

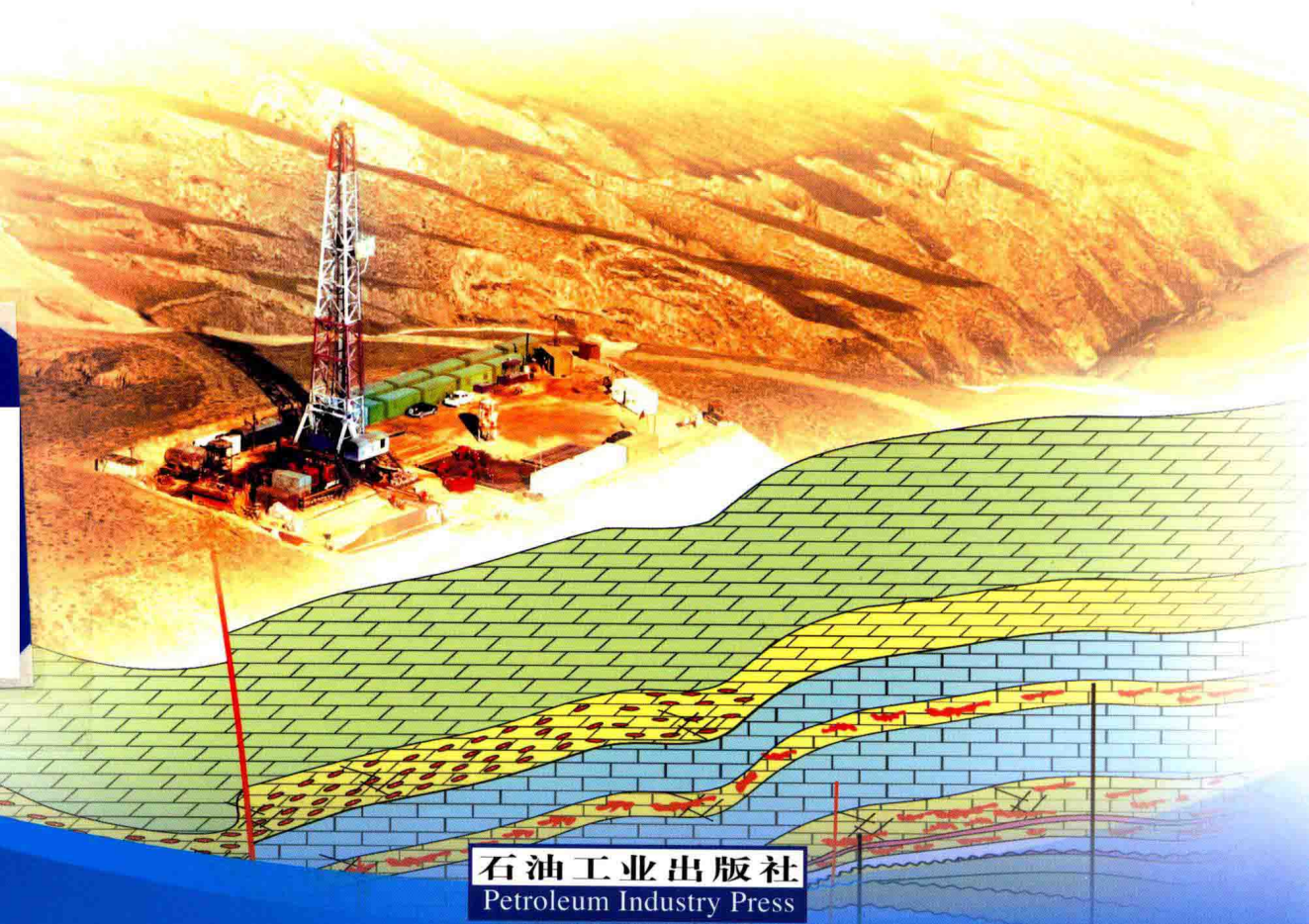


高等院校石油天然气类规划教材

天然气地质学

赵靖舟 张金川 高 岗 © 主编

戴金星 © 主审



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

天然气地质学

赵靖舟 张金川 高 岗 主编
戴金星 主审

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要阐述了天然气地质学的基本理论知识和研究方法,内容涵盖了天然气基本特征、天然气成因及判识、天然气源岩及生气模式、天然气储层及盖层、天然气运移聚集成藏特征、大中型气田形成的基本条件及主要控制因素,以及近年来非常规天然气的新进展和研究成果,最后介绍了天然气的资源评价方法。

本书是作为天然气地质、油气田开发等相关专业本科生教材而编写的,也可作为石油高校相关专业研究生的参考用书,同时可供天然气勘探和开发的技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

天然气地质学/赵靖舟,张金川,高岗主编.

北京:石油工业出版社,2013.12

(高等院校石油天然气类规划教材)

ISBN 978-7-5021-9927-2

I. 天…

II. ①赵…②张…③高…

III. 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(2013)第 298463 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:<http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010)64523579 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:18.25

字数:442 千字

定价:36.00 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

《天然气地质学》编审人员

主 编：赵靖舟 张金川 高 岗

主 审：戴金星

编写人员及单位：(按姓名拼音排序)

曹 青 西安石油大学

凡元芳 西安石油大学

高 岗 中国石油大学(北京)

蒋裕强 西南石油大学

李艳霞 西安石油大学

刘洪军 西安石油大学

时保宏 西安石油大学

张金川 中国地质大学(北京)

赵靖舟 西安石油大学

前 言

天然气地质学是研究地壳中天然气的形成及其分布规律的一门地质学科,其研究内容包括天然气的成因和类型、天然气藏的形成条件、成藏机理与分布规律以及天然气资源评价。

20世纪50年代,随着世界天然气工业的快速发展,天然气地质学逐渐由石油地质学中独立出来发展为一门系统的学科。1954年苏联地质学家维索茨基主编的《天然气地质学原理》的出版,是天然气地质学开始走向独立的标志;1979年维索茨基的《天然气地质学》的出版,则是天然气地质学作为独立学科渐趋成熟的标志,并且代表了20世纪70年代前世界天然气地质学研究的基本水平。

1986年,陈荣书、袁炳存编写的我国第一部《天然气地质学》由武汉地质学院出版社出版。该书分为10章,分别从天然气基本性质、储层和盖层、圈闭和气藏、天然气同位素特征、天然气成因、气源特征、天然气运移聚集、气藏形成和破坏、含气盆地分布规律及国内主要含气区地质特征多方面展开论述。1988年包茨主编的《天然气地质学》由科学出版社出版,该书被称为“我国第一部真正表述了有别于石油地质学的天然气地质学”;全书分为6章,分别论述了天然气的成因、储层、运移和聚集、天然气藏的形成特点以及含气盆地的类型,并列举了国内外15个典型气田实例。1989年戴金星、戚厚发和郝石生编著的《天然气地质学概论》由石油工业出版社出版,该书全面阐述了天然气的特征、天然气的运移、成藏条件、气藏类型、预测方法及分布规律,标志着中国天然气地质学渐趋成熟。

进入21世纪以来,国内外天然气勘探开发取得了一系列重大突破,天然气地质学研究也发生了较大变化。但国内目前使用的天然气地质学教科书大多仍是20世纪80年代出版的教材,此后一直未有新的教科书出版。鉴于此,2008年西安石油大学、中国石油大学(北京)、中国地质大学(北京)、西南石油大学4所院校的教师和专家聚集一堂,用5年时间共同打造了这本《天然气地质学》教材。

本书不仅吸收了以往出版的有关教材的优点,还囊括了20世纪90年代以来有关天然气地质研究的大量新成果,这其中就包含了非常规天然气研究方面的最新进展。

本书由赵靖舟、张金川、高岗担任主编,戴金星担任主审。全书共分10章,其中第一章由赵靖舟、曹青编写,第二章由凡元芳、刘洪军编写,第三章由刘洪军、赵靖舟编写,第四章由李艳霞编写,第五章由蒋裕强编写,第六章、第九章由高岗编写,第七章由时保宏编写,第八章、第十章由张金川编写。全书由赵靖舟统稿。

由于笔者水平有限,书中的不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

2013年10月

目 录

| | |
|--------------------|-------|
| 第一章 绪论 | (1) |
| 第一节 天然气工业发展概况 | (1) |
| 第二节 天然气地质学的产生与发展 | (8) |
| 第三节 天然气地质学的任务和研究内容 | (11) |
| 参考文献 | (12) |
| 第二章 天然气的基本特征 | (14) |
| 第一节 天然气的组分特征 | (14) |
| 第二节 天然气的物理性质 | (19) |
| 第三节 天然气的稳定同位素特征 | (25) |
| 参考文献 | (35) |
| 第三章 天然气的成因 | (37) |
| 第一节 天然气的成因类型 | (37) |
| 第二节 各类天然气的地球化学特征 | (40) |
| 第三节 天然气成因判识 | (47) |
| 参考文献 | (58) |
| 第四章 天然气源岩与生气机理 | (60) |
| 第一节 天然气源岩概述 | (60) |
| 第二节 天然气源岩评价 | (73) |
| 第三节 天然气的形成机理与模式 | (86) |
| 参考文献 | (100) |
| 第五章 天然气的储层与盖层 | (102) |
| 第一节 陆源碎屑岩储层 | (102) |
| 第二节 碳酸盐岩储层 | (116) |
| 第三节 其他类型储层 | (127) |
| 第四节 天然气的盖层 | (133) |
| 参考文献 | (142) |
| 第六章 天然气的运移 | (144) |
| 第一节 天然气运移的相态与方式 | (144) |
| 第二节 天然气运移的动力和阻力 | (151) |
| 第三节 天然气运移的时期、方向和距离 | (158) |
| 第四节 天然气运移地球化学 | (162) |
| 参考文献 | (172) |

| | |
|------------------------------|-------|
| 第七章 天然气成藏与聚集单元 | (175) |
| 第一节 天然气藏类型..... | (175) |
| 第二节 天然气成藏机理..... | (182) |
| 第三节 天然气聚集单元..... | (192) |
| 参考文献..... | (197) |
| 第八章 非常规天然气 | (198) |
| 第一节 致密砂岩气..... | (199) |
| 第二节 煤层气..... | (208) |
| 第三节 页岩气..... | (216) |
| 第四节 水溶气..... | (223) |
| 第五节 天然气水合物..... | (227) |
| 第六节 非常规天然气与常规天然气区别..... | (233) |
| 参考文献..... | (235) |
| 第九章 大气田特征及其分布规律 | (239) |
| 第一节 天然气田定义与划分..... | (239) |
| 第二节 大气田的基本特征..... | (241) |
| 第三节 大气田形成的主要控制因素与分布规律..... | (250) |
| 参考文献..... | (258) |
| 第十章 天然气资源评价 | (260) |
| 第一节 天然气资源评价概述..... | (260) |
| 第二节 地质类比法..... | (262) |
| 第三节 成因法..... | (264) |
| 第四节 统计法..... | (272) |
| 第五节 特尔菲法..... | (279) |
| 第六节 天然气资源评价方法体系..... | (280) |
| 参考文献..... | (283) |

第一章 绪 论

广义而言,天然气是指自然界存在的、天然形成的一切气体,包括大气圈、水圈、生物圈和岩石圈中各种自然过程形成的气体。天然气绝大多数是在标准状态下呈气态的化合物和元素组成的混合物,在特殊条件下才由单一气态组分组成。天然气中常见的气态化合物和元素有:烷烃气(C_{1-4})、二氧化碳、氮气、硫化氢、汞蒸气、一氧化碳和稀有气体(氦、氖、氩、氪、氙)等。

狭义的天然气一般指以烷烃气为主(少数情况下以二氧化碳或氮气为主,极少情况下以硫化氢为主)的,在岩石圈、水圈以至地幔和地核中的天然气(戴金星等,1992)。狭义的天然气可形成具有利用价值的矿藏,因而是天然气勘探开发的主要对象,也是天然气地质学研究的对象。

第一节 天然气工业发展概况

一、国外天然气勘探开发概况

(一)第二次世界大战前全球单一产气大国发展时期

产气大国是指年产气近 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 或更多的国家(戴金星,2005)。

美国是世界上天然气勘探开发起步较早的国家之一,也是全球第一个产气大国。美国天然气的勘探历史比石油勘探历史悠久。早在 1821 年,美国就在阿巴拉契亚盆地泥盆系钻了世界上第一口商业性页岩气井,也是美国第一口天然气井,比 1859 年钻探的第一口油井早了 30 多年。1881 年在阿巴拉契亚盆地发现了美国第一个大气田——Big Sandy 页岩气气田,该气田最终可采储量约为 $2832 \times 10^8 \text{ m}^3$,这使得阿巴拉契亚盆地成为 19 世纪美国重要的产气区(李小地等,2011)。

进入 20 世纪,美国天然气勘探逐步向全国展开。1916 年发现了门罗、彼撒内—瓦斯科姆、文图拉 3 个储量超过 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大气田。1910 年发现了长期作为美国第一大气田的潘汉得—胡果顿气田,其原始储量估计在 $15667 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1927 年在圣胡安盆地发现了第一个大型白垩系致密砂岩气田——Blanco 气田,最终可采储量约为 $4200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。特别是 20 世纪 20 年代地球物理勘探技术在油气勘探中的成功应用,形成了 20—50 年代大气田发现高峰和储量增长高峰。在 1965 年以前美国共发现储量超过 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的 30 个大气田中,1945 年前发现的就占了 20 个。由于天然气勘探不断取得突破,1929 年美国进入市场的天然气产量达到 $543 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为世界上第一个天然气产量超过 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的产气大国。1940 年美国天然气产量超过 $900 \times 10^8 \text{ m}^3$,1945 年突破 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 大关,达到 $1145 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为第二次世界大战前世界上唯一的天然气工业超级大国。

沙皇俄国没有天然气工业,十月革命之后苏联才建立起天然气工业部门。1928 年苏联仅产气 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$,主要是油田伴生气,纯天然气的产量微不足道。直到第二次世界大战初期,苏联的天然气储量和产量都很有有限,1940 年探明储量只有 $150 \times 10^8 \text{ m}^3$,开采天然气 $32.19 \times$

10^8m^3 , 储采比不到 5。1945 年苏联仅产气 $32.78 \times 10^8\text{m}^3$ 。20 世纪 50 年代初苏联还被认为是一个贫气的国家。

(二)第二次世界大战后至 20 世纪 80 年代全球常规天然气勘探开发快速发展时期

第二次世界大战后,包括天然气在内的油气工业在全世界得到迅速发展。其中,天然气工业以在欧美国家发展最快,出现了多个产气大国并存的格局,特别是美国和苏联作为两个天然气超级大国在此期间出现。

美国在 1983 年以前一直是世界第一产气大国。20 世纪 40 年代后到 50 年代初,美国油气勘探突飞猛进,勘探领域从陆上扩展到海上。1947—1970 年期间,共发现各种规模的气田 4395 个,其中大型和较大型的气田 189 个;天然气可采储量由 1945 年的 $4.18 \times 10^{12}\text{m}^3$ 增长到 1970 年的 $8.23 \times 10^{12}\text{m}^3$,天然气产量由 1945 年的 $1145 \times 10^8\text{m}^3$ 增至 1970 年的 $6204 \times 10^8\text{m}^3$ 。根据 1970 年资料,1965 年以前,美国共发现储量超过 $500 \times 10^8\text{m}^3$ 的大气田 30 个,其中 1945 年至 20 世纪 60 年代发现 10 个。由于第二次世界大战后天然气勘探的不断突破,美国天然气产量自 1945 年突破 $1000 \times 10^8\text{m}^3$ 大关后,1955 年突破 $2000 \times 10^8\text{m}^3$ 大关,以后分别于 1960 年、1963 年、1967 年、1970 年突破了 $3000 \times 10^8\text{m}^3$ 、 $4000 \times 10^8\text{m}^3$ 、 $5000 \times 10^8\text{m}^3$ 、 $6000 \times 10^8\text{m}^3$ 大关。1973 年,美国天然气产量达到 $6414 \times 10^8\text{m}^3$,成为历史高峰,此后天然气产量开始下降。到 1982 年,美国天然气产量降至 $5029 \times 10^8\text{m}^3$,与苏联当年天然气产量 ($5020 \times 10^8\text{m}^3$) 基本持平。到了 1983 年,美国天然气产量降至 $5000 \times 10^8\text{m}^3$ 以下,为 $4502 \times 10^8\text{m}^3$,而苏联当年产气 $5360 \times 10^8\text{m}^3$ 。自此,苏联取代美国成为世界第一产气大国。此后,美国天然气产量长期居第二。而且从 1983—1990 年,美国天然气产量一直未超过 $5000 \times 10^8\text{m}^3$ 。

苏联是在第二次世界大战后崛起的一个产气大国。1950 年苏联还是贫气国,探明天然气储量不足 $2230 \times 10^8\text{m}^3$,年产气为 $57.6 \times 10^8\text{m}^3$ 。20 世纪 50 年代开始,苏联相继对苏联地台北部的顿涅茨盆地、中亚的土兰盆地以及西西伯利亚盆地进行了大规模的区域地质—地球物理综合调查,结果在 50—60 年代先后发现了谢别林卡、加兹里、沙特里克和奥伦堡等一批大气田。20 世纪 60 年代中期至 70 年代初,又在西西伯利亚盆地发现了 11 个大气田(或油气田),其中包括长期作为世界上最大气田的乌连戈伊气田,使西西伯利亚盆地成为世界上最大的产油气区之一。到 1971 年初,在西西伯利亚盆地发现的气田和凝析气田共有 59 个,油气田有 5 个。1971 年以后,在西西伯利亚、土库曼、滨里海等盆地又相继发现了一批大型和特大型气田或油气田。由于天然气勘探的不断突破,从 20 世纪 50 年代中期起,苏联天然气工业开始迅速发展,商品气产量由 1951 年的 $62.5 \times 10^8\text{m}^3$ 迅速增长到 1970 年的 $1979 \times 10^8\text{m}^3$,增加了 30.7 倍;天然气可采储量由 1951 年的 $1730 \times 10^8\text{m}^3$ 增加到 1970 年的 $29.49 \times 10^{12}\text{m}^3$,增加了 170 倍,超过了美国(魏国齐等,2008)。1951—1976 年,苏联天然气产量增长速度远远超过其工业总增长速度,比发展较快的石油工业还要快得多,天然气产量年平均增长 16.7%,而工业总产值年平均增长 9.4%,石油产量年平均增长 10.6%。1960—1990 年,苏联天然气储量从 $18548 \times 10^8\text{m}^3$ 增长到 $453069 \times 10^8\text{m}^3$,天然气年产量从 $453 \times 10^8\text{m}^3$ 增长到 $8150 \times 10^8\text{m}^3$,增加了近 17 倍。这是因为在 1951—1990 年间,苏联发现和探明了 40 多个超大型气田(储量大于 $5000 \times 10^8\text{m}^3$)和大气田(储量 $300 \times 10^8 \sim 5000 \times 10^8\text{m}^3$)(戴金星,2005)。由于这些超大型气田和大气田的部分开发投产,1983 年起苏联年产气量超过美国而成为世界第一产气大国。苏联解体后,著名的中亚含气区分离出去了,但俄罗斯在 2008 年及以前仍保持世界第一产气

大国的地位,2008年产气 $6017 \times 10^8 \text{ m}^3$,是近10年来俄罗斯天然气产量的最高峰。

加拿大1960年产气 $143 \times 10^8 \text{ m}^3$,与我国1988年产气量差不多,还属贫气国之列,但1961年至1980年加拿大发现了5个大气田与一批中型气田,并相继投入开发,使该国在1970年产气 $567 \times 10^8 \text{ m}^3$ 而成为产气大国,1990年产气达 $1208 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为世界第三产气大国,并一直保持至今。2006年,加拿大天然气产量达到 $1884 \times 10^8 \text{ m}^3$,达到历史高峰。

荷兰1958年探明天然气储量不足 $740 \times 10^8 \text{ m}^3$,年产气仅 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$,是能源进口的贫气国。1959年探明了储量达 $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的格罗宁根大气田,1970年该气田全面投入开发,使荷兰1976年天然气产量达 $963 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为天然气输出国(戴金星,2005)。

另外,20世纪70年代在中东的波斯湾盆地、欧洲北海、北非、北美洲和大洋洲也相继发现了一批大型和特大型气田或油气田。

(三)20世纪90年代以来非常规天然气勘探开发快速发展时期

非常规天然气包括致密气、煤层气、页岩气和天然气水合物等,其中以致密气、煤层气、页岩气的勘探开发发展最快。

首先取得成功和快速发展的是致密气,特别是致密砂岩气。早在20世纪20年代,人们已认识到阿巴拉契亚盆地的致密气聚集不同于常规圈闭模式。但直到1976年在加拿大西部艾伯塔盆地发现了埃尔姆沃斯(Elmworth)巨型致密砂岩气田后,才在1979年提出了“深盆地”理论。20世纪70年代末期,美国石油价格一度高涨,为缓解石油供需矛盾,美国政府于1978年出台了《能源意外获利法》,鼓励非常规气体能源和低渗透气藏的开发。该法案的颁布有效地推动了美国非常规天然气工业的发展,在不到20年的时间非常规天然气的产量就增长到占美国天然气总产量的30%以上。

首先,20世纪80年代起,致密气的勘探开发在美国引起了重视,并产生了与深盆地理论相似的“盆地中心气”理论。在政策扶持以及盆地中心气理论的指导下,美国致密气勘探开发在20世纪80年代特别是90年代以来率先取得了重大突破和迅速发展。1990年美国本土48个州致密砂岩气的产量达到 $529 \times 10^8 \text{ m}^3$,占当年美国天然气产量的11.1%和非常规天然气产量的67%,1998年突破 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2005年,美国致密砂岩气产量达到 $1228 \times 10^8 \text{ m}^3$,占美国全国天然气产量的24.1%和非常规天然气产量的48.8%(Nehring,2008)。2008年,美国致密气产量达到历史高峰,为 $1910 \times 10^8 \text{ m}^3$,此后致密气产量开始下降。2010年,美国致密气产量为 $1754 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占天然气总产量的29%,仍然是美国天然气产量构成中重要的组成部分。截至2010年,美国已在23个盆地大约发现900个致密气田,剩余探明可采储量超过 $5 \times 10^{12} \text{ m}^3$,生产井超过10万口,进行致密气开发的盆地主要是落基山地区的大绿河盆地、丹佛盆地、圣胡安盆地、皮申斯盆地、粉河盆地、犹因他盆地、阿巴拉契亚盆地和阿纳达科盆地。

煤层气在美国1932年就有地面井投入生产,但针对资源的煤层气勘探开发活动起始于20世纪70年代。1977年和1980年黑勇士和圣胡安两大盆地的第一个煤层气田先后投入生产,1981年这两个盆地形成煤层气商业性生产,1988年突破年产气量 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。20世纪90年代以来,美国煤层气工业进入了高速发展阶段。特别是1993年以来至2007年,美国煤层气产量一直保持稳定增长。1993年煤层气年产量 $210 \times 10^8 \text{ m}^3$,超过了我国同期天然气总产量。1997年美国煤层气产量跃升到 $337 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2002年美国煤层气年产量增长到 $410 \times 10^8 \text{ m}^3$,2004年达到 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占美国当年天然气总产量的8.5%(秦勇,2006)。2007年,美国煤层气产量升至 $540 \times 10^8 \text{ m}^3$,达到历史高峰。

加拿大煤层气勘探与开发试验起始于1978年,但长时期内没有获得重大进展。21世纪

初以来,该国根据煤层气地质条件实际,注重发展了连续油管压裂、二氧化碳注入、水平羽状井等增产技术,使得煤层气产业开始高速发展。煤层气井数从2001年的250口增长到2004年底的3300余口(其中1735口井投入生产),煤层气产量从2002年的 $1 \times 10^8 \text{m}^3$ 左右增至2004年的 $15.5 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

澳大利亚煤层气目前已成为天然气供应多元化的一个组成部分。1996年以来,煤层气(包括矿井瓦斯抽放)产量连年增长,2004年达到 $12.85 \times 10^8 \text{m}^3$,其中78%产自昆士兰州(秦勇,2006)。

页岩气的勘探开发更早。早在1821年,美国就在纽约州Fredonia附近泥盆系富有机质的Dunkirk页岩完钻了世界上第一口商业生产的页岩气井。但美国页岩气广泛的商业性开采直到1980年实施了非常规燃料税收优惠政策以后,特别是1981年Mitchell能源公司在得克萨斯州北部Fort Worth盆地Barnett页岩钻探了第一口页岩气井后,页岩气的商业性开采才引起重视。然而,由于技术等原因,1989年美国仅产页岩气 $42 \times 10^8 \text{m}^3$,1999年美国页岩气产量达到 $108 \times 10^8 \text{m}^3$ 。2000年以来,由于高气价、页岩储层描述以及钻井完井技术的进步,页岩气成了有经济价值的勘探开采对象。2005年,美国页岩气产量升至 $209 \times 10^8 \text{m}^3$ 。2008年,美国页岩气产量达到 $572 \times 10^8 \text{m}^3$,比2007年增长了71%,页岩气产量占到美国干气总产量($5800 \times 10^8 \text{m}^3$)的10%。其中70%的页岩气产量来自得克萨斯州的Barnett页岩。2009年,美国页岩气勘探开发更是取得了惊人的重大突破,页岩气生产井增至约98600口,产量达 $928 \times 10^8 \text{m}^3$,超过我国常规天然气的年产量。其中,仅Barnett页岩的产量就达到了 $560 \times 10^8 \text{m}^3$ 。2010年美国页岩气产量达到 $1378 \times 10^8 \text{m}^3$,2011年增至 $1820 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

在非常规天然气勘探开发不断取得突破的推动下,20世纪80年代后期特别是90年代以来,美国天然气产量扭转了70年代早中期至80年代中期持续下滑的局面,转而开始呈增长态势。首先,在致密气的带动下,1991年美国天然气产量重上 $5000 \times 10^8 \text{m}^3$ 大关。然后,从1993年特别是1997年开始,在致密气和煤层气的共同推动下,美国天然气产量到2004年已增至 $5264 \times 10^8 \text{m}^3$ 。2005年以来,页岩气产量的快速增长使得美国天然气产量继续保持在较高水平。2009年以来页岩气的重大突破,使得美国天然气产量在2009年、2010年和2011年分别达到 $5840 \times 10^8 \text{m}^3$ 、 $6041 \times 10^8 \text{m}^3$ 和 $6513 \times 10^8 \text{m}^3$,从而连续3年超过俄罗斯而再次成为世界第一产气大国。其中,2010年美国天然气总产量中致密气产量 $1754 \times 10^8 \text{m}^3$ 、页岩气产量 $1378 \times 10^8 \text{m}^3$ 、煤层气产量 $484 \times 10^8 \text{m}^3$,非常规气产量已经占美国天然气总产量的60%左右(图1-1)。

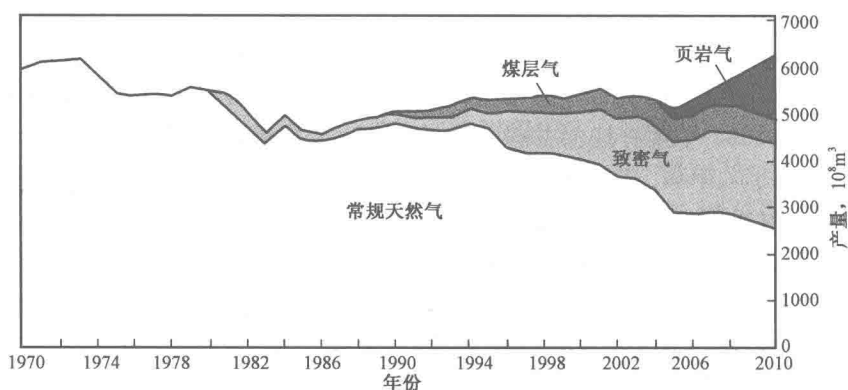


图1-1 美国1970—2010年天然气产量变化图(据邱中建、邓松涛,2012)

美国页岩气取得的巨大成功,在全球引发了一场“非常规革命”。自2010年以来,以页岩气为主的非常规油气勘探开发开始引起了全球的高度重视。世界正进入非常规油气特别是非常规天然气的时代!

二、中国天然气勘探开发概况

(一)1949年前中国天然气工业的萌芽时期

中国是世界上发现和利用天然气最早的国家之一。中国古代天然气的开采成果以四川盆地特别是该盆地的自流井气田最为突出。自流井气田面积 50km^2 ,是世界上第一个投入开发的天然气田,在汉朝就发现了自流井天然气。13世纪到18世纪末,自流井构造浅气层得到了大规模的开发,利用天然气煮盐。19世纪初,自流井气田开始进行深层气开发,1835年采用“卓筒井”(顿钻小口井)技术钻成了世界上第一口超过千米(1001.4m)的深井(兴海井),日产气 $5000\sim 8000\text{m}^3$ 。1840年以后,井深 1200m 的磨子井又钻遇了深层高产天然气,日产气 $20\times 10^4\text{m}^3$,当时称为“火王井”。1850年左右,自流井气田已有10余口采气井,年采气近 $1\times 10^8\text{m}^3$ 。据测算,自流井气田到1949年底,经历了300余年采气历史,累计生产天然气约 $300\times 10^8\text{m}^3$ 。

从中国采用近代工艺技术进行油气勘探的1878年(光绪四年)至新中国成立前夕,在中国仅发现6个气田:1913年、1934年和1937年在台湾分别发现了锦水气田、竹东气田和牛山气田、六重溪气田;1939年11月四川巴县石油沟巴1井在井深 1100m 以下三叠系石灰岩产气 $14150\text{m}^3/\text{d}$,成为石油沟气田的发现井;1943年12月在四川隆昌发现圣灯山气田,发现井产气 $14\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ 。

可见,至新中国成立前夕中国发现气田仅有7个(其中4个在台湾),年产气仅 $700\times 10^4\text{m}^3$ (除台湾省外),天然气探明储量为 $3.85\times 10^8\text{m}^3$ 。

(二)1949—1990年中国天然气工业形成时期

1949年新中国成立后,中国天然气工业开始加快发展。特别是经过“六五”和“七五”国家天然气科技攻关项目的实施,我国天然气探明储量和产量得到了较快增长。

新中国成立前,我国仅在四川盆地发现了气田,且没有发现储量大于 $100\times 10^8\text{m}^3$ 以上的大中型气田。1949—1978年,我国天然气仅按照一元成气论进行勘探,在此30年期间探明天然气地质储量 $2284\times 10^8\text{m}^3$,平均每年探明储量 $76\times 10^8\text{m}^3$ (戴金星等,2002),30年探明储量相当于新中国成立前100多年累计探明天然气储量的593倍。“六五”期间(1981—1985年)共获得天然气地质储量 $1345\times 10^8\text{m}^3$,年均获天然气探明储量 $269\times 10^8\text{m}^3$,发现气田9个,其中大中型气田2个(苏桥和柯克亚),均为煤成气田,最高年产 $128.3\times 10^8\text{m}^3$ (1985年)。“七五”攻关期间(1986—1990年)共获得探明天然气储量 $3082\times 10^8\text{m}^3$,年均增加 $616\times 10^8\text{m}^3$,比“六五”期间翻了一番,发现气田20个,其中探明大中型气田10个(大池干井、锦20-2、磨溪、汪家屯、台南、双家坝、平湖、崖13-1、涪北二号、福成寨),其中5个是煤成气田。“七五”期间累计产气 $700.3\times 10^8\text{m}^3$,最高年产 $147.1\times 10^8\text{m}^3$ (1990年)。

(三)1991—2000年中国天然气工业加快发展时期

截至1990年年底,中国累计探明天然气地质储量 $7044.96\times 10^8\text{m}^3$,其中年新增储量超过 $1000\times 10^8\text{m}^3$ 的仅1年(1990年)。1990年前达到大气田储量规模的大气田只有3个(威远、

卧龙河、崖 13-1),分布在四川和琼东南 2 个盆地。

然而,进入 20 世纪最后 10 年,中国天然气勘探步入了快速发展时期(赵贤正等,2002)。自 1991 年开始到 2000 年的“八五”和“九五”期间,我国天然气勘探不断取得重要突破,共新探明了 13 个大气田(千米桥、五百梯、沙坪场、牙哈、和田河、克拉 2、靖边、榆林、乌审旗、新场、春晓、东方 1-1、乐东 22-1),老气田达到大气田规模的 4 个(涪北 1、涪北 2、台南、磨溪),合计共 17 个大气田,从而使有大气田发现和探明的盆地达到 8 个(四川、鄂尔多斯、塔里木、柴达木、渤海湾、琼东南、莺歌海、东海)。

伴随一批大气田的发现和探明,1991—2000 年天然气探明储量显著增长(图 1-2)。10 年共新增天然气探明地质储量 $18512.29 \times 10^8 \text{ m}^3$,是 1949—1990 年 40 多年新增天然气探明地质储量的 2.63 倍。而且新增天然气储量连续 10 年超过 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中 1998 年新增天然气探明储量近 $2500 \times 10^8 \text{ m}^3$,主要原因是探明了和田河气田以及柴达木盆地东部 3 个气田第四系储量的扩大。2000 年新增天然气探明储量近 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$,主要得益于克拉 2、乌审旗、千米桥、春晓等大气田的探明。其中,“八五”期间年新增天然气探明地质储量 $1394 \times 10^8 \text{ m}^3$,”九五”期间达到 $2308 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。而“七五”期间平均年新增天然气储量只有 $616 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。截至 2000 年年底,全国天然气累计探明地质储量已达到 $2.56 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

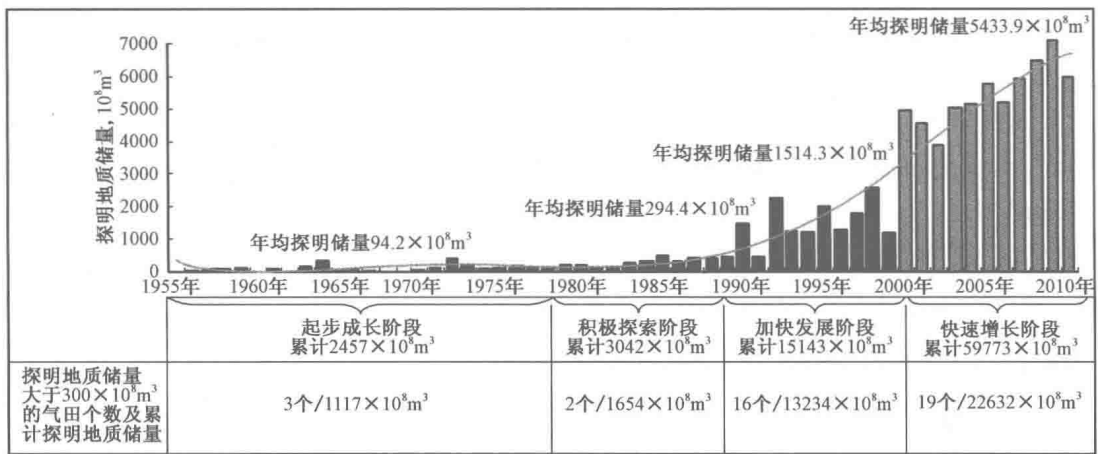


图 1-2 中国历年新增天然气探明储量分布直方图(据魏国齐等,2012,修改)

随着天然气探明储量的快速增长,天然气产量也稳步增长。1990 年中国天然气产量 $152.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ (含油田伴生气),2000 年上升到 $272 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。除四川老气区天然气产量不断增长外,鄂尔多斯、吐哈、柴达木、琼东南、东海等盆地天然气相继投入开发,保证了天然气产量的稳步提高。

(四)2001 年以来中国天然气工业高速发展时期

进入 21 世纪,我国天然气勘探不断取得重大突破,使得我国天然气探明储量一直保持高速增长(图 1-2)。2001—2004 年平均每年新增天然气探明储量 $4564.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,累计天然气探明储量上升到 $4.38 \times 10^{12} \text{ m}^3$,增加了 41.55%,远高于同期世界平均增长水平(赵文智等,2005)。其中“十五”期间(2001—2005 年)天然气探明储量主要来自鄂尔多斯、四川、塔里木、柴达木 4 大盆地。到了“十一五”期间(2006—2010 年),天然气勘探的突破主要集中在鄂尔多斯、塔里木、四川、柴达木、松辽、准噶尔等 6 大盆地,主要勘探领域包括大面积砂岩岩性、海相

碳酸盐岩、前陆盆地冲断带、火山岩气藏、生物气气藏等。2000—2010年,共发现 $300 \times 10^8 \text{m}^3$ 以上的大气田 19 个,年均新增探明储量超过 $5000 \times 10^8 \text{m}^3$,累计探明天然气地质储量达到 $5.98 \times 10^{12} \text{m}^3$ (魏国齐等,2012)。截至 2010 年年底,全国天然气累计探明地质储量 $7.67 \times 10^{12} \text{m}^3$,可采储量 $4.47 \times 10^{12} \text{m}^3$ (贾承造,2012)。

由于勘探上不断取得重要突破,21 世纪以来我国天然气产量也快速上升(图 1-3)。2001 年全国天然气产量达到 $303 \times 10^8 \text{m}^3$,居世界第 18 位。到 2005 年,我国天然气产量增加到 $493 \times 10^8 \text{m}^3$,世界排名升至第 14 位,已逼近世界产气大国行列。

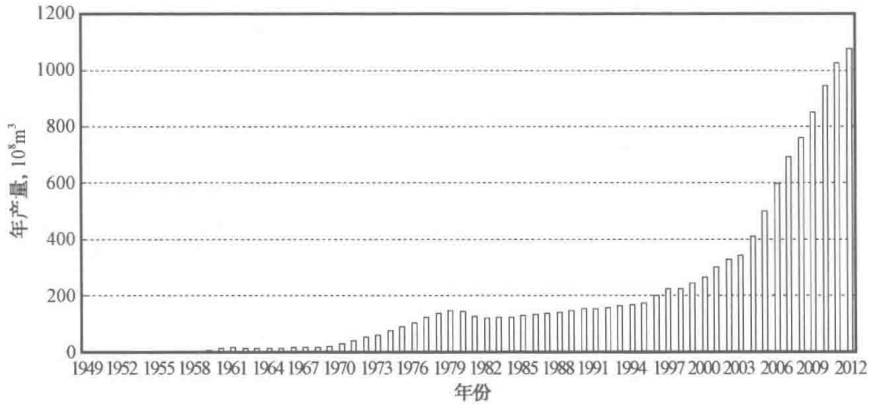


图 1-3 中国 1949—2012 年天然气年产量变化图

据 BP 世界能源统计年鉴(2012 年 6 月),2005 年以前,全球天然气年产量超过 $500 \times 10^8 \text{m}^3$ 的产气大国不超过 13 个,2006—2011 年间产气大国增至 16~18 个。

2006 年我国天然气产量达到 $585 \times 10^8 \text{m}^3$,从而正式迈入世界产气大国行列,成为全球 17 个产气大国之一,世界排名升至第 13 位。2011 年,我国天然气产量达到 $1025 \times 10^8 \text{m}^3$,成为全球 7 个年产量超过千亿立方米的产气大国之一,世界排名升至第 6 位。可以看出,从 2001 年到 2011 年的 10 年间,我国天然气产量增长了 3.4 倍,世界排名由第 18 位升至第 6 位,从而实现了几代人的天然气大国梦想。

21 世纪以来,中国天然气产量之所以能够保持高速增长并实现天然气大国梦,主要与致密气的快速发展有关。进入 21 世纪以来,我国致密气勘探开发突破不断,探明储量也表现出大幅度增长(图 1-4)。截至 2010 年年底,中国共发现了 45 个大气田,其中致密砂岩大气田 15 个(戴金星等,2012)。到 2011 年年底,全国已累计探明致密气地质储量 $3.3 \times 10^{12} \text{m}^3$ 左右,约占全国天然气总探明储量的 39%;2011 年致密气产量大致在 $256 \times 10^8 \text{m}^3$,约占全国天然气总产量的 1/4。致密气已成为我国天然气增储上产的重要领域,在天然气工业发展中占有非常重要的地位(杨涛等,2012)。可以说,正是由于鄂尔多斯、四川、塔里木等盆地致密气勘探的持续突破,才使得我国在 2006 年得以进入世界产气大国行列,并在 2011 年突破了千亿立方米大关。

近年来,煤层气勘探开发在我国也取得重要进展,页岩气勘探也开始受到重视。由于我国非常规天然气资源十分丰富,且其勘探程度较常规天然气低得多,因此预计今后非常规天然气将成为我国天然气工业的主要增长点,其发展前景十分广阔。

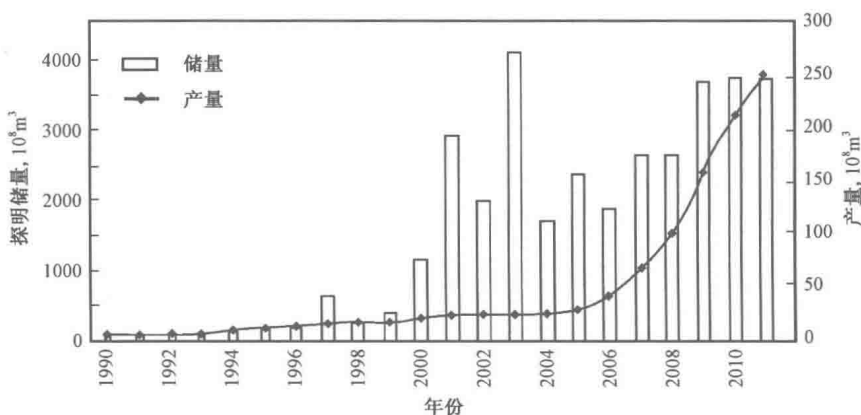


图 1-4 1990—2011 年中国致密气储量和产量增长形势图(据杨涛等,2012)

第二节 天然气地质学的产生与发展

天然气地质学(natural gas geology)是研究岩石圈中天然气形成与分布规律的一门地质学科。

一、国外天然气地质学的产生与发展

国外天然气地质学的发展以欧美国家为代表,大体可分为 3 个阶段:油气地质学时期(1954 年以前)、天然气地质学独立时期(1954—1979 年)以及非常规天然气地质学发展时期(1979 年以来)。

(一)油气地质学时期(1954 年以前)

自从 20 世纪初石油地质学诞生以来,天然气一直被作为石油地质学的研究对象之一,属于石油地质学的一部分。这是因为天然气和石油特别是油型气和石油有密切的关系,这就决定了天然气地质学前身依附在石油地质学中。20 世纪 50 年代以前,指导天然气勘探的地质理论主要就是油型气理论,认为天然气主要与油伴生,是生油母质进入到高热演化阶段的产物。因此,这个时期天然气勘探还主要依附于石油地质理论的指导,油、气地质理论及油、气勘探并不严格区分,因而可称为油气地质学时期。

(二)天然气地质学独立时期(1954—1979 年)

尽管天然气与石油有许多相似之处,但二者之间特别是煤成气和石油之间又有明显区别,这就决定了天然气地质学成为一门独立学科的必然趋势。天然气地质学从石油地质学中独立出来成为一门独立的学科,是在油气工业发展到一定阶段且天然气研究出现新理论两个基本条件得到满足的前提下实现的。

第二次世界大战后,随着大量天然气田的发现和天然气研究的不断深入,人们认识到天然气在成因、成藏和分布规律等许多方面与石油都有重要差别。20 世纪 40 年代德国学者首先提出了煤成气理论(史训知等,1985),并从 50 年代开始在西欧、中亚(主要在卡拉库姆盆地)和西西伯利亚盆地指导天然气评价和勘探取得重大成果和效益,从而突破了以往石油地质学中不把含煤盆地或层系作为天然气勘探目标及研究对象的传统概念,开辟了煤成气勘探的新

领域。在此情况下,天然气地质学逐渐从石油地质学中脱离出来,成为一门独立的分支学科。1954年苏联地质学家维索茨基出版了《天然气地质学原理》,是天然气地质学开始走向独立的标志。1979年维索茨基在《天然气地质学原理》的基础上出版了《天然气地质学》,是天然气地质学作为独立学科渐趋成熟的标志,并且代表了20世纪70年代前世界天然气地质学研究的基本水平。该书除了介绍天然气的性质、组分和分布外,重点讨论了天然气的成因、天然气聚集的条件、天然气藏的类型、气藏的形成和演化等,同时还详细讨论了盆地类型与油气聚集的关系以及天然气在不同盆地中的分布特点,另外还提出了含气盆地和天然气聚集带的概念。至此,天然气地质学的基本理论已建立了起来。

(三)非常规天然气地质学发展时期(1979年以来)

20世纪70年代末特别是80年代以来,除了常规天然气地质理论进一步得到深化外,非常规天然气地质理论在北美得到快速发展。其中,在致密气研究方面,20世纪70年代末加拿大学者Masters(1979)提出了深盆气概念,以此解释西加拿大盆地致密气藏的聚集模式;80年代美国学者又提出了类似的概念——盆地中心气;80年代后期—2004年,深盆气或盆地中心气研究及勘探开发在全世界特别是北美地区受到广泛重视,并形成了较系统的认识(Law, 2002)。2004年以来,盆地中心气理论开始受到挑战。

在煤层气地质研究方面,20世纪70—80年代美国煤层气研究形成并完善了“解吸—扩散—渗流”理论和“排水—降压—采气”生产流程,使两个煤层气田(圣胡安盆地和黑勇士盆地)投入试验开发;80年代完善了煤层气评价采用的煤级、含气量、渗透性、水动力条件、构造背景、沉积体系等6大基本指标,取得了煤层气产量的突破(徐凤银等,2008)。1980年形成煤层气商业性生产规模,1988年年产突破 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 大关。1989年将煤层气开发试验扩大到阿巴拉契亚、拉顿、皮申斯等盆地,认识到北美西部洛基山造山带存在煤层气高产走廊,形成了以煤储层双孔隙导流、中煤级煤生储与成藏优势、低渗极限与高煤级煤产气缺陷等为核心的煤层气勘探理论体系。1994年提出“生物型或次生煤层气成藏”理论,并在粉河低煤级煤盆地实现煤层气商业性开发,促进1997年煤层气产量跃升到 $337 \times 10^8 \text{ m}^3$,这种高速增长趋势持续到1999年(秦勇,2006)。

页岩气的地质研究在20世纪80年代以来特别是21世纪以来也得到较快发展,提出了页岩气主要以吸附气和游离气方式赋存的特点(Curtis, 2002),基本搞清了海相页岩气的形成和富集条件,建立了页岩气选区评价标准与资源评价方法。

1995年,美国地质调查局提出了连续型聚集的概念,并将致密砂岩油气藏与盆地中心气、页岩气、煤层气、天然气水合物等一起归入连续型油气聚集之列,认为连续聚集是指空间分布范围大、无清晰边界的油气聚集,且其或多或少不依赖于水柱而存在(Schmoker, 1995)。连续型油气聚集概念的提出,不仅对非常天然气资源的重新认识具有重要意义,而且对于非常规天然气的成藏机理与富集规律研究及勘探开发具有重要的指导意义,因此已引起越来越多的关注。

二、中国天然气地质学的产生与发展

在中国,直到20世纪80年代以前还没有独立的“天然气地质学”学科。1979年,戴金星将煤层气理论引入中国,是促进中国天然气地质学独立发展的重要里程碑。陈荣书等1986年出版的《天然气地质学》、包茨1988年出版的《天然气地质学》、戴金星等1989年出版的《天然

气地质学概论》则是中国天然气地质学渐趋成熟的重要标志。

总体来看,中国天然气地质学的发展可分为如下4个阶段。

(一)油气地质学发展阶段(20世纪70年代末以前)

这一时期我国实际上尚无独立的天然气地质学科和系统的天然气地质理论,天然气地质学依附于石油地质学而存在,是石油地质学的一部分。指导天然气勘探开发的理论主要是油型气的一元成气论,即认为天然气是生油母质在高演化阶段的产物。在一元论的指导下,我国天然气勘探的领域受到很大限制,天然气工业发展十分缓慢。

(二)成气理论发展阶段(20世纪70年代末—90年代初期)

1979年戴金星发表了《成煤作用中形成的天然气和石油》(《石油勘探与开发》1979年第3期),从而将煤成气理论引进中国,认为煤系成烃总体上以成气为主成油为辅。煤成气理论的引进,使得我国天然气形成理论由早期的一元论发展为二元论,从而一方面大大推动了我国天然气的勘探开发步伐,另一方面也促进了天然气地质学在我国的诞生。“六五”国家科技攻关项目“煤层气开发研究”(1983—1985年)及“七五”(1986—1990年)国家科技攻关项目“天然气地质理论和勘探测试技术”的实施,有力地推动了煤成气理论在我国的深化发展,并促进了其他天然气成因理论的提出和发展。经过“六五”和“七五”的科技攻关,我国天然气地质工作者发展、形成和完善了以成气理论为主的一系列天然气地质学基础理论,包括煤成气理论、生物气理论、生物—热催化过渡带生气理论、天然气成因分类以及天然气鉴别标志体系等,成气理论由1979年前的一元成气论发展为多元成气论。此外,“七五”科技攻关还提出了天然气运聚平衡理论,分析了天然气形成与富集的基本地质因素等。

1992年出版的《中国天然气地质学》(卷一)系统总结了“六五”和“七五”天然气科技攻关的主要成果,该书的出版标志着我国天然气成气理论已基本完善,对后来我国天然气地质理论和天然气勘探开发事业的发展产生了重要影响。

(三)天然气成藏理论发展阶段(20世纪90年代早期—21世纪初)

与“六五”、“七五”科技攻关不同,“八五”(1991—1995年)国家科技攻关除继续深化成气理论的研究外,天然气地质研究的重点由成气理论转移到了大中型气田成藏理论的研究,包括成藏条件、成藏机理与分布规律等的研究,攻关项目名称就是“大中型气田形成条件、分布规律和勘探技术研究”。通过“八五”攻关,在天然气成藏地质理论方面取得了重要进展(戴金星等,1997)。主要的进展有:

(1)深化了大中型气田分布规律和成藏主控因素的认识,明确指出大中型气田形成的主要控制因素有:生气中心及其周缘;成气区内与大型古隆起有关的圈闭;潜伏的低、中阶煤系中或与其关联的上、下大中型圈闭;成藏晚期的大中型圈闭;生气区内大面积孔隙型储层和异常压力封存箱上及箱间圈闭。其中,生气中心对大中型气田的控制作用,经“八五”攻关后进一步明确认为我国大中型气田一般分布在生气强度一般大于 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的范围。另外,后来的“晚期成藏理论”实际在“八五”甚至较早时已经提出。

(2)对川东高陡背斜带石炭系、鄂尔多斯盆地中部奥陶系风化壳以及莺歌海盆地泥底辟作用的成藏机制与天然气富集规律的研究取得了重要进展。

(3)深化了天然气聚集带、天然气聚集区及天然气聚集域的划分研究。

上述成果为天然气成藏基本理论的建立奠定了良好基础,对“八五”以来我国天然气的勘探起了十分重要的指导作用。