

非常规油气地质

邹才能 等著



地质出版社

非常规油气地质

邹才能 陶士振 侯连华 朱如凯
袁选俊 宋 岩 牛嘉玉 董大忠 等著
柳少波 蒋凌志 王社教 张国生

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书系统介绍了非常规油气的地质理论及相关技术,重点介绍了连续型油气藏的基本特征、评价方法和勘探开发关键技术,分类介绍了致密砂岩油气、煤层气、页岩气、碳酸盐岩缝洞型油气、火山岩储层油气、变质岩储层油气、重油沥青、天然气水合物的内涵、形成条件、储层特征、聚集机理、富集规律和勘探开发关键技术,并对非常规油气的发展前景和勘探开发技术进行了展望。

本书可供石油勘探和研究工作者使用,也可供石油院校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

非常规油气地质 / 邹才能等著. —北京: 地质出版社, 2011. 3
ISBN 978-7-116-07156-8

I. ①非… II. ①邹… III. ①石油天然气地质
IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 033431 号

FEICHANGGUI YOUQI DIZHI

责任编辑: 孙亚芸 宫月莹
责任校对: 卓文娟
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: zhs@gph.com.cn
传 真: (010)82310759
印 刷: 北京天成印务有限责任公司
开 本: 889mm × 1194mm 1/16
印 张: 19.75
字 数: 580 千字
版 次: 2011 年 3 月第 1 版
印 次: 2011 年 3 月第 1 次印刷
定 价: 98.00 元
书 号: ISBN 978-7-116-07156-8

(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

随着世界油气需求的不断增长、国际油价的持续高位震荡，以及应对气候变化、发展低碳经济的现实需要，具有很大资源潜力和发展空间的非常规石油天然气，特别是非常规天然气越来越受到各个国家和石油公司的高度重视。

综观全球油气工业的生命周期大约为 300 年，目前已经历了近 150 年。油气工业的发展，主要经历构造油气藏、岩性地层油气藏和非常规连续型油气藏三大发展阶段或领域，实现两次重大理论技术创新和跨越。第一次是从构造油气藏向岩性地层油气藏的创新和跨越，找油气的思想从寻找易于识别的构造圈闭，向较难识别的岩性地层圈闭过渡，核心是找油气圈闭；第二次是从岩性地层油气藏向非常规连续型油气藏的创新和跨越，找油气的思想是从寻找岩性地层圈闭，向无明显圈闭界线的储集体系过渡，核心是找油气储集体，目前正处于两次跨越过程中。

非常规油气是现今无法用常规方法和技术手段进行经济性勘探开发的资源。其特点是资源规模大，储层物性差，一般空气渗透率 $< 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，孔隙度 $< 10\%$ 。可分为连续型与断续型两种基本分布类型。非常规资源开发需要具备必需的特殊技术、经济条件，才能推动非常规资源转化为常规资源。

近年来，伴随理论认识的深化和勘探开发技术的进步，全球非常规油气勘探开发取得了一系列重大突破。致密气、煤层气、重油、沥青砂等已成为全球非常规石油天然气勘探开发的重点领域，页岩气成为全球非常规天然气勘探开发的热点领域，致密油成为全球非常规石油勘探开发的亮点领域。全球非常规油气产量快速增长，在全球能源供应中的地位日益凸显。2008 年全球非常规石油产量已超过 $6000 \times 10^4 \text{t}$ ，非常规天然气产量超过 $5600 \times 10^8 \text{m}^3$ ，占全球石油、天然气产量比例分别上升到 2% 和 18%。

中国的重油、致密油、致密气、页岩气、煤层气等非常规油气资源也非常丰富，具有良好的发展前景。鄂尔多斯盆地华庆地区中生界已发现大规模分布的致密大油区。作为我国致密砂岩气区成功勘探开发的典型代表，鄂尔多斯盆地苏里格地区成为目前唯一探明储量超 $2 \times 10^{12} \text{m}^3$ 、年产量超 $100 \times 10^8 \text{m}^3$ 的大气区。煤层气经过近 20 年的技术攻关与工业化试验，已取得重要进展，建成年产 $25 \times 10^8 \text{m}^3$ 的生产能力。页岩气的勘探研究与产业化试验也已开始起步，2010 年在四川盆地成功钻探了 2 口页岩气井，首次发现纳米级孔隙（本书封面是威 201 井志留系产气页岩有机质孔）并获得了页岩气发现，证实我国具有发展页岩气的资源基础。

全球非常规油气突破带来重要启示：一是非常规油气发展要分层次展开，并要先开展工业化试验；二是技术突破与规模化应用是推动非常规油气发展的重要因素；

三是政策支持与油气价格上涨,为非常规油气发展提供了强劲动力;四是重大领域突破,需要长期基础理论研究与技术攻关准备;五是认识的误区,就是勘探的禁区,解放思想,才能解放油气,才能推动非常规转为常规。以页岩气为例,页岩气的突破在资源、理论和技术上均具有重要意义,对领域的拓展和油气工业的发展产生深远影响:①突破了资源禁区,增加了资源类型与资源量,常规勘探中将页岩作为非储层考虑,忽视其作为源储一体式的有效资源量;②突破了传统成藏理论,挑战常规储层下限和传统圈闭成藏观点,证实具有纳米级孔喉的储集体系也能聚集天然气;③突破了非常规技术,实现油气勘探开发技术升级换代,带动常规与非常规油气勘探开发技术的发展,推动致密油气、页岩油气等非常规资源成为常规资源。

为推动非常规油气工业发展,普及和推广相关理论、技术和方法,作者在系统调研国内外非常规油气理论技术与勘探开发进展的基础上,重点结合近年来岩性地层油气藏项目主要研究成果,编写出版《非常规油气地质》一书,供科研院所、高校、石油公司等相关研究人员参考。

本书共11章。前言由邹才能、陶士振编写;第一章“绪论”由邹才能、陶士振、李小地、李建忠、吴松涛、杨智、林森虎编写;第二章“连续型油气聚集”由邹才能、陶士振、郭秋麟、张颖、袁选俊、杨智、高晓辉等编写;第三章“致密砂岩油气”由邹才能、朱如凯、白斌、杨华、徐春春、高晓辉、王岚、杨智、吴松涛、张响响、苏玲等编写;第四章“煤层气”由宋岩、柳少波、洪峰、姜林、马行陟等编写;第五章“页岩气”由邹才能、董大忠、王社教、李新景、王玉满、李建忠、李登华、廖仕孟、陈更生、黄凌等编写;第六章“碳酸盐岩缝洞型油气”由邹才能、朱如凯、陶小晚、贾进华、邹光辉、王招明、杨海军、唐俊伟等编写;第七章“火山岩储层油气”由邹才能、侯连华、朱如凯、赵霞、毛治国、匡立春、梁世君、冯志强、赵志魁等编写;第八章“变质岩储层油气”由邹才能、侯连华、袁选俊、孟卫工、杨春、杨帆等编写;第九章“重油沥青”由牛嘉玉、蒋凌志编写;第十章“天然气水合物”由邹才能、陶士振、杨智编写;第十一章“非常规油气前景展望”由邹才能、张国生、陶士振、吴松涛、林森虎、梁坤编写。本书最后由邹才能、陶士振、侯连华、朱如凯、袁选俊、张国生统编和修改。

本书编写过程中,得到了中国石油总部、勘探研究院、相关油气田等单位领导、院士、专家的大力支持与帮助,在此一并谢忱。由于时间关系,书中不妥之处在所难免,恳请各位专家和学者批评指正,以期再版时充实提高。

作者

2011年3月

目 录

前 言	
第一章 绪论	(1)
第一节 石油地质学发展历程	(1)
第二节 全球油气勘探现状与趋势	(10)
第三节 常规与非常规油气地质异同	(14)
第四节 非常规油气地质地位和意义	(18)
参考文献	(23)
第二章 连续型油气聚集	(26)
第一节 连续型油气藏的概念与类型	(26)
第二节 连续型油气形成与特征	(28)
第三节 非常规油气资源评价方法	(39)
第四节 非常规油气勘探开发关键技术	(45)
参考文献	(48)
第三章 致密砂岩油气	(50)
第一节 致密砂岩油气的内涵	(50)
第二节 致密砂岩储层成因机理	(55)
第三节 致密砂岩油气形成与分布	(67)
第四节 致密砂岩油气勘探潜力	(71)
第五节 典型实例	(73)
参考文献	(92)
第四章 煤层气	(94)
第一节 煤层气的形成	(94)
第二节 煤储层地质特征	(98)
第三节 煤层气赋存状态和产出机理	(104)
第四节 煤层气形成与分布	(108)
第五节 煤层气资源评价和选区	(114)
第六节 典型实例	(118)
参考文献	(125)
第五章 页岩气	(128)
第一节 页岩气内涵	(128)
第二节 页岩储层特征	(137)
第三节 页岩气形成与分布	(142)
第四节 页岩气开发关键技术	(146)
第五节 页岩气勘探潜力	(151)
第六节 典型实例	(159)

参考文献	(163)
第六章 碳酸盐岩缝洞型油气	(165)
第一节 碳酸盐岩缝洞型储层成因及识别	(165)
第二节 碳酸盐岩储层缝洞系统与单元	(172)
第三节 碳酸盐岩缝洞型油气运聚机理与富集因素	(175)
第四节 碳酸盐岩缝洞型油气勘探开发技术	(181)
第五节 碳酸盐岩缝洞型油气资源潜力与方向	(184)
第六节 典型实例	(186)
参考文献	(190)
第七章 火山岩储层油气	(192)
第一节 火山岩类型与构造环境	(192)
第二节 火山岩储层成因机理	(197)
第三节 火山岩储层油气成藏模式与分布规律	(205)
第四节 火山岩油气藏评价与预测	(215)
第五节 火山岩油气资源潜力和勘探方向	(221)
第六节 典型实例	(224)
参考文献	(230)
第八章 变质岩储层油气	(232)
第一节 变质岩类型与构造背景	(232)
第二节 变质岩储层成因机理	(236)
第三节 变质岩油气藏形成与富集规律	(243)
第四节 变质岩裂缝储层预测方法	(249)
第五节 典型实例	(252)
参考文献	(257)
第九章 重油沥青	(259)
第一节 重油沥青物理化学性质和特征	(259)
第二节 重油沥青类型与分布	(263)
第三节 重油沥青形成与演化	(266)
第四节 重油沥青聚集成藏机制	(269)
第五节 重油沥青开采技术	(272)
第六节 重油沥青资源潜力与分布	(273)
第七节 典型实例	(277)
参考文献	(284)
第十章 天然气水合物	(285)
第一节 天然气水合物的概念及特征	(285)
第二节 天然气水合物热动力学模型	(288)
第三节 天然气水合物形成与分布	(294)
第四节 天然气水合物评价预测及资源潜力	(297)
参考文献	(301)
第十一章 非常规油气前景展望	(303)
第一节 非常规油气发展前景	(303)
第二节 非常规油气勘探开发技术展望	(308)
参考文献	(310)

第一章 绪 论

全球油气工业的发展历程约为 300 年, 主要经历构造油气藏、岩性地层油气藏和非常规连续型油气藏 3 个发展阶段或勘探领域。油气分布方式有单体型、集群型、连续型 3 种类型。从单体型构造油气藏向集群型岩性地层油气藏跨越, 是第一次理论技术的创新, 其核心是寻找圈闭油气藏; 从集群型岩性地层油气藏向连续型非常规油气藏的跨越, 是第二次理论技术的创新, 其核心是寻找有利储集体, 突破了常规储层物性存在下限与从传统圈闭找油的理念。据美国联邦地质调查局和美国能源部的统计, 目前全球非常规石油资源规模达 $4495 \times 10^8 \text{t}$, 与常规石油资源基本相当, 全球非常规石油产量快速上升, 2008 年较 2001 年增长近一倍, 已经超过 $6000 \times 10^4 \text{t}$; 全球非常规天然气资源规模达 $3922 \times 10^{12} \text{m}^3$, 是常规天然气资源的 8 倍, 非常规天然气产量快速上升, 已经超过 $5600 \times 10^8 \text{m}^3$ 。非常规油气资源在全球能源结构中的地位越来越重要, 是未来油气勘探的战略性领域, 亟需开展非常规油气地质的深入研究。本章在简要回顾石油地质学发展历程的基础上, 重点论述非常规油气的特点、地位和意义。

第一节 石油地质学发展历程

石油地质学作为矿床学的一个分支, 其发展与石油工业息息相关。从 19 世纪 50 年代的利用油气苗找油, 到 19 世纪 80 年代的背斜理论、20 世纪 20 年代的圈闭理论, 再到 20 世纪 50 年代的干酪根晚期热降解生烃及陆相生油论, 石油地质学从无到有, 逐渐发展和丰富。石油地质学的发展促进了全球油气勘探的进程。20 世纪 90 年代, 由于油气勘探难度的加大, 油气成藏理论也从传统的“生、储、盖、圈、运、保”等静态要素的分析, 发展到强调静态要素和动态要素之间相互作用的含油气系统、成藏动力学系统分析, 以及纳米孔隙系统储层、非常规储层系统连续型油气聚集的研究。

一、启蒙阶段 (19 世纪 60 年代之前)

早期油气勘探活动中, 由于缺乏对油气分布规律的认识, 没有相应的理论作指导, 找油工作主要依赖人们对自然现象的直观感觉。油气苗是最早、最直观应用于油气勘探的标志之一。正是依据油苗显示, 1859 年 8 月, E. L. Drake 在美国宾夕法尼亚州泰特斯维尔成功发现了世界近代史上第一个油田, 从此揭开了近代油气工业的序幕。同样, 我国的延长、老君庙、独山子、圣灯山及克拉玛依等油气田的发现也与油气苗密不可分。石油工业已经历了近 150 年的发展历史。

我国石油天然气勘探开发的历史源远流长。英国著名学者李约瑟在研究了我国古代钻井技术后, 在他所著的《中国科学技术史》一书中写到: “今天用于开采石油与天然气的深井就是从中国人的这些技术中发展起来的”, 并指出“这种技术大约在 12 世纪以前传到了西方各国”。1835 年 (道光十五年), 我国打成了世界第一口超千米的“卓筒井” (四川省自贡市大安寨, 深度达 1001.42m), 使钻探技术达到了一个新的阶段。1850 年 (道光三十年) 钻井深度达到 1100m (四川省自贡市的磨子井)。美国为了汲取地下的石油, 在宾夕法尼亚打的第一口井是在 1859 年打成

的,深度仅有 21.64m,直到 1871 年才钻达 338.33m;俄国在 1848 年才打成一口井深为 60m 左右的井。19 世纪末期出现的旋转钻井技术,实际上是我国钻井技术的发展。

二、形成阶段 (19 世纪 60 年代至 20 世纪 20 年代)

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,美国人斯泰利·亨特 (T. Sterry Hunt) 提出背斜理论,并对油气聚集的 4 个条件进行了初步论述,内容涵盖烃源岩、背斜构造、裂缝及遮挡条件,但该理论的提出在美国国内没能够引起勘探家们的重视。直到 1875 年,背斜聚油理论才传到欧洲。1885 年,怀特 (I. C. White) 在 *Science* 杂志上发表了 *The Geology of Natural Gas*, 系统阐述了背斜理论,并于 1888 年成功将其应用于井位部署。至此,这一学说才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背斜找油,并在勘探上获得成功 (Levorsen, 1956)。1917 年美国石油地质家协会 (AAPG) 成立并出版 *AAPG Bulletin*, 标志着石油地质学的诞生。从此,石油地质学正式进入油气勘探领域,成为一门不可缺少的找油科学。相关的石油地质学专著包括 E. H. Cunningham Craig (1920) 的 *Oil Finding: an Introduction to the Geological Study of Petroleum* 和 William H. Emmons (1921) 的 *Geology of Petroleum*。

19 世纪初,在德国油气勘探界,油气田线状分布理论曾风靡一时,也就是将已知的产油井点连成一条直线,在该线上找油。由于当时发现的油气田大多位于盐丘构造的翼部,盐丘构造基本是沿断层排列,线状找油理论的应用在当时获得了不少成功。由于不同地区地质条件存在差异性,最终使得油气田线状分布理论在发展中遭受挫折。尽管线状分布理论存在不科学性,但它在一定程度上促进了油气勘探的发展,同时也促使石油地质学家寻找新的、更合理的油气勘探地质理论,为后期圈闭理论的发展奠定了基础。

三、发展阶段 (20 世纪 20 年代至今)

(一) 国外石油地质理论发展

1. 油气圈闭理论发展阶段 (20 世纪 20~50 年代)

随着勘探实践不断深入,人们发现油气聚集场所除背斜外还包括其他构造,如盐丘 (墨西哥湾,于 1901 年发现)、底辟构造 (罗马尼亚,于 1907 年发现) 及古潜山 (美国,于 1901 年发现) 等。据 A. I. Levorsen (1956), F. G. Clapp 于 1910 年、1917 年、1929 年提出了油气聚集的构造分类,包括背斜、向斜、穹窿、不整合及断层等类型; B. R. 利莱于 1928 年指出了油气田存在不同的成因类型; Mecoolough 于 1934 年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; 威尔逊于 1934 年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,但其并未使用类似术语; A. I. Levorsen (1956) 建立了较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和次生地层圈闭两类。1920~1959 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,至此人们开始认识到,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,一些由岩性、地层及复合成因形成的圈闭也是油气聚集的有利场所,进而扩大了油气勘探领域。

该阶段的代表性专著有: E. R. Lilley (1928) 的 *The Geology of Petroleum and Natural Gas*, 古勃金 (1932) 的《石油论》, E. N. Tiritsoo (1951) 的 *Petroleum Geology*, W. L. Russel (1951) 的《石油地质学原理》, K. K. Landes (1951) 的《石油地质学》, A. I. Levorsen (1956) 的 *Geology of Petroleum* 等。

2. 生理理论和油气初次运移理论阶段 (20 世纪 60 ~ 80 年代)

关于油气成因争论已久, 总体可归纳为无机成因和有机成因。

无机成因论最早源于俄国著名化学家 Д. И. 门捷列夫 1876 年提出的碳化物说, 随后 B. Л. 索科洛夫 (1889) 提出了宇宙说, R. Robinson (1963, 1966) 提出了费-托地质合成说, 耶兰斯基 (1966, 1971) 提出了蛇纹石化生油说, 切卡留克 (1971) 提出了高温生成说, T. Gold (1993) 提出了地幔脱气说 (张厚福等, 1999)。尽管无机成因学说已被实验所证实, 油气勘探实践表明, 有机成因油气占主导地位, 特别是进入 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, 有机成因理论逐渐占据主导地位。

油气有机成因学说的建立经历了一个漫长过程 (张厚福等, 1999)。早在 18 世纪中叶, 俄国著名科学家罗蒙诺索夫便提出蒸馏说, 认为石油是煤在地下高温蒸馏的产物, 这是最早的有机成因说。20 世纪 20 年代初期, 维尔纳茨系统研究了有机质的地质作用, 并论述了石油有机成因的主要依据。Treibs (1933) 首次证实吡啶化合物广泛存在于不同时代、不同成因的石油及沥青中, 从而为石油有机成因理论找到了一个重要的依据。进入 20 世纪 60 年代, 随着色谱技术的广泛应用, 对地质体中有机质演化有了深入的认识。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, 这一发现否定了沉积有机质直接成油说, 同时开启了有机质成岩演化机理及其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; Vassovitch (1969) 提出石油生成存在主要阶段和主要相; Pusey (1973) 提出了“地温窗”和“液体窗”的概念; 70 年代初, B. P. Tissot 等以巴黎盆地下托尔阶页岩为研究对象, 建立了干酪根热降解生烃演化模式, 提出并完善了干酪根晚期生烃学说, 总结了油气生成、演化和分布的规律; Connan (1974)、Tissot 和 Welte (1978) 建立了油气生成模型, 用于定量确定烃源岩的生烃潜力。

油气生成与初次运移密不可分, 而干酪根晚期热降解生烃学说, 对油气初次运移相态提出了挑战。G. I. Adamans (1903)、M. J. Munn (1909)、J. V. Lewis (1924)、L. F. Athy (1930)、M. G. Cheney (1940)、W. G. Meinschein (1959) 及 C. O. McAuliffe (1966) 提出的水溶相学说受到了质疑; 同时, 许多学者对初次运移开展了相关研究, 如 L. C. Price (1983) 对气溶相的可能性进行的论证、K. Magara (1978) 对泥岩压实和初次运移动力的研究、Barker (1972) 对水热增压的研究、Power (1967) 和 Burst (1969) 对粘土矿物脱水的研究、Leythaeuer 等 (1982) 对烃类扩散的研究、Dickey (1975) 对石油初次运移相态的研究等, 基本解决了油气初次运移相态、动力及通道等问题 (张厚福等, 1999)。

干酪根热降解生烃理论和油气初次运移理论的建立, 解决了油气生成和运移的根本问题, 明确了油气的原始母质来源和演化过程, 弄清了基本的排烃机理。这一理论的建立丰富了石油地质学理论, 促使油气勘探从以背斜理论为主导的时代, 进入了以生油理论为主导的阶段。

3. 油气动态成藏和非常规石油地质阶段 (20 世纪 90 年代至今)

(1) 油气动态成藏理论阶段

随着油气勘探工作的不断深入, 勘探者们认识到仅依靠圈闭和生油理论, 并不能满足油气勘探的要求, 必须立足于盆地整体, 在静态地质要素分析和研究的基础上, 详细刻画油气成藏的整个动态过程, 深刻理解油气藏形成机理及分布规律, 为优选勘探目标、提高勘探效益服务。

立足沉积盆地整体进行油气勘探的认识由来已久, 如前苏联地质学家提出的“含油气区”, 他们认为“含油气区是成因上有联系的, 并与其在大区构造单元相伴生的油气聚集区域”。布罗德和耶列门科提出“含油气区是地壳中的这样一个地段, 该地段在漫长的地质历史时期是一个统一的沉积拗陷, 而拗陷的特点是有沥青生成作用和区域性油气聚集的条件”。此外, Perrodon 在其所著的 *Dynamics of Oil and Gas Accumulations* 一书中, 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评价的基础。

沉积盆地找油理论的提出,是石油地质学从实践到认识的一次重要飞跃,表明人们已经开始认识到只有沉积盆地才能够聚集有机物质并将其转化为油气。从沉积盆地整体出发,系统分析油气形成的基本地质与地球化学条件、油气源与圈闭在时间和空间上的配置关系,是正确认识油气藏平面和垂向上的分布规律,提高油气勘探成功率和勘探效益的必由之路。立足沉积盆地,系统研究油气藏形成的石油地质条件和油气分布规律,是现代找油理论出现的重要标志。

同时,石油地质学家开始关注油气动态成藏过程。J. M. Hunt (1990) 提出了流体封存箱成藏理论,将生、储、盖等静态要素与温度、压力等动态条件结合起来,从而全面揭示了油气运移和成藏过程;W. G. Dow 等 (1972) 首次提出了含油气系统的概念,随后 Magoon (1987)、Magoon 和 W. G. Dow (1994) 进一步完善了这一理论。总体来看,“含油气系统”理论强调“从源岩到圈闭”的研究思路,通过地质作用将各成藏要素连接为一个有机整体,以过程恢复为主线、以关键时刻为时间界面的成藏要素与成藏作用的组合关系的研究为重点,综合、系统、动态地研究油气藏的形成与分布。在此基础上,结合流体动力学研究,如 Munu (1909) 提出的油气运移水力学理论、Hubbert (1953) 的流体势理论及 Bahlberg (1983) 的成藏动力学系统等(蒋有录等,2006),通过对油气输导体系、运移路径、成藏动力及成藏期次的研究,详细刻画油气成藏的整个过程,最终促使了油气成藏动力学的形成。成藏动力学强调油气成藏过程的动态研究,其意义在于使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的研究,从而详细刻画油气藏的形成机理及分布规律。

(2) 非常规油气地质阶段

对非常规油气地质的研究,可追溯到 20 世纪 30 年代,W. B. Wilson (1934) 在油气藏分类中提出了开放油气藏,虽然当时认为其没有勘探价值,但表明 Wilson 已预测到非常规油气藏的存在。由于资源品位低、储层差、成藏机理复杂、勘探开发难度大,非常规油气资源一直没有得到勘探界的重视;直到 20 世纪 90 年代,随着油气勘探方向的转变和技术进步,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)及页岩油(H. W. Parker, 1970)等逐渐成为储量增长的主体之一,石油地质学家们才将注意力转移到非常规油气地质的研究上。经过近 20 年的努力,非常规油气地质学得到了较大发展,涵盖非常规油气资源的内涵、种类、地质特征、资源评价方法和开发技术等多个方面。

USGS 的 Schmoker 和 Gautier 等 (1995) 提出了“连续型油气聚集”的概念,泛指在含油气盆地的致密砂岩、煤层、页岩等非常规储层中大面积聚集分布、圈闭和盖层界限不清、缺乏明确油水界面的油气资源。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天然气资源进行了评价(Schmoker, 1999, 2002; Klett and Charpentier, 2003; Klett and Schmoker, 2004; Crovelli, 2004; Cook, 2004; Schmoker, 2005; Pollastro, 2007),指导了美国非常规油气资源的评价。B. E. Law 等 (2002) 提出了非常规油气系统的概念,认为其与构造圈闭无关,基本上不受重力分异的影响,区域上存在大规模的普遍含油气区带,并简要介绍了煤层气、深盆地气及天然气水合物等几种非常规天然气资源。2007 年,由 SPE、AAPG、WPC (World Petroleum Council) 和 SPEE (Society of Petroleum Evaluation Engineers) 联合发布的 *Petroleum Resources Management System* 一文,定义了非常规油气资源的相关概念,认为连续型矿产(continuous-type deposit)和非常规资源(unconventional resources)基本等同,指大面积连续分布、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。

(二) 中国石油地质理论发展

从 20 世纪 20~30 年代开始,经过我国几代石油地质与勘探科技人员的艰苦探索和努力,逐步

建立和发展了以中国陆相石油地质理论等为核心的中国石油地质理论体系。

我国石油勘探的每一次突破、每一个发现都非偶然，都是广大地质学家、勘探家们艰苦努力的结果，是不断解放思想、转变观念、深化认识、积极创新理论、大力开展先进适用勘探技术攻关与应用的结果，遵循了实践、认识、再实践、再认识的辩证过程。我国石油地质理论在多方面取得了一系列新进展，如煤成烃理论（黄第藩等，1995；王昌桂等，1993，1997；赵文智等，1995）指导了西北地区侏罗系煤系沉积盆地的油气田发现，奠定了在我国西部煤系地层中找油、找气的理论基础，使我国西部地区成为我国近年来油气储产量增长的重要地区。中国含油气盆地构造研究取得了重大进展，如深入研究了中国大陆板块构造与含油气盆地的关系（李德生，1980；田在艺等，1985；张恺，1995；武守诚，1988；罗志立等，1989；翟光明、宋建国、靳久强、高维亮，2002）。我国天然气勘探指导理论从油型气的“一元论”发展为油型气和煤成气的“两元论”，并从“两元论”发展进入油型气、煤成气、无机成因的“多元论”时期（戴金星等，1995，2000），大力推动了我国天然气的勘探，促进了我国天然气工业的迅猛发展，使我国迈入了世界重要的天然气产气大国的行列。

进入新世纪以来，针对我国中东部盆地，尤其是渤海湾盆地等进入较高勘探程度阶段，提出了富油气凹陷“满凹含油”（赵文智等，2003）等新认识，实现了富油气凹陷勘探理念的变化和整体饱和勘探，使勘探领域跳出了二级构造带的范围，为松辽、渤海湾等盆地实施整体三维部署和精细勘探提供了有效的理论依据。赵文智等（2001）提出了叠合盆地油气形成、分布与富集规律，以及复合含油气系统的研究方法。海相生油及海相石油地质理论（赵文智等，1995~2010）、新构造晚期成藏理论（孙肇才，1991；邱蕴玉，1994；戴金星等，1992，1996）、环青藏高原区域成藏学（贾承造等，2008）等认识，丰富和完善了我国石油地质理论。实现了从地质规律的认识到石油地质理论的升华，同时紧密结合我国油气勘探实践，体现了基础理论与实际应用的结合，有效地指导了我国油气勘探的进行，推动了我国石油工业的发展。

对陆相湖盆沉积学的研究由广度向深度发展，早期的一般陆相湖盆沉积特征研究向沉积成因机制研究发展（吴崇筠，1983；吴崇筠等，1985），主要研究古气候、古地理、古构造、古水系等因素对陆相沉积特征的影响；系统地提出了陆相沉积、层序与储集岩形成、演化与分布的相关理论（顾家裕，1994；裴泽楠等，1997；罗平，2003；邹才能，2004）。

下面主要简述陆相生油理论及源控论、复式油气聚集带理论、天然气地质理论、岩性地层油气藏理论、前陆冲断构造成藏理论、海相碳酸盐岩油气地质理论、非常规油气地质理论等。这些具有中国特色的石油地质理论的提出和发展，进一步丰富和完善了中国乃至世界石油地质学的相关内容。

1. 陆相生油及源控论理论

20世纪30年代之前，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，人们对陆相盆地能否形成大规模油气聚集持否定态度，这也是美孚石油公司顾问地质师富勒于1916年、斯坦福大学地质系教授希洛埃于1927年、德士古石油公司经理罗杰斯于1932年等得出中国“贫油论”的主要理论依据。我国老一辈地质学家以地质理论基础，结合多年中国油气勘探经验，指出“美孚的失败，并不能证明中国没有油气可办”（李四光，1928）。那时，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，正式拉开了中国陆相找油和研究的序幕。

1941年，潘钟祥在AAPG Bulletin上发表题为 *Nonmarine Origin of Petroleum in North Shanxi and the Cretaceous of Sichuan, China* 的论文（Pan, 1941），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；1947年黄汲清、1948年翁文波等提出了“陆相生油，多期、多层含油的理论”，这些创造性的研

究,为我国陆相盆地油气勘探提供了坚实的理论基础。从1955年开始,在准噶尔、酒泉、柴达木、塔里木、四川、鄂尔多斯等盆地内获得了油气发现,充分展示了陆相地层的含油气远景。1959年大庆油田的发现,证明了陆相生油理论的正确性。这一重大突破是油气勘探实践的重大进展,也是石油地质理论的重要创新,有效地指导了非海相盆地的油气勘探工作,为我国乃至世界石油工业作出了重要贡献。

陆相石油地质理论创立以来,一代又一代地质学家和勘探家不断对陆相石油地质理论进行了丰富、发展和完善,并对陆相生油层的形成和陆相生油的基本条件做了深入的研究(胡朝元,1982;田在艺,1960),总结出了潮湿与干燥气候的时代转变、长期的深拗有利于生油层的形成,内陆、潮湿、拗陷、强烈拗陷的盆地、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(胡朝元,1982;田在艺,1960;黄第藩等,1982,1983;程克明等,1993)。陆相烃源岩和石油地球化学系列指标和参数的建立(黄第藩等,1982,1984;程克明等,1993),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为源岩评价标准、生油量的定量评价及资源评价和石油演化提供了科学依据,为勘探目的层确定提供了准确的方向;陆相烃源岩和油气中生物标志化合物及相关参数的确定(黄第藩等,1982,1983;王廷栋等,1989),为油气源对比和生源、石油运移途径的确定提供了科学信息。

与此同时,大庆油田的发现又促使石油地质学家们思考陆相盆地油气的分布规律。根据中国含油气盆地多隆(凸)多拗(凹)的特征,考虑到陆相沉积近物源、短水流的特点,中国地质学家等认为陆相地层快速的岩性岩相变化、断裂发育往往使得油气难以进行大规模的长距离运移,生油凹陷生成的油气主要聚集在生油凹陷的内部和周缘,主要的生油区控制了油气田的分布(胡朝元,1982)。源控论指出,找油要找到有利生油拗陷和地区,提出“定凹选带”的勘探思路,为油气勘探指明了方向。

2. 陆相盆地富油气凹陷与复式油气聚集带理论

龚再升(1997)根据海洋石油勘探的实践,指出凹陷有“红凹”与“黑凹”、“富凹”与“贫凹”的区别,提出了“富生油凹陷”的概念。中国近海盆地古近纪凹陷大多数都不同程度地发育湖泊到沼泽相烃源岩,但烃源岩的质量和油气资源的丰度差别较大,根据渤海湾、珠江口和北部湾等盆地51个凹陷油气资源的评价结果,将凹陷按富烃程度分为3类,指出其中的富生油凹陷,其源岩主要是内源或短源河流充填的湖相沉积,源岩生油(气)能力强(生烃量大于 $500 \times 10^4 \text{ t/km}^2$),排聚系数(大于7%)和油气资源丰度(大于 $15 \times 10^4 \text{ t/km}^2$)高。凹陷总资源量大,具备形成大、中型油气田的物质基础。

袁选俊等(2002)指出,陆相盆地富油气凹陷的理论实质就是在那些烃源岩发育、资源丰度高、油气十分富集的凹陷中,树立“满凹含油”的思想,寻找不仅包括正向构造带中的油气藏,更重要的是寻找负向构造带中的油气藏,特别是各种隐蔽性油气藏。区内油气藏类型多种多样,多层叠置、“满凹含油”(赵文智,2006)。不仅有岩性油气藏、地层油气藏,还有火成岩油气藏及潜山油气藏等,储量十分丰富,占研究区已探明总储量的近40%。已发现的东营、沾化、辽西、辽东、大民屯、饶阳、歧口-板桥等富油气凹陷中,资源丰度高、规模大的隐蔽油气藏十分发育,勘探潜力大。深潜山、洼陷带浊积岩体、陡坡带砂砾岩体、沙河街组三段及中生代火山岩、缓坡带水进超覆三角洲砂体、复杂隐蔽断块等是富油气凹陷油气藏的主要勘探方向。

20世纪70年代,随着渤海湾等盆地的勘探,地质学家发现,除二级构造带之外,断裂带、岩性尖灭、物性变化带、地层超覆带及地层不整合带对油气的聚集和分布具有重要的控制作用。从而提出了复式油气聚集带理论,形成以—种油气藏类型为主、其他油气藏类型为辅的多种类型油气藏群分布的特征,横向和纵向上构成不同层系、不同类型油气藏叠合连片分布的含油气带。

复式油气聚集带理论主要是20世纪70~80年代针对渤海湾断陷盆地总结出的油气分布规律,

勘探思路是“整带解剖”。渤海湾盆地古近—新近纪强烈的块断构造活动导致这个大型的断陷—坳陷盆地发育众多的断层，整个盆地被这些断层和基底凸起分割成六大坳陷和 50 多个箕状凹陷或地堑凹陷，油气储集在各式各样复杂的圈闭之中。由于强烈的断块活动与断层的发育，岩性、岩相变化大，地层超覆、不整合和沉积间断多，在各二级构造带背景下，除发育背斜构造或断块圈闭外，还在不同层系中广泛发育了岩性地层圈闭，形成了不同层系、不同圈闭类型相互叠置的含油气带（邱中建，1974）。

该理论提出了渤海湾盆地复式油气聚集带的 12 种基本模式（胡见义等，1991），即被覆背斜构造带、逆牵引背斜构造带、断裂构造带、底辟拱升背斜构造带、挤压背斜构造带、砂岩上倾尖灭带、粒屑灰岩岩性圈闭带、透镜体岩性圈闭带、古河道砂岩岩性圈闭带、地层超覆不整合“基岩”带、地层超覆圈闭带、地层不整合圈闭带等；强调规模较大的复式油气聚集区，包括成组成排的断裂、构造带，大范围的岩性岩相变化带，大量的地层超覆、不整合带等，凡是可以聚集油气的地方都有油气的存在；指出随着勘探的不断深入，将逐渐跳出二级构造带，进入斜坡和凹陷，直到整体解剖凹陷。复式油气聚集带（区）理论指导了渤海湾盆地以及我国陆相含油气盆地的油气勘探，先后发现并建成了胜利、大港、辽河、任丘、中原等五大油田。

作为中国石油地质理论的重要组成部分，复式油气聚集带理论阐明了陆相盆地油气聚集的基本规律，充实了石油地质学的内容，巩固了渤海湾油区为我国大油区的战略地位，对我国石油工业的发展起到很大的推动作用。

3. 天然气地质理论

20 世纪 40 年代以前，国、内外的油气勘探以海相生油论或陆相生油论的一元论为指导，20 世纪 40 年代后期煤系生烃理论逐渐形成并指导了油气勘探（史训知等，1985）。煤系生烃理论的提出是对海相生油论与陆相生油论的重要补充和发展，煤成天然气在中国早已被勘探实践所证实，多元成气理论得以发展和完善。在勘探新发现和前人研究成果的基础上，戴金星（1992）将我国天然气的成因系统划分为无机成因气、有机成因气和混合成因气，使我国天然气地质理论从油型气的一元论发展为油型气、煤成气等多元论。根据我国实际情况，把混合成因气作为一个大类区分出来，对天然气的勘探具有重要的理论与实际指导意义；对有机成因气，根据母质类型和热成熟度做了进一步的细化，使有机成因气的研究更加全面、系统；建立了系统的不同成因天然气的鉴别标志和指标标准。

20 世纪 60 年代后期，以澳大利亚学者为代表的腐殖型成烃研究者，注意到煤系地层不仅能成气还可形成油，特别是在澳大利亚吉普斯兰盆地煤系烃源岩中发现了大量的煤成油。20 世纪 70 年代末煤系生烃理论被引入我国（戴金星等，1979，1980）。煤成烃是指煤和含煤地层中高等植物为生烃母质，在成岩作用过程中形成烃类。煤系地层不仅能够生成大量的天然气，也能生成相当数量的石油，形成工业性的油气田。20 世纪 90 年代煤成烃理论在我国研究和勘探中出现热潮（宋岩等，1998，2005）。我国在“六五”、“七五”期间都把煤成气勘探开发研究列为国家重点科技攻关项目。按照煤系生烃理论，对我国含煤盆地含气性作了预测（戴金星等，1986），如指出从中亚卡拉库姆盆地至我国塔里木、准噶尔和吐哈盆地存在一个以早、中侏罗世煤系为源岩的煤成气聚集域（戴金星等，1995）。戴金星（2007）等通过定量或半定量地研究中国大气田的形成条件和主控因素，认为中国大气田分布在生气中心及其周缘（生气强度大于 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ），晚期成藏是中国大气田形成的普遍规律，有效烃源区内古隆起圈闭有利于大气田形成（分为古构造形成与聚气同步型、古构造聚气滞后型、古构造聚气叠置型），大气田多形成于煤系或其上、下圈闭中（分为自生自储式、下生上储式和上生下储式），大面积孔隙型储集体（砂岩储层孔隙度多大于 12%，渗透率多大于 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；碳酸盐岩储层孔隙度多大于 3%，渗透率多大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ）和低气压区有利于形成大气田。综合利用这些条件指导中国大气田评价和勘探，近 10 年来取得了很好的效果，发现储量在 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上的大气田 8 个（如克拉 2、苏里格、大牛地、榆林、乌审旗、子洲、普光 and 徐深等气田），促进了我国天然气工业的快速发展。

戴金星等(1992)根据天然气中烷烃气组分变化及其碳同位素系列演化特征,建立了煤型气甲烷回归方程($\delta^{13}\text{C}_1 = 14.12\text{lg}R_0 - 34.39$)、油型气甲烷回归方程($\delta^{13}\text{C}_1 = 15.80\text{lg}R_0 - 42.20$)、 $\delta^{13}\text{C}_1 - \text{C}_1/\text{C}_{2+3}$ 图版、 $\delta^{13}\text{C}_1 - R_0$ 图版、 $\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_3$ 图版、煤型气 $\delta^{13}\text{C}_{1-3} - R_0$ 图版和轻烃 C_7 系统三角图版,提出了鉴别有机烷烃气和无机烷烃气、鉴别有机烷烃气中煤型烷烃气、油型烷烃气的地球化学指标;指出无机成因的烷烃气的甲烷一般 $\delta^{13}\text{C}_1 > -30\text{‰}$,具负碳同位素系列,甲烷的 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 值为 $n \times 10^{-5} \sim 7$,无机成因的二氧化碳的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} > -8\text{‰}$ 。

赵文智等(2002~2005)提出了高效天然气成藏新认识,总结了有机质接力成气演化模式、高效气源灶概念与评价方法、高效成藏过程的评价指标、叠合盆地深层优质储层形成机理与模式以及高效气藏形成的三大要素组合等新认识。

邹才能等(2006~2007)通过深化研究,进一步提出了天然气大气区的概念和勘探理念,强调天然气的勘探从圈闭、区带向大区的转变,同时,由大气区的发展带动大油气区的建设,构建碎屑岩、碳酸盐岩、火山岩三大类岩性地层大气区的勘探地质理论、勘探思路、评价方法与战略规划。

4. 前陆冲断带油气地质理论

在中西部前陆盆地油气勘探中,引进断层相关褶皱理论(何登发等,1999;贾承造,2005),建立了中国前陆盆地油气成藏与富集理论。通过对我国中西部前陆盆地构造特征、大地构造背景、地球物理特征的理论研究和典型前陆盆地的详细解析(贾承造等,2005),系统分析了我国中西部前陆盆地的发育特征和特殊性,提出中国的中西部普遍存在具有典型特征的陆内会聚,且与古特提斯构造阶段造山带在新特提斯构造阶段的再活动有关,具有“再生”前陆盆地的特征。

与世界上典型的前陆盆地相比,中国前陆盆地主要形成于印支和喜马拉雅两期,在地质特征上具有小盆地、大逆冲带,陆相盆地,巨厚的磨拉石堆积,两期前陆构造,晚期活动性强,统一的构造演化背景控制区域性的盆地沉降和沉积等特征。根据两期前陆的叠合程度差异造成的盆地几何形态、挠曲沉降、地层层序、沉积充填、构造变形等特点,可将中国中西部前陆盆地归纳为改造型、新生型、叠加型和早衰型4种组合类型的前陆盆地。不同组合类型前陆盆地具有不同的结构特征,决定了不同组合类型前陆盆地地源岩、储盖组合等成藏地质条件的差异,并决定了不同组合类型前陆盆地的成藏特征和油气勘探潜力上的差异。

上述认识有效地指导了前陆盆地勘探的选区定带,拓展了前陆盆地的勘探范围,提升了前陆盆地的资源潜力。如在塔里木盆地库车前陆冲断带发现的克拉2、迪那2等大气田,为西气东输奠定了坚实的基础。我国中西部地区发育的前陆盆地,大多经历了喜马拉雅期强烈的逆冲推覆,使得优质烃源岩被现今山体所掩覆,成藏优越。目前的研究表明,库车前陆盆地有约3000 km^2 的烃源岩掩覆在天山之下,现今酒泉盆地的原盆边界向南部祁连山可以推移10 km 以上。前陆盆地地质理论为中西部前陆冲断带的勘探提供了重要的理论指导。

5. 岩性地层油气藏理论

中国岩性地层油气藏勘探和研究成果丰硕,1986年,胡见义就提出非构造油气藏形成的“三线三面”控制因素,即岩性尖灭线、地层尖灭线、构造等高线、断层面、不整合面、顶底板面;2007年李丕龙等提出了隐蔽油气藏“断坡控砂、复式输导、相势控藏”。21世纪以来,我国陆上东部探区已进入了以岩性地层油气藏为主要勘探对象、中西部探区也进入了构造油气藏和岩性地层油气藏并重的阶段。中国石油天然气集团公司岩性地层油气藏项目组开展了岩性地层油气藏沉积、储层、圈闭、区带和技术的系统攻关研究。

面向我国陆相断陷、拗陷、前陆和海相克拉通4类沉积盆地,针对中国陆上砂砾岩、碳酸盐岩和火山岩三大岩类,贾承造等(2008)建立了岩性地层油气藏陡坡断阶-湖侵和高位域水下扇-扇三角洲组合、多坡折缓坡-湖侵和高位域河流三角洲组合、深断陷-湖侵和高位火山爆发-溢流相组合、中央构造带翼部-高位三角洲组合、长轴缓坡-湖侵和低位域河流三角洲组合、短轴缓坡-高位域河流三角洲组合、短轴陡坡-高位域河流三角洲组合、短轴陡坡-低位域扇三角洲-水

下扇-火山岩组合、短轴缓坡-湖侵域河流三角洲组合、台缘-海侵域礁滩组合、台内-海侵域滩坝组合、台内-滨岸海侵域砂坝组合、台内-海陆交互相高位域三角洲组合、古隆起-岩溶组合等14种构造-层序成藏组合模式,提出了中低丰度岩性地层油气藏大面积成藏理论,揭示了4类原型盆地岩性地层油气藏富集规律,提出了岩性尖灭线、地层超覆线、地层剥蚀线、物性变化线、流体突变线、构造等高线等“六线”、断层面、不整合面、洪泛面、顶底板面等“四面”的圈闭形成10个控制要素,并制定了主要目的层三级层序单元沉积微相分布图、有效烃源岩分布图、储集体顶面构造图、分日的层勘探程度图的“四图叠合”工业制图方法,形成了陆相层序地层学工业化应用和地震储层预测两项核心技术(贾承造等,2007),推动了中国陆上油气勘探由构造油气藏向岩性地层油气藏的重大转变,使中国陆上大规模的岩性地层油气藏勘探取得了显著成效。

“十一五”期间,深化和扩展了碎屑岩、碳酸盐岩和火山岩三大岩类的岩性地层油气藏研究领域,建立了陆相敞流大型浅水三角洲、湖盆中心砂质碎屑流与碳酸盐岩3种储集体成因模式,拓展了湖盆中心勘探领域;揭示和提出了火山岩有效储层形成机理与综合评价方法,初步建立了火山岩不整合体5层结构模式及划分标准,包括未蚀变带、崩解带、淋滤带、水解带及土壤层,指出淋滤带储层物性最好,提出了不整合体勘探的有利层段和综合评价方法;揭示了碎屑岩、火山岩、碳酸盐岩和变质岩四大岩类不整合结构,提出了地层油气藏新分类方案,指出地层油气藏将是我国未来的重要勘探领域。研究成果有效地推动了我国岩性地层油气藏勘探。

系统地开展了多种岩石类型储集体岩性地层油气藏的形成与分布研究,奠定了寻找海相碳酸盐岩、火山岩、变质岩大油气田的理论基础。针对我国海相碳酸盐岩板块小、时代老、储层非均质性、油气成藏复杂的特点,提出了古隆起、台缘带、台内礁滩、不整合风化壳等油气藏形成与分布规律。基于我国陆上火山岩储层的分布特点,根据松辽深层、准噶尔盆地东部大型风化壳石炭系、三塘湖盆地二叠系等盆地火山岩油气勘探实践,系统归纳了我国沉积盆地火山岩发育与分布的特征,指出中国沉积盆地内发育石炭-二叠系、侏罗-白垩系和古近-新近系3套火山岩,主要形成于陆内裂谷和岛弧环境,提出了东部岩性型、中西部地层型火山岩油气分布与富集规律等新认识。

岩性地层油气藏理论和技术成果的现场应用取得了明显实效,初步解决了制约我国岩性地层大油气田/区油气勘探潜力的诸多瓶颈问题。推动断陷、拗陷、前陆、克拉通四类盆地重点区块岩性地层油气藏储量的快速增长,2008~2010年年底,全国新增石油探明储量 $13.95 \times 10^8 \text{t}$,约占各种类型总和的66%,新增天然气探明储量 $13098 \times 10^8 \text{m}^3$,约占各类储量总和的98%,成为储量增长的主体。

6. 非常规油气地质理论

随着国内油气资源结构的转变,非常规油气资源如深盆气、致密砂岩气、页岩气、煤层气、致密油及页岩油等,逐渐成为油气勘探的新领域,由此引起了国内学者对非常规油气地质研究的重视。中国学者引进并提出了深盆气、致密砂岩气、深盆油、向斜油等概念。根据美国联邦地质调查局相关的研究成果,结合中国油气勘探实践,邹才能等(2009b)提出“连续型”油气藏(场)概念,是泛指在大范围非常规储集体系中油气连续分布的非常规圈闭油气藏,并对其地质特征、资源潜力、评价及开采方法进行了系统的论述。在此基础上,邹才能等(2010)进一步强调了非常规石油地质研究的重要性,强调对非常规资源、非常规储集层、非常规成藏、非常规油气开发技术等研究、评价与开发,尤其是研究微米、纳米级微观储集空间的形成机理、油气运聚与分布规律、经济可采储量与发展战略等。

2008~2010年,邹才能等把非常规油气分为连续型与断续型两种基本类型,发展了连续型油气聚集概念,明晰了连续型油气藏(场)概念及其10个基本地质特征。连续型油气藏(场)指在大范围非常规储集体系中油气连续分布的非常规圈闭油气藏,与传统意义的单一常规圈闭油气藏有本质区别,其典型特征包括“缺乏明显圈闭界限,无统一油气水界面,非浮力成藏”,揭示了连续型油气“持续充注、连续分布”的聚集机制。连续型油气藏具有4个方面特征,即非圈闭油气聚集、

成藏过程持续、成藏空间连续、开采过程持续。成藏过程的连续，即“持续充注”，油气运聚成藏过程是一个持续的动态平衡过程，成藏相对连续。“连续分布”是连续型油气藏的最根本特征。源储一体或储集体大范围连续分布、圈闭无形或隐形决定了油气区大面积连续分布，地层普遍含油气，油气藏边界不显著或难以确定，易形成大油气区（层）。这一概念强调突破了常规圈闭成藏模式。

第二节 全球油气勘探现状与趋势

一、全球油气勘探现状

截至2009年，全球已发现951个大油气田（按国际标准，大油田可采储量 $>0.685 \times 10^8$ t，大气田可采储量 $>850 \times 10^8 \text{m}^3$ ），发现高峰在20世纪60~70年代，共发现其中的435个大油气田（图1-1）。

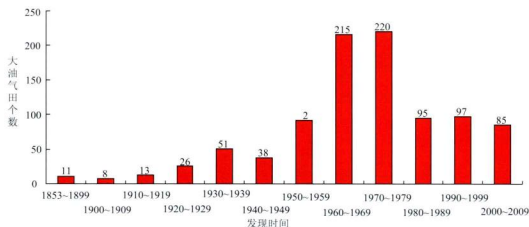


图1-1 全球大油气田发现时间的分布

（据 Paul Mann, 2007; IHS, 2010）

近年来仍有重大发现，2000~2009年，全球发现大油气田85个。这些重大发现主要分布在被动陆缘深水区、碳酸盐岩、岩性地层及非常规油气等领域。陆上新发现大油气田主要分布在中东、中亚等地区，海上主要分布在巴西、澳大利亚、西非与墨西哥湾四大深水区。

全球油气具有不均一分布的特点，以区域构造盆地为单位，集中分布在特定的油气聚集域和聚集区中。常规大型、特大型油气田分布主要受大的构造背景控制，在构造域上，主要以特提斯构造域为主；在构造类型上，以被动大陆边缘、前陆冲断带和克拉通正向构造为主。非常规大型、特大型油气田分布于大型负向构造区或斜坡区，如盆地中心、大型构造的斜坡或向斜区、海域与冻土带等。

二、大型、特大型油气田分布规律

1. 常规大型、特大型油气田分布

全球油气宏观区域分布受构造域和盆地类型控制。构造域（tectonic domain）是指较大陆地台区和褶皱区更高级别的大地构造单元。黄汲清等（1980）将中国大地构造划分为古亚洲构造域、特提斯构造域和环太平洋构造域等三大构造域。