

四川盆地开江—梁平海槽东南台缘带 走滑断裂特征及其控藏作用

吴永宏^{1,2}, 刘嘉伟¹, 冯亮², 庞艳超¹, 唐青松², 刘晓旭¹, 邬光辉¹

1 西南石油大学地球科学与技术学院; 2 中国石油西南油气田公司重庆气矿

摘要 开江—梁平海槽周缘二叠系—三叠系礁滩型气藏是四川盆地天然气勘探开发的重点领域,但深度(>4 500 m)碳酸盐岩储层致密,制约了天然气藏的高效勘探与开发。基于重新处理的三维地震资料,开展走滑断裂的地震识别,研究走滑断裂的构造特征,并结合钻井资料分析走滑断裂控藏作用与天然气富集规律。结果表明:开江—梁平海槽地区发育一系列北西向的走滑断裂带,具有纵向分层、平面分段特征。剖面上走滑断裂多表现为直立型断裂与花状断裂多层叠置,平面上断裂组合以斜列、侧列为主,形成线性构造、雁列构造、花状构造、马尾状构造等多种构造类型。走滑断裂位移小、成熟度低,经历震旦纪末—早寒武世、前二叠纪、二叠纪—三叠纪等3期走滑断裂活动,具有连接生长机制与继承性发育的特征。走滑断裂带裂缝发育,断裂及其相关溶蚀作用控制了优质储层的发育,可导致碳酸盐岩渗透率增长超过1个数量级、孔隙度增长超过1倍。走滑断裂不仅沟通海槽内的二叠系烃源岩,形成侧向运移优势通道,而且可垂向连通深部烃源岩,形成断裂输导、复式成藏的多个含气层。开江—梁平海槽周缘台缘带及台内与走滑断裂有关的深层碳酸盐岩气藏的勘探开发潜力巨大,是值得深入探索的有利新领域。

关键词 走滑断裂; 成储; 成藏; 台缘带; 开江—梁平海槽; 四川盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

0 前言

随着中浅层油气资源日渐减少,深度(>4500 m)与断层相关的油气资源成为勘探开发的重点领域^[1-2]。近年来,在塔里木克拉通盆地内部发现一系列走滑断裂及断控海相碳酸盐岩缝洞型油气藏^[3-6],开辟了深层海相碳酸盐岩油气勘探开发新领域。深层走滑断裂特征及其控储控藏机理复杂^[3-9],是当前研究的重点与难点。

开江—梁平海槽周缘二叠系—三叠系台缘礁滩是四川盆地海相碳酸盐岩勘探开发的重点领域^[10-11],已发现元坝、普光、龙岗等礁滩相气田。开江—梁平海槽是受中晚二叠世区域伸展作用形成的拉张槽,控制了碳酸盐台地结构与二叠系烃源岩的发育与分布^[12-14]。受控于构造活动与海平

面变化的共同作用,台缘礁滩体连片叠置分布,形成沿台缘带广泛分布的相控礁滩型储层^[10-11,14-18]。海槽内二叠系烃源岩发育^[19-22],生成的油气向台缘带侧向运聚,台缘礁滩体油气成藏条件优越^[21-23]。该区碳酸盐岩以发育低孔低渗储层为主,天然气富集程度与单井产量差异大,而且台内与海槽内礁滩体的勘探效果总体较差,因此,寻找断控型碳酸盐岩油气富集区对高效勘探开发具有重要意义。

开江—梁平海槽地区尚未开展走滑断裂及其控藏作用的研究,本文利用海槽东南缘三维地震资料,在金字塔导航处理提高走滑断裂分辨率的基础上,开展走滑断裂的构造特征分析,探讨其控储控藏作用,以期与走滑断裂有关的断控型天然气藏的勘探开发提供地质依据。

收稿日期:2023-05-22; 改回日期:2023-07-21

本文受中国石油-西南石油大学创新联合体科技合作项目“古大陆隆拗格局与寒武—前寒武纪油气资源潜力分析及区带优选”(编号:2020CX010101)、国家自然科学基金项目“鄂西裂陷槽在扬子古大陆裂解中的沉积响应及其油气地质意义”(编号:41972121)联合资助

第一作者: 吴永宏,工程师,从事油气勘探与开发地质研究。通信地址:400707 重庆市渝北区大石坝大庆村287号;E-mail: wuyh01@petrochina.com.cn

通信作者: 邬光辉,博士,教授,主要从事构造地质与石油地质研究。通信地址:610500 四川省成都市新都区新都大道8号;E-mail: wugh@swpu.edu.cn

1 地质背景

四川盆地位于扬子地台西北侧,是一个经历多期构造-沉积旋回的叠合盆地^[24-25]。受近全球性的晚新元古代裂陷作用,在前震旦系变质基底上广泛发育晚震旦世克拉通内碳酸盐台地,西部被近南北走向的德阳—安岳裂陷槽分隔^[12,24-25]。在早寒武世快速海侵过程中,筇竹寺组暗色页岩广泛分布,进而继承性发育寒武纪—中奥陶世克拉通内碳酸盐台地,形成多期、多类型碳酸盐台地的叠置^[24-26]。晚奥陶世—早志留世进入克拉通内碎屑岩发育阶段,沉积上奥陶统五峰组—下志留统暗色页岩^[22]。在志留纪—石炭纪经历多期的区域隆升,并遭受广泛的剥蚀,导致石炭系碳酸盐岩发育风化壳岩溶作用^[24-25]。

受控于中晚二叠世的峨眉地裂运动和四川盆地北部勉略洋的俯冲消减^[12-14],在南北向区域伸展作用下沿开江—梁平一线逐步形成克拉通内北西西走向的浅水海槽,于晚二叠世长兴期达到拗陷高峰期,并在早三叠世飞仙关期逐渐消亡^[13]。随着海槽的发育,在长兴早期开始发育缓坡台地,在长兴中晚期演化为镶边台地,开始发育大型的台缘礁滩体(图1)。早三叠世飞仙关早期发育鲕粒滩,随后海槽由于“填平补齐”逐渐演变为局限台地^[15-18]。中晚三叠世进入前陆盆地发育阶段,中新界发育多期陆内拗陷碎屑岩沉积,发生多期隆升形成多个不整合,并在盆地周缘形成了一系列断裂构造^[24-25]。开江—梁平海槽的西部与东部遭受一系列北东向逆冲-褶皱的叠加与改造作用,形成现今的复杂地质结构^[13-18]。

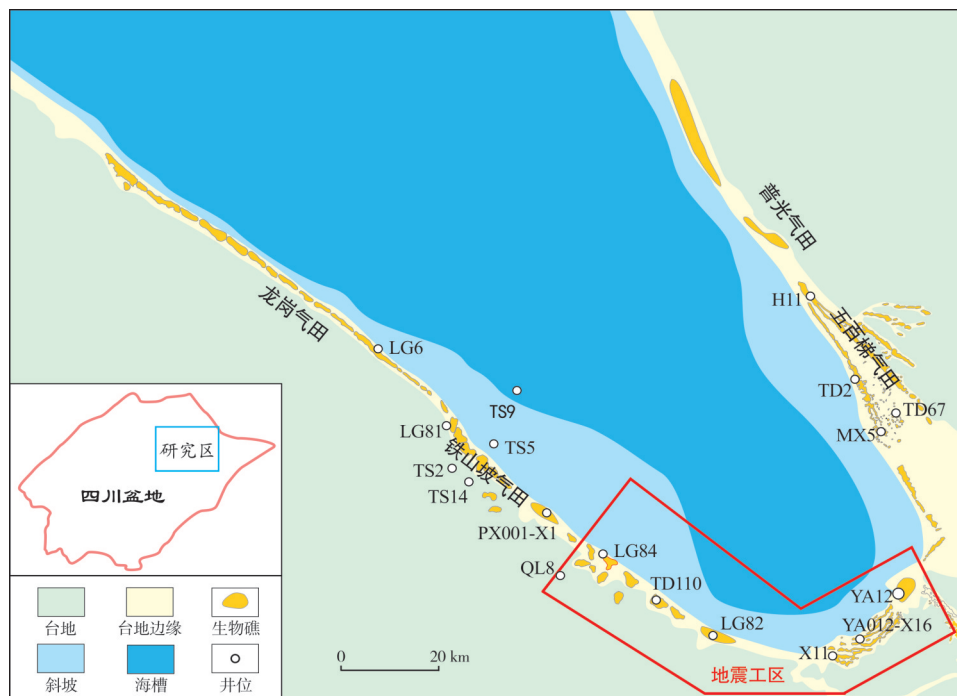


图1 开江—梁平海槽及周缘二叠纪长兴期古地理简图及天然气田分布(据文献[11-13]修编)

Fig.1 Lithofacies-palaeogeography sketch map during the Permian Changxing period and gas fields distribution in the Kaijiang-Liangping trough and its periphery (cited from references [11-13], modified)

2 走滑断裂特征

2.1 走滑断裂的识别与分布

对比开江—梁平海槽与川中地区的地震资料^[27-28]发现,研究区北东向强烈的逆冲作用造成走滑断裂难以成像,三叠系膏盐层的塑性变形也影响了地震成像的精度,而且研究区走滑断裂规模相对较小,这使得本区地震资料分辨率低、走滑断裂难以识别,

因此,前期没有开展走滑断裂的地震解释。本文对研究区叠后地震资料进行了针对走滑断裂的提高分辨率处理,处理后的地震剖面对微小走滑断裂具有更清晰的断面成像特征^[29],平面上表现出更清晰的走滑断裂形态和走向(图2),空间上对低序级走滑断裂的三维展布刻画更可靠,有利于走滑断裂的综合解释和研究。在地震资料重新处理的基础上,对走滑断裂地震识别方法进行对比分析,优选相干、增强相干与最大

似然性等地震属性平面图识别走滑断裂(图2)。

相干体分析技术是大尺度断裂检测的常用方法^[30-31],规模相对较大的走滑断裂在相干属性剖面上截然断开,在相干属性平面上展布清晰(图2a),因此该方法是开江—梁平地区走滑断裂解释的实用简便方法。由于研究区走滑断裂规模小,加上地震分辨率低,故采用了增强相干处理,进一步突出了走滑断裂的地震响应特征^[31]。增强相干属性不仅能更清晰地反映走滑断裂的平面分布,而且能反映走滑断裂的规模、变形程度和变形宽度(图2b)。针对相干属性在断层复杂时横向分辨力较低,断层

组合关系响应不清晰,且易受岩性等因素干扰的问题,采用了最大似然属性增强走滑断裂的地震成像效果^[31-32]。结果表明,最大似然属性不仅有利于反映走滑断裂在剖面上的展布特征,而且对走滑断裂平面组合关系的响应更加清晰,并可以压制岩性或岩相变化的干扰,在微小、复杂走滑断裂发育区应用效果更好(图2c)。此外,在走滑断裂的解释过程中还利用了地震振幅属性。

由于走滑断裂的断面难以成像,而且基底的地震反射杂乱不清,故一般通过高陡直立的背斜或向斜推断走滑断裂的分布(图3)。受后期走滑断裂的

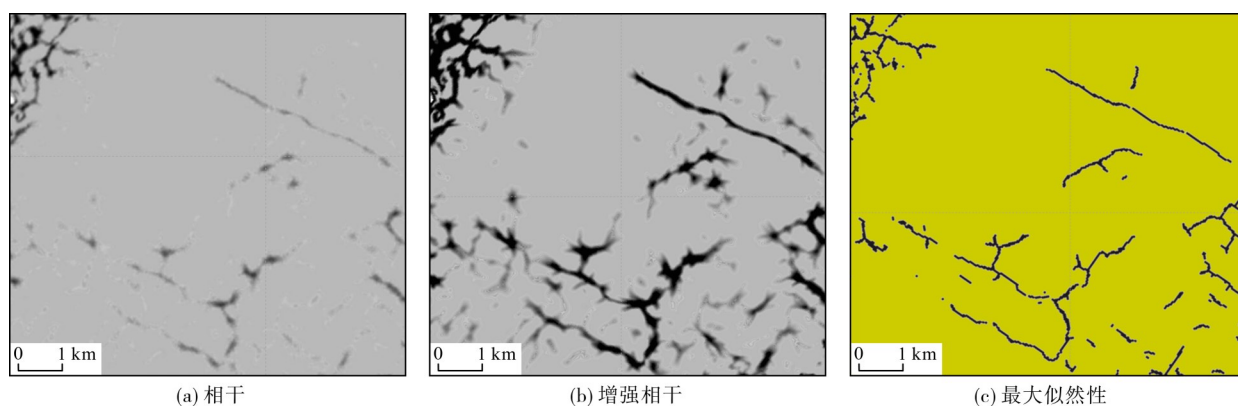


图2 开江—梁平海槽东南部反映三叠系走滑断裂分布的地震属性平面图(位置见图3a)

Fig. 2 Seismic attribute plans showing the Triassic strike-slip faults in the southeastern Kaijiang-Liangping trough (location is shown in Fig. 3a)

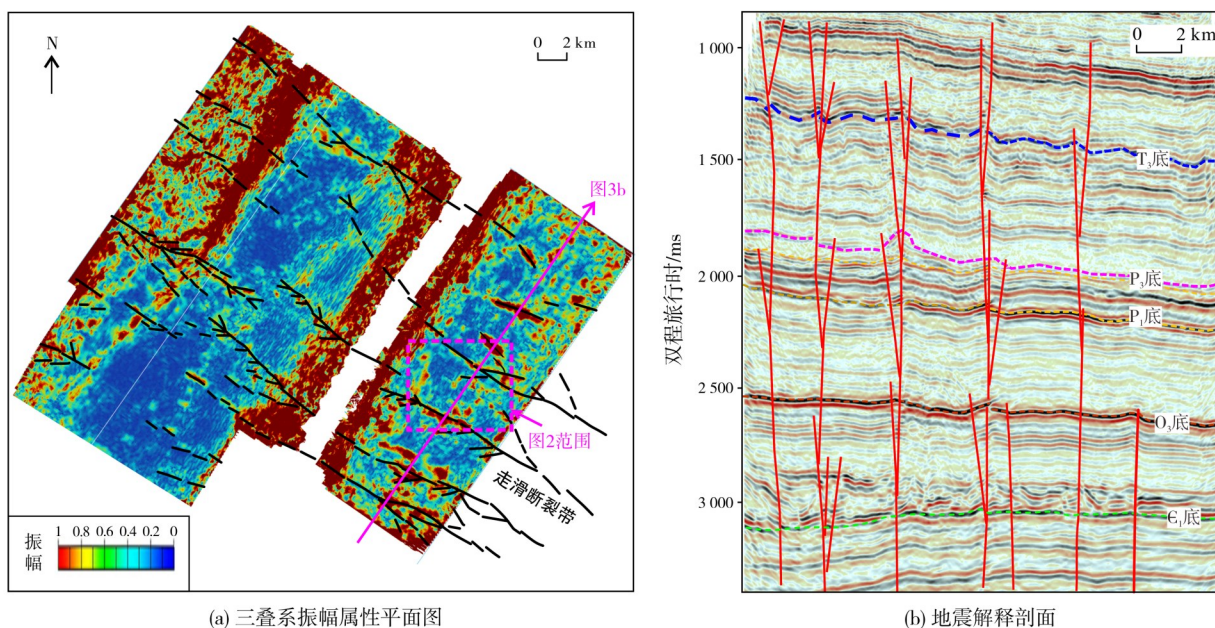


图3 开江—梁平海槽东南部走滑断裂综合解释(平面图位置见图4)

Fig. 3 Comprehensive interpretation of the strike-slip faults in the southeastern Kaijiang-Liangping trough (plan location is shown in Fig. 4)

影响,早期的地层、沉积相带及构造出现水平方向的错动(图2),可用于判识走滑断裂。同时,断层在平面上的雁列/斜列组合、马尾状构造(图2,图3a)等典型平面标志有助于走滑断裂的识别。在剖面上(图3b),断至基底的高陡直立断层、花状构造与直立的短轴背斜带是判识走滑断裂的重要剖面标志。结合研究区的地质背景,通过不同地区典型走滑断裂的特征分析,可以利用地震剖面与平面标志判识走滑断裂。

在构造建模与走滑断裂识别的基础上,开展了开江—梁平海槽东南部龙门—大猫坪地区走滑断裂的三维地震解释。如图4所示,研究区发育北西向走滑断裂:在西部三维区解释出6条北西向走滑断裂带,有3条断裂带延伸长度超过50 km;在东部大猫坪三维区识别出3条北西向走滑断裂带,往西北方向可能一直延伸至海槽内部。这些走滑断裂带断续分布,总长度达290 km。

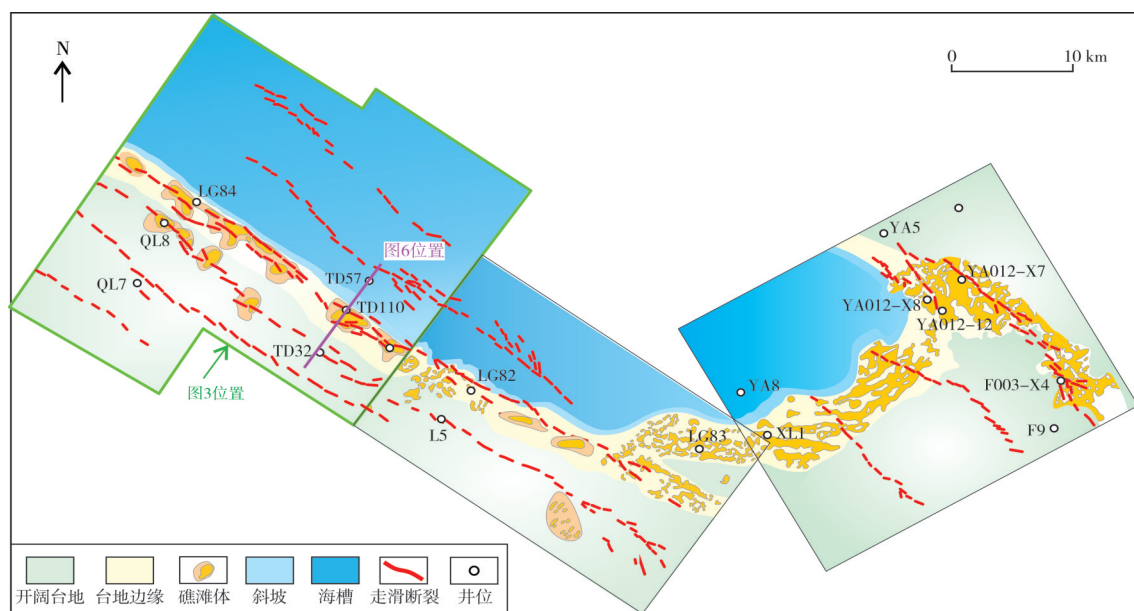


图4 开江—梁平海槽东南地区二叠纪长兴期古地理叠加走滑断裂平面分布图

Fig. 4 Map of paleogeography of the Permian Changxing period superimposed the strike-slip faults in the southeastern Kaijiang-Liangping trough

2.2 走滑断裂几何学特征

地震解释剖面显示,走滑断裂主要分布在三叠系之下(图3b),纵向上分层特征明显。下部构造层以张扭性走滑断裂为主,向上有一系列走滑断裂终止在下寒武统下部,下寒武统的走滑断裂带垂向变形高差达100 m以上,以正掉的负花状断裂形成的地堑发育为特征,与川中地区类似^[27],代表了早期的走滑断裂活动。在这些走滑断裂带中,多有走滑断裂向上延伸至二叠系底部,并呈压扭性特征,在二叠系之下,压扭背斜构造起伏幅度可超过200 m。同时,走滑断裂向上撒开形成更为宽阔的花状构造,向下收敛并入深部主干断裂,呈现显著的继承性发育特征。有少量断裂向上延伸至三叠系,并向上撒开,以线性雁列特征为主,并发育正花状构造,断裂活动较弱,为继承性发育。二叠系一下三叠统碳酸盐

岩中走滑断裂位移小、变形弱,垂向高差一般小于60 m。在上三叠统顶部,走滑断裂的位移增大、变形增强,形成向上撒开的正花状构造,构造幅度可超过200 m。与多期构造活动相对应,走滑断裂多期活动、继承性发育,可在多套地层形成花状构造(图3b),产生“花上花”的结构特征。研究区下部以负花状构造为主,上部为正花状构造,多在分支断裂上斜向生长发育。由于上下构造活动强度有差异,花状构造的规模差别较大,但以继承性发育为主,向下并入主干断裂带。

在地震剖面上,走滑断裂通常呈现正花状、负花状、半花状、直立型等4种样式。沿走滑断裂带收敛处常形成正花状构造:主干断裂在碳酸盐岩上部形成2个分支断裂向上撒开背冲,在碳酸盐岩顶部形成断垒,类似冲断系统的突发构造,但断面高陡,向下收敛、合并,具有明显的“挤压、逆断、背形”构

造特征^[31]。正花状构造比较多见,在二叠系底部、三叠系广泛分布。前者可能与区域挤压作用有关,后者受控于局部断裂组合关系。负花状构造向上撒开,形成反向下掉的断堑,具有明显的“拉张、正断、向形”构造特征^[31]。这种构造样式较少,主要分布在震旦系、二叠系。小型走滑断裂通常表现为直立型,以单一平直高陡断面出现。断裂带狭窄直立是普遍特征,这是走滑应力场所决定的。直立型断裂在空间上可能平行分布,形成相互近于平行的高陡断裂系。其规模较小,断裂高陡、平直,倾角 $>80^\circ$,倾向可能出现变化,不同层位的断距变化较大。

由于地震资料分辨率低,因此走滑断裂带的水平位移难以有效测量。根据对东部二叠系台缘带走滑断裂错动情况的分析,其水平位移一般低于500 m。此外,根据走滑断裂的排列组合分析,很多走滑断裂呈右阶步组合(图4)。鉴于二叠纪具有伸展背景下的拉张环境^[12-14],推断走滑断裂在晚二叠世—早三叠世呈右行的张扭性断裂。走滑断裂带在平面上以雁列、斜列断裂组合形成的线性构造为主,具有贯穿程度低的特征,表明走滑断裂演化成

成熟度较低。在主干断裂附近出现较多的R剪切断裂,在尾端可能出现马尾状构造,局部叠覆部位可能出现地垒与地堑。同时,走滑断裂的分段特征显著(图4)。这些反映出走滑断裂带具有连接生长的特征,呈现从孤立—软连接—硬连接以及叠覆生长的演化特点。

根据走滑断裂平面、剖面组合特征,在构造建模的基础上,识别出线性构造、雁列构造、叠覆构造、叠加构造、马尾状构造等构造类型(图5)。小型走滑断裂与大型走滑断裂的小位移部位通常出现线性构造。线性构造在地震剖面上表现为单一高角度断层,倾角接近 90° ,断面平直,在平面上直线延伸,垂向与水平断距较小,通常为小型断裂或是断裂活动较弱的区段,断裂两侧的地层起伏较低。有的区段可能出现断面倾向改变或者上下层位的倾向转变,在地震剖面上出现断面扭曲,相邻剖面上断面倾向突变,在空间上形成丝带效应。线性构造在空间上可能平行分布或侧列分布,形成相互近于平行的高陡断裂系(图3)。在走滑断裂发育的初期,往往发育雁列断裂,是走滑断裂有效的鉴别标志^[27,31]。研究区雁列断裂发育,走滑断裂带向上发

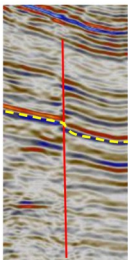
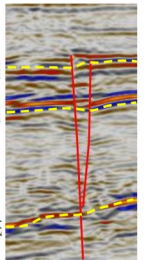
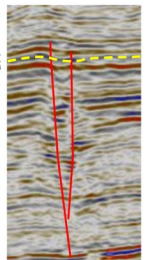
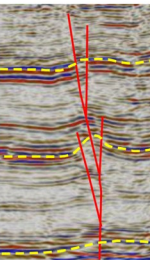
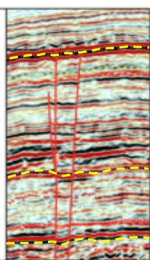
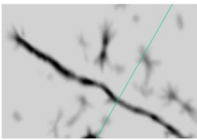
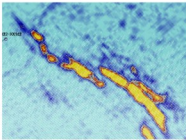
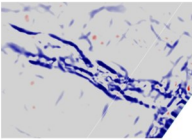
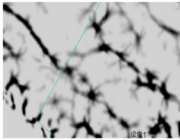
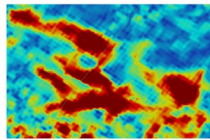
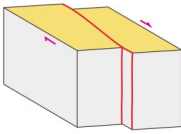
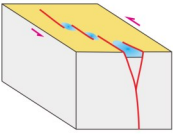
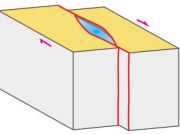
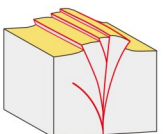
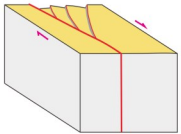
类型	线性构造	雁列构造	叠覆构造	叠加构造	马尾状构造
剖面图					
平面图					
模式图					
特征	单一断面高陡, 线性延伸, 倾向可能变化, 断裂规模较小	盖层发育一系列雁列分布的小型断裂, 以正掉为主, 形成微型地堑(模式图蓝色示), 向下合并线性延展	左行左阶或右行右阶断裂组合, 形成张扭性断陷(模式图蓝色示), 本区断裂规模较小	基底走滑错断, 盖层斜向压扭, 上部盖层分支, 向下收敛合并, 以半花状为主	沿主断裂两侧或单侧发育撒开的分支断裂, 断裂规模较小, 断裂带活动强烈

图5 开江—梁平海槽东南地区走滑断裂构造模式

Fig. 5 Structural models of the strike-slip faults in the southeastern Kaijiang-Liangping trough

散,在顶部出现一系列雁列构造,剖面上多呈逆断上升的小型断垒,平面上呈斜列分布,平直断裂带消失。大型走滑断裂带通常由多条断裂带叠覆组合而成,在叠覆段发生强烈的断裂相互作用,压扭叠覆区发育地垒,而张扭叠覆区发育地堑(图5)。由于断裂断面陡直,强烈的走滑断裂活动应力集中在断线附近很窄的范围内,导致窄而高陡的小型断垒比较多见。微型拉分地堑少见,处于拉分地堑发育的初期阶段。在走滑断裂的发散尾端,容易形成马尾状构造,表现为一系列斜列的断裂呈发散状排列。马尾状构造主断裂活动减弱,断裂变形带撒开变宽,剖面上断距较小,向下收敛依附于主断裂,平面上沿主断裂带两侧向外发散(图5)。

2.3 走滑断裂的形成与演化

对比川中地区走滑断裂形成期次^[28],推断开江—梁平海槽东南地区至少经历震旦纪末—早寒武世、前二叠纪及二叠纪—三叠纪3期走滑断裂活动。

在前震旦系基底之上,四川盆地在近东西向区域拉张背景下逐渐发育德阳—安岳裂陷槽^[12-14]。在德阳—安岳震旦系裂陷槽斜向伸展发展的过程中,受先存北西向基底薄弱带的影响,逐步发育与台缘带高角度相交的走滑断裂^[28]。这类起调节作用的走滑断裂沿海槽走向可能一直延伸至西北部板块边缘,沿开江—梁平海槽一线也有较多的发育,并不断生长形成横穿震旦系灯影组台地的大型断裂带。地震解释发现,研究区震旦系走滑断裂规模较小,以高陡直立的线性断裂为主,花状构造较少;平面上,以雁列、斜列组合断裂为主。

震旦纪末—早寒武世,在近东西向区域裂陷作用下,形成调节板内伸展变形的北西西向走滑断裂带,对应下部的张扭性断层。同时,走滑断裂向上撒开形成更为宽阔的花状构造,向下收敛并入深部主干断裂。

寒武纪—奥陶纪早期,走滑断裂活动较弱,具有继承性活动特征,部分走滑断裂复活,发育直立线性的微小断裂向上生长。在盆地从伸展转向挤压的过程中,川中古隆起逐步形成,在二叠纪沉积前已转向压扭性的走滑作用^[28]。受控于原—古特提斯洋开合的构造背景,研究区在晚加里东期—早海西期均受到来自西—北西方向的构造作用的影响。

由于俯冲作用下缺少大规模的冲断作用,或冲断变形并没有传递到四川克拉通内部,因此刚性的基底没有发生大规模的逆冲断裂活动。但在斜向挤压作用下,造成多期走滑断裂的复活与继承性发育,在研究区也形成压扭性走滑断裂,表明先期构造对后期断裂活动具有重要的控制作用。

中晚二叠世—早三叠世,北部勉略洋发生俯冲消减^[14],形成南北向伸展作用。受北西向走滑断裂带的控制,开江—梁平海槽沿北西方向发育(图4)。同时,克拉通内也逐步形成斜向拉张作用,并激发先存走滑断裂带的复活,沿早期走滑断裂带位置发生微弱活动的张扭性走滑断裂,并影响台缘带的走向与沉积变迁。这期走滑断裂规模小,以直立线性断裂为主,向下并入早期的压扭断裂带。

中晚三叠世,上扬子西缘与其西侧的特提斯域地块或多岛弧盆增生体发生碰撞拼合,并且华南陆块与华北陆块碰撞拼合^[13-14],在四川盆地西南缘、西缘和北缘发育前陆盆地,形成广泛的抬升剥蚀,并转向陆相沉积。在此过程中,研究区受到斜向的挤压作用,走滑断裂又发生一期较强烈的活动。本期走滑断裂同样沿早期的走滑断裂带发育,但可能有一定的位置偏移。受强烈的斜向挤压作用影响,发育压扭性正花状构造(图3b),构造变形强度大,断裂带宽度大,其中的垂向逆冲分量较大。三叠纪之后,走滑断裂基本停滞,仅局部存在少量的继承性走滑断裂活动。

3 走滑断裂控储控藏作用

开江—梁平海槽两侧二叠系—三叠系台缘滩与台内滩相^[10-11,14-18]发育白云岩孔隙型储层,但是这类礁滩体基质储层趋向致密(孔隙度一般低于8%,渗透率一般低于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。除了碳酸盐岩低孔低渗基质储层外,沿走滑断裂带发育裂缝—孔洞型储层。研究区单井天然气产量差异巨大,通过针对性地开展老井复查与重新认识,发现高产气井大多与断裂有关。如TD110井日产气高达 $58 \times 10^4 \text{ m}^3$,是邻井产量的数倍,目前的产气量已超出单井计算的储量。地震资料重新处理解释表明:TD110井钻穿张扭性断层下盘的三叠系,向下进入呈杂乱地震反射的二叠系长兴组台缘礁滩体。能量差异属性剖面分析(图6)表明,该井钻遇具有团簇状强能量响应的走滑断裂破碎带。岩心中可见多种类型的裂

缝,具有多期充填的方解石,反映多期断裂活动。岩心与成像测井图像上可见沿裂缝发育溶蚀孔洞,被方解石半充填。测井解释的裂缝-孔洞层厚度大,其孔隙度比基质孔隙型储层高出一倍以上。由此可见,断裂与沿断裂溶蚀的孔洞对礁滩体储层具有重要的建设性作用。

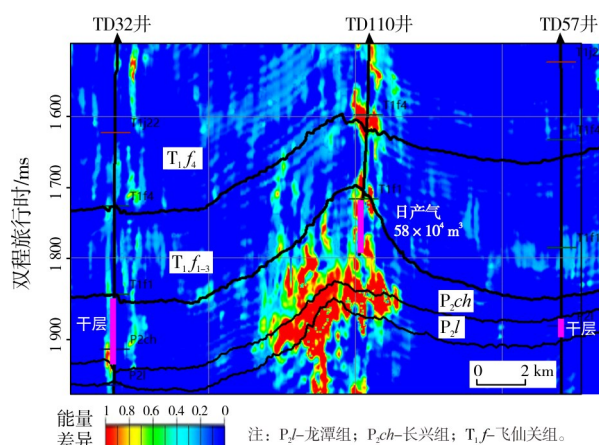


图6 能量差异属性剖面显示开江—梁平海槽东南二叠系储层特征(剖面位置见图4)

Fig. 6 Seismic energy differentiation attribute showing the Permian reservoirs in the southeastern Kaijiang-Liangping trough (location is shown in Fig. 4)

在台缘带走滑断裂发育区,走滑断裂对古地貌与礁滩体分布具有控制作用,在相控基础上叠加的断裂作用是优质储层发育的主控因素。如东部大猫坪地区长兴组礁滩体在横向上具有显著的差异性(图4),其横向变化的部位多与走滑断裂重合。统计分析表明:远离走滑断裂破碎带的相控储层含裂缝极少,以孔隙-孔洞型储层为主,储层段孔隙度一般 $<5\%$,渗透率一般 $<2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。而走滑断裂带裂缝发育,主要沿主干断裂破碎带800 m范围内分布,在分支断裂或破碎带叠覆部位可能超过1200 m(图6)。TD110井裂缝有效孔隙度极低,但裂缝发育部位有利于碳酸盐岩次生溶蚀孔隙的发育,有效孔隙度可能增加50%以上。裂缝对致密碳酸盐岩的渗透率具有重要的控制作用,储层渗透率可以增加1~2个数量级。对测井解释储层的统计分析表明:基质储层段平均孔隙度一般为2%~5%,但断裂破碎带范围内孔隙度显著上升,孔隙度可提高50%以上,局部井段孔隙度增长1倍以上。储层段渗透率增长更为显著,高渗透性储层段可能增加2个数量级。这些特征表明优质裂缝-孔洞型、缝洞型储层与走滑断裂密切相关,走滑断裂控制了优质

储层的发育。对于断裂带内那些未受断裂改造的储层,在后期压裂机制下,一旦有裂缝作用,预期储层渗透率会大幅增长。

前期的研究强调紧邻开江—梁平海槽内的烃源岩(二叠系龙潭组)的油气侧向运移成藏模式^[19,21]。依据该模式,二叠系台缘礁滩体是最有利的勘探领域,而台内滩与海槽内烃源岩生成的油气之间的输导运移条件较差。本文研究认为,在地质演化过程中走滑断裂多期发育,可以有效沟通深部寒武系烃源岩、奥陶系—志留系烃源岩,形成优越的垂向运聚成藏地质条件(图7)。由于走滑断裂带的垂向沟通,深层烃源岩生成的油气容易沿走滑断裂带优势通道向上运移进入碳酸盐岩储层成藏,形成近源垂向输导成藏模式,并沿走滑断裂带多层段富集成藏。因此,不仅二叠系台内礁滩体,而且深层断裂带缝洞体储层也可能形成断控气藏,形成多层系复式成藏。同时,在东部大猫坪地区走滑断裂可沟通侧旁的海槽内二叠系烃源岩(图4),形成走滑断裂优势通道的侧向运移与成藏,通过断裂带储层近源侧向运移在紧邻的缝洞体储层中成藏与富集。

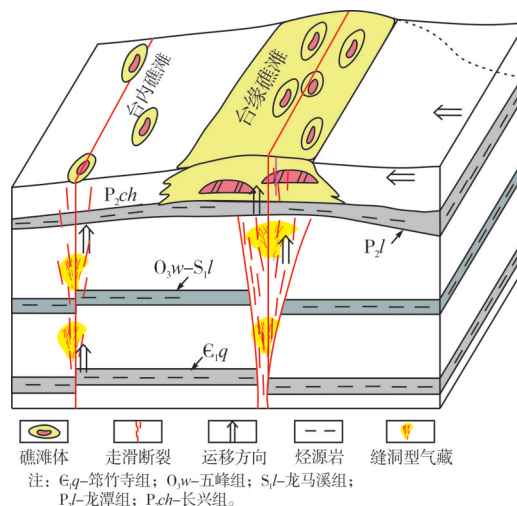


图7 开江—梁平地区二叠系台缘带走滑断裂带运聚成藏模式图

Fig. 7 Migration and accumulation model of the strike-slip fault zone in the Kaijiang-Liangping platform margin

综上所述,走滑断裂控制了优质储层的发育,沿走滑断裂带可形成与断裂相关的缝洞体碳酸盐岩储层;走滑断裂可垂向沟通油气源,在一系列局部发育的裂缝-孔洞型储层中形成走滑断裂控制的断控气藏,这是有利的勘探开发新领域。

4 结 论

四川盆地开江—梁平海槽周缘发育克拉通内小位移走滑断裂系统,走滑断裂具有重要的控储控藏作用,与走滑断裂相关的气藏是潜在的勘探开发有利领域。

(1)开江—梁平海槽发育一系列北西向的走滑断裂带,具有纵向分层、平面分段的特征:剖面上多为直立型与花状断裂多层叠置,平面上以斜列、侧列断裂组合为主,形成线性构造、雁列构造、叠覆构造、叠加构造、马尾状构造等多种构造类型。

(2)走滑断裂位移小、成熟度低,经历震旦纪末—早寒武世、前二叠纪及二叠纪—三叠纪等3期走滑断裂活动,具有连接生长机制与继承性发育的特征。

(3)走滑断裂及其相关的溶蚀作用控制了优质储层的发育,可导致碳酸盐岩渗透率增长超过1个数量级、孔隙度增长超过1倍。

(4)走滑断裂不仅可以沟通海槽内二叠系烃源岩,形成侧向运移优势通道,而且可垂向连通深部寒武系、奥陶系—志留系烃源岩,形成断裂输导、复式成藏的多个含气层,开江—梁平海槽周缘台缘带及台内与走滑断裂有关的深层碳酸盐岩气藏的勘探开发潜力巨大。

参 考 文 献

- [1] 贾承造, 庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1457-1469.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories [J]. Acta petrolei sinica, 2015, 36(12): 1457-1469.
- [2] 张光亚, 马锋, 梁英波, 等. 全球深层油气勘探领域及理论技术进展[J]. 石油学报, 2015, 36(9): 1156-1166.
ZHANG Guangya, MA Feng, LIANG Yingbo, et al. Domain and theory-technology progress of global deep oil & gas exploration [J]. Acta petrolei sinica, 2015, 36(9): 1156-1166.
- [3] 焦方正. 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[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 831-839.
JIAO Fangzheng. Significance of oil and gas exploration in NE strike-slip fault belts in Shuntuoguole area of Tarim Basin [J]. Oil & gas geology, 2017, 38(5): 831-839.
- [4] 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.
- [5] 云露. 顺北东部北东向走滑断裂体系控储控藏作用与突破意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 41-52.
YUN Lu. Controlling effect of NE strike-slip fault system on reservoir development and hydrocarbon accumulation in the eastern Shunbei area and its geological significance, Tarim Basin [J]. China petroleum exploration, 2021, 26(3): 41-52.
- [6] 王清华, 杨海军, 汪如军, 等. 塔里木盆地超深层走滑断裂断控大油气田的勘探发现与技术创新[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 58-71.
WANG Qinghua, YANG Haijun, WANG Rujun, et al. Discovery and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin [J]. China petroleum exploration, 2021, 26(4): 58-71.
- [7] 杨海军, 邬光辉, 韩剑发, 等. 塔里木克拉通内盆地走滑断层构造解析[J]. 地质科学, 2020, 55(1): 1-16.
YANG Haijun, WU Guanghui, HAN Jianfa, et al. Structural analysis of strike-slip faults in the Tarim intracratonic basin [J]. Chinese journal of geology, 2020, 55(1): 1-16.
- [8] 韩杰, 袁源, 肖春艳, 等. 塔中I号气田TZ83井区环状断溶体储层发育特征及油气聚集规律[J]. 海相油气地质, 2020, 25(3): 234-242.
HAN Jie, YUAN Yuan, XIAO Chunyan, et al. Development characteristics and oil-gas accumulation rules of fault-karst reservoir of TZ83 well area in Tazhong I gas field [J]. Marine origin petroleum geology, 2020, 25(3): 234-242.
- [9] 郑和荣, 胡宗全, 云露, 等. 中国海相克拉通盆地内部走滑断裂发育特征及控藏作用[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 224-238.
ZHENG Herong, HU Zongquan, YUN Lu, et al. Strike-slip faults in marine cratonic basins in China: development characteristics and controls on hydrocarbon accumulation [J]. Earth science frontiers, 2022, 29(6): 224-238.
- [10] 文龙, 张奇, 杨雨, 等. 四川盆地长兴组—飞仙关组礁、滩分布的控制因素及有利勘探区带[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 39-44.
WEN Long, ZHANG Qi, YANG Yu, et al. Factors controlling reef-bank reservoirs in the Changxing-Feixianguan Formation in the Sichuan Basin and their play fairways [J]. Natural gas industry, 2012, 32(1): 39-44.
- [11] 杨雨, 钟原, 李林娟. 开江—梁平海槽周缘二叠系—三叠系礁滩组合分布与成因[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(6): 683-690.
YANG Yu, ZHONG Yuan, Li Linjuan. Distribution and genesis of Permian-Triassic reef-shoal combination around Kaijiang-Liangping trough in Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (science & technology edition), 2021, 48(6): 683-690.
- [12] 刘树根, 王—刚, 孙玮, 等. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 1-22.
LIU Shugen, WANG Yigang, SUN Wei, et al. Control of intracratonic sags on the hydrocarbon accumulations in the marine strata across the Sichuan Basin, China [J]. Journal of

- Chengdu University of Technology (science & technology edition), 2016, 43(1): 1–22.
- [13] 高平, 李双建, 何治亮, 等. 四川盆地广元—梁平古裂陷构造—沉积演化[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 784–799.
- GAO Ping, LI Shuangjian, HE Zhiliang, et al. Tectonic–sedimentary evolution of Guangyuan–Liangping paleo-rift in Sichuan Basin[J]. Oil & gas geology, 2020, 41(4): 784–799.
- [14] 王兴志, 李博, 文龙, 等. 四川盆地北部中二叠世晚期“广元—旺苍”海槽特征及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 562–574.
- WANG Xingzhi, LI Bo, WEN Long, et al. Characteristics of “Guangyuan–Wangcang” trough during late Middle Permian and its petroleum geological significance in northern Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum exploration and development, 2021, 48(3): 562–574.
- [15] 张建勇, 周进高, 郝毅, 等. 四川盆地环开江—梁平海槽长兴组—飞仙关组沉积模式[J]. 海相油气地质, 2011, 16(3): 45–54.
- ZHANG Jianyong, ZHOU Jingao, HAO Yi, et al. A Sedimentary model of Changxing and Feixianguan reservoirs around Kaijiang–Liangping trough in Sichuan Basin [J]. Marine original petroleum geology, 2011, 16(3): 45–54.
- [16] 徐安娜, 汪泽成, 江兴福, 等. 四川盆地开江—梁平海槽两侧台地边缘形态及其对储层发育的影响[J]. 天然气工业, 2014, 34(4): 37–43.
- XU Anna, WANG Zecheng, JIANG Xingfu, et al. Morphological characteristics of platform margins along the Kaijiang–Liangping trough and their influences on reservoir development in the Sichuan Basin [J]. Natural gas industry, 2014, 34(4): 37–43.
- [17] 苏成鹏, 谭秀成, 刘宏, 等. 环开江—梁平海槽长兴组台缘礁滩相储层特征及成岩作用[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2046–2058.
- SU Chengpeng, TAN Xiucheng, LIU Hong, et al. Characteristics and diagenesis of platform margin reef–shoal reservoirs of Upper Permian Changxing Formation around Kaijiang–Liangping trough, eastern Sichuan Basin [J]. Geology in China, 2016, 43(6): 2046–2058.
- [18] 冯林杰, 蒋裕强, 刘菲, 等. 川东地区开江—梁平海槽南段飞仙关组鲕滩储层特征及主控因素[J]. 石油学报, 2021, 42(10): 1287–1298.
- FENG Linjie, JIANG Yuqiang, LIU Fei, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of oolitic shoal reservoir in Feixianguan Formation in the southern part of Kaijiang–Liangping trough, eastern Sichuan Basin [J]. Acta petrolei sinica, 2021, 42(10): 1287–1298.
- [19] 张健, 周刚, 张光荣, 等. 四川盆地中二叠统天然气地质特征与勘探方向[J]. 天然气工业, 2018, 38(1): 10–20.
- ZHANG Jian, ZHOU Gang, ZHANG Guangrong, et al. Geological characteristics and exploration orientation of Mid-Permian natural gas in the Sichuan Basin [J]. Natural gas industry, 2018, 38(1): 10–20.
- [20] 陈建平, 李伟, 倪云燕, 等. 四川盆地二叠系烃源岩及其天然气勘探潜力(一): 烃源岩空间分布特征[J]. 天然气工业, 2018, 38(5): 1–16.
- CHEN Jianping, LI Wei, NI Yunyan, et al. The Permian source rocks in the Sichuan Basin and its natural gas exploration potential (part 1): spatial distribution of source rocks [J]. Natural gas industry, 2018, 38(5): 1–16.
- [21] 郭彤楼. 元坝气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2019, 40: 748–760.
- GUO Tonglou. Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies in Yuanba gas field [J]. Acta petrolei sinica, 2019, 40: 748–760.
- [22] 杨雨, 汪华, 谢继容, 等. 页岩气勘探新领域: 四川盆地开江—梁平海槽二叠系海相页岩气勘探突破及展望[J]. 天然气工业, 2023, <https://51.1179.TE.20230331.1424.002.html>
- YANG Yu, WANG Hua, XIE Jirong, et al. Exploration breakthroughs and prospect of Permian marine shale gas in the Kaijiang–Liangping trough in the Sichuan Basin [J]. Natural gas industry, 2023, <https://51.1179.TE.20230331.1424.002.html>
- [23] 伍顺利, 何登发. 川东北地区长兴组—飞仙关组油气成藏组合特征及有利勘探区带[J]. 地质科学, 2018, 53(1): 242–268.
- WU Shunli, HE Dengfa. Characteristics of oil and gas reservoir formation and favorable exploration zone of Changxing–Feixianguan Formations, in the northeast of Sichuan Basin [J]. Chinese journal of geology, 2018, 53(1): 242–268.
- [24] 何登发, 李德生, 张国伟, 等. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 2011, 46(3): 589–606.
- HE Dengfa, LI Desheng, ZHANG Guowei, et al. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China [J]. Chinese journal of geology, 2011, 46(3): 589–606.
- [25] 李洪奎, 李忠权, 龙伟, 等. 四川盆地纵向结构及原型盆地叠合特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2019, 46(3): 257–267.
- LI Hongkui, LI Zhongquan, LONG Wei, et al. Vertical configuration of Sichuan Basin and its superimposed characteristics of the prototype basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology (science & technology edition), 2019, 46(3): 257–267.
- [26] 杨威, 谢武仁, 魏国齐, 等. 四川盆地寒武纪—奥陶纪层序岩相古地理、有利储层展布与勘探区带[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊2): 21–34.
- YANG Wei, XIE Wuren, WEI Guoqi, et al. Sequence lithofacies paleogeography, favorable reservoir distribution and exploration zones of the Cambrian and Ordovician in Sichuan Basin, China [J]. Acta petrolei sinica, 2012, 33(S2): 21–34.
- [27] 焦方正, 杨雨, 冉崎, 等. 四川盆地中部地区走滑断层的分布与天然气勘探[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 59–68.
- JIAO Fangzheng, YANG Yu, RAN Qi, et al. Distribution and gas exploration of the strike–slip faults in the central Sichuan Basin [J]. Natural gas industry, 2021, 41(8): 59–68.
- [28] 马兵山, 梁瀚, 邬光辉, 等. 四川盆地中部地区多期次走滑断层的形成及演化[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 333–345.
- MA Bingshan, LIANG Han, WU Guanghui, et al. Formation and evolution of the strike–slip faults in the central Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum exploration and development, 2023, 50(2): 333–345.

- [29] TANG Qingsong, TANG Shuhang, LUO Bing, et al. Seismic description of deep strike-slip fault damage zone by steerable pyramid method in the Sichuan Basin, China [J]. *Energies*, 2022, 15(21): 8131. <https://doi.org/10.3390/en15218131>.
- [30] 李宗杰, 杨子川, 李海英, 等. 顺北沙漠区超深断溶体油气藏三维地震勘探关键技术[J]. *石油物探*, 2020, 59(2): 283–294. LI Zongjie, YANG Zichuan, LI Haiying, et al. Three-dimensional seismic exploration method for ultra-deep fault-related dissolution reservoirs in the Shunbei desert area [J]. *Geophysical prospecting for petroleum*, 2020, 59(2): 283–294.
- [31] 杨海军, 邬光辉, 韩剑发, 等. 塔里木盆地走滑断裂构造解析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2022. YANG Haijun, WU Guanghui, HAN Jianfa, et al. The strike-slip fault analysis in the Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.
- [32] 马德波, 汪泽成, 段书府, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区走滑断层构造特征与天然气成藏意义[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 851–861. MA Debo, WANG Zecheng, DUAN Shufu, et al. Strike-slip faults and their significance for hydrocarbon accumulation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum exploration and development*, 2018, 45(5): 851–861.

编辑:董庸

Characteristics of the strike-slip faults and their effects on the gas accumulation in the southeastern Kaijiang–Liangping trough, Sichuan Basin

WU Yonghong, LIU Jiawei, FENG Liang, PANG Yanchao, TANG Qingsong, LIU Xiaoxu, WU Guanghui

Abstract: Large quantity of the Permian–Triassic reef–shoal gas reservoirs have been discovered in Kaijiang–Liangping trough, which is an important area for increasing reserve and production in the Sichuan Basin. However, there are many dense reservoirs in deep strata more than 4 500 m in this area, so it is important to find fault-related "sweet spot" reservoirs for efficient gas reservoir exploration and development. Based on the 3D seismic reprocessing and interpretation of strike-slip faults, the structural characteristics of strike-slip faults are studied, and the reservoir-controlling factors and favorable exploitation directions related to the strike-slip faults are analyzed combining with drilling data. The results show that a series of NW-trending strike-slip faults are developed in Kaijiang–Liangping trough. The strike-slip faults are mainly of vertical and flower-like faults in the section, and oblique and lateral faults in the plane. There are multiple types of structures such as linear structure, en echelon structure, flower structure, horse-tail structure, which are characterized by vertical stratification and planar segmentation. The strike-slip fault has small displacement and low maturity, and has experienced the late Ediacaran–Early Cambrian, pre-Permian and Permian–Triassic activities, and has the characteristics of linkage growth mechanism and inherited evolution. It is shown that fractures are developed in strike-slip fault zone, and they subsequent increase carbonate rock's permeability by more than one order of magnitude, and fracture-related dissolution porosity by more than one time, which play an important constructive role in carbonate reservoir. At the same time, the strike-slip faults not only form the dominant lateral migration channels connecting to the Permian source rocks in the trough, but also may vertically connect the deep Cambrian and Ordovician–Silurian source rocks to form multiple gas-bearing layers with the faults playing role of transportation and accumulation. The study suggests that there is great potential for natural gas exploration and development of the strike-slip fault-controlled gas reservoirs in the trough–platform margin and intra platform deep carbonate reservoirs in the Kaijiang–Liangping trough, which are favorable new domain that are worthy of further exploration and development in the Sichuan Basin.

Key words: strike-slip fault; reservoir forming; hydrocarbon accumulation; platform margin; Kaijiang–Liangping trough; Sichuan Basin

WU Yonghong, First author: Engineer, engaged in geological research of oil and gas exploration and development. Add: No. 287, Daqing Village, Dashiba, Yubei District, Chongqing 400707, China

WU Guanghui, Corresponding author: PhD, Professor, mainly engaged in structural geology and petroleum geology. Add: No. 8 Xindu Avenue, Xindu District, Chengdu, Sichuan 610500, China