

塔里木盆地巴楚-塔北地区深层寒武系油气成藏过程与勘探方向

郑见超^{1,2,3}, 李斌⁴, 袁倩⁵, 戚明辉^{2,3}, 尹中山^{2,3}, 彭军⁴, 黄毅^{2,3}, 张烨毓^{2,3}

(1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 页岩气评价与开采四川省重点实验室, 四川 成都 610091; 3. 自然资源部 复杂构造区页岩气勘探开发工程技术创新中心, 四川 成都 610091; 4. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 5. 中国石油 西南油气田分公司 勘探开发研究院, 四川 成都 610500)

摘要:塔里木盆地作为典型的海相含油气盆地经历多期构造改造,寒武系地层埋深大,勘探风险高。其中巴楚和塔北作为主要的控藏古隆起,勘探未能取得进一步突破。为此结合钻井、地震和测试分析等基础资料,运用盆地模拟技术,在大区域和广时域上动态恢复油气成藏过程,力求加深认识,指明勘探方向。研究认为:①塔里木盆地地寒武统玉尔吐斯组烃源岩热演化主要有加里东中期、加里东晚期—海西早期、海西晚期和喜马拉雅期晚期4个关键时期,具有坳陷区连续型、斜坡区接力型以及周缘山前带快速型3种热演化模式。②研究区断裂型、输导层型和不整合型输导体系发育,具备油气运移的条件。③通过油气运聚过程研究,提出了反向汇聚型、扩散型和汇聚型3种油气运聚模式。其中巴楚地区东部发育反向汇聚型,西部发育扩散型。塔北地区发育汇聚型。④巴楚东部地区有利的勘探目标为海西晚期前形成并保存较好的构造圈闭,西部地区为现今未被破坏的构造圈闭。塔北地区有利的油气运移指向区位于沙雅隆起西部台地内区域。

关键词:烃源岩热演化;盆地模拟;输导体系;油气成藏过程;勘探方向;玉尔吐斯组;寒武系;巴楚-塔北地区

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Hydrocarbon accumulation process and exploration direction of the deep Cambrian in Bachu-Tabei area, Tarim Basin

Zheng Jianchao^{1,2,3}, Li Bin⁴, Yuan Qian⁵, Qi Minghui^{2,3}, Yin Zhongshan^{2,3}, Peng Jun⁴, Huang Yi^{2,3}, Zhang Yeyu^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Sichuan Key Laboratory of Shale Gas Evaluation and Exploitation, Chengdu, Sichuan 610091, China; 3. Technology Innovation Center of Shale Gas Exploration and Development in Complex Structural Areas, MNR, Chengdu, Sichuan 610091, China; 4. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 5. Exploration & Development Research Institute of Southwest Oil and Gas Field Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: Tarim Basin as a typical marine petroliferous basin, has undergone multi-stage structural transformation, with its Cambrian strata deeply buried, highly risky in exploration. No significant exploration breakthrough has been made in Bachu-Tabei area where two major palaeo-uplifts control hydrocarbon accumulation in the region. In this regard, the study focuses on dynamically revealing the hydrocarbon accumulation process in large area and wide time domain by applying basin modeling technology in combination of the basic data of drilling, seismic exploration and test analysis, with a view to deepening understanding and deciphering exploration direction. The research results suggest that: (1) The thermal evolution of hydrocarbon source rocks in the Yuertus Formation mainly underwent 4 key periods, namely the Middle Caledonian, Late Caledonian-Early Hercynian, Late Hercynian and Late Himalayan periods, in 3 patterns of successive evolution in depression area, relaying evolution in slope area and rapid evolution in peripheral piedmont area; (2) Carrier systems of fault type, carrier bed type and unconformity type are well developed in the study area, indicating favorable conditions for hydrocarbon migration; (3) Three hydrocarbon migration and accumulation modes are put forward, that is,

收稿日期:2020-12-01;修订日期:2021-12-01。

第一作者简介:郑见超(1986—),男,博士研究生、工程师,石油天然气地质综合研究。E-Mail:17783437@qq.com。

通讯作者简介:李斌(1977—),男,博士、副教授,石油天然气地质综合研究。E-mail:lbinswpu@swpu.edu.cn。

基金项目:油气藏地质及开发工程国家重点实验室基金项目(PLN201616);四川省区域创新合作项目(21QYCX0050)。

reversed confluence mode as shown by east Bachu area, diffusion mode by west Bachu area and confluence mode by Tabei area; (4) The favorable exploration targets in the eastern part of Bachu area are the structural traps formed and well preserved before the Late Hercynian period, and the structural traps well preserved in the western part. The target zone favorable for hydrocarbon migration in Tabei area is situated inside the platform to the west of Shaya Uplift.

Key words: thermal evolution of source rock, basin modeling, carrier system, hydrocarbon accumulation process, exploration target, Yuertus Formation, Cambrian, Bachu-Tabei area

引用格式:郑见超,李斌,袁倩,等.塔里木盆地巴楚-塔北地区深层寒武系油气成藏过程与勘探方向[J].石油与天然气地质,2022,43(1):79-91.

DOI:10.11743/ogg20220107.

Zheng Jianchao, Li Bin, Yuan Qian, et al. Hydrocarbon accumulation process and exploration direction of the deep Cambrian in Bachu-Tabei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 79-91. DOI:10.11743/ogg20220107.

近年来,中国在海相深层油气勘探中取得了一系列成果,例如四川盆地安岳气田和普光气田、鄂尔多斯盆地靖边气田,以及塔里木盆地顺北气田和塔河气田等^[1-5],展现了巨大的勘探潜力。塔里木盆地作为中国最大的内陆叠合盆地,由于构造多期演化,加之寒武系埋深大,油气成藏关系更加复杂,勘探风险高。尤其在顺北和塔河地区储层平均深度虽然超过7 500 m,但仍然存在液态烃,使得深层油气的烃源岩热演化过程及源灶有效性^[6-8]、油气富集趋势、古油藏保存及调整方向等问题成为制约油气勘探的难题之一。目前,部分探井钻遇或钻穿寒武系且油气显示较好,揭示了寒武系勘探的巨大潜力。当前研究认为,对于塔里木盆地深层-超深层海相碳酸盐岩勘探应主要围绕古隆起和古斜坡开展^[9-10],而巴楚和塔北作为主要的控藏古隆起,长期以来受到广泛关注。针对寒武系油气藏的复杂变化,本研究借助盆地模拟技术,选取巴楚-塔北地区古隆起寒武系为研究对象,在大区域和广时域上动态恢复油气成藏过程,探索油气富集规律,力求降低勘探风险,指明勘探方向。

1 区域背景及石油地质条件

塔里木盆地位于新疆维吾尔自治区南部,区域构造位置为南天山断褶带与昆仑山断褶带之间,纵向上发育多个不整合面,横向上则被多条深大断裂切割。寒武纪一二叠纪主要以隆坳相间的构造格局演变为主,三叠纪一白垩纪主要以在断裂褶皱影响下形成的前陆逆冲带为主。寒武纪主要为被动大陆边缘碳酸盐台地-斜坡-陆棚-盆地沉积,具有陆表海台地性质,“西台东盆”的沉积格局形成并保持稳定^[11-12]。

1.1 烃源岩特征

目前勘探证实,塔里木盆地寒武系油气主要来自

下寒武统海相富有机质泥页岩。其中玉尔吐斯组黑色页岩被认为是最有效的主力烃源岩,长期以来得到广泛认可和持续关注^[13-18]。由于玉尔吐斯组烃源岩埋深较大,目前野外能够观察到的玉尔吐斯组出露于柯坪地区,剖面显示为黑色页岩,地层厚度为9.2 m。其下部岩性为未风化黑色炭质页岩,总有机碳(TOC)含量平均值为17.99%,上部为黑色含粉砂炭质页岩,TOC含量平均值为2.42%,沉积分散有机质的类型主要为I型或II₁型。岩相古地理及钻井揭示,除巴楚-塔中地区的中央隆起区缺失外,其余地区均广泛发育厚度不等的玉尔吐斯组烃源岩^[19-20]。据钻井显示,环满加尔地区下寒武统烃源岩丰度较高,为塔里木盆地海相油气最为重要的生烃区之一。其中以玉尔吐斯组及其同期异相的西山布拉克组烃源岩丰度最高,而巴楚隆起区下寒武统烃源岩不发育且缺失玉尔吐斯组地层。

1.2 储层特征及储-盖组合

沉积相是有利储集体形成的基础。塔里木盆地寒武系台缘礁滩、台内丘滩以及膏质云坪是储集层发育的有利相带^[21-22]。巴楚-塔北地区寒武系主要为白云岩储层,多数发育在下寒武统肖尔布拉克组(C_{1x})、中寒武统沙依里克组(C_{2s})及上寒武统下丘里塔格群(C_{3ql})。通过对该地区12口探井寒武系岩心样品孔隙度数据统计发现,寒武系孔隙度集中分布在0.1%~2.5%,渗透率分布范围较大,为 $(0.001\sim11\ 200)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,总体上表现为特低孔和特低渗特征。其中,巴楚-塔北地区肖尔布拉克组储层物性较好,平均孔隙度为3.7%,渗透率巴楚较塔北好,有利储层发育相带分布在巴楚隆起西侧和巴楚隆起以东至TS1井以西地区。

通过对研究区BT5井、Mabei1井、HT1井、He4井、XH1井、YQ6井和TS1井的岩心、薄片和扫描电镜观

察分析认为,寒武系碳酸盐岩储层发育多种储集空间类型,主要有晶间溶孔、粒内(间)溶孔、溶蚀孔洞以及裂缝等,其中裂缝和溶蚀孔洞是主要储集空间。肖尔布拉克组在巴楚地区主要以原生孔隙和溶蚀孔为主,裂缝较发育(图1a,b),而塔北地区的XH1井表现出原生孔隙不发育,溶蚀孔洞较少;沙依里克组在巴楚地区以溶蚀孔洞和裂缝为主(图1c,d);下丘里塔格群在巴楚-塔北地区以溶蚀孔洞为主,裂缝发育(图1e,f)。

在寒武纪整个塔里木盆地“西台东盆”的构造格局影响下,中寒武统膏岩以巴楚隆起中北部为中心,厚度向四周呈不规则状递减,环绕状分布^[23-24]。巴楚地区寒武系主要发育下寒武统肖尔布拉克组白云岩为储层、阿瓦塔格组膏岩为盖层的储-盖组合。塔北地区中东部中、下寒武统膏岩发育局限,致密白云岩、灰岩和泥岩提供了封盖条件。

2 烃源岩热演化史恢复

2.1 恢复参数

本次研究以盆地模拟技术为手段,选取不同构造

带10口实钻井进行玉尔吐斯组烃源岩热演化史恢复(图2a)。其中,埋藏史依据单井钻井分层、岩性解释和地震资料等建立,剥蚀量以实测镜质体反射率(R_o)及区域等效镜质体反射率(VR_o)为约束反演计算后综合确定,未钻遇地层通过地震数据加载虚拟层。边界控制参数中,不同地史上的古水深和大地热流值根据现场研究成果确定,并用古地温 Wygrala 模型进行修正^[19-20]。最后选取 Easy% R_o 化学动力学模型开展模拟。模拟结果用实测 R_o 和温度进行验证,结果可靠。

2.2 热演化史及热演化模式

热演化史模拟结果表明,玉尔吐斯组烃源岩具有多期和动态差异的演化特征(图2b)。目前,塔北地区有效烃源岩分布在沙雅隆起斜坡带,以生干气为主;巴楚地区东部的阿瓦提坳陷在海西晚期生烃枯竭范围逐渐扩大,西部麦盖提斜坡总体上进入生干气阶段。对比不同构造带烃源岩热演化史,将热演化过程划分为加里东中期、加里东晚期—海西早期、海西晚期以及喜马拉雅期晚期4个关键时期,同时根据不同构造带烃源岩镜质体反射率演化趋势,提出了热演化的3种模式(图2c)。

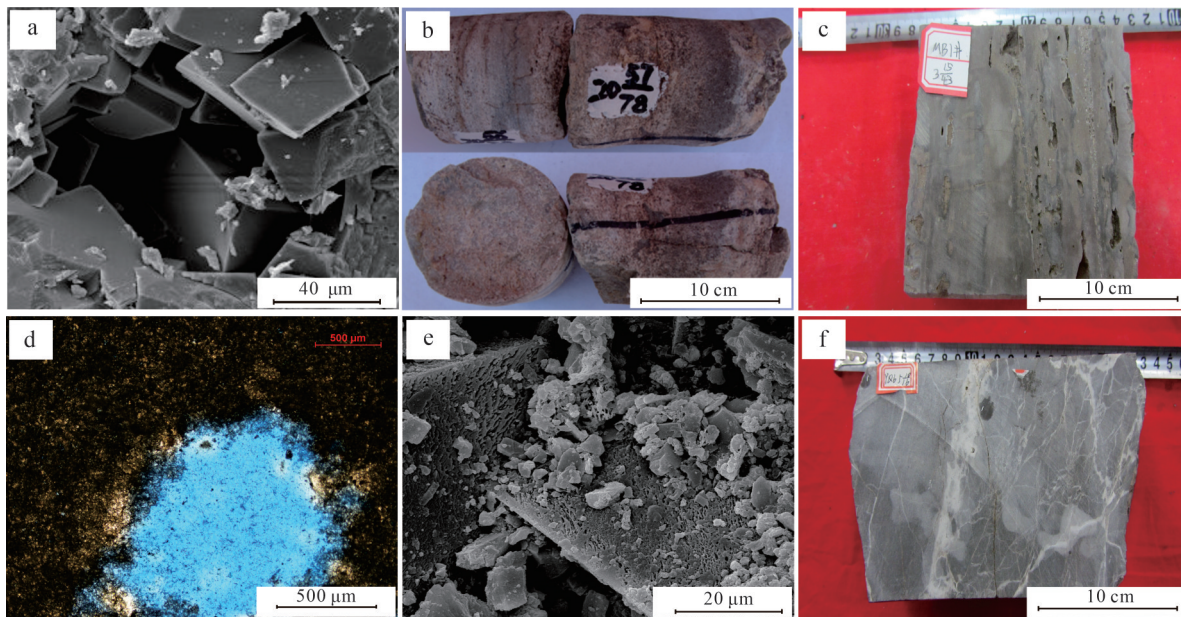


图1 塔里木盆地巴楚-塔北地区寒武系镜下及岩心照片(资料来源于中国石化西北油田分公司勘探开发研究院)

Fig. 1 Micrographs and core photos of the Cambrian in Bachu-Tabei area, Tarim Basin

(courtesy of Exploration and Development Research Institute of SINOPEC Northwest Oilfield Company)

a. 灰色粉晶白云岩,晶间溶孔发育,较大孔中充填自形程度较好的白云石,BT5井,埋深5 784.80 m, C_{1x} ,SEM;b. 高角度-垂直张开缝,缝宽0.3 mm,近90°,灰色泥晶白云岩,局部孔洞发育,未充填或被方解石半充填,BT5井, C_{1x} ,埋深5 786.16~5 786.30 m,岩心;c. 拉长状溶蚀孔洞,Mabei1井,埋深6 004.25~6 004.41 m, C_{2s} ,岩心;d. 含膏粉晶白云岩,溶蚀孔洞,Mabei1井,埋深6 002.98 m, C_{2s} ,蓝色铸体,正交偏光;e. 残余颗粒粉-细晶白云岩,在白云石晶体表面可见大量溶蚀微孔,BT5井, C_{3ql} ,埋深4 812.47 m,SEM;f. 水平-低角度泥质充填缝,切割早期方解石充填网状缝,溶孔较发育,浅灰色中晶白云岩,YQ6井,5-10/16,埋深7 119.74~7 119.89 m, C_{3ql} ,岩心

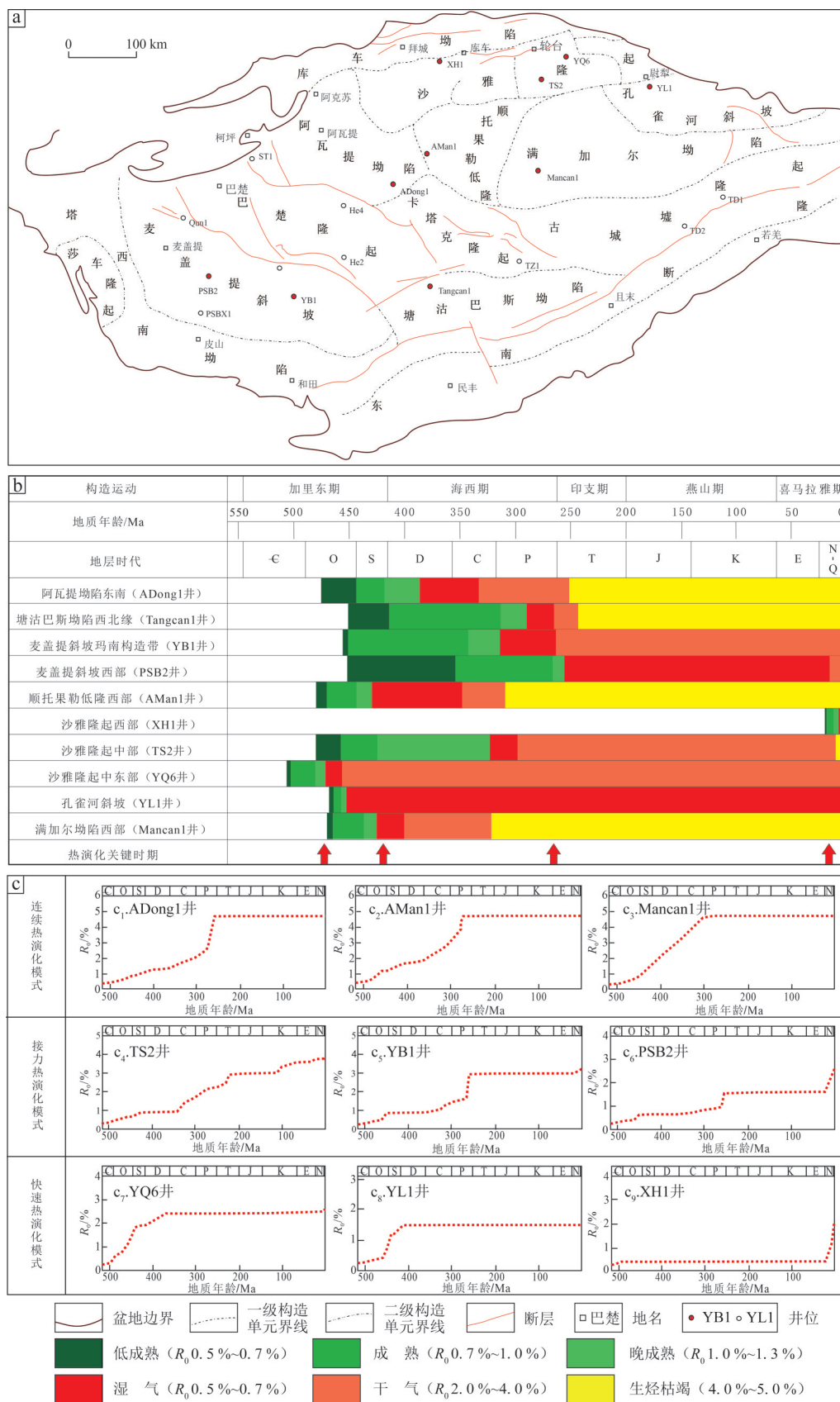


图2 塔里木盆地不同构造单元玉尔吐斯组烃源岩热演化阶段划分及热演化模式

Fig. 2 Classification of thermal evolution stages and evolution patterns of the Yuertus source rocks in different structural units, Tarim Basin

a. 塔里木盆地不同构造单元及热演化模拟选井; b. 不同构造带玉尔吐斯组烃源岩热演化史; c. 热演化模式

c. 寒武纪; O. 奥陶纪; S. 志留纪; D. 泥盆纪; C. 石炭纪; P. 二叠纪; T. 三叠纪; J. 侏罗纪; K. 白垩纪; E. 古近纪; N. 新近纪

1) 盆地坳陷区——连续热演化模式

以位于阿瓦提坳陷东南斜坡的ADong1井为代表(图2c₁),其热演化时间是从寒武纪开始直到二叠纪,主要是由于坳陷及其围斜区长期持续稳定沉降,热演化过程没有间断,呈连续型。

2) 盆地斜坡区——接力热演化模式

以位于沙雅隆起中部的TS2井为代表(图2c₄),热演化进程与不同时期构造活动有关。由于多次沉积间断及构造升降,其热演化过程表现出阶段性特征。

3) 盆地周缘山前带——快速热演化模式

以位于孔雀河斜坡的YL1井为代表(图2c₈),其热演化时间从寒武纪到志留纪—泥盆纪,随后进入生烃停滞阶段,虽然侏罗纪后再次埋深,但地温较低已不具备生烃条件,具有早期快速热演化特征。以位于沙雅隆起西部的XH1井为代表(图2c₉),中新世以后前陆坳陷快速填平加快了热演化进程,具有晚期快速热演化特征。

3 主要输导体系

输导体系是油气成藏过程中连接源岩与圈闭之间的路径网。前人研究表明^[25-28],断层型、不整合型和输导层型是构成塔里木盆地寒武系-奥陶系油气运移输导系统的基本元素。本次研究利用岩心、单井测井解释成果和地震解释数据开展研究区寒武系输导体系识别。

3.1 断裂型

巴楚地区断裂主要活动和定型期为加里东早期、海西期和喜马拉雅期。

加里东期断裂呈转折褶皱形态,控制形成系列断背斜构造。该时期巴楚西部主要为NW向断裂,东部主要为WE向断裂,具有延伸短的特点;海西期断裂主要呈NWW向展布;喜马拉雅期断裂NW向为主,具有延伸长的特点。总体来看,喜马拉雅期断裂活动剧烈,规模最大,断穿层系多,对巴楚地区油气输导具有重要意义(图3)。巴楚地区东部受喜马拉雅期断裂影响,前期油气藏遭受破坏和调整,而巴楚地区西部断裂则成为油气垂向运移的优势通道。

塔北地区在加里东晚期—海西早期形成了一系列NW和NE向呈“X”型相交的走滑断裂系统,具有多阶段继承性(图4)^[29]。该地区断裂虽然单体规模较巴楚地区小,但由于断裂发育集中,初始形成及持续生长时间与烃源岩生、排烃匹配关系较好,为满加尔坳陷及塔

北斜坡玉尔吐斯组烃源岩生成的油气提供有利的运移通道。

3.2 输导层型

多期构造改造及溶蚀作用是输导层型形成的关键。研究区寒武系下丘里塔格群、肖尔布拉克组发育多种溶蚀作用,包括(准)同生期大气淡水溶蚀作用、埋藏溶蚀作用、表生岩溶作用及与深大断裂有关的大气淡水溶蚀作用。同时寒武系地层受断裂影响,裂缝发育程度高。

塔北地区下丘里塔格群整体上发育溶蚀孔洞和裂缝(图5a,b),上部以裂缝为主,发育的溶孔孔径微小,由上向下溶孔的孔径由小逐渐增大,孔-缝-洞连通情况也随着溶蚀孔洞的发育而逐渐变好。XH2井、TS1井和YQ6井岩心观察统计表明,孔洞主要以未充填—半充填为主,裂缝充填状态主要以半充填为主,有效性较好;巴楚地区裂缝及孔洞也发育(图5c),以半充填—全充填缝为主,有效性较塔北地区稍差。其中,巴楚地区西部上寒武统在Tong1井和BT5井主要以溶蚀孔洞及裂缝为主,而东部的F1井和HT1井则表现为溶蚀孔洞型,且主要以小孔为主。

塔北地区钻至下寒武统肖尔布拉克组井较少。从XH1井钻揭来看,溶蚀孔洞具有欠发育的特征。但塔北隆起区西部的柯坪断隆东段野外剖面显示,该组因多期溶蚀而发育溶蚀孔洞,有利相带分布在轮南—牙哈低凸起之上及周缘^[30-31]。从XH1井和DG2井岩心观察统计表明,以水平—斜交的小微缝为主,有效性较好,有效缝线密度最高达12.9条/m。巴楚地区溶蚀孔洞较发育,主要以小孔为主,充填状态为未充填—半充填。其中,BT5井溶蚀孔洞中大、中和小孔线密度分别为2.2、7.7和20.0个/m。裂缝发育程度整体稍弱,但部分地区裂缝线密度仍达到13.5条/m(F1井),以水平—斜交的小微缝为主,有效性较好。总的来看,下寒武统肖尔布拉克组裂缝较发育,主要分布在巴楚—塔北构造活动较剧烈的地区,裂缝有效性在区域上呈现出较强的非均质性。

3.3 不整合型

震旦纪末期,塔里木板块受“柯坪运动”影响抬升遭受剥蚀,在盆地大部分地区形成T₀⁰区域不整合^[32]。其中,巴楚隆起区东北部在地震剖面上表现为震旦系被寒武系削截超覆特征^[33]。巴楚—塔北地区大面积发育T₈¹不整合面,不整合面上、下的地层有不同的构造特征,沉积环境具有明显变化^[34]。

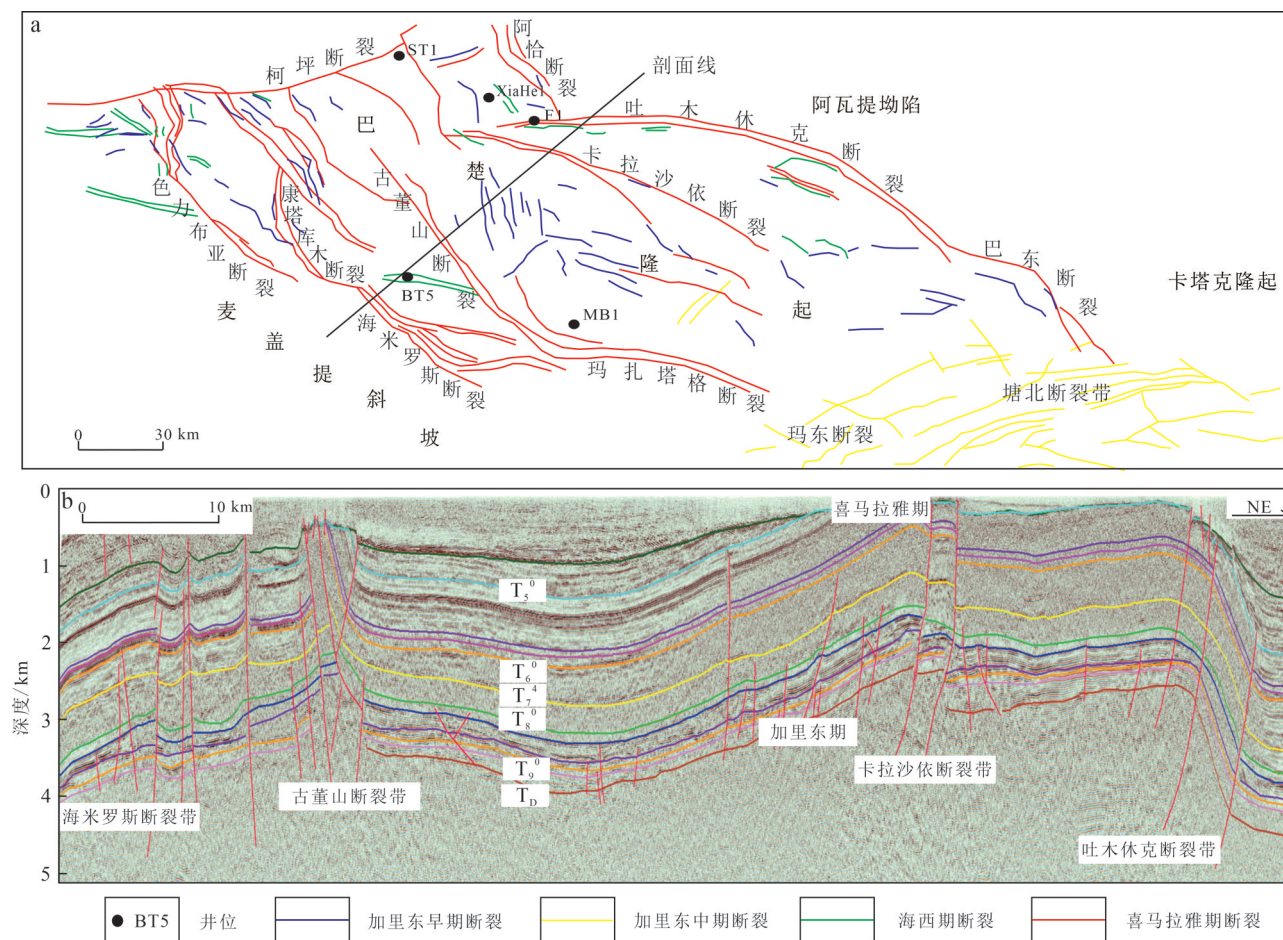


图3 塔里木盆地巴楚地区断裂活动分期(a)与东北向地震解释剖面断裂分布(b)

(b图基础资料来源于中国石化西北油田分公司勘探开发研究院)

Fig. 3 Stages of faulting activities (a) and the fault distribution on the NE-trending seismic section (b) in Bachu area, Tarim Basin (courtesy of Exploration and Development Research Institute of SINOPEC Northwest Oilfield Company for the basic data of Fig. 3b)

T_5^0 : 二叠系顶反射界面; T_6^0 : 志留系顶反射界面; T_7^4 : 中、下奥陶统一间房组反射界面; T_8^0 : 寒武系顶反射界面;

T_9^0 : 震旦系顶反射界面; T_D : 前南华系顶反射界面

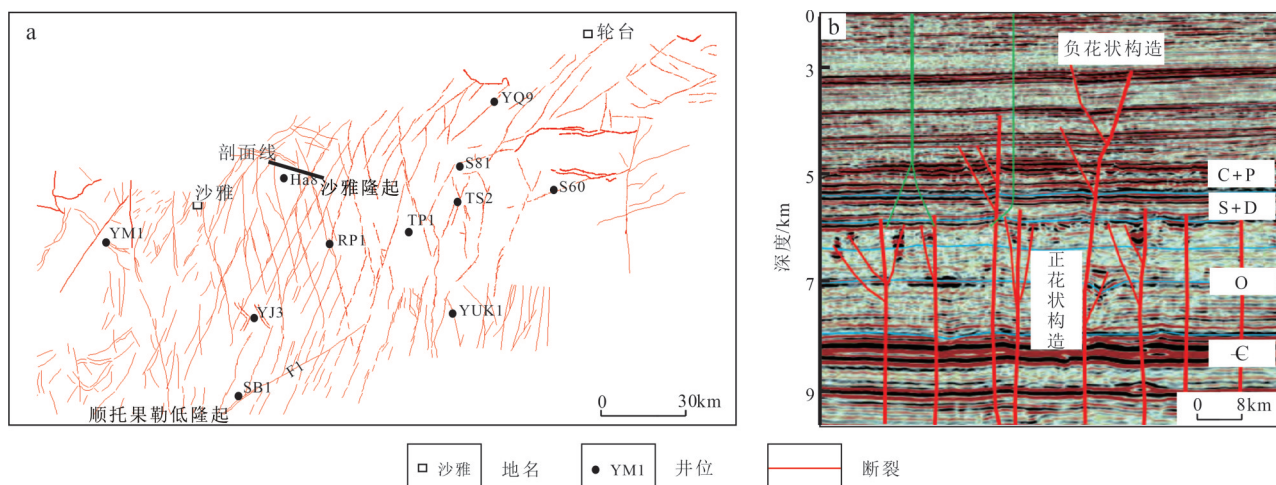


图4 塔里木盆地塔北地区断裂分布(a)及过哈拉哈塘 Ha8 井地震解释剖面断裂分布(b)(b图据文献[29]修改)

Fig. 4 Fault distribution in Tabei area (a) and fault distribution on seismic section across Well Ha8, Tarim Basin

(with Fig. 4b modified from reference [29])

C+P: 石炭纪和二叠纪; S+D: 志留纪和泥盆纪; O: 奥陶纪; C: 寒武纪

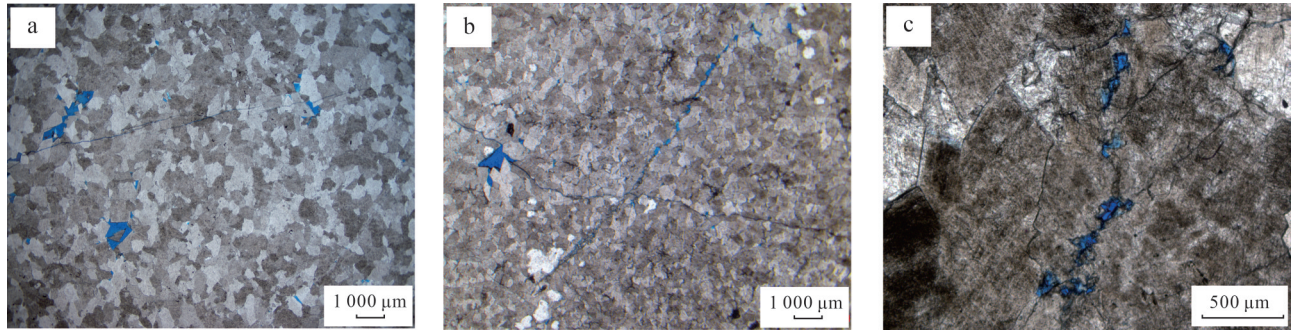


图5 塔里木盆地巴楚-塔北地区寒武系下丘里塔格群储层裂缝、溶蚀孔洞伴生关系

(资料来源于中国石化西北油田分公司勘探开发研究院)

Fig. 5 Association between fractures and dissolved pores in the Cambrian Xiaqiulitage Formation in Bachu-Tabei area, Tarim Basin

(courtesy of Exploration and Development Research Institute of SINOPEC Northwest Oilfield Company)

a. 沿裂缝发育晶间溶孔,中晶白云岩,TS1井, C_3 ql,埋深7 102.15 m,铸体薄片,单偏光;b. 共轭剪切缝,后期溶蚀形成沿裂缝分布或串珠状的溶蚀孔洞,裂缝和溶孔边缘分布鞍状白云石,细-中晶白云岩,BT5井, C_3 ql,埋深4 812.90 m,铸体薄片,单偏光;c. 晶间溶孔沿裂缝呈串珠状分布,异形白云石发育,粗晶白云岩,YQ6井, C_3 ql,埋深7 059.35 m,铸体薄片,单偏光

4 古构造背景下的油气运聚趋势

地史时期某一构造面所处的古海拔深度可以反映当时的古构造格局,古构造形态控制了油气运聚的趋势。本研究针对肖尔布拉克组顶面(T_8^4),通过现今地层地震解释和剥蚀量恢复数据,采用回剥法恢复热演化关键时期的古构造,进而开展油气运聚过程的模拟。

油气运移模拟原理:假设油气沿着一定倾角 α 的封盖层底面运移,速度就会降低 $\sin\alpha$ 倍。通常假设烃类通过低渗透层的运移是向上的,但对于整体盆地的油气运移系统而言,垂向运移较侧向运移要小一个数量级。因此,盆地范围内的油气运移模拟就变成了具有输导条件的储层或不整合面运移分析,即输导层上的流线分布,也就是优势运移通道的分布。

4.1 塔北地区

加里东中期,随着满加尔坳陷的玉尔吐斯组烃源岩开始生烃,塔北隆起前缘斜坡作为油气运移的主要指向区,流线顺着塔北斜坡向阿克库勒凸起方向延伸(图6a);加里东晚期—海西早期,由于满加尔坳陷围斜区烃源岩进入生烃高峰,塔北斜坡烃源岩进入生油窗,油气供给由远源转变为远-近源联合供烃,加之塔北地区走滑断裂体系的形成与扩张,油气开始了大规模、长距离的运移,流线整体上向西北推进,大量油气被塔北斜坡南部的断裂捕获,部分油气运移到塔河区域(图6b);海西晚期,近源供烃占据主导地位,塔北走滑断裂体系多次继承性发育和改造,断裂控储更加明

显,油气受断裂影响首先开始垂向运移,并在构造背景下向沙西凸起和阿克库勒凸起运移和调整(图6c);喜马拉雅晚期,随着隆凹格局更加明显,塔北地区的流线更加密集地向北推进。油气运聚范围突破塔河地区向深处扩大。由于油气由南向北运移,因此在相对构造高部位背景下,具有东西或近东西走向的断裂、X型断裂的中枢区域更易于捕获大量油气(图6d)。

4.2 巴楚地区

加里东中期,随着阿瓦提坳陷的玉尔吐斯组烃源岩进入生烃门限,巴楚地区东部开始接受来自阿瓦提坳陷的油气,流线指向吐木休克断裂北侧的背斜圈闭。巴楚地区西部虽然背斜圈闭较多且规模更大,由于塔西南地区烃源岩还未成熟,此时为空圈闭(图7a);在加里东晚期—海西早期,随着巴楚地区东部阿瓦提坳陷的油气大量生成,流线在吐木休克断裂处汇聚,ST1井附近开始了油气第一期成藏。同时,由于巴楚地区此时为北倾单斜,部分油气突破断裂向中部断裂和构造高点汇聚。巴楚隆起西缘的圈闭类型由背斜圈闭逐渐向断裂-背斜圈闭转变(图7b);海西晚期,巴楚地区东部随着吐木休克断裂的逐渐形成和扩大,油气被阻挡在断裂北侧,来自阿瓦提坳陷的油气仅能在ST1井和F1井附近汇聚,油气供给范围缩小。巴楚地区西部,随着烃源岩开始大量生烃,由于构造反转^[35],油气开始由南向北运移,整体呈现向北受断裂-背斜控制,向南受背斜控制的运移格局,断裂及断裂附近的背斜圈闭是有利指向区(图7c)。部分油气进入巴楚隆起并在BT5井附近聚集;在喜马拉雅期晚期,巴楚地区东部的油气供给能力基本丧失,吐木休

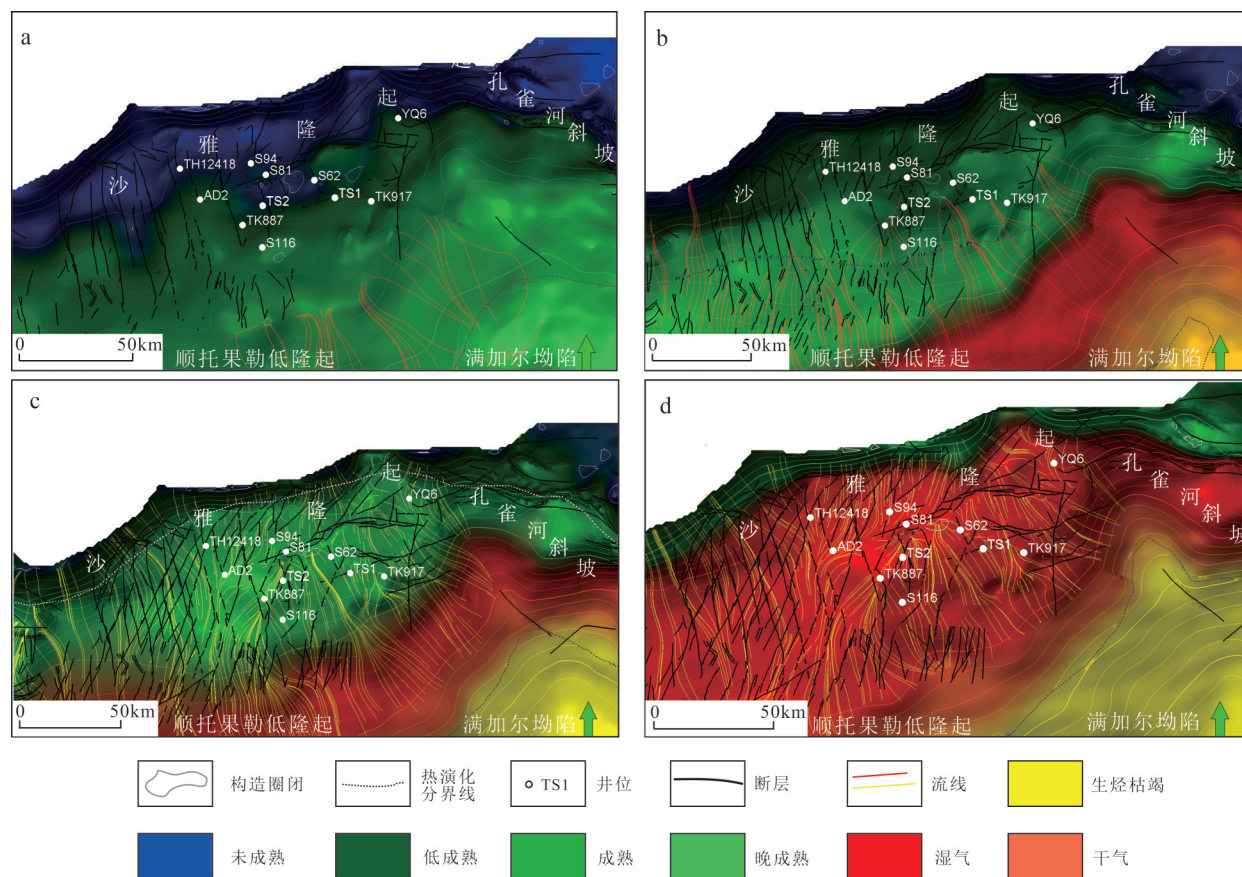


图6 塔里木盆地塔北地区 T_8^4 界面4个关键时期流线分布

Fig. 6 Streamline evolution of the T_8^4 interface during the 4 key periods in Tabei area, Tarim Basin

a. 加里东中期; b. 加里东晚期-海西早期; c. 海西晚期; d. 喜马拉雅晚期

克断裂以北挤压褶皱带是古油藏调整的有利指向区;巴楚地区西部,断裂-背斜控藏占据主导地位,隆起西缘的北部、中部以及玉北地区是油气运聚的有利指向区(图7d)。

4.3 油气运聚模式

根据流线模拟结果,提出了寒武系油气运聚趋势具有反向汇聚型、扩散型和汇聚型3种模式。巴楚地区整体上为侧源供烃,东部烃源岩为持续热演化模式,由于后期断、坳接触,油气运聚距离逐渐变短,呈现向阿瓦提坳陷反向汇聚的特征,运移指向区为断裂以北挤压褶皱带(图8a);西部由于烃源岩具有接力热演化模式,且海西晚期构造反转后,麦盖提斜坡长期向西南倾斜,油气运聚表现为扩散型,晚期油气呈长距离运移,运移指向巴楚隆起区,在盆地稳定斜坡带较为典型(图8b);塔北地区为远-近源联合供烃,隆、坳格局持续发育,后期近源油气与早期远源调整油气在一系列次生油气藏中聚集,油气持续向低势区汇聚,表现为汇聚型。在盆地继承性隆起区较为典型(图8c)。

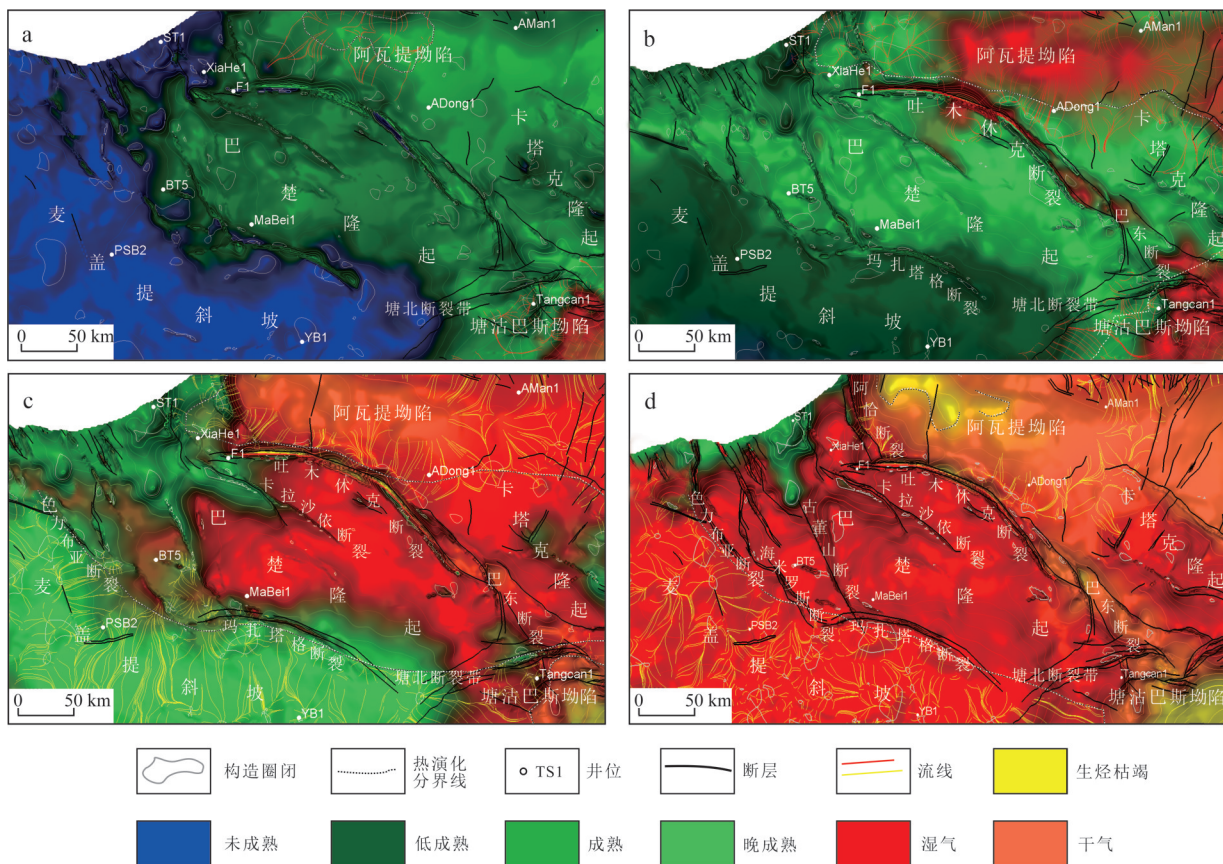
5 典型井分析与勘探方向优选

5.1 典型井分析

1) 巴楚地区西部——BT5井

BT5井位于巴楚隆起西北部海米东构造带西段。该井钻至震旦系,缺失玉尔吐斯组。储层为下丘里塔格群中、上部与肖尔布拉克组。该区构造圈闭形成于加里东晚期—海西早期,断裂为通源断裂,主要活动期为加里东晚期—海西期、喜马拉雅期。勘探资料表明,油气可能来自南部的寒武系斜坡相烃源岩。上寒武统下丘里塔格群测井解释为干层,而下寒武统吾松格尔组钻遇气测异常显示,说明中寒武统阿瓦塔格组膏岩盖层封闭性较好。

烃源岩热演化和油气充注期次表明,该区在海西晚期以成熟油气充注为主。流线分布显示,喜马拉雅期不具备油气运聚的优势通道。同时海米罗斯构造带持续活动,喜马拉雅期在早期变形的古生界中形成新断层^[36],使得保存条件变差。此外,下寒武统吾松格

图 7 塔里木盆地巴楚地区 T_8^4 界面 4 个关键时期流线分布Fig. 7 Streamline evolution of the T_8^4 interface during the 4 key periods in Bachu area, Tarim Basin

a. 加里东中期; b. 加里东晚期—海西早期; c. 海西晚期; d. 喜马拉雅晚期

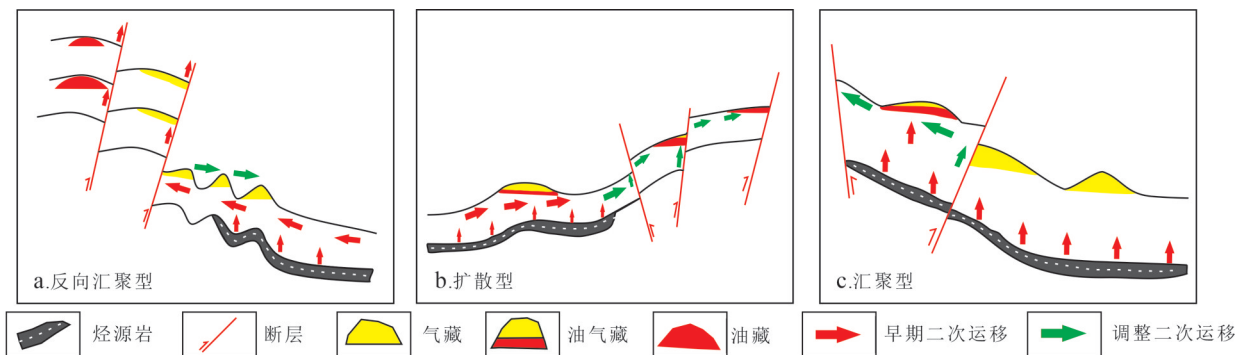


图 8 塔里木盆地巴楚-塔北地区寒武系油气运聚模式

Fig. 8 Sketch maps showing the hydrocarbon migration and accumulation modes of the Cambrian in Bachu-Tabei area, Tarim Basin

尔组和肖尔布拉克组储层中孔隙-裂缝沥青充填也指示古油藏被破坏。因此,保存条件不好、供烃不足是 BT5 井未发现寒武系油气藏的主要原因。

2) 巴楚地区东部——He4 井

He4 井位于巴楚隆起东部吐木休克断裂构造带。该井钻至震旦系,缺失下寒武统烃源岩。储集层主要以下寒武统肖尔布拉克组白云岩为主。勘探资料显示,该区构造活动开始于海西晚期,定型于喜马拉雅期。测试显示肖尔布拉克组为干层,下丘里塔格群为

水层。

由于巴楚东部油气来自于阿瓦提坳陷,热演化结果显示该地区生烃高峰位于加里东晚期—海西早期,而本区圈闭主要定型于喜马拉雅期。同时流线模拟显示,由于海西晚期后吐木休克断裂继承性活动,最终在喜马拉雅期向上断至古近系,使油气调整被阻挡在断层以北,导致没有充足的油气供给和良好的保存条件。因此,圈源不匹配,供烃不足及保存条件不好是 He4 井未发现寒武系油气藏的主要原因。

3) 巴楚地区东北部——ST1井

ST1井位于巴楚隆起东北部,东临阿瓦提坳陷。该井钻至震旦系,在下寒武统未发现玉尔吐斯组烃源岩^[37]。ST1井钻揭储-盖组合为阿瓦塔格组膏岩和肖尔布拉克组白云岩。优质储层主要发育在肖尔布拉克组上部。

本区构造为北西走向平行断层夹持的断块型背斜,形成于中石炭世一早二叠世,后期继承性发育。热演化史恢复表明,该构造形成时期具备油气来源的基础,但在海西晚期后阿瓦提坳陷的生烃枯竭范围逐渐扩大。流线模拟显示海西晚期后由于阿恰断裂的逐渐形成,阻挡了油气的调整供给。ST1井在钻遇的寒武系时有气测异常显示,但显示较差。肖尔布拉克组岩心见油质沥青,指示存在早期古油藏,但该层测井解释为水层,表明古油藏被破坏^[38]。综合认为喜马拉雅期高角度通天断层的发育是未发现寒武系油气藏的主要原因。

4) 塔北地区——TS1井

TS1井位于沙雅隆起阿克库勒凸起东部,钻至上寒武统下丘里塔格群,沉积环境以碳酸盐岩局限台地及台地边缘相为主。上寒武统下丘里塔格群储集空间类型主要以溶蚀孔洞和裂缝型为主。该井在寒武系钻遇不同级别的油气显示,同时在测试过程中具有少量天然气产出,证明曾经存在油气运聚。前人研究表明,现存油气曾经历过水洗氧化改造后又接受未经水洗氧化的烃类充注改造,证实了具有多期充注及改造的特征^[39]。

由于塔北地区为远-近源联合供烃,供烃时间长,范围广。但由于膏岩不发育,同时测试结果显示建隆体上覆层和内部相对致密碳酸盐岩突破压力低,封盖条件差。尤其是以天然气为主要类型的油气圈闭,缺乏有效封盖层。因此,缺乏良好的封盖条件,尤其是中寒武统膏岩不发育是该地区未能发现寒武系油气藏的主要原因。

5.2 有利勘探区

以肖尔布拉克组为例,该组沉积时期巴楚地区和塔北隆起区中西部是丘滩体系的主要发育地带^[40],高能沉积相带及(准)同生期暴露溶蚀作用共同控制了肖尔布拉克组储集层的大规模展布,为优质储层发育提供了基础。另外多种埋藏溶蚀作用叠加改造残余孔隙形成现今储集空间。

巴楚地区东部,由于阿瓦提坳陷的玉尔吐斯组烃源岩具有持续热演化模式,在海西晚期后生烃枯竭范

围逐渐扩大,同时由于海西晚期吐木休克断裂形成,使油气运聚呈反向汇聚型。加之喜马拉雅期断裂剧烈活动,破坏了古油藏。因此认为,海西晚期之前形成且保存较好的圈闭为有利勘探目标。结合流线分析认为,有利勘探区为吐木休克断裂北侧挤压褶皱带中保存较好的古构造高点,即 Xiahe1 井以北和 He4 井东北方向(图9)。

巴楚地区西部麦盖提斜坡的玉尔吐斯组烃源岩具有接力热演化模式,在海西晚期开始生烃,目前依然具有供烃能力。由于构造反转,油气向北呈扩散型运移。因此认为现今斜坡带保存较好的古构造高点是有利的勘探目标。结合流线分析认为, Ma4 井以西、YB1 井与 PSB2 井之间的区域为有利的勘探目标(图9)。

塔北地区为远-近源联合供烃,油气运聚呈现汇聚型。目前塔北斜坡的玉尔吐斯组烃源岩仍然具有供烃能力。由于沙雅隆起持续抬升,使得油气持续向北调整。从 TS1 井来看,有利的勘探目标应具有良好的封盖条件。因此结合流线分析,仅提出有利的油气运移指向区,即 TS1 井以西、XH1 井以南的台地内区域(图9)。

6 结论

1) 玉尔吐斯组烃源岩热演化阶段具有加里东中期、加里东晚期—海西早期、海西晚期和喜马拉雅期晚期4个关键时期。热演化过程具有盆地坳陷区连续热演化、盆地斜坡区的接力热演化,以及盆地周缘山前带快速热演化3种模式。

2) 巴楚-塔北地区深层寒武系具备油气运移的条件。输导体系主要包括断裂型、输导层型和不整合面型。输导层型主要发育在下寒武统肖尔布拉克组和上寒武统下丘里塔格群,不整合型为 T_0^0 和 T_8^1 为主。

3) 通过肖尔布拉克组顶面油气成藏过程运聚模拟,提出了反向汇聚型、扩散型和汇聚型3种油气运聚模式。巴楚地区东部为反向汇聚型油气运聚模式,玛扎塔格断裂以北挤压褶皱带是古油藏调整的有利指向区;西部为扩散型油气运聚模式,油气主要向北聚集和调整,斜坡带北部保存较好的古构造高部位是有利的指向区。塔北地区为汇聚型油气运聚模式,油气持续向北调整,具有东西或近东西走向的断裂、X型断裂的中枢区域是有利的指向区。

4) 对于巴楚地区来说,东部有利的勘探目标为海西晚期前形成并保存较好的圈闭,位于吐木休克断裂北侧挤压褶皱带中保存较好的古构造高点,即 Xiahe1

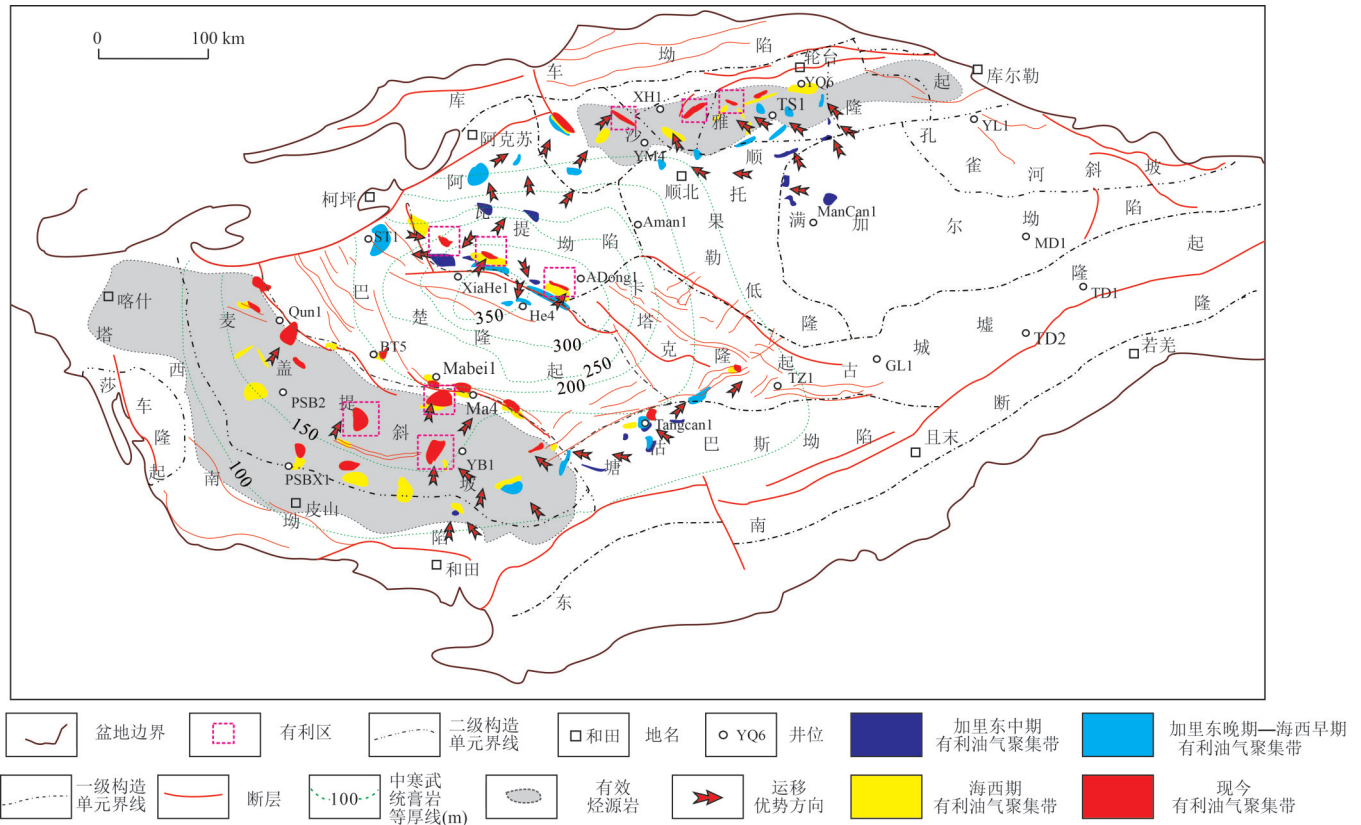


图9 塔里木盆地巴楚-塔北地区寒武系肖尔布拉克组储层有利油气聚集带预测(中寒武统膏岩分布据文献[23])

Fig. 9 Prediction map of favorable hydrocarbon accumulation zones of the Cambrian Xiaerbulake reservoirs in Bachu-Tabei area, Tarim Basin(the distribution of the Middle Cambrian gyprock as indicated by reference [23])

井以北和He4井东北方向的区域;西部为现今未被破坏的构造圈闭,即Ma4井以西、YB1井与PSB2井之间的区域。塔北地区有利的油气运移指向区位于TS1井以西、XH1井以南的台地内区域。

参考文献

- [1] 庞雄奇,汪文洋,汪英勋,等. 含油气盆地深层与中浅层油气成藏条件和特征差异性比较[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 1167-1187.
Pang Xiongqi, Wang Wenyang, Wang Yingxun, et al. Comparison of otherness on hydrocarbon accumulation conditions and characteristics between deep and middle-shallow in petroliferous basins [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(10): 1167-1187.
- [2] 马永生,蔡勋育,赵培荣. 深层、超深层碳酸盐岩油气储集层形成机理研究综述[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 181-192.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 181-192.
- [3] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等. 深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和“三元控储”模式:以四川普光气田为例[J]. 地质学报, 2010, 84(8): 1087-1094.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, et al. Formation mechanism of deep-buried carbonate reservoir and its model of three-element controlling reservoir: A case study from the Puguang

Oilfield in Sichuan [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(8): 1087-1094.

- [4] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 347-354.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, et al. Distribution and further exploration of the large-medium sized gas fields in Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 347-354.
- [5] 马永生,何登发,蔡勋育,等. 中国海相碳酸盐岩的分布及油气地质基础问题[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1007-1020.
Ma Yongsheng, He Dengfa, Cai Xunyu, et al. Distribution and fundamental science questions for petroleum geology of marine carbonate in China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1007-1020.
- [6] 任战利,祁凯,杨桂林,等. 沉积盆地深层热演化历史与油气关系研究现状及存在问题[J]. 非常规油气, 2020, 7(3): 1-7, 15.
Ren Zhanli, Qi Kai, Yang Guilin, et al. Research status and existing problems of relationship between deep thermal evolution history and oil and gas in sedimentary basins [J]. Unconventional Oil & Gas, 2020, 7(3): 1-7, 15.
- [7] 翟晓先,顾忆,钱一雄,等. 塔里木盆地塔深1井寒武系油气地球化学特征[J]. 石油实验地质, 2007, (4): 329-333.
Zhai Xiaoxian, Gu Yi, Qian Yixiong, et al. Geochemical characteristics of the Cambrian oil and gas in Well Tashen 1, the Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2007, (4): 329-333.

- [8] Zhu G Y, Milkov A V, Chen F R, et al. Non-cracked oil in ultra-deep high-temperature reservoirs in the Tarim Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 89: 252-262.
- [9] 何治亮, 金晓辉, 沃玉进, 等. 中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域[J]. *国石油勘探*, 2016, 21(1): 3-14.
He Zhiliang, Jin Xiaohui, Wo Yujin, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultra-deep marine carbonates in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(1): 3-14.
- [10] 漆立新. 塔里木盆地顺托果勒隆起奥陶系碳酸盐岩超深层油气突破及其意义[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(3): 38-51.
Qi Lixin. Oil and gas breakthrough in ultra-deep Ordovician carbonate formations in Shuntuoguole Uplift, Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(3): 38-51.
- [11] 陈荣林, 叶德燎, 徐文明. 滨里海盆地与塔里木盆地油气地质特征的类比[J]. *中国西部油气地质*, 2006(3): 261-266, 271.
Chen Ronglin, Ye Deliao, Xu Wenming. Comparison of geological characteristics between the Caspian Basin and the Tarim Basin[J]. *West China Petroleum Geosciences*, 2006(3): 261-266, 271.
- [12] 陈永权, 严威, 韩长伟, 等. 塔里木盆地寒武纪—早奥陶世构造古地理与岩相古地理格局再厘定——基于地震证据的新认识[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(10): 1831-1843.
Chen Yongquan, Yan Wei, Han Changwei, et al. Redefinition on structural paleogeography and lithofacies paleogeography framework from Cambrian to Early Ordovician in the Tarim Basin: A new approach based on seismic stratigraphy evidence[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(10): 1831-1843.
- [13] 杨宗玉, 罗平, 刘波, 等. 塔里木盆地阿克苏地区下寒武统玉尔吐斯组两套黑色岩系的差异及成因[J]. *岩石学报*, 2017, 33(6): 1893-1918.
Yang Zongyu, Luo Ping, Liu Bo, et al. The difference and sedimentation of two black rock series from Yurtus Formation during the Earliest Cambrian in the Aksu area of Tarim Basin, Northwest Chins[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(6): 1893-1918.
- [14] 韩慧宇. 塔里木盆地玉尔吐斯组烃源岩成因及生烃能力分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
Han Huiyu. The sedimentary model and hydrocarbon generation potential of Yurtus Formation source rocks in Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2017.
- [15] 熊冉, 周进高, 倪新锋, 等. 塔里木盆地寒武统玉尔吐斯组烃源岩分布预测及油气勘探的意义[J]. *天然气工业*, 2015, 35(10): 49-56.
Xiong Ran, Zhou Jingao, Ni Xinfeng, et al. Distribution prediction of Lower Cambrian Yuertusi Formation source rocks and its significance to oil and gas exploration in the Tarim Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(10): 49-56.
- [16] 朱光有, 陈斐然, 陈志勇, 等. 塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组优质烃源岩的发现及其基本特征[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(1): 8-21.
Zhu Guangyou, Chen Feiran, Chen Zhiyong, et al. Discovery and basic characteristics of the high-quality source rocks of the Cambrian Yuertusi Formation in Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(1): 8-21.
- [17] 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.
- [18] 张春宇, 管树巍, 吴林, 等. 塔西北地区早寒武世玉尔吐斯组热液作用及沉积模式[J]. *地质前缘*, 2019, 26(1): 202-211.
Zhang Chunyu, Guan Shuwei, Wu Lin, et al. Hydrothermal activity and depositional model of the Yurtus Formation in the Early Cambrian, NW Tarim, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 202-211.
- [19] 郑见超, 李斌, 刘羿伶, 等. 塔里木盆地寒武统玉尔吐斯组烃源岩热演化模拟分析[J]. *油气藏评价与开发*, 2018, 8(6): 7-12.
Zheng Jianchao, Li Bin, Liu Yiling, et al. Study on thermal evolution modeling of Lower Cambrian Yuertusi source rock, Tarim Basin[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2018, 8(6): 7-12.
- [20] 郑见超, 李斌, 吴海燕, 等. 基于盆地模拟技术的烃源岩热演化史及油气关系研究——以塔里木盆地玉尔吐斯组为例[J]. *油气地质与采收率*, 2018, 25(5): 39-49.
Zheng Jianchao, Li Bin, Wu Haiyan, et al. Study on the thermal history of the source rock and its relationship with hydrocarbon accumulation based on the basin modeling technology: A case of the Yuertusi Formation of Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2018, 25(5): 39-49.
- [21] 杜金虎, 潘文庆. 塔里木盆地寒武系盐下白云岩油气成藏条件与勘探方向[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(3): 327-339.
Du Jinhui, Pan Wenqing. Accumulation conditions and play targets of oil and gas in the Cambrian subsalt dolomite, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(3): 327-339.
- [22] 易士威, 李明鹏, 郭绪杰, 等. 塔里木盆地寒武系盐下勘探领域的重大突破方向[J]. *石油学报*, 2019, 40(11): 1281-1295.
Yi Shiwei, Li Mingpeng, Guo Xujie, et al. Breakthrough direction of Cambrian pre-salt exploration fields in Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(11): 1281-1295.
- [23] 季天愚, 杨威, 武雪琼, 等. 塔里木盆地台盆区寒武系盖层评价及对盖层有利区的优选[J/OL]. *中国地质*: 1-26[2021-12-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200617.1803.002.html>.
Ji Tianyu, Yang Wei, Wu Xueqiong, et al. Evaluation of Cambrian caprock in the platform-basin area of Tarim Basin and optimization of favorable area for caprock [J/OL]. *Geology in China*: 1-26 [2021-12-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200617.1803.002.html>.
- [24] 张天付, 黄理力, 倪新锋, 等. 塔里木盆地柯坪地区下寒武统吾松格组岩性组合及其成因和勘探意义——亚洲第一深井轮探1井突破的启示[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 928-940.
Zhang Tianfu, Huang Lili, Ni Xinfeng, et al. Lithological combination, genesis and exploration significance of the Lower Cambrian Wusonggeer Formation of Kalpin area in Tarim Basin: Insight through the deepest Asian onshore well——Well Luntan 1[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 928-940.
- [25] 张达景, 王英民, 肖志高, 等. 塔里木盆地台盆区古生界油气输导体系与勘探方向[J]. *石油与天然气地质*, 2006(5):

- 604-613.
Zhang Dajing, Wang Yingming, Xiao Zhigao, et al. Paleozoic carrier system in platform-basin transitional area of Tarim Basin and future exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2006(5): 604-613.
- [26] 尹微,樊太亮,曾清波. 塔里木盆地巴楚地区输导体系类型及油气成藏[J]. 石油实验地质, 2006(4): 340-344.
Yin Wei, Fan Tailiang, Zeng Qingbo, et al. Pathway system types and hydrocarbon accumulation in Bachu area, the Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2006(4): 340-344.
- [27] 李坤,赵锡奎,张小兵,等. 塔里木盆地阿克库勒凸起油气输导体系类型与演化[J]. 地质科学, 2007(4): 766-778.
Li Kun, Zhao Xikui, Zhang Xiaobing, et al. Hydrocarbon migration pathway system types and evolution in the Akekule rise, Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2007(4): 766-778.
- [28] 武芳芳,朱光有,张水昌,等. 塔里木盆地油气输导体系及对油气成藏的控制作用[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 332-341.
Wu Fangfang, Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, et al. Types of hydrocarbon migration pathways and its controlling effects on hydrocarbon distribution in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 332-341.
- [29] 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.
- [30] 郑剑锋,潘文庆,沈安江,等. 塔里木盆地柯坪露头区寒武系肖尔布拉克组储集层地质建模及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(3): 499-511.
Zheng Jianfeng, Pan Wenqing, Shen Anjiang, et al. Reservoir geological modeling and significance of Cambrian Xiaerbulak Formation in Keping outcrop area, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 499-511.
- [31] 严威,郑剑锋,陈永权,等. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组白云岩储层特征及成因[J]. 海相油气地质, 2017, 22(4): 35-43.
Yan Wei, Zheng Jianfeng, Chen Yongquan, et al. Characteristics and genesis of dolomite reservoir in the Lower Cambrian Xiaerbulak Formation, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2017, 22(4): 35-43.
- [32] 何金有,邬光辉,李启明,等. 塔里木盆地震旦系石油地质特征及勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(5): 482-484.
He Jinyou, Wu Guanghui, Li Qiming, et al. Petroleum geologic characteristics and hydrocarbon exploration objectives of Sinian in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(5): 482-484.
- [33] 何金有,邬光辉,徐备,等. 塔里木盆地震旦系-寒武系不整合面特征及油气勘探意义[J]. 地质科学, 2010, 45(3): 698-706.
He Jinyou, Wu Guanghui, Xu Bei, et al. Characteristics and petroleum exploration significance of unconformity between Sinian and Cambrian in Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45(3): 698-706.
- [34] 张宸嘉,樊太亮,高志前,等. 塔里木盆地寒武系中统-上统不整合面识别特征及地质意义——以肖尔布拉克剖面为例[J]. 东北石油大学学报, 2018, 42(5): 92-103, 11.
Zhang Chenjia, Fan Tailiang, Gao Zhiqian, et al. Geological significance and identification features of the Middle-upper Cambrian Boundary in the Tarim Basin: A case study from the Xiaerbulake Outcrop[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2018, 42(5): 92-103, 11.
- [35] 宁飞,云金表,李建交,等. 塔里木盆地巴楚隆起西南缘构造特征与勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 299-308.
Ning Fei, Yun Jinbao, Li Jianjiao, et al. Structural characteristics and exploration prospects of the southwestern margin of Bachu Uplift, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 299-308.
- [36] 张永,何登发,刘长磊. 塔里木盆地巴楚隆起海米罗斯断裂带几何学与运动学特征[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 984-1000.
Zhang Yong, He Dengfa, Liu Changlei. Geometrical and kinematical characteristics of Haimiluosi fault zone in the Bachu Uplift, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 984-1000.
- [37] 张春宇,管树巍,吴林,等. 塔里木盆地寒武统碳酸盐岩地球化学特征及其古环境意义:以舒探1井为例[J]. 地质科技通报, 2021, 40(5): 99-111.
Zhang Chunyu, Guan Shuwei, Wulin, et al. Geochemical characteristics and its paleo-environmental significance of the Lower Cambrian Carbonate in the northwestern Tarim Basin: A case study of well Shutun-1[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(5): 99-111.
- [38] 许丽莹. 柯坪地区下寒武统肖尔布拉克组沉积储层研究[D]. 北京:中国石油大学(北京), 2019.
Xu Liying. Study of sedimentary facies and reservoir geology of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in the Keping area [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.
- [39] 云露,翟晓先. 塔里木盆地塔深1井寒武系储层与成藏特征探讨[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(6): 726-732.
Yun Lu, Zhai Xiaoxian. Discussion on characteristics of the Cambrian reservoirs and hydrocarbon accumulation in Well Tashen-1, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6): 726-732.
- [40] 乔占峰,沈安江,倪新峰,等. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组丘滩体系类型及其勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 392-402.
Qiao Zhanfeng, Shen Anjiang, Ni Xinfeng, et al. Types of mound-shoal complex of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Tarim Basin, northwest China, and its implications for exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 392-402.

(编辑 梁 慧)