

美国页岩油资源分布特征与主控因素研究

白国平^{1,2}, 邱海华^{1,2}, 邓舟舟^{1,2}, 王文庸³, 陈君^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石化东北油气分公司, 长春 130062)

摘要:通过对美国页岩油资源的系统统计分析和主要页岩油盆地成藏要素的综合研究,揭示美国页岩油资源的分布规律与富集主控因素,为我国页岩油的勘探开发提供参考借鉴。美国页岩油总技术可采资源量为 1.50794×10^8 bbl,其中累计探明可采储量 365.40×10^8 bbl,探明率 24.2%。页岩油资源分布极不均衡,高度富集于二叠盆地,其次是海湾盆地和威利斯顿盆地。页岩油资源的富集主要受优质烃源岩规模、页岩层系顶底板和储集岩“甜点”规模等成藏要素的控制,前两者控制了页岩油的资源规模,后者控制了页岩油的产量规模。中国页岩油的勘探应特别关注大型沉积盆地内的选区和选层,发现新“甜点”和扩大已知“甜点”的规模是实现页岩油勘探新突破和页岩油增储上产的关键。

关键词:分布特征;富集主控因素;甜点;勘探启示;页岩油;美国

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Distribution and main controls for shale oil resources in USA

BAI Guoping^{1,2}, QIU Haihua^{1,2}, DENG Zhouzhou^{1,2}, WANG Wenyong³, CHEN Jun^{1,2}

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3. SINOPEC Northeast Oil Company, Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: Systematic analyses of statistical data of shale oil resources and an integrated investigation of geological elements in major shale oil basins in USA were made. They characterize the distribution features of shale oil resources and document the controlling factors for shale oil endowment in USA. The results provide insights for shale oil exploration and production in China. Recoverable shale oil resources amount to 1.51×10^9 bbl in USA, of which 36.5×10^9 bbl have already been proven with a discovery rate of 24.2%. The shale oil resources are unevenly distributed. The Permian Basin has the lion's share of the total, followed by the Gulf and Williston basins. The enrichment of shale oil resources is largely governed by the volume of high quality source rocks, the extensive top and bottom seals of shale oil plays and the scale of "sweet spots" in shale oil reservoir intervals. The former two control the total endowment of shale oil resources and the latter controls the production volume of shale oils. It is suggested that China's shale oil exploration should focus on the selection of favorable plays and their fairways in large sedimentary basins. The delineation of new "sweet spots" and the expansion of the extent of known "sweet spots" are the keys for the new breakthroughs of shale oil exploration and the increase of both shale oil production and reserves.

Key words: distribution feature; enrichment control factor; sweet spot; exploration implication; shale oil; USA

页岩革命从根本上改变了美国油气的对外依存度,页岩气产量的提高不仅巩固了自 2011 年以来美国全球第一大产气国的地位,而且使其于 2018 年成为了天然气净出口国,出口量达 $147 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1]。页岩油产量的大幅提升使得美国石油的对外依存度从历史最高点的 67.0% (2006 年) 降至 2018 年

的 25.2%。此外,美国页岩油革命对全球石油供需格局产生了根本性的影响,供大于需的关系结束了高油价,自 2015 年起,油价进入了低谷期,本轮的低油价也许还要持续数年。

国内外学者从不同角度探讨过美国页岩油的成藏条件、富集特征及其启示^[2-5],但涉及的对象

多是美国某个盆地^[6-8]、几个主要盆地内页岩油的成藏特征和富集规律^[4]或者国内外盆地之间页岩油地质特征的类比分析^[9]。然而,有关美国页岩油整体资源状况、分布特征和富集主控因素的研究尚不系统和全面,因此有必要对此开展进一步的研究。本文基于最新的美国页岩油资源的相关数据以及前人的研究成果,探讨美国页岩油资源的分布规律与富集主控因素,以期为我国页岩油勘探开发的进一步突破提供借鉴与启示。

1 页岩油术语体系

相对于页岩气而言,页岩油的涵义尚不统一,不同机构和研究人员定义出的页岩油概念不尽相同。国外机构(如 BGR^[10], EIA^[11], USGS^[12])和研究者(如 JARVIE^[2])多倾向于将页岩油(shale oil)与致密油(tight oil)等同起来,泛指储存于低渗含油层系(泥岩、页岩、粉砂岩、砂岩、泥灰岩、碳酸盐岩等)中的轻质石油(含凝析油)。与国外学者不同,我国学者则多倾向于将页岩油和致密油区分开来^[4, 13-14](表1)。

依据储存介质的差异,广义页岩油/致密油分为狭义页岩油和狭义致密油,并根据储集层的岩性,后者可进一步细分为致密砂岩油、致密灰岩油等^[13-14]。依据源储的上下配置关系,黎茂稳等^[4]将狭义致密油细分为源上、源内和源下致密油。如表1所示,国内学者定义出的狭义页岩油亦有部分储集于富有机质泥页岩中的致密夹层,但夹层是次要储集层,厚度占烃源岩层系总厚度的比例不超过20%^[4]。需要指出的是,国内学者提出的广义页岩油分类方案不能涵盖美国目前在产的所有页岩油类型,如源储一体的海湾盆地 Eagle Ford 页岩油的储集层为泥灰岩,岩性并非泥页岩,因而无法归属于表1中的具体页岩油类型。

依据页岩油赋存介质的差异和源储关系, JARVIE^[2]和 SONNENBERG 等^[15]将页岩油分为3类:基质型、裂缝型和混合型。基质型页岩油与页岩气类似,以源储一体和低基质渗透率为特征;裂缝

型页岩油源储一体或者非一体,以裂缝渗透率为主,基质渗透率极低;混合型页岩油与致密气类似,源储非一体,储集层为致密碎屑岩或碳酸盐岩。本文采用该分类方案,分析美国页岩油资源特征,除非特别标明,否则文中提及的页岩油均指广义页岩油。

2 美国页岩盆地

2.1 美国页岩油气盆地与产区

美国的页岩油气主要产自美国中东部的6个盆地(群)的7个页岩油气产区(图1),按近年来页岩油气的产量统计,依次为二叠盆地、阿帕拉契亚盆地、海湾盆地西部的 Eagle Ford 产区(包括 Eagle Ford 和 Austin Chalk 区带)、威利斯顿盆地、安纳达科盆地、海湾盆地东部的 Haynesville 产区和落基山盆地群(丹佛盆地、粉河盆地和帕克盆地)。威利斯顿盆地、二叠盆地和海湾盆地 Eagle Ford 产区以产页岩油为主,落基山盆地群和安纳达科盆地的页岩气产量高于页岩油产量,而阿帕拉契亚盆地和海湾盆地 Haynesville 组则以产页岩气占绝对优势。此外,加州圣华金等盆地的中新统 Monterey 区带也有少量的页岩油产量。

2.2 美国页岩油资源

参照石油工程师协会(SPE)油气资源管理体系(PRMS)^[17],本文采用的页岩油资源分类体系见表2。总可采资源量为总可采储量与待发现技术可采资源量之和,前者包括累计产量、剩余探明可采储量和未探明可采储量。

美国能源信息署(EIA)按月、按区带公布美国页岩油产量^[16],按年、按盆地公布剩余探明储量(可采,下同)^[18-21]以及按年、按区带公布待发现资源量(技术可采,下同)^[22],美国地质调查局(USGS)发布美国页岩油盆地以页岩区带为基本评价单元的待发现资源量^[12]。考虑到 USGS 的页岩油资评结果被广泛采用,置信度高,本文采用 USGS^[12]的资评结果。

2019年12月,EIA^[18]发布的2018年底美国页岩油剩余探明储量为 233.83×10^8 bbl(1 bbl ≈

表1 页岩油/致密岩分类体系

Table 1 Scheme for classification of shale oil/tight oil

分类	赋存介质	运移特征	按储集岩性细分 ^[13-14]	按源储配置关系细分 ^[4]
页岩油/ 致密油 (广义)	致密油(狭义)	泥页岩之外的致密岩石	源储非一体,有二次运移	(1) 源上致密油 (2) 源内致密油 (3) 源下致密油
	页岩油(狭义)	泥页岩及薄致密岩夹层	源储一体,无或有限二次运移	页岩油 页岩油(包含裂缝型页岩油)



图 1 美国页岩油资源量盆地分布

Fig.1 Distribution of shale oil resources in different basins in USA

表 2 页岩油资源分类方案

Table 2 Scheme for classification of shale oil resources

总地质资源量	已发现地质储量	总可采储量	累计产量
			剩余探明可采储量
			未探明可采储量
	不可采量		
待发现地质资源量	待发现技术可采资源量	不可采资源量	

注:表中红色标注的条目有系统的公开数据,其他的条目无系统的公开数据。

0.136 t);截至 2018 年底,美国累计产出的页岩油为 131.57×10^8 bbl; USGS^[12] 评估出的美国页岩油待发现资源量为 $1\ 142.54 \times 10^8$ bbl。三者之和即美国页岩油总资源量为 $1\ 507.94 \times 10^8$ bbl(表 3),其中页岩油累计探明储量(累计产量+剩余储量) 365.40×10^8 bbl,探明率为 24.2%。

3 美国页岩油资源分布特征

3.1 可采资源量

按盆地统计,美国页岩油资源主要富集于二叠盆地、海湾盆地和威利斯顿盆地,其页岩油资源量分

别为 $1\ 034.91 \times 10^8$ bbl, 195.56×10^8 bbl, 170.60×10^8 bbl,占美国页岩油资源量的 68.6%, 13.0%, 11.3%(表 3,图 1)。资源量排序第 4~6 位的盆地依次为阿帕拉契亚盆地(占 2.8%)、落基山盆地群(占 1.9%)和安纳达科盆地(占 1.4%),其他盆地的资源量合计为 16.66×10^8 bbl,仅占 1.1%(表 3)。

3.2 累计产量

美国的页岩油勘探开发可以追溯至 20 世纪初期,当时在加州圣华金等盆地发现了中新统 Monterey 组裂缝型页岩油藏。Monterey 页岩已有超过 100 年的产油史^[2],因此该区带(play)被视为美国最早投入开发的页岩油区带。2000 年(EIA 未公布 2000 年之前的系统数据),Monterey 页岩油产量为 21.84×10^4 bbl,占当年美国页岩油总产量的 16.9%,是仅次于二叠盆地 Spraberry 区带和海湾盆地 Austin Chalk 区带的第三大产页岩油区带。然而,Monterey 并未发展成一个重要的页岩油区带,截至 2018 年底,共累计产页岩油 3.52×10^8 bbl,仅占美国页岩油累计产量的 2.7%(表 4)。

美国页岩油产量在 2008 年之前增速平缓,

表3 美国页岩油资源数据

Table 3 U.S. shale oil cumulative production, proven reserves and undiscovered resources

盆地	主要产层	时代	累计产量/ 10 ⁸ bbl	剩余探明储量/ 10 ⁸ bbl	待发现资源量/ 10 ⁸ bbl	总资源量/ 10 ⁸ bbl	总资源量 占比/%	探明率/ %
二叠	Bone Spring, Spraberry 和 Wolfcamp	P ₁ -P ₂	45.68	110.96	878.27	1,034.91	68.6	15.1
海湾	Austin Chalk 和 Eagle Ford	K ₂	32.99	47.34	115.24	195.56	13.0	41.1
威利斯顿	Bakken 和 Three Forks	D ₃ -C ₁	30.49	58.62	81.49	170.60	11.3	52.2
落基山盆地群	Niobrara	K ₂	8.37	3.17	16.63	28.17	1.9	41.0
安纳达科	Mississippian 和 Woodford	D ₃ -C ₁	5.72	5.60	9.18	20.51	1.4	55.2
阿巴拉契亚	Utica	O ₃	1.01	3.45	37.07	41.53	2.8	10.7
其他	Monterey, Haynesville, Yeso 和 Glorieta 等	N ₁ , J ₃ , P ₂	7.31	4.69	4.65	16.66	1.1	72.1
合计			131.57	233.83	1 142.54	1 507.94		24.2

注:资料截至2018年底,原始数据源自EIA^[16,18-19], USGS^[12]。总资源量=累计产量+剩余储量+待发现资源量,探明率=探明储量(累计产量+剩余储量)/总资源量

表4 美国页岩油分类、地质特征和产量与待发现资源量

Table 4 Classification, geological features, production and undiscovered resources for shale oil plays in USA

盆地	页岩油区带	烃源岩	储集岩	类型 ¹⁾	累计产量 ²⁾		2019年产量		待发现资源量	
					值/ 10 ⁸ bbl	占比/ %	值/ 10 ⁸ bbl	占比/ %	值/ 10 ⁸ bbl	占比/ %
二叠	Spraberry	泥岩	砂岩、粉砂岩	混合型	21.03		5.89		45.51	
二叠	Bone Spring	泥岩	砂岩、粉砂岩	混合型	6.82		2.00		163.03	
海湾	Austin Chalk	泥灰岩	白垩岩	混合型	3.44	53.3	0.40	54.3	9.85	27.7
威利斯顿	Bakken/ Three Forks	页岩	石灰岩、白云岩、 粉砂岩	混合型	30.49		5.17		81.49	
落基山盆地群	Niobrara	页岩	泥灰岩	混合型	1.90		1.90		16.63	
二叠	Wolfcamp	泥岩	硅质泥岩	基质型	11.29		5.31		614.71	
二叠	Avalon	泥岩	硅质泥岩	基质型	0.36	33.6	0.22	37.0	55.02	64.1
海湾	Eagle Ford	泥灰岩	泥灰岩	基质型	29.55		4.53		53.35	
安纳达科	Woodford	页岩	硅质页岩	基质型	3.05		0.38		9.18	
加州盆地群	Monterey	页岩	硅质页岩	裂缝型	3.52	2.7	0.09	0.3	0.40	0.0
	其他			待定	13.67	10.4	2.37	8.4	93.37	8.2
合计					131.57		28.27		1 142.54	

1) 一个页岩油区带可同时发育不同类型的页岩油,本表所列仅为页岩油的主要类型。

2) 截至2018年底的累计产量。

2008年威利斯顿盆地 Bakken 页岩油投入开发,并成为当时的第一大产页岩油区带,产量开始明显上升(图2)。自2012年起,海湾盆地的 Eagle Ford 页岩油投入规模开发,美国页岩油产量呈现出加速上升的趋势,该区带于2017年11月超过 Bakken 区带成为了第一大产页岩油区带,不过很快就于2018年3月又被二叠盆地的 Spraberry 区带超越。Spraberry 区带目前仍是第一大产页岩油区带,其他的主力产页岩油区带依次为 Wolfcamp、Bakken/Three Forks 和 Eagle Ford 区带(表4,图2)。

截至2018年底,美国页岩油累计产量最高的盆地依次为二叠盆地、海湾盆地、威利斯顿盆地、

落基山盆地群和安纳达科盆地,累计产量分别为 45.68×10^8 , 32.99×10^8 , 30.49×10^8 , 8.37×10^8 , 5.72×10^8 bbl(表3),占美国页岩油累计总产量的34.7%,25.1%,23.2%,6.4%,4.4%,合计93.8%。

3.3 剩余探明可采储量

公开文献中没有以页岩油区带为统计单元的剩余探明储量资料,不过EIA在其每年发布的美国油气储量报告中有以盆地为统计单元的剩余探明储量信息。据可获取的最新资料,2018年底美国页岩油剩余探明储量为 233.83×10^8 bbl^[18],储采比12:1。剩余探明储量主要分布于二叠盆地(110.96×10^8 bbl)、威利斯顿盆地(58.62×10^8 bbl)和

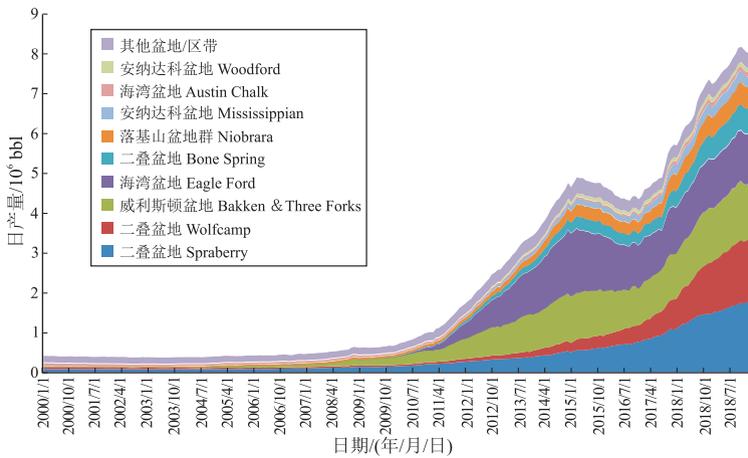


图 2 美国不同区带 2000-01-01—2020-03-01 页岩油日产量
原始数据源自 EIA^[16]。

Fig.2 Historical daily production of shale oil for different plays from 1 January 2000 to 1 March 2020 in USA

海湾盆地 (47.34×10^8 bbl) (表 5), 分别占美国剩余探明储量的 47.5%, 25.1% 和 20.2%, 合计 92.8%。

威利斯顿盆地是页岩油大规模投入勘探开发的首个盆地, 起先是 Bakken 区带, 近年来又逐步拓展至 Bakken 组之下的 Three Forks 组, 其剩余探明储量在 2014—2018 年期间变化不大(表 5)。海湾盆地是第二个页岩油大规模生产的盆地, 与威利斯顿盆地类似, 其剩余探明储量亦基本保持了平稳状态(表 5)。年产量、剩余储量和钻探工作量的变化趋势表明, 威利斯顿盆地的 Bakken/Three Forks 和海湾盆地的 Eagle Ford 页岩油区带已进入成熟勘探阶段, 它们的页岩油探明率已达 52.2% 和 41.1% (表 3)。

有别于威利斯顿盆地和海湾盆地, 二叠盆地的剩余探明储量呈现出快速增长的趋势; 2015 年底的剩余探明储量是 2012 年底的 3.3 倍, 2015—2018 期间, 剩余探明储量又从 7.82×10^8 bbl 增加至 110.96×10^8 bbl (表 5), 这主要归因于二叠盆地特拉华次盆内 Wolfcamp 区带的突破。页岩油产量、剩余储量和钻井工作量的趋势表明, 二叠盆地的页岩油勘探尚未进入成熟期, 仍处于上升阶段。二叠盆地页岩油的探明率仅为 15.1%, 该盆地是主导美

国近—中期页岩油勘探开发走向的最重要盆地。

3.4 待发现技术可采资源量

2001—2018 年期间, USGS 评估了美国 21 个页岩盆地内的 60 个评价单元的页岩油待发现技术可采资源量, 评价的盆地既包括前述的产页岩油盆地, 亦包含尚未有页岩油商业开发的盆地(如北阿拉斯加盆地、粉河盆地等), 本文采用的数据是待发现资源量的平均值。

截至 2018 年底, 美国页岩油待发现资源量为 $1\ 142.54 \times 10^8$ bbl。与累计产量和剩余探明储量的盆地分布相比, 待发现资源量的分布更加不均衡。二叠盆地一枝独秀, 其页岩油待发现资源量高达 878.27×10^8 bbl, 占美国待发现页岩油资源量的 76.9%。海湾盆地和威利斯顿盆地的页岩油待发现资源量为 115.24×10^8 和 81.49×10^8 bbl (表 3), 分别占 10.1% 和 7.1%。其余 18 个盆地的待发现资源量合计为 67.54×10^8 bbl, 仅占 5.9%。

4 美国页岩油富集主控因素

如前所述, 美国页岩油资源分布不均衡, 高度富集于二叠盆地。三大富页岩油盆地(二叠、海湾、威利斯顿)、有一定产量的页岩油盆地(丹佛盆

表 5 美国页岩油盆地 2012—2018 年剩余探明储量

Table 5 Shale oil reserves at year end of 2012—2018 for shale oil basins in USA 10^8 bbl

盆地	2012—2018 年剩余探明储量						
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
二叠盆地	2.36	3.35	7.22	7.82	49.60	83.19	110.96
威利斯顿盆地	31.66	48.44	59.72	50.30	52.26	54.47	58.62
海湾盆地	33.72	41.77	51.72	42.95	41.63	48.15	47.34
其他盆地	5.64	6.87	14.99	14.95	12.06	13.92	16.91

注: 原始数据源自 IEA^[19-22]。

地和安纳达科盆地)以及页岩油勘探未取得重大突破盆地(圣华金等加州盆地和黑勇士盆地)的页岩油成藏条件的综合分析表明,页岩油资源的富集主要受构造背景、优质烃源岩规模(生)、页岩层系顶底板(盖)和储集岩“甜点”区规模(储)的控制。WOOD^[23]、BREYER^[24]和黎茂稳等^[4]较系统地讨论过稳定大地构造背景对页岩油规模富集的控制作用,因此本文主要讨论“生、盖、储”对页岩油富集的控制作用。

4.1 优质烃源岩

优质烃源岩指 TOC 含量超过 1%、干酪根为 I/II 型、 R_o 现今仍处于 0.6%~1.3% 的烃源岩。区域广泛分布并具有一定厚度(即体积)的优质烃源岩是页岩油规模富集的核心控制因素。美国主要页岩油盆地烃源岩的分布和地化特征见表 6。

从表 6 可以看出,美国的主要页岩油区带均发育广泛分布的优质烃源岩。即使在分布范围最小的丹佛盆地,优质烃源岩的展布面积亦达 2 770 km²。优质烃源岩的厚度因盆地而异,从约 10 m 到百余米。在 5 大富页岩油盆地中,威利斯頓盆地 Bakken 组优质页岩烃源岩的厚度最小,上、下 Bakken 页岩段的厚度均为 5~12 m,但其 TOC 含量高,平均值达 11.0%^[25]。此外,展布范围广,面积达 34 200 km²,高 TOC 含量有效地补偿了烃源岩相对薄的厚度短板,从而使得该盆地成为了美国第三大富页岩油盆地(表 3)。

二叠盆地是美国页岩油最富集的盆地,其 68.1% 的页岩油总资源量分布于特拉华次盆,该次盆页岩油的高度富集归因于其独有的 2 个要素。一是次盆内发育多套广泛分布的中—厚层优质泥页岩烃源岩层系,自下而上依次为 Wolfcamp D,

Wolfcamp C, Wolfcamp B 下, Wolfcamp B 上, Wolfcamp A, Bone Spring 下, Bone Spring 中, Bone Spring 上, Avalon 下和 Avalon 上等烃源岩层,页岩油层系(包括烃源岩层和储集层)的总厚度是安纳达科盆地的 4 倍、海湾盆地 Eagle Ford 组的 8 倍、威利斯頓盆地 Bakken 组的 12 倍^[26];二是该次盆内页岩层系单位面积的高预估最终可采储量(EUR),EUR 主要受烃源岩成熟度、储集层厚度、孔隙度和含油饱和度的控制,特拉华次盆单位面积的 EUR 为 (22.09~62.52)×10⁴ bbl/km²,均值为 37.14×10⁴ bbl/km²;而其他盆地单位面积的 EUR 则为 (3.09~41.27)×10⁴ bbl/km²,均值 15.06×10⁴ bbl/km²。

4.2 页岩层系顶底板

区域广泛分布的顶底板隔层是成熟烃源岩生成的油气得以保存的关键,美国主要页岩油盆地均发育碳酸盐岩顶底板隔层^[27]。Bakken/Three Forks 组的顶底板为厚 30 余米的下石炭统 Lodgepole 组石灰岩和厚约 40 m 的上泥盆统 Birdbear 组石灰岩。Eagle Ford 组的顶板为上白垩统 Austin 白垩岩,底板为上白垩统 Buda 组石灰岩。在二叠盆地的米德兰次盆和特拉华次盆, Wolfcamp, Spraberry 和 Bone Spring 组由多旋回的碎屑岩和碳酸盐岩组成,组内的富碳酸盐岩层段可以构成有效的隔层,上石炭统 Cisco 组石灰岩构成了米德兰次盆 Wolfcamp 组的底板。安纳达科盆地 Woodford 组的顶、底板分别为下石炭统(密西西比亚系)石灰岩和上石炭统 Hutton 组石灰岩^[27]。

加州的 Monterey 组是美国最早产页岩油的区带,其资源潜力曾被寄予厚望。2011 年, EIA 发布的其待发现资源量曾高达 150×10⁸ bbl^[28],占当年评估出的美国页岩油待发现资源量的 64.4%。但

表 6 美国主要页岩油盆地烃源岩规模和地化特征

Table 6 Volumetric scale and geochemical features of source rocks for major shale oil plays in USA

盆地	主要区带	烃源岩规模		$w(\text{TOC})/\%$	地化指标	
		面积/km ²	厚度/m		干酪根类型	$R_o/\%$
二叠	Wolfcamp	51 120	60~1 200	<2.0~8.0/3.3	II	0.5~1.6
	Spraberry	17 170	60~300	~1.6	II, II/III	0.5~1.2
	Bone Spring	19 700	20~1 300	1~5	II, II/III	0.62
	Avalon	8 900	30~120	2~10	II/III	0.5~0.9
海湾	Austin Chalk & Eagle Ford	21 150	90~120	2.1~8.0/5.0	II	0.7~1.3
威利斯頓	Bakken & Three Forks	34 200	10~24	2.0~22.0/11.0	II	0.6~1.0
丹佛	Niobrara	2 770	210	2.0~8.0/5.0	II	0.6~1.3
阿纳达科	Mississippian & Woodford	5 850	37~67	1.0~14.0	II	0.6~1.5

注:表中数值为最小值~最大值/平均值。

随着进一步的勘探实践,其勘探潜力远非如此。2019年,EIA发布的其最新待发现资源量已大幅减至 2×10^8 bbl^[22],而 USGS 评价出的结果仅为 40×10^6 bbl^[7]。Monterey 组所处的加州盆地群不仅规模小,而且构造地质条件复杂。此外,这些盆地均是以碎屑岩充填为主的新生代拉分盆地,普遍缺失区域展布的碳酸盐岩顶板盖层,结果导致 Monterey 组内生成的油气大部分运移至上倾方向的圈闭,仅极少部分仍滞留于源储一体的硅质页岩中。

4.3 储集层与“甜点”

4.3.1 页岩油产层特征

从公开文献无法获取页岩油区带的剩余探明储量,但可获取区带级的页岩油产量和待发现资源量数据。据此,可统计分析不同类型页岩油的资源特征和页岩油发展趋势。美国页岩油的产层岩性多种多样,包括泥岩、页岩、泥灰岩、粉砂岩、砂岩、石灰岩和白云岩等(表 4)。裂缝型页岩油是最先投入商业开发的页岩油类型,最初始于 20 世纪初期的 Monterey 组。1953 年,威利斯顿盆地 Bakken 组上段裂缝型页岩开始产油^[29],但未形成规模。总体而言,裂缝型页岩油一直未产出大规模的轻质油,产量在美国页岩油总产量中占比很低(表 4)。

以 Bakken/Three Forks 为代表的混合型页岩油勘探开发的成功真正引领了美国页岩油革命,2000 年在威利斯顿盆地完钻了第一口水平井,并发现以 Bakken 中段白云岩为储集层的 Elm Coulee 油田^[29]。混合型页岩油一直是美国页岩油勘探开发的主体。截至 2018 年底,这类页岩油的累计产量为 70.15×10^8 bbl,占美国页岩油累计产量的 53.3%(表 4)。

基质型页岩油的规模生产始于 2012 年,当年海湾盆地 Eagle Ford 页岩油投入开发。截至 2018 年底,这类页岩油累计产油 44.24×10^8 bbl,占美国

页岩油累计产量的 33.6%。需要指出的是,近年来基质型页岩油的重要性在逐步提升。2019 年基质型页岩油的年产量为 10.45×10^8 bbl,占美国当年页岩油产量的 37.0%,比累计产量的占比高出 3.4%。此外,基质型页岩油的待发现资源量高达 732.25×10^8 bbl,占美国页岩油待发现资源量的 64.1%(表 4)。这些数据表明规模投产晚于裂缝型和混合型页岩油的基质型页岩油,正成为美国页岩油增储上产的主力页岩油类型。

4.3.2 “甜点”展布特征

“生、盖”是控制页岩油资源规模富集的关键成藏要素,但页岩油储集层的“甜点”发育与否及其规模是控制能否实现页岩油商业开发和产量规模的核心要素。依据“甜点”的发育特征,美国的页岩油区带可以分为 3 类:连续型、星点型和缺失型(图 3)。

二叠盆地 Wolfcamp 是“甜点”呈连续型分布区带的典型代表,目前该区带的产油井在烃源岩成熟灶区内连片分布,其他“甜点”连续型区带还包括二叠盆地的 Bone Spring 和 Spraberry、威利斯顿盆地的 Bakken/Three Forks 和海湾盆地的 Eagle Ford 区带等。截至 2018 年底,甜点连续型页岩油区带已累计产页岩油 109.14×10^8 bbl,占美国页岩油累计产量的 83.0%。Niobrara 和 Woodford 是“甜点”呈星点型分布区带的典型代表,前者的甜点区集中分布于丹佛盆地 Wattenberg 油田及其东北延伸区,而在丹佛盆地的其他地区以及粉河盆地和帕克盆地,产油井(“甜点”)仅零星分布。Woodford 的“甜点”在安纳达科盆地亦呈零星分布,而且“甜点”区的规模小于 Niobrara。海湾盆地西部上白垩统赛诺曼阶—土仑阶泥岩区带(该区带与 Eagle Ford 相邻,位于其东北侧)和盆地东部上白垩统 Tuscaloosa 海相页岩区带是“甜点”缺失型区带的代表,尽管它们待发现页岩油资源量达 33.35×10^8 bbl

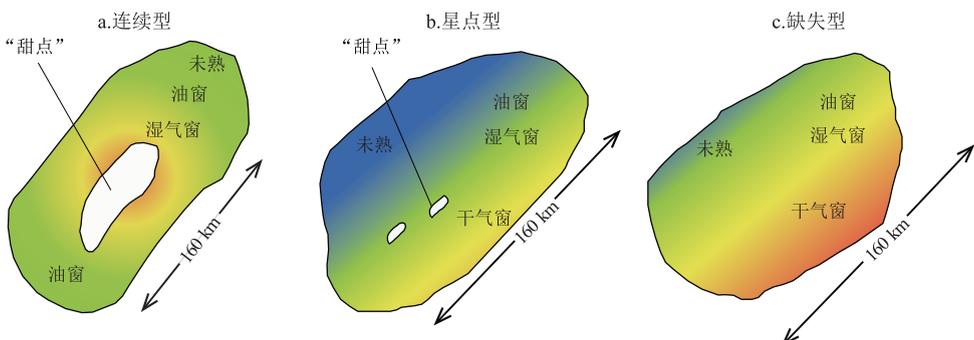


图 3 美国富页岩油区带“甜点”分布特征示意

Fig.3 A schematic diagram illustrating “sweet spot” distributions in shale plays in USA

和 16.79×10^8 bbl,但是“甜点”的缺失(或者尚未发现)使得这些页岩油待发现资源量丰富的区带尚无法实现页岩油商业开发。

甜点包括地质甜点和工程甜点,其发育受多种因素的控制,不同盆地甜点发育的主控因素不尽相同^[30]。美国页岩油的勘探实践表明,黏土矿物含量是控制工程甜点的的核心因素,美国实现商业产量的页岩油区带都具有低黏土含量的特征,其黏土含量普遍低于30%,加拿大页岩油区带也具有类似的特征。福特沃斯盆地 Barnett 页岩油气勘探突破后,石油公司对二叠盆地特拉华次盆的 Barnett 和黑勇士盆地 Floyd 页岩(Barnett 的等时地层)进行过页岩油勘探,但勘探结果表明这些页岩层系的黏土含量高于50%,因此无法成功压裂,页岩油勘探以失利告终。

5 对中国页岩油勘探开发的启示

页岩油富集主控因素——生、盖、储的规模发育是页岩油规模富集的基本必要条件,美国页岩油勘探开发实践表明,二叠、威利斯頓和海湾3大富页岩油盆地内的高产页岩油区带普遍具有广泛分布的特征,其中面积最小的 Eagle Ford 区带的分布范围亦高达 $21\ 150\ \text{km}^2$ 。因此,中国页岩油的勘探选区应首先关注大型沉积盆地内的页岩油区带。

美国已成功开发的页岩油既包含狭义页岩油(源储一体的基质型页岩油),又包含狭义致密油(混合型页岩油),而且狭义页岩油的重要性在提升,其资源潜力高于目前产量仍占主导地位的狭义致密油(表4)。中国页岩油的勘探既应关注与富有机质烃源岩伴生的致密碎屑岩和碳酸盐岩层段,又要高度重视富有机质脆性泥页岩和泥灰岩层段的勘探;应根据沉积盆地的具体成藏条件,优选水平钻探目的层段。

“甜点”发育与否控制着页岩油能否实现商业生产,我国的页岩油勘探开发已在鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地和渤海湾盆地的黄骅拗陷取得实质性突破,在这些盆地内寻求新区带、拓展已知“甜点”区的范围可以进一步增储上产。在页岩油勘探尚未取得实质性突破的盆地,寻找“甜点”区和选准钻探目的层是取得勘探突破的关键。

6 结论

(1)截至2018年底,美国累计产页岩油 131.57×10^8 bbl,剩余探明储量 233.83×10^8 bbl,待发现资源量 $1\ 142.52 \times 10^8$ bbl,页岩油资源量合计

为 $1\ 507.94 \times 10^8$ bbl。

(2)美国页岩油资源高度富集于二叠盆地,其页岩油资源量达 $1\ 034.91 \times 10^8$ bbl,占美国总量的68.6%,远远高于占比13.0%和11.3%的海湾盆地和威利斯頓盆地。二叠盆地、海湾盆地和威利斯頓盆地亦是页岩油高产的盆地,至2018年底已累计产页岩油 45.68×10^8 bbl, 32.99×10^8 bbl 和 30.49×10^8 bbl,分别占美国页岩油累计产量的34.7%,25.1%和23.2%。

(3)区域构造稳定区页岩油资源的富集主要受优质烃源岩规模、页岩层系顶底板和储集岩“甜点”规模等成藏要素的控制,前2个要素控制了页岩油资源的规模富集;储集岩“甜点”则控制了能否实现页岩油商业开发,“甜点”区的规模影响着页岩油的产量规模。

(4)美国页岩油以混合型和基质型为主,前者累计产出的页岩油超过了累计产量的50%,不过基质型页岩油区带的资源潜力更大,这类页岩油的待发现资源量占美国待发现页岩油资源量的64.1%。

(5)中国页岩油的勘探应优选大型沉积盆地内的有利页岩油区带,既要关注与优质烃源岩相伴生的脆性碳酸盐岩、粉砂岩和砂岩层段(混合型页岩油),又要关注富有机质脆性泥页岩和泥灰岩等层段(基质型页岩油)。寻找新“甜点”和拓展旧“甜点”的规模是实现页岩油增储上产的关键。

参考文献:

- [1] BP.Statistical review of world energy,2019[EB/OL].(2020-03).
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [2] JARVIE D M.Shale resource systems for oil and gas;part 2—shale oil resource systems[C]//BREYER J A.Shale reservoirs: giant resources for the 21st century. Tulsa: AAPG, 2012: 89-119.
- [3] LARUE D K, SMITHARD M, MERCER M. Three deep resource plays in the San Joaquin Valley compared with the Bakken Formation[J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(2): 195-243.
- [4] 黎茂稳,马晓潇,蒋启贵,等.北美海相页岩油形成条件、富集特征与启示[J].油气地质与采收率,2019,26(1):13-28.
LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIANG Qigui, et al. Enlightenment from formation conditions and enrichment characteristics of marine shale oil in North America[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 13-28.
- [5] 金之钧,白振瑞,高波,等.中国迎来页岩油气革命了吗?[J].石油与天然气地质,2019,40(3):451-458.
JIN Zhijun, BAI Zhenrui, GAO Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution? [J]. Oil & Gas Geology,

- 2019, 40(3): 451-458.
- [6] 李志明, 芮晓庆, 黎茂稳, 等. 北美典型混合页岩油系统特征及其启示[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(4): 1060-1072.
LI Zhiming, RUI Xiaoqing, LI Maowen, et al. Characteristics of typical hybrid shale-oil system in North America and its implications[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(4): 1060-1072.
- [7] 张新顺, 王红军, 马锋, 等. 致密油资源富集区与“甜点区”分布关系研究: 以美国威利斯顿盆地为例[J]. 石油实验地质, 2015, 37(5): 619-626.
ZHANG Xinshun, WANG Hongjun, MA Feng, et al. Relationship between resource-rich regions and sweet spots for tight oils: a case study of the Williston Basin in the USA[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5): 619-626.
- [8] ALANIZ R, GARRISON R, HARBOR R, et al. Delineation of an oil window: an integrated approach[C]//BREYER J A. The Eagle Ford shale: a renaissance in U.S. oil production. Tulsa: AAPG, 2016: 187-212.
- [9] 高辉, 何梦卿, 赵鹏云, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 页岩油与北美地区典型页岩油地质特征对比[J]. 石油实验地质, 2018, 40(2): 133-140.
GAO Hui, HE Mengqing, ZHAO Pengyun, et al. Comparison of geological characteristics of Chang 7 shale oil in Ordos Basin and typical shale oil in North America[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2): 133-140.
- [10] BGR. Energy study 2017: data and developments concerning German and global energy supplies[R]. Hannover, Germany: BGR, 2017: 1-184.
- [11] EIA. Technically recoverable shale oil and shale gas resources: an assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States[R]. [S.l.]: U.S. Energy Information Administration, 2013: 1-12.
- [12] USGS. USGS domestic continuous (unconventional) oil & gas assessments, 2000-present, 2019 [EB/OL]. (2020-03). <https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/noga-summary/>.
- [13] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 322-331.
ZHANG Jinchuan, LIN Lamei, LI Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 322-331.
- [14] 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.
ZHOU Qingfan, YANG Guofeng. Definition and application of tight oil and shale oil terms [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 541-544.
- [15] SONNENBERG S A, MECHKEL L. Our current working model for unconventional tight petroleum systems: oil and gas [EB/OL]. (2017-05-01). http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2017/80589sonnenberg/ndx_sonnenberg.pdf.html.
- [16] EIA. Tight oil production estimates by play to 2020 [EB/OL]. (2020-03). <https://www.eia.gov/petroleum/data.php>.
- [17] SPE (Society of Petroleum Engineers). Petroleum resources management system-2018 update [EB/OL]. (2020-05). <https://www.spe.org/en/industry/petroleum-resources-management-system-2018/?aliid=eyJpIjoiY2lpRXFsbzV0OGkzbTZlcClsluQiQil1MHdtWIJNUDBvSOxcLzR6Y2RtcIFZdz09ln0%253D>.
- [18] EIA. U.S. crude oil and natural gas proved reserves, year-end 2018 [EB/OL]. (2019-12-13). <https://www.eia.gov/natural-gas/crudeoilreserves/>.
- [19] EIA. U.S. crude oil and natural gas proved reserves, year-end 2016 [EB/OL]. (2018-02-13). <https://www.eia.gov/natural-gas/crudeoilreserves/archive/2016/>.
- [20] EIA. U.S. crude oil and natural gas proved reserves [EB/OL]. (2020-11-23). <https://www.eia.gov/naturalgas/crudeoilreserves/archive/2014/index.php>.
- [21] EIA. U.S. crude oil and natural gas proved reserves (2013) [EB/OL]. (2014-04-10). <https://www.eia.gov/naturalgas/crudeoilreserves/archive/2012/index.php>.
- [22] EIA. Assumptions to AEO 2020 (2020) [EB/OL]. (2020-03). <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/oilgas.pdf>.
- [23] WOOD L J. Shale tectonics; AAPG memoir 93 [M]. Tulsa: AAPG, 2010.
- [24] BREYER J A. Shale reservoirs: giant resources for the 21st century; AAPG memoir 97 [M]. Tulsa: AAPG, 2012.
- [25] SONNENBERG S A, JIN Hui, SARG J F. Bakken mudrocks of the Williston Basin, world class source rocks [EB/OL]. (2011-07-11). http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2011/80171sonnenberg/ndx_sonnenberg.pdf.html.
- [26] KINLEY T. You can't change the rock: lessons learned from the Wolfcamp shale in the Delaware Basin [EB/OL]. (2017-02-22). <https://www.aapg.org/videos/playmaker/ArticleId/39180/travis-kinley-you-cant-change-the-rock-lessons-learned-from-the-wolfcamp-shale-in-the-delaware-basin>.
- [27] HE Zhiyong, XIA D. HC migration and trapping in unconventional plays [M]. Houston, Texas: AAPG, 2017.
- [28] EIA. Review of emerging resources; U.S. shale gas and shale oil plays (2011) [EB/OL]. (2011-07). <https://www.eia.gov/analysis/studies/usshalegas/pdf/usshaleplays.pdf>.
- [29] SONNENBERG S A, PRAMUDITO A. Petroleum geology of the Giant Elm Coulee Field, Williston Basin [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(9): 1127-1153.
- [30] NASH S S. Evaluating shale play opportunities, optimizing your own operations [EB/OL]. (2016-02-01). http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2016/80512nash/ndx_nash.pdf.html.