

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202511010131

塔里木盆地中部走滑断裂分区发育控制因素探讨——以F₁₆断裂为例

宋兴国¹, 孙崇浩^{1,2,3}, 陈石^{4,5,*}, 梁鑫鑫¹, 杨果^{1,2,3}, 罗彩明^{1,2,3},
杨俊鹏¹, 彭梓俊¹, 史绪凯¹

(1. 中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000; 2. 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆 库尔勒 841000; 3. 新疆超深油气重点实验室, 新疆 库尔勒 841000; 4. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 5. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249)

摘要: 塔里木盆地中部走滑断裂系统具有显著的分区特征, 但分区的主控因素尚不明确。本文以横跨塔北隆起与阿满过渡带的大型走滑断裂—F₁₆断裂为研究对象, 利用三维地震资料, 对其开展了几何学、运动学解析, 并探讨其发育机制及对分区性的启示。研究表明, F₁₆断裂在平面上可划分为北、中、南三段, 其展布受中寒武世台缘带形态和先存基底结构的联合控制。断裂垂向上具有分层差异变形特征, 但浅部未发育典型的雁列式正断层。运动学分析揭示其中晚寒武世和中晚奥陶世两期均表现为左旋走滑性质, 后者活动强度显著增强。F₁₆断裂的发育机制可归结为: 中晚寒武世弱挤压背景下, 沿塔北台缘带形成的近南北向断裂雏形与受南部NE向基底薄弱带控制的阿满过渡带内NE向断裂在构造边界处连接; 中晚奥陶世强挤压应力下, 该断裂带垂向上继承性强烈活动, 最终定型。走滑断裂的分区性主要受前寒武基底结构非均一性的控制。塔北基底古隆起与阿满过渡带基底裂陷区的交界带作为一个有效的“应力屏障”, 通过阻碍应力传递、导致上覆盖层厚度变化以及促使断裂在边界处终止, 对走滑断裂的发育与分布起着决定性作用。

关键词: 塔里木盆地; F₁₆断裂; 构造演化; 形成机制; 分区发育

中图分类号: P551

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2026)04-1124-15

Controls on the Zonal Development of Strike-Slip Faults in the Central Tarim Basin: Insights from the F₁₆ Fault

SONG Xingguo¹, SUN Chonghao^{1,2,3}, CHEN Shi^{4,5,*}, LIANG Xinxin¹, YANG Guo^{1,2,3}, LUO Caiming^{1,2,3},
YANG Junpeng¹, PENG Zijun¹, SHI Xukai¹

(1. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China; 2. R&D Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC, Korla, Xinjiang 841000, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Ultra-deep Oil and Gas, Korla, Xinjiang 841000, China; 4. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 5. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The strike-slip fault system in the central Tarim Basin exhibits significant zoning characteristics, but the primary controlling factors for this zonation remain unclear. This study focuses on the large-scale F₁₆

收稿日期: 2025-11-01; **修回日期:** 2026-04-11; **编辑:** 袁茂文。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42472186); 中国石油天然气集团有限公司攻关性应用性科技专项“碳酸盐岩油气富集规律及有利区带研究”(2023ZZ16YJ01); 塔里木盆地超深层碳酸盐岩沉积体系与成储机理研究(YF202503)。

作者简介: 宋兴国, 男, 博士, 工程师, 1996年出生, 主要从事油气区构造解析研究。Email: alexsong1996@126.com。

***通信作者:** 陈石, 男, 博士, 副教授, 1986年出生, 主要从事含油气盆地构造分析研究。Email: chenshi4714@163.com。

引用格式: 宋兴国, 孙崇浩, 陈石, 等. 塔里木盆地中部走滑断裂分区发育控制因素探讨——以F₁₆断裂为例[J]. 现代地质, 2026, 40(4): 1124-1138. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202511010131.

SONG Xingguo, SUN Chonghao, CHEN Shi, et al. Controls on the Zonal Development of Strike-Slip Faults in the Central Tarim Basin: Insights from the F₁₆ Fault [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40(4): 1124-1138. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202511010131.

strike-slip fault, which traverses the Tabei Uplift and the Aman Transitional Zone. Utilizing 3D seismic data, we conducted geometric and kinematic analyses of the F₁16 fault to investigate its developmental mechanism and its implications for structural zoning. The results indicate that the F₁16 fault can be divided into northern, central, and southern segments in the planar view, whose distribution is jointly controlled by the morphology of the Middle Cambrian platform-margin zone and pre-existing basement structures. Vertically, the fault exhibits layered differential deformation, although typical en-echelon normal faults are not developed in the shallow section. Kinematic analysis reveals that the fault displayed sinistral (left-lateral) strike-slip characteristics during both the Middle-Late Cambrian and Middle-Late Ordovician periods, with the activity intensity increasing significantly during the latter period. The development mechanism of the F₁16 fault can be summarized as follows: during the Middle-Late Cambrian under a weak compressional stress field, incipient near-N-S trending faults formed along the Tabei platform margin connected with NE-trending faults within the Aman Transitional Zone, the latter being controlled by pre-existing NE-trending basement weak zones in the south, at a structural boundary; subsequently, during the Middle-Late Ordovician under strong compression, this fault zone experienced intensive, inherited vertical activity, ultimately finalizing its structure. The zoning of strike-slip faults is primarily controlled by the heterogeneity of the Precambrian basement structure. The boundary zone between the rigid basement high of the Tabei Uplift and the flexural rift system of the Aman Transitional Zone acts as an effective “stress barrier”. This barrier plays a decisive role in the development and distribution of strike-slip faults by hindering stress transfer, causing variations in the thickness of the overlying cap rock, and prompting faults to terminate at the boundary.

Key words: Tarim Basin; F₁16 fault; tectonic evolution; formation mechanism; zonal development

0 引言

上个世纪八十年代以来,塔里木盆地中部的油气勘探历经了多个阶段的重大突破与认识飞跃。从早期的潜山岩溶勘探,逐步发展到礁滩岩溶勘探、层间岩溶勘探,直至当前的断控岩溶勘探阶段,相继发现了轮古油气田、塔中I号气田、哈拉哈塘油田和富满油田等一系列大型油气田^[1-3]。随着勘探实践的深入,勘探主力区域也从古隆起、古坡折和古斜坡逐渐延伸至古凹陷和古台缘地带。在此过程中,走滑断裂对油气运聚与成藏的关键控制作用日益凸显,其发育特征与形成机制已成为当前塔里木盆地中部油气地质研究的前沿和热点课题^[4-6]。

塔里木盆地中部广泛发育走滑断裂系统。最新高精度三维地震资料揭示,围绕满加尔坳陷周缘分布有总面积超过90000 km²的走滑断裂系统^[7]。前人针对该区走滑断裂从几何学、运动学及动力学方面开展了大量研究工作,明确了其具有规模分级、平面分区、垂向分层、走向分段和活动分期的“五分”特征^[8,9],系统揭示了走滑

断裂在控储、控藏和控富的作用与机理,逐步建立了以原地生烃-垂向运移-断控缝洞储集为核心的油气成藏模式^[7,10-12],有效指导了富满油田和顺北油田的勘探与开发。在走滑断裂的平面展布方面,已有研究表明,不同构造单元内断裂的发育样式与组合特征具有显著差异,表现出明确的分区性^[8,13-15]。然而,目前关于这种分区性的主控因素与形成机制仍缺乏系统研究。值得注意的是,塔北隆起内多数走滑断裂向南延伸时止于其与阿满过渡带的边界附近,而F₁16断裂作为一条横跨塔北隆起与阿满过渡带的大型走滑断裂,构成了连接不同构造单元的地质纽带,为揭示盆地中部断裂系统的分区机制提供了关键研究对象。尽管F₁16断裂具有重要地质意义,当前研究仍相对薄弱。除部分学者对其几何学特征进行初步描述外^[5,16],该断裂在不同构造单元内的活动性对比及成因机制等方面尚缺乏深入分析,制约了对塔里木盆地中部走滑断裂系统整体形成规律与控藏机理的深入认识。

本文基于塔里木盆地高精度三维地震资料,利用GeoEast地震解释系统平台,对F₁16断裂开

展了精细构造解析。通过提取并融合相干属性与最大似然属性,精细刻画了主干及次级断裂的空间展布规律;在此基础上,定量统计并对比了断裂系统在深浅层系及不同构造单元内的活动强度差异,进而厘定了多期构造活动时序。结合区域周缘造山带隆升历史与深部基底结构特征,重点探讨了 F_116 断裂的成机制以及盆地中部走滑断裂分区发育控制因素。研究成果为完善塔里木盆地走滑断裂体系的成因模型提供了关键地质依据,对深化台盆区断控油气藏勘探与开发部署具有重要的指导意义。

1 区域地质概况

塔里木盆地位于新疆维吾尔自治区南部,面积约为 560000 km^2 ,是中国陆上最大的含油气叠合盆地^[17, 18]。盆地内部隆坳相间,整体表现为“三隆四坳”的构造格局。基于基底形态,边界断层以及沉积盖层发育特征,由北往南可以划分出七个一级构造单元。 F_116 断裂所处的塔北隆起与阿满过渡带位于塔里木盆地中部,南部毗邻塔中隆起,北部与库车坳陷相接,东西夹持于阿瓦提坳陷与满加尔坳陷之间(图1)。

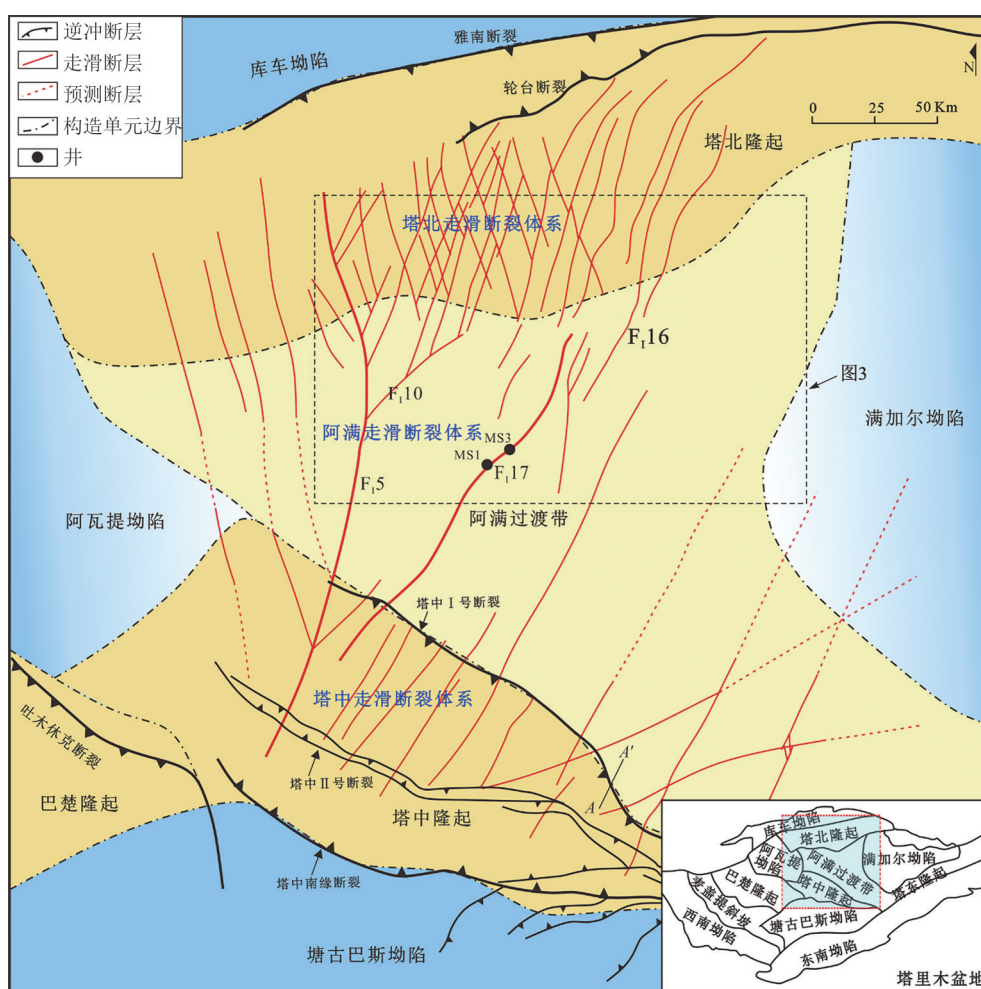


图1 塔里木盆地中部下古生界主要断裂分布图(修改自文献[9])

Fig. 1 Map of Major Faults in the Lower Paleozoic of the Central Tarim Basin (Modified from Ref. [9])

研究区内地层发育齐全,从震旦到第四系均有发育(图2)。盆地中部走滑断裂主要分布于古生界,其中直立走滑断层主要分布于寒武系—中奥陶统海相碳酸盐岩层,走滑断裂活化形成的雁列式正断层则主要分布于上奥陶统一二叠系海相碎屑岩层中。下寒武统玉尔吐斯组(C_{1y})泥岩作

为盆地中部主力烃源,与中奥陶统一间房组(O_{2y})断控缝洞型储集体和上奥陶统桑塔木组(O_{1s})区域厚层泥岩,构成了一套有利的生储盖组合,是富满油田与顺北油田目前的主要油气开采目标。深地塔科1井的钻探结果表明^[19, 20],下寒武肖尔布拉克组(C_{1x})以及吾松格尔组(C_{1w})

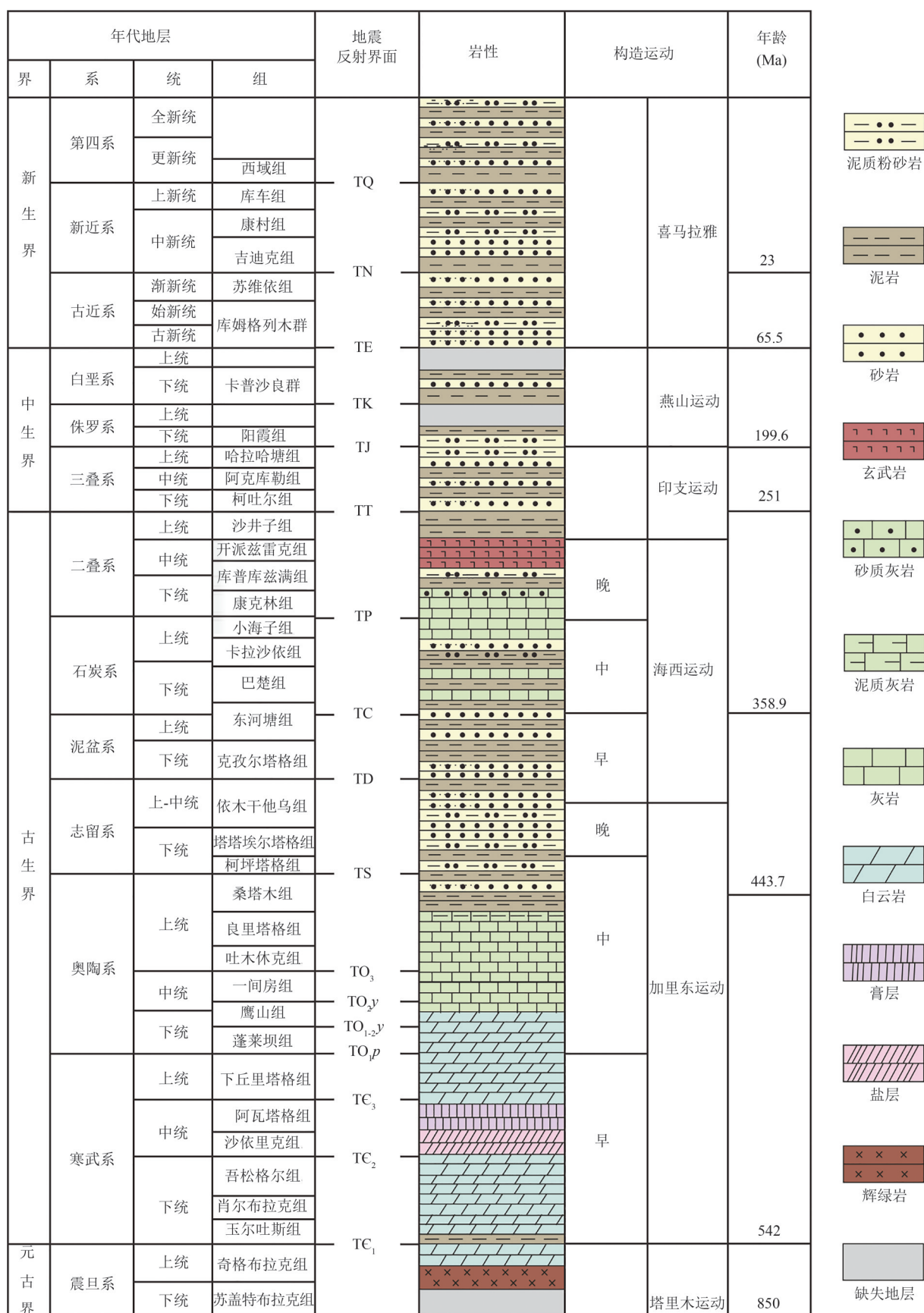


图2 塔里木盆地中部地层格架(修改自文献[15])

Fig. 2 Stratigraphic framework of the Central Tarim Basin (Modified according to Ref. [15])

内存在有效孔隙,与中寒武统沙依里克组(C_{2s})和阿瓦塔格组(C_{2a})可以构成一套储层组合,是下一步油气勘探的重点领域与方向。

塔里木板块是从Rodinia超大陆中裂解出来的重要块体,其大地构造演化经历了多阶段复杂的动力学过程^[21, 22]。该盆地形成于元古代结晶基底之上,其基底构造复杂,存在可追溯到古太古代的古陆核^[2, 23]。南华纪初期,受周缘俯冲作用和超级地幔柱活动的影响^[23-25],塔里木板块内部自约750 Ma开始广泛发育大陆裂谷。至寒武纪-早奥陶世,周缘古大洋处于扩张阶段,盆地整体处于弱伸展应力环境^[26, 27]。中一晚奥陶世,受南缘原特提斯洋俯冲消减作用影响^[28, 29],塔里木板块南部由被动大陆边缘转变为活动大陆边缘,应力环境由东西向伸展转为南北向挤压,导致塔北隆起与塔中隆起发生显著抬升。从志留纪至白垩纪,周缘板块和造山带(如南天山、西昆仑等)持续活动,引发多期弧陆碰撞和构造拼贴,造成盆地内部构造格局频繁变迁^[30, 31]。新生代以来,受印度板块与欧亚板块碰撞远程效应影响^[32],天山和昆仑山大幅度隆升,盆地进入前陆盆地演化阶段,最终形成现今“三隆四坳”的构造格局^[2, 33]。

2 走滑断裂分区发育特征

塔里木盆地中部走滑断裂系统具有显著的分区发育特征^[16, 34],在平面展布、组合样式及动力学机制上,塔北隆起、阿满过渡带及塔中隆起存在明显差异,可划分为三大断裂变形区:塔北走滑断裂体系、阿满走滑断裂体系以及塔中走滑断裂体系(图1)。

塔北隆起受南北向挤压应力场的影响,整体发生翘倾,发育透入性纯剪切走滑断裂系统。其平面展布具有明显的分带性:西部以NW向断裂为主;中部哈拉哈塘地区发育NW向和NE向两组断裂,相互交错限制,形成共轭剪切网格;东部则以NE向断裂为主导。中部和东部走滑断裂多向南逐渐消亡,主要终止于塔北隆起与阿满过渡带的构造边界附近,部分向南被 F_110 断裂限制终止(图3),仅有极少数断裂可贯穿塔北隆起并向南延伸至阿满过渡带(如 F_116),成为沟通两大构造单元的关键纽带。

阿满过渡带夹持于塔北隆起与塔中隆起之间,走滑断裂整体呈单剪连接型特征,以 F_15 断裂为

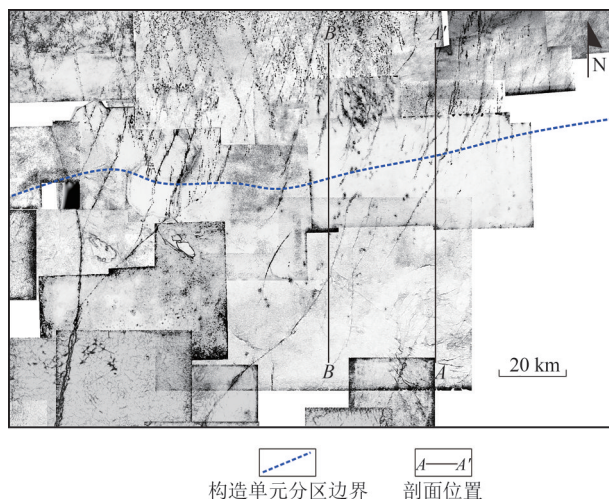


图3 塔里木盆地塔北隆起南部上奥陶统底面(TO_3)相干特征图(位置见图1)

Fig. 3 Coherence characteristics of the bottom surface of the Upper Ordovician (TO_3) at the southern boundary of the Tabei Uplift in the Tarim Basin (See Fig. 1 for the locations)

核心,NW向和NE向断裂对称分布于其两侧,形成向北撒开的帚状构造格局。 F_15 断裂以西的NW向断裂延伸较长,连通塔北与塔中隆起;而 F_15 断裂以东的NE向断裂多向北终止于构造边界,仅沟通阿满过渡带与塔中隆起。

塔中隆起内NE向走滑断裂与NW向逆冲断层形成十字交切,属逆冲调节型断裂体系。 F_15 断裂以西的NW向断裂自塔北隆起向南延伸并终止于 F_15 断裂; F_15 断裂以东发育近平行分布的NE向走滑断层,多数南延被塔中I号断裂限制,少数延伸至阿满过渡带;塔中隆起东南部发育NEE向走滑断裂,与NE向断裂组合构成小角度X型断层系统。

3 F_116 断裂活动特征

F_116 断裂平面延伸长度超过100 km,由塔北隆起向南延伸,贯穿塔北隆起与阿满过渡带边界,终止于阿满过渡带内。由于 F_116 断裂北部地震资料显示不佳,本文依托于近年采集的三维地震资料,选取了断裂平面显示较好的90 km,并参考前人针对 F_116 断裂取得研究成果与认识^[5, 16],对断裂的几何学与运动学特征进行系统解析。

3.1 几何学特征

(1) F_116 断裂平面发育特征。

F_116 断裂自塔北隆起向南延伸,最终止于阿满过渡带内,其平面展布过程中出现两次明显的

走向偏转。本文以断裂走向转折点为界，将F₁₆断裂划分为北、中、南三段（图4）：北段走向约NE26°，中段走向约NE4°，南段走向约NE30°。受分层差异变形控制，该断裂在不同深度的关键构造界面中表现出显著的平面展布差异。平面相

干属性分析表明，F₁₆断裂在志留系底面（TS）未呈现明显活动迹象（图4e）。为系统揭示深浅层断裂发育特征的差异，本文重点对上寒武统底面（TC₃）和上奥陶统底面（TO₃）的断裂结构进行了详细刻画与对比分析。

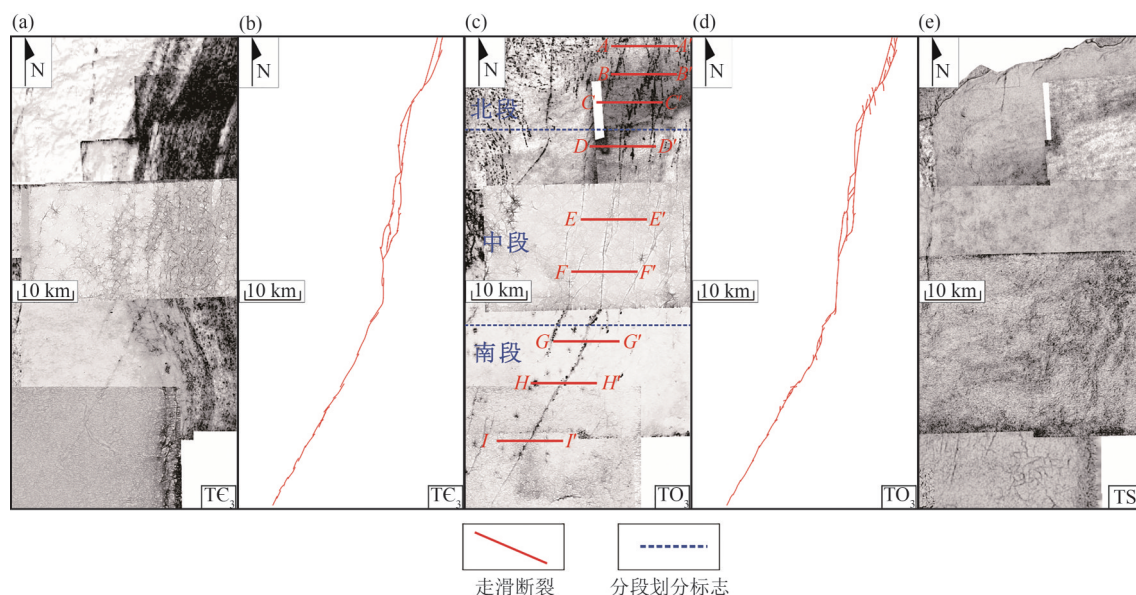


图4 塔里木盆地中部F₁₆断裂三维多层相干与断裂解释

Fig. 4 Multi-Layer coherence and fault interpretation of the F₁₆ fault in the Central Tarim Basin

(a) 上寒武统底面相干; (b) 上寒武统底面断裂展布特征; (c) 上奥陶统底面相干; (d) 上奥陶统底面断裂展布特征; (e) 志留系底面相干

在上寒武统底面（TC₃）上，走滑断裂整体呈线性展布，但不同区段的发育特征存在明显差异（图4a和b）。北段整体呈NE走向，由一系列呈左右阶交替排列的断片组成，断裂在南北两端均分叉为两支。中段总体为近南北走向，其平面形态自北向南发生显著变化：断裂从NE向逐渐偏转为近南北向，这一展布特征与右侧台缘带基本一致，表明台缘带可能对断裂发育产生了控制作用。该段北部与NE向断裂共同构成狭长的辫状叠接区，整体走向由NE向渐变为近南北向；向南则发育菱形叠接区，两侧主干断层均为近南北走向，内部发育多组次级断裂；最南端由多个小型断片线性叠接而成，无分支发育，并在尾端发生顺时针偏转。南段整体走向为NE向，主要由小型断片通过硬连接或软连接方式首尾相接，以右阶叠接为主要特征。

在上奥陶统底面（TO₃）上，走滑断裂的整体活动性显著增强，平面相干特征更为清晰。与下伏层系相比，该层位中断裂的单个断片长度增大，整体连通性提高，且在主干断层两侧广泛发育多种走滑派生构造（图4c和d）。北段断裂的总体形态与上寒武统底面相似，但其两侧发育多组R'破

裂和P破裂，与主干断层共同构成典型的羽状构造。中段断裂仍保持与下伏层相似的展布格局，但线性特征更加明显，且在辫状及菱形叠接区内部发育分支断层，使叠接区结构更趋复杂。最南端断裂呈现顺时针“甩尾”形态，并分叉出多条小型分支，表现出似马尾状构造特征。南段断裂活动强度较上寒武统底面显著增强，不仅单条断片长度增大，局部还发育辫状构造。

(2) F₁₆断裂剖面发育特征。

塔里木盆地中部走滑断裂普遍具有分层差异变形特征，通常体现为浅层发育雁列式正断层，而深部发育直立走滑断层。然而，F₁₆断裂的构造表现与此典型模式存在显著差异：其在浅部并未发育典型的雁列式正断层组合。基于其深部仍存在的直立走滑断层特征以及先存基底结构特征的约束，断裂垂向上可以划分出三个构造变形层：中部构造变形层（TC₃-TO₃）、深部构造变形层（TC₁-TC₃）以及基底构造变形层（TC₁之下）。此外，F₁₆断裂沿走向剖面发育特征也呈现出典型分段差异性，本文对断裂北段、中段和南段剖面特征进行了详细剖析与对比。

北段位于塔北隆起内, 整体呈 NE 走向, 在剖面上表现出显著的分层差异变形特征。在中部构造变形层中, 断裂面显示清晰, 表现为地震同相轴扭曲、错断及串珠状构造。走滑断裂活动较强,

在上奥陶统底面 (TO_3) 附近普遍发育分支断层, 组合形成花状构造, 破碎带内地震同相轴发生强烈扭曲变形 (图 5, 剖面 CC')。自北向南, 断裂由两条直立走滑断层逐渐汇合并为单一断层,

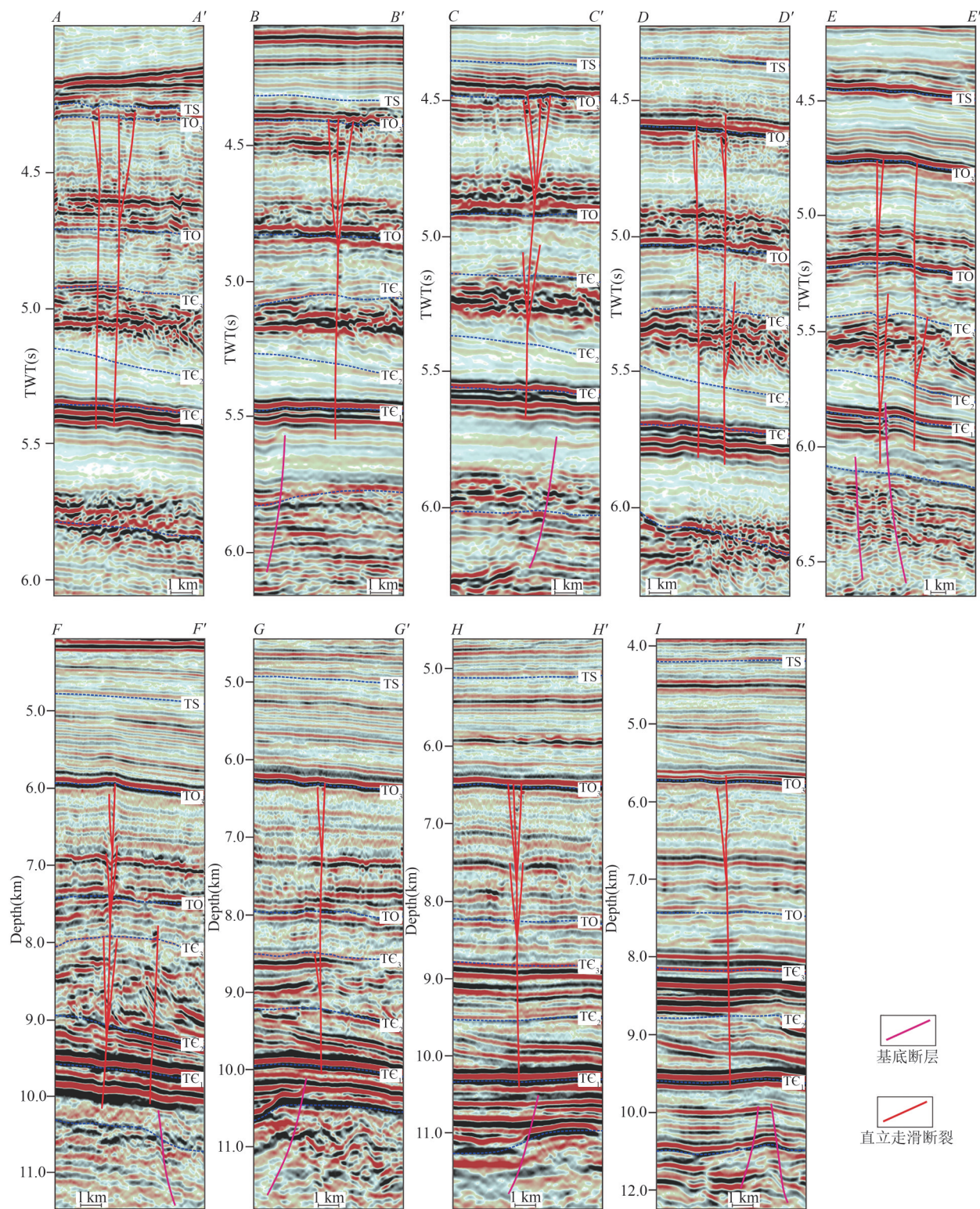


图5 塔里木盆地中部 F_{17} 断裂各段典型剖面发育特征 (剖面位置见图4)

Fig. 5 Typical Profile Development Characteristics of Each Segment of the F_{17} Fault in the Central Tarim Basin (See Fig. 4 for the profile locations)

同时主干断层两侧的分支断层数量逐渐增加(图5,剖面AA'和BB')。在深部构造变形层中,走滑断裂活动较弱,主要表现为直立平移走滑特征,向下延伸切入基底,在上寒武统底面(TC₃)附近基本不发育分支断层。由于该断裂靠近中寒武世台缘带,其中寒武统内部地震反射结构较为杂乱,见礁滩体及生物丘发育。前寒武系基底结构相对稳定,整体处于基底斜坡之上,局部发育正断层及其控制的小型基底裂隙。

中段整体呈近南北走向,位于阿满过渡带与塔北隆起的交界区域,是连接北段与南段的过渡区。在中部构造变形层中,走滑断裂活动较为强烈,普遍于上奥陶统底面(TO₃)附近发育分支断层,形成典型的花状构造。地震剖面显示断距清晰,沿主干断层垂向可见明显的串珠状结构(图5,剖面DD')。自北向南,断裂平面形态由辫状及菱形叠接区逐渐过渡为线性主位移带,剖面上也从两条独立的直立走滑断层逐渐合并为单一断层,破碎带内岩层变形强度也随之增强(图5,剖面EE'和FF')。局部区域中下奥陶统走滑断裂破碎带内发育分支断层,表现为负花状构造,与上奥陶统底面附近发育的正花状构造在垂向上形成多花叠置样式(图5,剖面FF')。上下花状构造的应力性质相反,反映了多期走滑活动的叠加效应。在深部构造变形层中,走滑断裂仍表现出较强的活动性,上寒武统底面(TC₃)附近普遍发育分支断层并形成花状构造。主干断层断面清晰,向下切入基底。中寒武统内部生物礁较为发育,地震同相轴反射杂乱,整体呈丘状外形。前寒武系基底整体处于斜坡环境,正断层广泛发育,局部可见小型裂隙构造。

南段整体呈NE走向,主体位于阿满过渡带内,属于该带NE向走滑断裂体系的组成部分。在中部构造变形层中,主干断层断面清晰可辨,但走滑活动整体较弱,以直立平移走滑为主要特征。多数断裂于上奥陶统底面(TO₃)附近发育分支断层,并形成花状构造(图5,剖面GG')。受断裂活动强度较低的影响,除典型叠接区外,剖面中断裂破碎带宽度普遍较小,且自北向南断层活动强度逐渐减弱。在部分剖面中,中下奥陶统内部地层出现明显沉降,发育负花状构造,而上奥陶统底面附近地层变形较弱,表现为弱正花状构造(图5,剖面HH'),这一特征可能与中奥陶世多幕

次走滑活动有关。在深部构造变形层中,走滑断裂活动较弱,主要表现为直立平移走滑,多数断裂未完全切穿寒武系进入基底。自北向南,中寒武统由台地边缘礁滩体逐渐过渡为平缓的膏盐岩地层。前寒武系基底中广泛发育基底裂隙,其边缘受正断层控制(图5,剖面II'),直立走滑断层多位于这些裂隙边缘的正断层之上。

3.2 运动学特征

(1) F₁16断裂活动强度特征。

F₁16断裂在中部及深部构造变形层主要表现为直立走滑变形,导致地层发生上拱或下陷,但未引起普遍的地层错断。因此,断距参数难以充分反映小滑移距直立走滑断裂的活动强度。本文通过测量垂向升降幅度与横向破碎带宽度来表征断裂活动强度,重点对比上寒武统顶面(TC₃)和上奥陶统底界面(TO₃)的活动强度差异,进而分析断裂活动强度的垂向变化规律。

F₁16断裂在上寒武统底面(TC₃)表现为相对较弱的断裂活动强度,整体以挤压上拱变形为主,变形强度呈现北强南弱的空间分异特征,并具有明显的分段差异性(图6)。北段垂向升降幅度为18~25 m,整体表现为挤压上拱变形,隆升幅度分布均匀,平均值约20 m;其破碎带宽度介于0.7~1.5 km,受断裂分叉与汇聚影响,呈“南北宽、中间窄”的格局。向南至中段,垂向升降幅度变化增大(-23~29 m),表现为南北两侧挤压隆升、中部拉伸下陷的变形模式,平均幅度仍维持在20 m左右;破碎带宽度为0.7~1.5 km,自北向南渐窄,对应断裂由两支独立断层汇聚为单一断层的结构转变,形成“北宽南窄”的特征。而南段垂向升降幅度为10~20 m,最大隆升位于中-南段交界附近,其余区域变形较弱,平均约10 m;破碎带宽度稳定在0.5~1.0 km,沿走向分布较均匀,仅于小型断片叠接部位出现局部宽度高值。

F₁16断裂在上奥陶统底面(TO₃)表现出显著增强的断裂活动强度,表现为继承性的挤压上拱和“北强南弱”格局(图7)。北段垂向升降幅度为18~22 m,相对稳定,平均值约20 m;破碎带宽度为1.9~2.25 km,沿走向分布平稳,平均宽度约2.1 km。中段垂向升降显著增强,幅度为20~40 m,平均达30 m;破碎带宽度为1.5~2.25 km,整体呈现由北向南逐渐减窄的趋势,此

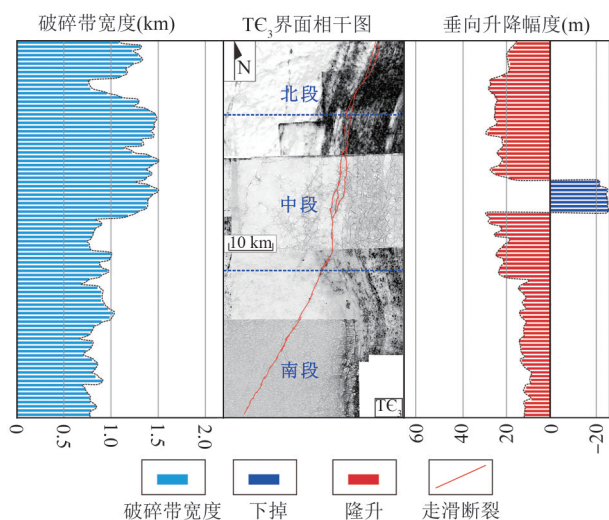


图6 塔里木盆地F₁₆断裂上寒武统底面(TC₃)断裂活动强度统计图

Fig. 6 Statistical diagram of fault activity intensity at the bottom surface of the Upper Cambrian (TC₃) of the F₁₆ fault in the Tarim Basin

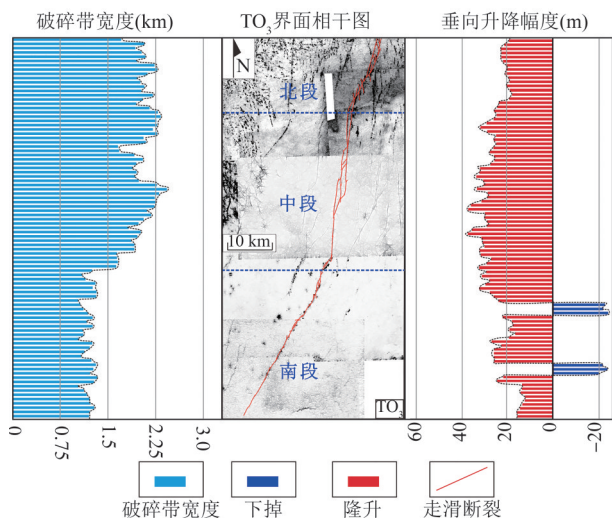


图7 塔里木盆地F₁₆断裂上奥陶统底面(TO₃)断裂活动强度统计图

Fig. 7 Statistical diagram of fault activity intensity at the bottom surface of the Upper Ordovician (TO₃) of the F₁₆ fault in the Tarim Basin

特征受断裂平面样式控制, 即从北部菱形与辫状叠接区向南过渡为线性主位移带。南段垂向升降幅度为-21~22 m, 整体以挤压隆升为主, 局部发育拉伸下陷, 强度自北向南减弱; 破碎带宽度为0.8~1.2 km, 分布稳定, 平均值约1.0 km。

(2) 走滑断裂滑移方向特征。

滑移方向是表征走滑断裂运动学特征的关键参数。通过恢复和对比断裂在不同层位中的滑移

方向, 并结合周缘造山带的活动规律, 可为厘定断裂活动期次、揭示其成因机制提供重要依据。F₁₆断裂的活动主要集中在中部与深部构造变形层, 而在浅部构造变形层中未发育雁列式正断层。因此, 本文重点对断裂在中部及深部构造层中的滑移方向特征展开分析。

本文选取上寒武统底面(TC₃)对F₁₆断裂深部构造变形层内的走滑方向进行了分析。三维地震水平切片显示, 断裂主位移带痕迹清晰, 地震同相轴被明显错断, 呈现典型的左旋走滑特征(图8a)。F₁₆断裂在中段平面错断显著, 而南段水平切片上同相轴仅发生微弱错断, 指示断裂滑移距离自北向南逐渐减小。

在上奥陶统底面(TO₃)上, 本文进一步分析了F₁₆断裂中部构造变形层内的走滑方向。三维地震水平切片表明, 断裂主位移带仍导致地震同相轴显著错断, 并保持典型的左旋走滑特征(图8b)。结合深部构造层的滑移方向特征, 可判定F₁₆断裂整体表现为持续的左旋走滑活动。

(3) 断裂活动期次。

塔里木盆地中部走滑断裂普遍发生多期活动, 造成断裂垂向上发生分层差异变形^[35-37]。本文根据断层与地层的切割关系、断层活动性、地层变形以及同沉积特征等, 对F₁₆断裂活动期次进行了厘定, 划分出两个主要活动时期: 中晚寒武世以及中晚奥陶世(图9)。

中晚寒武世, F₁₆断裂的整体活动强度相对较弱, 但在剖面上仍保留有显著的活动证据。在上寒武统底面(TC₃)附近, 断裂发育分支, 形成花状构造, 并与中部构造层内的花状构造在垂向上构成多重叠置关系。值得注意的是, 这些垂向花状构造在局部呈现出相反的应力特征, 表现为“上隆下陷”或“上陷下隆”的构造样式(图10), 反映了多期次构造活动的叠加, 表明断裂在中晚寒武世即已开始活动。此外, 在F₁₆断裂旁侧发育有一条隐伏断层, 该断层向上终止于中上寒武统内部(图10, 剖面1), 是断裂早期活动但晚期未持续发育而夭折的产物, 进一步指示该区域在中晚寒武世曾发生过走滑活动。

中晚奥陶世, F₁₆断裂活动显著增强, 普遍于上奥陶统底面(TO₃)附近发育分支断裂, 形成花状构造, 并引起地层明显变形。地层垂向变形幅度通常在上奥陶统底面处达到最大, 且该变形

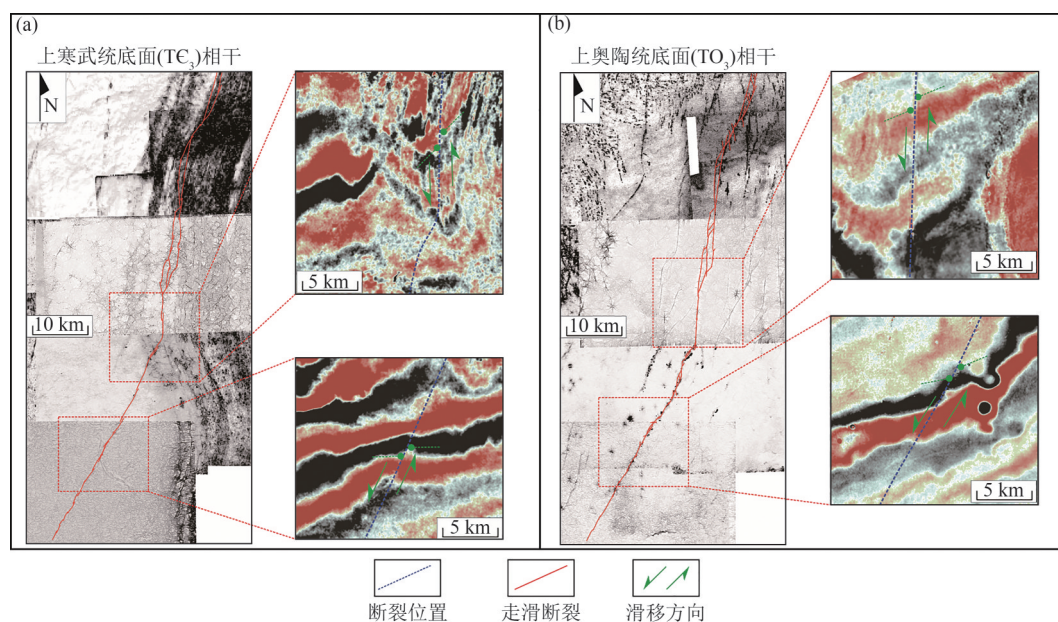


图8 塔里木盆地F₁₆断裂在上寒武统底面 (TC₃) (a) 与上奥陶统底面 (TO₃) (b) 滑移方向特征

Fig. 8 Slip direction characteristics of the F₁₆ fault in the Tarim Basin at the top of the Upper Cambrian (TC₃) (a) and the top of the Upper Ordovician (TO₃) (b)

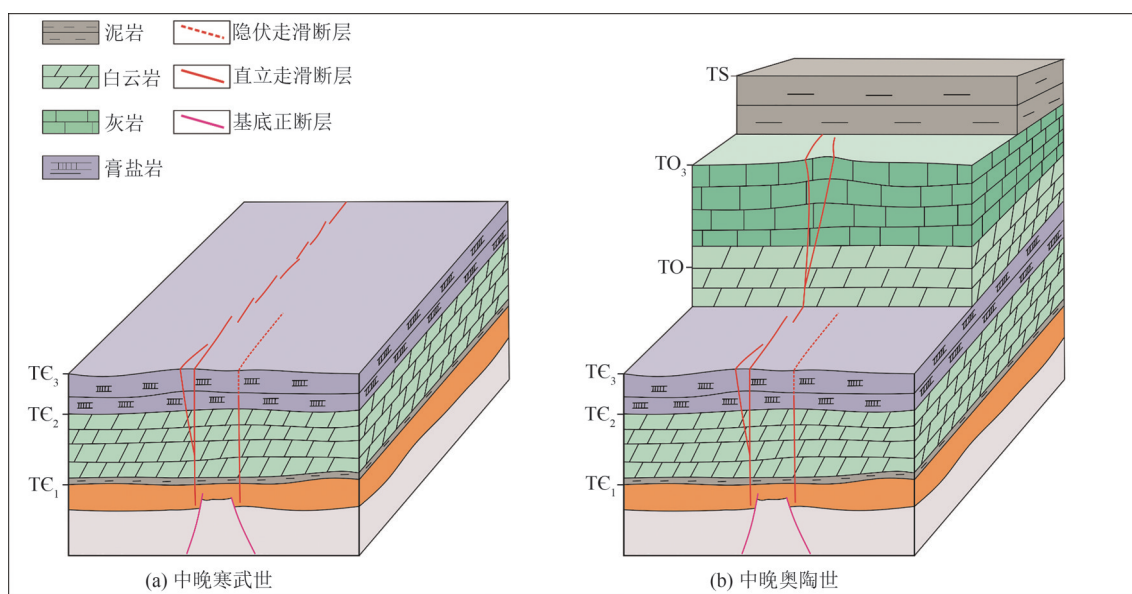


图9 塔里木盆地F₁₆断裂多期活动模式图

Fig. 9 Multi-stage activity model of the F₁₆ fault in the Tarim Basin

效应可持续延伸至上奥陶统内部，同时发育同沉积构造，具体表现为隆起翼部地层增厚而顶部地层减薄（图10，剖面1），指示断裂活动在中奥陶世末期达到峰值，并一直持续至晚奥陶世。走滑断裂局部呈现中奥陶统内部应力场反转的特征，即在鹰山组底面（TO_{1-2y}）附近发育负花状构造，而在上奥陶统底面（TO₃）附近则发育正花状构造（图10），这一现象表明该走滑断裂在中奥陶世中期已开始活动。

4 讨论

4.1 F₁₆断裂发育机制

F₁₆断裂是一条横跨塔北隆起和阿满过渡带的走滑断裂，其主体在塔北隆起内呈近南北向展布，向南延伸进入阿满过渡带后，走向逐渐转为NE向。与塔北隆起上其他走滑断裂不同，F₁₆断裂并未终止于构造单元边界附近，而是持续穿过了塔北隆起与阿满过渡带的过渡带，并表现出明

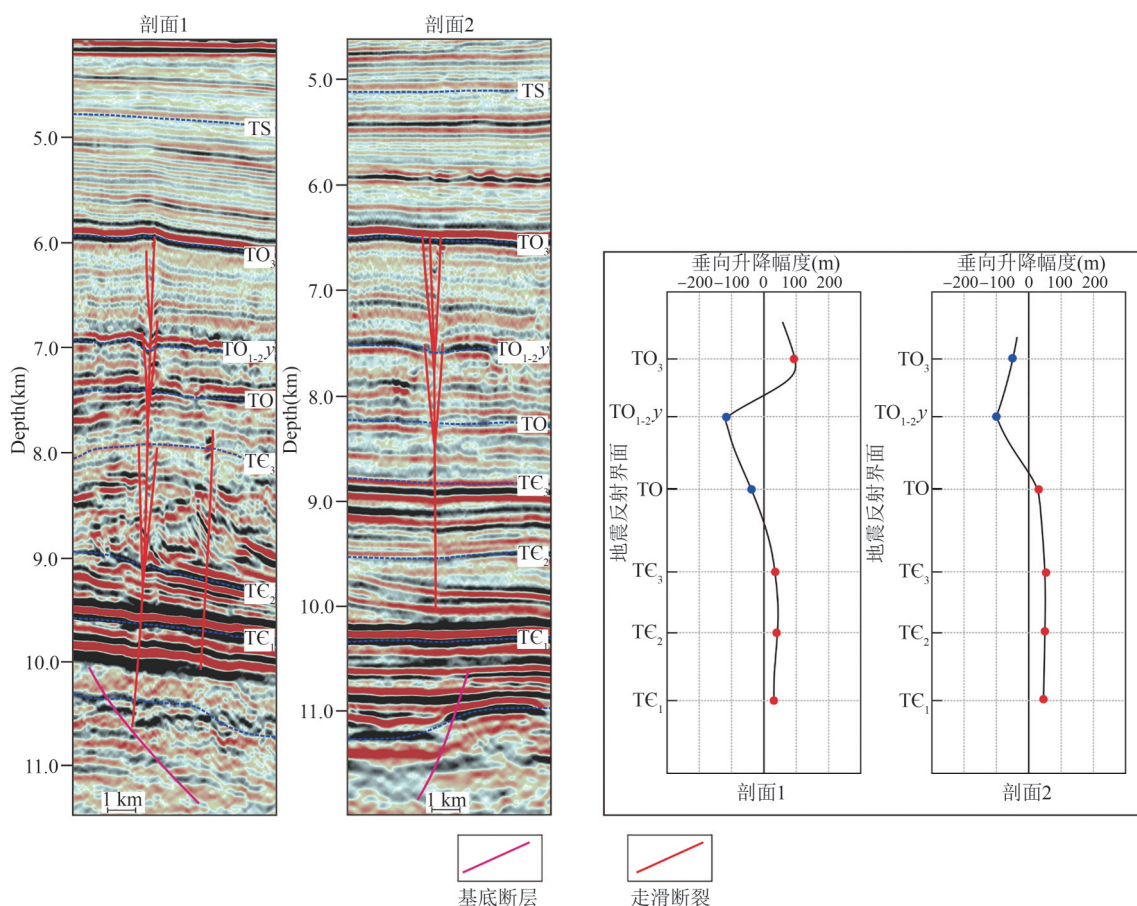


图10 塔里木盆地中部F₁₆断裂典型剖垂直升降幅度变化(剖面1和2位置见图5)

Fig. 10 Vertical uplift amplitude of the F₁₆ fault in the Tarim Basin (see Fig. 5 for the location of profiles 1 and 2)

显的走向偏转特征。这一独特的几何展布使其同时兼具塔北和阿满两大走滑断裂体系的构造属性,反映出其在区域构造转换中的特殊地位。明确F₁₆断裂发育机制对探讨不同走滑断裂体系耦合关系与连接过程具有重要意义,但是目前尚缺乏相关研究。

根据三维地震资料层位解释结果,本文重建了F₁₆断裂及周缘地区中寒武统的厚度分布格局(图11)。中寒武世,研究区中部处于碳酸盐岩台地发育阶段,整体呈现东西分异的古地理特征^[2, 26, 38]。厚度分析表明,中寒武统总体上具有西厚东薄的趋势,但在东部发育一条近南北向的条形增厚带,反映了该时期台缘带的展布位置。通过叠合中寒武统厚度图与走滑断裂平面分布发现,F₁₆断裂在塔北隆起内的发育轨迹与该台缘带的延伸高度重合,说明中寒武统台缘带的古地貌与岩性非均质性可能对断裂的展布和特征产生了重要控制作用。在此基础上,结合盆地周缘造山带活动历史、台缘带展布规律以及断裂

多期活动性质的时序耦合关系,本文初步构建了F₁₆断裂的发育模式,提出其形成主要受先存台缘带形态与基底结构非均质性的共同影响(图12)。

中晚寒武世,受盆地北部古亚洲洋初始俯冲

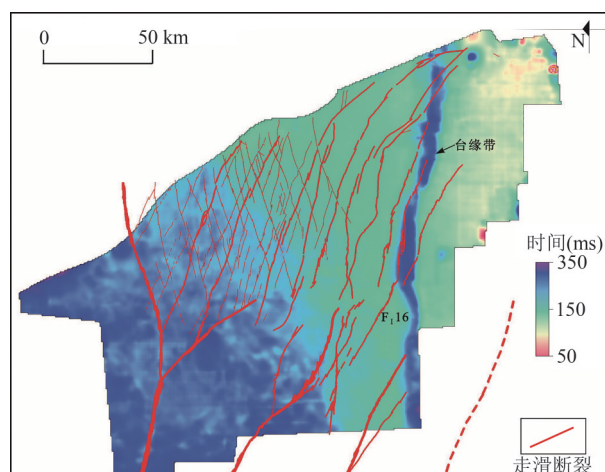
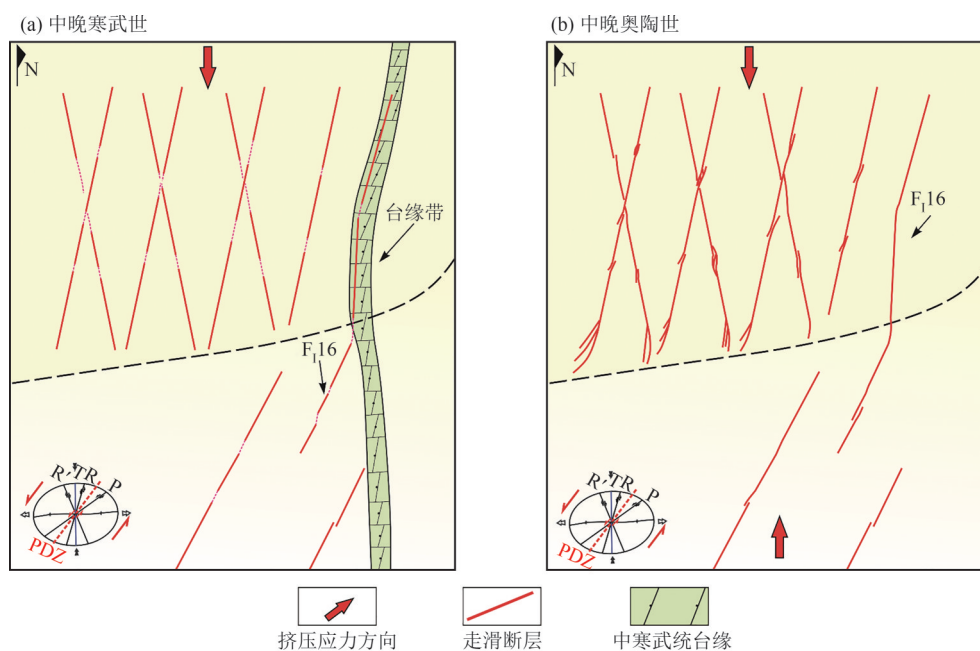


图11 塔里木盆地塔北隆起中寒武统厚度与断裂叠合图

Fig. 11 Superimposed map of the Middle Cambrian thickness and faults in the Tabei Uplift, Tarim Basin

图12 塔里木盆地F₁₆断裂生长演化过程示意图Fig. 12 Schematic diagram illustrating the growth and evolution process of the F₁₆ fault in the Tarim Basin

的影响^[39, 40], 盆地中部发育整体呈南北向的弱挤压应力背景。在此应力作用下, 塔北隆起发生纯剪切变形, 形成NW向和NE向两组共轭走滑断裂锥形。隆起东部受中寒武统台缘带形态控制, 沿台缘带发育的走滑断裂总体呈近南北走向, 并向南延伸至塔北隆起与阿满过渡带的边界。塔里木盆地南部基底存在一系列NE向薄弱带^[37], 其影响范围向北可延至阿满过渡带内, 导致塔中—阿满过渡带内的走滑断裂以NE向为主, 并在弱挤压背景下初步形成NE向走滑断裂系统。沿台缘带向南延伸的近南北向断裂与阿满过渡带内的NE向断裂在构造单元边界附近相互连接, 共同构成F₁₆断裂的早期雏形(图12a)。中晚奥陶世, 随着盆地南缘古昆仑洋与古阿尔金洋的俯冲闭合^[41, 42], 以及北缘南天山洋的双向俯冲^[43], 塔里木盆地整体转入南北向强挤压应力环境。在强烈挤压作用下, F₁₆断裂继承性强烈活动(图12b), 向上延伸并在奥陶系灰岩顶面附近形成花状构造。志留—石炭纪, 受南天山洋俯冲闭合影响^[43, 44], 盆地仍处于挤压背景, 但F₁₆断裂浅部未发育显著的雁列式正断层。究其机制, 雁列式正断层是深部走滑断裂在晚期构造活动中发生继承性活化的产物, 即深部剪切应力的上传递并转化为张性应力的结果。因此, 浅部雁列式正断层的发育程度直接受控于深部直立走滑断裂的活动强度。与F₁₅、F₁₇等持续强烈活动的大

型走滑断裂相比, F₁₆断裂深部的直立走滑活动强度显著偏弱, 导致其晚期继承性活化动力不足, 无法为浅部提供足够的应力来形成显著的雁列式正断层。

4.2 分区发育控制因素

塔里木盆地中部走滑断裂系统具有典型的分区差异发育特征: 塔北隆起区主要发育X型小角度共轭走滑断裂, 而阿满过渡带内则以NE向延伸的断裂为主。尽管这两大断裂体系多数在塔北隆起与阿满过渡带的边界附近终止延伸, 但仍有F₁₆等少数大型走滑断裂能够跨越并连接两大构造单元。目前对塔北隆起与阿满过渡带分区发育的控制因素已有一定认识。塔北隆起的X型小角度走滑断裂被普遍解释为在南北向挤压应力背景下形成的共轭断裂系统^[45]。其断裂夹角偏小的成因, 可能与灰岩的物理力学性质有关^[35], 或受塔北隆起区预先存在的NNW向与NNE向两组基底裂陷带的控制^[46]。阿满过渡带内的NE向走滑断裂, 则属于塔中隆起NE向断裂体系的向北延伸, 其发育受塔里木盆地南部NE向基底薄弱带的显著影响^[37]。两大断裂体系在构造单元边界附近多呈终止状态、平面上缺乏直接连接, 表明该边界对断裂延伸起到了明显的屏障作用。然而, 关于此边界的具体属性及其限制断裂延伸的内在机制, 目前仍不明确。

前人研究已充分揭示, 塔里木盆地前寒武纪

基底结构复杂,早期裂陷构造广泛发育^[47],对盖层构造格局具有显著控制作用^[26, 48]。根据对南华纪—震旦纪古构造格局的恢复结果,现今塔北地区在基底中曾存在一古隆起,而阿满过渡带则整体属于裂陷发育区^[2]。南北向地震剖面进一步显示,从塔北至阿满过渡带的基底结构表现为由基底斜坡向裂陷过渡的特征,平面上两大走滑断裂体系终止延伸的部位,正好对应于基底斜坡与裂陷的过渡区域(图13)。塔北地区基底隆起的锥形可能形成于新元古代早期,即在南北塔里木地块拼合之后^[2, 49]。结合塔北隆起南缘断裂展布特征及地震剖面解释结果,本文认为,限制塔北走滑断裂体系向南延伸的边界主要受前寒武纪基底结

构不均一性控制,该边界大致对应塔北刚性基底隆起与阿满过渡带柔性裂陷系统的交汇带。这种基底结构的横向突变构成了一个有效的“应力屏障”。物理模拟实验^[50]证明,此类先存的刚性差异边界会阻碍上覆盖层中断裂的传播,导致断裂在边界处因应力集中释放而终止或偏转^[51]。这与F₁₆断裂在边界处发生走向偏转,而其他多数断裂直接终止的现象高度吻合。此外,基底差异还导致上覆盖层厚度显著不同(图13),进一步降低了应力传递效率,共同强化了边界的屏障效应。因此,塔北与阿满两大走滑断裂体系多在此边界终止延伸,正是深部基底不均一性控制盖层构造格局的典型表现(图14)。

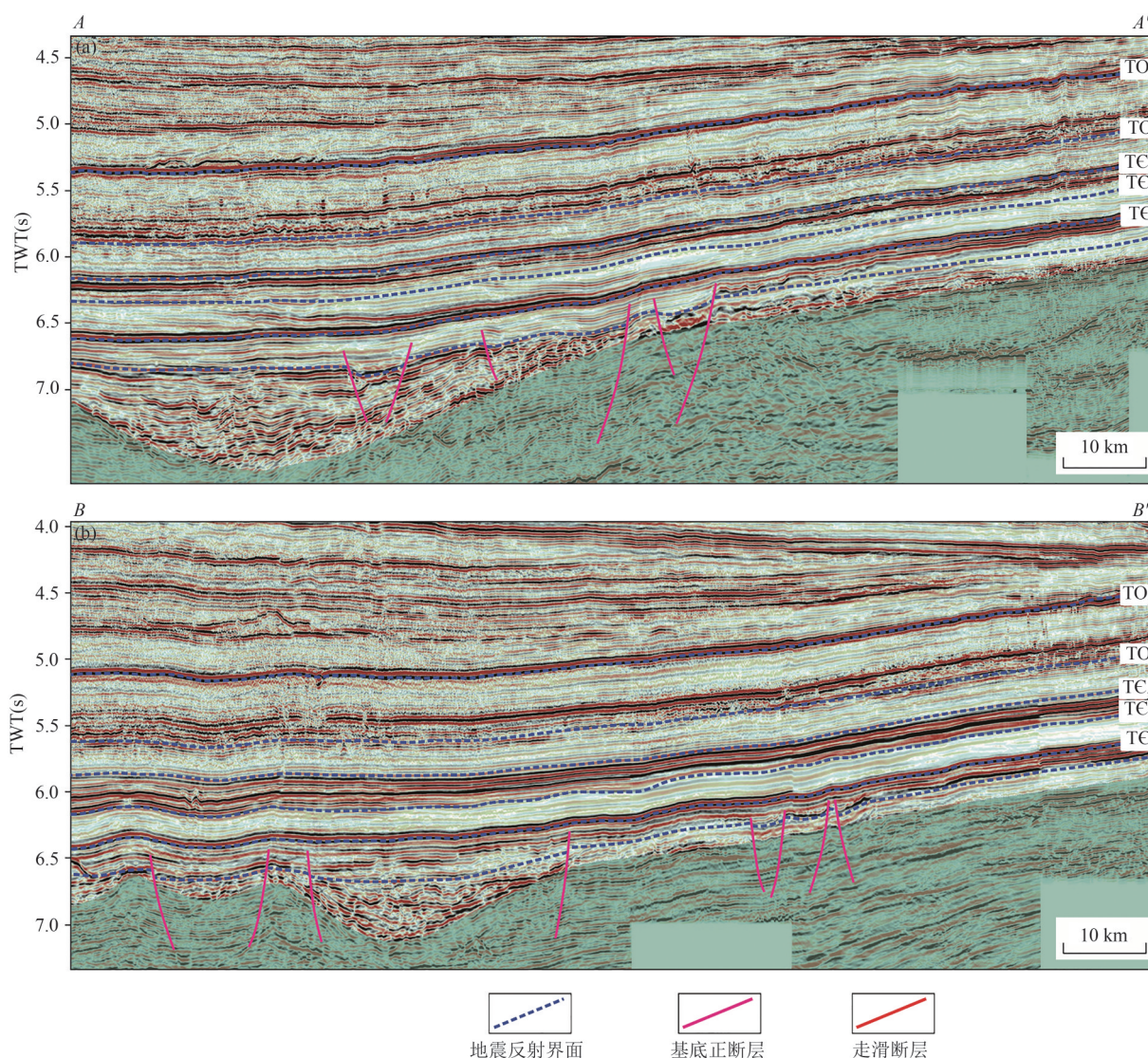


图13 过塔里木盆地塔北隆起南部边界南北向剖面(剖面位置见图3)

Fig. 13 North-south oriented profile across the southern boundary of the Tabei Uplift, Tarim Basin (See Fig. 3 for the profiles locations)

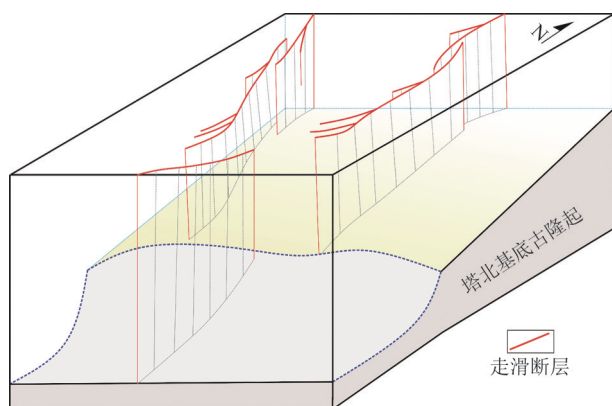


图14 塔北隆起南部边界限制走滑断裂延伸模式图

Fig. 14 Model diagram illustrating the restriction of strike-slip fault extension by the southern boundary of the Tabei Uplift

5 结 论

(1) F₁₆断裂的几何学特征表现为典型的走滑构造样式，具有“平面分段、垂向分层”的显著特点。平面上，该断裂根据走向变化可划分为三段：北段走向NE26°，以左右阶断片组合为特征；中段走向NE4°，发育辫状-菱形叠接构造；南段走向NE30°，主要表现为右阶小型断片连接。垂向上，断裂结构可进一步划分为中部、深部和基底三个构造变形层：中部和深部均发育直立走滑变形，基底则以裂陷为特征，而浅层未出现雁列式正断层。

(2) F₁₆断裂整体表现为左旋走滑性质，活动强度在空间上呈现“北强南弱”的分段差异，垂向上则显示上奥陶统底面的活动强度（垂向升降幅度和破碎带宽度）显著高于上寒武统底面。断裂主要活动期次为中晚寒武世和中晚奥陶世，其中中晚奥陶世为活动高峰期，表现为强烈的花状构造、地层变形及同沉积构造，局部垂向应力反转现象指示了多期活动的叠加。

(3) F₁₆断裂形成受先存基底结构和古地理格局联合控制，其穿单元展布是塔北隆起内受台缘带控制的近南北向断裂与阿满过渡带受NE向基底薄弱带控制的断裂在南北向挤压应力下连接的结果。塔北刚性基底古隆起与阿满过渡带基底裂陷区之间的过渡带，构成了一个显著的“应力屏障”。该屏障不仅阻碍了应力的有效传递，还引起了上覆盖层厚度的差异变化，进而导致多数断裂在边界处发生终止，最终塑造了走滑断裂的分区性展布格局。

参考文献：

- [1] 王清华, 杨海军, 李勇, 等. 塔里木盆地富满大型碳酸盐岩油气聚集区走滑断裂控储模式[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 239–251.
- [2] 邬光辉, 庞雄奇, 李启明. 克拉通碳酸盐岩构造与油气——以塔里木为例[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [3] 曹自成, 耿锋, 任丽丹, 等. 塔里木盆地深层—超深层碳酸盐岩油气勘探历程及新领域[J]. 新疆石油地质, 2025, 46(4): 395–402.
- [4] 王清华, 徐振平, 张荣虎, 等. 塔里木盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 15–32.
- [5] 刘冰雷, 赵永刚, 张银涛, 等. 塔里木盆地阿满过渡带东部主干走滑断裂变形特征及断溶储集体发育[J]. 地质科学, 2025, 60(2): 360–377.
- [6] 祝渭平, 孙东, 姚清洲, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气富集规律[J]. 特种油气藏, 2021, 28(2): 41–48.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [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.
- [10] 陈利新, 贾承造, 姜振学, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩富油模式与主控因素[J]. 石油学报, 2023, 44(6): 948–961.
- [11] 王清华, 杨海军, 汪如军, 等. 塔里木盆地超深层走滑断裂断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.
- [12] 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.
- [13] 侯少勇, 能源, 刘瑞东, 等. 塔里木盆地富满油田F₁₉走滑断裂带构造变形特征及变形机制——来自物理模拟实验的启示[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2025, 48(6): 550–562.
- [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.
- [15] DENG S, ZHAO R, KONG Q, et al. Two distinct strike-slip fault networks in the Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin: Hydrocarbon accumulation, distribution, and controlling factors[J]. AAPG Bulletin, 2021, 106(1): 77–102.
- [16] 宋兴国, 陈石, 杨明慧, 等. 塔里木盆地富满油田F₁₆断裂发育特征及其对油气分布的影响[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(3): 99–109.
- [17] 宋雯丹, 徐朝晖, 徐怀民, 等. 塔里木盆地克深气田构造裂缝主控因素及发育模式[J]. 现代地质, 2026, 40(2): 356–372.
- [18] 何登发. 中国多旋回叠合沉积盆地的形成演化、地质结构与油气分布规律[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 24–59.
- [19] 杨宪彰, 王祥, 张海祖, 等. 深地塔科1井万米超深层寒武系

- 天然气成藏地质特征及资源潜力[J]. 深地能源科技, 2025, 1(1): 61–73.
- [20] 杨海军, 王平, 孙崇浩, 等. 深地塔科1井万米深层优质白云岩储层特征及成因分析[J]. 深地能源科技, 2025, 1(1): 49–60.
- [21] 朱日祥, 赵盼, 赵亮. 新特提斯洋演化与动力过程[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(1): 1–25.
- [22] LI Z, BOGDANOVA S, COLLINS A, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160(1/2): 179–210.
- [23] WU G, XIAO Y, HE J, et al. Geochronology and geochemistry of the late Neoproterozoic A-type granitic clasts in the southwestern Tarim Craton: petrogenesis and tectonic implications[J]. *International Geology Review*, 2019, 61(3): 280–295.
- [24] GE R, ZHU W, WILDE S A, et al. Neoproterozoic to Paleozoic long-lived accretionary orogeny in the northern Tarim Craton[J]. *Tectonics*, 2014, 33(3): 302–329.
- [25] ZHANG C, ZOU H, LI H, et al. Tectonic framework and evolution of the Tarim Block in NW China[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1306–1315.
- [26] 郭光辉, 邓卫, 黄少英, 等. 塔里木盆地构造—古地理演化[J]. 地质科学, 2020, 55(2): 305–321.
- [27] 张光亚, 刘伟, 张磊, 等. 塔里木克拉通寒武纪—奥陶纪原型盆地、岩相古地理与油气[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 269–276.
- [28] 贾承造. 塔里木盆地板块构造与大陆动力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [29] DONG Y, HE D, SUN S, et al. Subduction and accretionary tectonics of the East Kunlun orogen, western segment of the Central China Orogenic System[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 231–261.
- [30] 许志琴, 李思田, 张建新, 等. 塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 1–22.
- [31] 许志琴, 李海兵, 杨经绥. 造山的高原——青藏高原巨型造山拼贴体和造山类型[J]. 地学前缘, 2006, 13(4): 1–17.
- [32] 李本亮, 贾承造, 庞雄奇, 等. 环青藏高原盆地体系内前陆冲断构造变形的空间变化规律[J]. 地质学报, 2007, 81(9): 1200–1207.
- [33] 贾承造, 魏国齐. 塔里木盆地构造特征与含油气性[J]. 科学通报, 2002(S1): 1–8.
- [34] 漆家福, 陈石, 罗彩明, 等. 塔里木盆地阿—满过渡区走滑断裂系统及其控藏规律[J]. 地质学报, 2024, 98(12): 3662–3682.
- [35] 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.
- [36] DENG S, LI H, ZHANG Z, et al. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(1): 109–137.
- [37] HAN X, DENG S, TANG L, et al. 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[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 410–427.
- [38] 郭光辉, 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.
- [39] REN R, HAN B F, XU Z, et al. When did the subduction first initiate in the southern Paleo-Asian Ocean: New constraints from a Cambrian intra-oceanic arc system in West Junggar, NW China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 388: 222–236.
- [40] HAN Y G, ZHAO G C, SUN M, et al. Paleozoic accretionary orogenesis in the Paleo-Asian Ocean: Insights from detrital zircons from Silurian to Carboniferous strata at the northwestern margin of the Tarim Craton[J]. *Tectonics*, 2015, 34(2): 334–351.
- [41] 李传新, 贾承造, 李本亮, 等. 塔里木盆地塔中低凸起北斜坡古生代断裂展布与构造演化[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1065–1073.
- [42] LAN X, LÜ X, ZHU Y, et al. The geometry and origin of strike-slip faults cutting the Tazhong low rise megaanticline (central uplift, Tarim Basin, China) and their control on hydrocarbon distribution in carbonate reservoirs[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 22: 633–645.
- [43] GAO Z, FAN T. Intra-platform tectono-sedimentary response to geodynamic transition along the margin of the Tarim Basin, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 96: 178–193.
- [44] CHEN C, LU H, JIA D, et al. Closing history of the southern Tianshan oceanic basin, western China: an oblique collisional orogeny[J]. *Tectonophysics*, 1999, 302(1–2): 23–40.
- [45] 马德波, 郭光辉, 朱永峰, 等. 塔里木盆地深层走滑断层分段特征及对油气富集的控制: 以塔北地区哈拉哈塘油田奥陶系走滑断层为例[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 225–237.
- [46] SONG X, CHEN S, ZHANG Y, et al. Formation mechanism of the small-angle X-type strike-slip faults in deep basin and its controlling on hydrocarbon accumulation: a case study from the Tabei Uplift, Tarim Basin, NW China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2024, 12: 1416850.
- [47] 陈永权, 王晓雪, 何皓, 等. 塔里木克拉通南华纪—寒武纪隆坳格局演化[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(4): 30–46.
- [48] NENG Y, LI Y, QI J, et al. Deformation Styles and Multi-Stage Evolution History of a Large Intraplate Strike-Slip Fault System in a Paleozoic Superimposed Basin: A Case Study From the Tarim Basin, NW China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 837354.
- [49] 能源, 张银涛, 谢舟, 等. 塔里木盆地富满油田 F I 19 走滑断裂带变形特征及多期活动物理模拟研究[J]. 现代地质, 2025, 39(6): 1555–1570.
- [50] MCCLAY K R. Extensional fault systems in sedimentary basins: a review of analogue model studies[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1990, 7(3): 206–233.
- [51] DOOLEY T P, SCHREURS G. Analogue modelling of intra-plate strike-slip tectonics: A review and new experimental results[J]. *Tectonophysics*, 2012, 574–575: 1–71.