

# 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

马庆佑, 曹自成, 蒋华山, 兰明杰

中国石化西北油田分公司勘探开发研究院

**摘要** 基于塔河、顺北油田的勘探实践,前人初步建立了走滑断裂带沟通原地下寒武统烃源岩、油气沿走滑断裂带“垂向运聚”的成藏模式,因此开展塔河—顺北地区走滑断裂带的通源性及其控藏作用研究,对下一步针对断溶体油气藏的勘探开发部署具有重要意义。基于断裂带结构、地震同相轴反射形态、振幅属性强弱等特征,并结合大量实钻井的油、气、水产能情况统计,认为通过走滑断裂与烃源层的接触关系、断裂的构造样式、活动强度等参数,可以定性评价走滑断裂带通源性。走滑断裂可直接沟通烃源岩(“有褶有断”的地震反射结构),具有花状构造的破碎带结构、长期活动的主干断裂带,则通源能力一般较强。塔河—顺北地区的走滑断裂带可初步划分为“上下多层贯通”强通源型、“下贯通上隐伏”中等通源型、“上下均未贯通”弱通源型等3种通源性结构模式,其与油气富集关系具有较好的相关性:“上下多层贯通”强通源型油气往往最富集,产能较好;“下贯通上隐伏”中等通源型油气富集程度减弱,产能差—中等;而“上下均未贯通”弱通源型油气产能通常很低甚至失利。

**关键词** 走滑断裂带; 构造样式; 油气垂向运移; 通源性; 油气富集; 塔河—顺北地区; 塔里木盆地

**中图分类号**:TE122.1 **文献标识码**:A

## 0 前言

断裂带、不整合面、高孔渗输导层是含油气盆地中油气运聚的主要优势通道。塔河油田长期的勘探实践表明:塔河地区油气不仅沿风化壳高孔渗输导层横向运移,还沿走滑断裂带垂向运移,从而形成了复式的大型缝洞成藏系统<sup>[1-3]</sup>。随着顺北油气田的发现,前人逐步建立了走滑断裂带“控储、控藏、控富”的油气富集模式<sup>[4-6]</sup>:走滑断裂带成为顺北油田碳酸盐岩油气藏最重要的垂向运移通道,也是油气的主要富集部位。近期沿走滑断裂带取得的良好勘探成效,开拓了塔里木盆地碳酸盐岩内幕油气勘探的新阵地,因此走滑断裂带成为了研究热点。众多学者对塔里木盆地走滑断裂带的变形特征、成因机制、控储控藏作用、油气勘探意义等方面开展了大量研究工作<sup>[7-12]</sup>,也取得了丰硕的研究成果。

更深入的研究表明:在塔里木盆地下古生界碳

酸盐岩“下生上储”式生储盖组合中,往往发育大量不同构造样式和规模的走滑断裂,但并不是所有的走滑断裂均可成为有效运移通道;走滑断裂能否直接起到输导油气的作用,与烃源岩层和主要储层的位置是否匹配关系非常密切<sup>[13-14]</sup>。比如2018年完钻的顺北蓬1井,在奥陶系鹰山组下段累计漏失泥浆超过2 000 m<sup>3</sup>,表明钻遇了良好储集体,但油气显示较差,综合分析认为该井所在的次级断裂带向下未沟通有效烃源岩,这是本井失利的主要原因。目前关于塔里木盆地走滑断裂带有效运移通道方面的研究成果报道较少。笔者把研究区走滑断裂带能否有效沟通下寒武统玉尔吐斯组烃源岩、油气能否沿断裂带垂向运移至上覆目的层中聚集的特征称为“走滑断裂带的通源性”,并基于塔河—顺北地区走滑断裂带的结构、地震反射形态、振幅属性变化等特征,结合对大量实钻井油气水产能情况的统计,初步划分出不同的走滑断裂带通源性结构模式及通源能力类型,探讨了其对油气富集的控制作

收稿日期:2019-09-16; 改回日期:2019-11-13; 网络出版日期:2020-08-06

本文受中石化重大专项“塔北下古生界油气田目标评价及勘探关键技术研究”(编号:P18095)资助

**第一作者**:马庆佑,高级工程师,从事油气勘探综合研究工作。通信地址:830011 新疆乌鲁木齐市长春南路中石化西北科研生产园区勘探开发研究院A303室;E-mail:37337428@qq.com

用,提出了有利勘探区带与攻关方向,这对指导塔里木盆地下一步的断溶体勘探具有重要意义。

## 1 区域走滑断裂体系划分

塔河—顺北地区位于塔里木盆地中北部,主要横跨沙雅隆起、顺托果勒低隆、满加尔坳陷、卡塔克隆起、古城墟隆起等5个一级构造单元<sup>[15]</sup>(图1)。该地区古生界的断裂样式以逆冲断裂、走滑断裂为主,正断裂发育相对要少。以走滑断裂带结构模型为指导,通过二维、三维地震连片解释,发现塔河—顺北地区中奥陶统碳酸盐岩顶面的断裂体系特征为:大致以走向NE45°的顺北1号走滑断裂(F23)为界,发育南、北两大不同类型的走滑断裂体系<sup>[16]</sup>(图1),北部以“X”形共轭纯剪切走滑断裂体系为主,南部以

近NE向单排左旋简单剪切走滑断裂体系为主。中—晚奥陶世至早—中泥盆世,在北昆仑—阿尔金碰撞造山、南天山洋中—东段俯冲消减作用下,盆地处于“南北双向强挤压”的区域构造背景。近EW向展布的沙雅隆起处于近SN向挤压应力场中,塔河等地区发育“X”形共轭纯剪切走滑断裂体系;而近NW向展布的顺托果勒低隆、卡塔克隆起等处于斜向压扭应力场中,顺北等地区发育以NE向为主、NW向为辅的简单剪切走滑断裂体系。三叠纪至新近纪,在新特提斯洋俯冲消减、天山碰撞造山作用下,塔北整体处于NNW向张扭应力场中,塔河等地区早期NNE向走滑断裂带呈多幕式继承性活动,发育多排NEE向雁列式张扭正断层组,顺北地区走滑断裂带继承性活动较塔河地区明显减弱。

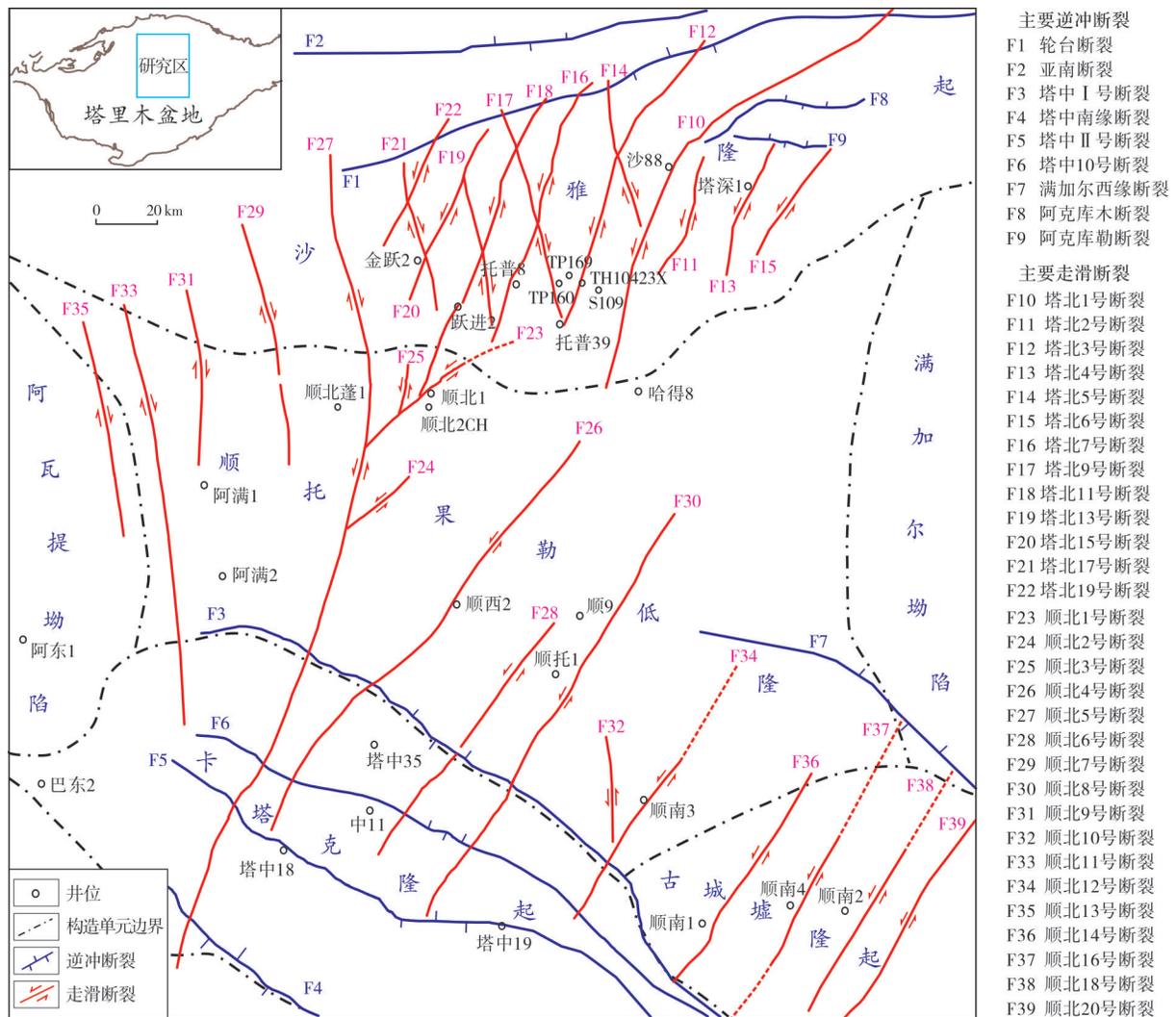


图1 塔河—顺北地区走滑断裂体系(中奥陶统碳酸盐岩顶面)平面分布图

Fig. 1 Distribution of strike slip fault system on the top of Middle Ordovician carbonate rocks in Tahe-Shunbei area

塔河—顺北地区走滑断裂带往往断穿寒武系,能有效沟通原地下寒武统玉尔吐斯组烃源岩。该套主力烃源岩经历了多期生排烃,油气以沿深大通源断裂带垂向运移为主,形成沿走滑断裂带分布的规模较大的断溶体油气藏。顺北油田同一断裂带不同深度的油气藏特征一致,目前实钻的最大油气柱高度近400 m;塔河油田高产稳产油气井大多沿NNE向主干走滑断裂带(如F16等)分布。这些均表明油气以沿走滑断裂带垂向运移为主,具有深大走滑断裂带“控储、控藏、控富”的油气富集规律。

## 2 走滑断裂带通源性的影响因素

任何一条断裂都有可能是潜在的运移通道,但并不是所有的运移通道都存在油气运移。走滑断裂通源能力的强弱,主要和走滑断裂与烃源层的接触关系、与储集层的相对位置,断裂带内部结构、断裂构造样式及断裂活动强度等有关。在成藏过程中,通源作用强的走滑断裂往往与烃源层、储集层及盖层之间具有良好的配置关系<sup>[13-14]</sup>,容易沟通下伏烃源层,有利于油气向上覆储集层运聚成藏。对于塔河—顺北地区走滑断裂带的通源性,可以通过以下参数进行定性评价。

### 2.1 与烃源层的接触关系

油源对比与成藏过程研究表明,塔河—顺北地

区下寒武统玉尔吐斯组发育陆棚—盆地相的泥质烃源岩,是本区中一下奥陶统碳酸盐岩成藏的主要油气来源。塔河—顺北地区的走滑断裂向下能否直接断穿中一下寒武统发育的膏质泥岩、膏质白云岩等致密盖层,断至下寒武统玉尔吐斯组烃源岩,是本区走滑断裂通源性强弱的最重要影响因素。笔者依据断裂的地震反射特征及相干属性,将走滑断裂向下与烃源层的接触关系定性划分为3类(图2):①“有褶有断”直接沟通。以塔北13号走滑断裂(F19)为代表,此类断裂带上的寒武系地震同相轴完全错断(图2a),断距通常为一个同相轴或以上,断裂带相干属性图上表现出明显的差异性,同时断裂带上有明显的褶曲特征,可指示其与下伏烃源岩具有较强的直接沟通关系。②“有褶无断”弱沟通。以塔北1号走滑断裂(F10)南部为代表,此类断裂带上的寒武系地震同相轴较连续,未发生明显错断,但地震同相轴有明显的褶曲变形(图2b),断裂带相干属性图上表现出较弱的差异性,可指示其与下伏烃源岩具有差—中等的沟通关系。③“无褶无断”未沟通。以塔北奥陶系内幕的走滑断裂(未编号)为代表,此类断裂带上的寒武系地震同相轴较连续(图2c),断裂带处振幅强弱没有变化,也未发生明显的褶曲变形,相干属性图上没有差异性,可指示其与下伏烃源岩无沟通关系。

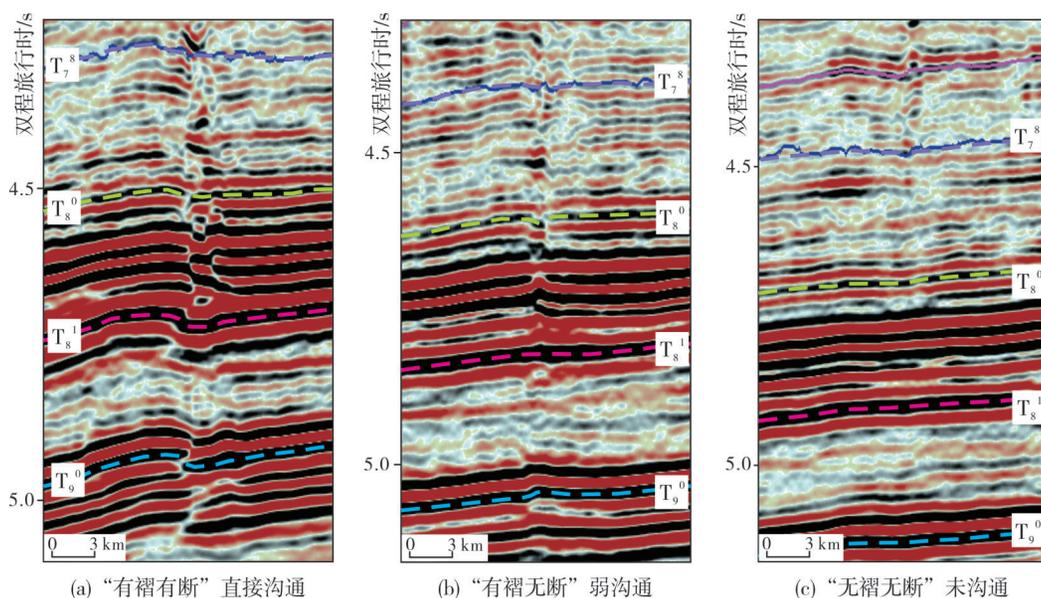


图2 塔河—顺北地区反映走滑断裂与烃源岩层沟通关系的地震反射结构

Fig. 2 Seismic reflection structure showing the connectivity between strike slip fault and source rock in Tahe-Shunbei area

## 2.2 与断裂构造样式的关系

对于基底卷入的走滑断裂而言,基底的断裂位移活动常常影响着自身的通源性能及上覆盖层的构造变形样式。砂箱物理模拟实验表明,走滑断裂带基底发生斜列侧接或弯曲转折的部位,会因局部应力场改变而形成垂向的位移升降,从而导致走滑断裂带上覆盖层普遍具有分段构造变形样式。根据走滑断裂带平面、剖面的变形特征,塔河—顺北地区主要发育负花状拉分型(以顺北1号走滑断裂F23为代表)、正花状压隆型(以顺北5号走滑断裂F27为代表)、直立平移型(以顺北7号走滑断裂F29

为代表)3大类构造变形样式(图3)。前2种构造样式受到的旋扭构造应力场最强,主干断裂向两侧发散,多个分支断裂与主干断裂一起向深部基底收敛合并,形成上宽下窄的楔形破碎带。沿这2种断裂带分布的碳酸盐岩缝洞体之间连通性往往较好,且大部分都能断至下伏烃源层内部,易形成较好的垂向输导系统,通源性较强。进一步的统计表明,负花状拉分型通源性要略优于正花状压隆型。而直立平移型受到的旋扭构造应力场较弱,分支断裂较少,断距较小,沿这种断裂带分布的缝洞体之间连通性变差,难以形成良好的垂向运移系统,通源性往往较差。

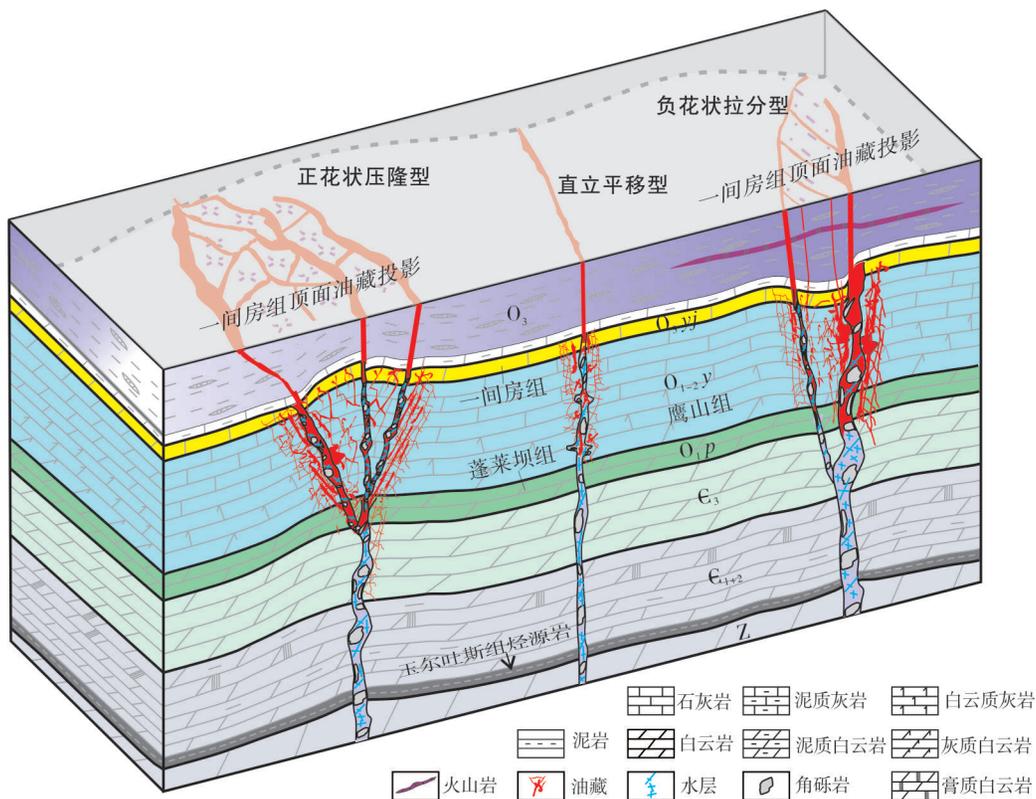


图3 塔河—顺北地区走滑断裂构造样式与通源能力之间的关系

Fig. 3 Relationship between structural style of strike slip fault and its source-connecting capacity in Tahe - Shunbei area

## 2.3 与断裂活动强度的关系

构造活动为油气沿断裂运移创造了条件,走滑断裂活动强度越大,其垂向输导油气的能力越强。断裂活动强度通常可以用断裂活动速率、断裂破碎带宽度这两个参数来表征<sup>[13]</sup>(图4)。断裂活动速率可以用某地质界面上断裂上、下盘的断距大小与形成该断距的断裂持续活动时间的比值来定量表示,

其值越大则反映断裂活动速率越大。在区域剪切应力作用下,走滑断裂活动时由于构造破裂作用,在断面两盘会形成大量的裂缝,这些裂缝互相切割、贯通和焊接,从而导致发育高渗透性的断裂破碎带,成为油气垂向运移的有效通道。在不考虑断裂带内部充填、胶结等情况下,一般而言走滑断裂活动强度越大,其形成的断裂破碎带越宽,因此碳酸盐岩走滑断裂破碎带的宽度大小也可以直观反

映断裂活动的强弱,地震上常用振幅变化率属性来刻画碳酸盐岩破碎带的宽度。

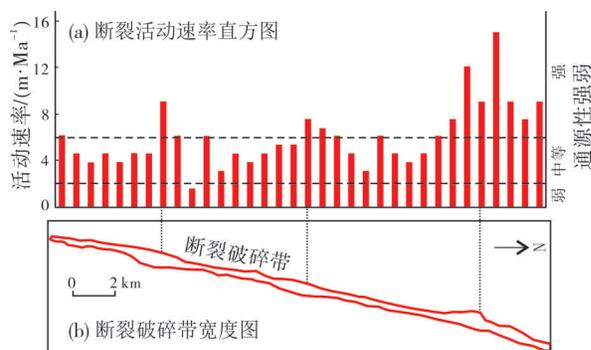


图4 走滑断裂的活动速率、破碎带宽度定性表征断裂活动强度(以塔北3号断裂为例)

Fig. 4 Fracture zone activity rate and width of strike slip fault qualitatively characterizing the activity intensity of the fault (taking Tabei 3 fault as an example)

笔者选择塔河—顺北地区的多条走滑断裂带,沿中奥陶统顶面按一定的间距统计出断裂两盘的断距大小,同时利用振幅变化率属性资料统计出断裂破碎带的宽度,编制了不同断裂带的断裂活动速

率直方图(图4a)及相应的断裂破碎带宽度图(图4b),从而定性表征断裂活动强弱及通源能力。根据对塔北3号(F12)、顺北5号(F27)等断裂带的活动速率与油气井产能的统计结果,初步认为强通源性断裂带的活动强度往往大于6 m/Ma,中等通源性断裂带的活动强度在2~6 m/Ma之间,而弱通源性断裂带的活动强度往往小于2 m/Ma。

### 3 塔河—顺北地区走滑断裂带通源性评价

根据塔河—顺北地区走滑断裂带立体结构模式及通源性的主要影响层系,将区内通源性结构模式纵向划分为3层,分别是上层(志留系以上)、中层(奥陶系—上寒武统)、下层(中寒武统至基底)。应用前文提出的走滑断裂带通源性主要影响因素及评价参数,结合研究区走滑断裂带立体结构解剖及大量油气水产能分析,认为本区走滑断裂带通源性的结构模式及通源能力可划分为3大类型(图5)。

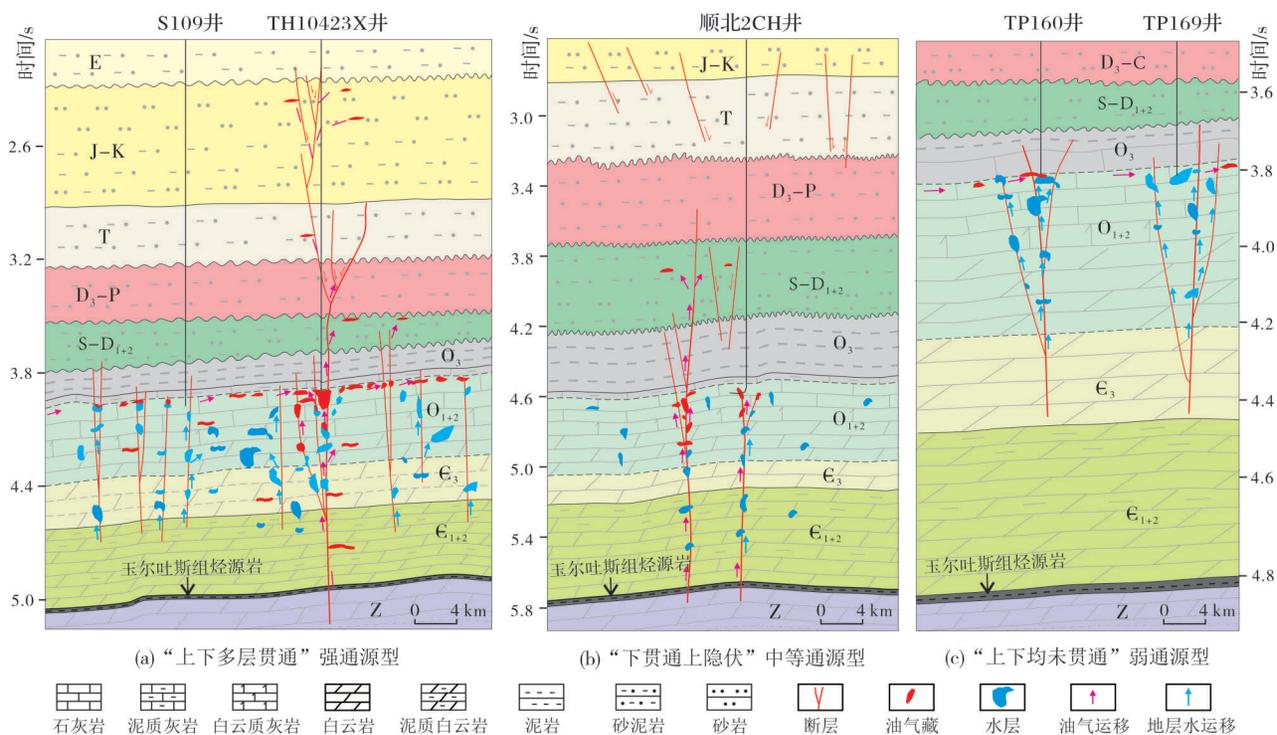


图5 塔河—顺北地区走滑断裂带通源性的结构模式及通源能力类型

Fig. 5 Structural models and types of source-connecting capacity of strike slip fault zone in Tahe-Shunbei area

#### 3.1 “上下多层贯通”强通源型

该类型以塔河地区塔北3号NNE向走滑断裂带

(F12)为代表,纵向上呈“四层楼式”结构模式(图5a):中下寒武统一基底以“1”字形直立状的“花根”结构为主;上寒武统一奥陶系以“y”字形或树枝形压

扭隆升的“正花状”结构为主;志留系—二叠系以张扭拉分沉降的“负花状”结构为主;三叠系—古近系以垂—垒结构或阶梯式正断层的“花上开花”结构为主。

塔北3号走滑断裂带在古生界上下贯通性较强,在中新生界稍弱;在地震剖面上“有褶有断”,寒武系同相轴完全错断,断裂带直接沟通了深部下寒武统玉尔吐斯组烃源层,油气可向上垂向运移到中—下奥陶统缝洞型圈闭中成藏,后期油气溢出后,可垂向调整到浅层的碎屑岩圈闭中聚集成藏。该走滑断裂带多期活动,加里东中期活动速率最大达15 m/Ma(图4),形成中—下奥陶统较宽的碳酸盐岩破碎带,由振幅变化率刻画的最大宽度达724 m,最终可形成通源性较强的垂向输导系统与规模较大的缝洞体系,成为油气运移优势通道与富集场所。该断裂带上的油气勘探成果较丰富,例如其上部署的TH10423X井(图5a),通源性结构较好,2005年11月投产,至今累产油达 $50\times 10^4$  t、累产水 $0.11\times 10^4$  t。而远离该主干断裂带的S109井,通源性结构较差,直井投产后累产油仅 $0.03\times 10^4$  t。

### 3.2 “下贯通上隐伏”中等通源型

该类型以顺北地区顺北2CH井走滑断裂带(未编号)为代表(图5b)。该断裂带属于顺北1号主干走滑断裂带(F23)的次级断裂带,纵向上中下寒武统一基底以“1”字形直立状的“花根”结构为主,在地震剖面上表现出“有褶无断”弱沟通特征,上寒武统一奥陶系花状构造不明显,以弱变形的“y”字形结构为主。该断裂带在寒武系底部及内幕界面的相干属性图上可见明显的差异性特征,越往上覆奥陶系,断裂相干迹象逐渐减弱,直到消失在中奥陶统。该断裂带加里东中期活动速率最大为8 m/Ma,由振幅变化率刻画的中—下奥陶统破碎带最大宽度为319 m。

顺北2CH井断裂带向下错开了基底,连通了深部下寒武统玉尔吐斯组烃源层,向上隐伏于中—上奥陶统。由于断裂活动强度不大,形成的缝洞体储集空间小,因此,油气虽然能垂向运聚,但往往不能富集。如顺北2CH井单位压降原油产出量在顺北地区相对较低,2016年10月投产以来,至今累产油仅 $0.1\times 10^4$  t。

### 3.3 “上下均未贯通”弱通源型

该类型以塔河地区奥陶系内幕的多分支断裂为代表(图5c)。断裂向下通常终止于中寒武统顶面,地震剖面上表现出“无褶无断”未沟通特征,中寒武统一基底地震同相轴无错断,也未见褶曲。断裂向上消失在上奥陶统桑塔木组泥岩中,花状结构主要出现在奥陶系内幕,上下均未贯通。

由于该类断裂向下未断穿中寒武统膏盐岩、泥质白云岩等盖层,不能连通下寒武统烃源层,油气无法垂向运移,邻区少量油气只能沿风化壳面侧向运聚。在这种情况下,即使顶部缝洞体很发育,油气也不能有效充注,最终只能形成水层或油水同层。如部署在该类断裂上的TP160井,2012年12月投产,至今累产油仅 $0.66\times 10^4$  t、累产水 $1.4\times 10^4$  t;而同类型的邻井TP169井,2013年5月投产,至今累产水 $3.3\times 10^4$  t。

## 4 有利勘探区带与攻关方向

在上述3种类型的走滑断裂带通源性结构模式指导下,经二维、三维连片地震解释,编制出塔河—顺北地区中奥陶统碳酸盐岩顶面走滑断裂带的通源性结构模式平面分布图(图6),并将其与油气富集之间的关系进行了对比分析:“上下多层贯通”强通源型结构模式,其油气往往最富集,产能较好,如塔河油田塔北1号(F10)、塔北3号(F12)与顺北油田顺北1号(F23)、顺北5号(F27)等走滑断裂带发育这种结构模式的地区往往油气较富集;“下贯通上隐伏”中等通源型结构模式,其油气富集程度降低,产能差—中等,如塔河油田塔北4号(F13)、塔北6号(F15)与顺北油田顺北7号(F29)、顺北9号(F31)等走滑断裂带,以发育这种结构模式为主,其油气产能相对较差;而“上下均未贯通”弱通源型结构模式,其油气产能往往很低甚至失利,如塔河、顺北地区的许多这种结构模式的断裂带,钻井或者以出水为主,或者为干井。

塔河—顺北地区沿走滑断裂带的勘探突破,大大扩展了塔里木盆地上奥陶统覆盖区的油气勘探领域。以上3种走滑断裂带通源性结构模式的划分,对下一步积极优选有利的通源断裂,争取扩大塔河—顺北地区特深断溶体油气藏的勘探成果具有重要推动作用。



- [7] 黄太柱. 塔里木盆地塔中北坡构造解析与油气勘探方向[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 1-11.
- [8] 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.
- [9] KIM Y S, SANDERSON D J. Inferred fluid flow through fault damage zones based on the observation of stalactites in carbonate caves[J]. *Journal of structural geology*, 2009, 32(9): 1305-1316.
- [10] 吕修祥, 张艳萍, 敬兵, 等. 走滑断层弯曲破碎带特征及对深部岩溶储集层发育的控制作用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(5): 839-850.
- [11] 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.
- [12] 张艳萍, 吕修祥, 于红枫, 等. 塔中隆起两组走滑断裂对岩溶储层发育的控制机制[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 663-673.
- [13] 付广, 王浩然. 利用地震资料预测油源断裂有利输导油气部位[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(1): 161-168.
- [14] 刘峻桥, 张桐, 孙同文, 等. 油源断裂输导能力对油气分布的控制作用[J]. 特种油气藏, 2017, 24(5): 27-31.
- [15] 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.
- [16] 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.

编辑:董庸

## Source-connectivity of strike slip fault zone and its relationship with oil and gas accumulation in Tahe-Shunbei area, Tarim Basin

MA Qingyou, CAO Zicheng, JIANG Huashan, LAN Mingjie

**Abstract:** Based on the exploration practice of Tahe and Shunbei oilfields, some scholars initially established a “vertical migration and accumulation” reservoir-forming model of strike-slip fault belts connecting the source rocks of Lower Cambrian. Therefore, it is of great significance to carry out the research on the source-connectivity of the strike slip fault zone and its control on reservoir-forming in Tahe-Shunbei area, in order to guide the next exploration and development of fault-controlled karst reservoirs. Based on the characteristics of fault zone structure, seismic event reflection pattern, amplitude attribute strength and so on, and combined with the statistics of oil, gas and water production capacity of a large number of drilling wells, it is considered that the source-connectivity of strike slip fault zone can be qualitatively evaluated by the contact relationship between strike slip fault and source rock, structural style and activity intensity of fault, and other parameters. If strike slip faults have direct contact relationship with source rocks (seismic reflection structure with fold and fault), fracture zone structure with flower structure and main fault zone with long-term activity, then the source-connecting capacity of strike slip fault is usually strong. The strike slip fault zone in Tahe-Shunbei area can be preliminarily divided into three types: strong source-connecting type of “upper and lower multi-layer connection”, medium source-connecting type of “lower connection and upper concealed” and poor source-connecting type of “upper and lower concealed”. The source-connecting type of strike slip fault zone has good correlation with oil and gas enrichment. The strong source-connecting type is often the most enriched and have better productivity; the degree of oil and gas enrichment of medium-connecting type is decreased, and the productivity is poor to medium; while the productivity of poor source-connecting type is usually very low or even lost. This recognition will play an important role in optimizing exploration targets and expanding exploration achievements of strike slip fault zone.

**Key words:** strike slip fault zone; structural style; vertical migration of oil and gas; source-connectivity; oil and gas enrichment; Tahe-Shunbei area; Tarim Basin

**MA Qingyou,** First 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., Urumqi, Xinjiang 830011, China