

美国页岩油勘探开发现状与前景展望

周庆凡¹,金之钧¹,杨国丰¹,董宁^{1,2},尚柱成²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石化休斯敦研发中心,美国休斯敦 TX 77006)

摘要:系统介绍了美国页岩油(致密油)勘探开发现状与发展前景。目前,美国页岩油区带分布广泛,遍及二叠盆地、威利斯顿盆地、墨西哥湾盆地和阿纳达科盆地等。页岩油储量总体呈增长趋势,2017年末页岩油证实储量占全美石油证实储量的比例接近50%。美国页岩油产量主要来自二叠盆地、巴肯和伊格尔福特三大页岩油区,目前其产量占全美页岩油产量的近80%;有利地质条件是这三大页岩油区发展的基础。受2014年油价暴跌影响,美国页岩油气作业钻机明显减少,页岩油产量有所下降;但自2016年中期开始,产量恢复增长,屡创新高。美国待发现的页岩油资源丰富,具有良好的发展潜力。根据预测,未来10年页岩油产量还将持续增长,是美国原油产量增长的主要来源。

关键词:产量;作业钻机数;可采资源量;证实储量;致密油;页岩油;美国

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Shale oil exploration and production in the U. S. : Status and outlook

Zhou Qingfan¹, Jin Zhijun¹, Yang Guofeng¹, Dong Ning^{1,2}, Shang Zhucheng²

(1. *Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;*

2. Sinopec Houston Tech LLC, Houston, TX 77006, USA)

Abstract: Shale oil (tight oil) plays are widely distributed in Permian, Williston, GOM, Anadarko and many other sedimentary basins in the U. S. The proved reserves of shale plays keep increasing year by year and account for about half of U. S. proved crude oil reserves. Approximately 80% of shale oil production comes from Permian Basin, Bakken and Eagle Fords plays. Favorable geological conditions are the fundamental factor for the shale oil development in the U. S. Affected by the slump in oil prices in 2014, the count of active rigs in the U. S. shale plays dropped dramatically, leading to the decrease of shale oil production. But the growth of shale oil production has recovered and made new highs since mid-2016, indicating a great potential for shale oil development in the U. S. The U. S. shale oil production is expected to keep increasing in the next decade, and to be the primary source of oil production growth in the U. S.

Key words: oil production, active rig count, recoverable resource, proved reserve, tight oil, shale oil, the U. S.

本文所说的页岩油是广义的页岩油概念,泛指蕴藏在页岩以及致密的砂岩和碳酸盐岩等含油层中的石油资源^[1]。美国是世界上实现页岩油商业开发最早的国家,也是目前页岩油产量最大的国家。美国页岩油的成功开发不仅大幅提高了美国原油的供应能力,也对世界原油市场格局产生了极大影响,得到广泛的关注。2014年下半年的原油价格暴跌一度给美国页岩油发展带来了严峻挑战,但其在低油价环境下表现出了顽强的生命力,不仅成功度过了油价寒冬,还保持了产量增长。经过十几年的发展,美国页岩油发展现状如何?页岩油主要产自哪里?发展潜力和前景

怎样?本文通过大量的文献调研和现场考察,对以上问题作了系统的回答。

1 页岩油开发概况

根据美国能源信息署(EIA)的资料,美国页岩油区带分布广泛。页岩油主要产自威利斯顿盆地的巴肯(Bakken)区带,墨西哥湾盆地西部的伊格尔福特(Eagle Ford)区带,二叠盆地的沃尔夫坎普(Wolfcamp)、博恩斯普林(Bone Spring)和斯普拉贝里(Sparberry)区带,丹佛盆地的奈厄布拉勒(Niobrara)区带,以及阿纳

收稿日期:2019-03-07;修订日期:2019-03-11。

第一作者简介:周庆凡(1962—),男,教授级高级工程师,油气发展战略与勘探规划部署。E-mail:zhouqingfan_syky@sinopec.com。

基金项目:中国科学院咨询项目《中国页岩油(致密油)发展战略研究》(2017—2019)(KKBE170026)。

达克盆地的伍德福德(Woodford)区带(图1)。

1.1 页岩油储量

根据 EIA 最新发布的《美国油气证实储量报告》^[3],截止 2017 年底,美国页岩油证实储量为 199.73×10^8 bbl,比 2016 年增加 44.18×10^8 bbl,约占当年美国原油和凝析油总证实储量的 48%;其中,90%以上的页岩油证实储量来自三大页岩油区带(表 1)。2017 年,二叠盆地的页岩油证实储量大幅增长,增量超过 60%,证实储量增至 83.2×10^8 bbl,使其成为美国第一大页岩油资源区;巴肯区带以 54.5×10^8 bbl 的页岩油证实储量退居第二位;第三大页岩油资源区是墨西哥湾盆地西部的伊格尔福特区带,证实储量为 48.2×10^8 bbl。奈厄布拉勒和任德福德等其他页岩区带的页岩油证实储量相对以上三大区带小得多(表 1)。

1.2 页岩油产量

美国的页岩油开发始于 20 世纪 50 年代的威利斯顿盆地,但产量一直较低。因为美国气价下降致使页岩气开发效益下降甚至亏本,导致页岩气开发公司在 2005 年左右开始转向页岩油开发,美国的页岩油开发取得重大突破,产量从 2009 年开始进入快速增长期。受 2014 年油价下跌影响,美国页岩油产量在 2015 年 3 月达到

468×10^4 bbl/d 的阶段峰值后,进入连续 18 个月的递减期,在 2016 年 9 月达到 375×10^4 bbl/d 的阶段低值后持续快速回升;2017 年的平均产量已恢复至 2015 年峰值水平,2018 年继续大幅增长,全年平均产量已达 643.6×10^4 bbl/d;2019 年 1 月日均产量近 740×10^8 bbl(图 2)。

1.3 作业钻机数与完钻待完井数

作业钻机数是反映页岩气和页岩油勘探开发活动的一项重要指标,也与页岩气和页岩油产量有密切关系。近 10 年,美国页岩气和页岩油产量的快速增长与作业钻机数快速增长密不可分。从美国主要页岩区带 2007 年以来投入作业钻机数的变化情况可知,因为各区带投入勘探开发的时间差异,作业钻井数量增长时间先后有异,作业钻机达到高峰的时间也有所不同,但是在 2010—2015 期间,都经历了作业钻机快速增长并达到高峰的过程。这主要是因为受 2014 年下半年油价断崖式下跌并一直低迷,导致美国页岩油气投资大幅压缩的影响。直到 2016 年 6 月左右,这一局面才开始扭转,作业钻机数量恢复增长(图 3)。

为应对石油价格的低迷环境,美国从事页岩油作业的公司调整了策略,在实施压缩勘探开发投资、把有限投资集中到页岩油的核心区等措施的同时,还采取了先钻井延迟完井的策略,使得近几年主要页岩区的



图 1 美国本土页岩区带分布^[2]

Fig. 1 Shale plays distribution in the U. S. lower 48 states^[2]

表 1 美国主要盆地页岩油证实储量^[3]

Table 1 Proved reserves of shale oil in major U. S. basins^[3]

盆地/地区	区带	页岩油证实储量/(10 ⁸ bbl)	
		2016 年	2017 年
二叠盆地	博恩斯普林、 沃尔夫坎普	49.60	83.19
威利斯顿盆地	巴肯	52.26	54.47
墨西哥湾盆地西部	伊格尔福特	41.63	48.15
阿纳达科盆地	伍德福德	3.89	4.12
阿巴拉契亚盆地	马塞勒斯	1.39	2.79
丹佛盆地	奈厄布拉勒	2.25	2.32
福特沃斯盆地	巴奈特	0.22	0.20
其他		4.31	4.49
美国总计		155.55	199.73

完钻待完井(DUC)的页岩油气井数量不断上升。2017年,美国主要页岩区带的平均月度完钻待完井井数接近 6 100 口,是自 EIA 统计这类井以来的年度最高水平;2018 年继续增长,连续突破了 7 000 口和 8 000 口大关,全年平均超过了 7 500 口/月;2019 年 1 月继续增长,已接近 8 800 口,再创月度新高(图 4)。

2 三大区带地质特征与开发状况

美国页岩油产量主要来自二叠盆地、巴肯和伊格尔福特三大页岩油区。据 EIA 资料,2019 年 2 月美国页岩油产量近 80%产自这三大区^[5]。

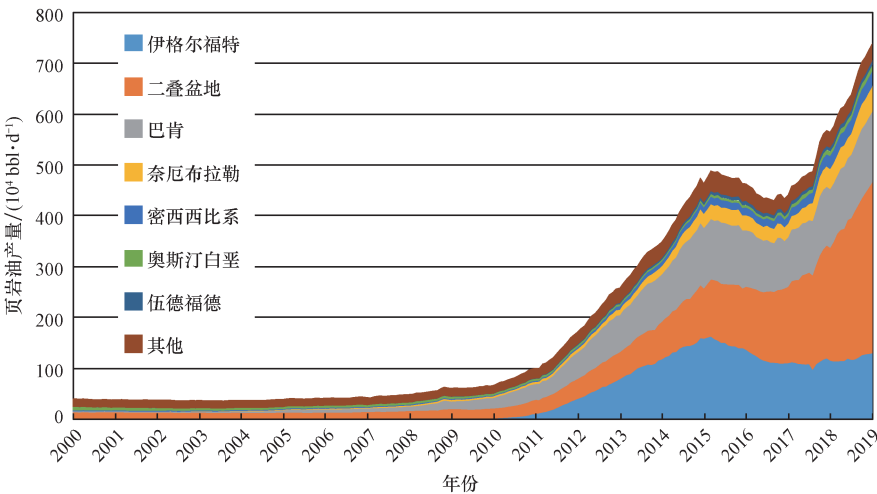


图 2 2000—2019 年美国主要页岩区带页岩油产量变化^[4]

Fig. 2 Shale oil production in major U. S. shale plays from 2000 to 2019^[4]

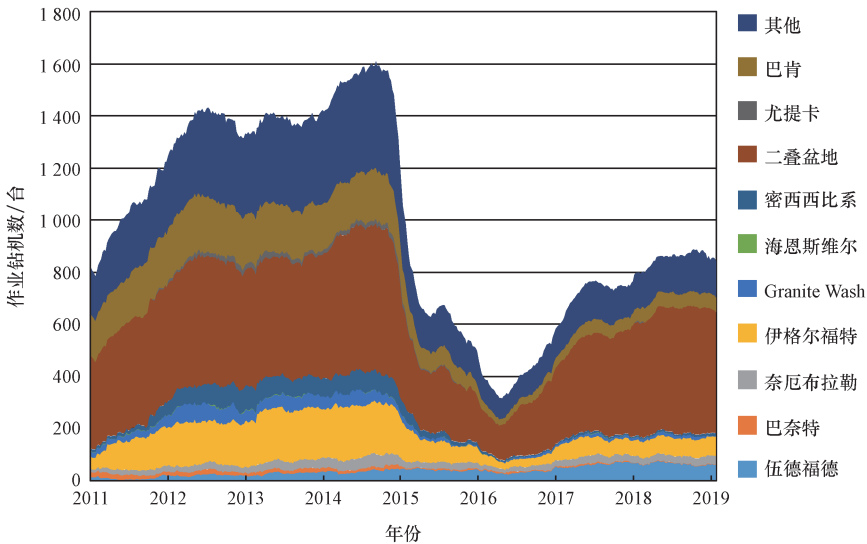
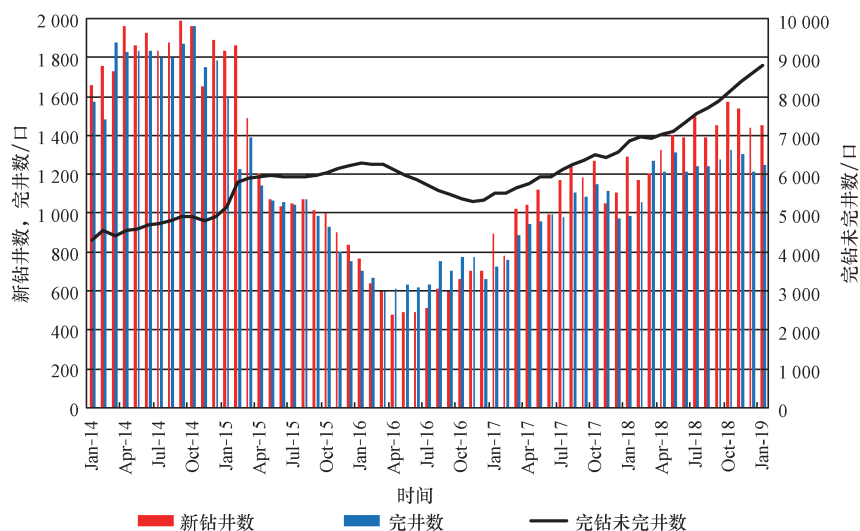
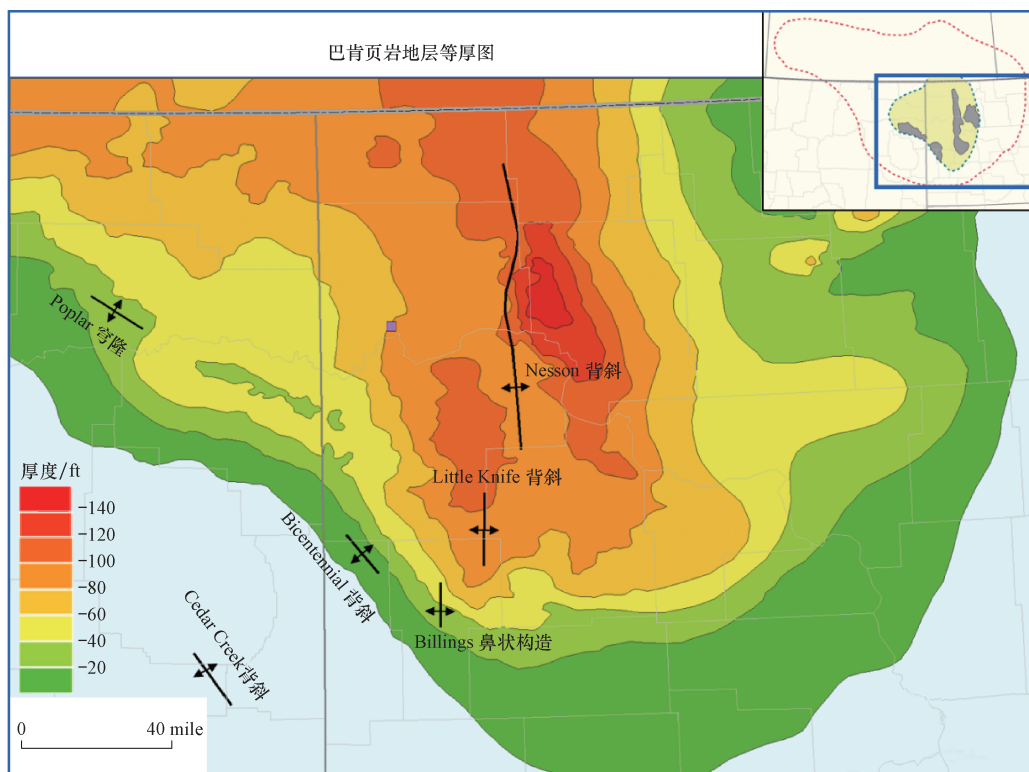


图 3 美国主要页岩油区带作业钻机数变化^[5]

Fig. 3 Change in the count of active rigs in major U. S. shale oil plays^[5]

图4 美国主要页岩区带完钻待完井井数变化^[5]Fig. 4 Change in the number of drilled but uncompleted wells in major U. S. shale plays^[5]图5 威利斯顿盆地美国境内巴肯组等厚图^[11]Fig. 5 Thickness contours of the Bakken Formation in the U. S. part of Williston Basin^[11]

2.1 巴肯区带

威利斯顿盆地的巴肯页岩区带是美国页岩油开发的发源地,目前是美国第二大页岩油产区。巴肯组沉积于晚泥盆世—早密西西比世(360 Ma)浅陆架中的海槽环境。巴肯页岩油区主力产层包括巴肯组和三叉组。巴肯组分为上、中、下3段,呈“三明治”结构^[6]。上、下巴肯段为石英含量较高的页岩,有机碳含量

(TOC)平均为2%~12%,个别地区可高达20%,热成熟度 R_o (镜质体反射率)为0.6%~1.0%;中巴肯段为富含石灰质和白云质的细—粉砂岩,部分小层富含黄铁矿,孔隙度为8%~12%,是巴肯区带页岩油的主力层位。巴肯组上、中、下3段的厚度比例在盆地中不同部位有所变化,整个巴肯组厚度从边缘的0厚度到沉积中心地带约150 ft(45.72 m)(图5),主要产区厚度在50~150 ft(15.24~45.72 m)。

上、下巴肯段页岩有机质类型为 I 型干酪根,大部分地区成熟度在生油窗内,但盆地的东部和北部也存在相当面积的未成熟区。巴肯区带主要产区地层压力梯度为 0.66 ~ 0.78 psi/ft (14.93 ~ 17.64 MPa/km),超出了静水压力梯度 0.465 psi/ft (10.52 MPa/km),是超压地层。研究发现,压力梯度和页岩厚度、成熟度有一定的相关性,生油层较厚,成熟度较高,地层压力系数较高,产能会比较好。

巴肯区带页岩油开发始于 20 世纪 50 年代,当时发现了美国的第一个页岩油藏。自 2000 年以来,巴肯中段页岩油开发的突破,使巴肯区带成为美国页岩油开发的热点地区,作业钻机数和页岩油产量快速增长。在 2014 年 12 月到达 122×10^4 bbl/d 的产量峰值后,由于油价暴跌导致作业钻机数快速下降,连续两年产量呈总体下降趋势,2016 年底时一度降至 92×10^4 bbl/d。但自 2017 年以来,该区页岩油产量再度恢复增长,2017 年底时产量超过 110×10^4 bbl/d。2019 年 2 月,巴肯区带的页岩油产量已达到 144×10^4 bbl/d 的水平,又创新高(图 6)。

2.2 伊格尔福特区带

伊格尔福特页岩是一套晚白垩世的沉积岩,由富有机质的海相页岩构成,在南德克萨斯州的大部分地区都有分布,面积约 $2\,000\text{ mile}^2$ ($5\,180\text{ km}^2$)。这套页岩在露头中也有出露。这套富含石油和天然气的地层从韦布县(Webb)和马弗里克县(Maverick)境内的德克萨斯-墨西哥边界线向东德克萨斯州延伸了 400 mile (644 km),宽度大约为 50 mile (80 km)。伊格尔福特组的分布和厚度变化受区域构造控制。在西南部的马弗里克盆地厚度最大,向东北部的 San Marcos 隆起厚度逐渐减薄,平均厚度为 250 ft (76.2 m) (图 7),埋深为 0 ~ 17 000 ft (0 ~ 5 181.6 m)。

伊格尔福特页岩矿物含量中,钙质含量为 40% ~ 90%,泥质含量为 15% ~ 30%,硅质含量为 10% ~ 29%。这套页岩中含有大量的碳酸盐,增强了其脆性,有利于实施水力压裂作业。它的总有机碳含量(TOC)为 2% ~ 12%,热成熟度(R_o)为 0.45% ~ 1.40%,孔隙度为 8% ~ 12%,压力梯度为 0.5 ~ 0.8 psi/ft (11.3 ~ 18.1 MPa/km)。该组划分为上、下两个单元^[7],伊格尔福特组上段为海退期沉积的浅灰-深灰色互层状钙质泥岩,伊格尔福特组下段以海进期沉积的深灰色泥岩为主。伊格尔福特组顶部与 Austin 白垩不整合接触,下伏 Buda 组灰岩。伊格尔福特组下段富有机质钙质泥岩是主要目标,向东北部 San Marcos 隆起逐渐变化为较多硅质的 Pepper 页岩,Pepper 页岩沉积在东德克萨斯盆地,属远端三角洲相。Pepper 页岩内不连续的低渗砂岩是该区带页岩油主要的钻井和完井目的层。伊格尔福特组从西北向东南下倾,深度从露头变化到 17 000 ft (5 181.6 m)。由于伊格尔福特组埋深变化很大,其热成熟度(R_o)从 0.45% 变到 1.40%,致使其油气分布平面分带性十分明显,从西北到东南从原油、凝析油到干气成带分布,油气比较高。

伊格尔福特页岩区带是继巴肯页岩油区带之后发展起来的又一个重要页岩油产区。该区规模开发始于 2008 年,页岩油产量快速增长,2012 年末其产量超越巴肯区带,于 2015 年 3 月达到产量峰值,日均产量约为 171×10^4 bbl;随后产量持续下降,2017 年末才停止下降,产量恢复增长,但 2018 年下半年又被巴肯区带反超。2019 年 2 月,伊格尔福特区带的页岩油产量达 143×10^4 bbl/d (图 8),目前是美国页岩油第三大产区。

2.3 二叠盆地

二叠盆地位于德克萨斯州和新墨西哥州,构造上属

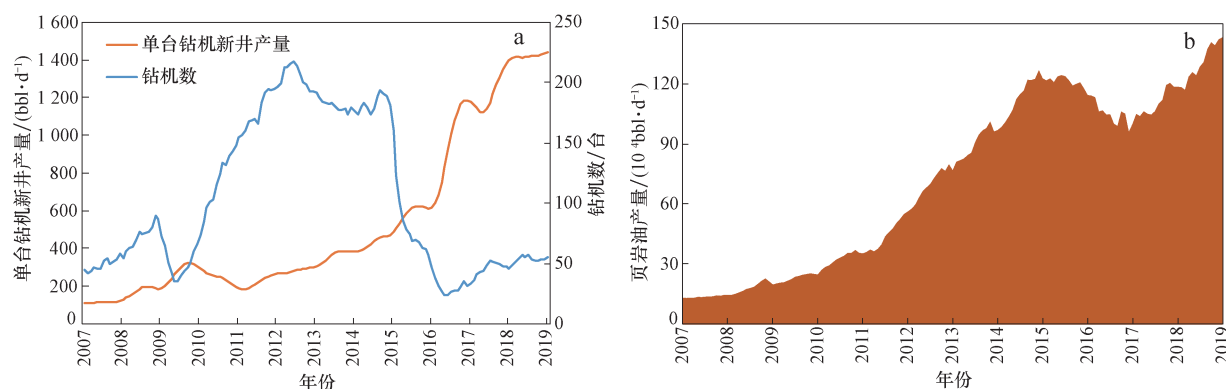


图6 巴肯页岩区钻机数(a)及页岩油产量变化(b)^[5](资料截止2019年1月)

Fig.6 Active rig counts (a) and shale oil production change (b) in the Bakken shale play^[5] (as of Jan. 2019)

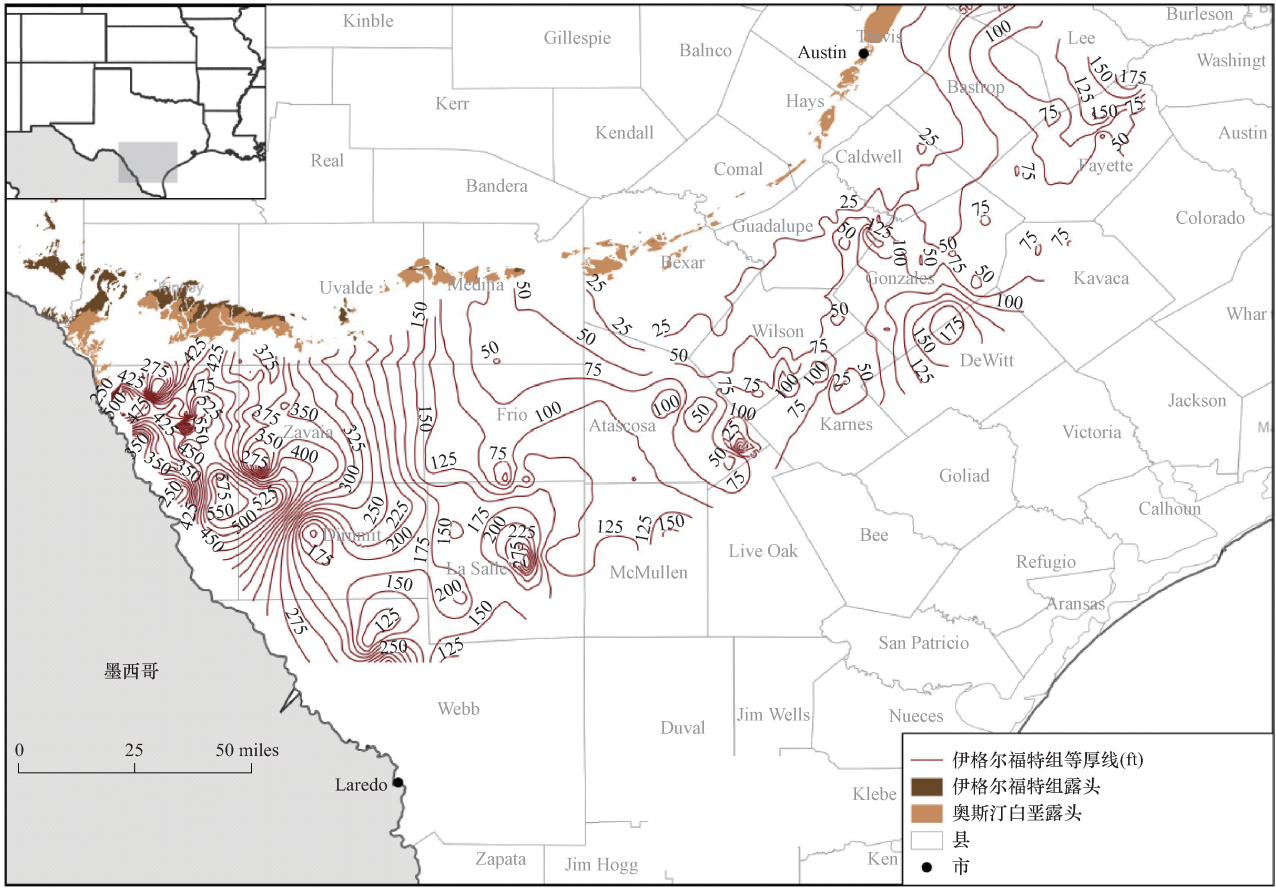


图7 墨西哥湾盆地西部伊格尔福特组等厚图^[7]

Fig.7 Thickness contours of the Eagle Ford Formation in the Western Gulf of Mexico Basin^[7]

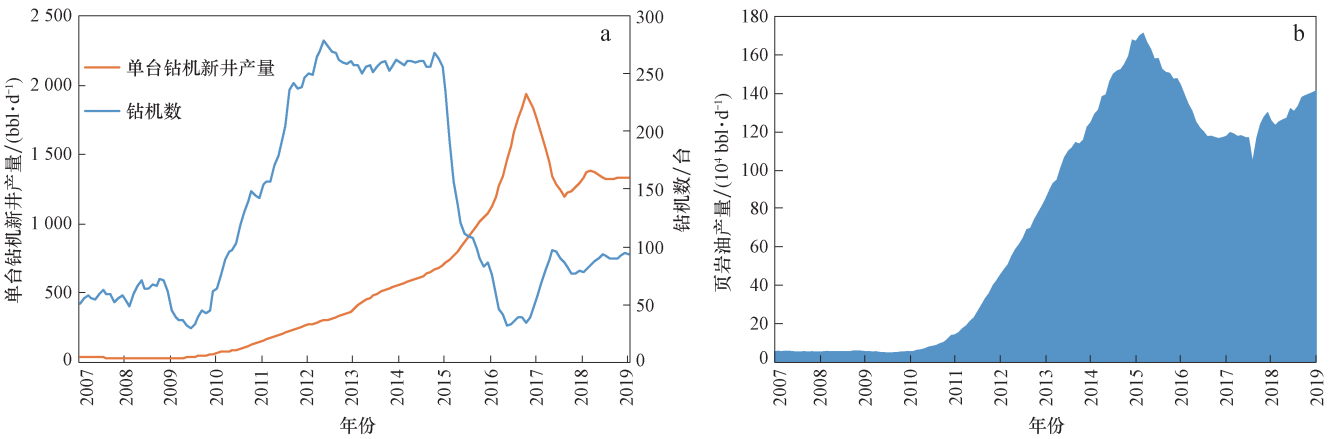
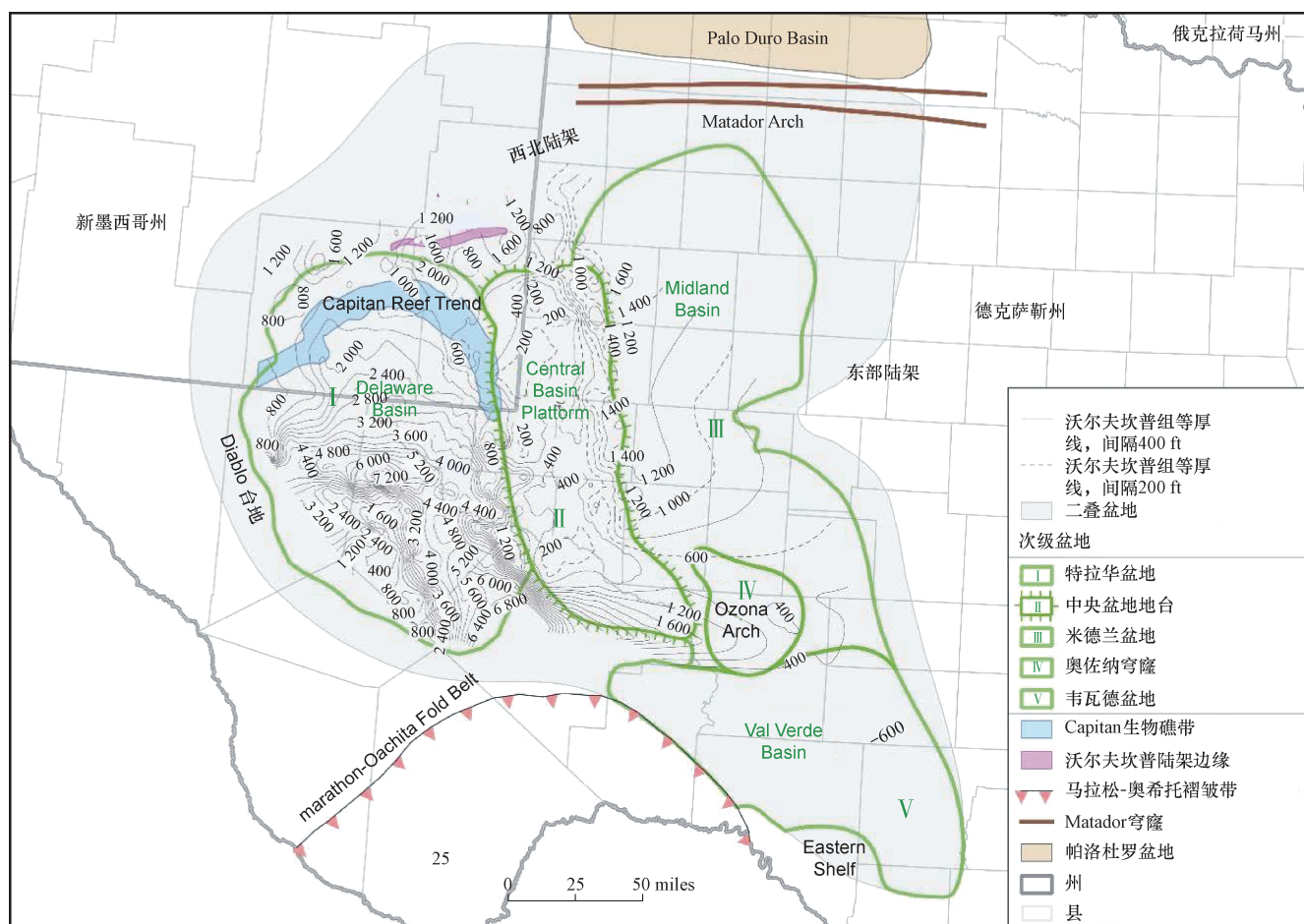


图8 伊格尔福特区带钻机数(a)及页岩油产量变化(b)^[5](资料截止2019年1月)

Fig.8 Active rig counts (a) and shale oil production change (b) in the Eagle Ford play^[5] (as of Jan. 2019)

于马拉松-沃希托河造山带前陆,面积75 000 mile²。二叠盆地发育于中石炭世的开阔海域。现今的二叠盆地总体呈NW-SE向,主要3个构造单元组成,即特拉华盆地、中央台地和米德兰盆地(图9)。特拉华盆地和米德兰盆地的构造发展主要受中央台地抬升的影响,其次是马拉松-沃希托河造山带的逆掩作用。宾夕

法尼亚纪和沃尔夫坎普期,米德兰盆地和特拉华盆地的快速沉降和中央台地的抬升导致盆地的差异发育。由于基底的差异运动,中央台地的抬升导致了米德兰盆地和特拉华盆地的差异沉降和不同的盆地形态。构造运动持续到沃尔夫坎普期末,两个次级盆地快速变形和沉降停止,但是整个盆地的沉降持续到二叠纪末^[8]。

图9 二叠盆地沃尔夫坎普组等厚图^[8]Fig. 9 Thickness contours of the Wolfcamp Formation in the Permian Basin^[8]

二叠盆地拥有多套页岩油层系,如全盆分布的沃尔夫坎普组、特拉华盆地的博恩斯普林组和米德兰盆地的斯普拉贝里组,其中沃尔夫坎普组潜力最大。近期产自沃尔夫坎普组的页岩油产量快速增长,已成为二叠盆地页岩油的主力来源。

沃尔夫坎普页岩为二叠纪沃尔夫坎普期沉积的富有机质地层,在盆地的3个次级单元都有分布,其构造和地层厚度整体受基底构造控制。二叠盆地沃尔夫坎普页岩厚度在200~7 050 ft(60.96~2 148.84 m),其中特拉华盆地800~7 000 ft(243.84~2 133.60 m),米德兰盆地400~1 600 ft(121.92~487.68 m),中央台地200~400 ft(60.96~121.92 m)(图9)。沃尔夫坎普组为一套复杂的地层单元,在盆地边缘主要为富有机质页岩和泥质碳酸盐岩。沉积和成岩作用控制了沃尔夫坎普组不均一性,由上到下分为4段(A,B,C,D)。这4段的岩性、化石含量、孔隙度、TOC和热成熟度明显不同,其中A段和B段是页岩油的主要钻探目标。据测井和生产资料,沃尔夫坎普组上部(A段和B段)有利目标层厚度大于1 000 ft(304.8 m),埋深大于

3 000 ft(914.4 m),孔隙度在4.0%~8.0%,TOC在1.0%~8.0%。

在特拉华盆地和米德兰盆地的深部贫氧区域沉积了大量有机质,岩心分析表明沃尔夫坎普组页岩有机碳含量(TOC)为2.0%~8.0%。沃尔夫坎普组岩相在整个盆地有明显变化。碳酸盐浊积岩源于中央台地,其TOC为0.6%~6.0%;而硅质碎屑为主的浊积岩来自周边高地,它的TOC通常小于1.0%;非钙质泥岩夹层的TOC高达8.0%。油样分析表明,沃尔夫坎普组页岩油主要源于海相Ⅱ型干酪根,部分产自Ⅲ型干酪根^[8]。

二叠盆地是美国最大的页岩油产区,也是唯一在2014年下半年油价暴跌时仍然保持页岩油产量增长的地区。由于二叠盆地良好的地质条件,具有多层页岩油叠加,资源丰富,加上其优越的市场环境,二叠盆地业已成为美国页岩油开发热点地区,也是近几年页岩油产量增长最快的地区。据EIA统计,2019年2月在二叠盆地作业页岩油气钻机近490台,占全美的50%以上,页岩油日产量已近 400×10^4 bbl,目前且仍呈上升趋势(图10)。

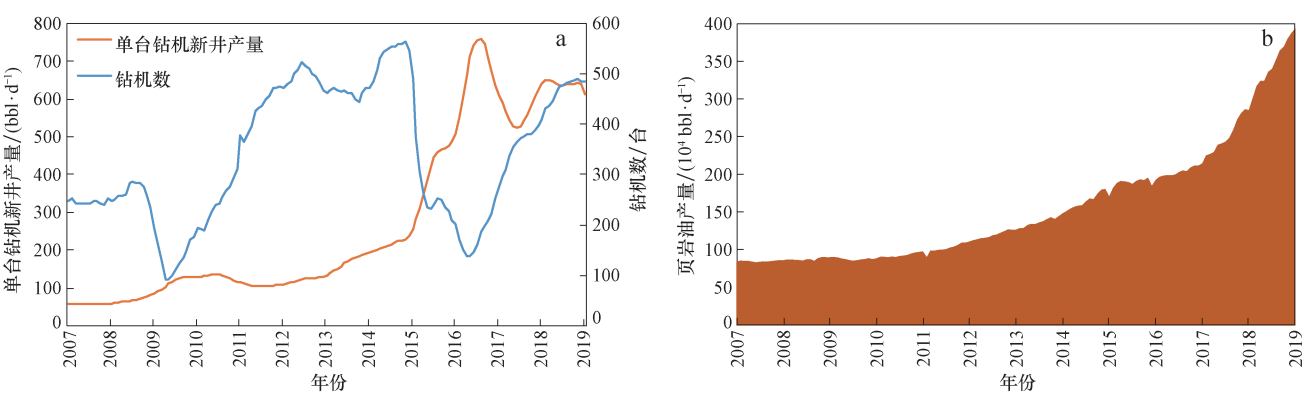


图 10 二叠盆地页岩区钻机数(a)及页岩油产量变化(b)^[5](资料截止 2019 年 1 月)

Fig. 10 Active rig counts (a) and shale oil production change (b) in the Permian Basin^[5] (as of Jan. 2019)

表 2 美国主要页岩油区待发现技术可采资源量评价^[15]

Table 2 Undiscovered technically recoverable resources assessment in the U. S. shale oil plays^[15]

评价区	评价单元 个数	待发现的资源量/(10 ⁶ bbl)				评价结果 发布时间
		F95	F50	F5	均值	
巴肯区 *	6	4 417	7 046	11 430	7 375	2013 年
伊格尔福特区 **	3	5 266	8 204	12 846	8 515	2018 年
米德兰盆地斯普拉贝里组	2	1 870	3 945	7 625	4 240	2017 年
米德兰盆地沃尔夫坎普组	6	11 430	19 041	31 468	19 948	2016 年
特拉华盆地沃尔夫坎普组 + 博恩斯普林组 + 阿瓦隆组	9	26 729	44 762	71 075	46 271	2018 年

注:资料来源自美国地质调查局(USGS),2013—2018。
* 巴肯区包括巴肯组和斯里福克斯组。
** 伊格尔福特区除伊格尔福特组外,还包括了其相关的诺曼阶-土伦价层系。

3 资源潜力与产量增长

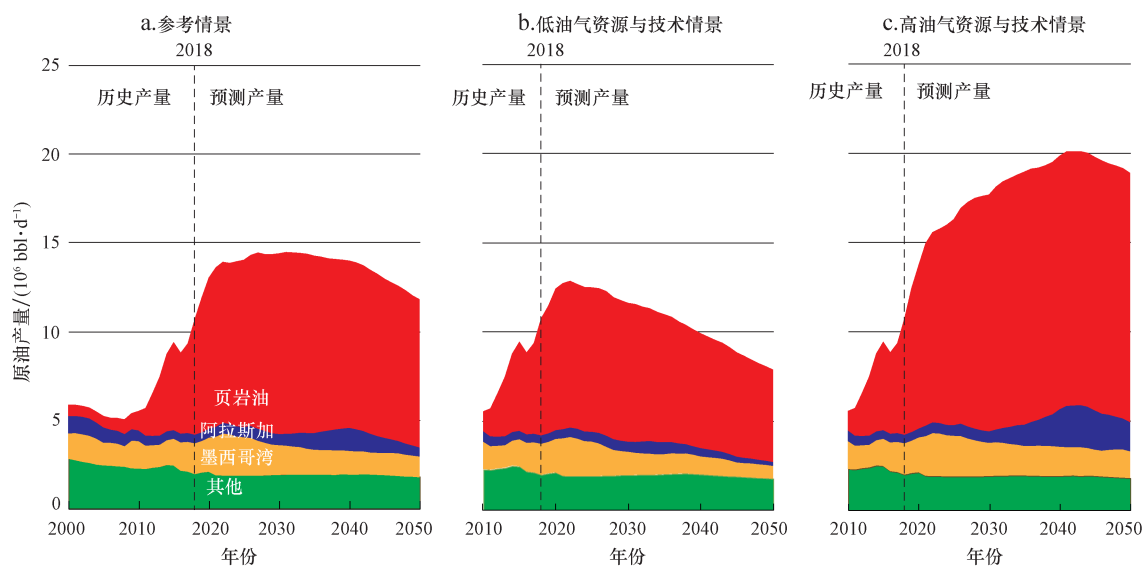
3.1 资源潜力

与页岩气一样,美国页岩油开发之所以取得巨大成功除了得益于技术进步、成熟的市场条件以及良好的基础设施等地上因素外,与其丰富的地下资源是分不开的。多家机构研究表明,美国具有丰富的页岩油资源。2013 年,EIA 发布全球页岩油气资源评价报告,美国页岩油技术可采资源量为 581×10^8 bbl,仅次于俄罗斯名世界第二位^[9]。在 2017 年 EIA 发布《Annual Energy Outlook 2017》报告时,引用的美国页岩油技术可采资源量为 903×10^8 bbl^[10]。美国地质调查局(USGS)利用大量开发井资料对美国三大主力页岩油资源量开展了更为精细的评价(表 2)^[11-15],仅这 3 个地区待发现的页岩油技术可采资源量就达到 863×10^8 bbl(均值)。其中,二叠盆地页岩油技术可采资源量达到 704×10^8 bbl,这是目前评价的世界范围内页岩油资源最为丰富的地区。这就不难理解二叠盆地为什么成为美国乃至世界页岩油产量最大的地区。

3.2 产量增长

目前,页岩油已经在美国的石油产量中占据了半

壁江山,已成为未来美国石油产量增长的主要来源。近年来,EIA 每年都发布页岩油产量预测,2019 年预测的页岩油产量比 2018 年的有明显提高^[16]。根据最新发布的《年度能源展望 2019》^[17],在参考情景下,随着油价复苏和成本降低,2031 年之前美国页岩油产量都将保持稳定增长态势,2031 年高峰产量达 $1\,028 \times 10^4$ bbl/d,比 2018 年预测的日产量峰值提高超过 200×10^4 bbl;到达峰值之后产量缓慢下降,到 2050 年产量会降至 840×10^4 bbl/d 左右。在高油气资源与技术情景下,即基于具有较高的单井 EUR(Estimated Ultimate Recovery,最终可采量)、较大的页岩油资源基础和长期的技术进步的前提下,与参考情景相比,其资源基础大而开发成本低,在此情景下,页岩油产量将呈高速增长态势,到 2035 年页岩油产量将达到 $1\,422 \times 10^4$ bbl/d 的峰值;随后产量略有下降,到 2050 年产量仍然维持在 $1\,400 \times 10^4$ bbl/d 的水平以上。在低油气资源与技术情景下,即低于参考情景的预期下,页岩油产量在预测区间内先呈短期增长,在 2022 年前后产量达到峰值;然后进入较长期的产量下降通道,到 2050 年基本与目前页岩油产量水平持平(图 11)。影响页岩油未来产量预测的主要因素是油价和开采技术的不确定性。未来油价和开发技术适应性的变化难以把握,它们的变化将直接影响页岩油开发。

图 11 不同情景下美国原油产量增长预测^[16]Fig. 11 Growth prediction of the U. S. crude oil production in various scenarios^[16]

4 结语

综上所述,尽管 2014 年油价断崖式下跌导致的油价低迷对美国页岩油勘探开发产生了影响,页岩油区带作业钻机数一度有明显减少,但是美国页岩油产量经历短期下降后又恢复增长,产量再创历史新高。美国页岩油产区广泛分布,形成了二叠盆地、巴肯区带和伊格尔福特区带三大主力产区。美国页岩油资源潜力巨大,二叠盆地是目前世界上页岩油最丰富的地区。在未来 10 年,美国页岩油产量将持续增长,展现良好的发展前景。

参 考 文 献

- [1] 周庆凡,杨国丰. 致密油与页岩油的概念与应用[J]. 石油与天然气地质,2012,33(4):541-544,570.
Zhou Qingfan, Yang Guofeng. Definition and application of tight oil and shale oil terms[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 541-544, 570.
- [2] US Energy Information Administration (EIA). Shale in the United States[EB/OL]. (2018-10). https://www.eia.gov/energy_in_brief/article/shale_in_the_united_states.cfm.
- [3] US Energy Information Administration (EIA). US crude oil and natural gas proved reserves, year-end 2017[R]. EIA, 2018.
- [4] US Energy Information Administration (EIA). Estimated monthly production derived from state administrative data[R]. EIA, 2019.
- [5] Baker Hughes. North America rig count[EB/OL]. (2019-03). <http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=79687&p=irol-reportsother>.

- [6] Sonnenberg S A, Pramudito A. petroleum geology of the giant Elm Coulee field, Williston Basin[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(9): 1127-1153.
- [7] US Energy Information Administration (EIA). Update to the EIA Eagle Ford play maps[R]. EIA, 2014.
- [8] US Energy Information Administration (EIA). Permian Basin Wolfcamp shale play, geology review[R]. EIA, 2018.
- [9] US Energy Information Administration (EIA). Technically recoverable shale oil and shale gas resources; An assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States[R]. EIA, 2013.
- [10] US Energy Information Administration (EIA). Assumption to the annual energy outlook 2017[R]. EIA, 2017.
- [11] US Geological Survey (USGS). Assessment of undiscovered oil resources in the Bakken and Three Forks Formations, Williston Basin Province, Montana, North Dakota, and South Dakota[R]. USGS, 2013.
- [12] US Geological Survey (USGS). Assessment of undiscovered oil and gas resources in the Eagle Ford Group and associated Cenomanian-Turonian strata, US Gulf Coast, Texas[R]. USGS, 2018.
- [13] US Geological Survey (USGS). Assessment of continuous resources in the Wolfcamp shale of the Midland Basin, Permian Basin Province, Texas[R]. USGS, 2016.
- [14] US Geological Survey (USGS). Assessment of undiscovered oil and gas resources in the Spraberry Formation of the Midland Basin, Permian Basin Province, Texas[R]. USGS, 2017.
- [15] US Geological Survey (USGS). Assessment of undiscovered oil and gas resources in the Wolfcamp shale and Bone Spring Formation of the Delaware Basin, Permian Basin Province, New Mexico and Texas[R]. USGS, 2018.
- [16] US Energy Information Administration (EIA). Annual energy outlook 2018 with projections to 2050[R]. EIA, 2018.
- [17] US Energy Information Administration (EIA). Annual energy outlook 2019 with projections to 2050[R]. EIA, 2019.

(编辑 李 军)