

塔里木盆地台盆区下古生界全油气系统碳酸盐岩油气藏改造特征与成因模式

曹 鹏^{1,2,3}, 赵振丞^{1,2}, 庞雄奇^{1,2}, 李才俊^{1,2}, 庞 宏^{1,2}, 林会喜⁴, 杨海军⁵, 马奎友^{1,2}, 张思佳^{1,2}

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国石油 迪拜研究院, 迪拜 415747; 4. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 102206; 5. 中国石油 塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000]

摘要:塔里木盆地台盆区深层碳酸盐岩储层是中国重要油气产层, 油气资源潜力巨大。受多期构造活动、多期油气充注和调整改造的影响, 其油气藏改造特征、成因模式和分布规律尚不完全明确, 制约了深层-超深层油气勘探的进展。基于全油气系统理论, 系统研究了塔里木盆地台盆区下古生界碳酸盐岩油气藏改造特征与成因模式, 研究结果表明: ①台盆区碳酸盐岩改造类油气藏油气成藏动力边界和动力场均受到构造破坏; 早期油气藏类型由连续致密油气藏转变为常规裂缝型、缝洞型或孔洞型油气藏。呈现叠复连续油气藏特征, 形成断溶体油气藏新类型。②台盆区碳酸盐岩改造类油气藏受控于沉积演化、构造运动、成藏期次和保存条件等多因素动态耦合, 历经3个演化阶段, 油气成藏动力边界在物理化学的作用下被破坏。③改造类油气藏具有“纵向分层、横向分带”的有序分布特征。纵向分层性主要由岩性组合和沉积环境差异决定, 横向分带性则受断裂和不整合面发育程度控制。礁滩体油气藏和不整合孔洞类油气藏主要位于自由动力场, 断层裂缝类油气藏则位于浮力成藏下限与油气成藏底线之间的局限动力场。

关键词:成因模式; 改造特征; 碳酸盐岩; 下古生界; 台盆区; 全油气系统; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Transformations and genetic models of the Lower Paleozoic carbonate reservoirs interpreted by the whole petroleum system in the platform-basin area, Tarim Basin

CAO Peng^{1,2,3}, ZHAO Zhencheng^{1,2}, PANG Xiongqi^{1,2}, LI Caijun^{1,2}, PANG Hong^{1,2}, LIN Huixi⁴, YANG Haijun⁵, MA Kuiyou^{1,2}, ZHANG Sijia^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. CNPC R&D (DIFC) Company Limited, Dubai 415747, The United Arab Emirates; 4. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 5. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China]

Abstract: Deep carbonate hydrocarbon reservoirs in the platform-basin area of the Tarim Basin represent a significant hydrocarbon pay interval in China, holding considerable resource potential. However, their transformation characteristics, genetic models, and distribution patterns remain poorly understood due to the influence of multi-phase tectonic activities, multi-stage hydrocarbon charging, and late-stage adjustments and modifications. These hinder the progress of effective deep and ultra-deep hydrocarbon exploration therein. Based on the theory of the whole petroleum system, we systematically investigate the transformation processes and genetic models of the Lower Paleozoic carbonate hydrocarbon reservoirs in the platform-basin area of the Tarim Basin. The results indicate that the reformed carbonate hydrocarbon reservoirs in the platform-basin area exhibit several distinct characteristics: (1) tectonization-induced

收稿日期: 2025-05-20; 修回日期: 2025-08-08。

第一作者简介: 曹鹏(1985—), 男, 高级工程师, 碳酸盐岩油藏综合地质描述与成藏、油藏工程。E-mail: caopeng@cnpcrd.com。

通信作者简介: 庞雄奇(1961—), 男, 教授、博士研究生导师, 油气藏形成机制与分布规律、油气资源评价与油气田勘探。E-mail: pangxq@cup.edu.cn。

基金项目: 中国石油科学研究与技术开发项目(2021DJ0101); 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003-02)。

failure of the dynamic boundaries for hydrocarbon accumulation; (2) tectonic movement-induced failure of the dynamic fields for hydrocarbon accumulation and migration; (3) the transformation of early-stage continuous, tight reservoirs into conventional fractured, fractured-vuggy, or pore-cavity reservoirs; (4) the formation of superimposed, consistently distributed hydrocarbon reservoirs, and (5) the emergence of novel fault-karst hydrocarbon reservoirs. These reservoirs are governed by the dynamic coupling of multiple factors, including sedimentary evolution, tectonic movements, hydrocarbon accumulation and migration stages, and preservation conditions. The failure of the dynamic boundaries for hydrocarbon accumulation occurred after three evolutionary stages of physicochemical effects. The reformed hydrocarbon reservoirs display an orderly distribution pattern characterized by vertical layering and lateral zoning. The vertical layering is primarily determined by the differences in lithologic assemblages and depositional environments, while the lateral zoning is controlled by the developmental degrees of faults and unconformities. In the platform-basin area, reef-shoal and unconformity-controlled pore-cavity reservoirs are predominantly distributed within free hydrodynamic fields. In contrast, fault-controlled fractured reservoirs are typically found in constrained hydrodynamic fields between the buoyancy-driven hydrocarbon accumulation depth (BHAD) and the baseline of hydrocarbon accumulation.

Key words: genetic model, transformation characteristics, carbonate rock, Lower Paleozoic, non-foreland basin area, whole petroleum system, Tarim Basin

引用格式:曹鹏,赵振丞,庞雄奇,等.塔里木盆地台盆区下古生界全油气系统碳酸盐岩油气藏改造特征与成因模式[J].石油与天然气地质,2025,46(4):1299-1315. DOI:10.11743/ogg20250418.

CAO Peng, ZHAO Zhencheng, PANG Xiongqi, et al. Transformations and genetic models of the Lower Paleozoic carbonate reservoirs interpreted by the whole petroleum system in the platform-basin area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46 (4): 1299-1315. DOI: 10.11743/ogg20250418.

中国大陆地质活动频繁,沉积盆地普遍受到强烈的后期改造作用,这对油气藏的赋存条件和富集模式产生了重要影响。经多次地质调整后形成的改造类油气藏,使得在深层-超深层地层也能发育规模可观的油气资源^[1]。在中国塔里木盆地已发现埋深超过7~8 km的油气藏^[2],这一发现突破了传统理论关于“石油死亡线”以下不可能存在液态石油的认识,表明传统油气地质理论在改造条件下和超深层等非传统领域的应用面临挑战。

在改造类油气藏研究方面,前人已取得一定进展。庞雄奇根据改造内容将改造类油气藏细分为介质改造和组分改造2大类、5种类型^[3-4]。其中,介质改造包括对储层裂缝和孔隙结构的重塑,而组分改造则涉及油气成分分异和相态异常等现象。研究认为,这类油气藏通常具有“位置迁移、规模改造、组分破坏、相态异常”等特征^[5]。刘池洋从改造型盆地的角度提出了“原盆控源、过程控储、改造控藏、多源成藏、动态聚散、晚期定位”的油气赋存成藏理论^[6]。王清华建立了超深层走滑断裂破碎带差异控储模型,揭示了“相-断-溶”三元时空复合差异成储机理,构建了“源-断-储-盖”四元耦合成藏和“小藏大田”的走滑断控油藏模型^[7]。梁鑫鑫等利用地震技术精细刻画了走滑断裂破碎带的控储作用^[8-12],宋兴国等则进一步剖析了

典型断裂的发育特征和演化规律及其对油气分布的影响^[13-18]。然而,现有研究主要侧重于改造类型的划分和控储控藏模式等方面,局限于储层、盖层和圈闭等静态要素的匹配关系,忽视了油气系统改造的动态演化过程,未能明确常规油气藏、改造类油气藏和非常规油气藏在时空上的内在联系,对油气藏改造特征与成因模式的系统性研究较为欠缺,这些问题亟待深入探讨。

贾承造院士于2017年提出全油气系统概念^[19],指出传统的含油气系统理论已难适用于非常规油气领域,主张从烃类“生-排-运-聚”全过程分析常规-非常规油气聚集机理^[20]。后经过发展形成了“全油气系统理论”(whole petroleum system,简称WPS)^[21],揭示了在一般地质条件下全油气系统中存在3种烃类动力场、3种原始烃类和3种储集岩^[21-22],并建立了常规和非常规油气藏有序分布的基本模式^[21-24]。这一理论强调含油气盆地中烃源岩层系生成的油气从生成演化到非常规连续型聚集和常规圈闭成藏的全过程,同时关注后期调整改造的地质因素与过程,解决了传统油气理论适用性局限的问题,为在复杂地质条件下的油气系统研究提供了理论依据。

塔里木盆地台盆区深层碳酸盐岩储层是中国重要

的油气产区,特别是寒武系-奥陶系海相碳酸盐岩蕴藏着巨大的油气资源潜力^[25]。该区已相继发现轮古、塔河、塔中、哈拉哈塘、富满和顺北等多个亿吨级油气田^[26]。然而,台盆区内深层碳酸盐岩受多期构造活动、多期油气充注和调整改造的影响,形成了“多动力-多期次-多要素”的叠加复合成藏区^[5],导致油气藏改造特征、成因模式和分布规律不清等问题,这些问题严重制约着深层-超深层油气勘探,亟需建立更全面、更系统、更先进的油气地质理论以解决塔里木盆地改造背景下的油气勘探难题。

基于此,本文以全油气系统理论为指导依据,以塔里木盆地台盆区为例,对下古生界碳酸盐岩油气藏改造特征进行研究,从动态演化调整过程揭示油气藏主控因素、成因模式和分布特征。本研究旨在为塔里木盆地台盆区深层碳酸盐岩油气资源的高效勘探与开发提供理论指导,为全油气系统理论的完善和发展提供实际研究案例。

1 研究方法和技术路线

1.1 全油气系统理论方法

贾承造院士提出的全油气系统是指含油气盆地中一套或多套相互关联的有效烃源岩层系生成的油气,

从生成演化到非常规连续性聚集和常规圈闭中聚集,以及后期调整改造的全部地质要素与地质过程的自然系统^[21]。从“烃源岩-储层-动态耦合和有序聚集”的视角出发,发现在一般情况下,沿烃源岩向上的常规和非常规油气藏存在有序分布规律模式(图1)。具体表现为,全油气系统底部主要在源岩层内形成页岩油气资源(S,页岩油气藏),下部主要形成和分布源-储紧邻的致密油气资源(T,致密油气藏),中部主要形成和分布源-储分离的常规油气资源(C,常规油气藏),顶部主要形成和分布稠油沥青和天然气水合物(A,变异改造型油气藏)^[21-24]。

全油气系统内存在3个重要的油气动力门限^[27-29],即油气运聚成藏过程中动力边界或突发性变化对应的临界条件,分别为浮力成藏下限、油气成藏底限和源岩供烃底限。这3个门限分别界定了常规、致密和页岩油气资源的最大埋深范围。根据3个油气动力门限,可将含油气盆地内围合划分为自由动力场(F-HDF)、局限动力场(C-HDF)和束缚动力场(B-HDF)3类动力场^[22,24,30](图2)。这3类动力场分别主导着常规、致密和页岩3类油气资源的形成与分布规律。其中,在自由动力场内,浮力主导油气运聚,烃类排出源岩并富集在高孔、高渗储集体中,形成常规油气藏;在局限动力场内,非浮力主导油气运聚,烃类排出源岩并富集在低孔、低渗储集体中,形成致密油气资源;在束缚动力场

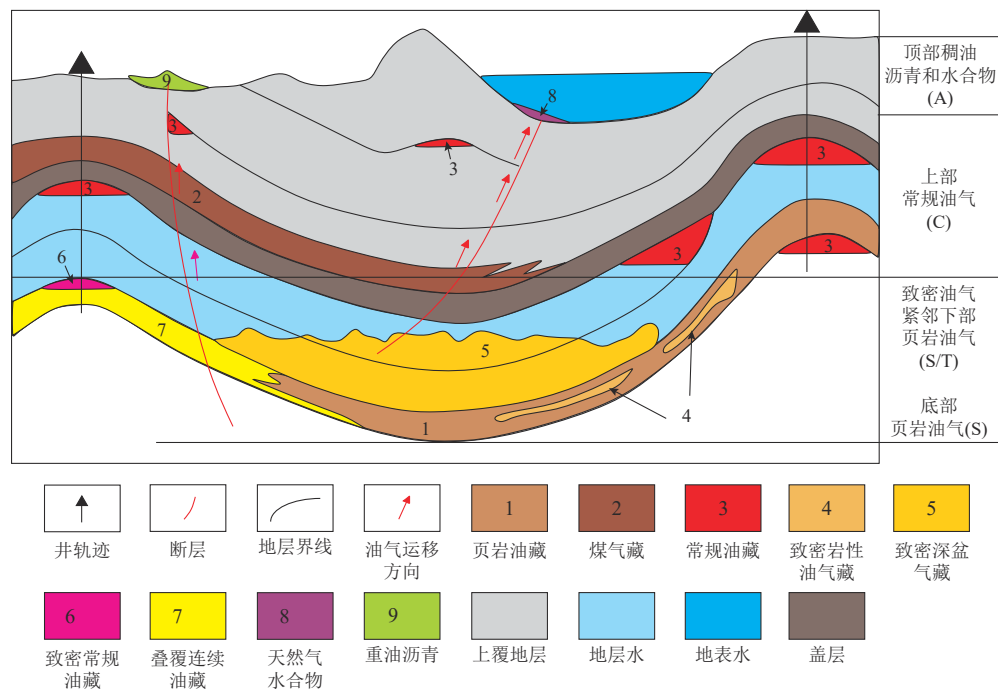


图1 全油气系统内常规和非常规油气藏有序分布基本模式^[24]

Fig. 1 Basic pattern showing the ordered distribution of conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs within a whole petroleum system

A. 变异改造型油气藏; C. 常规油气藏; S. 页岩油气藏; T. 致密油气藏

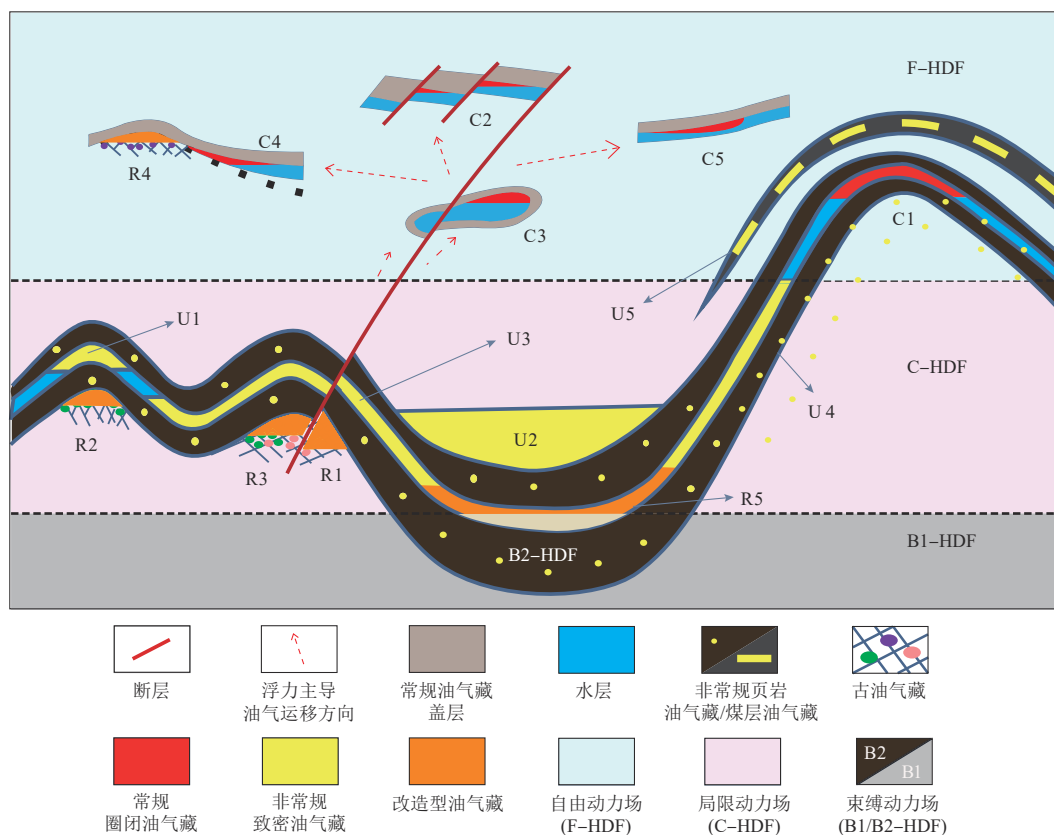


图2 全油气系统内流体动力场及其控制下的油气藏分布模式^[5]

Fig. 2 Schematic showing a fluid dynamic field and related hydrocarbon reservoir distribution pattern within a whole petroleum system

C1. 常规背斜油气藏; C2. 常规断块油气藏; C3. 常规岩性油气藏; C4. 常规地层油气藏; C5. 常规复合油气藏; U1. 致密常规油气藏; U2. 致密深盆油气藏; U3. 致密连续油气藏; U4. 页岩油气藏; U5. 煤层气藏; R1. 裂缝改造油气藏; R2. 孔洞改造油气藏; R3. 裂缝-孔洞复合改造油气藏; R4. 氧化改造稠油沥青(矿)藏; R5. 高温裂解改造干气藏

内,分子扩散主导油气运聚,烃类滞留在源岩层内部,形成页岩油气藏^[3,5,24]。

1.2 基于叠合盆地动态演化过程的改造类油气藏成藏研究

塔里木盆地复杂的地质特征与多期生排烃作用相互耦合,导致该盆地经历了多次改造和调整过程,形成了多套生-储-盖组合。中国学者针对此类复杂结构盆地提出了“叠合盆地”的概念^[31],系指不同时期在同一地理位置叠加形成的不同类型沉积盆地或地层组合。此类盆地通常经历了多期构造变动和沉积演化,广泛发育不整合面,为改造类油气藏的发育提供了有利地质条件。叠合盆地的复杂性使得改造类油气藏成因多样,既包括常规油气藏经后期改造形成的类型,也包括非常规油气藏在特定地质条件下发生改造的产物。全油气系统理论的提出将这些不同类型的改造类油气藏纳入统一框架进行研究,关注动态演化的调整过程(如多期成藏和油气调整)、系统要素的整合(源-

储配置和输导体系)和油气藏有序分布规律。这一理论突破了传统理论的局限性,能够系统揭示各类改造油气藏之间的内在成因联系。

1.3 技术路线

本文以全油气系统理论为核心指导,采用文献调研、数据统计分析和盆地构造演化剖析相结合的研究方法,重点关注经后期改造作用的油气藏对整个油气系统的全方位影响和重塑。首先通过剖析塔里木盆地台盆区碳酸盐岩成藏特征,揭示其与一般地质条件下油气藏的差异,进而基于全油气系统油气分布模式和动力场理论,系统分析改造类油气藏的改造特征。在此基础上,基于油气动力场成藏机制,阐明台盆区深层碳酸盐岩常规和非常规油气藏联合共生规律,明确改造类油气藏分布规律(图3)。最后从沉积构造演化、烃源岩生排烃史和改造过程出发,厘清塔里木盆地台盆区碳酸盐岩改造类油气藏形成的主控因素,总结其成因模式。

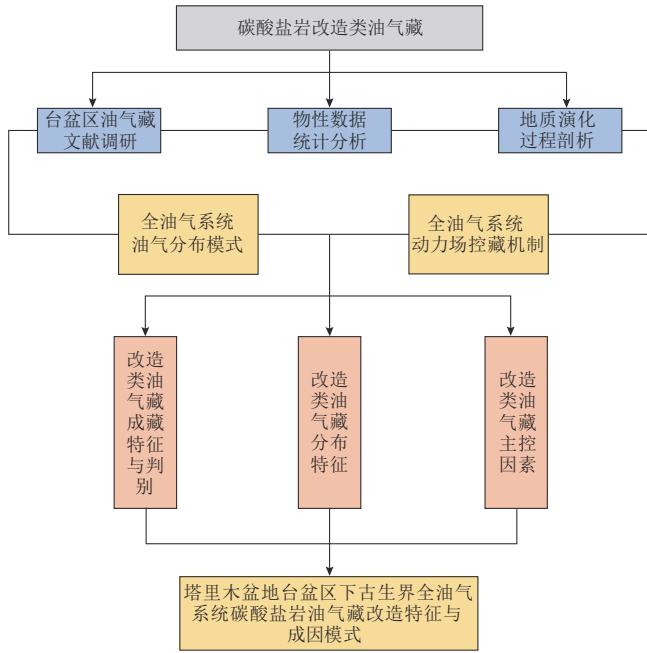


图3 塔里木盆地台盆区碳酸盐岩改造类油气藏特征与成因模式研究技术路线图

Fig. 3 Technical roadmap for research on characteristics and genetic model of carbonate reformed reservoirs in platform basin area of Tarim Basin

2 塔里木盆地台盆区下古生界全油气系统分布特征

2.1 台盆区下古生界全油气系统空间分布范围

塔里木盆地是中国规模最大的含油气盆地,总面积约 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$,属于大型复合叠合盆地^[32]。该盆地可划分为台盆区和前陆区2大油气富集区带^[33]。盆地内主要发育下寒武统、石炭系-二叠系和三叠系-侏罗系3套主力烃源岩。台盆区下古生界全油气系统主要以分布在北部坳陷及其周缘地区的下寒武统海相烃源岩为基础,发育下寒武统白云岩-中寒武统膏盐岩和中、上奥陶统灰岩-上奥陶统泥岩2套优质储-盖组合^[34]。

在纵向分布上,台盆区下古生界全油气系统碳酸盐岩厚度可达数千米,局部地区超过3 km(图4a),平均埋深约7 500 m。下寒武统的玉尔吐斯组泥页岩厚度为50~100 m,为奥陶系提供了油气来源^[35-36]。储层主要包括中-下奥陶统鹰山组和一间房组以及上奥陶统良里塔格组,油气主要沿断裂或不整合面富集于

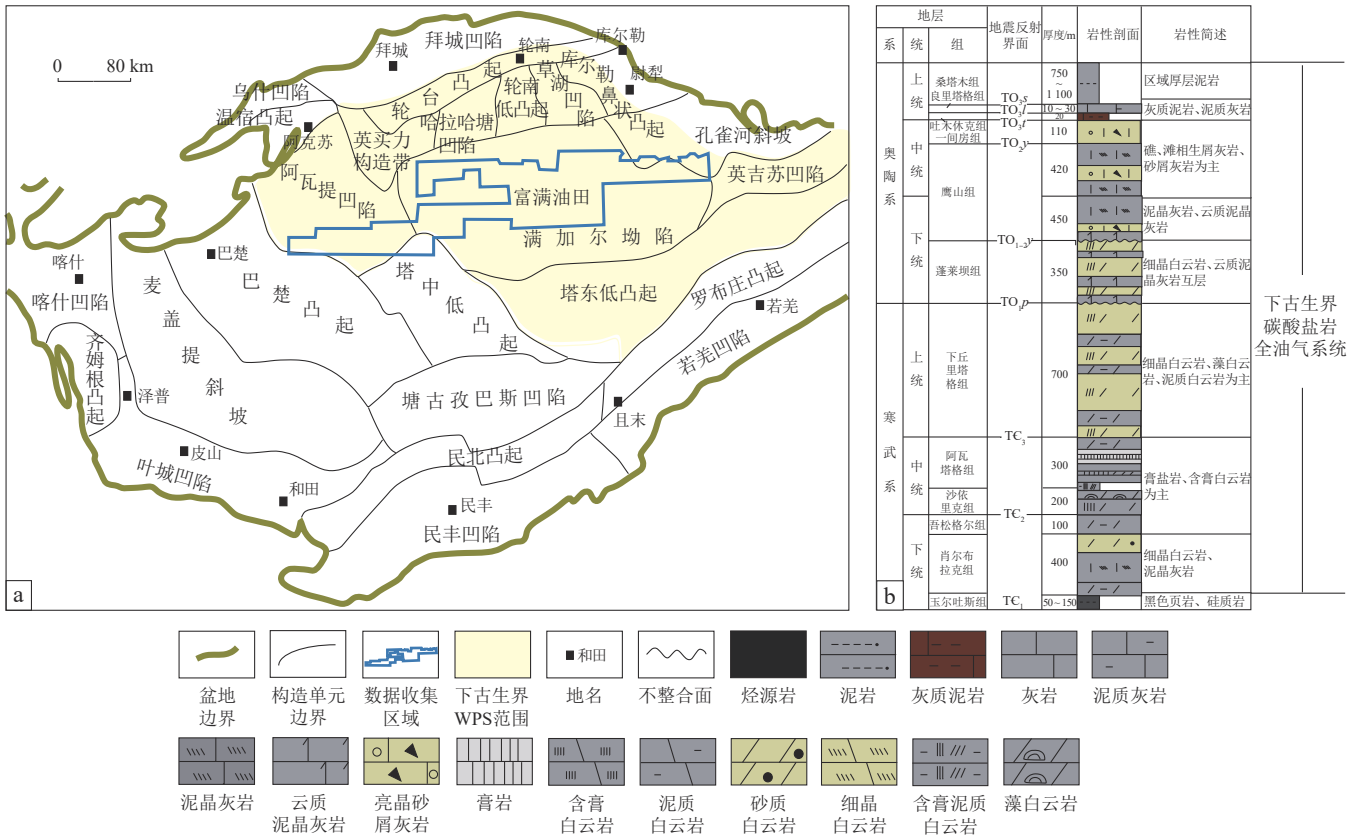


图4 塔里木盆地台盆区下古生界全油气系统(WPS)平面分布(a)和地层柱状图^[34](b)

Fig. 4 Map (a) and composite stratigraphic column (b) of the Lower Paleozoic whole petroleum system in the platform-basin area, Tarim Basin^[34]

断溶体或岩溶体;盖层为上奥陶统桑塔木组,在该套地层被剥蚀的部分区域,盖层则为志留系和石炭系的泥岩^[37]。

在平面分布上,台盆区与下寒武统玉尔吐斯组烃源岩直接相关的油气分布区域覆盖塔北隆起、中央隆起、北部坳陷和东南坳陷等多个构造单元,主要涉及顺北、富满、轮南、塔河和塔中等重要油田(图4b)。

2.2 台盆区下古生界全油气系统地史演化时域范围

塔里木盆地台盆区油气藏的形成历经了加里东期—喜马拉雅期等多期构造变动和3期油气充注^[38-40](图5)。加里东运动早期,塔中—阿满—塔北地区形成大型碳酸盐岩台地。随着南天山洋的俯冲作用,塔北地区逐渐隆升,塔中地区与塔北地区开始出现差异沉积,阿满地区则演变为两者间的过渡构造。此时下寒武统烃源岩尚未大规模排烃,烃源岩与寒武系白云岩储层呈“源—储紧邻”配置,少部分油气以分子扩散方式进入寒武系内部,而奥陶系等储层尚未大规模接受油气充注。

进入加里东中晚期,塔北持续隆升,塔中也逐渐抬升。在南、北双向的挤压应力下,阿满地区发育大量走滑断裂。这一时期下寒武统烃源岩开始排烃,生成的低成熟原油沿着断裂从寒武系向奥陶系储层运移,在鹰山组 and 一间房组的礁滩体储层中形成早期常规油气藏。随着后期埋深增加,这些油气藏逐渐致密化,在平面上沿断裂带呈条带状分布。

海西早期,南天山洋闭合引发大规模构造运动,断裂活动频繁。此时,烃源岩进入成熟演化阶段,大量生

成高成熟度原油。活跃的走滑断裂仍作为良好运移通道,将油气充注至奥陶系碳酸盐岩储层。埋深进一步增加,部分早期常规油气藏或连续致密油气藏发生改造,在纵向上形成“垂向叠置”的分布特征,平面上则呈北西向条带状展布。

海西晚期,继承性发育小规模挤压性或压扭性断裂,火山岩喷发促使部分早期走滑断裂再次活动。烃源岩持续生烃,油气藏规模逐渐扩大并保存至今^[41]。深部油气沿断裂向浅部运移,平面上在富满—顺北地区走滑断裂带形成断溶体雏形,储层以构造裂缝与溶蚀孔洞复合体系为特征。

印支期—燕山期,羌塘板块与塔里木板块的强烈碰撞导致三叠系普遍受到剥蚀,塔西隆起形成。前期形成的油气藏受构造抬升和剥蚀作用发生调整改造:纵向上浅部油气藏因盖层破坏而逸散,深部奥陶系断溶体在相对稳定的构造环境中得以保存,同时部分油气沿新形成的断裂向石炭系—二叠系储层运移。

至喜马拉雅运动期间,塔北隆起逐渐演化为库车再生前陆盆地的前缘隆起和前陆斜坡,阿满过渡带的中、新生界呈现北倾翘倾特征。至此,台盆区构造格局趋于稳定,并在此基础上形成了现今油气系统格局^[42]:纵向上,油气主要富集于超深层的寒武系—奥陶系断溶体中,同时在经过多期充注与构造改造叠加后,油气藏呈现“叠复连续”的特征;平面上,油气藏沿走滑断裂带呈条带状分布。

3 碳酸盐岩油气藏改造特征与成因模式

3.1 改造类油气藏基本概念

基于全油气系统理论和叠合盆地构造演化的视角,改造类油气藏是指在地质演化历史过程中,由于动力边界或动力场遭受破坏而导致储集特征、成藏动力、富集模式发生显著变化的油气藏。这类油气藏与常规地质条件下形成的油气藏相比,在类型、特征及分布规律等方面均存在明显差异。

3.2 改造类油气藏特征及判别方法

改造类油气藏主要具有以下5点特征:①油气成藏动力边界受到构造破坏;②油气成藏动力场受到构造破坏;③早期油气藏类型发生变化,连续致密油气藏转变为常规裂缝型、缝洞型或孔洞型油气藏;④呈现叠复连续油气藏特征;⑤形成断溶体油气藏这一新型油气藏。

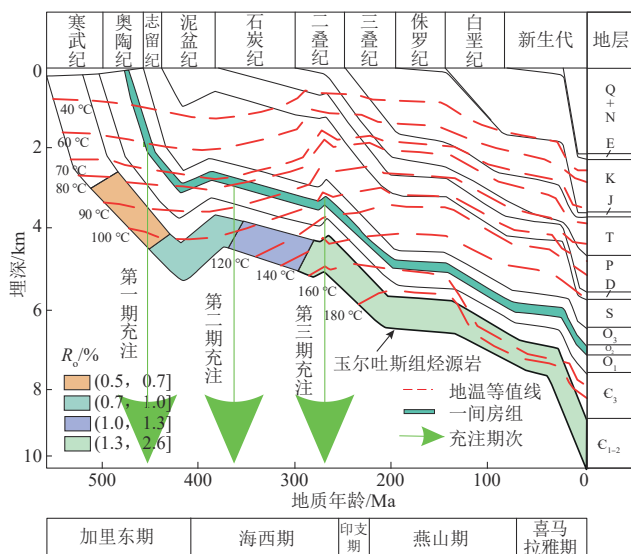


图5 塔里木盆地台盆区下古生界全油气系统时间分布^[42]

Fig. 5 Temporal distribution of the Lower Paleozoic whole petroleum system in the platform-basin area, Tarim Basin^[42]

3.2.1 油气成藏动力边界受到构造破坏

构造变动会打破原本被封闭在特定区域内的油气动力平衡,被形成新的平衡状态。通过统计分析可以有效识别动力边界的破坏特征。在油气动力边界中,浮力成藏下限是指在含油气盆地中,油气运聚动力随埋深增大由浮力主导向非浮力主导转变的临界条件^[27]。采用统计分析法确定浮力成藏下限,将全油气系统常规油气藏和致密油气藏两类油气藏的孔隙度(Φ)、渗透率(K)和孔喉半径(R)等关键参数的统计结果放入同一个坐标内进行比较,两类油气藏的参数交叉点就是浮力成藏下限对应的临界条件。这种方法同时可以评估不同动力对不同油气藏形成的贡献大小^[43]。在未受改造的全油气系统中,当浮力常规油气藏和非常规致密油气藏各占50%时,对应埋深应基本一致。若两者存在显著差异,则表明研究区油气成藏

动力边界受到了构造变动破坏。

应用该方法对塔里木盆地台盆区富满地区碳酸盐岩参数进行分析,确定该区浮力成藏下限的临界条件为 $\Phi = 5\%$, $K = 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $R = 0.5 \mu\text{m}$ 。据此可将油气藏划分为Ⅰ类浮力常规油气藏、Ⅱ类非浮力致密油气藏、Ⅲ₁类应力改造裂缝型油气藏和Ⅲ₂类流体改造孔洞型油气藏4类(图6a)。统计分析表明(图6b),富满地区以Ⅱ类致密非常规油气藏(占比49%)和Ⅲ₁类构造应力改造油气藏(占比47%)为主,Ⅰ类浮力主导常规油气藏和Ⅲ₂流体改造类油气藏占比较小。

此外,通过统计富满地区各类油气藏比例随埋深的变化,发现Ⅰ类浮力常规油气藏占比达50%、对应的埋深约为5 000 m,而非常规致密油气藏占比50%、对应的埋深约为6 600 m,两者存在1 600 m的显著差异(图6c)。研究区内,埋深5 000 m以浅区域为浮力主导形成的常规油气藏,油气储层的孔隙度介于1.03%~

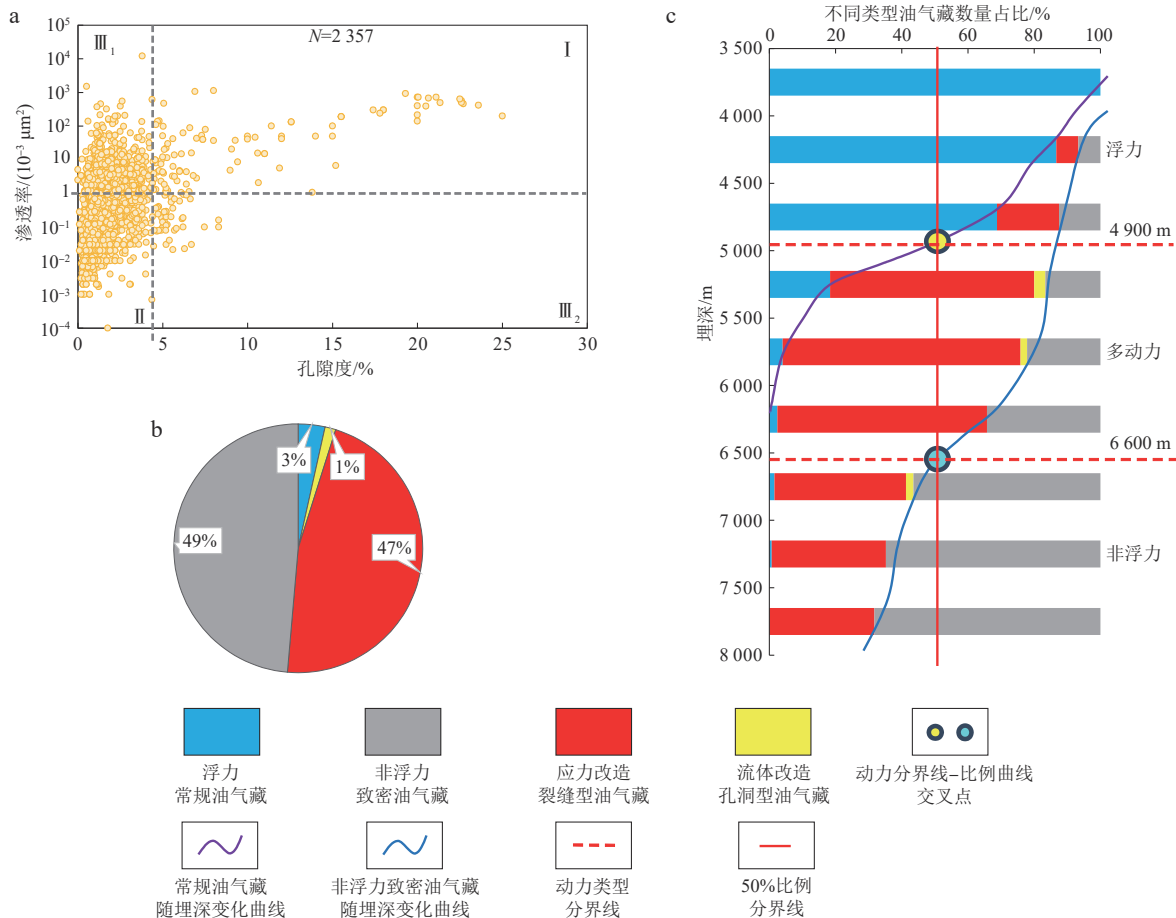


图6 塔里木盆地富满地区油气成藏动力判别以及浮力成藏下限对应埋深变化特征

Fig. 6 Discrimination for hydrocarbon accumulation dynamics and burial depth variations corresponding to the BHAD in the Fuman area, Tarim Basin

a. 基于浮力下限对应临界条件识别4种动力油气藏; b. 4类成藏动力贡献量评价饼状图; c. 4类动力贡献量随埋深变化条形图

Ⅰ. 浮力常规油气藏; Ⅱ. 非浮力致密油气藏; Ⅲ₁. 应力改造裂缝型油气藏; Ⅲ₂. 流体改造孔洞型油气藏

25.00%(平均值为15.36%),渗透率介于 $(0.640\ 0\sim 1\ 138.000\ 0)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ (平均值为 $290.200\ 0\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$);埋深6 600 m以深区域为非浮力主导形成致密油气藏,油气储层的孔隙度介于0.10%~4.98%(平均值为1.41%),渗透率介于 $(0.001\ 0\sim 0.997\ 0)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ (平均值为 $0.190\ 0\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$);埋深5 000~6 600 m区域则为多种动力复合形成的油气藏,油气储层的孔隙度介于0.10%~20.50%(平均值为1.63%),渗透率介于 $(0.000\ 1\sim 2\ 012.000\ 0)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ (平均值为 $3.410\ 0\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$)。这表明动力边界明显受到了破坏。

3.2.2 油气成藏动力场受到构造破坏

塔里木盆地台盆区油气成藏动力场受到了多期构造运动的强烈影响。这些区域构造活动不仅为油气运移聚集提供了有利条件,还通过断裂发育、构造挤压和地层剥蚀等过程,导致油气成藏功能要素和地层形态与结构发生改变。以富满地区为例,部分断裂在三维区内可延伸17 km,上断至石炭系,下断至寒武系,断距可达百米。在多种动力的主导作用下,处于局限动力场的油气开始顺着断裂运移,破坏了油气成藏动力场的稳定性,导致动力场边界模糊化(图7),为常规油气的运移和聚集创造了条件。原本在束缚/局限动力场形成的致密油气藏发生流体重新分配,部分油气进入局限/自由动力场区域并得以保存^[44]。

动力场的变化可能导致晚期相-势-源不复合,这种不复合使得油气难以聚集。相态变化可能影响油气

储存空间和运移通道,势能变化可能影响油气运移方向和速度,烃源岩变化可能影响油气生成和供应。这会进一步破坏油气成藏动力场的完整性,导致前期勘探成功率较低^[45]。

3.2.3 油气藏类型发生转变

塔里木盆地台盆区油气藏类型在复杂构造变动和多期成藏作用下发生转变,表现为从连续型致密油气藏向常规裂缝型、缝洞型和孔洞型油气藏的转变。例如,塔中地区良里塔格组储层普遍致密,原始状态下以平面连片广泛分布的连续型碳酸盐岩油气藏为主^[46]。然而在局部区域,随着构造变动和溶蚀作用的加剧,断裂和不整合面作为油气运移的主要通道,不仅改变了油气藏的储集条件和流体性质,也重塑了油气在储层中的分布和富集模式,导致以溶蚀孔洞、裂缝和缝洞为特征的高孔、高渗储集体广泛发育^[47-48]。

油气在浮力作用下进入目的层的高孔渗区富集,在断层交汇部位,储层渗透率普遍提高了2~3个数量级,油气藏在平面上顺着断层及其交汇部位分布,在剖面上呈现出地层被断层切割、油气沿断裂聚集在物性较好的构造高部位上的特征(图8a₁,a₂)。根据测井储层物性分析,富满地区碳酸盐岩储层有效孔隙度分布范围为1.80%~29.70%(平均值为4.79%,中值为3.12%),渗透率分布范围为 $(0.01\sim 379.48)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ (平均值为 $11.35\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,中值为 $0.43\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$),呈现出“低孔-高渗”常规储层的特点(图8b₁—b₅)。

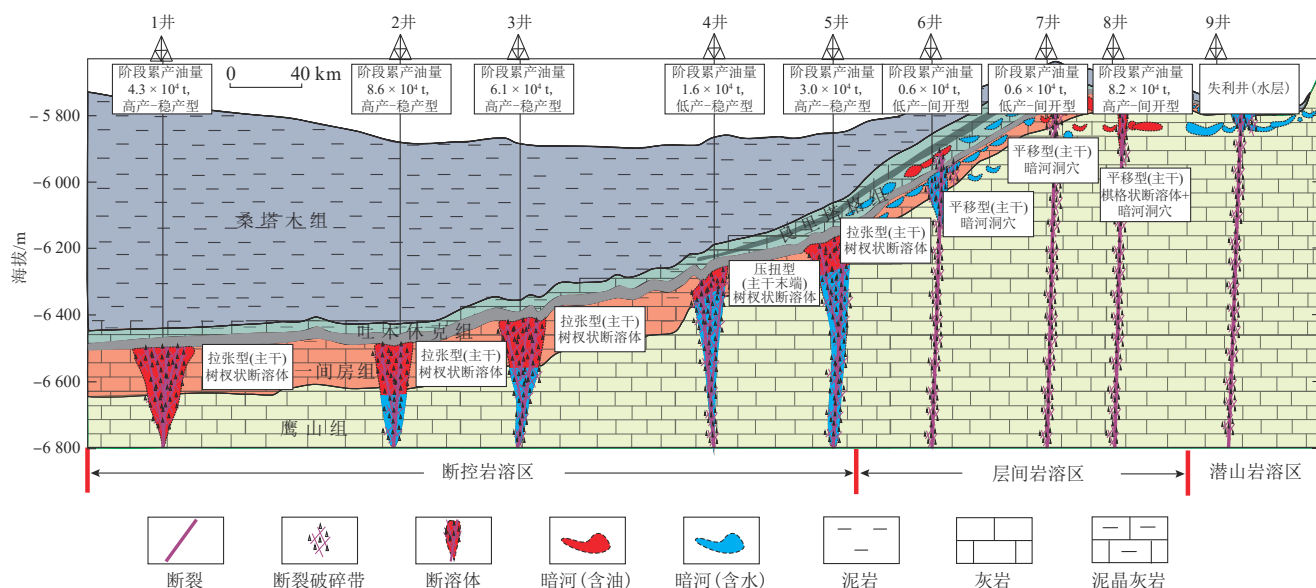


图7 塔里木盆地富满地区油气成藏动力场构造变动破坏

Fig. 7 Tectonization-induced failure of the hydrocarbon accumulation dynamic fields in the Fuman area, Tarim Basin

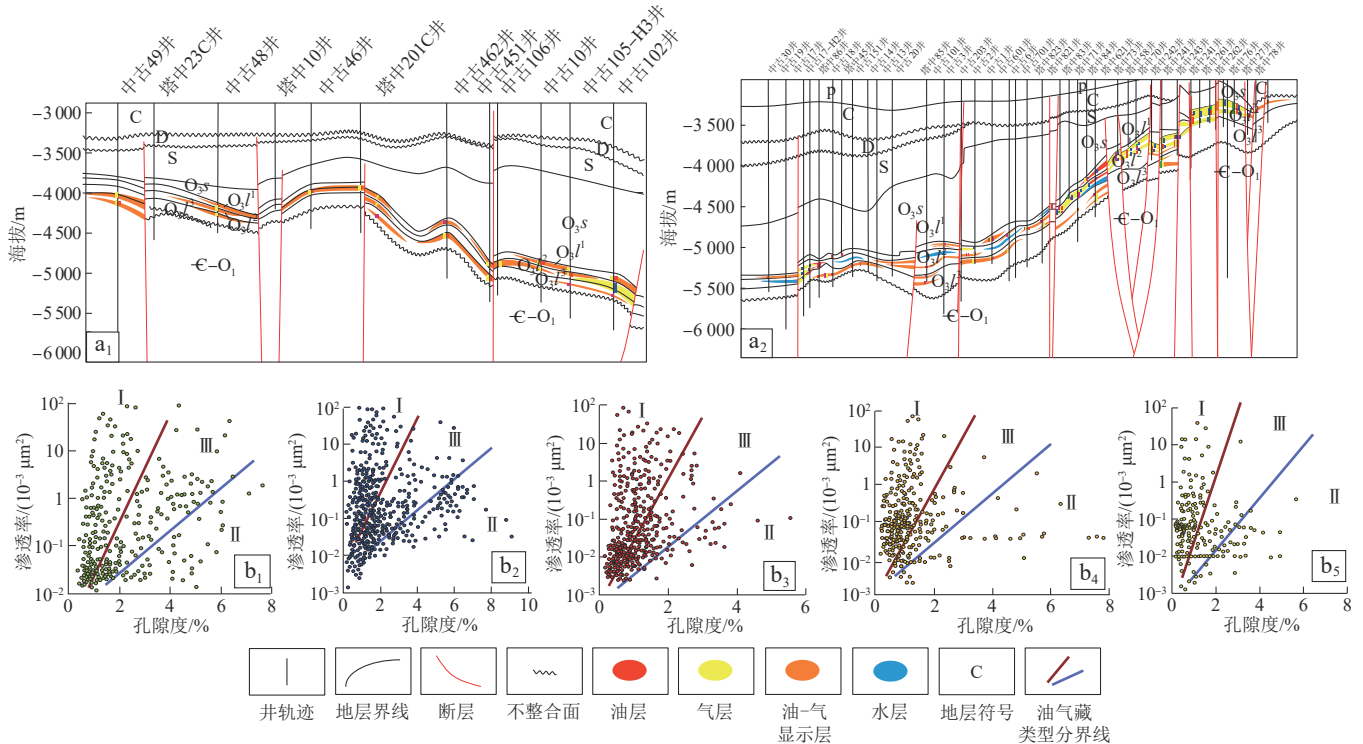


图8 塔里木盆地台盆区油气藏类型分布(a_1, a_2)^[46]及孔-渗散点图(b_1-b_5)

Fig. 8 Profiles showing the distributions of reservoir types (a_1, a_2 ; after reference [46]) and scatter diagrams illustrating the relationship between porosity and permeability (b_1-b_5) in the platform-basin area, Tarim Basin

a_1 . 过中古49井—中古102井剖面; a_2 . 过中古30井—塔中78井剖面; b_1 . 良里塔格组1段; b_2 . 良里塔格组2段; b_3 . 良里塔格组3段; b_4 . 鹰山组; b_5 . 蓬莱坝组

I. 裂缝型油气藏; II. 孔隙型油气藏; III. 裂缝-孔隙型油气藏
(O_3^I 为泥质条带灰岩段, O_3^I 为颗粒灰岩段, O_3^I 为含泥灰岩段。)

3.2.4 叠复连续油气藏

塔里木盆地独特的多旋回构造演化使其成为一个复杂的叠合盆地,同时烃源岩在不同阶段地质历史时期多次生排烃,加之良好的储-盖组合为油气保存提供了有利条件,这样的“要素复合、过程叠加、多期成藏、晚期定型”的成藏模式使得塔里木盆地台盆区下古生界从纵向空间分布而言,形成了叠复连续油气藏这一全新类型的油气藏^[49-51]。塔中地区良里塔格组、鹰山组和上寒武统发现的碳酸盐岩油气藏就属于构造调整改造作用下形成的叠复连续型油气藏(图8 a_1, a_2)^[46],具有多层结构,不同层位油气藏之间相互叠置、连续分布。与被改造前相比,此类油气藏在产状、组分和规模等方面均存在显著差异^[52]。台盆区动力场边界被破坏且具有控藏作用,因此叠复连续油气藏是油气藏在三维空间上的改造体现。庞雄奇等曾对这类油气藏的成因进行研究,发现叠复连续油气藏受局限流体动力场控制,不同阶段和动力形成的各类油气藏在时空叠加复合,纵向上紧邻有效烃源岩层系,平面上受同一目的层段“近

源-优相-低势”复合区控制,资源潜力巨大^[30,53]。

3.2.5 断溶体油气藏

目前在塔里木盆地顺托果勒低隆起、塔河地区和富满地区碳酸盐岩地层也发现一种全新类别的油气藏——断溶体油气藏。这类油气藏是在多期构造活动和溶蚀改造共同作用下形成的,其储集空间以断控裂缝-洞穴为特征(图9a)。在断裂带三维地质模型中,红色为溶洞,绿色为断裂/裂缝(图9b)。储集体呈现条带状、羽状、夹心饼状和平板状等不同形态,集中分布于走滑断层及周围的破碎带上,具有非均质性极强、油气沿断裂不均匀富集的特点。

在多期次构造活动与流体溶蚀改造过程的耦合作用下,走滑断裂系统在中-下奥陶统碳酸盐岩地层中构成了复合孔缝网络体系,形成以洞穴、构造裂缝和沿缝溶蚀孔洞为主的优质储集空间(图9 c_1-c_3),且走滑断裂规模越大,缝洞体越发育^[54-55]。生产数据分析表明,90%以上的高效井分布在走滑断裂带上,特别是在大型走滑断裂及其分支断裂顶端和走滑断裂张扭部

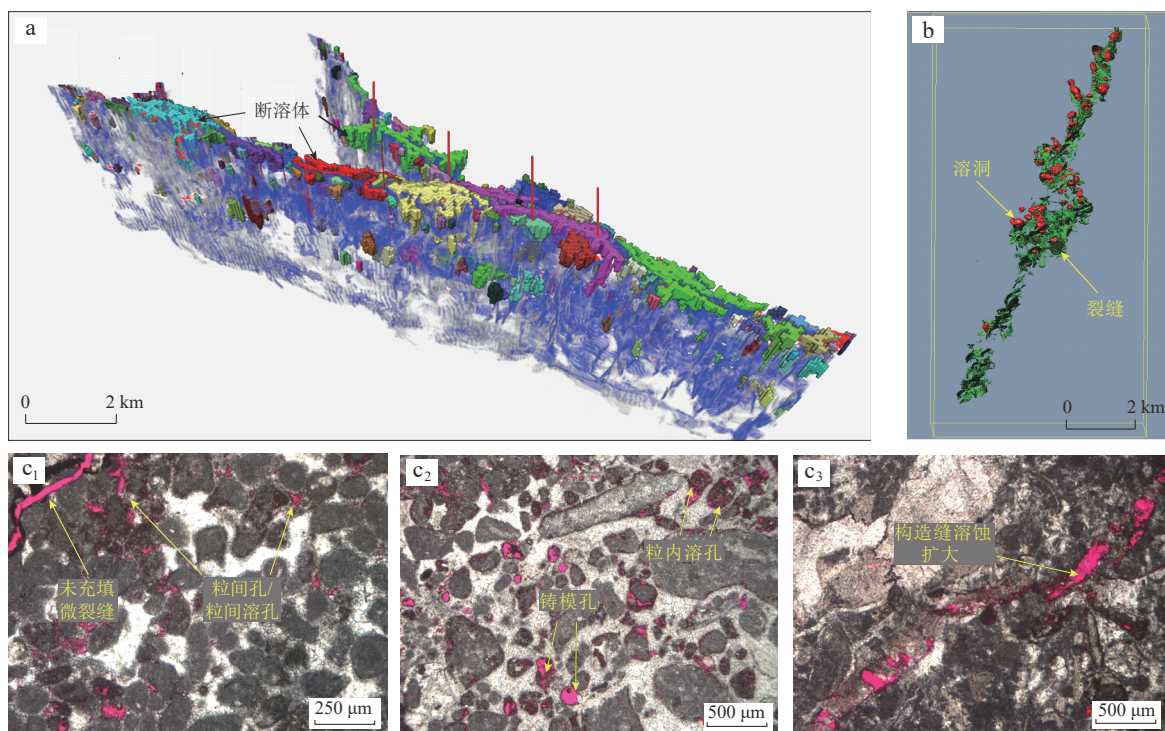


图9 塔里木盆地富满地区断溶体油气藏发育示意图

Fig. 9 Schematic diagrams showing the fault-karst reservoir development in the Fuman area, Tarim Basin

a. 断溶体油气藏三维雕刻量化; b. 断溶体三维地质模型; c₁. 粒间孔、粒间溶孔、微裂缝, 埋深 7 231.65 m, X 井, 单偏光, 铸体薄片显微照片; c₂. 粒内溶孔、铸模孔, 埋深 7 240.00 m, X 井, 单偏光, 铸体薄片显微照片; c₃. 构造缝溶蚀(方解石半充填), 埋深 7 377.50 m, X 井, 单偏光, 铸体薄片显微照片

位, 油气富集程度更高^[55]。如富满油田的 F₁₇ 走滑断裂带, 能够将下伏埋深超过 10 km 的烃源岩生成的油气直接输导至上覆奥陶系断溶体圈闭中聚集成藏^[56]。

断溶体油气藏的成藏机制突破了构造低部位岩溶储层发育受限的传统认识。其储集空间的形成主要受控于走滑断裂系统的构造破裂作用和后期埋藏过程中流体溶蚀改造作用, 二者共同作用可形成一定规模的储集体^[57], 是塔里木盆地在特定改造条件下形成的一种独特油气藏类型^[58]。

3.3 改造类油气藏成因模式与分布特征

3.3.1 改造类油气藏成因模式

塔里木盆地台盆区下古生界碳酸盐岩改造类油气藏的成因模式是多因素动态耦合的复杂地质过程, 其核心在于全油气系统中动力边界与动力场的破坏、重构及多期地质事件的叠加改造。沉积演化奠定了物质基础^[59], 下寒武统玉尔吐斯组泥页岩主力烃源岩与中-下奥陶统碳酸盐岩储层形成“源-储分离”配置, 寒武-奥陶系海相沉积环境控制的碳酸盐岩岩性组合, 以及多期海侵-海退旋回形成的不整合面, 都为后期改造提供了初始储集空间与预改造空间。上奥陶统桑

塔木组泥岩和石炭系膏泥岩作为区域性盖层, 虽然在部分区域被断裂切割, 但仍能有效阻止油气大规模逸散。构造运动是动力场破坏和运移网络形成的关键, 加里东期、海西期和喜马拉雅期等多期构造事件形成的走滑断裂切割岩层, 形成垂向输导通道并促使储层破裂。浮力常规油气藏与非浮力致密油气藏各占 50% 时的埋深差证实了构造活动对原始动力场边界的破坏作用。多期油气充注伴随构造活动同步发生^[60-61], 加里东早期低成熟原油、海西期高成熟原油和喜马拉雅期凝析气的充注与断裂活动耦合。

在时空演化上, 改造类油气藏的形成经历了 3 个主要阶段: ①寒武纪—奥陶纪末为早期成藏阶段。下寒武统烃源岩生成油气, 并形成“源-储紧邻”的初始分布。加里东中、晚期走滑断裂活动破坏动力场, 油气向奥陶系运移并在礁滩体和断裂带附近形成常规油气藏。早期形成的原生油气藏一部分随后期埋深增加逐渐致密化, 另一部分受断裂或不整合面控制形成早期的裂缝型油气藏和孔洞型油气藏, 属于一期构造改造型油气藏。②泥盆纪—二叠纪进入改造调整阶段。大规模走滑断裂沟通深部烃源岩与上覆储层, 部分原生油气藏和已被改造的油气藏继续发生改造, 使其富集在断溶体、缝洞和孔洞, 属于多期改造型油气藏。同

时,多期充注导致不同相态油气垂向叠置、平面连续分布,形成叠复连续油气藏。③新生代至今为定型阶段。区域挤压使得断裂活动减弱、盖层封闭性增强,改造成果得以保存(图10)。

在动力场破坏的物理化学过程中,流体-岩石相互作用形成复杂孔缝网络,应力场与流体场耦合导致动力场边界模糊化。构造应力的双重作用形成高渗透通道,促使油气从束缚/局限动力场向自由动力场运移,油气在浮力或多动力下可能会沿着新的运移通道向新的圈闭中聚集,或者对原有油气藏进行补充和改造。

3.3.2 改造类油气藏分布特征

如前文所述,在构造变动和溶蚀的改造作用下,虽然塔里木盆地台盆区油气藏类型发生了转变,也形成了新的油气藏类型,但总体上可归纳为礁滩体油气藏、断层裂缝类油气藏和不整合孔洞类油气藏3大类型(表1;图11a)。从动力场分布来看:①礁滩体油气藏主要发育于礁滩缝洞体成藏区,如塔中1号气田。礁滩体本身具有良好的储集性能,断裂和不整合面为油气的运移提供了通道,使得油气能够在礁滩体中聚集成藏。这类油气藏一般位于浮力成藏下限之上,受构造和沉积条件的双重控制。②断层裂缝类油气藏主要发育于断溶体成藏区,如顺北-富满油田。埋深位于浮力成藏下限与油气成藏底线之间的局限动力场,受断裂和不整合面控制。③不整合孔洞类油气藏多发育于哈拉哈塘油田和轮古油田等地区。受潜山和不整合面控制,不整合面附近的岩石经过长期风化和淋滤作用,形成了大量的孔洞和裂缝,油气通过不整合面和相关的断裂系统运移到这些孔洞体中聚集成藏,位于浮力成藏下限之上。自由动力场中既有常规类油气藏也有改造类油气藏,而局限动力场中既有致密类油气藏也有改造类油气藏。

从空间分布来看,改造类油气藏呈现出“纵向分层、横向分带”的分布特征(图11a,b)。各时期地层的

岩性组合和沉积环境差异导致了这种分层性。例如,寒武系-奥陶系主要以碳酸盐岩等沉积为主,形成了特定的储集空间和盖层条件,从而控制了油气在碳酸盐岩层系的分布。改造类油气藏平面上主要受到走滑断裂带和不整合面控制,在中部碳酸盐岩发育地区,走滑断裂发育面积约 $9 \times 10^4 \text{ km}^2$,这些断裂及其发育的次级断裂在横向上形成宽窄不一的条带状或雁列式储层,宽度通常在几十米至数百米之间,不仅为寒武系油气向奥陶系的运移提供了主要通道,还控制了油气藏的空间分布。不整合面也可以成为运移通道,使得油气能够在不同的储集层之间进行横向运移和重新分配,不整合面与断裂在交汇部位形成了网络节点,共同构成了复杂的运移网络并呈条带状分布,是油气运移和聚集的有利位置。因此,油气高产甜点区主要分布在走滑断裂带和不整合面附近以及二者的交汇处^[5],且以阿满过渡带为中心,南北向油气性质逐渐由轻质油过渡为中质油和重质油,向东则过渡为凝析气,呈现出“西油、东气”的分布格局^[26]。

4 结论

1) 以塔里木盆地台盆区下古生界为例,以全油气系统理论为指导依据,发现碳酸盐岩改造类油气藏主要具有以下特征:①油气成藏动力边界受到构造破坏;②油气成藏动力场受到构造破坏;③早期油气藏类型发生变化,连续致密藏转变为常规裂缝型、缝洞型或孔洞型油气藏;④呈现叠复连续油气藏特征;⑤形成断溶体油气藏这一新型油气藏。

2) 塔里木盆地台盆区下古生界碳酸盐岩改造类油气藏受控于沉积演化、构造运动、成藏期次和保存条件等多因素动态耦合,这些因素相互影响、相互制约,历经3个演化阶段,导致油气成藏动力边界和动力场在物理化学的作用下被破坏,共同影响了油气藏的形成、分布和演化。

3) 改造类油气藏具有“纵向分层、横向分带”的有

表1 塔里木盆地台盆区碳酸盐岩油气藏类型及特征对比

Table 1 Types and characteristic comparison of carbonate hydrocarbon reservoirs in the platform-basin area, Tarim Basin

油气藏成因分类	礁滩体油气藏	断层裂缝类油气藏	不整合孔洞类油气藏
成藏动力分类	常规类油气藏(原生)、改造类油气藏	致密类油气藏(原生)、改造类油气藏	常规类油气藏(原生)、改造类油气藏
动力场类型	自由动力场	局限动力场	自由动力场
储集空间类型	缝洞体(油气藏)	断溶体(油气藏)	孔洞体(油气藏)
油气藏主控因素	隆起-断裂-礁滩	断裂/不整合-低势区	潜山-不整合
油气藏特征	常规成藏基础上的后期改造、层状连续、构造高部位	致密油气藏经构造改造向常规油气藏过渡、多期改造,沿断裂条带状分布、叠复连续	不整合面控制的岩溶改造,常规地层油气藏与改造型溶蚀储层的复合

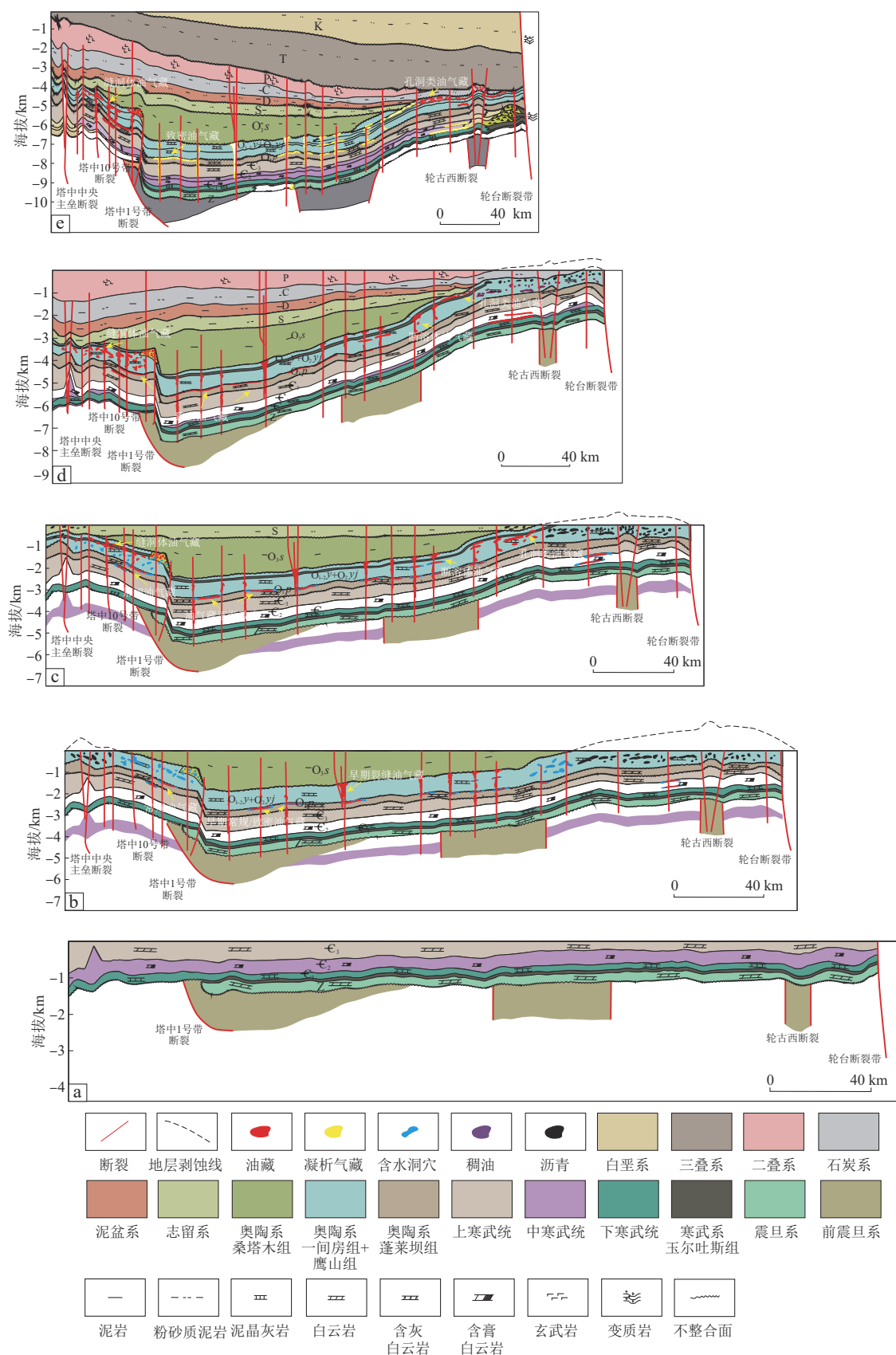


图10 塔里木盆地台盆区改造类油气藏时-空演化模式(据文献[42]修改)

Fig. 10 Profiles showing the spatio-temporal evolution pattern of reformed carbonate reservoirs in the platform-basin area, Tarim Basin (modified from reference [42])

a. 寒武纪; b. 奥陶纪剥蚀后; c. 志留纪剥蚀后; d. 二叠纪剥蚀后; e. 现今

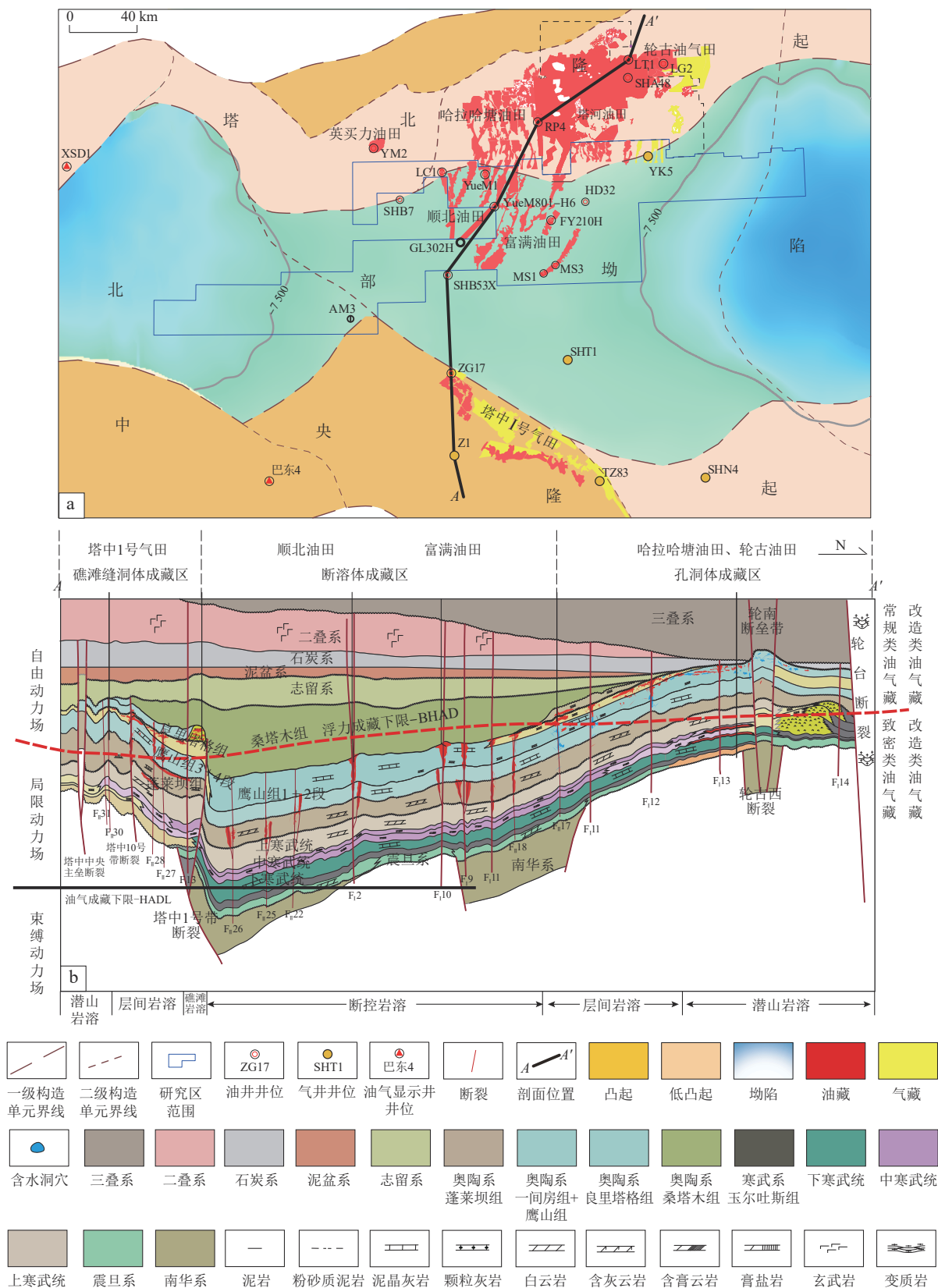


图 11 塔里木盆地台盆区下古生界改造类油气藏分布特征(据文献[26]修改)

Fig. 11 Basic distribution characteristics of the Lower Paleozoic reformed hydrocarbon reservoirs in the platform-basin area, Tarim Basin (modified from reference [26])

a. 平面分布特征; b. 剖面分布特征

序分布特征,其中,纵向分层性主要由岩性组合和沉积环境差异所决定,横向分带性则受断裂和不整合面发育程度控制。礁滩体油气藏和不整合孔洞类油气藏主要位于自由动力场,断层裂缝类油气藏则位于浮力成藏下限与油气成藏底线之间的局限动力场。全油气系统理论从动态演化视角将全过程纳入统一框架,揭示了构造活动对油气系统的全方位改造效应及不同动力场中油气藏的转化规律,为复杂叠合盆地改造类油气藏的成因解析与勘探实践提供了创新理论范式,也为该区深层超深层油气资源高效勘探开发提供理论指导,从而有利于优选靶区和提升勘探效率。

参 考 文 献

- [1] 贾承造. 含油气盆地深层—超深层油气勘探开发的科学技术问题[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 1-12.
JIA Chengzao. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(5): 1-12.
- [2] 马永生, 蔡勋育, 黎茂稳, 等. 深层—超深层海相碳酸盐岩成储成藏机理与油气藏开发方法研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 692-707.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, LI Maowen, et al. Research advances on the mechanisms of reservoir formation and hydrocarbon accumulation and the oil and gas development methods of deep and ultra-deep marine carbonates[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 692-707.
- [3] PANG Xiongqi, SHAO Xinhe, LI Maowen, et al. Correlation and difference between conventional and unconventional reservoirs and their unified genetic classification [J]. Gondwana Research, 2021, 97: 73-100.
- [4] PANG Xiongqi, ZHOU Xinyuan, LIN Changsong, et al. Classification of complex reservoirs in superimposed basins of western China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2010, 84(5): 1011-1034.
- [5] 庞雄奇, 贾承造, 宋岩, 等. 全油气系统定量评价: 方法原理与实际应用[J]. 石油学报, 2022, 43(6): 727-759.
PANG Xiongqi, JIA Chengzao, SONG Yan, et al. Quantitative evaluation of whole petroleum system: principle and application [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(6): 727-759.
- [6] 刘池洋, 黄雷, 赵俊峰, 等. 改造型盆地油气赋存-成藏理论体系纲要[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 84-108.
LIU Chiyang, HUANG Lei, ZHAO Junfeng, et al. Hydrocarbon occurrence and accumulation processes in reformed basins—theories outline [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 84-108.
- [7] 王清华, 蔡振忠, 张银涛, 等. 塔里木盆地超深层走滑断控油气藏研究进展与趋势[J]. 新疆石油地质, 2024, 45(4): 379-386.
WANG Qinghua, CAI Zhenzhong, ZHANG Yintao, et al. Research progress and trend of ultra-deep strike-slip fault-controlled hydrocarbon reservoirs in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2024, 45(4): 379-386.
- [8] 梁鑫鑫, 张银涛, 陈石, 等. 塔里木盆地富满油田走滑断裂多核破碎带地震响应特征[J]. 岩性油气藏, 2025, 37(2): 127-138.
LIANG Xinxin, ZHANG Yintao, CHEN Shi, et al. Seismic response characteristics of strike-slip fault multi-core damage zones in Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2025, 37(2): 127-138.
- [9] 汪如军, 孙冲, 袁敬一, 等. 基于结构张量的走滑断裂破碎带地震识别——以富满油田超深层碳酸盐岩为例[J]. 新疆石油地质, 2024, 45(4): 475-482.
WANG Rujun, SUN Chong, YUAN Jingyi, et al. Seismic identification of strike-slip fault damage zones based on structure tensor analysis: A case study of ultra-deep carbonate rocks in Fuman Oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2024, 45(4): 475-482.
- [10] 吕心瑞, 孙建芳, 李红凯, 等. 塔里木盆地深层碳酸盐岩缝洞型油藏精细地质建模技术[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1195-1210.
LYU Xinrui, SUN Jianfang, LI Hongkai, et al. Fine geological modelling technology for deep fractured-vuggy carbonate oil reservoirs in the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1195-1210.
- [11] 陈叔阳, 何云峰, 王立鑫, 等. 塔里木盆地顺北1号断裂带奥陶系碳酸盐岩储层结构表征及三维地质建模[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(2): 124-135.
CHEN Shuyang, HE Yunfeng, WANG Lixin, et al. Architecture characterization and 3D geological modeling of Ordovician carbonate reservoirs in Shunbei No. 1 fault zone, Tarim Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(2): 124-135.
- [12] 曹自成, 云露, 漆立新, 等. 塔里木盆地顺北地区顺北84X井超千米含油气重大发现及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 341-356.
CAO Zicheng, YUN Lu, QI Lixin, et al. A major discovery of hydrocarbon-bearing layers over 1,000-meter thick in Well Shunbei 84X, Shunbei area, Tarim Basin and its implications [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 341-356.
- [13] 宋兴国, 陈石, 杨明慧, 等. 塔里木盆地富满油田F₁16断裂发育特征及其对油气分布的影响[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(3): 99-109.
SONG Xingguo, CHEN Shi, YANG Minghui, et al. Development characteristics of F₁16 fault in Fuman Oilfield of Tarim Basin and its influence on oil and gas distribution [J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(3): 99-109.
- [14] 刘强, 张银涛, 陈石, 等. 塔里木盆地走滑断裂发育演化特征精细解析及其地质意义: 以富满油田F₁17断裂为例[J]. 现代地质, 2023, 37(5): 1123-1135.
LIU Qiang, ZHANG Yintao, CHEN Shi, et al. Development and evolution characteristics of strike-slip faults in Tarim Basin and its

- geological significance: A case study of F₁17 fault in Fuman Oilfield[J]. *Geoscience*, 2023, 37(5): 1123–1135.
- [15] 张银涛, 陈石, 刘强, 等. 塔里木盆地富满油田F₁19断裂发育特征及演化模式[J]. *现代地质*, 2023, 37(2): 283–295.
ZHANG Yintao, CHEN Shi, LIU Qiang, et al. Development characteristics and evolution model of F₁19 fault in Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. *Geoscience*, 2023, 37(2): 283–295.
- [16] 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.
- [17] 杨海军, 能源, 邵龙飞, 等. 塔里木盆地台盆区走滑断裂带多层叠加样式及石油地质意义[J]. *新疆石油地质*, 2024, 45(4): 387–400.
YANG Haijun, NENG Yuan, SHAO Longfei, et al. Multilayer superimposition patterns of strike-slip fault zones and their petroleum geological significance in platform area, Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2024, 45(4): 387–400.
- [18] BIAN Qing, ZHANG Jibiao, HUANG Cheng. The Middle and Lower Cambrian salt tectonics in the central Tarim Basin, China: A case study based on strike-slip fault characterization[J]. *Energy Geoscience*, 2024, 5(2): 100254.
- [19] 贾承造. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(1): 1–11.
JIA Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 1–11.
- [20] 贾承造, 郑民, 张永峰. 非常规油气地质学重要理论问题[J]. *石油学报*, 2014, 35(1): 1–10.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Four important theoretical issues of unconventional petroleum geology [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(1): 1–10.
- [21] JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. Whole petroleum system and ordered distribution pattern of conventional and unconventional oil and gas reservoirs [J]. *Petroleum Science*, 2023, 20(1): 1–19.
- [22] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 全油气系统理论基本原理[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(4): 679–691.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. Basic principles of the whole petroleum system [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(4): 679–691.
- [23] 宋岩, 贾承造, 姜林, 等. 全油气系统内涵与研究思路[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(6): 1199–1210, 1226.
SONG Yan, JIA Chengzao, JIANG Lin, et al. Connotation and research strategy of the whole petroleum system [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(6): 1199–1210, 1226.
- [24] 庞雄奇, 贾承造, 郭秋麟, 等. 全油气系统理论用于常规和非常规油气资源评价的盆地模拟技术原理及应用[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1417–1433.
PANG Xiongqi, JIA Chengzao, GUO Qiulin, et al. Principle and application of basin modeling technology for evaluation of conventional and unconventional oil-gas resource based on whole petroleum system theory [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1417–1433.
- [25] 田军. 塔里木盆地油气勘探成果与勘探方向[J]. *新疆石油地质*, 2019, 40(1): 1–11.
TIAN Jun. Petroleum exploration achievements and future targets of Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(1): 1–11.
- [26] 田军, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地富满油田成藏地质条件及勘探开发关键技术[J]. *石油学报*, 2021, 42(8): 971–985.
TIAN Jun, YANG Haijun, ZHU Yongfeng, et al. Geological conditions for hydrocarbon accumulation and key technologies for exploration and development in Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(8): 971–985.
- [27] PANG Xiongqi, JIA Chengzao, WANG Wenyang, et al. Buoyance-driven hydrocarbon accumulation depth and its implication for unconventional resource prediction[J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(4): 101133.
- [28] PANG Xiongqi, HU Tao, LARTER S, et al. Hydrocarbon accumulation depth limit and implications for potential resources prediction[J]. *Gondwana Research*, 2022, 103: 389–400.
- [29] PANG Xiongqi, JIA Chengzao, ZHANG Kun, et al. The dead line for oil and gas and implication for fossil resource prediction [J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(1): 577–590.
- [30] 庞雄奇, 周新源, 姜振学, 等. 叠合盆地油气藏形成、演化与预测评价[J]. *地质学报*, 2012, 86(1): 1–103.
PANG Xiongqi, ZHOU Xinyuan, JIANG Zhenxue, et al. Hydrocarbon reservoirs formation, evolution, prediction and evaluation in the superimposed basins [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(1): 1–103.
- [31] 庞雄奇, 金之钧, 姜振学, 等. 叠合盆地油气资源评价问题及其研究意义[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(1): 9–13.
PANG Xiongqi, JIN Zhijun, JIANG Zhenxue, et al. Evaluation of hydrocarbon resources of superimposed basin and its significance [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(1): 9–13.
- [32] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
JIA Chengzao. Tectonic characteristics and petroleum Tarim Basin China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [33] 马庆佑, 吕海涛, 蒋华山, 等. 塔里木盆地台盆区构造单元划分方案[J]. *海相油气地质*, 2015, 20(1): 1–9.
MA Qingyou, LYU Haitao, JIANG Huashan, et al. A division program of structural units in the Paleozoic platform-basin region, Tarim Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2015, 20(1): 1–9.
- [34] 王清华, 徐振平, 张荣虎, 等. 塔里木盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. *石油学报*, 2024, 45(1): 15–32.
WANG Qinghua, XU Zhenping, ZHANG Ronghu, et al. New fields, new types of hydrocarbon explorations and their resource

- potentials in Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1): 15–32.
- [35] 乔俊程, 常少英, 曾溅辉, 等. 塔里木盆地北部富满地区超深层走滑断裂带碳酸盐岩油气差异成藏成因探讨[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(5): 1226–1246.
- QIAO Juncheng, CHANG Shaoying, ZENG Jianhui, et al. Origin of differential hydrocarbon accumulation in ultra-deep carbonate reservoirs along strike-slip fault zones in the Fuman area, northern Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(5): 1226–1246.
- [36] 李峰, 朱光有, 吕修祥, 等. 塔里木盆地古生界海相油气来源争议与寒武系主力烃源岩的确定[J]. *石油学报*, 2021, 42(11): 1417–1436.
- LI Feng, ZHU Guangyou, LYU Xiuxiang, et al. The disputes on the source of Paleozoic marine oil and gas and the determination of the Cambrian system as the main source rocks in Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(11): 1417–1436.
- [37] 郭秋麟, 黄少英, 卢玉红, 等. 塔里木盆地台盆区下古生界油气系统模拟及资源分布预测[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1459–1471.
- GUO Qiulin, HUANG Shaoying, LU Yuhong, et al. Modeling and resource distribution prediction of the Lower Paleozoic petroleum system in platform area of Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1459–1471.
- [38] 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(1): 64–77.
- HE Dengfa, JIA Chengzao, LI Desheng, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(1): 64–77.
- [39] 徐勤琪, 储呈林, 郭小文, 等. 塔河油田盐下地区原油地球化学特征及不同期次油气成藏贡献[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(1): 111–123.
- XU Qinqi, CHU Chenglin, GUO Xiaowen, et al. Geochemical characteristics of crude oil and contributions to hydrocarbon accumulation in multiple stages in Tahe subsalt area [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2024, 46(1): 111–123.
- [40] 胡文革, 马龙杰, 汪彦, 等. 关于塔里木盆地深层油气藏高效开发的实践与思考[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(4): 519–528.
- HU Wenge, MA Longjie, WANG Yan, et al. Application and reflections on efficient development of deep oil and gas reservoirs in Tarim Basin [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(4): 519–528.
- [41] 薛一帆, 文志刚, 黄亚浩, 等. 深层—超深层走滑断裂带储层流体来源与油气成藏过程研究——以塔里木盆地富满油田为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(4): 549–559.
- XUE Yifan, WEN Zhigang, HUANG Yahao, et al. Study on reservoir fluid source and hydrocarbon accumulation process in deep to ultra-deep strike-slip fault zone: A case study of Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(4): 549–559.
- [42] 喻春花. 富满地区奥陶系超深层天然气地球化学特征、成因和来源[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2023.
- YU Chunhua. Geochemical characteristics, genesis and source of Ordovician ultra-deep natural gas in Fuman area [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2023.
- [43] PANG Bo, PANG Xiongqi, LI Caijun, et al. A novel method for quantitatively identifying driving forces and evaluating their contributions to oil and gas accumulation [J]. *Geoscience Frontiers*, 2024, 15(4): 101801.
- [44] PANG Xiongqi. Unified model for oil and gas reservoirs formation [M]//PANG Xiongqi. Quantitative Evaluation of the Whole Petroleum System. Singapore: Springer, 2023: 183–216.
- [45] 陈君青, 姜振学, 庞雄奇, 等. 应用新方法剖析钻探井失利原因: 以塔里木盆地台盆区寒武系碳酸盐岩为例[J]. *现代地质*, 2013, 27(5): 1161–1172.
- CHEN Junqing, JIANG Zhenxue, PANG Xiongqi, et al. An new method applied to analyzing the unsuccessful drills: Take the Cambrian in the platform of the Tarim Basin as an example [J]. *Geoscience*, 2013, 27(5): 1161–1172.
- [46] 王阳洋, 陈践发, 庞雄奇, 等. 塔中地区良里塔格组连续型碳酸盐岩油气藏地质特征与成因机制[J]. *石油学报*, 2015, 36(增刊2): 60–70.
- WANG Yangyang, CHEN Jianfa, PANG Xiongqi, et al. Geological features and formation mechanism of successive-type carbonate hydrocarbon reservoirs in Lianglitage Formation of Tazhong area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(S2): 60–70.
- [47] 成锁, 简世凯, 谭杨, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩储层孔隙特征刻画[J]. *断块油气田*, 2023, 30(5): 816–821.
- CHENG Suo, JIAN Shikai, TAN Yang, et al. Pore characteristics of Ordovician carbonate reservoir in Tarim Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2023, 30(5): 816–821.
- [48] 杨新影, 何皓, 晏楠, 等. 基于梯度结构张量的碳酸盐岩缝洞型储层定量预测技术——以塔里木盆地轮古油田奥陶系储层为例 [J/OL]. *大庆石油地质与开发*: 1–9 [2025–07–25]. <https://doi.org/10.19597/j.issn.1000-3754.202407027>.
- YANG Xinying, HE Hao, YAN Nan, et al. Quantitative prediction technology for carbonate fractured-vuggy reservoirs based on gradient-structure tensor: Taking Ordovician reservoirs in Lungu Oilfield of Tarim Basin as an example [J/OL]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*: 1–9 [2025–07–25]. <https://doi.org/10.19597/j.issn.1000-3754.202407027>.
- [49] 庞雄奇, 高剑波, 吕修祥, 等. 塔里木盆地“多元复合——过程叠加”成藏模式及其应用[J]. *石油学报*, 2008, 29(2): 159–166, 172.
- PANG Xiongqi, GAO Jianbo, LYU Xiuxiang, et al. Reservoir accumulation pattern of multi-factor recombination and procession superimposition and its application in Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(2): 159–166, 172.
- [50] 周兴熙. 复合叠合盆地油气成藏特征——以塔里木盆地为例 [J]. *地学前缘*, 2000, 7(3): 39–47.
- ZHOU Xingxi. The petroleum reservoir-forming characteristics of the composite superimposed basin—An example from Tarim Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(3): 39–47.
- [51] PANG Xiongqi, JIA Chengzao, PANG Hong, et al. Destruction of

- hydrocarbon reservoirs due to tectonic modifications; Conceptual models and quantitative evaluation on the Tarim Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 91: 401–421.
- [52] 庞雄奇,周新源,鄢盛华,等. 中国叠合盆地油气成藏研究进展与发展方向——以塔里木盆地为例[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 649–656.
- PANG Xiongqi, ZHOU Xinyuan, YAN Shenghua, et al. Research advances and direction of hydrocarbon accumulation in the superimposed basins, China: Take the Tarim Basin as an example[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 649–656.
- [53] 庞雄奇,姜振学,黄捍东,等. 叠复连续油气藏成因机制、发育模式及分布预测[J]. *石油学报*, 2014, 35(5): 795–828.
- PANG Xiongqi, JIANG Zhenxue, HUANG Handong, et al. Formation mechanisms, distribution models, and prediction of superimposed, continuous hydrocarbon reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(5): 795–828.
- [54] 鲁新便,胡文革,汪彦,等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(3): 347–355.
- LU Xinbian, HU Wenge, WANG Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 347–355.
- [55] 韩剑发,苏洲,陈利新,等. 塔里木盆地台盆区走滑断裂控储控藏作用及勘探潜力[J]. *石油学报*, 2019, 40(11): 1296–1310.
- HAN Jianfa, SU Zhou, CHEN Lixin, et al. Reservoir-controlling and accumulation-controlling of strike-slip faults and exploration potential in the platform of Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(11): 1296–1310.
- [56] 张艳秋,陈红汉,王燮培,等. 塔里木盆地富满油田走滑断裂带通源性评价[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(3): 787–800.
- ZHANG Yanqiu, CHEN Honghan, WANG Xiepei, et al. Assessment of connectivity between source rocks and strike-slip fault zone in the Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(3): 787–800.
- [57] 漆立新. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(1): 102–111.
- QI Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(1): 102–111.
- [58] 杨德彬,鲁新便,鲍典,等. 塔里木盆地北部奥陶系海相碳酸盐岩断溶体油藏成因类型及特征再认识[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 357–366.
- YANG Debin, LU Xinbian, BAO Dian, et al. New insights into the genetic types and characteristics of the Ordovician marine fault-karst carbonate reservoirs in the northern Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 357–366.
- [59] 郭春涛,史江涛,刘亮,等. 塔里木盆地塔河地区中下奥陶统沉积特征及其演化模式[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(1): 68–82.
- GUO Chuntao, SHI Jiangtao, LIU Liang, et al. Sedimentary characteristics and evolution model of Middle and Lower Ordovician in Tahe area, Tarim Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(1): 68–82.
- [60] 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.
- [61] 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.
- 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.

(编辑 王 迪)