



松辽盆地南部青山口组一段页岩油富集地质特征及资源潜力

徐兴友, 刘卫彬, 白 静, 陈 珊, 李耀华

中国地质调查局 油气资源调查中心, 北京 100083

摘 要: 松辽盆地南部长岭凹陷青一段发育一套优质的半深湖—深湖相暗色页岩, 沉积厚度大, 分布稳定. 页岩层系内存在大量滞留烃, 具有可观的页岩油资源潜力. 利用大量录井、测井、试油、岩心及分析测试资料, 对青一段页岩滞留烃含量及分布、岩相组合、储集空间、矿物组成等富集主控因素进行了全面分析. 结果表明, 青一段页岩中滞留烃性质以中—轻质油为主, 流动性好, 在纵向上主要富集在 1800~2500 m 范围内. 青一段页岩可划分为层理型、纹层型、互层型 3 种岩相类型, 其中层理型和纹层型滞留烃含量高, TOC 主体大于 1.5%, 有机质类型以 I、II₁ 型为主, 热解 S₁ 主体大于 2×10⁻³, 孔隙度大于 5.5%, 孔径以介孔—宏孔为主, 脆性矿物含量大于 50%, 可压性好, 是主要的页岩油富集模式. 通过富集主控因素叠合及有利岩相评价, 优选乾安富集区部署实施吉页油 1HF 井, 经压裂测试获得 16.4 m³/d 的高产页岩油流. 采用热解 S₁ 法初步估算长岭凹陷青一段页岩油资源量为 35×10⁸ t, 证实了松辽盆地南部具有可观的页岩油资源潜力.

关键词: 页岩油; 富集特征; 岩相类型; 吉页油 1HF 井; 青山口组; 松辽盆地

ENRICHMENT CHARACTERISTICS AND RESOURCE POTENTIAL OF SHALE OIL IN THE FIRST MEMBER OF QINGSHANKOU FORMATION IN SOUTHERN SONGLIAO BASIN

XU Xing-you, LIU Wei-bin, BAI Jing, CHEN Shan, LI Yao-hua

Oil and Gas Resources Survey Center, CGS, Beijing 100083, China

Abstract: There is a set of high quality semi-deep to deep lacustrine dark shale developed in the first member of Qingshankou Formation(K₂qn¹) in Changling Sag, southern Songliao Basin, with large sedimentary thickness and stable distribution. A lot of residual hydrocarbon exists in shale layers with shale oil resource potential. Based on massive data of well logging, oil testing, core sampling and experimental test, the paper comprehensively analyzes the main controlling factors of enrichment including content and distribution of residual hydrocarbon, lithofacies assemblages, reservoir space and mineral compositions in the shale. The results show the residual hydrocarbon is mainly medium-light oil, with good fluidity and enrichment range of 1800–2500 m vertically. The shale of K₂qn¹ can be divided into bedded, laminated and interbedded lithofacies types, and the content of residual hydrocarbon in the former two types is high, with TOC more than 1.5% generally, Type I and Type II₁ of organic matters, pyrolysis S₁ more than 2×10⁻³, porosity

收稿日期: 2021-04-30; 修回日期: 2021-05-26. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地区调查局项目“松辽盆地南部页岩油战略调查”(DD20190115).

作者简介: 徐兴友(1968—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事页岩油气调查评价与地球化学综合研究工作, 通信地址 北京市海淀区北四环中路 267 号奥运大厦, E-mail/xuxingyou@mail.cgs.gov.cn

通信作者: 刘卫彬(1991—), 工程师, 主要从事页岩油气调查评价与地质-工程一体化综合研究工作, 通信地址 北京市海淀区北四环中路 267 号奥运大厦, E-mail/ogslwb@126.com

more than 5.5%, mesoporous-macroporous pore size, brittle mineral content more than 50% and good fracturing property, which is the major enrichment pattern of shale oil. Through superposition of main controlling factors of enrichment and evaluation of favorable lithofacies, JYY-1HF well is optimized and deployed in Qian'an enrichment area and 16.4 m³/d of shale oil flow is yielded after fracturing. The shale oil resource of K_{2qn}¹ in Changling Sag is estimated to be 35×10⁸ t by pyrolysis S₁ method, proving that the southern Songliao Basin has considerable shale oil resource potential.

Key words: shale oil; enrichment characteristics; lithofacies type; JYY-1HF well; Qingshankou Formation; Songliao Basin

0 引言

松辽盆地是世界上已发现油气资源最为丰富的陆相沉积盆地,也是中国重要的产油气盆地之一。目前,松辽盆地常规油气勘探开发已进入中后期,常规油气增储上产难度大,迫切需要开拓新的油气接替领域^[1]。松辽盆地白垩系发育沙河子组、青山口组、嫩江组等多套陆相页岩,是盆地主要烃源岩层,在地质历史时期生成了大量的烃类,除了运移至砂岩储层聚集成藏外,还有大量的油气残留于页岩中,形成了巨大的页岩油气资源^[2-6]。

中国中生代以来广泛发育大型淡水、咸水长期持续沉降的拗陷和断陷湖盆,均可保存有机质形成优质烃源岩。通常陆相页岩油层以 I—II 型有机质为主,热演化程度上多处于液态石油生成阶段,成熟区主力烃源岩层资源潜力大,且富集大量可动资源。半深湖—深湖相是烃源岩形成的最有利相带,沉积有机质丰度高,可形成高丰度的页岩有利区(段)。富有机质页岩中有机质纹层广泛存在,有机质为无定型、不规则的微粒、凝块或絮团,呈纹层状和条带状^[5-6]。另外,陆相页岩层系石油充注程度高、含油层系多、分布面积广,石油资源规模大,存在多类型局部有利储集层“甜点”。近年重点探区勘探研究和初步实践证实,中国陆相页岩层系具有烃源岩内大规模石油聚集成藏、多层系多类型大面积分布特征^[7]。

松辽盆地白垩系上统青山口组一段(以下简称“青一段”)页岩有机质丰度高、类型好、演化程度适中、生烃能力强,页岩内部大量滞留烃富集,是典型的陆相页岩油潜在勘探开发层系。目前多口探井在青一段页岩层段中见丰富页岩油显示,部分探井试油获得油流。另外,根据前人研究成果,从页岩储层特征、地球化学特征等基础油气地质条件的角度,青一段页岩是松辽

盆地页岩油勘查最为现实的层系,具备规模页岩油资源形成所需的基础地质条件^[8-9]。目前,松辽盆地页岩油气资源勘探尚处于起步阶段,缺乏针对青一段页岩油富集特征的系统研究。本文以松辽盆地南部长岭凹陷为例,系统分析青一段页岩滞留烃、岩相类型、储集空间及物性、页岩矿物组成等特征,研究富集主控因素,通过多因素叠合圈定页岩油富集区,为其他地区的深湖相页岩勘查提供借鉴。

1 区域地质概况

松辽盆地是中国东部大型叠合含油气盆地,总面积达 26×10⁴ km²,根据基底性质和盖层的区域地质特征,整体划分为中央拗陷区、北部倾没区、西部斜坡区、东北隆起区、东南隆起区和西南隆起区等 6 个一级构造单元^[10-13]。本次研究对象主要是位于松辽盆地南部的的主力生烃凹陷——长岭凹陷(图 1)。青一段泥页岩广泛发育,分布面积超过 2×10⁴ km²,沉积厚度大,是页岩油勘查有利领域。

长岭凹陷发育下部上侏罗统一下白垩统断陷层系和上部上白垩统拗陷层系双层地质结构。自下而上依次发育火石岭组、沙河子组、营城组、登娄库组、泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组,其中青山口组一段是拗陷层系主力页岩油富集潜在层系^[14-15],也是本次研究的目的层段。

2 青一段页岩油富集地质特征

2.1 页岩分布特征

松辽盆地上白垩统为大型淡水—微咸水湖相沉积环境。青山口组沉积早期(青一段)湖盆急剧扩张,湖盆面积扩大,主要沉积了深湖及半深湖相有机质富集的暗色泥岩;青山口组沉积晚期(青二、三段),总体表

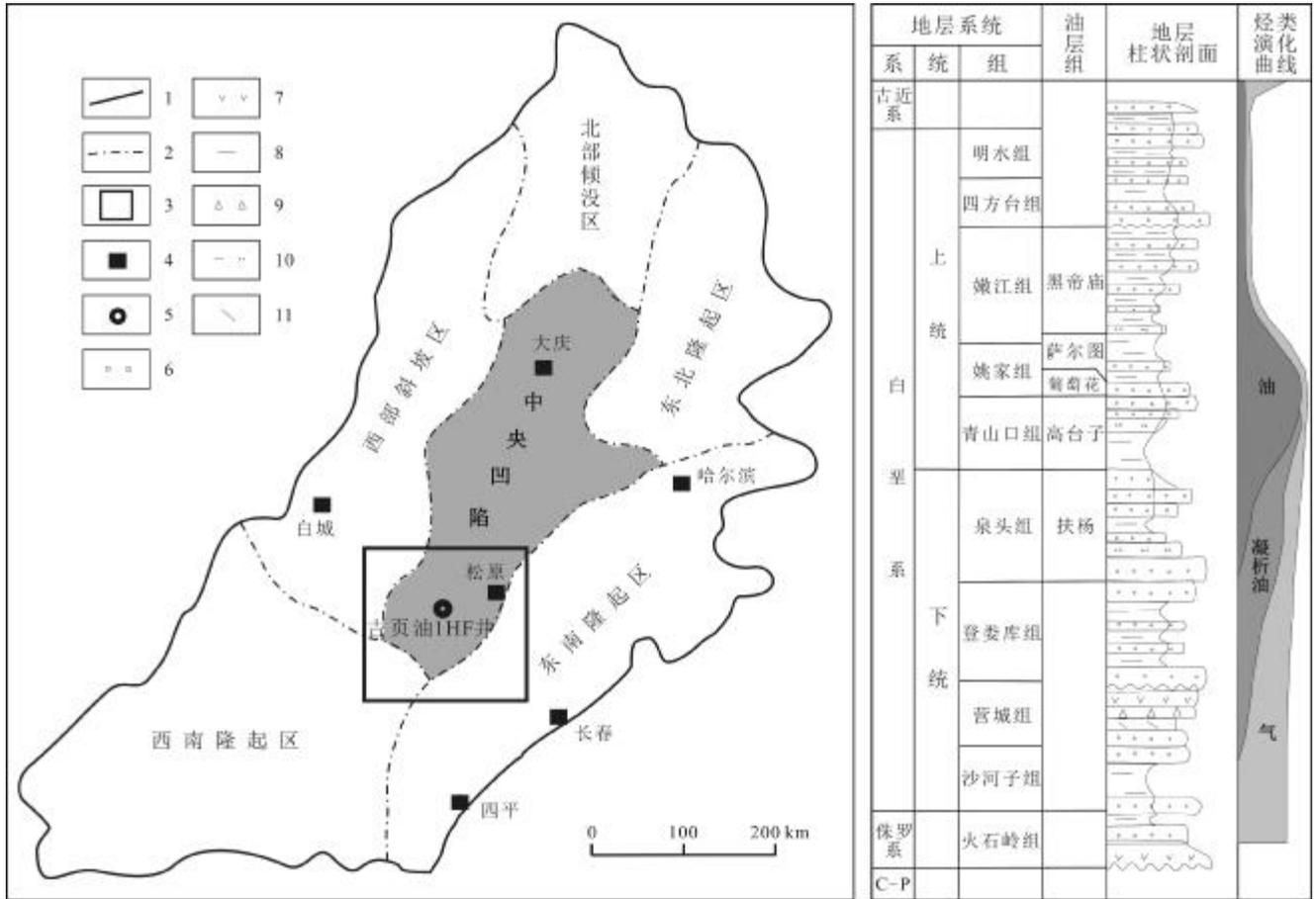


图1 松辽盆地南部构造位置及地层综合柱状图
(据文献[15]改编)

Fig. 1 Tectonic location and comprehensive stratigraphic column of southern Songliao Basin
(Modified from Reference [15])

1—盆地边缘(basin boundary); 2—一级构造单元界线(boundary of first-order tectonic unit); 3—研究区范围(study area); 4—地名(place name); 5—井号(well number); 6—砂岩(sandstone); 7—火山岩(volcanic rock); 8—泥页岩(shale); 9—角砾岩(breccia); 10—粉砂岩(siltstone); 11—盐膏岩(salt gypsum rock)

现为水退,湖盆萎缩,陆源碎屑供应充分,粗碎屑物质较发育,主要沉积三角洲前缘砂岩及滨浅湖相泥岩^[15-17]. 因此,在垂向分布上优质页岩主要发育于青一段中下部,暗色泥岩厚度一般为50~100 m,平均厚度80 m,主体埋深1 500~2 500 m. 在平面上,青山口组沉积时期松辽盆地南部主要发育西部和南部两大河流体系,湖盆主要分布在盆地中部及北部,在盆地中心发育半深湖—深湖亚相,向盆地边缘逐渐演化为前三角洲、三角洲前缘亚相. 因此,青一段暗色页岩主要分布于中央拗陷区的长岭断陷,沉积中心为乾安—大安一带,最大厚度超过90 m(图2).

2.2 页岩滞留烃特征

2.2.1 滞留烃含量与分布

长岭凹陷青一段页岩有机质丰度高,有机碳含量(TOC)以1.5%~3.0%为主,平均达到2.0%以上;有机质类型为I型、II₁型,以生油型母质为主;有机质演化程度为0.8%~1.1%,处于生油高峰阶段,具有滞留烃富集的物质基础. 青一段暗色页岩具有较高的残留烃量,氯仿沥青“A”含量绝大部分大于0.2%,平均值为0.35%,最高可达2%;热解S₁值含量普遍大于1.5×10⁻³,最高可达4×10⁻³,平均为2.2×10⁻³. 受有机质演化程度及生排烃作用的影响,页岩中滞留烃富集在一

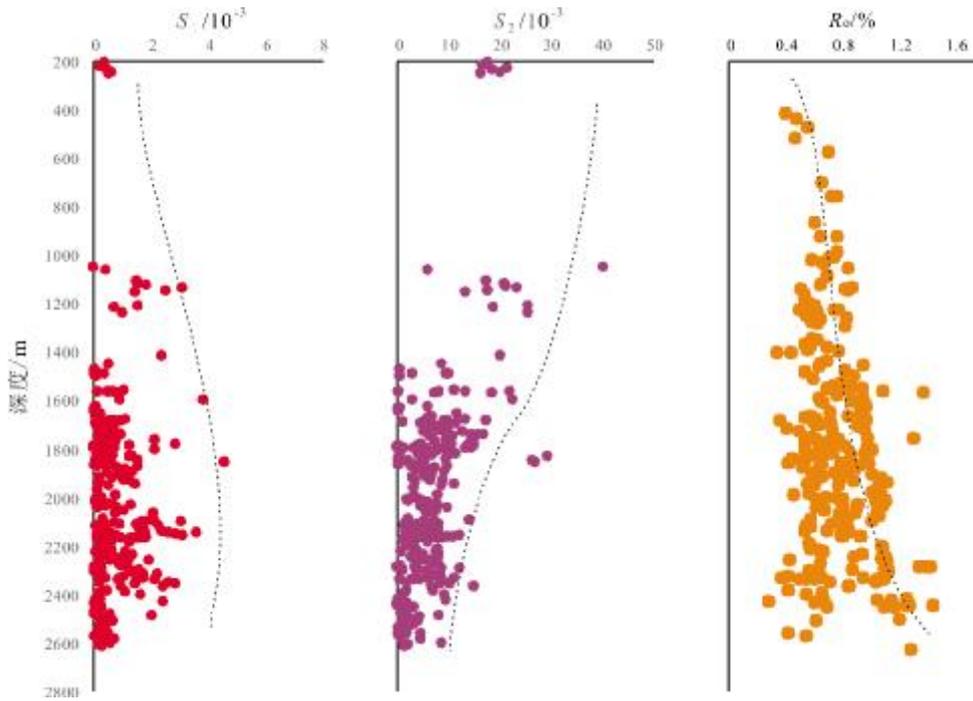


图3 青一段页岩有机地球化学综合演化剖面

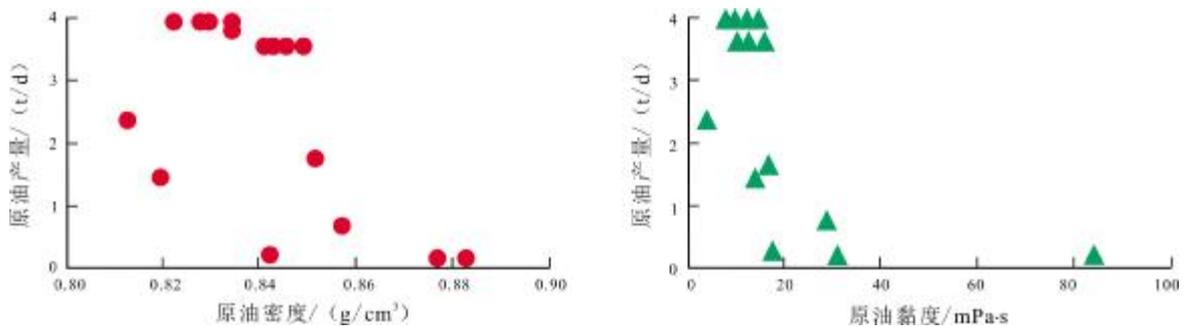
Fig. 3 Comprehensive evolution profile of organic geochemistry of K_2qn^1 shale

图4 青一段页岩中原油性质与单井产量关系

Fig. 4 Relation between crude oil properties and single well production in K_2qn^1 shale

晶间孔占主体,约占 58.8%,其次为石英、长石所围成的粒间孔,约占 33.04%,黄铁矿晶间孔约占 5.1%,几乎不发育粒内溶孔和白云石晶间孔(图 6a),孔径类型以介孔为主,孔径分布区间集中在 10~50 nm (图 6b);纹层型页岩和互层型页岩具有较高的长英质矿物粒间孔含量,分别为 36%和 45%,明显高于层理发育型页岩中的粒间孔含量,该类型粒间孔主要发育在砂质纹层中,在泥质纹层中仍以伊利石晶间孔为主。纹层型页岩孔径类型以介孔-宏孔为主,孔径分布区间集中在 20~60 nm;互层型页岩孔径类型以介孔-宏孔为主,孔径分布区间集中在 3~30 nm。综合来看,层理型页岩

孔隙类型以黏土矿物晶间孔为主,纹层型和互层型页岩孔隙类型兼具黏土矿物晶间孔和长英质粒间孔,平均孔隙直径大小排序为:纹层型页岩>层理型页岩>互层型页岩。

2.5 矿物组成特征

青一段页岩矿物主要由石英、钾长石、斜长石、方解石、黏土矿物及黄铁矿组成。本研究对长岭凹陷青一段页岩岩心矿物组成进行了分析,结果表明青一段页岩脆性矿物含量为 33%~70%,均值 52%,以石英和斜长石为主;黏土矿物含量 23%~68%,均值 46%,以伊利石和伊/蒙混层为主(图 7);碳酸盐矿物、黄铁矿

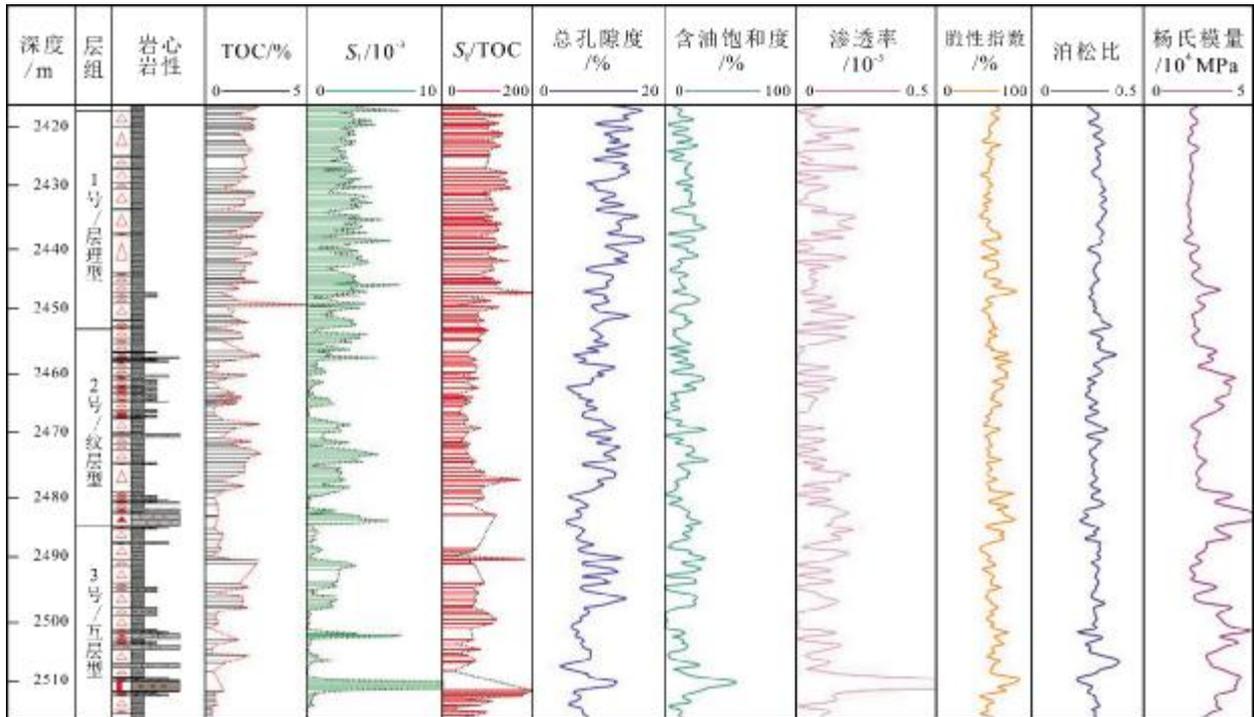


图5 长岭凹陷青一段岩相及层组划分图

Fig. 5 Lithofacies and stratigraphic division of K_2qn^1 in Changling Sag

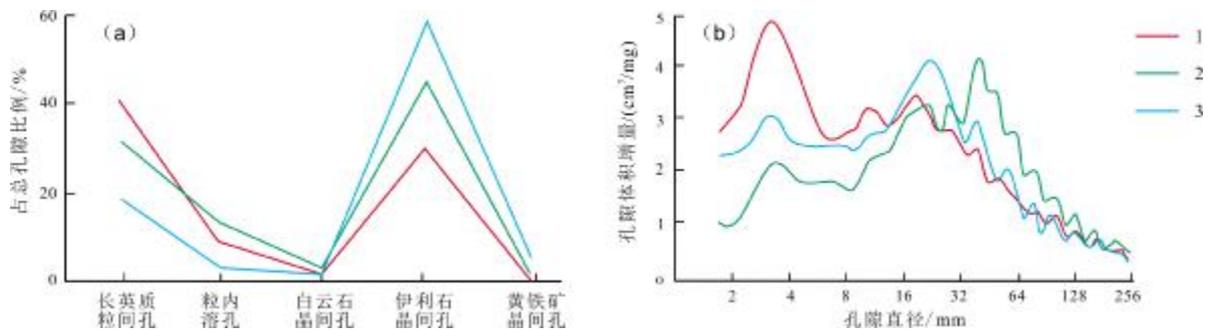


图6 青一段页岩各类岩相孔隙特征

Fig. 6 Pore characteristics for various lithofacies of K_2qn^1 shale

1—互层型(interbedded type); 2—纹层型(laminated type); 3—层理型(bedded type)

等含量较少. 其中,层理型页岩以黏土矿物为主,平均含量为 53.7%;纹层型页岩中主要成分石英、长石和黏土矿物呈现混积分布,分别为 26.6%、16.3%和 32.4%,局部发育介形虫纹层,引起碳酸盐含量局部较高;互层型页岩黏土矿物含量较低,平均值为 21.5%,长英质含量较高,平均 64.6%,局部砂质层内出现少量钙质胶结,引起方解石含量增加. 整体来看,青一段页岩脆性矿物含量高,可压裂性较好,其中纹层型和互层型页岩可压裂性要优于层理型页岩.

综合对青一段页岩油富集地质条件的分析表明,层理型和纹层型兼具较好的含油性、物性、储集空间类型和可压裂性,是长岭凹陷最重要的页岩油富集目标层系,可以作为有利区优选和井位部署的重要依据.

3 页岩油资源潜力

3.1 有利区优选

有利区的优选决定页岩油的勘探方向. 有利区是指在富有机质页岩发育的基础上,页岩层系中滞留烃



图7 青一段页岩全岩矿物含量及黏土矿物含量分布图

Fig. 7 Distribution of whole rock mineral and clay mineral contents in K_2qn^1 shale

1—石英(quartz); 2—长石(feldspar); 3—碳酸盐矿物(carbonate mineral); 4—菱铁矿(siderite); 5—黄铁矿(pyrite); 6—黏土矿物(clay mineral); 7—伊蒙混层(illite-smectite mixture); 8—伊利石(illite); 9—绿泥石(chlorite)

富集,通过钻探能够或可能获得页岩油流的区域^[23-25]. 主要的评价指标是在潜力区评价的基础上,提高页岩的厚度、有机质丰度、成熟度等参数的标准,且增加含油性参数(热解 S_1 或氯仿沥青“A”)的约束. 依据松辽盆地南部青山口组一段页岩油发育地质条件,综合分析国内已有陆相页岩油有利区评价指标,建立了基于页岩厚度(大于 50 m)、TOC(大于 1.5%)、 R_o (大于 0.7%)、 S_1 (大于 1.0×10^{-3})、 S_1/TOC (大于 100%)等多参数的有利区优选评级标准.

按照上述多因素评价标准,对长岭凹陷进行页岩油富集要素叠合评价,圈定出乾安和大安两个页岩油富集区,有利区面积 2 880 km^2 (图 8). 其中,乾安有利区主要分布在长岭凹陷乾安次洼,有利区面积为 1 300 km^2 ,发育三角洲外前缘深湖—半深湖相带页岩,青一段主要发育层理型、纹层型两类有利页岩层系;大安—塔虎城有利区主要分布在长岭凹陷大安—塔虎城次洼、红岗阶地东北部及扶新隆起带西缘,有利区面积为 1 580 km^2 ,主要发育深湖—半深湖相带页岩,青一段以层理型页岩为主,纹层型页岩欠发育. 因此,优选发

育两类有利岩相的乾安有利区部署吉页油 1HF 井实施钻探验证,该井压后放喷求产获得 16.4 m^3/d 的高产页岩油流,证实了页岩油富集有利区优选的正确性.

3.2 资源潜力评价

目前,针对陆相页岩油气资源潜力尚未形成一个较为明确和有针对性的评价体系,常规油气资源评价方法中成因法、资源丰度类比法、EUR 类比法、容积法、油气资源空间预测法等,因需要的地质参数较多,不适用于勘探程度较低、缺少试采数据的页岩油资源评价. 考虑到数据丰富程度,本次评价主要采用体积法中的热解 S_1 法对松辽盆地南部长岭凹陷的页岩油资源进行估算. 该方法具有方法成熟、分析精度高、经济快捷、样品用量少、获取比较方便等优点.

热解 S_1 法是应用热解 S_1 参数作为页岩油含量的衡量指标. S_1 为游离态,是岩石在热解升温过程中 300 $^{\circ}C$ 以前热蒸发出来的,为源岩中已经生成但尚未排出的烃类产物,正是页岩油评价和勘探的对象. 计算公式如下:

$$Q=V \times \rho \times S_1 \times (k_{\text{轻烃}} + k_{\text{重烃}})$$

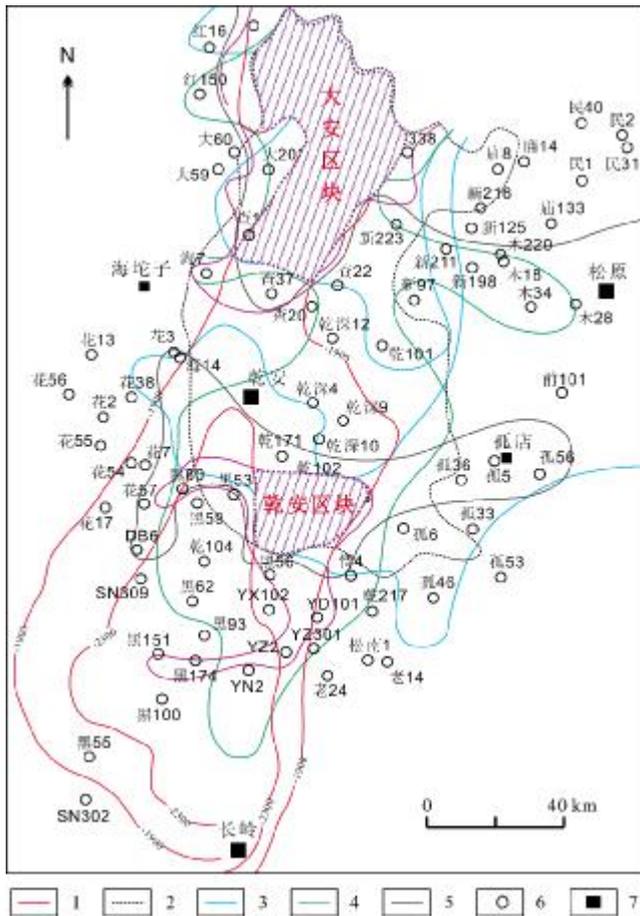


图8 松辽盆地南部青一段页岩油有利区分布图

Fig. 8 Distribution map of favorable areas for shale oil in K_{2qn}^1 in southern Songliao Basin

1—地层埋深 (buried depth of formation); 2—超压边界 (overpressure boundary); 3—TOC 边界 (TOC boundary); 4— R_o 边界 (R_o boundary); 5— S_1 边界 (S_1 boundary); 6—井号 (well number); 7—地名 (place name)

式中, V —页岩体积, m^3 ; ρ —页岩密度, g/cm^3 ; S_1 —残留烃含量, 10^{-3} ; $k_{轻烃}$ — S_1 的轻烃补偿校正系数; $k_{重烃}$ — S_1 的重烃补偿校正系数。

在参数选取过程中, ρ 、 $k_{轻烃}$ 、 $k_{重烃}$ 均属于经验参数, 根据长岭地区概率统计得出固定赋值, 其中乾安地区页岩岩石密度为 $2.45 g/cm^3$, 大安地区页岩岩石密度为 $2.4 g/cm^3$; 通过吉页油 1HF 井青一段岩心分温阶热解实验与常规热解对比确定重烃校正系数 ($k_{重烃}$) 为 2.1, 根据取心后立即实测热解 S_1 值与放置 2 个月后实测热解 S_1 数据对比确定轻烃校正系数 ($k_{轻烃}$) 为 0.79; 对于 V 、 S_1 参数的确定采用归一化网格法进行, 对上文有利区的优选评价过程中形成的页岩等厚图、 S_1 等值线图按照 $10 km \times 10 km$ 的密度进行网格化处理, 计

算每一单元格中的资源丰度. 最终, 按照热解 S_1 方法初步估算乾安有利区页岩油资源量约 $15 \times 10^8 t$, 大安—塔虎城有利区约 $20 \times 10^8 t$, 长岭凹陷青一段页岩油资源量约为 $35 \times 10^8 t$, 具有十分可观的页岩油勘探开发前景。

4 结论

(1) 松辽盆地南部长岭凹陷青一段半深湖—深湖相页岩发育, 页岩油远景区面积可达 $2 \times 10^4 km^2$, 青一段页岩沉积厚度 $50 \sim 100 m$, 平均厚度 $80 m$, 滞留烃含量高, 有利深度段在 $1800 \sim 2500 m$, 且原油性质为轻质—中质, 流动性好, 具备页岩油富集有利地质条件。

(2) 青一段页岩可划分为层理型、纹层型、互层型 3 种岩相类型, 其中层理型和纹层型兼具较好的含油性、物性、储集空间类型和可压裂性, 是主要的页岩油富集层系。

(3) 依据形成的页岩油富集地质认识, 按照富集主控因素多因素叠合法评价出乾安和大安两个页岩油富集区, 有利区面积 $2880 km^2$. 其中, 乾安富集区发育层理型、纹层型两类有利页岩层系, 在该区部署吉页油 1HF 井实施钻探验证, 压后测试获得 $16.4 m^3/d$ 的高产页岩油流, 对中国深湖相页岩油勘探开发具有借鉴意义。

(4) 采用热解 S_1 方法初步估算长岭凹陷青一段页岩油资源量为 $35 \times 10^8 t$, 其中乾安有利区页岩油资源量 $15 \times 10^8 t$, 大安—塔虎城有利区 $20 \times 10^8 t$, 证实松辽盆地南部青一段具有十分可观的页岩油勘探开发前景。

参考文献 (References):

- [1] 周志, 阎玉萍, 任收麦, 等. 松辽盆地页岩油勘探前景与对策建议 [J]. 中国矿业, 2017, 26(3): 171-174.
Zhou Z, Yan Y P, Ren S M, et al. Prospects and strategy for shale oil exploration in Songliao Basin, China [J]. China Mining Magazine, 2017, 26(3): 171-174.
- [2] 张君峰, 许浩, 赵俊龙, 等. 中国东北地区油气地质特征与勘探潜力展望 [J]. 中国地质, 2018, 45(2): 260-273.
Zhang J F, Xu H, Zhao J L, et al. Geological characteristics and exploration potential of oil and gas in the northeast area of China [J]. Geology in China, 2018, 45(2): 260-273.
- [3] 李艳, 张秀颖, 逯晓喻, 等. 松辽盆地上古生界烃源岩特征及有效性分析 [J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(4): 39-47.
Li Y, Zhang X Q, Lu X Y, et al. Characteristics and validity analysis of hydrocarbon source rocks of Upper Paleozoic in Songliao Basin [J].

- Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(4):39-47.
- [4] 张建深, 郭庆福, 冯子辉. 松辽盆地青一段泥岩生烃、排烃特征与油气藏的形成关系[J]. 大庆石油地质与开发, 1991, 10(1):6-10.
- Zhang J S, Guo Q F, Feng Z H. Relationship between characteristics of hydrocarbon generation & expelling of shale in Qing No.1 member of Songliao Basin & generation of oil & gas reservoir [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1991, 10(1):6-10.
- [5] 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 J C, Lin L M, Li Y X, et al. Classification and evaluation of shale oil[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 322-331.
- [6] 高瑞祺. 泥岩异常高压带油气的生成排出特征与泥岩裂缝油气藏的形成[J]. 大庆石油地质与开发, 1984, 3(1): 160-167.
- Gao R Q. Characteristics of petroleum generation and expulsion in abnormal pressure shale zones and the formation of fractured shale reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1984, 3(1): 160-167.
- [7] 李微, 庞雄奇, 赵正福, 等. 松辽盆地青一段常规与非常规油气资源评价[J]. 中国海上油气, 2018, 30(5):46-54.
- Li W, Pang X Q, Zhao Z F, et al. Evaluation on the conventional and unconventional oil and gas resources in K_1qn^1 of Songliao Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(5):46-54.
- [8] 李士超, 张金友, 公繁浩, 等. 松辽盆地北部上白垩统青一段泥岩特征及页岩油有利区优选[J]. 地质通报, 2017, 36(4):654-663.
- Li S C, Zhang J Y, Gong F H, et al. The characteristics of mudstones of Upper Cretaceous Qingshankou Formation and favorable area optimization of shale oil in the north of Songliao Basin [J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(4):654-663.
- [9] 薛海涛, 田善思, 卢双舫, 等. 页岩油资源定量评价中关键参数的选取与校正——以松辽盆地北部青一段为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 70-78.
- Xue H T, Tian S S, Lu S F, et al. Selection and verification of key parameters in the quantitative evaluation of shale oil: A case study at the Qingshankou Formation, northern Songliao Basin [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 70-78.
- [10] 刘和甫, 梁慧社, 李晓清, 等. 中国东部中生代裂陷盆地与伸展山岭耦合机制[J]. 地学前缘, 2000, 7(4):477-486.
- Liu H F, Liang H S, Li X Q, et al. The coupling mechanisms of Mesozoic-Cenozoic rift basins and extensional mountain system in eastern China[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4):477-486.
- [11] 郭少斌, 曲永宝, 王树学. 陆相盆地层序及体系域模式——以松辽盆地西部斜坡为例[J]. 地质科技情报, 1998, 17(4):38-43.
- Guo S B, Qu Y B, Wang S X. Model of terrestrial basin sequence and system tracts: Taking the western slope of Songliao Basin as an example [J]. Geological Science and Technology Information, 1998, 17(4):38-43.
- [12] Feng Z Q, Jia C Z, Xie X N, et al. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao Basin, Northeast China[J]. Basin Research, 2010, 22(1):79-95.
- [13] 侯启军, 冯志强, 冯子辉. 松辽盆地陆相石油地质学[M]. 北京:石油工业出版社, 2009:65-88.
- Hou Q H, Feng Z Q, Feng Z H. Continental petroleum geology in the Songliao Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 65-88.
- [14] 张文军, 胡望水, 官大勇, 等. 松辽裂陷盆地反转期构造分析[J]. 中国海上油气, 2004, 16(4): 230-234.
- Zhang W J, Hu W S, Guan D Y, et al. An analysis of tectonic inversion in Songliao Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2004, 16(4):230-234.
- [15] 张君峰, 徐兴友, 白静, 等. 松辽盆地南部白垩系青一段深湖相页岩油富集模式及勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4):637-652.
- Zhang J F, Xu X Y, Bai J, et al. Enrichment characteristics and exploration practice of deep lacustrine shale oil in the first member of Qingshankou Formation, southern Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4):637-652.
- [16] 卓弘春, 林春明, 李艳丽, 等. 松辽盆地北部上白垩统青山口-姚家组沉积相及层序地层界面特征[J]. 沉积学报, 2007(1): 29-38.
- Zhuo H C, Lin C M, Li Y L, et al. Characteristics of sedimentary facies and sequence boundary in Upper Cretaceous Qingshankou-Yaojia Formation of northern Songliao Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007(1): 29-38.
- [17] 高有峰, 王璞珺, 程日辉, 等. 松科 1 井南孔白垩系青一段沉积序列精细描述: 岩石地层、沉积相与旋回地层[J]. 地学前缘, 2009, 16(2):314-323.
- Gao Y F, Wang P J, Cheng R H, et al. Description of Cretaceous sedimentary sequence of the first member of the Qingshankou Formation recovered by CCSD-SK-Is borehole in Songliao Basin: Lithostratigraphy, sedimentary facies and cyclic stratigraphy [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(2): 314-323.
- [18] 孙钰, 孙贺龙. 松辽盆地南部长岭凹陷上白垩统沉积有机相研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(4): 537-545.
- Sun Y, Sun H L. Sedimentary organic facies study of late Cretaceous in Changling Sag of southern Songliao Basin [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008, 16(4): 537-545.
- [19] 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. AAPG Memoir 97, 2012:89-119.
- [20] 柳波, 石佳欣, 付晓飞, 等. 陆相页岩层系岩相特征与页岩油富集条件——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青一段富有机质页岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5):828-838.
- Liu B, Shi J X, Fu X F, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: A case study of organic-rich shale in first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 828-838.

- [21]柳波,吕延防,冉清昌,等. 松辽盆地北部青山口组页岩油形成地质条件及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2):280-285.
Liu B, Lü Y F, Ran Q C, et al. Geological conditions and exploration potential of shale oil in Qingshankou Formation, northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 280-285.
- [22]李吉君,史颖琳,黄振凯,等. 松辽盆地北部陆相页岩孔隙特征及其对页岩油赋存的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(4): 27-34.
Li J J, Shi Y L, Huang Z K, et al. Pore characteristics of continental shale and its impact on storage of shale oil in northern Songliao Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(4) : 27-34.
- [23]黄文彪,邓守伟,卢双舫,等. 页岩有机非均质性评价及其在页岩油资源评价中的应用——以松辽盆地南部青一段为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5):704-711.
Huang W B, Deng S W, Lu S F, et al. Shale organic heterogeneity evaluation method and its application to shale oil resource evaluation — A case study from Qingshankou Formation, southern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5):704-711.
- [24]李士超,张金友,公繁浩,等. 松辽盆地北部青一段一、二段泥岩七性特征及页岩油有利区优选[J]. 地质论评, 2017, 63(S1): 71-72.
Li S C, Zhang J Y, Gong F H, et al. The seven properties characteristics of mudstone in the first and second member of Upper Cretaceous Qingshankou Formation and favorable area optimization of shale oil in the north of Songliao Basin[J]. Geological Review, 2017, 63(S1): 71-72.
- [25]秦梦华,王中鹏. 松辽盆地长岭坳陷上白垩统页岩油有利区优选及资源潜力[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(31):209-215.
Qin M H, Wang Z P. Optimization of the favorable area and analysis of the resource potential for the Upper Cretaceous shale oil in Changling Depression, Songliao Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(31):209-215.

(上接第 376 页/Continued from Page 376)

- [20]Khoshnoodkia M, Mohseni H, Rahmani O, et al. TOC determination of Gadvan Formation in South Pars gas field, using artificial intelligent systems and geochemical data[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 78(1): 119-130.
- [21]董宁,许杰,孙赞东,等. 泥页岩脆性地球物理预测技术[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(S1): 69-74.
Dong N, Xu J, Sun Z D, et al. Shale brittleness prediction by geophysical methods[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(S1): 69-74.
- [22]Fillippone W R. Estimation of formation parameters and the prediction of overpressures from seismic data[R]. SEG 0502, Dallas, Texas: SEG, 1982.
- [23]马海. Fillippone 地层压力预测方法的改进及应用[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(6): 56-61.
Ma H. Pore pressure prediction with seismic interval velocity by the modified Fillippone method [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(6): 56-61.
- [24]张磊夫,董大忠,孙莎莎,等. 三维地质建模在页岩气甜点定量表征中的应用——以扬子地区昭通页岩气示范区为例[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(9): 1332-1340.
Zhang L F, Dong D ZH, Sun S S, et al. Application of 3D geological modeling in quantitative characterization of shale gas sweet spots: Case study of Zhaotong national demonstration area of Yangtze region [J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(9): 1332-1340.
- [25]胡华锋,胡起,林正良. 页岩气储层地层压力预测方法及其在四川盆地的应用[J]. 石油物探, 2018, 57(3): 362-368.
Hu H F, Hu Q, Lin Z L. Pore pressure prediction for shale gas reservoirs and its application in the Sichuan Basin, China [J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2018, 57(3): 362-368.

(上接第 404 页/Continued from Page 404)

- Zhang J C, Lin L M, Li Y X, et al. Classification and evaluation of shale oil [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 9(5): 322-331.
- [18]宁方兴,王学军,郝雪峰,等. 济阳坳陷页岩油赋存状态和可动性分析[J]. 新疆石油天然气, 2015, 11(3):1-5.
Ning F X, Wang X J, Hao X F, et al. An analysis in occurrence state and mobility of shale oil in Jiyang Depression [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2015, 11(3): 1-5.
- [19]卢双舫,张敏. 油气地球化学[M]. 北京:石油工业出版社,2008: 19-20.
Lu S F, Zhang M. Petroleum geochemistry [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 19-20. (in Chinese)
- [20]肖飞,杨建国. 湖相泥页岩密闭冷冻测试与现场地化录井热解参数对比研究[C]. 福州:第十二届全国石油地质实验技术学术会议,2020.
Xiao F, Yang J G. Comparative study of the pyrolysis parameters between laboratory test of airtight freezing samples and geochemical mud logging in the well site [C]. Fuzhou: The 12th National Academic Conference of Petroleum Geology Experimental Technology, 2020. (in Chinese)
- [21]李延钧,张烈辉,冯媛媛,等. 页岩有机碳含量测井评价方法及其应用[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1):169-175.
Li Y J, Zhang L H, Feng Y Y, et al. Logging evaluation method and its application for measuring the total organic carbon content in shale gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(1): 169-175.
- [22]Dow W G. Kerogen studies and geological interpretations[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7: 79-99.