

塔里木盆地富满油田东部走滑断裂发育特征与油气成藏

宋兴国^{1,2},陈石^{1,2},谢舟³,康鹏飞³,李婷³,杨明慧^{1,2},梁鑫鑫^{1,2},彭梓俊³,史绪凯³

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京102249;2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京102249;
3. 中国石油塔里木油田公司,新疆库尔勒841000]

摘要:富满油田东部走滑断裂是塔里木盆地奥陶系超深层碳酸盐岩油气藏勘探的重点目标。该走滑断裂活动较弱,识别解译难度较大,需要深入研究其发育、演化及控藏特征。基于富满油田最新采集的三维地震数据,选取并精细解译了3条典型主干断裂(F_{10} , F_{12} 和 F_{17}),明确了富满油田东部走滑断裂活动特征及主要活动期次。在此基础上,结合油气性质及成藏期次,分析了断裂活动特征与油气成藏的关系,加深了对该区域断裂发育特征与油气分布规律的认识,进一步明确了断裂演化与油气成藏的耦合关系对油气性质的影响。研究表明,富满油田内走滑断裂具有垂向分层差异变形特征,可划分出4个构造变形层,由下往上分别为盐下基底构造层(TC_2 之下)、盐构造层(TC_2 - TC_3)、碳酸盐岩构造层(TC_3 - TO_3t)和碎屑岩构造层(TO_3t 之上)。研究区断裂活动期次整体可划分为加里东早期、加里东中期Ⅲ幕和加里东晚期—海西期3个阶段,其中加里东中期Ⅲ幕是区域内断裂主要活动阶段。结合油气性质差异、油井生产动态、断裂活动特征与油气成藏期的耦合关系认为,断裂活动影响了垂向运移通道的开启,控制了油气垂向运移;断裂持续活动时间长,使油气运移通道保持开启,有利于晚期高成熟油气的持续充注,造成断控油气藏具有油气充注强度大、成熟度高及气/油比高的特征。

关键词:分层差异变形;多期构造演化;走滑断裂;油气成藏;富满油田;塔里木盆地

中图分类号:TE122.3 文献标识码:A

Strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in the eastern part of Fuman oilfield, Tarim Basin

SONG Xingguo^{1,2}, CHEN Shi^{1,2}, XIE Zhou³, KANG Pengfei³, LI Ting³, YANG Minghui^{1,2}, LIANG Xinxin^{1,2}, PENG Zijun³, SHI Xukai³

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China]

Abstract: The strike-slip faults in the eastern Fuman oilfield have been targeted for Ordovician ultra-deep carbonate reservoirs in the Tarim Basin. However, they are difficult to be identified and interpreted with available data due to their weak activity, thus it is essential to deeply understand their development, evolution and reservoir-controlling characteristics. Based on the newly acquired 3D seismic data of the oilfield, three typical trunk faults (F_{10} , F_{12} and F_{17}) are selected for a fine interpretation to clarify the activity characteristics and main faulting stages of the strike slip faults. Combined with oil and gas properties and reservoir-forming stages, the study analyzed the relationship between fault activity characteristics and hydrocarbon accumulation to deepen the understanding of fault development characteristics and hydrocarbon distribution in the area as well as clarifying the coupling relationship between multi-stage evolution of faults and multi-stage accumulation of hydrocarbons. The results show that the strike-slip faults in the Fuman oilfield has the characteristics of vertical stratified differential deformation, which can be divided into four tectonic deformation layers from bottom up: the subsalt basement tectonic layer (below TC_2), salt tectonic layer (TC_2 - TC_3), carbonate rock tectonic layer (TC_3 - TO_3t) and clastic rock tectonic layer (above TO_3t). The active faulting can be divided into three

收稿日期:2022-06-13;修订日期:2022-12-16。

第一作者简介:宋兴国(1996—),男,博士研究生,油区构造。**E-mail:** alexsong1996@126.com。

通讯作者简介:陈石(1986—),男,博士、副教授,含油气盆地构造。**E-mail:** chenshi4714@163.com。

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U21B2062)。

stages: the early Caledonian, the third episode of the middle Caledonian and the late Caledonian-Hercynian, among which the third episode of the middle Caledonian is the main active faulting stage. Combined with the coupling relationship between the difference of oil and gas properties, the production performance of oil wells, the characteristics of fault activity and the period of hydrocarbon accumulation, comprehensive analyses show that faulting affects the opening of vertical migration pathway and controls the vertical hydrocarbon migration. The faulting lasts for a long time, which keeps the hydrocarbon migration pathways open and is conducive to the continuous charging of late highly mature oil and gas, resulting in fault-controlled reservoirs characterized by high hydrocarbon charging intensity, high maturity and high gas-oil ratio.

Key words: layered differential deformation, multi-stage tectonic evolution, strike-slip fault, oil and gas accumulation, Fuman oilfield, Tarim Basin

引用格式:宋兴国,陈石,谢舟,等.塔里木盆地富满油田东部走滑断裂发育特征与油气成藏[J].石油与天然气地质,2023,44(2):335-349. DOI: 10.11743/ogg20230207.

SONG Xingguo, CHEN Shi, XIE Zhou, et al. Strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in the eastern part of Fuman oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2):335-349. DOI:10.11743/ogg20230207.

大型走滑断裂分布于板块边缘,滑移距可达数万米,不仅难以形成有效油气储层,还可能对油气成藏造成破坏^[1]。随着地震采集及处理技术的进步,在塔里木盆地台盆区解译识别出多条克拉通内小滑移距断层,这些断层组合形成了环满西走滑断裂体系^[2-3]。近年来,塔里木盆地阿满过渡带超深层奥陶系碳酸盐岩油气勘探不断取得突破^[4],验证了走滑断裂的控储、控藏作用^[5-8]。中国石油在富满油田奥陶系碳酸盐岩的油气勘探也不断取得新发现,目前已落实多条油气富集断裂带^[4-5],包括F₁5,F₁17和F₁19等极富油断裂,多口井(满深1井、满深3井、满深7井等)获高产油流;油田平面含油面积超过10 000 km²,年石油产量超过 200×10^4 t,累计上交三级地质储量油气当量约 10×10^8 t。

前人对台盆区走滑断裂的几何学展布、运动学特征及动力学来源均开展了大量研究^[9-14],明确了断裂几何学上分区分带、分层分段、分级分期的特征^[6, 15-20]。早期受地震资料缺乏等因素影响,前人的研究集中于塔中隆起及塔北隆起,在阿满过渡带开展的断裂研究主要集中于F₁5(顺北5号断裂)^[21-23],而对其他走滑断裂的研究较少。前人对油气性质平面分布特征及控制因素的研究主要探讨了烃源岩演化特征及膏盐层展布规律对油气差异分布的影响^[5, 24],但未能合理解释相邻断裂油气性质分布差异大的现象,对断裂演化特征与油气性质差异分布的关系也缺乏研究。目前富满油田的主力勘探开发区域位于其东部(F₁5东侧),研究区走滑断裂产状高陡且变形较弱,造成研究区断裂识别、构造解译、活动期次判别及控藏规律分析难度较大,影响了油田的井位部署和油气藏开发。

本文以塔里木盆地富满油田新采集的三维地震资料为基础,结合相干和最大似然等多种地震属性,分析了F₁10,F₁12和F₁17三条典型走滑断裂,精细解析了断裂的发育特征,并结合油气分布特征探讨了断裂对油气成藏的控制作用。除了为该区域油气勘探目标的优选和井位设计提供思路,还有助于深入认识该区域断裂的发育特征与油气分布规律的关系,从而进一步明确断裂演化与油气成藏的耦合关系对油气性质的影响。

1 地质概况

富满油田所在的阿满过渡带北接塔北隆起,南临塔中隆起,东西向分别夹持于满加尔凹陷与阿瓦提凹陷之间,形态上总体呈马鞍状(图1)^[5],是盆地内部相对稳定的构造单元。

基于前人对塔北隆起和塔中隆起的构造演化及盆地周缘造山带活动的分析,阿满过渡带的构造演化可能经历了多个阶段。在加里东早期(寒武纪),塔里木板块周缘洋盆均处于扩张阶段,盆内整体处于伸展应力环境,阿满过渡带发生沉降;在加里东中晚期(中奥陶世),周缘洋盆停止扩张并陆续向塔里木板块俯冲,盆内整体处于挤压应力环境并持续至海西早期(泥盆纪),阿满过渡带内发生持续强烈挤压;在海西中-晚期(石炭纪一二叠纪),南天山洋持续俯冲闭合,塔北隆起发生持续挤压抬升,阿满过渡带也发生抬升;在印支期—燕山期(三叠纪—白垩纪),盆地周缘构造相对稳定,阿满过渡带整体发生稳定沉降,并在喜马拉雅期(古近纪—第四纪)定型^[25-28]。

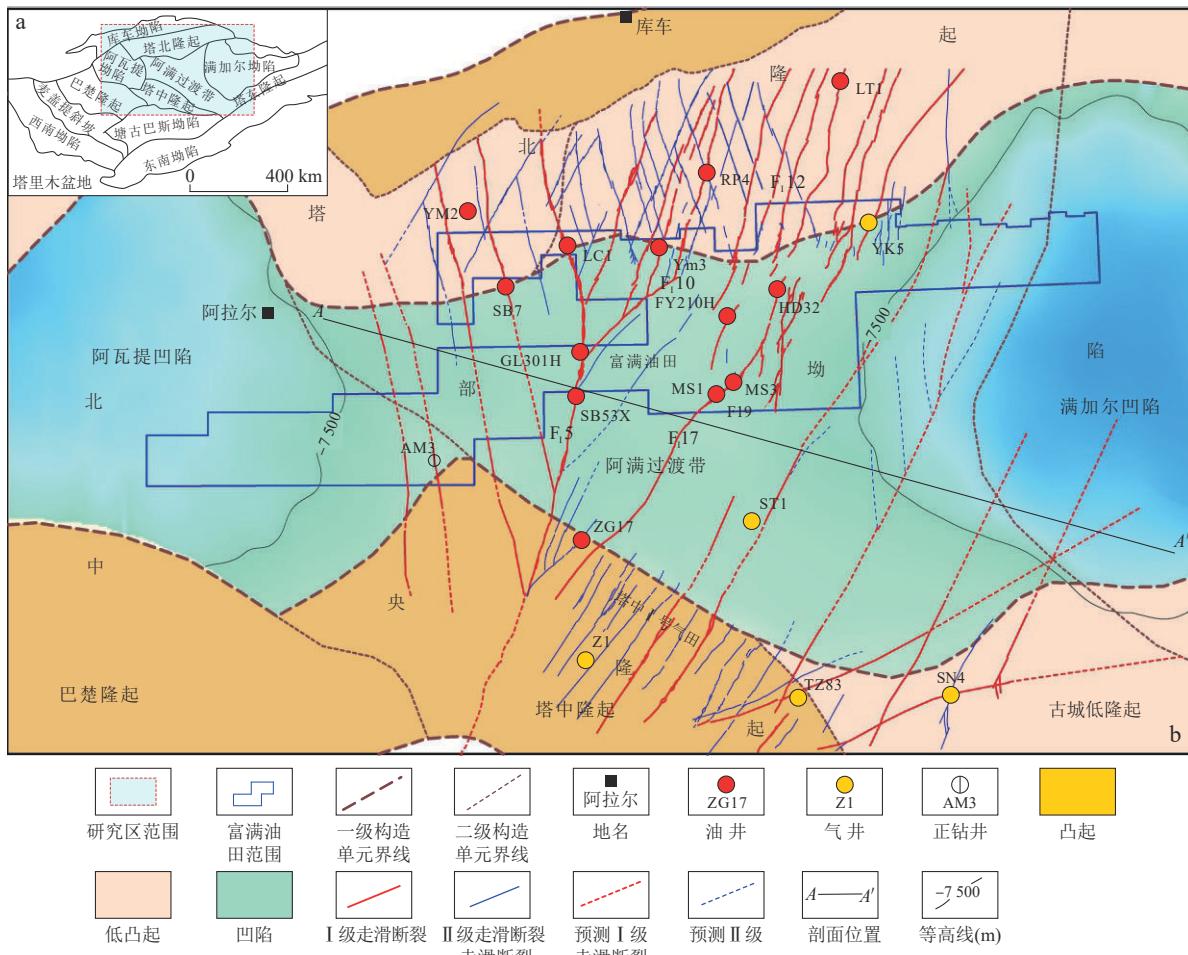


图1 富满油田区域构造位置(a)及邻区下古生界主要断裂分布(b)(据文献[5]修改)

Fig. 1 Maps showing the regional tectonic location of the Fuman oilfield (a) and the distribution of main faults of Lower Paleozoic in the oilfield and its adjacent area (b) (modified after reference [5])
(正钻井指正在钻探的井。)

阿满过渡带奥陶系地层发育完整(图2)^[5],由下往上依次为蓬莱坝组(O_{1p})、鹰山组(O_{1-2y})、一间房组(O_2y)、吐木休克组(O_3t)、良里塔格组(O_3l)和桑塔木组(O_3s)。目前富满油田勘探主力目的层位是奥陶系一间房组(O_2y)和鹰山组的1-2段(O_{1-2y}^{1-2}),垂向上与下寒武统玉尔吐斯组(E_y)黑色页岩及上奥陶统桑塔木组(O_3s)区域性厚层泥岩组成良好的生-储-盖组合。钻井岩心及测井等资料显示,目的层原生孔隙基本不发育,主要储集空间为受断裂破碎作用及岩溶作用影响的孔、洞、缝,属于断控缝洞型储层^[5, 29-30](图3)。

不同于塔北典型的X型共轭体系及塔中的逆冲撕裂调节体系,阿满过渡带介于塔北隆起和塔中隆起两大断裂体系之间,平面上走滑断层发育密度整体不高,以F₁5断裂为核心东西两侧分别分期发育了NE和NW向两组断裂,整体形态上呈帚状(图1)。剖面上(图4),阿满过渡带走滑断裂活动强烈,剖面特征清

晰,且基底发育一系列前寒武基底裂陷构造,整体具有明显的分层变形结构。近期研究及勘探实践表明,玉尔吐斯组烃源岩在阿满过渡带沉积厚度大,垂向上与走滑断裂断控型储层及厚层桑塔木组泥岩盖层叠置,通过走滑断裂垂向沟通烃源岩,整体构成具有原地生烃、垂向运聚的复式走滑断控油气成藏体系,具有极大的油气勘探潜力^[2-3]。

2 富满油田走滑断裂分层变形结构

前人研究发现,塔里木盆地台盆区走滑断裂垂向上具有分层差异变形特征^[9, 11, 21],普遍以一间房组顶面(TO_{3t})为界,整体划分为深、浅两大构造变形层;深层(TO_{3t} 以下)发育直立花状走滑断层,浅层(TO_{3t} 以下)发育雁列式正断层。解译新采集的精细三维地震资料发现台盆区断裂分层变形特征可进一步细化,在

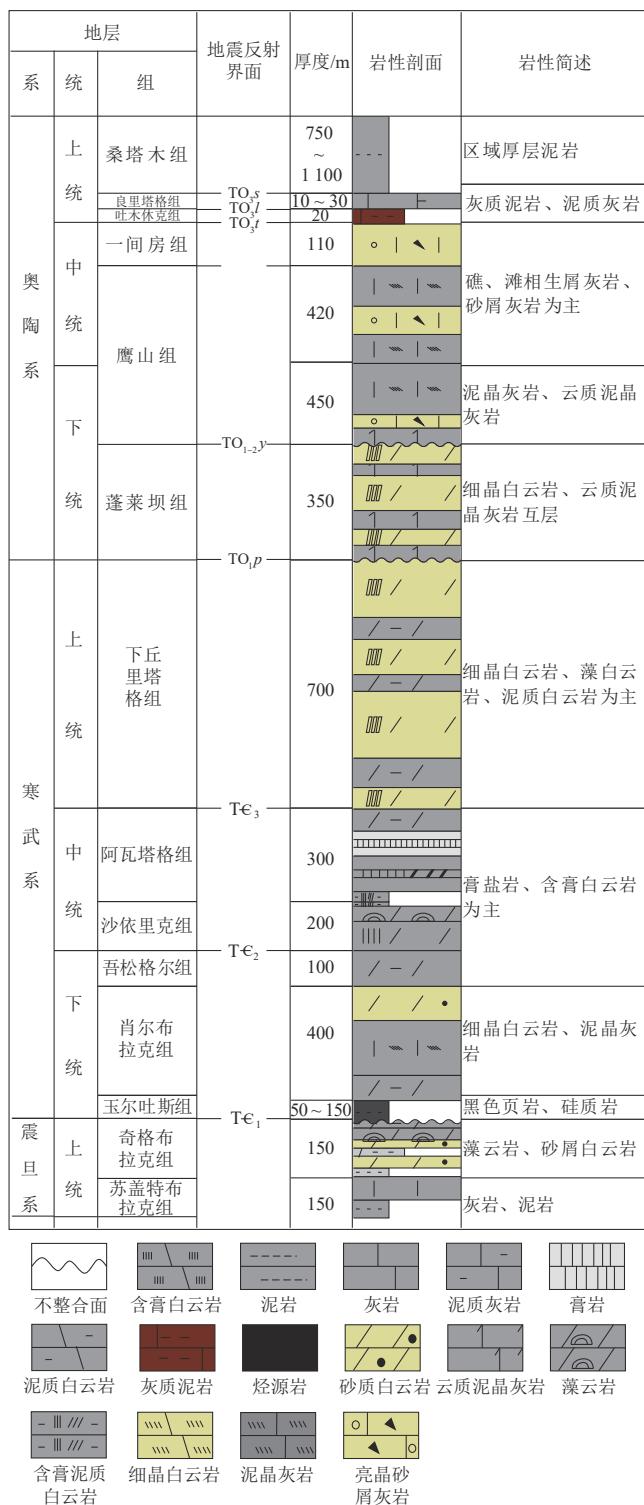


图2 富满油田下古生界碳酸盐岩地层特征(据文献[5]修改)

Fig. 2 Stratigraphic characteristics of the Lower Paleozoic carbonates, Fuman oilfield (modified after reference [5])

中寒武统膏盐层及盐下地层存在差异变形特征(图4);并且膏盐层和盐下构造对油气的生成及垂向疏导具有重要影响^[2],故进一步细分总结断裂的分层变形特征具有重要意义。

基于富满油田三维地震资料解释成果,总结了走滑断裂分层变形特征,建立了分层变形结构模型(图5)。综合研究区走滑断裂分层变形样式特征、岩性、应力机制等因素,垂向上划分出4个构造变形层,由下往上分别为盐下基底构造层(Tε₂之下)、盐构造层(Tε₂—Tε₃)、碳酸盐岩构造层(Tε₃—TO_{3t})和碎屑岩构造层(TO_{3t}之上)。

受前寒武基底结构影响,盐下基底构造层变形主要表现为3种样式:正断层、逆断层和基底古隆起。正断层为南华震旦纪裂谷构造持续活动的产物,逆断层为正断层反转形成,隆起可能为基底古隆起或者后期构造运动形成的隆起。在正断层裂谷发育区,玉尔吐斯组烃源岩及新元古代烃源岩沉积厚度大,属于烃源岩优势发育区。

依据盐层变形特征及应力发育情况,盐构造层可划分出3种主要变形样式,即盐席构造、盐撤凹陷和盐拱背斜,分别对应平移、压扭和张扭3种构造变形应力环境。压扭环境中发育的盐撤凹陷,膏盐层厚度相对较小,油气沿断裂带向上运移阻力小,属于优势运移区。

基于断裂发育结构及破碎带内地层形变特征,碳酸盐岩构造层也可划分3种主要变形样式,分别为平移走滑、负花状构造和正花状构造,分别对应平移、张扭和压扭3种应力环境。

碎屑岩构造层中主要发育雁列式正断层。依据断裂发育特征,可划分为半地堑、地堑及复合地堑。复合地堑为多期叠加产物,在早期压扭应力条件下形成的正花状构造被晚期雁列式正断层下切改造,在F₁5(顺北5号)断裂南段广泛分布。

3 富满油田东部典型主干断裂发育特征

基于富满油田新采集的三维地震资料及提取的相关属性等,选取F₁10,F₁12以及F₁17断裂进行精细译,明确了富满油田东部主干断裂的发育特征,厘定了断裂活动期次。

3.1 F₁10断裂发育特征

F₁10断裂位于F₁5断裂东侧,整体呈NNE向展布,向南终止于F₁5断裂之上,向北延伸至阿满过渡带与塔北隆起边界处,并限制了塔北隆起哈拉哈塘地区一系列NNE及NNW向共轭断裂(图1)。

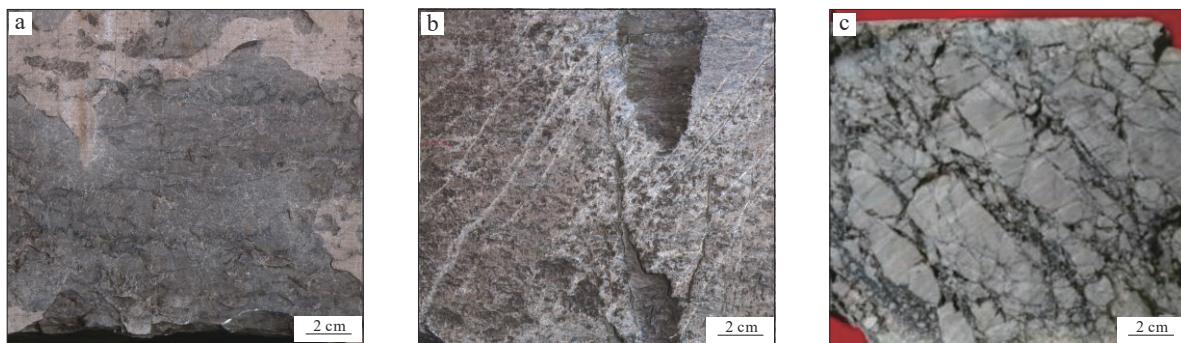


图3 富满油田奥陶系一间房组碳酸盐岩储层岩心特征

Fig. 3 Core characteristics of Ordovician carbonate reservoirs in the Yijianfang Formation of the Fuman oilfield

- a. 灰色灰岩,部分溶蚀孔洞被充填,满深8井,埋深6 352.46 m; b. 浅灰色砂屑灰岩,沿裂缝溶蚀孔洞,富源302H井,埋深6 355.52 m;
c. 断层角砾岩,未充填网状裂缝发育,哈得27井,埋深6 291.34 m

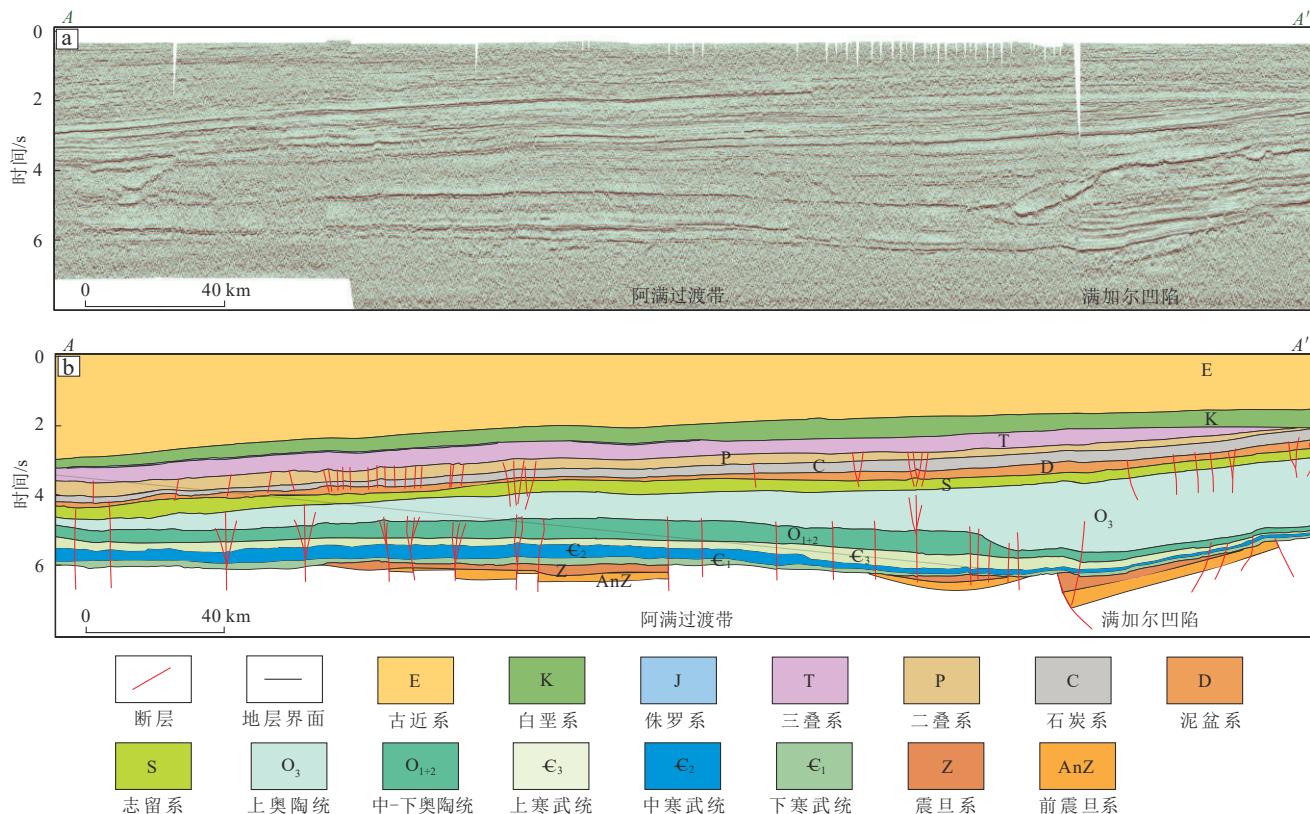


图4 塔里木盆地阿满过渡带区域地质剖面(剖面位置见图1)

Fig. 4 Regional geological section of the Aman transition zone, Tarim Basin (see Fig. 1 for the location)

- a. 地震剖面; b. 地质解释剖面

3.1.1 断裂分层展布特征

受垂向岩性差异与断裂分期变形的影响, F_1 ~10断裂各构造层断裂展布特征(图6)具有明显差异。寒武系底面相干显示(图6a)其断裂活动较弱, 沿断裂破碎带呈不连续线性展布。上寒武统底面断裂活动增强, 线性特征增强, 平面发育叠接构造(图6b)。

奥陶系灰岩顶面断裂活动性最强, 南部以线性特征为主, 与 F_1 ~5断裂斜交; 中部沿主位移走滑断裂派生构造发育, 形成辫状, 发育数个叠接区; 北部断裂活动减弱, 以线性特征为主, 限制塔北隆起多条走滑断层的发育, 平面形态形似马尾构造(图6c)。志留系底面沿主位移带发育雁列式断层, 呈右阶形式排列(图6d)。

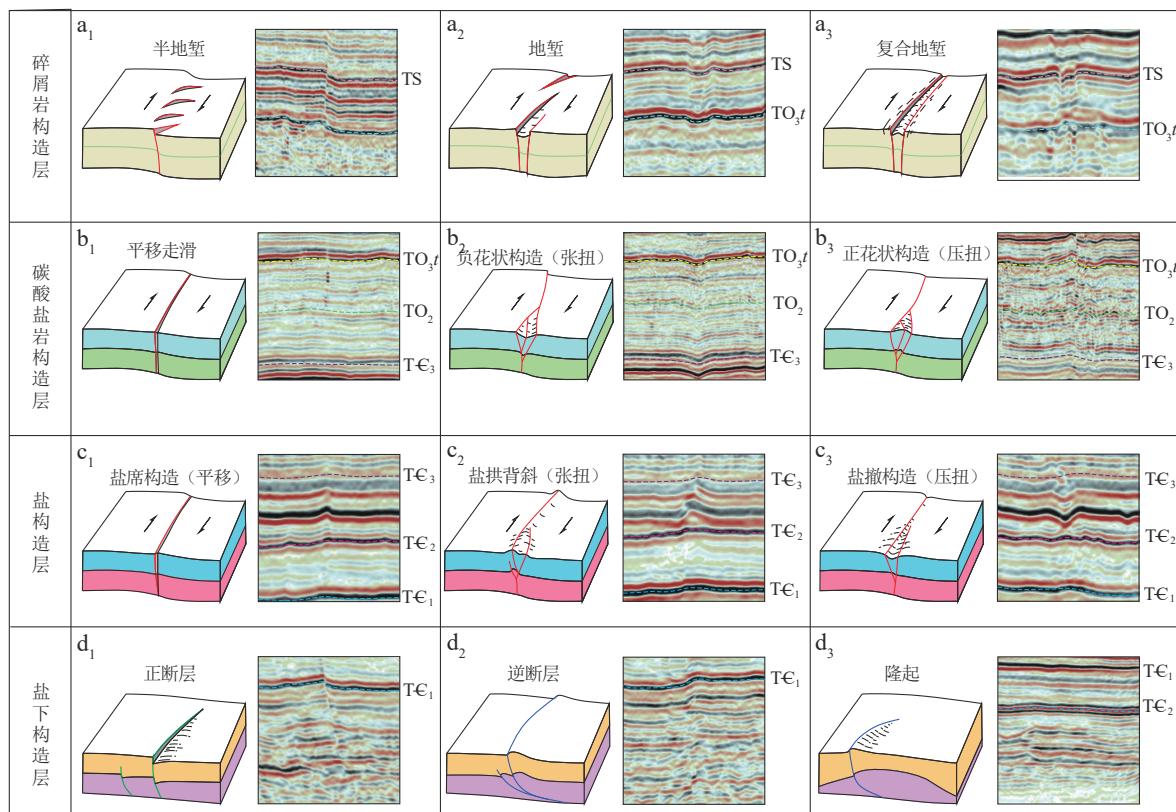


图5 富满油田走滑断裂分层差异变形结构

Fig. 5 Layered differential deformation structures of strike-slip faults in the Fuman oilfield
注:小图中,左图为差异变形结构立体示意图,右图为相应地震反射剖面特征。

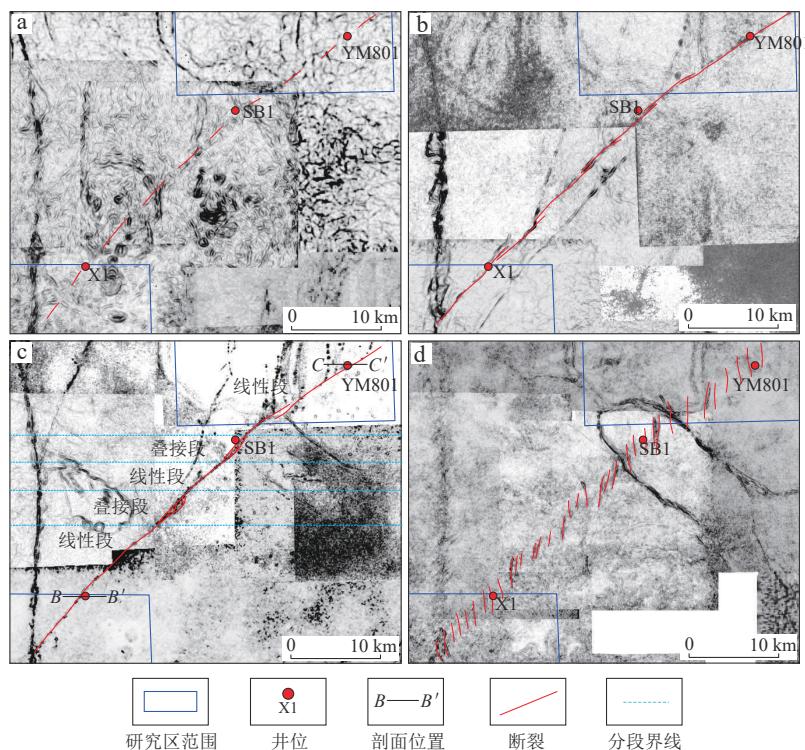
图6 富满油田F₁₀走滑断裂三维多层相干切片

Fig. 6 Multi-layer coherence slices of F₁₀ strike-slip fault in the Fuman oilfield

a. 下寒武统底面(TE₁)相干; b. 上寒武统底面(TE₃)相干; c. 奥陶系一间房组顶面(TO_{3t})相干; d. 志留系底面(TS)相干

3.1.2 断裂分段变形特征

F_{10} 具有明显的平面分段特征;依据断裂平面展布及构造发育特征,富满油田及附近区域的断裂自南向北可划分为线性段、叠接段、线性段、叠接段和线性段(图6)。

如图5所示,富满油田地震资料采集范围覆盖断裂的南侧与北侧,均处于线性段中。富满油田内 F_{10} 断裂的分段变形特征如下。

断裂南部地震剖面特征(图7,剖面B—B')显示,基底地层发生显著下凹,发育前寒武小型凹陷构造;断裂产状陡立,切穿盐层,贯通基底,向上直达奥陶系一间房组顶面;剖面上沿断层破碎带,“串珠”构造特征发育明显;灰岩顶面处于弱压扭应力环境,于顶面附近发育小型分支,地层发生微弱上拱变形;碎屑岩构造层中,雁列式正断层活动性较强,发育典型地堑构造。

断裂北部地震剖面特征(图7,剖面C—C')显示,基底以平坦沉积为主;走滑断裂产状直立,不发育分支,向下贯通基底,向上活动终止于一间房组顶面;碎屑岩构造层中,正断层活动性强,断距显著,地层发生显著下掉,发育地堑构造,且地层中存在典型岩浆侵入构造,发育岩床。

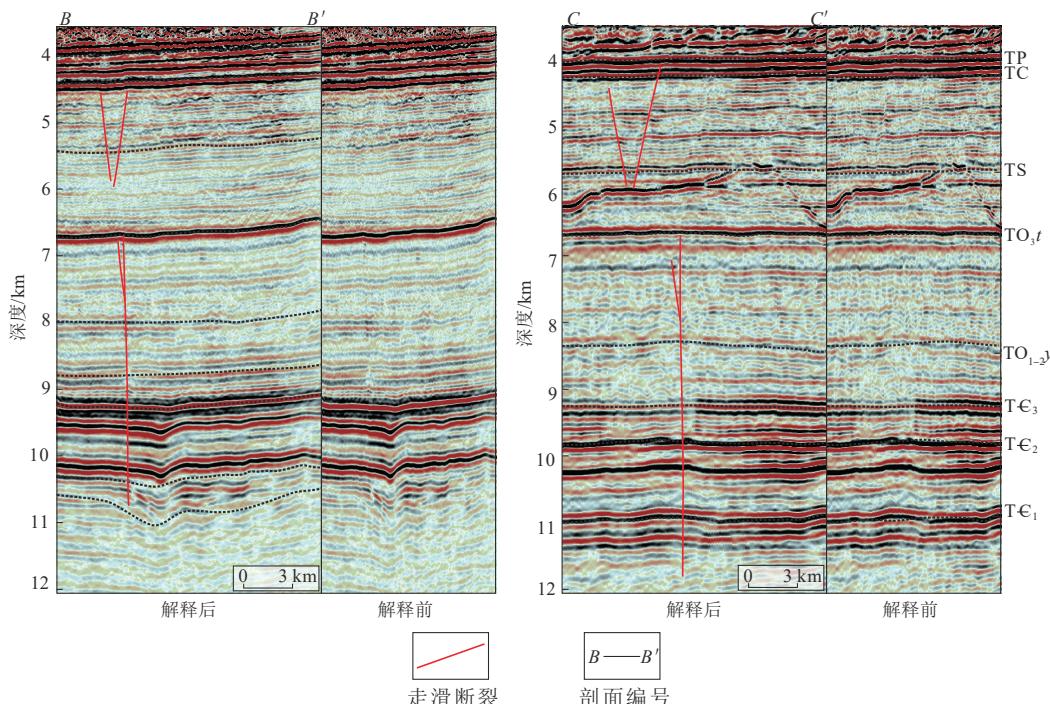


图7 富满油田 F_{10} 走滑断裂分段变形特征(剖面位置见图6)

Fig. 7 Typical section showing segmented deformation of F_{10} fault in the Fuman oilfield (see Fig. 6 for the location of the section)

3.2 F_{12} 断裂发育特征

F_{12} 断裂平面延伸距离超过120 km,横跨塔北隆起与阿满过渡带,富满油田资料范围包含断裂南部(图1)。

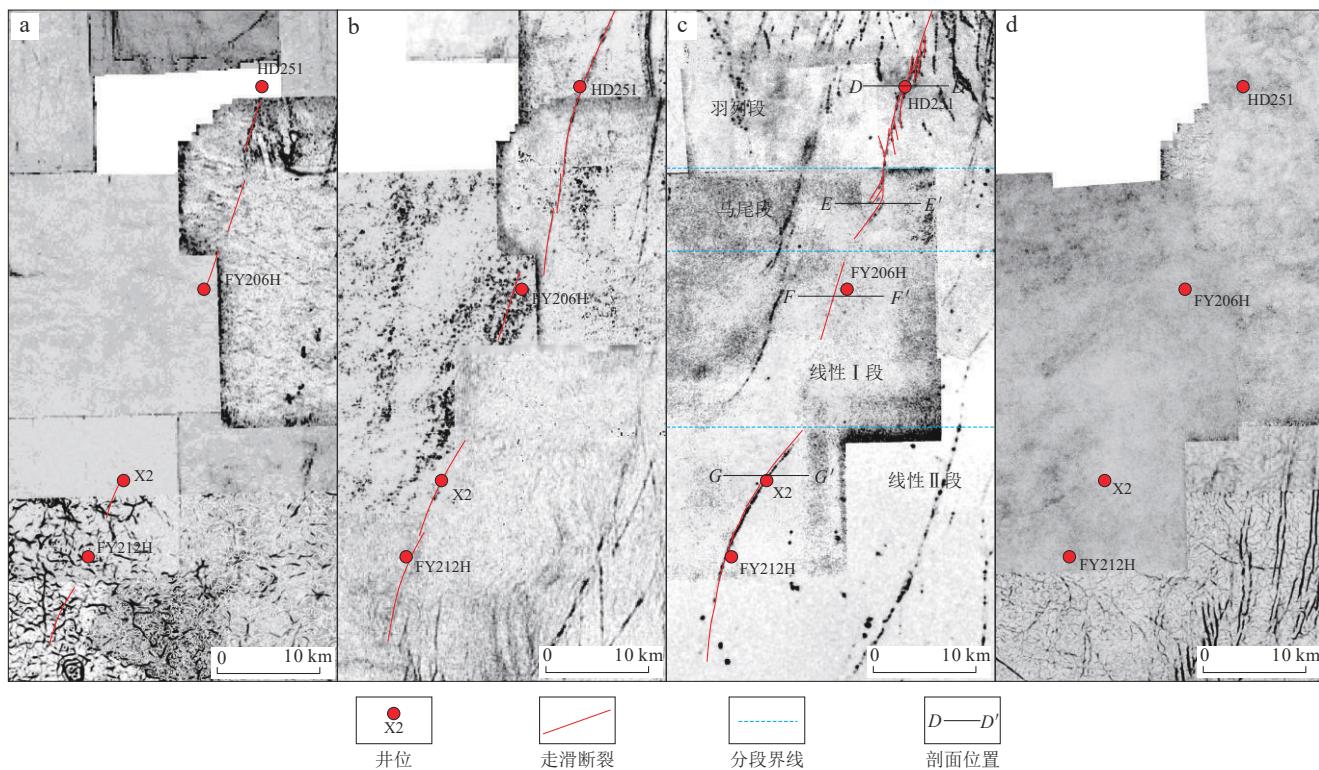
3.2.1 断裂分层展布特征

受垂向岩性差异与断裂分期变形的影响,研究区内 F_{12} 断裂各构造层断裂展布特征(图8)具有明显差异。

寒武系底面断裂活动弱,仅南部及北部发育微弱线性构造,且平面上不连续,中部无断裂显示;上寒武统底面断裂活动特征较强,以线性展布为主,连续性强,中部断裂显示强;奥陶系一间房组顶面,断裂活动增强,南部以连续线性展布为主,中部发育弱线性构造,北部破碎带内发育走滑派生构造,样式丰富,发育马尾及羽状等平面构造样式;志留系底界断裂无活动显示。

3.2.2 断裂分段变形特征

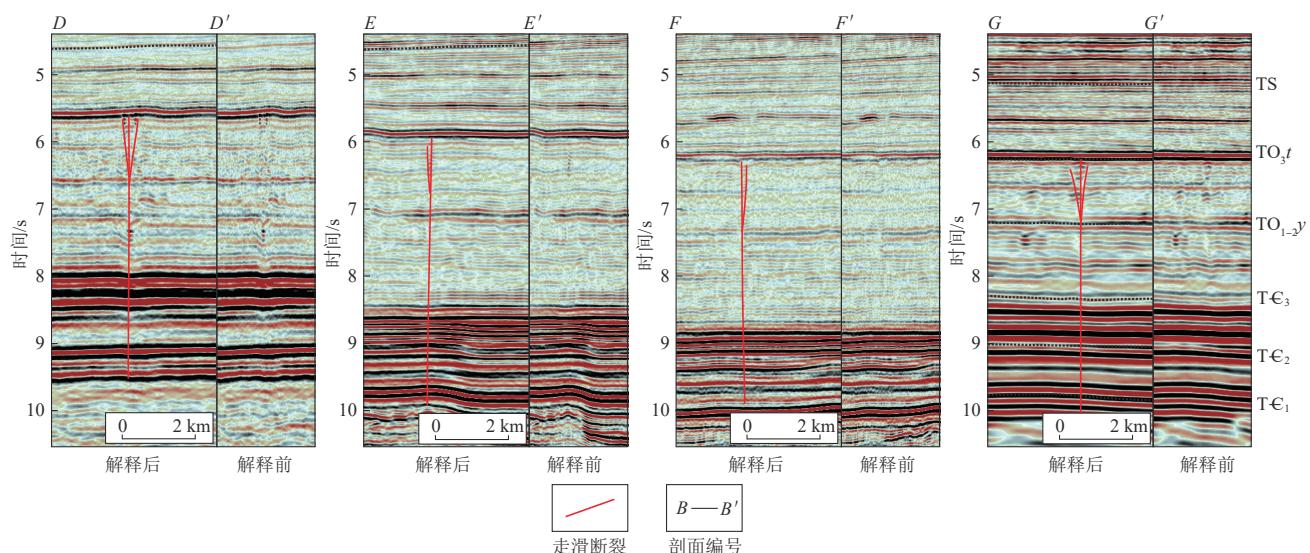
依据断裂分层差异变形特征,结合断裂平面展布及构造发育特征,研究区内的断裂自北向南可划分为羽列段、马尾段、线性I段和线性II段(图8)。

图8 富满油田F₁₂走滑断裂三维多层相干切片Fig. 8 Multi-layer coherence slices of F₁₂ strike-slip fault in the Fuman oilfield

a. 下寒武统底面(TE_1)相干;b. 上寒武统底面(TE_3)相干;c. 奥陶系一间房组顶面(TO_{3t})相干;d. 志留系底面(TS)相干

羽状段剖面特征(图9,剖面D—D')显示,走滑断裂活动性强,奥陶系碳酸盐岩构造层中破碎带宽度大,“串珠”构造发育数量多,且整体处于压扭应力环境,地层发生显著上拱构造变形,发育正花状构造。马尾段剖面特征(图9,剖面E—E')显示,奥陶系灰岩顶面处于弱压扭应力环境,地层发生弱上拱变形,且

断裂破碎带于灰岩顶面附近发育典型串珠构造。线性I段与线性II段特征类似,地震剖面(图9,剖面F—F'和G—G')显示,断裂活动性弱,主干断裂产状直立,局部发育分支,向下贯通至寒武系,向上终止于一间房组顶面,且地层产状平坦,破碎带内地层整体变形微弱。

图9 富满油田F₁₂走滑断裂分段变形特征(剖面位置见图8)Fig. 9 Typical section showing segmented deformation of F₁₂ fault in the Fuman oilfield (see Fig. 8 for the location)

3.3 F₁₇断裂发育特征

F₁₇断裂平面延伸距离超过200 km,横跨塔中隆起与阿满过渡带,富满油田资料范围内断裂长度超过60 km;平面上断裂走向发生逆时针偏转,由NEE向转变为NNE向(图1)。

3.3.1 断裂分层变形特征

受垂向岩性差异与断裂分期变形的影响,F₁₇断裂各构造层断裂平面展布特征(图10)具有明显差异。

下寒武统底面(TC₁)显示,断裂整体活动性较弱,平面上主要以不连续线性展布为主,两侧不发育分支,局部存在叠接区,发育软连接构造。上寒武统底面(TC₃)显示,相较于盐下基底构造层,寒武系盐构造层中断裂活动性强,线性特征明显,连续性强;断裂南部与北部发育多条断层,平面上呈雁列式叠接分布。奥陶系一间房组顶面(TO_{3t})显示,奥陶系碳酸盐岩构造层中走滑断裂活动性强,平面破碎带宽度大,分支

断裂发育,具有典型平面分段特征。志留系底界(TS)显示,碎屑岩构造层中,断裂活动强烈,平面展布特征明显,整体呈右阶雁列式排布,且具有北长南短的分布特征。

3.3.2 断裂分段变形特征

奥陶系一间房组顶面(TO_{3t})F₁₇断裂具有明显的平面分段特征(图10);依据断裂发育特征,可将断裂由北往南依次划分为线性段、叠接Ⅰ段、叠接Ⅱ段、辫状段。

线性段平面上断裂整体呈线性特征展布;走滑断层走向逐渐由发生逆时针偏转(图10)。地震剖面显示,具有典型分层差异变形特征(图11,剖面H—H'和I—I')。基底构造层中,走滑断层直立,插入基底;基底地层发生下凹,发育大型前寒武凹陷。盐构造层中,断裂切穿盐层,处于弱压扭环境,盐层发生弱上拱变形,发育小型盐拱背斜。碳酸盐岩构造层中,走滑断层活动较强,主断面产状直立,分支断裂终止于碳酸盐岩内幕层中;灰岩顶面,沿断层破碎带发生岩溶,剖面“串

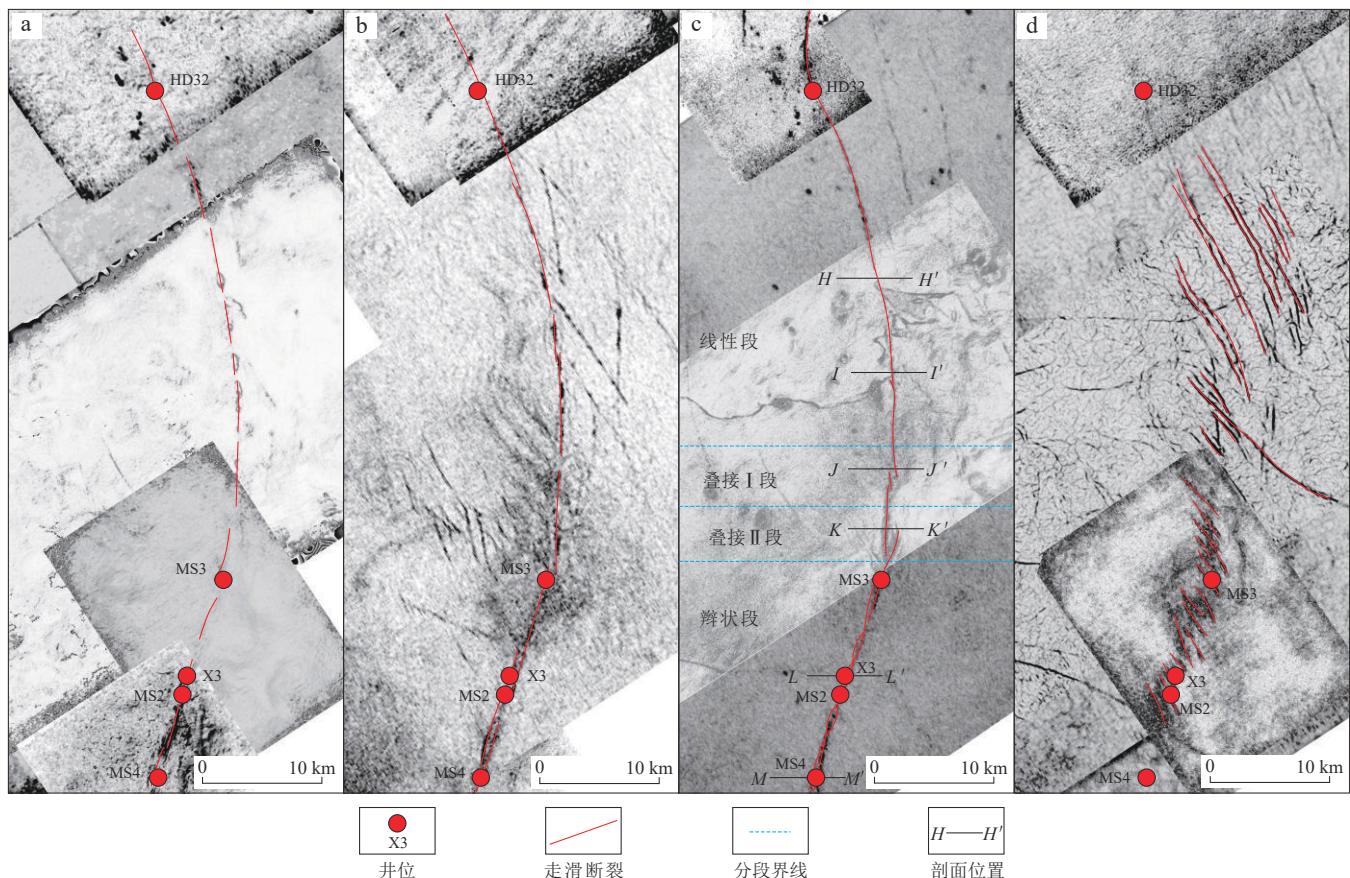


图10 富满油田F₁₇走滑断裂三维多层相干特征

Fig. 10 Multi-layer coherence slices of F₁₇ strike-slip fault in the Fuman oilfield

a. 下寒武统底面(TC₁)相干; b. 上寒武统底面(TC₃)相干; c. 奥陶系一间房组顶面(TO_{3t})相干; d. 志留系底界(TS)相干

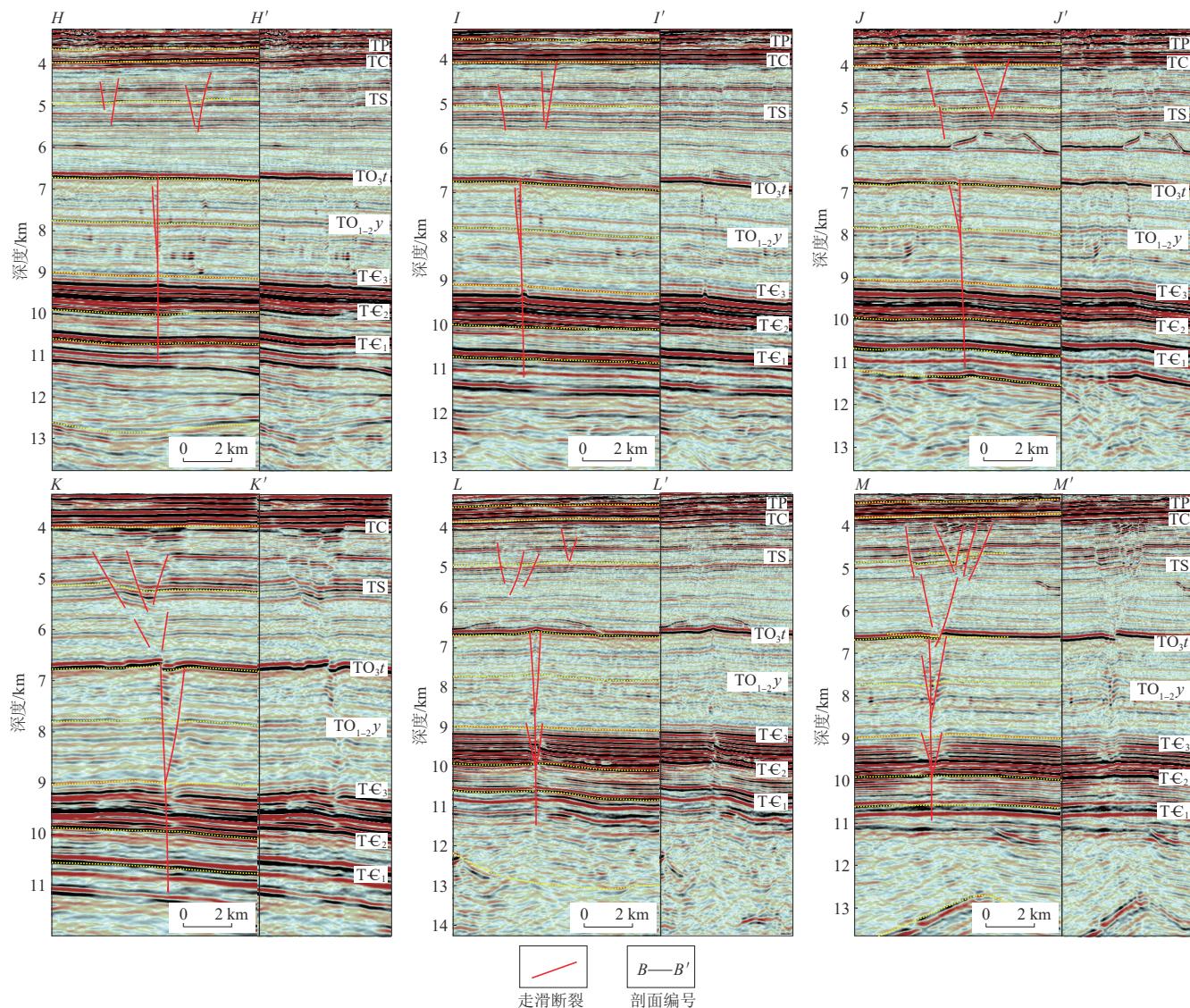


图11 富满油田地区F₁17走滑断裂分段变形特征(剖面位置见图10)

Fig. 11 Typical section showing segmented deformation of F₁17 fault in the Fuman oilfield (see Fig. 10 for the location of the section)
(小图中左、右图分别代表解释后和解释前剖面。)

“珠”特征明显。碎屑岩构造层中，雁列式正断层活动较弱，断距较小，地层发生小幅度下掉变形，发育地堑构造。

叠接Ⅰ段整体沿NE向展布，整体发育线性走滑构造，平面上走滑断层呈右阶软连接形式发生叠接。地震剖面显示断裂具有典型分层差异变形特征（图11，剖面J—J'）。基底构造层中，走滑断层直插基底，不发育分支；基底地层发育于斜坡之上，发育小规模上超。盐构造层中，走滑断裂破碎带局部处于弱压扭环境，发育盐辙构造。碳酸盐岩构造层中，走滑断裂活动较强，断面显示清晰，整体处于弱压扭环境；灰岩顶面附近，沿断裂破碎带垂向发生碳酸岩溶，剖面上“串珠”特征显著。碎屑岩构造层中，雁列式正断层活动强度中等，发育地

堑和半地堑构造。

叠接Ⅱ段平面上两条断层以左阶软连接的方式发生叠接，造成局部形成小型拉分地堑；叠接区断裂活动强度大，横向破碎带宽度可达1~2 km。地震剖面显示具有典型分层差异变形特征（图11，剖面K—K'）。基底构造层中，走滑断层直插基底；基底构造活动弱，地层变形微弱，沿斜坡发育超覆构造。盐构造层中，走滑断层直立切穿盐层；破碎带内局部处于弱张扭环境，发育小型盐拱背斜。碳酸盐岩构造层中，走滑断层活动强，发育分支断裂，发育负花状构造；受断裂左旋左阶叠接的影响，破碎带内地层整体处于张扭环境，地层发生显著下掉。碎屑岩构造层中，雁列式正断层活动强烈；正断层发育数量多，发育复合式地堑构造，且局

部可向下切穿奥陶系灰岩顶面。

辫状段平面上沿 NEE 向延伸,破碎带内发育走滑断裂派生构造,平面上组合形成多个辫状构造,沿主位移带交替发育,呈“糖葫芦串”状分布。地震剖面显示断裂具有典型分层差异变形特征(图 11,剖面 L—L' 和 M—M')。基底构造层中,走滑断层断面直立,不发育分支;基底发育震旦系凹陷,且走滑断裂处于凹陷边缘或中心部位。盐构造层中,破碎带局部处于弱张扭和弱压扭环境,发育花状构造,并且盐层发生流动形成盐丘和盐撤凹陷构造。碳酸盐岩构造层中,走滑断裂活动强度大,破碎带内地层发生强烈破碎变形,整体以上拱变形为主,发育正花状构造,局部受晚期雁列式正断层下切影响,发育“隆中凹”构造(图 11,剖面 M—M')。碎屑岩构造层中,雁列式正断层活动强烈,断距较大,地层发生显著下掉,发育地堑、半地堑及复合地堑等构造。

3.4 断裂活动期次

研究区走滑断裂主体发育在古生界,地层沉积时期对应加里东运动及海西运动;加里东运动可划分为早、中、晚 3 个期次,并且具有多幕活动的特点,其中加里东中期可划分 I 幕、II 幕和 III 幕,分别活动于中奥陶世末、晚奥陶世中期及晚奥陶世末。依据断裂垂向差异分层变形特征、切穿层位差异、不整合面展布特征等因素,结合及区域构造应力场背景,富满油田东部走滑断裂整体可大致划分为 3 个阶段的多期活动:加里东早期、加里东中期 III 幕以及加里东晚期—海西期(图 12)。

加里东早期断裂活动主要发生在上寒武统底面($T\epsilon_3$)附近。受断层活动的影响,剖面上发育花状构

造,盐层发生剧烈流动变形,发育盐丘、盐拱、盐席以及盐撤凹陷等一系列构造,与上部碳酸盐岩构造层变形特征形成强烈反差(图 11),局部可见上寒武统下奥陶系塔格组(ϵ_{3q})发生同沉积增厚。

加里东中期断裂活动主要发生于奥陶系一间房组顶面附近。剖面上发育花状构造,处于张扭或压扭应力环境,造成一间房组顶面(TO_3t)之上及志留系底面(TS)之下地层发生形变(图 11),对应加里东中期 III 幕构造活动。

加里东晚期—海西期断裂活动表现为,沿断裂带发育一系列与下伏走滑断裂主位移带走向斜交的雁列式正断层;且斜交角度小于 45°,指示晚期断裂活动整体处于张扭应力环境。断裂向下可切穿志留系底面,向上活动至石炭系;平面上均呈右阶排列,指示该阶段断裂发生左旋走滑活动。

结合断裂发育特征可判断, F_{10} 和 F_{17} 断裂规模大且活动时间长,浅层均发育雁列式正断层,持续活动至海西期;而 F_{12} 断裂主体终止于一间房组顶面附近,浅层雁列式正断层基本不发育,表明断裂主体活动终止于加里东中期 III 幕。

4 断裂活动特征对油气成藏的影响

F_{10} 和 F_{17} 断裂的原油密度相对于 F_{12} 断裂的小,而气/油比指数则相对要大(图 13a),油气成熟度高。选取 3 条断裂带上 3 口投产时间接近的典型高产井,对其生产动态特征(图 13b)进行分析发现,3 口井(X1, X2 和 X3 井)均在投产初期具有 100~200 t 日产油量,但随着后期的开发,X2 井产量波动性较 X1 及 X3 井更大,且产量逐渐降低,含水率逐渐升高,接近 40%;

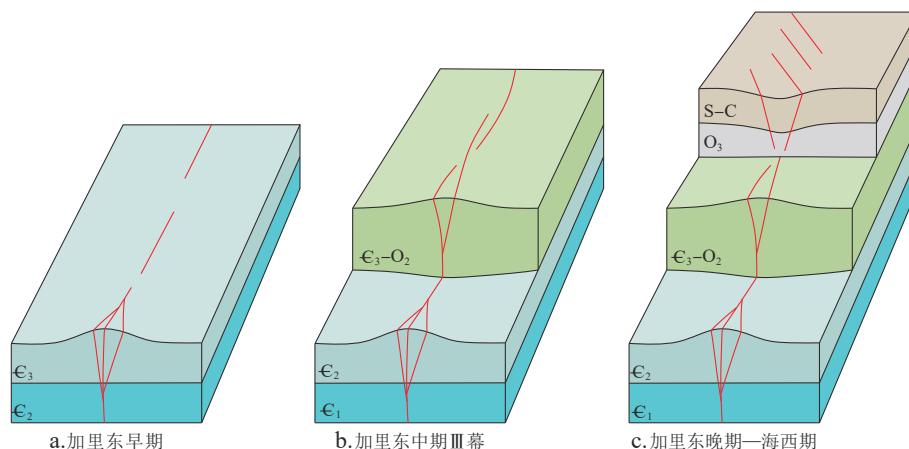


图 12 富满油田东部走滑断裂演化模式

Fig. 12 Evolution model of strike-slip faults in the East of the Fuman oilfield

X1和X3井产量也有波动,但整体稳定性更好,日产油量稳定介于100~200 t,且目前含水率极低。综合油气性质及生产动态特征,可知F₁10和F₁17断裂的油气充注强度相对较大。

前人对塔里木台盆区油气成藏研究认为,现今奥陶系碳酸盐岩储层中可动用油气来源于下寒武统玉尔吐斯组(ϵ_y)黑色泥页岩^[5, 30],3个主要成藏期为加里东晚期、海西期—印支期及燕山期—喜马拉雅期^[7, 31-32]。富满油田所处的阿满过渡带位于生烃中心,以晚奥陶世成藏为主。埋藏史及热演化史(图14)显示,玉尔吐斯组烃源岩在加里东晚期已进入生油高峰,在晚海西期进入高成熟生气阶段,而在喜马拉雅晚期,则进入了原油裂解气和干酪根裂解气充注期^[7, 32]。

结合油气性质差异、断裂活动特征与油气成藏期的耦合关系分析认为,F₁10,F₁12和F₁17断裂原油性质

及油气充注强度差异主要受控于断裂活动期次的差异(图15)。这3条断裂带在早加里东期和加里东中期Ⅲ幕均有剧烈活动,垂向上均切穿中寒武统膏盐层直通烃源岩,且一间房组顶面附近破碎带内均有串珠显示,为晚加里东期油气垂向运移及储集提供了条件。海西期为台盆区重要的油气成藏期与调整期,F₁12断裂在该时期未发生活动,断裂开启程度相对较低,限制了油气沿断裂发生垂向运移,造成高成熟油气对油气藏的充注改造较弱。而F₁10和F₁17断裂在海西期发生活动,断裂开启程度高,此阶段油气藏发生强烈充注,造成油气藏内油气成熟度高,且整体充注强度大。

综上所述,断裂活动期次与油气成藏期次的耦合关系控制了油气充注强度,影响了油气性质。研究区内加里东晚期—海西期发育活化的走滑断裂带,断裂垂向运移通道开启程度相对较好,晚期气侵程度高,整体油气充注强度大,原油密度低且气/油比高。

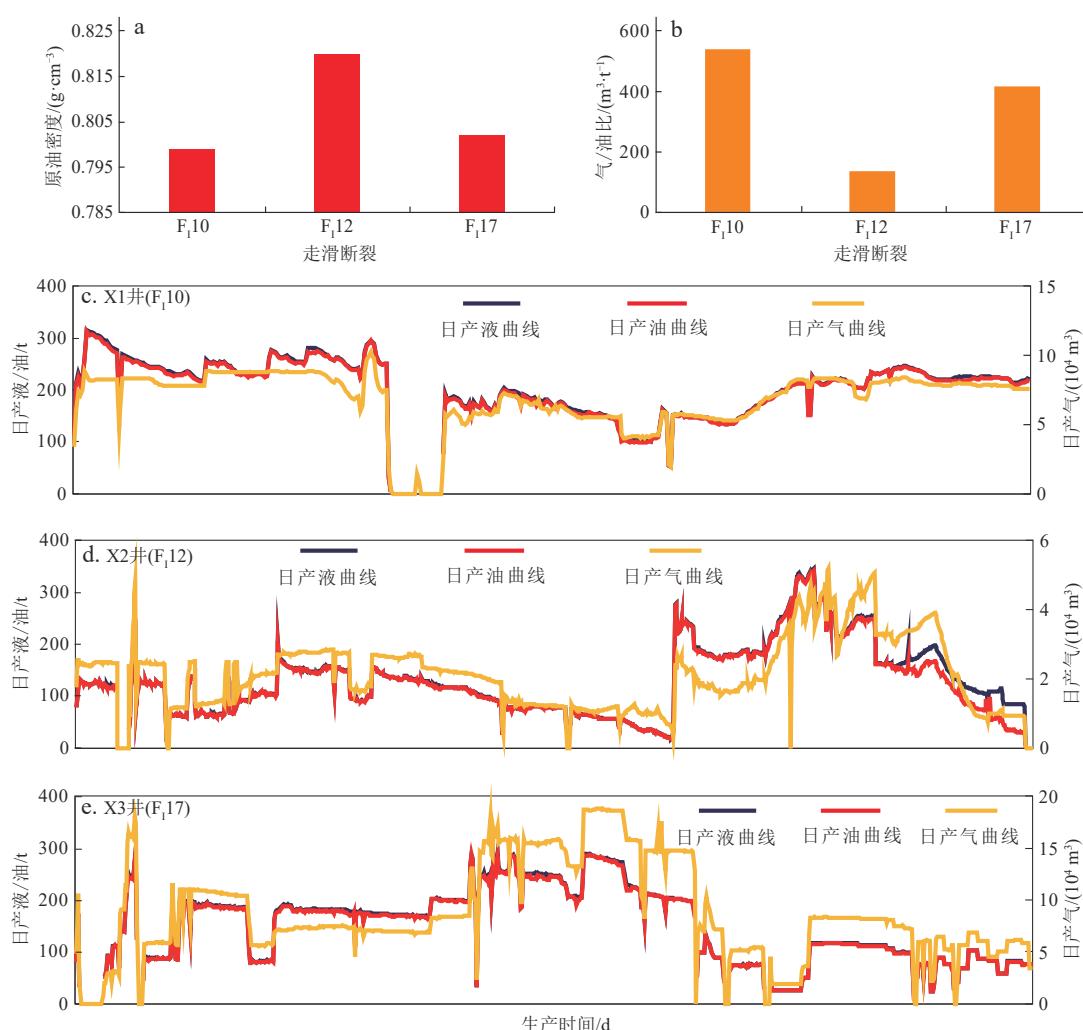


图13 富满油田东部典型走滑断裂油气性质

Fig. 13 Oil and gas properties of typical strike-slip faults in the east of the Fuman oilfield

a—b. 分别为走滑断裂F₁10,F₁12,F₁17的原油密度和气/油比; c—e. 分别为走滑断裂F₁10,F₁12,F₁17的产液量、产油量和产气量

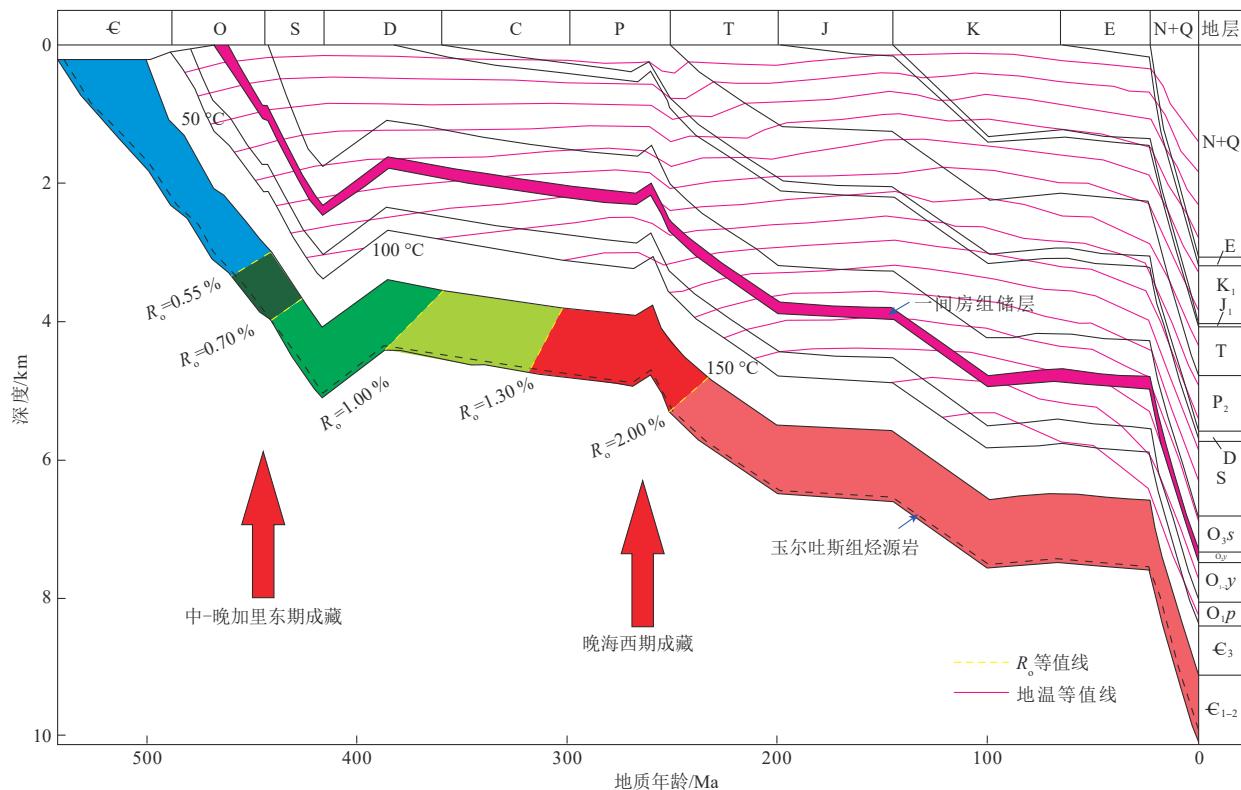


图14 富满油田及邻区埋藏史及热演化史(据文献[7]和[32]修改)

Fig. 14 Burial history and thermal evolution of the Fuman oilfield and its adjacent area (modified after [7] and [32])
(从蓝色向红色过渡表成熟度增加。)

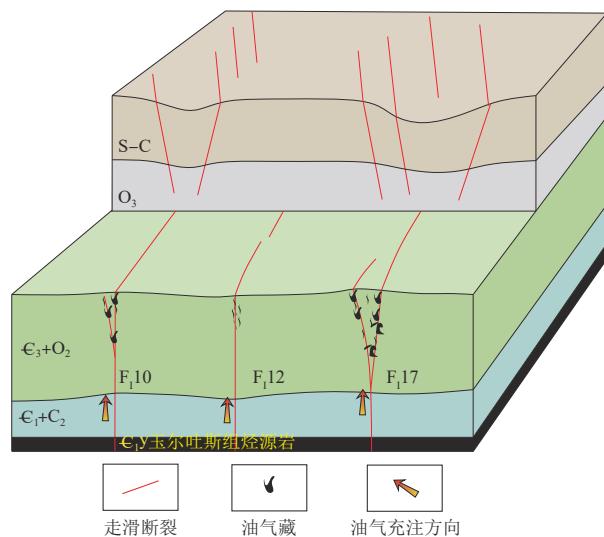


图15 富满油田东部典型走滑断裂油气成藏模式

Fig. 15 Oil and gas accumulation model of typical strike-slip faults in the east of the Fuman oilfield

5 结论

1) 富满油田内走滑断裂普遍具有分层差异变形的特征, 垂向上划分出4个构造变形层, 由下往上分别

为盐下基底构造层($T\epsilon_2$ 之下)、盐构造层($T\epsilon_2-T\epsilon_3$)、碳酸盐岩构造层($T\epsilon_3-TO_3t$)和碎屑岩构造层(TO_3t 之上)。

2) 富满油田东部主干断裂发生多期活动, 可划分为加里东早期、加里东中期Ⅲ幕和加里东晚期—海西期3个阶段。其中加里东中期Ⅲ幕是区域内断裂主要活动阶段, 对应剖面上一间房组顶面附近的强烈变形; 部分断裂在加里东晚期—海西期发生活化, 在浅层碎屑岩构造层中发育雁列式正断层。

3) 断裂活动期次与油气成藏期次的耦合关系控制了原油性质及油气充注强度。研究区内加里东晚期—海西期发生活化的断层, 断裂垂向运移通道开启程度高, 晚期气侵程度强, 整体油气充注强度大, 原油密度低且气/油比高。

参 考 文 献

- [1] SYLVESTER A G. Strike-slip faults [J]. GSA Bulletin, 1988, 100(11): 1666-1703.
- [2] 王清华, 杨海军, 汪如军, 等. 塔里木盆地超深层走滑断裂控大油气田的勘探发现与技术创新[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 58-71.
WANG Qinghua, YANG Haijun, WANG Rujun, et al. Discovery

- and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 58–71.
- [3] 杨学文, 田军, 王清华, 等. 塔里木盆地超深层油气地质认识与有利勘探领域[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 17–28.
YANG Xuewen, TIAN Jun, WANG Qinghua, et al. Geological understanding and favorable exploration fields of ultra-deep formations in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 17–28.
- [4] 杨海军, 邓兴梁, 张银涛, 等. 塔里木盆地满深1井奥陶系超深断控碳酸盐岩油气藏勘探重大发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 13–23.
YANG Haijun, DENG Xingliang, ZHANG Yintao, et al. Great discovery and its significance of exploration for Ordovician ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs of Well Manshen 1 in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25 (3) : 13–23.
- [5] 田军, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地富满油田成藏地质条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2021, 42(8) : 971–985.
TIAN Jun, YANG Haijun, ZHU Yongfeng, et al. Geological conditions for hydrocarbon accumulation and key technologies for exploration and development in Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(8): 971–985.
- [6] 江同文, 昌伦杰, 邓兴梁, 等. 断控碳酸盐岩油气藏开发地质认识与评价技术——以塔里木盆地为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 1–9.
JIANG Tongwen, CHANG Lunjie, DENG Xingliang, et al. Geological understanding and evaluation technology of fault controlled carbonate reservoir development: A case study of the Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3): 1–9.
- [7] 杨率, 邬光辉, 朱永峰, 等. 塔里木盆地北部地区超深断控油藏关键成藏期[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 249–261.
YANG Lv, WU Guanghui, ZHU Yongfeng, et al. Key oil accumulation periods of ultra-deep fault-controlled oil reservoir in northern Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 249–261.
- [8] 邓尚, 李慧莉, 张仲培, 等. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 878–888.
DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39 (5): 878–888.
- [9] 刘雨晴, 邓尚. 板内中小滑移距走滑断裂发育演化特征精细解析——以塔里木盆地顺北4号走滑断裂为例[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 124–136.
LIU Yuqing, DENG Shang. Structural analysis of intraplate strike-slip faults with small to medium displacement: A case study of the Shunbei 4 fault, Tarim Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(1): 124–136.
- [10] 杨海军, 邬光辉, 韩剑发, 等. 塔里木克拉通内盆地走滑断层构造解析[J]. 地质科学, 2020, 55(1): 1–16.
YANG Haijun, WU Guanghui, HAN Jianfa, et al. Structural analysis of strike-slip faults in the Tarim intracratonic basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(1): 1–16.
- [11] 梁鑫鑫. 塔里木盆地塔中隆起走滑断裂体系及形成机制研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
LIANG Xinxin. Study on the strike-slip faults system and its formation mechanism in the Tazhong Uplift, Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020.
- [12] 罗彩明, 梁鑫鑫, 黄少英, 等. 塔里木盆地塔中隆起走滑断裂的三层结构模型及其形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 118–131, 148.
LUO Caiming, LIANG Xinxin, HUANG Shaoying, et al. Three-layer structure model of strike-slip faults in the Tazhong Uplift and its formation mechanism [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1) : 118–131, 148.
- [13] 黄少英, 宋兴国, 罗彩明, 等. 塔北隆起X型走滑断裂成因机制的新解释[J]. 现代地质, 2021, 35(6): 1797–1808, 1829.
HUANG Shaoying, SONG Xingguo, LUO Caiming, et al. Formation mechanism of the conjugate strike-slip faults in Tabei uplift [J]. Geoscience, 2021, 35(6): 1797–1808, 1829.
- [14] 邬光辉, 马兵山, 韩剑发, 等. 塔里木克拉通盆地中部走滑断裂形成与发育机制[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3) : 510–520.
WU Guanghui, MA Bingshan, HAN Jianfa, et al. Origin and growth mechanisms of strike-slip faults in the central Tarim cratonic basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 510–520.
- [15] 邓尚, 刘雨晴, 刘军, 等. 克拉通盆地内部走滑断裂发育、演化特征及其石油地质意义: 以塔里木盆地顺北地区为例[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(6): 1111–1126.
DENG Shang, LIU Yuqing, LIU Jun, et al. Structural styles and evolution models of intracratonic strike-slip faults and the implications for reservoir exploration and appraisal: A case study of the Shunbei area, Tarim Basin [J]. Geotectonica et Metallogenesis, 2021, 45(6): 1111–1126.
- [16] 韩剑发, 苏洲, 陈利新, 等. 塔里木盆地台盆区走滑断裂控储作用及勘探潜力[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.
- [17] 郑晓丽, 安海亭, 王祖君, 等. 塔北哈拉哈塘地区走滑断裂分段特征及其与油气成藏的关系[J]. 浙江大学学报(理学版), 2018, 45(2): 219–225.
ZHENG Xiaoli, AN Haiting, WANG Zujun, et al. The segmentation features of strike-slip fault and its relation with the fault and reservoirs in Halahatang area, North Tarim Basin [J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2018, 45(2): 219–225.
- [18] 能源, 杨海军, 邓兴梁. 塔中古隆起碳酸盐岩断裂破碎带构造

- 样式及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 40–50, 127.
- NENG Yuan, YANG Haijun, DENG Xingliang. Structural patterns of fault broken zones in carbonate rocks and their influences on petroleum accumulation in Tazhong paleo-uplift, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 40–50, 127.
- [19] YUAN Haowei, CHEN Shuping, NENG Yuan, et al. Composite strike-slip deformation belts and their control on oil and gas reservoirs: A case study of the northern part of the Shunbei 5 strike-slip deformation belt in Tarim Basin, northwestern China [J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 755050.
- [20] SU Jin, WANG Xiaomei, YANG Haijun, et al. Hydrothermal alteration and hydrocarbon accumulations in ultra-deep carbonate reservoirs along a strike-slip fault system, Tarim Basin, NW China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 203: 108605.
- [21] 韩俊, 况安鹏, 能源, 等. 顺北5号走滑断裂带纵向分层结构及其油气地质意义[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 152–160.
- HAN Jun, KUANG Anpeng, NENG Yuan, et al. Vertical layered structure of Shunbei No. 5 strike-slip fault zone and its significance on hydrocarbon accumulation [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 152–160.
- [22] 邓尚, 李慧莉, 韩俊, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断裂中段活动特征及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 990–998, 1073.
- DENG Shang, LI Huili, HAN Jun, et al. Characteristics of the central segment of Shunbei 5 strike-slip fault zone in Tarim Basin and its geological significance [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 990–998, 1073.
- [23] 刘宝增. 塔里木盆地顺北地区油气差异聚集主控因素分析——以顺北1号、顺北5号走滑断裂带为例[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 83–95.
- LIU Baozeng. Analysis of main controlling factors of oil and gas differential accumulation in Shunbei area, Tarim Basin-taking Shunbei No. 1 and No. 5 strike slip fault zones as examples [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 83–95.
- [24] 云露. 顺北东部北东向走滑断裂体系控储控藏作用与突破意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 41–52.
- YUN Lu. Controlling effect of NE strike-slip fault system on reservoir development and hydrocarbon accumulation in the eastern Shunbei area and its geological significance, Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 41–52.
- [25] 何登发, 周新源, 杨海军, 等. 塔里木盆地克拉通内古隆起的成因机制与构造类型[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 207–221.
- HE Dengfa, ZHOU Xinyuan, YANG Haijun, et al. Formation mechanism and tectonic types of intracratonic paleo-uplifts in the Tarim Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 207–221.
- [26] 安海亭, 李海银, 王建忠, 等. 塔北地区构造和演化特征及其对油气成藏的控制[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 142–147.
- AN Haiting, LI Haiyin, WANG Jianzhong, et al. Tectonic evolution and its controlling on oil and gas accumulation in the northern Tarim Basin [J]. Geotectonica et Metallogenica, 2009, 33(1): 142–147.
- [27] 邬光辉, 陈鑫, 马兵山, 等. 塔里木盆地晚新元古代-早古生代板块构造环境及其构造-沉积响应[J]. 岩石学报, 2021, 37(8): 2431–2441.
- WU Guanghui, CHEN Xin, MA Bingshan, et al. The tectonic environments of the Late Neoproterozoic-Early Paleozoic and its tectono-sedimentary response in the Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(8): 2431–2441.
- [28] 能源, 邬光辉, 黄少英, 等. 再论塔里木盆地古隆起的形成期与主控因素[J]. 天然气工业, 2016, 36(4): 27–34.
- NENG Yuan, WU Guanghui, HUANG Shaoying, et al. Formation stage and controlling factors of the paleo-uplifts in the Tarim Basin: A further discussion [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(4): 27–34.
- [29] 邓兴梁, 闫婷, 张银涛, 等. 走滑断裂带碳酸盐岩油气藏的特征与井位部署思路——以塔里木盆地为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 21–29.
- DENG Xingliang, YAN Ting, ZHANG Yintao, et al. Characteristics and well location deployment ideas of strike-slip fault controlled carbonate oil and gas reservoirs: A case study of the Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3): 21–29.
- [30] 汪如军, 王轩, 邓兴梁, 等. 走滑断裂带对碳酸盐岩储层和油气藏的控制作用——以塔里木盆地北部坳陷为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 10–20.
- WANG Rujun, WANG Xuan, DENG Xingliang, et al. Control effect of strike-slip faults on carbonate reservoirs and hydrocarbon accumulation: A case study of the northern depression in the Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3): 10–20.
- [31] 云露. 顺北地区奥陶系超深断溶体油气成藏条件[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 136–142.
- YUN Lu. Hydrocarbon accumulation of ultra-deep Ordovician fault-karst reservoirs in Shunbei area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 136–142.
- [32] 张银涛, 邓兴梁, 邬光辉, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区走滑断裂带油气分布与油藏模式[J]. 地质科学, 2020, 55(2): 382–391.
- ZHANG Yintao, DENG Xingliang, WU Guanghui, et al. The oil distribution and accumulation model along the strike-slip fault zones in Halahatang area, Tarim Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(2): 382–391.
- [33] 王斌, 赵永强, 何生, 等. 塔里木盆地顺北5号断裂带北段奥陶系油气成藏期次及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 965–974.
- WANG Bin, ZHAO Yongqiang, HE Sheng, et al. Hydrocarbon accumulation stages and their controlling factors in the northern Ordovician Shunbei 5 fault zone, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 965–974.

(编辑 卢雪梅)