

# 俄罗斯页岩油地质特征及勘探开发进展

梁新平<sup>1,2</sup>, 金之钧<sup>1</sup>, Alexander Shpilman<sup>3</sup>, 殷进根<sup>1</sup>, 刘全有<sup>1</sup>, Boris Uspensky<sup>4</sup>

[1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 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. 汉特-曼西斯克州国有地下资源合理利用分析研究中心, 俄罗斯 秋明 625026;

4. 喀山联邦大学地质与石油技术研究院, 俄罗斯 喀山 420008]

**摘要:**俄罗斯主要页岩油资源赋存于西西伯利亚地台的巴热诺夫组和东欧地台的多玛尼克地层,页岩油区可采资源总量大,具备大规模开发利用的基础设施和外部环境,是未来开发利用的重要潜力区。巴热诺夫组主要岩性为硅质泥页岩,分布于上侏罗统-下白垩统,平均厚度为30 m,TOC平均为7%,有机质含量一般大于4%,以I-II型有机质为主,成熟度介于0.5%~1.1%;多玛尼克页岩油层系为一套泥盆系中弗拉阶-石炭系下杜内阶硅质/含硅的泥质石灰岩,整体厚度在100~600 m,有机碳含量在0.5%~24%,以I-II型有机质为主,在伏尔加-乌拉尔盆地中北部成熟度介于0.5%~1.5%,南部靠近滨里海地区以生气为主。目前虽然受国际油价影响,俄罗斯页岩油资源的勘探开发探索却未停滞;2016年对巴热诺夫组146口垂直井进行测试,在活跃天数范围内日产油流量10.8 t,对36口水平井进行测试,在活跃天数范围内平均日产流量7.5 t;俄罗斯天然气工业股份有限公司2018年成立的巴热诺夫技术中心,目前已将水力压裂的时间减少50%,单位生产成本减少40%。在俄罗斯开发页岩油资源享受矿产开采零税率,不少油田地质资料充分、相互之间距离不远且基础设施完善,未来俄罗斯页岩油有望实现商业开采。

**关键词:**页岩油;巴热诺夫组;多玛尼克相;上侏罗统;伏尔加-乌拉尔盆地;东欧地台;西西伯利亚;俄罗斯

中图分类号:P618.13

文献标识码:A

## Geological characteristics and latest progress in exploration and development of Russian shale oil

Liang Xinping<sup>1,2</sup>, Jin Zhijun<sup>1</sup>, Alexander Shpilman<sup>3</sup>, Yin Jinyin<sup>1</sup>, Liu Quanyou<sup>1</sup>, Boris Uspensky<sup>4</sup>

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

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

3. V. I. Shpilman Research and Analytical Center for the Rational Use of the Subsoil (Autonomous institution of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra), 75 Malygina street PO box 286, Tumen 625026, Russia;

4. Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia]

**Abstract:** Russia is rich in unconventional shale oil resources, covering almost all sedimentary basins ranging from Cambrian to Neogene in age. The major areas of prospecting potential in Russia are the Bazhenov Formation of the Western Siberian platform and the Domanik formations in the Eastern European platform. Bazhenov Formation is the Upper Jurassic-Lower Cretaceous in age. Its main lithology is siliceous shale, with a thickness of 30 m and TOC of 7% on average. Its TOC is generally above 4%, mainly falling on kerogens Type I-II domain, with the maturity ranging from 0.5% to 1.1%. While Domanik formations, also called "Domanik facies" or "Domanik deposits" from the Paleozoic Upper Devonian (Russian stage-D<sub>3</sub>fr<sup>2</sup>) to Lower Carboniferous (Tournaisian-C<sub>1</sub>t) in age, in the Volga-Urals and Timan-Pecher oil and gas provinces, are dark siliceous-clayey-bituminous limestones falling on kerogens Type I-II domain, with an overall thickness of 100-600 m, TOC of 0.5-24%, and maturity ranging from 0.5% to 1.5% in the north-central part of Volga-Ural Basin. However, their gas production is mainly concentrated on the southern part of Caspian sea. Despite of the unfavorable impact due to the low international oil prices, the exploration and development of shale oil resources in Russia have never been stopped: 146 vertical wells in the Bazhenov Formation were tested in 2016, with an average daily pro-

收稿日期:2019-02-06;修订日期:2019-03-15。

第一作者简介:梁新平(1987—),女,博士,页岩油气地质。E-mail:liangxinping\_syky@sinopec.com。

通讯作者简介:金之钧(1957—),男,中国科学院院士,石油地质。E-mail:jinzj\_syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41625009,41811530094);中科院学部项目(KKBE170026)。

duction rate of 10.8 t during the active days; meanwhile 36 horizontal wells were tested with an average daily production rate of 7.5 t during the active days. The Bazhenov technology center, set up by Gazprom in 2018, has cut down the time of hydraulic fracturing to 50%, and unit production cost to 40% in the development of Bazhenov oil. Moreover, the development of shale oil resources in Russia can enjoy preferential policies like zero tax rate for mineral exploitations. Together with its existing favorable conditions, including abundant geological data for most oil fields, relatively short distances among these oil fields, and perfect infrastructures, the expectation is very positive for the future commercial development of shale oil in Russia.

**Key words:** shale oil, Bazhenov Formation, Domanik facies, Upper Jurassic, Volga-Ural Basin, Eastern European platform, Wesermt Siberia, Russia

美国页岩油气勘探开发的成功极大地推动了世界范围内对页岩油气资源的探索。全球范围内除美国之外,俄罗斯、中国、加拿大和阿根廷等也有巨大的页岩油气资源潜力。近年来俄罗斯开始密切关注非常规石油的前景,虽然勘探开发区块不多,但在东欧地台和西伯利亚地台早已有针对非常规页岩油层段布置的参数井,如位于鞑靼斯坦共和国、乌得穆尔特共和国、乌里杨地区和汉特-曼西斯克地区等<sup>[1-5]</sup>。据 EIA 资料,俄罗斯页岩油技术可采资源量约  $1.07 \times 10^{10}$  t,居世界首位;页岩气技术可采资源量约  $6.90 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>,居世界第九位<sup>[6]</sup>。俄罗斯自然资源与环境部 Сергей Донский 表示,巴热诺夫组石油地质资源量为  $1.74 \times 10^{11}$  t,地质储量约  $(1 \sim 6) \times 10^{10}$  t,其中已开发的 92 个油藏技术可采储量为  $5.00 \times 10^8$  t,目前对该地层的储量计算方法各科研机构尚未达成一致,石油产量不足  $1.00 \times 10^6$  t/a,尚未商业有效开发。俄罗斯石油地质科学院(VNIGRI)对东欧地台多玛尼克页岩油进行了评估,认为在季曼-伯朝拉含油气省该地层原地资源量为  $1.14 \times 10^{11}$  t 石油和  $3.40 \times 10^{13}$  m<sup>3</sup> 天然气,其中包括可采资源量  $8.30 \times 10^9$  t 原油和  $4.80 \times 10^9$  m<sup>3</sup> 天然气,该资源量在伏尔加-乌拉尔盆地更多,技术可采量分别为  $1.78 \times 10^{10}$  t 石油和  $8.30 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup> 天然气。

俄罗斯对难开采石油的定义包括了页岩油、油页岩、致密砂岩油、沥青和稠油,一般指从低渗透储层的岩石中开采出的石油,烃源岩中的页岩油在俄罗斯属于难开采石油的一种。2013 年俄罗斯政府有关部门出台了税收减免政策,鼓励开采页岩油,2018 年获得  $1.2 \times 10^5$  桶/天的页岩油产量,俄罗斯政府希望在 2025 年前将难开采石油在全国石油总产量中的比例从目前的 1% 提高到 10% 甚至更多,其中首先开发西西伯利亚的巴热诺夫组页岩和东欧地台的多玛尼克层系页岩<sup>[7]</sup>。这些页岩均为与北美地质条件相似的海相沉积,其勘探开发还处于起步阶段,未来仍面临技术、成本和环境等方面的挑战。埃克森美孚公司、荷兰皇

家壳牌集团、英国石油公司和挪威国家石油公司都曾与俄罗斯国家石油公司签署过共同开发页岩资源的协议,但在 2014 年之后受国际形势影响,目前只有挪威国家石油公司共同参与开发北极和非常规项目。俄罗斯本国也有多家科研机构参与页岩的地质-地球化学及钻井-开发工艺研究,包括莫斯科大学、俄罗斯石油天然气大学、俄罗斯能源地质开发研究院、油气地质研究院和地质勘探研究院等,目前已明确了勘探开发目的层系和主要研究区,部分地区测试也取得了大量进展。因此,本文将简单介绍俄罗斯重点盆地的页岩油地质特征,结合其近年最新的勘探开发进展,探讨其前景,为中国石油公司未来进入俄罗斯非常规领域提供勘探开发和投资建议。

## 1 典型盆地页岩油地质特征

俄罗斯主要的页岩油地层分布于西西伯利亚的巴热诺夫(Bazhenov)组和东欧地台的多玛尼克(Domanik)层系。巴热诺夫组是俄罗斯最有潜力的页岩油地层,形成于上侏罗统-下白垩统最大规模的海侵时期,厚度为 10~50 m,覆盖了西西伯利亚约  $3.6 \times 10^6$  km<sup>2</sup> 的面积,是盆地主要的烃源岩;东欧地台季曼-伯朝拉盆地和伏尔加-乌拉尔盆地的多玛尼克层系也是盆地的主要烃源岩,主要形成于上泥盆统弗拉阶的海侵时期,厚度不等,在全伏尔加-乌拉尔盆地内均有分布,在季曼-伯朝拉盆地主要分布于东部地区。两套烃源岩陆上分布面积均大于  $1.0 \times 10^6$  km<sup>2</sup>(图 1),页岩油区可采资源总量大,具备大规模开发利用的基础设施和外部环境,是未来开发利用的重要潜力区。其他的页岩油资源赋存于东西伯利亚盆地的寒武系库阿纳姆组(Kuanam)、北高加索地区的古近系哈杜姆组(Khadum)、加里宁格勒地区的志留系兰多维利组(Landoverly)和贝加尔湖周缘上白垩统火山硅质岩等地区。致密油资源有西西伯利亚地区的侏罗系秋明组(Tyu-

men) 和下白垩系阿奇莫夫组 (Achimov) 等层系<sup>[1,6,8,9]</sup>。东西伯利亚深层和贝加尔湖周缘等地区页岩资源潜力丰富,但目前整体研究程度很低,短时期内不会大规模勘探开发;西西伯利亚页岩油地层与致密油地层相邻,面积大、分布广、资源潜力大,有望实现商业性开采,是未来首要开发区<sup>[7]</sup>。(图1;表1)

1.1 巴热诺夫组地质特征

西西伯利亚盆地是一个巨大的中-新生代沉积的沉积中心,基底由复杂的褶皱和变质岩组成,在二叠纪最终形成。巴热诺夫组是西西伯利亚盆地的主要生油岩地层,全盆地大面积广泛分布,为侏罗系和白垩系的含油气地层分界,是全盆地的地质标志层,在地震和测井上均有明确异常显示,可为全盆地和局部地区的地质划分、地质构造和盆地建模提供统一的基础<sup>[10-12]</sup>。

巴热诺夫组页岩通常由黑色、硅质页岩组成,粉砂质含量低,有机质含量高。水平层理中很容易看到各种细粒度的层状成分(硅质、碳质和黄铁矿)<sup>[13]</sup>。XRD衍射实验表明,大部分的样品均以石英为主要矿物,其次为钠长石、似云母矿物(伊蒙混层)和黄铁矿,通常都是次要矿物。其他粘土矿物(高岭石和绿泥石)偶见,通常含量不多,而碳酸盐矿物(方解石和白云石)也偶尔可见<sup>[13]</sup>。岩相上巴热诺夫组主要为低粘土质硅岩、泥质-钙质硅岩、硅质页岩、灰质-硅质页岩、灰泥及碳酸盐岩6类(图2)。

岩样化学分析表明:泥质硅质岩和硅质岩中有机质含量分别为13.60%,2.70%,氧化铝为8.00%,17.60%,硫化物为5.16%,2.40%。在高P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量的岩石中,这些数值分别为17.10%,9.17%和7.26%;P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>在泥质硅质岩和硅质岩中的平均含量很相近,为

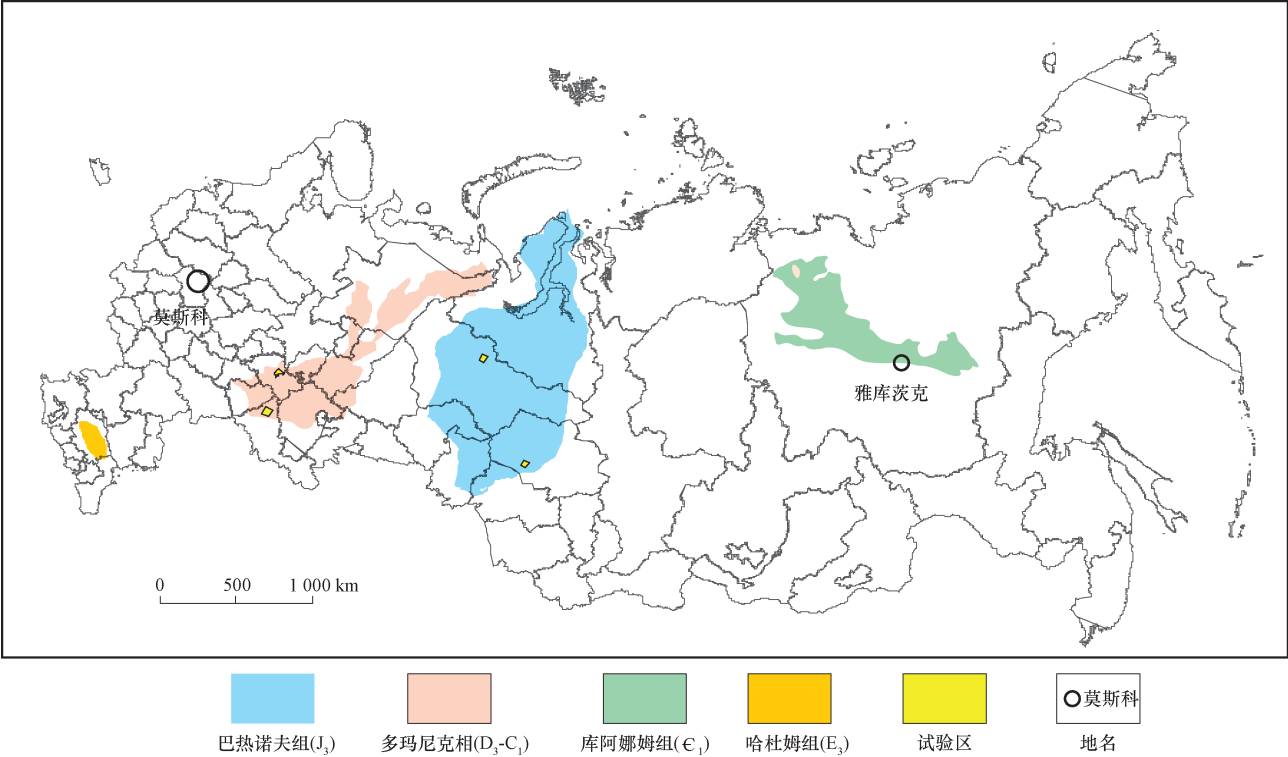


图1 俄罗斯主要页岩油地层分布区

Fig.1 The distribution of major shale oil strata in Russia

表1 俄罗斯页岩油资源地质参数 (据全俄石油地质研究院 VNIGNI,2016)

Table 1 Geological parameters of Russian shale oil resources (according to All-Russian Institute of Petroleum Geology VNIGNI,2016)

| 地层                                     | 盆地      | 面积/(10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> ) | 岩性     | 埋深(顶部)/m      | 厚度/m      | TOC/%      | R <sub>o</sub> /% |
|----------------------------------------|---------|---------------------------------------|--------|---------------|-----------|------------|-------------------|
| 巴热诺夫组(J <sub>3</sub> )                 | 西西伯利亚   | 132.2                                 | 泥页岩    | 2 500 ~ 3 300 | 20 ~ 70   | 2.0 ~ 17.0 | 0.50 ~ 1.50       |
| 多玛尼克相(D <sub>3</sub> -C <sub>1</sub> ) | 伏尔加-乌拉尔 | 89.3                                  | 泥质碳酸盐岩 | 500 ~ 5 000   | 100 ~ 800 | 0.5 ~ 24.0 | 0.60 ~ 3.00       |
| 多玛尼克相(D <sub>3</sub> -C <sub>1</sub> ) | 季曼-伯朝拉  | 19.0                                  | 泥质碳酸盐岩 | 1 800 ~ 4 500 | 0 ~ 90    | 2.0 ~ 20.0 | 0.70 ~ 1.37       |
| 库阿娜姆组(Є <sub>1</sub> )                 | 东西伯利亚   | 56.5                                  | 泥页岩    | 0 ~ 500       | 30 ~ 70   | 1.6 ~ 26.0 | 0.50 ~ 2.00       |
| 哈杜姆组(E <sub>3</sub> )                  | 北高加索    | 19.6                                  | 泥岩     | 1 500 ~ 1 800 | 30 ~ 200  | 0.5 ~ 4.0  | 0.60 ~ 1.10       |



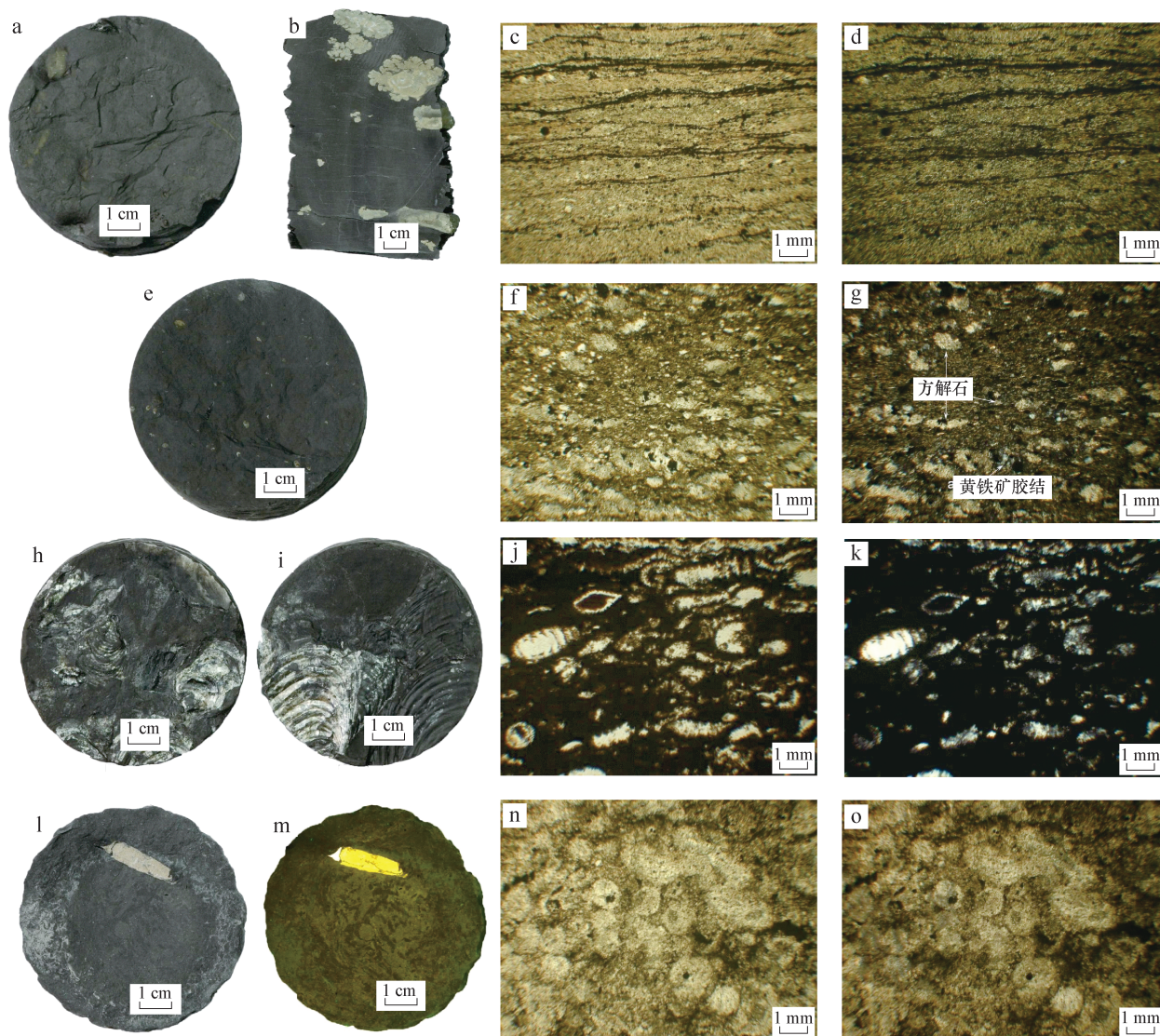


图2 西西伯利亚巴热诺夫组页岩主要岩性照片

Fig.2 Typical lithologic photos of the Bazhenov shale in Western Siberia

a,b. 纹层状泥质硅质岩,深灰色、含碳,松散的泥质岩,密集、坚韧、有孔,具有水平的丘状剪切,黄铁矿燧石丰富;c,d. 具纹层状结构,含绿泥石-水云母的泥质岩与煤互层;e. 泥质碳质硅质岩,深灰-褐色,似沥青质,见贝壳状裂缝;f,g. 见方解石,黄铁矿化的绿泥石-水云母胶结,薄片状及层状结构;h,i. 硅质放射虫岩,具燧石及圆丘状断裂;j,k. 见沥青质放射虫;l. 日光照片;m. 荧光照片,硅质碳质放射虫岩,碳质、致密、坚韧、块状,具有硬质和丘状裂缝;n,o. 见碳酸盐化的沥青质放射虫。c,f,g,n 为单偏光,d,j,k,o 为正交光

0.25%和0.20%。异常成分的河道岩石以极低  $TOC$  平均含量(粉砂质泥岩 0.6%,泥质粉砂岩 0.24%)为特征,但很多数量的岩石是低于这一数值的。粉砂质泥岩中的硫化物平均含量为 0.60%,泥质粉砂岩中为 0~1.09%, $Al_2O_3$  为 10.38%和 18.70%。白云岩中包含了超过 70%的碳酸盐矿物,其他成分很少。相比于硅质岩,碳酸盐中  $TOC$ ,  $Al_2O_3$  和硫化物的含量(2.90%,2.78%,2.70%)与泥质硅质岩中的更相似。

泥质硅质岩中  $SiO_2$  含量(51.80%)与硅质岩中  $SiO_2$  含量(54.80%)相近,但在这些岩石中的  $SiO_2$  含量与不同的矿物有关。根据岩石矿物组成的化学分析

显示,泥质硅质岩中石英、粘土矿物和长石的含量分别是 37.06%,20.66%和 6.50%,硅质岩中分别为 24.76%,50.90%和 12.21%。泥质硅质岩、硅质岩、碳酸盐岩和异类岩中黄铁矿的平均含量分别为 9.50%,4.48%,5.09%和 0.98%。泥质硅质岩和硅质岩最本质的不同在于前者有更高的有机质、石英(主要是自生)、黄铁矿含量和较低的粘土矿物、长石含量<sup>[13]</sup>。

另外,在巴热诺夫组岩心观察过程中经常可见碳酸盐岩夹层,某些岩心观察中见火山灰夹层,同时切面上可见钙质、方解石裂缝,以及甲壳动物、浮游生物等



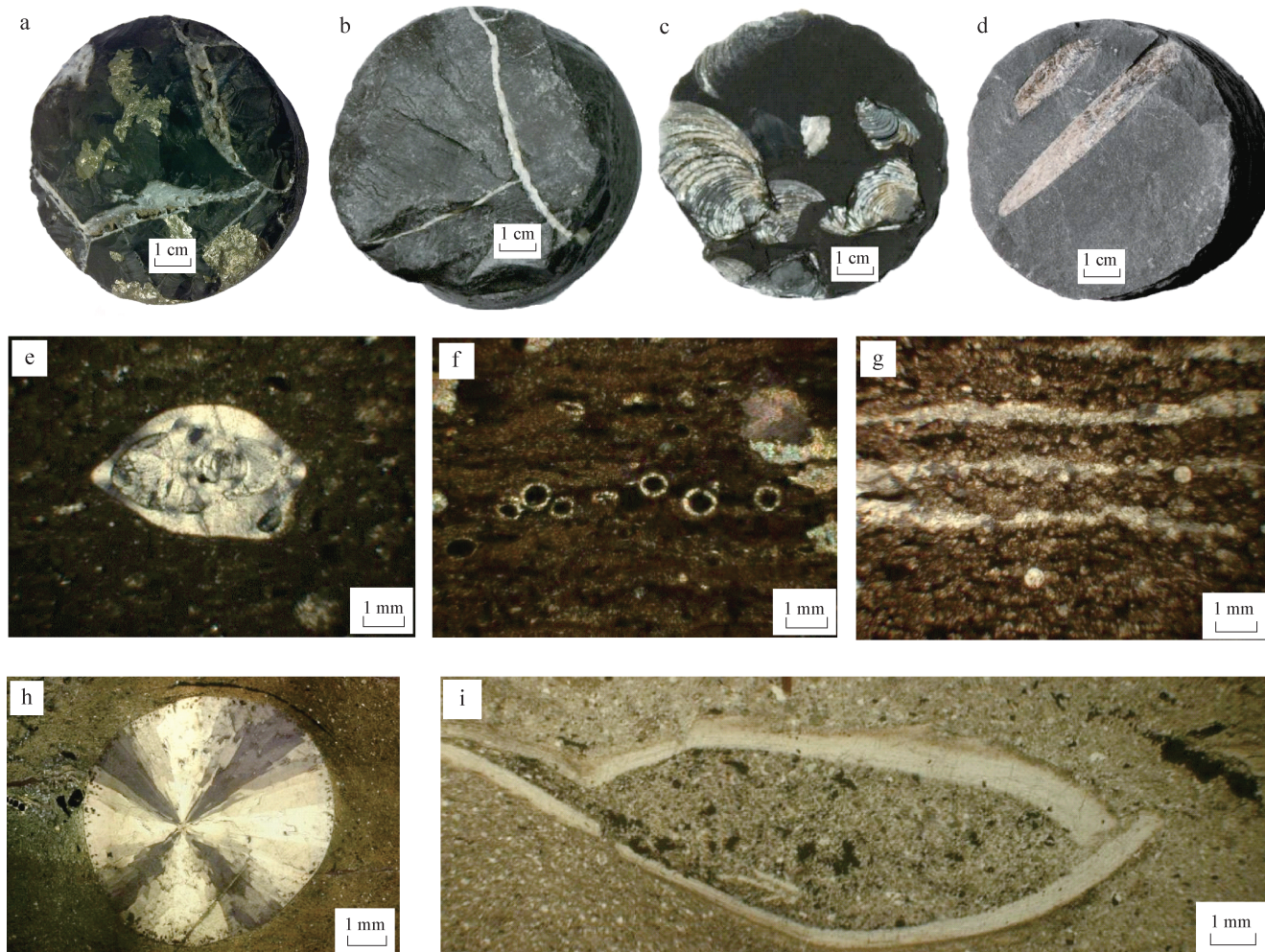


图3 西西伯利亚巴热诺夫组页岩岩石断面及古生物特征

Fig. 3 Rock section and paleontologic features of the Bazhenov shale in Western Siberia

a. 方解石裂缝,断面发育黄铁矿;b. 裂缝发育碳酸盐岩;c. 双壳类残骸断面;d, h. 剪石类;e. 甲壳动物残骸;f. 单一浮游生物;g. 钙质裂缝;i. 介形壳

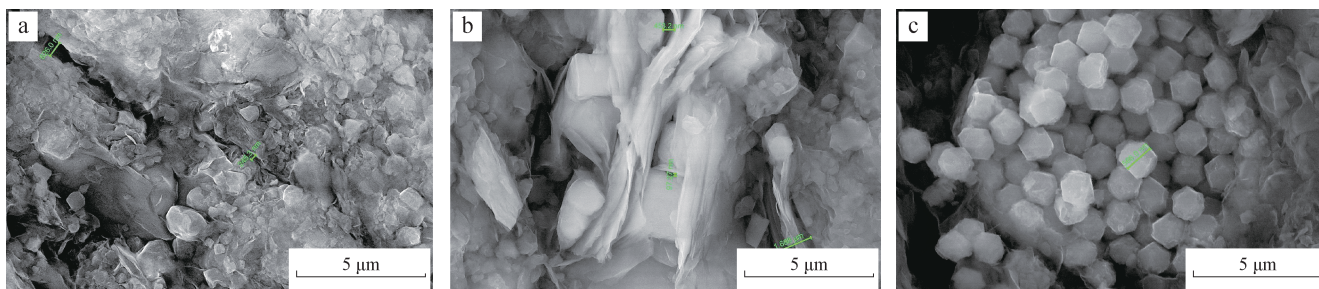


图4 西西伯利亚巴热诺夫组典型页岩扫描电镜照片

Fig. 4 SEM photos of typical Bazhenov shales in Western Siberia

a. 断裂;b. 充满粘土矿物和黄铁矿的孔隙;c. 黄铁矿

化石,发育放射虫(图3),可与全球其它地区放射虫类比<sup>[14-15]</sup>,微观镜下可见黄铁矿颗粒与粘土矿物孔隙共存(图4)。

巴热诺夫组页岩分布较广但深度却分布不均,其干酪根成熟度和岩石分类有很大的不同。西西伯利亚盆地巴热诺夫组中最中央、最陡的部分目前正处于生

油窗期,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%<sup>[16-20]</sup>。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,  $R_o$  范围在0.5~1.3%,主要为0.7%~1.1%,盆地北部地区局部  $R_o$  可达1.3%,进入生气阶段。同时其边缘地区及演化较

低的地区,只是接近生油窗。在伏尔加-早贝利阿斯期西西伯利亚海的深水区有机质含量大都超过15%~20%<sup>[21-22]</sup>。

巴热诺夫组页岩总有机碳含量在2%~11%,平均为4%。前人研究<sup>[3,12,18]</sup>西西伯利亚盆地有机质类型主要为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。

纵向上巴热诺夫组整体可划分为上、中、下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,平均孔隙度为7.5%,含油饱和度在80%左右。中段以泥质硅质岩,平均孔隙度为5.5%,含油饱和度在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,平均孔隙度为7%,含油饱和度在50%~60%。

## 1.2 多玛尼克地层地质特征

“多玛尼基蒂”(Доманикиты)一词源于多玛尼克地层,1843年由克伊泽尔林(Кейзерлинг А)第一次提出。后来,1939年俄罗斯科学院院士斯特拉霍夫(Страхов Н М)引入“多玛尼克相”(Доманиковые фации)一词,将与上泥盆中弗拉阶多玛尼基蒂层段相似的沉积均称为多玛尼克相<sup>[16]</sup>。当时的多玛尼基蒂地层岩性上主要为黑色和暗褐色沥青质和硅质碳酸盐岩叠层,并含有少量的粘土(5.9%~13.6%),沥青质有机物含量较高,约为18.7%,硅化程度也较高,约为37.23%。后来在乌拉尔山、伏尔加-乌拉尔地区和布里别特凹陷中上泥盆系中弗拉阶均识别出类似的地层,从岩相上看,其成分多样化明显,但主要岩性均为碳酸盐岩,存在大量的粘土物质,游离的二氧化硅和有机物质,结构上薄层、页岩层明显,且多有黄铁矿作用,层理中有大量的锥壳纲类(Coniconchia)古生物遗迹残留,例如竹节石(Tentaculites)和光壳节石(Styliolona)。这是最初多玛尼克段具体的相带含义,后期“多玛尼克相”和“多玛尼克沉积”等词在地质概念上均是由该意义演化而来,近年来为将多玛尼克段(多玛尼基蒂段)与多玛尼克相区别,将多玛尼基蒂段修改为谢米卢基段(Semiluksk)<sup>[23]</sup>。

多玛尼克相包含了乌拉尔前缘、季曼-伯朝拉盆

地和伏尔加-乌拉尔盆地欠补偿的洼地和坳陷区内与多玛尼克段相似的沉积,地层上一般覆盖了从上泥盆中弗拉阶的萨尔噶耶夫段(Carg)到下石炭的杜内阶(图5)。该套地层形成于欠补偿的深水盆地中,盆地底部为水动力条件安静的还原环境,底水受到硫化氢污染,在此条件下底水生物群(介形亚纲,无铰壳腕足动物)以及浮游生物群(主动浮游生物和在水层中“浮游”的有机物)大量繁殖,例如棱角石目、竹节石、牙形虫、鱼纲、真蕨和放射虫类等。乌拉尔前缘地区中泥盆艾菲尔阶Aphon亚阶Cheroyarsk和艾姆阶Vyazovsk段沉积物的矿物成分、沉积条件等与在乌赫塔地区的多玛尼克组在岩相上也具有一定的相似性,因此一定条件下可以互称<sup>[23-25]</sup>。

上泥盆中弗拉阶谢米卢基段(Semiluksk)岩性上表现为深灰色、黑色、成泥岩状、细粒石灰石、含大量沥青、硅质含量高、油侵明显,黑色硅化石灰岩岩石裂缝的缝隙尺寸为6 mm×8 mm和3 mm×4 mm,裂缝接触面上有充填灰褐色的有机质,裂缝中被黑色粘土和次生方解石的石灰石小颗粒所填充;部分层段灰黑色硅岩含白云石透镜体,裂缝宽度达1 mm,边缘填充石英颗粒,内部为方解石;另外含黑色高硅质、高沥青质灰泥岩和泥灰岩夹层,层理明显。

多期的构造运动在上泥盆-下石炭系沉积时期多玛尼克地层形成时期起到了主要作用,导致了整个俄罗斯东南板块的下沉,形成了深水欠补偿的多玛尼克盆地。在门德姆(Mendeimsk)时期发生了大规模的海退,一直持续到杜内阶,因此在伏尔加-乌拉尔盆地形成了卡玛-基耐尔凹陷系统,多玛尼克沉积主要沿其主轴带分布,岩性表现为泥灰岩和石灰岩的交替,靠近坳陷内侧边缘的碳酸盐岩也含少量沥青。到早石炭纪博布里科期甚至更晚的时期卡玛-基耐尔凹陷系统从伏尔加-乌拉尔盆地的北部向东南部延伸,并在这个方向上逐渐扩大。

多玛尼克相形成时期整体可分为3个主要的古地理带:含淤泥洼地的相对深水陆棚,浅海大陆架带和海岸带。深水陆棚区与洼地主轴区相连,此时的多玛尼克盆地沉积深度在100~300 m。浅水大陆架带与洼地的侧缘相连,而海岸带则在背斜隆起部位(图6)。

谢米卢基时期多玛尼克页岩油沉积层厚度范围从5 m到60~90 m,门德姆-杜内阶的单层沉积具有与谢米卢基时期类似的厚度以及沉积亚相类型,同一时期盆地斜坡的地层厚度有着显著增加,厚度为300~400 m,部分隆起区可达600 m,在相邻的隆起拱顶处它们的厚度再次降低至100 m左右。



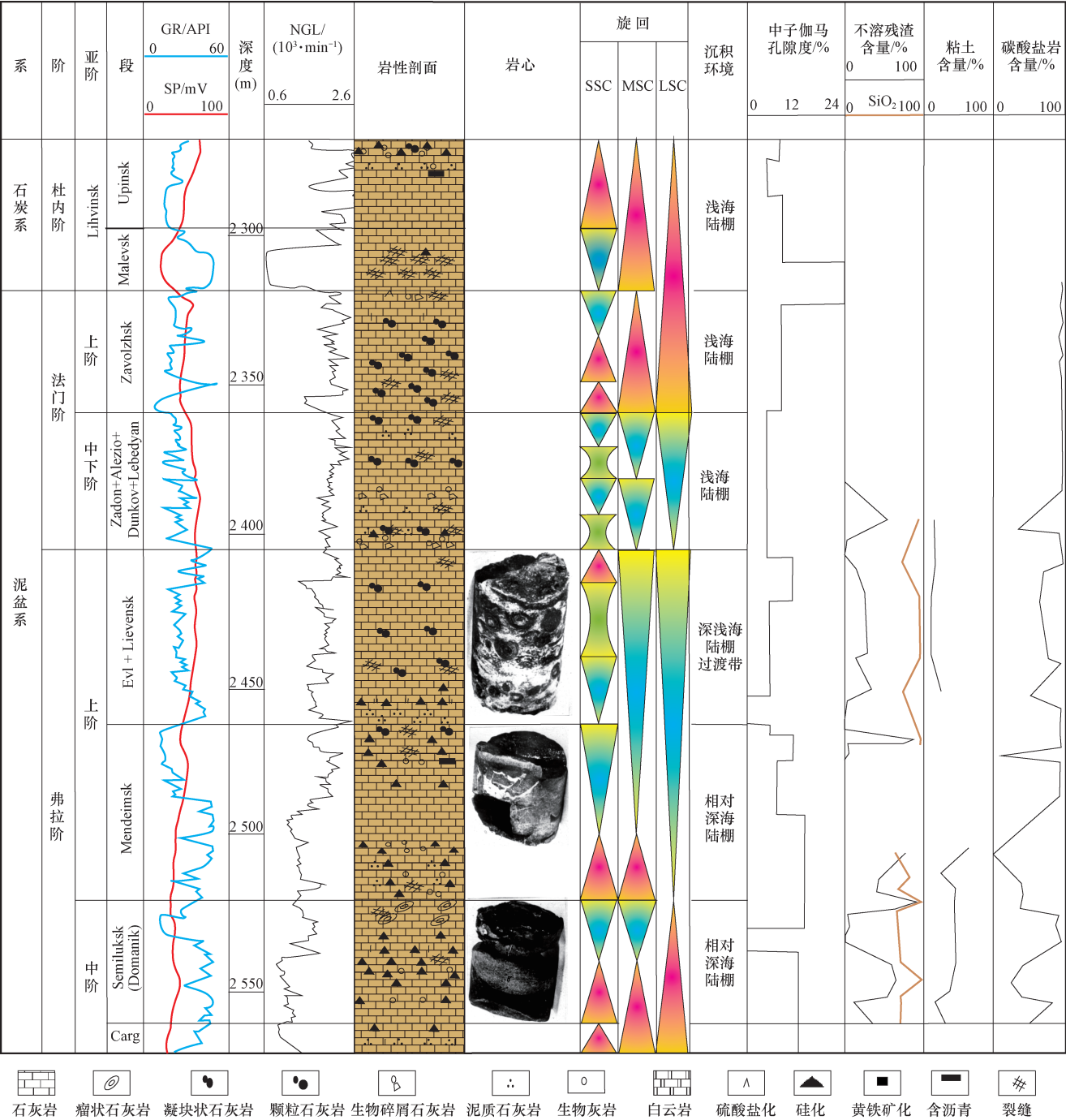


图 5 伏尔加-乌拉尔盆地萨马拉地区 B8 井单井沉积环境及层序综合分析<sup>[16]</sup>

Fig. 5 Comprehensive analysis on sedimentary environment and sequences of Well B8 in Samarra region, Volga-Urals basins<sup>[16]</sup>

伏尔加-乌拉尔盆地上泥盆-下石炭系可看作一个新的构造沉积旋回,发育 4 个中期旋回和多个短期旋回(图 5)。构造和古地貌决定了多玛尼克相形成时期的构造及沉积相带的发育,决定了卡玛-基耐尔欠补偿凹陷系统(图 6,图 7)的形成及其两侧礁脉的发育。

卡玛-基耐尔凹陷系统的外缘和侧缘陆架发育大规模的礁体和生物礁,与凹陷区内的构造相带毗邻。

位于欠补偿凹陷侧缘区域的礁体发育规模最大、范围最广,覆盖了整个凹陷系统的侧缘。晚泥盆纪礁群是在海退时期形成的,此时年轻的裂谷地层一直向盆地内相对深水区转移,多玛尼克岩相的分布面积急剧减少,主要被限制在卡玛-基耐尔凹陷系统内部,由此形成了凹陷区、斜坡以及台地上沉积岩相的差异。在洼地区的南部和东南部沉积深度增大,深海沉积物的比例随之增加,岩石压实导致它们的储集性降低,因此在



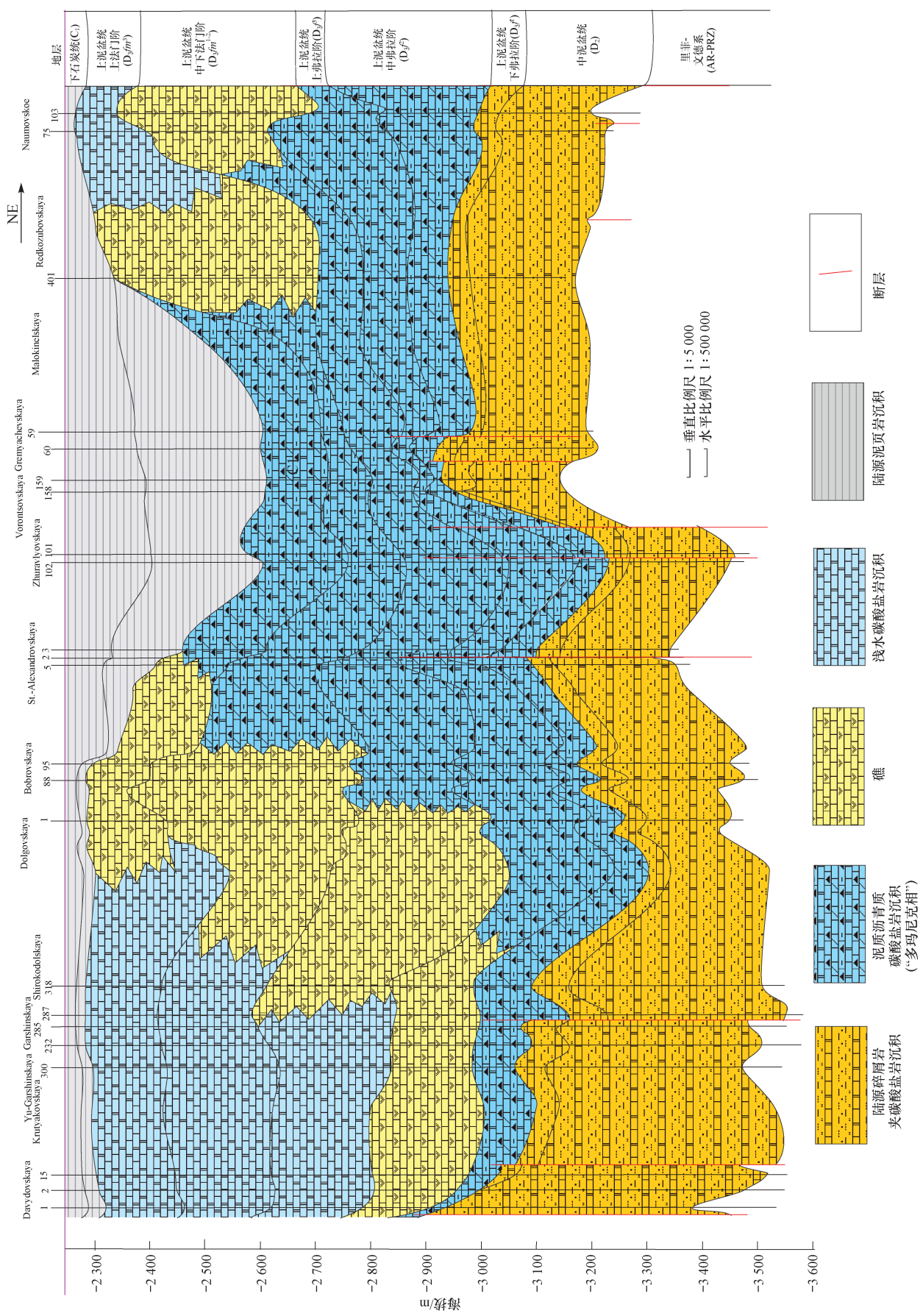


图6 俄罗斯地台东南部奥伦堡地区Muhanovo-Erohovsk (ME) 凹陷沉积相剖面

Fig.6 Sedimentary facies profile of ME sag in Orenburg area, southeastern Russian platform

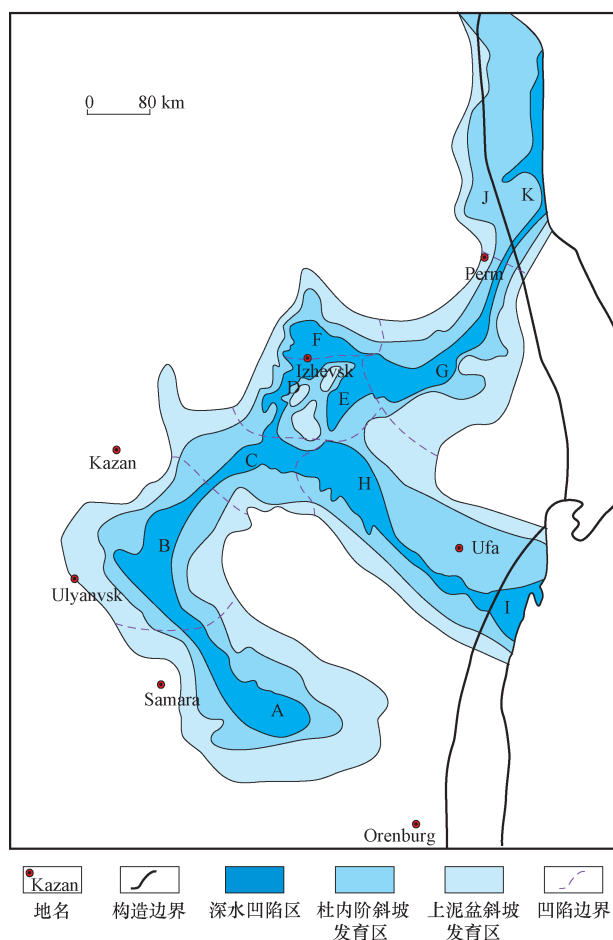


图7 伏尔加-乌拉尔盆地卡玛-基耐尔凹陷系统  
杜内阶的分布特征

Fig. 7 The structure of the Kama-Kinel depression system in  
Tournaisian, Volga-Urals basins

A. Muhanovo-Erohovsk; B. Ust-Cheremshansk; C. Lower Kama;  
D. Mozhginsk; E. Sarapulsk; F. Fokinsk; G. Shalym'skogo and Kali-  
nin; H. Aktanysh-Chishminsk; I. Inzer-Usolsk; J. Chelvinskogo  
Dobriansk; K. Kizelovsk

此条件下裂缝改善了储集性能。

据俄罗斯化石能源地质与开发研究院资料,多玛尼克地层有机碳含量为0.5%~24%,以I-II型有机质为主,伏尔加-乌拉尔盆地中北部成熟度介于0.5%~1.5%,南部靠近滨里海地区以生气为主;脆性矿物含量高,储集空间主要溶洞、晶间孔、有机质孔,且局部发育大量的裂缝;剖面上有机物的含量和沥青成分的变化范围很大,从谢米卢基层的26%到扎沃尔时期(Zavolzhsk)的2%~3%。沥青中三氯甲烷含量为0.1%~2%。谢米卢基层沥青化程度为5%~10%,晚法门阶为25%~30%;自下而上剖面上从底部到顶部有机质、氯仿沥青A的含量逐渐减少,生烃潜力的逐渐降低。

目前东欧地台的各大油田都位于开发后期,因此该区域广泛分布的多玛尼克油页岩岩相含沥青的硅

质、泥质沉积物将会是未来勘探增储的重点目的层。结合钻井、岩心等地质及地球物理资料综合分析认为,最有前景的地区是卡玛-基耐尔凹陷系统中的Muhanovo-Erohovsk 凹陷(图7),该区有机质含量高且成熟度适中,多玛尼克页岩总厚度大且裂缝非常发育。

## 2 其他地区页岩油资源特征

### 2.1 东西伯利亚深层页岩

东西伯利亚页岩油潜力区为古老西伯利亚地台的上元古界和古生界。库阿娜姆地层属于中-下寒武统的沥青质页岩沉积,有非常薄的灰岩夹层,面积约 $7.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图8),在Olenek地区露头出露厚度50~70 m,有毫米-厘米级薄夹层;在Tajmyr湖的东部Turuzovskoy亚阶有5段,总厚度约160 m,为泥页岩与硅质岩互层,自下而上为70 m页岩、20 m海绵岩、15 m页岩、25 m海绵岩和20 m页岩,有机质含量在0.73%~1.95%;在Minusinskom凹陷Bystryanskaya亚阶也存在约26 m的页岩层<sup>[3]</sup>。该区贝加尔湖-帕托姆斯基地区低谷里非系也有一套很好的烃源岩,厚度约50 m,有机质含量平均为4%,下文德系含气页岩厚度约40 m。根据两口已钻参数井(Chaykinsk 279和Chaykinsk 376)预估Kochergat组可采页岩油资源量为 $(3.0 \sim 7.5) \times 10^9 \text{ t}$ ,可采页岩气资源量 $5.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。东西伯利亚可采页岩油资源量俄罗斯学者预估高达 $3.0 \times 10^{10} \text{ t}$ ,为西西伯利亚的2倍之多,该地台的页岩资源未来也有望成为俄罗斯主要产油气区<sup>[1-3]</sup>。

### 2.2 北高加索哈杜姆页岩地层

对高加索盆地东部和中部的哈杜姆地层的研究始于1924年,该段页岩油资源丰富,研究初期在Benoisk地区Sta649井(深度3 206 m)获得过持续3周600 t/d的流量。哈杜姆地层属于古近系渐新统吕泊阶,岩性上以沥青质灰质泥岩、页岩为主,有灰泥夹层,深度范围1 000~4 000 m,中部地区2 000~3 000 m,整体厚度30~200 m;有机质含量0.26%~8.35%,以II-III型干酪根为主;俄罗斯学者认为潜力区位于Louisiana区的Hinesville区块,有机质含量平均4.46%,TOC一般大于3%,生烃潜力 $S_1 + S_2$ 位于6.96~13.92 mg/g,目前针对这一页岩层系俄罗斯也在积极探索中<sup>[3]</sup>。

### 2.3 贝加尔周源、俄罗斯东北部及远东地区

Verkhoyansk-Kolyma地区、贝加尔周源山脊、萨哈林州、堪察加半岛西部、楚科奇和其他一些地区页岩油

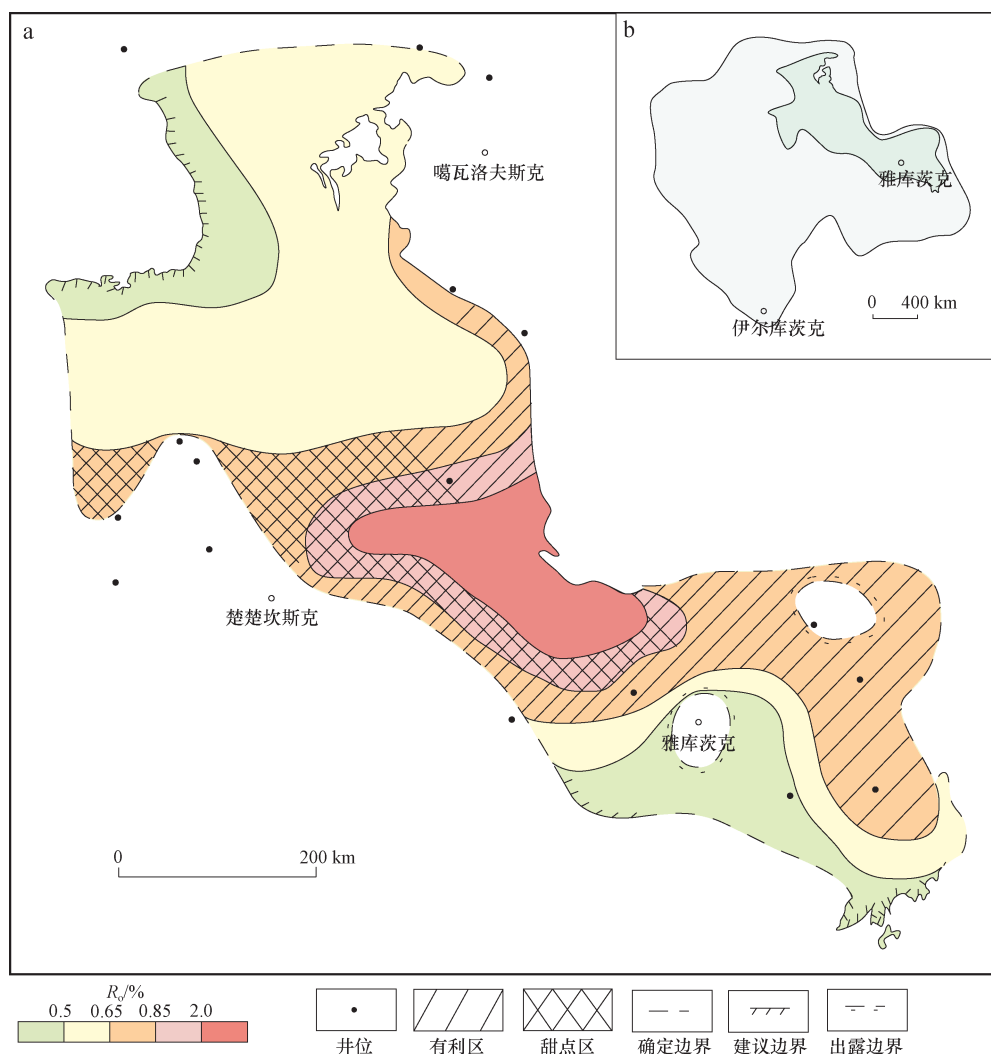


图8 东西伯利亚盆地库阿娜姆组页岩分布(据 Bazhenova T. K., 2014)

Fig. 8 The distribution of the Kuanam shale in the Eastern Siberian Basin (according to Bazhenova T. K., 2014)

a. 库阿娜姆组页岩分布区; b. 库阿娜姆组页岩在东西伯利亚地台的地理位置

均有发现,大多数情况下其地质特征相似。例如在楚科奇地区,在盆地科里亚克高地和洼地 Hatyrskoy 的边界上白垩统火山硅质岩沉积厚度达 2 600 m,其上沉积了一套优质的富有机质黑色页岩。该区 Nelkan-Sette-Daban 页岩盆地被认为是未来最有可能开发的地区,该区位于西伯利亚地台和 Okhotsky 海之间,是前缘 Gazimur 额尔古纳河微大陆和邻近 Aginsk-Borschovochnoy 古生界接缝区相互作用的结果(西伯利亚地台与中国地台),目前估计在数百亿吨油当量,但整体该区研究程度低。该区下石炭统页岩分布面积虽然只有大约 4 000 km<sup>2</sup>,但其厚度大,约为 3 000 m,据初步估计其下石炭统页岩可采资源量为  $3.0 \times 10^9$  t<sup>[3,26,27]</sup>。

目前在俄罗斯针对页岩地层没有官方认可的方法,标准计算方法例如确定孔隙度、裂缝、含油面积和有效厚度等并非完全合理,因此也不完全适用,但有一点是毋庸置疑的,俄罗斯页岩油资源潜力巨大,有待开发。

### 3 典型盆地页岩勘探开发进展

由于美国页岩的成功勘探开发加之俄罗斯本国勘探开发技术的改进,在 2012 年底俄罗斯能源部就拟定了加入全球页岩革命的发展计划。虽然 2014 年之后受国际因素影响页岩油勘探开发被延迟,但仍有西方石油公司在俄罗斯进行研发和试验。

巴热诺夫-1 井位于西西伯利亚 Frolovskaya 坳陷 Lyaminsky 油气区,设计井深 3 200 m。该井钻探目的是钻穿厚度 50 ~ 70 m 的巴热诺夫组,研究其地质构造并评估包括巴热诺夫-阿巴拉组沉积盖层,同时进行 Lyaminskogo 区西南部巴热诺夫组有利区评价,钻井及所有前期工作计划在 2019 年 12 月 20 日前完成。

挪威国家石油公司 Equinor ASA (Stoil) 在萨马拉



地区拥有 12 个常规以及非常规区块的作业权,在俄业务不受制裁影响,同时参与共同开发北极项目。该公司进入俄罗斯市场多年,在地质建模及预测、有利区优选、钻井及压裂等工艺方面拥有丰富的经验,截至 2019 年底计划布置 3 口多玛尼克地层水平井,但目前获得的成果对外仍严格保密,故本文将重点介绍巴热诺夫组页岩的勘探开发现状及最新进展。

### 3.1 巴热诺夫组页岩油产量及预测

目前各研究机构对俄罗斯未来页岩油的产能预测不同,俄罗斯国家石油公司预估到 2020 年可年产  $1.5 \times 10^7$  t,俄罗斯自然资源部预估到 2030 年可年产  $8.4 \times 10^7$  t,BP 预测到 2035 年可达年产  $4.0 \times 10^7$  t<sup>[6]</sup>,俄罗斯科学院 A. E. Kontorovich 院士评估,到 2040 年从巴热诺夫组页岩中产出的原油可达  $1.4 \times 10^8$  t/a。历史上从巴热诺夫-阿巴拉组中采出的页岩油呈逐年升高的趋势,产量在 2014 年达到顶峰  $7.5 \times 10^4$  t,之后虽然

有所下降,但仍明显高于历史平均水平(图 9)。

据俄罗斯秋明施比利曼研究院资料,2016 年在西伯利亚巴热诺夫-阿巴拉组中有 146 口垂直井在产,按照活跃天数算,平均日产油流 10.8 t,其中平均日产油量 0~10 t 的井数为 89 口,10~20 t 的井数为 35 口,20~30 t 井数 9 口,30~40 t 的井数 10 口,40~50 t 的井数 2 口。布置部分水平井并进行分段压裂,有 39 口井初期日产油 10~40 t,但后期压裂之后产量递减速度快且产量递减大,一般在第 3 年之后便不能够生产,获得较高流量的 9 口水平井产量在第 5 年之后有的也几乎将为零,这可能与其没有突破压裂技术有关。截至 2016 年,正在产出的水平井有 36 口,分别位于 9 个不同的油田,水平井段长度约 1 500 m,在活跃天数内日产油 1.0~22.2 t 不等,有 19 口井日产油高于 4 t,平均日产油 7.5 t(图 10)。采用气体加热注入法提高采收率:即将气体和空气混合注入地层,通过原位生成的方法来提高采收率。

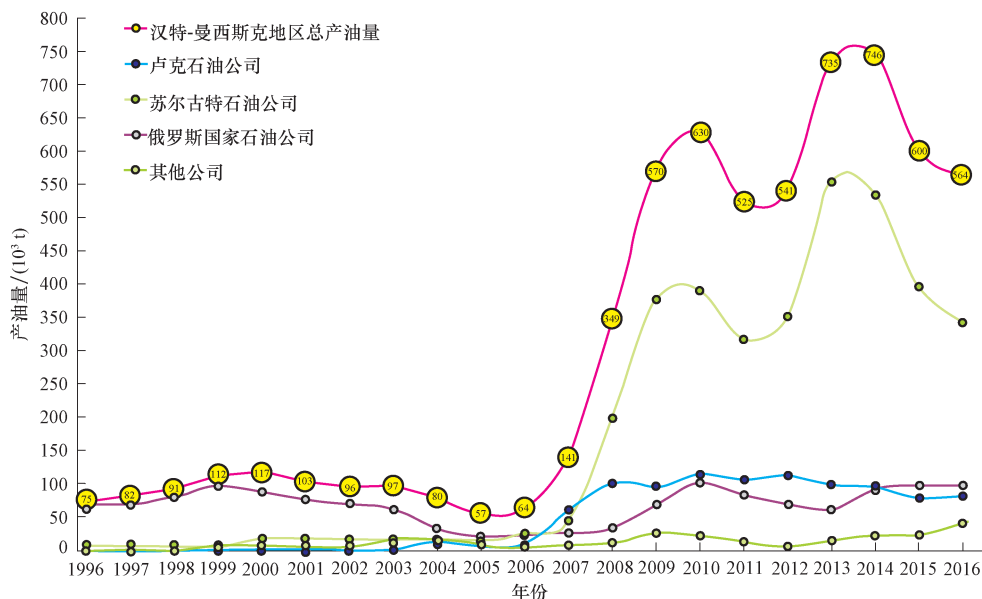


图 9 各大油公司在巴热诺夫-阿巴拉组地层中的产油历史

Fig. 9 History of oil production from Bazhenov-Abalak formations by major oil companies

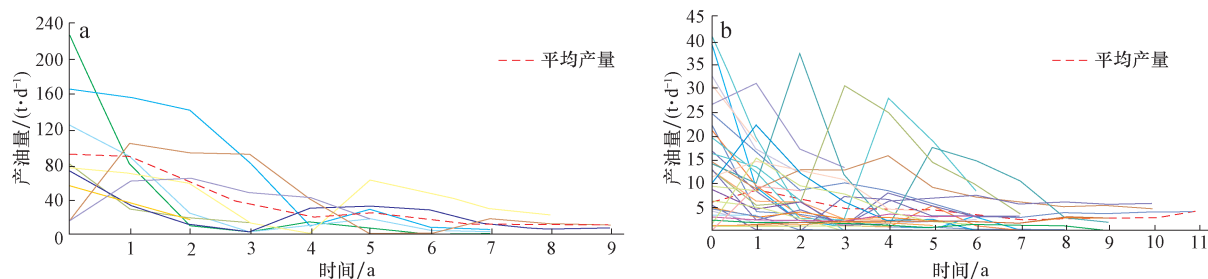


图 10 汉特-曼西斯克地区巴热诺夫-阿巴拉组地层水平井年产量

Fig. 10 Average annual production from horizontal wells in Bazhenov-Abalak deposits, Khanty-Mansiysk region

a. 9 口高流量井; b. 39 口中低流量井

### 3.2 巴热诺夫组页岩油试验区最新进展

俄罗斯天然气工业股份公司的子公司 Bazhen 技术中心于 2018 年 7 月注册,9 月 1 日开始工作。Bazhen 非常规油气藏开发技术中心在汉特-曼西斯克地区拥有 9 个许可区域,分别是 Krasnoleninsky 油田的 Palyanovsk 地区, Nyagan 组的 5 个区和 Salym 油田的 3 个区。根据保守估计,区块内可采资源量为  $7.6 \times 10^8$  t, 当时计划在 Krasnoleninsky 油田的 Palyanovsk 地区钻探 50 口井,并进行水力压裂。2018 年共钻探 10 口井,在 Palyanovsk 油田完成了 2 口水平井(另外两座钻井平台正在投入使用)钻探并投入使用。目前已经取得了以下工作成果:①利用本国技术钻探 10 口高科技井,均获工业油流;②进行 70 级水力压裂,达到 15 级/1 000 m 的密度;③钻井时间从 47 d 减少到 35 d;④水力压裂阶段的持续时间从 48 h 减少到 24 h,最佳可达 8 h。2019 年计划将压裂阶段的数量将增加到 30 个,水平段的长度将增加到 1 500 m。

2018 年,在汉特-曼西斯克地区的 Krasnoleninsky 油田的 Palyanovsk 区块测试了许多用于开发巴热诺夫组页岩油的新技术,均为俄罗斯自主研发,其中包括:①首次采用基于烃的溶液清洗井筒,对温度和压降的依赖性降低,降低了额外操作的成本。高温高压井(HTPD)通常被归类为危险井和复杂井。通常,出口温度变得非常高并且需要使用钻井液冷却器等。为了尽量减少高温对钻井液性质的负面影响,应进行额外的操作:将化学活性固相的含量保持在较低水平,用热稳定添加剂处理洗涤液,将 pH 值保持在确保添加剂有效性的水平等。②处理水平井时:成功测试了旋转固井的方法,确定套管在其固井过程中的旋转和蠕变,允许用水泥浆增加环形空间的填充程度。③确保水泥井的密封性:首次使用弹性水泥;④多级水力压裂,高速注入大量流体;⑤抽空塞法(使用复合电缆塞分离压裂和穿孔阶段)和许多其他独特的解决方案。

同时 2018 年 Bazhen 中心开始工业使用由俄罗斯天然气工业股份公司与莫斯科物理科技学院(MIPT)共同自主研发的软件包 GROWTH MFR,预测储层裂缝并提前预防可能的风险。该软件莫斯科物理科技学院 2016 年开始研发,使用水力压裂模拟器,计算出最佳裂缝系统,并对 2018 年钻探的 10 口井中的每口井都进行了建模。

后期所有水平井钻井技术、热化学效应设备、水力压裂技术、水力压裂设备、产品收集和制备设备,地球物理仪器和软件系统等都将被广泛用于 Bazhenov 地

层的进一步开发,为降低 Bazhenov 地层的勘探开发成本和创造效益做准备。根据 Bazhen 中心总经理 Bazhen K. Strizhnev 的说法,经验的积累、新方法和新材料的引入,完全足够提高生产效率,目前巴热诺夫组页岩中开采的单位成本已从每吨  $3.0 \times 10^5$  卢布减少到  $1.8 \times 10^5$  卢布(rub),计划 2025 年的年产量将达到  $1.0 \times 10^7$  t/a,总市场量达到  $3.0 \times 10^{11}$  rub/a。

### 3.3 小结

虽然俄罗斯页岩油开发整体仍处于初期阶段,开采尚未达到商业规模,笔者仍认为,即使受当前油价影响,在俄罗斯开发页岩油资源也具有自身优势,未来俄罗斯页岩油有望实现商业开采。首先俄罗斯政府高度重视这两套地层的开发;其次西西伯利亚盆地和伏尔加-乌拉尔盆地已有多年的勘探开发历史,这两个地区拥有比较完备的基础设施,盆地内各油田彼此相距不远且道路状况良好,无需内部管道建设,有足够的能源供给(如电、暖气等),地质钻井、遥测等资料充分,因此初期石油开采成本低;另外目前巴热诺夫技术中心在地质建模、裂缝预测、水平井开采、水力压裂等方面也取得了良好的效果;而且为刺激巴热诺夫组地层和其他页岩区块的勘探,俄政府出台了税收减免政策,这些地层享受矿产开采零税率,拥有页岩油开采经验的外国公司有机会进入俄罗斯市场。

## 4 结论

1) 俄罗斯主要的页岩油资源赋存于西西伯利亚盆地巴热诺夫组和伏尔加-乌拉尔盆地多玛尼克地层,其次为季曼-伯朝拉盆地的多玛尼克地层,东西伯利亚盆地的库阿纳姆(Kuanam)、北高加索地区的哈杜姆层(Khadum),以及西西伯利亚地区的侏罗系秋明(Tyumen)、下白垩系阿奇莫夫(Achimov)等层系。西西伯利亚地台和东欧地台伏尔加-乌拉尔盆地的页岩油区地质条件优越,埋藏不深,且有机质含量高,可采资源总量大,具备大规模开发利用的基础设施和外部环境,是未来开发利用的重要潜力区。

2) 巴热诺夫组是西西伯利亚盆地上侏罗统一套非常优质的烃源岩,主要埋深 2 000 ~ 3 000 m,全盆地大面积广泛分布,地球物理特征明显,平均厚度约 30 m,岩性上以泥质、钙质、硅质页岩或者硅质放射岩为主,夹薄层火山灰、碳酸盐岩和放射虫化石;TOC 平均为 7%,有机质含量一般大于 4%,以 I-II 型有机质为主,成熟度介于 0.5% ~ 1.1%;储层物性好,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,裂缝发育,储集空间主要为溶洞、晶间孔和有机质孔、多玛尼克页岩油层系为一套泥盆系中弗拉阶-石炭系下杜内阶硅质/含硅的泥质石灰岩,主要埋深1 500 ~ 3 500 m,整体厚度在100 ~ 600 m,TOC在0.5 ~ 24%,以I-II型有机质为主,伏尔加-乌拉尔盆地中北部成熟度介于0.5% ~ 1.5%,南部靠近滨里海地区以生气为主;脆性矿物含量高,储集空间主要为溶蚀孔和微裂缝。

3) 在俄罗斯开发页岩油资源具有自身优势,首先是地层享受矿产开采零税率,因此在满足地质资料充分、各油田彼此相距不远且基础设施完善的条件下,加之俄罗斯本国政府高度重视页岩油层系的开发,未来俄罗斯页岩油有望实现商业开采。

致谢:感谢俄罗斯秋明国有地下资源合理利用分析研究中心、全俄油气地质研究院和喀山大学地质与石油技术学院提供数据资料,感谢中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院周庆凡教授对本文校正和完善提出的宝贵意见,感谢审稿专家对本文的审核并提出的建设性意见。

### 参 考 文 献

- [1] Высоцкий В. И. Ресурсы сланцевого газа и прогноз их освоения [J]. ИнфоТЭК, 2011, 1: 51 - 55.
- [2] Цветков Л. Д., Цветкова Н. Л. Сланцевые углеводороды: библиогр. обзор [M]. Ярославль: НПП «Недра», 2012.
- [3] Жарков А. М. Оценка потенциала сланцевых углеводородов России/Минеральные ресурсы России [J]. Экономика и управление, 2011, 3: 16 - 21.
- [4] Вагин А. В. Оценка перспектив нефтегазоносности доманиковых отложений верхнего девона Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции/Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г. [R]: Газпром ВНИИГАЗ, 2011: 173 - 177.
- [5] Матвиенко В. Н., Федотова С. А., Ермолаев В. Г. и др. Гидрогеология и геохимия РОВ перспективных комплексов Восточно-Кубанской впадины, Западно-Кубанского прогиба и Таманского полуострова: отчет о науч.-иссл. Работе [C]. - Краснодар: Союзбурнефть - ВНИПИтермнефть, 1985.
- [6] 王京, 刘琨. 俄罗斯致密油资源潜力和勘探开发现状 [J]. 国际石油经济, 2017, 25(7): 80 - 88.  
Wang Jing, Liu Kun. Russia's tight oil resources potential and E&D status [J]. International petroleum economics, 2017, 25(7): 80 - 88.
- [7] О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов российской федерации в 2016 и 2017 годах [R]. 2018, Москва.
- [8] Корчагина Ю. И. Катагенез органического вещества нефтематеринских пород//Природа органического вещества современных и ископаемых осадков [R]. Наука, 1973: 162 - 168.
- [9] Захаров В. А., Бейзель А. Л., Лебедева Н. К. и др. Свидетельства эвстатики Мирового океана в верхнем мелу на севере Сибири [J]. Геология и геофизика, 1991, 8: 8 - 14.
- [10] A. E. Kontorovich, E. V. Ponomareva, L. M. Burshtein. Distribution of organic matter in rocks of the Bazhenov horizon (West Siberia) [J]. Russian Geology and Geophysics, 2018, 59: 285 - 298.
- [11] A. N. Fomin. Thermal maturity of uppermost Middle Jurassic sediments in the West Siberian basin [J]. Russian Geology and Geophysics, 2017, 58: 443 - 450.
- [12] E. A. Kostyreva, I. S. Sotnich. Geochemistry of organic matter of the Bazhenov Formation in the north of the Khantei antecline [J]. Russian Geology and Geophysics, 2017, 58: 434 - 442.
- [13] M. V. Shaldybin, Y. M. Lopushnyak, I. V. Goncharov et al. The mineralogy of the clayey-silty siliceous rocks in the Bazhenov Shale Formation (Upper Jurassic) in the west Siberian Basin, Russia: The role of diagenesis and possible implications for their exploitation as an unconventional hydrocarbon reservoir [J]. Applied Clay Science, 2017, 136: 75 - 89.
- [14] Danelian, Ordovician Radiolaria from Nevada and Newfoundland—A comparison at the family level [J]. Marine Micropaleontology, 1990, 15(3 - 4): 393 - 402.
- [15] Yuri NZanin, Vika GEder, Al' bina G. Zamirailova et al. Models of the REE distribution in the black shale Bazhenov Formation of the West Siberian marine basin, Russia [J]. Chemie der Erde, 2010, 70: 363 - 376.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] M. B. Skvortsov, M. V. Dakhnova, S. V. Mozhegova et al. Geochemical methods for prediction and assessment of shale oil resources (case study of the Bazhenov Formation) [J]. Russian Geology and Geophysics. 2017, 58: 403 - 409.

(下转第 503 页)



- [53] Angel D L. Carbon flow within the colonial radiolarian microcosm [J]. Symbiosis, 1991, 10(1-3): 195-271.
- [54] Dennett M R, Caron D A, Michaels A F, et al. Video plankton recorder reveals high abundances of colonial radiolarian surface waters of the central North Pacific [J]. Journal of Plankton Research, 2002, 24(8): 797-805.
- [55] 赵建华, 金之钧, 金振奎, 等. 四川盆地五峰组-龙马溪组含气页岩中石英成因研究 [J]. 天然气地球科学, 2016, 27(2): 377-386.
- Zhao Jianhua, Jin Zhijun, Jin Zhenkui, et al. The genesis of quartz in Wufeng-Longmaxi gas shales, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2): 377-386.
- [56] Stow D A V, Huc A Y, Bertrand P. Depositional processes of black shales in deep water [J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(4): 491-498.
- [57] 薛叔浩, 刘雯林, 薛良清, 等. 湖盆沉积地质与油气勘探 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- Xue Shuhao, Liu Wenlin, Xue Liangqing, et al. Sedimentary geology and oil exploration in lacustrine basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [58] 冯增昭. 中国沉积学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2013: 706-811.
- Feng Zengzhao. Chinese Sedimentology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 706-811.
- [59] Rowe H, Hughes N, Krystin R K. The quantification and application of handheld energy-dispersive X-ray fluorescence (ED-XRF) in mudrock chemostratigraphy and geochemistry [J]. Chemical Geology, 2012, 324-325: 122-131.
- [60] Arthur M A, Dean W E. A holistic geochemical approach to cyclomazia examples from Cretaceous pelagic limestone sequences [C]// Einsele G, Ricken W, Seilacher A. Cycles and Events in Stratigraphy. Berlin: Springer Verlag, 1991: 126-166.
- [61] Norman M D, De Deckker P. Trace metals in lacustrine and marine sediments: A case study from the Gulf of Carpentaria, northern Australia [J]. Chemical Geology, 1990, 82: 299-318.
- [62] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993: 4-28.
- Deng Hongwen, Qian Kai. Chinese sedimentology [M]. Lanzhou: Gansu Science & Technology Press, 1993: 4-28.
- [63] Algeo T J, Maynard J B. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems [J]. Chemical Geology, 2004, 206: 289-318.
- [64] Tribouillard N, Riboulleau A, Lyons T, et al. Enhance trapping of molybdenum by sulfurized organic matter of marine origin as recorded by various Mesozoic formations [J]. Chemical Geology, 2004, 213: 288-295.
- [65] 刘刚, 周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用: 以江汉盆地潜江组为例 [J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 307-314.
- Liu Gang, Zhou Dong-sheng, et al. Application of microelement analysis in identifying sedimentary environment: Taking Qian Jiang Formation in the Jianghan Basin as an example [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 307-314.
- [66] Dill H, Teschner M, Wehner H. Petrography inorganic and organic geochemistry of Lower Permian carbonaceous fan sequences ("Brand-Schiefer Series")-Federal Republic of Germany: Constraints to their palaeogeography and assessment of their source rock potential [J]. Chemical Geology, 1988, 67: 307-325.

(编辑 张玉银)

(上接第490页)

- [21] 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.
- [22] 张新顺, 王红军, 马锋, 等. 西西伯利亚盆地侏罗系致密油发育特征与资源潜力 [J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 101-108.
- Zhang Xinshun, Wang Hongjun, Ma Feng, et al. Characteristics and resource potential of Jurassic tight shale oil reservoirs in West Siberian Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 101-108.
- [23] Liang X P, Galushyn G A, Filippov V P. Conditions of Domanicites Formation in the South-Eastern Part of the Russian Platform [J]. Georesursy, 2015, 3(62): 54-63.
- [24] Liang X P, Filippov V P, Galushyn G. A. Paleogeographic reconstruction and structural morphology of Domanik Formation in the Republic of Tatarstan [R]. SPE-176610. Society of Petroleum Engineers. SPE Russian Petroleum Technology Conference 26-28th October 2015, Moscow.
- [25] Liang X, Barkov S L. Geochemical conditions of Domanic deposits generation in the south-east area of the Russian platform [J]. Geology, geophysics and development of oil and gas fields, 2015, 10: 21-27.
- [26] Зорин В. Т., Петерсон Л. Н. Стратиграфия нижнекаменноугольных отложений северной части Минусинского прогиба [J]. Геология и геофизика, 1989, 8: 10-17.
- [27] Цветков Л. Д., Цветкова Н. Л. Нефтеносность зон растяжения земной коры на примере оффшорной части Бразилии и востока России [J]. Вести газовой науки: Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г. -М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013, 5(16): 105-114.
- [28] Прищепа О. М., Аверьянова О. Ю., Ильинский А. А. и др. Нефть и газ низкопроницаемых сланцевых толщ -резерв сырьевой базы углеводородов России [M]. -Сиб.: ФГУП «ВНИГРИ», 2014. -323 с. : ил. -(Труды ВНИГРИ).

(编辑 张玉银)