

国外致密油 储量评估技术进展

张君峰 毕海滨 许 浩 赵俊龙 段晓文 著



地质出版社

国外致密油储量评估技术进展

张君峰 毕海滨 许 浩 著
赵俊龙 段晓文



地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

致密油是近年来继“页岩气”突破后的又一热点领域,是非常现实的石油接替资源,其开发将成为弥补常规油气缺口的重要途径。本书主要包括:国外致密油储量及产量现状,致密油界定,国外致密油储量评估方法,容积法评估致密油地质储量关键参数,递减法评估致密油技术可采储量关键参数,致密油储量评估实例分析,总结与展望。全书系统性强,内容丰富,是一部详细介绍致密油储量评估进展的著作。

本书适合从事致密油地质与工程研究的人员及相关专业技术人员阅读,也可以作为高等院校相关专业师生参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

国外致密油储量评估技术进展 / 张君峰等著. —北京:地质出版社, 2015. 11
ISBN 978-7-116-08782-8

I. ①国… II. ①张… III. ①致密砂岩-石油储量-资源评价-研究-国外 IV. ①TE155

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 279006 号

责任编辑: 孙亚芸 杨 艺

责任校对: 王素荣

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010) 66554528 (邮购部); (010) 665554633 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010) 66554582

印 刷: 北京地大天成印务有限公司

开 本: 787 mm × 1092 mm 1/16

印 张: 8.25

字 数: 200 千字

版 次: 2015 年 11 月北京第 1 版

印 次: 2015 年 11 月北京第 1 次印刷

定 价: 48.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-08782-8

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

油气是关系到国家经济发展和安全的重要战略资源。随着国民经济持续发展,油气供需矛盾进一步突出。同时,常规石油资源的勘探程度不断提高,勘探难度越来越大,已开发老油田主体进入了高含水、高采出程度的“双高”阶段,原油稳产、产量上升面临很大难度。因此,立足国情,发挥国内油气资源的保障作用,分享国际先进技术,加快非常规油气勘探与开发是弥补国内油气缺口的重要途径。

致密油,又称“黑金”,是近年来继“页岩气”突破后的又一热点领域,是非常现实的石油接替资源,正成为全球非常规石油勘探的亮点领域。2008年,美国 Bakken 致密油实现了规模开发,成为当年全球十大发现之一。同年,美国得克萨斯州南部的 Eagleford 致密油开发亦取得突破。北美致密油的成功开发强烈刺激着中国致密油产业的发展,通过进一步加大勘探开发力度和技术应用规模,有效地开发致密油资源,将为中国原油产量的增加发挥重要作用。

本书通过信息检索,密切跟踪了国外致密油产业的发展动态,特别是北美致密油资源分布和开发潜力,分析了致密油储量评估方法,目的是为中国非常规油气发展战略提供依据,为增强我国致密油产业国际竞争力提供信息支持。

全书共分7章,围绕“致密油储量评价方法”这一核心,开展了以下研究:

第一章为“国外致密油储量及产量现状”,通过大量的资料调研,密切跟踪了全球致密油发展的最新动向,重点评价了美国、加拿大的致密油储量、产量现状及未来发展趋势,详细解剖了 Bakken、Eagleford、Cardium 三套致密油地层的生产及地质特征。

第二章为“致密油界定”,分析了国内外不同研究机构及专家学者提出的致密油定义,并进行对比归类,尤其关注勘探开发过程中致密油与页岩油的差别,结合致密油特征,从方便储量计算的角度提出了合理的致密油概念。

第三章为“国外致密油储量评估方法”,通过对比国内外不同研究机构的致密油资源评价方法,分析了不同资源评价方法的特点与差异,总结出致密油不同资源评价方法的适用性。

第四章、第五章分别为“容积法评估致密油地质储量关键参数”、“递减法评估致密油技术可采储量关键参数”，明确了致密油储量评估过程中关键参数的确定方法，如含油面积、有效厚度、孔隙度、含油饱和度、递减速率等。

第六章为“致密油储量评估实例分析”，分别对容积法、递减法及二者的综合应用开展了实例分析，进一步说明致密油储量评估方法的适用性。

第七章为“总结与展望”，总结了本书的主要研究成果，并对未来中国致密油勘探开发过程中储量的计算提出了一些建设性意见。

本书编写过程中得到了中国石油勘探开发研究院油气资源规划所李建忠教授、李淑珣及姚爱华等同志的大力支持，在此表示衷心的感谢！

书中不免出现一些疏漏之处，如有读者发现，请不吝赐教，容后改进。

作 者

2015 年 5 月

目 录

前 言

第一章 国外致密油储量及产量现状	1
第一节 北美致密油资源	1
一、概述	1
二、美国致密油资源	6
三、加拿大致密油资源	9
第二节 其他国家(地区)致密油资源分布	11
第三节 典型致密油地层地质特征与生产特征	13
一、美国 Bakken 致密油地层	13
二、美国 Eagleford 致密油地层	18
三、加拿大 Cardium 致密油地层	27
第二章 致密油界定	33
第一节 前人对致密油的定义	33
第二节 适用于储量评估的致密油定义	37
第三节 致密油储层渗透率与孔隙度上限	39
第三章 国外致密油储量评估方法	43
第一节 油气资源评价分类体系	43
一、油气资源管理系统	43
二、加拿大油气资源评价手册	43
三、联合国分类系统	43
第二节 致密油资源评估方法	43
一、致密油评价指标	43
二、致密油储量评估方法	45
第四章 容积法评估致密油地质储量关键参数	49
第一节 有效面积	49
一、证实面积	49
二、井控规则	51
第二节 有效厚度	54
一、有效厚度下限标准	54
二、确定有效厚度的基本要求	56

第三节 有效孔隙度	58
第四节 原始含水饱和度	59
第五节 地层原油体积系数与溶解气油比	60
第五章 递减法评估致密油技术可采储量关键参数	61
第一节 常规递减曲线法	61
一、常规递减曲线类型	61
二、常规递减法应用条件	62
三、常规递减曲线类型判断	62
四、递减率及递减指数的确定方法	63
第二节 致密油递减曲线法	63
一、Duong 产量递减法	64
二、SEPD 产量递减法	70
三、YM - SEPD 产量递减法	72
四、经验产量递减方法的适用性	76
第六章 致密油储量评估实例分析	78
第一节 双曲递减法应用实例	78
第二节 YM - SEPD 递减法应用实例	81
一、干气井	82
二、湿气井	84
三、逆行气井	86
四、挥发性油井	90
五、黑油井	95
六、实际 Cardium 油井	96
第三节 双曲递减法和指数递减法综合应用实例	98
第四节 技术可采储量与地质储量综合计算实例	99
第七章 总结与展望	106
一、基本认识	106
二、建议	108
参考文献	110
附录 1 缩写词的中英文对照	118
附录 2 本书作者定义的致密油分类	120
附录 3 典型致密油地层物性统计	121
附录 4 SEC 储量评价的参数获取方法统计	122
附录 5 YM - SEPD 方法计算可采储量的实际生产井概况	125

第一章 国外致密油储量及产量现状

油气是关系到国家经济发展和安全的重要战略资源。随着国民经济的持续发展,油气供需矛盾进一步突出。加之,常规石油资源的勘探程度不断提高,勘探难度越来越大,已开发老油田主体进入了高含水、高采出程度的“双高”阶段,原油稳产、产量上升面临很大困难。因此,立足国情,发挥国内油气资源的保障作用,分享国际先进技术,加快非常规油气的勘探与开发成为弥补油气缺口的重要途径。

第一节 北美致密油资源

一、概述

致密油,又称“黑金”,是近年来继页岩气突破后的又一热点领域,是非常现实的石油接替资源,正成为全球非常规石油勘探的亮点领域。2005年以来,先进的钻完井及数值模拟技术的应用,加上油价的飙升,致密油资源逐渐变成北美油气开发最活跃的目标之一。

目前,北美已在19个盆地中发现了致密油,其中已经生产致密油的地区主要分布于美国中陆地区和落基山地区,范围从艾伯塔省中部地区一直延伸到得克萨斯州南部地区,同时,西南地区以及加利福尼亚南部的 Monterey 地层也开始生产致密油。已被证实的致密油预测区遍及落基山地区、墨西哥湾地区和美国东北部地区(图1-1)。

北美不同地区致密油的形成时代不同,主要赋存于泥盆纪—新近纪的地层中,具有4套主力产油层。其中,最著名的地层为威利斯顿盆地的 Bakken 地层、得克萨斯州的 Eagleford 地层、艾伯塔盆地的 Cardium 地层以及加利福尼亚州圣华金盆地的 Monterey 地层(图1-1)。这些致密油地层均具有区域性、大面积分布的特征。美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)曾经评估 Bakken 地层覆盖了北达科他州、蒙大拿州和萨斯喀彻温省南部的几个县; Niobrara 地层可能包含科罗拉多州、怀俄明州甚至新墨西哥州的大部分地区。在加拿大,已经生产致密油的 Cardium 地层也覆盖了艾伯塔盆地中部的大部分地区。

在北美致密油资源构成中,美国致密油产量占北美致密油总产量的91%,而加拿大只占9%(图1-2)。据美国能源信息署(Energy Information Administration, EIA)数据统计,2013年第四季度,美国致密油平均日产量为3.22MB^①。这一水平足以推动美国原油生产水平(平均日产量7.84MB)达到世界总产量的10%以上(10.4%),高于2012年第四季度的9%(图1-3)。其中,美国致密油占世界原油产量的4.3%,而世界范围内,

① 缩写符号意义见附录1,下同

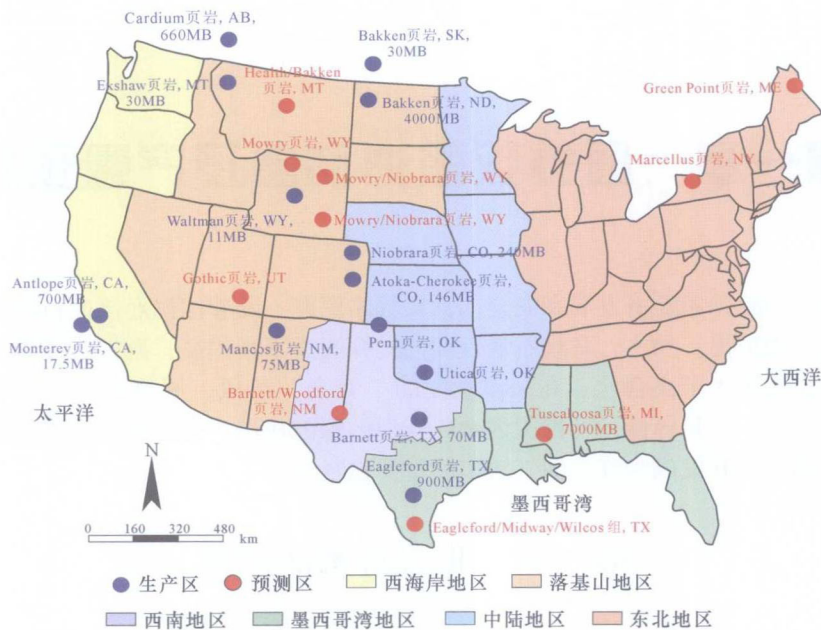


图 1-1 北美致密油产区及预测区分布及储量评估

(据 NPC, 2011; Sorensen, 2011; EIA, 2012)

AB—艾伯塔省; SK—萨斯喀彻温省; MT—蒙大拿州; ND—北达科他州; ME—缅因州;
CO—科罗拉多州; CA—加利福尼亚州; UT—犹他州; NM—新墨西哥州; OK—俄克拉何马州;
TX—得克萨斯州; MI—密西根州; WY—怀俄明州; NY—纽约州

致密油产量则不足原油总产量的 1%。2014 年 2 月，美国 64% 的致密油生产来自两套地层：一套是得克萨斯州南部的 Eagleford 页岩 (1.21MB/d，占美国致密油总产量的 36%)，另一套是北达科他州和蒙大拿州的 Bakken 页岩 (0.94MB/d，占美国致密油总产量的 28%)。2014 年 5 月，美国完钻致密油生产井 45468 口，在钻 1861 口。在加拿大，尽管 2013 年致密油平均日产量仅为 0.34MB，但这一数据却占加拿大原油总产量 (3.52MB/d) 的 9.7%。2014 年，加拿大致密油产量为 0.4MB/d，较 2011 年 (0.2MB/d) 翻了一番。这些致密油全部集中在加拿大西部的艾伯塔省、马尼托巴省和萨斯喀彻温省。

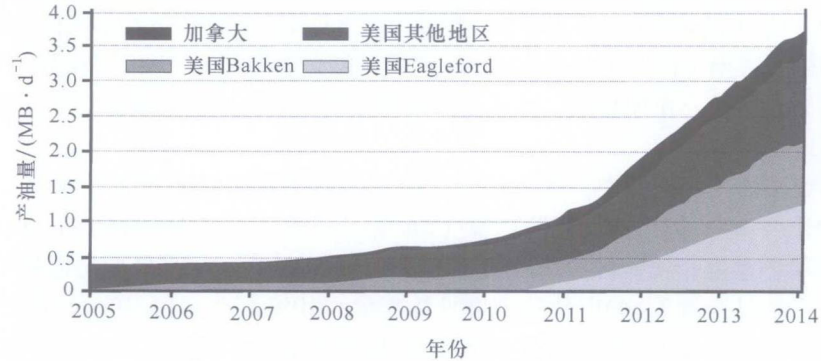


图 1-2 北美致密油产量 2005 ~ 2014 年增长曲线

(据 EIA, 2014)

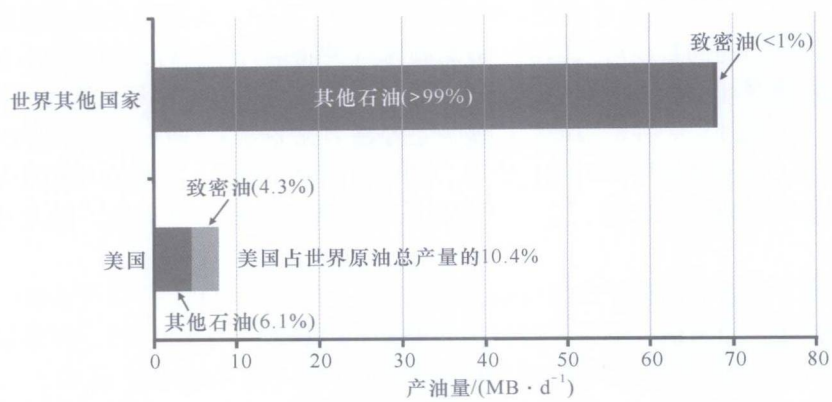


图 1-3 美国原油产量、致密油产量占世界原油总产量的百分比
(据 EIA, 2014)

表 1-1 为美国国家石油委员会（National Petroleum Council, NPC）2011 年评估的北美致密油可采储量，可以看到，致密油资源总量为 5.588 ~ 10.25BB（包括已生产的和预测的）。然而，随着新技术的应用，这一评价结果会被低估。美国国家石油委员会随后通过对大量的前人研究成果和私人企业预测等结果进行分析，发现致密油资源总的可采储量高达 34BB。在生产致密油的地层中，Bakken 页岩被认为是当前最大的致密油可采目标层，可采储量为 3.65 ~ 4.30BB。计算得到的前景地层中，位于路易斯安那州和密西西比州南部的 Tuscaloosa 海相页岩可能具有 7.0BB 的可采储量。

表 1-1 北美主要致密油产区储量

地层	州/省	储量/BB
Bakken	ND、MT、SK	3.650 ~ 4.300
Cardium	AB	0.660 ~ 1.890
Monterey	CA	0.718 ~ 3.500
Niobrara	CO、WY	0.240
Atoka - Cherokee	CO	0.146
Mancos	NM	0.075
Barnett	TX	0.056
Exshaw	AB、MT	0.030
Eagleford	TX	0.013
总计	—	5.588 ~ 10.25

注：AB 为艾伯塔省；SK 为萨斯喀彻温省；MT 为蒙大拿州；ND 为北达科他州；CA 为加利福尼亚州；CO 为科罗拉多州；WY 为怀俄明州；NM 为新墨西哥州；TX 为得克萨斯州。

(据 NPC, 2011)

美国国家石油委员会对致密油可采资源的评估是基于州和联邦政府部门已出版的文献、报告计算的，如美国地质调查局和北达科他州矿业资源局（North Dakota Department of Mineral Resources, NDDMR）对美国证券交易委员会（Securities and Exchange

Commission, SEC) 所做报告中包含的储量公开声明。其中, 大部分文献或报告对于这种资源所使用的词语是储量或可采储量, 并且技术可采储量与经济可采储量没有差别。这是因为开发这种致密油资源都会使用到资金密集型技术, 如深部水平井、复杂完井技术、多级水力压裂等。此外, 一种资源能否被认为是经济可采资源还取决于油价的变化、品质、所交税的数额、遵循法规所付出的代价等。当评估一种资源时, 可能在当前环境下是经济可采的, 但是对于致密油来说, 这一资源也应当被认为是技术可采的, 如北达科他州的 Bakken 地层。

总的来看, 致密油储量评价结果是比较保守的, 主要体现在以下 3 个方面: ①一些致密油地层虽然生产致密油 (如俄克拉何马州的 Penn 页岩、Utica 页岩), 但是缺少对其储量的相关报道; ②几个开发时间较早的致密油地层 (如 Eagleford 页岩、二叠盆地的 Barnett 页岩和 Woodford 页岩、怀俄明州的 Mowry/Niobrara 页岩) 的储量可能比现在报道的要高很多; ③随着技术和效率的不断提高, 未来致密油可采储量也可能会增加。同时, 致密油储量评价也存在较强的不确定性, 特别是可采储量的评估, 如 2014 年 5 月 21 日 EIA 报道美国 Monterey 页岩致密油可采储量值削减了 96%。

然而, 致密油勘探具有十分广阔的前景。2009 年, 北美致密油实际日产量为 0.265MB, 按照该速度计算, 预计到 2035 年, 如果不考虑压裂水源的限制、税收规则改变等因素的影响, 北美致密油日产量最低目标为 0.6MB, 最可能实现的日产量目标是 2MB。以 Bakken 致密油开发为例, 2012 年仅在北达科他州生产的 Bakken 致密油就达到日产量 0.45MB, 若以这样的速度计算, 北达科他州致密油生产至少能够维持 10 年, 到 2035 年致密油的日产量将会增长到 0.6MB。同时, Eagleford 地层产量也将会最终达到 0.8MB/d。如果萨斯喀彻温省和蒙大拿州的 Bakken 地层致密油生产水平都达到北达科他州生产水平一半的话, 那么 Eagleford、Niobrara、Cardium 致密油地层的产量也将十分喜人, 到 2035 年致密油总产量就会超过 2MB/d。实际上, 这些预测仅考虑了一部分生产致密油的储层, 存在很大的局限性, 因此, 预测结果可能会低估了致密油产量。由于开发技术不断进步, 致密油储量计算方法不断精确, 除非政策发生巨大变化, 否则到 2035 年将会有 3MB/d 的致密油产出 (表 1-2)。

表 1-2 2035 年北美致密油产量预测

油气类型	产量/ (MB · d ⁻¹)			
致密油	2009 年 实际产量	2035 年预测产量		
		最低产量	最可能产量	最高产量
	0.265	0.6	2	3

(据 NPC, 2011)

基于对当前致密油资源量、开发技术以及油价环境的认识, 从定性的角度来看, 未来 40 年中, 北美致密油产量将在 2015 ~ 2025 年之间达到高峰 (图 1-4)。北达科他州矿业资源局计划到 2050 年从该州的 Bakken 地层生产的致密油日产量达到 0.25 ~ 0.35MB。若用这种递减速率计算其他致密油地层的产量, 可以看到, 如果致密油生产能够持续到 2050 年, 届时致密油总产量仍旧能够达到 1 ~ 2MB/d。

在接下来的几十年中, 若 Bakken 地层这种强势生产会持续下去的话, 致密油产量的数量级和北美其他致密油地层的开发将在很大程度上取决于政策性因素。尽管 Bakken 地

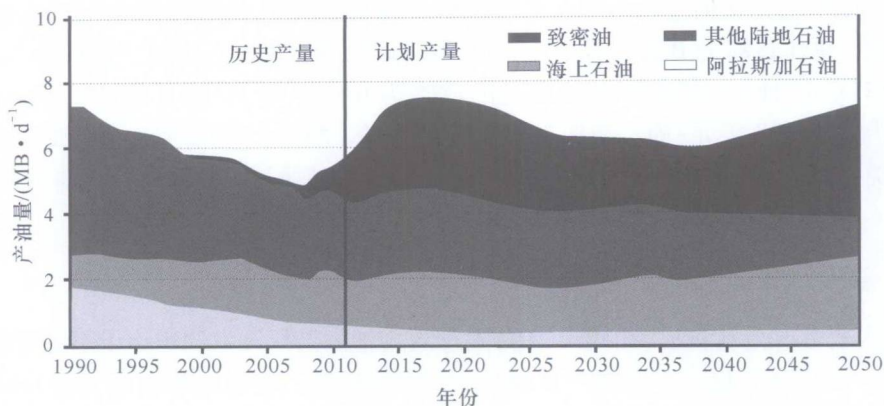


图 1-4 北美原油生产趋势及预测
(据 EIA, 2013)

层的钻井采油成功率很高（有些报道称超过 90%），但是这些成功是建立在资金密集型技术基础上的，额外的费用将与政府法规或者税收挂钩，这在很大程度上会影响致密油区块开发的经济可行性。

成功的致密油开发不仅依赖于钻井、完井、数值模拟技术的发展，更依赖于对既定地层地质特征的准确认识。由于致密油地层地质条件存在变数，所以要求对应的关键技术和地质研究能够具有多变性。例如，在 Bakken 地层致密油开发过程中，开发技术的更新和关键地质表征的实践对于致密油的成功开发至关重要，而且相关内容会作为研究工作的一部分，其资金要么完全由行业支付，要么由行业和政府联合资助，如化石能源办公室能源部（Department of Energy's Office of Fossil Energy, DEOFE）和北美能源安全研究伙伴（Research Partnership to Secure Energy for America, RPSEA）。在过去，联邦税法允许石油公司注销其参与研究项目的相关费用，但税法的改变将会导致石油公司不仅不能注销这些费用，而且还将对基金研究项目产生极大的抑制作用，这对新兴的、尚未开发的致密油地层是非常关键的因素，会在时间上阻碍这些地层的开发。

无效的监管政策也可能会阻碍致密油的开发进程。当前，环境保护局（Environmental Protection Agency, EPA）正在重新审视水力压裂技术、方法、操作过程，希望能够制定出关于水力压裂设计、施工和监控的新的政策与法规。然而，每个致密油地层都是特殊的，在某一地区安全而实用的技术在另一个地区有可能不适用，这就要求针对水力压裂技术的政策、法规要因地制宜。如果环境保护局严格执行一对一的压裂操作法规，那么很有可能造成法规不适用、地层开发不经济等后果。

当然，政策决定对于致密油开发也有积极的影响。具有易于操作特征的租赁、许可过程的政策能够及时地促进地层的开发。充分资助的监管机构能够持续让员工及时而彻底地评估和处理事务。这种充分资助的持续能够确保当前制度被强制实施，而且还能保护环境，既能够为管理机构投资开发数字资源和基础设施服务，也能够提高监管和技术转让的效率。

此外，对于致密油的生产成本来说，不仅地层之间变化很大，甚至同一地层内，不同生产井的成本也存在较大差异。整体上，致密油与致密气、常规石油天然气的开发成本正变得难以区分，并且逐渐趋于一致。目前，原油的生产成本走势降低，平均为 40 ~ 80 美元/桶；页岩油则居中，成本范围为 50 ~ 70 美元/桶；油砂的成本则高居首位，为 70 ~ 90

美元/桶。以加拿大艾伯塔和美国的致密油生产为例,艾伯塔的致密油生产成本平均为 54.42 美元/桶(最高为 Braver Hill Lake Group 地层,62.89 美元/桶;最低为 Bakken 地层,47.53 美元/桶),美国的致密油生产成本为 63.39 美元/桶(最高为 Three Forks/Sanish 地层,74.98 美元/桶;最低为 Monterey 地层,51.11 美元/桶),而油砂的生产成本为 56 美元/桶(利用蒸汽辅助重力泄油技术),与美国和加拿大致密油的生产成本相当。

二、美国致密油资源

自从页岩气开发获得成功以后,美国对于致密油的勘探开发同样给予了高度重视,并试图复制“页岩气”模式,实现“原油自给”。2006 年,威利斯顿盆地 Elm Coulee 油田的 Bakken 地层致密油生产突破 0.05MB/d,极大地提升了致密油勘探开发的信心,吸引了大量投资。2009 年,美国致密油勘探开发投资达到 514 亿美元,创下历史高峰。致密油产量快速增长的推动因素是 2008 年以来针对非常规储层所应用的钻井与压裂技术的不断进步与完善。2008 年,Bakken 地层致密油实现了规模化开发,该突破被确定为当年全球十大发现之一。2010 年,美国年产致密油产量突破 214MB,使美国持续 24 年的石油产量下降趋势首次得以扭转,石油供应真正实现了复苏。2011 年,美国定向井石油产油量首次超过了天然气产量,水平井数量超过了直井数量,致密油日产量超过了 0.456MB。仅 2014 年 1~4 月,美国致密油产量就高达 0.838MB/d,是 2013 年的 1.17 倍。

美国能源信息署 2012 年年度能源展望(Annual Energy Outlook 2012, AEO 2012)早期发布会指出,美国国内石油产量增长受陆地致密油资源和墨西哥湾深水油气资源的联合推动。2012 年,美国境内致密油生产井超过 2000 口,平均单井产油 85.7B/d。因此,美国能源信息署预计,美国国内石油增长将从 2010 年日产 5.5MB 增到 2020 年日产 6.7MB,其中,陆地致密油资源将大幅度增长,2020 年全美致密油产量将达到 1071MB,使美国原油总产量增加 1/3,大大减少其对外依存度,在一定程度将改变世界能源格局,2030 年将达到 1300MB。近年来,页岩气开发中应用的技术将加快致密油资源的开发。由于致密油的大量增产,美国能源信息署还预测尽管伴生成本高,轻质油增长的趋势还会持续下去,高油价和生产方法的进步促使致密油生产有利可图。

目前,美国致密油勘探开发的典型代表是威利斯顿盆地的 Bakken 地层和得克萨斯州的 Eagleford 地层,其中 Bakken 地层是美国最大的致密油生产地层,主要位于威利斯顿盆地的中部和北部,地质资源量为 164.3BB,可采资源量为 4.2BB,待发现资源量为 2.6BB 油及相近数量的伴生气。从 2000 年 Bakken 致密油开发取得突破开始,其原油日产量达到 0.05MB,2000~2010 年 Bakken 地层累计产油已超过 200MB。而 Eagleford 地层的油气种类较多,致密油主要赋存于区带北部,2010 年全年产油约 1.42MB。

据美国能源信息署统计,2011 年 11 月,84% 的致密油产量主要来自 Bakken 和 Eagleford 地层。2012 年第一季度,Bakken 和 Eagleford 地区致密油日产量超过了 0.75MB,接近美国同期石油产量的 12.5%,且产量持续保持增长趋势。然而,由于其他地层致密油产量的提高,2014 年 2 月,美国 64% 的致密油生产来自 Eagleford 页岩(日产量 1.21MB,占美国致密油总产量的 36%)和 Bakken 页岩(日产量 0.94MB,占美国致密油总产量的 28%),较 2011 年 11 月有所降低。2013 年下半年,致密油日产量超过 3MB。

2014 年 4 月，Eagleford 地层原油产量增幅最大，其增长率是二叠盆地的 2.3 倍、Bakken 地层的 1.7 倍，使美国从 2010 年 4 月到 2014 年 4 月，北达科他州和得克萨斯州的原油产量平均年增长率分别达到 37% 和 28%（其他地区年增长率仅 2%）。在此期间，由于致密油的贡献，北达科他州和得克萨斯州原油产量占美国总产量（8.4MB/d）的百分比亦从 26% 增长到 48%。到 2014 年 7 月，美国原油月生产同比增长，Eagleford 地层仍然居首位，其次为二叠盆地和 Bakken 地层，同时，致密油占原油生产的比例也接近峰值。截止到 2015 年 2 月，美国致密油日产量已超过 4.5MB（图 1-5）。

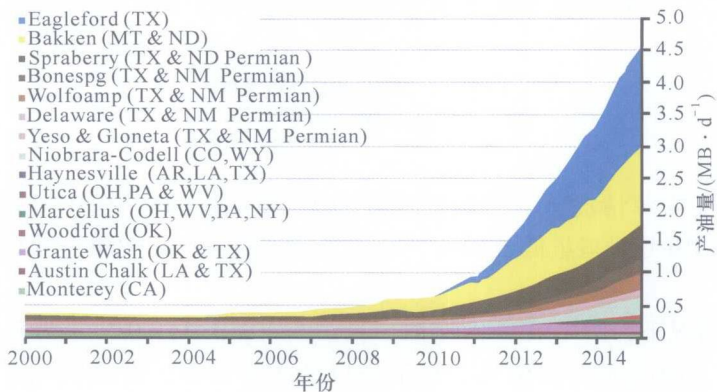


图 1-5 美国致密油产量情况
(据 EIA, 2015)

TX—得克萨斯州；MT—蒙大拿州；ND—北达科他州；NM—新墨西哥州；CO—科罗拉多州；WY—怀俄明州；PA—宾夕法尼亚州；WV—西弗吉尼亚州；OK—俄克拉何马州；CA—加利福尼亚州；NY—纽约州；OH—俄亥俄州；LA—路易斯安那州；AR—阿肯色州

此外，美国能源信息署 2014 年年度能源展望（AEO 2014）对美国原油生产与进口及油价（截止到 2040 年）进行了预测（图 1-6，图 1-7）。结果表明：

1) 在高油气资源情况下，2019 年原油产量为 11.3MB/d，2035 年为 13.3MB/d，其中致密油占 67%，达到高峰；相反，在 2012~2040 年间，原油进口量持续降低，2036~2040 年进口量几乎为 0；在 2040 年，油价为 125 美元/桶。

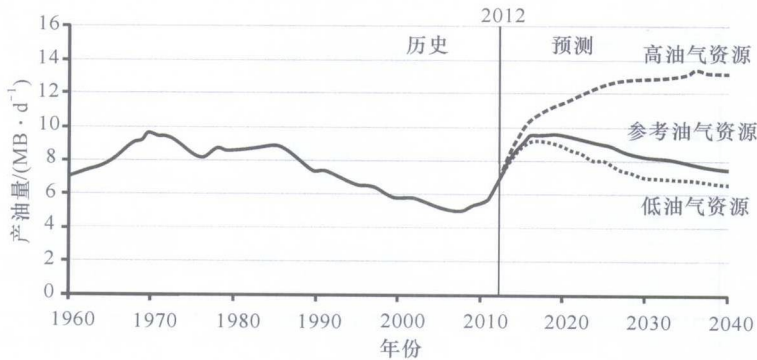


图 1-6 美国原油产量情况预测
(据 EIA, 2014)

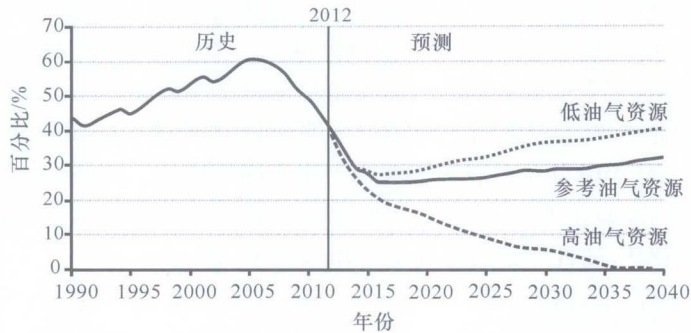


图 1-7 美国原油进口情况
(据 EIA, 2014)

2) 在低油气资源情况下, 美国原油在 2017 年产量为 9.10MB/d, 2040 年产量为 6.60MB/d; 而 2016 年进口量低至 26%, 2040 年回升到 40%; 2040 年原油油价为 145 美元/桶。

3) 在参考情况下, 2012 年美国原油产量为 6.50MB/d, 2019 年为 9.60MB/d, 致密油产量占 81%, 达到高峰; 2016 年, 原油进口量低至 25%, 而 2020 年, 原油进口量最低, 随后回升, 到 2040 年, 原油进口量回升到 32%; 在 2040 年, 油价为 141 美元/桶。

在储量方面, 归因于水平井和水力压裂等资金密集型技术在致密油储层中的应用, 美国原油和凝析油伴生气探明储量在 2012 年增加了 4.5BB, 这是美国原油探明储量连续增长的第四年 (图 1-8), 其中, 90% 以上的致密油探明储量增长来源于 Eagleford、Bakken、Barnett、Marcellus、Niobrara 五大致密油地层 (表 1-3)。可见, 开发致密油大大增加了美国原油的探明储量。在美国各州中, 得克萨斯州增加的石油探明储量最大, 增加近 3BB。其中, Eagleford 地层致密油的探明储量为 3.4BB, 首次超过了威利斯顿盆地 Bakken 地层的石油储量 (探明储量 3.2BB), 成为美国最大的致密油地层。同年, 在威利斯顿盆地 Bakken 地层及其下部的 Three Forks 地层中的钻井结果, 使北达科他州的原油储量净增加了 1.1BB。

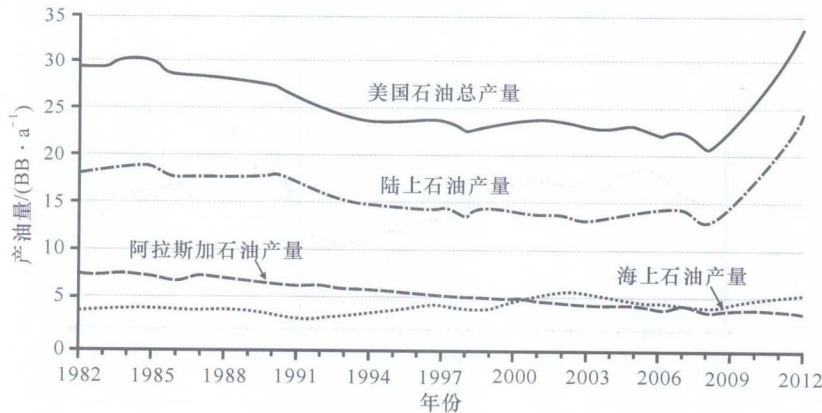


图 1-8 美国原油生产趋势 (1982~2012 年)
(据 EIA, 2014)

表 1-3 2011 年和 2012 年美国致密油储量与产量情况

盆地	地层	州	2011 年产量 MB	2011 年储量 MB	2012 年产量 MB	2012 年储量 MB
墨西哥海湾	Eagleford	TX	71	1251	209	3372
威利斯頓	Bakken	ND、MT、SD	123	1998	213	3166
福特沃斯	Barnett	TX	8	118	10	66
阿巴拉契亚	Marcellus	PA、WV	—	—	4	72
丹佛-朱尔斯堡	Niobrara	CO、KS、NE、WY	2	8	3	14
总计	—	—	204	3375	439	6690
其他致密油	—	—	24	253	41	648
全美总计	—	—	228	3628	480	7338

注：TX 为得克萨斯州；ND 为北达科他州；MT 为蒙大拿州；SD 为南达科他州；CO 为科罗拉多州；WY 为怀俄明州；PA 为宾夕法尼亚州；WV 为西弗吉尼亚州；KS 为堪萨斯州；NE 为内布拉斯加州。

(据 EIA, 2014)

三、加拿大致密油资源

加拿大是世界上第五大石油出口国，致密油资源同样具有非常好的前景。加拿大的致密油主要产于西加拿大沉积盆地（Western Canada Sedimentary Basin, WCSB），始于 2005 年萨斯喀彻温省东南以及马尼托巴省西南的 Bakken 地层。加拿大西部有大量轻质致密油储层，既有常规油藏（如 Cardium 地层的 Pembina 油田）周边的资源，也有全新的局部资源。在西加拿大沉积盆地，有 4 个地区不同储层都含有致密油：Bakken 或 Exshaw 地层（马尼托巴、萨斯喀彻温、艾伯塔和英属大不列颠）；Cardium 地层和 Beaverhill Lake 地层（艾伯塔）；Viking 地层（萨斯喀彻温、艾伯塔）；Lower Shaunagvon 地层（艾伯塔和英属大不列颠）；Duvernay 或 Muskwa 地层（艾伯塔）；Lower Amaranth 地层（马尼托巴）。2010 年致密油开发已经延伸到盆地的其他储层，水平井数量从 2005 年的 10 口增加至 2010 年的 140 口。Bakken 页岩致密油产量在 2011 年 3 月超过了 0.078MB/d。目前，艾伯塔盆地已经是西加拿大的主要致密油产区。

西加拿大盆地致密油主要分为八大区带（表 1-4），但是盆地总储量目前尚未查明。加拿大 WCSB 公司目前已经确认了超过 0.5BB 的探明和可能致密油储量。预计随着勘探活动的增加，储量将会进一步上涨。目前，作业公司已经公开报道了加拿大境内 Bakken 的探明和可能储量是 0.225BB。此外，Cardium 地层（艾伯塔省）储量为 13MB，Viking 地层（艾伯塔省和萨斯喀彻温省）储量为 58MB，Lower Shuanavon 地层（艾伯塔省）储量为 93MB。加拿大东部也被认为存在致密油。在西部的纽芬兰岛，一口特别设计用来测试 Green Point 地层致密油储量的井已经完成，作业商在 2012 年 1 月进行了多种测试。魁北克 Anticosti 岛上奥陶系 Macasty 页岩（相当于魁北克南部 Utica 页岩气储层）多年来已知为非常好的烃源岩，最近报道的岩石分析证实在细粒岩石层序里也存在轻质油。同期地层位于俄亥俄州的 Utica 页岩目前也被认定为主要存在页岩油气藏。

表 1-4 西加拿大致密油地层地质参数

地层	Bakken/ Exshaw	Cardium	Viking	Lower Shaunavon	Monteney/ Doig	Duvernay/ Muskwa	Beaverhill Lake	Lower Amaranth
类型	致密油	致密油	致密油	致密油	致密油	页岩油	致密油	致密油
所属省	MB/SK/ AB/BC	AB	AB/SK	SK	AB	AB	AB	MB
是否有常规 石油产出	是	是	是	是	是	否	是	是
典型深度/ft ^①	2951 ~ 8197	3934 ~ 7541	1967 ~ 2951	4262 ~ 5246	2623 ~ 7213	>6557	6557 ~ 9508	2623 ~ 3278
已报道储量 MB	225	130	58	93	—	—	—	—
单井典型初始 产油量/ (B · d ⁻¹)	120 ~ 250	150 ~ 500	100 ~ 200	100 ~ 250	200 ~ 600	未知	250 ~ 2000	100 ~ 200

注：MB 为马尼托巴省；SK 为萨斯喀彻温省；AB 为艾伯塔省；BC 为不列颠哥伦比亚省。

(据 Johnson and Wall, 2012)

尽管加拿大国家能源委员会 (National Energy Board, NEB) 已经认定加拿大致密油资源处于起步阶段，但该区致密油具有非常好的前景。2010 年致密油日产量超过 0.16MB，而同年加拿大新发现陆地原油产量只有 0.276MB/d。若以 0.134MB/d 的开采速度进行计算，当前 0.5BB 的探明和概算致密油储量能够保持 10 年。同美国一样，西加拿大沉积盆地致密油产量已经扭转了加拿大常规石油长期递减的趋势。2010 年底，加拿大轻质油产量大约较 2009 年底增长了 9%，主要来自致密油产量的增长。从图 1-9 可以看出，截止到 2011 年 1 月，西加拿大沉积盆地致密轻质油产量中，Bakken 地层致密油产量最高，约占 40%，其次为 Cardium 地层。萨斯喀彻温省致密油在 2011 年第一季度产量是 0.09MB/d，马尼托巴省产量达到 0.025MB/d。据艾伯塔能源保护委员会 (Alberta Energy Resources Conservation Board, AERCB) 2011 年预测，2014 年艾伯塔致密油日产量会增加 0.17MB。

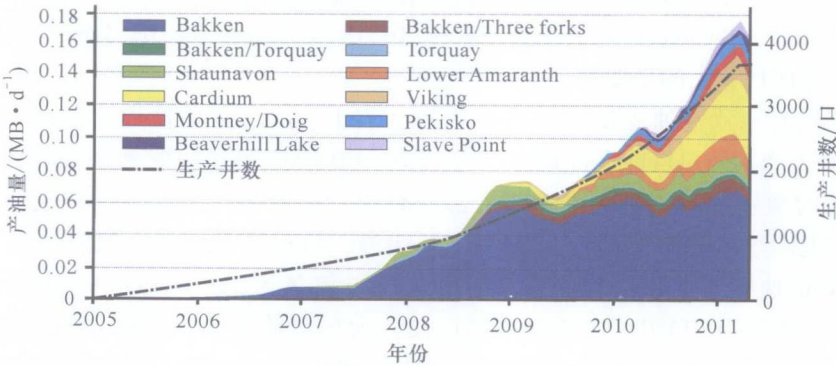


图 1-9 西加拿大沉积盆地致密油产量情况
(据 NEB, 2011)

① 1ft=0.3048m