

塔里木盆地兰尕与和田河断裂带变形特征及成藏演化模式

马海陇^{1,2,3}, 蒋林^{1,2}, 丁文龙^{3,4,5}, 韩鹏远³, 王震^{1,2}, 张长建^{1,2},
文欢^{1,2}, 丁立明^{1,2}, 李杰^{1,2}

[1. 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830001; 2. 缝洞型油藏提高采收率重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830001; 3. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 4. 中国地质大学(北京)海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083; 5. 中国地质大学(北京)页岩气资源战略评价国土资源部重点实验室, 北京 100083]

摘要:塔里木盆地中部发育北北东向—近南北向“半走滑—半逆冲”的“Y”字形逆冲滑脱断裂,其构造样式与邻区断裂差异较大,两侧断裂体系也不同,目前对其形成机制和构造演化特征的认识尚不清楚。通过对和田河与兰尕断裂带的构造解析,研究其形成机制与演化特征;通过与塔河油田兰尕断裂带油气成藏特征对比,分析和田河断裂带油气运移聚集特征。研究表明:兰尕及和田河半走滑—半逆冲的“Y”字型逆冲滑脱断裂带形成于加里东晚期,向下收敛为走滑断裂,向上逆冲至志留纪地层内,形成断背斜。区域地应力是这2条断裂带形成的主要原因。早奥陶世末,受西南、东南和北部3面应力作用,塔北隆起形成大规模北北东向和北北西向走滑断裂,巴楚隆起形成北北东向走滑断裂。加里东运动晚期,受东昆仑和南天山洋挤压作用,形成向下收敛为走滑断裂、向上逆冲至志留纪地层内的逆冲滑脱断裂,并切割走滑断裂,使逆冲断裂上盘走滑断裂再活动,形成的缝网规模及破碎程度远比下盘及其他区域大。在后期构造运动作用下,逆冲断裂带内走滑断裂继承发育,并错断逆冲断裂。兰尕断裂带内发育两种有利成藏模式:①主干北北东向走滑断裂横交向切上倾断溶体油气成藏模式;②油气沿次级北北东向走滑断裂分段富集的断溶体油气成藏模式。海西运动晚期,和田河构造带沿主干断裂充注的油气向次级北北东向走滑断裂控制的缝洞型储层侧向调整,发育断溶体油气藏,油气沿断裂带分段富集。因此,南部背斜区北北东向断溶体为有利勘探目标。

关键词:断溶体;构造演化;成藏模式;和田河构造带;兰尕构造带;巴楚隆起;塔里木盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Deformation characteristics and hydrocarbon accumulation models of the Lan'ga and Hotan River fault zones in the Tarim Basin

MA Hailong^{1,2,3}, JIANG Lin^{1,2}, DING Wenlong^{3,4,5}, HAN Pengyuan³, WANG Zhen^{1,2}, ZHANG Changjian^{1,2},
WEN Huan^{1,2}, DING Liming^{1,2}, LI Jie^{1,2}

[1. Northwest Oil Field Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830001, China; 2. Key Laboratory for Enhanced Oil Recovery for Fractured-Vuggy Reservoirs, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830001, China; 3. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Enrichment Mechanism (Ministry of Education), China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 5. Key Laboratory of Shale Gas Resource Strategic Evaluation (Ministry of Land and Resources), China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: A Y-shaped thrust-detachment fault striking NNE-near NS directions is developed in the middle of the Tarim Basin, composed of strike-slip for a half and thrust for another half. The fault exhibits significantly different structural style from those in adjacent areas and involve varying fault systems on both sides. However, its formation mechanisms and structural evolution remain unclear. In this study, we investigate the formation mechanisms and evolutionary characteristics with the structural analysis of the Hotan River and Lan'ga fault zones. Comparing the two fault zones in terms of the hydrocarbon accumulation characteristics in the Tahe oilfield, we delve into the characteristics of

收稿日期:2024-04-06;修回日期:2024-09-05。

第一作者简介:马海陇(1985—),男,硕士研究生、副研究员,石油构造解析。E-mail:297048455@qq.com。

通信作者简介:丁文龙(1965—),男,教授、博士研究生导师,石油构造分析与控油气作用、非常规油气储层裂缝形成机制、定量表征与分布预测及工程甜点评价。E-mail:dingwenlong2006@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(42372171,42072173)。

hydrocarbon migration and accumulation along the Hotan River fault zone. The results indicate that the Lan'ga and Hotan River fault zones are formed during the Late Caledonian, featuring a semi-strike-slip, semi-reverse-thrust Y-shaped thrust-detachment structure. These fault zones converge downwards into strike-slip faults and thrust upwards into the Silurian strata, forming faulted anticlines. Regional in-situ stress is identified as the main cause of the formation of both fault zones. At the end of the Early Ordovician, large-scale NNE- and NNW-trending strike-slip faults were formed in the Tabei Uplift and NNE-trending strike-slip faults were formed in the Bachu Uplift due to stresses from the southwest, southeast, and north. During the Late Caledonian, thrust-detachment faults that converged downward into strike-slip faults and thrust upward to the Silurian strata were formed due to the compression from Eastern Kunlun Orogen and the South Tianshan Ocean, cutting through the strike-slip faults. Thus, those strike-slip faults in their hanging walls got reactivated. Consequently, their hanging walls exhibit more developed fracture networks and a higher degree of fracturing compared to their foot walls and other areas. As a result of late-stage tectonic movements, these strike-slip faults continue to develop in the thrust fault zones, which further dislocate the thrust faults. The Lan'ga fault zone presents two favorable hydrocarbon accumulation models: (1) of the main NNE-trending strike-slip faults transecting the fault-karst reservoir dipping upward, and (2) of the fault-karst reservoirs characterized by segmented hydrocarbon enrichment along the secondary NNE-trending strike-slip faults. Specifically, the hydrocarbon charging along main faults in the Hotan River structural zone underwent lateral adjustment into the secondary NNE-trending strike-slip-controlled reservoirs of fractured-vuggy type during the Late Hercynian, leading to the formation of fault-karst reservoirs, which exhibit segmented hydrocarbon accumulation along the fault zones. The NNE-directed fault-karst reservoirs in the southern anticline zone represent the favorable exploration target.

Key words: fault-karst reservoir, structural evolution, hydrocarbon accumulation model, Hotan River structural zone, Lan'ga structural zone, Bachu Uplift, Tarim Basin

引用格式: 马海陵, 蒋林, 丁文龙, 等. 塔里木盆地兰尕与和田河断裂带变形特征及成藏演化模式[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1259–1274. DOI: 10. 11743/ogg20240505.

MA Hailong, JIANG Lin, DING Wenlong, et al. Deformation characteristics and hydrocarbon accumulation models of the Lan'ga and Hotan River fault zones in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1259–1274. DOI: 10. 11743/ogg20240505.

塔里木盆地经历多期构造运动, 形成一系列控“盆”、控“边”以及控“带”构造带^[1-4]。对塔里木盆地不同构造单元、不同层系中不同性质的逆冲断裂、走滑断裂和正断裂的报道屡见不鲜, 但对盆地中部发育的半逆冲-半走滑“Y”字型滑脱逆冲断裂却鲜有报道, 为什么其构造样式除与邻区断裂差异较大外, 其两侧断裂体系差异也较大? 它的形成机制和构造演化特征是什么?

研究认为塔北地区“X”形共轭走滑断裂是在中奥陶世末期受西南、东南和北部3面挤压应力作用而形成的^[5-7], 在“三面挤压、南强北弱”的构造应力作用下, 盆地中部形成近南北向的应力平衡面。阿瓦提与满加尔凹陷过渡带—顺托果勒低凸起至卡塔克低凸起西端一线在应力平衡面上^[5]。在南北向应力作用下, 形成塔北“X”形共轭走滑断裂; 在东北向挤压主应力区内, 平行于盆地西南边界的逆冲断裂是其主要特征, 如控制盆地西南边界的铁克里克断裂^[4], 控制巴楚隆起边界^[3]的北西向—近东西向色力布亚、玛扎塔格^[8]和吐

木休克^[9]等逆冲断裂, 以及控带断裂玉中断裂带^[10]; 在北西向挤压主应力区, 平行于盆地东南边界的逆冲断裂为其主要特征, 如控盆断裂车尔臣^[11]等, 控制塔北隆起边界的北东东向轮台和亚南^[2]等逆冲断裂, 以及控带断裂玛东^[12]与和田河东台缘^[13]断裂带。那么半走滑-半挤压逆冲断裂是否是来自塔西南与塔东南方向的应力在盆地中部作用的结果? 塔河油田和顺北油田奥陶系发育受走滑断裂带控制的断溶体油气藏^[14-15], 其走滑断裂集“控储、控圈、控运、控藏、控富”于一身。兰尕构造带奥陶系既有构造背斜又有走滑断裂, 其控储、控藏作用与单纯走滑断裂有何异同? 是否可以借鉴指导和田河构造带勘探开发?

本文基于二维和三维地震资料, 结合区域地质对塔里木盆地和田河与兰尕断裂带进行精细构造解析, 再结合区域动力学背景, 厘定其形成机制与演化特征, 并通过与塔河油田兰尕构造带油气成藏规律对比, 尝试建立和田河构造带成藏模式, 以期对巴楚隆起油气勘探开发有所助益。

1 区域地质概况

北北东向和田河断裂带位于塔里木盆地巴楚隆起东段,其南部与北西西向玛扎塔格构造带相交,北部与北西西向卡拉沙依断裂带相邻,为洼陷内的局部隆起带^[13](图1a,b,d)。西侧发育众多与其走向一致的北北东向走滑断裂,东侧发育与塘沽巴斯坳陷内断裂平行的北东东向走滑断裂。近南北向兰尕断裂带位于塔北隆起阿克库勒凸起,西侧主要发育北北西向和北北东向“X”形共轭走滑断裂,与其相邻的有北北东向TP12CX断裂带和北北西向沙99断裂,东侧发育北北东向和北东东向走滑断裂,与其相邻的有北北东向TK494断裂带(图1c,f)。和田河构造带及邻区自下而上主要发育震旦系、寒武系-奥陶系、志留系-泥盆系、石炭系-二叠系、侏罗系和新生界,普遍缺失中生代地层,缺失一间房组,局部缺失志留系-泥盆系地层,构造高部位上奥陶统地层遭受剥蚀,明显减薄。兰尕断裂带及邻区与和田河断裂带基本类似,不同之处在于发育白垩系与三叠系(图2)。

2 兰尕与和田河断裂带特征

2.1 兰尕断裂带特征

利用面元15 m×15 m,覆盖次数196的高精度三维地震资料,开展兰尕断裂带精细解析。兰尕断裂带断裂系统纵向上分5套构造层序,分别为基底构造层[中寒武统(C_2)—基底]、下构造层[上寒武统(C_3)—志留系(S)]、中构造层[志留系(S)—二叠系(P)]、上构造层[侏罗系(J)—古近系(E)],以及顶构造层[新近系(N)—第四系(Q)]。下构造层断裂最发育,顶构造层断裂欠发育。兰尕逆冲断裂带在基底构造层和下构造层发育。基底构造层由多组南北向直立走滑断裂组成,宽度较浅层变大(图3a,b;图4d,e),向上断穿中寒武统阿瓦塔格组顶面(地震反射界面 T_3^1),此外,多组北北东向、北北西向和北西西向直立走滑断裂与兰尕断裂带相互交切。下构造层(图3b)由南北向直立走滑断裂与近南北向逆冲断裂2种不同性质的断裂组成近南北向“Y”字形逆冲滑脱断裂,近南北向逆冲断裂深、浅层断裂走向不一致(图5),深层如 T_3^1 界面断裂呈南北走向,走向趋势一致(图5b);浅层 T_4^1 界面则分3大段(图5a):北北西向、北北东向和南北向,各大段内又由不同走向的小段组成(图5a,c),使得整个断裂带呈锯齿状,断距变化点往往与断裂走向改变点相吻合,24号和47号测线是这3大段的转折点和断距变化点。地震反射界面 T_3^1 与 T_4^1 逆冲断裂断距整体变化趋势一致,但 T_3^1 界面断距整体大于 T_4^1 界面,这是因为灰岩脆性层与上覆桑塔木组泥岩塑性层的过渡区会吸收部分断距。加里东中期形成的北北东向和北北西向走滑断裂,使得越往浅部,越易沿这些断裂释放应力,因此,浅部整体走向近南北向,但内部由多条北北东向和北北西向断裂组成(图5)。逆冲断裂控制断背斜形成,向上未断穿志留系,志留系在断背斜两翼呈微上超迹象,志留系顶部地层被剥蚀削平,向下在阿瓦塔格组膏盐层附近收敛于南北向走滑断裂(图4d,e)。微上超迹象说明加里东中期Ⅲ幕末—加里东晚期逆冲断裂是渐变形成的,边挤压、边沉积,使断背斜两翼志留系逐渐上超,但加里东晚期是其应力主作用期,前期挤压力弱,使志留系整体近平行于奥陶系。可见逆冲断裂截切走滑断裂的情况,也存在走滑断裂错断逆冲断裂的现象。具体表现为,不同走向的次级走滑断裂大都在逆冲断裂上盘发育,下盘基本无迹象,只有多期活动的主干走滑断裂错断逆冲断裂。

中构造层及上覆构造层内兰尕断裂带未继承活动。中构造层内的北北西向和北北东向主干走滑断裂继承发育,向上断至二叠系顶面,向下断至奥陶系内,平面见北北西向和北北东向左阶排列的雁列式及线状走滑断裂(图3c)。上构造层以花状直立走滑断裂和褶曲、背斜变形为特征(图3d)。兰尕断背斜上部地层在石炭系盐体滑脱作用下形成微褶曲和背斜,并发育多期雁列式张扭性走滑断裂,顶构造层平行披覆在上构造层之上,断裂欠发育。

2.2 和田河断裂带特征

利用面元25 m×25 m,覆盖次数256的二维地震资料,开展和田河断裂带精细解析。和田河构造带断裂系统纵向上分4套构造层序,分别为基底构造层[(中、下寒武统(C_{1+2})—基底]、下构造层[上寒武统(C_3)—志留系(S)]、中构造层[泥盆系(D)—古近系(E)]和上构造层[新近系(N)—第四系(Q)],这4套构造层变形差异显著(图4a)。断裂主要集中在基底和下构造层,而中构造层以褶皱变形和走滑断裂为主,褶皱顶部存在剥蚀现象,上构造层呈单斜披覆在中构造层上。其中,中构造层经历海西早期、海西晚期、印支期—燕山期以及喜马拉雅早期等构造活动,这几期构造活动以微褶皱、褶曲变形及走滑断裂为变形特征,故将其划分为一套构造层。

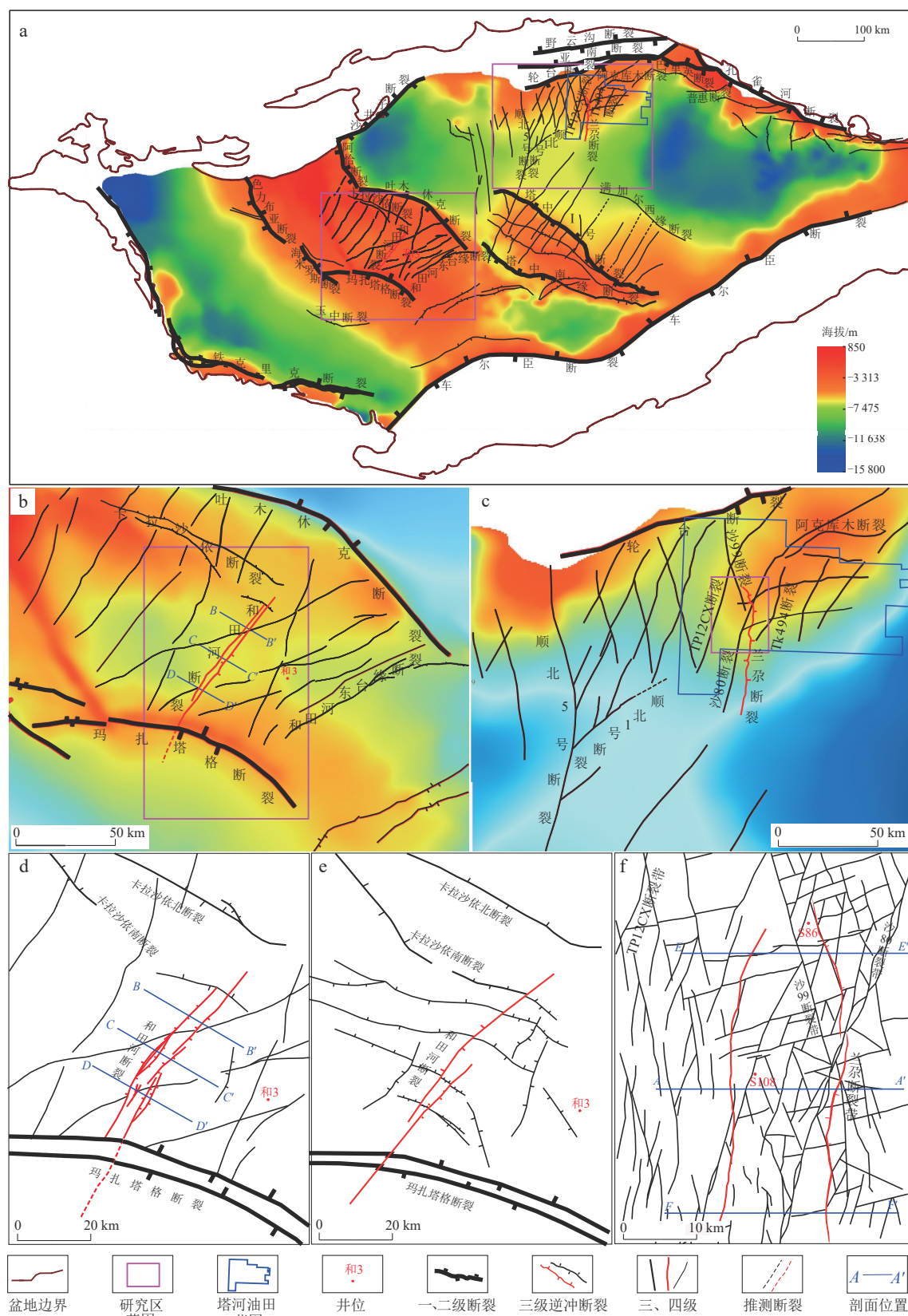


图1 塔里木盆地研究区构造位置

Fig. 1 Structural location map of the research areas in the Tarim Basin

- a. 塔里木盆地中、下奥陶统顶面现今构造; b. 和田河断裂带局部位置; c. 兰杂断裂带局部位置; d. 和田河构造带中、下奥陶统顶面断裂; e. 和田河构造带上寒武统沙依里克组顶面断裂; f. 兰杂构造带中奥陶统鹰山组下段顶面断裂 (图中红色断裂为本次重点研究断裂。)

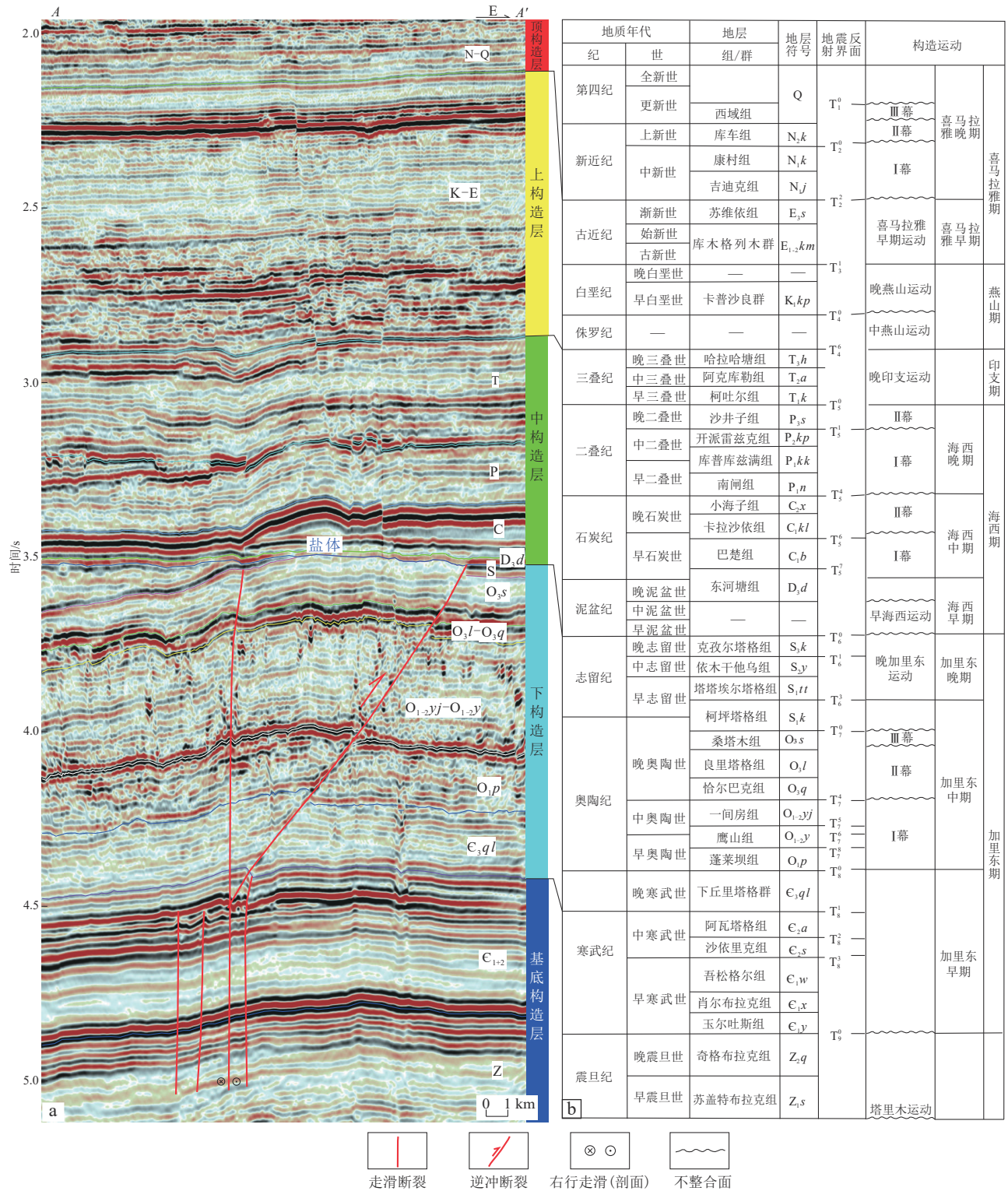


图2 塔河油田兰茆断裂带不同构造层剖面(a)及地层简表(b)(剖面位置见图1f)

Fig. 2 Schematic diagram showing the varying structural layer section and formations of Lan'ga fault zone in Tahe oilfield

(see Fig. 1f for the position of section A—A')

(“—”表示没有对应地层。)

基底构造层断裂(图4a,c)为北西西向近直立的逆断裂,断距小,向下断穿基底,向上大部分断至T₈界面。和田河断裂带为右行左阶北东东向走滑断裂(图

1e),向上断穿T₈界面及以上多套地层,说明北西西向逆冲断裂与和田河东断裂带活动在期次和成因机制上存在差异。

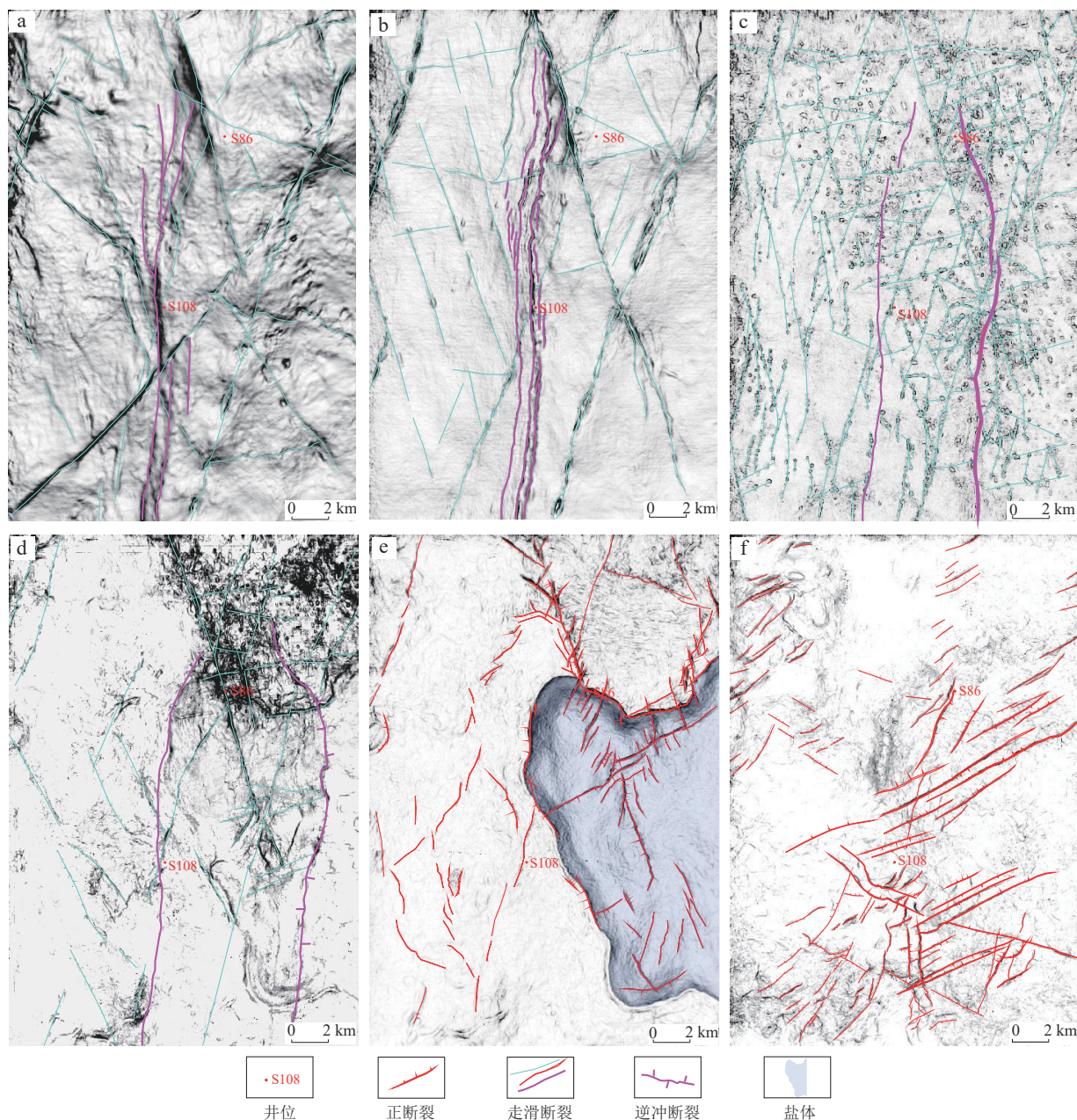


图3 塔河油田兰尕断裂带关键反射界面相干与断裂体系平面叠合图

Fig. 3 Superimposition map of key interfaces from coherence and fault systems in the Lan'ga fault zone of Tahe oilfield

a. 震旦系顶面(T_5^0), 0~20 ms; b. 寒武系阿瓦塔格组顶面(T_6^0), 0~20 ms; c. 奥陶系云质灰岩顶面(T_7^0), 0~20 ms; d. 奥陶系一间房组顶面(T_7^1), 0~20 ms; e. 石炭系巴楚组顶面(T_8^0), 0~20 ms; f. 三叠系顶面(T_3^4), 0~20 ms

下构造层由直立走滑断裂与逆冲断裂2种不同性质的断裂组成北北东向“Y”字形逆冲滑脱断裂。走滑断裂在左侧,逆冲断裂在右侧,倾向北西西。逆冲断裂向上未断至志留系内,控制断背斜的形成,志留系与奥陶系展布特征基本一致,在断背斜顶部有减薄迹象,由于志留系内地震成像差,波组接触关系不清晰,看不到逐渐上超的迹象,仅志留系顶部被剥蚀。顶部被剥蚀说明在泥盆纪沉积前,本区受抬升影响,地层遭到剥蚀。向下在阿瓦塔格组膏盐层附近合并收敛于走滑断

裂,形成半走滑-半逆冲的“Y”字型构造样式。现既有逆冲断裂截切走滑断裂的情况,也存在走滑断裂错断逆冲断裂的现象。

中构造层顶部被削截,在微褶皱-褶曲变形带内,发育直立走滑断裂。上部地层从褶皱-褶曲-单斜形态及褶皱幅度变小来看,其经历多期构造活动,呈现继承发育的特点。上构造层以单斜披覆在中构造层上,从各构造层差异变形来看,此构造带为多期构造活动共同作用的产物。

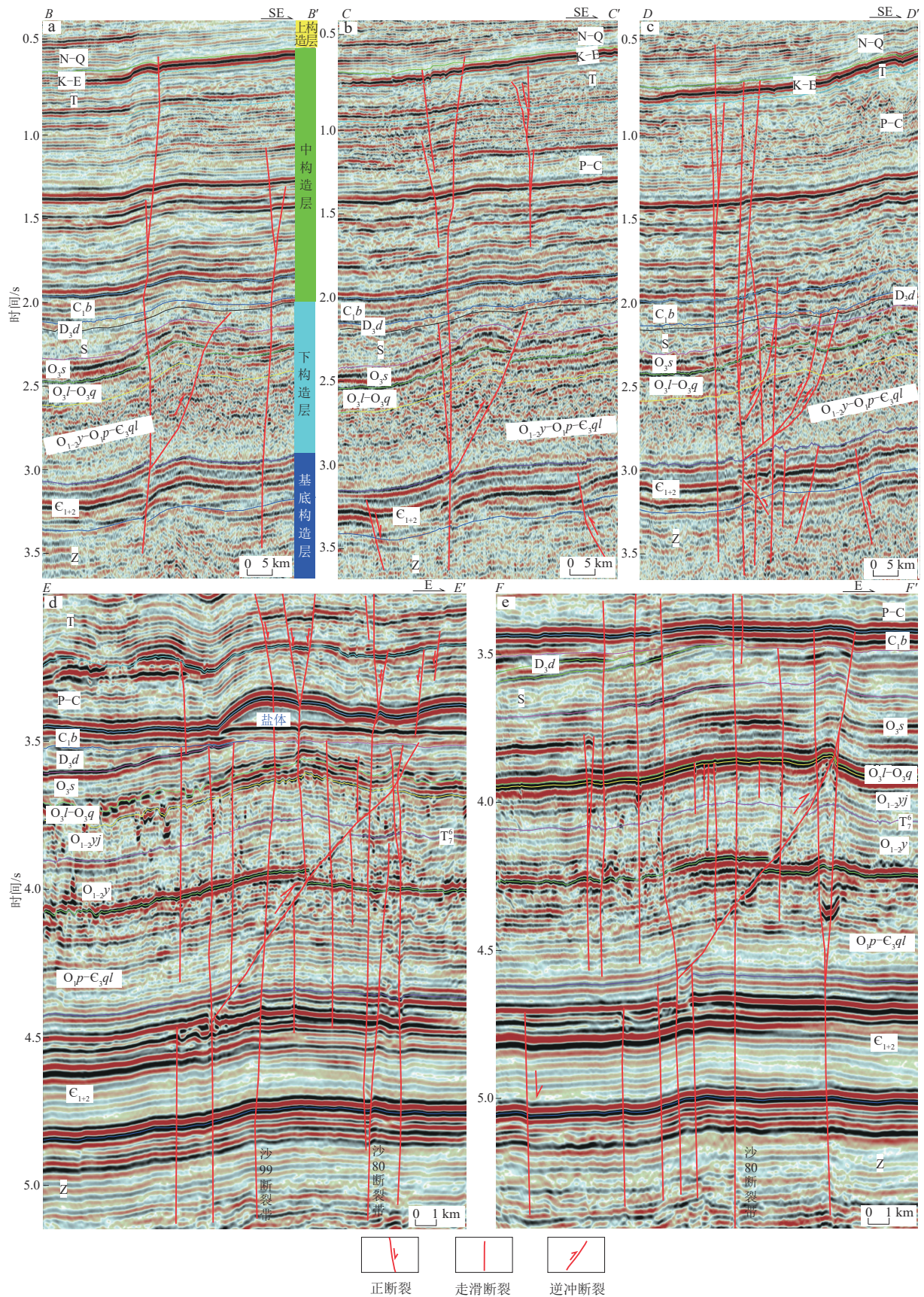


图4 塔里木盆地过和田河与兰尕断裂带典型地震剖面(剖面位置见图1d,f)

Fig. 4 Typical seismic profiles crossing the Hotan River and Lan'ga fault zones in the Tarim Basin
(see Fig. 1d and f for the section locations)

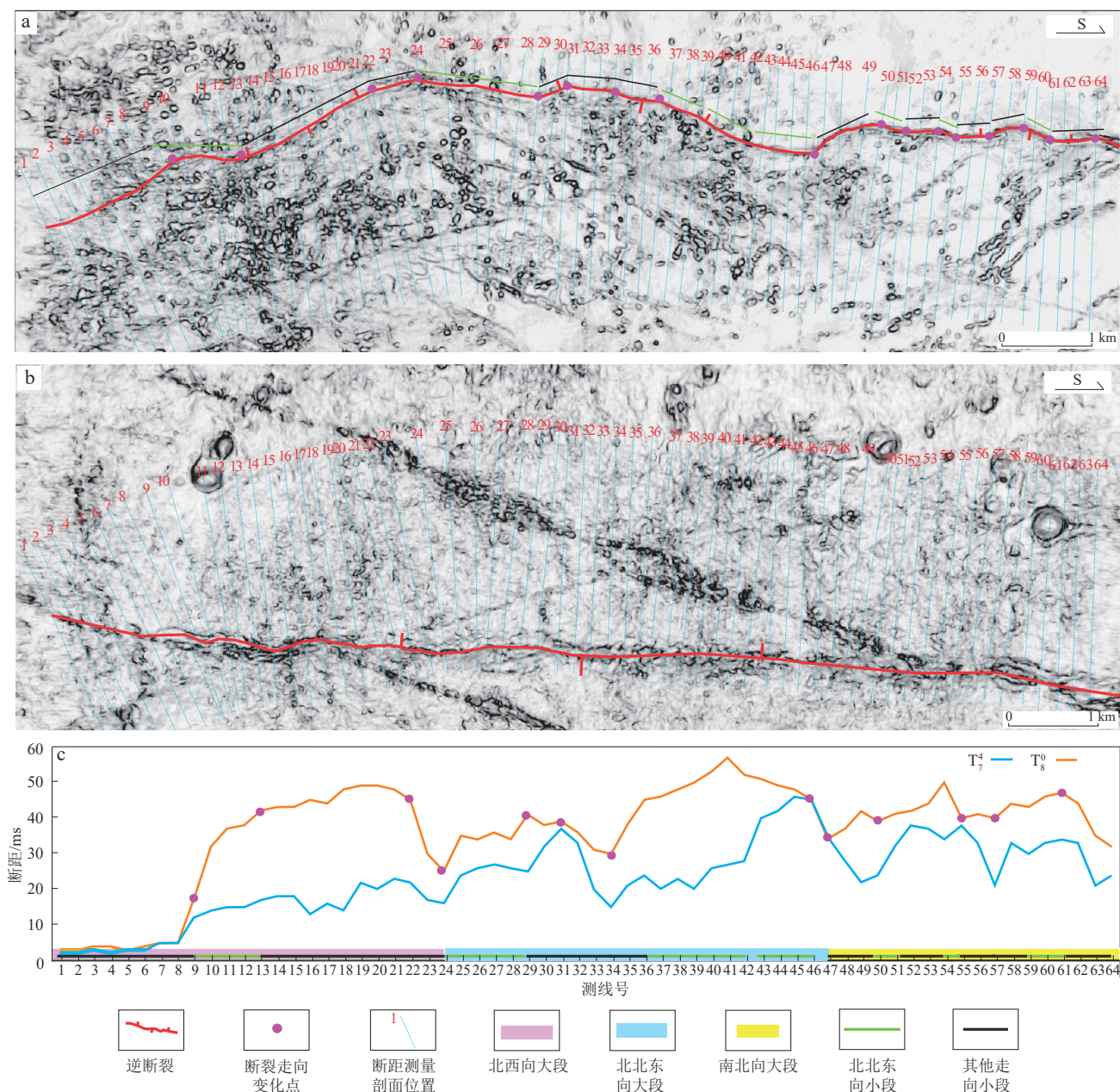


图5 塔河油田兰尕逆冲断裂带深、浅层断距分布

Fig. 5 Distributions of the fault throw of the Lan'ga fault zone in deep and shallow formations in Tahe oilfield

a. 奥陶系一间房组顶面(T_7^4), 0 ~ 20 ms; b. 寒武系顶面(T_8^0), 0 ~ 20 ms; c. T_7^4 和 T_8^0 界面断距统计

此外,沿断裂带走向,从北到南(图4a—c),志留系上部从褶皱渐变为微褶曲,这是由于北部临近卡拉沙依断裂端部(图1b),喜马拉雅期强烈活动造成和田河构造带剧烈活动。而南部截切玛扎塔格断裂带,志留系最薄,说明加里东晚期和田河构造带南高北低,南部抬升最高,构造活动最强。下构造层内形成大“Y”中包含小“y”字型滑脱逆冲断裂,即复式“y”字型构造样式(图4c)。

由上可得,这两条半走滑-半逆冲的“Y”字型逆冲滑脱断裂形成于加里东晚期,向下合并收敛于走滑断裂,其中,兰尕断裂带收敛于近南北向走滑断裂,和田

河断裂收敛于北北东向走滑断裂,二者向上逆冲至志留系内,形成断背斜,后期构造活动使逆冲断裂带形成的断背斜构造带内走滑断裂继承发育。

3 断裂带演化特征及成因机制

3.1 构造演化特征

1) 奥陶纪形成北东向压扭走滑断裂

加里东早期,整个塔里木板块及其周缘处于拉张

环境^[1-4]。受此构造作用影响,巴楚和田河及塔北兰尕地区形成了一系列北西西向至近东西向正断裂,向上断至 T_3^0 界面,向下断穿基底,形成小型半地堑及地堑,巴楚大部分正断裂在后期强烈挤压应力作用下形成未突破塑性膏盐层的正反转逆冲断裂^[13](图6a),因此,塔北地区后期挤压应力较弱,基底未形成正反转逆冲断裂,仅继承并逐步形成北西西向走滑断裂。和田河和兰尕断裂带在加里东早期并未发育。晚寒武世—早奥陶世,塔里木板块开始向南俯冲,西昆仑在早奥陶世晚期已进入碰撞聚敛阶段,昆仑洋向南逐渐消减,构造作用从拉张环境向挤压环境转变^[1-4]。该期巴楚和塔北地区受西昆仑西南边界的挤压作用,沿基底北北东向构造薄弱带形成一系列北北东向初始破裂带(图6b),并经历短暂暴露,在大气淡水溶蚀作用下形成规模有限的岩溶缝洞型储层^[15-17],兰尕及和田河断裂带现雏形。中奥陶世末期—晚奥陶世,塔里木板块西南缘古昆仑洋开始闭合,形成北东向挤压应力,东南部阿尔金洋盆开始闭合,形成北西向挤压应力,同时板块北部受南天山洋^[18]的抵制作用形成反作用力,塔北地区在南北向水平挤压应力场作用下形成左行北北东向及右行北北西向“X”型共轭走滑断裂。

而塔西南地区在东北向挤压力下,形成一系列北西向逆冲断裂带,如色力布亚、玛扎塔格、吐木休克以及塔中I号断裂带,同时,北北东走向走滑断裂开始发育并切割北西西向基底断裂;在塔东南北西向挤压力作用下,塘古巴斯坳陷玛东^[12]构造体系初步形成,亚南和轮台等逆冲断裂开始活动,同时塔北、顺南和巴楚东段等地区形成北东东走向走滑断裂。此外,在塔东南与塔西南近东西向分力作用下,塔里木盆地中部现北北东向展布的顺托果勒低凸起雏形。可能由于巴楚隆起与卡塔克隆起右行左阶旋扭作用,北北东向低凸起在巴楚隆起与卡塔克低凸起连接处消失,而出现在巴楚隆起内部。

2) 晚奥陶世末—晚志留世形成挤压逆冲滑脱断裂

加里东中、晚期,塔里木盆地主要受到来自东南缘东昆仑碰撞造山作用的强烈挤压^[1-4]。晚奥陶世末始,在强烈的挤压作用力下,盆地南部一系列近平行于东南边界的逆冲断裂带大规模发育,如玛东逆冲断裂带;北部轮台和亚南等大型逆冲断裂带和北东东走向走滑断裂继承发育。同时,南天山和塔里木盆地北缘大量奥陶纪—泥盆纪陆缘弧侵入岩和火山岩的存在,使得人们对南天山洋早古生代向南俯冲和塔里木盆地北缘活动的认识达成共识^[18]。在南天山洋俯冲和东昆仑碰

撞共同作用下,沿盆地中部低凸起局部地区走滑断裂基础上发育了“半走滑—半逆冲”Y字型逆冲断裂,即巴楚隆起和田河(图6c)和塔北隆起兰尕断裂带。逆冲断裂根部并入直立走滑断裂,向上逆冲断裂错断直立走滑断裂。由于处于持续挤压环境,使得志留系呈边沉积、边挤压变形特点,造成断背斜两翼志留系逐渐上超及背斜轴部减薄,由于加里东晚期是应力主作用期,前期挤压力较弱,志留系整体近平行于奥陶系。

3) 海西中、晚期形成张扭走滑断裂

准噶尔洋和南天山洋的俯冲方式在泥盆纪发生了从前进式到后撤式的构造转换,导致在南天山地区—塔里木北缘在晚泥盆纪—石炭纪形成了一系列弧后有限洋盆^[18]。由于古特提斯洋的扩张,塔里木板块在石炭纪处于弱伸展环境并发生整体沉降,导致塔里木盆地巴楚—麦盖提地区(巴麦地区)西部由北东侵单斜演化为区域性单斜^[5,7]。走滑断裂以张扭性质继承发育,并反切割逆冲断裂,断穿基底,可成为良好的油气运移通道。兰尕断背斜带上构造层内可见张扭正花状断裂特征,向上断至 T_3^0 界面(古生界顶面),呈左行左阶排列和线性张扭走滑断裂(图6d,图3c)。然而和田河构造带难见张扭花状特征,因为自中新世始,印度板块与欧亚板块陆陆碰撞产生强烈的挤压变形,将张扭活动迹象改造成压扭性质褶皱—褶曲正花状构造样式。相对巴麦地区和田河构造带,塔北地区兰尕构造带距离碰撞带更远,保留了早期正花状活动痕迹。

4) 中生代—喜马拉雅中、晚期形成走滑断裂

侏罗纪早期,昆仑山前及天山处于弱伸展构造环境^[1-4],这种构造背景可能延续到古近纪末,塔北地区在上侏罗统及上部地层形成了多套正断裂。喜马拉雅晚期,在印度板块与欧亚板块强烈碰撞挤压作用下,和田河构造带南北两侧的卡拉沙依和玛扎塔格断裂带剧烈活动并定型^[19]。和田河构造带处于较为稳定的隆起内部,部分走滑断裂再次活动,除其北部受卡拉沙依断裂影响形成褶皱—褶曲变形外,还发育直立压扭正花状走滑断裂。而兰尕构造带处于库车前陆盆地前缘隆起部位,随着前缘隆起引张变形引发岩石圈翘倾^[18],兰尕构造带整体处于拉张构造环境中,继承并形成一系列右阶雁列式张性断裂。

3.2 断裂成因机制探讨

研究发现^[20-21],巴楚隆起整体处于近东西向正、负磁异常带内,内部存在近北北东向正磁异常,南部麦盖提斜坡整体处于北北东向正、负磁异常带内,而塔北地区存在北北西向和北北东向正、负磁异常带。这些航

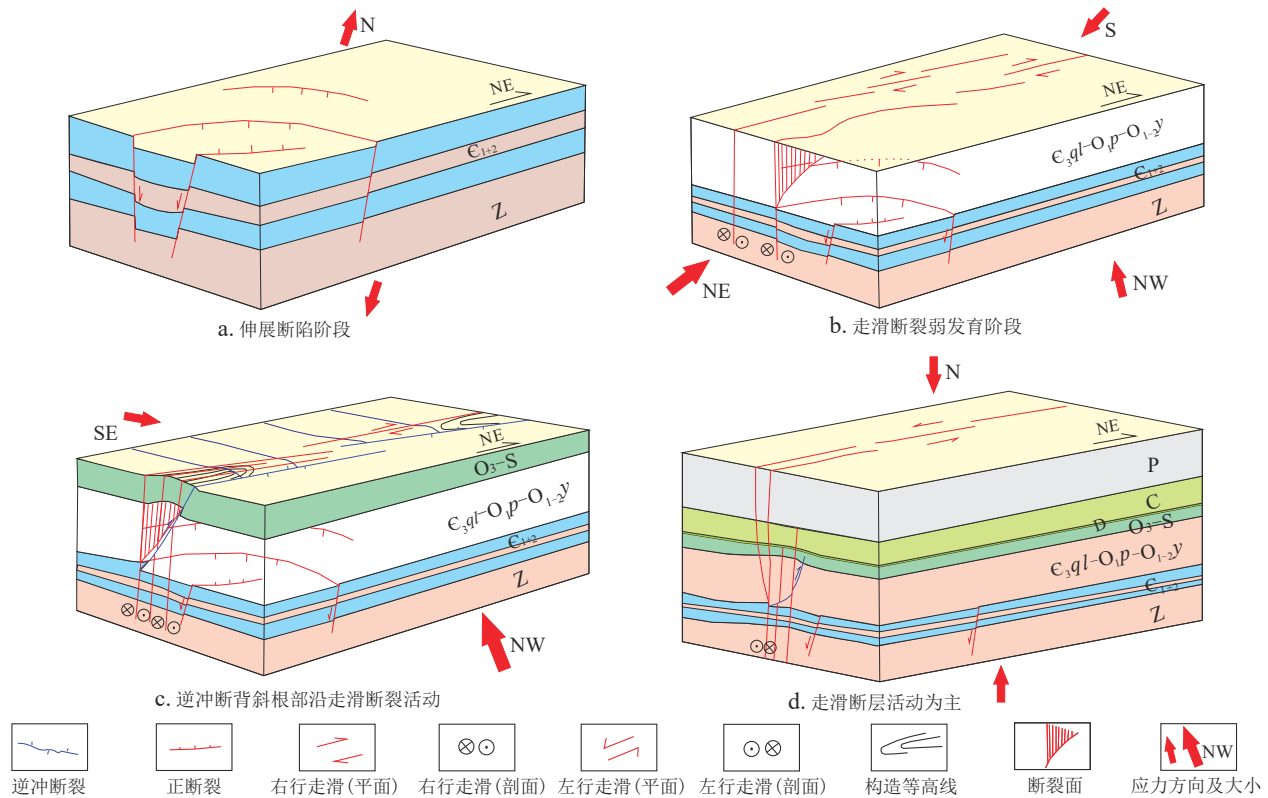
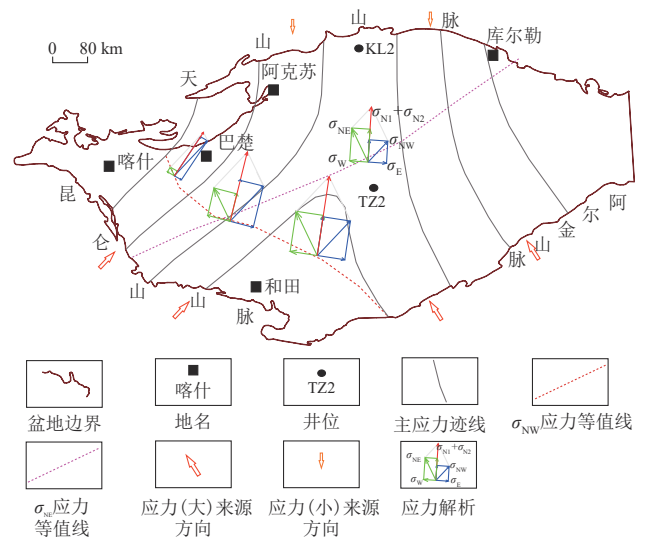


图6 塔里木盆地和田河断裂带构造演化示意图

Fig. 6 Schematic diagrams showing the structural evolution of the Hotan River fault zone in the Tarim Basin

磁异常带说明巴楚隆起可能存在近东西和北北东向的隐伏基底断裂,塔北隆起存在北北西和北北东向的隐伏基底断裂。在区域应力场作用下,这些隐伏基底断裂作为构造薄弱带易首先破裂,进而形成北北东和北北西向构造带,这可能是和田河断裂带形成的主要原因。航磁异常走向与兰尕断裂带走向不同,说明基底断裂的存在不是兰尕断裂带产生的根本原因。

此外,中奥陶世末期受西南、东南和北部3面挤压应力作用(图7),来自塔西南方向的应力可分解为 σ_w 和 σ_{N1} 2个分力;而塔东南方向的应力可分解为 σ_e 和 σ_{N2} 2个分力。二者正北方向的合力与南天山洋反作用力相互作用形成共轭走滑断裂体系,而在东、西向的 σ_w 和 σ_e 分力作用下,形成顺托果勒低凸起及兰尕构造带,其中,只有存在近东西向的应力才能使兰尕构造带走向呈南北向。假设北西向应力 σ_{NW} 大小相等(离塔东南边界断裂垂直距离相等来实现),随着临近塔西南北东向应力 σ_{NE} 变大,使近东西向分应力逐渐变为北西西向,这种变化显然会产生近北北东向构造带,北北东向顺托果勒低凸起(图1a)形成。而和田河构造带主要受北东向和北西向应力(σ_{NE} 和 σ_{NW})影响,假设二者距离塔西南边界相等时北东向应力 σ_{NE} 相等,那么越靠近塔东南,北西向应力 σ_{NW} 越大,二者的合力从东到西

图7 塔里木盆地中奥陶世末期构造主应力迹线平面图
(据文献[6]修改)Fig. 7 Plan view of the principal stress trajectories of structures in the Tarim Basin at the end of the Middle Ordovician
(modified after reference [6])

由北北东向逐渐转变为北东向。它们的合力是北北东向走滑断裂与逆冲断裂形成的根本原因。而东、西向的 σ_w 和 σ_e 分力方向由北西西向逐渐变为北西向,这是和田河微凸起形成的根本原因。

4 油气富集特征及成藏演化模式

4.1 兰尕断裂带油气富集特征

兰尕逆冲断裂带可分为3个区:背斜区、陡翼断片区和缓翼向斜区。陡翼断片区是指逆冲断裂带向向斜一侧2.0 km,背斜一侧0.5 km范围内区域;缓翼向斜区是指缓翼增厚区边界向背斜一侧1.0 km处,向向斜一侧2.0 km范围内的区域;剩余区域为背斜区。增厚区是指逆冲断裂滑脱逆冲使地层增厚的区域。由于向下滑脱至 T_8^1 界面附近,故利用 $T_8^1-T_7^1$ 界面残厚图表征增厚区(图8)。

逆冲断裂带不同位置裂缝发育程度不同。塔里木盆地阿克苏地区西克尔野外剖面志留系岩性为粉砂质泥岩、泥质粉砂岩与砂岩互层,可见厚度超过10.0 cm的砂岩层。剖面普遍见节理(图9),为弱逆冲断裂发育区(图9c),节理非常发育,逆冲断裂前翼地层被剥蚀,沿内幕节理岩体风化严重,崩落特征明显。逆冲段

节理发育线密度为4.2~5.9条/m,而未逆冲段(缓翼区)节理发育线密度为1.1~2.4条/m。逆冲断裂作用区节理发育密度和破碎程度远高于未作用区。这说明逆冲断裂改造先存断裂,使其更破碎,缝网更发达,被改造缝网多集中在逆冲断裂上盘。其中,背斜区缝网最发育,其次为断片区,最次为缓翼向斜区。

兰尕逆冲断裂带油气藏特征如下:海西晚期和喜马拉雅期油气沿沟通寒武系玉尔吐斯组烃源岩的走滑断裂垂向运移,聚集在北北东向和北北西向等走滑断裂控制的奥陶系一间房组及鹰山组下段岩溶缝洞型储层中,奥陶系桑塔木组泥岩为区域盖层^[15, 22]。未断穿基底的北北东向和北北西向走滑断裂也可聚集成藏,但需要通过横向调整与主干断裂建立连通道。故此油气藏仍是典型的断溶体油气藏,并非构造圈闭控制的油气藏,背斜高部位仅仅是优势油气运移指向区。

该区油气藏具有4个特点:①主干北北东向走滑断裂油气规模小;②与北北东向主干断裂带沟通的其他走向断溶体油气产量高;③油气产能由高到低依次为背斜区、陡翼断片区和缓翼向斜区;④浅覆盖区油

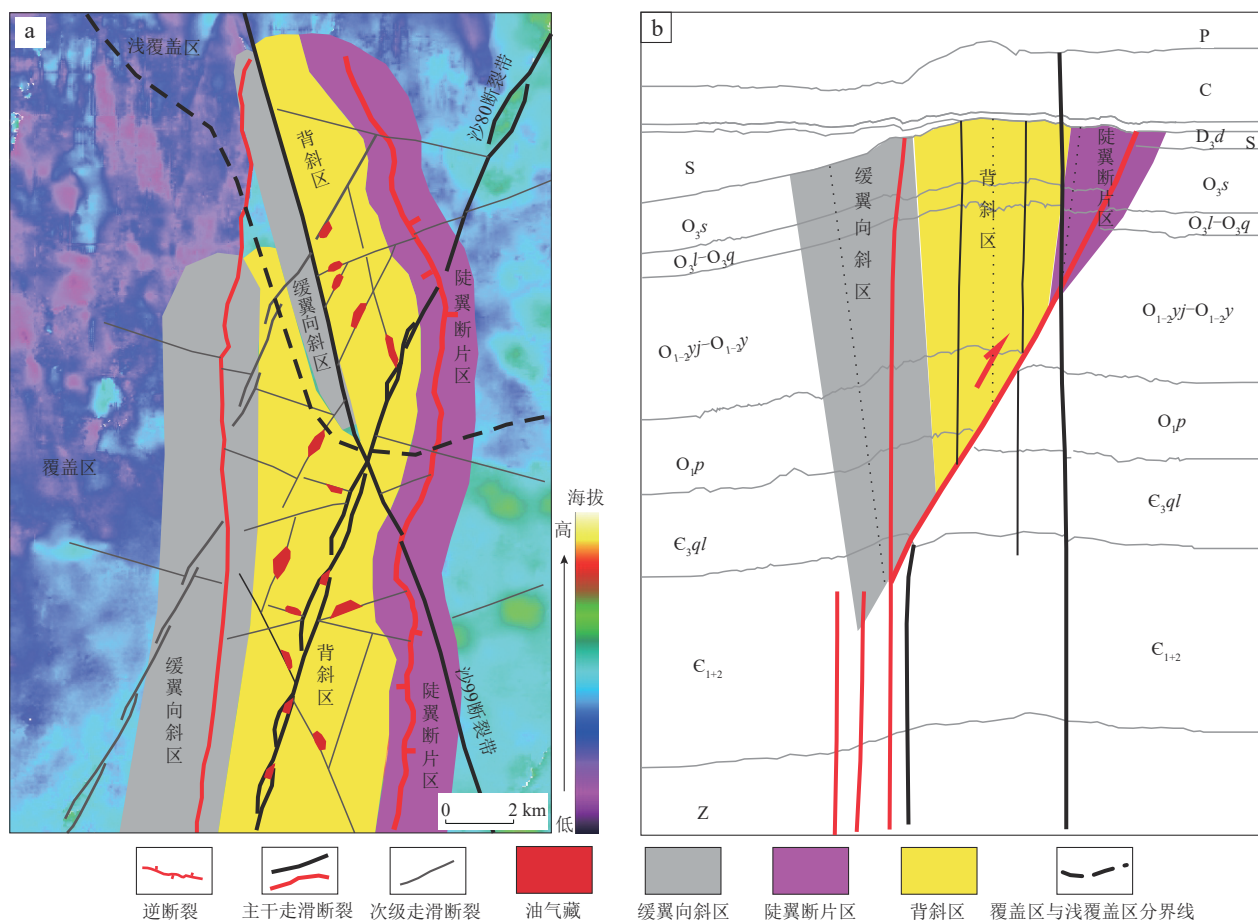


图8 塔河油田兰尕构造带油气藏分区、分带平面(a)及剖面(b)示意图

Fig. 8 Schematic map (a) and profile (b) showing the zonation and segmentation of oil reservoirs in the Lan'ga fault zone, Tahe oilfield

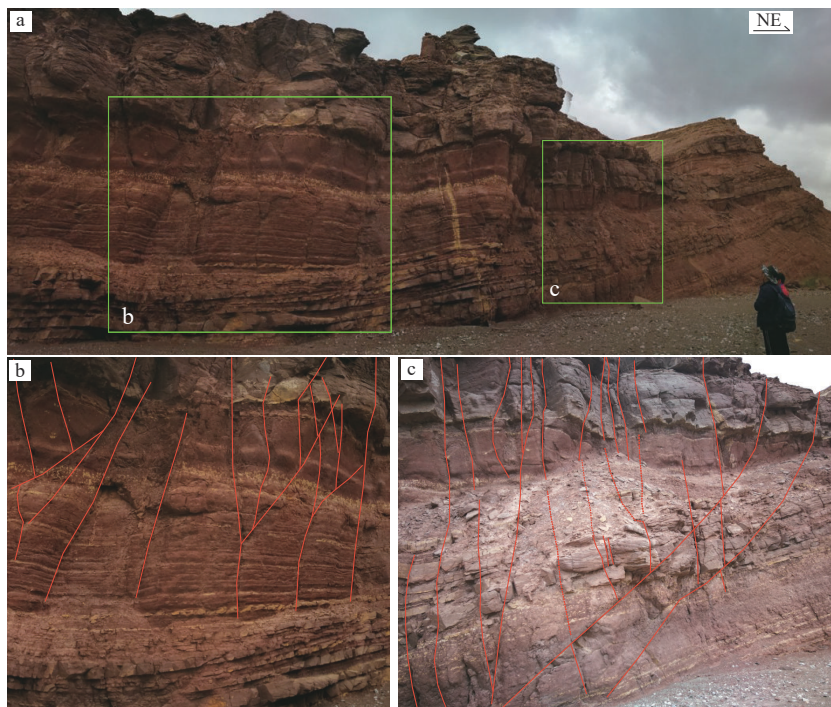


图9 塔里木盆地阿克苏地区西克尔野外剖面照片

Fig. 9 Xikeer outcrop section in the Aksu area, Tarim Basin

a. 节理面; b. 未发育逆冲断裂; c. 发育逆冲断裂

(图b和c中红色线条表示断裂。)

气产能优于覆盖区。

兰尕断裂带邻区 TP12CX 北北东向主干走滑断裂分段控藏特征明显,其控藏作用由大到小依次为油气藏规模拉分段、平移段和挤压段。其中,拉分段单井油气平均产能在 5.0×10^4 t 以上^[23]。但是,兰尕断背斜带内沙 80 北北东向主干走滑断裂油气藏规模普遍较小,大部分单井油气平均产能在 $(1.0 \sim 2.0) \times 10^4$ t,或是水井,具见水快、暴性水淹特征。TP12CX 与沙 80 断裂带地层坡度相当,分别为 $2.7^\circ \sim 2.9^\circ$ 和 $3.0^\circ \sim 3.3^\circ$ 。前者沿断裂断可分段规模富集,而后者表现为整体断裂带侧向连通,大部分油气沿断裂向北部高部位和断裂带两侧高部位运移的特点。尽管沙 80 断裂带储集体规模(地层压力大、产液量高)与 TP12CX 相当,但是由于沙 80 断裂带在加里东晚期遭受挤压逆冲断裂的改造,断裂带内整体连通,成为油气向北部高部位及横向上倾断溶体运移的高速通道,造成油气无法在主干断裂带大规模富集。而 TP12CX 断裂带在加里东晚期未遭受逆冲断裂改造,完整保留了走滑断裂分段特征,从而分段富集规模大。这里上倾断溶体是指由其他走向走滑断裂控制的断溶体,位于北北东向主干走滑断裂两侧的上倾高部位。

此外,与主干北北东向横向连通的次级北北东向走滑断裂,分段富集油气产能较高。其未断穿逆冲断裂面,未与烃源岩沟通,需要在逆冲断裂面以上与主干

断裂建立横向连通,油气才能规模充注、分段富集;未建立横向连通的北北东向断溶体由于充注差,油气规模小,单井油气平均产能低小于 1.0×10^4 t。次级北北东向走滑断裂之所以能分段规模富集是因为其后期活动弱或者不活动,断裂带未整体连通,保留了分段性,所以油气不会沿断裂带向高部位运移,具备分段成藏的条件^[23-25]。

兰尕构造带地跨顺层岩溶区(桑塔木组泥岩浅覆盖区)和断控区(覆盖区)。桑塔木组泥岩覆盖区以南 $4.0 \sim 7.0$ km 为浅覆盖区和覆盖区的分界线,北部为浅覆盖区,南部为覆盖区,浅覆盖区岩溶缝洞型储层规模优于覆盖区^[26-27],兰尕构造带内以沙 99 断裂为分界线(图 8)。

产量统计结果显示(图 10,图 11):① 浅覆盖 3 个区内单井平均产量均优于覆盖区,其中,浅覆盖背斜区单井平均累产油 5.200×10^4 t,而覆盖背斜区仅为 2.355×10^4 t;② 背斜区单井平均产量最高,缓翼向斜区最低,陡翼断片区居中;③ 背斜区溶洞型储层最发育,陡翼断片区居中,缓翼向斜区最不发育(图 12,图 13)。

加里东中期 I 幕活动时期整体地貌呈北高南低,塔河地区普遍遭受暴露,接受大气淡水溶蚀,以溶丘洼地为主,岩溶规模有限,对缝洞型储层贡献有限^[28]。加里东中期 II 幕活动时期整体地貌依然呈北高南低,

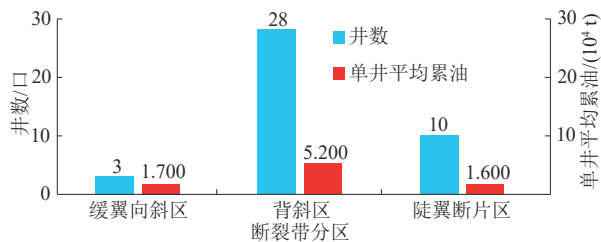


图10 塔河油田浅覆盖区逆冲断裂增厚区分带产量统计

Fig. 10 Zonal production statistics of the thickened areas with thrust faults in the shallowly overburden region, Tahe oilfield

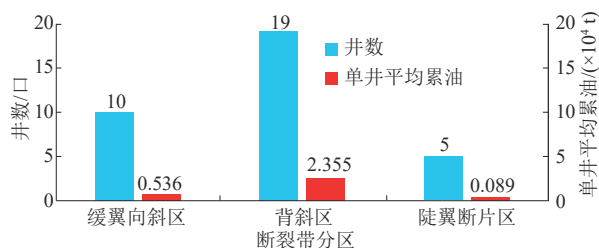


图11 塔河油田覆盖区逆冲断裂增厚区分带产量统计

Fig. 11 Zonal production statistics of oil of the thickened areas with thrust faults in the overburden region, Tahe oilfield

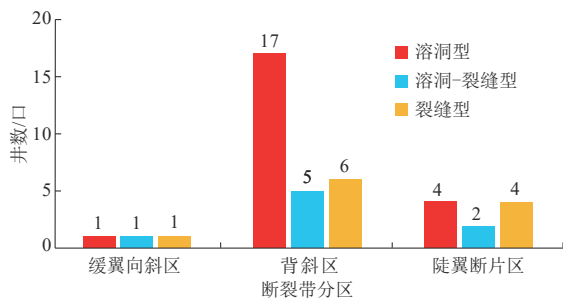


图12 塔河油田浅覆盖区逆冲断裂增厚区分带储层分类统计

Fig. 12 Classified statistics of reservoirs in different zones of the thickened areas with thrust faults in the shallowly buried region, Tahe oilfield

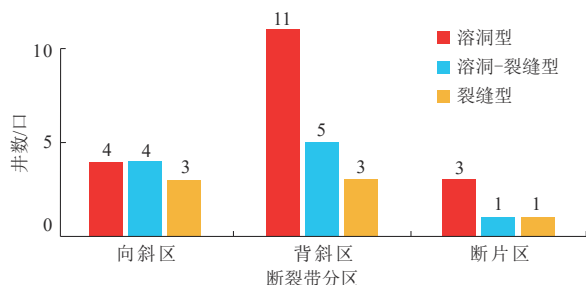


图13 塔河油田覆盖区逆冲断裂增厚区分带储层分类统计

Fig. 13 Classified statistics of reservoirs in different zones of the thickened areas with thrust faults in the buried area, Tahe oilfield

浅覆盖区不仅发育沿断裂、顺层溶层溶蚀,即在中-下奥陶统鹰山组和中奥陶统一间房组上段顺层溶蚀,还

发育深切沟谷,沿地表水系下渗至一间房组形成“下降型”埋藏断控岩溶系统^[29];而覆盖区,仅发育沿断裂带顺层溶蚀。加里东中期Ⅲ幕—海西早期,整体地貌由北高南低转至东北高西南低,水流方向仍然由北向南。在水的分流等作用影响下,顺层岩溶作用向南逐渐变弱。所以加里东中期Ⅱ幕活动时期,南、北岩溶作用的不同及加里东中期Ⅲ幕活动后,顺层岩溶作用由北往南逐渐减弱造成浅覆盖区储层优于覆盖区。

沿北北东向和北北西向走滑断裂发育锯齿状南北及正西倾向的逆冲断裂,使其上盘走滑断裂再次活动,并在背斜轴部发育一系列张节理。再次活动的走滑断裂与张节理组成的缝网规模从背斜区向陡翼断片区和缓翼向斜区逐渐变小,由于陡翼断片区逆冲断裂上盘切穿的奥陶系较薄,所以其缝网规模较背斜区小,缓翼向斜区最小。加里东晚期—海西早期岩溶作用是沿这些走滑断裂带及张节理顺层发育的。因此,走滑断裂和裂缝的数量与规模决定储层发育规模,故溶洞型储层单井平均产量由高到低依次为背斜区、陡翼断片区和缓翼向斜区。

由上可得,兰尕构造带内,北北东向主干走滑断裂控制的断溶体油气藏侧向封挡难,油气藏规模小。此外,该断裂带内发育2种有利成藏模式:①主干北北东向走滑断裂垂向充注,交切断裂横向调整,呈上倾断溶体富集模式;②主干断裂充注的油气向次级北北东向走滑断裂侧向调整,呈次级断裂分段富集模式。

4.2 兰尕与和田河断裂带油气藏演化模式

在上述构造解析基础上,结合塔河油田兰尕断裂带油气藏特征,对比分析和田河断裂带油气成藏条件,探讨其潜在勘探领域及成藏模式。

由于与和田河断裂带相交的玛扎塔格断裂带上和田河气田的存在,及前人推测北北东向走滑断裂是和田河气田油气运移的主要通道^[13,30],可以推断本区或邻区存在烃源岩,油气能够沿走滑断裂运移充注。盖层为石炭系泥岩,保存条件较好。故本文主要讨论储层控制因素及成藏模式。

和田河逆冲断裂带桑塔木组地层南薄北厚^[3],整体厚度100~200 m,较薄,南部可以被看作浅覆盖区,北部为覆盖区。玛扎塔格断裂带以南地区奥陶统缺失,而加里东中期Ⅱ幕—海西早期整体地层南高北低,加里东中期Ⅰ幕活动期北北东向走滑断裂已具雏形,因此在鹰山组内具备沿北北东向走滑断裂发育顺层岩溶缝洞型储层的条件。在由南向北的岩溶水分流作用下,南部岩溶作用强于北部,因此南部储层可能优于北

部。主干北北东向走滑断裂受加里东晚期的挤压再改造,断裂浅层整体连通,油气往北部高部位以及北北东向次级断裂侧向调整运移。由于北北西向等断裂与主干走滑断裂交切的走滑断裂欠发育,油气沿交切断裂横向调整,上倾缝洞体富集模式不适合和田河构造带。次级北北东向走滑断裂后期活动弱或不活动,沿断裂带油气保留了分段富集的特征,侧向封挡保证油气不会沿断裂带向高部位运移,次级北北东向走滑断裂具备分段成藏的条件(图14a)。

据此,和田河构造带的有利成藏模式是海西运动晚期,和田河构造带沿主干断裂充注的油气向次级北北东向走滑断裂控制的缝洞型储层侧向调整,沿断裂带分段富集的断溶体模式(图14b)。背斜区次级北北东向走滑断裂成藏潜力最大,陡翼断片区次之,缓翼向斜区最次。由于南部更靠近和田河油气田,而且储层较北部更优质,因此油气规模可能更大。由于和田河构造带处于相对高部位,同时走滑断裂经历加里东晚期活动再改造,油气运移通道更通畅,所以相对于邻区北北东向和北东东向走滑断裂,和田河构造带是油气运移指向区和油气运移的高速通道,是最有利成藏区。如果能够实现最有利区油气勘探突破,那么巴楚隆起断溶体油气藏开发潜力巨大。

因此,和田河构造带奥陶系鹰山组北北东向次级断裂控制的断溶体值得探索,特别是南部背斜区北北东向断溶体。

5 结论

1) 兰尕及和田河半走滑-半逆冲的“Y”字型逆冲滑脱断裂形成于加里东晚期,向下收敛于加里东中期走滑断裂,其中,兰尕断裂带收敛于北北东向和北北西向走滑断裂组成的锯齿状南北向走滑断裂,和田河收敛于北北东向走滑断裂,向上逆冲至志留系内,上部地层内多期走滑断裂继承发育。

2) 隐伏基底断裂和区域应力背景是兰尕与和田河断裂带形成的主要原因。中奥陶世末—上奥陶世末地层西南、东南和北部3面受力,在塔北隆起形成北北东向和北北西向走滑断裂,在巴楚隆起形成北北东走滑断裂。加里东晚期,在东昆仑和南天山洋挤压作用下形成向下收敛于走滑断裂,向上逆冲至志留系内的逆冲滑脱断裂,并切割走滑断裂。后期构造运动使逆冲断裂带内走滑断裂继承发育,反错断逆冲断裂。

3) 兰尕构造带内发育2种有利成藏模式:①主干北北东向走滑断裂垂向充注,交切断裂横向调整,呈上

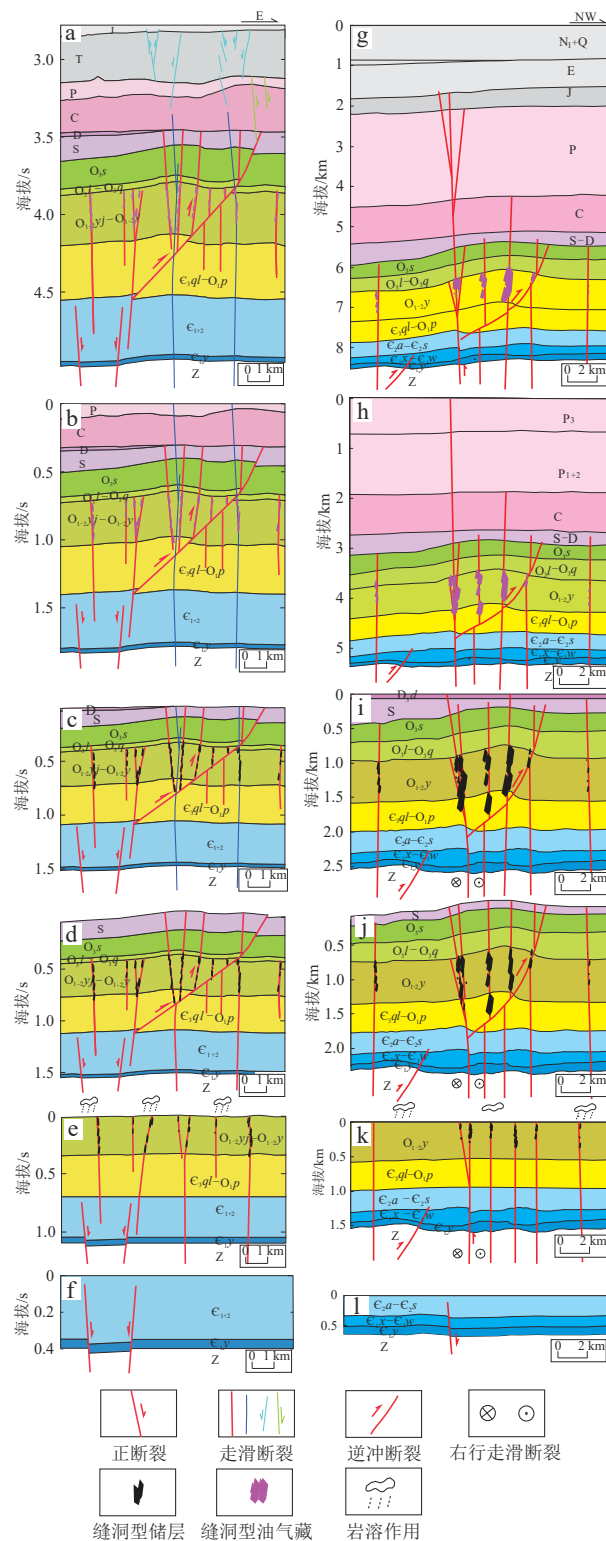


图14 塔里木盆地和田河与兰尕构造带成藏演化模式示意图
Fig. 14 Schematic diagrams showing the evolutionary models of hydrocarbon accumulation in the Hotan River and

Lan'ga fault zones, Tarim Basin

a. 兰尕构造带现今部分构造; b. 二叠系沉积后; c. 石炭系沉积前; d. 泥盆系沉积前; e. 中、下奥陶统沉积后; f. 中、下寒武统沉积后; g. 和田河构造带现今构造; h. 二叠系沉积后; i. 石炭系沉积前; j. 泥盆系沉积前; k. 中、下奥陶统沉积后; l. 中、下寒武统沉积后

倾断溶体油气藏富集模式;② 主干充注断裂向次级北北东向走滑断裂侧向调整,断溶体油气藏呈分段富集模式。

4) 和田河构造带潜在有利成藏模式是主干充注断裂向次级北北东向走滑断裂控制的缝洞型储层在海西晚期侧向调整,沿断裂带分段富集,形成断溶体油气藏。南部背斜区北北东向断溶体尤其值得探索。

参 考 文 献

- [1] 杜德道,李洪辉,闫磊,等. 塔里木盆地构造变形迁移与三大地质事件的关系及其地质意义[J]. 地质科学, 2023, 58(2): 379-397.
DU Dedao, LI Honghui, YAN Lei, et al. Deformation migration and three major geological events in Tarim Basin and their geological significance[J]. Chinese Journal of Geology, 2023, 58(2): 379-397.
- [2] 袁丹丹. 轮台断裂带特征及控藏作用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
YUAN Dandan. Study on the characteristics of Luntai fault belt and its control on accumulation[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021.
- [3] 郑晓丽. 塔里木盆地巴楚隆起断裂特征及古隆起迁移演化规律[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
ZHENG Xiaoli. The faulting characteristics and paleo-uplift migration of Bachu uplift, Tarim Basin[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [4] 邓尚,邱华标,刘大卫,等. 克拉通内走滑断裂成因与控藏机制研究进展——以塔里木盆地北部为例[J/OL]. 石油与天然气地质: 1-15[2024-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4820.TE.20240909.2238.002.html>.
DENG Shang, QIU Huabiao, LIU Dawei, et al. Advances in research on the genetic mechanisms of intracratonic strike-slip fault system and their control on hydrocarbon accumulation: A case study of the northern Tarim Basin [J/OL]. Oil & Gas Geology: 1-15 [2024-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4820.TE.20240909.2238.002.html>.
- [5] 吕海涛,张哨楠,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.
LYU 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.
- [6] 李国会,李世银,李会元,等. 塔里木盆地中部走滑断裂系统分布格局及其成因[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 30-37.
LI Guohui, LI Shiyin, LI Huiyuan, et al. Distribution pattern and formation mechanism of the strike-slip fault system in the central Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3): 30-37.
- [7] 张仲培,徐勤琪,刘士林,等. 塔里木盆地巴麦地区东段北东向走滑断裂体系特征及油气地质意义[J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 761-769.
ZHANG Zhongpei, XU Qinqi, LIU Shilin, et al. Characteristics of NE strike-slip fault system in the eastern section of Bachu-Maigaiti area, Tarim Basin and its oil-gas geological significance [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(4): 761-769.
- [8] 周慧,陈永权,李洪辉,等. 塔里木盆地巴楚隆起北缘的吐木休克断裂与巴东断裂[J]. 地质科学, 2021, 56(1): 1-18.
ZHOU Hui, CHEN Yongquan, LI Honghui, et al. The Tumuxiuke and Badong faults on the northern boundary of the Bachu rise, Tarim Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2021, 56(1): 1-18.
- [9] 张永,郑孟林,陈横俊,等. 塔里木盆地巴楚隆起玛扎塔格断裂带几何学与运动学特征[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 325-337.
ZHANG Yong, ZHENG Menglin, CHEN Jiajun, et al. Geometrical and kinematical characteristics of the Mazartag fault zone in Bachu Uplift, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 325-337.
- [10] 马海陇,邓光校,王震,等. 塔里木盆地麦盖提斜坡玉中构造带特征及石油地质意义[J]. 断块油气田, 2022, 29(1): 1-7.
MA Hailong, DENG Guangjiao, WANG Zhen, et al. Characteristics and petroleum geological significance of Yuzhong structural belt in Maigaiti slope, Tarim Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(1): 1-7.
- [11] 孙松领,张正刚,荣光来,等. 阿尔金断裂带中段中生代盆地形成及演化[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(5): 528-535.
SUN Songling, ZHANG Zhenggang, RONG Guanglai, et al. Formation and evolution of Cenozoic basins in the middle part of Altyn Tagh fault zone [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(5): 528-535.
- [12] 郭颖,汤良杰,余腾孝,等. 塔里木盆地塘古巴斯坳陷玛东构造带断裂特征及成因探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(4): 643-653.
GUO Ying, TANG Liangjie, YU Tengxiao, et al. Fault features and formation mechanism of Madong structural belt in Tanggubasi Depression, Tarim Basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(4): 643-653.
- [13] 马海陇,王震,邓光校,等. 塔里木盆地和田河地区断裂特征及其油气地质意义[J]. 断块油气田, 2021, 28(3): 329-334.
MA Hailong, WANG Zhen, DENG Guangxiao, et al. Fault features in eastern Hetianhe area, Tarim Basin and its petroleum geological significance [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, 28(3): 329-334.
- [14] 张继标,邓尚,韩俊,等. 多期构造应力控制走滑断控储层发育机理与差异性研究——以塔里木盆地顺北地区为例[J]. 石油实验地质, 2024, 46(4): 775-785.
ZHANG Jibiao, DENG Shang, HAN Jun, et al. Study on development mechanism and variability of strike-slip fault-controlled reservoirs regulated by multi-stage structural stress: A case study of the Shunbei area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(4): 775-785.
- [15] 鲁新便,胡文革,汪彦,等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特

- 征与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 347-355.
- LU Xinbian, HU Wenge, WANG Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 347-355.
- [16] 孙福宁, 胡文瑄, 胡忠亚, 等. 断裂-层序双控机制下的热液活动及成储效应——以塔里木盆地塔河、玉北地区下奥陶统为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 558-575.
- SUN Funing, HU Wenxuan, HU Zhongya, et al. Impact of hydrothermal activities on reservoir formation controlled by both faults and sequences boundaries: A case study from the Lower Ordovician in Tahe and Yubei areas, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 558-575.
- [17] 张鹏. 塔河油田奥陶系兰茺断裂带油水分布规律研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- ZHANG Peng. Research on oil/water distribution of Ordovician reservoir in Langa fault zone of Tahe oil field [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [18] 王博, 宋芳, 倪兴华, 等. 天山古生代增生造山作用及其构造转换事件[J]. 地质学报, 2022, 96(10): 3514-3540.
- WANG Bo, SONG Fang, NI Xinghua, et al. Paleozoic accretionary orogenesis and major transitional tectonic events of the Tianshan orogen[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(10): 3514-3540.
- [19] 张强, 黄太柱, 李慧莉, 等. 塔里木盆地西部的新生代断裂活动[J]. 岩石学报, 2016, 32(3): 833-846.
- ZHANG Qiang, HUANG Taizhu, LI Huili, et al. The Cenozoic faults in western Tarim Basin, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(3): 833-846.
- [20] 徐鸣洁, 王良书, 钟锴, 等. 塔里木盆地重磁场特征与基底结构分析[J]. 高校地质学报, 2005, 11(4): 585-592.
- XU Mingjie, WANG Liangshu, ZHONG Kai, et al. Features of gravitational and magnetic fields in the Tarim Basin and basement structure analysis[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(4): 585-592.
- [21] 何碧竹, 焦存礼, 蔡志慧, 等. 塔里木盆地中部航磁异常带新解译[J]. 中国地质, 2011, 38(4): 961-969.
- HE Bizhu, JIAO Cunli, CAI Zhihui, et al. A new interpretation of the high aeromagnetic anomaly zone in central Tarim Basin[J]. Geology of China, 2011, 38(4): 961-969.
- [22] 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.
- [23] LV Yanping, MA Hailong, WANG Zhen, et al. Genetic types of the tp12cx strike-slip fault segments and their role in controlling reservoirs in the Tarim Basin [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 916475.
- [24] 汪如军, 王轩, 邓兴梁, 等. 走滑断裂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.
- [25] 杨海军, 能源, 邵龙飞, 等. 塔里木盆地台盆区走滑断裂带多层叠加样式及石油地质意义[J]. 新疆石油地质, 2024, 45(4): 387-400.
- YANG Haijun, NENG Yuan, SHAO Longfei, et al. Multilayer superimposition patterns of strike-slip fault zones and their petroleum geological significance in platform area, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2024, 45(4): 387-400.
- [26] 张长建, 张振哲, 金燕林. 塔河油田浅覆盖区中一下奥陶统承压岩溶缝洞结构特征——以T738井区为例[J]. 海相油气地质, 2023, 28(2): 133-143.
- ZHANG Changjian, ZHANG Zhenzhe, JIN Yanlin. Characteristics of confined karst fractures-caves structure of the Middle-Lower Ordovician in shallow coverage zone of Tahe Oilfield: Taking the T738 well block as an example [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2023, 28(2): 133-143.
- [27] 张长建, 吕艳萍, 张振哲. 塔里木盆地塔河油田西部斜坡区中下奥陶统古岩溶洞穴发育特征[J]. 石油实验地质, 2022, 44(6): 1008-1017, 1047.
- ZHANG Changjian, LYU Yanping, ZHANG Zhenzhe. Features of Middle-Lower Ordovician paleo-karst caves in western slope area, Tahe oil field, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(6): 1008-1017, 1047.
- [28] 漆立新, 云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 1-12.
- QI Lixin, YUN Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 1-12.
- [29] 张长建, 吕艳萍, 文欢, 等. 塔河油田西部斜坡区加里东运动中期Ⅱ幕水文地貌特征及其对洞穴发育的控制[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(2): 135-144.
- ZHANG Changjian, LYU Yanping, WEN Huan, et al. Paleohydrogeomorphic characteristics of episode II of Middle Caledonian movement and their controls on karst cave development in western slope area of Tahe Oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(2): 135-144.
- [30] 周新源, 杨海军, 李勇, 等. 中国海相油气田勘探实例之七塔里木盆地和田河气田的勘探与发现[J]. 海相油气地质, 2006, 11(3): 55-62.
- ZHOU Xinyuan, YANG Haijun, LI Yong, et al. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (part 7): Hotanhe Gas Field in Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11(3): 55-62.

(编辑 张 晟)