类型等。而储层表征的重点则是定性研究和定量表征储层本身的两大地质特性。前者以油藏的地质特征描述为主, 强调静态研究与所采用的技术方法, 以建立油藏的静态模型为目的; 而后者则以储层两大特性的研究和成因解释为主, 强调定量与形成的动态过程, 以建立预测模型为宗旨。

储层地质学则是两者的核心内容或基础, 它是以储层的物理特性和几何特征研究为中心, 以地质和地球物理资料的使用与解释为手段进行各种分析与研究, 以解决储层的各向异性和非均质性为目的, 最终建立储层的各种地质模型。

三、研究内容及其意义

储层地质是油气勘探开发过程中的一项系统工程。在区域勘探阶段, 需研究储层层位、成因类型、岩石学特征、沉积环境、构造作用、物性、孔隙结构特征、含油性、储集岩体几何形态、储集体分布规律, 以及对有利储层分布区的预测, 这些都属于储层地质学的重要研究内容 (表 1-3)。

表 1-3 储层地质学的任务、内容及学科基础

任 务	核 心 内 容	学 科 基 础
对储集体的外观形体与内部属性的空间展布进行预测	物理特性——非均质性； 几何特性——各向异性	沉积岩石学、岩石学、古生物和古生态学、构造地质学、石油地质学、有机地球化学、油层物理学、层序地层学和地震地层学、矿场地球物理学、岩石力学、渗流力学、钻井工程和采油工程等

在开发阶段，开发井网布置和开发方案的制订、油层保护和改造、开发过程中剩余油分布的分析和油田调整方案的制定、提高采收率优化方案的设计和和实施，都要求对储层进行综合研究。此外，在分级储层评价中，探明地质储量和预测可采储量，建立储层模型以及油藏描述等工作都是建立在储层地质研究基础上的。

油气储层地质学是一门多学科、多技术的综合性学科，涉及内容有沉积岩石学、岩石学、古生物和古生态学、构造地质学、石油地质学、有机地球化学、油层物理学、层序地层学和地震地层学、矿场地球物理学、岩石力学、渗流力学、钻井工程和采油工程等学科。它需要多学科的协同配合，同时，它又促进了上述学科的发展。

第二节 储层地质学研究的动态与趋势

一、储层研究的地位与面临的挑战

1986 年的世界石油价格暴跌致使整个石油工业不得不降低成本。大多数有远景的低勘探成熟度含油气盆地都处于勘探费用较高的边远地区，油气勘探与生产成本较高，致使世界上主要产油国把重点转向勘探成熟区和对已开发油田挖掘增储上产的潜力。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、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 万亿立方米。然而，挖掘这部分储量遇到了两个新的挑战：一是必须更精确地描述储层特征，按油藏规模描述砂体的连续性、储层物性的空间分布及岩石内部微观特征等；二是改善或提高认识储层非均质性的手段，包括储层的静态和动态特征。解决这些问题的方法之一就是开展储层表征及建模研究。

全世界各大石油公司的状况都是如此，例如：在 1981—1990 年的十年间，皇家壳牌石油公司经营的油田（除北美以外）可采储量增长了 36 亿标准桶，在油田扩边后，还将增加 10 亿标准桶的可采石油储量（Michael, 1993）。这是由于储层表征（50%）和地质学、地震学及岩石物理学资料的修正（30%），以及钻井结果的重新评价与开发（20%）使可采储量得以显著增加。

自 2002 年以来，由于受世界经济的波动、供需失衡论、石油枯竭论和政治因素的影响，世界石油价格一路飙涨，刺激各大石油公司增加对石油勘探的投入，尤其对特殊、隐蔽、深水以及边界地区的各类可能存在较大规模的油气圈闭进行广泛而深入的勘探。高油价使过去认为无经济价值和勘探难度较大的油区获得了生命力，拓展了油气勘探在方法和技术上的创新与完善。然而，2008 年受美国经济危机的影响，世界油价飙升后的迅速跌落，再次刺激石油工业重新考虑降低成本。而众多成功的经验与失败的教训告诉人们，油气勘探新理论与新技术能否充分结合，或者说地球物理学家与地质学家能否同舟共济已成为油气勘探能否突

破与发展的核心，油藏工程师与地质家的思维融合是提高采收率的关键所在。油价的高位波动促使油气勘探与开发都更加注重难度较大、费用较高的精细油气储层表征与建模技术研究。

目前在全世界范围内大约有 20% 的可动用石油储量，因储层在垂向上和平面上的各种非均质性隔挡和界面条件被滞于地下而无法采出。同时，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，各种非均质性隔挡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）是储层研究中极为重要的一个课题。

二、油气储层研究的历史与展望

（一）储层地质学的形成与发展阶段（1966—1983）

1971 年美国的 MacKenzie 首次明确提出了“储层地质学”的概念，着重从储层的沉积特征、油层的对比以及砂体的连通性等方面进行了论述。随着油田勘探与开发的不断进行，寻找优质储层和提高采收率已成为石油界两个极为关注的问题。这个时期是多学科、多方位相互交叉开始进行储层研究并形成专业分支的核心时期。

1. 油藏描述的提出与形成

1966 年 Jahns 等在 SPE 上发表了《应用井底压力响应资料快速获取二维油藏描述的方法》，可以说它是最早用到“油藏描述”一词的文章。随后 Coats 于 1970 年又在 SPE 上发表了《用油田生产动态资料来确定油藏描述的新技术》。

油藏描述最初形成时的代表技术应是由斯伦贝谢公司在 20 世纪 70 年代提出以测井为主体的油藏描述技术。20 世纪 70 年代末至 80 年代初，斯伦贝谢公司首先研制了油藏描述服务系统（Reservoir Description Services—RDS），并在阿尔及利亚等地区进行了应用，取得了明显的效果。应当说这个时期是油藏描述的图件表达阶段，并没有以建立地质模型作为核心内容，其基本方法是以测井为主体的模式化技术、多学科的协同研究。随后的十年间，各石油公司纷纷引用并迅速发展了这一技术，将其扩展为用地震、测井、地质等多学科来研究油气藏的特征，目前已形成一套综合（集成）的油气藏研究方法和技术。因此，当代油藏描述的核心是采用各种资料，运用地质统计学的确定性建模方法来建立油藏的静态地质模型。

2. 储层沉积学的形成

20 世纪 60 年代世界上发现了一系列大油气田，勘探家与油藏工程师们希望以较少的钻井资料，对油气储层的特征与分布作出较为正确的评价与预测，并在勘探开发中取得较好的经济效益。这就要求对油气藏，关键是储层的空间展布与内部物性的变化规律作出科学的预测和描述。由于这些生产实际的需要，20 世纪 60 年代后期，出现了应用沉积学的理论和方法来解决石油勘探开发中的储层特征描述及分布问题，而且立即引起石油地质学家和油藏工程师们的高度重视，储层沉积学也随之而诞生。20 世纪 70 年代以后，随着石油工业的迅速发展与各种测试手段的涌现，储层沉积学逐步走向成熟，目前在油气勘探和开发的实践中得到了许多成功应用。

3. 储层非均质性概念的形成

无论是常规储层还是特殊储层，其四性（岩性、物性、电性及含油性）在三维空间上

都是变化的，储层各种属性在空间上的变化就是储层的非均质性。非均质性对油气田的开发效果影响很大，尤其是对地下油气水的运动、提高油田采收率影响深远。

4. 随机建模技术

1963年马特隆提出了“地质统计学”(Geostatistics)的概念：“随机函数形式体系对于自然现象调查与估计的应用”，是以研究各种地质变量的空间相关性为基础，由变量的空间相关性分析、克里金估值及随机模拟三大部分组成。克里金法是一个计算插值函数方差最小的估值法，是确定性建模的数学理论基础。20世纪70年代初期，马特隆的学生儒尔奈耳(1974, 1978)在其发表的论著中讨论了随机模拟在矿业中的应用，文中称随机模拟为条件模拟，并创造性地将地质统计学应用到了石油勘探开发领域，形成了石油地质统计学，随后得到了十分广泛的应用与发展。

克里金方法与以概率统计为基础的蒙特卡洛法(Monte Carlo)相结合形成了随机模拟的数学理论基础，随机模拟在油藏(储层)描述中的应用，在20世纪80年代后期被世界各国的同行称为随机建模。

早在1966年，Bennion等就在SPE上发表了《用随机模型来预测储层物性》，这是最早公开发表的关于随机建模的文章。1982年，挪威Hydro石油公司的哈得逊(Haldorsen)博士和他的老师莱克(Lake)教授共同发表了一篇关于利用统计学方法对油田尺度模拟模型中泥岩空间分布进行管理的论文，文章的特点是应用储层建模的思想来解决油气储层的空间预测问题，它标志着储层随机建模技术的形成。

(二) 储层表征的形成与发展阶段(1984—1995)

国内外在20世纪五六十年代开发的油田大多已进入高含水期，其剩余油气的评价与预测就显得十分重要，这就要求人们分单元对储层内剩余油气进行预测，随之出现了流动单元的概念。然而随着油田勘探与开发的不断深入，多学科的渗透，尤其是地质统计学的引入，储层地质学在油藏描述的基础上更趋于量化，为满足储层预测模型建立的目的，诞生了储层表征的概念。

在此期间我国出版了多本以储层地质学为题的教科书：1996年8月，戴启德、纪友亮主编的《油气储层地质学》，1996年吴元燕编写的《油气储层地质》，1998年12月，陈军中编写的《定量储层地质学》，1998年方少仙、侯方浩主编的《石油天然气储层地质学》，1998年吴胜和、熊琦华编写的《油气储层地质学》，1998年强子同编写的《碳酸盐岩储层地质学》，2005年11月，姚光庆、蔡忠贤编写的《油气储层地质学原理与方法》等。它们均是满足各石油与地质院校储层地质学课程用书而编写的教材。

1. 流动单元的提出

1984年，Hearn等在对美国怀俄明州Hartzog Draw油田的Shannon砂岩储层进行研究时，首次提出了岩石物理流动单元的概念。1988年，Rodriguez等用渗透率、孔隙度、粒度中值的多坐标交汇法划分流动单元，提出了两种划分流动单元的方法。1993年，Amaefule等提出的“流动单元”的概念比Hearn等提出的更具体。1995年，Ti Guangming等在研究阿拉斯加北斜坡Endicott油田的储层时，对流动单元做到了真正意义上的定量研究。1997年Alden等提出，压汞曲线上进汞饱和度大于35%时的孔隙半径 R_{35} 的大小可以反映岩石中的流体流动和开发动态，因此可用 R_{35} 值来划分流动单元，并认为流动单元是孔隙半径 R_{35} 均匀分布的、具有相似的岩石物理性质并使流体连续流动的储集层段。

裘亦楠教授认为流动单元是砂体内部建筑结构的一部分，同时还指出流动单元是一个

相对概念，应根据油田的地质、开发条件而定。1996年，裘亦楠和穆龙新教授等进一步阐述了这一思想，认为储层的非均质性具有层次性，油田处在一定阶段，由某一层次非均质性引起的矛盾为主要矛盾，此时可以把下一层次的非均质性看成是均质的，即作为油水运动的基本单元。目前的“流动单元”应指一个油砂体及其内部因受边界限制的不连续薄隔挡层，各种沉积微界面、小断层及渗透率差异等造成的渗流特征一致的储层单元。

2. 储层表征的形成

储层表征的概念最早是由美国能源部研究院提出的。由美国俄克拉荷马州巴特列斯维尔国家和能源部研究所 (NIPER) 主办，于1985年4月29日至5月1日在美国得克萨斯州 Galleria 召开的“第一届国际储层表征会议”上，经大会组织委员会第一次会议讨论，由大会主席 Larry W. Lake 陈述为：定量地确定储层的性质（特征）、识别地质信息及空间变化的不确定性过程，其地质信息应包含两个要素或内容。它们为：(1) 储层的物理特性，主要是指某一储集体内部物理特征（孔隙度、渗透率、含油性）的不均一性——非均质性；(2) 储层的空间特性，即储层在空间上的外观形态特征。

于兴河 (2008) 认为，定义中的“不确定性过程”是指所建立的模型是多个而不只是一个；多个模型之间的差别正说明了其不确定性，对多个模型采用各种方法进行优选，选出相对确定的一个或几个模型。因此，储层表征的核心就是运用各种资料、采用定量的方法与随机技术建立储层的预测模型。

1990年12月的 SPE 丛书 No. 27 对储层表征进行了较为详细的解释：储层表征是一个油藏（储层）地质学与数学相结合的科学，它寻求定量地确定油藏渗透介质中预测流体流动所需的各种参数，虽然预测方法可以各种各样，但是油藏数值模拟是现在最重要的一种。确定油藏数值模拟所需的地质输入数据主要包括地质、岩石物理、地质统计、拟函数及地震成像数据。然而，在2001年，由 AAPG 出版的《储层表征新进展》一书中，作者 (Schatzinger 和 Jordan) 将其目的解释为四个方面：(1) 保证高驱替效率；(2) 最优化扫油效率；(3) 提供可靠的油藏动态预测；(4) 降低风险及效率最大化。

从储层表征的提出至今，美国能源部为此召开了四次国际会议（表 1-4），参加会议的人数一次比一次多，人员来自世界各地，以欧美为主。另外，进入 21 世纪后，每年美国的 AAPG 年会上都有一个主题是储层表征与建模，这或许是美国能源部没有再单独举办这种专业会议的原因。

表 1-4 历届国际油气储层表征会议情况一览表

时 间	届 次	地点、人数	主题 内容
1985 年 4 月	第一屆	得克萨斯州的 Galleria, 175 人	四个主题：(1) 地质及岩石物理基础；(2) 空间可变性；(3) 模拟参数确定；(4) 非均质性介质中的流体流动
1989 年 6 月	第二屆	得克萨斯州的 Dallas, 233 人	首次从层次规模（或尺度）进行划分，分为微观非均质性、宏观非均质性、大型非均质性和巨型非均质性四个技术主题分会场
1991 年 11 月	第三屆	俄克拉荷马州的 Tulsa, 247 人	(1) 非均质性及各向异性；(2) 油田研究和数据需求；(3) 储层建模与井间描述；(4) 最优油藏管理
1997 年 3 月	第四屆	得克萨斯州的 Houston, 256 人	旨在讨论 1985 年首届会议以来储层表征技术的最新进展，会议主要议题有：油藏描述、改善和提高采收率、方法与技术、裂缝分析、仿真和建模

需要说明的是，油藏描述与储层表征有着较为明显的差异，前者的核心重在用各种地质与地球物理资料（地震与测井）对油藏进行细致的描述，主要以建立油藏的静态地质模型为目的。而后者则主要是应用地质统计学的方法对各种资料（地质、测井及地震）进行分析，以建立储层（油藏）的预测模型为目的。因此前者多是确定性建模，而后者则多是随机建模。当然国内外也有很多学者将两者看作同义词，因为两者之间并没有截然的界线（图 1-1）。

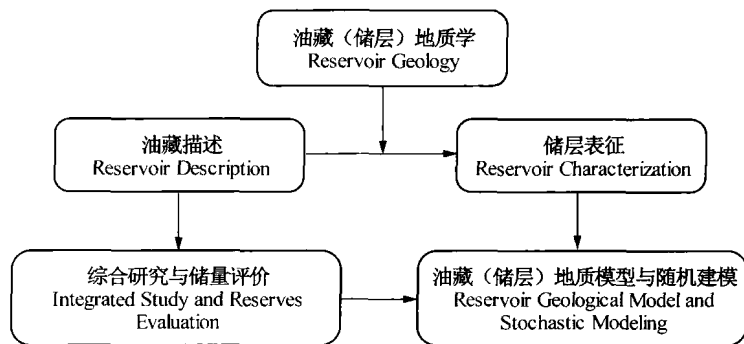


图 1-1 储层地质学、油藏描述及储层表征三者之间的相互关系（据于兴河，2002）

3. 储层非均质性的专业化

1986 年 Weber 在对油田进行定量评价和开发方案的设计中，根据 Pettijohn 的分类思路，着重从封存箱的角度来考虑油藏的分隔性，提出了一个更为全面的分类体系，主要是增加了构造特征、隔夹层分布及原油性质对储层非均质性的影响。1989 年 Weber 和 Geuns 在研究储层的模型特征时，为了更好地描述和简化砂体几何特征，将砂体在空间的叠置形式与展布特征综合成储层的空间结构形体，分为三种：（1）拼块状（Jigsaw Puzzle）；（2）迷宫状（Labyrinth）；（3）千层饼状（Layer Cake）。这三种基本结构可以说是从空间定量方式的角度给出的储层非均质性概念，主要是针对海相碎屑岩储层的总结，考虑到陆相碎屑岩的沉积特点，于兴河（1997）提出第四种储层的空间结构形体，即（4）夹心状或馅饼状（Stuffing Pie）。

我国学者裘亦楠（1985，1987，1992）根据多年的工作经验和 Pettijohn 的思路，结合我国陆相储层的特点，既考虑了非均质性的规模，也考虑了开发生产的实际，分层次将碎屑岩储层的非均质性由大到小分成五类：（1）微观非均质性；（2）基本岩性物性；（3）层内非均匀质性；（4）平面非均质性；（5）层间非均质性。这个分类适合我国的国情，也便于操作，在我国得到了广泛应用。

4. 随机建模方法与软件

20 世纪 90 年代由于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，加上井间砂体的预测和砂体规模的确定已成为油田开发地质亟待解决的问题，这些为储层预测和油田开发服务的各种储层建模方法和软件不断涌现奠定了基础，并逐渐形成了三大学派：（1）以 Journel 和他的学生为首的北美（美国斯坦福大学和加拿大阿尔伯特大学）学派，以序贯指示模拟（SIS）和序贯高斯模拟（SGS）方法为主；（2）以法国 Matheron 和他的学生 M. Armstrong 和 A. Galli 为首的法国地质统计中心学派，以截断高斯模拟方法（TGS）为主；（3）以 Haldorsen 和 H. Omre 为首的挪威学派，以示

性点过程模拟方法为主。

这个时期是储层建模软件发展最快的时期，随机建模方法作为国际上众多石油公司、研究所和大学竞相发展的一门技术，每年有大量的论文和研究报告问世。常见的软件有：美国新墨西哥矿业技术学院开发的 TUBA 软件；美国地层模型公司 (Strata Model) 研制的 SGM 软件；荷兰 Jason 公司推出的 StatMod 模块；美国 Dynamic Graphic 公司开发的 EarthVision 软件；美国德士古石油公司推出的 Gridstat 软件；挪威 Smedvig Technologies 公司研制开发的 STORM，后发展为 RMS 软件；斯伦贝谢公司推出的 Petrel 软件；法国国家科学研究中心研制开发 GOCAD 软件；英国 VoluMetrix 公司开发的 FastTracker 软件；Landmark 公司推出的 PowerModel 软件；美国储层表征研究与咨询公司推出的 RC² 软件；加拿大 Hampson-Russell 公司推出的 Geostat 模块；俄罗斯的 Geovariances 公司研发的 Isatis 软件以及美国的 Prism Seismic 公司 CRYSTAL 软件等。这些软件可以说全部是在以上三大学派研究的基础上应用与开发出来的，包括 Deutsch 和 Journel 开发的 GSLIB。因此，这些软件大多都提供了 SIS 和 SGS 这两种经典的方法。这些是国外产学研相结合，企业重视将科学理论发展成技术并形成产业化推向市场的具体体现。而我国在此方面的起步较晚，关键是还没有形成产学研相结合的路子，大多只是高校与科研机构进行一些应用方面的研究，编制一些小程序，没有形成良好的软件系统并推向市场。

(三) 储层地质学展望

目前国际上对油气地质勘探与开发的研究进展很快，新方法、新理论的不断出现，使储层地质学从单一性学科向多学科协同发展，现已成为石油地质学的三大研究领域（沉积盆地分析、层序地层学研究和储层表征或建模）之一。可以说它是今后一个时期或跨世纪石油地质工作的热门研究领域。笔者对我国东部断陷盆地油气勘探工作已进行多年，有了很好的基础，正是在这样的学科背景和前提下，笔者认为今后石油地质学科开展研究的总体技术路线为：从实际资料入手→构造演化机制分析→层序地层的划分→沉积体系和体系域的研究→总结构造演化对沉积相分布的控制以及与油气储层的配置关系→完善成藏系统→建立储层地质模型→达到储层预测，最后实现盆地不同构造演化时期与油气储层展布的一体化模式，做到储层的盆地规模和井间规模的预测与模拟。由于它所涉及的学科领域较多，尤其是要求研究者具有较全面的石油地质学知识和扎实的数理与计算机基础，因而，对现在的石油地质工作者提出了更高要求。

目前，我国的石油地质工作，特别是在新技术的发展方面与国外的确还存在着较大的差距，但是简单地与国外进行对比和“临摹”的思维习惯对我们总结和创造有自己特色的地质理论是有一定害处的（刘宝珺，1992）。因此，我们现在的石油地质工作的重点应是如何处理好引进—吸收—创造三者的关系，发展“理解性思维，创造性研究”的路子，进而总结出具有中国石油地质学的特色理论，为我国的油气资源勘探与开发服务。

第三节 国内外油气储层研究方向

一、储层地质学的研究日益从宏观向微观方向发展

近年来，随着碎屑岩系油气藏开发与岩性隐蔽油气藏勘探的深入，要求掌握各

种不同沉积环境下所形成砂体在时空上的展布规律及几何学特征 (Ravenne, 1989; 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和连续性, 即宏观非均质性的研究。为此, 开展储层沉积学的研究和建立储层地质模型越来越受到人们的重视。然而, 储层的微观孔隙结构、孔隙中的粘土杂基及自生粘土矿物不仅对驱油效率有明显的影响, 还对储层产生不同程度的伤害。这就要求研究储层的微观非均质性, 采取合理的措施为储层保护提供可靠的地质依据。

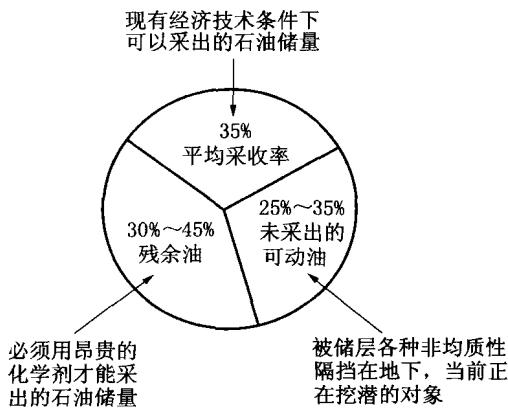


图 1-2 不同技术条件下油气采出状况 (据裴亦楠, 1993)

一般来说是将储层细分成多个流动单元来挖掘二次采油未波及部分的可动油。根据美国发表的统计数字, 平均采收率为 35%, 残余油为 30% ~ 45%, 未采出的可动油为 25% ~ 35% (图 1-2)。可动剩余油分布的预测则是目前攻关的难点。控制剩余可动油的地质因素很多, 主要包括不同层次的非均质性及断层等遮挡引起的井网控制程度问题等, 目前宏观非均质性的描述技术已经过关, 主要难点是层内规模的更细、更微观一级非均质性的深入研究, 以及一些地质现象的三维空间描述, 即井间预测问题。

二、储层的描述和预测日益从定性向定量方向发展

为了对地下储集砂体的孔隙度、渗透率进行计算和预测, 以满足油气生产的实际需要, 不少学者进行了大量的研究工作 (M. Scherer, 1987; Schmohr, 1989; Robert, 1991; D. P. Edward, 1992; Dutton, 1992), 并提出了一些经验公式或数学模型, 但往往这些公式中的一些参数在实际应用中难以或无法确定, 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性。

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、含油饱和度等做到定量而准确的预测。因此, 储层建模 (尤其是随机建模) 与模拟成为预测储层物性和非均质性的主要方法。

目前, 人们已经认识到对这些储层物理特性的预测应充分考虑其形成时的沉积环境、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。

定量描述和预测砂体在横向上的连续性或空间展布特征, 即开展储层随机建模或模拟研究已成为储层地质学家近年来的重点攻关内容, 这也正是为满足油田开发、钻加密井和扩边井的迫切需要。储层沉积学是这一研究的基础, 计算机技术是实现其目的的重要手段。随机建模技术的关键是发展地质统计技术和各种条件模拟、非条件模拟技术, 加上地质约束及物性的统计规律限制, 求出各储层参数空间分布的非均质性面貌, 即逼近地质真实的一种或多种可能的实现。