

## 塔中隆起两组走滑断裂对岩溶储层发育的控制机制

张艳萍<sup>1</sup>,吕修祥<sup>2,3</sup>,于红枫<sup>4</sup>,敬兵<sup>4</sup>,张春林<sup>1</sup>,蔡俊<sup>1</sup>

[1. 中国石油大学(北京)北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249; 3. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; 4. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院,新疆库尔勒 841000]

**摘要:**走滑断裂对塔中隆起岩溶储层发育的控制机制一直缺乏深入研究。采用均方根振幅属性,对塔里木盆地塔中北斜坡奥陶系浅、中、深部的岩溶储层进行预测,发现大量岩溶储层继承性分布于北西向和北东向断裂所夹持块体的东北和西南角区域,特别是中古5和中古10块体的深层奥陶系尤为明显。沉积相和古地貌等无法解释这种现象,走滑断裂活动可提供合理解释:北西向断裂的右旋压扭,诱发北东向断裂的左旋走滑,断裂之间的块体的东北和西南角位于北西向和北东向走滑断裂的交汇区,断裂诱发的裂缝带交错发育;而断裂的走滑运动导致其东北和西南角形成局部拉张区、西北和东南角形成局部挤压区,岩石的抗拉强度远小于抗压强度,故拉张区极易拉张破裂成缝。裂缝提供溶蚀流体运移通道,也增加流体与岩石的接触面积,故走滑断裂夹持块体的东北角和西南角岩溶储层发育,表明走滑断裂是塔中岩溶储层发育的控制因素之一。

**关键词:**走滑断裂;岩溶储层;碳酸盐岩;奥陶系;塔中隆起

**中图分类号:**TE121.2

**文献标识码:**A

## Controlling mechanism of two strike-slip fault groups on the development of the Ordovician karst reservoirs in the Tazhong Uplift, Tarim Basin

Zhang Yanping<sup>1</sup>, Lyu Xiuxiang<sup>2,3</sup>, Yu Hongfeng<sup>4</sup>, Jing Bing<sup>4</sup>, Zhang Chunlin<sup>1</sup>, Cai Jun<sup>1</sup>

(1. China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. College of Geoscience, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China)

**Abstract:** Controlling mechanisms of strike-slip faults on development of the Ordovician karst reservoirs in the Tazhong Uplift, Tarim Basin are poorly understood. Seismic attribute of root mean square amplitude was used to predict karst reservoir distribution in the shallow, middle and deep Ordovician on the North Slope of Tazhong Uplift. The results show that most of the karst reservoirs distribute with inheritance in the northeastern and southwestern ends of blocks which are bounded by the NW- and NE-trending faults, especially the deep Ordovician in ZG5 and ZG10 blocks. Such distribution characteristics cannot be interpreted by sedimentary facies and palaeogeomorphology, while strike-slip fault activity could provide a possible interpretation: Right-lateral compress-shear activity of the NW-trending faults induces left-lateral strike-slip activity of the NE-trending faults. The northeastern and southwestern ends of blocks bounded by the NW- and NE-trending faults are located in the intersection area of the NW- and NE-trending faults, where crossed fracture zones induced by faults are well developed. In addition, the strike-slip movements led to local extension in the northeastern and southwestern ends of blocks, while local compression in the northwestern and southeastern ends. Extensional fracturing of rock in local extension area is much easier than compressional fracturing of rock in local compression area for that the tensile strength of rock is much smaller than its compressive strength. The extensional fractures provide migration pathway to dissolution fluid and increases contact area of dissolution fluid and rock, so the northeastern and southwestern ends of blocks have well developed karst reservoirs. The research suggests that the strike-slip fault is one of controlling factors on development of karst reservoirs in the Tazhong Uplift.

**Key words:** strike slip fault, karst reservoir, carbonate rock, Ordovician, Tazhong Uplift

收稿日期:2016-04-06;修订日期:2016-06-06。

第一作者简介:张艳萍(1977—),女,博士,油气藏形成与分布、地震资料解释。E-mail: zhyphh@163.com。

通讯作者简介:吕修祥(1963—),男,教授、博士生导师,油气藏形成与分布。E-mail: luxx@cup.edu.cn。

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973计划)项目(2012CB214804);国家自然科学基金项目(41372146,41572100)。

塔里木盆地压扭作用十分显著,走滑断裂带广泛发育,引起了学者的注意<sup>[1]</sup>。受地震资料品质的限制,塔中隆起北东向走滑断裂一直未被发现,直到2003年塔中东部塔中16—塔中31井区三维地震数据的采集,走滑断裂的识别和研究才逐渐得以开展<sup>[2]</sup>。前人已经意识到走滑断裂对塔中碳酸盐岩储层具有强烈的改造作用<sup>[3-4]</sup>,但也有观点认为走滑断裂活动的改造作用十分有限<sup>[5-6]</sup>。近几年,随着塔中隆起及周边三维地震数据的采集,走滑断裂对储层改造、构造圈闭发育和油气运聚的控制作用获得了广泛的研究。周新源等<sup>[7]</sup>、兰晓东等<sup>[8]</sup>分别肯定了走滑断裂对塔中隆起中西部 and 东部地区储层的改造作用和油气分布的控制作用;杨海军等<sup>[9]</sup>、王建忠等<sup>[10]</sup>则指出北东向走滑断裂与塔中Ⅰ号断裂带交汇部位作为埋藏热液溶蚀流体的注入点,控制了岩溶作用的推进,且作为油气注入点,控制了油气运聚。对于塔中Ⅰ号断裂以北的斜坡过渡带(中石化矿权区),杨圣彬等<sup>[11]</sup>、李萌等<sup>[12]</sup>和甄素静等<sup>[13]</sup>分析认为北东向走滑断裂对碳酸盐岩储层也具有强烈的改造作用,同时控制了古生界构造圈闭的发育,并作为油气运移通道控制了油气分布。上述研究均未涉及两组走滑断裂活动诱发的局部应力区对岩溶储层发育的影响。依据地震属性优化原则,本文采用均方根振幅属性对塔中北斜坡奥陶系深、中、浅层的岩溶储层进行预测。通过对岩溶储层分布和相关控制因素的分析,首次提出两组走滑断裂运动诱发的局部应力区对塔中北斜坡奥陶系岩溶储层的发育存在控制作用,并分析了其作用机制。研究成果丰富了走滑断裂活动对岩溶储层发育的控制机理,为塔中隆起岩溶储层预测及其奥陶系深部油气勘探提供重要参考。

## 1 地质背景

塔里木盆地位于新疆维吾尔自治区的南部,面积约 $5.6 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。塔中隆起位于塔里木盆地腹地,在区域构造位置上位于中央隆起中段的中部,北与满加尔凹陷和阿瓦提凹陷相邻,南与塘古孜巴斯凹陷呈斜坡过渡关系,西以吐木休克断裂为界与巴楚断隆相邻,东为塔东低隆。塔中隆起整体呈北西—南东向展布,平面上具有分带性,自北向南依次发育塔中Ⅰ号断裂带、塔中10号断裂带、塔中Ⅱ号断裂带和塔中南缘断裂带,这些断裂带自东向西呈扇状发散,形成塔中隆起东窄西宽的构造格局。4个二级构造单元包括塔中北斜坡带、中央断垒带、塔中南斜坡带和东部潜山带(图1)。

塔中隆起的主要勘探目的层为古生界碎屑岩和碳酸盐岩层系(表1)。本文主要以奥陶系良里塔格组、鹰山组和蓬莱坝组的碳酸盐岩储层为研究对象。

## 2 塔中隆起走滑断裂发育特征

### 2.1 北西向走滑—逆冲断裂

塔中Ⅰ号断裂、塔中10号断裂、塔中Ⅱ号断裂和塔中南缘断裂活动初期多具逆冲性质,其后叠加走滑运动,为走滑—逆冲性质断层<sup>[14,16-19]</sup>(图1)。

塔中Ⅰ号断裂带是塔中隆起北部边界断裂,整体走向北西,倾向南西,形成于加里东中期<sup>[16]</sup>。断裂的构造变形强度自东向西呈现减弱的趋势,并具有分段性的变形特点。东段断距大,主断层切入前寒武系基底,属基底卷入型。中西段(除塔中45井区外)断距较小,断裂未切入前寒武系基底,属盖层滑脱型,且后期叠加了右旋走滑变形<sup>[14,16-19]</sup>。

塔中10号断裂带位于塔中隆起北斜坡的中部,整体走向北西,倾向北东,断裂活动可能始于加里东中期,在加里东晚期—海西早期和海西晚期都有活动<sup>[6]</sup>。依据地震剖面,其主断层由北向南逆冲,向上断至石炭系,并伴生反冲断层,形成背冲断块构造带,并存在明显走滑特征的花状构造,具右旋压扭性质<sup>[14,17-19]</sup>。受地震资料品质影响,其主断层向下是消失于寒武系滑脱层中(盖层滑脱型)<sup>[17,20]</sup>,还是直接切入前寒武系基底(基底卷入型)<sup>[18]</sup>,目前还存在争议。

塔中Ⅱ号断裂带位于塔中隆起的轴部,与塔中Ⅰ号断裂带共同控制了塔中隆起的发育。整体走向北西,主断层倾向北东,向上断入二叠系,与背冲断层组合形成断背斜构造,背斜轴部遭受抬升剥蚀并缺失中—上奥陶统。断裂活动可能始于加里东中期,在加里东晚期—海西早期和海西晚期都有活动<sup>[6]</sup>。自东向西构造变形强度呈减弱趋势,也具有分段性和先逆冲后右旋压扭的变形特点,存在明显走滑特征的正花状构造<sup>[14,16-19]</sup>。不过,其主断层属于基底卷入型还是盖层滑脱型同样存在争议<sup>[17-18,20]</sup>。

### 2.2 北东向走滑断裂

除北西向走滑—逆冲断裂外,塔中隆起上还发育一系列北东向走滑断裂,将北西向走滑—逆冲断裂带分割成段,在形成网状断裂系统的同时,也将北斜坡切割为不同的块体。自西向东依次发育塔中49、塔中86、中古15、中古8、中古10、中古5、中古6和塔中82等走滑断裂(图1)。

北东向走滑断裂垂直断距较小,多介于50~150 m,

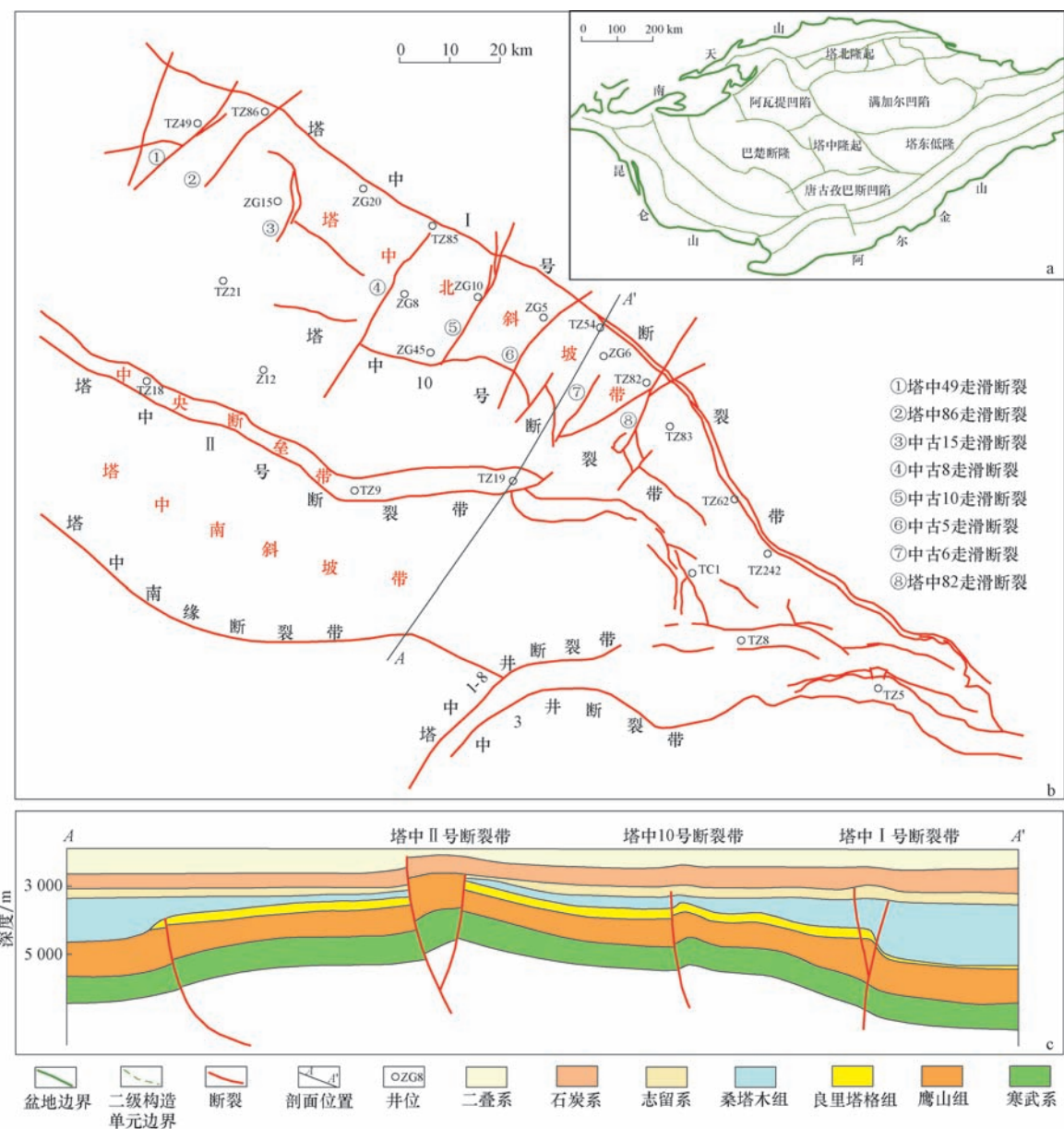


图 1 塔中隆起构造单元划分(据文献[14]修改)

Fig. 1 Structural units of the Tazhong Uplift(modified from reference[14])

a. 塔中隆起构造位置;b. 塔中隆起断裂和构造单元分布;c. 北东-南西向构造剖面

表 1 塔中隆起古生界地层划分<sup>[15]</sup>

Table 1 Division of the Paleozoic sequence in the Tazhong Uplift<sup>[15]</sup>

| 系   | 组     | 厚度/m    | 岩性                        | 构造期次  |
|-----|-------|---------|---------------------------|-------|
| 石炭系 | 小海子组  | 0~690   | 细砂岩夹泥岩,粗砂岩                | 海西中期  |
|     | 卡拉沙依组 |         | 泥岩,粉砂岩、细砂岩                |       |
|     | 巴楚组   |         | 泥岩,灰岩,石英砂岩                |       |
| 泥盆系 |       | 0~241   | 细砂岩                       | 海西早期  |
| 志留系 |       | 0~517   | 泥质粉砂岩,泥岩                  | 加里东晚期 |
|     | 桑塔木组  | 0~748   | 巨厚层状灰色泥岩                  |       |
| 奥陶系 | 良里塔格组 | 0~1 001 | 藻粘结灰岩,厚层生物骨架岩,厚层泥质灰岩、泥晶灰岩 | 加里东中期 |
|     | 鹰山组   | 0~697   | 中-厚层状白云质灰岩                |       |
|     | 蓬莱坝组  | 0~1 572 | 灰质白云岩,白云质灰岩               |       |
| 寒武系 |       | 0~2 918 | 厚层白云岩为主                   | 加里东早期 |

二维地震资料较难识别,仅在三维地震数据采集之后,才逐渐被识别。这类断裂多断至志留系—泥盆系,西部少量断至二叠系,主断面陡立,向上与分支走滑组合形成负花状构造,向下收敛合并切入前寒武系基底。除负花状构造外,拉分地堑和尾羽断裂也广泛发育。部分走滑断裂在中加里东期末(中-晚奥陶世)可能已经开始活动<sup>[2,11]</sup>,在加里东晚期和海西期(志留纪—泥盆纪和晚二叠世)活动得到继承和加强<sup>[2-3,17]</sup>。塔中隆起中西部地区走滑断裂为左旋张扭性质,东部地区局部因受力变化等因素影响,表现为右旋性质<sup>[3]</sup>。

本次研究以北西向的塔中 I 号和塔中 10 号断裂、北东向的中古 15 和塔中 82 走滑断裂之间的奥陶系碳酸盐岩储层和相关的走滑断裂为研究对象。



### 3 两组走滑断裂与岩溶储层发育空间关系

塔中隆起奥陶系良里塔格组发育礁滩体储层,而鹰山组则发育不整合风化壳岩溶型储层。岩溶储层的发育受到岩性-沉积相、古地貌-不整合岩溶和古构造-断裂等因素的控制,各因素在不同层位、不同区域表现出不同程度的控制作用。前两者可控制岩溶储层的区域分布范围,而断裂因素则可以控制局部地区大型缝洞系统的发育。

#### 3.1 均方根振幅属性预测塔中岩溶储层

根据各种地震属性参数对碳酸盐岩岩溶储层的不同特征反应敏感性的不同,有多种地震参数可供储层研究工作<sup>[21]</sup>。依照地震属性优化原则,优选出对所预测储层最敏感、属性个数最少的地震属性或地震属性组合,来提高地震属性的预测精度。在碳酸盐岩岩溶储层发育区,尤其是孔洞型储层发育区,总体振幅强度会明显高于非储层发育区,振幅类属性预测储层最有

效<sup>[21]</sup>。其中,均方根振幅属性是反映缝洞型储层的主要敏感性地震参数<sup>[22]</sup>,能很好地指示储层的展布特征,且预测可靠性和信噪比相对较高。

为了验证均方根振幅属性在塔中奥陶系缝洞储层预测中的有效性,对比中古8井钻井资料、串珠状反射特征以及均方根振幅属性预测储层的关系(图2)。①中古8井自鹰山组顶界( $T_{gs}^2$ )向深部发育强振幅的垂向复合型串珠状反射,自 $T_{gs}^2$ 向下发育长度约135 ms(图2a)。② $T_{gs}^2$ 上下各30 ms提取的均方根属性识别出中古8井周围岩溶储层发育(图2b), $T_{gs}^2$ 以下30~90 ms均方根振幅属性也预测储层发育(图2c)。③钻井在鹰山组遭遇了气测升高、溢流、井漏、钻具放空及无法测井等现象。首先,从良里塔格组底段开始,直至鹰山组6 145.58 m井底深度,因溢流、井漏严重无法开展测井工作。其次,6 129.00~6 145.58 m井段放空16.58 m,放空过程中发生溢流0.9 m<sup>3</sup>,钻井液累计漏失3 776.30 m<sup>3</sup>,表明缝洞储层异常发育,而该井段是鹰山组顶界以下第一个串珠强反射的上半部分,该串珠从地震剖面时间段上刚好对应图2b所示的均方根振幅属性异常。最后,5 893.00~6 145.58 m井

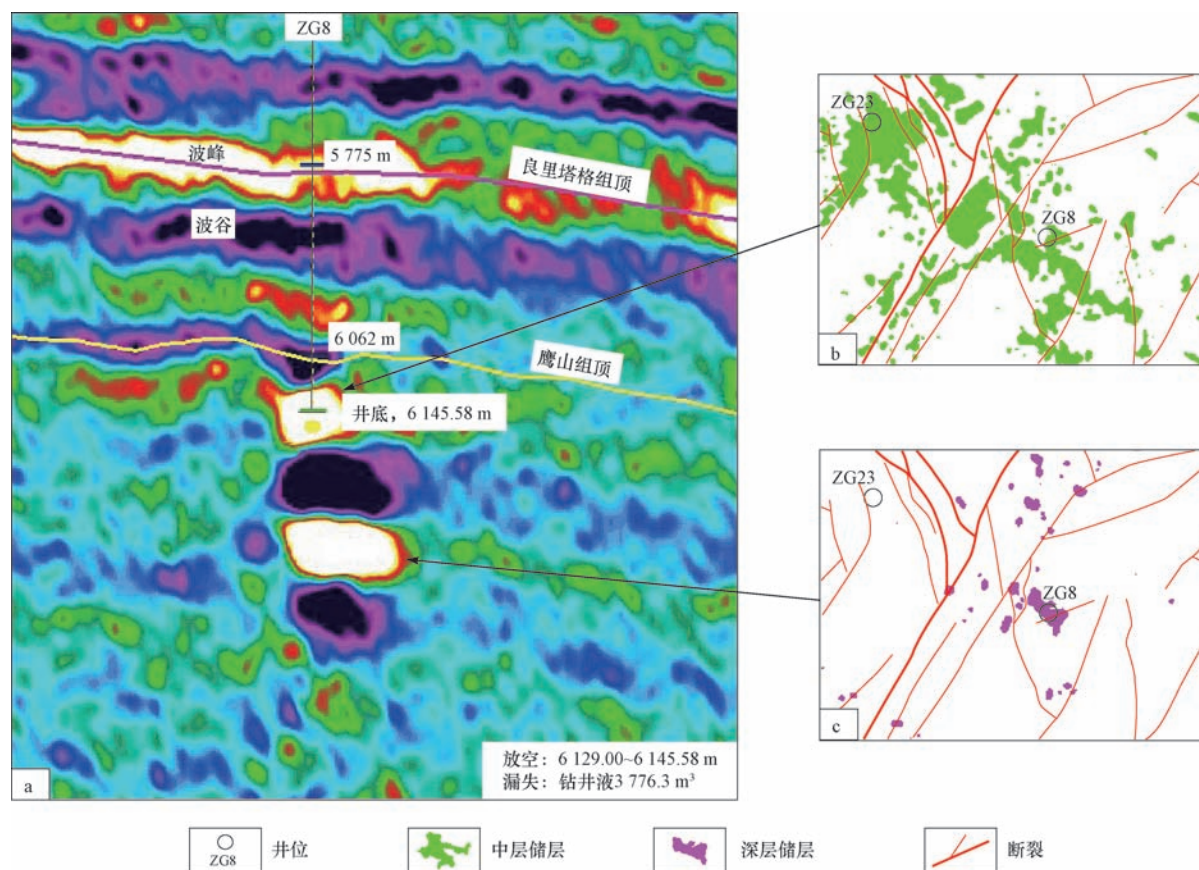


图2 塔中隆起中古8井钻井资料、串珠状地震反射与均方根振幅属性预测储层对比

Fig. 2 Comparison of reservoir prediction results from drilling data of Well ZG8, string beads seismic response and root mean square amplitude in the Tazhong Uplift

a. 中古8井发育的串珠状地震反射;b.  $T_{gs}^2$ 上、下各30 ms提取均方根属性预测的岩溶储层;

c.  $T_{gs}^2$ 以下30~90 ms提取均方根振幅属性预测的岩溶储层

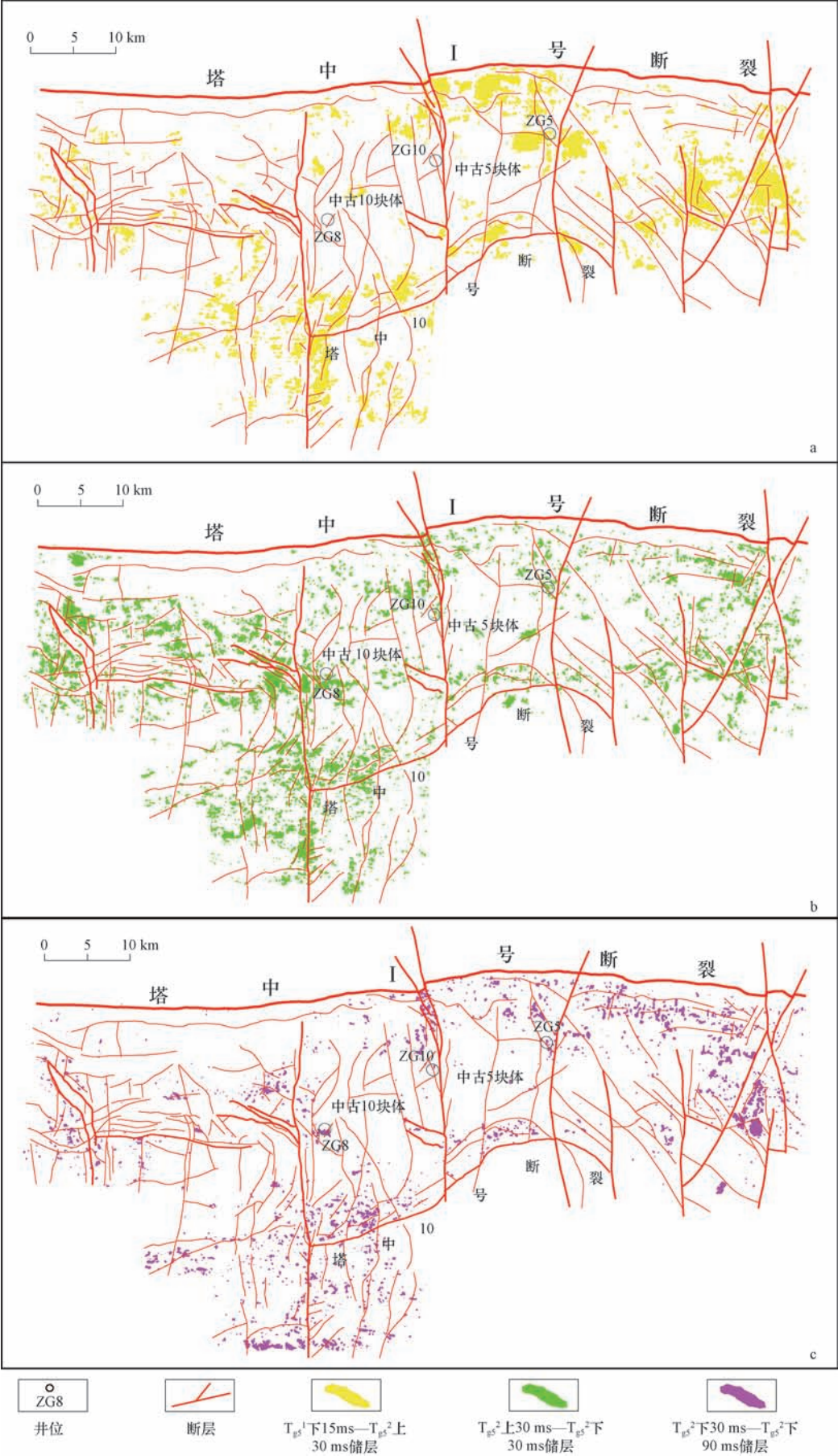


图3 塔中隆起奥陶系储层与鹰山组断裂分布叠合图

Fig. 3 Map of the Ordovician reservoir in the Tazhong Uplift with the faults in the Yingshan Formation overlapped  
a. 奥陶系浅部储层与断裂分布; b. 奥陶系中部储层与断裂分布; c. 奥陶系深部储层与断裂分布



段未行改造措施试油,日产油约为  $160 \text{ m}^3$ ,日产气约为  $150\,000 \text{ m}^3$ 。中古8井的钻井、串珠反射、均方根振幅属性预测储层的相互对比,以及研究区内其它大量钻井的验证,证实了均方根振幅属性在塔中预测奥陶系缝洞储层的有效性和可靠性。

### 3.2 走滑断裂与岩溶储层平面分布关系

以研究区下奥陶统鹰山组断裂分布图为底图,选取不同的时窗范围,依据地震属性优化原则,用均方根振幅属性分别对塔中奥陶系浅、中、深三层碳酸盐岩储层进行预测。对奥陶系浅部储层,分析时窗选取在桑塔木组底面( $T_{\text{gs}}^1$ 地震反射界面)以下15 ms到良里塔格组底面( $T_{\text{gs}}^2$ )以上30 ms(图3a)。对奥陶系中部储层,分析时窗为鹰山组顶的风化壳( $T_{\text{gs}}^2$ )上、下各30 ms(图3b)。对奥陶系深部储层,分析时窗为鹰山组顶面风化壳( $T_{\text{gs}}^2$ )以下30~90 ms(图3c)。

对比奥陶系浅、中、深岩溶储层预测结果发现:

1) 整体上,奥陶系浅部储层连片性最好,呈片状分布,与良里塔格组礁滩体沉积相有关。中部储层呈片状或条带状分布,分布范围较广,该层段的岩溶储层包括塔中岩溶储层较发育的良里塔格组底部与鹰山组顶部。深部岩溶储层呈散点状发育,相对较弱。前述表明均方根振幅属性揭示的岩溶储层特征符合塔中隆起目前的勘探认识。

2) 奥陶系浅、中、深部岩溶储层在区域上主要围绕包括塔中I号断裂带和塔中10号断裂带在内的构造带发育。这些区域是岩溶古地貌相对高部位和台地边缘沉积相的发育区,表明古地貌和沉积相等因素对岩溶储层的区域分布具有控制作用<sup>[23]</sup>。但岩溶储层并非沿塔中I号带和塔中10号带周围随意分布,大量岩溶储层主要继承发育于北西向和北东向断裂的交汇区域,特别是主干断裂所夹持块体的东北和西南对角区域,而块体的中央区域,岩溶储层则相对最不发育。这种现象在中古5块体和中古10块体的奥陶系深层最为明显(图3c),岩溶储层几乎局限发育于块体的东北和西南对角区域。这种现象并非古地貌和沉积相等因素所能解释。将中古5块体和中古10块体的奥陶系深部岩溶储层与鹰山组岩溶古地貌和沉积相叠合(图4,图5),发现其沉积相和岩溶古地貌呈北西-南东向的条带状展布,每个块体的西北角和东北角之间、西南角和东南角之间,沉积相和古地貌特征差异不大,但岩溶储层发育规模差异较大,表明沉积相和古地貌之外的因素在具体控制每个块体对角区域岩溶储层的发育。走滑断裂活动可以解释这种现象:因为走滑断裂活动导致其夹持块体的对角区域形成局部应力拉张区,另一对角区域形成局部应力挤压区,相较应力挤压

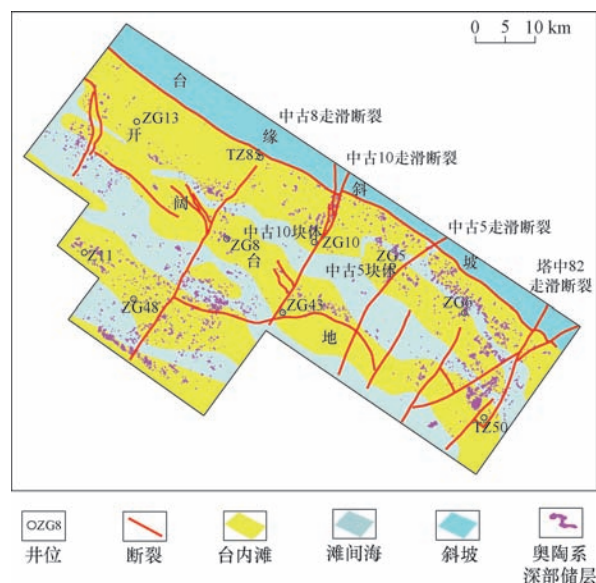


图4 塔中隆起奥陶系深部储层与鹰山组沉积相叠合图  
(据文献[23]修改)

Fig. 4 Map of the deep Ordovician reservoirs in the Tazhong Uplift with the Yingshan Formation sedimentary facies overlapped(modified from reference[23])

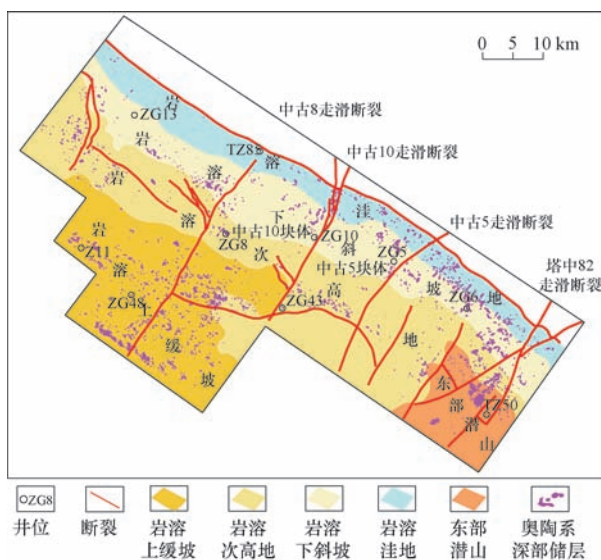


图5 塔中隆起奥陶系深部储层与岩溶古地貌叠合图  
(古地貌据文献[24]修改)

Fig. 5 Map of the deep Ordovician reservoirs in the Tazhong Uplift with the Yingshan Formation palaeogeomorphology overlapped(modified from reference[24])

区,拉张区岩石更易拉张破裂成缝,提供溶蚀流体运移通道,同时也增加了流体与岩石的接触面积,进而促进岩溶储层的发育。

### 3.3 走滑断裂与岩溶储层发育规模的关系

分别统计钻井的测井解释储层厚度、钻井液的漏失量与北东向主干走滑断裂距离的关系,发现越靠近北东向主干走滑断裂,奥陶系(鹰山组和良里塔格组)

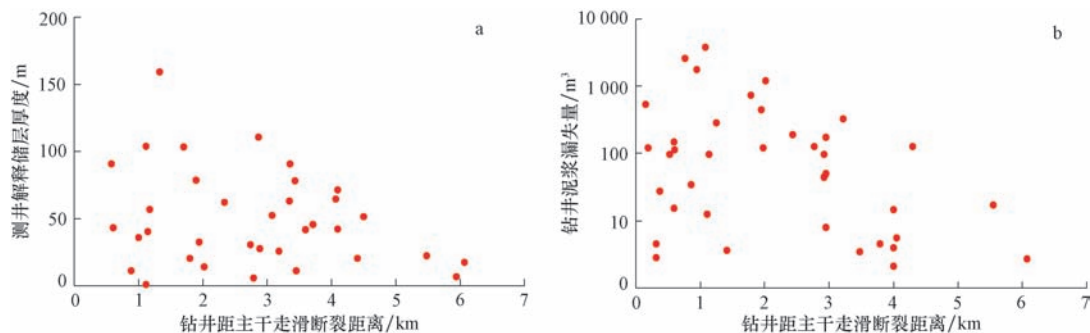


图6 塔中隆起奥陶系钻井岩溶储层发育规模与走滑断裂距离关系

Fig. 6 Relationship between karst reservoir scale defined by well data and distance of well to strike slip fault in the Ordovician of the tazhong Uplift

a. 钻井测井解释储层厚度与主干走滑断裂距离关系; b. 钻井泥浆漏失量与主干走滑断裂距离关系

测井解释的储层厚度、钻井液的漏失量均呈现增加的趋势(图6),表明距离主干走滑断裂越近,岩溶储层的发育规模有增加的趋势。

塔中地区走滑断裂活动与奥陶系岩溶储层平面分布的关系以及岩溶储层纵向发育规模的相关性表明,走滑断裂及其活动产生的局部应力区,与沉积相、古地貌因素一样,是塔中隆起奥陶系岩溶储层发育过程中的关键控制因素。局部地区的局部层段,如中古10块体和中古5块体的奥陶系深层,走滑断裂在岩溶储层发育过程中占据了主导地位,其影响程度甚至超过了沉积相和古地貌等因素,故走滑断裂及其伴生的相关活动是塔中隆起奥陶系岩溶储层发育的控制因素之一,其对奥陶系深层岩溶储层发育的控制作用更加明显。下文将试论两组走滑断裂对岩溶储层发育的控制机制。

## 4 走滑断裂对岩溶储层发育控制机制

### 4.1 断裂和裂缝在岩溶储层改造中的作用

碳酸盐岩储层溶蚀改造的过程,是多种内在和外在因素共同控制和作用的结果。前人研究认为,塔中隆起奥陶系碳酸盐岩储层主要受到沉积相、古地貌和不整合因素的控制<sup>[23-25]</sup>。此外,断裂及其伴生裂缝因素也逐渐受到关注,杨海军等<sup>[23]</sup>认为塔中隆起中-下奥陶统鹰山组岩溶风化壳储层,不整合岩溶虽然控制了储层的横向展布,但埋藏溶蚀才是优化储集性能的关键,优质储层主要沿断裂(包含走滑断裂)和裂缝发育带分布。刘忠宝等<sup>[26]</sup>则强调了裂缝在塔中奥陶系风化壳岩溶和埋藏岩溶的发育过程中具有控制作用,溶蚀孔洞与裂缝密切共生。前述表明断裂(包含走滑断裂)和伴生裂缝在塔中奥陶系岩溶储层改造过程中是具有控制作用的。

对于断裂和裂缝对岩溶储层发育具有控制作用的原因,由于碳酸盐岩基岩本身渗透性相对较差,不利于

流体的大规模流入和流出,进而溶蚀并改善储层,但断裂和裂缝可以大大改善碳酸盐岩基质的渗透性能,在储层岩溶过程中扮演了流体渗滤通道的角色。大气淡水和深部流体(酸性流体、热液)可以获得运移通道,溶蚀碳酸盐岩,使埋藏岩溶、热液改造作用得以发生<sup>[23]</sup>,没有断裂及其裂缝带的沟通,上述岩溶作用难以大规模推进和发展<sup>[27]</sup>。在岩溶发育过程中,多条裂缝相交处,更容易形成溶孔,而在多组断裂交汇的地带,往往能够形成缝洞共生的优质储集层<sup>[26,28-29]</sup>,因为断裂或裂缝的交叉切割,多期断裂或裂缝的叠置发育,不仅降低了岩石的强度,更利于后期的碎裂破坏,同时也增加了岩溶渗滤通道以及流体与岩石的接触面积,更利于岩溶作用的推进。

### 4.2 距离走滑断裂越近裂缝越发育

断裂会导致两侧岩层的破裂,裂缝自然增加,距离断裂越近影响越强,裂缝越发育,走滑断裂也不例外。利用FFA裂缝检测相干技术,识别中古5块体的鹰山组裂缝,获得了鹰山组地震可识别裂缝的平面分布图(图7)。分别统计12个1 km×8 km条带内裂缝的数量。结果显示,距离主干走滑断裂越近,鹰山组裂缝越发育,在距离主干走滑断裂1.5~2.0 km之外,裂缝发育密度出现骤减的趋势,反映出主干走滑断裂对两侧地层裂缝化的影响范围可能在1.5~2.0 km,范围之外的裂缝多为区域构造因素影响。

### 4.3 应力拉张区裂缝发育

两组走滑断裂活动除了增加两侧地层裂缝的发育程度外,还会导致夹持块体的对角区域产生的局部应力拉张区(图8),可发育小型的张断裂<sup>[30]</sup>,也最容易发育张裂缝。因为岩石的抗压应力强度远远大于抗张应力强度,抗剪应力强度则介于两者之间<sup>[31]</sup>。如石灰岩的单轴抗压强度通常为30~250 MPa,而抗拉强度仅为5~25 MPa。因此,拉张较挤压更容易使岩层



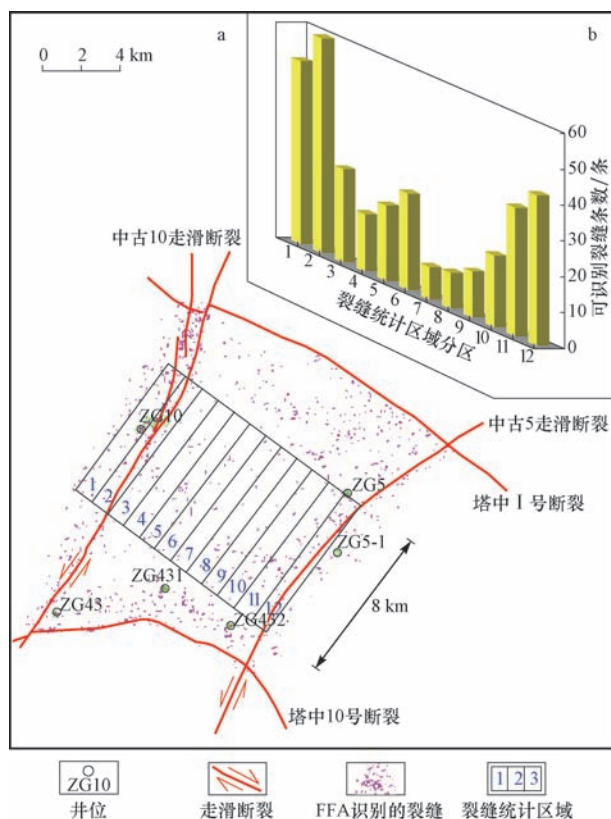


图7 塔中隆起中古5块体鹰山组裂缝分布特征

Fig. 7 Fracture distribution characteristics of the Yingshan Formation in ZG5 block in the Tazhong Uplift

a. FFA 裂缝检测技术识别的裂缝平面分布及裂缝统计分区;  
b. 裂缝统计区的裂缝柱状分布

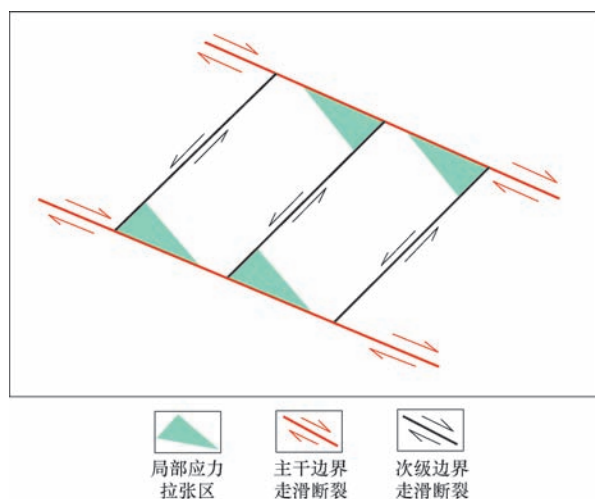


图8 走滑断裂诱发局部拉张区发育模式  
(据文献[30]修改)

Fig. 8 Development model of local extension areas induced by strike-slip faults (modified from reference[30])

产生破裂,故应力拉张区相对最容易产生裂缝。若早期存在裂缝,岩石的抗拉张强度会降至更低。

#### 4.4 走滑断裂对岩溶储层发育的控制机制

综上所述,断裂和裂缝在碳酸盐岩储层改造过程

中起着流体通道的关键作用,控制岩溶作用的推进和发育,而北西向走滑-逆冲断裂和北东向走滑断裂将塔中隆起北斜坡切割为多个块体。块体的东北和西南对角区域不仅为北西向走滑-逆冲断裂和北东向走滑断裂所诱发裂缝带的交汇区域,同时叠置了张裂缝发育区,成为块体的裂缝密集区,具有占优势的溶蚀流体运移通道。此外,北西向的塔中I号断裂带与北东向主干走滑断裂交汇部位,被证实为油气充注点<sup>[32-33]</sup>,同时也是深部溶蚀流体的注入点<sup>[9]</sup>,为块体东北和西南对角区域的裂缝密集区带来溶蚀流体,使之成为岩溶发育区(图9)。

结合塔里木盆地周缘造山带的演化历史、塔中隆起走滑断裂活动期次以及生排烃史,总结出走滑活动对塔中隆起岩溶储层发育的控制过程。

##### 1) 加里东中期I幕(早奥陶世末期)

受古昆仑洋俯冲消减产生的强大挤压应力,与西昆仑造山带有关的断裂系统逐渐开始发育,塔中隆起北西向断裂逆冲活动<sup>[18,20]</sup>,北西走向的裂缝伴生发育,并控制形成西高东低的构造格局。随后的中奥陶世,构造隆升得以继续,下奥陶统鹰山组储层遭受广泛的剥蚀,发生大规模的不整合岩溶作用,风化壳型岩溶储层广泛发育。

##### 2) 加里东中期II幕(晚奥陶世末期)

古阿尔金洋俯冲消减闭合<sup>[18,20]</sup>,东南方向挤压作用开始占据优势,塘古坳陷和塔中隆起东南部向西北凸起的弧形冲断带已经开始活动,导致塔中隆起东部强烈隆升,中西部地区北西向的逆冲断层开始右旋压扭(走滑)变形<sup>[14,17-19]</sup>,包括塔中I号断裂、塔中II号断裂、塔中10号断裂的右旋压扭变形,诱发基底薄弱带发育北东向左旋走滑断裂,北西向裂缝继承发育,北东向伴生裂缝以及块体的东北和西南对角区域张裂缝开始发育,为其后的溶蚀作用提供良好的渗滤通道。奥陶系储层在桑塔木组泥岩沉积期处于浅埋藏阶段,埋藏岩溶作用虽有发生,但较弱。

##### 3) 加里东晚期-海西早期(晚志留世-中泥盆世)

来自东南方向的冲断构造进一步加强,特别是中-晚志留世,塘古坳陷和塔中隆起东南部大规模弧形冲断带形成。中泥盆世阿尔金断隆又强烈隆升<sup>[17]</sup>,使得塔中隆起中西部地区北西向右旋压扭(走滑)断裂活动、北东向左旋走滑断裂活动得到继承和加强,北东向和北西向的断层伴生裂缝以及断裂间块体的对角区域张裂缝继承发育。寒武系烃源岩在志留纪进入第一期排烃高峰期,酸性流体沿先期形成的断裂和裂缝运移并溶蚀沿途的碳酸盐岩储层,第一期埋藏岩溶作用得以发生,该期岩溶作用全区分布,但溶蚀作用较弱<sup>[34]</sup>。



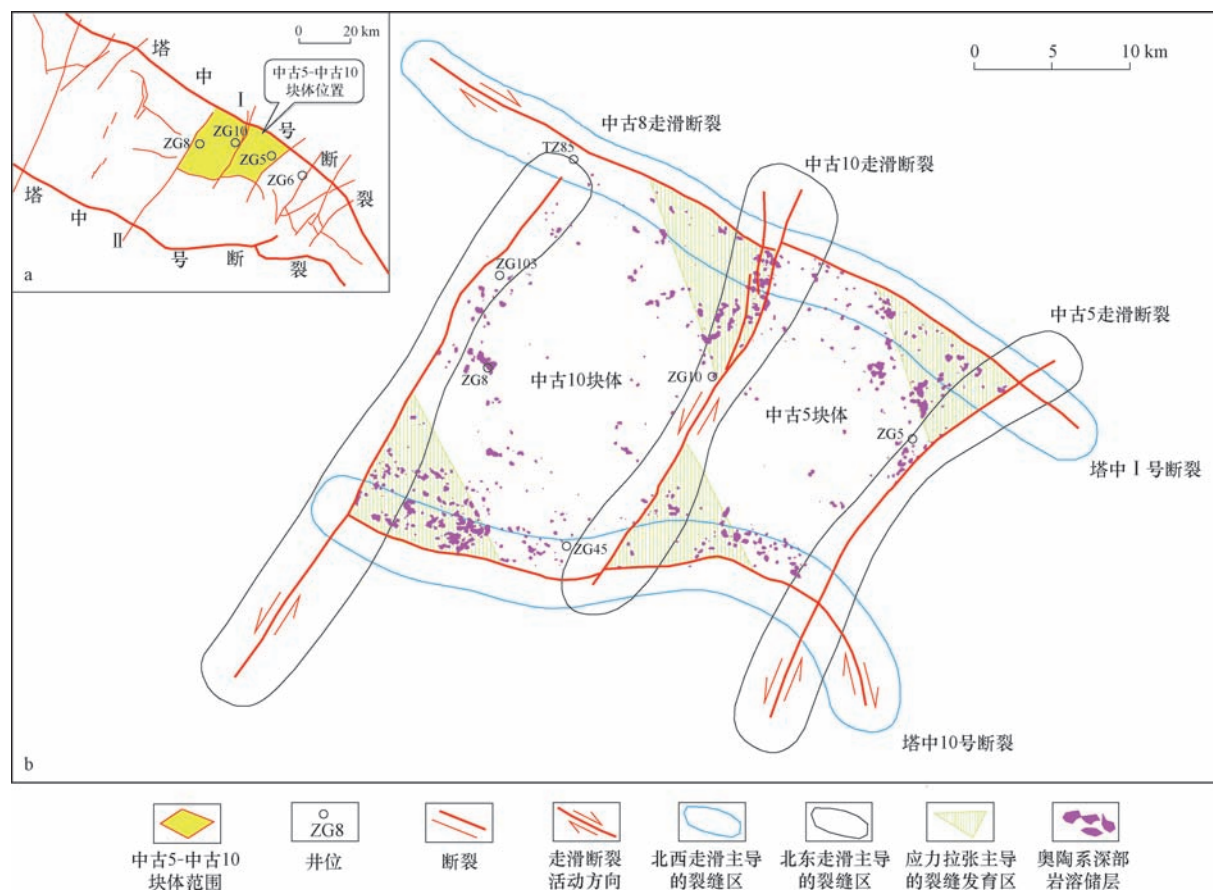


图9 塔中隆起走滑断裂与中古5、中古10块体均方根振幅预测岩溶储层关系

Fig. 9 Relationship between strike-slip faults and karst reservoirs predicted by seismic attribute of root mean square amplitude in ZG5 and ZG10 blocks in the Tazhong Uplift

a. 块体位置; b. 走滑断裂与岩溶储层关系

#### 4) 海西晚期

受南天山洋闭合的影响,塔里木盆地的断裂活动总体由盆地南部向北部迁移,导致南部的塔中隆起和塘古坳陷等地区断裂活动微弱<sup>[18,20]</sup>,北西向断裂的右旋压扭变形变得微弱,北西向断裂的伴生裂缝和块体对角区域张裂缝化作用减弱。但南天山洋的闭合,北东向的挤压占据优势,少部分北东向走滑断裂继续活动断至二叠系。塔中隆起中西部地区在二叠纪广泛发生火山活动,岩浆热液沿包括走滑断裂和裂缝带在内的通道上涌并改造围岩储层<sup>[35]</sup>。此外,寒武系烃源岩进入第二期排烃高峰期,奥陶系烃源岩也进入第一期排烃高峰期,岩浆热液和酸性流体使得第二期埋藏岩溶作用得以大规模发生。

#### 5) 喜马拉雅期

寒武系烃源岩进入大规模生气阶段,而奥陶系烃源岩则进入大规模生油阶段,酸性流体可以利用先期的运移通道,促进第三期埋藏岩溶作用的发生。第三期埋藏岩溶作用受走滑断裂和裂缝发育的控制非常明显,在走滑断裂或塔中I号、塔中10号断裂带附近较为发育,远离走滑断裂表现较弱。

## 5 结论

1) 利用均方根振幅属性,对塔中隆起北斜坡三维地震采集区奥陶系浅、中、深部的碳酸盐岩岩溶储层进行预测,发现大量岩溶储层继承性分布于北西和北东断裂所夹持块体的东北和西南角区域,特别是中古5块体、中古10块体的奥陶系深部,这种现象尤为明显。

2) 沉积相和古地貌等因素无法解释中古5和中古10块体的岩溶储层分布现象,分析认为走滑断裂活动及其诱发局部应力区导致了这种现象。因为北西向断裂的右旋压扭活动,诱发北东向断裂的左旋走滑运动,而两组断裂活动导致其东北和西南、西北和东南区域分别形成局部应力拉张区、局部应力挤压区,应力拉张区更易拉张破裂并发育裂缝。此外,应力拉张区还处于北东向、北西向断裂的交汇区域,交错叠加了断裂诱发的裂缝带,成为裂缝密集区。裂缝提供溶蚀流体通道的同时,也增加了流体与岩石的接触面积,使得块体的东北和西南角区域岩溶储层异常发育。研究表明,走滑断裂是塔中隆起岩溶储层发育的控制因素之一。

3) 加里东中期 I 幕,塔中隆起北西向断裂开始逆冲活动,北西向裂缝伴生发育。加里东中期 II 幕,北西向逆断层开始右旋压扭活动,并诱发北东向左旋走滑断裂活动,走滑活动相关的裂缝开始发育。加里东晚期—海西早期,压扭、走滑和伴生裂缝的发育得到继承和加强,并发生了第一期大规模埋藏岩溶作用。海西晚期,走滑断裂活动及伴生变形开始减弱,但岩浆热液主导的第二期埋藏岩溶作用得以发生。喜马拉雅期,第三期埋藏岩溶作用沿走滑断裂和裂缝带发生。

4) 塔中隆起中西部奥陶系深层的岩溶储层预测和油气勘探可多关注北西向和北东向走滑断裂的交汇区域,特别是两者所夹持块体的东北和西南角区域(局部应力拉张区)。

### 参 考 文 献

- [1] 汤良杰. 塔里木盆地走滑断裂带与油气聚集关系的探讨[J]. 地球科学, 1992, 17(4): 403–409.  
Tang Liangjie. A discussion on the relation between strike-slip fault belts and hydrocarbon accumulation in Tarim Basin[J]. Earth Science, 1992, 17(4): 403–409.
- [2] 李明杰, 胡少华, 王庆果, 等. 塔中地区走滑断裂体系的发现及其地质意义[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(1): 116–121.  
Li Mingjie, Hu Shaohua, Wang Qingguo, et al. Discovery of strike-slip fault system in Tazhong area and geological meaning[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(1): 116–121.
- [3] 张承泽, 于红枫, 张海祖, 等. 塔中地区走滑断裂特征、成因及地质意义[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(5): 22–26.  
Zhang Chengze, Yu Hongfeng, Zhang Haizu, et al. Characteristic, genesis and geologic meaning of strike-slip fault system in Tazhong area[J]. Journal of South-West Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(5): 22–26.
- [4] 张艳萍, 杨海军, 吕修祥, 等. 塔中北斜坡中部走滑断裂对油气成藏的控制[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(4): 342–344.  
Zhang Yangping, Yang Haijun, Lv Xiuxiang, et al. Strike-slip faults and their controls on hydrocarbon reservoir in middle part of Northern Slope of Tazhong area, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(4): 342–344.
- [5] 罗春树, 杨海军, 李江海, 等. 塔中奥陶系优质储集层特征及断裂控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 716–724.  
Luo Chunshu, Yang Haijun, Li Jianghai, et al. Characteristics of high quality Ordovician reservoirs and controlling effects of faults in the Tazhong area, Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 716–724.
- [6] 张仲培, 王毅, 云金表, 等. 塔中地区断裂不同演化阶段对油气聚集的控制[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 316–323.  
Zhang Zhongpei, Wang Yi, Yun Jinbiao, et al. Control of faults at different evolution stages on hydrocarbon accumulation in Tazhong area, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 316–323.
- [7] 周新源, 吕修祥, 杨海军, 等. 塔中北斜坡走滑断裂对碳酸盐岩油气差异富集的影响[J]. 石油学报, 2013, 34(4): 628–636.  
Zhou Xinyuan, Lv Xiuxiang, Yang Haijun, et al. Effects of strike-slip faults on the differential enrichment of hydrocarbons in the northern slope of Tazhong area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(4): 628–636.
- [8] 兰晓东, 吕修祥, 朱炎铭, 等. 走滑断裂与盖层复合成藏模式——以塔中东部中古 51 井区鹰山组为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 107–115.  
Lan Xiaodong, Lv Xiuxiang, Zhu Yanming, et al. Hydrocarbon accumulation pattern jointly controlled by strike-slip faults and cap rocks: a case from Yingshan Formation in well ZG-51 block of eastern Tazhong area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 107–115.
- [9] 杨海军, 李开开, 潘文庆, 等. 塔中地区奥陶系埋藏热液溶蚀流体活动及其对深部储层的改造作用[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 783–792.  
Yang Haijun, Li Kaikai, Pan Wenqing, et al. Burial hydrothermal dissolution fluid activity and its transforming effect on the reservoirs in Ordovician in Central Tarim[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 783–792.
- [10] 王建忠, 向才富, 庞雄奇. 塔中断层交汇与岩溶缝洞体系控制的油气成藏效应[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(3): 954–961.  
Wang Jianzhong, Xiang Caifu, Pang Xiongqi, et al. Combined effects of fault intersections and karstification fracture-cavity systems on hydrocarbon accumulation in Tazhong area[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(3): 954–961.
- [11] 杨圣彬, 刘军, 李慧莉, 等. 塔中北围斜区北东向走滑断裂特征及其控油作用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 797–802.  
Yang Shengbin, Liu Jun, Li Huili, et al. Characteristics of the NE-trending strike-slip fault system and its control on oil accumulation in north peri-cline area of the Tazhong Paleogeoclinal Uplift[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 797–802.
- [12] 李萌, 汤良杰, 李宗杰, 等. 走滑断裂特征对油气勘探方向的选择——以塔中北坡顺 1 井区为例[J]. 石油实验地质, 2016, 38(1): 113–121.  
Li Meng, Tang Liangjie, Li Zongjie, et al. Fault characteristics and their petroleum geology significance: A case study of well Shun-1 on the northern slope of the central Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(1): 113–121.
- [13] 甄素静, 汤良杰, 李宗杰, 等. 塔中北坡顺南地区走滑断裂样式、变形机理及石油地质意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(12): 2315–2324.  
Zhen Sujing, Tang Liangjie, Li Zongjie, et al. The characteristics, formation and petroleum geology significance of the strike-slip fault system in Shunnan area, northern slope of Tazhong Uplift[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(12): 2315–2324.
- [14] 李本亮, 管树巍, 李传新, 等. 塔里木盆地塔中低凸起古构造演化与变形特征[J]. 地质论评, 2009, 55(4): 521–530.  
Li Benliang, Guan Shuwei, Li Chuanxin, et al. Paleo-tectonic Evolution and Deformation Features of the Lower Uplift in the Central Tarim Basin[J]. Geological Review, 2009, 55(4): 521–530.
- [15] 庞雄奇, 周新源, 李卓, 等. 塔里木盆地塔中古隆起控油气模式与有利区预测[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 189–198.  
Pang Xiongqi, Zhou Xinyuan, Li Zhuo, et al. A model for controlling hydrocarbon and predicting favorable exploration zones of the Tazhong palaeouplift in Tarim Basin, NW China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 189–198.
- [16] 丁长辉, 周红波, 路鹏程, 等. 塔中低凸起古生界构造特征及演化

- [J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 148–153.
- Ding Changhui, Zhou Hongbo, Lu Pengcheng, et al. The Paleozoic structural features and its evolution of the Tazhong Low Uplift, Xinjiang. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(1): 148–153.
- [17] 郭光辉, 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.
- [18] 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.
- [19] 李传新, 王晓丰, 李本亮, 等. 塔里木盆地塔中低凸起古生代断裂构造样式与成因探讨[J]. 地质学报, 2010, 84(12): 1727–1734.
- Li Chuanxin, Wang Xiaofeng, Li Benliang, et al. Paleozoic faulting structure styles of the Tazhong Low Uplift, Tarim Basin and its mechanism[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(12): 1727–1734.
- [20] 汤良杰, 漆立新, 邱海峻, 等. 塔里木盆地断裂构造分期差异活动及其变形机理[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2569–2583.
- Tang Liangjie, Qi Lixin, Qiu Haijun, et al. Poly-phase differential fault movement and hydrocarbon accumulation of the Tarim Basin, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(8): 2569–2583.
- [21] 王招明, 杨海军, 王清华, 等. 塔中隆起海相碳酸盐岩特大型凝析气田地质理论与勘探技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 255–261.
- Wang Zhaoming, Yang Haijun, Wang Qinghua, et al. Geological theory and exploration technology for marine carbonate giant condensate field of Tazhong uplift in Tarim Basin[M]. Beijing: Science Press, 2012: 255–261.
- [22] 吴欣松, 魏建新, 吕建波, 等. 碳酸盐岩古岩溶储层预测的难点与对策[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(6): 16–21.
- Wu Xinsong, Wei Jianxin, Chang Jianbo, et al. Difficulty and counter measures in carbonate paleokarst reservoir prediction[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2009, 33(6): 16–21.
- [23] 杨海军, 韩剑发, 孙崇浩, 等. 塔中北斜坡奥陶系鹰山组岩溶型储层发育模式与油气勘探[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 199–205.
- Yang Haijun, Han Jianfa, Sun Chonghao, et al. A development model and petroleum exploration of karst reservoirs of Ordovician Yingshan Formation in the northern slope of Tazhong palaeo uplift[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 32(2): 199–205.
- [24] 吉云刚, 韩剑发, 张正红, 等. 塔里木盆地塔中北斜坡奥陶系鹰山组深部优质岩溶储层的形成与分布[J]. 地质学报, 2012, (86)7: 1163–1174.
- Ji Yungang, Han Jianfa, Zhang Zhenghong, et al. Formation and distribution of deep high quality reservoir of Ordovician Yingshan Formation in the Northern Slope of the Tazhong area in Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, (86)7: 1163–1174.
- [25] 张宝民, 刘静江. 中国岩溶储集层分类与特征及相关的理论问题[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 12–29.
- Zhang Baomin, Liu Jingjiang. Classification and characteristics of karst reservoirs in China and related theories[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(1): 12–29.
- [26] 刘忠宝, 孙华, 于炳松, 等. 裂缝对塔中奥陶系碳酸盐岩储集层岩溶发育的控制[J]. 新疆石油地质, 2007, 38(3): 289–291.
- Liu Zhongbao, Sun Hua, Yu Bingsong, et al. The Control of fractures on Karst in Ordovician carbonate reservoirs in Tazhong Area, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 38(3): 289–291.
- [27] 赵文智, 朱光有, 张水昌, 等. 天然气晚期强充注与塔中奥陶系深部碳酸盐岩储集性能改善关系研究[J]. 科学通报, 2009, 54(20): 3218–3230.
- Zhao Wenzhi, Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, et al. Relationship between the later strong gas-charging and the improvement of the reservoir capacity in deep Ordovician carbonate reservoir in Tazhong area, Tarim Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(20): 3218–3230.
- [28] 艾合买提江·阿不都热和曼, 钟建华, 李阳, 等. 碳酸盐岩裂缝与岩溶作用研究[J]. 地质论评, 2008, 54(4): 485–494.
- Abdura Hman Ahmatjan, Zhong Jianhua, Li Yang, et al. Study on effect between Karstification and fracture in carbonate rocks[J]. *Geological Review*, 2008, 54(4): 485–494.
- [29] 石书缘, 刘伟, 姜华, 等. 塔北哈拉哈塘地区古生代断裂-裂缝系统特征及其与奥陶系岩溶储层关系[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(12): 4568–4577.
- Shi Shuyuan, Liu Wei, Jiang Hua, et al. Characteristics of Paleocene fault-fracture system and their relationship with Ordovician Paleokarst reservoirs in Halahatang area, north Tarim Basin[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(12): 4568–4577.
- [30] Allen P A, Allen J R. Basin analysis: principles and applications [M]. 2nd ed. Oxford UK: Blackwell Publishing Ltd, 2005: 205–206.
- [31] 漆家福, 夏义平, 杨桥. 油区构造解析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 5–7.
- Qi Jiafu, Xia Yiping, Yang Qiao. Structural analysis of oil province [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 5–7.
- [32] Pang H, Chen J Q, Pang X Q. Key factors controlling hydrocarbon accumulations in Ordovician carbonate reservoirs in the Tazhong area, Tarim basin, western China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43(47): 88–101.
- [33] 李素梅, 庞雄奇, 杨海军, 等. 塔中 I 号坡折带高熟油气地球化学特征及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 210–216.
- Li Sumei, Pang Xiongqi, Yang Haijun, et al. Geochemical characteristics and implication of high thermal maturity oils in Tazhong- I faulted slope break zone[J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(2): 210–216.
- [34] 郑剑, 王振宇, 杨海军, 等. 塔中地区奥陶系鹰山组埋藏岩溶期次及其对储层的贡献[J]. 现代地质, 2015, 29(3): 665–674.
- Zheng Jian, Wang Zhenyu, Yang Haijun, et al. Buried karstification period and contribution to reservoirs of Ordovician Yingshan formation in Tazhong area[J]. *Geoscience*, 2015, 29(3): 665–674.
- [35] 吕修祥, 杨宁, 解启来, 等. 塔中地区深部流体对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 284–289, 296.
- Lv Xiuxiang, Yang Ning, Xie Qilai, et al. Carbonate reservoirs transformed by deep fluid in Tazhong area[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(3): 284–289, 296.