



塔里木盆地碳酸盐岩走滑断层破碎带宽度—高差相关性分析

袁敬¹⁾, 邬光辉^{2,3)}, 万效国¹⁾, 邓卫²⁾, 刘瑞东¹⁾1) 中国石油塔里木油田分公司, 新疆库尔勒, 841000;
2) 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都, 610500; 3) 西南石油大学羌塘研究院, 成都, 610500

内容提要: 断层破碎带的宽度—位移关系对断层发育机制研究与致密储层的勘探开发具有重要意义。露头研究一般认为断层破碎带的宽度与位移呈幂律关系, 但往往难以获得地下走滑断层破碎带的宽度与位移数据。在走滑断裂精细解析基础上, 结合断层破碎带的井—震响应分析, 通过塔里木盆地塔中、塔北地区 10 条走滑断裂带三维地震资料测量断层破碎带的宽度与高差, 研究断层破碎带宽度与高差的分布及其相关关系, 探讨碳酸盐岩断层破碎带的分布规律。结果表明: ① 塔里木盆地寒武—奥陶系碳酸盐岩断层破碎带发育, 破碎带宽度超过 1000 m, 一般在 100~700 m, 不同地区与不同岩性碳酸盐岩断层破碎带具有相似的宽度分布范围; ② 碳酸盐岩断层破碎带的宽度与高差具有较好的正相关性, 断层破碎带宽度/高差比值高达 70, 一般在 3~16, 回归分析同一条断层的破碎带宽度是高差的 4~12 倍; ③ 大多碳酸盐岩断层破碎带的宽度与位移以幂律关系继承性发育, 但其中部分快速生长, 而另一部分减速生长, 并造成数据的分散性。结果揭示: ① 断层破碎带的宽度与高差相关性分析的方法可以用来预测碳酸盐岩断层破碎带的分布; ② 即便在相同的构造背景与岩性条件下, 同一条断层破碎带的宽度与位移也可能不是简单的线性或幂律关系, 而是呈现多趋势或多阶段的分布规律。

关键词: 断层破碎带; 碳酸盐岩; 破碎带宽度; 高差; 分布; 塔里木盆地

断层不仅是自然科学研究与工程应用的热点与难点, 而且与油气运聚成藏关系密切 (Caine et al., 1996; Aydin, 2000; Di et al., 2005; Pei Yangwen et al., 2015; He Xiangli et al., 2019)。在狭窄的应变与位移集中的断层核外围, 往往发育宽阔的受断裂作用影响的断层破碎带 (Kim et al., 2004; Torabi et al., 2011; 万效国等, 2016), 可以统称为断层破碎带, 其宽度可达数千米。研究表明, 断层破碎带具有复杂内部构造变形、流体—岩石作用、渗流作用 (Faulkner et al., 2010; 邬光辉等, 2012; Bense et al., 2013; Li Yonggang et al., 2014; 刘鹏等, 2019)。近年来一个重要的进展是建立断层破碎带宽度与位移的相关关系 (Torabi et al., 2011; Ma Debo et al., 2019), 并由此揭示断层破碎带的发育机制。尽管地质条件差异很大, 全球断层破碎带的宽度与位移大多具有正相关关系, 呈现线性关系

(Shipton et al., 2003; Childs et al., 2009)、对数关系 (Fossen et al., 2000) 或指数关系 (Torabi et al., 2011; Faulkner et al., 2011; Savage et al., 2011)。但多有不同程度的分散性 (Torabi et al., 2011; Ma Debo et al., 2019), 通常归结于断层的构造背景、变形机制、岩性、埋深与成岩作用等多种复杂因素 (Choi et al., 2016; Torabi et al., 2011)。目前断层破碎带宽度与位移关系研究主要集中在露头剖面, 盆地内部由于缺少资料研究很少。

近年来随着四川、塔里木与鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩油气勘探开发的快速发展 (马永生等, 2011; 赵文智等, 2014; 何治亮等, 2016), 深层古老碳酸盐岩已成为中国重要的油气接替领域。近年来, 在塔里木盆地下古生界碳酸盐岩发现一系列走滑断层, 其破碎带宽度达 5 km (万效国等, 2016; Wu Guanghui et al., 2019; Ma Debo et al., 2019;), 并控

注: 本文为中国石油股份公司重大专项(编号: 2018E-1806), 中国石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目(编号: 2020CX010301)和国家自然科学基金重大研究计划重点项目(编号: 91955204)的成果。

收稿日期: 2020-12-14; 改回日期: 2021-06-11; 网络首发: 2021-08-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.08.011

作者简介: 袁敬一, 女, 1987 年生, 硕士, 工程师, 主要从事地球探测与信息技术研究; Email: yuanjing-tlm@petrochina.com.cn。通讯作者: 邬光辉, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 主要从事构造地质研究; Email: wugh@swpu.edu.cn。

制了优质储层的分布与油气的富集(万效国等,2016;能源等,2017;Lu Xinbian et al., 2017;沈卫兵等,2018;Wu Guanghui et al., 2019;Han Xiaoying et al., 2020),形成走滑断裂控特大型油气田。塔中地区奥陶系碳酸盐岩断层破碎带的地震测量分析表明,断层破碎带宽度—位移具有幂率关系,但呈现出3个阶段与快、中、慢3种发育方式(Ma Debo et al., 2019;邬光辉等,2020),不同于其他地区断层破碎带的生长方式。但断层破碎带宽度—位移的关系复杂,其分布特征不明确,是否受控于不同地区的构造背景与层位有待进一步研究。

本文通过塔里木盆地地震剖面解析,统计分析碳酸盐岩断层破碎带宽度与位移之间的关系,探讨破碎带宽度的分布规律。

1 地质背景

塔里木盆地是在太古代—早新元古代结晶基底基础上形成的克拉通盆地,寒武—奥陶系海相碳酸盐岩分布面积达 $24 \times 10^4 \text{ km}^2$,厚度逾2000 m,具有多套储盖组合与含油气层段,油气资源丰富(Li Qiming et al., 2010;杜金虎,2010),是盆地克拉通区油气勘探开发的主体。已发现的碳酸盐岩油气田(藏)主要分布于塔北隆起南斜坡与塔中隆起北斜坡地区,其中轮南—塔河油田、塔中北斜坡凝析气田分别是我国最大的海相碳酸盐岩油田与凝析气田,而且在超深层寒武系一下奥陶统深层与坳陷区的油气勘探不断有新突破,并主要围绕一系列大型走滑断裂带展开。

通过对三维地震资料连片工业构造解释与成图,塔北—满西—塔中地区走滑断层发育(Wu Guanghui et al., 2018;韩剑发等,2019;Deng Shang et al., 2019;杨海军等,2020;Han Xiaoying et al.,

2020),识别70多条大型走滑断裂带,分布面积达 $9 \times 10^4 \text{ km}^2$,构成环满西走滑断裂系统(图1、图2)。研究表明(杨海军等,2020),环满西走滑断裂系统形成塔北、阿满与塔中3个分区,根据规模可以划分4级断层,呈现出分区、分级、分类与分段的差异性;走滑断层主要以压扭为主,分布于寒武系—奥陶系碳酸盐岩中,志留系—泥盆系、石炭系—二叠系、中生界—古近系有张扭继承性活动(韩剑发等,2019;Deng Shang et al., 2019;杨海军等,2020),演化具有继承性与改造性,连接生长造成了小位移、超长的陆内走滑断裂带(Wu Guanghui et al., 2018;邬光辉等,2020;Zhang Yintao et al., 2020)。

研究表明,沿走滑断裂带缝洞体碳酸盐岩储层发育,控制了碳酸盐岩内幕区储层的分布,并对隆起

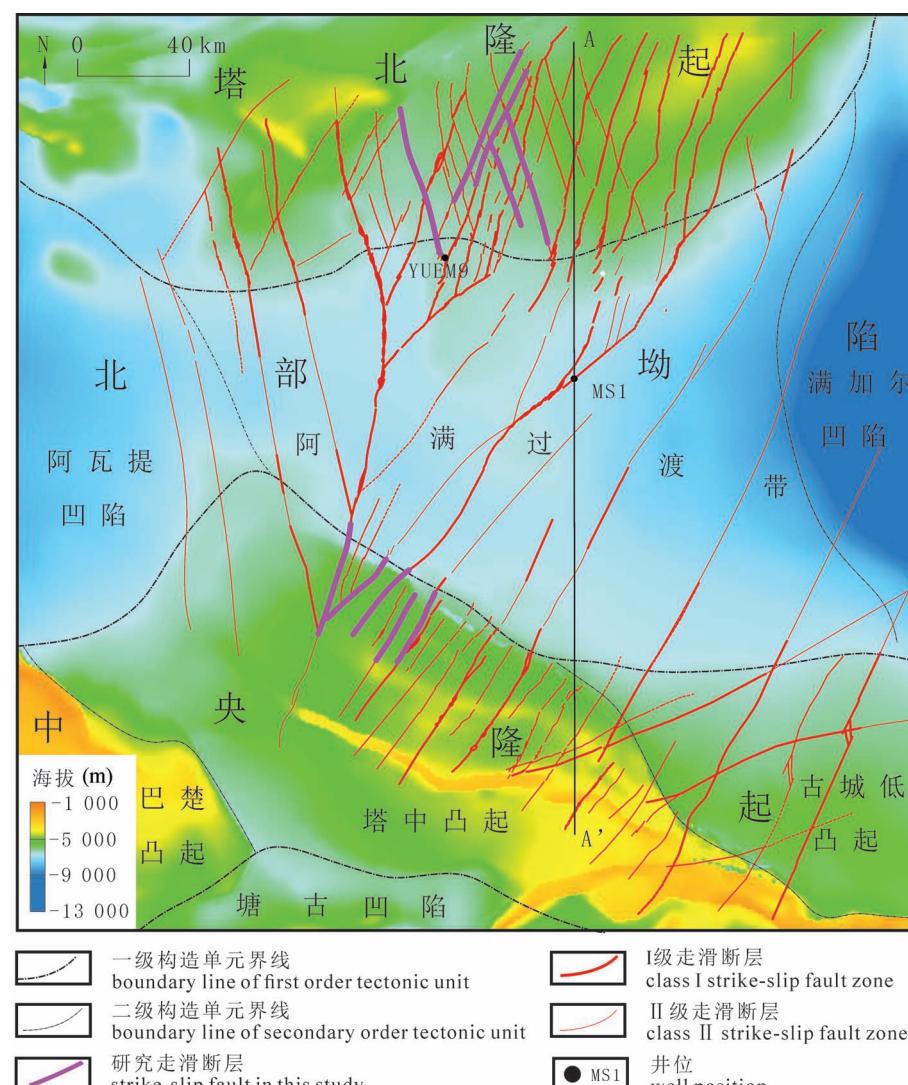


图1 塔里木盆地中部走滑断裂系统纲要图(据杨海军等,2020 修改)
Fig. 1 Map of the fault system in the Lower Paleozoic in the Central Tarim Basin
(modified after Yang Haijun et al. 2020&)

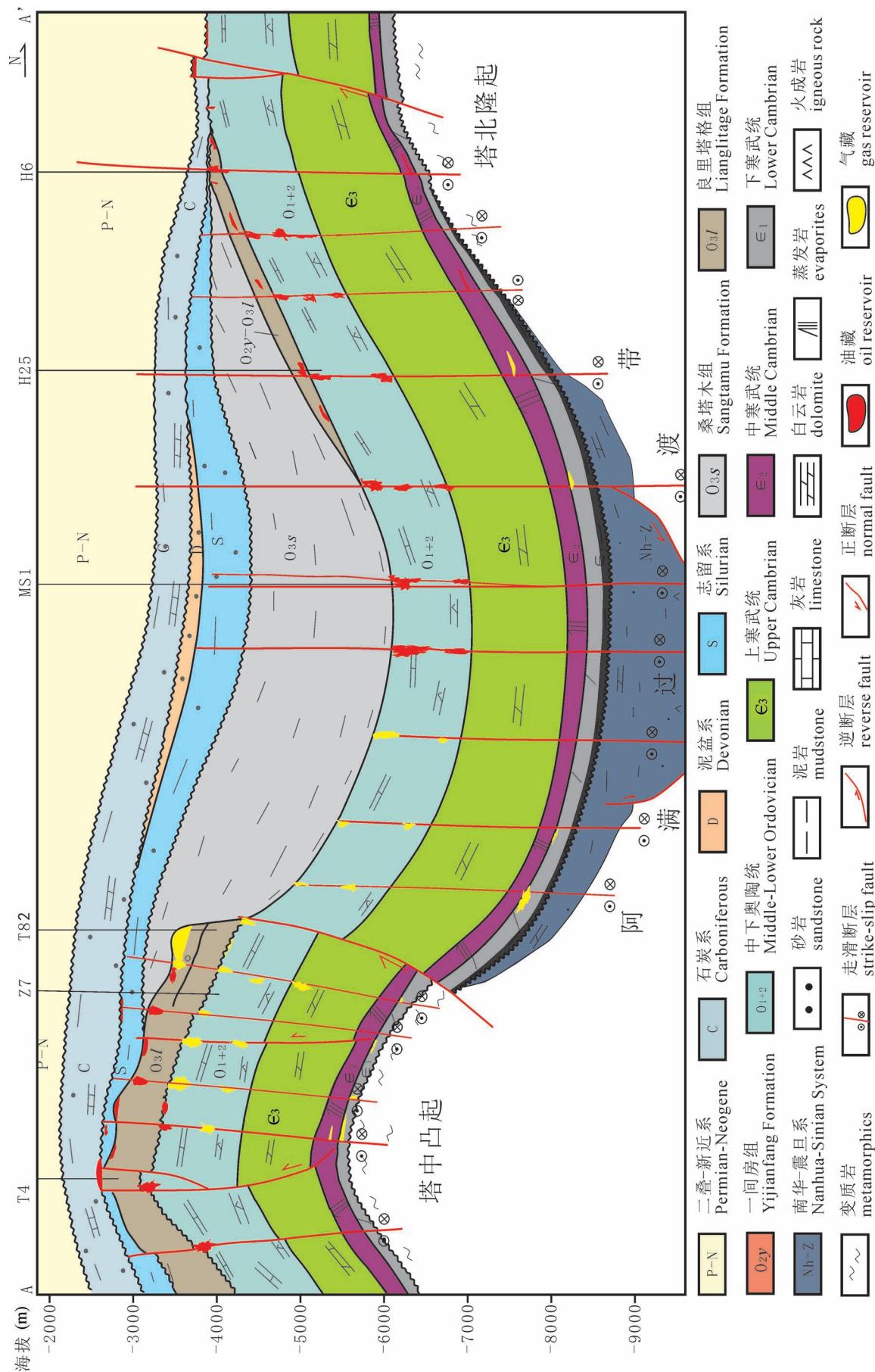


Fig. 2 The oil/gas reservoir model of the Central Tarim Basin (modified from Yang Haijun et al. 2020& 2020修改)

区的碳酸盐岩风化壳储层具有重要的改造作用(李传新等, 2009; 杜金虎, 2010; 鲁新便等, 2015; 焦方正, 2017; Lu Xinbian et al., 2017; Wu Guanghui et al., 2019; Deng Shang et al., 2019; 韩剑发等, 2019; 邬光辉等, 2020)。同时, 油气藏评价与开发实践表明, 大多数高效井位于大型断层破碎带上, 对油气成藏与分布具有明显的控制作用(鲁新便等, 2015; Lü Xiuxiang et al., 2016; Lu Xinbian et al., 2017; 焦方正, 2017; 韩剑发等, 2019; 江同文等, 2020), 断层破碎带是塔中、塔北隆起礁滩体与风化壳油气藏中高效井的主要钻探对象。综合分析, 环满西走滑断裂系统对奥陶系碳酸盐岩储层与油气分布及其产出具有重要的控制作用, 呈现明显“断控”特征, 不同于风化壳与礁滩体控制的大型“准层状”油气藏及国内外常规“断控”油气藏。

由此可见, 塔里木盆地地下古生界复杂碳酸盐岩油气富集及产出与断裂带关系密切, 断层破碎带的分布对碳酸盐岩储层、成藏研究及其油气高效勘探开发具有重要意义。

2 碳酸盐岩断层破碎带宽度与高差相关性

大型的断裂带大多具有较宽的变形带, 一般划分为断层核与破碎带(Kim et al., 2004; Peacock et al., 2017)。由于地下往往很难区分断层核与破碎

带, 可以统称为断层破碎带, 并可以通过地震资料进行判识(万效国等, 2016; Ma Debo et al., 2019)。由于断层破碎带构造变形强烈, 地震剖面上(图3)表现为杂乱、不连续波组, 波形变化大, 同相轴突变, 发生扭曲、分叉; 出现弱振幅或局部异常强振幅, 高频异常, 波形错断、分叉或无反射。由于断层破碎带与围岩多呈渐变过渡, 在地震剖面上断层破碎带外边界区域可能呈现同相轴连续、振幅减弱、频率降低, 其边界往往难以准确判识, 需要精细的裂缝与储层预测方法判识。本文以地震属性平面图进行约束, 并利用钻井验证, 通过地震剖面判识断层破碎带的边界并测量其宽度(万效国等, 2016; Ma Debo et al., 2019)

随着海相碳酸盐岩地层油气勘探开发的深入, 塔里木盆地塔中北斜坡与塔北南斜坡进行了大面积的高精度地震勘探, 能开展断层及破碎带的精细刻画与地震储层预测(杜金虎, 2010), 并为大量的钻探证实。在断裂构造解释与工业成图的基础上, 本文选取地震资料较好的塔中北斜坡5条大型走滑断层的奥陶系碳酸盐岩地层顶与中寒武统盐膏层顶、哈拉哈塘地区5条大型走滑断裂带的奥陶系碳酸盐岩地层顶及其1条断层中寒武统盐膏层顶, 沿断裂带走向拾取断层破碎带的宽度(wd) (包括断层核) 和断层两盘的高差(ΔH), 具体方法详见文献(Ma Debo et al., 2019; Wu Guanghui et al., 2019; 邬光辉

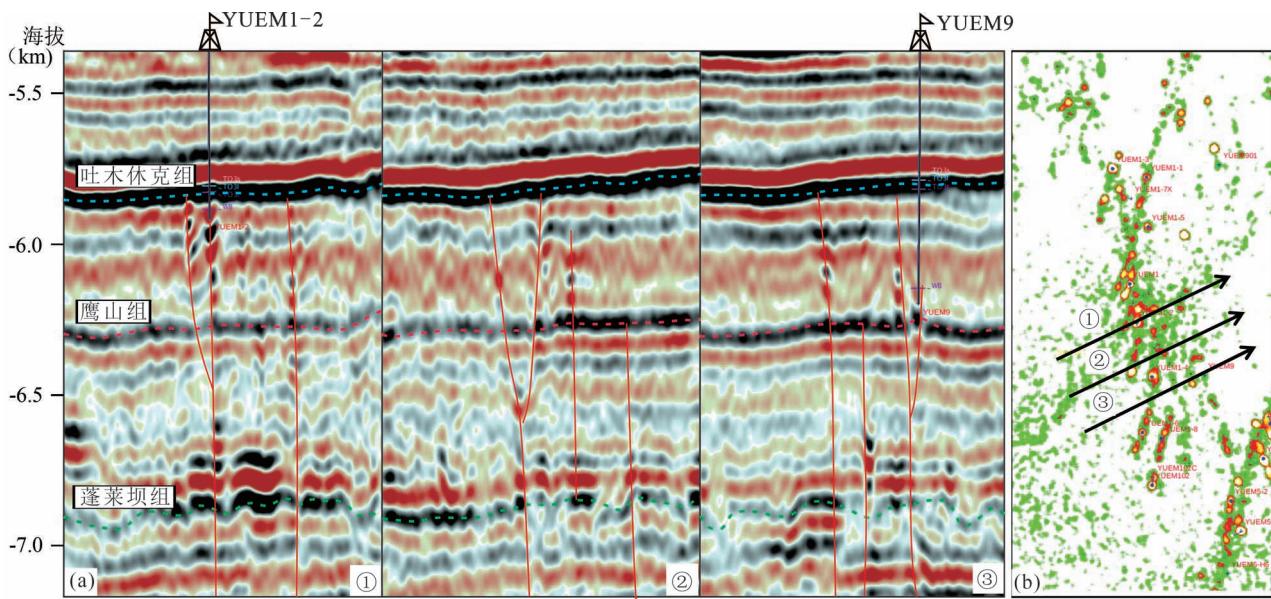


图3 地震剖面(a, ①~③)与奥陶系碳酸盐岩顶面地震振幅变化率平面图(b)示断层破碎带

Fig. 2 Seismic sections (①~③) and seismic amplitude at the top Ordovician carbonates (b) showing the fault damage zones
图(a) 中沿断层的杂乱反射、不连续反射是断层破碎带; 图(b) 中红色与绿色部位是断层破碎带

The fault damage zones are showing with chaotic reflections and discontinuous reflections in Figure 2a and red and green blocks in Figure 2b

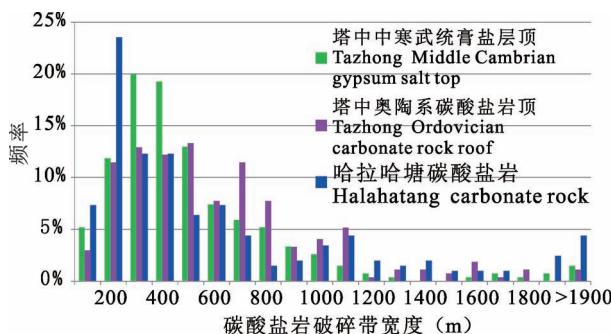


图4 碳酸盐岩断层破碎带宽度分布

Fig. 4 Width of damage zones at the top of the Ordovician carbonates along the strike of the strike-slip faults

等, 2020)。

2.1 断层破碎带的宽度与高差分布

通过10条走滑断层的数据统计分析(图4), 塔里木盆地碳酸盐岩走滑断层带具有较宽的破碎带, 宽度超过2000 m, 但一般在1100 m内, 主要分布在100~700 m。其中, 哈拉哈塘地区下古生界碳酸盐岩的破碎带宽度峰值较低, 约为200 m; 塔中中寒武统盐膏层顶的破碎带宽度峰值在300~400 m, 而塔中奥陶系碳酸盐岩顶破碎带的宽度峰值分布在800 m较宽范围内。由于断层尾端与小断层缺少统计, 一些100 m范围内的断层破碎带没有列入统计范围。断层破碎带宽度超过1100 m的数据很少, 虽有零星的高值宽度出现, 但分析发现大多数异常高值受次级断裂的影响。

塔中、哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩高产油气井多分布在距断层核2000 m范围内(万效国等, 2016; 韩剑发等, 2019; 江同文等, 2020), 与断层破碎带的分布一致。沿断层走向上, 破碎带宽度具有较大的变化, 呈现出明显的分段特征, 出现构造样式的变化。断层高差也随破碎带宽度的变化而变化, 但变化幅度较小。总体而言, 在塔中和塔北地区、不同层位和岩性的奥陶系灰岩和寒武系白云岩, 断层破碎带宽度的分布具有较好的相似性。

统计分析表明, 寒武系—奥陶系碳酸盐岩走滑断层的高差分布在500 m的较大范围内。尽管数据较分散, 但碳酸盐岩断层破碎带的宽度与高差也呈现明显的正相关关系(图5)。碳酸盐岩断层破碎带的宽度与高差之比分布在2个数量级范围内, 一般分布在2~30倍。全球其他地区断层破碎带的宽度与位移统计关系多呈3个数量级的发散分布(Kim et al., 2004; Torabi et al., 2011; Savage et al.,

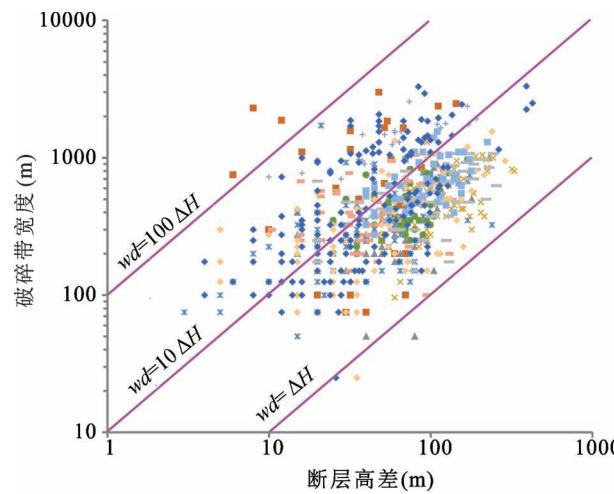


图5 塔里木盆地走滑断层破碎带宽度与高差关系散点图(不同颜色和形状点代表不同的断层)

Fig. 5 Plots of width of damage zone versus the throw along the strike-slip faults (Different color and shape points represent different fault zones)

2011; Choi et al., 2016), 相较而言, 塔里木盆地碳酸盐岩的宽度与高差具有较好的正相关关系, 发散性较小。通过典型断层回归分析(图6), 一些碳酸盐岩破碎带的宽度与高差呈正相关关系, 并具有较高的相关系数。

通过断层破碎带宽度/高差分析(图7), 破碎带宽度/高差比值具有较大的分布范围, 高值可达70, 但一般分布在3~16范围内, 峰值位于4~8。尽管有较大的频谱宽分布, 但不同地区、不同层位的碳酸盐岩走滑断层的宽度/高差分布比较一致。回归分

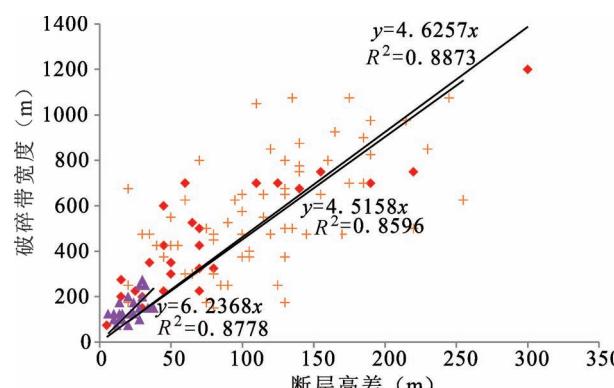


图6 塔里木盆地典型走滑断层破碎带的宽度—高差相关性(不同颜色和形状点代表不同的断层)

Fig. 6 Correlation between the width of damage zone and throw from the Paleozoic carbonates of typical strike-slip faults (Different color and shape points represent different fault zones)

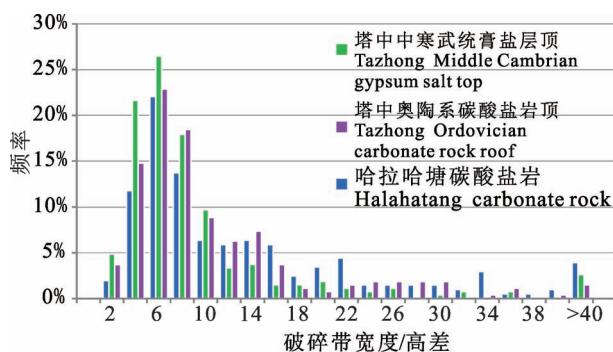


图 7 碳酸盐岩断层破碎带宽度/高差比值分布

Fig. 7 Plots of fault damage zone width / throw of the Paleozoic carbonates along the strike-slip faults

析表明,塔里木盆地碳酸盐岩走滑断层的破碎带宽度与高差的回归一般在 4~12 倍。可见碳酸盐岩断层破碎带的宽度与断层高差关系密切,大多具有良好的正相关性,宽度/高差的比值多处于一个数量级范围内。

因此可见,塔里木盆地走滑断层碳酸盐岩破碎带的宽度与高差具有较好的正相关关系,断层的高差可以替代位移与破碎带的宽度进行相关性分析,并可以用来预测碳酸盐岩破碎带的宽度。在资料较差的区域或是勘探阶段,结合地震属性,通过断层的高差进行破碎带宽度的预测,有利于井位的部署,是易操作的经济实用方法。

2.2 断层破碎带的宽度与高差的多种对应关系

虽然塔里木盆地古生界碳酸盐岩走滑断层破碎带的宽度与高差具有较好的正相关关系,而且不同地区、不同层位岩性地层的破碎带宽度分布相近,但仍然呈现出明显的分散性,且同一条断层的同一层位也具有分散性与较低的相关系数(图 5、图 6)。

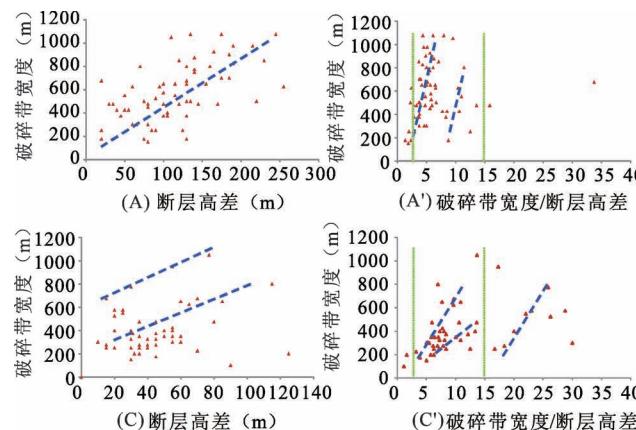


图 8 塔中地区奥陶系碳酸盐岩走滑断层破碎带宽度与高差、宽度/高差分布

Fig. 8 Plots of damage zone width—throw and width—width/throw of the Ordovician carbonate in central Tarim Basin area

选取塔中地区西部四条走滑带奥陶系碳酸盐岩顶面的数据进行分析,可见即便同一断层的不同部位破碎带宽度与高差也有较大的分散性,也出现多种的对应关系(图 8)。在断层破碎带宽度与断层高差相关图上,既有呈单一线性关系的增长(图 8a),其中在不同的破碎带宽度范围均有较大的分散性。也有呈现发散状的快、慢趋势并存的关系(图 8b),表明有的部位破碎带生长快,有的部位生长较慢。另外,有的断层有部分数据呈现与主体数据近平行分布的趋势(图 8c),同时可见趋势线偏离构造高差的零点,在没有较大高差时已有较大的破碎带宽度发育。这可能揭示存在分支断层,或其他因素影响破碎带的发育,地震剖面分析可能还存在分支断层的影响。还有一种断层的破碎带宽度随高差生长发生突然减速,出现明显的拐点(图 8d),呈现幂律分布特征,其拐点处高差约 70 m,表现为两段式生长。但其他断层未出现这样的变化,该突变可能代表断层破碎带宽度发育机制的转变。整体数据分布表明(图 5),由于不同区间不同断层的数据相互补充,破碎带宽度与高差总体呈现明显的幂律关系,而不是单个断层局部数据的线性关系(图 6)。由此可见整体数据的宏观分布规律比较一致,但单一断层不同部位存在较大的变化。

在断层破碎带宽度(wd)与断层破碎带宽度/高差($wd/\Delta H$)关系图上(图 7),也呈现多种对应关系。随着 wd 的增长, $wd/\Delta H$ 通常也呈增长趋势,其比值主要分布在 3~15 范围内,但也不是单一的增长趋势。有的数据呈现平行增长的趋势(图 8a'),其中部分数据初始就出现较大的 $wd/\Delta H$ 值,可能揭示破碎带生长机制的差异。另外,多条断层出现 $wd/\Delta H$

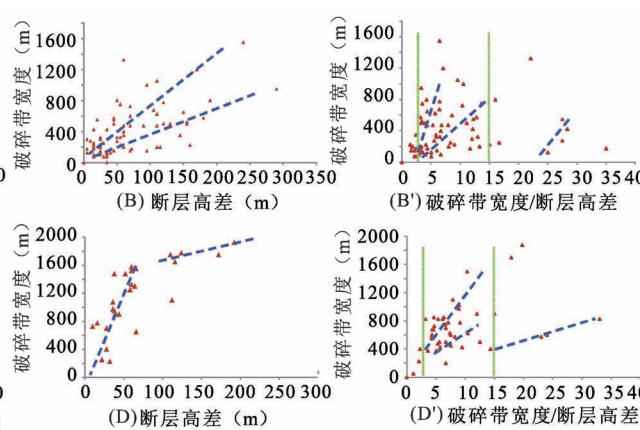


图 8 塔中地区奥陶系碳酸盐岩走滑断层破碎带宽度与高差、宽度/高差分布

Fig. 8 Plots of damage zone width—throw and width—width/throw of the Ordovician carbonate in central Tarim Basin area

的二个分区(图 8b'—d')。其中较低值区($wd/\Delta H < 15$)呈现发散生长的快、慢两种趋势类型,使得数据具有较大的发散性。而高比值($wd/\Delta H > 15$)区虽然数据较少,但也呈现正相关关系,而且破碎带发育初始就具有很高的破碎带宽度/高差比值($wd/\Delta H$)。低值区与高值区呈现两种不同的生长模式,这两区破碎带的生长机制可能存在较大的差异。

整体而言,断层破碎带宽度(wd)和断层破碎带宽度/高差($wd/\Delta H$)均呈现明显的分散性(图 8)。同一地区(如哈拉哈塘地区),或同一断层也可能呈现多种对应关系,但均具有较低的相关系数,表明其间关系复杂,不能以简单的关系式概括。虽然数据分散,但 $wd/\Delta H$ 值主要分布 15 内,并也随着破碎带宽度呈增长趋势,表明破碎带宽度随着高差增大而增长的速率有上升趋势。同时,数据整体呈现幂律关系,与 $wd-\Delta H$ 的变化规律相似(图 5), $wd/\Delta H$ 的增长速率随破碎带宽度的增加有降低趋势。数据的分散性也表明,在破碎带宽度较低时,破碎带宽度(wd)与破碎带宽度/高差比值($wd/\Delta H$)的变化更大,可能揭示断层破碎带生长早期的不稳定性。

不同于 $wd-wd/\Delta H$ 分布关系,断层高差(ΔH)与断层破碎带宽度/高差($wd/\Delta H$)呈现明显的幂律负相关关系(图 7)。随着断层高差的增长,破碎带宽度/高差($wd/\Delta H$)快速降低, $wd/\Delta H$ 值从 70 降低到 5 以内。当断层高差增长至 100 m 以后, $wd/\Delta H$ 基本稳定在 2~16 范围内,并逐渐集中于 3~6。这可能揭示断层破碎带宽度随高差的增长,破碎带宽度生长速率呈快速降低并趋于稳定的过程。同时也表明,在断层高差较小时(<100 m),断层破碎带的宽度的生长速率变化大,具有破碎带生长机制的差异。

3 讨论

断层破碎带宽度与位移的相关性定量研究,对断层生长发育模式、破裂机制与演化过程具有重要的作用(Caine et al., 1996; Kim et al., 2004; Childs et al., 2009; Torabi et al., 2011; Faulkner et al., 2011; Savage et al., 2011; Choi et al., 2016),前人对断层破碎带宽度随位移变化的整体宏观规律做过深入研究,本文着重探讨断层破碎带宽度演化的差异呈现的多样性。

虽然大多断层破碎带宽度与位移整体呈幂律关系(Fossen et al., 2000; Torabi et al., 2011; Choi et al., 2016),但是其中既有线性关系的分布(Fossen

et al., 2000),也有的呈对数关系(Shipton et al., 2003; Childs et al., 2009),尤其是宽度具有较大变化的破碎带。本文资料表明,在复杂的碳酸盐岩断裂带,即便在同一断层破碎带也会有较大的差异(图 8),不能用一种关系模式概括破碎带宽度随位移的生长。

塔里木盆地碳酸盐岩大型走滑断层破碎带的宽度与位移也整体呈幂律特征(图 5),但断层破碎带的宽度与位移可能同时出现线性关系、对数关系与幂律关系(图 6、图 8)。即便排除异常值,在同一地区相同岩性的断裂破碎带也会有多种对应关系(图 8)。 $wd-wd/\Delta H$ 的分布关系也揭示在同一断裂带,也有破碎带宽度生长速率的差异。在断层高差较小时,破碎带宽度随高差的生长速率具有很大的变化范围,不仅揭示破碎带宽度发育机制的差异,也表明生长模式有较大的变化。由此可见,尽管有些断裂带并没有出现明显的某种相关关系,个别数据的精度不高,但数据的分散性与多种趋势并存的统计规律明显,揭示断层破碎带宽度生长的多样性与差异性。

综合分析,大型的复杂碳酸盐岩断层破碎带的宽度随位移的增长而加大,但存在多种不同发育模式(图 8)。在断层破碎带发育的早期,破碎带的宽度随位移增长,但此时已呈现数据的分散性。断层破碎带宽度随位移生长的速率发生在较大的变化范围(图 6),破碎带宽度生长极不稳定。

随着破碎带的生长,破碎带宽度随位移可能出现多种发育趋势。塔里木盆地大多数破碎带宽度随位移的增长而稳定增长,并呈幂律趋势变化,符合大多破碎带宽度的发育模式(Torabi et al., 2011; Choi et al., 2016; Ma Debo et al., 2019)。但有部分破碎带宽度生长的速率没有减缓,反而出现快速增长。这部分数据分散性更大,回归分析的相关性更差,显示破碎带宽度生长的不稳定性。同时,有部分破碎带的宽度随位移的增长而缓慢生长,甚至没有增长,处于停滞状态。由于不同的变化数据来源于不同的断层,而不是同一断层,因此,同一断层破碎带的宽度随位移也可能形成快速、正常与缓慢的三种增长方式(Ma Debo et al., 2019)。

4 结论

通过塔里木盆地实例解剖,碳酸盐岩断层破碎带宽度随位移的发育存在多样性。

(1) 塔里木盆地不同地区、不同层位与岩性的

碳酸盐岩断层破碎带宽度与构造高差具有正相关关系, 揭示走滑断层可以用构造高差替代位移进行破碎带宽度的预测与机理分析。

(2) 塔里木盆地寒武系—奥陶系碳酸盐岩断层破碎带发育, 地震识别破碎带宽度可逾 3000 m, 一般在 100~700 m, 不同地区与层位具有相似的分布。断层破碎带的宽度/高差可达 70, 一般在 3~16 倍, 回归分析同一条断层的破碎带宽度是高差的 4~12 倍; 断层破碎带的宽度/高差与宽度分散性大, 并与高差呈负相关关系。

(3) 塔里木盆地碳酸盐岩断层破碎带随高差的扩大而增长, 但不是单一的线性、对数或幂律关系, 可能同时出现发散、平行等多种方式以及二段模式发育。大多数断层破碎带的宽度与位移以幂律关系继承性生长, 但其中部分减速生长, 也有部分出现快速生长。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 杜金虎. 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, 1~174.
- 韩剑发, 苏洲, 陈利新, 郭东升, 张银涛, 吉云刚, 张慧芳, 袁敬一. 2019. 塔里木盆地台盆区走滑断裂控储控藏作用及勘探潜力. 石油学报, 40(11): 1296~1310.
- 何治亮, 金晓辉, 沃玉进, 李慧莉, 白振瑞, 焦存礼, 张仲培. 2016. 中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域. 中国石油勘探, 21(1): 3~14.
- 江同文, 韩剑发, 邬光辉, 于红枫, 苏洲, 熊昶, 陈军, 张慧芳. 2020. 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. 石油勘探与开发, 47(2): 213~224.
- 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.
- 李传新, 贾承造, 李本亮, 杨庚, 杨海军, 罗春树, 韩剑发, 王晓峰. 2009. 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. 地质学报, 83(8): 1065~1073.
- 刘鹏, 王永诗, 宋明水, 王敏. 2019. 渤海湾盆地车镇凹陷断裂带微观特征. 地质论评, 65(z1): 77~78.
- 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 李新华, 李涛, 吕艳萍, 何新明, 杨德彬. 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.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 2011. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述. 地学前缘, 18(4): 181~192.
- 能源, 杨海军, 邓兴梁. 2017. 塔中古隆起碳酸盐岩断裂破碎带构造样式及其石油地质意义. 石油勘探与开发, 45(1): 40~127.
- 沈卫兵, 庞雄奇, 陈践发, 王阳洋, 张科, 贾颖超, 罗广平. 2018. 塔里木盆地塔中 II 区奥陶系油气差异性分布及其主控因素分析. 地质论评, 64(4): 913~926.
- 万效国, 邬光辉, 谢恩, 张银涛, 高莲花. 2016. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩断层破碎带地震预测. 石油与天然气地质, 37(5): 786~91.
- 邬光辉, 陈志勇, 曲泰来, 王春和, 李浩武, 朱海燕. 2012. 塔里木盆地走滑带碳酸盐岩断裂相特征及其与油气关系. 地质学报, 86(2): 219~227.
- 邬光辉, 张韬, 朱永峰, 万效国, 熊昶. 2020. 碳酸盐岩断裂破碎带结构、分布与发育机制. 地质科学, 55(1): 68~80.
- 杨海军, 邬光辉, 韩剑发, 苏洲. 2020. 塔里木克拉通内盆地走滑断层构造解析. 地质科学, 55(1): 1~16.
- 赵文智, 胡素云, 刘伟, 王铜山, 李永新. 2014. 再论中国陆上深层海相碳酸盐岩油气地质特征与勘探前景. 天然气工业, 34(4): 1~9.
- Bense V F, Gleeson T, Loveless S E, Bour O, Scibek J. 2013. Fault zone hydrogeology. Earth-Science Reviews, 127: 171~192.
- Caine J S, Evans J P, Forster C B. 1996. Fault zone architecture and permeability structure. Geology, 24(11): 1025~1028.
- Childs C, Manzocchi T, Walsh J J, Bonson C G, Nicole A, Schöpfer M P J. 2009. A geometric model of fault zone and fault rock thickness variations. Journal of Structural Geology, 31: 117~127.
- Choi J H, Edwards P, Ko K, Kim Y S. 2016. Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach. Earth-Science Reviews, 152: 70~87.
- Deng Shang, Li Huili, Zhang Zhongpei, Zhang Jibiao, Yang Xin. 2019. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin. AAPG Bulletin, 103(1): 109~137.
- Di T G, Han R, Hirose T, Paola N D, Nielsen S, Mizoguchi K, Ferri F, Cocco M, Shimamoto T. 2005. Fault lubrication during earthquake. Nature, 471: 494~498.
- Du Jinju. 2010#. Oil and Gas Exploration of Cambrian—Ordovician Carbonate in Tarim Basin. Beijing: Petroleum Industry Press; 1~174.
- Faulkner D R, Jackson C A L, Lunn R J, Schlische R W, Withjack M O. 2010. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. Journal of Structural Geology, 32: 1557~1575.
- Faulkner D R, Mitchell T M, Jensen E, Cembrano J. 2011. Scaling of fault damage zones with displacement and the implications for fault growth processes. Journal of Geophysical Research, 116: B05403.
- Fossen H, Hesthammer J. 2000. Possible absence of small faults in the Gullfaks Field, northern North Sea: implications for downscaling of faults in some porous sandstone. Journal of Structural Geology, 22: 851~863.
- Han Jianfa, Su Zhou, Chen Lixin, Guo Dongsheng, Zhang Yintao, Ji Yungang, Zhang Hufang, Yuan Jingyi. 2019&. Reservoir-controlling and accumulation-controlling of strike-slip faults and exploration potential in the platform of Tarim Basin. Acta Petrolei Sinica, 40(11): 1296~1310.
- Han Xiaoying, Tang Liangjie, Deng Shang, Cao Zicheng. 2020. Spatial characteristics and controlling factors of the strike-slip fault zones in the northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin: Insight from 3D seismic data. Acta Geologica Sinica, 94(2): 516~529.
- He Xiangli, Li Haibing, Wang Huan, Si Jialiang, Zhang Lei, Xu Zhiqin, Sun Zhiming. 2019. A new insight into the influence of composition of fault rocks on aseismic and seismic fault slip. Acta Geologica Sinica, 93(3): 760~762.
- He Zhiliang, Jin Xiaohui, Wo Yujin, Li Huili, Bai Zhenrui, Jiao Cunli, Zhang Zhongpei. 2016&. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultra-deep marine carbonates in China. China Petroleum Exploration, 21(1): 3~14.
- Jiang Tongwen, Han Jianfa, Wu Guanghui, Yu Hongfeng, Su Zhou, Xiong Chang, Chen Jun, Zhang Hufang. 2020&. Differences and controlling factors of composite hydrocarbon accumulations in the

- Tazhong uplift, Tarim Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 47(2): 213~224.
- Jiao Fangzheng. 2017&. Significance of oil and gas exploration in NE strike-slip fault belts in Shuntuoguo area of Tarim Basin. Oil & Gas Geology, 38(5): 831~839.
- Kim Y S, Peacock D C P, Sanderson D J. 2004. Fault damage zones. Journal of Structural Geology, 26(3): 503~517.
- Li Chuanxin, Jia Chengzao, Li Benliang, Yang Geng, Yang Huijun, Luo Chunshu, Han Jianfa, Wang Xiaofeng. 2009&. Distribution and tectonic evolution of the paleozoic fault system, the north slope of Tazhong uplift, Tarim Basin. Acta Geologica Sinica, 83(8): 1065~1073.
- Li Qiming, Wu Guanghui, Pang Xiongqi, Pan Wenqin, Luo Chunshu, Wang Chenglin, Li Xinsheng, Zhou Bo. 2010. Hydrocarbon accumulation conditions of Ordovician carbonate in Tarim Basin. Acta Geologica Sinica, 84(5): 1180~1194.
- Li Yonggang, Xu Zhiqin, Li Haibing. 2014. Rock damage structure of the south Longmen-Shan fault in the 2008 M8 Wenchuan earthquake viewed with fault-zone trapped waves and scientific drilling. Acta Geologica Sinica(English Edition), 88(2): 444~467.
- Liu Peng, Wang Yongshi, Song Mingshui, Wang Min. 2019&. Fault zone microcharacteristics of Chezhen sag in Bohai Bay basin. Geological Review, 65(z1): 77~78.
- Lu Xinbian, Hu Wenge, Wang Yan, Li Xinhua, Li Tao, Lü Yanping, He Xinning, Yang Debin. 2015&. Characteristics and development practice of fault—karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin. Oil & Gas Geology, 36(3): 347~355.
- Lu Xinbian, Wang Yan, Tian Fei, Li Xinhua, Yang Debub, Li Tao, Lü Yanping, He Xinning. 2017. New insights into the carbonate karstic fault system and reservoir formation in the Southern Tahe area of the Tarim Basin. Marine and Petroleum Geology, 86: 587~605.
- Lü Xiuxiang, Wang Yafang, Zhang Yanping. 2016. Strike-slip faults and their control on differential hydrocarbon enrichment in carbonate karst reservoirs: A case study of Yingshan Formation on northern slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin. Acta Geologica Sinica, 90(2): 761~762.
- Ma Debo, Wu Ganghui, Scarselli Nicola, Luo Xinsheng, Han Jianfa, Chen Zhiyong. 2019. Seismic damage zone and width—throw scaling along the strike-slip faults in the Ordovician carbonates in the Tarim Basin. Petroleum Science, 16: 752~57.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. 2011&. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir. Earth Science Frontiers, 18(4): 181~192.
- Neng Yuan, Yang Haijun, Deng Xingliang. 2017&. Structural patterns of fault broken zones in carbonate rocks and their influences on petroleum accumulation in Tazhong Paleo-uplift, Tarim Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 45(1): 40~127.
- Pei Yangwen, Paton D A, Knipe R J, Wu Kongyou. 2015. A review of fault sealing behaviour and its evaluation in siliciclastic rocks. Earth-Science Reviews, 150: 121~138.
- Savage H M, Brodsky E E. 2011. Collateral damage: Evolution with displacement of fracture distribution and secondary fault strands in fault damage zones. Journal of Geophysical Research, 116: B03405.
- Shen Weibing, Pang Xiongqi, Chen Jianfa, Wang Yangyang, Zhang Ke, Jia Yingchao, Luo Guangping. 2018&. Differential hydrocarbon distribution and its key controlling factor, Tazhong II area, NW China. Geological Review, 64(4): 913~926.
- Shipton Z K, Cowie P A. 2003. A conceptual model for the origin of fault damage zone structures in high-porosity sandstone. Journal of Structural Geology, 25: 333~344.
- Torabi A, Berg S S. 2011. Scaling of fault attributes: A review. Marine and Petroleum Geology, 28: 1444~1460.
- Wan Xiaoguo, Wu Guanghui, Xie En, Zhang Yintao, Gao Lianhua. 2016&. The seismic technique description of carbonate fault damage zone in the Tarim Basin. Oil Gas Geology, 37(5): 786~91.
- Wu Guanghui, Chen Zhiyong, Qu Tailai, Wang Chunhe, Li Haowu, Zhu Haiyan. 2012&. Characteristics of the strike-slip fault facies in Ordovician carbonate in the Tarim Basin, and its relations to hydrocarbon. Acta Geologica Sinica, 86(2): 219~227.
- Wu Guanghui, Yuan Yajuan, Huang Shaoying, Vandyk TM, Xiao Yang, Cai Quan, Luo Bingxu. 2018. The dihedral angle and intersection processes of a conjugate strike-slip fault system in the Tarim Basin, NW China. Acta Geologica Sinica, 92(1): 74~88.
- Wu Guanghui, Gao Lianhua, Zhang Yintao, Ning Chaozong, Xie En. 2019. Fracture attributes in reservoir-scale carbonate fault damage zones and implications for damage zone width and growth in the deep subsurface. Journal of Structural Geology, 118: 181~193.
- Wu Guanghui, Zhang Tao, Zhu Yongfeng, Wan Xiaoguo, Xiong Chang. 2020&. The architecture, distribution and growth of carbonate fault damage zone. Chinese Journal of Geology, 55(1): 68~80.
- Yang Haijun, Wu Guanghui, Han Jianfa, Su Zhou. 2020&. Structural analysis of strike-slip faults in the Tarim intracontinental Basin. Chinese Journal of Geology, 55(1): 1~16.
- Zhang Yintao, Wu Guanghui, Li Guohui, Wan Xiaoguo, Yang Tianyi. 2020. A new growth model of fault attributes in a strike-slip fault system in the Tarim Basin. Acta Geologica Sinica, 94(5): 1373~1380.
- Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Liu Wei, Wang Tongshan, Li Yongxin. 2014&. Petroleum geological features and exploration prospect in deep marine carbonate strata on China: A further discussion. Natural Gas Industry, 34(4): 1~9.

The relationship between width—height difference of strike-slip fault damage zones in the Tarim Basin

YUAN Jingyi¹⁾, WU Guanghui^{2, 3)}, WAN Xiaoguo¹⁾, DENG Wei²⁾, LIU Ruidong¹⁾

1) Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000;

2) Southwestern Petroleum University, Chengdu, 610500;

3) Qiangtang Institute of Sedimentary Basin, Southwestern Petroleum University, Chengdu, 610500

Objectives: The relationship between the fault damage zone width and displacement is useful for fault process study and tight reservoir exploitation in the deep subsurface. However, the relationship is not generally display a power-law-scaling relationship and is difficult to assess the fault elements along the strike-slip fault in the deep

subsurface. Together with the analysis of the new 3D seismic responses, this paper presents a detailed fault attributes measurement and correlation analysis between the fault damage zone width and displacement of the strike-slip fault damage zones from the Lower Palaeozoic carbonates in the Tarim basin. Further, we discuss the fault damage zone width distribution along the fault zones.

Methods: With a detailed interpretation of the Ordovician carbonates by high resolution 3-D seismic data from the deep subsurface, we use height difference between the maximum and minimum altitude of the fault zone as a proxy for the vertical throw in seismic profiles. Constrained by seismic responds of the fault damage zone, we identify the fault damage zone envelop by the fault seismic coherence and amplitude change from the seismic profile, which is corrected by the seismic attributes and well data. Further, we measure the fault height difference and damage zone width from 10 strike-slip fault zones in the Tarim Basin. Finally, we analysis the relationship between the fault damage zone width and height difference.

Results: The results showed that: ① the carbonate fault damage zones developed in the Lower Paleozoic of the Tarim basin. The damage zone width is up to 3000 m, and generally in the range of 100~700 m, in which the width distribution is similar from different regions and lithology; ② there is good positive relationship between the fault damage zone width and height difference. Although a few values of the fault damage zone width/high difference are up to 70, most of them are in the range of 3~16; ③ most damage zone width grows with the displacement increase in power-law relationship, but some have higher enlarge rate, and some slow down with the height difference increase with a same tectonic background and lithology in a fault zone, which resulted in the data scatter.

Conclusions: By comprehensive analysis, the results indicate that height difference is an effective parameter for damage zone width prediction and scaling along strike-slip fault damage zone in the subsurface. The correlation between fault damage zone and displacement does not follow a simple linear or power law relationship, but shows in two trends or two stages to show different damage zone growth processes in the Tarim Basin.

Keywords: fault damage zone; carbonate; damage zone width; hight difference; distribution; Tarim Basin

Acknowlegements: The authors thank the Tarim Oil Company for data support and project research. We are grateful to MA Bingshan, LIU Xin, SUN Chong and MA Debo for their help. This study has been partly supported by National Science and Technology Major Project of CNPC (No. 2018E-1806) and Science and Technology Cooperation Project of the CNPC—SWPU Innovation Alliance (No. 2020CX010101) and the National Natural Science Foundation of China (No. 91955204)

First author: YUAN Jingyi, female, born in 1987, master, geophysicist; Email: 380650825@qq.com

Corresponding author: WU Guanghui, male, born in 1971, mainly study on structural geology and petroleum geology; Email: wugh@swpu.edu.cn

Manuscript received on: 2020-12-14; **Acceptedon:** 2021-06-11; **Network published on:** 2021-08-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 08. 011

Edited by: LIU Zhiqiang