



页岩气地质与勘探开发实践丛书·之三

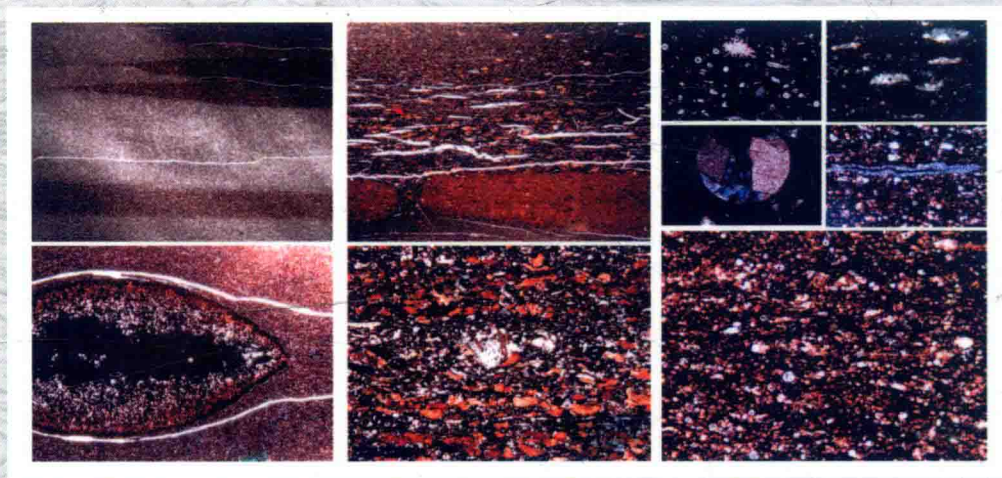
页岩油气藏

——21世纪的巨大资源

**SHALE RESERVOIRS:
GIANT RESOURCES FOR THE 21ST CENTURY**

[美] J. A. Breyer 主编

董大忠 黄金亮 王玉满 等译



石油工业出版社

页岩气地质与勘探开发 关键丛书·之二

页岩油气藏

——21 世纪的巨大资源

[美] J. A. Breyer 主编

董大忠 黄金亮 王玉满 等译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了页岩油气藏的基本特征,介绍了页岩油气资源特征、页岩储层评价方法、评价流程及页岩储层的岩石物理学特征等,分析了美国阿巴拉契亚盆地马塞勒斯页岩、威利斯顿盆地巴肯页岩、福特沃斯盆地巴奈特页岩和加拿大艾伯塔盆地牛奶河页岩的勘探开发实例,对我国页岩油气研究有重要的参考意义和指导价值。

本书可供从事页岩油气研究的地质人员、开发人员、油藏工程人员及相关专业师生参考阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

页岩油气藏——21 世纪的巨大资源/(美)布雷耶 (Breyer, J. A.) 主编;
董大忠等译. —北京:石油工业出版社, 2015. 11

(页岩气地质与勘探开发实践丛书·之三)

书名原文: Shale Reservoirs: Giant Resources for the 21st Century

ISBN 978-7-5183-0881-1

I. 页…

II. ①布…②董…

III. 油页岩-研究

IV. P618. 12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 229324 号

Translation from the English language edition: “Shale Reservoirs: Giant
Resources for the 21st Century” edited by J. A. Breyer, ISBN:
978-0-89181-379-8

Copyright © 2012

By the American Association of Petroleum Geologists

All Rights Reserved

本书经 American Association of Petroleum Geologists 授权石油工业出版社
有限公司翻译出版。版权所有,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2013-4215

出版发行:石油工业出版社有限公司

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523544

图书营销中心: (010) 64523633

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

2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 26

字数: 660 千字

定价: 180.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

《页岩气地质与勘探开发实践丛书·之三》

编 委 会

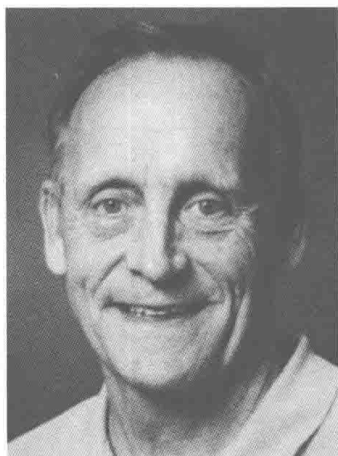
主 任：邹才能

委 员：董大忠 黄金亮 王玉满 李新景

王淑芳 管全中 张晨晨 蒲伯伶

吴 伟 冯子齐

主编简介



J. A. Breyer 是 Marathon 石油公司上游技术部的高级技术顾问。自 1975 年起，他一直任教于得克萨斯基基督教大学（其中 1981—1984 年短暂供职于 Exxon 生产研究公司），并于 2011 年退休。

在得克萨斯基基督教大学（TCU）任教期间，Breyer 一直致力于为石油与天然气行业提供咨询服务。Breyer 曾多次荣获 TCU 的教学成果奖，其教学水平得到学生的认可，教授的课程被评为荣誉课程（Honors Program）。Breyer 培养的多数研究生均供职于石油与天然气行业。2005 年，他因“为墨西哥湾岸区地质学家教育和培训作出巨大贡献”而被授予 GCAGS（墨西哥湾岸区地质学会联合会）杰出教育家奖。自 1993 年

起（直至退休），他每年夏天均参加 TCU in Scotland 计划。他曾多次（超过 20 次）爬上位于 Siccar Point 的陡峭悬崖，曾徒步远足至 Ben Nevis（不列颠诸岛的最高峰）山顶。此外，过去数年，他还与学生一道多次登顶 Guadalupe 峰。

Breyer 已单独或合作发表超过 60 篇期刊论文和公司报告。他热衷于各类地质研究，除石油地质以外，他所发表的论文还涉及《Jules Verne's Journey to the Center of the Earth》（《儒勒·凡尔纳通向地球中心的旅行》）、《Charles Lyell's philosophy of science》（《查尔斯·莱尔的科学哲学》）、前寒武纪遗迹化石、得克萨斯州西部的白垩纪火山活动以及 High Plains 的中新世脊椎动物群。此外，他还作为第二作者合作撰写论文《利用正电子湮没频谱测量泥岩的总有机碳（TOC）含量》，并发表于期刊《Radiation Physics and Chemistry》——此研究领域受他的研究生启发。

此外，Breyer 还是 AAPG、SEPM 以及美国地质学会的会员。

译者前言

随着中国社会与国民经济的持续和快速发展,对天然气等能源的需求急剧增长,供需矛盾日益突出。据国际能源署预测,2030年前化石能源仍为世界主体能源,石油和天然气在世界一次能源消费结构中的比例将占66%,中国能源消费比例将由目前的23.9%上升到32%,特别是天然气的消费比例将由现在的4%提升到13%,我国天然气供应将出现巨大缺口。

页岩油气是目前全球非常规油气勘探中的热点,备受关注和重视。北美地区是全球发现和勘探开发页岩气最早的地区,美国通过近50年的勘探开发与技术攻关实现了规模化开采,2014年页岩气产量已高达3700亿立方米,占全美天然气总产量的48%,有效助推了美国“能源独立”战略的实施,对世界能源格局和地缘政治产生了重大影响。

中国陆上页岩气资源丰富,具有良好的勘探开发前景;加快页岩气的勘探开发是确保中国能源安全供给的重要举措和实现向清洁能源转变的重要途径。借鉴美国经验,我国于2010年正式启动页岩气勘探开发,在陆上众多地区开展评价、钻探和开发试验,证实我国页岩气资源丰富,勘探开发前景大,并在四川盆地初步实现海相页岩气规模化开采。

本书以美国阿巴拉契亚盆地马塞勒斯页岩、威利斯顿盆地巴肯页岩、福特沃斯盆地巴奈特页岩和加拿大艾伯塔盆地牛奶河页岩气勘探开发为实例,系统介绍了页岩油气藏的基本特征,详细阐述了页岩储层评价方法、流程及岩石物理学特征,对我国页岩气的研究具有重要的参考意义和指导价值。本书翻译工作由董大忠、黄金亮、王玉满、李新景、王淑芳、管全中、张晨晨等共同完成,董大忠、王玉满对全书作了审校整理。本书可供科研院所、高校、油公司等从事页岩油气研究的相关科研人员参考,但由于译者水平有限,译文中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

前言

J. A. Breyer

Marathon 石油公司上游技术部, 美国得克萨斯州休斯敦

“石油首次发现于何处? 最终的分析结果显示, 石油首次发现于人类的大脑!”

——Wallace E. Pratt, 1952

“过去, 人们已数次认为油气资源接近枯竭, 事实上枯竭的是我们的思路!”

——Parke A. Dickey, 1958

20 世纪 70 年代初, 美国的大多数勘探地质学家将不太经济或边际经济的油气资源 (例如煤层气、页岩气、致密砂岩气) 视为非常规资源 (Law 和 Curtis, 2002)。20 世纪 70 年代末启动的税收刺激计划和联邦政府资助研究使得页岩油气资源在 20 世纪最后 20 年成为经济可采的资源类型。如果不考虑经济因素, 大多数非常规油气资源均具有两个重要地质特征 (Law 和 Curtis, 2002)。常规含油气系统属于构造或地层圈闭中因浮力驱动所形成的油气聚集, 而多数非常规含油气系统的形成不受水柱的影响, 其分布不受构造或地层圈闭约束。

页岩油气并非新型资源。美国的商业页岩油气生产起始于 1821 年, William A. Hart 针对裂缝性页岩气藏钻探了一口井 (产层为上泥盆统 Dunkirk 页岩), 并向纽约市 Fredonia 镇供应照明用气 (Roen, 1993)。截至 2000 年, 针对页岩气藏的钻井数已超过 28000 口, 天然气年产量接近 $380 \times 10^9 \text{ ft}^3$ (Hill 和 Nelson, 2000)。当时, 美国的主要页岩气资源系统为 Michigan 盆地的 Antrim 页岩 (泥盆系)、Appalachian 盆地的 Ohio 页岩 (泥盆系)、Illinois 盆地的 New Albany 页岩、Fort Worth 盆地的 Barnett 页岩 (密西西比系), 以及 San Juan 盆地的 Lewis 页岩 (白垩系) (Curtis, 2002)。天然气价格的上升以及 Barnett 页岩开发所促进的水平钻井和水力压裂技术进步, 进一步推动了 21 世纪初的页岩气开发。

Steward (2007) 详细论述了 Barnett 页岩气藏的勘探开发历史, 其涉及范围从 Mitchell 能源公司 1981 年针对 Barnett 页岩所钻的第一口井一直延续至 2002 年 Mitchell 能源公司与 Devon 能源公司合并。随着勘探热潮的到来, 部分地区的 Barnett 页岩气区带租赁费用已超过每英亩 30000 美元。2003—2004 年, Arkoma 盆地 Fayetteville 页岩启动开发。2006 年, 针对路易斯安那州西北部 and 得克萨斯州东部 Haynesville 页岩 (侏罗系) 钻探了第一口井, 促使页岩气勘探热潮进一步蔓延。与此同时, 随着 Marcellus 页岩及其他东部页岩气藏钻探成功, 密西西比州东部的巨大页岩气资源也逐渐引起人们的重视。2008 年, Petrohawk 公司发现 Hawkville 气田 (位于 La Salle 县), 揭开了得克萨斯州南部白垩系鹰滩页岩气区带的勘探序幕。此外, EOG 资源公司、EnCana 公司以及 Apache 公司也在加拿大不列颠哥伦比亚省 Horn River 盆地 Muskwa 页岩中发现了潜在的页岩气区带。仅仅十年以前, 几乎很难想象来

自 Appalachian 盆地 Marcellus 页岩及其他东部页岩气区带的储量可以大幅提高美国国内的油气储量。

2008 年,美国能源部能源信息署(EIA)开始将页岩气资源从其他天然气资源中分离,对其进行单独跟踪。2009 年,美国的天然气总产量为 $26.01 \times 10^{12} \text{ft}^3$,其中 $3.38 \times 10^{12} \text{ft}^3$ 产自页岩气藏。截至 2009 年,美国的累计天然气探明储量为 $283.9 \times 10^{12} \text{ft}^3$,其中页岩气的探明储量达到 $60.6 \times 10^{12} \text{ft}^3$ 。EIA 2011 年度能源展望估计,美国的技术可采未探明天然气资源为 $2552 \times 10^{12} \text{ft}^3$,其中 $827 \times 10^{12} \text{ft}^3$ 来源于页岩气藏;而 2010 年度报告中估算的页岩气技术可采未探明资源量仅为 $347 \times 10^{12} \text{ft}^3$ 。虽然页岩气资源量估算值大幅增加在业界存在一定争议,也遭到部分学者质疑,但是美国的天然气供给已然可以满足当前的需求(年需求量约为 $23 \times 10^{12} \text{ft}^3$)。根据 2010 年国际能源展望推测,到 2035 年,美国的页岩气产量将占国内天然气供应总量的 26%。

在页岩气藏的开发过程中,工业界再次重复了石油开发历史中所经历的模式,即“新发现导致产量过剩、价格下降,但是此种现象会因需求增大(而非供给量降低)而快速消除”(Dickey, 1958)。当然,天然气也需要开拓新市场(McClendon, 2010)。目前,发电所需的天然气量正逐步增大。如果美国国内运输市场的重点部分改为天然气驱动的交通工具,将带来更多的经济、环境和地缘政治优势。

当前,石油与天然气之间的价格差异正处于历史最高水平,因此,页岩油气藏中的凝析油和石油开发已越来越受到重视。例如,在过去两年,鹰滩页岩区带的作业方已将重点转向开采凝析油和石油。与此类似,Barnett 页岩的作业方也缩减了干气井的钻井数量,转而开采 Fort Worth 盆地北部(此区域的页岩处于生油窗)的液态烃类。此外,落基山脉地区的 Niobrara 组(白垩系)也具有巨大的石油生产潜力。EOG 资源公司在 Denver-Julesburg 盆地北部钻探了一口井,其初始日产量达到 1750bbl,第二个月的平均日产量为 680bbl(Oil and Gas Investor, 2010)。目前,Williston 盆地 Bakken 组的石油产量正逐步增加,虽然多数石油产自 Bakken 组中段的碳酸盐岩储层,而非 Bakken 组上段和下段的页岩。2008 年,美国地质调查局估计北达科他州和蒙大拿州境内的 Bakken 组技术可采石油储量为 $30 \sim 43 \times 10^8 \text{bbl}$,此估计值是 1995 年估计值的 25 倍。但是,Bakken 组(和 Niobrara 组)应被视为混合或常规含油气系统,而不是非常规含油气系统(Hill 等, 2011),其石油主要产自物性较差的碳酸盐岩储层,而非页岩。与此相反,Barnett 页岩和鹰滩页岩的石油生产则主要产自页岩储层。尽管看似不可能,但是如果美国页岩油气藏内的石油储量像页岩气一样改变国内的能源供给也不足为奇。

对页岩气藏的分析增大了含油气系统的研究范围。目前,孔隙直径的测量下限已达到纳米级,基质渗透率的测量下限已达到 10^{-9}D 。当前的研究热点和重点为如何将纳米尺度的测量值粗化至微观尺度(薄片)或井筒地球物理测井尺度。在过去的 10~20 年,对页岩沉积体系的宏观(盆地级)和肉眼(相/构型要素)尺度地质认识正不断增强,但是仍须开展大量深入研究。以前曾认为页岩层段具有各向同性和均质性,但是深入研究表明,页岩层段为复杂的层状细粒沉积物堆积。为了优选页岩沉积体系或砂岩、碳酸盐岩沉积体系页岩层段的

“甜点”位置，必须深入分析页岩层段内从地层结构尺度至纹层尺度的地质变化。页岩油气藏归根结底仍属于地质区带（而不仅仅是租赁区带或工程作业区带），其开采须借助于先进的钻井和完井技术。

本书的出版应归功于所有审稿专家对初稿的公平评审，并提出了实质性的修改意见和建议。作者和编辑诚挚地感谢 Kirt Campion、Wally Dow、Nick Harris、Steve Hickman、Ronald Hill、Bo Henk、Julie Lefever、Dave Lockner、Bob Loucks、Gary Myers、Paten Morrow、Jim Pancake、Marty Parris、Casey Patterson、Steve Ruppell、Russell Spears、Charlotte Sullivan、Chris Sweezey 以及匿名审稿专家的审稿服务，你们的审稿意见和建议极大地提高了本书的质量。

感谢 Larry Brogdon 先生、Casey Patterson 先生尤其是 Andree Griffin 女士针对所有问题所给出的个人或专业建议（常规和非常规）。

目 录

- 1 页岩气资源系统 (1)
Daniel M. Jarvie
- 2 页岩油资源系统 (23)
Daniel M. Jarvie
- 3 非常规页岩气储层的孔隙—区域尺度综合表征流程 (56)
Roger M. Slatt Paul R. Philp Younane Abousleiman Prerna Singh
Roderick Perez Romina Portas Kurt J. Marfurt Steven Madrid Arroyo
Neal O'Brien Eric Eslinger Elizabeth T. Baruch
- 4 低渗岩层围压及岩石强度影响流体沿力学不连续面流动的评价方法 (82)
Milton B. Enderlin Helge Alsleben
- 5 Appalachian 盆地 Marcellus 天然气区开发历史、地质因素对产量的影响以及
作为世界级大气藏的潜力 (107)
William A. Zagorski Gregory R. Wrightstone Douglas C. Bowman
- 6 Marcellus 页岩资源评价 (137)
Richard Smosna Kathy R. Bruner
- 7 Williston 盆地泥盆系—密西西比系 Bakken 组石油技术可采资源量评估的
地质模型 (142)
Richard M. Pollastro Laura N. R. Roberts Troy A. Cook
- 8 艾伯塔和萨斯喀彻温省上白垩统 Milk River 组古微生物气藏细粒岩中的大型连续型
天然气聚集 (201)
Neil S. Fishman Jennie L. Ridgley Debra K. Higley
Michele L. W. Tuttle Donald L. Hall
- 9 得克萨斯州 Fort Worth 盆地密西西比系 Barnett 页岩的碳酸盐岩性特征 (239)
Kitty L. Milliken Ruairi J. Day Stirrat Petro K. Papazis Christian Dohse

10 得克萨斯州 Fort Worth 盆地南部密西西比系 Barnett 页岩的岩性特征 (272)
Philip J. Bunting John A. Breyer

11 得克萨斯州 Fort Worth 盆地南部密西西比系 Barnett 页岩楔形体及地层结构 (292)
Rachael M. Monroe John A. Breyer

12 连续型页岩气藏的岩性和地层变化——美国得克萨斯州 Fort Worth 盆地
密西西比系 Barnett 页岩 (312)
John A. Breyer Philip J. Bunting Rachael M. Monroe Michael B. Steed

13 采石场露头及露头壁后综合研究——俄克拉何马州 Woodford 含气页岩的
多尺度表征 (326)
Roger M. Slatt Nichole Buckner Younane Abousleiman Rafael Sierra
Paul R. Philp Andrea Miceli Romero Romina Portas Neal O'Brien
Minh Tran Robert Davis Timothy Wawrzyniec

14 得克萨斯州 Fort Worth 盆地 Newark East 气田核心区西南部 Barnett 页岩及
Ellenburger 不整合面的地震地层学研究 (347)
Elizabeth T. Baruch Roger M. Slatt Kurt J. Marfurt

15 含气页岩岩石物理学研究 (364)
Eric Eslinger Robert V. Everett

1 页岩气资源系统

Daniel M. Jarvie

(Worldwide Geochemistry LLC)

摘要：页岩油气资源系统对于北美的石油，特别是天然气的供给有着举足轻重的影响，至少让美国在天然气方面的能源供给实现了自给自足。页岩油气资源系统为典型的富有机质泥岩，泥岩同时作为烃源岩和储层或者作为互层状贫有机质相的烃源岩。目前，已从此类典型低孔（<15%）特低渗（ 10^{-9} D）储层中成功开发油气，从而推动了世界范围内勘探和开发此类资源系统的热潮。页岩气资源系统的成功开发为美国提供了一种满足其长期能源供给的可能，这是一种最清洁、最廉价的烃类能源资源。

页岩气资源系统彼此之间差别很大，但是最好的资源系统具有类似的共同点，这些共同点包括：具有总有机碳含量（TOC）高的海相泥页岩、热成熟度处于生气窗范围、富有机质相和贫有机质相互层以及脆性岩石结构。页岩气资源系统的常规分类方案包括含气类型、有机质丰度、热成熟度以及贫有机质非黏土岩相的夹层频率。此种分类方案十分基础，包括以下4种连续型页岩气资源类型：①生物成因系统；②低热成熟度的富有机质泥岩系统；③高热成熟度的富有机质泥岩系统；④烃源岩层段与非烃源岩层段互层的混合系统。

页岩气资源系统中通常发育3种孔隙类型：基质孔隙、因有机质分解而形成的有机质孔隙以及裂缝孔隙。不过裂缝孔隙并不是热成因型页岩气资源系统的主要储集类型。

为了准确地预测实际资源潜力，必须确定原始氢和有机质的含量。这是一项繁复的工作，当缺乏未成熟烃源岩或相关数据集时，可以通过采用常规图形和概率分布（P50）氢指数使其简化。

页岩油气资源系统通常被认为是一种连续型富有机质烃源岩，烃源岩可能既是烃源岩也是油气储层，或者可能在连续型贫有机质夹层内充注和封盖油气。因此，既存在烃源岩内部的初次油气运移过程（Welte 和 Leythausen, 1984），也存在烃源岩与非烃源岩夹层之间的二次运移过程（Welte 和 Leythausen, 1984）。此外，还存在烃源岩与非夹层、非连续储层之间的运移过程。在这种方案下，裂缝型页岩油系统（页岩发育开启裂缝）也被归为页岩油气资源系统。

现实中存在着两种可以产出油气的页岩油气资源系统：根据含气量和含油量的相对大小，分为页岩气资源系统和页岩油资源系统，干页岩气资源系统几乎只产生出甲烷，湿页岩气资源系统产出部分液体，而页岩油资源系统也产出部分天然气。因此，通常根据主要产出物类型将其分别称为页岩气资源系统或者页岩油资源系统。虽然其岩层都是泥岩，大家都习惯了称其为页岩油气藏；但是，无论是储层岩相或者储层质量方面，都应将它们视为含油气系统（Magoon 和 Dow, 1994），因为它们适用于所有的构成要素和过程。

虽然我们对于页岩油气资源系统有着众多的定义，但是这些油气资源并非刚出现，而是在过去100年间一直从裂缝性泥岩层中持续地产出油气（Curtis, 2002）。比如 Appalachian

盆地的泥盆系页岩气和 Monterey 裂缝性页岩油已经持续生产了 100 多年，就是一个很好的例证。最近一个世纪的关注重点转移到了致密泥岩系统（可能存在裂缝，但是被成岩矿物，例如方解石所充填）。当然，通常含有高二氧化硅组分的易脆岩层也极其重要。页岩油气资源系统指含有残余油气并排出过油气的富有机质泥岩或钙质泥岩。当烃源岩层和非烃源岩层互层产出时，彼此之间紧密的联系让人们很难确定到底哪个岩层是烃源岩，例如，奥斯汀白垩及其互层的 Eagle Ford（鹰滩）页岩（Grabowski, 1995）。当然，除了残留油气或排出至夹层的油气以外，大多数富有机质烃源岩排出的油气都已发生长距离运移，最终充注于常规储层。

北美页岩气资源开采的巨大成功引起了国际上对于类似资源勘探的高度关注。只要存在页岩烃源岩，就可能存在页岩油气资源潜力，其中的风险包括地质、地球化学、岩石物理、工程、后勤，以及经济和环境因素。页岩油气资源一个最主要的优点就是它们相对于其他碳氢可燃能源而言是最清洁的。天然气不仅是产生微粒和烟雾组分最少的燃料，也是所有碳氢类燃料中生成二氧化碳最少的燃料。

1.1 背景

高产页岩气资源系统在可预见的未来将为美国的天然气自给自足提供坚实的保障。不过要实现这一目标却需要十年，或者几十年的时间，这取决于经济、环境以及政治条件对于页岩气生产的影响。此种形式上的能源自给自足应归功于非常规页岩气藏开发的巨大成果。美国独立的勘探和开发公司勘探并开采出了大量超过市场需求的天然气，因此在保留了大量剩余可采储量的同时也显著地拉低了天然气价格。

在世界范围内（包括沙特阿拉伯），天然气都被视为价格昂贵的石油替代品。挑战是如何能够高效、经济、安全地开采和使用这种能源。页岩油气资源提供了一种经济的、丰富的能源储备，可以满足长期的生产和开发。未来可能会有充足的低成本新能源来满足工业生产、社会生活和政治统治的需要，也许是可再生能源或者其他能源类型，页岩油气资源为实现这一目标搭建了一座桥梁。

由 Mitchell 能源开发公司（MEDC）牵头的若干美国独立石油公司在过去十年一直致力于非常规页岩气资源的勘探和开发，而 Mitchell 公司比其他公司起步更早。1982 年 Barnett 页岩 MEDC 1-Slay 井开钻，揭开了具有革命意义的页岩气勘探开发序幕（Steward, 2007）。在 20 世纪 80 年代和 90 年代的大部分时间里，这种油气资源难以开采且不具有经济效益。即使 1991 年完成了第一口水平井 MEDC 1-Sims，也很难说取得了经济效益和技术上的成功。水平井技术对于页岩油气资源开发而言极为重要，但这只是一系列开发页岩气，彼此关联的技术中的一个环节。例如，如果缺乏对于岩石力学性质、应力场以及压裂增产流程重要性的清晰认识，仅仅通过水平钻井并不能很好地开采页岩气。在 20 世纪 90 年代，大多数 Barnett 页岩井的天然气流速为 $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ($500 \times 10^3 \text{ ft}^3/\text{d}$) 左右，除 1-Sims 井为水平井之外，其余所有井都是直井。当 MEDC 开始使用水力压裂增产技术降低成本时，随着天然气流速提高，经济效益也显著提升（Steward, 2007）。同时，人们也认识到直井可以在生产一段时间后重新压裂增产，这可以将其生产效率提升到一个可观的水平，通常可以达到或者超过最初的天然气流速。三维地震和微地震技术的应用已被证明极大地推动了 Barnett 页岩的成功勘探（Steward, 2007）。例如，今天人们还在讨论的一个话题是构造和断层对于资源潜力的

影响有多大。传统的经验可能会告诉你这些因素是有利的，但是事实上它们通常都会产生不利影响。人们认识到因为存在构造和断层，压裂增产的效力被削弱了，所以通常会降低压裂成功率（Steward，2007）。应用微地震技术，有助于工程师确定压裂能量的方向，从而调整压裂方案（Steward，2007）。

最终，石油界通过使用水平井和新技术提升了 Barnett 页岩的勘探成功率，同时也开始认识到其含气资源潜力。但是，Barnett 页岩通常被视为个案，其经验并不能够被复制。

2002 年，MEDC 被 Devon 能源公司收购，这被认为是石油界一个颇具示范意义的事件。Devon 能源公司对于 Barnett 页岩资源量的重新评价让其针对性地应用了极其成功的水平钻井。虽然对 Barnett 页岩成功地进行了再评价，但是，其他公司对于此类油气资源系统所具有的广阔前景仍持观望态度。经过以下几个事件，情况有了转机：Devon 能源公司整合了富有经验的由原 Devon 和 MEDC 所属的 Barnett 页岩团队，极大地提高了水平钻井成功率；Devon 能源公司尝试应用新技术来评价页岩区块；西南能源公司宣布在阿肯色州 Arkoma 盆地的 Fayetteville 页岩气勘探取得突破；此外，从原 MEDC 离开的富有经验的地质学家和工程师，将自身的页岩气勘探知识和经验带到了其他公司。这些因素一起推动了数量众多的公司开始积极关注页岩油气资源。

George Mitchell 与他在 MEDC 的同伴不屈不挠的探索精神，以及 Devon 能源公司和西南能源公司在页岩层段钻井技术方面取得的突破，共同推动了这场油气史上的革命。最终，他们的成功推动了整个美国的页岩气资源勘探，甚至世界范围内对于页岩气资源的关注。

1.2 页岩气资源系统的特征

页岩油气区带具有何种特征才不至于使其从人们的眼皮底下溜掉呢？显然不会是因为它们具有烃源岩的特征，因为大多数页岩为不同热成熟度的富有机质烃源岩，其生成的油气充注了已开采盆地中的常规油气田。尽管页岩层段的油气资源潜力众所周知，但是其岩石特性极不适于作为储层，通常被作为有效烃源岩和盖层，这一特征更进一步加剧了人们对于其不可能作为油气储层的印象。

然而，页岩层段滞留和储集油气的能力却被极大地忽视了，有时候通过泥岩测井响应曲线可以识别出页岩气，不过这通常都没有引起人们的重视，因为这些页岩层段既是烃源岩也是盖层，它们具有的储层特征却被忽视了。扩散作用虽然是一个极其缓慢的过程，但是却暗示着油气已经在过去漫长的地质年代里从这些岩层中逸散了，比如，人们通过对 Barnett 页岩系统油气生成过程建模进行分析，估计其在距今 250 Ma 达到最大生烃量（Jarvie 等，2005a），然而因为历史上极其复杂的埋藏和构造演化，其达到最大生烃量的时间估计约为距今 25Ma。尽管如此，在这个过程中生成的烃类也很难如期望般完全保留下来，以至于难以达到商业开采规模。所以，尽管有着非常好的盖层，页岩气在地层中的扩散作用会导致滞留气含量持续减少，从而限制了资源系统的总资源量。后期矿物填充裂缝和常规油气藏的发现，证实了在 Fort Worth 盆地曾经发生过油气从页岩地层中扩散的现象。1991 年，MEDC 1-Sims 水平井的产气量也并不是非常让人满意，这也说明了该气藏的含气量并未达到满足商业开发的程度（Steward，2007）。

富有机质的泥岩长期被人们忽视了，它们具有多种特性：既有生烃也有排烃的能力，同时它们也具有储存烃类和产生自生孔隙的能力。Sandvik 等（1992）和 Pepper 等（1992）的

数据说明油气从烃源岩中排出既是原始有机质丰富导致的,同时也和烃指数有关,因为都与有机质的吸附能力有关。Pepper (1992) 的论文揭示了如果假设初始氢指数 (HI_0) 为 434mg/g 的话,那么 Barnett 页岩系统中有 60% 的油气已排出烃源岩。这也就是说,在 Barnett 页岩系统中还依然存在着 40% 的资源量,当地温条件达到热成熟水平 (镜质组反射率等效值 $R_{oe} > 1.4\%$), 残余油裂解为气和碳类物质,这些残余的原生气或者后期裂解气就形成了 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩系统中的页岩气 (Jarvie 等, 2007)。

另外, Reed 和 Loucks (2007) 以及 Loucks 等 (2009) 的研究结果也显示,有机质孔隙的形成是 Barnett 页岩地层达到生气地温门限值以后的结果。Jarvie 等 (2006) 认为有机质在转化形成油气的过程中,部分油气从烃源岩中排出,最终会留下一些孔隙,为页岩气提供了一种储集空间。总有机碳含量的变化也说明此种有机质孔隙是由于有机质转化生成油气而产生的 (Jarvie 等, 2007)。此类低孔隙度 (4%~7%) 在一定的压力—体积—温度 (pVT) 条件下可以存储大量油气,这也证实了 Barnett 页岩系统的天然气地质储量 (GIP) 巨大。事实上,我们可以假设在地质历史上的石油生成高峰期,压力、温度等条件都比现在要高很多,那时的地层储气能力也比现在要高很多。后期随着构造运动,生成的油将在低温和低压条件下凝析从而存储在体积固定的孔隙中,这样就形成了两相的含油气储集系统。这是一种非常重要的分析思路,不光适用于 Barnett 页岩系统,而且适用于其他任何油气资源系统,条件是同时含有液体和气体,而且液体在压力降低的时候会发生凝析。

1999 年钻探的 MEDC 3-Kathy Keele 井 (现在被称为 K. P. Lipscomb 3-GU) 终于证实了 Barnett 页岩气藏的潜力,人们在钻井过程中进行了压力取心 (Steward, 2007), 其资源潜力约为 $2.13 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ($195 \times 10^9 \text{ ft}^3/\text{层段}$), 这个值比以前的估计值大了约 250%。

人们应该注意的是,在烃源岩满足了适当的地温条件时有可能既生成油也生成气,而其相对的组分比例关系说明了生成油和生成气的不同时间,也就是说,油和气都是在达到适合自身生成条件的地温时期产生的。大多数油气藏既含有油也含有气,不过 Fayetteville 页岩系统是个例外,那里的地温直接升高到只生成气的条件,其 R_o 值为 2.5%。由于液态烃类产品对于经济发展而言非常重要,人们更愿意寻找以液态油为主、气为辅的油气藏。

北美 Barnett 页岩的页岩气资源系统衍生出了种类繁多的页岩气藏,这也成为世界范围内的热门话题。这些资源系统虽然各有特色,但也具有一些共同的特点。人们根据核心产区初始产量 (IP) 和后续产量数据确定了最好的页岩气井,从这些井数据可以发现如下共同特征:

- (1) 通常为海相页岩,一般可以认为是 II 型有机质 (HI_0 为 250~800mg/g);
- (2) 烃源岩富含有机质 (现今总有机碳含量 $\text{TOC}_{\text{pd}} > 1.00\%$);
- (3) 处于生气的地温时窗内 ($R_{oe} > 1.4\%$);
- (4) 较低的含油饱和度 ($S_o < 5\%$);
- (5) 含大量的硅质 (>30%) 和碳组分;
- (6) 具有不膨胀的黏土组分;
- (7) 渗透率低于 1000mD;
- (8) 孔隙度低于 15%, 通常介于 4%~7% 之间;
- (9) 初始产量超过 $100 \times 10^9 \text{ ft}^3/\text{层段}$;
- (10) 具有富有机质泥岩层,厚度大于 150ft (45m);
- (11) 存在超压 (略微超压或极度超压);

- (12) 第一年产量急剧降低 (>60%);
- (13) 具有统一的已知主应力场;
- (14) 在构造和断层位置布井;
- (15) 油气系统可以连续追踪。

将不同的页岩气资源系统分门别类是一件让人非常头痛的工作。这些系统本身变化就很大，从非常简单到极其复杂。一个基本的分类方案可以包括如下一些指标：不同气类型的组合（生物气或者裂解气）、有机质丰度、裂解气产生所对应的不同热成熟度，以及裂缝形态（开启或闭合）（图 1-1）。

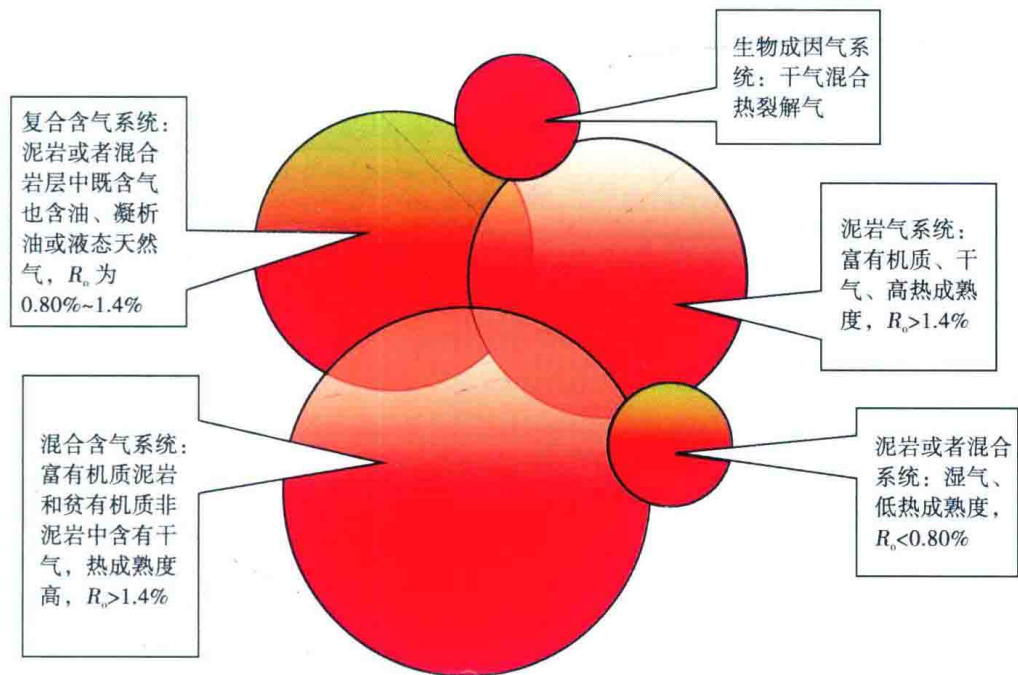


图 1-1 简化后的页岩气资源系统分类图

利用气体类型（生物气或者热裂解气）、烃源岩有机质丰度、热成熟度以及岩相，
将页岩气资源系统分为 5 种基本类型，圆圈的大小代表了资源量潜力的大小

混合系统定义为富有机质烃源岩与非黏土夹层互层产出，比如碳酸盐岩、粉砂岩、砂岩或者含钙的泥质白云岩等等。在这种情况下，混合系统内既有烃源岩，又有其他岩层，可以使生成的天然气在不同岩相之间运移，同时非烃源岩往往由于其岩石性质，作用更加重要。

虽然富有机质的泥岩系统通常发育有机质孔隙，但是混合系统中可能并没有这种类型的孔隙，它们通常都发育岩石基质孔隙，或者在一定条件下发育裂缝孔隙。加拿大西部沉积盆地的三叠系 Doig Phosphate 和 Montney 地层展示了泥岩地层和混合页岩系统在有机质富集程度和储集空间方面的差异。Doig Phosphate 地层是一套富有机质的泥岩地层，其孔隙度和总有机碳含量有着很好的对应关系，然而 Montney 页岩却显示了相反的特征，而且两个变量的相关性很差（图 1-2）。由 Doig Phosphate 地层的例子可知，由于有机质分解作用而产生的次生孔隙是其主要储集空间（Jarvie 等，2006）。然而，Montney 页岩的油气源于富有机质的 Montney 页岩层或者其他烃源岩，主要储集于基质孔隙中（Riediger 等，1990）。其他的混合系统基本和上述情况类似，比如，鹰滩混合页岩系统就被认为是由高总有机碳含量的含钙或泥质灰泥岩地层组成，其中的层状碳酸盐岩夹层（通常占 60%）为相邻的岩层提供了额外

的基质孔隙空间。

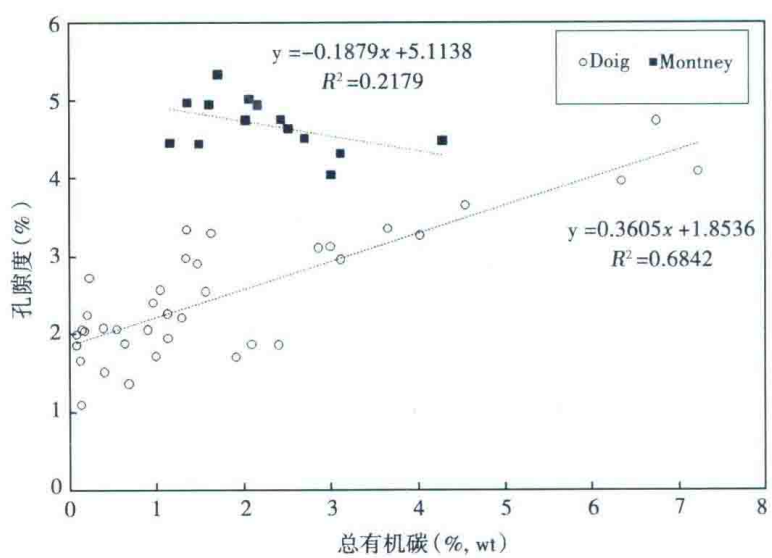


图 1-2 Montney 页岩和 Doig Phosphate 地层的总有机碳含量和孔隙度交会图

Montney 页岩的孔隙度和总有机碳含量之间显示出不太明显的负相关关系，而 Doig Phosphate 地层的孔隙度和总有机碳含量之间却呈明显的正相关关系，图中截距表示其基质孔隙度为 2% 左右；Montney 页岩孔隙度和总有机碳含量的相关性不太明显，说明混合系统的孔隙主要来自于基质而不是有机质， R^2 代表线性相关系数

1.3 有机质丰度——总有机碳评价

对于任何烃源岩来说，首要和最基本的分析是有机质丰度，常以总有机碳含量（TOC）表示。总有机碳含量是评价某个沉积岩样品中的有机碳多少的指标，但是它又不能单独表征生烃能力，如需表征生烃能力，应综合评价氢含量或基于化学和光学分析的有机显微组分比例。总有机碳含量随着烃源岩的岩相不同和热成熟度不同而发生变化，甚至随着岩石样品类型不同而变化，人们曾经为烃源岩到底需要多大的总有机碳含量才能达到商业开发的要求而争论不休。另外，还需要考虑生成油气的滞留和排出问题，虽然所有保存于沉积岩中的有机质在地温条件合适的情况下都会裂解生成油气，然而对于油气勘探开发公司来说，这些生成的油气能否满足开发和商业化生产却是一个未知数。当评价油气生成潜力的时候，必须综合考虑烃源岩的原始数量（TOC）和质量（烃源岩类型）。

确定总有机碳含量是一个定性化的分析过程，其本身就充满变数，比如热成熟度、样品采集技术、样品种类（岩屑或取心）、样品质量（例如，只有细粒岩心、岩屑，或者样品已被污染）以及其他岩心或岩屑样品。从记载的 Fayetteville 和 Chattanooga 页岩地层取心资料来看，因为岩屑样品通常受混合效应影响，不同样品类型质量有所变化。有机质丰度不太高的沉积岩通常会影响到下伏有机质丰度高的沉积岩，受影响的平均厚度可达 10~40ft（3~12m）。这种情况可以从在 Fayetteville 和 Chattanooga 地层钻探的井中的岩屑分析中找到证据，通过总有机碳含量可以识别出在富有机质泥岩段的最上部发育着一段有机质丰度低的页岩，而且该页岩的总有机碳含量随着侵入有机质丰度高的泥岩深度变化而变化（Li 等，2010a）。钻井是一个将不同有机质丰度的岩屑进行混合的过程，MEDC 在 Barnett 页岩中进行钻井的过程中也发现存在同样的情形（Steward，2007）：人们发现岩屑比岩心具有更低的镜质组反