

雅布赖盆地侏罗系新河组致密油形成条件与有利区资源潜力

高岗¹,赵乐义²,马国福²,李涛²,王建国²,杨军²,李昱东²,徐瑾²

[1. 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;

2. 中国石油 玉门油田公司 勘探开发研究院,甘肃 酒泉 735019]

摘要:雅布赖盆地是我国西部一个侏罗纪湖相含油气盆地。为了评价其侏罗系新河组致密油的勘探前景,基于烃源岩、储集层条件及其配置关系的分析,采用地质要素叠合法优选出盆地的致密油有利区,并利用小面元容积法估算了资源潜力。研究表明,雅布赖盆地的优质烃源岩主要分布在中侏罗统新河组下段,累积厚度大、有机质丰度高、有机质类型好、处于生油的成熟热演化阶段,为致密油主要发育段;低孔、低渗的致密储集层主要以薄互层或夹层形式分布在烃源岩层内,原油具备典型的源内自生自储特征;成熟的富有机质烃源岩与储集层的大面积直接接触和巨厚的泥岩封盖是致密油发育的重要控制因素。首先,通过烃源岩成熟度确定了小湖次凹为致密油发育有利部位。然后,综合测井和录井油气显示成果,依据烃源岩 TOC (有机碳含量) $> 1\%$ 、 $0.6\% < R_o$ (镜质体反射率) $< 1.3\%$ 、储集层(孔隙度 $\geq 4\%$) 累计厚度 $> 10\text{ m}$ 的标准,圈定了盆地致密油有利区主要分布在小湖次凹的中西部。最后,根据小面元容积法估算有利区石油地质资源量大致为 $0.92 \times 10^8\text{ t}$,资源丰度平均为 $34.5 \times 10^4\text{ t/km}^2$ 。

关键词:有利区;致密油;新河组;侏罗系;小湖次凹;雅布赖盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Formation conditions of the Jurassic Xinhe Formation tight oil reservoirs and resource potential in the Yabrai Basin

Gao Gang¹, Zhao Leyi², Ma Guofu², Li Tao², Wang Jianguo², Yang Jun², Li Yudong², Xu Jin²

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, CNPC Yumen Oilfield Company, Jiuquan, Gansu 735019, China)

Abstract: The Yaburai Basin is a Jurassic lacustrine petroliferous basin in western China. In order to assess tight oil potential of the Xinhe Formation in the basin, we employed a geological factor superimposition method to select tight oil play fairway and a small cell volumetric method to calculate the resources based on analyses of source rocks and reservoiring conditions as well as their coupling relationship in the basin. The research shows that high-quality source rocks are mainly located in the lower Xinhe Formation in the Middle Jurassic. Tight oil reservoirs are mainly developed in this source rock interval featuring in large cumulative thickness, rich organic matter of favorable types, and being within oil window. Low-porosity and low-permeability tight reservoirs occur as thin interbeds and interlayers inside the source rocks. Crude found there shows clear signs of self-generation and self-preservation. The large area of contact between matured organic-rich source rocks and reservoirs and the effective sealing of massive mud rock cap are the most important controlling factors of tight oil reservoirs in the basin. The sub-sag Xiaohu was considered to be a play fairway based on analyses of maturity of source rocks. A comprehensive study of mud and wireline logging data as well as oil and gas shows were used to establish a standard ($TOC > 1\%$, $0.6\% < R_o < 1.3\%$, reservoir porosity $\geq 4\%$, accumulative thickness $> 10\text{ m}$) to pinpoint the location of play fairway at the central and western part of the subsag. Calculation shows that the target holds an oil-in-place of 92 million tons and resource abundance of 345 thousand tons per square kilometers.

Key words: play fairway, tight oil, Xinhe Formation, Jurassic, Xiaohu Subsag, Yabrai Basin

收稿日期:2016-03-14;修订日期:2017-02-27。

第一作者简介:高岗(1966—),男,博士、副教授,油气勘探与开发。E-mail:gaogang@cup.edu.cn。

基金项目:中石油股份公司重大科技专项(2012E330);中国石油第四次油气资源评价资助项目(2013E-050209)。

致密油作为一种重要的非常规油气资源,近些年在全球范围内都取得了重要的勘探与开发成果^[1-4]。中国对致密油的认识较晚,致密油的概念近年来才逐步被推广。松辽盆地白垩系、四川盆地中-下侏罗统、准噶尔盆地二叠系、鄂尔多斯盆地三叠系延长组以及渤海湾盆地沙河街组等都有较大的致密油资源潜力^[5-12]。雅布赖盆地位于河西走廊的中段,南部以北大山为界与潮水盆地毗邻,东南部以巴彦乌拉山为界与巴彦浩特盆地相邻,西北部以雅布赖山为界与银根-额济纳旗盆地相望(图1),大地构造位置处于华北克拉通的北部弱活化带内^[13]。盆地南北宽约50 km,东西长约240 km,地形较平缓,海拔约在1 200~1 500 m,面积约为 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[14]。雅布赖盆地于20世纪60年代开始油气勘探,先后完成石油地质普查报告和1:50 000航磁普查工作。从1983年开始,逐渐开展区域性石油普查;1995—1998年钻探井3口,但均未获得突破。2008年,雅布赖盆地开始新一轮的综合研究,确定了盆地的勘探类型及重点勘探方向。2009年在盐场次凹部署柳1井和盐1井,见少量油气显示,但均未获得突破。2010年开始陆续部署了多口探井,其中雅探1、雅探2、雅探3、雅探5和雅探8井共5口井在侏罗系新河组下段获得低产油流;雅探6井试油获低产油流,经压裂后获得工业油流,展示出一定的勘探潜力^[15-16]。储集层物性分析显示,雅布赖盆地侏罗系新河组总体具备低孔、低渗——致密的油气储集背景,油层与油气显示段主要分布在高有机质丰度段内,显示具有致密油形成的基本条件。本次主要通过对源岩、储集层及其配置关系的分析,依据致密油层发育及

其控制因素确定雅布赖盆地侏罗系新河组下段致密油的分布区。

1 盆地基本地质特征

雅布赖盆地的基底于印支期末发生断块运动,受区域性拉张应力作用,形成两条近东西向展布的同生正断层,具备了雅布赖断陷湖盆的雏形^[17]。盆地共经历了5期主要的构造-沉积演化阶段:①侏罗纪早期主要发育断陷型沉积;②侏罗纪末整体抬升遭受剥蚀,北部抬升剧烈,剥蚀量大;③白垩纪早期主要发育南北双断型断陷沉积;④白垩纪末发生了强烈挤压,南部隆升遭受剥蚀,白垩系凹陷剥蚀殆尽;⑤古近纪以来主要发育挤压拗陷型沉积。雅布赖盆地分为东部隆起和西部拗陷两个一级构造单元,整体显示“一拗一隆”的构造格局^[16]。西部拗陷分为红杉湖凹陷、黑茨湾凸起及萨尔台凹陷3个二级构造单元,其中的萨尔台凹陷自东向西又分为梭托次凹、红刺梁低凸起、小湖次凹、黑沙低凸起和盐场次凹5个三级构造单元^[18](图1)。盆地地层由前侏罗系(PreJ)基底和侏罗系(J)、白垩系(K)、古近系(N)、新近系(E)以及第四系(Q)组成。小湖次凹沉积岩最发育,厚度超过5 000 m。各时期地层主要形成于河流-湖泊沉积体系^[19-20]。其中,侏罗系为烃源岩主要发育层段,包括下侏罗统的茈萆沟组(J_1j)、中侏罗统的青土井组(J_2q)、新河组下段(J_2x^1)、新河组上段(J_2x^2)以及上侏罗统的沙枣河组(J_3s)。盆地的主要勘探目的层为中侏罗统新河组。

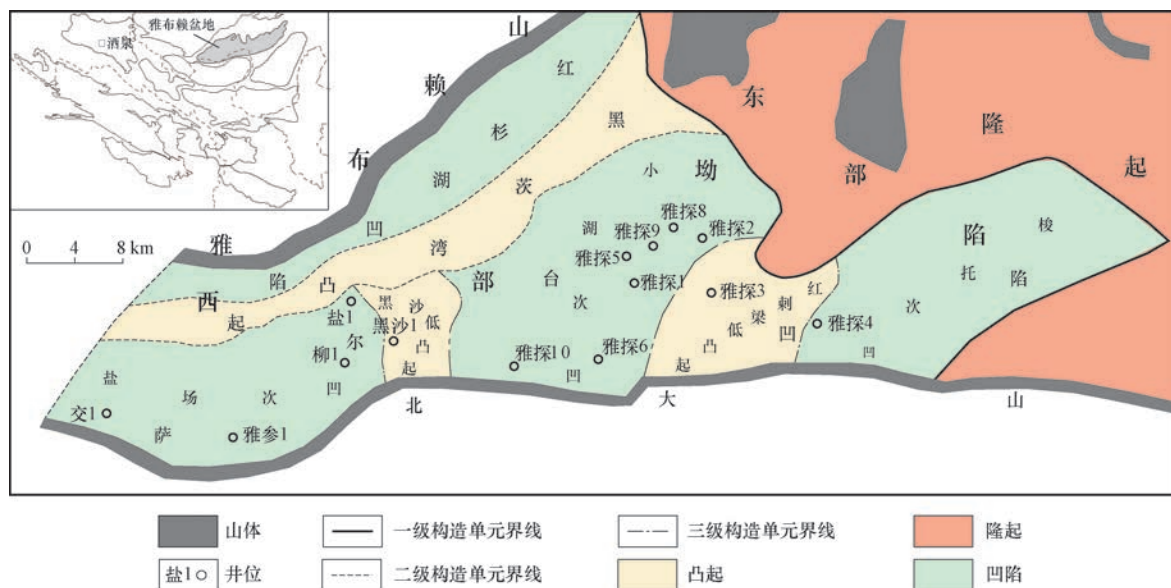


图1 雅布赖盆地地理位置与构造单元划分

Fig. 1 Sketch map showing the location and tectonic units of the Yabrai Basin

2 烃源岩条件

雅布赖盆地中侏罗世时期,发育辫状河三角洲和扇三角洲两大沉积体系。在南部陡坡带,由于近源、坡陡,冲积扇可直接入湖形成扇三角洲沉积体系,而来自北大山的物源向陆一侧发育扇三角洲相。在小湖次凹北部斜坡带,由于坡降较缓、物源近,黑茨湾低凸起发育的辫状河将沉积物直接入湖形成辫状河三角洲沉积体系(图 2)。雅布赖盆地中侏罗统底部的青土井组主要形成于浅水沼泽和冲积扇沉积环境,岩性主要为砂砾岩与泥岩;中侏罗统新河组下段主要为小型断陷湖盆的近物源短程入湖沉积特点,发育辫状河三角洲和湖相等沉积相带,岩性以泥岩夹砂岩为主,湖相泥岩最为发育;中侏罗统新河组上段和上侏罗统沙枣河组主要形成于干旱气候条件下的滨浅湖、冲积扇沉积环境,岩性主要为砂岩、砂砾岩与砂质泥岩。烃源岩主要发育于中侏罗统青土井组和新河组

(图 3)。

据有机地化分析结果(表 1),上侏罗统沙枣河组与新河组上段泥岩样品有机质丰度总体较低,有机碳含量(*TOC*)均低于 0.40%,热解生烃潜量($S_1 + S_2$)均低于 0.40 mg/g。新河组下段泥岩 *TOC* 最高接近 7.50%,平均值为 1.01%; $S_1 + S_2$ 最高接近 54.50 mg/g,平均值为 4.84 mg/g;氯仿沥青“A”含量最高接近 0.50%,平均值为 0.13%。青土井组泥岩有机碳含量与生烃潜力较高,接近于新河组下段,甚至 *TOC* 均值高于新河组下段(表 1)。*TOC* 与 $S_1 + S_2$ 关系图(图 4)清楚地显示,沙枣河组主要属于非烃源岩;新河组上段多数为差烃源岩,仅少量中等-极好烃源岩;新河组下段虽然也有差烃源岩,但中等-好烃源岩明显大大增加,其极好烃源岩的 *TOC* 主要都低于 10%,属于湖相页岩特征;青土井组不同级别的烃源岩均有,但其极好烃源岩的 *TOC* 多在 10%以上,属于炭质页岩特征。可见,总体上有机质丰度显示新河组下段烃源岩最好。

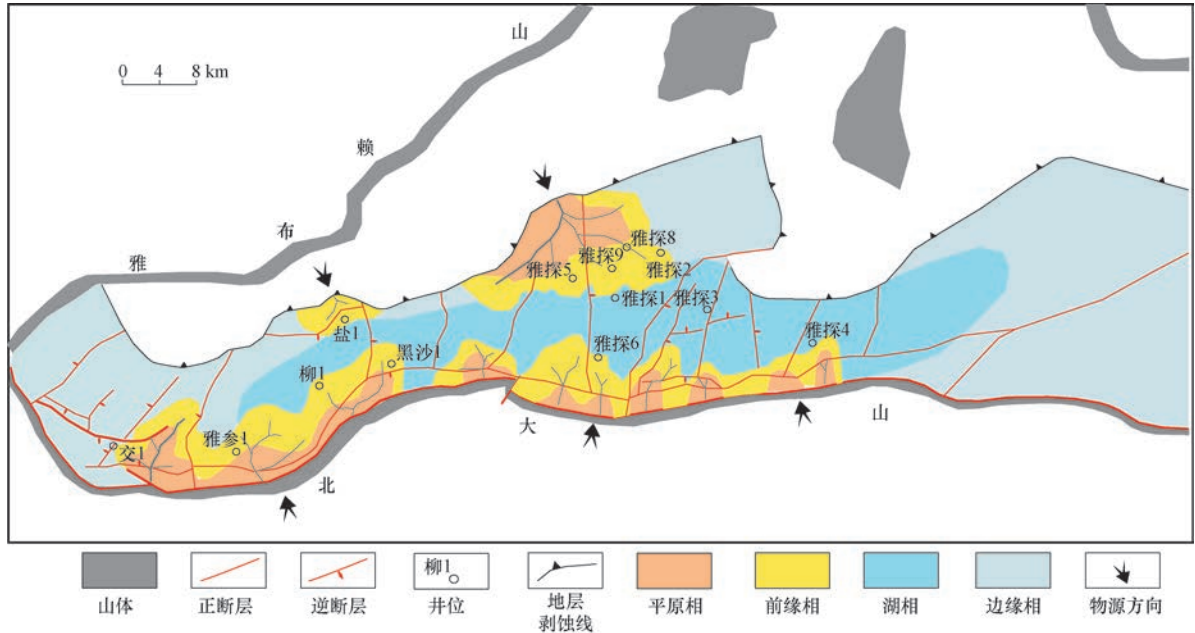


图 2 雅布赖盆地新河组沉积相

Fig. 2 Sedimentary facies of the Xinhe Formation in the Yabrai Basin

表 1 雅布赖盆地不同层位泥岩样品有机质丰度参数统计

Table 1 Organic matter abundance in the Middle Jurassic source rocks in the Yabrai Basin

层位	<i>TOC</i> /%	($S_1 + S_2$)/(mg · g ⁻¹)	氯仿沥青“A”含量/%
J ₃ s	0.04 ~ 0.25/0.13(4)	0.02 ~ 0.25/0.11(4)	—
J ₂ x ²	0.09 ~ 0.32/0.19(51)	0.03 ~ 0.40/0.11(51)	—
J ₂ x ¹	0.09 ~ 7.49/1.01(325)	0.10 ~ 54.57/4.84(325)	0.01 ~ 0.49/0.13(24)
J ₂ q	0.64 ~ 6.40/2.03(18)	0.35 ~ 15.03/4.84(18)	—

注:表中数据为最小值~最大值/平均值(样品个数)。

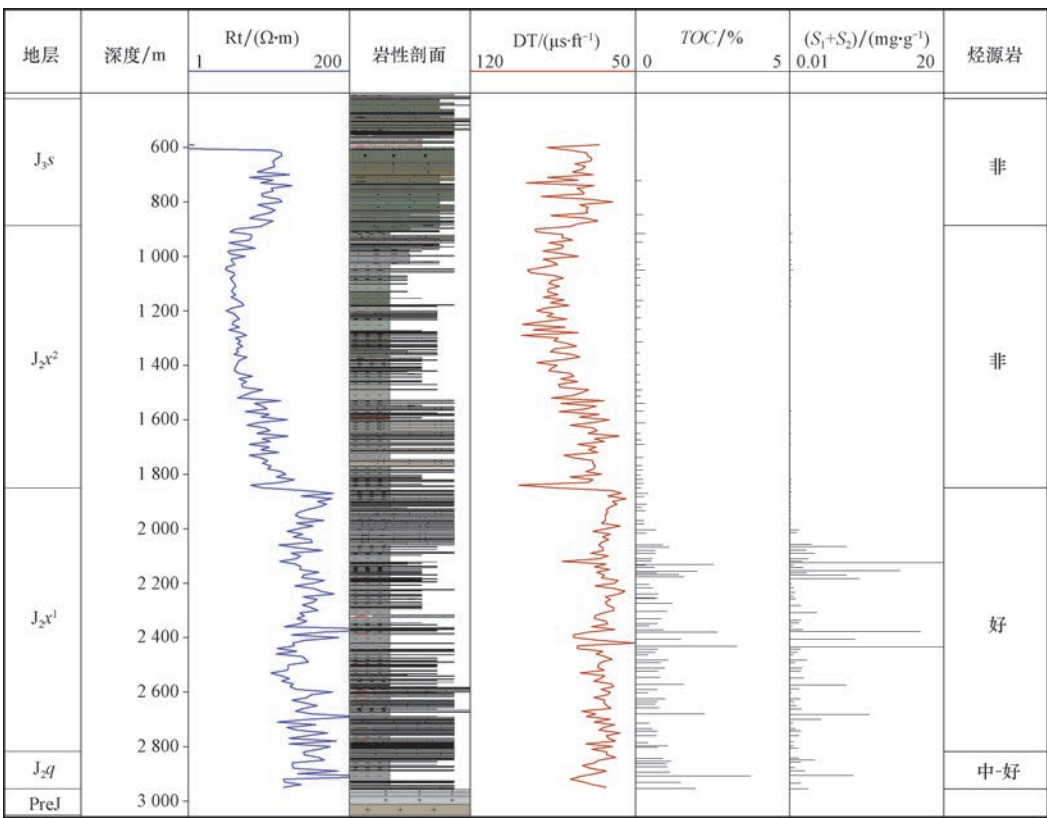


图 3 雅布赖盆地雅探 1 井侏罗系岩性组合与泥岩有机碳含量分布柱状图
Fig. 3 Histogram showing lithological association and organic carbon content values of the Jurassic in Well Yatan 1, Yabrai Basin

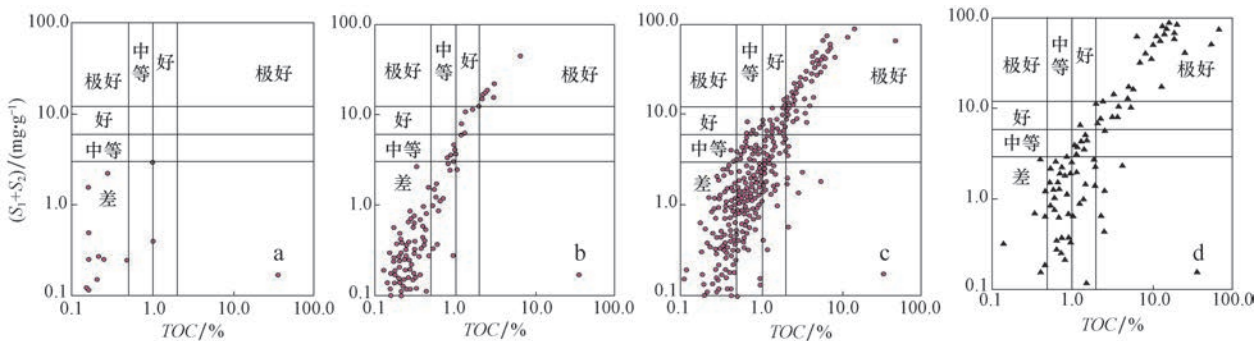


图 4 雅布赖盆地侏罗系烃源岩 TOC 与 $S_1 + S_2$ 关系
Fig. 4 TOC versus $S_1 + S_2$ of the Jurassic source rock samples in the Yabrai Basin
a. J_3s ; b. J_2x^2 ; c. J_2x^1 ; d. J_2q

在测井 TOC 预测^[21-23]的基础上,根据单井新河组下段烃源岩 TOC 统计结果,结合沉积相特征,绘制了雅布赖盆地新河组下段烃源岩 TOC 平面分布图(图 5)。从图 5 中可见,新河组下段烃源岩 TOC 高值区主要分布在小湖次凹与梭托次凹。

从烃源岩热解最高峰温(T_{max}) - 氢指数(HI)关系(图 6)来看,新河组上段母质类型以Ⅲ型为主,少量Ⅱ₂型;新河组下段不同母质类型均有分布,但主要为

Ⅱ₁ - Ⅰ型,多具倾油特征;青土井组泥岩母质类型主要为Ⅱ₂ - Ⅲ型,有机质类型较差,具倾气特征。

盆地烃源岩镜质体反射率(R_o)值变化于 0.4% ~ 1.4%,主要处于生油窗范围。由于构造抬升作用影响,不同次凹的烃源岩 R_o 与深度关系有变化(图 7)。总体上,盐场与小湖次凹抬升幅度较小,生油门限深度大致在 1 500 m 左右。梭托次凹抬升幅度较大,目前的生油门限深度在 1 150 m 左右(图 7)。

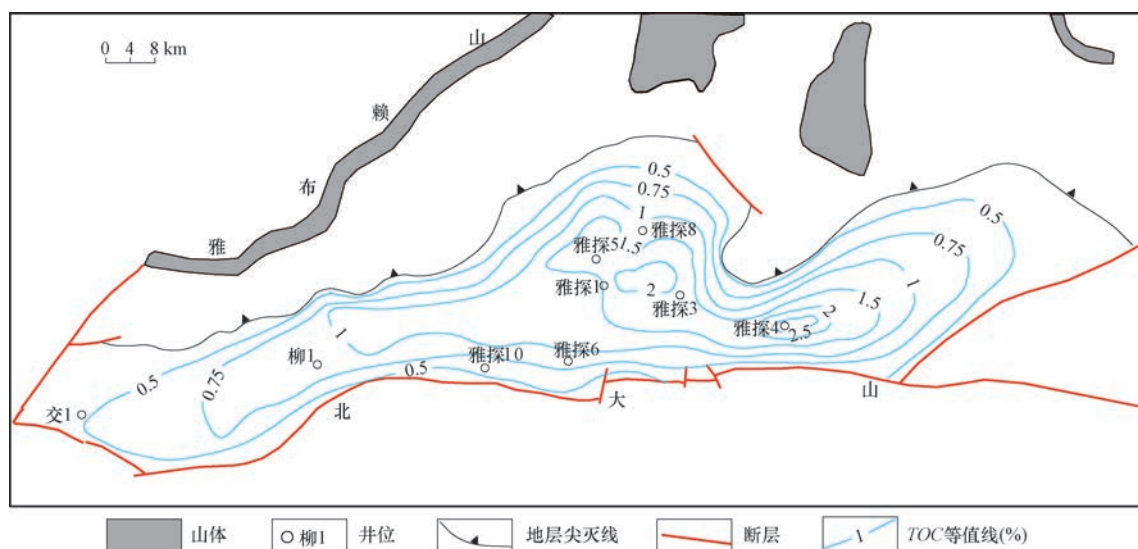
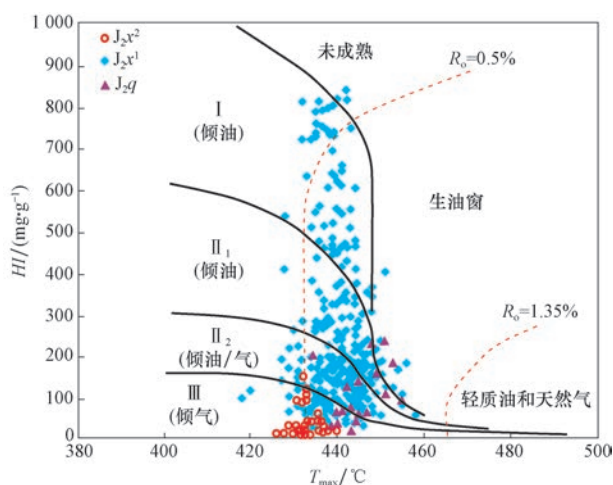


图5 雅布赖盆地新河组下段烃源岩 TOC 分布

Fig. 5 TOC content distribution of the Lower Xinhe Formation source rocks in the Yabrai basin

图6 雅布赖盆地中侏罗统不同层段烃源岩 $T_{\max}$ 与 HI 关系Fig. 6 HI versus $T_{\max}$ of the Middle Jurassic source rock in the Yabrai Basin

综合各项源岩地化评价指标(表2)来看,上侏罗统沙枣河组与中侏罗统新河组上段泥岩有机质丰度与成熟度低、类型差,综合评价为非烃源岩;中侏罗统新河组下段源岩有机质丰度较高、类型好,正处于生油窗阶段,综合评价为中等-好的倾油型源岩;青土井组烃源岩有机质丰度较高、演化程度高,但有机质类型差、厚度也较小,综合评价为中等级别的倾气源岩。可见,新河组下段为主力烃源岩层。

据单井暗色泥岩厚度统计结果,结合沉积相与地层厚度,绘制了新河组下段源岩厚度分布图(图8)。由图8中可见,新河组下段沉积于断陷形成期,断裂活动剧烈,小型断陷湖盆的近物源短程入湖沉积特点控

制了雅布赖盆地的沉积体系,从陡坡带至缓坡带呈现冲积扇、扇三角洲、半深湖、辫状河三角洲等依次分布,湖盆内发育浊积扇。新河组时期沉积中心位于萨尔台凹陷,其中在小湖次凹沉积地层厚度大,烃源岩发育,最大厚度达1000 m。在盐场次凹和梭托次凹也有一定的沉积,高值区主要分布在坳陷中心小湖次凹和梭托次凹。在盐场次凹暗色泥岩厚度最大也可达600 m。

3 储集层条件

雅布赖盆地的录井油气显示层、测井解释的油层与测试油层等都主要位于新河组下段,与烃源岩主要呈互层或夹层形式分布。所以,目前的现实勘探目的层为新河组下段,主要对新河组下段储集层进行分析。新河组下段碎屑岩储层主要存在荧光级别显示,也有少量的油浸、油斑与油迹显示,而且油气显示主要集中在细砂岩、粉砂岩及含砾不等粒砂岩中,也有较多的泥岩有荧光显示。新河组下段砂岩储层成分成熟度低,石英含量相对较少,长石、岩屑含量高,主要为长石砂岩、岩屑长石砂岩与长石岩屑砂岩。岩屑成分则主要是变质岩岩屑、岩浆岩岩屑及少量的沉积岩岩屑。岩石分选性总体中等,岩石支撑类型主要以颗粒支撑为主,磨圆度较差,以次棱角状为主。颗粒接触关系为点-线状或是线状接触。储集层孔隙类型包括原生孔隙、次生孔隙及微裂缝,其中以原生孔隙为主,发育少量次生孔隙,局部发育微裂缝(图9)。

新河组下段砂岩储层平均孔喉直径为0.66 μm ,为微细喉型孔隙结构;储层排驱压力大,平均排驱压力达到1.73 MPa;储层分选系数亦较大,反映孔喉分选

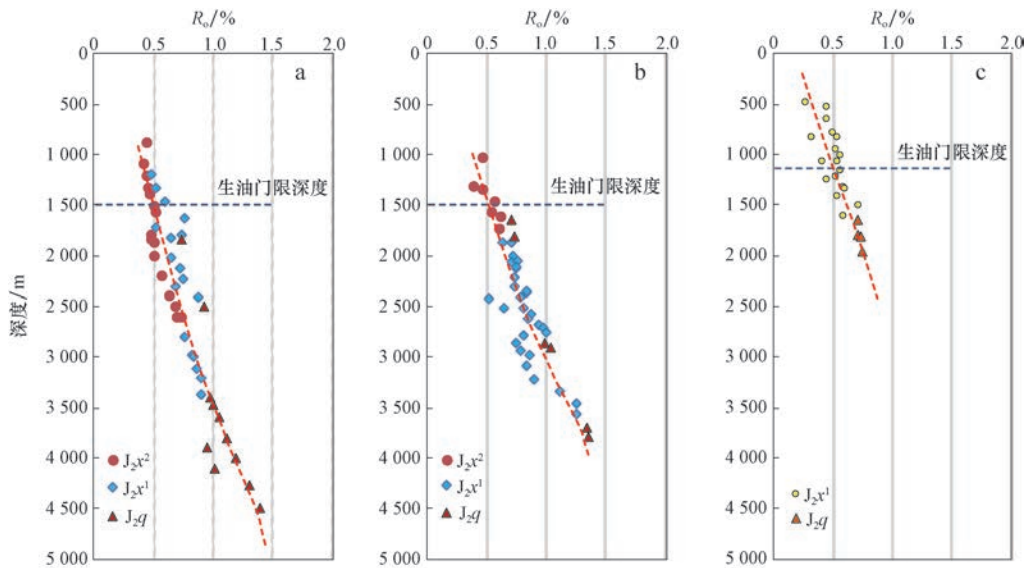


图 7 雅布赖盆地不同次凹中侏罗统源岩 R_o 与深度关系

Fig. 7 R_o versus depth of the Middle Jurassic source rock samples in the different subsags of the Yabrai Basin

a. 盐场次凹;b. 小湖次凹;c. 索托次凹

表 2 雅布赖盆地不同层位源岩综合评价

Table 2 Comprehensive evaluation of the Jurassic source rocks in the Yabrai Basin

层位	有机质丰度级别	有机质类型	成熟度(R_o)/%	综合评价
J_3s	非	Ⅲ型	—	非烃源岩
J_2x^2	非	Ⅲ型	0.39 ~ 0.62	非烃源岩
J_2x^1	中等—好	Ⅱ ₁ —Ⅱ ₂ 型	0.45 ~ 1.25	中等—好源岩
J_2q	中等—好	Ⅱ ₂ —Ⅲ型	0.71 ~ 1.36	中等源岩

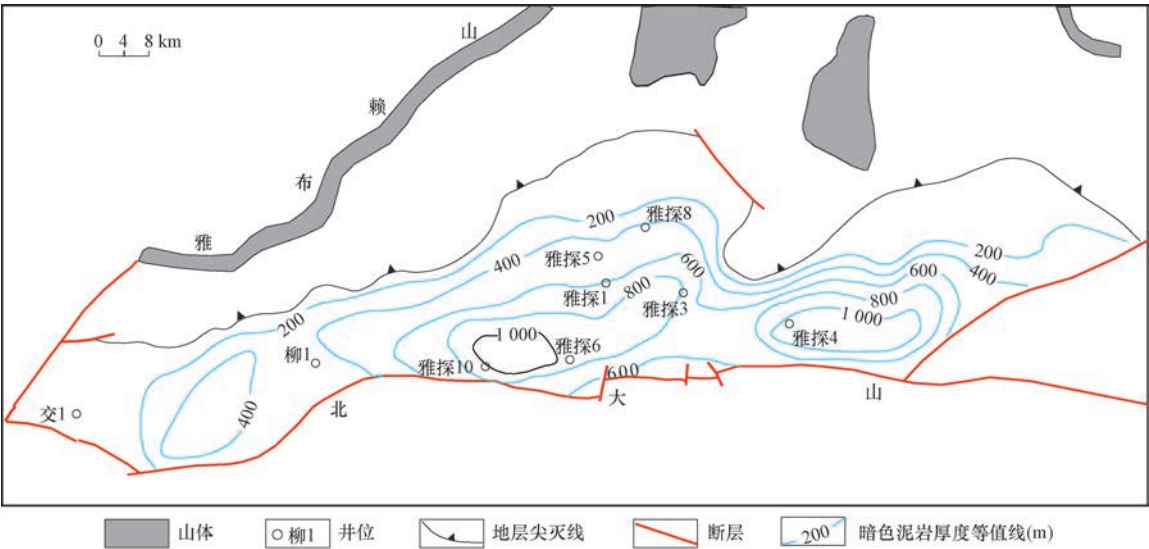


图 8 雅布赖盆地新河组下段烃源岩厚度等值线

Fig. 8 Isopach of source rocks in the Lower Xinhe Formation in the Yabrai Basin

性差。储层孔隙度分布在 1.39% ~ 15.36%, 主体分布在 4% ~ 12%, 平均值为 7.66%, 将近 80% 的样品孔隙度小于 10%; 渗透率主体分布在 $(0.01 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 近 73% 的样品渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 10)。可见, 新河组下段砂岩储层物性总体致密, 具备形成致密油的储集条件。

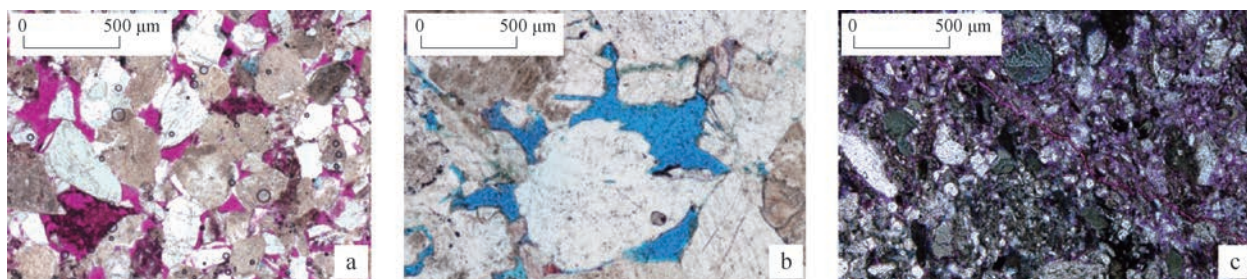


图9 雅布赖盆地小湖次凹新河组下段砂岩储层孔隙发育特征

Fig. 9 Pores of sandstone reservoirs in the Lower Xinhe Formation of the Xiaohu Subsag, Yabrai Basin

a. 雅探6井,埋深2 651.30~2 651.34 m, J_2x^1 , 不等粒长石砂岩,原生粒间孔发育,铸体薄片;b. 雅探6井,埋深2 653.70 m, J_2x^1 , 粗砂质巨粒岩屑长石砂岩,粒间溶孔为主,铸体薄片;c. 雅探5井,埋深2 298.50 m, J_2x^1 , 微裂缝发育,铸体薄片

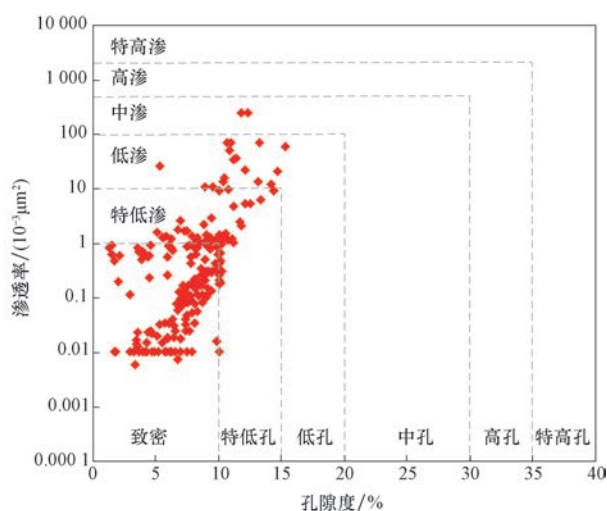


图10 雅布赖盆地小湖次凹新河组下段储层物性评价

Fig. 10 Porosity and permeability of reservoirs in the Lower Xinhe Formation of the Xiaohu Subsag, Yabrai Basin

4 源-储配置关系

成熟的烃源岩主要分布在小湖次凹,已有的油气发现和油气显示都主要分布在小湖次凹的新河组下段(图11),含油致密储层与富有机质烃源岩紧密接触,储层类型主要为源内薄层砂岩。盆地在新河组下段沉积时期,湖盆内发育有浊积扇,水体扰动较强,造成大面积分布的泥岩与砂体互层,为致密油的形成构建了非常有利的源-储配置关系,属于高有机质丰度烃源岩层内的致密油。富有机质烃源岩分布稳定、连续性好、厚度较大。小湖次凹中心的雅探1井和雅探6井发育的具油气显示的致密储层层数较多,累计厚度较大,向北、向南致密储层层数均减少,累计厚度减薄(图11)。多口探井钻探证实,新河组下段成熟优质烃源岩内所夹的薄砂层具有良好的油气显示。

5 致密油有利区与资源潜力

5.1 致密油有利区的确定

依据单井镜质体反射率(R_o)与深度关系,结合新河组下段顶、底埋深明确了盆地新河组下段中部 R_o 分布特征(图12)。由于盆地早侏罗世初,在南北向拉张应力的作用影响下开始断陷,南部北大山前断裂活动加剧,盆地南部下沉较快,形成南深、北浅的构造格局,并在北大山前形成沉积中心。到中侏罗世,断裂活动进一步加剧,盆地北部雅布赖山前形成早期雅布赖山前断裂,北大山前正断裂和早期雅布赖山前正断层急剧下沉,并造成了小湖次凹的埋深明显大于盐场次凹和梭托次凹。因此,烃源岩成熟区靠近南部的北大山,小湖次凹的成熟度明显高于盐场次凹和梭托次凹(图12)。梭托次凹烃源岩 R_o 分布范围为0.4%~0.7%,处于未熟-低成熟阶段;小湖次凹烃源岩整体处于成熟阶段,小湖次凹深处局部已达生油晚期——高成熟早期阶段;盐场次凹整体处于未熟阶段,仅在次凹深洼处雅参1井附近 R_o 达到最大值0.7%,进入低熟阶段。综合以上分析,可以认为雅布赖盆地仅有小湖次凹具备形成致密油的条件。

本次致密油的评价标准为:烃源岩 $TOC > 1\%$, $0.6\% < R_o < 1.3\%$,孔隙度 $\geq 4\%$,及致密油储集层累计厚度 > 10 m。针对盆地的勘探现状,制定出盆地致密油储层的划分标准:烃源岩 $TOC > 1\%$,烃源岩段所夹砂岩中有荧光级别以上的油气显示层;单砂层厚度 ≥ 2 m;孔隙度 $\geq 4\%$;储集层埋深 $< 4 500$ m;剔除测井解释成果或试油结论明显为水层的层段。综合新河组下段中部 R_o 等值线图、致密储层厚度图及新河组下段孔隙度等值线图和新河组下段源岩有机碳含量等值

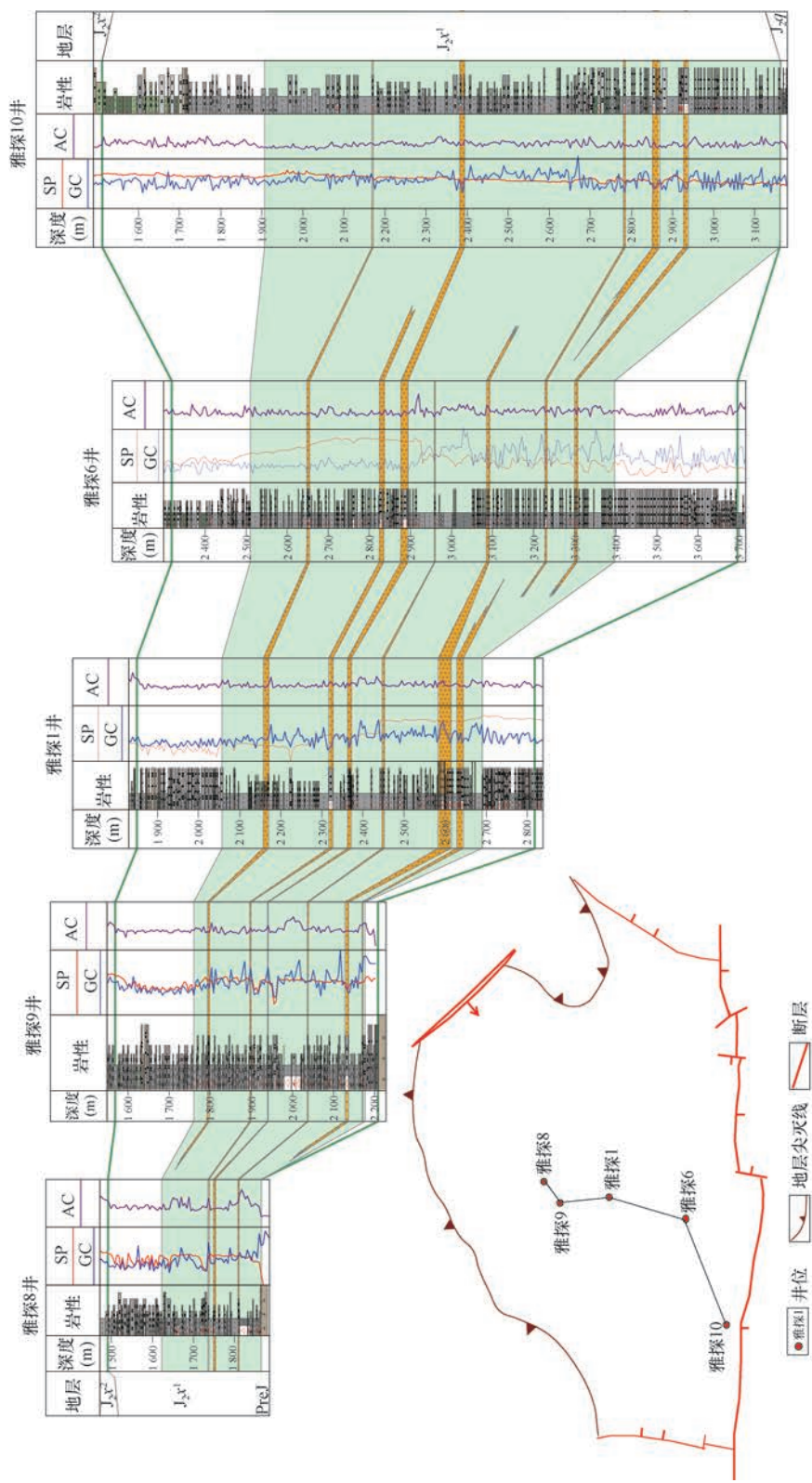


图11 雅布赖盆地小湖次凹新河组下段致密油源-储配置剖面

Fig. 11 Relationship of source rocks and reservoirs of the Lower Xinhe Formation tight oil in the Xiaohu Subbasin, Yabrai Basin

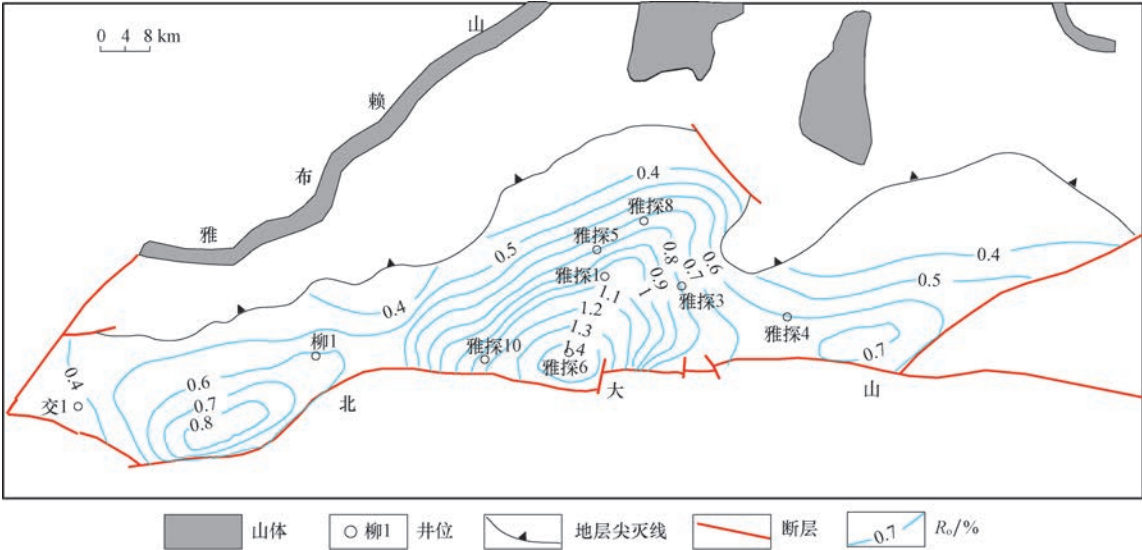


图 12 雅布赖盆地新河组下段中部 R_o 等值线

Fig. 12 Contour map of R_o in the middle part of the Lower Xinhe Formation in the Xiaohu Subbasin, Yabrai Basin

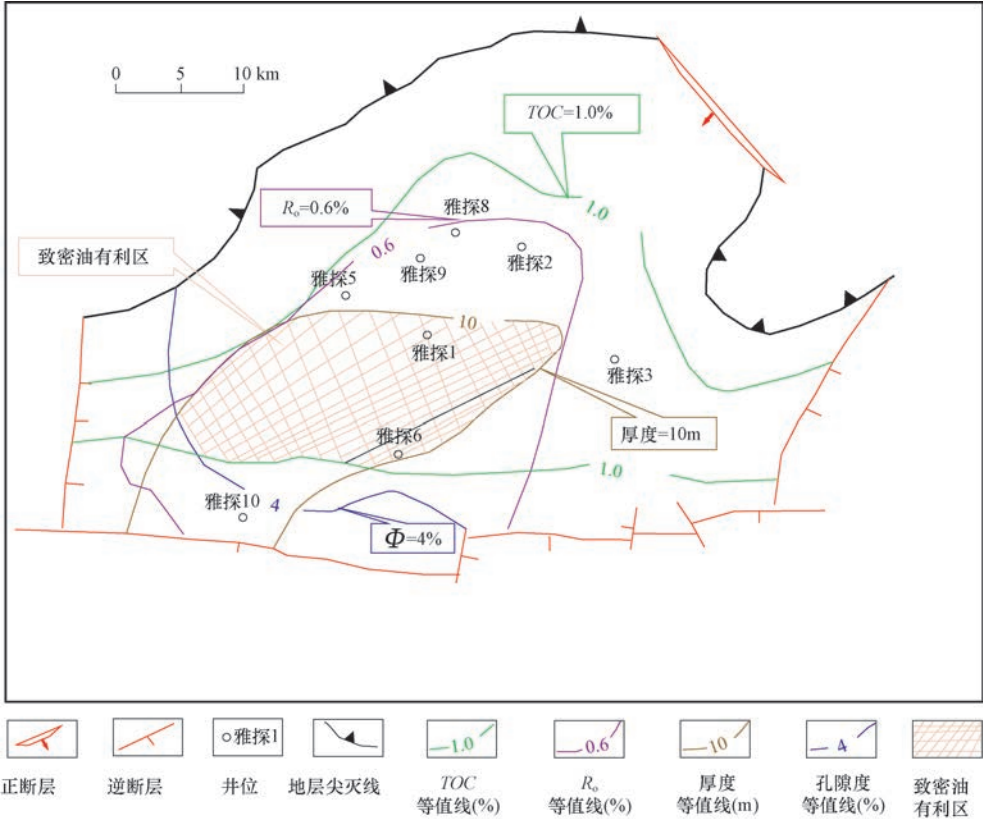


图 13 雅布赖盆地小湖次凹侏罗系新河组下段致密油有利区分布

Fig. 13 Favorable play distribution of tight oil in the Lower Xinhe Formation in the Xiaohu Subbasin, Yabrai Basin

线图等,采用地质要素叠合法确定了致密油分布的有利区位于小湖次凹,面积大致为 266 km²(图 13)。基于此,依据单井孔隙度与含油饱和度测井解释成果,结合致密油储集层厚度和沉积相分布等,综合确定小湖

次凹新河组下段致密油储集层的孔隙度与含油饱和度分布图(图 14)。可见,新河组下段孔隙度整体小于 10%,属于致密型储层;含油饱和度最大达 70%,展示出良好的勘探前景。

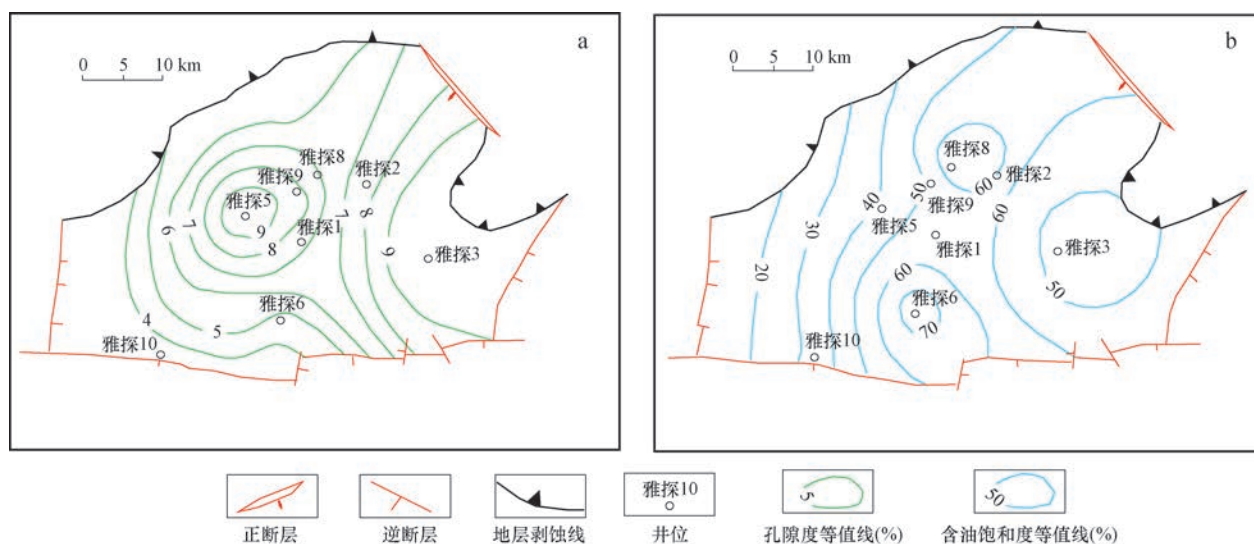


图14 雅布赖盆地小湖次凹侏罗系新河组下段孔隙度(a)与含油饱和度(b)等值线

Fig. 14 Contour map of porosity (a) and oil saturation (b) of the Xinhe Formation reservoirs in the Xiaohu Subsag, Yabrai Basin

5.2 有利区致密油的资源潜力

主要采用小面元容积法计算有利区的致密油资源量。该方法的基本原理是将评价区划分为若干网格单元(称面元),考虑每个网格单元致密储层有效厚度和有效孔隙度等参数的变化,然后逐一计算出每个网格单元的资源量。计算公式如下:

$$Q_c = 100A_o H_o \Phi (1 - S_w) \rho_o / B_o \quad (1)$$

式中: Q_c 为小面元致密油地质资源量, 10^4 t; A_o 为小面元含油面积, km^2 ; H_o 为小面元有效储层厚度, m; Φ 为小面元有效孔隙度, 小数; S_w 为小面元含水饱和度, 小数; ρ_o 为地面原油密度, t/m^3 , 取值为 $0.89 \text{ t}/\text{m}^3$; B_o 为原始原油体积系数, 无量纲, 取值为 1.021。

所有小面元资源量(Q_{ci})之和即为总资源量。根据计算结果,小湖次凹新河组下段有利区的致密油资源量为 0.92×10^8 t, 资源丰度平均为 $34.5 \times 10^4 \text{ t}/\text{km}^2$ 。

6 结论

雅布赖盆地的优质烃源岩与致密油储集层主要分布在中侏罗统新河组下段。新河组下段泥质烃源岩厚度大,有机质丰度高,类型好,处于生油阶段。储集层总体为低孔低渗——致密储集层,具备致密油形成的基本条件。致密油层厚度总体都较薄,主要在烃源岩层段内呈夹层形式分布,属于典型的自生自储成藏模式。致密油主要受优质烃源岩与烃源岩层内储集层的控制。依据地质要素叠合法确定的新

河组下段有利区主要分布在小湖次凹中、西部,有利区的致密油资源量为 0.92×10^8 t, 资源丰度平均为 $34.5 \times 10^4 \text{ t}/\text{km}^2$ 。

参 考 文 献

- [1] Miller B, Paneitz J, Yalely S, et al. Unlocking tight oil: Selective multi-stage fracturing in the Bakken shale[J]. SPE 116105, 2008.
- [2] Houston M, McCallister M, Jany J. Next generation multi-stage completion technology and risk sharing accelerates development of the Bakken play[J]. SPE 135584, 2010.
- [3] Clarkson C R, Pedersen P K. Production analysis of western Canadian unconventional light oil plays[J]. SPE 149005, 2011; 1-23.
- [4] 林森虎, 邹才能, 袁选俊, 等. 美国致密油开发现状及启示[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 25-30.
Lin Senhu, Zou Caineng, Yuan Xuanjun. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 25-30.
- [5] 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.
- [6] 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.
Jiang Chengzao, Zou 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.
- [7] 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 Xianyang. Characteristics and resource

- prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. *Acta Petrole Sinica*, 2013, 34(1): 1–11.
- [8] 匡立春,唐勇,雷德文,等.准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 657–668.
- Kuang Lichun, Tang Yong, Lei Dewen, et al. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 657–668.
- [9] 梁浩,李新宁,马强,等.三塘湖盆地条湖组致密油地质特征及勘探潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(5): 563–572.
- Liang Hao, Li Xinning, Ma Qiang, et al. Geological features and exploration potential of Permian Tiaohu Formation tight oil, Santanghu Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(5): 563–572.
- [10] 汪少勇,李建忠,李登华,等.川中地区公山庙油田侏罗系大安寨段致密油资源潜力分析[J]. *中国地质*, 2013, 40(2): 477–486.
- Wang Shaoyong, Li Jiangzhong, Li Denghua, et al. The potential of tight oil resource in Jurassic Da'anzhai Formation of the Gongshan-miao oil field, central Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 2013, 40(2): 477–486.
- [11] 徐梦龙,何治亮,尹伟,等.鄂尔多斯盆地镇泾地区延长组8段致密砂岩储层特征及主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(2): 240–247.
- Xu Menglong, He Zhiliang, Yin Wei, et al. Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoirs in the 8th member of the Yanchang Formation in Zhenjing area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(2): 240–247.
- [12] 吴伟涛,邓静,赵靖舟,等.鄂尔多斯盆地华庆地区长7油层组致密油成藏条件与成藏模式[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(6): 874–881.
- Wu Weitao, Deng Jing, Zhao Jingzhou, et al. Accumulation conditions and models of tight oil reservoirs in Chang-7 of Huaqing area, the Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(6): 874–881.
- [13] 钟玮,林常梅.雅布赖盆地中生代构造特征[J]. *四川地质学报*, 2013, 33(1): 7–11.
- Zhong Wei, Lin Changmei. Tectonic characteristics of Mesozoic Era in Yaburai Basin[J]. *Journal of Sichuan Geology*, 2013, 33(1): 7–11.
- [14] 田涛,任战利,马国福,等.雅布赖盆地萨尔台凹陷烃源岩地球化学特征、成熟度演化与油气关系[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(6): 2745–2753.
- Tian Tao, Ren Zhangli, Ma Guofu, et al. The relations of hydrocarbon generation to the geochemical features and maturity evolution of source rocks in Sartai Sag, Yaburai Basin[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(6): 2745–2753.
- [15] 黄军平,杨克荣,杨占龙,等.雅布赖盆地侏罗系烃源岩特征及油气勘探方向[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(5): 948–955.
- Huang Junping, Yang Kerong, Yang Zhanlong, et al. Characteristics of Jurassic source rocks and direction of petroleum exploration in Yaburai Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(5): 948–955.
- [16] 吴晓智,王桂君,郑民,等.雅布赖盆地构造演化与油气聚集[J]. *地质科学*, 2015, 50(1): 74–87.
- Wu Xiaozhi, Wang Guijun, Zheng Min, et al. Structural evolution and hydrocarbon accumulation in Yaburai Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50(1): 74–87.
- [17] 王联社,李香平.试论雅布赖盆地砂岩型铀矿成矿前景[J]. *铀矿地质*, 2003, 19(6): 339–343.
- Wang Lianshe, Li Xiangping. Discussion on metallogenic prospect of sandstone-type uranium deposit in Yaburai basin[J]. *Uranium Geology*, 2003, 19(6): 339–343.
- [18] 赵宏波.雅布赖盆地中生代构造特征[J]. *石油化工应用*, 2011, 30(9): 71–75.
- Zhao Hongbo. Basin tectonic characteristics of Mesozoic Era in Yaburai Basin[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2011, 30(9): 71–75.
- [19] 钟福平,钟建华,由伟丰,等.内蒙古雅布赖盆地红柳沟中侏罗统沉积相及沉积环境研究[J]. *地球科学与环境学报*, 2010, 32(2): 149–154.
- Zhong Fuping, Zhong Jianhua, You Weifeng, et al. Study on sedimentary facies and environment of Middle Jurassic in Hongliugou of Yaburai Basin, Inner Mongolia[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2010, 32(2): 149–154.
- [20] 吴茂炳,刘春燕,郑孟林,等.内蒙古西部雅布赖盆地侏罗纪沉积-构造演化及油气勘探方向[J]. *地质通报*, 2007, 26(7): 857–864.
- Wu Maobing, Liu Chunyang, Zheng Menglin, et al. Jurassic depositional-tectonic evolution in the Yaburai Basin, western Inner Mongolia, China and direction of petroleum exploration[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(7): 857–864.
- [21] Passey Q R A. Practical model for organic richness from porosity and resistivity logs[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(12): 1777–1794.
- [22] 高岗,王绪龙,柳广弟,等.准噶尔盆地上三叠统源岩TOC含量预测方法[J]. *高校地质学报*, 2012, 18(4): 1–6.
- Gao Gang, Wang Xulong, Liu Guangdi, et al. Prediction method of organic carbon abundance of dark color mudstones in the Triassic System of Junggar Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2012, 18(4): 1–6.
- [23] 孟元林,申婉琪,周新桂,等.东部盆地群下白垩统烃源岩特征与页岩气勘探潜力[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(6): 893–902.
- Meng Yuanlin, Shen Wanqi, Zhou Xingui, et al. Characteristics of the Lower Cretaceous source rocks and shale gas exploration potential of eastern basin group, NE China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(6): 893–902.

(编辑 李军)