



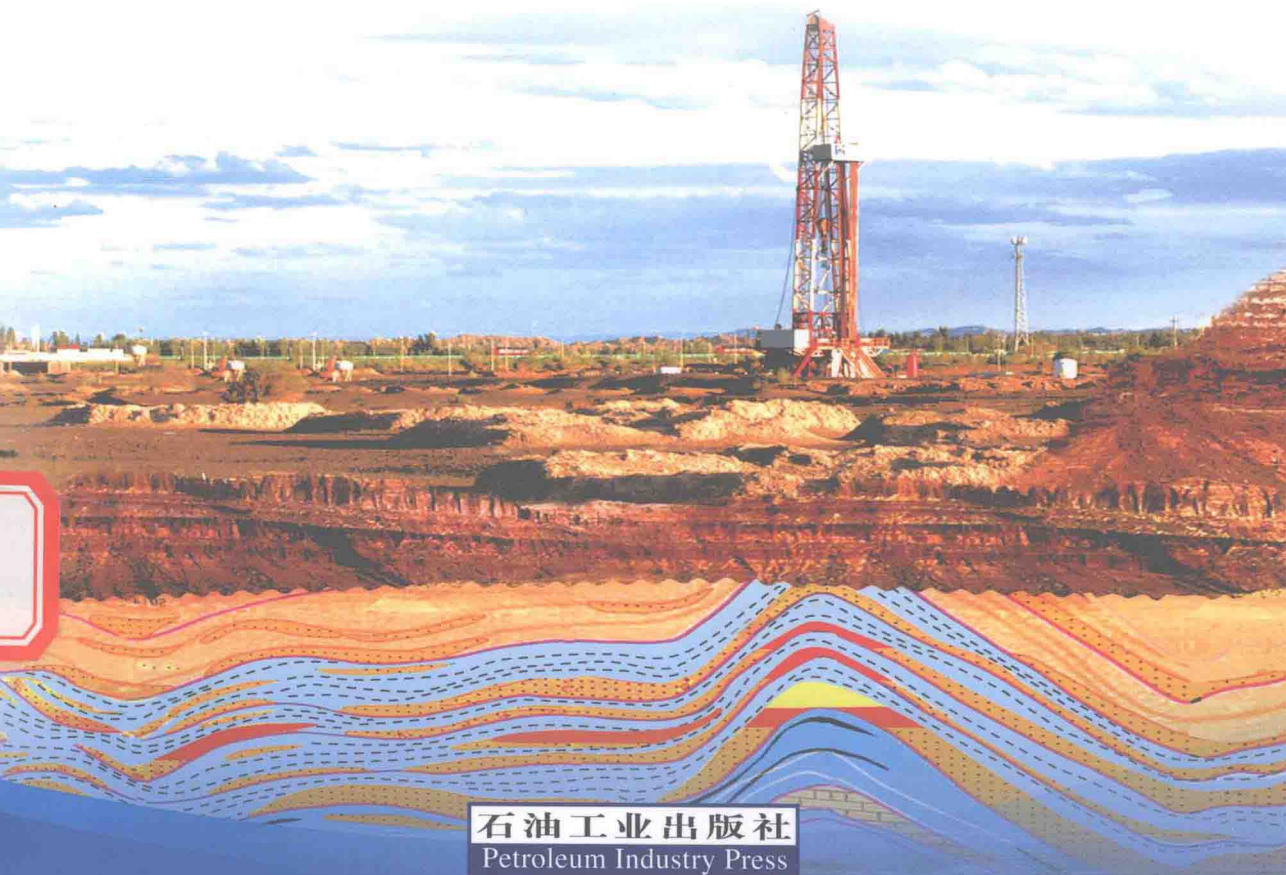
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

高等院校石油天然气类规划教材

# 石油天然气地质与勘探

(第二版)

蒋有录 查明 © 主编



石油工业出版社  
Petroleum Industry Press

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
高等院校石油天然气类规划教材

# 石油天然气地质与勘探

(第二版)

蒋有录 查明 主编

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书主要阐述石油和天然气在地壳中的生成、运移、聚集成藏的基本原理与分布规律,以及油气勘探的理论及技术方法、程序及任务。内容体系以油气成藏原理为核心,按照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,系统阐述油气成藏的静态要素(烃源岩、储集层、盖层)和油气生成、运移、聚集动态作用过程,重点阐述油气生成、运移、聚集成藏的基本原理,系统介绍油气藏类型、油气聚集单元、油气分布规律及主控因素,在此基础上阐述了油气勘探的理论及技术方法、程序和任务。

本书可作为高等学校资源勘查工程、地质工程、地质学、勘查技术与工程、地球物理学、地球化学等专业的教材,也可供石油工程等相关专业师生以及生产和科研单位的油气地质与勘探工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

石油天然气地质与勘探/蒋有录,查明主编.-2版.  
北京:石油工业出版社,2016.8

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-5183-1409-6

I. 石…

II. ①蒋…②查…

III. ①石油天然气地质-高等学校-教材

②油气勘探-高等学校-教材

IV. P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 180289 号

---

出版发行:石油工业出版社

(北京市朝阳区安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010)64523693

图书营销中心:(010)64523633 (010)64523731

经 销:全国新华书店

排 版:北京苏冀博达科技有限公司

印 刷:北京晨旭印刷厂

---

2016 年 8 月第 2 版 2016 年 8 月第 5 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:25

字数:640 千字

---

定价:45.00 元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

## 第二版前言

《石油天然气地质与勘探》第一版为普通高等教育“十五”国家级规划教材及高等院校石油天然气类规划教材,自2006年5月出版以来,受到中国石油大学(华东)和兄弟院校师生及相关科技人员的广泛好评,满足了油气地质类专业人才的培养需求。该教材先后印刷4次,总发行15000册,并先后获得了山东省高等学校优秀教材一等奖、中国石油高等教育优秀教材奖。

第一版教材迄今已出版整10年,期间油气地质学科理论与技术有了长足发展,尤其是非常规油气地质理论与勘探技术有了重大进展,需要将前沿理论成果及勘探实例充实到教材中,同时原教材部分内容需要修订和完善。为此,编者充分吸收油气地质与勘探方面的新进展并结合自己的科研成果,编写完成了《石油天然气地质与勘探》第二版。

第二版教材主要进行了如下修改:

(1)增强了非常规油气藏内容,尤其加强了致密油气藏、页岩油气藏的特征及形成条件等内容。增补了压力在有机质生烃过程中的作用、非常规储层、流体吸附和流体流动类型、油气运移地球化学研究方法、隐蔽油气藏勘探理论和成熟探区油气勘探等内容。

(2)在全面修订基础上,对以下内容作了重要修改:油气地质勘探趋势、温度与时间在有机质生烃过程中的作用、热解法评价烃源岩、油气输导体系、油气差异聚集原理、油气藏保存及次生油气藏形成模式、流体包裹体法确定成藏期、地层油气藏形成特点、含油气系统、油气资源分布特征、油气资源评价方法等。重新编写了主要含油气盆地石油地质特征、油气分布主控因素等内容。

(3)对油气勘探等部分章节进行了精简,删减了部分内容,如流体饱和度概念及内容、孔隙度和渗透率计算方法、油气在不同类型圈闭中聚集的模式、油气勘探理论进展、盆地模拟技术、我国油气勘探的前景领域、区域勘探中的盆地分析与油藏描述评价方法等。

本教材为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材和高等院校石油天然气类规划教材,由中国石油大学(华东)蒋有录教授和查明教授主编。教材的申请立项、编写大纲及各章节内容体系安排、编写组织工作由蒋有录负责。具体编写分工如下:前言、绪论、第五章和第六章由蒋有录编写;第一章由曲江秀编写;第二章由谭丽娟编写;第三章由刘华编写;第四章由张卫海编写;第七章由刘华、刘景东编写;第八章和第九章由查明编写。全书由蒋有录审查定稿。

中国地质大学(北京)张金川教授对本教材第五章第八节非常规油气藏的形成提出了宝贵意见,吕雪莹、赵凯、范婕、胡洪瑾等参加了本教材的资料收集整理及图件清绘工作,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,教材中会存在一些不当或错误之处,请读者批评指正。

编者  
2016年5月

## 第一版前言

油气藏的形成是发生在地质历史中的事件,我们今天要经济、有效地寻找到这些深埋地下的油气矿藏,需要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。那么地壳中的油气藏是如何形成及分布的?我们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、程序和任务,核心内容是油气藏原理。

本教材的内容体系遵循油气藏形成及油气勘探的“正演”顺序,即围绕油气藏的形成、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。教材主要内容分为九章,并建立了以下体系:首先从认识石油、天然气和油田水的基本特征入手;之后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;之后介绍油气聚集的最基本单元油气藏及其特征,以及油气田、油气聚集带、含油气盆地,油气在地壳中的分布规律及控制因素;在系统阐述了含油气盆地油气藏形成及分布规律的基础上,最后介绍油气勘探的方法、程序和任务。

石油天然气地质学是矿床学的一个分支,是在石油和天然气勘探及开采的大量实践中总结出来的一门新兴学科。20世纪中叶以来,国内外学者出版了一系列石油天然气地质学及勘探方面的教材及专著。本教材是在参考和综合了国内外代表性教科书基础上,同时补充了国内外油气地质及勘探方面的新进展和作者的科研成果编写而成的。主要参考的代表性教科书包括:张厚福等编(1999)的《石油地质学》、陈荣书主编(1994)的《石油及天然气地质学》、张一伟编(1981)的《油气田勘探》(内部)、胡朝元和张一伟等编著(1985)的《油气田勘探及实例分析》、丁贵明和张一伟等编著(1997)的《油气勘探工程》、A. I. 莱复生(1967)的《石油地质学》等。本教材将原来分属于《石油地质学》和《油气田勘探》两本教材的内容统一起来,即将油气地质学原理和油气勘探统一到《石油天然气地质与勘探》一本教材中。

本教材为普通高等教育“十五”国家级规划教材和高等学校石油天然气类规划教材,由中国石油大学(华东)蒋有录教授和查明教授主编。教材的申请立项、编写大纲及各章节内容体系安排、编写组织工作由蒋有录负责。具体编写分工如下:前言、绪论、第五章和第六章由蒋有录编写;第一章由谭丽娟编写;第二章由任拥军编写;第三章由张立强编写;第四章由张卫海编写;第七章由王纪祥编写;第八章和第九章由查明编写。全书由蒋有录审查定稿。

承蒙我国著名石油地质学家、中国石油大学张一伟教授为本书作序,他对我们编者给予了鼓励和鞭策,在此表示衷心的感谢!刘华、张小莉、鲁雪松、曲江秀、陈涛、蔡东梅等参加了本教材的资料收集整理及图件清绘和文字校对工作,在此表示感谢。

本教材采用了新的体系,尽管作了很多努力,但由于编者水平有限,书中错误在所难免,敬请专家和读者批评指正。

编者  
2005年12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 人类利用石油和天然气的历史	2
第三节 近现代油气地质与勘探发展简况	4
第四节 油气地质与勘探的任务及主要内容	11
第一章 石油、天然气及油田水的基本特征	12
第一节 石油	12
第二节 天然气	28
第三节 油田水	32
第四节 油气中的稳定同位素	36
思考题	37
第二章 石油和天然气的成因	39
第一节 油气成因概述	39
第二节 生成油气的原始物质	44
第三节 有机质演化生烃的影响因素与模式	56
第四节 天然气的成因类型及特征	66
第五节 烃源岩评价	76
第六节 油源对比	86
思考题	91
第三章 储集层和盖层	92
第一节 储集层概述	92
第二节 碎屑岩储集层	98
第三节 碳酸盐岩储集层	110
第四节 特殊岩类储集层	120
第五节 盖层的类型及其封盖机制	129
思考题	137
第四章 石油与天然气运移	138
第一节 油气运移概述	138
第二节 油气初次运移	142
第三节 油气二次运移	156
第四节 油气运移研究方法	173
思考题	183
第五章 油气聚集与油气藏的形成	184
第一节 圈闭与油气藏的概念及度量	184
第二节 油气聚集原理	189

第三节	油气藏的形成与保存条件	195
第四节	油气藏的破坏与再形成	205
第五节	油气藏形成时期的确定	210
第六节	凝析气藏的形成原理	216
第七节	天然气藏与油藏形成及保存条件的差异	220
第八节	非常规油气藏的形成	223
第九节	三场与油气藏形成的关系	237
	思考题	247
<b>第六章</b>	<b>油气藏的类型及特征</b>	<b>248</b>
第一节	概述	248
第二节	构造油气藏	252
第三节	地层油气藏	270
第四节	岩性油气藏	279
第五节	水动力油气藏	287
第六节	复合油气藏	289
	思考题	291
<b>第七章</b>	<b>油气聚集单元与分布规律</b>	<b>292</b>
第一节	油气田	292
第二节	油气聚集带及含油气区	297
第三节	含油气盆地	300
第四节	含油气系统	314
第五节	我国及世界油气资源分布特点	319
第六节	油气分布的控制因素	324
	思考题	329
<b>第八章</b>	<b>油气勘探理论与技术方法</b>	<b>330</b>
第一节	油气勘探理论	330
第二节	油气勘探技术	338
第三节	油气资源评价	346
	思考题	353
<b>第九章</b>	<b>油气勘探程序与任务</b>	<b>354</b>
第一节	油气勘探程序	354
第二节	区域勘探	359
第三节	圈闭预探	362
第四节	油气藏评价勘探	374
第五节	滚动勘探开发	378
	思考题	386
	参考文献	387

# 绪 论

## 第一节 石油和天然气在现代社会中的地位

能源是现代工业生命的基础,并广泛地影响着经济。石油和天然气作为一种重要的能源和战略资源,在现代社会中越来越显示其重要性。石油和天然气已渗透到人类生活的方方面面,无论是油气生产国还是非生产国,石油和天然气在各国经济发展中都占有非常重要的地位。近几十年来,世界油气价格的大幅上涨,使石油和天然气这种战略资源更为各国所重视。许多产油地区的国际争端,尤其是像中东这样的富油气地区,无论是以何种理由发动战争或引起重大纠纷,其真实意图都与争夺巨大的油气资源有关。尽管近年来油气价格波动较大,但未来几十年石油和天然气作为第一能源的地位很难改变,各国仍对油气资源十分重视。

石油和天然气在我国国民经济中占有举足轻重的地位。从建国初期到大庆油田投入开发前的十几年时间,我国一直需要进口石油。随着大庆油田的开发,我国自产石油除自足外还能出口赚取外汇。20世纪80年代中期石油创汇曾是我国外汇的主要来源,年创汇高峰的1985年,石油创汇占全国出口创汇总额的26.19%(石宝珩,1999)。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,2015年进口石油已占到我国石油消耗量的近60%,天然气对外依存度达30%,而且这种短缺情况还有继续加大的趋势。因此,我国的石油安全问题已提到重要议事日程。国家政府十分重视石油和天然气这一战略问题,制定了各种措施促进石油和天然气工业的发展。

石油和天然气是优质的能源。石油是现代工业的血液,从石油中提炼的汽油、煤油、柴油等是优质动力燃料。石油和天然气发热量大、燃烧完全、运输方便、空气污染小等优点,使其在世界能源消费结构中所占的比重越来越大。据统计,从1950年到2014年,世界能源消费结构发生了很大变化,煤炭、石油、天然气、水电和核能所占能源消费的比重分别从1950年的61.2%、26.9%、10.1%和1.8%变化为2014年的30%、32.6%、23.7%和11.2%,煤炭所占比重大大降低,而石油和天然气所占比重显著增大(表1)。不同国家或地区能源构成不同,经济越发达地区,石油和天然气所占能源消费的比重越高,如2014年北美地区的石油占能源消费的36.3%,天然气占30.7%,而煤炭只占17%左右。而相比之下,我国的能源结构仍然以煤炭为主,近十几年来约占能源消费的三分之二左右,油气约占四分之一。近十几年来,我国北方地区经常遭受雾霾困扰,这与我国的能源构成及经济总量不断提升有很大关系。因此降低污染较大的煤炭消耗量,提高石油和天然气在一次能源中的比重,尤其是天然气洁净能源的比重,是改善我国空气质量、实现可持续性发展的重要举措。

随着我国能源结构的调整,煤炭在能源构成中的比重继续下降,全球将很快形成煤炭、石油、天然气、新能源四分天下的局面,多家机构(IEA,2013;OPEC,2013;BP,2014)预测,未来20~30年,石油占能源构成比重将显著降低,新能源比重将显著上升,而煤炭比重略下降,天然



表 1 世界及我国能源消费结构变化

单位: %

年份	煤炭	石油	天然气	水电和核能
1950	61.2	26.9	10.1	1.8
1960	49.9	33.0	14.9	2.1
1970	34.9	42.9	19.8	2.4
1980	30.6	44.1	21.8	3.5
1990	27.3	38.7	22.0	11.9
2000	25.2	38.3	23.7	12.9
2010	29.6	33.6	23.8	11.7
2014	30.0	32.6	23.7	11.2
2000(中国)	67.8	23.2	2.4	6.6
2010(中国)	70.5	17.6	4.0	7.4
2014(中国)	66.0	17.5	5.6	9.1

注:数据来自 BP Statistical Review of World Energy, 2015; 中国数据来自国家统计局。

气比重略上升,其中,石油占 26%~28%,天然气占 23%~26%,煤炭 25%~28%,新能源占 19%~24%,总体呈现四分天下的局面。可见,油气在能源结构中的比重仍将超过 50%,石油和天然气无疑仍是世界上最重要的能源,新能源在未来 20~30 年内还难以成为第一能源。

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。作为化工原料,石油和天然气更体现出它们的价值。目前已从石油中提炼出三千多种产品,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。

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,未来几十年天然气有可能将取代石油成为第一能源。

## 第二节 人类利用石油和天然气的历史

石油和天然气是人类为了各种不同目的而最早利用的矿产之一。早在人类开始利用金属和煤以前,人类就已开始利用石油。世界上关于石油利用和开采的记载最早见于公元前 40 年左右用楔形文字写的美索不达米亚藏书中以及埃及金字塔中用象形文字写的书中(H.Beckmann, 1976)。

我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。最早的石油记载见于班固著《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,可见早在近两千年前我国陕北就发现了能够燃烧的石油。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(张厚福等,1999)。

科学术语“石油”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。”“石油……生于水际沙石,与泉水相杂惘惘而出。”他在描述了陕北富县、延安一带石油的性质和产状后,进一步推论了石油的利用远景:“此物后必大行于世,……盖石油至多,生于地中无穷,不若松木有时而竭。”

在人类历史上,石油在照明、医药、宗教、建筑、军事等方面都起着重要作用。在不同的时期,石油具有不同的用途。考古学家在挖掘出的古老城镇、教堂和坟墓中,发现了大量当时人们借助于石油和沥青做成的很多日常生活用品,如从埃及坟墓中曾发掘出一些用富含多硫化物的石油保存下来的木乃伊。在电灯发明之前,人们一直用中质和较轻质的石油来照明。几乎在所有的国家都可以看到各种不同形式的小型陶制油灯,而且常常用石油作为燃料。直到现在,在那些尚未通电的偏僻乡村,仍在使用类似的煤油灯(H.Beckmann,1976)。

某些石油含有防腐的硫化物,也就是含有杀菌的硫化物。甚至在现代药店中都在出售许多由多硫化物制成的药,它们可以医治皮肤病及其他疾病。至今仍有很多的药和药水是用石油制造的。石油在医药方面的应用,目前首先是药品的包装器材,而不是药品,大部分装药瓶和管都是由一些用石油或天然气生产的塑料物质制成的。现代化石油工业的分支之一是从石油或天然气生产食品,尽管还存在一些困难,但将来一定会利用石油生产出大量食品,尤其是蛋白质。

在历史上,石油不仅用于润滑、照明、燃烧和医药,而且很早就用于军事上,石油与战争有着密切关系。我国《元和郡县志》记载,公元576年,酒泉人民用油烧毁突厥人攻城的武器,保全了酒泉城。北宋神宗六年(公元1073年),在京都汴梁军器监设有专门的“猛火油作”,加工石油制作兵器。世界上最早的一批燃烧弹是由石油、硫磺和类似物质组成的。这种装在陶器瓶或玻璃瓶中的混合物用手掷出去,当碰着水或湿气时就会突然燃烧起来,其最重要的用途是攻击船只和城镇。起先,这些燃烧弹是手投掷的,后来,这类燃烧弹改为用抛弹机和投射器来发射,这种武器就成了杀伤力很大的武器。第一次世界大战中,士兵们使用了一种称为火焰喷射器的武器,它是由装有石油的钢瓶和另外一个含有压缩氧气的钢瓶组成。在第二次世界大战期间,曾有成千上万的平民被装有苯和磷的燃烧弹杀害。军事工业在这方面的新“成就”是胶化汽油弹,其中除石油和磷之外还含有金属粉末,这是一种真正的杀伤力大的武器。从另一方面来说,如果没有石油供给汽车、卡车、坦克和飞机,就不可能进行现代化的战争,所以石油与军事有密切关系。

石油和天然气曾与中东国家拜火教徒的宗教信仰之间具有密切的联系,拜火教徒的名字就是因为其教堂中具有永不熄灭的火而得来的。这些“永恒之火”实际上就是天然气苗。拜火教的祭司们必须使火总是在燃烧着,他们常常用石油或天然气来达到这个目的。一些教堂用铅制导管从几百米外的油苗处引来天然气点火。由此看来,几千年以前,最早用下套管和井口装置的方法来完成气井并建造天然气管的应该是拜火教的祭司们(H.Beckmann,1976)。

我国四川劳动人民最早利用天然气煮盐在世界上都是闻名的。晋朝常璩(音渠)在《华阳国志》中记载了2200年前(公元前221—公元前210年)的秦始皇时代,四川临邛县郡(即今邛崃市)劳动人民钻井开采天然气煮盐的情景:“有火井,夜时,光映上照。民欲其火,先以家火投之,顷许如雷声,火焰出,通耀数十里,以竹筒盛其光藏之,可拽行终不灭也”。有时一口火井可烧盐锅700口。天然气煮盐促进了我国钻井技术的迅速发展。公元前256—公元前251年,秦朝李冰为蜀守时就发明了顿钻,并在四川广都成功地钻成了第一口采盐井。至公元前221—公元前210年,四川邛崃出现了用顿钻钻凿的天然气井(张厚福等,1999)。

近现代,石油和天然气主要用于工业,由石油和天然气提炼或作为原料制成的各种产品转化为工业和民用产品。19世纪后半叶,人们从石油中提炼煤油点灯照明,称为石油工业发展缓慢的“煤油时代”。20世纪初,内燃机的广泛使用促进了石油工业蓬勃发展,从1900年至1940年,石油主要用于提炼汽油,可称为“汽油时代”。1940年后,化学工业的发展需要利用石

油产品作为基础原料,提炼出的 3000 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世界各国的动力燃料,在世界能源消费结构中已占 60%左右,所以现代石油工业已发展到“燃料和化工原料时期”。

### 第三节 近现代油气地质与勘探发展简况

人类发现和利用石油与天然气的历史悠久,但真正有意识较大规模地寻找和开发油气,则只有不到两百年的历史。到 19 世纪中叶,近代石油工业诞生,标志着人类大规模勘探和开采石油与天然气的开始。人类从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,指导这一勘探活动的理论——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与油气地质理论发展简况

##### (一) 建国前我国油气勘探简况

我国在世界上是最早开发气田的国家,四川自流井气田的开采约有两千年历史。《自流井记》关于“阴火潜燃于炎汉”的记载表明,早在汉朝就已在自流井发现了天然气。据《富顺县志》记载,晋太康元年(公元 280 年)彝族人梅泽在江阳县(今富顺县)自流井发现石缝中流出泉水,“饮之而咸,遂凿石三百尺,咸泉涌出,煎之成盐”。

从汉朝末年开,在自流井大规模开采天然气煮盐以来,共钻井数万口,采出了几百亿立方米天然气和一些石油。宋末元初(13 世纪),已大规模开采自流井的浅层天然气。1840 年钻成磨子井,在 1200 米深处钻达三叠系嘉陵江统石灰岩第三组深部主气层,强烈井喷,火光冲天,号称“火井王”,估计日产气量超过 40 万立方米。“经二十余年犹旺也。”这样长的气田开采历史在世界上也是罕见的(张厚福等,1999)。

近代以前,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开始以后至新中国诞生的一百年时间,与其他民族工业一样,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家以唯海相生油论对中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,已有近 140 年的历史。借助于国外技术力量,1878 年清政府在台湾省苗栗钻了中国第一口油井,1907 年在陕西延长钻了第一口油井(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 年在陕北钻井 7 口,均未获工业油流。1922 年 2 月,美国地质家 E. Blackwelder 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,中国决不会生产大量石油。”从此,“中国贫油论”在世界传播(张文昭,1999)。

1937 年抗日战争爆发,石油来源被日本封锁,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

日产油 10t 的工业油流,发现了老君庙油田。

20 世纪 40 年代,中国地质学家李四光、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,指出中国石油勘探前景广阔。在一系列勘探实践的基础上,中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)发表了《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陆相生油理论,为我国陆相盆地油气田勘探提供了坚实的理论基础。

但在新中国成立之前,我国在石油勘探和开发方面基础极其薄弱。到 1949 年,除台湾外,全国只有玉门老君庙、陕北延长和新疆独山子 3 个小油田,以及四川自流井、圣灯山、石油沟 3 个小气田;8 个地质调查队,大小钻机只有 7 台;石油职工 1.1 万人,各类技术人员仅有 623 人,地质技术人员只有 28 人,油田生产单位只有玉门、延长两个,1949 年产原油  $12 \times 10^4$  t,最高年产石油  $32 \times 10^4$  t(1943 年)。从 1904 年到 1949 年,累计生产原油不超过  $310 \times 10^4$  t,而同期进口石油  $2800 \times 10^4$  t(张厚福等,1999)。

## (二)新中国油气勘探与油气地质理论发展简况

我国石油勘探开发工业在新中国建立之后获得了快速发展。经过半个多世纪几代石油人的艰苦奋斗,石油工业创造了辉煌业绩,成为支撑我国国民经济的支柱产业。回顾新中国 60 多年的油气勘探历程,我国油气勘探的历史可分为初期发展阶段、快速发展阶段和稳定发展阶段 3 个大的发展时期。

### 1. 初期发展阶段

建国初至 1959 年发现大庆油田,这 10 年是我国石油勘探的初期发展时期。这一时期的勘探重点在中西部地区的四川、鄂尔多斯、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。但还没有根本改变进口石油的局面。

### 2. 快速发展阶段

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,实现了中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,由此中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唯海相生油论,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。这极大地解放了中国石油地质与勘探工作者的思想,开创了在陆相盆地寻找大油田的新篇章。

1961 年在渤海湾盆地东营凹陷的华 8 井喷油,1962 年在营 2 井获高产油流,发现和证实了胜利油田。1964 年勘探主力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。1975 年华北任丘古潜山油田的发现,打开了石油勘探的新领域。在松辽盆地、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蓬勃展开,相继在四川、江汉、鄂尔多斯、苏北等盆地进行了较大规模的油气勘探,发现了一大批油气田。

这一时期,松辽盆地和渤海湾盆地的重大发现和全面开发使我国石油工业进入了前所未

有的高速发展时期,也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  $1 \times 10^8 \text{t}$ (图1),使得中国跃居世界产油大国的行列。

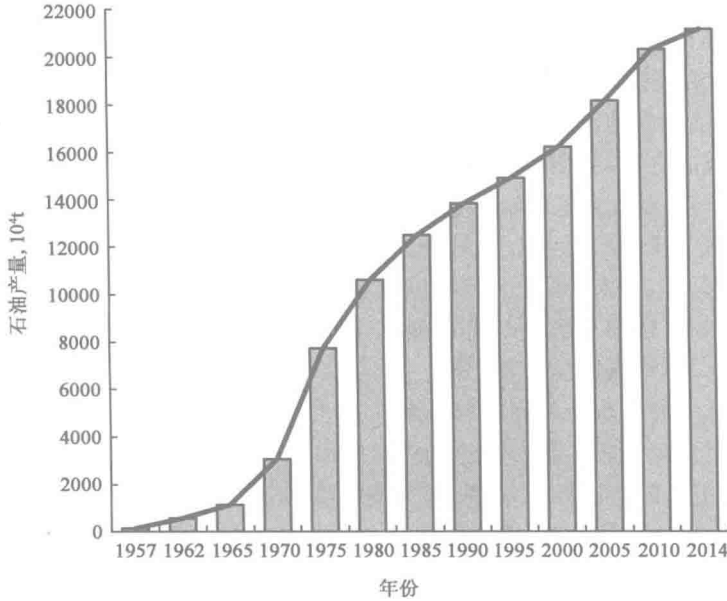


图1 我国历年石油产量变化直方图

### 3. 稳定发展阶段

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30年的艰苦努力,发现了一大批大中型油气田,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。

这一时期天然气勘探获得了重大进展,相继发现了莺琼盆地崖13-1、鄂尔多斯盆地靖边和苏里格、塔里木盆地克拉2、四川盆地普光等一大批大气田,探明天然气储量及天然气产量快速增长。随着钻井技术的进步和天然气成藏理论的发展,我国天然气勘探,尤其是中西部盆地天然气勘探进入一个持续发展的新阶段。

自20世纪80年代以来,我国海洋石油勘探获得了前所未有的快速发展,储量、产量迅速增长,1996年年产石油超过  $1500 \times 10^4 \text{t}$ ,2003年达  $3336 \times 10^4 \text{t}$ ,2015年达  $4773 \times 10^4 \text{t}$ 。目前海洋已成为保持我国石油产量增长的主要领域。与此同时,我国积极开拓海外石油勘探开发市场,在南美、中亚、非洲、中东等地区已取得重要成果。

在油气地质理论方面,半个多世纪的勘探实践形成了具有中国特色的陆相盆地石油地质理论,主要为三个方面: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。根据陆相盆地油气生成、运聚特点及勘探实践,建立了以生油凹陷控制油气分布、油气近距离运移聚集为要点的“源控论”,成为指导我国陆相盆地油气勘探的重要理论。以渤海湾盆地断块油气田成藏条件和分布规律为主要内容的复式油气聚集(区)带理论的

建立,丰富了中国石油地质理论,并有效地指导了中国东部断陷盆地的石油勘探。中国陆相盆地油气地质与勘探理论及实践丰富了世界油气地质与勘探的理论宝库。

## 二、世界近现代油气勘探与油气地质理论发展简况

近现代油气勘探开始于 19 世纪中叶。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后,标志着近代石油勘探开发工业的开始。由于找油的需要,油气地质理论伴随着找油实践而诞生并发展。

一般认为,1859 年 Drake 在宾夕法尼亚州根据油气苗所钻的一口油井标志着近代油气勘探开发工业的开始。尽管这口井钻井深度只有 21.69m,产油量每天只有 69.5bbl(1bbl=0.158987m<sup>3</sup>),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。由于发现一个高产油田,很快可以发财致富,所以在石油工业初期发展过程中充满着投机与竞争,资本家争先恐后滥采石油,往往一个油田被几家公司分采,不保护油层压力,致使能量过早枯竭,油田遭到破坏。

到 19 世纪末,世界上只有美、俄等十几个国家产油,石油产量迅速增加,1900 年世界总产油量达到  $2043 \times 10^4 \text{t}$ (表 2)。当时找油的主要依据是出露于地面的油气显示,这种油气显示被称为油气苗,是地下的油气矿藏沿断裂或裂缝运移到地表来的,因此在具有地面油气苗的地方钻井,就可以钻到地下的油气矿藏。随着不断的油气勘探实践,地质家们发现油苗沿背斜分布、油气位于地下背斜构造的高部位等现象,1861 年加拿大学者斯泰利·亨特(T.S.Hunt)初步提出了背斜理论,1885 年美国学者怀特(L. C. White)在《科学》上发表论文,系统阐述了“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,取得了油气勘探的很大成功。

表 2 世界历年石油总产量

年 份	产量,10 <sup>4</sup> t	年 份	产量,10 <sup>4</sup> t
1860	7	1940	29450
1865	37	1945	35540
1870	80	1950	53845
1875	130	1955	79701
1880	410	1960	108142
1885	500	1965	155051
1890	1050	1970	232412
1895	1420	1975	266155
1900	2043	1980	299586
1905	2946	1985	280960
1910	4490	1990	316410
1915	5920	1995	325600
1920	9440	2000	358960
1925	14640	2005	394150
1930	19320	2010	397540
1935	22680	2014	422060

进入 20 世纪后,背斜学说已成为油气勘探公司普遍接受的理论,地质家们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)成立和AAPG会刊出版,标志着石油地质学的诞生,石油地质家从此正式走上油气勘探的舞台。

20世纪20—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,并在勘探实践中发现了地层等圈闭类型,使找油工作可在地面没有任何显示的地区进行,大大拓展了人们找油的领域,油气产量增加很快,世界产油量在1930年接近 $2 \times 10^8$ 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,1930年发现了东得克萨斯大型地层油气藏,突破了背斜聚油理论,使人们认识到,油气聚集于背斜、地层等圈闭中,除了背斜这种最简单、最常见的圈闭外,还有其他类型的圈闭也可聚油,从而形成了找油的圈闭理论。McColough(1934)提出了圈闭学说,聚油圈闭需要三个条件,即储集层、盖层和遮挡条件,具有统一的油气水界面,该理论指导了20世纪20—50年代的油气勘探。

在第二次世界大战前后发现了一大批油气田和重要的含油气区,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—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 $30 \times 10^8$ t,之后缓慢增长,2000年达 $35.9 \times 10^8$ t,2010年达 $39.8 \times 10^8$ t(表2)。

近30多年来,各种先进技术的应用,尤其是地震勘探技术的迅速发展,使人们对地下地质体的刻画和预测更加准确,精度越来越高。在勘探程度较低的地区获得了许多重要突破,在一些勘探程度较高的地区,石油勘探向精细化发展,找到了一大批用常规方法难以发现的隐蔽油气藏。

海上油气勘探开展较晚,真正离岸在浅水区从沉没驳船上的第一批海上钻井,开始于1930年美国路易斯安那州滨外、委内瑞拉马拉开波湖和苏联里海巴库附近,之后许多国家都相继重视开展海上油气勘探,钻探技术设备的进步大大促进了海上油气勘探的迅速发展。世界海洋石油地质储量巨大,约在 $2000 \times 10^8$ t以上。1995年海洋石油产量占世界总产量的30%,天然气产量占世界总产量的21%。到2013年,海上石油产量约占世界总产量的36%,天然气产量占世界总产量的29%。

伴随着大量油气勘探实践,油气地质理论不断发展。这些理论反映在不同时期出版的代表性论著中。除了背斜理论和圈闭理论外,自20世纪50年代以来,建立了一套含油气盆地油气生成、运移、聚集、保存及分布的油气地质理论,出现了盆地找油论、源控论、陆相成藏、复式油气聚集、干酪根热降解生烃等理论,对油气勘探产生了重要影响,提高了勘探成功率。如五六十年代出版了一批经典的石油地质学专著,其中尤以莱复生(A. I. Levorsen)的《石油地质学》(1956)最为重要,成为当代“石油地质学”的经典论著,为培养大批油气地质勘探人才发挥了重要作用。60年代开始发展起来的源控论,使油气勘探进入一个新阶段。七八十年代以有机地球化学方法建立的干酪根热降解生烃理论对现代油气勘探起了重要指导作用,经典的著作包括蒂索(B. P. Tissot)和威尔特(D. H. Welte)(1978, 1982)的《石油形成与分布》、Hunt(1979)的《石油地球化学和石油地质学》、Chapman(1982)的《石油地质学》、Hobson(1981)的《石油地质学导论》等。八九十年代,以隐蔽油气藏、层序地层学、含油气系统等为代表的油气勘探理论及方法,有效地指导了油气勘探。与此同时,由于石油与天然气的差异,随着天然气勘探的不断发展,天然气地质学应运而生,建立了天然气生成、运聚理论,出版了一批天然气地质学专著,如戴金星(1996)的《中国天然气地质学》。近十几年来,随着以页岩气为代表的非常规油气勘探的发展,提出了连续型油气聚集等理论,出版了一大批非常规油气勘探方面的论著,如J. B. Curtis(2002)的《非常规油气系统》、邹才能(2014)的《非常规油气地质学》等。

世界经过一百多年的油气勘探,已逐渐形成了日臻完善的油气地质理论,建立了系统的油

气生成、运移、聚集及分布理论。油气勘探的实践不断提出新的问题,为油气地质的发展提供了依据;反过来,油气地质理论又对油气勘探起指导作用。因此,油气勘探实践—认识—再实践—再认识,使油气地质理论不断发展完善,油气勘探技术手段不断提高,人类对地下油气藏的认识和勘探逐渐科学化。

### 三、油气地质勘探发展趋势

截至 2014 年,全球最终常规可采油气资源量分别为  $4878 \times 10^8 \text{t}$  和  $471 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,可供人类使用 100 多年。据世界油气杂志统计,2004 年底世界石油和天然气剩余储量分别为  $1750 \times 10^8 \text{t}$  和  $171 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,而 2015 年世界石油和天然气剩余探明可采储量已分别达  $2269 \times 10^8 \text{t}$  和  $197 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。十年间,世界石油和天然气油气剩余储量分别增加了  $519 \times 10^8 \text{t}$  和  $26 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。资料表明,世界石油发现量的峰年在 20 世纪 50 年代末期到 70 年代末,平均可采储量在  $50 \times 10^8 \text{t/a}$  以上,80 年代平均发现率为  $20 \times 10^8 \text{t/a}$ (丁贵明,1997)。但近 20 年来,世界剩余油气储量有了大幅度增加,产油气量增加较快。据统计,2014 年,世界共生产石油  $42.2 \times 10^8 \text{t}$ ,生产天然气  $346 \times 10^{12} \text{m}^3$ ;我国生产石油  $2.1 \times 10^8 \text{t}$ ,居世界第 4 位,生产天然气  $1345 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,居世界第 6 位(表 3、表 4)。

表 3 2014 年世界主要产油国家石油产量

单位:  $10^4 \text{t}$

位次	国家	产量	位次	国家	产量
1	沙特阿拉伯	54340	11	墨西哥	13710
2	俄罗斯	53410	12	巴西	12210
3	美国	51990	13	尼日利亚	11350
4	中国	21140	14	挪威	8560
5	加拿大	20980	15	安哥拉	8300
6	伊朗	16920	16	哈萨克斯坦	8080
7	阿拉伯联合酋长国	16730	17	阿尔及利亚	6600
8	伊拉克	16030	18	印度尼西亚	4120
9	科威特	15080	19	英国	3970
10	委内瑞拉	13950	20	利比亚	2330
世界总计					422060

资料来源:BP Statistical Review of World Energy,2015。

表 4 2014 年世界主要产油国家天然气产量

单位:  $10^8 \text{m}^3$

位次	国家	产量	位次	国家	产量
1	美国	7283	11	土库曼斯坦	693
2	俄罗斯	5787	12	马来西亚	664
3	卡塔尔	1772	13	墨西哥	581
4	伊朗	1726	14	阿拉伯联合酋长国	578
5	加拿大	1620	15	乌兹别克斯坦	573
6	中国	1345	16	荷兰	558
7	挪威	1088	17	澳大利亚	553
8	沙特阿拉伯	1082	18	英国	366
9	阿尔及利亚	833	19	阿根廷	354
10	印度尼西亚	734	20	印度	317
世界总计					34606

资料来源:BP Statistical Review of World Energy,2015。



从国外油气勘探形势来看,近 20 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,新增油气储量一部分来自老油气区的深化勘探。剩余常规油气资源多分布在海洋、沙漠、极地地区以及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 20 年来,我国油气勘探难度越来越大,面临着严峻挑战。在勘探程度较高的地区,新发现油气田的规模越来越小。未发现的剩余资源在地面条件恶劣(如沙漠、戈壁、黄土塬和高原等)的地区约占 49%,其余剩余资源量中的低渗透和重稠油还有相当大的比例。地面条件较好的常规油剩余资源量,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,但由于作为第一能源的地位短时期内不会改变,近十几年油气价格持续在高位运行,大大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海洋深水、陆上深层、非常规油气藏、成熟探区隐蔽油气藏等。

#### (一)海洋深水及新区油气勘探

新区始终是油气勘探的活跃领域,纵观世界油气勘探历史,大型—特大型油气田往往是在新区或新层系发现的。陆上新区包括沙漠、沼泽等一些地表条件较差的地区。海洋油气勘探,尤其是深水勘探,主要也是新区勘探。随着海洋地球物理勘探和海上钻井技术的发展,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,目前可在水深 3000m 的海洋钻探石油,从而为人类开辟了更加广阔的油气勘探领域。因此,海洋油气勘探方兴未艾,将越来越显示其重要性。近 10 年来,在巴西等地区深水勘探取得了重大突破,发现了多个大型—特大型深水油气田。

#### (二)陆上深层油气勘探

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,我国四川盆地、塔里木盆地的深层油气勘探获得了重大突破,发现了一大批大型气田,如四川普光气田、塔里木塔河油田等,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。

#### (三)非常规油气勘探

非常规油气包括非常规石油和非常规天然气,前者主要包括致密油、重(稠)油、页岩油、油砂油、油页岩油等,后者主要包括致密砂岩气、煤层气、页岩气、天然气水合物等。21 世纪以来,随着世界油气地质理论的发展与勘探技术的进步,全球非常规油气勘探开发取得一系列重大突破,特别是美国的致密油气、页岩气、煤层气,加拿大油砂,发展非常迅速,非常规油气资源逐渐成为全球油气储量、产量增长的重点领域和研究热点。近年来,我国鄂尔多斯盆地、四川盆地致密油气、页岩气勘探获得了重大发现,未来非常规油气勘探将成为陆上油气勘探的重要领域。

#### (四)成熟探区隐蔽油气藏勘探

在一些勘探程度较高的地区(成熟探区),背斜和断层等较大型油气藏被发现之后,较难发现的岩性、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程度地区油气勘探的主要目标。同时随着三维地震技术的进步,大大提高了勘探家们对地下地质情况的认识,使老区勘探焕发了勃勃生机,如在我国渤海湾盆地东营、沾化、饶阳等富油凹陷的深化勘探