

文章编号: 0253-2697(2014)05-879-11 DOI: 10. 7623/syxb201405007

# 裂谷盆地盐构造形成演化及油气成藏地质意义

——以苏丹红海裂谷盆地为例

吴珍云<sup>1</sup> 尹宏伟<sup>1</sup> 汪 新<sup>2</sup> 郑俊章<sup>3</sup> 王兴元<sup>1</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院 江苏南京 210046; 2. 浙江大学地球科学系 浙江杭州 310027;  
3. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

**摘要:**在裂谷盆地油气构造圈闭研究中,盐岩的沉积使得构造圈闭类型复杂多样化,同时也增加了油气勘探的难度,尤其是盐下油气勘探的难度。以苏丹红海裂谷盆地作为研究实例,利用比例化物理模拟实验探讨含盐裂谷盆地盐相关构造演化机制和影响因素,并结合研究区地震剖面 and 地层岩性特征讨论其对油气构造圈闭形成和油气成藏的影响。模拟实验结果表明,同裂谷沉积及基底断裂作用是影响苏丹红海盆地内盐构造演化的 2 个主要控制因素。同时,原始盐岩沉积厚度对盐构造演化及样式也有重要的影响。综合实验模拟结果和研究区地震剖面分析认为苏丹红海裂谷盆地盐上构造圈闭主要类型有盐构造相关的遮挡圈闭、滚动背斜圈闭和披覆构造圈闭;盐下构造圈闭主要为断背斜等基底断块相关的构造圈闭。此外,受地层岩性特征和盐岩沉积及构造分布等影响,盆地形成盐上自生自储、盐下下生上储 2 套油气成藏模式。对比分析显示盐上、盐下储集层性能相当,但盐下油源条件较盐上好,且存在致密的盐岩层盖层和丰富的基底断裂油气运移通道。因此,综合分析认为苏丹红海裂谷盆地盐下断块油气成藏具有巨大的潜力,可以作为未来油气勘探的重点领域。

**关键词:**苏丹红海;裂谷盆地;物理模拟;盐构造;同构造沉积;基底断裂;构造圈闭;油气成藏

**中图分类号:**TE112.3 **文献标识码:**A

## Simulation of salt structure formation and evaluation of its geological significance to oil-gas accumulation: a case study of the Sudanese Red Sea rift basin

Wu Zhenyun<sup>1</sup> Yin Hongwei<sup>1</sup> Wang Xin<sup>2</sup> Zheng Junzhang<sup>3</sup> Wang Xingyuan<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Jiangsu Nanjing 210046, China;  
2. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Zhejiang Hangzhou 310027, China;  
3. PetroChina Research Institute of Petroleum and Development, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In rift basins, salt rock deposition leads to the formation of complex and diverse types of oil- and gas-bearing structural traps, greatly increasing the difficulty in oil and gas exploration, especially in subsalt strata. Taking as an example the Sudanese Red Sea rift basin, this study explored the evolutionary mechanism and influencing factors of salt-related structures in rift basins through scaled physical modeling. Combined with seismic profiles and stratigraphic lithology, this paper discussed the significance of salt-related structures to the formation of oil- and gas-bearing structural traps and associated hydrocarbon accumulation. The results from physical modeling indicate that syn-tectonic deposition and basement faulting are two major factors influencing the evolution of salt-related structures in the Sudanese Red Sea rift basin. Additionally, the initial thickness of salt rocks has a significant impact on the evolution of salt-related structures. Combined with the interpretation of seismic profiles, it is considered that in the Sudanese Red Sea rift basin include, the major types of supra-salt structural traps include salt-related barrier trap, rolling anticline trap and drape fold trap, whereas the sub-salt structural traps mainly include basement-fault-block-related structural traps such as fault-related anticlines. Due to the influence of stratigraphic lithology, salt rock deposition and salt structure distribution, two oil-and-gas-accumulation systems are developed in the rift basin: the self-generating and self-preserving reservoir in the supra-salt strata, and the lower-generating and upper-preserving reservoir in the subsalt strata. Comparison analysis

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 40872134, No. 41272227)和国家重大科技专项(2011ZX05029-002)资助。

**第一作者:**吴珍云,男,1986年2月生,2008年获东华理工大学学士学位,现为南京大学博士研究生,主要从事盐构造、构造地质模拟及应用地球物理方面的研究工作。Email: zyw5918@163.com

**通信作者:**尹宏伟,男,1971年5月生,1993年获南京大学学士学位,2003年获美国阿拉巴马大学博士学位,现为南京大学地球科学与工程学院教授,主要从事盐构造、构造地质及模拟方面的研究工作。Email: hwyin@nju.edu.cn

shows that the supra- and sub-salt reservoirs have comparable properties. However, the sub-salt reservoir has better hydrocarbon source rocks, which contains a dense salt rock cover and abundant pathways for hydrocarbon migration through the basement faults. Hence, it is believed that the sub-salt basement fault blocks have huge potential for oil and gas accumulation and provide an important area for future oil and gas exploration in the Sudanese Red Sea rift basin.

**Key words:** Sudanese Red Sea; rift basin; physical modeling; salt-related structure; syn-rift deposition; basement faults; structural trap; oil-gas accumulation

大陆裂谷型盆地是油气聚集的有利区,其作为重要的盆地类型在油气勘探中占有重要的地位<sup>[1]</sup>。长期以来,中国众多石油地质学者在大陆裂谷盆地构造演化和油气勘探研究过程中取得了许多认识,并形成了丰富的裂谷盆地构造圈闭和油气成藏理论<sup>[2-10]</sup>。然而,对于含盐裂谷盆地,盐岩的沉积和分布,可以影响甚至改变盆地油气聚集和成藏过程中的生储盖模式<sup>[11-17]</sup>。近年来,随着中国实行“充分利用国内国外两个市场”和“走出去”油气资源战略,各石油公司加大了海外含油气盆地的勘察和开发,其中红海盆地是重要战略目标之一<sup>[18]</sup>。苏丹红海裂谷盆地作为典型含盐沉积盆地,其中区域性盐岩分布使得盆地构造演化更加复杂,盆地油气成藏模式与非含盐裂谷盆地非常不一致,进而加大了其油气勘探的难度,尤其是盐下油气勘探。因此,针对中国当前海外含盐裂谷盆地油气勘探所面临的新任务和新难题<sup>[19]</sup>,需要更多地了解含盐裂谷盆地中盐构造的形成演化机制以及探讨其对盆地油气聚集和成藏的影响。

在前人研究基础上,笔者通过物理模拟实验探讨了同裂谷沉积盆地盐构造的形成过程和形成机制。实验主要研究同裂谷沉积及基底断裂作用对苏丹红海裂谷盆地内盐构造演化的影响,同时结合现有资料对苏丹红海裂谷盆地油气成藏特征做初步分析,为苏丹红海含盐裂谷盆地的地震资料解译、盐构造识别和归类、油气成藏精确分析及油气勘探提供一定的理论参考。

## 1 区域地质概况

苏丹红海裂谷沉积盆地(图1),是晚渐新世以来形成的一个完全发育于陆间环境的年轻含盐裂谷盆地。盆地共经历了3期构造演化阶段,形成自下而上3个沉积地层层序<sup>[20]</sup>(图2):①盐下层序,包括渐新统 Hamamit 组,中新统 Rudeis 组、Kareem 组和 Belayim 组,主要是海相砂、泥岩组合;②盐岩层,为中新统 Dunganab 组膏岩层,也是区域性盖层;③盐上层序,由中新统 Zeit 组、上新统一更新统 Wardan 组和 Shagara 组构成,为一套砂、泥岩互层,其间夹杂少量砾岩和石膏。据盆地钻探结果<sup>[18]</sup>,苏丹红海地区发育盐下、盐上2套重要的烃源岩(图2):①盐下 Rudeis

组,属于裂谷早期深水海相泥岩,其分布广泛,厚度达数百米,处于高成熟阶段,为盐下大油气田主力生油层;②盐上 Zeit 组下部三角洲相泥岩,其平面分布相对局限,仅在南部浅水区发育,厚度达数百米,但生烃指标纵向变化大,达到生烃标准的厚度较小。钻探显示盆地发育盐下、盐上2套储盖组合(图2):盐下储盖组合以 Dunganab 组巨厚盐层作为良好的区域性盖层,以 Belayim 组碳酸盐岩(平均孔隙度 14%)作为良好的储集层;盐上储盖组合为 Zeit 组下部的砂、泥岩互层,其中以单层厚度不大、平均孔隙度为 16%的砂岩作为储集层,以层间泥岩作为盖层,但其封堵能力相

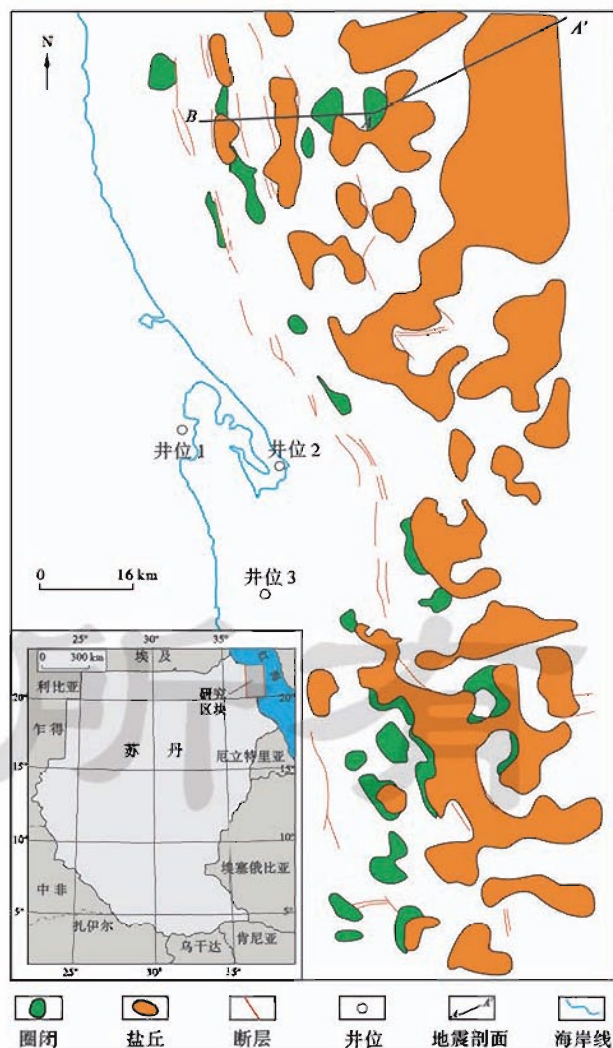


图1 苏丹红海裂谷盆地研究区及其盐构造分布

Fig. 1 Distribution of salt structures and study area in Sudanese Red Sea rift basin

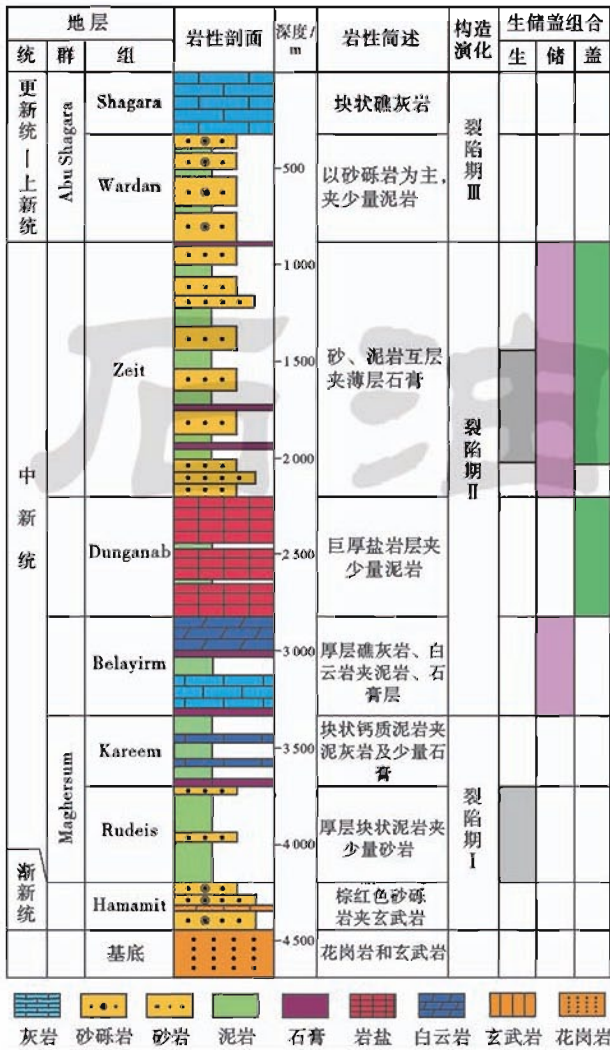


图 2 苏丹红海裂谷盆地地层综合柱状图

Fig. 2 Composite stratigraphic column of the Sudanese Red Sea rift basin

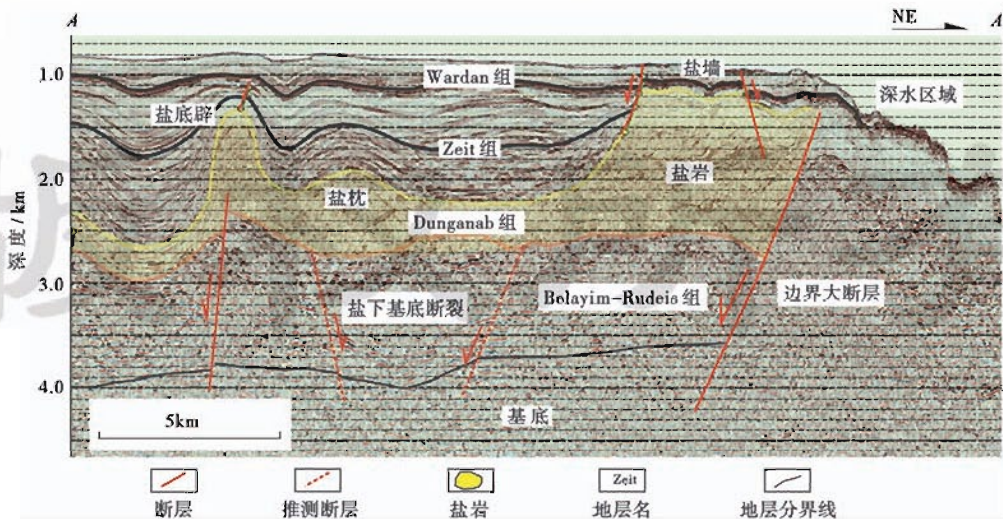
对较差。

盆地自晚中新世大范围塑性蒸发盐岩层沉积以来,发育丰富的盐构造<sup>[20-23]</sup>。近年来,随着油气勘探的深入,越来越多的油气圈闭证实与盐构造有着密切的关系<sup>[22,23]</sup>(图 1)。根据已有的地质勘探成果,前人已对盆地内盐构造样式识别做了大量的研究工作<sup>[21-25]</sup>。研究表明,盆地内主要盐构造样式有盐底辟、盐墙、盐舌、盐焊接和盐滚构造等。盐下构造样式主要有基底断裂(断坡)、断背斜、地垒和地堑构造。研究还发现盐下基底断裂顶部往往分布着盐底辟等构造,两者具有很好的垂向空间对应性(图 3)。此外,地震剖面显示,基底断层容易切穿薄层盐岩,并在基底断层顶部发育滑脱构造(盐凹构造)(图 4)。但是,针对盆地内盐相关构造形成演化机制及其与油气构造圈闭、油气成藏之间的关系,目前研究的还比较少。

## 2 实验设计

### 2.1 实验材料

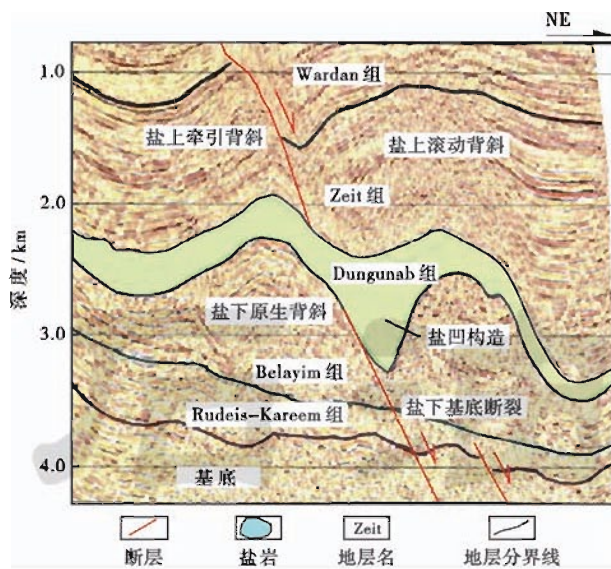
实验采用的模拟材料主要有 2 种:松散石英砂和聚酯硅胶,分别用以模拟上地壳脆性地层和塑性盐岩层。松散石英砂粒径在 200~400 μm,其抗张强度接近零,变形特性遵循摩尔-库伦破裂准则,破裂内摩擦角为 25°~30°,非常接近地壳浅部沉积地层的脆性变形行为<sup>[26-29]</sup>,从而成为模拟裂谷拉张构造的理想材料<sup>[30-32]</sup>。聚酯硅胶是牛顿流体<sup>[33,34]</sup>,且可以在较小的差异应力下变形,适合作为模拟自然界中盐岩的材料。



注:裂谷区域内沉积厚层盐岩,在地垒构造边界基底正断层上方发育高幅度盐底辟构造,边界大断层上盘发育大型盐墙。

图 3 苏丹红海裂谷盆地研究区典型基底断层活动型盐构造(剖面位置见图 1)

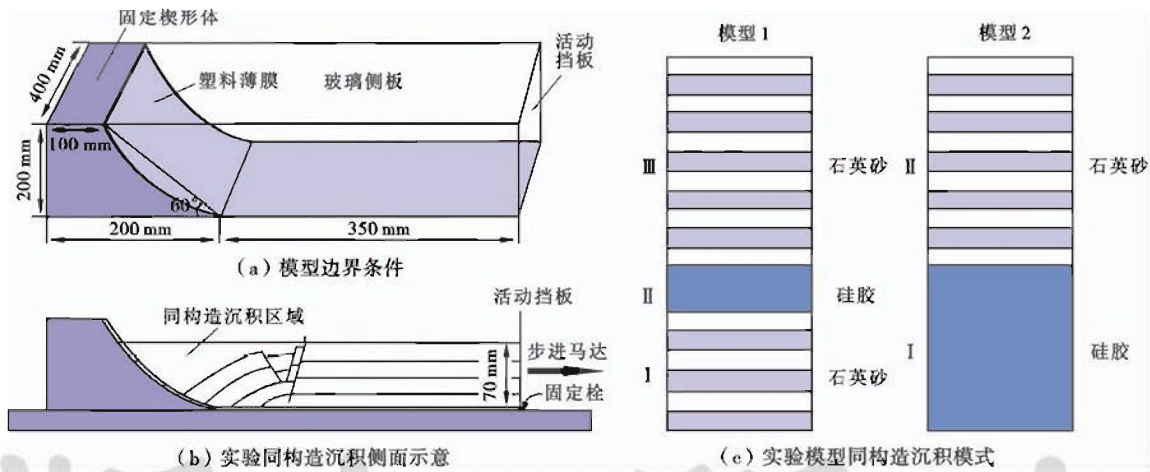
Fig. 3 Typical salt structures with the relationship of the movement of basement faults in the Sudanese Red Sea rift basin(see the location in Fig. 1)



注:区域内沉积薄层盐岩,盐上发育盐滚背斜和牵引背斜,盐下沉积地层中发育断块和盐凹构造。

图4 苏丹红海裂谷盆地典型断层滑脱型盐相关构造 (据文献[18]修改)

Fig. 4 Typical salt-related structures with the relationship of slipping faults in the Sudanese Red Sea rift basin(modified from the literature[18])



注:实验共拉张150 mm,其中模型1中同构造沉积I拉张量为50 mm,同构造沉积II拉张量为20 mm,同构造沉积III拉张量为80 mm;模型2中同构造沉积I拉张量为70 mm,同构造沉积II拉张量为80 mm。

图5 实验模型设计

Fig. 5 Design of experiments model

裂谷沉积。在拉张过程中,每隔10 min对模型顶面拍摄照片,记录盐底辟构造在模型顶面上的发展过程。实验结束后先在模型的顶面撒上保护砂层,然后对模型喷水将其浸湿,最后对模型剖面以观察其内部的构造形态。

2.3 实验比例

本研究中物理模拟实验的设计符合比例化模型的相似性原理,模型和原型之间在几何学、运动学以及动力学3个方面对应成比例(表1)。物理模拟实验中,

2.2 模型设置及操作

实验采用长、宽、高分别为55 cm、40 cm、20 cm的砂箱实验装置,装置左端是具有梨式边界的固定楔形体,用以模拟梨式大断裂。模型底部为塑料薄膜,薄膜右侧与模型右端挡板连接,用于实现左侧裂谷区的均匀伸展,从而模拟单剪拉张裂谷盆地[图5(a)]。塑料薄膜之上铺上不同颜色互层的7 cm厚的干燥石英砂[图5(b)]。拉张过程中分阶段地在裂谷拗陷区域内加入聚酯酰胺和石英砂,模拟同裂谷沉积地层[图5(b)]。实验共建立了2个模型,其中模型1中为薄层硅胶,模型2作为对比实验,为厚层硅胶[图5(c)]。模型1同裂谷沉积分为3个阶段进行,包括盐下同裂谷沉积(I)、盐岩沉积(II)和盐上同裂谷沉积(III)[图5(c)]。模型2同裂谷沉积分为2个阶段进行,包括盐岩沉积(I)和盐上同裂谷沉积(II)[图5(c)]。

实验通过步进电机对模型右侧的活动侧板实施水平移动,并通过模型底部与右侧板连接的塑料薄膜来带动左侧裂谷盆地的形成[图5(b)]。电机由计算机控制,运动速率可以精确到0.001 mm/s。本次实验中,步进马达以0.002 mm/s的速率向右运动,模型的拉张量为150 mm。实验每运行一段时间添加一次同

模型和原型的动力学相似表示为<sup>[29,35]</sup>:

$$\sigma_r = \rho_r \cdot g_r \cdot l_r \tag{1}$$

式中: $\sigma_r$ 为模型和原型之间应力的比值; $\rho_r$ 为密度的比值; $g_r$ 和 $l_r$ 分别为重力加速度和长度(厚度)的比值。实验在正常重力场中进行,因此重力加速度的比值 $g_r$ 为1。实验中的模拟材料密度比 $\rho_r$ 约为0.5。长度比例 $l_r$ 为 $1 \times 10^{-5}$ ,即模型中的1 cm代表自然界中的1 km。根据公式(1)可得模型与原型的应力比值 $\sigma_r$ 为 $5.4 \times 10^{-6}$ 。

在塑形变形物理模拟实验中,模型和原型的时间相似比表示为<sup>[28,29]</sup>:

$$t_r = \eta_r / \sigma_r \quad (2)$$

式中: $t_r$ 为模型和原型之间时间的比值, $\eta_r$ 为黏度的比值。本实验中硅胶与盐岩的黏度比值 $\eta_r$ 约为 $1.2 \times 10^{-15}$ 。根据公式(2)可得模型和原型时间比值为 $2.2 \times 10^{-10}$ ,即实验中 1 h 约代表自然界中 0.5 Ma。

表 1 实验材料参数及模型相似比

Table 1 Analogue material parameters and scaling ratios in the analogue experiments

物理参量	重力加速度/ ( $m \cdot s^{-2}$ )	长度/m	石英砂(砂岩) 密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )	硅胶(盐岩) 密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )	黏度/( $Pa \cdot s$ )	应力/Pa	时间/s
原型	9.81	1000	2400	2200	$1 \times 10^{19}$	$2.35 \times 10^7$	$3.4 \times 10^{14}$
模型	9.81	0.01	1297	926	$1.2 \times 10^4$	127	$7.5 \times 10^4$
比例化相似比	1	$1 \times 10^{-5}$	0.54	0.42	$1.2 \times 10^{-15}$	$5.4 \times 10^{-6}$	$2.2 \times 10^{-10}$

10<sup>-10</sup>,即实验中 1 h 约代表自然界中 0.5 Ma。

### 3 实验结果

#### 3.1 模型 1

模型拉张初期,地层沿着犁式正断层向下滑移。

随着拉张距离逐渐增大,在模型内部形成一条边界主断层(图 6 中 BMF 断层)。随后,裂谷区域在犁式正断层及边界主断层(BMF)之间形成,并且随着拉张量增大而增大。裂谷区域内地层形成斜坡-地垒-地堑构造组合样式(图 7)。

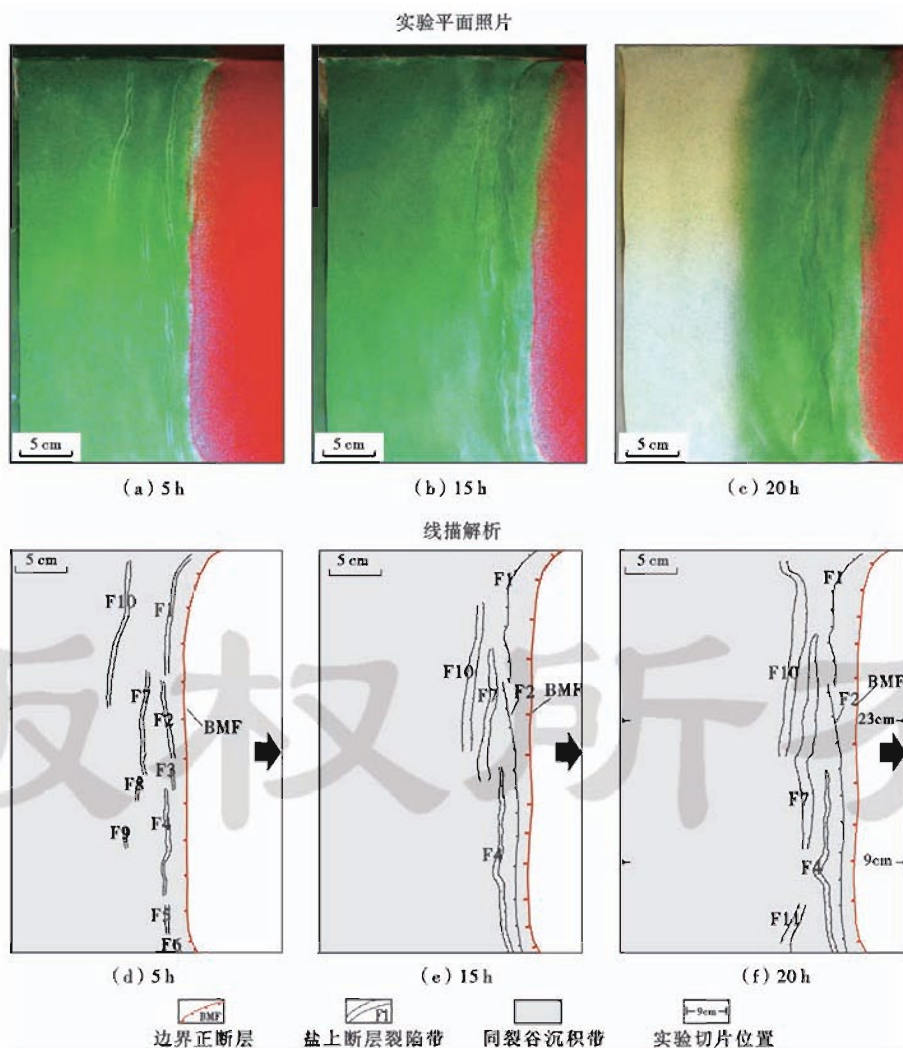


图 6 模型 1 实验顶面构造演化

Fig. 6 Plane view of the structural evolution of Model 1

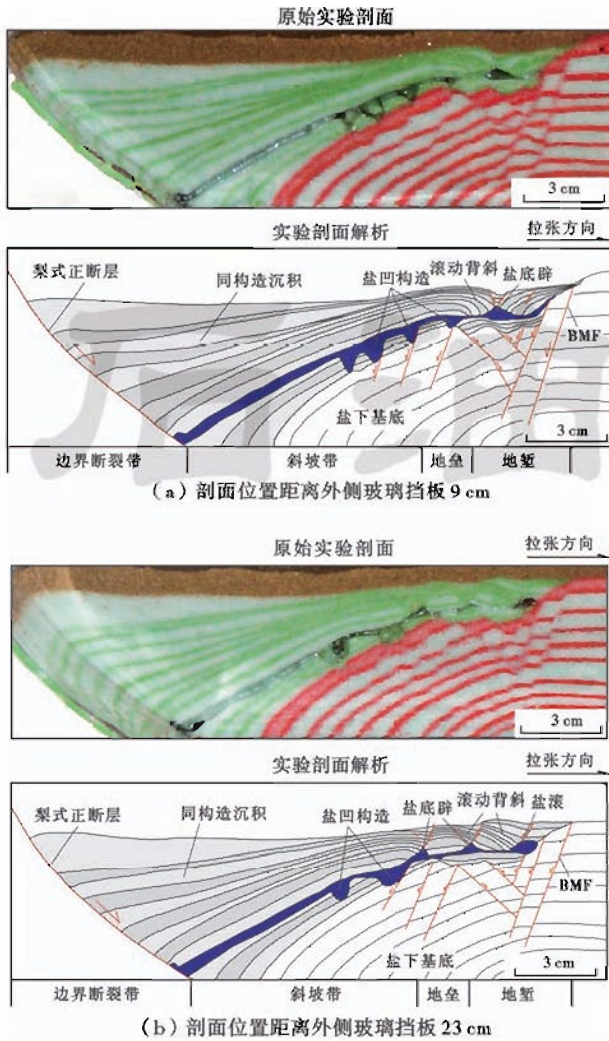


图7 模型1实验剖面及解析[剖面位置见图6(b)]

Fig.7 Photograph and line drawing of a profile cut parallel in the shortening direction from Model 1 [see the location in Fig.6(b)]

在模型拉张过程中,分3个阶段加入同裂谷沉积:盐下脆性沉积层、薄层盐岩层及盐上脆性沉积层。随着盐岩层的沉积,模型开始发育盐相关构造。模型运行5 h后,盐上地层中发育基本垂直于拉张方向的正断层[图6(a)和图6(d)]。随着同裂谷沉积的增加,这些盐上正断层一部分继续发育,并伴随着裂陷带宽度逐渐增大,另一部分则停止发育,消失在同裂谷沉积地层下[图6(b)和图6(e)]。模型最后,裂谷区域盐上地层中发育4排大致平行的裂陷断层带,但是沿着断层没有盐岩出露地层表面[图6(c)和图6(f)]。

观察最终模型实验剖面(图7)可以发现,自拉张端向固定端方向,整个同构造沉积呈扇型楔体形态,以披覆单斜构造样式叠置在基底地层之上。在扇形同裂谷沉积层的薄端,正断层发育于盐底辟和盐滚构造的顶部,沿着正断层形成滚动背斜等盐相关构造;盐下基

底断裂则分布在地堑、地垒及斜坡带上段,分布范围较盐上地层要大。在模型中部,剖面结果显示部分盐下断层透过薄层盐岩到达盐上地层。盐岩层作为塑形“夹层”调节着盐上地层与盐下地层构造变形,主要发育三角反应盐底辟(triangle reactive diapir)和盐滚(salt roller)构造,但是盐构造规模和幅度均非常小。值得注意的是,沿着梨式正断层滑移,斜坡带沉积地层旋转,其上段地层在张应力作用下裂开,形成滑脱断块和盐凹构造(图7)。

3.2 模型2

模型2在模型1的基础上进行了一些改变,即模型第一阶段只沉积厚层盐岩,盐下没有脆性沉积层[图5(c)]。与模型1实验结果相比,盐岩沉积前构造演化基本一致,模型在梨式正断层和边界主断层(BMF)之间形成楔形沉积空间,基底构造形态主要为斜坡带-地垒-地堑构造样式。盐岩沉积后,盐上地层开始发育2排断陷组合F1和F2[图8(a)和图8(d)]。随着拉张量的增加,断陷组合F1和F2逐渐被盐岩填充[图8(b)和图8(e)],形成盐底辟,并且大部分盐底辟出露到地层表面[图8(c)和图8(f)]。在整个模型拉张过程中,盐上地层没有再发育其他断层。

由模型2实验剖面(图9)可知,自拉张端向固定端方向,整个同构造沉积依然呈扇型楔体形态,越靠近梨式正断层,沉积地层厚度越大。整个上覆地层形成

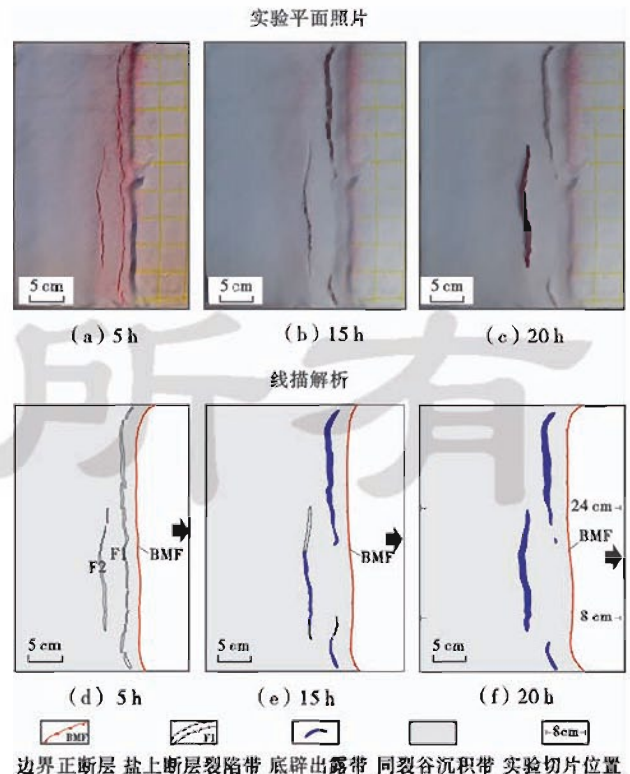


图8 模型2实验顶面构造演化

Fig.8 Plane view of the structural evolution of Model 2

披覆单斜构造。盐底辟发育于扇型同裂谷沉积的薄端,底辟两侧地层发生轻微的挠曲,形成拖曳构造。巨厚盐岩层作为塑形流动体分割调节盐上地层和盐下地层,形成由下而上构造形变完全不一致、十分明显的双构造层特征。

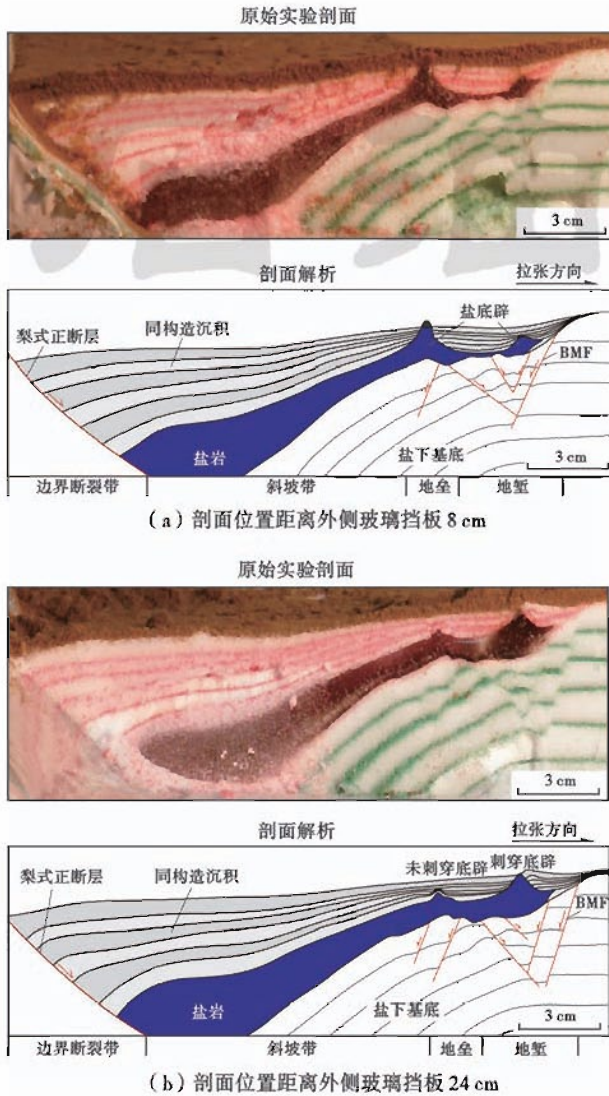


图 9 模型 2 实验剖面及解析[剖面位置见图 8(b)]

Fig. 9 Photograph and line drawing of a profile cut parallel in the shortening direction from Model 2

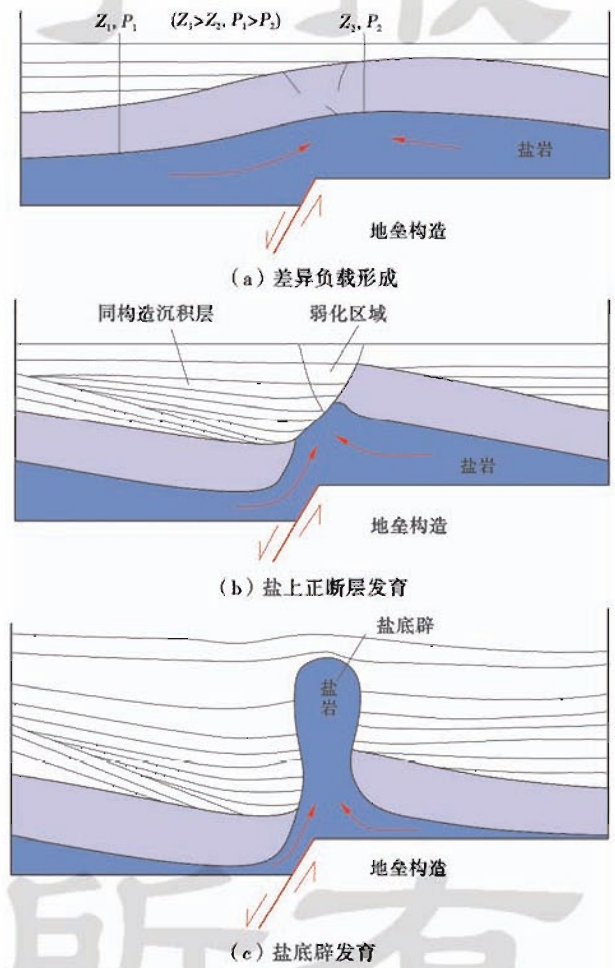
[see the location in Fig. 8(b)]

同模型 1 对比,模型 2 实验结果主要有以下几个异同点:①盐底辟规模较大,甚至发育盐刺穿构造出露地层表面,盐底辟顶部没有“V 型”正断层发育;②沿着梨式正断层滑移,基底斜坡带发生地层旋转,其上覆厚层盐岩发生明显的流动汇聚,形成盐枕构造(图 9);③盐下基底斜坡带滑脱断块发育不明显,也没有发育盐凹构造;④在基底地垒构造边界(地垒与斜坡带转折端)断层处,其上覆地层均对应盐底辟构造的发育(图 7 和图 9)。

## 4 讨论

### 4.1 盐构造形成机制及影响因素

在厚皮拉张盐构造实验中,盐下基底断层活动往往会得到盐上覆地层构造形变的响应,这种响应往往是盐上覆地层产生断裂或者发育盐构造<sup>[32,36-38]</sup>(图 10)。对比模型 1 和模型 2 实验结果,可以发现在基底地垒边界断裂附近,均发育盐底辟构造,说明盐底辟构造发育的位置受基底断裂的控制(图 7 和图 9)。前人研究也证明盐底辟构造演化与盐下基底断裂作用密切相关,如丹麦盆地、北海盆地、墨西哥湾盆地等<sup>[36,38-42]</sup>。此外,



断层及断块移动 同构造沉积层 盐岩及流动方向 前构造沉积层  
注:(a)正断层运动初始阶段,随着正断层断距增大,在盐上覆地层中逐渐形成差异沉积负载,同时在断层上方区域内地层挠曲,并产生破裂(张应力作用),形成弱化区域;(b)随着断距进一步加大,差异负载增大,促使盐岩向盐上覆地层弱化区域流动;(c)随着盐岩持续向基底正断层上方弱化区域流动汇聚,盐底辟形成。 $Z$  为盐顶埋藏深度; $p$  为盐顶压力。

图 10 盐下基底正断层触发盐底辟发育示意(据文献[36]修改)  
Fig. 10 Formation of a diapir caused by the movement of a basement normal fault(modified from the literature[36])

模型中,地层沿着犁式正断层滑移,形成楔形生长地层,使得盐上产生同裂谷沉积重力差异负载,促使盐岩往盐上覆地层弱化区域(断裂带)蠕动,促使盐底辟或者盐滚构造继续生长。

实验模拟结果还表明盐相关构造形成演化还受原始盐岩厚度的影响。盐岩层比较薄时,盐上覆地层中盐构造规模小,盐构造顶部正断层发育,并沿着正断层形成断层滑脱相关构造(图7);盐岩层厚时,盐上覆地层中盐底辟(盐墙)规模大,甚至刺穿上覆地层并露出地表,沿着盐底辟边界形成拖曳构造和滑脱构造(图9)。盐下地层则主要形成大量多米诺式和反向式基底断块(组成地堑地垒构造样式),同时基底斜坡带因受由地层旋转而产生的张应力作用而容易形成基底断块和盐凹构造(图7)。这些构造样

式在苏丹红海裂谷盆地地震剖面中均能够发现(图3和图4)。

总之,物理模拟实验结果表明苏丹红海盆地盐构造演化受到同裂谷沉积和基底断裂活动的共同影响。

#### 4.2 盐相关构造对盆地圈闭形成及油气成藏的影响

地震剖面 and 实验结果均表明,由于盐岩层的存在,苏丹红海裂谷盆地纵向上形成十分明显的双构造层特征,即盐下构造和盐上构造变形明显不一致(图3,图4,图7和图9)。盐上构造层主要发育沿断裂成排分布的与盐岩蠕动、滑脱相关的滚动背斜、断背斜和披覆构造,形成相应圈闭类型主要有遮挡圈闭、滚动背斜圈闭和披覆构造圈闭[图11(a)];而盐下构造层则主要发育基底正断层,形成多米诺式断块圈闭、反向断块圈闭和断背斜圈闭等[图11(b)]。

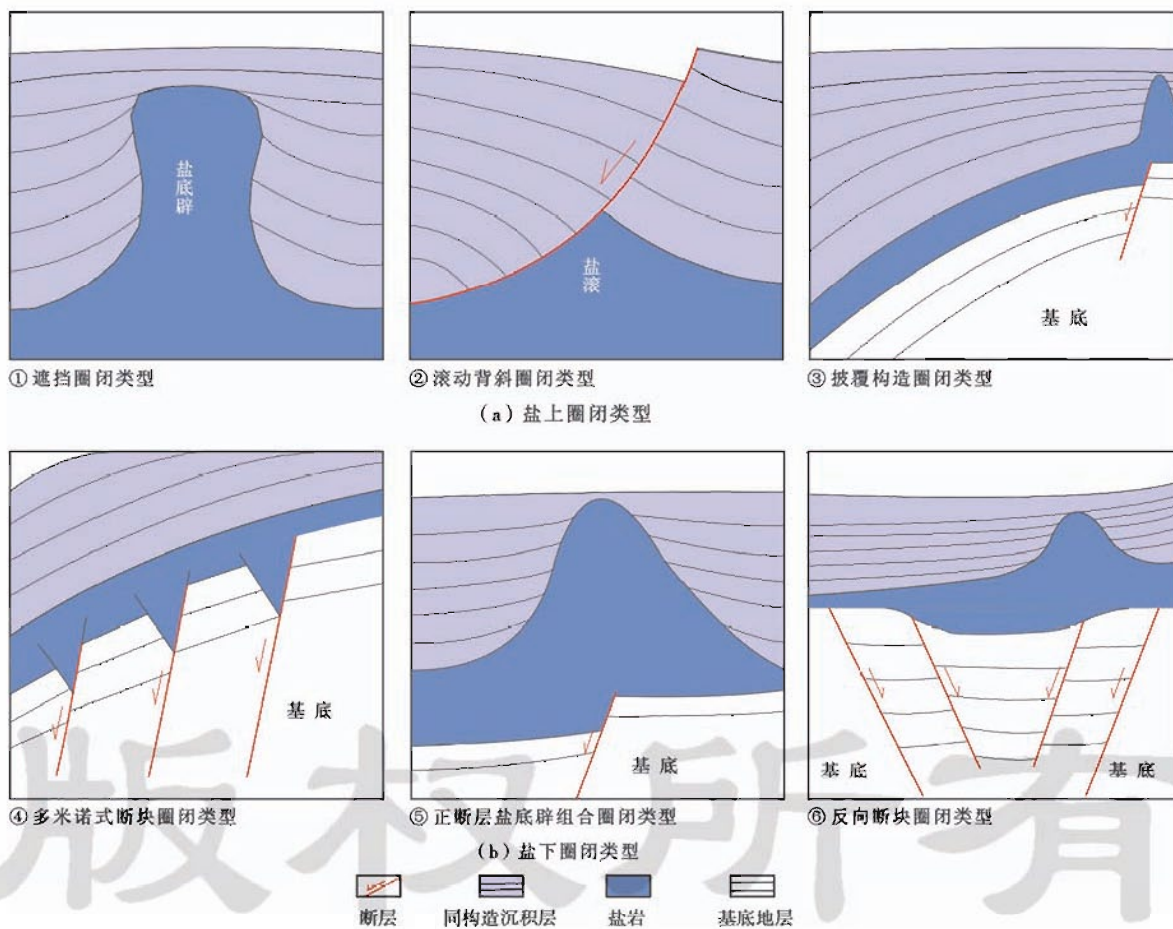


图 11 含盐裂谷盆地盐相关构造圈闭类型

Fig. 11 Salt-related trap styles in salt bearing rift basin

根据苏丹红海裂谷盆地内地层岩性特征可知,盆地内存在 2 套生储盖组合(图 2)。盐上覆地层生储盖组合均位于 Zeit 组,盐下生储盖组合则分别由 Rudeis、Belayirm 和 Dunganab 3 组不同的地层共同组成。结合盆地内发育的多种圈闭类型,可以形成盐上自

生自储、盐下下生上储等多种不同的油气成藏模式(图 12)。但是,不同样式的圈闭因其构造成因和圈闭层位的不同,导致盆地内油气成藏条件存在差异。前人对盆地内储集层、生油层的综合评价认为盐上盐下储集层条件相当,但盐下油源条件较盐上要好<sup>[18,22]</sup>。



此外,盐岩因其自身物理特性,有利于形成异常高压,使其下部岩层保持较高的孔隙度,并形成次生孔隙,从而改善盐下地层储集物性<sup>[43,44]</sup>。物理模拟实验结果及区域地震剖面均表明盐下断裂样式丰富,有利于油

气的运移,并且盐岩层作为致密的区域性盖层,可以防止油气向盐上地层逃逸<sup>[45]</sup>。因此,苏丹红海裂谷盆地盐下油气成藏条件要优于盐上油气成藏条件,盐下断块油藏可以作为未来油气勘探重点领域。

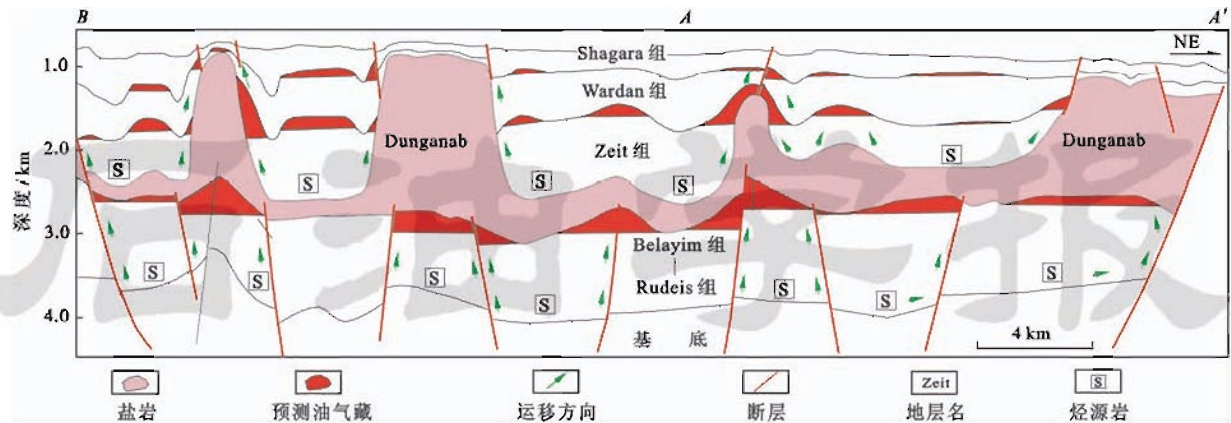


图 12 苏丹红海盆地代表性油气成藏模式[剖面位置见图 1(b)]

Fig. 12 Representative pattern of petroleum reservoir-forming in Sudanese Red Sea rift basin[see the location in Fig. 1(b)]

## 5 结 论

(1) 同裂谷沉积及基底断裂作用是影响苏丹红海盆地内盐构造演化的 2 个主要控制因素。前者形成盐上覆地层重力差异负载作用,促使盐岩流动、汇聚;后者促发地层旋转和断层拉张作用,控制盐上弱化区域的位置。两者共同作用,促使盐岩在盐上覆地层的薄弱部位或者基底断坡附近向上蠕动并形成盐底辟或盐滚等盐构造,同时盐上覆地层形成滚动背斜和断背斜等断层相关构造。

(2) 原始盐岩厚度对盐构造样式具有重要的影响。盐岩层薄时,盐上覆地层中盐构造规模小,顶部正断层发育,并沿着正断层形成断层滑脱相关构造;盐岩层厚时,盐上覆地层中盐底辟(盐墙)规模大,甚至刺穿上覆地层并出露地表,沿着盐底辟边界地层容易形成拖曳构造和滑脱构造。

(3) 结合实验模拟结果和研究区地震剖面分析认为,苏丹红海裂谷盆地盐上构造圈闭主要类型有盐构造相关的遮挡圈闭、滚动背斜圈闭和坡覆构造圈闭;盐下构造圈闭主要为断背斜等基底断块相关的构造圈闭。

(4) 受地层岩性特征和盐岩沉积及构造分布等影响,苏丹红海裂谷盆地形成盐上自生自储、盐下下生上储 2 套油气成藏模式。两者储集层性能相当,但后者油源条件较前者好,且存在致密的盐岩层盖层和丰富的基底断裂油气运移通道。综合分析认为苏丹红海裂谷盆地盐下断块油气成藏具有巨大的潜力,可以作为未来油气勘探的重点领域。

**致谢** 在实验过程中得到南京大学构造物理模拟实验室谢国爱高级工程师的帮助,在此表示感谢!瑞典乌普萨拉大学 Hemin Koyi 教授和 Faramarz 教授的讨论和建议为本文的提高提供了极大的帮助,在此表示诚挚的感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Lowell J D. Structural styles in petroleum exploration[M]. Tulsa, Oklahoma: Oil and gas Consultants International, Inc., 1985.
- [2] 童崇光. 中国东部裂谷系盆地的石油地质特征[J]. 石油学报, 1980, 1(4): 19-26.  
Tong Chunguang. Some characteristics of petroleum geology of the rift system in eastern China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1980, 1(4): 19-26.
- [3] 李德生. 渤海湾盆地复合油气田的开发前景[J]. 石油学报, 1986, 7(1): 1-21.  
Li Desheng. Prospect of the composite megastructural oil and gas field in Bohai Gulf of China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, 7(1): 1-21.
- [4] 张功成, 徐宏, 刘和浦, 等. 松辽盆地反转构造与油气田分布[J]. 石油学报, 1996, 17(2): 8-14.  
Zhang Gongcheng, Xu Hong, Liu Hefu, et al. Inversion structures in relation to oil and gas field distribution in Songliao basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(2): 8-14.
- [5] 陆克政, 漆家福, 戴俊生, 等. 渤海湾新生代含油气盆地构造模式 [M]. 北京: 地质出版社, 1997.  
Lu Kezheng, Qi Jiafu, Dai Junsheng, et al. The structural model of Cenozoic hydrocarbon basin in Bohai bay [M]. Beijing: Geologic-

- real Publishing House, 1997.
- [6] 陈振岩, 陈永成, 仇劲涛, 等. 辽河盆地新生代断裂与油气关系[J]. 石油实验地质, 2002, 24(5): 407-412.  
Chen Zhenyan, Chen Yongcheng, Qiu Jingtiao, et al. Relationship between the Cenozoic faults and hydrocarbon in the Liaohe Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2002, 24(5): 407-412.
- [7] 窦立荣, 陆内裂谷盆地的油气成藏风格[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 29-31.  
Dou Lirong. Formation style of petroleum accumulations in interior rift basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 29-31.
- [8] 窦立荣, 潘校华, 田作基, 等. 苏丹裂谷盆地油气藏的形成与分布——兼与中国东部裂谷盆地对比分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 255-261.  
Dou Lirong, Pan Xiaohua, Tian Zuoj, et al. Hydrocarbon formation and distribution of rift basins in Sudan; A comparative analysis of them with rift basins in East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 255-261.
- [9] 刘和甫, 李晓清, 刘立群, 等. 伸展构造与裂谷盆地成藏区带[J]. 石油与天然气地质, 2006, 26(5): 537-552.  
Liu Hefu, Li Xiaoqing, Liu Liqun, et al. Petroleum plays in rift basins and extensional structures[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 26(5): 537-552.
- [10] 张庆龙, 葛荣峰, 赵立文, 等. 辽河盆地中部构造演化与古潜山油气成藏模式[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 211-217.  
Zhang Qinglong, Ge Rongfeng, Zhao Liwen, et al. Structural evolution and model of hydrocarbon accumulation in buried hills in the central Liaohe Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(3): 211-217.
- [11] Weijermars R, Jackson M P A, Vendeville B. Rheological and tectonic modeling of salt provinces[J]. Tectonophysics, 1993, 217(1): 143-174.
- [12] 戈红星, Jackson M. 盐构造与油气圈闭及其综合利用[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1996, 32(4): 640-649.  
Ge Hongxing, Jackson M. Salt structural, hydrocarbon traps and mineral deposits[J]. Journal of Nanjing University, Natural Sciences, 1996, 32(4): 640-649.
- [13] Warren J K. Evaporites, sediments, resources and hydrocarbons; sediments, resources, and hydrocarbons[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2006.
- [14] Hudec M R, Jackson M P A. Terra infirma: understanding salt tectonics[J]. Earth-Science Reviews, 2007, 82(1/2): 1-28.
- [15] Kane K E, Jackson C A L, Larsen E. Normal fault growth and fault-related folding in a salt-influenced rift basin, South Viking Graben, offshore Norway[J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(4): 490-506.
- [16] Mohriak W U, Szatmari P, Anjos S. Salt, geology and tectonics of selected Brazilian basins in their global context[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2012, 363(1): 131-158.
- [17] Rowan M G, Lawton T F, Giles K A. Anatomy of an exposed vertical salt weld and flanking strata, La Popa Basin, Mexico[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2012, 363(1): 33-57.
- [18] 王国林. 苏丹红海水域石油地质特征与勘探策略[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(1): 128-130.  
Wang Guolin. Petroleum geology and exploration strategy in Sudanese Red Sea Area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(1): 128-130.
- [19] 贾承造. 关于中国当前油气勘探的几个重要问题[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊1): 6-13.  
Jia Chengzao. Several important issues about current oil and gas exploration in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(Supplement 1): 6-13.
- [20] Bunter M A G, Abdel Magid A E M. The Sudanese red sea: 1, new developments in stratigraphy and petroleum-geological evolution[J]. Journal of Petroleum Geology, 1989, 12(2): 145-166.
- [21] Schultz K I. Structure and stratigraphy of the Gulf of Suez, Egypt [G]// Landon S M, ed. Interior rift basin; Tulsa, OK, American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1994, 59: 57-96.
- [22] Bosworth W, Huchon P, McClay K R. The red sea and Gulf of Aden Basins[J]. Journal of African Earth Sciences, 2005, 43: 334-378.
- [23] 王国林. 红海盆地 Tokar 地区构造成因与圈闭样式[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(4): 475-479.  
Wang Guolin. Tectonic origin and structural styles in Tokar area, Red Sea Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(4): 475-479.
- [24] 苏传国, 姜振学, 郭新峰, 等. 苏丹红海中部地区盐构造特征及油气勘探潜力分析[J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35(4): 1-7.  
Su Chuanguo, Jiang Zhenxue, Guo Xinfeng, et al. Structural property and exploration potential in the middle of Sudanese Red Sea Area[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2011, 35(4): 1-7.
- [25] 张勇刚, 庄锡进, 吕福亮, 等. 红海盆地盐区速度建模技术研究与应用[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(5): 614-617.  
Zhang Yonggang, Zhuang Xijin, Lü Fuliang, et al. The seismic velocity modeling technology in the salt region, Red Sea Basin; study and application[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(5): 614-617.
- [26] Weijermars R. Estimation of paleostress orientation within deformation zones between two mobile plates[J]. Geological Society of America Bulletin, 1993, 105(11): 1491-1510.
- [27] Cotton J T, Koyi H A. Modeling of thrust fronts above ductile and frictional detachments; application to structures in the Salt Range and Potwar Plateau, Pakistan[J]. Geological Society of America Bulletin, 2000, 112(3): 351-363.

- [28] 尹宏伟,王哲,汪新,等.库车前陆盆地新生代盐构造特征及形成机制:物理模拟和讨论[J].高校地质学报,2011,17(2):308-317.  
Yin Hongwei, Wang Zhe, Wang Xin, et al. Characteristics and mechanics of cenozoic Salt-Related structures in Kuqa Foreland Basins; insights from physical modeling and discussion[J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 17(2):308-317.
- [29] Wu Zhenyun, Yin Hongwei, Wang Xin, et al. Characteristics and deformation mechanism of salt-related structures in the western Kuqa depression, Tarim Basin; insights from scaled sandbox modeling[J]. Tectonophysics, 2014, 612:81-96.
- [30] Byerlee J. Friction of rocks[J]. Pure and Applied Geophysics, 1978, 116(4/5):615-626.
- [31] Krantz R W. Measurements of friction coefficients and cohesion for faulting and fault reactivation in laboratory models using sand and sand mixtures[J]. Tectonophysics, 1991, 188(1/2):203-207.
- [32] Wibjack M O, Callaway S. Active normal faulting beneath a salt layer: an experimental study of deformation patterns in the cover sequence[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(5):627-651.
- [33] Weijermars R. Flow behaviour and physical chemistry of bounding putties and related polymers in view of tectonic laboratory applications[J]. Tectonophysics, 1986, 124(3):325-358.
- [34] Koyi H A, Ghasemi A, Hessami K, et al. The mechanical relationship between strike-slip faults and salt diapirs in the Zagros fold-thrust belt[J]. Journal of the Geological Society, 2008, 165(6):1031-1044.
- [35] Bonini M. Deformation patterns and structural vergence in brittle-ductile thrust wedges: an additional analogue modelling perspective[J]. Journal of Structural Geology, 2007, 29(1):141-158.
- [36] Koyi H, Jenyon M, Petersen K. The effect of basement faulting on diapirism[J]. Journal of Petroleum Geology, 1993, 16(3):285-312.
- [37] Pascoe R, Hooper R, Storhaug K, et al. Evolution of extensional styles at the southern termination of the Nordland Ridge, Mid-Norway; a response to variations in coupling above Triassic salt[J]. Geological Society of London, 1999, 5:83-90.
- [38] Koyi H, Petersen K. Influence of basement faults on the development of salt structures in the Danish Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 1993, 10(2):82-94.
- [39] Buchanan P G, Bishop D J, Hood D N. Development of salt-related structures in the Central North Sea; results from section balancing[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1996, 100(1):111-128.
- [40] Davison I, Alsop G I, Evans N G, et al. Overburden deformation patterns and mechanisms of salt diapir penetration in the Central Graben, North Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(5):601-618.
- [41] Dooley T, McClay K R, Hempton M, et al. Salt tectonics above complex basement extensional fault systems; results from analogue modelling[J]. Geological Society of London, 2005, 6:1631-1648.
- [42] Stewart S A. Salt tectonics in the North Sea Basin; a structural style template for seismic interpreters[J]. Special Publication Geological Society of London, 2007, 272:361-369.
- [43] 赵振宇,周瑶琪,马晓鸣,等.含油气盆地中膏盐岩层对油气成藏的重要影响[J].石油与天然气地质,2007,28(2):299-308.  
Zhao Zhenyu, Zhou Yaoqi, Ma Xiaoming, et al. The impact of saline deposit upon the hydrocarbon accumulation in petroliferous basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(2):299-308.
- [44] 张朝军,田在艺.塔里木盆地库车坳陷第三系盐构造与油气[J].石油学报,1998,19(1):6-10.  
Zhang Chaojun, Tian Zaiyi. Tertiary salt structures and hydrocarbons in Kuche depression of Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(1):6-10.
- [45] 付晓飞,宋岩,吕延防,等.塔里木盆地库车坳陷膏盐质盖层特征与天然气保存[J].石油实验地质,2006,28(1):25-29.  
Fu Xiaofei, Song Yan, Lü Yanfang, et al. Rock mechanic characteristics of gypsum cover and conservation function to gas in the Kuche depression, the Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(1):25-29.

(收稿日期 2014-04-14 改回日期 2014-07-12 责任编辑 熊英)

版权所有