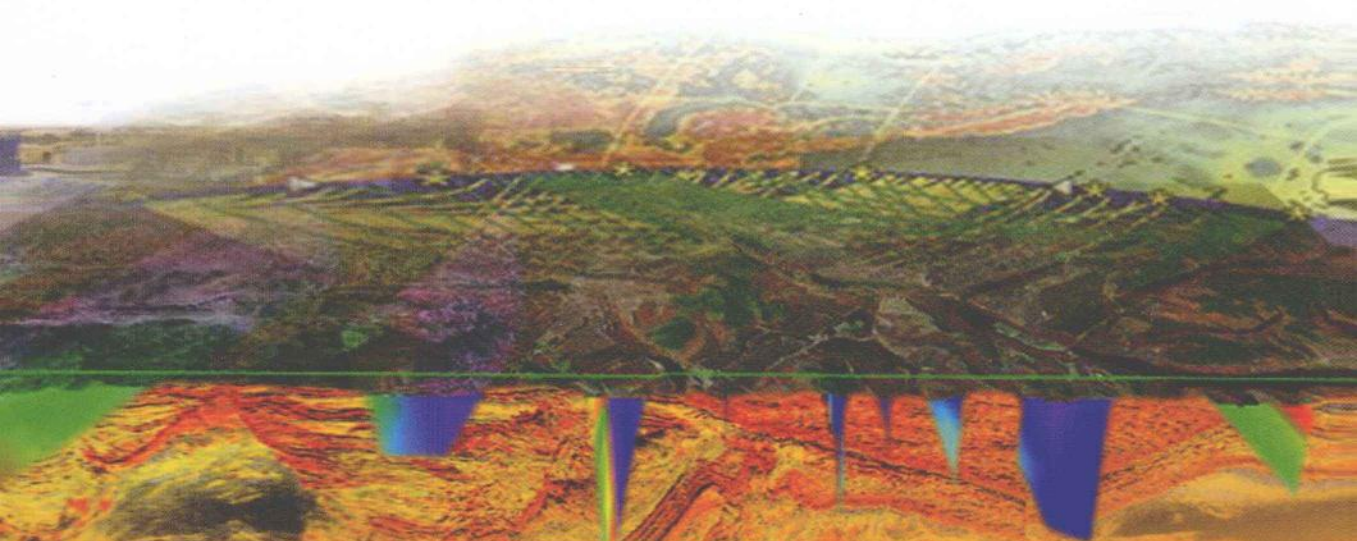




高等院校石油天然气类规划教材

油气地质与勘探概论

廖明光 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

油气地质与勘探概论

廖明光 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书的内容以油气成藏原理为核心,按油气藏形成及分布的正演顺序,从认识石油、天然气和油田水的基本特征入手,较系统地阐述了油气成藏的基本要素(生储盖运圈保)及其作用过程,重点阐述储集层和油气藏形成基本原理,系统介绍了油气藏类型及其分布规律,在此基础上简述了油气勘探的方法和程序、钻井地质基本知识和油气资源评价以及储量计算的基本理论。

本书可作为高等院校勘查技术与工程(物探和测井)、石油工程、地球物理学专业的教材,也可供其他非石油主干专业的师生以及从事油气田勘探和开发工作的生产和科研人员参考与选用。

图书在版编目(CIP)数据

油气地质与勘探概论/廖明光主编.

北京:石油工业出版社,2011.9

高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 978-7-5021-8603-6

I. 油…

II. 廖…

III. 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(2011)第 169682 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)64251362 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京华正印刷有限公司

2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:16.25

字数:410 千字

定价:25.00 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

油气藏的形成是发生在地质历史中的事件,要经济、有效地寻找到这些深埋地下的油气矿藏,需要以油气地质理论作为指导,搞清油气在地壳中的分布规律,同时还需要先进的勘探技术手段。地壳中的油气藏是如何形成及分布的?通过何种方法才能有效地找到这些油气藏?这就是本书要回答的主要问题。本教材主要阐述了油气在地壳中的生成、运移、聚集成藏的基本原理与分布规律,以及油气勘探的方法和程序,核心内容是油气成藏原理。

本教材的内容体系围绕油气藏的形成、分布及油气勘探这一主线,按照事物发生、发展的顺序展开论述。全书共分为十章,建立了以下体系:首先从认识石油、天然气和油田水的基本特征入手,讨论石油和天然气的成因以及生成、储存和封盖油气的烃源岩、储集层和盖层;然后重点阐述油气的运移、聚集与油气藏形成的基本原理,介绍油气聚集的最基本单元油气藏及其特征以及油气在地壳中的分布规律和控制因素;再介绍油气勘探的方法及程序;最后简介钻井地质、油气资源与储量的基本知识。

本教材被列为高等院校石油天然气类规划教材,由西南石油大学廖明光主编。教材的申请立项、编写大纲及各章节内容体系安排、编写组织工作由廖明光负责。为了充分反映我国石油高等院校广大石油地质学教师的科研成果和教学经验,组成了由3所石油高校教师参加的教材编写组。参加本教材编写的有中国石油大学(北京)陈冬霞、李潍莲、邹华耀,长江大学郭甲世、林小云,西南石油大学李斌、廖明光、唐洪。本书的具体编写分工如下:前言、绪论、第三章和第六章第三节至第五节由廖明光编写;第一章由李斌编写;第二章和第六章第一节至第二节由林小云编写;第四章和第五章的第二节由陈冬霞编写;第五章的第一节、第三节和第四节由李潍莲编写;第七章由邹华耀编写;第八章由郭甲世编写;第九章和第十章由唐洪编写。全书由廖明光审查定稿。

在本教材的立项和编写过程中,得到了中国石油大学(华东)蒋有录教授、中国石油大学(北京)柳广弟教授、西南石油大学颜其彬教授的大力支持,在此表示衷心的感谢!西南石油大学李凌、路俊刚、王显财、苟亚西、王少奇等参加了本教材的资料收集整理、图件清绘和文字校对工作,在此一并表示感谢。

由于编者水平所限,教材中一定还有许多不当之处,在此诚请使用本教材的广大师生和阅读本书的读者提出宝贵意见,以便教材再版时更正。在此表示衷心欢迎和感谢!(liaomg@swpu.edu.cn)

编 者

2011年4月

目 录

绪论	(1)
第一节 石油和天然气在现代社会中的地位	(1)
第二节 近现代油气勘探发展简况	(1)
第一章 石油、天然气和油田水的基本特征	(7)
第一节 石油	(7)
第二节 天然气	(17)
第三节 油田水	(20)
第二章 石油和天然气成因	(23)
第一节 油气成因概述	(23)
第二节 油气生成的原始物质	(25)
第三节 有机质的演化与油气生成	(29)
第四节 烃源岩及评价	(36)
第三章 储集层和盖层	(42)
第一节 储集层概述	(42)
第二节 碎屑岩储集层	(51)
第三节 碳酸盐岩储集层	(60)
第四节 特殊岩类储集层	(67)
第五节 盖层	(70)
第四章 油气运移	(74)
第一节 基本概念	(74)
第二节 初次运移	(75)
第三节 二次运移	(82)
第五章 油气聚集与油气藏的形成	(90)
第一节 圈闭和油气藏的概念及度量	(90)
第二节 油气聚集原理	(93)
第三节 油气藏形成的基本条件	(98)
第四节 油气藏的破坏与再形成	(107)
第六章 油气藏的类型和特征	(110)
第一节 油气藏分类	(110)
第二节 构造油气藏	(111)
第三节 地层油气藏	(123)
第四节 岩性油气藏	(129)
第五节 复合油气藏	(136)

第七章 油气分布规律	(139)
第一节 含油气盆地基本特征	(139)
第二节 前陆盆地油气分布规律	(143)
第三节 裂谷盆地油气分布规律	(147)
第四节 克拉通盆地(狭义)油气分布规律	(153)
第五节 我国及世界油气资源分布特点	(158)
第八章 油气勘探	(165)
第一节 油气勘探概述	(165)
第二节 油气勘探方法	(168)
第三节 区域勘探	(174)
第四节 圈闭预探	(178)
第五节 油气藏评价勘探	(183)
第六节 滚动勘探开发	(186)
第七节 勘探典型实例	(190)
第九章 钻井地质	(198)
第一节 钻井地质设计	(198)
第二节 地质录井	(201)
第三节 完井资料整理	(213)
第十章 油气资源与储量	(219)
第一节 油气资源与储量概念及分类	(219)
第二节 油气资源评价方法	(224)
第三节 油气储量计算及评价	(226)
参考文献	(247)

绪 论

第一节 石油和天然气在现代社会中的地位

石油和天然气作为重要的能源和战略资源,在当代社会经济中占有极其重要的地位。我国党中央和国务院对油气资源高度重视,将油气资源与粮食、水资源一同列为影响经济社会可持续发展的三大战略资源。石油已经不仅仅是“工业的血液”,而且已经渗透到社会生活的方方面面,并且在国际战略中具有举足轻重的地位。

石油和天然气是非常宝贵的燃料。从石油中提炼出的汽油、煤油、柴油等是汽车、拖拉机、火车、飞机、轮船的优质动力燃料,超音速飞机、火箭、导弹、飞船等现代化设备的燃料也离不开石油产品。石油和天然气的发热量大、燃烧完全、运输方便和污染小等优点,使其在世界能源消费结构中所占的比重越来越大。据环球能源网资料,2007 年世界能源消费总量为 $110.993 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量,其中石油占 35.6%、煤炭占 26.6%、天然气占 25.6%、水力占 6.4%、核能占 5.6%。石油和天然气占世界能源消费的 61.2%。

石油又是重要的润滑油料,从微小精密的钟表到庞大高速的发动机,都需要润滑才能转动,所以人们将润滑油料视为机器的“食粮”。

石油和天然气还是非常重要的化工原料,乙烯、丙烯等化学工业应用的主要基础原料多来自石油和天然气。目前已从石油中提炼出 3000 多种产品,应用到各个领域。由石油和天然气为原料生产的品种繁多的石油化工产品,是国民经济不可缺少的重要材料。

30 多年来,我国实行改革开放政策,国民经济获得了快速发展,对石油和天然气的需求也随之增加。虽然我国石油产量每年仍有所增长,但已不能满足经济快速发展的需求。1993 年以后,我国石油的进口量逐年上升,由出口国变为石油的净进口国,2009 年,进口石油已占到我国石油消耗量的 50% 左右,而且这种短缺情况还有继续加大的趋势。

石油作为一种战略资源在国际政治中占有越来越重要的地位。从近几十年来国际关系的现实可以看到,石油资源是国家间发生战争和冲突的主要因素,特别是谋求对石油资源的控制成为国际斗争的焦点之一。两伊战争、伊拉克入侵科威特、海湾战争、阿富汗战争、伊拉克战争、巴以冲突、非洲一些国家的内战等,其背后都存在着深刻的石油因素。随着石油资源的日益紧缺,石油对社会经济发展的制约作用将愈加突出,以各种形式出现的全球能源争夺战也将愈演愈烈。

由于人类对环保的要求越来越高,天然气作为更洁净、更高效的能源正越来越受到世界各国的重视。据专家预测,21 世纪上半叶,天然气将逐渐取代石油成为第一能源。

第二节 近现代油气勘探发展简况

英文“Petroleum”一词来源于希腊文 Petra(岩石)和 oleum(油)之意。中文“石油”一词,来源于宋代沈括(1031—1095)的《梦溪笔谈》。人类发现并利用石油和天然气的历史悠久,但真

正有意识地、较大规模地寻找和开发油气,则只有近 200 年的历史。19 世纪中叶,近代石油工业诞生,标志着人类大规模勘探、开采石油和天然气的开始。人类最初利用油气苗寻找油气,后来提出了经典的“背斜学说”。到 20 世纪初,诞生了对现代油气勘探起重要作用的地球物理方法,油气地质理论和方法不断发展完善,指导油气勘探活动的理论——油气地质学也获得了突飞猛进的发展。回顾近现代油气勘探与油气地质学发展历史,对认识现代油气地质与勘探理论有重要意义。

一、我国近现代油气勘探发展简况

(一)新中国成立前的油气勘探

我国是世界上最早开发气田的国家,四川自流井气田的开采约有 2000 年的历史。《自流井记》关于“阴火潜燃于炎汉”的报道表明,早在汉朝就已在自流井发现了天然气。自流井即因这口井自喷卤水而得名。

近代世界石油工业诞生以前,我国在认识、利用和开采石油及天然气资源方面一直走在世界前列,积累了丰富的知识和宝贵的经验。但在 19 世纪中叶近代石油工业诞生以后至新中国诞生前的 100 年时间里,我国的油气勘探开发工业发展极为缓慢,远远落在了西方国家后面。加上当时国外一些地质学家以惟海相生油论对我国陆相盆地含油气远景的错误推论,认为中国贫油,大大影响了我国油气勘探的进程。我国长期依赖“洋油”的历史直到发现大庆油田后才得到改变。

中国近代石油勘探从 1878 年台湾省钻探第一口油井开始,已有 130 多年的历史。借助于国外技术力量,1878 年清政府在台湾省苗栗打了中国第一口油井,1907 年在陕西延长打成了中国大陆的第一口油井(延 1 井),1909 年在新疆独山子开凿油井。1913 年美国某公司组成调查团到我国陕西、山东、河南、河北、甘肃、东北等地进行首次石油地质调查,并于 1914 年在陕北打井 7 口,均未获工业油流。1922 年 2 月,美国地质学家 E. Blackwelder 撰写论文《中国和西伯利亚石油资源》指出:“中国没有中、新生代海相沉积,古生代沉积也大部分不生油,除了中国西部、西北部某些地区外,所有各个年代的岩层都已剧烈褶皱、断裂,并或多或少被火成岩侵入。因此,中国绝不会生产大量石油。”从此,中国贫油论在世界传播(张文昭,1999)。

1937 年抗日战争爆发,石油来源断绝,国民党政府不得不自己加紧勘探、开发石油。1938 年冬,孙健初等一行 9 人骑骆驼顶寒风,在戈壁滩上开始石油勘探,地质人员在酒泉盆地和河西走廊地区进行地质普查、构造细测,于 1939 年 8 月 1 日,1 号井钻至 88.18m 获工业油流日产油 10t,发现了老君庙油田。

20 世纪 40 年代,我国地质学家李四光、谢家荣、翁文灏、翁文波、潘钟祥、黄汲清等通过亲身的地质考察和勘探实践,指出我国石油勘探前景广阔。在一系列勘探实践的基础上,我国石油地质理论开始萌芽。如 1941 年潘钟祥在美国石油地质协会会志(AAPG)发表《论中国陕北和四川白垩系陆相生油》的论文;1947 年黄汲清、翁文波等提出“陆相生油,多期、多层含油的理论”;1948 年翁文波撰写了《从定碳比看中国石油远景》。这些杰出的地质学家开创了中国和世界陆相生油理论,为我国陆相盆地油气勘探提供了坚实的理论基础。

尽管如此,新中国成立以前,全国只开发了台湾出磺坑、陕西延长、新疆独山子和甘肃老君庙 4 个小油田,四川自流井、石油沟、圣灯山和台湾锦水、竹东、牛山、六重溪等 7 个小气田。全国从事石油地质的技术人员 20 余人,钻井工程师 10 多人,地球物理和采油工程师不足 10 人。从 1904 年到 1948 年累计产油 $278.5 \times 10^4 \text{t}$ 。1943 年石油最高产量 $32 \times 10^4 \text{t}$,1949 年仅产原油

$12 \times 10^4 \text{t}$ 。1949 年全国只有 8 台钻机,累计探明石油储量 $2900 \times 10^4 \text{t}$ 。

(二)新中国的油气勘探发展

1949 年中华人民共和国成立后,党和政府十分重视石油地质勘探事业,我国石油勘探工作者发扬自力更生、艰苦奋斗的精神,发现了一个又一个的油气区和油气田,石油年产量成倍上升:从 1949 年的年产 $12 \times 10^4 \text{t}$ 至 20 世纪 70 年代末期就突破了 $1 \times 10^8 \text{t}$ 大关,2010 年年产原油 $20301 \times 10^4 \text{t}$,成为世界第四大石油生产国。

综观 1949 年以来的油气勘探历程,我国的油气勘探可以划分为三个阶段:20 世纪 50 年代的初期发展阶段;20 世纪 60 年代至 20 世纪 80 年代中期的快速发展阶段和 20 世纪 80 年代中期至今的稳定发展阶段。

1. 初期发展阶段(1950—1959 年)

新中国成立初期至大庆油田发现的 10 年是我国石油勘探的初期发展阶段。这一时期的勘探重点在中西部地区的四川、陕甘宁、酒泉、准噶尔、柴达木、吐鲁番等盆地,这些地区地表油气显示较多,已有少数油气田,地层出露较好,构造比较明显。除原有的老君庙、延长、圣灯山等油气田继续详探开发外,又陆续发现克拉玛依、冷湖、油砂山、鸭儿峡、蓬莱镇、南充等油田和川南一批气田,石油工业有了显著发展,尤其是准噶尔盆地西北缘克拉玛依大油田的发现是新中国石油勘探史上的第一次重大突破。尽管如此,依然没有从根本上改变我国进口石油的局面。

2. 快速发展阶段(1960—1985 年)

从 1959 年大庆油田的发现到 20 世纪 80 年代中期,我国石油勘探进入快速发展阶段。1959 年 9 月 26 日,松辽盆地松基 3 井获得了工业油流,发现了大庆油田,实现了我国石油工业发展史上历史性的重大突破,也标志着我国石油勘探进入了第二个大的阶段,由此我国石油勘探开始战略转移,即重点由中西部地区转向东部地区。大庆油田发现的理论意义在于突破了惟海相生油论,从实践上证明了陆相盆地,尤其是大型湖泊沉积物不仅能够生油,而且可以形成大型油田。这极大地解放了我国油气地质学家的思想,开创了在陆相盆地寻找大油田的新篇章。

1961 年渤海湾盆地东营凹陷的华 8 井喷油,1962 年营 2 井获高产油流,发现和证实了胜利油田。1964 年勘探重点从松辽盆地转移到渤海湾盆地,相继发现和建成了胜利、大港、辽河、华北、中原等石油生产基地。特别是 1975 年华北任丘古潜山油田的发现,开拓了石油勘探的新领域。在松辽、渤海湾盆地勘探和开发取得重大进展的同时,全国其他地区石油勘探工作也在蓬蓬勃勃地展开。相继在四川、江汉、陕甘宁、苏北等盆地进行了较大规模的石油勘探,发现了一大批油气田。

这一时期,大庆油区和渤海湾油区的发现和全面开发使石油工业进入前所未有的高速发展时期,是我国石油勘探的黄金时期。该时期石油产量大幅度增长,1965 年产量超过 $1000 \times 10^4 \text{t}$,1973 年超过了 $5000 \times 10^4 \text{t}$,1978 年突破了 $1 \times 10^8 \text{t}$ 。到 1985 年,我国累计探明石油地质储量 $116 \times 10^8 \text{t}$,当年石油产量达到 $1.294 \times 10^8 \text{t}$,使我国跃居世界产油大国的行列。

3. 稳定发展阶段(1986 年至今)

20 世纪 80 年代中后期至现在,我国石油勘探进入稳定东部、发展西部、油气并举、大力发展海洋勘探和积极开拓海外石油勘探开发市场的新阶段。在东部深化勘探的同时,重点加强了西部地区,特别是塔里木、准噶尔、吐哈、柴达木和鄂尔多斯等盆地的油气勘探工作。经过近

20 年的艰苦努力,发现了一大批新油田,保证了我国原油产量的稳定增长,西部盆地探明石油储量较快速增长的趋势还将继续下去。天然气勘探获得了重大突破,相继发现了南海琼东南盆地的崖 13—1 大气田,鄂尔多斯盆地的靖边大气田、苏里格气田、榆林气田、乌审旗气田,塔里木盆地的克拉 2 大气田,四川盆地的罗家寨、普光等一批大气田。这一阶段我国探明天然气储量快速增长。我国海洋石油勘探获得了前所未有的快速发展,产量迅速增长,1996 年年产量超过 $1500 \times 10^4 \text{t}$ 。2010 年,我国海洋石油天然气产量首次超过 $5000 \times 10^4 \text{t}$,目前已成为保持我国石油产量增长的主要领域。

近年来,我国石油企业积极推进海外油气勘探活动,海外油气业务迅速发展,已形成了非洲、中亚、南美、中东和亚太 5 个合作区域。2010 年,中国石油天然气集团公司(以下简称中石油)海外油气项目原油作业产量已达到 $8673 \times 10^4 \text{t}$ 。

新中国的石油勘探走过了近 60 年的光辉历程。截至 2006 年底,我国累计探明石油地质储量 $265 \times 10^8 \text{t}$,累计探明天然气地质储量 $61830 \times 10^8 \text{m}^3$ 。2010 年,年产原油 $20301 \times 10^4 \text{t}$,年产天然气 $944.8 \times 10^8 \text{m}^3$ 。根据新一轮油气资源评价结果,我国陆地和近海拥有石油地质资源量 $765 \times 10^8 \text{t}$ 、天然气地质资源量 $35 \times 10^{12} \text{m}^3$,南海南部海域还拥有石油地质资源量 $130 \times 10^8 \text{t}$ 、天然气地质资源量 $9 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。我国目前石油资源探明程度不到 30%,天然气资源探明程度仅为 14%。另外我国还有丰富的油砂、油页岩、煤层气、页岩气、天然气水合物等非常规油气资源。因此,我国油气资源勘探的潜力仍然很大,勘探前景依然广阔。

在油气地质理论方面,我国石油地质工作者以勘探实践为基础,形成了具有中国特色的陆相盆地石油地质理论,主要包括 3 个方面:陆相生油理论、源控论和复式油气聚集带理论。松辽盆地大庆油田的发现使陆相生油理论得到实践的检验,并成为松辽盆地、渤海湾盆地等一批陆相盆地寻找大型油气田的理论依据。根据陆相盆地油气近距离运移聚集的勘探实践建立的“源控论”,成为我国陆相盆地油气勘探的重要理论。以渤海湾盆地断块油田成藏条件与分布规律为主要内容的复式油气聚集(区)带理论的建立,丰富了我国石油地质理论,并有效地指导了我国东部断陷盆地的油气勘探。

二、世界近现代油气勘探发展简况

早期利用的石油主要来自于从地层中自然流出的石油。在美国宾夕法尼亚州泰特斯维尔城附近有一条小河,河边有一系列油苗,河面上常常漂着原油,人们把这条小河叫做石油溪。近代的石油工业就是从这里开始的。Drake 尝试用顿钻钻井,并于 1859 年 8 月 27 日在钻到 21.69m 深时出油,他用蒸汽动力泵抽出了石油。实际上,在中国、俄罗斯、罗马尼亚等国都有早于 Drake 井的气井和油井(吴凤鸣,1999),但世界石油界还是将 Drake 钻的油井看作世界第一口油井,并作为近代石油工业的开端。尽管这口井钻井深度只有 21.69m,产油量每天只有 69.5bbl($1\text{bbl}=0.159\text{m}^3$),但由此产生的巨大利润,极大地刺激了投资者,因此迅速掀起了寻找和开采石油的热潮,使油气勘探和开采进入了工业化阶段。

在 19 世纪末,找油的主要依据是地面油气苗,在具有地面油气苗的地方钻井。随着不断进行的油气勘探实践,地质学家们发现油气常常位于背斜的高点,1861 年,美国地质学家怀特提出了著名的“背斜聚油理论”。该理论在 19 世纪结束前的二三十年期间,在美国、欧洲得到广泛的应用,取得了油气勘探的极大成功。到 19 世纪结束,世界上只有美、俄等十几个国家产油,但石油产量却迅速增加,1900 年世界总产油量达到 $2043 \times 10^4 \text{t}$ 。

进入 20 世纪后,背斜学说已成为石油勘探公司普遍接受的理论,石油勘探人员通过地面

地质测量圈定背斜构造,使油气勘探取得了巨大成功,找油工作已具有专业性特点,石油地质学家逐渐成为找油不可缺少的专业人才。1917年美国石油地质家协会(AAPG)的成立和AAPG会刊的出版,标志着石油地质学的诞生,石油地质学从此正式走上油气勘探的舞台。

20世纪20年代至30年代,地震、重力及其他地球物理方法的发明和应用使在覆盖区查明地下的背斜构造成为可能,找油工作可在地面没有任何显示的平原区进行,大大拓展了人们找油的领域,油气产量迅速增加,1930年,世界产油量接近 $2 \times 10^8 \text{t}$ 。地球物理方法使人们不仅可识别背斜圈闭,还可识别地层、岩性等圈闭,从而形成了找油的圈闭理论。

20世纪的前60年是世界主要油气区的发现时期,波斯湾油区、伏尔加—乌拉尔油区、北非油区、阿拉斯加油区、墨西哥湾油气区、南美油区等世界重要产油区都是在这—时期发现和开发的。尤其是波斯湾巨型富油气区的发现,使世界油气分布格局发生了巨大改变,世界产油国到20世纪50年代末达到60多个。20世纪60年代至70年代是世界石油勘探的高峰发现时期,产量大幅度增加,到1980年世界石油产量接近 $30 \times 10^8 \text{t}$ 。

20世纪60年代以来,自然科学理论的突破和新技术革命带来了油气勘探理论和技术的巨大进步。在此期间,石油地质学的新理论、新方法层出不穷。板块构造理论在石油勘探中得到广泛应用;有机地球化学的发展确立了干酪根热降解生油理论的主导地位;沉积学的发展从现代沉积类比入手建立了不同沉积环境的相模式,可以充分利用地震信息进行地层、岩性和岩相的预测;地层油气藏、岩性油气藏等隐蔽油气藏、深盆地气藏等新的油气藏类型的发现,为油气的勘探开发提供了更广阔的前景。在勘探技术上,由于大量采用数字地震仪,使用多道多次覆盖技术,配以大容量存储设备、高速电子计算机数据处理,使油气勘探技术达到新的水平,在勘探程度高的老探区探明储量也不断扩大。20世纪60年代以来,海上钻井设备的开发和使用大大促进了海上油气的勘探。自20世纪80年代至今的第三次石油科技革命正在向纵深发展,新理论、新方法和新技术不断涌现,如高分辨率地震、三维地震、四维地震、处理解释一体化、三维可视化、层析成像、核磁测井等新方法,地震地层学、层序地层学、未熟—低熟油理论、煤成油理论、天然气成因与成藏理论、油气系统等新理论和新概念不断应用于油气勘探,保证了世界油气储量持续稳定的增长。

尽管进入20世纪60年代以后油气勘探的难度越来越大,但由于新理论和新技术的广泛应用,油气田仍然持续被发现,油气储量稳定增长。除西西伯利亚、北海、中国等新油气区的发现之外,在老油区的勘探也不断有新的发现。尽管全球石油产量从1960年的 $10.8 \times 10^8 \text{t}$ 增加到2009年的 $35.25 \times 10^8 \text{t}$,但全球剩余石油可采储量仍从1960年的 $364 \times 10^8 \text{t}$ 上升到2006年的 $1804 \times 10^8 \text{t}$ 。20世纪60年代以后,天然气的勘探取得了长足的进展,发现了北海南部和西伯利亚等大气区,并在波斯湾盆地发现了目前世界储量最大的北方气田。世界天然气剩余探明可采储量从1960年的 $7.46 \times 10^{12} \text{m}^3$ 增加到了2009年的 $187.76 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。科学技术的进步在油气开发中起到了关键作用。

随着石油地质理论研究的不断深入和科学技术的进步,油气勘探正在向新领域、新类型和新深度发展,世界油气勘探仍有广阔而光明的前景。

三、油气地质勘探发展趋势

从国外油气勘探形势来看,近十几年来油气勘探领域呈现了新的特点。世界油气勘探的重大发现主要集中在海洋和新区,新增油气储量的相当一部分来自已发现油气区的深化勘探;剩余常规油气资源多分布在海域、偏僻的沙漠、寒冷的极地地区和已开发含油气盆地的深部层

位;非常规油气资源越来越受到重视,已成为油气勘探新的重要领域。

近十几年来,我国油气勘探难度加大,面临着严峻挑战。在勘探程度较高的地区,新发现油气田越来越小。未发现的剩余资源分布中,地面条件恶劣地区(如沙漠、海滩、沼泽等)的石油剩余资源量约占 30%(丁贵明,1997),且低渗透和重稠油还占相当大的比例;地面条件较好的常规油剩余资源量中,受岩性、地层控制的油气藏又占很大比重。

尽管油气勘探的难度在增大,但由于油气价格的持续上涨,仍极大地刺激了世界各国的油气勘探活动,加速了油气勘探开发工业的发展。归纳起来,未来世界油气勘探的重要领域主要为新区、海洋、深层、隐蔽油气藏以及天然气等。

1. 新区油气勘探

从世界和我国石油勘探的历史可清楚地看到,新区是寻找大型油气田的主要领域,是一个国家石油生产持续增长的基础。只有新区不断有重大发现,才能接替老油区的产量递减,才能使一个国家石油生产保持可持续性发展。当然,这些勘探新区一般都是地面条件较恶劣的地区,是过去难以开展勘探工作的地区。

2. 海洋油气勘探

实际上海洋勘探也是新区勘探。随着海洋地球物理勘探和海上钻井技术及装置的发展,人类向海洋进军的步伐加快,海洋石油勘探不仅可在浅海大陆架钻探,甚至可到更深的水域开展勘探,从而为人类开辟了更加广阔的油气勘探领域。目前海洋油气勘探方兴未艾,其重要性越发显示出来。

3. 深层油气勘探

随着深层地震和钻井技术的发展,4000m 以下的深层油气资源已成为重要勘探领域。尤其是在一些多层系含油气地区,开展深部层系的油气勘探已取得重要突破。近十几年来,我国东部渤海湾及松辽等盆地加强了深部勘探研究,已取得重要成果,尤其是松辽盆地深层天然气勘探已取得重大突破。

4. 隐蔽油气藏勘探

在一些勘探程度较高的地区,在容易找到的构造油气藏,主要是背斜和断层油气藏都发现之后,较难发现的以岩性、地层油气藏为主体的隐蔽油气藏就成为主要的勘探目标。一般大型构造油气藏在勘探的早期基本即可被发现,而大量的、单个规模较小的隐蔽油气藏是中高勘探成熟区油气勘探的主要目标。我国渤海湾盆地济阳坳陷的隐蔽油气藏勘探已取得很大成功,近几年每年都在隐蔽油气藏中获得数千万吨的地质储量。

5. 天然气勘探

天然气勘探包括常规天然气勘探和非常规天然气勘探。近十几年来,世界天然气的储产量增长幅度超过石油,天然气总探明储量当量(1000m^3 天然气折合 1t 石油)已与石油总探明储量持平,而且天然气快速增长的趋势还在继续。我国天然气储产量近十几年呈快速增长趋势。在不远的将来,天然气可能将取代石油成为第一能源。因此,常规天然气勘探是非常重要的领域。在地下呈吸附或固体状态的非常规天然气,即页岩气、煤层气、致密砂岩气和天然气水合物,已越来越受到重视。

第一章 石油、天然气和油田水的基本特征

第一节 石 油

石油是地下岩石空隙中天然生成的、以液态烃为主要化学组分可燃有机矿产。石油成分复杂(现已鉴定出上千种有机化合物),主要成分为烃类,还含有数量不等的非烃化合物和多种微量元素,有时溶有一些烃类气体、非烃气体、不等量固态烃和非烃物质。所以,石油实际上是多种有机化合物的混合体。

研究石油的化学组成和物理性质,对于查明油气的生成、运移、聚集和分布规律,制订开采、加工方案,评价油品的质量等都具有非常重要的意义。

一、石油的化学组成

(一)元素组成

不同地区、不同时代的石油元素组成比较接近,但也存在一定的差异(表1-1-1)。组成石油的化学元素主要有碳、氢、氧、硫、氮,其中碳和氢两种元素占绝对优势。

表1-1-1 国内外某些石油的元素组成(据张厚福等,1999)

石油产地		元素组成,%				
		C	H	O	N	S
中国	大庆油田(萨尔图混合油)	85.74	13.31	0.69	0.15	0.11
	胜利油田(101混合油)	86.26	12.20	—	0.41	0.80
	胜利油田孤岛地区	84.24	11.74	—	0.47	2.20
	大港油田	85.67	13.40	—	0.23	0.12
	江汉油田(混合油)	83.00	12.81	1.63	0.47	2.09
	克拉玛依油田(混合油)	86.13	13.30	0.28	0.25	0.04
前苏联	雅雷克斯	80.61	10.36	8.97	—	1.05
	乌克兰	84.60	14.00	1.25	1.25	0.14
	老格罗兹内	86.42	12.62	0.68	—	0.32
	卡拉-布拉克	87.77	12.37	0.46	—	—
美国	文图拉(加利福尼亚州)	84.00	12.7	1.20	1.70	0.4
	科林加(加利福尼亚州)	86.40	11.7	—	—	0.60
	博芒特(得克萨斯州)	85.70	11.00	2.61	2.61	0.70
	堪萨斯州	84.20	13.00	0.45	0.45	1.60

1. 碳和氢

从石油中各组分的质量百分比来看,一般石油中碳的含量为84%~87%,氢的含量为11%~14%,这两种元素总量达95%~99%,平均为97.5%。碳、氢元素的重量比(C/H)平均

为 6.5, 原子比约为 0.57(或 1:1.8)。这两种元素主要以烃类形式存在, 是组成石油的主体。

2. 氧、硫、氮

在石油中, 氧、硫、氮也主要以化合物形式存在。这 3 种元素及微量元素的总含量一般只有 1%~4%, 但有时由于硫分增多, 这个比例可高达 3%~7%。

各油田石油的含硫量差异很大, 多数油田石油的含硫量不到 1%, 例如我国任丘油田为 0.33%~0.43%、克拉玛依油田平均为 0.05%, 但有些油田石油的含硫量却可高达 4%~5%, 如墨西哥石油含硫量高达 3.6%~5.3%。依据含硫量通常把开采至地表的石油(简称原油)分为高硫(含硫量大于 1%)和低硫(含硫量小于 1%)两类; 也有人采用三分的方式, 将原油分为高硫原油(含硫量大于 2%)、含硫原油(含硫量为 2%~0.5%)和低硫原油(含硫量小于 0.5%)。

石油中的硫含量有环境指示意义, 通常海相、近海湖盆相、盐湖相等半咸—咸水沉积地层中生成并产出的石油含硫量较高, 一般大于 1%; 内陆淡水湖泊相沉积地层中生成并产出的石油含硫量较低, 一般小于 1%。

石油中的硫是一种有害杂质, 它容易产生硫化氢(H_2S)、硫化亚铁(FeS)、亚硫酸(H_2SO_3)、硫醇铁($[RS]_2Fe$), 甚至会产生硫酸等化合物, 对机器、管道、油罐、炼塔等金属设备具有强腐蚀性, 因此它是评价石油质量的一项重要指标。

石油中氮含量一般比硫含量低得多, 绝大部分石油含氮量小于 0.2%, 通常以 0.25% 作为贫氮和高氮原油的界线。

石油中氧的含量分布在 0.1%~4.5%, 均是以结合氧的形式存在。

3. 微量元素

除上述 5 种主要元素外, 在石油中还发现其他微量元素, 构成了石油的灰分。通过对石油的灰分进行分析, 识别出 50 多种微量元素, 其含量变化从十万分之几到万分之几。按其含量多少和常见程度列举 33 种微量元素如下: Fe、Ca、Mg、Si、Al、V、Ni、Cu、Sb、Mn、Sr、Ba、B、Co、Zn、Mo、Pb、Sn、Na、K、P、Li、Cl、Bi、Be、Ge、Ag、As、Gd、Au、Ti、Cr、Cd。

石油中的元素构成与自然界的有机物十分接近, 被作为石油有机成因的证据之一。这些微量元素中, 钒(V)和镍(Ni)两元素分布普遍并具成因意义, 通过 V/Ni 值可区别海相或陆相成因的石油, 钒、镍含量低且 V/Ni 值小于 1 者一般为陆相成因的石油; 钒和镍含量较高且 V/Ni 值大于 1 者一般为海相成因的石油。因此, 研究石油灰分的元素组成对解决石油成因和运移聚集问题都有着重要意义。

(二) 石油的化合物组成

石油的化合物组成归纳起来主要可分为烃类和非烃类两种。

1. 烃类化合物

目前石油中已鉴定出的烃类化合物超过 425 种。按本身结构的不同可分为三类: 烷烃、环烷烃、芳香烃和环烷芳香烃。其中烷烃与环烷烃为饱和烃, 芳香烃和环烷芳香烃为不饱和烃。

1) 烷烃

烷烃又名脂肪族烃、石蜡烃, 通式为 C_nH_{2n+2} , 化学性质不太活泼。事实上, “石蜡”这个名称本身就意味着“亲和力不大”。在常温常压下, 含 1 到 4 个碳原子($C_1 \sim C_4$)的烷烃呈气态; 含 5 个到 16 个碳原子($C_5 \sim C_{16}$)的直链烷烃呈液态; 17 个碳原子(C_{17})以上的高分子烷烃皆呈固态。烷烃的相对密度、熔点及沸点均随相对分子质量增加而上升。所有烷烃的相对密度

都小于 1,几乎不溶于水(气态烃除外)。

烷烃分子结构的特点是碳与碳原子都以单键 C—C 相连。排列成直链式,无支链者为正构烷烃,有支链者为异构烷烃,见图 1-1-1。

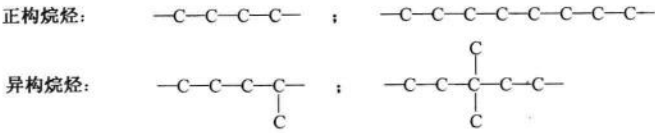


图 1-1-1 正构烷烃和异构烷烃结构示意图

(1)正构烷烃。

石油中已鉴定出 $\text{C}_1 \sim \text{C}_{45}$ 的正构烷烃。正构烷烃一般占石油质量的 15% ~ 25%,轻质石油中可达 30% 以上,而重质石油中可小于 15%。常见的正构烷烃的物理常数见表 1-1-2 所示。

表 1-1-2 正构烷烃的物理常数(据张厚福等,1999)

名称	分子式	熔点,℃	沸点,℃	相对密度(液态时)	通常物态状态
甲烷	CH_4	-182.6	-161.6	0.424	气
乙烷	C_2H_6	-182.10	-88.6	0.546	气
丙烷	C_3H_8	-187.1	-42.2	0.582	气
丁烷	C_4H_{10}	-138.0	-0.5	0.579	气
戊烷	C_5H_{12}	-129.7	36.1	0.6263	液
己烷	C_6H_{14}	-95.3	68.8	0.6594	液
庚烷	C_7H_{16}	-90.3	98.4	0.6837	液
辛烷	C_8H_{18}	-56.8	125.6	0.7028	液
壬烷	C_9H_{20}	-53.7	125.6	0.7028	液
癸烷	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	-29.7	174.0	0.7179	液
十一烷	$\text{C}_{11}\text{H}_{24}$	-25.6	195.8	0.7404	液
十二烷	$\text{C}_{12}\text{H}_{26}$	-9.7	216.2	0.7498	液
十三烷	$\text{C}_{13}\text{H}_{28}$	-6.0	235.5	0.7568	液
十四烷	$\text{C}_{14}\text{H}_{30}$	5.5	251.0	0.7638	液
十五烷	$\text{C}_{15}\text{H}_{32}$	10.0	268.0	0.7688	液
十六烷	$\text{C}_{16}\text{H}_{34}$	18.1	280.0	0.7749	液
十七烷	$\text{C}_{17}\text{H}_{36}$	22.0	303	0.7767	固
十八烷	$\text{C}_{18}\text{H}_{38}$	28.0	300	0.7776	固
十九烷	$\text{C}_{19}\text{H}_{40}$	32	330	—	固
二十烷	$\text{C}_{20}\text{H}_{42}$	36	—	—	固

在石油中不同碳原子数正构烷烃的相对含量呈一条连续的分布曲线,称为正构烷烃分布曲线。这说明石油中正构烷烃同系物是一个连续系列。不同类型石油的正构烷烃分布特点如图 1-1-2 所示,每条曲线上极大值对应的碳数为该曲线的主峰碳。

曲线的分布特点与成油的原始有机质类型、成油环境以及有机质的成熟度密切相关,不同

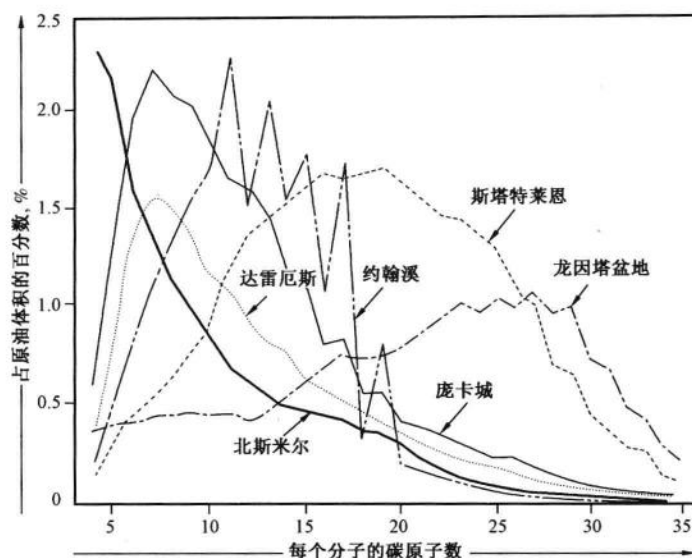


图 1-1-2 不同类型石油的正构烷烃分布曲线图(据 Martin, 1963)

石油的正构烷烃分布曲线特征是不同的。一般陆源有机质形成的石油中高碳数(C_{22} 以上)正构烷烃含量高,海生低等浮游生物(细菌、藻类)形成石油中低碳数(C_{22} 以下)的正构烷烃居多。有机质演化成成熟程度较高、年代较老、埋深较大的石油中低碳数正构烷烃居多;相反,演化程度低的石油,正构烷烃碳数偏大。此外,受微生物强烈降解的石油中,正构烷烃常被选择性降解,一般含量较低,低碳数的正构烷烃更少。

(2) 异构烷烃。

石油中的异构烷烃以碳数不大于 10 者为主,高碳数者以类异戊间二烯型烷烃最受重视。其特点是在直链上每 4 个碳原子有 1 个甲基支链。

类异戊二烯型烷烃在石油中的含量可达 0.5%,现已发现 C_9 至 C_{25} 规则的异戊间二烯型烷烃。在沉积物和石油中,往往以植烷、姥鲛烷、降姥鲛烷、异十六烷及法呢烷的含量最高,其结构式如图 1-1-3 所示。

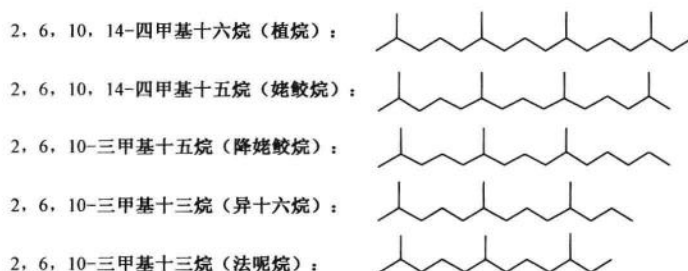


图 1-1-3 常见类异戊二烯型烷烃结构示意图

由于同源石油中所含的异戊间二烯型烷烃类型、含量相近,都直接来自生物体,可用于油源对比,故称为生物标志化合物。具体地讲,所谓生物标志化合物,是指来源于生物体、基本保持了原始组分的碳骨架,记载了原始生油母质特殊分子结构信息的有机化合物。这类化合物

又被称为“分子化石”、“地球化学化石”以及“指纹化合物”。

在类异戊二烯型烷烃中,以姥鲛烷和植烷为最常用的生物标志化合物。姥鲛烷和植烷含量的相对高低,不仅可以反映原始沉积环境的氧化还原条件,还与水介质的酸碱度有关。一般来说,姥植比(Pr/Ph)小于1反映还原环境,大于1反映氧化环境;酸性水介质环境有利于姥鲛烷的形成,而偏碱性水介质环境有利于植烷的形成。不同沉积相 Pr/Ph 的变化情况如表 1-1-3 所示。

表 1-1-3 不同沉积相环境形成的石油的 Pr/Ph 变化(据梅博文 2001)

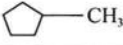
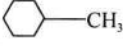
沉积相	水介质	Pr/Ph	石油类型
咸水深湖相	强还原	0.2~0.8	植烷优势
淡水—微咸水深湖相	还原	0.8~2.8	植烷均势
淡水湖沼相	弱氧化—弱还原	2.8~4.0	姥鲛烷优势

2) 环烷烃

石油中的环烷烃是一类性质与烷烃相似,但在分子中含有碳环结构的饱和烃,多为五元环或六元环及其衍生物,以单环和双环为主。多环中以四环甾烷和五环萜烷较为重要,其结构与生物体的四环甾族化合物和五环三萜烯类化合物有明显的相似性,也是重要的生物标志化合物。环烷烃被广泛应用于烃源岩成熟度分析和油源对比中,这类化合物有明显的旋光性,它们的存在被认为是石油有机成因的标志。

在石油中多环烷烃的含量随成熟度增加而明显减少,高成熟石油中以 1~2 环的环烷烃为主。由于碳原子所有的价已被饱和,所以环烷烃和烷烃一样,都是比较稳定的。环烷烃的相对密度、熔点和沸点都比碳原子数相同的烷烃为高,但相对密度仍小于 1(表 1-1-4)。

表 1-1-4 环烷烃的物理常数(据张厚福等,1999)

名称	结构式	相对密度	熔点,℃	沸点,℃
环丙烷		0.720(-79℃)	-127.6	-32.9
环丁烷		0.703(0℃)	-80	12
环戊烷		0.745(20℃)	-93	49.3
甲基环戊烷		0.779(20℃)	-142.4	72
环己烷		0.779(20℃)	6.5	80.8
甲基环己烷		0.769(20℃)	-126.5	100.8
环庚烷		0.810(20℃)	-12	118
环辛烷		0.836(20℃)	11.5	148

3) 芳香烃和环烷芳香烃

芳香烃是指具有 6 个碳原子和 6 个氢原子组成的特殊碳环—苯环的化合物,其特征是分子中含有苯环结构,属不饱和烃。由于此类烃族中许多成员具有一种强烈的芳香气味,故称芳