



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS  
高等学校教材

# 油气田开发地质学

Geology of Oil-gas Field Exploitation

■ 国景星 王纪祥 张立强 主 编  
李红南 王金友



中国石油大学出版社

国景星 王纪祥 张立强 主编  
李红南 王金友

# 油气田开发地质学

中国石油大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

油气田开发地质学/国景星等主编. —东营:中国石油  
大学出版社,2008.8

ISBN 978-7-5636-2641-0

I. 油… II. 国… 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(2008)第 117236 号

**书 名:** 油气田开发地质学

**作 者:** 国景星 王纪祥 张立强 李红南 王金友

---

**责任编辑:** 李 锋 (电话 0546—8392791)

**封面设计:** 九天设计

---

**出 版 者:** 中国石油大学出版社 (山东 东营 邮编 257061)

**网 址:** <http://www.uppbook.com.cn>

**电子信箱:** shiyoujiaoyu@126.com

**排 版 者:** 中国石油大学出版社排版中心

**印 刷 者:** 东营石大博雅印务有限公司

**发 行 者:** 中国石油大学出版社 (电话 0546—8392791)

**开 本:** 185×260 印张: 23 字数: 573 千字

**版 次:** 2008 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

**定 价:** 34.00 元

油气田开发地质学是石油高等院校石油工程专业学生必修的一门专业基础课,不仅包含了油气成藏的基本理论,以及油气田勘探的任务、方法与技术,而且包含了直接服务于油气田开发的综合性、实用性内容——油气田地下地质学,它们是石油工程专业学生实现油气地质与开发相结合,用油气开发地质理论科学指导油气生产所必需的基础和前提。

本教材是在充分考虑石油工程专业学生在前期课程“地质学基础”中学习并掌握的矿物与岩石、地层与古生物、沉积相、构造等相关内容的基础上,系统介绍油气藏的形成与分布,如何寻找石油与天然气,如何定性、定量描述油气田地下地质特征,从而使学生在理论学习的基础上,了解油气开发地质中的方法与技术,掌握油气藏地下地质特征,为将来的实际工作奠定坚实的基础。

本教材是在1999年编写的《油田开发地质学》的基础上,参考了国内外近年来的有关专著及文献资料,如张厚福和方朝亮等编写的《石油地质学》(1999)、蒋有录和查明主编的《石油天然气地质与勘探》(2005)、吴欣松和张一伟等编著的《油气田勘探》(2000)、吴元燕和陈碧珏等主编的《油矿地质学》(1995)、吴元燕和吴胜和等主编的《油矿地质学》(2006)、李德生主编的《石油勘探地下地质学》(1989)、陈立官主编的《油气田地下地质学》(1983)、戴启德和纪有亮等主编的《油气储层地质学》、伍友佳主编的《油藏地质学》(2004)及学科的最新进展等,并在认真征求了使用过该教材的师生和油田专家的宝贵意见的基础上编写而成的。

本书的编写由中国石油大学(华东)国景星、王纪祥、张立强、李红南、王金友完成。绪论、第二章、第六章、第十章由国景星编写;第一章、第七章由王金友编写;第三章、第八章由张立强编写;第四章、第五章由王纪祥编写;第九章、第十一章、第十二章由李红南编写。全书由国景星统稿完成。

本教材由中国石油大学(华东)林承焰教授审阅。编写过程中还得到了中国石油大学(华东)地球资源与信息学院、石油工程学院的专家、学者的热情帮助和指导,在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,其中难免有不当甚至错误之处,诚恳欢迎使用本教材的师生和广大读者批评指正。

编者

2008年3月

# Contents 目 录

绪论	1
第一节 油气田开发地质学的任务及内容	1
第二节 石油及天然气工业在国民经济中的作用	1
第三节 世界油气勘探发展简史	2
第四节 我国油气勘探简史	4
第五节 世界油气勘探发展趋势	6
第一章 油气田地下流体的基本特征	9
第一节 石油	9
第二节 天然气	20
第三节 油田水	26
第二章 石油和天然气的生成	30
第一节 油气成因理论发展概况	30
第二节 生成油气的原始物质	33
第三节 油气生成的条件	37
第四节 有机质演化与成烃模式	43
第五节 烃源岩研究	46
第三章 储集层与盖层	54
第一节 储集层的岩石物性参数	54
第二节 碎屑岩储集层	60
第三节 碳酸盐岩储集层	70
第四节 特殊岩类储集层	77
第五节 盖层	81
第四章 油气运移及油气藏的形成	85
第一节 油气初次运移	85
第二节 油气二次运移	95
第三节 圈闭与油气藏的概念及量度	105
第四节 油气藏形成的基本地质条件	109
第五章 油气聚集类型及分布规律	117
第一节 油气藏的类型	117
第二节 油气聚集单元	137
第三节 油气资源分布特点及控制因素	146

<b>第六章 油气田勘探</b> .....	155
第一节 油气勘探方法与技术.....	155
第二节 油气勘探的程序.....	158
第三节 区域勘探.....	160
第四节 圈闭预探.....	164
第五节 油气田评价勘探.....	169
第六节 滚动勘探开发.....	172
<b>第七章 钻井地质</b> .....	176
第一节 单井地质设计.....	177
第二节 地质录井.....	185
第三节 完井地质报告的编写.....	213
<b>第八章 地层对比及油层沉积微相研究</b> .....	216
第一节 地层对比.....	216
第二节 沉积微相研究.....	234
<b>第九章 油气田地下构造研究</b> .....	247
第一节 油气田地下构造的研究内容及方法.....	247
第二节 断层研究.....	250
第三节 油气田地质剖面图的编制.....	261
第四节 油气田构造图的编制.....	266
<b>第十章 地层温度和地层压力</b> .....	273
第一节 地层温度.....	273
第二节 地层压力.....	280
<b>第十一章 石油及天然气储量计算</b> .....	301
第一节 油气储量的分类和综合评价.....	301
第二节 容积法计算油气储量.....	309
第三节 压力降落法计算天然气储量.....	330
第四节 油气储量计算的其他方法.....	334
<b>第十二章 油藏描述简介</b> .....	337
第一节 油藏描述的任务及研究内容.....	337
第二节 油藏描述基础资料.....	339
第三节 油藏描述方法技术.....	342
<b>参考文献</b> .....	359

# 绪 论

## 第一节 油气田开发地质学的任务及内容

油气田开发地质学属石油地质学范畴,是石油工程专业的一门专业基础课。课程的任务是培养学生综合应用基础地质、石油与天然气地质、油气田地下地质、地球物理勘探及矿场地球物理测井等专业知识,分析和解决油气田开发过程中开发方案编制、方案调整、剩余油分布研究等具体地质问题。

由于油气开采的方式、方法、技术要求等均围绕油气藏进行,因此“油气田开发地质学”的课程内容以油气藏为核心,大体上分为两个部分。第一部分以油气藏形成为重点,论述石油与天然气地质学的基本原理,主要包括油气田的地下流体、石油和天然气的生成、油气藏的形成与分布规律等;第二部分以油气藏描述为中心,运用基础地质、油层物理、地球物理及地球化学等资料,精细描述油气藏的地质特征,获取油气藏地质参数,建立油气藏地质模型,并研究油气藏中流体的性质与分布,计算石油和天然气的地质储量,为油气田的合理开发提供可靠的地质依据。

教材中的第一部分以基础理论为主,第二部分以方法及应用为主,通过理论与实践相结合的方式,培养学生综合分析和解决油气田地质问题的基本技能和方法,为油气田开发方案设计、动态分析、提高采收率及取得好的经济效益打好基础。

## 第二节 石油及天然气工业在国民经济中的作用

石油和天然气在国民经济中占有极其重要的地位,现在已经能够从中提炼出三千多种产品,应用于农业、工业、国防、科学技术等各个领域。

石油被誉为工业的血液,从石油中提炼的汽油、煤油、柴油等是车、船、飞机的优质燃料,超音速飞机、火箭、导弹、飞船等现代化武器的燃料也离不开石油产品。石油和天然气以发热量大、燃烧完全、运输方便、减少空气污染等优点,被誉为“高效、洁净能源”,其世界能源消费结构中所占的比例越来越大,见表绪-1。目前,各种能源排列顺序是石油(40.0%)、天然气(23.0%)、煤炭(27.2%)、水利(2.5%)和核能(7.2%)。从表绪-2中可以看出,我国石油与天然气消费比重特别是天然气消费比重明显偏低。

表绪-1 世界能源消费结构(%)

年 份	1960	1970	1980	1985	1990	1995	2000	2005
煤	48.9	34.9	29.0	30.7	28.5	27.2	25.0	27.8

续表绪-1

年份	1960	1970	1980	1985	1990	1995	2000	2005
石油	35.8	42.9	43.3	37.9	40.0	39.7	40.6	36.4
天然气	13.4	19.8	19.0	20.1	22.5	23.1	24.2	23.5
水利和核能	1.9	2.4	8.7	11.3	9.0	10.0	10.3	12.3

注:1960—2000年数据来自《世界经济》1996(12)及BP Statistical Review of World Energy, June 2004;

2005年数据来自《上海节能》2006,(4);2005年世界能源消费结构统计评论,作者钱伯章。

表绪-2 中国1990—2005年能源消费状况(%)

年份	1990	1992	1994	1996	1998	2000	2002	2005
煤	76.2	75.7	75.0	74.7	69.6	66.1	65.59	68.98
石油	16.6	17.5	17.4	18.0	21.5	24.6	23.97	21.60
天然气	2.1	1.9	1.9	1.8	2.2	2.5	2.62	2.80
水利和核能	5.1	4.9	5.7	5.5	6.7	6.8	7.82	6.50

注:1990—2000年数据来自国家统计局《2004中国统计年鉴》;

2005年数据来自《上海节能》2006,(4);2005年世界能源消费结构统计评论,作者钱伯章。

石油也是重要的润滑油料,几乎所有的转动机械包括从微小精密的钟表到庞大高速的发动机,都需要润滑方能转动,所以人们将润滑油料视为机器的“食粮”。

石油和天然气也是优质的有机化工原料。乙烯、丙烯、丁二烯、苯、甲苯、二甲苯、乙炔、萘等化学工业应用的主要基础原料多来自石油和天然气,这些化工产品广泛应用于工业、农业、日常生活等国民经济的各个部门。

所以,在社会主义现代化建设过程中,发展石油和天然气工业有着十分重要的意义。

### 第三节 世界油气勘探发展简史

世界上发现和利用石油与天然气的历史已有三千多年了,但作为工业规模的油气勘探和开发仅有一百多年的历史。总结世界主要油气生产国家勘探经历的情况,可以把世界油气勘探发展史概略地划分为三个阶段。

#### 一、初期阶段

大体上可以认为是19世纪40年代以前这一漫长的时代。

中国是世界上最早发现、开采和利用石油及天然气的国家之一,根据史料记载已有三千多年的历史。由于天然气比石油更易从地层中逸出,遇到野火、雷鸣就会燃烧,因此,在历史上认识天然气早于石油。早在三千多年前(公元前1122—公元前770年间),周代《易经》就有了“上火下泽”、“火在水上”、“泽中有火”等记载,阐明了可燃的天然气在地表湖沼水面所出露的气苗。最早的石油记载见于1900多年前班固著《汉书·地理志》:“高奴,有洧水,可蘸”。“高奴”系指今陕西省延安县一带,“洧(音渭)水”是延河的一条支流,“蘸”乃古代“燃”字。这是描述水面上有像油一样的东西可以燃烧。科学术语“石油”一词是北宋著名科学家沈括在《梦溪笔谈》中首次提出的:“鄜延境内有石油,旧说高奴县出脂水,即此也。”



在欧洲和中东,人们将大量的天然气苗当成“永恒之火”,拜火教盛行。一些油气苗、地沥青和各种沥青矿藏的地面露头,曾被视为奇迹吸引了不少游客。古老的高加索巴库地区是世界上最早发现和利用油气资源的地区之一,15世纪已开采了相当数量的原油。

该阶段对于石油和天然气的发现绝大多数属偶然现象,缺乏正确的理论指导,在认识上带有神秘的宗教色彩。直到18世纪末、19世纪初,随着生产和科学技术的发展,才开始出现有关油气成因的假说,人们逐渐从神秘的宗教色彩中解放出来。由于受生产和认识水平的限制,该阶段在油气生成理论方面以无机生油学派占统治地位。

## 二、中期阶段

时间上自19世纪40年代至20世纪40年代。

19世纪后半叶,俄国(1848年在比比-埃巴特)、美国(1859年在宾夕法尼亚州)相继钻成了各自的第一口产油井。以后相当长的时间内,找油主要靠定“野猫井”(指以寻找新油气藏为目的而钻的井)的人。这些人并不是地质学家,他们主要根据五条办法布井找油:① 随机钻井;② 偶然发现油气;③ 发现牧场上同一棵树在过去50年中三次着火;④ 溪流学,沿小溪流弯曲处向下往南走40步打井;⑤ 用魔杖或小黑盒占卜。

随着人们对石油和天然气寻找范围的日益扩大,以及科学技术的不断发展和水平的提高,人们在寻找油气的实践活动中,逐渐认识到油气的聚集常与背斜构造有关,因而提出了“背斜聚油理论”(1861年,由美国著名的油气专家怀特提出),该理论的出现是油气勘探史上的重大转折。但是“背斜聚油理论”在当时的美国并不为广大油气勘探家们所重视和采用。1875年,“背斜聚油理论”传到欧洲,被广泛采用并取得了显著效果。1880年后才在美国和墨西哥等地得到推广。

与此同时,为了适应寻找背斜、发现油藏,特别是覆盖区勘探工作的需要,产生并逐步完善了重力、磁法、电法等地球物理勘探方法。同时,钻井技术普遍提高,1895年发明了旋转钻,钻探深度可达1000 m以上。为了在钻井中划分出油、气、水层,电法测井及地质录井方法都有了相应的发展。地震等地球物理方法在研究构造、寻找背斜圈闭方面起到了重要的作用。

在油气生成理论上,由于无机成因理论难于解释油气主要分布于沉积岩且在大量背斜圈闭中发现油气聚集等事实,认为石油是由水盆中生物形成的有机成因理论逐渐抬头,最后占据了统治地位。

## 三、近期阶段

自20世纪40年代开始,化学工业的发展需要利用石油及天然气产品作为基础原料,所提炼出的三千多种产品渗透到国民经济的各个领域;同时,石油和天然气及其产品还是车、船、飞机的优质动力燃料,在世界能源消费结构中已占60%~70%。正是这种越来越多的生产及生活等需求,进一步刺激了油气的勘探与开发。

伴随着大规模开展的油气田勘探开发工作,人们获得了丰富的地面及地下地质资料,从而对油气生成、运移、聚集等各方面的规律有了进一步认识。同时,科学技术的迅速发展和各种油气勘探方法的质量有了明显的提高,勘探深度和精度达到了相当高的水平,因此,该阶段的主要特点是人们在油气勘探工作中的预见性大大提高。

勘探领域和勘探对象,从中期阶段以“背斜聚油理论”为指导的背斜构造找油,逐渐扩展到

目前以现代油气成因理论、油气成藏原理等为理论指导,向深层、海洋、复杂地区等领域拓展,寻找构造、岩性、不整合及水动力等圈闭的全方位找油,勘探及开发领域更为广泛。

从勘探工作来讲,全球有 600 多个沉积盆地,其中 400 个进行过勘探工作,含有工业油气的有 160 多个,尚有 200 个盆地从未或很少勘探过。从石油产量上看,世界石油产量从石油工业发展初期 1860 年的  $7 \times 10^4$  t 至 2005 年增长到  $35.9 \times 10^8$  t(表绪-3),大约增长了 50 000 倍。

表绪-3 世界石油产量变化

年 份	产量/( $10^8$ t)	年 份	产量/( $10^8$ t)
1975	26.615 5	1999	32.355
1980	29.958 6	2000	33.617
1985	28.096 0	2001	33.373
1990	30.2	2002	32.713
1995	30.722 4	2003	34.25
1996	31.687 5	2004	35.497
1998	32.470	2005	35.896 9

#### 第四节 我国油气勘探简史

中华民族以其勤劳、勇敢和智慧著称,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。但是,近百年来由于帝国主义的侵略和掠夺,由于封建主义和官僚资本主义的长期统治,扼杀了我国的石油工业,使我国具有光辉历史的石油及天然气工业在解放前的相当长一段时间内基本上处于停滞状态。

中国近代石油勘探从 1878 年清政府在台湾省(苗栗)钻探第一口油井开始,已有近 130 年的历史。1907 年在陕西延长打了第一口油井(延 1 井),1909 年在新疆独山子开凿油井。1913 年,美孚石油公司组成调查团到我国陕西、山东、河南、河北、甘肃、东北等地进行了首次石油地质调查,钻了 7 口井,均未获工业油流。1922 年 2 月,美国地质学家斯坦福大学教授 E. Blackwelder 撰写论文“中国和西伯利亚石油资源”,认为“中国没有中、新生代海相沉积……中国决不会生产大量石油”。

新中国成立前,全国只有两个地质调查队,几十名地质勘探人员,90% 以上的面积没有进行过石油地质调查。石油产量少得可怜,从 1904—1949 年的 45 年间,全国只有几个小油田,石油累计产量不超过  $310 \times 10^4$  t(表绪-4)。

但是,帝国主义的侵略、封建和官僚资本主义的长期统治并没有使石油地质工作者屈服。20 世纪 20 年代,王竹泉、潘钟祥、孙健初等地质学家,在极其困难的条件下对我国进行了石油地质勘查工作,足迹遍及陕北高原、河西走廊、四川盆地、云贵高原、天山内外和沿海平原,从实践到理论均做了许多有价值的探索。1938 年,孙健初等人到玉门进行石油地质勘查工作,1939 年 8 月 11 日,老君庙 1 号井在井深 88 m 处钻遇 K 油层,经完井试油,初试日产原油 10 t 左右。此后钻的 2,3,4 号井均钻遇了油层,证实了玉门油田是一个具有工业价值的大油田。

表绪-4 我国解放前 1904—1949 年原油产量表

年 份	产量/t	年 份	产量/t
1904	122	1941	243 082
1905	464	1942	308 064
1910	561	1943	320 970
1915	2 569	1944	300 346
1920	1 132	1945	175 657
1925	3 526	1946	101 010
1930	65 229	1947	65 902
1935	125 895	1948	89 035
1940	172 311	1949	121 000

我国地质学家潘钟祥从中国地质实际出发,对陆相生油问题进行了深入的探讨,于 1941 年在美国石油地质学家协会会志(AAPG)第 25 卷 11 期发表的“中国陕北和四川白垩系的非海相生油”论文中指出“石油不仅来自海相地层,也能来自淡水沉积物”,明确提出了“陆相生油”学说,为我国石油、天然气勘探提供了理论依据。

新中国成立后,在中国共产党的领导下,坚决贯彻自力更生、艰苦奋斗的精神,使我国的油气勘探事业取得了飞速的发展,在油气勘探与开发方面取得了举世瞩目的成就,为新中国的经济发展做出了巨大贡献(表绪-5)。回顾新中国的油气勘探开发历史,大致经历了四个阶段。

表绪-5 中国石油产量变化

年 份	产量/(10 <sup>8</sup> t)	年 份	产量/(10 <sup>8</sup> t)
1975	0.759 4	1999	1.611 2
1980	1.042 0	2000	1.618 6
1985	1.239 2	2001	1.648 3
1990	1.366 4	2002	1.702 8
1995	1.494 5	2003	1.707 5
1996	1.564 5	2004	1.747
1998	1.605 0	2005	1.808 4

新中国成立后的前十年为第一个阶段。由于受“背斜聚油理论”和“唯海相生油理论”等观点的限制,主要在山前拗陷、盆地边缘找油,故又称山前拗陷-盆地边缘找油时期。其中的 1949—1954 年期间,首先在老君庙等油田迅速恢复生产,在酒泉和其他西部含油气区进行了少量的勘探工作。由于经验少、技术水平低,仅发现了几个中小型油气田,成效不大。1955—1958 年期间,开展了全国性的大规模石油普查工作,勘探重点主要集中在中西部地区的四川、陕甘宁、酒泉、准噶尔、柴达木、吐鲁番、民和等盆地。老一代地质学家李四光、黄汲清、潘钟祥、孙健初等积极从事石油地质调查勘探及组织领导工作。通过该阶段工作,陆续发现了克拉玛依、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,但仍没有根本改变进口石油的局面。

第二阶段始于 1959 年,以松辽盆地松基 3 井喷油为标志(1959 年 9 月)。该阶段油气勘

探重点由西部转向了东部平原。在环境条件恶劣、工作条件极端艰苦的情况下,通过石油人的顽强拼搏,相继发现了大庆油田(1959年)、胜利油田(1963年)、大港油田(1964年)、辽河油田(1969年)等,石油年产量迅速增长,根本改变了我国石油工业落后的面貌。

1975年任丘古潜山油田的发现,打开了石油勘探的新领域,标志着我国油气勘探工作进入了一个新的阶段。该油田的发现,首次在古老的中、上元古界白云岩中找到了巨大的地层油气藏,使得油气勘探向着更为广阔的领域发展,不仅在中、新生界陆相地层,而且要在古生界和中、上元古界海相地层中寻找油气藏;不仅要寻找背斜、断层等构造油气藏,而且要注意勘探古潜山、地层超覆、古河道、古三角洲等多种类型地层油气藏。1978年我国原油产量超过亿吨,迈入世界产油大国行列。

20世纪80年代末,我国石油工业坚持“稳定东部、发展西部、油气并举”的勘探战略,在西北部的塔里木、准噶尔、吐哈三大盆地及东南沿海加强勘探,并取得可喜成绩。1989年吐哈盆地台参1井侏罗系煤系地层喷油,发现鄯善、丘陵等一批大中型煤系油气田;在准噶尔盆地东部及腹地、酒泉盆地东部等地区的侏罗系煤系地层获得重要发现,展现出侏罗系煤系地层的找油气前景;在被寄予厚望的塔里木盆地,经过多年的艰苦努力,发现了一批含油气构造并探明了多个整装油气田,初步揭示了它作为我国最大含油气盆地灿烂的勘探与开发前景。除此之外,在渤海、南海和东海海域发现了一批大型含油气构造,均具有丰富的油气储量。如渤海的蓬莱19-3构造目前已探明原油储量 $3 \times 10^8$  t,并且储量规模正在进一步扩大;位于东海盆地的西湖凹陷被认为是东海海域天然气资源量丰富的地区,专家预测其天然气总资源量约为 $(1 \sim 2) \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>,将为中国21世纪天然气的大规模开发利用提供保证。

与此同时,我国还逐渐培育、锻炼、成长起来一支油气地质勘探和科学研究队伍,在油气地质理论及相关的边缘学科研究领域都做出了很大贡献。例如,在油气生成理论方面,通过对各主要含油气盆地的生油、气特征的研究,逐步创立并完善了“陆相生油”学说,不仅批判了“唯海相生油论”的偏见,摆脱了“中国贫油论”的理论束缚,而且找到了一大批重要的陆相大油田,为我国的油气勘探指明了方向;对油气聚集及分布规律有了更系统的认识。随着油气勘探经验的不断积累,从中国区域构造特征出发,不但总结了背斜、断层等构造类型油气藏的形成和分布规律,而且对“新生古储”、“自生自储”等复杂的地层油气藏油气聚集规律有了系统的认识,初步掌握了我国油气藏的形成及分布规律,为开展更大规模的油气勘探工作奠定了坚实的理论基础。

## 第五节 世界油气勘探发展趋势

从近代油气勘探至今,世界石油工业的发展已有100余年历史。根据第14届世界石油大会报道,全球最终常规可采油气储量分别为油 $3113 \times 10^8$  t,天然气 $328 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>,在已探明的油田中,剩余可采储量约 $1511 \times 10^8$  t,预计还可以找到的潜在资源量约有石油 $644.8 \times 10^8$  t,天然气 $1325 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>。

展望世界各国油气地质勘探发展,可以归纳为如下几个方面:

### 1) 新区油气勘探

勘探与开发实践表明,要想使油气产量相对稳定或稳步增长,必须有数量可观的油气后备

储量作保证,其中新区的发现及勘探对储量及产量的增长至关重要。特别是对于石油工业发展较早的国家,所谓的新区越来越少甚至已无新区可言,明显感到“能源危机”的威胁;那些石油工业发展较慢或起步较晚的国家逐渐认识到靠发展石油工业来繁荣国民经济是一条有效的捷径,故加大了勘探与开发力度。因此,近20年来,发现的一系列新探区,如中国东部平原、塔里木盆地和东南沿海,前苏联西西伯利亚,北非撒哈拉大沙漠,西非尼日尔河三角洲,西欧北海,加拿大的北极地区,澳大利亚吉普斯兰及美国阿拉斯加等,这些新探区的发现和开发逐渐改变了世界油气资源分布的面貌,中国、墨西哥、挪威、阿尔及利亚、利比亚、尼日利亚等国跃居世界主要产油国的行列。

## 2) 海洋油气勘探

伴随着海洋地球物理勘探和海上钻井技术装置的不断改善,大陆架浅海区为世界油气勘探开拓了一个崭新的、广阔的领域,具有较大的油气勘探前景。水深在200 m以内的大陆架面积约有 $3\,000 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,已有近百个国家开展了海上油气勘探,其中45个国家在海上找到了油气田。波斯湾、北海、墨西哥湾、库克湾、几内亚湾、加勒比海都已发现了储量、产量相当可观的油田或气田。除此之外,包括太平洋、大西洋、印度洋、北冰洋在内的辽阔海域也可能蕴藏着大量油气资源。墨西哥湾深海考察证明,在水深3 000 m以上的深水盆地中仍可见油气。值得注意和欣喜的是,环绕中国东南沿海海域,近十几年来已在印度尼西亚(爪哇海和望加锡海峡)、沙捞越、文莱、菲律宾和泰国湾等地共发现40多个海上油气田,并在我国的渤海、南海、东海、海南岛北部湾均有重要发现。其中,2006年6月(科学时报2006年6月23日报道),中国海洋石油总公司及加拿大赫斯基能源公司(Husky Energy)宣布,在我国南海北部水深1 500 m的白云凹陷深水区发现大气田,纯天然气层厚56 m,含气构造面积 $60 \text{ km}^2$ ,预计可采储量 $(1\,133 \sim 1\,699) \times 10^8 \text{ m}^3$ ,这是首次在中国领海内发现的深海气田,也是迄今在我国海域所发现的最大气田之一。所有这些都标志着中国东南沿海广大海域拥有巨大的含油气远景。

## 3) 寻找多种类型油气藏,特别是隐蔽油气藏勘探

自19世纪80年代开始,人们关注的对象以背斜油气藏为主,但是,自从20世纪20年代末期在委内瑞拉马拉开波盆地发现了著名的玻利瓦尔湖岸大油田(1917年)、美国得克萨斯州发现了胡果顿大气田(1918年)后,发现其中的油气聚集与背斜构造无关,而是受地层不整合、古潜山、地层超覆及断层等控制。因此,油气勘探不再单纯寻找背斜油气藏,而是发展为寻找多种类型油气藏,特别是大量的、单个规模较小的地层、岩性等隐蔽油气藏,勘探领域更加广泛。而沉积学、岩相古地理学、地震地层学、层序地层学等学科的进一步发展及相互融合,大大促进了多种类型油气藏的勘探。

## 4) 深层油气勘探

随着科学技术的发展,井深超过6 000 m(约20 000 ft)的超深井钻探日渐增多。例如,美国西内部的阿纳达科盆地是世界上超深井最为集中的探区,1972年在贝卡姆县于7 335~7 482.1 m深处钻开了世界最深产气层,1974年在沃希托县完成了深达9 583.2 m的世界级超深井的钻探;我国在四川盆地于1977年成功地钻成一口7 175 m深的超深井。这些超深井的钻探,不仅为深层油气研究提供了地质基础,同时也进一步扩大了油气勘探的领域,以满足世界日益增长的油气需求。从钻探结果来看,在深部地层中发现的气藏和凝析气藏明显超过油藏,因此,随着超深井钻探的日益增多,研究凝析气藏和深部纯气藏的形成及分布规律的问题也逐渐引起人们的注意和重视。

### 5) 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(1 000 m<sup>3</sup>天然气折合 1 t 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。如我国在四川东北地区发现的普光气田,已探明储量  $3\,560.72 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,为中国第二大气田,这是中国第一次在海相地层中找到大规模气田。在不远的将来,天然气将可能取代石油成为第一能源。

综观上述发展趋势,我国的油气勘探形势极为喜人。无论在我国大陆,还是在东南沿海,海相和陆相沉积岩系都非常发育、分布广泛,拥有巨大的含油气远景。特别是海相沉积岩系,近 20 年来在塔里木、鄂尔多斯、四川等盆地中发现了一系列大中型油气田,如塔里木盆地的塔河、轮南、雅合-雅克拉、塔中等大油田,四川盆地的五百梯、罗家寨、普光等大气田等。对此,国内外有关专家有过许多重要评论,如英国《经济学家》周刊 1979 年 3 月 3 日一期刊登的“中国的石油地质情况”一文评论道:“据保守的估计,中国陆上石油储量约  $53.4 \times 10^8$  t,等于美国已探明的和可能探明的石油储量。人们普遍估计它的海上石油储量也同陆上差不多,约为  $55 \times 10^8$  t。”并推测“中国肯定会成为一个重要的产油国”。中国工程院院士翟光明于 2006 年 5 月在第九届北京科学技术博览会“中国能源战略高层论坛”上表示,中国油气资源比较丰富,勘探前景比较广阔,从油气勘探的实践来看,中国油气储量增长阶段性非常明显,中国未来至少还有十年的储量增长期。总之,我国油气资源非常丰富,发展潜力巨大,让我们努力学习并熟练掌握油气科技文化知识,为把我国建设成为一个现代化的社会主义强国而努力奋斗。

# 第一章 油气田地下流体的基本特征

在油、气田区域内,地下岩石孔隙或裂缝中存在着多相流体,既有石油、天然气等烃类流体,也分布着大量与烃类有关的油田水。勘探开发实践证明:研究石油、天然气及油田水的化学组成和物理性质等基本特征,对于查明油气的生成、运移、聚集和分布规律,评价油气的质量,编定开采、加工方案等都具有非常重要的意义。

## 第一节 石油

石油是储存于地下岩石空隙(孔、洞、缝)中的、天然生成的、以液态烃为主要化学组分的可燃有机矿产。这种矿产成分复杂,现已鉴定出上千种有机化合物,除液态烃类外,还含有数量不等的非烃类化合物和多种元素,有时溶有一些烃类气体、非烃类气体及不等量的固态烃。所以,石油实际上是多种有机化合物的混合物,而且各地的石油成分不一,无确定的化学成分和物理常数。

### 一、石油的元素组成

组成石油的常见元素大约有 30 多种。同一产地石油的元素含量可以变化较大,而不同地区、不同时代的石油的元素组成可以比较接近(表 1-1)。

表 1-1 国内外某些石油的元素组成(据张厚福等,1999 修改)

石油产地		元素组成/%				
		C	H	S	N	O
中 国	大庆油田(萨尔图混合油)	85.74	13.31	0.11	0.15	0.69
	胜利油田(101 混合油)	86.26	12.20	0.80	0.41	
	胜利油田孤岛地区	84.24	11.74	2.20	0.47	
	大港油田	85.67	13.40	0.12	0.23	
	江汉油田(混合油)	83.00	12.81	2.09	0.47	1.63
	克拉玛依油田(混合油)	86.13	13.30	0.04	0.25	0.28
前 苏 联	雅雷克苏	80.61	10.36	1.05		8.97
	乌克兰	84.60	14.00	0.14	1.25	1.25
	老格罗兹尼	86.42	12.62	0.32		0.68
美国	宾夕法尼亚州	84.9	13.7	0.5		0.9
	文图拉(加利福尼亚州)	84.00	12.7	0.4	1.70	1.20

续表 1-1

石油产地		元素组成/%				
		C	H	S	N	O
美国	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	0.70	2.61	
	堪萨斯州	84.20	13.00	1.60	0.45	0.45
墨西哥		84.2	11.4	3.6		0.8
伊朗		85.4	12.8	1.06		0.74

### 1. 主要元素

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。按质量计算,碳元素约占 84%~87%,氢元素约占 11%~14%,两者大约占石油总量的 95%~99%。这两种元素主要以烃类形式存在,是组成石油的主体。

石油中的氧、硫、氮元素也主要以化合物形式存在。总含量一般小于 1%~4%,但有时由于硫分增多,总量可高达 3%~7%。含硫、含氮、含氧的化合物大多富集于石油的胶质、沥青质等组分中。

### 2. 微量元素

除上述五种主要元素外,石油亦含有种类极多的微量元素,常见的有 Fe, Ca, Mg, Si, Al, V, Ni, Cu, Sb, Mn, Sr, Ba, B, Co, Zn, Mo, Pb 等。它们以金属元素为主,而且可从石油燃烧后的灰分中识别出来。各地石油所含微量元素的种类和数量各不相同,其含量变化从十万分之几到万分之几。

在这些微量元素中,钒(V)和镍(Ni)两元素的分布普遍并具有成因意义。通过 V/Ni 值可区分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、镍含量较高且 V/Ni 值大于 1 者一般为海相成因的石油。由于钒(V)和镍(Ni)在煤、油页岩及石油中分布稳定,且石油的生成、运移及成藏过程对其含量的影响不大,因此,两元素也可作为油源对比的证据之一。

## 二、石油的化合物组成

石油中的元素主要结合成不同的化合物存在。归纳起来,其化合物组成主要可分为烃类和非烃类两类化合物。

### 1. 烃类化合物

烃类化合物是由碳和氢两种主要元素组成的。目前已鉴定出的烃类化合物超过 420 多种,按其结构分为烷烃、环烷烃及芳香烃三类。

#### 1) 烷烃

烷烃又称脂肪族烃,分子通式为  $C_nH_{2n+2}$ 。烷烃属饱和烃,化学性质不太活泼。烷烃的分子结构特点是碳原子以 C—C 单键呈直链式相连。若无支链,则为正构烷烃;若有支链,则为异构烷烃。其分子结构如图 1-1 所示。

#### (1) 正构烷烃。

正构烷烃一般占石油质量的 15%~25%。目前已鉴定出碳原子数为  $C_1 \sim C_{45}$  的正构烷



正构烷烃： $-C-C-C-C-$ ； $-C-C-C-C-C-C-C-$

异构烷烃： $-C-C-C-C-$ ； $-C-C-C-C-C-C-$

图 1-1 正构烷烃和异构烷烃结构示意图

烃，且多数正构烷烃的碳数 $\leq C_{35}$ 。在常温常压下，甲烷到丁烷呈气态，戊烷到十六烷呈液态，十六烷以上的高分子正构烷烃皆呈固态。正构烷烃的相对密度、熔点及沸点均随相对分子质量增加而上升(表 1-2)。正构烷烃的相对密度都小于 1，几乎不溶于水(气态烃除外)。

表 1-2 正构烷烃的物理常数(据戴启德,1999 修改)

名称	分子式	熔点/℃	沸点/℃	相对密度(液态时)	通常状态
甲烷	$CH_4$	-182.5	-161.4	0.424 0	气
乙烷	$C_2H_6$	-182.7	-88.6	0.546 2	气
丙烷	$C_3H_8$	-187.1	-42.2	0.582 4	气
丁烷	$C_4H_{10}$	-138.3	-0.5	0.578 8	气
戊烷	$C_5H_{12}$	-129.7	36.1	0.626 3	液
己烷	$C_6H_{14}$	-95.3	68.7	0.659 4	液
庚烷	$C_7H_{16}$	-90.6	98.4	0.683 7	液
辛烷	$C_8H_{18}$	-56.8	125.6	0.702 8	液
壬烷	$C_9H_{20}$	-53.7	150.7	0.717 9	液
癸烷	$C_{10}H_{22}$	-29.7	174.0	0.729 9	液
十一烷	$C_{11}H_{24}$	-25.6	195.8	0.740 3	液
十二烷	$C_{12}H_{26}$	-9.6	216.2	0.748 3	液
十三烷	$C_{13}H_{28}$	-6.5	234.0	0.756 8	液
十四烷	$C_{14}H_{30}$	5.5	252.5	0.763 6	液
十五烷	$C_{15}H_{32}$	10.0	270.5	0.768 8	液
十六烷	$C_{16}H_{34}$	18.1	286.5	0.773 3	液
十七烷	$C_{17}H_{36}$	22.0	303	0.775 7	固
十八烷	$C_{18}H_{38}$	28.0	317	0.776 8	固
十九烷	$C_{19}H_{40}$	32.0	330	0.777 6	固

在石油中，不同碳原子数的正构烷烃在一定范围内是连续分布的。不同类型石油的正构烷烃分布特点如图 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。

不同石油的正构烷烃分布曲线形态是不同的，这与生油原始有机质的类型、形成环境及其成熟度密切相关。一般陆源有机质生成的石油中高碳数( $C_{22}$ 以上)的正构烷烃含量高，海生低等浮游生物(细菌、藻类)生成的石油中低碳数( $C_{22}$ 以下)的正构烷烃居多。有机质热演化程度较高的石油中低碳数正构烷烃居多；相反，演化程度低的石油中，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。