



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

面向 21 世纪课程教材

高等院校石油天然气类规划教材

# 油藏地质学

(第三版)

蔡正旗 李延钧 蒋裕强 唐 洪 等编  
伍友佳 主审

石油工业出版社  
Petroleum Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

面向 21 世纪课程教材

高等院校石油天然气类规划教材

# 油 藏 地 质 学

(第三版)

蔡正旗 李延钧 蒋裕强 唐 洪 等编

伍友佳 主审

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书内容主要包括油气藏地质理论基础、钻井地质基础和开发地质基础三大部分,介绍了地壳中石油和天然气的形成过程、产出状态、分布规律及影响油气资源分布的控制因素;还介绍了从钻井地质资料的录取,到综合应用地质、物探、测井、实验室分析及油气测试等资料分析储层特征、储层非均质性、油藏在开发过程中的地质变化和油气储量计算等内容。

本书可作为石油工程、勘探技术工程等非资源勘查工程专业本科学生教材,也可作为从事油田经营管理等专业人员学习掌握油藏地质知识的教材或参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

油藏地质学/蔡正旗等编. —3版.

北京:石油工业出版社,2011.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

面向21世纪课程教材

高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 978-7-5021-8510-7

I. 油…

II. 蔡…

III. 油田开发-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119521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)64240656 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油报印刷厂

---

2011年6月第3版 2011年6月第8次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:21.5

字数:549千字

---

定价:35.00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

## 第三版前言

本教材出版至今,获得了专家、师生和读者的好评。当然,不少专家、老师、同学和读者也对本书提出了许多意见和建议,足见他们对本教材的关心和爱护。藉此第三版出版之际,首先向关心本书的专家、师生和读者表示深切的谢意。

本版充分考虑教学第一线专家的意见,特别是石油工程有关专家学者的建议,对全书做了较大修订。本着让石油工程、勘查技术工程等非资源勘查工程专业师生、读者能更有效、系统、连贯学习的原则,本版改动把全书分为了三大篇。对第二版第一章和第二章内容做了调整和改动,补充了近年来较为流行或公认的最新研究成果,以此作为第一篇。对第二版第三章和第四章中的部分内容进行了次序调整和新资料的补充与完善,作为第二篇。第五章至第十一章这部分内容进一步系统化,并补充了储层构型、微构造、流体流动单元的概念和划分方法及其开发措施等最新的研究资料与认识成果,作为第三篇。此外,对本书的有关概念做了进一步的斟酌和更新。

本版由多位老师集体编写,第一章、第二章,第八章第一节、第二节及第十章由李延钧副教授编写;第三章、第四章由蔡正旗教授编写;第五章、第六章由蒋裕强副教授编写,周彦老师参与了第五章部分内容编写;第七章由李斌副教授编写;第八章第三节由徐志明副教授编写;第九章由唐洪、杨辉廷老师编写;第十一章由渠芳老师编写。全书由李延钧、蔡正旗统稿,伍友佳主审。虽然如此,限于专业水平,书中的不足与错漏之处仍在所难免,切望各位专家、同仁和广大读者给予批评指正。

编者  
2011年2月

## 第二版前言

本书初版两年,所印 2000 册已销售一空,不得不今年再版。不少专家、老师、同学和读者对本书提出了许多意见和建议,足见他们对本教材的关心和爱护。藉此再版之际,首先向关心本书的专家、师生和读者表示深切的谢意。

本次再版,对全书做了较大修订。主要考虑与石油工程、石油物探等非地质的石油上游专业的《地质基础》课程的衔接,对初版第四章至第七章中较深的内容和与《地质基础》课程衔接不好的部分做了全面改动。对初版第八章至第九章和第一章至第三章中的部分内容做了次序调整。此外,对本书的字句做了进一步的斟酌、订正。

本次再版,由于蔡正旗副教授忙于其他工作,全书由伍友佳高级地质师结合教学实践和各方面意见进行了全面修订。虽然如此,限于个人的业务水平,书中的不足与错漏仍在所难免,切望各位专家、同仁和广大读者给予批评指正。

伍友佳

2003 年 10 月

# 第一版前言

《油藏地质学》是为非地质专业的本科学生学习油气地质知识而开设的一门课程。在学习了《地质学基础》课程之后,为使学生了解、掌握油气藏形成、油气藏描述、油藏地质在开发过程中的变化等油气地质知识,特意编写了这本《油藏地质学》教材。本书内容包括油气生成与运移聚集的石油地质知识、油气藏描述知识,以及油藏在开发过程中的地质变化等开发地质知识。目的在于让从事石油上游行业工作的非地质勘探人员通过本书的学习就可基本了解、掌握油藏或油田地质的基本知识。这就为从事钻井、采油、油藏工程、石油物探及其他石油上游行业工作的同志学习后续专业课程打下一个全面的油藏地质知识的基础。

本书绪论、第一章至第三章及第八章至第九章由伍友佳高级地质师编写,第四章至第七章由蔡正旗副教授编写,全书由伍友佳统稿。由于水平所限,加之时间仓促,错漏之处在所难免,望各位专家、同行及广大读者给予指正。

编者

2000年11月

# 目 录

绪论 .....	(1)
----------	-----

## 第一篇 油气藏地质理论基础

第一章 油气藏的形成 .....	(5)
第一节 油气生成 .....	(5)
第二节 油气藏形成的基本条件 .....	(20)
第三节 油气藏形成过程 .....	(31)
第二章 圈闭与油气藏 .....	(38)
第一节 圈闭的度量 .....	(38)
第二节 油气藏 .....	(39)
第三节 圈闭与油气藏类型 .....	(42)

## 第二篇 钻井地质基础

第三章 钻井地质设计 .....	(50)
第一节 井位部署原则 .....	(50)
第二节 钻井地质设计 .....	(53)
第四章 录井基本方法与技术 .....	(59)
第一节 录井及发展 .....	(59)
第二节 建立单井地质剖面的录井 .....	(59)
第三节 识别油、气、水层的录井 .....	(68)
第四节 综合录井技术 .....	(78)

## 第三篇 开发地质基础

第五章 油层对比与沉积微相划分 .....	(81)
第一节 油层对比 .....	(81)
第二节 河流—三角洲地区的油层对比 .....	(93)
第三节 碳酸盐岩储集单元对比 .....	(94)
第四节 沉积微相划分与应用 .....	(97)

<b>第六章 储层特征与评价</b> .....	(110)
第一节 储层类型 .....	(110)
第二节 储层非均质性研究 .....	(133)
第三节 储层潜在伤害研究 .....	(155)
第四节 储层裂缝研究 .....	(161)
第五节 储层构型研究 .....	(177)
第六节 储层综合评价 .....	(180)
<b>第七章 油藏构造特征</b> .....	(197)
第一节 油藏构造研究 .....	(197)
第二节 微构造研究 .....	(200)
第三节 油藏断层研究 .....	(202)
第四节 油气田地质剖面图的编制方法 .....	(209)
第五节 油气田构造图的编制与应用 .....	(213)
<b>第八章 油藏流体系统</b> .....	(219)
第一节 油藏流体性质及分布 .....	(219)
第二节 油气水系统 .....	(221)
第三节 油层压力和温度 .....	(224)
<b>第九章 油藏地质模型与油气储量计算</b> .....	(236)
第一节 油藏地质模型 .....	(236)
第二节 油气资源与储量概念及分类 .....	(241)
第三节 油气储量计算及评价 .....	(248)
<b>第十章 油藏动态地质</b> .....	(275)
第一节 油藏开发阶段的划分 .....	(275)
第二节 开发期油藏地质变化 .....	(288)
第三节 油层水洗规律 .....	(300)
第四节 储层流动单元 .....	(308)
<b>第十一章 剩余油分布与预测</b> .....	(319)
第一节 剩余油的概念及类型 .....	(319)
第二节 剩余油的分布特征 .....	(322)
第三节 剩余油分布的检测研究方法 .....	(328)
<b>参考文献</b> .....	(334)



# 绪 论

## 一、油藏地质学课程设置与定名

油藏地质学对于我们而言,并不陌生,也不难理解。这门课已针对石油工程等专业开设多年,各石油高校在石油工程课程设置或教学实践中大多使用“油气藏开发地质学”这一名称,但从多方面考虑,我们觉得仍沿用“油藏地质学”这一名称比较严谨。之所以在石油高校中开设这门课程,其原因主要体现在以下几个方面。

### (一)石油高校专业设置与合并的需要

自1995年以来,国内各石油高校已全部将钻井、采油、油藏工程三个专业归并为石油工程专业,将物探、测井专业合并为石油地球物理探测专业,现为资源勘查技术专业,等等。随着专业的合并,专业知识面势必扩宽、专业课程数目将会增多,显然,对一些课程进行调整合并十分必要。随着专业技术和油气勘探开发理论的进步、教学实践的进行,更新、完善和补充“油藏地质学”(第二版)相关教材内容也势在必行。

### (二)专业地质课程系统性的需要

非资源勘查工程专业的师生常感到地质课程的分散和缺乏系统性、连贯性的特点,遂有集地质课程于一门课程的建议。传统的石油地质专业知识分布在《普通地质学》、《矿物学》、《普通岩石学》、《沉积岩石学》、《地史古生物学》、《构造地质学》、《石油地质学》、《油矿地质学》、《开发地质学》等课程中,这对于非资源勘查工程专业的师生来说确有分散之嫌。在考虑上述意见并全面权衡以后,各石油高校比较一致的意见是,将石油工程专业、勘查技术工程专业的地质课程集中归并为两门课程:一门是《地质学基础》,集中讲述普通地质学、岩石矿物学、沉积岩与沉积相、构造等地质基础知识;另一门是《油藏地质学》,集中介绍油气藏形成、油气藏描述、油气藏开发地质等专业地质知识。这样的课程设置,便于非资源勘查工程专业学生能对石油天然气地质专业知识形成一个系统连贯的认识。

### (三)油气藏有效开发的需要

“油藏地质学”这门课是为油气开发服务的,是为有效开采油气、提高油气采收率奠定基础的。在内容编排上考虑了石油工程专业专家、学者的建议,强调了油气藏开发过程中的地质变化和地质学基础,以及实用技术方法,并涉及相应的油气藏开发措施,使开发与地质间的联系更为紧密和直接。同时,这门课程与“开发地质学”内容和侧重点有所不同,“开发地质学”内容是在学习了《石油地质学》、《油矿地质学》之后地质知识的延伸扩展,这显然与我们这里的“油藏地质学”所涵盖的内容大不一样。从某种意义上讲,“油藏地质学”是《石油地质学》、《油矿地质学》、《开发地质学》以及《油气藏描述》等的概括,当然不是简单的汇总,其侧重点的和课程目的是不一样的。

### (四)油气钻井技术工程的需要

现代石油工程专业包含了油气钻井技术工程,其中很大部分的学生在大四选择并就业油气钻井工程,而与之有关的钻井地质基础是必不可少的。大家知道,一个完整的油气井钻探应包含了钻井和录井两方面的专业技术工作,缺一不可,而且相互联系、依托紧密。此外,钻井地质基础对于其它非资源勘查工程专业而言,也是需要了解和熟悉的内容。因此,本教材添加增

补了该内容。

基于以上原因,我们《油藏地质学》课程的名称和内涵就这样确定了。

在了解了上述关于《油藏地质学》的设置与定名的情况以后,我们就可以对“油藏地质学”做如下定义:

油藏地质学就是关于油气藏形成、钻井地质基础、油气藏地质特征和油气藏在开发中地质变化的理论与研究方法的学科,是一门了解和掌握油气藏动态和静态地质特征、直接为油气藏开发服务的专业技术课。

## 二、油藏地质学研究的内容

### (一) 油气藏地质理论基础

油气藏形成的基本要素及其相关概念不仅是从事油气勘探要掌握的内容,也是从事油气开发等非资源勘查工程专业的工作者和学生应该了解和熟悉的基础知识。油气藏都是在漫长的地质历史过程中逐渐形成的,它们的形成和演化都有其自身的规律性。这部分内容传统上是属于《石油地质学》的研究范畴,但现行的《石油天然气地质学》教材都是以勘探找油气为目的编写的,其内容大量涉及油气与油气藏的形成、储存和分布的学说、理论和规律,这对于非资源勘查工程专业的学生来说显然太专太深太多,也没必要。同时本书第二版这部分内容依然偏多偏专,因此本教材只择取其中关于油气与油气藏形成的基本部分,而将主要基于油气成因理论和勘探目的的油气生成及分布规律等内容予以大量舍弃和归纳。此外,储层与盖层的概念,圈闭与油气藏的概念和度量也属于油气藏地质理论基础的重要内容,在资料与研究成果的使用、介绍中,尽可能补充近年来较为流行或公认的最新研究成果。由此形成本教材的第一篇,包括教材的第一章和第二章。

### (二) 钻井地质基础

《油藏地质学》(第二版)是把钻井地质基础这部分内容放在“油藏描述的地质资料”中介绍的,我们觉得不够全面,如钻井地质设计、井别等关键且现场常用的概念被忽略了,而石油工程专业是集钻井、采油和油藏为一体的一个综合性油气工程主干专业,离开了钻井地质基础,显然是不完善的。因此,本版补充了这部分内容,并阐述清楚各种录井技术与方法是必要的,也符合石油工程专业学科的要求,同时也为其它非资源勘查工程专业弥补了这一知识点。鉴于钻井地质基础的特殊性和独立性,我们把它作为本教材的第二篇,包括教材的第三章和第四章。

### (三) 开发地质基础

开发地质基础是本教材的第三篇,即本教材的第五章至第十一章,内容较多,是油藏地质学的核心,也是直接与油气开发工程有关的主要内容。涵盖了油气层对比与沉积微相划分、储层特征与评价、油气藏构造特征、油气藏流体与地层温度压力系统、油气藏地质模型与储量计算、油气藏动态地质和剩余油分布与预测七大方面的内容。本篇重点涉及油气层划分对比原则与步骤;沉积微相划分与应用;储层的特征描述及储层非均质性、裂缝特征分析、储层敏感性、储层构型分析等;油藏构造与微构造研究、井下断层识别、油气田地质剖面图及构造图的编制方法;油藏流体性质与分布、地层温度、地层压力系统和油气水的基本分布规律;油气藏地质模型及相关的概念、分类和建模原理;油气储量的计算方法和容积法计算油气储量的基本公式及计算参数的确定等。

由于油气藏投入开发以后,不仅有地下油气水的运动变化,还有地下油层自身及其与流体

相互作用的动态地质变化,这些变化共同影响着油气的采出和油田开发效果。而开发过程中的油藏动态地质和油水运动规律及剩余油分布,则是油田开发地质工作者全力追寻的目标。这部分内容传统上是由《开发地质学》讲述。本教材将这部分内容集中并系统化,尤其注意补充最新的研究资料与认识成果,如储层构型、微构造、流体流动单元的概念和划分方法及其开发措施等,这也是历年相关教材少有的,因此,这些有用而前缘的新理论新方法的补充是必要的。

### 三、油藏地质在油气田开发工作中的地位和作用

无论是油气勘探还是油气开发,其对象和目标都是针对“油气”,而“油气”又储集在一定地质条件下的油气藏中,只有了解和掌握油气藏方方面面的地质情况和油气分布特征,才能有效开发油气并提高油气采收率。油气藏从发现到开发结束,要经历很长的时间,其间要经过评价勘探、开发设计与实施、开发生产、开发调整及提高采收率等多个工作阶段。在油田从发现到开发结束的整个过程中,油藏地质都是整个工作的起点和基础。离开油藏地质,油田开发无从谈起;油藏地质情况不清,这样的油气藏开发起来必然问题重重;只有油藏地质情况清楚,才能谈得上科学合理开发油气田。由此可以看出,油藏地质在油气田开发工作中处于一种基础、核心、关键和支配的地位,油藏地质工作在油气田开发中起着智囊团、参谋部的作用。

油藏从勘探到开发结束的基本过程与各阶段的主要地质工作见表0-1。表中只有区域勘探阶段的地质工作不属于油藏地质研究的范围,其它所有阶段都涉及油藏地质研究工作,而且与开发联系紧密。

表0-1 石油勘探开发的基本过程与各阶段主要地质工作

分项	区域勘探阶段	评价勘探阶段	开发设计与开发实施阶段	开发生产阶段	调整及提高采收率阶段
目的	找油	探明油藏	设计实施开发方案	采出油气	提高采油速度与采收率
成果	提供油藏	提交开发储量	提供油气生产能力	提供商品原油	改善开发效果,增加可采储量
时间	1~几年	1~几年(1~2)	1~3年左右	20~50年以上	
主要地质工作	生储评价、成藏条件研究、指示有利勘探方向	钻探取资料、油藏描述、油藏评价及储量计算	试采及开发试验、编制开发方案、钻井、油田建设、编制射孔投产投注方案	动态分析、开发管理、油藏静态研究、开发治理研究	油藏开发的整体解剖研究、编制调整方案、提高采收率研究与方案编制

### 四、怎样学好油藏地质学

油藏地质学的学习,既有一般学科的共性,也有其自身的特点。要想学好一门课程,需要了解其特点,并采取有助于该课程学习的针对性措施,方能收到事半功倍的效果。建议大家从以下三个方面进行学习。

#### (一) 了解学科特点

油藏地质学具有以下两个重要的特性:

(1) 综合性。油藏地质学作为石油工程专业及其它非资源勘查专业学生的地质专业课,它涵盖了该专业的全部地质知识;从面上来说,油藏地质学与油层物理、渗流力学、石油物探、石油测井、油藏工程与采油工程关系紧密,互为基础和互相补充。要学习好油藏地质学这门课

程,就应该首先学好各门相关课程。

(2)应用性。油藏地质学从科学或学科这一角度来看可能是不够系统不够完善的,但它的确是油田开发的起点和基础,是油田开发极为重要且必不可少的核心工作。油藏地质学的存在并不在于其理论体系的严密,而是在于油气开发生产实践的需要。因此,怎样学习和应用油藏地质学知识解决实际问题、指导油气开发生产、改善开发效果、提高油气采收率,就显得特别重要。

### (二)学好相关课程

鉴于油藏地质学较强的综合性和重要的应用性,我们必须努力学好这门课程。为达到此目的,我们必须学好相关课程,例如,《地质学基础》课程中的沉积岩与沉积相、《构造地质学》、《油层物理》、《渗流力学》、《石油测井》,及后续的《油藏工程》、《采油工程》等。只有学好了相关各课程,才能学好《油藏地质学》。

### (三)养成踏实、严谨的学风与作风

油藏地质学是一门直接为油气田开发及勘探服务的学科。之所以强调其学风与作风的踏实、严谨,理由如下:

(1)油田开发与勘探的高风险与高投入,必须要求在其中起关键作用的油藏地质工作者在工作中细致、严格、踏实。在油藏勘探开发工作中,地质工作者因踏实严谨而创造或节省上亿元财富的事迹并非个别;但由于地质工作的疏忽而损失浪费上亿元的事例确也并不罕见。

(2)油田开采动态反映与开发效果表现的滞后性,使得对开采措施不当或开发决策失误的发现必然较晚,这往往会造成一定的损失。如果我们能通过自己踏实严谨的工作避免一次或几次这样的失误,或者能更早地发现和纠正这些失误,这不正是油藏地质工作者所致力追求的吗?当然也是我们的责任与义务。

(3)油藏地质工作主要是熟悉和掌握资料。我们必须搜集油藏从第一口探井开始到至今为止所能得到的一切资料,进行仔细地分析研究和综合判断,才能掌握油藏地下的最新动态,以便随时制定客观合理而又切实可行的对策措施。

(4)油藏地质工作在油田开发中处于参谋部、智囊团的重要地位,一项措施的实施或一个方案的施行,常常牵动方方面面,稍有不慎则徒劳无功或造成不必要的损失。

良好的学风十分关键,真心诚意才能达到静心高效学习的效果。学风与作风不是一个早晨一下决心就能养成的,必须在长期的学习、生活、工作中不懈地自律,并且应从年轻时代开始。

# 第一篇 油气藏地质理论基础

## 第一章 油气藏的形成

### 第一节 油气生成

#### 一、油气成因

石油一词,源出北宋沈括(公元1031—1095年)《梦溪笔谈》:“富延境内有石油,旧说高奴县出脂水,即此也”。而在更早的唐、晋、汉,甚至周代,我国已有关于石油的记载。比如,周代的《易经》中就有“上火下泽”、“火在水上”、“泽中有火”的记载。英文中,石油一词为“petroleum”或“rock oil”。石油是天然产出的烃类物质,在正常条件下,呈气态者称为天然气,呈液态者称为石油或原油(原状的未经加工的石油),呈固态者称为沥青或沥青砂或气水合物(可燃冰)等。

石油的成因问题,是石油地质界一个重大问题。它不仅具有重要的理论意义,而且具有指导油气勘探的重要实践意义。

自19世纪70年代以来,人们对石油成因问题,先后提出过几十种假说。大多数假说都是根据两方面的认识提出来的:一是实验室的实验认识;二是石油勘探开发的实践认识。按照原始生油物质的不同,可以把各种生油假说归纳为两大学派,即无机生油学派和有机生油学派。前者认为石油是由无机物质变化生成的,而后者则认为石油是由有机物质演变形成的。

#### (一)石油无机成因说与有机成因说

长期以来,两大学派展开了激烈的争论。19世纪末到20世纪中叶,无机学派曾盛行一时,其比较著名的学说有:Д. И. 门捷列夫的碳化物说(1876);B. Д. 索可洛夫的宇宙说(1889);H. A. 库得梁采夫的岩浆说(1949)等。

20世纪以来,有机学说逐渐占据优势,但在有机生油学派内部也有争论。例如,对于生油物质,有的认为是植物,有的认为应是动物;在生油环境方面,有海相生油与陆相生油的争论;在生油时间上,有主张成岩早期生油的,也有认为主要是成岩后期生油的。但20世纪70年代以来,晚期生油说逐渐成为主流学派。

由于石油成分的复杂多样性、油气生聚时间的极其长期性、石油本身的流动性以及随之而来的石油运聚场所的空间变化性,造成石油成因问题研究困难。迄今为止,关于油气生成的许多细节问题仍不清楚,有关石油生成问题的争论仍在继续中,但基本以石油有机成因说占据主导地位。

如今多数学者认为:自然界虽确有无机生成的低分子烃类化合物存在,但其数量与规模均极有限,绝大部分的石油是由动植物尸体经过埋藏演化形成的;其中不排除成岩早期即有部分油气生成,但大量油气的生成应在成岩作用的后期。

## (二) 石油有机成因说主要证据

随着油气勘探和生油研究不断深入,无机成因论逐步为有机成因论所代替。有机成因论的主要论据为:

(1) 世界上已发现的油气田,99.9%以上都分布在沉积岩中;与沉积岩无关的大片岩浆岩、变质岩区没有产出石油;少量工业油流的岩浆岩、变质岩都与沉积岩毗邻。

(2) 油气中先后鉴定出很多与活生物体有关的生物标志化合物。例如,石油中的卟啉类化合物、异戊间二烯烃类、胆甾醇、植物甾醇等生物成因物质的存在。又如,石油中的碳同位素与生物体中的碳同位素符合母源成因分馏效应。这都说明二者之间具有不可否认的成因关系。

(3) 石油成分的复杂多样性和石油组成元素的大体一致性,与生物有机质成分的复杂多样性及其组成元素的大体一致性,有着惊人的相似性。(表 1-1)。

表 1-1 石油与沉积岩中的有机质的元素组成对比表

元素	沉积岩中的有机质	石油
C	52% ~ 71%	83% ~ 87%
H	7% ~ 10%	11% ~ 15%
O	15% ~ 35%	痕量 ~ 4%
N	4% ~ 6%	痕量 ~ 4%
S	—	痕量 ~ 4%

(4) 在近代海相与湖相沉积中已发现有有机质向油气转化的证据。我国在青海湖及洞庭湖,美国在墨西哥湾与加利福尼亚滨外大陆架,前苏联在里海、黑海和谢万湖的近代沉积中,通过热模拟实验,都发现了有机质向石油转化的直接证据。

总之,油气的有机成因说,由于充分考虑了油气的生成和产出的地质、地球化学条件。深入对比了油气及有机质的组成特征,更能说明油气的成因,为绝大多数石油地质、地球化学工作者所接受。但现代研究证明,部分天然气则很可能是无机成因的。

## 二、生油气母质

自然界的生物,种类繁多。但是不论是高等生物还是低等生物,也不论是水生生物还是陆地生物,它们都是由脂肪、蛋白质、碳水化合物、木质素和色素等化合物组成的。虽然这些物质转变成为石油,其过程、细节目前还研究得不很清楚,但大量资料表明,上述生物物质在适当的环境条件下,都可以转变成烃类,生物体中的各种有机物质都可以作为石油生成的原料。

近年来的油气地球化学研究认为,石油是从“干酪根”逐渐演变形成的。干酪根(Kerogen)一词来源于希腊语,意为能生成油蜡状物的物质。1912年 A. G. Brown 第一次提出该术语,表示苏格兰油页岩中的有机物质,这些有机物质在干馏时可产生类似石油的物质。以后这一术语多用于代表油页岩和藻煤中的有机物质。直到 20 世纪 60 年代才明确规定为代表沉积岩中的不溶有机质。Forsmann 和 Hunt(1963)明确提出,干酪根是指一切不溶于普通有机溶剂的沉积岩分散状有机物质,特别是非储集沉积岩中的不溶有机质。如图 1-1 所示,Tissot 和 Welte

(1978)则定义为沉积岩中既不溶于含水的碱性溶剂,也不溶于普通有机溶剂的有机组分,它泛指一切成油型、成煤型的有机物质,但不包括现代沉积物中的腐殖物质。此外,亨特(1979)认为干酪根是不溶于非氧化的酸、碱溶剂的沉积岩中全部分散的有机质,这个定义为多数学者所接受。干酪根是原始有机质经过一定埋藏,在还原环境下经过一定的化学或生物降解转化而形成的大分子物质。它是沉积有机质的主体,约占沉积有机质总量的80%~90%。亨特(1979)认为:80%~95%的石油烃是由于干酪根转化形成的。

干酪根可以划分为三种主要类型(图1-2):

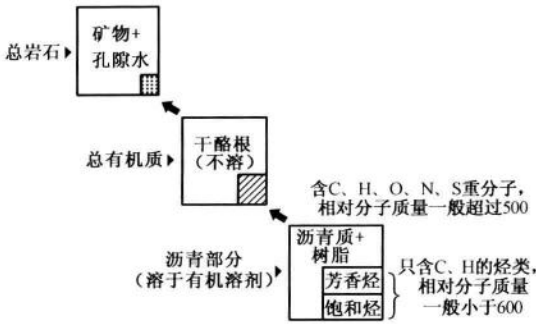


图 1-1 沉积岩中分散有机质组成  
(据 Tissot 等,1978)

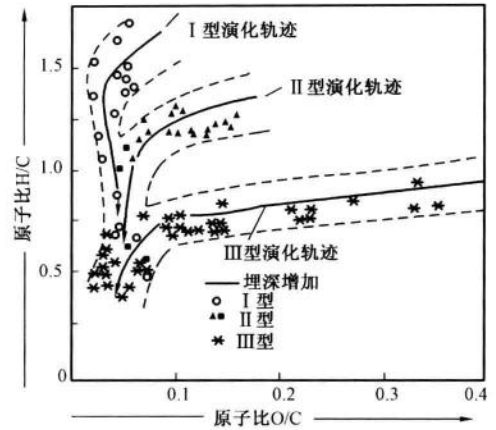


图 1-2 不同来源干酪根的元素演化图

- I型: ○美国尤英塔盆地绿河页岩(据 B. P. Tissot 等,1978)
- II型: ▲法国巴黎盆地下托尔页岩(据 B. Durand 等,1972)
- 德国里阿斯波西多尼希费组(据 B. Durand 等,1972)
- III型: \*喀麦隆杜阿拉盆地洛格巴巴页岩(据 B. Durand 等,1976)  
+ 腐殖煤(据 B. Durand 等,1972)

**I型干酪根:**以含类脂化合物为主,直链烷烃很多,多环芳烃及含氧官能团很少,具高氢低氧特征(H/C原子比1.25~1.75,O/C原子比0.026~0.12),它可以来自藻类沉积物,也可能是各种有机质被细菌改造而成,生油潜能大。

**II型干酪根:**氢含量较高(H/C原子比0.65~1.25,O/C原子比0.04~0.13),但较I型干酪根略低,为高度饱和的多环碳骨架,含中等长度直链烷烃和环烷烃较多,也含多环芳烃及杂原子官能团,来源于海相浮游生物和微生物,生油潜能中等。

**III型干酪根:**具低氢高氧特征(H/C原子比0.46~0.93,O/C原子比0.05~0.30),以含多环芳烃及含氧官能团为主,饱和烃很少,来源于陆地高等植物,对生油不利,但可成为有利的生气来源。

地球上的油气储量是较为丰富的,到1997年底,已发现的常规石油可采储量约为 $2.5 \times 10^{11}$ t,其中约44%已被采出。作为生油物质的沉积有机质,其数量情况怎样,对于油气生成是否足够,这是有机生油学说必须回答的一个问题。根据亨特(1979)的研究,所有沉积物和沉积岩中总的有机碳含量约为 $1.2 \times 10^{19}$ kg,其中,分散于沉积岩中的有机碳为 $1.1 \times 10^{19}$ kg,煤和泥碳中的有机碳为 $1.5 \times 10^{15}$ kg,非储层石油中的有机碳为 $2.65 \times 10^{17}$ kg,储层石油中的有机碳为 $1.0 \times 10^{15}$ kg。总之,沉积岩中的有机碳只有约0.01%以油气的形式存在于储层中,可见,石油的生成与聚集是非常低效的。但尽管如此,由于地壳沉积物体积巨大( $80 \times 10^6 \text{ km}^3$ ),

以有机碳平均含量取 1% (Parker Trask 认为,近代沉积物平均有机碳含量为 2.5%,古代沉积物中约为 1.5%),并且以 0.1% 转化为烃类计算,将会生成  $8 \times 10^{11} \text{ m}^3$  烃类。这一数量十分接近地球上已知可采与不可采的全部石油的数量。可见,作为生烃物质,地球上的有机质是足够丰富的。

### 三、油气生成的影响因素

油气生成的全过程从分散有机质被埋藏堆积后的生物化学作用阶段便已开始,经过成岩作用中干酪根的形成及深成作用阶段的热降解,以及原油在高成熟及过成熟阶段的热裂解和最终的甲烷化阶段。油气生成的影响因素主要包括原始有机母质组成和性质、地层温度与埋藏时间、细菌和矿物催化作用等。

#### (一)母质组成与性质

由于沉积环境和生物活动的多样性,不同类型烃源岩中的沉积有机质来源复杂多样。例如,深湖、海相沉积环境的藻类、浮游植物相对发育,往往形成腐泥型干酪根,含有较高比例的脂类化合物,生烃能力高,生油潜力大。在沼泽、滨浅湖等沉积环境,烃源岩中的沉积有机质主要来源于陆地植物,生化组成以木质素、纤维素和芳香丹宁为主,一般形成腐殖型干酪根,其生油能力差、主要生成天然气。

根据化学动力学原理,干酪根开始大量裂解成油气是一系列化学反应的结果,而干酪根活化能的大小是控制反应速度的关键因素。I 型干酪根因以脂肪族结构为主,杂原子键少,故活化能分布中对应于弱键的低值少,大部分值在  $70 \times 4184 \text{ J/mol}$  附近,相当于 C—C 键断裂所需的活化能,所以它要求较高的门限温度。而且在高温下,反应速率迅速增长,生烃量很快上升到峰值。II 型干酪根活化能分布较宽,由于杂原子键较多,活化能值比 I 型低,峰值为  $50 \times 4184 \text{ J/mol}$ ,故门限温度较低。III 型干酪根活化能分布平缓,最大值集中在  $60 \times 4184 \text{ J/mol}$ ,故门限温度介于 I 型和 II 型之间。由此,Tissot 和 Welte 提出了油气生成界限,II 型干酪根首先进入门限,相当于成熟度  $R_o = 0.5\%$ ,III 型次之, $R_o = 0.6\%$ ,I 型干酪根最后, $R_o = 0.7\%$ 。

#### (二)地层温度与埋藏时间

干酪根作为一种结构复杂的缩合物,从化学动力学角度来看,是由一些能量不同的键组合而成的聚合物。干酪根生成油气的过程并不是一个简单的裂解反应,而是由一系列平行和连续的反应组成,但从总体过程来看,尤其是成熟的干酪根生成油气的过程(成熟干酪根→重杂原子化合物→油气+残余碳),可以近似为具有一级反应特征的热裂解反应,反应速率与温度和活化能的关系适合阿仑尼乌斯方程。

$$k = A \exp \left[ \frac{-10^3 E}{R(T + 273)} \right] \quad (1-1)$$

式中  $t$ ——埋藏时间,由埋藏史确定, Ma;  
 $k$ ——干酪根成烃的反应速率,  $\text{Ma}^{-1}$ ;  
 $A$ ——干酪根的频率因子,  $\text{Ma}^{-1}$ ;  
 $E$ ——干酪根的活化能, kcal/mol;  
 $R$ ——气体常数,  $R = 1.986 \text{ cal}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  
 $T$ —— $t$  时刻地温,  $^{\circ}\text{C}$ 。

除温度外,时间对干酪根裂解也有影响,J. Connan(1974)在研究石油生成时间与温度关系时从阿仑尼乌斯方程出发,得出时间—温度关系式:



$$\ln t = \frac{E}{RT} - A \quad (1-2)$$

式中  $t$ ——时间, Ma;  
 $A$ ——频率常数,  $\text{Ma}^{-1}$ ;  
 $R$ ——气体常数,  $R = 1.986 \text{ cal}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  
 $E$ ——活化能,  $\text{J}/\text{mol}$ 。

式(1-2)表明烃源岩年龄对数与该层温度之间存在着线性关系。在石油生成过程中,时间和温度存在着补偿关系。因此,生烃门限温度不仅取决于古地温,还取决于烃源岩的地质时代,即该温度下的时间间隔。当干酪根类型相同时,烃源岩时代越新,门限温度就越高,反之,烃源岩层越老,其门限温度就越低(图1-3)。干酪根成烃过程中,时间和温度的作用并不完全相当,温度对有机质的热演化起主导作用,反应速率与温度成指数关系,与时间呈线性关系。也就是说,温度增加  $10^\circ\text{C}$ ,时间需增加一倍才是等效的。

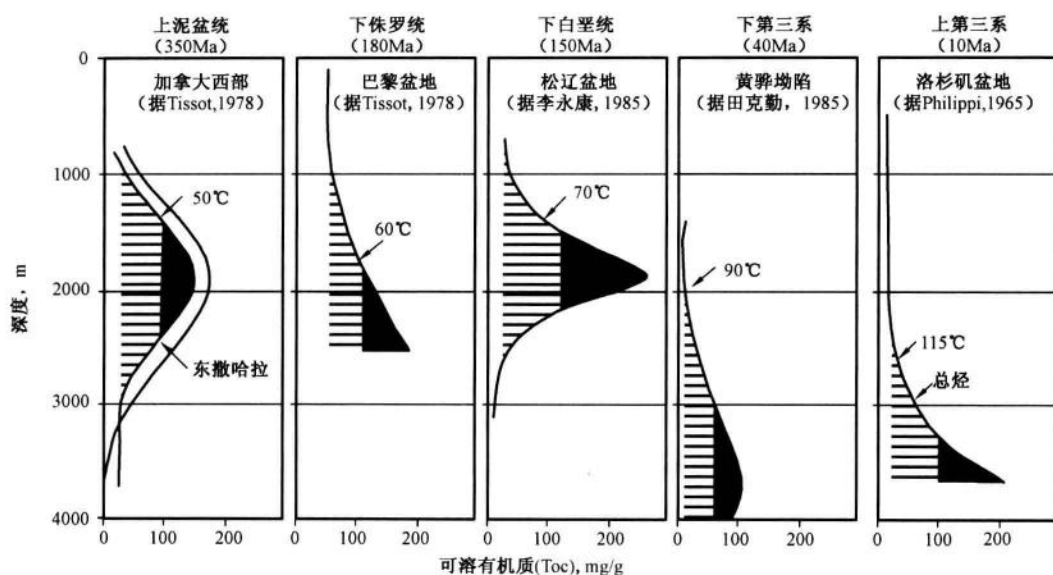


图1-3 几种不同时代烃源岩的门限深度和门限温度比较

时间的补偿作用也是有一定限度的,古老地层若埋藏过浅,从未达到生油门限温度,时间再长也无法使有机质成熟。J. Karweil 在研究煤化温度与时间关系时,发现在  $50 \sim 60^\circ\text{C}$  以下,即使经历长达两亿年的时间也不能达到在  $150^\circ\text{C}$  下受热两千万年的煤化程度。也就是说受热温度过低(小于  $50 \sim 60^\circ\text{C}$ ),时间因素的影响很小,当温度超过  $50 \sim 60^\circ\text{C}$  时,时间的影响才显示出来。

干酪根生烃过程与煤化过程相似,是一个长期的而连续累加的不可逆过程。经受的温度较低,生油过程就缓慢;温度升高,过程随之加速;温度再度降低,干酪根生油过程可以再次变慢,只要有有机质不被氧化、剥蚀,便有生油潜力,无论经历多么复杂的过程,一旦进入门限深度就可以生成烃类,即“二次生烃”。

总之,在时间和温度的综合效应下,有利于生成并保存油气的盆地是年轻的热盆地和古老的冷盆地。相反,年轻的冷盆地中的有机质难以达到生油门限值,干酪根难以大量转化为油气。相反,在老盆地中,长期处于高地温环境条件则对油气的保存并不利,尤其是石油(液态烃)的保存温度一般不超过  $200^\circ\text{C}$ 。