

塔里木盆地顺北超深断控油气藏“源-断-储-藏” 协同演化机制

云露,曹自成,耿锋,丁勇

(中国石化西北油田分公司,新疆乌鲁木齐830011)

摘要:以塔里木盆地顺北油气田为研究对象,聚焦超深层油气勘探领域的成藏机制难题,通过多学科技术手段系统揭示了断控油气的形成机理。针对超深层成藏机制复杂、预测难度大的行业痛点,研究团队创新构建了“源-断-储-藏”四要素时-空演化分析体系,为全球超深层油气勘探提供了理论支撑。采用高精度三维地震解析、岩石力学实验和流体包裹体分析等多技术融合方法:通过地震资料精细处理识别断裂系统展布特征,开展岩石力学实验揭示碳酸盐岩破裂-溶蚀过程,结合激光拉曼光谱等技术实现成藏期次精准划分。在多维度数据支撑下,重点阐明了断裂系统在成藏过程中的核心作用机制。取得5项主要创新认识:①证实断裂带具有“输导-控储-定藏”三重功能,不仅作为油气运移通道,更通过控制储层发育与圈闭演化成为成藏关键因素。②揭示断裂系统内部协作机制,主干断裂与次级断裂协同作用,促使碳酸盐岩形成溶蚀-破裂复合型储集空间。③建立走滑断裂活动与油气充注的耦合关系,发现断裂周期性活动通过调控烃源岩热演化控制主成藏期。④阐明断裂封闭性动态变化对差异成藏的控制作用,其时空差异直接导致油气赋存状态分异。⑤创新提出超深层“断控动态耦合”成藏新模式,揭示顺北油气田是断裂系统与成藏要素多期耦合的结果。该研究首次系统建立了超深层断控油气藏的形成理论体系,突破了传统静态成藏认知,提出了动态耦合的成藏新模式。研究成果不仅能够为顺北油气田后续勘探开发提供精准指导,更将推动超深层油气勘探从经验预测向理论驱动的范式转变,对全球同类油气藏勘探具有重要借鉴价值。

关键词:成藏机制;协同演化;源-断-储-藏;断控油气藏;顺北油气田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Source rock-fault-reservoir-trap coevolution mechanisms of ultra-deep fault-controlled hydrocarbon reservoirs in the Shunbei area, Tarim Basin

YUN Lu, CAO Zicheng, GENG Feng, DING Yong

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

Abstract: This study aims to address the critical challenge of understanding hydrocarbon accumulation mechanisms in ultra-deep sequences. Using interdisciplinary techniques, we systematically reveal the formation mechanisms of fault-controlled hydrocarbon reservoirs in the Shunbei oil and gas field, Tarim Basin. Given the complexity of hydrocarbon accumulation and serious difficulties in predicting ultra-deep hydrocarbon reservoirs, which are recognized as major challenges in hydrocarbon exploration, we innovatively develop a four-element spatiotemporal evolution analysis system that incorporates source rocks, faults, reservoirs, and traps. This system is expected to provide theoretical support for global ultra-deep hydrocarbon exploration. A multi-technique combined approach integrating high-precision 3D seismic interpretation, rock mechanics experiments, and fluid inclusion analysis is employed in this study. Specifically, the distribution characteristics of fault systems are identified through fine-scale seismic data processing. Meanwhile, the rupture and dissolution processes of carbonate rocks are determined using rock mechanics experiments, while the hydrocarbon accumulation stages are precisely divided using techniques including laser-excited Raman spectroscopy. By integrating multi-dimensional data, we elucidate the mechanisms underlying the core role that fault systems play in the hydrocarbon accumulation process. Five

收稿日期:2025-07-01;修回日期:2025-09-25。

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

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合基金集成项目(U24B6001);中国石化科技攻关项目(P24235, P23244);局控项目(KJ202404)。

innovative insights are obtained in this study. First, fault zones are found to perform a triple function of conduction, controlled storage, and trapping determination. In addition to serving as pathways for hydrocarbon migration, faults also function as a key for reservoir development and trap evolution, establishing them as a critical factor governing hydrocarbon accumulation. Second, the internally coordinated mechanisms of the fault systems are identified, revealing that the combined effects of primary and secondary faults facilitate the formation of dissolution-rupture composite reservoir spaces within carbonate rocks. Third, the coupling relationship between strike-slip faulting and hydrocarbon charging is established, indicating that periodic faulting controls the major hydrocarbon accumulation periods by regulating the thermal evolution of source rocks. Fourth, the controlling effects of dynamic changes in fault sealing capacity on differential hydrocarbon accumulation are clarified, demonstrating that the spatiotemporal differences in the sealing capacity directly lead to differentiation in hydrocarbon occurrence. Fifth, an innovative model illustrating the dynamic coupling of faults' controlling effects in ultra-deep hydrocarbon reservoirs is developed, revealing that the Shunbei oil and gas field is a result of multi-stage coupling between fault systems and factors governing hydrogen accumulation. Overall, this study systematically develops, for the first time, a theoretical system for the formation of ultra-deep fault-controlled hydrocarbon reservoirs. In this system, a novel hydrocarbon accumulation pattern characterized by dynamic coupling is introduced, challenging the traditional view of hydrocarbon accumulation as a static process. The study findings have provided accurate guidance for subsequent hydrocarbon exploration and exploitation of the Shunbei oil and gas field, while also promoting the transformation of ultra-deep hydrocarbon exploration from empirical prediction into a theory-driven paradigm. Furthermore, these results offer a critical reference for the exploration of similar ultra-deep hydrocarbon reservoirs worldwide.

Key words: hydrocarbon accumulation mechanism, coevolution, source rock-fault-reservoir-trap, fault-controlled hydrocarbon reservoir, Shunbei oil and gas field, Tarim Basin

引用格式: 云露, 曹自成, 耿锋, 等. 塔里木盆地顺北超深断控油气藏“源-断-储-藏”协同演化机制[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(4): 1061-1077. DOI: 10. 11743/ogg20260401.

YUN Lu, CAO Zicheng, GENG Feng, et al. Source rock-fault-reservoir-trap coevolution mechanisms of ultra-deep fault-controlled hydrocarbon reservoirs in the Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(4): 1061-1077. DOI: 10. 11743/ogg20260401.

塔里木盆地顺北低隆平台区奥陶系碳酸盐岩因为处于超深状态, 传统观点认为不具备发育规模性奥陶系储层; 同时, 该区寒武系台地平台区一般认为不发育寒武系优质烃源岩, 并且顺北地区寒武系地层埋深大、热演化程度高, 油源条件也欠佳, 同时也不是侧向油气运聚指向的区域, 因此向来被视作油气勘探的禁区。针对塔里木盆地台地相区烃源岩发育特征不明这一难题, 西北油田分公司通过重建早寒武世玉尔吐斯期岩相古地理, 明确上升洋流驱动的深水陆棚相为优质烃源岩发育相带, 并确定玉尔吐斯组是台盆区的主力烃源岩, 突破了满加尔坳陷侧源供烃的传统认知; 针对古老烃源岩生烃演化和供烃潜力不清以及超深层油气成藏规律不明等难题, 通过构造演化、热史恢复与生烃模拟研究, 建立“特定条件”下的生烃演化模式, 明确了油气藏相态控制因素与富集规律; 针对超深连续沉积的巨厚古老致密碳酸盐岩台地内是否发育规模储集体这一科学难题, 基于构造演化、沉积成岩与物理模拟研究, 提出碳酸盐岩内部走滑断裂“构造破裂、块体滑动、体积调整”成储新机制, 在 7 500 m 以深发现了新类型

储集体——断控缝洞型储集体, 即因走滑断裂构造破裂形成的洞穴、孔洞和裂缝集合体; 揭示断裂内部由断层核和破碎带组成的“核-带”结构, 构建了多核带“栅状”断控缝洞型储集体模型, 突破了断裂作为油气输导与封挡条件的传统认识。基于上述认识, 塔里木盆地西北油田顺北地区奥陶系油气勘探在主干断裂带、低级序次级断裂带和断裂带间区块连续取得重大突破, 为中国深地油气战略储备提供了新资源。

与国内其他盆地相比, 顺北油气田的地质条件具有超深、高温和高压的极端特征, 其复杂地质条件对勘探技术提出挑战, 也为成藏机制研究带来难题。顺北油气田埋深超过 7 500 m, 最大埋深超过 8 600 m, 是全球罕见的典型超深层碳酸盐岩断控缝洞型油气藏^[1]。顺北奥陶系超深储层的形成受走滑断裂带的控制, 储集体呈现“栅状结构”, 以裂缝-溶洞为主, 非均质性极强。顺北油气田是中国在超深层碳酸盐岩油气勘探领域取得的重大突破, 其储层特征和成藏模式与四川盆地震旦系-寒武系、鄂尔多斯盆地寒武系-奥陶系等典型深层碳酸盐岩油气藏既有相似之处, 也存在显著差

异(表 1)。

①储层成因与环境各异:顺北油气田以断裂控制的深部缝洞系统为特色;四川盆地的典型代表安岳气田,与台内裂陷周缘的礁滩沉积和岩溶作用关系密切;鄂尔多斯盆地靖边气田则主要得益于大面积的风化壳岩溶作用。

②埋深与工程挑战不同:顺北油气田的超深层特性(埋深 > 7 000 m)使其勘探面临前所未有的高温-高压环境,对地震精细成像、钻井技术和成本控制提出了极高要求。四川盆地深层(埋深普遍在 5 000 ~ 6 000 m 以深)勘探也面临类似挑战。相对而言,鄂尔多斯盆地靖边气田的埋深较浅(主力层位埋深多小于 4 000 m),工程难度稍低,储层预测是关键。

③成藏模式不同:顺北油气田位于塔里木盆地腹部,其成藏过程主要受走滑断裂带控制,表现为“垂向输导、晚期成藏”的特点。四川盆地安岳气田等油气藏的形成与台内裂陷的发育演化密切相关,烃源岩与储层配置形式多样(下生上储、旁生侧储),断裂和不整合面共同构成了油气的运移通道;鄂尔多斯盆地靖边气田的形成则主要依靠大面积分布的风化壳储层和侧向运移,成藏模式相对简单,古构造背景和岩溶古地貌控制作用明显。顺北地区创新性地提出的“断控缝洞型”成藏理论,突破“走滑断裂带仅为运移通道”的传统认知,将碳酸盐岩有效储层下限延至埋深 8 500 m 以深。这一理论指导发现了 4 个亿吨级油气区。而四川盆地页岩气开发更多基于“超压富气”模式,其理论创新聚焦储层保存条件的研究而非构造控藏机制。顺北首创“超深水平井+分段酸压”技术组合,如顺北 53-2H 井以 8 874.4 m 深度创造了亚洲定向井纪录。该井采用了配

套耐温 200 ℃、耐压 172 MPa 的随钻测量仪器,2024 年完井一次成功率达 97.3%,裸眼多级分段完井深度突破 8 850.0 m。

前期研究表明,顺北油气田具有“断控成储、断控输导、断控成藏”特征^[2],断裂系统在油气藏形成中起关键作用。与常规构造油气藏不同,断控油气藏成藏过程涉及断裂系统与烃源岩演化、储层改造及保存条件的动态耦合,远比常规油气藏复杂。其中,本地烃源岩是油气生成的基础,其演化受温度、压力及埋藏历史的影响,断裂活动显著改变了地层热传导和压力分布,加速或延缓烃源岩成熟,影响油气生成效率和产量;储层改造是断控油气藏形成的另一关键环节,超深层岩石的致密性使得原生孔隙度和渗透率较低,而断裂活动形成的裂缝和溶蚀孔洞显著改善了储层渗透性和储集能力;保存条件对油气藏的稳定性至关重要,断裂既能改善运移通道,也可能因过度活动导致油气散失,优化调整保存条件是顺北油气成藏研究的核心问题之一。针对上述问题,现有研究因为多聚焦于单一要素的静态描述,因此难以揭示多要素协同演化机制。

1 地质背景与研究方法

1.1 区域地质特征

顺北油气田地处塔里木盆地中部的顺托果勒低凸起构造带(图 1),顺北超深断控油气藏是多种地质因

表 1 塔里木盆地顺北油气田与四川盆地及鄂尔多斯盆地石油地质条件对比

Table 1 Comparison of petroleum geological conditions among the Shunbei oil and gas field in the Tarim Basin, the Sichuan Basin and the Ordos Basin

对比维度	顺北油气田(寒武系-奥陶系)	四川盆地(震旦系-寒武系)	鄂尔多斯盆地(寒武系-奥陶系)
储层岩性	奥陶系灰岩与白云岩,受走滑断裂强烈控制	震旦系灯影组和寒武系龙王庙组白云岩为主	奥陶系白云岩为主(如马家沟组)
埋藏深度/m	超深层,埋深普遍大于 7 000 m,最深超过 9 000 m	深层-超深层,埋深普遍在 5 000 ~ 6 000 m 以深	相对较浅,主力层位埋深多小于 4 000 m(如靖边气田)
孔隙度(%) / 渗透率(10 ⁻³ μm ²)	低孔(平均约 1.96%)、低渗(平均约 7.50 × 10 ⁻³ μm ²),非均质性强	低孔(3.00% ~ 12.00%)、低渗[(0.50 ~ 479.30) × 10 ⁻³ μm ²],非均质性强	低孔(平均约 6.00%)、低渗(平均约 2.63 × 10 ⁻³ μm ²)
主要储集空间	断裂带控制的缝洞系统(构造破裂溶蚀孔洞)	礁滩相颗粒滩孔隙、岩溶孔洞(灯影组)	风化壳岩溶孔、洞、缝(如马家沟组顶部)
储层主控因素	走滑断裂(控储、控藏、控富)	台内裂陷周缘丘滩相沉积(如德阳-安岳裂陷)、表生岩溶	不整合面(表生期大气水岩溶)
烃源岩	下寒武统玉尔吐斯组陆棚相优质烃源岩	下寒武统筇竹寺组和麦地坪组海相泥页岩	奥陶系自身海相碳酸盐岩或上古生界煤系气源(对于中部气田)
典型油气藏类型	超深层断控缝洞型油气藏	台内礁滩型气藏(如安岳气田)、岩溶型气藏	古风化壳岩溶型气藏(如靖边气田)
成藏模式特点	“源-断-储-藏”动态耦合,走滑断裂带垂向输导为主,晚期成藏	下生上储或旁生侧储,断层与不整合面联合输导	古风化壳大面积成藏,侧向运移为主

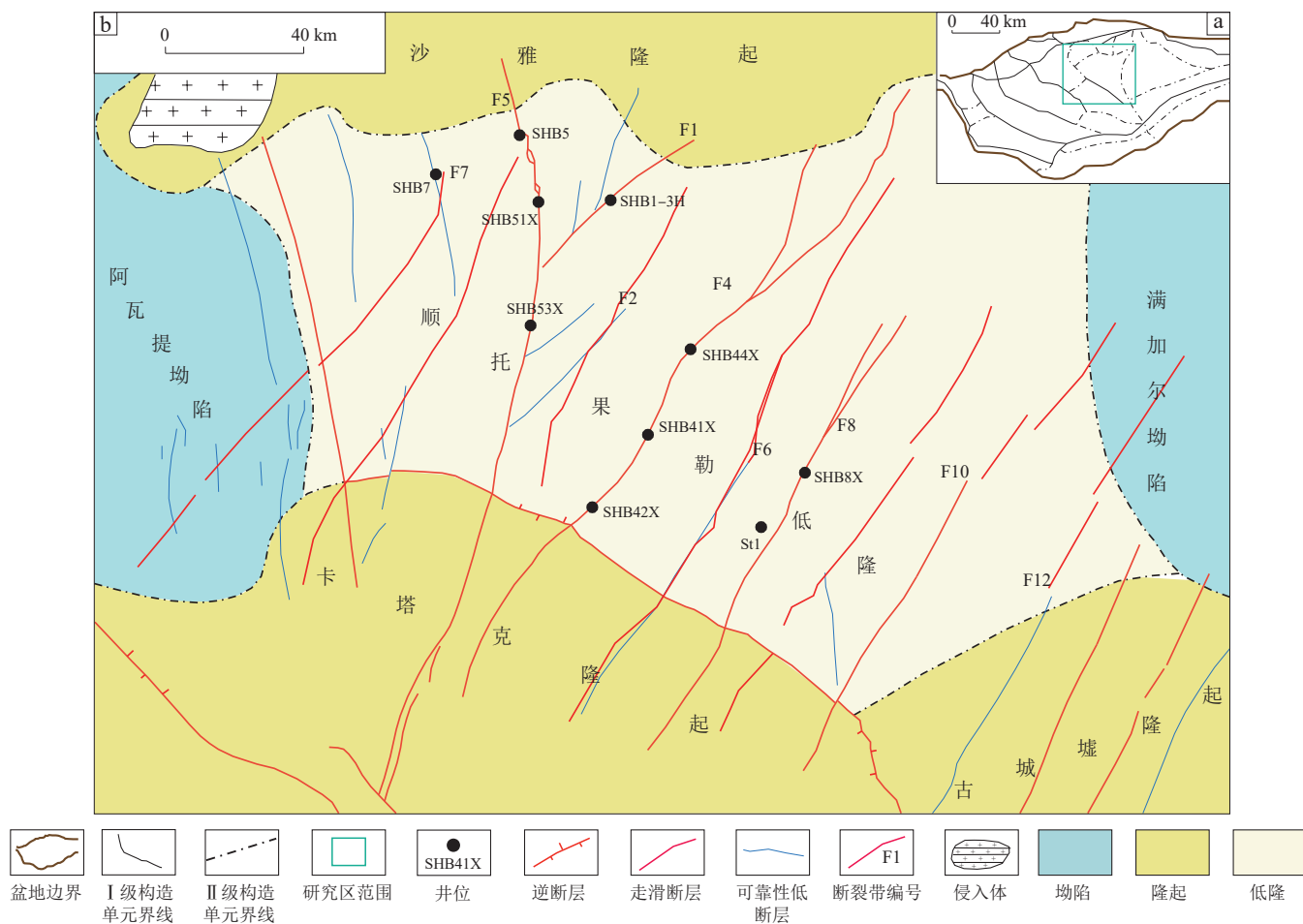


图1 塔里木盆地顺北油气田构造位置(a)及奥陶系断裂平面分布(b)

Fig. 1 Tectonic location (a) and the Ordovician fault distribution (b) of the Shunbei oil and gas field, Tarim Basin

素共同作用的结果。在多种地质作用的长期影响下,该地区发育NE向走滑断裂系统,该系统经历了复杂的演化过程,对区域内的地层、岩石及流体运移产生了深远的影响。

1.1.1 烃源岩条件

寒武系玉尔吐斯组烃源岩是顺北地区油气的重要来源^[3-4],其总有机碳含量(TOC)为1.5%~4.2%,生烃潜力良好。加里东晚期—海西早期进入生油窗,有机质热降解生成液态石油;印支期—燕山期进一步演化至高成熟轻质油和凝析油气阶段,后期液态石油裂解为天然气,使得该区域气源十分丰富^[5-9]。

1.1.2 储层特征

奥陶系碳酸盐岩是重要储集层^[10-12],其基质孔隙度通常低于2%,储集空间有限。断裂带在其中起关键作用,断裂带内部因构造应力释放和地下水溶蚀作用,发育溶蚀孔洞和构造裂缝的复合储集体。溶蚀孔洞发育于地下水易溶蚀的岩石中并逐渐扩大连通;构造裂

缝是应力作用下岩石破裂而产生,增加渗透性并为溶蚀作用提供通道。二者交织构成复合储集体,为油气储存和运移提供空间。

1.1.3 运移与聚集差异

多期构造运动塑造了顺北地区的地质特征,其中走滑断裂的垂向分层活动与侧向分段差异演化影响油气运移与聚集^[13-14],增加了油气勘探的复杂性。本区断层具有垂向分层和侧向分段的差异演化特征。垂向分层活动方面,不同深度的断裂带变形特征和活动强度不同。浅部断裂带受地表应力的直接影响,活动频繁且变形复杂,常常伴随着地层的错动和褶皱现象;深部断裂带受到上覆地层压力和岩石力学性质的制约,活动方式和强度与浅部有别;这种差异使断裂带纵向结构不同,进而影响了油气的垂向运移与聚集。侧向分段差异演化方面,走滑断裂在水平方向上的不同段落具有不同的演化历史和构造特征。因区域应力场不均匀和地层岩性差异,各段落活动强度、变形方式及地层改造程度有明显差别。部分段落构

造裂缝和溶蚀孔洞发育好,储集条件佳;部分段落构造活动弱,储集条件欠佳,使顺北地区的油气分布格局复杂化。

1.2 研究方法

基于断控油气藏成藏过程的复杂性,本文采用多尺度地质-地球物理综合分析方法,整合地质露头、钻井资料和地球物理勘探技术,构建了“源-断-储-藏”协同演化模式,系统阐明了各要素在地质历史中的相互作用及其对油气生成、运移和聚集的控制作用。

在综合研究方面,采用“构造解析-成藏模拟-动态验证”三位一体的研究方法,通过数据整合、要素解析(源/断/储/藏)、模型构建、动态模拟及实证验证等流程,运用多种技术开展多维度研究。构造解析方面,基于高精度三维地震资料,融合相干体与曲率属性分析技术,精细刻画了断裂系统的结构特征。储层分析方面,采用岩心CT扫描(X射线断层扫描)获取储集空间的三维结构,结合声发射实验定量分析储层参数。油气充注与成藏期研究方面,联合运用流体包裹体显微测温技术,测定包裹体的形成温度,推断油气充注期次及时段;运用激光拉曼光谱技术,分析包裹体化学成分,明确油气性质、来源及充注期的差异;应用饱和压力法,对比了主干断裂带、次级断裂带及断裂带间的成藏期次。多方法协同规避了单一技术局限,进一步提升了顺北成藏期次判定的可靠性。

2 “源-断-储-藏”协同演化特征

烃源岩作为油气生成的物质基础,其生烃演化进程对油气资源的形成起着决定性作用。断裂在油气运移过程中扮演关键通道角色,同时影响着储层的分布与改造。储层的发育程度和物性特征直接关乎油气的储存能力。三者与圈闭条件相互配合,协同演化,共同决定了顺北地区油气藏的形成、分布及规模。

2.1 烃源岩热演化与生-排烃阶段

2.1.1 烃源岩热演化机制

顺北地区的油气主要源自本地寒武系玉尔吐斯组的烃源岩^[4, 15-17]。其热演化过程受到多重因素制约:埋藏深度增加导致地温升高,构成演化主驱动力;地层高压则通过改变有机质反应动力学特性,使生烃过程复杂化。此外,顺北地区特有的“高压抑制”现象尤其显著^[18-20]。

2.1.2 生-排烃关键阶段

基于生烃演化史的研究,顺北地区烃源岩经历了3个主要的生-排烃阶段(图2):加里东晚期—海西早期,形成以正常原油为主的初次排烃,构造条件有利于烃类生成与排出;印支期—燕山晚期,受构造运动叠加,形成轻质油及凝析油为主的二次排烃;喜马拉雅期,快速沉降背景下原油裂解与干酪根生干气为主的成烃过程。

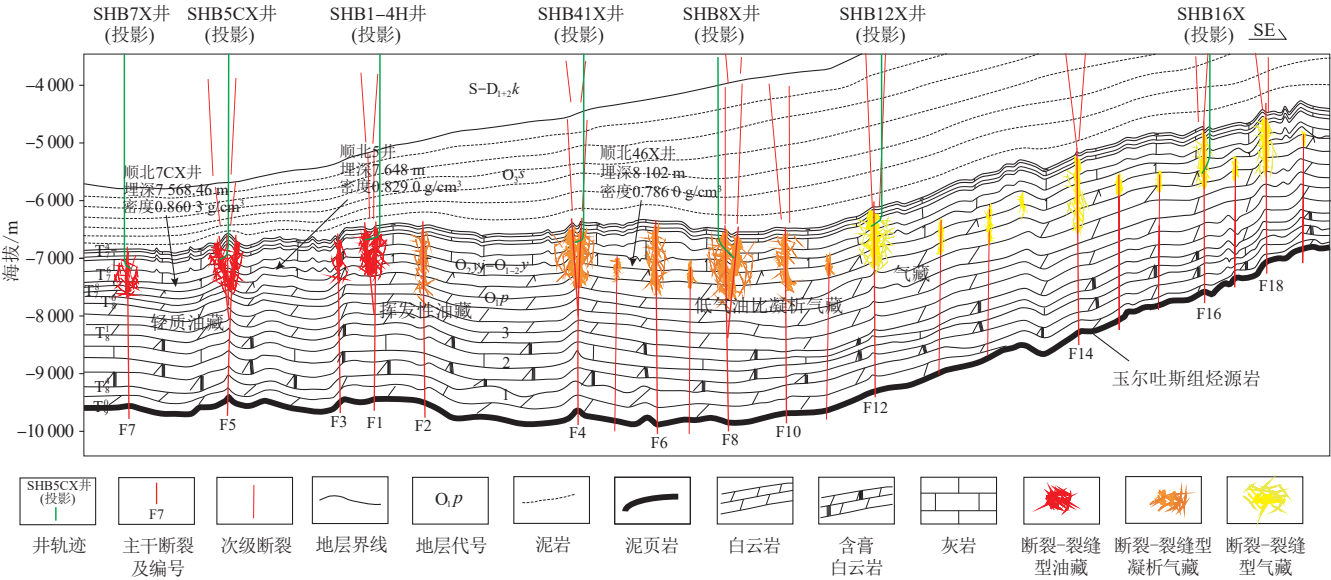
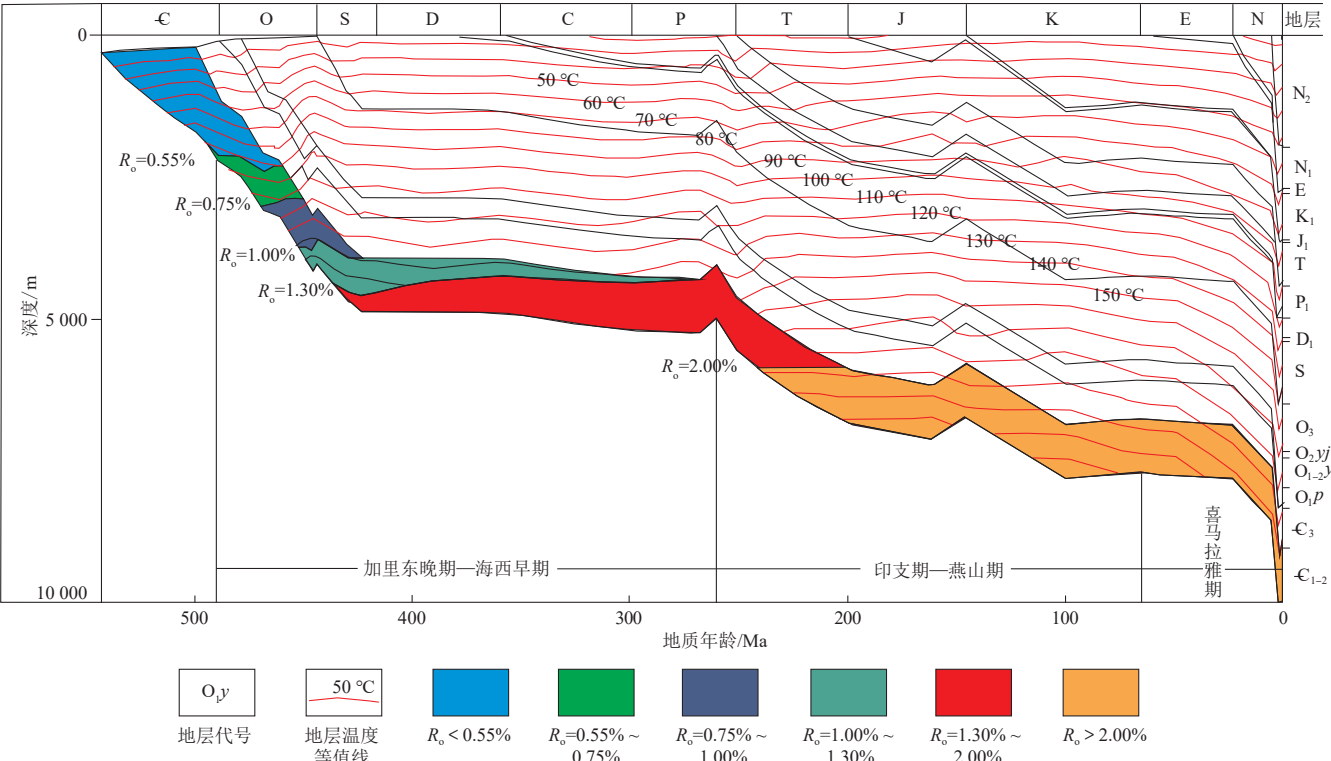
2.1.3 油气藏分布特征

基于多期成藏改造作用,顺北地区油气藏类型呈现明显的带状分布特征^[21]。根据断层横向形变宽度、垂向形变高差、断层位移速率、活动时代以及地震活动性等参数,可以确定断裂活动强度。研究结果表明,断裂活动强度与油气性质和分布之间存在显著的控制关系,不同断裂带由于构造位置、断裂活动性及源-储配置差异,形成各具特色的油气藏分布格局。其中,断裂活动控制方面,断裂活动强度由北向南逐渐增强,控制油气藏类型从油藏向凝析气藏和干气藏过渡;热演化分带方面,热演化程度北低南高,北部以油藏为主,南部逐渐过渡为凝析气藏和干气藏;充注期次差异方面,北部油藏多期充注特征明显,南部气藏以喜马拉雅期充注为主;空间分布规律方面,油气藏类型沿1号—12号断裂带呈现明显的带状有序分布特征(图3),由北向南依次为油藏—凝析气藏—干气藏,反映了断裂活动与热演化的综合控制作用。

2.1.4 成藏期次空间分异

饱和压力法是石油地质学中用于确定油气藏形成时间的重要方法之一,其核心原理是基于油气在地下的物理-化学行为与地层压力之间的动态关系。该方法最适合用于近源饱和油藏或凝析气藏,特别是那些地饱压差小且无明显后期改造的油气藏。前期研究表明,顺北地区油气藏特征基本符合上述适用条件^[3]。

包裹体测温与饱和压力法综合分析表明(图4),从大尺度的塔河-顺北地区成藏期次对比呈现明显的空间分异特征。具体来看,北部主干断裂带的成藏期次较少(以1期为主)、且成藏时间相对较早,油气以侧向运移(异地烃源)为主;中部主干断裂带的成藏期次较多(以2期和3期为主),以晚期成藏为主,垂向与侧向(本地烃源)运-聚并存;南部主干断裂带的成藏期次同样较多(以3期为主),以晚期原油裂解为主,垂向



与侧向(本地烃源)运-聚模式;次级断裂带及断裂带间区域以早期成藏侧向运聚与晚期原油裂解模式为

主。这种空间差异与烃源岩热演化程度(北低、南高)及断裂活动性紧密相关。

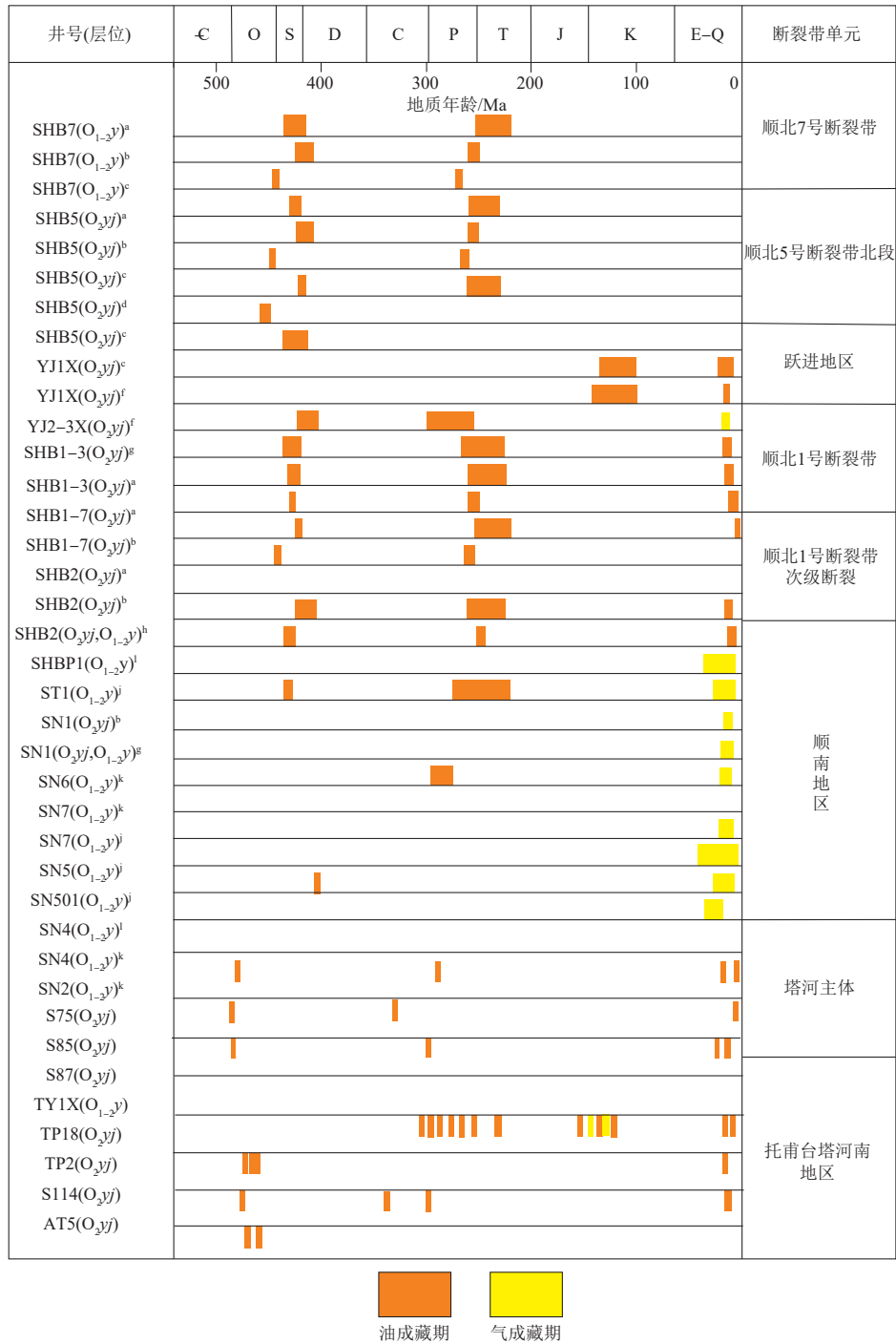


图4 塔里木盆地塔河与顺北地区主要断裂带成藏期次及其分布

Fig. 4 Hydrocarbon accumulation stages and their distributions within major fault zones in the Tahe and Shunbei areas , Tarim Basin

(O₂yj为一间房组;O₃yj为鹰山组;上标a,b,c,d,f,g,h,g和l表示不同来源的样品/资料。)

2.2 断裂特征

2.2.1 断裂类型与分布格局

1) 走滑断裂

顺北地区断裂系统复杂,以走滑断裂与伸展断裂为主导。在平面和垂向上,走滑断裂按特定构造应力

方向分布,相互汇聚组合成断裂带,其结构特征记录了区域构造应力的动态演化。这些断裂作为深部油气运移的通道,其周缘常形成复杂圈闭,已成为该区油气勘探的重点目标。然而,断裂活动导致周围地层变形大、储层性质多变,因此精确识别与表征断裂系统是成功勘探的关键前提。

2) 逆断裂

逆断裂在顺北地区主要呈叠瓦状或对冲式分布,多形成于挤压构造环境,平面上常与走滑断裂交织构成复合断裂系统。垂向上,逆断裂具有明显的穿层性,可切穿多套地层单元,不仅控制浅部沉积相带展布与构造演化历史,还通过断裂带的启闭性影响储层发育。其形成的逆冲推覆构造可导致地层抬升剥蚀或深埋,既可能破坏原有油气藏,也能通过地层堆叠形成优质储集体。此外,逆断裂活动可引发深部流体上涌,改变浅部地层的物质组成与物理-化学性质,并通过控制烃源岩的埋藏深度间接影响油气生成过程,使得该区油气勘探在复杂地质约束下仍具较大潜力。

2.2.2 断裂带内部结构

主干断裂带与次级断裂带储层特征存在明显差别(图5)。

1) 主干断裂带储层发育特征

①空间分布特征

主干断裂带所控制的高渗透储层主要沿断层下盘呈带状展布,形成典型的“断控型”储集体。断裂带下盘由于受断层活动影响强烈,形成了有利的储层发育环境。

②岩石学特征

储层岩石以灰岩为主,溶蚀作用强烈。次生溶蚀孔隙发育,形成了良好的储集空间。高角度剪切裂缝广泛发育,这些裂缝与溶蚀孔洞组合形成了串珠状的储-渗结构,显著改善了储层的渗流条件。

③物性特征

储层物性表现出较高的孔-渗性能,其中,在断层活动较为强烈的区域,形成了局部“甜点区”,展现出优异的储集和渗流性能。

④形成机制

断层活动引起的压溶作用加速了碳酸盐岩的白云石化改造,促进了次生孔隙的形成。热液活动进一步强化了溶蚀作用,塑造了复杂的次生孔隙系统。与此同时,与断层相关的裂缝网络构成了油气运移的有效渗流通道,使该类储层具有良好的油气聚集成藏条件。

2) 次级断裂带储层发育特征

①空间分布特征

次级断裂控制的储层在空间上呈现出“雁列式”分布特征,这些断裂主要发育于上盘转折端附近。断裂规模较小,控制范围有限,形成的储层规模相对较小。

②岩石学特征

储层主要以溶蚀孔洞为主,表现为孤立的溶蚀孔,

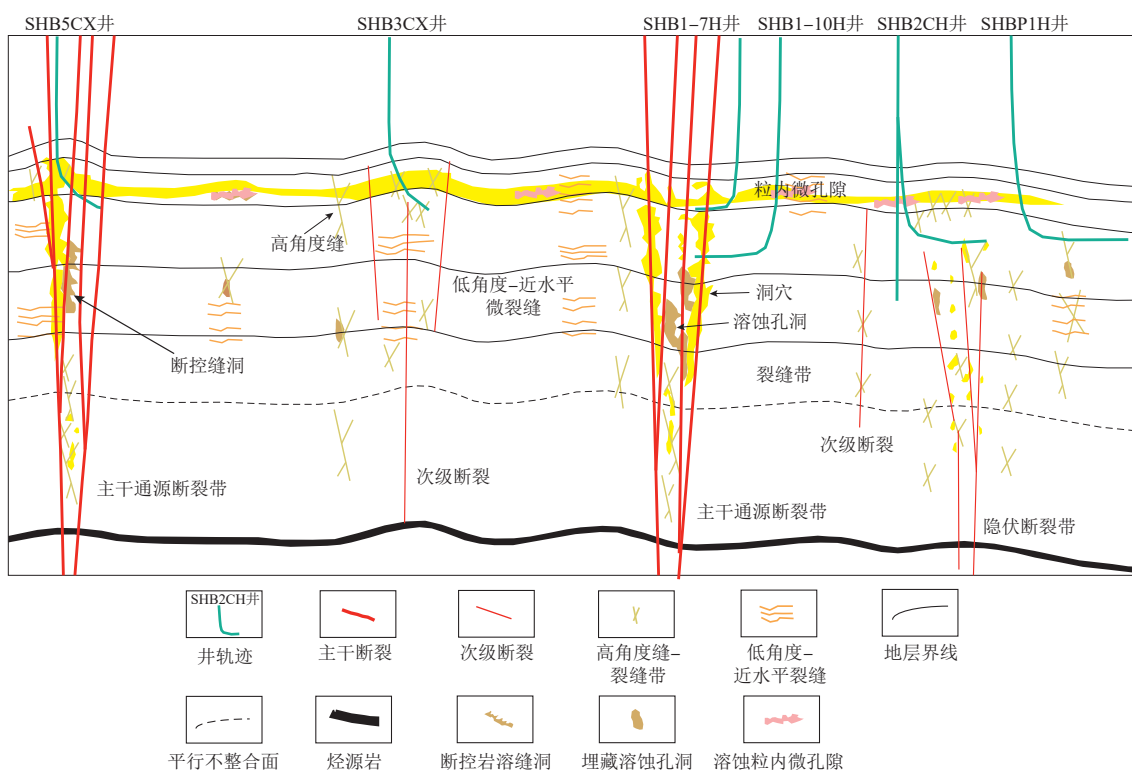


图5 塔里木盆地顺北地区中-下奥陶统主干与次级断裂储层发育特征对比

Fig. 5 Well-correlation section showing the comparison of reservoir characteristics of the Middle-Lower Ordovician primary and secondary faults in the Shunbei area, Tarim Basin

孔径较小。裂缝密度较低,裂缝间距较大,难以形成有效连通的裂隙网络。

③物性特征

储层表现出“低孔-低渗”的特征,在局部地区可见断层角砾岩充填,表明断裂带的活动性较弱,储层改造作用有限。

④形成机制

断层活动产生的剪切破裂对储层的改造作用较弱,形成了有限的渗流通道。储集空间主要是原生孔隙,经后期轻微溶蚀改造而成。这种储层由于渗流能力较差,油气富集程度有限,勘探开发效益较低。

3) 主干断裂带与次级断裂带对比

主干断裂带的储层以其优越的物性和发育良好的缝洞-裂缝系统在油气勘探中具有重要的价值;而次级断裂带的储层则表现为低孔隙度和低渗透率的特征,渗流能力有限,勘探价值相对较低。

2.2.3 走滑断裂活动与孔隙结构特征

岩石力学实验清晰揭示,走滑断裂具有周期性活动特征,这种周期性的活动促使裂缝网络处于动态扩展之中。破裂阈值与围压之间存在着极为显著的相关性,会随着围压的升高呈指数降低。其中酸性流体沿着断裂带进行侧向运移,在这一过程中,溶蚀现象频发,逐渐形成了溶蚀孔隙,这些溶蚀孔隙与裂缝系统在空间上实现了相互叠合。

1) 岩心分析揭示的“三段式”储层结构

岩心分析表明,断裂带内部呈现出典型的“三段式”储层结构(图6),各段具有独特的岩石特征与储集性能。

① 上部碎裂岩带(破碎带)

从岩性上看,该带主要以奥陶系灰岩为主。在断裂核部强烈剪切作用的长期影响下,岩石破碎程度极

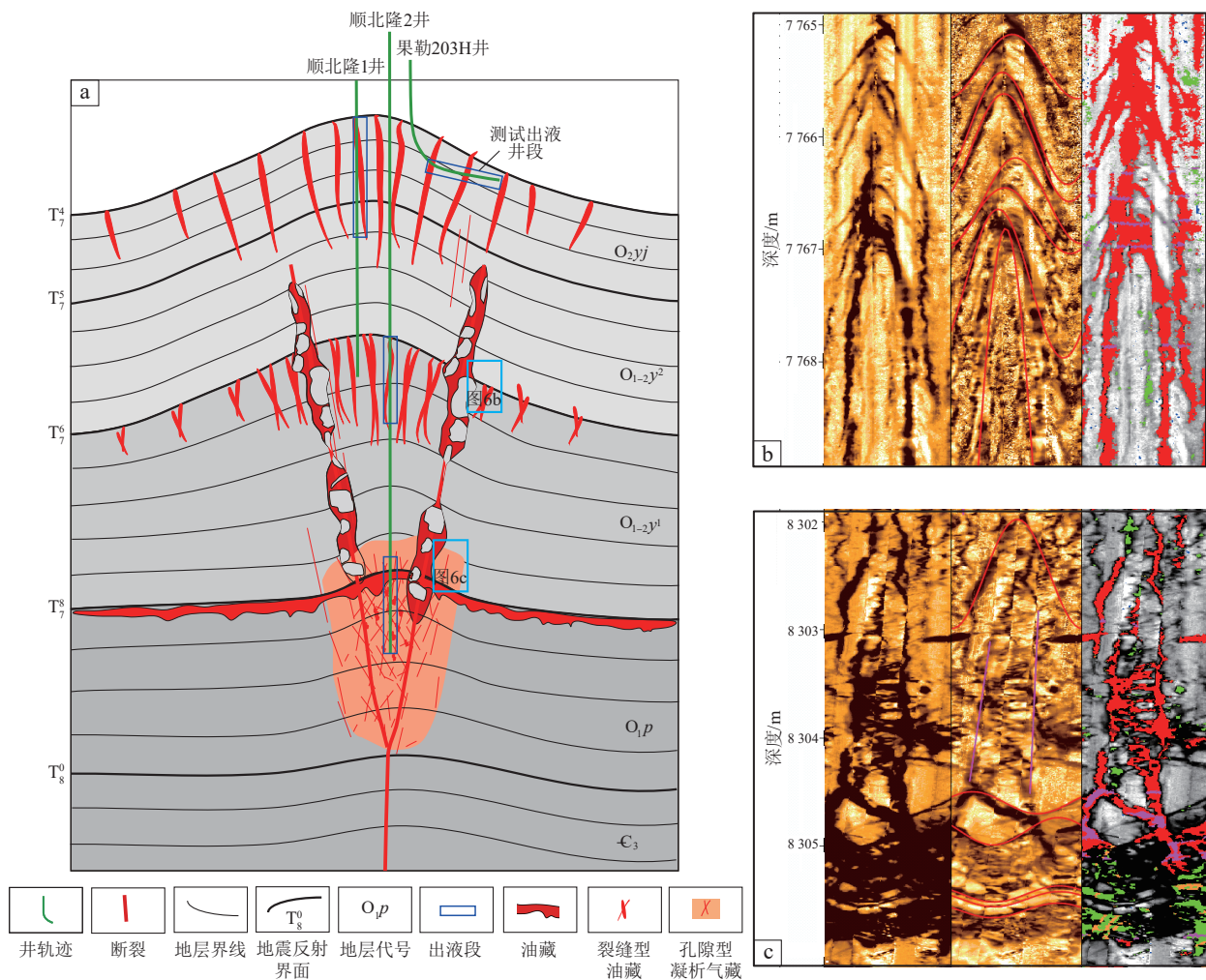


图6 塔里木盆地顺北地区断裂带内部储层结构“三层-三段”概念模型

Fig. 6 Conceptual models of the three-layer and three-segment reservoir structure within fault zones in the Shunbei area, Tarim Basin

a. 储层发育模式图; b. 裂缝型储层成像测井图像(顶部裂缝带); c. 缝洞型储层成像测井图像(底部漏失段)

高。张性破裂在其中占据主导地位,并且伴有溶蚀孔洞。储集空间丰富多样,包含密集的网状裂缝,如高角度剪切缝与碎裂缝,构成了渗流网络;还有大气水沿裂缝溶蚀形成的溶蚀扩缝孔洞,部分孔洞被热液矿物充填。此带主要受加里东期—海西期断裂走滑活动、表生期岩溶与深部热液溶蚀叠加作用的影响。在储集性能方面,孔隙度处于中等水平,然而渗透率较低,整体以裂缝-孔隙型储集层为主。其充填物或许能够指示古油藏的调整情况,现今虽多为致密带,但勘探意义重大。不过,该带非均质性较强,需要借助地震属性融合技术进行精准预测。

② 中部裂缝-孔洞带(优势储集段)

该带位于断裂带中部,为灰岩-白云岩过渡带。热液矿物的强烈胶结作用形成了热液胶结致密带,剪切作用造就了网状裂缝系统,方解石充填率低。储集空间包含白云石化残留的残余晶间孔以及热液间歇性活动形成的局部溶蚀窗。印支期热液上涌导致硅化现象发生,后期构造应力释放产生微裂缝,使得该带渗透率小,常规试采产能较低,通常需要进行酸压改造。此段网状裂缝与溶蚀孔洞相互交织,未充填裂缝比例超过60%,是高产、稳产的主力层段。

③ 下部变形基质带(致密带)

该带位于断裂带深部,由下奥陶统蓬莱坝组白云岩构成,发育埋藏白云石化作用。其储集空间为晶间

孔-溶孔复合体,还伴有层间滑脱缝。该段受埋藏成岩阶段白云石化作用以及寒武系盐层塑性流动引发的层间滑脱控制。整体上,此带连续性良好,层间滑脱缝与缝合线微缝在局部区域形成“短距离连通网络”,但由于埋深超过7 500 m,发育低角度缝合线构造,基质致密,孔隙度小,渗透率低。该带的储集空间发育有限,且以“孤立、分散”分布的晶间孔-溶孔复合体、层间滑脱缝和低角度缝合线为主要的储集空间类型。

2) “三层结构”的形成机制与油气意义

顺北奥陶系油气藏断裂带核部的“三层结构”,是多期构造活动、热液溶蚀以及成岩作用共同作用形成的垂向分带性的结果,在储层的发育与油气的富集中具有极为关键的意义。“三层结构”形成了独特的“上洞-中阻-下孔”垂向封存体系,不同断裂带之间存在着一定的差异。而断裂带核部热液活动的期次与储层演化之间的定量耦合关系,是当前亟待深入研究的关键课题,这对于更精准地认识油气藏的形成和分布具有重要意义。

2.2.4 断裂活动期次与油气成藏

加里东中、晚期—海西早期、印支期—燕山期和喜马拉雅期这3个关键时期的断裂活动相互关联、相互影响,共同构成了该区域断裂的演化历史,对油气的成藏与分布至关重要。基于多条断裂带的综合解析(图7),可以明确该区域的断裂活动经历了这3个

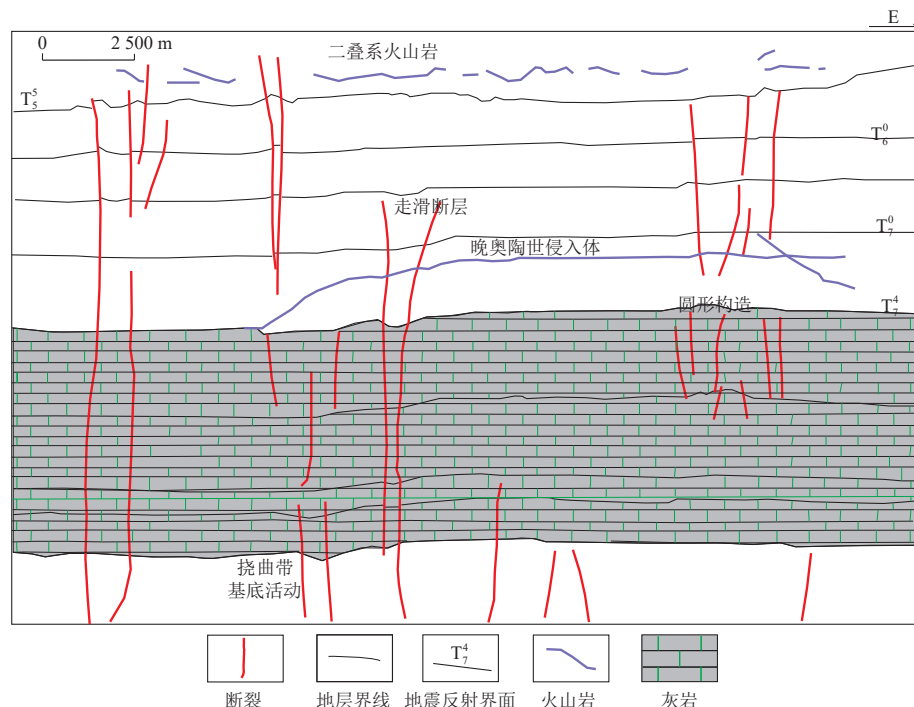


图7 塔里木盆地顺北1三维工区东西向地震-地质解释剖面

Fig. 7 EW-oriented seismic and geological interpretation section of the 3D seismic acreage 1 in the Shunbei area, Tarim Basin

关键时期,各阶段都有其独特的特征与规律,且各阶段的活动相互关联,最终塑造了复杂而独特的断裂体系。

1) 加里东中、晚期—海西早期(晚奥陶世—中泥盆世末):首次大规模活动

此阶段区域断裂活动活跃,其直接证据为断裂带内 T_7^4 — T_7^0 界面间同相轴发生明显变形与错位,表明地壳应力场作用下岩石经历了破裂与位移过程。推测加里东中期I幕存在区域破裂作用,形成初始节理系统,断裂在此基础上发生走滑运动。走滑作用不仅改变了地层状态,为油气运移与聚集创造了构造条件,还可能引发岩浆侵入和变质作用,进而影响区域地层的性质与结构。

2) 印支期—燕山期:调整与再活动

印支期—燕山期,早期断裂在新地壳运动背景下调整再活动,海西晚期断裂普遍再活动并诱发新断裂,部分未切入基底。 T_3^0 界面上、下断裂带地震相差异反映其受不同程度应力作用改造, T_3^0 界面之上中生界内发育的小微断裂证实下部走滑断裂再度活动,这些小微断裂对油气藏局部聚集与调整有重要的影响。

3) 喜马拉雅期:持续与改造

喜马拉雅期构造运动强烈,断裂活动持续且进一步改造。受印度板块与欧亚板块碰撞挤压,地壳应力场发生变化,既有早期断裂继续活动,又有新断裂形成发展。断裂活动使地层变形错动更复杂,改造油气藏储集空间和运移通道,可能破坏早期油气藏,也为重新运移与聚集创造条件。该期构造运动还可能触发岩浆侵入与变质作用,改变地层物性与区域构造格局,对油气成藏与分布产生了深远影响。

2.3 烃源岩热演化与断裂活动的时-空耦合关系

2.3.1 油气充注与保存条件的动态平衡

1) 成岩作用与储层演化

通过对新生变形、胶结、白云石化、破裂及压实—压溶等多种成岩作用的精细研究,结合硅质特征与多期成岩流体性质分析,本研究构建了顺北地区清晰的成岩演化序列(图8),并识别出3期关键的破裂—充填过程。早期成岩阶段以泥晶化、重结晶和胶结作用为主。随埋深增加,胶结作用导致孔隙空间堵塞,黄铁矿化和白云石化现象逐渐显现。浅埋藏期的白云石化规模有限,对储层物性改善不明显。随着埋藏加深和构造活动增强,多期破裂作用形成裂缝系统与扩容性角砾岩,有效改善了储层物性;但后续地层水充填胶

结部分破坏储集空间,硅化作用虽总体破坏储集空间,但在深部油气显示段可能表现出一定的建设性改造效应。

2) 断裂带结构与储集体

断裂带规模在纵向上差异显著,储集体发育程度与断裂级别密切相关。主干断裂带(如SHB5CX和SHB1-3H断裂带)储集空间以洞穴和裂缝为主,储集体规模大、产量高;次级断裂带(如SHB3CX和SHB2CH断裂带)储集空间多为高角度裂缝,储集规模与产量较小;断裂带外围区域储集体发育较差。主干断裂形成的有利破碎带经溶蚀改造后,形成大规模断控缝洞型储集体,断穿下伏烃源岩,油气富集程度高,实际生产表现为高油压、高日产液量和良好的产能稳定性。

3) 裂缝网络与成藏

断裂带内部岩石经历多期变形改造,裂缝网络提升渗透率,热液活动扩大孔隙空间,使优势输导通道与储集空间叠合,为油气运移与聚集创造条件。研究表明,顺北地区断裂系统具有“控储、控运、控藏”三位一体特征:控储方面,深大断裂(如走滑断裂)通过裂缝网络与热液岩溶形成缝洞型储集体;控运方面,断裂为垂向运移主通道,多期构造活动形成“断裂空腔—裂缝—溶洞”复合输导体系;控藏方面,断裂带与储集体空间耦合关系决定油气藏分布与富集。

4) 封闭性与成藏模式

顺北断裂封闭性动态演化模拟是一个系统性工程,完整的模拟过程通常包括前期数据准备、模型构建、参数赋值、数值计算、结果分析和验证应用等多个环节,需要多学科与多尺度参数的有机结合,涵盖地质、力学、流体和动态监测等多个方面。

顺北断裂带作为塔里木盆地超深层油气勘探的核心区域,其断裂封闭性的动态演化与油气成藏过程紧密耦合,形成了独特的“断裂控藏”体系。综合研究表明,受构造活动、成岩作用及流体作用的叠加影响,顺北断裂封闭性呈现“多期启闭”特征:早期开启(加里东中期—海西早期),断裂活动强烈,构造应力集中导致裂缝密集发育,此时断裂以“输导”功能为主,成为油气垂向运移的主要通道;中期调整(海西中期—印支期),断裂活动减弱,部分段落因应力松弛或成岩作用(如方解石胶结)逐渐封闭,而活跃段落仍保持输导能力,油气沿开启段侧向运移并局部聚集;晚期稳定(燕山期—喜马拉雅期),断裂基本停止活动,封闭性主要由现今地应力和断裂内部充填物(如泥质涂抹、矿物胶结)控制,压剪段因挤压应力作用,裂缝被压实或充填,封闭



图8 塔里木盆地顺北地区奥陶系成岩演化序列

Fig. 8 Diagenetic evolutionary sequence of the Ordovician system in the Shunbei area, Tarim Basin
(C2,C3和C4表示成岩期划分;图中“?”用于标识推测发生的成岩作用。)

性增强,可作为油气保存的边界。

断裂“开启期”决定油气运移路径与效率,控制“源-储”连通性;断裂“封闭期”决定油气聚集位置与保存条件,控制圈闭有效性;断裂分段与分层的封闭性差异,则导致油气“分段富集、立体分布”的成藏特征。因为断裂封闭性的动态演化与油气成藏过程深度耦合,形成了以“断裂控输导、封闭控保存、分段控富集”为核心的成藏模式,具体可分为“早期输导-晚期封闭”的断控圈闭成藏、“分段输导-差异富集”的断裂带分段成藏、“垂向分层-多期充注”的立体成藏3类典型模式。

2.3.2 空间维度的耦合

1) 断裂与烃源岩热演化空间的关联

从空间看,断裂系统显著影响烃源岩的热演化。断裂发育密集区因地层错动和热传导,使周边烃源岩获取深部热量,热演化程度高,成熟度明显高于远离断

裂区。大型断裂带是高效热流通道,加快深部热量向浅部传递。同时,烃源岩分布和形态反作用于断裂活动,厚层烃源岩会限制断裂延伸和扩展,使其活动方式和强度改变,如穿越时可能弯曲、分支或强度减弱。

2) 对油气运移与聚集的影响

断裂与圈闭的配置关系共同控制着油气的聚集过程。在断裂与背斜交汇处,断裂作为油源通道提供油气供给,背斜则发挥圈闭作用,此类配置常形成大型油气藏。不同级次的断裂与烃源岩和各类圈闭呈现多样组合,共同构成构成复杂而有序的油气运移-聚集网络,进而影响油气藏的空间分布格局。

3) 断裂对油气生成与运移的作用

引导热流体方面,断裂如“桥梁”,引导深部热流体流向烃源岩,改变其热环境和演化进程,加快生烃速率;开辟运移通道方面,断裂为油气运移提供便捷通道,如走滑断裂带附近油气运移活跃,有利于油气藏的形成。

4) 时间维度的耦合

不同地质时期,断裂活动与烃源岩热演化之间的时间耦合关系呈现不同特征:古生代早期断裂活动微弱,主要影响烃源岩的沉积环境,随着烃源岩持续埋藏,热演化程度逐渐加深;晚期断裂活动增强,与烃源岩热演化高峰期相契合,成为油气初次运移的通道,促使油气初步聚集。中、新生代地质环境发生改变,烃源岩热演化活跃,大量油气生成,同时断裂活动的强度和频次明显增加,其高峰期与烃源岩热演化高峰期高度同步,形成宽广的运移路径,促使油气快速大量排出并运移至圈闭,显著提升了成藏效率,形成众多沿断裂带富集的大型油气藏。加里东晚期—海西早期,区域构造应力场改变使断裂活动呈现新特点。烃源岩进一步成熟,断裂增强推动油气快速运移,影响油气聚集分布,形成新圈闭,改变分布格局。此时期两者耦合时间更精细,虽有微妙时差,但总体表现为相互促进。印支期—燕山期,区域构造运动加剧,断裂以挤压和走滑为主,烃源岩热演化进程随之加快。走滑断裂为油气提供长距离运移通道,挤压断裂形成聚集圈闭,两者耦合复杂且紧密。

从时间维度看,断裂活动的间歇性与烃源岩热演化的阶段性紧密呼应(图9)。断裂活动强烈时期,油气得以快速运移和聚集,而在活动平静期,烃源岩则持续热演化,为成藏积累能量。喜马拉雅期,伸展与走滑叠加的断裂活动使烃源岩热演化进入新阶段。伸展断裂为深部油气开辟了高效的运移通道,走滑断裂则进一步优化了油气的运移和聚集条件,使顺北地区此时期仍有新油气藏形成,成藏过程持续活跃。

5) 实例分析

以顺北1号断裂带为例,加里东中期(约450 Ma)顺北1号断裂带的强烈走滑活动使寒武系烃源岩深埋。

热模拟结果显示,该时期地温梯度达 $3.2\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$,较区域背景值升高约18%,烃源岩镜质体反射率(R_o)5 Ma内从0.6%升至1.3%^[5],实现生油窗向凝析气窗转变。在断裂引起的局部地温异常区,形成“断裂通道控热-热异常促生烃”高效耦合效应。

顺北地区主干断裂带、次级低级序断裂及断裂带间油气有序分布,印证了其时-空耦合关系:东部以气藏为主,西部以油藏为主;主干断裂带成藏期次多且晚期充注强烈,次级断裂及断裂带间成藏期次少,早期成藏后经历改造,晚期充注相对较弱。

2.3.3 时-空差异与油气分布

地质历史时期,构造运动与流体活动导致断裂封闭性持续变化。早期断裂开启有利于油气向上运移,晚期封闭性增强。天然气倾向深部聚集,石油偏浅部富集。断裂封闭性受地层流体压力和岩石力学性质等因素共同影响,这种时-空差异造就了油气纵向分异特征。结合前人研究,修改构建了顺北地区“断裂活动-成岩改造-油气充注”的“源-断-储-藏”演化成藏事件综合事件图(图10)。

3 成藏模式与勘探启示

3.1 成藏模式

综合考虑烃源岩、断裂系统及构造演化等因素,建立了顺北地区断控油气藏“源-断耦合供烃、断裂带立体输导、动态封闭控藏”的成藏模式(图11)。

3.1.1 源-断耦合供烃

烃源岩与断裂紧密耦合,深部烃源岩生成的油气

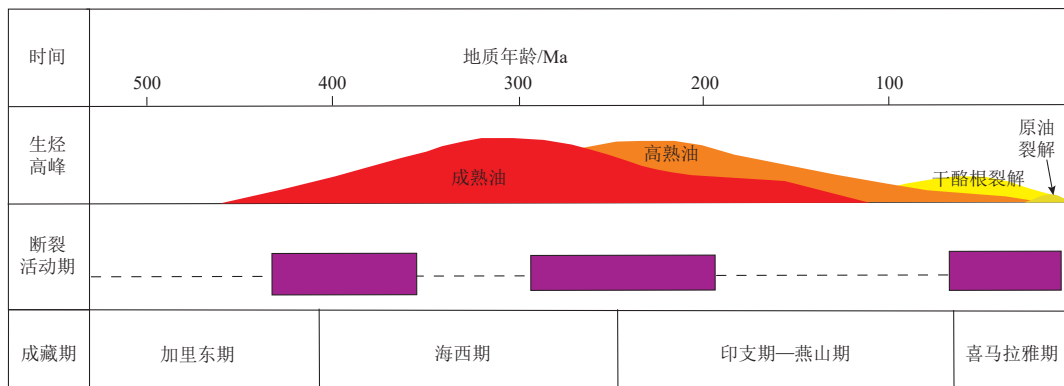


图9 塔里木盆地顺北地区烃源岩生烃高峰与断裂活动期及成藏期匹配示意图

Fig. 9 Schematic diagram showing the match between peak hydrocarbon generation periods of source rocks, faulting stages, and hydrocarbon accumulation stages in the Shunbei area, Tarim Basin

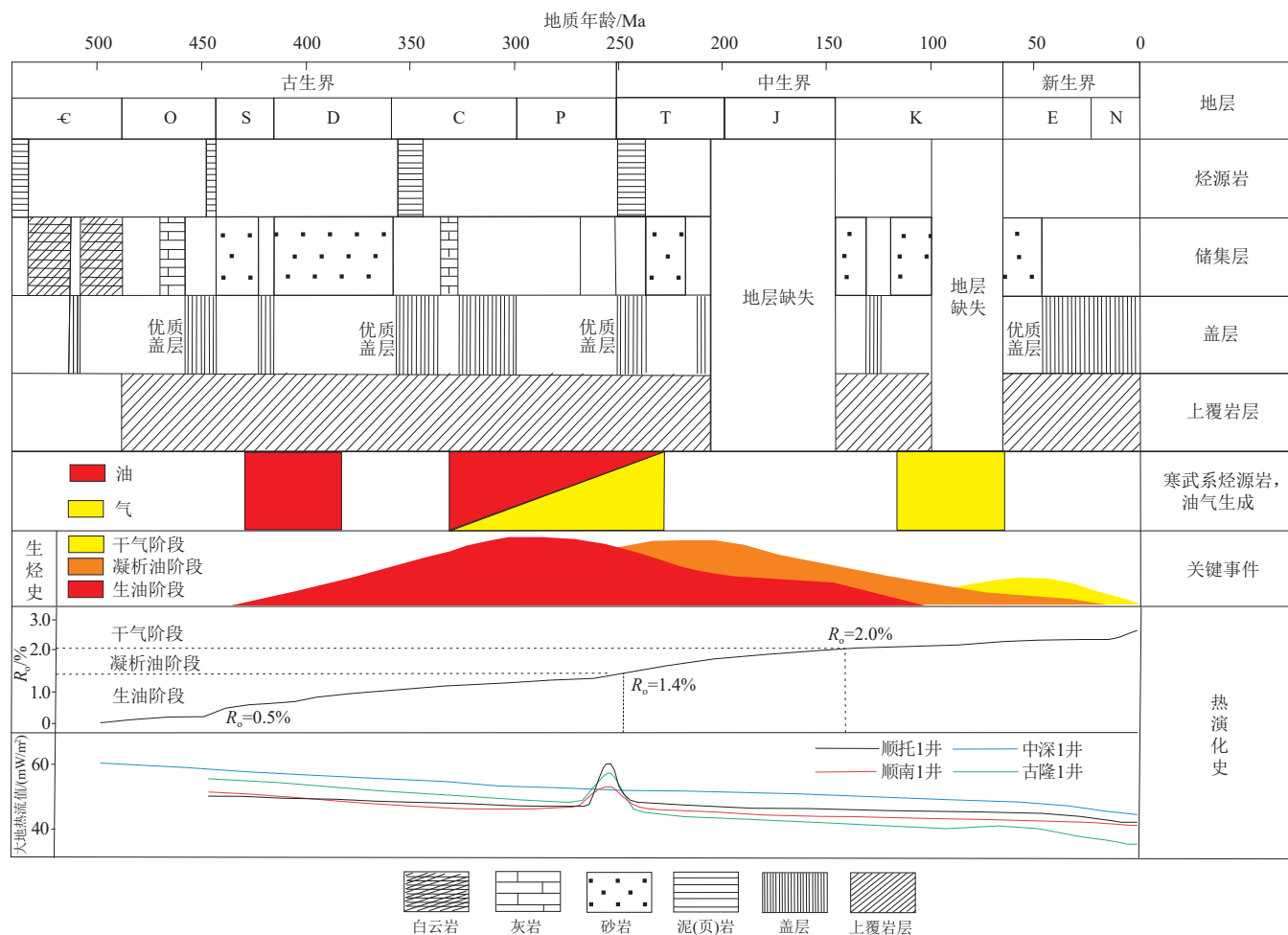


图10 塔里木盆地顺北地区“源-断-储-藏”演化成藏事件综合示意图

Fig. 10 Comprehensive schematic diagram showing the source rock-fault-reservoir-trap evolutionary events in the Shunbei area, Tarim Basin (R_o 为镜质体反射率。)

在压实与烃类增压驱动下沿断裂向上运移。断裂开启性与连通性受构造应力场控制^[18], 在生-排烃高峰期油气提供高效运移路径。耦合关系取决于空间位置、断裂活动历史及流体动力学条件, 部分区域深部断裂直接切入烃源岩层位, 另一些则通过派生裂缝实现流体连通。

3.1.2 断裂带立体输导

顺北地区断裂系统呈复杂的立体结构, 形成三维输导网络。垂向上, 油气沿主断裂从深部向浅部运移; 水平方向上, 通过次级裂缝和孔隙系统横向扩散。断裂带中心部位岩石破碎、孔-渗性好, 有利于油气快速运移; 边缘部位相对完整, 输导能力弱但可控制运移方向。

3.1.3 动态封闭控藏

多期构造运动导致断裂带封闭性呈现动态变化。早期断裂活动强烈, 油气沿断裂运移; 构造运动减弱

时, 断裂带因岩石压实和胶结作用而封闭性增强, 促使油气在圈闭中聚集并保存; 后期构造运动可能再次激活断裂, 导致油气重新运移与调整。喜马拉雅期的构造运动形成新断裂或改造老断裂, 进一步改变了封闭条件, 使油气在新圈闭中富集。这种动态过程导致油气藏分布复杂、性质多样。

3.2 核心要点

3.2.1 断控成储

断裂活动主导储层形成, 不仅破碎岩石构建裂缝网络, 还诱发热液溶蚀改造, 形成独特的裂缝-孔洞型储集体。该成藏模式突破了传统认知, 强调构造与流体耦合作用, 为超深层优质储层勘探提供了新依据。

3.2.2 断控输导

断裂作为关键输导通道, 其内部结构非均质性决

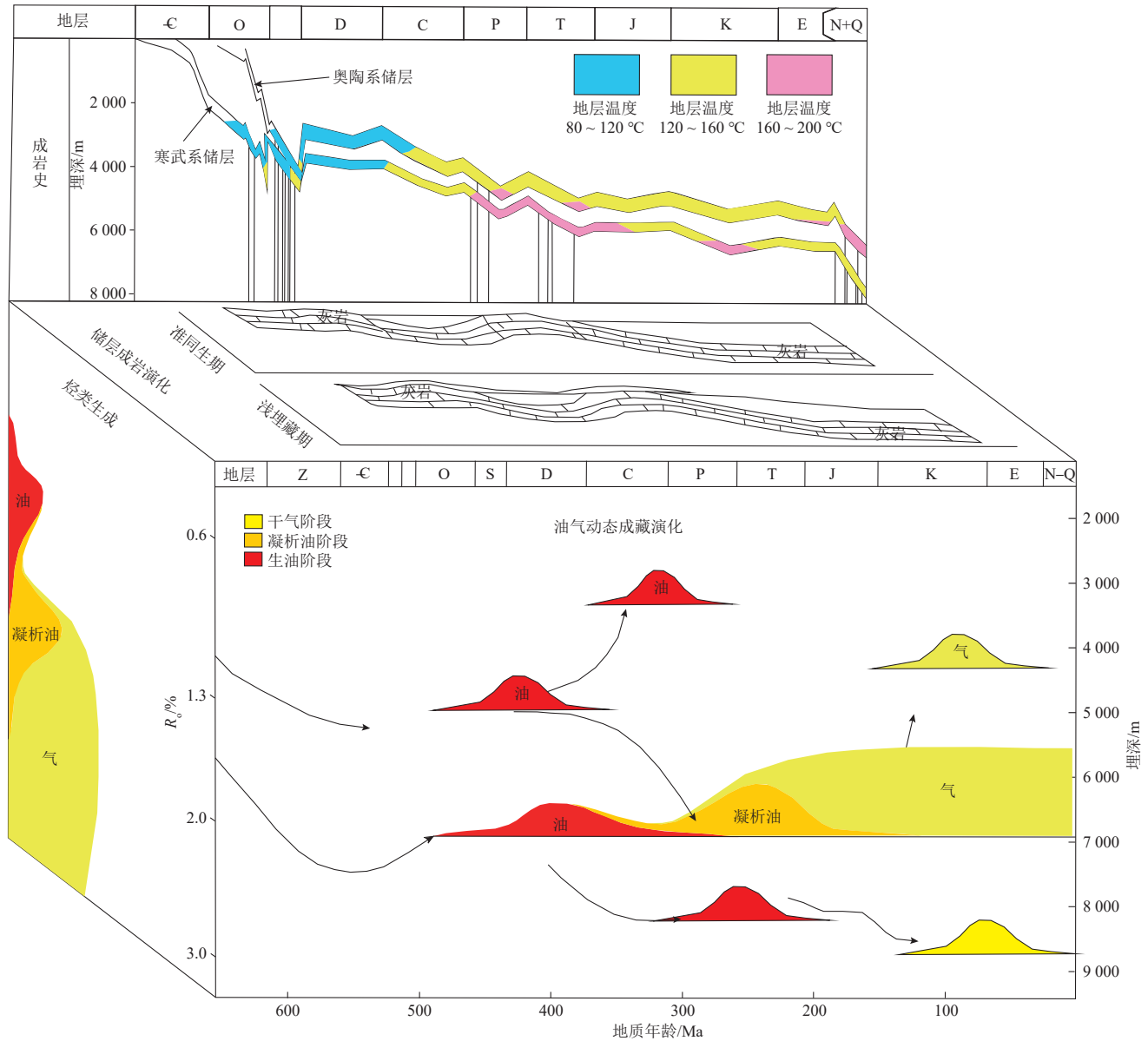


图 11 塔里木盆地顺北地区叠合盆地“源-断-储-藏”协同成藏过程示意图

Fig. 11 Schematic diagram showing the source rock-fault-reservoir-trap coevolution process in the Shunbei area, Tarim Basin

(R_o为镜质体反射率。)

定输导能力差异。优势输导通道形成与断裂活动历史、岩石破碎程度及流体蚀变作用相关。多期构造运动使断裂在不同时期具有不同开启性与连通性,油气得以长距离、立体式运移。

3.2.3 断控成藏

断裂封闭性动态调整决定油气富集位置。活动期断裂为油气输导通道,停止活动后形成封闭单元,促使油气在构造转折端等有利区段差异聚集。该理论阐释了油气成藏动态过程,表明断裂封闭性变化是控制油气聚集与保存的关键因素,为勘探目标定位提供核心指导。

3.3 勘探方向与建议

3.3.1 聚焦断裂带中-上段储集体

优先勘探断裂带中-上段(埋深6 000~8 000 m)的裂缝-孔洞复合储集体,该深度区间储集性能优异、油气运移条件良好,且构造应力适中,断裂裂缝系统既能高效沟通油气源,又避免裂缝连通性丧失;加之该段热液活动强烈,显著改善储层物性。勘探实践表明该深度段潜力巨大,建议加大资源投入,通过加密井网、深化精细研究,进一步挖掘其资源潜力。

3.3.2 关注走滑断裂转折端与古隆起叠合区

重点研究走滑断裂转折端(曲率 $>0.2\text{ m}^{-1}$)与古隆起的叠合区域。转折端因曲率大、应力集中而裂缝发育,有利于油气运移;古隆起长期处于构造高部位,是早期油气聚集的有利区。二者叠合既保证油气来源,又具备优越圈闭条件。建议开展区域构造演化研究,采用宽方位地震采集技术提升成像精度,结合先进数据处理技术,清晰刻画断裂带内部的结构特征。

4 结论

1) 顺北地区走滑断裂活动对烃源岩成熟度演化与储集空间发育影响显著。走滑断裂的剧烈活动改变了构造应力场,在断裂带周边产生了明显的热效应,加速了烃源岩的热演化过程,使其在较短的地质时期内达到适宜的成熟度,为油气生成奠定物质基础。同时,断裂活动引发岩石破碎形成裂缝网络,热液沿裂缝运移并与岩石发生化学反应,通过溶蚀作用产生孔洞,通过力学-化学耦合作用,在断裂带内部构建起高渗透率与高孔隙度的优势储集空间,有利于油气储存与运移。

2) 油气充注呈现“断裂活动期控输导、静止期控封存”的幕式特征。断裂活动期,断裂带开启成为油气高效运移通道;断裂静止期,断裂带被封堵,油气得以封存。现今最大水平主应力方向与断裂走向夹角影响油气保存状态。当夹角较小时,断裂带的封闭性好;而当夹角较大时,断裂带的封闭性较差,此关系为评估油气藏保存状态提供关键依据。

3) “源-断-储-藏”四要素协同演化模式为超深层碳酸盐岩油气勘探提供全新地质理论支撑。“源-断-储-藏”四要素协同演化模式阐释了各要素相互作用与协同演化过程,揭示出成储-成圈-成藏机制,创建超深断控油气藏成藏理论,突破了单一要素研究局限。在勘探实践中,超深断控油气藏成藏理论有助于指导综合考量多种地质因素,精准预测油气富集区,优化勘探部署方案,提升勘探成功率,推动勘探工作向更深更复杂区域拓展。

参 考 文 献

- [1] 焦方正, 漆立新, 云露, 等. 超深断溶体油气成藏理论与顺北油气田发现[Z]. 乌鲁木齐: 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司, 2020-06-09.
- [2] 云露. 顺北地区奥陶系超深断溶体油气成藏条件[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 136-142.
- [3] 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.
- [4] 漆立新, 云露, 李宗杰, 等. 顺北地区勘探目标评价与优选[Z]. 乌鲁木齐: 中石化西北油田分公司, 2017-08-05.
- [5] 丁勇, 潘泉涌. 地温梯度在塔里木盆地古生界热演化研究中的应用[J]. 石油实验地质, 2024, 46(3): 451-459.
- [6] 曹自成, 云露, 平宏伟, 等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系天然气地球化学与成因[J]. 地质科技通报, 2025, 44(5): 40-52.
- [7] 徐勤琪, 张黎, 李斌, 等. 塔河油田下寒武统烃源岩生排烃史差异演化及成藏效应[J]. 特种油气藏, 2024, 31(1): 20-30.
- [8] 邱楠生, 常健, 冯乾乾, 等. 我国中西部盆地深层-超深层烃源岩热演化研究[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 199-212.
- [9] 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.
- [10] JIAO Fangzheng, QI Lixin, YUN Lu, et al. Theory of hydrocarbon accumulation in ultra-deep fault-karst systems and the discovery of Shunbei Oil and Gas Field[Z]. Urumqi: China Petrochemical Co., Ltd. Northwest Oil Field Branch, 2020-06-09.
- [11] YUN Lu. Hydrocarbon accumulation of ultra-deep Ordovician fault-karst reservoirs in Shunbei area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 136-142.
- [12] 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 Petroli Sinica, 2022, 43(6): 770-787.
- [13] QI Lixin, YUN Lu, LI Zongjie, et al. Evaluation and Optimization of Exploration Targets in Shunbei Area[Z]. Urumqi: China Petrochemical Northwest Oil Field Branch, 2017-08-05.
- [14] DING Yong, PAN Quanyong. Application of geothermal gradient in the study of thermal evolution of Paleozoic source rocks, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2024, 46(3): 451-459.
- [15] CAO Zicheng, YUN Lu, PING Hongwei, et al. Geochemistry and origin of Ordovician natural gas in Shunbei area of Tarim Basin [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(5): 40-52.
- [16] XU Qinqi, ZHANG Li, LI Bin, et al. Differential evolutions of hydrocarbon generation and expulsion history of Lower Cambrian source rocks in Tahe Oilfield and accumulation effects[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2024, 31(1): 20-30.
- [17] QIU Nansheng, CHANG Jian, FENG Qianqian, et al. Maturation history of deep and ultra-deep source rocks, central and western basins, China [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 199-212.
- [18] 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 Petroli Sinica, 2017, 38(5): 502-511.

- [10] 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.
- [11] 郭宏辉, 冯建伟, 赵力彬. 塔里木盆地博孜一大北地区被动走滑构造特征及其对裂缝发育的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 962-975.
GUO Honghui, FENG Jianwei, ZHAO Libin. Characteristics of passive strike-slip structure and its control effect on fracture development in Bozi-Dabei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 962-975.
- [12] 焦方正. 塔里木盆地深层碳酸盐岩缝洞型油藏体积开发实践与认识[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 552-558.
JIAO Fangzheng. Practice and knowledge of volumetric development of deep fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 552-558.
- [13] 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]. 乌鲁木齐: 中石化西北油田分公司, 2018-12-20.
QI Lixin, YUN Lu, HUANG Taizhu, et al. Distribution law of oil and gas and optimization of breakthrough targets in Shuntuoguole area [Z]. Urumqi: China Petrochemical Northwest Oil Field Branch, 2018-12-20.
- [14] 焦方正. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 831-839.
JIAO Fangzheng. Significance of oil and gas exploration in NE strike-slip fault belts in Shuntuoguole area of Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 831-839.
- [15] 韩强, 云露, 蒋华山, 等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系油气充注过程分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(3): 645-658.
HAN Qiang, YUN Lu, JIANG Huashan, et al. Marine oil and gas filling and accumulation process in the north of Shuntuoguole area in northern Tarim Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(3): 645-658.
- [16] 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.
- [17] 谷茸, 云露, 朱秀香, 等. 塔里木盆地顺北油田油气来源研究[J]. 石油实验地质, 2020, 42(2): 248-254, 262.
GU Rong, YUN Lu, ZHU Xiuxiang, et al. Oil and gas sources in Shunbei Oilfield, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(2): 248-254, 262.
- [18] 顾忆, 万旻璐, 黄继文, 等. “大埋深、高压”条件下塔里木盆地超深层油气勘探前景[J]. 石油实验地质, 2019, 41(2): 157-164.
GU Yi, WAN Yanglu, HUANG Jiwen, et al. Prospects for ultra-deep oil and gas in the “deep burial and high pressure” Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2019, 41(2): 157-164.
- [19] 郝芳, 姜建群, 邹华耀, 等. 超压对有机质热演化的差异抑制作用及层次[J]. 中国科学:地球科学, 2004, 34(5): 443-451.
HAO Fang, JIANG Jianqun, ZOU Huayao, et al. Differential inhibition and hierarchy of overpressure on organic matter thermal evolution [J]. Science China Earth Sciences, 2004, 34(5): 443-451.
- [20] 郝芳, 邹华耀, 方勇, 等. 超压环境有机质热演化和生烃作用机理[J]. 石油学报, 2006, 27(5): 9-18.
HAO Fang, ZOU Huayao, FANG Yong, et al. Kinetics of organic matter maturation and hydrocarbon generation in overpressure environment [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(5): 9-18.
- [21] 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.
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.

(编辑 刘格云)