

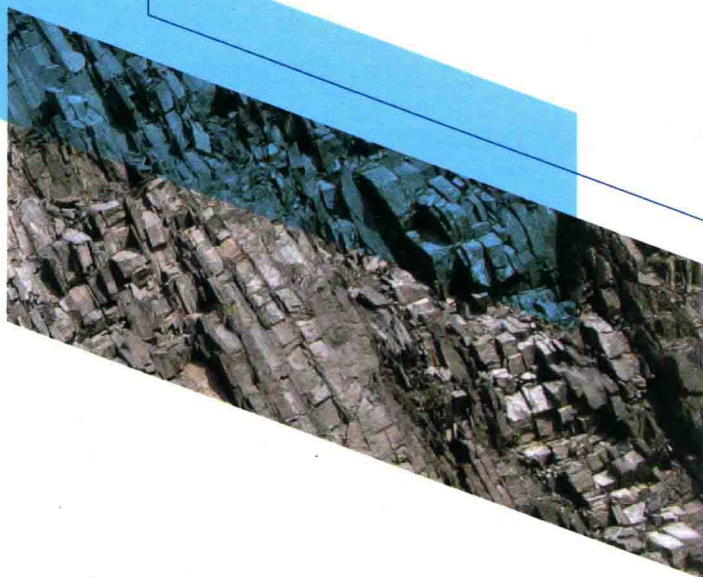
From Oil-Prone Source Rock to Gas-Producing Shale Reservoir
Lower Palaeozoic Organic-Matter-Rich Black Shale
in the Sichuan Basin and its Periphery

四川盆地及周缘

下古生界富有机质黑色页岩

——从优质烃源岩到页岩气产层

刘树根 冉波 郭彤楼 等·著
王世谦 胡钦红 罗超



科学出版社

四川盆地及周缘下古生界富有机质黑色页岩

——从优质烃源岩到页岩气产层

刘树根 冉 波 郭彤楼 王世谦 胡钦红 罗 超 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是系统研究四川盆地及周缘下古生界黑色页岩的形成、页岩气的保存和富集的专著,不仅全面分析了下古生界下寒武统牛蹄塘组和上奥陶统一志留统五峰组—龙马溪组黑色页岩的沉积富集、埋藏演化、有机质保存过程,页岩储层的储集物性、岩石力学特征,以及页岩含气性特征及其控制因素,辅以中国第一个页岩气田焦石坝页岩气田进行勘探实例解析。在此基础上系统探讨四川盆地及周缘下古生界页岩气分布的独特地质作用,并充分正视现在依然存在的问题。

本书可供石油地质、储层地质、油气成藏动力学、构造地质等研究方面的技术人员及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

四川盆地及周缘下古生界富有机质黑色页岩:从优质烃源岩到页岩气产层/
刘树根等著. —北京:科学出版社, 2014.12

ISBN 978-7-03-042927-8

I. ①四… II. ①刘… III. ①四川盆地—早古生代—黑色页岩—研究
IV. ①P588.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 309705 号

责任编辑:杨 岭 黄 桥/责任校对:李 娟
责任印制:余少力/封面设计:墨创文化

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>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 12 月第 一 版 开本:889×1194 1/16

2014 年 12 月第一次印刷 印张:21.75

字数:680 000

定价:228.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书作者

刘树根 冉 波 郭彤楼 王世谦

胡钦红 罗 超 杨 迪 孙 玮

叶玥豪 邓 宾 王世玉 邱嘉文

白志强 张 健 张 旋 刘荣琴

钟 勇

前 言

2013 年, 美国页岩气产量达 $3100 \times 10^8 \text{m}^3$, 占天然气总产量的 32%, 致使美国的能源消费结构和能源政策发生重大变化, 被喻为石油工业的一场页岩气革命。2014 年, 我国天然气总产量为 $1329 \times 10^8 \text{m}^3$, 其中页岩气产量仅为 $13 \times 10^8 \text{m}^3$ 。我国能否复制美国的这场页岩气革命, 是我国政府、油气工业界和学术界近几年均在努力攻克的难题。

目前, 我国页岩气地质研究和勘探开发正处于关键时期, 包含四川盆地在内的南方地区是大家最为关注的地区, 下古生界下寒武统牛蹄塘组和上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组是最被重视的层位。近年来, 针对我国南方下古生界页岩层系沉积相、储集层和页岩气富集因素等方面开展了大量研究, 尤其强调南方下古生界页岩层系与北美主要页岩气产层基础地质条件相似性和特殊性对比, 但忽视了其本身独特地质作用及其对我国南方页岩气形成和分布控制作用的研究。这集中表现在地质研究方面, 主要遵循北美经验重点研究了常规油气的优质烃源岩(TOC 大于 2%)如何能成为非常规页岩气的优质储层问题, 而忽视了我国南方下古生界页岩气开发最重要的问题——在强改造作用下优质页岩储层如何才能成为具有商业价值页岩气产层的探讨。以四川盆地为代表的中上扬子地区经历多旋回演化和多期构造的叠加与改造, 致使其海相、海陆过渡相富有机质页岩均经历了早期深埋藏(高演化), 后期强隆升、强剥蚀和强变形作用, 即强改造作用过程。这是我国南方富有机质页岩与北美页岩气产层在地质特征和演化上的最大不同, 也是中国南方页岩气资源潜力能否正确评价和高效勘探开发的最大挑战。这也是本专著定名为“四川盆地及周缘下古生界富有机质黑色页岩——从优质烃源岩到页岩气产层”的原因。鉴于此, 我们认为以下三个问题在一定程度上将影响我国页岩气产业发展的未来: ①四川盆地目前深埋藏高演化的下古生界页岩气开发如何才能具有商业价值? ②经过晚燕山—喜马拉雅期强改造作用(强隆升、强剥蚀和强变形)后, 四川盆地以外的广大南方地区是否仍然具有商业开发价值的页岩气和规模气田的保存和富集条件? ③四川盆地海陆过渡相和陆相页岩(气)特征与海相页岩(气)特征的异同性, 是否与海相页岩气一样具有较大的勘探开发前景? 本专著即是我们对前两个问题的初步研究成果。

本专著是中外学者和高校与企业密切合作的成果, 由刘树根和冉波统稿定稿。其中, 第 1 章由胡钦红和刘荣琴编写; 第 2 章由王世谦编写; 第 3、4 章由冉波、罗超、刘树根、叶玥豪、孙玮等编写; 第 5 章由刘树根、冉波、罗超、叶玥豪、孙玮等编写; 第 6 章由杨迪、刘树根、罗超、冉波、叶玥豪等编写; 第 7 章由郭彤楼编写; 第 8 章由刘树根、邓宾、钟勇、冉波等编写。在研究过程中, 有幸得到了罗平亚院士、康玉柱院士、赵先良、张大伟、李玉喜、张金川、王兰生、楼章华、魏志红、张长俊、周文、徐国盛、赵陵、何志文、包书景、王庭斌、高瑞祺、戴少武、姜文利、尹中山、陈长永和戚明辉等专家学者的指导和支持; 中石化勘探南方分公司、中石油西南油田分公司、中石化西南分公司、成都理工大学等在资料收集、研究场地和人员安排上给予了大力支持。在此一并致谢!

目 录

第1章 美国页岩气(油)勘探开发的过去、现在和未来	1
1.1 早期浅层页岩气的利用	1
1.2 乔治·米歇尔和他公司的页岩气深井	2
1.3 美国致密油开发的进展	4
1.3.1 主要的致密油区块	5
1.3.2 致密油的生产	6
1.4 页岩区块的开发阶段和环境问题	7
1.5 联邦政府的资助	8
1.5.1 能源部国家能源技术实验室(National Energy Technology Laboratory, NETL)	8
1.5.2 美国能源安全保障研究合作机构	10
附录: 关于米歇尔公司和巴奈特页岩气开发的简单历史	12
第2章 页岩气资源勘探与选区地质评价	25
2.1 页岩气基本特征	25
2.1.1 页岩与页岩气	25
2.1.2 页岩气特征	25
2.2 页岩气勘探基本原理	26
2.2.1 勘探依据	26
2.2.2 页岩生排烃组合模式	27
2.3 页岩气勘探开发基本程序	29
2.4 页岩气选区地质评价方法	31
2.4.1 页岩层系的区域地质特征评价	31
2.4.2 页岩含油气系统评价	31
2.4.3 页岩气资源潜力评价	33
2.4.4 页岩气有利勘探区优选	35
2.5 选区评价关键参数与标准	36
2.5.1 储层有效厚度	37
2.5.2 有机质含量	37
2.5.3 成熟度	38
2.5.4 矿物组成与岩石力学性质	39
2.5.5 储层物性	39
2.5.6 储层压力	40
2.5.7 盖层与保存条件	41
第3章 四川盆地及周缘下古生界富有机质黑色页岩发育特征	42
3.1 下寒武统牛蹄塘组	42
3.1.1 地层特征	42
3.1.2 岩相特征	42
3.1.3 页岩岩相	51

3.1.4 无机地化特征	52
3.1.5 富有机质页岩(黑色页岩)发育模式	70
3.1.6 黑色页岩的富集条件	75
3.2 上奥陶统一志留统五峰组—龙马溪组	76
3.2.1 地层特征	76
3.2.2 岩相特征	77
3.2.3 页岩岩相	81
3.2.4 无机地化特征	82
3.2.5 富有机质页岩(黑色页岩)发育模式	86
3.2.6 黑色页岩的富集条件	89
第4章 四川盆地及周缘下古生界富有机质黑色页岩典型剖面参数特征	94
4.1 下寒武统牛蹄塘组	94
4.1.1 金页1井	94
4.1.2 丹寨南皋剖面	121
4.1.3 雷波花生地—永善肖滩剖面	138
4.2 上奥陶统一志留统五峰组—龙马溪组	151
4.2.1 习水骑龙村剖面	151
4.2.2 雷波磨石沟剖面	168
第5章 四川盆地及周缘下古生界富有机质黑色页岩参数展布特征	181
5.1 牛蹄塘组页岩参数展布特征	181
5.1.1 有机地化特征	181
5.1.2 储层特征	185
5.1.3 含气性特征	198
5.2 五峰组—龙马溪组页岩参数展布特征	199
5.2.1 有机地化特征	199
5.2.2 储层特征	203
5.2.3 含气性特征	219
第6章 四川盆地及周缘下古生界富有机质黑色页岩岩石物理参数特征	221
6.1 岩石力学研究现状	221
6.2 样品采集及实验方法	222
6.3 下寒武统牛蹄塘组岩石物理参数特征	224
6.3.1 贵州丹寨九门村牛蹄塘组泥岩	225
6.3.2 贵州麻江羊跳牛蹄塘组泥质粉砂岩	229
6.3.3 金页1井牛蹄塘组泥岩	230
6.3.4 金石1井九老洞组砂岩	232
6.3.5 三轴压缩条件下各种岩石力学参数间的关系	232
6.4 上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组岩石物理参数特征	235
6.4.1 湖北恩施金龙坝龙含宝五峰组泥岩	235
6.4.2 重庆秀山溶溪龙马溪组泥质粉砂岩	240
6.4.3 重庆綦江观音桥观音桥段泥质白云岩	242
6.4.4 重庆綦江观音桥龙马溪组泥质白云岩	243
6.4.5 贵州习水骑龙村龙马溪组泥岩	244

6.4.6 三轴压缩条件下各种岩石力学参数间的关系	245
6.5 下古生界岩石物理参数比较性研究	248
6.5.1 影响岩石物理参数的因素	248
6.5.2 不同层位岩石力学特征对比分析	250
6.5.3 不同类型岩石物理参数实验对比分析	251
6.5.4 脆性矿物组成与岩石力学性质的关系	254
6.5.5 裂缝发育体系特征	255
6.5.6 地应力与裂缝	264
6.5.7 与北美典型泥页岩岩石物理参数综合对比分析	264
第7章 涪陵五峰组—龙马溪组页岩气田勘探实践	268
7.1 勘探历程与焦页1井的钻探	269
7.1.1 勘探历程	269
7.1.2 焦页1(HF)井简况	270
7.2 涪陵五峰组—龙马溪组页岩气田基本地质特征	274
7.2.1 构造特征	274
7.2.2 沉积特征	276
7.2.3 有机地化特征	278
7.2.4 页岩气层储集特征	280
7.2.5 页岩气层含气性评价	286
7.2.6 页岩矿物组成	286
7.2.7 页岩气组分特征	291
7.3 页岩气富集高产主控因素与勘探启示	292
7.3.1 页岩气富集高产主控因素	292
7.3.2 勘探启示	294
第8章 四川盆地及周缘下古生界页岩气形成分布的独特地质作用	297
8.1 四川盆地及周缘下古生界页岩深埋藏、强隆升、强剥蚀、强变形作用	298
8.1.1 四川盆地及周缘晚中—新生代强隆升剥蚀作用	298
8.1.2 四川盆地及周缘下古生界页岩的深埋藏作用	300
8.1.3 四川盆地及周缘的强变形作用	303
8.2 四川盆地及周缘下古生界页岩深埋藏和强改造过程的典型效应	304
8.2.1 下古生界页岩深埋藏与高演化作用	304
8.2.2 强隆升、强剥蚀和强变形作用致使页岩(气)的强改造作用	306
8.3 讨论	308
8.3.1 页岩气保存条件研究探讨	308
8.3.2 四川盆地及周缘差异性埋深-隆升剥蚀-变形作用与页岩气富集特征	310
参考文献	312
索引	333
本专著研究过程中完成的硕士、博士学位论文和发表的学术论文	334

第 1 章 美国页岩气(油)勘探开发的过去、现在和未来

页岩气是指形成并储集在页岩建造中的天然气。由于页岩建造的致密性,页岩气原本被认为是不具有经济的可采价值,直到 1997 年米歇尔能源公司利用清砂压裂的创新工艺,并整合了多种技术和方法,使得页岩气开采成本下降了近 2/3,在 2000 年首次实现了页岩气的商业化开采。从那时起,页岩气成为美国增速最快的初级能源,从而也激发了其他国家对页岩气开发的意愿。预计到 2020 年,北美天然气产量的一半将来源于页岩气(IEA, 2011)。

本章我们将回顾美国页岩气开发历史,尤其是介绍作为“页岩气水力压裂之父”的乔治·米歇尔和他的米歇尔能源公司,该公司自 1981 年在沃斯堡盆地的巴奈特(Barnett)页岩上打第一口初探井(C. W. Slay No. 1)开始,经过挫折和不断地探索,终于在近 20 年后取得了页岩气的商业化开采。在本章附录中,我们将较为详细地介绍第一口初探井和沃斯堡盆地巴奈特页岩的开发历史,从中了解当时的米歇尔能源公司所走过的曲折道路,以及在乔治·米歇尔领导下坚持探索,基于几个关键时刻的正确决策,终于使公司在页岩气商业开采方面取得成功。

但是页岩气的增产使美国的天然气量过剩,自 2007 年左右开始气价持续低迷,低于页岩气开采所需要的成本价。美国油气钻探公司受几十年中最低天然气价的影响,已经在 2008 年转移到相似页岩储层(富油区块)中的致密油开采,其致密油的生产量已经从 2004 年几乎为零,而增长到 2012 年的每天 100 多万桶(Hughes, 2013)。因而我们也将介绍目前致密油开发研究工作的重点,这主要从美国能源部的课题支持方向上说明。总之,本章主要目的是,简述美国(北美)页岩油气勘探开发的历程、现状和未来走势,总结其成功经验和应吸取的教训,由此期望对中国页岩气的勘探开发提供借鉴。

1.1 早期浅层页岩气的利用

关于阿巴拉契亚盆地黑色泥页岩的说法,早在 1627~1669 年间,就有法国开拓者和传教士的描述。在殖民时期,气体和原油在不少采盐井中被发现。1816 年因为在巴尔的摩市正式成立的煤制气公司,而开始了天然气生产工业(Curtis, 2002)。第一口专门用于开采并商业化应用页岩气的钻井,据 Harper(2008)的报道是于 1821 年在北美大陆的泥盆纪页岩中开始的。当时,纽约州弗雷多尼尔镇的居民注意到了从 Canadaway(加拿大路)小溪河床中向上冒泡的气体,有一个叫威廉·哈特的人,有远见性地用竹筒挖了口井来采集气体,并用于镇上的照明。这比德雷克上校在宾夕法尼亚州泰特斯维尔镇的小油溪上所钻的著名油井早将近 40 年。弗雷多尼尔的页岩气井只有 27ft^①深(约 9m),但它产生了足够的气来提供相当于“两支好蜡烛”的光亮强度(Harper, 2008)。到 1825 年,该井给两个商店、两个仓库和一个磨粉房供气,用空心的树干来作为输气管道,树干用沥青和破布相联结。在 1850 年,此井被加深到了 70ft,并产生足够的气用于 200 个照明灯。到了 1858 年,第二口页岩井开挖到 200 多英尺,这个井产气持续了 30~35 年。

据位于纽约州立大学弗雷多尼尔分校的地质学教师,在 2014 年召开的美国石油地质学家协会的年会上的最新报道(Lash and Lash, 2014),他们的多年研究结果表明,起始于弗雷多尼尔镇的第一口页岩气商业化井,是挖在加拿大路小溪的河床边,但很可能是发生在 1825 年的晚春与早夏之际,而不是经常被引用的 1821 年,该井由枪匠威廉·亚伦·哈特所挖掘。据当时的弗雷多尼尔镇《审查报》报道,该洞在片岩中挖到 27ft 深。到了 1825 年 8 月,生产的天然气被接收到了一个粗糙的储气器,用于小溪边的几家商

① 1ft=3.048×10⁻¹m, 英尺。

店和一个磨粉房的照明。在哈特井产量下降后,普雷斯顿·巴尔莫说服了几个商人,来投资新成立的煤气灯和水厂。巴尔莫出生于附近的雷斯特维尔镇,他在1847年8月到1851年的春季,在弗雷多尼尔学院学习过,该学院是纽约州立大学弗雷多尼尔分校的前身,他还是哈特的姻亲。在1857年晚夏,时年26岁的巴尔莫在加拿大路小溪边,距哈特井北边不到1mi^①的地方,又挖了两口井。因为不满意其中一口井的产气量,巴尔莫似乎懂得裂缝对页岩中气体传输的重要性,他决定用人工产生裂缝的方法来增产,在122ft深的地方点燃了8lb^②火药,据当时弗雷多尼尔《审查报》的报道:“随之而来的是大量的气体”。也就是说,作为第一个有史载的石油工程学家,巴尔莫首次成功地压裂增产了一口页岩井,并用铅管把气从井口输到位于镇中心的一个有八个面的储气房子。到1858年12月,镇中心安装了很多燃气灯,巴尔莫还承包了镇里安装市中心街头气灯杆的工程。随后,页岩气的使用被打表,在当时的价格高达1000ft³/4美元。但由于酗酒,巴尔莫仅活到30岁就去世了。只是直到最近,人们才认识到他应用了初期页岩气开发的先进科学和工程理念。

1.2 乔治·米歇尔和他公司的页岩气深井

乔治·米歇尔(1919~2013年)出生在得克萨斯州的加尔维斯顿市,他是一个移民到美国的希腊牧羊人的儿子。他在1940年以班级第一名的成绩,毕业于得克萨斯州农工大学的石油工程专业,为了完成学业,他在学生食堂中做过服务生,卖过糖果,并打造过书柜出售。在1946年,他创办了一家从事石油钻探的咨询公司,即米歇尔能源开发公司(Mitchell Energy & Development Corp.)的前身。他与他的钻井合约人埃利森·迈尔斯(Ellison Miles)是在得克萨斯州农工大学期间认识的,还有一位是从得克萨斯州大学毕业的咨询地质家约翰·杰克逊(John Jackson)。除此之外,他还与很多投资者接触,后来这些投资者帮助他们进入了沃斯堡盆地的油气田,在沃斯堡市的北面购买了3000英亩(1英亩约等于4047m²;一亩等于667m²)的租用权,当时那里被认为是“投机分子的墓地”。

到1964年底,他们的公司拥有了超过1000口生产油井。虽然公司的运营状况相当不错,但作为自己的石油公司的负责人,米歇尔看到自己的油井在一段短暂的生产期后,因为产量下降停产,而不满意。在20世纪80年代,他决定尝试一项重大的技术挑战,即试图从巴奈特页岩中开发页岩气。巴奈特页岩位于得克萨斯州沃斯堡盆地6500~9600ft的深部,位于得克萨斯州中北部的15个县境内。米歇尔和他的公司经过近20年的挫折和不断探索,终于取得了页岩气的商业化开采。他的公司在1972年上市,米歇尔占有70%的股份。在页岩气开采成功后,公司以35亿美元的价格与戴文能源公司于2002年1月合并。米歇尔和他的夫人辛西娅共有十个孩子,夫妻俩以将近二百万股的公司股票,成立了一个慈善基金会,还另外为这个基金会捐赠了二亿六千万美元。在米歇尔家族三代人的负责下,他们的慈善基金会已经提供了六千二百万美元的资助,绝大多数经费用于资助科学和环境持续性(包括清洁能源、水和天然气持久性)。对他的母校得克萨斯州农工大学,米歇尔共捐赠了将近价值一亿美元的地产和现金。在2011年,米歇尔参与了由沃伦·巴菲特和比尔·盖茨夫妇倡导的“赠与誓言”,把大部分财富捐赠给慈善机构。

作为页岩气水力压裂之父,米歇尔有很强的商业头脑,更重要的是,他的成功是智慧、乐观和持之以恒的最好证明。在近20年的挫折和渐进式的水力压裂技术的改进过程中,需要重点提到下面几个重要事件和当时米歇尔公司所做的正确决策。①米歇尔公司于1953年就开始和天然气管道公司(Natural Gas Pipeline Company of America, NGPL)商谈,这个天然气管道公司是输送天然气到高需求的芝加哥市场的最大公司,它也是美国最大的州际管道公司之一。米歇尔公司在1955年与天然气管道公司签订了北得克萨斯州地区的20年合约,在当时比当地的市场进气价要高,同时天然气管道公司同意向米歇尔公司贷款,用于勘探计划来了解该地区的储气量。合约还要求米歇尔公司提供符合管道质量的气,这使得他的公司

① 1mi=1.60934km, 英里。

② 1lb=0.453592kg, 磅。

在北得克萨斯州开发之初,就能够进入气体处理市场。米歇尔公司在1957年12月17日开始正式向天然气管道公司输送燃气,一直到1995年5月。这个合约在地区输气和价格方面的保证对米歇尔公司在巴奈特页岩的开发和扩大生产至关重要。②在1964年,米歇尔花了625万美元购买了休斯顿北部距离市中心约30mi的一块林地,共5万英亩用于将来房地产的开发。作为这个新的规划社区的开发者,他雇佣了专门的设计师来统筹设计这个新社区,本着保护树林和环境、减少洪涝等的主旨思想,以创造一个愉快的都市生活环境。该地在1974年下半年正式开始建设,名字叫“林地”(The Woodlands)。1997年米歇尔公司以四亿六千万美金的净收入价格出售了这个不动产,其中两亿美金用于偿还页岩气债款,至此公司已经在巴奈特页岩的开发上投资了大约两亿六千万美金。这个城市目前有近十万居民,每年召开不少的油气会议,比如在每年度2月左右召开的水力压裂技术会议。③由于1986年油价的暴跌,米歇尔公司在1987~1990年开始考虑与GRI(Gas Research Institute,天然气研究所)接触,以获得资金和技术的注入。从1990年开始的双方合作,导致了以后十年一系列的合作计划,包括油藏和生产的模拟、油藏的表征、产生裂缝的分析和设计、岩石性质和含气量的分析、天然的和人为的裂缝走向、对页岩开采中水平钻井的应用和生产井的再压裂。这些都对巴奈特页岩的开发过程有很大帮助。例如,1995年由GRI资助的桑迪亚实验室研发的微地震裂隙绘图技术,就被应用在巴奈特页岩的开采中。

由于米歇尔的开拓精神,在他的生涯中共参与了约一万口井的钻探,其中有超过一千口的初探井。作为独立生产商,米歇尔公司大约有两千名雇员,他们的成功很好地说明了美国页岩油气开采的商业模式。即由小型的独立生产商开展前期的勘探开发工作,它们经营方式灵活,敢于创新、挑战旧思维并接受新方法,成功之后由大型公司购买,大公司有一个成熟的经营模式,可以开展大规模的开发和生产。

美国独立石油协会(The Independent Petroleum Association of America, IPAA)代表了超过八千多家独立生产商公司的会员(包括戴文能源、先锋自然资源、阿帕奇)。根据美国国税局中613A(d)的定义条款,独立生产商公司在一年中的油气零售额不超过五百万美元,或年提炼不高于平均每天七万五千桶的原油。信息处理服务公司(IHS),作为一个在30多个国家和地区拥有超过5500名员工的全球性信息公司,在2010年所做的一个调查表明:独立生产商开发了美国95%的油气井,生产了美国50%的油和85%的天然气。独立生产商公司充分发挥其强项来开采或生产油气,与大型的油气公司竞争,它们可能有全球性的服务范围,雇员由几十到几千不等。

同时要说明的是,美国页岩气的开发,主要是米歇尔和其他油气私营公司的不懈努力,同时也有美国联邦政府和燃气工业界的资金投入。起始于20世纪70年代中期的能源危机,美国能源部于1977年成立,使联邦政府对能源方面的机构能够组合在一个架框下。美国联邦政府的投入,包括了美国能源部从1976年到1992年的“东部气田计划”(Eastern Gas Shales Project)。此计划起源于1973年的能源危机,由于能源的短缺和天然气价格的大幅上涨,促使美国能源部资助了覆盖多个州的合作计划,来研究美国东部泥盆纪的阿巴拉契亚盆地页岩。在长达16年的历史上,这个计划总共投资了大约920万美元,收集了东部页岩的覆盖范围、层次、岩石性质(后来被米歇尔公司开发巴奈特页岩时用到)等基本情况,并绘制了横断面地质图,也涉及了新的钻井促进和采收技术的研发和示范计划,这些投资最终产生水平井技术、微地震成像以及大型的水力压裂技术。终于在2000年,应用这些技术的集成以及清砂压裂,米歇尔公司实现了页岩气的商业化生产。另外,美国能源部在1991年,还直接补助了米歇尔公司在北得克萨斯州页岩上的第一口水平井(T. P. Sims B No. 1)。

针对当时联邦政府对天然气研发方面的投资,燃气工业界于1976年成立了GRI,成立的宗旨是对与天然气相关的研发计划进行投资和管理。它的管理研究经费,来自于天然气出售的跨州管道运输之附加费,这个附加费由当时的联邦能源管理委员会批准。在1994年的高峰时期,GRI有2.1亿美元的经费。其中对天然气供给方面,包括非常规气,提供资助用于勘探和开发,每年的经费就有300万~350万美元,高达它总运行经费的15%。一直到1998年,能源部与GRI的研发计划在极大程度上展开合作和协调,可以说它们支持的课题是互补性的。能源部强调基础研究,而GRI更关注于应用和技术转让。能源部的代表会参与GRI天然气研发方面的指导委员会,它们还共同举办每半年举行的会议来讨论高层次的计划,协调研究

方向而不重复。但是在 1998 年, GRI 急剧地改变了它原来的附加费融资机制, 逐步地减少强制性的附加税费, 而变为工业界和政府的自愿投资, 此时它们自己也要向能源部竞争课题了。在 2000 年 4 月, GRI 和燃气技术研究所合并而成了 GTI (Gas Technology Institute)。作为非营利机构, GRI 是个独立的技术单位, 它致力于与天然气能源和环境方面挑战相关的研发和培训工作。燃气技术研究所主要为燃气界培养它所需的工程师。到 2005 年, 附加税费完全停止, GTI 的经费全部来源于它的客户公司的自愿投资, 包括能源部和其他政府机构, 到此时 GRI/GTI 对天然气勘探开采技术的开发所起的作用就很少了。

1981 年 9 月, 丹·史都华德加盟米歇尔公司, 成为了公司在北得克萨斯州地区的地质学家, 此时公司正在巴奈特页岩上开钻与压裂第一口初探井 (C. W. Slay No. 1)。丹·史都华德作为地质学家的负责人, 维持和钻探常规的砾石气田, 同时帮助巴奈特页岩气的开发, 直接经历了米歇尔公司近二十年来对巴奈特页岩的开发历程。从 1988 年到 2002 年和戴文能源公司合并时, 丹·史都华德一直是米歇尔公司美国中部地区勘探部的负责人。2005 年 7 月, 乔治·米歇尔要求他把巴奈特页岩的开发历史整理出来。这个工作在 2007 年由沃斯堡地质协会和北得克萨斯州地质协会联合出版。本章后面的附录内容主要来自于该书对巴奈特页岩气开发早期历史的介绍。正像丹·史都华德在书中所说的: “承诺和毅力被不断体现在巴奈特页岩区块的开发过程中, 这不仅来自于乔治·米歇尔和公司的管理层, 更是在巴奈特团队的所有参与人员中”。

1.3 美国致密油开发的进展

尽管美国致密油的勘探开发, 不如页岩气那样年代久远, 但是最近从页岩建造中产出越来越多的石油, 使致密页岩油成为非常规石油资源开发中增速最快的前沿阵地。根据美国能源信息局 (EIA) 在 2012 年 6 月发布的“2012 年度能源展望”报告, 2035 年美国从八个致密油区块勘探开发中获得的石油产量, 将比 2011 年高一倍还要多。

美国能源信息局在 2013 年 4 月发布的“2013 年度能源展望”报告指出, 原油产量从 2008 年开始增长, 这改变了从 1986 年开始的产量下降势态。美国的原油产量从 2008 年的每天 500 万桶, 在 2012 年已经增长到了每天 650 万桶。产量增长在很大程度上, 来自于陆上原油产量的显著增长, 尤其是来自于页岩和其他致密建造中的石油产量, 而技术进步和相对较高的石油价格, 促进了对这些致密建造的勘探开发。

在这里有必要澄清一下“页岩油”和“油页岩”这两种截然不同的资源。油页岩事实上不是页岩并且不含石油, 它是一种在大量投资和环境代价下, 可以产出有机化合物的岩石, 这些有机化合物最终被加热处理制成可用的燃油。油页岩是干酪根的先驱, 而干酪根是一种组成常规石油资源的处于较早生油阶段的石油替代物。油页岩被圈闭在低孔隙度和低渗透率的岩石中, 这使得干酪根的提取非常困难。然而, 油页岩岩石比较接近地表。美国拥有巨大的油页岩资源, 尤其是在位于科罗拉多州西部、犹他州和怀俄明州的绿河 (Green River) 建造。

与“油页岩”不同, “页岩油”或者更加准确地称为“致密油”, 通常是指确实含石油并且有时候也许真的是页岩的岩石建造。页岩油的典型特点是, 岩石孔隙度不大, 渗透率很低。页岩油储层和致密油建造有一些微小的差异。页岩油储层富含黏土矿物并且易分裂。而致密油建造是由粉砂岩构成的, 粉砂岩是一种石英和其他矿物 (主要是白云石和方解石或者泥石) 的混合物, 不含大量的黏土矿物, 因而容易被水力压裂。因为大部分的致密油建造, 在钻井数据上与页岩油建造相似, 因此在下文中会同时用到页岩油或者致密油的名称。更为重要的是, 在很多页岩区块, 往往是页岩层和粉砂层交替存在, 而粉砂层为水力压裂的目标层位, 整个交替存在的多个层系成为了一个统一的页岩油开采体系。

美国石油供应量的增长, 最近几乎都是来自于用水平压裂技术开采的致密油建造。美国最重要的几个致密油区块包括威利斯顿盆地中的巴肯 (Bakken)-三叉 (Three Forks) 区块、得克萨斯州的鹰滩 (Eagle Ford) 和二叠纪 (Permian) 区块、主要位于科罗拉多州东北部沃登博格盆地中的奈厄布拉勒 (Niobrara) 区块以及加利福尼亚州圣华金盆地中的蒙特雷 (Monterey) 区块。这些区块可能只是致密油革命的开始, 美国至少有 20 个大的致密油建造, 它们中的一些 (如尤蒂卡 Utica) 正在经历快速的发展, 但令

人遗憾的是,来源于美国能源信息局、地质调查局和这些区块里的石油公司的资源评估,目前不能为它们的潜在资源储量和未来产量提供准确的意见。因此,以下章节的重点只是评估巴肯、鹰滩、二叠纪和蒙特雷致密油区块中,技术上可开采的致密油资源量。尽管不同机构和公司做出的估算有较大的差异,但是达成共识的是,这几大区块对这场致密油的革命来说非常重要。

1.3.1 主要的致密油区块

2012年美国能源信息局评估的美国陆上技术可开采页岩油资源量约为240亿桶。最大的页岩油建造是在加州南部的蒙特雷/桑托斯区块,估计其储量为154亿桶,约占美国页岩油资源总量的64%,蒙特雷页岩也是常规油储层的主要烃源岩。第二大和第三大页岩油区块是巴肯和鹰滩,估计其页岩油储量分别约为36亿桶和34亿桶(Madden and Vossoughi, 2013)。

1. 蒙特雷页岩

蒙特雷页岩油区块包括下段蒙特雷和桑托斯页岩,它们的面积大约为 1752mi^2 。该页岩深度范围为 $8000\sim 14000\text{ft}$,厚度为 $1000\sim 3000\text{ft}$ 。该页岩油区块每口井估计的最终开采量平均约为0.55亿桶石油,技术上可采石油总量约为154.2亿桶。但是蒙特雷页岩的地质情况使得水力压裂成本较高,更重要的是,加利福尼亚州的环境法规较严,州长在2013年9月20日签署了加强水力压裂管理的法令,导致目前开采量仍不大。

但巨大的储量并不说明相应的开采潜力。在对现有逐步增多的生产井的困难程度认识中,美国能源信息局在2014年5月21日宣布,把蒙特雷页岩油的技术可开采量的估计削减了96%,从2011年预计的137亿桶下调为6亿桶。这个下调并不影响该区块的近期产量,从2010年到2040年期间,产量将增长到每天57000桶,而2013年对同时期增长的估计为每天14000桶。

2. 巴肯-三叉页岩

巴肯页岩油区块是威利斯顿盆地的一部分,该盆地横跨蒙大拿州和北达科他州,绵延3万 mi^2 ,其位于美国境内的面积约为 6522mi^2 。根据美国能源信息局的资料,该油田含36.5亿桶油。2008年美国地质调查局的一个报告与这个评估是一致的,该报告估算未勘探的、技术上可采的石油储量为30亿~43亿桶。但是,这些数字与哈佛大学学者Maugeri(2012)提到的估计值有强烈的反差,他的文章指出,花费了毕生精力研究巴肯页岩的美国地质调查局地球化学家Leigh Price确信,巴肯有2710亿~5030亿桶的地质储量,其中可开采量估计有2060亿桶。他还指出北达科他州工业委员会,已经认可巴肯和三叉改进后的最终开采量估算值,并且在2011年1月宣布,这两个致密油储层中可采油储量仅在北达科他州就可以达到110亿桶。Maugeri(2012)的评估是基于后者的估计,并且预计巴肯和三叉可以产出450亿桶石油储量,到2020年每天产出石油约250万桶。

巴肯建造包括三个主要部分:下段页岩、中段白云岩和上段页岩。页岩是在相对较深的海相缺氧环境中沉积下来的,而白云岩是作为海岸碳酸盐储库,在浅层含氧充足的水环境中沉积下来的。中段白云岩是主要的石油储层,大约位于地表以下2mi处。巴肯建造的平均孔隙度约为5%,致密油区块渗透率非常低,平均仅为 $0.04\text{mD}^{\text{①}}$ 。尽管如此,垂向或近垂向存在的自然裂隙,使巴肯成为一个实施水平钻井技术的理想候选地。巴肯页岩埋深范围为 $4500\sim 7500\text{ft}$,平均深度6000ft,其平均厚度为22ft。

巴肯下面的三叉页岩由五层组成,由于和巴肯的邻近性,开采的致密油并不细分从哪个层次产出,而是把巴肯-三叉页岩作为一个连续的产油系统。

3. 鹰滩页岩

鹰滩页岩油区块位于得克萨斯州的Maverick盆地,从圣安东尼奥南部到奥斯汀北部绵延约2200mi。该区块包含高含量的石油液相成分,共有三个区域:含石油区、浓缩区和干气区。该页岩油区块估计拥有约35亿桶石油储量(EIA, 2012)。

^① $1\text{mD}=0.986923\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,毫达西。

同巴肯一样, Maugeri (2012) 也报道了鹰滩区块的开发前景。他的研究指出, 通过来自该区块不同地区运营公司的 100 多口钻井的数据报告, 并且利用能源信息局估算值作为出发点, 鹰滩页岩将会产出多于 150 亿桶的可采液体。

4. 二叠纪页岩

该地区是以开始于 299Ma 前的地质时代(二叠纪)命名的。二叠纪盆地是一个石油和天然气产区, 位于得克萨斯州西部以及新墨西哥州东南部的毗邻地区。二叠纪盆地覆盖了一个大约 250mi 宽、300mi 长的区域。很多产油气建造, 如 Yates、San Andres、Clear Fork、Spraberry、Wolfcamp、Yeso、Bone Spring、Avalon、Canyon、Morrow、Devonian 和 Ellenberger 都是二叠纪盆地的组成部分, 石油和天然气产自于地下几百英尺到 5mi 不等的地层中。二叠纪盆地引人注目的地方是其与众不同的一个地质特征, 即“叠加区块”。例如, 位于叠加区块 Wolfcamp 内的一口水平井, 在一切操作顺利的情况下, 花费 700 万~750 万美元。

1.3.2 致密油的生产

美国的致密油产量在 5 年内增长了不止 5 倍, 产量从 2007 年的 3900 万桶增长到 2011 年的约 21700 万桶。2007~2011 年, 美国总共产出了约 53300 万桶页岩油, 其中 36900 万桶来自巴肯页岩。剩下的分别来自奈厄布拉勒(6200 万桶)、鹰滩(6800 万桶)、蒙特雷(1800 万桶)以及伍德福德(Woodford)(900 万桶)。美国的石油生产将在 2020 年达到 670 万桶/天的峰值, 为 1994 年后的最高点, 其中近 80% 将来自致密油, 也就是说, 致密油产量将占据美国国内石油消费的 8%(EIA, 2012)。

致密油快速开采的这一趋势目前仍在保持, 巴肯、鹰滩、奈厄布拉勒和二叠纪区块, 仍是目前致密油开发生产的重点地区(图 1.1)。

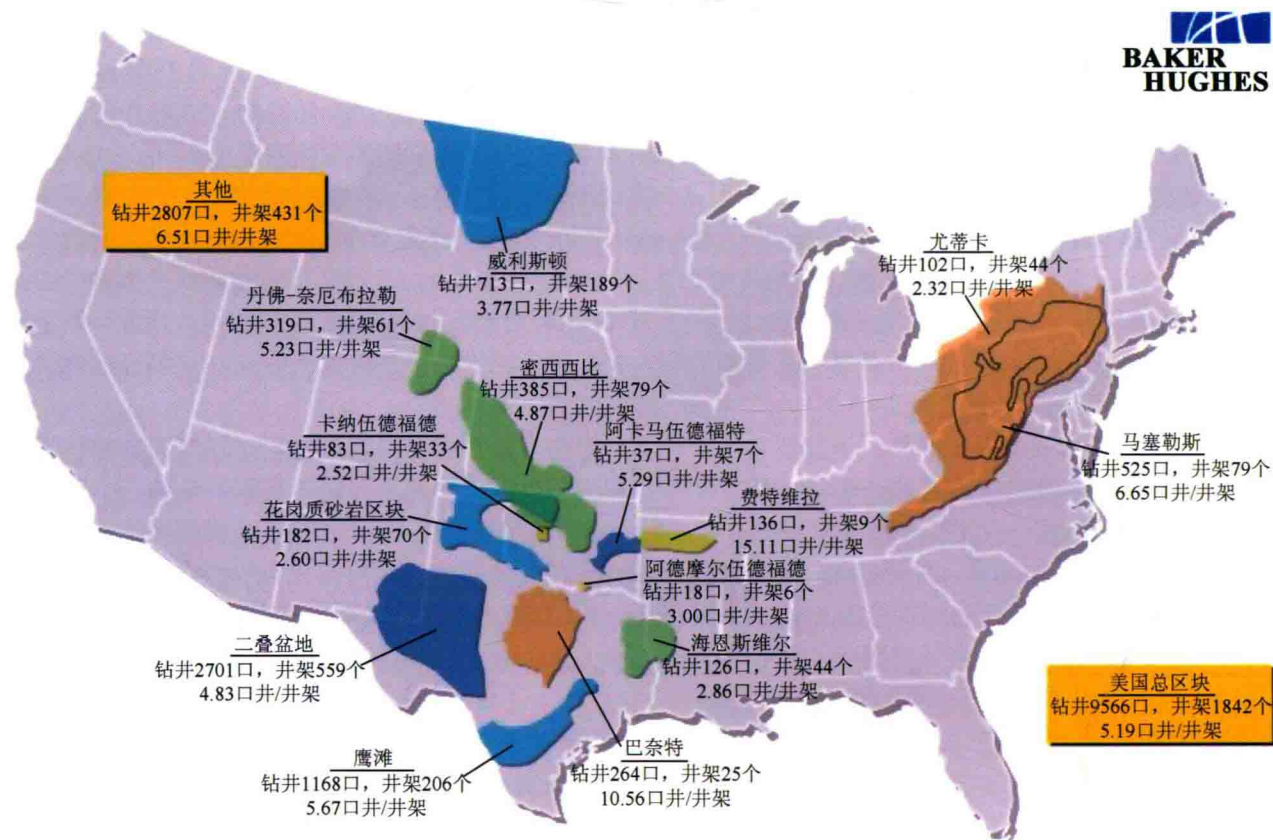


图 1.1 贝克休斯公司对美国 48 个州 2014 年第二季度(4~6 月)的钻井和钻井架统计

来源: 贝克休斯公司

Carroll 和 Klump(2013)在 2013 年 10 月 25 日的报道中指出,从 2010 年开始,所有的生产商已经在二叠纪盆地累积投资了 1500 亿美元,这个石油宝库估计价值为 5 万亿美元。据先锋自然资源估计,在开采 90 年后盆地的剩余产量仍有 500 亿桶,这比地球上除沙特阿拉伯 Ghawar 以外的任何油田都要高。但是,多变的地质情况,使得它的勘探开发成本较为昂贵。能源生产商平均需要有每桶 96 美元的石油价格,来从位于二叠纪盆地中克莱因(Cline)页岩和 Northern Mississippian Lime 层位的钻井中获利。与此相比,鹰滩页岩只需要每桶 78 美元,巴肯每桶 84 美元就能获利。而二叠纪盆地的一些地区只需要每桶 70~74 美元的价格就可以获利。美国指标原油,即西得克萨斯州中质原油,在 2013 年 10 月下降了 4.7%,于 10 月 24 日达到了 4 个月以来的最低点,即为每桶 95.95 美元,这主要是石油产量的增加而使得库存臃肿。布伦特原油,作为占世界石油三分之二的指标原油,在 2013 年均价为每桶 108.58 美元,未来很有可能降到每桶 70~80 美元,但是分析人士没有给出时间表。

在 2014 年 11 月 3 日,西得克萨斯州中质原油价格仅为每桶 78.77 美元,远远低于近期在 2014 年 6 月 23 日达到的 106.85 美元高峰值。页岩气的成功而导致的持续几年的价格低迷,是否会在致密油上重现,当拭目以待。

现在,二叠纪地区的钻井公司正处于繁荣期,超越了北美其他地区的石油工业。聚焦于二叠纪地区的勘探者包括先锋、Diamondback 和 Concho Resources Inc., 它们公司的股票在 2013 年已攀升了 81%,而包含 72 家公司的“标准普尔石油和天然气勘探和生产”指数则仅增加了 32%。先锋公司正在以 5.5 万亿美元的价格出售它在阿拉斯加州内的油气田,并计划将这项收入用于扩大二叠纪的钻探工作(Carroll and Klump, 2013)。2013 年 10 月 15 日在米德兰镇举行的 Hart Energy 的执行石油会议上,先锋公司董事长兼首席运营官 Timothy Dove 说到:在目前的能源价格下,该公司在二叠纪盆地的一些钻井中,可以赚取每桶 60~70 美元的利润。2013 年 10 月阿帕奇公司的一个汇报也显示,这家公司在二叠纪盆地的雇员数量,预计会从 2010 年的 345 人,在 2013 年末增长到 896 人。

在过去的 90 年间,二叠纪盆地已经产出了超过 290 亿桶的石油和 75 万亿 ft^3 的天然气,而工业界专家估计,该盆地剩余的可采油气资源量仍超过其已经的生产量。最近增产技术的加速使用,更增加了该盆地对美国石油生产的重要性。据作为负责州内油气工业的管理机构,得克萨斯州铁路委员会(Texas Railroad Commission)的统计报道,二叠纪盆地最近三年的石油生产量为:2010 年 270 百万桶,2011 年 295 百万桶,2012 年 312 百万桶。

位于休斯顿的西蒙斯国际公司在 2013 年预计,鹰滩石油产量将会在 2014 年的某个时间超过巴肯地区。2013 年,鹰滩每天生产 93 万桶石油,而巴肯正在以每天稍多于 100 万桶石油的速率生产,预计 2014 年这两个地区的石油产量将互换。而二叠纪地区在 2013 年应当可以达到每天 140 万桶的产量。可以预见的是,鹰滩将会继续以这样的速率生产,而二叠纪将会在水平钻井的驱动下加速生产,其石油产量将会在下一个五年内达到每天 200 万桶。

毋庸置疑的是,致密油对美国来说,是一个巨大的机遇。许多专家的分析表明,致密油产量到 2020 年可以达到每天 400 万桶,将占据美国一天消费量(1880 万桶)的近 1/4,并且把总体的国内石油生产水平,带回到美国曾经经历的 20 世纪 70 年代。

1.4 页岩区块的开发阶段和环境问题

页岩区块的开发要经过三个截然不同的阶段,从发现和规划阶段,经过钻探和储层评价阶段,再到生产阶段。第一个发现和规划阶段,是指收集储层全部原始信息的阶段,包括岩心取样在内的广泛分析工作,为工程师和地质人员提供直接的储层岩石性质,帮助他们提高对储层的认识,并且建立对该区块经济开发可行性的初步意见。在发现阶段完成有效的规划,很大程度上取决于通过三维地震成像技术获得的储层信息。第二个钻探和储层评价阶段是操作阶段,重点是非常有效地应用规划好的技术,使得在每个研究单元内,获得最大的储层接触和较低的花费,有关钻探基础设施的问题被解决。第三个生产阶

段,则致力于最优化开采储层,在美国页岩气和致密油区块通常需要水力压裂技术来增产,合适的压裂和支撑剂的放置,对成功的页岩区块开发至关重要。

然而,由于与水力压裂相关的环境和开采技术等问题,页岩油气的勘探开采过程备受世界争议,其中包括公众关注的是否对浅层地下饮用水造成污染、压裂回流液的处置、诱发地震风险、温室气体逃逸、淡水资源消耗、地表生态影响等问题(Vidic et al., 2013)。针对这些争议,下面介绍近两年美国联邦政府对相关课题的支持。

1.5 联邦政府的资助

1.5.1 能源部国家能源技术实验室(National Energy Technology Laboratory, NETL)

美国能源部下属的化石能源办公室的主要任务,是保证国家能够继续从传统的化石能源中取得清洁、安全、价格可以承受的能源,同时提高环境保护。化石能源办公室包括国家能源技术实验室,该实验室下属的油气战略中心(Strategic Center for Natural Gas and Oil, SCNGO)负责油气开采的研发工作,它目前的研究方向,包括甲烷水合物、超深水以及非常规油气技术。

1. 2012 年度的课题申请

2012 年 5 月,国家能源技术实验室发布了非常规油气技术的课题申请指南,旨在提高富油页岩储层的采收率,并且促进下一代二氧化碳石油增产技术的开发。

1) 专题 1——富油页岩储层表征和最优化发展

许多遍布美国的富油页岩储层只有有限的表征描述,为了保证最大化的采收率和环境保护,工业界需要对应力和天然裂隙系统有一个基本的了解。专题 1 的目标是提供对富油页岩区块改进的储层表征,这些表征包括与环境相关的特性以及鉴定“甜点区”所需的改良方法。本专题下的研究领域将用跨学科的方法,提高最终资源采收率,并降低环境影响。

(1) 基于野外岩心、钻井记录、液体样品和测井数据,对新开发的富油页岩资源进行储层表征和分析,从而改善钻井安置。

(2) 获得并分析定向岩心、钻井记录以及其他地球物理数据,来支持建立天然裂隙与生产力之间的联系,并获得天然裂隙对钻井定向的影响。

(3) 分析原位应力、地球物理、地球化学和微地震波数据,来改善水力压裂设计。

(4) 研发独特的生物标记(乙烷同位素翻转、同位素逆转、自由相和吸附相气体组成区别)来鉴别富油页岩中的“甜点区”。

2) 专题 2——非常规页岩区块水平钻井和水力压裂有效性的改善

专题 2 的目标是最优化开发资源,提高经济效益,降低累积环境影响,对优化储层开发的关键要素进行评价(如钻井间距、水平横向长度和方向、水力压裂的数量和间距、水力压裂处理的体积)。本专题所感兴趣的研究领域包括:

(1) 研发先进的技术和工程分析,用来支持最优化钻井和完井设计。

(2) 提高水力压裂效率技术的分析,包括改进的穿孔设计和间距。

(3) 研发可以更加有效并且经济的微地震波或其他可选择的裂隙成像工具,以及先进的裂隙成像数据的解释和分析。

(4) 研制先进的支撑剂,既可以解决嵌入问题又可以提高裂隙传导率。

3) 专题 3——下一代二氧化碳石油增产技术

促进下一代二氧化碳石油增产技术,以达到可以进行先导试验的程度。但此专题不是本章的重点。

2012 年度大约有 125 万美元的拨款,用于新项目的资助,2013 年度将会追加 500 万美元。能源部在本课题指南下批准了 8 个不同大小的项目,项目的期限为 24~36 个月。对于那些研究和开发类型的资助项目,成本分摊至少需要占 20% 的总项目支出。而对于示范和商业的应用项目,成本分摊应占 50%,并

且成本分摊必须来自非联邦政府机构。

2. 2013 年度的课题申请

2013 年 4 月, 国家能源技术实验室又发布了非常规油气技术的课题申请, 主要资助致力于改善页岩气、致密油和致密气资源开发对环境影响的项目。这个资助目标可以通过增强钻孔完整性和分带隔离性, 以及降低耗水量、气体排放量和资源消耗量来实现, 是能源部为促进国内非常规油气资源的环境友好式开发, 而提出的一系列规划的重要组成部分。

1) 专题 1——非常规油气开发环境影响的降低

尽管致密油、致密砂岩气和页岩气这些资源原位储量相当可观, 但是油气的采收效率普遍偏低, 造成大量的资源滞留在储层中。在当前的技术条件下, 这些非常规资源的最终开发, 预计需要相当数量的钻井, 从而对环境和社会造成很大的负担。专题 1 的目标是弥补地质学、岩石物理学、地质力学和完井及增产技术方面的重要知识缺口, 从而在确保能够从生产这些资源中获得最大公共效益的同时, 降低开发地区的工业活动和整体环境影响。本专题所感兴趣的研究领域包括以下方面, 但是不限于此。

(1) 能够阐述应用增产技术前后, 沿着水平井储层响应变化机理及其地质/工程控制的野外资料的收集和分析。

(2) 确定注水法对储层岩石物理性质的影响, 并评价增产液体的优化利用, 从而可以通过提高单井油气采收量, 来减少开采区所需的钻井数量。

(3) 将所需钻井总数量降到最低, 通过在时间和空间上, 考虑最有效的优化钻井布置的开发策略。

(4) 通过开发特定的遥感监测和解释技术, 避免潜在的环境、健康和安全影响。

2) 专题 2——与钻孔完整性和分带隔离性相关问题的确定、监测和减轻甲烷逃逸

公众对非常规资源开发和生产的许多担心, 都反映了人们对这些资源的开发所带来的空气和水质量潜在影响的忧虑。专题 2 的目标是, 从事旨在保护空气和水质量的研究, 这些研究是通过在整个野外开发过程中, 多种时间尺度上来确定、监测钻孔完整性和分带隔离性及减轻逃逸甲烷的排放相关的问题来实现的。本专题所感兴趣的研究领域包括以下几个方面, 但是不限于此。

(1) 甲烷逃逸的机理、速率和控制因素的评估, 包括改进的技术或方法。

(2) 评价目前在非常规资源开发中, 为保持钻井长期完整性而使用的可操作性和材料的可靠性。

(3) 开发特定的遥感监测和解释技术, 这些技术使钻井前的地质特征评估成为可能, 这可以促进钻井的长期完整性, 以及生产活动与浅层地下水资源的长期隔离。

(4) 评估通过压裂增产技术获得的资源开发, 对地下水文系统的长期影响, 重点关注资源开发和流体在地下运移与所经过的天然路径的潜在相互作用。

3) 专题 3——通过应用更加智能和耗水少的增产办法降低耗水量和资源消耗量

(1) 开发和验证降低非常规资源开发中淡水使用量的新技术和处理过程, 这包括利用现存的不可饮用水资源, 以及扩大返排水处理过程的效益。

(2) 开发、验证者演示无水增产技术, 可以用来取代(或与其相结合)以水为基础的水力压裂, 来降低耗水量和返排液体积。

本次申请下大约有 800 万美元的资金用于资助新项目, 最后批准了 7 个项目, 项目的期限为 1~3 年。这 7 个项目和牵头单位如下: ①水力压裂过程中的岩石和流体评价(加利福尼亚州圣地亚哥市的 Ground Metrics 公司); ②实践智慧的水泥(夏威夷州檀香山市的 Oceanit 实验室公司); ③代替烧柴油引擎的环境利益(西弗吉尼亚州立大学研究公司); ④用于水力压裂的泡沫稳定性研究(得克萨斯州立大学奥斯汀分校); ⑤测试甲烷和其他气体的逃逸(卡内基梅隆大学); ⑥马塞勒斯区块甲烷气体逃逸的连续两年检测(宾夕法尼亚州立大学); ⑦污染水的转化(Battelle 纪念研究所)。

3. 2014 年度的课题申请

2014 年 4 月底, 国家能源技术实验室又发布了非常规油气技术方面的课题申请, 资助方向致力于“考