



中国海洋大学教材建设基金项目资助  
高等院校教学用书

# 石油地质学

## PETROLEUM GEOLOGY

张金亮 常象春 主编

Edited by Zhang jinliang and Chang Xiangchun

石油工业出版社  
Petroleum Industry Press

中国海洋大学教材建设基金项目资助 高等院校教学用书

# 石油地质学

张金亮 常象春 主编

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书从石油天然气的基本特征入手,重点阐述油气藏形成的生、储、盖等三大静态要素和运、聚、保等三大动态要素,突出了油气成因类型、形成机制、成藏规律、分布特征,加强了对油气储层特征的研究,最后介绍了国内外相关研究的理论进展,详细剖析油气成藏机理与特点、油气成藏地质理论与研究方法,力求从理论与实践结合的角度促进对知识的掌握。

本书可作为高等院校矿产普查与勘探、地球探测与信息技术、地质工程、地球信息科学与技术等专业的教材,也可供生产和科研单位的石油地质工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

石油地质学/张金亮,常象春主编.

北京:石油工业出版社,2004.8

中国海洋大学教材建设基金项目资助高等院校教学用书

ISBN 7-5021-4756-X

I. 石…

II. ①张…②常…

III. 石油天然气地质-高等学校-教学参考资料

IV. P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第082125号

### 石油地质学

张金亮 常象春 主编

---

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

总 机:(010)64262233

发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:河北天普润印刷厂印刷

---

2004年8月第1版 2004年8月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:17

字数:440千字 印数:1—2000册

---

ISBN 7-5021-4756-X/TE·3323(课)

定价:26.00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

## 序

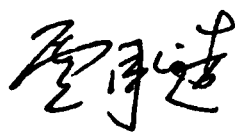
我国是世界上最早发现、开采和利用石油天然气的国家之一。石油天然气是现代经济和现代社会生存与发展的重要基础。经济的飞速发展,使得我国对油气的需求迅速增加。从1993年开始我国已成为一个石油净进口国,2003年中国消费了2.6亿吨石油,成为仅次于美国的第二大石油消费国,今后石油需求将继续攀升,经济发展及国家安全战略的需求对我国石油工业提出了巨大挑战。

石油地质学的发展可追溯到1885年I. G. White发表的“The Geology of Nature Gas”,由此建立了以沿背斜褶皱带分布油气藏的背斜说或重力说。1917年发现委内瑞拉马拉开波湖玻利瓦尔油区的许多巨大地层圈闭油气藏、1930年发现美国东得克萨斯大油田地层圈闭油气藏之后,又建立了“非背斜圈闭理论”。更值得我们关注的是,1967年由A. I. Levorsen等人系统地提出了“石油地质学理论”,为世界油气勘探的大发展奠定了良好的基础。其后,Tissot和Welte (1978), Hunt (1979)和Durand (1980)等相继提出了沉积有机质转化为干酪根的成烃途径,形成了干酪根降解成油理论。Cordell (1977)、Roberts (1980)和Chapman (1982)提出了油气在圈闭中聚集的渗滤作用、排替作用机理,明确了成藏过程中油气的二次运移和聚集机制。我国老一辈地质学家李四光、黄汲清、谢家荣、孙健初和潘钟祥等对创建我国近代石油地质学均做出了贡献。我国石油地质学家们经过大量勘探实践,形成了以“源控论”为核心的陆相生油理论,并在中国含油气盆地分析、复式油气聚集带油气分布、古潜山油气成藏、煤成烃和低熟油气理论、前陆盆地油气形成分布、海相油气生成等方面取得了重大进展。国内外学者在科研实践中不断深化认识,提出了许多新的、前沿性的认识,同时随着油气勘探实践,复杂的地质条件、地质过程又会提出许多新的问题,急需先进的地质理论和技术武装地质人员,以寻找更多的油气储量和提高采收率。

由中国海洋大学博士生导师张金亮教授和山东科技大学常象春博士主编完成的《石油地质学》教材,针对石油工业对地质人才的需求,结合非石油高等院校中专业课程的设置,包含了诸如石油天然气地球化学、储层沉积学、油气成藏要素的评价方法及指标、油气成藏的动力学机制等知识点。强调自然界油气生成到油气矿藏形成的客观发展过程,从油气生成到储集空间、封堵体系,从运移到聚集,从保存成藏到次生改造,教材在保留传统理论中的精髓内容的同时,融合了大量重要的新兴理论,并配以科研实例资料,形成一个完整的石油地质学知识体系结构。

该教材可以作为非石油高校本科生和研究生的教材,也可供广大石油地质工作者参考使用。

中国科学院院士



2004年7月10日

# 前 言

油气作为一种不可再生资源，在能源、经济、政治、军事及国防等方面处于十分重要的战略地位。我国的老一代石油地质工作者顶着“中国贫油论”的压力艰苦奋斗，向全世界证明了中国具有丰富的油气资源，而且还建立了陆相石油地质理论。我国原油产量从建国初仅 $12 \times 10^4 \text{t}$ ，到1978年突破 $1 \times 10^8 \text{t}$ ，到1997年底达 $1.6 \times 10^8 \text{t}$ 。我国同时又是一个石油消费大国，随着国民经济的发展，对油气的需求越来越大，油气资源供不应求的局面越来越明显，目前的年消耗量约为 $1.9 \times 10^8 \text{t}$ ，从1993年开始我国已成为一个石油净进口国。目前我国石油需求约15%靠进口，预计到2020年将有40%靠进口，供应缺口在逐渐增大，21世纪初期如果供需矛盾得不到缓解，石油将成为制约国民经济发展的瓶颈之一。

随着世界油气勘探开发的深入，石油工业形势日趋严峻，勘探难度日益增加，剩余石油可采储量呈下降趋势。这种严峻的勘探现实迫使油气勘探理论和技术必须有巨大发展，才能适应世界油气工业的持续发展。随着我国含油气盆地勘探程度的增加，要解决油气问题很重要的一点是怎么去寻找油气，用什么样的理论作指导。根据我国的经济技术和地质实际，油气勘探由浅层向深层发展，由构造或背斜控制转向岩性或向斜油气藏，但勘探成本也急剧增高。在新的阶段，必须重新考虑一些石油地质基本概念，重新认识被认为勘探程度很高的地区，重新评价已经被废弃的区带和层位。在学习国外勘探理论和技术的同时，对比国内油气勘探实际，有感于我国油气勘探思想应进一步开放，寻找大型油气田的步伐应加快，油气勘探概念要提到战略地位。中国盆地所蕴藏的资源量巨大，很值得我们从新的石油地质学的角度进行解剖，总结油气成藏条件和富集特征，形成和补充新的油气成藏理论，指出有利勘探方向。

《石油地质学》的基本内容是石油地质专业学生及油气勘探与开发的地质人员必须具备的基础知识。我们对国内外石油地质学教材和主要参考书进行了比较广泛的调查研究，分析了美国A. I. 莱复生《石油地质学》(1967年第二版)、英国G. D. 霍布逊《石油地质学进展》(1977)、澳大利亚R. E. 查普曼《石油地质学简明教程》(1976)、梁布兴和潘钟祥《石油地质学原理》(1959)、孟尔盛《石油地质学》(1951)、梁布兴《石油地质学原理》(1959)、西北大学《石油地质学》(1979)、潘钟祥《石油地质学》(1986)、陈荣书《石油天然气地质学》(1994)、张厚福《石油地质学》(1989, 1998)等教材和参考书的特点，结合编者多年的科研实践成果和教学经验，建立了教材体系，拟定了编写大纲。本《石油地质学》力求做到加强基础理论、全面反映本学科国内外最新科技成果，修正目前教材中的种种不足，本着“少而精，浅见深”的思想，促进对基本理论与方法的掌握和对本学科前沿方向的把握，既要充分反映油气地质研究的基本理论、基本方法和基本技能，又要及时体现当前油气地质领域出现的新理论、新思维、新技术。

近些年许多综合性大学不断拓展专业视野，开创更广的研究领域，为了进一步满足非石油高校师生在油气研究领域的日益发展，很有必要针对这些院校学生撰写易懂实用的石油地质学教材。为此，中国海洋大学将《石油地质学》列为“十五”重点建设教材，并给予基金资助。近几年来，综合国内外石油地质学原理的重要进展，结合编者的科研成果，在中国海

洋大学地球科学学院开设了本科生和研究生学位课《石油地质学》，并为多期各种地质、物探培训班讲授，引起各界注意，并提出了许多宝贵意见。中国海洋大学地球科学学院探测系李庆忠院士、刘怀山教授、张维冈教授、王修田教授、孟凡顺教授、薛荣俊教授、姜素华副教授等许多教师也对教材的内容提出了修改意见，并提出在实际教学中应加强生、储方面的教学内容，这些建议为本教材的编写奠定了大纲基础。由于本科生尚未开设沉积学和储层地质学课程，所以油气储层的内容有所加重，显得结构失衡，希读者见谅。

本书由中国海洋大学张金亮教授和山东科技大学常象春博士主编。研究生司学强、林辉、梁杰、杨子成、杜桂林、张鑫、戴朝强、刘晓林、覃利娟、贾瀛等人担任了图件绘制工作，司学强、林辉、梁杰、杨子成、杜桂林协助主编完成了部分章节的文字整理工作。中国海洋大学教务处及教材建设办公室对教材的编写给予了大力支持，山东省油气勘探开发工程技术研究中心对教材的编写和出版也给予了大力支持，特别是刘宝珺院士和谢俊副教授为教材的出版做了大量的工作，在此一并致谢！最后感谢中国石油天然气股份有限公司总地质师贾承造院士在百忙之中为本教材撰写序言！

由于编者水平有限，加之教学正在不断改革，书中内容难免有欠妥之处，望广大读者批评指正！

张金亮

2004年5月23日

# 目 录

绪论	(1)
第一章 石油天然气的生成	(9)
第一节 两种长期争论的油气成因论	(9)
第二节 石油天然气的生成及演化	(11)
第三节 天然气成因判识及形成机理	(26)
第四节 烃源岩地球化学评价	(35)
第五节 油气源对比	(45)
第二章 石油天然气储层	(61)
第一节 储层的岩石物理性质	(61)
第二节 陆源碎屑岩储层特征	(68)
第三节 碳酸盐岩储层特征	(94)
第四节 特殊岩类储层	(111)
第三章 石油天然气盖层	(124)
第一节 盖层类型及其封闭机理	(124)
第二节 生储盖组合划分及其意义	(129)
第四章 石油天然气运移	(132)
第一节 初次运移	(132)
第二节 二次运移	(140)
第五章 油气聚集与成藏	(152)
第一节 圈闭和油气藏	(152)
第二节 油气充注与混合作用	(154)
第三节 油气聚集	(157)
第四节 油气成藏条件及富集规律	(161)
第五节 油气成藏年代学	(173)
第六节 油气藏烃类性质的改造	(177)
第六章 油气藏类型	(184)
第一节 构造油气藏	(188)
第二节 非构造油气藏	(195)
第三节 复合油气藏与特殊油气藏	(202)
第七章 石油地质学理论进展	(205)
第一节 深盆地地质理论	(205)
第二节 煤成烃的形成机理	(225)
第三节 低熟油气形成机理	(231)
第四节 含油气系统	(238)

第五节 油气成藏动力学·····	(245)
第六节 天然气水合物·····	(252)
参考文献·····	(258)



# 绪 论

## 一、石油天然气的重要地位

油气能源的利用是人类文明发展中的一个重要里程碑。从 18 世纪中叶资本主义产业革命时期开始，煤炭代替木柴成为主要能源，世界能源消费进入了“煤炭时代”。20 世纪初期，煤炭占世界能源消费的 95%，直到 50 年代，煤炭仍占能源消费量的 50% 以上。60 年代中期，石油的消费量超过煤炭，在 1965 年石油占能源消费量的 39.4%，煤炭占 38.7%，从而全面进入“石油时代”。随着科学技术的发展，人类对能源的开发利用水平仍在不断提高，新能源不断增加。

具有现代意义的石油工业开始于 19 世纪 50 年代末期，1859 年美国宾夕法尼亚州打了一口井深为 21.69m 的油井，被认为是世界上第一口石油井，它的意义不仅在于开始采用了近代机械钻和使用了 4.4kW 的蒸汽动力，更为重要的是在当时社会环境下的经济意义。由于石油具有燃烧完全、发热量高、运输方便的特点，广泛应用于工业、国防、农业、交通等方面，被喻为“工业的血液”或“黑色的金子”。

石油同时还是一种宝贵的化学工业原料。目前利用石油（天然气）作原料的化工产品有 5000 多种，被广泛用于工业、农业、日常生活等方面。有机化工的 8 种基本原料（乙烯、丙烯、丁二烯、苯、甲苯、二甲苯、乙炔、萘）也主要来源于石油，特别是乙烯产量被当作衡量一个国家石油化工发展水平的重要标志。石油与现代农业也有密切关系，据估算，粮食生产中利用的能源约 90% 是石油天然气，这种能源中有 1/3 用于肥料生产。

现代社会中，石油更是第三世界国家经济腾飞的“发动机”。许多第三世界国家石油资源被发现和开采以前，多以农业或游牧业为主，经济发展较慢。20 世纪 50 年代以来，一批大型油田的发现和开采，使一些国家或地区经济迅速增长，如中东国家伊朗、伊拉克、科威特、沙特阿拉伯、巴林等自 60 年代以来，成为世界上重要的油气生产和出口基地，其经济增长速度之快是人类历史上罕见的。据统计，在 1973—1982 年的 10 年间，中东 8 个主要产油国获得了高达 10000 亿美元的巨额石油收入。对于工业化国家来说，石油也是经济高速发展的动力源泉。1973 年第一次石油危机以前，西方发达国家工业生产年平均增长率为美国 4.3%、日本 15.1%、德国 9.4%、法国 7.6%，其经济迅速发展的一个重要因素就是有廉价石油的充分供给。

石油问题同时又是生命攸关的问题，可以说没有石油就没有国防。石油不仅是一个重要的经济手段，同时也是一个重要的战略手段。人类社会进入“石油时代”的短短几十年里，自然界还没有那种原料像石油一样对国际社会产生如此巨大的影响，也没有哪种原料能像石油一样挑起如此多的兵戎相见和国际争端，石油在很大程度上左右着世界政治和经济局势。

## 二、油气组成及性质概述

石油（Oil）是什么？简单地说，石油是指赋存于地下岩石孔隙中，以碳氢化合物为主的液态可燃有机矿产。所谓可燃有机矿产指的是多由动植物遗体演变而来，具有燃烧能力，且属有机成因的矿产。石油从地下开采出来，没有经过加工提炼之前通常称之为原油（Crude oil）。石油中元素组成主要是 C、H、O、N、S，不同地区或不同层位的石油元素组

成是不同的,但总的来看,其中C、H约占97%~99%,S的含量变化较大,多数油田石油的含硫量一般低于1%,但也有一些油田石油的含硫量高达4%~5%。含N和O量一般都低于1%~1.5%,多数在万分之几到千分之几。石油和有机质的元素组成具有极大的相似性,表明其成因上存在密切联系,有机质向石油转化的标志是“脱氧、加氢、富集碳”,因而二者还存在一些差异。除了这些常见元素外,石油中还发现了其他微量的金属和非金属元素,称为灰分(目前检测出有59种),如Li、Na、K、Rh、Be、Mg、Ca、Ba、Ra、Al、Ga、Ni、V、Cu、Pb、Ba、Sr等等,它们虽然含量甚微,但与原始有机质有着明显的亲缘关系。特别是钒(V)与镍(Ni)这两种分布广泛并具有普遍成因意义的微量元素,在高含硫的石油中钒的含量往往很高,这类石油中主要是钒络合物形成的钒卟啉,其钒镍比通常大于1;而在低含硫的石油中,存在的主要是镍卟啉络合物,钒镍比一般小于1。这二者在油源对比、烃源岩有机相、油气成因及运移等方面研究中起着重要作用。

从化合物组成的角度看,石油可分为两大类,一类由碳、氢元素组成的化合物,俗称烃类(Hydrocarbon),如烷烃、环烷烃、芳香烃等;另一类含有氧、氮、硫等,称为非烃化合物(Nonhydrocarbon),如含氮的卟啉、含氧的酚、含硫的硫醇、硫醚等,近些年非烃分馏技术的发展,使得这些非烃化合物在油气运移或石油成因研究中起着重要作用。

原油具有丰富的颜色,一般有无色(如四川黄瓜山和大港油田部分井)、淡黄色、黄褐色、深褐色、黑绿色、黑色(大庆、胜利油田)。无色石油有的是一种轻质油,甚至可以即采即用;有的是油气运移过程中吸附效应所致。石油的密度一般是指相对密度,也就是在20℃单位体积石油的密度与4℃相同体积的水的密度之比(表0-1),一般石油的相对密度变化较大,介于0.75~1.0,多数小于1.0,对应于上述的颜色,浅色的相对密度低,深色的相对密度高,这主要取决于大分子量的胶质(Resin)或沥青质(Asphaltene)的含量,也可以说在一定范围内,石油越重,其含的碳就越多,而氢越少。粘度(Viscosity)是衡量石油流动性能的指标,一般来说受地下温度、压力和成分影响较大,温度升高粘度降低,压力增大粘度也增加,密度大的石油粘度相对也较大。石油在紫外线照射下均可发荧光(Fluorescence),主要是由于石油中的芳香烃和非烃引起的,油田在钻井取心过程的地质录井中常用此方法识别岩样中的含油性。当偏光通过石油时,由于石油中有机化合物分子结构中不对称碳原子存在,引起偏光面旋转一定角度,产生旋光性。油气烃类难溶于水,但易溶于有机溶剂。

表0-1 我国典型地区原油的物理性质

地区	正常原油					降解原油	
	时代	相对密度	含蜡量(%)	含硫量(%)	沸点(℃)	相对密度	含硫量(%)
松辽盆地	K <sub>2</sub>	0.84~0.85	23~26	0.06~0.10	26~32	0.95	0.14
黄骅坳陷	E	0.84~0.86	12~14	0.04~0.08	22~29	0.96	0.32
辽河坳陷	E	0.83~0.85	10~14	0.07~0.10	18~30	0.95	0.56
渤海地区	E	0.84~0.86	16~20	0.07~0.10	20~30	0.95	0.32
珠江口盆地	E	0.83~0.86	31~40	0.04~0.06	34~44	0.96	0.41
鄂尔多斯盆地	T <sub>3</sub>	0.82~0.86	14~15	0.05~0.09	14~20	0.92	0.07
准噶尔盆地	T <sub>1</sub> 、T <sub>2</sub>	0.84	10	0.03	7	0.96	0.38

天然气 (Natural gas) 经常与石油相伴生, 那么什么是天然气? 它也是赋存于地下岩石孔隙中的可燃有机矿产, 只不过是气态形式存在的。从广义上讲, 天然气是指自然界一切天然的气体, 表现为各种气体化合物或气态元素, 成因复杂, 产状多样。在石油天然气地质学界多将其理解为狭义的天然气, 主要指与油田和气田有关的可燃气体, 成分以气态烃为主, 多与生物成因有关。

天然气一般是无色的, 可有汽油味或硫化氢味, 其相对密度变化较大 (表 0-2), 一般与其相对分子质量有关, 重烃气含量高时相对密度大, 反之较小。天然气的粘度标准状态下一般不超过  $0.01\text{mPa}\cdot\text{s}$ , 相对分子质量越高粘度越小, 温度和压力增大时粘度增大。与石油相比天然气易溶于水和石油, 但相同条件下, 在石油中的溶解度要大大高于在水中的溶解度。

表 0-2 常见天然气组分的密度和相对分子质量

成分	分子式	相对密度	密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	相对分子质量
甲烷	$\text{CH}_4$	0.5543	0.7166	16.042
乙烷	$\text{C}_2\text{H}_6$	1.0488	1.3561	30.069
丙烷	$\text{C}_3\text{H}_8$	1.5617	2.0193	44.095
丁烷	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	2.0665	2.6720	58.121
戊烷	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	2.4872	3.2159	72.147
氢	$\text{H}_2$	0.0695	0.0899	2.016
氧	$\text{O}_2$	1.1053	1.4289	32.000
氮	$\text{N}_2$	0.9673	1.2505	28.016
二氧化碳	$\text{CO}_2$	1.5291	1.9768	44.018
硫化氢	$\text{H}_2\text{S}$	1.1906	1.5392	34.070
水蒸气	$\text{H}_2\text{O}$	0.5941	0.7680	18.016
空气		1.0000	1.2928	28.956
氦	$\text{He}$	1.1380	0.1782	4.000

天然气中常见的烃类气体有甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、戊烷, 非烃气体通常有氮气、二氧化碳、硫化氢、氢气等。天然气作为一种多组分气体, 可有多种分类, 按甲烷含量分为干气 ( $\text{CH}_4 > 95\%$ , Dry Gas) 和湿气 ( $\text{CH}_4 < 95\%$ , Wet Gas); 按硫化氢含量分为高硫化氢气体 ( $\text{H}_2\text{S}$  介于  $2\% \sim 70\%$ )、低硫化氢气体 ( $\text{H}_2\text{S}$  介于  $0.5\% \sim 2\%$ )、微硫化氢气体 ( $\text{H}_2\text{S}$  介于  $0 \sim 0.5\%$ ) 和无硫化氢气体; 按气体的相态可分为游离气、溶解气、吸附气; 根据矿藏分为气藏气、气顶气和凝析气等。

### 三、我国及世界油气资源分布及前景

#### 1. 悠久的油气发现与利用历史

我国是世界上发现和利用油气最早的国家之一, 最早的天然气记载可以追溯到 3000 年以前, 《易经》中就有“上火下泽”、“火欲上而泽欲下”等; 最早的石油记载是 1900 年前《汉书》中有“高奴, 有洧水, 可蘸”。在西方, 石油是拉丁文 *petra* (石头) 和 *oleum* (油)

的合成词，而我国最早并不将其称为石油，最初把石油看作是可以燃烧的水，故称“水肥”，还有“石漆”、“石脂水”、“猛火”、“雄黄油”、“硫黄油”、“泥油”等多种称谓。现在普遍认为“石油”一词最早出现于宋朝沈括（1031—1095）在1090年前后所著《梦溪笔谈》中，“……富延境内有石油，旧说高奴县出脂水，即此也”。不仅使用了“石油”这个词，而且描述了石油的状态、用途等，“此物必大行于世……盖石油至多，生于地中无穹，不若松木极时而竭”。然而据考证，早在北宋就有文人李晔（925—996）在编撰的《太平广记》中使用了石油一词，“石油井在生长县北90里，井出石油，取者以雉尾挹之……”。此书要比沈括的《梦溪笔谈》早100多年。

## 2. 薄弱的近代石油工业

广义上讲，中国的石油工业可追溯到北宋中期（距今约800年），那时将只有碗口粗的油井称“卓筒井”，到清朝1765年四川自贡的自流井气田深达745m。中国近代石油工业极为薄弱，1878年台湾苗栗县出油，1907年陕西延长油田投入生产，直到1949年新中国成立，除这两处清朝的油田外，仅有老君庙和独山子两处油田，以及四川圣灯山、石油沟两处气田，截至1949年共产油 $308 \times 10^4 \text{t}$ ，1949年仅产油 $12.1 \times 10^4 \text{t}$ ，旧中国遗留下来的石油地质人员20余人，钻探人员仅10余人，采油工程人员仅3人。

## 3. 发展迅速的现代石油工业

我国近代油气的发展主要是新中国成立后开始的。1949年9月25日，玉门油矿解放，1950年3月27日，中国和苏联政府签订创办中苏石油股份公司的协定，共同开发新疆独山子油矿，成为新中国与外国公司签订的第一个石油合资企业。1955年10月31日新疆准噶尔盆地西北缘黑油山地区1号探井喷出工业油流，发现克拉玛依油田；1957年建成新中国第一个天然石油基地——玉门油田；1958年9月13日青海省冷湖地区地中4井喷出工业油流，发现青海油田；1959年9月26日黑龙江省松辽盆地松基3井获工业油流，发现世界级的大油田——大庆油田；1962年9月23日山东省东营地区营2井喷出高产油流，发现胜利油田；1964年12月20日在天津港东地区北大港港5井喷出油流，发现大港油田；1969年8月1日开发建设江汉油田；1969年9月9日辽河盆地兴1井喷油，发现辽河油田；1970年4月20日开始全面开发吉林油田；1971年6月27日在甘肃省陇东地区长庆马岭岭9井喷出工业油流，发现长庆油田；1971年8月8日发现河南油田；1975年7月4日渤海湾地区任4井在碳酸盐岩古潜山中喷出油流，发现了华北油田；1975年9月7日在河南东濮凹陷发现中原油田；1977年5月17日在新疆南疆地区塔里木盆地西南边缘发现柯克亚油田；1977年10月四川相国寺气田首次在石炭系发现高产气井，奠定四川大气田的基础；1988年陕参1井打出高产气流，发现陕甘宁大气田；1988年11月17日在新疆塔里木盆地发现轮南油气田，揭开了开发塔里木油田的序幕；1989年1月4—5日新疆吐哈地区台参1井喷出工业油流，发现吐哈油田。

我国是一个石油生产大国，同时又是一个石油消费大国（表0-3）。我国石油生产与消费自20世纪80年代中叶后持续增长，1985年石油产量达到 $1.2 \times 10^8 \text{t}$ ，奠定了我国作为世界石油生产大国的地位；同时，随着经济的高速发展，也跨入了石油消费大国的行列。在过去10年间，由于经济迅速发展，我国的石油消费量年均增长6.66%；而受国内资源及开采条件的约束，同期我国石油的产量年均增速仅为1.75%。我国从1983年开始使用进口石油，当年进口量为 $905 \times 10^4 \text{t}$ ，1994年转变为净进口国，进口量逐年增加，2001年石油产量 $1.65 \times 10^8 \text{t}$ ，进口 $6490 \times 10^4 \text{t}$ ，占消费量的30%。石油消费与石油生产关系的消长，使得我

国从一个石油净出口国变成为一个石油净进口国。2002年,我国石油的产量(含石油和成品油)为 $1.689 \times 10^8 \text{t}$ ;而石油消费量达 $2.457 \times 10^8 \text{t}$ ,2003年石油产量为 $1.693 \times 10^8 \text{t}$ ,进口原油 $9100 \times 10^4 \text{t}$ 。根据有关预测,我国石油的净进口需求在未来10年将按年均10%的速度增长,至2010年将达到 $1.5 \times 10^8 \text{t}$ 。2003年前10个月,我国进口石油较2002年同期增长了30%,进口已达8000多万吨,全年可能达到 $1 \times 10^8 \text{t}$ ,而且今后进口量将会继续快速攀升。国际能源署预计,到2010年,我国每天的石油进口量将增长一倍,达到 $400 \times 10^4 \text{bbl}$ 。到2030年,预计我国每天将进口大约 $1000 \times 10^4 \text{bbl}$ 石油,几乎与美国目前的石油进口量相当。

表 0-3 21 世纪初期我国油气生产计划和需求比较 (据黄第藩等, 2002)

2000 年	2010 年	2020 年
原油生产: $1.6 \times 10^8 \text{t}$ 需求: $1.95 \times 10^8 \text{t}$ 缺口: $-0.35 \times 10^8 \text{t}$	原油生产: $(1.8 \sim 1.9) \times 10^8 \text{t}$ 需求: $2.65 \times 10^8 \text{t}$ 缺口: $-0.80 \times 10^8 \text{t}$	原油生产: $2.0 \times 10^8 \text{t}$ 需求: $3.3 \times 10^8 \text{t}$ 缺口: $-1.3 \times 10^8 \text{t}$
产气量: $300 \times 10^8 \text{m}^3$ 需求: $300 \times 10^8 \text{m}^3$ 缺口: 0	产气量: $(600 \sim 800) \times 10^8 \text{m}^3$ 需求: $(1000 \sim 1200) \times 10^8 \text{m}^3$ 缺口: $-400 \times 10^8 \text{m}^3$	产气量: $(1000 \sim 1200) \times 10^8 \text{m}^3$ 需求: $(1800 \sim 2000) \times 10^8 \text{m}^3$ 缺口: $-800 \times 10^8 \text{m}^3$

据国家计委能源所、中国地质科学院、中国工程院等单位以前对我国2010年的石油消费量进行的估计,认为基本消费量在 $(2.7 \sim 4) \times 10^8 \text{t}$ ,预计我国在2005—2020年石油的产量将在 $(1.8 \sim 2.1) \times 10^8 \text{t}$ ,每年的缺口为 $(0.7 \sim 1.8) \times 10^8 \text{t}$ ,对海外石油的依存度超过了30%。事实上,自1993年我国成为石油净进口国以来,我国石油对外依存度到2002年就已经达到33%。根据近来各方面的预测,我国石油的进口依存度到2020年很有可能达到50%~60%,与美国目前的58%相当;2020年我国石油进口将达 $3.6 \times 10^8 \text{t}$ ,这个数字是2001年的6倍。

我国作为一个发展中国家,长期以来煤炭占能源的75%左右(表0-4),煤烟型污染相当严重。我国目前一方面经济快速发展,能源供给日渐紧缺,但能源消费水平是世界上最低的国家之一,每千克当量油燃料实现的GDP值仅为0.6美元,是世界平均水平的1/5;另一方面环境污染已变得非常严重,仅1995年因环境污染导致的直接经济损失达200亿元以上。

表 0-4 我国能源生产和消费构成表

项目	一次性能 源生产量 ( $10^6 \text{t}$ 煤)	构成(%)				一次性能 源消费量 ( $10^6 \text{t}$ 煤)	构成(%)			
		原煤	原油	天然气	水电		原煤	原油	天然气	水电
年份	合计					合计				
1991	1048.44	74.1	19.2	2.0	4.7	1037.83	76.1	17.1	2.0	4.8
1992	1072.56	74.3	18.9	2.0	4.8	1091.70	75.7	17.5	1.9	4.9
1993	1110.59	74.0	18.7	2.0	5.3	1159.93	74.7	18.2	1.9	5.2
1994	1187.29	74.6	17.6	1.9	5.9	1127.37	75.0	17.4	1.9	5.7
1995	1287.28	75.5	16.7	1.8	6.0	1290.00	75.0	17.3	1.8	5.9
“八五”	5706.16	74.6	18.1	1.9	5.4	5806.83	75.2	17.5	2.0	5.3

鉴于能源需求量对经济发展的影响，同时冷战后一些霸权主义的高涨，社会发展必须考虑到要保持国民经济持续稳定增长、国家主权和领土的安全。2000 年中期，全球的石油储备量估计有  $59 \times 10^8$  bbl ( $8 \times 10^8$  t)，相当于 90 天的世界消费量，其中  $13 \times 10^8$  bbl 为战略储备，其余的  $46 \times 10^8$  bbl 为商业储备。美国 1975 年批准实施《能源政策与节约法》，按照该法要求，美国先后建成 5 个地下岩洞式石油战略储备基地，实际储备石油能力达  $7.5 \times 10^8$  bbl，可满足 158 天的消费；预计到 2020 年，美国石油需求将达到  $2670 \times 10^4$  bbl/d，比目前增加  $720 \times 10^4$  bbl，而石油产量将会从现在的  $650 \times 10^4$  bbl/d 降至  $510 \times 10^4$  bbl/d，进口石油的比例从目前的 53% 增加到 64%，因此美国的石油储备还会有大幅增长。日本没有油气资源，年消费石油  $2.58 \times 10^8$  t，年进口  $2.64 \times 10^8$  t，为此，日本的石油战略储备相当于 160 天的进口量。欧盟国家建立了相当于 90 天进口量的石油战略储备，德国达到 127 天。我国从近年起由政府拨款，开始建立战略储备石油，争取到 2010 年达到 90 天用量的储量。自 1992 年以来，我国先后在秘鲁、加拿大、苏丹、委内瑞拉、马六甲、泰国、哈萨克斯坦等国家和地区取得了合作项目或股权，中东—北非、中亚—俄罗斯和南美已经成为我国在国际上进行油气勘探开发的战略区。1993 年 3 月 5 日在泰国邦亚区块获得石油开发作业权，这是中国石油公司首次在海外获得油田开采权益；1993 年 7 月 15 日获得加拿大阿尔伯达省北端宁油田的部分股权，并生产出中国历史上第一桶海外原油。截至 2000 年，我国在国外形成  $2500 \times 10^4$  t 的原油生产能力，得到  $1200 \times 10^4$  t 的原油份额。

#### 4. 世界油气资源分布及前景

世界上油气产地分布范围非常广泛，从赤道到极地，从陆地到海洋，但由于各含油气盆地地质条件的差异，油气分布也不均匀。世界上油气最为富集的地带，包括波斯湾、墨西哥湾和加勒比地区、西欧国家西伯利亚、伯朝拉、北海、阿尔伯达和美国中陆地区的含油气盆地、北非盆地、前苏联高加索—滨里海诸盆地、中国松辽盆地和渤海湾盆地等，其中波斯湾、西西伯利亚、伏尔加—乌拉尔、马拉开波、墨西哥湾、锡尔特等 6 个大型盆地就拥有世界已发现储量的 65%。目前世界主要产油大国有沙特阿拉伯、独联体、美国、伊朗、中国、挪威、墨西哥、委内瑞拉、英国、尼日利亚、科威特、加拿大等国家和地区（表 0-5）。据第十五届世界石油大会估算，世界未探明资源量约为  $670 \times 10^8$  t，其中，中东、北美、前苏联三个地区拥有 65%。按未探明石油资源量排列，全球七大石油产区的位次为中东、前苏联、北美、亚太、南美、非洲和欧洲。其中，中东地区为  $160.8 \times 10^8$  t，占世界的 24.9%；前苏联地区为  $137.0 \times 10^8$  t，占 21.2%；北美地区为  $123.7 \times 10^8$  t，占 19.2%；亚太地区为  $72.9 \times 10^8$  t，占 11.3%。国际上著名的欧佩克组织（Organization of Petroleum Exporting Country，简称 OPEC），通过控制石油产量来影响其价格。这是 1960 年 9 月 14 日由委内瑞拉、伊拉克、伊朗、科威特、沙特阿拉伯等 5 个产油国在巴格达成立，其后又有国家加入或退出，目前该组织共有 11 个成员国。

表 0-5 世界十大石油储量国（2000 年 1 月止）

产油大国	剩余可采储量 ( $10^8$ bbl)	产油大国	剩余可采储量 ( $10^8$ bbl)
沙特阿拉伯 (Saudi Arabia)	2610	委内瑞拉 (Venezuela)	726
伊拉克 (Iraq)	1125	俄罗斯 (Russia)	486

续表

产油大国	剩余可采储量 (10 <sup>8</sup> bbl)	产油大国	剩余可采储量 (10 <sup>8</sup> bbl)
科威特 (Kuwait)	940	利比亚 (Libya)	295
阿联酋 (United Arab Emirates)	922	墨西哥 (Mexico)	284
伊朗 (Iran)	897	中国 (China)	240

目前全球陆地生产石油的格局基本已定，在陆地区域进一步发现大型油气田的机会越来越少，海洋将成为人类寻找和开发石油的最后一个区域，在未来相当长的一个时期内，世界油气需求量的增长，将主要通过海洋油气产量的增加来满足。目前世界上有 100 多个国家在海上勘查石油和天然气资源，据统计，到 20 世纪 90 年代，世界上已发现海上油田 1800 多个，海上大型油田 125 个，累计储量  $3160 \times 10^8 \text{bbl}$ 。据统计，前 10 多年来，世界海洋石油和天然气生产稳步上升，2003 年世界海洋石油生产量达到  $12.57 \times 10^8 \text{t}$ ，约占世界石油总生产量的 34.1%；2003 年世界海洋天然气生产量达到  $6856 \times 10^8 \text{m}^3$ ，占世界天然气总生产量约 25.8%。

石油是一种储量有限、不可再生的资源，据专家估计，到 2010 年前后，石油生产的鼎盛时期将结束，目前世界石油产量的 90% 左右来自开采 20 年以上的油田，70% 来自开采 30 年以上的油田，也就是说常规石油资源的枯竭已是世界面临的严峻现实。近年来，天然气资源的开发利用受到各国的广泛重视。天然气在地球上的蕴藏量比石油要丰富得多，到 1999 年 1 月，世界天然气储量为  $5.6 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，产量为  $2.3 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，但天然气资源的分布也不均匀，俄罗斯、伊朗、卡塔尔为世界三大天然气资源国，分别占世界总量的 33%、16%、6%。

天然气水合物 (Gas hydrate) 也成为前景巨大的新能源而日益受到关注。这种类型的能源是由天然气 (甲烷) 和水组成，故也称可燃冰。在标准温度和压力下， $1 \text{m}^3$  天然气水合物含有  $164 \text{m}^3$  的甲烷和  $0.87 \text{m}^3$  的水，其能量密度高于甲烷气，低于液化天然气和标准燃料油。天然气水合物的蕴藏量非常巨大，据专家估计，全世界在天然气水合物中含有的甲烷量至少有  $10 \times 10^{12} \text{t}$  固定碳，也有人估计仅海底天然气水合物资源量就大约相当于大陆和近海区已发现的矿物燃料甲烷量的两倍，足够满足人类需求 1000 年。

#### 四、石油地质学的任务和研究内容

石油天然气在工业、农业、国防和现代化建设中均处于重要地位，对人类生活各个方面都具有重大意义。在长期的石油天然气勘探开发实践中，不断总结升华出一门独立的学科——石油地质学 (Petroleum Geology)，可以表述为是“研究地壳中油气藏及其形成条件和分布规律的地质科学”。

石油地质学不是一门孤立的学科，它与许多基础地质学科和石油专业技术学科都有着密切的关系。成盆、成烃、成藏研究是石油地质学的三大主要内容。石油本身也是地壳组成的一部分，它的生成、演化等都不能脱离整体地质背景的发展演化过程，盆地是这些能源矿产赋存的最基本单元，从这些能源矿产形成富集的动力学背景入手，研究沉积盆地整体演化—改造过程和圈层相互作用、内外动力地质作用耦合的统一地球动力学环境，进行深层次的整体解剖和动态研究。如地球深部内动力地质作用与盆地形成演化和改造过程；地球表层系统

的外动力地质作用与成藏（矿）物质的聚积和分布关系；能源矿产富集成藏的地球动力学环境；流体、热力等主要动力作用与成矿物质的转化、迁移过程等。有了聚集基本单元后，就要研究石油天然气的生成物质基础，不同演化阶段的产物特征，不同演化阶段成烃产物的赋存条件和富集的物理化学环境；有机或无机物质成烃演化的化学热力学—动力学机制等方面。石油天然气形成以后，分散的油气如何聚集形成油气藏，影响其成藏的排替、运移、聚集动力学机理如何，各自受到什么地质因素制约？油气流体的定位成藏机制及动力学行为，以及聚集成藏后如何遭受改造破坏？油气如何进行调整再分配，油气富集与分布规律的主控地质条件等也是重要的研究内容。

石油地质学是指导石油天然气勘探的重要理论基础，本书将从石油天然气的基本特征等感性知识入手，重点阐述油气藏形成的生、储、盖等三大静态要素和运、聚、保等三大动态要素，并突出天然气的成因类型、形成机理、成藏规律、分布特征研究，在此基础上详细剖析油气成藏机理与特点、油气成藏地质理论与研究方法。既汲取有国内外相关研究的理论进展，又配合有最新科研成果实例解剖，从理论与实践结合的角度促进对知识的掌握。



# 第一章 石油天然气的生成

## 第一节 两种长期争论的油气成因论

世界上任何一种事物的形成首先要有物质基础，同时还要遵循一定的演化规律，亦即在一一定的成因和演化条件下，都要经历一个演化过程才能形成相应的产物。石油天然气亦不例外，对于其成因，无机成因说和有机成因说两大学派的对垒由来已久，其争议的核心是针对油气的起源物质和油气的生成演化过程的不同认识。无机成因说认为石油和天然气是在地下深处高温、高压条件下由无机物转变而来的，而有机成因说则主张油气是在地质历史上由分散在沉积岩中的动物、植物有机体转化而成的，这种争论自其产生起持续至今。

### 一、油气无机成因说

无机成因说出现于 19 世纪后期至 20 世纪中叶，包括有碳化说、宇宙说、岩浆说和陨石说等，认为石油及天然气的生成是由宇宙天体中简单的碳、氢化合物，或地下深处岩浆中所含的碳和氢通过无机方式合成的。

(1) 碳化说：由俄国门捷列夫于 1876 年提出，他认为把石油起源同煤相联系的提法与实际观察到的剖面有矛盾，根据实验室可以通过无机合成途径得到碳氢化合物的实验结果，提出石油是地下深处的重金属碳化物与下渗的地下水相互作用生成的。反应方程可以表示为：



即高温高压下，重金属铁与碳发生反应，生成重金属碳化物，由于其密度大，一般存在于地壳深处，后来由于地表水下渗与之反应生成碳氢化合物，这些反应生成的石油蒸汽沿着地壳中的裂隙向上运移，上升过程中若浸透岩层则可形成油页岩，若冷凝在地层孔隙中，则会在孔隙性岩层中聚集成藏。但这种观点的一大弱点是地下究竟有无重金属碳化物，同时地表的水能否穿过软流圈渗到地下深处，尚未有明确证据。

(2) 宇宙说：由俄国索可洛夫在 19 世纪晚期提出，其理论依据是在一些天体中发现有碳氢化合物，如土星、水星、天王星、海王星等气圈中，以及彗星的头部均有发现。故认为碳氢化合物是宇宙固有的，早在地球呈熔融状态时，碳氢化合物就包含在它的大气圈中，随着地球冷凝，碳氢化合物被冷凝岩浆吸收，这些碳氢化合物沿裂隙向地表运移的过程中聚集起来便可形成油气藏。但这种观点也有其不能解释的地方，即使地球早期存在碳氢化合物，也应是分子量小、结构简单，然而采出的石油分子量且分子结构非常复杂。

(3) 岩浆说：由前苏联库得梁采夫提出，他认为在许多天体上发现碳氢化合物，火山喷发岩中也发现有沥青，甚至于在岩浆岩中也找到有为数极少的石油，这些石油的形成同基性岩浆冷却时碳氢化合物的合成有关，正是因为这是在高温高压下形成，才会使许多不饱和碳氢化合物被聚合成饱和的碳氢化合物。也就是说有了石油，地球上才有了生物，故其二者相似的元素组成更表明不是石油来自有机物，而是有机物来源于石油。

(4) 高温生成说：俄国切卡留克根据金刚石合成实验，认为石油的形成是在上地幔古登堡层内，在高温高压下，铁的氧化物被还原而成烃类。

(5) 蛇纹石化生油说：俄国耶兰斯基根据某些油田发现于蛇纹岩或蛇纹化强烈的橄榄岩