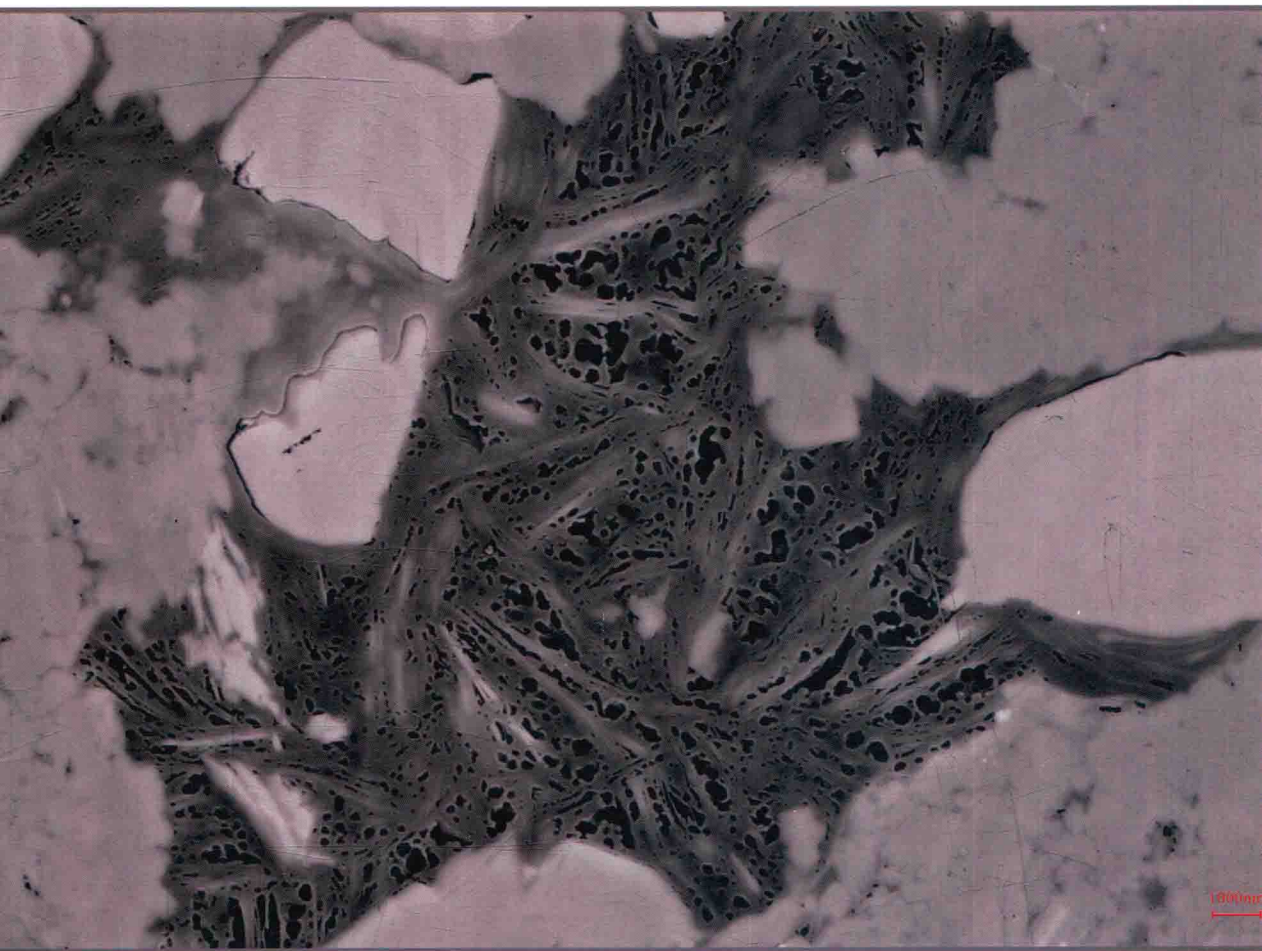


高等学校教材

# 非常规油气地质学

邹才能 等著



地质出版社

# 非常规油气地质学

邹才能 陶士振 侯连华 朱如凯 袁选俊  
张国生 宋岩 牛嘉玉 董大忠 吴晓智  
柳少波 蒋凌志 王社教 郭秋麟 杨智  
张颖 周灿灿 白斌 等 著

地质出版社

· 北京 ·

## 内 容 提 要

本书在分析展望石油工业发展趋势、非常规油气理论技术、发展前景与战略思考的基础上,系统介绍了非常规油气地质理论、关键技术与主要类型。全书分3篇,第一篇“非常规油气地质学基础”,包括绪论、非常规油气地质学内涵、非常规油气储集层、非常规油气聚集与评价;第二篇“非常规油气技术”,包括非常规油气资源评价方法、实验分析技术、地球物理技术、钻完井技术;第三篇“非常规油气各论”,包括致密油气、页岩油气、煤层气、重油沥青、油页岩、天然气水合物、其他非常规油气资源。本教材注重理论体系、技术方法和典型实例的并重与结合,在内容和结构上,体现了科学性与实用性、完整性和系统性的有机统一。

本书可供相关院校及科研院所作为教材使用,也可供油气勘探和研究工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

非常规油气地质学 / 邹才能等著. —北京:地质出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-116-08864-1

I. ①非… II. ①邹… III. ①石油地质学 IV. ①TE14

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第141104号

### FEICHANGGUI YOUQI DIZHIXUE

---

责任编辑:孙亚芸

责任校对:关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324569(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:31.25

字 数:740千字

版 次:2014年8月北京第1版

印 次:2014年8月北京第1次印刷

定 价:68.00元

书 号:ISBN 978-7-116-08864-1

审 图 号:GS(2014)2047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)


# 序 一

油气资源可分为常规资源、非常规资源两种基本类型，油气工业发展随着钻井、采油工艺技术的进步将经历常规油气、常规与非常规油气并重到非常规油气资源开发3个阶段，形成石油工业的发展史。目前我国常规油气资源（包括致密气）的探明程度石油仅为36%、天然气为16%；非常规油气资源探明程度煤层气为2%，页岩气勘探刚刚起步。就资源而言，油气仍可在相当长时期内满足人类社会发展的需要。非常规油气的开发，将使石油工业生命周期再延长数个世纪，使人类有充裕时间发展可再生能源和新能源。

理论来源于实践，理论又是为实践服务。我国陕甘宁、内蒙古省（区）范围内的鄂尔多斯盆地致密油气的大面积成功开发，为我国非常规油气发展提供了借鉴。1907年延1井上三叠统延长组致密砂岩内获得工业油流后，2012年中石油长庆油田公司、陕西延长油田公司及中石化镇泾油田年采油 $3547 \times 10^4 \text{t}$ ，历年累计采油 $27940 \times 10^4 \text{t}$ ，采油井逾10万口。1989年陕参1井于下奥陶统马家沟组灰岩获得工业气流。90年代又发现大面积分布的下二叠统石盒子组和山西组致密砂岩气藏。2012年产气 $314 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，其中，致密砂岩气 $270 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，灰岩气 $44 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。历年累计产气 $1745 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，建成气井万余口。1997年中石油建成陕京输气管线，实现了向北京供气。我国应从长远发展的道路来引领非常规油气资源的发展。应根据各油气盆地的地质条件，创造先进、适用的技术，走低成本的发展道路。

中国石油勘探开发研究院邹才能教授及其研究团队，为推进中国非常规油气资源的发展，依托先进的非常规油气实验室，结合多年来的研究与大量调研分析，先后于2011年、2012年编写出版了《非常规油气地质》第一版与第二版（北京，地质出版社），2012年在Elsevier出版了英文版。这些著作系统介绍了非常规油气内涵、地质特征、分布规律、资源潜力和勘探开发技术。2013年邹才能等合作者在《石油勘探与开发》第4期又刊出“非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学”一文。此外，作者还借助中国石油培训班、科研院校等平台宣讲国内外非常规油气勘探的理论与技术进展，推动非常规油气地质学的传播。本书的出版，为我国非常规油气从业者、科研院校师生及能源从业者提供了一部精品力作，值得庆贺和推广。

中国科学院院士



2014年7月

## 序 二

### PREFACE

Dr Zou and his colleagues have embarked beginning in 2011 on a major effort to put together a comprehensive book covering one of the two most important global aspects of the future of petroleum namely unconventional oil and gas (the other one is in my view the challenge of improved oil recovery in conventional fields).

The growing demand for energy in general is continuously growing due to the twin factors of population growth and improved standard of living worldwide and in China specifically. As far as petroleum is concerned the emerging importance of unconventional resources cannot be overstated, only about a third of the world's oil and gas reserves are conventional, the remainder are in unconventional resources including unconventional resources are: tight gas sands and carbonates, coalbed methane (CBM), shale gas and oil, heavy oil/tar sands, and methane hydrates. These resources are called "unconventional" because in order to economically access and produce them unconventional methods and expertise are required.

Most importantly unconventional hydrocarbon reservoirs have low permeability and porosity and so are difficult to produce. Often enhanced recovery techniques, such as fracture stimulation or steam injection etc., must be performed, making the process more difficult than a conventional play.

Unconventional Petroleum Geology written by Dr. Zou and his colleagues is a broad, updated and a truly unprecedented overview of the key technical aspects & progresses of all unconventional resources E&P, and their latest progresses on nano-pore characterization in tight oil/gas and shale oil/gas rocks in China, hydrocarbon enrichment and producing mechanism, "Sweet-spot" evaluation, and spatial distribution & prediction of petroleum resources, all of which are full of scientific value and practical significance. This book promises to serve as the first comprehensive textbook ever for graduate/postgraduate studies. The appearance of both prospective English and this Chinese version will make this unique textbook useable worldwide.

I congratulate Dr. Zou and his team for their major contribution.

Amos Nur

Stanford University

Member, US National Academy of Engineering

2014. 7. 30

# 前 言

能源与水、粮食一起构成人类赖以生存的三大要素。能源好似地球人前行的动力，油气又好似地球人敏感的“神经”。人类利用能源将经历从木柴向煤炭、煤炭向油气、油气向新能源的3次重大转换。随着世界经济社会对能源需求的持续增长、国际油价的高位运行和低碳社会的到来，由传统油气走向新能源的第三次重大转换将成为必然趋势。但在未来相当长时期内，新能源尚难以担当重任，全球一次能源正在迈入石油、天然气、煤炭、新能源“四分天下”的发展时代，油气在未来能源结构中的比例仍超过50%。目前，世界石油工业发展有三大态势，常规油气进入持续发展期，非常规油气进入战略突破期，油气科技创新进入黄金发展期。

油气资源可分为常规资源、非常规资源两种基本类型，常规与非常规油气“有序聚集、空间共生”，石油工业将形成常规油气和非常规油气两大协同发展工业体系，油气工业将经历常规油气、常规与非常规油气并重、非常规油气3个发展阶段，形成完整的石油工业生命周期。研究表明，全球常规与非常规油气资源总量大约 $5 \times 10^{12}$  toe，常规与非常规油气资源比例大约为2:8；形成中东、俄罗斯、北美、南美四大常规油气分布区，北美、亚太、南美、俄罗斯四大非常规油气分布区。目前常规油气资源采出程度仅为25%，非常规油气资源采出程度还微不足道。从资源角度看，油气完全可以在未来相当长时期内满足人类社会发展的需要，预测石油工业的生命周期将超过300年。

研究揭示全球常规-非常规油气形成与分布有10个基本规律：①常规-非常规油气有序聚集与空间共生；②特提斯域控制全球油气富集带的形成分布；③前陆盆地冲断带控制大型构造油气田群分布；④克拉通内隆起控制特大型油气田展布；⑤台地边缘控制生物礁滩大油气田群分布；⑥被动大陆边缘控制海洋巨型油气田形成分布；⑦前陆盆地前渊斜坡控制大规模重油沥青赋存；⑧盆地沉积斜坡控制致密油气与煤层气聚集；⑨盆地深水富有机质沉积控制页岩油、页岩气滞留；⑩低温高压海底沉积控制水合物展布。

目前，全球已进入常规油气稳定上产、非常规油气快速发展的新阶段。全球已基本形成中东、中亚-俄罗斯两大常规油气规模生产区。全球常规油气剩余可采储量与待发现可采资源量约2/3分布在中东、中亚-俄罗斯地区，其中，石油占全球总量的63%，天然气占全球总量的67%；中东、中亚-俄罗斯两大常规油气生产区油气产量比例持续上升，石油产量比例已由2000年的43%增长到2013年的49%，天然气产量比例已由2000年的34%增长到2013年的40%。全球正在形成西半球的美国、东半球的中国两大非常规油气战略发展区。非常规油气勘探开发在致密气、煤层气、页岩气、致密油等领域相继获得重大突破，非常规油气产量占油气总产量的比例快速升至10%以上。

近10年成为美国页岩气、致密油“革命性发展的黄金十年”。页岩气由南部地区的巴内特，到海恩斯维尔，再到东部地区的马塞勒斯，持续获得重大发展，成为非常规油气

发展的热点,2013年页岩气产量高达 $3100 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,约占美国天然气总产量的45%;致密油由北部地区的巴肯,到南部地区的鹰滩,再到东部地区的尤蒂卡,连续获得重大突破,成为非常规油气发展的亮点,2013年致密油产量已达 $1.4 \times 10^8 \text{ t}$ ,约占美国石油总产量的28%。页岩气、致密油等非常规油气快速发展使得美国油气对外依存度大幅下降,2013年,美国天然气对外依存度已降至5%,石油对外依存度降至33%,非常规油气持续推动着美国“能源独立”战略的实施。美国未来很有可能依靠美洲实现宽泛意义上的“能源独立”,保障美国本土“能源安全”。

近10年成为中国致密气、致密油“开创性发展的探索十年”。致密气已成为天然气增储上产的重要领域,近10年平均新增探明致密气地质储量 $2760 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,约占同期探明天然气总储量的45%;2013年致密气产量已达 $340 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右,约占全国天然气总产量的29%;发现了到目前为止全国最大的苏里格致密气区,截至2013年年底探明和基本探明地质储量已达 $3.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,年产量已达 $212 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。致密油在鄂尔多斯、准噶尔、松辽等盆地发现了 $(5 \sim 10) \times 10^8 \text{ t}$ 级的储量规模区,在渤海湾、四川等盆地也获重要突破。煤层气初步建成沁水盆地南部、鄂尔多斯盆地东缘两个地面生产基地,2013年地面煤层气开采量已达 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。页岩气在四川盆地南部和东部志留系龙马溪组海相页岩已初步实现工业突破(本书封面是2010年中国第一口页岩气发现井威201井有机质纳米孔图,孔径 $100 \sim 200 \text{ nm}$ ),2013年产量超过 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。致密油、致密气已成为中国非常规油气发展的第一重点,煤层气、海相页岩气将实现规模化生产。

未来世界石油工业科技发展主要有4个创新制高点:①老油田提高采收率;②陆地深层油气;③海洋深水油气;④非常规油气。以“页岩气革命”为代表的理论技术创新,正在推动整个非常规油气科技革命。高分辨率三维地震、水平井体积压裂已成为非常规油气勘探开发的两大核心技术,多井平台式“工厂化”生产成为油气低成本开采的新模式。

非常规油气大规模开发带来了油气地质认识、勘探开发技术与开采模式的重大变革,突破了传统常规石油地质学的许多认识,主要体现在5个方面:①突破了储集层物性限制,致密岩石、烃源岩都可以形成有效储集层;②突破了盖层封堵限制,致密储集层本身具有盖层功能,水势能也能封堵;③突破了圈闭界限限制,大面积层状储集体可储存油气,圈闭界限并不明显;④突破了运移动力限制,浮力作用不明显,生烃增压和毛细管压力差也可成为主要动力,通常遵循非达西渗流定律,油气水差异分布也不明显;⑤突破了聚集区位限制,非常规油气主要分布在盆地中心、斜坡等负向构造单元。

我国在非常规油气地质理论研究中取得了10项重要认识:①提出优质烃源岩控制主要非常规油气分布,源储共生型组合有利于非常规油气赋存;②建立陆相敞流湖盆大型浅水三角洲与砂质碎屑流、海陆相富有机质页岩等成因分布模式,拓展了盆地斜坡中心致密油气、页岩油气新领域;③发现非常规致密储层微纳米级孔喉系统,其孔隙占总孔隙的70%~90%,增加了储集空间,提升了非常规油气资源潜力;④建立油气聚集微纳米孔喉结构模式,揭示非常规“连续型”油气聚集规律,明确其与常规圈闭油气的十大特征差异,扩大了油气勘探开发面积;⑤提出非常规油气重点要评价烃源性、岩性、物性、脆性、含油气性与应力各向异性的“六特性”及其匹配关系,为有利区评选提供方法;⑥建立非常规油气“甜点区”优选、水平井体积压裂、平台式“工厂化”生产模式,为勘探开发提供科学程序;⑦建立非常规油气先高产、后低产“L”型开采曲线与理论预测

模型,揭示致密油和气、页岩油和气主要靠新井接替和新技术提高采收率等开发规律;⑧研发致密油和气、页岩油和气等8种类型非常规油气的单井可采储量等不同阶段资源评价方法,形成软件系统,为资源常态化评价提供方法;⑨揭示常规-非常规油气“有序聚集”规律,指出常规油气供烃方向有非常规油气共生、非常规油气外围空间可能有常规油气伴生,找油思想从“源外找油”深入到“进源找油”,需要建立常规-非常规油气协同发展新模式;⑩提出我国近期要加快致密油和气增储上产,加大页岩气、煤层气与页岩油的规模发展,加强页岩油与水合物创新探索的策略,推动非常规油气成为战略性接替资源。

但是,非常规油气发展还面临着10个方面挑战:①传统粗粒沉积学遇挑战,需发展以碎屑岩、碳酸盐岩为核心的细粒沉积学;②常规孔隙储集层遇挑战,需发展以微-纳米级孔隙为核心的非常规储层地质学;③常规圈闭成藏理论遇挑战,需发展以连续型油气聚集理论为核心的非常规油气地质学;④传统地球物理学遇挑战,需发展“六特性”评价技术与方法;⑤传统资源储量评价遇挑战,需建立技术与经济可采储量体系与标准;⑥直井钻探技术遇挑战,需发展水平井规模压裂技术;⑦开采方式遇挑战,需发展平台式“工厂化”生产;⑧管理方式遇挑战,需建立全过程低成本管理模式;⑨“非技术”问题挑战,需有政策、油价、资金、环保、设施等有效支撑;⑩院校教育遇挑战,需大力培养非常规创新型人才等。

一般以1859年美国成功钻探世界上第一口工业油井作为现代油气勘探开发的标志。1917年美国石油地质学家协会(AAPG)成立,并出版了《美国石油地质学家协会通报》(AAPG Bulletin),标志着石油地质学成为一门独立的学科。1934年McCullough(1934)正式提出了“圈闭学说”,成为常规油气成藏的核心内容。1954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的快速发展。

非常规油气研究始于20世纪30年代,指W. B. Wilson(1934)油气藏分类中的开放性油气藏。20世纪80年代以来,非常规油气资源,如盆地中心气(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)等逐渐成为全球油气储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。1995年美国联邦地质调查局(USGS)的Schmoker、Gautier等针对含油气盆地中致密砂岩、煤岩、页岩等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”概念。

2009年作者结合中国非常规油气勘探研究进展,引入“连续型油气聚集”的思想,并揭示出10个特征;2011年、2013年出版了《非常规油气地质》第一版和第二版,2012年Caineng Zou et al. 在爱思维尔(Elsevier)集团出版了《Unconventional Petroleum Geology》一书,2013年邹才能等在《石油勘探与开发》第4期发表了“非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学”一文。从2012年开始至今,作者申请并具体承办了由中国石油集团公司人事部主办的“非常规油气地质理论与评价技术培训班”,介绍国内外最新勘探研究成果,推动中国石油非常规油气的发展。从2011年起,作者还先后



在北京大学、中国石油大学（北京、华东）、西南石油大学、长江大学、西安石油大学等院校，宣讲传播全球非常规油气勘探与理论技术进展及研究成果。2010年、2011年邹才能等在中国石油勘探开发研究院研究生部开设了“非常规油气地质”研究生选修课，从2012年至今还在研究生部开设了“非常规油气地质学”地质类研究生专业必修课程。

作者认为“非常规油气地质学”是一门以研究非常规油气类型、细粒沉积、微纳米级储层、油气形成机理、分布特征、富集规律、产出机制、评价方法、核心技术、发展战略与经济评价等为重点的新兴油气地质学科。非常规油气地质学的核心是“储集层油气是否连续聚集”，评价的重点是烃源性、岩性、物性、脆性、含油气性与应力各向异性的“六特性”及其匹配关系，明确“生油气能力、储油气能力、产油气能力”，勘探主要目的是寻找油气连续或准连续分布边界与“甜点区”，开发寻找低成本开采技术与经济发展模式。而常规与非常规油气地质学的研究任务有显著不同，常规油气地质学的核心是“圈闭是否成藏”，评价的重点是“生、储、盖、圈、运、保”六要素及其最佳匹配关系，勘探主要目标是发现含油气圈闭，开发主要是追求高产和稳产。

非常规油气地质学的意义在于要用非常规思想，不断探索新理论、新方法、新技术、新管理，解决非常规油气勘探开发快速发展的理论技术问题和生产需求。“非常规油气地质学”的发展不仅在于解决人类社会发展的能源需求，更重要的是培育非常规思维、引领非常规创新，使人类认识世界有非常规思想、改造世界有非常规方法、推动世界有非常规人才，形成“非常规哲学”。

为更加系统地普及推广相关理论、技术和方法，更好地推进中国非常规油气工业的发展，作者在系统调研全球常规、非常规油气理论与勘探开发最新进展的基础上，结合国家油气重大专项“岩性地层油气藏成藏规律、关键技术及目标评价”、国家重点基础研究发展计划致密油（页岩油）973等项目及作者团队的研究新成果，在《非常规油气地质（第二版）》的基础上，进一步凝练提升，力求按学生教材的形式，编写出版《非常规油气地质学》一书，供相关院校作为教材使用，也可供科研院所、石油公司等相关研究人员参考。

《非常规油气地质学》共分3篇15章。第一篇“非常规油气地质学基础”，共有4章，分别是绪论、非常规油气地质学内涵、非常规油气储集层、非常规油气聚集与评价；第二篇“非常规油气技术”，共有4章，分别是非常规油气资源评价方法、实验分析技术、地球物理技术、钻完井技术；第三篇“非常规油气各论”，共有7章，分别是致密油气、页岩油气、煤层气、重油沥青、油页岩、天然气水合物、其他非常规油气资源。

“前言”由邹才能、张国生编写；“导言”由邹才能撰写；第一章“绪论”由邹才能、张国生、陶士振、袁选俊、胡素云、李建忠、李小地、杨涛、王红军、杨智、李欣、梁坤等编写；第二章“非常规油气地质学内涵”由邹才能、陶士振、袁选俊、杨智、张国生、吴松涛、高晓辉、庞正炼等编写；第三章“非常规油气储集层”由朱如凯、袁选俊、邹才能、吴松涛、白斌、杨智、蒋裕强、毛治国等编写；第四章“非常规油气聚集与评价”由邹才能、侯连华、杨智、王岚、杨帆、杨春、罗霞等编写；第五章“非常规油气资源评价方法”由郭秋麟、谢红兵、陈宁生等编写；第六章“实验分析技术”由朱如凯、柳少波、刘可禹、吴松涛、白斌、公言杰、马行陟、黄秀等编写；第七章“地球物理技术”由张颖、周灿灿、李潮流、李霞等编写；第八章“钻完井技术”由张国生、

邹才能、张颖、梁坤、李欣等编写；第九章“致密油气”由邹才能、白斌、朱如凯、侯连华、杨华、杜金虎、吴松涛、杨智、王岚、杨涛、贾进华、张响响、苏玲、庞正炼等编写；第十章“页岩油气”由董大忠、邹才能、杨智、黄金亮、王社教、李新景、王玉满、林森虎、崔景伟、王淑芳等编写；第十一章“煤层气”由柳少波、宋岩、马行陟、洪峰、姜林等编写；第十二章“重油沥青”由牛嘉玉、蒋凌志等编写；第十三章“油页岩”由吴晓智、王红岩、刘人和、郭巍等编写；第十四章“天然气水合物”由邹才能、杨智、陶士振等编写；第十五章“其他非常规油气资源”主要包括碳酸盐岩缝洞油气、火山岩储层油气、变质岩储层油气等内容，由侯连华、邹才能、朱如凯、汪泽成、陶小晚、张光亚、杨帆、王招明、李伟、朱光有、匡立春、孟卫工等编写。本书最后由邹才能、陶士振、张国生、杨智、白斌、侯连华、朱如凯、袁选俊、董大忠统编和修改。

感谢中国科学院院士李德生教授和美国工程院院士、斯坦福大学 Amos Nur 教授在百忙中为本书作序。本书编写过程中，得到了中国石油总部、中国石油勘探开发研究院、相关油气田公司及石油院校等单位领导、院士、专家的大力支持与帮助，得到了地质出版社孙亚芸编辑等的精心编辑和校对，在此一并表示诚挚谢忱。由于时间紧迫和作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正，以期在下一次再版时修正！

作者

2014年8月

# 导 言

## 非常规思维

常规人，要有非常规思想。只有枯竭的思想，没有枯竭的油气。认识的误区就是勘探禁区。只有想不到的油气，没有找不到的油气。只有解放不了的思想，没有解放不了的油气。常规思想找不到非常规油气，常规技术拿不到非常规油气。打破常规，形成非常规。常规油气也需要非常规方法。找油要不断重新认识找油理论、不断重新认识找油技术、不断重新认识找油思想。找油要敢于突破传统知识、突破传统技术、突破传统方法。找油要不断突破生烃温度最高极限、突破储层孔隙度最小极限、突破油气深度最大极限。找油就是发展老区、开辟新区、突破禁区。找油气要找准方向，找对方法。找油气方向决定成败，找油气方法决定成效。要用智慧透视地球，用技术降低风险。地质家是指出油气，勘探家是打出油气；研究不死心，探索不放弃。发现是硬道理，产量是硬指标。找油气就是找规律，找规模。找油气要有“不死心、不灰心、不放弃”的精神，坚持要不断，久攻要不弃。找油气是一门技术，更是一门艺术。

## 能源三次转换

水、粮食和能源是人类生存不可或缺的三大要素。能源好似地球人前行的动力，油气好像地球人敏感的“神经”。人类利用能源经历了从木柴向煤炭、煤炭向油气、油气向新能源的3次重大转换。能源开采效益与能源利用效率将成为能源科技创新的主题。随着世界经济社会对能源需求的持续增长、国际油价的高位运行和低

碳社会的逐渐到来，从传统油气走向新能源的第三次重大转换将成为必然趋势。但未来相当长时期内，新能源难以担当重任，煤炭、油气等化石能源仍将占世界能源消费总量的80%左右，常规和非常规油气在一次能源中仍占据主导地位，常规油气资源面临非常规的“新挑战”，非常规油气资源正在转变成“新常规”资源。

## 石油工业生命 300 年

油气工业发展将经历常规油气突破、常规油气与非常规油气并重、非常规油气发展3个阶段，形成完整的石油工业生命周期。据预测世界石油工业的生命周期大约为300年，自1859年现代石油工业诞生起，已历经150余年。1934年 McCollough 提出的“圈闭学说”是常规油气地质理论形成的重要标志，指导了常规油气资源的勘探开发；1995年 Schmoker 等提出的“连续型油气聚集”观点是非常规油气理论开启的里程碑，为非常规油气资源有效开发利用提供了科学依据。囿于找油气理论、技术和方法的不断创新，1956年哈伯特提出的石油产量“峰值理论”已被颠覆，世界油气产量高峰从20世纪60年代开始，可能会延迟到21世纪30~40年代，世界石油工业的生命周期也很可能会超过300年。

## 传统油气认识十大误区

传统油气观点尚存十大误区：①烃源岩只能作为生油气层，不能作为储集层，而页岩气已获突破；②致密储集层不能形成工业化产能，而致密油和气、页岩气已获工业化产量；③油气聚集必须有圈闭，而非常规连续型油气聚集并无明显圈闭；④油气必须靠浮力二次运移才能成藏，而非常规油气非浮力可源内或近源聚集；⑤油、气、水的分布只能是上气、中油、下水，具有统一界面，而非常规油气无统一油、气、水界面；⑥油气聚集必须有盖层，而非常规油气储集层具有盖层功能；⑦油气勘探深度有死亡线，超深层油气没有经济价值，而6000~8000m超深层油气已获发现；⑧油气

勘探存在禁区，而火山岩、变质岩、页岩储集层已获油气突破；⑨盆地斜坡中心负向构造单元以储集水为主，少有油气分布，而负向构造单元已发现了规模油气；⑩油气成藏指标存在严格的上下限标准，而非常规油气形成聚集没有严格的上下限。只有突破认识误区，才能发现找油新区。

## 石油地质研究六个新趋向

随着石油工业的发展，油气地质基础研究呈现新趋向：①生烃评价研究从生烃高峰期，向生烃全过程扩展；②储集层目标研究从发现微米至毫米孔喉的优良储集层，向纳米孔喉的储集层扩展；③油气成因机制研究从具有碳酸盐岩缝洞储集层的“管流”聚集、微米至毫米孔喉储集层的“渗流”运聚，延伸到致密条件的纳米级孔喉储层的“滞留”储集；④油气运移动力研究从浮力驱动，向压差驱动、扩散等多类型动力方式扩展；⑤油气聚集研究从圈闭、连续或准连续分布的大油气区或层系，向揭示常规-非常规不同类型油气资源空间的有序共生分布扩展；⑥资源分布研究从远景与地质资源量评价，向技术可采资源量与经济可采资源量空间预测转变。

## 石油科技革命标志

石油工业正从常规油气向非常规油气跨越，引发了一场重大石油科技革命，使其不断突破储层物性下限，不断突破油气聚集深度上限，不断突破油气采收率极限。石油科技革命有3个显著标志：一是理论的颠覆性，二是技术的突破性，三是生产的工业性。勘探开发非常规油气是，从常规寻找圈闭，向寻找大面积储集层转变，颠覆了传统圈闭油气成藏理论；从常规直井开发，向水平井规模压裂转变，突破了直井传统的开采方法；从常规单井开采，向平台式多井“工厂化”开采转变，打破了一个井场单井开采模式。新的科技革命引领了非常规油气工业化生产，推动世界石油工业理论技术的整体升级换代。

## 石油科技革命成果

石油工业史是科技发展史，油气地质理论技术不断创新，为世界经济持续发展提供了不竭的动力。从常规向非常规油气跨越的石油科技革命，主要形成两大地质理论和四大核心技术，即常规油气圈闭成藏理论、非常规油气连续型聚集理论，常规油气直井钻探技术、常规油气地震预测技术、非常规油气水平井规模压裂技术、纳米与气驱提高油气采收率技术。理论技术推动石油工业不断向前发展，2013 年全球油气产量超过  $70 \times 10^8 \text{t}$  油当量。科技推动油气资源的有效利用，满足了人类社会对油气的需求。

## 油气资源类型划分

以传统圈闭为依据，油气资源可分为构造、岩性地层与复合油气藏。依地质、技术和经济等因素，油气资源可分为常规与非常规两种类型，彼此有因果联系、空间共生。常规油气资源主要包括单体型构造、集群型岩性与地层油气藏。非常规油气资源主要包括准连续型油砂、碳酸盐岩和火山岩储层缝洞型油气；连续型致密油气、页岩油气和煤层气。随着全球油气工业的发展，地域由陆地向深水区、深度由中浅层向深层和超深层、资源由常规向非常规油气快速延伸，大于 3000m 海洋超深水等新区、超过 6000m 陆地超深层等新层系、小于 1000nm 孔隙超致密等新类型，将成为石油工业发展具有战略性的“三新”领域。

## 非常规与常规油气内涵

非常规油气是指用传统技术无法获得自然工业产量、需用新技术改善储层渗透率或流体黏度等才能经济开采、连续或准连续型聚集的油气资源。非常规油气有 2 个关键标志：①油气大面积连续分布，圈闭界限不明显；②无自然工业稳定产量，达西渗流不明显。

主要地质特征表现为源储共生，盆地斜坡中心大面积分布，圈闭界限与水动力效应不显著，主要采用水平井规模压裂、平台式“工厂化”生产、纳米与气驱等技术提高采收率等方式开采；基本类型有页岩油和气、煤层气、致密油和气、重油和沥青等。常规油气是指现有技术能获得自然工业产量的圈闭型油气资源，主要地质特征是储层物性好，源储分离，圈闭界限与水动力效应明显，具有统一油、气、水界面，一般位于正向构造单元，呈单体型或集群型分布，通常采用直井、地震等传统技术方法勘探和开采，主要类型有构造、岩性、地层油气藏。

### 非常规与常规油气区别

非常规资源是地层中难以流动的油气，常规资源是圈闭里可流动的油气。含油气盆地中非常规油气资源普遍分布，圈闭中聚集的常规油气资源是其中富集的“甜点”，分布局限。非常规油气聚集与常规油气藏的本质区别：油气是否明显受圈闭控制，单井是否有自然工业产量。非常规油气研究的灵魂是回答储层是否含油气，勘探的目标是突破“甜点区”、确立连续型或准连续型油气区边界，开发的追求是初期高产与长期累产，工作的关键是编制出成熟烃源岩厚度平面分布图、储层厚度平面分布图、储层顶面构造图和核心区评价表的“三图一表”。随着技术方法的进步，可以推动非常规资源向常规资源转化。常规油气研究的灵魂是回答圈闭是否成藏，勘探的目标是寻找含油气圈闭的边界，开发的追求是油气藏长期高产和稳产，工作的关键是编制圈闭平面分布图、油气藏剖面图和圈闭要素表的“两图一表”。

### 非常规与常规油气资源比例 8:2

非常规油气资源一般占 80%，常规油气占 20%。统计表明，全球非常规石油可采资源规模约  $6200 \times 10^8 \text{t}$ ，与常规石油资源大致

相当；全球非常规天然气可采资源规模约  $4000 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，是常规天然气资源的 8 倍。中国非常规石油可采资源规模约  $240 \times 10^8 \text{ t}$ ，与常规石油资源大致相当；中国非常规天然气可采资源规模约  $100 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，是常规天然气资源的 5 倍。全球非常规油气已实现重大突破，油砂油、重油、致密气、煤层气等成为非常规油气发展的重点领域，页岩气成为非常规天然气发展的热点方向，致密油成为非常规石油发展的亮点类型。非常规油气已成为全球油气供应的重要组成部分，2013 年非常规石油产量已占全球石油总产量的 6%，非常规天然气产量已占全球天然气总产量的 17% 以上，预测 2030 年全球非常规油气产量将占全部油气产量的 20% 以上。

### 常规 - 非常规油气“有序聚集”

常规 - 非常规油气“有序聚集”，是指富油气盆地或凹陷内常规与非常规油气在时间域持续充注、空间域有序分布，二者成因有先后、相互依存、紧密共生，形成统一的油气聚集体系。该体系揭示出不同类型油气资源“有序聚集”的规律，展示出富油气盆地或凹陷内常规与非常规油气资源应“同步研究、同步部署、同步勘探”，可采用多井平台“同步开采”模式对不同层系、不同类型油气“整体规划、整体建设、整体开发”，加快勘探开发节奏，提高资源开发利用效率和经济效益。据此规律可透视不同类型油气在空间上的分布位置，一般地，发现了常规油气，预示着供烃方向可能有非常规油气共生；发现了非常规油气，预示着外围空间可能有常规油气伴生。平面上，一般盆地边缘或斜坡分布有常规构造油气藏和岩性地层油气藏，凹陷或沉积中心聚集有非常规致密油气和页岩油气等；纵向上，从浅到深分布有远源的常规油气藏、近源的致密油气、源内的页岩油气等。以往不同阶段找油气思路有差异，一般早中期立足常规油气资源，用“源控论”寻找大型构造油气藏，用“复式油气聚集带”或“大油气区”理论寻找构造与岩性地层油气藏集群；中后期立足非常规油气资源，用“连续型油气聚集”认



识，寻找近源致密油气或源内页岩油气。而常规 - 非常规油气“有序聚集”体系认识突破了传统找油气思路，推动找油气地质理论从“找点”、“找带”、“找面”向“找体”跨越，打破了先找常规后找非常规的“先富后贫”的找油思路。对待常规与非常规油气，勘探追求“一网打尽”，开发追求“吃干榨尽”。

### 纳米级孔喉系统储层

通常非常规致密储层以纳米级孔喉系统为主，局部发育毫米级至微米级孔隙。纳米级孔喉系统储层主体孔径为 50 ~ 500nm，其中页岩气储层孔径为 5 ~ 200nm，页岩油储层孔径为 30 ~ 400nm，致密灰岩油储层孔径为 40 ~ 500nm，致密砂岩油储层孔径为 50 ~ 900nm，致密砂岩气储层孔径为 40 ~ 700nm。在纳米级孔喉中流体与周围介质之间，存在较大黏滞力和分子作用力，油气以吸附状态吸附于矿物和干酪根表面，或以扩散状态吸附于固体有机质内部，运移受控于油气滑移和表面相互作用力，形成“滞留”，基本不服从达西渗流规律，压差与扩散等是油气运聚的主要动力，一般可用孔隙“连通率”来表征流动能力。纳米级孔喉系统，增加了油气在致密储层的储集空间与流动能力，是非常规油气长期低产连续稳产的决定要素。

### “人造油气藏”

常规油气可称为“圈闭油气藏”，是一种天然油气藏，圈闭界限明显，有统一油气水界面，有自然渗透率，一般不需要人工压裂改造即可形成工业油气产量。非常规油气无明显圈闭界限，无自然工业产量，需“人造渗透率”，可称为“人造油气藏”，即一般需要采用直井缝网压裂、水平井体积压裂等方式，在地下形成以井眼长度为体积单元、人工压裂缝网为流动通道的“人造油气藏”。

致密油和气、页岩油和气等是典型“人造油气藏”，开采有“三难”，即高产难、稳产难、补充能量难。目前，国内外普遍采用