

文章编号: 0253-9985(2009)03-0316-08

塔中地区断裂不同演化阶段对油气聚集的控制

张仲培, 王 毅, 云金表, 周 波, 赵泽辉, 郑孟林

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 塔中地区断层活动时间主要集中在加里东中晚期, 海西期活动强度减小, 喜马拉雅晚期很弱。主要断裂带在活动时代与期次、对沉积地层改造和建造的控制上以及上、下地层接触关系上存在明显不同。含油气断裂构造带油气聚集差异与断裂的阶段演化有着紧密的内在联系, 体现在 4 个演化阶段的断层对油气聚集的差异控制上, 即同沉积断裂控油气、沉积期后断裂控油气、主生烃期断裂控油气和成藏期后断裂控油气。

关键词: 断裂构造; 断层差异演化; 油气聚集; 塔中地区; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A

Control of faults at different evolution stages on hydrocarbon accumulation in Tazhong area, the Tarim Basin

Zhang Zhongpei, Wang Yi, Yun Jinbiao, Zhou Bo, Zhao Zhehui, Zheng Menglin

(SINOPEC Exploration & production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract An analysis of how faulting activities in different evolution stages control the hydrocarbon distribution and accumulation is carried out based on a summarization of the basic features of different faulted zones in the Tazhong area, Tarim Basin. The result shows that faults in the Tazhong area were most active during the Mid-Late Caledonian, softened during the Hercynian, and weak during the late Himalaya. It also indicates that the major fault zones are significantly different in the time and stages of activity, control on the formation and deformation of sedimentary formations and stratigraphic contact relationships between the upper and lower layers. The differences in hydrocarbon accumulation among different oil/gas-bearing faulted zones are closely related with the evolutionary stages of the faults, as being embodied in the differential control of faults at four evolutionary stages on hydrocarbon accumulation, namely syn-sedimentary fault, post-sedimentary fault, peak-hydrocarbon-generation-stage fault and post-hydrocarbon-accumulation fault.

Key words fault structure; differential evolution of fault; hydrocarbon accumulation; Tazhong area; Tarim Basin

塔中地区包括塔中隆起及其围斜部位, 是塔里木盆地重要的油气勘探领域。目前在奥陶系风化壳岩溶、中-上奥陶统生物礁滩、志留系构造-岩性圈闭和东河砂岩-石炭系披覆背斜构造与复合型圈闭中均已经找到工业油气藏。油气藏主要沿断裂带分布, 如塔中 16-26 号构造中油气藏沿塔中 I 号断裂分布, 塔中 10-12 号构造油气藏则

沿塔中 10 井断裂分布, 塔中 4 号构造油气藏夹持于两条逆断层间。

塔中地区的油气聚集及其控制作用多有研究和论述^[1~8]。但区内断裂在不同演化阶段活动的差异性对油气分布和聚集的控制少有论述。本文拟在总结断裂构造带基本特征的基础上, 阐述塔中地区断裂主要演化阶段, 探讨断裂不同演化阶

段对油气聚集的控制作用。

1 断裂构造基本特征

塔中地区次级构造单元主要依据断裂带命名, 从北向南依次为塔中 I 号断裂构造带、塔中 10 井断裂构造带、塔中 II 号断裂构造带 (中央主垒带)、塔中 5-38 井断裂构造带、塔中南缘断裂 (或坡折) 构造带、塔中 1-7 号断裂构造带、塔中 3 井断裂、巴东南-塘北断裂带和塘古断裂带^[9] (图 1)。

1.1 断裂构造走向以北西向为主

塔中地区发育 4 组断裂, NW 向、NE 及 NEE 向、近 EW 向和近 NS 向 (图 1), 以 NW 向断裂占主导, 延伸远, 断距大, 基本控制了塔中低凸起的整个构造格局。其次为 NE-NEE 向断裂主要分布在塘古孜巴斯凹陷北缘及塔中隆起的西北部。近 EW 向断裂主要分布在塔中隆起东段塔中 5-

38 井区, 近 NS 向断裂主要分布在顺托果勒低隆北部, 一般规模较小。

NW 向与 NNW 向展布的大型构造带基本上控制着隆起的现今背斜形态, 如塔中 I 号断裂带控制着中央隆起带北部边缘, 塔中南缘断裂坡折带基本上控制着塔中隆起南部边缘。塔中 II 号断裂带和塔中 10 井断裂带, 作为隆起轴部和北斜坡上发育的 NW 向断裂, 使隆起的背斜形态更加复杂化。

此外, 多个 NW 走向及 NE 走向断层向东收敛, 向西撒开, 形成“帚”状平面组合^[9]。

1.2 断裂构造样式

受塔里木盆地多期挤压构造运动的影响, 工区内断层以逆断层占主导 (图 2)。多数为基底卷入式压扭断层, 如塔中 I 号断裂、塔中 II 号断裂等。多数断层断穿了下古生界, 一部分切入到上古生界和中生界, 有的甚至断至第三系底部 (图 2)。

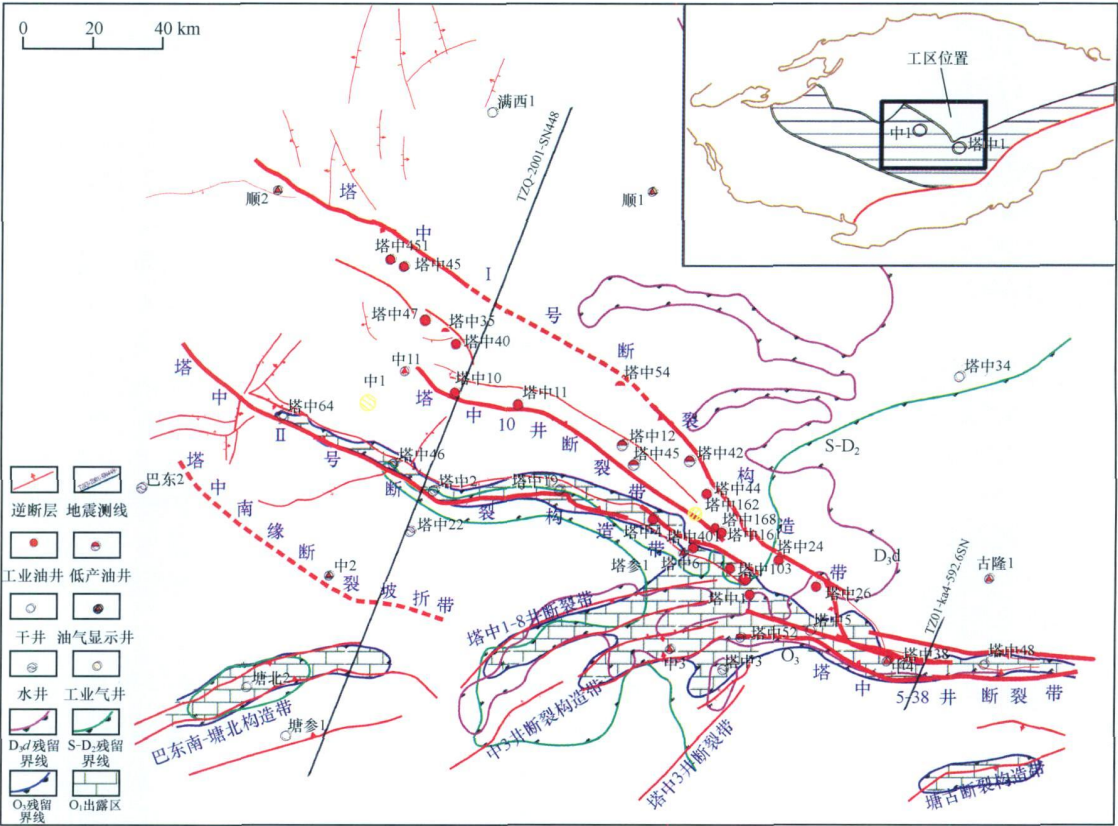


图 1 塔中地区断裂构造带与前石炭系地层分布简图

Fig 1 Outline of faulted structural zones and the Carboniferous layers in Tazhong area the Tarim Basin

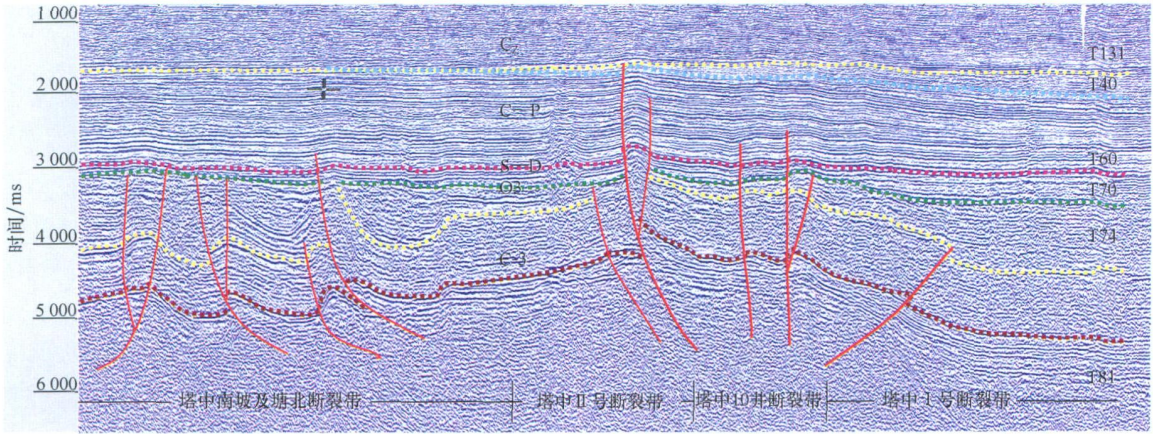


图 2 塔中地区中西部断裂带地震剖面地质解释

Fig. 2 Geologic interpretation of seismic profiles of the central and western faulted zones in Tazhong area (TZQ- 2001- SN448测线, 位置如图 1)

2 断裂演化阶段及断裂带间演化差异

塔中地区断裂活动有 4 个主要时期 (表 1), 断裂带间的演化活动在活动时代与期次、对沉积地层改造和建造的控制上存在明显差异。

2.1 断裂演化阶段

塔中地区断裂演化主要有 4 期 (图 3)。

1) 中加里东末期, 断裂初始反转阶段。塔中地区从寒武纪—早奥陶世的伸展构造状态, 到中奥陶世, 构造反转, 形成该区最早期的逆冲反转断裂体系, 如塔中 I 号断裂带和塔中南缘断裂带局部断层等。它们的形成控制了古隆起的初始边界。

2) 晚加里东—早海西期, 即在志留纪—泥盆纪, 帚状扭动断裂体系形成阶段。受阿尔金走滑断裂体系活动的影响, 塔中隆起受到压扭性构造应力场的作用, 断裂构造基本上都具有右行挤压走滑的性质。南西盘向北西方向走滑的过程中遇阻, 使塔中地区现今在平面上总体呈“帚”状展布的断裂构造体系。

3) 晚海西期, 塔中压扭断裂系进一步活动阶段。东河砂岩—石炭系沉积之前, 塔中隆起基本成型, 塔中 I 号断裂带基本停止活动; 二叠纪, 受南天山造山带形成和南缘甜水海地体与塔里木陆地拼贴碰撞的影响, 挤压应力向盆地内部传递, II 号断裂、部分南缘断裂和隆起东段的塔中 5—48 井断裂再次活动, 并形成了上古生界构造层的扭动断裂—背斜带。

4) 喜马拉雅期为稳定的演化阶段, 断裂构造活动对塔中隆起影响微弱, 只在隆起中西部的 II 号断裂和 10 号断裂有微弱活动, 局部形成 NNE 向断裂。

因此, 塔中地区断层活动时间以加里东中、晚期为主, 海西期活动强度减小, 喜马拉雅晚期活动强度很弱。

2.2 活动时代与期次

塔中地区虽然有 4 个主要断层活动时期, 但每一条断裂之间断层开始活动的时代、活动期次和主要活动时期均存在差异 (表 1; 图 4)。

图 4 表明, 塔中 I 号断坡折带主活动期为中晚奥陶世^[10], 在此后的漫长地质历史中, 活动很微弱, 局部未受任何影响; 塔中 II 号断裂带的主要活动期为早中加里东末期和晚海西期; 塔中 10 井断裂带主要活动时间为加里东晚期—海西早期, 海西晚再次活动, 但强度较前期小; 塔中南坡及塘北断裂带主要活动期在加里东中晚期和海西晚期, 此后基本没有断层活动; 塔中 5—48 井断裂带主要活动在加里东中晚期—海西早期, 海西晚期再次活动。

2.3 对沉积地层改造和建造的控制

在塔中隆起演化过程中, 断裂带差异演化导致的断块差异活动对已沉积地层改造和残留地层展布的控制明显。通过地震资料解释和井间地层对比所勾勒出的上奥陶统、志留系一中、下泥盆统、东河砂岩的残留界线表明, 塔中 I 号断裂东段、塔

表 1 塔中地区断裂构造要素、断裂演化活动特征与断裂带油气聚集特征统计对照

Table 1 Statistics of fault elements, evolution characteristics and hydrocarbon accumulation conditions of faulted zones in Tazhong area

断裂带名称		I 号断裂带	塔中 10 井断裂带	II 号断裂带	南坡及塘北断裂带	塔中 5—38 井断裂带
基本特征	走向/倾向	NW/SW	NW/NE(主断层)	东段: NW/SSW(主断层) 中西段: NW/NE(主断层)	南坡折: NW 塘北: NEE/(NNW, SSE)	EW/(N, S)
	逆冲方向	NE	SW	东段: NNE; 中西段: SW	SSE, NNW	N, S
	影响层位	AnC—O ₂ , 中段仅到 O	AnC—C	AnC—E	AnC—C	AnC—C
	发育时代和期次	O ₂ —O ₃	O—D ₃ P	O ₂ C—P, N	O, S, C	O, P
	断层落差	不同段有差异, 东段较大, 达 1 980 m	最大断层落差 270 m	由西向东逐渐增大, 最大达 900 m	东段最大超 2 000 m	最大达 2 600 m
演化时间与活动性	断层接触关系	东段: D ₃ d—C/O 地层间断时间较长; 中西段: D ₃ d—C/S—O 地层较连续	D ₃ d—C/S—D/O 地层间断时间较短	D ₃ d—C/O ₁	东段: C/O ₁ ; 西部: C/S—O	C/O ₁ , 地层间断时间较长
	活动性综合表现	东段强, 中西段弱; 晚期活动十分弱	较弱	多期性, 早、晚期强度均大, 断块抬升较高	多期性、东强西弱	早期强度大断块抬升较高
	对成藏条件的主要控制作用	1) 晚奥陶世同沉积断裂活动决定了上奥陶统礁滩沉积; 2) 晚期断裂活动弱决定了灰岩上覆地层保存完好	1) 断层活动控制了背斜构造的发育; 2) 断层活动较弱决定的灰岩上覆碎屑岩层系齐全	1) 断层多期活动决定了灰岩层系裂缝作用强; 2) 断块多期抬升控制岩溶作用期次多且长期持续	1) 断层多期活动决定了灰岩层系裂缝作用强; 2) 断块多期抬升控制岩溶作用期次多且长期持续	断块抬升控制岩溶作用长期持续
	圈闭类型	构造—岩性复合、背斜	背斜、潜山内幕	构造—地层、潜山为主		
	储/盖组合及典型油气藏代表	O ₃ l/O ₃ s: TZ26, TZ24, TZ44, TZ62, TZ58, TZ45 等 D ₃ d/C ₁ b: TZ24	S ₁ k/S ₁ y: TZ11, TZ12, TZ50; D ₃ d/C ₁ b: TZ10, TZ40, TZ16; C: TZ40; O ₃ : TZ12; O ₁ : 中 1, TZ16	O ₁ : TZ1, TZ4; C I / II : TZ4; D ₃ d/C ₁ b: TZ101, TZ4, TZ6		
油气藏特征	储层类型	礁滩复合体孔隙、石灰岩孔—缝型	砂岩孔隙、灰质云岩裂缝型	灰岩洞缝型、砂岩孔隙型		
	储量分布情况	上奥陶统礁滩复合体领域占主导	灰岩上覆碎屑岩领域占主导	灰岩岩溶储集体和碎屑岩领域均较大		
	输导条件与方式	油源断层、垂向运移	油源断层、垂向运移	油源断层、不整合面、裂缝复合网络		
主要成藏期		加里东中晚期、海西晚期和喜马拉雅期	加里东中晚期、海西晚期和喜马拉雅期	加里东中晚期、海西晚期和喜马拉雅期		注: AnC—前寒武系; O ₁ , O ₂ —下、中奥陶系; S ₁ k—柯坪塔格组; S ₁ y—志留系依木干他乌组; O ₃ l—上奥陶统良里塔格组; O ₃ s—桑塔木组; C ₁ b—巴楚组; D ₃ d—东河塘组; C I / II—石炭系内部 I 和 II 油组; TZ4—塔中 4 井
断层演化控制油气的方式		1) 同沉积期活动控制的台地边缘相为油气聚集奠定了生、储基础和近距运移条件; 2) 后期断层活动微弱程度决定了具有优质泥岩盖层和稳定保存	1) 断层活动派生的背斜构造发育; 2) 油气沿断层垂向运移, 分配到不同层位, 最终在断层沿不整合面运移, 最终在断层附近不同层系的背斜圈闭内聚集成藏	断块多次差异升降控制的断褶不整合(进而控制的岩溶高地)和高密度发育的裂缝系统对储层的改造, 决定了该带下奥陶统优质的孔隙—裂缝型储集空间的发展		

Fig. 4 Comparison of the evolution periods and active stages of the major faulted zones in Tazhong area

中5—48井断裂带、塔中Ⅱ号断裂带及塔中南坡及塘北断裂带因为多期活动,断块隆升遭受剥蚀,且活动强度相对较大,所以断裂相关褶皱轴部地区为上奥陶统和志留系一中、下泥盆统剥蚀殆尽的区域(图1)。在塔中隆起东段的塔中1井—5井—48井区,断层抬升较高,导致志留系一中、下泥盆统和东河砂岩由隆起西北向东南方向超覆减薄。

断层差异活动导致区内不同断裂带间上下地层接触关系不同。例如,下奥陶统的直接上覆地层在中3—塔中1—塔中5—塔中48井区的断裂带上是石炭系,往西为泥盆纪东河砂岩超覆在下奥陶统之上;在塔中Ⅱ号断裂带中东段,既有志留系与下奥陶统直接接触,又有东河砂岩与下奥陶统褶皱潜山直接接触;在塔中Ⅰ号断裂带与塔中10井断裂带,为上奥陶统与中、下奥陶统直接接触(图1)。

断层活动的差异性还导致碳酸盐岩地层裂缝发育程度的差异。前人对塔中地区奥陶系碳酸盐岩储层裂缝预测的结果表明,一级裂缝发育区主要分布在塔中Ⅱ号断裂带、南缘断裂带以及塔中Ⅰ号断裂带东段的塔中161—塔中44井区、塔中24—塔中26—塔中27井区、塔中45井区、塔中3井区—塔中52井区、塔中403井区、塔中2和塔中22井区^[15],对该地区灰岩顶面不整合面之下的风化壳岩溶发育起到促进作用。

除以上差异外,断层带所处位置不同,其演化过程对地层沉积也具有不同控制作用。晚奥陶世同沉积断层—塔中Ⅰ号断裂带控制的坡折古地貌形成了浅水台地边缘礁滩复合体^[13,14]。在塔中南坡及塘北断裂带,虽然钻探程度还很低,但从地质结构的相似性上看,也可能在上奥陶统存在这种受同沉积断层控制的台地边缘礁滩沉积。

3 断裂不同演化阶段对油气聚集的控制

根据塔中Ⅰ号断裂带、Ⅱ号断裂带东段和塔中10井断裂带上目前油气聚集情况的统计和分析表明,可以看出,油气藏的圈闭类型、主要储盖组合、储层类型以及主要含油气领域在不同带之间存在一定差异(表1)。

塔中Ⅰ号断裂带圈闭类型以构造—岩性复合

为主,同时还发育背斜圈闭;主要储盖组合为上奥陶统桑塔木组泥岩—良里塔格组灰岩,油气产层主要为上奥陶统良里塔格颗粒灰岩,储层为礁滩复合体孔隙型,部分为灰岩孔—缝型^[13];塔中10井断裂带,已发现油气藏主要圈闭类型以背斜型和潜山内幕型为主,油气产层则在灰岩上覆的碎屑岩层系比较多,主要产层和储盖组合类型也比较多,既有志留系内部依木干他乌组泥岩—柯坪塔格组砂岩组合,又有下石炭统巴楚组泥岩—东河砂岩组合,也有石炭系内部和石炭系与下奥陶统构成的储盖组合;储层类型有砂岩孔隙和灰质云岩裂缝型;在塔中Ⅱ号断裂带的东段,构造地层和潜山型圈闭是目前已发现油气藏的主要类型,油气在下奥陶统灰岩和其上覆的石炭系均有较丰富的聚集,储盖组合以石炭系内部与石炭系下部泥岩—下奥陶统灰岩组合最为典型,储层类型以灰岩洞缝型和砂岩孔隙型为主。

因此,区内断裂差异演化导致不同时期断裂带上成藏条件存在差异,对含油气断裂构造带上油气成藏聚集特征产生控制,其控制作用有四种类型。

3.1 同沉积断裂控油气

塔中Ⅰ号断裂在晚奥陶世的活动控制了塔中隆起边缘的坡折地貌,为台地边缘的礁滩复合体形成提供了沉积环境。在早、中奥陶世末期,塔中Ⅰ号断裂活动剧烈,塔中隆起开始形成。强烈的冲断作用导致塔中隆起抬升并遭受剥蚀,边界断裂剥蚀垮塌形成北倾的坡折带。晚奥陶世,随着海平面的持续上升,上奥陶统良里塔格组沉积时塔中沉入浅水下接受沉积,在塔中Ⅰ号断裂处形成高陡的断裂坡折带,沿断裂坡折带发育浅水台地边缘礁滩复合体,下盘沿坡折带相变为满加尔凹陷的深水砂泥岩。

礁滩相与邻近的台缘斜坡相具有生烃能力的灰泥丘邻接,为油气聚集奠定了很好的生、储基础,同时也为油气的近距离运移提供了条件^[14](图5a)。而其断层活动在奥陶纪末期的基本结束和后期构造运动中的微弱程度决定它同时具有规模厚度的上奥陶统桑塔木组优质泥岩盖层和稳定保存。这些条件最终控制油气在上奥陶统礁滩体的富集。

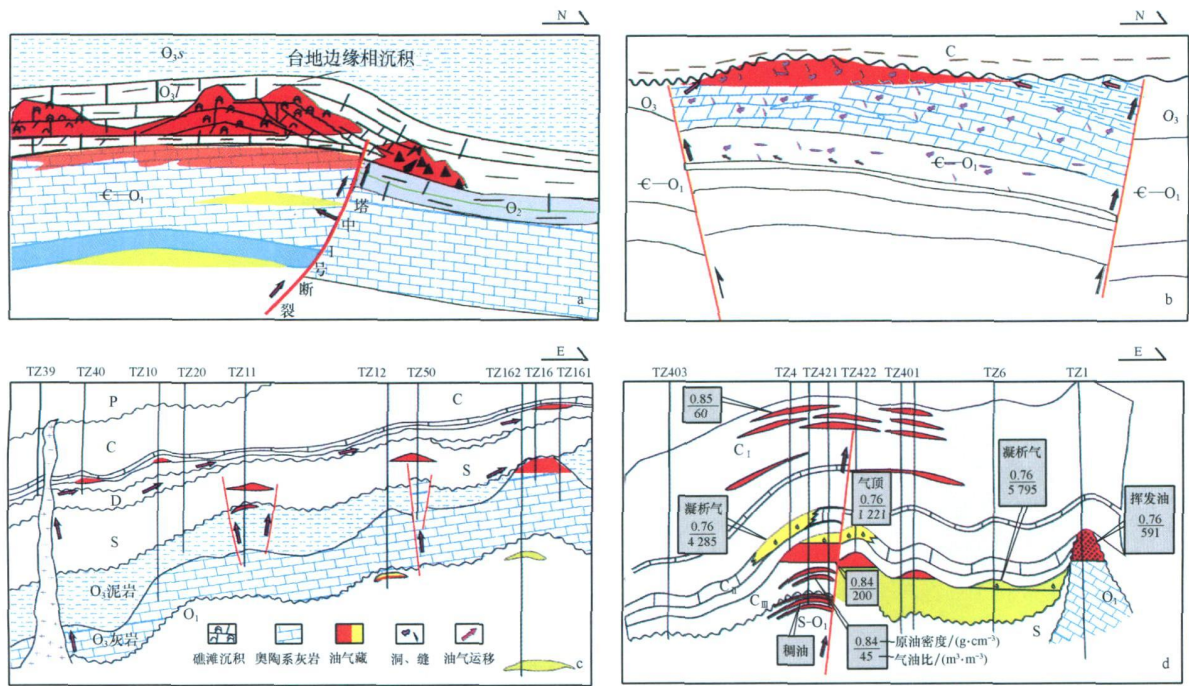


图 5 塔中地区断裂构造演化对油气聚集的控制模式

Fig. 5 Sketch map showing the controlling pattern of the faulted zones upon hydrocarbon accumulations in Tazhong area

- a. 塔中 I 号断裂的同沉积断裂控油气; b. 塔中 II 号断裂东段的沉积期后断裂控油气;
- c. 塔中 10 井断裂带的主生烃期断裂控油气; d. 塔中 4 构造的成藏期后断裂控油气

3.2 沉积期后断裂控油气

塔中 II 号断裂带断层活动以多期活动、断块抬升高和落差大为特征 (表 1), 所以, 断块多次差异升降控制的断褶不整合 (进而控制的岩溶高地) 和高密度发育的裂缝系统对储层的改造 (图 6), 决定了该带下奥陶统优质的孔洞-裂缝型储集空间的发育 (图 5b), 是下奥陶统高产油气的关键。也就是说, 这种断层对油气的控制, 体现在断层通

过对已沉积地层的改造达到对油气储层和储集空间的控制。

3.3 生烃期断裂控油气

塔中 10 井断裂带构造样式最典型特征是断层活动派生的背斜构造发育, 同时其活动强度相对其他断层都小, 对已沉积地层改造弱, 灰岩上覆碎屑岩层系保留齐全。所以, 断层在海西晚期活动时, 沟通了正值生烃期的寒武系一下奥陶统源岩^[16], 油气沿断层垂向运移, 分配到不同层位, 然后再沿不整合面运移, 并最终在断层附近不同层系的背斜圈闭内聚集成藏 (图 5c)。

3.4 成藏期后断裂控油气

在塔中 II 号断裂带的东段塔中 4 构造上, 断裂在燕山期一喜马拉雅期的活动对早期油气聚集的调整与改造, 加之该期活动断裂作用为油气垂向运移通道, 使得早期聚集的油气再次向上分配到潜山披覆层系并聚集成藏^[17~20], 决定了该构造上油气的复式聚集特征 (图 5d)。

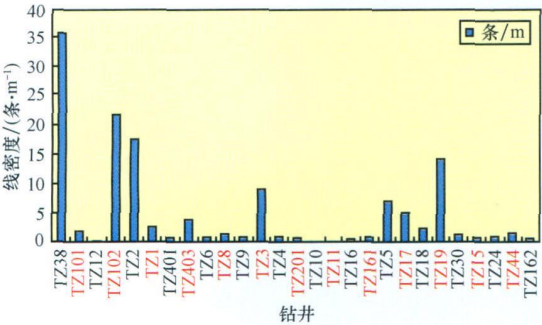


图 6 塔中地区钻井岩心裂缝线密度统计

Fig. 6 Statistic histogram of fracture line density in cores from different faulted zones in Tazhong area

4 结 论

1) 塔中地区发育多个走向的断层, 以北西向断层占主导; 断层活动时间主要集中在加里东中晚期, 海西期活动强度减小, 喜马拉雅晚期很弱; 各断裂在活动时代与期次、对沉积地层改造和建造的控制上以及上下地层接触关系上存在差异。

2) 塔中地区不同演化阶段的断裂对油气聚集控制作用不同。断裂差异演化对含油气断裂构造带上油气成藏聚集控制作用有 4 种类型, 即塔中 I 号断裂的同沉积断裂控油气、塔中 II 号断裂东段的沉积期后断裂控油气、塔中 10 井断裂带的主生烃期断裂控油气和塔中 4 构造的成藏期后断裂控油气。

参 考 文 献

1 吕修祥, 胡轩. 塔里木盆地塔中低凸起油气聚集与分布 [J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(4): 288~ 294

2 谢晓安, 吴奇之, 高岩, 等. 塔里木盆地压扭断裂带构造特征与油气聚集 [J]. 石油学报, 1997, 18(2): 13~ 17

3 姜振学, 杨俊, 庞雄奇, 等. 塔中 4 油田石炭系各油组油气性质差异及成因机制 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 159~ 166

4 吕修祥, 赵风云, 杨海军, 等. 塔中隆起志留系混源多期油气聚集特征与勘探对策 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2005, 20(3): 1~ 5

5 杨宁, 吕修祥, 周新源, 等. 塔里木盆地碳酸盐岩油气聚集带 [J]. 地质学报, 2006, 80(3): 398~ 405

6 王红军, 黄晓明. 塔中地区地层压力结构与油气的分布 [J]. 石油实验地质, 1999, 21(3): 242~ 245

7 赵宗举, 周新源, 范国章. 塔里木盆地塔中地区主要构造圈闭形成期分布及成藏意义 [J]. 海相油气地质, 2006, 11(2): 1~ 8

8 杨春林. 塔里木盆地压扭构造组合与油气聚集 [J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(6): 682~ 690

9 张振生, 李明杰, 刘社平. 塔中低凸起的形成和演化 [J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 28~ 31

10 邬光辉, 李启明, 张宝收, 等. 塔中 I 号断裂坡折带构造特征及勘探领域 [J]. 石油学报, 2005, 26(1): 28~ 30

11 赵靖舟, 庞雯, 吴少波, 等. 塔里木盆地海相油气成藏年代与成藏特征 [J]. 地质科学, 2002, 37(增刊): 81~ 90

12 赵靖舟, 李启明. 塔里木盆地油气藏形成与分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003. 50~ 100

13 周新源, 王招明, 杨海军, 等. 塔中奥陶系大型凝析气田的勘探和发现 [J]. 海相石油地质, 2006, 11(1): 45~ 51

14 赵宗举, 李宇平, 吴兴宁, 等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系特大型岩性油气藏成藏条件及勘探潜力 [J]. 中国石油勘探, 2004, 9(5): 12~ 21

15 魏国齐, 贾承造, 宋惠珍, 等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系构造- 沉积模式与碳酸盐岩裂缝储层预测 [J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 408~ 413

16 王飞宇, 张水昌, 张宝民, 等. 塔里木盆地寒武系海相烃源岩有机成熟度及演化史 [J]. 地球化学, 2003, 32(5): 461~ 468

17 刘克奇, 苏振阁. 塔里木盆地塔中 4 油田油气成藏条件与成藏模式 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2005, 29(2): 6~ 10

18 赵靖舟, 李秀荣. 晚期调整再成藏——塔里木盆地海相油气藏形成的一个重要特征 [J]. 新疆石油地质, 2002, 23(2): 89~ 92

19 何治亮, 陈强路, 钱一雄, 等. 塔里木盆地中央隆起区油气勘探方向 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 769~ 778

20 周波, 贾承造, 顾家裕, 等. 塔中台地边缘上奥陶统灰岩段裂缝对储层发育的控制作用——以塔中 I 号断裂坡折带为例 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 198~ 203

(编辑 高 岩)

(上接第 315 页)

8 Riedel M, Spence C D, Chapman N R, et al Deep-sea gas hydrates on the northern Cascadia margin [J]. The Leading Edge, 2001, 1(20): 87~ 91

9 Welhan J A, Lupton J E. Light hydrocarbon gases in Guaymas Basin hydrothermal fluids: thermogenic versus abiogenic origin [J]. AAPG Bulletin, 1987, 2(71): 215~ 223

10 丁安娜, 王明明, 李本亮, 等. 生物气的形成机理及源岩的地球化学特征——以柴达木盆地生物气为例 [J]. 天然气地球科学, 2003, 14(5): 402~ 407

11 帅燕华, 张水昌, 赵文智, 等. 陆相生物气纵向分布特征及形成机理研究——以柴达木盆地涩北一号为例 [J]. 中国科学 (D

辑: 地球科学), 2007, 37(1): 46~ 51

12 张水昌, 赵文智, 李先奇, 等. 生物气研究新进展与勘探策略 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 90~ 95

13 党玉琪, 侯泽生, 徐子远, 等. 柴达木盆地生物气成藏条件 [J]. 新疆石油地质, 2003, 24(5): 374~ 378

14 党玉琪, 张道伟, 徐子远, 等. 柴达木盆地三湖地区第四系沉积相与生物气成藏 [J]. 古地理论, 2004, 6(1): 110~ 118

15 农业部厌氧微生物重点开放实验室. 产甲烷细菌及研究方法 [M]. 四川成都: 成都科技大学出版社, 1997. 35~ 56

(编辑 董 立)