

塔里木盆地哈拉哈塘奥陶系缝洞型碳酸盐岩油田的勘探发现与评价探明

杨海军, 张银涛, 关宝珠, 李飞, 蔡泉

中国石油塔里木油田公司

摘要 塔里木盆地塔北隆起哈拉哈塘油田发现于2009年,是塔里木盆地碳酸盐岩原油增储上产的重要领域。哈拉哈塘油田具有复杂的油气成藏过程与油气分布,地质认识、勘探指导思路历经多次转变,经历了碎屑岩、礁滩体、层间岩溶与断控岩溶等多种类型油气藏勘探阶段。通过油田的勘探历程与勘探开发生产资料的综合分析,认识到受断裂、岩溶和不整合面等多因素控制的缝洞型储层是油气赋存的主要场所,走滑断裂控制了油气的分布与富集,油田具有复杂的油气成藏与分布规律。哈拉哈塘油田的勘探实践表明:优越的石油地质条件是形成大油田的基础,地质认识的突破是发现复杂大油田的关键,物探技术进步是复杂油田勘探开发的保障,勘探开发一体化是碳酸盐岩快速增储上产的有效途径。该案例研究对国内外类似的缝洞型碳酸盐岩油田的勘探开发具有重要借鉴意义。

关键词 碳酸盐岩;缝洞型;油气勘探;奥陶系;哈拉哈塘;塔里木盆地

中图分类号:TE132.1 **文献标识码**:A

0 前言

哈拉哈塘地区的油气勘探始于20世纪90年代,经历了20余年艰难曲折的探索。2006年,通过重新认识区块构造背景,将勘探方向从石炭系碎屑岩转向奥陶系碳酸盐岩;2009年,利用三维地震资料部署H7井获得成功,发现了哈拉哈塘奥陶系缝洞型碳酸盐岩油田;随后,通过地质认识的不断深化和地震技术的不断进步,实现哈拉哈塘油田的连片探明。2014年,建成了百万吨级的哈拉哈塘油田。

本文对哈拉哈塘奥陶系碳酸盐岩油田勘探开发历程进行了全面回顾,对油田的地质条件和成藏富集规律进行了系统分析,对勘探技术、勘探思路和勘探经验进行了深入总结,这将进一步丰富海相碳酸盐岩油气地质理论和勘探技术,为我国海相碳酸盐岩油气田勘探开发的不断深入提供借鉴和指导。

1 油田概况

哈拉哈塘奥陶系碳酸盐岩油田位于新疆维吾

尔自治区阿克苏地区沙雅县境内,地处塔克拉玛干沙漠北缘的绿洲—戈壁地区。油田构造位置位于塔北隆起轮南低凸起的西斜坡,北邻轮台凸起,西邻英买力低凸起,奥陶系向西、向南倾没(图1,图2),是塔北隆起奥陶系潜山向西延伸的鼻状构造的一部分^[1-2]。油田属轮古—塔河—哈拉哈塘—英买力奥陶系碳酸盐岩特大型油田的一部分。哈拉哈塘油田自2009年发现以来,主体于2012—2014年先后探明,累计探明含油面积1 322.81 km²。目前,油田实现了勘探持续突破,油田范围向南、向西不断扩大,已建成120×10⁴ t产能规模。油田基本参数见表1。

哈拉哈塘油田主力层系为奥陶系一间房组,埋深6 300~8 000 m。油藏类型为受断裂和岩溶共同控制的碳酸盐岩缝洞型油藏^[3-5],吐木休克组泥灰岩及桑塔木组巨厚泥岩与一间房组砂屑灰岩组成有利的储盖组合(图3),油气富集与油水分布受局部构造控制不明显,大型走滑断裂对油气富集具有明显的控制作用^[6-8]。

收稿日期:2022-06-30;改回日期:2022-12-21;网络出版日期:2023-04-13

本文受中国石油天然气股份有限公司科技重大专项“塔北碳酸盐岩勘探开发技术研究与应用”(编号:2015E-1805)和“缝洞型碳酸盐岩油气藏效益开发关键技术研究与应用”(编号:2018E-1806)资助

第一作者:杨海军,博士,教授级高级工程师,主要从事塔里木盆地油气勘探方面的研究工作。通信地址:841000 新疆库尔勒石化大道26号;E-mail:yanghjun-tlm@petrochina.com.cn

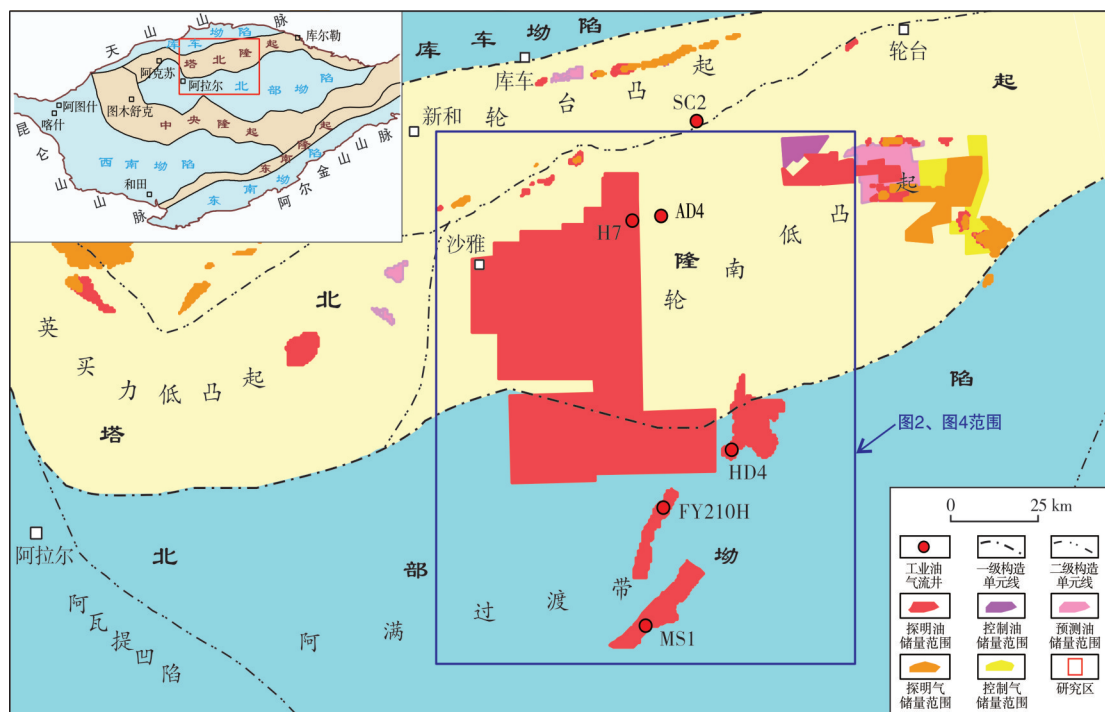


图1 塔里木盆地哈拉哈塘油田区域构造位置图

Fig. 1 Tectonic location of Halahatang Oilfield in Tarim Basin

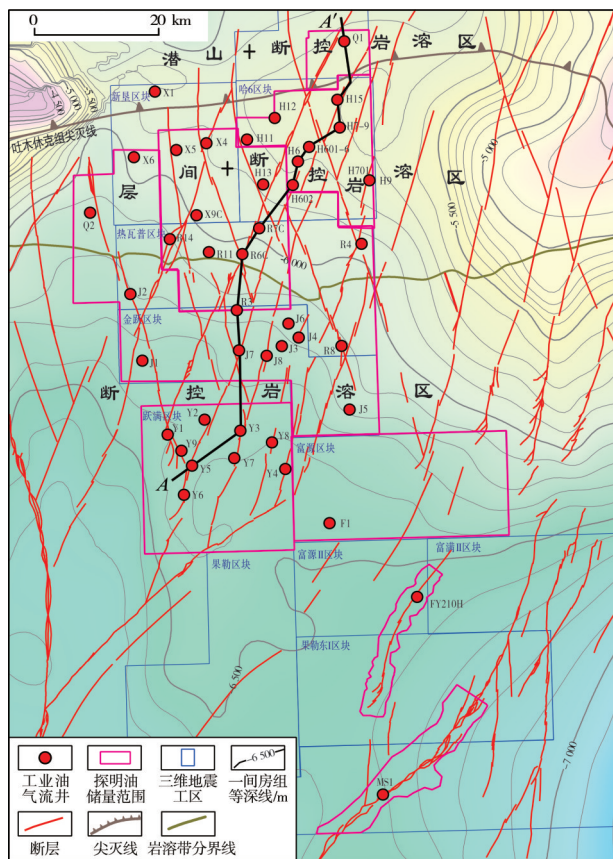


图2 塔里木盆地哈拉哈塘油田构造图

Fig. 2 Structural map of Halahatang Oilfield in Tarim Basin

2 油田勘探和发现历程

塔里木盆地哈拉哈塘地区的油气勘探始于1990年,前期以利用二维地震资料寻找志留系、石炭系碎屑岩圈闭为主,均以失利告终。2009年利用三维地震资料部署的H7井在奥陶系一间房组测试获高产油气流,拉开了哈拉哈塘百万吨级大油田建设的序幕。哈拉哈塘油田的勘探与发现,伴随着地质认识与勘探技术的不断发展和进步,主要可以分为4个阶段。

2.1 碎屑岩勘探阶段(1990—2005年)

1990年,哈拉哈塘地区开始采集二维地震资料,之后的10余年里利用二维地震资料针对志留系、石炭系碎屑岩先后钻探了H1井、H2井等8口探井,其中3口井钻揭奥陶系,均未获突破。分析主要原因是由于研究区二叠系巨厚的火成岩在横向、纵向上的岩性、厚度变化大,易形成速度陷阱,造成其下部的志留系、石炭系的低幅度构造难以落实;同时也表明利用二维地震资料无法准确预测非均质储层的空间展布特征。地质认识不足和品质不高的地震资料使得研究区的勘探一度陷入沉寂。

表1 塔里木盆地哈拉哈塘油田基本参数表
Table 1 Basic parameters of Halahatang Oilfield in Tarim Basin

油田名称		哈拉哈塘油田	油藏特征	油藏厚度	70~200 m
地理位置		新疆阿克苏地区沙雅县		石油来源	寒武系
区域构造位置		塔北隆起轮南低凸起的西斜坡		石油类型	常规原油
发现井(发现年份)		H7井(2009年)		原油性质	密度:0.751 1~1.058 0 g/cm ³ (20℃) 动力黏度:0.609 1~1 377 mPa·s 凝固点:-30~8℃, 含硫量:0%~2.09%
发现井产量		测试产量 298.24 m ³ /d		地层压力	65.35~76.20 MPa
首次产油时间		2009年		压力系数	1.06~1.15
石油产能		210×10 ⁴ t/a(2020年)		盖层时代与岩性	上奥陶统泥灰岩、泥岩
探明地质储量		31 083×10 ⁴ t(2020年)		层 位	奥陶系一间房组—鹰山组
可采储量		5 592×10 ⁴ t(2020年)	储层特征	主要岩性	石灰岩
储量丰度		18.65×10 ⁴ t/km ²		沉积环境	开阔台地相
发现依据		基于潜山斜坡区层间岩溶广泛发育及走滑断裂控储控藏的地质认识,优选有利油源断裂及规模储集体开展勘探部署		总厚度	200~300 m
油藏特征	圈闭类型	岩性圈闭		有效厚度	70~110 m
	圈闭形成时间	中晚加里东期—早海西期		孔隙类型	洞穴、裂缝-孔洞
	含油面积	1 457 km ² (2020年)		孔隙度	1.8%~31.2%
	圈闭高度	30~400 m		渗透率	(8.58~3 600)×10 ⁻³ μm ²
	油藏埋深	6 300~8 000 m		含油饱和度	70%~100%

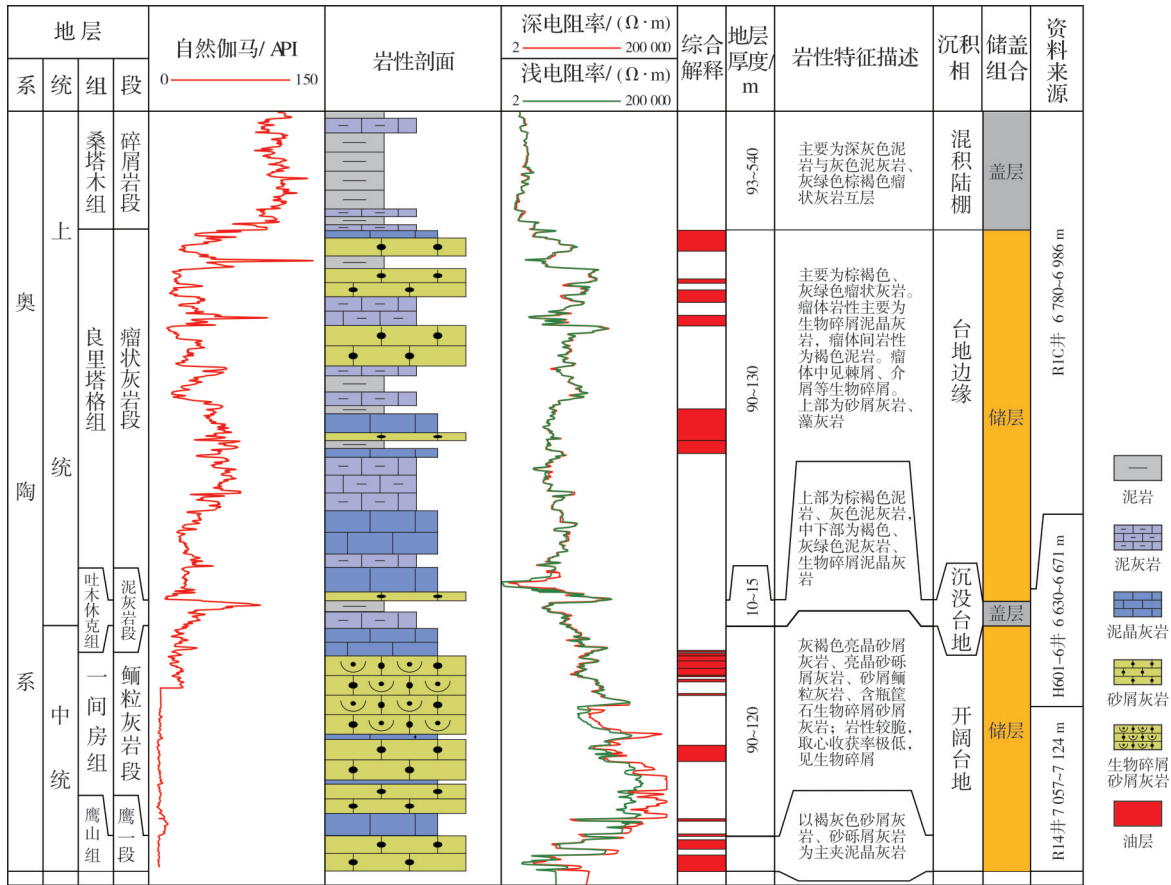


图3 塔里木盆地哈拉哈塘油田奥陶系综合柱状图

Fig. 3 Comprehensive stratigraphic column of Ordovician in Halahatang Oilfield, Tarim Basin

2.2 礁滩体勘探阶段(2006—2007年)

2006年,受塔中奥陶系良里塔格组大型台缘带礁滩凝析气藏的启发,分析认为哈拉哈塘地区也可能存在良里塔格组——一间房组台缘带礁滩型油藏。基于哈拉哈塘“奥陶系礁滩体”的认识,利用二维地震资料部署了H6风险探井,在奥陶系良里塔格组、一间房组未钻遇好储层而失利。通过该阶段的探索,结合塔中台缘带礁滩体勘探经验,逐渐认识到奥陶系碳酸盐岩的非均质性极强,基于二维地震资料已无法准确预测非均质储层的空间展布特征,高精度的三维地震资料才能可靠支撑超深非均质碳酸盐岩油气藏的勘探发现。

2.3 层间岩溶勘探阶段(2008—2015年)

2008年,随着盆地构造单元研究的不断深化,哈拉哈塘地区从原来认识的二级构造单元“哈拉哈塘凹陷”转变为轮南低凸起西斜坡,而且哈拉哈塘地区位于加里东期岩溶斜坡部位,具备发育规模储层及形成大油田的条件,这些认识使得哈拉哈塘的战略地位得到显著提升。在公司总部的支持下,塔里木油田确定了针对塔北碳酸盐岩富油气区三维地震“整体部署、分步实施”的思路,2008年哈拉哈塘第1块三维地震(哈6区块)采集完成。该三维工区的面元为 $25\text{ m}\times 25\text{ m}$,覆盖次数为72次,炮道密度为 11.52×10^4 个/ km^2 ,获得了较好品质的地震资料。依据该资料部署了H7井、H8井、H9井、H6C井共4口探井,2009年2月2日H7井首获高产油流,8 mm油嘴折日产油 298.24 m^3 ,其余3口井也全部成功,勘探获得全面突破。之后几年里新垦、热瓦普、金跃、跃满等区块相继获得突破,探明原油储量 $2.25\times 10^8\text{ t}$,年产原油达到 $102\times 10^4\text{ t}$,哈拉哈塘建成了百万吨级大油田。

勘探实践证实了大台地背景下层间岩溶储层大面积连片分布、英买力—哈拉哈塘—轮南整体连片含油局部富集的碳酸盐岩非均质准层状大油气田的认识,证明了三维地震对预测非均质碳酸盐岩储层的决定性作用。生产需求促进了技术进步,地震资料处理技术实现了从叠后时间偏移→叠前时间偏移→叠前深度偏移的转变,直接推动了各向异性叠前深度偏移技术的大规模应用,促进了缝洞型碳酸盐岩储层量化雕刻及储量估算技术的进步。

2.4 断控岩溶勘探阶段(2016年至今)

随着勘探向南部的金跃、跃满、富源、满深等区块的不断推进,一种深埋断控岩溶储层逐渐展现在地质家的面前。这类储层的特点是沿断裂集中分布,远离断裂储层则不发育,钻井轨迹重点针对钻遇断裂带进行优化,实钻井断裂带放空漏失率可达到75%以上。同时,南部断控区的油气沿断裂带更为富集,纵向油柱高度往往达到400~500 m。基于该认识的形成和突破,哈拉哈塘南部近年又新增探明储量 $0.86\times 10^8\text{ t}$,油气储量、产量呈现规模增长。同时,前期突破的哈6等区块逐渐步入瓶颈期,上产节奏放缓,钻井成功率减低;加之国际油价暴跌,哈拉哈塘勘探开发落入低谷。痛定思痛,地质家不断总结北部潜山区、层间区、断控区的成功经验,特别是南部断控岩溶储层的新认识和勘探的不断突破,更启发了关于哈拉哈塘北部区块油藏主控因素的认识深化,终于认识到走滑断裂是哈拉哈塘地区控储成藏的最为关键的因素,研究重点由以储层为中心向以走滑断裂为中心转变。叠后多重滤波去噪、辅助层相干、振幅变化率等断裂刻画技术应运而生,走滑断裂“三学五分”、差异控储控藏分析不断深化,动静态结合连通性分析、缝洞单元划分技术逐渐完善,精细勘探新认识及技术序列初步形成。通过2017年和2018年的艰辛探索,精细勘探助推哈拉哈塘油田迅速扭转不利局面,钻井成功率、年产油创历史新高。

3 油田主要地质特征

哈拉哈塘地区包括的工区范围主要有哈6、新垦、热瓦普、金跃、跃满、富源等区块,地质特征自北向南呈现分带变化。

3.1 岩溶、断裂和不整合控制规模储层的发育

哈拉哈塘地区典型的储层特征表现为大型洞穴及连片的裂缝孔洞型储层的多种组合,该特征的碳酸盐岩储层形成的主控因素比较复杂^[9-12]。不同于塔北轮南地区的潜山暴露(喀斯特)型的岩溶储层,研究区的岩溶储层主要发育在奥陶系的内部及层间位置,依据其发育的位置称之为层间岩溶。该类岩溶经历的暴露时间短,但储层规模大,充填特征并不明显^[13-14],其形成机理及过程较为复杂。针对以上储层特征开展的研究表明,该类缝洞型规模

储层的成因,实际上是在短期不整合、岩溶、断裂破碎的多重因素、多期作用的条件形成的^[15]。

塔北奥陶系经历了多期次岩溶作用^[16-18]。目前认为哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩经历了3期规模岩溶作用:一间房组沉积末期—吐木休克组沉积早期(加里东中期Ⅰ幕)、良里塔格组沉积末期(加里东中期Ⅱ幕)、桑塔木组沉积末期(加里东中期Ⅲ幕—晚加里东期),形成了良里塔格组顶部明河水系、桑塔木组顶部继承性明河、北部潜山区上奥陶统剥蚀尖灭等暴露特征。3期不整合岩溶作用的强度逐渐增大,同时顺层溶蚀作用及沿断裂溶蚀作用对内幕区纯石灰岩地层叠加改造,也在上奥陶统剥蚀尖灭线以南的区域内,形成了大规模的顺层、沿断裂溶蚀缝洞系统。受暴露期短、地表水循环条件向深部地层逐渐受限等影响,顺层溶蚀作用向南逐渐减弱,溶蚀水循环更集中在断裂带内,形成了沿走滑断裂的带状、线状展布的缝洞系统,地震响应表现为平面上呈线状分布的“串珠”特征。依据以上地质认识及岩溶储层展布特征,由北向南依次划分为潜山+断控岩溶区、层间+断控岩溶区、断控岩溶区3大岩溶区带(图2,图4)。

潜山+断控岩溶区 岩溶储层主要发育于一间房组、鹰山组中上部,岩溶系统具有明显的垂向分带特征,一间房组以溶蚀裂缝、溶蚀小孔洞为主,在振幅变化率属性平面图上表现为强振幅及点状强反射横向连片特征;鹰山组以溶洞、岩溶管道为主,振幅属性平面图上呈现连续—似连续的弯曲线状强反射特征。该区表层溶蚀作用较强,沿断裂溶蚀特征被淹没在横向连片的强反射中不易识别。

层间+断控岩溶区 该区地层发育基本完整,岩溶储层主要发育于一间房组、鹰山组,良里塔格组局部受走滑断裂上穿溶蚀影响,与一间房组—鹰山组形成一个纵向统一的油藏。该区奥陶系经多次暴露,地表明河系统发育。一间房组内部则发育与良里塔格组明河相关的岩溶洞穴、暗河岩溶管道系统,岩溶地下河发育长度约为3~4 km。岩溶储层规模相对较大,储层平面展布特征也较为复杂多样,既有与明河相关的线状暗河系统,也有沿不整合面发育的顺层承压水溶蚀缝洞系统,还有沿断裂带呈线性宽带状展布的断控相关溶蚀缝洞系统。可以说,该区储层大范围展布,储层特征的丰富性在塔北地区较为典型,但同时也带来了该区油水关系的复杂性。

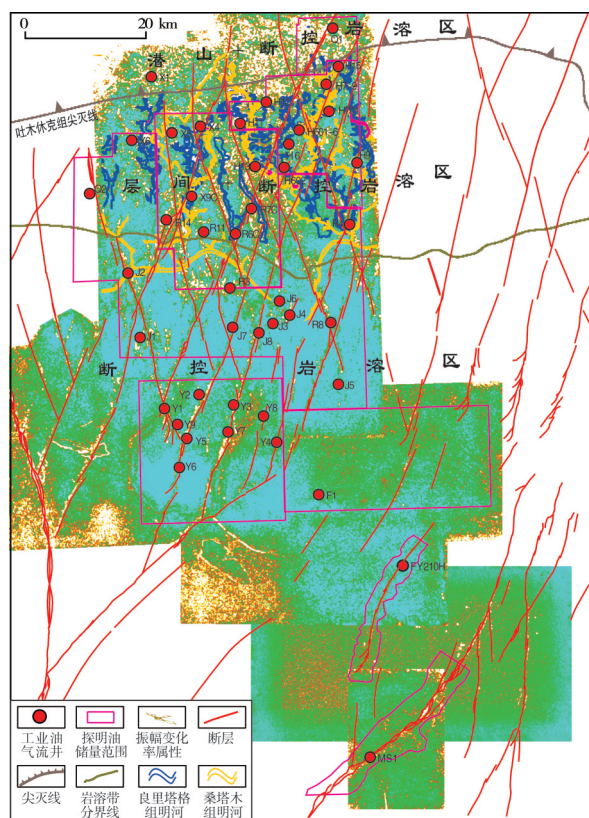


图4 塔里木盆地哈拉哈塘油田奥陶系一间房组—鹰山组振幅变化率刻画储层平面图

Fig. 4 Plan of reservoir characterized by amplitude change rate of Yijianfang Formation-Yingshan Formation in Halahatang Oilfield, Tarim Basin

断控岩溶区 该区岩溶储层主控因素逐渐转变为较为单一的走滑断裂,展布特征与走滑断裂的相关性更为明显,平面分布呈现沿断裂分布的线性特征,纵向上沿断裂分布的高角度裂缝系统溶蚀扩大而形成规模洞穴,地震响应表现为“长串珠”特征。

3.2 走滑断裂控制了油气富集

哈拉哈塘地区的油气分布呈现整体含油、局部富集的特征,油气受走滑断裂控制的特征明显^[19]。自北向南,走滑断裂都是油气富集的核心要素。受北部储层横向连片特征的影响,油气在哈拉哈塘北部潜山区分布于主干断裂两侧约2 km的范围,纵向含油厚度在150 m以内。而向南进入层间区及断控区之后,受走滑断裂样式、分支及裂缝带发育情况的影响,断裂带横向上含油气分布范围约为0.5~1 km,但纵向上含油层厚度较大,部分可达200 m以上,油气在断裂带上富集的特征更加明显。

在哈拉哈塘地区重要的岩溶发育期——加里东期,大型走滑断裂及伴生裂缝也处于活跃期,溶

蚀作用与断裂活动的叠加,使溶蚀流体沿断裂及其形成的薄弱带进行溶蚀扩大,进一步优化了储层。走滑断裂形成的花状构造主断面高陡直立,向下断穿寒武系至基底,向上多断至奥陶系顶面,局部断至二叠系与中生界。走滑断裂的这种纵、横向贯穿特征,十分有利于寒武系油源的充注和输导,使走滑断裂及其所形成的缝网体系成为哈拉哈塘油田油气垂向运聚的优势通道。研究表明:哈拉哈塘地区近走滑断裂的油气充注强度更大、油柱高度更大、单井产能更高;而远离走滑断裂,即使储层规模很大,局部构造有利,其油柱高度也远小于近断裂带,钻井易出水失利。钻探表明哈拉哈塘油田87%的高产井分布在主干走滑断裂带两侧1 000 m范围内,走滑断裂是控制油气富集的主要因素。

3.3 规模优质烃源岩控制了油气的分布与聚集

哈拉哈塘油田的油气来源于中一下寒武统优质烃源岩,特别是下寒武统玉尔吐斯组及其他层系斜坡相、盆地相、潟湖相烃源岩区的规模优质烃源岩,控制了油气的原地生成与聚集^[20-21]。野外露头(肖尔布拉克剖面、苏盖特布拉克剖面、昆盖阔坦剖面)与钻井资料揭示,玉尔吐斯组发育黑色泥岩,构成一套主要的优质烃源岩。野外剖面的TOC可达7%~14%,局部区域可高达22.39%^[22-23]。星火1井

玉尔吐斯组TOC分布范围为1%~9.43%,均值为5.5%^[23]。烃源岩主要发育在中缓坡、下缓坡及深海盆地相带中,烃源岩分布受北部坳陷的一系列克拉通内裂陷的控制,并在阿满克拉通内裂陷和昆仑山前克拉通内裂陷广泛分布,分布面积约为 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。目前在奥陶系发现的塔中、塔北以及和田河等大油气田均分布在玉尔吐斯组规模优质烃源岩发育区内,即遵循“源控论”。因此,规模优质烃源岩区控制了油气的原地生成与聚集。

塔北地区广泛分布的上奥陶统桑塔木组暗色泥岩在地震剖面上易于识别与追踪,根据地震资料解释,厚度可达2 600 m,分别向塔北隆起、塔中隆起减薄直至尖灭。桑塔木组泥岩盖层分布东西长920 km、南北宽380 km,面积超过 $15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盖层封闭能力与厚度的定量关系研究认为盖层的毛细管孔隙吸附阻力随着盖层厚度的增加而增大,因此,厚度巨大的中上奥陶统暗色泥岩盖层为区域优质盖层,保存条件十分优越。

油气经走滑断裂控制的缝网体系形成立体输导、网状运移,最终在奥陶系岩溶缝洞内聚集成藏。地球化学资料表明,哈拉哈塘地区共有3期油气成藏,分别为中一晚加里东期、海西期、喜马拉雅期。3个成藏期的油气强烈充注支撑了研究区的油气富集,最终形成了哈拉哈塘油田自北向南整体含油、沿断裂富集的油藏特征(图5)。

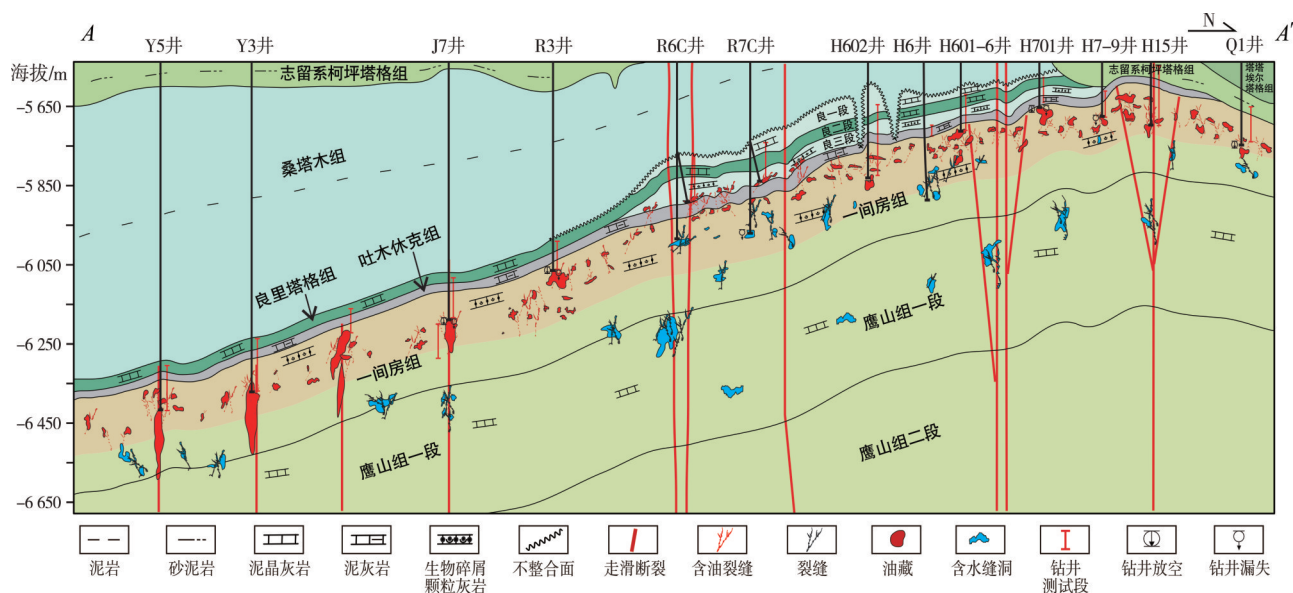


图5 塔里木盆地哈拉哈塘油田奥陶系油藏剖面图(剖面位置见图2)

Fig. 5 Section of Ordovician oil reservoir in Halahatang Oilfield, Tarim Basin (section location is shown in Fig. 2)

4 勘探启示

哈拉哈塘油田是一个超深、非均质性极强的缝洞型碳酸盐岩油田,平均埋藏深度超过7 000 m,是目前发现全球埋藏最深的碳酸盐岩油田之一。自2009年获得突破以来,含油面积不断扩展,原油产量迅速攀升,在不到10年的时间即建成了平面连片、年产百万吨的大油田。哈拉哈塘油田的勘探发现是超深海相缝洞型碳酸盐岩油气勘探的重大成果,也是中国海相油气勘探理论和实践的巨大飞跃,显示出中国超深海相碳酸盐岩勘探开发的巨大潜力,也为该类油气藏的勘探提供了重要启示。

4.1 优越的石油地质条件是形成大油田的基础

(1)源、储、盖配置有利。哈拉哈塘油田紧邻满加尔凹陷生烃中心,下寒武统玉尔吐斯组优质烃源岩分布广、厚度大、品质好。玉尔吐斯组沉积时期塔里木台盆区继承了震旦纪晚期的裂陷沉积背景,广泛沉积了一套陆棚斜坡到盆地相的海相烃源岩。这套烃源岩分布面积约为 $22.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,厚度为50~150 m,TOC平均为10.10%,成熟度(R_o)在1.4%~4.6%之间,为腐泥质型优质烃源岩,生烃量达 $5\,485 \times 10^8 \text{ t}$,其最大生烃中心正位于满加尔凹陷的中部。哈拉哈塘油田则位于满加尔凹陷的北部,近源条件有利。奥陶系一间房组和鹰山组沉积期间,沉积了厚层的滩相砂屑灰岩和砂砾屑灰岩及生物礁灰岩,该期沉积与加里东中期的构造运动耦合,形成了一间房组顶面广泛发育的不整合岩溶储层,同时叠加断裂改造,这有利于岩溶作用而形成优质储层^[12,24]。上奥陶统桑塔木组为一大套巨厚混积陆棚相深灰色泥岩地层,是塔北地区一套优质的区域盖层。源、储、盖的有利配置成为哈拉哈塘地区油气富集的重要前提和基础。

(2)输导体系完整。哈拉哈塘地区发育的深大断裂、多期叠加的区域不整合面整体构成三维空间完整有效的油气输导格架。深大断裂对油气的富集成藏起着主要的控制作用,是油气纵、横向运聚的重要通道,从而控制了油气富集区带的范围和规模。不整合面、层间岩溶系统横向渗透性好,是油气侧向运移的通道,控制了油气平面分布范围。受构造作用背景下的走滑断裂多期活化、早期暴露溶蚀作用、后期埋藏溶蚀作用的影响,哈拉哈塘油田

在一间房组和鹰山组形成了复杂的油气运聚缝网系统。总体表现为沿深大断裂运移而来的油气,沿断裂与一间房组—鹰山组的复杂溶蚀缝网系统交汇、输导、横向分配。受储层横向非均质性的影响,油气的横向运聚也展现出一定的差异富集特征。这套完整有效的输导体系,最终形成了哈拉哈塘地区“垂向通源、侧向分配、缝洞聚集”的成藏模式。

(3)多期规模成藏。哈拉哈塘油田主力烃源岩是下寒武统玉尔吐斯组,主要生烃期是加里东期、晚海西期和喜马拉雅期。油气沿深大断裂运移,沿缝网系统充注成藏。主要充注期发生在加里东晚期、海西期—印支期和燕山期—喜马拉雅期。3期主力生烃和3期油气充注,为哈拉哈塘油田规模成藏提供了重要条件^[25]。自隆起逼近生烃中心,油气更加富集,哈拉哈塘地区南部MS1井区,油柱高度更大,试采效果更好。

4.2 地质认识的突破是发现大油田的关键

哈拉哈塘油田的勘探经历了自碎屑岩构造勘探→奥陶系礁滩体风险勘探→奥陶系层间岩溶勘探→断控岩溶勘探等4个阶段,勘探历程的每次转变都伴随重大的地质认识突破。

(1)突破传统地质认识,“凹陷”变“隆起”,碳酸盐岩进入勘探视野。基于二维地震解释的构造认识,哈拉哈塘地区早期被认为是塔北地区的一个生油凹陷,基于源上找油的思路,勘探部署集中在石炭系碎屑岩构造圈闭,但始终未获突破。通过区域构造特征及演化分析及再认识,提出它处于轮古与英买力低凸起之间的过渡带,实际上是塔北隆起控制的轮南奥陶系古潜山背斜的西斜坡,奥陶系沉积背景与轮南—英买力地区一致,是碳酸盐台地而非早期认为的沉积凹陷。这一重大转变否定了原来哈拉哈塘下古生界是生烃凹陷的认识^[26],使得勘探主力层系由上部石炭系碎屑岩转向奥陶系碳酸盐岩。

(2)创新提出超深碳酸盐岩层间岩溶地质理论,指导勘探突破。在类比塔中而构思的礁滩体油气藏在哈拉哈塘地区的钻探未获突破的情况下,在新采集的三维地震资料的支撑下,发现了奥陶系巨厚碳酸盐岩内幕存在不整合面,识别出沿一间房组不整合面规模发育地震“串珠”状缝洞体异常反射,通过地质综合研究的深化,首次建立了层间岩溶的储层发育模式,创新了层间岩溶地质理论,成功揭示了超深碳酸盐岩仍存在优质储层的机理,勘探目标自礁滩体向层间岩

溶储层转变,实现了哈拉哈塘大油田的发现。

(3)从层间岩溶向断裂控储控藏转变,哈拉哈塘勘探成果逐渐扩大。勘探领域自北部塔北隆起斜坡区向南部阿满过渡带凹陷区不断扩展,突破了传统地质理论认识的束缚,明确了断控缝洞型储层发育机理,指出走滑断裂带多期活动产生的滑动破碎、流体叠加改造作用形成了沿断裂破碎带分布的优质规模缝洞型储层。建立了“寒武系多期供烃、走滑断裂垂向运聚、断裂破碎带控储、断裂带分段富集”的断控油气成藏模式,油气成藏条件不断突破埋深和生烃极限的认识,哈拉哈塘地区的勘探越打越深、越打越富。

4.3 物探技术进步是建成百万吨级大油田的保障

哈拉哈塘油田的重大发现很大程度得益于物探技术的不断进步。

(1)高密度、宽方位三维地震资料为缝洞型储层描述和走滑断裂刻画提供了资料基础。三维地震资料的采集为H7井的勘探发现奠定了基础,通过不断攻关高密度三维地震采集技术,地震资料的低频和频宽均得到有效拓宽,提升了复杂缝洞型储层的识别精度,实现了缝洞型储层和走滑断裂的准确成像。

(2)地震资料处理从叠前时间偏移走向叠前深度偏移,推动了油田的快速规模建产。模型正演表明叠前深度偏移对速度精度更敏感,相比叠前时间偏移地震资料,深度域地震资料上“串珠”平面位置普遍发生定向偏移。如根据时间域资料所部署的XK9井,实钻未钻遇洞穴储层,依据深度偏移结果对该井进行定向侧钻200 m后发生井漏,钻遇优质缝洞型储层,测试获得高产。应用深度偏移地震资料之后钻井成功率得以大幅提升。

(3)创立碳酸盐岩缝洞雕刻技术^[27],成为碳酸盐岩油藏储量计算的行业标准。在宽方位、较高密度三维地震资料采集的基础上,形成了连片叠前深度偏移处理、逆时偏移处理及融合处理技术^[28],实现了洞穴、孔洞、裂缝不同类型储层有效孔隙度和有效储集空间的量化雕刻,储层钻遇率达90%;形成了碳酸盐岩“缝洞雕刻容积法”储量计算新方法,使储量计算精度、储量动用程度大大提高。

4.4 勘探开发一体化的管理创新是碳酸盐岩快速增储上产的高效模式

碳酸盐岩油藏的特殊性决定了采用勘探开发

一体化的组织模式是最为行之有效的组织方式之一。勘探开发一体化以“油藏研究与地面建设一体化、地质与工程一体化、生产经营一体化、地下与地面一体化”为指导,以落实油气资源、实现规模效益开发为原则,强化油气理论与关键技术的创新,使得勘探与开发既相互继承又相互补充。在实现油气发现、油气储量向产量快速转化的同时,创新形成了碳酸盐岩储集体缝洞带、缝洞系统评价技术,提出大型缝洞集合体概念,集成了大型缝洞集合体储层描述技术,形成碳酸盐岩不规则井网高效布井技术,使得碳酸盐岩钻井成功率提高到75%以上,间接推动了富满十亿吨大油田的发现,正将塔里木盆地碳酸盐岩油气勘探开发推向新的高峰。

5 结论

哈拉哈塘油田的重大发现和不断滚动成为百万吨级的碳酸盐岩油田,得益于石油地质理论的不断突破和创新,得益于物探技术的突飞猛进,得益于管理体制的务实高效。目前塔里木盆地的超深油气勘探尚有大量未知领域有待认识和发现,哈拉哈塘地区的成功勘探实践一定会启发带动大批的超深油气资源不断获得突破和成功。

参考文献

- [1] 张银涛,孙冲,王轩,等.哈拉哈塘油田走滑断裂带控储成藏规律初探[J].西南石油大学学报(自然科学版),2020,42(1):10-18.
ZHANG Yintao, SUN Chong, WANG Xuan, et al. Reservoir formation patterns in the strike-slip fault zone of the Halahatang Oilfield [J]. Journal of Southwest Petroleum University (science & technology edition), 2020, 42(1): 10-18.
- [2] 王新新,崔德育,孙崇浩,等.哈拉哈塘油田A地区断裂特征及其控油作用[J].地质力学学报,2019,25(6):1058-1067.
WANG Xinxin, CUI Deyu, SUN Chonghao, et al. Characteristics of strike-slip fault and its controlling on oil in Block A of the Halahatang Oilfield, Tarim Basin [J]. Journal of geomechanics, 2019, 25(6): 1058-1067.
- [3] 宁超众,胡素云,潘文庆,等.塔里木盆地哈拉哈塘地区奥陶系良里塔格组古地貌与岩溶洞穴特征[J].石油与天然气地质,2020,41(5):985-995,1047.
NING Chaozhong, HU Suyun, PAN Wenqing, et al. Characterization of paleo-topography and karst caves in Ordovician Lianglitage Formation, Halahatang Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & gas geology, 2020, 41(5): 985-995, 1047.
- [4] 闵华军,贾祥金,田建军,等.哈拉哈塘奥陶系缝洞型成岩圈闭及其成因[J].西南石油大学学报(自然科学版),2019,41(5):33-44.
MIN Huajun, JIA Xiangjin, TIAN Jianjun, et al. Ordovician frac-

- tured-vuggy diagenetic trap and its genesis in Hanikata Formation [J]. Journal of Southwest Petroleum University (science & technology edition), 2019, 41(5): 33-44.
- [5] 廖涛, 侯加根, 陈利新, 等. 断裂对塔北地区哈拉哈塘油田奥陶系非暴露岩溶缝洞型储集层的控制作用[J]. 古地理学报, 2016, 18(2): 221-235.
- LIAO Tao, HOU Jiagen, CHEN Lixin, et al. Fault controlling on non-exposed karst fracture-vug reservoirs of the Ordovician in Halahatang Oilfield, northern Tarim Basin [J]. Journal of palaeogeography, 2016, 18(2): 221-235.
- [6] 马德波, 赵一民, 张银涛, 等. 最大似然属性在断裂识别中的应用: 以塔里木盆地哈拉哈塘地区热瓦普区块奥陶系走滑断裂的识别为例[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(6): 817-825.
- MA Debo, ZHAO Yimin, ZHANG Yintao, et al. Application of maximum likelihood attribute to fault identification: a case study of Rewapu block in Halahatang area, Tarim Basin, NW China [J]. Natural gas geoscience, 2018, 29(6): 817-825.
- [7] 马德波, 郭光辉, 朱永峰, 等. 塔里木盆地深层走滑断层分段特征及对油气富集的控制: 以塔北地区哈拉哈塘油田奥陶系走滑断层为例[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 225-237.
- MA Debo, WU Guanghui, ZHU Yongfeng, et al. Segmentation characteristics of deep strike slip faults in the Tarim Basin and its control on hydrocarbon enrichment: taking the Ordovician strike slip fault in the Halahatang Oilfield in the Tabei area as an example [J]. Earth science frontiers, 2019, 26(1): 225-237.
- [8] 郑晓丽, 安海亭, 王祖君, 等. 哈拉哈塘地区走滑断裂与溶解体油藏特征[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(4): 449-455.
- ZHENG Xiaoli, AN Haiting, WANG Zujun, et al. Characteristics of strike-slip faults and fault-karst carbonate reservoirs in Halahatang area, Tarim Basin [J]. Xinjiang petroleum geology, 2019, 40(4): 449-455.
- [9] 朱光有, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 827-844.
- ZHU Guangyou, YANG Haijun, ZHU Yongfeng, et al. Study on petroleum geological characteristics and accumulation of carbonate reservoirs in Hanikata area, Tarim Basin [J]. Acta petrologica sinica, 2011, 27(3): 827-844.
- [10] 孙崇浩, 朱光有, 郑多明, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区超深碳酸盐岩缝洞型储集层特征与控制因素[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(5): 1028-1036.
- SUN Chonghao, ZHU Guangyou, ZHENG Duoming, et al. Characteristics and controlling factors of fracture-cavity carbonate reservoirs in the Halahatang area, Tarim Basin [J]. Bulletin of mineralogy, petrology and geochemistry, 2016, 35(5): 1028-1036.
- [11] 沈安江, 陈娅娜, 蒙绍兴, 等. 中国海相碳酸盐岩储层研究进展及油气勘探意义[J]. 海相油气地质, 2019, 24(4): 1-14.
- SHEN Anjiang, CHEN Yana, MENG Shaoxing, et al. The research progress of marine carbonate reservoirs in China and its significance for oil and gas exploration [J]. Marine origin petroleum geology, 2019, 24(4): 1-14.
- [12] 赵宽志, 淡永, 郑多明, 等. 塔北哈拉哈塘地区奥陶系潜山岩溶储层发育特征及控制因素[J]. 中国岩溶, 2015, 34(2): 171-178.
- ZHAO Kuanzhi, DAN Yong, ZHENG Duoming, et al. Characteristics of karst reservoirs in the Ordovician buried hills of the Halahatang area, northern Tarim Basin [J]. Carsologica sinica, 2015, 34(2): 171-178.
- [13] 宁超众, 孙龙德, 胡素云, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩储层岩溶类型及特征[J]. 石油学报, 2021, 42(1): 15-32.
- NING Chaozhong, SUN Longde, HU Suyun, et al. Karst types and characteristics of the Ordovician fracture-cavity type carbonate reservoirs in Halahatang Oilfield, Tarim Basin [J]. Acta petrologica sinica, 2021, 42(1): 15-32.
- [14] 刘伟方, 郑多明, 王洪求, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩潜山古水系研究方法及其意义[J]. 海相油气地质, 2013, 18(4): 75-81.
- LIU Weifang, ZHENG Duoming, WANG Hongqiu, et al. Research methods and the significance of palaeodrainage patterns in Ordovician buried-hill carbonate reservoirs, Tarim Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2013, 18(4): 75-81.
- [15] 张庆玉, 梁彬, 秦凤蕊, 等. 哈拉哈塘凹陷奥陶系岩溶地貌及岩溶缝洞体发育模式[J]. 新疆石油地质, 2016, 37(6): 660-666.
- ZHANG Qingyu, LIANG Bin, QIN Fengrui, et al. Karst paleogeomorphology and development model of karst fracture-cave bodies of Ordovician in Halahatang Sag [J]. Xinjiang petroleum geology, 2016, 37(6): 660-666.
- [16] 倪新锋, 张丽娟, 沈安江, 等. 塔北地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶类型、期次及叠合关系[J]. 中国地质, 2009, 36(6): 1312-1321.
- NI Xinfeng, ZHANG Lijuan, SHEN Anjiang, et al. Paleo-karstification types, karstification periods and superimposition relationship of Ordovician carbonates in northern Tarim Basin [J]. Geology in China, 2009, 36(6): 1312-1321.
- [17] 淡永, 梁彬, 曹建文, 等. 塔北哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩岩溶层组特征与溶蚀强度分析[J]. 石油实验地质, 2015, 37(5): 582-590.
- DAN Yong, LIANG Bin, CAO Jianwen, et al. Characteristics and solution intensity of karst formations in Ordovician carbonates in the Halahatang area of the northern Tarim Basin [J]. Petroleum geology & experiment, 2015, 37(5): 582-590.
- [18] 宁超众, 李勇, 邓晓娟, 等. 哈拉哈塘地区热液岩溶形成演化与油气分布[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(4): 399-409.
- NING Chaozhong, LI Yong, DENG Xiaojuan, et al. Formation and evolution of hydrothermal karst and hydrocarbon distribution in Halahatang area [J]. Xinjiang petroleum geology, 2021, 42(4): 399-409.
- [19] 郑晓丽, 安海亭, 王祖君, 等. 塔北哈拉哈塘地区走滑断裂分段特征及其与油气成藏的关系[J]. 浙江大学学报(理学版), 2018, 45(2): 219-225.
- ZHENG Xiaoli, AN Haiting, WANG Zujun, et al. The segmentation features of strike-slip fault and its relation with the fault and reservoirs in Halahatang area, north Tarim Basin [J]. Journal of Zhejiang University (science edition), 2018, 45(2): 219-225.
- [20] 朱光有, 张水昌. 中国深层油气成藏条件与勘探潜力[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 793-802.
- ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential of deep reservoirs in China [J]. Acta petrologica sinica, 2009, 30(6): 793-802.
- [21] 郭光辉, 刘虎, 石晓龙. 塔里木盆地地下古生界海相碳酸盐岩油

- 气的特殊性[J]. 海相油气地质, 2014, 19(3): 1-7.
- WU Guanghui, LIU Hu, SHI Xiaolong. Particularities of hydrocarbon in Lower Paleozoic marine carbonate rocks in Tarim Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2014, 19(3): 1-7.
- [22] 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 534-547.
- LIANG Digang, ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, et al. Marine oil generation in China from the perspective of Tarim Basin [J]. Earth science frontiers, 2000, 7(4): 534-547.
- [23] 顾忆, 赵永强, 贾存善, 等. 塔里木盆地阿瓦提坳陷油气资源潜力分析[J]. 石油实验地质, 2012, 34(3): 257-266.
- GU Yi, ZHAO Yongqiang, JIA Cunshan, et al. Analysis of hydrocarbon resource potential in Awati Depression of Tarim Basin [J]. Petroleum geology & experiment, 2012, 34(3): 257-266.
- [24] 孙东, 杨丽莎, 王宏斌, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区走滑断裂体系对奥陶系海相碳酸盐岩储层的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(增刊1): 80-87.
- SUN Dong, YANG Lisha, WANG Hongbin, et al. Strike-slip fault system in Halahatang area of Tarim Basin and its control on reservoirs of Ordovician marine carbonate rock [J]. Natural gas geoscience, 2015, 26(S1): 80-87.
- [25] 倪新锋, 张丽娟, 沈安江, 等. 塔里木盆地英买力—哈拉哈塘地区奥陶系岩溶储集层成岩作用及孔隙演化[J]. 古地理学报, 2010, 12(4): 467-479.
- NI Xinfeng, ZHANG Lijuan, SHEN Anjiang, et al. Diagenesis and pore evolution of the Ordovician karst reservoir in Yengimahalla-Hanilcatam region of Tarim Basin [J]. Journal of palaeogeography, 2010, 12(4): 467-479.
- [26] 肖晖, 赵靖舟, 朱永峰, 等. 哈拉哈塘凹陷奥陶系原油成藏期次的地球化学示踪[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(4): 465-468.
- XIAO Hui, ZHAO Jingzhou, ZHU Yongfeng, et al. Geochemical tracking on hydrocarbon accumulation periods of Ordovician in Hanilcatam Sag, Tarim Basin [J]. Xinjiang petroleum geology, 2013, 34(4): 465-468.
- [27] 李国会, 袁敬一, 罗浩渝, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩缝洞型储层量化雕刻技术[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(4): 24-29.
- LI Guohui, YUAN Jingyi, LUO Haoyu, et al. Quantitative description technology for fracture-cavity carbonate reservoirs in Halahatang area, Tarim Basin [J]. China petroleum exploration, 2015, 20(4): 24-29.
- [28] 常少英, 李昌, 陈娅娜, 等. 海相碳酸盐岩储层地震预测技术进展及应用实效[J]. 海相油气地质, 2020, 25(1): 22-34.
- CHANG Shaoying, LI Chang, CHEN Yana, et al. Progress and application of seismic prediction technology for marine carbonate reservoir [J]. Marine origin petroleum geology, 2020, 25(1): 22-34.

编辑:黄革萍

Exploration and development of the Ordovician carbonate oil field in Halahatang, Tarim Basin

YANG Haijun, ZHANG Yintao, GUAN Baozhu, LI Fei, CAI Quan

Abstract: Halahatang Oilfield in the northern Tarim Basin was discovered in 2009, and obtained proven oil geological reserves of 2.47×10^8 t in the Ordovician carbonates by 2015. It is an important field for increasing reserves and production of crude oil from carbonate rocks in Tarim Basin. However, the geological conditions of the oilfield are so extremely complex that geological understanding and exploration guidance have undergone many changes, and Halahatang Oilfield has experienced many types of hydrocarbon reservoir exploration stages, such as siliciclastic rock trap, reef-shoal reservoir, interlayer karstic reservoir and fault-related karstic reservoir. Based on comprehensive analysis of the exploration history and exploration and development production data of the oilfield, it is recognized that the fracture-cave reservoir controlled by multiple factors such as faults, karstification and unconformity is the major place for oil and gas occurrence. Further, the distribution and enrichment of oil and gas controlled by the strike-slip faults have complex rules, and the strike-slip faults could connect the Cambrian source rocks to form large-scale petroleum accumulation and preservation. The exploration example of Halahatang Oilfield shows that the superior petroleum geological conditions are the basis for the formation of large oil fields, the breakthrough of geological understanding is the key to the discovery of complex large oil and gas fields, the progress of geophysical prospecting technology is the guarantee for the exploration and development of complex oil and gas fields, and the integration of exploration and development is an effective way to rapidly increase the reserves and production of carbonate rocks. It is suggested that the discovery and exploitation of deep complicated oilfield is depended on the favorable petroleum accumulation condition and geological understanding of the explorer, and appropriate seismic technology and the integrated organization of exploration and development. This case study has important reference significance for the exploration and development of complicate fracture-cave reservoirs.

Key words: carbonate rock; fracture-cave; oil and gas exploration; Ordovician; Halahatang; Tarim Basin

YANG Haijun, First author: PhD, Professoriate Senior Engineer, mainly engaged in research on oil and gas exploration in Tarim Basin. Add: No. 26, Shihua Avenue, Korla, Xinjiang 841000, China