

石油工程原理与实践

石油工程原理与实践

〔英〕J.S.阿切尔 C.G.沃尔 著

北京)

1
2

石油工业出版社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书是作者根据自己丰富的矿场经验和教学经验编写而成。全书共 14 章, 涉及了现代油藏开发的各项技术, 包含了许多经常用到的公式和方程。对油田的实际问题, 系统进行论述, 并以习题的形式帮助读者加深理解。本书切合目前油田开发实际, 是油藏工程师了解新技术的参考书, 对于许多刚出校门, 对油田工作正苦于无从下手的毕业生, 将是雪中送炭, 读了此书会很快适应工作。

* * * *

本书由周成勋 (8、9、14、附录 2)、崔耀南 (前言、1、2、3、4、5、附录 1)、潘兴国 (6)、张嘉祥 (11、12)、章木英 (10、13)、齐世梅 (7) 翻译, 全书经李克文同志校订。

J.S. ARCHER, C.G. WALL
PETROLEUM ENGINEERING PRINCIPLES AND PRACTICE
Graham & Trotman in 1986

石油工程原理与实践
〔英〕J.S.阿切尔 C.G.沃尔 著
周成勋 崔耀南 等译 李克文 校

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 $26\frac{1}{4}$ 印张 656 千字 印 1—2,000

1992 年 1 月北京第 1 版 1992 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0715-0 / TE · 677

定价: 13.45 元

序 言

本书是应帝国大学石油工程系学生对现行课程的需要而编写的，同时，也考虑了具有一定经验的短期培训学生的要求。然而，我们希望这一本书也能广泛地为现场石油工程师们以及那些希望查阅专业参考文献者使用。

本书既阐述了石油工程的各个方面，又提供了大量的背景资料，特别是那些在西北欧海洋环境中的实践经验。书中大多数资料是作者作为教师和咨询者的经验总结，还增加了一些有待进一步研究的问题，相信这些问题有利于对这一领域的认识与了解。

我们衷心感谢在本书的编写过程中提供过各种帮助的所有专家、学者与有关工作人员。同时，对允许我们引用有关资料的同行表示衷心的感谢。我们特别感谢目前仍在帝国大学和能源咨询有限公司中的同事和学生们，也特别感谢打印了大量手稿的 Jill 和 Janel，以及在 Graham 和 Trolman 有限公司工作的 Dan Smith、Lesley 和 Joan。

J.S.阿切尔 (Archer) 和 C.G.沃尔 (Wall)
1986 年

前 言

石油工程仅在本世纪才发展成为一个专门的研究领域，现在它已成为在地下沉积岩体中勘探石油流体的技术基础。开发油藏时为了确定可压缩烃类流体的地质储量和生产能力，需要对探井和评价井进行测试与评估。由于天然油藏在几何形态和物理特性方面是非均质的，所以很难完全认识和了解这一资源。在设计油田开采系统和地面设施方面，石油工程师起主要作用，因为油田开采系统要求部署的井网有较高的适应性；为原油输送、加工而设计的地面设施应保证产品能够满足管道运输或油罐运输的技术规范。

石油流体是由许多烃类物形成的复杂的混合物，并处在高温高压环境下，油层压力高达14500磅/英寸² (1000巴) 而温度高达450°F (230°C)。目前，对油藏动态进行的预测是建立在研究它们的热动力学基础上的。应用大型电子计算机进行复杂的数值模拟可以预测非均质油藏中的流体动态。作为一个现代石油工程师，必须能够充分利用电子计算机。对石油工程师的职责要求是非常广泛的，要有熟练的数据收集和整理的能力，以便能够按照积累的生产经验来修正模型，从而修改原来的生产方式。在所有的这些工作中，安全和节约是要强制贯彻执行的。

石油工程师是一个资源管理者，而且负责分析所有的生产数据。为了预测油藏、单井以及设备的动态，还要求石油工程师能够有效地解释这些数据。再者，石油和天然气工业之所以利润丰厚，很大程度上是由于石油工程方法和技术的不断发展和不断完善。

现代石油工程师所需要的知识面日益扩展，目前的文献研究表明，现在人们侧重于进行下面的一些研究，即改善油藏流体的动态预测方法和提高采收率两方面。进行这些研究要求掌握物理学、地质学、经典工程学、数学和计算机科学等知识。本书描述了石油工程的基础知识，所含学科覆盖面广，是很受欢迎的。

本书的作者都是伦敦帝国大学皇家矿业学院矿业资源工程系中石油工程方面的领导人。而且他们在进入帝国大学之前已在几家主要石油公司服务多年，有着丰富的矿场经验。帝国大学从本世纪起即由1913年开始开设石油技术课程起，这所大学就已经成为研究石油开采的中心。1973年石油工程部迁至皇家矿业学院矿业资源工程系目前的位置。现在开设有大学本科生和硕士研究生课程，同时有比较活跃的博士和博士后研究团体。

本书将有助于学生们在石油工程方面的基础训练，而且对于现场工程师们来说也是一本有价值的综合性参考书。本书有广泛的参考文献，这也将有利于读者在石油工程方面作进一步的深入研究。

A.H.斯特曼 (Sweetman)

(英国石油公司前总工程师，伦敦帝国大学石油工程系客座教授)

目 录

第一章 引言	(1)
1.1 石油工程	(1)
第二章 油藏	(6)
2.1 油藏形成的条件	(6)
2.2 油藏压力	(10)
2.3 含油气层中的流体压力	(11)
2.4 油藏温度	(13)
2.5 油藏流体的特性	(14)
2.6 油藏数据来源	(15)
第三章 钻井	(20)
3.1 钻井操作	(20)
3.2 钻井费用	(23)
3.3 完井和油井套管	(25)
3.4 完井	(28)
3.5 钻井液的控制	(29)
3.6 钻井液 (钻井泥浆和水泥) 的流变学性质	(30)
3.7 地层破裂压力和地层漏失测试	(31)
3.8 钻井过程中的数据采集	(31)
3.9 取芯泥浆	(33)
3.10 优化钻井	(34)
3.11 涡轮钻和常规的旋转钻	(34)
3.12 钻井遇到的特殊问题	(35)
3.13 生产井完井	(37)
第四章 地层流体性质	(41)
4.1 烃类系统的体积和相态特征	(41)
4.2 矿场系统的应用	(42)
4.3 压缩系数	(44)
4.4 地层流体特性的测定与预测	(44)
4.5 地层流体的体积系数 B	(53)
4.6 油气比	(57)
4.7 流体性质的直接测量—— PVT 分析	(57)
4.8 液体系统的一般关系	(60)
第五章 油藏岩石特性	(69)
5.1 数据来源及其应用	(69)
5.2 取芯设计	(70)

5.3	普通取芯和定向取芯	(72)
5.4	取芯泥浆系统	(73)
5.5	岩芯保护	(74)
5.6	井场控制	(74)
5.7	特殊岩性分析	(75)
5.8	由岩芯得到的资料	(75)
5.9	地质研究	(75)
5.10	常规岩性分析	(76)
5.11	孔隙度	(79)
5.12	渗透率	(86)
5.13	孔隙度和渗透率之间的关系	(96)
第六章	润湿性和毛细管压力对流体饱和度的影响	(104)
6.1	平衡条件	(104)
6.2	实验室测定及其与油藏系统的关系	(105)
6.3	孔隙大小分布	(109)
6.4	毛细管压力的滞后现象	(110)
6.5	油层井段中饱和度的分布	(110)
6.6	给定岩石类型的毛细管压力数据的相关关系	(111)
第七章	相对渗透率和多孔介质中的多相流动	(115)
7.1	定义	(115)
7.2	分流量	(117)
7.3	渗透率变化的影响	(121)
7.4	润湿性的影响	(123)
7.5	实验室测定相对渗透率数据	(124)
7.6	残余油饱和度	(126)
7.7	油层润湿性的控制	(127)
7.8	相对渗透率的相关关系	(128)
7.9	在驱替计算中相对渗透率数据的校正	(130)
7.10	在动态系统中的拟相对渗透率	(132)
7.11	静态拟相对渗透率函数	(132)
第八章	地质储量和可采储量的表示方法	(140)
8.1	原始地质储量	(140)
8.2	油藏面积	(140)
8.3	油藏厚度图	(142)
8.4	岩相描述	(143)
8.5	等孔隙度图	(144)
8.6	地层系数等值图	(144)
8.7	烃类孔隙体积图	(144)
8.8	概率统计	(145)
8.9	采收率和可采储量	(148)

8.10	油藏中的合理分配	(150)
第九章	油气井动态的径向流动分析	(154)
9.1	在单井系统中的径向流	(154)
9.2	线源解的提出	(156)
9.3	用实用单位表示的径向流方程式	(157)
9.4	试井方法中解析解的应用	(158)
9.5	压力恢复曲线分析	(160)
9.6	表皮效应	(164)
9.7	压力降落与油藏边界测试	(166)
9.8	气井试井	(168)
9.9	试井方法	(172)
9.10	试井和压力分析	(177)
第十章	油藏动态分析	(184)
10.1	气藏的采收率	(184)
10.2	油藏中的一次采油	(187)
10.3	重力分异和采收率	(195)
10.4	水侵油藏和注水油藏的物质平衡	(195)
10.5	总的物质平衡方程式的精度分析	(199)
第十一章	二次采油和压力保持	(204)
11.1	驱替原理	(204)
11.2	影响二次采油和压力保持的因素	(206)
11.3	注入水水质和盐水的处理	(215)
第十二章	提高烃类采收率	(221)
12.1	目标	(221)
12.2	开采方式对残余油的影响	(222)
12.3	渗透率的改善	(223)
12.4	混相驱机理	(224)
12.5	混相驱的应用	(225)
12.6	化学驱过程	(226)
12.7	重油开采	(230)
12.8	热能	(235)
12.9	凝析气藏	(238)
12.10	挥发性油藏	(243)
第十三章	影响生产操作的因素	(249)
13.1	生产系统	(249)
13.2	生产过程中的油藏动态	(251)
13.3	井筒中流体的流动	(252)
13.4	矿场处理设备	(255)
13.5	天然气的处理	(256)
13.6	原油的加工	(258)

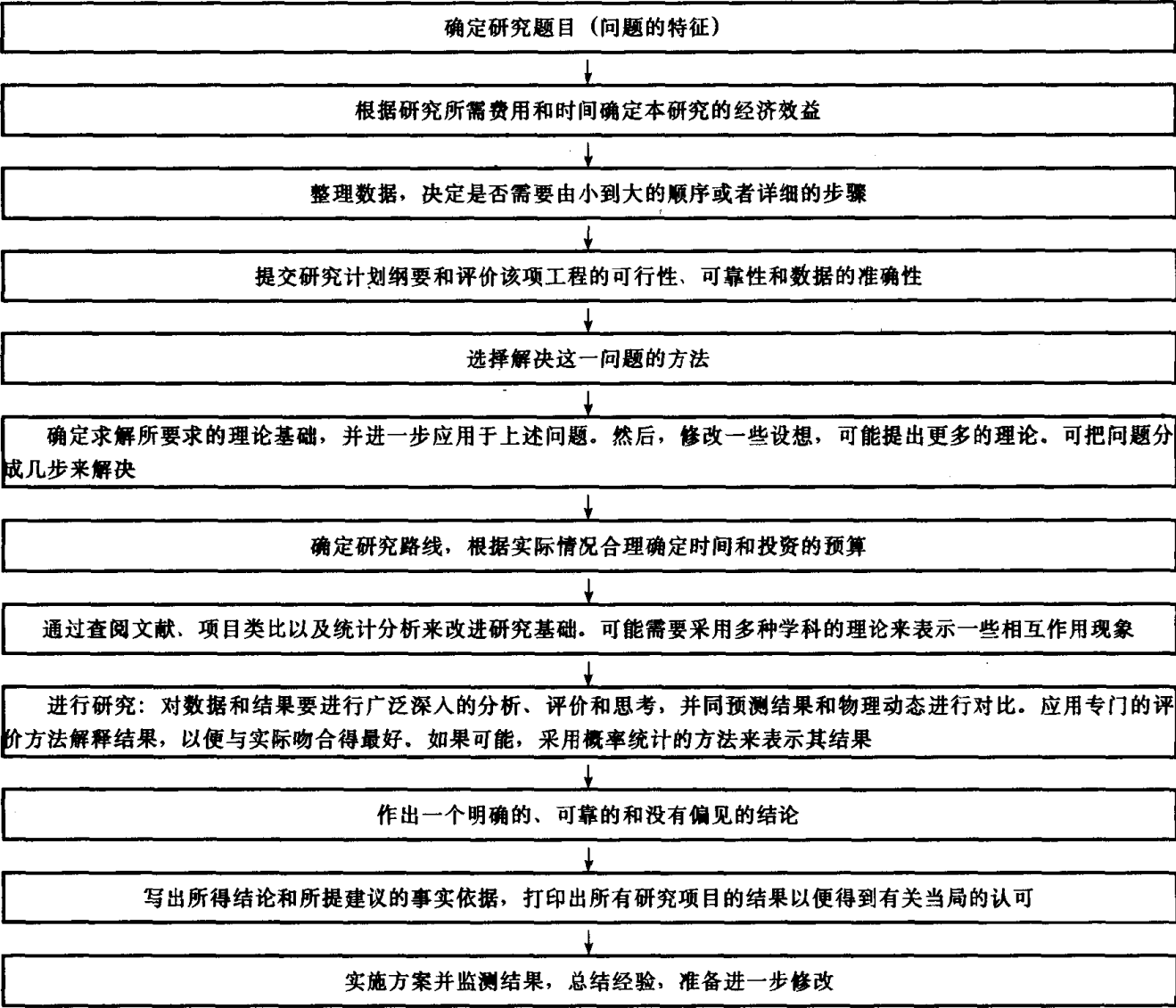
13.7	重油加工	(260)
13.8	产出水的处理	(260)
13.9	注入水的处理	(261)
13.10	原油计量	(261)
第十四章	油藏模拟概念及其在开发规划中的应用	(265)
14.1	模型	(265)
14.2	多相流动方程	(265)
14.3	模拟器的分类	(268)
14.4	模拟器的应用	(268)
14.5	模拟中的油藏描述	(270)
14.6	油藏模型在油田开发中的应用	(280)
附录 I	SPE 术语和单位	(290)
	单位	(290)
	SPE 符号标准	(292)
附录 II	习题解	(352)

第一章 引言

石油工程

石油工程学主要为开采具有工业储量的石油资源提供技术基础。石油工程学本身具有广泛的基础，充分吸收了工程学、地质学、数学、物理学、化学、经济学和地质统计学的基础知识。作为工程学的一个分支，石油工程的特殊之处在于，设计的基础来源于对生产动态的观察结果和由非常有限的岩样分析所得的油藏特征。石油工程不同于其他工程学科，油藏不可能被设计成能够实现某一特定任务的目标，不过，对于尚未完全探明的天然油藏，只要认为有一定的商业价值，就可开采其相当部分的储量。经过一段时间的开发，人们积累了累积产油量和更多有关油藏的资料后，就可以改进开采方式。由此可知，石油工程的设计可以应用一些不确定因素。表 1-1 列出了 Timmerman⁽¹⁵⁾ 提出的石油工程中解决问题的常规方

表 1-1 油藏工程中解决问题的思路



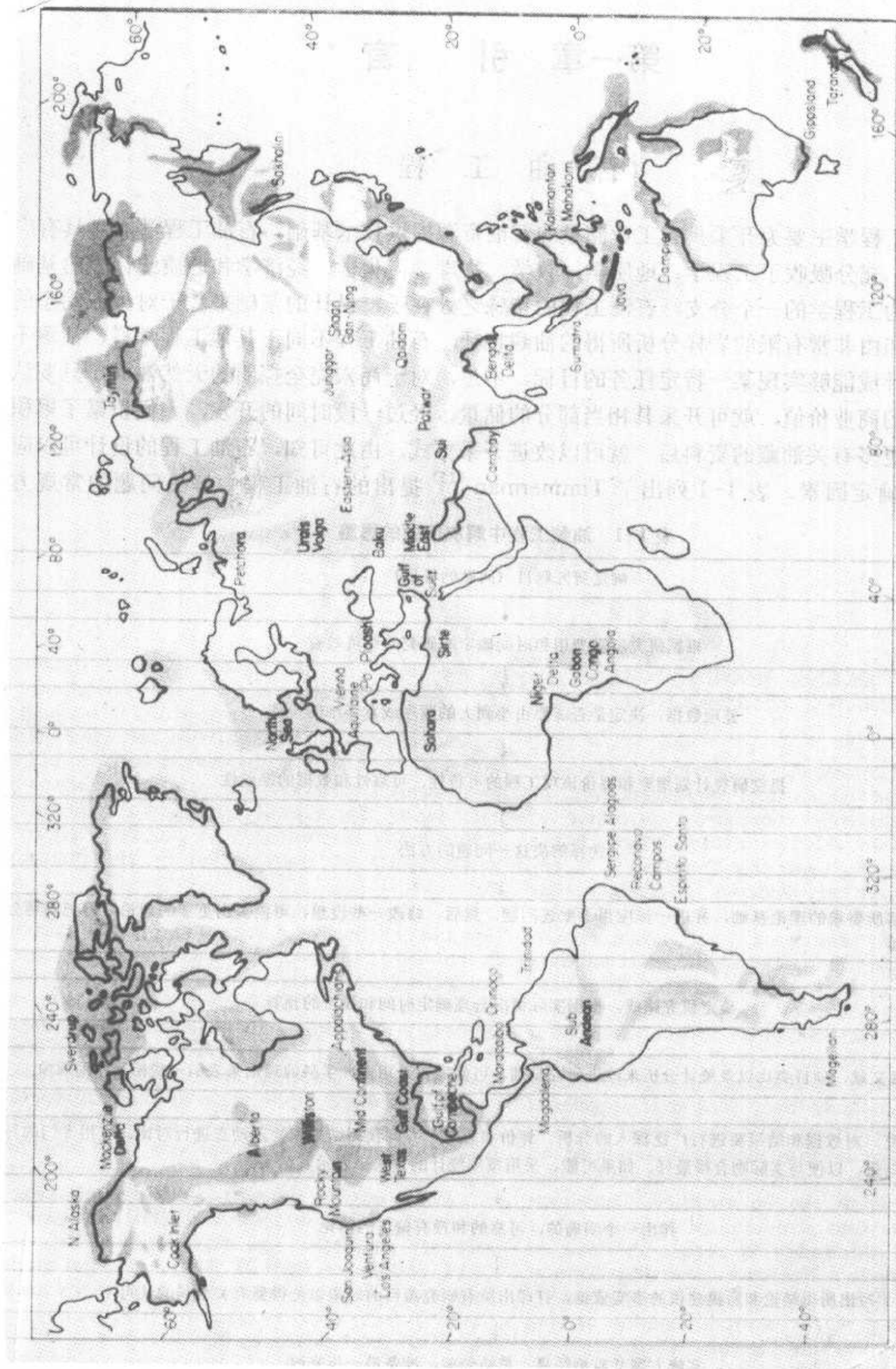


图 1-1 世界沉积盆地

法和思路。不同的地质储量和可采储量的术语有不同程度的可信度。在第八章中我们将讨论确定油气证实储量的表示方法。显然，油气开采的经济效益不可避免与石油工程的设计和实施有关。对于一项工程，石油工程师有责任对其技术可行性和经济价值进行分析和论证。

随着世界沉积盆地（图 1-1）中深部油藏勘探的不断增多和海上油田勘探的增多，原油生产费用越来越大。例如，根据税前原油生产成本，若陆上油井的钻井深度为 2000 米，而海上油井深度为 3000 米，则成本比例可能达到 1：10。目前在成熟度较高的含油气地区中的勘探，集中在隐蔽圈闭中的比在隆起幅度高、构造圈闭小的构造中多。从接近常规开采末期的油藏中进一步采油，要求使用在经济上有效的提高采收率方法。重油（API 重度低于 20° API）、凝析气和挥发性油藏（API 重度大于 45° API）的勘探需要专门的石油工程方法，特别是高压油藏和海洋油田。从含油砂岩和含油页岩中开采油气要求石油工程师与采矿工程师和化学工程师共同进行。

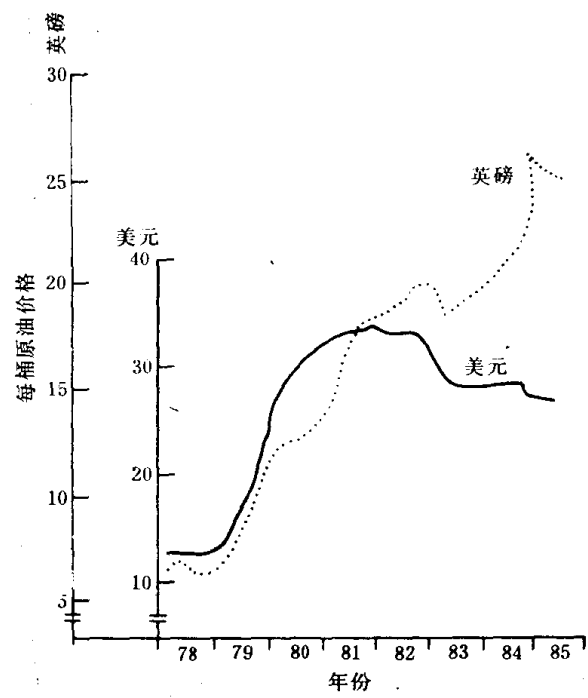


图 1-2 中东原油平均价格的变化

现行的财政投资环节，特别是在西北欧，已经增加了石油工程师之间在经济上和政治上的相互了解。世界石油市场上的原油价格，通过石油生产国之间的协商部分地得到了控制。图 1-2 表示了官方的中东原油平均价格的波动状况，这是从“石油情报周刊”上公布的数字中收集编绘出来的。由图清楚可见英国货币英镑和美国货币美元之间兑换率波动的影响。这些变化已经对石油生产公司的勘探开发产生了影响。一般来说，要求一个生产公司从货款中支出一定量的基本资金用于油田开发，但其偿还情况又与描述油藏生产的不确定性有关系。图 1-3 表示出了开发原油可采储量大约为 7500 万桶的英国海上油田的投资利润情况。1985 年的投资总额超过五亿英镑，以 1985 年的兑换率来计算，则超过 6 亿美元。从这个数字也可以非常清楚地看出，至少在收生产费用前的五年里，这一投资的绝大部分是无利可图的。由于这一原因，石油工程设计的原则是初期采油速度高，投资回收期短。开发英国大陆架油田时（可采储量不到 1 亿桶），石油工程师们遇到的挑战要比在 1983 年开发的每个油藏（拥有可采储量 4 亿桶）中遇到的挑战都要大。

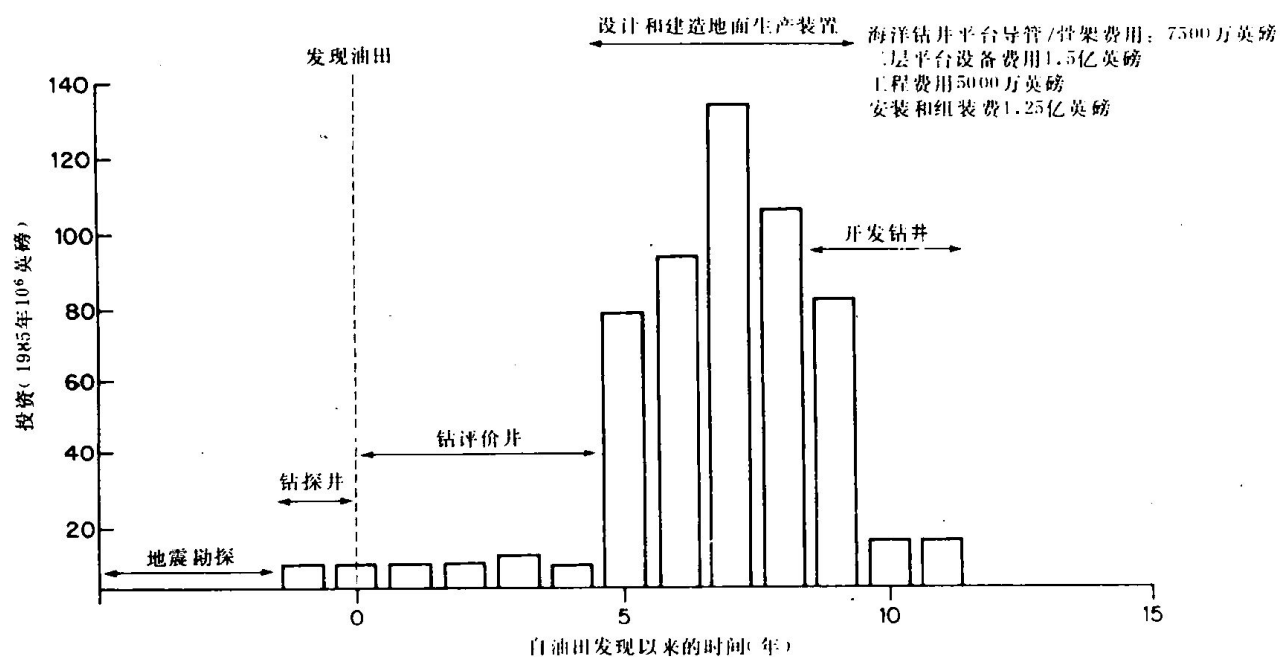


图 1-3 1985 年英国 (UKCS) 海上油田 (发现的原油可采储量为 7500 万桶) 的投资、支付和获利情况



图 1-4 应用“征服”号半潜式钻井船进行海上石油勘探

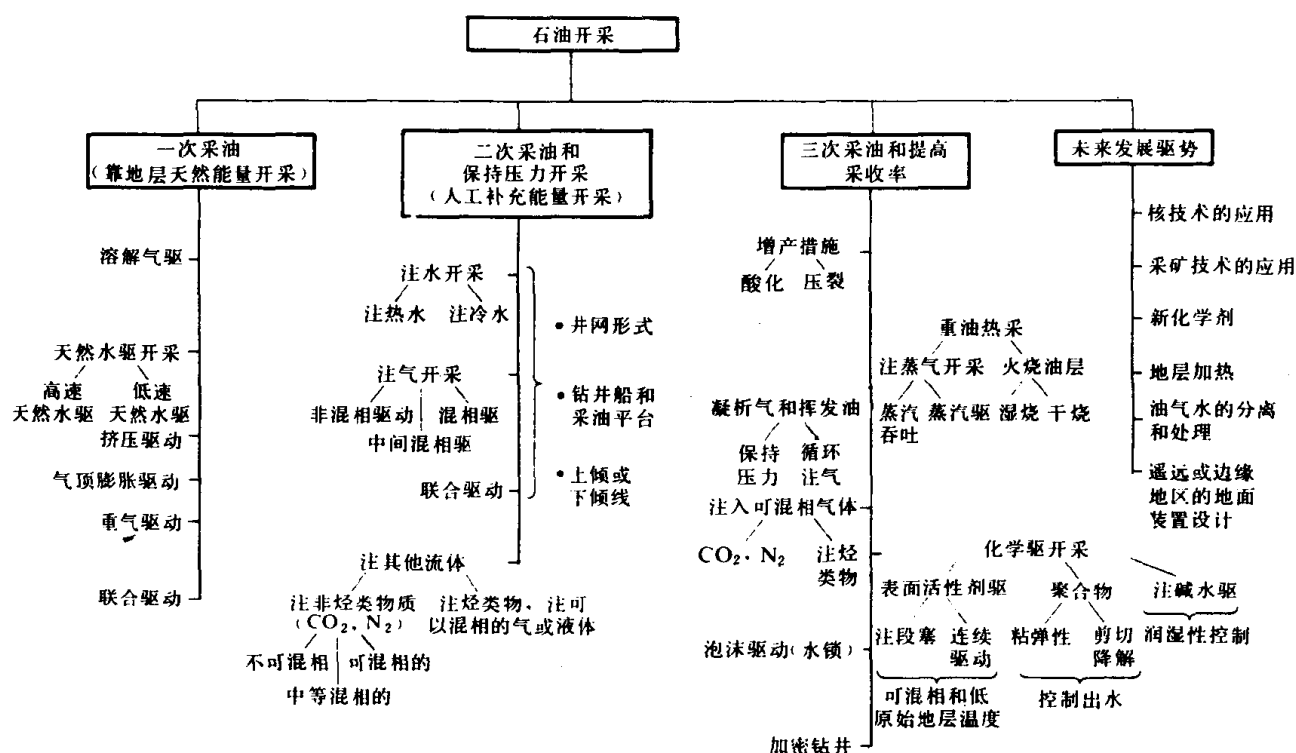


图 1-5 石油开采方法

参 考 文 献

- [1] *International Petroleum Engineering Encyclopedia* Pennwell Publish. Co. Tulsa (1983).
- [2] British Petroleum Company plc *BP Statistical Review of World Energy* (June 1984).
- [3] Department of Energy *Development of the oil and gas resources of the United Kingdom (the Brown Book)*, Pub. D.En. 1983 and annually.
- [4] Esso UK plc *Opportunities for British Industry* (1984).
- [5] UK Offshore Operators Association *Potential Oil and Gas Production from the UK Offshore to the Year 2000*, Technical Paper (Sept. 1984).
- [6] Brush, R.M. and Marsden, S.S. Bias in engineering estimation, *JPT* (1982) 433.
- [7] Marks, V.E. Further small offshore oilfield developments, SPE Paper 12988, *Proc. Europec* (1984), 265.
- [8] Underdown, D.J. The role of taxation in optimising the exploitation of the UK continental shelf, SPE Paper 13008, *Proc. Europec* (1984), 407.
- [9] Archer, J.S. Reservoir definition and characterisation for analysis and simulation, *Proc. 11th World Pet. Cong.*, London (1983), Paper PD6(1).
- [10] Perrodon, A. Dynamics of oil and gas accumulations, *Elf Aquitaine*, Mem 5. Pau 1983.
- [11] Master, C.D. Distribution and quantitative assessment of world petroleum reserves and resources, *Proc. 11th World Pet. Cong.* (1983), Paper PD11(1).
- [12] Hertz, D.B. Risk analysis in capital investment, *Harvard Business Review* (Jan. - Feb. 1984) and in *Pet. Trans.* Reprint Series 3, SPE of AIME (1970), 176.
- [13] Northern, I.G. Investment decisions in petroleum exploration and production, *JPT* (July 1964), 727.
- [14] Attanasi, E.D. and Haynes, J.L. Economics and appraisal of conventional oil and gas (in the Western Gulf of Mexico), *JPT* (Dec. 1984), 2171.
- [15] Timmerman, E.H. *Practical Reservoir Engineering*, Pennwell Publishing, Tulsa (1982), 2 vols.
- [16] Parra, F.R. Financial requirements and methods of financing petroleum operations in developing countries, *Proc. UN Conf., Petroleum Exploration Strategies in Developing Countries*, The Hague (1981), Graham & Trotman 177-192.

第二章 油 藏

2.1 油藏形成的条件

我们可以把油藏定义为在孔隙性可渗透沉积岩石中的油气聚集体。在发现该油气聚集体时，整个孔隙内流体承受的压力已经达到了平衡。一个油气田可以包括几个不同层状或不同压力系统的油藏。油气是在沉积盆地中聚集的，这个盆地提供了形成油藏的基本条件，即：

- (a) 烃类物源；
- (b) 石油在储集层中的形成和运移；
- (c) 圈闭。也就是在油气运移过程中和在其运移道路上在孔隙性沉积岩石中存在某种圈闭。

沉积盆地的成因和烃类物的生成、运移和圈闭，在地质文献中是一个十分广泛的课题⁽¹⁻¹⁰⁾。这里只作最基本的描述，图 2-1 和图 2-2 中表示了，根据世界各含油气盆地的勘探程度、成熟度和勘探工作量以及发现的油气量来说明某些世界沉积盆地中通过勘探钻井可发现石油的情况。北海含油气盆地可以认为是相对比较年轻的、具有高产量条件的勘探地区。

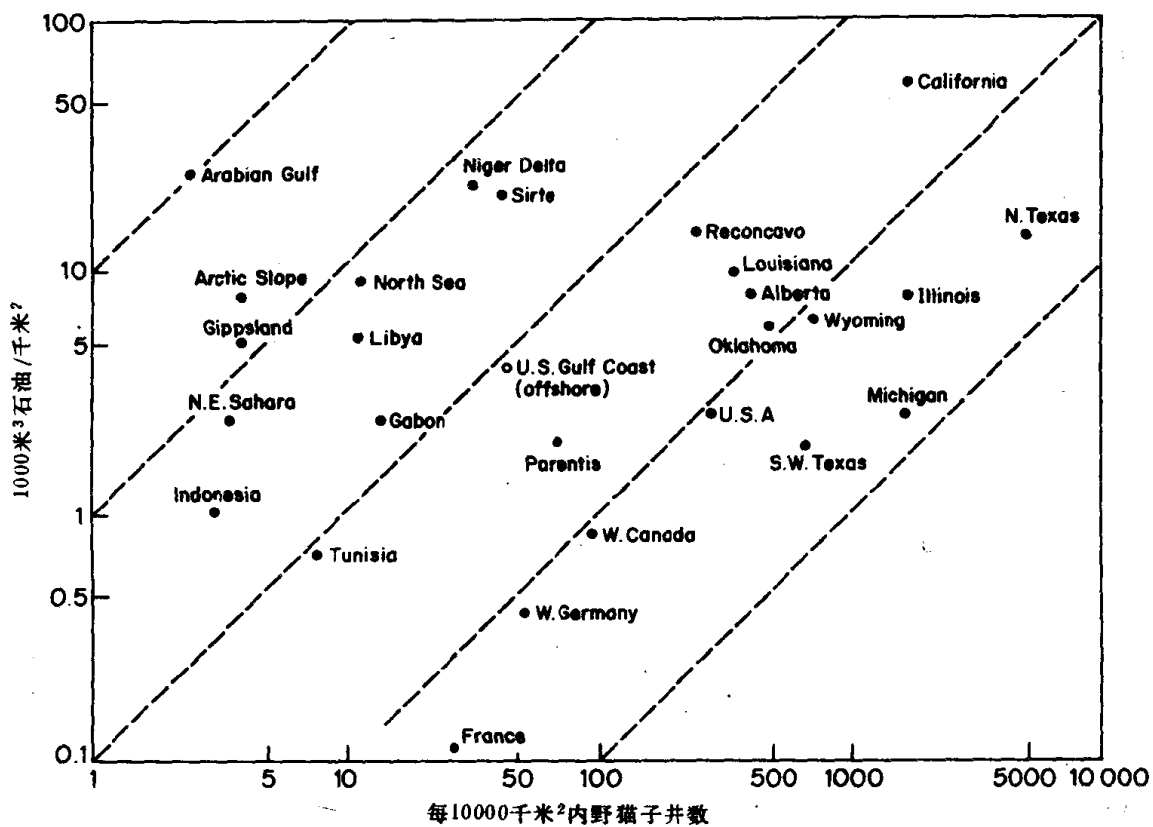


图 2-1 用野猫子井勘探获得成功的情况⁽¹⁸⁾

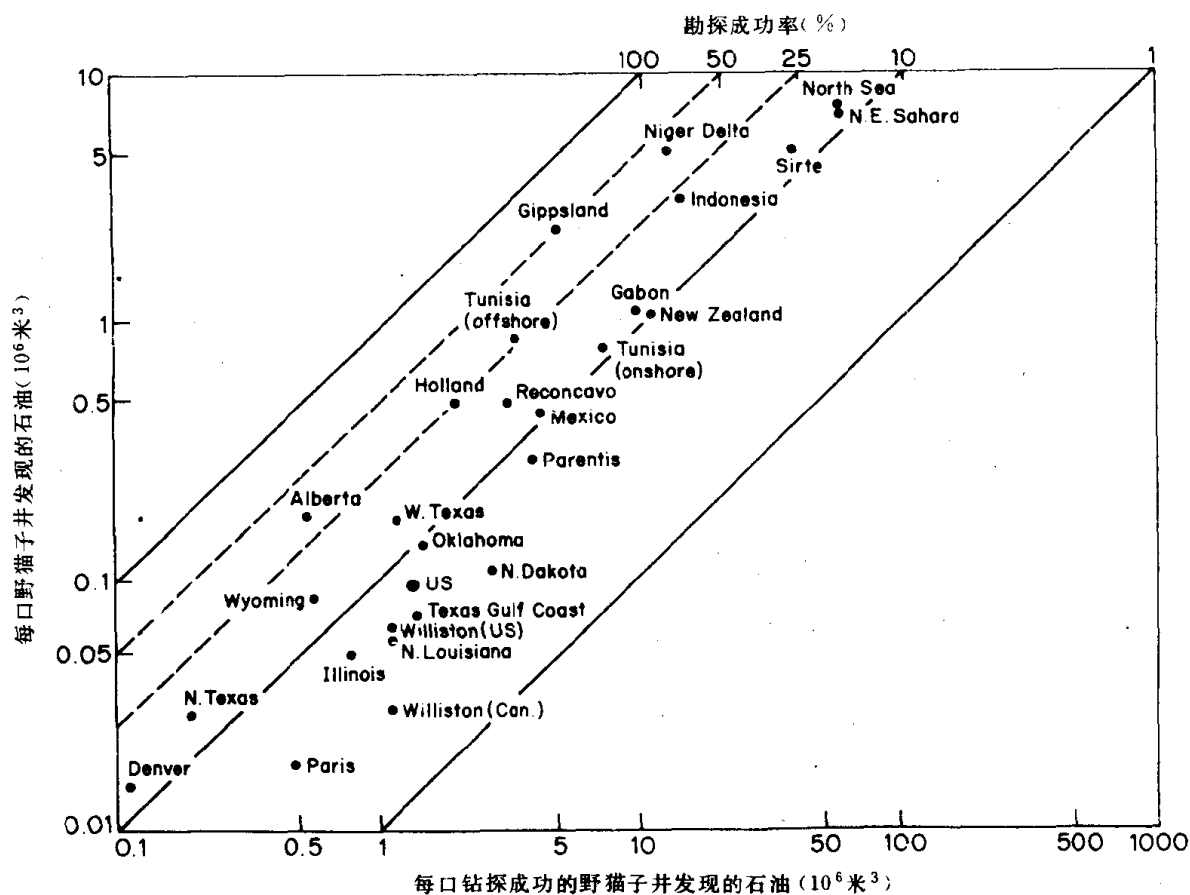


图 2-2 勘探密度与原油产量之间的历史关系

从石油工程的观点来看，人们通常把沉积盆地看为在缓慢下沉区域中水的聚集，同时把沉积物搬运到该地区。

原生沉积作用和沉积物的特性对储油岩石的孔隙度和渗透率有巨大的影响。包括压实作用、溶解作用、化学取代作用和成岩作用在内的次生沉积作用可能会进一步改变孔隙结构和孔隙的几何形态。由于有压实作用，岩石颗粒不断扩大接触，而且孔隙中的流体不断从逐渐减小的孔隙中挤压出来。如果孔隙中流体不能被排挤出去，那么孔隙中流体的压力就要上升。可以确信，石油是海洋中或海湾地区的脂肪、蛋白质的碳水化合物或动物残骸以及浮游生物和藻类缺氧分解的产物，需要在富含有机质的水中快速沉降，从而导致富含有机物的粘土在厌氧环境中沉积。石油储层在这种条件下，富含有机质的粘土由于高温高压的影响，成熟度变高。温度变化范围为 140°F 到 300°F ，这可能与埋藏深度和地质时代有关。这个条件对烃类物质演变为石油似乎是最理想的（如图 2-3 和图 2-4 所示）。有机物很长时间暴露在高温下或较短时间暴露于非常高的温度下，将会逐渐地生成具有凝析气、湿气和干气特性的碳氢混合物。在有可能生油的岩石中，有机质的平均含量大约为 1%（按重量计）。在北海油田中主要生油岩石的 Kimmeridge 粘土的平均含量大约为 5%（有机质含量大约为 7%），局部的薄层中有机物含量甚至超过 40%。作为油源，有机质中含烃量应当高于 7%（重量百分比）。在成熟的生油岩石中按有机碳含量的百分比计算，每平方千米沉积岩中大约会产生 $1300 \sim 5000 \text{ 米}^3$ 原油（即每英亩·英尺体积内含有 $10 \sim 40$ 桶油），这是一个基本的

经验规律。但是，不可以认为所有生成的石油将会被挤出去或被圈闭在多孔岩石中。

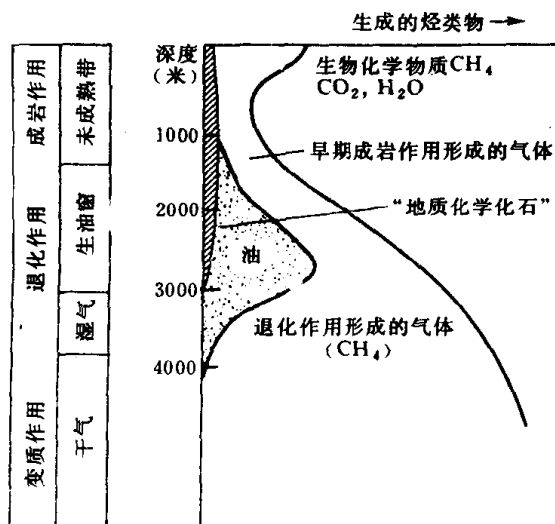


图 2-3 正常地温梯度下油气的生成

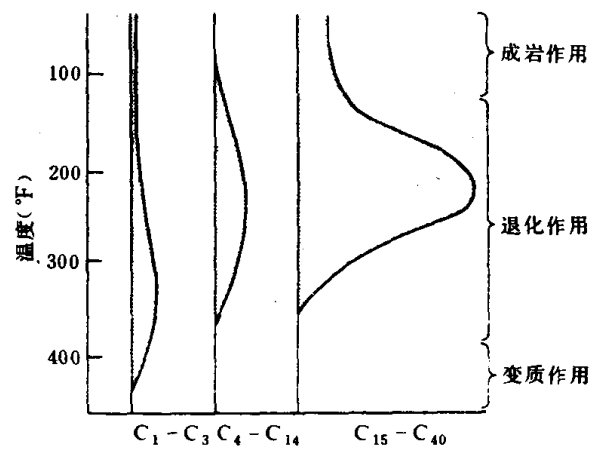


图 2-4 细颗粒沉积物中所含烃类数量的变化与温度的函数关系

生油岩层中形成的石油其运移问题至今还没有统一的认识。由于石油的生成伴随着体积的变化，而体积的变化又会形成局部高压，这也许会引起微裂缝的产生。这种宏观裂缝将提供油气向可渗透系统（如沉积岩或裂缝面）运移的通道。当压力下降时，生油岩石的微观裂缝可能重新闭合。石油是溶解在水中运移还是以明显的油相或气相进行运移？关于这一问题还没有一致的意见。油气运移过程包括两个主要阶段，也就是说，先通过生油岩石而后再通过可渗透系统。在可渗透系统中流体在压力梯度下产生油气的运移，这个运移作用可以把油气带到地面或者带到某种圈闭的地方。如图 2-5 中的实例所示，人们可以假设，在生油岩石中不到 10% 的石油已经被排驱走或者被圈闭住了。

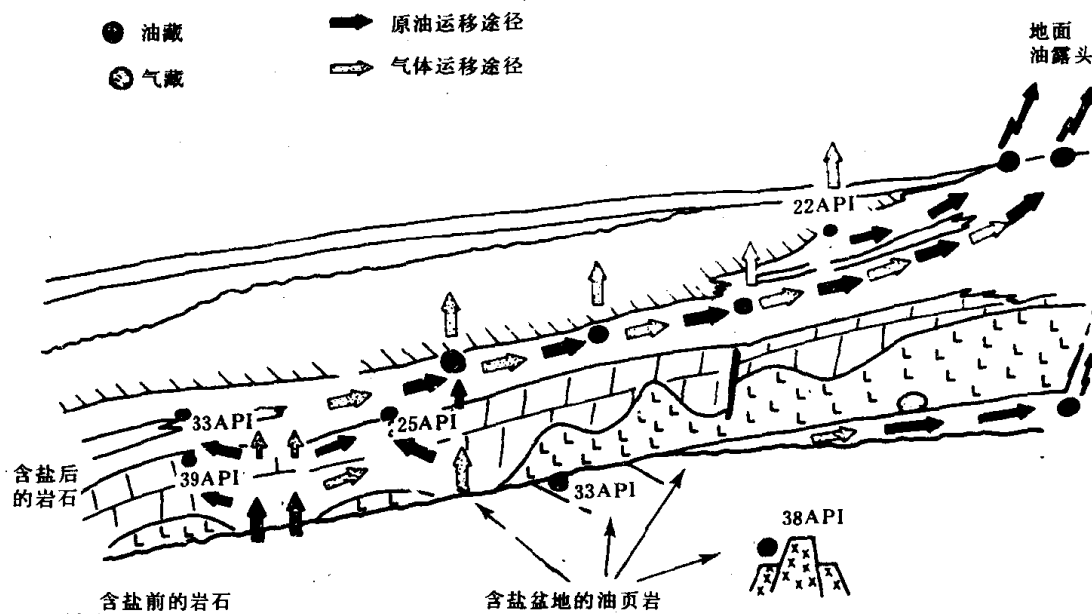


图 2-5 Congo 海岸含油气盆地剖面中流体运移模型

石油圈闭从形态特征上讲可以分为构造圈闭和地层圈闭两种。已经知道的油气聚集中的大多数为前一种圈闭类型。构造圈闭一般来说可以细分为背斜圈闭和断层圈闭，这可以根据沉积层的形状和它们的接触关系（如图 2-6 和图 2-7 中所示）来描述。

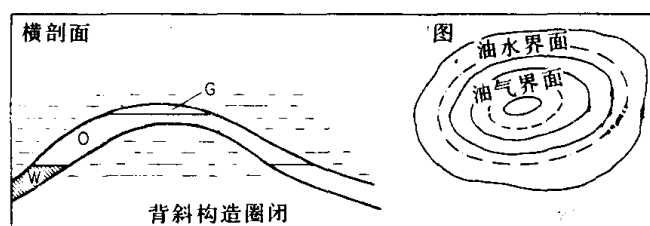


图 2-6 背斜构造

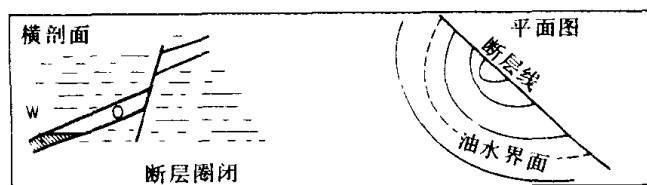


图 2-7 断层圈闭

非渗透岩石在可渗透储层的上、下起封闭作用。在平衡状态下，油气水三相之间的密度差可能会产生界面区，即油-水，油-气接触面。

地层圈闭是在沉积岩层从可渗透岩层向细粒的不渗透岩层变化时形成的（图 2-8）。

在油藏的边侧地区或不连续的河道砂体中以及深水处的三角洲沉积和石灰岩矿脉包络面中，存在这种圈闭类型。

在北海和其它几个沉积地区，人们发现有一种圈闭类型是由一个倾斜的不渗透地层被一个不渗透的不整合面（图 2-9）相截而形成的。这一圈闭是称为地层圈闭（通过细颗粒不渗透沉积物形成）还是称为构造圈闭（不整合地层特征形成后形成）目前还没有定论。

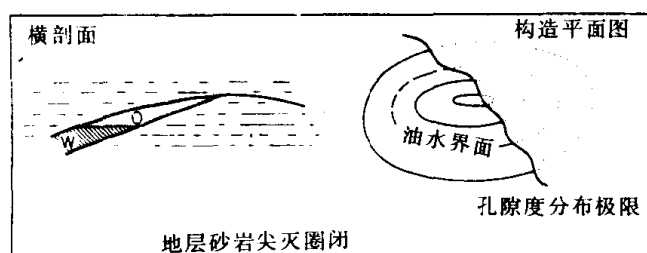


图 2-8 地层尖灭圈闭

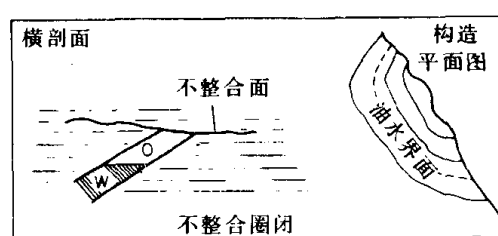


图 2-9 不整合圈闭

许多油藏是以构造圈闭和地层圈闭组成联合圈闭的形式而存在的。在北海的 Viking Graben 开发区中的 Brent 砂岩油藏中的圈闭特征是：受断层破坏的三角洲砂岩被白垩纪不整合面所截断。封闭侏罗系砂岩储层的是本身不整合的泥岩或页岩，或者是上侏罗系 Kimmeridge 页岩层。向下断裂、成熟度较高的 Kimmeridge 泥岩也提供了一种如图 2-10 中所示的石油油源。

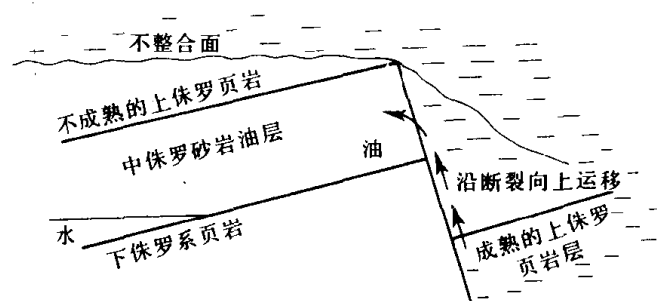


图 2-10 Brent 砂岩圈闭（英国大陆石油公司（UKCS））