

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.110>



# 塔里木盆地塔北地区深层走滑断裂分段性成因机制

冯建伟<sup>1</sup>, 郭宏辉<sup>1\*</sup>, 汪如军<sup>2</sup>, 昌伦杰<sup>2</sup>, 王超<sup>2</sup>, 高翔<sup>1</sup>

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2. 中石油塔里木油田公司, 新疆库尔勒 841000

**摘要:** 塔北地区深层走滑断裂带的分段性特征解析是研究断裂带控储控藏的关键问题, 对推动深层油气勘探开发具有重要意义。从哈拉哈塘断裂带发育特征与地震资料解释成果相融合的角度出发, 通过精细刻画哈 15 走滑断裂带结构及构造样式, 讨论塔北哈拉哈塘地区哈 15 断裂带的分段性特征。在明确了塔北地区断裂带走滑运动特征和应力状态的基础上, 以库伦-安德森纯剪模型和里德尔单剪模型为框架, 根据断裂带局部应力状态, 结合格里菲斯和库伦-莫尔等岩石破裂准则合理解释了深层走滑断裂次级 R' 剪破裂和 T 张破裂有序发育的成因机理。最终根据哈 15 断裂带的构造解析, 建立了被动走滑构造环境下的汇聚型走滑断层及派生构造发育典型模型。区域挤压应力衰减以及三向应力状态的转变是走滑断裂分段性的主要原因, 沿挤压应力方向可划分为压扭区、扭动区和张扭区, 可细分为线性紧闭断层组合带、直线型辫状构造带、对称羽状断层带、伸展/挤压叠覆带或斜向拉分地块以及马尾状断层组合带等。

**关键词:** 塔北地区; 走滑断裂分段性; 应力衰减; 岩石破裂准则; 地质力学。

中图分类号: P551

文章编号: 1000-2383(2023)07-2506-14

收稿日期: 2021-11-29

## Segmentation Genesis Mechanism of Strike-Slip Fracture of Deep Carbonate Rocks in Tabei Area, Tarim Basin

Feng Jianwei<sup>1</sup>, Guo Honghui<sup>1\*</sup>, Wang Rujun<sup>2</sup>, Chang Lunjie<sup>2</sup>, Wang Chao<sup>2</sup>, Gao Xiang<sup>1</sup>

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Tarim Oilfield, PetroChina, Korla 841000, China

**Abstract:** The segmental characteristics of the deep strike-slip fault zone in the Tarim Basin are the key issues in the study of fault zone reservoir control, which is of great significance for promoting deep oil and gas exploration and development. From the perspective of the integration of the development characteristics of the Harahatang fault zone and the results of seismic data interpretation, in this study it discusses the segmentation characteristics of the Ha-15 fault zone in the Harahatang area of Tabei by carefully characterizing the structure and structural style of the Harahatang fault zone. On the basis of clarification of characteristics and stress state of the strike-slip motion of the fault zone in the north of the tower, the causal mechanism of the orderly development of secondary R' shear fracture and T-tensile fracture of deep strike-slip fracture is reasonably explained by taking the Coulomb-Anderson pure shear model and the Riddle single shear model as the framework, and combining the rock fracture criteria of Griffith and Coulomb-Moir. Finally, according to the structural analysis of the Harb-15 fault zone, a typical model of convergent strike-slip fault and derived tectonic development in the passive strike-slip tectonic environment is established. It is believed that

基金项目: 中石油重大科技项目(No. ZD2019-183-006).

作者简介: 冯建伟(1979—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为构造地质学、构造应力场等. ORCID: 0009-0003-2039-8407. E-mail: linqu\_fengjw@126.com

\* 通讯作者: 郭宏辉, E-mail: guohonghui\_0326@126.com

引用格式: 冯建伟, 郭宏辉, 汪如军, 昌伦杰, 王超, 高翔, 2023. 塔里木盆地塔北地区深层走滑断裂分段性成因机制. 地球科学, 48(7): 2506—2519.

**Citation:** Feng Jianwei, Guo Honghui, Wang Rujun, Chang Lunjie, Wang Chao, Gao Xiang, 2023. Genesis Mechanism of Strike-Slip Fracture of Deep Carbonate Rocks in Tabei Area, Tarim Basin. *Earth Science*, 48(7): 2506—2519.

the attenuation of regional extrusion stress and the change of three-way stress state are the main reasons for the segmentation of strike-slip fractures, which can be divided into compression torsion zone, torsion zone and tensile torsion zone along the direction of extrusion stress, and can be subdivided into linear tight closure fault combination zone, linear braided structural zone, symmetrical plume fault zone, stretch/extrusion laminate zone or oblique tensile division plot and horsetail fault combination zone.

**Key words:** Tabei area; strike-slip segmentation; stress attenuation; rock fracture guideline; geomechanics.

## 0 引言

塔里木盆地油气藏资源丰富,截止目前,塔北、塔中已成为塔里木盆地两大勘探开发主战场,已开发哈拉哈塘、轮古、塔中I号等7个富油气区块,2019年油气产量达到 $375 \times 10^4$  t,占塔北-塔中地区油气产量的50%(汪泽成等,2013;汪如军等,2021).近年来,在塔北深层储层中发现一系列走滑断裂体系,大量学者对其构造样式、演化规律、控藏规律等进行了深入讨论,这些走滑断裂不仅垂向上连通储层,同时其伴生或派生构造缝极大地提高了储层物性特征(鲁新便等,2015;吕海涛等,2017;邱华标等,2017;李兵等,2019;郑晓丽等,2019).郑晓丽等(2018)、邬光辉等(2021)通过对哈拉哈塘地区走滑断裂分段特征的构造解析,从里德尔剪切模式与局部应力场的角度对研究区走滑断裂的分段性形成机制进行了分析,认为受挤压应力控制的断阶带,平面呈现羽状构造的储层裂缝最发育,主干断裂交汇处裂缝发育尤为显著,研究多侧重于构造的发育样式及形成序次,并未过多探讨力学层面.焦方正(2017)、兰明杰等(2017)根据断层的垂向活动及发育模式将走滑断裂派生构造分为走滑、拉分、压隆3种类型,认为负花-拉分段储层油气更为富集.可见,目前对塔北地区深层走滑断裂的研究多集中在断裂分段性几何学特征,对走滑断裂分段性的主要控制因素或构造样式差异性的机理研究尚少.

然而,随着塔北油气田由勘探阶段逐步转入评价、开发阶段,深层走滑断裂的分段性解析及控储控藏作用成为制约油气藏评价与高效井点优选的关键问题.塔北地区深层走滑断裂的研究依然面临诸多难点,受加里东期、海西期、印支-燕山期和喜山期构造活动的影响,地层遭受多期抬升暴露剥蚀,断裂继承性发育且相互切割叠加.本次研究充分利用哈拉哈塘地震资料解释成果,结合实验测试数据分析塔北地区深层走滑断裂分段性特征及形

成机制,以里德尔剪切模式和安德森断层成因模式为纽带,应用于走滑断裂带的分段性成因机制解释中,构建合理的断裂发育模式,推动塔北深层走滑断裂带控储控藏作用研究,加快深层油气藏的高效勘探开发进程以及优选高效井点.

## 1 地质概况

哈拉哈塘地区位于塔里木盆地北部塔北隆起中部,北接轮台凸起,南接满加尔坳陷,东抵轮南低凸起,西邻英买力低凸起(图1b).哈拉哈塘地区发育震旦系至泥盆系海相沉积、石炭系至二叠系海陆交互相沉积和中新生界陆相沉积.奥陶系自上而下可细分为上统桑塔木组、上统良里塔格组、上统吐木休克组、中统一间房组、中下统鹰山组和下统蓬莱坝组(图1c).其中,一间房组、鹰山组1段上部是目前发现的主要含油层系,均为岩溶型储层.桑塔木组、良里塔格组、吐木休克组整体由南向北依次剥蚀尖灭,最北部志留系柯坪塔格组覆盖于奥陶系一间房组潜山之上.塔北地区主要经历了早加里东古隆起雏形期、中晚加里东-早海西古隆起形成期、晚海西-印支期“断-隆”发育阶段和燕山-喜马拉雅调整定型期4个主要构造演化阶段(贾承造和魏国齐,2002;丁文龙等,2012).受多期构造运动的影响,哈拉哈塘地区主要发育了3套断裂体系:中-晚加里东期压扭走滑断裂、晚海西期张扭走滑断裂和燕山-早喜山期雁列式分布的张扭走滑断裂.其中,燕山-早喜山期走滑断裂发育于三叠系-古近系,晚海西张扭走滑断裂发育于志留系-二叠系,中-晚加里东期走滑断裂主要发育于寒武系-奥陶系.中-晚加里东运动期间,哈拉哈塘地区在东南方向挤压应力和塔北隆起的共同作用下形成了近南北向挤压应力场,发育NW向和NE向“X”型大型走滑断裂体系,甚至纵向断穿了寒武系至二叠系,横向平面延伸距离达72 km,对该区油气成藏具有重要的控制作用(朱光有等,2011; Han *et al.*, 2017).

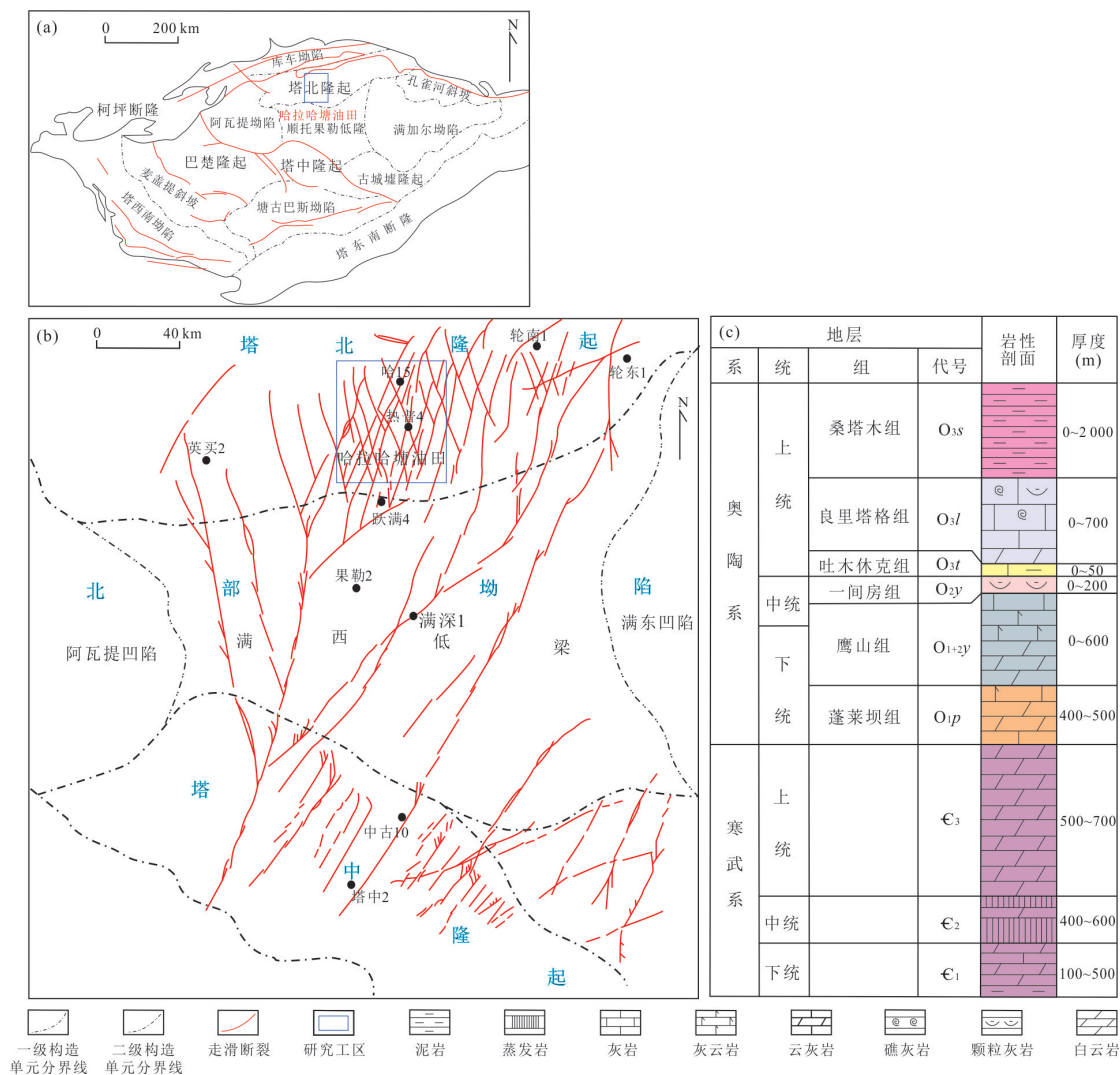


图 1 哈拉哈塘与塔北地区区域地质概况

Fig. 1 Geological survey of Harahatang area and Tabei area

a. 塔里木盆地构造单元划分; b. 塔北-塔中地区区域构造图; c. 哈拉哈塘地区典型地层柱状图

## 2 哈拉哈塘地区走滑断裂带特征分析

目前,对于断裂的解释主要采用相干属性法,作为一种估算波形相似度的方法,能有效突出相邻地震道的不连续性.哈拉哈塘地区走滑断裂的构造活动弱、断距小、走滑近,地震品质低,道间不连续信息被噪声压制严重,平面上走滑断裂特征不清楚.为了凸显相邻地震道之间的不连续性,采用广义希尔伯特变换地质异常体边界检测方法(李红星等,2015),消除背景噪声,提高小断裂的刻画精度,最终获得了更为清晰的中奥陶统一间房组顶断裂系统图(图2).

哈拉哈塘地区的走滑断裂体系主要呈北西、北

东走向,且平面上呈“X”型组合,北东向断裂为左旋走滑、北西向为右旋走滑,断裂系统在地震相干图上的痕迹由北部隆起向盆内逐渐变弱(图2a).这些走滑断裂向下断穿基底,向上断至石炭系底部,纵向上可识别出寒武系-奥陶系正花状构造样式和志留系-石炭系负花状构造样式两类,表明该走滑断裂至少经历2期走滑活动,即中-晚加里东期的压扭活动和晚海西期的张扭活动,以中-晚加里东期大型走滑断裂为主(李国会等,2021).地震资料显示,“X”型断层组合中单条主干断层不同位置的次级构造样式差异较大,表现出明显的分段性.以北东走向的哈15断裂带为例,整条主断裂带长超过80 km,由北往南划分为北段、中段和南段.北段断裂带总体上连续性好,与北西向断裂组成密集的“X”型.中



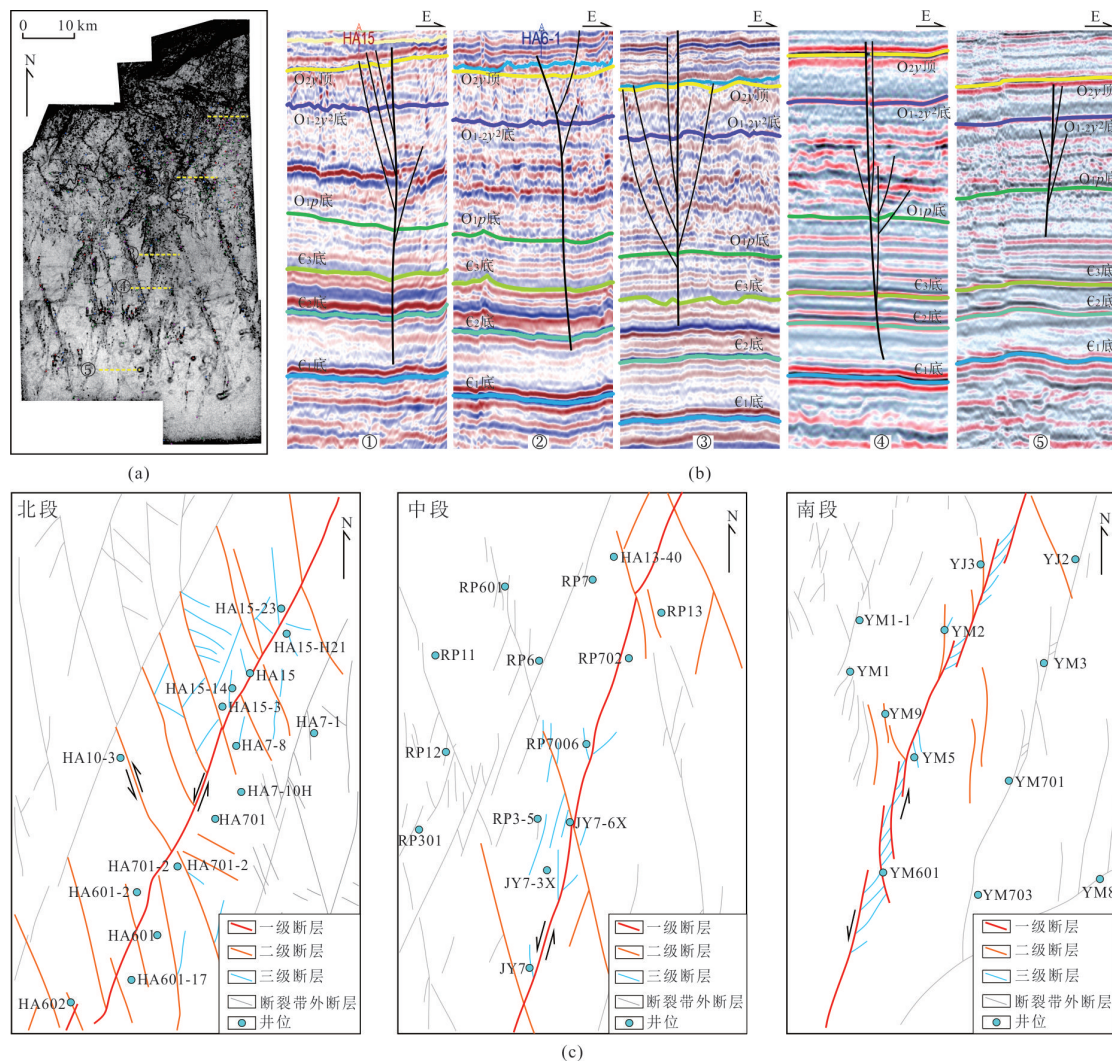


图 2 哈拉哈塘地区一间房组顶断裂平面图

Fig.2 Fault plan of Upper Yijianfang Formation in Harahatang area

a. 广义希尔伯特变换边界检测结果; b. 哈 15 井断裂不同段的地震剖面图; c. 哈 15 井断裂不同段的断层组合平面图

段主断裂连续性好,羽状次级断裂发育,总体上“X”型组合断裂密度低。南段断裂整体上不连续,表现为斜列叠覆型,主体由右行右阶的断层叠覆而成,北西向和北东向断裂痕迹不清。北段可进一步划分为 3 段,即北一段、北二段和北三段,其中北一段的主干断裂表现为线性压扭特征,次级分支断裂呈雁列式分布在主断裂两边,剖面上为半正花状构造样式(图 2b①)。北二段表现为典型的直线型辫状构造样式,由冲起构造和地堑组合而成,走滑海豚效应明显,沿走向断层倾向发生变化,剖面上为两条断层夹持的局部隆升或下掉断块,整体呈现为正花状和负花状构造相伴生(图 2b②)。北三段主体为 3 条断层组成的左行左阶叠覆段,第 2 条断层有一定弯曲,叠覆段内部表现为两种形式:一种是两条斜列

断层由单一的大角度斜交断层连接,称之为挤压型叠覆段,位于 HA601-2 井附近,表现为地层的小幅隆升;一种称之为拉张型叠覆段,位于哈 602 井附近,以拉张作用为主,一般形成张性断层、小型地堑等构造,地貌上表现为局部沉陷(图 2c 北段)。

根据平面和剖面显示特征,哈 15 一间房组顶面断裂段中段可划分为中一段和中二段,两者的差异主要体现在断裂带的宽度和旁侧分支断层样式上。中一段表现为斜列叠覆段,是北三段向南的延伸部分,平面上断层呈线性延伸,旁侧次级断层不发育,只在局部地区与北西向走滑断层相交,剖面上表现为近直立单一断层或半花状构造。中二段表现为羽状断层带(图 2c 中段、图 2b③),断层两盘相对位移的摩阻作用导致断层面两侧局部应力场发生改变,

强大的摩阻力使两盘岩石产生新的羽状排列的张性缝和剪裂缝,甚至出现低序次的分支断层,整体上主干断层两侧的张性缝和剪裂缝呈羽状或扇形对称排列.此类羽状断层带在剖面上表现为复合型花状构造,即一侧为正花状压扭型、一侧为负花状张扭型.这种羽状构造在中二段向北逐渐过渡为不对称的雁列式,剖面上为张扭性半花状构造.哈 15 断裂带南段整体上表现为斜列叠覆段,属于右行右阶拉张叠覆型,整体以拉张作用为主,常形成张性断层、小型地堑等,地貌上表现为局部下掉或沉降(贾承造等,2021).南段的北部与南部有差异,北部西侧出现了一系列里德尔剪切模式中的 R' 次级剪破裂,南部的斜列断层则呈现出马尾状,显示断层即将终止(图 2c 南段).具体来看,北部叠覆段处发育一系列与走滑断层 R 大角度斜交的 P 剪切断层,内部地层破裂较为严重,为局部应力集中的结果,剖面上则表现为两条高角度断层平行发育,两侧为展开的 R' 次级剪破裂(图 2b④).通常认为走滑断裂带宽度越小,紧密程度越大代表压扭作用更强烈,受影响的围岩更加破碎;此段离塔北力源位置相对远,根据地震反映的地层结构较为完整及走滑断裂带更浅推断此段的剪应力已经占据了主导地位,更利于线性走滑断层的产生.南部的叠覆段相对于北部具有弧形特征,4 条 R 断层呈马尾状依次向东南方向撒开,代表了走滑断裂带即将终止的方向.南部的叠覆段内与北部十分相似,也表现为一系列与走滑断层 R 大角度斜交的 P 剪切断层,地层破碎更为严重且下掉或沉降形成小型地堑,剖面上表现为浅层负花状构造(图 2b⑤).总体上南段的断裂带宽度较北段和中段窄,说明断裂带发育的尾端应力强度不断减弱.

### 3 深层走滑断裂带分段性模式及成因机制

截至目前,针对走滑断裂的力学成因机制模型主要有两种,一种为纯剪模型,又称库伦-安德森模型(Anderson, 1905);另一种为单剪模型,又称里德尔剪切模型(Riedel, 1929).共轭断裂大多用库伦-安德森模式解释,在均匀应力作用下形成,与最大主应力方向呈  $45^\circ - \varphi/2$  ( $\varphi$  为岩石内摩擦角),一般为  $25^\circ \sim 30^\circ$ .单剪机制产生一系列不同类型的剪切走滑断层,其中 Riedel 剪切模型是目前广泛接受和应用的单剪模式;在 20 世纪初,里德尔通过物理模

拟发现走滑断裂在形成演化的过程中,变形盖层中并非只发育单一的线性走滑断层,而是依次发育了大量次级派生构造(Riedel, 1929).按照派生构造的发育顺序依次为雁列式 R 剪切破裂、R 末端分支断层 R' 剪切或 T 张剪性破裂、P 剪切破裂、PDZ 主走滑带(Sibson, 1977; 童亨茂等, 2014; 杨率等, 2022).综合分析认为,塔北哈拉哈塘油田奥陶系走滑断裂体系整体走向为北东、北西向,即纯剪机制下发育的共轭走滑断层组合,因此可以将纯剪和单剪机制模型有机结合起来进行哈拉哈塘地区走滑断裂系统成因机制的探讨.

#### 3.1 哈拉哈塘地区古应力场特征

根据地震解释结果并参考前人研究成果,认为塔北-塔中大规模走滑断裂形成的时间为晚奥陶世,且塔北走滑断裂形成时间略晚于塔中地区,即中晚加里东期.基于构造形迹法,塔北地区共轭裂缝和共轭断层的夹角平分线指向 NNE-SSW 或近 SN 方向,即中晚加里东期的最大古应力方向.杨率等(2022)利用方解石脉体的 U-Pb 测年限定了塔北地区走滑断裂活动时间为距今约 460 Ma 的中奥陶世末期,杨毅等(2021)利用方解石脉中原生盐水包裹体最小均一温度确定了三期方解石脉形成时间分别为 445 Ma、430~428 Ma、418 Ma,与特提斯洋的大规模俯冲至 428 Ma 的时间段相当.

由于哈拉哈塘地区基底构造相对平缓、先存构造不发育、岩石物理性质均一,根据安德森模式,共轭走滑断裂形成的应力状态为  $\sigma_1$ (水平)  $>$   $\sigma_2$ (竖直)  $>$   $\sigma_3$ (水平).根据一些学者的测试结果,塔北-塔中地区中奥陶世末的最大古应力平均值为 169.3 MPa(王喜双等, 1997; 曾联波和王贵文, 2005; 丁文龙等, 2010); 丁原辰等(1996)、汤良杰和贾承造(2007)的测试结果显示塔北地区加里东期的最大古应力值为 130.9 MPa、135.5 MPa.结合徐国强等(2005)恢复得到塔北地区鹰山组 and 一间房组在加里东中晚期的古埋深为 3 500~4 000 m,考虑地层欠压实的影响,取地层平均密度为 2.6 g/cm<sup>3</sup>,计算出垂向重力应力值范围为 90~102 MPa.由此可见,如果不考虑东西向的最小古应力,加里东中晚期垂向古应力值明显低于水平构造运动引起的主应力值,符合安德森走滑断层应力状态条件.在挤压盆地中挤压应力在传播过程中衰减很快,塔北尤其是哈拉哈塘地区的走滑断裂带自北向南的发育显然显现出了这种特征,南端以撒开的马尾构造样式终



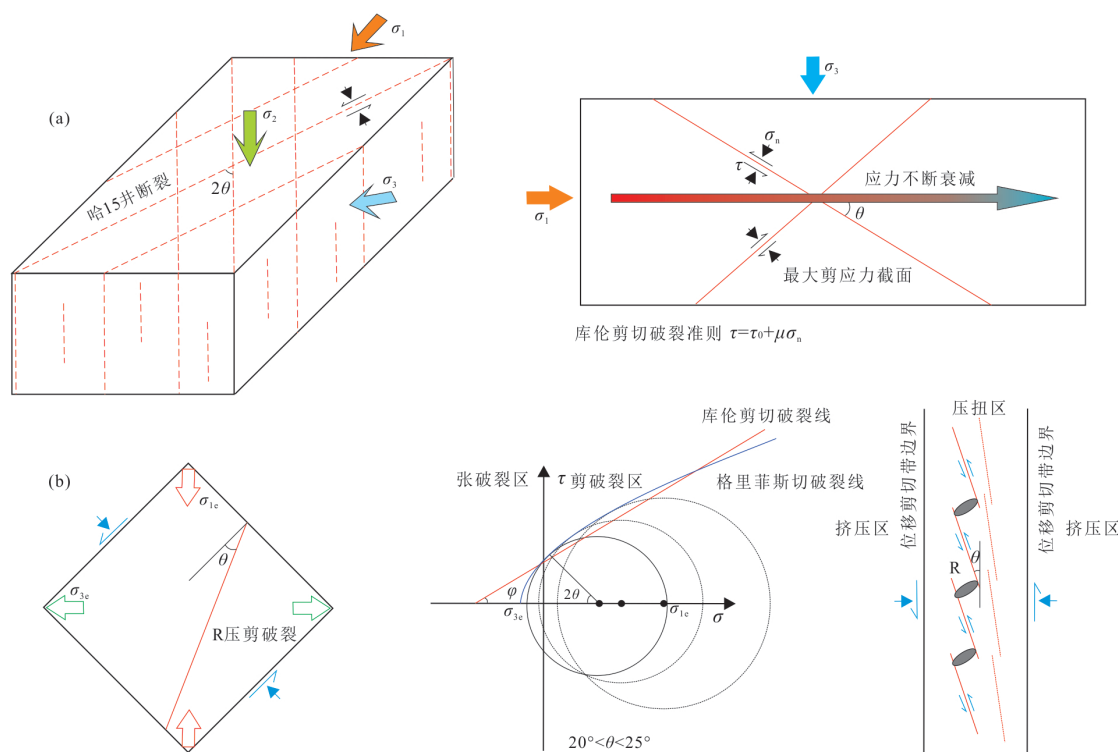


图3 衰减应力环境下汇聚型走滑断层及派生构造形成机制解析图

Fig.3 Analysis of the formation mechanism of convergent strike-slip faults and derivative structures under attenuated stress environment

a. 哈拉哈塘地区奥陶系共轭走滑断裂初始成因机制; b. 压扭性走滑断裂带R断层形成机制

止,且构造行迹不连续,代表断裂和应力作用自北向南传递;指示了塔北地区自北向南的挤压应力减弱,这种沿着断裂走滑方向应力的衰减影响着走滑断裂分段性的构造样式。

### 3.2 走滑断裂分段性成因机制

**3.2.1 纯剪模型下的走滑断裂分段机制** 相比于滑移距达几十千米至几百千米的大型走滑断裂,塔北哈拉哈塘地区深层走滑断裂滑移距小,仅有几百米至几千米,发育在稳定克拉通内部,因此将其称为陆内小位移走滑断裂(图3a)。安德森走滑断层应力状态下完全可以产生近直立的共轭剪切缝(Allen and Allen, 2005),这些剪切缝中的大尺度缝长度可达200 m以上,甚至500 m。随着中奥陶世末开始的多期次构造运动逐渐加强,这些初始大尺度共轭缝开始继承性活动,相互之间发生位移量干扰和制约,相邻断层开始延伸连接,并派生出一系列次级构造。

如图3a所示,正向挤压构造环境下形成的初始近直立共轭断裂或大裂缝,破裂面上不仅存在明显的剪应力作用,还存在正应力,两者都与正向挤压力密切相关。也就是说哈拉哈塘地区走滑断裂的形

成环境并非是理论意义上纯粹的走滑或主动走滑环境,而是一种被动走滑应力环境。因此,其断裂样式的发育既遵循纯剪模型,又与单剪里德尔模型十分相似。根据构造地质学理论,在单向挤压构造作用下剪裂面与最大主应力轴之间的夹角 $\theta$ 为 $45^\circ$ ,与岩石破裂实验及野外地质露头观察到的角度 $20^\circ \sim 25^\circ$ 不一致(An and Sammis, 1996; 张艳萍等, 2016; 许顺山等, 2017)。主要原因是潜在破裂面上的剪应力 $\tau$ 受正应力 $\sigma$ 的反向摩擦力 $\Delta\tau$ 影响,达不到理论最大剪应力极限,从而满足了另一应力平衡条件: $\tau = \tau_0 + \Delta\tau = \tau_0 + \mu\sigma = \tau_0 + \sigma\tan\varphi$ ,式中 $\mu$ 为岩石泊松比, $\varphi$ 为岩石的内摩擦角, $\tau_0$ 为岩石的内聚力。此平衡条件与由力学实验得到的直线型库伦剪切破裂线相吻合。根据莫尔圆分析可以得到实际的岩石共轭剪切破裂角 $\theta = 90^\circ - 2\varphi$ ,其值始终小于 $90^\circ$ ,而且岩石的脆性越强剪裂角越小。哈拉哈塘地区奥陶系地层中的共轭断层夹角在 $35^\circ \sim 45^\circ$ 范围内(黄少英等, 2021),说明了中晚加里东大规模走滑运动期间地层已经显示出了很好的脆性和弹性力学特征。

**3.2.2 单剪模型下的走滑断裂分段机制** 以哈15

断裂带力学分析为例,破裂面所承受的应力状态称之为压扭应力,相当于里德尔剪切模型中叠加了一个正向应力,但断层及派生断层仍为走滑性质.根据里德尔剪切模型和众多走滑物理模拟实验可知,在走滑构造形成的初始阶段总会先形成一系列雁列式 R 破裂,与主走滑带或主位移带成  $45^\circ - \varphi/2$  的夹角,且同一盘的滑向与主滑动面滑向一致(图 4b).由于水平应力差是控制断裂的平面产状及其规模稳定性的主要因素,在应力莫尔圆中(图 4b), $\sigma_{1e}$  为等效后的水平最大主应力, $\sigma_{3e}$  为等效后的水平最小主应力,破裂面上正应力( $\sigma_1$  的应力分量)的存在使得等效后的  $\sigma_{1e}$  和  $\sigma_{3e}$  均大于单剪应力莫尔圆中的等效挤压、拉张应力值,从而莫尔圆右移.根据库伦剪切破裂线与莫尔圆的特征,在压剪性破裂区  $2\theta$  为共轭剪破裂之间的夹角.同时,破裂面上正应力的存在使得 R 剪切破裂的排列方式产生了差异,可呈现松散雁列型和紧闭雁列型,前者与主走滑带的夹角大于后者.这在图 2c 中有很好的体现,如哈 15 断裂带的北段发育一系列紧闭雁列型 R 断层,与主走滑带的夹角为  $5^\circ \sim 15^\circ$ ;而南段发育一系列松散雁列型 R 断层,与主走滑带的夹角为  $20^\circ \sim 25^\circ$ .由前述可知,走滑破裂面上的附加正应力越大,压扭环境下 R 断层与主走滑带的夹角越小,反之,张扭环境下其夹角越大,这与应力场传播过程中的应力衰减现象关系密切;也就是说在走滑断裂带的末梢正向压应力已经变得很弱,更容易产生松散型的雁列式 R 断层组合.

随着走滑位移的持续增加和一系列构造样式的产生,主走滑断裂带的构造分带性更加明显,如两侧为挤压区、中心为压扭区,由此带动了中心压扭区发育密集的叶理构造.此处的叶理主要指在较强烈的走滑变形作用下,由于岩性的差异、矿物颗粒的面状优选方位引起岩石局部滑动的岩石物理性质的不连续面和易裂面,包括似层理、劈理和片理等.在大量叶理发育的条件下,首先会导致先存 R 等断层的产状发生一定的旋转,从而与主滑动面的夹角增大(图 5b).其次,根据裂缝性岩体莫尔圆,此时的先存断层和叶理面上承受的最大应力值会有所下降,相应的剪切破裂线也会相应下移.由力学分析可知,与最大主应力夹角处在  $\theta_1 \sim \theta_2$  范围内的先存断层和叶理显得不稳定,会发生继承性活动形成 P 破裂,与早期的 R 破裂交织呈菱形断块.又根据应力莫尔圆分析可知,在  $\theta_1 \sim \theta_2$  范围内产生的断层

既可能是剪破裂,也可能是张破裂.因此,菱形断块如果孤立出现即是里德尔剪切模型中所谓的分离侧接盆地样式,如果联合出现则是直线型辫状构造样式(图 5b 中绿色线为正断层),也就是说汇聚型走滑断层的伴生构造中基本不发育线性垒堑断块构造.根据里德尔剪切模型的描述,R 剪切破裂产生后造成局部应力场的重新分配,在断层重叠处,由于断盘的相向或反向运动产生了限制区或释放区并派生出一系列的 P 剪切破裂,且破裂与主滑动面交角  $\theta$  较小,与 R 剪裂面倾向相反、但滑向一致.

随着走滑位移的持续增加和大规模叶理的发育,地层应变变量已经接近岩石的抗剪强度极限,此时压扭带的中心位置会发生早期破裂的贯通并形成主走滑带 PDZ.沿着走滑断裂带方向,挤压应力和剪应力持续衰减,直到其强度不足以使岩石破裂为止,此处的等效应力  $\sigma_{1e}$  的衰减速率远大于  $\sigma_{3e}$ ,且两者的绝对值逐渐相近,即莫尔圆的圆心向坐标原点移动(Ahlgren, 2001).此种应力条件下,莫尔圆虽然大幅度缩小,但超过了节理性岩体破裂线的位置,使得整个地层中的先存断层和叶理变得不稳定(谢和平等, 2005;侯泉林等, 2018),尤其在走滑带前缘或末梢位置的叶理发生了向外滑动,形成了撒开的马尾状断层组合.在靠近力源附近,由于强烈的压扭作用,主走滑带位移量明显大于其他段,宽度小且呈紧闭状态,早期的 R、R'、P 破裂被大规模的位移剪切作用改造得面目全非.由此可以看出,走滑断裂带剪切应力环境下,即使不考虑岩性差异、基底构造和断裂产状变化也会发生明显的分段,这与实际中的应力场的衰减现象密不可分.

#### 4 汇聚型走滑断层及派生构造发育模型的实际应用

本次采用的走滑断裂带成因机制模型,适用于衰减型压扭或被动扭动/走滑环境,融合了里德尔单剪模型和格里菲斯准则、库伦-莫尔剪切准则,可以更好地从力学机制上对哈 15 断裂带的分段性进行合理解释(图 6).理论上,里德尔剪切是沿着与单一剪切的相对运动方向呈低角度( $10^\circ \sim 30^\circ$ )收敛的一系列剪切面或滑动面,呈现典型的雁行排列特征.里德尔剪切模型建立在纯走滑断层的基础上,断面上没有考虑附加压应力的影响;而我国广泛发育的叠合型盆地经历了多期的构造作用,尤其是西部挤压盆地内尽管存在着大量的走滑断裂,但这些断裂

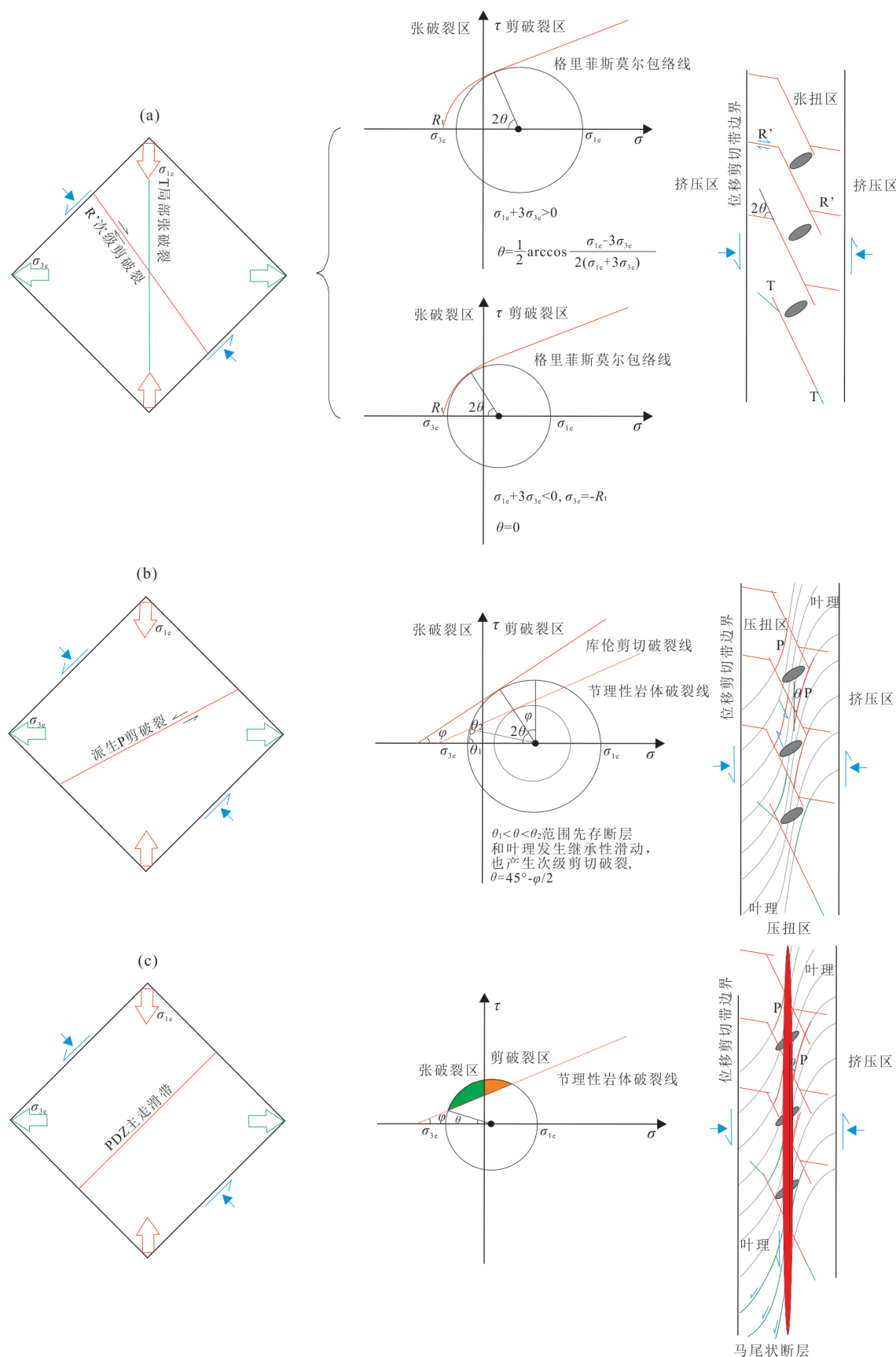


图 4 汇聚型走滑断层及派生构造发育的力学机制

Fig. 4 Mechanical mechanism of convergent strike-slip faults and derived structural development

a. 压扭性走滑断裂带 R' 和 T 断层形成机制; b. 压扭性走滑断裂带 P 断层形成机制; c. 压扭性走滑断裂带 PDZ 主走滑带形成机制



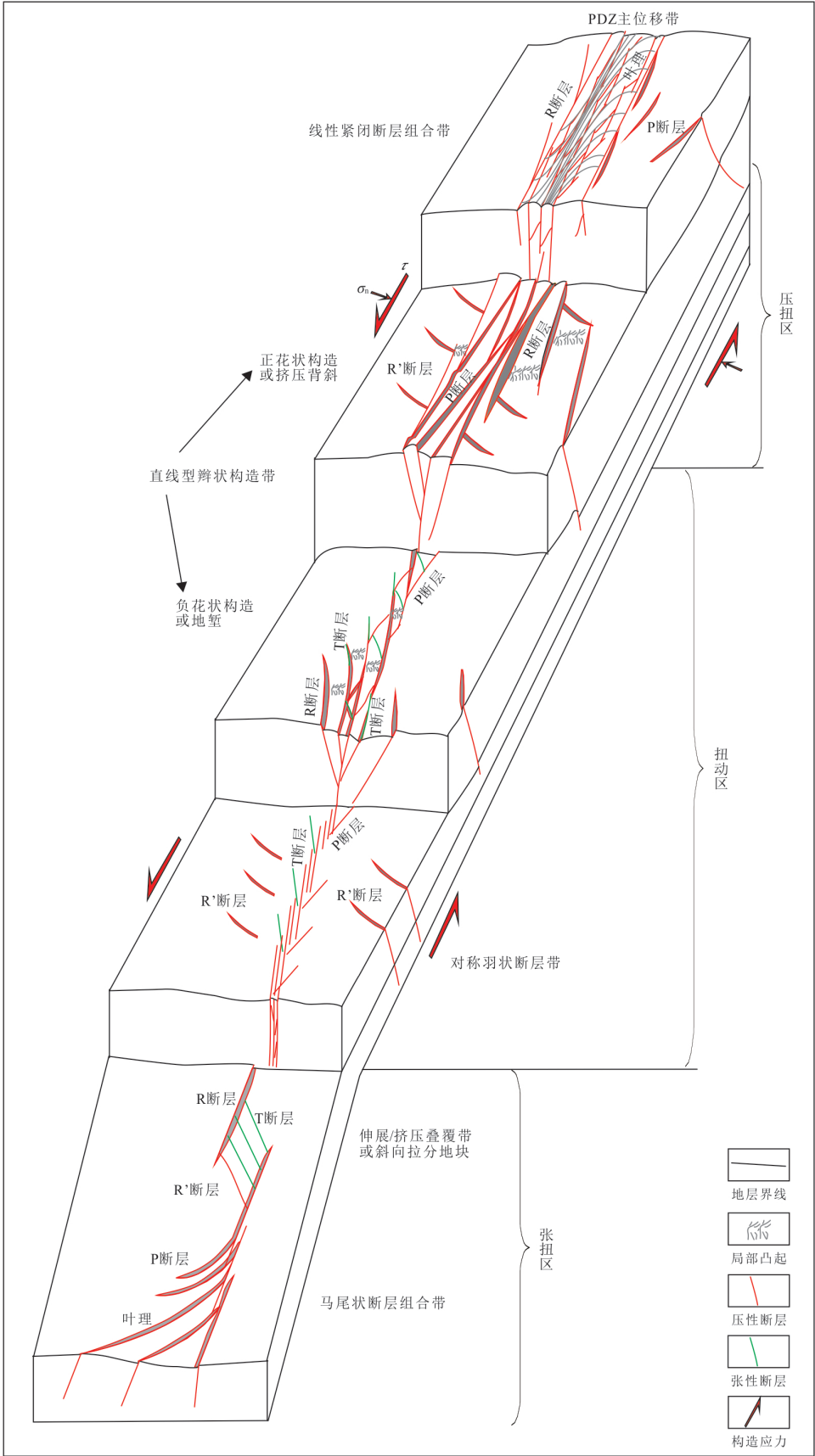


图 5 汇聚型走滑断层及派生构造发育典型模型

Fig. 5 Typical model of convergent strike-slip fault and derived structure development

图中分层显示是为了构造样式的直观性,不具有深度概念

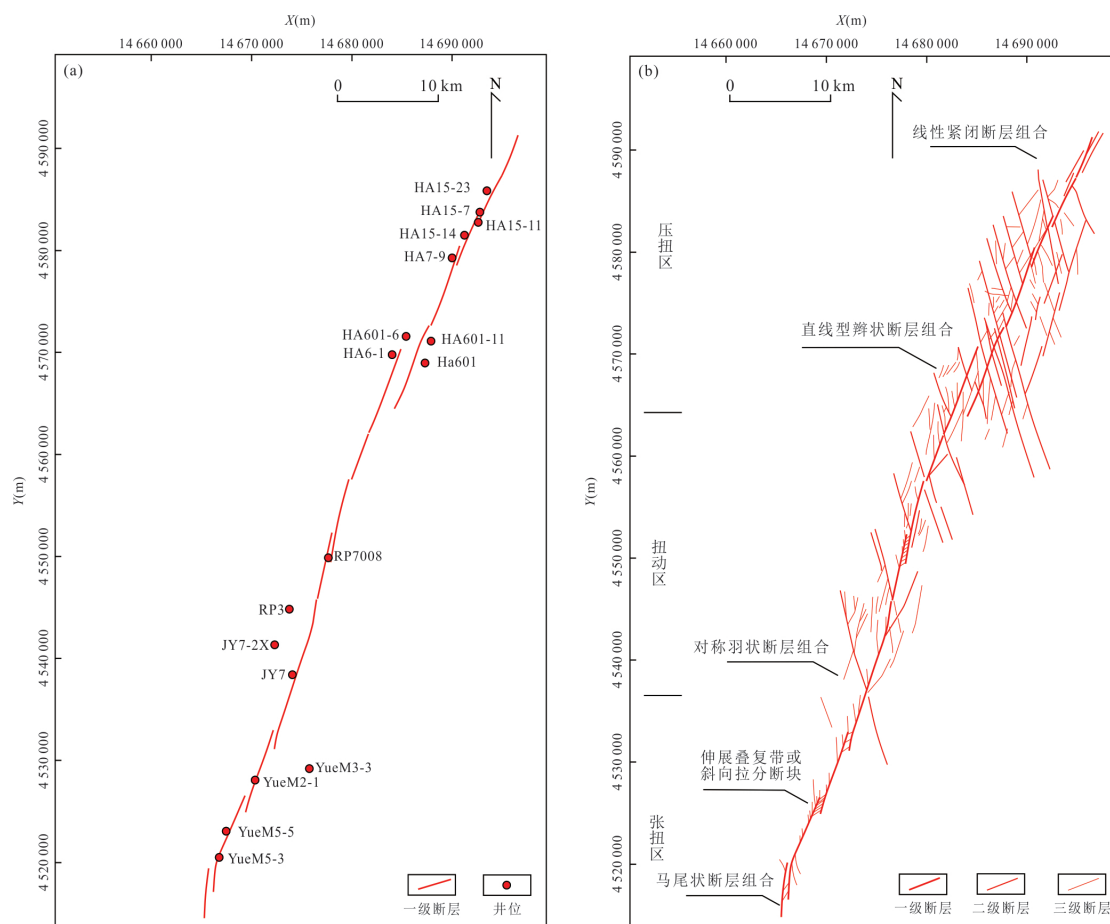


图6 哈15走滑断裂带发育特征

Fig. 6 Development characteristics of Ha-15 strike-slip fault zone

a. 哈15走滑断裂带发育特征; b. 哈15走滑断裂带分区特征

形成于复杂的区域挤压构造背景下,力学上属于一种被动型的走滑应力环境,断裂面不仅存在明显的剪应力或扭应力,也存在一定的压应力.从图5可以看出,在挤压构造背景下,共轭裂缝或初始断裂的产生使得应力场重新分配.哈拉哈塘地区“X”型大尺度裂缝或共轭断裂形成后,断层交汇部位的水平位移受到限制,断裂变形以有序或相继滑动的形式持续走滑.在加里东中晚期较弱的远程挤压作用下,应力场快速衰减,一方面靠近力源地区的初始共轭大尺度裂缝大多数发生错动或继承性活动;另一方面,在岩石破裂条件均质的情况下,应力状态的变化也导致了走滑断裂带发育明显的分段性特征,如压扭区、扭动区和张扭区.从哈15断裂带来看,从北向南,与之共轭的NW向断裂在相干体平面上其痕迹逐渐模糊,继承性活动断层逐渐变少,这也体现了区域应力场的衰减效应(图6a).在安德森III类应力状态下,压扭区内发育密集压扭性断层组成的辫状破碎带,受强烈剪应力和压应力的共

同作用,主滑动带两侧位移明显,剪切形成的大量叶理构造也有利于断裂大规模滑动(图6b).此断裂段的宽度比扭动区要宽,地层破碎程度高,且破碎带宽度稳定,由一系列密集的压性断层和裂缝组成,主断裂两侧的R和P断层行迹模糊,是被主走滑带强烈改造的结果(周铂文等,2022).

在扭动区内,发育典型的正花状构造或挤压背斜、负花状构造或地堑等构造样式,整体上组成直线型辫状构造带.由于靠近力源且紧邻强压扭段,首先发育的是正花状构造或挤压背斜,由一系列直线型R断层和P断层组成菱形或辫状主体,旁侧发育一系列R'次级断层.如哈15断裂带的北二段即为直线型辫状构造,由冲起型挤压背斜和地堑组成,整体上正花状和负花状构造样式相伴生(图2c).其次发育的是负花状构造或地堑辫状带,由于先发育的紧闭断层组合和挤压背斜对应力或能量的释放、消耗,断裂带上的压应力降低,应力状态向安德森I类应力状态转变.此种应力状态下,不仅雁行R

断层与主滑动面的夹角变大,作为先期断层延伸段的 T 断层和新产生的 P 断层也具有了张扭性特征,导致中间地块下沉成为辫状地堑构造.如图 5 中的辫状构造带,内部发育的 P 断层和 T 断层,使地层变得极为破碎.在压应力的不断衰减过程中,走滑断裂的中段剪应力逐渐占据主导地位,断层两盘走滑位移大,非常有利于同向走滑叶理的密集发育.此种变形环境下,R 断层顺时针旋转并相互连接形成痕迹清晰的断裂带,两侧发育的 P 断层和 T 断层组成对称的羽状构造;如哈 15 断裂带的中段即为典型的羽状断裂带(图 6b),一侧为正花状压扭型,一侧为负花状张扭型(图 2b).

在张扭区内,断面压应力迅速衰减,应力状态发生转变,剪应力已经逐渐不足以使岩石破裂,倾向于先存断层或构造的继承性活动以及次级破裂的产生.R 断层普遍发育,但它们在此处的排列间隔增大,局部 T 断层或 R' 断层在斜列的 R 断层之间发育,形成伸展或挤压叠覆带,中间则组成斜向拉分断块(图 6b).在图 2c 中断裂带的东段、图 2d 中断裂带以及图 3c 中断裂带的南段均发育这种类型的构造,也说明了图 2d 中断裂带很可能形成于衰减殆尽的应力场中.在张扭区的尾端出现了一系列由弧形断层组成的马尾状断层,内侧断层倾向于向外运动,呈现远离主断面的趋势;这在图 2c 中断裂带东段尾部有一定表现,但在图 3c 中哈 15 断裂带的南段不明显,说明此处受北西向共轭断裂的影响或发生了一定的位移转换,不利于马尾状断层组合的发育.

## 5 结论

(1)塔北哈拉哈塘地区深层走滑断裂带形成于中晚加里东期的挤压应力场背景下,分支走滑断裂形成于主走滑断层剪切派生应力场环境下,由初始共轭大尺度裂缝发展演化而来,符合库伦-安德森纯剪模型.裂缝共轭剪裂角为  $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ,与理论推导得到的共轭剪裂角  $90^{\circ}$  差异大,主要原因是潜在破裂面上的剪应力  $\tau$  受正应力  $\sigma$  导致的反向摩擦力  $\Delta\tau$  影响.

(2)压扭环境下挤压应力场的衰减效应对走滑断裂带的分段性具有明显控制作用,不同段位的主走滑带结构及旁侧分支断层样式受控于三向应力状态和岩石破裂包络线的动态配置;破裂面上正应力(区域挤压应力分量)的存在使得 R 断层的排列方式分成了松散型和紧闭型两种,次

级 R' 和 T 断层的力学机制符合局部应力场下的格里菲斯准则,T 张性断层的产生并非是出现了伸展构造环境,而是平面应力莫尔圆与破裂包络线的切点位置正好位于张性破裂区内.

(3)本次完善建立的汇聚型走滑断层及派生构造发育典型模型,适用于衰减型压扭或被动扭动/走滑构造环境,融合了里德尔单剪模型和格里菲斯准则、库伦-莫尔剪切准则.考虑走滑位移下的先存叶理构造,理论上沿着挤压应力衰减的方向,可划分为压扭区、扭动区和张扭区,可进一步细分为线性紧闭断层组合带、直线型辫状构造带、对称羽状断层带、伸展/挤压叠覆带或斜向拉分地块以及马尾状断层组合带等,为塔里木盆地塔北地区深层走滑断裂带的分段性成因机制提供了更合理的地质力学依据.

## References

- Ahlgren, S. G., 2001. The Nucleation and Evolution of Riedel Shear Zones as Deformation Bands in Porous Sandstone. *Journal of Structural Geology*, 23(8): 1203–1214. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00183-8](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00183-8)
- Allen, P. A., Allen, J. R., 2005. Basin Analysis: Principles and Applications. Blackwell Scientific Publication, Oxford, 201–218.
- An, L. J., Sammis, C. G., 1996. Development of Strike-Slip Faults: Shear Experiments in Granular Materials and Clay Using a New Technique. *Journal of Structural Geology*, 18(8): 1061–1077. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(96\)00012-0](https://doi.org/10.1016/0191-8141(96)00012-0)
- Anderson, E. M., 1905. The Dynamics of Faulting. *Transactions of the Edinburgh Geological Society*, 8(3): 387–402. <https://doi.org/10.1144/transed.8.3.387>
- Ding, W. L., Fan, T. L., Huang, X. B., et al., 2010. Paleostress Structural Stress Field Simulation for Middle-Lower Ordovician in Tazhong Area and Favorable Area Prediction of Fractured Reservoirs. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 34(5): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Ding, W. L., Qi, L. X., Yun, L., et al., 2012. The Tectonic Evolution and Its Controlling Effects on the Development of Ordovician Reservoir in Bachu-Markit Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2542–2556 (in Chinese with English abstract).
- Ding, Y. C., Sun, B. S., Wang, X. H., et al., 1996. Paleostress in Northern Tarim Oil Field Estimated by AE. *Journal of Geomechanics*, 2(2): 18–25 (in Chinese with English abstract).



- English abstract).
- Han, X. Y., Deng, S., Tang, L. J., et al., 2017. Geometry, Kinematics and Displacement Characteristics of Strike-Slip Faults in the Northern Slope of Tazhong Uplift in Tarim Basin: A Study Based on 3D Seismic Data. *Marine and Petroleum Geology*, 88: 410—427. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.08.033>
- Hou, Q. L., Cheng, N. N., Shi, M. Y., et al., 2018. The Union of Various Rock Deformation Criteria at Different Structural Levels and Its Further Development. *Acta Petrologica Sinica*, 34(6): 1792—1800 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S. Y., Song, X. G., Luo, C. M., et al., 2021. Formation Mechanism of the Conjugate Strike-Slip Faults in Tabei Uplift. *Geoscience*, 35(6): 1797—1808, 1829 (in Chinese with English abstract).
- Jia, C. Z., Ma, D. B., Yuan, J. Y., et al., 2021. Structural Characteristics, Formation & Evolution and Genetic Mechanisms of Strike-Slip Faults in the Tarim Basin. *Natural Gas Industry*, 41(8): 81—91 (in Chinese with English abstract).
- Jia, C. Z., Wei, G. Q., 2002. Structural Characteristics and Petroliferous Features of Tarim Basin. *Chinese Science Bulletin*, 47(S1): 1—8 (in Chinese).
- Jiao, F. Z., 2017. Significance of Oil and Gas Exploration in NE Strike-Slip Fault Belts in Shuntuoguole Area of Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 38(5): 831—839 (in Chinese with English abstract).
- Lan, M. J., Wang, H. T., Ma, Q. Y., et al., 2017. Characteristics of Shunbei No.8 Strike-Slip Fault in Shunbei Region of Tarim Basin and Their Controls on Reservoirs. *Petroleum Geology & Experiment*, 39(S1): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Li, B., Deng, S., Li, W. P., et al., 2019. Strike-Slip Fault System Activity and Hydrocarbon Geology Understanding in Tahe of Tarim Basin. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 26(4): 45—51 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. H., Li, S. Y., Li, H. Y., et al., 2021. Distribution Pattern and Formation Mechanism of the Strike-Slip Fault System in the Central Tarim Basin. *Natural Gas Industry*, 41(3): 30—37 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. X., Rao, S., Tao, C. H., et al., 2015. Generalized Hilbert Transform Seismic Edge Detection. *Oil Geophysical Prospecting*, 50(3): 490—494, 5 (in Chinese with English abstract).
- Lu, X. B., Hu, W. G., Wang, Y., et al., 2015. Characteristics and Development Practice of Fault-Karst Carbonate Reservoirs in Tahe Area, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 36(3): 347—355 (in Chinese with English abstract).
- Lü, H. T., Zhang, S. N., Ma, Q. Y., 2017. Classification and Formation Mechanism of Fault Systems in the Central and Northern Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 39(4): 444—452 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, H. B., Yin, T., Cao, Z. C., et al., 2017. Strike-Slip Fault and Ordovician Petroleum Exploration in Northern Slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 22(4): 44—52 (in Chinese with English abstract).
- Riedel, W., 1929. Zur Mechanik Geologischer Brucherscheinungen. *Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paleontologie B*, 8: 345—368.
- Sibson, R. H., 1977. Fault Rocks and Fault Mechanisms. *Journal of the Geological Society*, 133(3): 191—213. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.133.3.0191>
- Tang, L. J., Jia, C. Z., 2007. Structural Analysis and Stress Field Analysis of Tarim Superimposed Basin. Science Press, Beijing, 113—130 (in Chinese).
- Tong, H. M., Wang, J. J., Zhao, H. T., et al., 2014. Molar Space and Its Application to the Activation Prediction of Pre-Existing Weakness. *Scientia Sinica Terrae*, 44(9): 1948—1957 (in Chinese).
- Wang, R. J., Wang, X., Deng, X. L., et al., 2021. Control Effect of Strike-Slip Faults on Carbonate Reservoirs and Hydrocarbon Accumulation: A Case Study of the Northern Depression in the Tarim Basin. *Natural Gas Industry*, 41(3): 10—20 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. C., Zhao, W. Z., Hu, S. Y., et al., 2013. Reservoir Types and Distribution Characteristics of Large Marine Carbonate Oil and Gas Fields in China. *Oil & Gas Geology*, 34(2): 153—160 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. S., Li, J. C., Wang, S. M., et al., 1997. Oil and Gas Accumulation and Structural Stress Field in Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 23—28 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. H., Ma, B. S., Han, J. F., et al., 2021. Origin and Growth Mechanisms of Strike-Slip Faults in the Central Tarim Cratonic Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3): 510—520 (in Chinese with English abstract).
- Xie, H. P., Ju, Y., Li, L. Y., 2005. Criteria for Strength and Structural Failure of Rocks Based on Energy Dissipation and Energy Release Principles. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(17): 3003—3010 (in Chinese with English abstract).
- Xu, G. Q., Li, G. R., Liu, S. G., et al., 2005. Multiple Karst

- Cave Horizons in the Early Hercynian Weathering Crust in the Tarim Basin. *Acta Geologica Sinica*, 79(4):557—568 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S.S., Peng, H., Nietosamaniego, A.F., et al., 2017. The Similarity between Riedel Shear Patterns and Strike-Slip Basin Patterns. *Geological Review*, 63(2): 287—301 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S., Wu, G.H., Zhu, Y.F., et al., 2022. Key Oil Accumulation Periods of Ultra-Deep Fault-Controlled Oil Reservoir in Northern Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(2):249—261 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y., Wang, B., Cao, Z.C., et al., 2021. Genesis and Formation Time of Calcite Veins of Middle-Lower Ordovician Reservoirs in Northern Shuntuoguole Low-Uplift, Tarim Basin. *Earth Science*, 46(6):2246—2257 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. P., Lü, X.X., Yu, H. F., et al., 2016. Controlling Mechanism of Two Strike-Slip Fault Groups on the Development of the Ordovician Karst Reservoirs in the Tazhong Uplift, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 37(5):663—673 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L.B., Wang, G.W., 2005. Distribution of Earth Stress in Kuche Thrust Belt, Tarim Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 32(3): 59—60 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, X.L., An, H.T., Wang, Z.J., et al., 2018. The Segmentation Features of Strike-Slip Fault and Its Relation with the Fault and Reservoirs in Halahatang Area, North Tarim Basin. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 45(2): 219—225 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, X.L., An, H.T., Wang, Z.J., et al., 2019. Characteristics of Strike-Slip Faults and Fault-Karst Carbonate Reservoirs in Halahatang Area, Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 40(4): 449—455 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, B.W., Chen, H.H., Yun, L., et al., 2022. The Relationship between Fault Displacement and Damage Zone Width of the Paleozoic Strike-Slip Faults in Shunbei Area, Tarim Basin. *Earth Science*, 47(2):437—451 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G.Y., Yang, H.J., Zhu, Y.F., et al., 2011. Study on Petroleum Geological Characteristics and Accumulation of Carbonate Reservoirs in Hanilcatam Area, Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3):827—844 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 丁文龙, 樊太亮, 黄晓波, 等, 2010. 塔中地区中: 下奥陶统古构造应力场模拟与裂缝储层有利区预测. 中国石油大学学报(自然科学版), 34(5):1—6.
- 丁文龙, 漆立新, 云露, 等, 2012. 塔里木盆地巴楚-麦盖提地区古构造演化及其对奥陶系储层发育的控制作用. 岩石学报, 28(8):2542—2556.
- 丁原辰, 孙宝珊, 汪西海, 等, 1996. 塔里木盆地北部油田古应力的 AE 法测量. 地质力学学报, 2(2): 18—25.
- 侯泉林, 程南南, 石梦岩, 等, 2018. 不同构造层次岩石变形准则的融合与发展. 岩石学报, 34(6):1792—1800.
- 黄少英, 宋兴国, 罗彩明, 等, 2021. 塔北隆起 X 型走滑断裂成因机制的新解释. 现代地质, 35(6): 1797—1808, 1829.
- 贾承造, 马德波, 袁敬一, 等, 2021. 塔里木盆地走滑断裂构造特征、形成演化与成因机制. 天然气工业, 41(8): 81—91.
- 贾承造, 魏国齐, 2002. 塔里木盆地构造特征与含油性. 科学通报, 47(S1): 1—8.
- 焦方正, 2017. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义. 石油与天然气地质, 38(5): 831—839.
- 兰明杰, 王洪涛, 马庆佑, 等, 2017. 塔里木盆地顺北地区顺北 8 号走滑断裂特征及控储作用. 石油实验地质, 39(S1):1—6.
- 李兵, 邓尚, 李王鹏, 等, 2019. 塔里木盆地塔河地区走滑断裂体系活动特征与油气地质意义. 特种油气藏, 26(4): 45—51.
- 李国会, 李世银, 李会元, 等, 2021. 塔里木盆地中部走滑断裂系统分布格局及其成因. 天然气工业, 41(3):30—37.
- 李红星, 饶溯, 陶春辉, 等, 2015. 广义希尔伯特变换地震边缘检测方法研究. 石油地球物理勘探, 50(3): 490—494, 5.
- 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等, 2015. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践. 石油与天然气地质, 36(3): 347—355.
- 吕海涛, 张哨楠, 马庆佑, 2017. 塔里木盆地中北部断裂体系划分及形成机制探讨. 石油实验地质, 39(4): 444—452.
- 邱华标, 印婷, 曹自成, 等, 2017. 塔里木盆地塔中北坡走滑断裂特征与奥陶系油气勘探. 海相油气地质, 22(4): 44—52.
- 汤良杰, 贾承造, 2007. 塔里木叠合盆地构造解析和应力场分析. 北京: 科学出版社, 113—130.
- 童亨茂, 王建君, 赵海涛, 等, 2014. “摩尔空间”及其在先存构造活动性预测中的应用. 中国科学: 地球科学, 44(9): 1948—1957.
- 汪如军, 王轩, 邓兴梁, 等, 2021. 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. 天然气工业, 41(3): 10—20.
- 汪泽成, 赵文智, 胡素云, 等, 2013. 我国海相碳酸盐岩大油气田油气藏类型及分布特征. 石油与天然气地质, 34(2): 153—160.
- 王喜双, 李晋超, 王绍民, 等, 1997. 塔里木盆地构造应力场与油气聚集. 石油学报, 18(1): 23—28.
- 邬光辉, 马兵山, 韩剑发, 等, 2021. 塔里木克拉通盆地中部走滑断裂形成与发育机制. 石油勘探与开发, 48(3): 510—520.
- 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 2005. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则. 岩石力学与工程学报, 24(17): 3003—3010.
- 徐国强, 李国蓉, 刘树根, 等, 2005. 塔里木盆地早海西期多次风化石岩溶洞穴层. 地质学报, 79(4): 557—568.
- 许顺山, 彭华, Nietosamaniego, A.F., 等, 2017. 里德尔剪切组合型式与走滑盆地组合型式的相似性. 地质论评, 63(2): 287—301.
- 杨率, 邬光辉, 朱永峰, 等, 2022. 塔里木盆地北部地区超深断控油藏关键成藏期. 石油勘探与开发, 49(2): 249—261.
- 杨毅, 王斌, 曹自成, 等, 2021. 塔里木盆地顺托果勒低隆起北部中下奥陶统储层方解石脉成因及形成时间. 地球科学, 46(6): 2246—2257.
- 张艳萍, 吕修祥, 于红枫, 等, 2016. 塔中隆起两组走滑断裂对岩溶储层发育的控制机制. 石油与天然气地质, 37(5): 663—673.
- 曾联波, 王贵文, 2005. 塔里木盆地库车山前构造带地应力分布特征. 石油勘探与开发, 32(3): 59—60.
- 郑晓丽, 安海亭, 王祖君, 等, 2018. 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. 浙江大学学报(理学版), 45(2): 219—225.
- 郑晓丽, 安海亭, 王祖君, 等, 2019. 哈拉哈塘地区走滑断裂与断溶体油藏特征. 新疆石油地质, 40(4): 449—455.
- 周铂文, 陈红汉, 云露, 等, 2022. 塔里木盆地顺北地区下古生界走滑断裂带断距分段差异与断层宽度关系. 地球科学, 47(2): 437—451.
- 朱光有, 杨海军, 朱永峰, 等, 2011. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究. 岩石学报, 27(3): 827—844.