

中国石油深层-超深层碎屑岩油气 勘探进展与潜力

宋涛¹, 郑民², 黄福喜¹, 欧阳婧琳¹, 李明鹏¹, 曾繁迪¹, 范晶晶¹, 刘超¹, 刘航宇¹

1 中国石油勘探开发研究院; 2 中国石油油气和新能源分公司

摘要 近期中国石油天然气股份有限公司在深层-超深层碎屑岩勘探领域不断获得多项重大油气发现并落实一批规模储量, 展现出该领域巨大的勘探潜力。基于勘探进展与取得的地质认识, 结合我国陆上含油气盆地的特点, 将深层-超深层碎屑岩领域划分为前陆盆地、断陷盆地和坳陷盆地3种类型, 揭示了深层具有有效烃源岩规模分布、富油更富气, 以及4种成储机制控制深层优质储层发育, 深层成藏要素配置关系好等特征。结合深层碎屑岩的基础地质认识、生烃及资源潜力认识、有效储层分布规律和控藏因素等新认识优选有利区带, 提出未来四大攻关方向, 并基于剩余资源分布特点和勘探认识, 优选3类盆地的深层-超深层碎屑岩领域的十大重点区带作为下一步重点勘探目标。

关键词 深层-超深层; 碎屑岩; 重点领域; 重点区带; 油气勘探; 中国石油

中图分类号: TE132.1⁺1 **文献标识码**: A

引用: 宋涛, 郑民, 黄福喜, 等. 中国石油深层-超深层碎屑岩油气勘探进展与潜力[J]. 海相油气地质, 2024, 29(3): 225-235.
SONG Tao, ZHENG Min, HUANG Fuxi, et al. Exploration progress and potential of oil and gas in deep-ultradeep clastic rocks of PetroChina [J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(3): 225-235.

0 前言

随着勘探程度不断加深, 更深、更古老的层系作为油气勘探的接替领域显得愈发重要。目前全球范围内, 深层-超深层油气勘探日渐受到重视^[1-3]。我国深层-超深层油气资源丰富, 勘探潜力大, 特别是碎屑岩领域, 随着勘探开发理论认识的发展和物探、钻井技术的进步, 深层-超深层油气勘探取得了一系列重要突破^[4-5]。截至2021年底, 中国石油天然气股份有限公司(简称中国石油)在该领域累计探明石油地质储量近6亿吨、天然气地质储量超万亿方。特别是“十三五”以来, 中国石油加大深层-超深层碎屑岩油气勘探开发力度, 聚焦塔里木、准噶尔、河套等重点盆地, 探明了超亿吨石油地质储量的巴彦油田^[6-7]和近8 000亿方天然气地质储量的博孜一大北大气区^[8-9], 为国内油气增储上产奠定了资源基础。

本文根据国内“中西部冷盆, 东部热盆”的地质

特点, 将埋深3 500~4 500 m和大于4 500 m的地层分别作为东部的深层和超深层, 将埋深4 500~6 000 m和大于6 000 m的地层分别作为西部的深层和超深层^[10-11], 基于我国陆上重点盆地深层-超深层碎屑岩领域勘探进展, 分析总结深层-超深层成藏认识, 指出下一步勘探方向与潜力, 以期为勘探部署提供借鉴和依据。

1 近期深层-超深层碎屑岩勘探进展

“十三五”以来, 中国石油在深层-超深层碎屑岩领域的油气勘探成果具有时代跨度大、埋深纵深大、分布盆地广的特点。地层时代上, 深层-超深层碎屑岩勘探在志留系一新近系均有发现; 油气藏埋藏深度上, 东部盆地突破4 600 m, 西部盆地突破8 000 m; 油气分布盆地上, 东部的松辽、渤海湾等盆地, 中部的四川、鄂尔多斯、河套等盆地, 以及西部的塔里木、准噶尔、柴达木、吐哈等盆地均有发现。本文综合考虑盆地构造属性、勘探突破所处

收稿日期: 2023-11-27; 改回日期: 2024-07-28

本文受中国石油天然气股份有限公司科研项目“重点盆地油气综合地质研究与勘探潜力评价”(编号: 2022KT0405)资助

第一作者: 宋涛, 硕士, 高级工程师, 主要从事石油地质学、油气勘探规划部署相关研究工作。通信地址: 100083 北京市海淀区学院路20号; E-mail: st0601@petrochina.com.cn

通信作者: 欧阳婧琳, 硕士, 助理工程师, 主要从事油气勘探部署及石油地质综合研究工作。通信地址: 100083 北京市海淀区学院路20号; E-mail: ouyangjl@petrochina.com.cn

的构造位置,将近期深层-超深层碎屑岩勘探进展分为前陆盆地型、断陷盆地型和坳陷盆地型3种类型来阐述。

1.1 前陆盆地型深层-超深层碎屑岩

前陆盆地主要发育在大陆板块盆山结合部,是世界上油气资源最丰富、发现大油气田最多的盆地

类型之一^[12-13]。我国中西部发育有16个前陆冲断带^[14](图1)。“十三五”以来,中国石油在塔里木盆地库车坳陷博孜一大北区块、秋里塔格构造带以及准噶尔盆地南缘(图1中简称淮南缘)等区带勘探取得重要发现^[15],新增天然气探明地质储量7 608亿方、控制+预测地质储量5 311亿方,实现天山南北两大前陆构造区的油气勘探比翼齐飞。

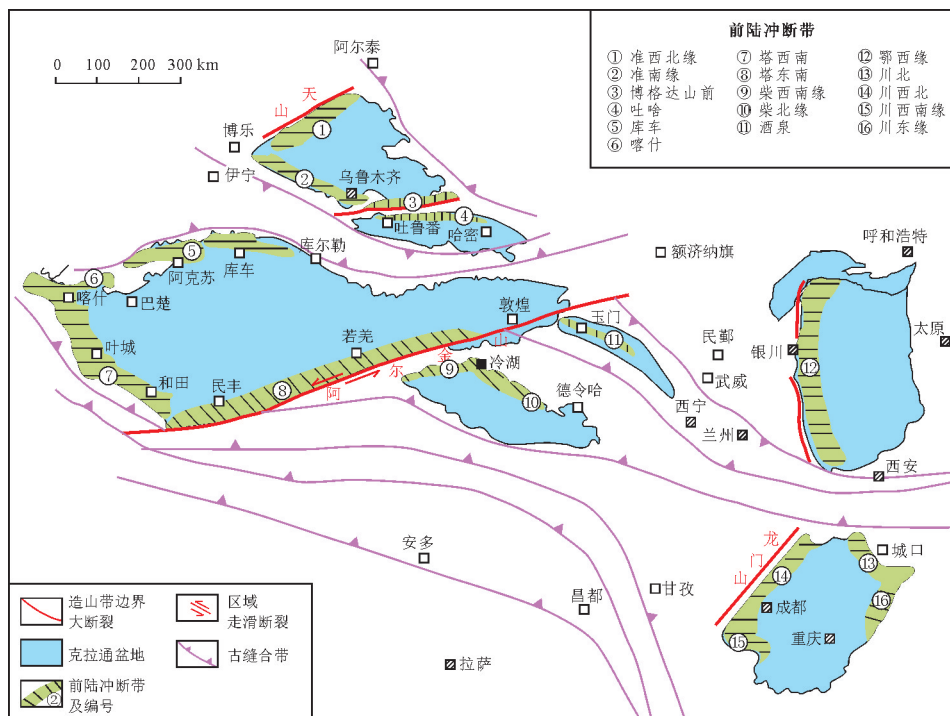


图1 中国中西部主要前陆冲断带分布示意图(据文献[14],修改)

Fig. 1 Sketch map showing the distribution of major foreland thrust belts in west-central China(cited from reference [14], modified)

天山南麓库车坳陷博孜一大北区块逐步形成新的万亿方大气区,秋里塔格构造带获重要突破克拉苏构造带克拉-克深段万亿方大气区的形成,坚定了对具有相似成藏条件的博孜一大北段的勘探信心。“十三五”以来强化地震攻关^[16]和地质研究,对构造空白区、构造转换区、构造叠置区、资料拼接区重新开展处理攻关,梳理断裂体系、厘定构造模型以及评价区带圈闭,在盐下深层巴什基奇克组6 500~8 500 m新发现一系列圈闭^[17-18],集中部署后新发现气藏18个,累计发现气藏22个,落实储量规模气7 017亿方、油6 585万吨,博孜一大北区块目前储备圈闭13个、圈闭资源量3 562亿方。秋里塔格构造带迪那段已获突破,佳木段一东秋段一直是风险勘探和预探的重点,但由于地表条件复杂、地震资料品质较差,一直未获突破。在加强地质研

究和地震处理攻关的基础上,构建逆冲叠瓦构造样式,发现多个圈闭,以创新思路部署东秋8井区高密度三维地震,大幅度提高了地震资料品质,部署上钻中秋1井在巴什基奇克组6 073~6 182 m测试获日产气52.56万方、油16.3方,实现了秋里塔格构造带勘探战略性突破^[19],探明天然气地质储量594亿方、凝析油地质储量207万吨。

天山北麓准噶尔盆地南缘下组合油气勘探获重大突破 准噶尔盆地南缘以中上组合为对象已经发现呼图壁等5个油气田,证实南缘具备油气成藏条件,但由于中上组合构造破碎、储层变化快,因此已发现油气藏规模较小。在南缘下组合寻找大油气田是几代石油人的梦想。近年来瞄准深层大构造,针对性开展成藏要素研究、复杂构造叠前深度偏移处理和钻井完井技术攻关,优选西段高泉背斜部

署高探1井,2019年高探1井清水河组获日产油1 213方、气32.17万方的高产,实现南缘下组合深层勘探的历史性突破^[20],创造了国内陆上碎屑岩单井石油产量的最高纪录。风险勘探中段背斜构造带,呼图壁背斜呼探1井、东湾背斜天湾1井分别在白垩系清水河组7 367~7 382 m、8 066~8 092 m获日产气61.9万方、油106.5方及气75.8万方、油127.2方的高产突破,实现南缘下组合天然气勘探的重大突破^[21],提交预测天然气地质储量1 062亿方、凝析油地质储量1 363万吨,评价南缘中段下组合天然气资源量为2.5万亿方,具备形成万亿方大气田的资源潜力。

1.2 断陷盆地型深层-超深层碎屑岩

断陷盆地在我国东部和北部普遍发育,是我国陆相石油地质理论的发源地,发现并形成了松辽盆地、渤海湾盆地两大油气生产基地。随着勘探的深入,下洼、近源成为近年来的勘探趋势。断陷盆地发育陡坡带扇三角洲和缓坡带曲流河、辫状河三角洲沉积体系,深层-超深层领域广阔。“十三五”以来,中国石油在河套、渤海湾、松辽、海拉尔等盆地

新增探明石油地质储量2.15亿吨、控制+预测石油地质储量3.79亿吨,探明天然气地质储量361亿方、控制+预测天然气地质储量1 770亿方^[22]。

河套盆地洼槽区超深层碎屑岩的石油勘探获重大突破。河套盆地经历了早白垩世反转成盆、古近纪差异伸展拗陷、新近纪强烈伸展断陷、第四纪走滑改造等多期构造运动^[7],早期由于二维地震测网稀疏且品质较差、油气成藏要素研究薄弱,勘探未获实质性突破。2017年开始加强重点地区地震部署和成藏研究,从潜山勘探入手,迅速发现并探明吉兰泰油田,风险勘探临华构造,临华1井、兴华1井钻遇厚油层并获高产,在中浅层累计探明石油地质储量1.35亿吨。为扩大勘探成果,探索洼槽区深层碎屑岩含油气层,在光明构造带、扎格构造带部署河探1井(图2)、扎格1井,分别在古近系临河组6 112.4~6 120.2 m和5 082.6~5 089.8 m获日产油302.4方、367.2方的高产突破^[6],具有近源岩、油藏厚、压力高、产量高的特征。河套盆地兴隆构造带—扎格构造带的深层-超深层碎屑岩展现5亿吨增储前景,开辟了整装规模增储新阵地。

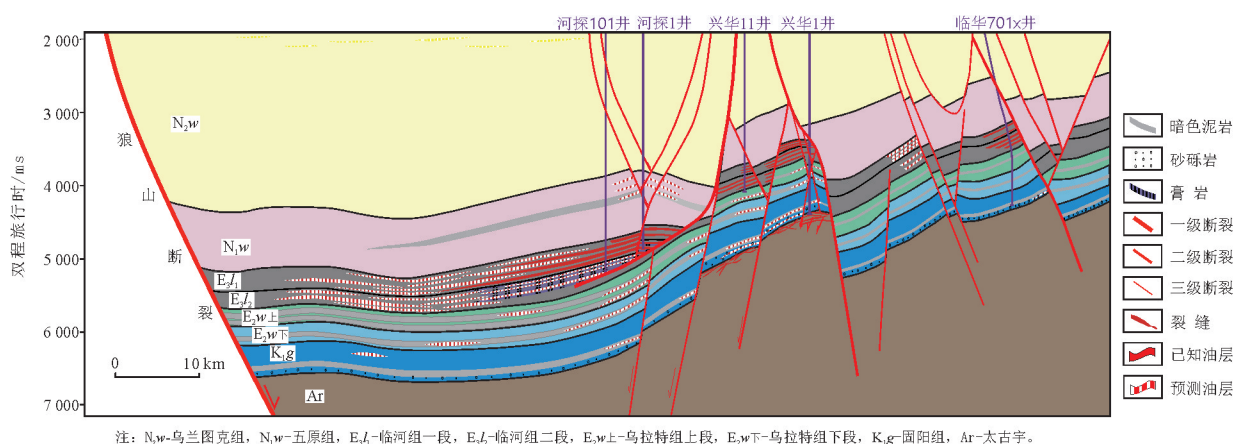


图2 河套盆地兴隆断裂构造带北部成藏模式图(据文献[6],修改)

Fig. 2 Hydrocarbon accumulation model of the northern Xinglong fault structural zone in the Hetao Basin (cited from reference [6], modified)

渤海湾盆地、松辽盆地深层碎屑岩油气勘探取得新进展。“十三五”期间,加强渤海湾盆地富油气凹陷洼槽区石油勘探,沙河街组—东营组深层碎屑岩实现多点开花。辽河油田清水凹陷洼128井在沙河街组一段3 726.2~3 738.7 m日产油60方,冀东油田辽中凹陷秦探1井在东营组三段3 878.6~4 053.8 m日产油61.5方,大港油田唐东9X2井在沙河街组二段4 736~4 758.7 m日产油25.2方,华北油田饶阳凹陷强104X井在沙河街组三段下亚段4 364.6~

4 375.4 m试气日产88.6方。同时,松辽盆地白垩系深层致密气勘探进展顺利,大庆油田徐家围子断陷徐西、徐东、安达、徐南等区带6口探井在沙河子组3 500~5 000 m测试日产气超10万方,吉林油田在德惠、长岭、梨树等断陷的3口井在沙河子组—营城组4 000~5 400 m测试日产气超10万方。

1.3 拗陷盆地型深层-超深层碎屑岩

拗陷盆地型碎屑岩领域主要发育于准噶尔盆

地中二叠统一三叠系,渤海湾盆地新近系、松辽盆地上白垩统上部、鄂尔多斯盆地三叠系—侏罗系等,多发育大型三角洲沉积体系,具备碎屑岩大面积成藏条件。按照前述标准,深层-超深层领域主要发育在准噶尔盆地中央坳陷斜坡区中二叠统一三叠系乌尔禾组、百口泉组等层系。

“十三五”以来,在准噶尔盆地深层-超深层碎屑岩领域,借鉴玛湖凹陷斜坡区岩性油气藏勘探经验,相继在沙湾、东道海子等富烃凹陷取得重要突破,展现盆地级规模勘探潜力,新增控制+预测石油地质储量2.01亿吨^[23-24]。2020年基于高精度三维地震资料持续攻关,针对盆地东部阜康凹陷开展新一轮综合地质研究,风险勘探阜中次级凹槽、阜南次级凹槽,康探1井、康探2井获高产突破。其中康探1井在二叠系上乌尔禾组一段、上乌尔禾组二段和三叠系韭菜园组均获百万方高产油气流,具有高压、高产的特征,突破了碎屑岩深埋条件下难以形成有效储层的传统认识,展现出阜康凹陷多层系立体勘探的潜力,康探1井区上乌尔禾组提交石油预测地质储量1.39亿吨。阜北、阜中、阜南三大凹槽三角洲沉积体系前缘相有利勘探面积超5 000 km²,圈闭资源量达23亿吨,展现

规模增储前景^[25]。

2 深层-超深层碎屑岩油气地质认识

陆上深层-超深层碎屑岩领域已在前陆盆地、断陷盆地和坳陷湖盆均发现规模油气富集区,充分证实深层-超深层具备油气成藏和富集的条件。以下从深层烃源岩、储层和成藏配置入手,探讨深层-超深层碎屑岩油气地质研究所取得的新认识。

(1)深层发育有效烃源岩,富油更富气,资源潜力巨大

我国古生代、中生代均处于全球烃源岩发育的有利构造环境:中生代处于特提斯洋盆西段被动陆缘环境,广泛发育煤系-湖相泥质烃源岩^[26];古生代时期,主要板块处于南、北纬度30°附近,气候湿热,利于有机质的发育和保存。

以前陆盆地冲断带深层为例,其广泛发育煤系与湖相泥质烃源岩,以Ⅲ型干酪根为主,生气强度大。塔里木盆地库车坳陷三叠系—侏罗系煤系、湖相泥质烃源岩的厚度达200~500 m^[27],生气强度高达400×10⁸ m³/km²;准噶尔盆地南缘侏罗系煤系、湖相泥质烃源岩厚度为100~250 m^[20,28-29](图3),中段生气强度大于120×10⁸ m³/km²。

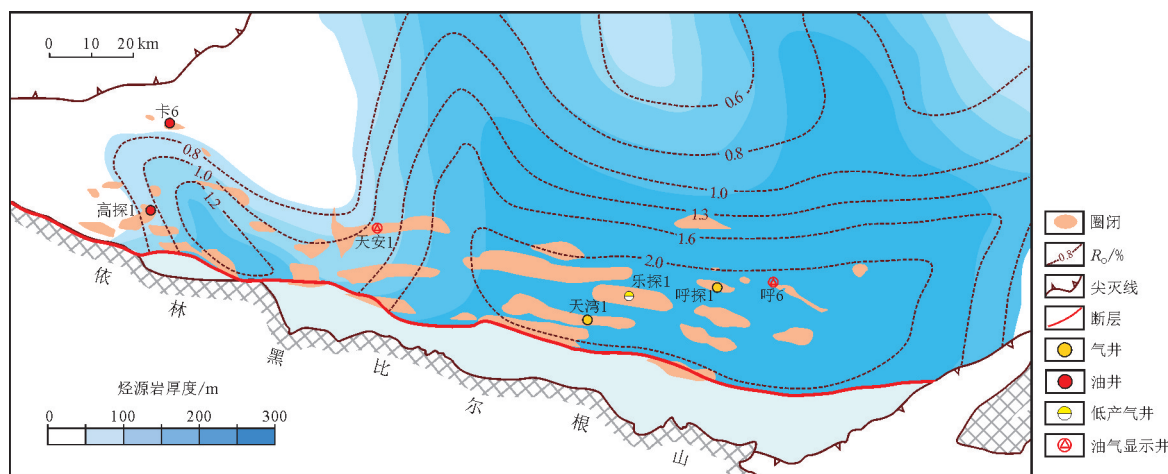


图3 准噶尔盆地南缘侏罗系烃源岩厚度图(据文献[20],修改)

Fig. 3 Thickness map of Jurassic source rocks in the southern margin of Junggar Basin (cited from reference [20], modified)

近年来以煤系地层作为气源岩持续探索,发现了鄂尔多斯盆地上古生界、库车坳陷中生界、松辽盆地徐家围子等多个规模气藏,这些领域煤岩样品的生气潜量分别达到210 mL/g、260 mL/g、270 mL/g。煤系气源岩生气枯竭的成熟度由 R_o 为2.0%(以往观点)延伸到5.5%^[30],生气潜量由200 mL/g(以往观点)

增加到300 mL/g(图4)^[10],基于这些新认识提升了对深层煤系源岩成气潜力的评价,研究成果为在中西部前陆深层寻找大气田奠定了认识基础。

(2)深层碎屑岩发育4种类型成储机制,可以发育优质储层

深层油气聚集的关键在于是否具有有效储层。

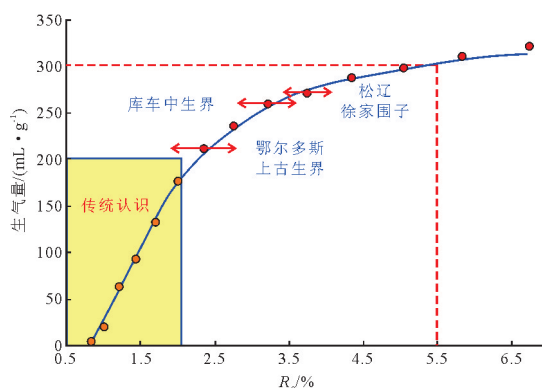


图4 中国煤系烃源岩完整的生气演化序列

Fig. 4 Complete gas generation sequence of coal bearing source rocks in China

以往认为东部盆地深层碎屑岩储层下限为3 500 m左右,西部为7 000 m左右。随着深层-超深层油气勘探和研究的不断深入,储层发育深度下限不断下探^[31-32],主要原因有4方面,即4种类型成储机制控制深层可发育优质储层。

一是早期浅埋、晚期快速深埋与后期构造运动叠加改造条件下,超深层仍可以发育规模、有效碎屑岩储层。以库车坳陷白垩系砂岩储层为例,该套储层纵向叠置、横向连片,厚200~400 m,面积达 1.8×10^4 km²,埋深介于6 000~8 000 m。按照正常匀速埋藏模式,当储层埋深至6 000 m,砂岩储层孔隙度由40%降至7%^[33]。而库车白垩系砂岩储层孔隙度在近8 000 m仍可达8%~10%^[34-35],这主要是由于该套储层早期浅埋,晚期快速埋藏至6 000 m,从物理模拟实验结果来看,砂岩孔隙度由40%仅下降至12%,为

深层-超深层规模有效碎屑岩储层发育奠定了基础。

二是早期烃类充注,深部储层物性得以较好保存。以塔中石炭系砂岩储层为例,塔中4井的砂岩储层埋深3 650 m,为中细粒岩屑石英砂岩,镜下显示油气充注,砂岩储层孔隙度为21%^[36];而邻区塔中17井同层埋深3 821 m,储层为细砂岩,该区无油气充注,孔隙度仅为12%。从塔中地区石炭系砂岩储层孔隙度-深度关系看,油气充注区储层孔隙度明显高于油水界面以下的未充注区,表明早期油气的充注使深部储层物性得以有效保存。

三是高温高压条件下砂岩快速溶蚀,有效储层深度界限下移。以往溶蚀实验温度多小于120°,且在常压条件下进行,近年来随着实验技术水平的提高,可以模拟地下深层温压条件(图5)。在高温(180 °C)、高压(53 MPa)条件下,温度达到150 °C之后,溶蚀速率快速增加,为常温常压下的2~3倍。受这一因素影响,在库车深层发育的长石岩屑砂岩发生溶蚀作用可增孔2%~3%(图5),有效深度下限得以下移^[35]。

四是强挤压应力作用,有利于超深层超压保孔、造缝增渗,有效提升碎屑岩储集物性。成岩物理模拟实验表明,深部储层晚期在侧向挤压作用下导致颗粒堆积-破裂造缝,孔隙可以有效沟通,特别是在前陆复杂构造区,晚期构造侧向挤压强烈,岩石颗粒破裂造缝,大大提升了储层的储渗能力。例如克深一大北地区储层总面孔率演化曲线包含两段式(图6),6 000 m以浅受压实作用原生孔面孔率

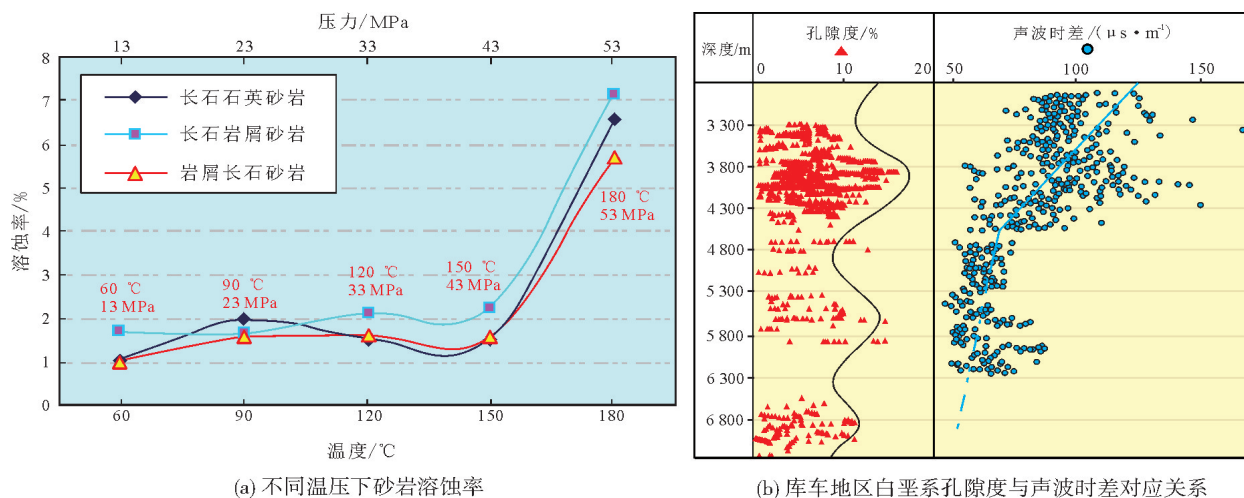
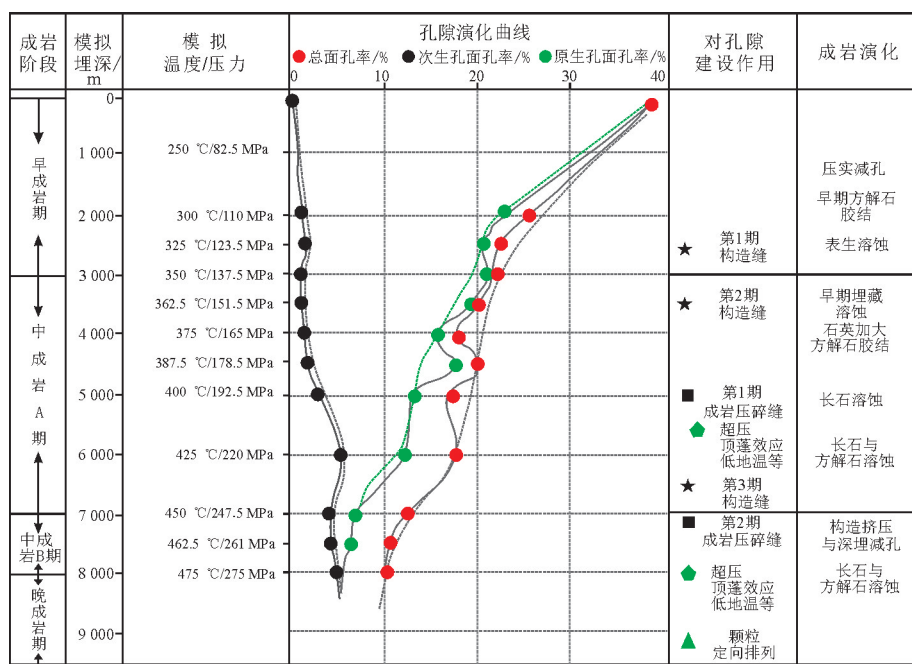


图5 不同温压下砂岩溶蚀率图(a)与库车坳陷白垩系孔隙度与声波对应关系图(b)

Fig. 5 Graph of dissolution rate of sandstone at different temperature and pressure (left) and correlation plot of porosity and interval transit time of Cretaceous in Kuqa Depression (right)



注：孔隙演化曲线的虚线为趋势线。

图6 库车克深—大北地区白垩系储层孔隙演化与埋深物理模拟关系图

Fig. 6 Physical simulation relationship between pore evolution and burial depth of Cretaceous reservoir in Keshen-Dabei area, Kuqa Depression

快速降至10%~15%，6 000 m以深原生孔面孔率持续递减至5%~10%，但超压作用颗粒破裂造缝，次生孔面孔率增长至5%，总面孔率稳定在10%~18%，渗透率由 $(0.2\sim0.5)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 增至 $(0.6\sim0.8)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

深层-超深层储层早期浅埋-晚期快速深埋、烃类充注、高温高压快速溶蚀、强挤压应力作用等多因素综合影响，深层优质储层得以发育^[5]。勘探已证实库车坳陷白垩系深层、准噶尔盆地阜东下斜坡二叠系、河套盆地临河坳陷古近系临河组砂砾岩优质储层的发育均受控于以上4大因素。

(3)前陆冲断带深层受多滑脱冲断体系控制，成藏要素配置关系好，下组合可以找到大油气田

深层碎屑岩在断陷、凹陷湖盆的成藏主要得益于深层优质储层的发育，形成斜坡—凹陷区砂砾岩的岩性-岩性地层油藏，成藏模式与中浅层类似。下文主要分析前陆盆地冲断带成藏要素配置关系。

前陆冲断带发育多滑脱冲断体系，深层构造圈闭成排成带展布。在库车地区，随着地震资料采集处理解释精度的不断提高，地质模型日趋逼近地下地质体。滑脱层模拟实验结果揭示，冲断带深层与冲断作用相关的构造圈闭非常发育。深部滑脱层是重要的区域性盖层。模拟实验揭示，随着埋深增大、温压增高，盐岩和泥岩塑性增加：盐岩的脆性、脆-塑性、塑性的临界埋深分别为600 m、3 000 m(图

7a)；泥岩在埋藏过程中经历由塑性→脆性→塑性的复杂转换^[37](图7b)，但同一密度的泥岩，随着埋深和围压增大，泥岩的抗压强度增大，破裂应变也增大，泥岩塑性增强趋势明显。深部泥岩/盐岩既是滑脱层又是封盖层，封闭能力增强^[38]，因此认为下组合成藏更有效，对其勘探潜力的评价上升。

前陆冲断带深层发育3类成藏模式，均可形成大油气田。一是以库车深层为代表的叠瓦构造型油气成藏模式，冲断带坐落在生烃中心之上、构造圈闭成排成带、含盐地层直接封盖，盐下近源，鳞片体(断背斜、断块、背斜)聚集；近年来在库车发现圈闭近50个，面积超过1 000 km²，圈闭资源量天然气近万亿方。二是以阿尔金山前断裂带为代表的走滑冲断构造型成藏模式，天然气运聚指向区+基岩潜山圈闭+泥岩封盖，油气在断裂交汇处聚集^[39-40]；主要分布在阿尔金山前带、昆北断阶带，目前已发现尖北、东坪、牛东、昆特依等气田和含气构造，探明、控制天然气地质储量1 310亿方。三是以淮南为代表的多滑脱叠置型构造成藏模式，叠置型滑脱层坐落在生烃中心之上，深层背斜叠置发育，侏罗系烃源岩与白垩系优质砂岩储层^[41]组成良好的储盖组合，油源断裂沟通源灶，泥岩滑脱层有效封盖(图8)；近年来高探1井、呼探1井、天湾1井等相继突破，证实该类型成藏有利^[42]。

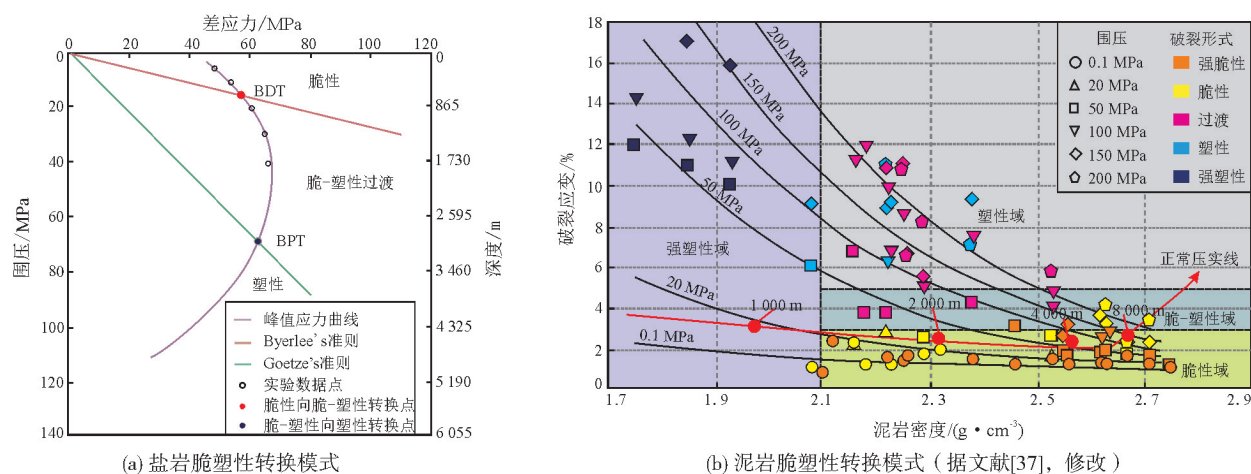


图7 盐岩、泥岩脆塑性转换模式(据文献[37],修改)

Fig. 7 Brittleness-plasticity transition mode of halite and mudstone(cited from reference [37], modified)

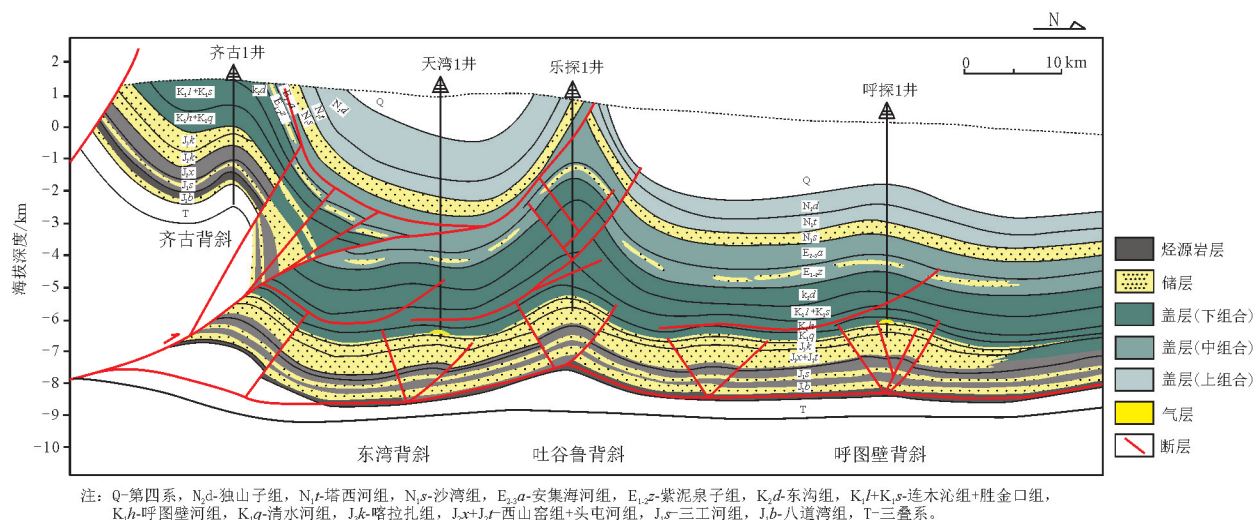


图8 淮南多滑脱叠置型构造藏模式

Fig. 8 Gas accumulation model of multi-slip overlapping structure in the southern Junggar Basin

3 陆上深层-超深层碎屑岩勘探潜力

从目前的勘探和认识来看,虽然深层规模勘探面临诸多挑战,但我国陆上深层-超深层有资源、有领域、有目标,具备加快发展的地质条件和资源基础,预计未来深层-超深层油气战略地位将会进一步提升。

3.1 深层-超深层规模勘探面临的挑战与攻关重点

中国深层-超深层地层时代老、构造演化复杂,与勘探相对成熟的陆相中浅层不同,深层-超深层油气勘探尚处于早期阶段,通过对近年来深层-超深层油气勘探成效进行评价分析,进一步明确规模

勘探面临的挑战与未来攻关的重点方向。

一是深层-超深层埋藏深、地层古老,地质结构认识不清,有利成藏组合确定难,需加强深层地质结构、沉积充填与构造演化过程的攻关,确定有利成藏组合,落实成藏组合平面分布;二是发育多类烃源灶、多途径生烃,资源潜力客观评价难,需要加强主力烃源灶分布与深层资源条件分析,客观评价深层资源潜力,确定资源有利富集区;三是规模储层形成、保持机制尚在探索,有效储层空间分布预测难,需强化不同类型储层形成、保持机制与分布规律研究,落实规模有效储层纵向层系分布与平面展布;四是储层非均质性强,油气藏形成与分布复杂,规模勘探目标选择难,需加强油气藏形成控制

因素、保存机制与目标评价研究,优选重点领域,落实有利区带,确定钻探目标。

3.2 陆上深层-超深层碎屑岩油气资源基础与重点区带增储潜力

我国陆上深层-超深层碎屑岩储层资源潜力大,近年来在塔里木盆地克拉苏构造带、准噶尔盆地南缘等区带取得了重要发现和突破,是中国石油未来油气勘探的重要领域。“十三五”油气资源评表明,深层-超深层资源量石油为200亿吨、天然气为41万亿方,剩余地质资源量石油为141亿吨、天然气为35万亿方,其中碎屑岩领域剩余石油50亿吨左右,天然气15万亿方左右,主要集中在塔里木、准噶尔、四川、渤海湾、松辽等含油气盆地。

近年来,油气勘探实践证实深层-超深层碎屑岩领域已成为中国石油近期及未来增储上产的重要领域。从剩余资源分布、勘探认识程度、勘探发展潜力等方面综合考虑,前陆盆地型、裂陷盆地型和坳陷盆地型3类盆地的深层-超深层碎屑岩及其十大重点区带仍是中国石油未来勘探重点领域,具有良好勘探潜力。前陆盆地型重点勘探区带为塔里木盆地库车山前深层、塔西南山前深层,准噶尔盆地南缘下组合,其资源潜力石油为8.22亿吨、天然气为5.65万亿方。裂陷盆地型重点勘探区带为渤海湾盆地歧口凹陷滨海斜坡、南堡凹陷南斜坡和松辽盆地古龙、长岭断陷,其资源潜力石油为9.63亿吨、天然气为1.23万亿方。坳陷盆地型重点勘探区带为准噶尔盆地环中央坳陷带斜坡区二叠系、三叠系,柴达木盆地环扎哈泉新近系,四川盆地川西坳陷带须家河组,其资源潜力石油为12亿吨、天然气为0.5万亿方。

4 结 论

(1)中国前陆盆地、断陷盆地和坳陷盆地3类盆地的深层-超深层碎屑岩领域具备油气成藏和富集的条件,展示深层-超深层碎屑岩领域油气勘探具有巨大潜力。

(2)深层-超深层发育古生代—中生代有效烃源岩,同时发育早期浅埋—晚期快速深埋、早期烃类充注、高温高压快速溶蚀、超压保孔造缝等4种成储机制控制形成的有效碎屑岩储层,在前陆型盆地还发育叠瓦构造型、走滑冲断构造型、多滑脱叠置型3

种有利成藏模式,成藏要素配置优越。

(3)深层-超深层领域剩余资源多,勘探潜力大,优选前陆型、断陷型、坳陷型三大类重点盆地的库车山前深层和准噶尔南缘下组合等十大重点区带作为下一步勘探的目标。

参 考 文 献

- [1] 贾承造, 庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1457-1469.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories [J]. Acta petrolei sinica, 2015, 36(12): 1457-1469.
- [2] 贾承造. 含油气盆地深层-超深层油气勘探开发的科学技术问题[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 1-12.
JIA Chengzao. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation [J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2023, 47(5): 1-12.
- [3] DUTTON S P, LOUCKS R G. Diagenetic controls on evolution of porosity and permeability in lower tertiary Wilcox sandstones from shallow to ultradeep (200-6700 m) burial, Gulf of Mexico Basin, U.S.A [J]. Marine and petroleum geology, 2010, 27(1): 69-81.
- [4] 李阳, 薛兆杰, 程喆, 等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 45-57.
LI Yang, XUE Zhaojie, CHENG Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China [J]. China petroleum exploration, 2020, 25(1): 45-57.
- [5] 操应长, 远光辉, 杨海军, 等. 含油气盆地深层-超深层碎屑岩油气勘探现状与优质储层成因研究进展[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 112-140.
CAO Yingchang, YUAN Guanghui, YANG Haijun, et al. Current situation of oil and gas exploration and research progress of the origin of high-quality reservoirs in deep-ultra-deep clastic reservoirs of petroliferous basins [J]. Acta petrolei sinica, 2022, 43(1): 112-140.
- [6] 张锐锋, 何海清, 朱庆忠, 等. 河套盆地临河坳陷石油地质特征与油气富集规律[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 695-705.
ZHANG Ruifeng, HE Haiqing, ZHU Qingzhong, et al. Petroleum geological features and hydrocarbon enrichment of Linhe Depression in Hetao Basin, NW China [J]. Petroleum exploration and development, 2023, 50(4): 695-705.
- [7] 张锐锋, 何海清, 陈树光, 等. 河套盆地临河坳陷石油地质新认识与重大发现[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(6): 1-12.
ZHANG Ruifeng, HE Haiqing, CHEN Shuguang, et al. New understandings of petroleum geology and great discovery in the Linhe Depression, Hetao Basin [J]. China petroleum exploration, 2020, 25(6): 1-12.
- [8] 魏国齐, 王俊鹏, 曾联波, 等. 克拉苏构造带盐下超深层储

- 层的构造改造作用与油气勘探新发现[J]. 天然气工业, 2020, 40(1): 20–30.
- WEI Guoqi, WANG Junpeng, ZENG Lianbo, et al. Structural reworking effects and new exploration discoveries of subsalt ultra-deep reservoirs in the Kelasu tectonic zone [J]. Natural gas industry, 2020, 40(1): 20–30.
- [9] 杨学文, 王清华, 李勇, 等. 库车前陆冲断带博孜—大北万亿方大气区的形成机制[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 175–187.
- YANG Xuewen, WANG Qinghua, LI Yong, et al. Formation mechanism of the Bozi–Dabei trillion cubic natural gas field, Kuqa foreland thrust belt [J]. Earth science frontiers, 2022, 29(6): 175–187.
- [10] 李剑, 余源琦, 高阳, 等. 中国陆上深层—超深层天然气勘探领域及潜力[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(4): 403–417.
- LI Jian, SHE Yuanqi, GAO Yang, et al. Onshore deep and ultra-deep natural gas exploration fields and potentials in China [J]. China petroleum exploration, 2019, 24(4): 403–417.
- [11] 郭旭升, 胡东风, 黄仁春, 等. 四川盆地深层—超深层天然气勘探进展与展望[J]. 天然气工业, 2020, 40(5): 1–14.
- GUO Xusheng, HU Dongfeng, HUANG Renchun, et al. Deep and ultra-deep natural gas exploration in the Sichuan Basin: progress and prospect [J]. Natural gas industry, 2020, 40(5): 1–14.
- [12] 何登发, 李德生, 王成善, 等. 中国沉积盆地深层构造地质学的研究进展与展望[J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 219–233.
- HE Dengfa, LI Desheng, WANG Chengshan, et al. Advances and challenge of structural geology of deep sedimentary basins in China [J]. Earth science frontiers, 2017, 24(3): 219–233.
- [13] 蔚远江, 杨涛, 郭彬程, 等. 中国前陆冲断带油气勘探、理论与技术主要进展和展望[J]. 地质学报, 2019, 93(3): 545–564.
- YU Yuanjiang, YANG Tao, GUO Bincheng, et al. Major advances and outlook for oil and gas exploration, theory and technology of foreland thrust belts in China [J]. Acta geologica sinica, 2019, 93(3): 545–564.
- [14] 管树巍, 何登发, 雷永良, 等. 中国中西部前陆冲断带运动学分类、模型与勘探领域[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 66–78.
- GUAN Shuwei, HE Dengfa, LEI Yongliang, et al. Kinematic classification, structural modeling and prospective fields of the foreland thrust belts in Midwest China [J]. Petroleum exploration and development, 2013, 40(1): 66–78.
- [15] 何海清, 范土芝, 郭绪杰, 等. 中国石油“十三五”油气勘探重大成果与“十四五”发展战略[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 17–30.
- HE Haiqing, FAN Tuzhi, GUO Xujie, et al. Major achievements in oil and gas exploration of PetroChina during the Thirteenth Five-Year Plan period and its development strategy for the Fourteenth Five-Year Plan [J]. China petroleum exploration, 2021, 26(1): 17–30.
- [16] 赵邦六, 董世泰, 曾忠, 等. 中国石油“十三五”物探技术进展及“十四五”发展方向思考[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 108–120.
- ZHAO Bangliu, DONG Shitai, ZENG Zhong, et al. Geophysical prospecting technology progress of PetroChina in the Thirteenth Five-Year Plan period and development direction consideration in the Fourteenth Five-Year Plan period [J]. China petroleum exploration, 2021, 26(1): 108–120.
- [17] 赖锦, 肖露, 赵鑫, 等. 深层—超深层优质碎屑岩储层成因与测井评价方法: 以库车坳陷白垩系巴什基克组为例[J]. 石油学报, 2023, 44(4): 612–625.
- LAI Jin, XIAO Lu, ZHAO Xin, et al. Genesis and logging evaluation of deep to ultra-deep high-quality elastic reservoirs: a case study of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa Depression [J]. Acta petrolei sinica, 2023, 44(4): 612–625.
- [18] 徐珂, 田军, 杨海军, 等. 塔里木盆地库车坳陷超深层现今地应力对储层品质的影响及实践应用[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(1): 13–23.
- XU Ke, TIAN Jun, YANG Haijun, et al. Effects and practical applications of present-day in-situ stress on reservoir quality in ultra-deep layers of Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Natural gas geoscience, 2022, 33(1): 13–23.
- [19] 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.
- [20] 杜金虎, 支东明, 李建忠, 等. 准噶尔盆地南缘高探1井重大发现及下组合勘探前景展望[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(2): 205–215.
- DU Jinhu, ZHI Dongming, LI Jianzhong, et al. Major breakthrough of Well Gaotan 1 and exploration prospects of lower assemblage in southern margin of Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum exploration and development, 2019, 46(2): 205–215.
- [21] 王启祥, 梁宝兴, 刘欢, 等. 呼探1井清水河组气藏流体相态特征及气藏类型[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(6): 709–713.
- WANG Qixiang, LIANG Baoxing, LIU Huan, et al. Fluid phases and gas reservoirs of Qinsuihe Formation in Well Hutan-1 [J]. Xinjiang petroleum geology, 2021, 42(6): 709–713.
- [22] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 断陷盆地注槽聚油理论的发展与勘探实践: 以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 1092–1102.
- ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Development and exploration practice of the concept of hydrocarbon accumulation in rifted-basin troughs: a case study of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum exploration and development, 2018, 45(6): 1092–1102.
- [23] 唐勇, 雷德文, 曹剑, 等. 准噶尔盆地二叠系全油气系统与

- 源内天然气勘探新领域[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(6): 654-662.
- TANG Yong, LEI Dewen, CAO Jian, et al. Total petroleum system and inner-source natural gas exploration in Permian Strata of Junggar Basin [J]. Xinjiang petroleum geology, 2022, 43(6): 654-662.
- [24] 张志杰, 周川闽, 袁选俊, 等. 准噶尔盆地二叠系源-汇系统与古地理重建[J]. 地质学报, 2023, 97(9): 3006-3023.
- ZHANG Zhijie, ZHOU Chuanmin, YUAN Xuanjun, et al. Source-to-sink system and palaeogeographic reconstruction of Permian in Junggar Basin, Northwestern China[J]. Acta geologica sinica, 2023, 97(9): 3006-3023.
- [25] 何海清, 支东明, 唐勇, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷康探1井重大突破及意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 1-11.
- HE Haiqing, ZHI Dongming, TANG Yong, et al. A great discovery of Well Kangtan 1 in the Fukang Sag in the Junggar Basin and its significance [J]. China petroleum exploration, 2021, 26(2): 1-11.
- [26] 钱大都, 魏斌贤, 李任, 等. 中国煤炭资源总论[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- QIAN Dadou, WEI Binxian, LI Ren, et al. Summary of China's coal resources [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [27] 王飞宇, 杜治利, 张水昌, 等. 塔里木盆地库车坳陷烃源灶特征和天然气成藏过程[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(4): 431-439.
- WANG Feiyu, DU Zhili, ZHANG Shuichang, et al. Source kitchen and natural gas accumulation in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Xinjiang petroleum geology, 2009, 30(4): 431-439.
- [28] 王绪龙, 支东明, 王屿涛, 等. 准噶尔盆地烃源岩与油气地球化学特征[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- WANG Xulong, ZHI Dongming, WANG Yutao, et al. Organic geochemistry of source rocks and hydrocarbons in the Junggar Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [29] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地油气源、油气分布与油气系统[J]. 地质学报, 2016, 90(3): 421-450.
- CHEN Jianping, WANG Xulong, DENG Chunping, et al. Oil and gas source, occurrence and petroleum system in the Junggar Basin, Northwest China [J]. Acta geologica sinica, 2016, 90(3): 421-450.
- [30] 王招明. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏盐下深层大气田形成机制与富集规律[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(2): 153-166.
- WANG Zhaoming. Formation mechanism and enrichment regularities of Kelasu subsalt deep large gas field in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Natural gas geoscience, 2014, 25(2): 153-166.
- [31] TISSOT B P, WEITE D H. Petroleum formation and occurrence: a new approach to oil and gas exploration[M]. Heidelberg: Springer, 1978.
- [32] 张光亚, 马锋, 梁英波, 等. 全球深层油气勘探领域及理论技术进展[J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1156-1166.
- ZHANG Guangya, MA Feng, LIANG Yingbo, et al. Domain and theory-technology progress of global deep oil & gas exploration[J]. Acta petrolei sinica, 2015, 36(9): 1156-1166.
- [33] 高志勇, 王晓琦, 李建明, 等. 库车坳陷克拉苏构造带白垩系储层孔喉组合类型定量表征与展布[J]. 石油学报, 2018, 39(6): 645-659.
- GAO Zhiyong, WANG Xiaqi, LI Jianming, et al. Quantitative characterization and distribution of pore throat assemblages of Cretaceous reservoir in the Kelasu tectonic belt, Kuqa Depression [J]. Acta petrolei sinica, 2018, 39(6): 645-659.
- [34] 田军, 杨海军, 吴超, 等. 博孜9井的发现与塔里木盆地超深层天然气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2020, 40(1): 11-19.
- TIAN Jun, YANG Haijun, WU Chao, et al. Discovery of Well Bozi 9 and ultra-deep natural gas exploration potential in the Kelasu tectonic zone of the Tarim Basin [J]. Natural gas industry, 2020, 40(1): 11-19.
- [35] 曾庆鲁, 莫涛, 赵继龙, 等. 7000 m以深优质砂岩储层的特征、成因机制及油气勘探意义:以库车坳陷下白垩统巴什基奇克组为例[J]. 天然气工业, 2020, 40(1): 38-47.
- ZENG Qinglu, MO Tao, ZHAO Jilong, et al. Characteristics, genetic mechanism and oil & gas exploration significance of high-quality sandstone reservoirs deeper than 7000 m: a case study of the Bashijiqi Formation of Lower Cretaceous in the Kuqa Depression [J]. Natural gas industry, 2020, 40(1): 38-47.
- [36] 江同文, 徐朝晖, 徐怀民, 等. 塔中低凸起石炭系网毯式油气成藏体系结构及输导体系[J]. 石油科学通报, 2017, 2(2): 176-186.
- JIANG Tongwen, XU Chaohui, XU Huaimin, et al. Mesh-work-carpet structural petroleum accumulation and transportation systems of the Carboniferous in the central Tarim Uplift [J]. Petroleum science bulletin, 2017, 2(2): 176-186.
- [37] 鲁雪松, 柳少波, 田华, 等. 深层背斜圈闭中泥岩盖层完整性评价方法及其应用:以四川盆地川中地区震旦系气藏为例[J]. 石油学报, 2021, 42(4): 415-427.
- LU Xuesong, LIU Shaobo, TIAN Hua, et al. An evaluation method for the integrity of mudstone caprock in deep anticlinal traps and its application: a case study of the Sinian gas reservoirs in the central Sichuan Basin [J]. Acta petrolei sinica, 2021, 42(4): 415-427.
- [38] 王招明, 李勇, 谢会文, 等. 库车前陆盆地超深层大油气田形成的地质认识[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(1): 37-43.
- WANG Zhaoming, LI Yong, XIE Huiwen, et al. Geological understanding on the formation of large-scale ultra-deep oil-gas field in Kuqa foreland basin [J]. China petroleum exploration, 2016, 21(1): 37-43.
- [39] 孙秀建, 阎存凤, 张永庶, 等. 柴达木盆地阿尔金山前基岩气藏成藏条件分析[J]. 特种油气藏, 2015, 22(1): 75-78.
- SUN Xiujian, YAN Cunfeng, ZHANG Yongshu, et al. Analysis on accumulation conditions of basement gas reservoir of Altyn-Tagh Front, Qaidam Basin [J]. Special oil & gas reser-

- voirs, 2015, 22(1): 75–78.
- [40] 田光荣, 白亚东, 裴明利, 等. 柴达木盆地阿尔金山前东段输导体系及其控藏作用[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(3): 348–357.
- TIAN Guangrong, BAI Yadong, PEI Mingli, et al. The transport system and its control on reservoir formation in the eastern front of the Altun Mountain, Qaidam Basin [J]. Natural gas geoscience, 2020, 31(3): 348–357.
- [41] 郭华军, 司学强, 袁波, 等. 准噶尔盆地南缘中段超深层相对优质砂岩储层发育特征及主控因素[J]. 海相油气地质, 2022, 27(3): 313–324.
- GUO Huajun, SI Xueqiang, YUAN Bo, et al. The characteristics and main controlling factors of ultra-deep sandstone reservoir in the middle part of the southern margin of Junggar Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2022, 27(3): 313–324.
- [42] 高崇龙, 王剑, 靳军, 等. 前陆冲断带深层储集层非均质性及油气差异聚集模式: 以准噶尔盆地南缘西段白垩系清水河组碎屑岩储集层为例[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 322–332.
- GAO Chonglong, WANG Jian, JIN Jun, et al. Heterogeneity and differential hydrocarbon accumulation model of deep reservoirs in foreland thrust belts: a case study of deep Cretaceous Qingshuihe Formation clastic reservoirs in southern Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum exploration and development, 2023, 50(2): 322–332.

编辑:黄革萍

Exploration progress and potential of oil and gas in deep-ultradeep clastic rocks of PetroChina

SONG Tao¹, ZHENG Min², HUANG Fuxi¹, OUYANG Jinglin¹, LI Mingpeng¹, ZENG Fandi¹, FAN Jingjing¹, LIU Chao¹, LIU Hangyu¹

1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development; 2. PetroChina Oil, Gas & New Energies Company

Abstract: The PetroChina has continuously made a number of major oil and gas discoveries and implemented a number of large-scale reserves in the field of deep-ultradeep clastic rocks, demonstrating the huge exploration potential in this field. Based on the exploration progress and geological cognition obtained, combined with the characteristics of onshore oil and gas basins in China, the deep-ultradeep clastic rock domain could be divided into three types: foreland basin, graben basin and depression basin, and the scale distribution of deep effective source rocks and the characteristics of riching in oil especially gas are revealed. The new recognitions that four formation mechanisms control the development of deep high-quality clastic reservoirs and deep reservoir-forming factors are well configured are also proposed from the research. Combining the basic geological understanding of deep clastic rocks, source rock and resource potential, effective reservoir distribution and reservoir-controlling factors of deep clastic rocks, four major directions for future research are proposed: (1) Strengthen research on deep geological structure, sedimentary filling and tectonic evolution, determine favorable reservoir combination and their plane distribution. (2) Strengthen the evaluation of main hydrocarbon source rock distribution, and objectively estimate the deep resource potential, then determine the favorable resource enrichment area. (3) Strengthen researches on the formation, preservation mechanism and distribution law of different types of reservoirs, and implement the vertical layer distribution and plane distribution of large-scale effective reservoirs. (4) Strengthen analysis of the control factors, preservation mechanism, and trap evaluation of oil and gas reservoirs, implement favorable zones from priority areas, and determine drilling targets. Based on the distribution characteristics of the remaining resources and exploration understanding, ten zones in the deep-ultradeep clastic rock field of the three types of basins are selected as the next key exploration targets. The estimated resource potential is nearly 3 billion tons of oil and over 7 trillion cubic meters of natural gas.

Key words: deep-ultradeep layer; clastic rocks; key fields; key plays; oil-gas exploration; PetroChina

SONG Tao, First author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in petroleum geology, oil and gas exploration planning and deployment. Add: No. 20 Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing 100083, China. E-mail: st0601@petrochina.com.cn

OUYANG Jinglin, Corresponding author: MSc, Assistant Engineer, mainly engaged in petroleum geology, oil and gas exploration deployment. Add: No. 20 Xueyuan Rd., Haidian District, Beijing 100083, China. E-mail: ouyangjl@petrochina.com.cn