

文章编号: 0253-2697(2024)11-1607-14 DOI:10.7623/syxb202411004

# 雅布赖盆地侏罗系岩性油气藏勘探突破与意义

淡伟宁<sup>1</sup> 尹柯惟<sup>1</sup> 李 玲<sup>1</sup> 李晓红<sup>1</sup> 郭柳汐<sup>1</sup> 鱼占文<sup>1</sup> 王志成<sup>2</sup> 胡延旭<sup>1</sup> 刘凤妍<sup>1</sup>

(1. 中国石油华北油田公司勘探开发研究院 河北任丘 062552; 2. 中国石油华北油田公司勘探事业部 河北任丘 062552)

**摘要:**泛河西走廊盆地群发育众多中—小型盆地,该地区历经多期次改造,油气保存条件差,发育短轴小型沉积体系,储层致密,前期勘探以非常规油气为主,雅布赖盆地为其中的典型代表。为了进一步指导雅布赖盆地的油气勘探,综合岩心、岩石薄片、录井、测井及地球化学等资料,对雅布赖盆地侏罗系油气藏的储层地质条件和油气成藏特征开展了深入研究。研究表明:①盆地的构造-沉积演化经历了多期的成盆与改造过程,盆地两翼构造改造强,而盆地内部主体改造弱,保存条件好;②发育南、北双向三角洲沉积体系,斜坡带继承性的古地貌(沉积坡折和古沟谷)控制了砂体的展布方向和有利储层分布,储层在纵向上与最大湖泛面处的烃源岩叠置,形成自生自储的岩性油气藏。雅布赖盆地的油气勘探在新油气成藏模式的指导下,部署的钻井钻遇较好储层,试油均获工业油流,一改以往勘探低效的不利局面。雅布赖盆地中—深层发育地层油气藏、潜山油气藏等潜力领域,多层系立体勘探有望实现持续突破。研究成果将有力推动雅布赖盆地勘探发现,同时也将开辟泛河西走廊盆地群中—小型盆地常规—非常规并举的油气勘探新局面。

**关键词:**泛河西走廊盆地群;雅布赖盆地;侏罗系;岩性油气藏;古地貌

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

## Exploration breakthrough of Jurassic lithological oil and gas reservoirs in Yabulai Basin and its significance

Dan Weining<sup>1</sup> Yin Kewei<sup>1</sup> Li Ling<sup>1</sup> Li Xiaohong<sup>1</sup> Guo Liuxi<sup>1</sup> Yu Zhanwen<sup>1</sup>  
Wang Zhicheng<sup>2</sup> Hu Yanxu<sup>1</sup> Liu Fengyan<sup>1</sup>

(1. *Exploration and Development Research Institute, PetroChina Huabei Oilfield Company, Hebei Renqiu 062552, China;*  
2. *Exploration Department of PetroChina Huabei Oilfield Company, Hebei Renqiu 062552, China*)

**Abstract:** The Pan-Hexi Corridor Basin group has developed numerous small- and medium-sized basins. Since undergoing multiple stages of transformation, the area has poor oil-gas preservation conditions, small short-axis sedimentary systems, and tight reservoirs. Early exploration mainly focuses on unconventional oil and gas, especially in Yabulai Basin. To guide the oil-gas exploration in Yabulai Basin, the geological conditions and hydrocarbon accumulation characteristics of Jurassic oil-gas reservoirs in Yabulai Basin are studied based on core, thin section, well log, logging and geochemical data. The result shows as follows. (1)The tectonic-sedimentary evolution of the basin has gone through multiple stages of basin formation and transformation. The two wings of the basin have undergone strong transformation, but the main body of the basin has good preservation conditions due to weak transformation. (2)The bidirectional delta sedimentary systems are developed in the south and north of Yabulai Basin, where the distribution of sand bodies and favorable reservoirs are controlled by the inherited paleo-landforms (sedimentary slope breaks and ancient valleys)of the slope zone. The reservoir is superimposed vertically with the source rocks at the maximum lake flood surface, thus forming a self-generating and self-storing lithological reservoir. Guided by the new oil-gas accumulation model, the drilling rigs deployed in Yabulai Basin encountered good reservoirs and obtained industrial oil flow during oil testing, thus improving the inefficient exploration in the past. In addition, the potential areas such as stratigraphic and buried hill oil-gas reservoirs are developed in the deep strata of the basin, and multi-layered three-dimensional exploration is expected to achieve sustainable breakthroughs. The research results will strongly promote the exploration and discovery of Yabulai Basin, and also open up a new era of conventional and unconventional oil-gas exploration in small- and medium-sized basins of the Pan Hexi Corridor Basin group.

**Key words:** Pan-Hexi Corridor Basin group; Yabulai Basin; Jurassic; lithologic reservoir; paleo-landform

**基金项目:** 中国石油天然气股份有限公司华北油田公司项目“雅布赖盆地油气富集因素及有利勘探方向研究”(2023-HB-A15-01)资助。

**第一作者:** 淡伟宁,男,1971年12月生,1996年获中国石油大学(华东)学士学位,现为中国石油华北油田公司勘探开发研究院副院长、高级工程师,主要从事石油地质与勘探研究。Email: yjy\_dwn@petrochina.com.cn

**通信作者:** 尹柯惟,男,1989年11月生,2015年获成都理工大学硕士学位,现为中国石油华北油田公司勘探开发研究院高级工程师,主要从事含油气盆地地质综合研究。Email:471755208@qq.com

引用:淡伟宁,尹柯惟,李玲,李晓红,郭柳汐,鱼占文,王志成,胡延旭,刘凤妍.雅布赖盆地侏罗系岩性油气藏勘探突破与意义[J].石油学报,2024,45(11):1607-1620,1637.

Cite :DAN Weining, YIN Kewei, LI Ling, LI Xiaohong, GUO Liuxi, YU Zhanwen, WANG Zhicheng, HU Yanxu, LIU Fengyan. Exploration breakthrough of Jurassic lithological oil and gas reservoirs in Yabulai Basin and its significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(11): 1607-1620, 1637.

雅布赖盆地是在前古生界变质岩结晶基底和上古生界褶皱基底上发育起来的中生代—新生代断陷沉积盆地<sup>[1-2]</sup>。该盆地位于阿拉善地块北部,其西北以雅布赖山为界与银根—额济纳旗盆地相邻,南邻北大山并与潮水盆地相对,东接巴彦乌拉山并与巴彦浩特盆地相望。盆地呈 NEE 向狭长展布,其 EW 向长度约为 170 km,SN 向宽度约为 50 km,面积约为 1.0 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup><sup>[3-6]</sup>。盆地以往的钻井有 31 口,在前侏罗系、侏罗系多套地层中均见到油气显示,但仅有 3 口见低产油流,没有取得勘探的实质性突破。盆地的主要目的层为侏罗系新河组下段,其沉积以富泥沉积环境为主,砂体相对不发育,有效储层厚度薄,横向变化快,分布范围不明确,油气成藏的主控因素不清楚,勘探方向难以把握。盆地内油层的含油饱和度低,压裂前、后的试油结果均为油水同出、油少水多,加之原油密度大、黏度高且均为重质原油,难以实现效益开发。2021 年以来,油田公司持续开展盆地整体研究,重新认识盆地内的凹陷结构和烃源岩分布、古构造与砂体的关系、油气成藏规律等,围绕雅布赖盆地小湖次凹部署了 6 口探井并在雅华 3 井和雅 5 井获得工业油流。雅华 3 井在常规试油中获得产油量为 26 t/d 的高产工业油流,其原油物性好(密

度为 0.83 g/cm<sup>3</sup>、黏度为 10.99 mPa·s、凝固点为 24 ℃),试采 1 个多月,产油量稳定在 9 t/d,并在 2023 年首次提交石油预测地质储量 3 000 × 10<sup>4</sup> t,实现了勘探突破。笔者基于近期勘探实践,应用岩心、岩石薄片、录井、测井及地球化学等资料,系统剖析了雅布赖盆地侏罗系油气的成藏特征及富集规律,进一步明确了油气勘探潜力,以期为泛河西走廊地区中—小型盆地的油气勘探提供借鉴。

### 1 油气勘探简历及突破井部署思路

雅布赖盆地的油气普查工作始于 1983 年,截至 2023 年底,已完成三维地震满覆盖面积达 408 km<sup>2</sup>。油气勘探工作主要经历了 3 个阶段:①第 1 阶段(1997—2009 年)为早期探凹阶段,先后在盐场次凹—黑沙凸起的构造高点部位部署并钻探了 5 口探井(图 1),发现油气显示,但试油均未获得工业突破;②第 2 阶段(2010—2020 年)开始转战小湖次凹(图 1),在斜坡区钻探的 5 口井中均获得低产油气流,而在低部位勘探的雅探 6 井中,试油虽突破工业油流,但由于储层薄,砂体展布局限,未取得实质性进展,且即便在后续开展了以致密油为主攻对象的水平井钻探,勘探成效也不好;

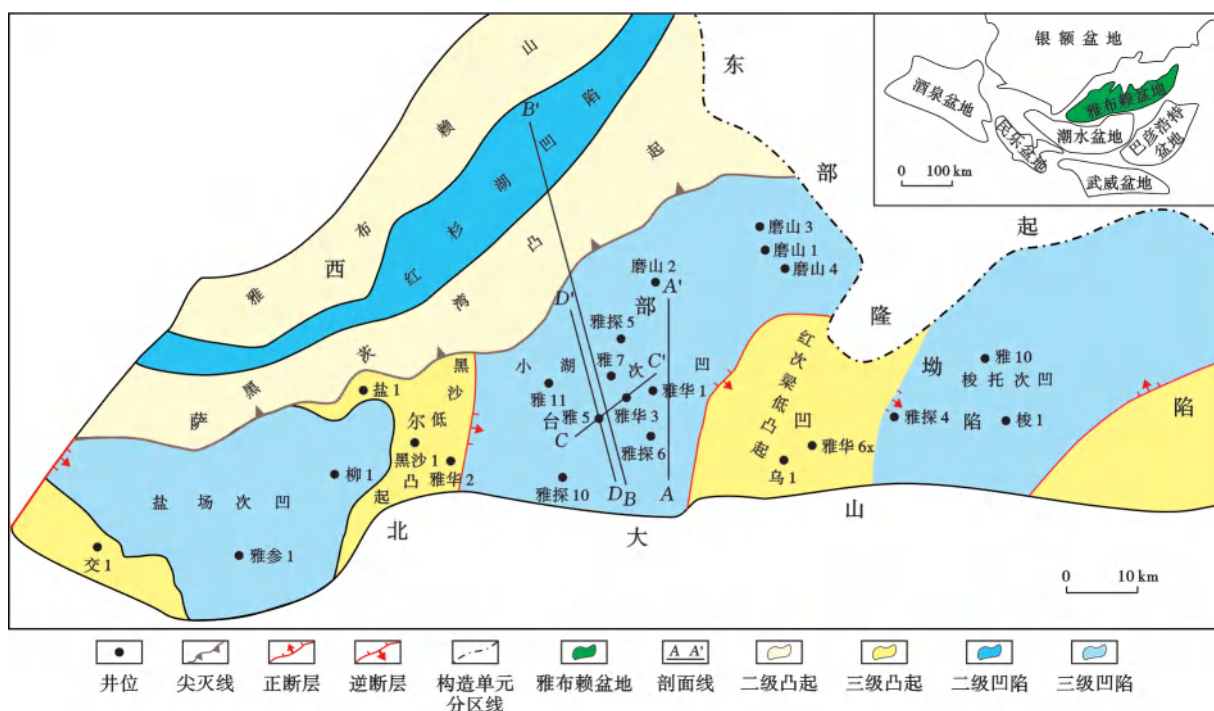


图 1 雅布赖盆地构造单元划分  
Fig. 1 Tectonic unit division of Yabulai Basin

③第 3 阶段(2021 年至今)在整体研究基础上认为,斜坡带具有结构平缓的构造稳定性,湖泛面上烃源岩的分布面积广,砂体具有经过长距离搬运沉积的特点,由此按照“优势物源寻找有效储层,近湖泛面烃源岩探索岩性油藏”的思路,在小湖次凹部署了雅华 3 井和雅 5 井等钻井(图 1),均获得成功。

## 2 油气地质条件

### 2.1 地层层序

雅布赖盆地主要为中生代和新生代沉积盆地,盆地的基底由前侏罗纪花岗岩及变质岩构成,沉积地层自下而上依次发育侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系(图 2),最大沉积岩厚度达 5 300 m。侏罗系为盆地的主要沉积地层,发育下侏罗统茭茂沟组(J<sub>1j</sub>)、中侏罗统青土井组(J<sub>2q</sub>)和新河组(J<sub>2x</sub>)、上侏罗统沙枣河组(J<sub>3s</sub>)(图 2),中侏罗统新河组为主要沉积地层。根据盆地构造演化特征、沉积充填特征和层序界面的识别标志,将中侏罗统划分为 4 个 3 级层序(SQ1—SQ4,图 3),其中,SQ1 相当于青土井组,SQ2 相当于新河组下段。新河组下段自下而上进一步划分为Ⅲ砂组、Ⅱ砂组和Ⅰ砂组,分别对应低位体系域、湖侵体系域和高位体系域<sup>[7-9]</sup>。低位体系域沉积期,湖盆范围小,砂体沉积速度快,岩性为灰色砂岩、含砾砂岩夹灰黑色泥岩;湖侵体系域沉积期,湖盆范围快速扩大,沉积物粒度较细,岩性为深灰色、灰黑色泥岩夹浅灰色砂岩;高位体系域沉积期,砂体充填作用加强,岩性为浅灰色砂岩与深灰色、灰黑色泥岩互层。

垂向上,雅布赖盆地的中侏罗统厚度由北部缓坡至南部陡坡逐渐增大。青土井组厚度变化较大,主要发育在梭托次凹与盐场次凹,在小湖次凹也有局部发

育,砂体局限发育在深凹内。新河组下段从下至上可划分为 3 个砂层组:Ⅲ砂组厚度最小,部分区域遭受构造剥蚀致使地层厚度明显小于相邻区域,甚至缺失地层沉积,以厚层砂夹薄层泥岩为特征;Ⅱ砂组明显厚于Ⅲ砂组,以大套泥岩夹薄砂层为特征,多为滨—浅湖沉积;Ⅰ砂组厚度最大,发育大套砂体,多为扇三角洲前

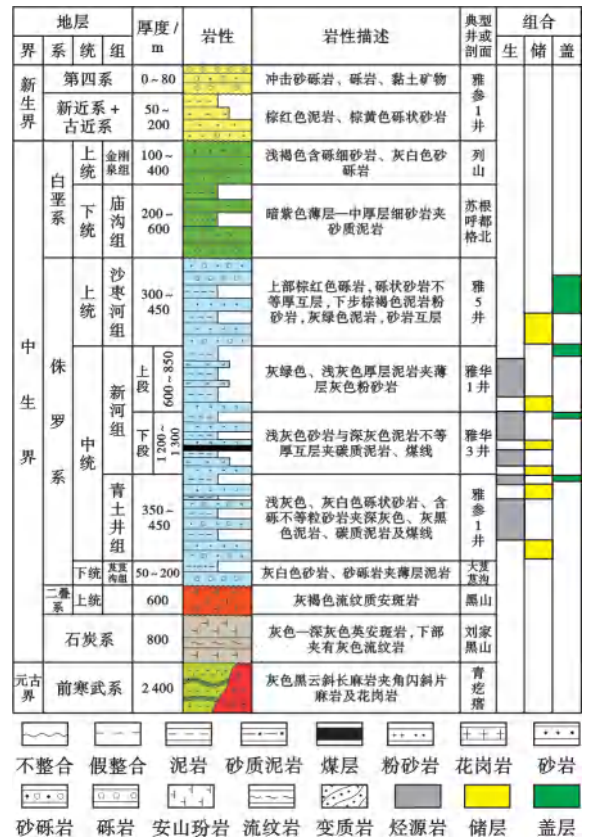


图 2 雅布赖盆地地层特征及生-储-盖划分

Fig. 2 Stratigraphic characteristics and divisions of source-reservoir-cap in Yabulai Basin

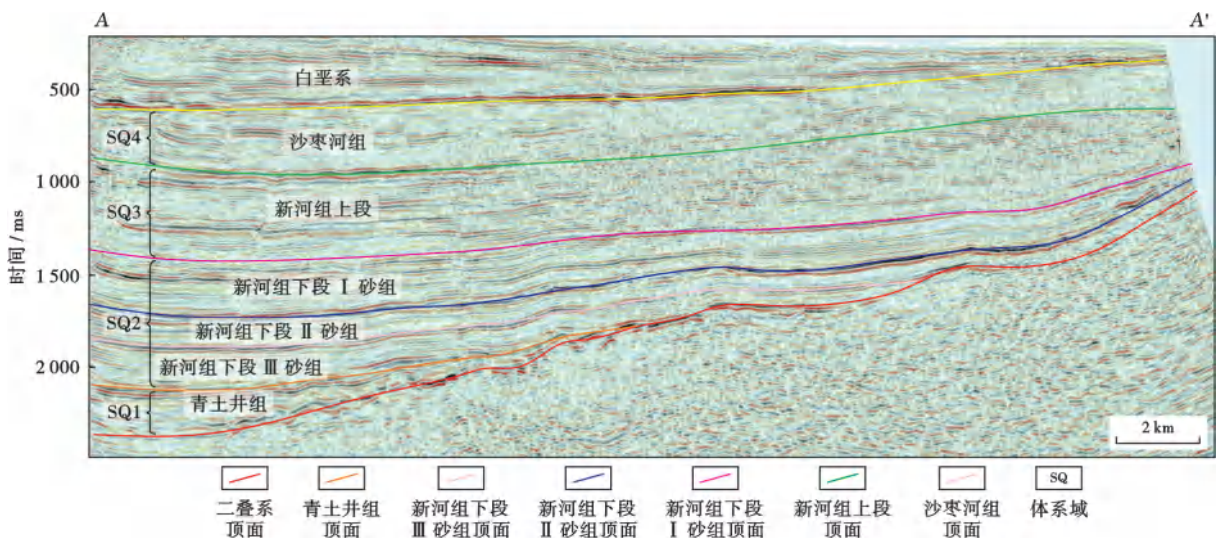


图 3 层序界面与砂组界面的划分(剖面位置见图 1)

Fig. 3 Division of sequence interface and sand group interface

缘与辫状三角洲前缘沉积。新河组下段沉积在垂向上稳定,无明显变化。平面上,青土井组在雅布赖盆地由北至SW、SE方向逐渐增厚,在盆地西南部 and 东南部发育2个沉积中心;新河组下段在雅布赖盆地由北至南增厚,其中,Ⅱ砂组和Ⅲ砂组主要发育在盆地东部,Ⅰ砂组向西扩展至全盆,而该段的沉积中心主要发育在盆地南部。

## 2.2 构造特征

雅布赖盆地划分为东部隆起和西部坳陷2个一级构造单元,西部坳陷又可以划分为3个二级构造单元,自北向南依次为红杉湖凹陷、黑茨湾凸起和萨尔台凹陷(图1)。其中,萨尔台凹陷自东向西可划分为5个三级构造单元,分别为梭托次凹、黑沙低凸起、小湖次凹、红茨梁低凸起和盐场次凹(图1)。

雅布赖盆地在三叠纪末期受印支运动影响,盆地基底发生拉张作用,形成2条边界正断层,分别沿北大山北部边缘和雅布赖山南部边缘呈EW向展布,奠定了雅布赖盆地断陷湖盆的雏形。

燕山运动早期(早—中侏罗世茆茆沟组沉积期),阿拉善地块处于强烈的伸展动力学背景,形成了侏罗纪裂谷沉降带,以及EW向的雅布赖拉张断陷,主控断裂为南部北大山正断层,控制了侏罗系沉积且沉积中心位于盆地南部。沉积地层向北超覆,早期表现为充填补平,但在中侏罗世青土井组—新河组沉积期,盆地整体下沉,湖盆范围扩大,地层南厚北薄,并在凹陷中心发育了盆地的主要烃源岩。燕山运动中期(晚侏罗世沙枣河组沉积期),湖盆逐渐萎缩,盆地接受干旱气候下的滨湖亚相—冲积扇相沉积。侏罗纪末期,阿拉善地块内部整体抬升,发生构造反转,致使雅布赖盆地北部急剧抬升,并使得中—下侏罗统遭受强烈剥蚀,形成了侏罗系与白垩系之间的角度不整合。

燕山运动晚期,阿拉善地块及其北部地区处于伸展构造环境,雅布赖山前产生EW向正断层,并急剧活动,使得盆地快速沉降,接受了早白垩世湖相—河流相沉积,沉积中心位于雅布赖山南部,即现今红杉湖凹陷处,与南部侏罗系凹陷形成南、北双断型跷跷板式结构。早白垩世末期,地块在NE—SW向挤压构造应力环境下发生隆升,形成区域性逆断层和盆地内的反转构造,并使得下白垩统遭受不同程度剥蚀,形成了白垩系与上覆古近系之间的不整合(图4)。

喜马拉雅运动期(晚白垩世—新生代),阿拉善地块的构造应力场表现为近SN向水平挤压。在此构造背景下雅布赖盆地主要表现为挤压走滑作用,其构造样式以反转构造和压缩构造为主,盆地内普遍发育逆

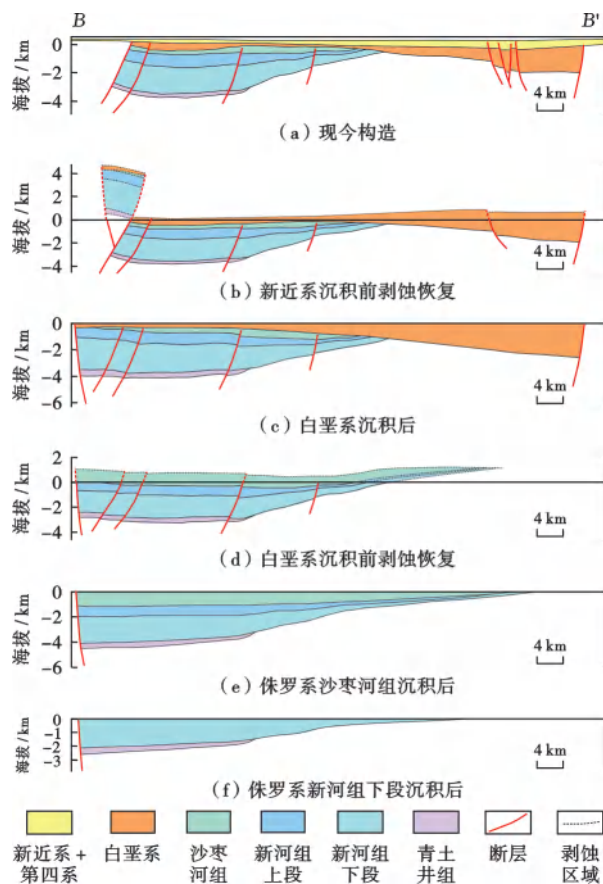


图4 雅布赖盆地构造演化(剖面位置见图1)

Fig. 4 Structural evolution of Yabulai Basin

掩推覆构造,而南部则形成NW走向的南倾逆冲推覆构造,导致新生代沉积盆地的范围明显缩小,沉积了一套河流相—山麓洪积相地层,形成现今箕状断陷型残留盆地<sup>[10-13]</sup>。

综上所述,雅布赖盆地形成时间早,后期在侏罗纪、白垩纪和新生代经历了多期次改造,盆地南、北两翼改造强烈,但盆地内主体构造活动弱,未遭到强烈破坏,油气藏的保存条件好。

## 2.3 烃源岩条件

古沉积环境研究表明,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,岩性主要为砂砾岩和泥岩。烃源岩最大沉积厚度为360 m,面积约为2 525 km<sup>2</sup>(图5)。在小湖次凹,青土井组的有机质类型以Ⅱ型—Ⅲ型为主,埋深中等,总有机碳(TOC)含量为1.37%~3.20%、平均为2.10%,生烃潜量( $S_1 + S_2$ )为0.99~5.81 mg/g、平均为3.58 mg/g,氯仿沥青“A”含量为0.009 0%~0.687 7%、平均为0.363 9%,氢指数( $I_H$ )为9.0~747.0 mg/g、平均为225.5 mg/g,镜质体反射率( $R_o$ )为0.77%~1.50%、平均为1.20%,已进入成熟演化阶段。综合评价青土井组为中等烃源岩。

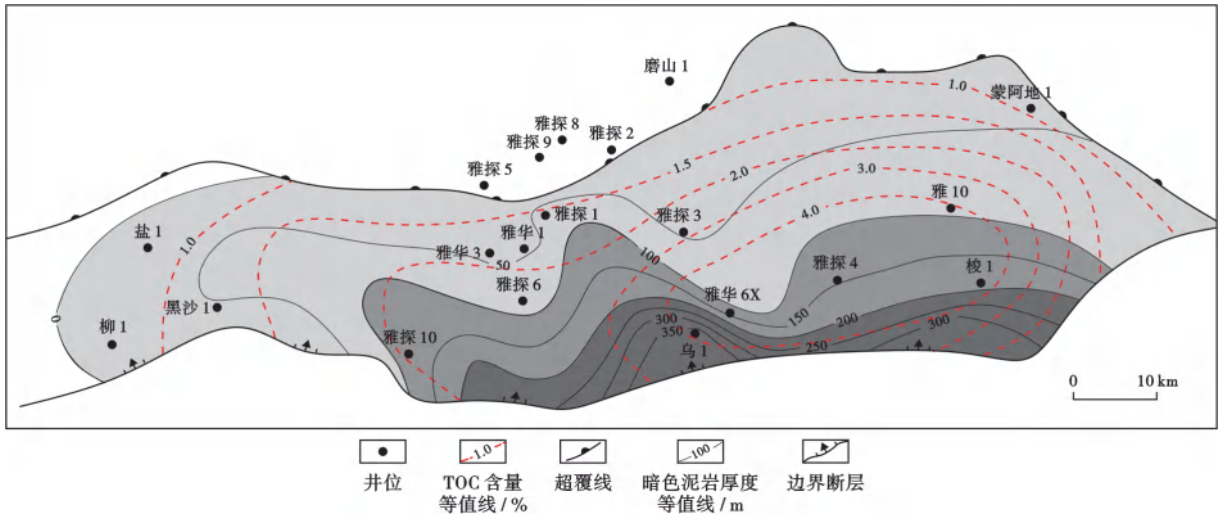


图 5 雅布赖盆地青土井组 TOC 含量和烃源岩厚度分布

Fig. 5 Distribution of TOC contents and source rocks of Qingtujing Formation in Yabulai Basin

新河组下段沉积期发育三角洲和湖相等沉积相带,岩性以泥岩夹砂岩为主,湖相泥岩发育,烃源岩累计厚度最大可达 1174 m,分布面积达 3 486 km<sup>2</sup>(图 6),是雅布赖盆地侏罗系凹陷的重要烃源岩,其有机质类型以 II 型为主。不同砂组的有机质丰度在纵向上存在差异:① III 砂组的 TOC 含量为 0.32~1.20%、平均为 0.86%, $S_1 + S_2$  为 0.25~0.60 mg/g、平均为 0.44 mg/g,氯仿沥青“A”含量为 0.042%~0.480%、平均为 0.045%, $I_H$  为 41.60~84.84 mg/g、平均为 52.70 mg/g,有机质丰度在 3 个砂组中最低;② II 砂组的 TOC 含量为 0.79%~4.02%、平均为 1.25%, $S_1 + S_2$  为 0.38~14.3 mg/g、平均为 2.77 mg/g,氯仿沥青“A”含量为 0.037%~0.298%、平均为 0.199%, $I_H$  为 39.44~345.38 mg/g、平均为 130.3 mg/g;③ I 砂组的 TOC 含量为 0.98%~3.80%、平均为 1.50%, $S_1 + S_2$  为

0.4~16.9 mg/g、平均为 4.1 mg/g,氯仿沥青“A”含量为 0.047%~0.425%、平均为 0.138%, $I_H$  为 40.74~424.49 mg/g、平均为 205.70 mg/g。I 砂组和 II 砂组的有机质丰度较高,其中,在 II 砂组顶部,最大湖泛面附近的烃源岩为雅布赖盆地最好的烃源岩层系。新河组下段烃源岩的  $R_o$  为 0.6%~1.3%,平均为 1.0%,进入成熟演化阶段。综合评价认为,新河组下段 II 砂组烃源岩为雅布赖盆地的较好烃源岩,新河组下段 I 砂组烃源岩为中等烃源岩,新河组下段 III 砂组烃源岩为差烃源岩(图 7)。

小湖次凹新河组下段烃源岩在侏罗纪中期开始生烃,在侏罗纪末期开始进入生油门限,在侏罗纪末期—白垩纪初期达到生烃高峰,并随着白垩纪和新生代以来的持续埋藏演化,成熟度进一步增高,现今已进入生油高峰阶段。对研究区的埋藏史和热演化史等成藏动

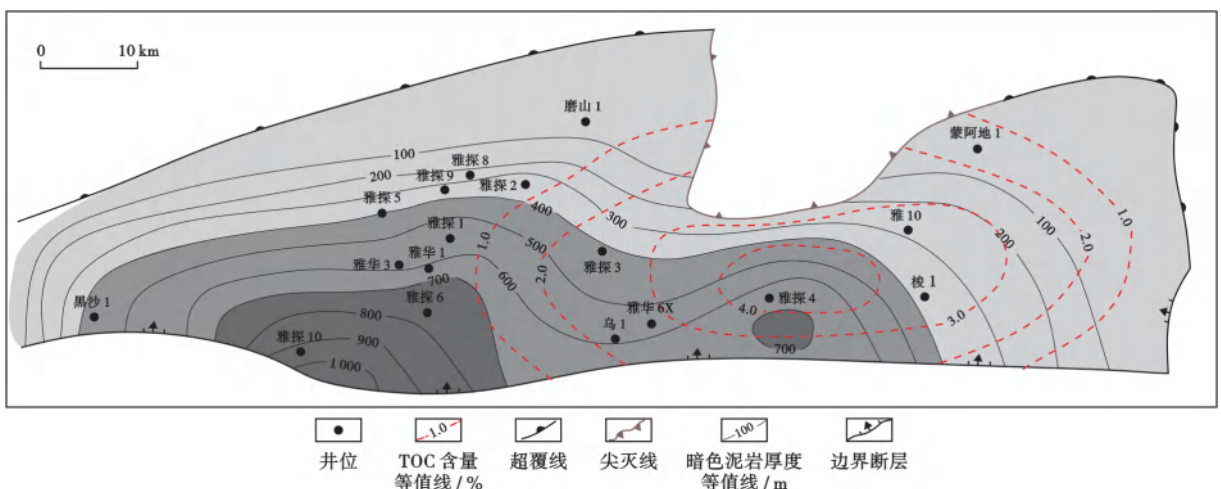
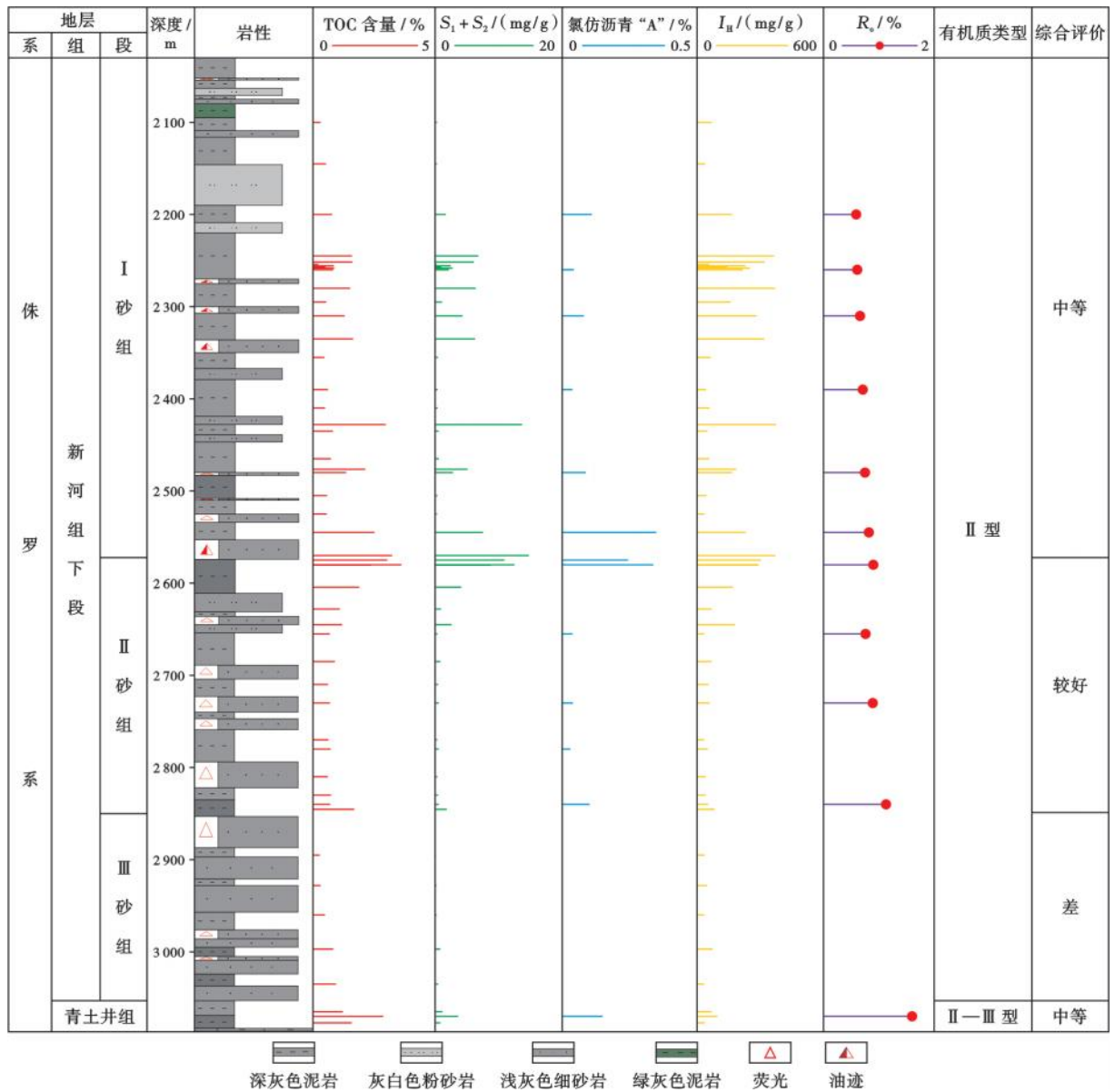


图 6 雅布赖盆地新河组下段 TOC 含量和烃源岩分布

Fig. 6 Distribution of TOC contents and source rocks of the Lower Member of Xinhe Formation in Yabulai Basin



注: TOC—总有机碳含量; S<sub>1</sub> + S<sub>2</sub>—生烃潜能; I<sub>H</sub>—氢指数; R<sub>o</sub>—镜质体反射率。

图7 雅华1井烃源岩综合评价

Fig. 7 Comprehensive evaluation of source rocks in Well Yahual

力学过程进行分析发现,小湖次凹的中侏罗统储层存在2期油气充注过程,分别发生在晚侏罗世(距今145~144 Ma)与早白垩世(距今100~123 Ma),与生烃演化过程一致<sup>[14-15]</sup>。油源对比研究表明,小湖次凹的原油普遍发生过短距离运移,具有近源富集的特点,油气主要来自小湖次凹的青土井组与新河组下段<sup>[15]</sup>。

## 2.4 沉积体系展布

### 2.4.1 物源分析

结合区域构造背景,借助测井古水流方向法、碎屑组分分析法、重矿物组合分析法可以综合分析、判断盆地的物源方向<sup>[16-18]</sup>。小湖次凹内磨山1井、雅探1井等11口井的井斜及层理数据汇总分析表明,小湖次凹在青土井组和新河组下段共存在3个古水流方向。古

水流的分布格局表明,新河组下段的物源在小湖次凹北部缓坡带主要来自雅布赖盆地北西部和北东部,在南部陡坡带多来自盆地南东部,而中央洼槽区为多源混积。通过岩石组分分析可看出,碎屑组分在平面上的变化规律为:由小湖次凹的北西部、北东部、南东部至中央洼槽区,石英组分含量呈递增趋势,岩石成熟度逐步增高(图8)。碎屑组分在平面上的变化趋势表明,小湖次凹存在NW向、NE向和SE向3大物源区[图8(b)—图8(d)]。此外,在青土井组—新河组下段,整体上各单井的碎屑组分含量无太大变化,碎屑组分在平面上的变化规律趋于一致,表明小湖次凹的物源区在中侏罗统沉积期保持了较好的延续性和相对的稳定性。

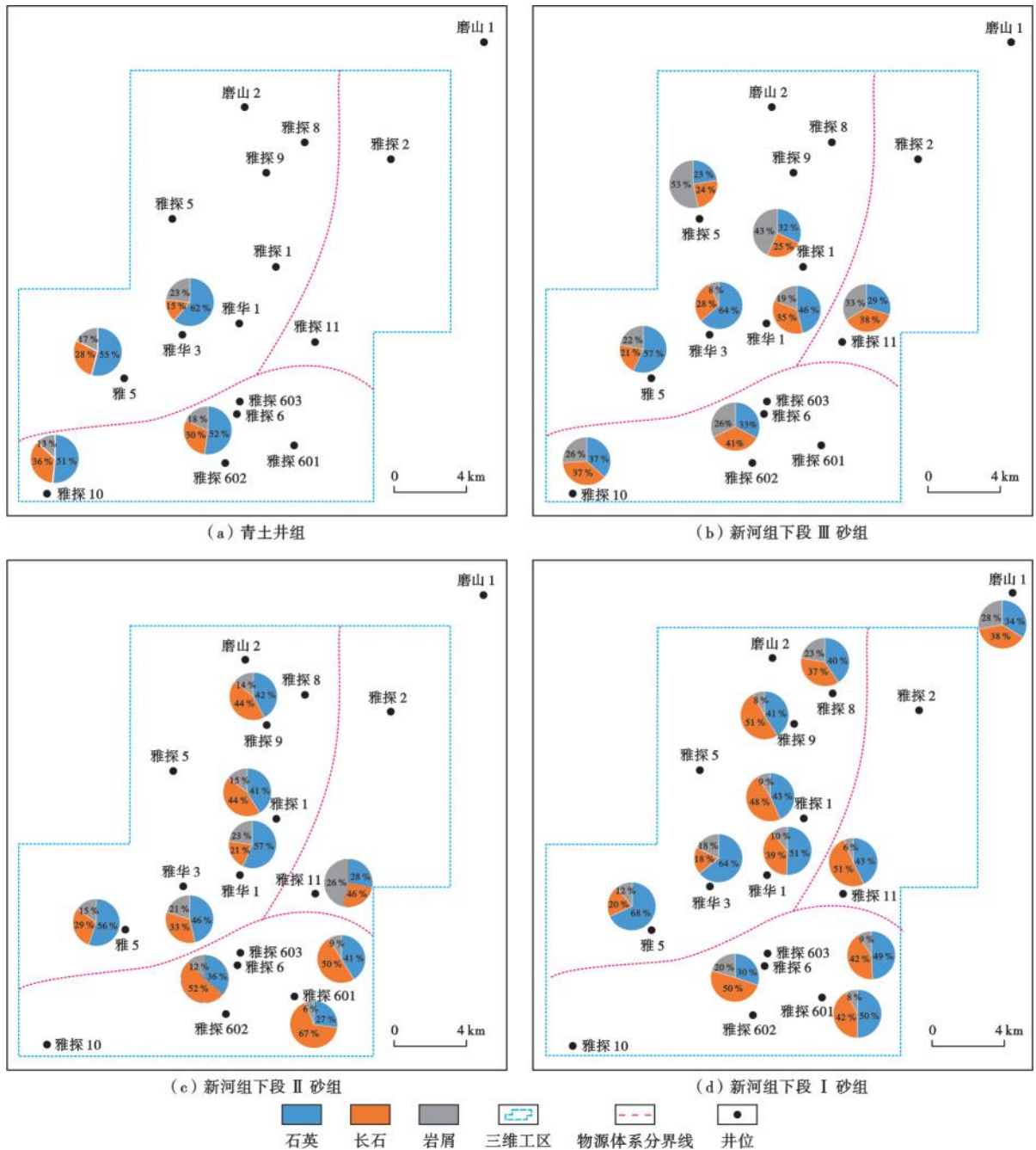


图 8 小湖次凹碎屑组分的平面分布

Fig. 8 Distribution of detrital components in Xiaohu subsag

重矿物组合的分析结果表明:新河组下段 III 砂组主要含锆石、金红石、石榴子石、磷灰石、锐钛矿和电气石等重矿物;小湖次凹主要存在 3 个物源体系,包括来自于 NW 向、NE 向和 SE 向的物源,NW 向物源的重矿物组合为“锆石 + 金红石 + 磷灰石 + 锐钛矿 + 电气石”,NE 向物源的重矿物组合为“锆石 + 石榴子石 + 磷灰石”,SE 向物源的重矿物组合为“锆石 + 金红石 + 石榴子石”。

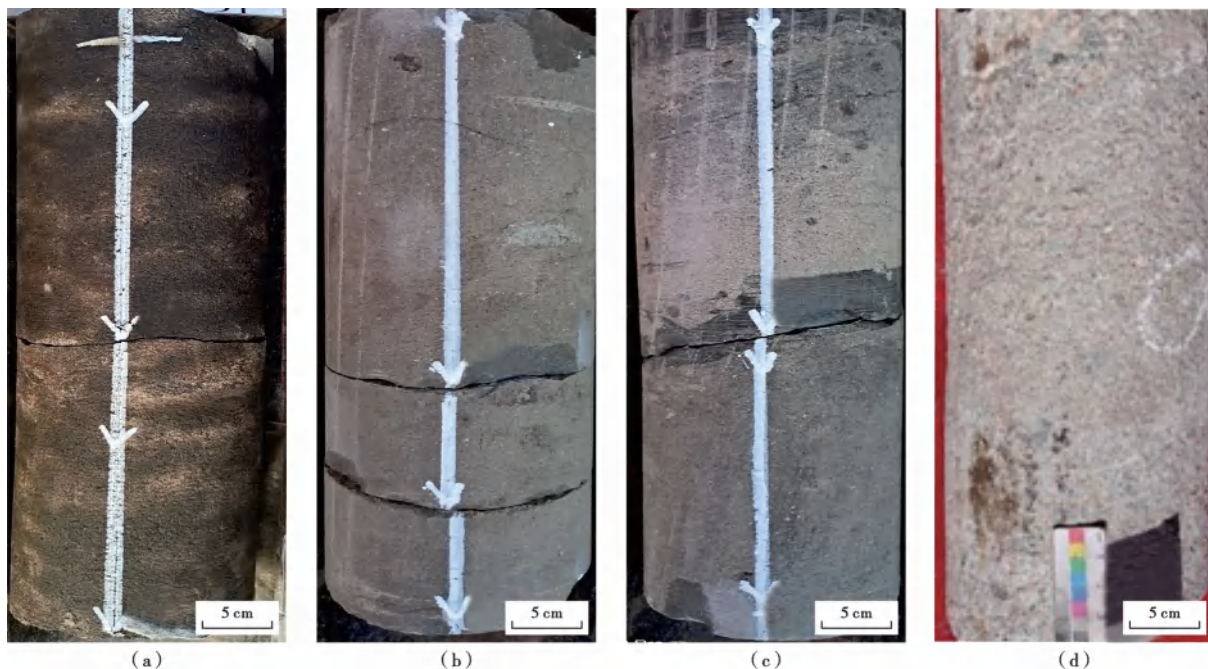
#### 2.4.2 沉积相特征

通过岩心观察发现,雅布赖盆地新河组下段和青

土井组主要的沉积亚相包括:①辫状河三角洲前缘亚相,主要发育水下分流河道、分流间湾和河口坝微相。水下分流河道沉积以细砂岩为主,向上粒度变细,整体发育多层正韵律层理,分选为中等—好,磨圆度较好,呈次棱—次圆状,发育冲刷面、大—中型交错层理、平行层理等沉积构造,部分冲刷充填构造中可见黑色泥砾[图 9(a)];河口坝沉积位于水下分流河道末端,沉积于水动力相对较弱的环境中,沉积物以分选好、磨圆好的细砂岩、粉砂岩、灰色—灰黑色泥岩互层为主,发育块状层理、平行层理、中—小型板状交错层理等,整

体呈下细上粗的反韵律[图 9(b)];分流间湾沉积的岩性主要为灰色、暗色泥岩和灰色粉砂质泥岩,偶夹泥质粉砂岩和粉砂岩,具水平层理和沙纹层理,富含陆生植物碎片、炭屑和垂直虫孔[图 9(c)]。②扇三角洲前缘亚相,主要发育水下分流河道、分流河道间湾微相。水下分流河道是扇三角洲前缘亚相的主体沉积,厚度大,分布面积广,发育典型的河流二元结构,具正粒序且发

育块状层理、平行层理和交错层理等,可见同生变形层理,呈颗粒支撑;常见“漂砾”,反映其分异程度较低;河道砂因频繁交互冲刷,形成具有连续底冲刷构造和正韵律叠合的含砾砂岩[图 9(d)]。分流河道间湾沉积的岩性多为灰绿色、灰色泥岩与粉砂岩,发育波状层理、水平层理和透镜状层理,常见植物碎屑,可见“漂砾”与黑色炭屑。



(a) 灰色油浸中砂岩,水下分流河道沉积,新河组下段,雅华 3 井 2644.07 m; (b) 灰色细砂岩,河口坝沉积,新河组下段,雅华 3 井 3188.80 m; (c) 灰色细砂岩与灰黑色泥质粉砂岩,分流间湾沉积,新河组下段,雅华 3 井 3188.45 m; (d) 灰色含砾砂岩,扇三角洲前缘水下分流河道沉积,新河组下段,雅探 10 井 2703.60 m。

图 9 小湖次凹新河组下段和青土井组的三角洲沉积特征

Fig. 9 Deltaic sedimentary characteristics of the Lower Member of Xinhe Formation and the Qingtujing Formation in Xiaohu subsag

#### 2.4.3 砂体特征

古地貌分析认为,小湖次凹斜坡带发育多条坡折带和古沟谷。坡折带主要影响凹陷区内不同时期沉积体系的发育类型及其展布范围,而作为沉积物搬运通道的古沟谷则对沉积体系的发育规模具有控制作用。坡折带-古沟谷的发育特征和展布规律对盆地沉积体系的平面展布和充填序列起着重要的控制作用。

坡折带是地形坡度突然变陡的区域,整体上具有上缓、中陡和下缓的特点。通过地层的精细解释及同沉积断层的识别,在小湖次凹北部缓坡带上识别出了 3 条沉积坡折带。小湖次凹北部缓坡发育三角洲相沉积,凹槽区发育湖相沉积,由于沉积速率的差异,三角洲平原和前缘过渡带、三角洲相与湖相过渡带均产生坡度变化,形成了沉积坡折。中侏罗统沉积期,构造运动逐渐减弱,构造坡折不明显,研究区发育较大范围的沉积坡折带。在坡折 I—II 一带多为三角洲平原亚相

沉积,在坡折 II—III 一带主要为三角状前缘亚相沉积,在坡折 III 以南的洼槽区主要发育湖相沉积。与坡折带伴生的古沟谷体系是主要的物源通道,对储集砂体的发育规模具有一定的控制作用,因而对其开展分析有助于储层预测。

笔者结合物源分析结果,进一步刻画了古沟谷在小湖次凹三维工区的发育位置。根据沟谷的几何形态,在小湖次凹共识别出 V 型和 U 型 2 种类型古沟谷。V 型沟谷的地震相呈孤立短轴状,以侵蚀下切为主,水动力较强,河道笔直,基本没有分支,水道在水流的强力冲击作用下形成深度较大的下蚀,水流所携带的沉积物颗粒大小不一、磨圆度极差、分选性差,其发育的坡折带偏陡,且在沟谷末端远离中心位置处发育面积、体积均较大的三角洲相沉积。U 型沟谷是物源通道壮年期发育的产物,沉积分垂向加积和侧向加积 2 种类型。侧向加积反映古沟谷在河道的频繁摆动下



不断发生侧向迁移,而垂向加积反映相对稳定的河道充填,这一阶段物源输送能力强,输送距离远且稳定,沉积物的颗粒大小相对均一,磨圆度和分选性较好,可在盆地边缘形成面积和体积较大的三角洲砂体,是油气储存的有利场所<sup>[19-20]</sup>。

综上所述,盆地在中侏罗世共存在南、北 2 大物源体系,北部斜坡带在 NW 向和 NW 向发育长源辫状河三角洲沉积体系,南部陡坡带在 SE 方向发育近源扇三角洲沉积体系,沉积破折带与古沟谷等古地形控制着有利砂体的平面展布(图 10)。

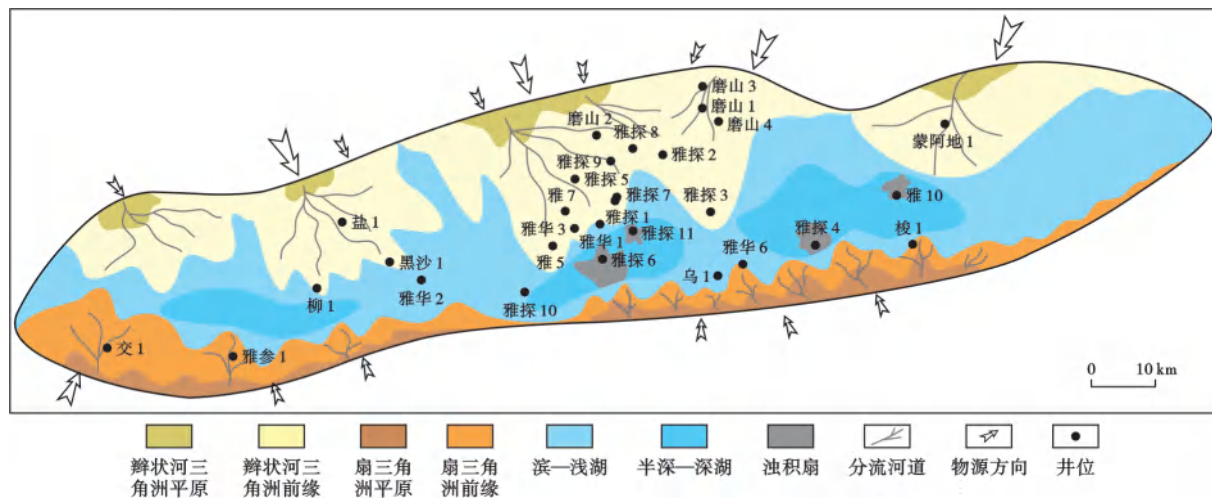


图 10 雅布赖盆地新河组下段 I 砂组沉积相分布

Fig. 10 Distribution of sedimentary facies of the Lower Member of Xinhe Formation in Yabulai Basin

## 2.5 储层条件

### 2.5.1 岩石类型

岩心、岩屑观察和岩石薄片分析表明,雅布赖盆地中侏罗统的骨架颗粒以长石、石英为主,岩屑含量相对较少,岩石成分成熟度总体偏低,平均为

0.69。岩屑成分主要为变质岩岩屑,其次为火成岩岩屑,沉积岩岩屑较为少见。由于沉积环境和母岩区岩性变化,中侏罗统上、下地层中各种骨架颗粒组分的含量有差异(表 1),由此构成了不同的储层岩石类型。

表 1 雅布赖盆地中侏罗统碎屑和岩屑成分

Table 1 Middle Jurassic clasts and debris composition in Yabulai Basin

地层	石英/%	长石/%	岩屑/%	岩石成分成熟度	岩屑含量/%			
					变质岩	火成岩	沉积岩	
新河组下段	I 砂组	40.19	48.13	11.67	0.67	52.87	43.09	4.04
	II 砂组	39.77	51.38	8.85	0.66	50.84	46.91	2.25
	III 砂组	38.59	39.11	22.30	0.63	55.94	40.03	4.03
青土井组	46.14	42.82	11.04	0.86	67.13	32.87	0	
平均	40.91	45.87	13.21	0.69	56.42	41.09	2.49	

青土井组储层的岩石类型主要为长石砂岩与岩屑长石砂岩,其矿物成分以石英、长石为主,石英的平均含量为 46.14%,长石的平均含量为 42.82%,岩屑的平均含量为 11.04%(表 1)。岩屑组分含变质岩、火成岩和沉积岩,岩石中碎屑颗粒的分选和磨圆度较差,胶结物以黏土矿物和碳酸盐为主。

新河组下段 III 砂组储层的碎屑成分与青土井组有所区别,岩石类型主要为长石砂岩、岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩和少量的岩屑砂岩。矿物成分以石英、长石和岩屑为主,石英的平均含量为 38.59%,长石的平均含量为 39.11%,岩屑的平均含量为 22.30%(表 1)。

岩屑组分含变质岩、火成岩和沉积岩,岩石中碎屑颗粒的分选和磨圆度最好,胶结物以黏土矿物、碳酸盐和石英为主,杂基的相对含量略大于胶结物。

新河组下段 II 砂组的岩石类型主要为长石砂岩,含少量的岩屑长石砂岩。矿物成分以石英、长石为主,石英的平均含量为 39.77%,长石的平均含量为 51.38%(表 1)。岩屑组分含变质岩、火成岩和沉积岩,岩石中的碎屑颗粒的磨圆度较 III 砂组差,次棱状与次圆状的占比偏低,胶结物以碳酸盐和长石为主。

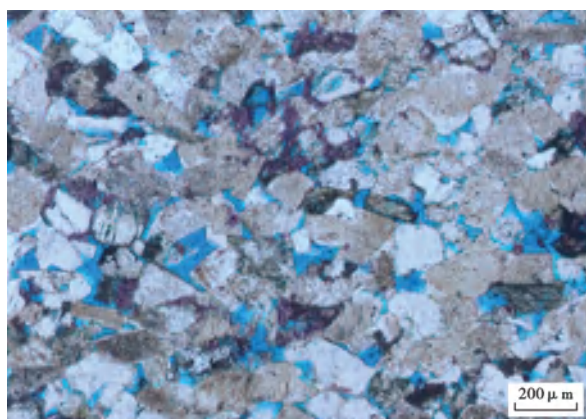
新河组下段 I 砂组的岩石类型主要为长石砂岩和岩屑长石砂岩,长石岩屑砂岩和岩屑砂岩相对较少。矿

物成分以石英、长石为主,石英的平均含量为 40.19%,长石的平均含量为 48.13%,岩屑的平均含量为 11.67%(表 1)。岩屑组分含变质岩、火成岩和沉积岩,岩石中碎屑颗粒的磨圆度较 II 砂组差,次棱状与次圆状的占比偏低,胶结物以碳酸盐和长石为主,结构成熟度仅次于 II 砂组。

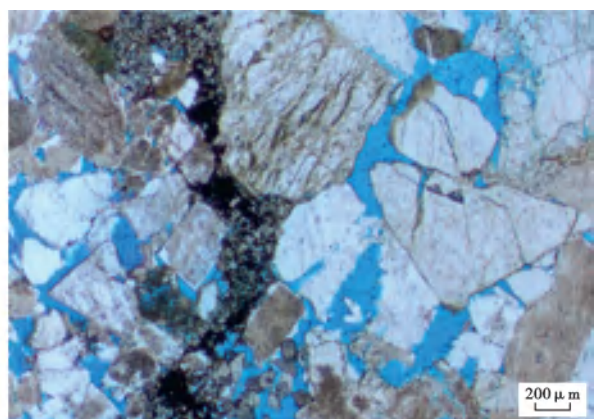
### 2.5.2 储集空间类型

基于岩石薄片、铸体薄片的观察和分析,雅布赖盆地中侏罗统的储集空间可划分为原生孔隙、次生孔隙和裂缝 3 大类。原生孔隙主要为粒间孔,常见于盆地缓坡带沉积中,且主要发育于新河组下段 I 砂组,孔隙边缘可见碳酸盐胶结物[图 11(a)]。次生孔隙在研究

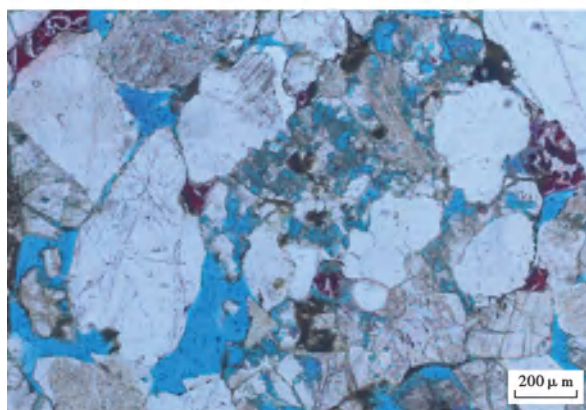
区的孔隙类型中占比最高,多发育在盆地陡坡带和凸起区沉积中,包含了粒间溶孔、粒内溶孔和晶间溶孔 3 类。盆地内的粒间溶孔主要为长石、岩屑、方解石胶结物的溶蚀孔隙,多呈不规则状,边缘为锯齿状或港湾状[图 11(b)]。粒间溶孔的孔喉相对较粗大,连通性好,对储层的物性条件有一定改善作用;粒内溶孔的孔径大小不等,形态不规则,边缘为锯齿状或港湾状[图 11(c)];晶间溶孔形态复杂,大小差异明显[图 11(d)]。微裂缝在盆地内总量较少且缝隙较窄,部分被方解石等胶结物所充填,提供的面孔率非常小,对储层改善的意义不明显,仅可能对发育孤立溶孔的岩石的渗透率有一定改善。



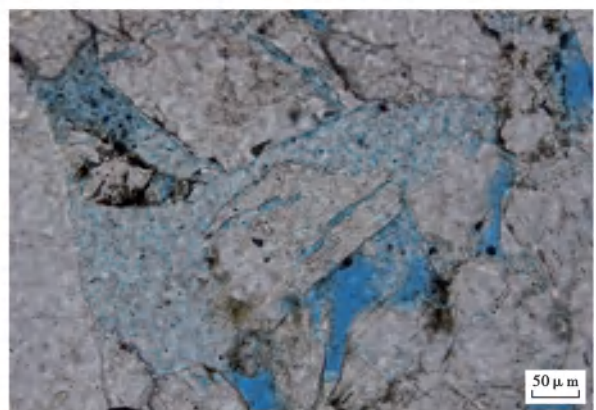
(a) 原生粒间孔, 细粒长石砂岩, 新河组下段, 雅探 1 井 2 361.14 m



(b) 粒间溶孔, 中粗粒岩屑长石砂岩, 新河组下段, 雅探 6 井 2 652.89 m



(c) 粒内溶孔, 中粗粒岩屑长石砂岩, 新河组下段, 雅华 3 井 2 644.85 m



(d) 晶间溶孔, 中细粒岩屑长石砂岩, 青土井组, 乌 1 井 1 530.58 m

图 11 雅布赖盆地中侏罗统储层的孔隙类型

Fig. 11 Pore types of the Middle Jurassic reservoirs in Yabulai Basin

### 2.5.3 储层物性

受不同地质时期沉积作用、成岩作用、埋深和构造活动差异影响,盆地内各砂组的储层物性在一定程度上具有不同的特征。除新河组下段 III 砂组总体为超低孔—特低孔储层外,其他砂组均为特低孔—超低孔储层。各砂组的渗透率大体一致,均表现为特低渗—超低渗储层的特征(图 12)。

平面上,小湖次凹南部陡坡带与北部缓坡带的储

层特征存在差异。南部陡坡带经历了快速深埋和后期强挤压作用,储层整体处于中成岩阶段 B 期,压实作用、石英次生加大作用与杂基重结晶作用显著,伊利石黏土矿物大量发育,储集空间多为发育在重力流主水道内以长石颗粒溶蚀为典型的粒内溶孔、粒间溶孔及少量微裂缝等,砂体薄且变化大,整体的非均质性较强。北部缓坡带整体处于断陷湖盆斜坡带上,储层的成岩演化和成藏史差异小,主要发育辫状河三角洲前

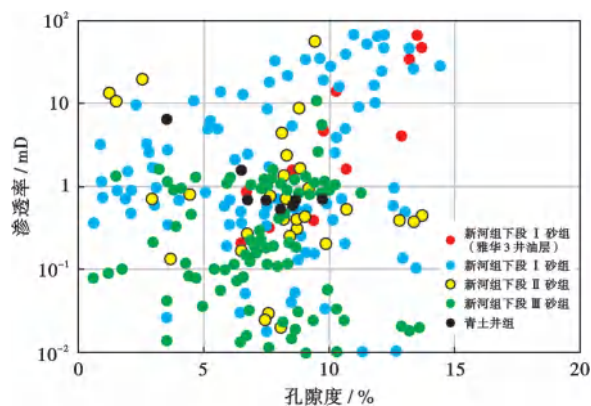


图 12 雅布赖盆地中侏罗统储层的孔渗关系

Fig. 12 Relationship between porosity and permeability of the Middle Jurassic reservoirs in Yabulai Basin

缘砂,砂体粒度较大、成熟度高、砂层厚,是有利储层发育的关键位置;缓坡带经历了快速埋深后的再抬升作用,储层整体处于中成岩阶段 A2 期,成岩作用以压实作用和胶结作用为主,溶蚀作用弱,储集空间主要为发育在水下分流河道砂中的原生粒间孔,局部可见粒间溶孔,孔渗性较好;缓坡带的原生粒间孔提供了主要的渗流通道,厚层河道砂是有利储层保存的关键<sup>[21-25]</sup>。

纵向上,青土井组储层的储集性能差于新河组下段,新河组下段 I 砂组的储集性能最好,其次为 III 砂组,II 砂组的储集性能相对最差。原因在于:①青土井组为近源沉积,分选差,碎屑颗粒多为线接触,加之后期埋藏深,压实作用强;② III 砂组的砂层较厚,但其成分成熟度和结构成熟度在新河组下段中最低,碎屑颗粒多为线接触、缝合接触,大量杂基、塑性岩屑的发育进一步降低了储层的孔渗性,碳酸盐胶结物大多在强压实作用之后形成并充填溶蚀孔和粒间孔,交代碎屑颗粒,即便经过后期溶蚀作用也多形成孤立孔隙;③新河组下段 II 砂组中发育大量薄层透镜状滩坝砂,其岩石粒度较细,厚层泥夹薄层砂的岩性组合使得多期碳酸盐强胶结作用更为显著,由此导致储层的储集性能相对较差;④新河组下段 I 砂组中碎屑颗粒的成分成熟度和结构成熟度高,骨架颗粒的抗压能力较强;⑤雅布赖盆地具有早期成藏的特征,根据储层的含油级别和物性统计分析,储层的含油级别越低,孔隙度和渗透率越低,其中,具有荧光显示及无含油显示的储层,其所对应的孔隙度小于 8%、渗透率小于 1 mD,而具有油迹、油斑、油浸级别的储层,其所对应的孔隙度大于 10%、渗透率大于 101 mD,这表明油气的早期充注保护了原生粒间孔,抑制了后期压实作用和胶结作用的进行,且有机酸溶蚀可使得孔隙相互连

通。综合以上 5 种因素,新河组下段 I 砂组在纵向上的储集性能最好。

## 2.6 油气充注与油藏特征

雅布赖盆地油气的富集成藏主要与储集层的优劣、烃源岩的生烃/供烃条件以及后期的保存条件有关,主要发育岩性油气藏及潜山油藏。雅布赖盆地遭受的构造改造弱,未遭到强烈破坏,油气保存条件好。盆地在最大湖泛期发育一套较好的烃源岩,分布稳定。最大湖泛期之后,北部缓坡带发育大面积的长源三角洲沉积,由于物源充足,供水系能量较强,砂体搬运过程中易形成 V 型或 U 型古沟谷,在坡折区多发育一定规模的三角洲沉积,其在地震剖面上呈“透镜状”反射特征,储层条件较好(图 13、图 14)。最大湖泛期的主力烃源岩在成熟后生成油气,油气沿垂向运移至湖泛面之上,并在三角洲水下分流主河道砂体中聚集成藏,而上覆泥岩则提供了良好的区域盖层条件,由此形成“古地形控砂、岩性尖灭控圈、优质储层控富集、自生自储”的成藏模式。雅华 3 井等井均在该模式认识下取得了钻探成功,表明盆地具备“最大湖泛面控藏”的特征。斜坡带物源方向,最大湖泛面的大型岩性圈闭是雅布赖盆地下一步的重点勘探领域。

## 3 勘探启示及意义

### 3.1 打破中国西部侏罗系盆地常规油气不富集的传统认识,拓宽油气勘探领域

以往的研究认为,泛河西走廊地区盆地面积小、改造强,常规油气不富集,以致密油等非常规领域为主要勘探对象。近期的研究认为,雅布赖盆地构造翼部及负向沟谷区发育厚砂体,砂体在纵向上与有机质丰度高、类型好、热演化程度高的烃源岩叠置,后期改造破坏小,易形成自生自储的规模富集油藏。这一认识有效带动了中国西部盆地侏罗系常规油气勘探的整体认识,拓宽了油气勘探领域,实现了常规-非常规油气勘探并举。

### 3.2 长源方向可以找到有利储层,突破中国西部侏罗系盆地储层致密的传统认识

在泛河西走廊地区,盆地的成盆时间早,多发育短轴小型沉积体系,岩石的成分成熟度和结构成熟度低,后期埋藏深度大,造成盆地内的碎屑岩储层整体致密。近期研究发现,雅布赖盆地斜坡带发育 NW 向长源三角洲砂体,砂体粒度较粗、成熟度高、砂层厚,其中,在雅华 3 井油层段,砂体的孔隙度平均为 11.5%,渗透率大部分为 12~102 mD。勘探成果表明,雅布赖盆地具备发育大型长源沉积体系的条件,有利于寻找有利储层。

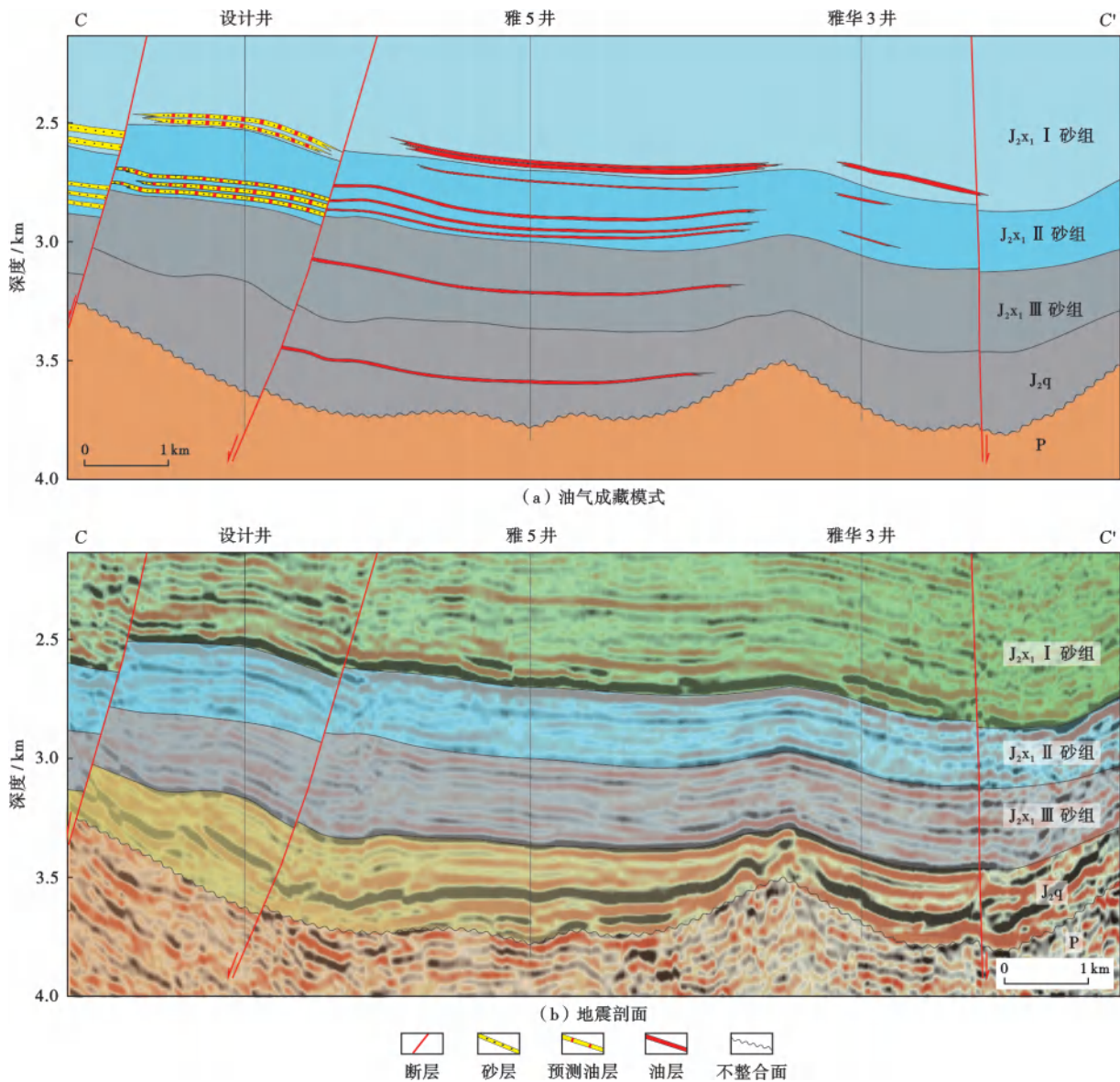


图 13 雅布赖盆地横切物源方向的油气成藏模式(剖面位置见图 1)  
 Fig. 13 Hydrocarbon accumulation model across provenance in Yabulai Basin

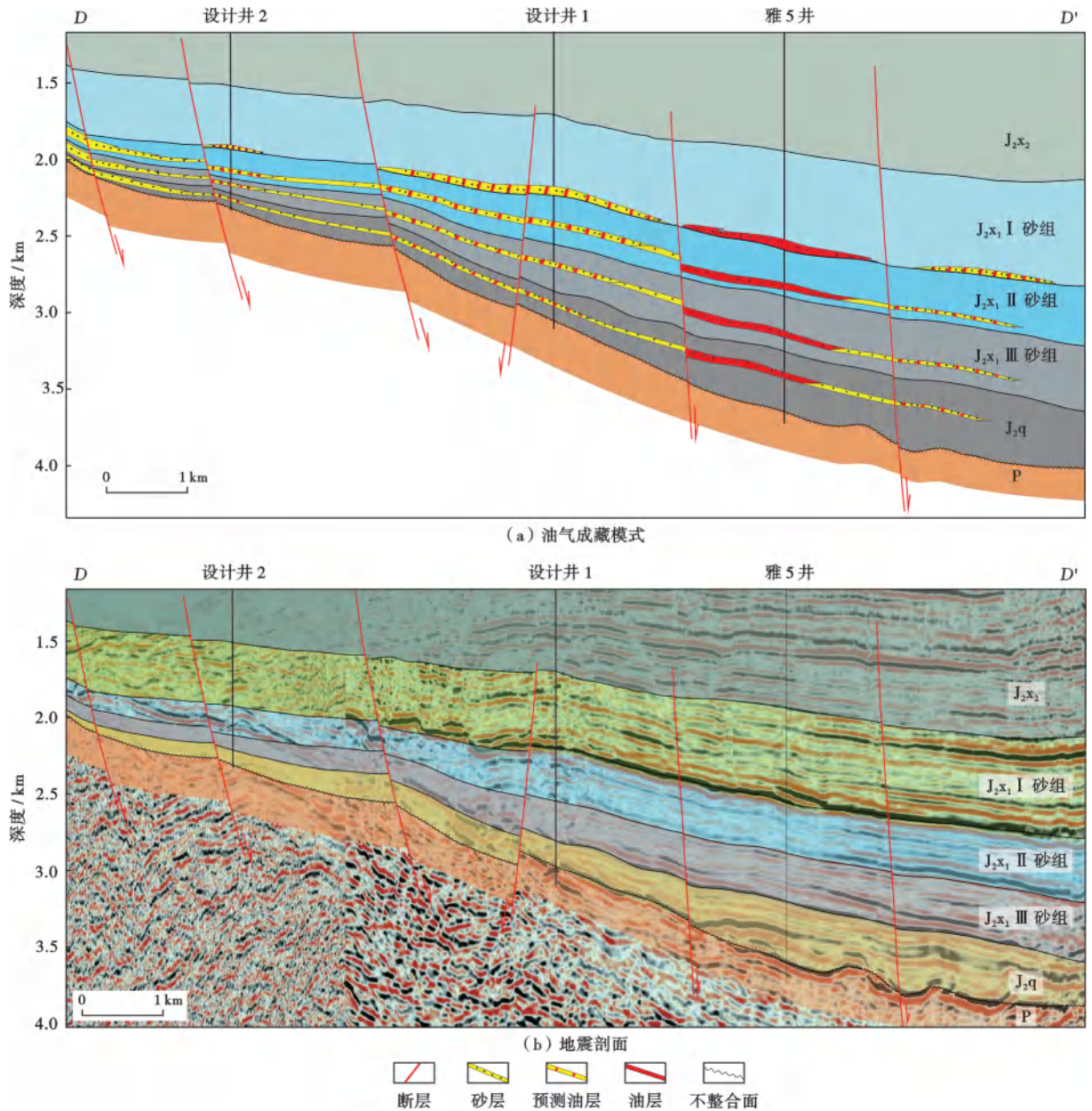
3.3 盆地主体稳定区是残留型盆地油气富集的“黄金区”

泛河西走廊地区的盆地主要分布在褶皱山系或构造活动带上,经历了多期成盆作用与改造作用,最终形成现今的残留型盆地。传统地质认识认为此种类型盆地形成时间早,具备早期成藏的特征,但其油气保存条件要求高,难以形成油气富集。雅布赖盆地小湖次凹斜坡带的成功勘探表明,在多期伸展与挤压形成的叠合盆地中,相对稳定的主体区仍具备形成规模富集油藏的条件,斜坡带控制了烃源岩、储集体和圈闭的分布,是改造残留型盆地的突破方向。

3.4 地层、潜山等领域见到有利苗头,勘探潜力大

基于烃源岩丰度、类型、厚度等指标参数,计算出

雅布赖盆地的总体油气资源量为  $1.4 \times 10^8$  t。小湖次凹斜坡带的勘探发现证实了斜坡带发育 NW 向长源三角洲砂体,有利于形成良好储集条件且成藏条件好。向 NW 向物源方向,斜坡带中一外带可作为下一步有利勘探方向,聚焦新河组下段 I 砂组和 II 砂组的岩性油藏,兼探斜坡带中一外带青土井组和新河组下段 III 砂组的地层超覆油藏,并逐步扩大勘探成果。雅布赖盆地深层发育断块、断垒型潜山,裂缝发育,潜山在侧向上与新河组下段和青土井组源岩对接,多口井已见到油气显示,是下一步勘探突破的潜力方向。继续开展环洼立体勘探,有望在勘探空白区发现规模储量。



注: J<sub>2</sub>x<sub>2</sub>—侏罗系新河组上段; J<sub>2</sub>x<sub>1</sub>—侏罗系新河组下段; J<sub>2</sub>q—侏罗系青土井组; P—二叠系。

图 14 雅布赖盆地顺物源方向的油气成藏模式(剖面位置见图 1)

Fig. 14 Hydrocarbon accumulation model along provenance in Yabulai Basin

### 4 结 论

(1) 泛河西走廊地区中一小型盆地历经多期次构造活动改造,对油气成藏不利,但雅布赖盆地的勘探发现证实在构造相对稳定区域有望获得常规油气储量。

(2) 雅布赖盆地经历了侏罗纪末期、白垩纪末期等多期构造运动,其南部遭受逆冲推覆,北部遭受抬升剥蚀,两翼受构造改造强烈,但盆地中部洼槽及斜坡带的源、储、盖等油气基础地质条件保存较好。

(3) 雅布赖盆地中部斜坡带新河组下段 I 砂组为一套物源来自 NW 向并经历长距离搬运入湖的辫状河三

角洲沉积体系,沉积坡折带与古沟谷共同控制了有利储层展布。其中以新河组下段 I 砂组下部(最大湖泛面之上)砂体的结构成熟度和成分成熟度高,物性最好。

(4) 新河组下段 I 砂组(高位体系域)和 II 砂组(湖侵体系域)源岩的有机质丰度高、类型好,砂体储集物性较好,是雅布赖盆地最有利的成藏组合,呈现在最大湖泛面附近近源富集的成藏特征。

### 参 考 文 献

[1] 陈启林,杨占龙. 泛河西走廊盆地群油气地质特征与勘探前景[J]. 天然气地球科学,2010,21(2):186-192.

- CHEN Qilin, YANG Zhanlong. Petroleum geology of Pan-Hexi corridor basins and exploration prospecting[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(2): 186-192.
- [2] 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 Yabulai Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50(1): 74-87.
- [3] 钟玮, 林常梅, 吴超, 等. 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, WU Chao, et al. The Mesozoic tectonic in the Yabrai Basin[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2013, 33(1): 7-11.
- [4] 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 Yabulai Basin, Inner Mongolia[J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 2010, 32(2): 149-154.
- [5] 张少敏, 操应长, 朱如凯, 等. 雅布赖盆地小湖次凹细粒沉积岩岩相特征与沉积环境探讨[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(2): 309-319.
- ZHANG Shaomin, CAO Yingchang, ZHU Rukai, et al. The lithofacies and depositional environment of fine-grained sedimentary rocks of Xiaohu subsag in Yabulai Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(2): 309-319.
- [6] 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): 857-863.
- WU Maobing, LIU Chunyan, ZHENG Menglin, et al. Jurassic depositional-tectonic evolution in the Yabulai Basin, western Inner Mongolia, China and direction of petroleum exploration[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(7): 857-863.
- [7] 林畅松. 沉积盆地的层序和沉积充填结构及过程响应[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 849-862.
- LIN Changsong. Sequence and depositional architecture of sedimentary basin and process responses[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 849-862.
- [8] 沈健. 鄂尔多斯盆地陇东地区致密砂岩储层碳酸盐胶结物特征及成因机理[J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(2): 24-32.
- SHEN Jian. Carbonate cementation characteristics and genetic mechanism of tight sandstone reservoirs in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(2): 24-32.
- [9] 石英涛, 廖远涛, 汤建荣, 等. 雅布赖盆地小湖次凹新河组下段层序及沉积相特征[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(5): 38-45.
- SHI Yingtao, LIAO Yuantao, TANG Jianrong, et al. Characteristics of sequence stratigraphy and sedimentary facies in the Lower Xinhe Formation of Xiaohu sub-sag, Yabulai Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34(5): 38-45.
- [10] 都鹏燕. 雅布赖盆地侏罗系有效烃源岩分布及其对油气的控制作用[D]. 北京: 中国石油大学, 2016.
- DU Pengyan. Distribution of Jurassic effective source rocks in the Yabrai Basin and its control to petroleum[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2016.
- [11] 王彦博. 雅布赖盆地新河组烃源岩地化特征及资源潜力分析[D]. 西安: 西安石油大学, 2014.
- WANG Yanbo. Analysis on geochemical characteristics and potentials of Xinhe Formation in Yabrai Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2014.
- [12] 高岗, 赵乐义, 马国福, 等. 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[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(3): 478-488.
- GAO Gang, ZHAO Leyi, MA Guofu, et al. Formation conditions of the Jurassic Xinhe Formation tight oil reservoirs and resource potential in the Yabrai Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(3): 478-488.
- [13] 杨波, 侯军, 陈海清, 等. 雅布赖中生代叠合盆地特征及勘探方向[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(增刊 2): 314-320.
- YANG Bo, HOU Jun, CHEN Haiqing, et al. Characteristics of the Yabrai Mesozoic basin and its exploration strategy[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(S2): 314-320.
- [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 Zhanli, MA Guofu, et al. The relations of hydrocarbon generation to the geochemical features and maturity evolution of source rocks in Sartai sag, Yabrai Basin[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(6): 2745-2753.
- [15] 田涛, 任战利, 吴晓青, 等. 雅布赖盆地萨尔台凹陷中一新代构造热事件的磷灰石裂变径迹分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(8): 2974-2982.
- TIAN Tao, REN Zhanli, WU Xiaoqing, et al. Apatite fission track analysis of Meso-cenozoic tectonic-thermal history in Sartai depression, Yabrai Basin[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(8): 2974-2982.
- [16] 彭治超, 付星辉, 刘俊超, 等. 沉积物源分析方法及研究进展[J]. *西安文理学院学报(自然科学版)*, 2017, 20(1): 116-121.
- PENG Zhichao, FU Xinghui, LIU Junchao, et al. Analysis methods and research progress of sediment source [J]. *Journal of Xi'an University(Natural Science Edition)*, 2017, 20(1): 116-121.
- [17] 郭佩, 刘池洋, 王建强, 等. 碎屑锆石年代学在沉积物源研究中的应用及存在问题[J]. *沉积学报*, 2017, 35(1): 46-56.
- GUO Pei, LIU Chiyang, WANG Jianqiang, et al. Considerations on the application of detrital-zircon geochronology to sedimentary provenance analysis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(1): 46-56.
- [18] 朱红涛, 徐长贵, 朱筱敏, 等. 陆相盆地源-汇系统要素耦合研究进展[J]. *地球科学*, 2017, 42(11): 1851-1870.
- ZHU Hongtao, XU Changgui, ZHU Xiaomin, et al. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental Basin[J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1851-1870.
- [19] 和子琛, 刘豪, 林鹤鸣, 等. 断陷湖盆坡折带-古沟谷对沉积的控制作用——以珠江口盆地海丰 33 洼陷古近系文昌组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 441-451.
- HE Zichen, LIU Hao, LIN Heming, et al. Controlling effect of slope-break zone and paleovalley on sedimentation in rifted lake basins: a case study of the Paleogene Wenchang Formation in Haifeng 33 subsag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 441-451.