

# 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

白小鸟<sup>a</sup>, 焦养泉<sup>b,c,d</sup>

(中国地质大学 a. 研究生院; b. 资源学院; c. 构造与油气资源教育部重点实验室;  
d. 生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:**转换斜坡是指两条倾向相同并在走向上叠覆的正断层之间的强烈旋转地带。此定义自20世纪50年代提出以来,尤其是在20世纪90年代后得到了深入的研究。转换斜坡是伸展盆地中传递带的一种类型,对储层沉积和烃类运聚具有重要意义。基于正断层的生长机制形成的转换斜坡具有显著的位移和演化特征,虽成因相似但规模悬殊。由于转换斜坡部位较小的构造沉降速率和对沉积物的输导作用,其控制下发育的沉积体的层序地层学特征为扇体,主要以进积的准层序组叠置而成;受转换斜坡演化的控制,沉积体的沉积学特征为前期扇体随断层叠覆程度加深而增大,后期随转换斜坡的破坏水系被重新定位从而导致扇体废弃。针对转换斜坡的特征,总结了前人对其研究的思路和方法。方法包括实验模拟研究和地质研究,其中,地质研究包括断层的定量分析、地层厚度和高程分析及层序地层学方法和沉积学分析。最后归纳了转换斜坡及其在油气储层研究中的应用与发展,并认为该领域在国内颇具研究前景。

**关键词:**转换斜坡;位移;演化;层序地层学;沉积学

**中图分类号:**TE121.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-7849(2011)06-0044-11

早在20世纪50年代就有人提出了转换斜坡(relay ramp)的定义:转换斜坡是指两条倾向相同并在走向上叠覆的正断层之间的强烈旋转地带<sup>[1-3]</sup>,其真正的发展应是在20世纪90年代Peacock等<sup>[4]</sup>提出转换斜坡的几何学特征和演化阶段以后。转换斜坡的功能是在两条分段断层之间传递位移<sup>[2-3]</sup>。许多学者给出了其他的术语,如Macdonald<sup>[5]</sup>称其为单斜斜坡(monoclinical ramp),Peacock等<sup>[6]</sup>也给出了一些同义的术语。与此相对,位移沿走向在倾向相反的裂谷边界断层和裂谷内断层间传递的地带被称为调节带<sup>[7-8]</sup>;而Morley等<sup>[9]</sup>和Moustafa<sup>[10-11]</sup>提出的传递带则包含了反向和同向叠覆断层的各种类型,由此可见,转换斜坡应是传递带的类型之一。

转换斜坡在伸展盆地正断层系中非常普遍。据Peacock等<sup>[3]</sup>的总结,许多构造过程受转换斜坡控制,包括滑动和有限位移形式、破裂形式与层序地层以及盆地发展。活动的转换斜坡还能控制其他地质过程,如古地貌、剥蚀作用和水系的排泄、露头形式以及火山活动的位置。

相对而言,转换斜坡之所以备受关注更在于其

对储层沉积和烃类运移具有重要意义<sup>[2-4,9,12]</sup>。首先,转换斜坡型构造调节带对物源体系的形成与发育具有明显的控制作用。断层端部活动较弱,下盘易形成构造低点,从而利于水系的汇聚;断层叠覆部位形成斜坡,成为水系入盆的通道<sup>[9,13-17]</sup>。其次是转换斜坡的时空演化直接影响了沉积物的平面展布和垂向叠置,从而对砂体发育具有明显的控制作用。此外,转换斜坡还可能成为油气运移的优势方向和有利圈闭的发育区。这是因为转换斜坡位于断层活动低弱区,处于下降盘相对凸起部位;同时,转换斜坡上发育复杂的小断层、裂缝(裂隙),因而形成于生油中心的油气易于向转换斜坡运移,并在斜坡内的背斜区形成有利圈闭或者沿小断层或裂缝(裂隙)进一步向盆地外运移<sup>[18]</sup>。

## 1 转换斜坡特征

### 1.1 转换斜坡的形成和演化

断层的连接是一种重要的断层生长机制<sup>[19-24]</sup>,这是因为正断层生长具有分段性。断裂活动在发育

收稿日期:2011-02-12

编辑:杨勇

基金项目:中国石油天然气股份有限公司大港油田公司大型横向协作项目“歧口凹陷富油气凹陷结构构造、层序地层及沉积体系研究”(DGYT-2007-JS-5315)

作者简介:白小鸟(1986—),女,现正攻读矿产普查与勘探专业硕士学位,主要从事储层沉积学与层序地层学方向。E-mail:bird82520@163.com

通信作者:焦养泉(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事储层沉积学与层序地层学研究。E-mail:895818905@qq.com

初期,变形分散于同向小断层系中,此时断层位移很小。之后,部分相邻小断层逐渐由断层端点相向生长、相互影响或连接,最终形成统一的大断裂。此时,变形开始集中于连接而成的少数大断裂中,其他小断层则基本停止活动<sup>[17,25]</sup>。Anders等<sup>[26]</sup>指出,拉张盆地的盆内高地将盆地分为一系列次级洼陷,这些盆内高地与同向断层叠覆区段即转换斜坡发育部位相对应。因而,转换斜坡形成于断层演化过程中断层分段与断层连接的过渡阶段。

前人从大量的断层中总结出单断层位移与长度之间存在定量关系: $D=cL^n$ ,其中 $D$ 是最大断层位移, $L$ 是断层长度,幂数 $n$ 一般在0.5~2之间, $c$ 是与岩石性质相关的常数。当 $n=1$ 时, $c=D/L$ ,即 $D$ 、 $L$ 之间的关系为线性关系,这就是Cowie等<sup>[27-28]</sup>提出的断层生长模式,该模式可以对 $D$ 、 $L$ 进行对数的线性拟合。拟合后,一些不符合 $D-L$ 关系的散点能反映断层曾发生过相互作用或连接。这些散点所分布的位置即为转换斜坡的发育部位。Anders等<sup>[26]</sup>也认为,盆内高地是由断层位移持续沿走向减小造成的,且这种减小不符合以大的断层群分析得出的断层位移—长度关系。分段断层通过相邻断层的相互影响抑制了彼此的伸展,此时, $D/L$ 值较高;断层的连接导致断层长度的骤增,因而导致 $D/L$ 骤减。而现今我们观测到的是连接后断层的高 $D/L$ 比值,这说明后期必然发生了快速的位移增加<sup>[26,29]</sup>,这个过程使 $D-L$ 关系呈阶梯状(图1-A)。但无论是正断层还是走滑断层,各分段断层的平均 $D/L$ 值一般大于整条断裂带的 $D/L$ 值<sup>[20]</sup>。

孤立单断层的位移—距离剖面通常为对称的钟形,中间位移最大,向两端逐渐减小至零。相邻分段断层的位移—距离剖面通常具有不对称性并朝着转换斜坡方向具有较大斜率,这也反映了分段断层在发生连接之前相互间发生了作用,在连接点上,转换斜坡通常使得总断层位移(total displacement)达到最小<sup>[4]</sup>。然而,通过累加两条叠覆断层的位移,最终的位移剖面中最大的位移却位于叠覆部位<sup>[20]</sup>。

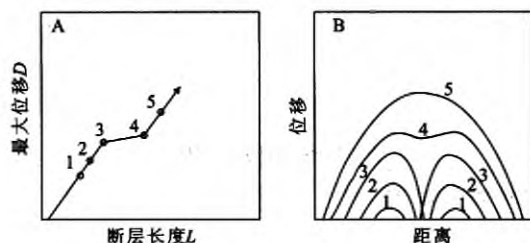


图1 断层连接模式图<sup>[20-21,23,30]</sup>

Fig. 1 Fault linkage model

A. 断层最大位移—长度剖面;B. 位移—距离剖面,图中数字代表各个演化阶段。

Dawers等<sup>[29]</sup>认为,在一个包含有3条或更多的断层系统的生长过程中,中部的分段断层会优先生成;在连接之前的中部断层段未必具有最大的位移速率,但在连接之后会加速生长,最终增长为最大位移。随着断层系统的继续演化,整个系统的位移—距离剖面最终接近于孤立断层的钟形形态(图1-B)。

Peacock等<sup>[3,20]</sup>根据分段断层相互作用和连接的程度将转换斜坡的演化分为4个阶段:第一阶段,分段断层各自独立地相向伸展(图2-A);第二阶段,两条相互作用的断层间地层旋转形成转换斜坡(图2-B);第三阶段,斜坡上连接两条断层的裂缝开始发育并破坏斜坡(图2-C);第四阶段,转换斜坡遭到彻底破坏,两条断层连接成为一条具拐点的断层(图2-D)。这种演化可以随时间进行,也可以在同期断裂系的其他部位见到。例如,当在两条断层间发育分支断层或者沿走向的拐点时,就代表转换斜坡的演化进入第四阶段。

转换斜坡内部通常发育小断层,Griffiths<sup>[31]</sup>将东非裂谷中这种在转换斜坡内发育的复杂断层系称为“箱状断层”(box faults)。这种小断层在转换斜坡演化过程中对主断层的连接和对斜坡的破坏具有重要作用<sup>[32]</sup>。当转换斜坡上发育裂缝或者小破坏断层(breaching fault)时,说明边界断层已经在深部

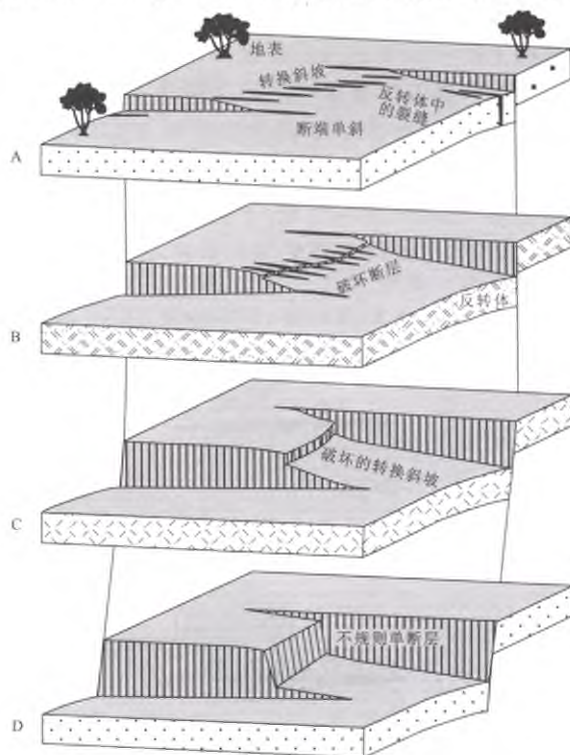


图2 Koa'e和Hilina的转换斜坡时空演化简图<sup>[3]</sup>

Fig. 2 Block diagrams showing the temporal and spatial evolution of relay ramp in the Koa'e and Hilina fault systems



连接,且两条边界断层可能都在地震事件中发生了倾滑<sup>[3]</sup>。同时,这些小断层也对烃类运移或聚集具有重要意义<sup>[9,18]</sup>。

## 1.2 转换斜坡的规模

转换斜坡的形成机理和特征虽然相似,其规模却可以相差很大。Soliva 等<sup>[33]</sup>从野外露头选取的转换斜坡的规模仅数十厘米长,而 Peacock<sup>[34]</sup>描述了迄今为止世界上规模最大的转换斜坡——格陵兰岛东北部的 Hold With Hope 转换斜坡,其宽度(斜坡边界断层的间距)为 100 km,整个转换斜坡覆盖面积近 25 000 km<sup>2</sup>。

## 1.3 转换斜坡对层序样式与入盆水系的控制

### 1.3.1 对层序样式的控制

Young 等<sup>[35-36]</sup>先后研究了埃及 Suez 裂谷边界断层——Thal 断层不同活动强度部位的沉积响应,对研究转换斜坡控制下发育的沉积体的层序地层学和沉积学特征具有借鉴意义。

构造沉降和沉积物供给的相互作用(局部因素)与海平面的变化(区域因素)共同作用决定了地层单元的演化。层序中保留下来的主要的相对海平面上升记录,很大程度上取决于构造沉降;层序中保留下来的主要海退面则取决于转换斜坡带(断层端部)的海平面下降速度明显超过构造沉降速率,这是因为在正断裂系统中,发生硬连接之前的转换斜坡在多数构造事件中处于相对较高的部位,从而导致了基准面的下降和显著的局部侵蚀作用。

由于转换斜坡部位的上盘沉降速率较断层中部小,加上转换斜坡带上部构造低点对水系的汇聚作用及转换斜坡本身的输导作用使之具备了充足的沉积物供给,导致可容纳空间的增大总是低于沉积物的供给效率,这使得扇体的垂向叠置主要由进积的

准层序组组成,并伴有少量的加积成分。这些扇体倾角小,向盆地方向前积的距离远,分布范围大。同时,在海平面快速下降时期,其下降速率易超过构造沉降速率,因而利于暴露面的形成,使先前的沉积地层大量剥蚀。相反,在断层中部构造沉降速率最大的区域,沉积物主要来源于下盘局部点物源,供给有限。在相对海平面上升缓慢期间,可以见到向盆地进积有限的扇体;在相对海平面快速上升期间,则容易见到废弃的扇体和海侵事件。因而,单个扇体虽各自前积,但多个扇体的垂向叠置则显示为加积准层序组,扇体间以主要海泛面为界。扇体倾角大,前积距离短,砂体分布范围有限(图 3)。

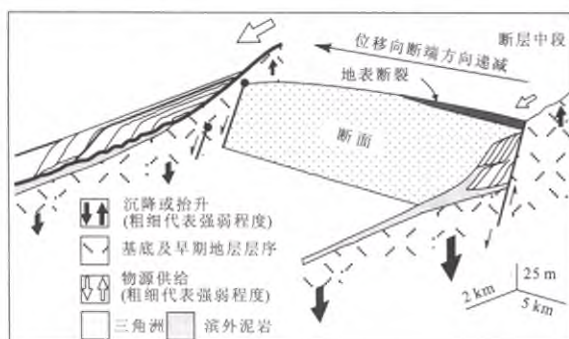


图 3 断层中部和转换斜坡带的三角洲叠置方式的对比简图<sup>[35]</sup>

Fig. 3 Comparison of delta overlay method between relay ramp and fault segment centre

### 1.3.2 对入盆水系的控制

沉积物输入和沉积作用随着转换斜坡的演化也发生相应的变化。Gupta 等<sup>[25]</sup>对埃及 Sinai 的苏伊士裂谷转换斜坡处的沉积物分配样式进行了研究,并提出了相应的模式(图 4)。当分段断层相向生长,

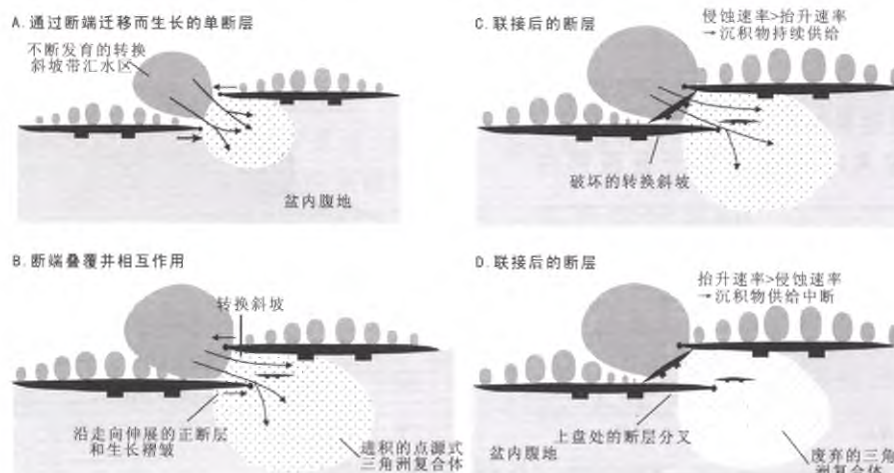


图 4 埃及 Sinai 苏伊士裂谷转换斜坡演化对同裂陷期沉积物分配的控制<sup>[25]</sup>

Fig. 4 Cartoon illustrating conceptual model for spatial and temporal variation in clastic input from the footwall margin of an extensional basin in response to relay ramp evolution

下盘地貌遭受剥蚀时,主要的碎屑物分配体系就形成了(图4-A)。水系自上盘汇水区形成后,汇聚进入地势相对低洼的转换斜坡下盘一侧。随着断层叠覆的推进,转换斜坡的坡度变大,输送路径受到生长断层端部复杂连接形式的影响。叠覆区域是断裂作用最弱的区域,这就导致复杂的分配路径(图4-B)。最终,随着断层叠覆的继续推进,转换斜坡逐渐变形直至最终分段断层被破坏断层连接。这其中又包括两种情形:尽管发生了连接和转换斜坡的破坏,但当下盘水系能持续下切逐渐抬升的转换带表面时,上盘沉积中心处的沉积物分配和沉积作用还能持续进行(图4-C);但如果河流的侵蚀速率不足以与下盘的抬升速率持平,水系可能发生倒转,沉积物的分配遭到切断。这将导致碎屑物向盆地该位置的供给突然终止,水系朝着一个可供替代的入盆口重新定向,早期沉积的扇体在连接后的断裂系统上盘附近得以保留(图4-D)。在这种情形下,尽管转换带的水系未曾遭受破坏,但显然它们所携带的沉积物卸载区被重新定位了。无论转换带的上盘还是下盘遭到破坏,都很大程度上决定了转换斜坡的保存潜力和碎屑物聚集后的地层几何形态。

## 2 研究思路与方法

### 2.1 模型实验研究

在实际地质数据难以采集的情况下,室内的实验模拟研究无疑是快捷简便的方法。但这需要实际的地质资料的验证。

Imber等<sup>[37]</sup>用三维计算机模型重建了转换斜坡带的几何形态、位移剖面 and 应变特征,验证了过去基于几何和动力学分析建立的转换斜坡生长和破坏模型。Rotevatn<sup>[38]</sup>采集了转换斜坡带露头的构造和地层数据,重建了计算机储层模型,以此测试自然界中转换斜坡带的流体流通状况。实验模拟研究的另一个优点是可以通过人工干预研究单因素对结果的控制。例如,一般认为,活动构造盆地内的旋回性沉积受控于外界因素,包括海平面旋回、幕式构造事件或者气候变化导致的沉积物供给变化。Kim等<sup>[39]</sup>实验了简化的伸展转换斜坡体系中的旋回性沉积,前提是设置断层滑动速率为常量和没有基准面波动的沉积物分配;他们指出,如果将实验结果按比例换算到自然界相同规模和时间跨度的地区,类似的地域性旋回可以在10或5 Ma的时间内沉积10~20 m厚的地层,其影响效果与已知的受外界因素影响的情况相当。另外,Athmer等<sup>[40]</sup>进行了水下转换斜坡实验研究,发现不同的流体入盆方式对应不同的沉积结果。

截至目前,许多关于转换斜坡带控制发育的储层物性的研究都是基于实验模型研究<sup>[38,41-42]</sup>。Maerten等<sup>[43]</sup>也指出,理解断层连接的几何形式应该改进储层流体模拟的模型,从而减少不必要的钻井施工数量;同时用North Sea北部的Oseberg Syd油田的两个地下实例解释了如何通过地震解释建立断裂储层的三维数字模型,从而提取有关断层连续性和储层分割性的信息。

### 2.2 地质研究

对于特定盆地内转换斜坡的地质研究,进行盆地综合分析是前提,包括盆地的动力学背景和演化分析、地层格架、构造格架的搭建<sup>[44]</sup>。转换斜坡带是正断层系统中一个过渡性的构造单元,因而,断层的成因学、几何学的准确分析是必要的。下面介绍在此基础上研究转换斜坡的特征和演化及其控制下发育的沉积体的层序地层学和沉积学特征的方法。

#### 2.2.1 断层的定量分析

前已述及刻画转换斜坡特征和演化的一些参数。断层的总位移曲线(位移—距离剖面)是在假设的伸展方向(与断裂系统走向垂直的方向)上各断层面上位移总和的曲线。这种曲线的形态一般被认为是反映分段断层相互作用的参数<sup>[4,29,45]</sup>。一般来说,假如断层间的接近程度足以使它们的应力场发生相互作用,那么它们在末端的叠覆部位会显示位移斜率的明显增大<sup>[20,46-47]</sup>。在一个特定的构造背景下,单一正断层具有一个与断层规模无关的 $D/L$ 比值<sup>[48]</sup>,也就是所谓的自相似性(self-similar)。Dawers等<sup>[29]</sup>及Schlische等<sup>[49]</sup>的野外观测显示,在普通的岩石和构造环境中,连接的断裂系统也具有与孤立单一断层相似的定量自相似性,如果将转换斜坡内(断层叠覆或连接区域)的小断层的位移与叠覆断层的位移加和,会形成一个类似于单一孤立断层的平钟形位移剖面形态。

Contreras等<sup>[50]</sup>以东非裂谷的Malawi盆地边界断层——Usisya断裂系统为例,以地震反射双程旅行时(TWTT)刻画断层位移,经过多方面的校正,运用位移—距离分析的方法分析了边界断层——Usisya断裂系统的生长过程。在Nyasa层序沉积期间(始于约8.6 Ma前),Usisya断裂系统的3条分段断层的位移分布如图5-A所示,可以看出,断陷早期,北段最为活跃,另两个区段也在活动,但总位移较小。此时北段与中段的叠覆部位,即转换斜坡发育部位的总位移是两段中最小的部位。接下来的时期,即Boabab层序沉积期(2.5 Ma之后),南段的活跃度几乎是另两段的两倍。此时北段与中段间的转换斜坡部位的总位移得到了显著的补偿(图5-B)。最后一个时期,即Mbamba层序沉积期

(2.3~1.6 Ma),中段的活跃程度几乎是另外两条断层的两倍(图 5-C)。图 6 展示了 Usisya 断裂系统总体的演化模式:在经历了具有对称位移分布的初始生长阶段后,北段和南段分别朝南、朝北倾斜开始形成不对称的位移剖面,中段仍保持对称的位移剖面。在 Boabab-Mbamba 层序沉积期间,中段位移增长直至成为整个系统中的最大位移,长度却未增长。北段和中段、中段和南段的转换斜坡处均可见到位移的不对称性和陡倾的位移斜率。然而,随着断层的继续生长,转换斜坡处最终的位移速率是否会经历一个剧增过程使得中段的位移达到最大,尚有待进一步的研究验证。

除了与位移有关的分析方法外,在条件允许的情况下,断层的应力分析无疑是分析断层活动性的直接方法。地震学辅以计算机模型的研究已经揭示:断层间短期内(100 a)以周围应力场的建设性和破坏性的相互干扰形式相互作用<sup>[51-53]</sup>。准静态有限和边界元法(quasi-static finite and boundary element methods)进一步研究了具雁列状组合形态的断层间这种应力的相互作用<sup>[22,54]</sup>。后来又有学者提出向量和弹性的断块模型以说明断裂核心以及分段断层通过连接生长的相关观点<sup>[16,55]</sup>。

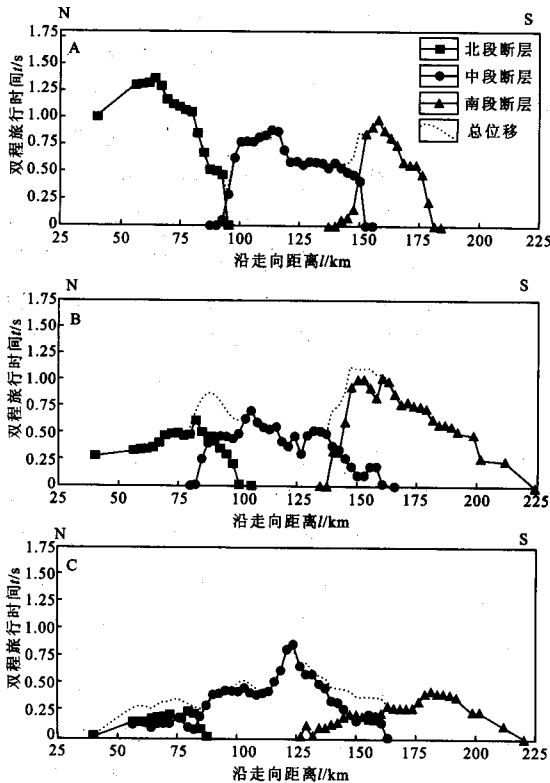


图 5 Usisya 断裂系统在各层序沉积期的位移-距离剖面图<sup>[50]</sup>  
Fig.5 Distance-strike displacement profiles of Usisya fault system during each sequence deposition  
A. Nyasa 层序沉积期; B. Boabab 层序沉积期; C. Mbamba 层序沉积期。

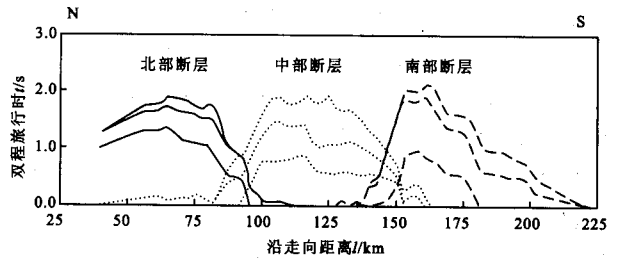


图 6 累计曲线图刻画 Usisya 断裂系统三条分段断层的长度和位移增长过程<sup>[50]</sup>  
Fig.6 Cumulative plot showing how the three segments of the Usisya system increased their length and displacement

### 2.2.2 地层厚度、构造高程分析

地层厚度和构造高程的分析主要是为了指示转换斜坡的存在。

Young 等<sup>[36]</sup>认为,在硬连接和显著的位移积累之前的断陷初始阶段,埃及 Suez 裂谷边界断层,即 Thal 断层内在许多断陷事件期间都处于相对较高区域的转换斜坡,其依据有:残留的地层厚度很低;始终为下盘的低点,从而为粗碎屑三角洲提供物源通道。此外的依据还有,转换斜坡最终的断层位移 600 m 处,绝对海平面下降的幅度达到 100 m,导致了至少 25 m 厚的地层遭受剥蚀。

图 7 是 Huggins 等<sup>[56]</sup>从露天开采煤矿现场采集钻孔资料后,绘制而成的转换斜坡带的煤层高程等值线图(图 7-A)和相应的断距-距离剖面(图 7-B),可以看出,断层 A、B 叠覆部位发育的转换斜坡中,煤层高程沿断层走向自断层 B 向断层 A 均匀减小,指示了斜坡地形的存在。

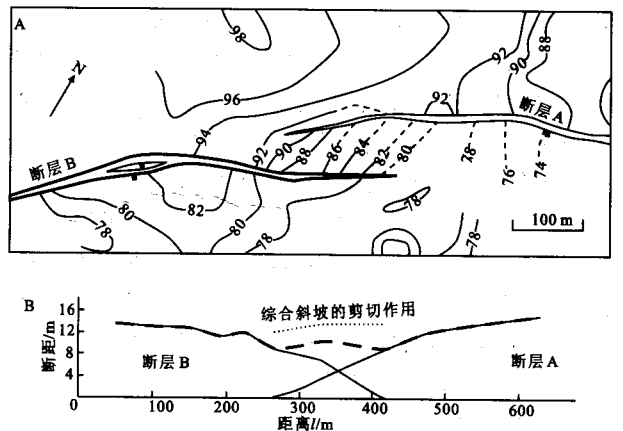


图 7 Northumberland 地区 Daisyhill 露天煤场的转换斜坡<sup>[56]</sup>  
Fig.7 Relay ramp at Daisyhill open-cast coal site, Northumberland

A. 煤层高程等值线图(单位:m),虚线表示推测部分;B. 分段断层在转换斜坡的断距剖面,下部虚线表示两条分段断层的断距综合;上部短虚线表示包含了韧性剪切应变的总断距。



### 2.2.3 层序地层学方法和沉积学方法

应用层序地层学和沉积学的方法是为了研究转换斜坡控制下的沉积过程和沉积体的时空配置。目前层序地层学已经发展相对成熟,具体方法在此不再赘述。沉积学分析使用的方法手段也与其他构造背景下的沉积体系分析相似。露头分析和钻孔资料对于沉积相的确定和相的垂向叠置分析无疑是最可靠、最直接的。在许多情况下,露头 and 钻孔资料不很齐备时,在利用有限的钻孔资料之余,辅以地震三维数据体或计算机的模型研究就显得至关重要。研究的最终目的是分析转换斜坡各演化阶段的沉积响应,建立相应的模型,从而指导储层分布和储层质量的预测。

Bruhn 等<sup>[57]</sup>通过对 North Sea 丹麦 Tail End 地堑的转换斜坡及重力流沉积作用的演化进行研究,验证了转换斜坡演化的过程控制着可容纳空间的产生和断陷盆地沉积物供给的时空演化。研究区为三维地震数据覆盖,但缺乏钻孔控制,只在研究区边缘存在个别钻孔用以标定层位。通过解释地震相和地震振幅与岩石学特征对应关系,将目的层位分为3个地层单元,结果表明,下部地层为平行反射方式;中部地层以发散状和上超为反射特征;上部地层以明显的下超为反射特征。在此基础上通过地层厚度的平面展布特征和断层分布关系来确定沉降中心的转移和转换斜坡的形成与演化过程(由于该区的地震时间和深度的转换关系尚未确定,故以地震反射的双程旅行时间表征地层的厚度)。3个地层单元分别对应转换斜坡的3个演化时期,地震属性均方根振幅(RMS)的提取对它们的展布以及转换斜坡(断层 1a、1b 与断层 1d 叠覆部位,2b 为连接或破坏断层)的演化具有很好的反映。下部地层对应转换斜坡初始形成时期,RMS 异常反映为在转换斜坡下游呈长条状平行于边界断层分布,其他的异常反映为小规模、呈长条状位于断层中部,且垂直于断层走向(图 8-A),暗示着转换斜坡对物源沟通的重要作用;中部地层,即最大沉降期转换斜坡上的连接断层对应最为活跃的时期,RMS 振幅异常仍为长条状分布但相对前一时期更分散(图 8-B);上部地层对应转换斜坡被连接断层完全破坏时期,此时连接断层下降盘形成新的可容纳空间,发育与其他断层边缘相似的小垛体,而不再具有原来沟通长轴物源的作用,地震属性 RMS 振幅异常为完全分散状沿连接后的断层边缘分布(图 8-C)。

对于转换斜坡是否对沉积物起到输送路径的作用,需要通过物源的综合分析加以验证。除了常规的重矿物分析<sup>[58-59]</sup>、碎屑岩组分分析、古水流分析、地球化学分析等方法外,裂变径迹法<sup>[60]</sup>、地震反射

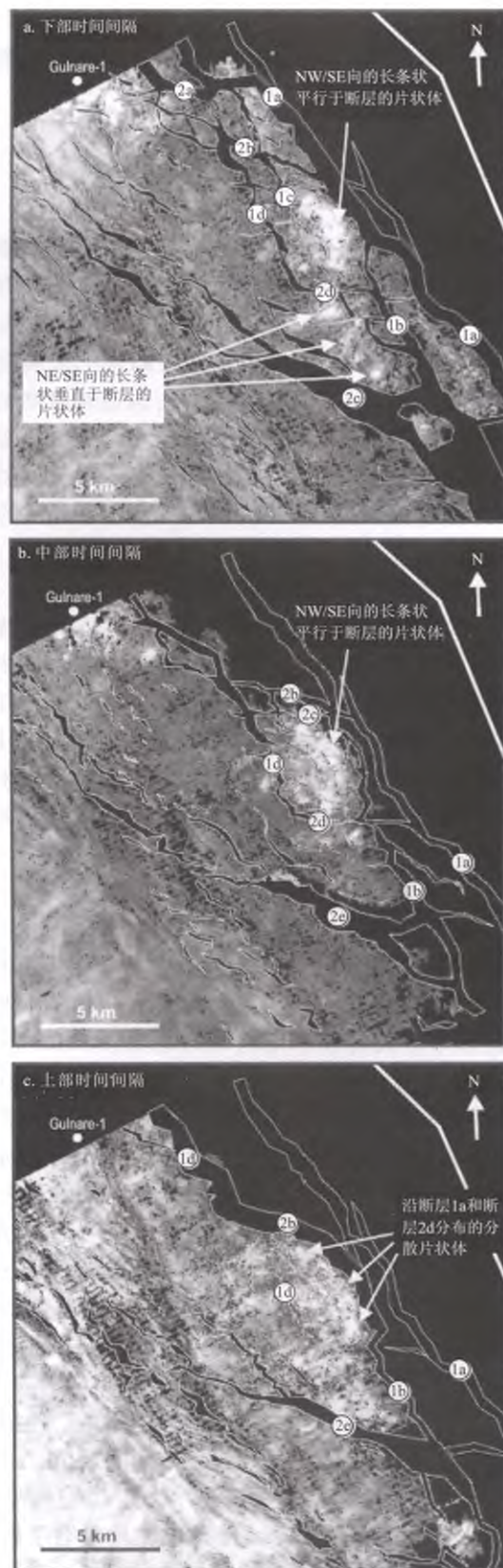


图8 丹麦 Tail End 地堑 3 个时间间隔的 RMS 振幅平面图<sup>[57]</sup>

Fig. 8 RMS amplitude map during 3 interval of Tail End rift valley

A. 下部时间间隔内提取的 RMS 平面图; B. 中部时间间隔内提取的 RMS 平面图; C. 上部时间间隔内提取的 RMS 平面图。

特征分析等方法也得到了应用。由于各方法具有各自的限制条件或者局限性,故而物源分析应强调多因素的综合取证<sup>[61-62]</sup>。

### 3 转换斜坡研究的应用与发展

早期对于断层生长历史和转换斜坡演化规律等的研究大多数情况下都是基于位移模式以推测为主<sup>[16,20-22,29,63]</sup>。Contreras等<sup>[50]</sup>通过研究东非裂谷 Malawi 盆地边界断层,给出了这些断层生长模型的一个实际证据。同时也说明在某一构造域内增长至最大位移的断层通常具有更高的位移速率的预想并非普遍适用<sup>[64]</sup>。此后,断层的生长和转换斜坡的演化规律逐渐得到大量实践的证实并取得了新的发展。

#### 3.1 断层生长与转换斜坡演化分析

Imber等<sup>[37]</sup>的模拟实验研究表明,转换带被破坏前属稳定的构造带,它通过近平面状转换斜坡的旋转逐渐“生长”,而转换边界断层的长度却没有显著增加。当破坏断层自顶部或底部贯穿转换斜坡,这种稳定的生长就停止了。破坏断层的生长并非瞬时的,因而斜坡仍持续旋转并在转换边界断层间传递位移,直至边界断层被完全连接。硬连接之后,位移通过贯穿断层表面的滑动作用协调。Bozkurt<sup>[65]</sup>研究了土耳其西南部近 50 km 长的 Manisa 断层,Manisa 断层最终的几何形态(沿走向弯曲)是早期不连续分段断层的活化及相互间通过转换斜坡连接、破坏等方式持续作用的共同结果。Ciftci等<sup>[66]</sup>研究了土耳其西南部 Gediz 地堑中转换斜坡内裂缝和断层的方向及其变化,这些构造叠加了早期平行于区域应力场和晚期垂直于区域应力场两个方向的应力,并认为转换斜坡是应力异常部位,随着应力变化,斜坡地带形成了新的构造样式。与此类似,Walker<sup>[67]</sup>研究了转换带内破坏断层的断距与三维展布方向之间的关系,认为破坏断层的倾斜滑动和相对较大的倾角意味着其具有相对较大的断距速率,从而使连接后的断层中部具有水平方向的应变,并认为断层滑动过程中最小断距能否在断层连接部位保存下来取决于破坏断层的三维展布方向。Matmon等<sup>[68]</sup>利用地磁学和光学测量地层倾斜坡度,认为转换斜坡南翼的倾斜终止以及断端距离地面只有数百米的事实说明转换斜坡已经接近连接断层破坏。

相对于历史时期的活动断层来说,对于目前地表或近地表的正在活动的断层生长及转换斜坡的分析更少但更具有借鉴意义。Peacock等<sup>[3]</sup>识别了夏威夷 Kilauea 火山正在活动的转换斜坡,并识别出

处于各个不同演化阶段的转换斜坡。di Bucci等<sup>[69]</sup>研究了意大利 1688 年 Sannio 地震破坏区内的 Calore River 峡谷,认为该区存在 NE 倾向的活动拉张系统的主断层,该断层与毗邻复杂变形带内的另一条断层相互作用形成处于演化的第三阶段的活动转换斜坡,这为 1688 年的 Sannio 地震提供了一种可能的解释。Hus等<sup>[70]</sup>对 Zavarotny 的大型转换斜坡(10 km×40 km)作了研究,该转换斜坡由平行于主断层的次级断层控制发育形成,并且在斜坡内连接断层已经形成但还不足以破坏斜坡,许多迹象表明其具有明显向破坏阶段演化的趋势。

此外,关于断层生长与转换斜坡演化的定量研究也有了新进展。Soliva等<sup>[33]</sup>用两个露头中提取的 39 cm 至米级的转换斜坡,建立了分段断层的连接评判标准。Hus等<sup>[71]</sup>用塑性地壳的模拟装置测试了断层间距、长度、叠覆长度和断层走向在转换斜坡演化中的作用。Soliva等<sup>[72]</sup>通过野外和实验分析,证明了有限断层周围应力的有限减小控制了断层间距及断层连接转换斜坡的能力。由于有限断层群的断层间距与地层厚度呈线性相关,因而地层厚度对评估规模不等的分段断层间的相互作用、连接及生长具有重要意义。

#### 3.2 转换斜坡带的沉积响应

Gawthorpe等<sup>[17]</sup>建立了断陷盆地的构造—沉积演化模型。认为断层生长、连接和死亡是盆地结构的主要构造控制要素。盆地通过潜山深埋或缺失的方式连接,从而使裂谷的水文学从封闭式演变为开放式。此外,由气候、海或湖平面的变化引起的非构造效应对盆地级别的沉积样式也有影响。Young等<sup>[35-36]</sup>先后对埃及 Suez 裂谷主控断层——Thal 断层自断层中心至分支断层间的转换斜坡处的层序地层学和沉积学进行了研究,突出了转换斜坡对储层研究的重要意义。水系对断层叠覆和硬连接的响应也是对转换带破坏这一构造样式的反映<sup>[25]</sup>。Trudgill<sup>[73]</sup>及 Commins等<sup>[74]</sup>均以美国西部犹他州 Canyonlands 地堑为例,研究了水系的变化与转换斜坡演化的相互关系,这对预测储层的分布与质量有重要意义。Ofstedal等<sup>[75]</sup>研究了世界上最大的转换斜坡——Hold With Hope 转换斜坡后发现,转换斜坡的上部遭受剥蚀,下部局部沉降并发生粗碎屑三角洲前积。粗碎屑单元的退积形式显示了盆地逐渐加深的过程,是全盆地受快速沉降控制造成区域性海侵的结果。

#### 3.3 转换斜坡带的成藏意义

前人的研究<sup>[12,18,76]</sup>表明,转换斜坡及其内部构造对烃类储集和运移有重要意义。但若一味认为转换斜坡的存在对储层发育有利无疑是片面的。断层



的连续性和连接状况通过将储层分割或增加流体路径的曲折性影响流体流动,既表现为传导作用,也表现为封堵作用<sup>[43]</sup>。最近的研究也表明,尽管软连接的转换斜坡增强了网状流体穿越断裂带的能力,但由于受沉积学、地层学、埋藏史及变形机制等因素的影响,在转换斜坡型构造调节带易形成构造的不均一性,转换带的压力沟通可能仍然很差,使得哪怕只是存在少数低渗透的变形带也可能造成整个系统的渗透性呈几个数量级下降<sup>[38,41-42]</sup>。

## 4 结 语

自20世纪90年代构造调节带(传递带或转换带)被引入国内以来,不少学者已在相关领域作了尝试<sup>[77-90]</sup>,但多限于对概念和类型的解释,对其演化规律及对沉积控制多只是宏观把握,尚未对具体的控制机理、时空演化规律等做深入研究,就其对烃类运聚及储层物性的控制等方面也只是略有提及。目前,已有学者提出,在断陷盆地内考虑调节带等构造对于储层预测具有重要意义<sup>[78-79]</sup>。我国发育典型断陷盆地,如渤海湾盆地、二连盆地等,除有限钻孔资料外,许多研究区都已被三维地震数据体覆盖,故而笔者认为,未来该领域在国内的研究颇具前景且富有意义。

## 参考文献:

- [1] Goguel J. Traite de Tectonique. Masson, Paris Translated by Thalmann, H. E., 1962. Tectonics, 1952, Freeman, San Francisco.
- [2] Larsen P H. Relay structures in a Lower Permian basement-involved extension system, East Greenland[J]. Journal of Structural Geology, 1988, 10: 3-8.
- [3] Peacock D C P, Parfitt E A. Active relay ramps and normal fault propagation on Kilauea Volcano, Hawaii[J]. Journal of Structural Geology, 2002, 24: 729-742.
- [4] Peacock D C P, Sanderson D J. Geometry and development of relay ramps in normal fault systems[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78: 147-165.
- [5] Macdonald G A. Faults and monoclines on Kilauea Volcano, Hawaii[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1957, 68: 269-271.
- [6] Peacock D C P, Knipe R J, Sanderson D J. Glossary of normal faults[J]. Journal of Structural Geology, 2000, 22: 291-305.
- [7] Bosworth W. Geometry of propagating continental rifts[J]. Nature, 1985, 316: 625-627.
- [8] Faulds J E, Varga R J. The role of accommodation zones and transfer zones in the regional segmentation of extended terranes[C]// Faulds J E, Stewart J H. Accommodation zones and transfer zones: The regional segmentation of the basin and range province. [S. l.]: Geological Society of America Special Paper, 1998, 323: 1-45.
- [9] Morley C K, Nelson R A, Patton T L, et al. Transfer zone in east Africa rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 1234-1253.
- [10] 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: 755-768.
- [11] 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]. AAPG Bulletin, 2002, 86: 979-1000.
- [12] Peacock D C P. Strike-slip relay ramps[J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17(10): 1351-1360.
- [13] Leeder M R, Gawthorpe R L. Sedimentary models for extensional tilt-block/half-graben basins[J]. Geological Society Special Publication, 1987, 28: 139-152.
- [14] Gawthorpe R L, Hurst J M. Transfer zones in extensional basins: Their structural style and influence on drainage development and stratigraphy[J]. J. Geol. Soc. Lond., 1993, 150: 1137-1152.
- [15] Morley C K. Developments in the structural geology of rifts over the last decade and their impact on hydrocarbon exploration[J]. Geol. Soc. London Spec. Publ. 1995, 80: 1-32.
- [16] Gupta S, Cowie P A, Dawers N H, et al. Mechanism to explain rift basin subsidence and stratigraphic patterns through fault array evolution[J]. Geology, 1998, 26: 595-598.
- [17] Gawthorpe R L, Leeder M R. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins[J]. Basin Research, 2000, 12: 195-218.
- [18] Coskun B. Oil and gas fields-transfer zone relationships, Thrace basin, NW Turkey[J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14(4): 401-416.
- [19] Peacock D C P. Displacement and segment linkage in strike-slip fault zones[J]. Journal of Structural Geology, 1991, 13: 1025-1035.
- [20] Peacock D C P, Sanderson J. Displacement, segment linkage and relay ramps in normal fault zones[J]. Journal of Structural Geology, 1991, 13: 721-733.
- [21] Cartwright J A, Trudgill B D, Mansfield C S. Fault growth by segment linkage, an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands Grabens of SE Utah[J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17: 1319-1326.
- [22] Willemse E J M, Pollard D D, Aydin A. Three dimensional analyses of slip distributions on normal faults arrays with consequences for fault scaling[J]. Journal of Structural Geology, 1996, 18: 295-309.
- [23] Kim Y S, Andrews J R, Sanderson D J. Damage zones around strike-slip fault systems and strike-slip fault evolution, Crackington Haven, southwest England[J]. Geoscience Journal, 2000, 4: 53-72.
- [24] Kim Y S, Andrews J R, Sanderson D J. Secondary faults and segment linkage in strike-slip fault systems at Rame Head, southern Cornwall[J]. Geoscience in South-West England, 2001, 10: 123-133.
- [25] Gupta S, Underhill J R, Sharp I R, et al. Role of fault inter-



- actions in controlling synrift sediment dispersal patterns; Miocene, Abu Alaq Group, Suez Rift, Sinai, Egypt[J]. *Basin Research*, 1999, 11: 167-189.
- [26] Anders M H, Schlische R W. Overlapping faults, intra-basin highs, and the growth of normal faults[J]. *Journal of Geology*, 1994, 102: 165-180.
- [27] Cowie P A, Scholz C H. Physical explanation for the displacement-length relationship of faults: A post-yield fracture mechanics model[J]. *Journal of Structural Geology*, 1992, 14: 1133-1148.
- [28] Cowie P A, Scholz C H. Displacement-length scaling relationship for faults: Data synthesis and discussion [J]. *Journal of Structural Geology*, 1992, 14: 1149-1156.
- [29] Dawers N H, Anders M H. Displacement-length scaling and fault linkage[J]. *Journal of Structural Geology*, 1995, 17: 607-614.
- [30] Kim Y S, Sanderson D J. The relationship between displacement and length of faults: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 68: 317-334.
- [31] Griffiths P S. Box-fault systems and ramps: A typical associations of structures from the eastern shoulder of the Kenya Rift [J]. *Geological Magazine*, 1980, 117: 579-586.
- [32] Ferrill D A, Stamatakis J A, Sims D. Normal fault corrugation: Implications for growth and seismicity of active normal faults[J]. *Journal of Structural Geology*, 1999, 21: 1027-1038.
- [33] Soliva R, Benedicto A. A linkage criterion for segmented normal faults[J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26: 2251-2267.
- [34] Peacock D C P, Price S P, Whitham A G, et al. The world's biggest relay ramp: Hold with hope, NE Greenland[J]. *Journal of Structural Geology*, 2000, 22: 843-850.
- [35] Young M J, Gawthorpe R L, Sharp I R. Sedimentology and sequence stratigraphy of a transfer zone coarse-grained delta, Miocene Suez Rift, Egypt[J]. *Sedimentology*, 2000, 47: 1081-1104.
- [36] Young M J, Gawthorpe R L, Sharp I R. Architecture and evolution of syn-rift clastic depositional systems towards the tip of a major fault segment, Suez Rift, Egypt[J]. *Basin Research*, 2002, 14: 1-23.
- [37] Imber J, Tuckwell G W, Childs C W, et al. Three-dimensional distinct element modelling of relay growth and breaching along normal faults[J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26: 1897-1911.
- [38] Rotevatn A, Tveranger J, Howell J A, et al. Dynamic investigation of the effect of a relay ramp on simulated fluid flow; Geocellular modelling of the Delicate Arch Ramp, Utah[J]. *Petroleum Geoscience*, 2009, 15(1): 45-58.
- [39] Kim W, Paola C. Long-period cyclic sedimentation with constant tectonic forcing in an experimental relay ramp[J]. *Geology*, 2007, 35: 331-334.
- [40] 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.
- [41] Rotevatn A, Buckley S J, Howell J A, et al. Overlapping faults and their effect on fluid flow in different reservoir types, A LIDAR-based outcrop modeling and flow simulation study [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93: 407-427.
- [42] Rotevatn A, Fossen H, Hesthammer J, et al. Are relay ramps conduits for fluid flow Structural analysis of a relay ramp in Arches National Park, Utah[J]. *Geological Society Special Publication*, 2007, 270: 55-71.
- [43] Maerten L, Pollard D D, Karpuz R. How to constrain 3-D fault continuity and linkage using reflection seismic data: A geomechanical approach[J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84: 1311-1324.
- [44] 李思田, 解习农, 王华, 等. 沉积盆地分析基础与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [45] Willemse E J M. Segmented faults: Correspondence between three-dimensional mechanical models and field data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 675-692.
- [46] Trudgill B, Cartwright J. Relay-ramp forms and normal-fault linkages, Canyonlands National Park, Utah[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1994, 106: 1143-1157.
- [47] Cartwright J A, Mansfield C S. Lateral displacement variation and lateral tip geometry of normal faults in the Canyonlands National Park, Utah[J]. *Journal of Structural Geology*, 1998, 20: 3-19.
- [48] Dawers N H, Anders M H, Scholz C H. Growth of normal faults: Displacement-length scaling[J]. *Geology*, 1993, 21: 1107-1110.
- [49] Schlische R W, Young S S, Ackermann R V, et al. Geometry and scaling relations of a population of very small rift-related normal faults[J]. *Geology*, 1996, 24: 683-686.
- [50] Contreras J, Anders M H, Scholz C H. Growth of a normal fault system: Observations from the Lake Malawi Basin of the east African rift[J]. *Journal of Structural Geology*, 2000, 22: 159-168.
- [51] King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84: 935-953.
- [52] Hodgkinson K M, Stein R S, King G. C P. The 1954 Rainbow Mountain-Fairview Peak-Dixie Valley earthquakes: A triggered normal faulting sequence[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 25459-25471.
- [53] Deng J S, Sykes L R. Evolution of the stressfield in Southern California and triggering of moderate size earthquakes: A 200-years perspective[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 9859-9886.
- [54] Crider J G, Pollard D D. Fault linkage: Three-dimensional mechanical interaction between echelon normal faults [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 24373-24391.
- [55] Spyropoulos C, Scholz C H, Shaw B E. A model for the growth of a population of cracks[J]. *EOS, Transactions of the American Geophysical Union*, 1997, 78: 733.
- [56] Huggins P, Waiterson 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: 1741-1755.
- [57] Bruhn R, Vagle K. Relay ramp evolution and mass flow deposition (Upper Kimmeridgian-Lower Volgian) in the Tail End Graben, Danish North Sea[J]. *Basin Research*, 2005, 17: 551-567.

- [58] Morton A, Hurst A. Correlation of sandstones using heavy minerals: An example from the Statfjord Formation of the Snorre Field, northern North Sea[C]//Dunay R E, Hailwood E A. Nonbio stratigraphical methods of dating and correlation. [S. l.]: Geological Society Special Publication, 1995, 89: 3-22.
- [59] 何钟铎,刘招君,张峰. 重矿物分析在盆地中的应用研究进展[J]. 地质科技情报, 2001, 20(4): 29-32.
- [60] 周祖翼,毛凤鸣,廖宗廷,等. 裂变径迹年龄多成分分离技术及其在沉积盆地物源分析中的应用[J]. 沉积学报, 2001, 19(3): 456-458, 473.
- [61] 焦养泉,李珍,周海民. 沉积盆地物质来源综合研究:以南堡老第三纪亚断陷盆地为例[J]. 岩相古地理, 1998, 18(5): 16-20.
- [62] 赵红格,刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 409-415.
- [63] Simpson D W, Anders M H. Tectonic and topography of the western United States: An application of digital mapping[J]. GSA Today, 1992, 2: 117-118, 120-121.
- [64] Nicol A, Walsh J J, Watterson J, et al. Displacement rates of normal faults[J]. Nature, 1997, 390: 157-159.
- [65] Bozkurt E, Sozbilir H. Evolution of the large-scale active manisa fault, Southwest Turkey: Implications on fault development and regional tectonics[J]. Geodinamica Acta, 2006, 19(6): 427-453.
- [66] Ciftci N B, Bozkurt E. Anomalous stress field and active breaching at relay ramps: A field example from Gediz Graben, SW Turkey[J]. Geological Magazine, 2007, 144(4): 687-699.
- [67] Walker J P F, Roberts G P, Cowie P A, et al. Horizontal strain-rates and throw-rates across breached relay zones, central Italy: Implications for the preservation of throw deficits at points of normal fault linkage[J]. Journal of Structural Geology, 2009, 31(10): 1145-1160.
- [68] Matmon A, Katz O, Shaar R. Timing of relay ramp growth and normal fault linkage, Upper Galilee, northern Israel[J]. Tectonics, 2010, 29: 2016.
- [69] di Bucci D, Massa B, Zuppetta A. Relay ramps in active normal fault zones: A clue to the identification of seismogenic sources (1688 Sannio earthquake, Italy) [J]. Geological Society of America Bulletin, 2006, 118(3/4): 430-448.
- [70] Hus R, de Batist M, Klerkx J, et al. Fault linkage in continental rifts: Structure and evolution of a large relay ramp in Zavarotny, Lake Baikal(Russia)[J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28: 1338-1351.
- [71] Hus R, Acocella V, Funicello R, et al. Sandbox models of relay ramp structure and evolution[J]. Journal of Structural Geology, 2005, 27: 459-473.
- [72] Soliva R, Benedicto A, Maerten L. Spacing and linkage of confined normal faults: Importance of mechanical thickness[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2006, 111(B1): Art. No. B01402.
- [73] Trudgill B D. Structural controls on drainage development in the Canyonlands grabens of southeast Utah[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86: 1095-1112.
- [74] Commins D, Gupta S, Cartwright J. Deformed streams reveal growth and linkage of a normal fault array in the Canyonlands graben, Utah[J]. Geology, 2005, 33: 645-648.
- [75] Oftedal B T, Andresen A, Muller R. Early Triassic syn-rift sedimentation at hold with hope, Northeast Greenland[J]. Onshore-Offshore Relationships on the North Atlantic Margin, 2005, 12: 191-206.
- [76] Peacock D C P. Propagation, interaction and linkage in normal fault systems[J]. Earth-Science Reviews, 2002, 58: 121-142.
- [77] 陈发景. 调节带(或传递带)的基本概念及分类[J]. 现代地质, 2003, 17(2): 186.
- [78] 陈发景,贾庆素,张洪年. 传递带及其在砂体发育中的作用[J]. 石油与天然气地质, 2005, 25(2): 144-148.
- [79] 王家豪,王华,肖敦清,等. 伸展构造体系中传递带的控砂作用: 储层预测的新思路[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 19-25.
- [80] 王纪祥,陈发景,李趁义. 山东惠民凹陷伸展构造及调节带特征[J]. 现代地质, 2003, 17(2): 203-209.
- [81] 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.
- [82] 刘德来,王伟,马莉. 伸展盆地转换带分析:以松辽盆地北部为例[J]. 地质科技情报, 1994, 13(1): 59.
- [83] 胡望水,王燮培. 松辽盆地北部变换构造及其石油地质意义[J]. 石油与天然气地质, 1994, 15(2): 164-172.
- [84] 周建生,杨池银,陈发景,等. 黄骅坳陷纵向变换带的构造特征及成因[J]. 现代地质, 1997, 11(4): 425-433.
- [85] 刘剑平,汪新文,周章保,等. 伸展地区变换构造研究进展[J]. 地质科技情报, 2000, 19(3): 27-32.
- [86] 邬光辉,漆家福. 黄骅盆地一级构造变换带的特征与成因[J]. 石油与天然气地质, 1999, 2(2): 152-158.
- [87] 孙向阳,任建业. 东营凹陷北带转换带构造与储集体分布[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 21-23.
- [88] 赵红格,刘池阳,杨明慧,等. 调节带和转换带及其在伸展区的分段作用[J]. 世界地质, 2000, 19(2): 105-111.
- [89] 刘剑平,汪新伟,汪新文. 临清坳陷变换构造研究[J]. 地质科技情报, 2004, 23(4): 51-54.
- [90] Dou L R, Chang L. Fault linkage patterns and their control on the formation of the petroleum systems of the Erlan Basin, Eastern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20: 1213-1224.



## Relay Ramp in Extensional Basins: An Important Structure of Reservoir Deposition and Hydrocarbon Migration or Accumulation

BAI Xiao-niao<sup>a</sup>, JIAO Yang-quan<sup>b,c,d</sup>

(a. Graduate School; b. Faculty of Earth Resources; c. State Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education; d. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To understand comprehensively the role of relay ramp in extensional basins, and to introduce research methods, we refer plenty of documents about relay ramp since it was proposed and sum up the conclusions and approaches. The relay ramp is defined as “a volume of rotation between two normal fault segments that overstep along the strike in the same dip direction” proposed in 1950s, and researched in depth since 1990s. Relay ramps are one kind of transfer zones in extensional basins where they can be significant for reservoir deposition and hydrocarbon migration or accumulation. The fault growth results in relay ramp with characteristic displacement profiles and various scales. The sequence stratigraphy in relay ramp area is the strongly progradational pattern of deltas due to the low subsidence rate and high sediment supply, while the sedimentology is the delta being drowned resulted from redirection of sediment efflux due to the evolution of relay ramp. This paper has summarized previous research methods of relay ramp including experimentation and field investigation as well as the quantitative analysis of faults, stratigraphic thickness and elevation analysis, sequence stratigraphy and sedimentology. It is suggested that the study of relay ramp should have a possible future development in our country.

**Key words:** relay ramp; displacement; evolution; sequence stratigraphy; sedimentology

(上接第 43 页)

## Discussion on Characteristic Activity of Xiangfan-Guangji Fault Since the Quaternary, Hubei

LEI Dong-ning<sup>1,2</sup>, CAI Yong-jian<sup>1,2,3</sup>, YU Song<sup>1,2</sup>,  
WU Jian-chao<sup>1,2</sup>, QIAO Yue-qiang<sup>1,2</sup>, FAN Guang-ming<sup>3</sup>

- (1. Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China;
2. Institute of Earthquake Engineering of Wuhan, Wuhan 430071, China;
3. Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In recent years, some data have been obtained about the Quaternary activity of Xiangfan-Guangji fault belt. These data suggest that three geometric segments of the fault are characterized by various activities since Quaternary. The TL and ESR dating of fault gouge ranges from 700 ka to 300 ka (averaging 500 ka), which suggests that the fault should have undergone intense activities during the Early and Middle Pleistocene Epoch. The historical and present seismic activity image illustrates that, seismic activity neighbouring the fault belt is gradually increased from NW toward SE, and this is favourably consistent with the activity of three fault segments themselves. In temporal, the strength and frequency of seismic activity have an increasingly enhanced trend.

**Key words:** Xiangfan-Guangji fault; Quaternary; fault activity; seismic activity; ESR/TL dating