

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.504>



塔里木盆地麦盖提斜坡罗西断裂发育特征、演化及形成机制

耿 锋^{1,2}, 易泽军^{3,4*}, 郝建龙², 沙旭光², 王海学^{3,4}, 冯 昌³, 段宏亮³

1. 中国矿业大学地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2. 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

3. 东北石油大学CNPC断裂控藏研究室, 黑龙江大庆 163318

4. 东北石油大学油气藏及地下储库完整性评价黑龙江省重点实验室, 黑龙江大庆 163318

摘 要: 塔里木盆地玉北地区发育一系列北东向断裂并获油气发现, 断裂带内不同段的构造样式存在显著差异. 以罗西断裂为例, 结合断层分段特征与活动期次研究, 应用砂箱物理模拟和应变分析技术, 探讨罗西断裂的演化与形成机制. 结果表明: 罗西断裂是一个典型的逆冲—走滑复合构造, 平面具有“三段式”生长特征, 整体表现为隆起特征, 局部出现“下凹”现象. 基于不整合特征、深度—幅度曲线以及年代地层格架, 认为罗西断裂主要经历三期变形: (1) 加里东中期Ⅲ幕是罗西断裂雏形的形成时期, 逆冲断裂开始微弱抬升; (2) 加里东晚期是罗西断裂的主要活动时期, 活动强度比加里东中期Ⅲ幕强烈; (3) 海西早期是罗西断裂走滑改造的主要时期. 砂箱物理模拟实验证实, “三期两向”叠加变形控制着罗西断裂的演化与形成机制, 加里东中期Ⅲ幕和加里东晚期控制以斜向逆冲为主的隆起带的形成, 海西早期张扭改造控制“下凹”的形成演化. 应变分析指示逆冲—走滑复合构造有利储层部位主要集中在边界断层、与边界断层小角度斜交的走滑断层和断层交汇区域, 这对塔里木盆地碳酸盐岩逆冲—走滑断裂控储与规模储层勘探有重要意义.

关键词: 断层分段性; 断层活动期次; 形成机制; 物理模拟; 罗西断裂; 塔里木盆地; 石油地质.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2023)06-2087-17

收稿日期: 2022-10-04

Development Characteristics, Evolution and Formation Mechanism of Luoxi Fault in Maigaiti Slope, Tarim Basin

Geng Feng^{1,2}, Yi Zejun^{3,4*}, Hao Jianlong², Sha Xuguang², Wang Haixue^{3,4}, Feng Chang³, Duan Hongliang³

1. School of Geoscience and Surveying and Mapping Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

2. SINOPEC Northwest Oilfield Company Exploration and Development Research Institute, Urumqi 830011, China

3. CNPC Fault Controlling Reservoir Research Laboratory, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China

4. Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir and Underground Gas Storage Integrity Evaluation of Heilongjiang Province, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41972157); 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司“玉北中西部—巴楚东段奥陶系规模储层测试分析”项目(No.34400008-21ZC0613-0016).

作者简介: 耿锋(1983—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事油气勘探与评价方面工作. ORCID: 0000-0002-2482-865X. E-mail: dif.xbsj@sinopec.com

***通讯作者:** 易泽军, 讲师, 主要从事盆地构造解析方面工作. ORCID: 0009-0002-4395-3509. E-mail: dkyzj2010@163.com

引用格式: 耿锋, 易泽军, 郝建龙, 沙旭光, 王海学, 冯昌, 段宏亮, 2023. 塔里木盆地麦盖提斜坡罗西断裂发育特征、演化及形成机制. 地球科学, 48(6): 2087—2103.

Citation: Geng Feng, Yi Zejun, Hao Jianlong, Sha Xuguang, Wang Haixue, Feng Chang, Duan Hongliang, 2023. Development Characteristics, Evolution and Formation Mechanism of Luoxi Fault in Maigaiti Slope, Tarim Basin. *Earth Science*, 48(6): 2087—2103.

Abstract: A series of NE-trending faults have been developed in the Yubei area of the Tarim basin and oil and gas were discovered. The structural styles of different segments of the fault zone are significantly different. In this paper, the Luoxi fault is taken as an example, the evolution and formation mechanism of the Luoxi thrust-strike-slip composite structure are discussed by means of sand box physical simulation and strain analysis, combined with the study of fault segmentation and active stages. The results show that Luoxi fault is a typical thrus-strike-slip composite strcture, and the plane of the Luoxi fault has a “three-segment” growth pattern, with uplift as a whole and sag as a local phenomenon. Based on the unconformity characteristics, depth-amplitude curves and chronostratigraphic framework, it is considered that the Luoxi fault experienced three stages of deformation: (1) the Middle Caledonian stage III was the formative period of the rudiment of the Luoxi fault, and the thrust fault begins to rise weakly; (2) the late Gariton Luoxi fault is the main active stage, and the active intensity is stronger than the stage III of Middle Caledonian; (3) the Early Hercynian period is the main period of strike slip reformation of Luoxi fault. The sandbox physical simulation experiment confirmed that the “three stages and two directions” superimposed deformation controlled the evolution and formation mechanism of the Luoxi fault, and the Middle Caledonian III episode and the Late Caledonian stage controlled the formation of the oblique thrust uplift belt, the formation and evolution of “sag” was controlled by the early transtensional deformation at the Early Hercynian period. Strain analysis indicates that the favorable reservoir positions of the thrust-strike-slip composite structure are mainly concentrated in the boundary fault, strike-slip fault with small angle oblique intersection with the boundary fault and the fault confluence area, this is of great significance to the exploration of Tarim basin carbonate reservoirs controlled by thrust-strike-slip faults and large-scale reservoirs.

Key words: fault segmentation; fault movement period; formation mechanism; analogue model; Luoxi fault; Tarim basin; petroleum geology.

0 引言

我国深层海相碳酸盐岩正处于大油气田发现的高峰期,塔里木盆地寒武系—上奥陶统发育大型碳酸盐岩台地,面积超过 30 万 km²,油气资源丰富,具有多套储盖组合(贾承造,1997;杜金虎等,2010)。塔里木盆地历经 30 多年的勘探开发,早期发现了轮南—塔河、哈拉哈塘、塔中等大—中型碳酸盐岩油气田,相继顺北地区和玉北地区超深层寒武—奥陶系油气勘探取得重大突破(邓尚等,2021)。勘探实践表明:油气主要围绕断裂带富集,表明断层在油气成藏中起到至关重要的作用(漆立新,2014;邬光辉等,2020;郭旭升,2022)。以塔中—巴楚隆起带为分界,盆地北部已发现油气田主体与系列 NE 向走滑断裂带密切相关(刘士林等,2018);而南部麦盖提—塘古巴斯地区以逆断层为主,局部发育走滑断层,整体表现出“储—运—聚”一体化成藏特征(李映涛等,2019;马永生等,2020;漆立新,2020)。南部麦盖提—塘古巴斯地区相继完成一批超深层钻井,均发现油气显示,仅部分钻井发现工业油气,以中小型油气藏为主,且同一条断层不同构造部位表现出差异性油气富集特征(漆立新,2020)。要解决上述问题,断裂带的精细解剖与成因机制是核心。

罗西断裂长期以来都被视作海米罗斯断裂向西南调节位移的一条走滑断裂,主要活动于海西晚期。2021 年完钻的罗西 1 井是罗西断裂(中石化三维区)第一口井,完钻揭示背斜顶部良里塔格组、志留系和泥盆系的缺失,使鹰山组顶界比地震解释深度要高 300~400 m,否定了过去关于罗西断裂为海西晚期一条简单的走滑断裂的观点,预示着罗西断裂更可能是一个复杂的逆冲—走滑复合构造(魏国齐等,1995;D’Adda *et al.*, 2017)。因此,本文以塔里木盆地麦盖提斜坡区寒武系—二叠系内发育的罗西断裂为例,系统分析罗西断裂的几何学和运动学特征,结合物理模拟实验,明确罗西断裂形成机制,从而为深化塔里木盆地下古生界碳酸盐岩油气成藏认识提供支撑,指导逆冲—走滑复合构造油气勘探。

1 研究区地质背景

麦盖提斜坡位于塔里木盆地南部,北邻巴楚隆起,南接西南坳陷,东临塘古巴斯坳陷。斜坡区发育一系列 NW 向、NE 向断层。罗西断裂位于塔里木盆地麦盖提斜坡区东部(图 1),走向 NEE 向(约 70°),中石化三维覆盖区长度 37 km,向东与近 EW 向乌山断裂相接(丁文龙等,2008)。

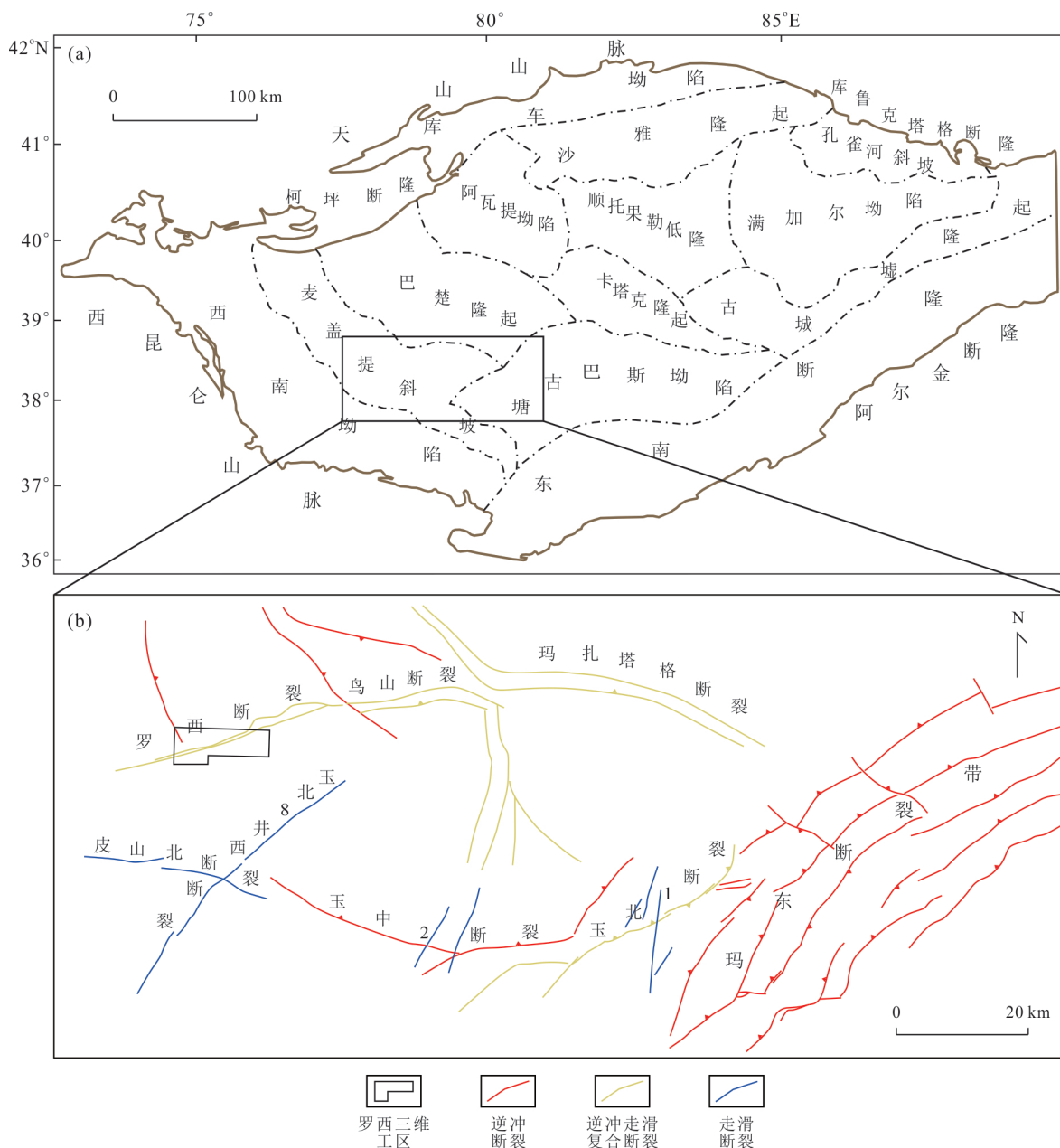


图1 塔里木盆地构造单元与局部地区断裂分布

Fig.1 Structural units and local fault distribution of Tarim basin

a. 塔里木盆地构造单元划分; b. 研究区主要断裂分布

自寒武纪以后,塔里木盆地主要经历五期构造运动(何文渊等,2000;丁文龙等,2008,2012;何登发等,2008):一是加里东早期(寒武纪—中奥陶世)克拉通弱伸展作用阶段,经历区域稳定沉降;二是加里东中期—加里东晚期(中奥陶世—中泥盆世)整体持续处于挤压状态,加里东中期III幕(奥陶世末)库地洋向南侧中昆仑微陆块俯冲消减,导致了隆起带凹陷相间分布格局,形成了麦盖提斜坡南高北低、东高西低的构造格局;三是海西期(晚泥盆

世—早二叠世),由于受到南天山洋闭合与岛弧碰撞的影响,导致巴—麦地区转变为区域性南倾单斜;四是印支期—燕山(三叠纪—白垩纪)整体处于近南北向挤压隆升阶段;五是喜山期处于构造格架定型阶段。

玉北中西部—巴楚东段地区地层整体发育较为齐全,除中生界大面积沉积缺失外,震旦系—第四系均有发育,部分地层因构造剥蚀或沉积间断造成了不同程度的缺失(丁文龙等,2012),其中寒武

系和下奥陶统主要以灰岩和白云岩为主(马红强等, 2006; 刘忠宝等, 2015), 是深层—超深层碳酸盐岩研究的主要目的层。

2 罗西断裂构造特征

2.1 边界断层特征

由于埋深较大地震资料品质一般, 罗西断裂边界断层的发育部位、断层性质一直都是认识的难点。2021年完钻的罗西 1 井揭示鹰山组比地震剖面预测深度要浅 462 m, 侧钻也未遇边界断层, 表明罗西断裂的边界断层需要重新厘定。本文在新处理三维地震资料基础上, 依据钻遇地层情况, 结合轴面分析方法, 对罗西断裂的边界断层作出新的分析。

罗西断裂发育两条边界断层, 南、北两侧各有一条, 两条断层在断层性质、断距、断层延伸长度方面相差不大, 只是在断层倾角上北侧边界断层明显更陡。南侧边界断层向下消失在北侧边界断层上或与北侧边界断层一齐消失在阿瓦塔格组断口上, 二者构成“y”形或“v”形组合。这种断层组合表明北侧边界断层是主断层, 南侧边界断层是次级断层。

北侧边界断层垂向上总体可分为上、下两段。下段断层形成于阿瓦塔格组膏岩盐顶界, 向上切穿寒武系—奥陶系, 消失在泥盆系内或石炭系底界, 断距大, 断层倾角大且多变化。断面在部分地震剖面上表现为同向轴错断、空白弱反射或串珠状特征。下段断层性质复杂, 不同深度断层性质存在差异。寒武系阿瓦塔格组—丘里塔格群以逆冲为主, 断层倾角自阿瓦塔格组膏岩盐滑脱层至丘里塔格群下部由 0° 增加至 33° 。丘里塔格群上部是北侧边界断层不同倾角断坡的过渡区, 往上蓬莱坝组及其上覆地层断层倾角普遍大于 70° , 且断层性质为斜滑断层。北侧边界断层的上段未见明显断距, 断层难以识别。依据皮山北 2 井—罗西 1 井—玉北 8 井连井地震剖面结果, 罗西断裂上盘石炭系厚度稳定, 泥盆系东河塘组出现突然减薄, 表明石炭系底界或泥盆系是上、下两段的连接层段。轴面分析结果表明, 罗西断裂石炭系—二叠系褶皱两翼的向斜轴面向下收敛呈正扇形, 沿走向轴面发育位置连续可追踪。依据轴面向下消失点位置, 结合深层断面地震反射特征, 可以确定边界断层的发育位置。上段断层倾角与蓬莱坝组基本一致, 剖面上形态为线状, 切穿石炭系—二叠系, 消失在二叠系顶界, 被新生界不整合面削截。

南侧边界断层同样分为上、下两段, 二者在泥盆系内或石炭系底界过渡, 下段断层倾角向浅层略微增大, 但相比北侧边界断层倾角变化幅度小, 剖面上整体呈线状。南侧边界断层向下大都未收敛到阿瓦塔格组膏岩盐滑脱层, 多终止在北侧边界断层上。上段断层产状与下段基本一致, 切穿石炭系—二叠系, 消失在二叠系顶界, 被新生界不整合面削截。

南、北边界断层深浅层特征的差异反映出深层为早期断层, 逆冲分量较大, 随着断层端点迅速向上传播后被遗弃, 浅层是新生断层, 走滑分量较大, 通常切割或追踪早期断层。南侧边界断层性质, 深部为北侧边界断层的反冲断层, 浅层被走滑断层追踪形成斜滑断层。

2.2 构造样式

罗西断裂在鹰山组构造平面图上整体形态表现为隆起特征、局部“下凹”或平缓, 边界断层平面组合样式为平行式, 剖面样式为“v”形或“y”形。由于逆冲分量和走滑分量占比不同, 沿走向边界断层性质可能发生改变, 表现出不同部位宽窄变化、断层倾角变化和局部“下凹”结构叠加特征。两条边界断层所夹持断块内部, 发育多条北西西向左阶雁列式次级走滑断层, 次级走滑断层终止在边界断层上, 将断块分割为多个纺锤形断片, 次级断层沿边界断层处交叉连接形成多个三叉式断层组合。由于局部应力的改变, 三叉式断层组合样式存在变化, 在断裂带宽度较窄的部位剖面上既可以出现单侧轻微下凹也可以出现中央明显下凹, 呈现正断层特征; 在断裂带宽度较宽的部位, 三叉式断层组合在剖面上未见下凹, 多见陡倾角区, 造成伴生褶皱前后翼的不对称现象。

依据断层性质、断层产状和断层相关背斜形态, 罗西断裂发育 3 种主要组合样式, 即“微弱隆起”“压扭隆起”和“压扭隆起+局部下凹”。“微弱隆起”主要表现为断层两侧地层垂向断距小, 鹰山组断距小于 50 m, 伴生褶皱不明显, 褶皱宽度较窄; “压扭隆起”主要表现为断层两侧地层垂向断距大, 鹰山组断距普遍在 300~400 m, 伴生褶皱宽度较大, 褶皱样式为宽缓褶皱, 闭合高度 40~100 m, 是典型的正花状构造; “压扭隆起+局部下凹”是“压扭隆起”的改造类型, 通常在“压扭隆起”的一侧靠近边界断层位置形成“下凹”, “下凹”占比通常不超过整个褶皱宽度一半, 少数部位可能超过一半。不同组合样

式的分布具有一定规律性,并受断裂分段特征控制.

2.3 分段构造特征

罗西断裂的分段特征对揭示逆冲—走滑复合构造的成因机制非常重要,但是受麦盖提斜坡喜山期掀斜活动影响,现今构造图上的罗西断裂相关构造以单斜为主,平面分段特征不明显,而通过趋势面分析将倾斜造成的影响抵消后,沿断裂走向断裂带宽度和褶皱形态呈现出显著差异(图2).由于海西晚期是罗西断裂的定型时期,后期没有断裂活动,掀斜校正后的构造图可以反映出海西晚期的古构造格局(图2).在此基础上,采用断距—距离曲线进行分段研究(Barnett *et al.*, 1987; 付晓飞等, 2015),断裂初始形态为多个孤立断层,孤立断层的断面断距等值线整体呈椭圆形,中心断距大,向四周断距逐渐减小,至端点处断距变为0.随着两条邻近孤立断层发生连接,二者开始相互作用,形成转换带,由于转换带变形会吸收断距,转换带对应的断距相对较小,据此可以对断层进行分段.以断裂的西南端点为0点,选择171条等间距正交剖面进

行断距统计,罗西断裂(中石化三维区)整体表现出“三段式”生长特征,由南往北依次为南段、中段和北段(图3).

2.3.1 南段发育特征 罗西断裂南段平面走向75°,长8.6 km,整体表现为微弱隆起(图3,图4),奥陶系断距不明显,断裂断距相对较小,介于0~50 m(图3a),断层近直立,走滑断层(绿色)倾角大于逆断层(见图4 Line1216).断裂带宽度相对较宽, T_7^4 宽度0~1.9 km,宽度相对稳定(图3b), T_8^2 宽度0.2~2.0 km(表1),罗西断裂南段由西往东构造变形强度趋缓(见图4中Line1304),表现出“西宽东窄”特征(图2,图3b).西侧以“压扭隆起”为主;中部以“微弱隆起”为主,偶见“下凹”结构,继续往东地层几乎无变形.结合 T_7^4 古构造图和 T_8^2 古构造图,可以发现罗西断裂 T_7^4 构造与 T_8^2 断层走向存在某种联系,当 T_8^2 断层走向在75°左右,剖面上 T_7^4 断裂表现为“压扭隆起”(图4a);当 T_8^2 断层走向在85°左右,剖面上 T_7^4 断裂表现为“平缓”特征或无明显变形图4c);当 T_8^2 界面断层走向90°,剖面上 T_7^4 断裂表现为“微弱

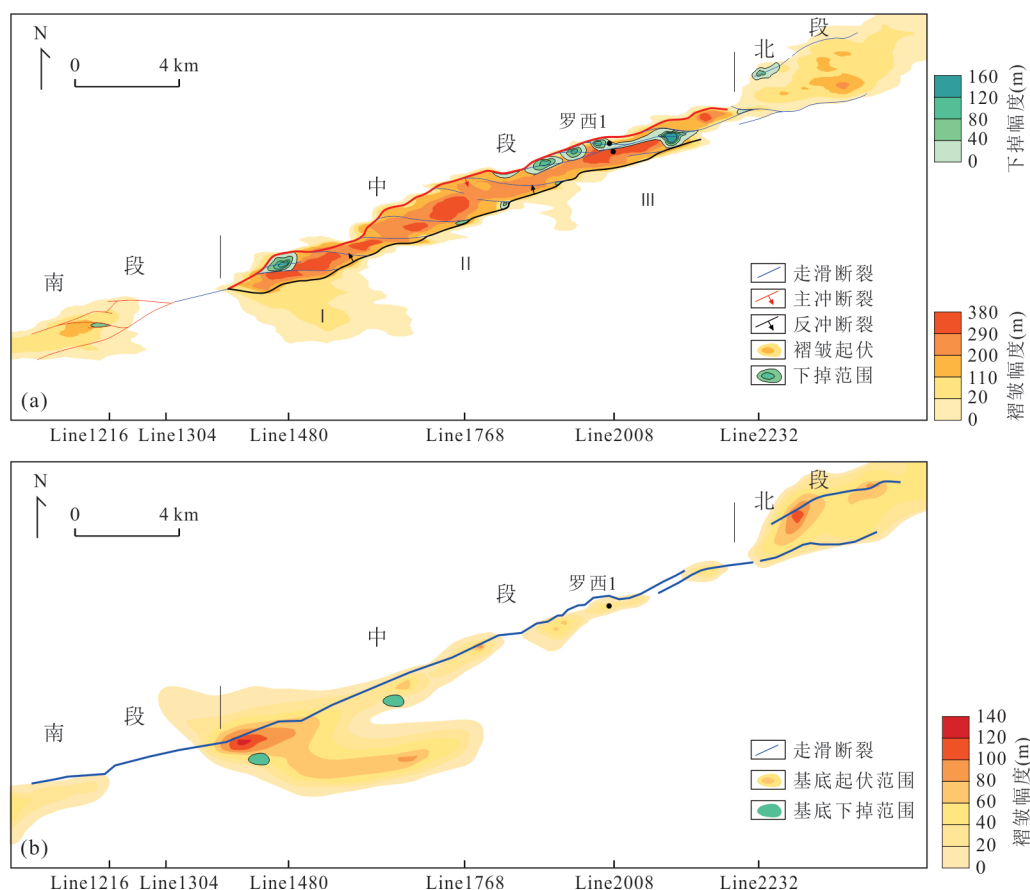


图2 罗西断裂古构造、断裂分布与分段特征

Fig.2 Paleogeomorphology, fault distribution and segmentation characteristics of the Luoxi fault

a. 海西晚期鹰山组顶界(T_7^4)古构造与断裂分布;b. 海西晚期阿瓦塔格组底界(T_8^2)古构造与断裂分布

隆起+局部下凹”(图 4b).这种早晚期叠加变形所表现出的追踪和改造,可能与古应力方位和先存断裂配置有关(D’Adda *et al.*, 2017).

2.3.2 中段发育特征 罗西断裂中段平面走向 70°,长 19.7 km,整体表现为“压扭隆起”,局部叠加“下凹”,断距明显,北支断裂断距 180~480 m,南支断裂断距 130~270 m(图 3a,表 1),断层倾角为罗西断裂最大,内部发育多条次级走滑断层,倾角大于逆断层(图 3,图 4).中段的断裂带宽度为罗西断裂最宽, T_7^4 宽度 1.1~2.2 km, T_8^2 宽度 0.5~2.8 km(表 1),尽管罗西断裂带在 T_7^4 界面和 T_8^2 界面的平均宽度相差不大,但分布规律却存在明显不同. T_7^4 断裂带中间宽、东西窄, T_8^2 断裂带则西宽东窄(图 3b),导致这种差异的原因可能是罗西断裂与北北西向基底逆断层(未断穿 T_7^4 ,平面上向北与皮山北 2 断裂连接)对走滑分量的吸收.

依据断层性质、断层倾角和断裂带宽度,罗西断裂中段可进一步分为三段.Ⅰ段是罗西断裂与北北西向基底逆断层(向北与皮山北 2 断裂连接)汇聚部位,长 6.1 km, T_8^2 断裂走向 70°,主要表现为背冲式强烈隆起和“下凹”结构,受断裂交汇的影响,隆起范围较宽,表现出北西向褶皱与北东向褶皱交叉特征(图 2). T_7^4 界面北支断裂局部存在一个“几”形双向弯曲,内部发育一个孤立“下凹”结构(图 2),下凹幅度在 T_5^6 界面最大,可达 160 m(见图 4 中 Line1480).Ⅰ段内部还发育有两条相对明显的左阶排列次级断裂,断裂在地震剖面上表现为倾角区的突变,两端特征明显,分别与南北支断裂交汇,中部

识别难度较大,推测次级断裂的成核在南北支断裂上,后向中间连接(Dooley and Schreurs, 2012),中部由于断距小所以地震反射特征模糊.次级走滑断裂倾角在 60°~90°,从中间往两端断层倾向逐渐相反,呈现出典型的丝带效应,反映了这些次级断裂的走滑性质.

Ⅱ段是罗西断裂走向最偏北的一段,长 5.0 km, T_8^2 断裂走向 67°,整体隆起特征要强于其他段,是最典型的“压扭隆起”发育区(图 3,图 4), T_7^4 界面的褶皱宽度和幅度为中段最大,断层倾角最小,“下凹”结构几乎不发育,仅在南支逆断层与次级走滑断裂交汇处见轻微下凹,幅度不超过 20 m(见图 4 中 Line1768).北支断裂为主断裂,南支断裂具有反冲断裂性质,倾角相对北支高陡.Ⅱ段内部同样发育多条次级走滑断裂,产状与Ⅰ段接近,只是次级断裂间隔比Ⅰ段略宽(图 3).北支断裂构成一个宽缓的“几”形,“几”形东侧发育小规模的下凹”结构,某种程度反映了东侧的离散边界特征.次级走滑断裂与南北支断裂的楔形交汇处是形成”下凹”结构的主要位置.

Ⅲ段是罗西断裂走向相对偏东的一段,长 8.6 km, T_8^2 断裂走向 72.7°,“压扭隆起”特征与Ⅰ段近似,与Ⅱ段的区别在于“下凹”结构普遍发育,且“下凹”结构规模较大,且多位于次级断裂与逆冲断裂交汇处(图 2,图 4).最强烈的“下凹”结构呈现拉分特征,幅度超过 200 m(见图 4 中 Line2008),分布在南支逆断层处,该段 T_8^2 界面断裂走向 90°左右,也是Ⅲ段走向最偏东的部位,显示出基底断层走向对

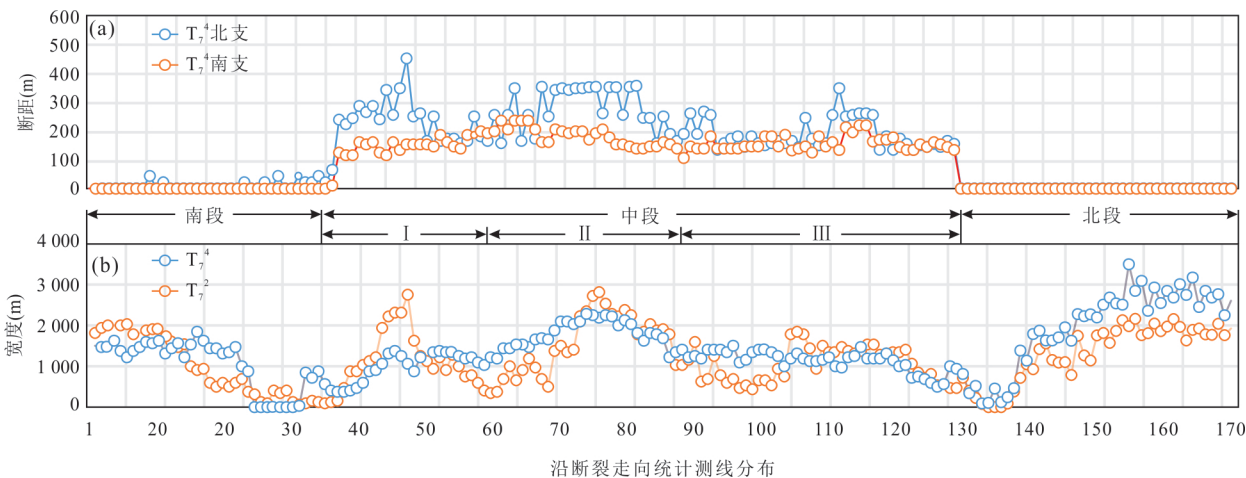


图 3 罗西断裂的分段特征

Fig.3 Segmentation characteristics of the Luoxi fault

a. 罗西断裂 T_7^4 断距—距离曲线; b. T_7^4 与 T_8^2 断裂带宽度—距离曲线; 横坐标为测线编号

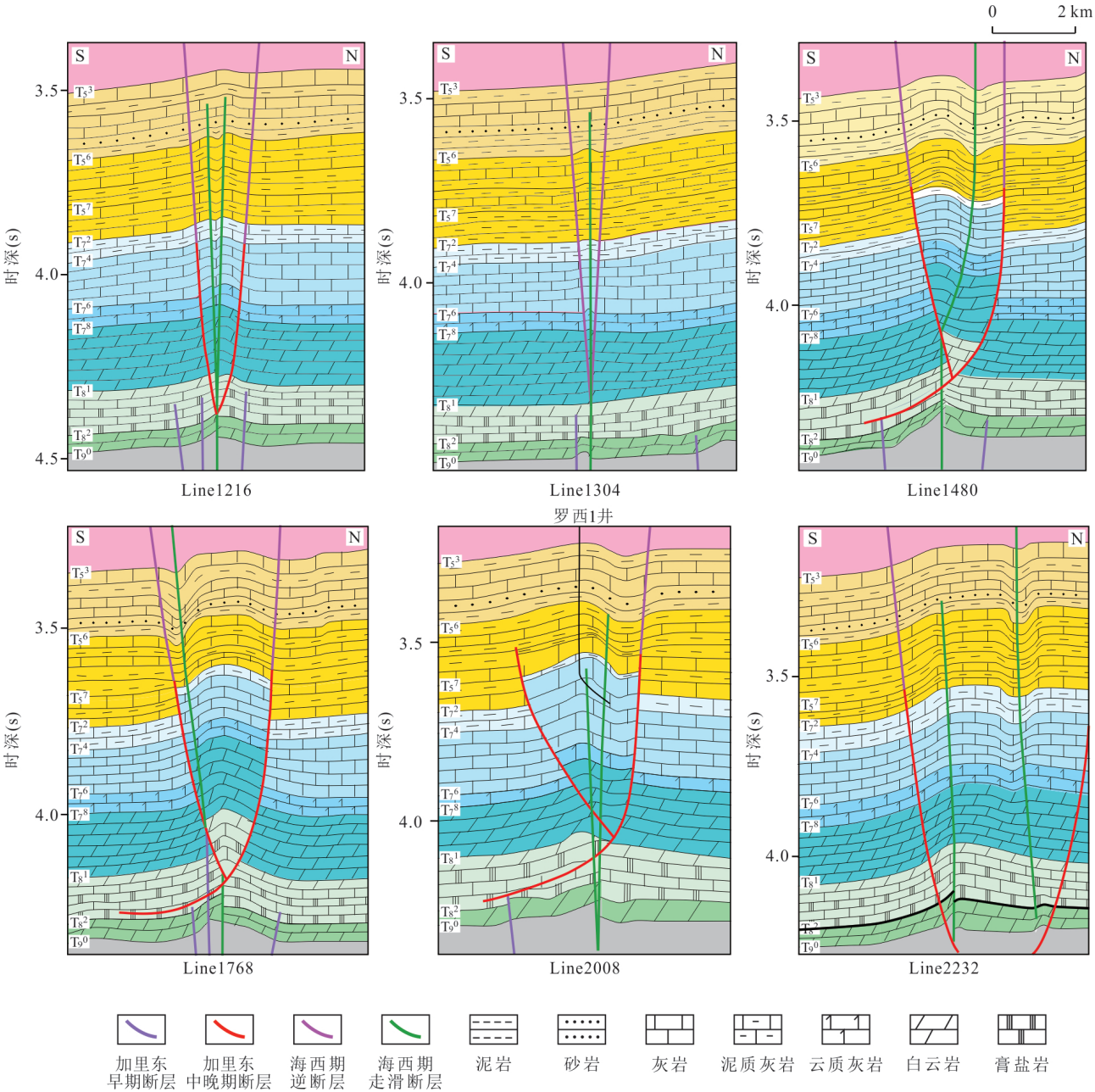


图 4 罗西断裂地震地质剖面

Fig.4 Seismic geological section of the Luoxi fault

纵向拉伸 4.5 倍,剖面位置见图 2

表 1 罗西断裂不同段构造特征				
Table 1 Structural characteristics of different sections of the Luoxi fault				
构造特征		南段	中段	北段
走向		75°	70°	67°
延伸长度		8.6 km	19.7 km	8.7 km
断距	北支断距	0~50 m	180~480 m	0 m
	南支断距	0 m	130~270 m	0 m
断裂带宽度	T ₇ ⁴	0~1.9 km	1.1~2.2 km	1.6~3.5 km
	T ₈ ²	0.2~2.0 km	0.5~2.8 km	1.0~2.1 km

奥陶系构造的控制作用。

2.3.3 北段发育特征 北段构造样式整体表现为宽缓隆起(图 3,图 4),平面走向 77°,长 8.7 km,奥陶系断距不明显,南、北支断裂断距几乎为零,控制背斜平面分布的逆冲断裂具有基底卷入三角剪切褶皱特征(Champion *et al.*, 2001), T_7^4 宽度 1.6~3.5 km, T_8^2 宽度 1.0~2.1 km(表 1)。

罗西断裂北段发育两条边界逆冲断裂,南支断裂属于罗西断裂的东北端,北支断裂属于罗斯 2 段南支断裂的西南端,由此可知北段实际上是罗西断裂与罗斯 2 段南支断裂的叠覆区(图 3),其特征与罗斯 2 段类似,都属于右旋左阶,但又有区别。罗斯 2 段显然离距较小,以强烈逆冲隆升为主,而罗西断裂北段离距较大,两条断裂的左阶叠接面积大,上盘整体抬升,形成一宽缓背斜,下盘受牵引形成向斜,地层连续无错断,具有基底卷入三角剪切褶皱特征,与背斜相关逆冲断裂断距不发育(图 4 中 Line2232)。在北段的南侧,可以见两条近直立次级走滑断裂,其与中段连接并形成一个小“下凹”结构(图 2)。奥陶系宽缓背斜对应的寒武系也呈现“马鞍”状宽缓隆起,在整体宽缓隆起的基础上,近边界断层处相对隆起,幅度约 40m,显示出寒武系构造与奥陶系构造的耦合关系。

3 罗西构造形成演化历史

3.1 不整合面发育特征与断层活动性

罗西断裂不仅平面上具有分段变形特点,剖面上也表现出垂向分层。通过连井剖面 and 三维地震资

料的分析,寒武系一下奥陶统的鹰山组为整合接触,鹰山组一二叠系内则发育多套不整合面,地层不同程度缺失(图 5)。

鹰山组顶部为一套区域不整合面,发生过一定时间的地表暴露,井下多见表生岩溶作用形成的溶蚀孔缝结构。该不整合面广泛分布在塔西南和麦盖提斜坡,是加里东中期和田古隆起活动的证据(丁文龙等,2012)。罗西断裂上盘可见鹰山组的减薄,减薄厚度较小,数米至十几米范围,表明该期罗西断裂仅有微弱活动。

良里塔格组顶部不整合面与鹰山组顶部不整合相似,也是加里东中期和田古隆起活动的结果,良里塔格组地层从北往南向玉北 8 井方向剥蚀尖灭。二者的区别在于,良里塔格组厚度跨过罗西断裂发生了明显变化。基于罗西 1 井钻井资料和区域地层对比,罗西断裂上盘良里塔格组的剥蚀量为 95 m,厚度趋势法估计区域地层减薄为 15 m,余下的 80 m 推测为断盘隆升的结果(图 6)。良里塔格组顶部不整合面在罗西断裂的变化表明罗西断裂在加里东中期Ⅲ幕活动明显增强。

志留系和泥盆系发育有多个局部不整合面,主要围绕古构造高点以超覆不整合形式出现(图 5),造成志留系和泥盆系向南尖灭。罗西断裂带两侧志留系和泥盆系厚度大致相等,断裂带内缺失志留系和中、下泥盆统,上泥盆统东河塘组上段直接覆盖在良里塔格组上,估算志留系和泥盆系累积剥蚀厚度达 216 m,反映罗西断裂在加里东晚期发生了强烈活动,活动强度向东增强(图 6),罗西断裂东侧罗

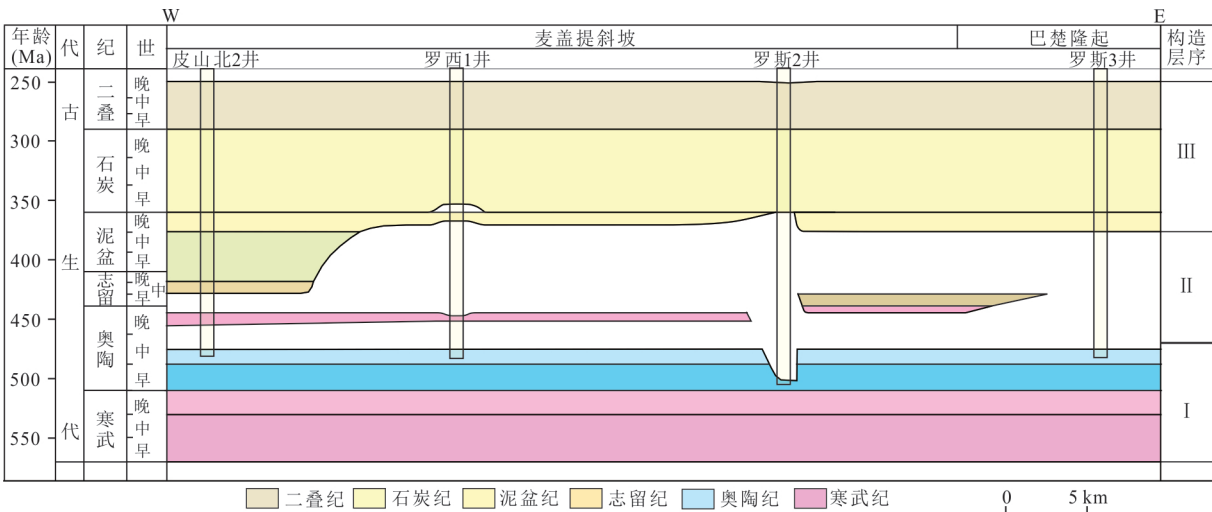


图 5 过井年代地层格架
Fig.5 Stratigraphic framework of time by across the wells

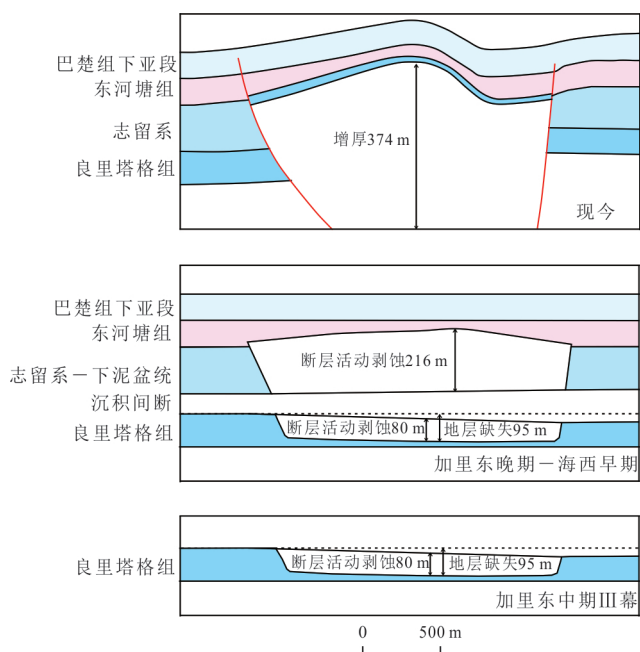


图6 罗西断裂地层剥蚀量恢复(纵横比1:1)

Fig.6 Restoration of strata denudation in the Luoxi fault (vertical to horizontal equals 1:1)

斯2段的良里塔格组—泥盆系全部缺失,鹰山组与石炭系巴楚组角度不整合接触。

东河塘组—二叠系在区域上为整合接触,但在罗西断裂附近出现了多个“下凹”结构,“下凹”结构内部地层增厚,属于生长地层。生长地层的存在表明罗西断裂在海西早期存在过一定程度的活动。

二叠系不整合面是整个塔里木盆地广泛发育的不整合面,与上覆古近系平行不整合接触为主,对罗西断裂而言,仅在断背斜顶部有轻微的削截关系,地层剥蚀厚度数米范围,反映罗西断裂在海西晚期逐渐停止了活动。

3.2 深度—幅度曲线与断层活动性

罗西断裂局部地震剖面显示出特殊的“下凹”结构,内部发育生长地层,反映海西期的构造活动。“下凹”结构深度范围主要限定在 T_5^3 界面以下和 T_7^4 界面之上,平面上呈现圆形、椭圆形或长条形分布特征,主要分布在逆冲边界断层与内部斜列走滑断裂的交汇处,从整体结构分析认为局部下凹结构受控于晚期走滑叠加变形。为了有效表征走滑断层变形期次,提出了应用深度—幅度曲线厘定断层活动期次,深度—幅度曲线是指在地震剖面上不同地层深度条件下“下凹”幅度大小变化规律(图7),

一般来说,幅度变化最大的层位代表“下凹”开始形成的时期。一方面,砂层在破碎前通过褶皱变

形会对向上传递位移吸收,进而导致“下凹”幅度向上减小(Dooley and Schreurs, 2012)。另一方面,断裂作用与褶皱作用具有负相关性,沿断面越深断裂变形越强,褶皱变形越弱。后期走滑断层在追踪早期断面迅速向上传递时,断裂作用越强的砂层,对应的褶皱作用越弱,进而造成最大幅度层位的“下凹”幅度减弱。“幅度变化最大的层位向上、向下的幅度减弱”的构造样式在塔里木走滑断裂带中常见,如顺北1号断裂、顺北5号断裂、和田河5号断裂、皮山北走滑断裂、玉北8井西走滑断裂。

从图7可以看出,罗西断裂下凹幅度0~140 m,下凹幅度最大值集中在100~140 m,下凹幅度变化最大的层位大约在 T_5^6 界面(下石炭统巴楚组),反映出走滑作用开始于 T_5^6 界面沉积之后,这与晚期(海西早期)区域张扭变形具有一致性,即海西早期罗西断裂局部地段存在张扭作用,控制着局部“下凹”的形成。

3.3 罗西断裂形成演化过程

在前人研究基础上(汤良杰等, 2012),结合不整合面特征和深度—埋深曲线分析认为,加里东早期是罗西断裂先存断裂的形成时期,断层主要位于基底且活动微弱,海西晚期断裂活动微弱,新生代罗西断裂不活动。寒武纪—海西早期是罗西断裂的主要活动时期,又可细分为加里东中期Ⅲ幕、加里东晚期和海西早期3个阶段。

加里东中期Ⅲ幕,对应的界面是上奥陶统顶面(T_7^0),是罗西断裂雏形的形成时期。早古生代,在伸展状态下,塔里木盆地前寒武系发育了一系列北东向正断层,由于和田古隆起方向的挤压,这些断层开始复活(张永等, 2019),形成北东向走滑断裂及一系列伴生的高角度基底卷入构造(马海陇等, 2019),基本奠定了罗西断裂带构造格局。加里东中期Ⅲ幕的构造运动使罗西断裂开始微弱抬升,良里塔格组遭受剥蚀,剥蚀厚度在80 m左右,同时断层南盘受和田古隆起影响形成微弱掀斜,跨过断裂良里塔格组向南减薄,良里塔格组上覆的上奥陶统在构造带顶部缺失(图6)。

加里东晚期,对应的界面是中下泥盆统顶面(T_6^0),是罗西断裂的主要活动时期。罗西断裂以北,普遍发育有厚度1 200 m的志留系与泥盆系,跨过断裂厚度减为80 m,并且向南继续减薄尖灭,罗西断裂带顶部志留系剥蚀殆尽,上泥盆统东河塘组超覆在良里塔格组上,与下盘相比厚度骤减为100~

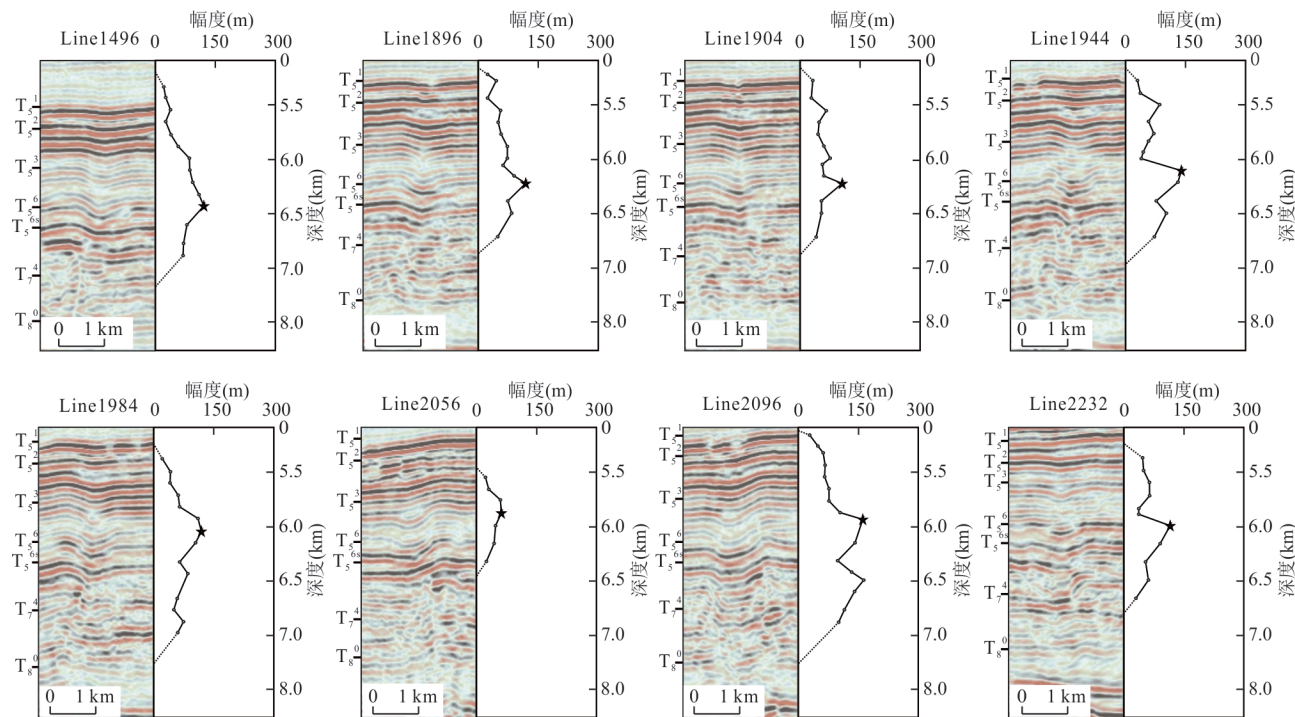


图7 罗西断裂典型地震剖面与深度—幅度变化曲线(纵向拉伸2.5倍)

Fig.7 Typical seismic profile and depth-amplitude variation curves in the Luoxi fault (vertical to horizontal equals 2.5:1)

240 m,明显受断裂活动控制(图6).该期断裂活动强度比加里东中期Ⅲ幕强烈,是罗西断裂的主要活动时期.

海西早期,对应的界面是巴楚组顶界(T_5^6),是罗西断裂走滑改造,“下凹”结构形成时期.石炭纪古特提斯洋张开和南天山洋的发育,塔里木盆地构造格局变为北压南张,形成了塔里木盆地的第二期海侵,石炭系在巴楚隆起之上发育齐全,总体南厚北薄,麦盖提斜坡一系列北东向古构造上巴楚组超覆其上(陈刚等,2014).由于罗西断裂毗邻的巴楚隆起开始处于伸展环境,罗西断裂构造应力方向发生偏转,生长地层幅度—埋深曲线揭示(图7),罗西断裂局部发育伸展环境,形成压扭隆起+局部下凹型构造和拉分下凹型构造,并持续到早、中二叠世.该期是罗西断裂的走滑改造期,活动强度较大,罗西断裂也在该期定型.

海西晚期对应的界面是二叠系顶面(T_5^0),上覆古近系,罗西断裂在早期主断裂的基础上继承性活动,但是可能与来源于南天山洋闭合有关的应力源距离较远、影响较小有关,该期断裂断距小,向上进入二叠系内部逐渐消失,在石炭—二叠系中以褶皱变形为主,褶皱普遍平缓,“下凹”结构不发育.由于区内缺失中生界,不易判断中生代断裂活动情况,

但根据前述断裂未明显断开二叠系上部,表明中生代断裂未发生进一步向上断开,可能是以整体抬升剥蚀为主,断裂基本不活动(图8).

4 罗西断裂的形成机制

4.1 相似性模型的构建

在构造解析基础上,为弄清罗西逆冲—走滑构造的成因机制,采用砂箱物理模拟方法开展研究.实验过程严格遵循脆性变形砂箱物理模拟方法(McClay and Bonora *et al.*, 2001; Ritter *et al.*, 2016; Fedorik *et al.*, 2019),伺服电机以1 cm/min的速度带动移动挡板活动,实现断层变形过程模拟,高清相机拍照间隔为5 s,选定20 s的间隔提取图像,为后续三维建模和应变分析提供依据.

相似性模型的构建主要包括3个方面:一是基底断裂与应力配置关系以及变形期次.这包含两方面:(1)基底断裂如何模拟;(2)古应力方向如何确定.本次实验在模拟基底断裂时,主要依据构造解析结果,罗西断裂的最早活动源于寒武系正断层在中奥陶世的复活,因此本次研究以 T_8^2 界面断裂作为先存断裂设计罗西断裂带砂箱物理平面地质模型.由于实际边界断层的复杂性,模拟实验的先存边界作了一定简化,模拟结果和实际构造可能在细节分

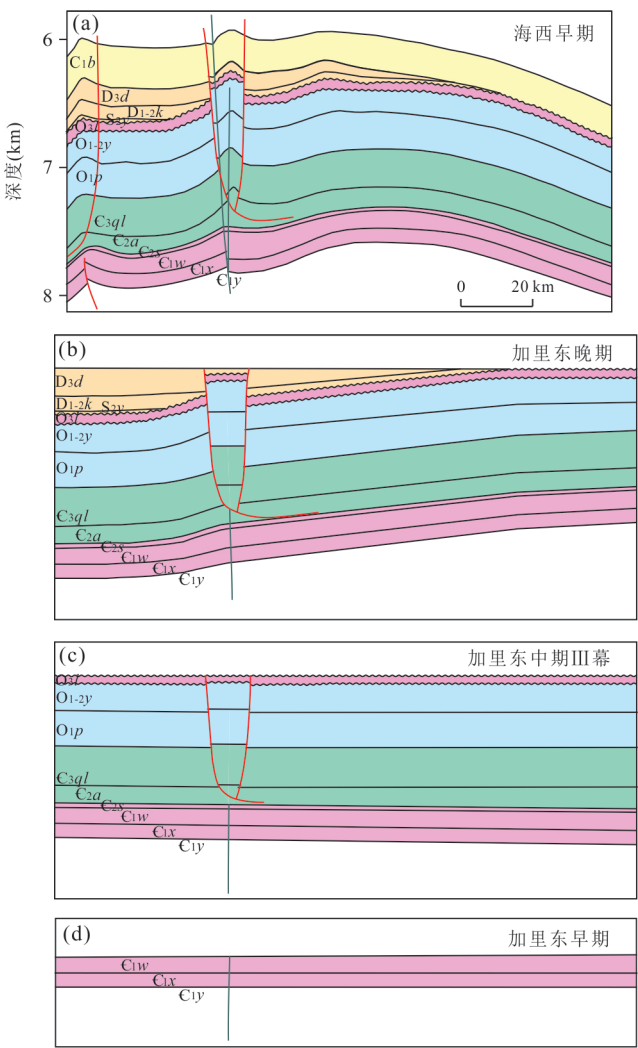


图8 罗西逆冲—走滑复合构造形成演化历史(纵向拉伸36倍)
Fig.8 Formation and evolution history of the Luoxi thrust-strike-slip composite structure (vertical to horizontal equals 36:1)

表 2 实验采用相似性材料物理性质(实验结果得自Hubbert直剪仪)			
Table 2 Physical properties of similar materials used in experiments (experimental results obtained from Hubbert direct shear apparatus)			
材料	石英砂	云母粉	石英砂—云母粉混合材料
粒径(μm)	106~230	106~230	106~230
铺设方式	筛撒	筛撒	筛撒
密度(g/cm ³)	1.36	1.10	1.24
内摩擦角φ(°)	27.4	21	24.8
内摩擦系数μ	0.52	0.38	0.46
内聚力C(Pa)	149	83	101

段上存在不一致,不过本次研究的模拟重点在于应力偏转对断裂性质的影响,以及对分段结构的调整效应,整体分段仍符合相似性.

古应力方向的确定历来是构造解析的难点,但由于罗西断裂的特殊性,不同走向基底断层对应的奥陶系构造样式存在显著差异,可以推知罗西断裂奥陶系构造样式对基底先存断裂走向非常敏感,反过来就可以利用同期构造样式和基底先存断裂走向的相关性来推断古应力.基底断裂走向与断裂带宽度、构造样式的相关性也为前人证实(D’Adda *et al.*, 2017; Fedorik *et al.*, 2019; 周铂文等, 2022).为此本次研究基于斜向滑移角度和断裂性质、断裂产状的相关性,提出了一种半定量方法来表征罗西断裂不同期次的古应力方向(图9),分析结果表明,罗西断裂主要经历了“三期两向”变形活动(三期主要构造变形,两次应力方向改变,加里东早期变形活动微弱),加里东中期Ⅲ幕和加里东晚期罗西断裂带整体均为压隆型构造,推断其最大主应力方向大约为90°;海西早期罗西段层同时发育压隆区和拉分区,根据走向分布玫瑰花图,推测海西早期最大主应力方向大约为80°,应力方向发生10°偏转(图9).

据此,砂箱模拟实验还设计了三期两向叠加变形:第一期加里东中期Ⅲ幕和第二期加里东晚期应力方向不变,第三期海西早期应力方向发生偏转.在实际模拟过程中,由于先存断裂走向多变,应力方向的标定以罗西断裂中段为参照,第一、二期变形中段基底断层与最大主应力夹角大约30°.第二期变形中段基底断层与最大主应力夹角大约20°(图10).

二是岩石力学和几何学的相似性.参照国内外砂箱物理模拟实验的设计原则(Adam *et al.*, 2005; Hus *et al.*, 2005; Ritter *et al.*, 2016),本次模拟地层层下段以深层碳酸盐岩以灰岩和白云岩为主,平均内聚力35.8 MPa,平均密度2.6 g/cm³;上段以碎屑岩为主,平均内聚力32.3 MPa,平均密度2.5 g/cm³.实验采用的模拟材料为石英砂和石英砂与白云母混合物,并以筛撒方式铺设,相关岩石力学参数如表2所示,据此可计算几何学相似系数约1:100 000,即实验模型中1 cm代表实际模型1 km.阿瓦塔格组—良里塔格组厚约1 500 m,对应铺设实验材料厚1.5 cm;上泥盆统东河塘组—石炭系厚约0.7 km,对应铺设实验材料厚0.7 cm(图10).

三是动力学相似性,主要涉及变形速率和变形

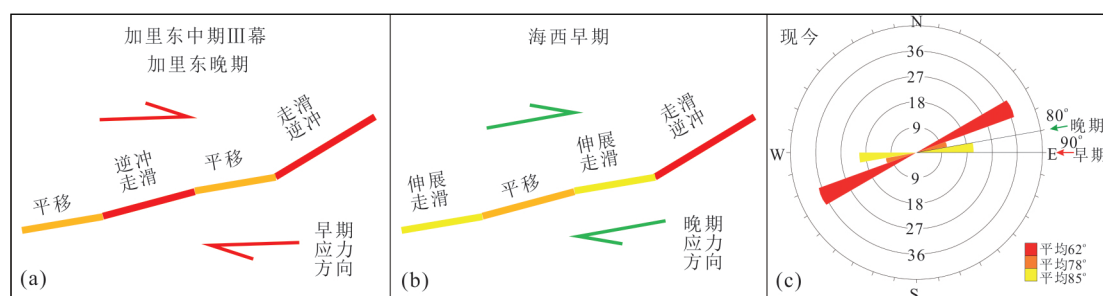


图9 利用不同期次断层性质变化分析古应力方向

Fig.9 Analysis of paleo-stress direction by using the variation of fault properties at the different times

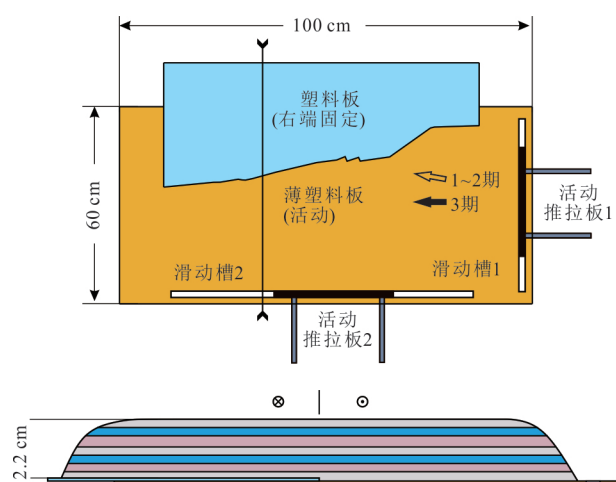


图10 地质模型结构设置与边界参数

Fig.10 Structure setting and boundary parameters of geological model

位移的相似(Adam *et al.*, 2005; Hus *et al.*, 2005; Ritter *et al.*, 2016). 罗西断裂变形时期 T_s^2 界面埋深小于 3 km, 地震剖面显示阿瓦塔格组膏岩盐并未构成明显滑脱层, 主要作用是盐上盐下构造的力学分界, 因此变形机制为脆性变形机制, 砂箱物理模拟不需要考虑时间因素的影响. 罗西断裂模拟的难点在于走滑断裂的位移量计算(Duvall *et al.*, 2020), 本次研究基于斜向滑移过程中的地层抬升下凹幅度进行换算, 即鹰山组隆升 350 m 对应实验模型隆升 3.5 mm, 罗西断裂“下凹”幅度 200 m, 对应实验模型下凹 2 mm.

第一、二期构造活动时, 活动推拉板 1 和活动推拉板 2 各自以一定速率推进, 模拟应力方位 90° , 累积施加 1.9 cm 的位移变形; 第三期构造活动时, 活动推拉板 1 向前推挤, 活动推拉板 2 不活动, 模拟应力方位 80° , 累计施加 1.7 cm 的位移变形. 在砂箱模拟完成后, 通过等间距切割剖面, 提取深、浅层三维空间坐标, 重构三维地形(图 12a), 并对罗西 1 井对

应的位置剖面进行基于模拟结果的构造复原(图 12b~12f). 进一步, 本文基于寒武纪以后罗西断裂“三期两向”叠加变形物理模拟结果, 实施了不同阶段平面应变分析(Adam *et al.*, 2005), 即通过 DIC 方法(数字图像追踪)获得位移场后, 运用 Matlab 软件开展应变数值分析将位移场转化为平面剪应变场. 罗西断裂走滑变形位移量大, 垂向位移量小, 平面剪应变的形成演变能够代表走滑作用过程中应变的分布和集中特征.

4.2 实验结果

第一、二期变形结果如图 11a~11c, 当变形达到 0.7 cm 时, 可见有沿着先存基底方向的带状微弱隆起, 不同先存断裂方位形成隆起带宽度表现出差异. 南段和中段北端断裂带宽度最小, 雁列角 40° , 断裂带宽度 2 cm, 中段和北段断裂带宽度最大, 雁列角分别为 44° 和 53° , 断裂带宽度分别为 3.1 cm 和 4.7 cm(图 11b). 当变形达到 1.2 cm 时, 南段和中段北端产生一系列清晰可见的雁列式断裂, 雁列角不变, 断裂带宽度扩展到 3.5~4.0 cm, 中段和北段隆起区域进一步抬升, 雁列角不变, 断裂带宽度扩展到 7.4~8.7 cm, 未见明显 R 破裂; 当前进 1.9 cm 时, 整个断裂带以隆起为特征, 断裂带宽度和雁行式断裂无明显变化(图 11c, 11c').

第三期变形结果如图 11d~11f, 第三期变形是在第一、二期变形结果夷平和再沉积基础上叠加, 夷平后铺设一层 1 cm 石英砂(图 11d), 代表志留系—石炭纪的稳定沉积, 然后开始第三期变形, 此时应力方向逆时针偏转 10° , 目的是模拟两期不同方向向挤压的叠加变形. 当变形达到 1.3 cm(总位移 3.2 cm)时, 南段和中段北段产生一系列清晰可见的雁列式断裂, 雁列角 27° , 断裂带宽度 2.7 cm, 中段和北段隆起区域进一步抬升, 雁列角 32° , 断裂带宽度 4.7~9.1 cm, 未见明显 R 破裂(图 11e). 当变形达到

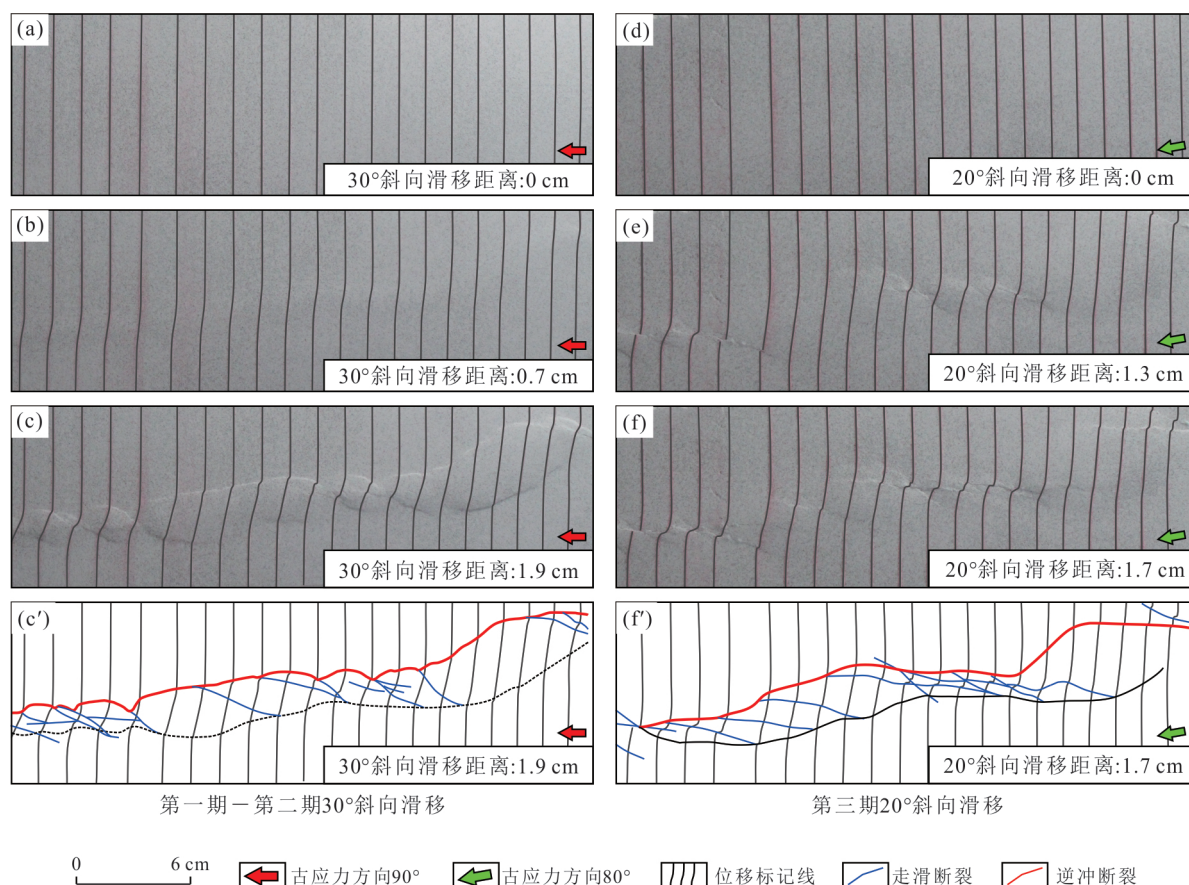


图 11 罗西断裂“两期一异向”叠加变形过程物理模拟

Fig.11 Physical simulation of “two-stages and different direction” superposition deformation process of the Luoxi fault

1.7 cm(总位移 3.6 cm)时,中段和北段持续隆起,中段内部形成多个 R 破裂,南段和中段北端形成下凹并形成局部 PDZ,断裂带宽度和雁行式断裂无明显变化(图 11f, 11f').

4.3 形成机制

综合构造解析和物理模拟结果,罗西断裂分段结构差异性与先存基底断裂和“三期两向”古应力的配置关系密切相关。

罗西断裂所在位置受盆地北部海西期板块边界,盆地西南加里东期、海西期板块边界,盆地东南加里东期、海西期板块边界的远端效应影响,不同方向区域应力在此叠加,形成相对不稳定的局部应力场。随着不同方向区域应力大小和方向的改变,罗西断裂的局部应力方向也跟随变化。不同时期、不同方向的局部应力作用在同一段先存断裂上,造成断层性质发生改变,逆冲分量或走滑分量占比出现变化,构造样式也表现出叠加特征。先存断裂的分段结构和不同段的走向差异进一步造成构造样式沿断裂走向的多变,构造样式的分段特征。下面

依据断裂的主要活动时期来分析罗西断裂的形成机制。

加里东中期Ⅲ幕和加里东晚期,伴随和田古隆起活动的减弱,巴楚隆起活动的增强,其影响范围向西南延伸,毗邻巴楚隆起的罗西地区受到来自北东方向的挤压开始超过来自塔西南的挤压。与此同时,塔东南方向伴随阿尔金洋的俯冲开始向盆强烈挤压,并在玉北地区形成一系列北东向逆冲断裂,罗西地区同时受到东南方向和北东方向挤压,形成东西向局部应力场(90°;图 9),因此,加里东中期Ⅲ幕斜向挤压作用控制着罗西逆冲背斜的形成,这与物理模拟第一期变形结果是一致的(图 11a, 11c),南段和中段主体为压扭作用的结构,北段处于两条大型断裂的叠接段,右旋左阶组合使得该段发生大范围的基底隆升,造成 T_7^4 界面和 T_8^2 界面褶皱范围大致相当(图 2 和图 11)。整体来说,罗西断裂南段先存断裂主体走向从西向东由 77°变为 86°,与古应力夹角 13°~4°,形成的断层倾角 35°~70°,主体表现为近平移断层特征,隆起不明显且向东减弱。中段先

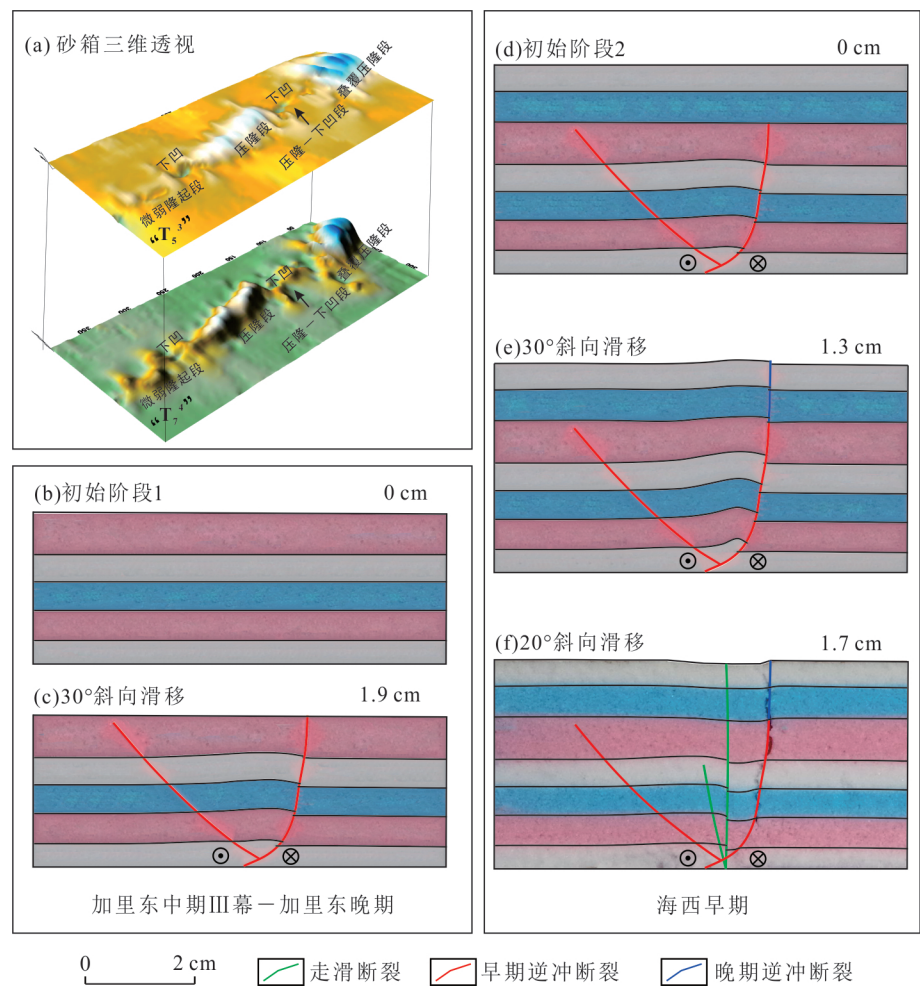


图 12 罗西断裂“压隆一下凹”构造的形成机制

Fig.12 Formation mechanism of “uplift-depression” structure of Luoxi fault

存断裂走向 70° ,与古应力夹角 20° ,沉积盖层断层初始倾角 29° 左右,在下丘里塔格群和阿瓦塔格组膏岩盐界面,可以看到低角度断层的反射,由于斜向走滑分量较大,基底断裂产状对沉积盖层断层影响较大,低倾角断层尚未发育完全便会被基底断裂切断,与导致最终形成奥陶系断裂倾角与先存断裂接近.北段先存断裂走向 78° ,与古应力夹角 12° ,沉积盖层断层初始倾角 35° 左右,在下丘里塔格群和阿瓦塔格组膏岩盐界面,可以看到该低角度断层的反射,和中段情况类似(图 2 和图 11).

海西早期,塘沽巴斯凹陷方向挤压减弱,巴楚隆起持续受到挤压作用(汤良杰等,2012),造成罗西地区的古应力由向西挤压变成向南西西挤压.依据构造行迹判断,海西早期古应力方向 80° 左右(图 11),罗西断裂的南段、中段和北段在构造应力方向 10° 调整后,表现出不同的响应特征,既发育压隆构造又发育“下凹”结构(图 11a、11e 和图 12),实验模

拟结果成功验证了这一现象(图 11,图 12),与实际构造特征具有较好的响应.应力场转变还导致罗西断裂中段的 III 亚段由压扭作用转变为张扭作用,基底断层走向转变部位形成显著“下凹”结构甚至“拉分”构造,如南段走向 86° 段和中段走向 92° 段,整体上中段“下凹”幅度远大于南段的“下凹”段,这种幅度的增大可能与晚期张扭应力在逆冲断层与走滑断层交汇区集中有关.

5 地质意义

塔里木盆地深层奥陶系碳酸盐岩储层孔隙度普遍低于 5% ,不具备储层条件.野外和实际钻井证实,断裂的破裂作用及其伴生裂缝发育程度是提高碳酸盐岩储层渗透性的重要基础.本文基于砂箱物理模拟结果从应变角度间接反映了逆冲—走滑断裂伴生裂缝的分布规律.罗西断裂加里东中期 III 幕

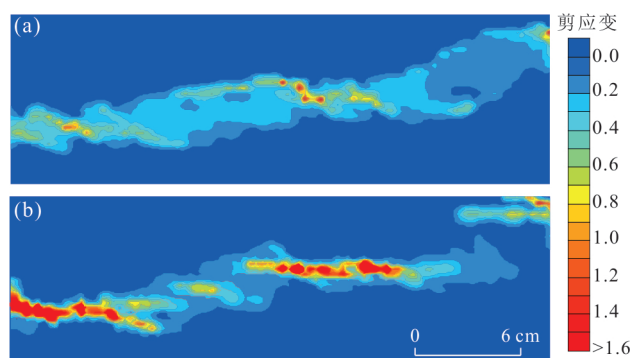


图13 罗西断裂形成过程及其平面应变分布特征

Fig.13 Formation process and characteristics of plane strain distribution of Luoxi fault

以斜向挤压作用为主,既发育逆冲背斜,也存在走滑断层特征(图11,图12),应变主要集中在边界断层、与边界断层小角度斜交的走滑断层和断层交汇区域(图13a),这也指示了逆冲—走滑复合构造有利储集层发育的部位;海西早期以张扭作用为主(图11,图12),局部表现为“下凹”特征(图2a),以走滑作用为主,应变主要集中在断裂带中部(图13b)。未来油气勘探应以伸展走滑改造段作为重要勘探选区目标,其次是边界断层附近,在滑移量足够大的条件下,断背斜高部位也可以成为有利储层发育区。

6 结论

(1)罗西断裂作为典型的逆冲—走滑复合构造,边界断层在不同地质时代表现出不同性质,整体表现出“微弱隆起”或“压扭隆起”特征,“压扭隆起+局部下凹”特征。沿断裂走向分为南段、中段和北段,南段为微弱隆起叠加走滑,中段一、二小段为强烈隆起持续叠加,中段三段强烈隆起叠加伸展走滑,北段宽缓隆起持续变形。不同段的断层性质、组合样式、生长连接方式有明显差异。

(2)罗西断裂自寒武纪以后主要经历三期构造运动,加里东中期Ⅲ幕是罗西断裂初始形成时期;加里东晚期是罗西断裂的主要活动时期;海西早期是罗西断裂走滑改造、“下凹”结构形成的关键时期。

(3)罗西断裂的形成与先存基底断裂和“三期两向”古应力的配置关系密切相关。盆地周边不同方向区域应力共同作用在罗西断裂,随着区域应力大小和方向的改变,罗西断裂的局部应力方向也跟随变化。加里东中期Ⅲ幕和加里东晚期的向西挤压,使得罗西断裂早期逆冲断隆特征明显;晚期海

西早期的向南西西的挤压与先存断裂的夹角沿走向变化,是造成早期“隆起”晚期改造为“隆起—下凹”构造的主要机制。

(4)逆冲—走滑复合构造样式控制着地层应变分布模式,应变主要集中在边界断层、与边界断层小角度斜交的走滑断层和断层交汇区域,指示逆冲—走滑复合构造有利储集层发育的部位。

References

- Adam, J., Urai, J.L., Wieneke, B., et al., 2005. Shear Localisation and Strain Distribution during Tectonic Faulting—New Insights from Granular-Flow Experiments and High-Resolution Optical Image Correlation Techniques. *Journal of Structural Geology*, 27(2): 283–301. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.08.008>
- Barnett, J., Mortimer, J., Rippon, J., et al., 1987. Displacement Geometry in the Volume Containing a Single Normal Fault. *AAPG Bulletin*, 71(8): 925–937
- Champion, J., Mueller, K., Tate, A., et al., 2001. Geometry, Numerical Models and Revised Slip Rate for the Reelfoot Fault and Trishear Fault-Propagation Fold, New Madrid Seismic Zone. *Engineering Geology*, 62(1–3): 31–49. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00048-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00048-5)
- Chen, G., Tang, L.J., Yu, T.X., et al., 2014. Poly-Phase Fault Activities and the Control on Hydrocarbon Accumulation of Yubei Thrust Belt, Tarim Basin. *Journal of China University of Mining & Technology*, 43(5): 870–879 (in Chinese with English abstract).
- D’Adda, P., Longoni, R., Magistroni, C., et al., 2017. Extensional Reactivation of a Deep Transpressional Architecture: Insights from Sandbox Analogue Modeling Applied to the Val d’Agri Basin (Southern Apennines, Italy). *Interpretation*, 5(1): SD55–SD66. <https://doi.org/10.1190/int-2016-0078.1>
- Deng, S., Liu, Y.Q., Liu, J., et al., 2021. Structural Styles and Evolution Models of Intracratonic Strike-Slip Faults and the Implications for Reservoir Exploration and Appraisal: A Case Study of the Shunbei Area, Tarim Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(6): 1111–1126 (in Chinese with English abstract).
- Ding, W.L., Lin, C.S., Qi, L.X., et al., 2008. Structural Framework and Evolution of Bachu Uplift in Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 15(2): 242–252 (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).
- Dooley, T. P., Schreurs, G., 2012. Analogue Modelling of Intraplate Strike-Slip Tectonics: A Review and New Experimental Results. *Tectonophysics*, 574—575: 1—71. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.05.030>
- Du, J. H., 2010. Oil and Gas Exploration Cambrian-Ordovician Carbonate Rocks in Tarim Basin. Petroleum Industry Press, Beijing, 151(in Chinese).
- Duvall, M. J., Waldron, J. W. F., Godin, L., et al., 2020. Active Strike-Slip Faults and an Outer Frontal Thrust in the Himalayan Foreland Basin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(30): 17615—17621. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001979117>
- Fedorik, J., Zwaan, F., Schreurs, G., et al., 2019. The Interaction between Strike-Slip Dominated Fault Zones and Thrust Belt Structures: Insights from 4D Analogue Models. *Journal of Structural Geology*, 122:89—105. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2019.02.010>
- Fu, X. F., Sun, B., Wang, H. X., et al., 2015. Fault Segmentation Growth Quantitative Characterization and Its Application on Sag Hydrocarbon Accumulation Research. *Journal of China University of Mining & Technology*, 44(2): 271—281(in Chinese with English abstract).
- Guo, X. S., 2022. Discussion and Research Direction of Future Onshore Oil and Gas Exploration in China. *Earth Science*, 47(10): 3511—3523(in Chinese with English abstract).
- He, D. F., Zhou, X. Y., Yang, H. J., et al., 2008. Formation Mechanism and Tectonic Types of Intracratonic Paleouplifts in the Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 15(2):207—221(in Chinese with English abstract).
- He, W. Y., Li, J. H., Qian, X. L., et al., 2000. The Mesozoic Evolution of Bachu Fault-Uplift in Tarim Basin. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 36(4):539—546(in Chinese with English abstract).
- Hus, R., Acocella, V., Funicello, R., et al., 2005. Sandbox Models of Relay Ramp Structure and Evolution. *Journal of Structural Geology*, 27(3):459—473. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.09.004>
- Jia, C. Z., 1997. Structural Characteristics and Oil and Gas of Tarim Basin in Chinese. Petroleum Industry Press, Beijing(in Chinese).
- Li, Y. T., Qi, L. X., Zhang, S. N., et al., 2019. Characteristics and Development Mode of the Middle and Lower Ordovician Fault-Karst Reservoir in Shunbei Area, Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 40(12):1470—1484 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. L., Zhang, Z. P., Yun, J. B., et al., 2018. NE-Trending Fault Belts in Tanggubasi Depression of the Tarim Basin: Features, Genetic Mechanism, and Petroleum Geological Significance. *Oil & Gas Geology*, 39(5):964—975 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. B., Gao, S. L., Liu, S. L., et al., 2015. Ordovician Carbonate Sedimentary Characteristics and Models of Bachu-Maigaiti Region in Tarim Basin. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 46(11): 4165—4173(in Chinese with English abstract).
- Ma, H. Q., Wang, S. Y., Lin, J., 2006. Hydrocarbon Migration and Accumulation Characteristics in the Bachu-Maigaiti Area of the Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 28(3):243—248(in Chinese with English abstract).
- Ma, H. L., Yu, J. F., Zhang, C. J., et al., 2019. The Characteristics of North-East Strike Slip Faults in Eastern Bachu Uplift of Tarim Basin. *Xinjiang Geology*, 37(3):348—353 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. S., Li, M. W., Cai, X. Y., et al., 2020. Mechanisms and Exploitation of Deep Marine Petroleum Accumulations in China: Advances, Technological Bottlenecks and Basic Scientific Problems. *Oil & Gas Geology*, 41(4): 655—672, 683 (in Chinese with English abstract).
- McClay, K., Bonora, M., 2001. Analog Models of Restraining Stepovers in Strike-Slip Fault Systems. *AAPG Bulletin*, 85(2): 233—260. <https://doi.org/10.1306/8626c7ad-173b-11d7-8645000102c1865d>
- Qi, L. X., 2014. Exploration Practice and Prospects of Giant Carbonate Field in the Lower Paleozoic of Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 35(6): 771—779(in Chinese with English abstract).
- Qi, L. X., 2020. Characteristics and Inspiration of Ultra-Deep Fault-Karst Reservoir in the Shunbei Area of the Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 25(1): 102—111(in Chinese with English abstract).
- Ritter, M. C., Leever, K., Rosenau, M., et al., 2016. Scaling the Sandbox-Mechanical (Dis) Similarities of Granular Materials and Brittle Rock. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(9): 6863—6879. <https://doi.org/10.1002/2016JB012915>
- Tang, L. J., Qi, L. X., Qiu, H. J., et al., 2012. Poly-Phase Differential Fault Movement and Hydrocarbon Accumulation of the Tarim Basin, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8):2569—2583(in Chinese with English abstract).
- Wei, G. Q., Jia, C. Z., Yao, H. J., 1995. The Relation of Thrust-Strike Slip Structure and Hydrocarbon Potential in Late

- of Hercynian in North Area of Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 16(2): 96—101 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. H., Deng, W., Huang, S. Y., et al., 2020. Tectonic-Paleogeographic Evolution in the Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology*, 55(2): 305—321 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., He, D. F., Liu, C. L., 2019. Three-Dimensional Geological Structure and Genetic Mechanism of the Bachu Uplift in the Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 26(1): 134—148 (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).
- ### 附中文参考文献
- 陈刚, 汤良杰, 余腾孝, 等, 2014. 塔里木盆地玉北冲断带分期活动特征及其控油气作用. *中国矿业大学学报*, 43(5): 870—879.
- 邓尚, 刘雨晴, 刘军, 等, 2021. 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. *大地构造与成矿学*, 45(6): 1111—1126.
- 丁文龙, 林畅松, 漆立新, 等, 2008. 塔里木盆地巴楚隆起构造格架及形成演化. *地学前缘*, 15(2): 242—252.
- 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.
- 杜金虎, 王招明, 李启明, 2010. 塔里木盆地寒武—奥陶系碳酸盐岩油气勘探. 北京: 石油工业出版社.
- 付晓飞, 孙兵, 王海学, 等, 2015. 断层分段生长定量表征及在油气成藏研究中的应用. *中国矿业大学学报*, 44(2): 271—281.
- 郭旭升, 2022. 我国陆上未来油气勘探领域探讨与攻关方向. *地球科学*, 47(10): 3511—3523.
- 何登发, 周新源, 杨海军, 等, 2008. 塔里木盆地克拉通内古隆起的成因机制与构造类型. *地学前缘*, 15(2): 207—221.
- 何文渊, 李江海, 钱祥麟, 等, 2000. 塔里木盆地巴楚断隆中新生代的构造演化. *北京大学学报(自然科学版)*, 36(4): 539—546.
- 贾承造, 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社.
- 李映涛, 漆立新, 张哨楠, 等, 2019. 塔里木盆地顺北地区中: 下奥陶统断溶体储层特征及发育模式. *石油学报*, 40(12): 1470—1484.
- 刘士林, 张仲培, 云金表, 等, 2018. 塔里木盆地塘古巴斯坳陷北东向断裂带特征、成因及石油地质意义. *石油与天然气地质*, 39(5): 964—975.
- 刘忠宝, 高山林, 刘士林, 等, 2015. 塔里木盆地巴楚—麦盖提地区奥陶系碳酸盐岩沉积特征及模式. *中南大学学报(自然科学版)*, 46(11): 4165—4173.
- 马海陇, 于静芳, 张长建, 等, 2019. 塔里木盆地巴楚隆起东段北东向走滑断裂特征. *新疆地质*, 37(3): 348—353.
- 马红强, 王恕一, 蔺军, 2006. 塔里木盆地巴楚—麦盖提地区油气运聚与成藏. *石油实验地质*, 28(3): 243—248.
- 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 等, 2020. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发: 研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题. *石油与天然气地质*, 41(4): 655—672, 683.
- 漆立新, 2014. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩大油气田勘探实践与展望. *石油与天然气地质*, 35(6): 771—779.
- 漆立新, 2020. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示. *中国石油勘探*, 25(1): 102—111.
- 汤良杰, 漆立新, 邱海峻, 等, 2012. 塔里木盆地断裂构造分期差异活动及其变形机理. *岩石学报*, 28(8): 2569—2583.
- 魏国齐, 贾承造, 姚慧君, 1995. 塔北地区海西晚期逆冲—走滑构造与含油气关系. *新疆石油地质*, 16(2): 96—101.
- 邬光辉, 邓卫, 黄少英, 等, 2020. 塔里木盆地构造—古地理演化. *地质科学*, 55(2): 305—321.
- 张永, 何登发, 刘长磊, 2019. 塔里木盆地巴楚隆起的三维地质结构及成因机制. *地学前缘*, 26(1): 134—148.
- 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.