

西西伯利亚盆地侏罗系致密油发育特征与资源潜力

张新顺,王红军,马 锋,贺正军,白 斌,梁英波

(中国石油 勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:西西伯利亚盆地是全球几大富油气盆地之一,随着常规油田的不断开发,产量持续下降,迫切需要找到新的产能增长点。通过对该盆地主力烃源岩巴热诺夫组的地球化学、储层物性等多方面分析,探索其致密油发育特征,并利用图形体积法对其致密油技术可采资源量进行评价,结合巴肯组、鹰滩组、延长组等典型致密油产区进行对比,综合分析其致密油可采性。结果表明:巴热诺夫组是一套极好的烃源岩,具有高有机质丰度、中等成熟度,厚度大。储层岩性以灰质硅质岩、泥质硅质岩为主,夹薄层碳酸盐岩和粉砂岩,泥质含量低,富含石英等脆性矿物,部分地区天然裂缝非常发育。储层以Ⅰ类和Ⅱ类致密油储层为主,测井显示含油饱和度高。巴热诺夫致密油技术可采资源量达 76×10^8 t,Ⅰ类致密油储层技术可采资源为 9.2×10^8 t,盆地中西部资源丰度较高。综合考虑配套工业设施等可采条件,目前中鄂毕地区是最为有利的致密油开采区,其关键地质条件也均已达到世界级致密油产区的标准。

关键词:资源潜力;致密油;巴热诺夫组;西西伯利亚盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Characteristics and resource potential of Jurassic tight shale oil reservoirs in West Siberian Basin

Zhang Xinshun, Wang Hongjun, Ma Feng, He Zhengjun, Bai Bin, Liang Yingbo

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: The West Siberian Basin is one of the richest world-class petroliferous basins. With continuous development of the conventional oil, the oil production is declining continuously, so it is an urgent need to find new growth points of the oil production. The characteristics of its shale oil reservoirs are studied through analyses of the geochemical characteristics and reservoir physical properties of the main source rocks of the Bazhenov Formation in the basin, and the technical recoverable tight oil resources are estimated by using the graphics-volume method. Also the recoverability of the Bazhenov tight oil is evaluated comprehensively through comparison with some famous tight oil plays, such as Bakken, Eagle Ford and Yanchang tight oil plays. The result shows that the Bazhenov Formation is an excellent source rock featuring in high organic matter abundance, moderate maturity, large thickness of 20–50 meters. The lithologies are dominated by carbonate silicates and shaly silicates with interbeds of carbonates and siltstone. The quartz content is high, the clay content is low, and natural fractures are highly developed in local areas. The reservoir belongs to type I and type II tight reservoir with high oil saturation. The technical recoverable resource of the Bazhenov tight oil is 7.6 billion tons, and class I resource of tight oil is 0.92 billion tons, which are mainly distributed in the central and west region of the basin. Taking the available facilities into consideration, the Central Ob, with all the key geological conditions at the standards of world-class tight oil plays, is the most favorable area for future development.

Key words: resource potential, tight oil, Bazhenov Formation, West Siberian Basin

随着美国致密油革命的成功,掀起了全球范围内的致密油勘探开发热潮^[1-3]。众所周知,俄罗斯西西伯利亚盆地是全球几大富油气盆地之一^[4],从1934年开始勘探,到1970年产量迅速增长,占到全苏联一半以上石油产量,1988年其产量高达 4.09×10^8 t,占全

苏联石油产量66%^[5],但随后产量开始下降,2013年产量为 3×10^8 t,占俄罗斯产量的60%^[6]。该盆地已经历80年的油气勘探,陆上中浅层常规石油资源大多已被发现,大部分油田进入开发中期,迫切需要开辟新的领域来稳产、增产,因此非常规致密油等油气资源的

勘探开发变得越来越迫切。西西伯利亚盆地巨大油气产量和储量的原因,就是有多套成熟的优质烃源岩^[7-9],这些优质烃源岩排烃之外,是否有大量的石油滞留在生烃层系内部或者紧邻的致密层系中,这部分滞留的石油,是否可以像美国的致密油一样大规模开采出来非常值得关注。近期的低油价虽不利于非常规油气的开发投产,但有利于在低成本进入致密油勘探开发区块,待未来油价走高时获得更大利益,因此西西伯利亚盆地致密油重要性不言而喻。

考虑到致密油受控于优质烃源岩的基本条件,本文通过研究西西伯利亚盆地主力烃源岩巴热诺夫(Bazhenov)组烃源岩地球化学特征、产层岩性及物性特征、平面展布情况等,详细分析了巴热诺夫组致密油发育特征,并对该组致密油技术可采资源进行初步评价,结合几个成功开发的致密油区探讨西西伯利亚盆地致密油的勘探开发前景,为未来该区的海外勘探和投资提供建议。

1 地质背景

西西伯利亚含油气盆地属于大型大陆裂谷盆地,是俄罗斯境内最大油气产区,位于乌拉山东侧,西与蒂

曼-伯朝拉盆地相邻,东以叶尼塞河为界,和东西伯利亚盆地相邻,南邻哈萨克丘陵带,北接喀拉海^[10],面积达 $240 \times 10^4 \text{ km}^2$,盆地内地势低洼,平均海拔在 150 m 以下。西西伯利亚盆地可分为南西西伯利亚次盆、乌拉尔-弗罗洛夫次盆、中鄂毕次盆、纳迪姆-塔兹次盆、南喀拉海-亚马尔次盆 5 个次盆(图 1)。盆地是晚古生代末拼接起来的,晚二叠世-三叠纪发生大规模裂谷作用和岩浆喷发,沉积厚层的粗碎屑岩和火山岩。早侏罗世末,盆地发生区域性沉降,形成多套生储盖组合。侏罗纪以来,盆地经历了两个超级海侵-海退旋回,沉积了三、四千米厚以碎屑岩为主的地层,整体构造活动强度趋弱^[11]。

在盆地中南部,侏罗系烃源岩基本上处于成熟阶段,而下白垩统源岩尚未成熟。在北部,侏罗系烃源岩达到了高成熟-过成熟阶段,下白垩统含煤层系也提供了大量的生物气^[12]。因此盆地油气分布整体上以南油北气为特征,67% 的石油分布在中鄂毕次盆,68% 的天然气分布在北部纳迪姆-塔兹次盆和南喀拉海-亚马尔次盆。油气主要储集于侏罗系和白垩系,目前上侏罗统-下白垩统成藏组合中已发现油气藏超过 3 500 个,下侏罗统成藏组合中已发现油气藏超过 400 个,盆地油气待发现资源量在 $25 \times 10^8 \text{ t}$ 左右^[13-14]。

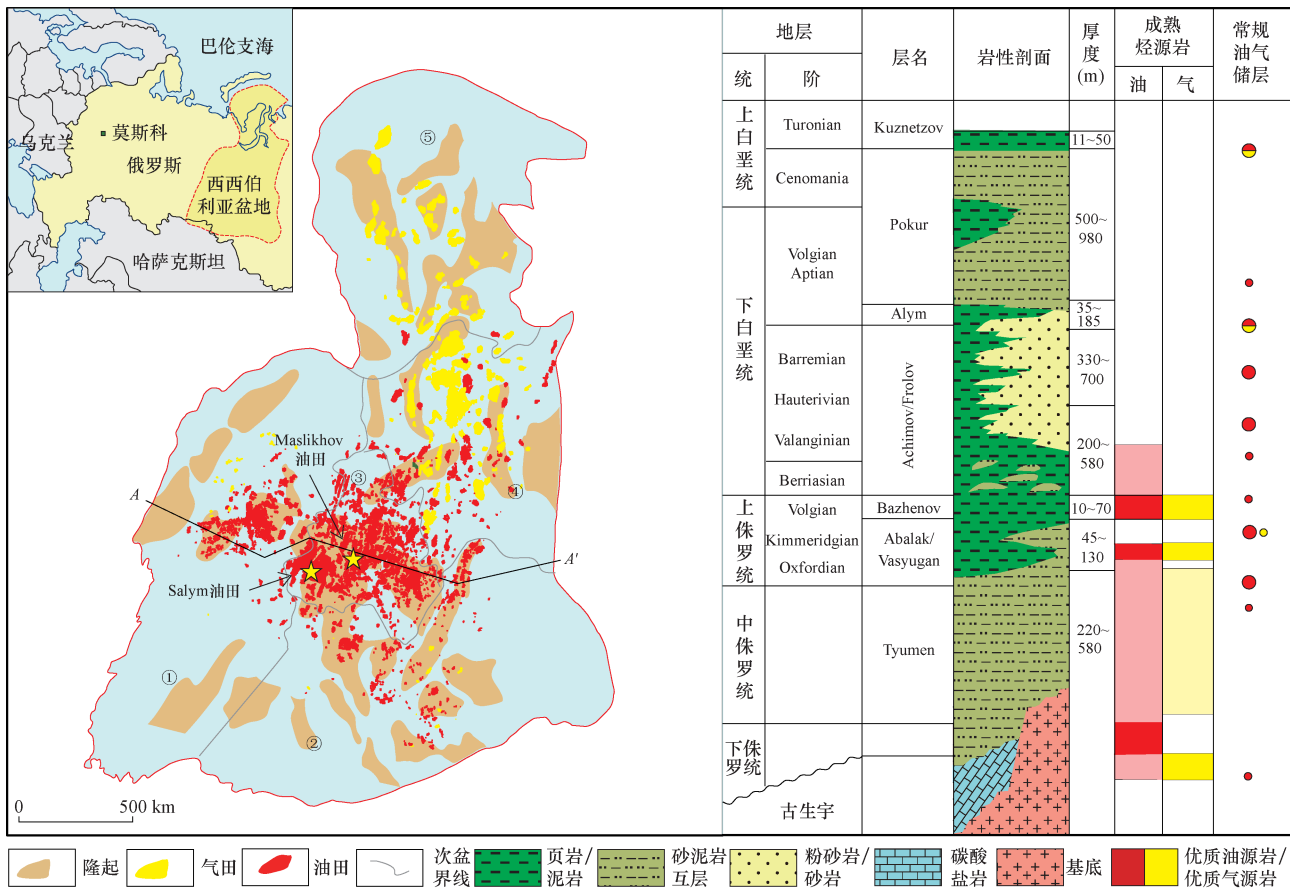


图 1 西西伯利亚盆地油气田分布和中鄂毕次盆地层综合柱状图

Fig. 1 Distribution of oil and gas fields in the West Siberian Basin and stratigraphic column of the Central Ob sub-basin

①乌拉尔-弗罗洛夫次盆;②南西西伯利亚次盆;③中鄂毕次盆;④纳迪姆-塔兹次盆;⑤南喀拉海-亚马尔次盆

西西伯利亚盆地广泛分布的优质烃源岩及相对稳定的构造背景,为形成大规模的非常规油气连续聚集提供了有利条件。

2 致密油特征

2.1 生烃条件

西西伯利亚盆地大面积海相沉积开始于中侏罗世末期的卡洛夫期,到伏尔加期沉积的巴热诺夫组及其相当层系成为了盆地最重要的油源岩。巴热诺夫组形成于最广泛的海侵过程中,局限海环境,沉积速率低,大量浮游藻类有机质富集,含有大量的有机质,达 $18 \times 10^{12} \text{ t}^{[15]}$ 。岩性主要为硅质泥岩和钙质泥岩,局部有粉砂岩及砂岩夹层,在盆地边缘的泥岩中少含或不含沥青。在西部及东南部出现以砂岩为主的沉积,只在乌拉尔东部的一些小凹陷中有陆相沉积。在大部分地区,巴热诺夫组为主要生油层^[8,16](图2)。

巴热诺夫组页岩有机碳含量(TOC)大于4%的占70%以上,其中盆地中部有机碳含量为2%~15%,平均在7%以上,局部高达25%以上。盆地北部 TOC 相对较低,为2%~7%。该组沥青含量可达12.6%,氯仿沥青“A”体积分数平均为0.41%,热解参数 S_2 为10~120 mg/g,为极好烃源岩,部分为好烃源岩(图3)。有机质类型主要为I-II型,氢指数(HI)为400~700 mg/g,随成熟度增加下降到150~300 mg/g。该套页岩层中 S_1/TOC 比值主要为40~100 mg/g,显示高含油量,层内碳酸盐岩和砂岩薄夹层 S_1/TOC 比值更高,主要为200~400 mg/g,已达到非常好的产层标准。产烃指数(PI)和热解峰值温度(T_{max})分别为0.1~0.5和425~455℃,产烃率较高,且该套页岩主要处于低熟-成熟生油阶段。

巴热诺夫组页岩分布面积广,盆地中部和南部厚度主要在25~50 m,镜质体反射率(R_o)为0.5%~0.8%。从盆地南部向东北逐渐增厚,最厚达400 m以上,盆地东北部该层埋深也较大,从2 200 m增加到

4 500 m, R_o 主要为0.7%~1.1%,局部 R_o 可达1.3%,进入生气阶段。

源岩 S_1 随着 TOC 增大表现为三段性,稳定高值段代表烃源岩内部烃类达到饱和,对应为致密油富集资源。稳定低值段代表有机质丰度低,生成的油量还难以满足页岩自身残留的需要,更无法开采,对应为致密油无效资源。介于之间的快速增长段对应为目前较难开发的低效资源^[17]。由此,巴热诺夫组致密油无效资源、低效资源和富集资源的 S_1 划分界限为2 mg/g和6.5 mg/g, TOC 划分界限为1.5%和3.5%,巴热诺夫组大部分属于富集资源,仅部分属于低效资源,总体上还是非常好的。Maslikhov油田的巴热诺夫组上部排烃效率(PEE)为2.5~4,平均为3,下部为1.5~2.5,平均为2^[18]。也同样表明巴热诺夫组整段均富含游离烃的情况下,上部富集程度更为高(图4)。

2.2 储集条件

巴热诺夫组厚度25~50 m,盆地中部厚度在25 m左右,北部厚度较大。主要岩性为泥质硅质岩和灰质硅质岩^[19](图5a),其中夹多套薄层碳酸盐岩和泥质粉砂岩,单层厚度多小于1 m^[20]。纵向上该组分为3段,均富含油,上段以富有机碳的灰质硅质岩、硅质页岩为主,平均孔隙度7.5%,含油饱和度80%左右。中段以泥质硅质岩,平均孔隙度5.5%,含油饱和度60%~70%。下段以硅质页岩和灰质硅质岩互层为主,裂缝较为发育,平均孔隙度7%,含油饱和度50%~60%。储集空间主要为晶间孔、微溶洞和有机质孔,局部发育裂缝发育。地层沉积时含有较多放射虫化石层,现今部分被溶蚀,或遭白云岩化后又形成裂缝,成为良好储层^[21](图5b—e)。有机质孔孔隙小且连通性差,在裂缝和溶蚀作用不发育的层段,孔渗都比较低。因此,靠近断裂带,深部热液上涌,促进碳酸盐岩溶蚀,加之裂缝发育,可以进一步促进优质储层的发育。部分碳酸盐岩层被溶蚀,形成毫米级为主的溶孔,小溶洞直径可达1~2 cm。在巴热诺夫组硅质岩和

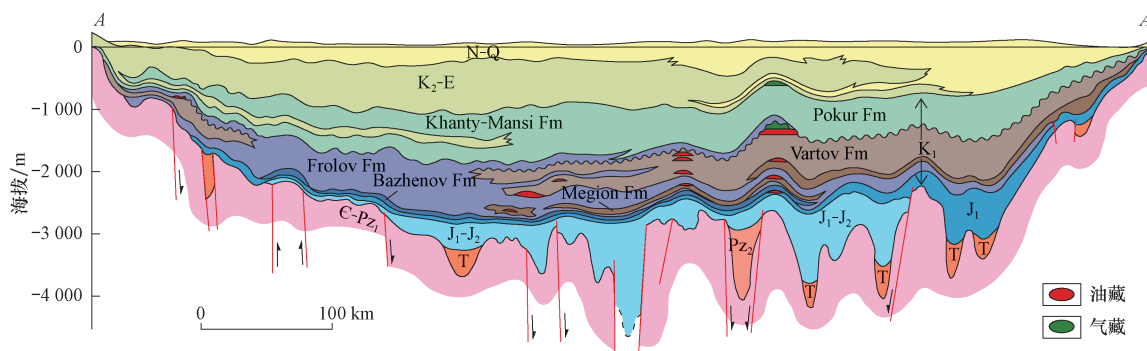


图2 西西伯利亚盆地构造剖面

Fig. 2 Structural section across the West Siberian Basin

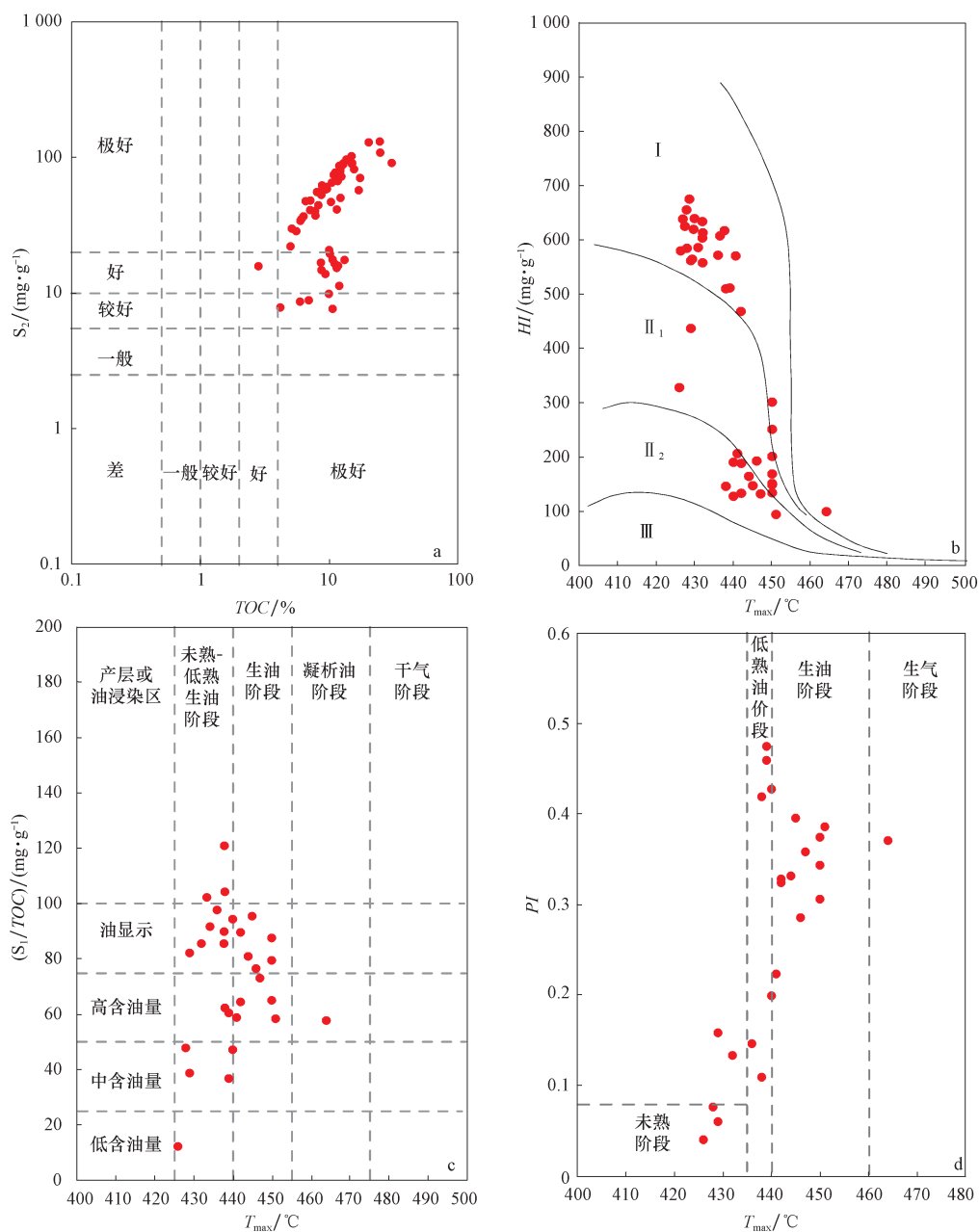
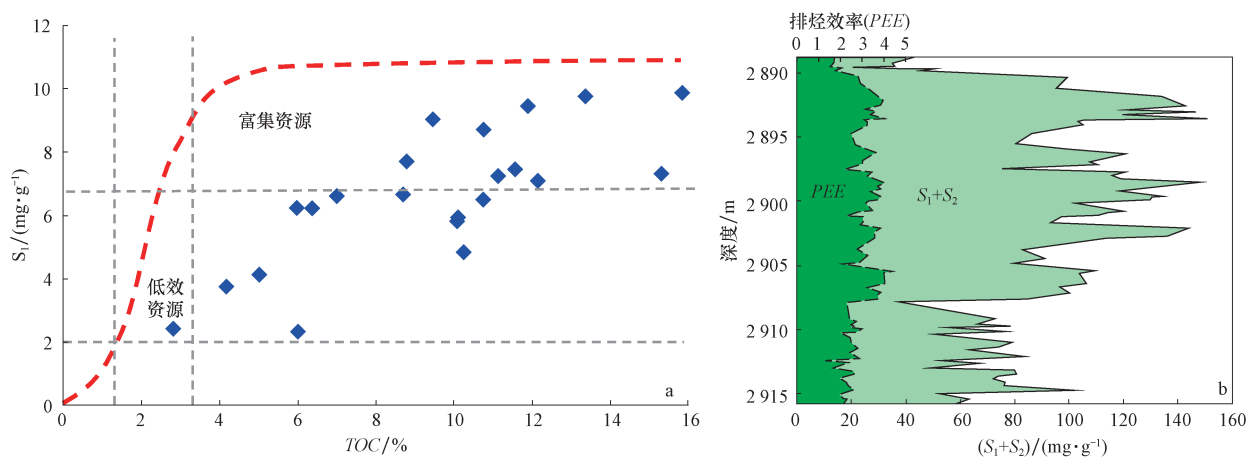


图3 西西伯利亚盆地巴热诺夫组烃源岩地球化学特征

Fig. 3 Geochemical characteristics of source rocks in the Bazhenov Formation in the West Siberian Basin

a. 有机质丰度评价; b. 有机质类型评价; c. 含油量评价; d. 成熟度评价

图4 西西伯利亚盆地巴热诺夫组含油量与 TOC 关系及排烃效率Fig. 4 Relationship between oil content and TOC (a) and expulsion efficiency (b) of the Bazhenov Formation in the West Siberian Basin

灰质硅质岩中微裂缝密度为 20 ~ 180 条/m, 平均 90 条/m; 在碳酸盐岩层中为 60 ~ 320 条/m, 平均为 200 条/m^[22]。

巴热诺夫组基质渗透率为 $0.005 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 其中灰质硅质岩、硅质岩平均孔隙度在 8.6%, 孔隙直径为 100 ~ 250 μm , 基质渗透率 $4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。泥质硅质岩平均孔隙度在 5.8%, 孔隙直径为 2.5 ~ 25 μm , 基质渗透率 $0.46 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

按照致密层系储层划分标准, 大部分属于致密层系中 I 类和 II 类致密油储层^[23], 也含有常规储层和 III 类致密油储层(图 6)。常规储层主要是富含放射虫层段遭受溶蚀作用, 形成大量的溶蚀孔隙和微溶洞, 大大提高了储层的孔隙度和渗透率, 另外裂缝发育区也会改善储层。III 类致密油储层主要是泥质含量高、溶蚀作用不明显且遭受了强烈的胶结作用, 使得储层物性变得很差。总体上, 泥质含量越高, 储层物性越差, 泥

质硅质储层比灰质硅质储层差。纵向上巴热诺夫组上段泥质含量较低、含油饱和度较高, 下段泥质含量较高、含油饱和度较低^[18], 但整个层段的泥质含量基本上不超过 30%、含油饱和度大于 50%(图 6)。总体而言, 巴热诺夫组上段和下段均为较好的致密油储层。

3 资源潜力评价

多家评价机构先前已对该盆地的巴热诺夫组做过资源评价, 均认为该组蕴藏着巨大的非常石油资源。USGS 对西西伯利亚巴热诺夫组非常规连续性石油技术可采资源的预测为 $66.4 \times 10^8 \text{ t}$ ^[24], EIA 则认为该组非常规油技术可采资源有 $101.8 \times 10^8 \text{ t}$ ^[25]。

3.1 资源潜力评价

本次利用图形体积法对西西伯利亚盆地巴热诺夫

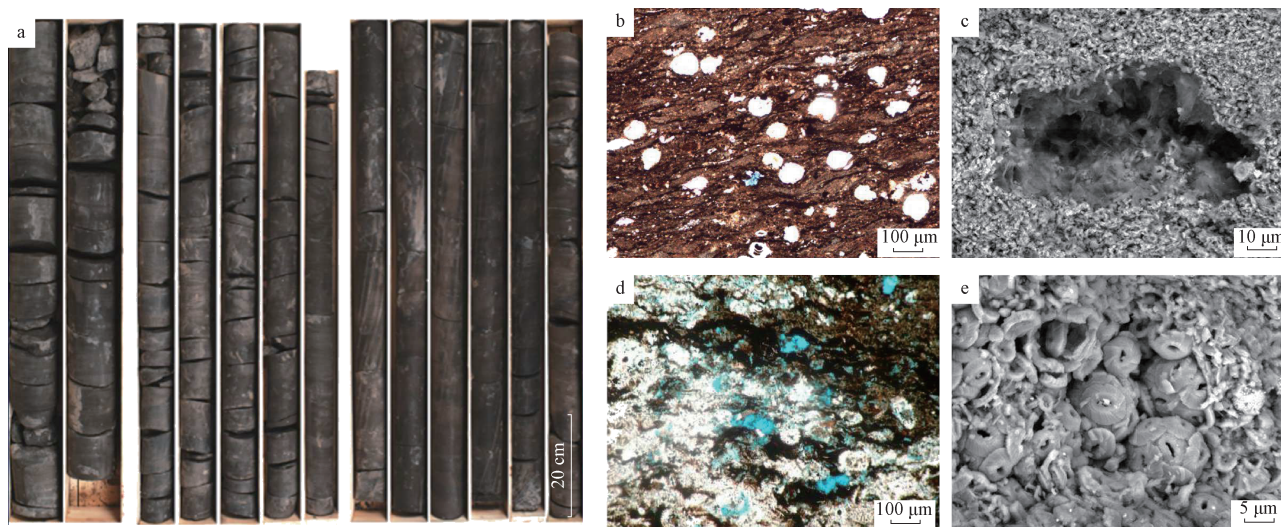


图 5 西西伯利亚盆地巴热诺夫组岩心及镜下照片

Fig. 5 Core photos and microscopic photos of the Bazhenov Formation in the West Siberian Basin

a. 饱含油岩心照片; b. 灰质硅质岩, 含放射虫和颗石藻类化石; c. 放射虫化石被溶蚀形成的孔洞;

d. 碳酸盐岩溶蚀孔隙及裂缝; e. 颗石藻类化石

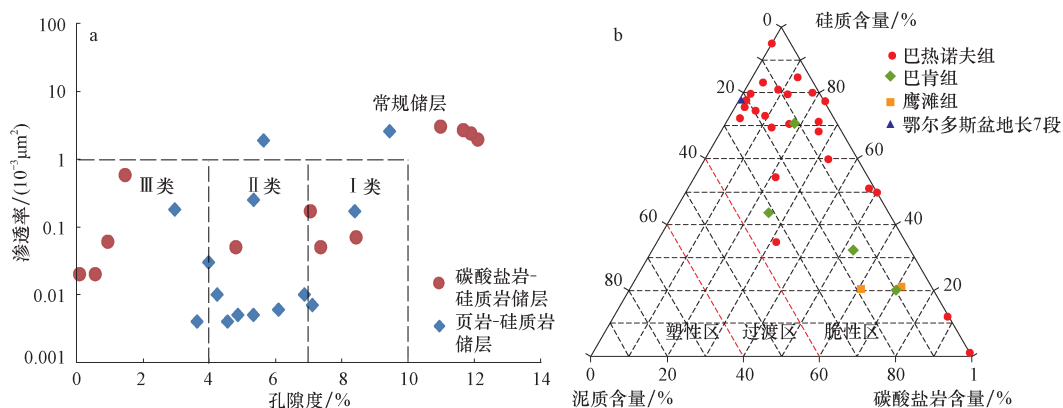


图 6 西西伯利亚盆地巴热诺夫组储层分类(a)及矿物成分三角图(b)

Fig. 6 Classification of tight reservoirs and mineral contents (b) of the Bazhenov Formation in the West Siberian Basin

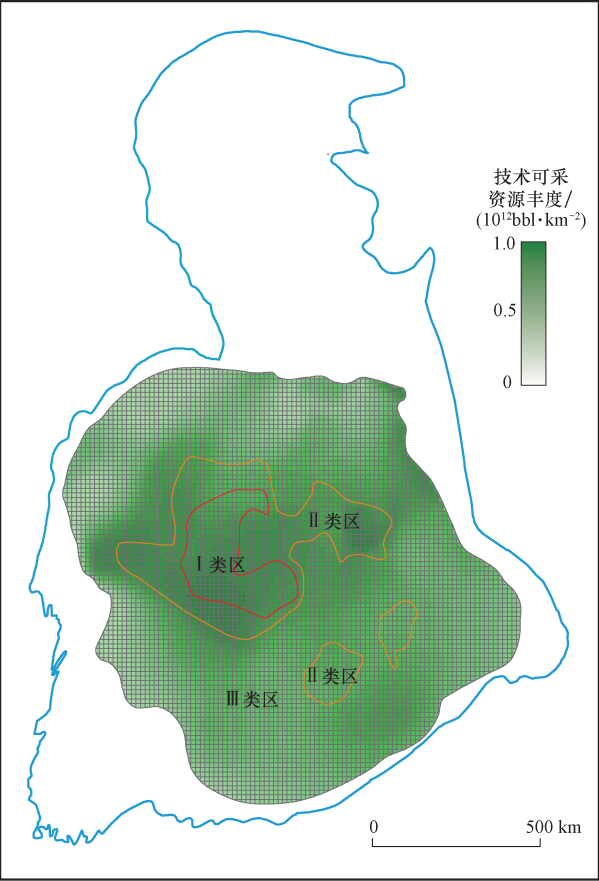


图 7 西西伯利亚盆地巴热诺夫组致密油资源丰度评价
Fig. 7 Evaluation map of tight oil resource abundance in the Bazhenov Formation in the West Siberian Basin

进行资源评价。首先通过致密油选区标准将埋深适中、厚度具备工业开采规模、富有机质的优质烃源岩、处于生油窗范围内的致密油资源区范围划分出来。致密油资源区划分标准为： $TOC > 2\%$ ， R_o 为 $0.6\% \sim 1.1\%$ ，产层厚度大于 14 m ，埋深为 $1\,000 \sim 3\,500\text{ m}$ 。在此基础上，利用 GIS 空间图形叠合插值运算，结合容积法计算致密油的参数公式实现为圈定有利致密油区域的参数等值线图之间的叠加运算，最终圈定西西伯利亚盆地巴热诺夫组有利含油面积达 $124 \times 10^4\text{ km}^2$ ，地质资源量为 $1\,637 \times 10^8\text{ t}$ 。根据目前致密油层可采系数下限取值 4.6% ，计算其致密油技术可采资源量为 $76 \times 10^8\text{ t}$ ，几乎和全美国的致密油可采资源 ($79.8 \times 10^8\text{ t}$) 相当^[22]，未来勘探开发潜力巨大(图 7)。

3.2 未来勘探有利区初探

依据巴热诺夫组页岩有机质含量、有机质成熟度、产层厚度、埋深、与常规油气区共生、构造分区、资源丰度共 7 个关键指标综合分析，将巴热诺夫组致密油分布区划分为 I 类资源富集区，II 类资源富集区和 III 类资源富集区(图 7；表 1)。I 类区位于苏尔古特利亚明隆起到斜坡带，面积 $7 \times 10^4\text{ km}^2$ ，可采资源量 $9.2 \times 10^8\text{ t}$ ，埋深小于 $3\,000\text{ m}$ ，厚度大于 25 m ，高有机质含量 ($TOC > 9\%$)，成熟度适中 ($R_o = 0.7\% \sim 1.1\%$)，紧邻常规油气富集区，资源丰度较高。建议作为介入该区的首选目标，在条件许可的情况下，首先开展前期开发先导实验。II 类区和 III 类区建议在 I 类区取得突破的基础上，作为持续跟进的接替区准备。

4 开采条件

4.1 典型致密油产区地质条件比对

目前，全球大部分致密油成功开发的地区均在北美洲^[26-27]，其中产量最高的两个地区就是美国的威利斯顿盆地巴肯 (Bakken) 组致密油和海湾盆地鹰滩 (Eagle Ford) 组致密油^[28-30]。国内致密油开发最好的地区是鄂尔多斯盆地延长组长 6 段、长 7 段^[31-32]。因此，在俄罗斯巴热诺夫组致密油开发资料较少的条件下，与这几个致密油重要产区关键地质参数的进行对比，能够更为清晰的显示其地质条件优劣(表 2)。对比显示，西西伯利亚巴热诺夫致密油在埋藏深度、热演化程度、储层脆性矿物、孔渗等多项地质参数与鄂尔多斯盆地延长组致密油极为相近，甚至在原地资源丰度、压力系数、有机质丰度方面更优于鄂尔多斯盆地延长组致密油，具有重要的勘探潜力。

生烃条件方面，巴热诺夫组总体与美国巴肯组、鹰滩组致密油地质条件相当，与国内延长组致密油比有机质类型更好 (I - II 型)、丰度更高和成熟度更为适中，生烃条件非常优越，保证了油源的充足。其原地资源丰度高和有利勘探面积大，为其规模开发提供了良好条件。

储集条件方面，巴热诺夫组和美国两个地区基本

表 1 西西伯利亚盆地巴热诺夫组致密油资源分级

Table 1 Resource classification of tight oil in the Bazhenov Formation in the West Siberian Basin

资源分级	$TOC/\%$	$R_o/\%$	厚度/ m	埋深/ m	常规油气	构造特征	资源丰度	面积/ (10^4 km^2)	技术可采 资源量/(10^8 t)
I 类区	>9	$0.7 \sim 1.1$	>25	$<3\,000$	非常富集	隆起 - 斜坡区	高	7.1	9.2
II 类区	>5	$0.6 \sim 1.2$	>20	$<3\,200$	富集	斜坡区	较高	17.6	12.2
III 类区	>2	$0.5 \sim 1.3$	>10	$<3\,500$	局部富集	盆地区	一般	99.3	54.6

表 2 典型致密油产区地质参数对比

Table 2 Comparison of geological parameters between typical tight oil plays

		西西伯利亚盆地巴热诺夫组	威利斯顿盆地巴肯组	海湾盆地鹰滩组	鄂尔多斯盆地延长组
基本特征	时代	晚侏罗世—早白垩世	晚泥盆世—早石炭世	晚白垩世	晚三叠世
	埋深/m	2 200 ~ 3 500	2 100 ~ 3 300	1 300 ~ 3 600	1 200 ~ 2 300
	沉积环境	海相	海相	海相	陆相
	地层总厚度/m	25 ~ 50	15 ~ 45	35 ~ 110	100 ~ 600
源岩特征	厚度/m	16	5 ~ 12	35 ~ 110	40 ~ 110
	TOC/%	5 ~ 17	5 ~ 10	4.5	2 ~ 10
	R _o /%	0.6 ~ 1.1	0.5 ~ 1.3	0.6 ~ 1.3	0.7 ~ 1.3
	有机质类型	I - II 型	II 型	II 型	II 型
储层特征	岩性	硅质岩、粉砂岩	白云质粉砂岩	泥灰岩、钙质页岩	粉 - 细砂岩
	单层厚度/m	<2	0.5 ~ 15	<2	2 ~ 25
	累计厚度/m	25 ~ 45	5 ~ 20	35 ~ 110	5 ~ 50
	脆性矿物含量/%	70	40 ~ 85	20 ~ 45	35 ~ 70
	孔隙度/%	5 ~ 12	4 ~ 11	5 ~ 15	6 ~ 14
	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	0.02 ~ 2.00	0.01 ~ 1.00	0.04 ~ 1.20	0.01 ~ 1.00
	含油饱和度/%	50 ~ 80	68	55 ~ 85	53 ~ 85
工程条件	压力系数	1.3 ~ 1.5	1.2 ~ 1.6	1.4	0.75 ~ 0.85
	压裂深度/m	2 200 ~ 3 500	2 100 ~ 3 300	2 800 ~ 3 600	1 900 ~ 2 200
	泊松比	0.25	0.22 ~ 0.29	0.24 ~ 0.26	0.25
	杨氏模量/GPa	10 ~ 15	15.5	10.3	17
流体性质	原油密度(API)/(°)	29 ~ 46	41 ~ 48	42 ~ 60	31 ~ 60
	气油比/(scf · bbl ⁻¹)	200 ~ 800	500 ~ 1 800	800 ~ 2 000	120
	含油量/(kg · m ⁻³)	26.5	21.9	18.8 ~ 35.4	33.2
	有利勘探面积/(10 ⁴ km ²)	124	26	8	5 ~ 10
	平均 EUR/(10 ⁴ · 井 ⁻¹)	3.55	4.87	3.8 ~ 8.4	4
	原地资源丰度/(10 ⁴ t · km ⁻²)	95	68.5	147 ~ 210	47

相当或较好,孔隙度和含油饱和度都基本持平,渗透性相对较高,但总体上比延长组条件好,呈现利于压裂的特征。在 Salym 油田地区靠近断裂带地区已证实有大量裂缝发育。但是在原油重度方面,巴热诺夫组原油 API 为 29° ~ 46°,相对较低一些^[33],不过仍在中等比重和轻质油范围。

总体上,仅考虑致密油可采相关的地质因素,巴热诺夫组致密油在生烃条件和储集条件两方面都已达到了美国致密油成熟开发区的条件,具有很高的开采可行性。

4.2 可采性分析

对于致密油开采工程上而言,主要考虑埋深、脆性矿物含量和地层压力等。埋深上,巴热诺夫组致密油压裂深度为 2 800 m 左右,稍比延长组深,但与北美致密油基本相当。脆性矿物含量方面,硅质和钙质含量占比超过 70%,并且局部地区有碳酸盐岩和粉砂岩的

夹层,适合水力压裂工艺的开展。地层压力方面,巴热诺夫组地层超压明显,这方面明显优于延长组。因此,适用国内鄂尔多斯盆地延长组的水力喷砂体积压裂及裸眼封隔器分段多簇压裂等致密油开发关键技术,以及水源集中供应、压裂工艺提效、压裂液回收重复利用、丛式井组交替压裂等提效降本的工厂化作业技术均具备在西西伯利亚盆地巴热诺夫致密油高效、规模、低成本的开发实践的地质基础。在 I 类资源区的地质条件更为优越,并且与常规油气富集区重叠,更有利于新的技术手段的经济有效的实施。

另外,早在 1976—1985 年,巴热诺夫组就被认为是大型自生自储型油藏,产能低、采收率低。Rosneft、Shell 等公司在 Maslikhov 油田和 Salym 油田已钻数十口开发井,以直井为主,在进行巴热诺夫组致密油的开采试验,个别井产能可达 600 t/d 以上,不过大多数井产量递减较快^[5,34]。这也都证实了巴热诺夫组内滞留了大量的石油,估计使用水平井分段压裂等新的开发

技术后,将获得更大的单井产能,使得该组致密油变得经济上可采,为西西伯利亚盆地油气产量长期稳定提供保障。

5 结论

1) 西西伯利亚盆地巴热诺夫组是一套非常优质的烃源岩,厚度在 25 ~ 50 m,有机质丰度平均为 7%,以 I - II 型有机质为主,成熟度介于 0.5% ~ 1.1%,在生成并排出了大量的烃类之外,仍有大量的烃类滞留在巴热诺夫组内部,属于致密油富集型资源。

2) 巴热诺夫组岩性以灰质硅质岩、泥质硅质岩为主,夹薄层碳酸盐岩、粉砂岩和多套富含放射虫化石的硅质岩。储集空间主要溶洞、晶间孔、有机质孔,裂缝较为发育。孔隙度在 4% ~ 10%,渗透率在 $0.005 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,以 I 类和 II 类致密储层为主,含油饱和度为 50% ~ 80%。

3) 图形体积法评价巴热诺夫组致密油资源潜力巨大,其总技术可采资源量达 $76 \times 10^8 \text{ t}$,其中 I 类区技术可采资源达 $9.2 \times 10^8 \text{ t}$ 。与其他致密油规模产区相比,巴热诺夫组孔渗物性较好,含油饱和度高,埋深适中,地层超压明显,石英等脆性矿物含量非常高,且局部发育大量的裂缝,综合评价其致密油的可采性非常高。

参 考 文 献

- [1] EIA. Annual energy outlook 2014 [EB/OL]. [2014-05-08]. <http://www.eia.gov/forecasts/AEO/pdf/0383%282014%29.pdf>
- [2] BP. BP energy outlook 2035 [EB/OL]. [2014-01-14]. <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/energy-outlook.html>.
- [3] 任战利,李文厚,梁宇,等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组致密油成藏条件及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, (2): 190-198.
Ren Zhanli, Li Wenhui, Liang Yu, et al. Tight oil reservoir formation conditions and main controlling factors of Yanchang Formation in south-eastern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, (2): 190-198.
- [4] Burlin Y K, Sokolov B A. 俄罗斯的沉积盆地和油气资源(英文)[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 351-361.
Burlin Y K, Sokolov B A. Sedimentary basins and hydrocarbon resources in Russia[J]. Earth Science Frontiers. 2000, 7(4): 351-361.
- [5] 金之钧,王志欣. 西西伯利亚盆地油气地质特征[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 84-91.
Jin Zhijun, Wang Zhixin. Oil & gas geological characteristics of West Siberia Basin[M]. Beijing: Sinopec Press, 2007: 84-91.
- [6] EIA. Russia looks beyond West Siberia for future oil and natural gas growth [EB/OL]. [2014-09-19]. <http://www.eia.gov/today-in-energy/detail.cfm?id=18051>.
- [7] Kontorovich A E, Surkov V S, Nesterov I, et al. Petroleum potential of the west siberian superprovince [C]//Proceedings of the proceedings of the 27th International geological congress. Oil and Gas Fields. Vsp, 1984, 13: 73-83.
- [8] Kontorovich A, Moskvina V, Bostrikova, et al. Main oil source formations of the West Siberian Basin [J]. Petroleum Geoscience, 1997, 3(4): 343-358.
- [9] Peters K, Kontorovich A E, Moldovan J, et al. Geochemistry of selected oils and rocks from the central portion of the West Siberian Basin, Russia [J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(5): 863-887.
- [10] 杜鹏,何登发,张光亚. 西西伯利亚盆地北部大气田的形成条件和分布规律[J]. 中国石油勘探, 2011, (3): 23-30.
Du Peng, He Dengfa, Zhang Guangya. Formation and distribution of giant gas fields in Northern West Siberian Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2011, (3): 23-30.
- [11] 朱伟林,王志欣,宫少波,等. 国外含油气盆地丛书: 俄罗斯含油气盆地[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
Zhu Weilin, Wang Zhixin, Gong Shaobo, et al. Foreign oil and gas basin series: oil and gas basin of Russia [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [12] 陶高强,董清水,聂辉,等. 俄罗斯西伯利亚地台油气成藏条件与分布规律[J]. 世界地质, 2012, 31(1): 139-147.
Tao Gaoqiang, Dong Qingshui, Nie hui, et al. Research on hydrocarbon accumulation condition and distributive regulation of Siberian platform, Russia [J]. Global Geology, 2012, 31(1): 139-147.
- [13] 梁英波,赵喆,张光亚,等. 俄罗斯主要含油气盆地油气成藏组合及资源潜力[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 38-46.
Liang Yingbo, Zhao Zhe, Zhang Guangya, et al. Resource potentials of main plays in the petroliferous basins in Russia [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 38-46.
- [14] Associates G. Petroleum geology and exploration potential in the Former Soviet Republics [M]. Russia: Gustavson Associates, 1992.
- [15] Gavshin V, Zakharov V. Geochemistry of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Bazhenov Formation, West Siberia [J]. Economic Geology, 1996, 91(1): 122-133.
- [16] Goncharov I, Samoilenko V, Oblasov N. Prospects of shale oil Bazhenov Formation in the South-East of Western Siberia [J]. SPE 171170, 2014.
- [17] 卢双舫,黄文彪,陈方文,等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249-256.
Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 249-256.
- [18] Lopatin N, Zubairaev S, Kos I, et al. Unconventional oil accumulations in the Upper Jurassic Bazhenov Black Shale formation, West Siberian Basin: a self-sourced reservoir system [J]. Journal of Petroleum Geology, 2003, 225-244.
- [19] Yuri Z N, Eder V, Zamirailova A. Composition and formation environments of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous black shale Bazhenov Formation (the central part of the West Siberian Basin) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25(3): 289-306.

- Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 216 – 222.
- [17] 袁仕俊, 夏宏泉, 范文同, 等. 库车地区地面岩芯岩石力学实验与应用研究[J]. 石油工业计算机应用, 2013, 77: 47 – 50.
- Yuan Shijun, Xia Hongquan, Fan Wentong, et al. Experiment and application of ground core mechanics Kuqa[J]. Computer Application of Petroleum, 2013, 77: 47 – 50.
- [18] 葛洪魁, 黄荣樽, 庄锦江, 等. 三轴应力下饱和水砂岩动、静态弹性参数的试验研究[J]. 石油大学学报, 1994, 18(3): 41 – 47.
- Ge Hongkui, Huang Rongzun, Zhuang Jinjiang, et al. Experimental study on dynamic and static elastic parameters of water-saturated sands under triaxial stresses[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1994, 18(3): 41 – 47.
- [19] 李敏, 练章华, 陈世春, 等. 岩石力学参数试验与地层破裂压力预测研究[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(5): 15 – 18.
- Li Min, Lian Zhanghua, Chen Shichun, et al. Rock mechanical parametric experiments and the research of formation fracture pressure prediction[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(5): 15 – 18.
- [20] 尤明庆, 苏承东, 杨圣奇. 岩石动、静态参数之间的研究[J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2002, 21(6): 413 – 419.
- You Mingqing, Su Chengdong, Yang Shengqi. Relation between static and dynamic parameters of rocks[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology (Natural Science) 2002, 21(6): 413 – 419.
- [21] Wang Z, Nur A. Dispersion analysis of acoustic velocities in rocks[J]. Journal of the Acoustic Society of America, 1990, 87(6): 2384 – 2395.
- [22] 任科英. 实验室岩石声学速度测试中的频散现象[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 05: 779 – 782 + 836 + 665.
- Ren Keying. Acoustic testing laboratory core speed dispersion phenomenon[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 05: 779 – 782 + 836 + 665.
- [23] 葛洪魁, 陈颀, 林英松. 岩石动态与静态弹性参数差别的微观机理[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 04: 34 – 36 + 7 – 6.
- Ge Hongkui, Chen Yu, Lin Yingsong. Microscopic mechanism of difference between static and dynamic elastic parameters of rock[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences) 2001, 04: 34 – 36.

(编辑 张亚雄)

(上接第108页)

- [20] Zanin Y N, Eder V G, Zamirailova A B G, et al. Models of the REE distribution in the black shale Bazhenov Formation of the West Siberian marine basin, Russia[J]. Chemie der Erde-Geochemistry, 2010, 70(4): 363 – 376.
- [21] Khamidullin R R. Reservoir properties of the Bazhenov formation[J]. SPE 162094, 2012.
- [22] IHS. Going Global: Predicting the Next Tight Oil Revolution[EB/OL]. [2014-09-01]. <http://www.ihs.com/products/cera>.
- [23] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343 – 350.
- Jia chengzao, Zhou Caineng, Li jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343 – 350.
- [24] Ulmishek G F. Petroleum geology and resources of the West Siberian Basin, Russia[J]. USGS Bulltin, 2003: 9 – 20.
- [25] EIA. Technically recoverable shale oil and shale gas resources; an assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States[EB/OL]. [2013-05-01]. <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas>.
- [26] EIA. Review of emerging resources: US shale gas and shale oil plays[EB/OL]. [2011-07-01]. <http://www.eia.gov/analysis/studies/usshalegas/pdf/usshaleplays.pdf>.
- [27] Hartenergy. North American Shale Quarterly[EB/OL]. [2015-03-01]. <https://stratadsadvisors.com>.
- [28] Walls J D, Sinclair S. Eagle Ford shale reservoir properties from digital rock physics[J]. First Break, 2011, 29(6): 97 – 101.
- [29] Pollastro R M, Roberts L N, Cook T A. Geologic assessment of technically recoverable oil in the Devonian and Mississippian Bakken Formation[C]//Geological Survey Digital Data Series DDS-69-W. U S Geological Survey, 2013.
- [30] Hsu S C, Nelson P P. Characterization of eagle ford shale[J]. Engineering Geology, 2002, 67(1): 169 – 183.
- [31] 姚泾利, 邓秀芹, 赵彦德, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 150 – 158.
- Yao Jingli, Deng Xiuqin, Zhao Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 150 – 158.
- [32] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 1 – 11.
- Yang hua, Li Shixiang, Liu Xiangyang. Characteristic and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1 – 11.
- [33] Zumberge J E. Petroleum geochemistry of Upper Jurassic Bazhenov shale source rocks and corresponding crude oils, West Siberian Basin, Russia[C]//Unconventional Resources Technology Conference (URTEC). Colorado: 2014, 1369 – 1376.
- [34] Deacon A, Mackay H. The salym project[J]. SPE 136559, 2010.

(编辑 张亚雄)