

塔里木盆地塔北台盆区奥陶系油气分布有序性

云露,曹自成,耿锋,汪洋,丁勇,刘永立

(中国石化西北油田分公司,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:塔河和顺北油气田是中国石化在塔里木盆地塔北台盆区发现的面积最大、富集程度最高、油气连片分布、多层系聚集的两大油气田。分析了塔河和顺北油气田奥陶系油气藏的油气性质、油品多相态、成藏模式与差异成藏富集、油气井油气产出与断裂差异活动性,研究了塔北台盆区奥陶系油气分布有序性。结果表明:①多源多期生排烃、烃源岩差异热演化、长期稳定发育的古隆起和古斜坡背景及储层形成与发育共同控制了塔北台盆区油气性质和油品相态的有序分布。②多期构造调整和多期成藏控制了塔北台盆区气藏-超重质油藏的油气主成藏期、油气藏类型有序分布和油气富集程度。③断裂垂向导和断裂区东部岩性与不整合面侧向导形成了顺北成藏模式;顺北地区多为原地充注,油柱高度大;坡度控制下侧向导调整与通源断裂带规模控制了油气差异富集;烃源岩演化特征控制了本区在海西晚期和燕山期成藏为主的原生油气藏分布;断裂、不整合面和岩溶缝洞体横向输导为主形成了塔河成藏模式;塔河油气田呈现多期立体连片成藏,深大断裂带与古隆起和古斜坡控制了油气差异富集。④在富油气区带整体有序成藏背景下,通源走滑断裂带具有“控储、控藏、控富”有序成藏特性,油气沿深大走滑断裂带运移路径周边圈闭富集。⑤根据塔里木盆地塔北台盆区奥陶系油气有序性分布,提出环满加尔坳陷西缘、环轮台断裂带和环阿瓦提北坡为立体勘探增储上产潜力区。

关键词:富集规律;有序分布;油气藏;奥陶系;顺北地区;塔河地区;塔北台盆区;塔里木盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Regularity of the Ordovician hydrocarbon system distribution in the Tabei non-foreland area of the Tarim Basin

YUN Lu, CAO Zicheng, GENG Feng, WANG Yang, DING Yong, LIU Yongli

(Northwest Oil Field Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The Tahe and Shunbei oil and gas fields, discovered by SINOPEC, are recognized as two major oil and gas fields in the Tabei non-foreland area of the Tarim Basin (also referred to as the study area). Both fields exhibit contiguous hydrocarbon distribution and accumulation of multilayer systems, boasting the largest areas and the highest degrees of hydrocarbon enrichment in the study area. Focusing on the Ordovician hydrocarbon reservoirs in these two oil and gas fields, we investigate their hydrocarbon properties, multiple hydrocarbon phases, hydrocarbon accumulation patterns, differential hydrocarbon enrichment, production performance, and differential fault activity. Accordingly, we explore the orderly distribution of the Ordovician hydrocarbon systems in the study area. The results indicate that the orderly distributions of hydrocarbon properties and phases in the study area are jointly controlled by the multi-source and multi-stage hydrocarbon generation and expulsion, differential thermal evolution of source rocks, long-term stable evolution of paleo-uplifts and -slopes, and the formation and evolution of reservoirs. The major hydrocarbon accumulation periods of gas and ultra-heavy oil reservoirs, orderly distribution of hydrocarbon reservoir types, and the degree of hydrocarbon enrichment in the study area are governed by multi-stage structural adjustments and corresponding multi-stage hydrocarbon accumulation. In the Shunbei area, the hydrocarbon accumulation pattern is characterized by vertical hydrocarbon transport along faults and lateral transport via lithologic carrier beds and unconformities in the eastern part of the study area, determining that hydrocarbon accumulation in this area is predominantly driven by in-situ

收稿日期:2024-07-17;修回日期:2024-12-18。

第一作者简介:云露(1972—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质综合研究。E-mail:yunl.xbsj@sinopec.com。

通信作者简介:丁勇(1968—),男,博士、研究员,石油地质与油气成藏综合研究。E-mail:178932832@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(U20B6001, U21B2063, 42272167, 41902160, U19B6003);中国石化科技部项目(P23186)。

hydrocarbon charging, exhibiting great oil column heights. The differential hydrocarbon enrichment in this area is controlled by lateral hydrocarbon adjustments and the scale of source rock-rooted fault zones under certain slope gradient. The distribution of primary hydrocarbon reservoir, principally formed during the Late Hercynian and the Yanshanian, is governed by the evolutionary characteristics of source rocks in the area. In contrast, the Tahe area manifests a hydrocarbon accumulation pattern dominated by lateral hydrocarbon transport along faults, unconformities, and fracture-cavity karst bodies. The Tahe oil and gas field largely exhibits multi-stage hydrocarbon accumulation in vertically layered and laterally contiguous reservoirs, resulting in differential hydrocarbon accumulation governed by deep-seated fault zones and paleo-uplifts and -slopes. Against the backdrop of the overall orderly hydrocarbon accumulation in the hydrocarbon-rich zones, the source rock-rooted strike-slip fault zone functions to control hydrocarbon storage, accumulation and enrichment in an orderly manner, with hydrocarbons being trapped and enriched around the migration pathways around the deep-seated strike-slip fault zone. Given the orderly distribution of the Ordovician hydrocarbon system in the study area, it can be inferred that the potential areas for reserve and production increase via all-round exploration include the circum-western margin of the Manjiaer Depression, circum-Luntai fault zone, and the circum-Awati north slope.

Key words: enrichment pattern, orderly distribution, hydrocarbon reservoir, Ordovician, Shunbei area, Tahe area, Tabei non-foreland area, Tarim Basin

引用格式: 云露, 曹自成, 耿锋, 等. 塔里木盆地塔北台盆区奥陶系油气分布有序性[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 15–30. DOI: 10. 11743/ogg20250102.

YUN Lu, CAO Zicheng, GENG Feng, et al. Regularity of the Ordovician hydrocarbon system distribution in the Tabei non-foreland area of the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 15–30. DOI: 10. 11743/ogg20250102.

前人对油气分布有序性研究有过论述,翟光明^[1]等揭示了含油气盆地形成与区域构造背景及演化的紧密联系,指出盆内构造单元、烃源岩、储集层、盖层沉积条件以及油气藏类型等5个方面均遵循着一定的分布规律,这些规律共同决定了从前陆盆地到克拉通盆地油气藏分布的有序性,构建了一个以复合油气藏为显著特征的有机统一体系。何治亮^[2]等认为塔里木盆地台盆区在“大埋深、高压、低地温”的特殊环境下,生烃过程受到抑制,但液态烃的分布深度却可达10 km以上,并强调古构造高部位在加里东中-晚期和海西期对早期油气运聚起到了关键作用,而燕山晚期—喜马拉雅期活动的走滑断裂带则主导了晚期高熟油气的富集。郭旭升^[3]等基于四川盆地的勘探现状和进展,以主力烃源岩为核心,详细划分了四川盆地海相碳酸盐岩全油气系统,并深入分析了各含油气系统的成藏特征,总结了常规与非常规一体化成藏的规律,为未来的勘探方向提供了指导。不难看出,油气分布的有序性是一个涉及多因素、多阶段和多尺度的复杂地质现象。在叠合盆地中,多期构造活动、多套油气源层、多期成烃和排烃、多期成藏以及多期运移再分配等特点共同促成了油气在纵向上多层系、平面上多类型的复合油气藏的有序分布规律。油气分布有序性是表征油气差异富集规律的重要途径,能够为寻找接替方向提供重要依据,

然而前期对塔里木盆地塔北台盆区奥陶系油气有序分布系统研究与成因机理探讨较少。通过研究关键成藏要素(如压力、流体和储集性等)的联动演化及其耦合控藏作用,深入理解油气有序性分布及差异性富集的内在机理,从而能更有效地指导油气勘探和开发。

塔北台盆区位于塔里木盆地北部(图1),地理条件复杂,构造活动强烈。塔河和顺北油气田作为该区域的重要油气田,其勘探开发成果充分展示了该区良好的多层系油气立体勘探前景。这两个油气田跨越多个地质构造单元(图1b),受西昆仑山、阿尔金山和天山三大古洋盆消减闭合和碰撞造山等远程构造活动影响,其下古生界断裂体系表现出多样性和复杂性,特别是小位移走滑断裂体系的发育对油气的运移和富集起到了关键作用(图1c)^[4-7]。

勘探实践证实,塔北台盆区油气资源富集度极高^[4-18],具有油气分布广泛、多层系聚集、储量丰富和油品多相态分布等特点。其中,塔河油气田在多个地层展现出多期、立体成藏特性,油气性质及油气藏相态呈现出有序分布特征,顺北地区也具有相似的多期成藏和油气性质及油气藏相态有序分布的特点。然而,对于塔里木盆地奥陶系油气藏整体成藏特征与有序分布规律缺乏系统分析,特别是对控制有序分布的油气成藏过程和主控因素缺乏系统研究和总结。

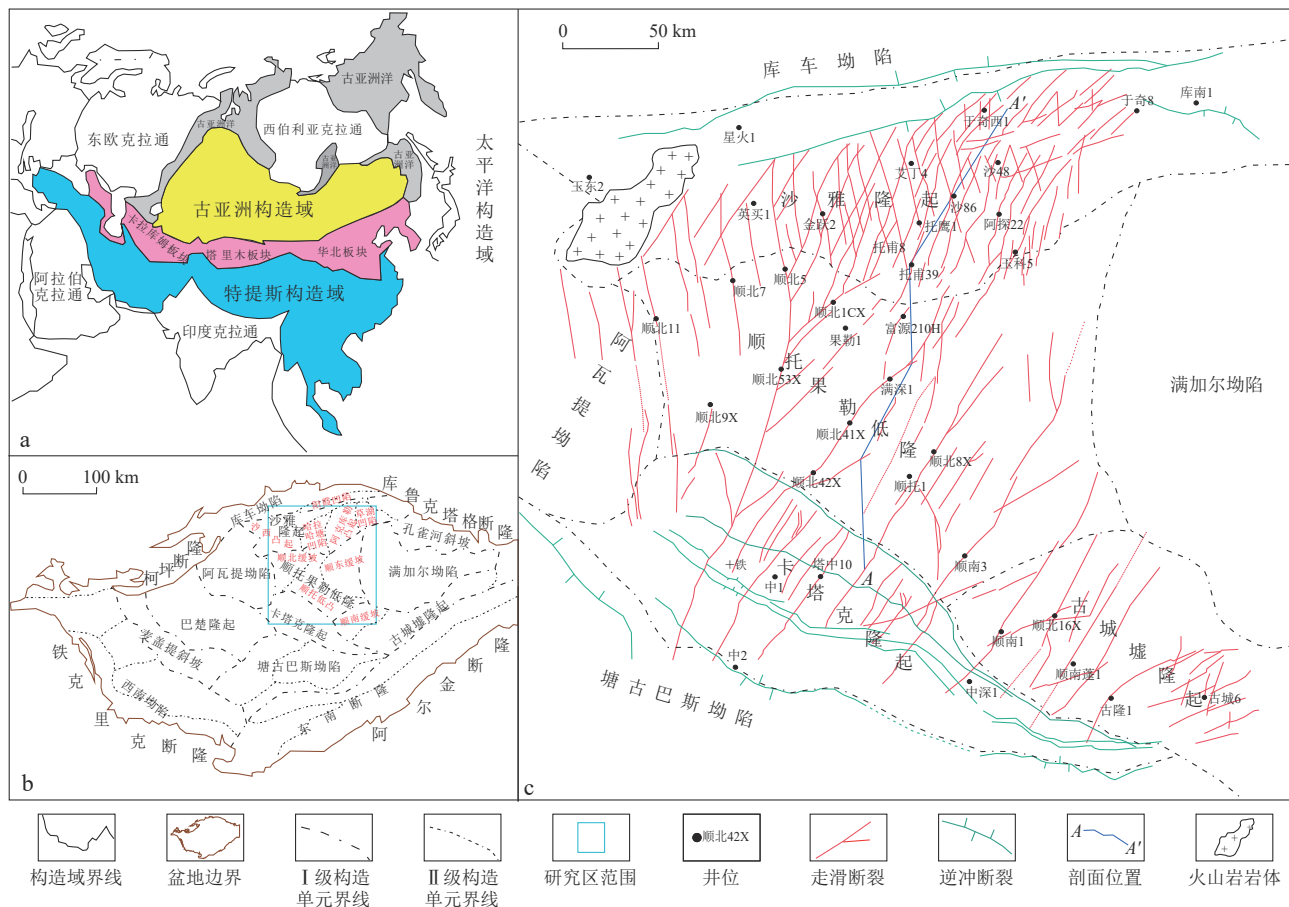


图1 塔河地区和顺北地区构造位置与中-下奥陶统断裂展布

Fig. 1 Structural location of the Tahe-Shunbei area and distribution of the Middle-Lower Ordovician faults in the area

a. 全球大地构造位置; b. 塔里木盆地构造单元; c. 研究区中-下奥陶统顶面(T_7^4)断裂展布

本文基于近年来在塔河和顺北油气田开展的多期成藏过程与主控因素、断裂体系与油气运移、油气藏分布成因研究以及油气富集规律与勘探方向等国家级和企业级科研项目成果,通过对塔河和顺北油气田的奥陶系油气藏中的油气性质、油品多相态、成藏模式与差异成藏富集、油气井油气产出与断裂差异活动性等进行系统分析,进一步探讨塔里木盆地奥陶系油气有序性分布成因和控制因素,以期对未来勘探方向提供更有力的指导。

1 塔北台盆区油气性质与油气藏有序性分布

1.1 塔北台盆区主要油气藏特征

1.1.1 塔河油气田

塔河油气田奥陶系碳酸盐岩圈闭独具特色,属于

典型的风化壳岩溶缝洞型地层圈闭^[8]。这类圈闭的形成源于构造-岩溶旋回的复杂作用,通过多个缝洞单元在三维空间内的交织叠合,构建了一个复合油气藏系统。该系统拥有独立的油-气-水循环体系,形态各异且不规则。这些单独的油气藏(缝洞单元)叠加方式多样,形成了层次丰富的含油区域,展现出不均匀但连片的富集特征。勘探实践和综合研究表明,塔河地区奥陶系油气藏具备以下特征。

1) 储集体的核心构成是缝洞单元,这些单元各自独立,构成相对完整的油气藏。而基岩本身并不具备显著的储集和渗透性能。储集体的分布严格遵循古风化壳的分布规律,平面上相互叠加,纵向上则因构造-岩溶旋回的影响而分层。

2) 盖层可以是上覆稳定的泥岩层,也可以是那些不具备储集和渗透性能的基岩。

3) 油气藏内部,缝洞单元的边界主要由不具储集和渗透性能的基岩构成,此外,被砂-泥质、硅质和方解石等充分充填的断裂也充当了边界角色。

4) 从整体上看,油气藏并不拥有统一的底水层,而是呈现东高、西低的自然趋势。整个油气田可被细分为多个独立的油-水体系,每个体系都有其独特的油-水界面,而岩溶和断裂的发育程度则是影响油-水界面深度的关键因素。

5) 油藏流体的性质在此地区展现出显著的变化,由东南至西北,依次分布着凝析气、轻质油、正常油和重质油,这种有序的分布也伴随着原油密度从 0.82 g/cm^3 逐渐上升至 1.00 g/cm^3 以上(图2)。

6) 塔河油气田奥陶系油藏的平均压力系数为

1.10,表明其属于正常的压力系统;而平均地温梯度为 $2.10 \text{ }^\circ\text{C}/(100 \text{ m})$,则显示出偏低温系统的特性。平面上压力差异分布显著,其主要驱动力为水驱和弹性驱。

7) 高产井均分布在古隆起、古斜坡及深大断裂带上(图2),表现在塔河地区高产井均分布在阿克库勒鼻凸古隆起及外围TP39井区的I级和II级主干断裂带上。此外油气藏油品性质变化大,但与中-下奥陶统鹰山组顶界面(T_7^5)地温分布趋势一致(图2),高地温区以气为主,低地温区以油为主。总体具有高温-高压、超稠-超黏和高含硫的特性,温度可高达 $140 \text{ }^\circ\text{C}$,平

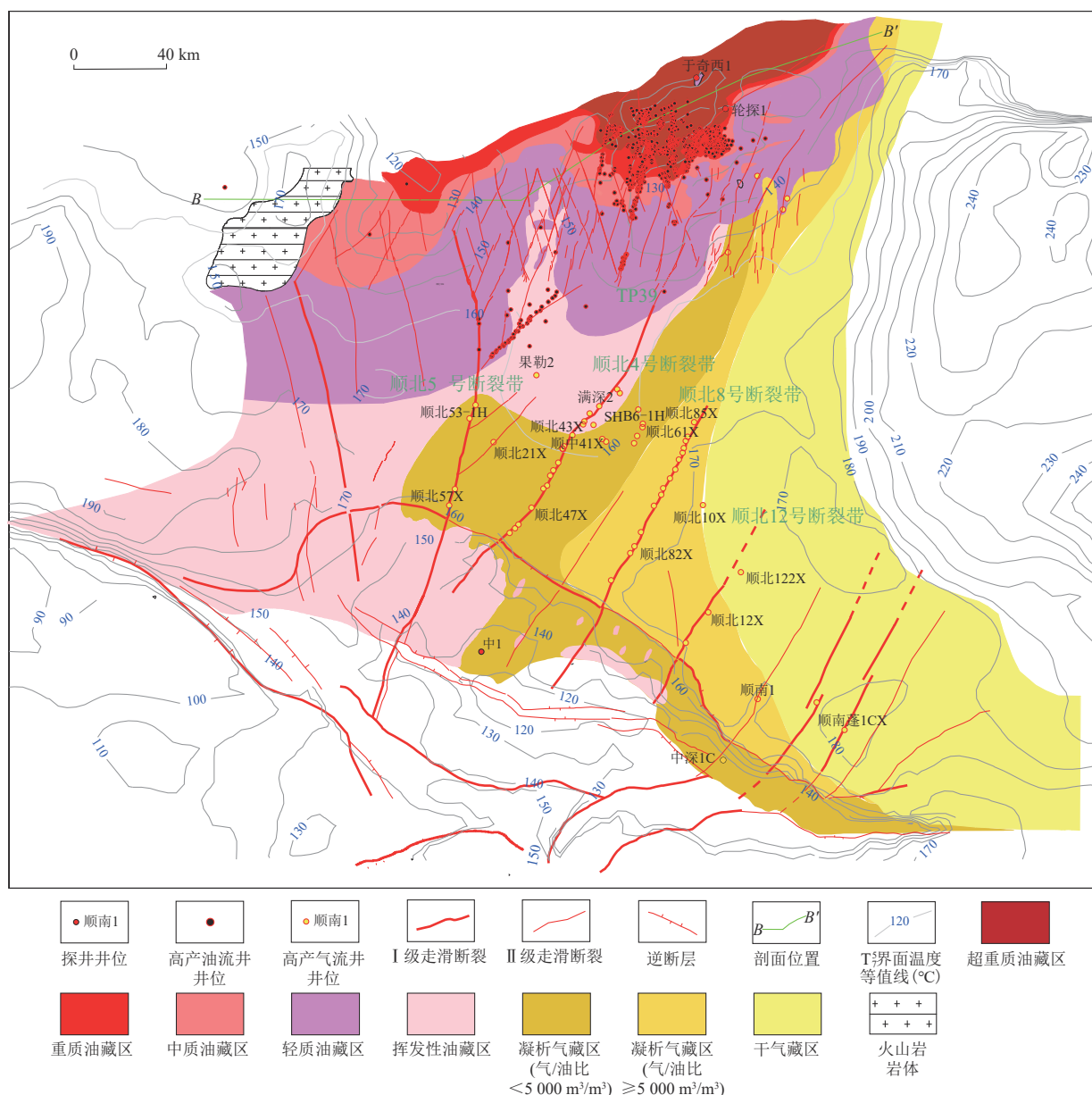


图2 塔北台盆区奥陶系油气藏、 T_7^5 界面温度、高产井和主干断裂带分布叠合图

Fig. 2 Map showing the distributions of the temperatures at the interface between the Ordovician hydrocarbon reservoirs and the T_7^5 , as well as high-yield wells and major fault zones in the Tabei non-foreland area
(T_7^5 为中-下奥陶统鹰山组顶面。)

均油藏压力超过 60 MPa。阿克库勒凸起核部原油密度多数在 0.98 g/cm^3 以上,局部最低原油密度为 0.82 g/cm^3 , 50°C 时原油黏度约为 $1\,000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 部分区域原油黏度高达 $130 \times 10^4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 西南部轻质油区富含硫化氢。

总体上,塔河油气田奥陶系油气藏在多期岩溶控储体系下,储层非均质性强,呈现立体连片成藏,深大断裂带与古隆起和古斜坡共同控制油气差异富集。

1.1.2 顺北油气田

顺北油气田是由一系列断控缝洞体油气藏构成的独特的“断控缝洞体油气藏群”^[19-22]。这些油气藏沿着走滑断裂带分布,其形成不受传统构造控制,展现出无统一油-水界面的特性。这些油气藏的特点在于平面上规模宏大但宽度较窄,同时在纵向上油气柱高度显著。其储层主要由中-下奥陶统的碳酸盐岩构成,这些岩石经走滑断裂多期活动后破碎,被后期流体溶蚀改造,形成了独特的缝洞型储层。而盖层则由上覆的上奥陶统泥岩和泥灰岩及中-下奥陶统内部的致密碳酸盐岩组成。圈闭类型属于典型的断控(缝洞)型圈闭。

顺北油气藏的平面分布主要由断裂带控制,断裂带的活动强度和构造样式决定了油气藏在平面分布上的宽度,宽度范围为 $300 \sim 1\,600 \text{ m}$ 。高产井主要分布在 I 级和 II 级断裂带,在纵向上,油气藏的油柱高度大,进入特定地层(如一间房组)顶面的油气柱高度可达 430 m 。这些油气藏的温-压系统呈现出高温、常压的特点,且顶面埋深普遍位于 $7\,300 \text{ m}$ 以下。总体上,顺北地区油气藏在断裂控储-控源-控聚体系下,油柱高度大,储层非均质性更强,坡度控制下,侧向调整与通源断裂带规模控制了油气差异富集。

尽管顺北油气田内部不同断裂带之间存在显著差异,但整体而言,油气藏呈现出西油东气、整体成藏、断裂带富集和油气柱高度大的特征^[23]。顺北地区原油物性以中质油-轻质油气为主^[20],如在顺北5号带北段,原油密度介于 $0.828\,1 \sim 0.843\,0 \text{ g/cm}^3$,平均值为 $0.834\,0 \text{ g/cm}^3$,显示出轻质油的特征;而在顺北5号带中段、顺北1号带分支和顺北1号断裂带,原油密度较低,介于 $0.796\,0 \sim 0.803\,0 \text{ g/cm}^3$,平均值为 $0.799\,0 \text{ g/cm}^3$,属于挥发原油范畴。原油的黏度与其密度紧密相关,在 30°C 下测定,顺北地区的原油黏度范围为 $1.95 \sim 7.92 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,平均值为 $2.51 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,属于低黏原油。原油的凝固点则为 $-26^\circ\text{C} \sim -5^\circ\text{C}$,平均值为 -16°C 。原油的含硫量较低,介于 $0.10\% \sim 0.21\%$,平均值为 0.11% ,属于低含硫原

油。原油的含蜡量平均为 4.70% ,显示出高含蜡原油的特点。原油的初馏点范围为 $51.50^\circ\text{C} \sim 80.00^\circ\text{C}$,平均值为 66.05°C ,属于高初馏点原油。

1.2 油气性质平面有序分布

塔北台盆区奥陶系油气藏油气性质差异大,整体呈现出“北重南轻、西油东气”的有序分布格局(图2)。塔河油气田东南部油质轻、成熟度高,西北部油质重、成熟度低(与地温分布趋势一致);顺北油气田从北向南,原油密度逐渐减小,气/油比则逐渐升高,这些物理性质的分布特点与塔河油气田呈现出类似的有序性(图2)。

塔河油气田流体性质变化较大,尤其是奥陶系油气藏几乎涵盖了所有的烃类流体类型,原油密度虽然在不同区域差异明显,但总体上呈“北重南轻、西油东气”的有序分布格局^[22]。西北部艾丁-于奇西区块原油属超重质,密度超过 1.00 g/cm^3 ;阿克库勒凸起核部原油密度集中在 $0.88 \sim 1.00 \text{ g/cm}^3$,属中质油-重质油类别;西南部托甫台区块南、北两端原油密度差异明显,北部为中质油-重质油,南部靠近 TP39 井区逐渐转变为轻质油-挥发性原油;东南部原油密度分布复杂,其西部以轻质油为主,东部则出现挥发性原油、凝析油和轻质油交替分布。总体上,塔河油气田奥陶系具有整体含油气特点,并在平面上呈现规律性有序变化。其中,超重质油藏的覆盖范围较小,主要分布在塔河油气田西北部;重质油藏及中质油藏分布在阿克库勒凸起核部;轻质油藏覆盖范围相对较广,主要分布在塔河油气田西南斜坡带;挥发性油藏及凝析气藏主要分布在阿克库勒凸起东南斜坡带。从塔河东南部向西北部,依次出现凝析气藏、挥发性油藏、轻质油藏、中质油藏、重质油藏和超重质油藏的有序分布规律。

顺北油气田奥陶系断控缝洞型油气藏的油气同样也呈现明显的“西油东气”的有序分布特点。自西向东,不同断裂带与断裂带间总体原油密度递减,气/油比递增,天然气相对密度与干燥系数也随之变化。西部顺北7号断裂带以轻质油藏为主,原油密度为 0.851 t/m^3 ,气/油比为 $44 \text{ m}^3/\text{m}^3$,天然气相对密度为 0.986 ,天然气干燥系数为 0.535 ;往东的顺北5号断裂带中段和北段依然为轻质油藏,原油密度为 $0.800 \sim 0.843 \text{ t/m}^3$,气/油比为 $43 \sim 187 \text{ m}^3/\text{m}^3$,天然气相对密度为 $0.741 \sim 0.925$,天然气干燥系数为 $0.613 \sim 0.816$,其中北段原油密度和天然气相对密度高于中段,气/油比和干燥系数则低于中段;继续向东至顺北1号带,则以挥发性油藏为主;再向东南至顺北5号断裂带南段、顺北4号断裂带和顺北8号断裂带则以凝析气藏为主。

整体上看,顺北地区气藏主要为干气藏(图2)。

1.3 油气成藏差异有序富集与分布

塔河与顺北油气田勘探实践与研究表明,塔北台盆区奥陶系油气呈现出有序分布特点(图3),即古构造和通源主干断裂带共同控制油气立体成藏和差异富集。

塔河油气田中,与奥陶系油气藏共生的志留系、泥盆系、石炭系、三叠系、白垩系和古近系等原生和次生油气藏,呈现出有序分布特征。其中,奥陶系油气藏在缝洞储集体控制下,形成类似于“准层状”的分布,表现为大面积连续分布及沿断裂带局部富集的特点(图3)。油气藏非均质性和分隔性强,不同储集类型的缝洞单元交织分布,形成连通性各异的缝洞系统,各单元具有独立的压力系统和油-水界面。油藏内流体流动规律复杂,溶洞内流体呈现管流特征,裂缝中的流体流动则符合渗流特性。再加上油藏后期调整改造,使得油、气、水等流体分布呈现出复杂态势。在此区域内,奥陶系油藏不存在统一的油-水界面,油-水界面随中-下奥陶统顶面埋深下降而相应降低,总体遵循上部为油、下部为水的分布规律。油层厚度沿南北方向差异显著,南部油层厚度普遍较薄。北部高

地如阿克库勒凸起核部和艾丁地区的油气柱高通常约200 m,局部可达300 m;而南部斜坡区如托甫台地区油气柱高约100 m,盐下地区则多在80 m以内,局部甚至低于50 m。根据塔河油气田奥陶系高产井分布情况,主体区即阿克库勒凸起核部的海西早期古岩溶缝洞区,油气富集度较高,呈准面状分布。而外围地区,特别是在艾丁和托甫台地区的上奥陶统覆盖区,沿NNE向和NNW向主干走滑断裂分布的缝洞带,尤其是构造匹配良好的NNE向主干断裂带油气富集程度较高。

顺北油气田奥陶系断控缝洞型油气藏的油气柱高度受走滑断裂破碎带控制(图4),油气藏主要沿断裂带富集,油气柱高度大且无统一油-水界面,断裂活动强度与储集体规模和油气富集程度相关。顺北1号、顺北5号和顺北4号断裂带最高油气柱分别为580, 510和613 m。即使在顺北1号断裂带南、北两端构造高差达370 m的情况下,构造较高或是较低部位均发现高产工业油气流,且未遇见底水。顺北油气田断控缝洞型油气藏纵向油气柱高度大,油气藏内部连通性受断裂带活动及现今应力方向影响,其中东部NE向断裂体系内部连通性优于NW向,后者非均质性更显

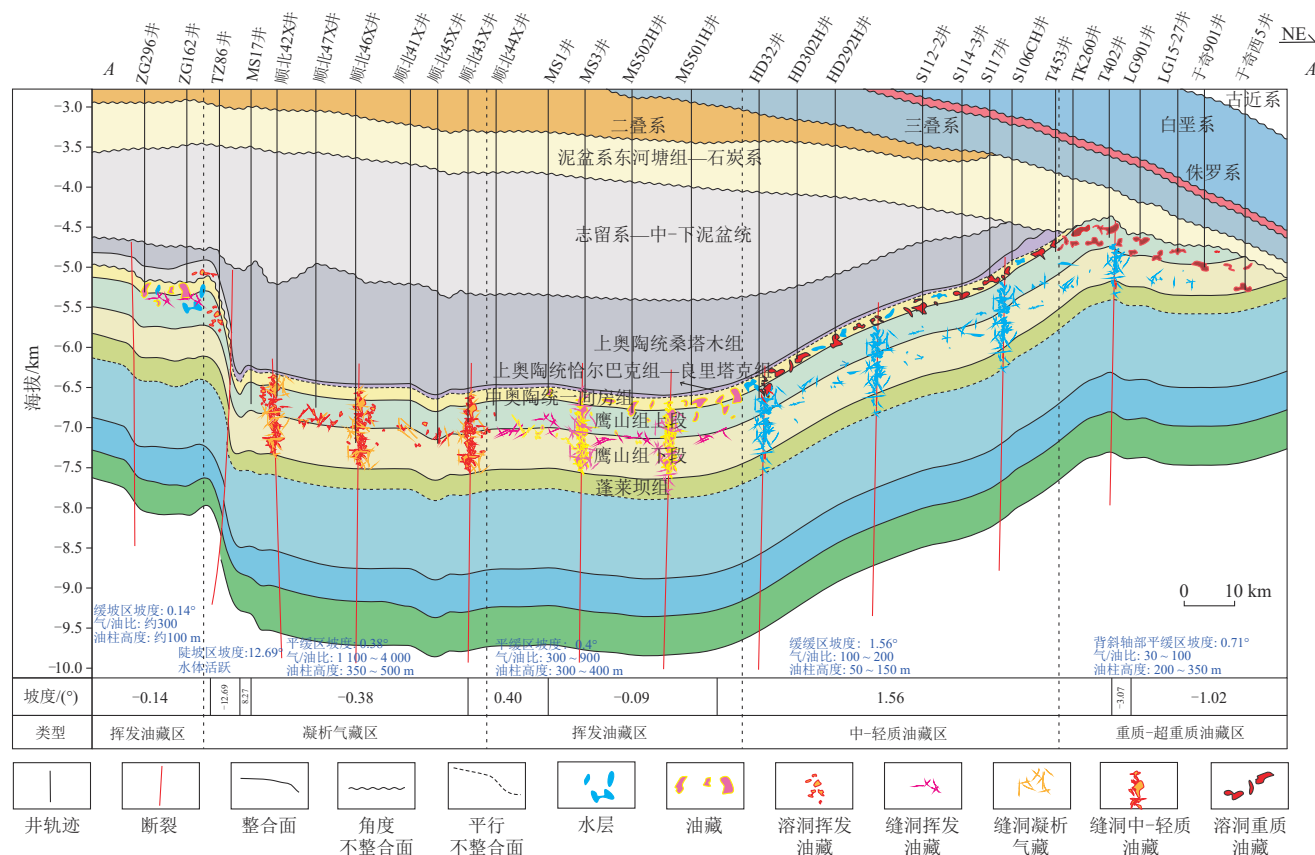


图3 过塔中—顺北4号带—富满—塔河油气藏剖面(剖面位置见图1c)

Fig. 3 Hydrocarbon reservoir profile crossing Tazhong-Shunbei No. 4 fault zone - Fuman-Tahe areas (see Fig. 1c for the profile location)

著。因此,顺北油气田虽然非均质性更强,但总体也表现出“东北段富、西南段贫和北油南气”等有序分布特征。

1.4 成藏期有序分布

勘探实践与综合研究表明,塔北台盆区油气藏具备多源、多期成藏和主成藏期规律性分布的特征。

1.4.1 塔河油气田油气多源、多期、立体、有序成藏

根据大量包裹体测温、饱和压力/露点压力法和同位素测年等实验研究,塔河油气田成藏期主要可分为以下阶段^[12, 18]。

1) 加里东晚期油气成藏。满加尔生烃坳陷在加里东晚期发生首次原油充注,规模较大。受加里东晚期—海西早期构造抬升影响,油藏遭强烈改造,现存原油以超重质为主,集中在加里东早—中期岩溶形成的储集体中,标志着塔河油气田的第一期成藏,同时也是主要破坏期,仅在隆起斜坡上保存条件良好的地方保留了改造程度较轻的油藏。

2) 海西晚期油气成藏。受加里东期古油藏残留程度、海西早期破坏程度及海西晚期充注改造程度制约,海西期原油的密度变化较大,重质油至轻质油均有分布。整体来看,海西早期以破坏为主,海西晚期则以成藏改造为主。海西晚期中质油—轻质油对加里东晚期—海西早期破坏古油藏的充注和改造,构成了塔河油气田的第二次主要成藏期,也是第一次有效的成藏期。

3) 燕山期油气成藏。这一时期成藏的原油保存状态良好,未经生物降解等后生作用影响,以轻质油、凝析

油气和天然气为主要特征,原油密度低于 0.87 g/cm^3 。根据东、西部烃源灶的差异演化,西部以轻质油—挥发油为主,东部则以凝析油—天然气为主。因此,燕山期轻质油对早期成藏的古油藏有一定的改造作用,形成了近源原生油气藏,是深层—超深层油气的主要成藏期。

4) 喜马拉雅期天然气成藏。这一时期成藏以天然气充注为主,天然气的甲烷碳同位素值大于 -38% ,干燥系数大于 0.970 ,标志着这是一个以高成熟天然气为主的成藏期。

综上所述,塔河油气田奥陶系历经了加里东晚期、海西晚期和燕山期多期油气成藏,并经历了喜马拉雅期天然气充注改造,而形成了多期立体成藏的复合油气藏。结合塔河地区地层岩性剥蚀情况、风化淋滤作用、潜水面升降变化、圈闭形态的形成与破坏,以及烃源岩生—排—运—聚阶段研究^[24-26],综合厘定了塔河油气田油气成藏事件(图5)。

从塔河油气田不同层位油气藏综合研究成果(图6)可以看出,尽管不同区块主成藏期次存在差异,但总体上塔河油气田西北部主成藏期最早为加里东晚—海西早期,由西往东、由北往南依次为海西晚、印支期—燕山期和喜马拉雅期,主成藏期呈有序分布特点。

1.4.2 顺北油气田油气有序成藏

顺北油气田不同断裂带的流体包裹体均一温度—埋藏史间接定年研究表明^[23-33],顺北油气田油气具有多期持续充注的特点,充注时期分别为加里东晚期($435.0\sim 400.0\text{ Ma}$)、海西中—晚期($350.0\sim 220.0\text{ Ma}$)、

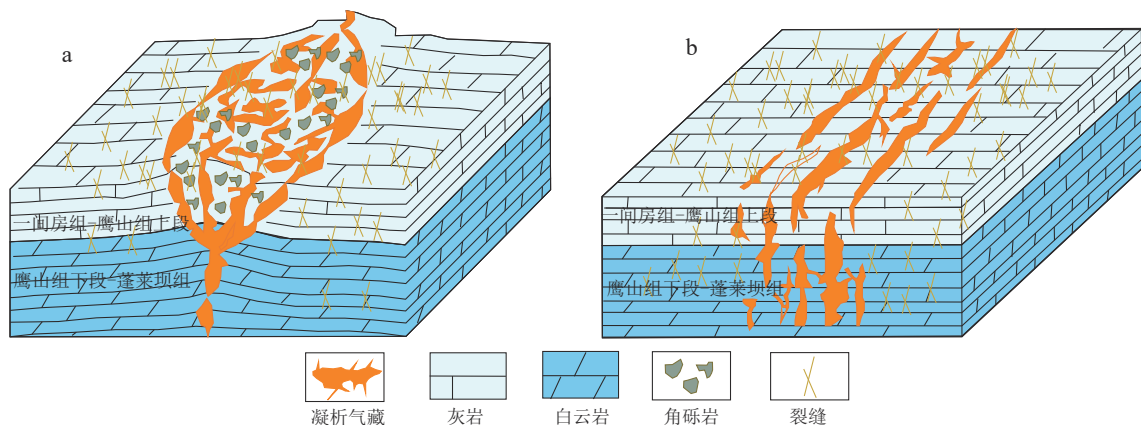


图4 顺北油气田压扭性质和张扭性质走滑断裂带内部储集结构示意图

Fig. 4 Schematic diagrams showing reservoir architecture within transpressional and transtensional strike-slip fault zones in the Shunbei oil and gas field

a. 压扭型走滑断裂“蜂窝状”储集结构(以顺北5井区为例); b. 张扭型走滑断裂“栅状”储集结构(以顺北4井区为例)

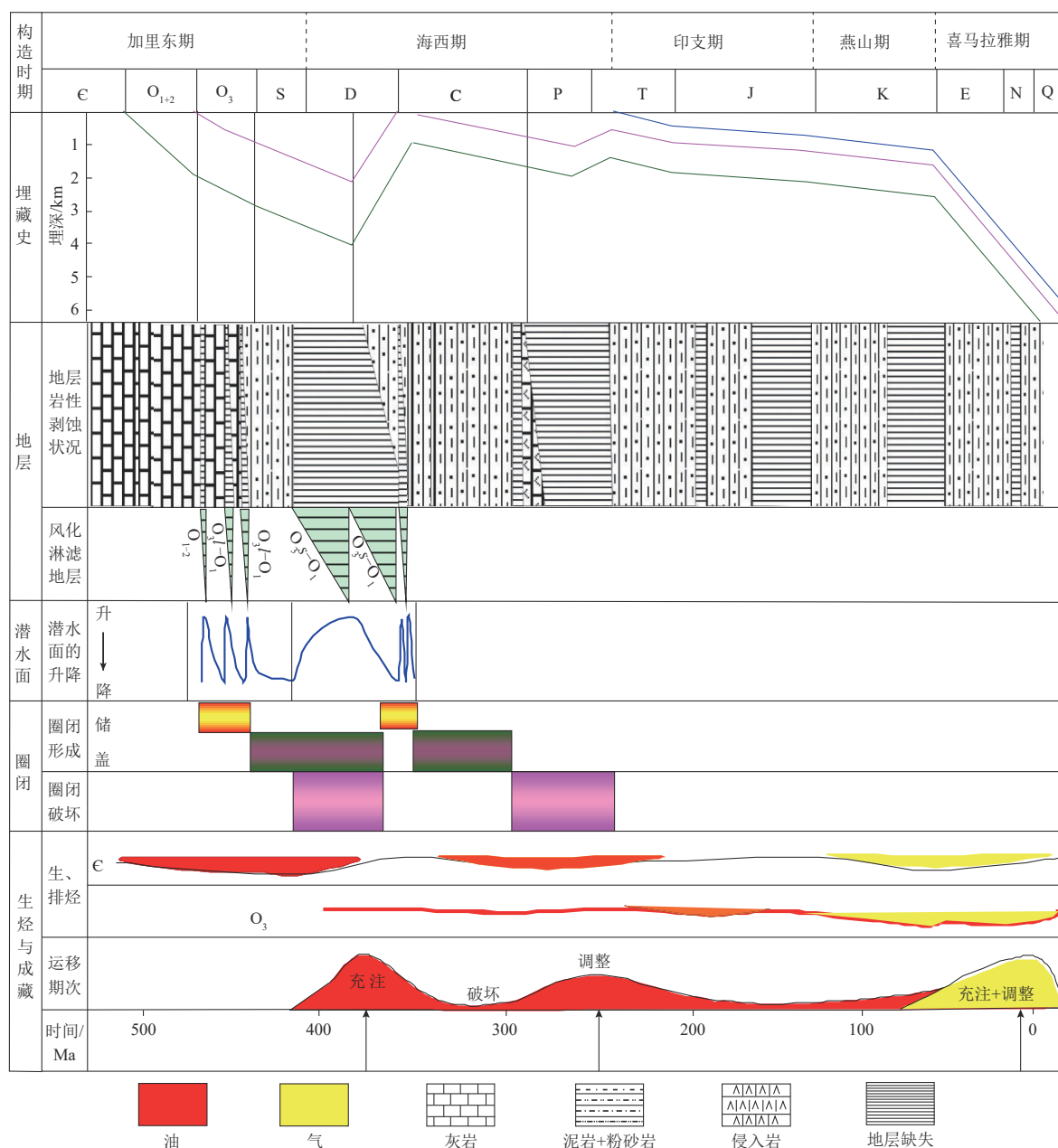


图5 塔河油气田油气成藏事件综合分析

Fig. 5 Comprehensive analysis chart showing hydrocarbon accumulation events in the Tahe oil and gas field

O₁. 下奥陶统; O₁₋₂. 中-下奥陶统; O₃l. 上奥陶统良里塔格组; O₃s. 上奥陶统桑塔木组

燕山晚期—喜马拉雅晚期(140.0 ~ 15.0 Ma)(图7)。其中,顺北1号断裂带和顺北5号断裂带北段及中段油包裹体同期盐水均一温度投点结果表明,存在3期油气充注:第一期黄绿色荧光油充注时期为加里东晚期(435.0 ~ 410.0 Ma);第二期蓝绿色荧光油充注时期为海西晚期(291.0 ~ 240.0 Ma);第三期亮蓝色荧光油充注时期为喜马拉雅晚期(23.6 ~ 2.2 Ma)。顺北4号断裂带存在3期油气充注:第三期亮蓝色荧光油充注时间为海西中—晚期(350.0 ~ 252.0 Ma);第三期富气相油充注时间为燕山晚期(140.0 ~ 60.0 Ma);天然气充

注时间为喜马拉雅晚期(20.0 ~ 3.0 Ma)。顺北6号和8号断裂带存在2期油气充注:第三期亮蓝色荧光油充注时间为海西中—晚期(352.0 ~ 260.0 Ma);天然气充注时间为燕山晚期—喜马拉雅晚期(130.0 ~ 15.0 Ma)。顺北12号断裂带存在2期油气充注:第二期油(第一期不发荧光沥青)充注时间为海西早—中期(416.0 ~ 340.0 Ma);天然气充注时间为燕山期(200.0 ~ 95.0 Ma)。

综上所述,顺北1号断裂带和5号断裂带北段油气充注期次丰富,具有多期油成藏的特点,顺北4—顺北

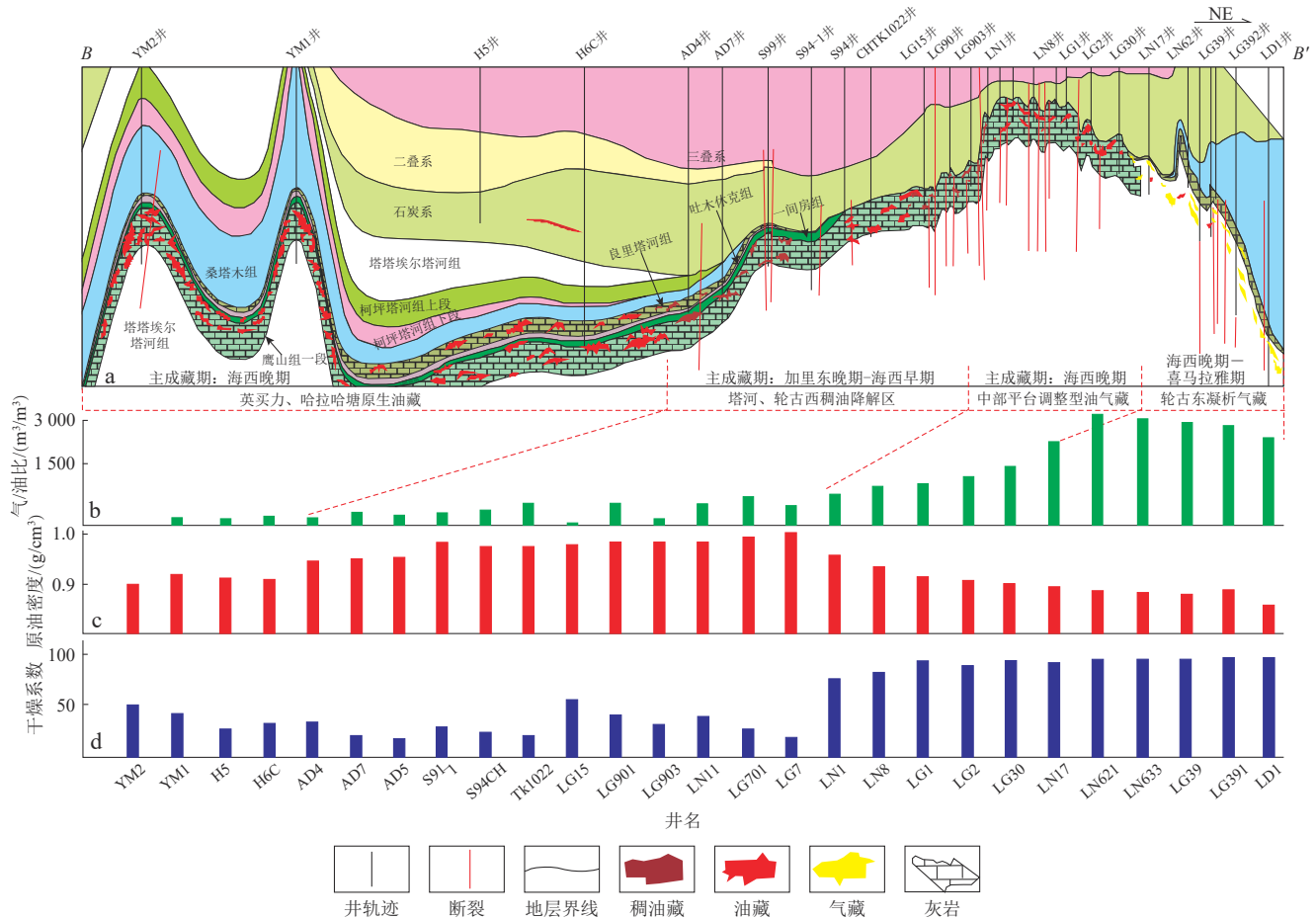


图6 塔北台盆区油气性质与油气藏特征综合分析(剖面位置见图2)

Fig. 6 Comprehensive analysis chart showing hydrocarbon properties and reservoir characteristics in the Tabei non-foreland area (see Fig. 2 for the profile location)

a. 油气藏剖面示意图; b. 气/油比; c. 原油密度; d. 天然气干燥系数

12号断裂带主要以晚期高成熟度原油和天然气成藏为主。

2 塔北台盆区奥陶系油气分布有序性主控因素

环满加尔坳陷西缘富油气区带的形成与其特有的区域成藏背景密切相关。通过对塔河和顺北油气田油气成藏过程进行对比研究(表1),得出以下油气藏富集与有序分布的主控因素。

2.1 多源多期接力生排烃、差异热演化与断裂差异活动控制了奥陶系油气有序分布

塔河地区奥陶系油气成藏过程中,油气主要来源于满加尔坳陷多套烃源岩的多期热演化侧向供烃和本地玉尔吐斯组烃源岩垂向辅助供烃,这种“多套烃源、侧向供烃”为主的供烃条件为塔河地区奥陶系多期成

藏改造和油气富集打下了基础。

环满加尔坳陷西缘普遍呈现出“寒武纪多期供烃、原地垂向输导、晚期聚集成藏”的规律,早期烃类通过通源断裂系统垂向运移,后续根据不整合面、断裂和输导层的发育状况,发生不同程度的侧向油气调整。在晚期油气充注阶段,高-过成熟的烃类主要沿通源走滑断裂系统运聚,由于时间短暂,侧向调整有限。

不同地区烃源岩生、排烃过程存在时空差异,加里东晚期—海西早期形成的大规模油气藏多遭破坏,海西晚期以原油聚集为主,喜马拉雅期以天然气聚集为主。塔北台盆区海相油气成藏过程和类型可总结为:古隆起区(塔北和塔中)多期改造-补给型成藏区带和古平台区(顺北)原生稳定型成藏区带。已在环满加尔坳陷西缘古生界碳酸盐岩领域发现油气田群,包括塔河—哈拉哈塘、顺北—富满和塔中油气田群,油气藏类型主要分为潜山型底水油气藏、岩溶缝洞型底水油气藏和断控缝洞型弱底水或无底水油气藏,沿构造高部

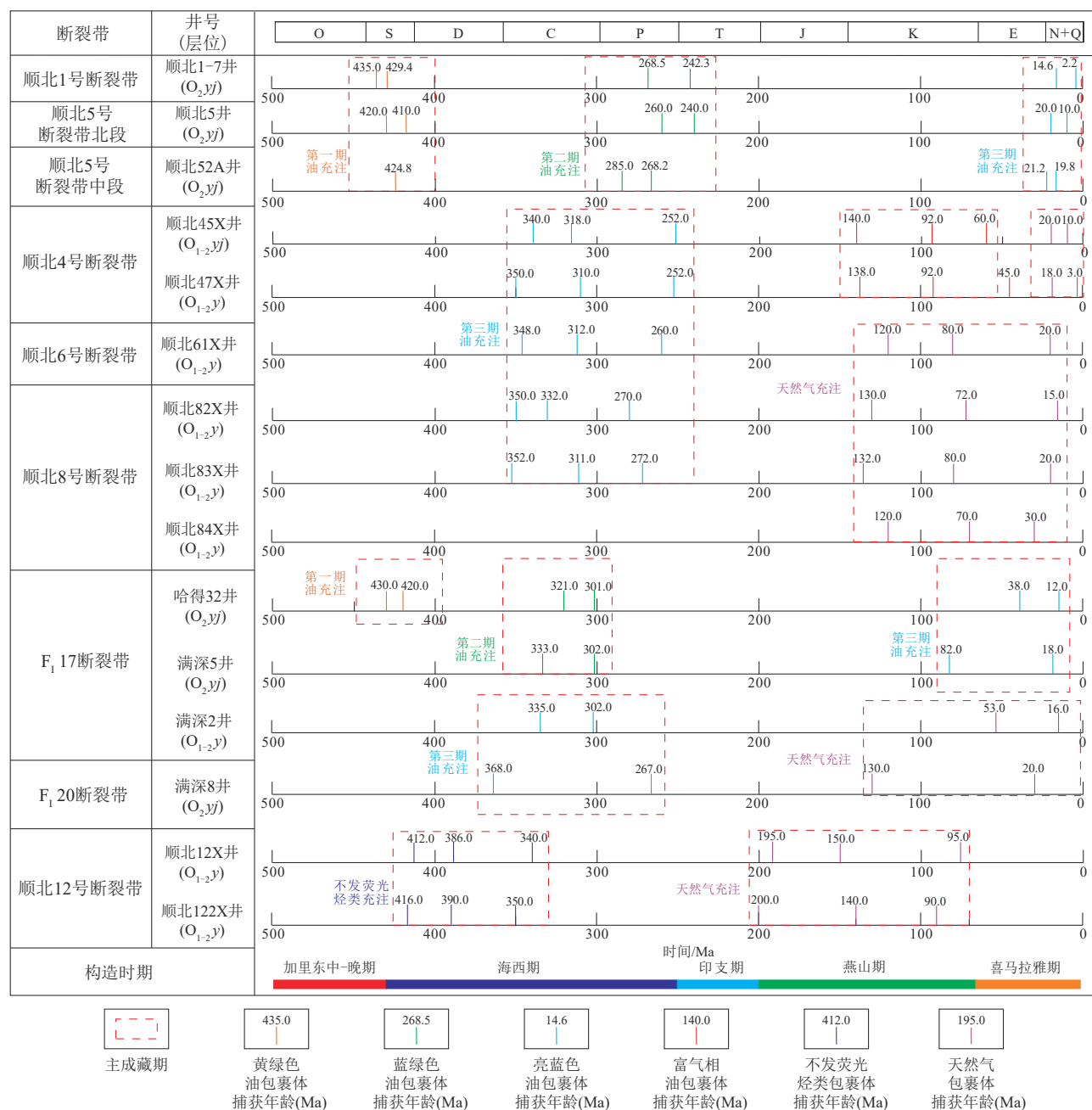


图7 顺北地区奥陶系油气主成藏期确定

Fig. 7 Major hydrocarbon accumulation periods of the Ordovician hydrocarbon reservoirs in the Shunbei area

位至生烃凹陷区,油气藏类型从重质稠油至凝析气和天然气有序分布。

2.2 长期稳定发育的古隆起、古斜坡和低隆起为油气差异富集有序分布提供条件

塔河地区位于长期稳定的古隆起和古斜坡,顺北地区则处于稳定低隆起区。这种稳定的构造背景使得油气田得以形成和发展。

从过塔中—顺北4号带—富满—塔河油气藏剖面(图3)看,依次由挥发油藏、凝析气藏、挥发油藏、中

质-轻质油藏、重质-超重质油藏有序分布。多期构造调整控制了油气藏的有序分布和油气富集程度的分配,决定了顺北地区原地充注油柱高度大,塔北地区侧向调整强烈,局部构造决定富集程度。

断裂垂向输导、不整合面侧向输导的顺北成藏模式决定了顺北地区以原地充注为主,油柱高度大,坡度控制下侧向调整与通源断裂带规模控制了油气差异富集,烃源岩演化特征控制了顺北地区油气藏是以海西晚期和燕山期成藏为主的原生油气藏;断裂、不整合面和岩溶缝洞体横向输导为主的塔河成藏模式决定了塔

河油气田呈现多期立体连片成藏,深大断裂带与古隆起和古斜坡控制了油气差异富集。

2.3 储层形成及发育规模决定了勘探类型的有序分布和油气聚集规模

巨厚的碳酸盐岩沉积为缝洞型储层提供了物质基础。在优质烃源岩和区域盖层的“源-盖”控藏条件下,油气经过多期充注,沿区域不整合面、通源断裂和输导层在整个环满加尔坳陷西缘地区呈驱替式差异聚集成藏。

塔河油气田奥陶系勘探实践表明,油气富集主要受控于沙雅隆起轴部构造及其匹配的网状岩溶缝洞体系和加里东中-晚期形成并在后期持续活动的NNE向和NNW向主干通源走滑断裂及其断控岩溶缝洞体系,构成了多期成藏油气的运移、聚集,使其调整到理想位置,并且得益于优良的储-盖组合条件。塔河油气田以岩溶储层控制为主,而顺托果勒低隆区则是断裂“控储、控聚、控富”特征显著(图2)。基于这个认识,塔北台盆区勘探形成了从岩溶主控到“断裂+岩溶”复合控制,再到断裂主控的全序列勘探格局。

2.4 通源性和侧向封挡是油气藏差异富集的关键

石炭系和上奥陶统区域泥岩盖层为油气富集提供了重要保障。多期构造运动对塔里木盆地海相层系的油气成藏与保存起到决定性作用,关键成藏期的构造格局控制油气运移方向,而后期构造运动对油气调整和保存至关重要。通过系统梳理塔北台盆区奥陶系油气成藏主控因素,提出通源性和侧向封挡条件

是差异富集的关键。统计结果表明,塔河和顺北地区奥陶系油气富集带与高产井大多位于NE向(通源和侧向封挡来自东南部的油气)深大断裂带上(图2)。通源走滑断裂带展现出“控储、控藏、控富”的有序成藏特性,晚期油气沿深大走滑断裂带运移路径向周边圈闭中富集。

3 有序性成藏模式

有序性成藏模式是指油气在地质历史过程中,按照一定的规律和顺序聚集成藏的过程。通过对比塔河与顺北油气成藏模式和油气差异有序富集特征,揭示塔北台盆区油气成藏的规律性和有序性,为油气勘探和开发提供重要的指导。

3.1 塔河地区与顺北地区油气成藏模式对比

塔里木盆地因其多旋回叠合的地质特性,孕育了复杂而独特的海相碳酸盐岩油气富集规律。长期的科研探索构建了一系列具有代表性和指导意义的控藏模式^[17-24],主要包括“源-盖控烃模式”“古隆起及古斜坡控聚模式”“枢纽带控聚模式”“断裂控藏模式”和“储层控藏模式”等。然而,从隆起带至斜坡区、由地表构造至深层乃至超深层的广阔空间中,各类控藏模式的应用及其有效性会因不同区带的具体地质条件差异而有所变化。顺北地区以海西晚期—燕山期形成的原生油气藏为主,尽管其成藏模式与塔北地区存在一定差异,但两者间亦存在诸多共性(表1)。

表1 塔河-顺北地区奥陶系成藏特征对比

Table 1 Comparison of the hydrocarbon accumulation characteristics of the Ordovician reservoirs in the Tahe-Shunbei area

成藏特征	塔河油气田	顺北油气田
构造位置	加里东期—海西期持续古隆起	夹持于塔北和塔中地区两大古隆起之间的低隆带
地质作用	多个不整合面、奥陶系多期岩溶;油藏受强烈氧化降解改造	多类型溶蚀,溶蚀作用弱;油气藏微弱改造
烃源岩	中东部寒武系—中-下奥陶统、西部下寒武统玉尔吐斯组	下寒武统玉尔吐斯组、东部寒武系—中-下奥陶统
储层	中奥陶统一间房碳酸盐岩岩溶缝洞体储层、 中奥陶统鹰山组内幕碳酸盐岩储层	中奥陶统一间房断控缝洞体储层、 中奥陶统鹰山组内幕碳酸盐岩储层
油气藏平均埋深/m	6 529	7 512
温、压特征	100 ~ 130 ℃, 常压,压力系数1.05 ~ 1.10	150 ~ 160 ℃, 常压,压力系数1.12 ~ 1.17
盖层	下石炭统石炭系巴楚组、上奥陶统桑塔木组泥岩	上奥陶统桑塔木组泥岩
储-盖组合	下石炭统巴楚组—奥陶系、上奥陶统桑塔木组—中奥陶统一间房组	上奥陶统桑塔木组—中奥陶统一间房组
油气性质	西部中质油—重质油和超重质油,中东部轻质油; 伴生气	轻质油—挥发油;伴生气
油气成熟度	成熟—高成熟	高成熟
输导条件	断裂、不整合面和岩溶缝洞体横向输导为主	断裂垂向输导、东部岩性与不整合面输导
成藏期次	海西晚期为主,加里东晚期和燕山期为辅	海西晚期和燕山期
油气藏类型	残留—改造古油藏	原生油气藏

3.1.1 塔河地区成藏模式

塔河地区主体坐落在沙雅隆起奥陶系古隆起高位,具备优越的垂向和侧向充注条件,展现出典型的立体复式成藏特征。早期形成的原油遭受氧化降解等后生作用,形成加里东期—海西期残留改造的古油藏。由于沙雅隆起高位地层在加里东期和海西期经历了剧烈抬升剥蚀,导致印支期以后直到喜马拉雅期沉积盖层形成之前都无法使下伏寒武系烃源岩达到再次生烃的高温条件,故塔河地区在海西晚期以后仅能接纳来自隆起围斜部位的寒武系—中—下奥陶统的侧向烃源,这也是塔河地区原油密度分布规律有序变化的根本原因。而东部区域出现了晚期天然气的再充注现

象,断裂经历了多期活动。初步估计,在塔河油气田外围志留系沉积厚度超过500 m的区域,下伏寒武系烃源岩才具备再次生烃能力。整个成藏期从北向南表现出,艾丁地区加里东期—海西期残留—改造超重质到重质古油藏,至塔河阿克库勒凸起核部海西晚期重质到中质油藏,再至跃进—顺北地区燕山期轻质到挥发性油藏的多期有序成藏特征。

3.1.2 顺北地区成藏模式

顺北地区油气资源主要源自本地的下寒武统烃源岩,其主要成藏阶段为海西晚期—印支期及燕山期—喜马拉雅期,后者是最重要的成藏期(图8)。通源走滑断裂带作为油气垂向输导通道和缝洞型储集体的良

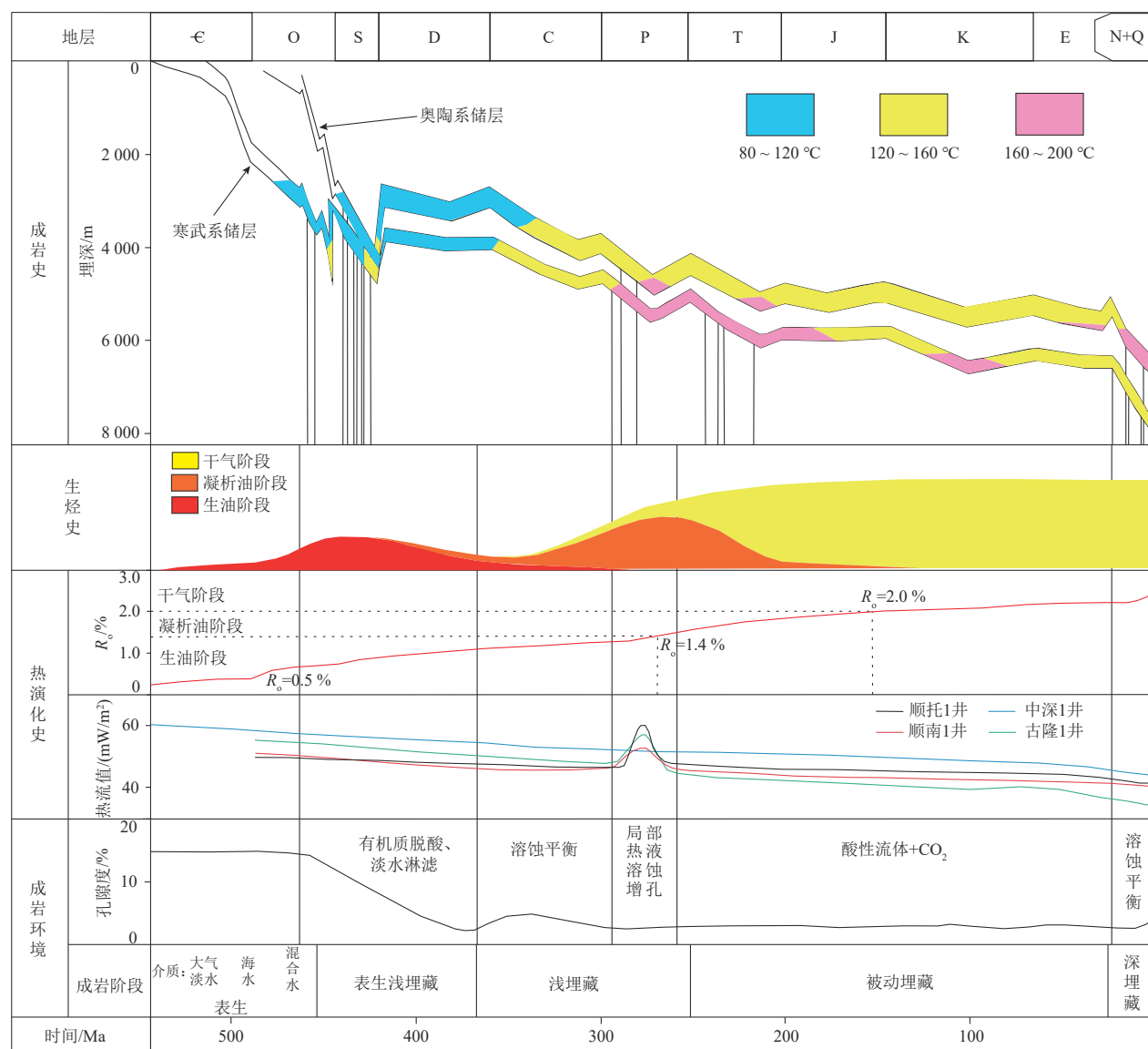


图8 顺北地区成储和成烃演化史

Fig. 8 Evolutionary histories of reservoir formation and hydrocarbon generation in the Shunbei area

好发育区域,决定了油气充注强度及富集规模。顺北地区西部主要表现为垂向充注,顺北地区东部兼具垂向与侧向充注,多期成藏且以晚期成藏为主。原生气藏为主断裂活动强度大且通源性优良的走滑断裂带,储集体规模大,油气充注充分,油气富集度高,烃源岩的晚期热演化程度直接影响奥陶系油气藏在平面上的分布特征。

相比满加尔坳陷,顺托果勒地区由于海西晚期以来稳定的构造背景,下寒武统玉尔吐斯组烃源岩埋深较浅,燕山期以来,其埋深始终保持在6 500 m以上。顺北2井包裹体古压力恢复结果显示,古压力范围在64.3~75.7 MPa,当前寒武系地温低于240℃,呈现出“大埋深、高压”的生烃演化抑制条件,以生油为主。模拟实验揭示烃源岩倾油性增强,延缓了干酪根裂解为天然气的过程。顺北1号断裂带显示的天然气具有低成熟度(如较低的甲烷碳同位素组成和较低的干燥系数)和较低的气/油比特征,表明其受到了生烃演化抑制作用的影响。顺托果勒低隆地区寒武系烃源岩在燕山期之后仍具备形成高成熟液态烃的条件,盆地深

层海相层系在当前勘探深度内探明的储量仍以液态烃为主。海西晚期以来持续的构造稳定环境使顺托果勒地区处于相对封闭的状态,且油气沿断裂运移的趋势在海西晚期之后明显减弱,即由南向向北的运移强度变弱,这是顺北地区走滑断裂体系控藏的一大特点,促进了“原地烃源、压力抑制、断裂主导、原油富集”成藏模式的形成,区别于塔河地区以碳酸盐岩岩溶缝洞体系大规模成藏的模式^[34-39]。

3.2 塔河—顺北地区油气差异有序富集特征分析

顺托果勒低隆—沙雅隆起构造演化和差异区域构造演化(坡度)变化表明(图9),塔北台盆区中—下奥陶统持续平缓区有利于油气原地富集,而斜坡区侧向调整趋势大,富集程度低,局部水体活跃。多期构造调整和成藏控制了从气藏到超重质油藏的有序分布以及油气富集程度的分配,形成了顺北地区油气的原地充注,油柱高度大,塔北地区侧向调整强烈,局部构造高点决定富集程度。顺托果勒低隆—塔北隆起,在海西期、印支期和燕山期构造继承性强,塔北南坡油气持续向塔

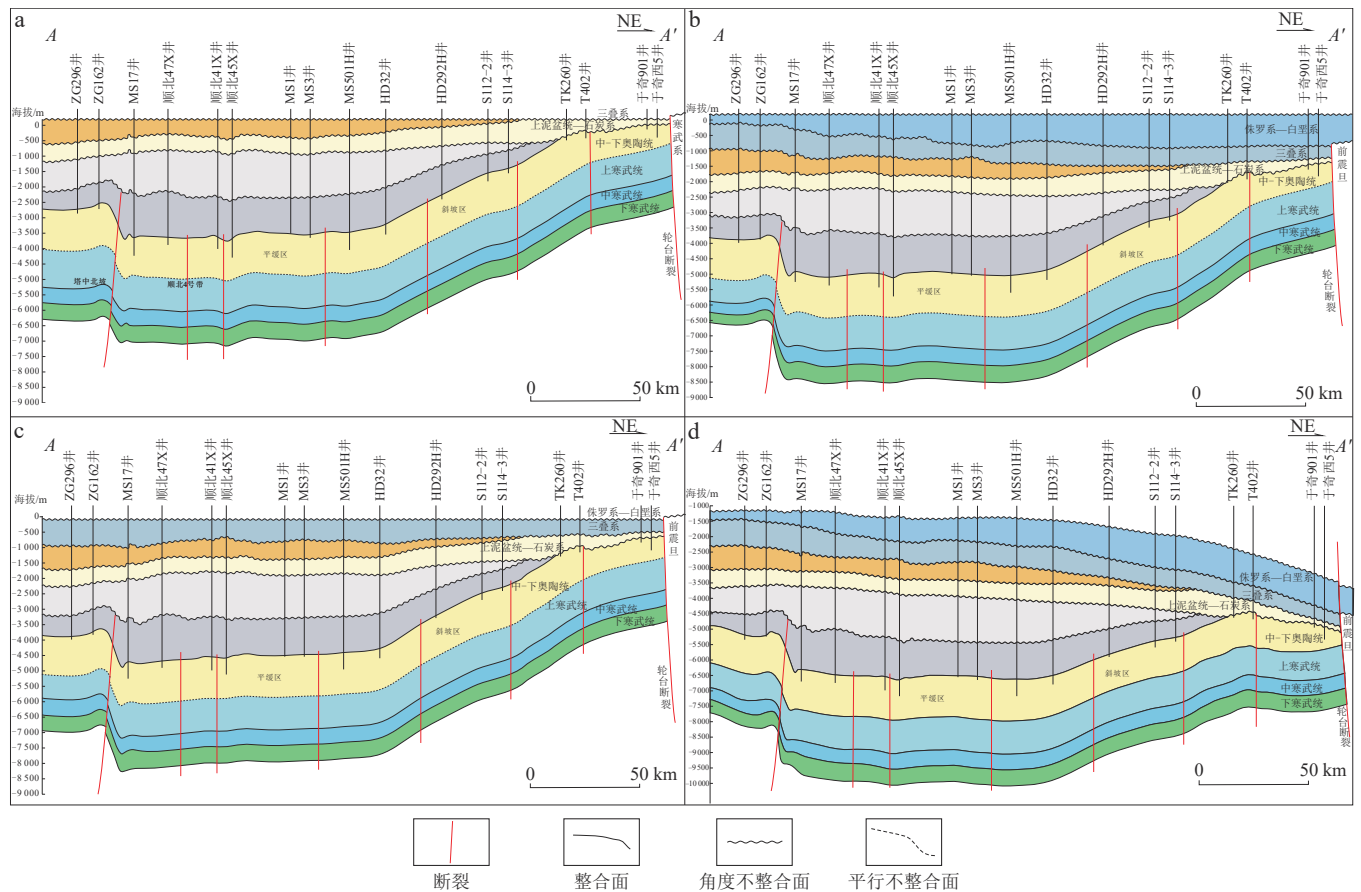


图9 顺托果勒低隆—沙雅隆起差异区域构造演化(剖面位置见图1c)

Fig. 9 Differential structural evolution from the Shuntuoguole low uplift to the Shaya uplift (see Fig. 1c for the profile location)

a. 海西晚期地层构造格局;b. 燕山末期地层构造格局;c. 印支末期地层构造格局;d. 现今地层构造格局

河地区一轮台断裂侧向运移;在喜马拉雅期,构造反转,北部形成回倾,抑制了油气逸散,油气重新调整富集^[38-42]。

塔北台盆区下古生界碳酸盐岩经历了多期油气垂向充注和侧向调整,不同地区富集主控因素具有较大差异性。以塔河西部TP39井区为例(图2,图3,图6,图9),斜坡区侧向调整程度大,油层厚度薄,而背斜区平缓,有利于油气富集;以顺北8号带—塔中北坡为例(图2,图3,图6,图9),顺托果勒低隆起构造平缓,油气侧向调整程度弱,有利于原地运聚富集。研究表明,塔河地区和顺北地区具备通源走滑断裂带“控储、控藏、控富”有序成藏特性^[28],晚期油气沿深大走滑断裂带运移路径向周边圈闭中富集。

4 结论

1) 塔里木盆地塔北台盆区奥陶系油气性质、主成藏期及油气相态分布均呈现出显著的有序性特征。奥陶系作为重要的油气储层,经历了多期次的油气充注和多旋回构造运动的叠合与改造,奥陶系油气藏整体上呈大面积、准层状分布,且多期次的油气充注使得油气藏在不同层位和区域均有分布,烃类相态多样,断裂与岩溶控制作用显著,储层非均质性强,形成了“东气西油、南气北油分布,主成藏期东南晚、西北早,多相态油气共存并差异富集”的复杂油气藏分布格局。

2) 塔北台盆区奥陶系油气藏的有序富集是多因素综合作用的结果,包括多套烃源岩、多期次的生排烃过程、热演化差异、稳定的古隆起与古斜坡环境、储层演化、圈闭形成及有效盖层等,这些因素共同作用于立体有序成藏过程。

3) 在油气富集带的地质背景下,塔北台盆区通源走滑断裂带起着关键作用,它调控着储层、油气富集过程,特别是在深大断裂带中,晚期油气沿此运移并富集于断裂带及邻近圈闭内。

4) 环满加尔坳陷西缘、环轮台断裂带和环阿瓦提北坡区域,因上述有利条件的叠加,为塔里木盆地未来立体勘探及增储的重点潜力区域。

参 考 文 献

- [1] 翟光明,王建君. 论油气分布的有序性[J]. 石油学报, 2000, 21(1): 1-9.
ZHAI Guangming, WANG Jianjun. The regularity of oil deposits' distribution[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(1): 1-9.
- [2] 何治亮,陆建林,林娟华,等. 中国海相盆地原型-改造分析与油气有序聚集模式[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 60-72.
HE Zhiliang, LU Jianlin, LIN Juanhua, et al. Marine basins in China—A prototype-reconstruction analyses and ordered hydrocarbon accumulation patterns[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 60-72.
- [3] 郭旭升,黄仁春,张殿伟,等. 四川盆地海相碳酸盐岩全油气系统成藏特征与有序分布规律[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 743-758.
GUO Xusheng, HUANG Renchun, ZHANG Dianwei, et al. Hydrocarbon accumulation and orderly distribution of whole petroleum system in marine carbonate rocks of Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 743-758.
- [4] CHOI J H, EDWARDS P, KO K, et al. Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 152: 70-87.
- [5] DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(1): 109-137.
- [6] AYDIN A, BERRYMAN J G. Analysis of the growth of strike-slip faults using effective medium theory [J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(11): 1629-1642.
- [7] 李国会,李世银,李会元,等. 塔里木盆地中部走滑断裂系统分布格局及其成因[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 30-37.
LI Guohui, LI Shiyin, LI Huiyuan, et al. Distribution pattern and formation mechanism of the strike-slip fault system in the central Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3): 30-37.
- [8] 云露,闫文新,赵江. 阿克库勒凸起成藏地质条件及控油规律[J]. 新疆地质, 2001, 19(4): 305-308, 314.
YUN Lu, YAN Wenxin, ZHAO Jiang. geological condition and ore-controlling regularity of oil-pool formation in Akekule uplift [J]. Xinjiang Geology, 2001, 19(4): 305-308, 314.
- [9] 云露,肖志高,徐明军. 浅谈塔里木盆地台盆区天然气勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(4): 428-432.
YUN Lu, XIAO Zhigao, XU Mingjun. A brief talk on gas exploration potential in the platform-basin region, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(4): 428-432.
- [10] 漆立新,云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 1-12.
QI Lixin, YUN Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 1-12.
- [11] 云露. 塔河油田奥陶系油气成藏模式研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
YUN Lu. Petroleum accumulation model of Ordovician reservoir in Tahe Oilfield [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.
- [12] 陈红汉,吴悠,丰勇,等. 塔河油田奥陶系油气成藏期次及年代学[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 806-819.
CHEN Honghan, WU You, FENG Yong, et al. Timing and chronology of hydrocarbon charging in the Ordovician of Tahe

- oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 806-819.
- [13] 云露, 蒋华山. 塔里木盆地北部沙雅隆起含油气系统及勘探靶区选择[J]. 石油实验地质, 2002, 24(6): 506-511.
- YUN Lu, JIANG Huashan. Petroleum system and exploration strategy in Shaya uplift of the northern Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2002, 24(6): 506-511.
- [14] 云露, 曹自成. 塔里木盆地顺南地区奥陶系油气富集与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 788-797.
- YUN Lu, CAO Zicheng. Hydrocarbon enrichment pattern and exploration potential of the Ordovician in Shunnan area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 788-797.
- [15] 李斌, 赵星星, 邬光辉, 等. 塔里木盆地塔中Ⅱ区奥陶系油气差异富集模式[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 308-320.
- LI Bin, ZHAO Xingxing, WU Guanghui, et al. Differential hydrocarbon accumulation model of the Ordovician in Tazhong II block, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 308-320.
- [16] 翟晓先, 云露. 塔里木盆地塔河大型油田地质特征及勘探思路回顾[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 565-573.
- ZHAI Xiaoxian, YUN Lu. Geology of giant Tahe Oilfield and a review of exploration thinking in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 565-573.
- [17] 漆立新, 云露. 塔里木台盆区碳酸盐岩成藏模式与勘探实践[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 867-876.
- QI Lixin, YUN Lu. Carbonate reservoir forming model and exploration in Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(5): 867-876.
- [18] 胡伟, 徐婷, 杨阳, 等. 塔里木盆地超深油气藏流体相行为变化特征[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 1044-1053.
- HU Wei, XU Ting, YANG Yang, et al. Fluid phases and behaviors in ultra-deep oil and gas reservoirs, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 1044-1053.
- [19] 云露, 邓尚. 塔里木盆地深层走滑断裂差异变形与控储控藏特征——以顺北油气田为例[J]. 石油学报, 2022, 43(6): 770-787.
- YUN Lu, DENG Shang. Structural styles of deep strike-slip faults in Tarim Basin and the characteristics of their control on reservoir formation and hydrocarbon accumulation: A case study of Shunbei oil and gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(6): 770-787.
- [20] 云露. 顺北东部北东向走滑断裂体系控储控藏作用与突破意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 41-52.
- YUN Lu. Controlling effect of NE strike-slip fault system on reservoir development and hydrocarbon accumulation in the eastern Shunbei area and its geological significance, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 41-52.
- [21] 张红波, 周雨双, 沙旭光, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断裂隆起段发育特征与演化机制[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 321-334.
- ZHANG Hongbo, ZHOU Yushuang, SHA Xuguang, et al. Development characteristics and evolution mechanism of the uplifted segment of the No. 5 strike-slip fault zone in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 321-334.
- [22] 黄诚, 云露, 曹自成, 等. 塔里木盆地顺北地区中-下奥陶统“断控”缝洞系统划分与形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 54-68.
- HUANG Cheng, YUN Lu, CAO Zicheng, et al. Division and formation mechanism of fault-controlled fracture-vug system of the Middle-to-Lower Ordovician, Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 54-68.
- [23] 云露. 顺北地区奥陶系超深溶解体油气成藏条件[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 136-142.
- YUN Lu. Hydrocarbon accumulation of ultra-deep Ordovician fault-karst reservoirs in Shunbei area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 136-142.
- [24] 段太忠, 张文彪, 何治亮, 等. 塔里木盆地顺北油田超深溶解体深度学习地质建模方法[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 203-212.
- DUAN Taizhong, ZHANG Wenbiao, HE Zhiliang, et al. Deep learning-based geological modeling of ultra-deep fault-karst reservoirs in Shunbei Oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 203-212.
- [25] 漆立新, 云露, 曹自成, 等. 顺北油气田地质储量评估与油气勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 127-135.
- QI Lixin, YUN Lu, CAO Zicheng, et al. Geological reserves assessment and petroleum exploration targets in Shunbei Oil & Gas Field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 127-135.
- [26] 宋兴国, 陈石, 谢舟, 等. 塔里木盆地富满油田东部走滑断裂发育特征与油气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 335-349.
- SONG Xingguo, CHEN Shi, XIE Zhou, et al. Strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in the eastern part of Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 335-349.
- [27] 漆立新, 云露, 黄太柱, 等. 顺托果勒地区油气分布规律与突破目标优选[Z]. 新疆维吾尔自治区, 中石化西北油田分公司, 2018-12-20.
- QI Lixin, YUN Lu, HUANG Taizhu, et al. Oil and gas distribution pattern and breakthrough target optimization in Shuntuoguole area[Z]. Xinjiang Uyghur Autonomous Region, Sinopec Northwest Oilfield Branch, 2018-12-20.
- [28] 漆立新, 丁勇. 塔里木盆地顺北地区东西部海相油气成藏差异[J]. 石油实验地质, 2023, 45(1): 20-28.
- QI Lixin, DING Yong. Differences in marine hydrocarbon accumulation between the eastern and western parts of Shunbei area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(1): 20-28.
- [29] 马安来, 漆立新. 顺北地区四号断裂带奥陶系超深层油气地球化学特征与相态差异性成因[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 247-262.

- MA Anlai, QI Lixin. Qi lixin the geochemical characteristics and phase differences of Ordovician ultra deep oil and gas in the Shunbei area's No. 4 fault zone [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(6): 247-262.
- [30] 刘建章, 蔡忠贤, 滕长宇, 等. 塔里木盆地顺北地区克拉通内走滑断裂带中-下奥陶统储集体方解石脉形成及其与油气充注耦合关系[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 125-137.
- LIU Jianzhang, CAI Zhongxian, TENG Changyu, et al. Coupling relationship between formation of calcite veins and hydrocarbon charging in Middle-Lower Ordovician reservoirs in strike-slip fault zones within craton in Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 125-137.
- [31] 黄越义, 廖玉宏, 陈承声, 等. 塔里木盆地顺南1井和顺南4井油气相态演化的数值模拟与预测[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 138-149.
- HUANG Yueyi, LIAO Yuhong, CHEN Chengsheng, et al. Numerical simulation and prediction of hydrocarbon phase evolution of Wells Shunnan 1 and 4, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 138-149.
- [32] 庄新兵, 顾忆, 邵志兵, 等. 塔里木盆地地温场对油气成藏过程的控制作用——以古城墟隆起为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(5): 502-511.
- ZHUANG Xinbing, GU Yi, SHAO Zhibing, et al. Control effect of geothermal field on hydrocarbon accumulation process in Tarim Basin: A case study of Guchengxu uplift [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(5): 502-511.
- [33] 丁勇, 彭守涛, 夏东领. 塔河油田艾丁地区奥陶系油气藏特征与成藏期[J]. *新疆石油地质*, 2013, 34(3): 262-264.
- DING Yong, PENG Shoutao, XIA Dongling. The reservoir characteristics and hydrocarbon accumulation stages of Ordovician in aiding area of Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2013, 34(3): 262-264.
- [34] 罗明霞, 曹自成, 徐勤琪, 等. 塔里木盆地塔河油田塔深5井震旦系原油地球化学特征及地质意义[J]. *地质科技通报*, 2024, 43(1): 135-149.
- LUO Mingxia, CAO Zicheng, XU Qinqi, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Sinian crude oil from Well Tashen 5, Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(1): 135-149.
- [35] 吴鲜, 李丹, 韩俊, 等. 塔里木盆地顺托果勒北部地区超深层现今地温场特征[J]. *石油学报*, 2022, 43(1): 29-40.
- WU Xian, LI Dan, HAN Jun, et al. Characteristics of present ultra-deep geothermal field in the northern Shuntuoguole low uplift, Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 29-40.
- [36] CHAI Zhi, CHEN Zhonghong, LIU Hua, et al. Light hydrocarbons and diamondoids of light oils in deep reservoirs of Shuntuoguole Low Uplift, Tarim Basin: Implication for the evaluation on thermal maturity, secondary alteration and source characteristics [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 117: 104388.
- [37] 黄第藩, 赵孟军, 刘宝泉, 等. 塔里木盆地东部天然气的成因类型及其成熟度判识[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 1996, 36(4): 365-372.
- HUANG Difan, ZHAO Mengjun, LIU Baoqun, et al. Genetic types and maturity identification of natural gas in eastern Tarim Basin [J]. *Science China Earth Sciences*, 1996, 36(4): 365-372.
- [38] 田家奇, 李国蓉, 刘永立, 等. 塔北地区鹰山组下段—蓬莱坝组白云岩成因及控储意义[J]. *新疆石油地质*, 2024, 45(3): 306-316.
- TIAN Jiaqi, LI Guorong, LIU Yongli, et al. Genesis of Dolomite and Its Controls on Reservoir Spaces in Lower Yingshan Formation-Penglaiba Formation, Northern Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2024, 45(3): 306-316.
- [39] 仲米虹, 唐武. 塔北地区三叠纪拗陷湖盆异重流沉积特征及主控因素[J]. *新疆石油地质*, 2023, 44(1): 1-8.
- ZHONG Mihong, TANG Wu. Sedimentary Characteristics and Controlling Factors of Hyperpycnal Flow in Triassic Depressed Lake Basin, Northern Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(1): 1-8.
- [40] 段永贤, 宋金鹏, 郇志鹏, 等. 塔北、塔中奥陶系碳酸盐岩异常高压形成、保存与分布[J]. *新疆石油地质*, 2023, 44(4): 421-428.
- DUAN Yongxian, SONG Jinpeng, HUAN Zhipeng, et al. Formation, Preservation and Distribution of Abnormally High Pressure in Ordovician Carbonate Rocks in Northern and Central Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(4): 421-428.
- [41] 姚红生, 云露, 咎灵, 等. 苏北盆地溱潼凹陷阜二段断块型页岩油定向井开发模式及实践[J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(2): 141-151.
- YAO Hongsheng, YUN Lu, ZAN Ling, et al. Development mode and practice of fault-block oriented shale oil well in the second member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(2): 141-151.
- [42] 曹自成, 唐大卿, 骆满嵩, 等. 塔里木盆地顺北地区中新界断裂构造特征及演化[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(1): 226-238.
- CAO Zicheng, TANG Daqing, LUO Mansong, et al. Structural characteristics and tectonic evolution of Mesozoic-Cenozoic faults in the Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(1): 226-238.

(编辑 许诺)