

塔河油田奥陶系走滑断裂带分区差异 变形特征与控储模式

徐中祥, 马庆佑

中国石化西北油田分公司

摘要 基于三维地震资料解释、钻井岩心观察、样品分析化验、FMI与试油资料分析等手段,详细剖析了塔河油田不同地区奥陶系走滑断裂带的差异变形特征、形成演化过程及成因机制,探讨了其对中—下奥陶统规模储层发育的控制作用。研究结果表明:①受控于区域构造应力场转换及塔北古隆起演化,塔河油田奥陶系发育三大走滑断裂系统。托普台—主体区X型对称共轭断裂系统:NNE、NNW走向的两组断裂呈X型对称共轭切割,密集成网,主次级断裂伴生;于加里东中期同时形成,印支期—喜马拉雅期NNE走向断裂持续活动。于奇中西部非对称共轭断裂系统:NE、SN走向的两组断裂非对称共轭,呈带状和断续状展布,局部相互切割;先后于加里东晚期—海西早期和海西晚期初始形成,印支期—喜马拉雅期两者均持续活动,NE走向断裂晚期活动更强。东南斜坡区多走向复合断裂系统:NNE、NEE、SN、NNW走向的4组断裂均呈断续展布,NNE与NEE走向断裂限制SN走向断裂延伸;先后于加里东中期—海西期形成,印支期—喜马拉雅期NE与NEE走向断裂持续活动。②三大走滑断裂系统的差异变形与形成演化,控制着塔河油田奥陶系发育3类与走滑断裂相关的控储模式。塔河主体区表层岩溶+断裂同期耦合型:经历加里东中期—海西早期表生岩溶作用,同期X型共轭走滑断裂带叠加耦合活动,形成 T_4 界面之下大面积分布的岩溶缝洞型储集体,沿印支期—喜马拉雅期持续活动的NNE向主干断裂带储层更发育。于奇中西部内幕岩溶+晚期断裂改造型:经历加里东中期—海西晚期多期表生岩溶作用,导致 T_4 界面之下表层岩溶缝洞型储层普遍被夷平化或严重充填,早期岩溶形成的未充填内幕储集体叠加印支期—喜马拉雅期走滑断裂的改造,可保留现今的规模有效储层。东南斜坡区断控缝洞型:处于上奥陶统覆盖区,加里东中期表生岩溶作用弱,走滑断裂多期持续活动的强度控制着规模储集体的发育。

关键词 断溶体;走滑断裂;变形特征;构造演化;控储模式;奥陶系;塔河油田

中图分类号:TE121.2 文献标识码:A

0 前言

塔里木盆地塔河油田是国内最大的海相碳酸盐岩油田,以奥陶系碳酸盐岩岩溶缝洞型油气藏为主体,其上叠加了多层系的碎屑岩次生油气藏组成大型复式油气田,目前合计保有三级地质储量约 15×10^8 t油当量。多年的勘探开发实践表明^[1-2],塔河油田主要发育喀斯特缝洞型和断控缝洞型两大类型的油气藏,奥陶系油气富集程度主要受控于碳酸盐岩储集体的发育程度以及储集体与油气充注通道的连通程度,而走滑断裂带对规模缝洞型储层的发育以及油气通源性均具有重要控制作用。因

此,开展走滑断裂研究对认识塔河油田两大类缝洞型油气藏的形成与富集均具有重要意义。

塔河油田构造位置处于塔北沙雅隆起,经历了多期构造运动,走滑断裂极其发育。前人对塔河油田及邻区的走滑断裂构造特征、形成演化过程及控储控藏作用开展过研究,认识到塔河地区走滑断裂在加里东中期—喜马拉雅期多期活动^[3-4],走滑断裂对岩溶储层发育及油气富集具有重要控制作用^[5-9],提出了塔河油田具有“层控”与“断控”两种油藏类型^[2],这些认识对塔河油田长期的勘探开发部署具有重要意义。但是,塔河油田受多期构造运动改造,导致不同区块在地层结构、岩溶改造期次、断

收稿日期:2022-01-17;改回日期:2022-04-27

本文受中国石化科技部项目“塔里木盆地走滑断裂带成因及控藏机制研究”(编号:P20062-2)资助

第一作者: 徐中祥,高级工程师,从事油气勘探部署研究与管理工。通信地址:830011 新疆乌鲁木齐市长春南路中国石化西北科研生产园区勘探开发研究院;E-mail: xuzx.xbsj@sinopec.com

通信作者: 马庆佑,副研究员,从事石油构造地质与勘探研究工作。通信地址:830011 新疆乌鲁木齐市长春南路中国石化西北科研生产园区勘探开发研究院 A303室;E-mail: 37337428@qq.com

裂变形特征及活动强度等方面存在明显的差异性,前人对塔河油田内部断裂体系的分区差异变形特征研究总体比较少,同时对不同断裂体系的控储模式缺乏差异对比研究。

近些年,塔河油田的勘探由主体区向外围的于奇中西部、东南斜坡区等地区(以下简称外围区)不断拓展,勘探成效不够显著,外围区面临着诸多难题亟待攻关。目前,对整个塔河油田的断裂体系缺乏系统解析与分区对比研究,对外围区走滑断裂带的变形特征与演化过程认识不清,对不同断裂体系控制规模储集体发育的机理尚不明确,这些是制约塔河油田外围区勘探突破的关键问题。因此,本文基于对塔河油田大量三维资料的地震地质解释,结合钻测录井、试油等资料的综合分析,详细剖析了奥陶系走滑断裂带的分区差异变形特征与形成演化过程,建立了3类走滑断裂带的发育模式,重点探讨了断裂体系对塔河外围区中一下奥陶统规模储

层发育的控制作用,旨在为塔河油田向外围区的持续勘探拓展提供基础依据和借鉴。

1 区域地质概况

塔河油田构造位置处于塔里木盆地北部的沙雅隆起,主体位于阿克库勒凸起与草湖凹陷两个二级构造单元^[10],北靠雅克拉断凸,南邻顺托果勒低隆及满加尔坳陷,西为哈拉哈塘凹陷(图1a)。研究区经历了加里东期、海西期、印支期、燕山期以及喜马拉雅期等5期构造运动,自下而上发育9个区域性不整合界面(图1b)。受多期区域应力场转换和古隆起迁移的影响,塔河油田所在的阿克库勒凸起,大致经历了加里东早期形成稳定克拉通建造、加里东中期形成鼻状低凸起雏形、加里东晚期—海西早期形成NE—SW向大型箱状背斜、海西晚期形成雅克拉断凸披覆背斜、印支期—燕山期形成库车周缘前陆盆地的前渊隆起、喜马拉雅期成为深埋古凸起等演化阶段。

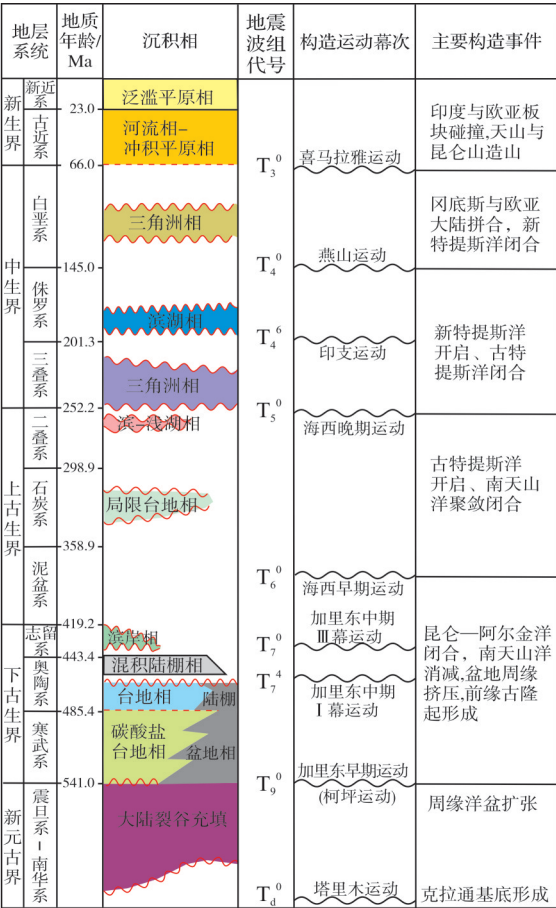
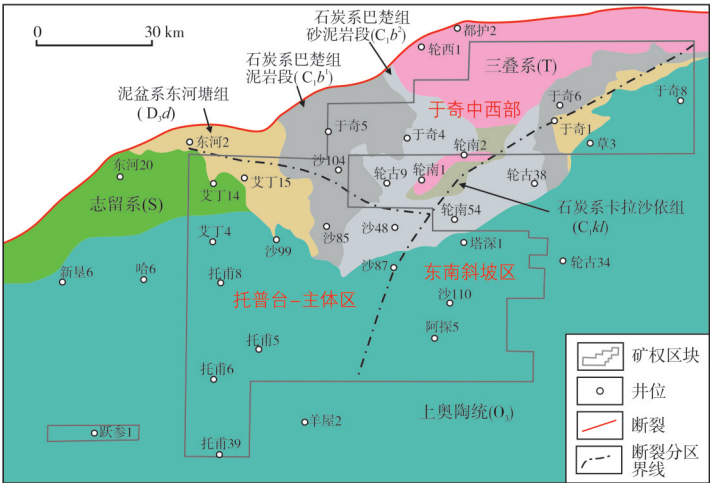
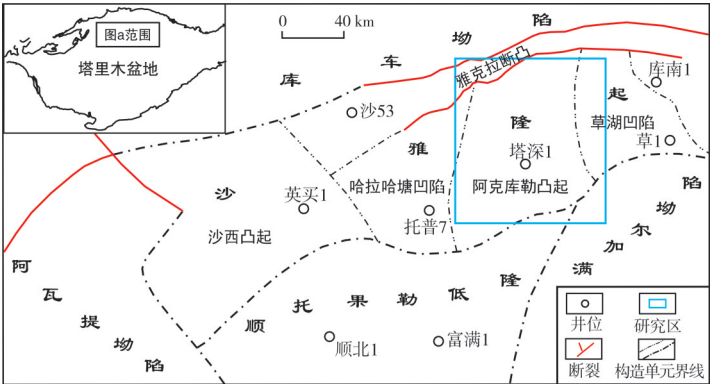


图1 塔河油田地质概况

Fig. 1 Geological overview of Tahe Oilfield

塔河油田下古生界奥陶系自下而上发育蓬莱坝组(O_{1p})、鹰山组(O_{1-2y})、一间房组(O_{2yj})、哈尔巴克组(O_{3q})、良里塔格组(O_{3l})与桑塔木组(O_{3s})。受加里东中期构造运动的影响,大部分地区中一下奥陶统与上奥陶统顶部均遭受了不同程度的剥蚀,整体上 T_7^0 界面之下的地层剥蚀程度是于奇中西部>托普台—主体区>东南斜坡区。同时,受加里东晚期—燕山期多期构造运动的影响, T_7^0 界面之上不同程度地缺失上古生界—中新世,导致目前塔河油田不同地区中一下奥陶统顶面(T_7^4 界面)上下地层序列差异较大(图1c):塔河主体区主要为石炭系巴楚组(C_1b)或泥盆系东河塘组(D_3d)与鹰山组上段组成的角度不整合接触关系;

于奇中西部地区主要为巴楚组或三叠系与鹰山组下段组成的角度不整合接触关系;东南斜坡区主要为哈尔巴克组与一间房组组成的整合或平行不整合接触关系。

2 走滑断裂分区差异变形特征

塔河油田奥陶系的断裂性质主要有逆冲和走滑两大类(图2),其中轮台大型逆冲断裂带构成了塔河油田现今的北部边界,内部还发育阿克库勒、阿克库木等次级逆冲断裂带,这些逆冲断裂带前人研究较多^[11-12],本文不再赘述。塔河油田走滑断裂极其发育,不同地区的断裂变形具有独特性,整体可以划分为三大变形区域(图2)。

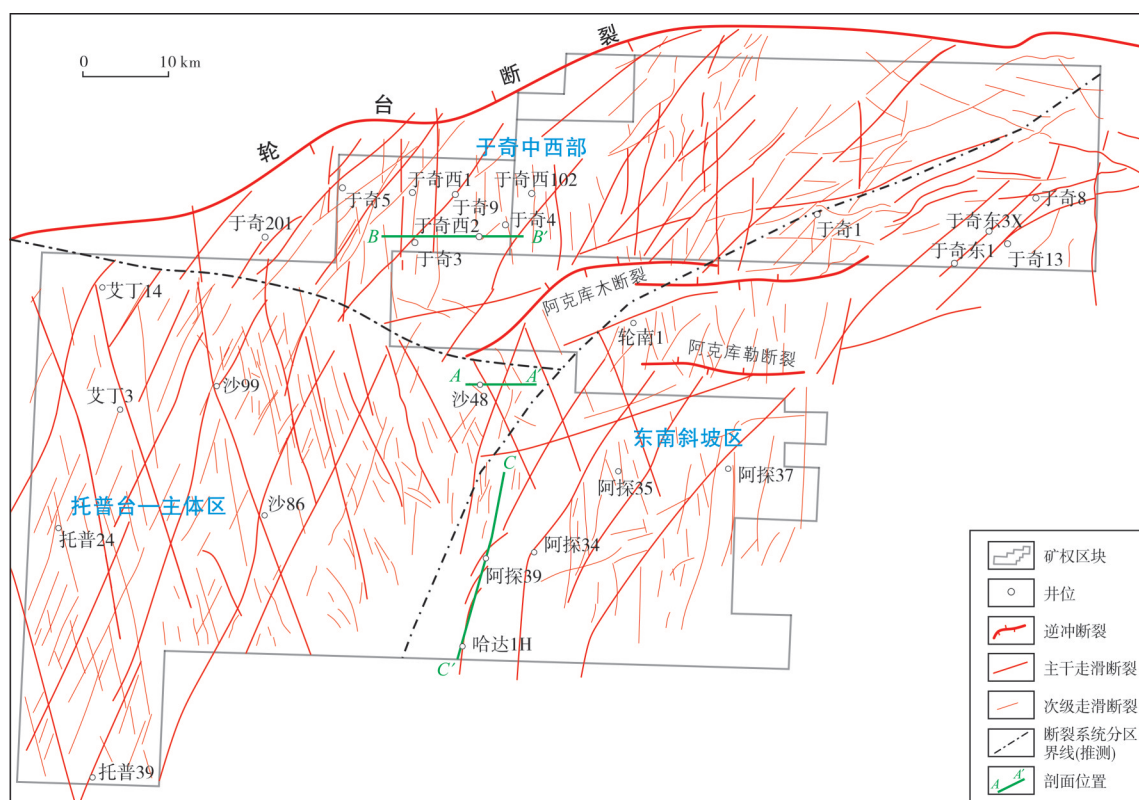


图2 塔河油田中一下奥陶统顶面(T_7^4 界面)断裂系统平面分区图

Fig. 2 Zoning map of fault system on top of Middle-Lower Ordovician (T_7^4 interface) in Tahe Oilfield

2.1 托普台—主体区X型对称共轭断裂系统变形特征

托普台—主体区奥陶系主要发育NNE、NNW走向的走滑断裂(图2),平面上延伸长度在40~70 km之间,两组断裂呈X型对称共轭交切,主干断裂与次级断裂伴生、密集成网,符合共轭断裂体系发育规

律。平面上两组走滑断裂发育密度近似,NNE走向断裂密度(0.32条/km)略大于NNW走向断裂密度(0.25条/km)。中一下奥陶统顶面断裂表现出明显的分段特征(图3a),平面上呈左旋右阶展布,可分出压隆段、平移段和拉分段构造样式。中新世发育多组右旋左阶组合排列的雁列式正断裂,平面上雁列方向与深层奥陶系走滑断裂走向一致。

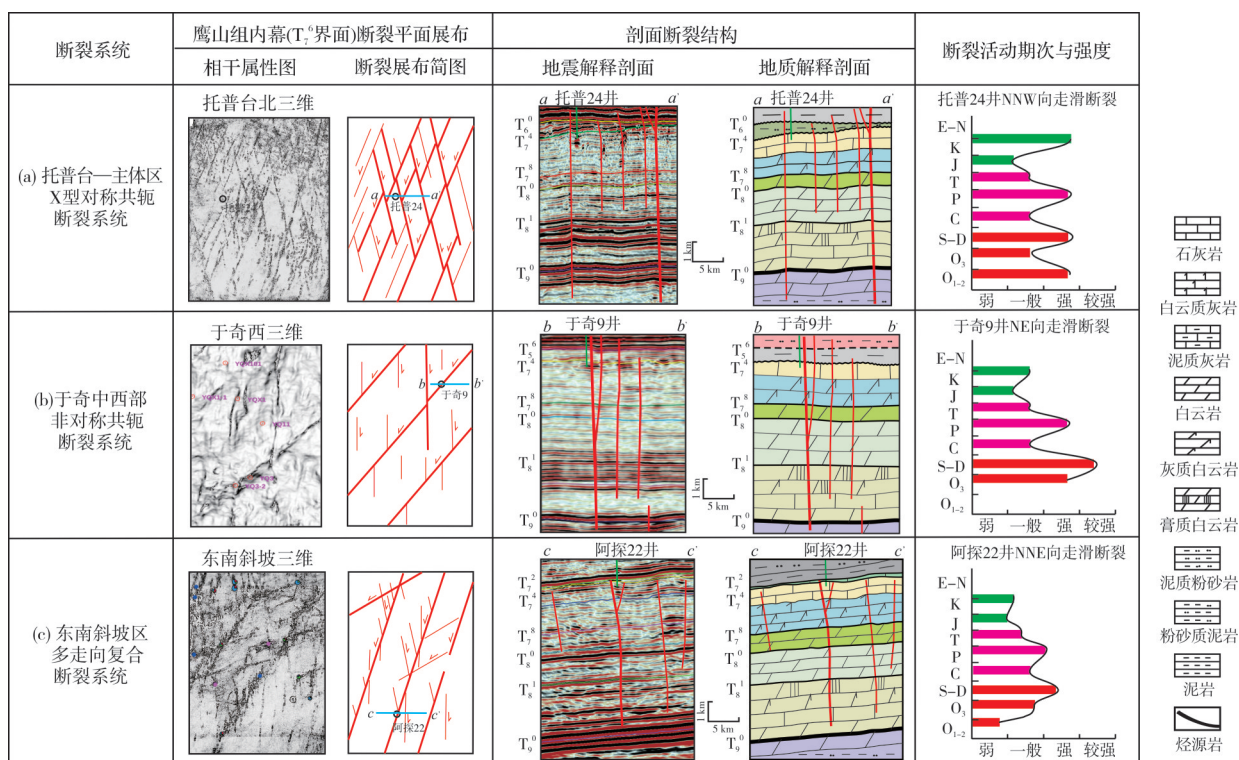


图3 塔河油田奥陶系分区断裂系统变形特征解析图

Fig. 3 Analysis of deformation characteristics of Ordovician zoning fault system in Tahe Oilfield

纵向上寒武系主干断裂呈“1”字形直立状(图3a),向下陡直断穿基底(T_0^0 界面),而次级断裂往往向下断穿寒武系顶面(T_8^0 界面),消失在中寒武统顶面(T_8^1 界面)之上;奥陶系主干断裂呈花状构造样式^[13-14],压隆段呈正花状特征,拉分段呈负花状特征;志留系—泥盆系整体缺失严重,断裂形迹不易识别;石炭系—二叠系发育少量由深部奥陶系延伸上来的“1”字形直立状断裂;中新生界则发育阶梯式正断裂形成的小地堑构造样式,与下伏奥陶系主干走滑断裂带局部相接。

2.2 于奇中西部非对称共轭断裂系统变形特征

于奇中西部地区奥陶系主要发育NE、SN走向的走滑断裂(图2),平面上两组断裂非对称共轭,局部相互切割。其中,NE走向断裂平面上呈带状展布,延伸长度大(18~30 km),连续性较好,为该区的主干走滑断裂;SN走向断裂平面上呈断续状展布,延伸长度短(4~16 km),连续性差,为该区的次一级走滑断裂。整体上,NE向断裂带规模(长度与破碎宽度)大于SN向断裂,但SN走向断裂发育密度(0.16条/km)大于NE走向断裂密度(0.11条/km)。中一下奥

陶统顶面断裂表现出明显的分段特征(图3b),平面上呈左旋右阶展布,可分出压隆段、平移段和拉分段构造样式。中新生界发育多组右旋左阶组合排列的雁列式正断裂^[15],平面上雁列方向主要与深层奥陶系NE向走滑断裂走向一致,少量沿深层奥陶系SN向断裂零星发育。

纵向上深层寒武系断裂呈“1”字形(图3b),表现出高陡、直立、单根的特征,NE向主干断裂大部分向下陡直断穿基底(T_0^0 界面),纵向分层叠接强,而SN向次级断裂往往向下断穿中寒武统顶面(T_8^1 界面),具有一定的纵向分层叠接;奥陶系主干断裂呈花状构造样式,压隆段呈正花状、拉分段呈负花状特征;志留系—二叠系整体缺失严重,断裂形迹不易识别;中新生界则发育阶梯式或成对的正断裂,形成小地堑构造样式,但整体多为“悬空”特征,与下伏奥陶系走滑断裂并不相接。

2.3 东南斜坡区多走向复合断裂系统变形特征

东南斜坡区奥陶系位于两大走滑断裂体系叠加改造区,共发育NNE、NEE、SN、NNW走向的4组断裂(图2)。其中,NNE与NNW向走滑断裂为同一

体系,两组断裂交切成网,平面上呈断续展布特征;NEE与SN向走滑断裂为同一体系,切割NNE与NNW向走滑断裂体系。东南斜坡区奥陶系两大走滑断裂体系共同组成了多走向复合断裂系统。其中,NNE、NEE两组走向断裂带规模(长度与破碎宽度)大,为该区主干走滑断裂,平面上呈似马尾状、左阶展布特征,具有明显的分段性(图3c);NNW、SN两组走向断裂带规模小,为该区的次级走滑断裂,平面上呈断续展布特征。中新生界沿奥陶系走滑断裂上方没有明显派生雁列式正断层。

纵向上该区结构单一,分层变形特征不明显(图3c)。断裂主要呈“1”字形高陡、直立、单根的特征,大部分断裂向下均未断穿基底(T_0 界面),而是切穿中寒武统顶面(T_8 界面),具有一定的纵向分层叠接。奥陶系断裂花状构造样式不典型,大部分呈“1”字形或“半花状”样式。受上覆石炭系盐岩层的封挡,奥陶系主断裂向上覆中新生界未派生雁列式正断层。

3 走滑断裂分区差异演化力学机制

受多期次区域应力场转换与古隆起迁移演化

的影响^[16],塔河油田三大分区走滑断裂系统,具有独特的形成演化过程及成因机制。

3.1 托普台—主体区X型对称共轭断裂系统形成机制

加里东中期I幕运动时期,塔河托普台—主体区在近SN向区域构造应力场下(根据X共轭剪裂面的锐角平分线方向确定最大主应力方向为 $N3^\circ E$,步骤略),NNE、NNW走向的两组走滑断裂同时初始形成(图4a1),规模级别相近,没有主、次级之分。加里东晚期—海西早期运动时期,在近NEE—SWW向区域构造应力场下,NNE、NNW走向的两组先存走滑断裂继承性活动(图4a2),但受阿克库勒凸起隆升影响,志留系—泥盆系剥蚀严重,加里东晚期—海西早期的断裂形迹比较难识别。海西晚期构造运动时期,在近NNE—SSW向区域应力场下,NNE、NNW走向的两组先存走滑断裂继承性活动,少量向上延伸至二叠系(图4a3)。印支期—喜马拉雅期运动时期,在长期的近NE向区域构造应力场下(根据雁列式正断裂排列方向确定最大主应力方向为

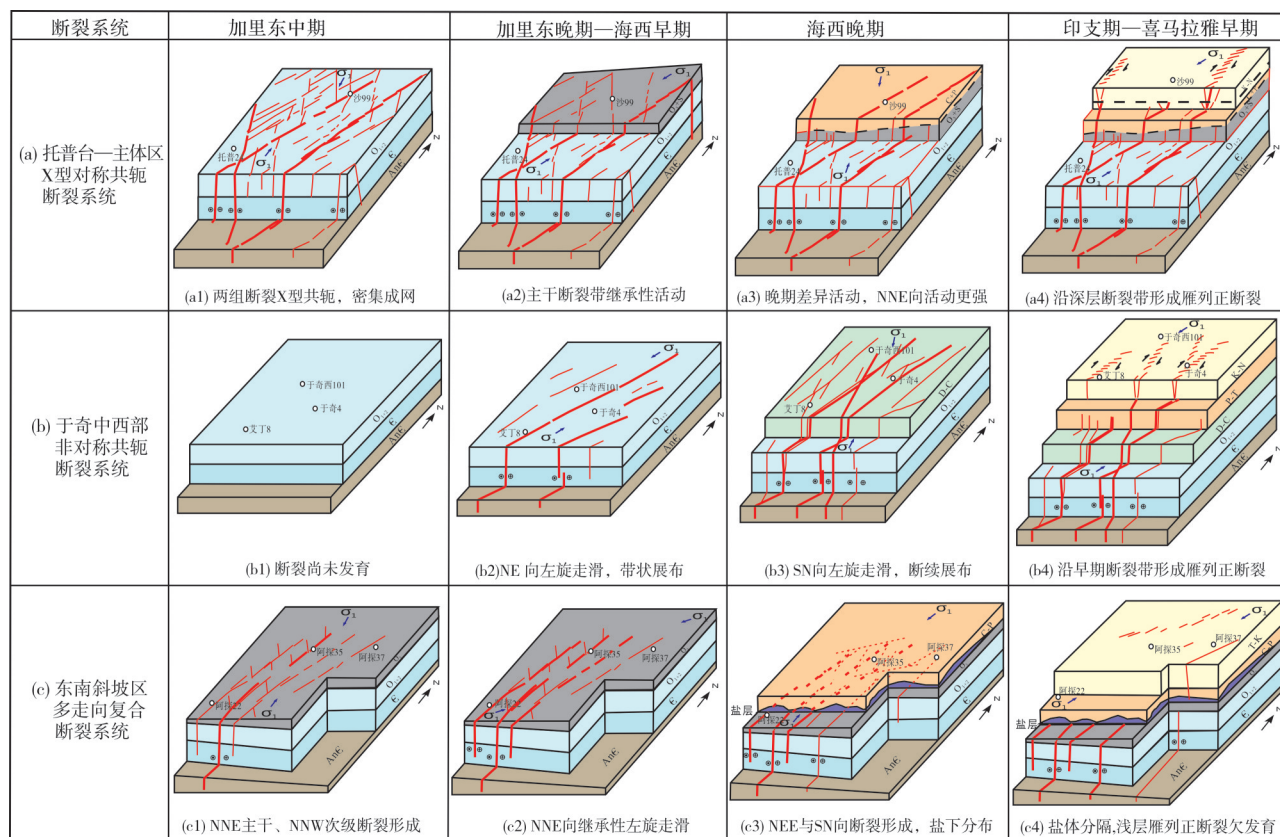


图4 塔河油田奥陶系分区断裂系统形成演化模式图

Fig. 4 Formation and evolution model of Ordovician zoning fault system in Tahe Oilfield

N44°E—N52°E之间,步骤略),早期形成的NNE走向断裂继承性活动,断裂带规模进一步增大,同时受 T_7^4 界面上下地层塑性差异的影响,中新生界形成多组右旋左阶组合排列的雁列式正断裂(图4a4),雁列方向与深层中一下奥陶统NNE向的走滑断裂走向一致;而早期NNW走向断裂此时与区域应力场方向不一致,整体活动较弱。整体上,呈现出现今两组X型对称共轭走滑断裂规模的差异,NNE走向断裂晚期持续活动更强。

3.2 于奇中西部非对称共轭断裂系统形成机制

加里东中期I幕运动时期,于奇中西部地区受由SN向的区域挤压应力较弱,此时断裂尚未形成(图4b1)。加里东晚期—海西早期运动时期,在古天山洋东段消减闭合挤压作用下,形成近NEE—SWW向区域构造应力场,NE走向的走滑断裂初始形成,左旋走滑活动(图4b2)。海西晚期运动时期,在近NNE—SSW向区域应力场下,NE走向的先存走滑断裂继承性活动;此时SN走向的走滑断裂初始形成,右旋走滑活动,受NE向先存断裂带限制,SN向走滑断裂带断续展布(图4b3)。印支期—喜马拉雅期运动时期,在长期近NE向区域构造应力场下,早期形成的NE走向断裂继承性活动,断裂带规模进一步增大。中新生界形成多组右旋左阶组合排列的雁列式正断裂(图4b4),雁列方向与深层中一下奥陶统NE向走滑断裂走向一致,SN向雁列式断裂零星发育,表明NE向断裂晚期活动更强。

3.3 东南斜坡区多走向复合断裂系统形成机制

东南斜坡区处于碳酸盐台地与斜坡的结合部位,区域构造应力场比较复杂,发育多走向的复合断裂系统。加里东中期I幕运动时期,东南斜坡区在SN向区域挤压应力场下,初始形成了NNE与NNW向走滑断裂体系(图4c1),其中NNE向主干断裂活动强度更大。加里东晚期—海西早期运动时期,在近NEE—SWW向区域构造应力场下,早期先存的NNE走向断裂继承性活动(图4c2)。海西晚期构造运动时期,在近NNE—SSW向区域应力场下,初始形成NEE与SN走向的走滑断裂;受NNE向先存断裂带限制,NEE与SN走向的断裂带断续展布(图4c3)。印支期—喜马拉雅期运动时期,在长期

近NE向区域构造应力场下,早期形成的NNE、NEE走向断裂继承性活动,断裂带规模进一步增大;受石炭系盐岩层的影响,NNE、NEE及SN走向的走滑断裂晚期活动的张扭应变变量向上被塑性层吸收,上覆地层中雁列正断层欠发育(图4c4)。整体上,现今NNE、NEE向两组断裂比SN向断裂晚期活动性更强。

4 断裂分区差异控储模式

塔河油田长期的勘探开发实践表明,多期表生岩溶作用与断裂破裂改造是控制规模缝洞型储层发育的最主要因素。走滑断裂破碎带是岩溶作用的优势通道,在碳酸盐岩内部形成了可代谢的淡水溶蚀系统,大大改善了碳酸盐岩溶蚀作用的条件。塔河油田岩溶发育条件研究表明^[1-3],从东南斜坡区→托普台—塔河主体区→于奇中西部地区,岩溶作用持续时间呈逐渐增加的趋势,同时这些地区的断裂变形及演化也具有明显的分区特征,据此建立了走滑断裂带的分区差异控储模式。

4.1 塔河主体区表层岩溶+同期断裂耦合型

塔河主体区受加里东中期与海西早期两期岩溶作用的叠加改造,发育准层状分布的岩溶缝洞型储集体系统^[17],构成多个规模不等、几何形态各异、叠合连片的缝洞单元,具有“垂向叠置、准层状分布”的岩溶缝洞特征(图5)。这类储集体发育于古风化壳表层,渗滤岩溶作用深度达100~350 m,由不同幅度、不同规模的岩溶残丘、溶峰、峰丛垄脊等正向地貌单元构成。如位于大型风化壳岩溶区的沙48井区缝洞单元,岩溶缝洞体规模较大,开发过程中表现为天然能量充足,单井产能较高的特征。这类储集体的形成和分布均与中—上奥陶统顶不整合面(T_7^4)有关,尤其是与风化壳岩溶区的古地貌、古水系关系密切^[2]。

塔河主体区加里东中期与表层岩溶同期发育的NNE、NNW走向的两组走滑断裂,呈X型共轭对称、密集发育,组成的断缝系统不断地继承性破碎,反复地溶蚀扩大,最终发育成规模较大的表层岩溶与同期断裂耦合型优质储集体(图5),成为塔河油田奥陶系碳酸盐岩油气的主产区。塔河主体区 T_7^4 界面之下发育的大面积连片分布的岩溶缝洞型储集体,与同期走滑断裂带叠加耦合作用,通常沿主干走滑断裂带形成更优质的缝洞储集体。塔河主

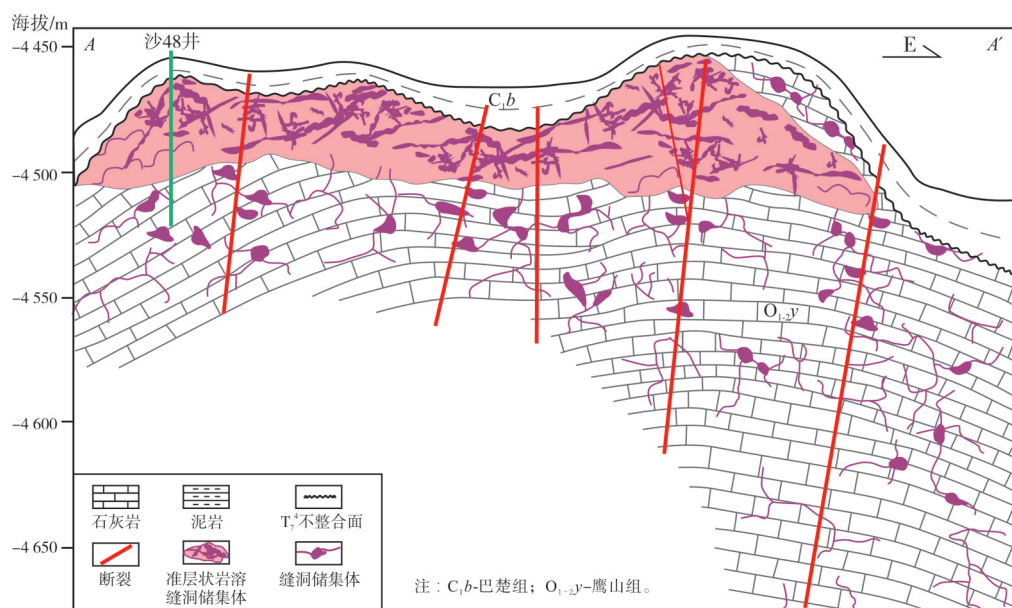


图5 塔河主体区表层岩溶+同期断裂耦合型控储模式(剖面位置见图2)

Fig. 5 Coupling reservoir control model of epikarst+contemporaneous fault in the main area of Tahe Oilfield (section position is shown in Fig. 2)

体区NNE走向的主干断裂带长期与区域NE向最大主应力方向一致,晚期持续活动性强,是目前表层岩溶与同期断裂耦合型储集体最发育的部位。

4.2 于奇中西部内幕岩溶+晚期断裂改造型

于奇中西部地区受加里东中期—海西晚期多期岩溶叠加改造,地表岩溶作用持续时间长,改造作用非常强烈,导致奥陶系一间房组及鹰山组上段

整体缺失, T_4 界面表层的岩溶储集体也大部分被剥蚀殆尽,只剩下深部内幕岩溶储集体。于奇中西部地区大量实钻井资料表明,残留的鹰山组中一下段碳酸盐岩地层主要发育洞穴型和裂缝-孔洞型两类储层,但洞穴型储层被砂泥岩及灰岩角砾严重充填,储集性能大部分遭受破坏,现今保留下来的有效储集体主要为 T_4 界面表层之下的深部内幕溶蚀孔洞及沿晚期断裂带附近发育的裂缝带(图6)。

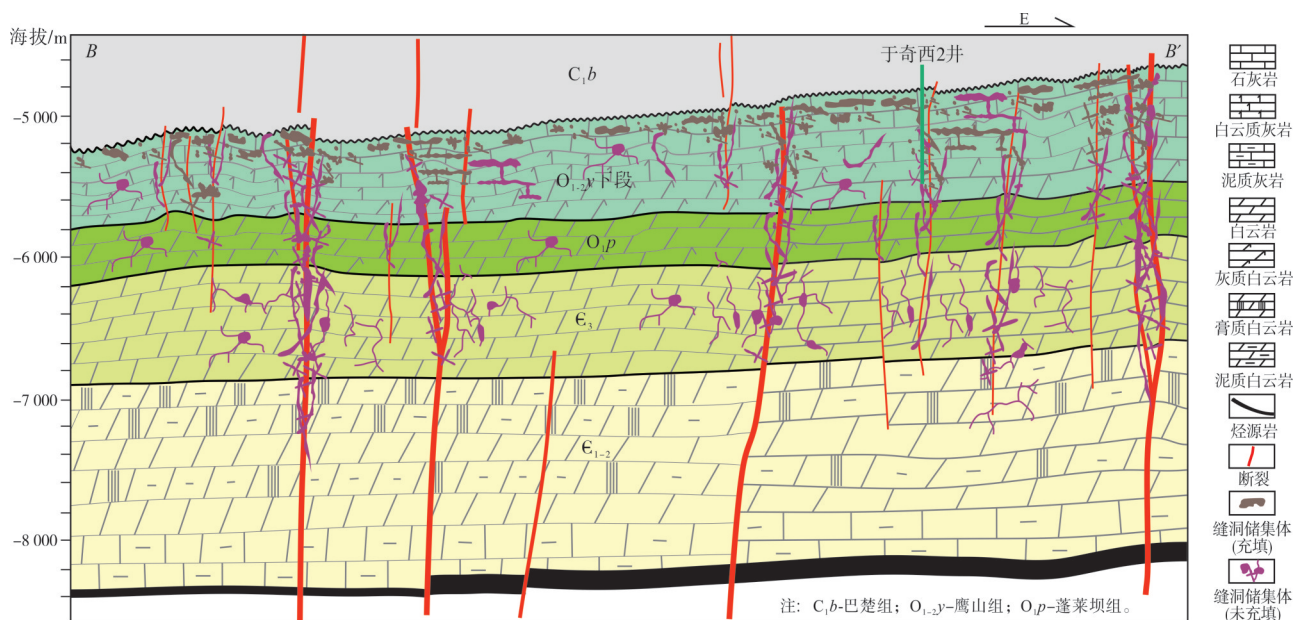


图6 于奇中西部内幕岩溶+晚期断裂改造型控储模式(剖面位置见图2)

Fig. 6 Reservoir control model of inner karst+late fault reconstruction in central and western regions of Yuqi (section position is shown in Fig. 2)

于奇中西部地区表层洞穴型储层虽然充填严重,但主要充填时期在加里东晚期—海西早期,而于奇中西部地区NE走向主干断裂带与SN向次级断裂带均在海西晚期及之后持续继承性活动,其中NE走向主干断裂晚期活动性更强。这些走滑断裂带的晚期活动,一方面可以改造内幕的岩溶洞穴型储层,另一方面可以派生大量裂缝,从而形成内幕岩溶叠加晚期断裂改造型储层(图6)。

于奇中西部 T_4 界面之下鹰山组内幕振幅变化率属性和断裂叠合图显示(图略),强振幅变化率主要呈条带状沿断裂带分布。通过对于奇中西部地区有成像测井资料的于奇201井、于奇4井、于

奇5井、于奇西102井和于奇西2井等井的裂缝解释来看:裂缝倾角多大于 70° ,表现为高角度裂缝;裂缝走向主要为NE或近SN向,与两组断裂带的走向一致,表明裂缝走向、倾角与走滑断裂具有高相关性。如于奇西2井在5 690~5 970 m井段成像测井解释裂缝99条(图7a,部分井段),发育密度达0.7条/m,对应在岩心上可见未充填高角度裂缝及沿高角度裂缝溶蚀扩大形成的孔洞(图7b1)。另外,于奇3井岩心上可见沿高角度裂缝半充填的原油(图7b2),表明内幕岩溶叠加晚期断裂改造下形成的缝洞型储集体充填程度低,可以形成规模储集体。

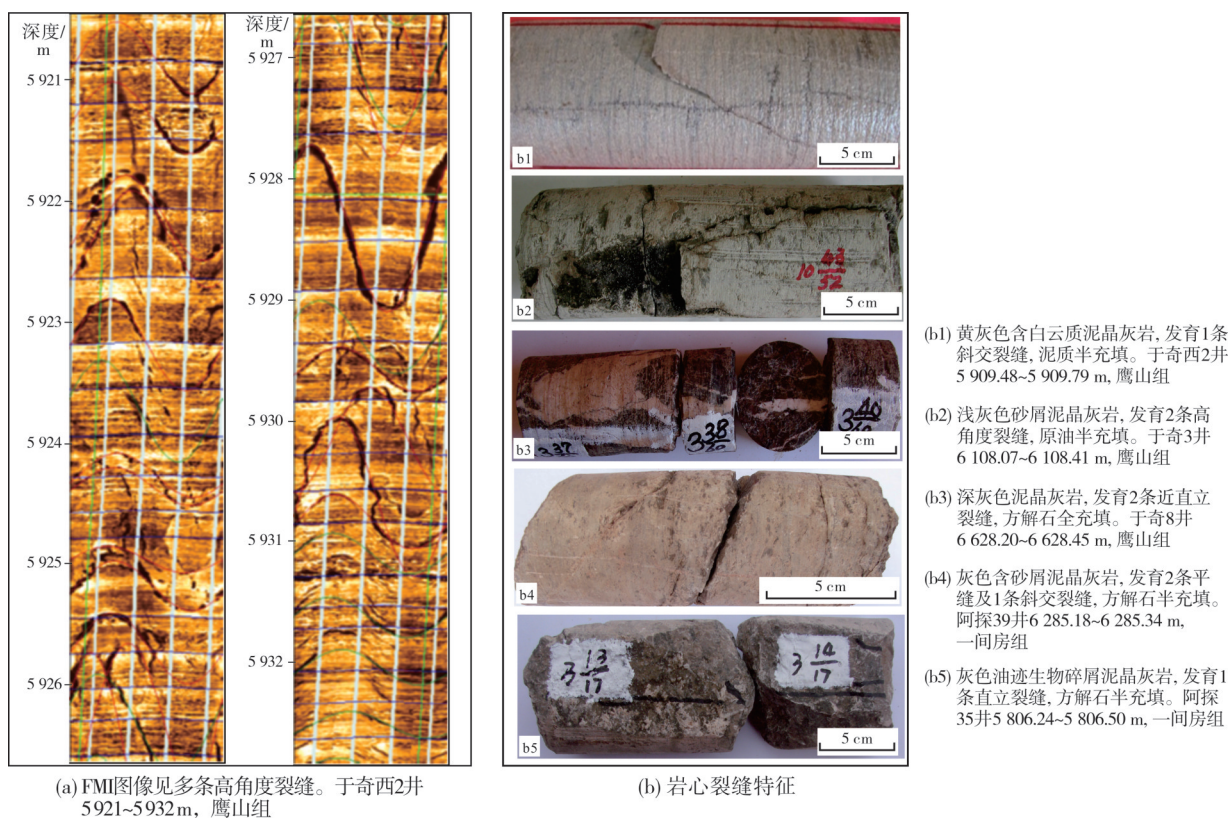


图7 塔河地区部分钻井FMI与岩心识别裂缝图版

Fig. 7 FMI and core fracture identification chart of some wells in Tahe Oilfield

4.3 东南斜坡区断控缝洞型

东南斜坡区中一下奥陶统碳酸盐岩顶面(T_4 界面)之上被巨厚的桑塔木组泥岩覆盖,仅在加里东中期I幕构造运动中抬升暴露地表,遭受短暂的大气淡水淋滤。由于加里东中期I幕构造运动持续时间有限,东南斜坡区 T_4 界面加里东中期表生岩溶改造程度低,只发生短暂的选择性溶蚀,岩溶

发育深度和规模都无法与塔河主体区、于奇中西部等地区加里东中期—海西期的岩溶作用相比。因此,东南斜坡区中一下奥陶统顶面岩溶储层欠发育(图8),规模储集体主要受NNE、NEE、SN、NNW等多个走向的断裂带控制,其中NNE、NEE走向的主干断裂破碎带规模大,晚期活动性强,控制着规模储层的发育,储层类型以未充填及半充填的裂缝、溶蚀孔洞为主。

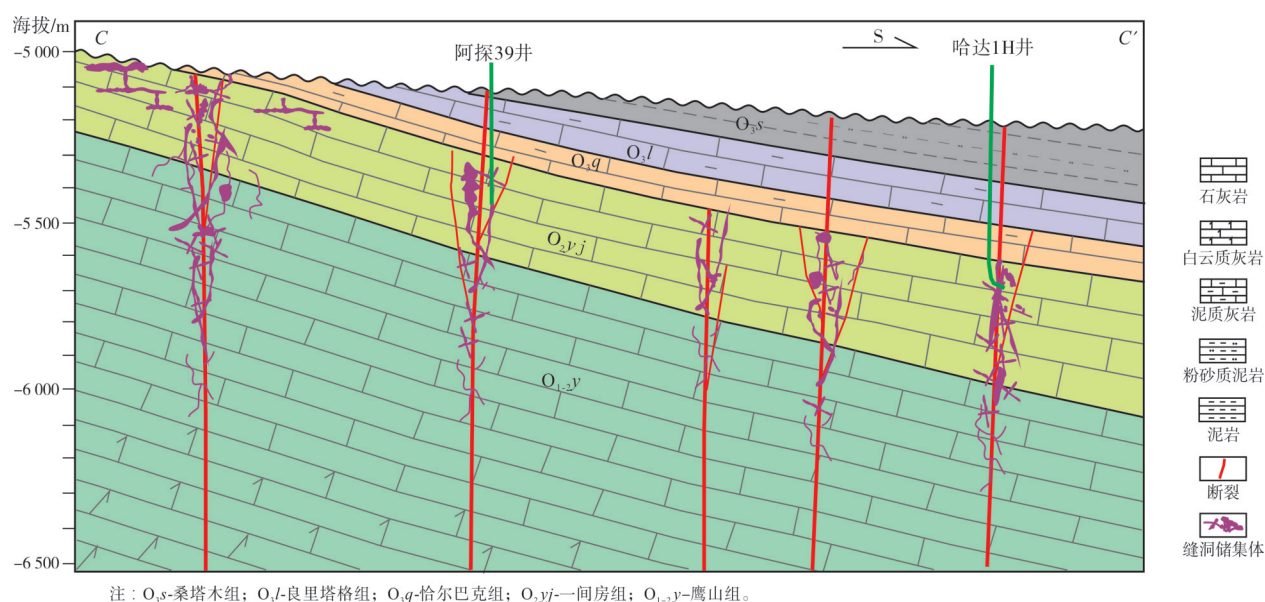


图8 塔河油田东南斜坡区一间房组断控缝洞型控储模式(剖面位置见图2)

Fig. 8 Reservoir control model of fault-controlled fracture-vug of Yijianfang Formation in southeast slope area of Tahe Oilfield (section position is shown in Fig. 2)

东南斜坡区很少发育大的洞穴系统,前期针对T₇⁴界面表层岩溶缝洞型储层钻探的多口井(于奇8井、于奇13井、于奇东1井等)也均未钻遇放空或漏失现象。于奇东区块岩心和薄片观察发现,除小型溶蚀孔洞外,裂缝是区内主要的储集空间,构造裂缝多以中—高角度缝为主,部分被半充填(图7b3),充填物多为方解石及少量白云石、泥质。近期针对NE向主干断裂带钻探的于奇东3X井在一间房组钻遇放空,且漏失泥浆1 600多方,表明于奇东区块走滑断裂晚期活动可以改善储集体性能。

从阿探34井、阿探35井、阿探37井、阿探39井等8口井的成像测井解释来看,东南斜坡区主要发育近NE走向的高角度裂缝,倾角普遍大于70°,裂缝的倾角、走向与断裂带较一致,岩心上可见高角度直立缝或斜交缝发育,部分被方解石半充填(图7b4,7b5)。其中阿探37井6 022~6 154 m井段成像测井解释裂缝97条,发育密度达0.73条/m。根据8口井的裂缝密度统计结果来看,随着距断裂带距离的增大,裂缝发育密度逐渐减小,表明该地区裂缝发育主要受走滑断裂控制。东南斜坡区发育的NNE、NEE走向断裂带规模大,为该区主干断裂,因此控制着现今有效裂缝走向主要沿近NE向分布。近期针对NNE向主干断裂带钻探的哈达1井在一间房组钻遇放空和漏失(图8),进一步说明该区块岩溶作用欠发育,走滑断裂带活动强度控制

着规模裂缝—孔洞型或裂缝型储集体的发育。

5 结 论

(1)受控于区域构造应力场转换及塔北古隆起演化,塔河油田走滑断裂可以分为三大断裂系统,具有差异变形与演化特征。托普台—主体区X型对称共轭断裂系统:NNE、NNW两组走向的断裂呈X型对称共轭切割,密集成网;于加里东中期同时形成,印支期—喜马拉雅期NNE走向断裂持续活动。于奇中西部非对称共轭断裂系统:NE、SN两组走向的断裂非对称共轭,呈带状和断续状展布,局部相互切割;先后于加里东晚期—海西早期和海西晚期初始形成,印支期—喜马拉雅期两者均持续活动,NE走向断裂晚期活动更强。东南斜坡区多走向复合断裂系统:NNE、NEE、SN、NNW走向的4组断裂均呈断续展布,NNE与NEE走向的两组断裂限制SN走向的断裂延伸;受石炭系盐层影响,浅层雁列式断裂不发育。

(2)塔河油田各地区经历的表生岩溶作用持续时间及强度存在差异,同时各地区断裂变形及演化也具有分区特征,据此建立了奥陶系与走滑断裂相关的3类控储模式:塔河主体区表层岩溶+同期断裂耦合型、于奇中西部内幕岩溶+晚期断裂改造型、东南斜坡区断控缝洞型。这一成果为塔河油田向外围区寻找规模储集体提供了依据。

参考文献

- [1] 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 and experiment, 2011, 33(4): 323-331.
- [2] 鲁新便, 杨敏, 汪彦, 等. 塔里木盆地北部“层控”与“断控”型油藏特征: 以塔河油田奥陶系油藏为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(4): 461-469.
LU Xinbian, YANG Min, WANG Yan, et al. Geological characteristics of “strata-bound” and “fault-controlled” reservoirs in the northern Tarim Basin: taking the Ordovician reservoirs in the Tahe oil field as an example [J]. Petroleum geology and experiment, 2018, 40(4): 461-469.
- [3] 吕海涛, 张峭楠, 马庆佑. 塔里木盆地中北部断裂体系划分及形成机制探讨[J]. 石油实验地质, 2017, 39(4): 444-452.
LÜ Haitao, ZHANG Shaonan, MA Qingyou. Classification and formation mechanism of fault systems in the central and northern Tarim Basin [J]. Petroleum geology and experiment, 2017, 39(4): 444-452.
- [4] 郭光辉, 成丽芳, 刘玉魁, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系走滑断裂系统特征及其控油作用[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(3): 239-243.
WU Guanghui, CHENG Lifang, LIU Yukui, et al. Strike-slip fault system of the Cambrian-Ordovician and its oil-controlling effect in Tarim Basin [J]. Xinjiang petroleum geology, 2011, 32(3): 239-243.
- [5] 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.
- [6] 孙东, 杨丽莎, 王宏斌, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区走滑断裂体系对奥陶系海相碳酸盐岩储层的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(增刊1): 80-87.
SUN Dong, YANG Lisha, WANG Hongbin, et al. Strike-slip fault system in Halahatang area of Tarim Basin and its control on reservoirs of Ordovician marine carbonate rock [J]. Natural gas geoscience, 2015, 26(S1): 80-87.
- [7] 田鹏, 马庆佑, 吕海涛. 塔里木盆地北部跃参区块走滑断裂对油气成藏的控制[J]. 石油实验地质, 2016, 38(2): 156-161.
TIAN Peng, MA Qingyou, LÜ Haitao. Strike-slip faults and their controls on hydrocarbon reservoirs in the Yuecan block of the Northern Tarim Uplift, Tarim Basin [J]. Petroleum geology and experiment, 2016, 38(2): 156-161.
- [8] 韩长城, 林承焰, 任丽华, 等. 塔里木盆地塔河10区奥陶系断裂特征及对岩溶储层的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(5): 790-798.
HAN Changcheng, LIN Chengyan, REN Lihua, et al. Characteristics of Ordovician fault in the Block 10 of Tahe Oilfield, Tarim Basin and its controlling effect on karst reservoirs [J]. Natural gas geoscience, 2016, 27(5): 790-798.
- [9] 马庆佑, 曹自成, 蒋华山, 等. 塔河—顺北地区走滑断裂带的通源性及其与油气富集的关系[J]. 海相油气地质, 2020, 25(4): 327-334.
MA Qingyou, CAO Zicheng, JIANG Huashan, et al. Source-connectivity of strike slip fault zone and its relationship with oil and gas accumulation in Tahe-Shunbei area, Tarim Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2020, 25(4): 327-334.
- [10] 马庆佑, 吕海涛, 蒋华山, 等. 塔里木盆地台盆区构造单元划分方案[J]. 海相油气地质, 2015, 20(1): 1-9.
MA Qingyou, LÜ Haitao, JIANG Huashan, et al. A division program of structural units in the Paleozoic platform-basin region, Tarim Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2015, 20(1): 1-9.
- [11] 何海泉, 康志宏. 沙雅—轮台断裂与油气[J]. 石油实验地质, 1992(1): 40-45.
HE Haiquan, KANG Zhihong. The relationship between the Shaya-Luntai faulting system and oil/gas occurrence [J]. Petroleum geology and experiment, 1992(1): 40-45.
- [12] 陈赓俊, 王峰, 孙方源. 塔北隆起东部巴里英断裂的几何学与运动学特征[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 976-983.
CHEN Jiajun, WANG Feng, SUN Fangyuan. Geometrical and kinematic characteristics of Baliying fault in the eastern Tahe uplift, Tarim Basin [J]. Oil & gas geology, 2018, 39(5): 976-983.
- [13] 马庆佑, 沙旭光, 李玉兰, 等. 塔中顺托果勒区块走滑断裂特征及控油作用[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 120-124.
MA Qingyou, SHA Xuguang, LI Yulan, et al. Characteristics of strike-slip fault and its controlling on oil in Shuntuoguole region, middle Tarim Basin [J]. Petroleum geology and experiment, 2012, 34(2): 120-124.
- [14] 李兵, 邓尚, 李王鹏, 等. 塔里木盆地塔河地区走滑断裂体系活动特征与油气地质意义[J]. 特种油气藏, 2019, 26(4): 45-51.
LI Bing, DENG Shang, LI Wangpeng, et al. Strike-slip fault system activity and hydrocarbon geology understanding in Tahe of Tarim Basin [J]. Special oil & gas reservoirs, 2019, 26(4): 45-51.
- [15] 赵岩, 李曰俊, 孙龙德, 等. 塔里木盆地塔北隆起中—新生代伸展构造及其成因探讨[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2557-2568.
ZHAO Yan, LI Yuejun, SUN Longde, et al. Mesozoic-Cenozoic extensional structure in North uplift of Tarim Basin and its genetic discussion [J]. Acta petrologica sinica, 2012, 28(8): 2557-2568.
- [16] 贾承造. 塔里木盆地板块构造与大陆动力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
JIA Chengzao. Plate tectonics and continental dynamics in Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.

- [17] 吕艳萍, 吕晶, 徐想东, 等. 塔里木盆地塔河油田中下奥陶统鹰山组内幕储层成因机理[J]. 石油实验地质, 2021, 43(6): 1031–1037.

LÜ Yanping, LÜ Jing, XU Xiangdong, et al. Genetic mecha-

nism of inner reservoirs of Yingshan Formation of Middle–Lower Ordovician in Tahe Oil Field, Tarim Basin [J]. Petroleum geology and experiment, 2021, 43(6): 1031–1037.

编辑:董庸

Zonal differential deformation and reservoir control model of Ordovician strike-slip fault zone in Tahe Oilfield

XU Zhongxiang, MA Qingyou

Abstract: Based on 3D seismic data interpretation, drilling core observation, sample testing, FMI and oil test data analysis, the differential deformation characteristics of Ordovician strike-slip fault zones in different areas of Tahe Oilfield are analyzed in detail, three deformation and evolution models of strike-slip fault zones are established, and their control effect on the development of Middle–Lower Ordovician large-scale reservoirs in different areas is discussed. The results show that: (1) Controlled by the transformation of regional tectonic stress field and the evolution of ancient tectonic pattern in Tabei Uplift, three types of typical strike-slip fault zones are mainly developed in the Ordovician of Tahe Oilfield. In the main area of Yoputai–Tahe, NNE and NNW strike-slip faults that are symmetrically conjugate cut in “X” shape, form closely integrated network, and are associated with primary and secondary faults; they are formed simultaneously in the Middle Caledonian, and the NNE faults were continuously active in the Yanshanian–Himalayan. In the central and western regions of Yuqi, the NE and SN strike-slip faults are asymmetrically conjugate, distributed in strips and intermittently respectively, and locally cut each other; they were initially formed from late Caledonian to early Hercynian and late Hercynian respectively, both of which were continuously active during Indosinian–Himalayan, and the NE faults were more active. In the southeast slope area, the NNE, NEE, SN and NNW strike-slip faults are distributed intermittently and the NNE, NEE faults limit the extension of SN faults; they were initially formed in the middle Caledonian–Hercynian, and the NE, NNE faults continued to be active in the Yanshanian–Himalayan. Affected by the Carboniferous salt layer, the shallow en echelon faults are not developed. (2) Based on the differential deformation, formation and evolution of three strike-slip fault systems, three types of typical reservoir control models of Ordovician strike-slip faults in Tahe Oilfield are established. Contemporaneous coupling type of epikarst+faults in the main area of Tahe Oilfield: supergene karstification coupling with activities of strike-slip faults from middle Caledonian and early Hercynian developed a large area of karst fracture–cave reservoirs under the T_7^4 interface, and the reservoirs is more developed along the NNE strike-slip fault zone that was continuously active in Yanshanian–Himalayan. Inner karst+late fault reconstruction type in central and western regions of Yuqi: multi-staged supergene karstification in middle Caledonian–late Hercynian flattened the epikarst fracture–cave reservoir under the T_7^4 interface, and most of the remaining cave reservoirs in the middle and lower parts of Yingshan Formation have been seriously filled. The large-scale effective reservoirs are preserved now due to the unfilled early inner karst reservoir superimposing the transformation of strike-slip faults in Indosinian–Himalayan. Fault controlled fracture–cave type in the southeast slope area: it is located in the Upper Ordovician coverage area. The supergene karstification is weak in the middle Caledonian, and the intensity of multi-stage continuous activity of strike-slip faults controls the development of large-scale reservoirs.

Key words: fault–karst; strike-slip fault; deformation characteristics; tectonic evolution; reservoir control model; Ordovician; Tahe Oilfield

XU Zhongxiang, First author: Senior Engineer, mainly engaged in research and management of oil and gas exploration deployment. Add: Exploration and Production Research Institute of SINOPEC Northwest Oilfield Company, Changchun Nan Rd., Urumchi, Xinjiang 830011, China

MA Qingyou, Corresponding author: Senior Engineer, mainly engaged in comprehensive research of oil and gas exploration. Add: Exploration and Production Research Institute of SINOPEC Northwest Oilfield Company, Changchun Nan Rd., Urumchi, Xinjiang 830011, China