

塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践

鲁新便¹, 胡文革¹, 汪彦², 李新华², 李涛¹, 吕艳萍², 何新明², 杨德彬²

(1. 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011; 2. 中国石化西北油田分公司勘探开发研究院, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要:塔河地区上奥陶统覆盖区的碳酸盐岩地层经多期构造变形和岩溶作用后,沿大型溶蚀断裂带形成了各种不规则的缝洞体。利用高精度三维地震的精细相干、振幅变化率、地震时间切片等技术,结合野外露头、大量钻井资料和生产动态数据进行综合研究,首次提出了断溶体圈闭的理论概念,阐述了塔河上奥陶统覆盖区断溶体油藏的形成机理及其特征,依据其空间展布形态和控制因素将其划分为条带状、夹心饼状和平板状等。实践证实,断溶体圈闭(油藏)是塔河外围斜坡区极为特殊的一种油气藏类型,不同类型断溶体油藏开发效果差异较大,其中条带状断溶体油藏开发效果最好,该类圈闭的研究成果对塔里木盆地同类油藏的勘探开发都具有重要的借鉴意义。

关键词:缝洞体;断溶体;岩溶作用;碳酸盐岩;塔河油田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.3 **文献标识码:**A

Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin

Lu Xinbian¹, Hu Wenge¹, Wang Yan², Li Xinhua², Li Tao¹, Lyu Yanping², He Xinming², Yang Debin²

(1. Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2. Exploration & Production Research Institute of Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: Various irregular fractured-vuggy reservoirs were formed along the large fault-karst belts in the area covered by the Upper Ordovician in Tahe area due to multi-phase tectonic deformations and karstifications of the carbonates. Using fine coherence, amplitude change rate, time slice and other properties of high-precision three-dimensional seismic, outcrops, drilling and production data, this paper first presented a theoretical concept of fault-karst trap, and elaborated its forming mechanism and geologic characteristics in this area. The fault-karst reservoirs can be divided into three types by their shapes and controlling factors: banded, sandwich and tabular reservoirs. According to recent development practices, the fault-karst reservoir is a very special reservoir type in this area. The development effectiveness of different fault-karst carbonate reservoirs is quite dissimilar, with the banded ones being the best in development performance. It is of great significance for the petroleum exploration and development of similar reservoirs in the Tarim Basin.

Key words: fractured-vuggy rock mass, fault-karst rock mass, karstification, carbonate, Tahe oilfield, Tarim Basin

深大断裂体系在含油气盆地油气成藏和构造演化中的重要性已得到国内外众多学者的认可,对于断裂体系、断裂圈闭理论及其描述的技术方法也已取得了许多新认识和新成果^[1-5]。然而,前人更多关注的是由砂岩油藏断裂以及伴生的挤压褶皱、冲断、扭动变形、构造裂缝等地质体构成的各种圈闭类型,而对于碳酸盐岩地层内的断裂带本身能否形成有效的油气圈闭,特别是对于受多期岩溶作用改造后深大断裂及其派生的各类构造体所形成的碳酸盐岩断控岩溶缝洞体圈闭(油藏)鲜有报道。

长期以来,前人认为塔河油田属于阿克库勒凸起上的碳酸盐岩缝洞型油藏,塔河主体区因挤压、隆升而遭受强烈剥蚀,导致上奥陶统一泥盆系缺失,下石炭统巴楚组泥岩直接覆盖在中-下奥陶统一间房组或鹰山组之上,经多期岩溶作用的叠加改造,形成以风化壳岩溶为主的缝洞体^[6-8],其中岩溶古地貌是控制海西早期岩溶发育的重要因素之一。但塔河外围斜坡区,受上奥陶统覆盖的影响,岩溶缝洞体的发育与断裂带、构造变形带之间有较好的匹配关系,具有明显的断控岩溶特征,以深大断裂带为核心发生溶蚀扩大,使之成为

收稿日期:2014-09-28;修订日期:2015-02-16。

第一作者简介:鲁新便(1963—),男,博士、教授级高级工程师,碳酸盐岩缝洞型油藏开发地质及油藏工程设计。E-mail:lxnbmail@sina.com。

通讯作者简介:汪彦(1976—),男,博士、高级工程师,碳酸盐岩开发地质。E-mail:wangyan19760902@163.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB201005);国家科技重大专项(2011ZX05049)。

覆盖区中—下奥陶统岩溶缝洞体发育的有利区带,从而造就了塔河地区极为特殊的一种圈闭类型——断溶体圈闭。因此,深化研究塔河油田覆盖区断控岩溶缝洞体油藏对塔里木盆地同类油藏的勘探开发都具有重要的借鉴意义。

1 地质概况

塔河油田位于塔里木盆地北部沙雅隆起阿克库勒凸起的南部斜坡区,其奥陶系油藏是我国目前最为特殊的一类大型碳酸盐岩油藏^[6,9],先后经历了加里东中期、海西期、印支期—燕山期及喜马拉雅期等多期构造运动^[6-7,10],在上述构造演化背景下,形成了一系列不同级别、多期叠加、规模不等的断裂系统(图1),其中加里东中晚期—海西早期及海西晚期构造运动对断裂的发育影响最大。

经过数十年的开发实践表明,塔河油田深大断裂带不仅仅对油气聚集成藏具有明显的控制作用,而且深断裂体系(图1)及伴生的挤压褶皱、冲断和扭动变

形等地质体,在经历加里东期—海西早期长期岩溶作用的叠加改造后,形成了形态多样的岩溶缝洞体系,表现为大规模的地下古洞穴和古喀斯特溶蚀地貌。不同尺度的断裂体系除了与常规砂岩油藏的断裂控储控藏作用具有异曲同工之外,更为特殊的意义在于,塔河油田覆盖区中—下奥陶统碳酸盐岩中的深大断裂体系,经加里东期和海西期等多期岩溶作用改造后,沿这些深大断裂带溶蚀形成形态各异、尺度差异明显的柱状溶蚀孔缝及大型洞穴等储集空间,构成缝洞型油藏重要的一类油气储集空间。

2 断溶体圈闭的概念及分类

2.1 断溶体圈闭概念

塔河油田的勘探开发成果表明,奥陶系油藏主要的油气富集区多沿通源的深大断裂带附近或与之相关的次级断裂发育区,呈带状分布,在覆盖区尤为明显。据统计,原油累计产量大于 5×10^4 t的高产油气井大

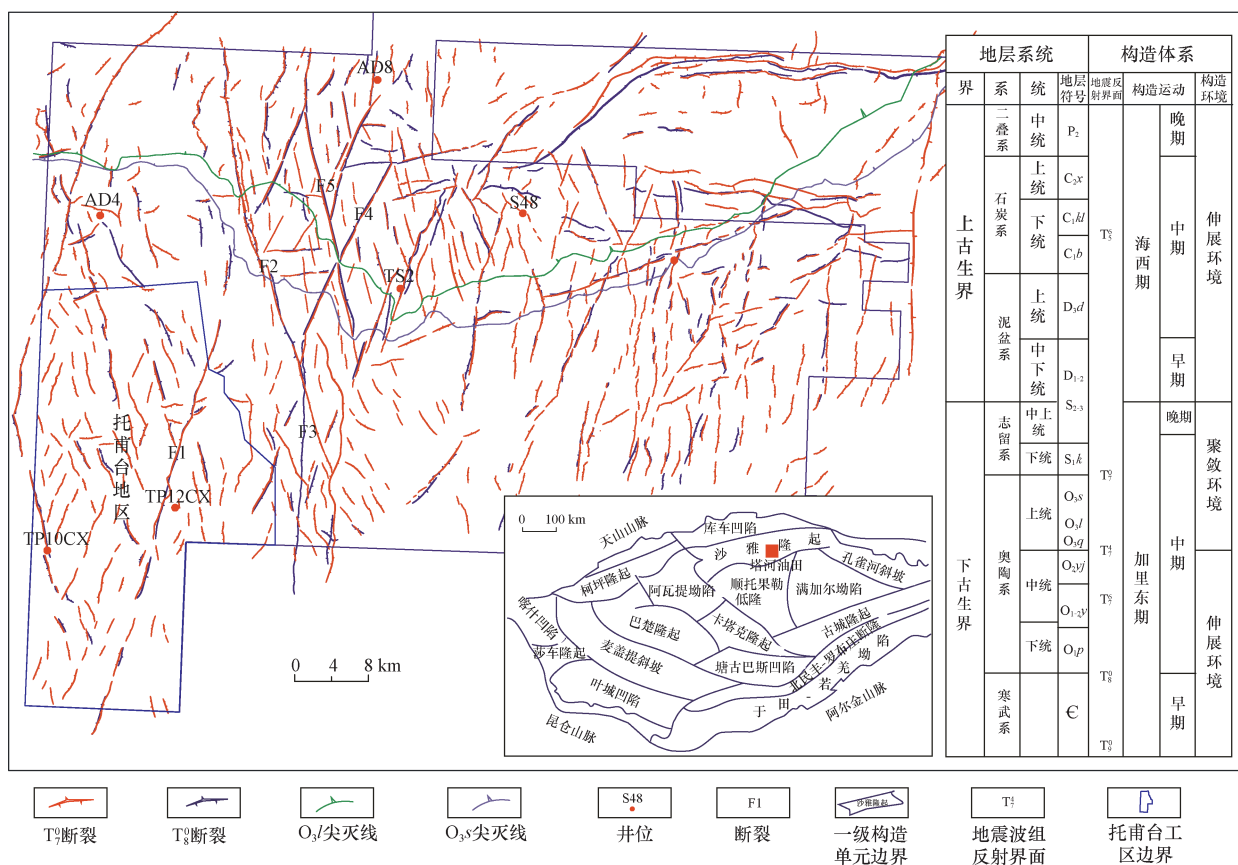


图1 塔河油田构造位置及大型主干断裂分布

Fig. 1 Structural location and distribution of the major faults of Tahe oilfield

P₂. 中二叠统; C₂x. 上石炭统小海子组; C₁kl. 下石炭统卡拉沙依组; C₁b. 下石炭统巴楚组; D₃d. 上泥盆统东河塘组; D₁₋₂-S₂₋₃. 中下统泥盆—中上志留统; S₁k. 下志留统柯坪塔格组; O₃s. 上奥陶统桑塔木组; O₃l. 上奥陶统良里塔格组; O₃q. 上奥陶统恰尔巴组; O₂yj. 中奥陶统一间房组; O₁₋₂y. 中下奥陶统鹰山组; O₁p. 下奥陶统蓬莱坝组; C. 寒武系; T₅⁰. 下石炭统标准灰岩(双峰灰岩)顶反射波界面; T₇⁰. 奥陶系顶反射波界面; T₇¹. 加里东中期 I 幕构造运动造成的不整合面反射波界面; T₈⁰. 寒武系顶反射波界面; T₉⁰. 震旦系顶反射波界面; F1. TP12CX 断裂; F2. S99 断裂; F3. 兰尔断裂; F4. T708 断裂; F5. T707 断裂

多数(约70%)与深大断裂有密切关系,在平面上具有“通源断裂断到哪里,油气就富集到哪里”的分布特征,其中在覆盖区的北西向及北东向相互切割的断裂体系上油气富集程度最高(图2)。贾承造等认为断裂体系对油气成藏的“油气运移、输导”控制作用主要在于断裂或断裂带可作为烃类的输导通道或者其遮挡面^[1,7,11-13]。罗群曾以柴达木盆地北缘的冷湖三号石深1井为例,提出“断层体圈闭”概念,认为具有储集体条件的断层体周缘被封闭,且其上方又有良好的封盖条件,当有油气聚集便可形成断层体油藏^[2-3]。由此

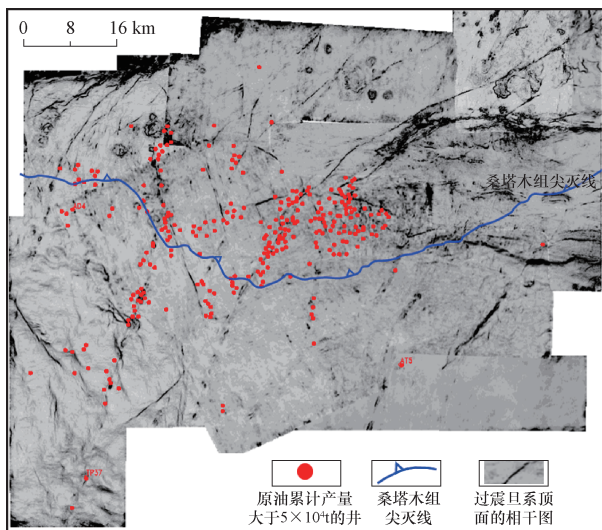


图2 塔河油田过 T_0 (震旦系顶)精细相干显示的通源深大断裂及中-高产油井分布

Fig. 2 Distribution of deep source rock-rooted faults and medium-high production wells on the top Sinian fine coherent reflection(T_0) in Tahe oilfield

可见,塔河油田覆盖区高累产井沿通源深大断裂带分布是通源断裂“控储成藏”的表现,也揭示了深大断裂带是中-下奥陶统油气富集最主要的控制因素之一。

综合塔河油田奥陶系油藏现场实践,本文将上奥陶统覆盖区碳酸盐岩受多期次构造挤压作用后,沿深断裂带(T_7-T_9)发育一定规模的破碎带,经多期岩溶水沿断裂下渗或局部热液上涌致使破碎带内断裂、裂缝被溶蚀改造而形成的柱状溶蚀孔、洞储集体,在上覆泥灰岩、泥岩等盖层封堵以及侧向致密灰岩遮挡下,形成一种由不规则状的断控岩溶缝洞体构成的圈闭类型,简称断溶体圈闭(图3)。这类圈闭在后期油气沿深大断裂垂向运移、充注成藏后形成一类特殊的断溶体油气藏。

2.2 圈闭类型

通过分析沿断层的岩溶规模、活动期次和构造样式,总结不同断裂组合样式下断溶体圈闭的差异岩溶特征及其油气富集规律,按断溶体圈闭展布形态划分为条带状、夹心饼状和平板状3类(表1)。

1) 条带状

塔河地区条带状断溶体圈闭受控于区域内的大型主干断裂,断裂样式以“Y字形”或“花状”为主,圈闭剖面形态多为漏斗形或“V”字形,平面上沿断裂走向呈不规则的宽条带状分布。此类圈闭油气富集与贯穿基底的深大断裂有极大联系,这些深大断裂往往是控制区域性构造格局的主干断裂,部分纵向上向上可断穿 T_5 ,向下断至烃源岩,平面延伸距离长,最长达45 km。其特征为压扭性、高角度走滑断裂系统,继承性发育。

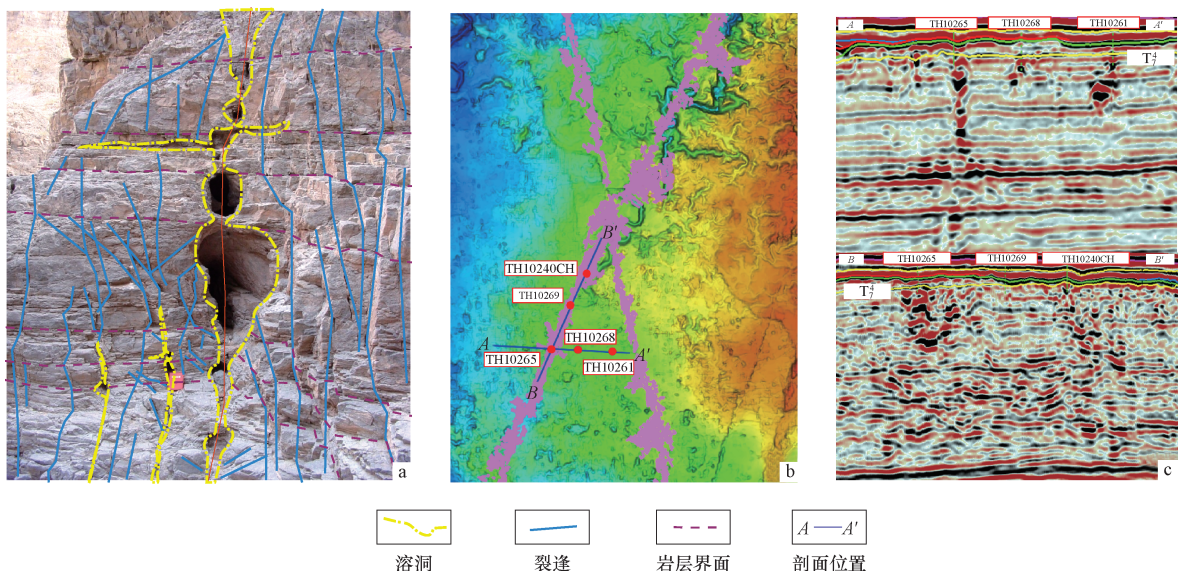


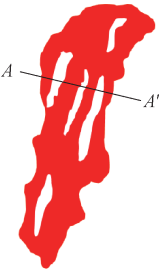
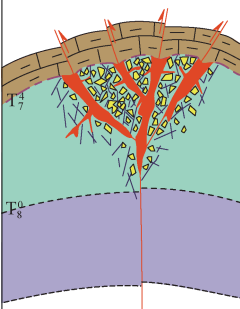
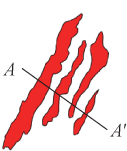
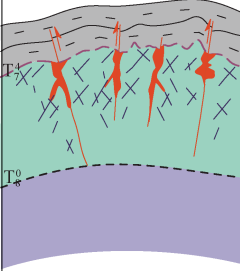
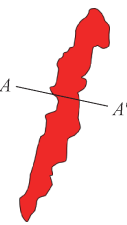
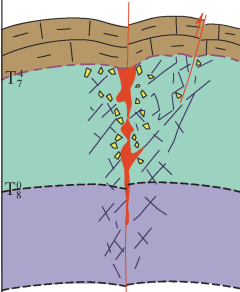
图3 塔河油田奥陶系断溶体圈闭露头、平面分布及其反射特征剖面

Fig. 3 Outcrop, plane distribution and seismic reflection profiles of fault-karst traps in Tahe oilfield

a. 断控岩溶露头; b. 利用相干体刻画的断溶体圈闭与构造面的叠合图; c. 断裂纵、横向地震反射剖面

表 1 塔河油田奥陶系断溶体圈闭(油藏)类型分类

Table 1 Classification of fault-karst trap(reservoir) of the Ordovician in Tahe oilfield

圈闭(油藏)类型		油藏模式示意图		发育位置	储层类型	主要分布区
		平面	A—A'剖面			
断溶体油藏	条带状			中-下奥陶统,进入 T_7^4 界面以下 0~240 m	溶洞型储集体、孔洞型储集体	托甫台地区、10 区南部及 8 区
	夹心饼状			中-下奥陶统,进入 T_7^4 界面以下 0~120 m	孔洞型储集体、裂缝-孔洞型储集体	10 区北部地区、12 区东部
	平板状			中-下奥陶统,进入 T_7^4 界面以下 0~160m	裂缝-孔洞型储集体、裂缝储集体	托甫台地区、10 区南部及 8 区、12 区西南部

注: T_7^4 为加里东中期I幕构造运动造成的不整合面反射波界面; T_8^0 为寒武系顶反射波界面。

在后期沿断裂下渗的大气淡水溶扩作用下形成以溶蚀的大型孔洞为主的优质储集体,同时油气沿断裂向上运移成为油气富集的有利部位。目前条带状断溶体油藏实钻井钻遇溶洞的油井占 46.2%,平均单井产能高达 37.4 t/d,生产中表现为能量较强,可长期稳定开采。

2) 夹心饼状

夹心饼状断溶体圈闭是受主干断裂所伴生的次级断裂控制,与主干断裂呈平行状或雁列式展布。此类伴生断裂形成期次变晚、纵向切割深度降低,顺断裂溶蚀规模变小、横向控储范围变小、油气富集程度相对主干断裂变差。这一系列平行或雁列式伴生断裂所形成的断溶体圈闭形态在平面上多呈夹心饼状,沿断裂走向呈一组同向的窄条带状分布。断裂面岩溶作用较强,次级断裂间破碎程度变差,主要发育裂缝型储集体,且岩溶作用也变弱,油气主要在伴生断裂面附近富集。塔河油田中夹心饼状断溶体油藏内共投产井 37 口,建产井 32 口,平均单井产能 20.2 t/d。

3) 平板状

平板状断溶体圈闭剖面上为单一线状,平面上为

孤立的窄条带状。该类油藏主控因素断裂有两种:一类受控于深大断裂,断裂的活动强度小,岩溶改造作用相对较弱,仅沿深断裂面附近发育较大的洞穴,油气局部较富集,投产井的平均产能为 16.5 t/d。另一类受控于 T_7^4 内幕断裂,由于此类断裂发育规模变小,主要为裂缝型储集体。局部井区沿小规模断裂可溶蚀形成孤立洞穴。如 T753CH 井侧钻点钻遇放空漏失,但投产后自喷期间油压下降快,表现为定容特征,该类油藏投产井的平均产能为 10.5 t/d。

3 油藏地质特征

本文以塔河托甫台地区为例(图 1),进一步阐述断溶体油藏的地质特征。托甫台地区位于塔里木盆地沙雅隆起中段阿克库勒凸起轴部的西南翼,是塔河油田西南部上奥陶统覆盖区,也是塔河地区发育断溶体油藏最典型的区块之一。区内多发育加里东早-中期形成的一系列 NNE 和 NNW 向深大断裂带,这些断裂基本控制了托甫台地区储层发育程度及分布,且断裂

规模较大、切割层位较深,对中-下奥陶统碳酸盐岩储集空间改造和油气垂向运移调整具有重要作用。

3.1 油藏分布特征

断溶体油气藏的空间展布不受局部构造高低或风化壳不整合面的控制,宏观上属于岩性油气藏范畴,这与塔河地区发育的大型走滑断裂体系息息相关。即使是同一条主干断裂带内,在构造演化过程中曾多次变换扭动方向,其宽度时窄时宽,变形强度亦是有强有弱,拉张、挤压、压扭现象共存,常伴生近乎直立的次级断裂,其倾向与主干断裂走向差别较大^[4-5]。在主干断裂带上伴生一系列的次级断裂,这些次级断裂与主干断裂带呈现为平行、不连续的斜交,受岩溶作用后,在剖面上呈漏斗形、V字形、梯形或线形(表1),在平面上表现出延伸不连续、宽窄不相等、边界不规则的分布特征(图4)。往往是同一断裂带上,受地应力和岩溶作用差异的影响导致不同井区具有明显的分段性。如塔河托甫台地区贯穿全区的 TP12CX 主干断裂带,延伸长度达 45 km,沿断裂带的溶蚀宽度为 0.1~2.4 km 不等,可划分为 5 个相对独立的断溶体油藏(表2;图4)。

3.2 储集体发育特征

沿深大断裂带溶蚀形成的断溶体油藏,储集空间以大型洞穴或溶蚀孔洞为主^[14-16]。此类储集体在钻井过程中常发生放空、泥浆漏失和井涌等现象,一般因岩心破碎或取不到岩心而缺乏实测物性数据,但是测试分析、测井解释和生产动态表明大型孔洞和洞穴型储层是优质的储集体。沿着 TP12CX 断裂带上实钻井钻遇溶洞型储层的钻遇率高达 46%,平均洞高 4.9 m,如 TP12CX 井、TP101 井和 TP29 井等,其中 TP12CX 井 O_{2y} 顶深为 6 359.3m(垂深),在垂深 6367.44~6 376 m 发生放空漏失,洞高 8.56 m,漏失泥浆 1 812 m³。根据地震、测井和钻录井资料研究表明,受岩溶水选择性溶蚀和裂隙发育程度的影响,断溶体油藏内部结构极其复杂,储集空间纵横向非均质性非常强。总体而言,由断溶体核部向边部及走向延伸末端,储集体发育程度和油气富集程度逐渐变差。

3.3 油藏开发特征

由于受岩溶和断裂发育程度影响,断溶体油藏纵、横向缝洞结构分隔性明显,同一断裂带上不同的地段能形成具有不同油水关系和能量体系的断溶体油藏。塔河油田托甫台地区 TP12CX 主干断裂带上的 TP101、TP249X、TP12CX、TP315 和 TP310 断溶体油藏的开发特征就表现出明显的差异性(表3)。总体而言,从南向北原始地层压力减小,原油密度和气油比逐

渐变,初期投产后均未见水。不同类型的断溶体油藏生产特征差异:条带状断溶体油藏(TP101、TP12CX 和 TP310)的单井产能高、含油范围大,但油柱高度相对平板状或夹心饼状断溶体油藏要稍低、自然递减明显低于其它两类断溶体油藏。从流压变化趋势来看(图5),投产较早的 TP12CX 条带状断溶体油藏初期缓后期下降快的趋势,TP101 和 TP310 条带状断溶体油藏变化稳定,而 TP249X 平板状和 TP315 夹心饼状断溶体油藏流压明显下降较快。由此可见,不同类型断溶体油藏的开发特征差异性较大。

4 断溶体油藏形成机理

4.1 多期继承性断裂

塔河地区奥陶系油藏的断裂体系一方面在早期构造应力作用下,纯灰岩初期发生以小规模、小断距的一系列错综复杂裂隙为主的裂缝带,尚未形成上下贯通的断裂面,但受地应力场的影响,裂缝仍具有一定的方向性。随地应力增加,断裂继承性发育,这些裂隙逐渐增多且破坏程度加剧形成一个或多个明显的错动面,多期的构造运动导致断层核部破碎程度增强,破碎范围增大,并使裂缝带发育成由断层角砾岩、细粒碎裂岩等组成的滑动破碎带^[4-5],在平面上由核部向两侧以发育大量诱导裂缝为主(图6a)。另一方面,因区域性的地壳抬升,导致大幅度的地层剥蚀,受岩溶和地表风化共同作用,早期断裂在垂向上沿断裂、裂缝继承性发育,致使断裂更为破碎、裂隙更为连通^[14]。因此,塔河奥陶系深大断裂带经历多期运动后,形成彼此交织、棋盘网格的断裂体系,高密度的网格状断裂致使灰岩地层破碎加剧、连通性增强(图6b),这都为后期岩溶改造提供了先决条件。

4.2 多期岩溶改造作用

塔河地区海西早期构造运动使该地区阿克库勒凸起轴部地区的碳酸盐岩台地大幅度抬升,伴有大量断裂构造产生,在长达 110 Ma 里,奥陶系出露地表长期遭受风化剥蚀,形成由残留的中-下奥陶统构成的“古潜山”风化壳,由此形成以海西期岩溶为主的缝洞体,多为“蜂窝状或网状”分布,横向连通性较好,但风化壳顶部充填严重^[6]。

在阿克库勒凸起轴部外围的覆盖区,在加里东中-晚期处于离散向聚敛、挤压背景转变,因构造变形宽缓,出露地层起伏不大,大气水动力相对较弱,加之构造断裂、裂缝还不十分发育,岩溶强度不大,主要发育以粒内溶孔、粒间溶孔为主的表生岩溶缝洞体。到海西期全区进入挤压背景,断裂活动强烈,前期 SN 向

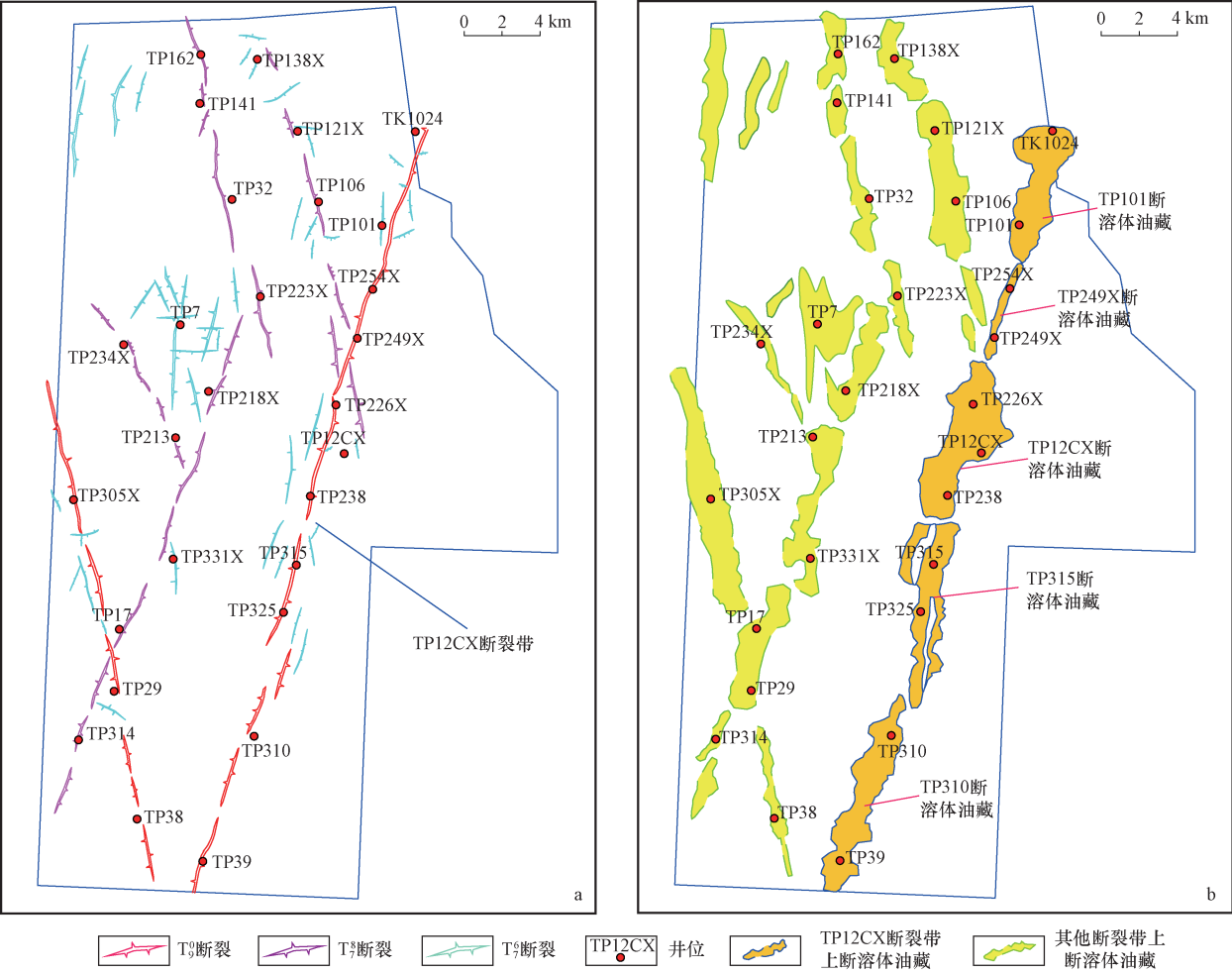


图 4 塔河托甫台地区主干断裂分布 a) 及不同类型断溶体油藏平面分布 b)

Fig. 4 Plain distribution of the major faults a) and different fault-karst reservoirs b) in Tuofutai area, Tahe oilfield

表 2 塔河托甫台地区 TP12CX 断裂带上不同类型断溶体油藏特征参数对比

Table 2 Comparison of parameters of different fault-karst reservoirs of TP12CX fault belt in Tuofutai area, Tahe oilfield		断裂带要素				储层特征		
断裂带名称	断溶体油藏	长度/km	宽度/km	深度/km	断开层位	溶洞钻遇率/%	溶洞高/m	储地比
TP12CX	TP101 条带状	11.6	0.2~2.3	1.5~1.8	T ₅ ⁶ —T ₉ ⁰	38.1	3.3	0.128
	TP249X 平板状	6.8	0.1~0.3	1.5~1.8	T ₅ ⁶ —T ₉ ⁰	16.7	3.0	0.179
	TP12CX 条带状	7.8	0.3~2.4	1.5~1.8	T ₇ ⁰ —T ₉ ⁰	46.7	4.9	0.161
	TP315 夹心饼状	8.3	0.2~1.6	0.9~1.2	T ₅ ⁶ —T ₉ ⁰	21.4	2.7	0.063
	TP310 条带状	10.5	0.1~0.8	0.9~1.2	T ₇ ⁰ —T ₉ ⁰	10.0	1.2	0.082

表 3 塔河托甫台地区 TP12CX 断裂带上不同类型断溶体油藏生产参数对比

Table 3 Production parameters of different fault-karst reservoirs of TP12CX fault belt in Tuofutai area, Tahe oilfield								
油藏名称	地层压力/ MPa	万吨采油压降/ MPa	原油密度/ (g·cm ⁻³)	油柱高度/m	气油比/ (m ³ ·t ⁻¹)	单井产能/ (t·d ⁻¹)	初期含水率/ %	自然递减率/ %
TP101 条带状	61.9	1.34	0.817~0.822	96	29.5	104.5	0	17.7
TP249X 平板状	68.4	2.26	0.796~0.804	105	53.5	59.5	0	28.8
TP12CX 条带状	71.7	1.68	0.722~0.735	93	97.0	72.7	0	23.2
TP315 夹心饼状	72.7	1.79	0.698~0.717	81	103.8	40.9	0	21.1
TP310 条带状	79.1	1.15	0.682~0.688	110	150.0	79.6	0	18.5

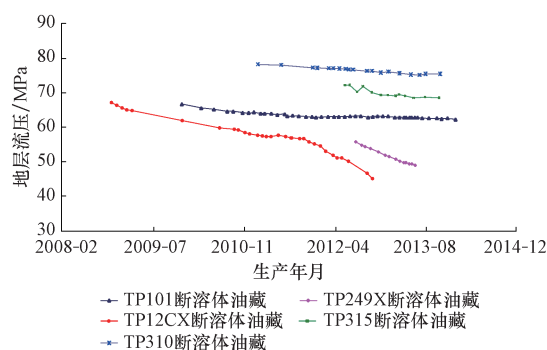


图5 塔河托甫台地区 TP12CX 深大断裂带上 5 个不同类型断溶体油藏流压随时间变化曲线

Fig. 5 Flowing pressure vs. time of five fault-karst reservoirs in TP12CX fault belt in Tuofutai area, Tahe oilfield

压扭性断裂向张扭性断裂转化,导致早期断裂体系的破碎程度加剧,使之成为流体的活动通道,因此海西期的地表水沿断裂破碎面不断地对加里东期岩溶缝、洞进行了进一步扩大、溶蚀或再改造,形成沿断裂带发育以“柱状溶洞”为主的缝洞储集体(图 6c)。

4.3 持续循环的岩溶水系

周文等认为在构造的主体部位、翼部或地表径流带只要存在断裂,就可能形成对流环——称为“对流环”模式^[17],也可称为“覆盖承压岩溶模式”^[18],均可形成深部岩溶洞穴。从岩溶机理上讲,研究区深部溶洞主要受到断裂形成的“潜水对流环”的控制。乔占峰等人通过对塔北地区英买 2 构造研究,提出了“断裂控制的非暴露型大气水岩溶作用模式”^[19]。

经岩心观察,研究区上奥陶统在构造活动期曾形成大量开启的断裂,如 T9I3 井桑塔木组的岩心中发现了宽度大于 4 cm 的构造裂隙,裂隙被方解石充填,并夹有泥岩角砾,在方解石内部还存在缝面,由泥质充填,具有

明显擦痕,反映了断裂多次活动和充填的过程。由此推断出塔河地区可能主要存在三种不同的岩溶水循环方式。第一种是沿着沟通剥蚀区和覆盖区的大型走滑断裂带内,形成沿着断裂带走向的“对流环”模式^[17];第二种是深大断裂与伴生断裂综合交错,形成裂隙的网络格局,下渗岩溶水由高势能区向次级断裂和裂缝系统扩散形成大气水循环^[19];第三种是局部孤立(深)断裂自身内部也可形成沿断裂带的小型“对流环”模式。

4.4 油气运聚条件

塔里木满加尔坳陷寒武系一中、下奥陶统烃源岩是塔河地区奥陶系油藏的主力烃源岩,坳陷和斜坡区寒武系一中、下奥陶统烃源岩提供的高成熟—过成熟油气沿 T_7^4 等不整合面从南东向北西运移至塔河地区^[6,11-13,20-23]。开发实践表明,塔河地区覆盖区奥陶系油藏的深大断裂已延伸到该地区寒武系—奥陶系烃源岩,纵向断开层位 $T_7^0-T_9^0$,这些通源的深大断裂在长期的构造运动和岩溶作用后,深大断裂系统不断地继承性破碎、反复地溶蚀扩大,伴生出大量被溶蚀扩大的次级断裂,都可成为后期油气充注、运移和成藏的优势通道、储存空间。但由于不同地区地应力和岩溶作用差异的影响,断裂带具有明显分段性,储集体具有相对分隔性,油藏内油水界面极不统一。因此,覆盖区深部的油气主要是沿通源深断裂带以垂向充注和运移为主,在溶蚀破碎带内部或所伴生的次级断裂间侧向调整,整体具有“藏下有源”的成藏特征。

5 开发实践

碳酸盐岩“断溶体圈闭”概念的提出,不但深化了塔河地区不同岩溶背景下缝洞体的成因认识,也使对断裂

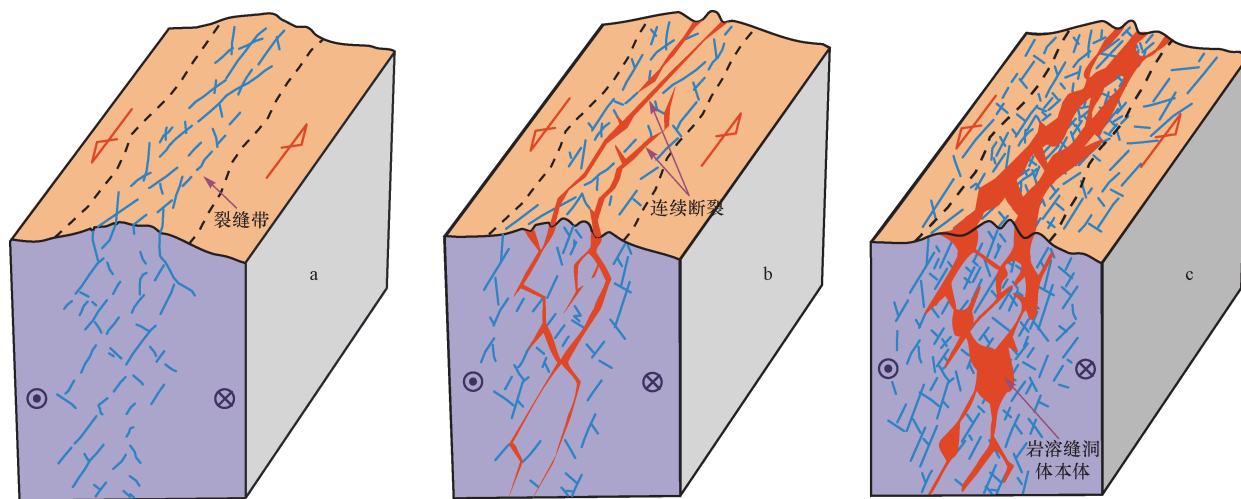


图6 塔河油田奥陶系油藏压扭型断控岩溶破碎带演化模式

Fig. 6 Evolution models of fractured karst zone under the control of compresso-shear fault in the Ordovician reservoir in Tahe oilfield

a. 走滑破裂阶段; b. 断裂连续阶段; c. 溶蚀扩大阶段

表4 塔河油田不同类型断溶体油藏投产并产状统计

Table 4 Occurrence statistics of brought-in wells of different fault – karst reservoirs in Tahe oilfield

油藏类型	投产井数/口	建产井数/口	建产率/%	单井稳定产能/(t·d ⁻¹)	投产并产能分级											
					Q≥30			20≤Q<30			10≤Q<20			Q<10		
					井数/口	所占比例/%	产能/(t·d ⁻¹)	井数/口	所占比例/%	产能/(t·d ⁻¹)	井数/口	所占比例/%	产能/(t·d ⁻¹)	井数/口	所占比例/%	产能/(t·d ⁻¹)
条带状	35	33	94.3	37.4	19	57.6	56.7	3	9.1	25.1	4	12.1	12.1	7	21.2	4.4
夹心饼状	37	32	86.5	20.2	9	28.1	36.7	8	25.0	23.0	6	18.8	15.8	9	28.1	4.0
平板状	36	32	88.9	14.0	5	15.6	34.0	8	25.0	22.5	3	9.4	14.4	16	50.0	3.3
小计	108	97	89.8	24.2	33	34.0	42.5	19	19.6	23.6	13	13.4	14.1	32	33.0	3.9

注:西北油田分公司内部产能界定:Q≥30 t/d 为高产井,20 t/d≤Q<30 t/d 为中高产井,10 t/d≤Q<20 t/d 为中低产井,Q<10 t/d 为低产、低效井。

表5 塔河油田 T707 和 T708 断溶体油藏不同破碎部位投产并产状统计

Table 5 Occurrence statistics of brought-in wells at different positions of the crushed zones in T707 and T708 fault-karst reservoirs, Tahe oilfield

断溶体油藏	断裂带部位	投产井数/口	建产井数/口	建产率/%	平均单井产能/(t·d ⁻¹)
通源主	核部	14	14	100.0	40.5
控断裂	破碎带	7	6	85.7	17.6
型	过渡带	1	1	100.0	10.4
合计		22	21	95.5	32.5

带的认识发生了由“控储控藏”向“控储成藏”的转变,使早期以“残丘、串珠状地震反射特征”为主的溶洞型油藏^[24-25]开发扩大到以“沿深断裂带溶蚀面、杂乱反射为特征”的裂缝—孔洞型油藏,实现了缝洞型油藏开发由“点状溶洞”向沿断裂带发育的“溶蚀断裂面”,三维不均一的平板状或条带状“断溶体”的重大转变。

塔河油田覆盖区条带状断溶体油藏的投产效果最好,夹心饼状和平板状断溶体油藏次之。近年来,针对断溶体油藏共投产 108 口,建产 97 口,建产率 89.8%,累油 48.5×10⁴ t,其中条带状断溶体油藏的平均产能为 37.4 t/d,夹心饼状和平板状分别为 20.2 t/d 和 14 t/d(表4)。在同一断裂带上沿主干断裂向伴生断裂横向外扩开发中油井表现出地层供液变差、油气充注程度变差等特征。一般来讲,断裂带核部及破碎带岩溶程度高、含油高度、油井产能高,多钻遇放空漏失;断裂过渡带、断裂带末端多表现为储集体欠发育、地层供液能力差(表5)。

6 结论

1) 塔河油田上奥陶统覆盖区沿溶蚀断裂发育带状分布的断溶体油藏,受地应力和岩溶作用等因素的控制,同一断裂带上断溶体圈闭具明显的分段性,按圈闭的空间展布形态及主控因素可划分为条带状、夹心饼状和平板状 3 类。

2) 既具有油源断裂背景,又有多期强烈岩溶改造

的断溶体油藏开发效果最优。一般来讲,条带状断溶体油藏钻遇井以中—高产井为主,沿主干断裂向伴生断裂外扩的开发中油井表现出地层供液变差、油气充注程度降低等特征。

3) 断溶体圈闭(油藏)概念的提出与实践给塔河油田的勘探与开发带来了新的启示,深化断溶体油藏特征及控制因素研究,可为塔里木盆地同类油藏的部署新井井位、编制产能建设方案、提高地质储量动用程度提供地质依据,提高油气的最终采收率。

参 考 文 献

[1] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京:石油工业出版社,1997:156-165.
Jia Chengzao. Structural features and hydrocarbon in Tarim Basin, China[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,1997:156-165.

[2] 罗群,姜振学,庞雄奇. 断裂控藏机理与模式[M]. 北京:石油工业出版社,2007:145-196.
Luo Qun, Jiang Zhenxue, Pang Xiongqi. Mechanisms and models of hydrocarbon reservoir controlled by faults[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2007:145-196.

[3] 罗群,黄捍东,庞雄奇,等. 自然界可能存在的断层体圈闭[J]. 石油勘探与开发,2004,31(3):148-150.
Luo Qun, Huang Handong, Pang Xiongqi, et al. A kind of possible natural fault petroleum trap[J]. Petroleum Exploration and Development,2004,31(3):148-150.

[4] 郭光辉,陈志勇,曲泰来,等. 塔里木盆地走滑带碳酸盐岩断裂相特征及其与油气关系[J]. 地质学报,2012,86(2):219-227
Wu Guanghui, Chen Zhiyong, Qu Tailai, et al. The Characteristics of the strike-slip fault facies and its relations to hydrocarbon in Ordovician carbonate, Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2):219-227.

[5] 屈泰来,郭光辉,刘加良,等. 碳酸盐岩断裂相分类特征——以新疆塔里木盆地柯坪露头为例[J]. 地球学报,2011,32(5):541-548.
Qu Tailai, Wu Guanghui, Liu Jialiang, et al. The classification and characteristics of carbonate fault facies: A case study of the outcrop of Kalpin area, Tarim Basin in Xinjiang[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011,32(5):541-548.

[6] 焦方正,翟晓先. 海相碳酸盐岩非常规大油气田——塔河油田勘探研究与实践[M]. 北京:石油工业出版社,2008:1-135.
Jiao Fangzheng, Zhai Xiaoxian. A unconventional large oil and gas field of marine carbonate rock: Exploration research and practice of

- Tahe oil-field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 1–135.
- [7] 翟晓先. 塔里木盆地塔河特大型油气田勘探实践与认识[J]. 石油实验地质, 2011, 33(4): 323–331.
- Zhai Xiaoxian. Exploration practice and experience of Tahe giant oil-and-gas field, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(4): 323–331.
- [8] 李阳, 范智慧. 塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 101–106.
- Li Yang, Fan Zhihui. Developmental pattern and distribution rule of the fracture-cavity system of Ordovician carbonate reservoirs in the Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 101–106.
- [9] 漆立新. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩大油气田勘探实践与展望[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 771–779.
- Qi Lixin. Exploration practice and prospects of giant carbonate field in the Lower Paleozoic of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 777–779.
- [10] 杜金虎, 周新源, 李启明, 等. 塔里木盆地碳酸盐岩大油气区特征与主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 652–661.
- Du Jinhu, Zhou Xinyuan, Li Qiming, et al. Characteristics and controlling factors of the large carbonate petroleum province in the Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 652–661.
- [11] 庞雄奇, 高剑波, 吕修祥, 等. 塔里木盆地“多元复合—过程叠加”成藏模式及其应用[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 159–166.
- Pang Xiongqi, Gao Jianbo, Lv Xiuxiang, et al. Reservoir accumulation pattern of multi-factor recombination and procession superimposition and its application in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 159–166.
- [12] 黄太柱, 蒋华山, 马庆佑. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩油气成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 780–787.
- Huang Taizhu, Jiang Huashan, Ma Qingyou. Hydrocarbon accumulation characteristics in the Lower Paleozoic carbonate reservoirs of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 780–787.
- [13] 陈红汉, 吴悠, 丰勇, 等. 塔河油田奥陶系油气成藏期次及年代学[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 807–819.
- Chen Honghan, Wu You, Feng Yong, et al. Timing and chronology of hydrocarbon charging in Ordovician of Tahe oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 807–819.
- [14] 钟建华, 毛毳, 李勇, 等. 塔北硫磺沟奥陶系含油古溶洞的发现及意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(11): 1660–1680.
- Zhong Jianhua, Mao C, Li Yong, et al. Discovery of the ancient Ordovician oil-bearing karst cave in Liuhuanggou, North Tarim Basin, and its significance[J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 55: 1406–1426, doi:10.1007/s11430-012-4467-3.
- [15] Lucia F J. Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. AAPG Bulletin, 1993, 79(9): 1275–1300.
- [16] Green D, Mountjoy E W. Fault and conduit controlled burial dolomitization of the Devonian west-central Alberta deep basin[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2005, 53(2): 101–129.
- [17] 周文, 李秀华, 金文辉, 等. 塔河奥陶系油藏断裂对古岩溶的控制作用[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2339–2348.
- Zhou Wen, Li Xiuhua, Jin Wenhui, et al. The control action of fault to paleokarst in view of Ordovician reservoir in Tahe area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2339–2348.
- [18] 严威, 王兴志, 丁勇, 等. 塔河南部奥陶系海西早期岩溶的发现[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(3): 53–60.
- Yan Wei, Wang Xingzhi, Ding Yong, et al. Discovery of early Haixi phase[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(3): 53–60.
- [19] 乔占峰, 沈安江, 邹伟宏, 等. 断裂控制的非暴露型大气水岩溶作用模式——以塔北英买2构造奥陶系碳酸盐岩储层为例[J]. 地质学报, 2011, 85(12): 2070–2083.
- Qiao Zhanfeng, Shen Anjiang, Zou Weihong, et al. A fault-controlled non-exposed meteoric karstification: A case study of Ordovician carbonate reservoir at structure YM2 in northern Tarim Basin, northwestern China[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(12): 2070–2083.
- [20] 何发歧, 俞仁连, 杨惠明, 等. 塔里木盆地北部碳酸盐岩油气田[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2002: 132–133, 159–161.
- He Faqi, Yu Renlian, Yang Huiming, et al. Carbonate oil and gas field in the north of Tarim Basin, China[M]. Beijing: China university of geosciences Press, 2002: 132–133, 159–161.
- [21] 金之钧. 中国典型叠合盆地油气成藏研究新进展(之二)——以塔里木盆地为例[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 281–288, 294.
- Jin Zhijun. New progresses in research of China typical superimposed basins and reservoiring of hydrocarbons(part II): taking Tarim basin as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 281–288, 294.
- [22] 丁勇, 彭守涛, 李会军. 塔河油田及塔北碳酸盐岩油藏特征与成藏主控因素[J]. 石油实验地质, 2011, 33(5): 488–494.
- Ding Yong, Peng Shoutao, Li Huijun. Features and main controlling factors of carbonate reservoirs in Tahe Oilfield and northern Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(5): 488–494.
- [23] 顾忆, 邵志兵, 陈强路, 等. 塔河油田油气运移与聚集规律[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 224–230, 237.
- Gu Yi, Shao Zhibing, Chen Qianglu, et al. Oil migration and Accumulation pattern in the Tahe oil field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 224–230, 237.
- [24] 鲁新便. 塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏开发地质研究中的若干问题[J]. 石油实验地质, 2003, 25(5): 508–512.
- Lu Xinbian. Several problems in study of development programme of Ordovician carbonate reservoir in Tahe oil-field, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 25(5): 508–512.
- [25] 鲁新便, 蔡忠贤. 缝洞型碳酸盐岩油藏古溶洞系统与油气开发[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 22–27.
- Lu Xinbian, Cai Zhongxian. A study of the paleo-cavern system in fractured vuggy carbonate reservoirs and oil/gas development: taking the reservoirs in Tahe oil-field as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 22–27.

(编辑 张玉银)