

文章编号: 0253-2697(2024)04-0615-14 DOI:10.7623/syxb202404001

塔北西部喀拉玉尔袞构造带上寒武统下丘里塔格组 油气勘探突破及意义

王清华^{1,2,3}

- (1. 中国石油塔里木油田公司 新疆库尔勒 841000;
2. 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心 新疆库尔勒 841000;
3. 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心 新疆库尔勒 841000)

摘要:2023年9月,塔里木盆地塔北隆起西部喀拉玉尔袞构造带雄探1井在上寒武统下丘里塔格组获重大油气勘探突破,继白垩系、古近系后,塔北地区又获一重要层系发现,标志着塔北地区具备多层系立体成藏特征。基于构造样式、断裂特征及雄探1井钻井、测井、测试资料的综合分析,明确了喀拉玉尔袞构造带烃源岩条件、油源通道和储、盖条件及圈闭类型,系统梳理了喀拉玉尔袞构造带寒武系下丘里塔格组的油气成藏要素及成藏模式。塔北隆起深层发育两套烃源岩,其中,寒武系玉尔吐斯组为主要烃源岩层,前寒武系裂陷槽烃源岩为潜在烃源岩。研究区构造运动活跃,发育加里东期、海西期和喜马拉雅期断裂,NNW向走滑断裂叠加NW向及EW向逆冲断裂,形成相互交错的断裂体系,垂向沟通深部烃源岩与储集层。研究区上寒武统下丘里塔格组具有早期成圈、多期成藏的特点,晚海西期受强烈挤压作用的影响,多条通源断裂及相关构造圈闭雏形形成,后期构造运动叠加,研究区持续隆升,形成上寒武统大面积连片分布的构造圈闭,捕获多期油气充注。建立了下丘里塔格组“下生上储、断裂输导、近源成藏”的构造油气成藏模式。研究认识揭示,塔北西部寒武系下丘里塔格组具有巨大的油气勘探潜力,有望成为盆地台盆区新的油气增储上产战略接替区。

关键词:构造圈闭;储-盖组合;裂陷槽烃源岩;成藏期次;下丘里塔格组;喀拉玉尔袞构造带;塔北西部

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Breakthrough and significance of oil and gas exploration of Upper Cambrian Xiaqiulitage Formation in Kalayuergun structural belt, western Tabei uplift

Wang Qinghua^{1,2,3}

- (1. PetroChina Tarim Oilfield Company, Xinjiang Korla 841000, China; 2. CNPC R&D Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Korla 841000, China; 3. Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Korla 841000, China)

Abstract: Well Xiongtan1 in Kalayuergun structural belt of western Tabei uplift, Tarim Basin, has made a major breakthrough in oil and gas exploration in the Upper Cambrian Xiaqiulitage Formation in September 2023. This is another significant oil bearing strata discovery that has been made since Cretaceous and Paleogene in Tabei area, demonstrating the three-dimensional multi-layer hydrocarbon accumulation in Tabei area. Based on comprehensively analyzing the structural styles, fault characteristics, as well as the drilling, logging and testing data of Well Xiongtan1, the paper makes clear the source rock conditions, oil and gas channel, reservoir-cap conditions and trap types of Kalayuergun structural belt, and systematically summarizes the accumulation elements and modes of the Cambrian Xiaqiulitage Formation in Kalayuergun structural belt. Two sets of deep source rocks are developed in Tabei uplift. The hydrocarbon source correlation shows that the Cambrian Yuertusi Formation is the main source rock layer, and the potential source rock is developed in the pre-Cambrian rift trough. Tectonic movement is active in the study area, forming Caledonian, Hercynian and Himalayan faults. NNW-trending strike-slip faults are superimposed with NW- and EW-trending thrust faults, forming an interlaced fault system, which vertically communicates with deep source rocks and reservoirs. Traps of the Upper Cambrian Xiaqiulitage Formation were formed at an early stage, where multiple periods of oil and gas accumulation occurred; under the influence of strong compression in Late Hercynian period, several faults connected with source rocks and related structural traps were initially formed. As a result of the late tectonic movement, the whole area continued to uplift, and formed a large area of continuously distributed tectonic traps in the Upper Cambrian reservoir, capturing oil and gas in multiple stages. The hydrocarbon accumulation mode of “lower generation and upper reservoir, dredging by faults and near-source accumulation” is established. The research results reveal that the Cambrian Xiaqiulitage Formation in western Tabei uplift has a huge exploration prospect, and it is expected to become a new strategic replacement area for increasing reserve and production in the platform area of Tarim Basin.

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技重大专项“海相碳酸盐岩油气规模增储上产与勘探开发技术研究”(2023ZZ16YJ01)资助。

作者简介: 王清华,男,1968年8月生,2007年获浙江大学博士学位,现为中国石油塔里木油田公司教授级高级工程师,主要从事油气勘探研究与管理工作。Email:wqh-tlm@petrochina.com.cn

Key words: structural trap; reservoir-cap association; source rock of rift trough; accumulation stages; Xiaqiulitage Formation; Kalayuergun structural belt; western Tabei uplift

引用:王清华. 塔北西部喀拉玉尔袞构造带上寒武统下丘里塔格组油气勘探突破及意义[J]. 石油学报, 2024, 45(4): 615-628.

Cite: WANG Qinghua. Breakthrough and significance of oil and gas exploration of Upper Cambrian Xiaqiulitage Formation in Kalayuergun structural belt, western Tabei uplift[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(4): 615-628.

塔北地区是塔里木盆地海相碳酸盐岩油气增储上产的主战场之一^[1-3],然而位于塔北隆起西部南喀—英买力低凸起的喀拉玉尔袞构造带却一直未获得海相油气突破,碳酸盐岩油气勘探程度较低,特别是寒武系白云岩领域的勘探尚未涉足。前人针对塔北西部地区碎屑岩陆相油气成藏特征开展了一系列研究,徐桂芬等^[4]、王俊鹏等^[5]、苏洲等^[6]讨论了薄砂层沉积作用及地质、地震储层预测,张君峰等^[7]基于新苏地1井的勘探突破分析了沙井子构造带志留系油气地球化学特征并开展了油源对比,张斌等^[8]利用生物标志化合物讨论了奥陶系上覆地层陆相与海相油源的区分。但当前尚未有塔北西部寒武系油气成藏特征研究的报道,且尚无钻井揭露寒武系,因此,寒武系是塔北西部地区一个全新的、尚未引起重大关注的勘探与研究领域。

2023年9月,雄探1井在上寒武统下丘里塔格组内幕白云岩储层获得油气突破,首次在塔北西部地区获得海相高产油气流,打开了一个全新的勘探层系与富油气区带,是塔北西部海相油气勘探的一个转折点。雄探1井的勘探突破揭示:①塔北西部寒武系烃源岩广泛发育,烃源岩条件有利,具备规模成藏的物质基础;②塔北西部主要发育构造油气藏,油气沿断裂在构造高部位富集成藏;③塔北西部—英买力地区上寒武

统海相油气具备良好的勘探前景和巨大的勘探潜力,有望成为台盆区新的油气增储上产战略接替区。雄探1井在上寒武统的油气发现表明,有必要加强对塔里木盆地上寒武统白云岩领域的探索。

综合雄探1井钻井、试油、测井和地球化学测试资料以及三维地震资料、储层与成藏演化史等,分析了塔北西部喀拉玉尔袞构造带的烃源岩条件、油源通道、储-盖组合与圈闭类型,建立了喀拉玉尔袞构造带上寒武统下丘里塔格组油气成藏模式,以期资源潜力评价、勘探有利区优选提供依据和有益参考。

1 区域地质背景及勘探开发历程

喀拉玉尔袞构造带位于塔北西部英买力低凸起的西部,走向为NW—SE向,其东北侧为秋里塔格构造带,西南部为阿瓦提凹陷及温宿凸起。构造带古生界主要由喀拉玉尔袞逆冲断裂控制的多个宽缓的断背斜、断鼻构造组成。受加里东、海西、印支—燕山、喜马拉雅多期构造运动影响,特别是海西期和喜马拉雅期构造挤压活动强烈,喀拉玉尔袞构造带的古生界—中生界与新生界发生明显分层变形,逐渐形成现今构造格局。喀拉玉尔袞构造带寒武系顶面构造为一大型断背斜,被多组次级断裂分割成多个断块,形成多个局部构造高点(图1)。

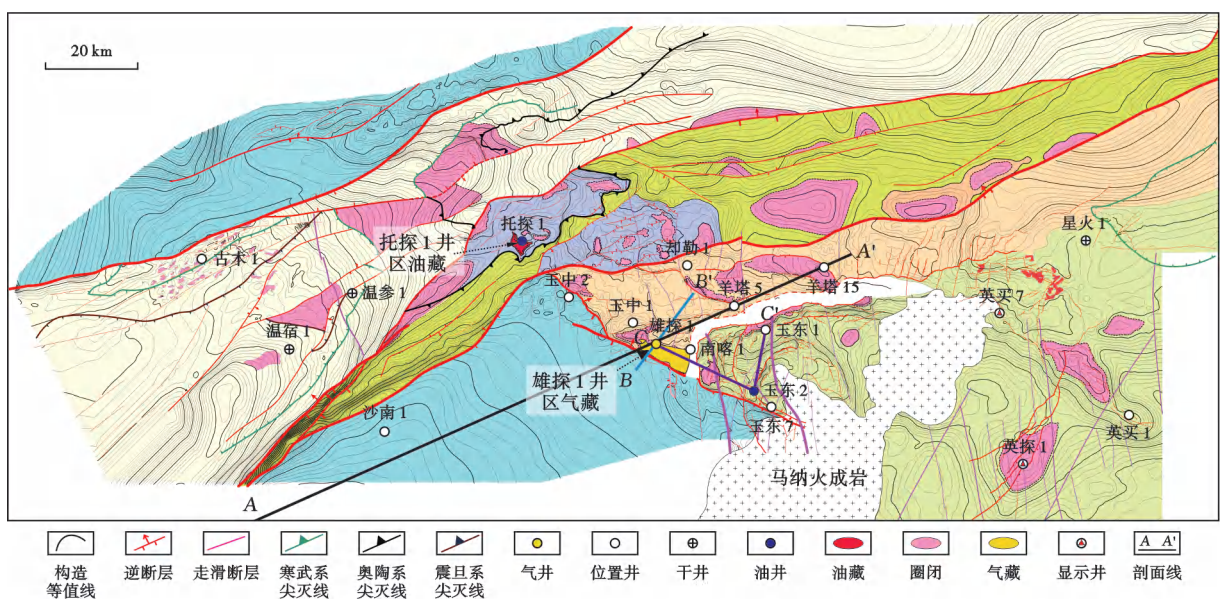


图1 塔里木盆地西北部构造纲要及勘探成果

Fig. 1 Tectonic outline and hydrocarbon discoveries of western Tarim Basin

塔北西部的油气勘探工作起始于塔里木油田会战初期,至今有30余年,总体可分为3个阶段。

(1) 油气发现阶段(1989—1992年)

该阶段是塔北西部油气勘探初始阶段,1989年,第一口发现井英买1井在奥陶系裸眼酸化测试获得338 t/d高产油流,油气来源于海相烃源岩。1992年,英买2井也获得了海相油气发现,并于2010年提交探明石油地质储量。但此后30余年间,除英买2井区滚动扩边勘探获得零星发现以外,英买力低凸起再未获得海相油气勘探突破,尤其是位于英买力低凸起马纳火成岩以西的喀拉玉尔袞构造带,仅见个别海相油气勘探苗头。

(2) 陆相油气勘探阶段(1994年至今)

1994年,羊塔1井、羊塔5井在古近系、白垩系先后获得工业油气流,其油气均来源于库车坳陷陆相烃源岩,塔北西部进入陆相油气勘探阶段。1997—2018年,先后完钻8口预探井,除却勒4井、玉中1井和玉中2井失利外,玉东2井、却勒1井、玉东1井、玉东5井和玉东7井均获得了工业油气流。其中,1997年完钻的玉东2井除在白垩系获得高产油流外,在下部的奥陶系灰岩潜山也见良好油气显示,4938~4964m段酸化测试获稠油产量6.4 t/d,首次在塔北西部发现海相油气。随后玉东1井和玉东7井分别以奥陶系和志留系为海相油气兼探目的层,其中,玉东1井奥陶系测试为含气水层,玉东7井在志留系柯坪塔格组发现沥青与轻质油包裹体,均未获得油气发现。

(3) 海相油气重大勘探突破阶段(2023年至今)

2022年,中国石油塔里木油田公司在塔北西部喀拉玉尔袞构造带部署风险探井——雄探1井,完钻井深为6947m,完钻层位为上寒武统下丘里塔格组(图2),该井是塔北西部目前为止唯一一口在寒武系获得勘探突破的井。雄探1井在下丘里塔格组见气测显示58m/15层,全烃含量最高达5.32%,组分全。2023年9月,雄探1井下丘里塔格组储层经酸压改造后选择8mm油嘴,油压为40MPa,获得高产油气流,折合产油量为201 t/d,折合产气量为177899 m³/d,不含水,测试结论为凝析气层,海相油气勘探取得重大突破。此外,该井在志留系柯坪塔格组上段3亚段见到较好的油气显示,荧光显示为两期油气充注,推测为早期重质油充注、晚期轻质油充注,测井解释为差油层3m/1层,初步展现出良好的勘探苗头。雄探1井的突破证实塔北西部具有巨大的海相油气勘探潜力,该地区一跃成为塔里木盆地增储上产的重要领域。

2 油气地球化学特征及油源分析

精细油气源对比是成藏体系复杂垂向叠加分析的重要手段,对于油气成藏分析和成藏模式建立具有重要意义^[8]。前人关于英买力低凸起的油气来源观点不一;肖晖等^[9]认为英买力低凸起的海相油气源自满加尔坳陷寒武系—奥陶系烃源岩;张科等^[10]通过分析轮探1井原油生物标志化合物认为,塔里木盆地超深层轻质原油主要来源于下寒武统玉尔吐斯组;张斌等^[8]根据英买力低凸起原油生物标志化合物分析认为,该区海相原油主要来自于中—上奥陶统烃源岩。但尚无喀拉玉尔袞构造带寒武系海相油气来源的相关报道,系统分析对比雄探1井、玉东2井原油的测试资料,可为研究区油气藏解剖、油气输导体系识别提供直接证据。

玉东2井奥陶系潜山原油的密度在20℃和50℃条件下分别为1.0495 g/cm³、1.0336 g/cm³,凝点>64℃,蜡含量为1.90%,具有低蜡的特点,胶质含量为24.82%,沥青质含量为3.16%(表1)。

雄探1井下丘里塔格组1件原油样品的地面密度在20℃和50℃条件分别为0.8096 g/cm³、0.7873 g/cm³,运动黏度为2.082 mPa·s,动力黏度为1.639 mPa·s,凝固点为-26℃,硫含量为0.419%,蜡含量为2.1%,胶质含量为0.34%,沥青质含量为0.09%,属于“低黏度、低含硫、低胶质+沥青质、低含蜡”的轻质油。雄探1井下丘里塔格组1件天然气样品的相对密度为0.7355,CH₄含量为75.97%,CO₂含量为4.00%,H₂S含量为0.32%,N₂含量为0.03%,干燥系数为0.82,表现为偏湿、CO₂含量中等的特征。

不同沉积环境中形成的烃源岩生成的原油表现出不同的生物标志化合物地球化学特征。张斌等^[8]基于姥植比(Pr/Ph)和重排化合物与规则化合物的比值认为,塔北西部油源为奥陶系海相烃源岩。姜乃煌等^[11]认为海相原油的似甲基二苯并噻吩含量远大于陆相原油,应用该指标判断塔北西部寒武系油气来源也取得了良好效果。

雄探1井原油具有一定的姥植优势,Pr/Ph比值为0.42,原油 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-31.5‰(图3),生物标志化合物具有“高C₂₈三环萜含量、低C₂₉三环萜含量、低C₃₀未知藿烷含量”的特征(图4),均指示其为典型海相原油。原油 Σ 甲基二苯并噻吩(MDBT)/ Σ 甲基菲(MP)比值和甲基菲比率与寒武系玉尔吐斯组烃源岩相近(图5),表明其油源岩为玉尔吐斯组烃源岩。

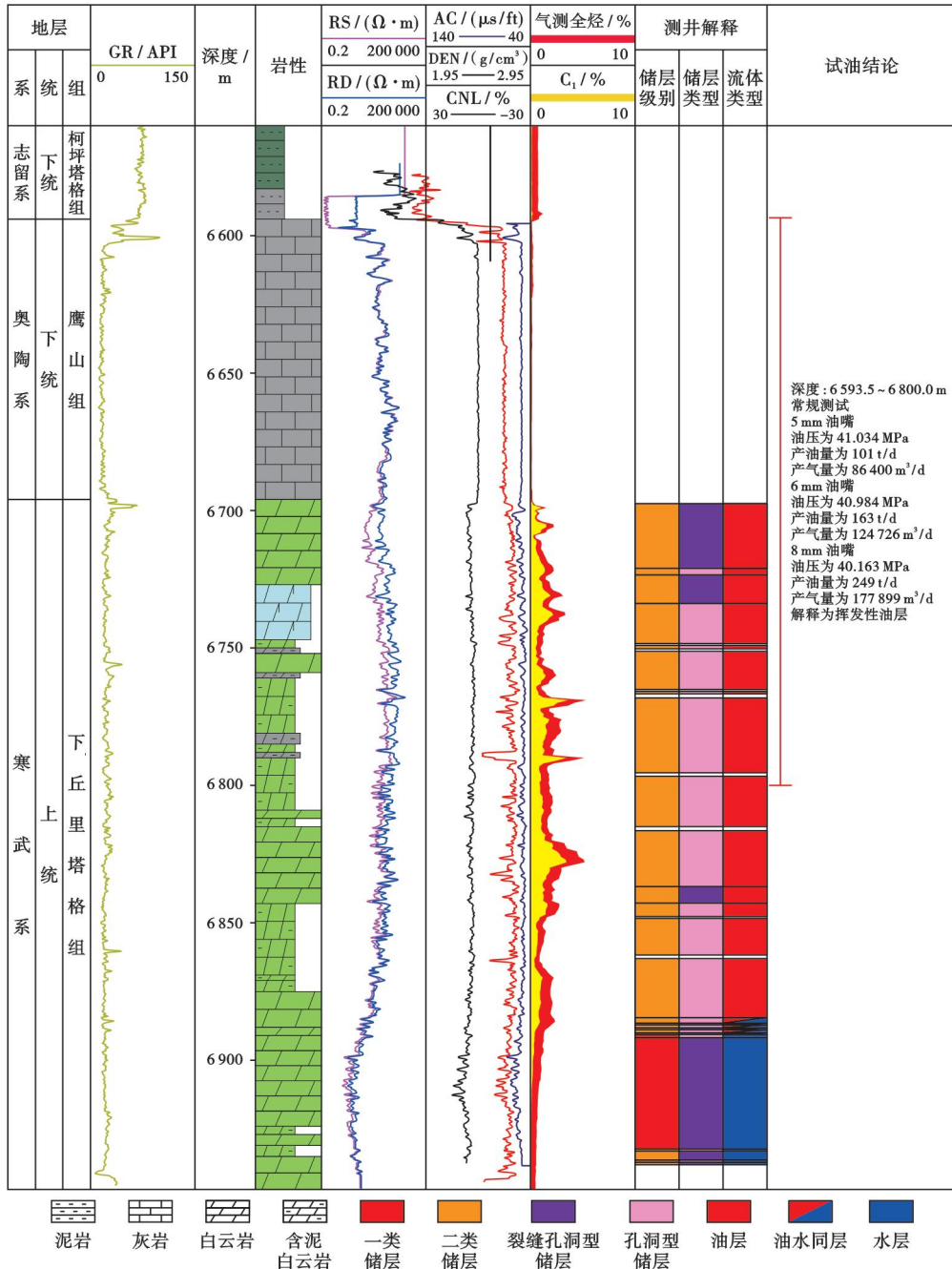


图2 雄探1井寒武系—奥陶系综合地层特征

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic characteristics of Cambrian-Ordovician of Well Xiongtan1

表1 玉东2井、雄探1井海相原油的物理性质

Table 1 Physical properties of the crude oils of Well Yudong2 and Well Xiongtan1

井号	密度(20℃)/ (g/cm ³)	密度(50℃)/ (g/cm ³)	含水量/ %	凝点/ ℃	残碳/ %	灰分/ %	蜡/ %	胶质/ %	沥青质/ %	含砂/ %
玉东2	1.0495	1.0336	5.000	>64.0	22.47	9.34	1.90	24.82	3.16	20.80
雄探1	0.8096	0.7873	0.225	-26.0	0	0	2.10	0.34	0.09	0

3 油气成藏条件

喀拉玉尔袞构造带上寒武统下丘里塔格组白云岩储层油气富集条件相对复杂,油气分布不均一。平面

上,油气主要集中在断裂带及构造高部位,在雄探1井区最为富集;纵向上,油气多层叠置,主要沿构造等值线分布。分析下丘里塔格组油气藏剖面产状特点和侧向遮挡条件,认为其主要为断背斜油气藏。

油气分布规律及其主控因素分析对于深化油气成藏认识、指导油气勘探具有重要意义^[12-13]。综合分析认为,研究区下丘里塔格组油气富集主要受控于烃源岩发育特征、逆冲-走滑断裂输导和喀拉玉尔衮构造上盘古生界构造三大要素。

3.1 玉尔吐斯组烃源岩与前寒武系裂陷槽烃源岩是油气形成的物质基础

充足的油气来源是油气富集成藏的物质基础^[14-15]。周俊峰等^[16]、张水昌等^[17]基于露头 and 岩心资料分析认为,塔北西部下古生界主要发育寒武系玉尔吐斯组及

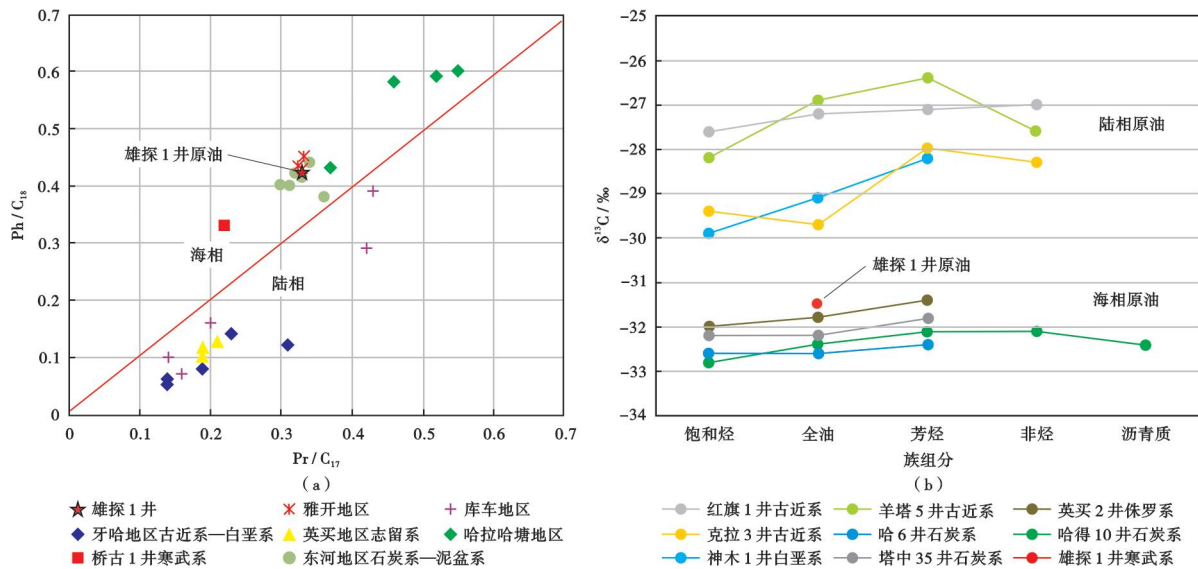


图 3 雄探 1 井原油生物标志化合物特征

Fig. 3 Biomarker compound characteristics of Well Xiongtan1

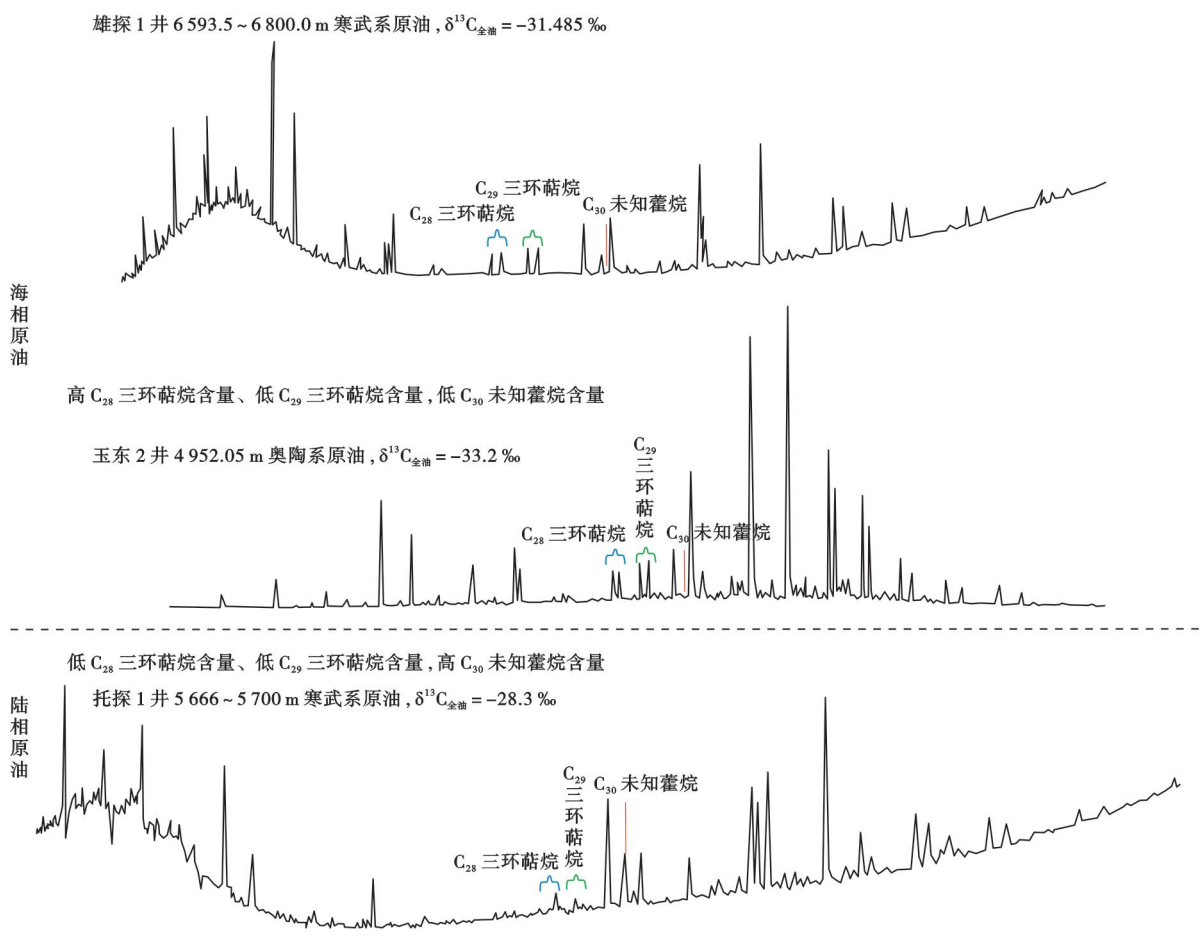
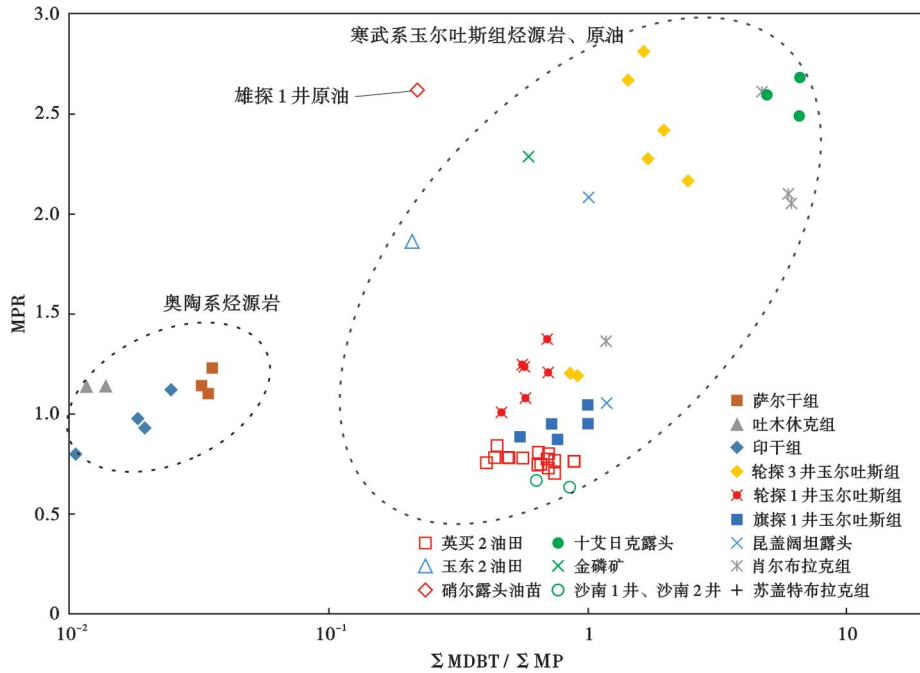


图 4 雄探 1 井原油与典型海相、陆相原油生物标志物特征对比

Fig. 4 Biomarker characteristics comparison of the crude oil of Well Xiongtan1 and the typical marine, continental crude oils



注:MDBT—甲基二苯并噻吩;MP—甲基菲;MPR—甲基菲比率。

图5 雄探1井原油油源对比分析

Fig. 5 Oil-source rock correlation of the crude oil of Well Xiongtan1

奥陶系萨尔干组和印干组3套烃源岩^[7]。雄探1井原油与玉尔吐斯组烃源岩具有相近的饱和烃生物标志化合物特征:高含长链三环萜烷含量、低伽马蜡烷含量、低 C_{28} 甾烷含量和较轻的碳同位素值($\delta^{13}C$ 小于 -31%)。雄探1井原油的 $\Sigma MDBT/\Sigma MP$ 比值为1.16,与玉尔吐斯组烃源岩($\Sigma MDBT/\Sigma MP$ 比值 >0.40)相近,与奥陶系烃源岩($\Sigma MDBT/\Sigma MP$ 比值 <0.10)差异明显,表明该井的油气源自玉尔吐斯组烃源岩。玉尔吐斯组烃源岩在阿瓦提—塔北地区广泛发育,厚度多在10~40 m,在塔北西部的厚度较大,可达30~70 m(图6);总有机碳(TOC)含量平均值介于3%~12%。地震标定资料显示,研究区前震旦系“两凹一隆”特征明显,阿满古梁将阿瓦提凹陷分割为2个生烃中心,其中,满西凹陷向西北部延伸至塔北西部;塔北西部前寒武系裂陷槽烃源岩反射特征明显,且厚度大(图7),是潜在的有利烃源岩发育区。

3.2 油气运移通道

断裂发育是影响构造形成、储层改造及油气运移的关键因素^[18-19],断裂输导体系的时空展布控制着含油气流体的运移方向、路径及分布^[20]。却勒—玉东区块在不同地质时期主要受3种构造应力作用,发育3组断裂体系。第1组是弧形逆冲断裂,主要活动于晚海西期,受马纳火成岩侧向挤压影响、沿中寒武统盐层滑脱所致,垂向上断开中寒武统一二叠系,平面上呈弧形展布,控制了二个弧形构造带分布。第2组是走滑

断裂,主要为NNW向区域I级断裂,活动于晚加里东期—晚海西期,以晚加里东期为主,是塔中、塔北地区大型走滑断裂的一部分,垂向上断开基底—二叠系,是研究区重要的油源断裂。第3组断裂是基底卷入逆冲断裂,主要为NNW向、近EW向,是北部构造应力挤压所致,平面上发育喀拉玉尔袞断裂和却勒4断裂两条断裂,控制了却勒—玉东区块西部两排构造带的展布,其中,喀拉玉尔袞断裂形成于加里东期,持续活动至燕山期,在研究区内延伸约50 km,垂向上断开基底—三叠系,断距约为2 000 m,断面倾角大于 20° ,是该地区重要的油源断裂;却勒4断裂形成于海西期,自基底向上断至三叠系底,平均断距约为500 m,断面倾角大于 40° ,在研究区内的延伸长度为40 km(图8)。

3.3 构造格局

雄探1井位于喀拉玉尔袞构造带上盘穹隆背景上的一个断鼻构造,构造整体被喀拉玉尔袞断裂及其反冲断裂夹持,其中,喀拉玉尔袞断裂呈NW—SE向,控制形成了断裂带上盘的穹隆背斜构造。整个构造表现为断鼻形状,其NW方向发育一个近EW向展布的断背斜构造,形成面积较大的构造圈闭,雄探1井位于该圈闭西高点的东翼斜坡位置,构造条件较好(图1、图9)。

3.4 储集层条件与储-盖组合

3.4.1 储集层特征

塔北地区寒武系下丘里塔格组发育岩溶改造型储集层^[21],主要包括具不同地质背景和成因的潜山岩

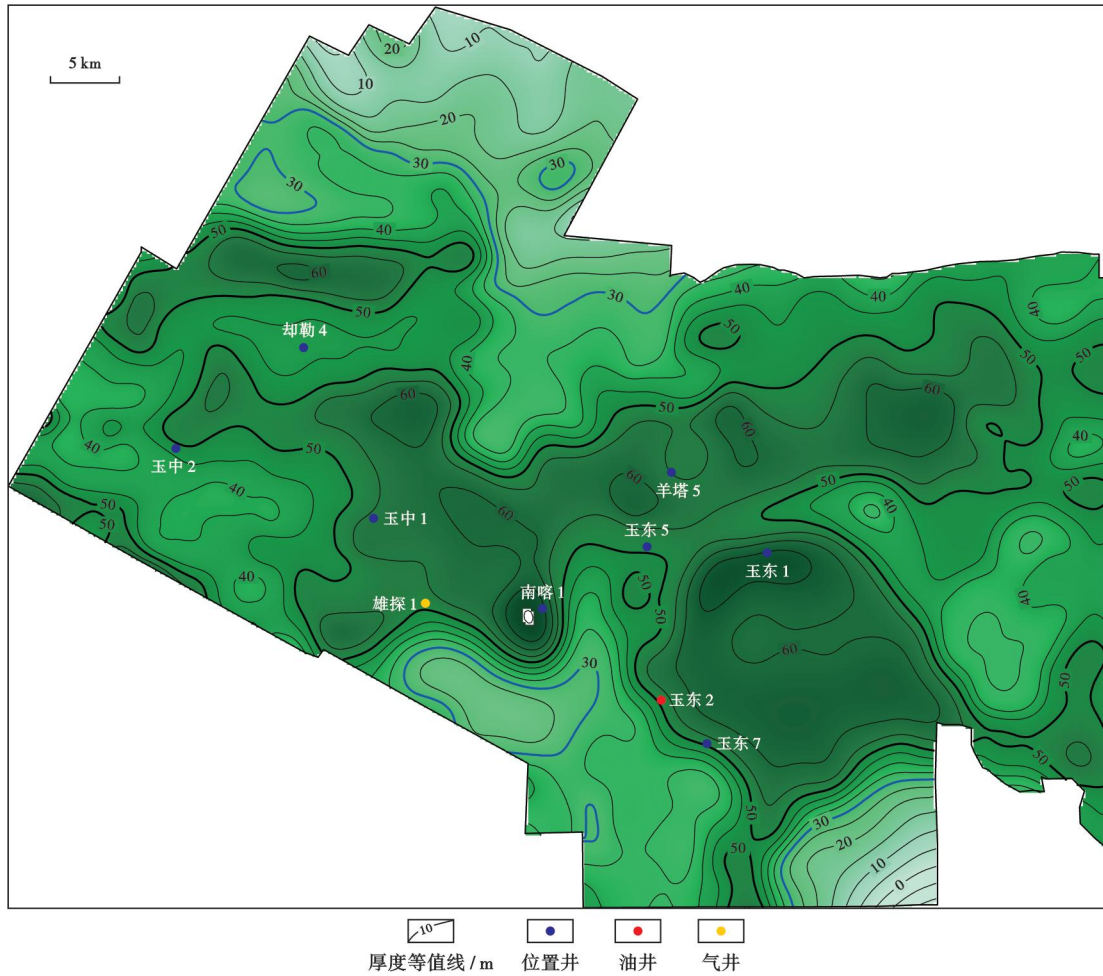
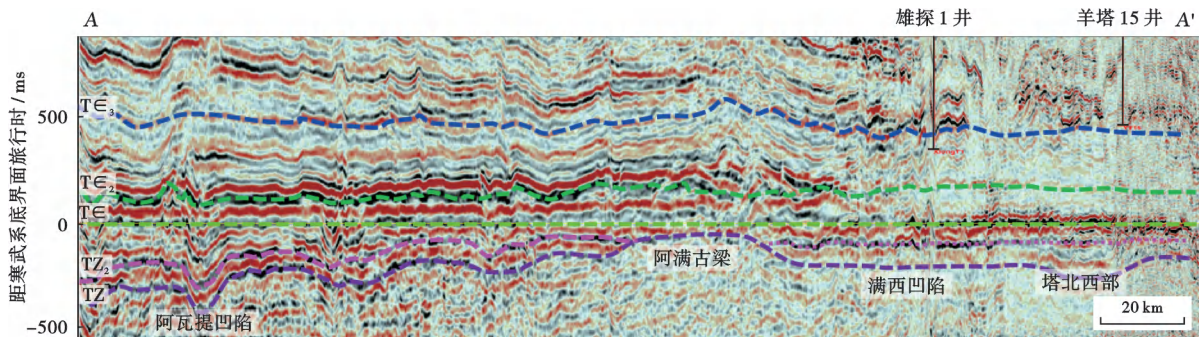


图 6 塔北西部喀拉玉尔袞构造带寒武系玉尔吐斯组烃源岩厚度

Fig. 6 Source rocks thickness of Cambrian Yuertusi Formation in Kalayuergun structural belt, western Tabei uplift



注: TZ—震旦系底; TZ₂—上震旦统底; TE—寒武系底; TE₂—中寒武统底; TE₃—上寒武统底。

图 7 塔北西部喀拉玉尔袞构造带裂陷槽烃源岩地震剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 7 trending seismic profile of source rock of the rift trough in Kalayuergun structural belt, western Tabei uplift

溶、内幕层间岩溶及埋藏-热液岩溶等岩溶类型^[22-24]。岩溶作用通常形成规模不等的溶孔、溶洞及溶缝,因此,岩溶改造型储层具有极强的非均质性^[25]。近年来,在塔里木、四川等盆地的勘探实践表明,岩溶储层的发育主要受 3 个因素影响:高能沉积相带是岩溶储层发育的基础,顶部大型不整合面发育是岩溶储层发育的关

键,断裂和裂缝网格是大气淡水的主要渗滤通道^[26-29]。

喀拉玉尔袞构造带下丘里塔格组与上覆奥陶系鹰山组之间存在岩性突变,由下部的白云岩直接突变为灰岩,自然伽马测井曲线在岩性突变处表现出明显的峰值,揭示上、下地层间存在一个明显的不整合面。地震解释剖面显示,下丘里塔格组顶界面的地震同相轴

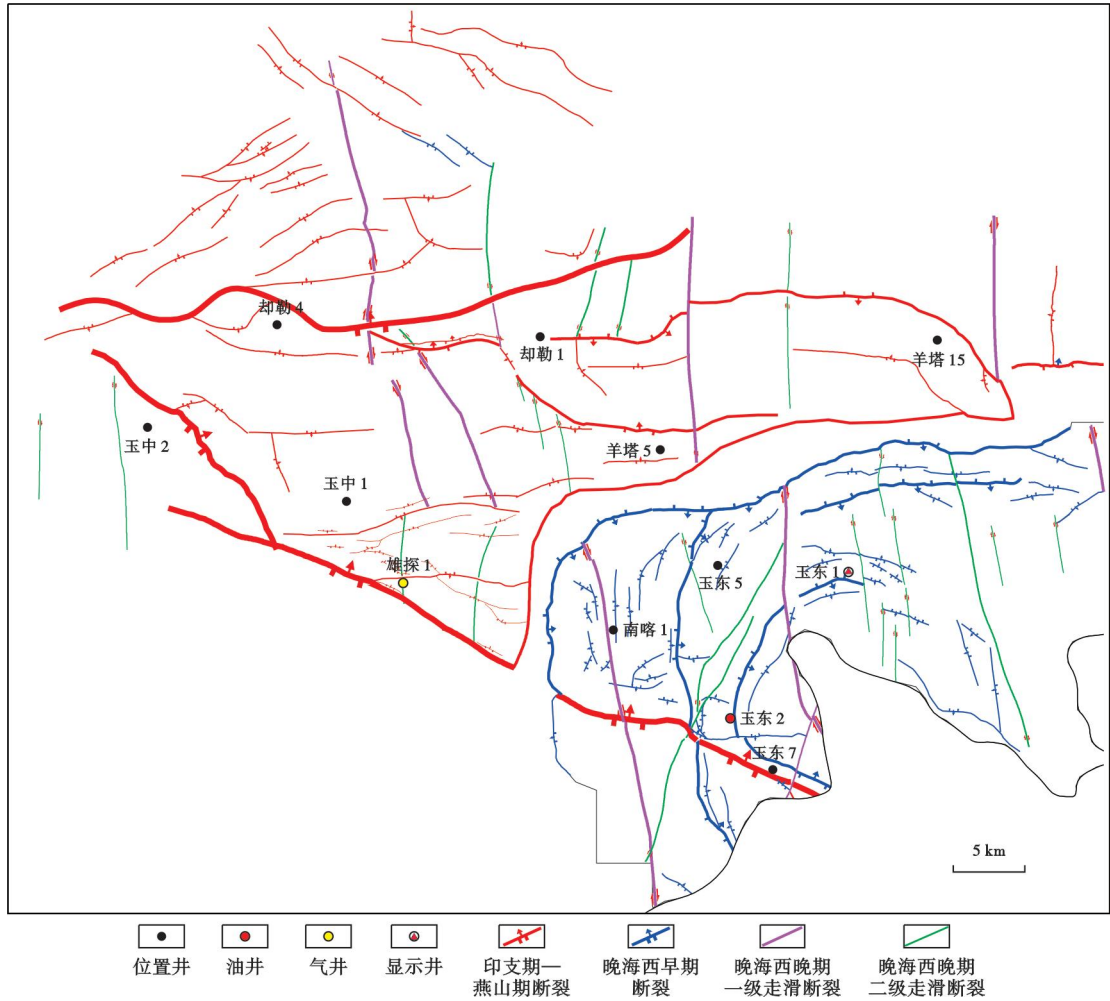
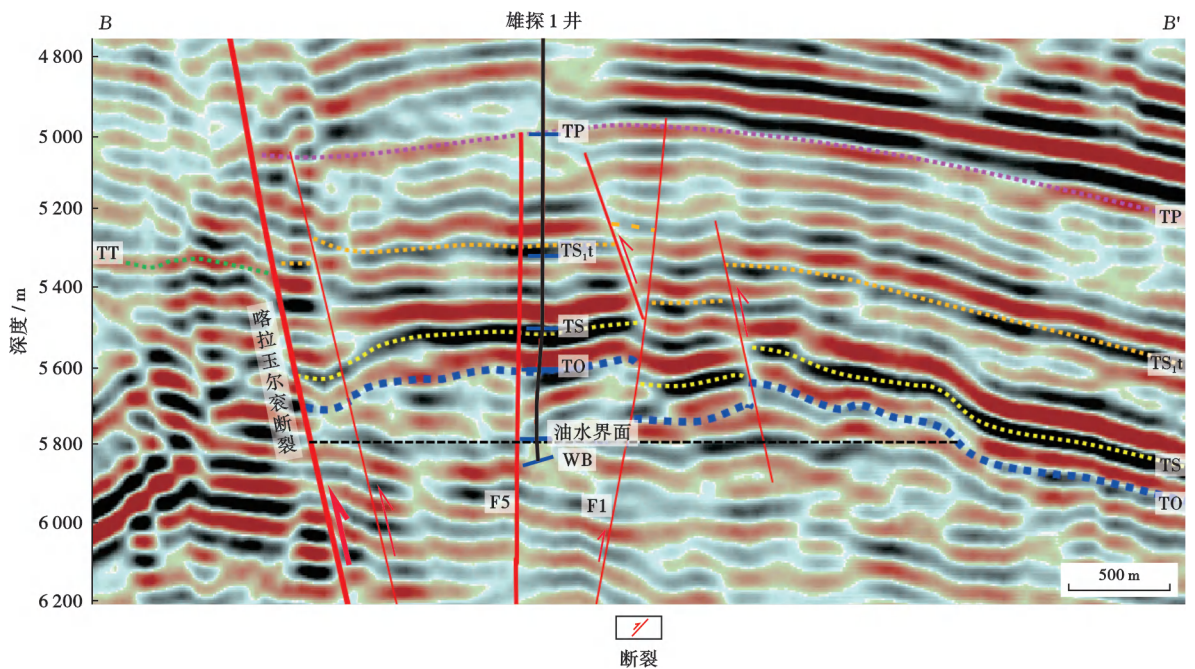


图8 塔北西部喀拉玉尔袞构造带上寒武统断裂纲要

Fig. 8 Fault system of Upper Cambrian in Kalayuerqun structural belt, western Tabei uplift



注: TT—三叠系底; TP—二叠系底; TS_t—志留系塔塔埃尔塔格组底; TS—志留系底; TO—奥陶系底; WB—完钻井深。

图9 过雄探1井SN向地震剖面(剖面位置见图1)

Fig. 9 SN trending seismic profile crossing Well Xiongtan1

连续性较好,可大范围追踪,表明研究区寒武系与奥陶系之间为平行不整合,层间岩溶发育(图 9)。加里东期,喀拉玉尔袞构造带整体属于岩溶储层发育区,下丘里塔格组为局限一半局限台地沉积,台内高能滩广泛发育,为后期层间岩溶改造提供了较好的物质基础。

喀拉玉尔袞构造带寒武系下丘里塔格组岩性主要为晶粒白云岩,储集空间以溶蚀孔洞、晶间(溶)孔和裂缝为主。岩心上可见针孔状基质溶孔较均匀分布,孔径最大为 5 mm,最小为 1 mm,多在 2~3 mm。此外,岩心整体破碎严重,表明裂缝发育。电成像测井图像上,溶蚀孔洞表现为不均匀分布的暗色斑块,被中-高角度裂缝沟通(图 10)。白云石晶体以细晶为主,呈他形一半自形晶粒状较紧密镶嵌,显微镜下可见晶间孔、晶间溶孔和裂缝,部分薄片可见残留颗粒幻影,推测原岩为颗粒灰岩。综合岩心、岩石薄片特征和测井响应,将喀拉玉尔袞构造带下丘里塔格组白云岩储层划分为孔洞型、裂缝-孔洞型 2 种类型(图 11)。

当前,塔北西部仅雄探 1 井在下丘里塔格组取心,但由于岩心破碎,仅 1 件样品符合常规孔渗测试标准,

实测孔隙度为 3.44%,渗透率为 2.64 mD;另有 3 件岩心样品基于工业 CT 扫描分析,平均孔隙度约为 3.50%。雄探 1 井下丘里塔格组测井解释平均孔隙度为 5.00%、平均渗透率为 0.83 mD。综合分析认为,喀拉玉尔袞构造带寒武系下丘里塔格组白云岩储层为低孔、特低渗储层。

3.2 盖层特征

喀拉玉尔袞构造带寒武系下丘里塔格组储层上覆两套盖层^[30-31]:①研究区稳定发育的奥陶系鹰山组致密灰岩,厚度为 100~300 m,测井孔隙度为 0.10%~1.04%(平均为 0.20%),测井渗透率为 0.002~0.257 mD(平均为 0.012 mD)。②致密碎屑岩,受多期构造运动和奥陶系上覆地层遭受不同程度剥蚀的影响,该套盖层在研究区不同构造带差异发育,其中,雄探 1 井区为厚约 80 m 的志留系柯坪塔格组中段泥岩,玉东 2 井区为厚约 80 m 的白垩系卡普沙良群泥岩,玉东 1 井区为二叠系以泥岩和细砂岩为主的砂泥岩段。整体上,雄探 1 井区、玉东 2 井区第 2 套盖层的油气封堵效果优于玉东 1 井区,其与第 1 套盖层叠置可与寒武系下丘里塔格组形成有效的储-盖组合(图 12)。

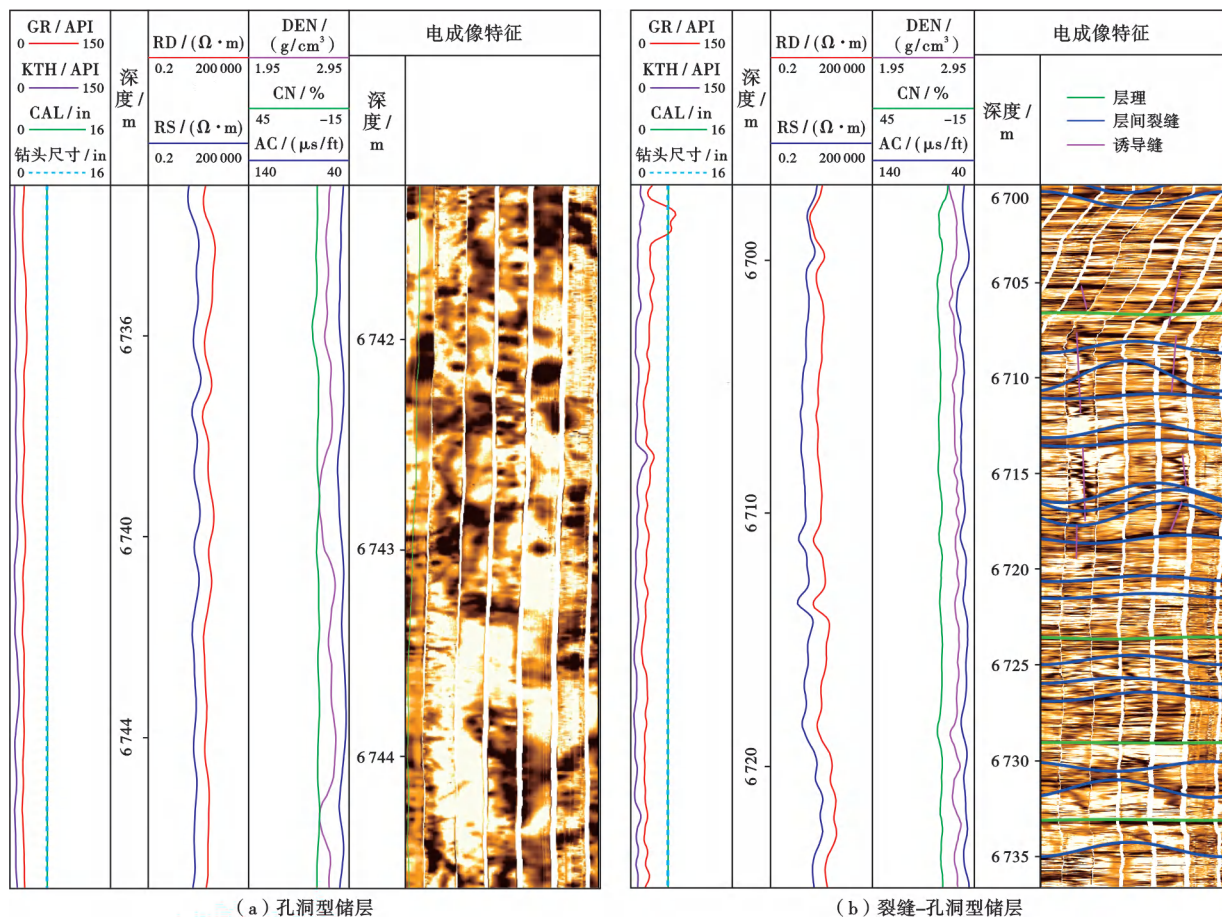
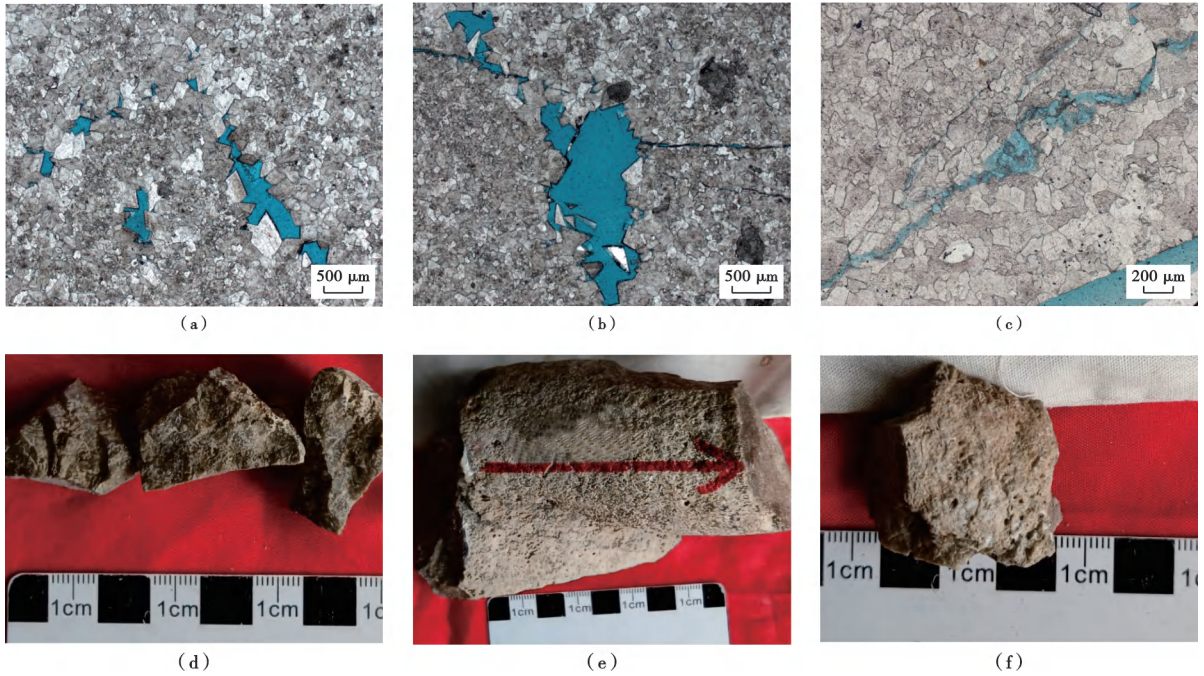


图 10 塔北西部喀拉玉尔袞构造带上寒武统下丘里塔格组成像测井溶蚀孔洞特征

Fig. 10 Characteristics of solution holes of Upper Cambrian Xiaqiulitage Formation in Kalayuergun structural belt, western Tabei uplift



(a) 细晶白云岩, 具晶粒结构, 主要由细晶白云石组成, 含少量粉晶、中晶白云石, 部分白云石晶粒内见泥质, 晶面较脏, 白云石呈他形一半自形晶粒状紧密镶嵌, 发育不规则状白云石晶间孔、晶间溶孔, 孔径为 0.04~1.00 mm, 雄探 1 井 6709.0 m; (b)、(c) 细晶白云岩, 具晶粒结构, 主要由细晶白云石组成, 含少量粉晶、中晶白云石, 部分白云石晶粒内见泥质, 晶面较脏, 白云石呈他形一半自形晶粒状紧密镶嵌, 见 1 条未充填的不规则溶蚀缝, 雄探 1 井 6790.0 m; (d) 细晶白云岩, 岩心较破碎, 裂缝较发育, 雄探 1 井 6708.5 m; (e) 细晶白云岩, 岩心较完整, 表面见溶蚀孔及白云岩基质孔, 斜裂缝、垂直缝发育, 雄探 1 井 6709.0 m; (f) 细晶白云岩, 岩心较破碎, 裂缝较发育, 岩心表面可见针孔状基质孔, 雄探 1 井 6710.0 m。

图 11 塔北西部喀拉玉尔袞构造带上寒武统下丘里塔格组储集空间特征

Fig. 11 Reservoir space characteristics of Upper Cambrian Xiaqiulitage Formation in Kalayurgun structural belt, western Tabei uplift

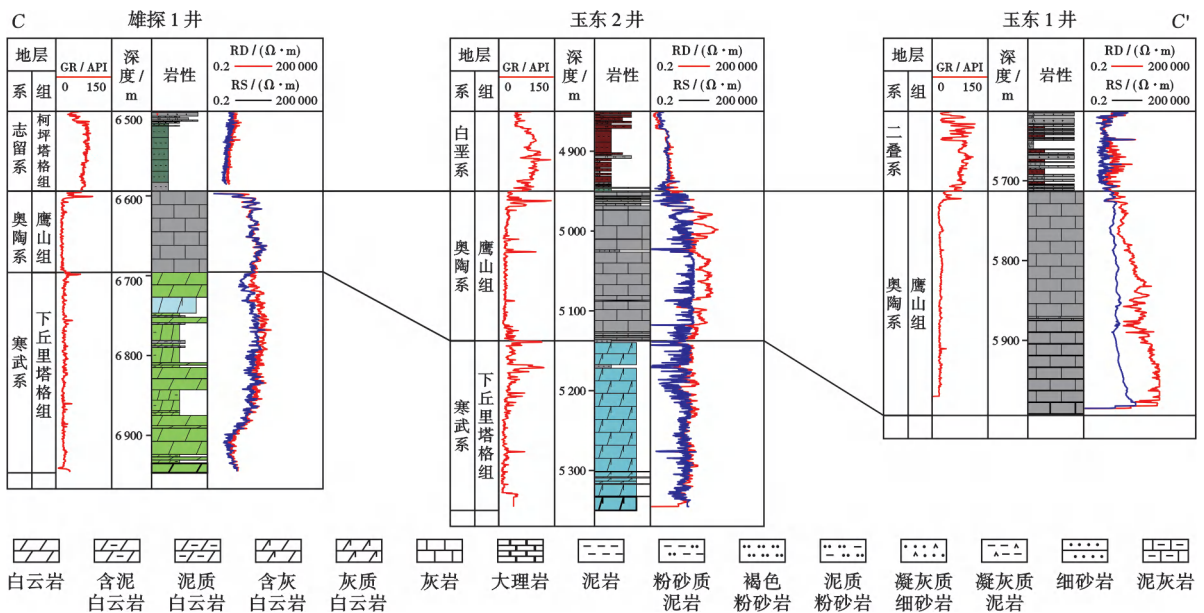


图 12 塔北西部喀拉玉尔袞构造带上寒武统下丘里塔格组盖层对比(剖面位置见图 1)

Fig. 12 Caprock correlation of Upper Cambrian Xiaqiulitage Formation in Kalayurgun structural belt, western Tabei uplift

3.4 圈闭形成与成藏期次

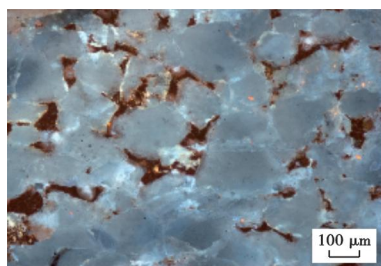
塔北西部地区位于构造转换带,自北向南构造走向由近EW向转变为NW向,NW/NNW向、NE/NNE向调节断裂共轭发育,圈闭分布受断裂控制,主要沿断裂走向呈排带状分布,形成规模油气富集^[5]一个典型的多层系含油、多种油源、多次油气充注的复式油气区^[8]。肖晖等^[9]综合流体包裹体测试资料和埋藏史-热演化史分析认为,英买力低凸起奥陶系油藏的主成藏期为晚加里东期和晚海西期;周俊峰等^[16]根据烃源岩热演化分析认为,晚海西期为奥陶系油藏的主要成藏期。基于雄探1井实钻、实测资料,从构造与成藏关系入手,系统分析了该区油气成藏期次。构造在油气聚集及大一中型油气田形成过程中具有控制作用^[32],喀拉玉尔袞断裂及其伴生断裂不仅控制了圈闭形成,也为深部烃源岩生成的油气提供了良好运移通道。根据构造演化与成藏期次的耦合关系,笔者将研究区寒武系油气成藏划分为加里东期、晚海西期和喜马拉雅期3个阶段。

3.4.1 加里东期

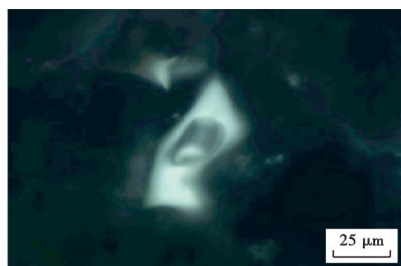
喀拉玉尔袞大断裂形成于加里东期,至晚加里东期,早期断裂继承性活动,形成北高南低的构造格局。该时期,寒武系玉尔吐斯组烃源岩已进入低成熟度生油期,镜质体反射率(R_o)约为0.5%,流体包裹体镜下分析显示,早期形成的油藏遭到破坏形成沥青质,发橙褐色荧光,志留系储层孔隙中可见形成于加里东期的重质油[图13(a)]。

3.4.2 晚海西期

晚海西期,研究区经历了强烈的构造运动,早期发育的断裂持续活动,马纳火成岩发育,走滑断裂开始形成,构造发生翘倾,构造格局由早期的北高南低转变为南高北低,古生界一下部中生界构造层开始形成背斜。该时期,玉尔吐斯组烃源岩进入热演化成熟期, R_o 约为1.0%,镜下可见发黄绿色荧光的油包裹体,其伴生盐水包裹体的均一温度为73.0~91.9℃,为寒武系油气的主要成藏期[图13(b)]。



(a) 加里东期重质油,发橙褐色荧光,雄探1井6708.5 m



(b) 晚海西期成熟油,发黄绿色荧光,雄探1井6708.9 m



(c) 喜马拉雅期轻质油,发蓝绿色荧光,雄探1井6709.7 m

图13 塔北西部喀拉玉尔袞构造带上寒武统下丘里塔格组包裹体特征

5 Fig. 13 Inclusion characteristics of Upper Cambrian Xiaqiulitage Formation in Kalayuergun structural belt, western Tabei uplift

3.4.3 喜马拉雅期

喜马拉雅期,强烈的造山运动使塔北隆起强烈下沉北倾,古近系向南超覆沉积。晚喜马拉雅期,受近SN向挤压应力作用的影响,沿古近系膏盐岩层及上覆地层发育滑脱断层,深部断层重新活动,使得该地区构造格局进一步复杂化,古生界—中生界下部构造层表现为由复杂断块组成的大型断背斜,中生界上部—新生界构造层表现为向北倾斜的斜坡,喀拉玉尔袞构造带最终定型。该时期,玉尔吐斯组烃源岩进入高热演化成熟期, R_o 约为1.5%,镜下可见少量发蓝绿色荧光的油包裹体,其伴生盐水包裹体的均一温度为105.6~112.3℃,为主要成藏期[图13(c)]。

3.5 油藏模式^[6]

综上分析,建立了喀拉玉尔袞构造带寒武系“构造控圈、晚期成藏”的油藏模式。喀拉玉尔袞构造带寒武系生、储、盖、圈、运、保等成藏要素具有良好的互相配置关系,油气成藏条件非常优越。主力烃源岩为阿瓦提凹

陷深部玉尔吐斯组烃源岩和前寒武系裂陷槽烃源岩;储集层为上寒武统下丘里塔格组白云岩;广泛发育的柯坪塔格组中段泥岩与奥陶系鹰山组灰岩组成有效盖层,整体保存条件优越。受早—中加里东期构造运动挤压作用影响,喀拉玉尔袞构造带发育一系列NW—SE向逆冲走滑断裂,地势北高南低。加里东期—燕山期,走滑断裂发育,古生界—中生界下部开始形成背斜构造,圈闭初步形成,该时期,烃源岩进入热演化成熟阶段,为主要成藏期。喜马拉雅期,喀拉玉尔袞构造带构造格局进一步复杂化,圈闭类型最终定型,该时期也是主要成藏期。

综合研究认为,塔北西部喀拉玉尔袞地区上寒武统下丘里塔格组主要发育构造圈闭,油气沿断裂垂向输导至下丘里塔格组形成构造油气藏,且烃源岩主要排烃期与圈闭形成时间耦合性较好,建立了“下生上储、断裂输导、近源成藏”的构造油气成藏模式,整体上,下丘里塔格组油气藏空间上分布有序、平面分布严格受构造控制(图14)。

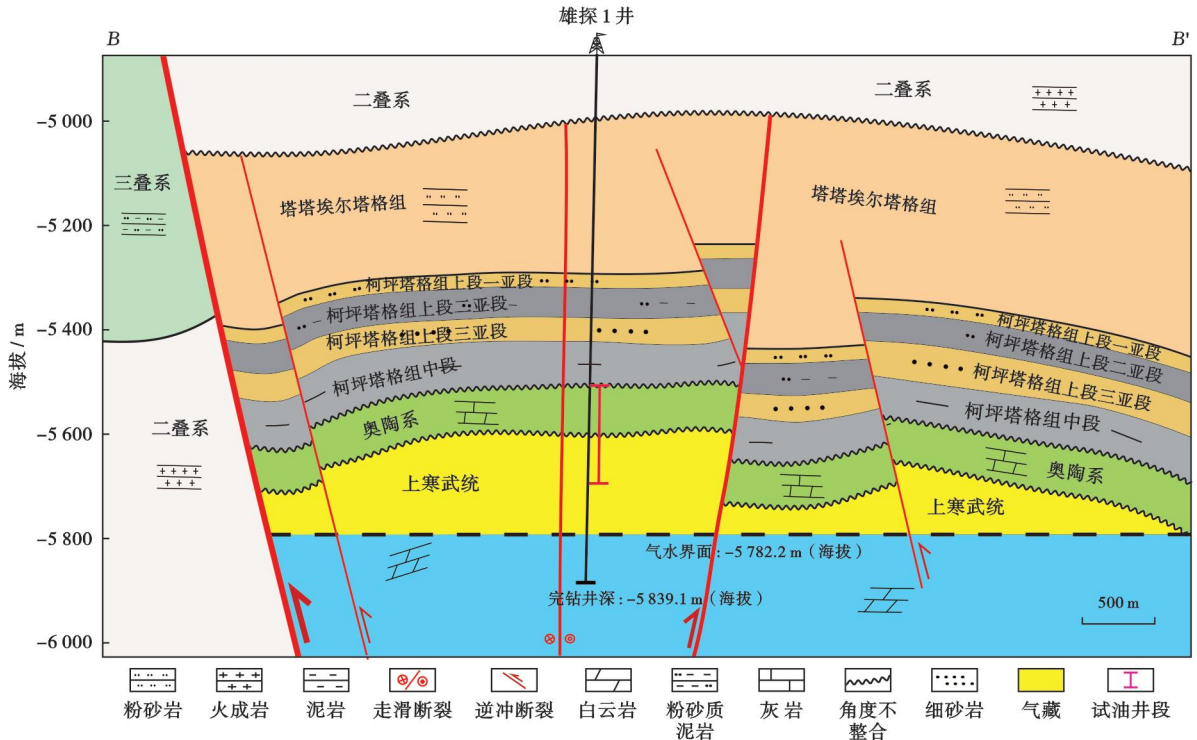


图 14 塔北西部喀拉玉尔袞构造带上寒武统下丘里塔格组油藏样式(剖面位置见图 1)

Fig. 14 Accumulation model of Upper Cambrian Xiaqiulitage Formation in Kalayuergun structural belt, western Tabei uplift

4 勘探突破的启示与意义

喀拉玉尔袞构造带雄探 1 井的突破,对塔里木盆地油气勘探具有重要启示意义:①首次在盆地寒武系下丘里塔格组内幕获得海相油气,首次在塔北西部地区获得海相高产油气流,打开了一个全新的勘探层系与富油气区带,使塔北隆起西段海相油气勘探区由英买 2 井向西拓展了近 100 km。②证实了塔北西部寒武系烃源岩广泛发育,且具有规模生烃潜力,根据三维地震资料预测,该套烃源岩的厚度在 30~50 m, TOC 含量为 5.50%~11.75%,烃源岩条件与富满地区相似,具备规模成藏的物质基础;此外,前寒武系裂陷槽烃源岩可能也是该地区重要的油气来源,因此塔北西部油气勘探潜力巨大。③证实了塔北西部一英买力地区上寒武统海相油气具有良好的勘探前景与巨大的勘探潜力,有望成为塔里木盆地台盆区新的油气增储上产战略接替区。塔北西部一英买力地区上寒武统构造圈闭成排、成带分布,已发现 17 个圈闭及圈闭显示(图 1),总面积为 479 km²,落实石油资源量为 5.4 × 10⁸ t,天然气资源量为 5 200 × 10⁸ m³。

5 结论

(1) 塔北西部喀拉玉尔袞构造带雄探 1 井在寒武系下丘里塔格组取得油气勘探重大突破,油气源对比

显示油气主要来自寒武系玉尔吐斯组及前寒武系裂陷槽烃源岩,具备形成原生油气藏的有利地质条件。主力储层寒武系下丘里塔格组内幕白云岩储层与上覆柯坪组中段泥岩、鹰山组灰岩构成有利的储-盖组合。

(2) 受多期构造运动影响,喀拉玉尔袞构造带断裂演化复杂多样,其中,走滑断裂、逆冲断裂是重要的油源断裂。研究区加里东期形成的圈闭遭受破坏,晚海西期、喜马拉雅期为构造圈闭形成期,深部烃源岩的排烃期与圈闭形成时间耦合性较好,发育“下生上储、断裂输导、近源成藏”的构造油气成藏模式。

(3) 雄探 1 井油气勘探突破证实塔北西部一英买力地区上寒武统具有良好的海相油气勘探前景与巨大的勘探潜力,有望成为盆地台盆区新的油气增储上产战略接替区。

参 考 文 献

[1] 安海亭,李海银,王建忠,等.塔北地区构造和演化特征及其对油气成藏的控制[J].大地构造与成矿学,2009,33(1):142-147.
AN Haiting, LI Haiyin, WANG Jianzhong, et al. Tectonic evolution and its controlling on oil and gas accumulation in the northern Tarim Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(1): 142-147.

[2] 杨海军,邓兴梁,张银涛,等.塔里木盆地满深 1 井奥陶系超深断控碳酸盐岩油气藏勘探重大发现及意义[J].中国石油勘探,2020,25(3):13-23.

- YANG Haijun, DENG Xingliang, ZHANG Yintao, et al. Great discovery and its significance of exploration for Ordovician ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs of Well Manshen 1 in Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(3): 13-23.
- [3] 耿玉海, 李江海, 贺电. 塔里木盆地塔北隆起西部圈闭类型、分布及空间组合规律[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(2): 193-200.
- GENG Yuhai, LI Jianghai, HE Dian. Trap types, distribution and the law of spatial combination in the West Tabei uplift, Tarim Basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2008, 44(2): 193-200.
- [4] 徐桂芬, 林畅松, 刘永福, 等. 塔北西部早白垩世卡普沙良群沉积期古隆起演化及其对沉积的控制作用[J]. *地球科学*, 2016, 41(4): 619-632.
- XU Guifen, LIN Changsong, LIU Yongfu, et al. Evolution of palaeo-uplift and its controlling on sedimentation of Kapushaliang group of Early Cretaceous in western Tabei uplift[J]. *Earth Science*, 2016, 41(4): 619-632.
- [5] 王俊鹏, 赵继龙, 曾庆鲁, 等. 塔北隆起玉东地区盐下薄砂岩高分辨地震预测[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(2): 730-739.
- WANG Junpeng, ZHAO Jilong, ZENG Qinglu, et al. High resolution seismic prediction of thin sandstone under gypsum-salt in the Yudong area of the uplift in the north of the Tarim Basin[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(2): 730-739.
- [6] 苏洲, 刘永福, 韩剑发, 等. 相控约束下的超深薄层砂体预测技术在塔北隆起玉东区块中的应用[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(2): 295-306.
- SU Zhou, LIU Yongfu, HAN Jianfa, et al. Application of ultra-deep sandstone reservoirs prediction technology under seismic facies controlled in Yudong block of Tabei uplift, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(2): 295-306.
- [7] 张君峰, 张远银, 高永进. 塔里木盆地沙井子构造带志留系油气勘探突破及启示[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(1): 203-214.
- ZHANG Junfeng, ZHANG Yuanyin, GAO Yongjin. Silurian hydrocarbon exploration breakthrough and its implications in the Shajingzi structural belt of Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1): 203-214.
- [8] 张斌, 崔洁, 顾乔元, 等. 塔北隆起西部复式油气区原油成因与成藏意义[J]. *石油学报*, 2010, 31(1): 55-60.
- ZHANG Bin, CUI Jie, GU Qiaoyuan, et al. Oil origin classification in composite hydrocarbon accumulation play in the western Tabei uplift and its geological significance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(1): 55-60.
- [9] 肖晖, 赵靖舟, 杨海军, 等. 塔北英买力低凸起奥陶系油藏充注历史的流体包裹体证据[J]. *石油学报*, 2012, 33(3): 372-378.
- XIAO Hui, ZHAO Jingzhou, YANG Haijun, et al. Evidence of fluid inclusions for the hydrocarbon charging history of Ordovician reservoirs in Yingmaili low-uplift, northern Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 372-378.
- [10] 张科, 苏劲, 陈永权, 等. 塔里木盆地寒武系—奥陶系烃源岩油源特征与超深层油气来源[J]. *地质学报*, 2023, 97(6): 2026-2041.
- ZHANG Ke, SU Jin, CHEN Yongquan, et al. The biogeochemical features of the Cambrian-Ordovician source rocks and origin of ultra-deep hydrocarbons in the Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(6): 2026-2041.
- [11] 姜乃煌, 朱光有, 张水昌, 等. 原油似甲基二苯并噻吩含量与沉积环境及次生变化的关系[J]. *地质前缘*, 2008, 15(2): 186-194.
- JIANG Naihuang, ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang, et al. The content of methyl dibenzothiophenes in oil and its relationship with depositional environment and catagenesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(2): 186-194.
- [12] 蒋有录, 卢浩, 刘华, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷新近系油气富集特点与主控因素[J]. *石油学报*, 2011, 32(5): 791-796.
- JIANG Youlu, LU Hao, LIU Hua, et al. Enrichment characteristics and major controlling factors of hydrocarbons in the Neogene of Raoyang depression, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(5): 791-796.
- [13] 平贵东, 吕延防, 范立民, 等. 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷油气富集规律及主控因素分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(10): 4167-4178.
- PING Guidong, LÜ Yanfang, FAN Limin, et al. Rules and main controlling factors of hydrocarbon enrichment of Urxun-Beier depression, Hailar Basin[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(10): 4167-4178.
- [14] 孙雨, 马世忠, 姜洪福, 等. 松辽盆地三肇凹陷葡萄花油层油藏分布特征及其控制因素[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2011, 42(8): 2387-2393.
- SUN Yu, MA Shizhong, JIANG Hongfu, et al. Distribution characteristics and controlling factors for reservoirs of Putaohua oil layer in Sanzhao sag of Songliao Basin[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2011, 42(8): 2387-2393.
- [15] 刘宗堡, 马世忠, 吕延防, 等. 大型凹陷斜坡带油气成藏模式——以三肇凹陷葡萄花油层为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2008, 38(6): 937-945.
- LIU Zongbao, MA Shizhong, LÜ Yanfang, et al. Hydrocarbon accumulation model of big depression ramp area——as Putaohua reservoir in the Sanzhao depression[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2008, 38(6): 937-945.
- [16] 周俊峰, 张虎权, 余建平, 等. 塔北西部玉东地区奥陶系油气成藏条件与勘探潜力[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(S1): 121-129.
- ZHOU Junfeng, ZHANG Huquan, YU Jianping, et al. Analysis of the hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential in the Ordovician in Yudong area of West Tabei uplift[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(S1): 121-129.
- [17] 张水昌, 梁狄刚, 张宝民, 等. 塔里木盆地海相油气的生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- ZHANG Shuichang, LIANG Digang, ZHANG Baomin, et al. Marine hydrocarbon generation in Tarim Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [18] 付广, 李世朝, 杨德相. 断裂输导油气运移形式分布区预测方法及其应用[J]. *沉积学报*, 2017, 35(3): 592-599.
- FU Guang, LI Shizhao, YANG Dexiang. A method forecasting distribution areas of fault transporting oil-gas migration and its application[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(3): 592-599.
- [19] 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(S1):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.
- [20] 康婷婷,赵凤全,刘鑫,等.塔里木盆地塔中北斜坡奥陶系鹰山组三段—四段油气富集主控因素及有利区带[J].*天然气地球科学*,2021,32(4):577-588.
KANG Tingting, ZHAO Fengquan, LIU Xin, et al. Main controlling factors of oil and gas enrichment and favorable zones: case study of 3rd and 4th members of Ordovician Yingshan Formation, northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*,2021,32(4):577-588.
- [21] 赖锦,包萌,刘士琛,等.塔里木盆地深层、超深层白云岩优质储集层测井预测[J].*古地理学报*,2021,23(6):1225-1242.
LAI Jin, BAO Meng, LIU Shichen, et al. Prediction of high quality deep and ultra-deep dolostones reservoirs in Tarim Basin by well logs [J]. *Journal of Palaeogeography*,2021,23(6):1225-1242.
- [22] 沈安江,赵文智,胡安平,等.海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J].*石油勘探与开发*,2015,42(5):545-554.
SHEN Anjiang, ZHAO Wenzhi, HU Anping, et al. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*,2015,42(5):545-554.
- [23] 赵文智,沈安江,胡安平,等.塔里木、四川和鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩规模储层发育地质背景初探[J].*岩石学报*,2015,31(11):3495-3508.
ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, HU Anping, et al. A discussion on the geological background of marine carbonate reservoirs development in Tarim, Sichuan and Ordos Basin, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*,2015,31(11):3495-3508.
- [24] 郑剑锋,沈安江,陈永权,等.塔里木盆地地下古生界白云岩储集空间特征及储层分类探讨[J].*天然气地球科学*,2015,26(7):1256-1267.
ZHENG Jianfeng, SHEN Anjiang, CHEN Yongquan, et al. Reservoir space and reservoir classification of Lower Paleozoic dolomite in the Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*,2015,26(7):1256-1267.
- [25] 赵文智,沈安江,潘文庆,等.碳酸盐岩岩溶储层类型研究及对勘探的指导意义——以塔里木盆地岩溶储层为例[J].*岩石学报*,2013,29(9):3213-3222.
ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, PAN Wenqing, et al. A research on carbonate karst reservoirs classification and its implication on hydrocarbon exploration: cases studies from Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*,2013,29(9):3213-3222.
- [26] 朱东亚,金之钧,张荣强,等.震旦系灯影组白云岩多级次岩溶储层叠合发育特征及机制[J].*地学前缘*,2014,21(6):335-345.
ZHU Dongya, JIN Zhijun, ZHANG Rongqiang, et al. Characteristics and developing mechanism of Sinian Dengying Formation dolomite reservoir with multi-stage karst [J]. *Earth Science Frontiers*,2014,21(6):335-345.
- [27] 罗冰,谭秀成,李凌,等.蜀南地区长兴组顶部岩溶不整合的发现及其油气地质意义[J].*石油学报*,2010,31(3):408-414.
LUO Bing, TAN Xiucheng, LI Ling, et al. Discovery and geologic significance of paleokarst unconformity between Changxing Formation and Feixianguan Formation in Shunan area of Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*,2010,31(3):408-414.
- [28] 王国锋,张大伟,邓守伟,等.四川盆地自贡区块茅口组岩溶储层发育特征及其主控因素[J].*天然气工业*,2022,42(9):63-75.
WANG Guofeng, ZHANG Dawei, DENG Shouwei, et al. Development characteristics and main controlling factors of Maokou Formation karst reservoirs in Zigong block of the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*,2022,42(9):63-75.
- [29] 张满郎,郭振华,张林,等.四川安岳气田龙王庙组颗粒滩岩溶储层发育特征及主控因素[J].*地学前缘*,2021,28(1):235-248.
ZHANG Manlang, GUO Zhenhua, ZHANG Lin, et al. Characteristics of and main factors controlling the karst shoal reservoir of the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in the Anyue gas field, central Sichuan Basin, China[J]. *Earth Science Frontiers*,2021,28(1):235-248.
- [30] 崔海峰,郑多明,张年春,等.英买力地区复合潜山的地层分布及意义[J].*地球物理学进展*,2008,23(5):1514-1519.
CUI Haifeng, ZHENG Duoming, ZHANG Nianchun, et al. Stratigraphic distribution of complex buried hill and its significance in the Yingmaili area [J]. *Progress in Geophysics*,2008,23(5):1514-1519.
- [31] 崔海峰,郑多明,李得滋.英买力地区碳酸盐岩内幕油气藏特征及勘探方向[J].*石油地球物理勘探*,2010,45(S1):196-201.
CUI Haifeng, ZHENG Duoming, LI Dezi. Reservoir characteristics and exploration trend for carbonate inner reservoir in Yingmaili area [J]. *Oil Geophysical Prospecting*,2010,45(S1):196-201.
- [32] 王建民,王佳媛.鄂尔多斯盆地伊陕斜坡上的低幅度构造与油气富集[J].*石油勘探与开发*,2013,40(1):49-57.
WANG Jianmin, WANG Jiayuan. Low-amplitude structures and oil-gas enrichment on the Yishaan slope, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*,2013,40(1):49-57.

(收稿日期 2023-12-25 改回日期 2024-02-16 编辑 肖 飞)