

库车坳陷东部阳霞凹陷侏罗系 石油地质条件与勘探方向

智凤琴, 张荣虎, 余朝丰

中国石油杭州地质研究院

摘要 库车坳陷是塔里木盆地重要的油气勘探区,但目前对其东部阳霞凹陷侏罗系的石油地质条件认识不足,进而影响阳霞凹陷区域勘探方向的确定。应用露头、钻井和地震资料,从构造演化、地层展布、烃源岩条件和沉积储层特征等方面分析阳霞凹陷的石油地质条件,研究认为:阳霞凹陷的中一下侏罗统具有优越的烃源岩条件和规模有效储层,源-储“三明治”式的地层组合模式供烃效果好,区域盖层和直接盖层条件优越,生、储、盖配置良好,构造条件有利于油气保存和成藏,具备发育源储一体型油气藏的石油地质条件。实钻井丰富的油气显示预示着阳霞凹陷具有良好的油气远景。综合分析认为,阳霞凹陷中南部斜坡带发育一系列侏罗系透镜状砂体向南上倾尖灭形成岩性圈闭,是阳霞凹陷下一步重点勘探领域。

关键词 成藏条件;岩性圈闭;勘探方向;侏罗系;阳霞凹陷;库车坳陷

中图分类号:TE122.1 **文献标识码**:A

0 前言

库车坳陷是塔里木盆地油气富集程度较高的坳陷之一,生、储、盖、圈、运、保配置良好,坳陷的中部和北部构造带近几年也不断获得勘探突破^[1-3]。2017年以来,坳陷东部也取得了油气勘探发现,部署在吐格尔明背斜东翼的吐东2、吐东202等井先后在侏罗系阳霞组 and 克孜勒努尔组获得了工业油气流,其中,吐东2井在克孜勒努尔组和阳霞组发现厚120.2 m的油气层,阳霞组获日产油33.7 m³、日产气12.7×10⁴ m³,克孜勒努尔组获日产油127 m³、日产气44×10⁴ m³,首次实现了库车坳陷东部源内中下侏罗统构造-岩性油气藏勘探的重大突破,展现了库车坳陷东部中生界源内构造-岩性油气藏的巨大勘探潜力。

位于吐格尔明背斜带南部的阳霞凹陷长250 km,宽10~25 km,面积约为4 500 km²,中石油矿权内勘探面积约为1 190 km²。目前已探明资源量天然气约为2 954×10⁸ m³,石油约为5 120×10⁸ t。随着吐格尔明背斜带东部勘探的突破,阳霞凹陷中生界

也成为重点关注领域。前人研究认为:阳霞凹陷在三叠纪—侏罗纪与北部的吐格尔明背斜带为同一个湖盆,发育中下侏罗统煤系、上三叠统煤系及湖相泥岩2套烃源岩,烃源岩具有厚度大、热演化程度高、生烃强度大等特征^[4-5]。库车坳陷东部白垩系发育大型湖相砂坝^[6]和中下侏罗统克孜勒努尔组、阳霞组和阿合组辫状河三角洲平原和前缘沉积砂体^[7-9],东部和中部砂岩储层物性较好^[10-11]。现阶段的勘探研究认为:阳霞凹陷北部发育构造型油气藏,成藏模式与吐格尔明背斜带东部类似;南缘发育岩性油气藏,属晚期—超晚期成藏,以凝析油和正常成熟度的天然气为主^[4]。

但是,部署在凹陷南缘的阳霞1井和阳霞2井钻探失利,只在侏罗纪地层发现油气显示,2020年部署在北部构造圈闭上的阳探1井钻探也失利。阳霞凹陷是否具有有利的石油地质条件?勘探方向在哪里?针对这些问题,本文从区域地质和现有的钻井、地震资料入手,对阳霞凹陷油气成藏关键地质条件开展综合研究,预测油气分布有利区,指出下一步的勘探方向。

收稿日期:2023-02-07;改回日期:2023-04-06

本文受中国石油“十四五”上游领域前瞻性基础性课题“前陆冲断带下组合规模储层形成机理与有效性评价技术研究”(编号:2021DJ0302)资助

第一作者:智凤琴,硕士,高级工程师,主要从事沉积储层和油气勘探方面的研究工作。通信地址:310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号;E-mail:zhifq_hz@petrochina.com.cn。ORCID:0009-0006-6710-7373

1 地质背景

库车坳陷位于塔里木盆地北部, 紧邻天山山脉, 南至塔北隆起, 西起温宿, 东至库尔勒, 东西长约450 km, 南北宽约20~60 km, 面积约为16 000 km²。阳霞凹陷位于库车坳陷的东部(图1), 是一个近东西向展布的中新生代沉降凹陷, 北与吐格爾明地区以断裂相接, 南邻轮台凸起, 西部和秋里塔格构造带相接, 东则为南天山构造带, 面积约为4 500 km²。

库车坳陷是构成塔里木大型叠合复合盆地的重要组成部分^[12], 是在塔里木地块北缘古生代褶皱带的基础上发展起来的中新生代盆地, 经历了晚二叠世—三叠纪的前陆盆地、侏罗纪—古近纪的伸展拗陷盆地和新近纪—第四纪再生前陆盆地3个主要的发展阶段^[13-16]。阳霞凹陷形成于二叠纪和三叠纪基底之上, 三叠纪开始接受沉积, 地层北厚南薄, 具有前陆盆地特征; 侏罗纪为断陷盆地, 发育伸展断

层, 南部边界发育控凹断层, 地层整体北厚南薄, 向南超覆尖灭; 白垩纪至新近纪为弱伸展拗陷, 南部控凹断层停止活动, 沉积中心南移, 白垩纪地层向北减薄尖灭; 新生代以来, 受印度板块向北挤压作用的影响, 北部断层活动剧烈, 南天山地区开始发生缩短与隆升作用, 北部吐格爾明隆升为背斜, 阳霞凹陷成为库车前陆盆地的一个沉降中心, 新生代最大沉降可达10 000 m(图2)。

库车坳陷侏罗系自下而上为下侏罗统的阿合组(J_1a)和阳霞组(J_1y), 中侏罗统的克孜勒努尔组(J_2kz)和恰克马克组(J_2q), 上侏罗统的齐古组(J_3q)和喀拉扎组(J_3k)。其中, 克孜勒努尔组和阳霞组自上而下均划分为4段, 分别是克一(J_2kz_1)、克二(J_2kz_2)、克三(J_2kz_3)、克四(J_2kz_4)段和阳一(J_1y_1)、阳二(J_1y_2)、阳三(J_1y_3)、阳四(J_1y_4)段。阳霞凹陷阳探1井侏罗系发育下统阿合组、阳霞组, 中统克孜勒努尔组三、四段, 缺失克孜勒努尔组一段与二段、恰克马克组和上侏罗统(图3)。

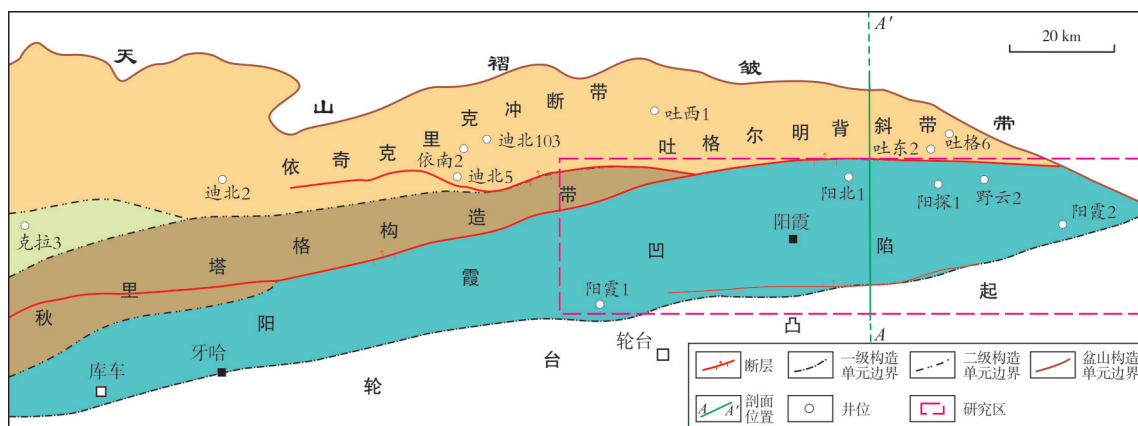
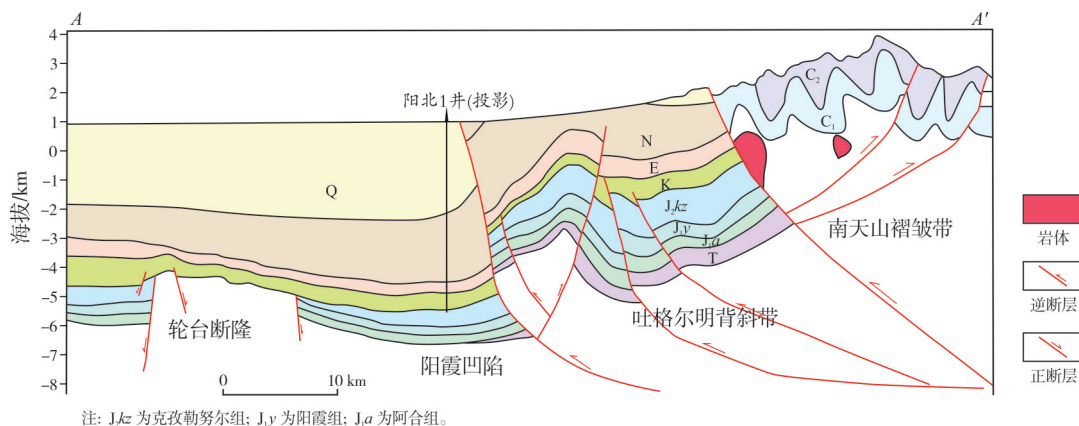


图1 阳霞凹陷构造位置图

Fig. 1 Tectonic location map of Yangxia Sag in Kuqa Depression



注: Jkz 为克孜勒努尔组; Jy 为阳霞组; Ja 为阿合组。

图2 阳霞凹陷地层结构剖面(剖面位置见图1)

Fig. 2 Stratigraphic-structural profile of Yangxia Sag (profile location is shown in Fig. 1)

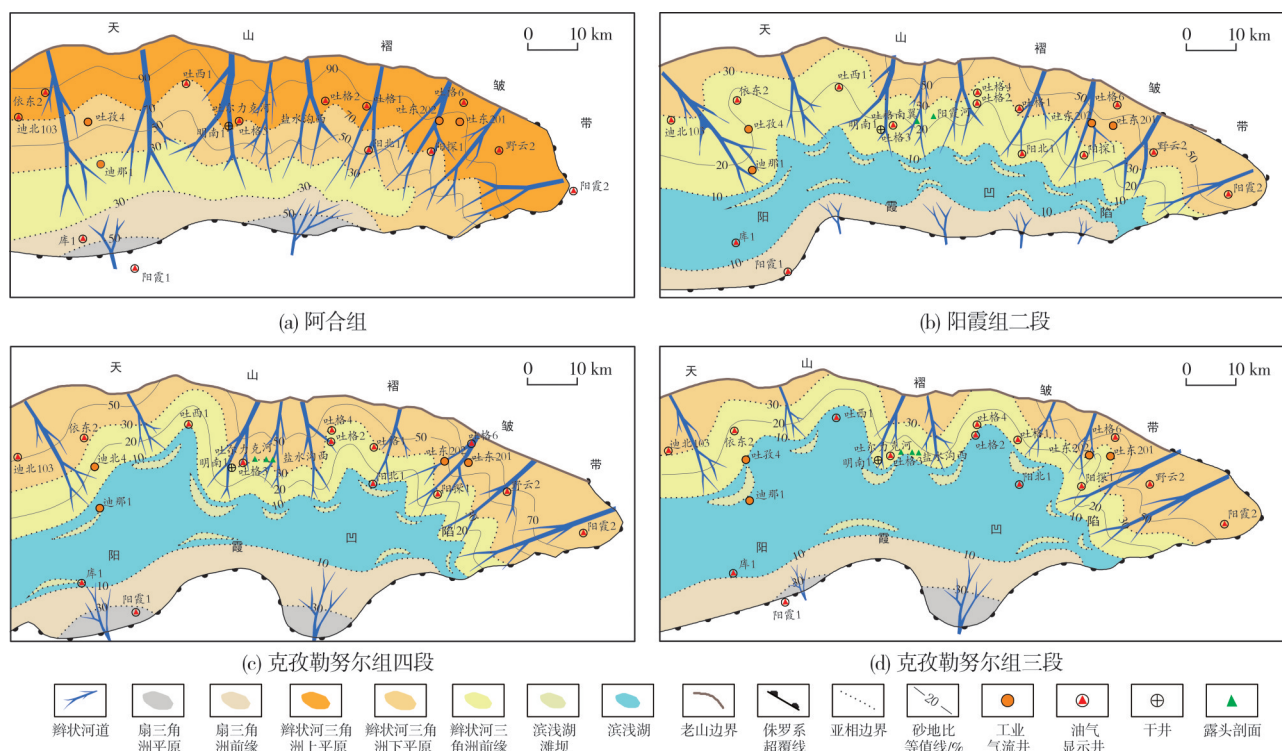


图4 阳霞凹陷及周围侏罗系目的层段沉积相平面图

Fig. 4 Sedimentary facies plans of the Jurassic target layer in Yangxia Sag and surrounding areas

角洲沉积体系,砂泥比值较高,砂地比值最高达到90%。南部轮台凸起提供次要物源,仅发育扇三角洲等近源沉积(图4a)。

阳霞组二、四段沉积相主体为辫状河三角洲下平原和前缘,主要沉积微相为辫状河道、水下分流河道和沼泽间湾,其次发育滨浅湖等沉积亚相。与阿合组相比,阳霞组砂地比值大幅降低,一般为30%~72%,发育中—薄层透镜状砂体。沉积物源主要来自北部,南部为次要物源(图4b)。自北向南依次发育辫状河三角洲平原—前缘、砂坝和湖泊相。阳霞组一段和三段沉积期为最大湖泛和次级湖泛发育期,岩性以泥岩为主。

克孜勒努尔组四段主体为辫状河三角洲下平原亚相和前缘亚相(图4c),主要沉积微相类型为辫状河道、水下分流河道和沼泽间湾。克孜勒努尔组三段沉积期(图4d),阳霞凹陷内发育辫状河三角洲前缘亚相,沉积微相为水下分流河道、河口坝、前缘席状砂、滨浅湖等。克孜勒努尔组三段、四段沉积期的物源主要来自北部,南部发育次要物源。自北向南依次发育辫状河三角洲平原—前缘、砂坝和湖泊相。克孜勒努尔组三段沉积期的古地理和沉积环

境基本继承了四段沉积期的特征。

2.2 储层特征

根据钻井资料和阳霞凹陷3 000 km的二维地震资料解释成果,认为阳霞凹陷发育克孜勒努尔组辫状河三角洲前缘砂岩储层、阳霞组辫状河三角洲下平原—前缘砂岩储层和阿合组大型辫状河三角洲平原—前缘砂岩储层(图4)。其中,克孜勒努尔组三、四段和阳霞组二段中一薄层透镜状砂岩储层,纵向上与侏罗系煤系烃源岩相互叠置,天然气可近距离充注,是本次储层研究的重点。

2.2.1 储层岩性及储集空间特征

根据野外露头观测和钻井(阳霞2井和阳探1井)岩心、岩石薄片观察,阳霞凹陷及周围克孜勒努尔组和阳霞组储层岩石类型主要为长石岩屑砂岩。碎屑组分中石英含量为35%~42%,长石含量为21%~31%,岩屑含量为27%~41%,以变质岩岩屑为主,储层填隙物含量为10.5%~32.5%。储层有孔隙型和裂缝—孔隙型2种类型。孔隙型储层以原生粒间孔、粒内溶孔、粒间溶孔为主,以阳霞组储层为例,原生粒间孔相对总孔隙的占比为72.5%,粒内溶

孔占比为15.5%,粒间溶孔占比为9.0%(图5)。裂缝-孔隙型储层颗粒裂缝和粒内溶孔发育,基质孔隙与裂缝有效沟通,形成缝-孔喉系统(图6)。

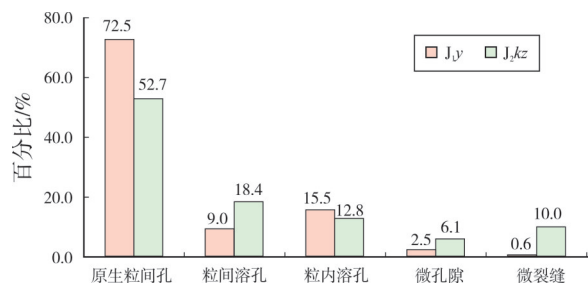
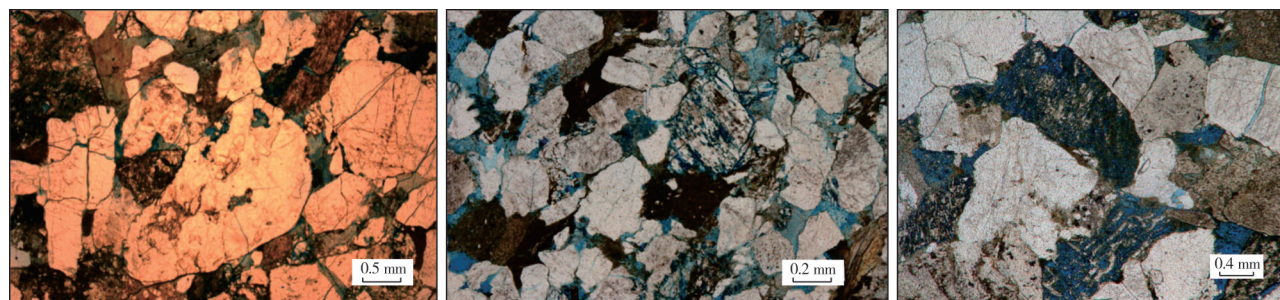


图5 阳霞凹陷及周缘侏罗系储层不同类型储集空间占比直方图

Fig. 5 Percentage histogram of different types of reservoir space of Jurassic in Yangxia Sag and surrounding areas



(a) 颗粒裂纹发育, 粒内溶孔、泥质微孔。阳霞2井 5 281.05 m, 阳霞组。蓝色铸体片
(b) 长石内溶孔、泥质微孔、高岭石晶间孔。阳霞2井 5 292.3 m, 阳霞组。蓝色铸体片
(c) 粒内溶孔和粒间微孔发育。阳探1井 7 475.1 m, 阳霞组。蓝色铸体片

图6 阳霞凹陷侏罗系储集空间类型铸体薄片特征

Fig. 6 Photos of casting thin sections showing the Jurassic reservoir space types in Yangxia Sag

2.3 烃源岩及油源对比

2.3.1 烃源岩有机质类型、丰度及成熟度

库车坳陷烃源岩主要集中在侏罗系和三叠系。侏罗系烃源岩为发育在克孜勒努尔组四段、阳霞组一段和四段的湖相泥岩和煤层;三叠系烃源岩为发育在塔里奇克组和黄山街组的暗色泥岩和煤层^[4]。三叠系仅在阳霞凹陷北部发育,地层较薄,向凹陷中部和南部斜坡上倾尖灭。

侏罗系烃源岩有机碳含量(TOC)总体在2.1%~2.8%之间,其中湖相泥岩的TOC为1%~2%,煤层泥岩的TOC为3%~6%,属于好烃源岩或优质烃源岩。现今镜质组反射率(R_o)一般为1.0%~1.4%,属于成熟—高成熟烃源岩^[4, 17]。

阳探1井阳霞组(7 618~7 760 m)原油、阳探1井三叠系(7 892 m)烃源岩和依南2井阳霞组(4 404.5 m)烃源岩等3个样品的CPI值在1.00~1.02之间,也表

2.2.2 储层物性特征

物性分析以阳探1井和阳霞2井岩心资料为基础,实测阳霞组储层孔隙度主要为4%~10%,平均为7%,渗透率主要为 $(1\sim30)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均为 $8.35\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。按照塔里木盆地中—下侏罗统储层的综合评价标准^[16],以Ⅱ—Ⅲ类储层为主。

储层的物性受储层的碎屑组分、构造挤压和埋藏压实等因素控制。阳霞凹陷北部边界靠近深大断裂带,储层非均质性强;中部和南部受构造挤压作用较弱,储层基质孔隙度相对较高。现今阳霞凹陷侏罗纪地层北部埋藏较深,中部和南部较浅,因此,在储层碎屑组分稳定的情况下,凹陷中部和南部的储层物性好于北部。

明阳霞凹陷侏罗系和三叠系烃源岩均处于成熟阶段。

2.3.2 油源对比

阳探1井侏罗系阳霞组原油正构烷烃主峰为 C_{17} 和 C_{20} (双峰型)(图7a),与依南2井阳霞组煤系烃源岩正构烷烃主峰为 C_{17} 和 C_{19} (双峰型)(图7b)的特征相似;三叠系塔里奇克组烃源岩主峰为 C_{18} ,是单峰型(图7c)。阳探1井侏罗系原油和依南2井阳霞组烃源岩姥植比接近, $\text{Pr/Ph}>1$,显示其母质形成于偏氧化环境;阳探1井三叠系烃源岩 $\text{Pr/Ph}<1$,其沉积环境为弱还原环境。阳探1井侏罗系原油正构烷烃的相对含量和姥植比与三叠系塔里奇克组烃源岩有较大差异,而与阳霞组煤系烃源岩有较好可比性。

藿烷系列可以有效地指示烃源岩的沉积环境。淡水沉积环境下伽马蜡烷的丰度较低,而咸水沉积

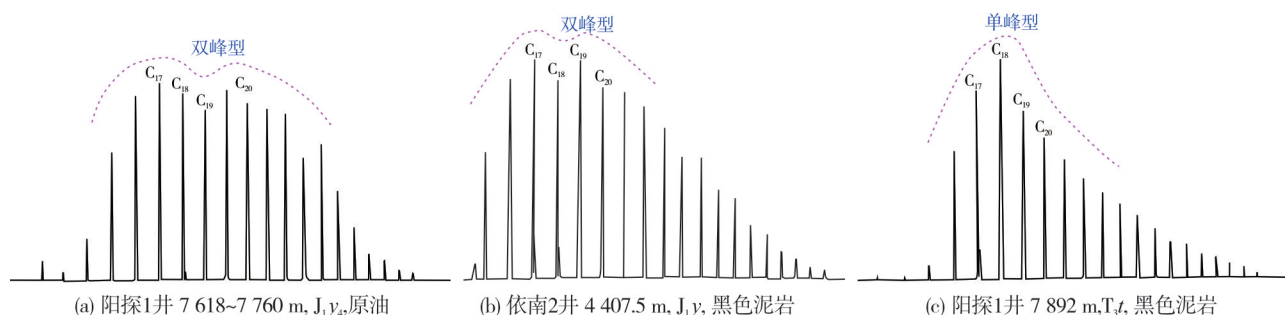


图7 阳霞凹陷原油和烃源岩饱和烃分布

Fig. 7 Saturated hydrocarbons distribution of crude oil and source rocks in Yangxia Sag

环境下伽马蜡烷丰度较高^[18]。阳探1井侏罗系原油(图8a)、依南2井阳霞组烃源岩(图8b)和阳探1井阿合组烃源岩(图8c)3个样品中伽马蜡烷丰度较低,显示为典型的淡水沉积环境;阳探1井三叠系烃源岩样品中伽马蜡烷丰度较高(图8d),表现为咸水沉积环境。阳探1井阳霞组原油样品和依南2井阳霞组烃源岩2个样品中 C_{19} 、 C_{20} 、 C_{21} 三环萜烷呈现逐渐递减(图8a,8b);阳探1井三叠系烃源岩三环萜烷情况相反, C_{19} 、 C_{20} 、 C_{21} 呈现逐渐递增(图8d)。

甾烷作为重要的生物标志化合物,能够反映有机质输入的类型和有机质的热演化程度。通常认为,陆相沉积有机质中 C_{27} — C_{29} 甾烷呈反“L”形分布,而海相沉积有机质中 C_{27} — C_{29} 甾烷呈“V”形分布。

布。阳探1井侏罗系原油、依南2井阳霞组烃源岩和阳探1井阿合组烃源岩3个样品中 C_{27} — C_{29} 甾烷呈反“L”形分布,即 $C_{29} > C_{27} > C_{28}$ (图8a—8c),表明侏罗系烃源岩中陆源高等植物的输入较高。阳探1井三叠系烃源岩样品中 C_{27} — C_{29} 甾烷呈“V”形,即 $C_{29} = C_{27} > C_{28}$ (图8d),表明三叠系烃源岩形成于海相沉积环境。

综上所述,阳霞凹陷侏罗系和三叠系烃源岩都处于成熟阶段,侏罗系烃源岩具有陆相淡水沉积特征,三叠系烃源岩形成于咸水沉积环境。从原油和烃源岩的饱和烃、萜烷和甾烷的分布特征来看,阳霞凹陷侏罗系的油气主要来源于侏罗系自身的烃源岩,而非其下伏的三叠系烃源岩。

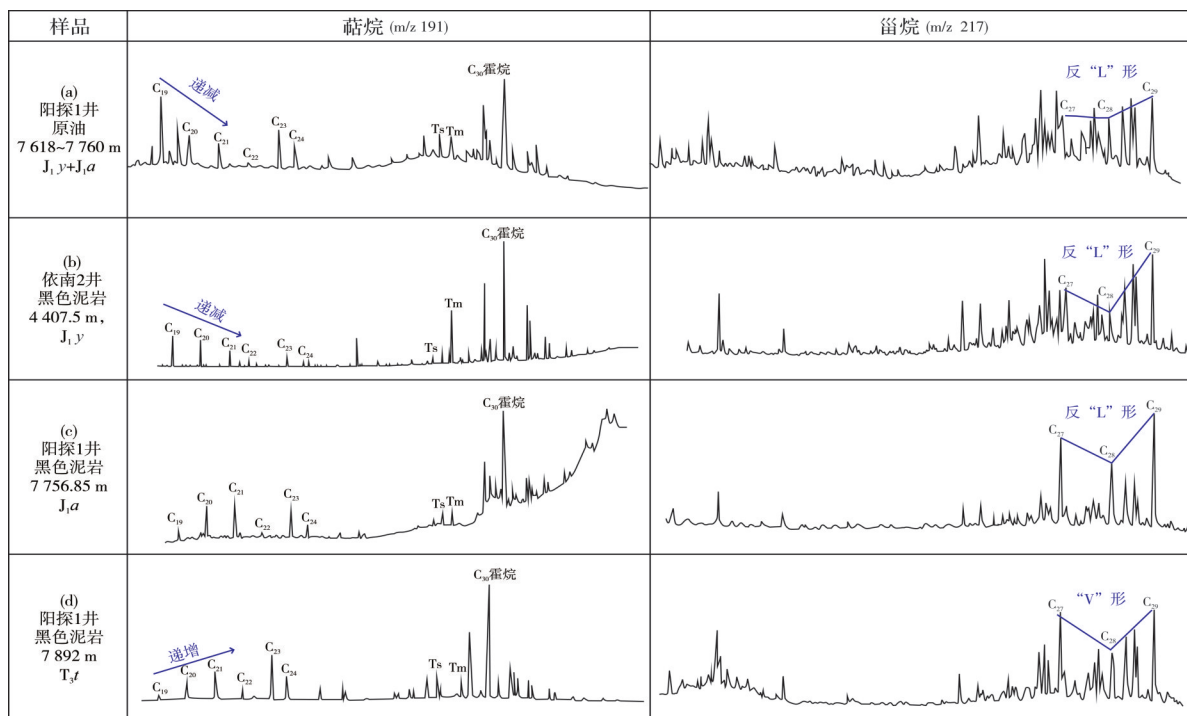


图8 阳霞凹陷原油和烃源岩萜烷、甾烷分布特征

Fig. 8 Characteristics of terpene and sterane of crude oil and source rocks in Yangxia Sag

2.3.3 侏罗系烃源岩分布

根据露头、钻井和区域二维地震解释成果认为^[17]:三叠系塔里奇克组烃源岩厚度薄且分布局限,尤其是阳霞凹陷的南部缺失三叠系;阳霞组一段湖相暗色泥岩厚度介于30~60 m,平面上分布稳定,覆盖整个阳霞凹陷。

克孜勒努尔组三、四段和阳霞组一段是库车坳陷侏罗系烃源岩分布的重要层段。库车坳陷侏罗系烃源岩地层整体北厚南薄,自西向东逐渐增厚,坳陷最东部的吐格爾明地区和阳霞凹陷地层厚度

最大,最厚处达到近700 m。本文根据钻井、地震解释和反演成果编制了阳霞凹陷阳霞组烃源岩厚度(图9),可以看出阳霞组烃源岩呈北厚南薄、西厚东薄,平面上发育多个次洼,烃源岩局部加厚。在凹陷南部边界,由于侏罗系变薄,烃源岩厚度也相对较小。从整个库车坳陷来看,阳霞凹陷主体处于侏罗系烃源岩较发育区(仅次于北部的吐格爾明地区)。结合侏罗系储层发育特征分析,阳霞凹陷烃源岩与克孜勒努尔组和阳霞组砂岩储层易于形成源-储“三明治”结构,天然气近距离充注,具备发育源-储一体型的油气成藏条件。

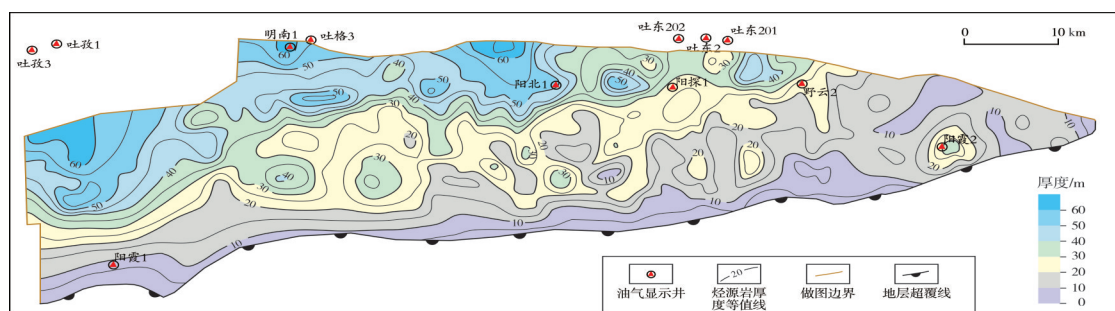


图9 阳霞凹陷侏罗系阳霞组烃源岩厚度图

Fig. 9 Thickness contour map of source rock of the Jurassic Yangxia Formation in Yangxia Sag

3 实钻井侏罗系油气显示特征

目前阳霞凹陷内钻遇侏罗系的探井共有3口,但试油结果均未获工业油气流。

阳探1井位于凹陷北部野云3号背斜构造带上,钻遇的侏罗系厚度为962 m(克孜勒努尔组381 m,阳霞组377 m,阿合组204 m)。分析认为阳探1井失利的原因在于:构造不落实,钻井北部紧邻大断层,气藏遭受破坏。但该钻井揭示侏罗系油气显示活跃,发现油气显示196.0 m/82层,其中克孜勒努尔组96.0 m/36层、阳霞组52.0 m/24层、阿合组25.0 m/13层。克孜勒努尔组和阳霞组试油结论为含气水层。

阳霞1井和阳霞2井均位于阳霞凹陷的南部斜坡,钻探目的是了解阳霞凹陷侏罗系底部砂岩超覆尖灭型圈闭的含油气性。这两口井因过于靠近凹陷的南部边界,紧邻剥蚀面,所以油气保存条件差。但油气显示良好:阳霞1井在阳霞组气测显示油层为7 m/2层,槽面上可见50%的绿黄色油花和10%的气泡;气层为1 m/1层,槽面上可见30%的气泡,集气点火见火焰,火苗高度为3 cm。阳霞2井实钻录井解释克孜勒努尔组差气层17.5 m/7层;解释阳霞组差油气层10.0 m/2层、含气水层18.5 m/2层、差

气层15.0 m/11层,试油结论为含气水层。

总之,阳霞凹陷北部构造带和南部斜坡区均有丰富的油气显示。分析认为,凹陷油气成藏的关键因素在于圈闭有效性和保存条件,下一步的勘探应避免北部深大断裂及凹陷的南部和东部边界,向凹陷的中部和中南部寻找有利目标。

4 勘探方向

4.1 油气成藏模式

阳霞凹陷侏罗系克孜勒努尔组和阳霞组辫状河三角洲下平原—前缘分流河道、水下分流河道和河口砂坝砂体垂向上呈不连续加积,横向上呈透镜状延伸,累计厚度一般为100~120 m。凹陷北部砂体厚度较大,但横向连续性差,凹陷中部至南部斜坡,砂体横向连续性较好。单砂体厚度一般为1~3 m,复合砂体厚度一般为5~20 m^[4]。在地震反演剖面上,克孜勒努尔组和阳霞组砂岩储层与侏罗系煤系烃源岩纵向上相互叠置,形成烃-储“三明治”结构。这种透镜状砂体在凹陷中南部斜坡带上倾尖灭,叠加上覆的白垩系和古近系较好的泥岩顶板,可形成岩性圈闭(图10)。据此建立了克孜勒努尔组和阳霞组自生自储的岩性油气藏成藏模式(图11)。

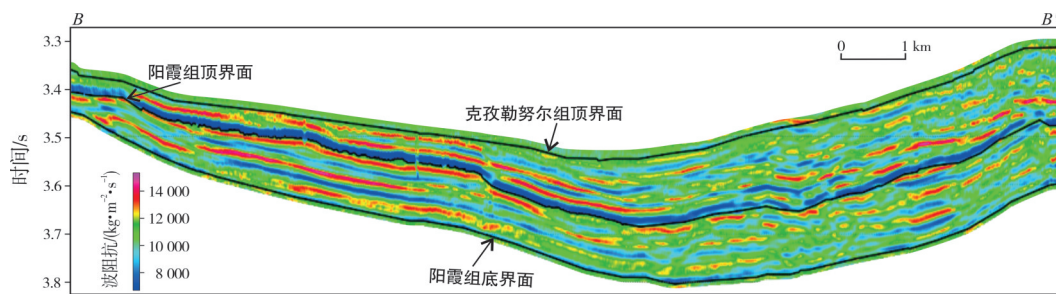


图 10 阳霞凹陷南北向砂体结构地震反演剖面(剖面位置见图 12)

Fig. 10 Seismic inversion profile showing north-south sand body structure in Yangxia Sag (profile location is shown in Fig. 12)

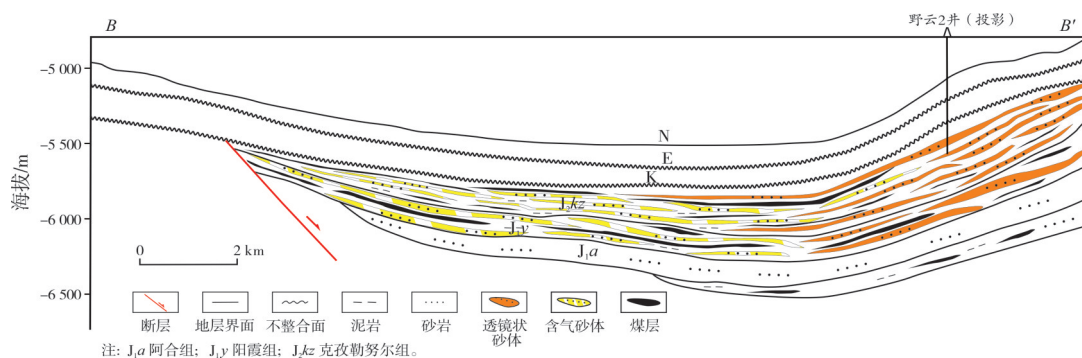


图 11 阳霞凹陷侏罗系岩性油气藏成藏模式(剖面位置见图 12)

Fig. 11 Formation pattern of Jurassic lithological oil and gas reservoirs in Yangxia Sag (profile location is shown in Fig. 12)

4.2 油气成藏有利区

基于阳霞凹陷成藏关键条件分析,阳霞凹陷中南部斜坡是最佳油气成藏区。其依据如下:

(1)长期位于古隆起斜坡低部位,是油气运移的有利指向区;而且远离北部深大断裂,这使该区的油气保存条件较好。

(2)为辫状河三角洲下平原和前缘分布区,发育分流河道、水下分流河道和河口坝砂体,利于形成岩性或地层-岩性圈闭。

(3)烃源岩与储层配置好。侏罗系为优质烃源岩和源-储“三明治”结构,油气源充足且供烃效果好;阳霞组和克孜勒努尔组有效储层发育、物性较好。该区储层埋深在 5 000~6 000 m 之间,较凹陷北部埋藏浅,根据阳探 1 井和阳霞 2 井砂岩储层孔隙度与埋深关系预测,东南部储层孔隙度在 4%~10% 之间。

(4)根据烃源岩发育区、克孜勒努尔组砂地比数据和克孜勒努尔组顶面构造图,在阳霞凹陷中部和南部斜坡带优选 4 个岩性圈闭,圈闭面积总计 161.38 km²(图 12)。

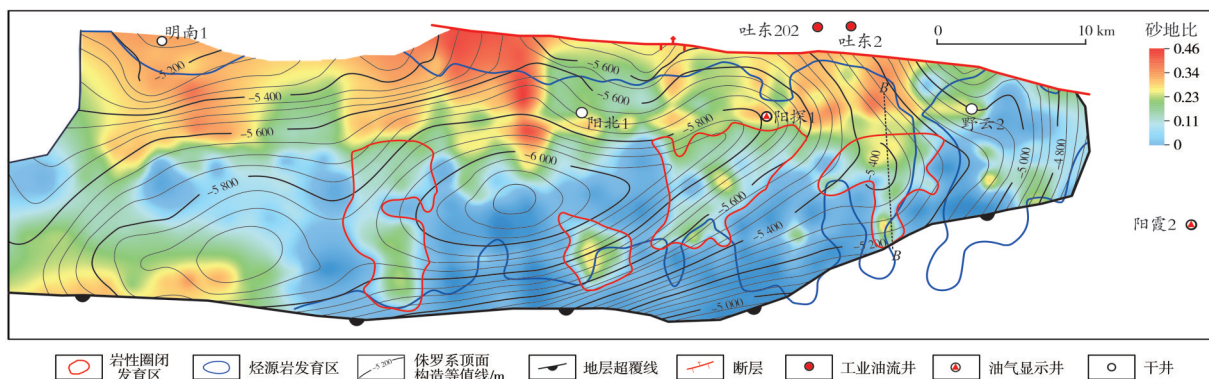


图 12 阳霞凹陷侏罗系克孜勒努尔组岩性圈闭分布图

Fig. 12 Distribution of lithological traps of the Jurassic Kizilenur Formation in Yangxia Sag

5 结 论

库车坳陷阳霞凹陷三叠系—侏罗系发育多套已处于成熟阶段的优质煤系和湖相烃源岩,发育侏罗系克孜勒努尔组和阳霞组辫状河三角洲下平原—前缘相规模有效储层,区域内生、储、盖配置良好。尤其是凹陷的中南部斜坡区域,地层—岩性圈闭发育,且远离深大断裂和地层剥蚀面,油气保存条件较好,是阳霞凹陷侏罗系下一步勘探的有利区带。

参 考 文 献

- [1] 王清华, 张荣虎, 杨宪彰, 等. 库车坳陷东部迪北地区侏罗系阿合组致密砂岩气勘探重大突破及地质意义[J]. 石油学报, 2022, 43(8): 1049–1064.
WANG Qinghua, ZHANG Ronghu, YANG Xianzhang, et al. Major breakthrough and geological significance of tight sandstone gas exploration in Jurassic Ahe Formation in Dibe area, eastern Kuqa Depression[J]. Acta petrolei sinica, 2022, 43(8): 1049–1064.
- [2] 杜金虎, 田军, 李国欣, 等. 库车坳陷秋里塔格构造带的战略突破与前景展望[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 16–23.
DU Jinhu, TIAN Jun, LI Guoxin, et al. Strategic breakthrough and prospect of Qiulitag structural belt in Kuqa Depression[J]. China petroleum exploration, 2019, 24(1): 16–23.
- [3] 易士威, 李明鹏, 范士芝, 等. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏和东秋断层上盘勘探突破方向[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 309–324.
YI Shiwei, LI Mingpeng, FAN Tuzhi, et al. Exploration directions on the Kelasu and East-Qiulitag fault hanging walls, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Oil & gas geology, 2021, 42(2): 309–324.
- [4] 魏国齐, 张荣虎, 智凤琴, 等. 库车坳陷东部中生界构造—岩性地层油气藏形成条件与勘探方向[J]. 石油学报, 2021, 42(9): 1113–1125.
WEI Guoqi, ZHANG Ronghu, ZHI Fengqin, et al. Formation conditions and exploration directions of Mesozoic structural-lithologic stratigraphic reservoirs in the eastern Kuqa Depression[J]. Acta petrolei sinica, 2021, 42(9): 1113–1125.
- [5] 万佳林. 库车坳陷吐格明地区侏罗系油气成藏过程研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
WAN Jialin. Research on Jurassic hydrocarbon accumulation process in Tugelming area, Kuqa Depression[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [6] 张荣虎, 邹伟宏, 陈戈, 等. 塔里木盆地北部下白垩统大型湖相砂坝特征及油气勘探意义[J]. 石油学报, 2018, 39(8): 845–857.
ZHANG Ronghu, ZOU Weihong, CHEN Ge, et al. Characteristics and hydrocarbon exploration significance of the huge Lower Cretaceous lacustrine sand bar in the northern Tarim Basin[J]. Acta petrolei sinica, 2018, 39(8): 845–857.
- [7] 颜彩娜. 塔里木盆地阳霞地区侏罗系阿合组沉积相研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
YAN Caina. Sedimentary facies study of Ahe Formation of Jurassic in Yangxia region of Tarim Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [8] 韩菲. 塔里木盆地阳霞地区侏罗系阳霞组沉积相研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
HAN Fei. Sedimentary facies study of Jurassic Yangxia Formation in Yangxia region of Tarim Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [9] 袁纯, 张惠良, 王波. 大型辫状河三角洲砂体构型与储层特征: 以库车坳陷北部阿合组为例[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(6): 73–84.
YUAN Chun, ZHANG Huiliang, WANG Bo. Sand body configuration and reservoir characteristics of large braided river delta: a case study of Ahe Formation in northern Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Lithologic reservoirs, 2020, 32(6): 73–84.
- [10] 李国欣, 易士威, 林世国, 等. 塔里木盆地库车坳陷东部地区下侏罗统储层特征及其主控因素[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(10): 1506–1517.
LI Guoxin, YI Shiwei, LIN Shiguo, et al. Reservoir characteristics and major factors influencing the reservoir quality of Lower Jurassic in eastern Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural gas geoscience, 2018, 29(10): 1506–1517.
- [11] 王珂, 张荣虎, 余朝丰, 等. 塔里木盆地库车坳陷北部构造带侏罗系阿合组储层特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(5): 623–635.
WANG Ke, ZHANG Ronghu, YU Chaofeng, et al. Characteristics and controlling factors of Jurassic Ahe reservoir of the northern tectonic belt, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural gas geoscience, 2020, 31(5): 623–635.
- [12] 漆家福, 李勇, 吴超, 等. 塔里木盆地库车坳陷收缩构造变形模型若干问题的讨论[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 106–120.
QI Jiafu, LI Yong, WU Chao, et al. The interpretation models and discussion on the contractive structure deformation of Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 106–120.
- [13] 何光玉, 赵庆, 李树新, 等. 塔里木库车盆地中生代原型分析[J]. 地质科学, 2006, 41(1): 44–53.
HE Guangyu, ZHAO Qing, LI Shuxin, et al. Analysis on Mesozoic prototypes of the Kuqa Basin in Tarim, northwestern China[J]. Chinese journal of geology, 2006, 41(1): 44–53.
- [14] 何登发, 周新源, 杨海军, 等. 库车坳陷的地质结构及其对大油气田的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 19–32.
HE Dengfa, ZHOU Xinyuan, YANG Haijun, et al. Geological structure and its controls on giant oil and gas fields in Kuqa Depression, Tarim Basin: a clue from new shot seismic data[J]. Geotectonica et metallogenia, 2009, 33(1): 19–32.
- [15] 张玮, 徐振平, 赵凤全, 等. 库车坳陷东部构造变形样式及演化特征[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(1): 48–53.
ZHANG Wei, XU Zhenping, ZHAO Fengquan, et al. Structural-

- al deformation styles and tectonic evolution characteristics in eastern Kuqa Depression [J]. *Xinjiang petroleum geology*, 2019, 40(1): 48–53.
- [16] 张荣虎, 杨海军, 魏红兴, 等. 塔里木盆地库车坳陷北部构造带中东段中下侏罗统砂体特征及油气勘探意义[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(9): 1243–1252.
- ZHANG Ronghu, YANG Haijun, WEI Hongxing, et al. The sandstone characteristics and hydrocarbon exploration significance of Lower Jurassic in middle east section of northern tectonic belt in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Natural gas geoscience*, 2019, 30(9): 1243–1252.
- [17] 凡闪, 卢玉红, 李玲, 等. 塔里木盆地库车坳陷吐格爾明及周缘地区三叠系—侏罗系烃源岩地球化学特征、分布规律与油气地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(12): 1–17.
- FAN Shan, LU Yuhong, LI Ling, et al. Geochemical characteristics, distribution and petroleum geological significance of Triassic–Jurassic source rocks in the Tugeerming and surrounding area of Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Natural gas geoscience*, 2022, 33(12): 1–17.
- [18] 刘如红, 李剑, 肖中尧, 等. 塔里木盆地库车坳陷吐格爾明地区油气地球化学特征及烃源探讨[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(4): 574–581.
- LIU Ruhong, LI Jian, XIAO Zhongyao, et al. Geochemical characteristics and implication for gas and oil source correlation in the Tugeerming area of the Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. *Natural gas geoscience*, 2019, 30(4): 574–581.

编辑:张润合

Jurassic petroleum geological conditions and exploration direction in Yangxia Sag, eastern Kuqa Depression

ZHI Fengqin, ZHANG Ronghu, YU Chaofeng

Abstract: Kuqa Depression is an important oil and gas exploration area in Tarim Basin, but the understanding of Mesozoic petroleum geological conditions of Yangxia Sag in the east is insufficient, which in turn affects the determination of exploration direction. Based on outcrop, drilling and seismic data, this paper analyzes the petroleum geological conditions of Yangxia Sag from the aspects of tectonic evolution, stratigraphic distribution, hydrocarbon source rock conditions and sedimentary reservoir characteristics, etc.

It is believed that Triassic and Jurassic coal measure and lacustrine source rocks are developed in the Middle–Lower Jurassic in Kuqa Depression, and Yangxia Sag is in the relatively developed area of Jurassic–Triassic source rocks. The organic carbon content of hydrocarbon source rocks is between 2.1% and 6%, which belongs to high-quality hydrocarbon source rocks. The *CPI* value ranges from 1.00 to 1.02, indicating that the hydrocarbon source rock is in the mature–high mature stage. The Middle Jurassic Kizilenur Formation in Yangxia Sag developed braided river delta downstream plain facies and front facies sandstone reservoirs, with the main provenance from the southern Tianshan Mountains in the north and the secondary provenance from Luntai fault uplift in the south. The distributary channel, subaqueous distributary channel and estuarine bar sand bodies in the downstream plain facies–front facies of braided river delta form high-quality reservoirs with porosity of 4%–10% and permeability mainly of $(1-30) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, which belong to class II–III reservoirs. The sandstone reservoirs and the coal measure source rocks of the Kizilenur and Yangxia Formations are superimposed on each other vertically, forming a hydrocarbon–reservoir “sandwich” structure. The sand body pinch out upward to form a lithological trap in the middle and southern slopes of Yangxia Sag, being overlaid by the Cretaceous and Paleogene mudstone cover, forming a self-generating and self-storing oil and gas reservoir model.

The southern boundary of Yangxia Sag developed a sag-controlled fault during the Jurassic deposition period. Still, since the Cretaceous to the present, the tectonic activity is weak, which is favorable for oil and gas preservation and reservoir formation. The rich hydrocarbon shows in the actual wells indicate that the Yangxia Sag has good oil and gas prospect. A series of lithologic traps formed by southward pinching-out lens-shaped sand bodies in the Kizilenur and Yangxia Formations were found in the south-central slope zone of the Yangxia Sag, and the comprehensive analysis suggests that this area is the next key exploration field of the Yangxia Sag.

Key words: reservoir formation conditions; lithological traps; exploration direction; Jurassic; Yangxia Sag; Kuqa Depression

ZHI Fengqin, First author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in research on reservoir geology and oil and gas exploration. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China. ORCID: 0009-0006-6710-7373