



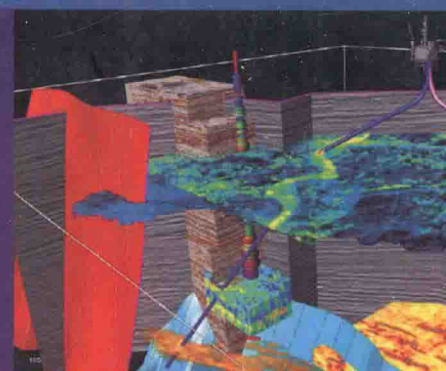
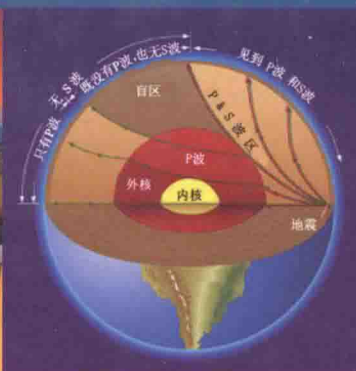
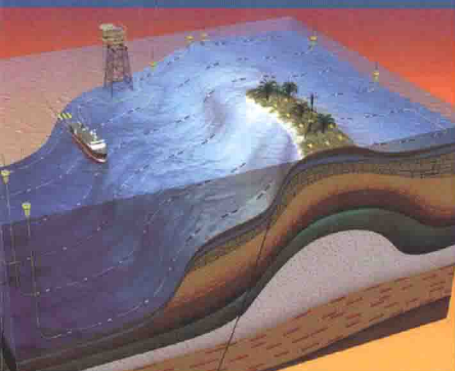
石油地球科学

——从沉积环境到岩石物理学

(第二版)

【挪】Knut Bjørlykke 等编著

王学军 蔡加铭 黄忠范 译



石油工业出版社

石油地球科学

——从沉积环境到岩石物理学

(第二版)

【挪】 Knut Bjørlykke 等编著
王学军 蔡加铭 黄忠范 译



石油工业出版社

内 容 提 要

本书内容包括:石油地质学入门,沉积(岩石)学——沉积物的搬运和沉积环境,沉积地球化学——沉积物是怎样产生的,砂岩和砂岩储层,碳酸盐沉积物,泥岩、页岩、二氧化硅沉积和蒸发盐岩,地层学,地震地层学、层序地层学和盆地分析,沉积盆地中的热传递,沉积盆地中地下水和流体流动,地质力学——沉积盆地中的应力和应变,沉积盆地中的构造和油气圈闭,沉积岩石的压实作用——页岩、砂岩和碳酸盐岩,油源岩和石油地球化学,石油的运移,测井——原理、应用和不确定性,地震勘探,勘探岩石物理学——地质作用与可观察到的地球物理现象间的联系,四维地震,油气勘探中海上 CSEM 和海上 MT 数据解释,生产地质学,油藏模拟介绍,非常规油气,碳的捕获和储存(CCS),挪威陆棚地质学,勘探策略等。

本书可供从事油气地质勘探和石油地质综合研究的专业人员学习参考,也可作为高等院校、科研院所相关专业本科生和研究生的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

石油地球科学:从沉积环境到岩石物理学:第二版/(挪)克努特·比约里卡(Knut Bjørlykke)等编著,王学军等译.
—北京:石油工业出版社,2017.2

书名原文:Petroleum Geoscience: From Sedimentary Environments to Rock Physics (Second Edition)

ISBN 978-7-5183-1644-1

I. 石…

II. ①克… ②王…

III. 石油天然气地质

IV. TE1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 308984 号

Translation from the English language edition:

Petroleum Geoscience: From Sedimentary Environments to Rock Physics (Second Edition)
by Knut Bjørlykke.

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010, 2015, All Rights Reserved.

本书经 Springer 授权石油工业出版社有限公司翻译出版。版权所有,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2013-7954

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.cn

编辑部:(010) 64523533 图书营销中心:(010) 64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:35.25

字数:900 千字

定价:298.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

本书第二版是对 2010 年初版的更新和完善，同时还增加了 4 章新的内容。

石油地质学和地球物理学是没有令人满意的科学定义的学科。它们还包括地球科学中用于石油勘探和生产的许多不同的领域。

在许多情况中，几乎所有的观察能力在油气勘探和生产中都是有用的，但部分相关学科与油气勘探和生产的联系显得更加紧密。由于石油的形成，以及大多数形成的油气都赋存在沉积岩石中，沉积学自然成为关键。古生物学在确定岩石地层年代中有重要作用，且碳酸盐岩储层大多是由化石组成的。构造地质学和盆地分析同样是重构油气运移和成藏所必不可少的。地球化学和油气化学也是组成本书的主要内容。目前，石油工业中约有 50% 的地球科学工作者与油气生产的关系比与油气勘探的关系更加密切。因此，本版增添了由挪威国家石油公司专家所撰写的油藏模拟相关章节。

地球物理的基本方法包括测井和地震勘探。最近，电磁方法也常用于勘探和生产中，因此，这次出版增加了介绍电磁方法的章节。同时，还将碳捕获和储存 (CCS) 的内容专门列为一章做详细介绍。本版对首版中的测井部分做了修改并增加了新的内容，使其更加完善。

大多数高等院校并不专门提供和设置兼顾石油地质学和地球物理学的课程，在这些领域中也只有少量的硕士和博士课程，所以，油公司招收的许多地质学人员缺乏这方面的训练。

本版尝试向读者介绍油气勘探相关学科的内容，同时也包括油气生产和模拟方面的部分内容。

因本书涉及许多不同学科的内容，难以逐个做深入的阐述。书中为读者提供的是所涉及领域较简短但很明确的基本理论和实例，因而只能压缩油田实例的数量和精简所介绍实例的内容。

本书尽量使所编写的内容能够满足部分地质学和地球物理学背景有限的读者的需要。部分章节中包含相对基础的内容，但许多章节的内容都反映出了最新的理论和先进的技术，同时也向读者提供了有关原始研究专著的相关讨论和参考文献^①。书中的每章都是相对独立的，所以可能存在一定程度的内容重叠。

石油地质学和地球物理学都是应用科学，具有很强的实践性。实践经验是不可缺少的。独立的石油勘探章节是由在挪威陆棚 (NCS) 有 40 年工作经历的地质学家 (Hans Rønnevik) 所编写的。

挪威陆棚已经历了近 50 年的油气勘探，通过挪威石油署能够很好地为大家提供钻井和地震勘探的大量数据，它们的网址是 www.npd.no。他们还拥有大量的岩心资料。

① 对相关参考文献感兴趣的读者，请参阅本书的英文版 (Knut Bjørlykke, 2015, Petroleum Geoscience, Second Edition, Springer)。

由于书中涉及学科的范围很广，只能压缩原始的参考文献。已往的教材通常都列出大量原始参考文献，这对追踪相关文献是很有用的。但目前已有电子数据库，这使寻找相关参考文献和新书变得更加便捷。

本书试图建立起连接地球物理学和地质学的纽带，并特别强调沉积物的压实作用、流体流动和岩石物理学。要求石油地质学家拥有的技术应适应最近已出现的重大变化。传统的主要地质任务是识别和确定储层、有闭合幅度的构造和附近的成熟油(烃)源岩。

现在，容易发现和容易生产的石油和天然气藏越来越少，或者已经接近枯竭，而勘探和生产的技术趋于更加先进。现在不但能够从运移到储层的油气藏中生产石油和天然气，还能够从油(烃)源岩(页岩)中产出石油和天然气。这使全世界的油气储量在最近数年内有相当大的增长。在北美洲，页岩气和页岩油的产量已经增加，并已使国际天然气价格降低。

非常规石油(沥青砂、油页岩)及致密气藏和页岩气中的天然气生产，要求相关人员在矿物学、化学和物理学等领域具有很强的背景知识。

地球物理方法已变得更加复杂和精密。现在，在钻井之前根据地震勘探数据解释和综合分析，就有可能检测气和石油的存在。通常用于矿物探测的电磁勘探方法，现在也用于发现石油。由于常规石油越来越少，使越来越多的地质学家更加关注和参与重油、油页岩和页岩气的勘探和生产。这些资源的利用会产生比常规油气更严重的环境问题，并趋于在生产过程中排放更多的 CO_2 。

这强烈要求相关从业人员在油气的化学和物理学领域，以及矿物学和岩石力学(岩石物理学)领域有更扎实的背景知识。物理和化学模拟也是极其重要的。

即使可选择的新能源正在研发，但全世界在数十年之内将仍需要化石燃料。解决在生产 and 利用化石燃料过程中产生的环境问题仍然是目前面临的很大难题。

在有充足的可再生低价能源应用之前，地球科学人员在油气勘探和生产领域，以及尽可能降低污染和 CO_2 排放领域应该能够做出自己的贡献。

环境地质学的许多理论基础和石油地质学是相同的。

从化石燃料中捕获 CO_2 并将它们储存在地下所需要的技术与油气生产技术在很多方面是相同的。

希望本书能够成为包括油气工业在内的所有地球科学从业人员的有用参考资料。

本书作者名单

Per Avseth, 挪威, 奥斯陆市, 塔洛石油公司

Knut Bjørlykke, 挪威, 奥斯陆市, 奥斯陆大学地质科学系

Jan Inge Faleide, 挪威, 奥斯陆市, 奥斯陆大学地质科学系

Nils-Martin Hanken, 挪威, 特隆姆瑟市, 挪威北极大学地质系

Helge Hellevang, 挪威, 奥斯陆市, 奥斯陆大学地质科学系

Pål T. Gabrielsen, 特隆赫姆市, EMGS(ASA OSE 电磁地质服务公司)

Roy Gabrielsen, 挪威, 奥斯陆市, 奥斯陆大学地质科学系

Kaare Høeg, 挪威, 奥斯陆市, 奥斯陆大学地质科学系

Jens Jahren, 挪威, 奥斯陆市, 奥斯陆大学地质科学系

Ståle Emil Johansen, 挪威, 特隆赫姆市, NTNU

Ragner Knarud, 挪威, 斯塔外格市, 挪威国家石油公司

Martin Landrø, 挪威, 特隆赫姆市, NTNU

Nazmul Haque Mondol, 挪威, 奥斯陆市, 奥斯陆大学地质科学系, 挪威地球化学研究院(NGI)

Jenø Nagy, 挪威, 奥斯陆市, 奥斯陆大学地质科学系

Jesper Kresten Nielsen, 挪威, 阿尔塔市, 新区勘探 ASA 北部能源公司

Jan C. Rivenæs, 挪威, 斯塔外格市, 挪威国家石油公司

Hans C. Rønnevik, 挪威, 奥斯陆市, 伦丁采矿公司

Petter Sørhaug, 挪威, 斯塔外格市, 挪威国家石油公司

致 谢

作为本书初版和第二版的文字编辑, Adrian Read (E-mail: adrian.read@geo.uio.no) 为本书的出版做了大量的工作。

Jan Petter Holm 为本书的第二版提供了新的图件。

Per Arne Bjørkum(挪威国家石油公司)和 Antony Spencer(以前在挪威国家石油公司工作)审查了本书初版的大部分内容。

Tony Dickson, Tom Andersen 和 Olav Walderhaug(挪威国家石油公司)分别审阅了本书的第3章、第4章和第5章的内容。

Masaoki Adachi, Jon Reierstad 和 Jan Petter Holm 为本书绘制了许多图件, Tom Erik Maast, Øyvind Marcussen, Olav Blaich, Brit Thyberg, Delphine Croizé Delphine 和 Tove Midtun 也为本书中的图件准备做了大量工作。

挪威国家石油公司在本书出版的准备阶段提供了资助。

Fugro 地质科学部提供了挪威海上和世界其他地区的优质地震资料。

在此, 对为本书出版提供帮助和支持的所有单位和个人表示衷心的感谢。

Knut Bjørlykke

目 录

1	石油地质学入门.....	(1)
2	沉积(岩石)学——沉积物的搬运和沉积环境	(28)
3	沉积地球化学——沉积物是怎样产生的	(81)
4	砂岩和砂岩储层	(104)
5	碳酸盐沉积物	(131)
6	泥岩、页岩、二氧化硅沉积和蒸发盐岩	(185)
7	地层学	(197)
8	地震地层学、层序地层学和盆地分析	(217)
9	沉积盆地中的热传递	(233)
10	沉积盆地中地下水和流体流动	(237)
11	地质力学——沉积盆地中的应力和应变	(256)
12	沉积盆地中的构造和油气圈闭	(272)
13	沉积岩石的压实作用——页岩、砂岩和碳酸盐岩	(297)
14	油源岩和石油地球化学	(305)
15	石油的运移	(316)
16	测井——原理、应用和不确定性	(327)
17	地震勘探	(362)
18	勘探岩石物理学——地质作用与可观察到的地球物理现象间的联系	(384)
19	四维地震	(413)
20	油气勘探中海上 CSEM 和海上 MT 数据解释	(435)
21	生产地质学	(460)
22	油藏模拟介绍	(473)
23	非常规油气	(491)
24	碳的捕获和储存(CCS)	(500)
25	挪威陆棚地质学	(510)
26	勘探策略	(538)

1 石油地质学入门^①

石油地质学是由那些对发现和采收石油和天然气最有意义的地质学科组成的。由于大多数明显和容易寻找的油气早已被发现,所以,在沉积盆地的进一步勘探中必须应用更高级的方法。这些方法包括先进的地球物理技术和盆地模拟技术,特别是目前更需要的油田生产中提高石油采收率的技术。石油技术已经取得很大的进步,在油气勘探和生产领域研发出了许多新的方法和模拟程序。

然而,了解决定不同沉积岩的分布及其物理性质的地质过程是极其重要的。这些知识是能够成功应用现有方法的基础。

因为几乎所有涉及的不同学科都是相互依赖的,所以,在教授石油地质学时很难确定从何处入手。

本章只提供石油地质学中部分领域的简要概述,引入主题和问题。其余大多数章节再对本章所提及的相关内容进行扩展,为相应议题提供更完善的背景知识。

由于几乎所有油气都分布在沉积岩石中,因此,沉积地质学就成为石油地质学的主要基础之一。通常利用沉积模型来预测沉积盆地中不同岩相分布的位置,并由此预测可能存在的有机质含量高的烃源岩、储集岩和盖层。可能的砂岩或者碳酸盐岩储层的分布及其几何形态需要具体的沉积模型,而层序地层学已经成为这类重构中的有用技术。

用微体古生物(包括孢粉)可以实现对多个探井中所钻遇地层进行生物地层对比,石油行业对生物地层学领域的发展有很大影响。因为钻井作业中取得的样品很小,所以我们不能依赖用大化石进行生物地层学对比;即使在岩心样品中,见到大化石的机会也很低。对比之下,钻井所获得的数克岩屑中可能含有数百个微化石或者孢粉体,它们是植物的残留物(如花粉、孢子)。这些微化石(孢粉体)通常也能提供比大化石更好的地层对比结果。

储集岩大多是具有足够的孔隙、能包含大量油气的砂岩和碳酸盐岩。而其他岩石类型(如页岩、盐岩)的组分和性质也是很重要的。

沉积环境(沉积相)决定了储集岩及其主要组分的分布。然而,随着上覆岩层增加和埋藏导致的成岩作用,地层性质会发生变化。

成岩作用决定了砂岩和碳酸盐岩储层的孔隙度(压实作用)、渗透率和其他物理特性(如速度)的变化。控制矿物反应的化学作用对储层性质的变化也有很重要的作用。

有机地球化学,包括地层中的有机物质和它们转变为油气的研究,已经成为石油地质学中另一个必不可少的部分。

大地构造学和构造地质学论述了盆地的形成和动态演化历史中的沉降、褶皱活动、上隆作用。形成构造圈闭的褶皱和断层活动的时间与油气运移年代之间的关系是非常重要的。

人工地震勘探方法已经成为沉积相、地层、层序地层学和构造发展成图的主要技术。由于激发线间距为 100m 或者更小,船舶记录的海上地震勘探数据已经非常有效。由于高质

^① 本章作者 Knut Bjørlykke, Department of Geosciences, University of Oslo, Oslo, Norway, E-mail: knut.bjorlykke@geo.uio.no。

量地震勘探数据处理技术的快速提高,地震勘探数据地质解释已经成为一个重要的和不断发展的领域。地震勘探和其他地球物理数据(资料)经常是我们仅有的数据,尤其是近海勘探中,因为近海钻井的费用极高。小间距采集地震测线可以为沉积盆地中的关键部分提供高分辨率的地震图像。在油气生产期间,通过对油田区重复进行三维地震勘探,可以观测到气/油、油/水界面是如何由于油气藏逐渐衰竭而移动的。因为时间成为第4维,所以又将这种方法称为四维地震。

地球物理测量包括重力测量和磁力测定;过去,电磁法大多用于矿床勘探,最近10~20年已经应用于石油勘探。电磁法用于检测地层中由于油取代地层水而出现变高的电阻率。该方法要求海水深度为数百米,以及油气藏埋藏较浅(小于2~3km)。

陆上工区地震探测采集比海上船舶采集更贵,这是因为陆上勘探时检波器必须放置在网格状的、不平坦地面的观测系统中。然而,陆上钻井的费用远小于近海钻机的钻井费用,因此,陆上勘探和生产可采用较密的井距。

采用地球物理辅助性岩石类型间接成图方法的重要性,在石油地质研究中逐渐提高。但是,仍有必要取样并对岩石本身进行检查。石油地质工作者必须经过广泛的地质培训,而野外工作是一种更有效的实践方法。

地球物理测井方法同样已得到快速发展,从单一的电测井和放射性测井到利用先进的测井设备测井,这些设备可以提取井所钻遇层序中的许多详细信息。测井曲线(钻井记录)可提供连续的有关岩石的特性,这是很难从出露地层或者岩心样品中得到的。这种信息不但有可能解释岩石的岩性成分和孔隙度、渗透率的变化,同时还能够解释岩石的沉积环境。图像(Image)测井还有可能测定井内地层的层理和裂缝。

实用石油地质学不仅以许多不同的地质和地球物理学科为基础,同时还要求有很好的基础化学、物理学、数学和计算背景,尤其是对不同类型盆地进行模拟计算的能力。

世界上很高百分比的地质和地球物理工作者都直接或间接地与石油行业有关,石油行业招收了大学中大量相关专业的学生。石油行业也为许多研究提供资金,这些研究不仅包括范围窄的应用性研究,而且还为被大家广泛理解的地球地壳(尤其是沉积盆地)做了更大的贡献。直接针对油气勘探和生产的应用性研究通常会得到基础地质作用方面更清晰的认识。

环境地质学已经成为一个非常重要的领域,它研究的问题不但与石油工业相关,还与岩石和地层中污染的总体分布有关。

因此,要求有很好的化学基础背景知识。

1.1 油历史概述

原油曾经在许多地方渗出地表。古代就已经有人收集从这种天然分布的石油中产出的沥青来用于照明和医学。希腊人甚至用于战争。在部分地区,如德国19世纪已挖掘小矿井以获得原油。1859年之前,人们还从煤中获取石油用于煤油灯。至1859年,在Edwin Drake从泰特斯维尔(西宾夕法尼亚)附近的石油溪开采石油之前,石油都不是从井孔中产出的。Edwin Drake所钻井的深度约为25m,日产石油8~10bbl^①,与先前的产量相比,这已是很大的数量了。数年后,石油溪的周围钻了74口井,美国的石油年产量升至 50×10^4 bbl。当时美国以外地区每年石油总产量的最大值是5000bbl。至1870年,石油产量增长10倍,美国是 5×10^6 bbl,其余国家是538000bbl。南加利福尼亚早在1864年就开始生产石油,但

^① 1桶(bbl)=0.159立方米(m³)。

由于原油密度太大且经生物降解，无法流入井孔，所以许多年一直是将传递轴置入含油地层中进行开采。

初期的石油勘探大多在地表寻找油苗，然后在油苗区附近钻井，这不需要太多的地质知识。后来，认识到石油是分布在沉积岩地层形成的穹隆或者背斜构造中，由于石油的密度小于水的密度，且需要低渗透率地层(盖层)防止油气上升和逃逸。这导致对地表可见的穹隆和背斜普遍进行地质成图(尤其在美国)。同时也发现，油田有位于由多个背斜或者断层所限定的构造走向带的趋势，并将这种规律应用于勘探。大量的盐穹隆(丘)通常就是这种状况，成为重要的勘探目标。

到19世纪末，石油产量快速上升，逐渐发展起更系统的地质勘探准则。在地表得到的地质信息通常并不能代表该构造在深层的状况。地表见不到的构造，可以通过对比井之间的测井曲线和钻井中获得的岩屑的途径，进行地质成图。一种方法是通过分析不同井的岩屑，测定具特定特征地层的深度。20世纪20年代和30年代从井中发展的改进的电性曲线，使全部工作变得更简单，因为它们可提供所通过岩层的连续垂向剖面。第一条测井曲线是表示井中岩石电流(电阻率)的简单记录，后来的伽马测井曲线，记录的是不同沉积岩发射出的伽马射线。

直至20世纪，美国一直保持着世界产油大国的地位。因而，美国成为石油技术发展的领头羊，这强烈反映在目前石油行业所用的专业术语方面。美国通常还是重要的石油进口国，尽管最近由于页岩油和页岩气的开采使其国内的产量有所增加，所需的进口量已有所减少(能源统计地址：www.eia.gov)。

美国的油气消费量为 $(18\sim 20)\times 10^6\text{ bbl/d}$ ，占世界总油气消费量 $(94\times 10^6\text{ bbl/d})$ 的很大部分。

1930—1940年期间，石油工业开始意识到中东地区有极丰富的石油资源，该地区拥有世界油气总储量的60%。从那时开始，中东地区控制了世界的原油产量。

20世纪的50—60年代，油气勘探扩展到陆棚区，开启了新的储量区。在发展现代地震勘探之前，不可能在近海对海底以下的深沉积盆地进行有效勘探。只要能够在陆上的盆地中发现丰富原油，就不会有发展海上勘探的钻机和生产平台的动力。

从20世纪70年代开始，得益于改进的地震勘探方法，出现持续增加的大型海上国际合作勘探。尤其是先进的测井技术，能够从每口井得到优质信息。在高效计算机发展之前，地震勘探记录是以模拟方法为基础的，它产生的结果与现代标准的地震勘探数据相差甚远。船舶上记录地震勘探数据的费用远低于人工定位检波器的陆上地震勘探记录的费用。在陆上，广泛的(expensive)钻井可能比昂贵的地震勘探成图更便宜。

原油价格的上涨和新的技术已经使先前无人问津区域的勘探引人注目，包括深海区域。高油价也可以为更好地提高油气采收率买单。目前，全世界尚未勘探的沉积盆地已经很少，因而使发现新的巨型油田(大于 $5\times 10^8\text{ bbl}$)变得越来越困难。

现在，对重油、沥青砂岩和油页岩的兴趣正不断增强。

油页岩是出露在近地表的一种生油岩。如果生油岩(页岩)是成熟的，它就有油气的特征气味，但是，如果它尚未成熟，那么油气还没有生成。如果油页岩是成熟的，则许多原油通过初次运移就已经逸散。因为油气是完全分散在细粒沉积物中，所以分散的油气不能以砂岩和碳酸盐岩油气藏中那样的方式产出。只能通过压裂油页岩并加热蒸馏出分散的油气滴，才能获取油气。然而，页岩可以含有天然气，当页岩中发育有网状小裂缝时，天然气就可以产出。在今后数年内，可以期望，页岩气将成为一种重要的油气源，尤其在美国。

大量的化石燃料储藏在有机质丰富的泥岩或者页岩中，这些岩层的埋藏还没有达到有机物质转变成石油所需的深度。在这种情况下，只有极少量的油气逃逸。但是，这些附着物必须挖掘开采，并在炉中加热至 400~500℃ 才能生成石油(热解作用)。

科罗拉多州、犹他州和怀俄明州的古近—新近系 Green Rive 页岩是全世界最大的油气藏之一。页岩是湖相沉积，所含的有机物质主要是藻。

虽然从油页岩中可以产出大量的石油，但与常规石油相比，页岩油目前的生产成本相当高。同时，从油页岩中生产石油还存在一系列的环境问题，生产过程需要大量的水，而水资源并非总是很充分的。

这种矿藏中的石油储量超过常规石油的储量，但是，从这类油气藏中产出石油所涉及的很高成本和环境问题制约了它们的开发。从油页岩中生产石油的问题尤其严重。

1.2 有机物质的聚集

已经充分说明，石油是有机成因的，它的形成源自沉积物中的有机物质。甲烷可由无机物形成，这在其他行星的大气圈中已经见到，但是，来自地球内部的无机甲烷相当分散，因此，在地球的地壳中不可能形成较大的气藏。

衍生出石油的有机物质是通过光合作用形成的，即是储藏的太阳能(图 1.1)。

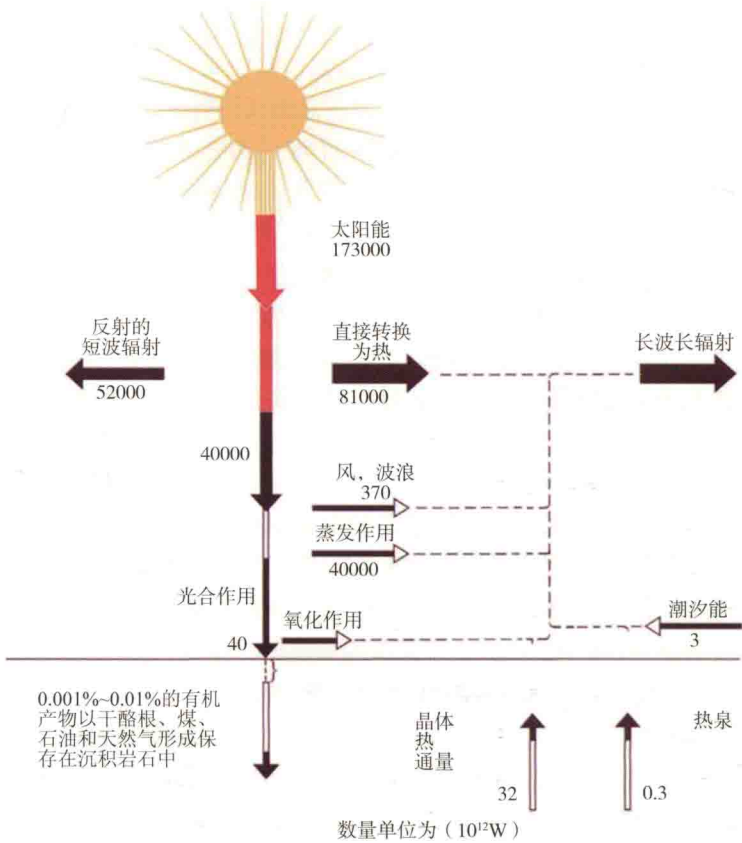


图 1.1 太阳能经过光合作用转变为化石燃料

只有少部分太阳能用于光合作用，大多数有机物质被氧化。因此，埋藏和保存在沉积地层中的有机物质非常少，同时，只有很少量有机物质充分集中成为可能(潜在)的油源岩

太阳光不断地在地球上转换成这样的能量，但是，只有很少部分的太阳能以有机物质和石油的形式保存下来。与生产和消耗的油气数量相比，每年在沉积盆地中形成的油气数量非常小。因此，即使原油也在不断地形(生)成，但实际上必须把石油当作不可再生能源。

分布在生油岩中且能生成石油的大多数有机物质是藻，它是光合作用的产物。浮游动物和较高级的生物也可以表现为觅食的藻，所以也是间接地与光合作用有关。因此，燃烧石油时所释放的能量是储藏的太阳能。因为石油是有机物质的衍生物，所以，了解高有机物质含量的沉积地层是如何沉积和沉积在何处是非常重要的。

目前，全世界海洋中每年有机物质的总产量是 $5 \times 10^{10} \text{t}$ 。这些有机物质的营养素是由搬运到海洋中的陆地侵蚀岩石供给的。所以，海岸地区的营养素供给量最大，尤其是充满沉积物的河流将所携带物卸入海洋的部位。海岸地区也可以提供来自大陆的植物碎片。

海洋顶部的 20~30m 层段是生物产量最高的带，大多数浮游植物生长发育在该带。太阳光在清澈海水中的穿透深度远大于在混浊海水中的穿透深度，然而，清澈海水中的营养素供应通常很少。在海面以下 100~150m 深度区，即使在很清澈海水中，对于光合作用，太阳光也太弱。

在海洋中，浮游植物为所有其他海洋生命提供营养素。浮游动物以浮游植物为食，因此，只有在浮游植物稳健产出的区域才是浮游动物大量繁殖的地方。有机体死后沉下去，并会腐烂，从而释放出营养素，并在更大的深度再循环。

在水循环受限的盆地中，可以保存更多的有机物质，并生成好的生油岩，生油岩中的有机物质成熟后生成油和气(图 1.2a, b)。

在北极和南极，稠密的冷水下沉至深水处，并沿深海底部向低纬度方向流动。这是热传输带，将热输送至较高纬度区，保持深水海洋为氧化型。在赤道附近，季风是东风，海洋表层水在季风的驱使下朝背离大陆西海岸方向流动。这样就使富含营养素的水从海底强烈上涌(升)，这些海底的水携带了特别高级别的原始有机产品(图 1.3)。这方面的最好例子是智利海岸和西非近海。

通过光合作用，低能量的二氧化碳和水转换成高能量的碳水化合物(例如葡萄糖)：



有机质产品并不限于二氧化碳或者水，但受限于营养素的有效性。磷(P)和氮(N)是最重要的营养素，铁离子的补充(供给)也能限制藻的产量。是这种在 $40 \times 10^8 \text{a}$ 前开始的光合作用已逐步建立起富含氧气的大气圈，而还原碳以石油、天然气和煤的形式聚集在沉积岩石中。然而，大多数分散在沉积物中的碳(如页岩和石灰岩)由于浓度太低，从未生成大量油和气。

通过光合作用储存的能量可在呼吸作用中直接被有机体利用。这是一种相反的作用，是将碳水化合物分解成二氧化碳和水，这样使生物体得到能量。

在生物体中，这种作用发生在夜间，因为没有迫使光合作用的阳光。当我们燃烧油气时，如当驾驶汽车时，通过氧化作用获取能量，同样是以上引用的光合作用方程的相反方向。100g 葡萄糖氧化可以释放出 375cal 能量。但没有产生被呼吸作用消耗的碳水化合物，可以以葡萄糖、纤维素或者淀粉形式储藏在细胞壁。光合作用也是合成脂类物和蛋白质的生物化学源(biochemical source)。蛋白质复杂的大分子，由凝结的氨基酸组成，如甘氨酸($\text{H}_2\text{NH}_2\text{-COOH}$)。

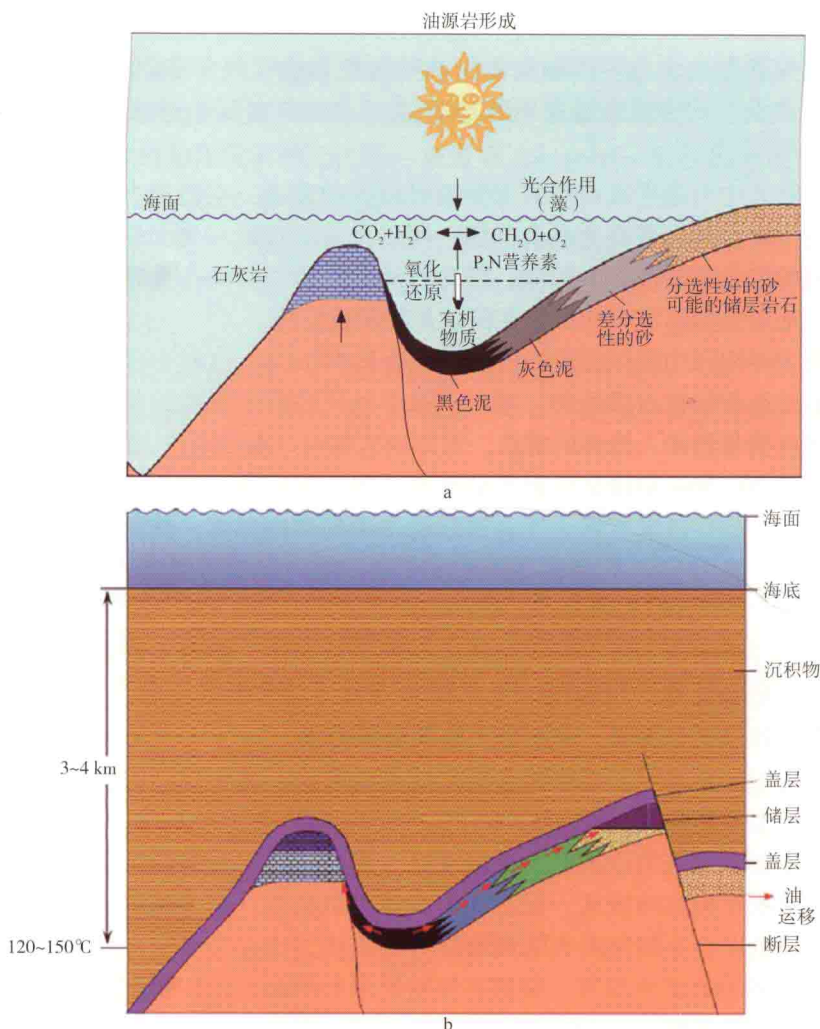


图 1.2 a 显示了可能油源岩和储集岩的沉积环境。几乎没有海底水循环的坳陷为被氧化前的有机物质的聚集提供了最好的环境。b 显示有机物质埋藏和成熟生成石油后从油源岩运移进入储集岩层。碳酸盐岩圈闭(如礁)是地层圈闭,而砂岩形成以断层为边界的构造圈闭。油源岩沉积为黑色泥,受热后变成富含有机质的页岩。分选性好的砂粒成为砂岩储层

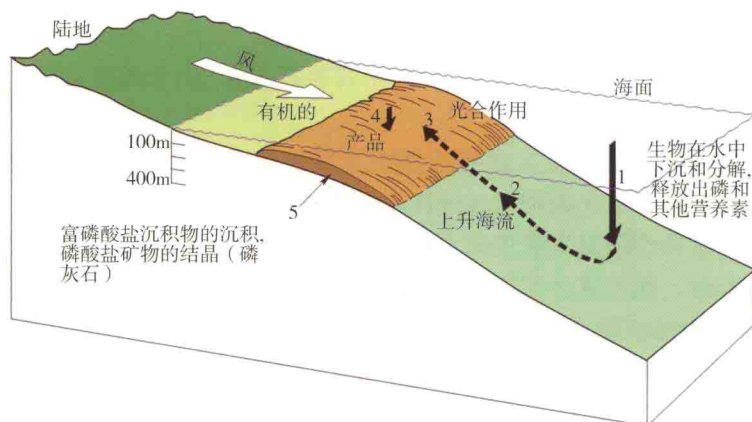


图 1.3 含丰富营养的水在含有机质沉积的大陆边缘上冲(涌)

干的浮游植物含碳 45%~55%，氮 4.5%~9%，磷 0.6%~3.3%，二氧化硅和碳酸盐各 25%。

浮游藻类是有机质的主要贡献者，使有机质产生石油。其中最重要的是硅藻，它有无定形的二氧化硅(蛋白石 A)壳。

硅藻在高纬度地区最丰富，在微咸水和淡水中也能见到。蓝—绿藻(青藻)生活在浅海区的海底，也是沉积地层中有机物质的主要贡献者。

在海岸湿地(沼泽)，尤其在三角洲，普遍存在以树和植物形式出现的有机物质产品，沉入泥土或者泥炭地的这类有机质产品可以避免被氧化。这些较高级的陆生植物残余可以形成泥煤(炭)，经较深埋藏后可以转换成褐煤或者沥青煤。但是，这类沉积也是可能的天然气和石油的源岩。植物体包括木材，也能顺河道漂流，当下沉至河底就沉积，通常是近岸三角洲环境的沉积。树木腐烂会释放二氧化碳，同时也会消耗氧气，消耗的氧气数量与该树木成长过程中所生成的氧气数量相同。在这个完整过程中，对大气圈的氧气没有净贡献。这也适用于大部分热带雨林。在那里，树木和植物下沉到黑泥中，防止了它们被氧化，这样，它们为大气圈的氧气有净贡献，同时也相应降低了大气圈中的二氧化碳含量。

所有的浮游动物都是靠食用浮游植物而生存。同样，在该生物链中，浮游动物被更高级的生物体吃掉。在食物链中的每一步(我们将其称为营养水平)，有机物质的数量(生物量)减少 10%(表 1.1)。

所以，90%的有机物质产出来自藻类。这就是藻类和一定程度上浮游动物能够说明大部分有机物质的原因，这些有机物质可以转化为石油。较大的动物(如恐龙)与生油和供油是完全不相干的。

表 1.1 生物链

营养水平	1	2	3	4
生物量	1000kg	100kg	10kg	1kg
生物体	浮游植物	浮游动物	甲壳动物	鱼

为石油提供有机物质的最重要的浮游动物是：

- (1) 放射虫类——二氧化硅壳，广泛分布，尤其在热带水域。
- (2) 有孔虫类——钙碳酸盐壳。
- (3) 翼足类——带一个足的深海软体动物，已经转变为翼状叶瓣；碳酸盐壳。

这是海洋食物链中第二最低等级。浮游动物被软体动物吃掉，而软体动物本身被鱼吃掉。海洋中能够产生的有机物质总数量与河流提供的营养素数量有关，但河水携带的不只是无机营养素。河水中还含有大量的有机物质，尤其是腐殖酸化合物、木质素和类似的由植物物质分解形成的物质，它们在冷水中具有弱的溶解性。当河水流入海洋时，由于海水的 pH 值升高和较低的海面温度，出现(发生)沉淀作用。

其他的植物物质，如蜡质和树脂，具有较高的抗分解性，是不溶于水的。这类有机物颗粒趋于将它们自己贴紧矿物颗粒，并伴随沉积物沉淀在海洋中。

古生代以来已经形成的油藏大多数已经隆升并遭受侵蚀作用，大量石油在漫长的地质时期已经在陆地上流(渗)动或者流入海洋。在这种情况下，石油污染是一种自然作用。实际在储层中圈闭的石油只是油源岩中形成石油的很少部分。人们可以预期，这种油苗(渗出石油)已经为更新年代地层中的石油再循环提供了有机物来源。但是，当遭受风化作用时，

石油很快分解，氧化成 CO_2 和营养素(P, N)(它们都是形成有机物质所需要的)被释放，它们能起到肥料的作用。

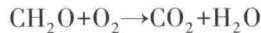
在陆地上，蒸发作用会消除石油中的较轻组分，而细菌会使较重组分降解。

在隆升的沉积盆地，如加利福尼亚州南部的文图拉盆地和洛杉矶盆地，在陆上和近海区都存在大量的自然油苗。

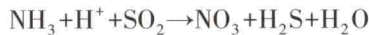
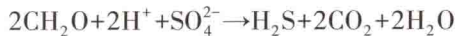
在圣巴巴拉到洛杉矶的海滩上，也存在许多油苗。

1.3 有机物质的分解

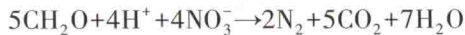
陆上和海洋中产出的几乎全部(大于 99%)有机物质通过直接的氧化或者经过微生物作用的方式被分解。如果存在氧气，有机物质按以下方式分解，即



式中，氧气是可得到的，有机物质在陆上和海水中都较快地被分解。由于生物体死亡，悬浮在海水中的有机物质穿过水柱下沉时会消耗氧气。如果由于水柱的密度分层导致封闭性水循环流，水中的氧气会被耗尽。替代的状况是，磷酸盐和硝酸盐中束缚的氧气被磷酸盐还原细菌和脱氮细菌所用，使有机物质在缺氧环境中腐烂。海底之下最初的数厘米地层中通常是氧化条件，而海底之下 5~30cm 普遍是还原条件。在氧化还原边界之下就没有游离的氧气，磷酸盐还原细菌按下式与有机物质起反应，即



H_2S 被释放，使混浊水和泥有刺激性气味。通过脱氧作用，可得到



当有机物质聚集的速度超过供给氧气的速度时，氧化还原边界位于水柱中，将氧化的表层水与还原的底水分隔。

黑海和部分深的挪威峡湾是将深海洋与浅的席状水分隔的典型盆地。淡水或者微咸的地表水(surface water)悬浮在盐度更高的水之上，这也有利于保持稳定的水分层，使之几乎不出现垂向混合作用。湖泊也可以有好的水分层现象，因为温暖地表水的密度小于较冷的底层水。沉积在湖底的黑泥可以产生油源岩。在寒冷气候环境，湖水在冬季会翻转，因为在 4℃ 时水的密度最大，妨碍了形成油源岩所要求的稳定的层状水。

1.4 油源岩的形成

所有的海洋有机物质都是在海洋表层透光带中经光合作用形成的。最大部分是藻类。部分浮游植物被化学分解和氧化，有些被浮游动物吃掉。这两类浮游生物都被更高级的生物吃掉，这些有机物质不易被消化的部分浓缩为粪球粒。它们可合并进入沉积物。浮游生物是由很小的生物组成的，它们在海洋中下沉相当慢，在它们到达海底之前几乎全部已经降解(氧化)。另外，粪球粒有砂粒大小，下降极快，所以，它们更有机会被保存在地层中。

有机物质在海底受微生物(细菌)作用容易被分解。也可能被生活在沉积物顶部的掘穴生物吃掉。这些生物活动对还原沉积物中的有机物有贡献，因为当沉积物被吃时，大多数有机物质已被消化。生物扰动也搅动了沉积物，使它们更多地暴露在含氧气的底水中。然而，如果底水是停滞的，氧气不足和 H_2S 的毒性会把大多数生命排斥在外。所产生的缺乏

生物扰动的环境能够更好地使有机物质保存在沉积物中，沉积物也能以未受扰动的完美纹层出现。每升水中氧气含量低于 0.5ml 时被定义为混浊(有毒)缺氧环境。然而，硫化物还原细菌能够利用大量的有机物质和沉淀的硫化物(如 FeS_2)。如果沉积物中所含的可溶性铁不足或者含有其他能使硫化物沉淀的金属，更多的硫元素将被结合进入有机物质，最终使这种油源岩生成的原油中的硫含量变高。

除完全的水混浊区外，缓慢的沉积速度会导致各沉积物地层在生物扰动和微生物分解带度过更长的时间，最终只有很少的有机物质可保存在沉积物中。快速沉积作用导致更多沉积的有机物质被保存下来，但是，从沉积开始，沉积的有机物质就被矿物颗粒冲稀。因此，与有机产量有关的中等沉积速度(10~100mm/1000a)能够产出最好的油源岩。

如大家所见，有机物质在沉积物中的有效聚集与总的生产能力之间没有多少相关关系，但有机物质的生产能力和生物成因分解及氧化活动之间存在相关关系。在有很强牵引流的地方，大多数有机物质会被氧化。深海区富氧水的主要来源是冷的表层水，它们在两极地区下沉至海底，并沿海底流向赤道地区。这种流动平衡了流向较高纬度区的表层水流，如大西洋中的海湾潮流(Gulf Stream)。

这些底流在冰川期具有相当规模，大量冷水在冰源周缘附近下沉。在温暖期，如白垩纪，两极地区可能没有冰，能够下沉并推动大洋转动体系的冷表层水也相当少。大西洋的深层在这一时期经历了混浊底部状况。这一时期由于浅层范围有限的向外流动，半封闭海盆中局限的水循环流是混浊水体形成的普遍原因(图 1.2a)。黑海是很好的例子。在河流提供大量淡水补充和蒸发速度相对低的状况下，低盐度的表层水导致水柱呈密度分层并使环流缩减。在几乎没有沉淀的盆地和存在有效(净)蒸发的地方，表层水的盐度和密度都高于它下方的水，表层水就会下沉。环流将表层的氧气带入，使底部成氧化环境，因而有机物质几乎没有生长和形成油源岩的可能。

湖泊或者半封闭的海盆经常有温度和(或)含盐度引起的密度分层，使得氧化的表层水不可能与盆地中较深处的水相混合，从而导致深处处于缺氧状态，且表层水中产出的有机物质能够在这里有高的保存程度。所以，油气勘探人员对淡水盆地的这方面情况相当感兴趣，尤其在非洲和中国。开阔海洋通常都有含氧的水，但是，普遍认为大西洋在白垩纪还属于称为“缺氧事件”期间的不流动(停滞)状态。这一时期，大量的黑泥沉积在大洋的深处。

1.5 有机物质的早期成岩作用

地层中有机物质的微生物分解是由于细菌、真菌和原始生物的活动引起的，在氧化条件下，微生物分解极其有效。然而，如果没有补充的氧气，孔隙水很快呈还原性。在较粗粒沉积物(砂)中，氧气可以扩散到海底以下 5~20cm 深处，而在黏土和细粒碳酸盐泥中，氧化和还原水的边界(氧化还原作用边界)在海底之下数毫米深度处。该部位沉积物的孔隙很小，由于有机物氧化作用使它精疲力竭，而水的循环和扩散不充分，不能恢复孔隙水中的原有氧气。富黏土沉积物很快成为比较封闭的体系，在细粒沉积物中，氧气从海底向下扩散得非常慢。

粗粒沉积物中，喜氧细菌的分解作用比在细粒沉积物中更有效。在厌氧转换中，细菌用了有机物质，如短的碳水化合物链。纤维素通过真菌，最后通过细菌分解，最终产物是