

高等教育“十二五”规划教材

非常规天然气 地质学

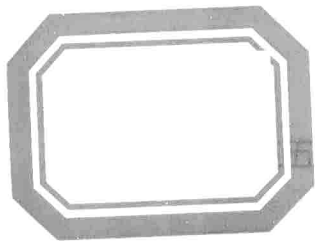
Feichanggui Tianranqi Dizhixue

主 编 李增学

副主编 常象春 刘海燕 吕大炜 韩 军 王东东 王平丽

中国矿业大学出版社





”规划教材

非常规天然气地质学

主 编	李增学		
副主编	常象春	刘海燕	吕大炜
	韩 军	王东东	王平丽

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书系统介绍了非常规天然气地质学的基本理论和研究方法,内容共分为八章。主要包括非常规油气地质研究进展、非常规油气地质的地位和意义,非常规天然气地质学地质基础及相关重要概念。本书重点论述了煤层气的物质组成和性质、煤储层、煤层气赋存状态及其转化机制、煤层气成藏、煤层气勘查开发的技术和方法、中国煤层气的地质特征和资源;介绍了煤系游离气的基本特征和成藏、瓦斯地质和瓦斯抽采;介绍了页岩气的基本概念和特征、页岩气的形成和成藏、页岩气的资源量评价、页岩气的勘探开发技术;介绍了致密砂岩气的基本概念、致密砂岩的储层特征和成因、致密砂岩气藏的地质特征和成藏过程、致密砂岩气的识别和评价;介绍了天然气水合物的概念和特征、天然气水合物气藏的形成和主要勘查方法等。

本书不仅是高校能源地质、资源勘查与地质工程、油气地质及勘探等专业的高年级教材,也可作为有关院校地质学专业学生、研究生的教材和参考书,还可作为现场地质技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

非常规天然气地质学/李增学主编. —徐州:中国矿业大学出版社, 2013.9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2014 - 1

I. ①非… II. ①李… III. ①石油天然气地质—地质学—高等学校—教材 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第199715号

书 名 非常规天然气地质学

主 编 李增学

责任编辑 潘俊成

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏徐州新华印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 22.5 字数 576 千字

版次印次 2013 年 9 第 1 版 2013 年 9 月第 1 次印刷

定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前言

在过去的近 150 年油气勘探开发历史中,人们一直心存这样的疑问——油气资源是否会很快枯竭?然而,人类勘探和开发的实践证明油气储量和产量每年却仍在增加着。不过,人们已经清醒地认识到,世界能源已进入后石油时代,全球能源以煤炭和石油为主的格局将转变为更清洁、更环保、分子结构更简单的天然气时代。据 2010 年美国休斯顿非常规天然气研讨会报道,全球非常规天然气资源量约为常规石油、天然气资源的 1.65 倍。近年来已成为新能源勘探焦点的非常规油气勘查开发在国外的能源资源发展中起了重要作用。因此,非常规天然气已经成为一种不容忽视的新能源。

非常规天然气资源,是指尚未充分认识、还没有可以借鉴的成熟技术和经验进行开发的一类天然气资源。非常规油气研究在国外具有较长的研究历史。国外学者很早就注意到了非常规油气及其地质特征的研究,政府也很快注意到对非常规油气资源的开发利用。20 世纪 40 年代以前,国、内外的油气勘查均以海相生油论或陆相生油论的一元论为指导,20 世纪 40 年代后煤系生烃理论逐渐形成并指导油气勘查实践。最早认知的连续型气藏属于致密砂岩气藏,1927 年发现于美国的圣胡安盆地,并于 20 世纪 50 年代初投入开发。20 世纪 70 年代,许多研究者对这种特殊类型的气藏进行了多种机理解释。1995 年美国联邦地质调查局提出“连续油气聚集”概念。21 世纪以来,随着石油勘查从常规油气藏延伸到非常规油气藏领域,非常规油气地质研究日益受到各国学者重视,致使近年来非常规油气地质研究进展显著。

20 世纪 60 年代后期,以澳大利亚学者为代表的腐植型成烃研究者注意到煤系不仅能生成气还可形成油。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。煤成烃,是指煤和含煤地层中以高等植物为生烃母质在成岩作用过程中形成烃类。随着国内油气资源结构的转变,非常规油气资源逐渐成为油气勘查的新领域,由此引起国内学者对非常规油气地质研究的重视。

世界页岩气资源非常丰富,主要分布在北美、中亚和中国。不断攀升的天然气价格和快速发展的页岩气藏勘查开发技术极大地激发了全球页岩气藏的勘查开发热潮。中国非常规油气资源丰富、种类多分布广,在未来油气工业中将占据重要地位。从 20 世纪 60 年代开始,我国陆续在不同盆地发现了工业性泥页岩裂缝油气藏,目前已在西部(如吐哈盆地、柴达木盆地、酒西盆地等)、中部(如鄂尔多斯盆地、四川盆地等)和东部(如松辽盆地、渤海湾盆地)以及南襄盆地、苏北盆地和江汉盆地等地发现并开发了泥页岩裂缝中的石油和天然气。

天然气水合物是 20 世纪人类在科学考察中发现的一种新的矿产资源。它是水和天然气在高压和低温条件下混合时产生的一种固态物质,有“可燃水”、“气冰”、“固体瓦斯”之称,被誉为 21 世纪具有商业开发前景的战略资源。从 20 世纪 80 年代开始,美、英、德、加、日等发达国家纷纷投入巨资相继开展了本土和国际海底天然气水合物的调查研究和评价工作,

同时美、日、加、印度等国已经制定了勘查开发天然气水合物的国家计划。特别是日本和印度,在勘查开发天然气水合物的能力方面已处于领先地位。世界已发现的海底天然气水合物主要分布区是大西洋海域的墨西哥湾、加勒比海、南美东部陆缘、非洲西部陆缘和美国东海岸外的布莱克海台等,西太平洋海域的白令海、鄂霍茨克海、千岛海沟、冲绳海槽、日本海、四国海槽、日本南海海槽、苏拉威西海和新西兰北部海域等,东太平洋海域的中美洲海槽、加利福尼亚滨外和秘鲁海槽等,印度洋的阿曼海湾,南极的罗斯海和威德尔海,北极的巴伦支海和波弗特海以及大陆内的黑海和里海等。2007年5月1日中国在南海北部首次采样成功,证实中国南海北部蕴藏着丰富的天然气水合物资源,标志中国天然气水合物调查研究水平已步入世界先进行列。据科学家粗略估算,中国在南海、青藏高原冻土带等地区的天然气水合物远景资源量至少有350亿吨当量油,成为世界上第三大天然气水合物储量大国。因此,2011年我国已将可燃冰纳入“十二五”能源发展规划,加快加强勘查和科学研究,以便为未来开发利用奠定基础。

虽然非常规天然气发展迅速,但从国内外现状来看,其勘查开发还存在许多问题亟待解决,包括机理分析和研究、实验测试和分析、有利选区和评价、含气特点和模拟、产能分析和预测、压裂技术和压裂液、精确导向和储层改造等。因此,非常规油气地质学的基础理论和勘查开发技术方法研究中仍有很多科学问题需要攻克。

本教材正是应目前我国非常规油气地质研究、勘查开发人才培养的急需而编写的。本书主要内容是就非常规天然气地质学的基础理论、研究方法以及勘查开发的基本方法进行较为系统的介绍,使其形成一个完整的学科。

本书内容共分为八章——绪论,非常规天然气地质学地质基础,煤层气,煤系游离气地质,瓦斯地质和瓦斯抽采,页岩气,致密砂岩气,天然气水合物。

本教材由李增学任主编;常象春、刘海燕、吕大炜、韩军、王东东、王平丽任副主编。具体写作分工如下——第一章、第二章由李增学执笔;第三章由刘海燕、吕大炜、王东东、王平丽执笔;第四章由吕大炜执笔;第五章由韩军执笔;第六章由李增学、吕大炜、王东东执笔;第七章和第八章由常象春执笔。全书最后由李增学统编、定稿。

在本书编写过程中,得到了中国矿业大学出版社的大力支持和帮助,得到了山东科技大学领导的关怀和支持。在此,一并表示诚挚谢意!

由于作者水平所限,加之时间较紧迫,书中不足之处难免,敬请专家、同行和广大读者批评指正。

编者

二〇一二年十月

目 次

前言	编者
第一章 绪 论	1
第一节 非常规天然气地质研究概述	1
一、非常规油气地质研究的历程	1
二、非常规油气地质研究的进展	3
第二节 非常规油气地质的地位和意义	8
一、非常规油气的战略地位	8
二、非常规油气的战略突破和意义	10
第三节 非常规天然气地质学的主要内容	13
第二章 非常规天然气地质学地质基础	16
第一节 非常规天然气地质学的有关概念	16
一、非常规油气地质	16
二、连续型储集天然气藏	18
第二节 常规油气地质与非常规油气地质的区别	21
一、油气资源的金字塔特征	21
二、非常规石油地质与传统石油地质的区别	21
三、中国连续型油气藏的特点	23
四、连续型油气藏的分类	23
五、连续型油气藏的形成、分布和演化特征	25
第三章 煤层气	28
第一节 煤层气的物质组成和性质	28
一、煤层气的形成	28
二、煤层气的化学组分和地球化学组成	30
三、煤层气的物理性质	33
四、煤层气的利用	35
第二节 煤储层	36
一、煤储层的储集空间	36
二、煤储层的渗透性	40
三、煤储层的其他性质	46

四、煤储层的分类分级	47
五、煤储层物性地质模型分析	48
第三节 煤层气的赋存状态及其转化机制	50
一、煤的吸附特征	50
二、游离态	59
三、溶解态	60
四、煤层气赋存状态的转换	61
第四节 煤层气成藏	63
一、煤层气藏的概念和相关问题	63
二、煤层气藏的边界和类型	63
三、煤层气藏的成藏机制	68
四、煤层气富集规律研究	78
五、煤层气资源量的计算	95
第五节 煤层气勘查开发的技术和方法	102
一、煤层气的地质评价	102
二、煤层气钻井和测井	105
三、煤层气完井和试井	114
四、煤层气生产技术	117
五、煤层气勘探的新技术和新方法	119
第六节 中国煤层气的地质特征和资源	123
一、中国煤层气的地质背景	124
二、中国煤层气资源及其分布特征	149
三、中国煤层气资源的勘查开发	155
第四章 煤系游离气地质	158
第一节 煤系分散有机质的丰度、性质和特点	159
一、煤系分散有机质的丰度	159
二、煤系分散有机质的性质和组成	160
第二节 煤系分散有机质的成烃机制	162
一、煤系有机质的成烃特点	162
二、煤系有机质的成烃演化机制	165
第三节 煤系游离气的基本特征	168
一、煤系游离气的组分	168
二、煤系游离气的地球化学特征	173
第四节 煤系游离气的成藏条件	181
一、构造热演化史和埋藏史研究	181
二、含煤地层的储集层特征	183
三、生、储、盖层组合型式	191
四、我国煤系游离气的圈闭类型	192

五、煤系游离气成藏模式研究	193
第五章 瓦斯地质和瓦斯抽采	196
第一节 煤层瓦斯的带状分布	196
一、煤层瓦斯风化带	197
二、甲烷带	197
第二节 矿井瓦斯涌出和矿井瓦斯等级	198
一、矿井瓦斯涌出	198
二、矿井瓦斯等级	200
第三节 煤与瓦斯突出机理	202
一、煤与瓦斯突出概况	202
二、煤与瓦斯突出的分类和显现特征	202
三、煤与瓦斯突出的机理	205
四、煤与瓦斯突出的防治	206
第四节 影响瓦斯赋存的地质因素	211
一、煤层埋藏深度	211
二、煤层和围岩的透气性	211
三、煤层倾角	212
四、煤层露头	212
五、地质构造	212
六、煤化程度	213
七、煤层地质演化史	213
八、水文地质条件	214
第五节 瓦斯的抽采和利用	214
一、瓦斯抽采的必要性	214
二、瓦斯抽采的方法和钻场布置	216
三、抽采瓦斯的利用	220
第六章 页岩气	223
第一节 页岩气的基本概念	223
一、页岩的类型和成因	223
二、页岩气的定义	227
三、页岩气与其他天然气对比	228
第二节 页岩气的基本特征	229
一、页岩气的组分	229
二、页岩气的性质和特征	231
第三节 页岩气储层的特征	237
一、页岩储层的岩石矿物组成	238
二、页岩储层的孔渗特征和微裂缝特征	240

三、页岩储层的含气性	240
四、页岩储层的评价标准	242
第四节 页岩气的形成和成藏	243
一、页岩气形成的有关因素	244
二、页岩气的成藏机理和控制因素	247
三、页岩气的成藏过程和特征	254
四、页岩气成藏的主控因素	259
五、典型页岩气的成藏模式分析	262
第五节 页岩气的资源评价	265
一、勘查初期阶段的资源评价	265
二、试井和投产阶段的资源评价	269
第六节 页岩气的勘探开发技术	273
一、页岩气勘探的关键技术	273
二、页岩气开发的关键技术	276
第七章 致密砂岩气	279
第一节 致密砂岩气概述	279
一、基本概念	279
二、研究概况	279
三、致密砂岩气的储层划分	279
第二节 致密砂岩储层的特征和成因	280
一、致密砂岩储层的基本特征	280
二、致密砂岩储层的沉积学和岩石学特征	281
三、致密砂岩储层的储集空间和储集性能	283
四、致密砂岩储层的成因	288
第三节 致密砂岩气藏的地质特征	291
一、致密砂岩气藏的构造分布	291
二、致密砂岩气藏的气水关系	292
三、致密砂岩气藏的压力系统	294
四、致密砂岩气储层间多发育富气“甜点”	296
五、致密砂岩气藏的气源岩	297
第四节 致密砂岩气藏的成藏过程	298
一、“动态圈闭”理论	298
二、气水倒置聚集的动力学机制	298
三、致密砂岩气藏的成藏特征	300
四、致密砂岩气藏形成的主控因素	304
第五节 致密砂岩气的识别和评价	308
一、致密砂岩储层物性下限的确定	308
二、致密砂岩气层的测井识别	312

三、孔隙率差值法和比值法	314
四、利用相对面积法识别气层	315
五、流体声阻抗比值法	315
六、视流体识别指标法	316
七、地层含气指标法	316
第八章 天然气水合物	317
第一节 天然气水合物概述	317
一、天然气水合物的概念	317
二、天然气水合物的研究概况	318
第二节 天然气水合物的特征	319
一、天然气水合物的物理化学性质	319
二、天然气水合物的类型	322
三、天然气水合物的结构	322
第三节 天然气水合物气藏的形成	323
一、天然气水合物的生成	323
二、水合物气藏的形成条件	325
第四节 天然气水合物的主要勘查方法	328
一、地震勘探法	328
二、地球物理测井法	330
三、地球化学勘查技术	331
第五节 天然气水合物的资源潜力和开发技术	332
一、全球天然气水合物的资源潜力	332
二、我国天然气水合物的资源潜力	334
三、天然气水合物勘查开发的相关问题	334
参考文献	336

第一章 绪 论

第一节 非常规天然气地质研究概述

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三个发展阶段或勘探领域。油气分布方式有单体型、集群型、连续型三种类型——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和从传统圈闭找油的理念。

一、非常规油气地质研究的历程

在过去近 150 年的油气勘查开发历史中,人们一直心存这样的疑问——油气资源是否会很快枯竭?实践证明,油气储产量每年仍然在增加着。近年来,已成为勘查焦点的非常规油气在勘查开发中起了重要作用。

国外很早就注意到了非常规油气及其地质特征(表 1-1),其中绝大部分属于连续型油气藏。最早认知的连续型气藏属于致密砂岩气藏,1927 年发现于美国的圣胡安盆地,并于 20 世纪 50 年代初投入开发,当时称之为隐蔽气藏。1950 年 J. D. Silver 提到该盆地缺乏边底水和白垩系地层普遍含气两个重要特征。70 年代,许多研究者对这种特殊类型的气藏进行了多种机理解释,提出了孤立(孔隙)体圈闭气藏、地层-成岩圈闭气藏、水动力圈闭气藏、水封型圈闭气藏等观点。1976 年,在加拿大西部阿尔伯达盆地发现了埃尔姆沃斯巨型深盆气藏,直到 1979 年, J. A. Masters 在对 Elmworth、MilkRiver 和 Blanco 气田分析的基础上提出了深盆气(deep basin gas)概念。1984 年, P. R. Rose 等人在研究 Raton 盆地时首先采用了“盆地中心气”(basin center gas)这一术语。1986 年, B. E. Law 等对“致密砂岩气”(tight sand gas 或 tight gas sands)进行了研究。1995 年美国联邦地质调查局提出了“连续油气聚集”概念(J. W. Schmoker, 2005),突出强调连续气藏是受水柱影响不强烈的大气藏,气体富集与水对气体的浮力无直接关系,并且不是由下倾方向气水界面圈定的离散、可数的气田群组成的。1996 年, J. W. Schmoker 正式使用“连续气藏”概念。

2006 年,美国联邦地质调查局提出:深层气(deep gas)、页岩气(shale gas)、致密砂岩气(tight gas sands)、煤层气(coal-bed methane)、浅层砂岩生物气(shallow microbial gas sands)、天然气水合物(natural gas hydrate)等六种非常规天然气(unconventional gas),统称为连续气(continuous gas)。

表 1-1 非常规连续型油气藏的国内外研究进展

类别	概 念	研究人员	年代	针 对 地 区
中国研究进展	天然气水合物	贺承租	1982	海底和永久冻土层
	煤层气	戴金星	1986	国内 14 个煤矿和 3 口煤层气中深井
	致密砂岩气	许化政	1991	东濮凹陷
	深盆气	金之钧、张金川等	1996	吐哈盆地台北凹陷
	根缘气	张金川	2003	鄂尔多斯、吐哈、四川盆地
	页岩气	张金川	2003	吐哈盆地吐鲁番拗陷水西沟群
	深盆油	侯启军	2006	松辽盆地(南部)
	向斜油	吴河勇	2007	松辽盆地(北部)
	连续型油气藏	邹才能	2009	中国相关油气区
国外研究进展	油苗发现	E. L. Drake	1859	美国宾夕法尼亚州泰物斯维尔
	“开放式”油气藏	威尔逊	1934	不定,预测将会存在并有潜力
	煤层气	Cervik, Joseph	1967	美国西部圣胡安盆地
	天然气水合物	D. L. Katz	1971	美国辛普森角、普鲁德霍湾等气田
	深盆气	J. A. Masters	1976	加拿大阿尔伯达盆地埃尔姆沃斯深盆气田
	致密气	B. E. Law	1979	美国西部地区盆地
	盆地中心气	P. R. Rose	1986	美国 Raton 盆地
	连续油气聚集	J. W. Schmoker	1995	美国油气资源评价区带
	页岩气	Asakawa, R. Tyler	1995	美国油气资源评价区带

非常规油气概念中的“非常规”涵义,是指目前还不能完全用常规方法和技术进行勘查、开发和加工的部分油气,主要根据一些特殊的标准进行划分,如最大基质渗透率、特殊的监管现状、需要特殊的工艺技术或难进入的区域(如极地或深水),而这些标准将会随着油气工业的进步而变化(J. W. Schmoker, 2002),且不同的人对“非常规”的理解不同。连续油气藏一般性地质特征为——缺少明显的盖层和圈闭,呈弥漫式富油或气,大范围分布,储层基质渗透率低,异常压力,与源岩距离较近;其开采特征为——采收率较低,缺少真正的空井,开发依靠裂缝渗透率,“甜点”具有相对高产特征但钻井偶尔也会出现“成功或失败”(J. W. Schmoker et al., 1996)。尽管所有钻进连续油(气)藏的井都会钻遇含油(气)储层,但很多则可能不具经济价值(J. W. Schmoker, 2005)。

中国对非常规油气的研究和勘查起步较晚,20 世纪 90 年代以后国内相继出现了深盆气(金之钧等, 2003)、根缘气(张金川等, 2003)、深盆油(侯启军等, 2006)、向斜油(吴河勇等, 2007)等概念。邹才能(2009)针对中国广泛分布的沁水煤层气、四川页岩气、川陕致密砂岩气、松辽和鄂尔多斯致密油、南海天然气水合物等非常规资源,提出了“连续型油气藏(场)”的概念,并揭示了其运移、渗流和聚集机理。

21 世纪以来,随着石油勘查从常规油气藏延伸到非常规油气藏领域,非常规油气地质研究日益受到重视。近年来非常规油气地质研究进展显著,主要表现在油气的储集空间微观结构研究方面,储层研究尺度已从微米级扩展到纳米级。研究表明,页岩中主要发育有机质、粒间、粒内三种主要纳米级孔隙,渗透率极低。

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查价值,但表明 W. B. 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、勘查开发难度大,非常规油气资源一直没有得到地勘界重视。直到 20 世纪 90 年代,随着油气勘查方向的转变和技术进步,非常规油气资源如深盆气(B. E. Law, 2002)、煤层气(W. B. Ayers Jr, 2002)、页岩气(P. H. Nielson, 1990)、致密砂岩气(J. A. Masters, 1979)和页岩油(H. W. Parker, 1970)等逐渐成为储量增长的主体之一,石油地质家们才将注意力转移到非常规油气地质研究上。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。

二、非常规油气地质研究的进展

20 世纪 40 年代以前,国、内外的油气勘查以海相生油论或陆相生油论的一元论为指导,20 世纪 40 年代后煤系生烃理论逐渐形成并指导了油气勘查(史训知, 1987)。煤系生烃理论的提出,是对海相生油论和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查实践所证实,多元成气理论亦得到发展和完善。在勘查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,对天然气的勘查具有重要的理论和实际指导意义;对有机成因气,根据母质类型和热成熟度做了进一步细化,使有机成因气的研究更加全面、系统;同时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植型成烃研究者,已注意到煤系地层不仅能生成气还可形成油。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,是指在煤和含煤地层中以高等植物为生烃母质于成岩作用过程中形成的烃类。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,形成工业性油气田。20 世纪 90 年代煤成烃理论在我国研究和勘查中遂形成热潮(宋岩等, 1998, 2005)。我国在“六五”、“七五”期间均把煤成气勘查开发研究列为国家重点科技攻关项目。戴金星等人按照煤系生烃理论,对我国含煤盆地含气性做了预测研究(戴金星等, 1986),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 $20 \text{ 亿 m}^3/\text{km}^2$),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(砂岩储层孔隙率多大于 12% ,渗透率多大于 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;碳酸盐岩储层孔隙率多大于 3% ,渗透率多大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)和低气势区有利于形成大气田。综合利用上述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 亿 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、普光和徐深等气田),有力地促进我国天然气工业快速发展。

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($\delta^{13}\text{C}_1 \approx 4.12 \lg R_0 - 34.39$)、油型气甲烷回归方程($\delta^{13}\text{C}_1 \approx 15.80 \lg R_0 - 42.20$)、 $\delta^{13}\text{C}_1 - \text{C}_1/\text{C}_{2+3}$ 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 $\delta^{13}\text{C}_1 > -30\text{‰}$,是负碳同位素系列,甲烷的 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 值为 $n \times (10^{-5} \sim 10^{-7})$,无机成因的二氧化碳的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 则大于 -8‰ 。

赵文智等(2002~2005)提出了高效天然气成藏新认识,总结出有机质接力成气演化模式、高效气源灶概念和评价方法、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和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概念和勘查理念,强调天然气的勘查从圈闭、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查地质理论、勘查思路、评价方法和战略规划。

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)。我国天然气勘查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),有力推动我国天然气勘查事业,促进我国天然气工业迅猛发展,使我国迈入世界重要的天然气产气大国行列。

随着国内油气资源结构的转变,非常规油气资源如深盆地、致密砂岩气、页岩气、煤层气、致密油和页岩油等逐渐成为油气勘查的新领域,由此引起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地、致密砂岩气、深盆地、向斜油等概念。根据美国联邦地质调查局相关研究成果,结合中国油气勘查实践,邹才能等(2009)提出的“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、评价和开采方法进行了系统论述。在此基础上,邹才能等(2010)进一步指出了非常规石油地质研究的重要性,强调对非常规油气资源、非常规储集层、非常规成藏、非常规油气开发技术等研究、评价和开发,尤其是研究微米、纳米级微观储集空间的形成机理、油气运聚和分布规律、经济可采储量和发展战略等。

2008~2010年,邹才能等把非常规油气分为连续型和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),是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,其与传统意义上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”,揭示出持续型油气“持续充注、连续分布”的聚集机制。连续型油气藏具有四个方面特征——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。成藏过程的持续即“持续充注”,油气运聚成藏过程是一个持续的动态平衡过程,因而成藏相对连续。而“连续分布”是连续型油气藏的最根本的特征。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)。这一概念明显地突破了常规圈闭成藏模式。

世界页岩气资源非常丰富,主要分布在北美、中亚和中国。全球第一口页岩气井 1821 年钻成于美国东部的阿巴拉契亚盆地的泥盆系地层。20 世纪 70 年代以后进入商业性开发,至今已有近 200 年发展历史。美国是世界实现页岩气商业性勘查开发最早的国家,在阿巴拉契亚、密歇根等多个盆地成功地实现了页岩气商业性开采。2007 年美国页岩气生产井已达 41700 多口,页岩气年产量近 500 亿 m^3 。2005 年以来,加拿大在其西部地区开始进行大规模页岩气资源潜力评价和开发先导性试验,2007 年页岩气产量约 10 亿 m^3 。中国对页岩气的研究始于 2005 年,页岩气的勘查开发尚处于探索阶段。

美国产气页岩主要分布在古生界和中生界,最初(1821 年)的商业性天然气产量来源于阿巴拉契亚盆地富含有机质的泥盆系页岩中。早在 1627~1669 年,法国的勘测人员和传教士就对阿巴拉契亚盆地富含有机质的黑色页岩进行过描述。他们提到的石油和天然气现在被认为来源于纽约西部的泥盆系页岩。1821 年被公认为是美国年轻的天然气工业的开端、第一口气井是在纽约 Chautauga 县泥盆系 Dunkirk 页岩中完井的,天然气用于弗里多尼亚城市照明,这些均比在宾夕法尼亚石油小溪发现著名的德雷克油井早 35 年。

20 世纪 70 年代中期,美国能源部在美国东部启动页岩气研究项目。地质、地球化学和石油工程等一系列研究的重点在于研究增产措施。20 世纪 80 年代和 90 年代初期,美国天然气研究所(GRI),〔现称为天然气技术研究所(GTI)〕基于这项研究,对美国泥盆系和密西西比系页岩中的天然气潜力进行了比较完整的评价并提高了天然气产量。由于上述突出工作,将人们的目光引向页岩气,实现了北美页岩气的成功开发利用,其发展速度非常之快。目前,北美页岩气的发展已超过煤层气,尤其是美国页岩气的大规模商业性开发已进入高速发展阶段。据统计,2000 年美国只在密歇根盆地(Antrim 页岩)、阿巴拉契亚盆地(Ohio 页岩)、伊里诺依盆地(New Albany 页岩)、沃斯堡盆地(Barnett 页岩)和圣胡安盆地(Lewis 页岩)等五个盆地生产页岩气,页岩气井约 28000 口(Ronald J. Hill 和 P. H. Nelson, 2000),从事页岩气生产的公司只有几家。到 2007 年,美国已在密歇根盆地(Antrim 页岩)、阿巴拉契亚盆地(Ohio 页岩)、伊里诺依盆地(New Albany 页岩)、沃斯堡盆地(Barnett 页岩)、圣胡安盆地(Lewis 页岩)、阿科马盆地(Woodford 页岩、Fayetteville 页岩)等 20 余个盆地发现了页岩气藏并成功开发,页岩气生产井增加到 41726 口(J. B. Curtis, 2007),页岩气年产量已接近 500 亿 m^3 ,约占美国天然气年产量的 8%(Exxon Mobil, 2008),从事页岩气生产的公司已达 60~70 家。尤其是沃斯堡盆地的 Barnett 页岩是目前美国最大的页岩气产区。Devon 公司 1981 年在沃斯堡盆地发现的 Newark East 页岩气田,其年产量自 2000 年起成为得克萨斯州最大的气田和全美第二大气田,2007 年页岩气产量为 217 亿 m^3 ,单井最高日产量达 9.99 万 m^3 。目前,参与沃斯堡盆地 Barnett 页岩气开发的公司有 Devon、Chesapeake、XTO、EOG、Burlington 及西南能源公司等,页岩气生产井达 8500 口。2000~2007 年所钻页岩气生产井 8588 口,其中水平井 5237 口,年产页岩气约 315 亿 m^3 ,占美国页岩气年产量的 70%左右。

美国的页岩气主要发现于古生界和中生界(D~K)海相地层中,目前勘探开发正由东北部地区的阿巴拉契亚、密歇根、伊利诺伊等盆地,中南部地区的沃斯堡、阿科马盆地向中西部地区的威利斯顿、丹佛、阿纳达科等盆地扩展。美国天然气研究所等近年发布的资料表明,

美国落基山地区盆地中的页岩气资源量为 1120 亿 m^3 , 逐渐形成了区域性页岩气勘探和开发的良好局面。

不断攀升的天然气价格和快速发展的页岩气藏勘探开发技术极大地刺激了全美页岩气藏的勘查开发热潮。近年来, 除沃斯堡盆地 Barnett 页岩的生产井数有大幅度增加并将继续增加外, 美国其他盆地的页岩地层正在被证实亦具有较好的页岩气生产前景。美国页岩气钻、完井数 2004 年为 2900 余口, 2005 年增加到 3400 多口, 2006 年超过 3600 口, 2007 年进一步增加到 4185 口, 至 2007 年全美已累计钻、完页岩气井 41726 口。据不完全统计, 2000 年以来, 全美页岩气钻井数量年增 10% 以上, 累计增加 75% 以上。2005 年以来, 页岩气钻井数量年增 15% 以上, 目前仍没有任何减缓迹象。

自 1821 年在阿巴拉契亚盆地发现第一口页岩气井, 到 1981 年美国中南部地区沃斯堡盆地 Barnett 页岩气田的成功开发, 以及 Barnett、Woodford、Caney、Fayetteville 和 Floyd 等一批新兴的页岩气聚集带勘查开发前景的证实, 与 Antrim、New Albany、Huron、Rhines-treet 和 Marcellus 页岩气层一样, 美国地质、工程专家均给予了极大关注。页岩气产量自 2000 年以来快速增长。美国页岩气产量 1991 年已近 44 亿 m^3 , 1997 年增长至约 100 亿 m^3 , 这一时期的页岩气主要来自阿巴拉契亚和密歇根两个盆地。1999 年, 密歇根盆地泥盆系的 Antrim 生物成因页岩气和阿巴拉契亚盆地泥盆系的 Ohio 热成因页岩产气约占页岩气总产量 (107 亿 m^3) 的 84%, 伊利诺伊盆地、沃斯堡盆地 (得克萨斯州) 和圣胡安盆地 (科罗拉多和新墨西哥州) 的产量相对较少。自 2005 年以来, 美国页岩气开发最活跃的盆地主要有沃斯堡盆地 (Barnett 页岩)、阿科马盆地 (Fayetteville 页岩)、圣胡安盆地和犹他盆地 (Lewis 和 Mancos 页岩) 和美国东部盆地群 (Devonian 和 Antrim 页岩), 其中 2004 年以来沃斯堡盆地的 Barnett 页岩业已成为美国最大的页岩气产区, 页岩气产量由此快速发展, 2007 年全美页岩气产量接近 500 亿 m^3 , 占美国天然气总产量的 8% 左右。

2000~2007 年, 美国发现页岩气藏的盆地由 5 个 (密歇根、阿巴拉契亚、伊利诺伊、沃斯堡和圣胡安盆地) 发展到以沃斯堡、阿科马、路易斯安那等为主的 30 个以上盆地, 页岩气产层几乎包含了所有的海相页岩烃源岩, 页岩气藏的钻探深度由发现初期的 600~2000 m 加深到目前的 2500~4000 m, 部分盆地的钻探深度已达 6000 m。2000 年以来, 页岩气开发钻井约 28000 口, 页岩气产量年增 50 亿 m^3 ~100 亿 m^3 。2008 年生产井约 42000 口, 页岩气年产量增至 500 亿 m^3 , 占北美天然气总产量的 17%。2005 年, 阿巴拉契亚盆地发现的泥盆系 Marcellus 页岩气藏, 面积达 24.605 万 km^2 , 地质储量达 42.48 万亿 m^3 (可采储量 7.4 万亿 m^3), 成为目前美国最大的气田之一。

美国页岩气开发的油气生产商早期以中小企业为主, 目前国际大油公司已全面参与, 主要页岩气生产商 2005 年只有 23 家, 而目前已达到 60 余家, BP、Shell、ExxonMobil、ConocoPhillips、挪威国家石油公司等全球大油公司都把页岩气作为重要开发目标并投入巨资。预计今后 10 年天然气增长的大部分来自页岩气, 其中 30% 的增长来自 Haynesville 页岩。路易斯安那州的第一口 Haynesville 页岩气井于 2006 年由 Encana 油气公司完成, 井深达 3925.21 m, 通过水平钻井、定向钻井、三维地震和大型水力压裂等先进钻、完井技术的规模推广应用, Encana、Chesapeake 和 Shell 等油气公司先后开启了几十年前就已发现的 Haynesville 页岩的巨大天然气潜力。与此同时, 美国东部阿巴拉契亚盆地 Marcellus 页岩的开发也呈现明显上升趋势。

由此可见,推动美国页岩气大发展的主要因素在于页岩气资源非常巨大、分布范围非常广泛、水平井钻井技术和连续油管分段压裂技术等低成本开发技术的突破和规模应用,以及成熟的市场、密集的输气管网、飙升的天然气价格和国家政策的大力扶持等。

加拿大是全球实现页岩气成功开发的第二个国家或地区。在加拿大西部不列颠哥伦比亚省的阿尔伯达、萨斯喀彻温、安大略和魁北克等地区广泛存在页岩气勘查开发远景区。加拿大的页岩气勘查开发始于1998年的阿尔伯达盆地。目前已在Utica、Muskwa、Montney、Horton和Horn River页岩中进行页岩气的先导性试验和开发生产。

世界其他国家均在着手进行页岩气的勘查开发。澳大利亚的Beach石油公司计划开发南澳大利亚库珀(Cooper)盆地的页岩气。在欧洲,虽然目前尚无页岩气开发,但在欧洲的众多地区发育有页岩气远景的页岩,如法国的东北部、欧洲的北部、德国和荷兰的石炭系页岩。欧洲许多国家的地质学家正在证明其广泛发育的富有机质页岩具有很好的页岩气前景。挪威国家石油公司已经与美国Chesapeake公司合作开发美国东部的Marcellus页岩,并希望把在美国的成功经验带回欧洲页岩气的开发中去。俄罗斯天然气巨头——俄罗斯天然气公司打算购买一家美国页岩气开发公司以获得页岩气开发技术用于俄罗斯页岩气开发。ExxonMobil公司在德国的下萨克森盆地拥有30万公顷的页岩气开发矿权,并准备首先钻探10口先导试验井,在匈牙利的Make Trough盆地钻探先导试验井。ConocoPhillips公司在波兰,Shell公司在瑞典,Eurenergy Resource公司在大不列颠均计划开发页岩气。与此同时,一些石油公司也在印度寻求页岩气开发机会。

从20世纪60年代开始,我国陆续在不同盆地发现了工业性泥页岩裂缝油气藏,目前已在西部(如吐哈盆地、柴达木盆地、酒西盆地等)、中部(如鄂尔多斯盆地、四川盆地等)和东部(如松辽盆地、渤海湾盆地)以及南襄盆地、苏北盆地和江汉盆地等处发现并开发了泥页岩裂缝中的石油和天然气。我国研究者通常所采用的“泥页岩油气藏”、“泥岩裂缝油气藏”和“裂缝性油气藏”等术语均主要是指裂缝中的常规机理聚集的油气,而忽略或较少涉及其中吸附态天然气的存在。

我国针对页岩气的研究和资源调查刚刚起步。目前,中国石油、中国石化等已开始了广泛的页岩气研究。中国页岩气发展已经历了两个发展阶段,正迈入第三阶段(图1-1)。早期以美国页岩气勘探开发动态跟踪为重点,包括页岩气基础理论、勘探开发进展、页岩气开采技术、增产措施等研究,全面系统地总结了美国页岩气盆地含气地质特征和勘探开发技术。根据美国页岩气特征,开展我国地质条件对比分析,初步评估了我国页岩气有利勘查开发领域和资源潜力,尤其是中国石油勘探开发研究院在四川盆地南部钻探了我国第一口页岩气地质浅井——长芯1井,获取了关于南方海相页岩的大量地质信息,推动我国页岩气勘查开发快速发展进程,使我国页岩气研究从跟踪形势步入勘查开发研究,并从区域上开始全国页岩气发展战略模式研究。通过与美国成功开发页岩气地质类比,指出我国页岩气勘查开发领域广泛,有南方古生界、华北古生界、塔里木古生界海相页岩,有鄂尔多斯、准噶尔、吐哈等盆地古生界石炭二叠系海陆过渡相泥-页岩和煤系高碳页岩、中生界三叠-侏罗系煤系高碳泥-页岩,还有渤海湾、松辽等盆地的新生代优质泥-页岩,均具有较好的页岩气资源勘查前景。

为摸清我国页岩气资源潜力,优选出有利目标区,推动我国页岩气勘查开发,增强页岩气资源可持续供应能力,国土资源部组织开展了全国页岩气资源潜力调查评价和有利区优选工作。