



# 地层油气藏

侯连华 杨帆 陶士振 杨春 等著

地质出版社

# 地层油气藏

侯连华 杨帆 陶士振 杨春  
朱如凯 袁选俊 王京红 罗霞  
卫延召 郭秋麟 孙夕平 吴孔友  
江涛 毛治国 刘磊 李富恒

著

地质出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书系统介绍了地层油气藏的勘探研究历史,地层油气藏的内涵、分类,不同类型地层油气藏的形成机制、分布规律和地层型区带、圈闭的评价、预测方法技术,为地层油气藏的勘探、研究提供了系统化、理论化、实践化的参考指南。

本书可供从事石油、天然气勘探的科研、管理人员及相关院校师生阅读参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

地层油气藏 / 侯连华等著. —北京:地质出版社,  
2017.3

ISBN 978-7-116-08266-3

I. ①地… II. ①侯… III. ①地层油气藏 IV.  
①P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 066939 号

### Diceng Youqicang

---

责任编辑:孙亚芸 杨 艺

责任校对:张 冬

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

咨询电话:(010)66554528(邮购部);(010)66554633(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)66554686

印 刷:北京地大彩印有限公司

开 本:787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

印 张:22.75

字 数:550千字

版 次:2017年3月北京第1版

印 次:2017年3月北京第1次印刷

定 价:118.00元

书 号:ISBN 978-7-116-08266-3

审 图 号:GS (2017) 430号

---

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

# 前 言

地层油气藏是自构造油气藏之后的油气勘探理念和认识的重大突破，明确了只要具备储层、保存和输导条件，就有可能形成油气聚集。依据地层油气藏的概念和模式，自1930年在美国东得克萨斯发现世界上第一个地层型油气田以来，全球大型地层油气田持续不断有新发现；据统计，国内外已探明的以地层型为主的油气藏储量约占总探明储量的48%。近些年，中国在塔里木盆地塔中-塔北奥陶系、准噶尔盆地西北缘、吐哈鲁克沁三叠系、四川盆地磨溪-高石梯震旦系灯影组、鄂尔多斯下古生界、辽河中新元古界、渤海湾盆地等领域发现了多个千亿立方米、亿吨级的大型地层油气田，储层岩性从碳酸盐岩、火山岩、变质岩到碎屑岩均有发现，构造部位从盆缘斜坡区，到盆内古隆起、潜山构造都有分布，大大拓展了油气勘探领域，展示了地层油气藏良好的勘探前景。

1936年莱复生首次提出了地层油气藏概念，主要关注除构造油气藏之外，受地层、岩性、水动力变化等因素控制而形成的油气藏类型。中国油气勘探家和学者在研究中，不断发展、丰富地层油气藏的概念、内涵，深化地层油气藏的成因、成藏机理和分布规律。2008年以来，以国家油气重大专项为支撑，中国石油科研人员通过对准噶尔、塔里木、四川、鄂尔多斯、渤海湾等盆地多种类型地层油气藏的精细解剖和规律总结，进一步明晰了地层油气藏的概念，重新建立并完善了地层油气藏分类体系，揭示了碳酸盐岩、火山岩、变质岩、碎屑岩4种储层岩性的地层油气藏的形成条件和关键控制因素，明确了不同类型地层油气藏在4类原型盆地中的分布规律；从构造、层序、不整合、储层、成藏等角度，梳理了地层型大油气区的形成与分布，并形成了地层型大油气区、区带评价和圈闭有效性评价方法，研发了地层尖灭线刻画、不整合结构识别、风化壳储层预测等配套技术系列。

本书共8章，内容涉及地层油气藏成因、分类、成藏，以及区带、圈闭评价等诸多方面，包括国内外地层油气藏研究的最新动态、理论基础、分布规律、方法技术、4类岩性地层油气藏的最新勘探进展。本书前言由侯连华编写；第一章“绪论”由侯连华、杨帆等编写；第二章“地层油气藏类型”由侯连华、杨帆、杨春等编写；第三章“地层油气藏形成的构造机制”由杨帆、朱如凯、吴孔友等编写；第四章“不整合

结构成因机制及控制因素”由杨帆、袁选俊、吴孔友、毛治国等编写；第五章“地层型油气藏成藏控因与模式”由杨春、陶士振、卫延召、王京红、刘磊等编写；第六章“地层型油气藏分布规律”由侯连华、杨帆、杨春、罗霞、李富恒等编写；第七章“地层型油气聚集区形成与分布”由侯连华、王京红、江涛等编写；第八章“地层型区带、圈闭评价及预测方法”由侯连华、郭秋麟、孙夕平等编写；全书由侯连华、杨帆统稿。

参与本书相关研究、实验及图件绘制等工作的还有曹锋、贺正军、张丽君、齐雪峰、崔化娟、李伯华、赵忠英、赵霞、王瑞菊、吴丰成、吴卫安、周学先、张黎、方向、袁庆东、方杰、许大丰、冯有良、彭红雨、朱耀龙、赵一民、王波、吴小州、韩文学、张越迁、刘振宇、刘巍、李震华、唐勇、杨迪生、贾希玉、秦志军、孔玉华、欧阳敏、常秋生、瞿建华、黄立良、杨梦云、梁浩、任忠跃、李欣、王淑芳等。

在本书编写过程中，得到了中国石油勘探开发研究院、新疆油田、塔里木油田、长庆油田、西南油气田、华北油田等单位领导和专家的大力支持与帮助，并提供了宝贵资料。贾承造院士、戴金星院士、邹才能教授、高瑞祺教授、顾家裕教授等对书稿提出了宝贵的修改意见，在此一并谢忱。受时间和水平所限，书中不妥之处在所难免，恳请各位专家和学者批评指正。



# 目 录

## 前 言

第一章 绪论	(1)
第一节 油气地质理论发展历程	(1)
一、世界石油地质学发展	(1)
二、中国石油地质学发展	(5)
第二节 中国油气勘探历程及发展趋势	(12)
第三节 地层油气藏研究与勘探进展	(18)
第二章 地层油气藏类型	(23)
第一节 地层油气藏概念与内涵	(23)
一、地层油气藏概念	(23)
二、地层油气藏内涵	(24)
三、地层油气藏与其他类型油气藏的异同	(25)
第二节 地层油气藏类型	(30)
一、地层圈闭分类	(30)
二、地层油气藏分类	(32)
第三节 地层油气藏特征	(33)
一、超覆型地层油气藏	(33)
二、削截型地层油气藏	(35)
三、风化壳潜山型地层油气藏	(38)
第三章 地层油气藏形成的构造机制	(43)
第一节 不整合形成的构造机制	(43)
第二节 超覆层序形成的构造机制	(48)
第三节 地层圈闭储盖组合形成的构造机制	(50)
第四节 地层油气藏形成的构造机制	(56)
第四章 不整合结构成因机制及控制因素	(68)
第一节 不整合与不整合结构	(68)
一、不整合的内涵	(68)

二、不整合的主要类型	(69)
三、风化壳与土壤层	(71)
四、不整合结构	(79)
五、不整合结构的成因机制	(87)
六、不整合结构的控藏作用	(88)
<b>第二节 碳酸盐岩不整合结构成因机制及特征</b>	(118)
一、碳酸盐岩不整合成因机制	(118)
二、碳酸盐岩不整合结构特征	(124)
三、碳酸盐岩风化壳储层特征	(125)
四、中国典型碳酸盐岩风化壳储层实例	(128)
<b>第三节 碎屑岩不整合结构成因及特征</b>	(133)
一、碎屑岩不整合结构及特征	(133)
二、碎屑岩不整合结构控制因素	(136)
<b>第四节 火山岩不整合结构成因及特征</b>	(139)
一、火山岩风化壳结构及特征	(139)
二、火山岩风化壳储层控制因素	(141)
三、火山岩风化壳分布规律	(145)
<b>第五节 变质岩不整合结构成因及特征</b>	(147)
一、变质岩风化壳结构及特征	(147)
二、变质岩风化壳成因及储层特征	(148)
三、变质岩风化壳储层的控制因素	(149)
<b>第五章 地层型油气藏成藏控因与模式</b>	(151)
<b>第一节 碳酸盐岩地层型油气藏控制因素</b>	(151)
一、构造运动背景	(151)
二、大规模分布的烃源岩	(152)
三、(似)层状分布的大规模有效储层	(153)
四、晚期规模生烃与大范围成藏	(154)
<b>第二节 碎屑岩地层型油气藏控制因素</b>	(155)
一、削截型地层油气藏控制因素	(155)
二、超覆型地层油气藏主控因素	(159)
三、海相砂岩地层油气藏控制因素	(163)
<b>第三节 火山岩地层型油气藏控制因素</b>	(166)
一、裂谷构造环境控制火山岩地层型油气藏分布	(166)

二、生烃中心区控制火山岩地层型油气藏展布	(168)
三、风化壳控制火山岩优质储层	(169)
四、区域盖层是控制大型地层油气藏形成的关键	(170)
五、继承性发育的构造高部位是油气富集区	(170)
<b>第四节 变质岩地层型油气藏控制因素</b>	(171)
一、变质岩古潜山内幕储层、隔层交互分布是油气藏形成关键	(172)
二、充足油源是成藏基础	(173)
三、侧向供油窗口控制古潜山含油幅度	(174)
四、深大断裂系统控制油气纵向运移	(175)
五、具有良好的封盖体系和保存条件	(175)
<b>第五节 地层型油气藏成藏模式</b>	(176)
一、碳酸盐岩地层油气藏成藏模式	(176)
二、碎屑岩地层油气藏成藏模式	(178)
三、火山岩地层油气藏成藏模式	(179)
四、变质岩地层油气藏成藏模式	(182)
<b>第六章 地层型油气藏分布规律</b>	(185)
<b>第一节 地层型油气藏宏观分布规律</b>	(185)
一、地层油气藏规模	(185)
二、地层型油气藏相态分布规律	(186)
三、地层型油气藏的纵向分布规律	(187)
四、地层型油气藏平面分布规律	(188)
<b>第二节 不同类型地层型油气藏分布规律</b>	(188)
一、碳酸盐岩地层油气藏分布规律	(189)
二、碎屑岩地层油气藏分布规律	(190)
三、火山岩地层油气藏分布规律	(193)
四、变质岩地层油气藏分布规律	(195)
<b>第三节 四类原型盆地地层型油气藏分布规律</b>	(196)
<b>第四节 中国三大区域地层油气藏分布规律</b>	(202)
<b>第七章 地层型油气聚集区形成与分布</b>	(206)
<b>第一节 油气聚集区概念及特征</b>	(206)
一、大型油气聚集区的概念	(206)
二、大型油气聚集区概念的发展与完善	(209)
三、大型油气聚集区形成条件	(212)



四、大型油气聚集区的地质特征 .....	(214)
第二节 碳酸盐岩缝洞地层型大型油气聚集区 .....	(216)
一、区域构造背景 .....	(216)
二、缝洞地层型大型油气聚集区形成条件 .....	(217)
三、缝洞地层型大型油气聚集区成藏与分布特征 .....	(220)
四、勘探效果 .....	(224)
第三节 碳酸盐岩层状岩溶地层大型油气聚集区 .....	(224)
一、区域构造背景 .....	(224)
二、层状岩溶地层型大型油气聚集区形成条件 .....	(226)
三、层状岩溶地层型大型天然气聚集区成藏与分布特征 .....	(234)
四、勘探效果 .....	(237)
第四节 碳酸盐岩块状岩溶地层型大型油气聚集区 .....	(238)
一、区域构造背景 .....	(238)
二、碳酸盐岩块状岩溶地层型大型油气聚集区形成条件 .....	(239)
三、碳酸盐岩块状岩溶地层型大型气藏特征 .....	(251)
四、勘探效果 .....	(252)
第五节 火山岩风化壳地层型大型油气聚集区 .....	(254)
一、区域构造背景 .....	(254)
二、火山岩风化壳大型油气聚集区形成条件 .....	(256)
三、勘探效果 .....	(259)
第六节 碎屑岩超覆、削截型大型油气聚集区 .....	(260)
一、区域构造背景 .....	(260)
二、碎屑岩地层大型油气聚集区形成条件 .....	(261)
三、碎屑岩地层大型油气聚集区分布特征 .....	(265)
四、勘探效果 .....	(268)
第七节 变质岩裂缝型大型油气聚集区 .....	(268)
一、区域构造背景 .....	(269)
二、变质岩裂缝型大型油气聚集区形成条件 .....	(270)
三、变质岩裂缝型大型油气聚集区分布规律 .....	(274)
四、勘探效果 .....	(275)
第八章 地层型区带、圈闭评价及预测方法 .....	(276)
第一节 地层有利区带评价方法 .....	(276)
一、碎屑岩地层型区带评价参数及标准 .....	(276)

二、碳酸盐岩地层型区带评价参数及标准 .....	(277)
三、火山岩地层型区带评价参数及标准 .....	(278)
四、变质岩地层型区带评价参数及标准 .....	(280)
五、区带评价方法 .....	(280)
六、火山岩地层型区带评价实例 .....	(281)
七、远源斜坡区碎屑岩岩性地层型区带评价实例 .....	(293)
<b>第二节 地层圈闭有效性评价方法 .....</b>	<b>(303)</b>
一、超覆型地层圈闭有效性评价 .....	(303)
二、削截型地层圈闭有效性评价 .....	(311)
三、碳酸盐岩地层圈闭有效性评价 .....	(313)
四、火山岩地层圈闭有效性评价 .....	(318)
五、变质岩地层圈闭有效性评价 .....	(325)
<b>第三节 关键参数评价方法技术 .....</b>	<b>(327)</b>
一、碳酸盐岩古岩溶识别方法 .....	(328)
二、碎屑岩风化壳识别方法 .....	(329)
三、火山岩风化壳识别与评价方法 .....	(335)
四、变质岩风化壳识别与评价方法 .....	(336)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(344)</b>

# 第一章 绪 论

地层油气藏从1880年概念的萌芽、提出,到发展至今,经历了一个多世纪,目前已成为油气增储上产的重要勘探领域之一。世界范围内,已探明的地层油气藏储量约占总探明储量的22%。探明油气当量在 $0.3 \times 10^8 \text{t}$ 以上的巨型、大型地层油气藏探明储量占地层油气藏总探明储量的61% (邹才能等,2010)。据不完全统计,2000年到2012年,中国石油地层油气藏新增天然气可采储量占总探明储量的19.6%,新增探明石油可采储量占总探明储量的26.0%,其中碎屑岩地层油气藏的探明石油可采储量约占40%。近年来,随着中国对地层油气藏研究的深入和勘探的重视,塔里木、四川、鄂尔多斯、准噶尔、渤海湾等盆地勘探获得了重大突破,主要的探明油气储量增长,很大部分源自于地层油气藏。

中国地层油气藏勘探取得了重大进展和成功,得益于老一辈石油地质学家和勘探家们的不懈努力和政策的扶持,尤其是“十五”、“十一五”、“十二五”中国石油岩性地层项目团队的深入研究与大力推广,为推动中国油气储量快速增长、保障油气储采比大于1,提供了坚实的理论基础和技术保障。

## 第一节 油气地质理论发展历程

中国是世界上最早开发天然气的国家,四川自流井气田的开采约有两千年的历史。但现代油气勘探开发一般以1859年美国成功钻探世界上第一口工业油井作为标志。在近代石油工业发展的150多年间,随着油气勘探开发实践的不断深入和积累,石油地质学理论日臻完善。

### 一、世界石油地质学发展

自1861年背斜油气地质理论提出以来,世界油气工业经历了150多年的理论技术探索发展,经历了常规油气、常规与非常规油气并举阶段,即将进入非常规油气发展阶段。早期油气产量增长缓慢,直到1920年油气当量产量才突破 $1.0 \times 10^8 \text{t}$ 大关;随着油气勘探开发理论、方法技术的不断涌现和创新发展,2014年世界油气当量产量上升至近 $73.5 \times 10^8 \text{t}$ ,其中,石油产量 $42.2 \times 10^8 \text{t}$ ,天然气当量产量 $31.3 \times 10^8 \text{t}$  (图1-1)。

19世纪中叶,加拿大的亨特(T. S. Hunt, 1861)、俄国的阿比赫(Г. В. Авиx, 1863)、美国的怀特(I. G. White, 1885)、奥地利的豪佛(Hofer, 1888)等先后提出了石油储集的“背斜说”,成为近代石油地质学的基础。1916年,D. Hager在美国出版了世界上第一部石油地质专著《实用石油地质》。20世纪30年代,在美国得克萨斯州东部地区发现巨型地层油藏之后,地质学家们认识到不能简单地仅靠“背斜理论”寻找油气,要



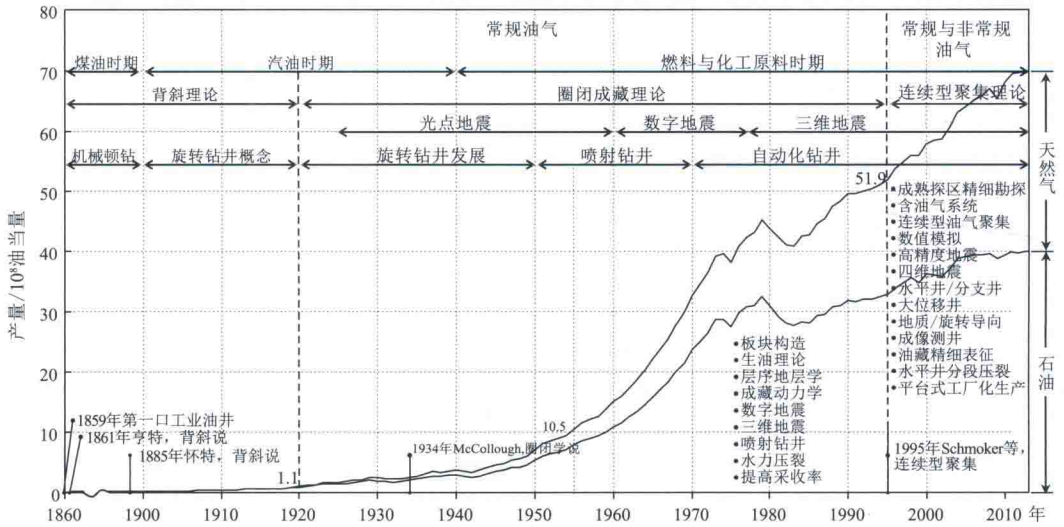


图 1-1 世界油气工业及理论技术发展历程

发现更多的新油气田，必须广泛地采用地层学、沉积学等新方法与新理论。1934年 McCollough 正式提出了极其重要的“圈闭学说”，成为常规油气成藏的理论内核。此后的油气勘探开发中，人们对沉积盆地形成与演化、背斜形成与演化、油气生成与运聚、油气藏形成与保存等方面不断进行研究与总结，形成了一系列指导油气勘探开发的理论与学说，奠定了现代石油地质学发展的基础。1956年，美国学者莱复生（A. I. Levorson）的《石油地质学》问世，实现了石油地质学理论的系统化、科学化，推动了世界油气工业快速发展。20世纪70~80年代，隐蔽油藏概念的提出（M. T. Halbouty, 1972），地震地层学（P. R. Vail, 1977）和层序地层学（B. Haq, P. R. Vail, H. W. Posamentier, 1987）的创立，使油气勘探领域进一步拓展，石油地质理论进一步丰富。20世纪90年代以来，沉积盆地数值模拟（I. Lerche 1990; S. Cloetingh, W. Sesir, F. Horvathetal, 1993）与含油气系统（Magoon and Dow, 1991, 1994）成为当代石油地质学发展的一个前沿，再现了含油气盆地形成与演化的动力学全过程，以及与之相伴的油气生成、排出、运聚和成藏历史，并包含各要素成藏过程中的时间配置关系和瞬态变化，使石油地质学从静态的单因素定性描述，提升到动态的整体化、定量化表征。近20年来，随着世界非常规油气勘探开发、非常规油气聚集理论取得突破认识，Schmoker等（1995）提出的“连续型油气聚集”概念，成为非常规石油地质的里程碑。Selley（1998）的《石油地质基础》（*Elements of Petroleum Geology*）、B. E. Law与J. B. Curtis（2002）的《非常规石油系统》（*Unconventional Petroleum Systems*）、邹才能等（2011）的《非常规油气地质》等将非常规油气地质理论的研究推向了较深入、广泛的领域，丰富和发展了非常规石油地质学理论。

### 1. 背斜油气藏理论

1848年美国人威廉·劳根（William Logan）发现油苗沿背斜分布，并将背斜概念引入石油勘探。1861年加拿大地质调查局的斯泰利·亨特（T. S. Hunt）初步提出背斜理论，对烃源岩、背斜构造、裂缝及遮挡条件4个油气聚集条件进行了论述。1885年美国人怀特（I. C. White）在《科学》杂志上发表的“天然气地质”（*The Geology of Natural*

Gas), 第一次系统地阐述了背斜油气藏理论, 1888 年成功地将该理论应用于井位部署, 从此背斜油气藏理论引起勘探家们的高度重视。美国、墨西哥等美洲国家开始推广应用背斜油气藏理论找油, 并在油气勘探实践活动中获得成功。

背斜油气藏理论认为: 油气聚集于背斜构造中, 石油、天然气和地层水按其密度产生分异, 油气密度低, 占据背斜的上部; 地层水密度大, 分布于背斜下部。背斜褶皱的上部被认为是勘探油气的最佳对象。19 世纪 80 年代, 在美国加利福尼亚州、墨西哥等地区的油气勘探中, 首次利用油田地质技术绘制了构造等高线图, 确定出了背斜褶皱的顶部位置, 发现了一批油田。直到 20 世纪 50 年代背斜油气藏理论都是油气勘探的主要找油气理论。在背斜油气藏理论指导下发现了一大批大型、特大型油气田, 推动了世界油气工业的发展。

## 2. 圈闭油气藏理论

圈闭油气藏理论孕育于 20 世纪初期, 形成于 20 世纪 20 ~ 50 年代。随着油气勘探实践的不断深入, 人们发现油气聚集场所除背斜构造外, 还包括盐丘、古潜山等其他构造类型。1901 年在墨西哥湾首次发现了盐丘油藏, 1907 年在罗马尼亚发现了底辟构造油藏, 1909 年在美国辛辛那提隆起寒武纪白云岩中发现了世界上第一个古潜山油藏。F. G. Clapp (1910, 1917, 1929) 提出了油气聚集的构造分类, 包括背斜、向斜、穹隆、不整合及断层等类型, B. R. 利莱 (1928) 指出油气藏存在不同的成因类型。McCollough (1934) 正式提出了“圈闭学说”, 认为圈闭需具备 3 个条件, 即储集层、盖层和遮挡条件, 具有统一的油、气、水界面, 储量严格按圈闭面积、闭合度、孔隙度等计算。威尔逊 (1934) 将油气藏分为闭合油气藏和开放油气藏两大类, 其分类涵盖了构造、岩性地层及复合油气藏类型。A. I. Levorsen (1956) 在其所著的《石油地质学》中建立了较为完善的圈闭分类体系, 将圈闭划分为构造、地层和复合圈闭, 其中地层圈闭包括原生地层圈闭和次生地层圈闭两类。1920 ~ 1950 年期间, 石油地质学的主要进展体现在圈闭学说的提出和发展。自圈闭学说提出后, 人们认识到, 只要具备储层、盖层和遮挡条件, 就有可能形成油气的聚集, 背斜仅仅是最常见、最简单的一种圈闭。1930 年在美国发现的东得克萨斯油田为世界上第一个岩性地层大油田, 以后又发现了一批非背斜大油气田。岩性、地层及复合成因的圈闭也是油气聚集的有利场所, 圈闭油气成藏是常规油气的理论核心。

## 3. 干酪根热降解生烃理论

20 世纪 60 年代, 随着有机地球化学的发展和现代分析测试技术的进步, 地球化学家们对油气有机成因的认识取得重要进展, 形成了干酪根热降解生油说。Bray 等 (1961) 发现现代沉积物和生物体中正烷烃碳数分布具奇偶优势, 正脂肪酸碳数分布具偶奇优势, 而古老沉积岩和石油中不具此优势, 这一发现开启了有机质成岩演化机理及与石油形成关系的研究。Phillippi 等 (1965) 提出沉积有机质大量转化成烃类需要一定的埋藏深度和温度; Vassoevich (1969) 提出石油生成存在主要阶段和主要相态; Pusey (1973) 提出了“地温窗”和“液体窗”的概念; 20 世纪 70 年代初, B. P. Tissot 等以巴黎盆地下托尔阶页岩为研究对象, 揭示了干酪根转化成油的机理, 形成了干酪根热降解生烃理论。Connan (1974)、Tissot 和 Welte (1978) 深入研究了油气生成与温度和时间关系, 建立了石油生成模型, 定量确定烃源岩生烃潜力。



以蒂索 (B. P. Tissot) 为代表的干酪根热降解生烃理论认为, 原始有机质沉积以后, 首先经过复杂的生物化学作用和聚合缩合作用形成干酪根, 干酪根在达到一定的埋藏深度后, 在温度的作用下发生热降解作用逐渐生成石油。将沉积物中的有机质分成两部分, 可溶于有机溶剂的部分称为沥青, 不溶于有机溶剂的有机质残余物即为干酪根。有机质向石油转化是干酪根热降解过程, 也就是 H : C 原子比逐渐增加的过程。石油生成于一定的温度范围 (称为“液态石油窗”)。在干酪根热降解生烃理论指导下, 从有机地球化学和光学测定总结出了一套反映有机质热成熟度的参数, 如  $T_{\max}$ 、 $R_o$ 、 $TTI$  等, 这些参数可直接应用于判识干酪根类型、成熟度及生烃潜力等。有机质成烃理论与分析测试技术的发展为定量评价烃源岩、计算生烃量奠定了理论基础。

#### 4. 含油气系统

随着油气工业的发展, 油气勘探难度越来越大, 仅靠背斜油气藏、圈闭和干酪根生油等理论已不能满足油气勘探实践的需要, 石油地质学家开始关注油气从烃源岩到圈闭的成藏全过程。含油气系统理论立足于沉积盆地整体, 在静态地质要素分析的基础上, 详细刻画油气生成、运移、聚集、成藏、保存的整个动态过程, 深刻理解油气藏形成的机理及分布规律。立足沉积盆地, 研究油气动态成藏全过程是石油地质学的一次重大发展。这一时期的板块学说、含油气盆地构造学、沉积储层学、层序地层学等相关学科的重大进展, 以及干酪根热降解生烃理论与油气运移的创新性理论, 促进了含油气系统研究的快速发展。

含油气系统早期是基于苏联地质学家的“含油气区”的认识, 他们认为“含油气区是成因上有联系、大区域构造单元相伴随的油气聚集区域”。Perrodon 在其所著的《石油地球动力学》中, 明确提出“没有盆地就没有石油”; Weeks 认为盆地分类是评价未发现油气资源的基础。油气动态成藏过程由 W. G. Dow 等 (1972) 首次在“石油系统” (oil system) 的概念中提出, 随后 A. Perredon (1980, 1992)、F. F. Meissner (1984)、G. F. Ulmishek (1986)、L. B. Magoon (1987)、G. Demaison 等 (1991)、H. D. Klemme (1994) 等学者拓展了其内涵与研究领域。J. M. Hunt (1990) 又提出了流体封存箱成藏理论, 将生、储、盖等油气藏形成的静态要素与温度、压力等动态条件结合起来, 全面揭示了油气生成、运移、聚集和成藏的动态过程。1994 年 L. B. Magoon 和 W. G. Dow 进一步丰富和完善了“含油气系统” (petroleum system) 概念, 强调油气“从源岩到圈闭”, 通过地质作用过程将各成藏要素链接为一个有机的整体, 简单含油气系统可用埋藏史图、剖面图、平面图、含油气系统事件图和油气聚集统计表“四图一表”来描述和评价。

含油气系统的研究以过程恢复为主线, 以关键时刻的成藏要素与成藏作用组合关系为重点, 综合、系统、动态地研究油气输导体系、运移路径、成藏动力及成藏期次, 详细刻画油气成藏的整个过程, 实现石油地质研究从传统的静态地质要素分析, 转变为面向动态地质过程的各个要素综合分析, 详细刻画油气藏的形成机理及分布规律。

#### 5. 非常规油气聚集理论

非常规油气的研究始于 20 世纪 30 年代, 属于 W. B. Wilson (1934) 油气藏分类中的开放性油气藏, 虽然当时认为该类油气藏没有勘探价值, 但已预测到非常规油气藏的存在。20 世纪 80 年代以来, 随着世界油气地质理论的发展与勘探技术进步, 盆地中心气 (B. E. Law, 2002)、煤层气 (W. B. Ayers Jr, 2002)、页岩气 (Nielson, 1990)、致密砂岩

气 (J. A. Masters, 1979)、页岩油 (H. W. Parker, 1970) 等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, 非常规油气地质研究也取得了长足进展, 涵盖了非常规油气资源内涵、种类、地质特征、资源评价方法和开发技术等各个方面。

美国地质调查局 (USGS) 的 Schmoker 和 Gautier 等 (1995) 针对含油气盆地中致密砂岩、煤层、页岩等非常规储层中油气大面积聚集分布、圈闭与盖层界限不清、缺乏明确油气水界面的特点, 提出了“连续型油气聚集”的概念, 在非常规石油地质理论发展中具有里程碑意义, 是非常规石油地质理论科学发展的重要标志和理论内核。基于这一概念, USGS 对致密砂岩气、页岩气、盆地中心气、煤层气、浅层微生物气及天然气水合物等非常规天然气资源进行了评价 (Schmoker, 1999, 2002; Klett et al., 2003; Klett et al., 2004; Crovelli, 2004; Cook, 2004; Schmoker, 2005; Pollastro, 2007)。B. E. Law 等 (2002) 提出了非常规油气系统的概念, 指出非常规油气系统与圈闭无关, 基本上不受重力分异的影响, 区域上存在大规模普遍含油气区带, 并对煤层气、深盆气及天然气水合物等非常规天然气资源进行了评价。2007 年石油工程师学会 (SPE)、石油评价工程师学会 (SPEE)、美国石油地质师协会 (AAPG)、世界石油大会 (WPC) 在《油气资源管理系统》中定义了非常规油气资源相关概念, 认为连续型矿产 (continuous-type deposit) 和非常规资源 (unconventional resources) 基本等同, 都定义为大面积连续分布、受水动力影响很小的油气聚集, 包括盆地中心气、页岩气、天然气水合物、天然沥青及油页岩等, 同时强调了其技术难度及经济可行性。

Harris (2012) 基于渗透率和流体黏度, 将非常规油气资源定义为: 通过技术改变岩石渗透率或流体黏度, 使得油气的渗透率与黏度比值变化, 从而获得工业产能的油气资源。针对非常规储层微观孔喉特征, 美国学者 Reed 和 Loucks (2007) 利用场发射扫描电镜实验观测分析表征了美国得克萨斯州沃斯堡盆地 Barnett 页岩储层的有机质孔隙特征, 其后多位学者针对非常规储层微观孔喉系统进行了研究 (Desbois et al., 2009; Curtis et al., 2010; Milner et al., 2010; Schieber, 2010; Slatt 和 O'Neal, 2011)。研究表明, 不同的孔隙结构决定了非常规储层性质的差异, 孔隙类型、尺寸与排列影响油气原地赋存与聚集 (Ambrose et al., 2010), 也影响页岩的封盖能力 (Dewhurst et al., 2002; Schieber, 2010)。孔隙成因与分布的差异性, 将对储层的渗透率和物性产生影响 (McCreesh, 1999; Passey et al., 2010)。非常规油气聚集理论正引起越来越多的石油地质学家的关注, 已经成为目前石油地质学研究的前沿。

## 二、中国石油地质学发展

众所周知, 中国是世界上最早发现、开采和利用石油与天然气的国家之一。据史料记载, 中国油气勘探开发至少已有 3000 多年历史, 中国石油地质的早期认识和利用曾一度领先于世界。早在 11 世纪末, 北宋科学家沈括在描述延河边的油苗时, 就明确指出“盖石油至多, 生于地中无穷”。到明清时期, “扇泥”已成为认识和划分地层、找油找气的一种重要手段。

中国近代石油工业起步于 19 世纪 80 年代。早在 1878 年, 清政府就在台湾设立了我国第一个开发石油的行政管理机构——矿油局, 在台湾苗栗钻成了中国第一口近代油井, 井深 120m, 日产油 0.75t; 1907 年在陕西钻探了延长 1 井, 井深 81m, 日产油 1.5t。到



1949年,在中国发现和投入开发的油气田有陕北延长、甘肃老君庙、新疆独山子、四川自流井、台湾锦水等中小型油气田,油气产量较低,1949年中国石油产量仅为 $12 \times 10^4 \text{t}$ 。中国石油地质学发展起步较晚,直到20世纪20年代以后,中国石油地质理论才系统产生,并且形成了陆相生油理论、“源控论”、复式油气聚集带(区)论,逐步形成了中国陆相石油地质理论体系。20世纪80年代以来,中国加强了东部成熟探区隐蔽性的岩性-地层油气藏、中西部前陆盆地与叠合盆地以及近海海域油气勘探,均取得了重大进展,石油地质理论在煤成烃理论、低熟油理论、陆相层序地层学、复合含油气系统、富油气凹陷满凹含油理论、叠合盆地成藏理论、前陆冲断带断层相关褶皱理论、岩性-地层油气藏大面积成藏理论、海相碳酸盐岩油气聚集理论、大油气区勘探地质理论等方面取得了重大进展。进入21世纪,随着非常规油气资源在北美地区的成功勘探开发,中国也加强了非常规油气勘探与研究,在鄂尔多斯盆地致密砂岩油和气、沁水盆地煤层气、四川盆地威远-长宁及涪陵地区等页岩气等非常规油气领域取得重大突破,开始从油气聚集机理、地质特征、勘探方法、选区评价与资源潜力预测等方面进行系统研究,初步建立起中国非常规油气聚集理论,推动了中国非常规油气快速发展。

### 1. 陆相生油理论

20世纪30年代之前,世界上已发现的油气田皆形成于特定大地构造单元的海相环境中,对陆相盆地能否形成大规模油气聚集普遍持否定态度,这也是美孚石油公司顾问富勒(1916)、斯坦福大学地质系教授希洛埃(1927)、德士古石油公司经理罗杰斯(1932)等专家得出中国“贫油论”的主要依据。中国老一辈地质学家以扎实的地质理论,结合多年勘探经验,指出“美孚的失败,并不能证明中国没有油气可办”(李四光,1928)。谢家荣、潘钟祥、黄汲清、孙健初等地质学家坚持实践第一,先后到陕北高原、河西走廊、四川盆地及天山南北进行油气地质调查,分别于1937年和1939年在陆相盆地中找到了新疆独山子油田和甘肃玉门老君庙油田,正式开启了中国陆相找油和研究的序幕。

1941年,潘钟祥在*AAPG Bulletin*发表题为“中国陕北和四川白垩系陆相生油”的论文,指出陕北的石油产自陆相三叠系及侏罗系,四川产天然气的自流井也是陆相地层,第一次在国际上系统阐述了“中国陆相生油”的观点,明确提出石油不仅来自海相地层,也能够来自淡水沉积物。1943年,黄汲清等在《新疆油田地质调查报告》中也提出:“陆相地层可以形成具有经济价值的油田。”1948年翁文波等提出“陆相生油,多期、多层含油的认识”。

1949~1960年,是中国陆相生油理论初步形成阶段。1957年,谢家荣指出大陆沉积中有机物可能主要是由陆生植物分异而来,陆相地层才是最可能的生油层。1959年,侯德封在探索西北地区油田形成地质条件时指出潮湿与干燥气候的时代转变,有利于生油层的形成。中国科学院兰州地质研究所则提出了“内陆潮湿拗陷”说,强调了古气候条件对陆相生油的重要性。田在艺等在详细分析总结准噶尔、鄂尔多斯、四川等盆地油气田形成的地质条件时,强调了长期拗陷的作用。石油科学研究院在翁文波院长的主持下,先后刊出了3辑《石油勘探研究报告集》(1960~1964),强调了“深水拗陷”的作用,指出长期的深拗陷有利于生油层的形成,盆地深拗陷的特征和分布对油气分布起着主要控制作用。至此,初步形成了中国陆相生油理论的基本轮廓。

1960年以来,是中国陆相生油理论深化发展阶段。该阶段对陆相生油层的形成和陆

相生油的基本条件做了深入系统的研究，总结出了潮湿与干燥气候的时代转变、长期的深坳有利于生油层的形成，内陆地区潮湿强烈坳陷的盆地、淡水—半咸水迅速堆积的巨厚湖泊相沉积、有机质丰富、还原环境是陆相生油的基本条件（田在艺，1960；胡朝元，1982；黄第藩等，1982，1984；胡见义等，1991；程克明等，1996）。由于陆相地层沉积相变化快，油气不能进行长距离运移，因而生油坳陷范围就是油气田的主要分布区（高瑞琪等，1997）；系统建立了陆相烃源岩和石油地球化学系列指标和参数（黄第藩等，1982，1984；程克明等，1995），使陆相生油理论从定性的地质推断发展为半定量—定量的科学分析，诸如有机质丰度、组分和类型、成熟度数值和参数的确定等，为烃源岩评价、生油量的定量评价、资源评价和石油演化提供了科学依据，为勘探目的层的确定提供了方法；确定了陆相烃源岩和油气中生物标志化合物、排油气门限及相关参数（黄第藩等，1982，1984；王廷栋等，1990；庞雄奇等，1997；王铁冠，2002；何生等，2010），建立了超压抑制有机质热演化的多参数识别标志，揭示了不同成熟度指标对超压的差异响应（郝芳等，2006），为油气源对比和生源、石油运移路径及动力的确定提供了科学信息（李明诚，1987；李思田，1995）。20世纪80年代，还对未熟—低熟油的形成条件、有机地球化学特征及分布规律进行了探讨，建立了未熟—低熟油理论，突破了干酪根热降解成烃学说的局限性。

近年来，中国新一代地球化学家进一步对陆相生油理论进行了完善与发展，提出了陆相烃源岩和油气中生物标志化合物及相关参数指标，标志着陆相生油理论的研究从宏观跨入分子地球化学新阶段；干酪根和油气、组分单体与系列碳同位素组成研究和数值的测定，为岩—油—气源直接对比提供了途径；对石油组分特别是饱和烃组分的确定、各种参数的标定等，为石油和烃源岩属性的研究提供了科学标尺；提出了陆相油气生成是地质历史发展、湖泊演化和生物化学进化的必然结果的基本结论，系统总结了成油湖泊的类型、演化和成油期，建立了陆相有机质成烃演化模式、成烃母质类型等陆相有机质类型划分标准及生烃潜力评价标准等指标，指出优质油源区是大中型油田形成的物质基础。

## 2. 源控论

源控论起源于20世纪50~60年代对松辽盆地生油区控制的油气田分布规律进行了总结（胡朝元等，1962）。松辽盆地大庆油田油气运移距离较短，油气自烃源岩生成后，就近聚集在生油有利区或邻近地带，这一分布规律的认识被简称为“源控论”（邱中建、龚再升，1999）。源控论指油气田的形成与分布密切受烃源岩控制，源控论的提出是基于陆相沉积的岩性岩相演变频繁与展布范围有限，油气田往往发育在生油坳陷的中心及周边，主力生油中心控制了大中型油气田的分布。

源控论强调勘探要找有利的生油凹陷和地区，勘探思路主要为“定凹选带”，即在一个盆地的勘探初期，要尽快利用各种手段查明生油中心，发现和确定生油区，并在其中或邻近地区选择有利圈闭进行钻探。

源控论在渤海湾盆地初期油气勘探过程中发挥了重要作用，同时勘探实践又进一步深化了源控论的内涵。渤海湾盆地勘探早期，源控论的找油思想已深入到该地区工作的石油地质家脑海中，勘探部署贯彻了源控论的基本思想。包括渤海湾盆地在内的华北地区勘探初期，基于勘探古生界油气藏的认识，部署钻探的华1—华6井均告失利。1960年在山东惠民凹陷沙河街构造上钻探的华7井，发现了近千米厚的古近纪暗色地层，明确了古近系