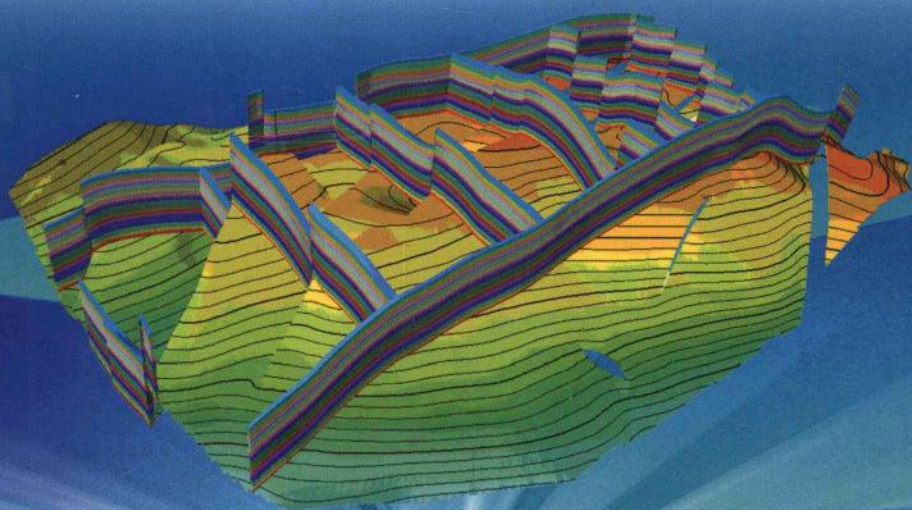


高等学校教材

油田开发地质学

张金亮 谢俊 等编著

By Zhang Jinliang and Xie Jun



DEVELOPMENT GEOLOGY

石油工业出版社

Petroleum Industry Press

高等学校教材

油田开发地质学

张金亮 谢俊 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统阐述了油田开发地质学的基本理论和研究方法,详细介绍了高分辨率层序地层学、精细构造、沉积微相、储层评价、地质建模、油藏动态分析和油藏数值模拟等内容,强调了静态与动态相结合的研究方法,揭示了注水开发油藏影响剩余油分布的主控因素,并给出了油田生产实例,力求从理论和实践相结合的角度促进对相关知识的掌握。本教材既概括了砂岩油藏注水开发地质的新理论、新技术和新方法,又介绍了油田开发的实际经验,总结了当今这一领域的最新研究成果和发展趋势。

本书可作为高等学校石油地质和石油工程专业本科生和研究生教材,也可供从事油气田勘探开发生产的管理人员、工程技术人员、开发地质人员和科研人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

油田开发地质学 / 张金亮, 谢俊等编著.

北京: 石油工业出版社, 2011. 5

ISBN 978 - 7 - 5021 - 8309 - 7

I. 油…

II. ①张… ②谢…

III. 油田开发 - 石油天然气地质

IV. P618. 130. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 032754 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

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 25.5

字数: 640 千字

定价: 65.00 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

序

我国油田经过数十年注水或三次采油开发，地下油、气、水分布关系更加复杂，储层非均质更加严重，油田产量递减速度进一步加快、稳产难度进一步加大，“三高二低”（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）的开发矛盾愈加突出，仍有大量石油（约65%）在现有技术条件下不能采出，油田开发工作遇到了前所未有的挑战。因此，必须在油气储层精细评价及油藏开发技术上不断创新，才能将油气田开发事业推向前进。

现代油气田开发地质学不再是传统石油地质学在开发中的应用，也不能仅限于对油气田的一般认识和描述，而是为了解决油气田开发过程中的系列地质理论、油气藏演化与动态描述技术问题，达到最大程度开发利用油气资源的目的。油气田开发地质工作的基本任务就是揭示油气藏的开发地质特征，精细描述油气藏三维空间的变化特征和微细的地质规律，同时研究油气层特征对地下流体运动和油气井产能的控制与相互作用，以及提高油气田开发效果与最终采收率的最佳方法。随着油气田开发的逐步深入，油藏开发地质特征研究也需要从宏观到微观的层次深入，从定性到定量、从静态到动态的密切结合，从储层精细描述到油藏工程设计和决策的综合分析。随着油田开发的深入和开发技术的不断提高，总会有一些目前还未认识到的影响油藏开发的新地质因素被不断揭露，需要开发地质家与油藏工程师去及时发现和有预见地进行超前研究。

张金亮和谢俊两位教授结合多年从事油气田开发的科研实践和教学经验编写了《油田开发地质学》教材，全面系统地总结了我国油田在新的形势下如何提高石油采收率所面临的开发地质学领域的新矛盾和新问题，对影响石油采收率的各项地质因素和开采因素进行了很多新的探索，从高分辨率层序地层学、微构造描述、沉积微相分析、储层综合评价、地质三维建模、油藏动态分析、油藏数值模拟到剩余油的调整挖潜进行了系统的表述，这些学术内容对我国高含水油田开采具有很好的应用价值和借鉴意义。

总之，本书是一部关于油田开发如何进一步深化地质研究与调整挖潜提高采收率方面的综合性教材，内容丰富、观点明确，无论从油田开发实践的意义还是从油藏精细描述的理论来看，都具有很高的实用价值和学术水平，对同行有重要参考意义。值此教材出版之际为序，以表祝贺之忱。

中国科学院院士



2010年9月16日

前 言

人们习惯上将石油工业分为石油上游工业和石油下游工业两大产业，上游指石油生产，下游指石油加工。上游又分为勘探与开发两大部分。勘探工作的主要目的是经济快速地发现油气田，在尽可能短的时间内准确找到盆地内的主力油气田；油田开发工作的主要目的是在油气田发现后，经济快速地、以尽可能高的采收率把油气开采出来。无论是勘探还是开发，都必须以深入了解工作对象的石油地质面貌为基础，因此都要以石油地质学及相关基础地质学科的理论为指导。然而油田开发和石油勘探的目的不同，需要研究的石油地质问题和地质工作方法也就有所不同。勘探地质学家需要研究和掌握的是石油如何从生成到进入油气藏的规律；而油田开发工程师则是研究和掌握哪些地质因素控制和影响石油从油气藏中的采出。这样，随着石油工业的发展，石油地质工作也就逐渐形成石油勘探地质和石油开发地质两大分支。油田开发地质学是石油地质学的一个分支，是随油田开发实践的深入而逐步形成的一门新的地质学学科，研究内容贯穿了从油气藏的发现到最终枯竭的全过程。

在我国已发现的 500 多个油田中，除大庆、胜利等几个主要油田外，其他油气田单位面积储量普遍较小，低品位油田居多，而且埋藏较深、类型复杂、品质较差、工艺技术要求高。在剩余可采储量中，优质资源不足，低渗或特低渗油、稠油和埋深大于 3500m 的超过 50%。目前我国剩余探明储量仅占世界总储量的 1.2%，且随着油田开发的不断深入，剩余石油资源中质量差、难开采的比重将越来越大。总的来看，勘探难度逐渐增大，隐蔽、复杂油气藏已成为勘探主要对象，地表及地质条件复杂的地区正成为勘探的重点目标区。老油田已进入高含水、高采出阶段，综合含水率高于 80%，可采储量平均采出程度大于 65%，原油产量呈递减趋势，开发难度越来越大，开采工艺要求越来越高。我国石油剩余可采储量主要分布于松辽盆地、渤海湾盆地、新疆和渤海、南海等近海地区，从具体油田来看，主要分布在大庆、胜利、新疆、天津、辽河、长庆、吉林等地区。我国油气资源的现状对油田开发地质工作者提出了更高的要求，开发地质工作的目标就是要精细、定量、准确地描述油气储层特性及其中所饱含流体的分布特征，其核心任务是精细描述油气藏开发地质特征、实现正确的油藏管理，即用好可利用的人力、技术、财力资源，以最小的投资和操作费用，通过优化开发方法，最大限度提高油藏采收率，从油藏开发中获得最大的利润。目前，我国油气田开发地质学已非常成熟地按着本身的特点和规律向前发展。

作者结合多年从事油气田开发的科研实践和教学经验，在开发地质学课程自编讲义的基础上，广泛听取并吸收了有关专家、学者和学生的意见，经过多次修改，反复完善而最终定稿。在本次教材出版中，为适应教学改革对本课程的性质、任务及功能的要求，考虑到教学课时所限以及教材内容的科学性和系统性，并参考多位审稿人的意见，删除了原讲义中碳酸盐岩储层地质和天然气开发技术评价的相关内容。本教材在介绍油田开发地质基本理论、技术和方法的背景下，系统、全面地介绍了油气田开发阶段油田开发地质研究的内容、流程和分析结论，并结合油田的大量实际生产资料对多种研究方法和技术进行了分析，力争做到理论与实践的紧密结合。

本书主要由张金亮和谢俊两位教授编写，多位博士后、博士生和硕士生协助完成了后期文字编写和图件绘制工作，其中史超群、赵红娟、任伟伟和代云娇参加了第二章的编写，石宁、王山章和宋爱学参加了第三章的编写，徐淑娟、李德勇和李存磊参加了第四章的编写，张中杰、王金凯、马学萍和丁芳参加了第六章的编写，王金凯参加了第八章的编写，任伟伟参加了第九章的编写，于江涛和孟宁宁参加了第十章的编写。刘婷、董紫睿、王春艳、唐明明、杨本松雪、李雪、闫伟、亚东菊、李莎莎、霍晓敏、张明、黎明、张鹏辉、袁勇、张翼、罗忠琴、吴浩等担任了图件绘制工作。最后由张金亮和谢俊负责全书文字和图件的审定统稿工作。

本书由中国海洋大学教材建设基金、中国海洋大学教材出版基金和北京师范大学国家支撑计划课题“国际重大资源态势评价与预测技术开发”资助。北京师范大学资源学院和山东科技大学地质学院多位领导和老师给予了大力支持和帮助。本书的编写还得到了许多个人和单位的关心和帮助，多位教授和学者给予了很大的帮助和支持，提供了许多国内外新成果和新资料，胜利油田、江苏油田、吉林油田、中原油田、大港油田、长庆油田、辽河油田、南阳油田等单位领导和技术专家对本教材提出了很好的建设性意见。早在2006年3月中国海洋大学教务处及教材建设办公室就对本教材讲义组织了审查，中国石油大学和中国地质大学的多位匿名审稿人对教材提出了很好的具体修改意见。在本课程讲义的6轮内部试用中，中国海洋大学、山东科技大学和北京师范大学的研究生对讲义提出了不少修正建议。对于所有关心、帮助本书编写工作的个人和单位，在此一并致谢。最后感谢贾承造院士为本教材撰写序言！

书中不妥和不足之处，敬请读者批评指正。

2010年10月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 油田开发地质学的发展历程	(1)
第二节 油田开发地质学的基础理论和技术方法	(3)
第三节 油田开发程序和开发原则	(8)
第四节 油田开发地质学发展展望	(10)
第二章 高分辨率层序地层学及应用	(17)
第一节 概述	(17)
第二节 高分辨率层序地层学理论基础	(18)
第三节 高分辨率层序地层学研究方法	(23)
第四节 基准面旋回级次及其界面特征	(32)
第五节 高分辨率层序地层学的应用	(45)
第三章 精细构造研究	(54)
第一节 井下断层研究	(54)
第二节 构造研究流程	(65)
第三节 构造图件的编制	(71)
第四节 微构造精细研究	(81)
第四章 沉积微相分析	(89)
第一节 概述	(89)
第二节 岩心微相分析	(92)
第三节 测井微相分析	(95)
第四节 砂体形态和微相分布	(110)
第五章 储层精细评价	(122)
第一节 储层的基本属性	(122)
第二节 储层敏感性评价	(129)
第三节 储层隔夹层描述	(136)
第四节 储层非均质性	(142)
第五节 储层流动单元	(153)
第六节 储层综合评价	(158)
第六章 储层地质建模	(160)
第一节 概述	(160)
第二节 储层地质模型基本概念	(162)
第三节 储层地质模型分类	(165)

第四节	储层地质建模原理	(171)
第五节	储层地质建模方法	(175)
第六节	常用地质建模软件简介	(191)
第七节	储层地质建模的应用实例	(196)
第七章	油气藏类型与温压系统	(204)
第一节	圈闭与油气藏	(204)
第二节	油气藏的开发分类	(207)
第三节	油气藏压力系统	(215)
第四节	油气藏温度系统	(220)
第八章	油田开发决策与设计	(224)
第一节	开发层系的划分与组合	(224)
第二节	注水开发方式选择	(227)
第三节	注采井网方式优化	(229)
第四节	合理注采压力系统	(235)
第五节	驱动类型选择	(236)
第六节	油藏开发方案的制订	(240)
第七节	开发对策研究实例	(243)
第九章	油藏地球化学原理及应用	(252)
第一节	概述	(252)
第二节	油藏地球化学监测理论和方法	(254)
第三节	原油气相色谱指纹法	(258)
第四节	紫外光谱技术	(276)
第十章	油田开发动态分析	(281)
第一节	油田开发动态分析的基本任务	(281)
第二节	油田开发动态分析的主要资料	(282)
第三节	油井、注水井生产动态分析	(282)
第四节	注采井组动态分析	(292)
第五节	油藏开发动态分析	(297)
第十一章	油气储量评价与采收率标定	(311)
第一节	油气储量评价	(311)
第二节	油气采收率和可采储量的静态计算方法	(325)
第三节	油气采收率和可采储量的动态计算方法	(329)
第四节	油气采收率和可采储量的综合标定	(338)
第五节	影响油气采收率和可采储量的因素	(339)
第十二章	油藏数值模拟技术与应用	(342)
第一节	概述	(342)
第二节	油藏数值模拟基本原理	(352)
第三节	油藏地质模型的建立	(353)

第四节	动态历史拟合方法	(356)
第五节	动态预测及方案优化	(360)
第六节	应用实例分析	(362)
第十三章	剩余油分布与调整挖潜对策	(369)
第一节	有关剩余油的基本概念	(369)
第二节	剩余油的分布类型	(370)
第三节	影响剩余油分布的因素	(374)
第四节	主要的调整挖潜对策	(381)
第五节	调整挖潜方案编制	(386)
参考文献	(390)

第一章 绪 论

近年来,勘探开发成熟度很高的产油国把注意力逐步转向老油田挖潜和提高采收率,促进了油田开发地质和相关技术快速发展,新理论、新技术和新方法层出不穷。注水开发相关理论、三次采油相关理论、地质统计学理论、油藏精细描述技术、核磁共振井下成像技术、三维可视化建模技术、随机建模技术、示踪剂测试技术和油藏数值模拟技术等理论、技术的出现,以及这些技术的协同发展,正在逐步实现油田开发地质工作由宏观向微观、由定性向定量的发展。因此,油气田开发地质学的成熟和发展对“认识油田和改善油田开发状况”将起到非常重要的作用。

第一节 油田开发地质学的发展历程

若从1859年算起,现代石油工业已有150余年的历史,然而开发地质学的出现只有60余年的历史,作为一个成熟的学科高速发展则是近30年的事情。开发地质学的出现和萌芽时期,可以前苏联M. Ф. 钦克于1946年出版的《油矿地质学》和美国L. W. 里诺1949年出版的《地下地质学》为标志。前者以前苏联广泛采用注水开发方式的实践经验为基础,具有创立开发地质学的作用。前苏联M. И. 马克西莫夫著《油田开发地质基础》(1975)和美国P. A. Dickey著《石油开发地质学》(1979)的出版反映油气田开发地质学进入比较成熟阶段。

中国石油工业在新中国成立前基本上处于空白,当时最大的油田——玉门油矿,1939年在美国控制下开采。那时根本不取资料,一条录井曲线就算是全部的地下资料,也没有完整的电测曲线,更没有储层岩样的分析资料和原油性质测试数据,根本不算是地质工作研究。新中国成立后,我国按照前苏联的一些作法,在老君庙油田开始进行一些笼统而简单的地质研究工作。1959年发现大庆油田后,通过大庆石油会战,对油田地质进行了深入细致的研究,形成了我国自己的一套工作方法,将勘探油田和开发油田两个阶段逐渐分离,并明确了各个阶段的研究内容和方法。总的来说,油田开发地质学的发展大致经历了3个阶段。

一、萌芽认识阶段(1930—1950年)

20世纪30年代以前,油田发现以后,往往采取“掠夺式开采”方式。以美国30年代初发现并投入开采的东得克萨斯大油田最为典型,该油田发现于1930年9月,到年底就钻成近万口采油井,10年内在560km²含油面积内完钻26000口生产井,而且这些生产井完全依靠天然能量开采。油井出现明显的井间干扰、过早见水、产量递减过快等特点。

20世纪40年代,“注水开发、污水回注”技术的成功应用带来了油田开发的一次历史性革命,注水开发亦称“二次采油”,在20世纪50年代很快成为普遍工业性应用的主导开发方式。这一历史性的变革是开发地质学产生并逐步成熟、独立的主要契机和动力。

注水开发技术在应用过程中遇到了诸如:储层连续性、连通性、流体差异性以及储层客观存在的非均质性问题(简称“储层非均质性”和“流体非均质性”问题),这就要求把

每口井每个储层的岩石物理属性求准，从而掌握它们的空间分布规律。这些逐渐被人们认识到的注水开发过程中必须进一步深入研究的油藏地质问题，突破了“笼而统之、大平均”的传统地质工作方法，不仅促使开发地质学产生和发展，而且也是现阶段仍然要解决的两个基础问题，只是在深度上、精度上需要不断提高。

当然，在石油工业发展的早期，主要是开发一些高产的自喷油田，这时石油地质工作者的主要任务是寻找新油气田。随着油气田的大量开发，油田类型增多，研究提高油田开发效果和经济效益的任务更为突出，为了以较少的投资去获得较好的经济效益和最高的采收率，开发地质工作者负有重要的责任。大量油田开发实践证明，地质因素是决定油田开发效果的关键因素，油气田开发方案和各种措施成败，无不与油田地质特征有关，因为它是决定油田开发效果的基本因素。因此，人们逐渐认识到油田开发工作的重要性，并逐步将油气田开发地质学从石油地质学中分离出来。

二、快速发展阶段（1960—1980年）

20世纪60年代初，大庆油田的开发加快了我国油田开发地质学的快速发展。大庆油田是非均质性相当严重的陆相多油层油田，实施了早期保持压力的内部注水开发战略，并将石油地质队伍明确划分为专攻盆地区域勘探的“区域地质研究人员”和专攻油田开发的“油田地质研究人员”两部分。油田地质科技人员经过多年的攻关，逐渐突破了陆相碎屑岩储层的小层对比技术、分层孔隙度、油气水饱和度、渗透率测井解释技术，在此基础上提出了油砂体的概念，指出注水开发中控制油水运动的基本单元是油砂体，形成了一套以油砂体为核心的储层地质研究方法。这套方法至今仍发挥着重要作用。

20世纪70年代，随着注水开发的深入，由于油水黏度比差异大，注入水发生单向突进，注水波及范围受限，原油采收率大大下降，油田开发效果逐渐变差。为了解决储层非均质性问题，许多国家开始重视三次采油技术，并进行了各种先导试验，我国胜利油田堵水调剖技术在这方面取得了显著的效果。这些新技术的成功应用促使油田开发地质工作向更深层次发展，最具代表性的是沉积相分析把过去以盆地大区域为对象、岩相古地理分析为主体，为勘探服务的沉积学理论和方法，引进到油田范围内，研究油砂体的沉积成因、分布和储层性质。

20世纪80年代，石油工业出现一些新形势以及现代高新技术的飞速崛起，促使油田开发地质又进一步向更高更深层次发展。该阶段，一些主要产油国都面临已开发含油气盆地和油气田进入勘探开发高成熟期，勘探工作转向自然地理条件很差的边远地区，勘探成本大幅度上升的不利局面。业内普遍认为，在老油田进一步加强开发地质研究，深化认识非均质性，通过钻加密井包括水平井、多底井、侧钻等和其他改善采油的方法，进一步提高老油田采收率，所能获得的经济效益远大于边远地区的勘探效益。这就需要更精确地描述地下流体的分布（特别是剩余油），要求油藏描述向更小尺度的量化描述发展。其次，计算机技术的发展，数学与地质的结合，分形、混沌学等非线性数学新理论和方法的出现，为描述一些地质现象提供了新武器。开发地质、油藏描述由宏观向微观、由定性向定量方向大大前进了一步，也由单一的地质学科走向了与地球物理、油藏工程、采油工程等多学科协同综合的道路。

随着发现的高产油田越来越少，已投入开发的油田大多进入高含水期开采。采储比减少，原油需求量增加。油田开发中现代科学技术的应用和经济观念的加强，要求对地下油藏

三维空间的微观变化有更精确的描述，而不是传统意义上的平均值；希望从定性到定量，建立三维地质模型；对油层的非均质性、渗透率的各向异性、油层井间变化、注入流体的推进以及剩余油的分布等作出准确解释和计算；并要求这些地质研究成果，必须经过油田动态的检验和修正，能够满足现代油藏工程计算预测和油田开发生产的要求。在这个阶段，人们逐步认识新理论、新方法和新技术对油田开发的重要性。

三、基本理论成熟阶段（1980 年末至今）

20 世纪 80 年代后期，我国东部地区大部分油田先后进入高含水期开发，需要采用各种稳产挖潜措施、水平井技术和三次采油技术，否则油田难以稳产和提高油田最终采收率。在使用这些技术之前，必须搞清各油层剩余储量的多少和剩余油饱和度的分布以及与各种地质因素的关系。否则，不管采用哪种技术，都难以收到好的效果，如有的油田打加密井的成功率仅为 70%，显然这个成功率太低。

20 世纪 90 年代以来，虽然各学科技术迅速发展，但需要通过油藏描述解决的问题日益复杂化，要求油田开发地质学向多学科一体化方向发展，提倡地质、地震、测井、油藏工程、采油工艺研究人员和计算机及现场工作人员协同工作，建立边缘学科及计算机的“地学平台”，应用多种数学方法（如地质统计学、随机模拟、人工智能等），动、静结合，研究、描述和准确预测地下油藏，建立三维定量地质模型。

油气田开发地质贯穿了整个油藏的开采历史：从依靠天然能量自喷开采的一次采油，逐步发展到以分层注水、分层采油、机械采油、措施改造、井网加密、层系调整的二次采油，再发展到以聚合物驱油为代表的三次采油等一系列配套的油田开发调整挖潜技术，奠定了我国大型陆上非均质多油层砂岩油田开发的科学理论基础。在这个阶段，油田开发地质学的基本理论得到进一步发展，并逐渐成熟。

第二节 油田开发地质学的基础理论和技术方法

油田开发地质学是一门综合性学科，它与石油地质、储层地质、油藏工程、油藏数值模拟和试井等课程彼此结合，相互渗透，互为补充。开发地质的研究方法，是一套综合研究方法，利用大量现代计算技术，以研究油层为中心，由粗到细、由定性到定量、由传统的地质图到展示三维空间变化的地质模型，静动结合，充分利用各种地质录井、测井、测试、试井、特殊的岩心分析技术和开发先导性试验等手段，用分析计算和模拟相结合的方法，反复验证和反演地质成果，做到正确、全面、详细，逐渐认识油层固有特征和微细的地质变化，指导油田合理开发，促进开发地质学的发展。油气田开发地质学发展到今天，已经形成了许多新的理论、方法和技术，并在油气田开发过程中得到了广泛应用。

一、油田开发地质学的基础理论

李阳（2007）认为油田开发地质学涉及的基础理论包括构造地质学、沉积学、岩石学、渗流力学、地质统计学、地球物理学、油藏工程学等方面的基础理论。作为油气田开发地质支柱和起主导作用的基础理论，应该是构造地质学理论、沉积微相控制理论、渗流力学理论、储层流体动力学理论、原油驱动理论和陆相剩余油富集理论。

1. 油田开发阶段的构造地质学理论

在油田开发地质学中，构造地质学理论结合地球物理理论侧重于解决油藏构造低级序断层、微幅度构造成因及其识别描述问题；构造动力学研究低级序断层力学性质、成因机制及组合模式。同时，随着国内东部陆相油藏开发的深入和提高采收率的需要，微幅构造问题也不再是仅仅解决地层的构造问题，而是着重于解决控制流体运动和剩余油富集的储层微构造问题。因此，沉积学理论也逐渐渗透到开发中后期的微构造研究中，这也是油气田开发地质学中构造研究的特点与常规构造地质学研究最大的不同。

2. 油田开发阶段的沉积微相控制理论

在油气田开采过程中，由于储层非均质性及流体非均质性，储层中的流体流动具有明显的方向性或不均衡性，其根本的控制因素仍为相控。沉积微相具有独自的岩性、岩石结构、构造、厚度、韵律性及一定的平面分布规律，是沉积微环境的产物和物质表现。沉积环境和沉积条件控制着砂体的发育程度、空间分布状况及内部结构，不同砂体微相具有不同的储集特征（包括微观孔隙特征和宏观非均质性特征），不仅对油气的运移、聚集、渗流及储层伤害程度有重要影响，而且对油层非均质性、油水运动规律、油层开发潜力及提高油田最终采收率都有十分重要的意义。正确识别沉积相和微相类型及其相互关系，是认识油气水运移关系的最基本要素。

3. 油田渗流力学理论

油田开发过程是油藏中的流体从油层渗流到井筒的过程，其基础理论为渗流力学；同时，在这种渗流过程中，由于储层流体动力学作用，改变了储层的原始参数，也导致了静态模型向四维模型的发展，作为这一发展的理论基础就是储层流体动力学。

4. 储层流体动力学理论

储层动力地质作用就是指注入流体在开发过程中对储层及其物性改造作用。在开发实践中，油藏开发流体对储层的改造和破坏是十分强烈的。这种地质作用是导致油藏或储层在不同含水阶段的宏观、微观和渗流参数变化的主因，也是控制不同含水阶段剩余油形成和分布的主导因素。

5. 原油驱动理论

根据油田开发的阶段，可将油田开发地质学理论分为天然能量驱油理论、水驱油理论、三次采油理论和微生物驱油理论。

(1) 天然能量驱油理论

油田开发初期，往往可以根据地质勘探成果和高压物性资料以及开发之后所表现出来的开采特点来确定油藏的驱油动力，因此，发展了天然能量驱油理论。该理论进一步细化，可包括：弹性膨胀能理论、溶解气驱油理论、边水或底水驱油理论、气顶气驱油理论、重力驱油理论，等等。

(2) 水驱油理论

在目前以及今后相当长的时期中，人工注水仍将是开发油田的主要方法。一个油藏70%左右的可采储量都是在该阶段开采出来。水驱油理论主要包括：边缘注水开发理论、边内切割注水开发理论、面积注水开发理论、注入水优势渗流理论、隔夹层及断层控油理论、储层非均质控油理论、油砂体控油理论，等等。

(3) 三次采油理论

当前，三次采油提高油田采收率已成为各油田研究的热点。国内许多油田根据各自特

点,开展了许多三次采油现场试验,这些研究成果和试验结论大大推动了三次采油驱油理论的发展。从驱替机理来看,三次采油的驱油理论主要有:热力采油理论,包括蒸汽吞吐理论、蒸汽驱油理论(包括注热水)、火烧油层理论;化学驱油理论,包括聚合物驱油理论、碱性水驱油理论、表面活性剂+聚合物二元复合驱油理论、碱+活性剂+聚合物三元复合驱油理论;混相驱油理论,包括混相烃驱油理论、二氧化碳驱油理论、惰性气体驱油理论。

(4) 微生物驱油理论

我国许多油田开展了微生物驱油现场先导性试验,有的油田取得了较好的驱油效果,但由于微生物驱油机理的复杂性,微生物驱油理论还有待进一步完善。

6. 陆相剩余油富集理论

在陆相油藏中,非均质性普遍存在,当非均质性较强时,储层物性与耦合关系发生了由量变到质变的转化,对注入水产生分割和阻挡作用即油藏分割性。所谓油藏分割性,是指在复杂非均质油藏中,由于低级序断层、夹层和物性差异等储层非均质性以及水动力等导致储层中流体渗流产生的分割作用。这种分割作用使得流体特别是驱替剂流动受阻,驱替效果变差,剩余油分布变得复杂,在局部地区形成剩余油富集区。这样的富集区是油藏进一步提高采收率的主要目标。陆相剩余油富集理论丰富了油藏开发地质学的内涵,是渗流力学、开发地质统计学、油藏工程学、油田开发理论综合的产物,着重解决水驱油理论、剩余油成因机理及其富集的问题,是油田进入高含水期后寻找剩余油的理论基础。

二、油田开发地质学的技术方法

经过长期的生产实践,油田开发地质学发展了多项技术方法,为油气田的开采作出了巨大贡献。

1. 微构造精细描述技术

油田开发中后期,构造精细研究的重点是开展小断距(断距小于5m)断层的对比及平面组合,储层构造研究和微幅度逆牵引构造研究等。并根据油水井生产过程中的注采关系等动态反映,研究断层的封闭性。

通过微地质界面研究技术,落实全区微构造,对整体构造重新认识,即砂体顶底面微构造研究。微构造是指油气藏构造背景上油砂体本身的细微起伏变化所显示的局部构造特征及不易确定的小断层的总称。通过以较密的井网资料为基石,直接以分布较广的主力油砂层顶面或底面为准,采用1~5m小间距等高线,用克里格等值线内插法绘制构造图,找出原来10~20m间距等高线构造图所掩盖的油层自身起伏微小变化的潜力点。

2. 细分沉积微相研究技术

油田开发实践表明,储层沉积相和沉积微相是油气水运移的主要控制因素。通过系统取心资料分别建立各油组的单井相模式,然后建立测井相模式图版。利用测井相模式和单井相模式,并结合相分布位置和所有井点测井曲线形态的组合特征进行综合分析,划分出沉积微相,在单元细分与对比的基础上,综合应用岩相划分和电性划分结果进行油层沉积微相划分和平面组合。再结合砂体分布和砂地比展布特征描述沉积微相在平面上和纵向上的分布,最终完成分层平面微相展布的分析,编制出分层微相平面图,作为储层描述和建立地质模型的基础。

3. 高分辨率层序地层学应用技术

随着油田开发的深入,为了寻找高度分散的剩余油,需要对已开发的地质层系进行更精细的划分。由此需要开展高分辨率层序地层学研究,建立高分辨率层序地层格架,对小层及

单层划分对比成果进行复核。层序地层学的核心在于确定等时地层格架以及时间地层框架内沉积地层的分布类型。在一个基准面旋回变化过程中形成的岩石单元是一个成因地层时间单元，通过基准面旋回的识别和等时对比，分析不同级次的陆相地层内部结构特征，建立高分辨率的地层框架，根据低级次旋回特征进行局部地层精细对比，可以为油藏精细描述提供基础资料。

4. 储层物性动态变化空间分布规律研究技术

地下石油和天然气都储存于各类储层之中，储层的类型、岩相、岩性、分布范围、形态特征、孔隙结构和储油物性变化，直接控制着地下油气分布、储量大小和产能。通过储层沉积相与“四性”关系研究，分析储层在三维空间的连续性和孔隙度、渗透率、（油、气、水）饱和度等物性的变化特征。对各种分析化验资料，特别是注水开发后的取心分析资料以及开发动态资料进行研究；结合吸水剖面、产液剖面和 C/O 比等测试资料，从储层基本特征、注入水与地层及流体的物理化学作用、地层温压变化、油水渗流机理及影响因素等方面入手，对注水开发后储层结构的变化规律和油水分布特征进行研究。

5. 隔夹层描述技术

隔层（insulating layer）也称遮挡层或阻渗层，即储层中能阻止或控制流体运动的非渗透层，其面积一般大于流动单元面积的二分之一，厚度变化较大，小则几十厘米至几米厚，大则几十米厚。夹层（interlayer）是指在砂岩层内所分布的相对非渗透层，与隔层相比，夹层分布不稳定，往往不能有效阻止或控制流体的运动。实际上，在渗流特征一致的连通砂层中（一个流动单元）的夹层也为流动单元内部夹层，其面积常小于流动单元面积的二分之一，厚度一般只有几厘米至几十厘米，延伸一般较小，稳定性差。因两者的成因和特征有很大的相似性，因此又统称为隔夹层。

隔夹层研究能够为揭示储层内部的非均质性、制订合理的开发方案、把握注水开发过程中油水运动规律、预测剩余油分布状况提供可靠的地质依据。隔夹层对剩余油的控制作用主要是通过流体渗流的分割和阻流而导致剩余油富集。通过大量的静动态资料和测试手段，可以比较精细刻画隔夹层的平面和纵向分布。

6. 三维可视化地质建模技术

储层地质模型所描述的储层特征包括储集体的几何形态、规模、连续性、连通性、内部结构、孔隙特征、储层物性参数的分布和隔夹层分布，等等。主要研究内容包括：构造模型（断层模型及层面模型）；沉积相及沉积微相模型；储层物性模型（有效厚度、孔隙度、渗透率）；储量的初步复算；地质模型粗化处理及模型数据格式转换，为建立合适的油藏数值模拟模型提供依据。三维可视化地质建模技术有别于常规的静态地质模型，其模型对不同成因类型的储层非均质有一定的预测。通过随机模拟技术，改变传统地质研究固定模式，建立井间参数和预测。在油藏的地质模型建立中，可以通过建立地震速度与岩性和孔隙度的关系将地震反演资料与钻井资料联合，采用以地震数据约束井间内插的方法，结合随机模拟技术预测储层分布和特性。

7. 油藏数值模拟技术

油藏数值模拟技术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。

8. 低级序断层精细描述技术

低级序断层是指延伸短、断距小的四级及其以下的小断层，这些小断层基本不控制油气

的聚集。但由于小断层影响注水开发油藏的水驱状况，因而是剩余油富集的重要控制因素。利用三维地震资料目标处理技术、全三维解释技术、井间地震技术、精细相干分析技术、三维多尺度边缘检测技术和动静态综合识别技术，可实现对低级序断层的精确描述。

9. 动态、静态描述相结合技术

油田开发过程是一个不断认识和调整的过程，贯穿油田开发全过程。油田开发动态分析以单井分析为基础，油井、注水井是注水开发油藏的基本单位，由井点扩张到井组，再逐渐扩大到油层，把各项参数联系起来进行综合分析，找出内在联系和变化规律。油井、水井动态分析就是通过对油井、注水井在生产过程中注水、产液（油）、含水和压力等情况的变化进行对比分析，发现问题找出原因并提出解决的措施。通过不断地注采调整，在产油、注水、含水和压力相对稳定的情况下，保证油井、注水井正常生产，从而合理开发油藏。

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态、静态相结合的精细油藏描述，在研究工作中充分利用动态、静态资料及各种测试资料，考虑储层及流体参数在注水开发过程中的动态变化，分析油气水的运移特征和分布规律。

10. 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，油井、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。

11. 剩余油描述技术

由于地层情况异常复杂，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。剩余油描述技术包括：剩余油宏观描述技术、剩余油微观描述技术、剩余油饱和度描述技术、剩余油储量丰度描述技术等。

12. 提高油田采收率技术

根据油田开发动态分析的结果，及时找出油田生产过程中暴露出的问题，并分析产生的原因，充分利用油藏数值模拟技术和油藏工程的精细描述方法，寻找剩余油的分布规律和分布模式，分析影响剩余油的主控地质因素和开发因素，制订合理的开发调整方案。目前常规的调整挖潜提高采收率技术包括：①完善注采井网、调整注采关系；②合理细分层系；③周期性注水；④改变液流方向；⑤机械、物理堵水；⑥加钻水平井，等等。非常规的调整挖潜提高采收率技术包括：①酸化压裂；②化学调剖；③适宜的三次采油技术；④物理场驱油技术；⑤高能气体压裂技术；⑥水力振荡解堵技术；⑦人工地震采油技术；⑧电液冲击技术；⑨井壁深穿切技术；⑩爆炸疏松地层技术；⑪化学生热解堵技术，等等。

第三节 油田开发程序和开发原则

油田开发程序是指油田从详探到全面投入开发的工作顺序。合理开发程序就是正确地处理好认识油田和开发油田的矛盾，把勘探和开发油田的工作很好地结合起来，分阶段、有步骤地开发油田。油田开发的每个阶段、每个步骤之间又是紧密联系着的，每部署一个新阶段的开发工作必须建立在上一阶段对油田认识的基础上，而且还要为下一阶段的开发部署作好准备。在发现油田、计算出探明储量并获国家储量委员会批准之后，为了最大限度地合理利用和采出地下原油，必须制订科学、经济的油田开发方案，遵循科学程序开发油田。

一、油田开发的基本程序

我国各油田开发的实际经验表明，一个油田开发，大体要按以下3个主要程序进行，即油田开发前的准备阶段、编制正式的油田开发设计方案和油田开发方案实施与调整完善。

1. 油田开发的准备阶段

油田开发的准备阶段是油田开发的基础，这个阶段首先要详细了解油田勘探工作的全过程，进而开展下面的研究工作：

1) 在已见油的构造和构造带上，通过地震测试资料的解释，落实构造和其中的断裂情况（包括主要断层的走向、落差、倾角等），确定含油带圈闭面积、闭合高度，根据构造形态合理布置探井，迅速控制含油面积，并对油气藏进行描述、分类及综合评价。

2) 在已控制的含油区域内打一批资料井（一般2~3km钻一口井），全面了解油层的物理性质在纵向和横向的变化情况。

3) 采用分区分层的试油试采方法，求取油层产能参数。

4) 根据含油面积、油层厚度等相关资料采用不同方法计算油藏地质储量。石油及天然气储量是编制油田开发方案、确定油田建设规模和国家投资的重要依据，也是指导油田进一步勘探、开发部署和国家长远规划的重要依据。

5) 利用基本的静态资料标定油藏采收率，估算可采储量。

6) 在已控制的含油区域内开辟生产试验区，进一步掌握油层特性及其变化规律。

7) 根据岩心、测井和试油试采等各项资料进行综合研究，作出油层分层对比图、构造图和断层分布图，确定油藏类型，然后进行油田开发设计。

8) 根据已获取的各项地层资料和流体资料，进行油田开发方案设计前的准备工作。

9) 形成油田开发可行性研究报告，申请国家主管部门审批，以取得油田的开发权，基本内容是：①储量评估，评价已批准探明地质储量的可靠性及核算结果；②单井产能核定，据测试资料确定稳定产能；③合理开发规模，最合理的采油速度与年产油（气）能；④经济评价；⑤节能与环境保护论证；⑥综合报告，包括开发方案概念设计、投资、融资、收益等。

2. 编制正式的油田开发设计方案

经国家主管部门批准初步开发方案和可行性研究报告后，以油气田地质特征为基础，进行油藏工程、钻井工程和地面建设工程的总体设计，形成油田整体开发设计方案，主要内容为：

1) 油气田基本情况与地质特征，主要包括：区域地质背景、构造和断层特征、储层性