

# 塔里木盆地博孜一大北地区被动走滑构造特征及其对裂缝发育的控制作用

郭宏辉<sup>1</sup>,冯建伟<sup>1</sup>,赵力彬<sup>2,3</sup>

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东 青岛 266580;2. 中国石油塔里木油田公司,新疆 库尔勒 84100;  
3. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249]

**摘要:**库车坳陷位于南天山山前,受多期造山作用、基底先存构造与盐构造等因素的影响,构造格局复杂。明确此类复杂构造系统对裂缝发育的控制作用,对天然气勘探开发具有重要意义。基于前人的研究成果,结合最新地震、露头调查、成像与岩心资料等,系统性总结分析了博孜一大北地区构造模式及裂缝分布特征。研究结果表明,新生代以来研究区在天山造山运动与塔里木板块旋转联合控制作用下,构造系统在冲断的基础上发生被动走滑;在多条NEE向逆冲断层控制下,研究区构造体系南北方向上具有显著差异,呈现明显的分带特征;在走滑调节构造控制下,东西方向上走滑与逆冲相互转化,呈现明显的构造分段特征;断层被动走滑是有效缝发育的主控因素,断层走滑扰动应力场控制下的裂缝发育呈现分带特征;断层走滑作用下形成的断-缝系统是提高井产能的关键。此外,探讨了博孜一大北地区被动走滑构造控制下的裂缝发育规律及井产能特征,为裂缝发育机理的进一步研究提供了基础,同时也为此类油气田勘探开发提供一定的参考。

**关键词:**被动走滑;有效缝;断层扰动应力场;裂缝分布;构造模式;库车坳陷;塔里木盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

## Characteristics of passive strike-slip structure and its control effect on fracture development in Bozi-Dabei area, Tarim Basin

GUO Honghui<sup>1</sup>, FENG Jianwei<sup>1</sup>, ZHAO Libin<sup>2,3</sup>

[1. School of Geoscience, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Tarim Oilfield, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China; 3. College of Geoscience, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

**Abstract:** The Kuqa Depression is of complex structural pattern under multi-stage orogeny, basal pre-existing structure and salt structure in the Meso-Cenozoic South Tianshan Mountains. It is of great significance to clarifying the control effect of such complex structural systems on fracture development. Based on the research results of predecessors, combined with the latest seismic data, outcrop survey, imaging data and core data, we systematically summarize and analyze the structural pattern and fracture distribution characteristics of the Bozi-Dabei area. The results show that since the Cenozoic, under the joint control of the orogeny of the Tianshan Mountains and the rotation of the Tarim plate, the structural system has passively slipped after thrusting. Under the control of multiple NEE-trending thrust faults, the structural system in the study area shows significant differences from south to north, showing obvious zonation; and under the control of the strike-slip adjustment structure, the strike-slip and thrust structures occur alternatively from east to west, showing obvious structural segmentation. Passive fault strike-slipping serves as the main factor controlling effective fracture development, resulting in zonation of fracture development under the control of strike-slip fault disturbance stress field. The fault-fracture system formed by the action of fault strike-slipping is key to increasing well productivity. This study discusses the fracture development pattern and well productivity characteristics under the control of passive strike-slip structure in the Bozi-Dabei area, which is of a basis to further research on the fracture

收稿日期:2023-01-16;修回日期:2023-06-23。

第一作者简介:郭宏辉(1995—),男,硕士研究生,构造地质、工程地质。E-mail:guohonghui\_0326@126.com。

通信作者简介:冯建伟(1979—),男,博士、副教授,构造地质学。E-mail:linqu\_fengjw@126.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(ZX20200204);中国石油重大科技项目(ZD2019-183-006)。

development mechanism and of certain referential significance to the exploration and development of similar oil and gas fields.

**Key words:** passive strike-slipping, effective fracture, fault disturbance stress field, fracture distribution, structural model, Kuqa Depression, Tarim Basin

引用格式:郭宏辉,冯建伟,赵力彬. 塔里木盆地博孜一大北地区被动走滑构造特征及其对裂缝发育的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 962–975. DOI: 10. 11743/ogg20230413.

GUO Honghui, FENG Jianwei, ZHAO Libin. Characteristics of passive strike-slip structure and its control effect on fracture development in Bozi-Dabei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 962–975. DOI: 10. 11743/ogg20230413.

随着全球油气勘探从常规走向非常规、从浅层走向深层乃至超深层,深层-超深层油气资源受到普遍关注并不断取得突破,其中致密砂岩储层已成为目前研究的热点之一<sup>[1-4]</sup>。近年来,在塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带西部博孜一大北地区连续取得天然气勘探的突破,成为继克拉-克深气田后的又一个万亿方大气区。中国深层致密砂岩储层以陆相沉积为主,有着埋藏深、成岩作用强、低孔低渗、高温高压和构造复杂等独特的地质特征。研究区断层被动走滑及裂缝系统不仅是改善储层物性、提高气藏产能的关键,也是重要的渗流通道和储集空间。目前,断层走滑发育的典型力学机制为纯剪切与简单剪切<sup>[5-8]</sup>。然而并不是所有断层均符合此类应力机制,肖坤泽与童亨茂<sup>[9-10]</sup>根据断层走滑的动力学机制提出了主动走滑断层和被动走滑断层,主动走滑断层应力机制为纯剪切或简单剪切,被动走滑断层是指在伸展应力或挤压应力机制下形成的走滑断层。伸展或挤压作用下地层几何变形受限时,与断层相关的伸展或挤压活动将会减弱,断层两盘将会发生走滑错动,以平衡变形空间与应力、应变之间的关系<sup>[11]</sup>。

与童亨茂先生文中所讨论的被动走滑构造不同的是,博孜一大北地区被动走滑构造不单是在挤压应力背景下发育的,亦受塔里木板块旋转的影响,但塔里木板块的旋转亦是在新生代印藏板块碰撞的远程挤压效应下产生的<sup>[12-14]</sup>。在构造挤压与板块旋转的共同作用下,天山造山带发育东端收敛、西端撒开的大型帚状构造体系。李四光先生在《地质力学概论》一书中,将帚状构造划分为旋扭构造的一种<sup>[15]</sup>。博孜一大北地区显然属于天山造山带旋扭构造体系,结合塔里木盆地的旋转特征,也证明了博孜一大北地区断裂体系在周缘构造系统的控制作用下发生了被动走滑。在这样的构造系统下,博孜一大北地区首先发生一系列前陆冲断构造,后因挤压变形受限及塔里木板块旋转的影响,近东西向逆冲断层发生左旋走滑改造,同时新生了一系列近南北向走滑构造。这种走滑活动导致断层周缘

应力条件发生变化,裂缝发育参数也随之改变,对研究区裂缝系统的发育具有重要的影响<sup>[16-19]</sup>。目前,针对这种挤压与被动走滑联合应力作用下的构造模式研究相对较少,此类构造对裂缝发育的控制作用认识仍然薄弱,阻碍着研究区气藏的勘探开发进展。因此,明确博孜一大北构造系统下的裂缝分布规律,完善裂缝研究理论与方法体系,有利于为此类油气田的高效勘探开发提供重要科学依据。

## 1 地质概况

库车坳陷位于塔里木盆地北部、天山南缘,东西长 550 km,南北宽 30 ~ 80 km,总面积约 3.7×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,博孜一大北地区位于库车坳陷克拉苏构造带西部,整体呈 NEE 向展布,是南天山造山运动控制下的前陆冲断带(图 1b)<sup>[20-21]</sup>。晚二叠世一早三叠世,库车坳陷属于前陆盆地发育期,天山造山带初步形成,整体变形程度较低,仅中天山有一定程度的隆升<sup>[22]</sup>。侏罗纪,盆地属于陆内断-拗期,盆地表现为弱伸展环境下形成的断陷盆地,天山造山带遭受一定程度的剥蚀,此时期构造相对稳定,仅克拉苏构造带发育少量伸展断层。白垩纪—古近纪的陆内拗陷时期,盆地变为弱挤压状态下的拗陷盆地,晚白垩世发生局部区域隆升事件,导致白垩系遭受不同程度剥蚀,构造变形自南向北减弱,库车坳陷与南部隆升构造变形的基本格局在此时期形成<sup>[20-22]</sup>。新近纪—第四纪,南天山造山带构造运动活跃,早期造山活动整体较弱,受北部造山带影响,库车坳陷发生挠曲变形,博孜一大北地区整体表现为弱挤压环境下的地层挠曲变形,盐下构造层开始形成小断距逆冲断层及较宽缓褶皱。造山运动晚期,博孜一大北地区遭受强烈挤压,形成了多个线性褶皱带,同时盐下断裂系统进一步发育,北部发育高角度基底卷入逆冲断裂,南部发育多条南向逆冲断层,形成了成排展布的叠瓦冲断构造,盐上层褶皱变形受断层切穿破坏,形成现今的构造形态<sup>[23-24]</sup>。研究





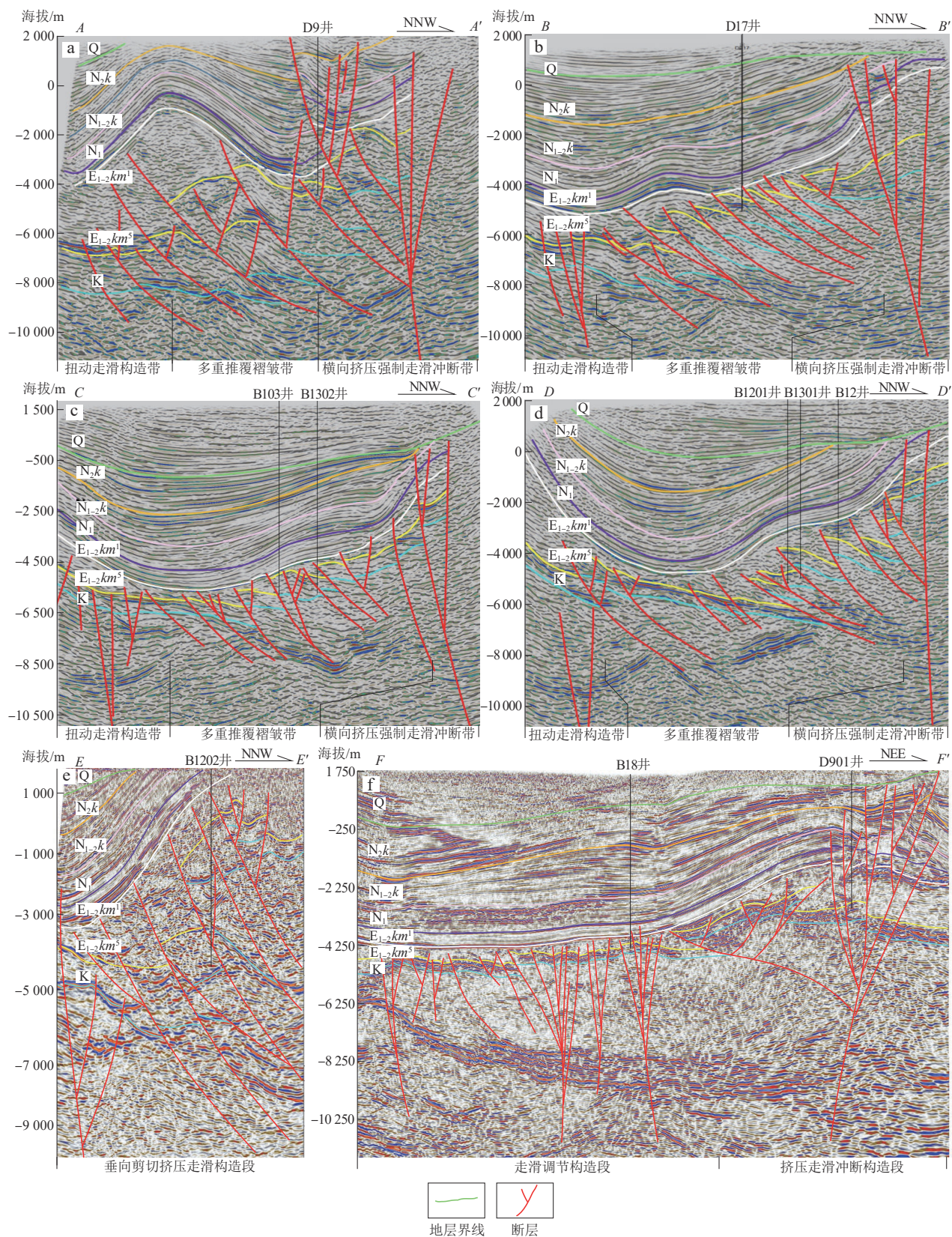


图2 博孜一大北地区典型地震剖面构造解释(剖面位置见图1c)

Fig. 2 Seismic interpretation of typical structural section in Bozi-Dabei area(see Fig. 1b for the section location)

a. 剖面A—A'; b. 剖面B—B'; c. 剖面C—C'; d. 剖面D—D'; e. 剖面E—E'; f. 剖面F—F'



具有空间叠置特征。由山前向盆内,构造样式由似花状构造变为高角度逆冲构造再变为低角度逆冲叠瓦构造,这反映了挤压作用逐渐减弱,空间应力状态随之变化。山前的花状或似花状构造样式代表了压扭或被动走滑环境的存在,这种盆内水平收缩和山前走滑抬升的构造特征说明了库车前陆冲断带的特殊性,基于这种构造特征,本文提出了走滑-冲断构造。剖面 $B-B'$ 与剖面 $A-A'$ 相比,关键差异在于盐上褶皱的规模和间距、盐下叠瓦冲断构造数量、断层冲断程度变化及垂向上构造叠加形式。剖面 $B-B'$ 中盐上层整体变形较弱,背斜规模明显减小,盐下层推覆强度也相对减弱。其中,盐下逆冲叠瓦构造的数量明显增多,但规模小于东部,且反冲构造基本不发育(图2b)。剖面 $C-C'$ 位于博孜段中部,北部发育高角度逆冲构造,基底逆冲强烈,向盆内逆冲叠瓦构造变形程度明显减弱。剖面 $E-E'$ 位于阿瓦特-博孜过渡段,发育典型楔形冲断叠瓦构造,构造垂向抬升显著。剖面 $F-F'$ 位于博孜-大北段,发育一定的走滑特征构造,如“Y”字形构造与似花状构造等,但走滑引起的地层变形规模较小,走滑作用相对较弱,东部整体在逆冲的基础上发育较大规模的似花状构造或多级“Y”字形构造,断层的一支向盆内延伸。

## 2.2 平面构造特征

根据三维地震资料解释及前人研究成果认为,研究区近SN向基底走滑断层与走滑调节构造发育<sup>[29-30]</sup>,断层走滑量呈现由西向东衰减的趋势,同排构造走滑量与逆冲推覆量具有相互转化的特点,断层或褶皱水平位移的减小伴随着垂向位移的增加(图3c,d)。阿瓦特段及博孜段西缘因基底古隆起遮挡作用构造变形空间有限,在近SN向构造挤压作用下发育阶梯状向北抬升的断褶系统。古隆起边缘发育的基底走滑断层导致大北段与博孜段的构造样式发生了较大转变<sup>[31]</sup>,大北段构造走向向北偏转,主断层间雁裂式断层组合减少,这反映了以挤压为主的应力环境。在南北方向上,研究区构造系统被多条NEE向断裂带划分为多个条形狭窄构造单元,由北向南逆冲幅度减弱。在构造挤压变形后期,褶皱前端逐渐稳定,构造变形转变为盖层逆冲滑脱,表现为断-褶系统前端断距小、后端断距大的特征。

博孜一大北地区从北向南依次发育山前高角度逆冲推覆构造、似花状构造或多级“Y”字形构造、断展褶皱和叠瓦构造等,同时伴有被动走滑改造特征,如花状

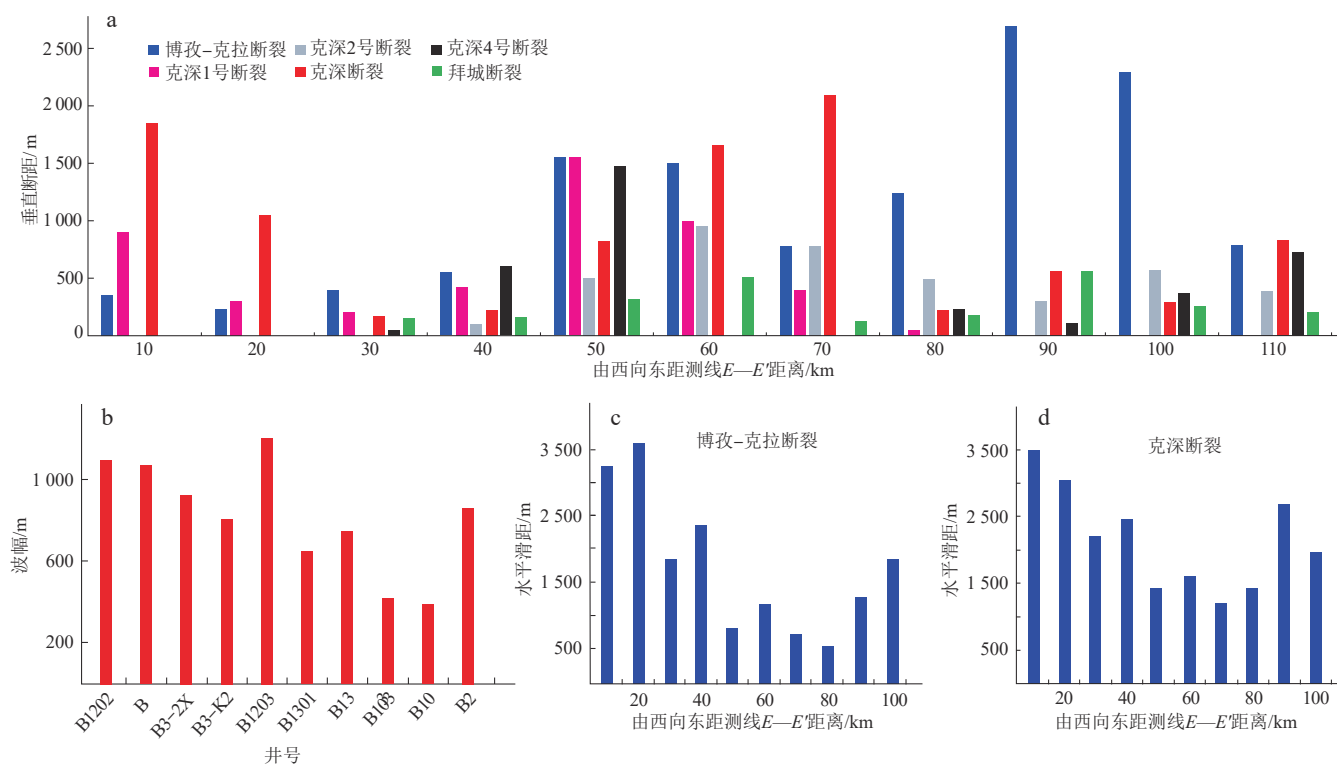


图3 博孜一大北地区断褶系统空间变化特征

Fig. 3 Spatial variation characteristics of fault-fold system in Bozi-Dabei area

- a. 博孜一大北地区断裂垂直断距空间变化特征; b. 博孜一大北地区各井位褶皱波幅特征; c. 博孜-克拉断裂水平滑距变化特征;  
d. 克深断裂水平滑距特征

或似花状构造、雁列褶皱等。库车坳陷及整个塔北地区平面断裂体系整体上呈现西端撒开、东端收敛的帚状特征(图1a),博孜一大北地区的地震水平切片也可识别出明显的帚状破碎区域,深部破碎带较窄,浅部破碎带相对较宽(图4a)。根据旋扭构造动力学理论,帚状断层是旋扭构造的基本样式,旋扭构造由两部分组成:一是旋扭的核心;二是围绕着核心的各种弧形褶皱和断层,称旋扭面(图4c)<sup>[32]</sup>。旋扭面在旋扭核心的动力机制带动下发生走滑,内旋面运动方向指示收敛方向,沿内旋面运动方向走滑作用减弱,旋扭面撒开度 $[\delta, (^{\circ})]$ 差异与旋扭面力学性质有关,旋扭构造类型也有所不同。撒开度小( $\delta \leq 30^{\circ}$ ),旋扭面多为单剪性质,易构成环状旋扭构造;撒开度大( $\delta > 90^{\circ}$ ),旋扭面多为张剪性,常构成辐射状旋扭构造;撒开度中等时( $45^{\circ} \leq \delta \leq 80^{\circ}$ ),旋扭面多为一般剪切或压剪性质。天山南缘断裂展布特征明显属于压性旋扭帚状构造样式,研究区地震切片帚状构造撒开度在 $30^{\circ}$ 左右,表现为典型的单剪(扭)旋扭构造体系。这种旋扭构造的发育,证明了挤压条件下研究区断层被动走滑,最大主应力方向与帚状构造体系近于垂直,越靠近帚状构造收敛区域最大主应力方向与走滑断层走向越近于平行(图4d),这种断层系统局部应力状态的变化,同时影

响着裂缝系统的发育。

### 3 走滑-冲断构造模式

新生代南北向构造挤压与造山运动过程中,博孜一大北地区受北部造山带阻挡的影响,构造变形空间受限,强烈的挤压作用导致产生了沿造山带走向近于平行的斜向挤压分量,这种斜向挤压与塔里木板块顺时针旋转导致NEE向断层被动走滑,地震剖面可见正花状构造,断层走滑机制与库车坳陷依南气田左行走滑断层发育的动力学机制相似<sup>[33]</sup>。

在持续的构造挤压与被动走滑过程中,研究区北缘断层持续向前陆逆冲推覆,形成了一系列的断弯褶皱、断展褶皱及相关的逆冲叠瓦构造等,组成库车坳陷的褶皱-冲断带。与此同时,逆冲断层在冲断推覆过程中受到斜向挤压作用,断层将沿着斜向挤压方向被动走滑,随之发育花状分支断层,形成类似“躺倒状”式花状构造,例如博孜段部分被改造的低角度逆冲断层。根据构造样式的差异,由北向南博孜一大北地区可划分为山前横向挤压强制走滑冲断带、挤压推覆褶皱带及扭动走滑构造带(图2a)。左旋走滑构造带南北界限分别为拜城断裂与克深4号断裂,该带逆冲变形较弱,

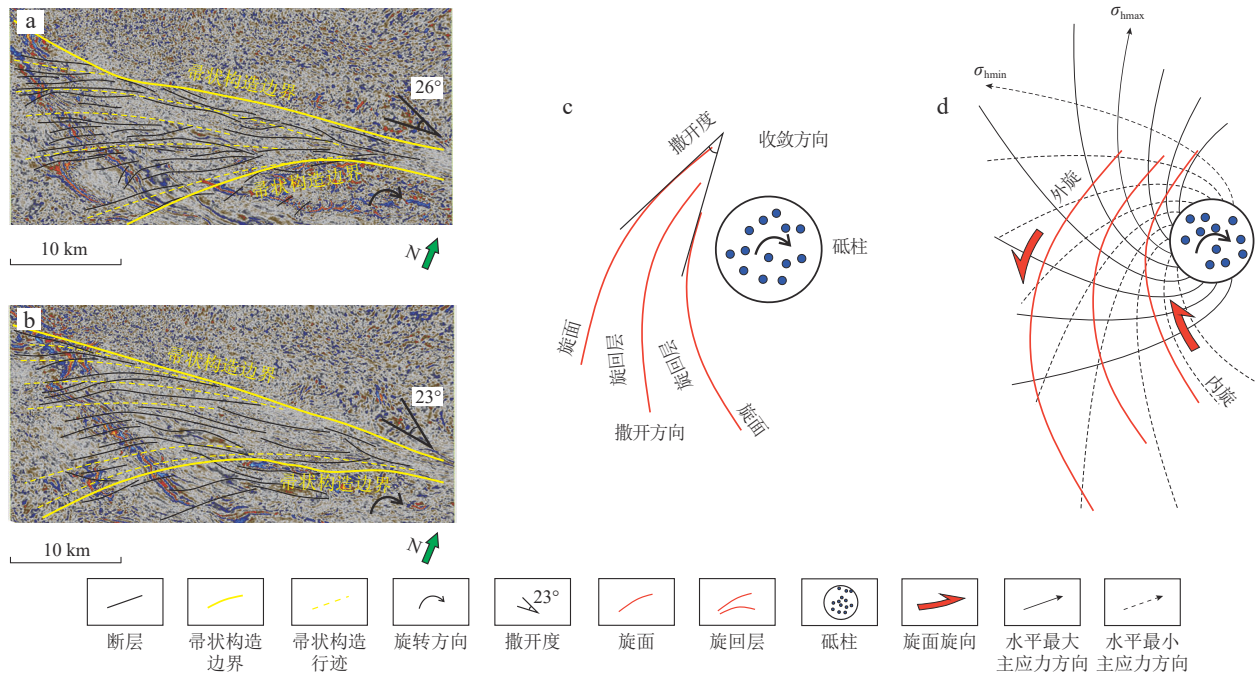


图4 博孜一大北地区深部帚状构造特征与压性旋扭构造模式

Fig. 4 Characteristics of deep broom-like structures and compressive rotational shear structure in Bozi-Dabei area

a. 海拔-6 500 m地震资料水平切片构造发育特征; b. 海拔-7 500 m地震资料水平切片构造发育特征; c. 压性旋扭构造特征(据李东旭2003,有修改);

d. 旋扭构造应力迹线(据李东旭2003,有修改)

( $\sigma_{\text{hmin}}$  为水平最小主应力;  $\sigma_{\text{hmax}}$  为水平最大主应力。)



断层规模小,剖面可见走滑特征。挤压推覆褶皱带南北界限为克深4号断裂与克深断裂,构造变形表现为多重推覆,逆冲叠瓦构造具有垂向叠置的特征。克深断裂以北为山前横向挤压强制走滑冲断带,博孜-克深断裂为该带走滑-冲断的主控断裂,断裂持续被动走滑上切新近系,发育挤压环境下的大规模似花状构造。

在持续冲断推覆的同时,研究区发育一系列与造山带近似垂直的走滑构造来调节不同部位的构造变形,多条近南北向河流发育、地层与地形的错断特征及地震剖面上正花状构造均指示了近SN向走滑断层的发育(图1a,图2b)<sup>[34]</sup>。另外,规模较大的走滑断层必然导致断层两侧构造发育突变式的差异,产生走滑与逆冲作用的转换,构造样式与断层断距的变化指示了这种转换规律(图3a)。例如,博孜段向大北段的过渡地区断层发育以小规模逆冲兼具走滑为特征,断层断距普遍较小(<500 m),博孜段西缘与大北段逆冲强烈<sup>[35]</sup>,发育大幅度冲起构造,断层断距普遍较大(>800 m),由此可将研究区划分为西部垂向剪切挤压走滑构造段、中部走滑调节构造段、东部挤压走滑冲断构造段(图2e, f)。垂向剪切挤压走滑构造段具体区域为阿瓦特段与博孜段西缘,主要发育呈阶梯状抬升的高角度逆冲断

层,古隆起边缘发育大规模基底走滑断层。中部挤压走滑构造段为博孜段向大北段过渡的大部分区域,多见走滑特征构造,如“Y”字形构造与似花状构造等,但整体规模较小。大北段为挤压走滑冲断构造段,冲断构造在南北方向上走滑特征显著,走滑断层的一支向盆内延伸,整体呈现规模较大的似花状构造或多级“Y”字形构造。

## 4 裂缝发育特征

根据钻井岩心裂缝识别和成像测井资料,白垩系储层以高角度剪切缝为主,裂面平坦,延伸距离长,开度较小(0.1~0.3 mm),少量小尺度缝被方解石或石膏充填。张性缝所占比例很小,通常缝面粗糙,延伸距离短,开度大(>2 mm),多数被方解石或石膏充填。在成像测井资料中,可见B301井5 939~5 941 m与5 955~5 958 m深度处发育两组几乎平行的裂缝,而在5 857~5 858 mm与5 927~5 929 m深度处发育网状裂缝(图5b)。在B1203井6 560~6 590 m深度处,可以看到一系列具有不同倾角的裂缝,且发育大量高角度缝,在6 566~6 572 m深度处,可以观察到由高角

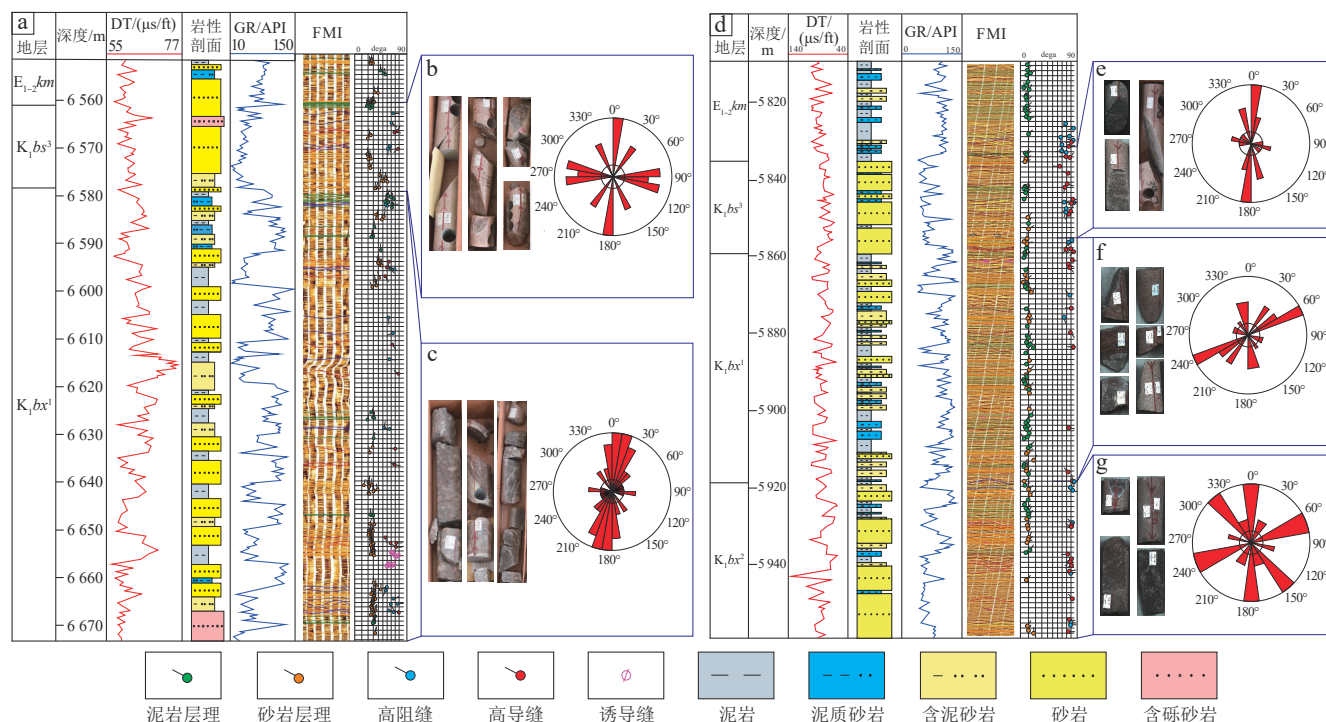


图5 博孜一大北地区单井裂缝及岩心特征

Fig. 5 Fracture and core characteristics of a single well in Bozi-Dabei area

a. B1203井裂缝参数与地质特征; b. B1203井巴什基奇克组三段岩心照片与裂缝走向玫瑰花图; c. B1203井巴西改组上段岩心照片与裂缝走向玫瑰花图; d. B301井裂缝参数与地质特征; e. B301井巴什基奇克组三段岩心照片与裂缝走向玫瑰花图; f. B301井巴西改组上段岩心照片与裂缝走向玫瑰花图; g. B301井巴西改组下段岩心照片与裂缝走向玫瑰花图

度裂缝和中-高角度裂缝组成的网状缝(图5a)。

根据研究区25口井裂缝统计分析表明,裂缝多为NNE-SSW与NNW-SSE向,EW与SN向次之。其中,博孜3与博孜12气藏位于博孜一大北地区西部垂向剪切挤压走滑构造段,各井裂缝密度普遍较高,主要发育NNE-SSW与NNW-SSE向裂缝。博孜3气藏位于克深断裂北部,主要发育NNW-SSE与NNE-SSW向裂缝,各井优势裂缝走向相近(B3-1X,B301,B302井),均为NNE-SSW向,仅B3井优势裂缝呈现共轭特征。博孜12气藏位于克深断裂南部,主要发育NE-SW与NW-SE向裂缝,NNW-SSE向裂缝次之,背斜东翼裂缝密度较高(B1203,B1201井),以NNW-SSE与NEE-SWW向裂缝为主,发育少量NNE-SSW向裂缝。博孜1与博孜2气藏位于博孜一大北地区中部挤压走滑段,断层被动走滑作用减弱,裂缝发育非均质性增强,优势裂缝走向不明显,各井区裂缝密度差异大,B10和B2井区裂缝几乎不发育,而B104井区裂缝发育密度较高。博孜1气藏东部优势裂缝为NNW-SSE向,西部井区优势裂缝呈现共轭特征(B102,B104井)。大北17与大北9气藏位于博孜一大北地区东部挤压走滑冲断构造段,两个气藏裂缝发育密度均较低,各气藏优势裂缝走向一致。大北17气藏位于克深断裂南部,主要发育NNE-SSW向裂缝,NE-SW向裂缝次之,各井裂缝发育特征

相似。大北9气藏位于克深断裂北部,仅发育NE-SW向裂缝,裂缝发育密度极低(表1)。从全区各井优势裂缝走向玫瑰花图可以看出,以克深断裂带为界,断裂带北侧研究区各井位优势裂缝走向普遍为近SN向,仅有个别井优势裂缝呈现近EW向。克深断裂带南侧研究区各井位优势裂缝走向无明显规律,近SN向、近EW向、NE-SW向与NW-SE向优势裂缝均有发育。

## 5 被动走滑对裂缝发育的控制作用

博孜一大北地区山前逆冲断层形成了独特的走滑-冲断构造系统,挤压应力环境下断层被动走滑,一组与断层走向近于平行、多组与断层走向斜交的剪切缝将会发育<sup>[16]</sup>,此种机制下白垩系储层发育了大量高角度剪切缝。通过分析断层与裂缝发育的力学机制、断层周缘裂缝参数等特征,深入讨论断层被动走滑与裂缝发育之间的内在联系。

### 5.1 不同区域裂缝参数差异

不同区域裂缝发育参数受断层被动走滑作用强度的直接影响,邻近断层的井有较高的裂缝密度,且裂缝走向与断层构造方位具有良好的一致性,以NW和NNW向为主,表明裂缝的发育与断层走滑活动具有时

表1 博孜一大北地区各井裂缝参数特征

Table 1 Fracture parameter characteristics of wells in Bozi-Dabei area

| 气藏   | 井号     | 构造部位      | 裂缝密度/(条/m) | 平均倾角/(°) | 优势走向             |
|------|--------|-----------|------------|----------|------------------|
| 博孜3  | B3     | 垂向剪切挤压走滑段 | 0.48       | 72.5     | NNE-SSW, NNW-SSE |
|      | B301   | 垂向剪切挤压走滑段 | 0.70       | 70.3     | NNE-SSW          |
|      | B302   | 垂向剪切挤压走滑段 | 0.59       | 65.4     | NNE-SSW          |
|      | B3-1X  | 垂向剪切挤压走滑段 | 0.70       | 66.5     | NNE-SSW          |
|      | B3-3X  | 垂向剪切挤压走滑段 | 0.27       | 81.2     | NNE-SSW          |
| 博孜12 | B12    | 垂向剪切挤压走滑段 | 0.52       | 69.9     | NW-SE, NNE-SSW   |
|      | B1201  | 垂向剪切挤压走滑段 | 0.96       | 75.6     | NW-SE            |
|      | B1202  | 垂向剪切挤压走滑段 | 0.65       | 65.1     | NNW-SEE          |
|      | B1203  | 垂向剪切挤压走滑段 | 1.07       | 69.6     | NNE-SSW          |
| 博孜1  | B101   | 走滑调节段     | 0.19       | 80.6     | NNW-SSE          |
|      | B101-2 | 走滑调节段     | 0.36       | 82.8     | NEE-SWW          |
|      | B102   | 走滑调节段     | 0.37       | 65.7     | SN, NEE-SWW      |
|      | B104   | 走滑调节段     | 0.75       | 70.8     | NNE-SSW, NNW-SSE |
|      | B105   | 走滑调节段     | 0.39       | 66.4     | NNW-SSE          |
| 大北17 | D17    | 挤压走滑冲断段   | 0.13       | 58.1     | NEE-SWW          |
|      | D1701X | 挤压走滑冲断段   | 0.09       | 64.3     | NEE-SWW          |
| 大北9  | D9     | 挤压走滑冲断段   | 0.25       | 65.9     | NE-SW            |
|      | D902   | 挤压走滑冲断段   | 0.15       | 64.8     | NE-SW            |
|      | D903   | 挤压走滑冲断段   | 0.14       | 64.7     | NE-SW            |



空上的一致性,断层持续走滑的同时发育了诸多高角度剪切缝。例如博孜12气藏中,B1201井区位于克深断裂带边缘,普遍发育高角度剪切缝,倾角多大于 $70^\circ$ ,密度为0.96条/m,优势走向裂缝与断裂带近于平行,均为NW-SE向。就整个区域而言,平面上相同优势走向裂缝沿主要大型断裂带呈条带状分布,多条断层联合控制的区域连续密集发育构造缝。如克深断裂与博孜-克拉断裂的联合控制下,博孜3与博孜12气藏各井位裂缝密度普遍较高。而位于博孜一大北地区中部及东部地区,断层被动走滑作用减弱(图3c),博孜1、大北9及大北17气藏各井裂缝密度普遍偏低,仅B104井靠近克深断裂带,裂缝密度达到0.75条/m(表1)。

## 5.2 断层扰动应力场与裂缝参数耦合

博孜一大北地区断层冲断的程度是有限的,当应力条件与变形空间无法满足断层持续冲断时,断层活动将转变为被动走滑,同时在区域应力作用下形成断层扰动应力场,这与挤压导致的旋扭应力场具有相似的扰动机制。不同于单纯的断层、褶皱作用引起的地层变形对裂缝发育的控制作用,被动走滑与主要造缝期古应力场的相互作用下,储层裂缝的发育与断层活

动导致的扰动应力场之间存在因果关系,断层两侧的裂缝走向显示了断层扰动应力场最大主应力方向的偏转特征<sup>[36]</sup>。距断层位置不同,裂缝发育程度也不同,裂缝发育优势方位显示出一定的分带性,随着裂缝发育区域远离断层,本文将裂缝发育带划分为单一走向裂缝带、无序共轭剪切裂缝带和简单剪切共轭裂缝带(图6a)。

克深断裂被动走滑同时控制着博孜3及博孜12气藏,结合单井共轭缝走向将应力方向投影到平面上,可见在靠近断层核部的一定范围内的狭窄带状区域内,最大主应力方向与断层走向夹角较小( $<10^\circ$ ),裂缝发育的优势走向与断层产状及持续的被动走滑密切相关。在这种应力状态及断层走滑的影响下,沿断层两侧的狭窄范围内密集发育近似于P破裂的与断层走向相近的剪切缝,构成了断层控制下单一走向裂缝带,裂缝继续扩展可发展为与主断层同向走滑的次级小断层,此区域裂缝密度及井产能均较高,例如B1203井与B1201井(图6b)。随着裂缝发育区远离断层,在相对较宽的范围内为无序共轭剪切裂缝带,断层走滑方位对裂缝发育的控制作用减弱,裂缝发育的主控因素转变为断层效应导致的复杂扰动应力场。受

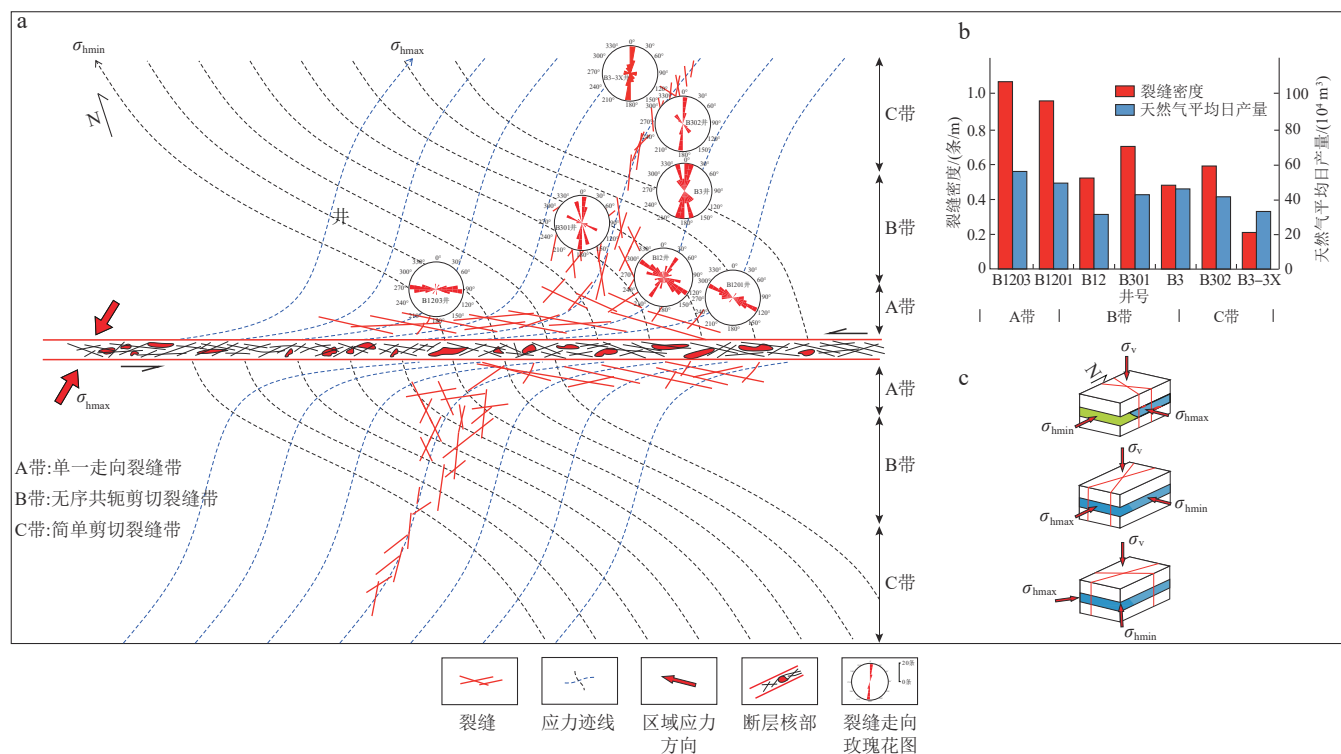


图6 断层扰动应力场对裂缝参数的控制作用

Fig. 6 Control effect of fault disturbance stress field on fracture parameters in Bozi-Dabei area

a. 断层扰动应力场与断层两侧裂缝发育分带特征; b. 断层两侧各井裂缝发育及产能特征; c. 三种应力状态特征

( $\sigma_{\text{hmin}}$  为水平最小主应力;  $\sigma_{\text{hmax}}$  为水平最大主应力;  $\sigma_v$  为垂向主应力。)

断层扰动应力场的影响,不同部位的最大主应力方向不同,越靠近断层的区域,与断层走向夹角越小,应力偏转区间大约为 $20^{\circ}$ (图6c)。在这种扰动应力场作用下,岩石破裂发育多组共轭剪切缝,部分裂缝走向与单一走向裂缝带近于垂直,但裂缝发育密度降低,但多组共轭剪切缝形成的高效裂缝输导网络使单井仍具有可观的产能特征,例如B12, B301与B3井。在距离断层更远的区域为简单剪切共轭裂缝带,地层破裂主要诱因转变为区域应力场,断层扰动应力场成为次要因素,最大主应力方向与区域应力场偏差小于 $5^{\circ}$ ,断层效应仅导致少量裂缝走向发生扰动,主要发育区域应力场控制下的一组共轭剪切裂缝或共轭剪切裂缝的一支,裂缝发育密度与井产能进一步降低。

### 5.3 储层物性差异

岩心铸体薄片观察表明,位于博孜段西部的大型基底走滑构造带的B301井区储层岩石碎屑颗粒以不等粒粗砂为主,不同粒度的砂岩不均匀混杂分布,碎屑颗粒以点-线接触为主。岩石中见少量剩余原生粒间

孔、粒间溶孔与粒内溶孔,方解石、钠长石胶结物以及硬石膏呈弱溶蚀特征。孔隙多呈孤立状散布,孔隙连续性较差,微裂缝断续分布,缝宽 $0.02 \sim 0.05 \text{ mm}$ ,平均面孔率为 $3.6\%$ (图7a,b)。博孜一大北地区中部的B101-2井区受南北向走滑调节断层影响,储层岩石碎屑为稳定性高的硅质岩、石英岩、石英砂岩和火山灰凝灰岩等,碎屑颗粒呈点-线接触,岩石胶结致密,薄片内可见数条方解石充填的构造缝,缝内可见微裂缝,缝宽 $0.01 \sim 0.03 \text{ mm}$ ,平均面孔率仅为 $0.1\%$ (图7c,d)。BZ103JS井位于博孜段中部,储层岩石碎屑以砾石为主,砾石内偶见溶孔,微裂缝沿砾石边缘贯穿砾石延伸,砾石内见由硬石膏半充填的微裂缝,缝宽 $0.01 \sim 0.12 \text{ mm}$ ,平均面孔率为 $1.3\%$ (图7e,f)。

对非常规深层油气藏而言,裂缝发育可明显改善储层物性特征,极大程度地影响着井产能。博孜一大北地区储层埋深普遍大于 $4500 \text{ m}$ ,上覆地层压力和成岩作用使储层极为致密,孔渗性极差。又因为储层上覆膏岩层形成的大量成矿流体存在,延伸较短、开度较大,缝面粗糙的张性缝常被方解石和白云石等矿物充填,有效性变差。而被动走滑构造控制下普遍发育的

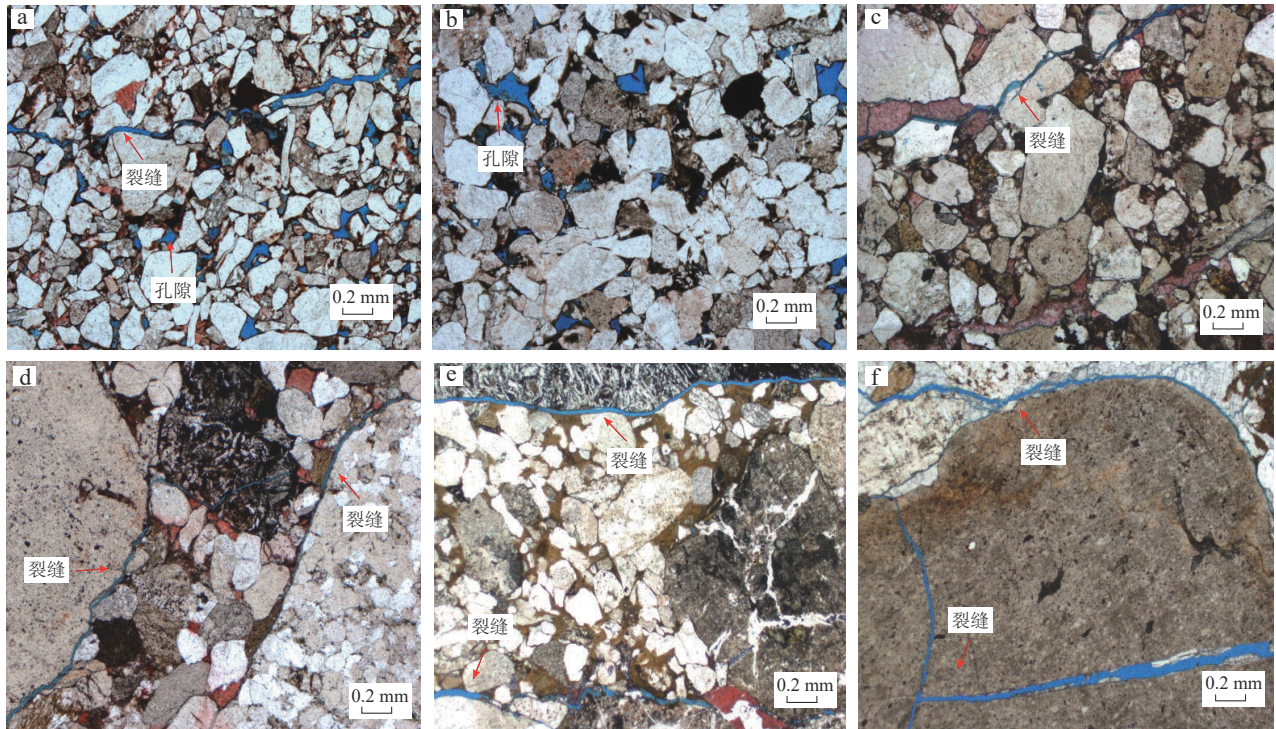


图7 博孜一大北地区储层岩石铸体薄片显微照片

Fig. 7 Images of casting thin sections of reservoir rocks in Bozi-Dabei area

a. B301井,埋深5838.82 m,不等粒砂状结构,剩余原生粒间孔、微裂缝发育,面孔率 $2.3\%$ ;b. B301井,埋深5836.85 m,粗-中粒砂状结构,原生粒间孔、粒间溶孔,面孔率 $4.2\%$ ;c. B101-2井,埋深7076.10 m,岩石胶结致密,孔隙性能差,方解石充填的构造缝内见微裂缝,面孔率 $0.1\%$ ;d. B101-2井,埋深7076.50 m,砂砾状结构,砾缘微裂缝发育,面孔率 $0.1\%$ ;e. B103JS井,埋深7399.16 m,岩石致密,孔隙度低,微裂缝沿砾石边缘发育,面孔率 $1.0\%$ ;f. B103JS井,埋深7399.16 m,岩石致密,孔隙度低,微裂缝沿砾石边缘发育,面孔率 $1.5\%$



高角度剪切裂缝普遍为有效缝,裂缝延伸远、开度小、缝面光滑,不易被矿物充填。断层被动走滑作用较强的区域,储层渗透率明显偏高,同时有效缝的发育可将储层渗透率提高1~4个数量级,走滑作用控制下发育的裂缝网络将成为储层高效的油气输导体系,在良好的油气地质配套条件下,博孜一大北地区气井具备了高储、高产的特征(表2)。

## 6 被动走滑构造对井产能的影响

整体来看,研究区天然气日产量大于 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的井均位于断层附近,且越靠近断层带单井裂缝密度及产能越高,尤其是博孜-大北地区西部的博孜12与博孜3气藏(图6b)。断层被动走滑作用下,普遍发育的裂缝系统使博孜12和博孜3气藏产能较高,单井平均日产量普遍大于 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,如B3-1X, B3, B301, B1201, B1202和B1203井(图8)。研究区西部大型断裂带被动走滑作用较强, B1203井裂缝发育线密度为1.07条/m,该井段的31个储层样品的平均渗透率为 $0.198 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均孔隙度为8.52%,单井平均日产气量高达 $55.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。B1201井6 518~6 538 m深度段的巴什基奇克组储层,裂缝发育密度高达0.96条/m,该井段的20个储层样品的平均渗透率为 $0.0657 \times$

$10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均孔隙度为6.97%,单井平均日产气量可达 $48.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。研究区中部断层被动走滑作用减弱,博孜1气藏单井产能明显较低,如B102和B101井平均天然气日产量均低于 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ , B1JS和B101-2井受南北向走滑调节构造的影响,平均天然气日产量达到 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,而靠近克深断裂边缘的B104井裂缝密度为0.75条/m,平均天然气日产量高达 $49.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。位于研究区东部断层被动走滑作用进一步减弱,构造变形以南北向的冲断为主,大北17和大北9气藏裂缝密度明显较低,但大型逆冲断层间密集发育的小断层代替裂缝成为了储层的高效输导系统,使D17和D9井裂缝发育密度均小于0.3条/m的条件下,仍具有较可观的天然气日产量。

可见,断层活动对博孜一大北地区单井产能具有重要作用,断层走滑作用下发育密集裂缝带,改善储层物性,进而影响着单井产能。在断层冲断和被动走滑的联合控制作用下,博孜12和博孜3气藏具有明显的高裂缝密度、高有效孔隙度、高产能的特征。随着断裂带被动走滑作用的减弱,博孜1气藏裂缝密度与井产能明显降低,大北9与大北17气藏在大型挤压冲断构造控制下,断层南北向走滑上切至新生代地层,密集发育的断层系统使气藏成藏位置较好的个别井具有较好的产能特征。

表2 博孜一大北地区储层岩石渗透率特征

Table 2 Permeability characteristics of reservoir rocks in Bozi-Dabei area

| 样品编号 | 井号     | 埋深/m     | 层位      | 构造部位      | 岩性    | 渗透率/( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) |
|------|--------|----------|---------|-----------|-------|---------------------------------|
| 1    | D903   | 5 178.20 | $K_1bs$ | 挤压走滑冲断段   | 细砂岩   | $*4.42 \times 10^2$             |
| 2    | D903   | 5 182.70 | $K_1bs$ | 挤压走滑冲断段   | 细砂岩   | $3.28 \times 10^{-2}$           |
| 3    | D17    | 6 104.59 | $K_1bs$ | 挤压走滑冲断段   | 细砂岩   | $3.07 \times 10^{-2}$           |
| 4    | D17    | 6 154.42 | $K_1bs$ | 挤压走滑冲断段   | 细砂岩   | $1.64 \times 10^{-1}$           |
| 5    | B1203  | 6 562.38 | $K_1bs$ | 垂向剪切挤压走滑段 | 细砂岩   | $1.09 \times 10^{-1}$           |
| 6    | B1203  | 6 566.56 | $K_1bs$ | 垂向剪切挤压走滑段 | 中砂岩   | $1.11 \times 10^{-1}$           |
| 7    | B1203  | 6 568.92 | $K_1bs$ | 垂向剪切挤压走滑段 | 粗砂岩   | $1.13 \times 10^0$              |
| 8    | B302   | 6 185.82 | $K_1bx$ | 垂向剪切挤压走滑段 | 细砂岩   | $1.10 \times 10^0$              |
| 9    | B302   | 6 186.94 | $K_1bx$ | 垂向剪切挤压走滑段 | 细砂岩   | $1.08 \times 10^1$              |
| 10   | B3     | 5 978.81 | $K_1bs$ | 垂向剪切挤压走滑段 | 中砂岩   | $7.08 \times 10^{-2}$           |
| 11   | B3     | 5 981.43 | $K_1bs$ | 垂向剪切挤压走滑段 | 中砂岩   | $6.15 \times 10^{-1}$           |
| 12   | B104   | 6 796.60 | $K_1bs$ | 走滑调节段     | 中砂岩   | $1.28 \times 10^{-2}$           |
| 13   | B104   | 6 796.70 | $K_1bs$ | 走滑调节段     | 中砂岩   | $6.82 \times 10^0$              |
| 14   | B103JS | 7 404.10 | $K_1bx$ | 走滑调节段     | 含砾细砂岩 | $5.14 \times 10^{-2}$           |
| 15   | B103JS | 7 404.50 | $K_1bx$ | 走滑调节段     | 细砾岩   | $*1.60 \times 10^4$             |
| 16   | B12    | 6 906.90 | $K_1bs$ | 垂向剪切挤压走滑段 | 粉砂岩   | $1.32 \times 10^{-2}$           |
| 17   | B12    | 6 908.33 | $K_1bs$ | 垂向剪切挤压走滑段 | 粉砂岩   | $2.44 \times 10^0$              |

注:\*表示测试岩样发育裂缝。





- 布特征及其成因——以塔里木盆地库车前陆冲断带克深气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 338-353.
- WANG Ke, ZHANG Ronghu, WANG Junpeng, et al. Distribution and origin of tectonic fractures in ultra-deep tight sandstone reservoirs: A case study of Keshen Gas Field, Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 338-353.
- [3] 张荣虎, 刘春, 杨海军, 等. 库车坳陷白垩系超深层储集层特征与勘探潜力[J]. 新疆石油地质, 2016, 37(4): 423-429.
- ZHANG Ronghu, LIU Chun, YANG Haijun, et al. Characteristics and exploration potential of ultra-deep Cretaceous reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(4): 423-429.
- [4] 周露, 莫涛, 王振鸿, 等. 塔里木盆地克深气田超深层致密砂岩储层裂缝分级分组合特征[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(11): 1668-1677.
- ZHOU Lu, MO Tao, WANG Zhenhong, et al. Classification and combination characteristics of fractures in super-deep tight sandstone reservoir of Keshen Gasfield in Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(11): 1668-1677.
- [5] 王义天, 李继亮. 走滑断层作用的相关构造[J]. 地质科技情报, 1999, 18(3): 30-34.
- WANG Yitian, LI Jiliang. Fault-related tectonics of the strike-slip faulting[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 1999, 18(3): 30-34.
- [6] 徐嘉伟. 论走滑断层作用的几个主要问题[J]. 地学前缘, 1995, 2(1/2): 125-136.
- XU Jiawei. Some major problems on strike-slip faulting[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(1/2): 125-136.
- [7] 刘和甫, 夏义平, 殷进垠, 等. 走滑造山带与盆地耦合机制[J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 121-132.
- LIU Hefu, XIA Yiping, YIN Jinyin, et al. Coupling mechanism of strike-slip orogen and basin[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(3): 121-132.
- [8] SYLVESTER A G. Strike-slip faults[J]. GSA Bulletin, 1988, 100(11): 1666-1703.
- [9] 肖坤泽, 童亨茂. 走滑断层研究进展及启示[J]. 地质力学学报, 2020, 26(2): 151-166.
- XIAO Kunze, TONG Hengmao. Progress on strike-slip fault research and its significance[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(2): 151-166.
- [10] 童亨茂, 范彩伟, 童传新, 等. 琼东南盆地宝岛变换带的特征、类型及其成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 897-905.
- TONG Hengmao, FAN Caiwei, TONG Chuanxin, et al. Characteristics, types and genetic mechanism of Baodao transfer zone, Qiongdongnan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 897-905.
- [11] MORLEY C K, NELSON R A, PATTON T L, et al. Transfer zones in the East African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(8): 1234-1253.
- [12] 能源, 李勇, 谢会文, 等. 库车前陆盆地盐下冲断带构造变换特征[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(1): 54-60.
- NENG Yuan, LI Yong, XIE Huiwen, et al. Tectonic transformation characteristics of subsalt thrust belts in Kuqa foreland basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(1): 54-60.
- [13] 代春萌, 曾庆才, 郭晓龙, 等. 塔里木盆地库车坳陷克深气田构造特征及其对气藏的控制作用[J]. 天然气勘探与开发, 2017, 40(1): 17-22, 51.
- DAI Chunmeng, ZENG Qingcai, GUO Xiaolong, et al. Structural characteristics of Keshen Gasfield in Kuqa Depression of Tarim Basin and their controlling effects on gas reservoirs[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2017, 40(1): 17-22, 51.
- [14] 赵俊猛, 张培震, 张先康, 等. 中国西部壳幔结构与动力学过程及其对资源环境的制约: “羚羊计划”研究进展[J]. 地学前缘, 2021, 28(5): 230-259.
- ZHAO Junmeng, ZHANG Peizhen, ZHANG Xiankang, et al. Crust-mantle structure and geodynamic processes in western China and their constraints on resources and environment: Research progress of the ANTILOPE project[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(5): 230-259.
- [15] 李四光. 地质力学的方法与实践: 第一篇-地质力学概论[M]. 北京: 地质力学研究所, 1965.
- LI Siguang. Methods and practice of geomechanics: Chapter 1-introduction to geomechanics [M]. Beijing: Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, 1965.
- [16] 吴晓智, 李佰华, 吕修祥, 等. 库车前陆盆地走滑断裂形成机理及其对油气的控制[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(2): 118-121.
- WU Xiaozhi, LI Baihua, LYU Xiuxiang, et al. Strike-Slip fault system in Kuqa foreland basin and its control on hydrocarbon[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(2): 118-121.
- [17] KIM Y S, PEACOCK D C P, SANDERSON D J. Mesoscale strike-slip faults and damage zones at Marsalforn, Gozo Island, Malta[J]. Journal of Structural Geology, 2003, 25(5): 793-812.
- [18] MCGRATH A G, DAVISON I. Damage zone geometry around fault tips[J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17(7): 1011-1024.
- [19] 孙永河, 万军, 付晓飞, 等. 贝尔凹陷断裂演化特征及其对潜山裂缝的控制[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(3): 316-322.
- SUN Yonghe, WAN Jun, FU Xiaofei, et al. Evolutionary of faults and their control on fractures in buried hill in Beier Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(3): 316-322.
- [20] 谢会文, 李勇, 漆家福, 等. 库车坳陷中部构造分层差异变形特征和构造演化[J]. 现代地质, 2012, 26(4): 682-690.
- XIE Huiwen, LI Yong, QI Jiafu, et al. Differential structural deformation and tectonic evolution in the middle part of Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Geoscience, 2012, 26(4): 682-690.
- [21] WANG Wei, YIN Hongwei, JIA Dong, et al. Along-strike structural variation in a salt-influenced fold and thrust belt: Analysis of the Kuqa Depression [J]. Tectonophysics, 2020,

- 786: 228456.
- [22] 徐振平, 李勇, 马玉杰, 等. 库车坳陷中部新生代构造形成机制与演化[J]. 新疆地质, 2011, 29(1): 37-42.
- XU Zhenping, LI Yong, MA Yujie, et al. The Cenozoic structure formation mechanism and evolution of Mid-Kuche Depression[J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(1): 37-42.
- [23] 张荣虎, 魏国齐, 王珂, 等. 前陆冲断带构造逆冲推覆作用与岩石响应特征——以库车坳陷东部中-下侏罗统为例[J]. 岩石学报, 2021, 37(7): 2256-2270.
- ZHANG Ronghu, WEI Guoqi, WANG Ke, et al. Tectonic thrust nappe activity and sandstone rock response characteristics in foreland thrust belt: A case study of Middle and Lower Jurassic, Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(7): 2256-2270.
- [24] 吴珍云, 杨秀磊, 尹宏伟, 等. 库车坳陷西段阿瓦特构造转换带盐构造演化特征及影响因素[J]. 地球科学, 2023, 48(4): 1271-1287.
- WU Zhenyun, YANG Xiulei, YIN Hongwei, et al. Characteristics and influencing factors of salt structure evolution in awate transfer zone, western Kuqa Depression [J]. Earth Science, 2023, 48(4): 1271-1287.
- [25] 易士威, 李明鹏, 范士芝, 等. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏和东秋断层上盘勘探突破方向[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 309-324.
- YI Shiwei, LI Mingpeng, FAN Tuzhi, et al. Exploration directions on the Kelasu and East-Qiulitag fault hanging walls, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 309-324.
- [26] 刘立炜, 周慧, 张承泽, 等. 库车坳陷克拉苏构造带协同变形机制及盆山耦合关系[J]. 地质科学, 2022, 57(1): 61-72.
- LIU Liwei, ZHOU Hui, ZHANG Chengze, et al. Synergistic deformation mechanisms and basin-mountain coupling of Kelasu structural belt in Kuqa Depression [J]. Chinese Journal of Geology, 2022, 57(1): 61-72.
- [27] 漆家福, 雷刚林, 李明刚, 等. 库车坳陷-南天山盆山过渡带的收缩构造变形模式[J]. 地学前缘, 2009, 16(3): 120-128.
- QI Jiafu, LEI Ganglin, LI Minggang, et al. A model of contractional structure for transition belt between Kuche Depression and southern Tianshan uplift [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(3): 120-128.
- [28] 王伟锋, 王乾, 单新建. 库车前陆冲断带横断层发育特征及其形成机制[J]. 中国地质, 2018, 45(3): 493-510.
- WANG Weifeng, WANG Qian, SHAN Xinjian. Development characteristics and formation mechanism of transverse faults along the Kuqa thrust belt [J]. Geology in China, 2018, 45(3): 493-510.
- [29] 杨克基, 漆家福, 刘傲然, 等. 库车坳陷中段基底断裂特征及其对盐构造变形的影响[J]. 地质科学, 2022, 57(4): 991-1008.
- YANG Keji, QI Jiafu, LIU Aoran, et al. Characteristics of basement faults in the middle section of Kuqa Depression and their influence on salt tectonic deformation [J]. Chinese Journal of Geology, 2022, 57(4): 991-1008.
- [30] 李涛, 王宗秀. 塔里木地块北部横向构造及断条模式[J]. 中国地质, 2006, 33(1): 14-27.
- LI Tao, WANG Zongxiu. Transverse structure and model of fault slivers in the northern part of the Tarim block [J]. Geology in China, 2006, 33(1): 14-27.
- [31] 汤良杰, 余一欣, 杨文静, 等. 库车坳陷古隆起与盐构造特征及控油气作用[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 145-150.
- TANG Liangjie, YU Yixin, YANG Wenjing, et al. Paleo-uplifts and salt structures and their influence on hydrocarbon accumulations in the Kuqa Depression[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 145-150.
- [32] 李东旭. 旋扭构造动力学[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 9-35.
- LI Dongxu. Torsion tectonic dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 9-35.
- [33] 何光玉, 卢华复, 李树新, 等. 库车盆地依南气田构造变形特征及动力学机制[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(2): 247-252.
- HE Guangyu, LU Huaifu, LI Shuxin, et al. Features and dynamics for structure deformation of Yinan Gas Field in Kuqa Basin, northwestern China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2004, 40(2): 247-252.
- [34] NENG Yuan, XIE Huiwen, YIN Hongwei, et al. Effect of basement structure and salt tectonics on deformation styles along strike: An example from the Kuqa fold-thrust belt, West China [J]. Tectonophysics, 2018, 730: 114-131.
- [35] 冯佳睿, 高志勇, 张宇航, 等. 库车坳陷大北克深井区白垩系储层含盐特征与分布规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(1): 38-54.
- FENG Jiarui, GAO Zhiyong, ZHANG Yuhang, et al. Salt-bearing characteristics and distribution of Cretaceous reservoirs of the Dabei and Keshen areas in the Kuqa Depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(1): 38-54.
- [36] 谭卓英, 夏志远, 丁宇, 等. 深部岩体地应力场分异特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S2): 3330-3337.
- TAN Zhuoying, XIA Zhiyuan, DING Yu, et al. Differentiation characteristics of insitu stress in deep rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S2): 3330-3337.

(编辑 张玉银)