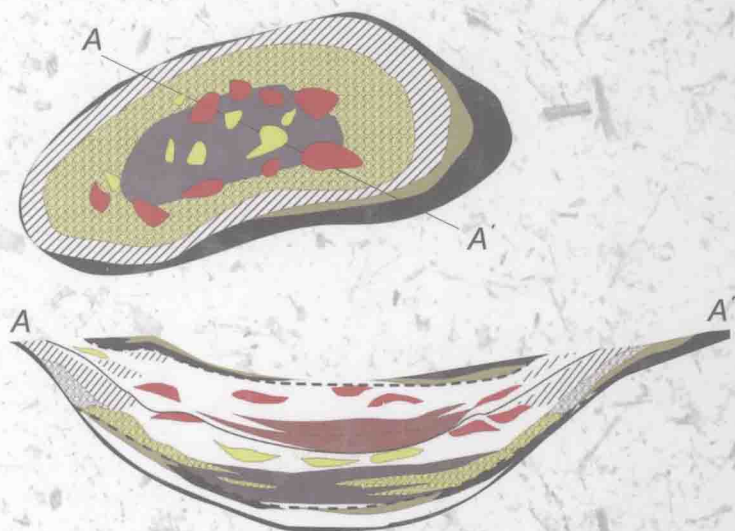


油气矿藏

地质与评价

牛嘉玉 蒋凌志 史卜庆 等 编著



科学出版社

油气矿藏地质与评价

牛嘉玉 蒋凌志 史卜庆 等 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书立足沉积盆地,从有机质赋存方式和类型、组分构成与成烃特征入手,分析沉积有机质富集成矿的地质环境和相应的油气矿藏类型,既包括符合油气生、运、聚的“经典油气藏”,又包括页岩气(油)、致密砂岩气(油)、煤岩油、煤层气、油页岩、天然气水合物等各类非常规油气矿藏;系统总结和论述各类油气矿藏的地质特征、资源潜力和关键开发技术。

本书可供从事石油天然气地质评价与勘探开发研究的科研工作者和高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气矿藏地质与评价/牛嘉玉等编著. —北京:科学出版社. 2013.7

ISBN 978-7-03-038166-8

I. ①油… II. ①牛… III. ①石油天然气地质-研究 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 159600 号

责任编辑:韩 鹏 王 运 王淑云/责任校对:鲁 素 邹慧卿

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 7 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 7 月第一次印刷 印张:49 1/4

字数:1 170 000

定价:348.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

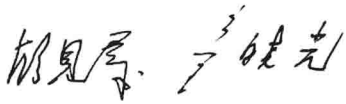
序

上百年来,石油地质学,包括中国陆相石油地质学,是以常规石油地质和成藏条件为基础的。随着油气勘探开发新技术和方法的不断研发与应用,过去认为是“非常规”的油气资源类型和相应矿藏陆续被投入商业性规模勘探和开采。将非流体渗流的非常规油气地质统一研究成系统理论,尚处于初步进行阶段或尝试阶段。

该书主要作者自1984年开始,在中国石油勘探开发研究院一直从事油气藏地质研究与勘探评价,先后开展了全国重油与油砂资源地质特征(1987~1991)、科探井选位研究与部署(1991~1999)、全国油气预探区带综合评价与战略方向(1999~2003,中国石油天然气股份有限公司项目)、中国东部老油区精细勘探地质评价与关键技术(2001~2013,国家“十五”至“十二五”油气专项)、全球非常规油气资源评价(2008~2011,国家“十一五”油气重大专项)等课题研究,对常规和非常规油气矿藏的地质特征和评价有许多新的见解和认识。

该书从有机质赋存方式、组分类型和成烃演化路径入手,系统分析和总结了有机质富集成矿、成藏的地质条件与特征以及构成的相应油气矿藏类型。基于油气藏形成的基本要素,初步尝试提出了常规与非常规油气矿藏分类方案和各类的基本特征;重点论述了各类非常规油气矿藏的地质评价、资源潜力和关键开发技术。以典型含油气盆地为例,分析了各种油气资源类型在沉积盆地中的成生联系和分布特征。这种对常规与非常规油气矿藏地质特征与评价的尝试和论述与总结尚属首次,也是长期从事石油地质研究的团队的集体成果。深信该书的出版会与广大石油科技工作者一起深入讨论石油地质学的发展,并将共同对丰富和发展石油地质学起到重要的推动作用。

中国工程院院士



2012年12月

前 言

20 世纪 30 年代美国石油地质学家协会(AAPG)组织出版了一系列有关著作和文章,阐述了石油生成、运移、聚集和油气藏类型等基本概念,这标志着经典石油地质学理论已基本成型。1951 年,K. K. Landes 先生率先出版了《石油地质学》。A. I. Levorsen 先生在 1954 年也编著了《石油地质学》,该书于 1959 年在我国翻译出版,流传较广。在近代中国石油地质事业发展中,老一辈地质学家在极其艰难的条件下,在“唯海相生油论”学术气氛的笼罩下,通过在中国的不断实践,提出了陆相生油等石油地质新认识,丰富和完善了世界经典石油地质学理论。

近年来,随着油气勘探开发的不断深入、规模不断扩大,以及新技术和方法的不断应用,新型油气矿藏不断被发现、探索和商业性开发,对各类油气矿藏研究的深度和广度也不断加大,极大丰富了石油地质学的内容。例如,地下裂解和压裂等技术的出现,使丰富的页岩油气和致密砂岩油气得以商业性开采;页岩、煤岩和油页岩等既可作为烃源岩,又可作为非常规的储集岩和封堵岩,形成了“自生自储自封型”的页岩油气矿藏和煤岩油气矿藏等。从而,油气藏形成的基本要素——生储盖的含义和类型都得到了前所未有的扩展。当今的“油气矿藏”既包括传统石油地质学所论述的符合油气生成、运移和聚集规律的“经典油气藏类型”,也包括各类非常规的油气矿藏类型,如页岩气、页岩油、煤岩油、煤层气、油页岩、可燃冰和致密砂岩气等。

因此,从油气矿藏形成的共同基本要素入手,系统论述和总结各类常规和非常规油气矿藏的地质特征、评价方法与开发技术,是非常必要的,也是对传统石油地质学的发展和完善。

本书试图立足油气形成和演化的基本单元——沉积盆地,从有机质赋存方式和类型、组分构成与成烃特征,系统论述沉积有机质富集成矿的地质环境与相应的油气矿藏类型,梳理出各类油气矿藏在沉积盆地中的成生联系和分布特征;并系统总结和论述各类油气矿藏的地质特征、资源潜力和关键开发技术,尤其突出各种非常规矿藏类型的系统论述,以便供相关科技工作者和院校师生参考。不足之处,请广大同仁指正!

作者虽长期从事油气藏地质研究与勘探评价,但若不依托项目或课题研究团队中各位成员多年的研究成果,是无法完成本书的。他们也是本书的编著者。现将本书依托的研究成果和相应科研人员名单对应列出,以表敬意和感谢。

油页岩:瞿辉、郑民、周长迁、吴晓智等;

页岩气:董大忠、王社教、李登华、黄金亮、王玉满、吕维宁等;

煤层气:刘人和、拜文华、汤达祯、昌燕、臧焕荣、梁峰等;

致密砂岩气：王朋岩、孔凡志、宫广胜等；

油砂：刘人和、梁峰、康永尚、法贵方、拜文华、昌燕等；

重油：朱世和、谢寅符、陈刚、刘亚明、刘乃震、马中振、白国斌、李星民等。

全书由牛嘉玉、蒋凌志、史卜庆统编，各章的编写和整理分工如下：

第一章至第二章：牛嘉玉、蒋凌志、史卜庆；

第三章：牛嘉玉、蒋凌志、史卜庆、蒲泊伶、李春光；

第四章：牛嘉玉、蒋凌志、李春光、陈建平、胡永乐、吴小洲、刘海涛；

第五章：牛嘉玉、蒲泊伶、蒋凌志、史卜庆；

第六章：蒋凌志；

第七章：牛嘉玉、侯创业、金军、王好平；

第八章：蒋凌志、史卜庆；

第九章：蒋凌志、牛嘉玉、梁文杰、钱家麟；

第十章：牛嘉玉、蒲泊伶、蒋凌志、史卜庆；

第十一章：蒋凌志、牛嘉玉；

第十二章：牛嘉玉、蒋凌志、宫广胜。

最后，对胡见义、童晓光和马宗晋三位院士及方朝亮教授等相关领导和同仁给予的技术指导和帮助，深表谢意！

作 者

2012 年 10 月

目 录

序

前言

第一章 概述	1
第一节 油气矿藏地质研究与评价的内容和目的	1
第二节 油气矿藏地质研究与评价的发展历程	2
参考文献	9
第二章 沉积盆地油气矿藏形成的物质基础	10
第一节 沉积盆地有机质赋存方式与组分类型	10
第二节 沉积有机质的组分构成与成烃特征	23
第三节 沉积有机质富集成矿的地质环境与类型	35
参考文献	43
第三章 油气矿藏构成的基本要素	45
第一节 生烃岩	45
第二节 储集岩	52
第三节 封堵作用	105
第四节 圈闭	139
第五节 油气矿藏的分类与特征	145
参考文献	154
第四章 常规油气矿藏地质与评价	159
第一节 常规油气矿藏形成的地质条件	159
第二节 常规油气资源评价方法与相关参数	199
第三节 常规油气藏分布特征与资源潜力	216
第四节 常规油气藏开发技术新进展与应用	237
参考文献	248
第五章 “页岩气(油)”矿藏地质特征与开发利用	251
第一节 概述	251
第二节 页岩气(油)矿藏形成的地质条件	254
第三节 页岩气资源评价方法与参数	279
第四节 页岩气(油)矿藏分布特征与资源潜力	285
第五节 页岩气资源开发技术与应用效果	320
参考文献	340

第六章 油页岩矿藏地质特征与开发利用	343
第一节 油页岩开发现状	343
第二节 油页岩矿藏形成的地质条件	345
第三节 资源评价方法与相关参数	355
第四节 油页岩矿藏分布特征与资源潜力	362
第五节 开发技术与应用效果	382
参考文献	392
第七章 “煤岩油”矿藏地质特征与开发利用	394
第一节 “煤岩油”矿藏形成的地质条件	395
第二节 煤岩油矿藏品质评价和相关参数	402
第三节 煤岩油矿藏的开发与加工工艺技术	414
第四节 煤炭资源分布与“煤岩油”资源潜力	420
参考文献	454
第八章 煤层气矿藏地质特征与开发利用	457
第一节 概述	457
第二节 煤层气矿藏形成的地质条件	458
第三节 资源评价方法与相关参数	472
第四节 煤层气矿藏分布特征与资源潜力	479
第五节 开发技术与应用效果	515
参考文献	534
第九章 重油与油砂矿藏地质特征与开发利用	538
第一节 概述	538
第二节 重油与油砂的成因与特征	539
第三节 重油藏及焦油砂矿形成的地质条件	571
第四节 重油与油砂资源评价方法与参数	585
第五节 重油与油砂矿资源的分布与潜力	589
第六节 重油与油砂资源开发技术与应用效果	639
参考文献	651
第十章 致密(油)气矿藏地质特征与评价	653
第一节 概述	653
第二节 致密砂岩气矿藏形成的地质条件	656
第三节 典型地区致密砂岩气资源的地质特征	670
第四节 资源评价方法与资源量分布	684
第五节 开发技术与应用效果	690
参考文献	697
第十一章 可燃冰矿藏地质与评价	700
第一节 天然气水合物资源的勘探开发历程	701

第二节	天然气水合物成矿的地质条件.....	703
第三节	资源计算方法与相关参数.....	718
第四节	天然气水合物资源的分布特征与前景	724
第五节	天然气水合物开发技术与效果.....	729
	参考文献	733
第十二章	沉积盆地中油气矿藏的分布特征	736
第一节	盆地不同区域水体沉积有机质分布	736
第二节	盆地不同发育时期油气矿藏的分布特征	738
第三节	实例 1: 中国鄂尔多斯盆地.....	740
第四节	实例 2: 美国阿巴拉契亚盆地.....	753
第五节	实例 3: 西加拿大盆地	764
	参考文献	775

第一章 概 述

第一节 油气矿藏地质研究与评价的内容和目的

油气矿藏是对富含烃类化合物的有机物质在地下以流体、半固体或固体相态富集并保存下来的所有矿床的总称。它既是油气勘探所寻找的目标，也是油气开发的对象。可见，油气矿藏是油气在地下赋存的基本单元。石油地质学家和勘探家最感兴趣的是油气矿藏的分布位置、储存油气规模的大小、分布的成带性或规律性等，以便通过研究和预测，开展有把握的钻探，不断发现和获取地下赋存的油气资源。油气矿藏既包括传统石油地质学所论述的符合油气生成、运移和聚集规律的“油气藏”类型，也包括各类非常规的油气矿藏类型，如页岩气、页岩油、煤岩油、煤层气、油页岩、可燃冰和致密砂岩气等矿藏。

传统“油气藏”被定义为赋存于单一圈闭内，具有统一的热力、压力系统和油（气）水界面的油气聚集基本单元（胡见义等，1991）。然而，随着各种勘探和开发技术与工艺的不断发展和进步，许多非常规的油气矿藏越来越多地被投入商业性开发和利用。这些非常规油气矿藏都需要现代石油地质学对“油气藏”的定义和其生、储、盖等基本要素的含义进行扩展和完善。

油气矿藏由封堵层（物）、储集介质体和油气三部分构成。对常规油气矿藏来讲，封堵物是指较致密的岩石，通过与储集岩石的接触界面，对储集介质体实施相对封堵。这一接触界面可以是沉积界面、断层面和不整合面，这些界面的组合或单一界面的弯曲对储集体的封堵更为有效。而对非常规油气矿藏来讲，储集体对外围或边界封堵条件要求相对较低，甚至由储集岩石自身特征来完成自身封堵，构成“自储自封型”圈闭。

对常规油气矿藏来讲，储集岩主要是指具有连通孔隙和渗透性的岩石，具备流体渗流和储存的空间。油气作为流体，大部分是以游离相态赋存于颗粒孔隙或裂缝之中，其流动符合渗流力学原理。而对非常规油气矿藏来讲，除重油和油砂矿藏之外，油气储集空间相对致密，尤其是渗透性差，油气多以吸附相态赋存于岩石颗粒微小孔隙或微裂缝之中，油气的渗流已不符合渗流力学原理。这些非常规储集层包括致密砂岩、页岩和煤岩等。例如，在煤岩中，除部分油气以游离相和吸附相存在外，大量似烃类物质则是以分子状态或非共价键的化学方式储集于煤岩有机大分子结构中。因此，油气矿藏的储集层可以由砂岩、碳酸盐岩、火山岩和变质岩组成，也可由泥岩、页岩和煤岩等致密性岩石类型构成，只不过是致密性岩石的储集方式已明显不同于常规储集岩。

而油气作为储集体赋存物，可以是储集介质自生的，也可以是外部运移进来的。显然，封堵层和储集介质体构成“圈闭”，而油气则是赋存于圈闭中的储集空间。因此，

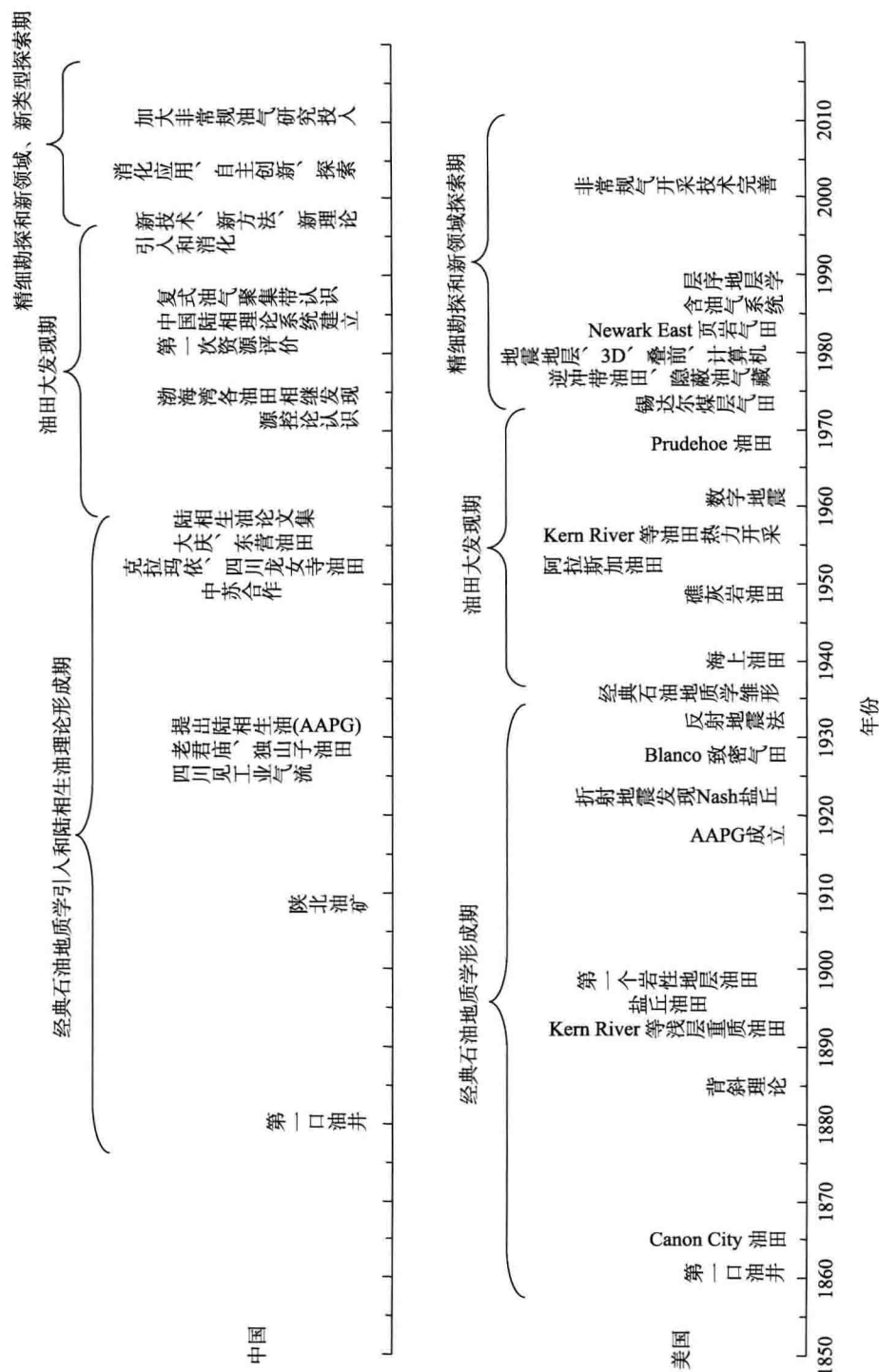
圈闭为一个能够允许油气聚集或赋存的空间场所,它具备良好的储集空间和不渗透的边界遮挡层(物)。非常规油气矿藏的圈闭均具有“自储自封”的倾向或特点,部分矿藏还具备“自生自储自封”的特征。这种“自储自封”的圈闭边界常由生烃岩体或储集砂体的边界构成,其油气聚集通常具有大面积、连续分布的特征。然而,只有满足当前经济和技术条件的“甜点”式油气富集区才是真正的非常规油气矿藏商业开采区。因此,在非常规油气的勘探评价过程中,以经济和技术关键参数为核心,刻画和圈定出其“甜点”式油气富集区的边界,是非常重要的。

近年来,随着油气勘探开发的不断深入以及新技术、新方法的不断出现和应用,各种新型的油气藏被不断发现、并投入商业性开发。从而,极大丰富了石油地质学的涵盖内容。例如,地下裂解和压裂等技术的出现,使丰富的页岩油气得以商业性开采;煤岩液化等工艺的提出,使资源丰富的煤岩油得以经济开发和加工。可见,页岩、煤岩和油页岩等既可作为烃源岩,又可作为非常规的储集岩和封堵岩,形成了“自生自储自封型”的页岩油气矿藏和煤岩油气矿藏。为此,作为油气藏形成基本要素的生储盖含义和类型都有所扩展和完善。

因此,作为石油地质理论的核心内容,油气矿藏地质研究与评价包括系统研究常规和非常规油气矿藏形成与分布的过程和特征。包括各类油气矿藏的构成要素、形成环境和条件、油气富集时间和期次、后期改造和调整,以及各类油气矿藏在各级地质单元中的展布特征等。从研究发展趋势来看,油气矿藏的研究和评价将从静态到动态,从宏观到微观,从定性到定量,从过去、现在到未来预测,不断发展。即从油气矿藏形成的基本要素、形成条件、形成时间和形成机制的全过程来研究,以揭示各类油气矿藏的地质特征与资源潜力。

第二节 油气矿藏地质研究与评价的发展历程

油气矿藏地质研究和评价的历程也是石油地质学与石油勘探发展的历史。回顾国内外油气矿藏地质研究的发展历程与勘探实践,一般都会发现:在一个地区的油气勘探过程中,只有当人们的理论认识逐渐符合客观地质规律之后,才会陆续获得油气的大发现和大突破。大油气田陆续被发现之后,人们面临的主要是一些相对规模较小的油气田,勘探目标也会更隐蔽,勘探难度加大,人们又开始寻找新区和非常规油气资源等。因此,国内外各个地区的发展历程整体上都经历了三个大的发展阶段:石油地质理论认识形成阶段、油气田大发现阶段,以及老区精细勘探和新领域、新类型探索阶段。本书以美国和中国油气地质理论发展和勘探实践为例,来回顾和对比三个发展阶段的特征。总体对比上看,中国各个发展阶段的起始时间都比美国的相应阶段晚 25 年左右(图 1.1)。其中,许多理论认识的提出和开始推广以及专项技术的研发和应用,也相应晚约 25 年。但针对我国地质特征,中国学者却建立和形成了具有中国特色的“陆相石油地质学理论和勘探方法”。



一、美国油气藏研究和勘探历程

从 1859 年完钻世界上第一口油井至今,美国 100 多年的油气勘探和研究历程大致经历了三个时期:第一个时期为经典石油地质学形成期(1935 年之前),第二个时期为油田大发现期(1935~1975 年),第三个时期为老区精细勘探和新领域探索期(1975 年之后)。

(一) 经典石油地质学形成期(1935 年之前)

美国是世界上最早以蒸汽机为动力进行钻井勘探开发油气田的国家。1859 年,美国人 E. L. Drake 在阿巴拉契亚(Appalachian)山区,以蒸汽机为动力,于宾夕法尼亚州(Pennsylvania)Titusville 区,成功钻探了世界上第一口工业油井,井深 21.69m,获得原油 $1.817\text{m}^3/\text{d}$,标志着世界石油工业的产生。1883 年,地质学家 I. C. White 研究了美国阿巴拉契亚区油气井后,指出石油聚集与背斜构造有密切关系。随后,在背斜顶部拟定了 3 口井位,先后获得油气流。1885 年开始, I. C. White 和 E. Orton 以大量实例论述了背斜储集、有机生成、储层的孔隙度和渗透率等一整套有关石油的地质认识,并按照这种认识在西弗吉尼亚州(West Virginia)钻探成功,证实了 I. C. White 和 E. Orton 地质理论认识的正确性。1860 年以 H. D. Rogers 为首的一批地质学家提出了石油海相生成等认识。1862~1896 年,在美国落基山区和得克萨斯州(Texas)等地区发现了 Canon City、Kern River 和 Midway Sunset 等一系列浅层重质大油田。1990 年 W. W. Orcutt 为联合石油公司组建了第一个指导勘探的地质研究部,效果显著。其他石油公司争相效仿。1901 年发现了第一个盐丘油田——纺锤顶油田,也是第一个自喷油田。1905 年在中陆区发现了第一个重要的地层圈闭油田——Glenn Pool 油田。1914 年开始,各石油公司雇用的地质人员迅速增加,石油地质工作的重要性日益突出。1917 年在塔尔萨城召开的石油地质研讨会上,正式成立了由 94 名会员构成的“西南石油地质学家协会”。1918 年,在俄克拉何马城召开的会议上,改名为“美国石油地质学家协会(AAPG)”。1924 年,首次应用折射地震法寻找地下石油圈闭,在得克萨斯州发现了 Nash 盐丘。1927 年发现了圣胡安盆地的致密砂岩气藏。

进入 20 世纪 30 年代,人们已开始充分认识到,完全由沉积或地层条件变化就可形成一种圈闭类型——地层圈闭(包括岩性圈闭)。至此,经典石油地质学的雏形已基本构成。美国石油地质学家协会组织出版和发表了一系列有关的专门著作和文章。1934 年出版了《石油地质问题》文集,阐明了有关石油生成、运移、聚集和油气藏类型等基本概念,标志着经典石油地质学概念已在世界上基本形成(胡文海和陈冬晴,1995)。随后的 1941 年出版了《典型地层油气藏》一书。并在 1954 年, A. I. Levorsen 先生编著了较为系统的《石油地质学》一书,1959 年被我国翻译出版。

(二) 油田大发现期(1936~1975 年)

20 世纪 30 年代中后期,由于地质理论认识的成熟和反射地震法的开始应用,先后

发现了墨西哥湾北岸的 Old Ocean 油田、伊利诺伊 (Iuinois) 州的 Salem 油田, 以及墨西哥湾上的第一个海上 Creole 油田。1943 年在俄克拉荷马州 (Oklahoma) 发现了地层圈闭大油田——West Edmond 油田。1948 年在得克萨斯州西部发现了 Scurry Reef 礁灰岩油田, 推动了世界其他地区寻找类似油田。1951 年在阿拉斯加州 (Alaska) 的库克湾发现了 Swanson River 油田。20 世纪 50 年代初开始, 早期发现的以 Kern River 为代表的浅层重质油田平均含水率已达 80% 以上。因此, 50 年代中后期出现的热力开采技术, 包括热水增产、蒸汽吞吐和蒸汽驱动等的出现, 成为这些老油田复苏的关键起因, 也掀起了开发老油田的热潮。美国油页岩主要为绿河组和密西西比纪, 50 年代开始, 一些石油公司建立了不少干馏炉, 如联合石油公司建立了日处理量高达 $1 \times 10^4 \text{t}$ 油页岩的岩石泵型干馏炉, 但未长期生产, 环境污染和成本等问题是阻碍其发展的主要原因。60 年代初, 数字地震技术的出现, 提高了构造成像和圈闭识别的精度, 扩大了勘探领域和勘探深度。1968 年在阿拉斯加州北坡发现了美国最大的 Prudhoe 油田, 可采储量达 $100 \times 10^8 \text{Bbl}^{\text{①}}$ 。美国在 1923 年原油的年产量就已达 $1 \times 10^8 \text{t}$, 原油最高年产量为 1970 年的 $4.55 \times 10^8 \text{t}$, 之后原油产量逐年下降。天然气产量的高峰年则略有滞后, 为 1973 年的 $6414 \times 10^8 \text{m}^3$, 之后天然气产量逐年下降。进入 70 年代中期, 每年新获得的原油可采储量呈下降趋势, 造成剩余可采储量下降、储采比降低和原油产量的下降, 新油气田的发现已不能弥补老油田的产量综合递减, 也标志着美国油田大发现期的结束。

(三) 老区精细勘探和新领域探索期 (1975 年之后)

自 20 世纪 70 年代中后期开始, 美国油气勘探进入了老区精细勘探和新领域、新类型探索时期。老区大量的边际油藏和非常规油气藏对技术和方法有着更高的需求。新的勘探远景地区都是一些地面和地下条件复杂的地区, 同样需求新技术和新方法。地震采集技术的改进、计算机技术的发展、三维地震技术的出现, 以及叠前处理技术、水平钻井、丛式井、大型压裂等技术的出现, 使上述目的的实现逐步成为了可能。1976 年, 在落基山逆掩断裂带中发现了油气田, 开辟了新的勘探领域。1977 年, AAPG 出版了《地震地层学》专辑, 又大大推动了地震地质解释的向前发展。1984 年, Masse 首次提出了“含油气系统”的概念。1987 年, Vail 等正式提出“层序地层学”概念, 表述为研究一套由不整合面及其相应的整合面为边界的, 具有成因联系的年代地层格架内岩层间相互关系的一门学科, 能提供一种更为精确的地质年代对比、岩相古地理再造和钻前预测生储盖组合的方法 (Vail, 1987)。1994 年, Magoon 和 Dow (1994) 正式系统提出了以“四图一表”为核心的“含油气系统”研究方法, 把“含油气系统”定义为“一套成熟烃源岩和它们所产生烃类的所有聚集。它属于含油气盆地和成藏组合两个含油气地质单元之间的一个地质单元层次。这一概念和研究方法的提出, 使地质学家对盆地和区带的石油地质评价更可靠、更清晰、更简易。这些分支学科和技术的发展都为老区精细勘探和新领域探索提供了强有力的支持。

① 1Bbl = 158.987L

随着常规油气储量的下降以及 1973 年石油禁运等政治因素的影响,人们的目光,自 20 世纪 70 年代开始,才逐步转向了煤制油和更难开采的煤层气、页岩气、致密砂岩气等非常规油气资源。美国能源部 1977 年实施的“煤层甲烷回采计划”,推动了 80 年代后期美国煤层气工业的全面发展。自 90 年代开始,随着政策变化以及压裂技术和水平井技术的进步,美国页岩气和致密砂岩气产量逐步增加。2000 年之后,各类非常规天然气产量增加迅速。受 20 世纪 70 年代中后期石油危机的影响,石油公司也陆续开始了煤液化技术的研发,80 年代中期基本成熟,但石油价格的回落和低迷,使煤制油技术的工业化生产一直没有实施。地下转化工艺技术的出现,也使油页岩资源的开发利用获得了避免环境污染的新途径。可见,技术的进步可使各类非常规油气资源逐步具有更高的商业价值,发挥出接替常规油气资源日益不足的重要作用。

二、中国油气藏研究与勘探历程

1878 年,中国在台湾省苗栗地区用顿钻完成了第一口深 120m 油井,被认为是标志着中国近代石油天然气工业的开始。一百多年来,通过反复地实践和认识,几代石油地质工作者已较为系统地研究和建立了具有中国特色的石油地质理论——中国陆相石油地质理论。中国油气矿藏勘探和研究的发展历程也经历了三个阶段:第一阶段为经典石油地质学引入和陆相生油理论形成期(1878~1960 年),第二个阶段为油田大发现期(1961~2000 年),第三个阶段为老区精细勘探和新领域、新类型探索期(2000 年之后)。

(一) 经典石油地质学引入和陆相生油理论形成期(1878~1960 年)

1907 年,清政府聘请了日本技师,用顿钻在陕北地区打出了第一口油井。20 世纪 20 年代至 30 年代初,老一辈地质学家在陕北和四川等地进行了系列地质调查。1932 年谢家荣先生编著出版《石油》一书,这是中国第一本关于石油地质学的书籍,该书主要汇编了外国书刊的石油地质理论认识,对中国问题论述较少。1934 年,陕北油矿勘探处成立,陆续发现了延长油田和七里村油田,但所采原油主要用于照明。1937 年,新疆独山子构造钻探了第一口出油井。1939 年玉门老君庙背斜构造钻探,井深 88m,获得 10t/d 自喷油流,发现了老君庙油田。1941 年,潘钟祥先生根据对陕北三叠系和四川侏罗系(当时定为白垩系)的调查以及前人工作,在美国石油地质家协会杂志上发表了《论中国陕北及四川白垩系陆相生油》的论文,明确提出了“石油的非海相成因”,认为“石油不仅来自海相地层,也能够来自淡水沉积物”,向当时流传的只有海相才能生油的论点提出了挑战。至 1949 年,已发现的油田包括玉门老君庙油田、陕北延长油田、台湾的出磺坑油田和竹头崎油田、新疆独山子油田、四川圣灯山气田等,累计发现石油地质储量 $2900 \times 10^4 \text{t}$,累计生产原油 $67.17 \times 10^4 \text{t}$,累计生产天然气 $0.11 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

新中国成立后,开展中苏合作。1955 年,准噶尔盆地西北缘部署位于南里油山背斜的 1 号探井,井深 620m,完钻获 19.62t/d 商业油流,发现了克拉玛依大油田。1958 年在四川的龙女寺、南充等背斜相继获得工业油流,陆续发现四个油田。1956 年石油工业

部成立华北石油勘探大队,开钻了华北的第一口石油参数井——华1井。1958年又在长春市成立了松辽石油勘探局,为中国石油勘探的重点由西向东转移做好了组织准备。1959年,松辽平原上的松基3井获高产油流,发现了大庆油田(翟光明,1996)。大庆油田的发现也标志着中国陆相油气地质理论的初步系统成型(包括陆相生油、沉积、储层和油气聚集等)。1960年石油工业出版社正式出版了《中国陆相沉积生油和找油论文集》。

(二) 油气田大发现期(1961~2000年)

1961年在山东东营凹陷辛镇构造钻探了华8井,在古近系东营组首次获得工业油流,证实了渤海湾盆地的含油气潜力。1963年,黄骅拗陷黄3井在新近系获得工业油流。1964年抽调大庆油田部分队伍,进入渤海湾盆地开展全面的石油地质研究与勘探。至20世纪80年代初,陆续发现了胜利、大港、冀中、中原、辽河及渤中等含油气区。这也是继大庆油田发现之后,我国石油勘探重点东移的第二个巨大成果。在渤海湾油区发现和发展的过程中,中国陆相油气地质理论也进一步得到了充实和提高,提出了渤海湾盆地复式油气聚集带理论,这一规律认识是在反复实践和全面综合研究的基础上逐步总结出来的。油气聚集带油气藏类型和数量众多,一次勘探是不能完成的。因此,提出勘探开发交叉进行,从而诞生了滚动勘探开发方法。

进入20世纪80年代,随着理论认识的深化、经验的积累、新技术和新方法的出现,以及装备的更新,勘探不断取得大突破和大发现,包括准噶尔盆地腹部、吐哈油田、渤海湾海域和滩海、鄂尔多斯盆地中部古生界大气田、四川气区的扩展等。1981~1985年,我国开展了全国第一次油气资源评价研究,第一次资源评价全面、系统地总结了新中国成立36年来的石油天然气勘探历程、成果、经验和石油地质特征,丰富和发展了石油地质理论,也为形成我国资源评价理论和方法系列奠定了基础;预测石油资源量 $787\times 10^8\text{t}$,天然气资源量 $33\times 10^{12}\text{m}^3$ 。80年代中后期,我国陆续开展了重油油砂、油页岩和致密砂气的研究与勘探。90年代初,开展了煤层气的研究与勘探,开辟了大城、晋城和吴堡等三个试验区。90年代中后期,在渤海湾盆地的辽河和胜利等油区的年增储量和产量中,重油沥青所占比例已经过半。1992~1994年,开展了第二次资源评价研究工作,对我国石油、天然气进行评价,并对重油及低渗透油气资源等也进行了初步的评价;预测全国石油资源量为 $940\times 10^8\text{t}$,天然气资源量 $38\times 10^{12}\text{m}^3$,为全国油气产量及储量的不断增长提供了科学依据和物质基础。自1989年成立塔里木石油会战指挥部,开始塔里木盆地新一轮的大规模油气勘探之后,至1997年,在库车拗陷前缘隆起发现了一个陆相凝析油气带(包括牙哈等六个凝析油气田),并坚持库车拗陷逆冲断裂带的山地地震和预探评价。1998年克拉2井在逆冲断裂带古近系获得高产气流,发现了克拉2气田。

(三) 老区精细勘探和新领域、新类型探索期(2000年以后)

老区是指勘探开发时间长、勘探程度高、资源探明率大于50%、精细勘探发现储量

比例较大的老油区。据初步统计,至2005年,中国17个主要含油气盆地的探明石油地质储量就已占这些盆地总石油资源量的30%,这些盆地中的老油区已进入石油勘探的高成熟期。尽管盆地面积大于 $10\times 10^4\text{km}^2$ 的10个大盆地平均探明率约30%,但部分油区的石油探明率高达70%。进入勘探高成熟期的含油气盆地或油区中,正向构造圈闭的油气藏多被发现和探明,而非构造油气藏,即所谓的隐蔽油气藏,则成为油气勘探的主要对象。目前老油区主要包括松辽和渤海湾盆地各探区、准噶尔盆地西北缘、四川盆地川中等地区,勘探实践表明老区依然是我国增储上产的主战场。依托层序地层学、二次三维地震采集和高精度连片处理技术、储层地球物理反演和预测技术、低阻油气层识别和解释技术、欠平衡钻井技术、定向井技术、快速钻井技术和酸化压裂等油层改造技术,精细勘探发现的年增探明储量均占全盆地的50%以上,老区精细勘探已形成了行之有效的思路和做法,油气勘探效果非常显著。

在渤海湾盆地,立足富油气凹陷,开展精细勘探,在复杂断块、滩海、岩性、潜山以及火山岩等领域取得了丰硕的勘探成果,发现了多个亿吨级的大油田。2005年准噶尔盆地西北缘精细勘探也有了重大突破,新增三级储量超过 $2\times 10^8\text{t}$,探明和控制的储量占全盆地新增的96%以上。在四川盆地,川中探区磨溪气田和广安气田是有着30年以上勘探历史的老气田。近年通过重新认识和深化勘探,仅广安地区的须家河组天然气新增三级储量规模就超过 $1\times 10^{11}\text{m}^3$ 。嘉陵江组在磨溪老构造,2005年新增探明储量就达 $300\times 10^8\text{m}^3$ 。在松辽盆地,扶杨油层和葡萄花油层的精细勘探也已构成若干个亿吨级场面。在吉林探区,红岗北及周边地区通过深化石油地质认识和突出效益勘探,扶余油层形成了亿吨级储量规模的勘探成果;在大庆探区,2005年通过对他拉哈-常家围子等地区葡萄花油层的精细研究和整体评价,已提交预测储量 $1\times 10^8\text{t}$ 以上。大庆探区扶杨油层也新增探明储量近 $6700\times 10^4\text{t}$ 。可见,老区精细勘探潜力巨大,对确保我国储量的持续稳定和增长有着举足轻重的作用。

从国外引入的“含油气系统”和“成藏组合”等概念,尽管学者论述颇多,但在勘探实践中却遇到了“水土不服”的现象。因为在勘探实践活动中,中国勘探家们依然习惯和继承应用我国老一辈地质学家总结的“源控论”、(复式)油气聚集带或区带等概念去寻找油气矿藏。

同时,新方法和新技术的发展也新区、新领域和非常规油气藏的探索提供了强有力的支持。2000年之后,我国天然气勘探进入了大发展时期。2000~2005年,17个以背斜构造圈闭为主的气田累计探明储量达 $22\ 805\times 10^8\text{m}^3$,平均每个气田的储量为 $1267\times 10^8\text{m}^3$ 。其中储量大于 $1000\times 10^8\text{m}^3$ 的气田有松辽盆地的徐深气田、塔里木盆地的克拉2气田、鄂尔多斯盆地的苏里格气田和子洲气田以及四川盆地的普光气田。

此外,面对近年来美国页岩气、煤层气和致密砂岩气产量的较快速增长,我国三大油公司也开始逐步加大各类非常规油气资源勘探开发的投入,已分别初步评价了我国各类非常规油气资源的潜力和有利区,为我国现代化进程提供重要的能源安全保障。