

文章编号:1009-9603(2021)04-0012-11

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.04.002

东海丽水凹陷构造转移带特征及其油气地质意义

刘欢¹,许长海^{1,2},申雯龙³,邓玉玲¹

(1.同济大学海洋与地球科学学院,上海200092;2.同济大学海洋地质国家重点实验室,上海200092;3.中海石油(中国)有限公司上海分公司,上海200335)

摘要:在伸展断陷盆地中,不同断层之间通过构造转移带进行位移的传递,以此实现区域伸展应力的守恒。东海陆架盆地丽水凹陷构造转移带十分发育,对丽水凹陷的结构具有至关重要的影响。基于构造转移带研究现状系统调研结果,结合丽水凹陷区域构造解释成果,采用构造分析、断裂解析、断层生长过程恢复、断层位移-走向曲线等方法,对丽水凹陷构造转移带的发育位置、类型及特征进行了详细剖析,识别出中转斜坡、转移断层、调节带3种主要的构造转移带类型,认为构造转移带是造成丽水凹陷灵峰主断裂走向急剧变化以及盆地沉积中心发生跃迁的主要原因,并将丽水凹陷的西次凹划分为南、北2个构造带。进而探讨构造转移带对沉积物输入盆地的影响及其对储层的控制作用,认为丽水凹陷主要边界断层之间发育的中转斜坡是有利的油气成藏区带。

关键词:构造转移带;中转斜坡;转移断层;调节带;丽水凹陷

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Characteristics of transfer zones in Lishui Sag, East China Sea and its significance for petroleum geology

LIU Huan¹, XU Changhai^{1,2}, SHEN Wenlong³, DENG Yuling¹

(1.School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai City, 200092, China; 2.State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai City, 200092, China; 3.China Limited-Shanghai, CNOOC, Shanghai City, 200335, China)

Abstract: In the extensional faulted basin, the displacement transfer between faults is enabled through the transfer zones to realize the conservation of regional extensional stress. The transfer zones of Lishui Sag in the East China Sea shelf basin are well developed, exerting a vital influence on the sag structure. Based on the systematic investigation into research status of transfer zones and the interpretation of regional structures in Lishui Sag, the locations, types and characteristics of the transfer zones in Lishui Sag were analyzed in detail through structural analysis, fault analysis, fault growth process recovery, fault displacement-strike curve and other methods. As a result, three main types of transfer zones were identified: relay ramps, transfer faults, and accommodation zones. It is believed that the transfer zones are the main reason for the sharp change in the strike of the main Lingfeng Fault of Lishui Sag and the transition of the sedimentary center in the basin, and the western sub-sag of Lishui Sag is divided into the north and south structural belts. Then the influence of the transfer zones on the process of sediment input into the basin and its control on the reservoir are studied. It is considered that the relay ramps between major boundary faults in Lishui Sag constitute a favorable accumulation zones.

Key words: transfer zone; relay ramp; transfer fault; accommodation zone; Lishui Sag

构造转移带 (transfer zone) 是断层位移从一条断层转移或传递到另一条断层的地带, 以此来实现区域应变的守恒。如果地质学家没有引入构造转

移带的概念, 我们对大型伸展构造域的认识 (例如裂谷系统) 将永远达不到现在的水平。认识到裂谷系统的不同部分 (有时具有完全不同的结构样式)

收稿日期:2021-03-20。

作者简介:刘欢(1996—),男,江西吉安人,在读硕士研究生,从事含油气盆地分析及区域构造地质学研究。E-mail:lhwym@tongji.edu.cn。

通信作者:许长海(1971—),男,内蒙古乌兰察布人,教授,博士。E-mail:xchxch@tongji.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目“东海陆架到南海北部晚中生代东亚汇聚边缘演变的岩浆弧记录”(41876045)。

相互作用,形成一个连贯的动力系统,是向前迈出的一大步。尽管构造转移带的概念是从逆冲区域的相互连接的断裂系统中得来的^[1],但自20世纪80年代初以来,它更多地是被应用于伸展区域的研究。MORLEY等提出了一个被广泛接受的定义:构造转移带是保存区域应变变形特征的协调系统^[2]。由于区域伸展应变一般不集中在一条大断层上,而是分布于不同的小断层,因此构造转移带的出现是这些伸展区域的一个非常普遍的现象。此外,构造转移带通常对应于裂谷边界断层几何形状显著变化(如断层走向的急剧变化或倾向截然相反)的区域。因此,如果想要理解裂谷或者伸展盆地的复杂特征,则不能忽略构造转移带。

构造转移带存在很多不同的术语,国外与之相关的有“relay zone”,“relay ramp”,“accommodation zone”,“graben shift”等^[3-15],这些术语通常有不同的含义,但都指示“transfer zone”的一种类型。中国学者常称之为构造变换带^[16-21]、构造转换带^[22-26]、断层调节带^[26-29]等,在本文中笔者将其称为构造转移带,因为“transfer zone”的本质意义在于描述伸展区域中为达到区域伸展应力平衡而出现的断层位移的转移或传递,而在使用“变换”或“转换”一词时,显然“transform”更为合适,最为明显的例子便是转换断层(transform fault)。

丽水凹陷是在晚中生代残留盆地基础上发育起来的新生代断陷盆地,与当今许多著名的裂谷盆地,如东非苏伊士裂谷系、北海维京地堑、奥斯陆裂

谷、贝加尔湖等^[30-35]类似,在其形成、发育与演化的过程中,都发育了特征明显的构造转移带,这些构造转移带在很大程度上决定了裂谷盆地的结构特征,控制了裂谷盆地的发育,对其沉积物输入的过程、储层发育及油气成藏都有着至关重要的影响^[36-39]。然而目前尚未有关于丽水凹陷构造转移带的研究报道,笔者首次对丽水凹陷构造转移带的发育位置和类型进行了详细的分析,并探讨了构造转移带对于丽水凹陷的油气地质意义,为研究区提供新的油气勘探方向。

1 区域地质概况

丽水凹陷位于东海陆架盆地的西南侧,北侧与椒江凹陷相邻,东侧以雁荡凸起与福州凹陷相隔,西部与浙闽隆起区相接。总体呈NE—SW向展布,可以划分为西次凹、灵峰凸起、东次凹和南次凹4个构造单元,总面积约为10 850 km²(图1)。

研究区沉积基底为中生代喷出岩、侵入岩及中元古代变质岩,之上为碎屑沉积为主的新生界,最大沉积厚度约为10 000 m。自下而上依次为上白垩统石门潭组、下古新统月桂峰组(E_{1y})、上古新统灵峰组(E_{1l})和明月峰组(E_{1m})、下始新统瓯江组(E_{2o})、中始新统温州组(E_{2w})、中新统、上新统组成,缺失上始新统及渐新统。

丽水凹陷从中生代末至第四纪经历了4个构造演化阶段:①断陷阶段(晚白垩世至古新世),在残

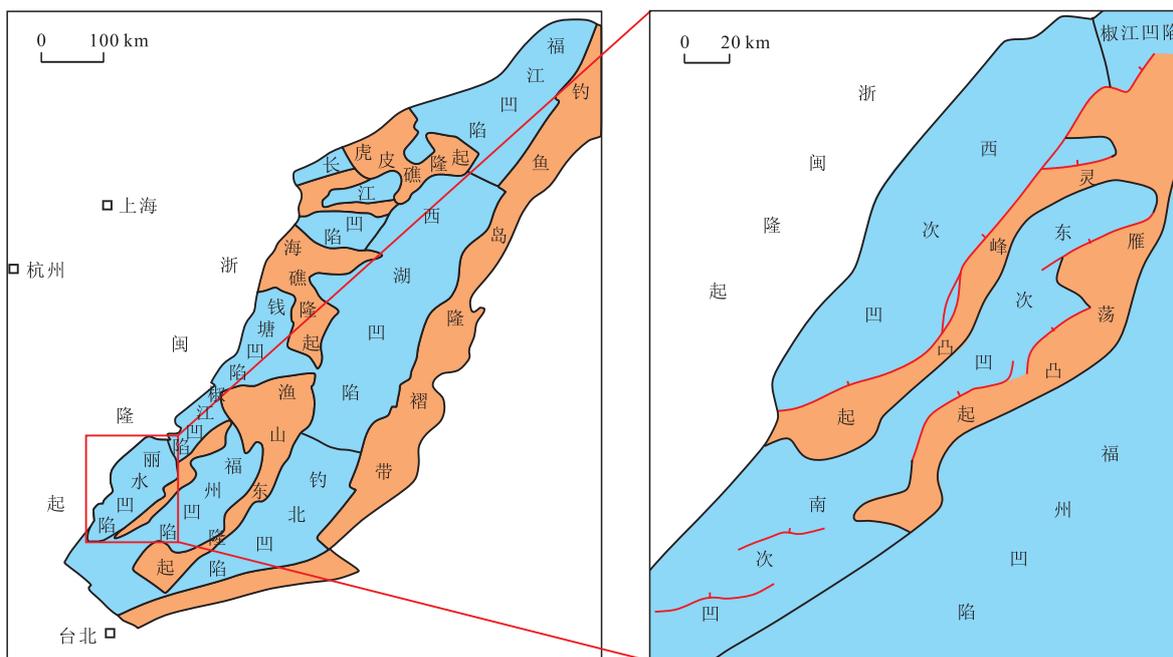
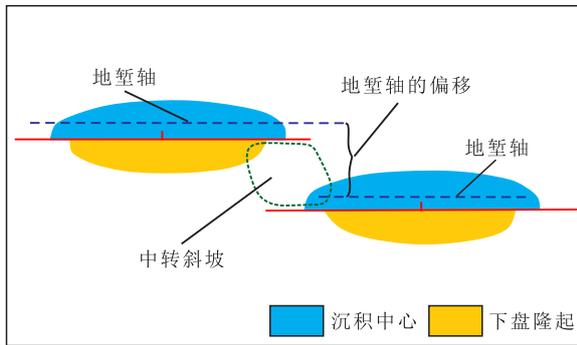


图1 丽水凹陷构造位置及构造纲要
Fig.1 Structural location and map of Lishui Sag

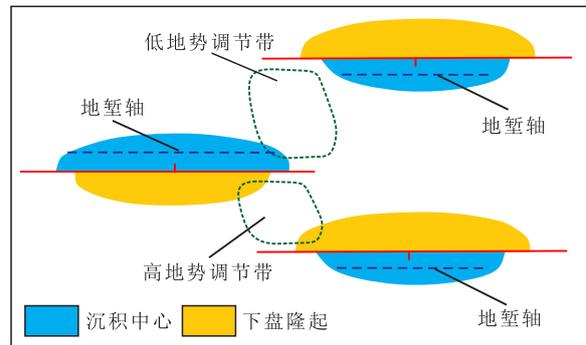
留中生代盆地基底上形成了NE—SW向地堑和半地堑沉积中心,显示NW—SE向的伸展应力与西太平洋板块俯冲欧亚板块有关。晚白垩世—古新世中期经历了一个快速沉积期,发生了强烈的断陷活动。古新世末期断陷作用开始减弱,灵峰凸起逐渐沉没于水下,次级盆地开始连接,沉积中心向东迁移。②拗陷阶段(始新世早期至始新世晚期),古新世末期瓯江运动结束了断陷阶段,丽水凹陷发生第1次构造反转。伸展运动和沉积速率显著减慢,伸展断层不再控制沉降中心^[40]。③抬升阶段(始新世晚期至中新世晚期),研究区发生了区域侵蚀事件。以花港运动为代表的第2次构造反转对区域抬升和剥蚀起了重要作用,致使丽水凹陷缺失上始新统和整个渐新统。④区域沉降阶段(晚中新世至第四纪),丽水凹陷进入平静的沉降期,沉积中心继续向东迁移^[41]。

2 构造转移带形成及类型

裂谷边界通常受较大的、延伸较远的边界正断



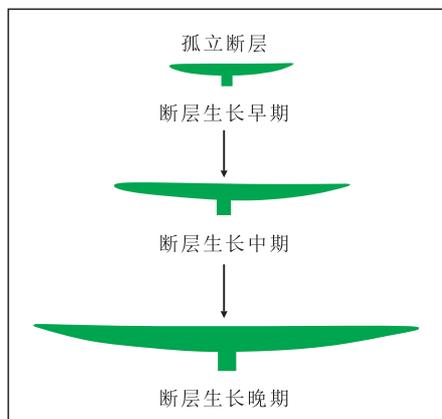
a—断层倾向相同



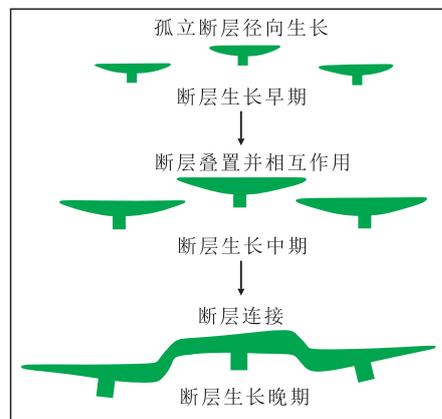
b—断层倾向相反

图2 裂谷边界断层走向的变化造成地堑轴偏移及沉积中心迁移

Fig.2 Shift of graben axis and transition of sedimentary center caused by change in fault strike at rift boundary



a—径向传播模式



b—分段式断层增长模式

图3 断层生长模式(根据文献[42]修改)

Fig.3 Fault growth modes(Modified by Reference[42])

层控制,但这些边界正断层的走向往往并不是始终如一的,而是在某些地区发生了急剧的变化,并造成裂谷发生轴向偏移及地堑沉积中心的迁移^[37](图2)。这是因为在裂谷发育初期,断裂系统是高度分段的,不同断层之间通过构造转移带进行连接,个别裂谷盆地是孤立的^[30-33]。在裂谷发育的早期阶段,随着伸展程度的增加,裂谷断层在断距增大的同时又沿走向传播,直到个别断层段相连接起来。当断层连接时,伸展作用集中在迅速积累大量个体位移的少数断层上,这通常是裂谷发育的高潮阶段。该阶段盆地发生了沿走向的连接,之前孤立的裂谷盆地也得以连接形成统一的裂谷盆地。

2.1 断层生长模式

断层的生长发育存在径向传播和分段式断层增长2种模式(图3)^[42]。在径向传播过程中,随着时间的推移,单个断层延长并积累了更多的位移,其断层位移随走向的变化曲线在形状上不会发生变化。当断层分段式增长时,随着断层的进一步发育,单个断层逐渐相互连接,导致断层长度突然增加,位移-走向曲线发生不规则的变化。在断层生

长发育的后期,其位移-走向曲线逐渐恢复,因为主要位移累积,而传播不会进一步增加(图4)。断层出现分段式增长的很大一部分原因在于其周围岩性的不均一性,当遇到韧性较高的岩体时,断层尖端的不均匀传播会导致断层的分段^[43]。

2.2 构造转移带分类

目前已有许多对于构造转移带的分类方案,但各方案的标准不同,因此很难有统一的观点。MORLEY 根据东非裂谷系统的观测结果,基于断层之间的几何轮廓,引入构造转移带的系统分类方案,认为主要存在同向型(断层倾向相同)和共轭型(断层倾向相反)2种类型,根据主要断层的重叠程度可以进一步划分为接近型、重叠型和并列型等9种类型^[2]。漆家福在前人研究的基础上认为裂陷盆地主

干正断层之间的几何关系可以分为同向倾斜、背向倾斜和相向倾斜3种组合方式,正断层之间的构造变换方式可以分为缓冲式、接力式、消长式、传递式和消减式等5种形式,构成了15种类型的构造转移带^[16]。不同方式的断裂组合所形成的不同构造转移带类型会随着主干正断层位移的渐进增大发生相应的转变。

尽管存在众多的分类方案,但根据断层的发育过程,总体可以分为软连接(soft-linkage)和硬连接(hard-linkage)2种类型^[44-49]。软连接的表现形式为中转斜坡(relay ramp),发育在2条重叠且倾向相同的正断层之间(图5a),此时2条断层之间还没有连接起来,对应于断层发育的早期阶段;而硬连接的表现形式为转移断层(transfer fault),将之前重叠的

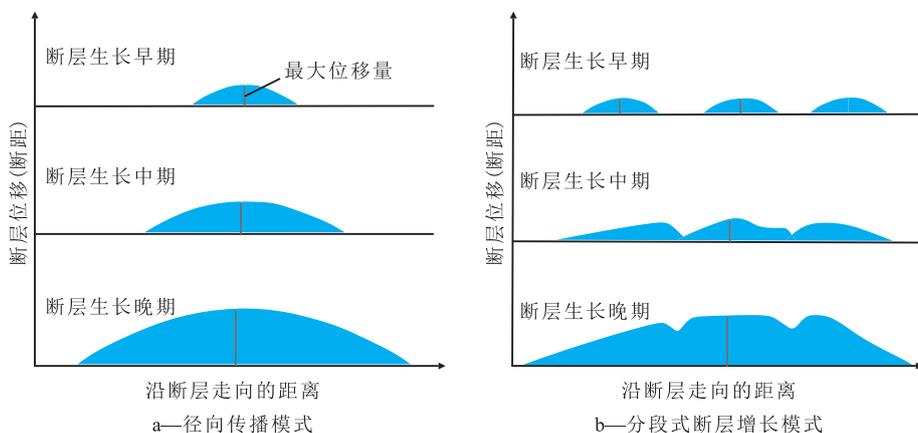


图4 不同断层生长模式下断层位移-走向曲线(根据文献[42]修改)

Fig.4 Curves of fault displacement-strike in different fault growth modes (Modified by Reference[42])

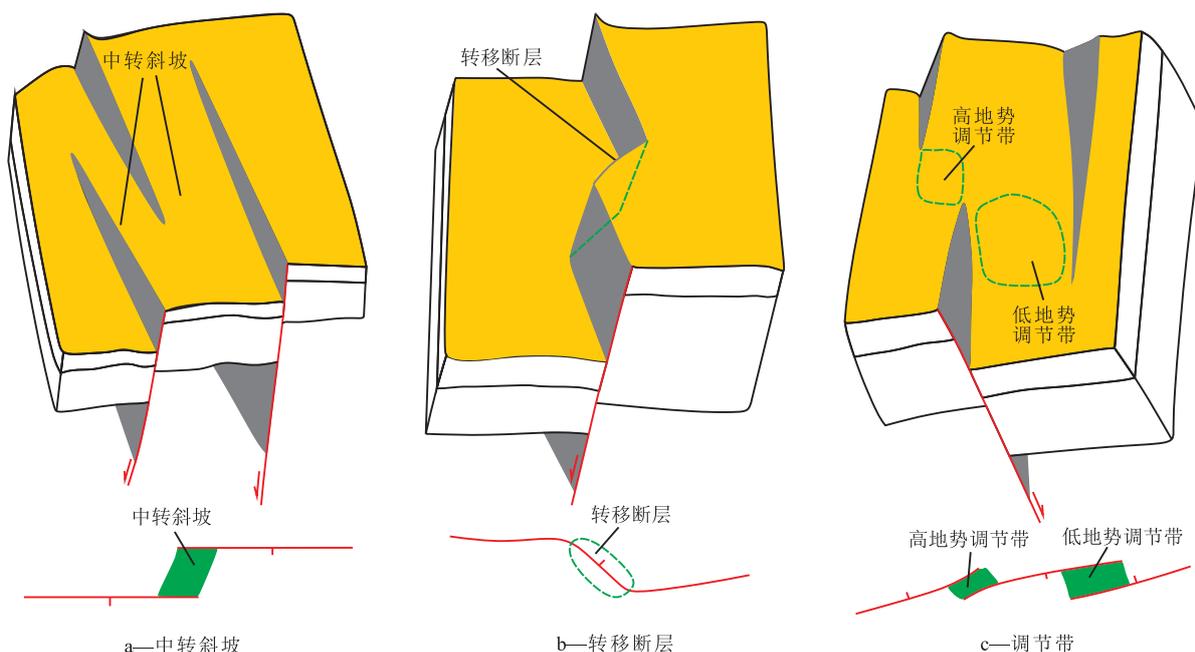


图5 构造转移带的分类

Fig.5 Classification of transfer zones

2条正断层连接起来(图5b),对应断层发育的晚期阶段。此外,还存在一种特殊的构造转移带类型,称之为调节带(accommodation zone),指的是2条倾向相反的正断层之间重叠的区域(图5c)。当一个调节带内的重叠断层倾向相向时,就会形成一个低起伏的调节带,而当断层倾向相背时,就会形成一个高起伏的调节带^[31]。调节带通常是不同裂谷盆地之间的构造或是所谓的跨流域转移带^[32],而中转斜坡则是裂谷同一侧不同断层之间的过渡带或盆地内转移带。尽管“调节带”常用于指构造转移带,但严格说来,调节带的重叠断层不必同时活动,而使用“转移带”则表明断层同时活动^[36]。在这里考虑到调节带也是断层生长过程中的产物,因此也将其划分至构造转移带当中。

总的来说,区域伸展应变不集中于单一的大位移断层,而是分布在不同的分段断层。构造转移带对应于这些断层之间的区域,复杂的变形特征将断层位移从一条断层转移或传递到另一条断层。根据断层生长发育的过程,可以划分出3种类型的构造转移带:软连接阶段的中转斜坡、硬连接阶段的转移断层以及调节带。对于中转斜坡,通常会发育很多微小断层,为之后的中转斜坡的破裂做准备;在硬连接阶段,之前存在的中转斜坡被转移断层破坏,从而实现了分段式断层的连接(图6)。

3 构造转移带特征

丽水凹陷最明显的结构特征是灵峰凸起将其分为东、西2个次凹(图1),然而不管是东次凹还是西次凹,在凹陷的内部都表现出结构的差异或构造的分带性,在西次凹中部可以明显地划分为南、北2个构造带(图7),其断裂特征呈现出差异性;东次凹

的沉积中心呈跃迁式发展,与西次凹相同,其地堑轴都出现了偏移;最明显的还是灵峰主断裂以及灵峰凸起的走向,在丽水凹陷的中部呈现急剧变化(图1,图7),这些现象都是构造转移带作用的结果。为了综合分析丽水凹陷的构造转移带,从断裂平面和剖面特征、断层位移-走向曲线、构造转移带地形特征共3个方面进行分析。

3.1 断裂平面和剖面特征

丽水凹陷的断裂在走向上总体呈NE—SW向,具有雁列式展布特征,部分断层走向发生旋转,与伸展方向平行(呈NW向)。存在F1—F8共8条主要的边界断层,除F7外均为反向断层(倾向为NW向,与剖面方向相反),这些断层的走向多不规则,在某些部位发生较大变化,或在断层末端叠置,在走向发生较大变化或断层末端叠置部位通常为构造转移带分布的位置(图7)。根据断层走向变化将F1断层分为F1-1, F1-2, F1-3, F1-4共4段,将F8断层划分成F8-1和F8-2共2段。其中F1-1与F1-2在末端相互重叠,其重叠部位形成了破裂的中转斜坡, F1-1与F1-3通过走向与之近于垂直的转移断层F1-4进行连接。F4分别与F2及F3在其重叠部位形成了中转斜坡, F5与F6(图7中的L5测线)、F8-1与F8-2相互叠置也形成了中转斜坡。在丽水凹陷西次凹的中部, F8分别与F7及F1倾向相反,通过调节带进行软连接,该调节带也造成了西次凹南、北部构造的分带,南部断裂在西次凹斜坡主体为顺向断层,而北部断裂均为反向断层(图7中的L2—L4测线)。先前存在的剪切带可能是调节带出现的原因^[51],对于丽水凹陷而言,调节带出现的原因可能是F7断层与F1断层之间存在古老的剪切带,但是由于地震资料在基底位置不够清晰,因此无法验证。

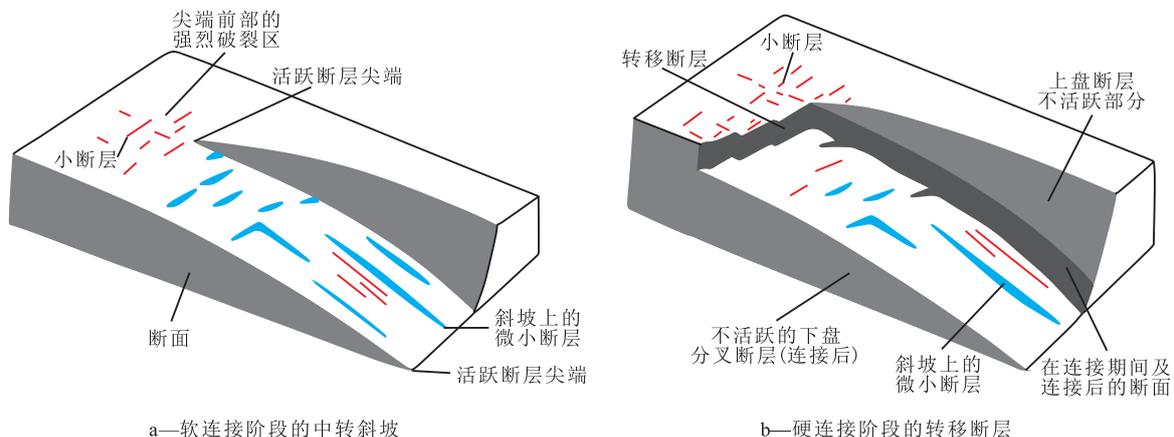


图6 不同断层连接阶段的构造转移带类型(根据文献[50]修改)

Fig.6 Types of transfer zones in different stages of fault connection (Modified by Reference[50])

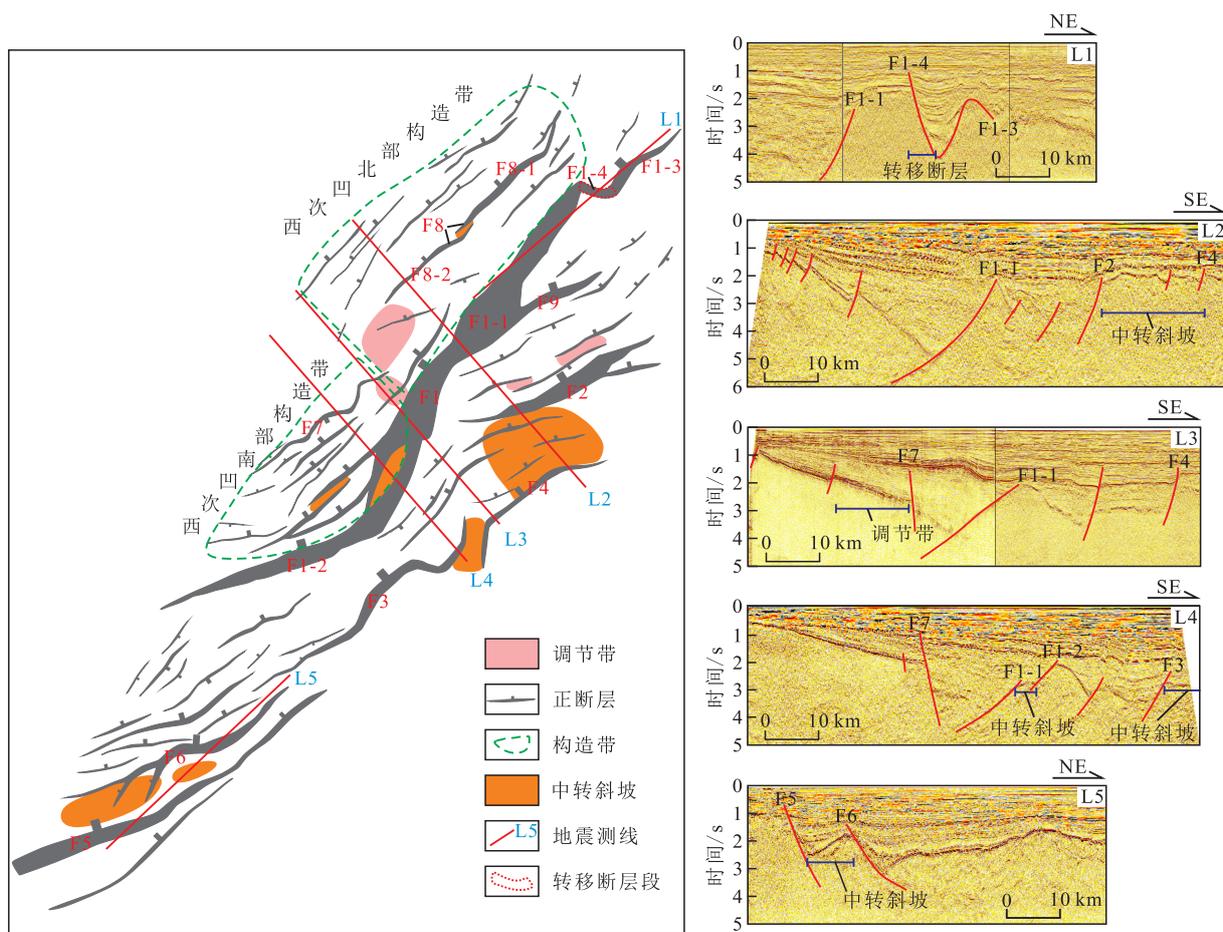


图7 丽水凹陷基底(Tg反射层)断裂系统及构造转移带平面和剖面特征

Fig.7 Base(Tg reflector)fault system in Lishui Sag and plane and profile features of transfer zones

3.2 断层位移-走向曲线特征

断层的生长发育过程可以通过断层位移-走向曲线体现, F1作为丽水凹陷最大的边界断层, 又称为灵峰主断裂, 其发育过程对于凹陷的结构形成具有重大影响。F7又称坡折带断裂, 一般认为与丽水36-1气田密切相关, 其走向变化极不规则, 为此, 选取F1与F7测定断层位移-走向曲线。

如图8所示, F1-1与F1-2在其重叠部位发生走向旋转, 且位移呈明显下降趋势, 两者通过转移断层连接, 在重叠部位形成破裂的中转斜坡。该中转斜坡在地震剖面上也有明显特征(图7中的L4测线)。F1-1与F1-3在其末端位移均有明显下降, 通过转移断层F1-4连接, 且从断层位移-走向曲线可以看出F1-1明显是由几段更小的断层相连形成, 但由于其走向变化较小, 因此不再细分。

相较于F1, F7的走向变化更为明显, 根据其位移随走向的变化规律可以将F7划分为F7-1, F7-2, F7-3, F7-4共4段; 其间通过转移断层T1, T2, T3连接; 在连接段F7-1, F7-2, F7-3, F7-4的位移均明显

减小。

3.3 构造转移带地形特征

利用地震资料可以很好地反映丽水凹陷的地形特征。从图9可以看出, 灵峰凸起及灵峰主断裂沿着研究区西次凹的边界延伸, 并在凹陷中部走向发生巨大的变化, 其走向的突变正是构造转移带作用的结果。在断层相互叠置部位, 形成了特征明显的中转斜坡, 其同斜坡倾向与2条断层重叠部分的走向平行。从沉积中心来看, 在丽水凹陷的构造转移带出现的区域, 地堑轴均发生了明显的偏移, 西次凹的斜坡部位因为高地势调节带A1的出现也发生了错位, 低地势调节带A2(位于F1与F7之间)的出现则使西次凹中部的地形呈现略微的凸起。

4 油气地质意义

在全世界许多裂谷盆地的构造转移带都发现了油气藏且展现出极大的勘探潜力。例如在东非乌干达阿尔伯特地堑的中转斜坡已被证实含有丰

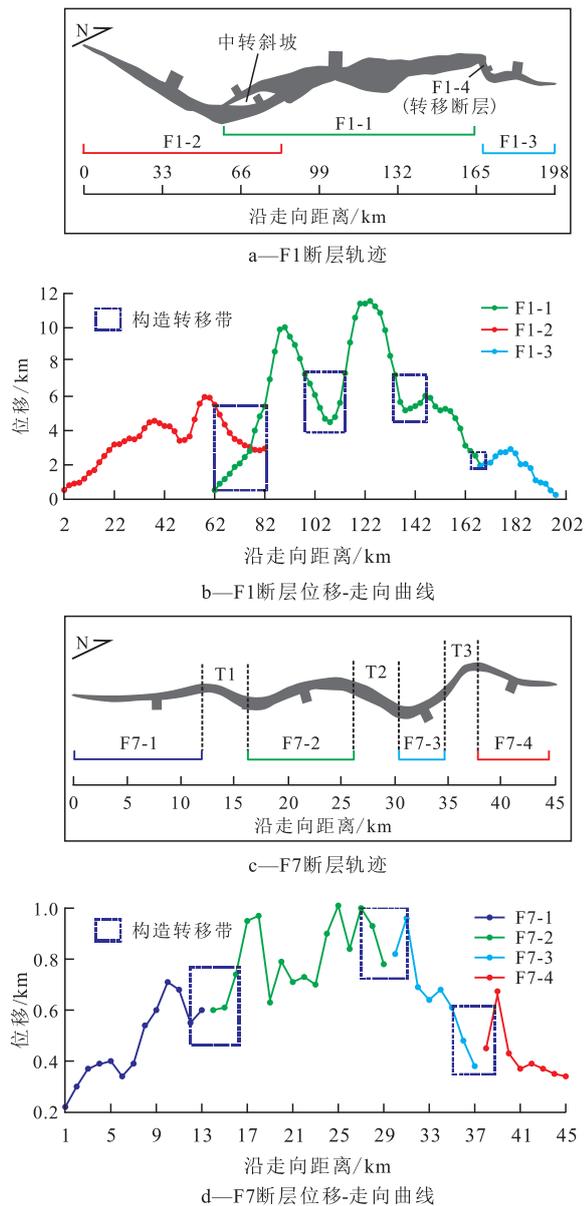


图8 F1与F7断层位移随走向的变化

Fig.8 Displacement changes of Faults F1 and F7 with strikes

富的油气藏^[52]。在北海维京地堑, Kvitbjørn 油田是其迄今为止最大的油气聚集区, 具有约为 $9.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的可采石油和 $2.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的可采天然气, 而该油田正位于地堑发生跃迁的位置, 也就是中转斜坡的位置^[37]。在苏伊士湾, 硅质碎屑砂岩储层以及油气田聚集主要出现在中部和南部半地堑, 而不是北部半地堑, 同样被解释为中转斜坡的控制作用^[53]。因此, 中转斜坡对于油气藏聚集的作用不容忽视。中转斜坡对断陷盆地油气成藏的影响主要存在控制沉积物运输以及油气运移通道2个方面。

4.1 控制沉积物输入

中转斜坡对同构造期和构造后期沉积物的沉积、水系的流向、泥沙进入点的位置以及构造高处沙源区的侵蚀强度等都具有根本性的控制作

用^[53-61]。边界断裂系统中发育的中转斜坡可以为粗粒沉积流进入盆地提供入口, 在中转斜坡发育辫状河三角洲^[54], 而在边界断层底部则发育扇三角洲, 沉积物或潜在储层砂体可能在边界断层附近以及中转斜坡的底部堆积(图10a)。中转斜坡可能因为转移断层或其边界断层的连接而破裂, 盆地边缘的沉积路线受到构造抬升的强烈影响^[53, 55]。邻近中转斜坡的沉积物被掩埋, 并不断远离裂谷边缘, 此时中转斜坡之上发育扇三角洲, 而在中转斜坡底部发育近岸水下扇(图10b)。在中转斜坡遭到完全破坏之后, 断层活动也随之不断减少, 中转斜坡对沉积流的影响, 特别是对细粒泥沙负荷水流的影响随着裂谷作用而减小, 只在边界断层与转移断层结合部位的底部发育扇三角洲(图10c), 最典型的例子是苏伊士裂谷或北海^[39]。

在丽水凹陷边界断层的衍化过程中产生了众多的中转斜坡, 这些中转斜坡或被转移断层所破坏, 或保留下来, 而发育中转斜坡的位置都应引起足够的重视, 因为这代表可能的沉积物输入通道。图11即为丽水凹陷发育的中转斜坡以及在该位置上预测分布的三角洲砂体。

4.2 油气运移通道

除控制沉积物输入之外, 中转斜坡对于油气运移也具有重要影响。首先, 中转斜坡是相连断陷盆地或地堑系统的构造高部位, 当烃源岩在地堑中心较深部位成熟时, 油气会向构造高部位逐步聚集, 因此中转斜坡很可能成为油气运移的通道。JOHANNESSEN等指出在维京地堑的北部, 油气运移是以中转斜坡作为通道, 并通过断层的侧向迁移发生的^[56]。其次, 中转斜坡是2条断层重叠且位移逐渐消失的区域, 因此如果这2条断层是盖层断层, 那么其封闭性能将在中转斜坡消失, 该处油气比其他部位更容易从地堑系统中逃逸出来, 为能够捕获油气的较浅侧翼结构提供油源。最后, 中转斜坡可能会发育局部构造圈闭, 例如美国犹他州峡谷国家公园地堑区和维京地堑^[39]。然而发育中转斜坡并不是有利油气运聚的充分条件, 孙同文等指出只有在转换带演化的早期, 其完整性未被破坏、裂缝发育适中、储层侧向连通性较好时才可能成为油气侧向运移的通道^[62]。

总之, 中转斜坡为局部构造高部位以及潜在油气聚集场所的认识有助于集中勘探这些地区, 识别中转斜坡的存在应是油气运移评价和盆地建模考虑的重要因素。因此对于丽水凹陷, 无论对沉积

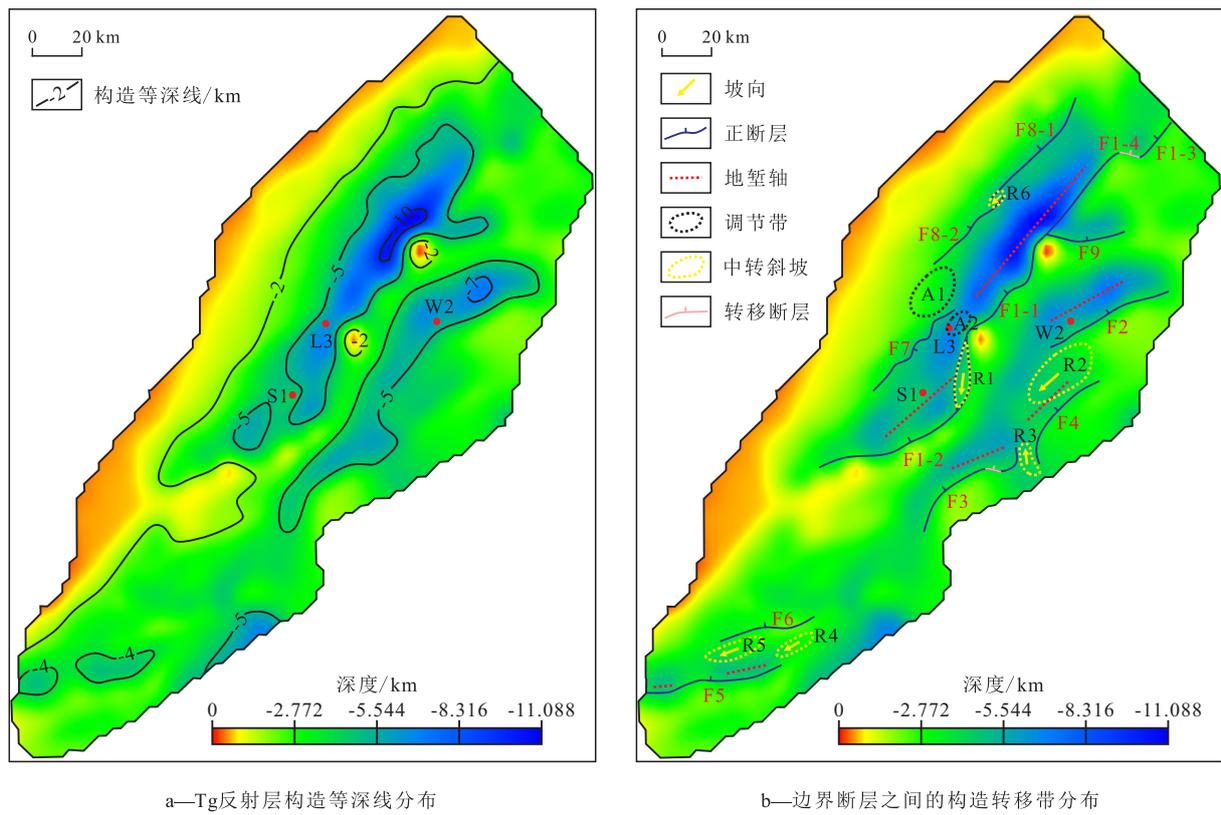


图9 丽水凹陷构造转移带地形特征

Fig.9 Topographical features of transfer zones in Lishui Sag

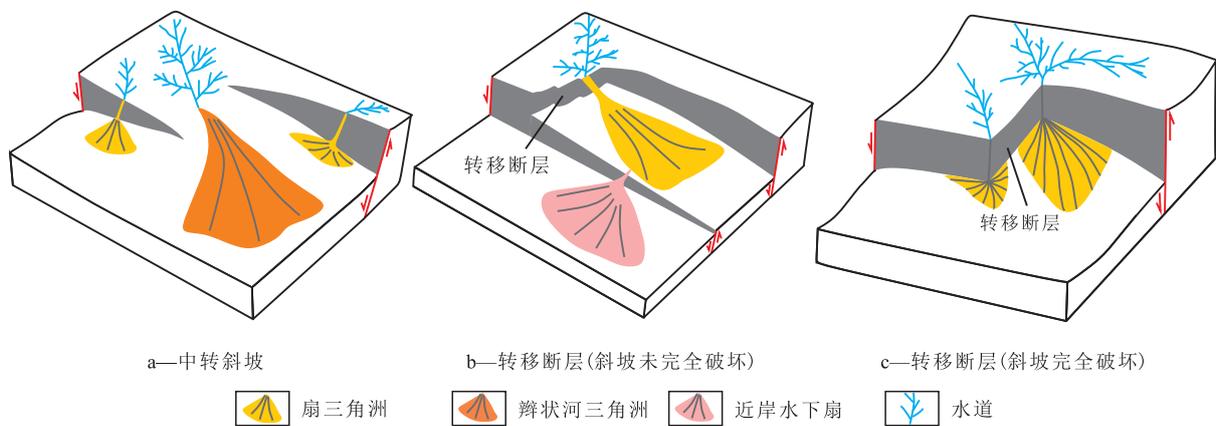


图10 中转斜坡的演化及其对沉积物输入的影响

Fig.10 Evolution of a relay ramp and its influence on sediment input

物运输的控制作用,还是作为油气运移的通道,研究区发育的中转斜坡都应引起足够的重视。

5 结论

构造转移带是伸展断陷盆地或裂谷系统中非常普遍的构造现象,其形成与演化受断层生长发育的影响,根据断层生长发育的不同阶段可以将其划分为软连接阶段的中转斜坡、硬连接阶段的转移断

层以及调节带。丽水凹陷的构造转移带发育明显,对凹陷结构的形成有着至关重要的影响,是造成研究区西次凹陷、北部构造分带以及丽水凹陷地堑偏移、灵峰主断裂和灵峰凸起走向急剧变化的主要原因。构造转移带的中转斜坡为沉积物输入盆地提供了绝佳的入口,也为油气的运移提供了通道,是油气聚集的有利地带。对于丽水凹陷而言,应该对其内部的构造转移带特别是中转斜坡足够地重视,因为其可能成为新的油气成藏有利区带。

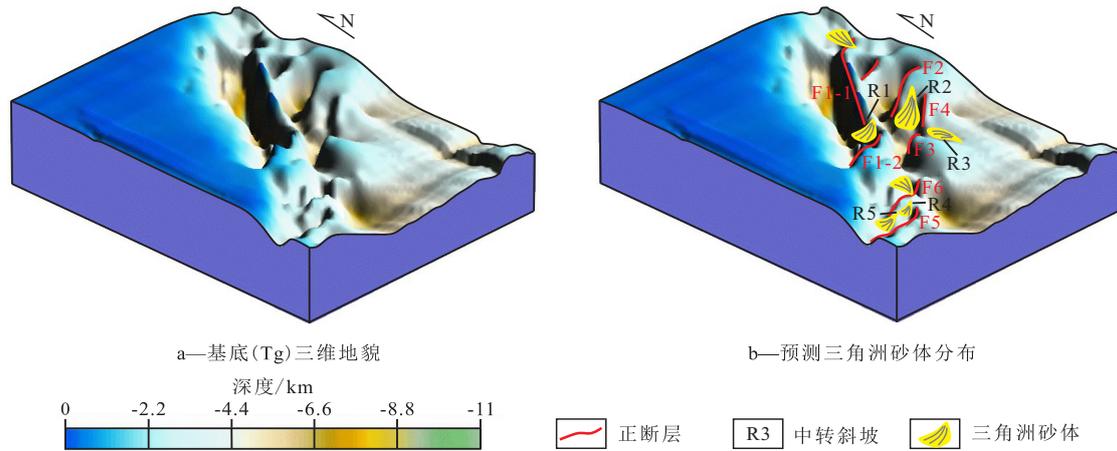


图11 丽水凹陷三角洲砂体分布预测

Fig.11 Distribution of delta sand bodies predicted in Lishui Sag

参考文献

- [1] DAHLSTROM C D A. Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1970, 18(3): 332-406.
- [2] MORLEY C K, NELSON R A, PATTON T L, et al. Transfer zones in the East African Rift System and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts [J]. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 1990, 74(8): 1 234-1 253.
- [3] HUGGINS P, WATTERSON J J, WALSH J J, et al. Relay zone geometry and displacement transfer between normal faults recorded in coal-mine plans [J]. *Journal of Structural Geology*, 1995, 17 (12): 1 741-1 755.
- [4] PEACOCK D C P, SANDERSON D J. Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones [J]. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13(6): 721-733.
- [5] PEACOCK D C P, SANDERSON D J. Geometry and development of relay ramps in normal fault systems [J]. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 1994, 78(2): 147-165.
- [6] TRUDGILL B, CARTWRIGHT J. Relay-ramp forms and normal fault linkages—Canyonlands National Park, Utah [J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1994, 106(9): 1 143-1 157.
- [7] BARTON C M, EVANS D J, BRISTOW C R, et al. Reactivation of relay ramps and structural evolution of the mere fault and wardour monocline, northern Wessex basin [J]. *Geological Magazine*, 1998, 135(3): 383-395.
- [8] FOSSEN H, ROTEVATN A. Fault linkage and relay structures in extensional settings—A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 154: 14-28.
- [9] BOSWORTH W. Geometry of propagating continental rifts [J]. *Nature*, 1985, 316(6029): 625-627.
- [10] COFFIELD D Q. Surface expression and internal structure of an accommodation zone, Gulf of Suez, Egypt [J]. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 1987, 71(5): 540.
- [11] FAULDS J, VARGA R. The role of accommodation zones and transfer zones in the regional segmentation of extended terranes [J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 1998, 323: 1-45.
- [12] KORNSAWAN A, MORLEY C K. The origin and evolution of complex transfer zones (graben shifts) in conjugate fault systems around the Funan Field, Pattani Basin, Gulf of Thailand [J]. *Journal of Structural Geology*, 2002, 24(3): 435-449.
- [13] MORLEY C K. Evolution of large normal faults: Evidence from seismic reflection data [J]. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 2002, 86(6): 961-978.
- [14] CHILDS C, WATTERSON J, WALSH J J. Fault overlap zones within developing normal fault systems [J]. *Journal of the Geological Society of London*, 1995, 152(3): 535-549.
- [15] GIBBS A D. Structural evolution of extensional basin margins [J]. *Journal of the Geological Society*, 1984, 141(4): 609-620.
- [16] 漆家福. 裂陷盆地中的构造变换带及其石油地质意义 [J]. *海相油气地质*, 2007, 12(4): 43-50.
- QI Jiafu. Structural transfer zones and significance for hydrocarbon accumulation in rifting basins [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12(4): 43-50.
- [17] 张彤, 李忠权, 蒙启安, 等. 构造变换带的识别及其在乌尔逊凹陷的应用 [J]. *岩性油气藏*, 2010, 22(4): 52-56, 63.
- ZHANG Tong, LI Zhongquan, MENG Qi'an, et al. Identification of structural transfer zone and its application in Wuerxun Depression [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2010, 22(4): 52-56, 63.
- [18] 余一欣, 周心怀, 魏刚, 等. 渤海湾地区构造变换带及油气意义 [J]. *古地理学报*, 2008, 10(5): 555-560.
- YU Yixin, ZHOU Xinhui, WEI Gang, et al. Structural transfer zones and their hydrocarbon significances in Bohai Bay area [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(5): 555-560.
- [19] 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 等. 渤海辽东湾坳陷临县构造变换带发育特征 [J]. *现代地质*, 2013, 27(5): 999-1 004.
- YU Yixin, ZHOU Xinhui, XU Changgui, et al. Formation of JX transfer zone in the Liaodongwan depression, offshore Bohai Bay Basin [J]. *Geoscience*, 2013, 27(5): 999-1 004.

- [20] 张参,牛成民,官大勇,等.渤东凹陷东南斜坡构造变换带识别及其石油地质意义[J].海洋地质前沿,2017,33(1):36-42.
ZHANG Can, NIU Chengmin, GUAN Dayong, et al. Identification of structural transfer zones on southeast slope of Bodong Sag and its implications for hydrocarbon accumulation[J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(1): 36-42.
- [21] 黄彤飞,张荻荻,李日俊,等.苏丹Muglad盆地Fula凹陷福西陡坡带变换构造特征及控藏作用[J].中国石油勘探,2020,25(4):105-114.
HUANG Tongfei, ZHANG Diqiu, LI Yuejun, et al. Characteristics of transfer structure and hydrocarbon accumulation control of Fula western steep slope belt in the Fula sag, Muglad Basin, Sudan[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(4): 105-114.
- [22] 刘恩涛,王华,李媛,等.北部湾盆地福山凹陷构造转换带对层序及沉积体系的控制[J].中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(3):17-22,29.
LIU Entao, WANG Hua, LI Yuan, et al. Control of transfer zone over sequences and depositional system in Fushan sag, Beibuwan Basin[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2013, 37(3): 17-22, 29.
- [23] 王文龙,汤济广,孙乔琪,等.构造转换带研究进展与发展趋势[J].地质与资源,2017,26(2):195-202.
WANG Wenlong, TANG Jiguang, SUN Qiaoqi, et al. Research progress and development trends of the transfer zone[J]. Geology and Resources, 2017, 26(2): 195-202.
- [24] 宁飞,汤良杰,朱传玲,等.挤压区局部构造转换带类型及石油地质意义[J].现代地质,2009,23(3):394-400.
NING Fei, TANG Liangjie, ZHU Chuanling, et al. Types of structural Transfer zone in compressional area and its significance of petroleum geology[J]. Geoscience, 2009, 23(3): 394-400.
- [25] 李强,田晓平,孙凤涛,等.辽中凹陷南洼构造转换带发育特征及其对油气成藏的控制作用[J].油气地质与采收率,2019,26(5):41-47.
LI Qiang, TIAN Xiaoping, SUN Fengtao, et al. Development characteristics of structural transfer zone and its control on hydrocarbon accumulation in south subsag of Liaozhong Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 41-47.
- [26] 韩文明,胡滨,张世鑫,等.东非裂谷系西支先存构造调节带构造特征及其与油气成藏的关系[J].海洋石油,2018,38(4):1-8.
HAN Wenming, HU Bin, ZHANG Shixin, et al. The research on the structural features of pre-existing tectonic accommodation zones and the relationship with hydrocarbon accumulation in the western branch of EARS[J]. Offshore Oil, 2018, 38(4): 1-8.
- [27] 蔡文杰,韩文明,许志刚,等.东非Lake Albert盆地构造调节带特征及其对油气成藏的控制作用[J].地质科技情报,2015,34(4):119-123.
CAI Wenjie, HAN Wenming, XU Zhigang, et al. Geological character of accommodation zone and its importance in controlling accumulation of oil and gas in Lake Albert Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(4): 119-123.
- [28] 路智勇,杨少春,白青林,等.东辛地区断层调节带的地震识别及特征[J].石油地球物理勘探,2019,54(2):433-446,460, VII.
LU Zhiyong, YANG Shaochun, BAI Qinglin, et al. Seismic identification of fault accommodation zones in Dongxin area[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(2): 433-446, 460, VII.
- [29] 柳万春.东非Albert湖盆北部构造调节带解析及其油气运聚分析[J].海洋石油,2017,37(4):8-11.
LIU Wanchun. Character of northern accommodation zone of Lake Albert Basin and its role in hydrocarbon migration and accumulation[J]. Offshore Oil, 2017, 37(4): 8-11.
- [30] ROSENDAHL R B. Architecture of continental rifts with special reference to East Africa[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1987, 15(1): 445-503.
- [31] MCCLAY K R, DOOLEY T, WHITEHOUSE P, et al. 4-D evolution of rift systems: Insights from scaled physical models[J]. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 2002, 86(6): 935-959.
- [32] GAWTHORPE R L, HURST J M. Transfer zones in extensional basins: their structural style and influence on drainage development and stratigraphy[J]. Journal of the Geological Society of London, 1993, 150(6): 1 137-1 152.
- [33] PEACOCK D C P. Scaling of transfer zones in the British Isles[J]. Journal of Structural Geology, 2003, 25: 1 561-1 567.
- [34] MOUSTAFA A R. Controls on the geometry of transfer zones in the Suez rift and northwest Red Sea: Implications for the structural geometry of rift systems[J]. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 2002, 86(6): 979-1 002.
- [35] BOSWORTH W. Geological evolution of the Red Sea: Historical background, review, and synthesis [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2015: 45-78.
- [36] MORLEY C K. Developments in the structural geology of rifts over the last decade and their impact on hydrocarbon exploration [J]. Geological Society of London Special Publications, 1995, 80: 1-32.
- [37] FOSSEN H, SCHULTZ R A, RUNDHOVDE E, et al. Fault linkage and graben stepovers in the Canyonlands (Utah) and the North Sea Viking Graben, with implications for hydrocarbon migration and accumulation[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(5): 597-613.
- [38] NELSON R A, PATTON T L, MORLEY C K. Rift-segment interaction and its relation to hydrocarbon exploration in continental rift systems[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(8): 1 153-1 169.
- [39] MOUSTAFA A R, KHALIL S M. Control of extensional transfer zones on syntectonic and posttectonic sedimentation: implications for hydrocarbon exploration[J]. Journal of the Geological Society, 2017, 142(2): 318-335.
- [40] 贾成业,夏斌,王核,等.东海陆架盆地丽水凹陷构造演化及油气地质分析[J].天然气地球科学,2006,17(3):397-401.
JIA Chengye, XIA Bin, WANG He, et al. Characteristic of tectonic evolution and petroleum geology in Lishui Sag, East China Sea Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(3): 397-401.
- [41] 蔡周荣,夏斌,孙向阳,等.丽水-椒江凹陷断裂构造特征与成盆机制的关系[J].海洋地质动态,2007,23(10):1-5.
CAI Zhourong, XIA Bin, SUN Xiangyang, et al. The relationship between tectonic feature and formation mechanism of Lishui-Jiaojiang depression[J]. Marine Geological Letters, 2007, 23(10): 1-

- 5.
- [42] BURBANK D W, ANDERSON R S. Tectonic geomorphology [M]. Oxford: Blackwell Science, 2001: 274.
- [43] VERMILYE J M, SCHOLZ C H. Fault propagation and segmentation: insight from the microstructural examination of a small fault [J]. *Journal of Structural Geology*, 1999, 21(11): 1 623-1 636.
- [44] MCCLAY K, KHALIL S. Extensional hard linkages, eastern Gulf of Suez, Egypt [J]. *Geology*, 1998, 26(6): 563-566.
- [45] PIVNIK D A, RAMZY M, STEER B L, et al. Episodic growth of normal faults as recorded by syntectonic sediments, July oil field, Suez rift, Egypt [J]. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 2003, 87(6): 1 015-1 030.
- [46] GAWTHORPE R L, JACKSON C A L, YOUNG M J, et al. Normal fault growth, displacement localisation and the evolution of normal fault populations: the Hammam Faraun fault block, Suez rift, Egypt [J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(6): 883-895.
- [47] PEACOCK D C P, KNIPE R J, SANDERSON D J. Glossary of normal faults [J]. *Journal of Structural Geology*, 2000, 22(3): 291-305.
- [48] ALLKEN V, HUISMANS R S, FOSSEN H, et al. 3D numerical modelling of graben interaction and linkage: a case study of the Canyonlands grabens, Utah [J]. *Basin Research*, 2013, 25(4): 436-449.
- [49] MORIYA S, CHILDS C, MANZOCCHI T, et al. Analysis of the relationships between strain, polarity and population slope for normal fault systems [J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27(6): 1 113-1 127.
- [50] CARTWRIGHT J A, MANSFIELD C, TRUDGILL B. The growth of normal faults by segment linkage [J]. *Geological Society of London Special Publications*, 1996, 99(1): 163-177.
- [51] YOUNES A I, MCCLAY K. Development of accommodation zones in the Gulf of Suez-Red Sea Rift, Egypt [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(6): 1 007-1 010.
- [52] ABEINOMUGISHA D, KASANDE R. Tectonic control on hydrocarbon accumulation in the intracontinental albertine graben of the east African Rift System [J]. *AAPG Memoir*, 2012, 9(100): 14-21.
- [53] ATHMER W, LUTHI S M. The effect of relay ramps on sediment routes and deposition: A review [J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 242(1/4): 1-17.
- [54] 施和生, 舒誉, 杜家元, 等. 珠江口盆地古近系石油地质 [M]. 北京: 地质出版社, 2017: 74-75.
SHI Hesheng, SHU Yu, DU Jiayuan, et al. Petroleum geology of Paleogene in Pearl River Mouth Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017: 74-75.
- [55] ATHMER W, GROENENBERG R M, LUTHI S M. Relay ramps as pathways for turbidity currents: a study combining analogue sandbox experiments and numerical flow simulations [J]. *Sedimentology*, 2010, 57(3): 806-823.
- [56] JOHANNESSEN J, HAY S J, MILNE J K. 3D oil migration modeling of the Jurassic petroleum system of the Statfjord area, Norwegian North Sea [J]. *Petroleum Geoscience*, 2002, 8(1): 37-50.
- [57] LAMBIASE J J, BOSWORTH W. Structural controls on sedimentation in continental rifts [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1995, 80(1): 117-144.
- [58] MOUSTAFA A R. Controls on the development and evolution of transfer zones: The influence of basement structure and sedimentary thickness in the Suez rift and Red Sea [J]. *Journal of Structural Geology*, 1997, 19(6): 755-768.
- [59] 白小鸟, 焦养泉. 伸展盆地的转换斜坡: 控制储层发育与烃类运聚的重要构造单元 [J]. *地质科技情报*, 2011, 30(6): 44-54.
BAI Xiaoniao, JIAO Yangquan. Relay ramp in extensional basins: an important structure of reservoir deposition and hydrocarbon migration or accumulation [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(6): 44-54.
- [60] 董道涛, 邱隆伟, 马永达, 等. 多断湖盆构造控砂与沉积充填过程——以渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷东部始新统为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 653-663.
DONG Daotao, QIU Longwei, MA Yongda, et al. Control of tectonics on sedimentation of sandstone and process of sediment filling in multi-fault lacustrine basins: A case study on the Eocene in eastern Zhanhua Sag, Jiyang Depression in Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(4): 653-663.
- [61] 赵海涛, 郭进京, 刘重庆. 琼东南盆地北部地区对倾叠覆型变换带形成演化及成因分析 [J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(6): 11-19.
ZHAO Haitao, GUO Jinjing, LIU Chongqing. Origin, evolution and genetic analysis of convergent overlapping transfer zone in northern Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(6): 11-19.
- [62] 孙同文, 高喜成, 吕延防, 等. 断裂转换带作为油气侧向、垂向运移通道的研究进展 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(5): 1 011-1 021.
SUN Tongwen, GAO Xicheng, LÜ Yanfang, et al. Research progress in fault transformation zones as lateral or vertical hydrocarbon migration pathways [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(5): 1 011-1 021.

编辑 邹澍滢