

塔里木盆地顺北5号走滑断裂隆起段发育特征与演化机制

张红波^{1,2},周雨双^{1,2},沙旭光³,邓 尚²,沈向存³,姜忠正³

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214126; 2. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 102206;
3. 中国石化西北油田分公司 勘探开发研究院,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:顺北5号带作为一条贯穿两大古隆起的主干走滑断裂带,可分为四段:北段、中段、南段以及隆起段,一直以来是塔里木盆地顺北地区及邻区走滑断裂体系形成及演化的研究重点。利用最新采集处理的高精度三维地震资料,开展顺北5号带隆起段精细解析,厘定其几何学和运动学特征,揭示顺北5号带形成演化过程。基于走向角度变化与分段变形样式,可将隆起段分为3段:隆Ⅰ“平移”段(NE16°)、隆Ⅱ“拉分”段(NE19°)、隆Ⅲ“压隆”段(NE25°)。隆起段自下而上发育高陡走滑断层与多套雁列正断层组合的分层变形样式,共经历了加里东中期、加里东晚期、海西中-晚期和印支期—喜马拉雅早期多期走滑活动,在研究区内表现为“隆Ⅱ、Ⅲ段强,隆Ⅰ段弱”的活动特征。受SN差异应力传递影响,顺北5号断裂隆起段和南段初期以塔中Ⅰ号断裂带为界自南向北左行走滑,北段和中段自北向南右行活动,最大主应力发生了NW向到NE向偏转;加里东晚期后,顺北5号断裂整体左行走滑;印支期—喜马拉雅早期,顺北5号断裂隆起段反转为右行走滑活动,最大主应力方向由NW向转为NE向。

关键词:变形样式;走滑断裂带;构造演化;塔中隆起;顺北地区;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Development characteristics and evolution mechanism of the uplifted segment of the No. 5 strike-slip fault zone in Shunbei area, Tarim Basin

ZHANG Hongbo^{1,2}, ZHOU Yushuang^{1,2}, SHA Xuguang³, DENG Shang², SHEN Xiangcun³, JIANG Zhongzheng³

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The No. 5 fault zone in Shunbei area, a main strike-slip fault zone running through two paleo-uplifts and being divided into north, middle, south and uplifted segments, has always been the focus of research on the formation and evolution of the strike-slip fault system in Shunbei area and its surroundings. In this study, the latest high-precision 3D seismic data newly acquired and processed are applied to carry out the fine analysis of the uplifted segment of the No. 5 fault zone in Shunbei area, determining its geometric and kinematic characteristics and revealing its formation and evolution process. According to the change of strike angle and segmented deformation pattern, the uplifted segment of the study area can be divided into three sections: the north translational section (NE16°) (uplifted segment I), the middle pull-apart section (NE19°) (uplifted segment II), and the south compressional-uplifted section (NE25°) (uplifted segment III). The uplifted segment in the study area develops a layered deformation pattern composed of high and steep strike-slip faults and multiple suites of en echelon normal faults from bottom to top, while undergoing multi-stage strike-slip activities during the Middle Caledonian, Late Caledonian, Middle-to-Late Hercynian and Indosinian-Early Himalayan periods. In the study area, the strike-slip activities feature “strong in the segments II and III, weak in the segment I”. Under the influence of stress transmission from south to north, the south and uplifted segments present sinistral strike-slip from south to north with No. 1 fault zone in Tazhong area as the boundary at the initial stage of

收稿日期:2022-12-14;修订日期:2023-01-10。

第一作者简介:张红波(1994—),男,助理研究员,构造地质学。E-mail: zhanghb7960.syky@sinopec.com。

通讯作者简介:周雨双(1987—),男,副研究员,构造地质学。E-mail: zhouys.syky@sinopec.com。

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技部项目(P22125)。

development, while the north and middle segments present dextral strike-slip from north to south, with the maximum principal stress deflecting from NW to NE. After the Late Caledonian period, the No. 5 fault zone in Shunbei area presented sinistral strike-slip as a whole, while during the Indosinian-Early Himalayan periods, the uplifted segment reversed to dextral strike-slip, with the maximum principal stress reversing from NW to NE.

Key words: deformation pattern, strike-slip fault zone, tectonic evolution, Tazhong uplift, Shunbei area, Tarim Basin

引用格式:张红波,周雨双,沙旭光,等.塔里木盆地顺北5号走滑断裂隆起段发育特征与演化机制[J].石油与天然气地质,2023,44(2):321-334. DOI:10.11743/ogg20230206.

ZHANG Hongbo, ZHOU Yushuang, SHA Xuguang, et al. Development characteristics and evolution mechanism of the uplifted segment of the No. 5 strike-slip fault zone in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 321-334. DOI: 10.11743/ogg20230206.

近年来,随着塔里木盆地走滑断控缝洞型油藏的发现,业界充分认识到走滑断裂既是输导体,又是储集体,具有明显的“控储、控圈、控运、控藏、控富”特征^[1-7]。多年的勘探开发实践证实,塔北—塔中地区走滑断裂属于板内走滑断裂,与盆缘断裂有明显不同,具有中、小滑移距、弱变形的特点^[8-16]。最新研究表明,塔北—塔中走滑断裂体系以顺北5号走滑断裂为界,具有东西分区、南北分带的特点^[5,8]。前人针对顺北地区5号走滑断裂开展了深入研究,基本明确了断裂发育样式、断裂活动特征等,其中北段以叠接压隆发育为主,偶有叠接拉分,中段以平移段发育为主,南段发育“中间主走滑断面+两侧地堑断面”复合构造,总体经历了加里东中期Ⅲ幕、加里东晚期和海西中—晚期等3个阶段的构造活动^[10-12]。然而针对塔中隆起区的顺北5号断裂样式以及断裂活动特征尚未见系统分析,另外,顺北5号带作为一条贯穿塔北—塔中的主干走滑断裂,其形成演化过程有待继续深入研究。

鉴于此,本文在总结前人研究成果基础上,基于研究区最新采集处理的高精度三维地震资料,重点开展三维研究区顺北5号走滑断裂分层、分段发育特征精细解析,厘定其活动期次与活动强度,通过古应力场与力学机制研究,结合区域动力学背景,揭示了顺北5号走滑断裂的形成演化过程。

1 区域地质背景

1.1 区域地质概况

塔中隆起位于塔里木盆地中部,北部紧邻顺托果勒低隆,南部是塘古巴斯坳陷,是以塔中I号断裂和塔中南缘断裂为南北边界、向北西倾没的大型继承性古隆起^[17-19]。塔中隆起经历多期构造运动,形成了多个不整合面和多组断裂体系,该区显生宙地层发育较为

齐全,除侏罗系缺失以外,寒武系—奥陶系发育巨厚的碳酸盐岩,晚奥陶世之后以碎屑岩沉积为主,其间发育多套不整合^[17-18]。塔中隆起总体发育4个断裂体系:①NW向逆冲断裂体系,与塔中隆起近平行发育,控制了塔中隆起的形成与内部的隆凹结构;②NEE向弧形逆冲断裂体系,主要分布在东南部,属于加里东中—晚期北昆仑—阿尔金俯冲形成的逆冲断裂;③NE向走滑断裂体系,主干走滑断裂与顺北地区均可对接(包括顺北5号带、4号带、8号带等),部分北东向走滑断裂在塔中10号带、塔中I号带附近终止发育;④NW向走滑断裂体系,除了NE向走滑断裂尾部派生的多个NW向拉分地堑以外,其主要发育在顺北5号断裂以西地区(包括顺北11号带、13号带等)(图1)。前期研究发现塔中隆起油气分布与断裂带密切相关,多期活动的NE向走滑断裂控制了油气的横、纵向输导与奥陶系缝洞型储集体发育,沿着多条NE向走滑断裂发现多个油气藏,纵向上油气主要在奥陶系聚集,局部石炭系、志留系、寒武系成藏,从而形成了塔中隆起区断控复式油气富集带^[20]。

1.2 顺北5号断裂展布特征

塔中—顺北—塔北连片三维地震资料揭示,台盆区走滑断裂体系整体呈南北对接、东西分区的特点^[5-7],塔北隆起发育共轭走滑断裂体系,塔中隆起发育单剪走滑断裂体系,在顺托果勒低隆南北相接,顺北5号带作为贯穿塔北和塔中两大隆起的大型盆内调节型走滑断裂,延伸长(约270 km)、规模大,是NE向和NW向走滑断裂体系的分界^[12,14-15]。根据连片地震资料解释,基于走向角度变化可将顺北5号断裂分为4段:其中北段位于塔北隆起(约NW20°);中段和南段位于顺托果勒低隆,中段为近NS向,南段约NE10°;隆起段位于塔中隆起(约NE20°),贯穿整个塔中隆起,自南向北切割多条NW向逆冲断裂。目前,

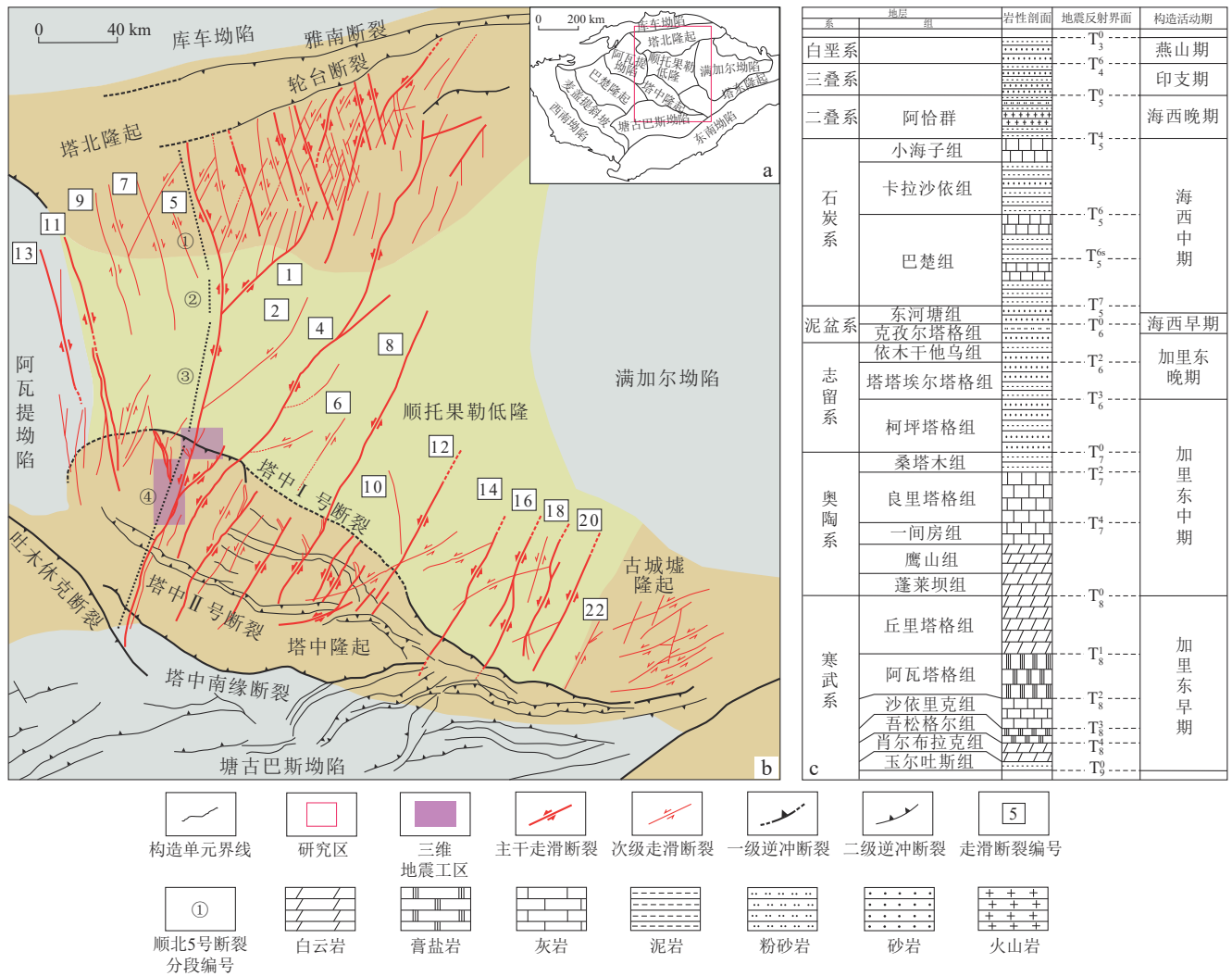


图1 塔里木盆地塔中地区及邻区下古生界主要断裂分布及地层格架

Fig. 1 Distribution of major faults in and stratigraphic framework of the Lower Paleozoic in the Tazhong area and the surroundings, Tarim Basin

a. 塔里木盆地构造单元; b. 塔中及邻区下古生界断裂分布; c. 塔中及邻区地层格架

①. 顺北5号断裂北段; ②. 顺北5号断裂中段; ③. 顺北5号断裂南段; ④. 顺北5号断裂隆起段

T_9^0 : 震旦系顶面; T_8^4 : 下寒武统肖尔布拉克组顶面; T_8^3 : 下寒武统吾松格组顶面; T_8^2 : 中寒武统沙依里克组顶面; T_8^1 : 中寒武统阿瓦塔格组顶面; T_8^0 : 上寒武统丘里塔格组顶面; T_7^4 : 中奥陶统一间房组顶面; T_7^3 : 上奥陶统良里塔格组顶面; T_7^2 : 奥陶系顶面; T_7^1 : 下志留统柯坪塔格组顶面; T_6^5 : 下志留统塔塔埃塔格组顶面; T_6^4 : 泥盆系克孜尔塔格组顶面; T_6^3 : 泥盆系东河塘组顶面; T_6^2 : 下石炭统生屑灰岩顶面; T_6^1 : 下石炭统标准灰岩顶面; T_5^4 : 上石炭统小海子组顶面; T_5^3 : 二叠系顶面; T_4^0 : 三叠系顶面; T_3^0 : 白垩系顶面

围绕顺北5号带部署的多口钻井获得工业油气流,其中北段和中段已转入开发评价阶段,而南段和隆起段仍处于探索阶段^[10]。

2 顺北5号断裂隆起段活动特征

板内中-小尺度走滑断裂精细解析重点包括了分段样式与分层变形研究以及断裂活动强度与断裂活动期次的厘定。本次研究主要针对新采集处理的高精度三维地震资料进行精细解析,明确了顺北5号断裂在

三维研究区内的分层发育结构与分段变形特征,揭示了研究区内顺北5号断裂隆起段活动特征与局部应力变化。

2.1 差异变形特征

分段差异演化是走滑断裂的基本特征之一^[1-4],前人研究揭示顺北地区走滑断裂不同分段展布阶式与叠接应变构造差异明显^[5, 7-8]。根据深部主干断裂走向角度变化、分段发育样式以及 T_8^1 界面(中寒武统阿瓦塔格组顶面)和 T_7^2 界面(上奥陶统良里塔格组顶面)垂向

断距大小统计,可将研究区顺北5号断裂隆起段划分为3段:隆Ⅰ“平移”段、隆Ⅱ“拉分”段、隆Ⅲ“压隆”段(图2)。

顺北5号断裂隆起段的隆Ⅰ段总体走向NE16°,在T₇界面可厘定出5个几何学断面,包括2个叠接压隆段和2个叠接拉分段,叠接发育长度和叠接面积较小,总体表现为线性平移特征。浅部不同层系雁列断层发育数量和展布方式也有明显差异,T₇界面(上奥陶统桑塔木组顶面)和T₆界面雁列断层发育特征相似,而T₆界面北段雁列断层倾向、发育位置与T₇界面相区别,推测可能为不同构造活动下形成,T₅和T₃界面显示北部雁列断层基本不发育(图3)。隆Ⅱ段总体走向NE19°,在T₇界面可厘定出5个几何学断面,包括4个叠接拉分段。隆Ⅲ段总体走向NE25°,在T₇界面可厘定出2个几何学断面,包括1个叠接拉分段和1个叠接压隆段。T₇界面反映出隆Ⅱ段与隆Ⅲ段为辫状构造发育段,其中隆Ⅱ段表现为张扭性质,隆Ⅲ段表现为压扭特点。T₆界面隆Ⅱ段、隆Ⅲ段雁列断层发育,呈右阶斜列展布、左行走滑活动,T₅、T₃层位相干雁列断层发育,呈右

行右阶展布特征,但两个层位雁列断层展布特征、发育数量不一,表明其为不同构造活动下发育形成的(图2)。多层位相干揭示T₈界面(中寒武统膏盐岩顶面)与T₇界面(上奥陶统碳酸盐岩顶面)在同一叠接位置的应变性质相反。在隆Ⅱ段左阶叠接位置,T₇界面表现为拉分下掉,T₈界面表现为压隆上拱;在隆Ⅲ段右阶叠接位置,T₇界面表现为压隆上拱,T₈界面表现为拉分下掉。T₇界面与T₈界面变形样式差异可能与刚性层与塑性层岩石力学性质有关。前人研究表明,塑性膏盐具有从高势区向低势区流动的特点,在地质应变率下,容易受应力影响的膏盐层充当了韧性加压层,有效地将上覆盖层与基底分隔开,分为盐上层与盐下层独立变形^[15]。在左行左阶位置,受局部张应力作用、势能降低,膏盐易聚集加厚、盐层上拱;在左行右阶位置,局部压应力集中、势能增高,膏盐易逃逸减薄、盐层下掉^[21]。

不同构造期活动、地层岩性与岩石力学参数差异等会造成走滑断裂带内部空间结构复杂、分层变形样式不一^[11]。通过对三维工区顺北5号断裂精细解析,

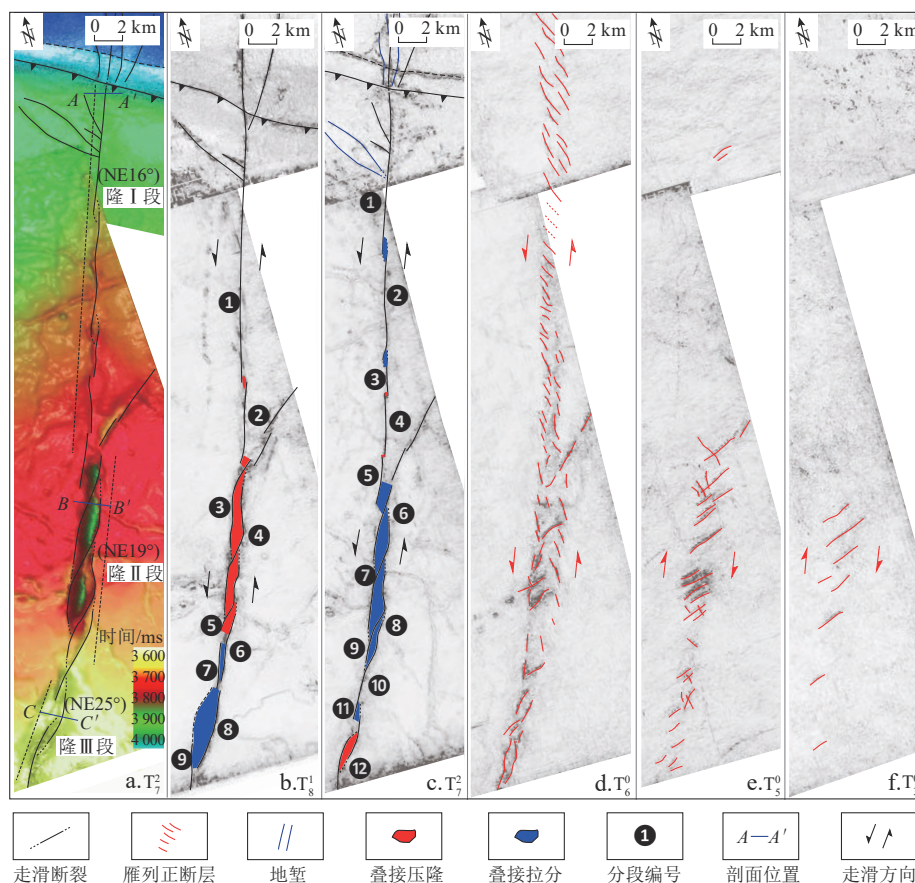


图2 塔里木盆地顺北5号断裂带隆起段多层位相干与断裂解释(三维地震工区范围见图1)

Fig. 2 Multi-layer potential coherence and fault interpretation of the uplifted segment of No. 5 fault zone in Shunbei area, Tarim Basin (see Fig. 1 for the 3D seismic acreage)

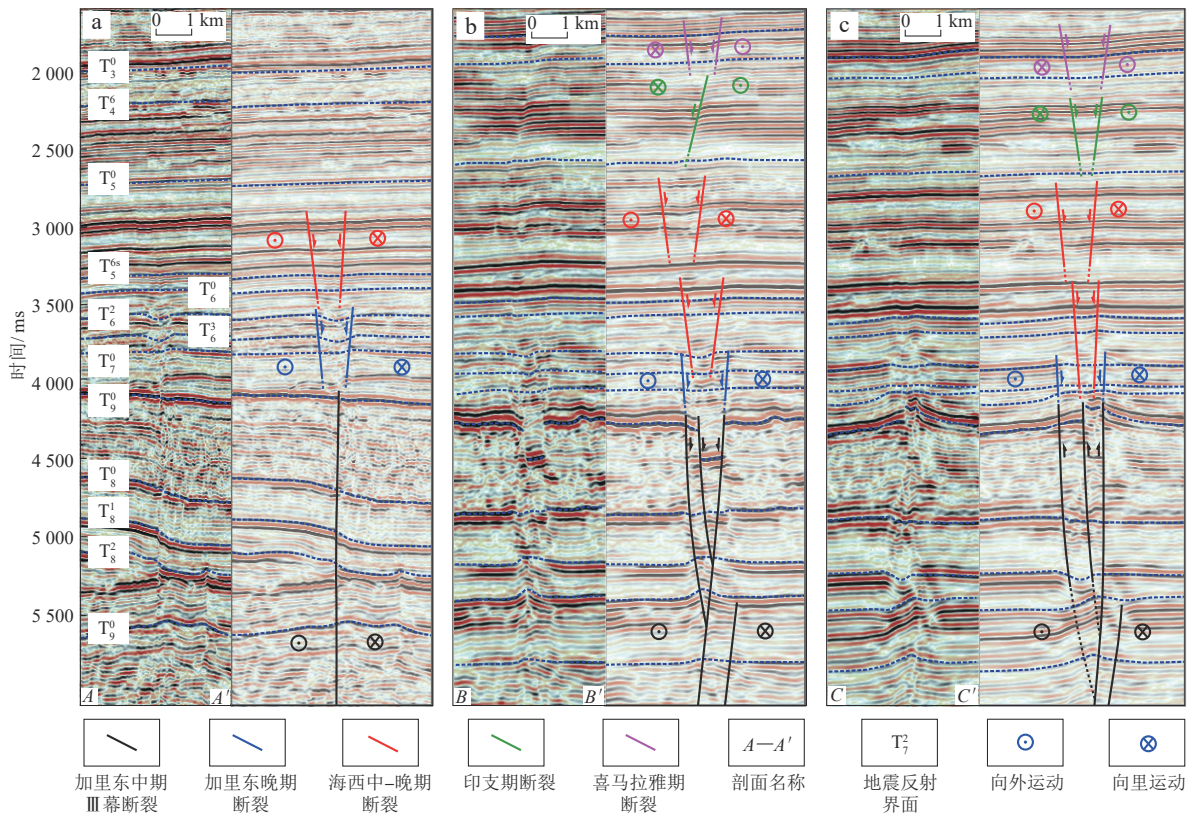


图3 塔里木盆地顺北5号断裂带隆起段各分层发育的典型剖面A—A'(a), B—B'(b)和C—C'(c)(剖面位置见图2)

Fig. 3 Representative profiles showing typical layered development pattern of Shunbei 5 fault zone in the uplifted segment of the No. 5 fault zone in Shunbei area, Tarim Basin (see Fig. 2 for the profile locations of A—A'(a), B—B'(b) and C—C'(c))

发现其具有深层与中层、浅层差异变形特点。深层构造样式主要在 T_7^2 界面及下伏地层发育,断裂在寒武系盐下底部表现为近直立走滑特征,隆Ⅱ段、隆Ⅲ段受挤压分量影响,寒武系盐下地层上拱明显,形成倾向北西的斜向高角度走滑样式。在寒武系膏盐岩层中(T_8^1 界面以下),隆Ⅰ段仍以近直立状断裂发育为主,隆Ⅱ段膏盐岩层受局部应力作用发生塑性流动、盐层上拱,向上在奥陶系碳酸盐岩顶面表现为负花状构造样式。南段膏盐岩层在局部应力作用下出现膏盐岩逃逸现象,盐层减薄、拉分下掉,断裂在碳酸盐岩顶面压隆上拱明显,总体表现为正花状构造样式(图3)。中层构造样式表现为近对称的小型地堑构造,隆Ⅱ段、隆Ⅰ段地层下掉明显,隆Ⅲ段则是在深层叠接压隆构造叠加改造为小幅下掉构造,主要在 T_6^2 界面(下志留统塔塔埃尔塔格组顶面)以下、 T_7^2 界面及上覆地层中发育。浅层构造样式主要表现在 T_6^0 界面(中-下泥盆统克孜尔塔格组顶面)和 T_5^6 界面(下石炭统巴楚组生屑灰岩顶面)雁列断层密集发育,雁列正断层与中层构造样式、深层主走滑断裂不一定相连,三维地震剖面揭示不同分段 T_7^2 界面(上二叠统沙井子组顶

面)以下雁列断层发育组数不一,隆Ⅰ段自二叠系库普库兹满组从上往下发育1组雁列正断层,隆Ⅱ段和隆Ⅲ段2组雁列正断层分层发育,剖面上雁列正断层倾向、发育位置不一,推测可能是不同构造活动造成的。在 T_4^4 界面(上三叠统哈拉哈塘组顶面)与 T_3^3 界面(古新统库姆格列木群底面)顺北5号断裂隆起段局部雁列正断层发育,表明断裂后期仍有活动。

2.2 断裂活动期次

针对盆内中-小尺度走滑断裂活动期次的判识,前人研究基本建立了相对合理的综合判别方法^[4],本次通过对不同构造样式发育层位、不整合面接触关系分析以及雁列正断层垂向断距大小统计,结合盆地周缘构造活动背景研究,将顺北5号断裂隆起段活动期次划分为4个阶段:加里东中期Ⅲ幕、加里东晚期、海西中-晚期、印支期—喜马拉雅早期。

第一阶段对应于加里东中期Ⅲ幕构造运动,顺北5号断裂隆起段 T_8^1 和 T_7^2 界面虽然存在叠接部位应变性质相反特征,但总体叠接方式相对统一,分段间叠接样式指示隆起段左行走滑活动(图2)。其中隆Ⅰ段剖

面揭示了 T_7^2 界面及 T_7^0 界面以下断裂构造样式具有一致性,主要引起寒武系一中上奥陶统碳酸盐岩地层变形,在隆Ⅱ、Ⅲ段则分别发育强拉分构造、压脊构造,造成 T_7^2 界面及 T_7^0 界面以下地层局部变形,且无明显角度不整合,因此认为该构造样式形成时期可能在晚奥陶世,大致对应于加里东中期Ⅲ幕构造运动。

第二阶段对应于加里东晚期,顺北5号断裂隆起段第一套雁列断层主要在 T_7^2 界面以上发育,多数雁列断层向上发育至 T_6^0 界面处,在紧邻的上覆地层中消失,此外 T_6^2 、 T_6^0 和 T_7^0 界面雁列垂向断距相对协调统一(图4),由此认为其形成时期为加里东晚期,深层主干走滑断裂在加里东晚期的再次活动造成上覆地层变形,从而形成了该套雁列正断层。

第三阶段对应于海西中-晚期构造运动,与之对应的第二套雁列正断层主要发育在 T_6^0 界面以上,向上断穿 T_4^2 界面,其与下伏第一套雁列正断层极少相连,雁

列正断层垂向断距大小反映出 T_6^2 和 T_6^0 变形的一致性,与下伏第一套雁列断层中 T_6^2 、 T_6^0 和 T_7^0 垂向断距大小存在差异(图4),另外雁列断层剖面发育位置、倾向角度与下伏第一套雁列断层不同,据此推测两套雁列断层形成时期不同。除此以外,顺北5号断裂隆起段的隆Ⅱ段、隆Ⅲ段在 T_5^2 界面之上还发育一套雁列正断层,该套雁列断层总体影响到 T_5^2 界面以下、 T_5^2 之上的地层变形,由此推断第二套雁列正断层发育于 T_5^2 界面之上,在海西中-晚期构造活动下形成。

第四阶段对应于印支期—喜马拉雅早期多期运动,多层相干的断裂展布特征揭示, T_3^0 和 T_3^2 界面雁列断层发育数量和发育位置不完全一致,地震剖面上断裂精细解析表明, T_4^2 界面以下、 T_5^2 界面之上发育一套右行斜列式展布的雁列正断层,总体变形特征与 T_3^2 界面之上发育的一套右行式雁列断层相区别,据此推测隆Ⅱ、Ⅲ段可能在印支期—喜马拉雅早期存在多期活动,断

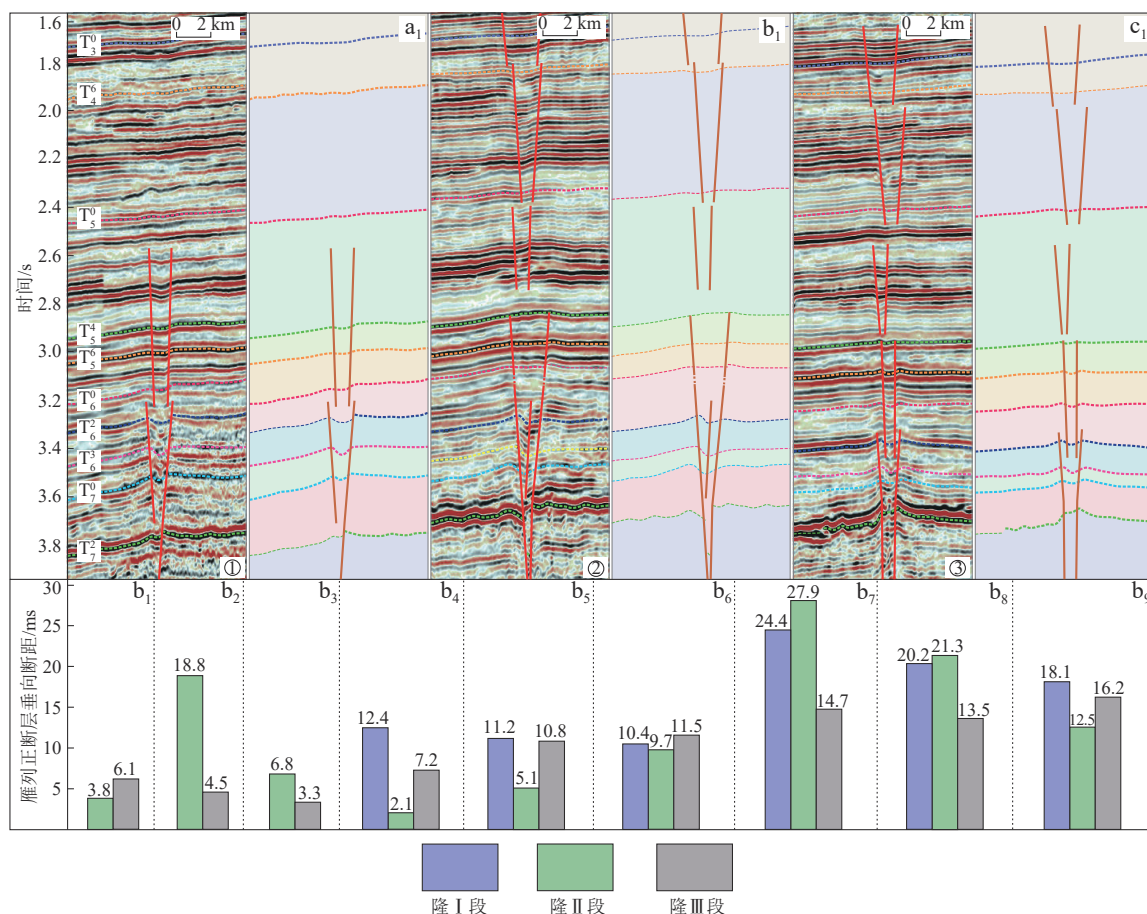


图4 顺北5号断裂带隆起段浅层发育的正断层典型剖面(a_1 — a_3)及垂向断距(b_1 — b_9)统计(剖面位置见图5)

Fig. 4 Typical profiles and vertical throws of shallow en echelon normal fault zones for the uplifted segment of the No. 5 fault zone in Shunbei area (see Fig. 5 for the profile location)

a_1 , 隆Ⅰ段剖面①; a_2 , 隆Ⅱ段剖面②; a_3 , 隆Ⅲ段剖面③

b_1 , T_3^0 ; b_2 , T_4^2 ; b_3 , T_5^2 ; b_4 , T_5^4 ; b_5 , T_5^2 ; b_6 , T_6^0 ; b_7 , T_6^2 ; b_8 , T_6^2 ; b_9 , T_7^0

裂运动方向由加里东中期—海西中、晚期的左行活动变为印支期—喜马拉雅早期的右行走滑,表明在海西晚期之后,顺北5号断裂隆起段局部应力场可能发生了一个大的转变。

2.3 断裂活动强度

同一条走滑断裂平面和垂向变形强弱的差异,与深部先存断裂分段性和主滑移带应变性质有关。前期研究证实走滑断裂初始发育阶段,由多个不连续的断面组成,由于先存断面的非均质性,导致后期剪切过程中主滑移带应变性质发生变化^[1],此外,走滑断裂分层—分段变形特点也决定了沿断裂带走向活动强度可能存在较大差异^[3-4]。

在深层断裂断距不明显且地层发生褶曲的情况下,通常利用沿断裂的局部隆升高度作为断距分析的依据^[5],本次研究通过对顺北5号断裂隆起段 T_8^1 和 T_7^2 界面198组垂向断距统计(正断距代表地层压隆、负断距代表地层下掉),用来揭示隆起段断裂活动强度变化以及分段发育特点(图5)。总体上看,寒武系膏盐岩

顶界面(T_8^1)与盐上碳酸盐岩顶界面(T_7^2)垂向断距特征相反,其中隆起隆Ⅰ段 T_8^1 和 T_7^2 界面垂向断距大小分布在 $-10 \sim 25$ ms和 $-45 \sim 50$ ms范围内,最大断距点位于对应于分段长度的中心位置;隆Ⅱ段分段发育情况在 T_7^2 界面垂向断距变化上体现得较为明显,表现为“中间断距最大、两边断距减小”的变化特征,呈现4组,对应于盐上碳酸盐岩顶面相干(T_7^2)发育的4个叠接拉分段,而隆Ⅲ段在盐上碳酸盐岩顶面断距变化同样具有这种特征,揭示了早期隆Ⅲ段发育2个叠接压隆段。

前人研究表明雁列正断层发育宽度、密度可以反映走滑断裂晚期活动强度^[4,15],本次研究通过对 T_5^{6s} 、 T_5^0 和 T_3^0 界面雁列断层发育数量、长度和宽度的对比,认为研究区自下往上发育4套雁列正断层,不同分层雁列几何学要素变化揭示了不同构造期深部主走滑断裂活动强度变化(图5)。其中 T_5^{6s} 界面雁列正断层呈右阶展布,雁列平均宽度隆Ⅰ段0.98 km、隆Ⅱ段1.69 km、隆Ⅲ段0.8 km;雁列发育密度隆Ⅰ段31条(1条/km)、隆Ⅱ段36条(3条/km)、隆Ⅲ段12条(1.5条/km),表明海西中—晚期隆起段活动强度隆Ⅱ段强、隆Ⅲ段次之、隆

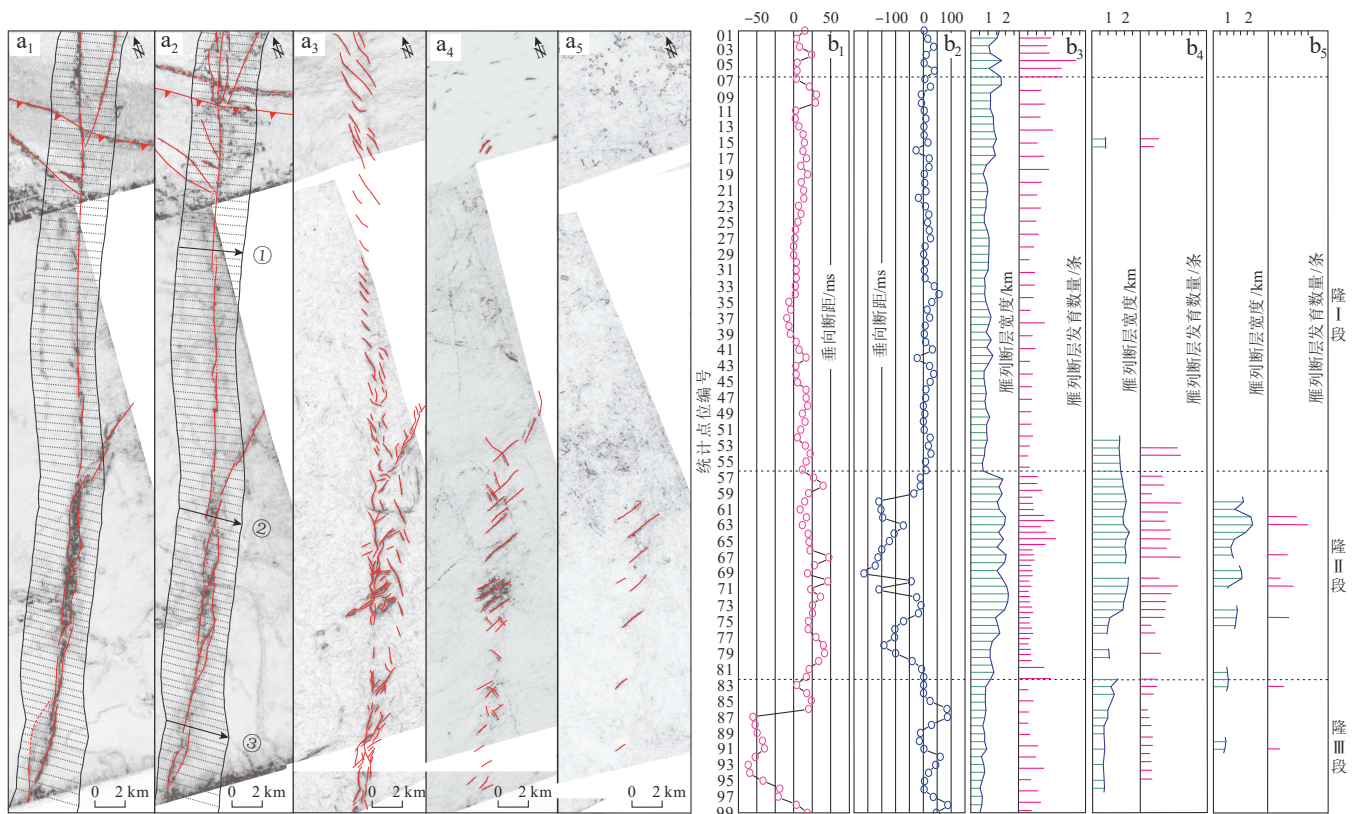


图5 顺北5号断裂带隆起段浅层雁列正断层展布特征(a_1 — a_5)及深部垂向断距变化(b_1 — b_5)

Fig. 5 Distribution of shallow en echelon normal faults (a_1 — a_5) and variation of vertical throws of deep faults (b_1 — b_5) for the uplifted segment of the No. 5 fault zone in Shunbei area

a_1, b_1, T_8^1 ; a_2, b_2, T_7^2 ; a_3, b_3, T_5^{6s} ; a_4, b_4, T_5^0 ; a_5, b_5, T_3^0

I段活动一般。 T_5^0 界面雁列正断层呈左阶展布,隆I段雁列正断层几乎不发育,雁列平均宽度隆II段1.82 km、隆III段1.18 km,雁列发育密度隆II段19条(1.5条/km)、隆III段12条(1.5条/km),而 T_3^0 界面隆II段雁列平均宽度0.98 km、密度6条(1条/km),由此认为印支期—喜马拉雅早期隆II段和隆III段可能发生了多期活动,其中隆II段活动强度要大于隆III段。

结合深层垂向断距特征与浅层雁列几何学要素变化分析,认为主滑移带叠接应变类型与分段性差异可能起关键作用,当深部主走滑断裂为张扭性质,断裂晚期活动强度最大;深部主走滑断裂为压扭性质,断裂晚期活动强度中等;主滑移带分段垂向断距较小、表现为平移性质时,断裂晚期活动强度一般。由此来看,顺北5号断裂隆起段断裂活动强度具有“早强晚弱、南强北弱”的特点,隆II段活动强度大、持续活动时期长,隆III段次之,而隆I段活动强度偏弱。

2.4 古构造应力场背景

研究走滑断裂带不同时期古构造应力场特征,是确定走滑断裂剪切变形过程和应力机制的关键^[3-4],通过走滑分支构造、叠接应变类型等可以反演古构造应力场环境分期,另外浅层雁列断层角度变化也可以指示下伏主走滑带(PDZ)后期活动应力状态^[5-7]。本次研究基于对顺北5号断裂隆起段不同分段局部应力场特征分析以及隆起段 T_5^6 、 T_5^0 、 T_4^6 与 T_3^0 界面不同分段雁列角大小测量,可以识别出三维研究区顺北5号断裂隆起段至少经历了3个不同时期的应力场变化(图6)。

加里东中期,受盆缘古昆仑方向与阿尔金方向活动影响,顺北5号断裂隆起段发育形成,产生了一系列NW/NE向分支断裂(R剪切、R'剪切与P剪切),基于 T_7^2 界面叠接发育样式与伴生构造特征等判断隆起段在该时期为左行走滑,其中NE20°断裂是顺北5号断裂伴生P剪切,NW35°断裂则是顺北5号断裂伴生R'剪切,由此分析隆I段最大主应力方向为NW31°,该时期隆II、III段最大主应力方向为NNW向(图7)。浅层雁列断层的形成与深部主滑移带再活动有关,其中,雁列正断层对应于Riedel剪切模型的T破裂,T破裂方向即为分段最大主应力方向^[22-24],此外,局部最大主应力方向变化可反映局部应力场的变化。通常在理想化简单剪切过程中,主位移带走向与雁列断层之间的夹角 $\beta = 45^\circ$,当存在垂直于主断面的张应力或压应力时,会形成雁列角 $\beta < 45^\circ$ 或 $\beta > 45^\circ$ ^[7,25](图8)。加里东晚期—海西中、晚期,顺北5号断裂隆起段最

大主应力 σ_1 发生顺时针小幅偏转(σ_1 平均角度为NW11°),各分段雁列角 $\beta < 45^\circ$ 且自南向北逐渐增大,表明其形成于斜拉应力环境中^[4,15],其中隆II段张应力分量最大。印支期—喜马拉雅早期,顺北5号断裂隆起段最大主应力 σ_1 反转为NE向,由加里东中期—海西中、晚期的左行活动转为右行走滑,分段最大应力角度自南向北减小,各分段 T_3^0 — T_5^0 界面雁列角 $\beta \approx 45^\circ$,说明下伏主滑移带处于纯剪应力状态下的走滑活动^[6-7]。

值得注意的是,加里东晚期到海西中—晚期,顺北5号断裂隆起段的隆II段和隆III段雁列断层呈近平行展布且雁列角偏小,反映了塔中隆起区在该构造期处于东西向弱伸展动力学背景,当垂直主位移带的张应力足够大时,雁列角会趋向于 0° ^[4,26],这也为海西晚期以后断裂继承性活动提供了条件。

3 讨论

3.1 顺北5号断裂带发育机制

水平滑移距大小可以反映主走滑断裂活动与分段发育特征,基于对顺北地区5号断裂不同分段A—F点滑移距测量,认为顺北5号断裂北段、中段与南段初期分段发育,后期逐段拼接^[2-3,7]。本次研究重点测量了三维研究区顺北5号断裂隆起段E—F点,测得隆I段水平滑移距约为0.68 km,隆III段水平滑移距1.35 km,其中D—F点水平滑移距总体表现为“两头大、中间小”的基本特征(图9),该特征差异与同一走滑断裂典型滑移距分布“中间大、两头小”的特点截然不同^[27-29]。基于上述分析,结合顺北5号断裂隆起段盐上碳酸盐岩顶面(T_7^2)垂向断距变化以及隆I段尾部断堑发育特征,认为顺北5号断裂隆起段为一条自南向北发育的断裂,由此推测隆起段与南段在初始阶段以塔中I号带为界,自南向北分段发育、左行走滑,后期拼接、整体走滑活动。

前人研究表明,顺北5号断裂南段与北段、中段在加里东中期分段发育,分属于不同的断裂体系^[2,4]。本次研究进一步证实,发育初期,顺北5号断裂隆起段、南段在南部力源作用下左行走滑活动,是两条不同的断层。受南北不同应力场影响,顺北5号断裂后期在顺托果勒低隆区交汇对接,从而形成一条贯穿塔中隆起、顺托果勒低隆以及塔北隆起的主干走滑断裂带。

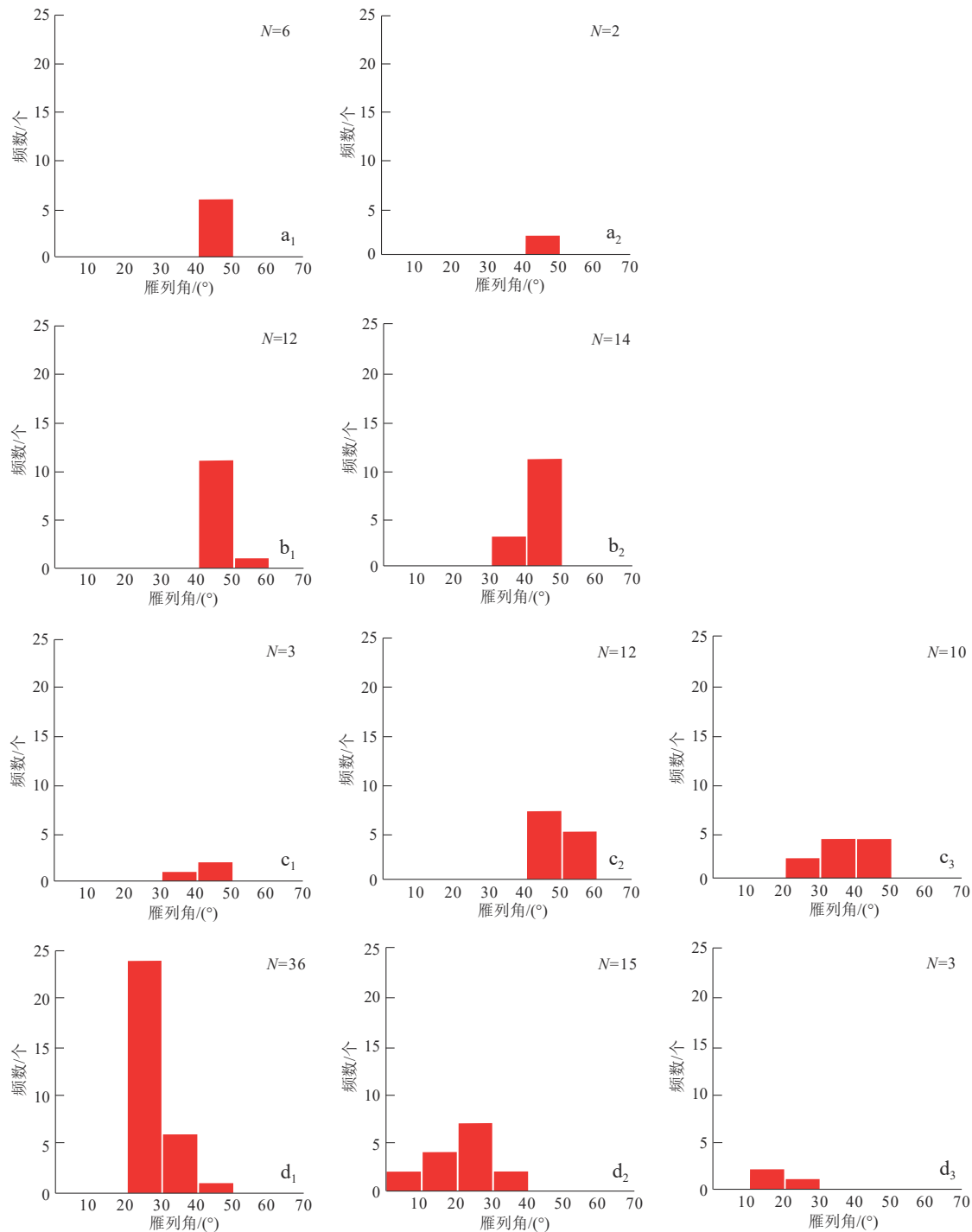


图6 顺北5号断裂隆起段各分段 T_5^6s 、 T_5^0 、 T_4^6 和 T_3^0 界面雁列角大小分布

Fig. 6 Distribution of the en echelon fault array angles of the northern, central and southern segments on T_5^6s , T_5^0 , T_4^6 and T_3^0 boundaries in each section of the uplifted segment in the No. 5 fault zone in Shunbei area

a_1 . T_3^0 界面隆Ⅱ段雁列角统计,均值 48.1° ; a_2 . T_3^0 界面隆Ⅲ段雁列角统计,均值 46.2° ; b_1 . T_4^6 界面隆Ⅱ段雁列角统计,均值 47.1° ; b_2 . T_4^6 界面隆Ⅲ段雁列角统计,均值 42.1° ; c_1 . T_5^0 界面隆Ⅰ段雁列角统计,均值 40.4° ; c_2 . T_5^0 界面隆Ⅱ段雁列角统计,均值 49.5° ; c_3 . T_5^0 界面隆Ⅲ段雁列角统计,均值 35.6° ; d_1 . T_5^6s 界面隆Ⅰ段雁列角统计,均值 27.2° ; d_2 . T_5^6s 界面隆Ⅱ段雁列角统计,均值 21.6° ; d_3 . T_5^6s 界面隆Ⅲ段雁列角统计,均值 17.8°

3.2 顺北5号断裂带演化过程

本文基于顺北5号断裂带分层-分段变形特征、不

同界面垂向断距差异以及古应力环境变化,结合区域构造运动背景,将顺北5号断裂带的总体演化过程划分为以下阶段。

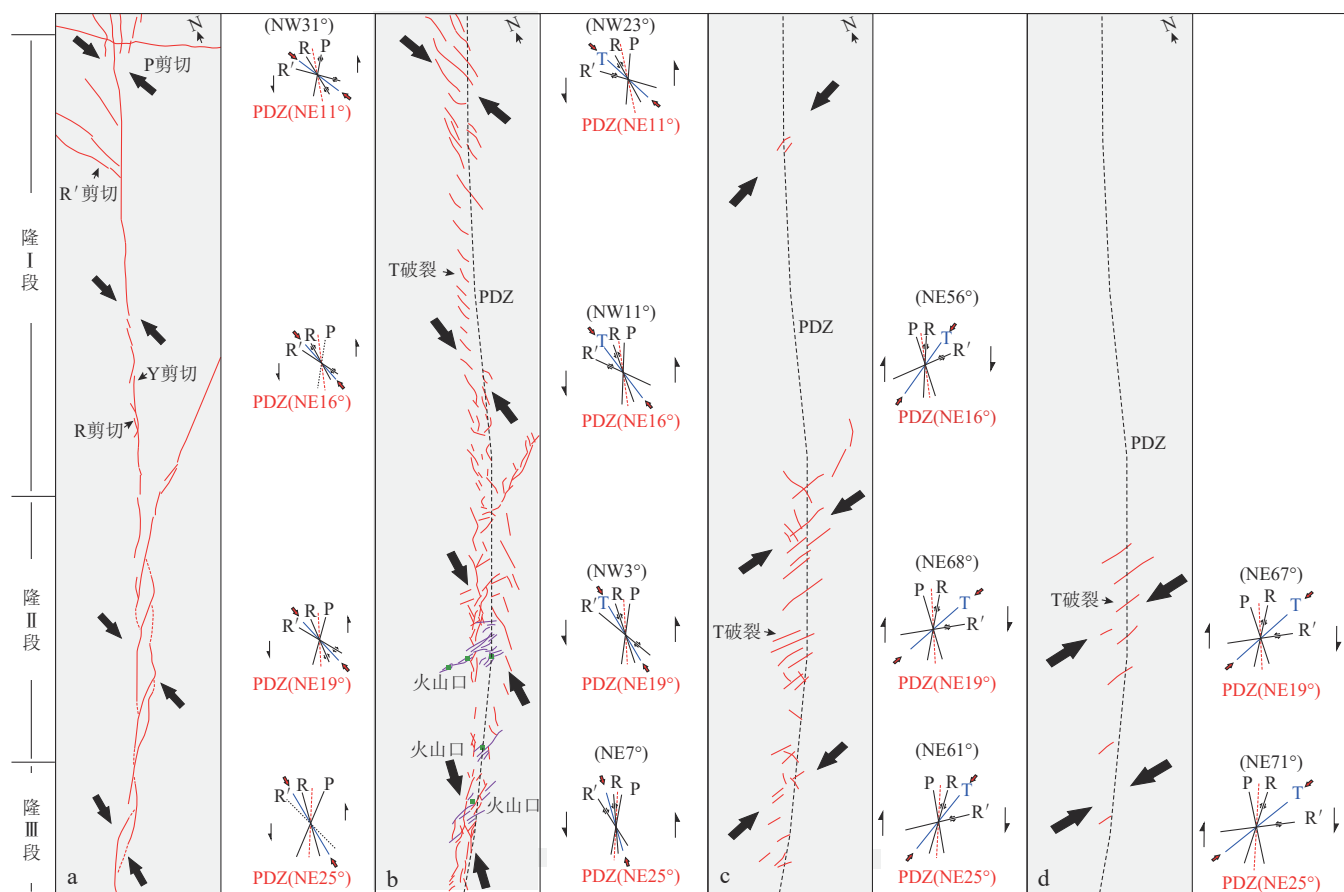


图7 顺北5号断裂隆起段各分段多层位相干局部应力场分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of local stress field revealed by multilayer potential coherence in each section of the uplift segment in the

No. 5 fault zone in Shunbei area

a. T_7^2 ; b. T_5^{6s} ; c. T_5^0 ; d. T_3^0

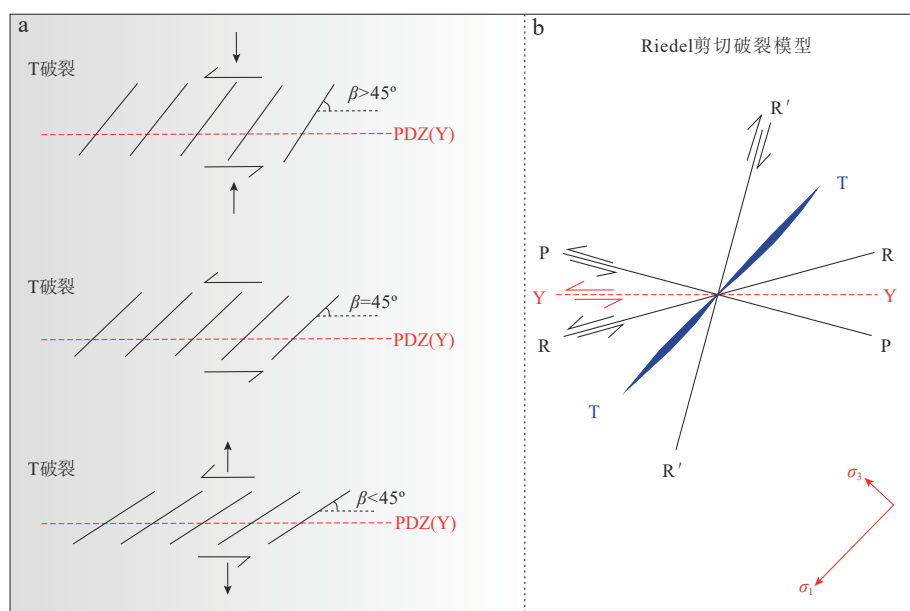


图8 局部最大主应力方向变化示意局部应力场状态(a)及经典里德尔剪切模型(b)

Fig. 8 The state of local stress field revealed by direction variation of local maximum principal stress (a) and the classical Riedel shears model (b)

β . 雁列断层角度; σ_1 . 最大主应力方向; σ_3 . 最小主应力方向; Y. 主滑移带; R. 里德尔剪切; R'. 反向里德尔剪切;

P. 与R剪切对称的P剪切破裂; T. 张破裂; PDZ. 主滑移带

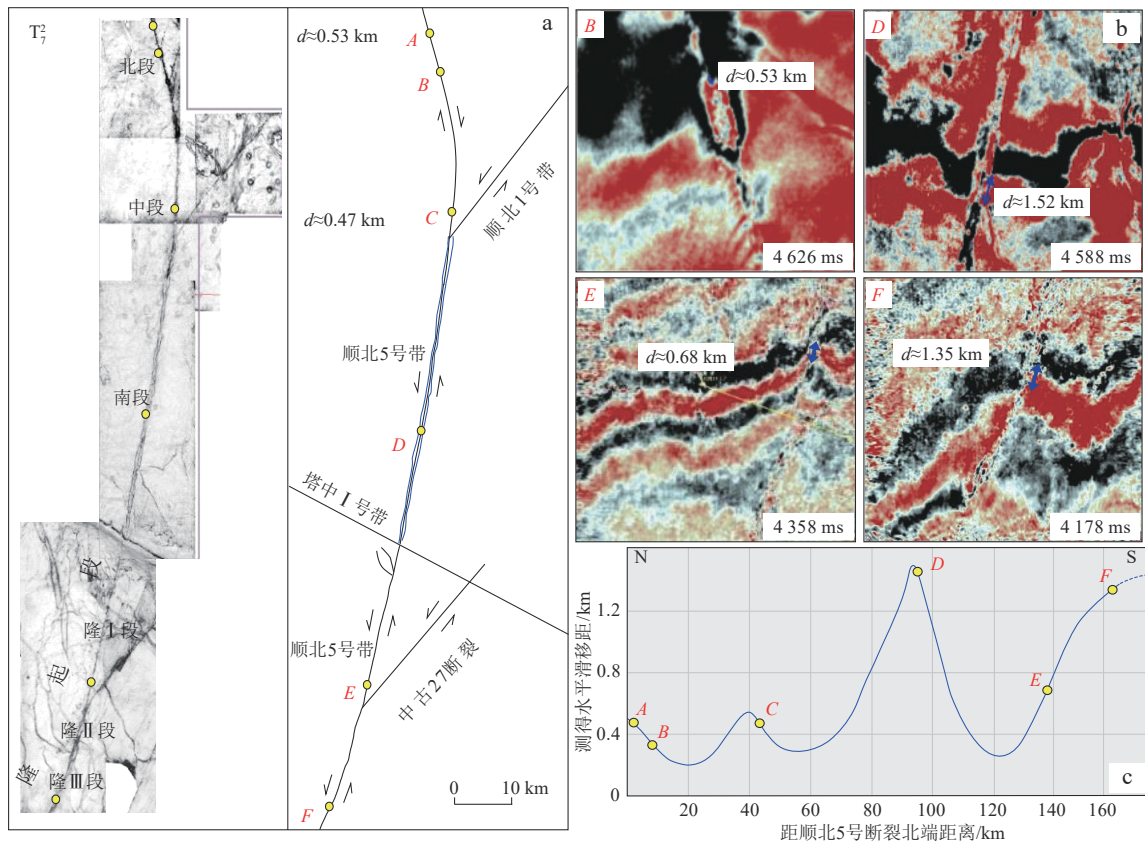


图9 塔里木盆地顺北5号断裂带滑移距分布特征

Fig. 9 Distribution characteristics of slip distance in the No. 5 fault zone in Shunbei area, Tarim Basin

a. T₂界面连片三维相干图(左图)及顺北5号断裂带水平滑移距测量点(A—F)位置(右图); b. 顺北5号断裂带水平滑移距(d)—深切片(切片位置见a); c. 顺北5号断裂带A—F点滑移距分布

(A, C点数据源自 Deng Shang, 2019; B, D点数据源自 Fan Taijiang, 2021。)

3.2.1 加里东中期Ⅰ幕

古昆仑洋俯冲消减加剧,西昆仑块体与塔里木地块碰撞拼贴^[17,19],塔里木块体内部主要受到西南缘的应力作用,塔中Ⅰ号带等控边断裂形成,该时期塔中隆起、塔北隆起开始隆升发育,同时在塔中隆起区以及塔中北坡形成一系列NE向区域节理,而塔北地区形成了一系列NNW向区域节理。

3.2.2 加里东中期Ⅲ幕

中昆仑地体与塔里木板块碰撞,此时南阿尔金洋盆向北俯冲消减闭合^[18],强烈的冲断活动造成塔中地区整体强烈隆升,由于同时受到SW方向以及SE方向挤压应力,塔中Ⅰ号带在压扭作用下继承性活动,顺北5号断裂沿NE向先存薄弱带开始发育,其中,顺北5号断裂隆起段、南段以塔中Ⅰ号断裂带为界自南向北分段发育、左行走滑(图10)。此时塔北地区受到由南向北挤压应力影响,顺北5号断裂北

段、中段自北向南右行活动,最大主应力发生了由NW向到NE向偏转。

3.2.3 加里东晚期

塔里木盆地北缘南天山洋俯冲消减,塔里木盆地西南缘古昆仑洋结束碰撞造山,东南缘的东昆仑洋俯冲消减闭合^[30],在盆地内部主要受到SE方向挤压应力影响,由于远程应力传递作用,塔中、塔北两大古隆起主干走滑断裂再次活动。在该构造活动期,顺北5号断裂隆起段自南向北在塔中Ⅰ号带附近与南段对接;与此同时,顺北5号断裂南段自南向北在顺托果勒低隆区与中段自北向南逐级拼接,之后顺北5号断裂整体左行活动。

3.2.4 海西中—晚期

南天山洋关闭,塔里木块体与中天山拼合,在盆地北部产生强烈碰撞造山,形成了自北向南的强挤压应力^[31],受到应力传递影响,顺北5号走滑断裂活

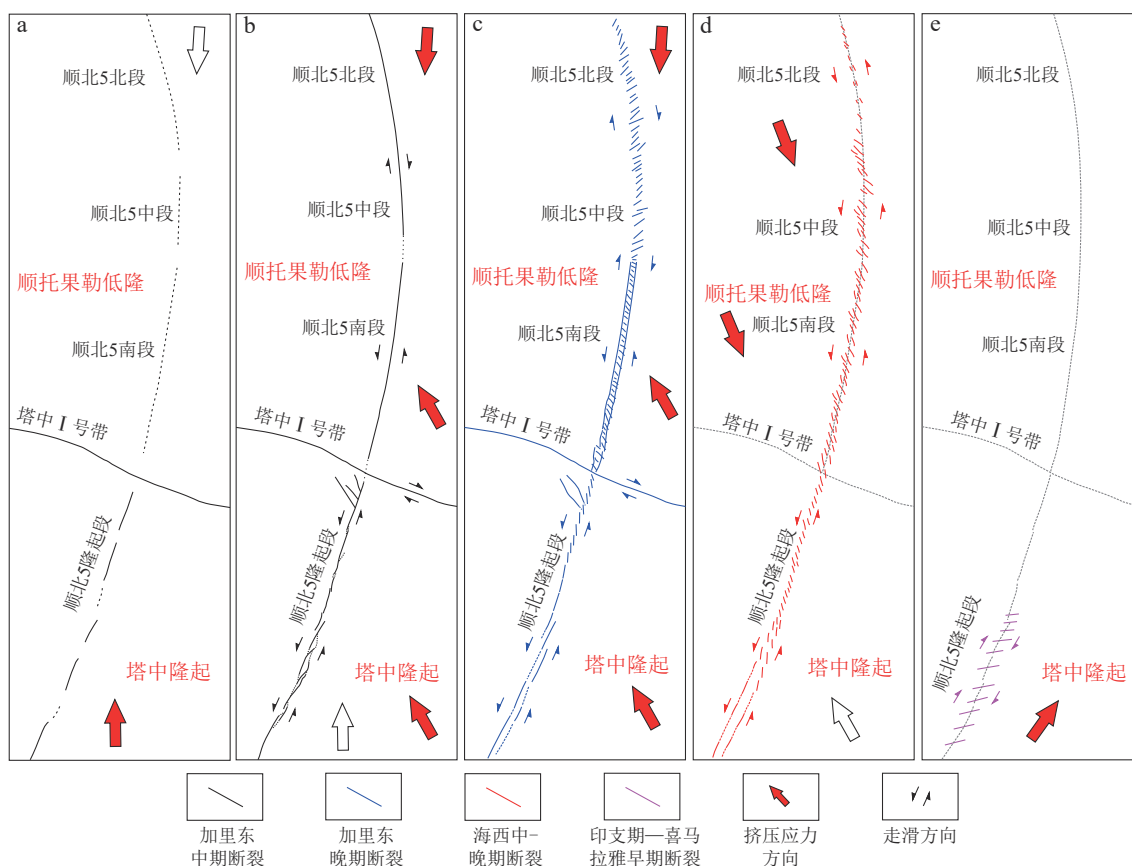


图10 塔里木盆地顺北5号走滑断裂带演化过程示意图

Fig. 10 Schematic diagram showing the evolution of the No. 5 fault zone in Shunbei area, Tarim Basin

a. 加里东中期Ⅰ幕; b. 加里东中期Ⅲ幕; c. 加里东晚期; d. 海西中-晚期; e. 印支期—喜马拉雅早期

化,在 T_5^0 之下和 T_5^6 界面之上地层中发育形成雁列正断层。

3.2.5 印支期—喜马拉雅早期

塔里木盆地处在南天山碰撞造山期之后的应力松弛期,受到盆缘NE-SW向应力影响^[32],塔中、塔北两大古隆起部分主干走滑断裂再活动,上覆地层在深层断裂活化后由于张扭作用形成贯穿中-新生界的雁列正断层。例如塔北隆起上托普39断裂在 T_2^4 界面上的雁列断层左阶展布、右行走滑,同早期左行活动时最大主应力方向存在明显差异^[1]。与此类似,在该构造运动期,塔中隆起上的顺北5号断裂局部分段同样表现为右行走滑特征,分段最大主应力方向由NW向转为NE向,而位于顺托果勒低隆区的顺北5号断裂则未见明显活动。分析认为这可能是由于塔中、塔北两大古隆起是盆缘应力向盆内传递的优先响应区,加之顺托果勒低隆上覆地层厚度相较塔中、塔北两大古隆起更厚,致使深层主走滑断裂未见响应活动,也未在浅层形成雁列正断层。

4 结论

1) 顺北5号断裂隆起段贯穿于塔中隆起,整体呈NE20°走向,是塔中隆起区规模最大、延伸最长的一条走滑断裂带。基于平面走向和分段样式变化,自北向南可将隆起段划分为3段:隆Ⅰ“平移”段(NE16°)、隆Ⅱ“拉分”段(NE19°)、隆Ⅲ“压隆”段(NE25°)。顺北5号断裂隆起段隆Ⅱ段具有深、中、浅层差异变形特点,深层构造样式主要在 T_2^2 界面及下伏地层发育,表现为近直立走滑特征,中层、浅层纵向上叠置发育多套雁列正断层。

2) 顺北5号断裂隆起段经历了加里东中期Ⅲ幕、加里东晚期、海西中-晚期、印支期—喜马拉雅早期多期活动,加里东中期—海西中、晚期左行活动,印支期—喜马拉雅早期反转为右行走滑,其中,隆Ⅰ段海西晚期后活动微弱,而隆Ⅱ、Ⅲ段持续活动至喜马拉雅早期,整体具有“早强晚弱、南强北弱”的特点。

3) 顺北5号断裂带形成演化受控于南、北两个不

同的应力场,有分段发育、逐级拼接、整体活动的特征。加里东中期Ⅲ幕,分段间相向发育,隆起段与南段以塔中Ⅰ号带为界,自南向北左行走滑,而中段和北段自北向南右行活动,最大主应力发生了由NW向到NE向偏转;加里东晚期后,顺北5号断裂带整体左行走滑,最大主应力为NW-SE向;印支期—喜马拉雅早期隆起段反转为右行走滑活动,分段最大主应力方向由NW向转为NE向。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 邓尚,李慧莉,韩俊,等. 塔里木盆地顺北5号走滑断裂中段活动特征及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 990-998, 1073.
- [3] 邓尚,刘雨晴,刘军,等. 克拉通盆地内部走滑断裂发育、演化特征及其石油地质意义:以塔里木盆地顺北地区为例[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(6): 1111-1126.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 邓尚,李慧莉,张仲培,等. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 878-888.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] 刘雨晴, 邓尚. 板内中小滑移距走滑断裂发育演化特征精细解析——以塔里木盆地顺北4号走滑断裂为例[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 124-136.
- LIU Yuqing, DENG Shang. Structural analysis of intraplate strike-slip faults with small to medium displacement: A case study of the Shunbei 4 fault, Tarim Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(1): 124-136.
- [16] 刘雨晴, 邓尚, 张荣, 等. 深层火成岩侵入体和相关构造发育特征及其石油地质意义——以塔里木盆地顺北地区为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 105-117.
- LIU Yuqing, DENG Shang, ZHANG Rong, et al. Characterization and petroleum geological significance of deep igneous intrusions and related structures in the Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 105-117.
- [17] 任建业, 张俊霞, 阳怀忠, 等. 塔里木盆地中央隆起带断裂系统分析[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 219-230.
- REN Jianye, ZHANG Junxia, YANG Huaizhong, et al. Analysis of fault systems in the central uplift, Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 219-230.
- [18] 任建业, 阳怀忠, 胡德胜, 等. 塔里木盆地中央隆起带断裂活动及其对海相克拉通解体的作用[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2012, 37(4): 645-653.
- REN Jianye, YANG Huaizhong, HU Desheng, et al. Fault activity and its controlling to marine cratonic breakup in Tarim Basin [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2012, 37(4): 645-653.
- [19] 邬光辉, 杨海军, 屈泰来, 等. 塔里木盆地塔中隆起断裂系统特征及其对海相碳酸盐岩油气的控制作用[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 793-805.
- WU Guanghui, YANG Haijun, QU Tailai, et al. The fault system characteristics and its controlling roles on marine carbonate hydrocarbon in the central uplift, Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 793-805.
- [20] 江同文, 韩剑发, 邬光辉, 等. 塔里木盆地塔中隆起断控复式油气聚集的差异性及主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 213-224.
- JIANG Tongwen, HAN Jianfa, WU Guanghui, et al. Differences and controlling factors of composite hydrocarbon accumulations in the Tazhong uplift, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 213-224.
- [21] WARREN J K. Flowing salt: Halokinesis [M]//WARREN J K. Evaporites. 2nd ed. Cham: Springer, 2016: 491-612.
- [22] WOODCOCK N H, SCHUBERT V. Continental strike-slip tectonics [M]//HANCOCK P L. Continental Deformation. Oxford: Pergamon Press, 1994: 251-263.
- [23] AYDIN A, NUR A. The types and role of stepovers in strike-slip tectonics [M]//BIDDLE K T, CHRISTIE-BLICK N. Strike-Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation. Broken Arrow: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1985: 35-44.
- [24] SYLVESTER A G. Strike-slip faults [J]. GSA Bulletin, 1988, 100(11): 1666-1703.
- [25] MARTIN E S. The distribution and characterization of strike-slip faults on Enceladus [J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(6): 2456-2464.
- [26] OLSON J E, POLLARD D D. The initiation and growth of en échelon veins [J]. Journal of Structural Geology, 1991, 13(5): 595-608.
- [27] POLLARD D D, FLETCHER R C. Fundamentals of structural geology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [28] COWIE P A, SCHOLZ C H. Growth of faults by accumulation of seismic slip [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1992, 97(B7): 11085-11095.
- [29] KIM Y S, SANDERSON D J. The relationship between displacement and length of faults: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2005, 68(3/4): 317-334.
- [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.
- XU Zhiqin, LI Sitian, ZHANG Jianxin, et al. Paleo-Asian and Tethyan tectonic systems with docking the Tarim Block [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 1-22.
- [31] 李曰俊, 杨海军, 赵岩, 等. 南天山区域大地构造与演化[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 94-104.
- LI Yuejun, YANG Haijun, ZHAO Yan, et al. Tectonic framework and evolution of South Tianshan, NW China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(1): 94-104.
- [32] 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 64-77.
- HE Dengfa, JIA Chengzao, LI Desheng, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 64-77.

(编辑 张 晟)