

全油气系统形成演化过程中常规与非常规油气藏转化机制及模式

肖惠译^{1,2}, 庞雄奇^{1,2}, 李才俊^{1,2}, 胡涛^{1,2}, 徐帆^{1,2}, 林孝飞^{1,2}, 胡耀^{1,2}, 王雷^{1,2}, 崔新璇^{1,2},
施砍园^{1,2,3}, 蒲庭玉^{1,2}, 鲍李银^{1,2}

[1. 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. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206]

摘要:全油气系统理论阐述了常规油气藏—致密油气藏—页岩油气藏有序分布基本模式,为常规和非常规油气藏的联合评价与勘探开发提供了重要的理论基础。然而,在全油气系统演化过程中,受“多动力、多期次、多要素”叠加复合成藏作用影响,形成的复杂油气藏往往难以通过油气藏有序分布基本模式进行识别和解释。基于动力学成藏作用对中国6大盆地典型油气藏进行分类与剖析,探讨了全油气系统演化过程中的常规与非常规油气藏转化机制。研究结果表明:①从全油气系统的基本原理出发,各类油气藏具有成因关联性。②在油气动力场的演化过程中,深层介质(尤其是碳酸盐岩储层)的形成和发育不仅受控于压实成岩作用,更受到流体活动及构造应力等多种改造作用的强烈影响,从而导致油气藏呈现特殊的分布模式。③通过系统分析,揭示了4种常规与非常规油气藏转化模式,包括压实致密型、应力改造型和流体改造型、特殊介质改造型,多种地质作用的复合效应使油气成藏特征与分布规律更为复杂。该研究对于深化全油气系统动态演化过程与机制的认识具有重要意义,为厘定复杂地质条件下全油气系统中油气藏形成与分布规律提供了理论依据。

关键词:油气动力场;油气藏转化;改造型油气藏;复杂油气藏;全油气系统

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Mechanisms and models of conversion between conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs during the formation and evolution of the whole petroleum system

XIAO Huiyi^{1,2}, PANG Xiongqi^{1,2}, LI Caijun^{1,2}, HU Tao^{1,2}, XU Zhi^{1,2}, LIN Xiaofei^{1,2}, HU Yao^{1,2}, WANG Lei^{1,2},
CUI Xinxuan^{1,2}, SHI Kanyuan^{1,2,3}, PU Tingyu^{1,2}, BAO Liyin^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China]

Abstract: The theory of the whole petroleum system (WPS) defines the orderly distribution of conventional, tight, and shale reservoirs, providing an important theoretical basis for the combined evaluation, exploration, and exploitation of conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs. However, during the evolution of the WPS, complex hydrocarbon reservoirs are formed by the superimposed, composite hydrocarbon accumulation processes characterized by multiple driving forces, multiple stages, and diverse elements. It's hard to identify and explain these complex reservoirs using the orderly distribution pattern of various hydrocarbon reservoirs. Based on dynamic hydrocarbon accumulation processes, we categorize and analyze typical hydrocarbon reservoirs across six major basins of China. Furthermore, we explore the mechanisms controlling the conversion between conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs during the evolution of the WPS. The results indicate that all types of hydrocarbon reservoirs exhibit genetic correlations

收稿日期:2025-05-08;修回日期:2025-07-06。

第一作者简介:肖惠译(1999—),男,博士研究生,油气成藏与分布规律。E-mail:M17373505530@163.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。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)。

according to the basic principle of the WPS. As hydrocarbon dynamic fields evolve, the formation and development of deep media (especially carbonate reservoirs) are governed by compaction and diagenesis, while intensively reformed by geofluid activities and tectonic stress, among others. A distinctive distribution pattern of hydrocarbon reservoirs occurs as a result. Systematic analysis reveals four conversion models between conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs, namely, compaction-induced tightness, stress reformation, geofluid reformation, and special medium reformation. The combined effects of multiple geological processes lead to more complex hydrocarbon accumulation characteristics and reservoir distribution patterns. This study holds great significance for deepening the understanding of the dynamic evolution process and mechanisms of the WPS, providing a theoretical basis for determining the formation and distribution patterns of hydrocarbon reservoirs in the WPS under complex geological conditions.

Key words: hydrocarbon dynamic field, hydrocarbon reservoir conversion, reformed hydrocarbon reservoir, complex hydrocarbon reservoir, whole petroleum system (WPS)

引用格式:肖惠译,庞雄奇,李才俊,等. 全油气系统形成演化过程中常规与非常规油气藏转化机制及模式[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(4): 1092–1106. DOI: 10. 11743/ogg20250405.

XIAO Huiyi, PANG Xiongqi, LI Caijun, et al. Mechanisms and models of conversion between conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs during the formation and evolution of the whole petroleum system [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1092–1106. DOI: 10. 11743/ogg20250405.

非常规油气理论的重大突破对经典石油天然气地质学产生了深远影响,使石油地质学家意识到含油气盆地内油气分布具有复杂性、多样性和特殊性,并展现出更广阔的资源前景^[1-4]。连续性聚集、微纳米级孔喉系统赋存、非浮力作用主导成藏等系列特征也使人们意识到含油气系统理论已难以有效指导非常规油气勘探,亟需对成藏要素地质概念和油气系统理论框架进行系统性重构^[3-4]。在常规和非常规油气的地质特征、成因机制、聚集模式及勘探实践研究的基础上,提出的全油气系统理论为常规和非常规油气藏的联合评价提供了新的研究视角与理论指导。全油气系统(whole petroleum system)定义为含油气盆地相互关联的烃源岩层形成的全部油气、油气藏、油气资源及其形成演化过程和分布特征在内的自然系统^[5]。全油气系统研究涵盖了油气成藏全要素、相互作用全过程、资源分布全系列以及研究评价全方位,既包括油气生成后从烃源岩到圈闭形成常规油气藏以及从烃源岩到非圈闭形成非常规油气藏的作用过程,也包括由这两种成藏作用形成的油气资源在成藏过程中的叠加、复合和相互转化,还包括在地质历史过程中形成及被破坏、已发现及尚未发现的所有油气藏和油气资源^[4-9]。

基于“源岩供烃-储层聚烃-成藏作用控油气分布”的基本原理,全油气系统理论阐述了常规与非常规油气藏之间的差异性及联合共生规律性,为油气藏形成与分布规律研究提供了重要的理论依据。全油气系统内油气藏均来源于烃源岩层系生成和排出的油气,早期排出烃在浮力驱动与圈闭封闭作用下形成常规油

气藏,分布于自由油气动力场的优质储层中,表现为高孔、高渗特征;晚期排出烃在非浮力驱动与自封闭作用下形成致密油气藏,分布于局限油气动力场的致密储层中,表现为低孔、低渗特征;而滞留烃则在自封闭作用下形成页岩油气藏,分布于束缚油气动力场的烃源岩中,表现为超低孔、超低渗特征^[5-7, 10-11]。与此同时,全油气系统理论揭示了3个动力场内3类油气藏有序分布的成因机制与模式:随着埋深增加,烃源岩层随着热演化程度升高而生成并排出油气,储层随着沉积压实程度的升高而经历致密化过程,源-储耦合关系导致了动力学成藏作用由浮力向非浮力驱动、圈闭封闭向自封闭的变化。这种“源”与“储”随埋深的规律变化,导致油气藏由深至浅依次表现为页岩油气藏—致密油气藏—常规油气藏的有序分布模式。其中,页岩油气藏与致密油气藏通常表现为互层或紧邻分布^[5, 7-8]。

随着勘探的深入,全油气系统理论面临着诸多无法基于有序分布模式进行阐述的问题。例如,贾承造等基于源-储的时-空耦合关系厘定了3类特殊分布模式,包括页岩油气藏—致密油气藏—常规油气藏从烃源岩向侧向展布的松辽盆地白垩系模式、从烃源岩向上和向下的双向展布的鄂尔多斯盆地三叠系模式,以及致密油气藏源-储分离的准噶尔盆地二叠系模式^[5]。在碳酸盐岩盆地及复杂叠合盆地中应用该理论时,发现的特殊油气藏分布更是充分反映了油气成藏过程与动力机制的复杂性。例如,塔里木盆地深层-超深层普遍发育后期改造型油气藏^[12-15],其分布与改造介质等因

素密切相关^[8,16-18],这与浮力或非浮力驱动导致油气在圈闭或致密储层中聚集的规律不一致;四川盆地普光地区深层碳酸盐岩油气藏中的常规、致密和改造型油气藏并存,这与常规-致密油气藏纵向有序叠置的规律认识不一致。本文重点从源-储耦合的视角研究典型全油气系统在形成演化过程中常规与非常规油气藏的转化机制及其叠加复合问题,研究成果将有助于深化全油气系统动态演化过程与机制的认识,为厘定复杂地质条件下的油气藏形成与分布规律提供理论依据。

1 研究方法与原理

1.1 基于成藏作用变化确定类型变化

油气藏类型通常依据其形成条件、储层特征和油气赋存状态等进行划分,而非常规油气藏是相对于早期开发利用的常规油气藏提出的笼统概念,并且为了统一认识以及勘探开发的实践需要,油气藏的命名通常以现今属性为依据。然而,油气藏的形成是一个缓慢且不断变化的地质过程,并且不同类型之间具有成因关联性。从成藏作用变化的角度出发研究油气藏的变化,烃源岩的生烃代表了油气藏形成的起点,成藏作用驱动烃源岩中的烃类发生再次分配并向各类储层中聚集。例如,页岩排烃可视为页岩油气藏向其他类型转化,其中早期排出烃以浮力为主导成藏动力,而晚期排出烃则主要受非浮力(如异常压力和毛细管力差等充注动力)及分子自封闭作用控制^[6-7]。

此外,储层形成后或油气聚集后在外力主导下还

可发生介质与组分的改造,庞雄奇等将之归类为改造型油气藏^[19-20]。油气藏的孔、渗特征可以有效反映油气藏形成过程中的成藏作用,依据目的层成藏临界孔、渗条件,可以将排出烃形成的油气藏划分为4类:①高孔-高渗的常规油气藏;②低孔-低渗的致密油气藏;③低孔-高渗的应力改造型油气藏;④高孔-低渗的流体改造型油气藏。油气藏的形成与改造是一个具有时间属性而不断演化的过程,如现今储层致密则意味着当前成藏需要非浮力驱动,而在成藏期时可能储层尚未致密而受到浮力作用驱动形成常规油气藏(图1),这些情况需要根据实际地质条件下的源-储耦合关系进行判别。基于成藏作用研究油气藏类型的变化过程有两种思路:①依据地质历史时期孔、渗的变化特征揭示成藏作用的变化,从而明确不同地质历史时期油气藏的类型变化;②依据目的层不同埋深条件下孔、渗的变化特征揭示成藏作用的变化,从而明确不同构造位置油气藏在不同演化时期的类型变化。

1.2 基于动力场演化确定油气藏变化过程

全油气系统由自由、局限和束缚3类动力场组成,它们代表着不同性质的储层介质,分别以浮力成藏下限、油气成藏底限与源岩供烃底限为边界条件。其中,浮力成藏下限代表了浮力驱动与非浮力驱动成藏的边界条件,油气成藏底限代表了油气成藏的最大深度,源岩供烃底限代表了烃源岩供烃能力的最大深度,而这也意味着3大动力场内通常分别发育常规油气藏、致密油气藏和页岩油气藏^[7,10-12]。不同动力场代表着不同区域的平均属性,并要求研究区的地质条件相对均

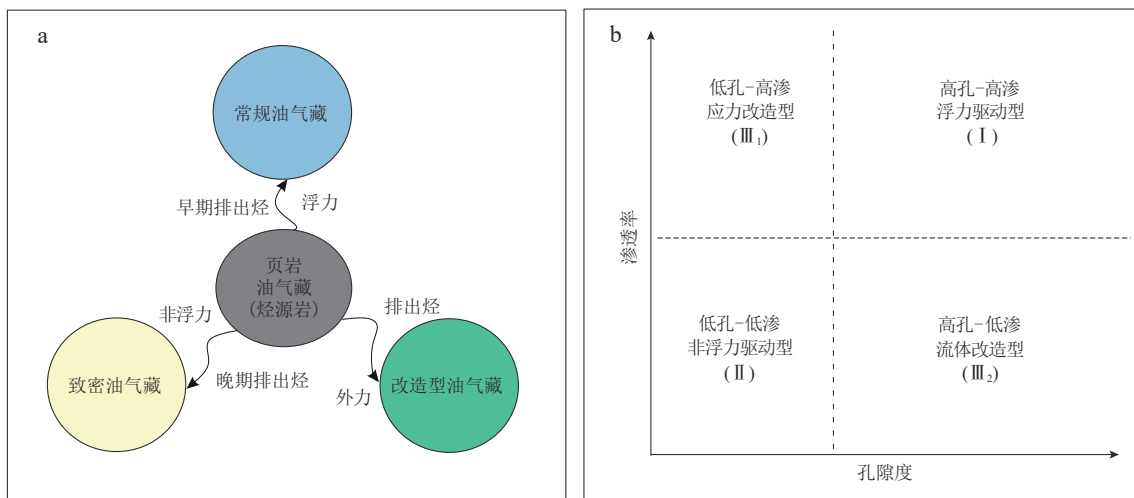


图1 常规和非常规油气藏的统一成因分类方案(a)及油气藏孔、渗特征与成藏动力类型划分的关系(b)

Fig. 1 Unified genetic classification scheme for conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs (a) and correlations between porosity-permeability characteristics of hydrocarbon reservoirs and the dynamic classification of hydrocarbon accumulation (b)

一。油气动力场的演化代表了储层成岩演化与烃源岩热演化相互耦合的地质过程:同一目的层随着埋深的增大不断经历压实成岩作用,导致目的层经历从自由动力场到局限动力场再到束缚动力场的演化过程,而与之相关联的烃源岩层在进入生烃门限之后、达到供烃底限之前,一直处于束缚动力场内,形成页岩油气藏并具有向外供烃的潜力,烃源岩排出烃在不同动力场中的成藏作用直接决定了油气藏的类型,而成藏后的动力场变化则意味着油气藏类型的变化。

本研究重点讨论烃源岩排出烃所形成油气藏类型的转化过程。基于油气动力场的演化过程,可以有效识别油气藏类型。在正常压实主导的深埋过程中,目的层早期经历自由动力场阶段,形成常规油气藏;中期经历局限动力场阶段,油气充注形成先致密、后成藏型致密油气藏;晚期经历束缚动力场阶段,排出烃难以有效聚集成藏。油气藏转化过程主要包含3种基本形式:①早期自由场中形成的常规油气藏随着储层介质演化到局限动力场阶段,而变化为先成藏、后致密型致密油气藏;②不同时期形成的致密油气藏由于范围扩大而叠加复合形成致密复合型油气藏;③局限动力场中,储层介质被应力等外力改造后形成改造型动力场,

相应的油气藏类型转化为改造型油气藏(图2)。

1.3 基于油气藏后期改造综合确定类型变化

油气动力场反映的是油气藏正常演化趋势下的形成与分布规律,其内在机制在于:随埋深的不断加大,储层在压实成岩作用下发生致密化过程,从而使浮力主导形成的常规油气藏逐渐向非浮力主导形成的致密油气藏转化。然而,储层介质的变化还受到外力改造作用的强烈影响,尤其是碳酸盐岩储层的溶蚀与应力改造作用。基于研究区油气藏成藏作用的统计分析可用于评价不同类型油气藏的相对比例,从而综合确定成藏作用的相对强弱及油气藏的类型,其中Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ₁和Ⅲ₂这4个区分别代表浮力驱动、非浮力驱动、应力改造和流体改造主导形成的油气藏(图1b)。当某一类别油气藏占比超过50%时,认定该类油气藏对应的成藏作用为主导作用;占比介于25%~50%则认定为主要作用^[20]。针对应力与流体改造对油气藏转化的影响,提出两种评价思路:①依据不同区块或埋深条件下的不同类型油气藏占比,定量评价外力改造的影响程度(图3a);②依据不同油气藏占比随地质条件变化特征,明确断裂与不整合面等地质条件导致的外力改

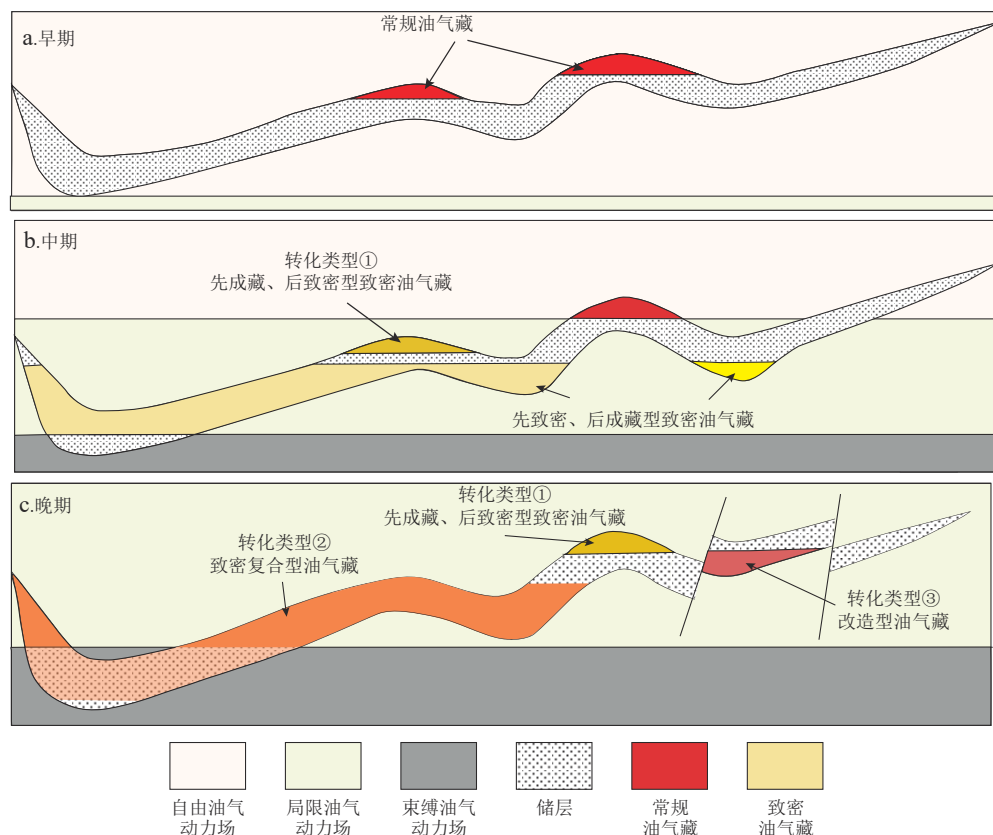


图2 油气动力场演化剖面及油气藏分布规律

Fig. 2 Profiles showing the evolution of hydrocarbon dynamic fields and the distribution pattern of hydrocarbon reservoirs

造成影响范围(图3b,c)。

1.4 技术路线与工作流程

本文的技术方案共分为5个步骤:①选定已发现存在异常油气藏分布的典型研究区,广泛收集地质资料和油气钻探成果;②基于油气藏的储层性质确定现今油气藏类型;③对已发现的代表性油气藏进行实例剖析,确定主要的烃源岩层及其关联的储集层,并恢复油气藏的动态成藏与类型转化过程;④揭示单一成藏作用主导下的地质历史时期油气藏与现今油气藏之间的差异性和关联性,识别并归纳常规与非常规油气藏之间的转化模式;⑤基于成藏作用的变化,揭示不同地质条件下的油气藏转化模式。

2 研究背景与资料来源

为解决上述问题,本文基于中国6个代表性盆地,厘定常规与非常规油气藏的转化模式,包括对塔里木盆地、准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、渤海湾盆地、松辽盆地在内的12 246口探井、80 763个目标区的钻井成果进行统计分析,这些目标区总油气资源占中国油气总资源量的62.6%,探明储量占中国探明油气总储量的76.9%,勘探面积约占中国主要盆地总勘探面积的40%^[19]。同时,重点选择库车坳陷致密砂岩油气藏剖析沉积压实主导的油气藏转化模式,并选择塔

中、富满-顺北、塔河油田以及普光气田碳酸盐岩油气藏剖析改造转化模式。相关研究资料来源于中国石油与中国石化相关油田单位的科研项目,涵盖了中国东部、中部及西部的各类简单和复杂油气藏类型。

3 研究结果

根据6大盆地的典型油气藏解剖结果,可将常规与非常规油气藏的转化分为压实致密型、应力改造型和流体改造型3种基本模式以及断溶体介质改造型特殊模式。

3.1 压实致密型

在地质历史时期,常规油气藏向非常规油气藏的转化是一个缓慢的动态演化过程,早期形成的常规油气藏在不被破坏的前提下,均有成为致密油气藏的潜力。针对致密油气藏形成存在的“先成藏”与“先致密”匹配问题,姜振学与庞雄奇等从地质认识上对两种致密油气的形成过程做出了解释^[8,21],大量的物理和数值模拟实验同样证实了两种地质过程的可能性^[22-27];贾承造等提出非常规油气成藏作用可概括为自封闭聚集作用,揭示了致密油气的微观充注封闭机理^[6,8]。常规油气藏广泛分布于浮力成藏下限^[19]之上,早期形成的常规油气藏深埋之后因储层压实等成岩作用,可转化为致密常规油气藏,其转化机制为“先成藏、后

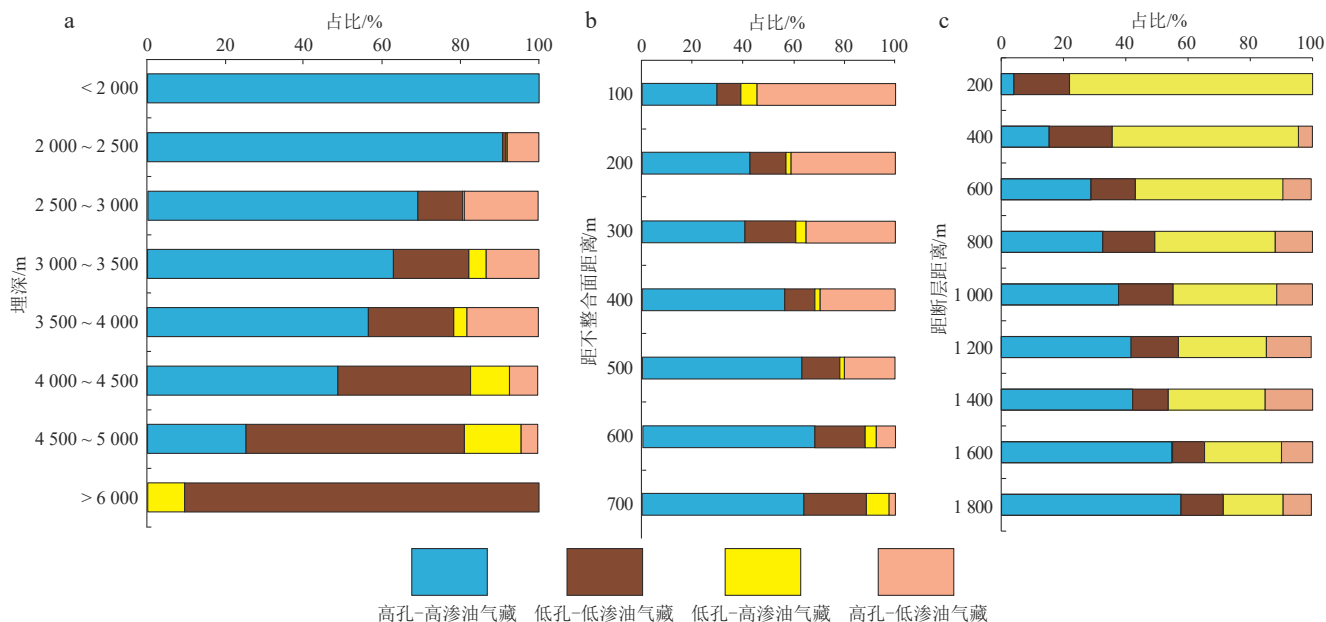


图3 南堡凹陷随着埋深(a)、距不整合面距离(b)和距断裂距离(c)的变化不同类型油气藏占比条形图^[20]

Fig. 3 Bar charts showing the proportions of various hydrocarbon reservoir types varying with burial depth (a), distance from the unconformity (b), and distance from faults (c) in Nanpu Sag^[20]

致密”。

由压实作用形成的致密油气藏普遍具有常规油气藏的特征,而与致密深盆气藏表现出显著差异。以库车坳陷连井剖面为例(图4),通过恢复储层物性演化史发现,依南2气藏侏罗系储层12 Ma时孔隙度为14.8%~13.2%,5 Ma时孔隙度为9.1%~8.7%,在8 Ma时开始致密;迪那2气藏古近系储层5 Ma时孔隙度为16.1%~14.5%,2 Ma时孔隙度为6.9%~4.5%,在3 Ma时开始致密。而油气充注史表明,库车坳陷烃源岩在23 Ma时开始排烃,排油高峰主要在20 Ma,排气高峰主要在5 Ma。通过包裹体均一化温度和烃源岩排烃史综合分析,确定迪那2气藏的成藏期主要为12 Ma;而依南2气藏成藏时间持续久,但天然气生成主要为5 Ma。这表明两个气藏现今均属于局限动力场的范围,甚至迪那2气藏的目的层埋深更大。但迪那2气藏是一个典型的先成藏、后致密型气藏,而依南2气藏是一个典型的先致密、后成藏型气藏,前者现今更具与常规油气藏类似的特征,表现为“高点汇聚、源-储分离”,而在成藏期表现为“高位封盖、高孔富集、高压成藏”。

3.2 应力改造型

对于常规油气藏而言,其本身具有良好的孔、渗条件,断裂活动通常会导致早期油气藏的破坏与散失,而在原地或异地聚集形成次生油气藏^[15, 28-29]。致密油气藏形成后易受到应力改造作用的影响,前人在含油气盆地中发现了大量与构造活动和应力作用有关的裂缝

型油气藏^[30]。构造变形作用形成的多期深大断裂有助于裂缝系统的成型,这些裂缝系统可在局部储集层中形成良好的孔-缝复合储集体,同时也有助于储层与烃源岩的沟通^[31-33]。

应力作用形成的裂缝型油气藏普遍具有低孔高渗、近断裂分布及圈闭中聚集的特征,油气聚集与断裂输导密切相关,转化机制为“先成藏、后应力改造、再成藏”。以塔中地区1号坡折带为例,其位于塔里木盆地中央隆起塔中低凸起之上,在晚奥陶世发育了陆棚-斜坡-盆地沉积体系,为典型的镶边陆棚边缘高能礁滩相沉积。油气藏中的储层以上奥陶统良里塔格组为主,发育生物灰岩和颗粒灰岩,原油来源于寒武系-奥陶系^[34],整体上,断裂控制了油气藏的形成与分布。塔中1号断裂形成于早奥陶世,表现为正断层,中-晚奥陶世反转为逆冲断裂,活动于震旦纪-志留纪,晚海西期基本停止,构造活动性自东向西明显变弱^[35];其油气注入点多沿走滑断层根部注入,而在花状构造上部表现为多点注入;油气藏具有圈闭特征,表现为“先成藏、后致密”的特征(图5a),在断层交汇部位其储层渗透率普遍提高了2~3个数量级。进一步统计油气藏储层物性数据发现,孔隙度主要集中在2%以下,而渗透率集中在 $(0.01 \sim 0.10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层已经普遍致密;部分油气藏的储层表现为低孔、高渗,为受到应力改造的裂缝型油气藏(图5b),其中深大断裂周边发育非常好的裂缝系统^[36],在岩心与镜下薄片上均可观察到大量裂缝,显著改善了储集层物性(图5c—f),大量沿断裂运移的油气进入由致密储层改造形成

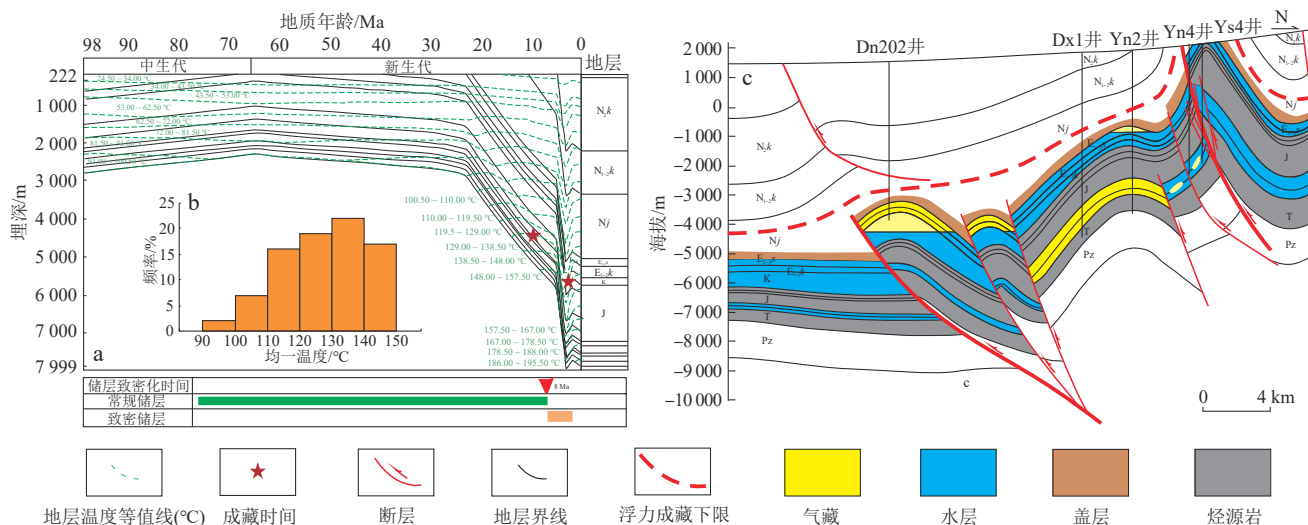


图4 塔里木盆地库车坳陷迪那-依南油气藏地质特征

Fig. 4 Geological characteristics of hydrocarbon reservoirs in the Dina-Yinan area, Kuqa Depression, Tarim Basin

a. 地层埋藏史、热史与构造演化史;b. 流体包裹体均一温度频率分布直方图;c. 迪那-依南油气藏剖面,红色虚线上方为自由油气动力场,下方为局限油气动力场 N_2k ,库车组; $N_{1-2}k$,康村组; N_j ,吉迪克组; $E_{2-3}s$,苏维依组; $E_{1-2}k$,库姆格列木组; K ,白垩系; J ,侏罗系; T ,三叠系; Pz ,古生界

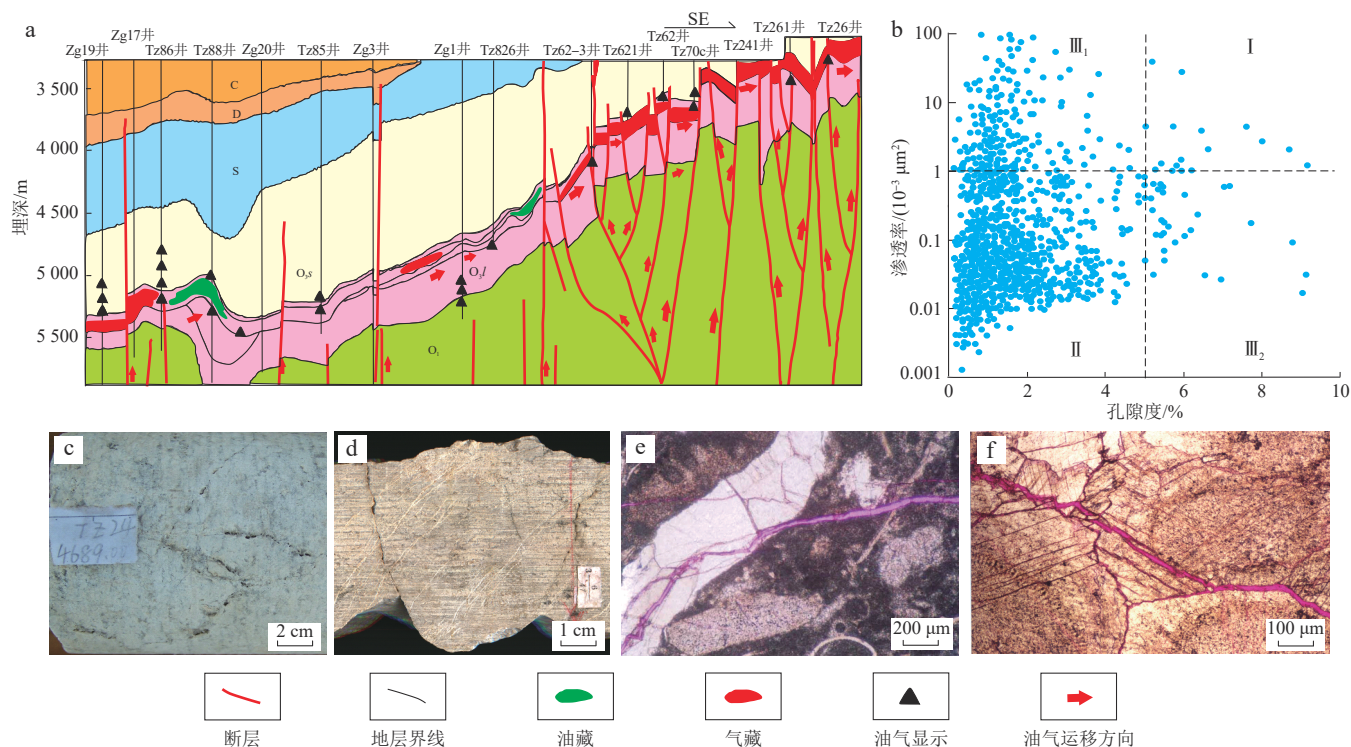


图5 塔里木盆地塔中地区1号坡折带应力改造型油气藏地质特征及典型井裂缝显微照片

Fig. 5 Geological characteristics and fracture images from typical wells for stress-reformed hydrocarbon reservoirs in the No. 1 slope break zone, Tazhong area, Tarim Basin

- a. 断裂与油气藏分布剖面; b. 孔隙度-渗透率交汇图; c. Tz24井, 埋深4 689.00 m, 岩心; d. Tz242井, 埋深4 502.00 m, 岩心; e. Tz823井, 埋深5 408.98 m, 铸体薄片, 单偏光; f. Tz82井, 埋深5 367.24 m, 铸体薄片, 单偏光
I. 高孔-高渗油气藏, II. 低孔-低渗油气藏, III₁. 低孔-高渗油气藏, III₂. 高孔-低渗油气藏
C. 石炭系; D. 泥盆系; S. 志留系; O_{3s}. 桑塔木组; O_{3l}. 良里塔格组; O₁. 下奥陶统

的裂缝型储层中。张翥等发现塔中1号坡折带的4期烃包裹体分别对应志留纪末低成熟油期、海西晚期生油期、喜马拉雅早期凝析油-湿气形成期以及喜马拉雅后期干气阶段^[37], 相较而言, 较多的致密油气藏与裂缝油气藏共存, 在 multi 期构造运动的破坏下保存下来的早期油气藏较少, 现今油气藏大多为喜马拉雅期充注形成的气藏。

经断裂运移到中、浅层的油气能够不断地在圈闭中运移和聚集, 最终形成油气藏。然而, 当断裂作为应力改造介质时, 其伴随的构造变形具有一定的局限性; 渤海湾盆地南堡凹陷油气运聚成藏普遍受断裂构造控制, 与断裂有关的油气藏及其储量分别约占油气藏类型的85%和油气储量的90%以上^[38]。Pang等人^[20]探讨了与不同断裂带相关的裂缝类油气藏及其相对比率随距断裂带距离的变化特征, 结果发现应力改造型裂缝油气藏占比随距断裂带距离的增大而减少, 它在最近处(距离<200 m)占比超过78%, 随距离增大(距离在1 600~1 800 m)比率减少至20%, 而断裂带控油气成藏的边界范围在0~2 000 m。

3.3 流体改造型

地层的抬升和剥蚀使含油气盆地发育多个不整合面, 反映了构造变动对油气富集成藏和保存的制约作用, 通常不整合面上被剥蚀的地层厚度越大, 下伏地层内油气藏受到破坏的概率越大^[16]。作为输导体系, 不整合面对于常规圈闭油气的运移成藏异常重要, 而对于致密油气而言, 其作用更多地体现在有助于流体改造形成高孔-低渗储集体^[20, 39]。

流体作用形成的孔洞型油气藏普遍具有高孔-低渗、近不整合面分布及离散状溶洞聚集的特征, 转化机制为“先成藏、后流体改造、再成藏”。塔河油田是中国最早发现的海相碳酸盐岩缝洞型油气田, 其奥陶系一间房组和鹰山组顶部岩溶缝洞型储集体已累计提交油气探明储量 15.28×10^8 t。该区域自前震旦系变质基底形成后, 经历了多期构造运动, 导致其北部上奥陶统一二叠系普遍缺失, 形成了区域不整合面^[40-42]。多期构造活动和岩溶作用共同塑造了以大型岩溶缝洞为主的有效储集空间^[43-44]。区内奥陶系储层以颗粒灰岩和

泥微晶灰岩为主,油气藏物性分析显示储层品质普遍较差,孔隙度主要集中在3%以下,而渗透率集中在 $(0.01 \sim 1.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其不整合面流体活动形成的高孔-低渗类油气藏数量较少,这表明强烈溶蚀作用形成的孔洞型油气藏可能难以使用岩心尺度的孔、渗数据进行表征。塔河油田奥陶系一间房组和鹰山组储层为表层岩溶风化壳,油气藏经历了加里东晚期、海西晚期、燕山期—喜马拉雅早期和喜马拉雅晚期4个成藏期(图6a)。其中,加里东期形成的古油藏大多在海西期被破坏,同时海西早期的构造抬升也促进了表生岩溶和内幕断控岩溶储层的发育(图6b),海西中晚期油气沿着深大走滑断裂输导成藏,至燕山晚期—喜马拉雅早期调整改造^[41,45]。剖面上油气藏多表现为典型的孤立点状分布,于奇地区以晚期成藏形成的轻质油

藏和气藏为主,而托普台地区以中-重质油藏为主,这种差异反映了油气来源的分区性特征(图7)。

不整合面作为流体改造介质时,其能够影响的范围十分有限。以南堡凹陷为例,古近系沉积之前的区域不整合面剥蚀量最大超过700 m^[46],流体改造型孔洞油气藏占比与距不整合面距离呈显著负相关关系。不整合面虽然是流体活动形成孔洞类油气藏的主导因素,在紧邻不整合面区域(距离 ≤ 650 m)其占比可达55%以上,但随着距离增大,这一影响迅速减弱^[20]。

3.4 断溶体介质改造型

断裂除了应力应变作用导致邻近储集介质被改造以外,还有一种特殊的断溶体储层表现形式。与高孔-高渗的礁滩相控油气藏、高孔-低渗的层间岩

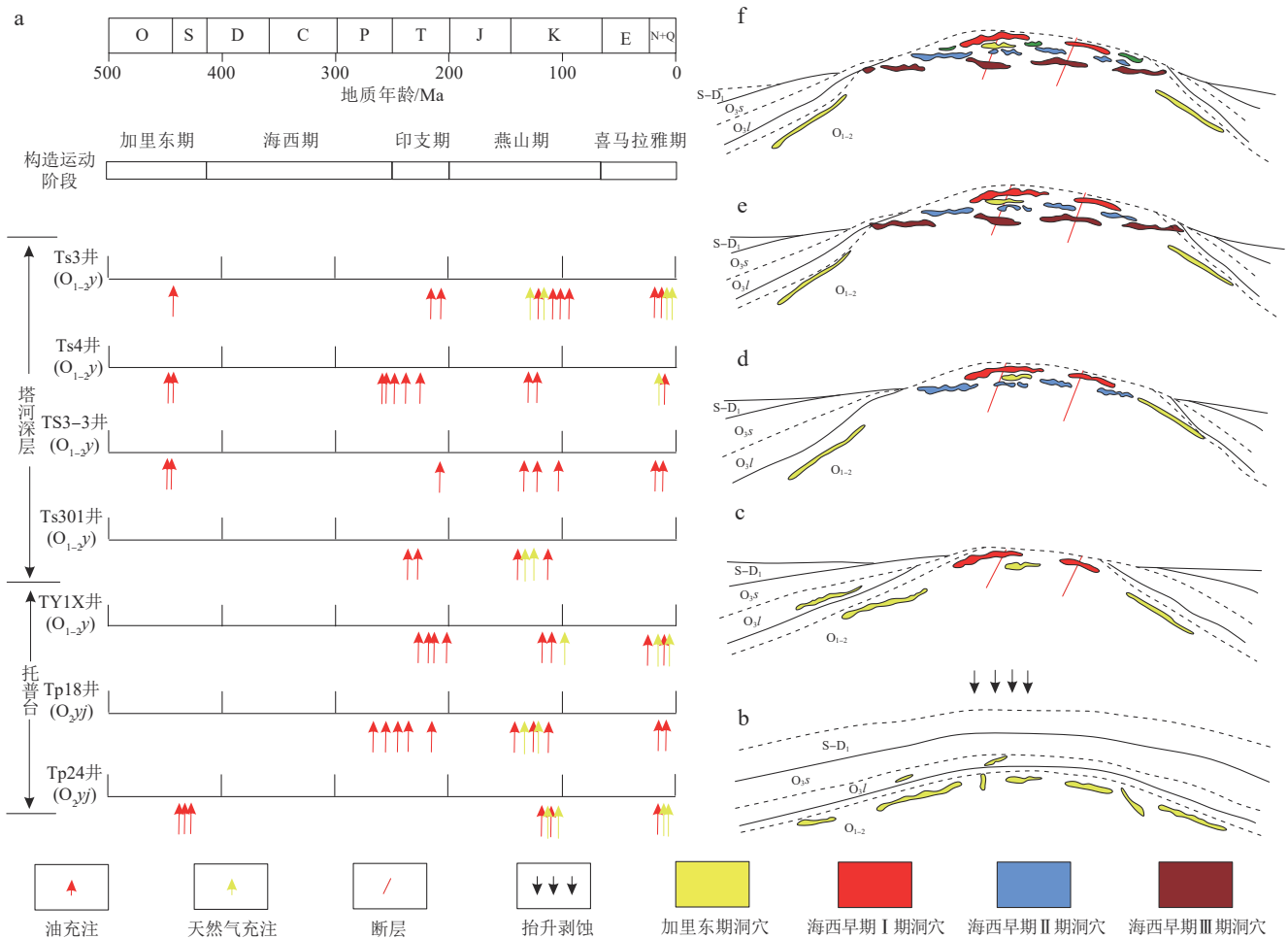


图6 塔里木盆地塔河油田奥陶系一间房组-鹰山组油气藏成藏期次与流体改造特征^[41,45]

Fig. 6 Hydrocarbon accumulation stages and geofluid-induced reformation of hydrocarbon reservoirs in the Ordovician Yijianfang-Yingshan formations, Tahe oilfield, Tarim Basin^[41, 45]

a. 成藏期次;b. 加里东期古表生岩溶洞穴分布;c. 海西早期断控-表生岩溶I期洞穴分布;d. 海西早期断控-表生岩溶II期洞穴分布;e. 海西早期断控-表生岩溶III期洞穴分布;f. 晚泥盆压实-埋藏岩溶调整后的洞穴分布

D. 泥盆系;S. 志留系; O_{3s} . 桑塔木组; O_{3l} . 良里塔格组; O_{2yj} . 一间房组; O_{1-2y} . 鹰山组

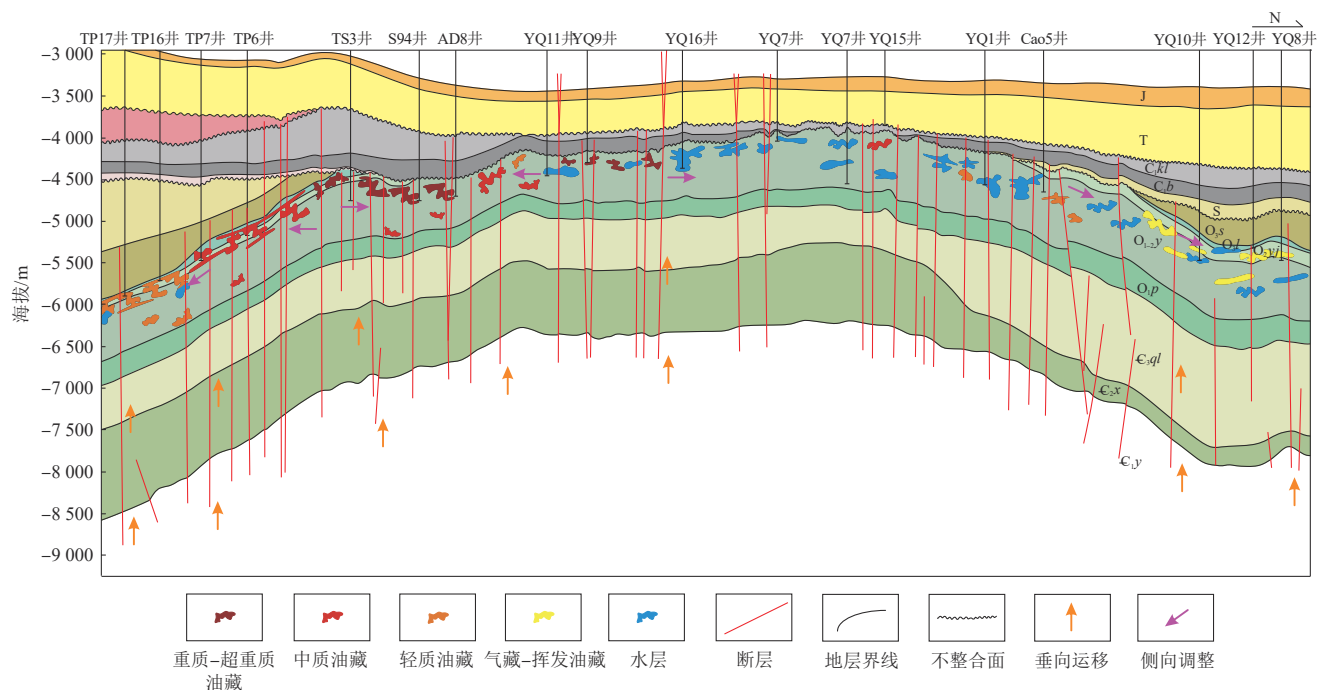


图7 塔里木盆地塔河油田奥陶系一间房组-鹰山组流体改造型油气藏地质特征

Fig. 7 Geological characteristics of geofluid-reformed hydrocarbon reservoirs in the Ordovician Yijianfang-Yingshan formations, Tahe oilfield, Tarim Basin

J. 侏罗系; T. 三叠系; C_1kl . 卡拉沙依组; C_1b . 巴楚组; S. 志留系; O_3s . 桑塔木组; O_3l . 良里塔格组; O_2yj . 一间房组; O_{1-2y} . 鹰山组; O_1p . 蓬莱坝组; C_3pl . 丘里塔格组; C_2x . 肖尔布拉克组; C_1y . 玉尔吐斯组

溶层控油气藏以及低孔-高渗的断控应力改造油气藏相比,断溶体油气藏因同时受到应力应变与流体溶蚀的双重改造作用,往往表现出后成型高孔-高渗特征。

流体与应力作用形成的断溶体油气藏普遍具有高孔-高渗、断裂带中聚集的特征,转化机制为“先成藏、后应力-流体联合改造、再成藏”。以塔里木盆地环阿满走滑断裂带为例,随着油气勘探不断向坳陷区探索,断裂伴生的断溶体等改造油气藏已成为塔里木盆地的重要勘探接替领域^[10,14-15,47-49]。断裂破碎带伴随构造破裂作用可形成断裂、裂缝、角砾间孔隙及断层空腔等优势空间,同时断裂及裂缝系统有利于流体对储层溶蚀改造,有助于储层的溶蚀改造^[50-53]。这种断裂自身发生介质改造形成的特殊储层具有两个显著特征:①受断层的显著控制;②自身破碎带影响的范围十分有限。塔里木盆地在南北方向上形成塔北、阿满与塔中3个分区,目前发现的油气主要来自下寒武统玉尔吐斯组,前人对于超深层断溶体油气藏厘定了“寒武多期供烃、深埋断溶成储、原地垂向输导、晚期成藏为主、走滑断裂控富”的油气成藏模式^[13]。位于阿满区富满与顺北油田的缝洞体油气藏受控于走滑断裂破碎带,多分布在距主断裂300 m范围内^[14]。当层间岩溶与走滑断裂复合叠加时,

塔北区哈拉哈塘油田的油气分布范围可扩展至距走滑断裂带800 m,而塔中地区由于走滑断裂叠加礁滩体与风化壳,其断控缝洞体储层分布范围可进一步可扩大至距走滑断裂带1 500 m内^[14](图8)。

4 讨论

4.1 叠合盆地通常发育复杂油气藏

在中国多期构造发育的复杂叠合盆地中,普遍发育由各种作用叠加形成的复杂油气藏,通常表现出位置迁移、规模改造、组分破坏和相态变异等复杂特征^[54]。造成这一现象的根本原因在于叠合盆地的多期构造变动导致了烃源岩的多期生排烃、储层的多期调整改造以及油气藏的多期聚集破坏过程,尤其是碳酸盐岩介质中的溶蚀与应力改造作用更为强烈,使正常压实成岩演化与烃源岩深埋热成熟耦合形成的早期浮力主导、晚期非浮力主导的油气成藏有序性遭到破坏^[55]。

多要素叠加形成的复杂油气藏普遍具有孔-渗关系复杂、沿多控藏要素分布以及在多类储集体中聚集的特征。以四川盆地普光地区二叠系全油气系统为

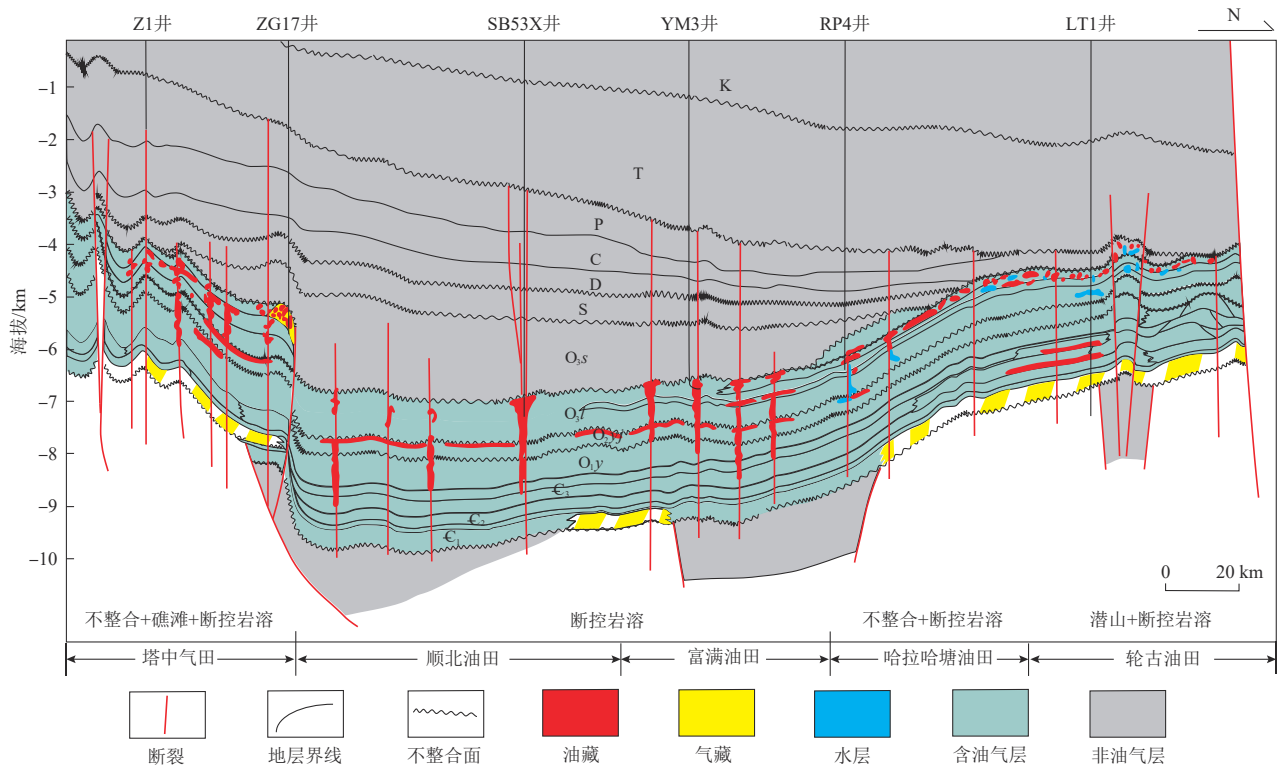


图8 塔里木盆地环阿满走滑断裂介质改造型油气藏地质特征

Fig. 8 Geological characteristics of media-reformed hydrocarbon reservoirs in the circum-Arman strike-slip faults, Tarim Basin

K. 白垩系; T. 三叠系; P. 二叠系; C. 石炭系; D. 泥盆系; S. 志留系; O_{3s} . 桑塔木组; O_{3l} . 良里塔格组; O_{2yl} . 一间房组; O_{1-y} . 鹰山组; C. 寒武系

例,目前已发现普光、大湾和清溪场等6个含油气区块,以龙潭组为主力烃源岩^[56],以长兴组和飞仙关组台地碳酸盐岩为主要储集岩,嘉陵江组和雷口坡组巨厚的膏盐层构成了区域性盖层,发育背斜类、背斜-岩性类、断层-岩性类3种气藏类型^[57-58]。基于孔-渗关系判别结果显示,普光地区属于浮力-非浮力和流体改造3种主要作用联合成藏,反映出现今的油气藏各区块除压实作用存在差异外,还受到流体改造的重要影响。在沉积相控制下,长兴组和飞仙关组储层主要为礁滩相白云岩和颗粒灰岩,溶蚀作用下形成的溶蚀孔十分常见,成岩过程中的多期溶蚀是普光构造储层储集性能进一步改善的关键因素^[57]。而断裂活动对于油气藏更是调整和破坏作用,应力改造作用有限(图9)。基于油气藏解剖与成藏动力分析可将普光气田油气成藏过程分为3个阶段:①晚三叠世—早侏罗世,浮力主导驱动原油进入圈闭形成古油藏;②晚侏罗世—白垩纪,部分储层在压实作用下逐渐致密,而溶蚀主导的储层则表现为高孔-低渗,此时的构造活动相对较弱,古油藏裂解成气并侧向输导形成古气藏;③晚白垩世至今,喜马拉雅运动强烈调整并破坏古气藏,储集层中的天然气侧向输导,形成现今气藏(图10)。

4.2 油气藏转化受控于多种地质作用

常规油气藏向致密油气藏的转化主要受沉积压实作用的主导,其关键控制因素为储层致密时间在充注时间之后,且常规油气藏形成后不被破坏。致密油气藏向改造型油气藏的转化则受到更多地质因素的影响。改造型油气藏占据主导地位时通常意味着构造活动在地质历史时期相对活跃,这也导致早期形成的油气藏相对更难保存下来。需要特别指出的是,改造型油气藏的转化本质上是储层性质的改变而非油气藏的直接转化,这一特征决定了其转化机制必须考虑时空匹配关系。①改造时储层若聚集有油气,则自封闭条件被破坏将导致油气散失,或发生油气的混合。值得注意的是,储层改造范围通常局限在不整合面和断裂带附近,此时整体油气藏格局可能保持稳定,但可能诱发邻近致密储层中的油气向改造优质储层二次运移。②改造时储层若未聚集油气,则可能存在两种情况:早期的构造运动已将油气藏破坏,此后发生的新油气充注可能来源于古油气藏的裂解与邻位油气的位置调整,也可能来源于烃源岩的再次供烃,这也导致了其转化机制为“先成藏、后改造、再成藏”;若当储层在改造之前未充注油气,后续形成的改造型油气藏则主要

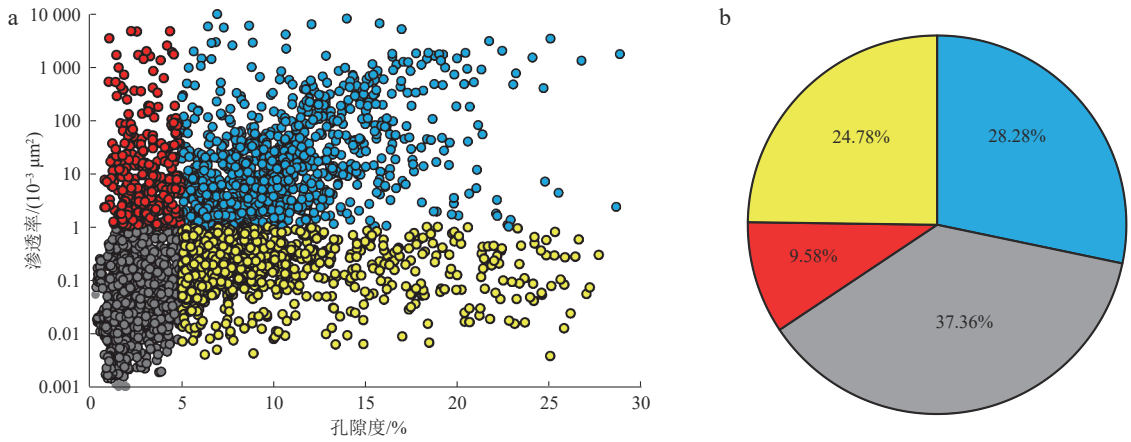


图9 四川盆地普光气田深层碳酸盐岩储层物性特征及不同类型油气藏相对比例

Fig. 9 Physical properties of deep carbonate reservoirs and proportions of various types of hydrocarbon reservoirs in the Puguang gas field, Sichuan Basin

a. 4种成藏动力识别结果;b. 4种成藏动力相对贡献饼状图

(图中的蓝色为浮力驱动型高孔-高渗油气藏,灰色为非浮力驱动型低孔-低渗油气藏,红色为应力改造型低孔-高渗油气藏,黄色为流体改造型高孔-低渗油气藏。)

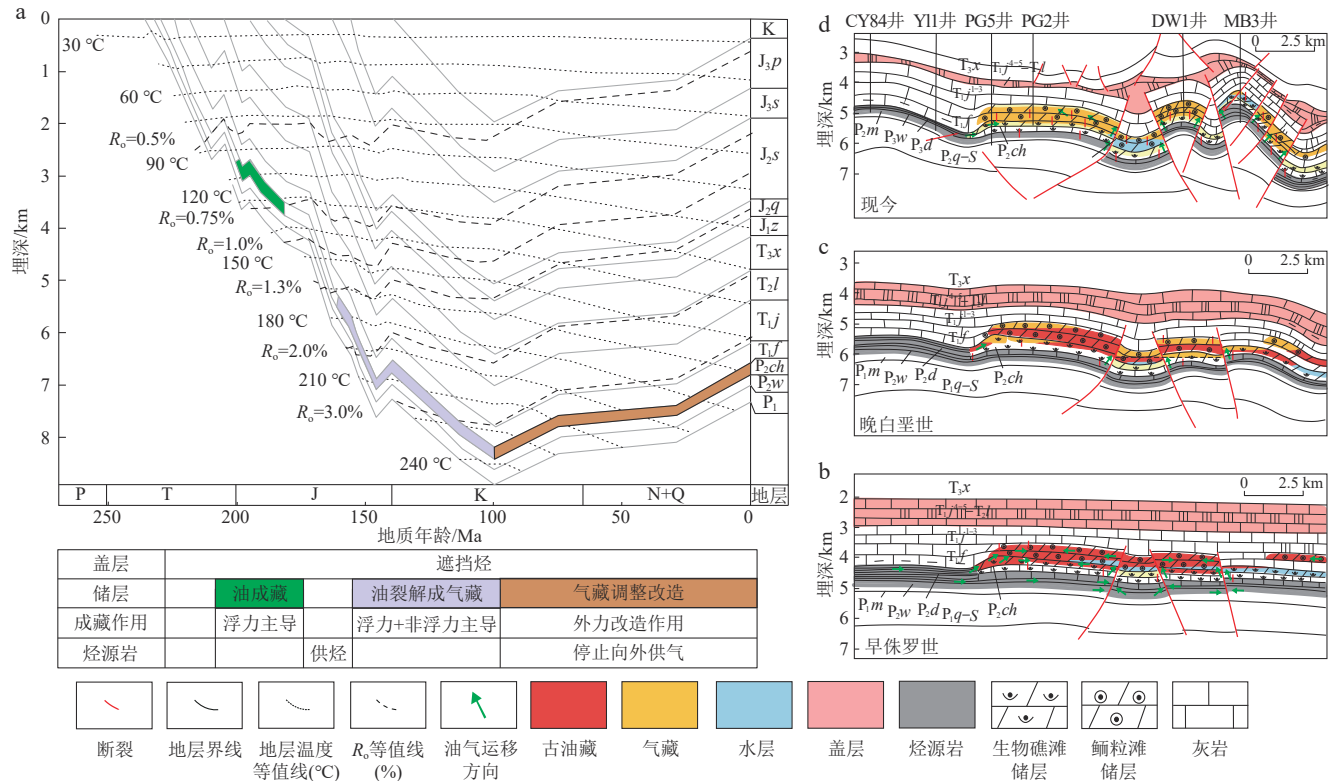


图10 四川盆地普光气田油气成藏演化综合图

Fig. 10 Composite diagrams showing the hydrocarbon accumulation evolution in the Puguang gas field, Sichuan Basin

a. 油气成藏综合事件图;b. 早侏罗世油气藏成藏模式剖面;c. 晚白垩世油气藏成藏模式剖面;d. 现今油气藏成藏模式剖面

K. 白垩系;J_{3p}. 蓬萊鎮組;J_{3s}. 遂寧組;J_{2s}. 沙溪廟組;J_{2q}. 千佛崖組;J_{1z}. 自流井組;T_{3x}. 須家河系;T_{2l}. 雷口坡組;T_{1j}. 嘉陵組;T_{1f}. 飛仙組;
P_{2ch}. 長興組;P_{2w}. 吳家坪組;P₁. 下二疊統;P_{1m}. 茅口組;P_{1q}. 栖霞組;S. 志留系

表现为烃类的位置转化,这需要结合具体的成藏期次分析。

油气藏的转化通常具有4类典型特征。①孔、渗

边界条件具有相对性。储层孔、渗实质上反映的是成藏作用,通过孔、渗参数边界划分,可以有效识别浮力驱动型、非浮力驱动型以及应力/流体改造型等不同成

因类型的油气藏,为成藏机理研究和定量评价提供了重要依据。在实际地质环境中,受岩性差异、地温梯度变化和生烃母质类型等多因素影响,边界条件往往存在过渡带现象,并表现出一定的区域差异性。②源-储组合条件具有复杂性。不同盆地表现出显著的源-储耦合差异。宏观上,鄂尔多斯盆地三叠系全油气系统表现为源-储双向分布,而松辽盆地白垩系全油气系统表现为侧向组合^[5];微观上,在页岩层系中普遍发育砂-泥互层、贫/富有机质复合叠加的源-储组合^[59],这种多尺度复杂性使得精细评价成藏作用成为揭示油气有序分布规律的关键所在。③油气藏的形成具有时序性。早期形成的常规油气藏其成藏动力为浮力,早期直接形成的致密油气藏其成藏动力为非浮力,而后期对致密油气藏储层的改造将导致油气藏的性质发生改变,包括储层物性改善及位置调整等。成藏时序的准确判定是理解油气藏类型转化过程的重要依据。④油气藏转化具有多样性。外力改造作用通常具有局部性特征,致使改造型油气藏与断裂系统及不整合面密切伴生,这也导致致密油气藏与改造型油气藏往往共生共存。除常规转化模式外,特殊地质条件下还可能发生双向转化:致密油气藏经破坏调整可形成常规油气藏,而常规油气藏遭破坏后也可能转化为改造型油气藏。这种复杂的转化关系使得碳酸盐岩盆地和复杂叠合盆地油气藏分布表现出显著的特殊性与复杂性。

4.3 油气藏形成与转化的精细描述仍面临挑战

非常规油气对经典石油天然气地质学理论形成了重要突破,伴随非常规油气勘探涌现的大量新术语与概念尚未得到系统梳理,这为理解常规与非常规油气藏形成演化的关联性与差异性带来了重大挑战,主要体现在以下3个方面。

1) 静态成藏要素存在差异

非常规油气藏并不具有明显的“圈闭”结构,常规油气藏中的生、储、盖等成藏要素更多的是宏观意义上的要素,而非常规油气藏中的“源-储一体”与“源-储紧邻”含义比较模糊,混积岩与互层砂-泥岩岩性组合下的源-储性质识别、岩性(岩相)定名、近源与源内区分仍面临挑战。同时,非常规油气的自封闭作用取代了传统常规油气藏的盖层功能,这种由微观分子作用力主导的封闭机制,与常规盖层的微观封闭机理既有相似性又具独特性。

2) 动态成藏过程存在差异

非常规油气成藏主要体现为短距离运移特征。页岩层系普遍存在纹层间及夹层间的微尺度运移,致密

油气则主要表现为近源运移。传统的初次运移与二次运移理论难以准确描述这些新型运移过程,进而导致“源”与“储”属性界定的复杂性。此外,油气充注动力具有明显的从源到储的指向性,“源”与“储”属性的复杂性也使得页岩油气的原地滞留与微运移现象难以明确区分。

3) 油气分布存在差异

常规油气藏与非常规油气藏本质上是相对概念。常规、致密、页岩油气藏大致代表着洼陷与构造高点等不同的分布位置,然而致密与页岩油气的大面积连续分布使“藏”的概念变得模糊,常规油气藏强调流体的有效聚集,而页岩与致密油气藏可能仅具有较低的富集程度。在此背景下,“甜点”概念可能与常规油气中的“油气藏”更具差异性。

5 结论

1) 全油气系统为常规与非常规油气藏的联合评价提供了重要的理论支撑。在全油气系统演化过程中,油气藏不断地形成和相互转化,并呈现有序分布模式,而深层地质条件下的油气藏往往表现为多类型改造叠加的复合体。

2) 常规与非常规油气藏转化的本质是各类油气藏具有成因关联性。在油气动力场演化过程中,深层介质条件下储层的形成发育并不完全受到压实作用的主导影响,局部地区的流体及应力等改造作用十分强烈,“多动力-多期次-多要素”叠加复合成藏作用导致了源-储耦合关系的有序性遭到破坏,从而形成特殊的油气分布模式。

3) 常规与非常规油气藏之间的转化具有4种基本的模式,分别是压实致密型、应力改造型和流体改造型3种基本模式以及断溶体介质改造型特殊模式。其中压实致密型在陆相沉积盆地更具有普遍代表性,而介质改造型受控于特定的地质条件,其分布与改造介质密切相关。多重作用叠加的含油气盆地通常形成复杂的油气藏分布模式。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,陶士振,袁选俊,等.连续型油气藏形成条件与分布特征[J].石油学报,2009,30(3):324-331.
ZOU Caineng, TAO Shizhen, YUAN Xuanjun, et al. The formation conditions and distribution characteristics of continuous petroleum accumulations[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 324-331.
- [2] 邹才能,陶士振,袁选俊,等.“连续型”油气藏及其在全球的

- 重要性:成藏、分布与评价[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 669-682.
- ZOU Caineng, TAO Shizhen, YUAN Xuanjun, et al. Global importance of "continuous" petroleum reservoirs: Accumulation, distribution and evaluation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 669-682.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 论非常规油气成藏机理: 油气自封闭作用与分子间作用力[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 437-452.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-containment and intermolecular forces [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 437-452.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] PANG Xiongqi, LIU Keyu, MA Zhongzhen, et al. Dynamic field division of hydrocarbon migration, accumulation and hydrocarbon enrichment rules in sedimentary basins [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2012, 86(6): 1559-1592.
- [11] PANG Xiongqi, JIA Chengzao, CHEN Junqing, et al. A unified model for the formation and distribution of both conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs [J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(2): 695-711.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 王清华, 杨海军, 汪如军, 等. 塔里木盆地超深层走滑断裂断控大油气田的勘探发现与技术创新[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 58-71.
- WANG Qinghua, YANG Haijun, WANG Rujun, et al. Discovery and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 58-71.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 韩鹏远, 丁文龙, 杨德彬, 等. 塔里木盆地塔河油田S80走滑断裂发育特征及其对奥陶系储层的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 770-786.
- HAN Pengyuan, DING Wenlong, YANG Debin, et al. Characteristics of the S80 strike-slip fault zone and its controlling effects on the Ordovician reservoirs in the Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 770-786.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 姜振学, 林世国, 庞雄奇, 等. 两种类型致密砂岩气藏对比[J]. 石油实验地质, 2006, 28(3): 210-214, 219.
- JIANG Zhenxue, LIN Shiguo, PANG Xiongqi, et al. The comparison of two types of tight sand gas reservoir [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2006, 28(3): 210-214, 219.
- [22] MEHMANI A, TOKAN-LAWAL A, PRODANOVIC M, et al.

- The effect of microporosity on transport properties in tight reservoirs [C]//North American Unconventional Gas Conference and Exhibition, the Woodlands, 2011. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2011: SPE-144384-MS.
- [23] SILIN D, KNEAFSEY T J, AJO-FRANKLIN J B, et al. A multimodal 3D imaging study of natural gas flow in tight sands [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, 2011. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2011: SPE-146611-MS.
- [24] KHALILI A D, ARNS C H, ARNS J Y, et al. Permeability upscaling for carbonates from the pore-scale using multi-scale Xray-CT images [C]//SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition, Vienna, 2012. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2012: SPE-152640-MS.
- [25] RAHMANIAN M R, AGUILERA R, KANTZAS A. A new unified diffusion—viscous-flow model based on pore-level studies of tight gas formations[J]. SPE Journal, 2013, 18(1): 38–49.
- [26] ABBAD M. Combining the micro grain imager with the effective medium theory for quick assessment of the absolute permeability in carbonates [C]//SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, 2012. Richardson: Society of Petroleum Engineers, SPE-160863-MS.
- [27] 郭秋麟, 陈宁生, 宋焕琪, 等. 致密油聚集模型与数值模拟探讨——以鄂尔多斯盆地延长组致密油为例[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(1): 4–10, 20.
- GUO Qiulin, CHEN Ningsheng, SONG Huanqi, et al. Accumulation models and numerical models of tight oil: A case study from Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(1): 4–10, 20.
- [28] 李斌, 张欣, 郭强, 等. 塔里木盆地寒武系超深层含油气系统盆地模拟[J]. 石油学报, 2022, 43(6): 804–815.
- LI Bin, ZHANG Xin, GUO Qiang, et al. Basin modeling of Cambrian ultra-deep petroleum system in Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(6): 804–815.
- [29] 李艳平, 汪洋, 向英杰, 等. 准噶尔盆地滴南凸起多层系油气富集条件及勘探前景[J]. 石油学报, 2023, 44(5): 778–793.
- LI Yanping, WANG Yang, XIANG Yingjie, et al. Hydrocarbon enrichment conditions and exploration prospects of multilayer system in Dinan salient of Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(5): 778–793.
- [30] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 207–216.
- JIAO Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 207–216.
- [31] NELSON R A, MOLDOVANYI E P, MATCEK C C, et al. Production characteristics of the fractured reservoirs of the La Paz Field, Maracaibo Basin, Venezuela [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(11): 1791–1809.
- [32] 庞雄奇, 林会喜, 郑定业, 等. 中国深层和超深层碳酸盐岩油气藏形成分布的基本特征与动力机制及发展方向[J]. 地质力学学报, 2020, 26(5): 673–695.
- PANG Xiongqi, LIN Huixi, ZHENG Dingye, et al. Basic characteristics, dynamic mechanism and development direction of the formation and distribution of deep and ultra-deep carbonate reservoirs in China [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 673–695.
- [33] 何春波, 张亚雄, 于英华, 等. 油源断裂输导油气演化阶段的确定方法及其应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(4): 1066–1074.
- HE Chunbo, ZHANG Yaxiong, YU Yinghua, et al. Determination method of Oil-Source fault transporting oil and gas evolution stage and its application [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(4): 1066–1074.
- [34] 李素梅, 庞雄奇, 杨海军, 等. 塔里木盆地海相油气源与混源成藏模式[J]. 地球科学, 2010, 35(4): 663–673.
- LI Sumei, PANG Xiongqi, YANG Haijun, et al. Generation, migration and accumulation model for the marine Oils in the Tarim Basin [J]. Earth Science, 2010, 35(4): 663–673.
- [35] 张仲培, 王毅, 云金表, 等. 塔中地区断裂不同演化阶段对油气聚集的控制[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 316–323.
- ZHANG Zhongpei, WANG Yi, YUN Jinbiao, et al. Control of faults at different evolution stages on hydrocarbon accumulation in Tazhong area, the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 316–323.
- [36] 刘洛夫, 李燕, 王萍, 等. 塔里木盆地塔中地区 I 号断裂带上奥陶统良里塔格组储集层类型及有利区带预测[J]. 古地理学报, 2008, 10(3): 221–230.
- LIU Luofu, LI Yan, WANG Ping, et al. Reservoir types and favorable oil-gas exploration zone prediction of the Upper Ordovician Lianglitage Formation in Tazhong No. 1 fault belt of Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography: Chinese Edition, 2008, 10(3): 221–230.
- [37] 张鼎, 赵瑞华, 张蒂嘉, 等. 塔中 I 号带奥陶系烃包裹体荧光特征与成藏期[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 63–68, 75.
- ZHANG Nai, ZHAO Ruihua, ZHANG Dijia, et al. Fluorescence characteristics of the Ordovician hydrocarbon inclusions in the Tazhong-I slope-break zone and the timing of hydrocarbon accumulation [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 63–68, 75.
- [38] 董月霞, 庞雄奇, 黄曼宁, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷油气成藏区带定量预测与评价[J]. 石油学报, 2015, 36(增刊2): 19–35.
- DONG Yuexia, PANG Xiongqi, HUANG Manning, et al. Quantitative prediction and evaluation of favorable hydrocarbon accumulation zones in Nanpu sag of Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(S2): 19–35.
- [39] 李毕松, 苏建龙, 蒲勇, 等. 四川盆地元坝地区二叠系茅口组相控岩溶刻画及预测[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(1): 69–77.
- LI Bisong, SU Jianlong, PU Yong, et al. Facies-controlled karst characterization and effective reservoir prediction of Permian Maokou Formation in Yuanba area, Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(1): 69–77.
- [40] 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.
- [41] 赵永强, 云露, 王斌, 等. 塔里木盆地塔河油田中西部奥陶系

- 油气成藏主控因素与动态成藏过程[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 758-766.
- ZHAO Yongqiang, YUN Lu, WANG Bin, et al. Main constraints and dynamic process of Ordovician hydrocarbon accumulation, central and western Tahe Oil Field, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(5): 758-766.
- [42] WANG Shen, LIU Hua, WU Xian, et al. Major period and process of hydrocarbon accumulation of deep reservoirs—A case study of Tuoputai area in Tarim Basin, China [J]. Geoenery Science and Engineering, 2023, 221: 111305.
- [43] 金强, 张三, 孙建芳, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶相形成和演化[J]. 石油学报, 2020, 41(5): 513-525.
- JIN Qiang, ZHANG San, SUN Jianfang, et al. Formation and evolution of karst facies of Ordovician carbonate in Tahe Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(5): 513-525.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 彭清华, 周江羽, 蒋少斌, 等. 南堡凹陷不整合类型及剥蚀量恢复[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(6): 657-660.
- PENG Qinghua, ZHOU Jiangyu, JIANG Shaobin, et al. Unconformity types and erosion thickness restoration in Nanpu Sag, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(6): 657-660.
- [47] 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.
- [48] 马永生, 蔡勋育, 云露, 等. 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 1-17.
- MA Yongsheng, CAI Xunyu, YUN Lu, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 1-17.
- [49] 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.
- [50] CAINE J S, EVANS J P, FORSTER C B. Fault zone architecture and permeability structure [J]. Geology, 1996, 24(11): 1025-1028.
- [51] FAULKNER D R, LEWIS A C, RUTTER E H. On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: Field observations of the Carboneras fault in southeastern Spain [J]. Tectonophysics, 2003, 367(3/4): 235-251.
- [52] 王清华, 杨海军, 李勇, 等. 塔里木盆地富满大型碳酸盐岩油气聚集区走滑断裂控储模式[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 239-251.
- WANG Qinghua, YANG Haijun, LI Yong, et al. Control of strike-slip fault on the large carbonate reservoir in Fuman, Tarim Basin—a reservoir model [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 239-251.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 马永生. 四川盆地普光超大型气田的形成机制[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 9-14, 21.
- MA Yongsheng. Generation mechanism of Puguang Gas Field in Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 9-14, 21.
- [57] 马永生, 蔡勋育, 郭彤楼. 四川盆地普光大型气田油气充注与富集成藏的主控因素[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊1): 149-155.
- MA Yongsheng, CAI Xunyu, GUO Tonglou. Main controlling factors of oil and gas filling and enrichment formation in Puguang large gas field, Sichuan Basin, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 149-155.
- [58] 冯冲, 郭彤楼, 邹华耀, 等. 川东北地区飞仙关组—长兴组天然气富集机制[J]. 现代地质, 2013, 27(4): 907-914.
- FENG Chong, GUO Tonglou, ZOU Huayao, et al. Enriched mechanism of natural gas in the Feixianguan-Changxing formations in the northeast Sichuan Basin [J]. Geoscience, 2013, 27(4): 907-914.
- [59] 赵文智, 卞从胜, 蒲秀刚, 等. 中国典型咸化湖盆页岩油富集与流动特征及在“甜点”评价中的意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 25-37.
- ZHAO Wenzhi, BIAN Congsheng, PU Xiugang, et al. Enrichment and flow characteristics of shale oil in typical salinized lake basins in China and its significance for “sweet spot” evaluation [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(5): 25-37.