

松辽盆地北部青山口组页岩油形成地质条件及勘探潜力

柳波¹,吕延防¹,冉清昌^{1,2},戴春雷¹,李梅¹,王猛¹

(1. 东北石油大学 非常规油气成藏与开发省部共建国家重点实验室培育基地,黑龙江 大庆 163318;

2. 中国石油 大庆油田有限公司 勘探开发研究院,黑龙江 大庆 163318)

摘要:页岩油气是重要的常规油气接替资源之一。根据页岩油区域地质调查,研究了松辽盆地北部青山口组页岩油形成的地质条件,优选出有利层段,并评估了其勘探潜力。青山口组内部旋回性明显,受湖平面控制富有机质与灰质、粉砂质泥岩交替出现;次级旋回下部暗色泥页岩具有单层厚度大、分布面积广,有机质丰度高等特点,目前尚处于大量生气阶段;次级旋回上部富含长英质矿物,属于特低孔特低渗性储层,扫描电镜下微孔及微裂缝较为发育,为油气滞留提供了储集空间;青一段泥页岩整体非均质性强,并普遍发育有异常压力,具备形成页岩油的有利地质条件。地球化学分析及等温吸附试验结果表明,青山口组一段相比其他层段含油性最好,并具有一定的含气量,是具有最优勘探潜力的页岩油层系。综合以上地质条件及含油气性研究,确定了青山口组一段页岩油有利层段的空间分布,并通过资源量计算的相关参数赋值,采用概率体积法计算出松辽盆地北部青山口组一段页岩油地质资源量为 105.60×10^8 t,勘探潜力巨大。

关键词:等温吸附;概率体积法;储集性能;页岩油;松辽盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Geological conditions and exploration potential of shale oil in Qingshankou Formation, Northern Songliao Basin

Liu Bo¹, Lü Yanfang¹, Ran Qingchang^{1,2}, Dai Chunlei¹, Li Mei¹, Wang Meng¹

(1. Accumulation and Development of Unconventional Oil and Gas, State Key Laboratory Cultivation Base Jointly-constructed by Heilongjiang Province and the Ministry of Science and Technology, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Co., Ltd, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: Shale oil and gas is one of the most important resources to replace the conventional oil and gas. According to regional geological surveying, the geological conditions of the development of shale oil in northern Songliao Basin were studied in this paper. Also, the favorable target intervals were selected and their potentials of exploration were assessed. The Qingshankou Formation has obvious cyclicity due to the control of lake level change, with mudstone rich in organic matter and gray matter and silty mudstone appearing alternately. The dark mudstone in the lower subcycle is characterized by large single layer thickness, broad distribution area and high content of organic matter, and is still at the stage of hydrocarbon generation. The upper subcycle is characterized by enrichment of quartz-feldspathic minerals and ultra-low porosity and permeability. Many micro pores and cracks are observed in scanning electron microscope, and they offer reservoir space for oil and gas. In addition, the shale reservoirs in K_1qn^1 are heterogeneous and mostly have abnormal pressure, thus are favorable for the shale oil accumulation. Geochemical analysis data and isothermal adsorption test of shale interval show that the 1st member of Qingshankou Formation is richest in oil, and contains some gas. So it has the largest exploration potential for shale oil exploration. Based on the above-mentioned geological conditions and oil-gas-bearing possibility study, the space distribution of favorable reservoir in K_1qn^1 is determined, and the OOIP of shale oil is calculated to be 10.56 billion tons by using probability volume method.

Key words: isothermal adsorption, probability volume method, reservoir property, shale oil, Songliao Basin

页岩气勘探的热潮自2005年以来席卷全球,预测全球页岩气资源量为 456×10^{12} m³,与全球常规天然

气、煤层气及致密气资源量的总和相当,页岩油的发现更是最近勘探的热点^[1-4]。中国石油勘探很早就

收稿日期:2013-10-24;修订日期:2014-01-10。

第一作者简介:柳波(1983—),男,博士、副教授,油气成藏地质学、非常规油气地质与勘探。E-mail:liubo6869@163.com。

基金项目:国家青年自然科学基金项目(41202101);中国博士后科学基金面上资助项目(2013M541338);国土资源部全国油气资源战略选区调查与评价专项(2009GYXQ15);黑龙江省普通高等学校青年学术骨干支持计划项目(1155G03)。

乎所有的陆上含油气盆地中发现了泥岩裂缝油气藏,如松辽盆地、渤海湾盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地、柴达木盆地等,可以预见页岩油的勘探前景十分广阔^[5]。

松辽盆地青山口组一段(K_2qn^1)是众所周知的一套生烃能力很强的优质烃源岩发育层位,其含油气显示也很广泛,在多口井岩心上可见,如哈 14 井、古平 1 井、英 12 井、哈 18 井等。其中,单井青一段泥岩裂缝段,1990、1992 年进行抽汲求产,日产油分别为 0.79 t 及 0.65 t,2011 年分段压裂,产量最高为油 3.7 t/d;试油一个月稳定产量 2.4 t/d,说明青一段是非常现实的页岩油勘探层系。然而,并非所有的泥页岩中都能发现具有工业价值的油气,松辽盆地青一段页岩油形成的地质条件如何,又有多大勘探潜力,能否为延续大庆油田原油长年稳产这一“奇迹”做出贡献,都是十分有意义的关注点。基于我国页岩油气勘探开发现状,结合国土资源部《全国页岩气资源潜力调查评价及有利区优选》工作要求,本文根据页岩油区域地质条件调查结果,研究松辽盆地北部青一段页岩油形成的地质条件,并初步评价了其勘探潜力。

1 页岩油形成的地质背景

松辽盆地广泛发育的两套泥页岩,即青山口组(K_2qn)和嫩江组(K_2n)。大量的研究工作表明,这两套泥页岩在埋深 1 300~1 500 m 左右进入生油气门限,在埋深为 2 500 m 左右达到排油气高峰阶段,并由于源岩层内残留有可观的烃量而普遍发育有异常高压^[6-7]。

青山口组一段可细分为 2 个四级层序(图 1),青一段四级层序 1 属于青一段下部,是在松辽盆地大型坳陷湖盆形成演化过程中,由于盆地构造沉降和大气降水综合作用,湖平面波动上升、水体加深,湖盆底部水体循环不畅,沉积相带由泉头组沉积时期的滨浅湖亚相发展为深湖-半深湖亚相,加上海侵引发的渤海沟通事件和全球缺氧事件的影响,导致了湖盆底层水体缺氧,湖水微咸化,底栖生物大量灭绝^[8]。同时,湖水表层生物的高生产力、陆源沉积物的匮乏和深湖-半深湖的强还原环境使得有机质得到较好的保存,沉积了具有水进凝缩意义的厚层富有机质页岩和暗色泥岩,并且有机碳含量(TOC)具有明显的旋回性。

青山口组一段沉积晚期,即对应于青一段上部的四级层序 2 沉积期,盆地构造沉降速度有所减慢,陆源沉积物不断向湖盆注入堆积而导致湖平面相对下降,呈现湖退现象,盆地内广泛发育有河流和滨浅湖沉积,深湖面积也明显缩小,此时不利于形成富有机质页岩,多形成泥岩较为不纯的粉砂质泥岩、灰质泥岩、泥质灰岩等粘土含量相对较低的细粒沉积岩,反而可能为页岩油的富集提供了有利的储集条件^[9]。

2 页岩油形成的地质条件

2.1 泥页岩层区域展布

在松辽盆地北部中央坳陷区,尤其是长垣、齐家古龙、三肇、王府凹陷,青一段页岩层系发育典型的“泥包

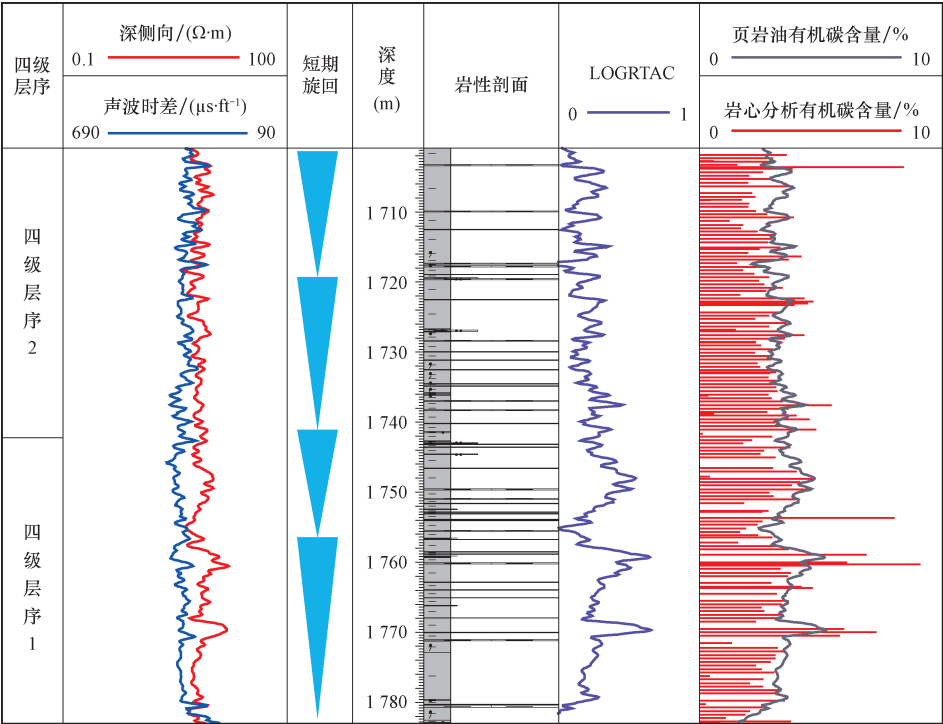


图 1 松辽盆地北部青山口组一段沉积层序综合柱状图(以茂 206 井为例)

Fig. 1 Composite histogram of K_1qn^1 in the northern Songliao Basin (case from M206 well)

砂”页岩地层组合,厚层页岩与砂岩和粉砂岩夹层共同储气,与 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩地层组合相似,易形成“混合岩性型”的页岩油。其富有机质页岩层系厚度为 20 ~ 45 m,平均厚度 32 m,主体埋深 1 500 ~ 2 500 m,上覆地层较厚,与美国五大页岩层系埋深相当(800 ~ 2 600 m),分布面积 38 723.60 km² (TOC 大于 1.5%)。同时,处于构造相对稳定区,无岩浆活动,较少发育规模性通天断裂破碎带,因而保存条件较好。

2.2 泥页岩的岩石矿物学特征

青一段泥页岩以发育锆石、黄铁矿、赤铁矿、菱铁矿和白钛石为特征。通过齐平 1 井 X-射线衍射-岩石矿物含量实测结果,其钙质含量多为 5% ~ 20%,长英质成分多为 40% ~ 70%,粘土矿物多小于 40% (图 2)。其中,粉砂岩类的矿物组成:钙质含量一般为 15% ~ 25%,长英质成分一般为 55% ~ 70%,粘土矿物一般小于 20%;泥岩类的矿物组成为:钙质含量一般小于 10%,

长英质成分一般为 50% ~ 60%,粘土矿物一般 15% ~ 50%。总体而言,与美国典型页岩油气藏区的页岩矿物组成具有一定的相似性。

2.3 泥页岩的生烃条件

利用源岩干酪根元素分析结果划分有机质类型,青一段源岩在 Van Krevelen 图、热解 HI 与 $T_{\max}$ 图均主要分布在有机质类型 I 型和 II₁ 型区域 (图 3)。TOC 统计结果表明,青一段泥页岩有机碳含量为 0.73% ~ 8.68%,平均 2.13%。镜质体反射率 (R_o) 为 0.7% ~ 1.3%,靠近湖盆中心可达 1.5%,总体处于大量生油阶段 (镜质体反射率 R_o : 0.4% ~ 2.0%),与 Eagle Ford 盆地页岩油热演化程度相近。

2.4 含油页岩层段的物性条件

泥页岩的孔隙度与渗透率测定仪器为 RecCore-04 型低磁场核磁共振岩样分析仪、脉冲渗透率仪,检

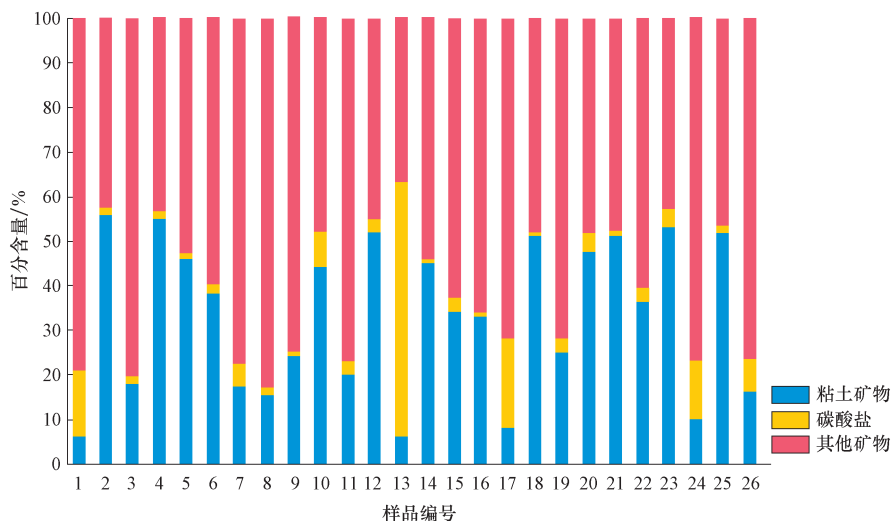


图 2 松辽盆地北部青山口组一段泥页岩矿物百分含量直方图 (以齐平 1 井为例)

Fig. 2 Mineral content histogram of K₁qn¹ shale in the northern Songliao Basin (case from Qiping1 well)

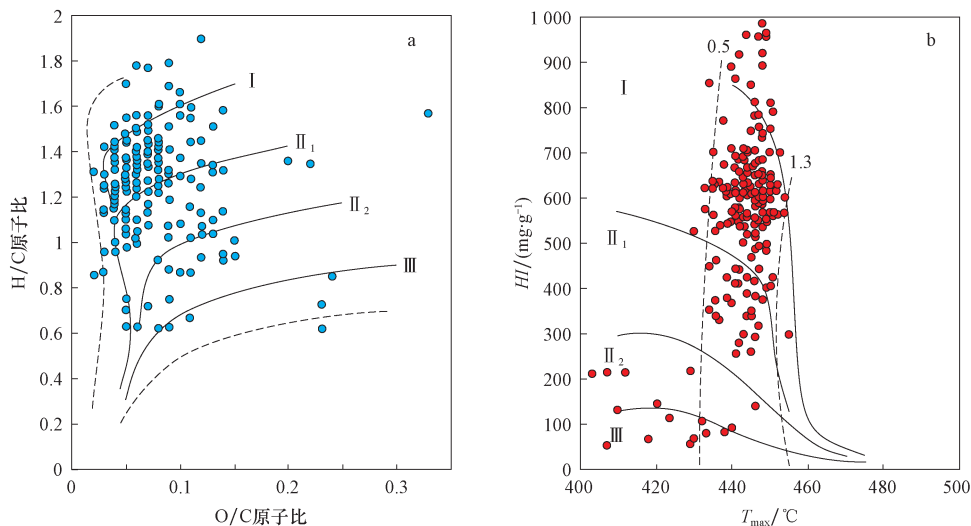


图 3 松辽盆地北部青山口组一段泥页岩有机质类型划分

Fig. 3 Organic types of K₁qn¹ shale in the northern Songliao Basin

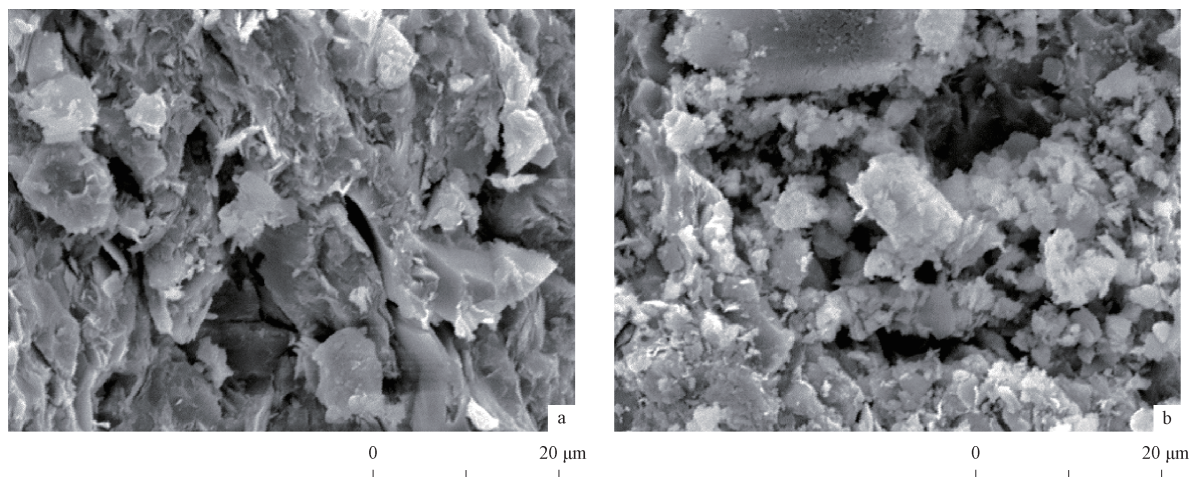


图4 松辽盆地北部青山口组一段泥页岩储层储集空间发育特征

Fig. 4 Space distribution of K_1qn^1 shale reservoir in the northern Songliao Basin

a. 微裂缝与晶间微缝; b. 粒间溶蚀孔与晶间微孔

测主要依据 SY/T 5336—2006、SY/T 6490—2000、QB 19561—2010标准规范。结果表明,青一段泥页岩测试样品的气测孔隙度范围为 5.24%~5.25%,脉冲法测得的渗透率值范围为 $0.000\ 3 \times 10^{-3} \sim 0.001\ 5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。岩石比表面分布在 $2.968 \sim 2.997 \text{ m}^2/\text{g}$,总孔体积为 $0.110\ 43 \sim 0.143\ 24 \text{ mL/g}$,平均孔径为 $6.254 \sim 9.254 \text{ nm}$ 。另据大庆油田研究院测定,青一段泥页岩($1\ 960 \sim 2\ 090 \text{ m}$)孔隙度为 1.4%~8.7%,平均 4.4%,渗透率多数小于 $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;美国威德福实验室测定青一段泥页岩孔隙度为 3.5%~5.8%,平均 4.6%,渗透率 $0.8 \times 10^{-3} \sim 3.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $2.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。综合以上数据,青一段泥页岩作为页岩油储层,属特低孔特低渗性储层。

扫描电镜下,该套暗色泥页岩结构较为致密,可见少量微孔隙,多在 $1 \sim 3 \mu\text{m}$,少量 $4 \sim 7 \mu\text{m}$ 。主要发育了 5 种类型的储集空间(图 4),即微裂缝、晶间微缝、粒间溶蚀孔、次生矿物晶间微孔及少量有机质孔,溶蚀微孔可达微米级(如长石溶蚀微孔可达 $10 \mu\text{m}$)。各种类型孔隙与微裂缝伴生发育,并可能彼此连通,组成“水平+垂直的裂缝网络系统”,为滞留在泥页岩中的部分油气提供了有效的储集空间,与 Pearsall 页岩颗粒内“孔隙网络”孔隙结构类似^[10-12]。

2.5 泥页岩层系地层压力特征

青一段泥岩单层厚度大,目前普遍欠压实,具有超压。青一段泥岩超压最早形成于青二、三段沉积时期,大部分开始形成于嫩四段沉积时期,其次是嫩二段、嫩五段和嫩三段沉积时期。由等效深度法,利用声波时差资料对其超压值大小及分布进行了研究,结果表明,青一段泥岩超压值最大可达到 20 MPa,主要分布在古龙凹陷、三肇凹陷中心,在凹陷边部排烃边界减小至 8 MPa 以下。

3 泥页岩层系含油气性分析

泥页岩层系是指富含有机质的暗色泥岩及其所夹的薄层砂质、灰质细粒岩组成的一套岩石组合系统。页岩气主要以吸附态、游离态及溶解态的形式,页岩油则主要以游离态的形式,赋存于泥页岩或薄层砂质、灰质细粒岩的储集空间中。

3.1 泥页岩层系含油性

事实上,处于“生油窗”范围内的泥质烃源岩普遍含油(氯仿沥青“A”含量, S_1),其含油性主要取决于其自身的生油能力以及生油时期的储油能力,只有二者在时空上相耦合,才具备页岩油勘探开发的潜力。 S_1 测定的是 C_{14} — C_{18} 烃类,与原油成份相比,缺少高碳数的烃类、沥青质及非烃含量;氯仿沥青“A”的成分包括 C_6 — C_{38} 烃类、胶质及沥青质,与原油成分相似,参数意义与含油率接近。通过本区各层系泥页岩样品的实测氯仿沥青“A”含量统计结果,青一段(K_2qn^1)平均值为 0.350 2%,远远高于嫩二段(K_2n^2)的 0.055 65%、嫩一段(K_2n^1)0.067 6%及沙河子组(K_1sh)0.036 6%,含油性最好(图 5)。

3.2 泥页岩层系含气性

青一段在钻探过程中经常出现气浸现象,在录井过程中则表现为明显的气测异常特征,说明这套泥页岩层系具有较好的含气性。为进一步证实其含气性,选取 TOC 大于 2%, S_1 大于 0.5% 的暗色泥岩样品分别进行了含气饱和度和等温吸附测定。其中,含气饱和度的测定使用 RecCore-04 型低磁场核磁共振岩样分析仪,等温吸附的测定使用 FY-KT 1000 型等温吸

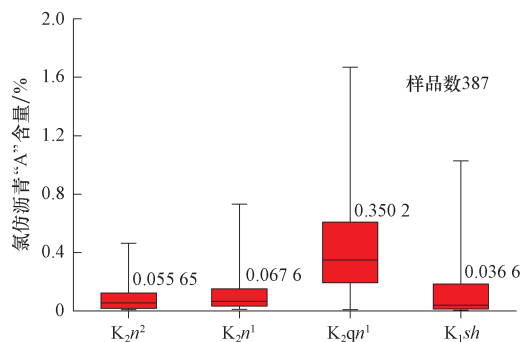


图5 松辽盆地北部各泥页岩层系氯仿沥青“A”含量统计
Fig. 5 Chloroform asphalt “A” box plot of each shale sequence in the northern Songliao Basin (sample No. 387)

附仪,并依据 QB 19560—2010 测定方法。结果表明,青山口组暗色泥岩的含气饱和度为 13.26%~25.80%,吸附气含量随着测试压力增大和 TOC 值的增高而增加(图6,图7)。如,英29井青一段暗色泥岩的吸附气含量,当压力由 0.40 MPa 逐渐增加到 10.20 MPa 时,吸附气含量则由 0.28 m³/t 增加到 2.08 m³/t。含气量的增加,可以提高页岩层系的气油比,增加原油在页岩中的流动性及可采性。

4 页岩油气勘探潜力

由于非常规储层天然气的聚集机理和过程复杂,相关计算参数难以准确把握^[13-14],故在全国页岩油资

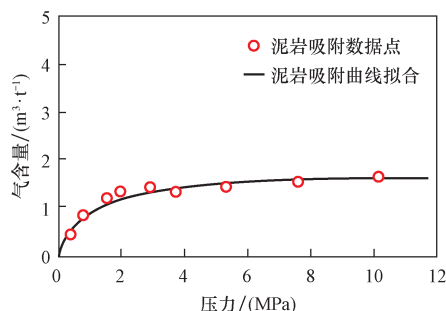


图6 英29井青一段暗色泥页岩等温吸附曲线
Fig. 6 Isothermal adsorption curve of dark shale of K_1qn^1 from Ying29 well

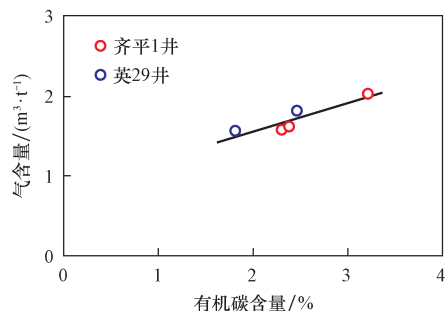


图7 松辽盆地青一段吸附气含量与有机碳含量关系
Fig. 7 Relationship between adsorbed gas content and organic carbon content of K_1qn^1 in the northern Songliao Basin

源评价方法选择中,推荐使用概率体积法或以概率体积法为主,依据概率体积法基本原理,页岩油资源量为泥页岩质量与单位质量泥页岩所含原油(含油量)之概率乘积^[15]。根据页岩油形成的地质条件分析,选取富有机质泥页岩分布面积、厚度、有机碳含量、氯仿沥青“A”含量、有机质成熟度、埋深以及含油性等,作为松辽盆地北部青一段页岩油有利区优选参数。关键参数的选取主要包括以下几个方面:

1) 合理确定页岩油评价层段:要有充分证据证明拟计算的层段为含油泥页岩段。在含油气盆地中,页岩层段见油气显示或气测录井在该段发现气测异常;在缺少探井资料的地区,要有油苗、油迹或其他油气异常证据;在缺乏直接证据情况下,要有足以表明页岩油存在的条件和理由。

2) 有效厚度:有利区评价目的层的泥地比大于60%,泥页岩连续厚度大于30 m,最小单层泥页岩厚度大于6 m,其它岩性夹层厚度小于3 m。页岩油有利区优选时应采用有效(处于主要生油阶段且有可能形成页岩油的)厚度进行评价。

3) 有机碳含量(TOC)和镜质体反射率(R_o):页岩油有利区评价单元内需要有 TOC 大于2.0%,且具有一定规模分布的富有机质泥页岩,成熟度 $0.5\% < R_o < 1.2\%$ 。

4) 埋藏深度:主体埋深不超过5 000 m。

5) 保存条件:保存条件良好,不受地层水淋滤影响等。

6) 含油率:低于0.1%的区域,不作为页岩油有利区。含油率以重量百分比进行表示,其概率赋值可参照离散型参数概率统计分析法进行。目前的主要方法有地球化学法、类比法、统计法、含油饱和度法、测井解释法、生产数据反演法等。本次主要使用的是地球化学法,即通过测定岩心样品中氯仿沥青“A”含量进行统计分析,编制概率分布直方图,确定其概率赋值区间。

结果表明,松辽盆地北部青一段页岩油地质资源为 105.60×10^8 t,按照类比法估算可采系数为10%的情况下,可采资源量为 10.56×10^8 t(表1)。计算数据充分说明大庆探区页岩油资源潜力丰富,是未来重要的勘探方向之一。

5 结论

1) 松辽盆地青一段为厚层-巨厚暗色泥岩与薄层砂质岩石互层,形成典型的“泥包砂”生储盖组合特征,气测异常丰富,有机碳含量 0.73%~8.68%,平均 2.13%,热演化程度在 0.7%~1.3%之间,是页岩油气形成的最有利层位。

表 1 松辽盆地北部青一段页岩油资源潜力(可采系数为 0.10)
Table 1 Resource potential of K₁qn¹ shale oil in the northern Songliao Basin

资源潜力	概率分布				
	P5	P25	P50	P75	P95
地质资源/(10 ⁸ t)	205.011 0	148.412 0	105.595 9	76.920 4	40.248 4
可采资源/(10 ⁸ t)	20.501 1	14.841 2	10.559 6	7.692 0	4.024 8

2) 青一段富有机质页岩均属特低孔特低渗性储层,经页岩储集层的微观特征研究,识别出“微孔+微缝”组合是青一段页岩储层的主要储集空间类型。

3) 通过富有机质页岩面积和厚度的正态分布概率统计、含气量的等温吸附实验等关键参数的合理赋值,计算出松辽盆地北部青一段页岩油地质资源为 105.60×10⁸ t,可采资源量为 10.56×10⁸ t,资源量可观,是未来重要的勘探方向之一。

参 考 文 献

[1] Alexandra A. H, Amin G., Bernhard M. K. Transport properties of unconventional gas systems [J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 31(1): 90-99.

[2] 聂海宽,张金川,包书景,等. 四川盆地及其周缘上奥陶统-下志留统页岩气聚集条件[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 335-345.

Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Bao Shujing, et al. Shale gas accumulation conditions of the Upper Ordovician-Lower Silurian in Sichuan Basin and its periphery [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 335-345.

[3] 邹才能,张光亚,陶士振,等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 129-145.

Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129-145.

[4] 杨振恒,韩志艳,李志明,等. 北美典型克拉通盆地页岩气成藏特征、模式及启示[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 463-470.

Yang Zhenheng, Han Zhiyan, Li Zhiming, et al. Characteristics and patterns of shale gas accumulation in typical North American cratonic basins and their enlightenments [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 463-470.

[5] 董大忠,邹才能,李建忠,等. 页岩气资源潜力与勘探开发前景[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 324-336.

Dong Dazhong, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Resource potential, exploration and development prospect of shale gas in the whole world [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 324-336.

[6] 姜福杰,庞雄奇,欧阳学成,等. 世界页岩气研究概况及中国页岩气资源潜力分析[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 198-211.

Jiang Fujie, Pang Xiongqi, Ouyang Xuecheng, et al. The main progress and problems of shale gas study and the potential prediction of shale gas exploration [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 198-211.

[7] 柳波,吕延防,赵荣,等. 三塘湖盆地马朗凹陷芦草沟组泥页岩系统地层超压与页岩油富集机理[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 699-705.

Liu Bo, Lü Yanfang, Zhao Rong, et al. Formation overpressure and shale oil enrichment in the shale system of Lucaogou Formation, Malang Sag, Santanghu Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 699-705.

[8] 刘立,王东坡. 湖相油页岩的沉积环境及其层序地层学意义[J]. 石油实验地质, 1996, 18(3): 311-316.

Liu Li, Wang Dongpo. Depositional environments of lacustrine oil shales and its sequence stratigraphy significance [J]. Experimental petroleum geology, 1996, 18(3): 311-316.

[9] 梁世君,黄志龙,柳波,等. 马朗凹陷芦草沟组页岩油形成机理与富集规律[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 588-594.

Liang Shijun, Huang Zhilong, Liu Bo, et al. Formation mechanism and enrichment conditions of Lucaogou Formation shale oil from Malang sag, Santanghu Basin. ACTA PETROLEI SINICA, 2012, 33(4): 588-594.

[10] Gareth R. Chalmers, R. Marc Bustin, Ian M. Power; Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: Examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1099-1119.

[11] 邹才能,杨智,陶世振,等. 纳米油气与源储共生型油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 13-26.

Zou Caineng, Yang Zhi, Tao Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 13-26.

[12] 黄金亮,邹才能,李建中,等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 69-75.

Huang Jinliang, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Shale gas generation and potential of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Southern Sichuan basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 69-75.

[13] 刘波涛,尹虎,王新海,等. 修正岩石压缩系数的页岩气藏物质平衡方程及储量计算[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 471-474.

Liu Botao, Yin Hu, Wang Xinhai, et al. Material balance equation with revised rock compressibility for shale gas reserve calculation [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 471-474.

[14] 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.

[15] 张金川,林腊梅,李玉喜,等. 页岩气资源评价方法与技术: 概率体积法. 地学前缘, 2012, 19(2): 184-191.

Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, et al. The method of shale gas assessment: Probability volume method. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 184-191.

(编辑 董立)