

塔里木盆地西南坳陷全油气系统多源复合成藏特征与有序分布模式

金玉洁^{1,2}, 王雷^{1,2}, 庞雄奇^{1,2}, 陈君青^{1,3}, 张现军⁴, 姜福杰^{1,2}, 陈宝新⁴

[1. 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 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; 3. 中国石油大学(北京) 理学院 油气光学探测技术重点实验室, 北京 102249; 4. 中国石油 塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000]

摘要:塔里木盆地西南(塔西南)坳陷地处盆-山过渡带,发育寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系和侏罗系等多套优质烃源岩。这些烃源岩层的成因与分布没有关联性,但在多期构造演化与多期成藏作用的过程中形成了多来源油气复合的复杂油气藏。本文在全油气系统理论指导下,综合开展了油气地球化学、储层物性与油气藏产状特征分析,系统剖析了塔西南坳陷“全油气系统多源复合型油气藏”的油气成藏机制和有序分布模式。研究表明,塔西南坳陷多源复合-多期构造叠合-多动力改造耦合形成的复杂油气藏具有4个基本特征:①油气成藏具有寒武系、石炭系、二叠系和侏罗系多源供烃、混源充注以及构造控制的油气运聚特征。②加里东期、晚海西期及印支期-天山期多期构造叠加塑造了多形式的油气运移通道与多动力聚集系统,形成了常规与非常规油气藏的差异聚集和有序分布特征。③系统演化过程中,自由动力场高孔-高渗储层控制常规油气藏的形成与分布,局限动力场低孔-低渗储层控制致密油气藏形成与分布,而束缚动力场源内超致密储层控制页岩油气藏形成与分布。④动力场形成演化过程中受应力和流体改造形成了裂缝型和孔洞型油气藏,导致多来源复合油气藏成因类型更加复杂。

关键词:改造类油气藏;常规和非常规油气藏;多来源复合全油气系统;油气成藏机制;化石能源;塔西南坳陷;塔里木盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Multi-sourced composite hydrocarbon accumulation and ordered distribution pattern of the whole petroleum system in the Southwestern Depression, Tarim Basin

JIN Yujie^{1,2}, WANG Lei^{1,2}, PANG Xiongqi^{1,2}, CHEN Junqing^{1,3}, ZHANG Xianjun⁴, JIANG Fujie^{1,2}, CHEN Baixin⁴

[1. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Beijing Key Laboratory of Optical Detection Technology for Oil and Gas, College of Science, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China]

Abstract: The Southwestern Depression of the Tarim Basin (also known as the Southwest Tarim Depression), located in a basin-mountain transitional zone, hosts multiple suites of high-quality source rocks, including Cambrian, Ordovician, Carboniferous, Permian, and Jurassic formations. Despite their uncorrelated genesis and distribution, these strata contribute to the formation of complex hydrocarbon reservoirs with composite hydrocarbon sources through multi-stage tectonic evolution and hydrocarbon accumulation. Using the whole petroleum system (WPS) theory as a guide, we comprehensively analyze the petroleum geochemistry, reservoir characterization, and the reservoir occurrence. Accordingly, the hydrocarbon accumulation mechanisms and ordered distribution pattern of the multi-sourced composite hydrocarbon reservoirs within the WPS of the Southwest Tarim Depression is examined. The results indicate that these complex hydrocarbon reservoirs, shaped by the coupling of multi-source inputs, multi-stage tectonic superposition, and multi-dynamic modification, exhibit four fundamental characteristics. First, the hydrocarbon accumulation features hydrocarbon supply from multiple sources, including the Cambrian, Carboniferous, Permian, and Jurassic formations; mixed hydrocarbon contributions; and structurally controlled hydrocarbon migration and accumulation. Second, multi-

收稿日期:2025-05-12;修回日期:2025-07-14。

第一作者简介:金玉洁(1990—),女,博士研究生,油气藏形成与分布。E-mail: jinyjcup@163.com。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(2021DJ0101)。

stage tectonic superposition during the Caledonian, Late Hercynian, and Indo-Tianshan orogenic events, sculpt diverse hydrocarbon migration pathways and a multi-dynamic hydrocarbon accumulation system. This results in differential hydrocarbon accumulation and ordered distribution of conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs. Third, during the system evolution, high-porosity and high-permeability reservoirs in the free-hydrocarbon dynamic field (F-HDF) govern the formation and distribution of conventional hydrocarbon reservoirs. In contrast, low-porosity and low-permeability reservoirs in the confined-hydrocarbon dynamic field (C-HDF) control the formation and distribution of tight hydrocarbon reservoirs, while intra-source ultra-tight reservoirs in the bound-hydrocarbon dynamic field (B-HDF) determine the formation and distribution of shale hydrocarbon reservoirs. Last, the stress deformation and fluid-rock interactions during dynamic field evolution gives rise to dual reservoir types (i. e., fractured and vuggy reservoirs), substantially complicating the genetic classification of multi-sourced, composite hydrocarbon accumulations.

Key words: reformed hydrocarbon reservoir, conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs, multi-sourced composite whole petroleum system (WPS), hydrocarbon accumulation mechanism, fossil fuel, Southwest Tarim Depression, Tarim Basin

引用格式:金玉洁,王雷,庞雄奇,等. 塔里木盆地西南坳陷全油气系统多源复合成藏特征与有序分布模式[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(4): 1316–1332. DOI:10. 11743/ogg20250419.

JIN Yujie, WANG Lei, PANG Xiongqi, et al. Multi-sourced composite hydrocarbon accumulation and ordered distribution pattern of the whole petroleum system in the Southwestern Depression, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1316–1332. DOI:10. 11743/ogg20250419.

塔里木盆地西南(塔西南)坳陷油气资源潜力巨大,自1952年依奇克里克构造型油气藏油气勘探取得突破以来,该地区相继发现了柯克亚构造带(柯克亚油气田)、乌恰构造带(阿克莫木气田)和柯东构造带(柯东油气田)等多个规模型油气田^[1]。目前,该地区已探明石油地质储量 $3\,237.02 \times 10^4$ t、天然气地质储量 $1\,020.57 \times 10^8$ m³。然而,塔西南坳陷地处前陆冲断带,构造变形强烈,储层空间展布表现出显著的非均质性,风化壳型储层发育程度普遍低于塔中与塔北地区^[2-3]。坳陷内发育寒武系^[4]、石炭系-二叠系^[3,5-6]和侏罗系^[7]等多套烃源岩,油气成藏过程受多期构造演化与烃源岩热演化耦合控制^[8-9],致使油气分布呈现“一井一藏”的特征^[10]。因此,亟需厘清多源条件下的成藏特征,以实现油气有利富集区的精准识别与高效预测。

为了指导复杂地质条件下的油气勘探,贾承造等^[11-14]通过多种方法研究并阐述了常规和非常规油气资源的差异性、关联性和联合共生规律,提出了全油气系统概念(whole petroleum system)并建立常规与非常规油气藏有序分布模式。他们认为,油气生成与分布的研究应不局限于“从源岩到圈闭”的视角,而应从“源-储耦合、有序聚集”的角度出发,包括长距离运移烃、近距离运移烃,以及排出烃与滞留烃等常规与非常规两种油气资源的聚集成藏。全油气系统研究包括烃类生成演化全过程:常规油气运移成藏及调整、改造与破坏、非常规油气原地成藏或调整、改造与破坏,揭示统一的常规与非常规油气分布富集规律等^[15],图1展

示了全油气系统常规和非常规油气藏有序分布的基本模式。

全油气系统被定义为“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”^[11-14]。然而,塔里木盆地西南坳陷发育多套烃源岩层,其形成时代、沉积背景与分布格局彼此独立,缺乏成因上的连续性,使全油气系统概念和理论难以直接应用于该区复杂的成藏规律研究。为此,本文依据油气来源特征的不同,将全油气系统划分为3类:①单来源全油气系统,指由一组在成因上相互关联的烃源岩层(一套或多套)提供油气形成的系统;②双来源全油气系统,由两组彼此成因不相关的烃源岩层供烃形成;③多来源全油气系统,则指由3组及以上成因上互不关联的烃源岩层供烃形成的复合系统。同一组烃源岩层的形成条件、形成时代、岩相特征和分布特征相似,而不同组的烃源岩层之间则存在显著差异。塔西南坳陷的油气来源于寒武系、奥陶系、石炭系和侏罗系等多个地层,这些烃源岩层不仅形成时代不同、岩性和岩相特征及生、排烃过程上具有明显差异,其成藏过程甚至跨越多个构造演化阶段,无法归入统一的烃源岩成因体系。因此,本文将“由多个成因独立烃源岩系统共同供烃”形成的全油气系统概称为多来源复合全油气系统,并在这一概念框架下开展塔西南坳陷全油气系统成藏特征与有序分布规律研究,图2展示了研究的思路和技术路线。

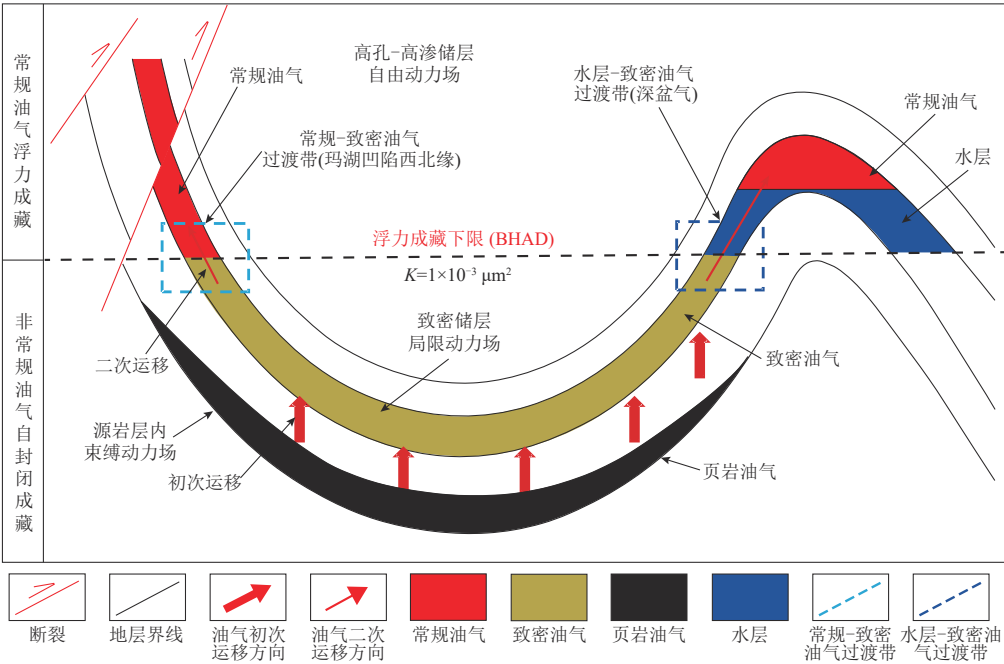


图1 油气动力场成藏机制及全油气系统中常规和非常规油气藏有序分布模式(据文献[14]修改)

Fig. 1 Hydrocarbon accumulation mechanisms driven by hydrocarbon dynamic fields and the ordered distribution pattern of conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs within the WPS (modified after [14])

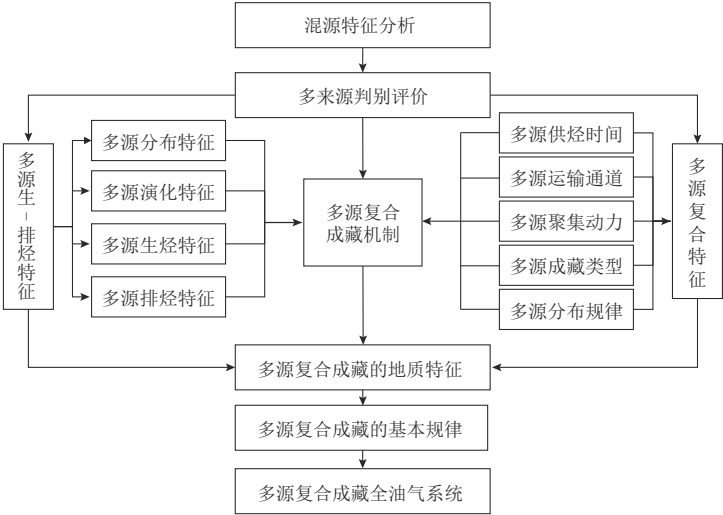


图2 多源复合全油气系统油气成藏特征与分布规律研究思路与技术路线

Fig. 2 Methodology and technology roadmap for research on hydrocarbon accumulation characteristics and reservoir distribution pattern of the multi-sourced composite WPS

1 塔西南坳陷多源复合全油气系统分布特征

受多套烃源岩供烃与多期构造运动的影响,塔西南坳陷成藏过程复杂,形成了多类型与多成因的油气藏系统。该区主要产层包括白垩系克孜勒苏群的常规砂岩储层、古近系卡拉塔尔组的致密碳酸盐岩储层以

及新近系西河甫组的常规砂岩储层。

塔西南坳陷常规与非常规油气的分布受构造基底、沉积环境演化和后期构造叠加改造的共同影响。在古裂陷构造基底上,古特提斯洋多期海侵-海退演替背景下,寒武系—新近系的多套烃源岩与海相碳酸盐岩和陆相砂岩储层共同组成多源复合型全油气系统。寒武系—中、下侏罗统的页岩广泛分布,成为塔西南坳陷非常规资源的重要组成部分;白垩系克孜勒苏

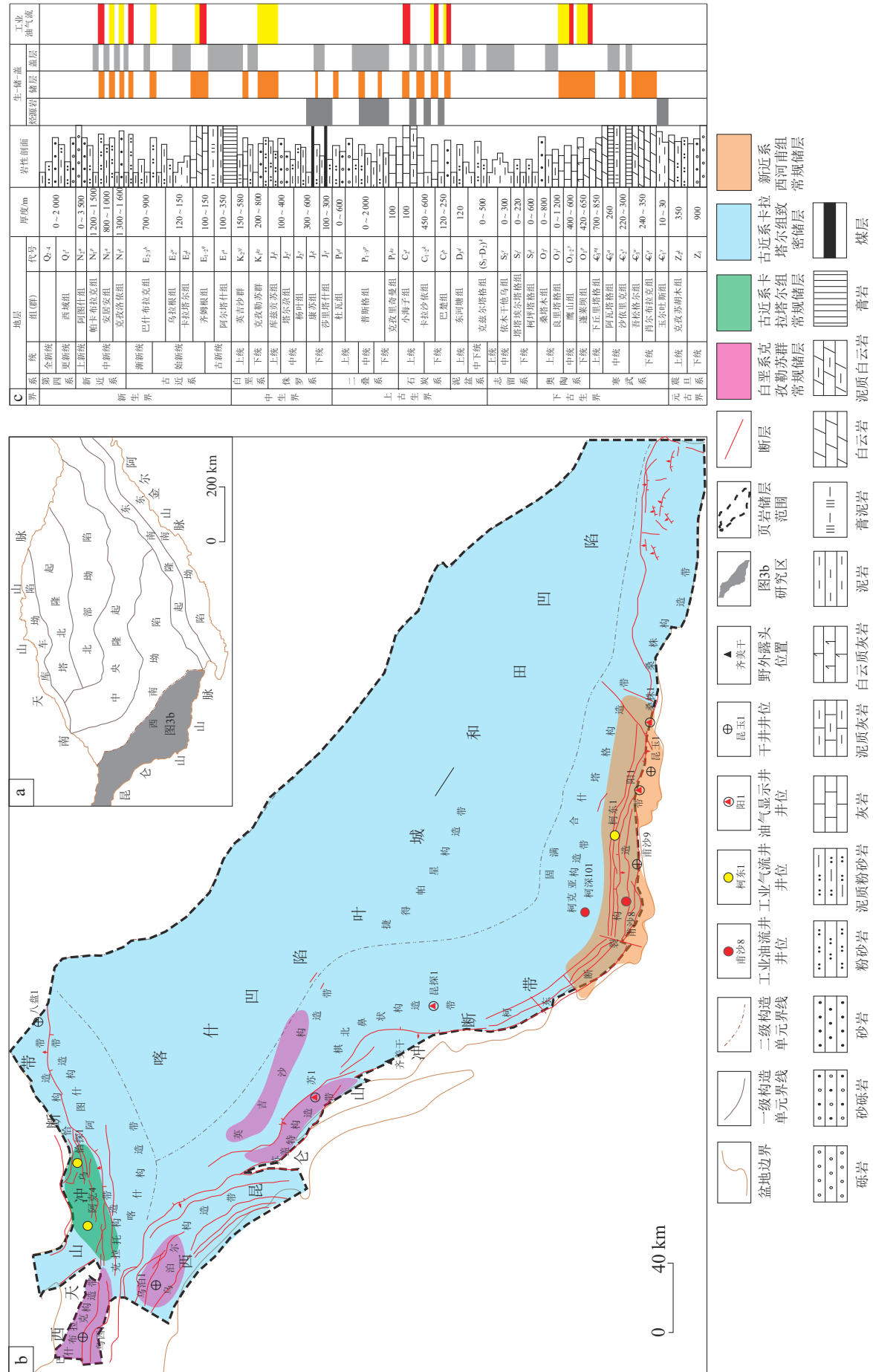


图3 塔里木盆地现今构造格架(a)、塔西南坳陷常规储层与非常规储层分布(b)(修改自[1])和地层综合柱状图(c)^[16]

Fig. 3 a. Present-day tectonic framework of the Tarim Basin (a), distribution of conventional and unconventional reservoirs in the Southwest Tarim Depression (modified after reference[1]) (b), and composite stratigraphic column of the Southwest Tarim Depression^[16](c)

群的常规砂岩储层广泛分布于巴什布拉克、乌泊、苏盖特及英吉沙等构造带;古近系卡拉塔尔组的致密碳酸盐岩储层沿昆仑山前带发育,而卡拉塔尔组常规储层主要发育于西天山山前带阿克地区;新近系西河甫组的常规砂岩储层主要分布在昆仑山前带的柯克亚地区(图3)。

塔西南坳陷位于被动大陆边缘,其沉积演化始于震旦系古裂陷基底之上,沉积过程主要受控于古特提斯洋的多期演化。区内自寒武系一中、下侏罗统发育大面积页岩^[6,17-18]。其中,寒武系玉尔吐斯组发育厚度约300 m的页岩,自南向北逐渐减薄;上石炭统卡拉沙依组一中、上二叠统普斯格组发育厚度约800 m泥页岩,构成深层烃源岩基础。石炭系-二叠系塔哈奇组形成风化壳溶蚀孔隙型碳酸盐岩储层;普斯格组下段则在三角洲前缘与滨浅湖砂坝中发育常规砂岩储层。随着北天山洋和南天山洋由东向西闭合,区域构造格局由伸展向挤压转变^[19],侏罗纪在山前带零星沉积了沼泽相泥页岩与煤,为生烃提供了局部物质基础。下白垩统克孜勒苏群沉积环境演化为辫状河体系,形成常规储层为主的砂岩储层,其孔隙度为5%~20%,渗透率为 $(0.10 \sim 100.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。古近系卡拉塔尔组受末次海退影响,发育大面积碳酸盐岩台地相与潟湖相,形成致密碳酸盐岩储层,孔隙度主要为1%~12%,渗透率为 $(0.01 \sim 10.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,局部潟湖相发育泥质页岩与钙质页岩。新近系西河甫组以扇三角

洲沉积体系为主,其孔隙度为3%~14%,渗透率为 $(0.01 \sim 100.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中,上段主要发育常规储层,下段发育致密储层。

目前,塔西南坳陷已经发现石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系、古近系与新近系共6套含油气层系。受印支期与喜马拉雅期两期构造运动的叠加影响,古生界地层发生叠瓦式冲断与强烈逆掩叠置,形成多条深大油源断裂与多种源-储配置组合。部分致密储层在构造改造作用下局部演化为常规储层,导致油气在空间上呈现出分块、分带和分层的分布特征。在该构造格局控制下,常规储层油气的富集主要受浮力驱动及优质储层控制,而致密储层油气则主要富集于近源断裂带及与油源断裂连接的高孔-高渗储层(图4)。

2 多源复合全油气系统油气成藏特征

2.1 多来源油气混合判识

塔西南坳陷的新近系西河甫组与古近系卡拉塔尔组是当前的主要产层,显示出显著的多套烃源岩供烃特征。已有多位学者围绕该区油气来源开展了系统研究(图5),普遍认为西河甫组与卡拉塔尔组所含油气来源于多个成因差异显著的烃源岩体系。部分研究指出,塔西南坳陷的原油与天然气主要受1~2套优势烃源岩控制。例如,Hu等通过原油有机地球化学特征

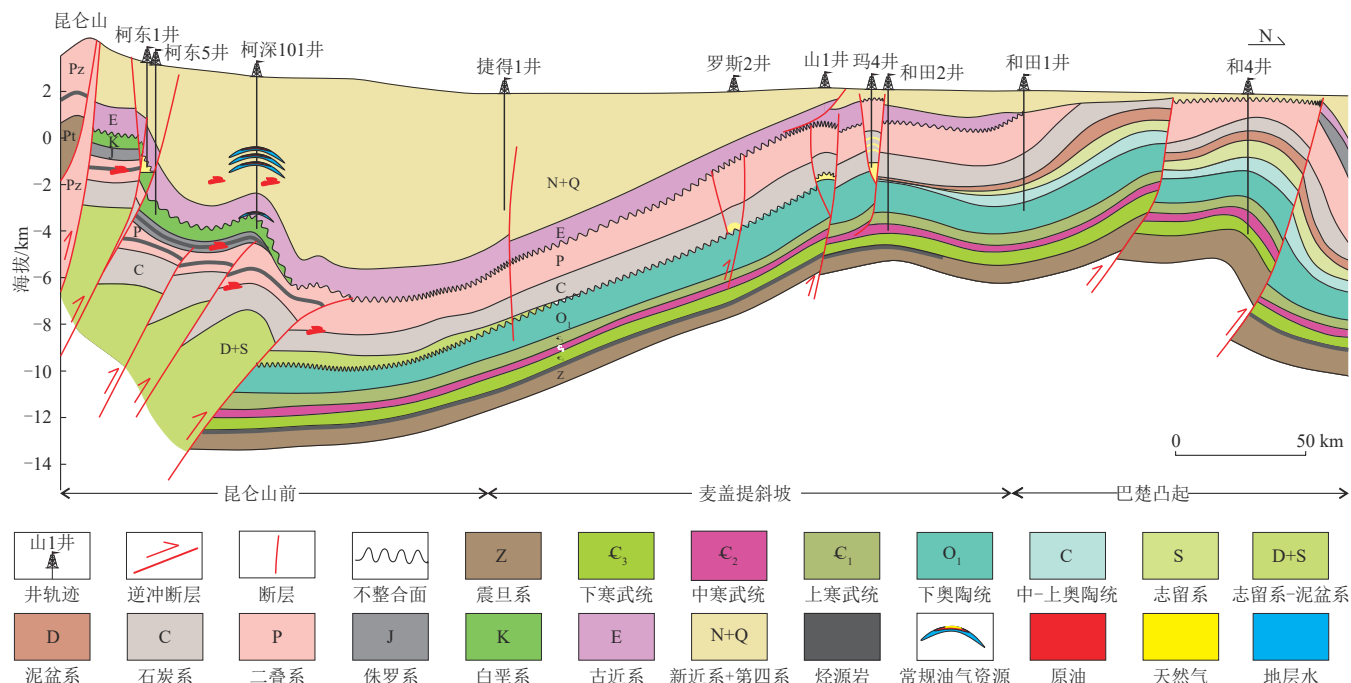


图4 塔里木盆地西南坳陷全油气系统剖面示意图

Fig. 4 Schematic cross-section of the WPS in the Southwest Tarim Depression

分析认为,塔里木盆地油气主要来源于寒武系烃源岩^[20]。Huang Wenyu等采用金刚石分馏技术对柯克亚地区的凝析油样品开展研究,发现该区经历了多期油气充注,其主力供烃层系包括二叠系与侏罗系^[21]。此外,叶探1井在二叠系取得的致密油气和页岩油气突破进一步验证了二叠系为有效生烃层系^[1]。张继超等基于石炭系-二叠系沉积特征及烃源岩评价,认为除二叠系外,石炭系深埋高熟烃源岩对塔西南坳陷油气供给也存在重要贡献^[22]。

通过对塔西南坳陷古近系天然气碳同位素特征的系统分析发现,该区天然气具有煤成气与油型气混合成因的特征(图6a)。甲烷、乙烷、丙烷与丁烷的碳同位素组成对比表明,古近系天然气与深部二叠系天然气在同位素特征上高度相似(图6b)。正构烷烃是饱和烃馏分中的主要组分,主要来源于生物体中以偶数碳原子优势存在的脂肪酸、脂肪醇及蜡质类化合物^[23]。对石炭系、二叠系、侏罗系与古近系的岩石抽提物与原油样品进行正构烷烃分布特征对比分析显示,二叠系与古近系样品在正构烷烃谱型上表现出高度一致性,均呈现“前锋型”分布特征(图6c),且多数原油样品在 C_{14} 之前的正构烷烃含量更高,同时保留明显的奇偶优势。甾烷作为重要的生物标志化合物,其结构保留了生物前体胆固醇的特征^[23]。对古近系原油、沥青和烃源岩抽提物中的 C_{27} - C_{28} - C_{29} 3种甾烷进行三元图对比分析发现,其主要分布于海相碳酸盐岩演化区,个别样品表现出湖相沉积特征(图6d)。综上所述,多种有机地球化学指标共同验证了塔西南坳陷存在多套有效烃源岩供烃。

2.2 多烃源岩层供烃评价

综合前人研究结果与地球化学分析结果表明,塔

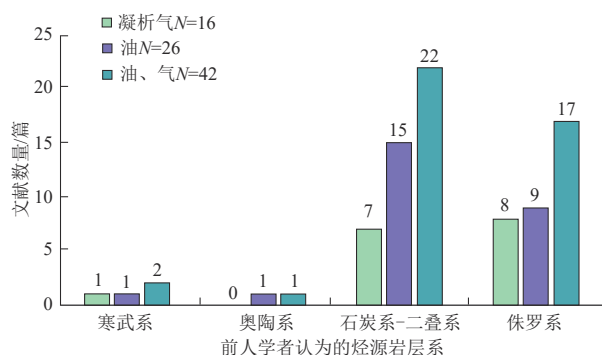


图5 塔里木盆地西南坳陷古近系-新近系油气来源文献篇数(N)统计柱状图

Fig. 5 The Paleogene-Neogene hydrocarbon sources in the Southwest Tarim Depression

西南坳陷的全油气系统为典型的多源供烃体系,其主要由寒武系、石炭系、二叠系和侏罗系等4套关键烃源岩层系组成。寒武系玉尔吐斯组以Ⅱ-Ⅲ型干酪根为主,有机质主要为藻类-腐殖混合型,该组烃源岩总有机碳含量(TOC)多集中在1.0%~5.0%,氢指数(HI)主要分布在200~500 mg/g,具备良好的生烃潜力,热演化阶段处于成熟-高成熟阶段(图7a₁, a₂)。石炭系卡拉沙依组干酪根类型以Ⅱ-Ⅲ型为主,有机质类型同样为腐殖-藻类混合型,TOC集中于0.8%~2.0%,HI分布在100~300 mg/g,反映其具备中等生烃潜力,热演化程度较高,处于高成熟-过成熟阶段(图7b₁, b₂)。二叠系烃源岩以Ⅱ-Ⅲ型干酪根为主,TOC主要集中在0.3%~1.2%,HI值普遍低于150 mg/g,生烃潜力相对较弱,已进入过成熟演化阶段(图7c₁, c₂)。侏罗系烃源岩干酪根类型为Ⅱ-Ⅲ型,TOC分布范围较广(0.5%~10.0%),HI主要集于200~500 mg/g,具有较强生烃潜力,其热演化程度处于成熟-过成熟阶段(图7d₁, d₂)。

在空间分布上(图8),寒武系玉尔吐斯组烃源岩主要发育于昆仑山前的震旦系楔形体及麦盖提斜坡内侧,整体受早加里东构造活动控制^[24],呈北、东向展布,厚度可达400 m。石炭系卡拉沙依组沉积于碳酸盐岩与砂-泥岩互层的混积斜坡体系中,在海侵背景下由西北向东南前积展布,沉积中心位于昆仑山前,厚度约200 m。二叠系烃源岩分布广泛,早期受海侵影响,晚期发生由东向西的海退^[25-26]。受构造基底和古海洋演化控制,目前以新藏公路为界,其西侧下二叠统为海相沉积,东侧则发育以湖相暗色泥岩为主的普斯格组烃源岩,主要分布于柯东-柯克亚与苏盖特构造带,最大厚度可达800 m。侏罗系烃源岩受中生代断陷盆地发育控制,呈北西向条带状零星展布^[25],分布于西昆仑与南天山山前冲断带内,沉积中心位于甫沙构造带,以暗色泥岩与煤系地层为主,最大厚度约420 m。

油气藏的发育范围与烃源岩的生烃强度、排烃强度及排烃中心位置密切相关。烃源岩排烃强度越大,距排烃中心越近,油气藏发育概率越大^[27-28]。本文采用岩石热解参数对生烃潜力与排烃潜力进行定量计算,具体方法参见Tao Hu (2021)^[29]。

计算结果表明,寒武系、石炭系与二叠系烃源岩为塔西南坳陷主要的烃量贡献层系。石炭系烃源岩在等效镜质体反射率(R_o)分别为0.75%和1.40%时达到烃生成和排出阈值,其累计生烃量为 286.32×10^8 t,累计排烃量为 252.88×10^8 t,排烃中心分布于喀什构造带周缘。二叠系烃源岩在 R_o 为0.67%和1.33%时达到烃生成和排出阈值,累计生烃量为 274.68×10^8 t,累计

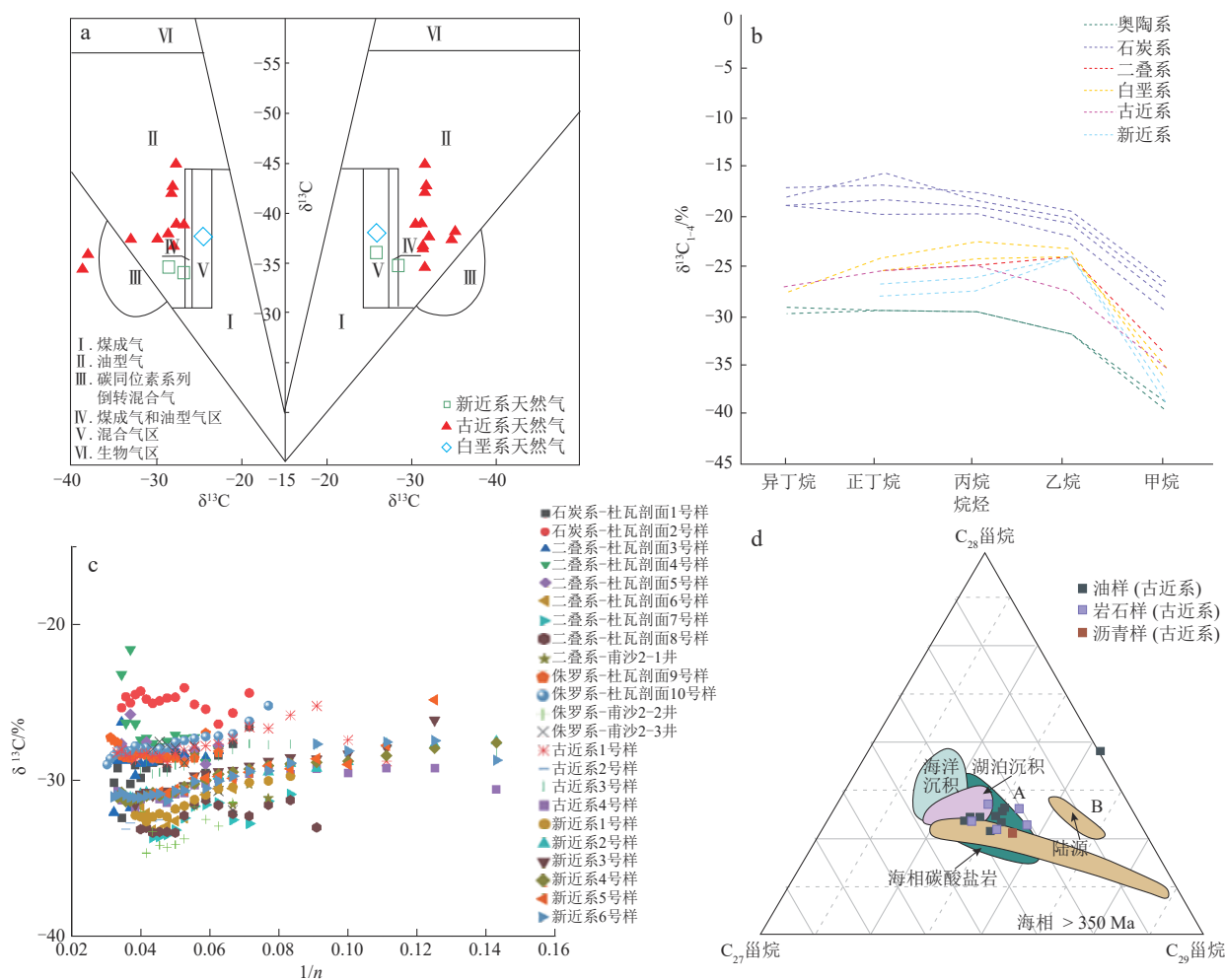


图6 塔里木盆地西南坳陷多来源原油和天然气地球化学特征对比

Fig. 6 Comparison of geochemical characteristics of crude oil and natural gas from multiple sources in the Southwest Tarim Depression
a. 天然气成因类型判别图版(碳同位素钟氏图); b. 甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷与异丁烷的碳同位素变化趋势; c. 原油正构烷烃碳同位素特征; d. 原油与烃源岩沉积环境判别图版

$\delta^{13}\text{C}$. 碳同位素值; $\delta^{13}\text{C}_1$. 甲烷碳同位素值; $\delta^{13}\text{C}_2$. 乙烷碳同位素值; $\delta^{13}\text{C}_3$. 丙烷碳同位素值; $\delta^{13}\text{C}_4$. 丁烷碳同位素值; n . 正构烷烃碳数; A. 非海相藻类有机质生成的原油; B. 陆相有机质(高等植物)生成的原油

排烃量为 $97.74 \times 10^8 \text{ t}$, 排烃中心主要位于喀什构造带及柯克亚构造带周缘。侏罗系烃源岩在 R_o 为 0.75% 和 1.25% 时分别达到烃生成和排出阈值, 总生烃量为 $20.18 \times 10^8 \text{ t}$, 排烃量仅为 $1.00 \times 5.46^8 \text{ t}$ 。Hu Yao 等^[30] 对寒武系玉尔吐斯组烃源岩开展了定量评估, 结果表明, 该组烃源岩在 R_o 为 0.46% 和 0.72% 时达到烃生成和排出阈值, 累计生烃量为 $68.88 \times 10^{10} \text{ t}$, 排烃量为 $35.59 \times 10^{10} \text{ t}$ 。图9展示了石炭系、二叠系和侏罗系烃源岩在平面上的生烃与排烃强度分布特征, 为多源复合成藏提供了物质基础。

2.3 多期次成藏预测

塔西南坳陷油气藏的形成受多期构造运动与油源断裂的控制, 呈现显著的多期次油气充注特征。古生界

储层受印支期高角度逆冲断裂的影响, 形成多组叠瓦式冲断构造, 后经喜马拉雅期构造运动叠加改造, 构造格局趋于复杂。塔西南地区皮山北1井的埋藏史与热史拟合结果^[31](图10)表明, 寒武系玉尔吐斯组烃源岩在加里东期达到最大埋深和最高温度, 对应的 R_o 约为 2.00%, 处于过成熟阶段。石炭系-二叠系烃源岩在海西晚期进入最大埋深阶段, 对应的 R_o 约为 1.25%, 其热演化程度与塔中地区基本一致。侏罗系烃源岩则于晚印支期—燕山期达到生烃与排烃高峰期, R_o 约为 1.10%。

塔西南坳陷的油气充注时序性与多套烃源岩的生-排烃高峰期及构造阶段高度耦合。古近系储层中流体包裹体的相变温度特征表明该区经历了两期油气充注事件。第一期充注的包裹体均一温度为 $75 \sim 90^\circ\text{C}$, 代表古油藏的形成, 充注时期可限定在上新世

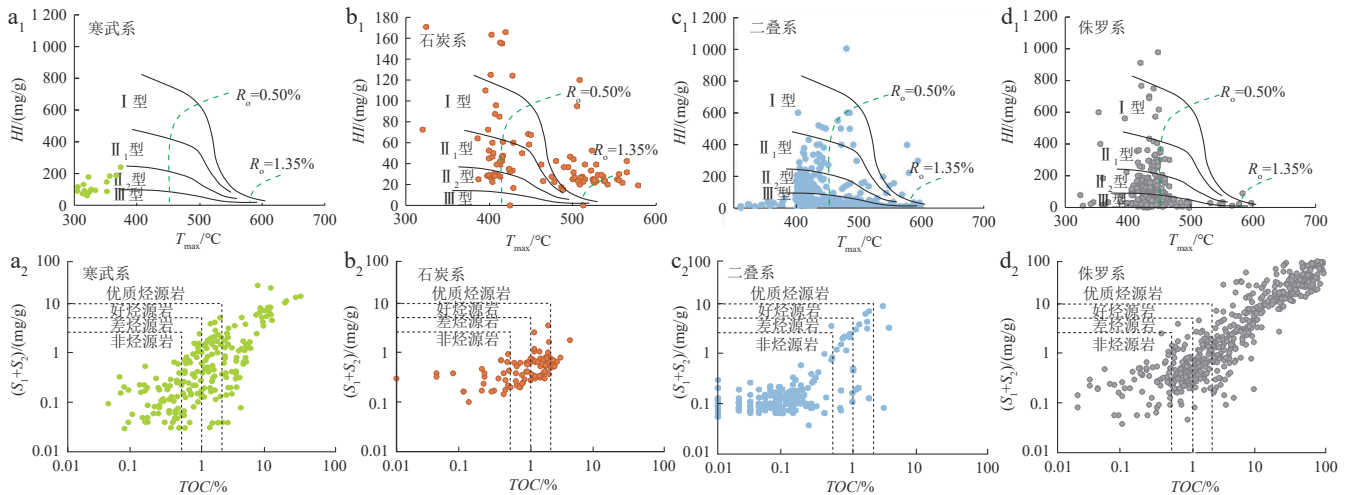


图7 塔里木盆地西南坳陷各套烃源岩有机质类型及生烃潜力

Fig. 7 Organic matter types and hydrocarbon generation potential of various source rock formations in the Southwest Tarim Depression

a₁—d₁. 分别为寒武系、石炭系、二叠系和侏罗系的有机质类型判别图版; a₂—d₂. 分别为寒武系、石炭系、二叠系和侏罗系的生烃潜力判别图版

(HI为氢指数; T_{max} 为最高热解峰温; S_1 为游离烃含量; S_2 为裂解烃含量; S_1+S_2 为生烃潜力; TOC为总有机碳含量。)

中晚期;第二期包裹体相变温度升高至105~110℃,对应更新世早期的再充注事件(图11)。

2.4 多动力成藏分析

塔西南坳陷全油气系统的形成过程表现为沉积演化、构造变形与多期次烃源岩排烃事件高度耦合,由此驱动多动力成藏及油气藏空间分布序列。在全油气系统中早期处于低成熟阶段的烃源岩其生烃能力不足,尚未达到生烃饱和阈值,烃类主要滞留于烃源岩内部,形成以吸附与赋存为主的束缚动力场,相应形成页岩油气等非常规资源类型。随着热演化程度提高,烃类逐渐向近源高孔隙-高渗透储层富集,形成局限动力场,后经埋藏逐渐演化为致密油气资源。而当有机质进一步成熟,并伴随持续沉积与构造深埋导致储集空间收缩,同时构造深埋增强断裂发育,烃类沿断裂和不整合面等通道长距离运移至远端圈闭,形成自由动力场,发育常规油气藏。这一连续过程伴随压实-成岩作用,使部分孔喉系统连通性退化,通道壁吸附与毛细管束缚效应共同作用,导致部分烃类长期滞留在烃源岩内。

以柯克亚地区卡拉塔尔组为例,该区发育典型的多源复合供烃油气藏,碳酸盐岩源岩在深埋阶段经历重结晶及构造改造,与泥岩和煤系烃源岩相比在孔隙演化及储集空间形成机制上存在显著差异。白云岩因易受溶蚀与构造破碎作用影响,形成以鲕粒溶蚀孔和晶间孔为主的储集空间及纵向运移通道^[32-33]。如图12所示,白云岩段孔隙度整体高于灰岩段,且油气分布广

泛跨越不同孔-渗组合区间,表明油气并非仅赋存在传统高孔-高渗储层中。卡拉塔尔组 R_o 为0.56%~0.70%,处于生油窗初始阶段,有机酸溶蚀与生烃增压尚未形成连通网络,因此外源油气仅在高渗通道内进入储层,极少量突破毛细管束缚进入致密区。柯克亚地区深部油源通过构造与溶蚀改造形成两种典型油气赋存模式:常规“四高-分离”型,高点汇聚、高位封盖、高孔富集、高压封存、源-储分离;非常规“四低-紧邻”型:低凹汇聚、低位倒置、低孔聚集、低压稳定、源-储邻近^[34]。根据储层物性及油气分布特征,卡卡拉塔尔组可划分为4类储层类型:I型高孔-高渗自由动力场储层,浮力成藏(占比28%);II型低孔-高渗应力改造储层,局限动力场非浮力成藏(占比41%);III型高孔-低渗溶蚀改造储层,局限动力场非浮力成藏(占比9%);IV型低孔-低渗束缚动力场储层,非浮力成藏(占比22%)。

3 多源复合全油气系统油气成藏类别及其演化模式

3.1 自由动力场烃源岩层排出烃形成常规油气藏

以柯克亚油田为典型研究对象,其主力油气藏分别是浅层新近系西河甫组凝析气藏和深层古近系卡拉塔尔组凝析气藏。浅层西河甫组发育一套碎屑岩储层,主要岩性包括细砂岩、粉砂岩、砂质泥岩、中-粗粒砂岩和砾岩。西河甫组由上至下共划分为西一段(X_1)—西九段(X_9)共9个层段,其中西四段(X_4)、西五段(X_5)和

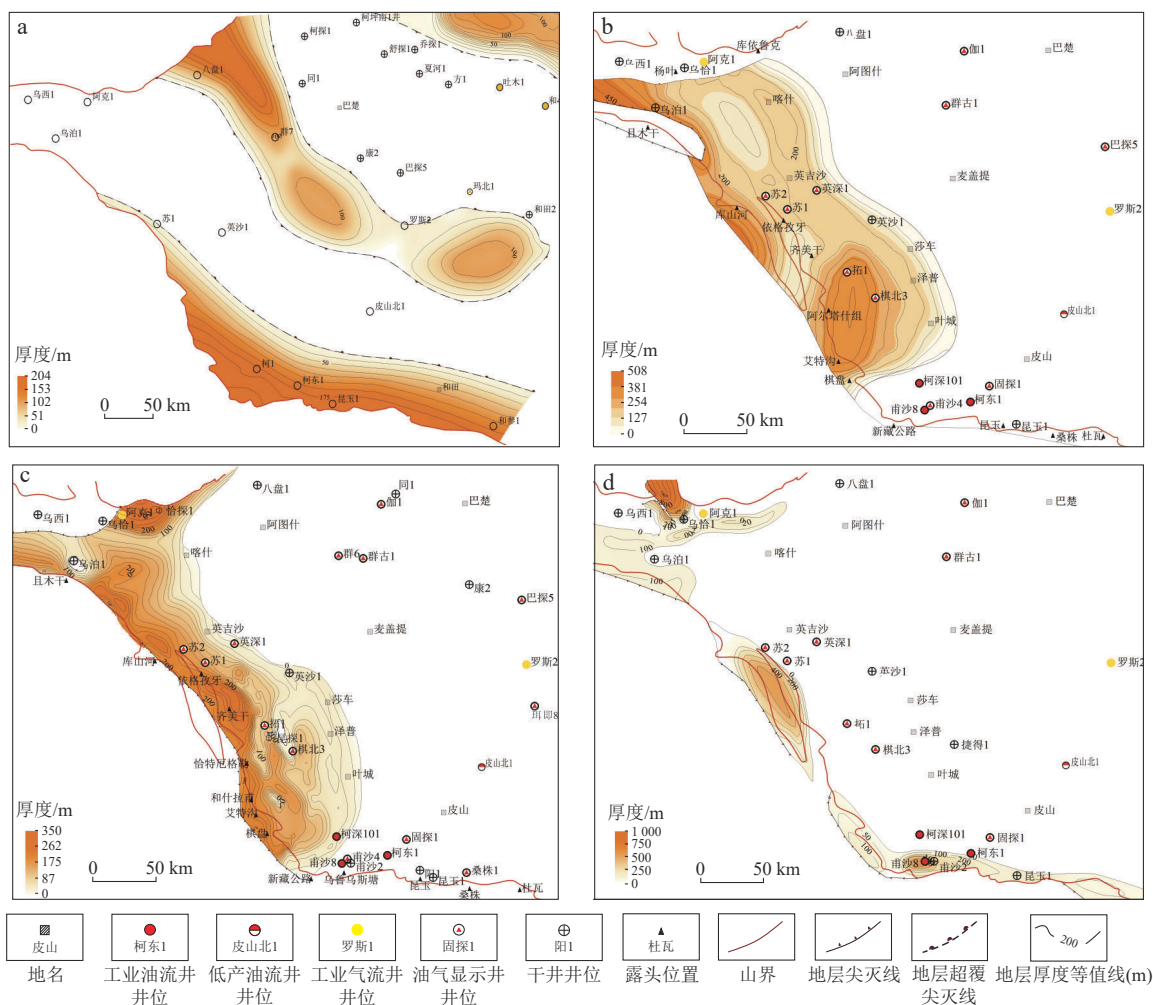


图8 塔里木盆地西南坳陷主要烃源岩厚度分布等值线图

Fig. 8 Isopach maps of major source rock formations in the Southwest Tarim Depression

- a. Thickness map of the Cambrian Yurtus Formation source rocks; b. Thickness map of the Carboniferous source rocks; c. Thickness map of the Permian Qipan Formation source rocks; d. Thickness map of the Jurassic source rocks
a. 寒武系玉尔吐斯组; b. 石炭系; c. 二叠系棋盘组; d. 侏罗系

西七段(X_7)可细分为两个亚段^[35]。根据储层物性统计(图13a), X_4 和 X_5^1 主要发育低孔-低渗致密砂岩; X_5^2 表现出典型高孔-高渗特征,属于优质常规储层; X_6 , X_7^1 和 X_7^2 以常规砂岩储层为主; X_8 则为致密储层。深部烃类沿区域性油源断裂向上运聚至各储层空间。研究表明,柯克亚地区浮力主导的油气成藏埋深下限约为4 000 m^[10],该深度以上以自由动力场为主导,油气藏呈现明确的油-气-水界面特征(图13b),圈闭相互独立,主要储层为高孔-高渗的 X_6 - X_7^2 ,是典型的自由动力场控制下的常规油气藏系统。

3.2 局限动力场烃源岩层排出烃形成致密油气藏

柯克亚凝析气田在浮力成藏下限之下为局限动力场,主要发育致密油气藏。该类油气藏常表现为“低凹

汇聚、低位倒置、低孔聚集、低压稳定”的“四低”特征^[14]。柯克亚地区致密储层埋深多大于3 600 m,油气分布于多尺度孔隙系统中,油-气-水层边界不明显(图14b),油气主要沿深部油源断裂输导,进入西河甫组和下部卡拉塔尔组的致密砂岩储层,在局限动力场控制下形成致密油气藏。

3.3 束缚动力场烃源岩层滞留烃形成页岩油气藏

塔西南坳陷油气地质条件优越,发育有寒武系、石炭系、二叠系和侏罗系等多套优质烃源岩。当烃源岩在生、排烃演化过程中,部分烃类因未突破生、排烃阈值或动力不足而滞留于烃源岩内部,即可在束缚动力场内形成页岩油气藏。图14展示了塔西南坳陷恰探1井中,二叠系棋盘组页岩油气藏和常规油气藏的共生组合关

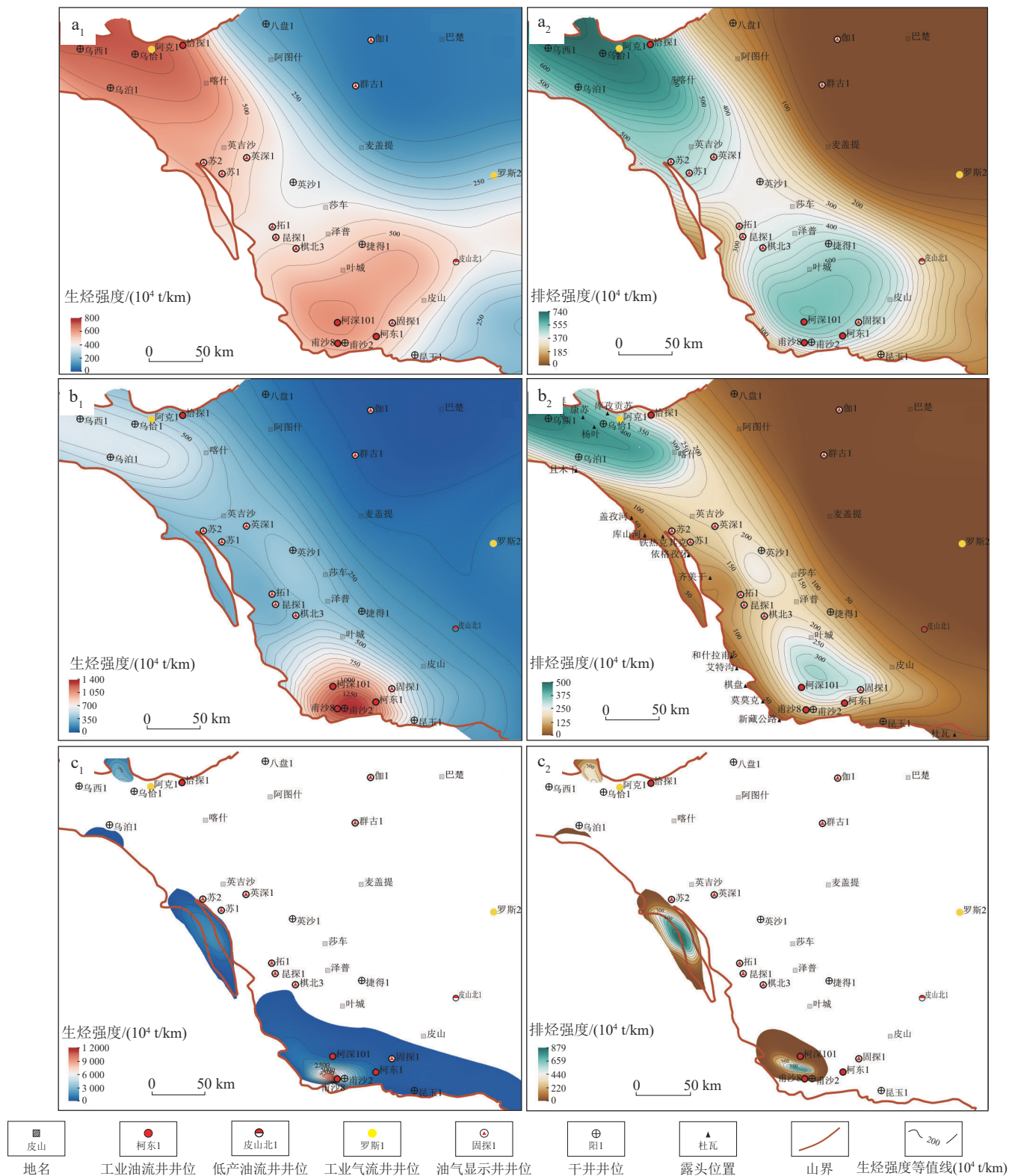


图9 塔里木盆地西南坳陷烃源岩生烃与排烃强度分布

Fig. 9 Contour maps of hydrocarbon generation and expulsion intensities of source rocks in the Southwest Tarim Depression

a₁—c₁. 分别为石炭系、二叠系和侏罗系的生烃强度等值线图; a₂—c₂. 分别为石炭系、二叠系和侏罗系的排烃强度等值线图

系,其特征包括:源-储共生、连续分布、缺乏明显油-水界面等。烃源岩内部的束缚动力场抑制了油气运移,促使烃类长期滞留,从而形成页岩型油气藏。

3.4 改造动力场改善储层物性形成改造类油气藏

2023年3月,叶探1井在柯东构造带二叠系普斯

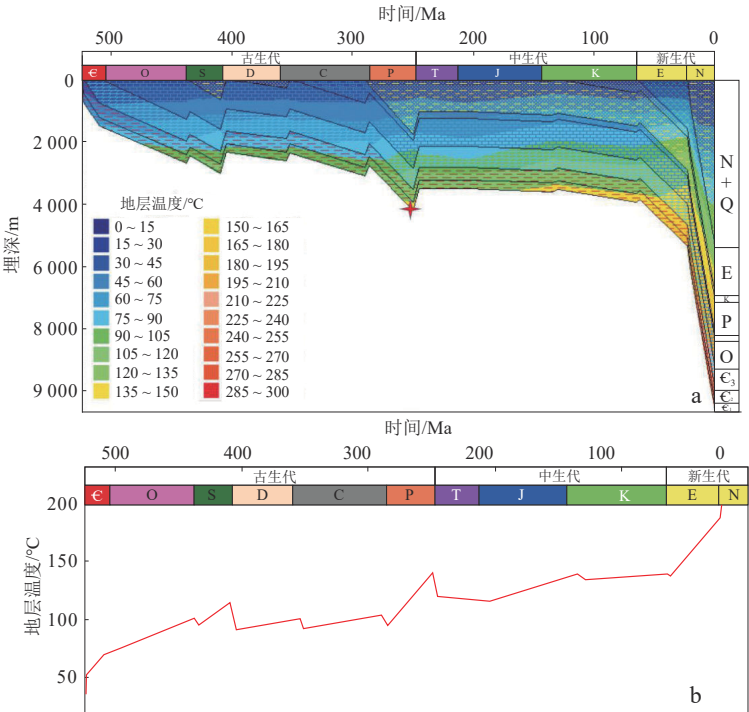


图 10 塔里木盆地西南坳陷皮山北 1 井埋藏史与热演化史特征^[31]
Fig. 10 Burial history and thermal evolution characteristics of well Pishanbei-1, southwestern Tarim Basin^[31]
a. 埋藏史与热演化史;b. 埋藏温度演化曲线

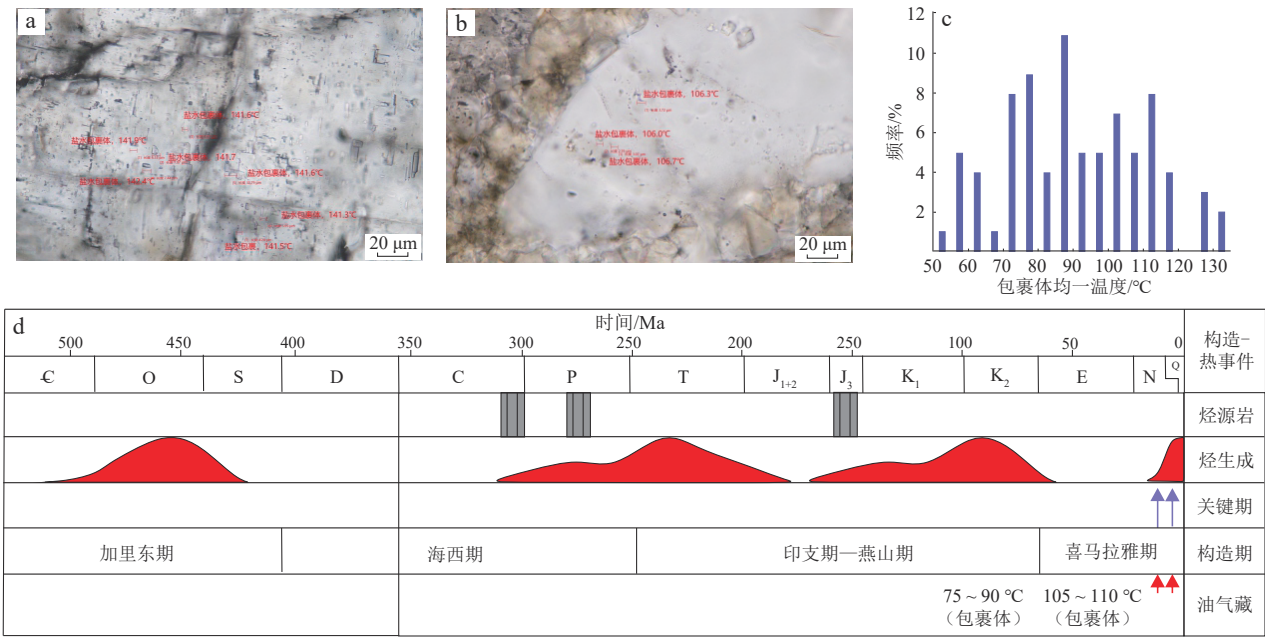


图 11 塔里木盆地西南坳陷热史与油气成藏期的耦合关系
Fig. 11 Coupling relationships between thermal history and hydrocarbon accumulation stages in the Southwest Tarim Depression
a. 烃类伴生包裹体,KZ106井,卡拉塔尔组,普通薄片镜下照片;b. 烃类伴生包裹体,KZ201井,卡拉塔尔组,普通薄片镜下照片;c. 卡拉塔尔组盐水包裹体均一温度频率分布直方图;d. 热史、构造演化史与成藏期的耦合关系

格组砂岩储层获得重大油气发现^[1]。塔里木盆地位于特提斯富油气构造域中段,古特提斯洋的开启为塔西南坳陷提供了丰富的油气物质基础。古近纪以来,随着新特提斯洋的闭合,山前带发生强烈挤压与冲断变形,尤其是喜马拉雅期逆冲断裂体系发育和印支期断裂再活动,导致塔西南坳陷山前地带断裂异常发育,断

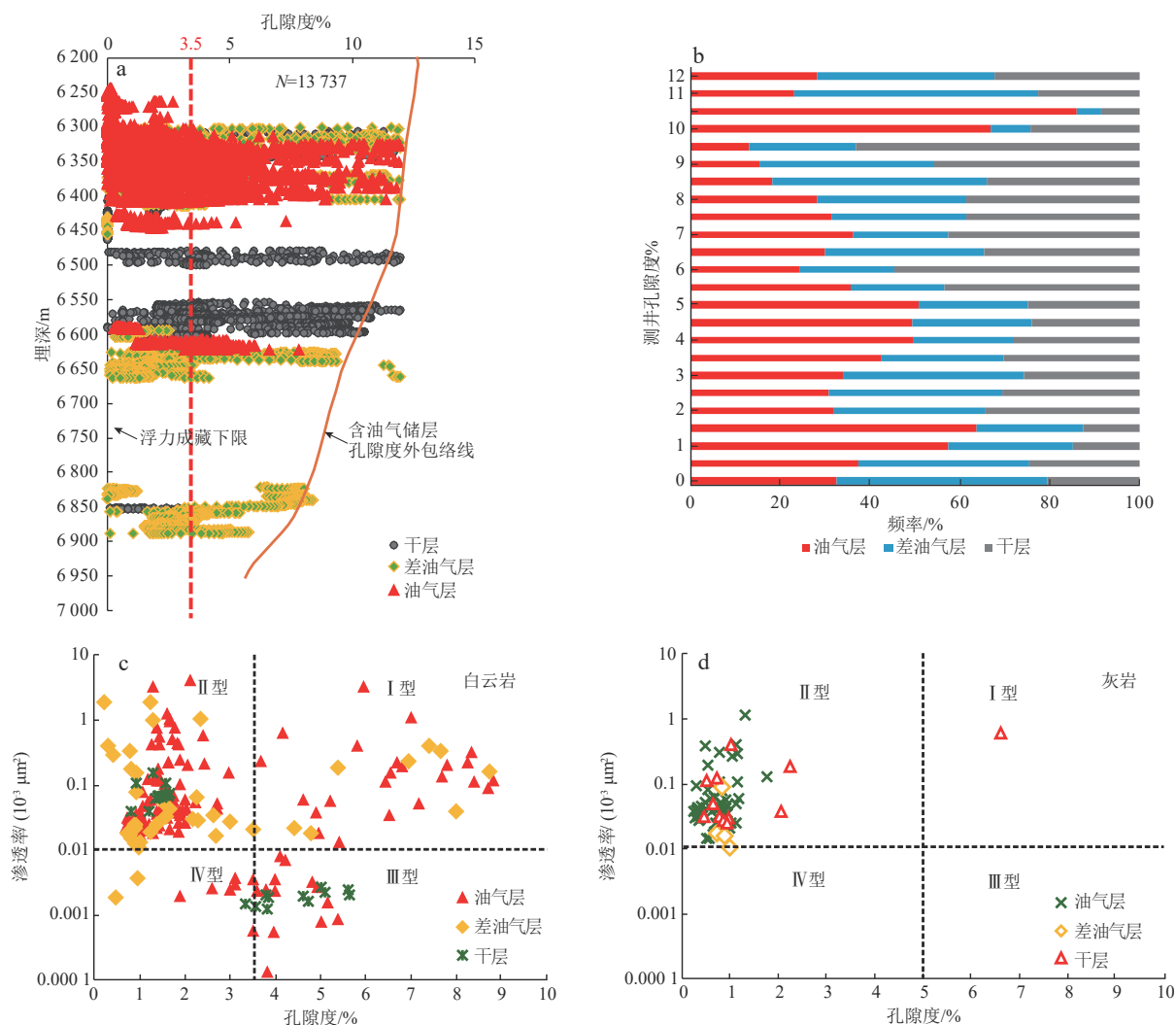


图12 塔里木盆地西南坳陷卡拉塔组储层孔隙度和渗透率与含油气性关系

Fig. 12 Relationships of porosity and permeability with hydrocarbon-bearing properties of reservoirs in the Kalatar Formation, Southwest Tarim Depression

a. 孔隙度与含油气性随埋深的变化; b. 不同孔隙度储层含油气性条形图; c. 白云岩段储层孔隙度、渗透率与含油气性关系; d. 灰岩段储层孔隙度、渗透率与含油气性关系

I型. 高孔-高渗自由动力场储层浮力成藏; II型. 低孔-高渗应力改造储层, 局限动力场非浮力成藏; III型. 高孔-低渗溶蚀改造储层, 局限动力场非浮力成藏; IV型. 低孔-低渗束缚动力场储层, 非浮力成藏

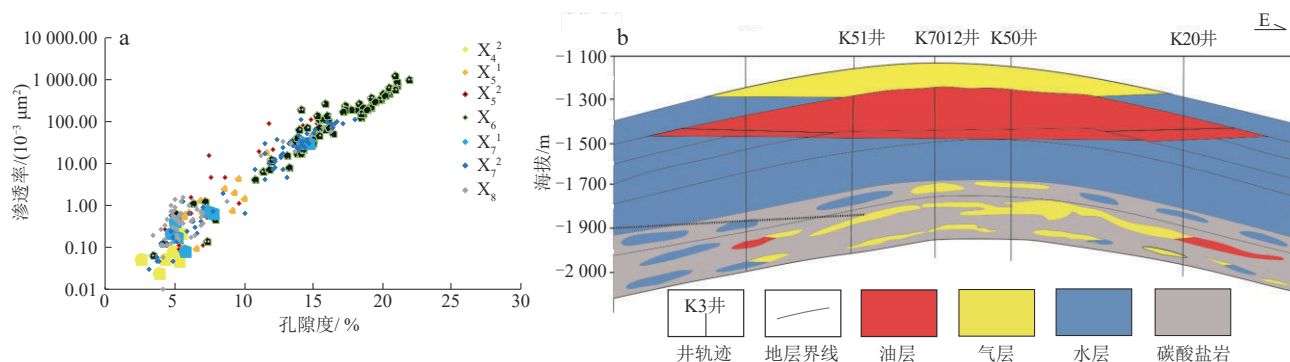
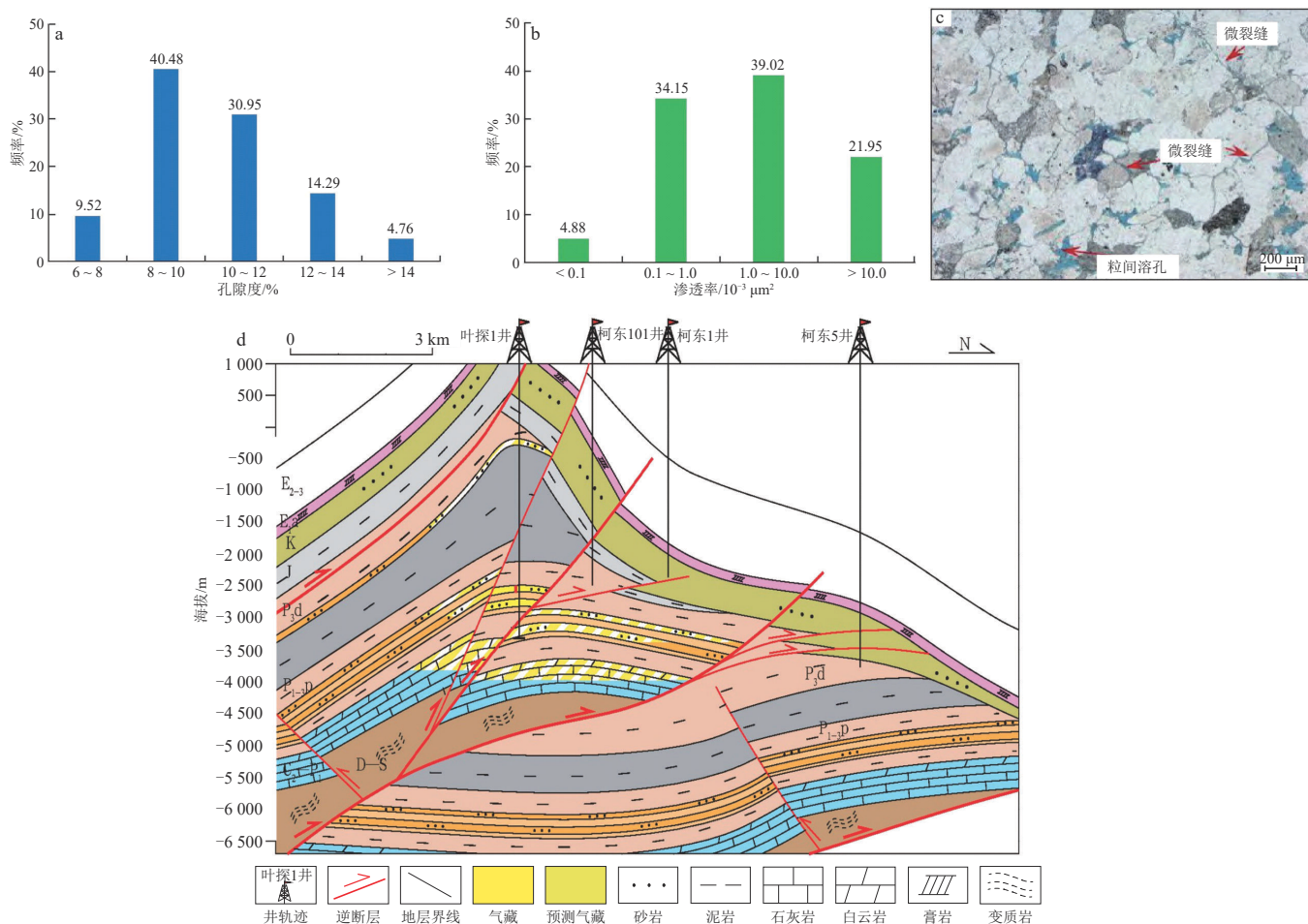


图13 塔里木盆地西南坳陷柯克亚地区西河甫组凝析气田储层物性特征(a)及油-气-水分布特征(b)

Fig. 13 Reservoir physical properties and oil-gas-water distribution characteristics of the condensate gas field in the Xihefu Formation, Kekeya area, Southwest Tarim Depression

a. 储层孔隙度与渗透率特征; b. 油藏剖面示意图

图15 塔里木盆地西南坳陷叶探1井油气藏特征^[1]Fig. 15 Characteristics of hydrocarbon reservoirs in well Yetan-1, Southwest Tarim Depression^[1]

a. 孔隙度频率分布直方图; b. 渗透率频率分布直方图; c. 储层样品铸体薄片显微照片; d. 油气藏成藏模式

D-S. 泥盆系-志留系; P_{1-3p}. 二叠系普斯格组; P_{3d}. 二叠系杜瓦组; C₂-P₁. 石炭系小海子组—二叠系克孜里奇曼组; J. 侏罗系; K. 白垩系; E_{1a}. 古近系阿尔塔什组; E₂₋₃. 古近系巴什布拉克组

油气包裹体,为早期充注,此时储层埋深较浅,以浮力成藏为主。

更新世早期,柯东断裂切割构造带,构造挤压强烈,甫沙背斜被断裂分割为几个断块;与此同时二叠系烃源岩进入生烃高峰,原油充注柯东构造带,驱替了石炭系生成的少量油型气向上运移并发生逸散。由于柯克亚构造带断裂系统发育程度不及柯东构造带,大量原油及天然气的聚集造成异常高压,当超压突破断裂的承受极限,古近系和新近系间的古断裂系统被开启,古近系和白垩系油气藏沿断裂运移至新近系,新近系储层捕获的 105 ~ 110 °C 的油气包裹体证实了这一过程。之后侏罗系烃源岩进入低成熟阶段,并逐步充注古近系和白垩系,包裹体均一温度达 120 ~ 140 °C,指示晚期致密气聚集过程。

至今,二叠系烃源岩已进入过成熟阶段,而侏罗系烃源岩尚处于成熟早期,储层内部存在多期油气充注

与混合想象。构造作用造成大规模断裂发育,既调控已有油气藏,也改造储层物性,形成典型的改造成藏特征。

4 结论

1) 多源复合型油气藏具有显著的混源充注特征。研究区寒武系、石炭系、二叠系与侏罗系等多套优质烃源岩时空上呈叠置分布,烃源岩类型多样、热演化程度差异,形成多层供烃、复合排烃的全油气系统供烃格局。同位素与生物标志化合物分析表明,石炭系和二叠系等多层烃源岩存在混源充注过程,油气藏内体现出多源复合、连续成藏与叠加演化的复合特征。

2) 多期构造叠加控制油气运聚路径与成藏时序。自加里东期以来的多阶段构造演化形成了区域性的高

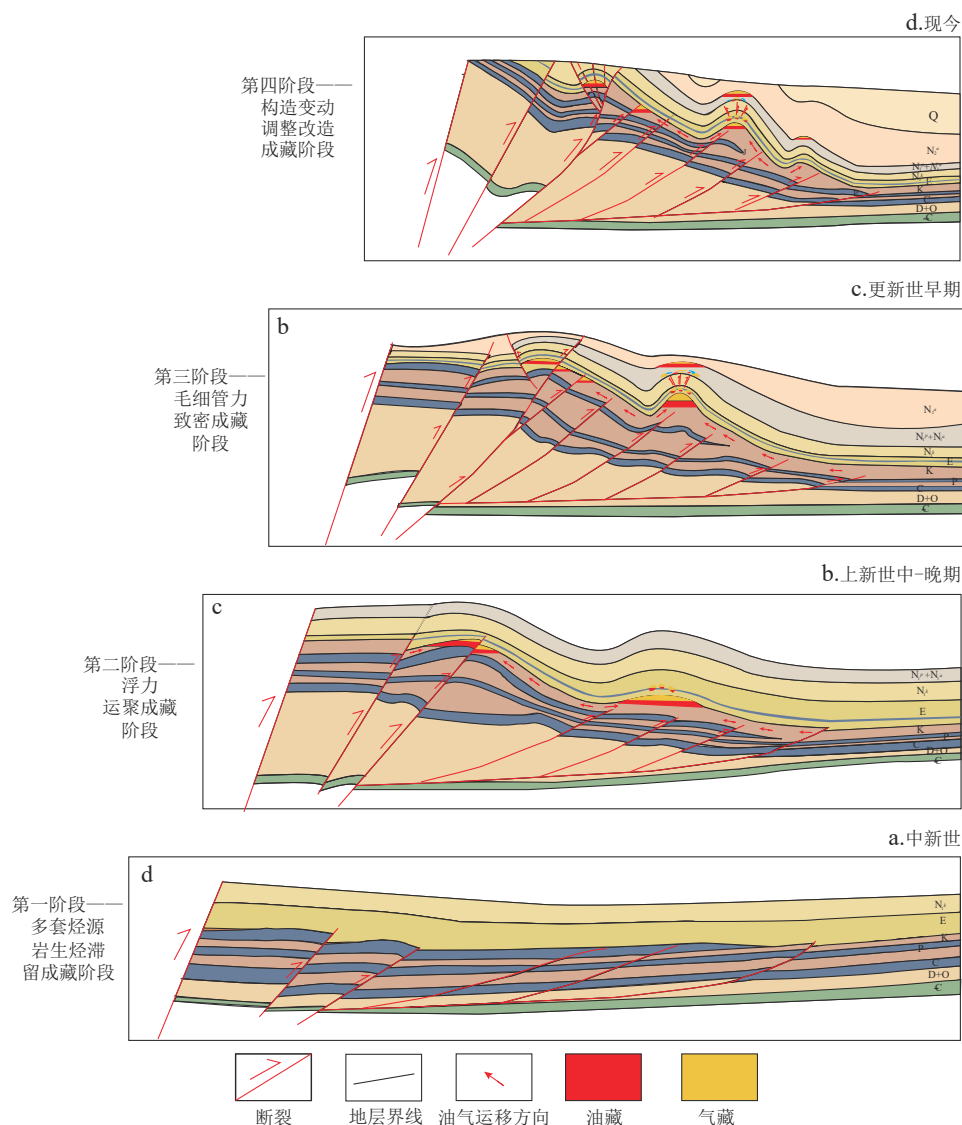


图16 塔里木盆地西南坳陷多源复合全油气系统油气运聚成藏演化模式

Fig. 16 Evolutionary pattern of hydrocarbon migration and accumulation in the multi-sourced composite WPS of the Southwest Tarim Depression

C. 寒武系; D+O. 泥盆系+奥陶系; C. 石炭系; P. 二叠系; K. 白垩系; E. 古近系; N_1k . 新近系克孜尔组; N_1p+N_1a . 新近系帕卡布拉克组-安居安组; N_2a . 新近系阿图什组; Q. 第四系

角度逆冲断裂与叠瓦推覆体系, 不仅为油气垂向运移和成藏提供动力与通道, 也在后期叠加改造中控制油气再分布与成藏。同时, 构造-热演化协同控制油气在不同层系的分布与富集。

3) “常规-非常规”油气在空间上呈现有序聚集, 且表现出强烈的系统复合性。油气富集受控于生-储-盖组合、断裂系统发育程度与成藏动力场的时空演化耦合。常规油气藏主要发育于高孔-高渗储层中, 其成藏机制以浮力为主导、断裂系统为主要输导通道, 常伴有构造叠加改造。非常规油气藏多以原地成藏为特征, 赋存于低孔-低渗致密储层或烃源岩中, 成藏过程受控于毛细管力、吸附力及生烃增压作用。整

体上, 该油气系统表现出多类型油气藏复合发育、多机制协同驱动的成藏模式。

参考文献

- [1] 王清华, 杨海军, 李勇, 等. 塔西南山前地区柯克亚周缘叶探1井油气勘探重大突破及意义[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(4): 1-16.
WANG Qinghua, YANG Haijun, LI Yong, et al. Major oil and gas discovery and significance of Well Yetan 1 in the peripheral Kekeya area in the piedmont of the southwestern Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(4): 1-16.
- [2] 刘军, 田雷, 杨丽莎, 等. 塔里木盆地塔西南坳陷古生界成藏条件特殊性与油气勘探意义[J]. 天然气工业, 2023, 43(9):

- 61-72.
- LIU Jun, TIAN Lei, YANG Lisha, et al. Particularity of Paleozoic hydrocarbon accumulation conditions in the southwest Tarim Depression and its implications for petroleum exploration [J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(9): 61-72.
- [3] 黄礼, 赵颖, 吕惠贤, 等. 塔里木盆地西南山前坳陷恰探1井二叠系天然气成因和来源[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(6): 1286-1297.
- HUANG Li, ZHAO Ying, LYU Huixian, et al. Genesis and source of Permian natural gas in Well Qitan-1 of piedmont depression, southwestern Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2024, 46(6): 1286-1297.
- [4] 崔海峰, 田雷, 张年春, 等. 塔西南坳陷南华纪—震旦纪裂谷分布及其与下寒武统烃源岩的关系[J]. *石油学报*, 2016, 37(4): 430-438.
- CUI Haifeng, TIAN Lei, ZHANG Nianchun, et al. Nanhua-Sinian rift distribution and its relationship with the development of Lower Cambrian source rocks in the southwest depression of Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(4): 430-438.
- [5] 侯啓东, 任收麦, 郭天旭, 等. 塔里木盆地西南坳陷二叠系页岩油气地质条件分析[J]. *西北地质*, 2020, 53(1): 168-177.
- HOU Qidong, REN Shoumai, GUO Tianxu, et al. Analysis of geological conditions of Permian shale oil and gas in the southwestern depression of the Tarim Basin, northwest China [J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(1): 168-177.
- [6] 胡伟, 徐婷, 杨阳, 等. 塔里木盆地超深油气藏流体相行为变化特征[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(4): 1044-1053.
- HU Wei, XU Ting, YANG Yang, et al. Fluid phases and behaviors in ultra-deep oil and gas reservoirs, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(4): 1044-1053.
- [7] 肖文韬, 吕修祥, 白忠凯, 等. 塔西南坳陷侏罗系泥页岩特征及页岩气潜力分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(增刊2): 491-501.
- XIAO Wenyao, LYU Xiuxiang, BAI Zhongkai, et al. Characteristics of Jurassic shales and potential of shale gas in southwest depression of Tarim Basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(S2): 491-501.
- [8] 崔海峰, 刘江丽, 田雷, 等. 塔西南坳陷震旦纪末古构造格局及其油气意义[J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(4): 67-75.
- CUI Haifeng, LIU Jiangli, TIAN Lei, et al. Palaeotectonic pattern at the end of Sinian and its hydrocarbon significance in the southwest depression of Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(4): 67-75.
- [9] 崔海峰, 田雷, 刘军, 等. 塔西南坳陷奥陶纪构造活动与油气成藏[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(4): 834-840, 850.
- CUI Haifeng, TIAN Lei, LIU Jun, et al. Ordovician tectonic activities and oil and gas accumulation in the Southwest Depression of Tarim Basin [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(4): 834-840, 850.
- [10] 孙耀玺, 庞雄奇, 成湘, 等. 复杂叠合盆地油气动力场划分及其与勘探的关系——以塔西南坳陷为例[J]. *断块油气田*, 2025, 32(2): 185-192.
- SUN Yaoxi, PANG Xiongqi, CHENG Xiang, et al. Division of hydrocarbon dynamic field in complex superimposed basins and its relationship with exploration: A case study of southwest Tarim Depression [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2025, 32(2): 185-192.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 贾承造, 庞雄奇, 郭秋麟, 等. 基于成因法评价油气资源: 全油气系统理论和新一代盆地模拟技术[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1399-1416.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, GUO Qiulin, et al. Assessment of oil-gas resources based on genetic method: Whole petroleum system theory and new generation basin modeling technology [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1399-1416.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张蔚. 塔里木盆地西南坳陷油气运聚成藏过程及富集特征[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- ZHANG Wei. Hydrocarbon migration and accumulation and its enrichment characteristics in southwest depression of the Tarim Basin, NW China [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [17] 高永进, 尹成明, 刘丽红, 等. 塔里木盆地西北缘寒武系肖尔布拉克组烃源岩特征[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(4): 1064-1078.
- GAO Yongjin, YIN Chengming, LIU Lihong, et al. Characteristics of source rocks in the Cambrian Xiaerbulake Formation in the northwestern Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(4): 1064-1078.
- [18] 刘得光, 伍致中, 李勇广, 等. 塔里木盆地西南坳陷烃源岩评价[J]. *新疆石油地质*, 1997, 18(1): 50-53.
- LIU Deguang, WU Zhizhong, LI Yongguang, et al. Source rock evaluation in southwest depression of Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1997, 18(1): 50-53.
- [19] SHEN Weibing, ZHU Xiangkun, XIE Hongzhe, et al. Tectonic - sedimentary evolution during initiation of the Tarim Basin: Insights from late Neoproterozoic sedimentary records in the NW Basin [J]. *Precambrian Research*, 2022, 371: 106598.

- [20] HU Shouzhi, WILKES H, HORSFIELD B, et al. On the origin, mixing and alteration of crude oils in the Tarim Basin[J]. *Organic Geochemistry*, 2016, 97: 17–34.
- [21] HUANG Wenyu, YU Shuang, ZHANG Haizhu, et al. Diamondoid fractionation and implications for the Kekeya condensate field in the southwestern depression of the Tarim Basin, NW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 138: 105551.
- [22] 李士超. 塔里木盆地西南地区石炭—二叠系沉积特征与烃源岩评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- LI Shichao. Carboniferous-Permian's depositional characteristic and source rock evaluation in southwestern area, Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010.
- [23] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The biomarker guide: Volume 2: Biomarkers and isotopes in petroleum systems and earth history [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [24] 崔海峰, 田雷, 张年春, 等. 塔西南坳陷寒武系玉尔吐斯组烃源岩分布特征[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(4): 577–583.
- CUI Haifeng, TIAN Lei, ZHANG Nianchun, et al. Distribution characteristics of the source rocks from Cambrian Yuertusi Formation in the southwest depression of Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(4): 577–583.
- [25] 何剑, 王振宇, 孙崇浩, 等. 柯克亚地区卡拉塔尔组沉积特征及演化[J]. *断块油气田*, 2009, 16(6): 13–16.
- HE Jian, WANG Zhenyu, SUN Chonghao, et al. Sedimentary characteristics and evolution of Kalataer Formation of Paleogene System in Kekeya area[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2009, 16(6): 13–16.
- [26] 杨红强, 王振宇, 周成刚, 等. 柯克亚气田古近系卡拉塔尔组碳酸盐岩成岩作用及孔隙形成[J]. *重庆科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 12(3): 14–17.
- YANG Hongqiang, WANG Zhenyu, ZHOU Chenggang, et al. Carbonate diagenesis and porosity formation of the Kataer Formation (Tertiary) in Kekeya Gas Field, Tarim Basin [J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 12(3): 14–17.
- [27] 周杰, 庞雄奇. 一种生、排烃量计算方法探讨与应用[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(1): 24–27.
- ZHOU Jie, PANG Xiongqi. A method for calculating the quantity of hydrocarbon generation and expulsion [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(1): 24–27.
- [28] 郭旭升, 马晓潇, 黎茂稳, 等. 陆相页岩油富集机理探讨[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1333–1349.
- GUO Xusheng, MA Xiaoxiao, LI Maowen, et al. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1333–1349.
- [29] 李明, 王民, 张金友, 等. 中国典型盆地陆相页岩油组分评价及意义[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1479–1498.
- LI Ming, WANG Min, ZHANG Jinyou, et al. Evaluation of the compositions of lacustrine shale oil in China's typical basins and its implications[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1479–1498.
- [30] HU Yao, JIA Chengzao, CHEN Junqing, et al. Restoration of hydrocarbon generation potential of the highly mature Lower Cambrian Yuertusi Formation source rocks in the Tarim Basin[J]. *Petroleum Science*, 2025, 22(2): 588–606.
- [31] 刘军, 田雷, 张虎权, 等. 塔西南坳陷麦盖提斜坡海西期油气成藏条件与勘探方向[J]. *石油地球物理勘探*, 2022, 57(3): 676–685.
- LIU Jun, TIAN Lei, ZHANG Huquan, et al. Accumulation conditions of Hercynian period in the Maigaiti slope, southwest depression of Tarim Basin and exploration direction [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2022, 57(3): 676–685.
- [32] ASCHWANDEN L, DIAMOND L W, ADAMS A. Effects of progressive burial on matrix porosity and permeability of dolostones in the foreland basin of the Alpine Orogen, Switzerland [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 100: 148–164.
- [33] BATALEVA Y V, NOVOSELOV I D, BORZDOV Y M, et al. Experimental modeling of ankerite-pyrite interaction under lithospheric mantle P-T parameters: Implications for graphite formation as a result of ankerite sulfidation [J]. *Minerals*, 2021, 11(11): 1267.
- [34] 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.
- [35] 魏秀丽. 柯克亚气藏新近系西河甫组西八段地质建模研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2013.
- WEI Xiuli. Geological modeling of the Xiba member in the Neogene Xihefu Formation of the Kekeya gas reservoir [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2013.
- [36] 王清华, 杨海军, 李勇, 等. 塔西南山前地区恰探1井石炭系—二叠系重大突破与勘探前景[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(4): 34–45.
- WANG Qinghua, YANG Haijun, LI Yong, et al. Major breakthrough in the Carboniferous-Permian in Well Qiatan 1 and exploration prospect in the piedmont southwestern Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(4): 34–45.

(编辑 刘格云)